

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI**

-----o0o-----

HỒ XUÂN BA

**ĐÁNH GIÁ ĐỘ BỀN THÂM NƯỚC VÀ KHUẾCH TÁN
ION CLORUA CỦA BÊ TÔNG CÓ XÉT ĐẾN YẾU TỐ
ỨNG SUẤT NÉN, ỨNG DỤNG TRONG KẾT CẤU CẦU**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Hà Nội - 2020

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI**

-----o0o-----

HỒ XUÂN BA

**ĐÁNH GIÁ ĐỘ BỀN THÂM NƯỚC VÀ KHUẾCH TÁN
ION CLORUA CỦA BÊ TÔNG CÓ XÉT ĐẾN YẾU TỐ
ỨNG SUẤT NÉN, ỨNG DỤNG TRONG KẾT CẤU CẦU**

Ngành: KỸ THUẬT XÂY DỰNG CÔNG TRÌNH GIAO THÔNG

Chuyên ngành: XÂY DỰNG CẦU HẦM

Mã số: 9580205

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

1- GS.TS. PHẠM DUY HỮU

2- PGS.TS. TRẦN THỂ TRUYỀN

Hà Nội - 2020

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan luận án này là công trình nghiên cứu của tôi. Các số liệu kết quả nêu trong luận án là trung thực và chưa được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Nghiên cứu sinh

Hồ Xuân Ba

LỜI CẢM ƠN

Luận án được thực hiện dưới sự hướng dẫn trực tiếp của GS.TS Phạm Duy Hữu và PGS.TS Trần Thế Truyền, là những người thầy đã tận tình hướng dẫn và định hướng khoa học; tạo điều kiện thuận lợi, giúp đỡ tác giả trong suốt quá trình học tập, chỉ dẫn tận tình và đã đóng góp các ý kiến quý báu để giúp tôi thực hiện luận án này.

Trong quá trình làm luận án, tác giả đã nhận được sự hỗ trợ và giúp đỡ nhiệt tình của quý thầy cô giáo, các nhà khoa học thuộc Bộ môn Cầu Hầm, Bộ môn Vật liệu Xây dựng - Trường Đại học Giao thông vận tải. Tác giả cảm ơn GS.TS. Trần Đức Nhiệm, PGS.TS. Nguyễn Ngọc Long, PGS.TS. Bùi Tiến Thành, PGS.TS. Nguyễn Thanh Sang, TS. Thái Khắc Chiến, PGS.TS. Nguyễn Trung Hiếu đã đồng viên và hỗ trợ tác giả trong suốt quá trình học tập.

Tôi xin trân trọng cảm ơn Ban Giám Hiệu Trường Đại học Giao thông Vận tải, Ban Giám đốc Phân hiệu, bộ môn Cầu Hầm Phân hiệu, Phòng Đào tạo Sau đại học, Phòng thí nghiệm Vật liệu xây dựng, Phòng Thí nghiệm và Kiểm định Công trình (Đại học Xây dựng) đã tạo điều kiện thuận lợi cho tôi trong quá trình học tập nghiên cứu tại Hà Nội.

Cuối cùng tôi bày tỏ cảm ơn các đồng nghiệp, gia đình người thân đã giúp đỡ tôi trong quá trình học tập nghiên cứu.

Hà Nội, ngày 18 tháng 02 năm 2020

Nghiên cứu sinh

Hồ Xuân Ba

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	I
LỜI CẢM ƠN	II
MỤC LỤC	III
DANH MỤC HÌNH ẢNH	VII
DANH MỤC BẢNG BIỂU	XI
DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT	XIII
MỞ ĐẦU	1
1. TÍNH CẤP THIẾT CỦA ĐỀ TÀI.....	1
2. MỤC TIÊU CỦA LUẬN ÁN	3
3. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHẠM VI NGHIÊN CỨU	3
3.1. Đối tượng nghiên cứu	3
3.2. Phạm vi nghiên cứu.....	3
4. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU	3
5. NHỮNG ĐÓNG GÓP MỚI CỦA LUẬN ÁN.....	4
CHƯƠNG 1:TỔNG QUAN VỀ ĐỘ BỀN CỦA BÊ TÔNG VÀ CÁC NGHIÊN CỨU LIÊN QUAN ĐẾN ĐỘ THẨM NƯỚC, KHUẾCH TÁN ION CLORUA CỦA BÊ TÔNG	5
1.1. ĐẶT VẤN ĐỀ	5
1.2. ĐỘ BỀN CỦA BÊ TÔNG.....	6
1.2.1. Khái niệm về độ bền của bê tông.....	6
1.2.2. Các chỉ tiêu về độ bền của bê tông	6
1.2.2.1. Khả năng chống thấm của chất lỏng qua bê tông	6
1.2.2.2. Sức kháng khuếch tán ion clorua của bê tông.....	8
1.3. CÁC NGHIÊN CỨU VỀ ĐỘ THẨM NƯỚC VÀ KHUẾCH TÁN ION CLORUA CỦA BÊ TÔNG TRÊN THẾ GIỚI.....	22
1.3.1. Các nghiên cứu về độ thấm nước của bê tông.....	22
1.3.1.1. Độ thấm nước của bê tông không chịu tải trọng	22
1.3.1.2. Độ thấm nước của bê tông chịu tải trọng	26
1.3.2. Các nghiên cứu về khuếch tán ion clorua của bê tông.....	28

1.3.2.1. Các nghiên cứu về hệ số khuếch tán ion clorua của bê tông không chịu tải trọng.....	28
1.3.2.2. Các nghiên cứu về quy luật gia tăng hệ số khuếch tán ion clorua của bê tông khi chịu tải trọng.....	33
1.4. CÁC NGHIÊN CỨU VỀ THỜI GIẠN KHỞI ĐẦU ĂN MÒN VÀ THỜI GIẠN LAN TRUYỀN ĂN MÒN, TUỔI THỌ	38
1.4.1. Khái niệm về tuổi thọ thiết kế, tuổi thọ sử dụng	38
1.4.2. Tuổi thọ sử dụng theo tác động của sự khuếch tán ion clorua trong môi trường biển.....	38
1.4.3. Các mô hình dự báo tuổi thọ kết cấu công trình bằng bê tông cốt thép có xét đến hiện tượng khuếch tán ion clorua.....	41
1.4.3.1. Thời gian khởi đầu ăn mòn do ion clorua theo Tuutti.....	41
1.4.3.2. Thời gian khởi đầu ăn mòn do ion clorua theo Duracrete (2000)[50]	45
1.4.3.3. Giai đoạn lan truyền	47
1.5. CÁC NGHIÊN CỨU VỀ ĐỘ THẨM NƯỚC VÀ THẨM ION CLORUA CỦA BÊ TÔNG Ở TRONG NƯỚC	48
1.6. KẾT LUẬN CHƯƠNG 1.....	52
CHƯƠNG 2: THÍ NGHIỆM XÁC ĐỊNH ĐỘ THẨM NƯỚC CỦA BÊ TÔNG CÓ XÉT ĐẾN TRẠNG THÁI ỨNG SUẤT NÉN	53
2.1. ĐẶT VẤN ĐỀ.....	53
2.2. CÔNG TÁC CHUẨN BỊ THÍ NGHIỆM	53
2.2.1. Vật liệu thí nghiệm và thành phần.....	53
2.2.1.1. Mô tả vật liệu sử dụng để chế tạo bê tông.....	53
2.2.1.2. Thí nghiệm xác định một số chỉ tiêu kỹ thuật của vật liệu chế tạo bê tông. .	55
2.2.2. Thiết bị thí nghiệm, mẫu thí nghiệm và phương pháp thí nghiệm	67
2.2.2.1. Thí nghiệm xác định cường độ chịu nén của bê tông	67
2.2.2.2. Thí nghiệm xác định độ chống thấm nước với mẫu bê tông chịu ứng suất nén trước	69
2.2.2.3. Thí nghiệm thấm nước với mẫu bê tông chịu ứng suất nén trực tiếp	72
2.2.2.4. Tiến hành thí nghiệm.....	74

2.3. PHÂN TÍCH ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM THẨM NƯỚC QUA BÊ TÔNG.....	76
2.3.1. Kết quả thí nghiệm thẩm nước với mẫu bê tông chịu ứng suất nén trước.....	76
2.3.2. Kết quả thí nghiệm thẩm nước với mẫu bê tông chịu ứng suất nén trực tiếp.....	78
2.4. KẾT LUẬN CHƯƠNG 2.....	82
CHƯƠNG 3: THÍ NGHIỆM PHÂN TÍCH KHUẾCH TÁN ION CLORUA CỦA BÊ TÔNG CÓ XÉT ĐẾN TRẠNG THÁI ỨNG SUẤT NÉN.....	84
3.1. ĐẶT VẤN ĐỀ.....	84
3.2. THÍ NGHIỆM THẨM ION CLORUA VỚI MẪU BÊ TÔNG CÓ XÉT ĐẾN TRẠNG THÁI ỨNG SUẤT NÉN TRƯỚC.....	84
3.2.1. Tiến hành thí nghiệm.....	84
3.2.2. Kết quả thí nghiệm và nhận xét.....	85
3.2.3. Xây dựng mối quan hệ giữa hệ số khuếch tán ion clorua với trạng thái ứng suất nén trước của bê tông.....	87
3.3. THÍ NGHIỆM THẨM ION CLORUA VỚI MẪU BÊ TÔNG CÓ XÉT ĐẾN TRẠNG THÁI ỨNG SUẤT NÉN TRỰC TIẾP.....	90
3.3.1. Nguyên tắc thử.....	90
3.3.2. Thiết bị thí nghiệm và hóa chất.....	90
3.3.3. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm.....	91
3.3.4. Tiến hành thí nghiệm.....	91
3.3.5. Kết quả thí nghiệm và nhận xét.....	92
3.3.6. Xây dựng mối quan hệ giữa hệ số khuếch tán ion clorua với trạng thái ứng suất nén trực tiếp của bê tông.....	96
3.4. QUAN HỆ GIỮA HỆ SỐ THẨM NƯỚC VÀ HỆ SỐ KHUẾCH TÁN ION CLORUA CỦA BÊ TÔNG.....	97
3.4.1. Tính toán hệ số khuếch tán ion clorua từ hệ số thẩm nước.....	97
3.4.1.1. Công thức lý thuyết của <i>Banthia</i>	97
3.4.1.2. Tính hệ số C_k cho các loại bê tông thí nghiệm.....	98
3.4.1.3. So sánh kết quả dựa trên công thức của <i>Banthia</i> và kết quả thí nghiệm (Bảng 3.13 và 3.14).....	101

3.4.2. Đề xuất công thức xác định hệ số khuếch tán ion clorua từ hệ số thẩm nước khi xét đến ứng suất trong bê tông	103
3.5. KẾT LUẬN CHƯƠNG 3.....	103
CHƯƠNG 4: TÍNH TOÁN DỰ BÁO TUỔI THỌ CÔNG TRÌNH CẦU BÊ TÔNG CỐT THÉP CÓ XÉT ĐẾN ẢNH HƯỞNG ĐỒNG THỜI CỦA HIỆU ỨNG TẢI TRỌNG VÀ TÁC ĐỘNG CỦA MÔI TRƯỜNG	105
4.1. ĐẶT VẤN ĐỀ	105
4.2. GIỚI HẠN PHẠM VI NGHIÊN CỨU.....	105
4.3. XÂY DỰNG MÔ HÌNH DỰ BÁO TUỔI THỌ CÔNG TRÌNH CẦU BÊ TÔNG CỐT THÉP	106
4.3.1. Tổng quát.....	106
4.3.2. Các tham số của mô hình	107
4.3.2.1. Hệ số khuếch tán ion clorua	107
4.3.2.2. Sự tích tụ nồng độ ion clorua trên bề mặt bê tông	107
4.3.2.3. Ngưỡng nồng độ ion clorua gây ăn mòn thép trong bê tông	108
4.3.3. Xây dựng mô hình dự báo tuổi thọ công trình cầu bê tông cốt thép theo tiêu chí khởi đầu ăn mòn cốt thép	112
4.3.4. Xây dựng mô hình dự báo tuổi thọ công trình cầu bê tông cốt thép theo tiêu chí ăn mòn cốt thép có xét đến trạng thái ứng suất của bê tông	114
4.4. ÁP DỤNG DỰ BÁO TUỔI THỌ CÔNG TRÌNH CẦU.....	116
4.4.1. Tính toán tuổi thọ trụ cầu khi chỉ xét đến tải trọng thường xuyên	117
4.4.2. Tính toán tuổi thọ trụ cầu khi có xét đến hoạt tải trên cầu.....	118
4.5. KẾT LUẬN CHƯƠNG 4.....	119
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ.....	121
1. KẾT LUẬN	121
2. KIẾN NGHỊ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO.....	123
DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA NGHIÊN CỨU SINH.....	124
TÀI LIỆU THAM KHẢO	125

DANH MỤC HÌNH ẢNH

<i>Hình 1.1 - Ảnh hưởng của độ rỗng, dạng, kích thước đường rỗng và tính liên thông của các lỗ rỗng đến độ thấm của bê tông (Scrivener (2001) [80]).....</i>	<i>7</i>
<i>Hình 1.2 - Các quá trình trong một buồng đo di trú do một hiệu điện thế (Andrade (1993)).....</i>	<i>17</i>
<i>Hình 1.3 - Ảnh hưởng của lỗ rỗng mao mạch đến độ thấm (Powers (1958))</i>	<i>23</i>
<i>Hình 1.4 - Hệ số độ thấm với khoảng thời gian khởi tạo và tổng thời gian thí nghiệm (ElDieb and Hooton (1995)).....</i>	<i>24</i>
<i>Hình 1.5 - Độ thấm nước theo thời gian với tỉ lệ N/X thay đổi (Abderrachid Amriou (2017)).....</i>	<i>25</i>
<i>Hình 1.6 - Bố trí thí nghiệm độ thấm nước qua bê tông chịu nén trực tiếp.....</i>	<i>28</i>
<i>Hình 1.7 - Quan hệ giữa tỷ lệ N/X và hệ số khuếch tán ion clorua (Stanish, K. (2000)).....</i>	<i>29</i>
<i>Hình 1.8 - Quan hệ giữa mức độ thấm và hệ số khuếch tán ion clorua (Ahmad S.(2003))</i>	<i>31</i>
<i>Hình 1.9 - Quan hệ giữa điện lượng và hệ số khuếch tán ion clorua</i>	<i>32</i>
<i>Hình 1.10 - Quan hệ giữa hệ số khuếch tán và cường độ chịu nén của bê tông.....</i>	<i>33</i>
<i>Hình 1.11 - Độ thấm ion clorua nhanh tại các cấp tải trọng nén trước khác nhau (C. Lim (2000)).....</i>	<i>34</i>
<i>Hình 1.13 - Mối quan hệ giữa hệ số khuếch tán ion clorua và độ lớn của ứng suất.....</i>	<i>36</i>
<i>Hình 1.14 - Thấm nhanh ion clorua của bê tông dưới tác dụng của tải trọng nén trực tiếp</i>	<i>36</i>
<i>Hình 1.15 – Bộ thí nghiệm thấm ion clorua của bê tông chịu tải trọng trực tiếp....</i>	<i>37</i>
<i>Hình 1.16 - Tuổi thọ sử dụng của kết cấu bê tông cốt thép: Mô hình hai giai đoạn của Tuuti (1980)</i>	<i>40</i>
<i>Hình 1.17 - Các sự kiện liên quan đến tuổi thọ sử dụng (DuraCrete (2000)).....</i>	<i>41</i>
<i>Hình 2.1 – Đường cong cấp phối của hạt cát</i>	<i>57</i>
<i>Hình 2.2 - Đường cong cấp phối của đá dăm</i>	<i>58</i>
<i>Hình 2.3 - Chuẩn bị thí nghiệm</i>	<i>67</i>
<i>Hình 2.4 - Quá trình nén mẫu.....</i>	<i>68</i>
<i>Hình 2.5 - Thiết bị xác định độ chống thấm nước của bê tông (HS – 40).....</i>	<i>69</i>
<i>Hình 2.6 - Sơ đồ xác định độ chống thấm (W)</i>	<i>70</i>

Hình 2.7- Nén trước các mẫu với các cấp tải trọng khác nhau	70
Hình 2.8 - Mẫu thử được cắt ra từ các mẫu trụ đã được gia tải theo các cấp tải trọng khác nhau và được xử lý chống thấm mặt bên.....	71
Hình 2.9 - Lắp mẫu thử vào máy thử thấm	71
Hình 2.10 - Sơ đồ đo độ thấm nước của bê tông chịu nén đơn trục trực tiếp	72
Hình 2.11 - Đúc và gia công các mẫu thí nghiệm đo thấm nước của bê tông chịu tải trọng nén trực tiếp	73
Hình 2.12 - Xử lý hai đầu mẫu bằng tấm đệm cao su và silicone	74
Hình 2.13 – Buồng đo thấm nước mẫu bê tông chịu tải trọng trực tiếp.....	74
Hình 2.14 - Đồng hồ đo áp lực nén của tải trọng và áp lực nước vào.....	75
Hình 2.15 - Cân điện tử kết nối với máy tính và bình hứng nước	75
Hình 2.16 - Máy tính với phần mềm Hyper Terminal tự động ghi số liệu về lưu lượng nước thoát ra khi thấm qua mẫu thí nghiệm	75
Hình 2.17 – Toàn cảnh bố trí thiết bị đo độ thấm nước của bê tông chịu tải trọng nén trực tiếp.....	75
Hình 2.18 – Quan hệ giữa mác chống thấm nước của bê tông C30 và C40 theo ứng suất nén trước	77
Hình 2.19 – Quan hệ giữa hệ số thấm nước của bê tông K (m/s) và ứng suất nén trực tiếp trong bê tông (Bê tông C30, áp lực nước $P = 3\text{atm}$).....	79
Hình 2.20 – Quan hệ giữa hệ số thấm nước của bê tông K (m/s) và ứng suất nén trực tiếp trong bê tông (Bê tông C30, áp lực nước $P = 4\text{atm}$).....	79
Hình 2.21 – Quan hệ giữa hệ số thấm nước của bê tông K (m/s) và ứng suất nén trực tiếp trong bê tông (Bê tông C30, áp lực nước $P = 5\text{atm}$).....	80
Hình 2.22 – Quan hệ giữa hệ số thấm nước của bê tông K (m/s) và ứng suất nén trực tiếp trong bê tông (Bê tông C30 theo các cấp áp lực nước khác nhau).	80
Hình 2.23 – Quan hệ giữa hệ số thấm nước của bê tông K (m/s) và ứng suất nén trực tiếp trong bê tông (Bê tông C40, áp lực nước $P = 3\text{atm}$).....	81
Hình 2.24 – Quan hệ giữa hệ số thấm nước của bê tông K (m/s) và ứng suất nén trực tiếp trong bê tông (Bê tông C40, áp lực nước $P = 4\text{atm}$).....	81
Hình 2.25 – Quan hệ giữa hệ số thấm nước của bê tông K (m/s) và ứng suất nén trực tiếp trong bê tông (Bê tông C40, áp lực nước $P = 5\text{atm}$).....	82

Hình 2.26 – Quan hệ giữa hệ số thấm nước của bê tông K (m/s) và ứng suất nén trực tiếp trong bê tông (Bê tông C40 theo các cấp áp lực nước khác nhau).	82
Hình 3.1 - Công tác chế tạo mẫu và tiến hành thí nghiệm	85
Hình 3.2 - Quan hệ giữa điện lượng và ứng suất nén trước trong bê tông C30.....	87
Hình 3.3 - Quan hệ giữa điện lượng và ứng suất nén trước trong bê tông C40.....	87
Hình 3.4 – Quan hệ giữa tỷ lệ tương đối của hệ số khuếch tán ion clorua qua bê tông với ứng suất nén trước của mẫu bê tông C30.	88
Hình 3.5 – Quan hệ giữa tỷ lệ tương đối của hệ số khuếch tán ion clorua qua bê tông với ứng suất nén trước của mẫu bê tông C40	89
Hình 3.6 Quan hệ giữa tỷ lệ tương đối của hệ số khuếch tán ion clorua qua bê tông với ứng suất nén trước của cả 2 loại bê tông C30 và C40	89
Hình 3.7 – Thí nghiệm nén xác định tải trọng lớn nhất gây phá hủy mẫu	90
Hình 3.8 - Thiết bị thí nghiệm thấm ion clorua với mẫu bê tông chịu tải trọng nén trực tiếp	91
Hình 3.9 - Lắp đặt khung gia tải.....	92
Hình 3.10 - Kết nối máy đo điện lượng với máy tính.....	92
Hình 3.11 – Quan hệ giữa tỷ lệ tương đối của hệ số khuếch tán ion clorua qua bê tông với ứng suất nén trực tiếp trong bê tông C30	95
Hình 3.12 – Quan hệ giữa tỷ lệ tương đối của hệ số khuếch tán ion clorua qua bê tông với ứng suất nén trực tiếp trong bê tông C40	96
Hình 3.13 – Quan hệ giữa tỷ lệ tương đối của hệ số khuếch tán ion clorua qua bê tông với ứng suất nén trực tiếp trong bê tông của 2 loại bê tông C30 và C40.....	97
Hình 3.14 - Biểu đồ quan hệ hệ số khuếch tán ion clorua dựa trên lý thuyết Banthia và kết quả thí nghiệm của bê tông C30.....	102
Hình 3.15 - Biểu đồ quan hệ hệ số khuếch tán ion clorua dựa trên lý thuyết Banthia và kết quả thí nghiệm của bê tông C40.....	102
Hình 4.1 - Quan hệ giữa chiều dày lớp bê tông bảo vệ với tuổi thọ công trình theo ứng suất nén trước	115
Hình 4.2 - Quan hệ giữa chiều dày lớp bê tông bảo vệ với tuổi thọ công trình theo ứng suất nén trực tiếp	116

- Hình 4.3** – Phân chia các vùng tác động của điều kiện môi trường biển đến tốc độ ăn mòn cốt thép trong bê tông trụ cầu.....117
- Hình 4.4** - Quan hệ giữa chiều dày lớp bê tông bảo vệ với tuổi thọ công trình theo các vùng khác nhau ở trạng thái ứng suất $S/S_{max} = 0.2$118
- Hình 4.5** - Quan hệ giữa chiều dày lớp bê tông bảo vệ với tuổi thọ công trình theo các vùng khác nhau ở trạng thái ứng suất $S/S_{max} = 0.7$119

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 1.1 - Cơ chế vận chuyển ion clorua căn bản trong các điều kiện tiếp xúc khác nhau [41].....	12
Bảng 1.2. Các giá trị m cho các loại bê tông	31
Bảng 1.3. Tốc độ tích lũy và nồng độ lớn nhất của ion clorua bề mặt.....	43
Bảng 2.1 - Các tính chất cơ lý của xi măng Vicen PC40.....	54
Bảng 2.2 - Thành phần hóa học của xi măng Vicen PC40	54
Bảng 2.3 - Thành phần khoáng vật của xi măng Vicen PC40.....	54
Bảng 2.4 - Bảng thành phần hạt của cát.....	56
Bảng 2.5 - Kết quả thành phần hạt của đá dăm	57
Bảng 2.6 – Khối lượng mẫu.....	59
Bảng 2.7 – Kết quả tính khối lượng riêng.....	59
Bảng 2.8 – Kết quả tính độ hút nước	60
Bảng 2.9 - Khối lượng mẫu	61
Bảng 2.10 - Kết quả tính độ hút nước	61
Bảng 2.11 - Kết quả tính khối lượng riêng của cốt liệu nhỏ.....	61
Bảng 2.12 - Kết quả tính khối lượng thể tích lên chặt của cốt liệu.....	63
Bảng 2.13 - Các chỉ tiêu thí nghiệm cốt liệu	63
Bảng 2.14 - Các chỉ tiêu của cát đã thí nghiệm.....	63
Bảng 2.15 - Các chỉ tiêu của đá dăm đã thí nghiệm.....	63
Bảng 2.16 - Thể tích các loại VL (trừ cát) trong $1 m^3$ hỗn hợp bê tông	65
Bảng 2.17 - Khối lượng thành phần vật liệu cơ sở cho $1m^3$ bê tông cấp 30.....	65
Bảng 2.18 - Thể tích các loại VL (trừ cát) trong $1 m^3$ hỗn hợp bê tông	66
Bảng 2.19 - Thành phần vật liệu cơ sở cho $1m^3$ bê tông cấp 40	67
Bảng 2.20 - Chi tiết về cường độ chịu nén của 2 loại bê tông thí nghiệm C30 và C40.....	68
Bảng 2.21 - Chi tiết về các nhóm mẫu, cấp áp lực nước và cấp gia tải	76
Bảng 2.22 - Kết quả thí nghiệm độ chống thấm nước của 2 loại bê tông C30, C40.....	76
Bảng 2.23 – Kết quả đo lưu lượng nước và tính toán hệ số thấm nước	78
Bảng 3.1 - Kết quả thí nghiệm khuếch tán ion clorua của bê tông thường C30.....	85
Bảng 3.2 - Kết quả thí nghiệm khuếch tán ion clorua của bê tông thường C40.....	86

Bảng 3.3 - Hệ số khuếch tán ion clorua của mẫu bê tông C30	88
Bảng 3.4 - Hệ số khuếch tán ion clorua của mẫu bê tông C40	88
Bảng 3.5 - Kết quả thí nghiệm khuếch tán ion clorua của mẫu bê tông C30, có xét đến trạng thái ứng suất nén trực tiếp	93
Bảng 3.6 - Kết quả thí nghiệm thấm ion clorua của mẫu bê tông C40, có xét đến trạng thái ứng suất nén trực tiếp.....	94
Bảng 3.7 – Hệ số khuếch tán ion clorua ở trạng thái không chịu tải của bê tông C30.....	98
Bảng 3.8 – Hệ số thấm nước theo các cấp áp lực của bê tông (C30) chịu tải trọng nén trực tiếp.....	99
Bảng 3.9 – Giá trị hệ số khuếch tán được tính từ hệ số thấm nước theo C (Bê tông C30).....	99
Bảng 3.10 – Hệ số khuếch tán ion clorua ở trạng thái không chịu tải của bê tông C40.....	100
Bảng 3.11 – Hệ số thấm nước theo các cấp áp lực của bê tông (C40) chịu tải trọng nén trực tiếp.....	100
Bảng 3.12 – Giá trị hệ số khuếch tán được tính từ hệ số thấm nước theo C (Bê tông C40).....	100
Bảng 3.13 – Hệ số khuếch tán ion clorua theo các cấp ứng suất của bê tông (C30) theo lý thuyết và thí nghiệm.....	101
Bảng 3.14 – Hệ số khuếch tán ion clorua theo các cấp ứng suất của bê tông (C40) theo lý thuyết và thí nghiệm.....	101
Bảng 4.1 - Tóm tắt các tiêu chuẩn xác định giới hạn tối đa cho phép của nồng độ ion clorua trong vữa và bê tông dự ứng lực	110
Bảng 4.2. Bảng thông số đầu vào	115

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT

Chữ cái viết tắt, kí hiệu	Chữ viết đầy đủ
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials (Hiệp hội các Viên chức Đường bộ và Vận tải Mỹ)
ACI	American Concrete Institute (Viện Bê tông Mỹ)
ASTM	American Society for Testing and Materials (Tiêu chuẩn Mỹ về Thí nghiệm Vật liệu)
BT	Bê tông
BTCT	Bê tông cốt thép
C	Cát
CL	Cốt liệu
CTH	Thí nghiệm trạng thái không ổn định
DU \bar{L}	Dự ứng lực
IC	Ion clorua (Ion Chloride (E), Ion Chlorure (F)) Cl ⁻
EN	EuroNorm (Tiêu chuẩn Châu Âu)
N/CKD	Nước/chất kết dính
N/X	Nước/xi măng
N	Nước
X	Xi măng
PTHH	Phần tử hữu hạn
PGSD	Phụ gia sử dụng
TTH	Trục trung hòa
TCN	Tiêu chuẩn ngành
TCVN	Tiêu chuẩn Việt Nam
RCPT	Rapid Chloride Penetration Test (Thí nghiệm thẩm nhanh ion clorua)

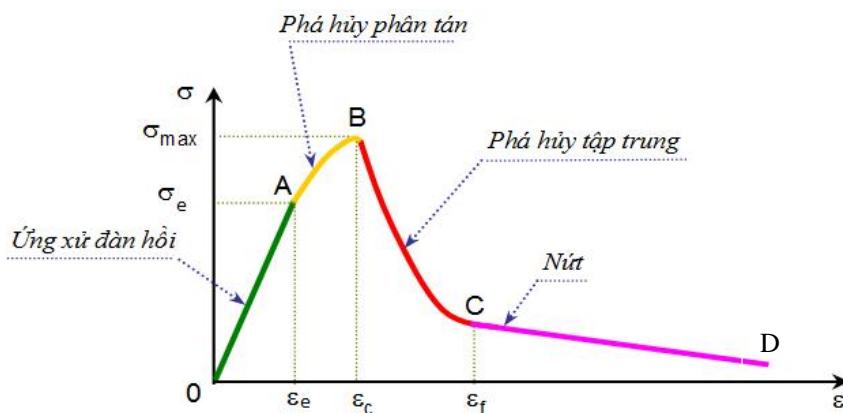
MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài

Độ bền của kết cấu công trình xây dựng nói chung và các công trình cầu, hầm nói riêng bằng bê tông cốt thép là một vấn đề được quan tâm nhiều trong thời gian gần đây ở Việt Nam. Một số yêu cầu về thiết kế các kết cấu theo độ bền đã được đưa vào trong các hồ sơ thiết kế mới, thiết kế sửa chữa nhằm duy trì tuổi thọ công trình như dự kiến. Một khi yêu cầu về độ bền được đảm bảo, công trình sẽ có tính bền vững theo thời gian, chi phí bảo trì sửa chữa công trình giảm xuống mức tối thiểu; năng lực khai thác công trình sẽ được phát huy tối đa.

Một trong các tiêu chí về độ bền của kết cấu công trình bằng bê tông cốt thép là độ bền của vật liệu bê tông chống lại khả năng thấm nước và thấm ion clorua. Bên cạnh việc nghiên cứu ứng dụng các loại bê tông có khả năng chống thấm tốt nhằm áp dụng trong thực tế thì việc đánh giá cơ chế thấm nước, thấm ion clorua qua bê tông, đặc biệt là các nghiên cứu có xét đến ảnh hưởng của tải trọng tác dụng đến thấm nước và thấm ion clorua cũng được nghiên cứu nhiều trong thời gian gần đây.

Dưới tác động của tải trọng, trong bê tông xuất hiện ứng suất; khi giá trị ứng suất này tăng lên sẽ gây ra các ảnh hưởng đến cấu trúc rỗng của bê tông thể hiện ở sự gia tăng không gian rỗng, liên thông giữa các lỗ rỗng; các vết nứt vi mô phân tán tập trung lại thành các vết nứt lớn xuất hiện trong bê tông (Hình 1). Giai đoạn ứng xử đàn hồi OA có thể coi bê tông nguyên vẹn; các vết nứt vi mô bắt đầu xuất hiện phân tán đều trong bê tông ở giai đoạn AB; các vết nứt tập trung lại để tạo ra các đường nứt lớn trong giai đoạn BC; Cuối cùng các đường nứt lớn xuất hiện ở giai đoạn CD, đánh dấu sự suy giảm ứng suất giảm dần về 0 trong bê tông.



Hình 1. Các giai đoạn ứng xử của bê tông

(OA-ứng xử đàn hồi; AB-phá hủy phân tán; BC - phá hủy tập trung; CD - nứt)

Ảnh hưởng của tải trọng đủ lớn sẽ gây ra nứt trong bê tông, vì thế cũng làm cho độ thấm nước và thấm ion clorua qua bê tông tăng lên theo trạng mức độ suất ngày càng lớn trong bê tông. Các nghiên cứu điển hình của các tác giả có xét đến ảnh hưởng của ứng suất trong bê tông đến độ thấm của bê tông có thể kể đến là Banthia & al (2008), A. Antoni & al (2008), Tran & al (2009), H. Wang & al (2011), W. Zhang & al (2011), G.P. Li & al (2011), A. Djerbi & al (2013), Junjie Wang & al (2015).

Các nghiên cứu của các tác giả trên đây chỉ ra các ảnh hưởng của ứng suất trong bê tông do tác động cơ học (tải trọng) gây ra đến độ thấm nước và thấm ion clorua qua bê tông thông qua các nghiên cứu thực nghiệm hoặc xây dựng mô hình lý thuyết dựa trên định luật Fick hoặc Darcy và mô hình cấu trúc rỗng của bê tông có xét đến sự dịch chuyển chất lỏng qua bê tông.

Một số điểm chưa được đề cập đến trong các nghiên cứu trên đây là các nghiên cứu thực nghiệm liên quan đến trạng thái ứng suất ngoài giới hạn đàn hồi của bê tông cũng như mối quan hệ giữa khuếch tán ion clorua và thấm nước của bê tông. Nếu có được các kết quả nghiên cứu về các vấn đề này sẽ cho phép dễ dàng tìm được khuếch tán ion clorua (vốn khá khó khăn khi thí nghiệm) từ độ thấm nước (đo đạc dễ dàng hơn) của bê tông; đồng thời dự báo ảnh hưởng của trạng thái tồn tại các đường nứt vi mô (chưa xuất hiện các đường nứt lớn) đến tuổi thọ sử dụng của các công trình cầu bê tông cốt thép.

Ở Việt Nam, vấn đề nghiên cứu ảnh hưởng của tải trọng đến độ thấm nước và thấm ion clorua của bê tông vẫn là vấn đề rất mới, chưa có nhiều nghiên cứu đề cập đến. Một phần do các thí nghiệm, đánh giá thấm nước và khuếch tán ion clorua qua bê tông còn phức tạp, đặc biệt là các thí nghiệm có xét đến ảnh hưởng của tải trọng nén trực tiếp.

Việc nghiên cứu đánh giá được mối quan hệ giữa độ thấm nước và khuếch tán ion clorua có xét đến yếu tố ứng suất trong bê tông là cần thiết, mang nhiều ý nghĩa cho công tác đánh giá, dự báo tuổi thọ của công trình; phù hợp với đặc điểm khai thác của các công trình nói chung và các công trình cầu nói riêng, đặc biệt là các công trình cầu ở Việt Nam.

Từ những đòi hỏi cấp thiết và ý nghĩa quan trọng trong việc đề xuất được mô hình đánh giá ảnh hưởng của tải trọng đến độ thấm của bê tông và ứng dụng trong dự báo tuổi thọ công trình bằng bê tông cốt thép nói chung và các công trình cầu nói riêng, đề tài nghiên cứu **“Đánh giá độ thấm nước và khuếch tán ion clorua của bê tông có xét đến yếu tố ứng suất nén, ứng dụng trong kết cấu cầu”** được lựa chọn làm đề tài luận án.

Nội dung luận án gồm 4 chương, mở đầu, kết luận và kiến nghị

- Mở đầu
- Chương 1: Tổng quan về độ bền của bê tông và các nghiên cứu liên quan đến độ thấm nước, khuếch tán ion clorua của bê tông.
- Chương 2: Thí nghiệm phân tích độ thấm nước của bê tông có xét đến trạng thái ứng suất nén.
- Chương 3: Thí nghiệm phân tích khuếch tán ion clorua của bê tông có xét đến trạng thái ứng suất nén.
- Chương 4: Tính toán dự báo tuổi thọ công trình cầu bê tông cốt thép có xét đến ảnh hưởng đồng thời của hiệu ứng tải trọng và tác động của môi trường
- Kết luận và kiến nghị

2. Mục tiêu của luận án

Mục tiêu của luận án là:

- Xác định hệ số thấm nước, mức chống thấm, hệ số khuếch tán ion clorua của một số loại bê tông thường dùng trong xây dựng cầu chịu tải trọng nén trước và chịu tải trọng nén trực tiếp.
- Xây dựng mối quan hệ giữa hệ số thấm nước và hệ số khuếch tán ion clorua, có xét đến hiệu ứng của tải trọng nén trực tiếp.
- Xây dựng mô hình dự báo tuổi thọ sử dụng cầu bê tông cốt thép có xét đến hiệu ứng của tải trọng theo tiêu chí khởi đầu ăn mòn cốt thép trong bê tông. Áp dụng dự báo tuổi thọ cho kết cấu công trình cầu bê tông cốt thép.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

3.1. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu là một số loại bê tông thường dùng trong xây dựng cầu. Hệ số thấm nước, thấm ion clorua và tương quan giữa chúng có xét đến ảnh hưởng của tải trọng. Tuổi thọ sử dụng công trình cầu bê tông cốt thép.

3.2. Phạm vi nghiên cứu

- Kết cấu bê tông cốt thép có ứng suất nén trong môi trường xâm thực có ion clorua.
- Bê tông trong các công trình xây dựng nói chung và công trình cầu nói riêng.

4. Phương pháp nghiên cứu

- Phương pháp tổng hợp, phân tích và so sánh.
- Phương pháp nghiên cứu chủ yếu là phương pháp nghiên cứu lý thuyết kết hợp với thực nghiệm. Sử dụng các lý thuyết tiên tiến về độ bền của bê tông để xác

định các tương quan (công thức) thực nghiệm và triển khai nghiên cứu thực nghiệm để kiểm chứng.

Mô hình hóa để dự báo tuổi thọ sử dụng của cầu bê tông cốt thép chịu tác động của sự khuếch tán ion clorua có xét đến hiệu ứng của tải trọng.

5. Những đóng góp mới của luận án

Luận án đã tiến hành các nghiên cứu thực nghiệm, phân tích tính thấm nước qua bê tông chịu ảnh hưởng của tải trọng với hai loại bê tông C30 và C40. Kết quả nghiên cứu cho thấy khi tăng cấp tải trọng nén thì độ thấm nước của bê tông tăng đáng kể; đặc biệt sau khi trong bê tông bắt đầu có thay đổi cấu trúc rỗng do tác động của tải trọng nén trước hoặc nén trực tiếp. Một mô hình thí nghiệm thấm nước có xét đến tải trọng nén trực tiếp đã được thiết kế, chế tạo và thử nghiệm dựa trên các kết quả nghiên cứu trên thế giới gần đây; thiết bị thí nghiệm này đã có các cải tiến để quá trình đo đạc được thuận lợi hơn, đặc biệt là quá trình không chế tải trọng và ghi nhận số liệu hoàn toàn tự động.

Luận án đã tiến hành các nghiên cứu thực nghiệm phân tích tính thấm ion clorua qua bê tông chịu ảnh hưởng của tải trọng đối với 2 loại bê tông C30 và C40. Kết quả nghiên cứu cho thấy ảnh hưởng đáng kể của tải trọng nén đến độ thấm ion clorua của bê tông. Một mô hình thí nghiệm thấm ion clorua có xét đến tải trọng nén trực tiếp đã được thiết kế, chế tạo và thử nghiệm dựa trên các kết quả nghiên cứu trên thế giới gần đây; thiết bị thí nghiệm này đã có các cải tiến để quá trình đo đạc được thuận lợi hơn, đặc biệt là quá trình kiểm soát lực nén trong bê tông.

Luận án đã đề xuất được mối quan hệ giữa giữa khuếch tán ion clorua hệ số thấm nước của bê tông. Xác định được hệ số C_k để tính toán hệ số khuếch tán ion clorua từ hệ số thấm nước của cùng loại bê tông. Từ đó đề xuất công thức tính toán quan hệ giữa hệ số thấm nước và hệ số khuếch tán ion clorua của bê tông có xét đến ảnh hưởng của ứng suất trong bê tông cho 2 loại bê tông xem xét.

Luận án đã áp dụng mô hình đề xuất để tính toán dự báo tuổi thọ sử dụng của các kết cấu công trình bê tông cốt thép trong điều kiện Việt Nam có xét đến ảnh hưởng của tải trọng thường xuyên và tải trọng khai thác.

CHƯƠNG 1

TỔNG QUAN VỀ ĐỘ BỀN CỦA BÊ TÔNG VÀ CÁC NGHIÊN CỨU LIÊN QUAN ĐẾN ĐỘ THẨM NƯỚC, KHUẾCH TÁN ION CLORUA CỦA BÊ TÔNG

1.1. Đặt vấn đề

Albert K.H. Kwan and Henry H.C. Wong [73] cho rằng, ngoài trừ những hư hỏng cơ học, tất cả các ảnh hưởng bất lợi đến độ bền của bê tông liên quan đến sự vận chuyển chất lỏng hoặc ion qua bê tông. Có bốn hoạt chất chủ yếu có tác động đến độ bền bê tông cốt thép trong thực tế, bao gồm: nước, oxy, cacbon đioxit và ion clorua. Chúng có thể di chuyển qua bê tông theo những cách khác nhau:

- + Sự thẩm thấu (dòng chảy chịu tác động dưới một gradien áp lực)
- + Sự khuếch tán (dòng chảy chịu tác động dưới một gradien nồng độ)
- + Sự hút thấm bề mặt (dòng chảy chịu tác động dưới một sức hút mao dẫn)

Trong thực tế sự hút thấm bề mặt thường không đáng kể, các yếu tố chính ảnh hưởng đến độ bền là độ thấm của bê tông. Đây chính là 2 yếu tố chính ảnh hưởng đến độ bền của các công trình xây dựng bằng bê tông cốt thép nói chung và các công trình cầu nói riêng.

Trong thực tế khai thác các công trình xây dựng, bê tông luôn chịu tác động của tải trọng. Thẩm của nước và khuếch tán ion clorua qua bê tông lúc này sẽ khác so với trường hợp bê tông không chịu tải. Đánh giá đặc điểm thẩm của nước và ion clorua qua bê tông có ứng suất trong bê tông là một xu hướng nghiên cứu mới trong thời gian gần đây.

Để có cơ sở cho việc đánh giá độ bền của bê tông và dự báo tuổi thọ dài hạn của các công trình bằng bê tông cốt thép, chương này sẽ trình bày các nội dung:

- + Tổng quan về độ bền của bê tông.
- + Các nghiên cứu về độ thấm nước và khuếch tán ion clorua của bê tông trên thế giới.
- + Các nghiên cứu về mối quan hệ giữa hệ số thẩm nước và hệ số khuếch tán ion clorua.
- + Các nghiên cứu về thời gian khởi đầu ăn mòn và thời gian lan truyền ăn mòn, tuổi thọ sử dụng.
- + Các nghiên cứu liên quan ở Việt Nam.

1.2. Độ bền của bê tông

1.2.1. Khái niệm về độ bền của bê tông

Độ bền của bê tông xi măng theo ACI 201.2R-08 [21] định nghĩa là "khả năng chống lại hoạt động thời tiết, ăn mòn hóa chất, mài mòn, hoặc bất kỳ quá trình suy thoái nào khác", có nghĩa là bê tông bền sẽ giữ lại hình thức ban đầu của nó, chất lượng, và khả năng phục vụ khi tiếp xúc với môi trường.

Adam Neville [23] giải thích độ bền của bê tông là "Bê tông phù hợp cho các mục đích mà nó được dự định dưới các điều kiện mà bê tông dự kiến sẽ được tiếp xúc và với tuổi thọ dự kiến trong suốt thời gian đó bê tông vẫn tiếp tục phục vụ". Tuy nhiên, mặc dù độ bền của kết cấu được dự kiến, kết cấu sẽ phục vụ mà không có những hư hỏng đáng kể nào đến mức cần thiết phải có những sửa chữa lớn trước khi hết thời gian tuổi thọ thiết kế, nhưng không thể coi thiết kế độ bền là một giải pháp thay thế cho công tác bảo trì được. Ngay cả đối với một kết cấu được thiết kế và xây dựng với một tiêu chuẩn độ bền cao, cũng vẫn cần phải kiểm tra và bảo trì thường xuyên để khôi phục năng lực cho mục đích của kết cấu cần đáp ứng.

Kết cấu bê tông cốt thép có thể bị hư hỏng do sự suy yếu của bê tông hoặc do quá trình ăn mòn các thanh cốt thép ở trong bê tông. Nguyên nhân dẫn đến sự suy yếu của bê tông bao gồm phản ứng kiềm – cốt liệu, tác động hóa học, đóng băng và tan băng, mài mòn và cháy. Thường có sự hiểu lầm rằng tác động cacbonat và ion clorua sẽ gây ra sự phá hủy kết cấu bê tông. Tuy nhiên, trong thực tế, tác động cacbonat và ion clorua sẽ không gây ra bất kỳ thiệt hại riêng nào cho bản thân bê tông mà chúng chủ yếu là nguyên nhân phá hủy lớp màng bảo vệ cốt thép trong bê tông, dẫn tới quá trình ăn mòn cốt thép. Sự suy giảm của bê tông không phải là vấn đề thường gặp. Trong hầu hết các trường hợp, nếu có bất kỳ vấn đề về độ bền của kết cấu bê tông, thì sự ăn mòn của các thanh cốt thép là nguyên nhân chính.

1.2.2. Các chỉ tiêu về độ bền của bê tông

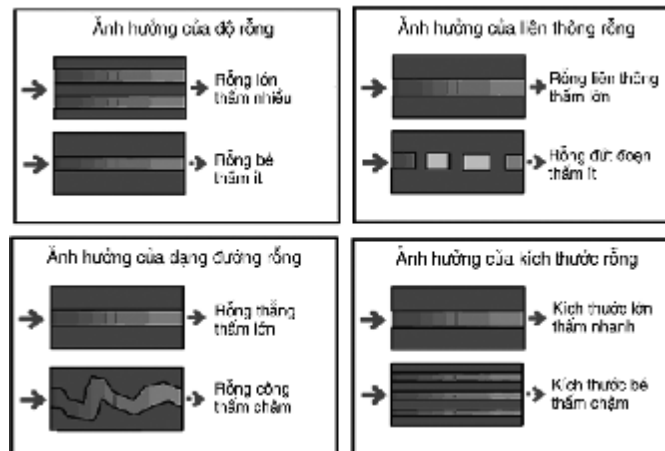
Theo các định nghĩa ở trên, sự suy giảm độ bền kết cấu bê tông cốt thép khi tiếp xúc với môi trường có rất nhiều cơ chế. Trong phạm vi nghiên cứu ở luận án này, cùng với điều kiện, đặc điểm khí hậu Việt Nam, đặc biệt là ở các vùng ven biển thì cơ chế dẫn đến suy giảm được đánh giá chủ yếu thông qua các chỉ tiêu về độ bền như khả năng chống thấm của chất lỏng và sức kháng khuếch tán ion clorua qua bê tông. Ngoài ra, có thể kể đến hiện tượng cacbonat hóa, ăn mòn sunfat, ăn mòn hóa học do axit và nước biển.

1.2.2.1. Khả năng chống thấm chất lỏng qua bê tông

Khả năng chống thấm của bê tông theo Mark G. Richardson [66] định nghĩa là

khả năng chống lại quá trình các chất lỏng thấm thấu qua một môi trường rỗng do sự chênh lệch thế năng. Sự chênh lệch về độ ẩm, áp lực thủy tĩnh, ứng suất, nhiệt độ, và nồng độ các hóa chất làm xáo trộn trạng thái cân bằng của các chất lỏng trong vật liệu rỗng; do vậy, sự di chuyển của dòng chất lỏng xảy ra để thiết lập lại sự cân bằng mới.

Khả năng chống thấm của bê tông, một loại vật liệu rỗng, phụ thuộc nhiều vào các tham số của môi trường bê tông như độ rỗng, độ ngoằn ngoèo của các lỗ rỗng và tính thông nhau giữa các lỗ rỗng. Scrivener [80] cho rằng, khi độ rỗng và độ thông nhau giữa các lỗ rỗng trong bê tông tăng lên, độ bền chống thấm của bê tông bị giảm xuống; và khi các lỗ rỗng càng thẳng, dòng chảy thấm có tốc độ càng nhanh. Dưới các tác động cơ học như co ngót, từ biến hay nhiệt độ,..., sẽ dẫn đến sự phá hủy trong bê tông kèm theo các đường nứt làm gia tăng các thông số trên, độ thấm của bê tông vì vậy cũng sẽ tăng nhanh. Sơ đồ thấm được minh họa trong Hình 1.1



Hình 1.1 - Ảnh hưởng của độ rỗng, dạng, kích thước đường rỗng và tính liên thông của các lỗ rỗng đến độ thấm của bê tông (Scrivener (2001) [80])

Năm 2000, Abbas nghiên cứu ảnh hưởng của không gian rỗng đến cường độ và độ thấm của bê tông [18], cho rằng cường độ bê tông phụ thuộc vào tỷ lệ rỗng của vật liệu; tuy nhiên, độ thấm lại phụ thuộc chủ yếu vào tính liên thông giữa các lỗ rỗng. Một khi bê tông có tính liên thông rỗng cao do các đường nứt xuất hiện vì nhiều nguyên nhân (co ngót, từ biến, tác động cơ học, nhiệt độ cao, ăn mòn...) trong quá trình khai thác, thì độ thấm của bê tông tăng rất nhanh.

Thuật ngữ "tính thấm – permeability" thường được sử dụng phổ biến, tuy nhiên, theo cách bao trùm tất cả để chỉ các tính chất có ảnh hưởng đến sự xâm nhập.

Quan hệ quan trọng giữa khả năng chống thấm chất lỏng và các cơ chế tác động tới độ bền của bê tông bao gồm hiện tượng cacbonat hóa, khuếch tán ion clorua gây ăn mòn cốt thép, ăn mòn sunfat, ăn mòn hóa học do axit và nước biển đã được thực

nghiệm qua nhiều nghiên cứu, đặc biệt là các nghiên cứu xem xét ảnh hưởng đồng thời của tải trọng và môi trường đến độ thấm của bê tông.

1.2.2.2. Sức kháng khuếch tán ion clorua của bê tông

Ăn mòn cốt thép trong bê tông là vấn đề phổ biến ảnh hưởng đến độ bền của kết cấu bê tông cốt thép. Trong đó ăn mòn do ion clorua gây ra là một trong những nguyên nhân chính dẫn đến sự suy giảm, ảnh hưởng đến độ bền lâu dài của các kết cấu công trình [42].

Bê tông bảo vệ cốt thép từ các tác động vật lí và hóa học. Quá trình khuếch tán ion clorua chính là nguyên nhân dẫn đến sự tích tụ ion clorua trên thép, làm tăng nguy cơ ăn mòn cốt thép. Sau rất nhiều nghiên cứu, Viện khoa học CCAA (Cement Concrete & Aggregates Australia) của Úc [41] cho rằng, sức kháng khuếch tán ion clorua phụ thuộc vào độ thấm thấu của bê tông và chiều dày lớp bê tông bảo vệ. Trạng thái nguyên vẹn của lớp bê tông bảo vệ dưới tải trọng khai thác, điều kiện của sự rạn nứt và bề rộng vết nứt cũng ảnh hưởng đến sức kháng khuếch tán ion clorua của bê tông. Ăn mòn cốt thép là một quá trình điện hóa. Do đó tính chất điện hóa của bê tông như điện trở suất là những thuộc tính quan trọng ảnh hưởng đến tốc độ ăn mòn cốt thép.

Khi cốt thép còn được bao bọc bởi các lớp bê tông bảo vệ đặc chắc, thì môi trường kiềm trong bê tông đủ cao để tạo ra một lớp màng bảo vệ các cốt thép. Nếu màng bảo vệ này bị phá hủy, quá trình ăn mòn cốt thép sẽ xảy ra dẫn đến sự suy giảm diện tích mặt cắt ngang và khả năng chịu lực của các bộ phận kết cấu bê tông cốt thép. Theo ACI 201.2R-01 [20], dạng ăn mòn điển hình nhất của cốt thép là ăn mòn điện hóa xảy ra do tác động xâm thực của các ion clorua qua bê tông.

Mặc dù còn tồn tại nhiều quan điểm về cơ chế xuyên thủng màng thụ động này, song về nguyên tắc hầu hết các nhà nghiên cứu đều thống nhất là khi độ pH của môi trường bê tông bị giảm đến một giới hạn nào đó thì hiện tượng xuyên thủng màng thụ động xảy ra.

Trong cuốn sách “Các thuộc tính của bê tông” của Neville A.M xuất bản năm 2003 (trang 503) [71] có ghi, giới hạn của độ pH đủ để làm mất trạng thái thụ động, dao động trong khoảng từ 9 đến 11,5. Nguyên nhân dẫn đến độ pH của bê tông bị giảm có một số lý do:

+ Quá trình cacbonat hóa bê tông dưới tác dụng của CO₂ có trong môi trường theo phản ứng:



Quá trình này diễn ra từ ngoài vào trong bê tông, theo thời gian. Tuy nhiên để quá trình cacbonat hóa diễn ra hoàn toàn (khi đó pH của bê tông chỉ còn khoảng 9) ngay cả khi có chiều dày lớp bê tông bảo vệ mỏng cũng cần một khoảng thời gian dài (20 ÷ 30 năm trở lên). Mặt khác kết quả khảo sát nhiều công trình thực tế chứng minh thậm chí những kết cấu bê tông có độ pH còn rất cao (lớn hơn 11,5) nhưng hiện tượng ăn mòn vẫn diễn ra.

+ Nguyên nhân do nồng độ ion clorua, vượt quá giới hạn, gây mất ổn định lớp màng thụ động:

Ion clorua có mặt trong bê tông với các lý do như: Kết cấu bê tông làm việc trong môi trường biển hoặc các môi trường chứa ion clorua khác, bê tông được chế tạo từ các vật liệu nhiễm mặn, khi xử lý bê tông bằng các chất làm tan băng hoặc khi dùng các phụ gia rắn nhanh chứa Ion clorua,... Vì vậy việc sử dụng nước biển, cốt liệu chứa ion clorua hoặc phụ gia như canxi clorua phải được kiểm soát chặt chẽ. Tiêu chuẩn Châu Âu EN 206-1 [53] giới hạn hàm lượng ion clorua trong một phạm vi từ 0,1 đến 0,4% trong trường hợp bê tông có cốt thép. Những hạn chế nghiêm ngặt hơn được áp dụng cho bê tông dự ứng lực.

Ion clorua có thể có mặt trong ba trạng thái: các ion clorua tự do trong dung dịch lỗ rỗng, ion clorua liên kết mạnh và ion clorua liên kết yếu. Ion clorua tự do đóng góp đáng kể vào nguy cơ ăn mòn. Chúng có thể được đưa vào từ một nguồn bên ngoài hoặc hiện tượng cacbonat hóa có thể giải phóng ion clorua liên kết từ các nguồn bên trong [66].

a) Các yếu tố ảnh hưởng đến sức kháng khuếch tán ion clorua

Tại Úc, phần lớn các công trình được xây dựng gần bờ biển nơi chúng tiếp xúc với ion clorua trong không khí hoặc tiếp xúc trực tiếp với nước biển. Độ bền của kết cấu bê tông cốt thép và bê tông dự ứng lực do đó phụ thuộc rất nhiều vào khả năng chống sự khuếch tán ion clorua. Trong nghiên cứu về sức kháng khuếch tán ion clorua của bê tông, Viện khoa học CCAA (Cement Concrete & Aggregates Australia) của Úc [41] chỉ ra rằng độ bền vật lý của kết cấu bê tông cốt thép do sự khuếch tán ion clorua bị ảnh hưởng bởi các yếu tố liên quan đến cấu trúc bê tông và kết cấu bê tông như tình trạng chịu ứng suất và tính nguyên vẹn của bề mặt.

✓ Các yếu tố liên quan đến cấu trúc bê tông

Sức kháng khuếch tán ion clorua của bê tông phụ thuộc rất lớn vào độ rỗng xốp của bê tông, kích cỡ lỗ rỗng, sự phân bố các lỗ rỗng và tính thông nhau giữa các lỗ rỗng. Độ rỗng xốp của bê tông phụ thuộc vào các yếu tố [41]:

- Loại xi măng và các thành phần hỗn hợp khác;

- Thành phần bê tông;
- Quá trình đầm chặt và bảo dưỡng bê tông.

Loại xi măng có ảnh hưởng đến độ rỗng xốp của bê tông và phản ứng của nó với ion clorua. Độ rỗng xốp của bê tông phụ thuộc rất nhiều vào tỷ lệ nước/xi măng và cốt liệu/xi măng, trong khi loại và khối lượng xi măng ảnh hưởng đến sự phân bố kích thước lỗ rỗng và các phản ứng hóa học của bê tông. Ảnh hưởng của loại xi măng và tỷ lệ nước/xi măng lên sức kháng khuếch tán ion clorua của bê tông, được đo bằng hệ số khuếch tán ion clorua.

Độ rỗng xốp hoặc độ thấm của bê tông phụ thuộc rất nhiều vào mức độ đầm chặt và bảo dưỡng trong quá trình thi công. Quá trình bảo dưỡng ảnh hưởng rất lớn đến độ rỗng xốp của lớp bê tông bảo vệ cốt thép khỏi sự ăn mòn do ion clorua gây ra.

▼ Các yếu tố liên quan đến kết cấu bê tông

Theo CIRIA C660 [43] kết cấu bê tông trong quá trình khai thác chịu những điều kiện ứng suất khác nhau gây ra cả những vết nứt vi mô và vĩ mô. Các vết nứt do uốn được theo dõi và kiểm soát bằng các giới hạn ứng suất trong thép và khoảng cách giữa các thanh cốt thép. Những vết nứt do nhiệt độ được kiểm soát bằng cách giới hạn sự thay đổi của nhiệt độ và không chế các điều kiện trong quá trình thi công và khai thác.

Mối quan tâm về các vết nứt và quá trình ăn mòn cốt thép đã được nghiên cứu từ lâu, năm 1978, trong báo cáo “Nghiên cứu bê tông trong môi trường biển – Nứt và ăn mòn” của Beeby A W – Hiệp hội xi măng và bê tông, Vương quốc Anh [32] chỉ ra rằng các vết nứt vi mô ảnh hưởng đến quá trình ăn mòn trong một thời gian ngắn, ảnh hưởng này suy giảm theo thời gian và trong một khoảng thời gian dài ảnh hưởng của bề rộng các vết nứt đến ăn mòn là không đáng kể. Có 2 lý do lý giải cho sự suy giảm ảnh hưởng của độ rộng vết nứt theo thời gian: quá trình điện hóa diễn ra không thuận lợi và vết nứt dần được làm lành. Báo cáo của viện nghiên cứu cảng và sân bay Nhật Bản [68] cho rằng những vết nứt hẹp (< 0.5mm) được làm lành trong suốt 15 năm tiếp xúc của mẫu thí nghiệm trong một vùng chịu ảnh hưởng bởi thủy triều dùng các loại xi măng khác nhau và kết luận rằng các chất lắng đọng được tìm thấy tại chân các vết nứt tạo ra một môi trường có nồng độ kiềm cao. Do đó ngăn chặn các phản ứng ăn mòn các thanh cốt thép tại chân các vết nứt. Báo cáo nghiên cứu cũng cho rằng nồng độ ion clorua gia tăng theo độ mở rộng vết nứt khi mà bề rộng vết nứt vượt quá 0.5mm. Những vết nứt rộng khoảng 0.3mm hoặc nhỏ hơn có thể tự làm lành, đặc biệt là trong môi trường nước biển, khi mà Magie và

Canbonat kết hợp với Canxi hydroxit tạo thành các sản phẩm không hòa tan Magie hydroxit và Canxi cacbonat, sau đó làm đầy các vết nứt.

Đến năm 2000, Lim C C trong bài báo nghiên cứu “Ảnh hưởng của vết nứt đến dự báo tuổi thọ kết cấu bê tông trong môi trường khắc nghiệt” [61] chỉ ra rằng, bê tông chịu ứng suất kéo cho kết quả khuếch tán ion clorua lớn hơn so với loại bê tông tương tự chịu ứng suất nén. Nó được lí giải là do các vết nứt vi mô ở giữa bề mặt cốt liệu và chất kết dính tại vùng chịu ứng suất kéo làm đẩy nhanh quá trình khuếch tán ion clorua. Ngược lại, sự suy giảm độ rỗng của bê tông tại các vùng chịu ứng suất nén, cản trở quá trình khuếch tán ion clorua.

Cao.H.T and Sirivivatnanon.V [40] cho rằng, trong thực tế các kết cấu bê tông với độ mở rộng vết nứt trong một giới hạn cụ thể được coi là có cùng sức kháng khuếch tán ion clorua như bê tông không chịu ứng suất. Ảnh hưởng bởi các điều kiện ứng suất khác nhau đến sức kháng khuếch tán ion clorua của kết cấu bê tông được xác định bằng hệ số khuếch tán ion clorua và được sử dụng trong các mô hình dự báo tuổi thọ.

Trong khi đó, nhiều nhà nghiên cứu khác lại phân biệt các yếu tố thuộc về vật liệu và các yếu tố thuộc về môi trường là những nhân tố chính ảnh hưởng tới tốc độ khuếch tán ion clorua của bê tông.

Vấn đề chống ăn mòn cho kết cấu trong các vùng có nồng độ ion clorua cao đã được quan tâm từ lâu. Năm 1986 trong dự án xây dựng sửa chữa và bảo trì các công trình cầu bê tông tại Mỹ do ăn mòn, Pritchard, B. [77] đã đề nghị một loạt các chi tiết thiết kế để giảm thiểu mức độ tiếp xúc của kết cấu với nguồn ion clorua như thiết kế sàn cầu liên tục để tránh các mối nối, khe nối mặt cầu hở, sàn thoát nước và nước đọng. Pritchard, B. cũng cho rằng hình dạng của cầu kiện cũng có thể ảnh hưởng đến độ bền của kết cấu. Cột ít bền hơn so với tường và dầm ít bền hơn các tấm. Có lẽ điều này là do sự khác biệt giữa hiệu quả của sự thẩm thấu hai trục và sự thẩm thấu một trục.

Dhir và cộng sự (1993), trong bài báo “Bê tông PFA: Nhiệt độ tiếp xúc ảnh hưởng đến sự khuếch tán ion clorua” đăng trên tạp chí Cement and Concrete Research số 23 [48] kết luận rằng sức kháng khuếch tán ion clorua của bê tông xi măng Poocăng ở 45°C ít hơn so với ở 5°C. Hệ số khuếch tán ảnh hưởng bởi nhiệt độ và có thể tăng gấp đôi khi nhiệt độ trung bình tăng lên từ 10°C đến 20°C. Ngoài ra, chẳng hạn sự thay đổi nhiệt độ theo mùa có thể dẫn đến ion clorua liên kết được hấp thụ trong mùa đông sẽ được giải phóng thành ion clorua tự do trong mùa hè.

Hiện tượng cacbonat hóa cũng được cho là ảnh hưởng đến mức độ khuếch tán ion clorua vào bê tông do quá trình cacbonat hóa giải phóng các ion clorua liên kết,

làm cho các ion clorua tự do có sẵn dễ khuếch tán vào khu vực chưa bị cacbonát hóa. Điều này có thể làm tăng nồng độ ion clorua có hại trong khu vực lớp bảo vệ và làm cho nồng độ tại cốt thép đến một mức độ giới hạn.

Đặc biệt là với các bộ phận của kết cấu chìm trong nước biển, các bộ phận này chịu một áp suất thủy tĩnh, nguồn ion clorua sẽ bị một áp lực thêm và truyền ion clorua vào bên trong lớp bê tông bảo vệ, làm gia tăng quá trình khuếch tán ion clorua.

b) Cơ chế vận chuyển ion clorua trong bê tông.

Việc vận chuyển ion clorua vào bê tông là một quá trình phức tạp liên quan đến quá trình khuếch tán, sức hút mao dẫn, thẩm thấu, chảy đối lưu qua hệ thống lỗ rỗng và mạng lưới các vết nứt vi mô, kèm theo sự hấp thụ vật lý và liên kết hóa học [59]. Với quá trình vận chuyển phức tạp như vậy, cần hiểu các cơ chế vận chuyển riêng lẻ và quá trình vận chuyển chủ yếu, xác định phương pháp kiểm tra thích hợp để định lượng sức kháng khuếch tán ion clorua của bê tông.

▼ Cơ chế vận chuyển

Trong phần này, nghiên cứu sinh sẽ trình bày các cơ chế vận chuyển riêng biệt. Thường có nhiều cơ chế vận chuyển liên quan đến nhau. Hầu hết các thông số kỹ thuật về hiệu suất dựa trên cơ chế vận chuyển chủ yếu và được áp dụng trong các điều kiện tiếp xúc cụ thể. Bảng 1.1 tóm tắt cơ chế vận chuyển ion clorua căn bản áp dụng cho các kết cấu trong điều kiện tiếp xúc khác nhau.

Bảng 1.1 - Cơ chế vận chuyển ion clorua cơ bản trong các điều kiện tiếp xúc khác nhau [41]

Điều kiện tiếp xúc	Kết cấu ví dụ	Cơ chế vận chuyển ion clorua căn bản
Ngập nước	Các kết cấu phần dưới ngập trong vùng thủy triều lên xuống	Khuếch tán
	Tường ngoài tầng hầm hoặc đường hầm ngập trong vùng thủy triều lên xuống. Các kết cấu có chứa chất lỏng	Sự thẩm thấu, khuếch tán
Chịu ảnh hưởng của thủy triều	Các kết cấu phần trên và kết cấu phần dưới nằm trong vùng thủy triều	Sức hút mao dẫn, khuếch tán
Vẩy, phun	Các kết cấu phần trên nơi có thủy triều	Sức hút mao dẫn, khuếch

	cao ở vùng cửa biển	tán
Bờ biển	Các công trình xây dựng ở ven biển hoặc kết cấu phần trên trên đỉnh thủy triều ở cửa sông hoặc các vùng ven biển	Sức hút mao dẫn

- Khuếch tán

Theo Thomas M., Bamforth P. [87], khuếch tán được định nghĩa là quá trình một chất lỏng, khí hoặc ion có thể truyền qua bê tông dưới hoạt động của một gradient tập trung. Sự truyền khối lượng là kết quả của chuyển động ngẫu nhiên các phân tử hoặc các ion tự do trong dung dịch. Phương thức vận chuyển này xảy ra trong môi trường bão hòa hoàn toàn, như các kết cấu bị ngập trong nước. Đối với những vật liệu rỗng, xốp như bê tông, hệ số khuếch tán D là đặc tính đặc trưng của vật liệu mô tả sự chuyển dịch của một chất dưới tác động của một gradien tập trung.

Khuếch tán ion clorua ở trạng thái ổn định, lực truyền hữu hiệu là gradien của các ion tự do phân tán trong lỗ rỗng. Hệ số khuếch tán được kí hiệu là D . D có thể được xác định từ sự chênh lệch của các ion clorua trong hai hộp được ngăn cách bởi bê tông. Nó cho phép các ion khuếch tán trong một gradient nồng độ. Tốc độ khuếch tán đạt được bằng cách đo định kỳ hàm lượng ion trong dung dịch. Khi các điều kiện trạng thái ổn định đạt được, hệ số khuếch tán được tính theo Định luật thứ nhất về khuếch tán của Fick I [24]:

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x}; \quad (1.2)$$

trong đó:

J - lưu lượng khối lượng ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$);

D - hệ số khuếch tán (m^2/s);

c - nồng độ (g/m^3);

x - khoảng cách (m).

Phương thức thử nghiệm này chỉ áp dụng trong các nghiên cứu, vì nó tốn rất nhiều thời gian và mẫu xi măng hoặc bê tông thí nghiệm có chiều dày giới hạn, mỏng.

Theo Oh B. H., Jang S.Y [73] trong thí nghiệm khuếch tán trạng thái không ổn định, sự thâm nhập của các ion đạt được bằng cách ngâm mẫu thử trong một dung dịch chứa các ion xác định hoặc bằng cách nhỏ dung dịch chứa các ion xác định lên mẫu thử trong một thời gian nhất định. Sự thâm nhập được duy trì theo một hướng bằng cách bịt mẫu thử chỉ trừ một mặt. Hoặc là chiều sâu thâm nhập hoặc là mặt cắt

thâm nhập của các ion xác định trong mẫu thử được xác định và Định luật thứ hai về khuếch tán của Fick, mô tả sự thay đổi nồng độ trong một đơn vị thể tích theo thời gian được sử dụng để xác định hệ số khuếch tán D.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (1.3)$$

Ở đây, D có thể là hằng số hoặc là một hàm của nhiều biến khác nhau, như là thời gian, nhiệt độ, nồng độ. Giải phương trình (1.3) với điều kiện biên $c = c_0$ và điều kiện ban đầu $c = 0$ với $x > 0$ và $t = 0$ ta có:

$$c = c_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]; \quad (1.4)$$

trong đó:

c - nồng độ ion ở khoảng cách x (kg/m^3);

c_0 - nồng độ ion ở bề mặt tiếp xúc (kg/m^3);

erf - hàm sai số;

x - khoảng cách đến bề mặt tiếp xúc (m).

erf là hàm sai số (error function). Các giá trị của hàm sai số $x/2\sqrt{Dt}$ được cho sẵn trong các bảng toán học hoặc có thể tính toán. Do đó, nếu hệ số khuếch tán được giả sử là hằng số và dữ liệu thực nghiệm của c theo x tại thời gian t được biết, phương trình (1.4) có thể được dùng để tính hệ số khuếch tán.

Từ chiều sâu thâm nhập đo được, hệ số khuếch tán được tính theo công thức:

$$X_d = 4\sqrt{Dt}; \quad (1.5)$$

trong đó:

X_d - chiều sâu thâm nhập (m);

t - thời gian tiếp xúc (s).

Nếu vật liệu khuếch tán bị cố định từng phần do tương tác hóa học hoặc hút bám vật lý với quá trình truyền khối lượng, phương trình cân bằng (1.3) sẽ phải được điều chỉnh như sau:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) - s \quad (1.6)$$

Tuy nhiên, có vẻ như các đặc tính kết cấu lỗ rỗng của bê tông thay đổi theo hiệu ứng này và do đó hệ số khuếch tán thay đổi theo thời gian. Trong những trường hợp đó một hệ số khuếch tán danh định có thể được tính theo phương trình (1.5), phụ thuộc vào thời gian.

Hệ số khuếch tán thay đổi theo nồng độ dung dịch trên bề mặt tiếp xúc và thời gian tiếp xúc do sự thay đổi trong khả năng liên kết của bê tông ở những điều kiện môi trường khác nhau. Do đó, hệ số khuếch tán, bằng cách giả sử rằng nó là không đổi với vật liệu, phải được xem là một hệ số khuếch tán biểu kiến. Kết quả là sự dự đoán hệ số khuếch tán dựa trên lời giải đơn giản cho Định luật thứ hai về khuếch tán của Fick vượt quá so với sự thâm nhập của các ion.

ASTM C 1556 [27] đưa ra một phương pháp tiêu chuẩn để xác định hệ số khuếch tán ion clorua biểu kiến của hỗn hợp xi măng bằng cách khuếch tán một số lượng lớn, ước tính chính xác cho cả hệ số khuếch tán biểu kiến và nồng độ ion clorua bề mặt. Tiêu chuẩn được viện dẫn dựa trên một nguồn dữ liệu chính xác từ một thí nghiệm trong phòng của NORDTEST NT Build 443.

- Sức hút mao dẫn

Viện khoa học CCAA (Cement Concrete & Aggregates Australia) của Úc [41] cho rằng, nếu bề mặt kết cấu bê tông không bão hòa khi tiếp xúc với môi trường nước chứa ion clorua, dưới áp lực mao dẫn, nước chứa ion clorua sẽ khuếch tán vào bề mặt bê tông đến độ sâu khoảng 5÷15 mm chỉ trong vòng vài giờ đến vài ngày. Quá trình này chịu ảnh hưởng bởi độ nhớt, mật độ và sức căng bề mặt của chất lỏng, cấu trúc lỗ rỗng (bán kính, độ cong và tính liên tục của các lỗ rỗng) và năng lượng bề mặt của bê tông. Cơ chế này có thể gây nên sự xâm thực đáng kể của ion clorua vào lớp bê tông bảo vệ. Nếu bề mặt kết cấu chịu tác động chu kỳ khô ẩm của nước chứa ion clorua, hệ thống lỗ rỗng sẽ tiếp tục hấp thụ và tích trữ ion clorua, dẫn đến lớp bê tông bảo vệ chịu ảnh hưởng của cơ chế này có nồng độ ion clorua khá cao.

Khi bê tông không thường xuyên tiếp xúc với chất lỏng như các kết cấu ở vùng thủy triều lên xuống, sẽ thường xuyên xảy ra quá trình vận chuyển chất lỏng ở trạng thái không ổn định. Trong trường hợp này, lượng chất lỏng hấp thụ trên bề mặt bê tông cũng như lượng chất lỏng vận chuyển ở bất kỳ khoảng cách nào từ bề mặt là một hàm của thời gian [49]:

$$a = \frac{\Delta m}{A \cdot f(t^n)} ; \quad (1.7)$$

trong đó:

a - tỷ lệ hấp thụ (g/m^2s^n);

Δm - Lượng nước hấp thụ (g);

A - Diện tích tiếp xúc với nước (m^2);

$f(t^n)$ - Hàm của thời gian.

Sau khi tiến hành thí nghiệm sức hút mao dẫn các mẫu bê tông trong một khoảng thời gian khá dài, Emerson and Butler [52] nhận xét, sự hút mao dẫn cũng có thể phát triển thành hiện tượng thấm ở trạng thái ổn định, nếu các điều kiện biên phù hợp được giữ liên tục theo thời gian. Một bộ phận bê tông tiếp xúc với nước ở một bên sẽ lấy chất lỏng bằng sức hút mao dẫn. Nếu sự bốc hơi nước ở phía đối diện cân bằng với việc lấy nước, sức hút mao dẫn vận chuyển nước qua một mặt cắt nào đó của bộ phận bê tông đó sẽ ở trạng thái ổn định.

Sức hút mao dẫn là một cơ chế quan trọng đối với sự khuếch tán ion clorua vào bê tông. Bê tông ở nơi tiếp xúc với dung dịch muối không bão hòa sẽ đưa dung dịch muối vào bằng lực hút mao dẫn; do đó ion clorua khuếch tán vào bê tông nhanh hơn bằng cách khuếch tán một mình. Đồng thời ion clorua bị vận chuyển bởi khuếch tán sẽ làm tăng độ sâu thâm nhập.

- Sự thấm thấu do chênh lệch áp lực

Theo Basheer và cộng sự [30] độ thấm thấu được định nghĩa là thước đo sự lưu thông của chất lỏng qua vật liệu rỗng xốp gây ra bởi cột nước áp lực. Độ thấm thấu của bê tông phụ thuộc vào cấu trúc lỗ rỗng và độ nhớt của chất lỏng. Phương thức vận chuyển này áp dụng cho các cấu kiện bê tông tiếp xúc với chất lỏng chịu một cột nước áp lực, ví dụ như trong các công trình ngăn nước (đê, đập,...). Ion clorua được vận chuyển bằng sự đối lưu với quá trình thấm thấu của nước vào bê tông.

Độ thấm nước của bê tông có thể được đo bằng các thí nghiệm, trong đó một trạng thái ổn định hoặc không ổn định của dòng nước được thiết lập. Khi bê tông quá đặc để có thể cho phép dòng chảy qua mẫu, chiều sâu nước thâm nhập dưới một áp lực thủy lực cũng được dùng để xác định hệ số độ thấm.

Hệ số thấm là một đặc trưng của vật liệu có được khi dòng chảy bão hòa ở trạng thái ổn định, khi đó tốc độ dòng chảy là không đổi. Hệ số thấm nước được tính theo Định luật thấm Darcy:

$$K = \frac{Q\mu L}{A(P_1 - P_2)} ; \quad (1.8)$$

Trong đó:

K – hệ số thấm nước (m^2);

Q – lưu lượng của dòng chảy (m^3/s);

μ - độ nhớt của nước (Ns/m^2);

L - chiều dài mẫu thử (m);

A - diện tích của dòng vuông góc với hướng dòng chảy (m^2);

P_1 - áp lực đầu vào (N/m^2);

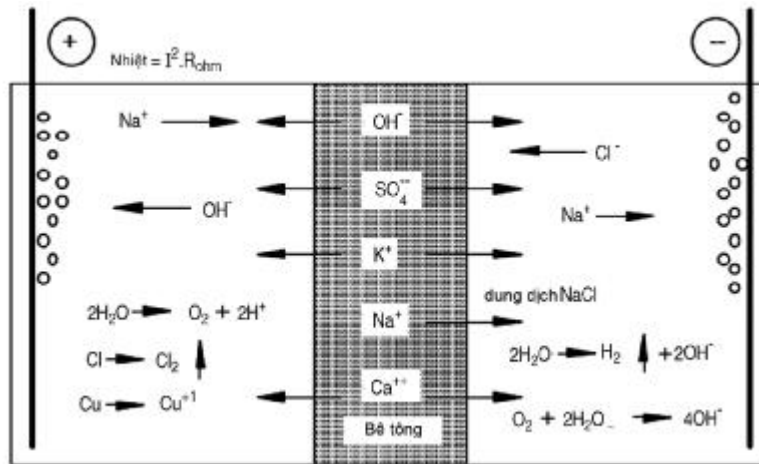
P_2 - áp lực đầu ra (N/m^2).

Khatri.R and Sirivivatnanon.V sau khi thực hiện nhiều thí nghiệm thấm nước cho rằng, nếu mẫu thí nghiệm hoàn toàn bão hòa nước và không có các tương tác hóa học hoặc vật lý giữa bê tông và nước trong suốt thí nghiệm, thì độ thấm thu được từ phương trình (1.8) chính là độ thấm thực tế của bê tông.

Do khó khăn của việc thiết lập trạng thái ổn định của dòng nước với đa số loại bê tông, việc đo dòng vào hoặc dòng ra cũng được dùng để đo độ thấm nước của bê tông trong thí nghiệm dòng nước không ổn định. Các áp suất thí nghiệm, thời gian thí nghiệm, và trình tự thí nghiệm khác nhau làm cho thí nghiệm này khó có thể được tiêu chuẩn hóa. Tuy nhiên, thí nghiệm này thích hợp để xác định sự thay đổi về chất lượng bê tông.

- Di trú

Theo Yang and Wang [90], khi ion clorua và mẫu thử được đặt vào một lồng di trú, sự di chuyển của các ion được tăng tốc và quá trình này được gọi là sự di trú ion. Thêm vào đó, điện trường ảnh hưởng đến hướng chuyển động của các ion khi chúng hướng về điện cực trái dấu. Các quá trình khác nhau xảy ra khi một điện trường được đặt vào một buồng khuếch tán và đã được mô tả bởi Andrade (1993) [38]



Hình 1.2 - Các quá trình trong một buồng đo di trú do một hiệu điện thế (Andrade (1993))

Ở đây, mỗi loại ion mang một phần của dòng điện tổng, (i) tỉ lệ với nồng độ, (c_j) của ion đó, điện tích của nó, (z_j) và suất dẫn ion của nó, (λ_j). Tỉ lệ này của dòng điện, (i_f) trong một chất điện phân cụ thể được gọi là số truyền tải, (t_f) của ion:

$$t_j = \frac{i_j}{i} = \frac{z_j c_j \lambda_j}{\sum z c \lambda} \quad (1.9)$$

Do đó, nếu dòng điện tương ứng với ion quan tâm được đo đạc, thì sẽ cho thông tin về độ linh động của ion đó.

Năm 1993, Andrade [38] cho rằng, quy luật chung khống chế các dịch chuyển ion trong chất điện phân là phương trình Nernst - Plank, trong đó lưu lượng tổng được xem xét là do sự khuếch tán, sự di trú và sự đối lưu. Sơ đồ các quá trình xảy ra trong buồng di trú như trong hình 1.2.

Thông lượng = khuếch tán + di trú + đối lưu

Có thể viết:

$$J_j = -D_j \frac{\partial c_j}{\partial x} - \frac{z_j F}{RT} D_j c_j \frac{\partial E}{\partial x} - c_j V_j ; \quad (1.10)$$

trong đó:

J_j - thông lượng của các loại, j ($\text{g}/\text{m}^2\text{s}$);

D_j - hệ số khuếch tán của các loại, j (m^2/s);

∂c_j - sự thay đổi nồng độ của các loại, j (g/m^3);

∂x - sự thay đổi khoảng cách (m);

z_j - điện tích của các loại, j (g/m^3);

F - hằng số Faraday ($\text{J}/\text{V}.\text{mol}$);

R - hằng số khí ($\text{J}/\text{mol}.\text{K}$);

T - nhiệt độ tuyệt đối (K);

$\partial E/\partial x$ - gradient điện thế (V/m);

V_j - vận tốc của dung dịch (m/s).

Phương trình này chỉ ra rằng sự chuyển động của các hạt tích điện trong một chất điện phân là tổng của các thành phần khuếch tán từ các gradient nồng độ, thành phần di trú phát sinh từ các gradient thế năng và lưu lượng của bản thân dòng điện phân (lực hút mao dẫn, tính thấm...). Khuếch tán là không quan trọng nếu gradient thế năng cao hơn khoảng 10 - 20 V/m. Tương tự, nếu giả định các điều kiện dòng ổn định và không có dòng điện phân, thì thuật ngữ đối lưu có thể bị loại bỏ. Sự di trú điện thuần túy được cho bởi công thức:

$$J_j = \frac{z_j F}{RT} D_j c_j \frac{\partial E}{\partial x} \quad (1.11)$$

Từ đây, có thể tính hệ số khuếch tán D nếu các điều kiện ổn định được thiết lập trong một buồng khuếch tán truyền thống.

Dạng khác của phương trình (1.11) đã được xây dựng bởi Zhang và Gjørsv (1995) [57] dựa trên mối quan hệ lý thuyết giữa khuếch tán và sự di trú của Einstein. Tuy nhiên, sự khác nhau cơ bản giữa hai hiện tượng này là các đại lượng hằng số được dùng trong các công thức và các quan sát thực nghiệm được yêu cầu để tính toán hệ số khuếch tán là như nhau trong cả hai trường hợp. Từ phương trình (1.11), trong một thí nghiệm di trú trạng thái ổn định, hệ số khuếch tán có thể được xác định theo công thức:

$$D_j = \frac{J_j RT}{c_j Z_j F \Delta E} \quad (1.12)$$

Trong một thí nghiệm, với chiều dày của mẫu, x , hiệu điện thế áp dụng, ΔE , nồng độ ion trong dung dịch, c_j và tất cả các hằng số đã được biết. Do đó, để tính hệ số khuếch tán D_j thông số duy nhất phải được xác định là giá trị của J_j có thể thu được từ thực nghiệm.

Chiều sâu thâm nhập của ion trong thí nghiệm di trú cũng có thể được sử dụng để tính hệ số khuếch tán. Việc này thông thường liên quan đến thí nghiệm di trú trạng thái không ổn định. Nếu không xem xét sự liên kết, mặt cắt ion trong suốt quá trình thâm nhập do sự di trú điện tích tuân theo phương trình cân bằng khối lượng với sự mô tả dòng theo phương trình (1.11). Do vậy, từ phương trình (1.6) có:

$$\frac{\partial c_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{z_j J}{RT} D_j c_j \frac{\partial E}{\partial x} \right) \quad (1.13)$$

Mangat và Nilson (1992) [33] đưa ra phương trình sau đây để tính hệ số khuếch tán bằng cách giải số học mô hình toán học.

$$D = \frac{RT}{zFE} \frac{x_d - ax_d^b}{t}; \quad (1.14)$$

trong đó:

R - hằng số khí (J/mol.K);

T - nhiệt độ (K);

z - hóa trị của ion;

F - hằng số Faraday (J/V.mol);

E - điện trường (V/m);

x_d - chiều sâu thâm nhập (m);

t - thời gian thí nghiệm (s);

a và b - các hằng số.

Với ion clorua, $z = -1$ và khi $E = -600 \text{ V/m}$, $T = 298\text{K}$ thì $a = 0.0622$ và $b = 0.589$

Dựa trên nguyên lý liên quan, các thí nghiệm di trú có thể được phân loại thành các thí nghiệm trạng thái ổn định và không ổn định. Các thí nghiệm trạng thái không ổn định nói chung liên quan đến những khoảng thời gian thí nghiệm ngắn hơn so với thí nghiệm trạng thái ổn định vì loại thí nghiệm đầu không được liên tục cho tới khi thiết lập các điều kiện trạng thái cân bằng. Thí nghiệm trạng thái không ổn định lần đầu tiên được đưa ra bởi Whiting vào 1981 [47] và được biết đến dưới tên thí nghiệm khuếch tán ion clorua nhanh. Thí nghiệm này về sau đã được chấp nhận trong cả AASHTO T277 [17] và ASTM C 1556-11a (2016) [28]. Một thí nghiệm trạng thái không ổn định khác là phương pháp CTH của Mangat và Nilson giới thiệu lần đầu năm 1992 [64]. Các thí nghiệm khuếch tán ion clorua nhanh hoặc theo phương pháp CTH có thể được dùng cho các thí nghiệm di trú trạng thái ổn định.

- Sự hút bám và sự nhả

Theo [41], hút bám là sự gắn kết của các phân tử trên bề mặt vật rắn do các lực thể tích trong các lớp đơn hoặc đa phân tử. Sự nhả là giải phóng các phân tử hấp phụ từ các bề mặt vật rắn.

Sự hút bám của ion clorua được kiểm soát bởi cấu trúc lỗ rỗng xốp nhỏ và các đặc tính sản phẩm của quá trình hydrat hóa. Đặc biệt là diện tích bề mặt đặc trưng và diện tích mặt của thành lỗ rỗng.

- Chế độ hỗn hợp

Viện khoa học CCAA (Cement Concrete & Aggregates Australia) của Úc [41] cho rằng cơ chế vận chuyển phụ thuộc vào điều kiện biên cũng như trạng thái độ ẩm và sự phân bố của nó trong phần tử bê tông. Sự thẩm thấu thuần túy của dung dịch ion clorua cũng như sự khuếch tán thuần túy của các ion clorua sẽ chỉ lan khắp các mẫu bê tông bão hòa, trong đó không có lực mao dẫn vẫn có thể hoạt động. Nếu bê tông khô hoặc không bão hòa được tiếp xúc với dung dịch chứa ion clorua, thì sức hút mao dẫn là cơ chế chi phối. Tuy nhiên, với cột nước áp lực nhỏ có thể hỗ trợ sự xâm nhập vào bằng cách thấm và sự khuếch tán các ion đồng thời mang các ion vào khe hở hẹp, nơi mà không có dòng chảy mao dẫn nào xảy ra nữa. Ngoại trừ các phần tử bê tông liên tục bị ngập trong nước biển, các phương thức vận chuyển hỗn hợp ion clorua này rõ ràng chiếm ưu thế trong hầu hết các trường hợp đối với những kết cấu bê tông đang trong giai đoạn khai thác.

▼ Cơ chế điện hóa

Tại hội thảo CANMET/ACI Int. Conf. về độ bền của bê tông, Baweja D, Roper H and Sirivivatnanon V [31] cho rằng, một số thuộc tính điện hóa được sử dụng để nghiên cứu ăn mòn cốt thép trong bê tông bao gồm điện trở suất, độ dẫn điện của bê tông. Điện trở suất của bê tông đo sức kháng của bê tông và phụ thuộc rất nhiều vào điều kiện độ ẩm, tính chất của ion trong dung dịch. Điện trở suất của bê tông gia tăng theo thời gian do quá trình hydrat hóa của xi măng và mức độ khuếch tán ion clorua giảm. Với kết cấu bị ăn mòn lớn, điện trở suất của bê tông sẽ ảnh hưởng đến hiện tượng ăn mòn và tốc độ ăn mòn. Độ dẫn điện ảnh hưởng đến sức kháng ăn mòn hơn là sức kháng khuếch tán ion clorua của bê tông.

▼ Cơ chế phơi nhiễm vùng biển

Các kết cấu ở vùng biển tiếp xúc với ion clorua từ nước biển trong bốn trường hợp sau đây:

- Vùng ngập nước
- Vùng thủy triều lên xuống
- Vùng sóng đánh
- Vùng ven biển

Các kết cấu vùng ngập nước tiếp xúc trực tiếp với nước biển. Sự khuếch tán ion clorua vào bê tông chủ yếu bằng sự khuếch tán và quá trình thẩm thấu dung dịch muối xảy ra ở một vài phạm vi. Các vùng bề mặt bê tông có thể hình thành các lớp phủ bảo vệ có độ thấm thấp do các phản ứng trao đổi ion với các hợp chất khác của nước biển, kết quả hình thành các lớp màng $Mg(OH)_2$ và $CaCO_3$. Do đó, mức độ khuếch tán ion clorua của các kết cấu này thường thấp hơn đáng kể so với tính toán từ các thí nghiệm thực nghiệm, khi không có các lớp màng bảo vệ có thể được hình thành từ các phương thức thí nghiệm đã được chọn.

Năm 1988, tại hội thảo về đánh giá độ bền của bê tông trong môi trường biển, Mehta P K [67] cho rằng, trong vùng thủy triều lên xuống và sóng đánh tính chất xâm thực của môi trường được tăng cường thêm bởi các yếu tố liên quan đến quá trình khô ướt xảy ra thường xuyên và liên tục theo thời gian, tác động từ ngày này qua ngày khác lên bề mặt kết cấu đã làm tăng nhanh mức tích tụ ion clorua, H_2O và O_2 từ nước biển và không khí vào trong bê tông thông qua quá trình khuếch tán nồng độ và lực hút mao dẫn. Chính yếu tố bê tông bị thay đổi trạng thái khô ướt thường xuyên sẽ làm gia tăng hiện tượng thẩm thấu các tác nhân xâm thực vào sâu hơn trong kết cấu so với phần bê tông bị ngập hoàn toàn trong nước vốn luôn ở trạng thái bão hòa nước.

Cũng tại hội thảo về đánh giá độ bền của bê tông trong môi trường biển, Espelid B. và Nilsen N. [54] nhận xét rằng ở vùng ven biển sẽ khó tránh được lượng nồng

độ các ion clorua đáng kể trong khí quyển, chúng có thể lắng đọng lại hoặc bị rửa trôi với nước mưa ở trên bề mặt của kết cấu. Sự khuếch tán của ion clorua vào bê tông được tác động bởi sức hút mao dẫn của nước biển khi có tiếp xúc trực tiếp. Với thời gian bề mặt kết cấu khô kéo dài, hiện tượng cacbonat hóa bề mặt bê tông có thể dẫn đến việc giải phóng các ion clorua dính bám.

1.3. Các nghiên cứu về độ thấm nước và khuếch tán ion clorua của bê tông trên thế giới

1.3.1. Các nghiên cứu về độ thấm nước của bê tông

Độ thấm nước của bê tông luôn là một vấn đề quan trọng đối với các kết cấu bê tông có tiếp xúc với nước vì độ thấm nước ảnh hưởng đến độ bền của kết cấu bê tông cốt thép. Thấm nước qua bê tông là một nguyên nhân của sự ăn mòn cốt thép trong bê tông khi kết cấu công trình tiếp xúc với môi trường nước có tính chất ăn mòn như nước ngầm, nước khoáng, nước biển, nước thải sinh hoạt và công nghiệp chứa các tác nhân ăn mòn. Ngoài ra, bê tông bị thấm nhiều sẽ làm mất nước trong hồ chứa, kênh mương, bể nước, gây thấm dột mái nhà, nước đọng,...

Theo Banthia N. và cộng sự [29] tính thấm của bê tông chịu ảnh hưởng bởi hai yếu tố chính: Một là đặc điểm độ rỗng như kích thước, độ ngoằn ngoèo, và tính liên thông giữa các lỗ rỗng, hai là các vết nứt vi mô trong bê tông, đặc biệt là tại mặt liên kết giữa cốt liệu và chất kết dính. Các yếu tố thuộc độ rỗng được kiểm soát chủ yếu bởi tỷ lệ N/X, mức độ hydrat hóa và mức độ đầm chặt. Trong khi đó, mật độ và vị trí của các vết nứt vi mô tại mặt liên kết được xác định bởi cấp ứng suất tác dụng, xuất hiện bên trong hay bên ngoài cấu trúc của bê tông. Ứng suất xuất hiện bên trong bê tông do sự co ngót, chênh lệch nhiệt độ, sự thay đổi đột ngột nhiệt-ẩm trong môi trường và các yếu tố gây nên sự mất ổn định về thể tích.

Ảnh hưởng của ứng suất do các tác động bên ngoài đến độ thấm bê tông vẫn còn chưa được hiểu rõ. Những câu hỏi như ứng suất ở mức độ nào, ở độ tuổi nào của bê tông là có thể chấp nhận được khi đánh giá về độ thấm cần phải được làm rõ.

1.3.1.1. Độ thấm nước của bê tông không chịu tải trọng

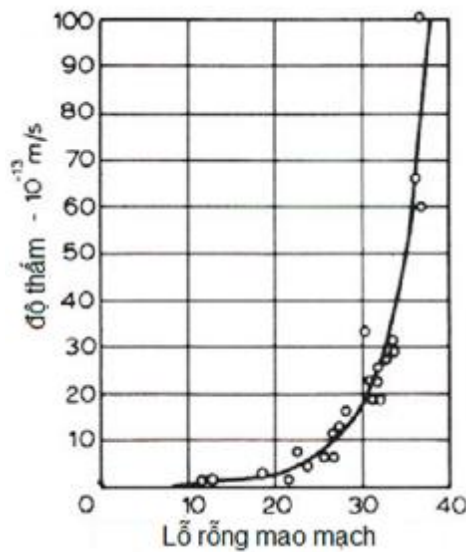
Albert K.H. Kwan and Henry H.C. Wong [25] cho rằng, khi áp dụng luật thấm Darcy (1856) đối với bê tông, ta gặp phải những khó khăn sau:

- Có những loại lỗ rỗng khác nhau trong bê tông: như lỗ rỗng gen, lỗ rỗng mao mạch, lỗ rỗng khí trong vữa xi măng và lỗ rỗng trong đá cốt liệu. Mỗi lỗ có kích thước và tính chất khác nhau, do đó dẫn đến sự khác biệt về độ thấm chung của bê tông
- Sự phân bố trong không gian của các lỗ rỗng là không đồng đều.

- Tính thấm của một loại vật liệu rỗng không chỉ phụ thuộc vào kích thước, độ ngoằn ngoèo của các lỗ rỗng, mà còn phụ thuộc vào tính thông nhau giữa các lỗ rỗng. Trong số các loại lỗ rỗng trong bê tông, lỗ rỗng khí thường bị cô lập trong khi lỗ rỗng mao mạch thường liên thông với nhau dưới dạng mao mạch, dẫn đến sự khác nhau về tính thấm của bê tông.

Tuy nhiên, năm 1995, Neville [72] đã chứng minh rằng, mặc dù có những khó khăn như trên nhưng có thể nói rằng những lỗ rỗng có liên quan đến tính thấm nước của bê tông là những lỗ liên thông với nhau và có kích thước nhỏ nhất là 120nm. Do đó, các lỗ rỗng gen (đường kính khoảng 9nm) và lỗ rỗng khí có thể được bỏ qua. Các lỗ rỗng đóng góp nhiều nhất vào tính thấm của bê tông là các lỗ rỗng mao mạch.

Mối quan hệ giữa độ thấm và lỗ rỗng mao mạch của vữa xi măng đã được Powers nghiên cứu chỉ ra năm 1958 [76] như trong biểu đồ Hình 1.3.



Hình 1.3 - Ảnh hưởng của lỗ rỗng mao mạch đến độ thấm
(Powers (1958))

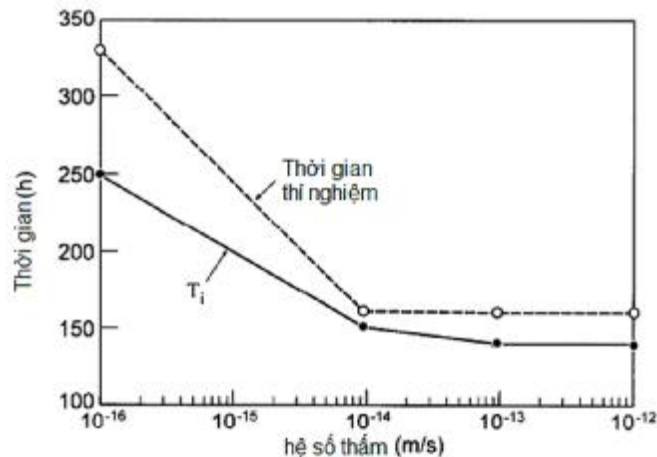
Với tầm quan trọng của việc xác định độ thấm của bê tông, một loạt các phương pháp đã được đề xuất để đo giá trị này. Nói chung, các phương pháp này có thể được phân thành hai loại: phương pháp trực tiếp và gián tiếp.

Hầu hết các phương pháp trực tiếp để xác định độ thấm của vật liệu rỗng xốp dựa vào định luật của Darcy. Năm 1989, Ludirdja D. và cộng sự [46] đưa ra một phương pháp đơn giản để xác định độ thấm nước của bê tông. Ông cho dòng nước đi qua một mẫu hình trụ mỏng dưới một gradient áp lực bằng một cột nước áp lực ở một phía của mẫu, trong khi vẫn giữ phía bên kia ở áp suất khí quyển. Dựa vào các

thông số hình học của mẫu, độ thấm được tính trực tiếp từ công thức của Darcy. Mặc dù các phương pháp này tương đối đơn giản, nhưng mất rất nhiều thời gian để đạt được điều kiện lưu lượng trạng thái ổn định (cần đến vài tuần cho mẫu có hệ số thấm k_w khoảng 10^{-11} m/s).

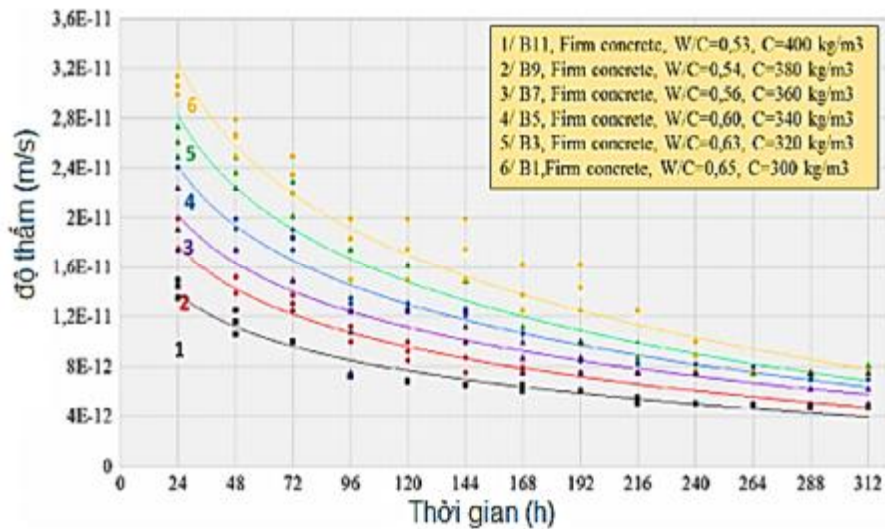
Nhược điểm của phương pháp thí nghiệm trên là quá trình hydrat hóa trong thời gian thử nghiệm dài như vậy có thể làm thay đổi cấu trúc lỗ rỗng và có thể dẫn đến sự thay đổi tính thấm của bê tông. Để giảm thời gian đó, các nhà nghiên cứu đã đề xuất áp dụng thêm một áp suất bổ sung (ví dụ khoảng $15 \cdot 10^5$ Pa), chứ không chỉ dùng áp lực cột nước ở phía 1 đầu mẫu. Tuy nhiên, do áp suất thí nghiệm cao hơn, xác suất rò rỉ tại mặt tiếp xúc của mẫu và khuôn thí nghiệm có thể lớn hơn.

Năm 1994, Eldieb và Hooton [16] đã giới thiệu một phương pháp thí nghiệm sử dụng một hộp ba trục áp suất cao để đo tính thấm nước của mẫu bê tông chất lượng cao. Một áp suất giới hạn được áp dụng cho mẫu hình trụ thông qua một ống bọc cao su để tránh rò rỉ nước xung quanh các mặt. Thí nghiệm tiến hành với ba mẫu hỗn hợp bê tông được thiết kế để có một khoảng rộng các giá trị độ thấm, để đánh giá độ nhạy cảm của phương pháp thử với mẫu có hệ số thấm cao và mẫu có hệ số thấm thấp. Giá trị cường độ chịu nén của 3 mẫu sau 28 ngày lần lượt là 29, 42, 74MPa. Kết quả thí nghiệm cho thấy, hệ số thấm thay đổi trong khoảng thời gian thí nghiệm. Tổng thời gian thí nghiệm để hệ số thấm đạt 1×10^{-14} m/s là khoảng 160 giờ và với hệ số thấm 1×10^{-16} là khoảng 330 giờ. Điều này là đúng với dự đoán do phép đo hệ số thấm thấp tùy thuộc vào khoảng thời gian cần thiết dài hơn để thiết lập trạng thái chảy ổn định. Với các hệ số thấm theo thứ tự là 1×10^{-12} , 1×10^{-13} , 1×10^{-14} , 1×10^{-16} m/s, thời gian khởi tạo tương ứng là khoảng 130, 140, 150 và 250 giờ. Kết quả thí nghiệm được trình bày trong biểu đồ Hình 1.4.



Hình 1.4 - Hệ số độ thấm với khoảng thời gian khởi tạo và tổng thời gian thí nghiệm (Eldieb and Hooton (1995))

Thay vì thí nghiệm với những dòng chảy dọc theo chiều cao mẫu, Abderrachid Amriou cùng cộng sự [19] đề xuất dòng chảy hướng tâm qua mẫu, được tạo ra bằng cách tác dụng một áp suất thủy tĩnh lên bề mặt phía ngoài của mẫu hình trụ rỗng làm cho nước di chuyển từ bên ngoài bề mặt vào bên trong mẫu. Bằng cách đo tốc độ dòng chảy ra, độ thấm được tính bằng một dạng thay đổi từ định luật thấm Darcy. Ông tiến hành thí nghiệm đo tính thấm với 12 mẫu bê tông khác nhau về cấp phối thành phần. Kết quả thí nghiệm cho các đường cong quan hệ của hệ số thấm theo thời gian. Những đường cong trong Hình 1.5 cho thấy tỷ lệ N/X ảnh hưởng lớn đến độ thấm của bê tông. Bê tông có tỷ lệ N/X thấp có độ thấm thấp hơn.



Hình 1.5 - Độ thấm nước theo thời gian với tỉ lệ N/X thay đổi
(Abderrachid Amriou (2017))

Phương pháp gián tiếp, đúng như tên gọi, người ta sẽ không trực tiếp đo độ thấm của bê tông. Đối với phương pháp này, có thể kể đến đầu tiên là thí nghiệm hấp thụ mặt ngoài ban đầu của bê tông theo tiêu chuẩn Anh và thí nghiệm thấm nhanh ion clorua [19].

Năm 1968, Brace và cộng sự [34] đã sử dụng phương pháp áp suất không ổn định để xác định tính thấm thấu của đá granit. Nguyên tắc của phương pháp này là đo sự suy giảm của áp suất áp dụng sau sự biến đổi đột ngột của áp suất này. Sự thay đổi áp suất phụ thuộc vào độ thấm của vật liệu. Phương pháp này có thể được dùng cho các vật liệu có độ thấm thấp tới $4 \cdot 10^{-14} \text{m/s}$.

Nói chung, phương pháp gián tiếp để đo độ thấm nhanh hơn nhiều so với phương pháp trực tiếp do chúng dựa trên các phép đo thu được ở điều kiện dòng chảy ở trạng thái không ổn định. Khả năng bị rò rỉ trong quá trình thí nghiệm bị loại bỏ. Và phương pháp này có thể áp dụng cho những vật liệu có độ thấm thấp. Tuy

nhiên, độ bão hòa của mẫu là một vấn đề rất khó khăn để có được đối với những vật liệu có tính thấm kém như bê tông chất lượng cao, trong khi đó độ bão hòa là rất cần thiết do ảnh hưởng rất lớn đến kết quả đo độ thấm của mẫu. Với phương pháp trực tiếp, mẫu bão hòa trong quá trình thí nghiệm cho đến khi đạt được trạng thái ổn định, và cần đến một thời gian thí nghiệm rất dài. Và với việc sử dụng một đầu vào áp suất cao có thể dẫn đến sự thay đổi cấu trúc của mẫu thí nghiệm. Một khó khăn khác của phương pháp này là quá trình thiết lập thí nghiệm, giải thích và phân tích kết quả thí nghiệm.

1.3.1.2. Độ thấm nước của bê tông chịu tải trọng

Các công trình nghiên cứu về ảnh hưởng của tải trọng đến khả năng thấm nước của bê tông đã được một số tác giả trên thế giới công bố như Kermani (1991) [60], Gerard (1996) [56], Lion & al (2005) [62], Banthia & al (2008) [9], Tran & al (2009) [82]. Tuy nhiên các kết quả này khá phân tán, một phần vì độ thấm nước của bê tông bị ảnh hưởng bởi công tác chuẩn bị mẫu thí nghiệm (dạng mẫu, thành phần bê tông, cấp phối cốt liệu, điều kiện bảo dưỡng...) và quá trình thí nghiệm (quá trình chất tải, áp lực của nước sử dụng...); Mặt khác, các kết quả đo thấm nước của bê tông thu được thấp hơn so với giá trị thấm thực tế do các phản ứng hóa-lý của nước với cấu trúc vi mô của bê tông. Chính các phản ứng hóa-lý này làm cho việc đánh giá cơ chế thấm nước của bê tông khó khăn hơn và cũng khiến cho kết quả đo thấm nước bị thấp hơn so với kết quả đo thấm khí.

Năm 1999, N.Hearn [69] đã tiến hành nghiên cứu ảnh hưởng các vết nứt do co ngót và tải trọng gây ra đến độ thấm của bê tông. Các vết nứt do co ngót được tạo ra bằng cách sấy nhanh mẫu bê tông ở 105°C, các vết nứt do tải trọng gây ra được tiến hành bằng cách gia tải nén một trục các mẫu trụ có kích thước 200x100mm ở các cấp ứng suất bằng 0.3, 0.5, 0.7, 0.8 lần giá trị ứng suất nén lớn nhất trung bình của mẫu. Kết thúc thí nghiệm, ông cho rằng các vết nứt có thể làm tăng đặc tính vận chuyển nước trong bê tông theo các mức độ khác nhau. Mức độ gia tăng này phụ thuộc vào loại vết nứt.

- Độ thấm nước không nhạy cảm với các vết nứt do tải trọng gây ra (thí nghiệm sau khi dỡ tải) do các vết nứt tạo thành dưới cấp 0.8f_c có thể không liên tục xuyên qua ma trận vữa và thu hẹp lại một phần khi dỡ tải

Trên tạp chí Building Research & Information năm 1991, Kermani với bài báo nghiên cứu về độ thấm nước của bê tông chịu ứng suất trước [60], ông đã tiến hành đo thấm nước của 3 mẫu bê tông dày 50mm được cắt từ mẫu bê tông hình trụ 200x100mm có thành phần khác nhau, sau khi được gia tải nén trước ứng với các cấp tải trọng là 0, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 và 0.7 lần giá trị cường độ chịu nén đặc trưng

của mẫu. Để giảm thời gian tiến hành thí nghiệm, quá trình đo thấm nước, mẫu bê tông chịu một áp lực nước đầu vào ổn định thay đổi với các cấp áp lực khác nhau. Sau khi kết thúc thí nghiệm và tiến hành xử lý số liệu, Kermani cho rằng độ thấm của bê tông có thể chịu ảnh hưởng rất lớn bởi ứng suất dư khi nó được gia tải trước và các chất phụ gia (có ảnh hưởng đến thành phần, cường độ và sự lan truyền các vết nứt vi mô trong bê tông) cũng có thể ảnh hưởng đáng kể đến độ thấm.

- Thời gian thí nghiệm cũng ảnh hưởng rất lớn độ thấm. Trong một khoảng thời gian ngắn từ 1 – 2 ngày, dòng chảy không ổn định, trong đó độ thấm tăng lên ở mức tối đa, sau đó đã có một sự giảm liên tục tốc độ dòng chảy ra theo thời gian. Nó giảm nhanh chóng trong khoảng thời gian từ 3 - 4 ngày thí nghiệm và sau đó gần như là không đổi trong khoảng thời gian sau của thí nghiệm

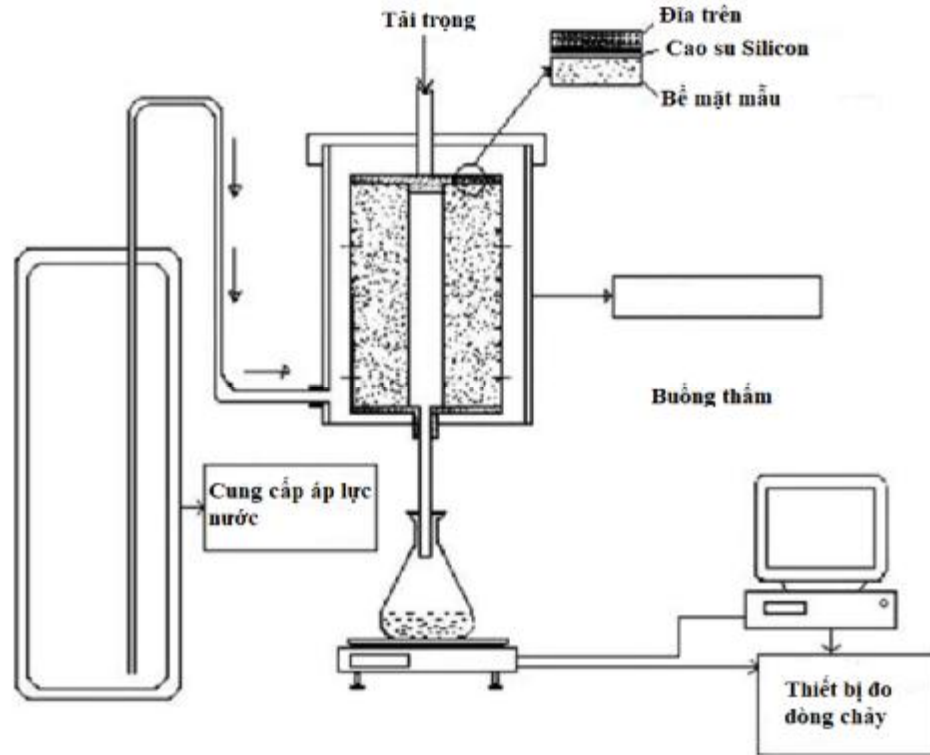
- Ở các cấp ứng suất trước thấp và trung bình, có một sự thay đổi nhỏ, khó đoán trước được độ thấm của mẫu bê tông, trong khi ở các cấp ứng suất trước cao, $\sigma > 0.4\sigma_{\max}$ độ thấm tăng nhanh chóng tùy thuộc vào kích cỡ, số lượng và trạng thái lan truyền của các vết nứt.

- Tốc độ của dòng chảy ra liên quan đến áp lực nước áp dụng ở đầu vào. Đối với bê tông không chịu ứng suất và chịu ứng suất cao, độ thấm tăng nhẹ với sự gia tăng của áp lực nước, trong khi đó ở mức ứng suất trước trung bình độ gia tăng là đáng kể

Nghiên cứu về ảnh hưởng của ứng suất nén trực tiếp đến độ thấm của bê tông vào năm 2005, Banthia và cộng sự [29] đã tiến hành thí nghiệm xác định độ thấm của bê tông khi phải chịu một ứng suất nén trực tiếp với các cấp tải 0.2, 0.3, $0.4f_c$ (Hình 1.6). Các mẫu bê tông được đem đi thí nghiệm ở những ngày tuổi khác nhau (từ 1-3 ngày). Mục đích là để đánh giá ảnh hưởng của việc phải chịu tải trọng sớm trong các mẫu bê tông. Các thí nghiệm được tiến hành, đối chứng với các mẫu bê tông tương ứng không phải chịu ứng suất. Sau khi tiến hành xử lý các kết quả thí nghiệm, Banthia và cộng sự kết luận rằng:

- Đối với mẫu bê tông chịu tải trọng sớm từ 1 ngày tuổi với ứng suất nén trực tiếp là $0.2f_c$, theo thời gian, độ thấm giảm. Trong khi đó với mẫu bê tông tương tự khi phải chịu ứng suất nén trực tiếp là $0.4f_c$ độ thấm lại tăng đáng kể theo thời gian

- Ở độ tuổi 3 ngày, ứng suất nén trực tiếp bằng $0.3f_c$ cũng làm giảm độ thấm của mẫu bê tông theo thời gian. Tuy nhiên ở cùng một cấp ứng suất tương tự như vậy, khi áp dụng với mẫu bê tông đã chịu trước đó 1 ứng suất $0.4f_c$ ở 1 ngày tuổi, có thể làm tăng đáng kể độ thấm của mẫu. Điều đó cho thấy rằng, việc phải mang tải sớm đã gây ra những hư hỏng không thể phục hồi. Điều này ảnh hưởng xấu đến độ thấm ở tuổi sau này ngay cả khi chỉ chịu một ứng suất thấp.



Hình 1.6 - Bố trí thí nghiệm độ thấm nước qua bê tông chịu nén trực tiếp

Năm 2009, trong luận văn tiến sĩ tại trường đại học Liege, Tran [88] chỉ ra độ thấm nước của bê tông phụ thuộc đáng kể vào hiệu ứng dư của tải trọng nén trước và áp lực nước trong quá trình thí nghiệm. Áp lực nước quá bé hoặc quá lớn đều gây ra hiệu ứng ngăn cản sự thấm thấu của nước qua bê tông. Sự xuất hiện các phá hủy cơ học do tải trọng tác dụng có ảnh hưởng đến sự gia tăng độ thấm nước của bê tông tương tự như với độ thấm khí. Độ thấm nước của bê tông xấp xỉ nhỏ hơn 100 lần so với độ thấm khí. Khi bê tông chưa chịu tải độ thấm nước ban đầu K_0 có thể được xác định gần đúng là 10^{-11} cm/s. Gia tăng của độ thấm nước cũng bắt đầu được ghi nhận khi $\sigma/\sigma_{\max} > 0.4 - 0.6$

1.3.2. Các nghiên cứu về khuếch tán ion clorua của bê tông

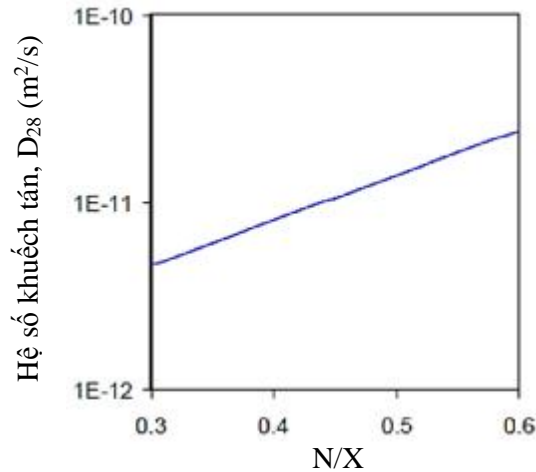
1.3.2.1. Các nghiên cứu về hệ số khuếch tán ion clorua của bê tông không chịu tải trọng

a) Xác định hệ số khuếch tán theo tỷ lệ nước/xi măng (N/X)

Stanish, K. (2000) [83] đã phát triển mối quan hệ giữa hệ số khuếch tán D_{28} và tỷ lệ N/X cho bê tông đã chuẩn hoá ở nhiệt độ 20°C. Dựa trên cơ sở dữ liệu lớn các thí nghiệm khuếch tán, ông đưa ra quan hệ thực nghiệm như phương trình sau:

$$D_{28} = 1 \times 10^{(-12,06 + 2,4N/X)} \text{ (m}^2/\text{s)} \quad (1.15)$$

Quan hệ này được thể hiện trong Hình 1.7.



Hình 1.7 - Quan hệ giữa tỷ lệ N/X và hệ số khuếch tán ion clorua
(Stanish, K. (2000))

Tang Luping, Joost Gulikers (2007) [85] đưa ra một phân tích toán học của sự khuếch tán ion clorua vào bê tông sử dụng định luật thứ hai Fick về khuếch tán với hệ số khuếch tán phụ thuộc thời gian. Các ông đã thảo luận các sai số gây ra bởi các ứng dụng của các biểu thức toán học đơn giản hóa được sử dụng trong một số mô hình cho việc đánh giá tuổi thọ của kết cấu bê tông cốt thép. Kết quả từ phân tích toán học này chứng minh rằng một số mô hình dựa trên giải pháp hàm bù của hàm sai số (erfc) có thể đánh giá quá cao tuổi thọ sử dụng. Một số dữ liệu ion clorua của mẫu sau 10 năm tiếp xúc với ion clorua tại hiện trường đã được sử dụng để so sánh với các mô hình được cải tiến. Kết quả cho thấy cả hai mô hình hàm bù của hàm sai số và các mô hình cải tiến dự đoán khá tốt khuếch tán ion clorua vào bê tông xi măng Poocăng, nhưng mô hình đơn giản hóa hàm bù của hàm sai số (erfc) đánh giá thấp đáng kể khuếch tán ion clorua trong bê tông có tro bay.

Long-Yuan Lia và các cộng sự (2012) [63] đã đưa ra một mô hình cấu trúc vi mô để sử dụng để mô phỏng khuếch tán ion clorua trong bê tông. Bê tông được xử lý như một loại vật liệu không đồng nhất, bao gồm hai pha: đá xi măng (xi măng sau khi thủy hóa) và cốt liệu. Sự khuếch tán ion clorua được giả định diễn ra chỉ trong pha đá xi măng. Kết quả đã chứng minh rằng mô hình Maxwell có thể dự đoán khá chính xác hệ số khuếch tán có hiệu của ion clorua trong bê tông.

$$D_{\text{eff}} = D_{\text{cem}} \frac{2\phi}{3 - \phi} ; \quad (1.16)$$

trong đó:

D_{cem} là hệ số khuếch tán ion clorua trong đá xi măng;

ϕ là phần thể tích của đá xi măng trong bê tông.

Garboczi and Bentz (1992) đã sử dụng mô phỏng để xây dựng một phương trình khuếch tán của bê tông theo độ rỗng như sau:

$$\frac{D}{D_0}(\phi) = 0.001 + 0.07\phi^2 + H(\phi - 0.18)1.8(\phi - 0.18)^2 \quad (1.17)$$

b) Ảnh hưởng của thời gian đến hệ số khuếch tán

Hệ số khuếch tán ion clorua D là một biến phụ thuộc thời gian. Các nghiên cứu đã chỉ ra mối quan hệ giữa hệ số khuếch tán và thời gian được biểu diễn tốt nhất bởi một hàm mũ (Thomas và Bamforth, 1999 [87]; Tang và Nilsson, 1992 [33]; Mangat và Molloy, 1994 [65]; Stanish và Thomas, 2003 [82]). Quan hệ giữa hệ số khuếch tán ion clorua với thời gian được mô tả bằng phương trình sau [87]:

$$D(t) = D_{28} \times \left(\frac{t_0}{t}\right)^m ; \quad (1.18)$$

trong đó:

$D_{(t)}$: là hệ số khuếch tán tại thời điểm t ;

D_{28} : là hệ số khuếch tán ion clorua của bê tông ở tuổi 28 ngày ;

$t_0 = 28$ ngày;

m : là hằng số (phụ thuộc vào tỷ lệ cấp phối trộn).

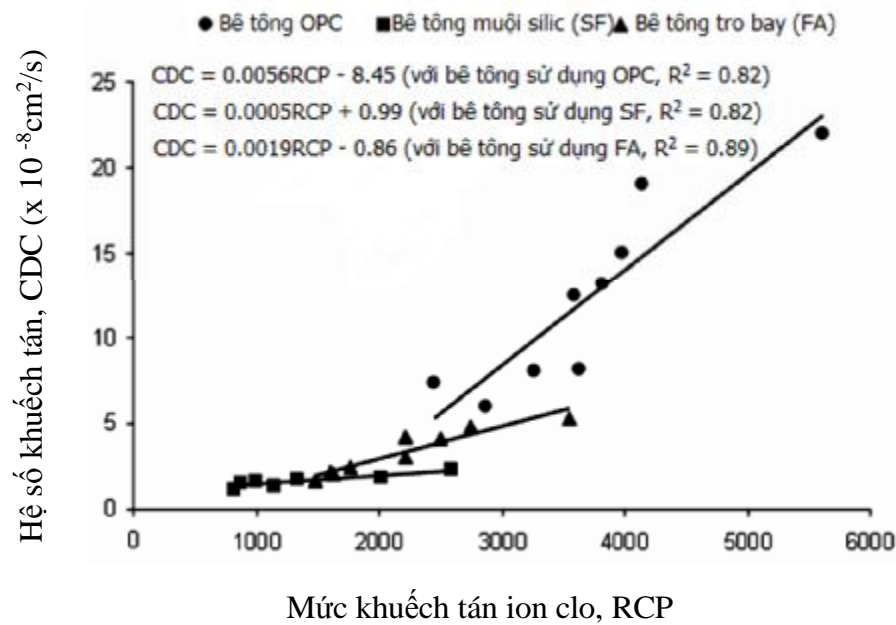
Thomas và Bamforth (1999) đã đề xuất những giá trị của m trong Bảng 1.2 dựa trên tổng hợp của các hệ số khuếch tán đã được công bố.

Bảng 1.2. Các giá trị của m cho các loại bê tông

Loại bê tông	Giá trị m
Bê tông PC	0.264
Bê tông tro bay	0.700
Bê tông xỉ (Slag)	0.620

c) Công thức quan hệ giữa hệ số khuếch tán và số coulombs

Theo kết quả nghiên cứu của Ahmad S., (2003) [24] về phương trình biểu thị mối liên hệ giữa hệ số khuếch tán ion clorua với điện lượng của bê tông. Mối tương quan này dùng để xác định hệ số khuếch tán ion clorua khi mức khuếch tán ion clorua đã biết (Hình 1.8).



Hình 1.8 - Quan hệ giữa mức độ thấm và hệ số khuếch tán ion clorua (Ahmad S. (2003))

Công thức tính hệ số khuếch tán ion clorua như sau:

$$\text{Bê tông thường:} \quad D = 0.0056Q_0 - 8.45 ; \quad (1.19)$$

$$\text{Bê tông sử dụng muội silic:} \quad D = 0.0005Q_0 + 0.99 ; \quad (1.20)$$

$$\text{Bê tông sử dụng tro bay:} \quad D = 0.0019Q_0 - 0.86 ; \quad (1.21)$$

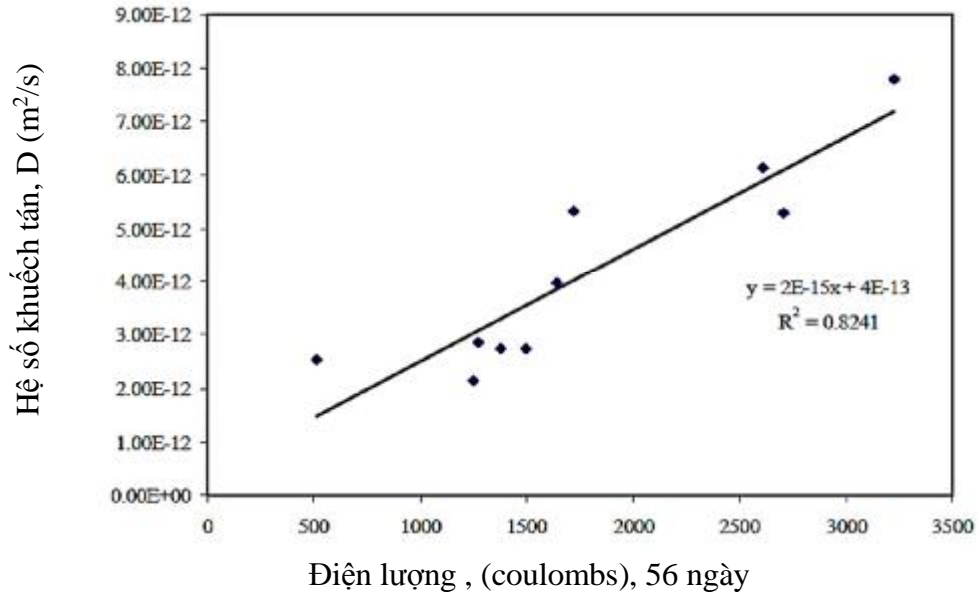
trong đó:

D: Hệ số khuếch tán Ion clorua của bê tông ($\times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$);

Q_0 : Mức khuếch tán ion clorua (Coulombs).

Elsharief A. và cộng sự (2004) [51] đã đưa ra công thức và biểu đồ (Hình 1.9) biểu thị quan hệ giữa hệ số khuếch tán ion clorua với số điện lượng (coulombs) của bê tông HPC ở tuổi 56 ngày như sau:

$$D = 0.4 + 0.002 \times \text{coulombs} (10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}) \quad (1.22)$$



Hình 1.9 - Quan hệ giữa điện lượng và hệ số khuếch tán ion clorua

Berke và các cộng sự (1992) [33] đã đưa ra mối tương quan giữa các hệ số khuếch tán và số điện lượng coulombs chuyển qua trong thí nghiệm.

$$D = 0.0103 \times 10^{-12} \times (Q_0)^{0.84} \quad (1.23)$$

Q_0 là điện lượng truyền qua trong 6 giờ theo thí nghiệm ASTM C1202.

d) Công thức quan hệ giữa hệ số khuếch tán và cường độ chịu nén của bê tông.

Omar S. Baghabra Al - Amoudi và cộng sự [74] đã tiến hành thí nghiệm xác định mối quan hệ giữa cường độ chịu nén của bê tông ở 28 ngày với hệ số khuếch tán ion clorua cho bê tông thường, bê tông có phụ gia silica fume và bê tông có phụ gia tro bay như sau:

$$D = \frac{a}{(f'_c)^b} \times 10^{-12} (\text{m}^2/\text{s}) ; \quad (1.24)$$

trong đó:

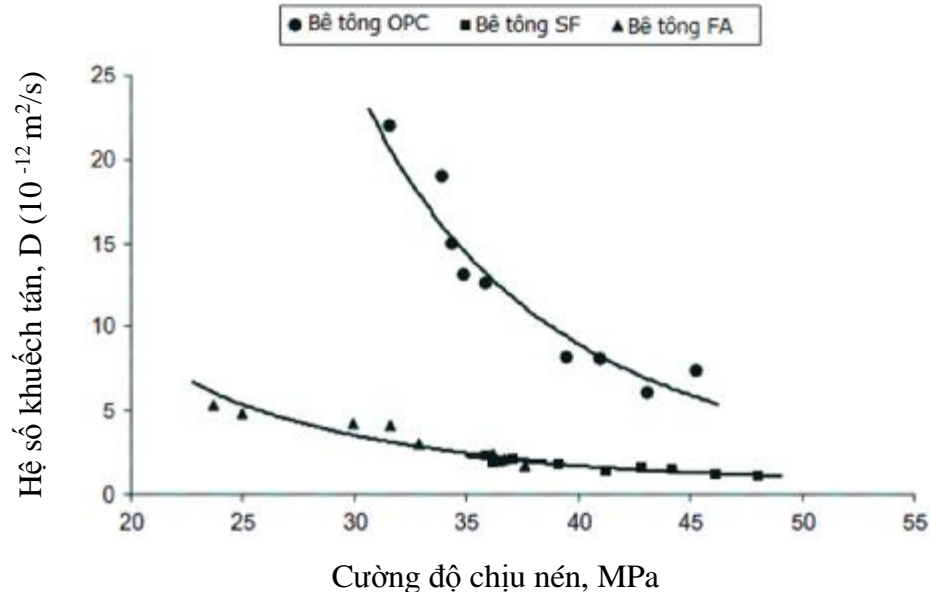
- f'_c là cường độ chịu nén của bê tông MPa;
- a, b là các hằng số thực nghiệm.

Bê tông thường (Bê tông OPC): $a = 4 \times 10^6$; $b = 3.54$; $R^2 = 0.91$

Bê tông có silica fume (Bê tông SF): $a = 5,133; b = 2.17; R^2 = 0.85$

Bê tông có tro bay (Bê tông FA): $a = 8,918; b = 2.31; R^2 = 0.85$

Hình 1.10 mô tả các quan hệ này.



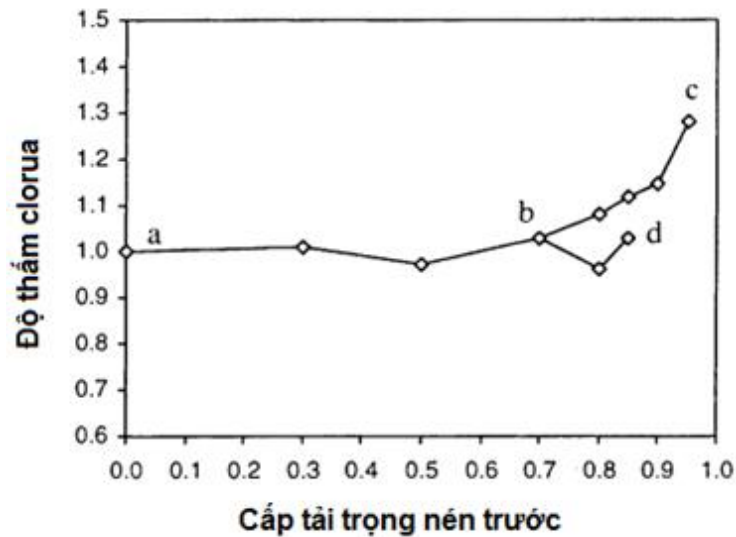
Hình 1.10 - Quan hệ giữa hệ số khuếch tán và cường độ chịu nén của bê tông

1.3.2.2. Các nghiên cứu về quy luật gia tăng hệ số khuếch tán ion clorua của bê tông khi chịu tải trọng

Năm 1999, C.M. Aldea và cộng sự, đăng bài báo trên tạp chí Vật liệu kỹ thuật xây dựng có tiêu đề “Ảnh hưởng của vết nứt đến độ thấm nước và ion clorua của bê tông” [39]. Trong nghiên cứu này, các yếu tố bao gồm thành phần vật liệu và chiều rộng vết nứt trung bình có thể ảnh hưởng đến mối tương quan giữa độ rộng vết nứt và độ thấm nước và ion clorua của bê tông. Các vết nứt được tạo trước trong các mẫu bê tông bằng thí nghiệm ép chẻ. Khuếch tán ion clorua được đánh giá bằng thí nghiệm thấm nhanh ion clorua và độ thấm nước được đánh giá bằng thí nghiệm thấm nước áp suất thấp. Kết quả tính toán cho thấy tính thấm ion clorua tăng lên cùng với độ mở rộng vết nứt và độ thấm nước chịu ảnh hưởng đáng kể hơn so với khuếch tán ion clorua.

C. Lim và cộng sự (2000) [37] thực hiện đánh giá ảnh hưởng các vết nứt vi mô và khuếch tán ion clorua của bê tông khi phải chịu một tải trọng nén trước một trục. Ông có nhận xét rằng, khi các mẫu bê tông được dỡ tải hoàn toàn ở cấp tải trọng nén trước là $0.5f_c$, các vùng xuất hiện vết nứt vi mô có thể hồi phục lại 100% như

trạng thái ban đầu. Tuy nhiên, khi dỡ tải ở cấp tải trọng từ 0.7 đến $0.95f_c$, một số vùng vết nứt không có khả năng hồi phục sau khi dỡ tải. Tính chất này có ý nghĩa quyết định rất lớn tính thấm của bê tông. Khuếch tán ion clorua của bê tông (sau khi dỡ tải) bị ảnh hưởng bởi sự xuất hiện của ứng suất nén trước. Khuếch tán ion clorua trong mẫu bê tông thay đổi không đáng kể khi các cấp tải trọng nén trước còn nhỏ $\sigma/\sigma_{max} \leq 0.7$. Mức độ gia tăng về độ thấm có thể thấy rõ khi các cấp tải trọng nén trước lớn $\sigma/\sigma_{max} > 0.7$ như trong Hình 1.11. Đường “ab” thể hiện khuếch tán ion clorua không thay đổi so với độ thấm ban đầu. Sau đó, đường “bc” sau ngưỡng $\sigma/\sigma_{max} = 0.7$ thể hiện khuếch tán ion clorua tăng nhanh.

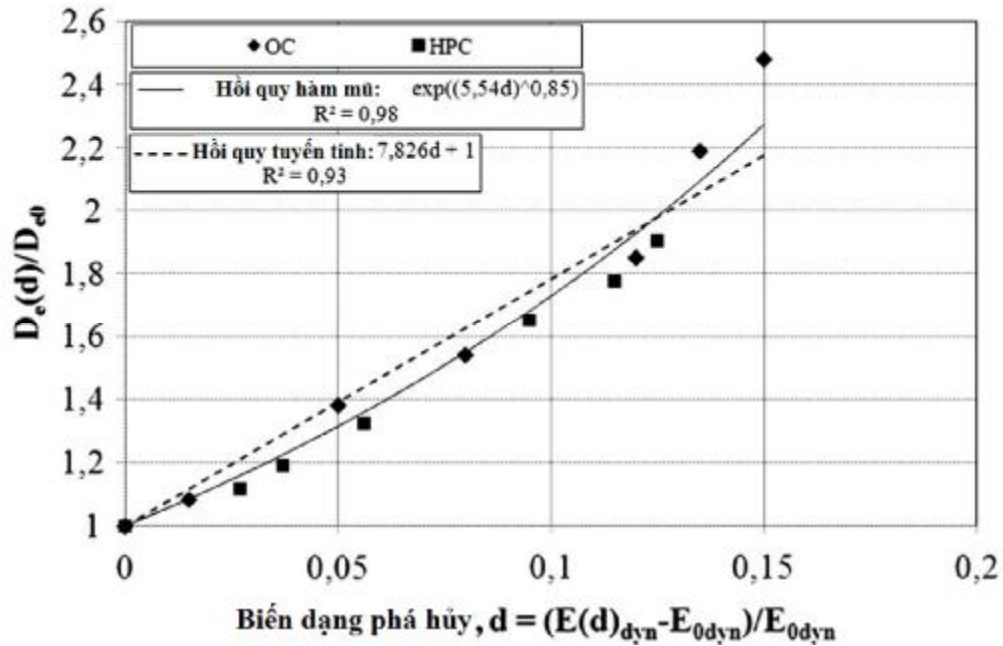


Hình 1.11 - Độ thấm ion clorua nhanh tại các cấp tải trọng nén trước khác nhau (C. Lim (2000))

Năm 2013, A. Djerbi Tegguer và cộng sự [15] đã tiến hành thí nghiệm, đánh giá ảnh hưởng của tải trọng nén một trục đến độ thấm khí và hệ số khuếch tán ion clorua của bê tông và đưa ra mối quan hệ của chúng. Mối tương quan giữa độ thấm khí và hệ số khuếch tán ion clorua được thiết lập bằng cách đưa ra một biến phá hủy do sự suy giảm độ cứng của bê tông bị hư hỏng dưới tác dụng của tải trọng nén một trục. Mẫu bê tông thường (OPC) và bê tông cường độ cao (HPC) được sử dụng trong thí nghiệm để xem xét ảnh hưởng của cơ chế xuất hiện và lan truyền vết nứt trong bê tông đến độ thấm khí và thấm ion clorua của bê tông. Mẫu bê tông hình trụ được gia tải trước với các cấp tải trọng từ 60% - 90% cường độ chịu nén giới hạn của mẫu. Kết thúc thí nghiệm, từ những kết quả có được, A. Djerbi Tegguer cho rằng:

- Hệ số thấm tương đối và hệ số khuếch tán ion clorua tương đối của bê tông thường và bê tông cường độ cao tăng với sự gia tăng của ứng suất dư, trong đó bê tông thường cho thấy giá trị cao hơn.

- Kết quả cho thấy sự biến thiên theo một hàm số mũ giữa độ thấm tương đối (hay hệ số khuếch tán tương đối) và trị số phá hủy d đối với cả bê tông thường và bê tông cường độ cao như trong Hình 1.12.



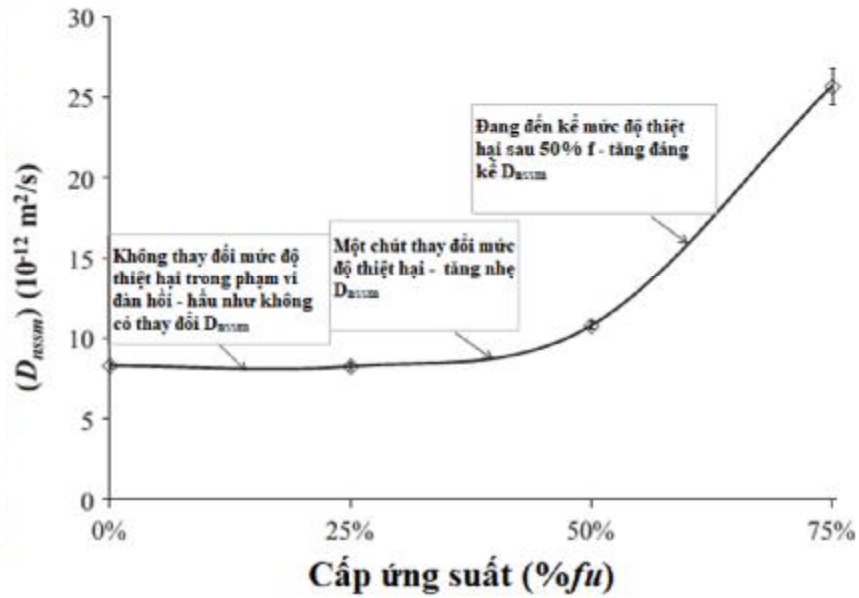
Hình 1.12 - Mối quan hệ giữa hệ số khuếch tán ion clorua tương đối và trị số phá hủy d của bê tông (A. Djerbi Tegger (2013))

G.P. Li & al (2011), nghiên cứu sự khuếch tán ion clorua qua bê tông chịu tải bằng thí nghiệm uốn mẫu dầm bê tông ngâm trong môi trường tương tự nước biển và chịu tác động của không khí biển. Điều kiện môi trường, tỷ lệ nước trên xi măng và độ lớn của ứng suất kéo khi uốn được xem xét nhằm đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố này đến khuếch tán ion clorua qua bê tông.

Junjie Wang & al (2015) đã nghiên cứu ảnh hưởng của ứng suất trong bê tông chịu nén trực tiếp đến khuếch tán ion clorua. Tác giả đề xuất tương quan giữa hệ số thấm ion clorua và độ lớn của ứng suất như trong hình 1.13.

Kết quả nghiên cứu cho thấy ảnh hưởng của ứng suất trong bê tông đến hệ số khuếch tán ion clorua quá một giới hạn ứng suất nhất định, đặc biệt tăng mạnh sau giới hạn 50% giá trị ứng suất phá hủy mẫu.

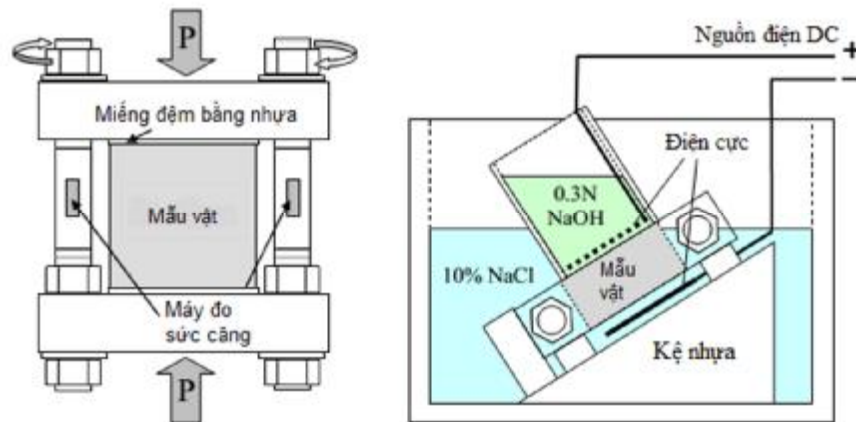
Hệ số khuếch tán ion clorua không ổn định



Hình 1.13 - Mối quan hệ giữa hệ số khuếch tán ion clorua và độ lớn của ứng suất

Hai thí nghiệm điển hình nhất về xác định ảnh hưởng của tải trọng nén trước và nén trực tiếp đến khuếch tán ion clorua của bê tông được đề nghị của Antoni & al (2008) và Junjie Wang & al (2015).

Antoni & al (2008) đề xuất thiết bị thí nghiệm được mô phỏng trong Hình 1.14 dựa trên thiết bị thí nghiệm NordTest Build 492 - NonSteady State Migration Test [Nordtest 1997]. Bê tông chịu nén bằng một hệ khung và đưa vào buồng đo thấm trong vòng 24h. Chiều sâu khuếch tán ion clorua được đo bằng thay đổi màu sắc theo chiều sâu mẫu sau khi thử nghiệm với dung dịch nitorát bạc.



Hình 1.14 - Thấm nhanh ion clorua của bê tông dưới tác dụng của tải trọng nén trực tiếp

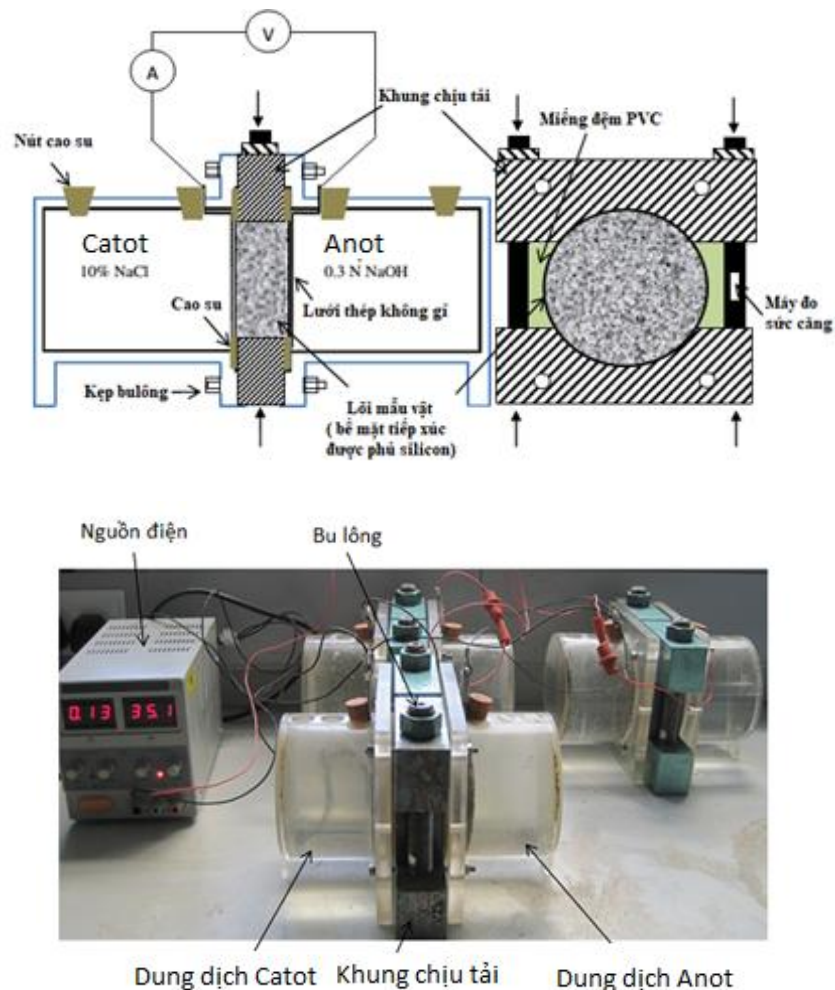
Hệ số thẩm ion clorua được tính theo công thức sau:

$$D_{\text{nssm}} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left(x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L \cdot x}{U - 2}} \right); \quad (1.25)$$

trong đó:

- D_{nssm} là hệ số khuếch tán ion clorua x 10^{-12} (m^2/s);
- T là nhiệt độ dung dịch ($^{\circ}\text{C}$);
- L là chiều dài mẫu (mm);
- U là điện thế áp dụng (V);
- t là thời gian thí nghiệm (h);
- x_d là chiều sâu khuếch tán ion clorua qua mẫu (mm).

Junjie Wang & al (2015) đề xuất thiết bị thí nghiệm như trong Hình 1.15, cũng dựa trên cơ sở thiết bị thí nghiệm NordTest Build 492. Hệ số khuếch tán ion clorua cũng được tính theo công thức (1.25).



Hình 1.15 – Bộ thí nghiệm thẩm ion clorua của bê tông chịu tải trọng trực tiếp

1.4. Các nghiên cứu về thời gian khởi đầu ăn mòn và thời gian lan truyền ăn mòn, tuổi thọ

1.4.1. Khái niệm về tuổi thọ thiết kế, tuổi thọ sử dụng

Trong thực tế khái niệm tuổi thọ thiết kế là khá trừu tượng. Năm 1984, Rostam [78] cho rằng, vòng đời của một kết cấu có thể nhỏ hơn tuổi thọ thiết kế, nhưng đó là một quyết định của chủ đầu tư dựa trên cơ sở kinh tế và chức năng. Thời gian thực sự một kết cấu giữ nguyên chức năng khai thác có thể là nhiều hơn hoặc ít hơn tuổi thọ thiết kế và điều này đưa ra nguồn gốc tuổi thọ sử dụng. Vài định nghĩa về tuổi thọ sử dụng đã được đề xuất. Một định nghĩa đơn giản nhất đã được Ủy ban 365 của ACI [22] đưa ra: Tuổi thọ sử dụng là thời gian mà kết cấu thực hiện chức năng đã định của nó. Theo 22TCN272-05 [1]: Tuổi thọ sử dụng là khoảng thời gian cầu được dự kiến khai thác an toàn

Tuổi thọ thiết kế của một kết cấu được chỉ rõ trong tiêu chuẩn thiết kế. Đó là một con số, thường dựa trên thời gian ước tính theo sự suy giảm các chức năng của kết cấu. Sự suy giảm các chức năng của kết cấu có liên hệ với các tác động của môi trường lên kết cấu. Yêu cầu cơ bản của tiêu chuẩn thiết kế dựa trên triết lý thiết kế các trạng thái giới hạn đó là: Sức kháng tính toán sẽ phải lớn hơn hiệu ứng của tải trọng. Các hệ số tải trọng và các hệ số của sức kháng đã dùng được kiểm chứng trên tuổi thọ thiết kế và điều này thiết lập chỉ số an toàn cho kết cấu (Tuuti (1980) [89], Sarja và Vesikari (1996) [106]).

Theo thời gian sử dụng chỉ số an toàn của kết cấu bị giảm do nhiều nguyên nhân. Có hai cơ chế chủ yếu dẫn đến sự suy giảm của kết cấu cầu bê tông cốt thép đó là sự suy giảm trực tiếp và sự suy giảm gián tiếp. Sự suy giảm trực tiếp được định nghĩa là sự suy thoái của pha xi măng và pha cốt liệu của bê tông do tiếp xúc với các chất độc hại. Sự suy giảm trực tiếp do các nguyên nhân như: ăn mòn sunfat; hư hại hóa học do các axit; hư hại hóa học do muối; phản ứng kiềm cốt liệu. Sự suy giảm gián tiếp được xác định do quá trình ăn mòn cốt thép gây ra nứt và vỡ bê tông.

1.4.2. Tuổi thọ sử dụng theo tác động của sự khuếch tán ion clorua trong môi trường biển

Năm 1980, tại hội nghị quốc tế về bê tông trong môi trường biển do viện bê tông Mỹ (ACI) tổ chức, Tuuti [89] cho rằng, các kết cấu bê tông cốt thép làm việc trong môi trường biển sẽ bị các ion clorua khuếch tán vào bê tông và tích tụ trên bề mặt cốt thép. Khi nồng độ ion clorua tại bề mặt cốt thép đạt tới ngưỡng nồng độ tới

hạn nó sẽ bắt đầu gây ăn mòn cốt thép. Cốt thép bị ăn mòn sẽ dẫn tới hai hậu quả. Thứ nhất là nó làm giảm diện tích mặt cắt ngang của cốt thép dẫn tới giảm sức kháng lại các tải trọng. Thứ hai, cốt thép bị ăn mòn sẽ sinh ra các sản phẩm ăn mòn, các sản phẩm ăn mòn nở thể tích gây ra ứng suất kéo trong lớp bê tông bảo vệ và gây nứt, tách, vỡ bê tông.

Mô hình hóa dự báo tuổi thọ sử dụng của các kết cấu bê tông cốt thép do khuếch tán ion clorua cần chỉ ra các quá trình dẫn đến ăn mòn thép trong bê tông do ion clorua gây ra. Các quá trình này cơ bản được mô tả như sau :

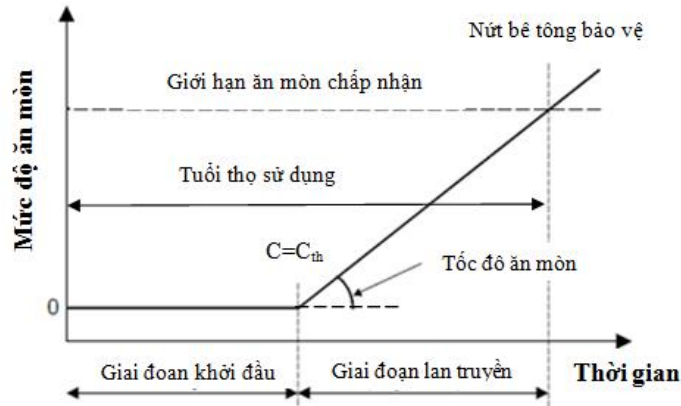
- Ion clorua trong môi trường tích lũy trên bề mặt bê tông.
- Ion clorua được khuếch tán vào bê tông qua một số cơ chế mà chủ yếu là khuếch tán.
- Nồng độ ion clorua được tích lũy theo thời gian tại bề mặt của cốt thép.
- Khi nồng độ ion clorua tại bề mặt cốt thép đạt tới mức ngưỡng tới hạn, thì màng thụ động trên mặt cốt thép bị phá vỡ và quá trình ăn mòn bắt đầu xảy ra.
- Sản phẩm của ăn mòn có thể tích lớn hơn cốt thép đã bị ăn mòn, gây ra ứng suất kéo trong lớp bê tông bảo vệ.
- Bê tông chịu kéo kém, do vậy sẽ xuất hiện các vết nứt hoặc thẳng góc hoặc nằm ngang hình thành tách lớp giữa các cốt thép.
- Các vết nứt tạo thành rạn nứt hoặc vỡ làm cho kết cấu bị xuống cấp như chức năng sử dụng không còn được đảm bảo hoặc gây mất an toàn. Đây có thể xem là thời điểm mà yêu cầu phải sửa chữa.
- Ăn mòn gây ra mất mát diện tích tiết diện thép, dẫn đến trạng thái giới hạn chịu lực không còn thỏa mãn.

Tuutti, K. đã đưa ra mô hình hai giai đoạn của tuổi thọ sử dụng của kết cấu bê tông cốt thép như trong hình 1.16. Theo đó tuổi thọ sử dụng gồm hai giai đoạn kế tiếp nhau: giai đoạn khởi đầu ăn mòn và giai đoạn lan truyền ăn mòn theo phương trình 1.26.

$$t = t_1 + t_2 ; \quad (1.26)$$

trong đó:

- t là tuổi thọ sử dụng ;
- t_1 là giai đoạn khởi đầu ăn mòn;
- t_2 là giai đoạn lan truyền ăn mòn.



Hình 1.16 - Tuổi thọ sử dụng của kết cấu bê tông cốt thép: Mô hình hai giai đoạn của Tuuti (1980)

Giai đoạn khởi đầu ăn mòn (t_1)

Giai đoạn khởi đầu ăn mòn là thời gian kể từ khi kết cấu bắt đầu tiếp xúc với ion clorua cho đến khi ion clorua khuếch tán vào bê tông tập trung trên bề mặt cốt thép đạt đến ngưỡng nồng độ gây ăn mòn. Độ dài của giai đoạn này phụ thuộc chủ yếu vào các yếu tố:

- Nồng độ ion clorua trên bề mặt bê tông;
- Nhiệt độ, độ ẩm của môi trường;
- Chiều dày lớp bảo vệ;
- Chất lượng của bê tông bảo vệ thông qua hệ số khuếch tán ion clorua;
- Ngưỡng nồng độ ion clorua gây ăn mòn cốt thép;

Giai đoạn lan truyền ăn mòn (t_2)

Giai đoạn lan truyền ăn mòn là thời gian kể từ khi cốt thép bắt đầu bị ăn mòn tới khi ăn mòn gây nứt hoàn toàn bê tông bảo vệ hoặc tới khi diện tích tiết diện cốt thép bị giảm do ăn mòn dẫn đến kết cấu không còn thỏa mãn trạng thái giới hạn chịu lực. Khi ăn mòn xảy ra và phát triển, các sản phẩm ăn mòn là gỉ, thể tích tăng khoảng 2-6 lần thể tích của thép bị gỉ, tạo áp lực lên bê tông xung quanh và cuối cùng dẫn đến kết cấu bị nứt (theo chiều dọc và ngang), vỡ và tách lớp của bê tông bảo vệ và mất diện tích tiết diện cốt thép, gây nguy hiểm cho kết cấu.

Bê tông đã nứt làm cho các tác nhân ăn mòn khuếch tán nhanh hơn đến bề mặt cốt thép, tốc độ ăn mòn sẽ nhanh hơn, gây nguy hiểm cho kết cấu. Vì vậy sự xuất hiện của vết nứt ăn mòn đầu tiên có thể là dấu hiệu quan trọng xác định điểm cuối của tuổi thọ sử dụng của kết cấu bê tông cốt thép.

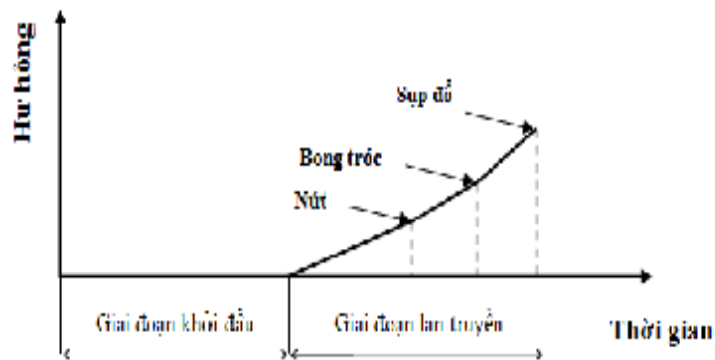
Độ dài của giai đoạn lan truyền ăn mòn phụ thuộc chủ yếu vào các yếu tố:

- Mật độ dòng điện ăn mòn,

- Chiều dày lớp bảo vệ,
- Chất lượng cơ học của bê tông bảo vệ thông qua cường độ chịu kéo của bê tông, mô đun đàn hồi, hệ số từ biến.

Yếu tố thứ nhất, mật độ dòng điện ăn mòn, phản ánh tốc độ của phản ứng ăn mòn điện hóa. Phản ứng ăn mòn tạo ra sản phẩm gỉ, nó có thể tích lớn hơn thể tích của thép bị ăn mòn và gây ra ứng suất kéo trong bê tông bảo vệ. Mật độ dòng điện ăn mòn phụ thuộc vào chất lượng của bê tông (điện trở suất của bê tông), nồng độ ion clorua tại bề mặt cốt thép, nhiệt độ và độ ẩm môi trường. Một yếu tố không thể thiếu trong quá trình trên là độ ẩm và ô xy cần được cung cấp. Yếu tố thứ hai và thứ ba thể hiện sức kháng nứt của bê tông bảo vệ.

Đến năm 2000, dự án DuraCrete (2000) - Thiết kế bền vững dựa trên thiết kế của các kết cấu bê tông, do Liên minh Châu Âu - Brite EuRam III [50] thực hiện đã chi tiết hóa giai đoạn lan truyền ăn mòn thành các giai đoạn nhỏ hình 1.17.



Hình 1.17 - Các sự kiện liên quan đến tuổi thọ sử dụng (DuraCrete (2000))

Để dự báo tuổi thọ sử dụng của kết cấu bê tông, điểm kết thúc của tuổi thọ cần được xác định. Hiện nay điểm kết thúc của tuổi thọ sử dụng còn đang là chủ đề tranh luận của các nhà nghiên cứu. Có hai quan điểm lớn về vấn đề này: quan điểm thứ nhất xem điểm kết thúc của tuổi thọ sử dụng là khi ăn mòn gây nứt hoàn toàn bê tông bảo vệ; còn quan điểm thứ hai là khi ăn mòn làm giảm diện tích tiết diện cốt thép gây nguy hiểm cho trạng thái giới hạn chịu lực.

1.4.3. Các mô hình dự báo tuổi thọ kết cấu công trình bằng bê tông cốt thép có xét đến hiện tượng khuếch tán ion clorua

1.4.3.1. Thời gian khởi đầu ăn mòn do ion clorua theo Tuutti

Dự báo giai đoạn khởi đầu ăn mòn sẽ dựa trên sự khuếch tán của ion clorua [89]. Do chênh lệch nồng độ, các ion clorua từ bề mặt của kết cấu bê tông sẽ khuếch tán vào trong bê tông tới cốt thép. Giai đoạn khởi đầu ăn mòn sẽ kết thúc khi nồng

độ ion clorua tại bề mặt cốt thép đạt đến ngưỡng nồng độ gây ăn mòn. Theo định luật thứ hai của Fick về khuếch tán:

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2} ; \quad (1.27)$$

trong đó:

- $C(x,t)$ là nồng độ ion clorua tại chiều sâu x và thời gian t ;
- D là hệ số khuếch tán ion clorua trong bê tông ;
- x là chiều dày tính từ bề mặt của bê tông ;
- t là thời gian .

Phương trình (1.27) được giải để tìm thời gian t sao cho $C(x,t)$ bằng ngưỡng nồng độ gây ăn mòn thép. Trong phương trình trên trường hợp D không đổi theo thời gian có thể giải bài toán bằng giải tích. Nhưng trên thực tế D thay đổi theo thời gian, do vậy để giải phương trình (1.27) cần dùng phương pháp số.

Các tham số của mô hình

Hệ số khuếch tán ion clorua

Hệ số khuếch tán ion clorua là tham số vật liệu, hệ số này giữ vai trò cốt yếu trong dự báo tuổi thọ của kết cấu bê tông phơi nhiễm ion clorua của môi trường ven biển Việt Nam. Hệ số khuếch tán ion clorua được dự báo theo tỷ lệ nước / xi măng và chịu ảnh hưởng của nhiệt độ, độ ẩm của môi trường cũng như các chất phụ gia.

Với các cầu vừa xây dựng xong có thể làm thí nghiệm để xác định giá trị đặc trưng của hệ số khuếch tán D_{28} .

Sự tích tụ nồng độ ion clorua trên bề mặt bê tông

Nồng độ ion clorua trên bề mặt bê tông tiếp xúc với một môi trường biển phụ thuộc vào vị trí địa lý của vùng biển cũng như khoảng cách so với mực nước biển. Theo vị trí của kết cấu bê tông cốt thép trong môi trường biển Ủy ban ACI 365 của Hoa kỳ chia thành 4 vùng:

- Vùng thủy triều (Marine splash zone) là vùng nằm trong biên độ thủy triều hoặc là ở trong phạm vi 1m so với mực nước cao nhất của thủy triều)
- Vùng sóng đánh (Marine spray zone) là vùng nằm cao hơn mực nước cao nhất của thủy triều 1m, nhưng đôi khi tiếp xúc với bụi nước biển)
 - Vùng không khí biển cách biển $\leq 800m$
 - Vùng không khí biển cách biển từ 800m đến 1500m

Có nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng nồng độ ion clorua trên bề mặt bê tông tiếp xúc với một môi trường biển được tích tụ sau đó tăng lên cùng với thời gian. Với

các vùng bê tông luôn tiếp xúc với nước biển nồng độ ion clorua bề mặt có thể không thay đổi với thời gian, ví dụ như vùng thủy triều, vùng sóng đánh của nước biển.

Nồng độ ion clorua bề mặt là một hàm của thời gian và là hàm có giới hạn theo thời gian. Quy luật tích lũy nồng độ ion clorua bề mặt có nhiều quan điểm: không đổi, hàm bậc nhất và hàm mũ.

Theo Swamy và các cộng sự [109], trong tất cả các điều kiện tiếp xúc, ngoại trừ các khu vực ngập nước, hàm lượng ion clorua bề mặt thay đổi tuyến tính với căn bậc hai của thời gian, cho thấy sự gia tăng của C_s có xu hướng suy giảm theo thời gian. Các yếu tố ảnh hưởng đến nồng độ ion clorua bề mặt là: thành phần của xi măng dùng trong bê tông; đặc điểm bề mặt của bê tông; chu kỳ khô ẩm của môi trường.

Theo Michael Thomas-life 365 đã sử dụng cơ sở dữ liệu được khảo sát bởi Viện muối Hoa Kỳ từ 1960-1984 và dữ liệu tốc độ tích tụ ion clorua của Wayers và các cộng sự năm 1993. Các giá trị của dữ liệu đã được so sánh với dữ liệu hàm lượng ion clorua thu thập được từ các cây cầu do Babie và Hawkins thực hiện năm 1987. Nồng độ ion clorua thay đổi tuyến tính với thời gian tùy theo từng vùng, từ 10 đến 30 năm như trong phương trình 1.26 sau:

$$C_s(t) = \begin{cases} kt & \text{khi } t \leq \frac{C_{s,\max}}{k} \\ C_{s,\max} & \text{khi } t \geq \frac{C_{s,\max}}{k} \end{cases} \quad (1.28)$$

$C_{s,\max}$ được lấy tùy thuộc vào các điều kiện tiếp xúc; khác nhau. Đối với kết cấu trong môi trường biển ACI 365 đưa ra Bảng 1.3:

Bảng 1.3. Tốc độ tích lũy và nồng độ lớn nhất của ion clorua bề mặt

Vùng	Tốc độ tích lũy k (%/ năm)	$C_{s,\max}$ (%/ khối xi măng)
Vùng thủy triều	Xảy ra ngay	0.8
Vùng sóng đánh	0.10	1.0
Cách biển $\leq 800\text{m}$	0.04	0.6
Cách biển từ 800m-1500m	0.02	0.6

Năm 1999, trên tạp chí “Materials and Structures” số 32, A. Costa và J. Appleton [44] đã nghiên cứu thực nghiệm nồng độ ion clorua bề mặt các vùng ven biển. Họ đã đưa ra quan hệ nồng độ ion clorua bề mặt là một hàm mũ có dạng như phương trình 1.29 sau:

$$C_{s(t)} = C_1 t^n ; \quad (1.29)$$

trong đó:

- $C_{s(t)}$ là hàm lượng ion clorua bề mặt tại thời điểm t (% khối lượng bê tông) ;
- C_1 hàm lượng ion clorua bề mặt sau một năm (% khối lượng bê tông) ;
- n là các hằng số thực nghiệm, phụ thuộc loại bê tông và vùng môi trường (vùng thủy triều: $C_1 = 0.38$, $n = 0.37$; vùng bụi nước biển: $C_1 = 0.22$, $n = 0,48$; vùng khí quyển biển $C_1 = 0.10$, $n = 0.59$).

Ngưỡng nồng độ ion clorua gây ăn mòn thép trong bê tông

Ngưỡng nồng độ ion clorua gây ăn mòn thép còn gọi là ngưỡng nồng độ ion clorua tới hạn (C_{th}) đóng vai trò quan trọng trong ăn mòn cốt thép.

Ngưỡng nồng độ ion clorua gây ăn mòn thép được định nghĩa là hàm lượng ion clorua cần thiết tại bề mặt cốt thép để gây phá vỡ màng thụ động của thép và bắt đầu gây ăn mòn. Nó thường được biểu thị theo tỷ lệ phần trăm của khối lượng bê tông hoặc khối lượng chất kết dính.

Các cầu ở Anh có ngưỡng nồng độ ion clorua tới hạn đã đo được khoảng từ 0,2% đến 1,5% khối lượng xi măng [75]. Tuy nhiên, ngưỡng nồng độ ion clorua tới hạn theo hàm lượng riêng ion clorua tự do hiếm khi được đo đạc, so với tổng hàm lượng ion clorua hoặc tỷ lệ $[Cl^-]/[OH^-]$.

Một số lượng lớn các nghiên cứu đã tập trung vào việc định lượng C_{th} , nhưng các giá trị đo thường phân tán. Lý do cho sự phân tán của C_{th} bao gồm các phương pháp đo lường, phương pháp biểu diễn C_{th} , điều kiện của giao diện thép - bê tông và ảnh hưởng của các yếu tố môi trường.

Ø Xác định thời điểm khởi đầu ăn mòn

Thời điểm khởi đầu ăn mòn có thể được phát hiện bằng cách theo dõi dòng điện macrocell giữa cực dương và cực âm, đo điện thế nửa pin hoặc theo dõi tốc độ ăn mòn đo bằng kỹ thuật phân cực hoặc phương pháp trở kháng AC.

Ø Đo hàm lượng ion clorua trong bê tông ở sát bề mặt thép

Đo hàm lượng ion clorua để xác định C_{th} được thực hiện sau khi ăn mòn bắt đầu xảy ra. Có hai giai đoạn trong việc xác định hàm lượng ion clorua: lấy mẫu và phân tích. Lấy mẫu thường bằng cách mài bê tông và thu thập bột ở các độ sâu khác

nau. Điều rất cần thiết là phải đảm bảo rằng mẫu bột thu được phải có lượng vữa xi măng đủ cao hơn bột cốt liệu.

Phương pháp sử dụng rộng rãi nhất để đo tổng hàm lượng ion clorua là sử dụng chiết xuất axit hòa tan, trong đó người ta cho rằng cả ion clorua liên kết và ion clorua tự do đều hòa tan trong axit. Đo ion clorua hòa tan axit (tổng lượng ion clorua) có thể được thực hiện bằng cách sử dụng điện cực chọn lọc ion clorua hoặc bằng cách chuẩn độ, ví dụ như mô tả trong tiêu chuẩn Anh Quốc 1881 phần 124 [35].

Ø Biểu diễn của ngưỡng nồng độ ion clorua

Ngưỡng nồng độ ion clorua gây ăn mòn C_{th} biểu diễn qua tổng hàm lượng ion clorua là cách tiếp cận rộng rãi và phổ biến nhất trong các tiêu chuẩn.

Tiêu chuẩn của Anh quốc BS 8810 [36] quy định hàm lượng ion clorua tới hạn $C_{th} = 0.10\%$ khối lượng xi măng cho bê tông dự ứng lực và $C_{th} = 0.20\%$ khối lượng xi măng cho bê tông cốt thép thường.

Theo nghiên cứu của Đại học kỹ thuật Munich Cộng hòa liên bang Đức (Technische Universität München) thông thường $C_{th} = 0.20\% - 0.40\%$ khối lượng xi măng.

Mối quan hệ thực tế giữa sự ăn mòn và hàm lượng ion clorua trong bê tông bị ảnh hưởng bởi nhiều thông số như:

- Loại, thành phần cấu tạo của xi măng;
- Các loại phụ gia;
- Độ ẩm và nhiệt độ;
- Độ xốp và cấu trúc lỗ rỗng của bê tông;
- Tính chất của bề mặt cốt thép;
- Sự hiện diện của các chất khác trong dung dịch lỗ rỗng (ví dụ như chất kiềm).

Trong chương trình Life 365 Michael Thomas [22] đã sử dụng giá trị $C_{th} = 0,05\%$ khối lượng của bê tông, giá trị này được lấy từ các kết quả nghiên cứu hàm lượng ion clorua từ 0.20% đến 0.40% khối lượng xi măng tương đương khoảng 0.03% đến 0.07% khối lượng bê tông.

1.4.3.2. Thời gian khởi đầu ăn mòn do ion clorua theo Duracrete (2000)[50]

Phương trình thiết kế (1.30), chỉ ra rằng ăn mòn được bắt đầu khi nồng độ ion clorua xung quanh cốt thép vượt quá nồng độ ion clorua giới hạn:

$$\mathbf{g} = \mathbf{c}_{cr}^d - \mathbf{c}^d(\mathbf{x}, t) = \mathbf{c}_{cr}^d - \mathbf{c}_{s,cl}^d \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\mathbf{x}_d}{2 \sqrt{\frac{t}{\mathbf{R}_{cl}^d(t)}}} \right) \right] \quad (1.30)$$

Từ đây ta có được thời gian khởi đầu ăn mòn

$$t_1 = \left[\left(\frac{2}{\mathbf{x}^c - \Delta \mathbf{x}} \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{\mathbf{c}_{cr}^c}{\gamma_{Ccr}^c} \frac{1}{A_{Cs,cl}^c \frac{W}{b} \gamma_{Cs,cl}^c} \right) \right)^{-2} \frac{\mathbf{R}_{0,cl}^c}{\mathbf{k}_{e,cl}^c \cdot \mathbf{k}_{c,cl}^c \cdot t_0^{n_{cl}^c} \cdot \gamma_{Rcl}} \right]^{\frac{1}{1-n_{cl}^c}} ; \quad (1.31)$$

trong đó:

- \mathbf{c}_{cr}^d Giá trị thiết kế của nồng độ ion clorua giới hạn;
- $\mathbf{c}_{s,cl}^d$ Giá trị thiết kế của nồng độ ion clorua bề mặt;
- \mathbf{x}^d Giá trị thiết kế của độ dày lớp bảo vệ bê tông;
- \mathbf{R}_{cl}^d Giá trị thiết kế sức kháng ion clorua.

Giá trị thiết kế của nồng độ ion clorua giới hạn có thể được xác định như sau:

$$\mathbf{c}_{cr}^d = \mathbf{c}_{cr}^c \frac{1}{\gamma_{Ccr}} ; \quad (1.32)$$

trong đó: γ_{Ccr} hệ số riêng phần cho nồng độ ion clorua giới hạn.

Giá trị thiết kế của nồng độ ion clorua bề mặt được xác định theo công thức:

$$\mathbf{c}_{s,cl}^d = A_{Cs,cl}(\mathbf{w}/\mathbf{b}) \gamma_{Cc,cl} ; \quad (1.33)$$

trong đó: $A_{Cs,cl}$ là một tham số hồi quy mô tả mối quan hệ giữa nồng độ bề mặt ion clorua và tỷ lệ nước/chất kết dính (\mathbf{w}/\mathbf{b}), và $\gamma_{Cc,cl}$ là hệ số riêng phần cho nồng độ bề mặt.

Giá trị thiết kế của bề dày lớp bảo vệ xác định theo công thức:

$$\mathbf{x}^d = \mathbf{x}^c - \Delta \mathbf{x} ; \quad (1.34)$$

trong đó: $\Delta \mathbf{x}$ là dung sai chiều dày lớp bảo vệ.

Cuối cùng, giá trị thiết kế của sức kháng phụ thuộc vào thời gian được tính theo các công thức dưới đây:

$$\mathbf{R}_{cl}^d = \frac{\mathbf{R}_{cl,0}^c}{\mathbf{k}_{e,cl}^c \cdot \mathbf{k}_{c,cl}^c \cdot \left(\frac{t}{t_0} \right)^{n_{cl}^c} \cdot \gamma_{Rcl}} ; \quad (1.35)$$

trong đó:

- $R_{c,0}^c$ là sức kháng đối với xâm ion clorua được xác định trên cơ sở các thử nghiệm tuân thủ;
- $k_{c,cl}^c$ là hệ số bảo dưỡng;
- $k_{e,cl}^c$ là hệ số môi trường;
- t_0 là tuổi của bê tông khi các thử nghiệm tuân thủ được thực hiện;
- n_{cl}^c là hệ số tuổi;
- γ_{Rcl} hệ số riêng phần về sức kháng đối với xâm ion clorua.

$$R_{0,cl}^c = \frac{1}{D_{0,cl}} ; \quad (1.36)$$

trong đó: $D_{0,cl}$ là hệ số khuếch tán ion clorua.

1.4.3.3. Giai đoạn lan truyền

Ăn mòn bắt đầu khi lớp phủ chủ động bị phá hoại giống kết quả của sự giảm pH do cacbonat hóa hoặc giống kết quả của việc hàm lượng ion clorua tăng lên trên ngưỡng gần với cốt thép. Thể tích của các sản phẩm ăn mòn gấp nhiều lần thể tích của kim loại gốc. Sự gia tăng của thể tích gây ra ứng suất kéo trong bê tông quanh các thanh thép dẫn đến nứt hoặc vỡ lớp phủ bê tông.

Khi ăn mòn phát triển, ba hiện tượng chính xuất hiện:

- Giảm mặt cắt ngang của thép;
- Giảm dính bám giữa bê tông và thép;
- Gây nứt ở bê tông và do đó giảm mặt cắt ngang chịu tải của bê tông.

Để xác định độ dài của tuổi thọ dài hạn thì giá trị ngưỡng giới hạn của khả năng chịu tải trọng phải được đánh giá theo hiện tượng suy giảm nói trên. Ngưỡng tới hạn có thể được diễn đạt giống như sự mất mát giới hạn của bán kính thanh thép được thúc đẩy bởi sự ăn mòn và do đó thời gian lan truyền có thể được tính toán theo cách sau (Alonso và Andrade, 1993) [26]:

$$t_2 = \frac{\Delta R_{max}}{r} ; \quad (1.37)$$

trong đó:

- t_2 là thời gian lan truyền của ăn mòn (năm);
- ΔR_{max} là mất mát bán kính thanh thép tối đa;
- r là tốc độ ăn mòn.

Trong trường hợp ăn mòn mở rộng, mất mát tới hạn của bán kính thanh thép dựa vào nứt của lớp phủ bê tông. Thời gian lan truyền (nứt) có thể được tính xấp xỉ

bằng công thức sau (Siemes, Vrouwenvelder và Van de Beukel, 1985) [81]:

$$t_2 = 80 \frac{C}{Dr} ; \quad (1.38)$$

trong đó:

- C là độ dày lớp phủ bê tông (mm);
- D là đường kính thanh thép (mm);
- r là tốc độ ăn mòn ($\mu\text{m}/\text{năm}$).

Tốc độ ăn mòn trong bê tông phụ thuộc lớn vào môi trường xung quanh. Yếu tố môi trường quan trọng là độ ẩm tương đối và nhiệt độ. Tốc độ ăn mòn của cốt thép trong bê tông có thể được tính ước lượng bằng công thức sau:

$$r = c_T r_0 ; \quad (1.39)$$

trong đó:

- c_T là hệ số nhiệt độ;
- r_0 là tốc độ ăn mòn ở 20°C .

Hệ số đầu tiên ảnh hưởng đến tốc độ ăn mòn trong bê tông ở $+20^\circ\text{C}$ là độ ẩm tương đối của không khí (hoặc bê tông) và hàm lượng ion clorua. Các hệ số khác như tỉ lệ xi măng/nước và loại xi măng cũng có thể có một số ảnh hưởng.

1.5. Các nghiên cứu về độ thấm nước và thấm ion clorua của bê tông ở trong nước

Có một số công trình trong nước nghiên cứu về độ thấm nước và khuếch tán ion clorua của bê tông tông điển hình như sau:

GS.TS Phạm Duy Hữu và các công sự xuất bản cuốn sách “Thiết kế kết cấu theo độ bền” năm 2016 [3]. Tác giả đã đề cập đến độ bền của bê tông, cốt thép và các nhân tố ảnh hưởng tới độ bền của kết cấu bê tông cốt thép. Đây là một tài liệu đầu tiên ở trong nước trình bày các nghiên cứu về thiết kế các kết cấu công trình theo độ bền.

Đề tài luận án tiến sỹ của Nguyễn Mạnh Phát năm 1997 có tên “Nghiên cứu nâng cao khả năng chống ăn mòn cho bê tông và bê tông cốt thép trong môi trường xâm thực biển” [14]. Trong nghiên cứu này tác giả nghiên cứu dùng phụ gia để tăng dẻo làm giảm tỷ lệ nước / xi măng, tăng độ đặc chắc, tăng khả năng chống ăn mòn cho bê tông và bê tông cốt thép.

Trong luận án tiến sỹ của Trần Đường năm 2005: “Ứng dụng mô hình Tang Luping- Olof Nilsson khảo sát sự khuếch tán ion clorua trong bê tông và nghiên cứu ảnh hưởng của phụ gia đến quá trình này” [11]. Tác giả đã sử dụng mô hình toán

học có sử dụng điện trường của Tang Luping và Olof Nilsson để xác định nhanh hệ số khuếch tán ion Cl⁻ trong bê tông được chế tạo từ xi măng Luksvaxi (Thừa Thiên-Huế). Từ đó có thể đưa ra dự đoán về thời điểm ion Cl⁻ đạt ngưỡng ăn mòn cốt thép trong bê tông. Tác giả cũng đã tìm tỷ lệ tối ưu cho phụ gia siêu dẻo naphthalene formaldehyde sulfonate và silica fume cho bê tông được chế tạo từ xi măng Luksvaxi (Thừa Thiên Huế) để hạn chế sự khuếch tán của ion Cl⁻ trong bê tông.

TS Nguyễn Mạnh Phát xuất bản cuốn sách “Lý thuyết ăn mòn và chống ăn mòn bê tông- bê tông cốt thép trong xây dựng” năm 2007 [5]. Tác giả đưa ra lý thuyết chung về ăn mòn bê tông và bê tông cốt thép, ăn mòn và chống ăn mòn trong môi trường biển. Cuốn sách cũng nêu các biện pháp bảo vệ kết cấu bê tông và bê tông cốt thép chống ăn mòn.

Ha Minh, Hiroshi Mutsuyoshi năm 2010 [4] viết bài báo “Sự hư hại của cầu bê tông dự ứng lực kéo sau trong điều kiện môi trường đặc biệt”. Theo các tác giả ion clorua gây ra ăn mòn ống bọc và cốt thép dự ứng lực trong dầm bê tông cốt thép phụ thuộc vào điều kiện vữa phụt vào ống bọc. Các tác giả đã tiến hành thí nghiệm hai nhóm dầm trong điều kiện thúc đẩy ăn mòn nhanh bằng dòng điện. Nhóm thứ nhất được thử nghiệm để xác định ảnh hưởng của tỷ lệ vữa trong ống bọc đến sự ăn mòn ống bọc và cốt thép dự ứng lực. Nhóm thứ hai để quan sát quan hệ giữa vết nứt do ăn mòn và ứng suất do ăn mòn. Họ đã đi đến kết luận: nứt do ăn mòn xảy ra sớm hơn trong các dầm phun đầy vữa trong ống bọc. Mặc dù bề rộng vết nứt trong dầm phun vữa đầy đủ lớn hơn, nhưng cốt thép dự ứng lực vẫn được bảo vệ tốt hơn. Trong thí nghiệm ăn mòn tăng tốc, bề rộng vết nứt do ăn mòn tạo thép dự ứng lực lớn hơn 2.5 đến 3 lần so với ăn mòn của ống bọc.

ThS Tô Minh Tuấn, TS Nguyễn Ngọc Nam, TS Vũ Ngọc Anh, năm 2010 [9] đã nghiên cứu đề tài “Tính toán tuổi thọ của kết cấu bê tông cốt thép chịu ăn mòn” Theo các tác giả tác nhân gây ăn mòn hóa học chính là ion clorua. Tính toán được thời gian cốt thép bị ăn mòn trong bê tông và gây ra nứt cho kết cấu sẽ hạn chế được rủi ro cho công trình. Nghiên cứu trình bày mô hình đơn giản nhằm xác định thời gian khởi đầu ăn mòn và thời gian ăn mòn gây nứt bê tông bảo vệ. Trong nghiên cứu này các tác giả sử dụng giải pháp hàm sai số (erf) để giải phương trình vi phân của định luật thứ hai của Fick về khuếch tán. Trong nghiên cứu này chưa đề cập tới ảnh hưởng của nhiệt độ và độ ẩm tới quá trình khuếch tán ion clorua gây ăn mòn và nứt.

Đề tài nghiên cứu của viện khoa học công nghệ xây dựng “Tình trạng ăn mòn bê tông cốt thép ở vùng biển Việt Nam và một số kinh nghiệm sử dụng chất ức chế ăn mòn Canxi nitrit” năm 2010 do TS. Phạm Văn Khoan, TS. Nguyễn Nam Thắng

[10] thực hiện. Đây là hướng nghiên cứu chỉ với mục đích tăng ngưỡng nồng độ ion clorua gây ăn mòn thép. Nghiên cứu này cũng chưa đưa ra được dự báo với giải pháp như vậy sẽ kéo dài tuổi thọ sử dụng của kết cấu bao nhiêu năm.

Đại học Đà Nẵng đã nghiên cứu đề tài “Nghiên cứu khảo sát hiện trạng ăn mòn phá hủy của các công trình bê tông cốt thép và khả năng xâm thực của môi trường ven biển thành phố Đà Nẵng”. Các tác giả là Trương Hoài Chính- Trần Văn Quang (2008) [12]. Nghiên cứu này chỉ đi vào khảo sát hiện trạng ăn mòn thép và cảnh báo nguy cơ ăn mòn thép của các công trình ven biển.

KS.Trương Nhật Tân, PGS.TS Trần Thế Truyền năm 2015 [13] tại Hội nghị khoa học toàn quốc – Cơ học vật rắn biến dạng lần thứ XII đã trình bày các kết quả thực nghiệm xác định ảnh hưởng dư của ứng suất nén trước đến khả năng chống thấm nước và khuếch tán ion clorua của bê tông thường ($f'_c = 30\text{MPa}$). Các mẫu thí nghiệm này được nén trước trên máy nén theo các cấp tải trọng khác nhau được mô tả thông qua giá trị ứng suất nén trong bê tông theo ứng suất lớn nhất σ_{\max} . Sau khi nén mẫu và dỡ tải, tiến hành gia công mẫu và thí nghiệm đo khuếch tán ion clorua của bê tông. Phân tích kết quả cho thấy ảnh hưởng đáng kể hiệu ứng dư của ứng suất nén trước trong bê tông đến khả năng chống thấm nước và khuếch tán ion clorua của bê tông. Kết quả nghiên cứu cũng cho phép có thể xác định nhanh khuếch tán ion clorua từ độ chống thấm nước của bê tông có xét đến hiệu ứng dư của ứng suất nén trước. Trong nghiên cứu này, mới chỉ xem xét đến ảnh hưởng hiệu ứng dư của ứng suất nén trước. Trong khi đó, với bê tông còn làm việc trong giai đoạn đàn hồi, ảnh hưởng của hiệu ứng dư này là không đáng kể. Các kết quả thí nghiệm cho thấy ảnh hưởng rõ nét khi ứng với các cấp tải trọng nén trước, bê tông nằm ngoài giới hạn đàn hồi.

Đề tài luận án tiến sĩ của Đào Văn Dinh năm 2014: “Dự báo tuổi thọ sử dụng của cầu bê tông cốt thép ven biển Việt Nam do khuếch tán ion clorua” [2]. Trong nghiên cứu này tác giả đã nghiên cứu thực nghiệm thấm nhanh ion clorua theo tiêu chuẩn ASTM C1202 cho các mẫu bê tông phổ biến trong xây dựng cầu tại Việt Nam. Kết quả thí nghiệm cho thấy bê tông cấp C30-C40-C50 có điện lượng truyền qua từ 2,577 cu lông đến 1,799 cu lông thuộc loại có mức khuếch tán ion clorua trung bình và thấp. Từ đó xây dựng công thức xác định hệ số khuếch tán ion clorua từ kết quả thí nghiệm nhanh ASTM C1202.

Năm 2010, TS. Trần Thế Truyền với đề tài nghiên cứu khoa học cấp bộ “Nghiên cứu cơ chế thấm thấu của nước và khí qua bê tông, ứng dụng trong phân tích cơ chế ăn mòn các công trình giao thông dưới tác động của môi trường” [6]. Tác giả đã tiến hành phân tích sự thấm nhập của nước và không khí qua bê tông và

ảnh hưởng của các tác động cơ học và môi trường đến độ thấm, từ đó đề xuất các mô hình cơ - thủy, cơ - thủy - nhiệt về tương tác của tải trọng và các yếu tố môi trường đến khả năng thấm nước và không khí của bê tông. Thông qua các thí nghiệm và mô phỏng cơ chế thấm nước và không khí qua bê tông, tác giả đánh giá sự thấm của ion clorua gây ăn mòn thép và sự ăn mòn cacbonat của bê tông dưới tác động của môi trường trong các kết cấu bê tông cốt thép và có kết luận đánh giá về tuổi thọ của các công trình xây dựng. Nghiên cứu này chưa xem xét, đánh giá trực tiếp ảnh hưởng của sự thấm ion clorua, mà đây chính là tác nhân xâm thực chính, chủ yếu gây ra các hư hỏng thường thấy trong các công trình bê tông cốt thép ở Việt Nam. Nghiên cứu còn chưa xem xét đến ảnh hưởng của tải trọng đến các kết quả thí nghiệm.

Nhận thấy, các nghiên cứu trên còn các vấn đề cần phải giải quyết như sau:

- Đánh giá độ thấm nước và khuếch tán ion clorua của bê tông thường trong trường hợp chịu ứng suất nén trước và trường hợp chịu tải trọng trực tiếp.
- Xây dựng mối quan hệ giữa hệ số thấm nước và mác chống thấm của bê tông có xét đến ứng suất nén trước.
- Xây dựng mối quan hệ giữa hệ số thấm nước và hệ số khuếch tán ion clorua của bê tông trong trường hợp chịu ứng suất nén trước và trường hợp chịu tải trọng trực tiếp.
- Phân tích ảnh hưởng ứng xử cơ học của bê tông khi chịu ứng suất nén trước hay khi chịu tải trọng trực tiếp đến độ thấm nước, khuếch tán ion clorua của bê tông.
- Tuổi thọ sử dụng do khuếch tán ion clorua của kết cấu bê tông cốt thép có xét tới ảnh hưởng tải trọng nén trước và nén trực tiếp trên cả hai giai đoạn khởi đầu ăn mòn và lan truyền ăn mòn.
- Thời gian lan truyền ăn mòn cần được dự báo định lượng.
- Dự báo thời gian lan truyền ăn mòn theo hai quan điểm về điểm cuối của tuổi thọ sử dụng: quan điểm thứ nhất xem điểm cuối của tuổi thọ sử dụng là khi ăn mòn gây nứt hoàn toàn bê tông bảo vệ; quan điểm thứ hai xem điểm cuối của tuổi thọ sử dụng là khi ăn mòn gây mất mát diện tích tiết diện cốt thép dẫn đến kết cấu không còn thỏa mãn trạng thái giới hạn chịu lực.

Luận án này sẽ giải quyết các vấn đề trên theo phương pháp số kết hợp với các kết quả có được từ thực nghiệm. Mô hình tuổi thọ sử dụng của cầu bê tông cốt thép trong luận án này sẽ gồm hai giai đoạn kế tiếp nhau: giai đoạn khởi đầu ăn mòn và giai đoạn lan truyền ăn mòn.

1.6. Kết luận chương 1

Việc đánh giá độ bền, dự báo tuổi thọ dài hạn của các công trình giao thông bằng bê tông cốt thép có ý nghĩa quan trọng trong công tác quản lý, vận hành hệ thống. Bằng chứng là vấn đề này đã được quan tâm, nghiên cứu từ rất lâu tại những nước phát triển ở trên thế giới.

Trong đó, hai yếu tố chính ảnh hưởng đến độ bền là độ thấm và độ khuếch tán của bê tông. Ngoài ra còn có thể kể đến hiện tượng cacbonat hóa, ăn mòn hóa học do axit và nước biển.

Qua nhiều nghiên cứu về độ thấm nước của bê tông, đã chỉ ra rằng, tính thấm của bê tông chịu ảnh hưởng bởi hai yếu tố chính: một là đặc điểm độ rỗng; như kích thước, độ ngoằn ngoèo, và tính liên thông giữa các lỗ rỗng; hai là các vết nứt vi mô trong bê tông, đặc biệt là tại mặt liên kết giữa cốt liệu và chất kết dính. Trong đó, ảnh hưởng của ứng suất do các tác động từ bên ngoài đến độ thấm bê tông vẫn còn chưa được làm rõ. Các thí nghiệm đo đặc độ thấm nước của bê tông được phân loại như sau: thí nghiệm dòng nước trạng thái ổn định, thí nghiệm dòng nước ở trạng thái không ổn định, thí nghiệm ngâm nước.

Trong khi đó, đối với các công trình xây dựng bằng BTCT trong môi trường biển, hiện tượng hư hỏng quan trọng cần phải tính đến là quá trình ăn mòn cốt thép trong bê tông do các ion clorua. Đã có rất nhiều nghiên cứu đưa ra các đề xuất, mối quan hệ giữa hệ số khuếch tán ion clorua của bê tông, tỷ lệ nước/ xi măng, thời gian, số điện lượng Coulombs. Ngoài ra, những nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của trạng thái ứng suất nén trước trong bê tông cũng đã được thực hiện. Các thí nghiệm khuếch tán ion qua bê tông bao gồm thí nghiệm khuếch tán trạng thái ổn định, thí nghiệm khuếch tán trạng thái không ổn định, thí nghiệm di trú vùng điện trường. Nói chung, việc thực hiện các thí nghiệm thấm ion clorua còn phức tạp (đặc biệt khi xét đến các trạng thái ứng suất trong bê tông). nên việc xác định gián tiếp hệ số khuếch tán ion clorua thông qua các thí nghiệm đơn giản hơn như thí nghiệm thấm nước có ý nghĩa quan trọng trong công tác đánh giá độ bền và dự báo tuổi thọ của các kết cấu công trình bê tông cốt thép.

CHƯƠNG 2

THÍ NGHIỆM XÁC ĐỊNH ĐỘ THẨM NƯỚC CỦA BÊ TÔNG CÓ XÉT ĐẾN TRẠNG THÁI ỨNG SUẤT NÉN

2.1. Đặt vấn đề

Mục đích của các thí nghiệm trong chương này là đánh giá độ thấm nước của một số loại bê tông điển hình thường dùng trong các công trình cầu ở Việt Nam. Hai loại bê tông có cường độ lần lượt là 30 MPa (ký hiệu C30) và 40 MPa (ký hiệu C40) được sử dụng trong các thí nghiệm này. Chương trình thí nghiệm bao gồm các thí nghiệm sau:

- Thí nghiệm xác định cường độ chịu nén của bê tông.
- Thí nghiệm xác định độ thấm nước của bê tông chịu ứng suất nén trước.
- Thí nghiệm xác định độ thấm nước của bê tông chịu ứng suất nén trực tiếp.

Chương này được cấu trúc thành 3 phần chính. Phần đầu chương là công tác chuẩn bị các mẫu thí nghiệm bao gồm công tác chuẩn bị vật liệu, đúc và bảo dưỡng mẫu thí nghiệm. Phần thứ 2 trình bày quy trình thực hiện thí nghiệm xác định cường độ chịu nén và thí nghiệm xác định độ thấm nước của bê tông chịu ứng suất nén trước và chịu ứng suất nén trực tiếp. Phần thứ 3 là các phân tích đánh giá kết quả thí nghiệm có được.

2.2. Công tác chuẩn bị thí nghiệm

2.2.1. Vật liệu thí nghiệm và thành phần

2.2.1.1. Mô tả vật liệu sử dụng để chế tạo bê tông

▼ Xi măng

Để thiết kế cấp phối cho bê tông có cường độ chịu nén $f_c' = 30$ MPa (C30) và $f_c' = 40$ MPa (C40), nghiên cứu sinh dùng xi măng Bim Sơn – PC 40 (đạt yêu cầu của TCVN 2682: 2009).

Các chỉ tiêu kỹ thuật của xi măng trình bày trong Bảng 2.1 và thành phần hóa học và khoáng được trình bày trong Bảng 2.2 và Bảng 2.3.

Bảng 2.1 - Các tính chất cơ lý của xi măng Bim Sơn PC40

TT	Tên chỉ tiêu	Đơn vị	Tiêu chuẩn	Kết quả thử nghiệm
1	Độ bền nén	MPa	TCVN 6016: 2011	29.0
	- 3 ngày			41.4
	- 7 ngày			49.1
2	Thời gian đông kết	Phút	TCVN 6017: 2014	105
	- Bắt đầu			160
	- Kết thúc			
3	Khối lượng riêng	g/cm ³	TCVN 4030: 2003	3.1
4	Lượng nước tiêu chuẩn	%	TCVN 6017: 2014	30.0

Bảng 2.2 - Thành phần hóa học của xi măng Bim Sơn PC40

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO tự do
21.65	5.25	3.42	65.0	0.06	1.80	0.25	0.72	0.125

Bảng 2.3 - Thành phần khoáng của xi măng Bim Sơn PC40

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
51.74	24.20	8.16	10.35

✓ Cốt liệu nhỏ (cát)

Cát dùng để chế tạo bê tông là cát thiên nhiên có cỡ hạt từ 0.14 đến 5mm - theo TCVN 7570-2008; từ 0.075 đến 4.75 mm - theo tiêu chuẩn của Mỹ.

Cát được sử dụng trong nghiên cứu này là cát sông Đà.

✓ Cốt liệu lớn (đá dăm)

Cốt liệu lớn được sử dụng là đá dăm Hòa Bình có kích thước $D_{max} = 10\text{mm}$, có mác theo cường độ chịu nén là đạt 120MPa. Các tính chất của đá đạt yêu cầu TCVN 7570:2006. Vật liệu đá để chế tạo bê tông phải có cường độ và độ hao mòn phù hợp. Đá dăm có độ nhám tốt, liên kết chặt chẽ với vữa xi măng nên cường độ kháng uốn của bê tông đá dăm cao hơn so với bê tông đá sỏi.

▼ Nước

Dùng nước sinh hoạt để sản xuất và bảo dưỡng bê tông. Nước dùng phải là nước sạch theo TCVN 4056: 2012 Nước cho bê tông và vữa – Yêu cầu kỹ thuật.

2.2.1.2. Thí nghiệm xác định một số chỉ tiêu kỹ thuật của vật liệu chế tạo bê tông

a. Xác định thành phần hạt của cốt liệu cho bê tông theo ASTM C33

Ø Thiết bị thử

- Cân kỹ thuật có độ chính xác tới 0,1g.
- Bộ sàng tiêu chuẩn lỗ vuông có với kích thước lỗ sàng lần lượt bằng:
 - + Đối với cốt liệu nhỏ là cát: 0.15; 0.3; 0.6; 1.18; 2.36; 4.75 mm;
 - + Đối với cốt liệu lớn là đá dăm: 2.36; 4.75; 9.5; 12.5; 19; 25; 37.5; 50; 63; 75mm.
- Máy lắc sàng.
- Tủ sấy có bộ phận điều chỉnh nhiệt độ đạt nhiệt độ sấy ổn định từ 105°C đến 110°C.

Ø Chuẩn bị mẫu thử

Đối với cốt liệu nhỏ: Cát

- Lấy mẫu cốt liệu, rồi giảm nhỏ bằng phương pháp chia tư hoặc phân đôi để được khối lượng mẫu đủ và có dư cho thí nghiệm.
- Sấy khô cốt liệu, cân lấy 2kg để thử.

Đối với cốt liệu lớn

- Sấy khô cốt liệu, cân lấy 5kg để thử

Ø Tiến hành thử

Đối với cốt liệu nhỏ: Cát

- Dùng mẫu đã sấy khô ở nhiệt độ $110 \pm 5^\circ\text{C}$ đến khối lượng không đổi, sàng qua mắt sàng 5mm.
- Xếp chồng các sàng qui định để sàng mắt to nằm trên, sàng mắt nhỏ nằm dưới và cuối cùng là đáy (không có lỗ). Để xác định mô đun độ lớn của cát phải dùng đủ các sàng có kích thước từ 0.15 đến 4.75mm.
- Đổ mẫu cốt liệu vào sàng trên cùng, rồi sàng bằng tay hoặc dùng máy lắc sàng (ở đây sàng bằng máy).
- Thời gian sàng phải đủ để hầu hết các hạt nhỏ hơn một sàng bất kì phải lọt qua sàng đó, được qui ước như sau: nếu lấy từng sàng ra sàng riêng trong 1 phút trên tờ giấy, lượng lọt qua sàng không được vượt quá 0.5% khối lượng mẫu cốt liệu ban đầu là được. Nếu không đạt như vậy, phải tiếp tục sàng.
- Cân phần cốt liệu sót riêng trên các sàng (S_r) chính xác tới 0.1g.

Ø Tính kết quả

- Tính lượng sót riêng (S_r) ở mỗi sàng theo % của khối lượng mẫu thử.
- Tính lượng sót tích lũy (S_{tl}) ở mỗi sàng theo % khối lượng mẫu thử. Chú ý là lượng sót tích lũy là tổng số của các lượng sót riêng trên sàng đó và các sàng ở trên.
- Tính lượng lọt (L) của mỗi sàng theo % của khối lượng mẫu thử theo công thức:

$$L = 100 - S_{tl} \quad (2.1)$$

- Tính mô đun độ lớn của cốt liệu nhỏ theo công thức:

$$M_{dl} = \frac{S_{tl}^{4.75} + S_{tl}^{2.36} + S_{tl}^{1.18} + S_{tl}^{0.6} + S_{tl}^{0.3} + S_{tl}^{0.15}}{100}; \quad (2.2)$$

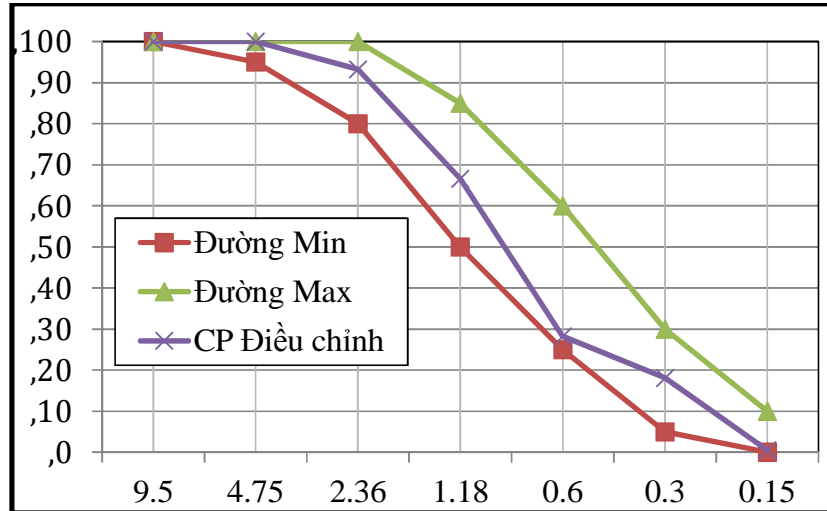
trong đó: $S_{tl}^{4.75}$, $S_{tl}^{2.36}$, ... $S_{tl}^{0.15}$ – Lần lượt là lượng sót tích lũy trên các sàng 4.75; 2.36; ... 0.15mm.

Ø Đánh giá kết quả

Đối với cốt liệu nhỏ là cát, thành phần hạt của cát như trong Bảng 2.4 và Hình 2.1

Bảng 2.4 - Bảng thành phần hạt của cát

Cỡ sàng(mm)	K.lượng riêng biệt (g)	Lượng sót riêng biệt, (%)	Lượng sót tích lũy, %	Lượng lọt sàng (%)	Tiêu chuẩn (%)
4.75	0	0	0	100	95-100
2.36	64	6.4	6.4	93.6	80-100
1.18	253	25.3	31.7	68.3	50-85
0.60	365	36.5	68.2	31.8	25-60
0.30	96	9.6	77.8	22.2	5-30
0.15	167	21.7	99.5	0.5	0-10
Đáy	5	0,5	0	0	---



Hình 2.1 – Đường cong cấp phối của hạt cát

- Mô đun độ lớn của cát:

$$M_{dl} = \frac{S_{tl}^{4.75} + S_{tl}^{2.36} + S_{tl}^{1.18} + S_{tl}^{0.6} + S_{tl}^{0.3} + S_{tl}^{0.15}}{100} = 2.8 \quad (2.3)$$

Theo TCVN 7570: 2006 Cốt liệu cho bê tông và vữa – Yêu cầu kỹ thuật. Cát được sử dụng là cát thô khi có M_{dl} trong khoảng từ 2.0 đến 3.3.

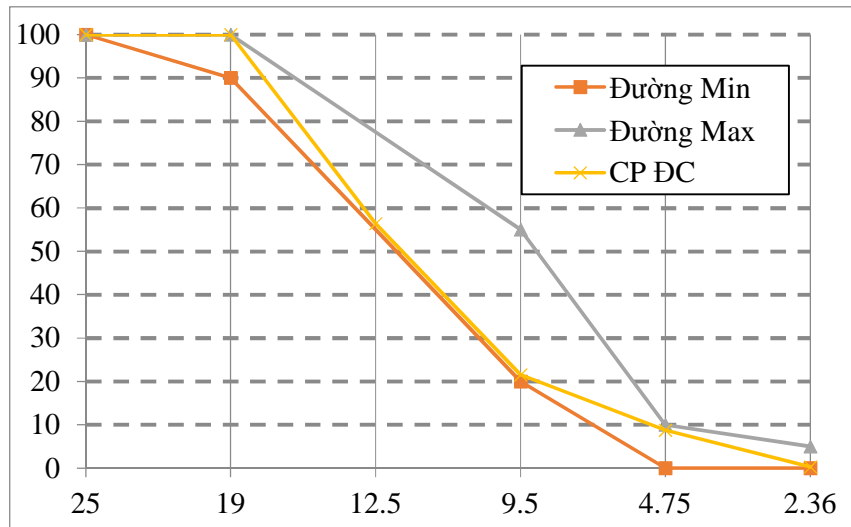
Nhận xét: Loại cát dùng đạt yêu cầu về thành phần hạt và mô đun độ lớn

Đối với cốt liệu lớn là đá dăm

- Thành phần hạt của đá dăm được thể hiện trong Bảng 2.5 và Hình 2.2.

Bảng 2.5 - Kết quả thành phần hạt của đá dăm

Cỡ sàng (mm)	K.lượng riêng biệt (g)	Lượng sót riêng biệt (%)	Lượng sót tích lũy (%)	Lượng lọt sàng (%)	Tiêu chuẩn (%)
25	0	0	0	100	100
19	0	0	0	100	90-100
12.5	2136	43.6	43.6	56.4	-
9.5	1709	34.9	78.5	21.5	20-55
4.75	626	12.8	91.3	8.7	0-10
2.36	415	8.4	99.7	0.3	0-5
Đáy	14	0.3	100	0	-



Hình 2.2 - Đường cong cấp phối của đá dăm

Nhận xét: Loại đá này thỏa mãn về thành phần hạt dùng làm cốt liệu lớn $D_{max} = 19$ mm cho bê tông.

b. Xác định khối lượng riêng và độ hút nước của cốt liệu lớn

Ø Thiết bị thử

- Cân có sức cân 5kg hoặc lớn hơn và độ chính xác tới 0.5g, kèm theo rọ được đan bằng lưới thép để cân mẫu trong nước (cân thủy tĩnh), kích thước mắt lưới thép không quá 3mm và đường kính rọ khoảng 20cm.

Ø Chuẩn bị mẫu thử

- Lấy mẫu cốt liệu, mẫu được phân đôi, rồi lấy một phần để làm thí nghiệm.
- Loại bỏ các hạt lọt sàng 4.75mm. Khối lượng mẫu tương ứng với kích thước danh nghĩa lớn nhất của cốt liệu là $D_{max} = 19$ mm
- Rửa kỹ mẫu bằng nước để loại bỏ bụi và tạp chất trên mặt các hạt, rồi ngâm mẫu trong nước để mẫu hút nước.
- Lấy mẫu ra khỏi nước, vẩy nước đi và lăn các hạt cốt liệu trên miếng vải ẩm có khả năng hút nước ở màng nước bám trên bề mặt các hạt. Các hạt lớn thì lau từng hạt bằng vải ẩm. Khi đó cốt liệu ở trạng thái bão hòa mặt ngoài khô.
- Mẫu đã chuẩn bị được chia thành hai phần bằng nhau để làm hai mẫu, khối lượng mỗi mẫu là 1kg.

Ø Tiến hành thử

- Cân mẫu thử chính xác đến 0.5g.
- Đổ mẫu thử vào rọ lưới thép, nhúng vào thùng nước, loại bỏ các bọt khí bám trên mặt các hạt nằm ở khe kẽ các hạt. Cân mẫu trong nước được khối lượng C (kg)

- Lấy mẫu ra khỏi nước và khô rọ, sấy khi đến khối lượng không đổi ở nhiệt độ 105°C, để nguội trong phòng rồi cân khối lượng A(kg) với độ chính xác 0.5g. Kết quả cân được như trong Bảng 2.6.

Bảng 2.6 – Khối lượng mẫu

Cốt liệu lớn (đá dăm) theo ASTM C127	Đá D _{max} = 19mm	
Tính khối lượng riêng (kg/cm ³)	Mẫu 1	Mẫu 2
Khối lượng khô bề mặt B(kg)	1.002	1.002
Khối lượng mẫu cân trong nước C(kg)	0.662	0.663
Khối lượng mẫu khô hoàn toàn A(kg)	0.993	0.994

Ø Tính kết quả

- Tính khối lượng riêng của cốt liệu lớn ở trạng thái khô (ρ_k) theo công thức:

$$\rho_k = \rho_n \cdot \frac{A}{B-C} \quad (\text{g/cm}^3); \quad (2.4)$$

trong đó:

- A - Khối lượng mẫu khô cân trong không khí, kg;
- B - Khối lượng mẫu bão hòa khô bề mặt cân trong không khí, kg;
- C - Khối lượng mẫu bão hòa khô bề mặt cân trong nước, kg.

Tính độ hút nước trong bão hòa mặt ngoài khô của cốt liệu lớn (H_n), % theo công thức:

$$H_n = \frac{B-A}{A} \mathbf{100\%}; \quad (2.5)$$

trong đó: B, A - Khối lượng của mẫu trước và sau khi sấy.

Khối lượng riêng của đá xác định được như trong Bảng 2.7.

Bảng 2.7 – Kết quả tính khối lượng riêng

Cốt liệu lớn (đá dăm) theo ASTM C127	Cốt liệu D _{max} = 19mm	
	Mẫu 1	Mẫu 2
Tỉ trọng riêng (g/cm ³)	2.921	2.932
Trung bình (g/cm ³)	2.926	
Kết quả khối lượng riêng (g/cm ³)	2.926	

Độ hút nước của đá xác định được như trong Bảng 2.8.

Bảng 2.8 – Kết quả tính độ hút nước

Cốt liệu lớn (đá dăm) theo ASTM C127	Cốt liệu D _{max} =19mm	
	Mẫu 1	Mẫu 2
Độ hút nước (%)	0.906	0.805
Trung bình (%)	0.856	

c. Xác định khối lượng riêng và độ hút nước của cốt liệu nhỏ theo ASTM C128

Ø Thiết bị thử

- Cân kỹ thuật có độ chính xác tới 0.1g.
- Khuôn hình côn bằng kim loại có đường kính trong đáy trên là 38mm, đáy dưới là 89mm, chiều cao 74mm và chiều dày 4mm.
- Chày đầm bằng kim loại có khối lượng bằng 340 ± 15 g, đầu phẳng tròn có đường kính bằng 25 ± 3 mm.
- Bình định mức có dung tích đến vạch định mức bằng 500ml.

Ø Tiến hành thử độ hút nước (trạng thái bão hòa trong mặt ngoài khô)

- Mẫu cát lấy theo phương pháp lấy mẫu được phân đôi để được một lượng mẫu khoảng trên 1000g.
- Phun nước để tưới cát và giữ ẩm trong 24h. Sau đó rải cát thành một lớp mỏng làm cho cát khô đều
- Đổ cát vào khuôn hình côn và đầm nhẹ bằng chày 25 cái, gạt bằng mặt, rồi rút nhẹ khuôn lên theo phương thẳng đứng sao cho cốt liệu trong côn sụt xuống và trải đều, như vậy cốt liệu ở trạng thái bão hòa mặt ngoài khô.
- Mẫu cát được phân đôi để làm hai mẫu thử cho hai thí nghiệm song song để được kết quả trung bình.

Ø Tiến hành thử khối lượng riêng

- Cân mẫu thử có độ ẩm nêu trên chính xác tới 0.1g là S (kg). Mẫu được đổ vào bình định mức có khối lượng đã biết và có dung tích bằng 500ml.
 - Lăn nghiêng bình trên một mặt phẳng để bọt khí thoát ra hết. Sau đó đặt bình vào chậu nước ở nhiệt độ 23°C trong 1h, rồi thêm nước cho đến ngang vạch 500ml.
 - Cân khối lượng bình + nước + mẫu chính xác đến 0.1g được khối lượng C(kg). Khối lượng bình đựng nước tới vạch định mức là B(kg).
 - Sấy khô mẫu, rồi cân với độ chính xác 0.1g được khối lượng A(kg).
- Các kết quả cân được trình bày trong Bảng 2.9.

Bảng 2.9 - Khối lượng mẫu

Cốt liệu nhỏ theo ASTM C128	Cát	
	Mẫu 1	Mẫu 2
Tính khối lượng riêng (kg/cm ³)		
Khối lượng khô bề mặt S(kg)	0.502	0.502
Khối lượng bình chứa đầy nước B(kg)	1.496	1.497
Khối lượng bình chưa đầy nước và cốt liệu C (kg)	1.806	1.806
Khối lượng mẫu khô hoàn toàn A (kg)	0.498	0.498

Ø Tính kết quả

Tính độ hút nước bão hoà trong mặt ngoài khô theo công thức:

$$H_n = \frac{S-A}{A} 100\% ; \quad (2.6)$$

trong đó: S, A - Khối lượng của mẫu trước và sau khi sấy.

Tính khối lượng riêng của cốt liệu nhỏ ở trạng thái khô theo công thức:

$$\rho_k = \rho_n \cdot \frac{A}{B+A-C} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (2.7)$$

Kết quả thí nghiệm được trình bày trong các Bảng 2.10 và 2.11.

Bảng 2.10 - Khối lượng riêng của cát

Cốt liệu nhỏ (cát) theo ASTM C128	Cát	
	Mẫu 1	Mẫu 2
Khối lượng riêng (g/cm ³)	2.649	2.635
Trung bình (g/cm ³)	2.642	
Kết quả khối lượng riêng (g/cm ³)	2.642	

Bảng 2.11 - Độ hút nước của cát

Cốt liệu nhỏ (cát) theo ASTM C128	Cát	
	Mẫu 1	Mẫu 1
Độ hút nước	0.803	0.803
Trung bình	0.803	

d. Xác định khối lượng thể tích lèn chặt của cốt liệu theo ASTM C29/C29M

Ø Thiết bị thử

- Cân kỹ thuật có độ chính xác bằng 0.2% khối lượng mẫu thử đem cân;
- Thanh đầm làm bằng thép tròn có đường kính 16mm, dài 600mm, đầu tiện tròn.
- Thùng đong hình trụ bằng kim loại có dung tích tùy theo kích thước danh nghĩa lớn nhất của cốt liệu. Xèng nhỏ, thước lá kim loại.

Ø Chuẩn bị mẫu thử

- Khối lượng mẫu lấy làm thí nghiệm vào khoảng 150% đến 200% lượng mẫu cần thiết để đổ đầy thùng đong, và phải bảo quản sao cho không bị phân tầng. Sấy khô mẫu đến khối lượng không đổi trong tủ sấy ở nhiệt độ $110 \pm 5^\circ\text{C}$.

Ø Tiến hành thử

- Phương pháp đầm chọc (dùng cho cốt liệu có kích thước lớn nhất bằng 37.5mm hoặc nhỏ hơn): Xúc cốt liệu đổ vào thùng bằng xèng đến mức 1/3 chiều cao của thùng, dùng tay san bằng mặt cốt liệu, rồi chọc 25 cái vào khối cốt liệu, phân đều trên bề mặt cốt liệu.
- Sau đó đổ tiếp cốt liệu vào thùng đến mức 2/3, rồi lại đầm chọc như trên. Cuối cùng đổ mẫu đến hơi đầy quá miệng thùng và đầm tiếp như trên. khi đầm lớp trên không được chọc xuống lớp dưới. Sau khi đầm xong, dùng thước san cốt liệu ngang bằng mặt thùng.
- Đối với cốt liệu lớn không san được thì dùng tay xếp các hạt trên mặt khối cốt liệu sao cho thể tích phần nhô lên xấp xỉ bằng phần lõm so với mặt ngang miệng thùng.
- Xác định khối lượng thùng (rỗng), khối lượng thùng + cốt liệu để từ đó xác định được khối lượng cốt liệu trong thùng chính xác đến 0.05kg.

Ø Tính kết quả

- Khối lượng thể tích ở trạng thái khô được tính theo công thức sau:

$$M = \frac{G-T}{V} \text{ hoặc } M = \frac{G-T}{F}; \quad (2.8)$$

trong đó:

- M- Khối lượng thể tích của cốt liệu ở trạng thái khô, kg/cm^3 ;
- G- Khối lượng của cốt liệu + thùng, kg;
- T- Khối lượng thùng, kg;
- V- Dung tích thùng, m^3 ;
- F- hệ số thể tích thùng đong, $1/\text{m}^3$.

Kết quả thí nghiệm được trình trong Bảng 2.12.

Bảng 2.12 - Khối lượng thể tích lên chặt của cốt liệu

Thí nghiệm theo tiêu chuẩn ASTM C29	Đá dăm	Cát
Khối lượng vật liệu đầm chặt (G-T) (g)	9,373	9,502
	9,430	9,467
Trung bình	9,401.5	9,484.5
Thể tích thùng đong (cm ³)	5,500	5,500
Khối lượng thể tích lên chặt (g/cm ³)	1.71	1.72

e. Kết quả các chỉ tiêu kỹ thuật của vật liệu đã thí nghiệm được tổng hợp trong các Bảng 2.13, 2.14 và 2.15.

Bảng 2.13 - Các chỉ tiêu thí nghiệm cốt liệu

TT	Danh sách các tiêu chuẩn thí nghiệm	Mã hiệu tiêu chuẩn
1	Xác định thành phần hạt của cốt liệu	ASTM C136
2	Khối lượng riêng cốt liệu nhỏ	ASTM C128
3	Khối lượng riêng của cốt liệu thô	ASTM C127
4	Độ hút nước của cốt liệu nhỏ	ASTM C128
5	Độ hút nước của cốt liệu thô	ASTM C127
6	Khối lượng thể tích lên chặt của cốt liệu	ASTM C29

Bảng 2.14 - Các chỉ tiêu của cát

Cát	Khối lượng riêng(g/cm ³)	Khối lượng thể tích lên chặt(g/cm ³)	Modun độ mịn	Độ hút nước	Độ ẩm (%)
Cát thô	2.642	1.72	2.836	0.803	0.4

Bảng 2.15 - Các chỉ tiêu của đá dăm

Đá dăm	Khối lượng riêng (g/cm ³)	Khối lượng thể tích lên chặt (g/cm ³)	Độ hút nước	Độ ẩm (%)
D _{max} = 19 mm	2.926	1.71	0.856	0.6

2.2.1.3. Thiết kế thành phần bê tông thí nghiệm

Hai loại bê tông C30 và C40 có cường độ chịu nén dự kiến ở tuổi 28 ngày là $f_c' = 30$ MPa và $f_c' = 40$ MPa. Tính toán thiết kế thành phần bê tông theo tiêu chuẩn ACI.211.1-97.

a. Bê tông C30

Bước 1: Lựa chọn độ sụt và cường độ trung bình yêu cầu

- Cường độ trung bình yêu cầu:

$$f_{cr}' = f_c' + 8.3 = 30 + 8.3 = 38.3 \text{ (MPa)}$$

- Chọn độ sụt gốc của hỗn hợp bê tông là 2.5 – 5cm.

Bước 2: Chọn kích thước tối đa của cốt liệu

- Cường độ trung bình yêu cầu: $38.3 \text{ MPa} < 62 \text{ MPa}$ tra bảng 6.2 - ACI.211.1-97 chọn $D_{\max} = 19$ (mm).

Bước 3: Chọn hàm lượng cốt liệu tối ưu

- Với $D_{\max} = 19 \text{ mm}$ và $M_k = 2.8$. Tra bảng 6.3 => thể tích cốt liệu thô là 0.72 m^3 cho 1 m^3 hỗn hợp bê tông.

- Khối lượng cốt liệu khô:

$$D = \text{VCA} \cdot \rho_{\text{Đdc}} = 1710 \times 0.72 = 1231 \text{ (kg)}$$

trong đó:

VCA: thể tích đá dăm đầm chặt trong 1 m^3 bê tông

$\rho_{\text{Đdc}}$: khối lượng thể tích đá đầm chặt

Bước 4: Xác định lượng nước và hàm lượng không khí

- Độ rỗng của cát được sử dụng:

$$r_d = (1 - \rho_{\text{cdc}} / \rho_c) * 100\% = (1 - 1.72 / 2.642) \times 100 = 34.9\%$$

trong đó:

r_{cdc} : khối lượng thể tích lèn chặt (g/m^3)

r_c : khối lượng riêng của cát (g/m^3)

- Độ rỗng cát $r_d = 34.9\%$ do đó lượng nước theo bảng 6.4 - ACI.211.1-97.

$$N = 169 \text{ (lít)}$$

- Hàm lượng không khí có trong hỗn hợp bê tông là 2%

Bước 5: Chọn tỷ lệ N/CKD

- Chọn tỷ lệ N/CKD = 0.43 (tra bảng 6.5 - ACI.211.1-97)

Bước 6: Tính toán hàm lượng chất kết dính

- Với tỷ lệ N/CKD = 0.43 lượng nước tính như trên $N = 169$ (lít)

- Lượng chất kết dính CKD = $169/0.43 = 393(\text{kg}/\text{m}^3)$

Bước 7: Xác định thành phần hỗn hợp cơ sở

- Bê tông cấp 30MPa sử dụng nguyên XM làm CKD
- Thể tích các loại VL (trừ cát) trong 1 m^3 hỗn hợp bê tông (bảng 2.16)

Bảng 2.16 - Thể tích các loại VL (trừ cát) trong 1 m^3 hỗn hợp bê tông

Xi măng	$393/(3,1.10^3)$	0.127 (m ³)
Đá	$1231/(2.926 \times 10^3)$	0.421 (m ³)
Nước	169/1000	0.169 (m ³)
Không khí	0.02	0.02 (m ³)
Tổng thể tích		0.737 (m ³)

- Thể tích của cát trong 1 m^3 bê tông là:

$$V_c = (1 - V_{\text{tổng}}) = 1 - 0.737 = 0.263 \text{ (m}^3\text{)}$$
- Khối lượng cát trong 1 m^3 bê tông là: $2.642 \times 0.263 \times 10^3 = 695 \text{ (kg)}$
Thành phần cấp phối của 1 m^3 bê tông cấp C30 được trình bày ở bảng 2.17:

Bảng 2.17 - Thành phần của 1 m^3 bê tông cấp C30

Xi măng	XM	393 (kg)
Cát khô	C	695 (kg)
Đá	Đ	1,231 (kg)
Nước	N	169 (lit)

b. Bê tông C40

Bước 1: Lựa chọn độ sụt và cường độ trung bình yêu cầu

- Cường độ trung bình yêu cầu:

$$f_{cr}' = f_c' + 8.3 = 40 + 8.3 = 48.3 \text{ (MPa)}$$
- Chọn độ sụt gốc của hỗn hợp bê tông là 2.5 – 5cm.

Bước 2: Chọn kích thước tối đa của cốt liệu

- Cường độ trung bình yêu cầu: $48.3 \text{ MPa} < 62 \text{ MPa}$. Tra bảng 6.2 theo ACI.211.1-97 chọn $D_{\text{max}} = 19 \text{ (mm)}$.

Bước 3: Chọn hàm lượng cốt liệu tối ưu

- Với $D_{\text{max}} = 19 \text{ mm}$ và $M_k = 2.8$. Tra bảng theo ACI.211.1-97 => thể tích cốt liệu thô là 0.70 m^3 cho 1 m^3 hỗn hợp bê tông.

- Khối lượng cốt liệu khô:

$$D = VCA \cdot \rho_{Đdc} = 1710 \times 0.70 = 1197 \text{ (kg)}$$

trong đó:

- + VCA: thể tích cốt liệu thô
- + $\rho_{Đdc}$: khối lượng đơn vị lèn chặt đá

Bước 4: Xác định lượng nước và hàm lượng không khí

- Độ rỗng của cát được sử dụng:

$$r_d = (1 - \rho_{cl}/\rho_c) \times 100\% = (1 - 1.72/2.642) \times 100\% = 34.9\%$$

trong đó:

- + r_{cl} : khối lượng thể tích lèn chặt (g/m^3)
- + r_c : khối lượng riêng của cát (g/m^3)
- Độ rỗng cát $V = 34.9\%$. Theo bảng theo ACI.211.1-97 8, dung lượng nước là $N = 185 \text{ (l/ m}^3\text{)}$
- Hàm lượng không khí có trong hỗn hợp bê tông là 2%

Bước 5: Chọn tỷ lệ N/CKD

- Chọn tỷ lệ N/CKD = 0.40 (tra bảng theo ACI.211.1-97)

Bước 6: Tính toán hàm lượng chất kết dính

- Với tỷ lệ N/CKD = 0.40 lượng nước tính như trên $N = 185 \text{ (lít)}$
- Lượng chất kết dính CKD = $185/0.40 = 463 \text{ (kg)}$

Bước 7: Xác định thành phần hỗn hợp cơ sở

- Bê tông cấp 40MPa sử dụng nguyên XM làm CKD
- Thể tích các loại vật liệu (trừ cát) trong 1 m^3 hỗn hợp bê tông (bảng 2.18)

Bảng 2.18 - Thể tích các loại vật liệu (trừ cát) trong 1 m^3 hỗn hợp bê tông

Xi măng	$463/(3.1 \times 10^3)$	$0.149 \text{ (m}^3\text{)}$
Đá	$1197/(2.926 \times 10^3)$	$0.409 \text{ (m}^3\text{)}$
Nước	$185/1000$	$0.185 \text{ (m}^3\text{)}$
Không khí	0.02	$0.02 \text{ (m}^3\text{)}$
Tổng thể tích		$0.763 \text{ (m}^3\text{)}$

- Thể tích của cát trong 1 m^3 bê tông là:

$$V_c = (1 - V_{\text{tổng}}) = 1 - 0.763 = 0.237 \text{ (m}^3\text{)}$$

Khối lượng cát trong 1 m^3 bê tông là: $2.642 \times 0.237 \times 10^3 = 626 \text{ (kg)}$

Thành phần cấp phối của 1 m³ bê tông cấp C40 được trình bày ở bảng 2.19:

Bảng 2.19 - Thành phần của 1m³ bê tông cấp 40

Xi măng	XM	463 (kg)
Cát khô	C	626 (kg)
Đá	Đ	1,197 (kg)
Nước	N	185 (lit)

2.2.2. Thiết bị thí nghiệm, mẫu thí nghiệm và phương pháp thí nghiệm

2.2.2.1. Thí nghiệm xác định cường độ chịu nén của bê tông

Thí nghiệm này nhằm mục đích xác định cường độ chịu nén của 2 loại bê tông xem xét là C30 và C40.

Áp dụng TCVN 3118-1993 – Phương pháp xác định cường độ chịu nén.

a) Thiết bị thí nghiệm

Máy nén;

Máy đo thấm nhanh ion clorua theo phương pháp đo điện lượng.

b) Mẫu thí nghiệm

Các mẫu thí nghiệm được chuẩn bị là mẫu hình trụ đường kính 150mm, chiều cao 300mm được đúc và bảo dưỡng trong điều kiện phòng thí nghiệm (Hình 2.3). Sau khi tháo mẫu ra khỏi ván khuôn thì tiến hành ngâm các mẫu vào bể nước trong vòng 28 ngày.



Hình 2.3 - Chuẩn bị thí nghiệm

Các mẫu thí nghiệm sau khi ngâm nước 28 ngày được chia ra thành các nhóm mẫu. Một nhóm mẫu được dùng để xác định cường độ chịu nén; từ đó làm cơ sở xác định chính xác ứng suất nén trước để đánh giá quan hệ giữa độ chống thấm và các cấp ứng suất nén trước của bê tông. Với các nhóm mẫu còn lại, tiến hành nén với các cấp tải trọng khác nhau đó là: 0 ; $0.3\sigma_{\max}$; $0.5\sigma_{\max}$; $0.8\sigma_{\max}$.

c) Thí nghiệm xác định cường độ chịu nén (Hình 2.4).



Hình 2.4 - Quá trình nén mẫu

Kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén của 2 loại bê tông C30 và C40 được trình bày trong bảng 2.20

Bảng 2.20 - Chi tiết về cường độ chịu nén của 2 loại bê tông thí nghiệm C30 và C40

Cấp bê tông	Lực nén (kN)	Cường độ nén (MPa)	Cường độ nén trung bình (MPa)
C30	318.50	40.55	41.68
	329.40	41.94	
	334.0	42.55	
C40	407.8	51.95	52.39
	411.3	52.40	
	414.7	52.83	

Cường độ nén của 3 mẫu thí nghiệm thỏa mãn yêu cầu về cường độ nén thiết kế. Tuy nhiên để đảm bảo độ tin cậy cần tiến hành thí nghiệm với nhiều mẫu hơn. Trong luận án này, do thời gian và điều kiện làm thí nghiệm bị hạn chế nên tác giả chỉ tiến hành thí nghiệm với số mẫu nhỏ.

Cường độ đặc trưng của mẫu thiết kế có thể tính gần đúng theo công thức:

$$C30: f'_c = R_{tb} - 8.3 \text{ (MPa)} = 32.13 \text{ (MPa)} > 30 \text{ (MPa)} \quad (2.9)$$

$$C40: f'_c = R_{tb} - 8.3 \text{ (MPa)} = 44.09 \text{ (MPa)} > 40 \text{ (MPa)} \quad (2.10)$$

2.2.2.2. Thí nghiệm xác định độ chống thấm nước với mẫu bê tông chịu ứng suất nén trước

Để đánh giá chỉ tiêu độ chống thấm nước của các loại bê tông, tác giả đã sử dụng phương pháp thí nghiệm theo tiêu chuẩn TCVN 3116 : 1993 “Bê tông nặng - Phương pháp xác định độ chống thấm nước” [7].

a) Thiết bị thí nghiệm độ chống thấm nước (Hình 2.5).



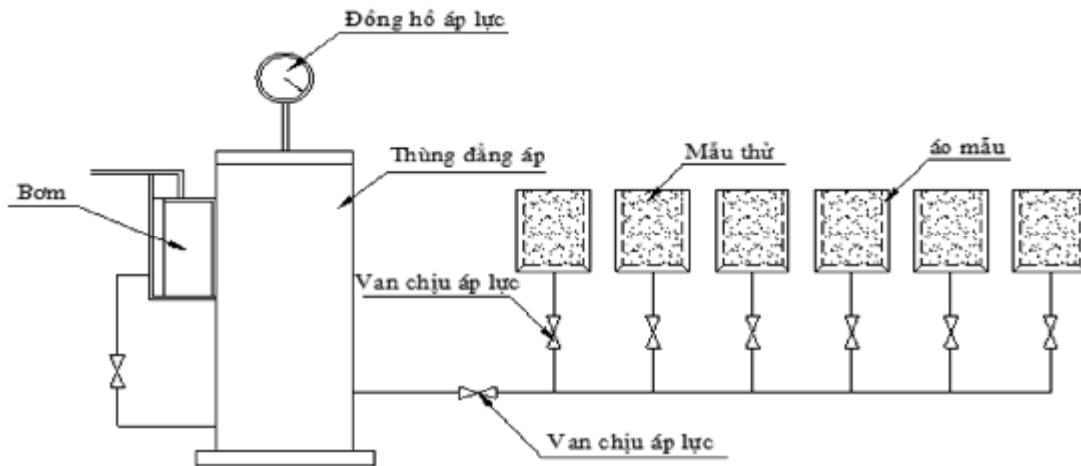
Hình 2.5 - Thiết bị xác định độ chống thấm nước của bê tông (HS – 40)

Thiết bị bao gồm:

- 06 áo mẫu bằng thép;
- Bộ gioăng cao su kín nước;
- Thùng chứa nước;
- Đồng hồ áp lực;
- 06 van đóng, xả nước;
- 01 van thu hồi nước;
- Rơ te tự động ngắt điện khi đủ áp.

b) Phương pháp xác định độ chống thấm nước của bê tông

Nguyên lý xác định độ chống thấm (W): cho nước áp lực thấm xuyên qua mẫu có tiết diện và chiều dày xác định với áp lực tăng dần từng cấp khác nhau, mỗi cấp là 2 daN/cm^2 . Thời gian giữ áp lực mỗi cấp là 16 giờ. Tiến hành tăng áp cho đến khi thấy trên mặt viên mẫu có nước xuyên qua. Cách xác định (W) được thể hiện trên hình 2.6.



Hình 2.6 - Sơ đồ xác định độ chống thấm (W)

c) Chế tạo và bảo dưỡng mẫu thí nghiệm

Chuẩn bị các tổ mẫu thử chống thấm. Mỗi tổ mẫu gồm 6 viên hình trụ đường kính bằng chiều cao và bằng 150mm. Mẫu được cắt từ mẫu trụ cao 300mm đường kính 150mm sau khi đã nén trước các tổ mẫu với các cấp tải trọng khác nhau đó là: $0.3\sigma_{\max}$; $0.5\sigma_{\max}$; $0.8\sigma_{\max}$ (Hình 2.7 và Hình 2.8). Các cấp ứng suất này được chọn dựa theo các kết quả nghiên cứu của các nghiên cứu đã công bố trên thế giới về các mức ứng suất điển hình cho thay đổi quy luật thay đổi độ thấm trong bê tông có xét đến ảnh hưởng của tải trọng.



Hình 2.7- Nén trước các mẫu với các cấp tải trọng khác nhau



Hình 2.8 - Mẫu thử được cắt ra từ các mẫu trụ đã được gia tải theo các cấp tải trọng khác nhau và được xử lý chống thấm mặt bên

Việc bảo dưỡng các mẫu bê tông cho đến trước khi thí nghiệm được tiến hành theo quy định của TCVN 3105 : 1993. Mẫu thử được bảo dưỡng, đóng rắn trong điều kiện môi trường của phòng thí nghiệm. Trong thời gian 28 ngày các mẫu thử chống thấm đều thử ở nhiệt độ bằng nhiệt độ của phòng thí nghiệm.

Các mẫu thí nghiệm sau khi ngâm nước 1 tháng được chia ra thành 4 nhóm. Tất cả các nhóm mẫu đều được nung đến 60°C trong vòng 1 tuần sau đó làm nguội xuống 25°C. Xung quanh mẫu được quét keo epoxy nhằm ngăn không cho nước thấm ra các mặt bên. Hai mặt mẫu được tạo nhám để tạo điều kiện cho nước thấm qua bê tông.

d) Tiến hành thí nghiệm

Kẹp chặt 6 áo có mẫu thử vào bàn máy, có gioăng cao su và các bu lông hãm (Hình 2.9). Bơm nước cho đầy ống và khoang chứa, mở van xả hết không khí giữa các mẫu thử và cột nước bơm. Sau đó đóng van xả khí.



Hình 2.9 - Lắp mẫu thử vào máy thử thấm

- Bom nước tạo áp lực tăng dần từng cấp, mỗi cấp là 2daN/cm^2 . Thời gian giữ mẫu ở mỗi cấp áp lực là 16 giờ.

- Tiến hành tăng áp cho tới khi thấy trên mặt viên mẫu xuất hiện nước thấm qua. Khi đó khóa van ngừng thử viên mẫu đó. Sau đó tiếp tục thử các viên còn lại và ngừng thử toàn bộ khi 4 trong 6 viên đã bị nước thấm qua.

- Độ chống thấm nước W chính bằng cấp cuối cùng đó trừ đi 2

2.2.2.3. Thí nghiệm thấm nước với mẫu bê tông chịu ứng suất nén trực tiếp

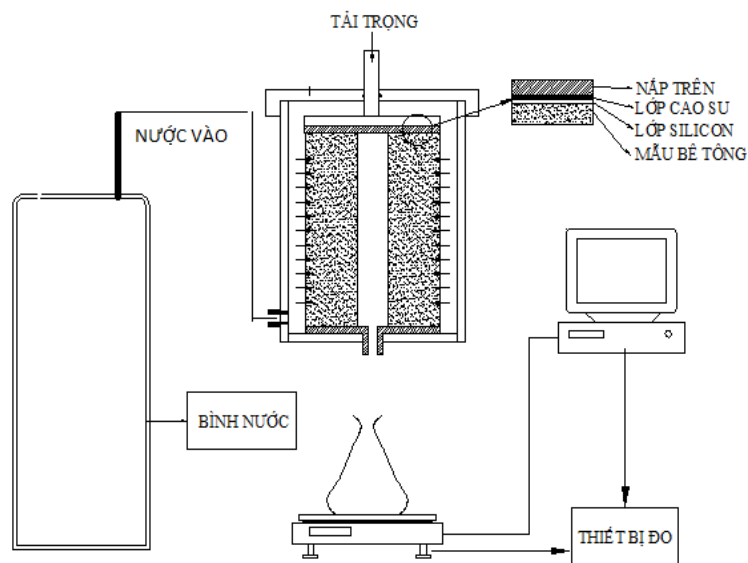
Mẫu bê tông thí nghiệm có cường độ chịu nén $f'_c = 30\text{Mpa}$ và $f'_c = 40\text{Mpa}$ có thành phần và các tính chất cơ lí của vật liệu tương tự như ở thí nghiệm đo độ chống thấm nước của bê tông chịu ứng suất nén trước.

a) Thiết bị thí nghiệm

Thiết bị đo thấm nước được chế tạo dựa trên cơ sở tham khảo nguyên tắc thiết kế thiết bị đo thấm của Banthia & al (2005). Thiết bị đo thấm gồm 3 bộ phận chính: lồng đo, bình cấp nước và các thiết bị đo (Hình 2.10).

Lồng đo bao gồm 2 tấm nhôm có kích thước $1400 \times 1400 \times 45\text{mm}$, liên kết với ống thép có đường kính 160mm , 50mm là đường kính của piston và 100mm là đường kính của đĩa nhôm phía trên. Lồng đo thấm được siết chặt nhờ 3 bu lông và đai ốc ở xung quanh kết hợp với các tấm đệm cao su, nhằm ngăn nước có thể thấm ra ngoài trong quá trình thí nghiệm. Áp lực nước cấp vào được duy trì ở mặt ngoài của mẫu, trong khi phía trong mẫu duy trì áp suất khí quyển.

Bình cấp nước có thể cấp nước tối đa đến 10atm tương đương với chiều cao cột nước là 100m .



Hình 2.10 - Sơ đồ đo độ thấm nước của bê tông chịu nén đơn trục trực tiếp

Các thiết bị đo bao gồm đồng hồ đo áp suất nước vào, senso cảm biến áp lực nước, đồng hồ đo áp lực của tải trọng, cân điện tử, máy đo dataloger và máy tính ghi nhận tác động của tải trọng và lưu lượng nước ra.

Độ chính xác của bộ thí nghiệm này được thử bằng cách tiến hành các thí nghiệm tương tự như cách mà tác giả Banthia & al (2005) đã làm. Kết quả cho thấy quy luật gia tăng độ thấm nước đo được trong thí nghiệm này là phù hợp với quy luật gia tăng độ thấm nước của tác giả Banthia và cộng sự. Để có thể lấy kết quả thí nghiệm đủ độ tin cậy, số lượng mẫu được đưa vào thí nghiệm khá lớn; nhưng chỉ lấy kết quả của 7 mẫu thí nghiệm cho quy luật gia tăng độ thấm tương tự nhau.

b) Mẫu thử nghiệm (Hình 2.11).

Mẫu bê tông được sử dụng trong các thí nghiệm này là mẫu hình trụ khoét lỗ được dùng để đo độ thấm nước của bê tông (hình 2.11). Mẫu dạng trụ rỗng có đường kính 100mm, chiều cao 200mm, khoét lỗ rỗng có đường kính 50mm.



Hình 2.11 - Đúc và gia công các mẫu thí nghiệm đo thấm nước của bê tông chịu tải trọng nén trực tiếp

Sau khi đổ bê tông, các mẫu thí nghiệm được bảo dưỡng trong phòng thí nghiệm trong vòng 24h. Tiếp đó, tất cả các mẫu được ngâm vào nước trong thời gian 1 tháng, nhiệt độ nước được duy trì ở 25°C. Sau 1 tháng ngâm nước, các mẫu được lấy ra và chia thành 4 nhóm mẫu, mỗi nhóm mẫu gồm 4 mẫu thí nghiệm; các mẫu được giữ trong điều kiện độ ẩm của phòng thí nghiệm. Hai đầu các mẫu thí nghiệm được xử lý bịt bằng các gioăng cao su tròn với keo silicon nhằm ngăn nước có thể thoát ra trong quá trình làm thí nghiệm (Hình 2.12).



Hình 2.12 - Xử lý hai đầu mẫu bằng tấm đệm cao su và silicone

2.2.2.4. Tiến hành thí nghiệm

Các mẫu thí nghiệm được lắp đặt vào trong các lồng đo thấm nước. Nước được cho đầy vào lồng đo thấm để loại hết các bọt khí. Nắp lồng thấm được siết chặt với bu lông và các gioăng cao su. Thiết bị đo được thể hiện trong các Hình 2.13, 2.14, 2.15, 2.16, 2.17.



Hình 2.13 – Buồng đo thấm nước mẫu bê tông chịu tải trọng trực tiếp



Hình 2.14 - Đồng hồ đo áp lực nén của tải trọng và áp lực nước vào



Hình 2.15 - Cân điện tử kết nối với máy tính và bình hứng nước



Hình 2.16 - Máy tính với phần mềm Hyper Terminal tự động ghi số liệu về lưu lượng nước thoát ra khi thấm qua mẫu thí nghiệm



Hình 2.17 - Toàn cảnh bố trí thiết bị đo độ thấm nước của bê tông chịu tải trọng nén trực tiếp

Chi tiết về các nhóm mẫu được thống kê như Bảng 2.21

Bảng 2.21 - Chi tiết về các nhóm mẫu, cấp áp lực nước và cấp gia tải

Nhóm mẫu	1	2	3	4
Số lượng mẫu	7	7	7	7
Ký hiệu nhóm	S1	S2	S3	S4
Áp lực nước (atm)	3; 4; 5	3; 4; 5	3; 4; 5	3; 4; 5
Ứng suất nén (σ/σ_{\max})	0.2	0.4	0.6	0.8

Mẫu thí nghiệm được gia tải nén trực tiếp bằng máy nén có kết nối với máy tính. Lưu lượng nước thoát ra được đo đạc theo thời gian bằng cân điện tử có kết nối với máy tính (Hình 2.16). Lưu lượng nước thấm (m^3/s) được ghi nhận sau khi dòng thấm đã ổn định. Áp lực nước được duy trì không đổi trong suốt quá trình đo thấm. Độ thấm ban đầu được đo ở cấp ứng suất nén $\sigma/\sigma_{\max} = 0.2$. Việc đo đạc độ thấm nước được duy trì trong thời gian 16 giờ. Bốn nhóm mẫu thí nghiệm được gia tải ở 4 cấp tải trọng tương ứng theo ứng suất tương đối $\sigma/\sigma_{\max} = 0.2; 0.4; 0.6$ và 0.8 . Mỗi nhóm mẫu có 4 mẫu được thí nghiệm ở một cấp tải. Áp lực nước được duy trì theo 3 cấp: 3atm, 4atm và 5atm. Các cấp áp suất nước này tương ứng với áp suất nước ở các độ sâu 30, 40 và 50 m.

Hệ số thấm nước của bê tông K (m/s) được tính toán với giả định dòng chảy đều và đẳng nhiệt theo luật thấm Darcy như sau:

$$K = \frac{Q \cdot L}{A \cdot \Delta h} ; \quad (2.11)$$

trong đó:

- Q (m^3/s) là lưu lượng nước thấm qua mẫu thí nghiệm;
- A (m^2) là diện tích mặt thấm nước của mẫu;
- Δh (m) là áp lực nước vào tính theo chiều cao cột nước;
- L (m) là chiều dày thấm nước của mẫu.

2.3. Phân tích đánh giá kết quả thí nghiệm thấm nước qua bê tông

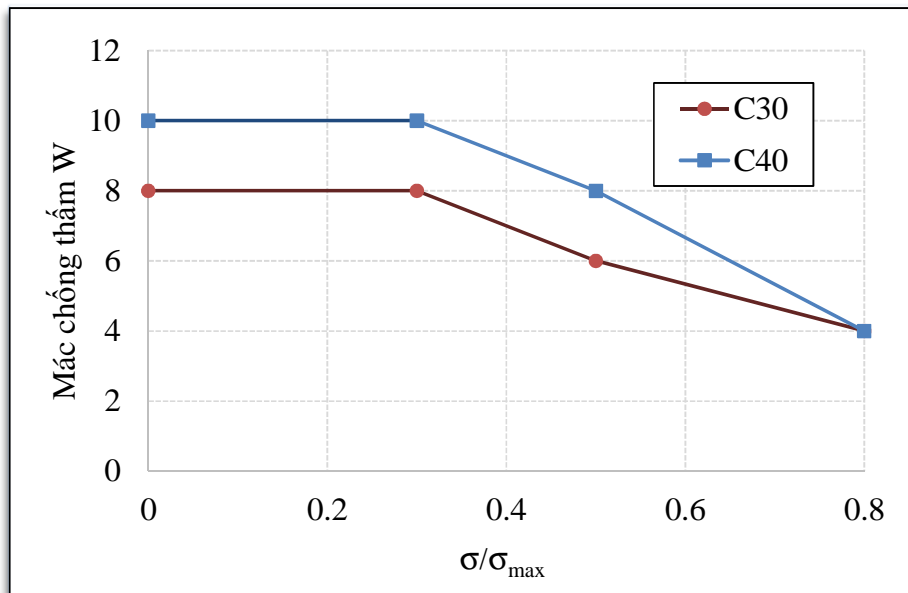
2.3.1. Kết quả thí nghiệm thấm nước với mẫu bê tông chịu ứng suất nén trước

Kết quả thí nghiệm được thể hiện trong Bảng 2.22.

Bảng 2.22 - Kết quả thí nghiệm độ chống thấm nước của 2 loại bê tông C30, C40

STT	Cấp tải trọng (kN)	Độ chống thấm W (daN/cm ²)	
		C30	C40
1	$0.0\sigma_{\max}$	$W \approx 8$	$W \approx 10$
2	$0.3\sigma_{\max}$	$W \approx 8$	$W \approx 10$
3	$0.5\sigma_{\max}$	$W \approx 6$	$W \approx 8$
4	$0.8\sigma_{\max}$	$W \approx 4$	$W \approx 4$

Dựa vào kết quả các thí nghiệm nói trên, ta xây dựng biểu đồ độ chống thấm nước của bê tông C30 và C40 khi xét đến ứng suất nén trước như sau (Hình 2.18):



Hình 2.18 – Quan hệ giữa mức chống thấm nước của bê tông C30 và C40 theo ứng suất nén trước

Khi ứng suất tương đối nén trước còn nhỏ $\sigma/\sigma_{\max} \leq 0.3$, gia tăng độ thấm nước khá chậm. Khi ứng suất tương đối lớn hơn $\sigma/\sigma_{\max} > 0.5$, độ thấm nước gia tăng rất nhanh. Sự xuất hiện các vết nứt phá hủy bê tông đã làm cho quá trình thấm nước tăng nhanh hơn.

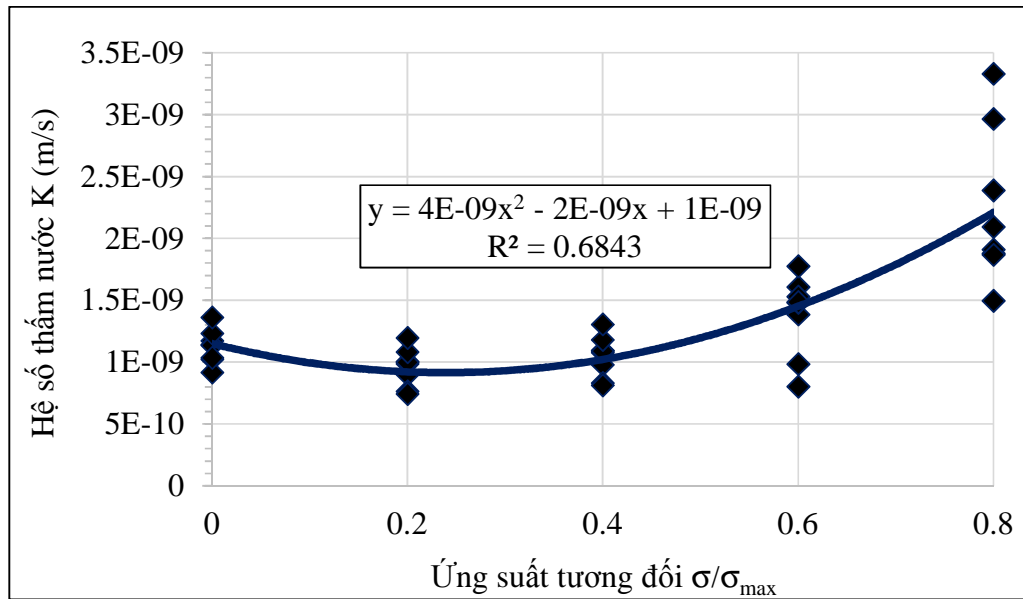
2.3.2. Kết quả thí nghiệm thấm nước với mẫu bê tông chịu ứng suất nén trực tiếp.

Các kết quả thực nghiệm về xác định hệ số thấm nước của bê tông được tính theo công thức (2.11). Hệ số thấm nước K (m/s) theo áp lực nước tính theo chiều cao cột nước (m) và cấp tải trọng tác dụng được trình bày ở bảng 2.23.

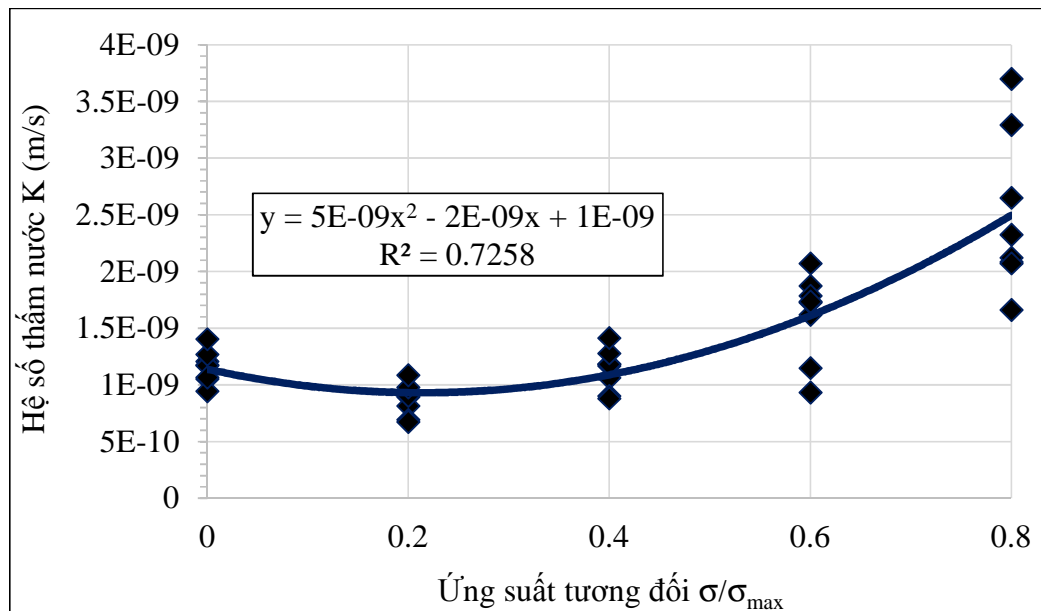
Bảng 2.23 – Kết quả đo lưu lượng nước và tính toán hệ số thấm nước

Loại bê tông	Ứng suất tương đối σ/σ_{\max}	Lưu lượng nước trung bình Q (m^3/s) đo được theo áp lực nước vào (atm)			Hệ số thấm nước K (m/s) được tính toán theo cấp áp lực nước vào (atm)		
		3	4	5	3	4	5
C30	0.0	4.37×10^{-08}	6.03×10^{-08}	5.89×10^{-08}	1.126×10^{-09}	1.161×10^{-09}	1.152×10^{-09}
	0.2	3.72×10^{-08}	4.51×10^{-08}	6.03×10^{-08}	9.587×10^{-10}	8.692×10^{-10}	9.299×10^{-10}
	0.4	4.06×10^{-08}	5.89×10^{-08}	8.06×10^{-08}	1.045×10^{-09}	1.134×10^{-09}	1.241×10^{-09}
	0.6	5.36×10^{-08}	8.37×10^{-08}	1.13×10^{-07}	1.381×10^{-09}	1.611×10^{-09}	1.745×10^{-09}
	0.8	8.70×10^{-08}	1.29×10^{-07}	1.81×10^{-07}	2.240×10^{-09}	2.488×10^{-09}	2.786×10^{-09}
C40	0.0	4.16×10^{-08}	4.29×10^{-08}	4.25×10^{-08}	1.08×10^{-09}	1.12×10^{-09}	1.11×10^{-09}
	0.2	3.60×10^{-08}	3.64×10^{-08}	3.77×10^{-08}	9.36×10^{-10}	9.46×10^{-10}	9.81×10^{-10}
	0.4	3.86×10^{-08}	4.19×10^{-08}	4.89×10^{-08}	1.00×10^{-09}	1.09×10^{-09}	1.27×10^{-09}
	0.6	5.10×10^{-08}	5.95×10^{-08}	7.05×10^{-08}	1.33×10^{-09}	1.55×10^{-09}	1.84×10^{-09}
	0.8	7.65×10^{-08}	9.18×10^{-08}	1.03×10^{-07}	1.99×10^{-09}	2.39×10^{-09}	2.68×10^{-09}

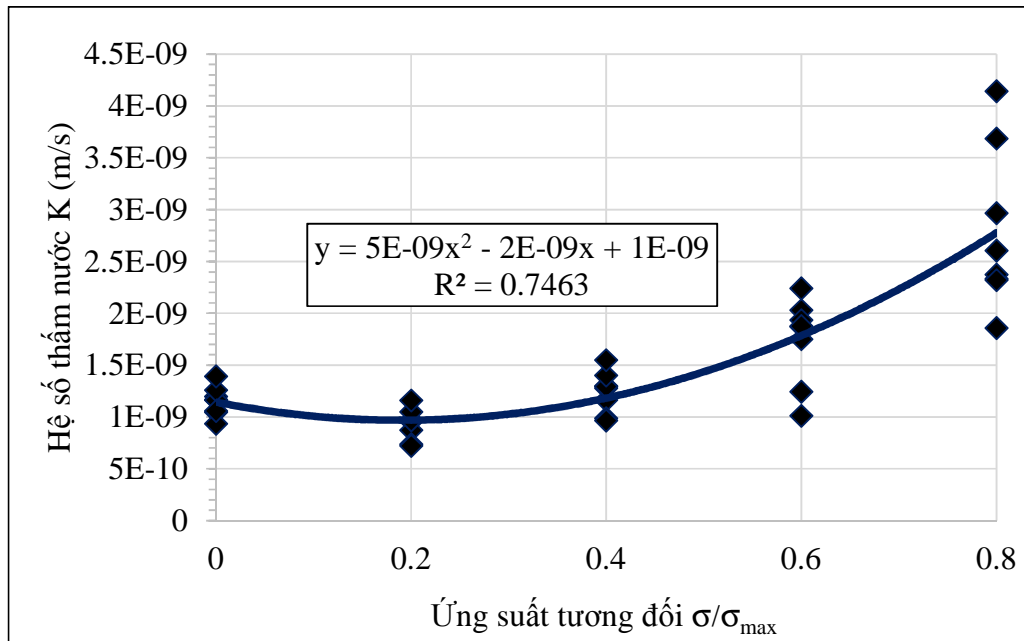
Trên hình từ 2.19 đến hình 2.26 chúng ta thấy đầu tiên độ thấm nước của bê tông gần như không thay đổi hoặc thay đổi chậm khi giá trị ứng suất tương đối $\sigma/\sigma_{\max} < 0.4$; sau ngưỡng này, hệ số thấm bắt đầu tăng nhanh. Khi ứng suất tương đối $\sigma/\sigma_{\max} \geq 0.6$, hệ số thấm nước gia tăng rất nhanh; điều này có thể giải thích là do cấu trúc vi mô của bê tông bị phá hủy sau ngưỡng ứng suất này - vốn là ngưỡng làm xuất hiện các vùng phá hủy phân tán (theo tiếp cận của cơ học phá hủy bê tông) - làm gia tăng độ thấm nước của bê tông. Quy luật gia tăng độ thấm nước của bê tông sau 28 ngày tuổi trong thí nghiệm này cũng tương tự như quy luật gia tăng độ thấm nước của bê tông non tuổi đã công bố của Banthia & al (2005) khi phá hủy cơ học chưa xuất hiện trong bê tông.



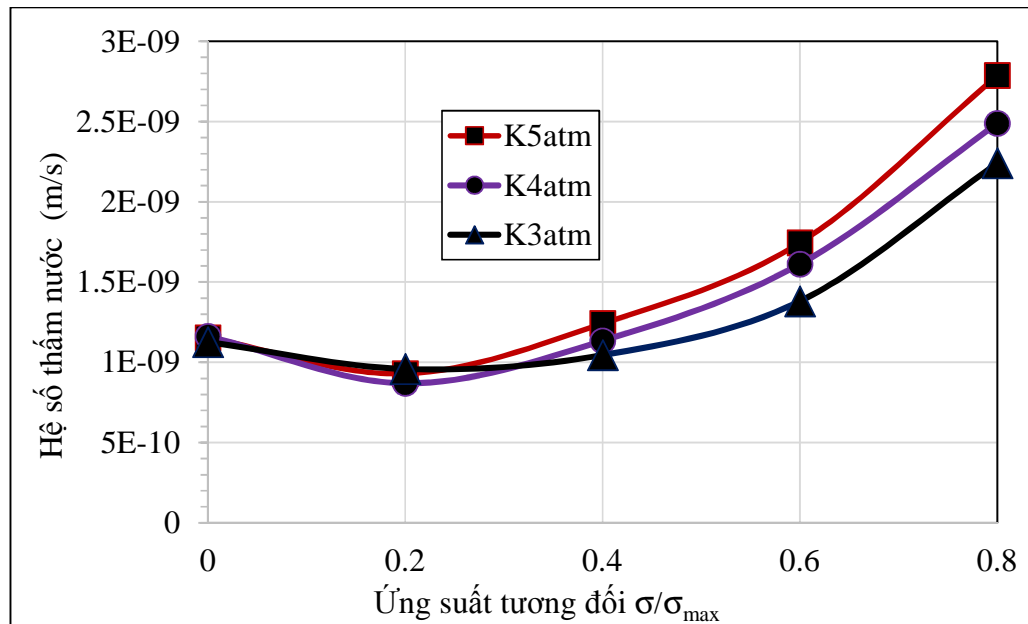
Hình 2.19 – Quan hệ giữa hệ số thấm nước của bê tông K (m/s) và ứng suất nén trực tiếp trong bê tông (Bê tông C30, áp lực nước $P = 3atm$).



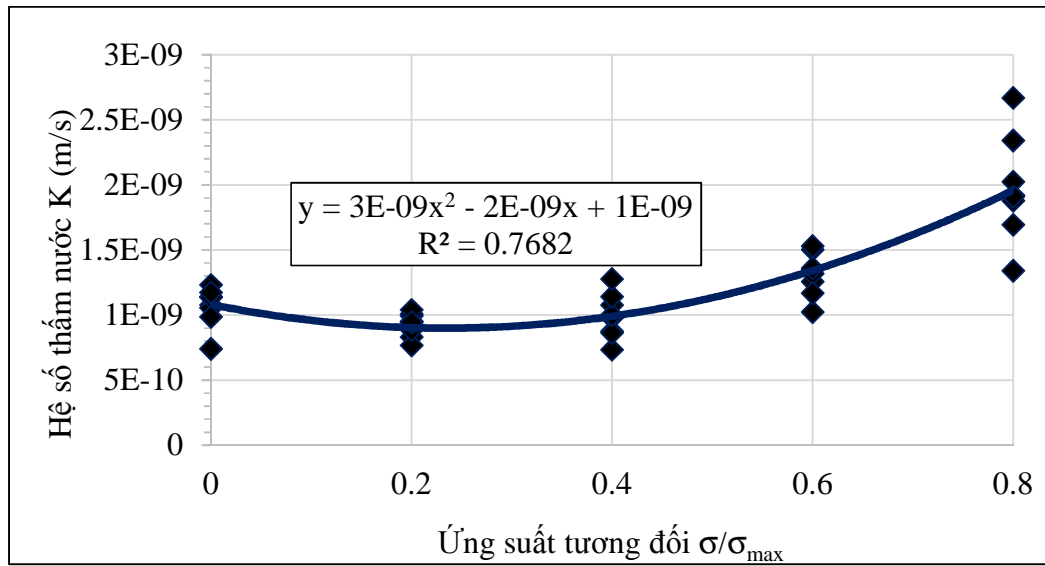
Hình 2.20 – Quan hệ giữa hệ số thấm nước của bê tông K (m/s) và ứng suất nén trực tiếp trong bê tông (Bê tông C30, áp lực nước $P = 4atm$).



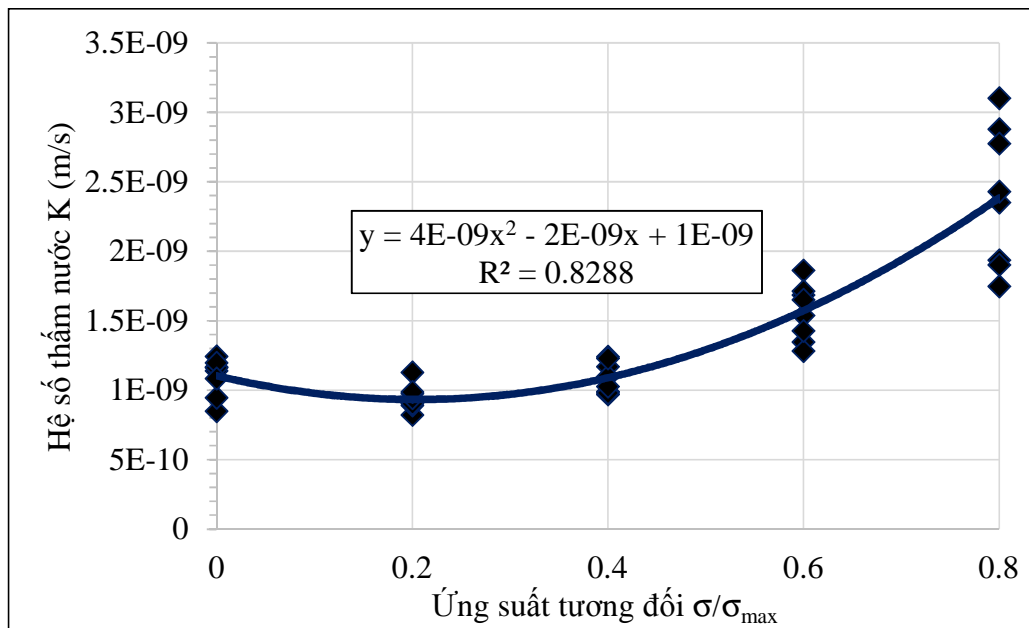
Hình 2.21 – Quan hệ giữa hệ số thấm nước của bê tông K (m/s) và ứng suất nén trực tiếp trong bê tông (Bê tông C30, áp lực nước P = 5atm).



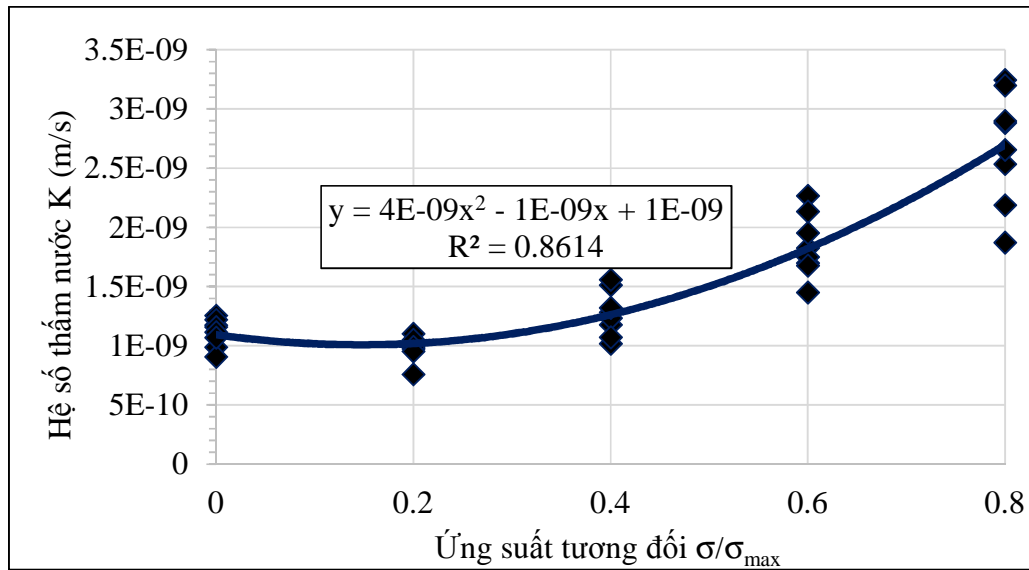
Hình 2.22 – Quan hệ giữa hệ số thấm nước của bê tông K (m/s) và ứng suất nén trực tiếp trong bê tông (Bê tông C30 theo các cấp áp lực nước khác nhau).



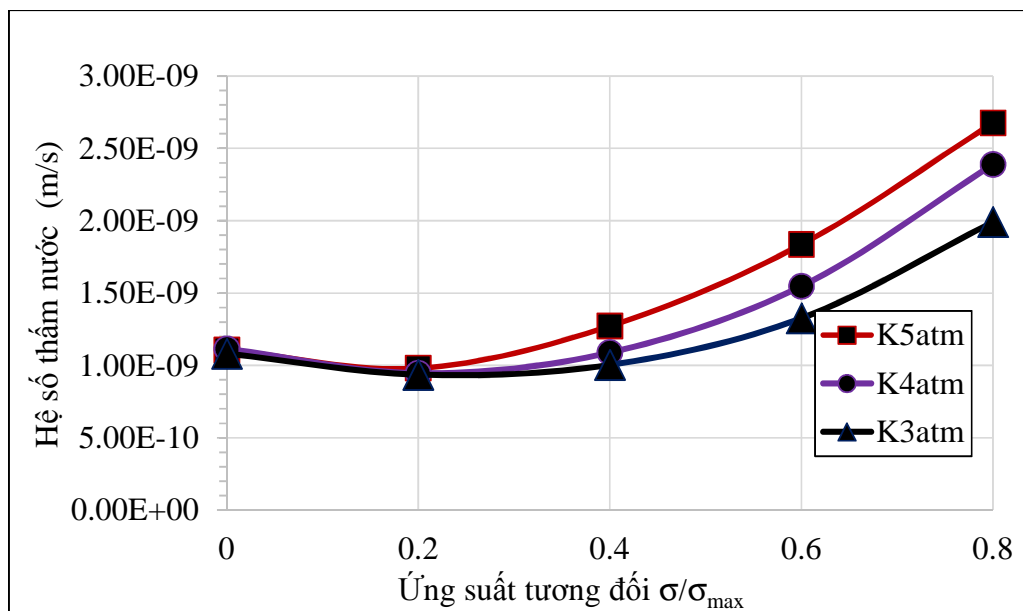
Hình 2.23 – Quan hệ giữa hệ số thấm nước của bê tông K (m/s) và ứng suất nén trực tiếp trong bê tông (Bê tông C40, áp lực nước $P = 3 \text{ atm}$)



Hình 2.24 – Quan hệ giữa hệ số thấm nước của bê tông K (m/s) và ứng suất nén trực tiếp trong bê tông (Bê tông C40, áp lực nước $P = 4 \text{ atm}$)



Hình 2.25 – Quan hệ giữa hệ số thấm nước của bê tông K (m/s) và ứng suất nén trực tiếp trong bê tông (Bê tông C40, áp lực nước P = 5 atm).



Hình 2.26 – Quan hệ giữa hệ số thấm nước của bê tông K (m/s) và ứng suất nén trực tiếp trong bê tông (Bê tông C40 theo các cấp áp lực nước khác nhau).

2.4. Kết luận chương 2

Trong chương 2, tác giả tiến hành thí nghiệm, phân tích tính thấm nước qua bê tông có xét đến yếu tố ứng suất nén. Hai cấp bê tông được lựa chọn, đó là bê tông có $f'_c = 30\text{MPa}$ và $f'_c = 40\text{MPa}$.

Kết quả thí nghiệm xác định độ chống thấm nước của bê tông chịu ứng suất nén trước cho thấy, khi ứng suất tương đối nén trước còn nhỏ $\sigma/\sigma_{\max} \leq 0.3$, gia tăng độ thấm nước khá chậm. Khi ứng suất tương đối lớn hơn $\sigma/\sigma_{\max} > 0.5$, độ thấm nước gia tăng rất nhanh. Sự xuất hiện các vết nứt phá hủy bê tông đã làm cho gia tăng thấm nước tăng nhanh hơn. Với mẫu bê tông C40, tốc độ suy giảm mác chống thấm khi ứng suất nén trước trong bê tông tăng, là thấp hơn so với mẫu bê tông C30.

Kết quả thí nghiệm đo thấm nước của bê tông chịu ứng suất nén trực tiếp cho thấy, độ thấm nước của bê tông gần như không thay đổi hoặc thay đổi chậm khi giá trị ứng suất tương đối $\sigma/\sigma_{\max} < 0.4$; sau ngưỡng này, hệ số thấm bắt đầu tăng nhanh, điều này có thể giải thích là do cấu trúc vi mô của bê tông bị phá hủy sau ngưỡng ứng suất này - vốn là ngưỡng làm xuất hiện các vùng phá hủy phân tán (theo tiếp cận của cơ học phá hủy bê tông) - làm gia tăng độ thấm nước của bê tông.

CHƯƠNG 3

THÍ NGHIỆM PHÂN TÍCH KHUẾCH TÁN ION CLORUA CỦA BÊ TÔNG CÓ XÉT ĐẾN TRẠNG THÁI ỨNG SUẤT NÉN

3.1. Đặt vấn đề

Mục đích của các thí nghiệm trong chương này là đánh giá khuếch tán ion clorua của một số loại bê tông điển hình thường dùng trong các công trình cầu ở Việt Nam. Hai loại bê tông có cường độ dự kiến lần lượt là 30 MPa (ký hiệu C30) và 40 MPa (ký hiệu C40) được xem xét trong các thí nghiệm này giống như trường hợp đánh giá độ thấm nước. Chương trình thí nghiệm bao gồm các thí nghiệm sau:

- Thí nghiệm xác định khuếch tán ion clorua của bê tông chịu ứng suất nén trước.
- Thí nghiệm xác định khuếch tán ion clorua của bê tông chịu ứng suất nén trực tiếp.

Chương này được cấu trúc thành 3 phần chính. Phần đầu chương là thí nghiệm thấm ion clorua với mẫu bê tông chịu ứng suất nén trước bao gồm nguyên tắc thử, công tác chuẩn bị vật liệu, đúc và bảo dưỡng mẫu, tiến hành thí nghiệm, xây dựng mối quan hệ giữa khuếch tán ion clorua với trạng thái ứng suất trước của bê tông. Phần thứ 2 trình bày quy trình thực hiện thí nghiệm thấm ion clorua với mẫu bê tông chịu ứng suất nén trực tiếp bao gồm các nội dung tương tự như ở phần 1. Phần cuối cùng là đề xuất mối quan hệ giữa hệ số thấm nước và hệ số khuếch tán ion clorua của bê tông.

3.2. Thí nghiệm thấm ion clorua với mẫu bê tông có xét đến trạng thái ứng suất nén trước

Thí nghiệm thấm ion clorua với mẫu bê tông chịu ứng suất nén trước được thực hiện theo TCVN 9337:2012 [8].

Thí nghiệm thấm ion clorua được thực hiện với tổ hợp mẫu 1 gồm 3 mẫu đối chứng không chịu ứng suất nén trước. 4 tổ hợp mẫu còn lại, mỗi tổ hợp gồm 3 mẫu được nén trước với các cấp $0\sigma_{\max}$; $0.3\sigma_{\max}$; $0.5\sigma_{\max}$; $0.8\sigma_{\max}$.

Chi tiết nguyên tắc thử, thiết bị và hóa chất sử dụng, công tác chuẩn bị mẫu xem Phụ lục 1.

3.2.1. Tiến hành thí nghiệm

Quá trình thực hiện được thực hiện tại Phòng Thí nghiệm Vật liệu Xây dựng của trường Đại học Giao thông vận tải, và được trình bày như sau:

Sau khi chuẩn bị mẫu thí nghiệm theo TCVN 9337:2012, tiến hành:

- Lấy mẫu thử ra khỏi bình đựng nước, lau sạch các giọt nước đọng quanh mẫu.
- Lắp mẫu thử vào khoang chứa mẫu. Dùng keo silicon trám vào khe tiếp giáp giữa mẫu thử và khoang chứa mẫu, đảm bảo bịt kín không rò rỉ nước ra ngoài.
- Đổ đầy hóa chất thử vào hai đầu khoang chứa mẫu thử, một đầu khoang đổ dung dịch NaOH 0.3N và đầu khoang kia đổ dung dịch NaCl 3%. Đậy kín hai đầu khoang bằng nút cao su để tránh bay hơi các dung dịch.
- Lắp đặt mạch điện gồm nguồn điện, vôn kế, ampe kế với khoang chứa mẫu thử theo sơ đồ tại Hình 3.1, TCVN 9337:2012.
- Nối cực âm của nguồn điện với đầu khoang chứa dung dịch NaCl, cực dương của nguồn điện với đầu khoang chứa dung dịch NaOH
- Đóng mạch điện và duy trì tại điện thế một chiều 60V.
- Theo dõi và ghi lại các thông số về cường độ dòng điện, nhiệt độ khoang chứa dung dịch NaCl trong 6h.



Hình 3.1 - Công tác chế tạo mẫu và tiến hành thí nghiệm

- Sử dụng các thiết bị đo tự động, tổng điện lượng truyền qua mẫu thử đã được tự ghi và tính toán.

3.2.2. Kết quả thí nghiệm và nhận xét

Kết quả đo thấm ion clorua của 2 loại bê tông có C30 và C40 được trình bày tại bảng 3.1 và bảng 3.2.

Bảng 3.1 - Kết quả thí nghiệm khuếch tán ion clorua của bê tông thường C30

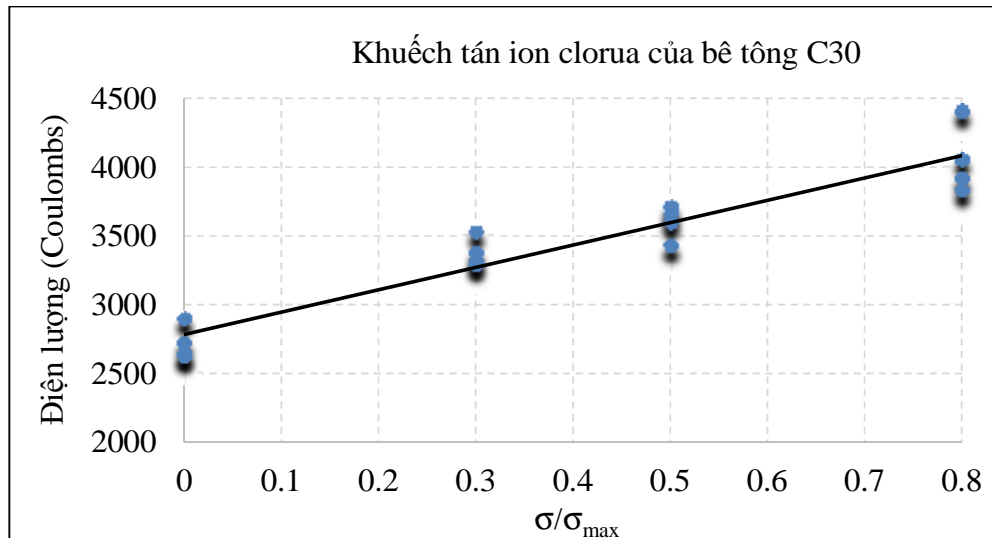
STT	Mẫu	Điện lượng (Coulombs)	Trung bình (Coulombs)
1	0%-1	2,893	2,719
2	0%-2	2,643	

3	0%-3	2,620	
4	30%-1	3,520	3,373
5	30%-2	3,316	
6	30%-3	3,284	
7	50%-1	3,702	3,592
8	50%-2	3,647	
9	50%-3	3,426	
10	80%-1	3,825	4,045
11	80%-2	3,910	
12	80%-3	4,400	

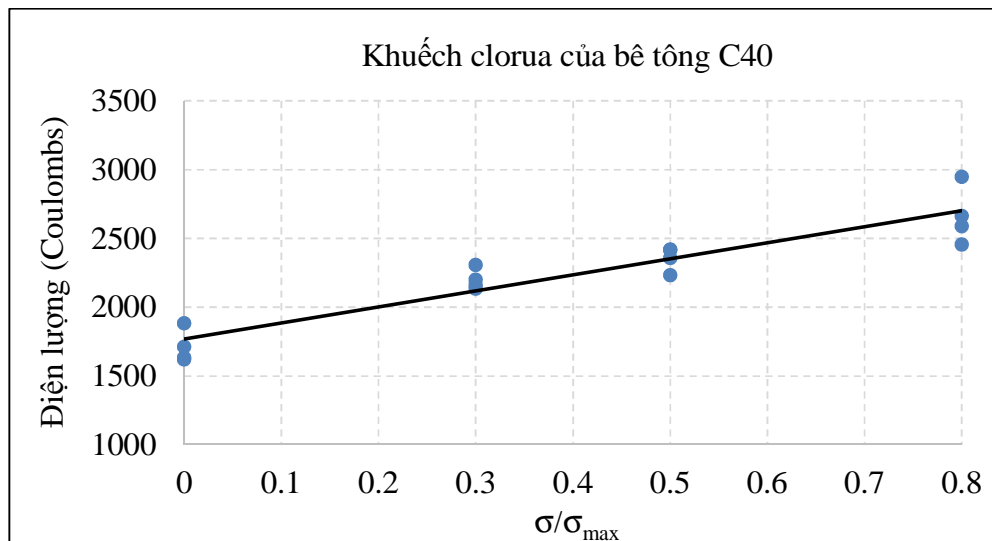
Bảng 3.2 - Kết quả thí nghiệm khuếch tán ion clorua của bê tông thường C40

STT	Mẫu	Điện lượng (Coulombs)	Trung bình (Coulombs)
1	0%-1	1,885	1,714
2	0%-2	1,622	
3	0%-3	1,635	
4	30%-1	2,309	2,202
5	30%-2	2,136	
6	30%-3	2,161	
7	50%-1	2,419	2,358
8	50%-2	2,418	
9	50%-3	2,234	
10	80%-1	2,458	2,666
11	80%-2	2,590	
12	80%-3	2,949	

Dựa vào các kết quả thí nghiệm nói trên, tiến hành vẽ biểu đồ quan hệ giữa khuếch tán ion clorua (thông qua giá trị điện lượng) của bê tông C30 và C40 khi với đến ứng suất nén trước như ở Hình 3.2 và 3.3.



Hình 3.2 - Quan hệ giữa điện lượng và ứng suất nén trước trong bê tông C30



Hình 3.3 - Quan hệ giữa điện lượng và ứng suất nén trước trong bê tông C40

Hình 3.2 và hình 3.3 cho thấy với 2 loại bê tông xem xét là C30 và C40, khuếch tán ion clorua tăng tuyến tính và khá đều.

3.2.3. Xây dựng mối quan hệ giữa hệ số khuếch tán ion clorua với trạng thái ứng suất nén trước của bê tông

Mối quan hệ giữa hệ số khuếch tán ion clorua của bê tông với điện lượng, được tính theo công thức sau:

$$D = 1.03 \times 10^{-2} \times Q^{0.84} \quad (x10^{-12}(\text{m}^2/\text{s}) \text{ theo Berke và Hicks [33]})$$

Kết quả tính hệ số khuếch tán ion clorua cho mẫu bê tông thí nghiệm C30 và C40 được trình bày trong bảng 3.3 và 3.4.

Bảng 3.3 - Hệ số khuếch tán ion clorua trung bình của mẫu bê tông C30

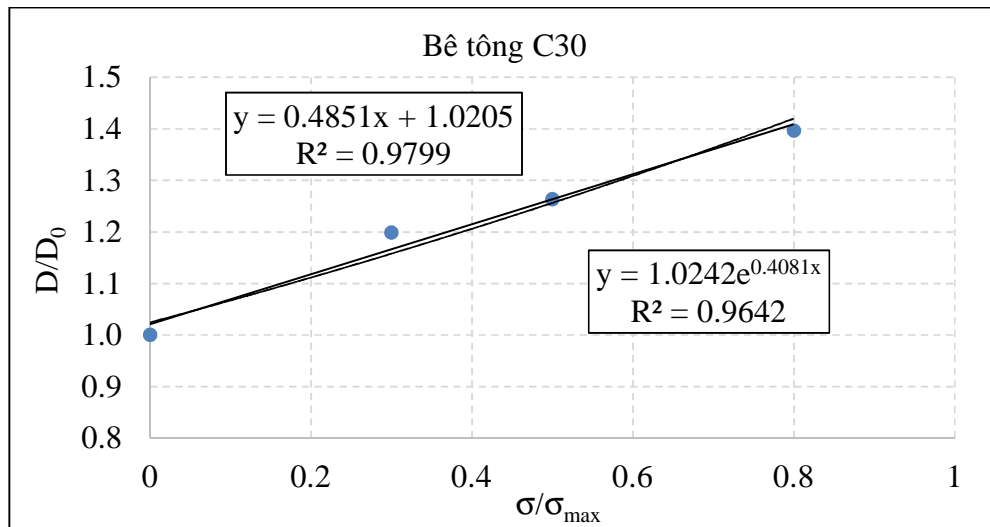
Cấp tải	C30		
	Culông	$D \times 10^{-12} (\text{m}^2/\text{s})$	D/D_0
0	2,719	7.90	1
0.3	3,373	9.47	1.20
0.5	3,592	9.98	1.26
0.8	4,045	11.03	1.40

Bảng 3.4 - Hệ số khuếch tán ion clorua của mẫu bê tông C40

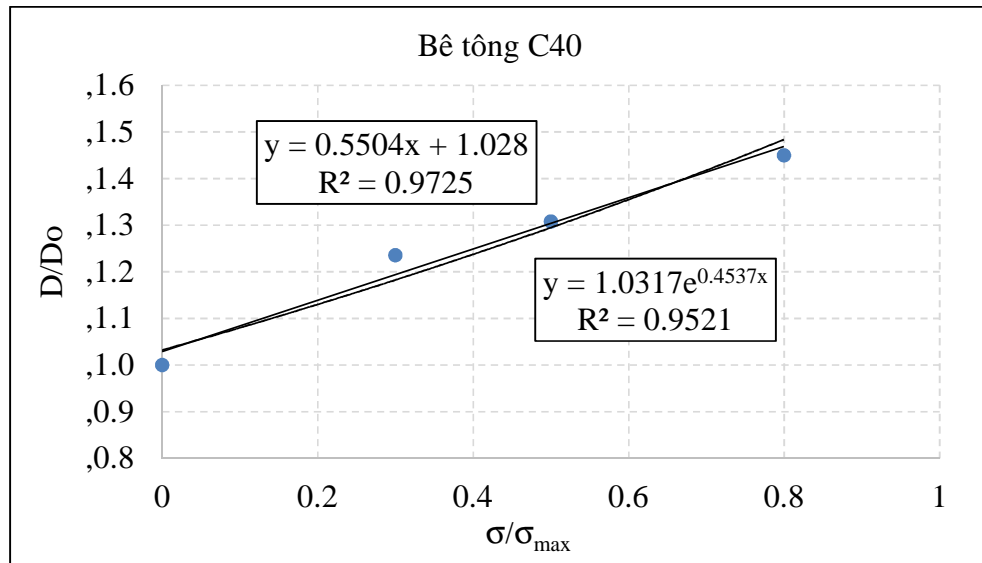
Cấp tải	C40		
	Culông	$D \times 10^{-12} (\text{m}^2/\text{s})$	D/D_0
0	1,714	5.36	1
0.3	2,202	6.62	1.24
0.5	2,358	7.01	1.31
0.8	2,666	7.77	1.45

Trong đó: D_0 là hệ số thẩm clorua ban đầu

Từ kết quả tính ở bảng 3.3 và 3.4, tác giả tiến hành xây dựng mối quan hệ gia tăng hệ số khuếch tán ion clorua qua bê tông (giá trị tương đối D/D_0) và ứng suất nén trước như ở Hình 3.4, Hình 3.5 và Hình 3.6.

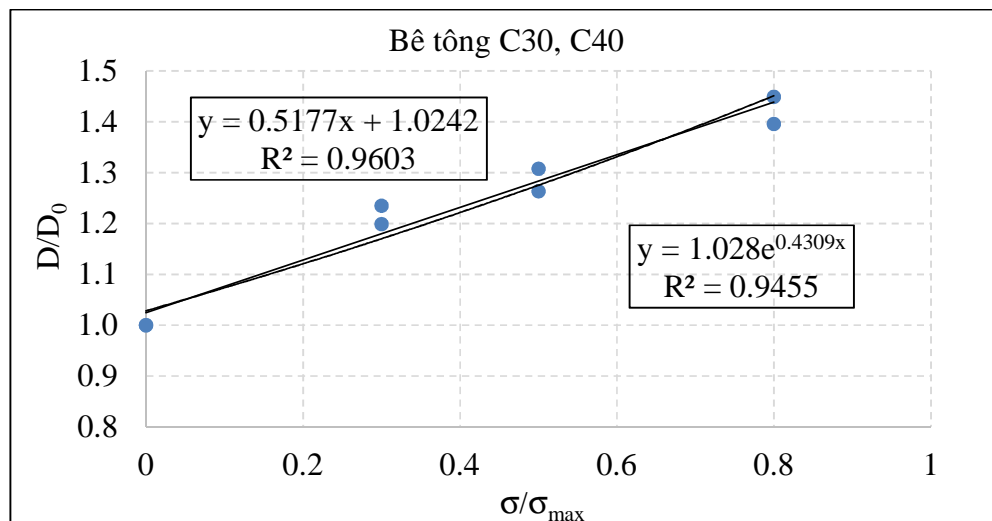


Hình 3.4 – Quan hệ giữa tỷ lệ tương đối của hệ số khuếch tán ion clorua qua bê tông với ứng suất nén trước của mẫu bê tông C30.



Hình 3.5 – Quan hệ giữa tỷ lệ tương đối của hệ số khuếch tán ion clorua qua bê tông với ứng suất nén trước của mẫu bê tông C40

Kết quả từ hình 3.4 và 3.5 cho thấy, với bê tông C30, khi ứng suất nén trước đạt đến $0.8\sigma_{\max}$ thì hệ số thấm tăng hơn 1.4 lần so với độ thấm của bê tông không chịu tải.



Hình 3.6 Quan hệ giữa tỷ lệ tương đối của hệ số khuếch tán ion clorua qua bê tông với ứng suất nén trước của cả 2 loại bê tông C30 và C40

Quy luật gia tăng hệ số thấm ion clorua theo ứng suất nén trước của cả 2 loại bê tông C30 và C40 được biểu diễn theo các công thức như sau:

$$+ \text{ Hồi quy hàm mũ: } D/D_0 = 1.028\exp(0.4309\sigma/\sigma_{\max}) \quad (3.1)$$

$$+ \text{ Hồi quy tuyến tính: } D/D_0 = 0.5177(\sigma/\sigma_{\max}) + 1.0242 \quad (3.2)$$

Các đường hồi quy trên đây cũng cho thấy quy luật gia tăng khuếch tán ion clorua của bê tông khá tương đồng với quy luật gia tăng độ thấm khí qua bê tông chịu ứng suất nén trước ((A. Djerbi Tegguer – 2013, Choinska – 2008, Tran - 2009) [15], [40], [88]).

3.3. Thí nghiệm thấm ion clorua với mẫu bê tông có xét đến trạng thái ứng suất nén trực tiếp

Tham khảo từ mô hình thí nghiệm của Junjie Wang, như đã trình bày ở mục 1.3, tiến hành thí nghiệm thấm ion clorua với mẫu bê tông chịu ứng suất nén trực tiếp có thay đổi ở thiết bị đo và kiểm soát ứng suất nén trực tiếp trong mẫu bê tông khi thực hiện thí nghiệm.

3.3.1. Nguyên tắc thử

Ứng suất tương ứng với tải trọng lớn nhất gây phá hoại mẫu được xác định từ thí nghiệm nén mẫu tương tự như mẫu dùng trong mô hình thí nghiệm thấm ion clorua chịu nén trực tiếp (Hình 3.7).

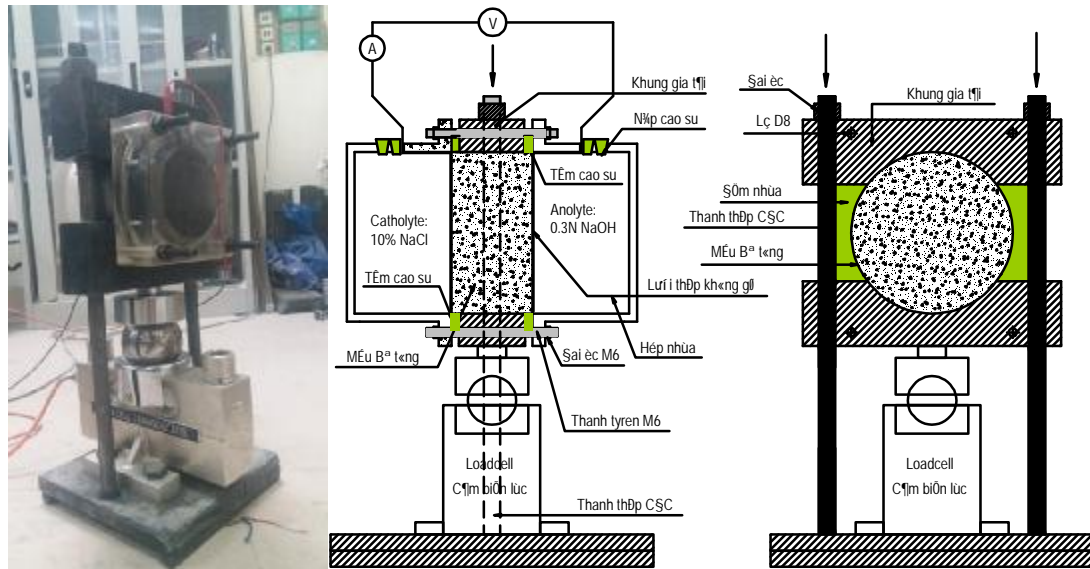


Hình 3.7 – Thí nghiệm nén xác định tải trọng lớn nhất gây phá hủy mẫu

Nguyên tắc thí nghiệm, đánh giá kết quả đo khuếch tán ion clorua qua mẫu bê tông được thực hiện tương tự như trong TCVN 9337:2012 “Bê tông nặng – Xác định khuếch tán ion clorua bằng phương pháp đo điện lượng”.

3.3.2. Thiết bị thí nghiệm và hóa chất

Ngoài các thiết bị và hóa chất đã được trình bày trong TCVN 9337:2012, trong thí nghiệm này có thêm thiết bị nén ngang được gắn liền với các thiết bị đo thấm ion clorua, qua đó thực hiện đồng thời công tác nén mẫu và công tác thấm ion clorua (Hình 3.8). Từ đó, xác định được khuếch tán ion clorua với mẫu bê tông chịu tải trọng nén trực tiếp.



Hình 3.8 - Thiết bị thí nghiệm thẩm ion clorua với mẫu bê tông chịu tải trọng nén trực tiếp

3.3.3. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm

Mẫu thí nghiệm có đường kính 100mm, chiều dày 50mm được cắt đôi và gia công từ mẫu trụ có đường kính 100mm chiều cao 200mm theo TCVN 9337: 2012.

Đầu tiên, thực hiện nén ngang, xác định ứng suất phá hoại σ_{\max} với 3 mẫu đường kính 100mm, chiều dày 50mm.

Sau đó, tiến hành thí nghiệm xác định khuếch tán ion clorua với tổ hợp mẫu 1 gồm 3 mẫu đối chứng không chịu tải trọng và 3 tổ hợp mẫu khác, mỗi tổ hợp gồm 3 mẫu được nén trước với các cấp ứng suất tương ứng $30\% \sigma_{\max}$; $50\% \sigma_{\max}$; $70\% \sigma_{\max}$.

3.3.4. Tiến hành thí nghiệm

Thí nghiệm được thực hiện tại Phòng thí nghiệm Vật liệu xây dựng của Trường Đại học Giao thông vận tải.

Để xét đến trạng thái ứng suất nén trực tiếp. Ứng suất được tạo ra bởi lực xiết từ bu lông và điều chỉnh bằng đồng hồ hiển thị lực (load cell), như trên hình 3.9 và hình 3.10. Sau khi xiết lực đến giá trị phù hợp thì lắp hai hai buồng đựng dung dịch NaCl và NaOH rồi tiến hành các bước tiếp theo như trong tiêu chuẩn TCVN.9337.2012 để đo khuếch tán ion clorua trong 6 giờ.

Tại ứng suất $\sigma/\sigma_{\max} = 0$ mẫu được lắp lên khung, không cần xiết bu lông tạo lực nén, rồi tiến hành lắp luôn buồng đựng dung dịch để thí nghiệm. Thiết bị thí nghiệm được kết nối với hệ thống máy tính để xác định tổng điện lượng truyền qua mẫu thử một cách tự động.



Hình 3.9 - Lắp đặt khung gia tải



Hình 3.10 - Kết nối máy đo điện lượng với máy tính

3.3.5. Kết quả thí nghiệm và nhận xét

Kết quả đo thấm của 2 loại bê tông C30 và C40 được trình bày ở Bảng 3.5 và Bảng 3.6.

Bảng 3.5 - Kết quả thí nghiệm khuếch tán ion clorua của mẫu bê tông C30, có xét đến trạng thái ứng suất nén trực tiếp

STT	Mẫu	Điện lượng (Coulombs)	Trung bình (Coulombs)	Tỷ lệ (%)	Hệ số khuếch tán $D \times 10^{-12}$ (m^2/s)	Tỷ số D/Do
1	0%-1	2,679	2,722	100	7.80	0.99
2	0%-2	2,753			7.98	1.01
3	0%-3	2,868			8.26	1.04
4	0%-4	2,588			7.58	0.96
5	30%-1	2,346	2,414	88.67	6.98	0.88
6	30%-2	2,239			6.71	0.85
7	30%-3	2,410			7.14	0.90
8	30%-4	2,659			7.76	0.98
9	50%-1	2,769	3,092	113.60	8.02	1.01
10	50%-2	3,326			9.36	1.18
11	50%-3	3,028			8.65	1.09
12	50%-4	3,246			9.17	1.16
13	70%-1	3,896	3,696	135.79	10.69	1.35
14	70%-2	3,655			10.13	1.28
15	70%-3	3,776			10.41	1.32
16	70%-4	3,458			9.67	1.22

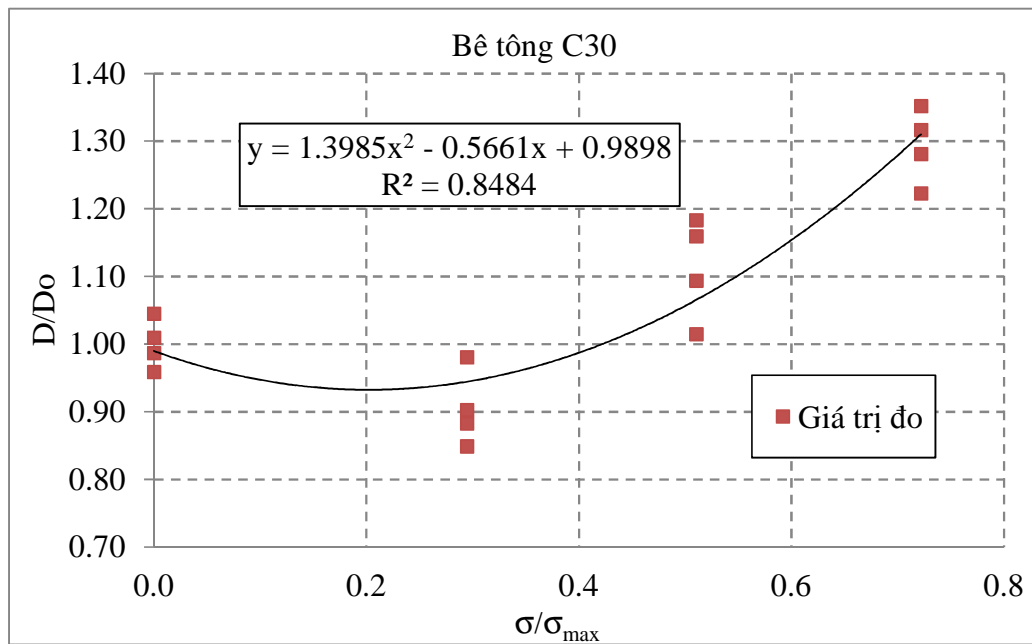
Bảng 3.6 - Kết quả thí nghiệm thấm ion clorua của mẫu bê tông C40, có xét đến trạng thái ứng suất nén trực tiếp

STT	Mẫu	Điện lượng (Coulombs)	Trung bình (Coulombs)	Tỷ lệ (%)	Hệ số khuếch tán $D \times 10^{-12}$ (m^2/s)	Tỷ số D/Do
1	0%-1	2,076	2,054	100	6.30	1.01
2	0%-2	1,948			5.97	0.96
3	0%-3	2,203			6.62	1.06
4	0%-4	1,987			6.07	0.97
5	30%-1	1,699	1,850	90.07	5.32	0.85
6	30%-2	1,849			5.72	0.92
7	30%-3	1,964			6.01	0.96
8	30%-4	1,886			5.81	0.93
9	50%-1	2,159	2,245	109.30	6.51	1.04
10	50%-2	2,074			6.29	1.01
11	50%-3	2,323			6.92	1.11
12	50%-4	2,422			7.17	1.15
13	70%-1	2,569	2,659	129.50	7.53	1.21
14	70%-2	2,718			7.90	1.27
15	70%-3	2,537			7.46	1.19
16	70%-4	2,813			8.13	1.30

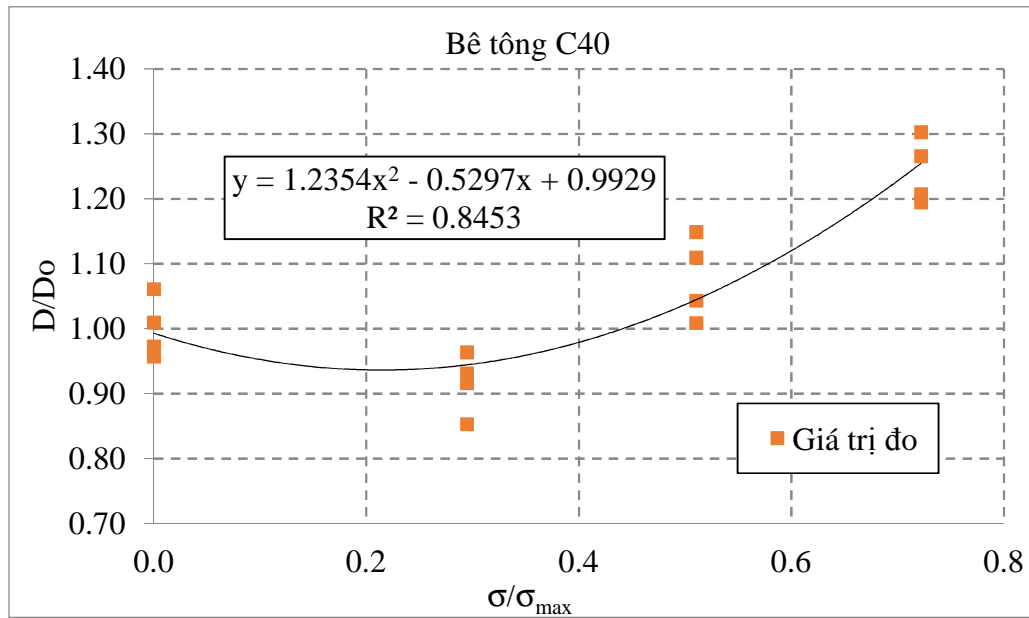
Quan hệ của khuếch tán ion clorua (C) của bê tông C30 và C40 theo thí nghiệm thấm nhanh tương ứng với các giá trị ứng suất khi nén đồng thời mẫu bê tông được biểu diễn trên hình 3.11 và hình 3.12. Hệ số khuếch tán cũng được tính

theo công thức của Berke và Hicks [33] từ điện lượng đo được của thí nghiệm thấm nhanh tương ứng.

Kết quả thí nghiệm cho thấy khuếch tán ion clorua thay đổi mạnh khi có sự xuất hiện của tải trọng tác động đồng thời. Tuy nhiên trước và sau khi gia tải khuếch tán ion clorua đều nằm trong mức “trung bình” theo TCVN 9337-2012. Tại cấp ứng suất 30% σ_{\max} , khuếch tán ion clorua trung bình giảm 11.33%. Khi tăng ứng suất lên 50% và 70% σ_{\max} , độ thấm của bê tông tăng lần lượt là 13.60% và 35.79%. Sự suy giảm độ thấm tại cấp ứng suất 30% σ_{\max} được giải thích là do ứng suất gây biến dạng vi mô và vì ứng suất vẫn nằm trong giới hạn đàn hồi, nên chưa phát sinh vết nứt, mà ngược lại làm tăng độ đặc và giảm lỗ rỗng của bê tông do đó làm giảm độ thấm. Trong trường hợp khuếch tán ion clorua giảm sẽ dẫn tới kéo dài thời gian khuếch tán ion clorua qua lớp bê tông bảo vệ để gây ăn mòn cốt thép trong các công trình bê tông cốt thép. Từ kết quả này cho thấy rằng trong kết cấu bê tông ứng suất trước, khi có ứng suất nén trong bê tông nằm trong giới hạn phù hợp có thể kéo dài thời gian khuếch tán và làm tăng tuổi thọ do quá trình khuếch tán ion clorua.



Hình 3.11 – Quan hệ giữa tỷ lệ tương đối của hệ số khuếch tán ion clorua qua bê tông với ứng suất nén trực tiếp trong bê tông C30



Hình 3.12 – Quan hệ giữa tỷ lệ tương đối của hệ số khuếch tán ion clorua qua bê tông với ứng suất nén trực tiếp trong bê tông C40

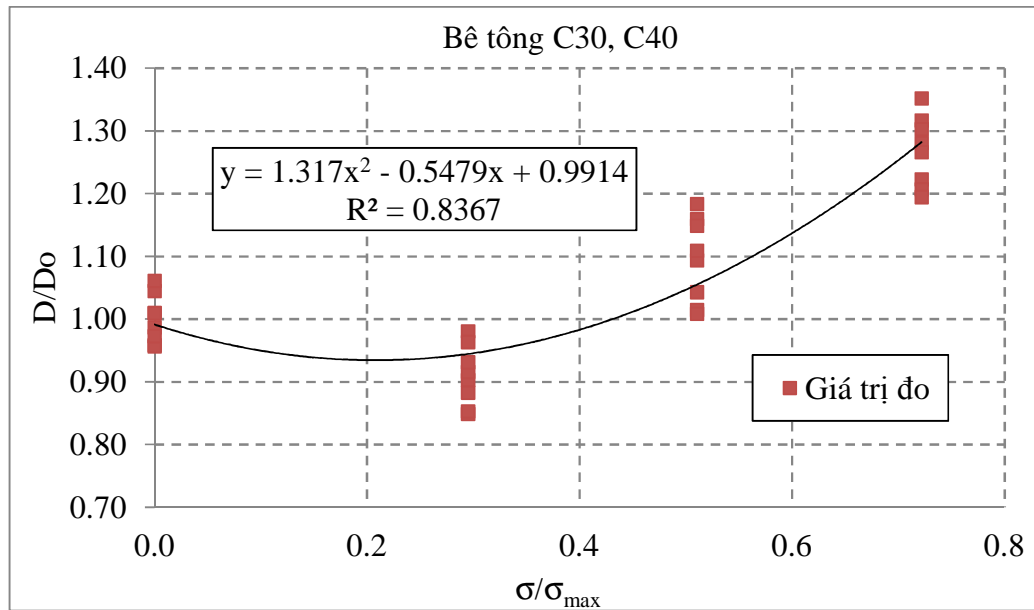
Từ hình 3.11 và 3.12 cho thấy tốc độ khuếch tán ion clorua qua bê tông giảm khi ứng suất ở mức $30\% \sigma_{\max}$ và tăng ở mức $50\% \sigma_{\max}$ và $70\% \sigma_{\max}$. Mức độ giảm ở giai đoạn đầu là khá lớn 11.33% và là cơ sở để đưa ra giải pháp kỹ thuật nhằm kéo dài tuổi thọ cho kết cấu bê tông cốt thép bằng cách sử dụng phương pháp dự ứng lực. Ở giai đoạn sau, ứng suất nén tăng làm xuất hiện thêm các hư hỏng vi mô và làm tăng dần kích thước của chúng dẫn tới làm tăng khuếch tán ion clorua. Ở giai đoạn này tốc độ khuếch tán có thể tăng thêm 20%-30%. Mức tải càng lớn thì sự hư hỏng của vật liệu càng nhiều, mức khuếch tán ion clorua càng tăng dẫn tới tốc độ suy thoái của kết cấu bê tông cốt thép trong môi trường chứa ion clorua càng nhanh.

3.3.6. Xây dựng mối quan hệ giữa hệ số khuếch tán ion clorua với trạng thái ứng suất nén trực tiếp của bê tông

Mối quan hệ giữa hệ số khuếch tán ion clorua của bê tông với điện lượng đo được, được tính theo công thức của Berke và Hicks như đã trình bày ở mục 3.2.3

Kết quả tính hệ số khuếch tán ion clorua cho mẫu bê tông thí nghiệm C30 và C40 được trình bày ở Bảng 3.3 và 3.4.

Từ kết quả đã tính toán tiến hành xây dựng mối quan hệ giữa hệ số khuếch tán ion clorua qua bê tông và ứng suất nén trực tiếp của cả 2 mẫu bê tông C30, C40.



Hình 3.13 – Quan hệ giữa tỷ lệ tương đối của hệ số khuếch tán ion clorua qua bê tông với ứng suất nén trực tiếp trong bê tông của 2 loại bê tông C30 và C40

Từ hình 3.13 cho thấy, quy luật thay đổi khuếch tán ion clorua qua bê tông chịu nén trực tiếp của 2 loại bê tông là khá tương đồng. Khi ứng suất nén thấp hơn $0.5\sigma_{\max}$ sự thay đổi độ thấm không đáng kể, nhưng khi ứng suất nén trước đạt đến $0.7\sigma_{\max}$ thì hệ số thấm tăng khoảng 1.3 lần so với độ thấm của bê tông không chịu tải.

Quy luật gia tăng hệ số thấm ion clorua theo ứng suất nén trước của 2 loại bê tông C30 và C40 được biểu diễn theo công thức như sau:

$$\text{Hồi quy hàm mũ: } D/D_0 = 1.317(\sigma/\sigma_{\max})^2 - 0.5479(\sigma/\sigma_{\max}) + 0.9914 \quad (3.3)$$

Hàm hồi quy trên đây cũng cho thấy quy luật gia tăng khuếch tán ion clorua của bê tông khá tương đồng với quy luật gia tăng độ thấm khí qua bê tông chịu ứng suất nén (Banthia & al (2006)).

3.4. Quan hệ giữa hệ số thấm nước và hệ số khuếch tán ion clorua của bê tông

3.4.1. Tính toán hệ số khuếch tán ion clorua từ hệ số thấm nước

3.4.1.1. Công thức lý thuyết của Banthia

Banthia & al (2006) đề nghị mối quan hệ giữa hệ số thấm nước K và hệ số khuếch tán ion clorua D của bê tông cốt sợi như sau:

$$K = C_k F^{0.5} S^{0.5} D ; \quad (3.4)$$

trong đó:

- S là hệ số xét đến ảnh hưởng của ứng suất nén trong bê tông, hệ số này được biểu diễn bằng tỷ lệ giữa hệ số thấm nước của bê tông có gia tải và bê tông không chịu tải:

$$S = \frac{K_{\text{có tải}}}{K_{\text{không tải}}}; \quad (3.5)$$

trong đó:

- + $K_{\text{có tải}}$: Hệ số thấm nước của bê tông không gia tải;
 - + $K_{\text{không tải}}$: Hệ số thấm nước của bê tông đã gia tải.
- F là hệ số xét đến ảnh hưởng của hàm lượng cốt sợi trong bê tông; hệ số F được biểu diễn bằng tỷ lệ giữa hệ số thấm nước của bê tông có cốt sợi và hệ số thấm nước của bê tông không có sợi.

$$F = \frac{K_{\text{có cốt sợi}}}{K_{\text{không cốt sợi}}}; \quad (3.6)$$

- C_k là hệ số xét đến tương quan giữa hệ số thấm nước và hệ số khuếch tán ion clorua của bê tông không chịu tải.

$$C_k = \frac{K_0}{D_0} \quad (3.7)$$

Khi chỉ xét đến bê tông thường ($F = 1$), công thức (3.4) trở thành:

$$K = C_k S^{0.5} D \quad (3.8)$$

3.4.1.2. Tính hệ số C_k cho các loại bê tông thí nghiệm

Hệ số khuếch tán ion clorua của bê tông được tính từ kết quả thí nghiệm thấm nhanh ion clorua theo Berke và Hicks (1992) như sau:

$$D = 1.03 \times 10^{-2} \times Q^{0.84} \times 10^{-12} (\text{m}^2/\text{s}) \quad (3.9)$$

a) Bê tông C30

Từ kết quả thí nghiệm xác định điện lượng thấm ion clorua cho bê tông C30, tính được hệ số khuếch tán ion clorua ở trạng thái bê tông không chịu tải theo công thức (3.9) như trong Bảng 3.7.

Bảng 3.7 – Hệ số khuếch tán ion clorua ở trạng thái không chịu tải của bê tông C30

C30	
Q (Culông)	D (m ² /s)
2722	7.909x10 ⁻¹²

Hệ số thấm nước đã được xác định ở chương 2 như trong Bảng 3.8.

Bảng 3.8 – Hệ số thấm nước theo các cấp áp lực của bê tông (C30) chịu tải trọng nén trực tiếp

Ứng suất tương đối σ/σ_{\max}	Hệ số thấm nước K (m/s) được tính toán theo cấp áp lực nước vào (atm)			Hệ số thấm nước trung bình K_{tb} (m/s)
	3	4	5	
0.0	1.126×10^{-09}	1.161×10^{-09}	1.152×10^{-09}	1.146×10^{-09}
0.2	9.587×10^{-10}	8.692×10^{-10}	9.299×10^{-10}	9.193×10^{-10}
0.4	1.045×10^{-09}	1.134×10^{-09}	1.241×10^{-09}	1.140×10^{-09}
0.6	1.381×10^{-09}	1.611×10^{-09}	1.745×10^{-09}	1.579×10^{-09}
0.8	2.240×10^{-09}	2.488×10^{-09}	2.786×10^{-09}	2.505×10^{-09}

Hệ số C_k cho bê tông C30 xét đến tương quan giữa hệ số thấm nước và hệ số khuếch tán ion clorua của bê tông không chịu tải được tính từ kết quả thí nghiệm thấm nước và thấm ion clorua là:

$$C_k = \frac{1.146 \times 10^{-9}}{7.91 \times 10^{-12}} = 144.93$$

Từ giá trị tính được hệ số khuếch tán ion Clorua như trong Bảng 3.9.

Bảng 3.9– Giá trị hệ số khuếch tán được tính theo hệ số thấm nước theo C_k (Bê tông C30)

Ứng suất tương đối σ/σ_{\max}	K (m/s)	S	D (m ² /s)
0.0	1.146×10^{-09}	1.00	7.91×10^{-12}
0.2	9.193×10^{-10}	0.80	7.083×10^{-12}
0.4	1.140×10^{-09}	0.99	7.888×10^{-12}
0.6	1.579×10^{-09}	1.38	9.283×10^{-12}
0.8	2.505×10^{-09}	2.18	11.691×10^{-12}

b) Bê tông C40

Từ kết quả thí nghiệm về xác định điện lượng thấm ion clorua cho bê tông C40, tính được hệ số khuếch tán ion clorua như sau theo công thức (3.9) như trong Bảng 3.10:

Bảng 3.10 – Hệ số khuếch tán ion clorua ở trạng thái không chịu tải của bê tông C40

C40	
Q (Culông)	D (m ² /s)
2054	6.243 x10 ⁻¹²

Hệ số thấm nước đã xác định ở chương 2 như trong Bảng 3.11.

Bảng 3.11 – Hệ số thấm nước theo các cấp áp lực của bê tông (C40) chịu tải trọng nén trực tiếp

Ứng suất tương đối σ/σ_{\max}	Hệ số thấm nước K (m/s) được tính toán theo cấp áp lực nước vào (atm)			Hệ số thấm nước trung bình K_{tb} (m/s)
	3	4	5	
0.0	1.08x10 ⁻⁰⁹	1.12 x10 ⁻⁰⁹	1.11 x10 ⁻⁰⁹	1.103 x10 ⁻⁰⁹
0.2	9.36 x10 ⁻¹⁰	9.46 x10 ⁻¹⁰	9.81 x10 ⁻¹⁰	9.543 x10 ⁻¹⁰
0.4	1.00 x10 ⁻⁰⁹	1.09 x10 ⁻⁰⁹	1.27 x10 ⁻⁰⁹	1.120 x10 ⁻⁰⁹
0.6	1.33 x10 ⁻⁰⁹	1.55 x10 ⁻⁰⁹	1.84 x10 ⁻⁰⁹	1.573 x10 ⁻⁰⁹
0.8	1.99 x10 ⁻⁰⁹	2.39 x10 ⁻⁰⁹	2.68 x10 ⁻⁰⁹	2.353 x10 ⁻⁰⁹

Hệ số C_k cho bê tông C40 có xét đến tương quan giữa hệ số thấm nước và hệ số khuếch tán ion clorua của bê tông không chịu tải được tính từ kết quả thí nghiệm thấm nước và thấm ion clorua bằng:

$$C_k = \frac{1.103 \times 10^{-9}}{6.24 \times 10^{-12}} = 176.72$$

Giá trị độ khuếch tán ion Clorua tính toán như trong Bảng 3.12.

Bảng 3.12 – Giá trị hệ số khuếch tán được tính theo hệ số thấm nước theo C_k (Bê tông C40)

σ/σ_{\max}	K (m/s)	S	D (m ² /s)
0.0	1.103 x10 ⁻⁰⁹	1.00	6.243 x10 ⁻¹²
0.2	9.543 x10 ⁻¹⁰	0.86	5.807 x10 ⁻¹²
0.4	1.120 x10 ⁻⁰⁹	1.02	6.290 x10 ⁻¹²
0.6	1.573 x10 ⁻⁰⁹	1.43	7.456x10 ⁻¹²
0.8	2.353 x10 ⁻⁰⁹	2.13	9.118 x10 ⁻¹²

3.4.1.3. So sánh kết quả dựa trên công thức của Banthia và kết quả thí nghiệm (Bảng 3.13 và 3.14)

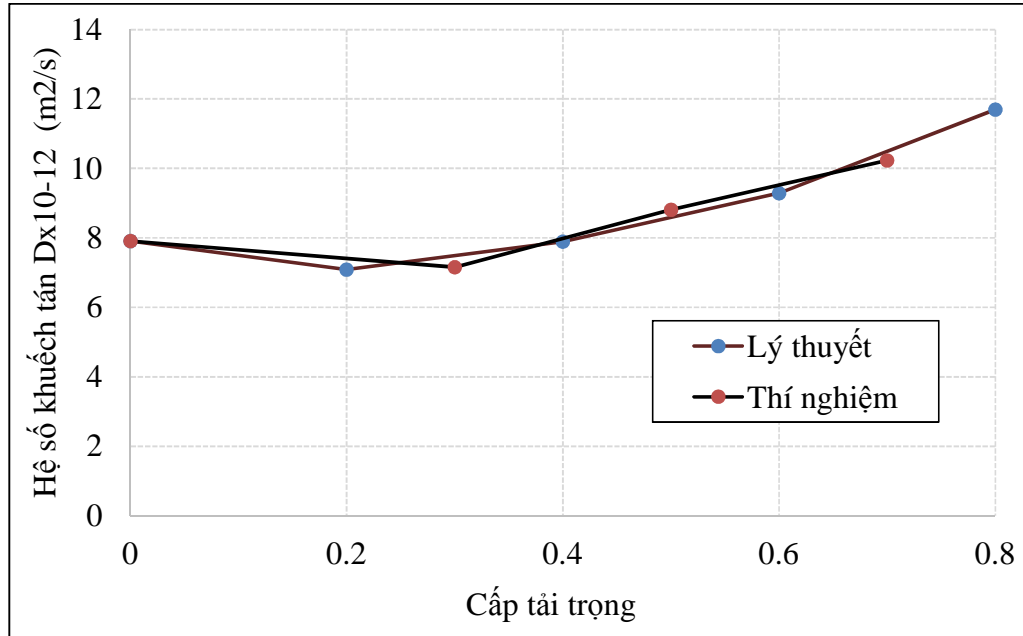
Bảng 3.13 – Hệ số khuếch tán ion clorua theo các cấp ứng suất của bê tông (C30) theo lý thuyết và thí nghiệm

Cấp ứng suất σ/σ_{\max}	C30		
	Culông	D thí nghiệm (m ² /s)	D lý thuyết (m ² /s)
0	2722	7.909 x10 ⁻¹²	7.909 x10 ⁻¹²
0.2			7.083 x10 ⁻¹²
0.3	2414	7.151 x10 ⁻¹²	
0.4			7.888 x10 ⁻¹²
0.5	3092	8.803 x10 ⁻¹²	
0.6			9.283 x10 ⁻¹²
0.7	3696	10.227 x10 ⁻¹²	
0.8			11.691 x10 ⁻¹²

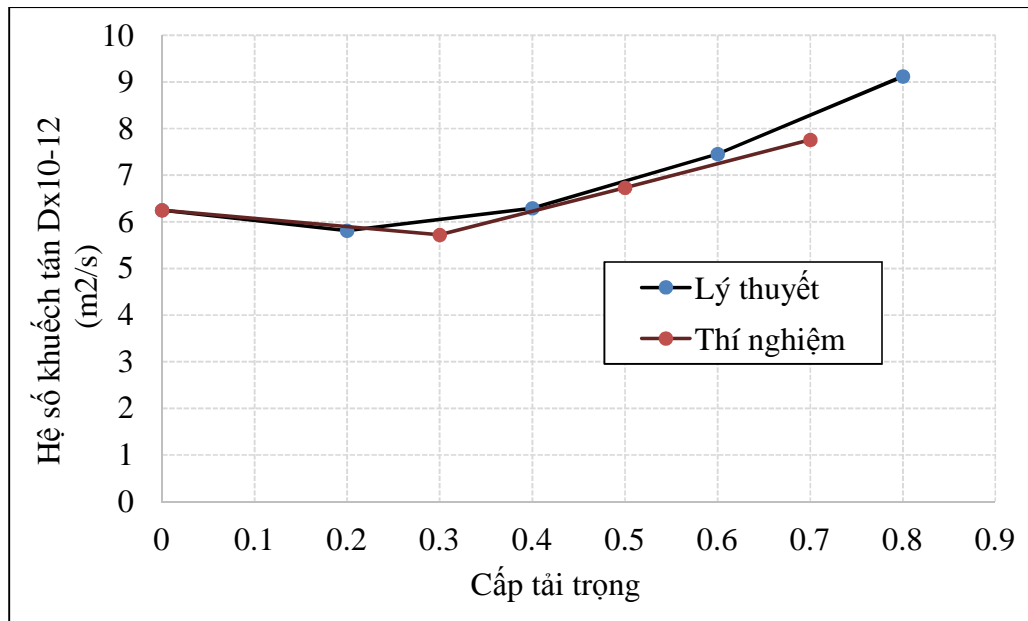
Bảng 3.14 – Hệ số khuếch tán ion clorua theo các cấp ứng suất của bê tông (C40) theo lý thuyết và thí nghiệm

Cấp ứng suất σ/σ_{\max}	C40		
	Culông	D thí nghiệm (m ² /s)	D lý thuyết (m ² /s)
0	2054	6.243 x10 ⁻¹²	6.243 x10 ⁻¹²
0.2			5.807 x10 ⁻¹²
0.3	1850	5.718 x10 ⁻¹²	
0.4			6.290 x10 ⁻¹²
0.5	2245	6.728 x10 ⁻¹²	
0.6			7.456x10 ⁻¹²
0.7	2659	7.755 x10 ⁻¹²	
0.8			9.118 x10 ⁻¹²

Từ bảng 3.13 và bảng 3.14 trên vẽ biểu đồ quan hệ giữa hệ số khuếch tán ion clorua dựa trên công thức lý thuyết Banthia và kết quả thí nghiệm, được thể hiện trên hình 3.14 và hình 3.15.



Hình 3.14 - Biểu đồ quan hệ hệ số khuếch tán ion clorua dựa trên lý thuyết Banthia và kết quả thí nghiệm của bê tông C30



Hình 3.15 - Biểu đồ quan hệ hệ số khuếch tán ion clorua dựa trên lý thuyết Banthia và kết quả thí nghiệm của bê tông C40

Qua hình 3.14 và 3.15, cho thấy, kết quả tính toán hệ số khuếch tán ion Clorua theo lý thuyết, và kết quả thí nghiệm khuếch tán ion clorua là khá sát nhau.

Kết quả thí nghiệm cho thấy, khi cấp ứng suất trong bê tông $\sigma/\sigma_{\max} \leq 0.3$, thì hệ số khuếch tán ion clorua giảm, khi cấp ứng suất này tăng lên, hệ số khuếch tán

tăng dần. Tăng mạnh khi cấp ứng suất trong bê tông vượt ngưỡng $\sigma/\sigma_{\max} \geq 0.6$.

3.4.2. Đề xuất công thức xác định hệ số khuếch tán ion clorua từ hệ số thấm nước khi xét đến ứng suất trong bê tông

Kết quả tính toán ở phần 3.4.1 cho phép đề xuất công thức tính hệ số khuếch tán ion clorua từ hệ số thấm nước như sau:

$$- \text{ Với bê tông C30: } K = 144.93 S^{0.5} D \quad (3.10)$$

$$- \text{ Với bê tông C40: } K = 176.72 S^{0.5} D \quad (3.11)$$

Với 2 công thức này có thể dễ dàng tính toán hệ số khuếch tán ion clorua từ hệ số thấm nước của một số loại bê tông thường dùng.

3.5. Kết luận chương 3

Tác giả đã tiến hành thực nghiệm phân tích tính thấm ion clorua qua bê tông chịu ảnh hưởng của tải trọng với các mẫu bê tông có $f'_c = 30\text{MPa}$ và $f'_c = 40\text{MPa}$. Có thành phần như đã thiết kế ở chương 2.

Kết quả thí nghiệm thấm ion clorua với mẫu bê tông chịu ứng suất nén trước cho thấy, khi ứng suất nén trước trong bê tông $\sigma/\sigma_{\max} \leq 0.8$ thì khuếch tán ion clorua tăng tuyến tính và khá đều; sau ngưỡng này thì khuếch tán ion clorua tăng mạnh.

Mối quan hệ giữa giữa khuếch tán ion clorua với trạng thái ứng suất nén trước của 2 loại bê tông C30, C40 mà tác giả luận án xây dựng, đề xuất là:

$$D/D_0 = 1.028 \times \exp(0.4309 \times (\sigma/\sigma_{\max})); \quad (3.12)$$

trong đó: D_0 là hệ số khuếch tán ion Clorua của bê tông (không xét tới tải trọng nén)

Mối quan hệ giữa giữa khuếch tán ion clorua với trạng thái ứng suất nén trực tiếp của 2 loại bê tông C30, C40 mà tác giả luận án xây dựng, đề xuất là:

$$D/D_0 = (1.317 \times (\sigma/\sigma_{\max})^2 - 0.5479(\sigma/\sigma_{\max}) + 0.9914 \quad (3.13)$$

Trong đó: D_0 là hệ số khuếch tán ion Clorua của bê tông (không xét tới tải trọng nén)

Kết quả thí nghiệm thấm ion clorua với mẫu bê tông chịu tải trọng trực tiếp cho thấy, khuếch tán ion clorua thay đổi mạnh khi có sự xuất hiện của tải trọng tác động đồng thời. Tuy nhiên trước và sau khi gia tải khuếch tán ion clorua đều nằm trong mức “trung bình” theo TCVN 9337-2012. Sự suy giảm độ thấm tại ứng suất 30% σ_{\max} được giải thích là do ứng suất gây biến dạng vi mô và vì ứng suất vẫn nằm

trong giới hạn đàn hồi nên chưa phát sinh vết nứt mà ngược lại làm tăng độ đặc và giảm lỗ rỗng của bê tông, do đó làm giảm độ thấm. Tốc độ khuếch tán ion clorua qua bê tông giảm khi ứng suất ở mức $0.3\sigma_{\max}$ và tăng ở mức $0.5\sigma_{\max}$ và $0.7\sigma_{\max}$.

Cuối cùng, tác giả luận án đề xuất mối quan hệ giữa hệ số thấm nước và hệ số khuếch tán ion clorua của bê tông như sau:

- Với bê tông C30: $K = 144.93 S^{0.5} D$
- Với bê tông C40: $K = 176.72 S^{0.5} D$

CHƯƠNG 4

TÍNH TOÁN DỰ BÁO TUỔI THỌ CÔNG TRÌNH CẦU BÊ TÔNG CỐT THÉP CÓ XÉT ĐẾN ẢNH HƯỞNG ĐỒNG THỜI CỦA HIỆU ỨNG TẢI TRỌNG VÀ TÁC ĐỘNG CỦA MÔI TRƯỜNG

4.1. Đặt vấn đề

Mục đích của chương này là xây dựng mô hình dự báo ảnh hưởng của tải trọng và môi trường đến tuổi thọ của các kết cấu công trình cầu bê tông cốt thép theo tiêu chí khởi đầu ăn mòn cốt thép trong bê tông.

Các kết quả thí nghiệm trong chương 3 sẽ được sử dụng làm cơ sở thiết lập các mô hình dự báo tuổi thọ công trình. Các mô hình này sẽ được ứng dụng trong dự báo tuổi thọ một công trình cầu cụ thể.

Chương này được cấu trúc thành 2 phần chính. Phần đầu là phần xây dựng mô hình dự báo có xem xét đến đồng thời ảnh hưởng của tải trọng và điều kiện môi trường. Phần thứ 2 là các tính toán dự báo tuổi thọ với một công trình cầu cụ thể có xét đến sự thay đổi của chiều dày lớp bê tông bảo vệ, nồng độ ion clorua bề mặt, ứng suất nén trước và nén trực tiếp trong bê tông.

4.2. Giới hạn phạm vi nghiên cứu

Trong phạm vi nghiên cứu của luận án này, chỉ đề cập tới tuổi thọ sử dụng theo sự khuếch tán ion clorua vào trong kết cấu cầu bê tông gây ăn mòn cốt thép.

Tuổi thọ sử dụng của cầu bê tông cốt thép do khuếch tán ion clorua là thời gian từ khi bắt đầu tiếp xúc với môi trường có ion clorua đến khi ion clorua gây ra ăn mòn cốt thép dẫn tới nứt bê tông bảo vệ hoặc tới khi ăn mòn gây ra mất mát diện tích tiết diện cốt thép làm giảm sức kháng xuống tới mức gây nguy hiểm cho trạng thái giới hạn chịu lực.

Tuổi thọ sử dụng của cầu bê tông cốt thép tính theo sự khuếch tán ion clorua sẽ được tính bằng năm và là tổng của hai giai đoạn kế tiếp nhau: Giai đoạn khởi đầu ăn mòn và giai đoạn lan truyền ăn mòn.

Trong phạm vi luận án này, liên quan đến phá hoại dài hạn của công trình do bị ăn mòn, chỉ xem xét đánh giá tuổi thọ của một công trình giao thông bằng bê tông cốt thép như là thời gian bắt đầu có sự ăn mòn các cốt thép trong bê tông do sự khuếch tán ion clorua vào bê tông hay chính xác hơn là thời gian mà nồng độ ion clorua (C) ở bề mặt các cốt thép đạt đến giá trị tới hạn (C_{cr}). Sự thay đổi của tuổi thọ công trình theo tiêu chí ăn mòn này được biểu diễn theo các thay đổi về bề dày lớp

bê tông bảo vệ và độ thấm của bê tông liên quan đến hệ số khuếch tán ion clorua vào trong bê tông có xét đến yếu tố ứng suất.

4.3. Xây dựng mô hình dự báo tuổi thọ công trình cầu bê tông cốt thép

4.3.1. Tổng quát

Tuổi thọ các công trình giao thông được định nghĩa là khoảng thời gian tính từ lúc đưa công trình vào khai thác đến lúc không còn sử dụng bình thường được. Vì độ bền của 1 công trình được đánh giá cả ở ba cấp tiếp cận là cấp độ công trình, cấp độ kết cấu và cấp độ vật liệu chế tạo, do đó để đánh giá tuổi thọ của công trình giao thông cần thiết phải đánh giá cùng lúc các nguy cơ xuất hiện phá hoại ở cả 3 tiếp cận này. Lúc đó, ngoài việc sử dụng các mô hình xác định cho việc đánh giá sự phá hoại khác nhau, ở các trường hợp khác nhau thì cần thiết phải sử dụng các mô hình xây dựng theo lý thuyết độ tin cậy để có một phân tích đánh giá chính xác tuổi thọ của công trình.

Trong bài báo “Mô hình số tuổi thọ của bê tông cốt liệu tái chế do tác nhân ăn mòn ion clorua” của Nathan D. Stambaugh và cộng sự [70] cho rằng, thời gian để ăn mòn bắt đầu xảy ra là một hàm phụ thuộc vào các tính chất vận chuyển của bê tông, các yếu tố hình học, các điều kiện biên tồn tại trong một môi trường nhất định và ngưỡng nồng độ ion clorua cần thiết để bắt đầu xảy ra quá trình ăn mòn cốt thép (nồng độ ion clorua giới hạn). Thời gian khởi đầu ăn mòn được xác định như là thời gian để ion clorua từ môi trường xung quanh xuyên qua lớp phủ bê tông và tích tụ đến một ngưỡng nồng độ đủ để cho bề mặt cốt thép bắt đầu xảy ra ăn mòn. Nồng độ ion clorua trên ngưỡng ion clorua giới hạn tại các vị trí làm giảm độ pH gần cốt thép, dẫn đến sự lắng đọng của các lớp oxit bảo vệ và hiện tượng ăn mòn trên các thanh cốt thép.

Trong chương 1 đã trình bày, cơ chế vận chuyển ion clorua có thể diễn ra theo nhiều cơ chế bao gồm: khuếch tán ion clorua dưới ảnh hưởng của một gradien nồng độ, sức hút mao dẫn, sự thấm thấu do chênh lệch áp lực, di trú trong một vùng điện trường. *Trong đó sự khuếch tán ion clorua là cơ chế chính của quá trình vận chuyển ion clorua vào bê tông cho các mô hình xây dựng trong đề tài nghiên cứu này.* Nó cho thấy mối quan hệ giữa nồng độ ion clorua, hệ số khuếch tán và thời gian các ion clorua chuyển động ngẫu nhiên trong bê tông có thể được mô tả bằng định luật thứ hai của Fick về khuếch tán (phương trình 1.27).

Phương trình (1.27) được giải để tìm thời gian t sao cho $C(x,t)$ bằng ngưỡng nồng độ gây ăn mòn thép. Phương trình trên có thể được giải bằng nhiều cách như giải tích, sai phân hữu hạn, phần tử hữu hạn,... Trong đề tài nghiên cứu này, nghiên

cứu sinh sử dụng phương pháp giải tích để giải quyết các bài toán trong những trường hợp khác nhau.

Các thông số đầu vào trong bài toán là quan trọng. Luận án này sẽ dựa trên những thông số đầu vào từ các thí nghiệm ở chương 2, chương 3 cùng với kết quả của các tác giả trong và ngoài nước. Các thông số đó sẽ được kiến nghị sử dụng cho mô hình sẽ được xây dựng.

4.3.2. Các tham số của mô hình

4.3.2.1. Hệ số khuếch tán ion clorua

Hệ số khuếch tán ion clorua là tham số của vật liệu, hệ số này giữ vai trò cốt yếu trong dự báo tuổi thọ của kết cấu bê tông theo tiêu chí ăn mòn cốt thép có nguyên nhân từ sự khuếch tán ion clorua và bê tông. Hệ số khuếch tán ion clorua phụ thuộc vào tỷ lệ nước / xi măng, nhiệt độ, độ ẩm của môi trường, trạng thái, cấp tải trọng tác dụng cũng như các chất phụ gia. Trong đề tài này, ở chương 3 đã xây dựng mối quan hệ giữa hệ số khuếch tán ion clorua theo các trạng thái và cấp chịu tải trọng khác nhau.

Với các cầu vừa xây dựng xong có thể làm thí nghiệm để xác định giá trị đặc trưng của hệ số khuếch tán D .

4.3.2.2. Sự tích tụ nồng độ ion clorua trên bề mặt bê tông

Nồng độ ion clorua trên bề mặt bê tông tiếp xúc với môi trường biển phụ thuộc vào vị trí địa lý của vùng biển cũng như khoảng cách so với mực nước biển. Theo vị trí của kết cấu bê tông cốt thép trong môi trường biển, năm 1999, A. Costa & J.Appleton [44], chia thành 3 vùng:

- Vùng thủy triều lên xuống (là vùng nằm trong biên độ thủy triều hoặc là ở trong phạm vi 1m so với mực nước cao nhất của thủy triều)
- Vùng ảnh hưởng bởi sóng biển (là vùng nằm cao hơn mực nước cao nhất của thủy triều 1m, nhưng đôi khi tiếp xúc với bụi nước biển)
- Vùng không khí biển ở ven biển.

Các kết quả trong nghiên cứu hiện này đã chỉ ra rằng nồng độ ion clorua trên bề mặt bê tông tiếp xúc với một môi trường biển được tích tụ sau đó tăng lên cùng với thời gian.

Kết quả nghiên cứu của Swamy và cộng sự [84] cho rằng, nồng độ ion clorua bề mặt tỉ lệ với căn bậc hai của thời gian, thể hiện sự gia tăng của C_s có xu hướng yếu đi theo thời gian. A.Costa và cộng sự [44] cũng kết luận rằng, sự gia tăng của C_s có xu hướng giảm dần theo thời gian. Tuy nhiên, họ thấy rằng C_s không phải luôn luôn

tỉ lệ với căn bậc hai của thời gian t và họ đề nghị mối quan hệ giữa C_s và t thể hiện theo phương trình:

$$C_{st} = C_{s0} \cdot t^n \quad (4.1)$$

Trong đó, C_{s0} là nồng độ ion clorua bề mặt sau thời gian 1 năm, n là hệ số thực nghiệm. Theo các điều kiện môi trường khác nhau các giá trị C_{s0} (theo % khối lượng bê tông) và n cho bê tông điển hình thường được lấy như sau (A. Costa & J.Appeleton [44]):

- Vùng ảnh hưởng bởi sóng biển: $C_{s0} = 0.21$; $n = 0.47$
- Vùng thủy triều lên xuống: $C_{s0} = 0.38$; $n = 0.37$
- Vùng khí hậu ven biển: $C_{s0} = 0.12$; $n = 0.54$

Theo Lifecon 2003 [86] nồng độ ion clorua trên bề mặt bê tông (C_s) phụ thuộc vào độ cao của kết cấu so với mực nước biển. Lifecon 2003 đưa ra đối với vùng thủy triều (cao hơn mực nước biển từ 0-3m) giá trị trung bình của $C_s = 0.51\%$ khối lượng chất dính kết, độ lệch chuẩn là 0.23%.

Ở Hàn Quốc, nghiên cứu của Seung-Woo Pack, Min-Sun Jung, trên tạp chí “Cement and Concrete Research 40 (2010) 302–312” [58] đưa ra quan hệ nồng độ ion clorua bề mặt là một hàm logarit tự nhiên của thời gian theo dạng:

$$C_s(t) = \alpha[\ln(\beta t + 1)] + k; \quad (4.2)$$

trong đó:

- $C_s(t)$ là nồng độ ion clorua bề mặt tại thời điểm t (% chất kết dính);
- α, β, k là các hằng số thực nghiệm phụ thuộc loại bê tông.

Nồng độ ion clorua trên bề mặt bê tông không những phụ thuộc vào vị trí địa lý của các vùng biển, mà còn phụ thuộc vào đặc tính của bê tông (có hay không xử lý bề mặt) và khí hậu của khu vực (do mưa rửa trôi). Để đơn giản luận án này sẽ chọn quy luật tích tụ nồng độ ion clorua bề mặt theo A. Costa & J.Appeleton dùng phương trình 4.1, nhưng ngưỡng nồng độ ion clorua tới hạn (C_{cr}) sẽ lấy theo các vùng biển của Việt Nam.

4.3.2.3. Ngưỡng nồng độ ion clorua gây ăn mòn thép trong bê tông

Ngưỡng nồng độ ion clorua gây ăn mòn thép còn gọi là ngưỡng nồng độ ion clorua tới hạn (C_{cr}) đóng một vai trò quan trọng. Ngưỡng nồng độ ion clorua gây ăn mòn thép được định nghĩa là hàm lượng ion clorua cần thiết tại bề mặt cốt thép để gây phá vỡ màng thụ động của thép và bắt đầu gây ăn mòn. Nó thường được biểu thị theo tỷ lệ phần trăm của khối lượng bê tông hoặc khối lượng chất kết dính.

Theo các công bố gần đây trên thế giới (RILEM 14 (2005) – A.Sara & E. Vesikari) [79], A. Costa & J.Appleton -1999) [44] thì giá trị nồng độ ion clorua ở bề mặt kết cấu bê tông cốt thép C_{cr} có thể thay đổi từ 0.3 đến 0.4% theo khối lượng xi măng. Các cầu ở Anh ngưỡng nồng độ ion clorua tới hạn đã đo được khoảng từ 0.2% đến 1.5% khối lượng xi măng. Tiêu chuẩn Anh giới hạn nồng độ ion clorua dưới mức 0.4% khối lượng xi măng cho các kết cấu bê tông cốt thép và mức 0.1% cho các kết cấu bê tông cốt thép dự ứng lực.

Một số lượng lớn các nghiên cứu đã tập trung vào việc định lượng C_{cr} , nhưng các giá trị đo thường phân tán. Lý do cho sự phân tán của C_{cr} bao gồm các phương pháp đo lường, phương pháp biểu diễn C_{cr} , điều kiện của giao diện thép bê tông và ảnh hưởng của các yếu tố môi trường.

a) Xác định thời điểm khởi đầu ăn mòn

Thời điểm bắt đầu ăn mòn có thể được phát hiện bằng cách theo dõi dòng điện macrocell giữa cực dương và cực âm, đo điện thế nửa pin hoặc theo dõi tốc độ ăn mòn đo bằng kỹ thuật phân cực hoặc phương pháp trở kháng AC.

b) Đo hàm lượng ion clorua trong bê tông ở sát bề mặt thép

Đo hàm lượng ion clorua để xác định C_{cr} được thực hiện sau khi ăn mòn bắt đầu xảy ra. Có hai giai đoạn trong việc xác định hàm lượng ion clorua: lấy mẫu và phân tích. Lấy mẫu thường liên quan đến mài bê tông và thu thập bột ở các độ sâu khác nhau. Điều rất cần thiết là phải đảm bảo rằng mẫu bột thu được phải có lượng vữa xi măng đủ cao hơn bột cốt liệu.

Phương pháp sử dụng rộng rãi nhất để đo tổng hàm lượng ion clorua là sử dụng chiết xuất axit hòa tan, trong đó người ta cho rằng cả ion clorua liên kết và ion clorua tự do đều hòa tan trong axit. Đo ion clorua hòa tan trong axit (tổng lượng ion clorua) có thể được thực hiện bằng cách sử dụng điện cực chọn lọc ion clorua hoặc bằng cách chuẩn độ, được mô tả trong tiêu chuẩn Anh Quốc 1881 phần 124.

c) Biểu diễn của ngưỡng nồng độ ion clorua

Ngưỡng nồng độ ion clorua gây ăn mòn C_{cr} biểu diễn qua tổng hàm lượng ion clorua là cách tiếp cận rộng rãi và phổ biến nhất trong các tiêu chuẩn.

Năm 2012 trong báo cáo tổng kết của Cục Quản lý đường cao tốc liên bang (FHWA) trên chương trình tính năng dài hạn của cầu đã đưa ra “Tóm tắt các tiêu chuẩn xác định giới hạn tối đa cho phép của ion clorua trong vữa và bê tông dự ứng lực”, bảng 4.1 [55].

Theo tiêu chuẩn EN206 concrete [32], giá trị giới hạn của nồng độ ion clorua được lấy như sau:

- Với các kết cấu bằng bê tông cốt thép thường: $C_{cr} = 0.4 \%$ theo khối lượng xi măng hay xấp xỉ bằng 0.05 đến 0.08 % theo khối lượng bê tông (KLBT).

- Với kết cấu bằng bê tông dự ứng lực: $C_{cr} = 0.2 \%$ theo khối lượng xi măng hay xấp xỉ bằng 0.025 đến 0.035 % theo khối lượng bê tông (KLBT).

Mối quan hệ thực tế giữa sự ăn mòn và hàm lượng ion clorua trong bê tông bị ảnh hưởng bởi nhiều thông số như:

- Loại, thành phần cấu tạo của xi măng
- Các phụ gia
- Độ ẩm và nhiệt độ
- Độ xốp và cấu trúc lỗ rỗng của bê tông
- Tính chất của bề mặt cốt thép
- Sự hiện diện của các chất khác trong dung dịch lỗ rỗng (ví dụ như chất kiềm)

Bảng 4.1 - Tóm tắt các tiêu chuẩn xác định giới hạn tối đa cho phép của nồng độ ion clorua trong vữa và bê tông dự ứng lực

STT	Nguồn	Mục	Vật liệu	Giới hạn	Loại ion clorua
1	AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications, xuất bản lần thứ, năm 2012	Mục 10, Dự ứng lực, Bảng 10.9.3.2	Vữa	0.08 % khối lượng bê tông	Tổng ion clorua (hòa tan trong axit) theo ASTM C1152
2	Chi tiết kỹ thuật cho vữa của các kết cấu kéo trước, PTIM55.01.03	Mục 3.3.4, hàm lượng ion clorua	Vữa	0.08% khối bê tông	Tổng ion clorua (hòa tan trong axit) theo ASTM C1152
3	Chỉ dẫn độ bền của bê tông, ACI201.2R-08	Chương 7, Ăn mòn của kim loại và các vật liệu khác đặt trong bê tông,	Bê tông dự ứng lực	0.08% khối bê tông	Tổng ion clorua (hòa tan trong axit) theo ASTM C1152

		bảng trong mục 7.2.3.4		0.06% khối bê tông	Tổng ion clorua (hòa tan trong nước) theo ASTM C1218
4	Bảo vệ kim loại trong bê tông chống lại ăn mòn, ACI 222R-01	Chương 3, bảng 3.1	Bê tông dự ứng lực	0.08% khối bê tông	Tổng ion clorua (hòa tan trong axit) theo ASTM C1152
				0.06% khối bê tông	Tổng ion clorua (hòa tan trong nước) theo ASTM C1218
5	ACI 318M-11	Chương 3, bảng R4.3.1	Bê tông dự ứng lực	0.06% khối bê tông	Tổng ion clorua (hòa tan trong nước) theo ASTM C1218
6	Vữa cho các bó cáp dự ứng lực- Các yêu cầu cơ bản, tiêu chuẩn châu Âu EN 447	Chương 6, mục 6.1	Vữa	0.10% khối bê tông	Sulfate $\leq 4,5\%$ khối lượng xi măng; Sulfua $\leq 0.01\%$ khối lượng xi măng.
7	Giới hạn hàm lượng ion clorua, hiệp hội tiêu chuẩn Canada (CSA) A23.1.09	Mục 4.1.1.2	Bê tông dự ứng lực	0.06% khối bê tông	Hòa tan trong nước
8	Hàm lượng ion clorua của bê tông	Bảng 1, Giá trị tối đa của hàm	Bê tông	0.5kg/m ³ ion clorua	Tổng Ion clorua

	tươi, hiệp hội bê tông tươi New Zealand, Inc.	lượng ion clorua	dự ứng lực	trong bê tông hoặc 0.14% khối lượng bê tông	(hòa tan trong axit)
9	Chỉ dẫn thiết kế và xây dựng của vữa đối với kết cấu bê tông dự ứng lực, hiệp hội kỹ sư bê tông dự ứng lực Nhật bản	Tập 1, mục 4.2	Vữa	0.3kg/m ³ ion clorua trong vữa hoặc 0.023% khối lượng bê tông	Tổng Ion clorua (hòa tan trong axit)
10	Quy tắc thực hành cho sản xuất bê tông đúc sẵn, sở nhà Hồng Kông	Chương 2, bảng 2.3	Bê tông dự ứng lực	0.1% khối lượng bê tông	Tổng Ion clorua (hòa tan trong axit)

Trong chương trình life 365 Michael Thomas [22] đã sử dụng giá trị $C_{cr} = 0,05\%$ khối lượng của bê tông, giá trị này được lấy từ các kết quả nghiên cứu hàm lượng ion clorua từ 0.20% đến 0.40% khối lượng xi măng tương đương khoảng 0.03% đến 0.07% khối lượng bê tông.

Dựa trên các phân tích ở trên, trong luận án này tác giả kiến nghị giá trị ngưỡng nồng độ ion clorua gây ăn mòn cốt thép được lấy như sau:

- Với bê tông cốt thép thường $C_{cr} = 0.05\%$ (theo khối lượng bê tông)
- Với bê tông dự ứng lực $C_{cr} = 0.025\%$ (theo khối lượng bê tông)

4.3.3. Mô hình dự báo tuổi thọ công trình bằng bê tông cốt thép theo tiêu chí khởi đầu ăn mòn cốt thép

Năm 1975, Crank [45] đưa ra mô hình toán học cho quá trình khuếch tán dựa trên định luật Fick II. Trong trường hợp hệ số khuếch tán là hằng số, nồng độ ion clorua trên bề mặt cốt thép ở công thức 4.1 với điều kiện biên $C_0 = C(0,t)$ (tức hàm lượng ion clorua bề mặt là hằng số) và điều kiện ban đầu $C = 0$, $x > 0$ và $t = 0$, được xác định bởi:

$$C_x = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right); \quad (4.3)$$

trong đó:

- C_x là nồng độ ion clorua ở chiều sâu x ;
- erf là hàm sai số;
- C_s là nồng độ ion clorua ở bề mặt bê tông của kết cấu;
- t là thời gian xem xét;
- x là chiều sâu tính từ bề mặt bê tông của kết cấu ;
- D là hệ số khuếch tán ion clorua.

Quá trình ăn mòn cốt thép bắt đầu khi $C_x = C_{cr}$, khi đó $x = h$ (chiều dày lớp bê tông bảo vệ) ta có :

$$C_{cr} = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{h}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \quad (4.4)$$

Thực tế thì tuổi thọ của các công trình nói chung và các công trình giao thông nói riêng theo tiêu chí ăn mòn cao hơn đáng kể so với kết quả được tính theo công thức ở trên vì độ khuếch tán ion clorua và nồng độ clorua bề mặt là những yếu tố phụ thuộc vào thời gian.

Để xem xét yếu tố thời gian trong biểu diễn giá trị độ khuếch tán ion clorua của bê tông thường nguyên vẹn, Mangat & Molloy (1994) [65] đề nghị quy luật thay đổi hệ số khuếch tán D theo thời gian t có dạng như sau:

$$D = D_{28} \left(\frac{t_0}{t} \right)^m ; \quad (4.5)$$

trong đó:

- D_{28} : là hệ số khuếch tán ion Clorua tại tuổi 28 ngày;
- t_0 : tuổi bê tông ($t_0 = 28$ ngày) ;
- m : là hệ số thực nghiệm được lấy như sau : (theo A.Costa and J.Appleton (1998))
 - + Vùng ảnh hưởng bởi sóng biển: $m = 0.245$;
 - + Vùng thủy triều lên xuống: $m = 0.2$;
 - + Vùng khí hậu ven biển: $m = 0.29$.

Để xem xét yếu tố thời gian trong biểu diễn giá trị nồng độ clorua bề mặt C_s trong luận án này tác giả lấy thay đổi theo đề nghị của A. Costa & J.Appleton (1998) như sau:

$$C_s = C_{s0} \cdot t^n ; \quad (4.6)$$

trong đó: C_{so} là nồng độ clorua bề mặt sau thời gian 1 năm; n là hệ số thực nghiệm. Theo các điều kiện môi trường khác nhau các giá trị C_{so} (theo % khối lượng bê tông) và n cho bê tông thường điển hình được lấy như sau (A. Costa & J.Appleton (1999)):

- Vùng ảnh hưởng bởi sóng biển: $C_{so} = 0.24$; $n = 0.47$;
- Vùng thủy triều lên xuống: $C_{so} = 0.38$; $n = 0.37$;
- Vùng khí hậu ven biển: $C_{so} = 0.12$; $n = 0.54$.

Như vậy nếu xét đến sự thay đổi theo thời gian của hệ số khuếch tán ion clorua và nồng độ clorua bề mặt thì (4.3) được viết lại như sau:

$$C_x = C_{so} t^n \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{28} t_0^m t^{1-m}}} \right) \right) \quad (4.7)$$

Từ đó ta có chiều dày nhỏ nhất của lớp bê tông bảo vệ h cần thiết để chống ăn mòn cốt thép trong bê tông được tính như sau:

$$h = 2\sqrt{3D_{28} t_0^m t^{1-m}} \times \operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{C_{cr}}{C_{so} t^n} \right) \quad (4.8)$$

4.3.4. Mô hình dự báo tuổi thọ công trình bằng bê tông cốt thép theo tiêu chí ăn mòn cốt thép có xét đến trạng thái ứng suất của bê tông

Khác với trạng thái khi không chịu tải, cấu trúc bê tông còn nguyên vẹn, khi phải chịu một tải trọng đủ lớn, cấu trúc bê tông bị phá hủy dẫn đến độ thấm của bê tông tăng rất nhanh, điều này sẽ tạo điều kiện cho độ khuếch tán ion clorua vào bê tông tăng càng nhanh, làm tăng nồng độ ion Clorua ở bề mặt cốt thép và hậu quả là gây ăn mòn cốt thép sớm hơn. Để giải thích điều này, khi ứng suất trong bê tông vượt quá giới hạn nứt sẽ làm cho bê tông nứt và tạo điều kiện cho độ thấm nước và độ khuếch tán ion clorua tăng nhanh.

Để xét ảnh hưởng của trạng thái ứng suất đến quá trình khuếch tán ion clorua vào bê tông, công thức xác định mối quan hệ giữa sự gia tăng hệ số khuếch tán ion clorua theo thời gian và trạng thái ứng suất nén trước hay nén trực tiếp ở chương sẽ được sử dụng trong các tính toán.

Do đó, từ công thức 4.8 và 3.12 ta thiết lập được công thức xác định tuổi thọ công trình bê tông cốt thép theo tiêu chí khởi đầu ăn mòn cốt thép trong bê tông.

a) Trường hợp xét tới trạng thái ứng suất nén trước

$$h = 2\sqrt{D_{28} t_0^{1-m} t_0^m 1.028 \exp(0.4309(\sigma/\sigma_{max}))} \times \operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{C_{cr}}{C_{so} t^n} \right) \quad (4.9)$$

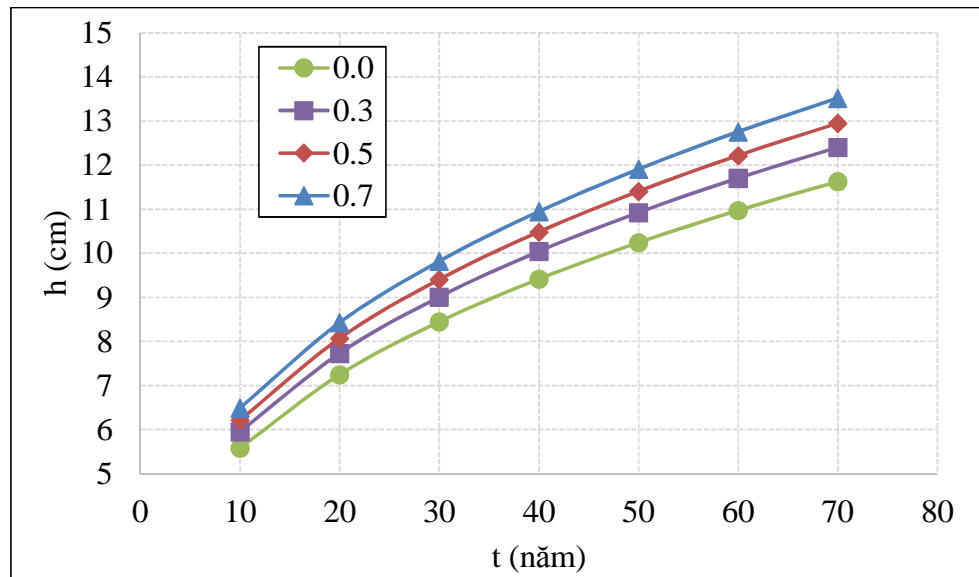
b) Trường hợp xét tới trạng thái ứng suất nén trực tiếp

$$h = 2 \sqrt{D_{28} t^{1-m} t_0^m \left(1.317 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{\max}} \right)^2 - 0.5479 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{\max}} \right) + 0.9914 \right) \times \text{erf}^{-1} \left(\frac{C_{cr}}{C_{so} t^n} \right)} \quad (4.10)$$

Áp dụng 2 công thức (4.9) và (4.10) với các thông số đã tính như Bảng 4.2, có thay đổi tuổi thọ công trình theo bề dày lớp bê tông bảo vệ tương ứng với các cấp ứng suất nén trước và nén trực tiếp như trên Hình 4.1 và 4.2.

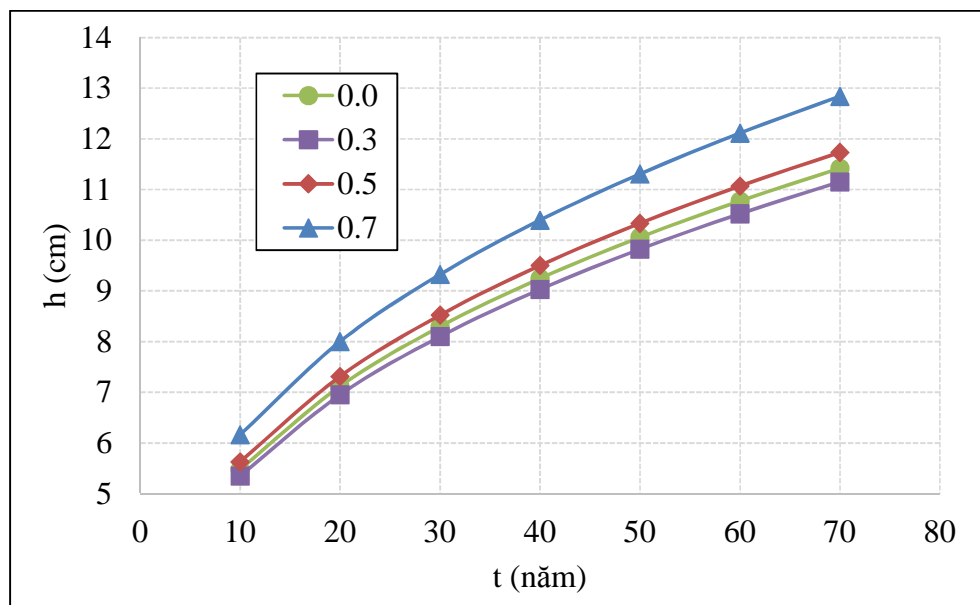
Bảng 4.2. Bảng thông số đầu vào

Hệ số khuếch tán ion Clorua ban đầu (28 ngày)	$D_{28} = 7.91 \times 10^{-12}$
Ngưỡng nồng độ ion Clorua gây ăn mòn	$C_{cr} = 0.05\%$
Vùng ảnh hưởng bởi sóng biển - Nồng độ ion Clorua bề mặt sau 1 năm: - Hệ số n:	$C_{so} = 0.24$ $n = 0.47$
Hệ số thực nghiệm m:	$m = 0.245$



Hình 4.1 - Quan hệ giữa chiều dày lớp bê tông bảo vệ với tuổi thọ công trình theo ứng suất nén trước

Trên hình 4.1 ta thấy trong trường hợp tải trọng nén trước; quy luật thay đổi tuổi thọ công trình theo chiều dày lớp bê tông bảo vệ khá tương đồng; sự gia tăng ứng suất nén trước sẽ yêu cầu chiều dày lớp bê tông bảo vệ lớn hơn.



Hình 4.2 - Quan hệ giữa chiều dày lớp bê tông bảo vệ với tuổi thọ công trình theo ứng suất nén trực tiếp

Trên hình 4.2 ta thấy, trong trường hợp tải trọng nén trực tiếp, quy luật thay đổi tuổi thọ công trình theo chiều dày lớp bê tông bảo vệ phụ thuộc vào trạng thái ứng suất nén trước theo các giai đoạn khác nhau. Khi $\sigma/\sigma_{\max} = 0.3$ thì chiều dày lớp bê tông bảo vệ giảm xuống, nhưng khi $\sigma/\sigma_{\max} = 0.5$ thì chiều dày lớp bê tông bảo vệ tăng lên và tăng lên đáng kể tại $\sigma/\sigma_{\max} = 0.7$

4.4. Áp dụng dự báo tuổi thọ công trình cầu bê tông cốt thép

Trong các ví dụ tính toán áp dụng dưới đây, tuổi thọ các cấu kiện bê tông cốt thép công trình cầu được tính toán theo các công thức (4.9) và (4.10). Các thông số liên quan đến bê tông thường đã được tiến hành trong các thí nghiệm ở các mục trước của phần 3 sẽ được sử dụng ở phần này. Các thông số khác được lấy theo khuyến cáo của một số kết quả nghiên cứu và tiêu chuẩn điển hình trên thế giới đã được phân tích ở các phần trên.

Hệ số khuếch tán ion clorua ban đầu D được xác định qua các thí nghiệm ở chương 3 có giá trị là $D_{28} = 7.9 \times 10^{-12}$ (m²/s) (bê tông C30) và $D_{28} = 6.243 \times 10^{-12}$ (bê tông C40)

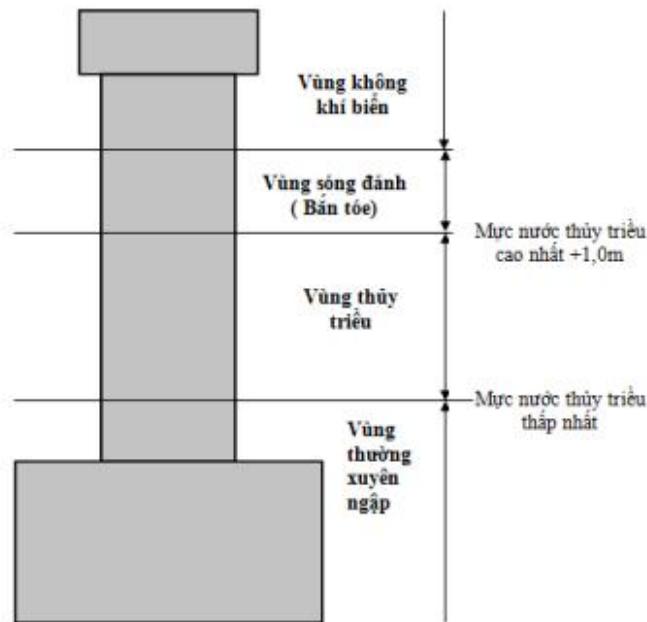
Khi xem xét đến yếu tố thời gian, trong luận án này, tác giả sử dụng mô hình của Mangat & Molloy (1994) [65]. Giá trị nồng độ ion clorua ở bề mặt kết cấu bê tông cốt thép C_s trong các tính toán sau được lấy theo kết quả nghiên cứu của A. Costa & J.Appleton (1999) [44] và có xét đến các yếu tố thời gian. Các giá trị đó như đã trình bày ở mục 4.3.3.

Theo EN206 concrete, giá trị giới hạn của nồng độ ion clorua ở bề mặt cốt thép được lấy là: $C_{cr} = 0.4\%$ theo khối lượng xi măng hay xấp xỉ bằng 0.05 đến 0.07% theo khối lượng bê tông (KLBT). Trong tính toán này C_{cr} được lấy là 0.05% theo khối lượng bê tông.

Mô hình đề xuất và các giá trị thực nghiệm đã được trình bày ở mục 4.3 được áp dụng trong mục tính toán này.

Ba vùng xem xét tốc độ ăn mòn cốt thép trụ cầu được xem xét trong tính toán này là:

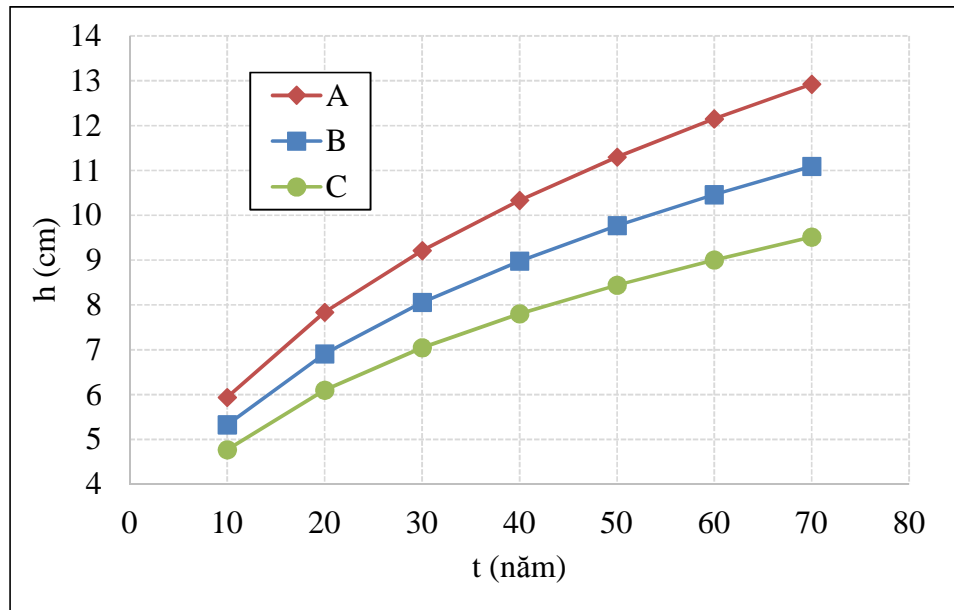
- + Vùng không khí biển
- + Vùng sóng đánh
- + Vùng thủy triều lên xuống.



Hình 4.3 – Phân chia các vùng tác động của điều kiện môi trường biển đến tốc độ ăn mòn cốt thép trong bê tông trụ cầu

4.4.1. Tính toán tuổi thọ trụ cầu khi chỉ xét đến tải trọng thường xuyên

Sử dụng công thức (4.10) cùng các thông số tính toán được lấy như ở trên. Lý do đây là trường hợp trụ chỉ chịu trọng lượng bản thân của trụ cầu và kết cấu nhịp trên cầu. Không xét đến sự có mặt của hoạt tải. Mô hình xét đến tốc độ ăn mòn cốt thép trong bê tông là mô hình nén trực tiếp với ứng suất trong bê tông $< 0.5\sigma_{max}$. Quan hệ giữa chiều dày lớp bê tông bảo vệ và tuổi thọ được biểu thị trong Hình 4.4.



Hình 4.4 - Quan hệ giữa chiều dày lớp bê tông bảo vệ với tuổi thọ công trình theo các vùng khác nhau ở trạng thái ứng suất $S/S_{max} = 0.2$

Trong hình 4.4:

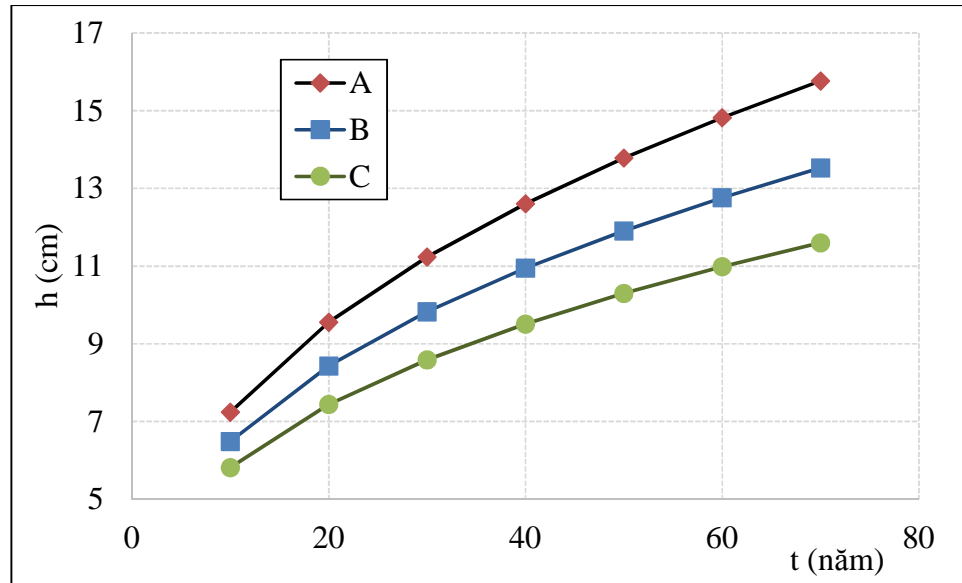
- A là vùng thủy triều lên xuống;
- B là vùng ảnh hưởng bởi sóng biển;
- C là vùng khí hậu ven biển.

Hình 4.4 cho thấy để đạt được một tuổi thọ dự kiến theo tiêu chí ăn mòn cốt thép thì bề dày lớp bê tông trong vùng thủy triều lên xuống là lớn nhất và trong vùng khí hậu ven biển là bé nhất. Hay nói cách khác, với các kết cấu bê tông cốt thép và bê tông dự ứng lực và với cùng một lớp chiều dày bê tông bảo vệ như nhau thì ở trong các môi trường khác nhau sẽ cho tuổi thọ khác nhau. Kết cấu công trình nằm ở vùng bị ảnh hưởng thường xuyên của sóng biển hoặc trong vùng thủy triều lên xuống cần thiết một chiều dày lớp bê tông bảo vệ lớn hơn hẳn so với các công trình chỉ nằm trong vùng chịu ảnh hưởng của khí hậu ven biển. Bề dày lớp bê tông bảo vệ của các công trình bằng bê tông dự ứng lực cũng cần thiết lớn hơn so với các công trình bằng bê tông cốt thép.

4.4.2. Tính toán tuổi thọ trụ cầu khi có xét đến hoạt tải trên cầu

Sử dụng công thức (4.9) cùng các thông số tính toán được lấy như ở trên. Lý do đây là trường hợp ô tô đi qua cầu gây nứt vi mô trong bê tông; các vết nứt này không khép lại khi hoạt tải ô tô ra khỏi cầu. Phần này sẽ tính với ứng suất trong bê tông từ $0.5\sigma_{max}$ trở lên với mô hình nén trước vì đây là giá trị ứng suất gây nứt bê tông (Chọn giá trị ứng suất = $0.7\sigma_{max}$). Quan hệ giữa chiều dày lớp bê tông bảo vệ

và tuổi thọ được biểu thị trong Hình 4.5.



Hình 4.5 - Quan hệ giữa chiều dày lớp bê tông bảo vệ với tuổi thọ công trình theo các vùng khác nhau ở trạng thái ứng suất $S/S_{max} = 0.7$

Trong đó Hình 4.5:

- A là vùng thủy triều lên xuống;
- B là vùng ảnh hưởng bởi sóng biển;
- C là vùng khí hậu ven biển.

Hình 4.5 cho thấy tương quan giữa chiều dày lớp bê tông bảo vệ với tuổi thọ khi có xét đến ảnh hưởng của hoạt tải gây nứt bê tông trên cầu khá giống với trường hợp chỉ xét tĩnh tải như trên hình 4.4. Tuy nhiên, cùng với 1 chiều dày lớp bê tông bảo vệ như nhau, thì tuổi thọ sẽ giảm đi khi có tác dụng của hoạt tải so với trường hợp chỉ xét đến ảnh hưởng của tĩnh tải.

4.5. Kết luận chương 4

Đề đề xuất mô hình dự báo tuổi thọ sử dụng theo khuếch tán ion clorua, mở đầu chương 4, tác giả đã trình bày các khái niệm, đặc điểm và sự khác nhau cơ bản về tuổi thọ sử dụng và độ bền của một kết cấu. Sự suy giảm trực tiếp và sự suy giảm gián tiếp được coi là hai cơ chế chủ yếu dẫn đến sự suy giảm của kết cấu cầu bê tông cốt thép, trong đó ở phạm vi nghiên cứu đề tài này, tác giả chỉ đề cập đến tuổi thọ sử dụng theo sự khuếch tán ion clorua vào trong kết cấu cầu bê tông cốt thép gây ăn mòn cốt thép. Mô hình dự báo tuổi thọ kết cấu bê tông cốt thép được xây dựng dựa trên mô hình của Tuutti. K gồm hai giai đoạn theo sự khuếch tán ion clorua vào trong kết cấu cầu gây ăn mòn cốt thép. Trong nghiên cứu này, liên quan đến phá hoại dài hạn của công trình do bị ăn mòn, tác giả chỉ xem xét đánh giá tuổi

thọ của một công trình giao thông bằng bê tông cốt thép như là thời gian bắt đầu có sự ăn mòn các cốt thép trong bê tông do sự khuếch tán ion clorua vào bê tông hay chính xác hơn là thời gian mà nồng độ ion clorua (C) ở bề mặt các cốt thép đạt đến giá trị tới hạn (C_{cr}). Phương trình tính toán nồng độ ion clorua ở bề mặt cốt thép được lấy theo định luật 2 Fick (RILEM 14 (2005) – A.Sara & E. Vesikari).

Ở cuối chương, tác giả tiến hành áp dụng tính toán dự báo tuổi thọ kết cấu cầu cầu bê tông cốt thép với các thông số từ thí nghiệm và lấy theo khuyến cáo của một số tiêu chuẩn điển hình trên thế giới, kết quả cho thấy tuổi thọ kết cấu bê tông cốt thép theo tiêu chí khởi đầu ăn mòn giảm đáng kể khi ứng suất nén trước tăng. Chiều dày lớp bê tông bảo vệ thay đổi có ảnh hưởng rất lớn đến tuổi thọ kết cấu bê tông cốt thép.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

Luận án đã thực hiện được các nội dung nghiên cứu liên quan đến phân tích độ thấm nước và thấm ion clorua của một số loại bê tông thường dùng trong xây dựng công trình cầu có xét đến ảnh hưởng ứng suất nén trong bê tông.

Các đóng góp mới của luận án được tóm tắt như sau:

1.1. Nghiên cứu thực nghiệm, phân tích tính thấm nước qua bê tông chịu ảnh hưởng của tải trọng với hai loại bê tông C30 và C40. Kết quả nghiên cứu cho thấy khi tăng cấp tải trọng nén thì độ thấm nước của bê tông tăng đáng kể; đặc biệt sau khi trong bê tông bắt đầu có thay đổi cấu trúc rỗng do tác động của tải trọng nén trước hoặc nén trực tiếp.

Một mô hình thí nghiệm thấm nước có xét đến tải trọng nén trực tiếp đã được thiết kế, chế tạo và thử nghiệm dựa trên các kết quả nghiên cứu trên thế giới gần đây; thiết bị thí nghiệm này đã có các cải tiến để quá trình đo đạc được thuận lợi hơn, đặc biệt là quá trình không chế tải trọng và ghi nhận số liệu hoàn toàn tự động.

Kết quả thí nghiệm đo thấm nước chịu ảnh hưởng của tải trọng nén trước cho thấy, khi ứng suất tương đối nén trước còn nhỏ $\sigma/\sigma_{\max} \leq 0.3$, độ thấm nước gia tăng khá chậm; sau ngưỡng này, độ thấm nước bắt đầu tăng nhanh; đặc biệt khi ứng suất tương đối lớn hơn $\sigma/\sigma_{\max} > 0.5$, độ thấm nước gia tăng rất nhanh. Sự xuất hiện các vết nứt phá hủy bê tông đã làm cho gia tăng thấm nước nhanh hơn. Với mẫu bê tông C40, tốc độ suy giảm mức chống thấm khi ứng suất nén trước trong bê tông tăng là thấp hơn so với mẫu bê tông C30.

Kết quả thí nghiệm đo thấm nước chịu ảnh hưởng của tải trọng nén trực tiếp cho thấy, độ thấm nước của bê tông gần như không thay đổi, thậm chí suy giảm một phần, sau đó tăng chậm khi giá trị ứng suất tương đối $\sigma/\sigma_{\max} < 0.4$; sau ngưỡng này, hệ số thấm bắt đầu tăng nhanh, sau ngưỡng này, độ thấm nước bắt đầu tăng nhanh; đặc biệt khi ứng suất tương đối lớn hơn $\sigma/\sigma_{\max} > 0.7$, độ thấm nước gia tăng rất nhanh giống trường hợp tải trọng nén trước. Điều này cũng có thể được giải thích là do cấu trúc vi mô của bê tông bị phá hủy sau ngưỡng ứng suất này - vốn là ngưỡng làm xuất hiện các vùng phá hủy phân tán (theo tiếp cận của cơ học phá hủy bê tông) làm gia tăng độ thấm nước của bê tông.

1.2. Các nghiên cứu thực nghiệm phân tích tính thấm ion clorua qua bê tông chịu ảnh hưởng của tải trọng đối với 2 loại bê tông C30 và C40. Kết quả nghiên cứu cho thấy ảnh hưởng đáng kể của tải trọng nén đến độ thấm ion clorua của bê tông.

Một mô hình thí nghiệm thẩm ion clorua có xét đến tải trọng nén trực tiếp đã được thiết kế, chế tạo và thử nghiệm dựa trên các kết quả nghiên cứu trên thế giới gần đây; thiết bị thí nghiệm này đã có các cải tiến để quá trình đo đạc được thuận lợi hơn, đặc biệt là quá trình kiểm soát lực nén trong bê tông.

Kết quả thí nghiệm thẩm ion clorua với mẫu bê tông chịu tải trọng nén trước cho thấy, khi ứng suất nén trước trong bê tông $\sigma/\sigma_{\max} \leq 0,5 - 06$ thì khuếch tán ion clorua tăng tuyến tính và khá đều; sau ngưỡng này thì khuếch tán ion clorua tăng mạnh. Tác giả đã đề xuất được mối quan hệ giữa giữa khuếch tán ion clorua và ứng suất nén trước trước của 2 loại bê tông C30 và C40.

Kết quả thí nghiệm thẩm ion clorua với mẫu bê tông chịu tải trọng nén trực tiếp cho thấy, khuếch tán ion clorua thay đổi mạnh khi có sự xuất hiện của tải trọng tác động đồng thời. Tuy nhiên trước và sau khi gia tải khuếch tán ion clorua đều nằm trong mức “trung bình” theo TCVN 9337-2012. Sự suy giảm độ thẩm tại ứng suất 30% σ_{\max} được giải thích là do ứng suất gây biến dạng vi mô và vì ứng suất vẫn nằm trong giới hạn đàn hồi nên chưa phát sinh vết nứt, mà ngược lại làm tăng độ đặc và giảm lỗ rỗng của bê tông, do đó làm giảm độ thẩm. Tốc độ khuếch tán ion clorua qua bê tông giảm khi ứng suất ở mức 30% σ_{\max} và tăng ở mức 50% σ_{\max} và 70% σ_{\max} .

1.3. *Xác định được hệ số C_k để tính toán hệ số khuếch tán ion clorua từ hệ số thẩm nước của cùng loại bê tông. Từ đó đề xuất công thức tính toán quan hệ giữa hệ số thẩm nước và hệ số khuếch tán ion clorua của bê tông có xét đến ảnh hưởng của ứng suất trong bê tông cho 2 loại bê tông xem xét như sau:*

$$+ \text{ Đối với bê tông C30: } \mathbf{K = 144.93 S^{0.5} D} \quad \text{với } C_k = 144.93$$

$$+ \text{ Đối với bê tông C40: } \mathbf{K = 176.72 S^{0.5} D} \quad \text{với } C_k = 176.72$$

1.4. *Áp dụng mô hình đề xuất để tính toán dự báo tuổi thọ sử dụng của các kết cấu công trình cầu bê tông cốt thép có xét đến ảnh hưởng của tải trọng thường xuyên và tải trọng khai thác.*

Kết quả phân tích cho thấy khi kết cấu chịu ảnh hưởng dư của tải trọng nén trước, tuổi thọ cấu kiện suy giảm theo gia tăng của ứng suất nén trước với mức suy giảm lần lượt là 16%, 27% và 33% khi ứng suất nén trước tăng lần lượt là 30%, 50% và 70% ứng suất phá hoại. Khi chịu ứng suất nén trực tiếp, có sự gia tăng về tuổi thọ 10% khi ứng suất nén đạt xấp xỉ 30% ứng suất lớn nhất (do hiệu ứng nén trực tiếp), sau đó tuổi thọ suy giảm nhẹ ở mức 0.4% khi ứng suất nén tăng lên 50%

và giảm mạnh đến 23% khi ứng suất nén trong bê tông tăng lên đến 70% giá trị ứng suất phá hoại.

Khi áp dụng tính toán dự báo tuổi thọ kết cấu trụ cầu nằm trong các vùng môi trường khác nhau: vùng không khí biển, vùng thủy triều lên xuống và vùng ảnh hưởng bởi sóng biển. Kết quả cho thấy ảnh hưởng đáng kể của các vùng môi trường biển đến tuổi thọ cấu kiện khi có xét đến cả ảnh hưởng của tĩnh tải và hoạt tải hoặc khi chỉ xét tĩnh tải.

1.5. Góp phần chế tạo bộ thiết bị đo thấm nước của bê tông chịu ứng suất nén trực tiếp và thiết bị đo thấm ion clorua của bê tông chịu ứng suất nén trực tiếp.

Luận án là một phần trong định hướng phát triển các nghiên cứu về độ bền của bê tông và kết cấu bê tông cốt thép. Các thiết bị đo thấm nước và thấm ion clorua được chế tạo và thử nghiệm với bê tông thường là cơ sở cho việc thực hiện các nghiên cứu tương tự với đối tượng là các loại bê tông khác như bê tông cường độ cao, bê tông nhẹ...

2. Kiến nghị hướng nghiên cứu tiếp theo

Hướng nghiên cứu tiếp theo dự kiến như sau:

- Nghiên cứu tương tự cho các loại bê tông khác, các loại bê tông nhẹ, bê tông cường độ cao, bê tông cường độ siêu cao...
- Nghiên cứu sự tích tụ ion clorua trên bề mặt bê tông của các loại bê tông khác nhau cho các vùng của Việt Nam, có thể vẽ bản đồ phân vùng nồng độ ion clorua trên bề mặt bê tông ở Việt Nam.
- Nghiên cứu đặc tính ngẫu nhiên của quá trình khuếch tán và ăn mòn.
- Nghiên cứu các tác động đồng thời của nhiều yếu tố như: cơ, lý, hóa, nhiệt.
- Xây dựng phần mềm mô phỏng tính toán.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA NGHIÊN CỨU SINH

1. Tran The Truyen, Le Quang Vu, Ho Xuan Ba, *Service life estimation of high performance reinforced concrete structures in considering the damage of concrete cover*, Proceedings of the International Conference EASEC-14, HCM City, 1/2016.
2. Hồ Xuân Ba, Lê Quang Vũ, *Ảnh hưởng của trạng thái chịu tải đến khả năng chống thấm của bê tông*, Tạp chí Khoa học GTVT số 51, Tháng 4/2016.
3. Hồ Xuân Ba, Trần Thế Truyền, Phạm Duy Hữu, *Thực nghiệm xác định độ thấm nước của bê tông chịu nén*, Tạp chí Khoa học GTVT, Số 53, Tháng 8/2016.
4. Tran The Truyen, Ho Xuan Ba, Hoang Viet Hai, Le Ba Anh, *Water permeability of concrete under uniaxial loading*, Proceedings of The 7th International Conference of Asian Concrete Federation - Sustainable Concrete for Now and the Future, ACF 2016, Tháng 11/2016.
5. Hồ Xuân Ba, *Ảnh hưởng của ứng suất nén trước đến khuếch tán ion clorua của bê tông thường và bê tông cường độ cao*, Tạp chí Giao thông Vận tải, Tháng 4/2017.
6. Trần Thế Truyền, Thái Khắc Chiến, Lê Quang Vũ, Hồ Xuân Ba, *Ảnh hưởng của lịch sử chịu tải nén trước đến độ thấm Ion clorua của một số loại bê tông, ứng dụng trong dự báo tuổi thọ kết cấu bê tông cốt thép*, Tạp chí KH GTVT, Số 57, Tháng 6/2017.
7. Tran The Truyen, Nguyen Xuan Tung, Ho Xuan Ba, *Effect Of Pre-Compressive Stress On Chloride Permeability Of Concrete Used Anti-Permeable Admixture*, Lecture Notes in Civil Engineering, Springer Nature, ISBN 978-981-10-6712-9 ISBN 978-981-10-6713-6 (eBook). DOI 10.1007/978-981-10-6713-6.
8. Lê Quang Vũ, Hồ Xuân Ba, Đoàn Bảo Quốc và Trần Thế Truyền, *Ảnh hưởng của ứng suất nén trước trong bê tông đến độ thấm của bê tông nhẹ*, Tuyển tập hội nghị cơ học toàn quốc lần thứ X, Hà nội, Tháng 12/2017.
9. Hồ Xuân Ba, Lê Quang Vũ, Thái Khắc Chiến, Trần Thế Truyền, *Ảnh hưởng của ứng suất nén đến độ khuếch tán ion clorua của bê tông*, Tạp chí KH GTVT số 66, 10/2018.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

TIẾNG VIỆT

- [1] **Bộ Giao thông vận tải (2005)**, “Tiêu chuẩn thiết kế cầu 22TCN272-05”.
- [2] **Đào Văn Dinh (2014)**, “Dự báo tuổi thọ sử dụng của kết cấu cầu bê tông cốt thép ở ven biển Việt Nam”, Luận án tiến sỹ, Trường đại học Giao thông Vận tải,
- [3] **Phạm Duy Hữu, Đào Văn Dinh, Trần Thế Truyền, Thái Khắc Chiến, Nguyễn Thanh Sang (2016)**, “Thiết kế kết cấu theo độ bền, NXB GTVT.
- [4] **Ha Minh, Hiroshi Mutsuyoshi (2010)**, “Sự hư hại của cầu bê tông dự ứng lực kéo sau trong điều kiện môi trường đặc biệt”, Workshop on Construction under Exceptional Condition, October 2010, Hanoi, Vietnam.
- [5] **Nguyễn Mạnh Phát (1997)**, “Nghiên cứu nâng cao khả năng chống ăn mòn cho bê tông và bê tông cốt thép trong môi trường xâm thực biển”, luận án TS chuyên ngành VLXD- Đại học Xây dựng.
- [6] **Trần Thế Truyền (2010)**, “Nghiên cứu cơ chế thấm thấu của nước và khí qua bê tông, ứng dụng trong phân tích cơ chế ăn mòn các công trình giao thông dưới tác động của môi trường”, Đề tài khoa học cấp bộ, Bộ GD&ĐT.
- [7] **TCVN 3116 : 1993**, “Bê tông nặng - Phương pháp xác định độ chống thấm nước”.
- [8] **TCVN 9337:2012**, “Bê tông nặng – Xác định khuếch tán ion clorua bằng phương pháp đo điện lượng”.
- [9] **Tô Minh Tuấn, Nguyễn Ngọc Nam, Vũ Ngọc Anh (2010)**, “Tính toán tuổi thọ của kết cấu bê tông cốt thép chịu ăn mòn” Workshop on Construction under Exceptional Condition, October 2010, Hanoi, Vietnam.
- [10] **Phạm Văn Khoan, Nguyễn Nam Thắng (2010)**, “Tình Trạng ăn mòn Bê tông cốt thép ở vùng biển Việt Nam và một số kinh nghiệm sử dụng chất ức chế ăn mòn Canxi nitrit”, Tạp chí KHCN Xây dựng (2), tr.42-45.
- [11] **Trần Dương (2005)**, “Ứng dụng mô hình Tang Luping- Olof Nilsson khảo sát sự khuếch tán ion Cl- trong bê tông và nghiên cứu ảnh hưởng của phụ gia đến quá trình này”, Luận án Tiến sỹ chuyên ngành hóa Vô cơ, Đại học Khoa học Tự nhiên-Đại học Quốc gia Hà Nội.
- [12] **Trương Hoài Chính - Trần Văn Quang (2008)**, “Nghiên cứu khảo sát hiện trạng ăn mòn phá hủy của các công trình bê tông cốt thép và khả năng xâm thực của môi trường ven biển thành phố Đà Nẵng”, Tạp chí khoa học và công nghệ Đại học Đà Nẵng, 6(29).

- [13] **Trương Nhật Tân, Trần Thế Truyền (2015)**, “Thực nghiệm xác định ảnh hưởng dư của ứng suất nén trước đến độ thấm nước và thấm ion clorua của bê tông, Tuyển tập Hội nghị cơ học vật rắn biến dạng toàn quốc lần thứ XII, Đà Nẵng.
- [14] **TS Nguyễn Mạnh Phát (2007)**, “Lý thuyết ăn mòn và chống ăn mòn bê tông- bê tông cốt thép trong xây dựng”, Nhà xuất bản Xây dựng.

TIẾNG ANH

- [15] **A. Djerbi, S. Bonnet, A. Khelidj, V. Baroghel-bouny, (2008)**, “Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete”, *Cement and Concrete Research* 38, 877-883
- [16] **A.S. Eldieb, R.D. Hooton, (1994)**, “A high-pressure triaxial cell with improved measurement sensitivity for saturated water permeability of highperformanc concrete”, *Cem. Concr. Res.* 24 (5) 854–862.
- [17] **AASHTO T 277**, “Standard Method of Test for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration”.
- [18] **ABBAS. A, CARCASSES. M, OLLIVIER. J. P,** “The importance of gas permeability in addition to the compressive strength of concrete”, *Magazine of Concrete Research* 52, 2000.
- [19] **Abderrachid Amriou, Mohamed Bencheikh, (2017)**, “New experimental method for evaluating the water permeability of concrete by a lateral flow procedure on a hollow cylindrical test piece”, *Construction and Building Materials* 151 642–649.
- [20] **ACI 201.2R-01**, “Guide to Durable Concrete”, *ACI Manual of Concrete Practice*, American Concrete Institute.
- [21] **ACI 201.2R-08**, *Guide to Durable Concrete*, Reported by ACI Committee 201.
- [22] **ACI Committe 365 (January 2012)**, “Life-365- Service Life Prediction Model- and Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Cost of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides”, Version 2.1.
- [23] **Adam Neville, (2000)**, “The question of concrete durability the answer: we can make good concrete today.” *Concrete International*, 22, 21-26.
- [24] **Ahmad S. (2003)**, “Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—a review” *Cement and Concrete Composites*, V. 25, Issues 4 5, pp. 459-471.

- [25] **Albert K.H. Kwan and Henry H.C. Wong (2005)**, “Durability of reinforced concrete structures: theory vs practice” in Proceedings of the Hong Kong Government Standing Committee on Concrete Technology Annual Concrete Seminar, Hong Kong, February, p. 1-20
- [26] **Andrade, C., Alonso, C. and Molina, F. J. (1993)**, “Cover cracking as a function of bar corrosion: Part I - Experimental test”, 26 453–464.
- [27] **ASTM C 1556 – 04**, “Standard Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion”.
- [28] **ASTM C1556-11a (2016)**, “Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion”.
- [29] **Banthia. N, Birpava. A, Mindess. S, (2005)**, “Permeability of concrete under stress”, Cement and Concrete Research 35, 1651-1655, 2005.
- [30] **Basheer L., Kropp J. and Clelan D.J.** “Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review” Construction and Building Materials V. 15, Issues 2-3, pp. 93-103 (2001).
- [31] **Baweja D, Roper H and Sirivivatnanon V**, “Quantitative Descriptions of Steel Corrosion in Concrete using Resistivity and Anodic Polarisation Data”, Proceedings 4th CANMET/ACI Int. Conf. on Durability of Concrete, edited by V M Malhotra, SP 170-3, pp 41–63.
- [32] **Beeby A W**, “Concrete in the Oceans – Cracking and Corrosion”, Technical Report No. 1, CIRIA/UEG, Cement and Concrete Association, Dept of Energy, UK, 1978.
- [33] **Berke, N. and Hicks, M., (1992)**, “Estimating the life cycle of reinforced concrete decks and marine piles using laboratory diffusion and corrosion data”.
- [34] **Brace WF, Walsh JB, Frangos WT, 1968**, “Permeability of granite under high pressure. J Geophys” 73(6):2225–36.
- [35] **British Standard 1881 (1988)**, “Part 124, Testing concrete – methods for analysis of hardened concrete, British Standards Institute”, London UK.
- [36] **British Standard 8110 (1985)**, “Part 1, Structural use of concrete – code of practice for design and construction, British Standards Institute”, London UK.
- [37] **C. Lim, (2000)**, “Microcracking and chlorid permeability of concrete under uniaxial compression, Cem. Concr. Com. 22 353–360”.

- [38] **C.Andrade.** “Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements”, *Cement and Concrete Research*, Volume 23, Issue 3, May 1993, Pages 724-742.
- [39] **C.M. Aldea, S.P. Shah, A. Karr,** (1999), “Effect of cracking on water and chloride permeability of concrete, *J. Mater. Civ. Eng.* 181–197”.
- [40] **Cao H T and Sirivivatnanon V,** ‘Service Life Modelling of Crack-free and Cracked Reinforced Concrete Members subjected to Working Load’, *Proceedings CIB Building Congress 2001*, Wellington, New Zealand, 2-6 April, 2001.
- [41] **Cement & Concrete Association of Australia,** “Chloride Resistance of Concrete”, 2009.
- [42] **Cement & Concrete Association of Australia,** “Durable Concrete Structures”, 1989.
- [43] **Construction Industry Research and Information Association,** “Early-age Thermal Crack Control in Concrete (CIRIA C660)”.
- [44] **Costa, A., Appleton, J. (1999),** “Chloride penetration into concrete in marine environment - Part I: Main parameters effecting chloride penetration. *Materials and structures*”. P252-259.
- [45] **Crank (1975),** “Mathematics of diffusion”, Brunel University Uxbridge.
- [46] **D. Ludirdja, R.L. Berger, J.F. Young, (1989),** “Simple method for measuring water permeability of concrete, *ACI Mater. J.* 86 (5)” 433–439.
- [47] **D. Whiting,** “American Concrete Institute SP-82-25”, pp 501-524 (1981).
- [48] **Dhir,R.,Jones, M.and Elghaly,A.(1993),** “PFAConcrete:exposure temperature effectson chloride diffusion”, *Cement and Concrete Research* 23(25):1105–14.
- [49] **Dias W.** “Influence of drying on concrete sorptivity” *Magazine of Concrete Research*, 56, p. 537-543 (2004).
- [50] **DuraCrete (2000),** “Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures”, The European Union-Brite EuRam III.
- [51] **Elsharief A., Cohen M.D., Olek J. (2004),** “Influence of aggregate type and gradation on themicrostructure and durability properties of Portland cement mortar and concrete” *International RILEM Symposium on Concrete Science and Engineering: A Tribute to Arnon Bentur*, RILEM Publications SARL, pp. 231-222.

- [52] **Emerson M. and Butler A.M.** “Chloride ingress into structural concrete: measurements and measures to reduce ingress” TRL Report (1997).
- [53] **EN206-1**, “Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity”.
- [54] **Espelid B and Nilsen N**, ‘A field study of the corrosion behaviour on dynamically loaded marine concrete structures’, Proceedings Second Int. Conf. SP109-4, 1988, pp 85–104.
- [55] **FHWA, summary report (November 2012)**, “Literature Review of Chloride Threshold Values for Grouted Post-Tensioned Tendons”, Long-term bridge performance program, FHWA Publication No.: FHWA-HRT-12-067
- [56] **Gérard B., Breysse D., Ammouche A., Houdusse O., Dirdry O. (1996)**, "Cracking and permeability of concrete under tension", Mater. Struct. 29 pp.141-151.
- [57] **Gjørsv O.E., Zhang** “Effect of Chloride Source Concentration on Chloride Diffusivity in Concrete” Materials Journal T., V.102, Issue 5, pp. 295-298 (2005).
- [58] **Ha-Won Song, Seung-Woo Pack, Ki Yong Ann (2009)**, “Probabilistic assessment to predict the time to corrosion of steel in reinforced concrete tunnel box exposed to sea water”, Construction and Building Materials, Volume 23, Issue 10, October 2009, Pages 3270-3278.
- [59] **J, Kropp and H K Hilsdorf, E & F N Spon**, “Performance Criteria for Concrete Durability”, London, 1995.
- [60] **Kermani. A (1991)**, "Stressed concrete. Permeability of stressed concrete", Building Research and Information 19, 360–366.
- [61] **Lim C C**, “Influence of cracks on the service life prediction of concrete structures in aggressive environments”, UNSW PhD thesis, 2000.
- [62] **Lion. M, Skoczylas. F, Lafhaj. Z, Sersar. M (2005)**, "Experimental study on a mortar. Temperature effects on porosity and permeability, Residual properties or direct measurements under temperature", Cement and Concrete Research 35, 1937–1942.
- [63] **Long-Yuan Li a, Jin Xia, San-Shyan Lin (2012)**,“A multi-phase model for predicting the effective diffusion coefficient of chlorides in concrete”- Construction and Building Materials 26, 295–301.
- [64] **Mangat L. and Nilsson L.-O.** “Chloride diffusivity in high strength concrete at different ages” Nord. Concr. Res. Publication No. 11 pp. 162–171 (1992).

- [65] **Mangat P.S. and Molloy B.T. (1994)**, “Prediction of long-term chloride concentration in concrete” *Material and Structure*, V. 27 pp. 338-346.
- [66] **Mark G. Richardson**, “Fundamentals of durable reinforced concrete”, London and New York First published 2002.
- [67] **Mehta P K**, ‘Durability of Concrete Exposed to Marine Environment – A Fresh Look’, *Proceedings Second Int. Conf. on Concrete in Marine Environment*, SP-109, 1988.
- [68] **Mohammed T U, Hamada, H and Otsuki N**, ‘Several factors regarding sustainability of marine concrete structures’, *Proceedings Sixth CANMET/ACI Int. Conf. on Durability of Concrete*, SP-212, pp 23–44.
- [69] **N. Hearn**, (1999), “Effect of shrinkage and load induced cracking on water permeability of concrete”, *ACI Mater. J.* 96 (6) 234–241.
- [70] **Nathan D. Stambaugh, Todd L. Bergman, Wil V. Srubar III, (2017)**, “Numerical service-life modeling of chloride - induced corrosion in recycled - aggregate concrete”, *Construction and Building Materials*, 161, 236 – 245.
- [71] **Neville A.M.**, “Properties of concrete” Book, Fourth edition (2003).
- [72] **Neville, A.M. (1995)**, “Properties of Concrete”, 4th Edition, Longman Group Limited, England, UK.
- [73] **Oh B. H., Jang S.Y.** “Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profile in concrete structures” *Cement & Concrete Research*, V.37, pp. 37-53 (2007).
- [74] **Omar S. Baghabra Al-Amoudi a , Walid A. Al-Kutti a , Shamsad Ahmad a, Mohammed Maslehuddin b, (2009)**, “Correlation between compressive strength and certain durability indices of plain and blended cement concretes”, *Cement & Concrete Composites* 31 672–676.
- [75] **P. Vassie (1984)**, “Reinforcement corrosion and the durability of concrete bridges”, *Proceeding of Institution of Civil Engineers* 76, 713–723.
- [76] **Powers T.C. (1958)**, “Structure and physical properties of hardened Portland cement paste”, *Journal of American Ceramic Society*, Vol.41, pp1-6.
- [77] **Pritchard B (1986)**, “Road salt corrosion in U.K.concrete bridges-Part 2”, *Construction Repair and Maintenance* 2(6):6–9.
- [78] **Rostam S. (1984)**, “Durability of concrete structures”, *Workshop Report, Comite Euro-International du Beton, Bulletin No.152*, pp.415–32.
- [79] **Sarja A. and Vesikari,E. (1996)**, “Durability Design of Concrete Structures”, *RILEM Report 14*, London, E&FN Spon.
- [80] **SCRIVENER K, 2001**, “Cours on-line”, EPF.

- [81] **Siemes, Vrouwenvelder và Van de Beukel, 1985**, “Durability of building: a reliability analysis”. *Heron*.30(3),2-48
- [82] **Stanish K., Thomas M. (2003)**, “The use of bulk diffusion tests to establish time-dependent concrete chloride diffusion coefficient” *cement & concrete Research* 33, pp. 55-62.
- [83] **Stanish, K. (2000)**, “Predicting the Diffusion Coefficient of Concrete from Mix Parameters, University of Toronto Report”.
- [84] **Swamy,R.N., Hamada and Laiw,J.C, (Jul. 1994)**, “ A citical evaluation of chloride penetration into concrete in marine environment”, in “ Corrosion and Corrosion Protection of steel in concrete” *Proceedings of an International Conference, University of Sheffield, England*, 404-419.
- [85] **Tang Luping, Joost Gulikers (2007)**, “On the mathematics of time-dependent apparent chloride diffusion coefficient in concrete” - *Cement and Concrete Research* 37, 589–595.
- [86] **Technical Research Centre of Finland (VTT) (2003), LIFECON Deliverable D 3.2**, “Service Life ModelsLife -Cycle Management of Concrete Infrastructures for Improved Sustainability”, Project funded by the European Community under the Competitive and Sustainable Growth Programme (2001-2003).
- [87] **Thomas M., Bamforth P. (1999)**, “Modelling diffusion in concrete- Effect of fly ash and slag” *Cement & Concrete Research* 29, pp. 487-495.
- [88] **Truyen T. Tran (2009)**, "Contribution to the study of mechanical and hydro mechanical behaviors of concrete", PhD Thesis (in French), University of Liege.
- [89] **Tuutti, K. (1980)**. “Service life of structures with regard to corrosion of embedded steel”, *Proceedings of the International Conference on Performance of Concrete in Marine Environment, ACI SP-65*, pp. 223-236.
- [90] **Yang C.C., Wang L.C.** “The diffusion characteristic of concrete with mineral admixtures between salt ponding test and accelerated chloride migration test” *Materials Chemistry and Physics*, V. 85, Issues 2-3, pp. 266-272 (2004).