

NGHIÊN CỨU NGUYÊN NHÂN HƯ HỎNG CỦA CÁC CẤU KIỆN BÊ TÔNG CỐT THÉP TRONG CÔNG TRÌNH CẢNG DƯỚI TÁC ĐỘNG CỦA MÔI TRƯỜNG BIỂN VÀ CÁC BIỆN PHÁP XỬ LÝ

Vũ Quốc Hưng^{a,*}

^a*Khoa Công trình thủy, Trường Đại học Xây dựng,
số 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 08/08/2019, Sửa xong 19/03/2020, Chấp nhận đăng 21/04/2020

Tóm tắt

Sự suy giảm cường độ chịu lực của các cấu kiện bê tông cốt thép (BTCT) trong công trình cảng diễn ra tương đối nhanh so với các công trình dân dụng khác có thể gây ra bởi các yếu tố xâm thực của môi trường biển. Sự xuống cấp của các cấu kiện này không những phụ thuộc vào hàm lượng xâm nhập của Sulphate (SO_4^{2-}) và Chloride (Cl^-) từ môi trường biển vào cốt thép mà còn khác nhau giữa các vùng tác động lên cấu kiện BTCT. Do đó, phân tích chính xác các nguyên nhân dẫn đến sự xuống cấp và hư hỏng cấu kiện BTCT trong công trình cảng là một nhiệm vụ cấp thiết. Trên cơ sở các phân tích, bài báo đề xuất các biện pháp xử lý đối với từng loại hư hỏng ở từng vị trí cụ thể trên cấu kiện nhằm khắc phục và nâng cao tuổi thọ cho công trình cảng trong vùng biển Việt Nam.

Từ khóa: suy giảm cường độ bê tông cốt thép; ăn mòn cốt thép; xâm nhập Cl^- ; carbonat hóa.

CAUSES OF REINFORCED CONCRETE DETERIORATION IN BERTHING STRUCTURES UNDER MARINE ENVIRONMENT AND PROPOSED SOLUTIONS

Abstract

Deterioration of reinforced concrete in berthing structures has been occurring more rapidly in comparison with that of civil engineering structures due to probably the penetration of marine environments. This deterioration depends on not only the penetration of Sulphate (SO_4^{2-}) and Chloride (Cl^-) from the marine environment, but also different components of reinforced concrete where marine environment attacks. Therefore, it is important to accurately determine the cause of these damage. Based these analyses, the detailed solutions are proposed to improve the lifetime of berthing structures in Vietnam's seas.

Keywords: reinforced concrete deterioration; corrosion of reinforced steel; penetration of Cl^- ; carbonation.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14\(2V\)-10](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14(2V)-10) © 2020 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

1. Đặt vấn đề

Hệ thống cảng biển Việt Nam đang khai thác hiện nay có khoảng 272 bến cảng, 350 cầu cảng, tổng chiều dài tuyến bến đạt khoảng 92,2 km [1]. Phần lớn kết cấu cảng là các cấu kiện bê tông cốt thép. Nhiều cầu cảng được xây dựng từ thập niên 70, 80 của thế kỷ trước đã có những dấu hiệu xuống cấp nghiêm trọng ảnh hưởng đến việc khai thác và an toàn lao động. Tốc độ xuống cấp diễn ra khá nhanh, nhiều công trình có tuổi thọ thiết kế 30÷40 năm, xong đã bị hư hỏng chỉ sau 10÷20 năm sử dụng, thậm chí có những công trình xuất hiện dấu hiệu xuống cấp chỉ sau 7-10 năm sử dụng [2, 3].

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: hungvq@nuce.edu.vn (Hưng, V. Q.)

Điển hình là thực trạng xuống cấp của bến cầu tàu 5000T cảng Thị Nại (Quy Nhơn) được phản ánh trong thời gian gần đây là một ví dụ [4]. Theo khảo sát, lớp bê tông dưới cầu tàu bị bong tróc, trơ cốt thép kèm theo nhiều vết nứt dọc (Hình 1).



Hình 1. Thực trạng xuống cấp cầu cảng 5000T cảng Thị Nại [4]

Từ thực trạng đó cho thấy, nhu cầu sửa chữa cũng như xây mới các công trình cảng dọc bờ biển ở Việt Nam là rất lớn. Do đó, phân tích các nguyên nhân gây ra tình trạng xuống cấp của các cầu kiện BTCT trong công trình cảng và các biện pháp hạn chế, khắc phục là vấn đề cấp thiết.

Phân tích các dấu hiệu xuống cấp từ thực tế khảo sát cho thấy, sự hư hỏng và suy giảm cường độ của các kết cấu BTCT trong công trình cảng diễn ra tương đối nhanh so với các cầu kiện BTCT trong các công trình dân dụng khác [1, 5]. Nguyên nhân của những hư hỏng này được thông kê và chia theo các nhóm bao gồm: các điều kiện môi trường chiếm khoảng 45%, quá tải trong khai thác chiếm 20%, sai sót trong thiết kế và thi công chiếm 20%, và các nguyên nhân khác chiếm 15% [6]. Trong đó, kết quả hư hỏng cầu kiện BTCT do các nhóm nguyên nhân va chạm cơ học của tàu, giải pháp kết cấu chưa hợp lý, khai thác vượt tải, ... thường dễ được phát hiện qua các biểu hiện như nứt, gãy, hỏng cầu kiện, ... qua đó sẽ có hướng xử lý kịp thời. Vì vậy, hư hỏng cầu kiện BTCT gây ra bởi các nguyên nhân này nằm ngoài phạm vi của nghiên cứu. Ngược lại, hư hỏng cầu kiện BTCT do môi trường biển là quá trình diễn ra chậm, khó phát hiện trong giai đoạn đầu. Khi phát hiện ra các hư hỏng do xâm thực thì cường độ của cầu kiện BTCT cũng suy giảm đáng kể so với thiết kế ban đầu. Do đó, mục tiêu chính của bài báo tập chung vào phân tích nguyên nhân và giải pháp sửa chữa cho các cầu kiện BTCT của công trình cảng chịu ảnh hưởng của các điều kiện môi trường biển. Kết quả nghiên cứu của bài báo dựa trên các tổng kết về lý thuyết ăn mòn cốt thép cho các cầu kiện BTCT chịu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường kết hợp với kinh nghiệm sửa chữa và kiểm định một số công trình cảng thực tế [7]. Từ đó, các giải pháp sửa chữa các cầu kiện BTCT được chia theo các vùng chịu ảnh hưởng xâm thực. Bên cạnh các biện pháp sửa chữa thông dụng như đổ bê tông gia cường và vữa cầu kiện, một số giải pháp như sử dụng keo dính đặc biệt, lưới cốt sợi (FRP), ống PileJax, ... được giới thiệu như các biện pháp gia cường mới trong công trình cảng tại Việt Nam.

2. Các nguyên nhân hư hỏng cầu kiện BTCT trong công trình cảng chịu tác động của môi trường biển

Các yếu tố môi trường biển như sóng, thủy triều, xâm thực mặn, ... là nguyên nhân chính dẫn đến các hư hỏng và giảm tuổi thọ kết cấu BTCT trong công trình cảng. Mức độ của những tác động đó là

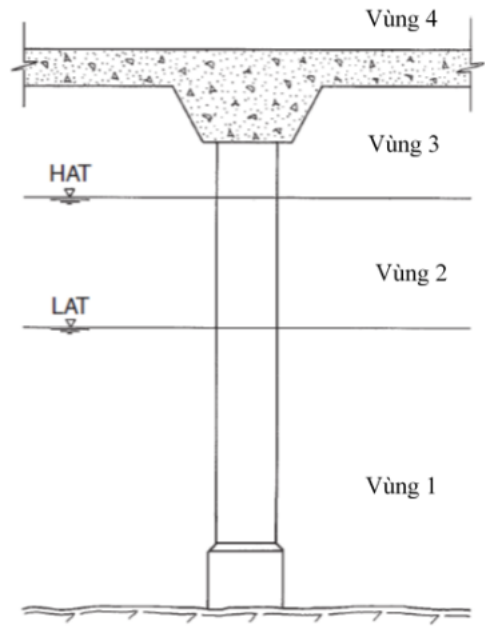
khác nhau theo vị trí của cầu kiện BTCT, có thể phân thành 4 vùng tác động [8], như trình bày trong Hình 2.

Vùng 1: là vùng luôn ngập trong nước vì vùng này thấp hơn mực nước triều thiên văn thấp nhất (LAT). Các cầu kiện trong vùng này luôn ngập trong nước.

Vùng 2: là vùng dao động mực nước triều, nó được hình thành giữa mực nước triều thiên văn cao nhất (HAT) và thấp nhất (LAT). Đây là vùng các cầu kiện bị xâm thực mạnh nhất.

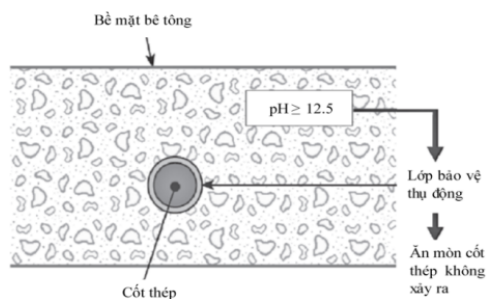
Vùng 3: đây là vùng sóng vỗ, nằm trên mực nước triều thiên văn cao nhất. Đây là vùng tiếp xúc với nước biển theo chu kỳ. Do sóng vỗ vào các cầu kiện vỡ ra tạo thành vùng tiếp xúc của cả pha lỏng và pha khí nên sự xâm thực của môi trường biển là mạnh trong vùng này. Kết cấu dầm, mặt dưới bản và các liên kết dầm cọc của công trình cảng thường cũng thường nằm trong vùng này.

Vùng 4: là vùng không thường xuyên chịu ảnh hưởng trực tiếp của nước biển ngoại trừ những thời điểm có sóng to gió lớn vỡ vượt lên mặt bến. Nên chủ yếu hư hỏng của cầu kiện BTCT trong vùng này do điều kiện khai thác.

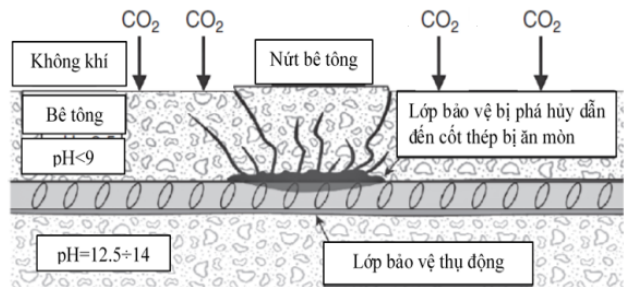


Hình 2. Vùng tác động của môi trường biển đến kết cấu công trình cảng

Một trong những nguyên nhân dẫn đến sự suy giảm cường độ bê tông là sự tấn công của Sulphate (SO_4^{2-}) và Chloride (Cl^-) và carbonat hóa (CO_2) trong môi trường vào cốt thép [9]. Về cơ bản, cốt thép trong bê tông được bảo vệ bởi môi trường kiềm ($\text{pH} > 12,5$) được hình thành từ các thành phần hóa học của xi măng Portland trong bê tông, được biết đến như lớp bảo vệ thụ động (Hình 3(a)). Lớp bảo vệ này bị phá vỡ khi pH trong môi trường bê tông gần cốt thép giảm mạnh bởi sự xâm nhập của CO_2 và Cl^- qua lỗ rỗng và vết nứt vào bê tông. Quá trình CO_2 từ môi trường khí thâm nhập vào bê tông được biết đến như quá trình carbonat hóa (Hình 3(b)). Sản phẩm của quá trình này là hỗn hợp $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}(\text{OH})_2$ hay còn gọi là rỉ sắt. Lớp rỉ sắt này xốp có thể tích gấp 2 đến 7 lần thể tích cốt thép tạo ra nó, nên lớp rỉ sắt này tạo ra một áp lực lớn lên lớp bê tông bảo vệ gây ra hiện tượng nứt bê



(a) Lớp bảo vệ thụ động trong BTCT



(b) Quá trình carbon hóa

Hình 3. Ăn mòn cốt thép gây ra bởi carbon hóa

tông, đến một thời điểm nào đó lớp bê tông sẽ bị bong tróc [10]. Hiện tượng bê tông bị carbonat hóa thường xảy ra trong vùng 4.

Trong giai đoạn tích tụ hình thành rỉ sắt, tốc độ suy thoái của cấu kiện BTCT được biểu thị bằng sự phát triển chiều sâu thâm nhập CO_2 theo thời gian và được xác định bằng công thức (1), (2) và (3) theo TCVN 9343-12 [11]:

$$x = k \sqrt{t} \quad (1)$$

trong đó x là chiều dày lớp bê tông bị carbonat hóa (mm); k là hệ số tốc độ carbonat hóa; t là thời gian bê tông chịu tác động xâm thực của khí CO_2 (năm).

Thời gian cốt thép bắt đầu rỉ khi chiều dày bê tông bị carbonat hóa tiến sát tới vị trí cốt thép:

$$t_{\max} = \left(\frac{C - 10}{k} \right)^2 \quad (2)$$

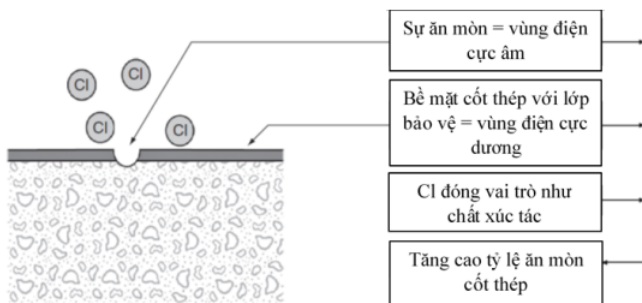
trong đó $t_{\max}$ là khoảng thời gian kết cấu tồn tại trong môi trường đến khi cốt thép bắt đầu rỉ (năm); C là chiều dày lớp bê tông bảo vệ cốt thép (mm); k là hệ số tốc độ carbonat hóa được xác định từ số liệu thực nghiệm.

Trong giai đoạn phát triển rỉ, tốc độ suy thoái kết cấu biểu thị bằng tốc độ rỉ cốt thép theo thời gian tính bằng tỷ lệ hao hụt bán kính cốt thép/năm.

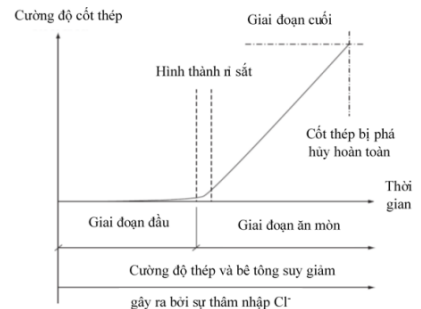
$$\Delta r = \frac{r_0 - r_t}{t_{\text{corr}}} \quad (3)$$

trong đó Δr là mức hao hụt bán kính cốt thép bị rỉ trên năm (mm/năm); r_0 là bán kính cốt thép ban đầu (mm); r_t là bán kính cốt thép tại thời điểm kiểm tra (mm), t_{corr} là thời gian cốt thép bị rỉ, tính từ thời điểm bắt đầu rỉ đến thời điểm kiểm tra (năm).

Một nguyên nhân khác dẫn đến cốt thép bị ăn mòn là sự thâm nhập của Cl^- , đây là vấn đề nghiêm trọng nhất đối với các cấu kiện BTCT trong công trình cảng và thường xảy ra trong vùng 2 và vùng 3. Hiện tượng ăn mòn cốt thép do xâm nhập Cl^- từ muối biển vào bê tông diễn ra trong hai giai đoạn. Đầu tiên là giai đoạn Cl^- thâm nhập vào bê tông phá hủy lớp bảo vệ thụ động của cốt thép còn gọi là quá trình tích tụ điều kiện gây rỉ (Hình 4). Quá trình này diễn ra trong khoảng 5÷10 năm đầu [8]. Giai đoạn 2 được biết đến như giai đoạn phát triển rỉ, được xác định từ khi cốt thép bị ăn mòn (hình thành rỉ sắt) cho đến khi cốt thép bị hư hỏng hoàn toàn. Mức độ ăn mòn của cốt thép tăng đáng kể trong giai đoạn này phụ thuộc đặc trưng môi trường xung quanh cốt thép như hàm lượng O_2 , điện trở suất và nhiệt độ [12].



(a) Quá trình Cl^- phá hủy lớp bảo vệ thụ động



(b) Sơ đồ suy giảm cường độ thép

Hình 4. Ăn mòn cốt thép gây ra bởi sự thâm nhập của Chloride

Tốc độ suy thoái của kết cấu được biểu thị bằng hàm lượng Cl^- tại vị trí cốt thép theo thời gian dưới tác động của môi trường biển, tính từ thời điểm bắt đầu, theo định luật Fick như sau [11]:

$$C_{(x,t)} = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{\sqrt{Dt}} \right) \quad (4)$$

trong đó $C_{(x,t)}$ là hàm lượng Cl^- trong bê tông ở vị trí bất kỳ x , tại thời điểm bất kỳ t , (kg/m^3); C_0 là hàm lượng Cl^- trên bề mặt của kết cấu BTCT (kg/m^3); t là thời gian Cl^- thâm nhập vào bê tông tính từ thời điểm ban đầu (năm); D là hệ số khuếch tán Cl^- trong bê tông ($cm^2/năm$).

Trong giai đoạn rỉ, tốc độ xuống cấp của kết cấu BTCT được xác định bằng tỷ lệ hao hụt bán kính cốt thép như công thức (3) hoặc tính bằng tỷ lệ suy giảm diện tích cốt thép/năm như công thức sau:

$$\Delta F = \frac{\left(1 - \frac{F_t}{F_0} \right) * 100}{t_{corr}} \quad (5)$$

trong đó ΔF là diện tích suy giảm cốt thép trên năm (%); F_0 là diện tích cốt thép ban đầu (mm^2); F_t là diện tích cốt thép tại thời điểm kiểm tra (mm^2); t_{corr} là thời gian cốt thép bị rỉ, tính từ thời điểm bắt đầu rỉ đến thời điểm kiểm tra (năm).



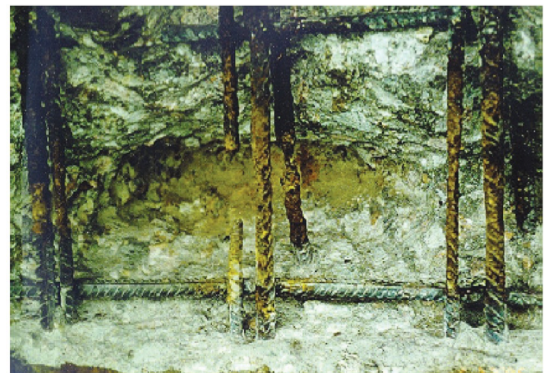
(a) Cọc BTCT bị ăn mòn theo hình côn



(b) Bong tróc sàn BTCT



(c) Hư hỏng lớp BT bảo vệ gờ chắn xe



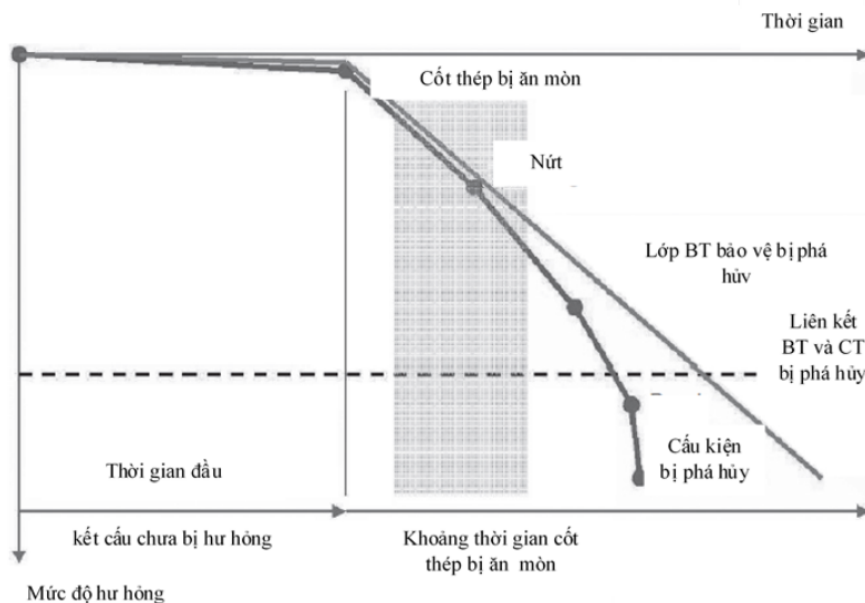
(d) Đứt cốt thép do ăn mòn trong môi trường biển

Hình 5. Các dạng hư hỏng điển hình của cấu kiện BTCT trong công trình cảng

Hư hỏng kết cấu BTCT trong công trình cảng có thể đến từ sự bào mòn gây ra bởi sóng, dòng chảy và thường xuất hiện trong vùng 2 (vùng dao động triều). Trong vùng này, nếu lớp bảo vệ không đủ dày, theo thời gian, cọc BTCT bị ăn mòn theo hình côn như trong Hình 5(a). Lớp bê tông bảo vệ cốt thép mặt dưới của sàn và dầm cầu tàu nằm vùng 3 thường bị bong tróc do lớp rỉ sắt hình thành từ sự xâm nhập của CO_2 và Cl^- (Hình 5(b)). Trong hai quá trình này, carbonat hóa có thể gặp ở tất cả các công trình sử dụng BTCT, trong khi đó quá trình thâm nhập Cl^- xảy ra chủ yếu ở các công trình mà có Cl^- tồn tại ở môi trường xung quanh như môi trường biển.

3. Các biện pháp sửa chữa và giảm thiểu ăn mòn cốt thép

Các biện pháp sửa chữa và giảm thiểu ăn mòn cốt thép của các cấu kiện BTCT trong công trình cảng sẽ phụ thuộc chính vào vị trí của các hư hỏng để tìm ra các nguyên nhân chính dẫn đến các hư hỏng đó. Mặt khác, việc đánh giá đúng mức độ hư hỏng cũng là một nhiệm vụ quan trọng để có thể đưa ra hướng xử lý phù hợp [13]. Về cơ bản, việc khảo sát phải xác định được cốt thép bị ăn mòn đang ở giai đoạn phát triển nào như trong Hình 6, cũng như kết hợp với việc đánh giá kiểm tra các chỉ số về: khả năng chịu lực, độ bền còn lại của kết cấu so với yêu cầu theo TCVN 5574:2012 [14], từ đó so sánh với phân cấp hư hỏng được trình bày trong Bảng 1, để đưa ra các hướng xử lý phù hợp.



Hình 6. Sơ đồ phát triển mức độ hư hỏng bởi ăn mòn cốt thép theo thời gian

Căn cứ vào mức độ suy thoái, tốc độ suy thoái và tầm quan trọng của kết cấu và khả năng tài chính của chủ đầu tư, ... để cân nhắc lựa chọn các hướng xử lý phù hợp cho kết cấu hư hỏng, cụ thể như sau:

- Hư hỏng cấp I: sửa chữa bảo vệ dự phòng cho các kết cấu thuộc nhóm A.
- Hư hỏng cấp II: sửa chữa và bảo vệ dự phòng cho kết cấu thuộc nhóm A và B nếu điều kiện tài chính cho phép và thời gian sử dụng còn dài. Các trường hợp khác chỉ cần tiếp tục theo dõi.
- Hư hỏng cấp III: gia cường và sửa chữa cho các kết cấu thuộc mọi loại bảo trì. Tuy nhiên, nếu thời gian còn lại của cấu kiện không còn dài thì chỉ có thể chỉ tăng cường theo dõi, hạn chế sử dụng chống đỡ tạm thời nếu cần.

Bảng 1. Phân cấp hư hỏng của các cấu kiện BTCT và các biện pháp khắc phục chung

Cấp hư hỏng	Mô tả trạng thái hư hỏng	Mức độ hư hỏng theo các yêu cầu kỹ thuật	Các phương án khắc phục chung				
			Sửa chữa	Gia cường	Tăng cường theo dõi	Chống đỡ tạm thời và hạn chế sử dụng	Phá bỏ
I	Không có bất cứ dấu hiệu hư hỏng nào thể hiện bên ngoài kết cấu (tuy nhiên cốt thép có thể trong giai đoạn tích tụ hình thành rỉ)	- Khả năng chịu lực: đạt yêu cầu - Sự làm việc bình thường: đạt yêu cầu - Độ bền: đạt yêu cầu	✓		✓		
II	Cốt thép rỉ nhẹ, gây nứt lớp bê tông bảo vệ nhưng chưa bong, lở. Các dạng vết nứt khác với bề rộng < 0,5 mm	- Khả năng chịu lực: đạt yêu cầu - Sự làm việc bình thường: đạt yêu cầu hoặc không đạt nếu bề rộng vết nứt lớn hơn mức cho phép - Độ bền: đạt yêu cầu hoặc không đạt yêu cầu (nếu kết cấu thuộc bảo trì loại A)	✓		✓		
III	Cốt thép rỉ nặng, bê tông bảo vệ nứt to hoặc bong lở hoàn toàn, có thể có dấu hiệu mất ổn định về mặt chịu lực	- Khả năng chịu lực: đạt yêu cầu hoặc không đạt yêu cầu tùy vào tính toán cụ thể - Sự làm việc bình thường: không đạt yêu cầu - Độ bền: không đạt yêu cầu (ΔF hoặc Δr vượt quá giá trị giới hạn)	✓	✓	✓	✓	
IV	Kết cấu đã bị gãy gục, sụp đổ	- Khả năng chịu lực: không đạt yêu cầu - Sự làm việc bình thường: không đạt yêu cầu - Độ bền: không đạt yêu cầu					✓

Ghi chú:

Nhóm A: bảo trì phòng ngừa cho loại công trình đặc biệt quan trọng có tuổi thọ > 100 năm

Nhóm B: bảo trì thông thường cho các công trình dân dụng công nghiệp có tuổi thọ thiết kế < 100 năm

Nhóm C: nhóm công trình tạm, có niên hạn sử dụng dưới 20 năm

Nhóm D: thuộc nhóm công trình ngoài khơi, công trình ngầm và công trình dưới nước

- Hư hỏng hạng IV: dỡ bỏ kết cấu trong mọi trường hợp.

Nhìn chung, công trình cảng thuộc nhóm D và nghiên cứu tập chung vào hướng xử lý cho các cấu kiện thuộc hư hỏng cấp III. Theo đó, nghiên cứu đề xuất ba hướng chính xử lý cho các cấu kiện BTCT trong công trình cảng như sau:

- Khôi phục lại cường độ chịu lực của kết cấu.
- Tăng cường độ chịu lực cho kết cấu.
- Khôi phục lại hình dạng bề mặt kết cấu.

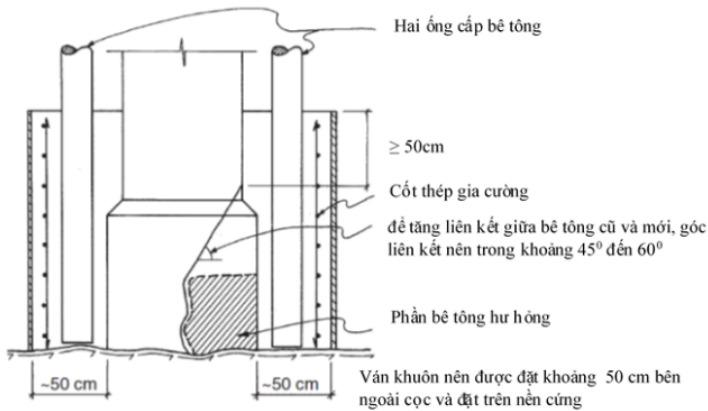
3.1. Biện pháp sửa chữa hư hỏng trong vùng 1

Vùng 1 là vùng luôn bị ngập trong nước, vì thế công tác sửa chữa trong vùng này thường phải được lên kế hoạch cụ thể theo hướng thời gian thi công dưới nước ngắn nhất vì có thể phải liên quan đến công tác lặn. Cách khắc phục trong vùng này thường sử dụng bao gồm: sử dụng ống đỡ bê tông

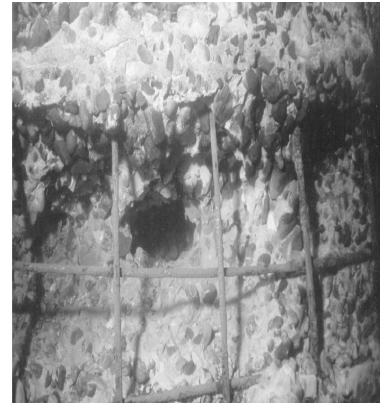
(Tremie pipe concrete), bơm bê tông áp lực cao (injection concrete), bơm vữa bê tông áp lực cao (micro concrete) hoặc bơm chất kết dính đặc biệt (special epoxy).

a. Sử dụng ống đổ bê tông dưới nước

Trường hợp vị trí bê tông hư hỏng nằm ở liên kết giữa cọc và đất nền (Hình 7(a)), việc làm sạch vị trí bê tông bị hỏng là nhiệm vụ đầu tiên cần thực hiện (Hình 7(b)). Ván khuôn được lắp đặt xung quanh cọc đảm bảo đủ không gian cho hai ống cấp bê tông đặt đối diện hai bên và cốt thép gia cường.



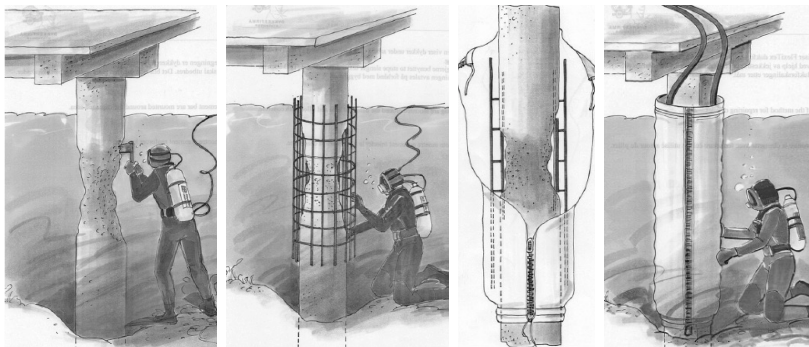
(a) Vị trí hư hỏng nằm ở liên kết giữa cọc và đất nền



(b) Làm sạch lớp BT hư hỏng

Hình 7. Sử dụng ống đổ bê tông xử lý phần BT hư hỏng giữa cọc và đất nền

Trường hợp phần bê tông bị hư hại nằm tại khoảng giữa vùng 1, túi vữa địa kỹ thuật có thể được sử dụng thay thế cho hệ thống ván khuôn (Hình 8). Sau khi phần bê tông hỏng được làm sạch, hệ thống thép gia cường được lồng trong túi vữa địa kỹ thuật tại phần BT hư hỏng, túi vữa địa kỹ thuật được khóa kín trước khi bê tông được bơm vào. Cũng có thể thay thế túi vữa địa bằng các vật liệu khác như ống nhựa tổng hợp cốt sợi thủy tinh hoặc sợi carbon (PileJax). Sau khi đổ bê tông, các ống này được để lại như một phần trong kết cấu gia cường.

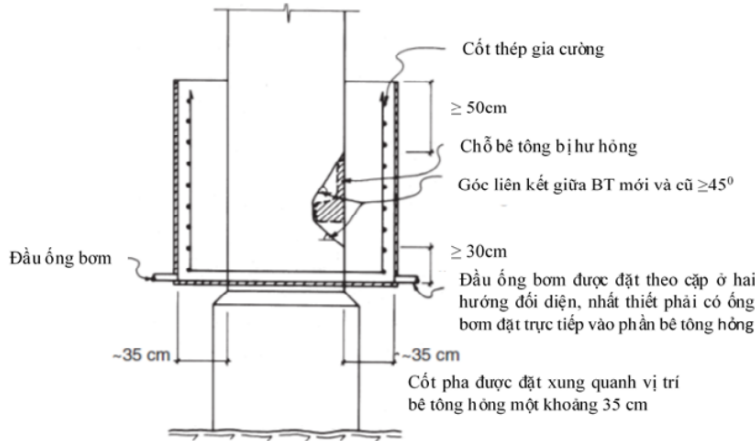


Hình 8. Sử dụng ống đổ bê tông kết hợp túi vữa địa kỹ thuật xử lý phần BT hư hỏng chìm trong nước, nằm giữa cọc

b. Bơm bê tông áp lực cao

Phương pháp này có ưu điểm là chiều dày lớp bê tông mới gia cường nhỏ hơn so với phương pháp sử dụng ống đổ bê tông. Tuy nhiên, phương pháp này lại đòi hỏi phải có thiết bị bơm bê tông áp lực

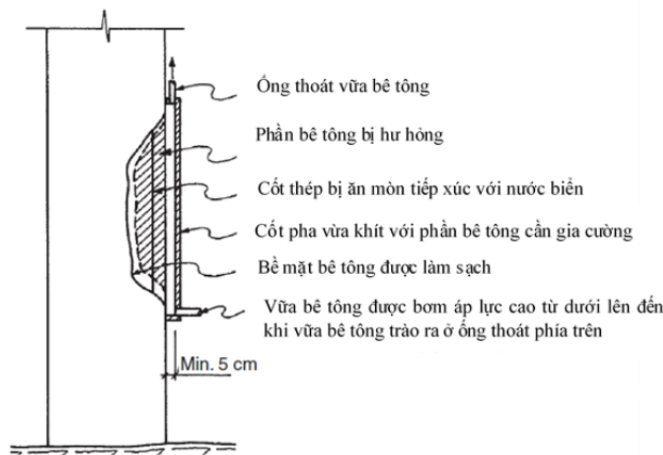
cao chuyên dụng. Cốt liệu của bê tông gia cường chia làm 2 phần. Phần thô với cốt liệu có đường kính $2\text{ cm} \leq d \leq 5\text{ cm}$ được đặt trước cùng với hệ thống cốt pha và thép gia cường (Hình 9). Phần bê tông (gồm vữa bê tông và cốt liệu nhỏ $< 2\text{ cm}$) được bơm áp lực cao từ phía đáy cốt pha theo phương pháp dâng bê tông dưới nước.



Hình 9. Sử dụng bơm bê tông áp lực cao xử lý phần BT hư hỏng

c. Bơm vữa bê tông áp lực cao

Đây biện pháp đơn giản hóa của phương pháp bơm bê tông áp lực cao. Về quy trình thực hiện hoàn toàn tương tự phương pháp bơm bê tông áp lực cao, chỉ khác phần cốt liệu hoàn toàn được đặt trước vào trong hệ cốt pha và phần bơm chỉ có vữa bê tông. Một ưu điểm khác của phương pháp này là phù hợp với xử lý các hư hại nhỏ hoặc là các phần bê tông hư hỏng của tường góc bên (Hình 10).



Hình 10. Sử dụng bơm vữa bê tông áp lực cao xử lý phần BT hư hỏng của tường bên

d. Phương pháp sử dụng chất kết dính đặc biệt

Đối với những phần bê tông bị hư hại nhẹ ($< 0,01\text{ m}^3$), có thể sử dụng keo kết dính đặc biệt (sử dụng được trong môi trường nước biển) bằng phương pháp thủ công.

e. Phương pháp dùng phụ gia chống rửa trôi

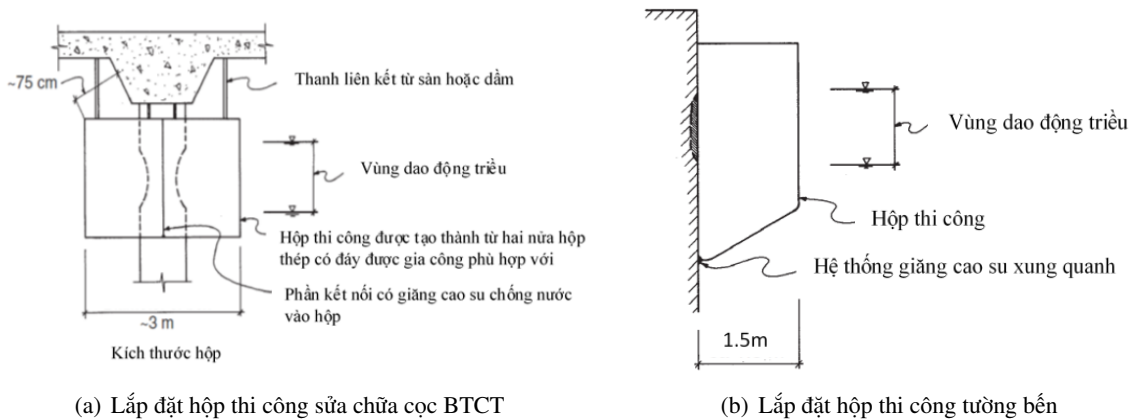
Đây là phương án kết hợp giữa xi măng và phụ gia chống rửa trôi (rescon) dùng cho bê tông dưới nước. Sử dụng kết hợp giữa xi măng và phụ gia chống rửa trôi giúp giá thành sửa chữa giảm đáng kể so với việc chỉ sử dụng epoxy.

3.2. Biện pháp sửa chữa hư hỏng trong vùng 2 (vùng dao động triều)

Các biện pháp sửa chữa trong vùng 1 hoàn toàn có thể áp dụng cho vùng 2. Tuy nhiên việc thi công vẫn là mục tiêu ưu tiên khi sửa chữa phần bê tông hư hỏng, do đó trong vùng 2 có thể áp dụng thêm một số biện pháp sửa chữa như sau:

a. Phương pháp sử dụng hộp sắt thi công kết hợp phun bê tông (Shotcrete)

Khi phần bê tông hư hỏng nằm trong vùng dao động triều, có thể lắp đặt hệ thống hộp thi công ngăn nước bao quanh cọc BTCT hoặc tường bên kết hợp với phun bê tông như trong Hình 11.



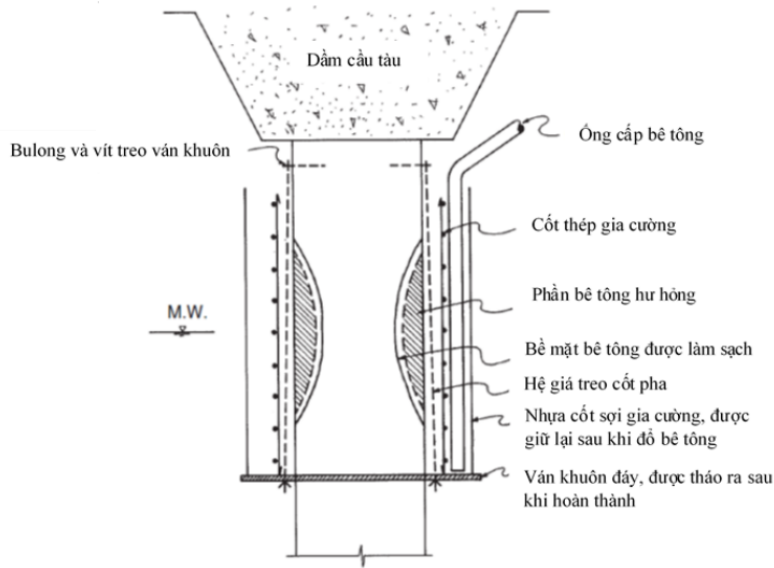
(c) Lắp đặt hộp bê tông đầu cọc

Hình 11. Sử dụng hộp sắt thi công kết hợp phun bê tông

Phần bê tông hư hại và cốt thép được đánh rửa sạch bằng máy phun cát hoặc nước áp lực cao. Phần bê tông mới được phun vào một lớp 2÷3 cm trước khi tiến hành cấy thêm cốt thép (nếu cần thiết). Có thể tiến hành phun bê tông một lớp với chiều dày 4÷5 cm hoặc 2 lớp chiều dày 2÷3 cm. Tỷ lệ nước/xi măng của bê tông phun thường < 0.4, cường độ của bê tông mới cũng được yêu cầu có độ dính bám > 20 MPa.

b. Phương pháp sử dụng ống đổ bê tông kết hợp nhựa gia cường bằng cốt sợi thủy tinh (tremie pipe concrete + glass fibre reinforced polyester)

Ván khuôn được treo bằng hệ thống bulong và vít khoan phía trên của phần bê tông hư hỏng, đáy của ván khuôn là hai nửa bán cầu có đường kính trong phù hợp với đường kính cọc. Ván khuôn bên là ống nhựa cốt sợi thủy tinh, sau khi đổ bê tông sẽ được để lại như một phần của kết cấu gia cường (Hình 12).



Hình 12. Sử dụng cốt pha nhựa gia cường bằng cốt sợi

Bê tông sử dụng thường có độ sụt từ 16÷18 cm, bơm qua ống có đường kính khoảng 20 cm. Trong quá trình đổ bê tông, ống cấp bê tông không di chuyển, bê tông sẽ được đẩy từ dưới đáy lên trên tới khi đầy khuôn. Sử dụng búa hoặc vật dụng tương tự gõ vào thành làm chặt bê tông.

3.3. Biện pháp sửa chữa hư hỏng trong vùng 3 (vùng sóng vỗ)

Trong vùng này điều quan trọng nhất là phải hiểu đầy đủ nguyên nhân gây ra hư hỏng của cầu kiện. Để làm được điều đó, việc khảo sát kỹ, đo vẽ đầy đủ hiện trạng là ưu tiên hàng đầu, trước khi đưa ra các phương án sửa chữa. Trong đánh giá hiện trạng cầu kiện BTCT cần cân nhắc các phương án đảm bảo giữa kinh tế và kỹ thuật.

Các hư hỏng của cầu kiện BTCT trong vùng này là dễ được phát hiện nhất, tuy nhiên đây cũng là vùng các cầu kiện bị hư hỏng nhiều nhất. Đa phần dạng hư hỏng của các cầu kiện là do Cl^- thâm nhập ăn mòn cốt thép vì thế các biện pháp phổ biến thường được sử dụng bao gồm:

- Khôi phục lại hình dạng cầu kiện BTCT (vữa).
- Bảo vệ cốt thép bằng phương pháp cathodic.
- Gia cường bằng vật liệu Fiber Reinforced Polymer (FRP).

a. Khôi phục lại hình dạng kết cấu BTCT

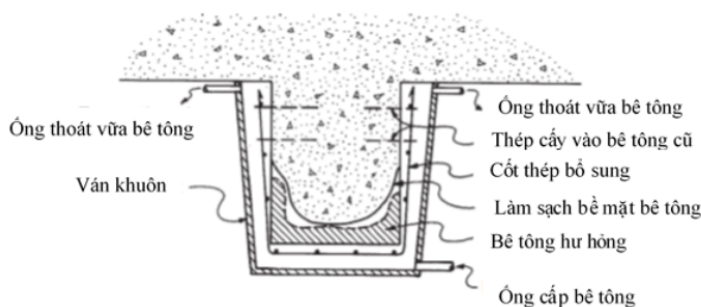
Sự suy thoái của bê tông trong vùng 3 là do sự ăn mòn cốt thép với biểu hiện là các vết nứt dọc dài theo thớ dưới của dầm và bản. Theo thời gian, các lớp bê tông bảo vệ bị bong tróc rơi xuống và để



Hình 13. Hư hỏng thường xảy ra trong đầm, bản của công trình cảng

lộ cốt thép bị rỉ như minh chứng trong Hình 13. Biện pháp sửa chữa trong trường hợp này thường là khôi phục lại đầm và bản về kích thước ban đầu.

Trước tiên, bề mặt bê tông và cốt thép được làm sạch bằng cát phun áp lực cao. Sau đó, lượng cốt thép gia cường được cấy thêm vào tùy thuộc vào đánh giá khả năng chịu lực còn lại của cốt thép chủ. Đối với bản, dùng biện pháp phun bê tông theo từng lớp $2 \div 3$ cm phục hồi lại lớp bê tông bảo vệ. Đối với đầm, sử dụng hệ thống ván khuôn và phương pháp dâng bê tông như Hình 14. Trong trường hợp cần tăng cường liên kết giữa cốt thép và bê tông mới, phần bê tông sau cốt thép chủ có thể được đục bỏ từ $2 \div 3$ cm.



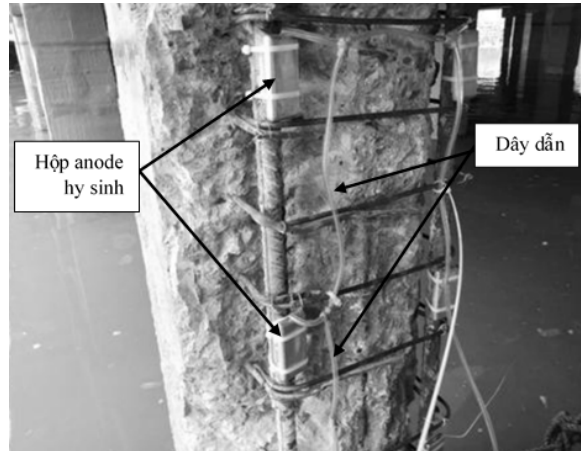
Hình 14. Phương pháp hồi phục kích thước đầm

b. Biện pháp bảo vệ cốt thép sử dụng cathodic

Nguyên lý sử dụng cathodic được biết đến từ đầu thế kỷ 19, nhưng mãi cho đến những năm 50 của thế kỷ 20 mới được bắt đầu áp dụng. Các biện pháp sửa chữa như vá, hồi phục lại kích thước cấu kiện về cơ bản cũng chỉ là giải pháp thụ động để khắc phục hậu quả của việc Cl^- xâm nhập vào cốt thép. Trong khi đó, biện pháp sử dụng cathodic là biện pháp chủ động giảm thiểu sự thâm nhập của Cl^- vào cốt thép ở mức thấp nhất bằng cách tạo ra một dòng điện hướng Cl^- ra khỏi cốt thép. Đây là biện pháp được đánh giá là tin cậy và hiệu quả. Nhìn chung hiện nay có hai loại bảo vệ bằng cathodic:

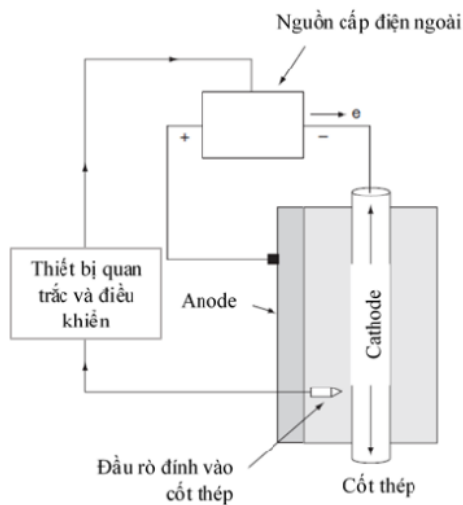
- Dùng hệ thống điện cực anode hy sinh: Nguyên lý của phương pháp này là dùng các kim loại hoạt động mạnh hơn sắt, như kẽm, nhôm, magie, ... để làm điện cực dương, cốt thép là điện cực âm. Khi đó các điện cực này sẽ bị ăn mòn thay vì ăn mòn cốt thép (Hình 15). Ưu điểm chính của phương pháp này là lắp đặt nhanh, đơn giản không cần nguồn điện cấp, phù hợp với các hư hỏng loại III (lớp

bảo vệ bị bong lỏ). Tuy nhiên, phương pháp này lại có nhược điểm là không ổn định vì không kiểm soát được dòng điện sinh ra nên thường xuyên phải theo dõi tốc độ ăn mòn của các anode hy sinh để có thể thay thế.

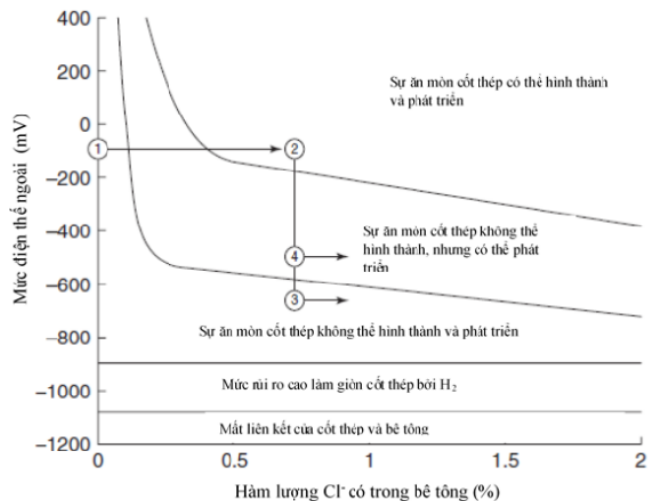


Hình 15. Lắp đặt hệ thống điện cực anode hy sinh

- Phương pháp dùng dòng điện ngoài: Nguyên lý chính của phương pháp này cũng tương tự như phương án dùng anode hy sinh. Điểm khác biệt lớn là sử dụng dòng điện ngoài để hạ thấp điện thế tại cốt thép hơn so với điện cực tại bề mặt bê tông làm cho các ion Cl^- bị hút ra khỏi cốt thép, giúp cốt thép khôi phục lại lớp bảo vệ thụ động (Hình 16(a)). Trong điều kiện bình thường, hàm lượng Cl^- sẽ tăng dần trong bê tông, từ vị trí (1) đến vị trí (2) sau vài năm sử dụng (Hình 16(b)). Khi có dòng điện ngoài với điện áp phù hợp, hàm lượng Cl^- sẽ ở vị trí (3), nơi mà sự ăn mòn không thể hình thành, hoặc vị trí (4) nơi sự ăn mòn cốt thép bị hạn chế dần và tiến tới mức thấp nhất. Điện cực bị ăn mòn



(a) Dùng dòng điện ngoài hạ thấp điện thế cốt thép



(b) Quan hệ giữa mức điện thế ngoài (mV) và hàm lượng Cl^- có trong bê tông

Hình 16. Nguyên lý và mức điện áp ngoài bảo vệ cathode

của phương pháp này có thể chủ động thay bằng các điện cực trơ có nguồn gốc từ cao su hoặc carbon nên có thể sử dụng được trong thời gian dài mà không cần thay thế. Đối với những hư hỏng của bản cầu tàu, điện cực dương trên bề mặt bê tông có thể sử dụng lưới titan, băng titan hoặc các loại vữa trộn kim loại có tính dẫn điện, ... sau đó phun (1,5÷2) cm bê tông lên bề mặt tạo lớp bảo vệ. Độ bền và các yêu cầu trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Các loại lưới anode dùng trong bảo vệ cốt thép [8]

Vật liệu làm anode	Tuổi thọ công trình (năm)	Cường độ dòng điện ngoài (mA/m ²)	Ghi chú
Lưới titan	25	10÷20	Hệ thống lưới phủ titan tương đối bền, tuy nhiên nó làm tăng trọng lượng đáng kể cấu kiện
Lưới carbon	25		Lưới carbon là điện cực trơ nên tương đối bền, không làm tăng trọng lượng kết cấu
Băng titan	25	10÷20	Tương tự lưới titan
Vữa dẫn điện	25	20÷50	Biện pháp này đảm bảo tốt sự phân bố chống ăn mòn cho cốt thép, tuy nhiên cũng rất dễ bị đoạn mạch nên cần đi kèm biện pháp ngăn đoạn mạch khi thi công
Anode rời	20	10÷20	Thường xuyên phải theo dõi vì bị ăn mòn nhưng cũng rất dễ thay thế
Sơn phủ kẽm dẫn điện	15		Sự phân bố đồng đều, tuy nhiên phải định kỳ theo dõi và sơn phủ bù

c. Gia cường cấu kiện bằng vật liệu Fiber Reinforced Polymer

Vật liệu Fiber Reinforced Polymer (FRP) là một dạng vật liệu tổng hợp được chế tạo từ ba loại vật liệu sợi bao gồm sợi carbon, sợi thủy tinh và sợi aramid. Đặc tính của vật liệu FRP là có cường độ chịu kéo rất cao, mô đun đàn hồi lớn, trọng lượng nhỏ và bền. Có nhiều dạng FRP dùng trong lĩnh vực xây dựng như dạng tấm, thanh, cáp, vải, cuộn, ... Trong sửa chữa và gia cố công trình cảng thường dùng loại FRP dạng tấm và dạng vải [15].



Hình 17. Sử dụng FRP gia cố dầm, bản cầu tàu

Bề mặt bê tông sửa chữa cần được làm sạch, sơn tăng cường độ dính bám, làm phẳng bề mặt bằng việc phun bù vữa bê tông. Phủ keo epoxy hoặc nhựa dán chuyên dụng, sau đó đặt các tấm FRP. Cuối

cùng, khi cấu kiện khô có thể sơn phủ bảo vệ. Tuy theo vị trí cần gia cường mà có hai phương pháp thi công bao gồm: phương pháp dán khô và phương pháp dán ướt. Hình 17 là minh họa cho việc gia cố dầm và bản cầu tàu sử dụng phương pháp dán khô.

4. Kết luận

Qua nghiên cứu cho thấy, hiện tượng xuống cấp của các cấu kiện BTCT trong công trình cảng có nguyên nhân chính là do sự ăn mòn cốt thép gây ra bởi sự xâm nhập của CO_2 từ môi trường khí và đặc biệt là ion Cl^- từ muối biển. Do vậy việc ngăn ngừa và giảm thiểu hàm lượng Cl^- và CO_2 xuất hiện trong bê tông là nguyên lý chính và là giải pháp chủ động trong phòng chống sự ăn mòn cốt thép. Phương pháp bảo vệ cathode là một biện pháp chủ động như vậy. Các biện pháp còn lại cơ bản là các giải pháp thụ động với mục đích khôi phục lại hoặc gia cường khả năng chịu lực của cấu kiện BTCT. Tùy thuộc vào việc kiểm định công trình cảng và bài toán kinh tế-kỹ thuật để có thể đưa ra được biện pháp xử lý phù hợp trong các trường hợp cụ thể.

Tài liệu tham khảo

- [1] Phạm, V. P., Huệ, N. N., Đầu, H. N., Dương, B., Lộc, D. V., Hưng, V. Q., Đông, B. V., Quý, N. M. (2010). *Quy hoạch cảng*. Nhà xuất bản Xây dựng.
- [2] Khoan, P. V., nnk (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 Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng*, 30–42.
- [3] Hạnh, K. Đ., Hiền, T. D. T. (2011). Tình trạng ăn mòn bê tông cốt thép và giải pháp chống ăn mòn cho công trình bê tông cốt thép trong môi trường biển Việt Nam. *Tạp chí Khoa học kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường*, 44–59.
- [4] Báo dân sinh (2017). *Thiệt hại sẽ rất lớn nếu cầu cảng Thị Nại không được sửa chữa kịp thời*. Truy cập ngày 17/4/2017.
- [5] Hậu, L. P., Hưng V., Q. (2012). Sử dụng hiệu quả và hợp lý các cấu kiện bê tông đúc sẵn trong gia cố mái công trình biển. *Tạp chí Biển và Bờ*, 21–29.
- [6] Gjörv, O. E. (2014). *Durability design of concrete structures in severe environments*. CRC Press.
- [7] Brownjohn, J. M. W. (2007). Structural health monitoring of civil infrastructure. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851):589–622.
- [8] Thoresen, C. A. (2018). *Port designer's handbook: recommendations and guidelines*. Thomas Telford.
- [9] Phát, T. M. (2007). *Lý thuyết ăn mòn và chống ăn mòn bê tông - Bê tông cốt thép trong xây dựng*. Nhà xuất bản Xây dựng.
- [10] Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Redaelli, E., Polder, R. (2013). *Corrosion of steel in concrete*. Wiley Online Library, 392:534–547.
- [11] TCVN 9343:2012. *Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép - Hướng dẫn công tác bảo trì*. Viện khoa học công nghệ xây dựng, Bộ xây dựng.
- [12] Chen, D., Mahadevan, S. (2008). [Chloride-induced reinforcement corrosion and concrete cracking simulation](#). *Cement and Concrete Composites*, 30(3):227–238.
- [13] Khoan, P. V., Trần, N. (2004). Giải pháp chống ăn mòn và bảo vệ cốt thép chịu tác động xâm thực clo trong môi trường biển. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng IBST*, 1:64–76.
- [14] TCVN 5574:2012. *Tiêu chuẩn thiết kế bê tông và bê tông cốt thép*. Viện khoa học công nghệ xây dựng, Bộ xây dựng.
- [15] Bakis, C. E., Bank, L. C., Brown, V., Cosenza, E., Davalos, J. F., Lesko, J. J., Machida, A., Rizkalla, S. H., Triantafyllou, T. C. (2002). [Fiber-reinforced polymer composites for construction—State-of-the-art review](#). *Journal of Composites for Construction*, 6(2):73–87.