

Nghiên cứu ảnh hưởng của cacbonat hoá và thấm nước mưa tới ăn mòn cốt thép

Vũ Việt Cường^{1*}, Nguyễn Đình Hải²

¹ Trung tâm Khoa học công nghệ, Trường Đại học Giao thông Vận tải

² Bộ môn Vật liệu Xây dựng, Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Giao thông Vận tải

TỪ KHOẢ

Thấm nước mưa
Ăn mòn thép
Bong tróc
Cacbonat hóa

TÓM TẮT

Bảo trì đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo an toàn và kéo dài tuổi thọ sử dụng của các công trình xây dựng. Tuy nhiên, do hạn chế về nguồn nhân lực và chi phí bảo trì, việc thiết lập các ưu tiên bảo trì trở nên đặc biệt cần thiết. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng quá trình cacbonat hóa và điều kiện ẩm ướt trong các lỗ rỗng của bê tông có ảnh hưởng lớn đến sự ăn mòn và bong tróc hư hỏng. Chiều sâu cacbonat hóa từ lâu được xem là một thông số đáng tin cậy và có thể dự đoán để đánh giá nguy cơ bong tróc, trong khi sự hiện diện của nước chỉ được coi là một điều kiện cần. Tuy nhiên, các khảo sát gần đây cho thấy có nhiều trường hợp bong tróc xảy ra ở bê tông không bị cacbonat hóa. Phân tích từ các khảo sát này chỉ ra rằng độ sâu cacbonat hóa không phải là một thông số dự đoán chính xác cho hiện tượng bong tróc, thậm chí gây khó khăn cho các kỹ sư trong việc đánh giá nguy cơ hư hỏng công trình. Hơn nữa, qua nghiên cứu xác suất thống kê sự thấm nước mưa đóng vai trò quan trọng đối với hiện tượng bong tróc, không chỉ vì nó là điều kiện cần cho sự ăn mòn mà còn ảnh hưởng đến quá trình cacbonat hóa. Các thí nghiệm trong điều kiện phòng thí nghiệm đã được thực hiện để xác định tác động của sự lặp lại nước mưa mô phỏng đến sự ăn mòn trong bê tông bị cacbonat hóa toàn phần, một phần và không bị cacbonat hóa. Ngoài ra, ảnh hưởng của giá trị pH và các anion như NO_3^- và SO_4^{2-} trong nước mưa mô phỏng đến sự ăn mòn cũng được xem xét nhằm làm sáng tỏ cơ chế của vấn đề này.

KEYWORDS

Water permeability
Corrosion of reinforced steel
Spalling
Carbonation

ABSTRACT

Maintenance plays a crucial role in ensuring safety and extending the service life of construction structures. However, due to limitations in human resources and maintenance costs, establishing maintenance priorities becomes particularly essential. Studies have shown that carbonation processes and moisture conditions within the pores of concrete significantly impact corrosion and spalling phenomena. The carbonation depth has long been regarded as a reliable and predictable parameter for assessing spalling risk, whereas the presence of water has only been considered a necessary condition. However, recent surveys indicate that spalling has occurred in numerous cases where concrete was not carbonated. Analyses from these surveys suggest that carbonation depth is not an accurate predictive parameter for spalling and may even pose challenges for engineers in assessing structural damage risks. Furthermore, probabilistic studies have demonstrated that rainwater infiltration plays a significant role in spalling, not only because it is a necessary condition for corrosion but also because it influences the carbonation process. Laboratory experiments have been conducted to determine the impact of repeated simulated rainwater exposure on corrosion in partially carbonated and non-carbonated concrete. Additionally, the effects of pH values and anions such as NO_3^- and SO_4^{2-} in simulated rainwater on corrosion have been examined to clarify the underlying mechanisms of this issue.

1. Đặt vấn đề

Bê tông cốt thép được sử dụng rộng rãi trong xây dựng nhờ chi phí thấp, độ bền cao và khả năng tạo hình dễ dàng. Trong nhiều trường hợp, bê tông cốt thép cũng thể hiện độ bền lâu dài nhờ môi trường kiềm cao, giúp hình thành và duy trì một lớp thụ động bảo vệ bề mặt thép khỏi sự ăn mòn [1]. Tuy nhiên, trong một số điều kiện, lớp thụ

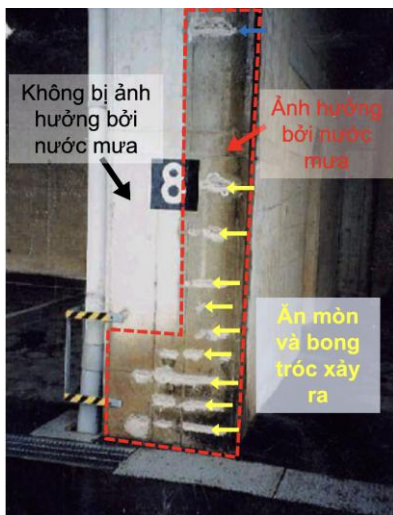
động này có thể bị phá vỡ, dẫn đến sự ăn mòn xảy ra. Sự ăn mòn của cốt thép trong các cấu trúc bê tông là một trong những vấn đề lớn đối với ngành công nghiệp xây dựng, bởi nó có thể gây bong tróc, làm giảm tuổi thọ công trình và gia tăng chi phí bảo trì. Hậu quả nghiêm trọng từ sự ăn mòn thép trong bê tông được xem là một trong những thách thức hạ tầng lớn nhất mà các quốc gia công nghiệp đang đối mặt [2].

*Liên hệ tác giả: vietcuong.vu@utc.edu.vn

Nhận ngày 15/12/2025, sửa xong ngày 06/02/2026, chấp nhận đăng ngày 07/02/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.02.2026.1204>

Carbonat hóa là quá trình trong đó carbonate từ không khí trung hòa môi trường kiềm trong bê tông, dẫn đến sự mất đi lớp thụ động của cốt thép. Tuy nhiên, chỉ riêng quá trình carbonat hóa không đủ để gây ra sự ăn mòn thép, bởi ăn mòn là một phản ứng điện hóa đòi hỏi sự hiện diện của oxy và nước [3]. Tương tự carbonate, oxy trong không khí có thể dễ dàng thâm nhập vào bê tông trong điều kiện khô. Nhiều nghiên cứu khảo sát cho thấy trong điều kiện khô, độ sâu carbonat hóa có thể rất lớn, thậm chí vượt quá độ dày lớp bê tông bảo vệ, nhưng mức độ ăn mòn lại không đáng kể [4][5]. Nguyên nhân là do thiếu sự thấm nước tới vị trí cốt thép. Ngược lại, khi bê tông ngập hoàn toàn trong nước, sự ăn mòn cũng không đáng kể do hạn chế thâm nhập của carbonate và oxy. Các cấu trúc bê tông trải qua chu kỳ ướt-khô dường như đáp ứng đầy đủ các điều kiện tiếp xúc với carbonate, oxy và nước. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng sự ăn mòn và bong tróc đáng kể xảy ra ở các cấu trúc bê tông tiếp xúc với nước mưa, ngay cả khi độ sâu carbonat hóa chưa chạm đến cốt thép [4][5][6]. Do đó, một số ý kiến cho rằng độ sâu carbonat hóa là một thông số gây nhầm lẫn trong việc ưu tiên bảo trì, và các tiêu chuẩn thiết kế cần coi khả năng chống thấm nước mưa là yếu tố quan trọng hàng đầu để ngăn ngừa ăn mòn [7].



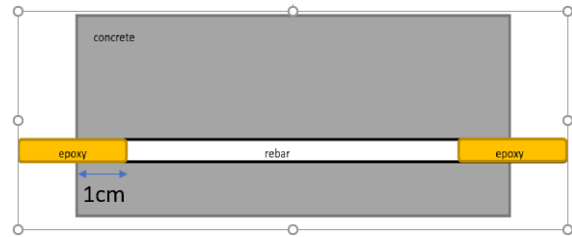
Hình 1. Ảnh hưởng của thấm nước mưa tới hư hỏng kết cấu bê tông cốt thép [6].

Dữ liệu về nước mưa tại Nhật Bản (năm 2014) cho thấy nước mưa chứa axit với độ pH có thể xuống tới 3,5 [8]. Các nghiên cứu đã xác nhận rằng axit có thể phân hủy tất cả các sản phẩm thủy hóa, bao gồm gel C-S-H, ngay cả ở mức pH 4,7 [9][10]. Hơn nữa, thành phần nước mưa chứa các anion như Cl^- , NO_3^- và SO_4^{2-} , vốn có khả năng gây hại cho cấu trúc bê tông. Trong nghiên cứu này, tác động kết hợp của carbonat hóa và sự thấm nước mưa xét tới tính axit (độ pH) tới sự ăn mòn cốt thép đã được đánh giá. Các mẫu bê tông cốt thép được đặt trong chu kỳ ướt-khô; trong giai đoạn ướt, các mẫu được ngâm trong các loại nước mưa mô phỏng với các độ pH khác nhau, và các thông số ăn mòn được đo ngay sau chu kỳ ướt.

2. Thí nghiệm và phương pháp đo

2.1. Chế tạo mẫu thí nghiệm

Mẫu thí nghiệm được chế tạo từ vữa với tỷ lệ nước-xi măng là 0,65 có kích thước $20 \times 20 \times 5$ cm, độ dày bê tông bảo vệ 1 cm. Một thanh thép nguyên bản được nhúng vào mỗi mẫu, với đường kính 1cm. Hai đầu thanh thép nằm ngoài vữa để kết nối dây điện với một potentiometer, và được phủ epoxy sâu 1 cm vào phần vữa để ngăn ăn mòn tại các đầu cốt thép như mô tả ở Hình 2.



Hình 2. Hình dạng, kích thước mẫu và cách bố trí cốt thép.

Xi măng Portland thông thường (OPC) đạt tiêu chuẩn công nghiệp Nhật Bản (JIS), với khối lượng riêng 3,15, được sử dụng trong vữa. Cốt liệu mịn có kích thước tối đa 4,75 mm và khối lượng riêng 2,65. Các mẫu được đúc với mặt bê tông bảo vệ ở đáy khuôn. Sau khi đúc, mẫu được phủ bề mặt và đặt trong phòng trộn 1 ngày trước khi tháo khuôn, sau đó bảo quản ở nhiệt độ $20^\circ C$ và độ ẩm tương đối 60%. Trước khi thử nghiệm, 5 mặt của mẫu được phủ 2 lớp epoxy, chỉ để lại 1 mặt lớp bê tông bảo vệ tiếp xúc với khí và nước.

2.2. Gia tốc Carbonat hoá

Mục đích của gia tốc carbonat hóa là đánh giá ảnh hưởng của giá trị pH nước mưa mô phỏng đến sự ăn mòn ở các mức độ carbonat hóa khác nhau. Dù độ dày bê tông bảo vệ mỏng (1 cm) và sự chênh lệch độ sâu carbonat hóa nhỏ (0,5 hoặc 1 cm), kết quả thu được vẫn đủ để phân biệt trạng thái ăn mòn nhờ độ nhạy cao của potentiometer.

Các mẫu được đặt trong buồng gia tốc carbonat hóa để đạt độ sâu carbonat hóa 0,5 cm, 1 cm và 2 cm, với 6 mẫu cho mỗi mức độ. Buồng được duy trì ở điều kiện $40^\circ C$, độ ẩm tương đối 30% và nồng độ carbonate 5%. Độ sâu carbonat hóa được đo bằng cách phá vỡ các mẫu trụ kiểm chứng 5×10 cm cùng điều kiện chế tạo, sau đó phun phenolphthalein để xác định chiều sâu carbonat hoá.

2.3. Nước mưa mô phỏng

Theo Cơ quan Khí hậu Nhật Bản (2014), giá trị pH thấp nhất của nước mưa được ghi nhận là 3,51, với giá trị trung bình là 4,87 và độ lệch chuẩn là 0,417. Phân bố chuẩn của pH cũng như thành phần trung bình của nước mưa được minh họa trong Hình 4 và Bảng 1. Việc phân tích phân bố này cho phép xác định tần suất xuất hiện của các giá trị pH thực tế, từ đó lựa chọn giá trị pH phù hợp cho nước mưa mô phỏng.

Tỷ lệ giữa ion sunfat (SO_4^{2-}) và nitrat (NO_3^-) vào khoảng 1:1 được coi là một chỉ số quan trọng của quá trình axit hóa. Do đó, trong nước mưa mô phỏng, hai loại axit H_2SO_4 và HNO_3 được sử dụng với tỷ lệ 1:1.

2.4. Thiết bị và phương pháp đo

Thiết bị potentiometer Giatec iCOR™ được sử dụng để đo ba thông số: tốc độ ăn mòn, thế ăn mòn và điện trở bê tông. Thiết bị này phù hợp cho cả ứng dụng thực địa và phòng thí nghiệm. Mối quan hệ giữa thế ăn mòn và xác suất ăn mòn được điều chỉnh từ ASTM C876.

2.5. Qui trình thí nghiệm

Các mẫu được đặt trong buồng thời tiết ở giai đoạn khô (5 ngày, 40 °C, 30 % RH), sau đó ngâm trong thùng 40 lít nước mưa mô phỏng (2 ngày) ở giai đoạn ướt. Mỗi thùng chứa nước mưa với pH từ 7 đến 2,5. Giá trị pH được duy trì bằng cách bổ sung lượng axit hai lần mỗi ngày, kiểm tra bằng máy đo pH. Sau giai đoạn ướt, mẫu được lấy ra, làm sạch bề mặt và đo các thông số ăn mòn.

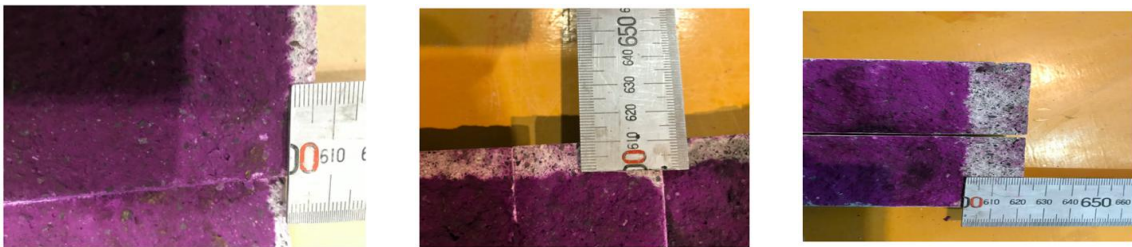
3. Kết quả và thảo luận

Mặc dù thiết bị có thể đo ba thông số, nhưng việc đánh giá khả năng xảy ra ăn mòn chỉ dựa trên hiệu điện thế ăn mòn. Do đó, trong nghiên cứu này, chỉ số hiệu điện thế ăn mòn được xem xét. Ngoài ra, dữ liệu của chu kỳ đầu tiên trong tất cả các thí nghiệm có sự khác biệt đáng kể so với các chu kỳ còn lại, nên đã bị loại bỏ. Kết quả của bốn mức thí nghiệm được trình bày trong Hình 7. Có thể thấy rằng chỉ có trường hợp độ sâu cacbonat hóa 5 mm thể hiện hiệu điện thế ăn mòn

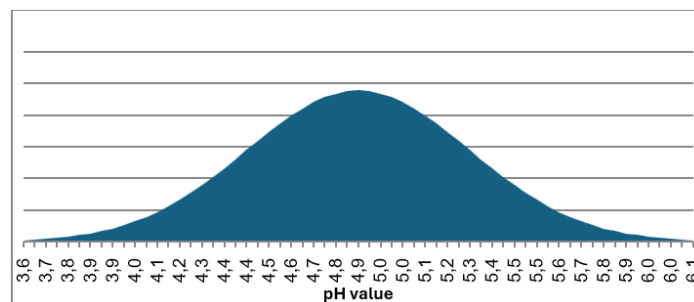
có xu hướng phụ thuộc vào giá trị pH của nước mưa mô phỏng, trong khi các trường hợp còn lại không cho thấy ảnh hưởng này. Hơn nữa, trong cả bốn trường hợp, hiệu điện thế ăn mòn có xu hướng giảm độ âm theo chu kỳ, nghĩa là rủi ro ăn mòn giảm. Từ đó có thể kết luận rằng giá trị pH hoặc các axit trong nước mưa hầu như không có hoặc có ảnh hưởng không đáng kể đến quá trình ăn mòn. Kết quả này có thể giải thích bởi lượng axit trong nước mưa mô phỏng quá nhỏ so với lượng lớn $\text{Ca}(\text{OH})_2$ có tính đệm trong vữa xi măng [11]. Hơn nữa, các anion SO_4^{2-} và NO_3^- không gây ăn mòn ngay cả khi thanh thép tiếp xúc với chúng [12]. Sự giảm hiệu điện thế ăn mòn có thể là do quá trình thủy hóa xi măng bổ sung và sự hình thành thạch cao từ phản ứng giữa H_2SO_4 và $\text{Ca}(\text{OH})_2$ trong vữa xi măng.

Mức độ cacbonat hóa cao hơn của mẫu thử dẫn đến giá trị hiệu điện thế ăn mòn có giá trị âm hơn. Hơn nữa, trong trường hợp độ sâu cacbonat hóa đạt 20 mm, hiệu điện thế ăn mòn của tất cả các mẫu tiếp xúc với nước mô phỏng đều âm hơn -500 mV/CSE, giá trị này cũng âm hơn so với ngưỡng -350 mV/CSE – mức giới hạn với 90 % khả năng xảy ra ăn mòn theo tiêu chuẩn ASTM C876 [13].

Sau khi hoàn tất đo lường ăn mòn qua tất cả các chu kỳ, các mẫu thử được phá vỡ để kiểm tra sự ăn mòn có thể quan sát được của cốt thép. Như thể hiện trong Hình 8, đối với trường hợp có độ sâu cacbonat hóa 20 mm, tình trạng ăn mòn nghiêm trọng đã xảy ra trên cốt thép với lượng sản phẩm ăn mòn rõ ràng, mặc dù mẫu thử chỉ trải qua ba chu kỳ. Trong khi đó các mẫu có độ sâu cacbonat hóa 0mm và 8mm, không phát hiện được sự ăn mòn có thể quan sát bằng mắt thường. Đối với mẫu thử có độ sâu cacbonat hóa 8 mm, một số mẫu có hiệu điện thế ăn mòn âm hơn -350 mV/CSE; tuy nhiên, giá trị này trở nên ít âm hơn sau các chu kỳ thí nghiệm. Do đó, điều này có thể lý giải hợp lý cho việc không phát hiện ăn mòn rõ ràng trên các mẫu thử này.



Hình 3. Đo chiều sâu cacbonat hoá bằng các mẫu kiểm chứng.



Hình 4. Phân bố chuẩn giá trị pH nước mưa ở Nhật Bản (2014).

Bảng 1. Thành phần của nước mưa.

Thành phần nước mưa ($\mu\text{mol/L}$)												
SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	NH_4^+	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	nssSO_4^{2-}	nssCl^-	nnsCa^{2+}	nssMg^{2+}	nnsK^+
20.7	19	94.6	21.9	80.8	3	6.9	9.8	15.8	2.8	5.1	0.8	1.4

Lưu ý: nss là viết tắt của "không phải muối biển".

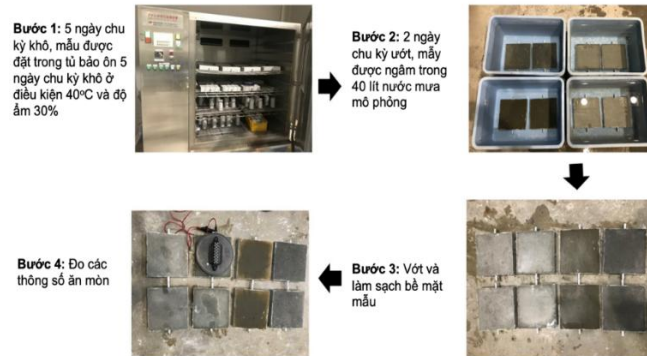


Hình 5. Thiết bị đo các thông số ăn mòn cốt thép.

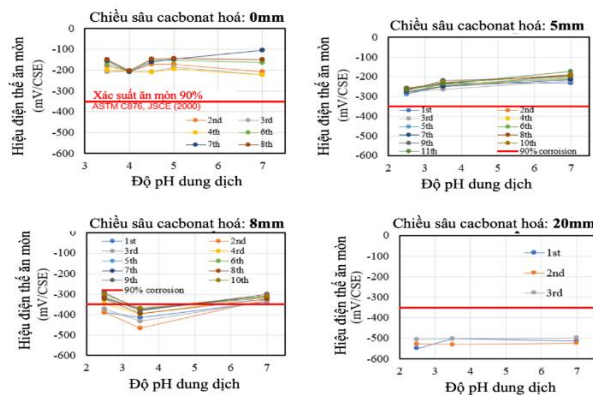
Bảng 2. Mối quan hệ giữa hiệu điện thế ăn mòn và xác suất khả năng xảy ra ăn mòn.

Hiệu điện thế ăn mòn đo được (mV/CSE*)	Xác suất xảy ra ăn mòn
> -200	Nhỏ hơn 10 %
- 200 to -350	Không xác định
< -350	Lớn hơn 90 %

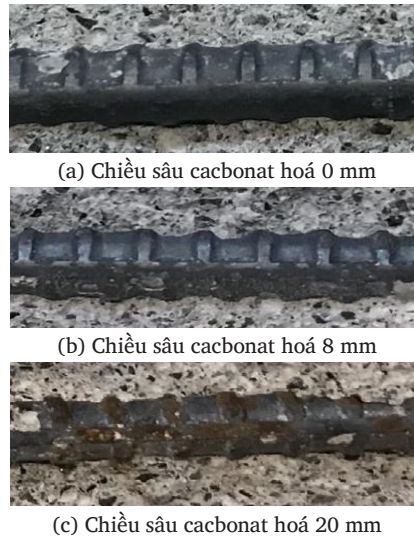
Lưu ý: CSE = Điện cực đồng sunfat.



Hình 6. Quy trình thí nghiệm đo các thông số ăn mòn.



Hình 7. Ảnh hưởng của chiều sâu cacbonat hoá và độ pH dung dịch tới hiệu điện thế ăn mòn.



Hình 8. Hình ảnh tình trạng ăn mòn của cốt thép sau khi phá dỡ mẫu.

4. Kết luận

Từ các kết quả thí nghiệm thu được, có thể rút ra một số kết luận chính như sau:

- Axit trong nước mưa không hoặc có ảnh hưởng không đáng kể đến sự ăn mòn của cốt thép. Do đó, ăn mòn nên được xem xét là kết quả của tác động kết hợp giữa quá trình cacbonat hóa và sự thâm nhập của nước.
- Ăn mòn có thể xảy ra do tác động kết hợp của quá trình cacbonat hóa và sự thâm nhập của nước, ngay cả khi độ sâu cacbonat hóa chưa đạt đến vị trí của cốt thép.
- Hiệu điện thế ăn mòn thu được phụ thuộc vào độ sâu cacbonat hóa của mẫu thử. Do đó, có thể kết luận rằng, trong cùng một điều kiện thâm nhập nước, mức độ ăn mòn phụ thuộc vào mức độ cacbonat hóa tại vị trí cốt thép.

Vì vậy để đánh giá khả năng ăn mòn của bê tông cốt cần xây dựng mô hình dự báo xác định chiều sâu ăn mòn do tác động kết hợp của quá trình cacbonat hóa và sự thâm nhập của nước.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được thực hiện với sự hỗ trợ tài chính từ Đề tài T2025-XD-007, và sự hỗ trợ kỹ thuật, thiết bị tới kỳ Kishi Lab, Viện khoa học công nghiệp, Đại học Tokyo - Nhật Bản. Nhóm tác giả xin được cảm ơn trân trọng cảm ơn sự hỗ trợ trên.

Tài liệu tham khảo

[1]. A. Poursaee, Corrosion of Steel in Concrete Structures. 2016.
 [2]. J. P. Broomfield, Corrosion of steel in concrete, 2nd Edition. 2007.

[3]. S. Ahmad, "Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction - A review," Cem. Concr. Compos., vol. 25, no. 4-5 SPEC, pp. 459-471, 2003.
 [4]. H. S. Tadayoshi Ishibashi, Tokiharu Furuya, Naoyuki Hamasaki, "Investigation of concrete spalling in bridges," JSCE Proc., vol. V56, no. No.711, pp. 125-134, 2002.
 [5]. T. I. Satoshi Maehara, "Study on the effect of the presence or absence of rain on carbonation and spalling," JSCE Proc., vol. Vol 74, no. 2, pp. 80-87, 2018.
 [6]. Y. Matsuda, "Water' controls and determines the durability of concrete. 1-effect of water on degradation of concrete structure," Jstage - Concr. Eng., vol. 51, no. 12, pp. 989-994, 2013.
 [7]. Y. Yuki, "Research on durability design, concrete construction and evaluation of surface quality to rationally ensure the durability of structures," 2019.
 [8]. "Rainwater participation report -Japan Climate Agency," 2014.
 [9]. Y. F. Fan, Z. Q. Hu, Y. Z. Zhang, and J. L. Liu, "Deterioration of compressive property of concrete under simulated acid rain environment," Constr. Build. Mater., vol. 24, no. 10, pp. 1975-1983, 2010.
 [10]. H. Okochi, H. Kameda, S. I. Hasegawa, N. Saito, K. Kubota, and M. Igawa, "Deterioration of concrete structures by acid deposition - An assessment of the role of rainwater on deterioration by laboratory and field exposure experiments using mortar specimens," Atmos. Environ., vol. 34, no. 18, pp. 2937-2945, 2000.
 [11]. E. E. Pressler, S. Brunauer, D. L. Kantro, and C. H. Weise, "Determination of the Free Calcium Hydroxide Contents of Hydrated Portland Cements and Calcium Silicates," Anal. Chem., vol. 33, no. 7, pp. 877-882, 1961.
 [12]. M. M. El-Naggar, "Effects of Cl⁻, NO³⁻ and SO⁴²⁻ anions on the anodic behavior of carbon steel in deaerated 0.50 M NaHCO₃ solutions," Appl. Surf. Sci., vol. 252, no. 18, pp. 6179-6194, 2006.
 [13]. ASTM C876-91, "Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete," vol. 03, no. Reapproved, pp. 1-6, 1999.