

雨掛かりの有無が中性化による かぶりの剥離・剥落に及ぼす影響に関する研究

前原 聡¹・伊代田 岳史²

¹正会員 東急建設株式会社 技術研究所 (〒252-0244 神奈川県相模原市中央区田名3062-1)

E-mail: maehara.satoshi@tokyu-cnst.co.jp

²正会員 芝浦工業大学教授 工学部土木工学科 (〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5)

E-mail: iyoda@sic.shibaura-it.ac.jp

RC 構造物での中性化による鉄筋腐食の進行は、雨掛かりなどによる水分供給の有無に影響を受けると考えられる。本研究では、実構造物を対象として 221 測点の中性化深さ、かぶりおよび鉄筋の腐食度を調査し、それらの結果に基づいて雨掛かりの有無が鉄筋腐食の進行とかぶりの剥離・剥落に及ぼす影響を整理した。また、実構造物より鉄筋を採取、分析して雨掛かりの有無による中性化での鉄筋腐食の違いとコンクリートの含水率分布を調査した。その結果、かぶりの剥離・剥落に至るまでの過程で、雨掛かりの有無が大きく影響することが示唆され、雨掛かりがある場合では水分供給による乾湿繰り返しの影響を受け、含水率の変動がコンクリート表面のほうが大きくなる。そのことで、鉄筋の腐食速度がコンクリート表面のほうが大きくなることが考えられた。

Key Words : carbonation, corrosion, cover concrete, spalling/falling, rain exposure

1. はじめに

RC 構造物の代表的な劣化である中性化は、コンクリート中のアルカリ性を低下させ、鉄筋の不動態皮膜を破壊、鉄筋腐食を引き起こす。この鉄筋腐食は、腐食生成物の体積膨張圧によりかぶりコンクリートにひび割れや剥離・剥落を発生させる。かぶりコンクリートの剥落は、大きな第三者災害につながることから、RC 構造物を維持管理していくうえで適切な補修等の対策を施す必要がある。さらに、鉄筋が露出することで腐食が著しく進展し、構造物の性能を低下させる。そのため、構造物を長期間供用するためには、現状の劣化程度の把握とその後の正確な劣化予測をすることが重要となる。

中性化による劣化過程で鉄筋腐食は、かぶりから中性化深さを減じた中性化残りが「ある値」となると開始するものとされており、土木学会コンクリート標準示方書¹⁾では、中性化残り 10mm が鉄筋腐食の開始の目安とされている。鉄筋腐食が開始する以前での劣化予測では、中性化残りがこの「ある値」となるまでの期間を予測することになり、その中性化の進行には、水セメント比やセメント種類および環境条件などが影響を及ぼすとされている。その中でも、コンクリートの乾燥状態により中性化の進行は変化し、雨掛かりなどによる水分供給があ

る場合では、乾燥状態にある場合よりも進行が遅くなるといわれている^{2,3)}。そして、鉄筋腐食が開始した後は、腐食面積率、腐食減量および腐食深さなどの腐食程度に着目し、劣化程度を予測することになる。例えば、鉄道構造物等維持管理標準⁴⁾を参考にすると、剥離・剥落に至るまでの期間では、中性化による鉄筋の腐食速度は腐食深さで 3.0×10^{-3} mm/年とし、ひび割れ発生時の腐食深さとなるまでの時期を予測することができる。

また、森永⁵⁾は、水セメント比が 55% で寸法 $20 \times 40 \times 148$ mm の角柱モルタル供試体の全断面を促進中性化させた状態で、各々の環境条件に供試体を約 3 年間暴露して鉄筋の腐食量を求めている。この実験から、鉄筋の腐食量は時間の経過とともに増加し、腐食量の重回帰分析から温度、湿度および酸素濃度の要因を変数とした腐食速度を定量的に示している。その結果、温度および湿度が大きいほど、腐食速度が大きくなることを定式化して提案している。さらに、石橋ら⁶⁾は、実構造物の調査結果に基づいた検討において、雨掛かりがある場合のほうがかぶりコンクリートが剥離・剥落し易くなる傾向にあることを示している。これらより、大気中での鉄自体の腐食に関して、水分および酸素の供給の程度によって、腐食速度が大きくなることを知られていることを考慮すると、コンクリート内での鉄筋腐食の進行においても、

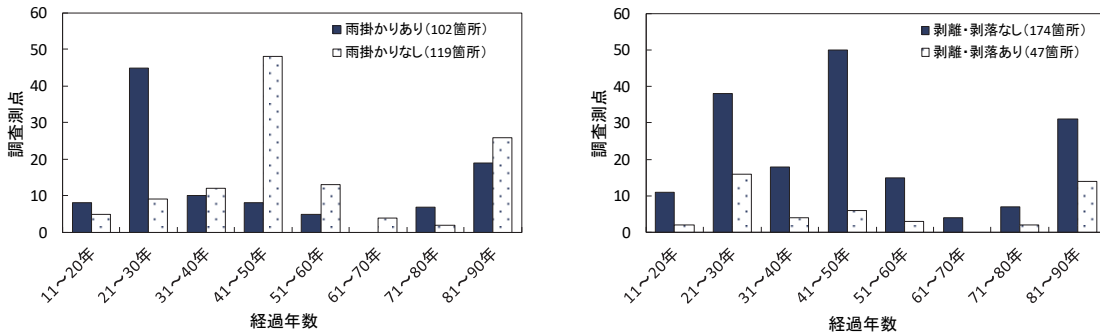


図-1 調査測点の概要

雨掛かりの有無などの環境条件が大きく影響を及ぼすものとする。

以上のことから、雨掛かりがある場合は中性化の進行は遅くなるが、鉄筋腐食の進行は速くなることが想定される。しかし、中性化による劣化過程において、雨掛かりなどの環境条件が鉄筋腐食の進行に及ぼす影響を考慮しての劣化予測がなされていないのが現状である。そこで、中性化の進行から鉄筋腐食、かぶりコンクリートの剥離・剥落の劣化過程において、雨掛かりの影響を整理する必要があると考える。

まず、本研究では、昭和初期に構築され 80 年以上経過したものから経過年数 10 年程度と幅広い施工年代の実構造物の様々な部材において、中性化深さ、かぶりおよび鉄筋の腐食度を調査した。それらの調査結果に基づき雨掛かりの有無が鉄筋腐食の進行およびかぶりコンクリートの剥離・剥落に及ぼす影響を整理した。

次に、実構造物から中性化により腐食した鉄筋を採取し、鉄筋断面を光学顕微鏡で観察して腐食の偏りを把握するとともに断面減少量を求めた。それらの結果より、中性化の進行を加味して、雨掛かりの有無による腐食速度を算出し、腐食速度に及ぼす雨掛かりの影響を示した。

2. かぶりコンクリートの剥離・剥落に及ぼす雨掛かりの影響

(1) 実構造物の調査概要

a) 対象構造物

表-1 に対象構造物の諸元を示す。調査対象は、高架橋、橋梁、擁壁およびトンネルなどの合計 36 構造物で、柱、梁、スラブ下面、高欄、壁部および有筋区間の覆工コンクリートなどの様々な部材において、調査を実施した。それらの竣工年は 1927 年（昭和 2 年）から 2003 年（平成 15 年）であり、経過年数が 11~87 年の構造物である。それらの中で、23 構造物は竣工から 40 年以上が経過しており、全体の 6 割程度であった。なお、全ての対象構造物は、首都圏内の市街地で、飛来塩分や凍結防止材などの外的塩化物イオンの影響がない一般環境下で、

表-1 対象構造物の諸元

No.	構造物種類	部位	竣工年	調査年	経過年数	調査測点
1	高架橋	柱、スラブ下面	1927	1982	55	8
2	高架橋	柱、梁、スラブ下面	1927	2011	84	12
3	高架橋	柱、梁、スラブ下面	1927	2014	87	4
4	高架橋	柱、梁、スラブ下面	1928	2011	83	9
5	高架橋	柱、梁、スラブ下面	1928	2014	86	13
6	擁壁	壁部	1928	2014	86	6
7	高架橋	柱、梁	1929	1999	70	3
8	高架橋	スラブ下面	1929	2014	85	2
9	橋梁	橋台	1932	2012	80	4
10	高架橋	柱	1937	2014	77	5
11	高架橋	柱	1950	2014	64	1
12	高架橋	柱、梁	1957	2008	51	10
13	高架橋	柱、梁、スラブ下面	1961	2010	49	6
14	高架橋	柱、梁、スラブ下面	1964	2010	46	9
15	高架橋	柱、梁、スラブ下面	1964	2014	50	5
16	高架橋	梁	1965	2014	49	1
17	人工地盤	スラブ下面	1966	2008	42	7
18	高架橋	柱、梁、スラブ下面	1966	2011	45	3
19	トンネル	覆工	1966	2014	48	3
20	トンネル	覆工	1966	2014	48	4
21	高架橋	柱、梁、スラブ下面	1968	2010	42	7
22	高架橋	柱、梁、スラブ下面	1968	2010	42	17
23	トンネル	覆工	1972	2014	42	1
24	トンネル	覆工	1977	2010	33	4
25	トンネル	覆工	1977	2014	37	6
26	高架橋	柱、梁、スラブ下面	1982	2014	32	5
27	高架橋	柱、梁、スラブ下面	1984	2011	27	6
28	擁壁	壁部	1987	2008	21	6
29	擁壁	壁部	1987	2013	26	14
30	擁壁	壁部	1987	2014	27	6
31	トンネル	覆工	1987	2014	27	2
32	橋梁	スラブ上面	1989	2008	19	4
33	橋梁	高欄	1989	2010	21	19
34	トンネル	覆工	2003	2014	11	2
35	トンネル	覆工	2003	2014	11	3
36	高架橋	柱、梁、スラブ下面	2003	2015	12	4
合計						221

表-2 鉄筋腐食度の評価基準⁴⁾

腐食度	評価基準
0	施工時の状況を保ち、以降の腐食が認められない。質量減少率：0%
I	部分的に軽微な腐食が認められる。質量減少率：2%
IIa	表面の大部分に腐食が認められる。質量減少率：4%
IIb	部分的に断面欠損が認められる。質量減少率：6%
III	鉄筋の全周にわたり断面欠損が認められる。質量減少率：10%

劣化要因として中性化となる環境条件のものを選定した。

b) 調査方法

各調査箇所において、目視・打音にてひび割れや剥離・剥落の有無を確認した。また、構造物、部材の周辺状況や雨掛かり、漏水による水跡の有無などから調査箇所における雨掛かりの有無を判断した。図-1 に調査測点数の内訳を、経過年数ごとの雨掛かりの有無および剥離・剥落の有無に分けて示す。調査測点は合計 221 点であり、その内の雨掛かりのある箇所は 102 点であった。また、剥離・剥落していた箇所は 47 点であった。

調査方法は、ひび割れや剥離・剥落のない箇所において、電磁レーダ法等の非破壊試験により鉄筋位置を把握し、剥離・剥落箇所では、目視および打音にてその位置

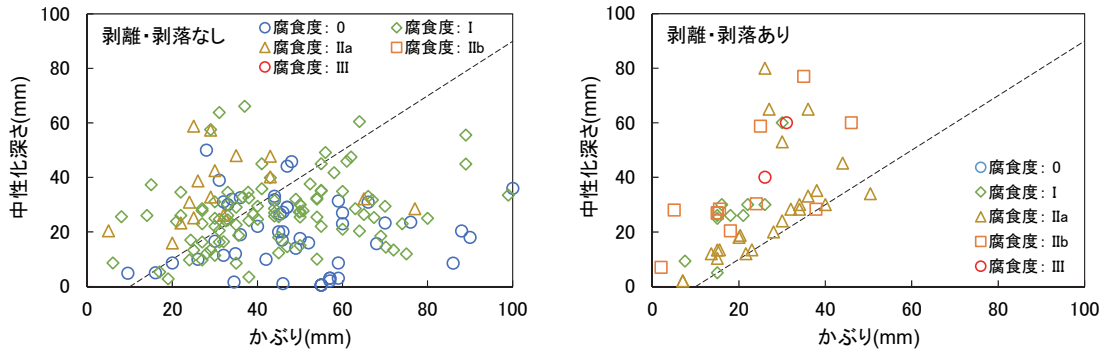


図-2 剥離・剥落に及ぼす腐食度の影響

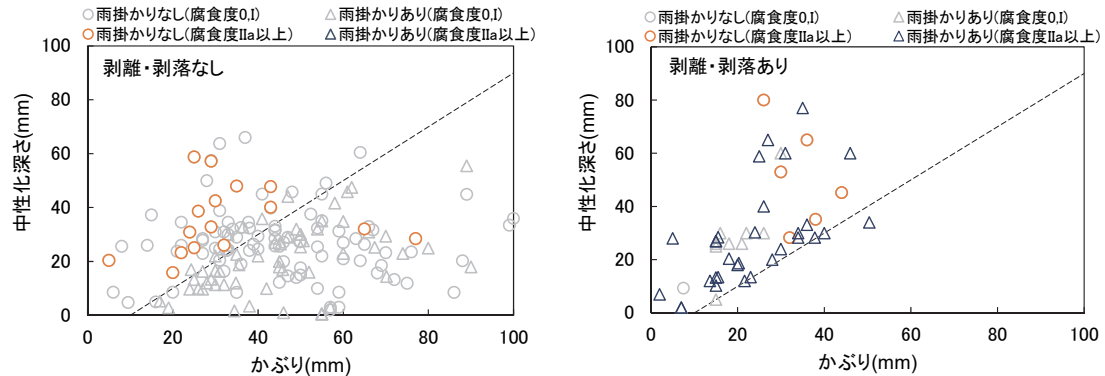


図-3 剥離・剥落に及ぼす雨掛かりの影響

を特定した。剥落箇所では、かぶりコンクリートがなく、鉄筋が露出していることから、調査時点での中性化深さと鉄筋腐食は著しく進行していると考えられる。そこで、剥離・剥落による中性化と鉄筋腐食の進行を除外するため、剥離・剥落箇所では、対象とする鉄筋の延長線上で、同程度のかぶりが残っている近傍の箇所を基本に調査した。

かぶりおよび中性化深さは、調査する位置で 100×100mm 程度の範囲を、かぶり側の鉄筋が露出するまではつとり、かぶりをノギスにて測定し、フェノールフタレイン溶液の噴霧により中性化深さを求めた。また、腐食度は、表-2 に示す鉄筋腐食度の評価基準⁴⁾に従い、露出させた鉄筋を目視にて評価し、5段階に分類した。

(2) 実構造物の調査結果および考察

図-2, 3 にかぶりと中性化深さの調査結果を示す。図-2 では腐食度ごとに分類し、図-3 では雨掛かりの有無の影響を、それぞれ剥離・剥落の有無に分けて図示した。図中の破線は中性化残り 10mm を示しており、破線より左側に分布している調査結果は、調査時点において中性化残りが 10mm 以下で、土木学会コンクリート標準示方書で示されている発錆限界以上の中性化が進行しているものである。

図-2 より、鉄筋の腐食度が IIa 以上のものは、概ね中性化残りが 10mm 以下となる箇所が発生していた。つまり、腐食度 IIa 「鉄筋の表面の大部分に腐食が認められる」まで中性化により鉄筋が腐食するためには中性化残

りが 10mm 以下となるまで中性化が進行することが条件としてあげられる。ただし、腐食度 IIa であってもかぶりコンクリートの剥離・剥落に至らない箇所も多く存在していた。また、腐食度 I であっても剥離・剥落している箇所が、かぶり 25mm 程度以下において確認された。これは、かぶりが小さい場合には腐食程度が小さくとも剥離・剥落しやすいことが考えられる。

次に図-3 より、雨掛かりの有無の影響を考慮すると雨掛かりのない場合では、腐食度が IIa 以上であっても剥離・剥落に至らない箇所が多く存在した。また、雨掛かりがある場合では、概ね中性化の進行が中性化残り 10mm 以下となり、腐食度が IIa 以上と腐食が進行すると、かぶりコンクリートが剥離・剥落に至る傾向を示している。つまり、腐食度 IIa と同程度の腐食程度であっても雨掛かりがない場合には剥離・剥落に至らない箇所が多く存在していること、さらに、腐食度 I でもかぶりが小さい箇所において、雨掛かりがある場合には剥離・剥落にしていることから、かぶりコンクリートの剥離・剥落に雨掛かりの有無が影響していることが示唆される。

なお、図-3 の剥離・剥落なしにおいて、かぶりが 60mm 以上で中性化残りが 10mm 以上であっても腐食度 IIa である箇所があった。本研究の範囲では、目視・打音によってかぶりコンクリートのひび割れや剥離・剥落の有無を判断している。これらは、コンクリート内部に空洞や豆板、材料分離などの施工初期における初期欠陥が発生していた可能性もあり、原因を特定するためにはより詳細な調査が必要であると考えられる。

(3) 腐食開始からの経過年数

それぞれの腐食度における想定腐食開始からの経過年数を求めた。中性化残りが 10mm となった時点から腐食開始と仮定し、式(1)により、中性化速度係数を用いて中性化残りが 10mm となる経過年数を算出した。そして、調査時点での構造物の経過年数から減じることで中性化残りが 10mm となった時点からの経過年数を求めた。表-3、図-4 に剥離・剥落箇所で腐食度 IIa 以上かつ中性化残りが 10mm 以下となるまで中性化が進行している箇所での想定腐食開始からの経過年数と腐食度の関係を示す。

$$t = t_1 - ((c - 10) / \alpha)^2 \quad (1)$$

ここで、 t : 想定腐食開始からの経過年数(年), t_1 : 構造物の経過年数(年), c : かぶり(mm), α : 中性化速度係数 $\alpha = y / \sqrt{t_1}$ (mm/√年), y : 中性化深さ(mm)

調査測点の多い腐食度 IIa に着目すると、腐食度 IIa の想定腐食開始からの経過年数は、雨掛かりがある箇所では平均 18.1 年、雨掛かりがない箇所では平均 43.6 年となった。つまり、腐食度 IIa の平均想定経過年数は、雨掛かりがない場合は、ある場合よりも 2.5 倍程度大きかった。想定腐食開始からの経過年数にばらつきが見られるが、これは、雨掛かりがある中でも、水分の供給量やコンクリートの緻密性などコンクリート中での鉄筋位置における水分状態が異なることや腐食度 IIa に達してからの経過年数の違いが影響しているものと推測する。

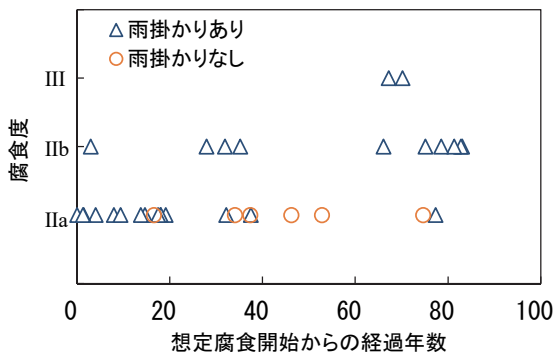


図-4 腐食度と経過年数の関係

表-3 想定腐食開始からの経過年数

	腐食度	最小値	最大値	平均値
雨掛かりあり	III	67.2	70.2	68.7
	IIb	2.9	83.1	53.7
	IIa	0.0	77.3	18.1
雨掛かりなし	IIa	16.5	74.6	43.6

表-4 対象構造物および分析試料の概要

鉄筋分析試料	構造物種類	部材	経過年数(年)	鉄筋径(mm)	腐食度	かぶり(mm)	中性化深さ(mm)	中性化残り(mm)	雨掛かりの有無	圧縮強度(N/mm ²)	剥離・剥落
A-1	A 高架橋	スラブ	10 ^{※1}	φ8	IIa	25.0 ^{※2}	22.7 ^{※2}	23	あり	13.0	なし
A-2			55(10)	φ8	IIa	8.1	42.1	-34.0			あり
B-1	B 高架橋	スラブ	64(32)	φ19	IIa	70.0 ^{※3}	92.4 ^{※3}	-22.4	なし	22.7	あり(補修)
C-1	C 高架橋	スラブ	87	φ19	IIa	25.0	63.8	-38.8		23.8	なし

※1 A 高架橋が供用年数 45 年時に実構造物から 1×2m 範囲のスラブを切出して保管、※2 切断面からのかぶりと中性化深さ、※3 吹付け補修箇所での補修厚さを含む

3. 鉄筋腐食に及ぼす雨掛かりの影響

(1) 構造物と鉄筋の概要および分析方法

a) 分析試料の概要

表-4、図-5 に対象構造物と採取した鉄筋の諸元を示す。分析試料の鉄筋は、A、B 高架橋および C 高架橋からスラブの一部を切出して、保管していたものより採取した。

A 高架橋のスラブ試験体は、供用年数 45 年時に実構造物より 1m×2m 程度切出して、スラブ下面が上側となるように 10 年間、屋外に暴露した。その後、中性化深さやかぶり、鉄筋の腐食度を調査し、分析試料 A-1 と A-2 の鉄筋を採取した。それらの分析試料は、調査時点で 55 年が経過しており、A-1 はスラブ下面からのかぶりが 86.3mm で、中性化深さが 65.5mm であった。なお、A-1 は切出した試験体の切断面からのかぶりが 25mm で、中性化深さは 22.7mm であったことから、試験体を切出した後に中性化が進行し、鉄筋が腐食したものである。このことから、A-1 は中性化残りが 2.3mm で中性化の進行が鉄筋表面まで到達していない状況であった。次に A-2 はスラブ下面からのかぶりが 8.1mm、中性化深さが 42.1mm であり、中性化残りが -34.0mm と鉄筋背面まで中性化が進行していた。A-2 では、中性化は供用開始から 55 年をかけて進行したもので、切出す前の 45 年間は雨掛かりがない環境で、切出してから 10 年間において雨掛かりのある環境で腐食したものである。

分析試料 B-1 は、供用年数 64 年が経過した B 高架橋より切出したスラブ試験体を雨掛かりのないように養生して保管していたものから鉄筋を採取した。B 高架橋のスラブ試験体は、供用年数 64 年が経過しており、供用年数 32 年時において吹付け補修がなされていた⁷⁾。吹付け補修前のかぶりは、過去の記録よりかぶりは 30mm 程度と推測され、補修時点において鉄筋背面よりも中性化が進行していたことが確認されている。また、吹付け

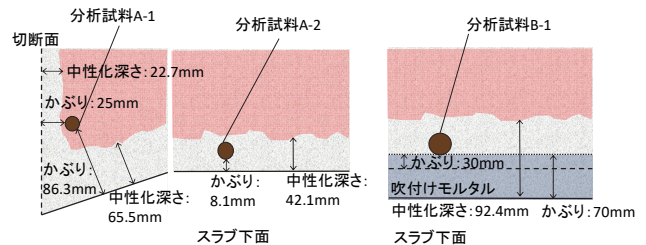


図-5 対象構造物および分析試料の概要

補修では水セメント比が40%以下のモルタルが使用され、かぶり厚が70mm以上確保されていたことから、吹付け補修後の中性化と鉄筋腐食の進行は著しく少なく、B-1は32年間で、雨掛かりのない環境下で中性化と腐食が進行したものとして推測する。

C高架橋スラブ試験体は、B高架橋に隣接しているC高架橋から供用年数87年時に1m×1m程度切出して、雨掛かりのないように養生して保管していたものである。なお、C高架橋には吹付け補修はなされていなかった。

b) 最大腐食深さおよび断面減少量

鉄筋腐食における腐食深さおよび断面減少量に及ぼす雨掛かりの有無の影響を把握するために、分析試料A-1、A-2およびB-1を対象に鉄筋断面の観察を行った。

分析試料は、鉄筋表面に付着したコンクリートを除去し、真空脱気環境下にて樹脂包埋した。その後、目視では孔食のように局部的に著しく腐食している箇所は確認されなかったため、任意の断面にて切断した。そして、切断断面を粒度320~4000番の耐水研磨紙と1μダイヤモンドスプレーを用いて鏡面研磨を行った。倍率12.5~500倍の光学顕微鏡にて、断面の全形とかぶり側、左右側(A-1においては上下側)、背面側で断面観察を行い、各箇所での最大腐食深さと断面減少量を求めた。なお、A-1では切断断面側をかぶり側とした。

c) 腐食生成物および体積膨張倍率

コンクリート中の鉄筋腐食では、オキシ水酸化鉄(α-FeOOH, β-FeOOH, γ-FeOOH)や酸化鉄(Fe₃O₄)などの腐食生成物が確認されている^{8)~10)}。それらの腐食生成物はそれぞれの密度が異なることから、含有する腐食生成物の割合によって、腐食生成物全体の体積膨張倍率が変化する。つまり、鉄筋腐食による断面減少量が同一であっても、腐食生成物の膨張倍率が異なるとかぶりコンクリートに作用する膨張圧が変化すると考えられる。

そこで、雨掛かりの有無の違いによる腐食生成物の種類、割合と体積膨張倍率を把握するため、分析試料A-1、A-2およびB-1の腐食生成物の結晶相をXRD分析にて同定した。それらの分析試料の鉄筋表面に付着したコンクリートを除去した後、腐食生成物を削り落として粉末状として採取した。採取した腐食生成物に内部標準試料としてZnOを15wt%添加してメノウ乳鉢にて粉碎、混合し、測定用試料とした。そして、内部標準試料を用いたリートベルト解析により結晶相の定量分析を行った。

次に、それぞれの腐食生成物の鉄素地Feに対する体積膨張倍率を式(2)により算出した^{8)~11)}。腐食生成物の密度は、PDF(Powder Diffraction File)に示されている値を用いた。なお、本研究では非晶質の腐食生成物は溶液中に液化し、腐食膨張には寄与しないと想定して、X線回折の結果として「非晶質+未同定相」と判断されたものを除外して算出した¹¹⁾。

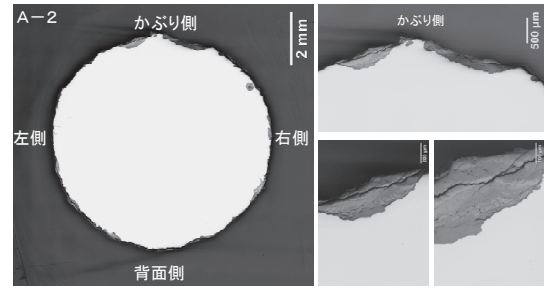


図-6 断面観察結果

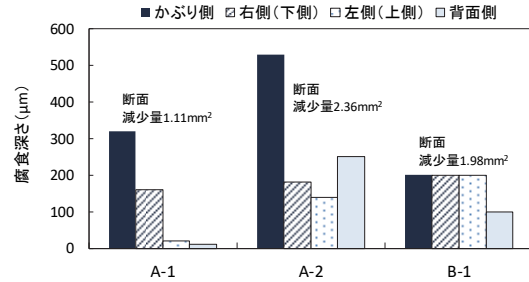


図-7 断面減少量および最大腐食深さ

$$\gamma = \frac{\rho_{Fe} \cdot \sum u_i n_i}{u_{Fe} \cdot n_{Fe} \cdot \rho} \quad (2)$$

ここで、 γ : 腐食生成物の体積膨張倍率、 ρ : 腐食生成物の密度(g/cm³)、 n_i : 腐食生成物の分子1個に含まれる各原子の数、 u_i : 各原子量、 ρ_{Fe} : 鉄の密度(g/cm³)

(2) 分析結果および考察

a) 最大腐食深さおよび断面減少量

図-6に断面観察結果の一例を、図-7に最大腐食深さと断面減少量の測定結果を示す。雨掛かりのあるA-1とA-2では、かぶり側の腐食深さが、左右および背面よりも大きくなり、鉄筋断面において腐食がかぶり側に偏る傾向を示した。雨掛かりのないB-1では各4方向での腐食深さは同程度となり、鉄筋断面において均一的に腐食している。また、中性化の進行が鉄筋背面まで達していないA-1の背面では腐食深さは著しく小さいが、A-2およびB-1の腐食深さはこれよりも大きく、中性化の進行が鉄筋背面に達することで、背面においても腐食が開始することが分かる。なお、断面減少量は、雨掛かりがあるA-2で2.36mm²と雨掛かりのないB-1の1.98mm²よりも大きくなった。A-2とB-1では、左右および背面の腐食深さは同程度であることから、雨掛かりのあるA-2ではかぶり側の腐食が大きくなることで断面減少量が増加したものである。

b) 腐食生成物および体積膨張倍率

図-8にX線回折による腐食生成物の定量分析結果と腐食生成物全体の体積膨張倍率を示す。A-1とA-2では、塩化物イオンの共存により生成されるβ-FeOOHが検出され、体積膨張倍率が2.77と2.70で、B-1の2.60よりも若干大きくなった。電食実験や塩害を模擬した腐食促進

実験では、条件によって密度が小さく体積膨張倍率に大きく寄与する塩化酸化鉄や塩化水酸化鉄が生成されると報告がある⁹⁾。今回の分析においては、それらの生成物は検出されなかった。

試料採取箇所や採取方法によるバラツキを考慮すると A-1, A-2 および B-1 の体積膨張倍率は同程度であり、雨掛かりの有無によって腐食生成物の体積膨張倍率に大きな違いはないと考える。

4. 腐食速度に及ぼす雨掛かりの影響

(1) 腐食対象範囲

断面観察の結果から、中性化が鉄筋背面まで達していない A-1 では鉄筋背面での腐食深さは小さいが、中性化が鉄筋背面に達することで、A-2 のように背面においても腐食が開始することが示された。これは、鉄筋腐食において、中性化の進行が影響を及ぼしていることを示している。そこで、図-9 に示すように中性化における鉄筋腐食の進展は、中性化の進展とともに鉄筋円周方向における腐食対象範囲が決定されるものと想定した。

まず、中性化の進行に伴い中性化残りが 10mm となった時点において鉄筋の腐食が開始するとした。ただし、中性化残りが 10mm となった時点においては、鉄筋のかぶり側が腐食対象範囲となり、鉄筋の背面側は、腐食対象範囲とはならないものと考えられる。中性化が進展し、中性化深さがかぶりと鉄筋直径-10mm 以上となった時点で鉄筋円周における腐食対象範囲が鉄筋全周となるものと仮定した。鉄筋円周における腐食対象範囲の算出方法を式(3a)(3b)(3c)に示す。

$$y < c - 10 \quad : \quad R = 0 \quad (3a)$$

$$c - 10 \leq y < c + D - 10 \quad : \quad R = D \cdot \cos^{-1} \frac{2(D - y - c + 10)}{D} \quad (3b)$$

$$y \geq c + D - 10 \quad : \quad R = \pi \cdot D \quad (3c)$$

ここで、 R : 鉄筋円周における腐食対象範囲(mm),
 y : 中性化深さ(mm), c : かぶり(mm), D : 鉄筋径(mm)

(2) 腐食速度

a) 分析試料および分析方法

腐食が開始した後で、雨掛かりの有無により鉄筋断面方向の腐食速度が異なるものと想定した。鉄筋断面方向の腐食速度を設定するにあたり、表-4 に示す A, B, C 高架橋のスラブ試験体より、さらに鉄筋を採取し、それらの断面減少量から腐食速度を求めた。断面方向の腐食速度を算出する際に用いた鉄筋の概要を表-5 に示す。

採取した鉄筋は、長さ 80mm 程度に切断し、鉄筋表面

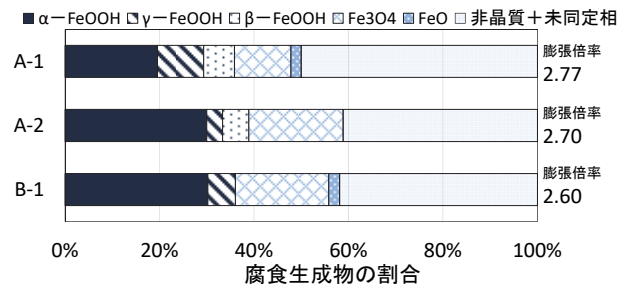


図-8 腐食生成物の含有割合および体積膨張倍率

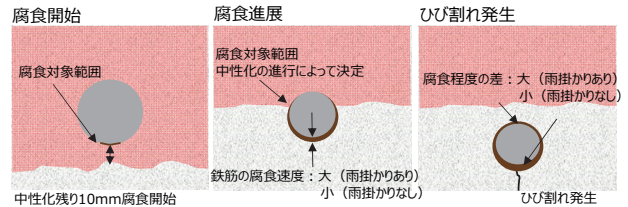


図-9 中性化による鉄筋腐食の進展機構

表-5 分析試料の概要

鉄筋分析試料	経過年数 雨掛かりの有無	鉄筋径 (mm)	中性化深さ (mm)	かぶり (mm)	断面減少量 (mm ²)
A-2	45年 雨掛かり なし	φ8	42.1	8.1	236 [*]
A-3			42.1	8.8	295
A-4			42.1	20.1	135
A-5			42.1	20.1	154
A-6			50.8	4.3	289
A-7	10年 雨掛かり あり	φ8	50.8	17.7	186
A-8			50.8	36.0	197
A-9			57.1	36.0	183
B-1	32年雨掛かりなし	φ19	52.4	30.0	198 [*]
C-1	87年 雨掛かり なし		63.8	25.0	326
C-2			63.8	25.0	421
C-3			63.8	25.0	445
C-4			63.8	26.0	306
C-5		63.8	27.0	458	

*断面観察により求めた断面減少量

に付着したコンクリートを除去した。その後、60℃、10%クエン酸二アンモニウム水溶液に 12 時間以上、浸漬させ腐食生成物を除去した。そして、腐食生成物除去後の鉄筋重量と長さを計測し、それぞれの鉄筋の単位長さあたりの重量を求めた。なお、断面観察を実施した A-2 および B-1 の断面減少量と単位長さあたりの重量の関係をを用いて、それぞれの分析試料の断面減少量を求めた。表-5 に分析試料の概要と断面減少量の結果を示す。

b) 腐食速度の算出方法および結果

まず B-1, C-1~5 で、雨掛かりのない場合の断面方向の腐食速度を算出した。B, C 高架橋の経過年数と中性化深さから中性化の進行を想定し、経過年数期間における腐食対象範囲の累計を式(3a)(3b)(3c)にて求めた。その腐食対象範囲の累計に鉄筋断面方向の腐食速度 dr/dt を乗ずることで鉄筋の断面減少量となることから、表-5 の断面減少量および式(4)により腐食速度 dr/dt を求めた。図-10 に断面方向の腐食速度の算出結果を示す。雨掛かりのない B, C 高架橋における鉄筋の腐食速度は、 $0.7 \sim 1.4 \times 10^3$ (mm/年)となった。なお、雨掛かりのない場合の結果は、森永⁹⁾の提案式による温度 20℃、湿度 60~70% の腐食速度 $1 \sim 2 \times 10^3$ 程度(mm/年)と概ね一致している。

$$M_n = \frac{dr}{dt} \cdot \sum_{i=1}^n R_n \quad (4)$$

ここで、 M_n ：経過年数 n における鉄筋の断面減少量 (mm^2)、 dr/dt ：鉄筋断面方向の腐食速度 ($\text{mm}/\text{年}$)、 R_n ：経過年数 n における鉄筋円周での腐食対象範囲 (mm)

次に、A 高架橋から採取した分析試料は、45 年間は雨掛かりがない環境で、スラブ試験体を切出してから 10 年間に於いて雨掛かりのある環境で腐食したものである。そこで、断面方向の腐食速度を算出するにあたり、雨掛かりのない 45 年間では、B-1、C-1~C-5 から求めた腐食速度の平均値 $1.0 \times 10^3 (\text{mm}/\text{年})$ として、その後の雨掛かりのある環境下での腐食速度を断面減少量および式 (4) から求めた。なお、調査時点において鉄筋背面まで中性化が進行しており、その中性化の進行程度を考慮すると供用年数 45 年においても鉄筋背面まで中性化が進行していたと推測する。そのため、環境が変化することで中性化の進展も変化することが考えられるが、鉄筋円周での腐食対象範囲に与える影響は小さいことから、中性化の進展は 55 年間で一律として考えた。

図-10 に鉄筋の腐食速度とかぶりの関係を示す。図中には参考文献^{9), 12)}における中性化による鉄筋の腐食速度をあわせて示す。雨掛かりのある A-2~A-9 の腐食速度は、 $1.4 \sim 5.2 \times 10^3 (\text{mm}/\text{年})$ となり、雨掛かりのない場合よりも大きくなった。さらに、雨掛かりのある場合は、かぶりが小さいほど腐食速度が大きくなる傾向を示した。

(3) コンクリート中の含水率分布

a) 調査概要および調査方法

雨掛かりの有無による腐食速度の違いは、コンクリート中の含水率に影響を受けると考え、A 高架橋および C 高架橋より切出したスラブ試験体を対象に調査した。

雨掛かりの有無によって、コンクリート表面からの内部にかけて含水率が異なることが考えられるため、対象スラブ試験体のコンクリート表面から深さ方向の含水率を測定した。含水率の測定は、電気抵抗式の測定器の表示値を用いて含水率分布を把握した。含水率の測定にあたっては $\phi 6\text{mm}$ 、長さ 70mm 程度の削孔穴を 30mm 間隔で 3 箇所設け、そこに電極 (長さ約 15mm) を挿入して深さ 10mm 毎の含水率を測定する手法^{13), 14), 15)}を参考とした。測定箇所はスラブ下面で、かぶりコンクリートにひび割れや剥離・剥落がない箇所を対象とした。測定時における環境条件は、A 高架橋のスラブ試験体では、試験体を屋内にて 7 日間以上静置して乾燥させた状態と、乾燥状態で測定した後に、雨掛かりの状態を模擬するため、コンクリート表面を 1 日および 3 日間湿潤状態とした湿封養生を行った後に、測定を行った。

b) 調査結果および考察

図-11 にコンクリート表面からの深さ方向の含水率の

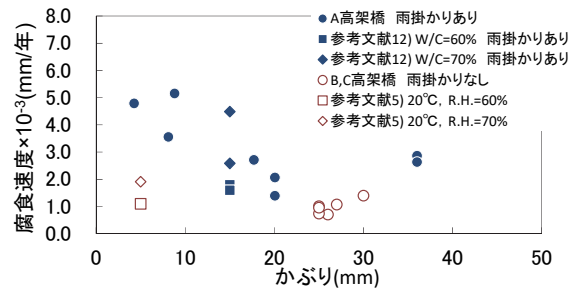


図-10 鉄筋の腐食速度とかぶりの関係

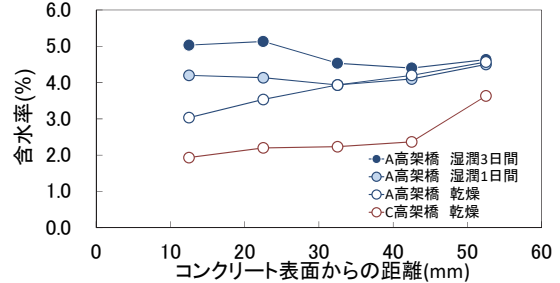


図-11 コンクリート表面からの含水率の分布

分布を示す。A 高架橋および C 高架橋の乾燥状態における表層と内部では、表層のほうが乾燥の影響を受けるため、含水率は 1~2% 程度小さくなった。また、雨掛かりのある A 高架橋では、コンクリート表面から 10~50mm の範囲の含水率は 3~5% であるのに対して、C 高架橋では含水率が 2~4% と雨掛かりのないほうが全体的に含水率が小さくなる傾向を示した。また、A 高架橋において、湿潤状態を 1 日間保つことで、コンクリート表面から 10~20mm の範囲の含水率が大きくなり、コンクリート内部と同程度の含水率となった。さらに、3 日間湿潤状態を保つとコンクリート表面から 10~20mm の範囲の含水率は、コンクリート内部の含水率よりも大きくなった。ただし、3 日間湿潤状態を保つことで含水率が変動する範囲はコンクリート表面から 40mm 程度の範囲であり、コンクリート表面から 50mm 以深における含水率の変動は小さかった。

以上のことから、雨掛かりのある構造物では、ない場合よりもコンクリート中の含水率が全体的に大きくなる傾向を示し、特に、コンクリート表面からの 50mm 程度までの範囲においては、乾湿繰り返しによる影響を受け、含水率の変動が内部よりも表面の方が大きくなるものと推測される。これは、実構造物を対象とした調査結果¹³⁾と同様の傾向を示しており、雨掛かりがある場合のコンクリート中の含水率は、表面から 50mm 程度以深では外部環境の影響は少なく、含水率の変動は小さいと考えられる。このことにより、雨掛かりがある場合、乾湿繰り返しによるコンクリート中の含水率の変動が表層のほうで大きくなり、中性化による鉄筋腐食において、かぶりが小さいことや鉄筋のかぶり側が腐食しやすい環境となるものと考えられる。なお、雨掛かりがない場合は、コンクリート中の含水率の変動は少なく、鉄筋の腐食速度もか

ぶりに応じて変化は少ないと推測する。

以上、コンクリートの含水率分布と最大腐食深さ、断面減少量および腐食速度の結果より、雨掛かりがある場合には、腐食が速くなり腐食量が多くなることで、雨掛かりがない場合よりもかぶりコンクリートが剥離・剥落し易くなることが考えられる。すなわち、雨掛かりの有無の違いによる腐食速度を定式化することで、実状に応じた中性化による鉄筋腐食に起因する劣化予測や現状の劣化程度の把握をすることが可能になると考える。

5. まとめ

本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 対象構造物の調査結果の範囲内で、中性化残りが10mmとなった時点からの経過年数は、腐食度Ⅱaにおいて、雨掛かりがある箇所で平均18.1年、雨掛かりがない箇所で平均43.6年であった。
- (2) 雨掛かりのある場合では、かぶり側の腐食深さが大きくなり、鉄筋断面において腐食がかぶり側に偏ることが確認された。
- (3) 雨掛かりがある場合、腐食速度はコンクリート表面のほうが大きくなる傾向を示した。これは、乾湿繰り返しの影響を受け、含水率の変動がコンクリート表面のほうが大きくなること一因と考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書【設計編】，2013。
- 2) 松田芳範，上田洋，石田哲也，岸利治：実構造物調査に基づく中性化に与えるセメントおよび水分の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 32, No. 1, pp. 629-634, 2010。
- 3) 嵩英雄，和泉意登志，友澤史紀，福士勲：経年RC構造物におけるコンクリートの中性化と鉄筋腐食，コンクリート工学論文集，Vol. 6, pp. 181-184, 1984。
- 4) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・

- 同解説（構造物編）コンクリート構造物，2007。
- 5) 森永繁：鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究，東京大学博士論文，1986。
 - 6) 石橋忠良，古谷時春，浜崎直行，鈴木博人：高架橋等からのコンクリート片剥落に関する調査研究，土木学会論文集，No. 711/V-56, pp. 125-134, 2002。
 - 7) 峰松敏和，瀬野康弘，大橋潤一，住田裕紀：鉄道高架橋における吹付けモルタルによる補修工事と追跡調査，コンクリート工学年次論文集，Vol. 21, No. 2, pp. 229-234, 1999。
 - 8) 須田久美子，S. Misra，本橋賢一：腐食ひびわれ発生限界腐食量に関する解析的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 14, No. 1, pp. 751-756, 1992。
 - 9) 高谷哲，中村士郎，山本貴士，宮川豊章：コンクリート中の鉄筋の腐食生成物の違いがひび割れ発生腐食量に与える影響，土木学会論文集E2, Vol. 69, No. 2, pp. 154-165, 2013。
 - 10) 高谷哲，西澤彩，中村士郎，山本貴士，宮川豊章：コンクリート中における鉄筋の腐食生成物の生成プロセスおよび電気化学的特性，土木学会論文集E2, Vol. 71, No. 3, pp. 235-247, 2015。
 - 11) 前原聡，伊代田岳史：塩化物イオンと中性化による腐食生成物の違いがひび割れ発生に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 39, No. 1, pp. 1051-1056, 2017。
 - 12) 鳥取誠一：鉄筋腐食に関する暴露試験等に基づいたコンクリート構造物の劣化予測，京都大学博士論文，2003。
 - 13) 玉井謙，上田洋：外部環境がコンクリート構造物内部の含水状態に与える影響，土木学会第64回年次学術講演会，V-215, pp. 427-428, 2009。
 - 14) 鈴木浩明，玉井謙，上田洋：コンクリート表層における水分浸透深さの時間依存性及び水セメント比と養生の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 35, No. 1, pp. 751-756, 2013。
 - 15) 鈴木浩明，上田洋：コンクリートの品質が水分浸透深さの時間依存性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 36, No. 1, pp. 676-681, 2014。

(2017. 3. 23 受付)

STUDY ON THE EFFECT OF RAIN EXPOSURE ON CARBONATION-INDUCED SPALLING / FALLING OF THE COVER CONCRETE

Satoshi MAEHARA and Takeshi IYODA

In this study, the effect of rain exposure on the progress of reinforcement corrosion and state of cover concrete was investigated through a survey of actual concrete structures. Sample data on the carbonation depth, cover depth, and degree of rebar corrosion were collected from 221 locations, as well as the presence or absence of rain exposure at each sampling location, and the relationship between corrosion state, spalling or falling off of the cover concrete, and the degree of rain exposure were examined. The degree of rebar corrosion was determined by analysis of rebars obtained from actual structures.

It was found that, when there is exposure to rain, the change in moisture content is larger on the surface than inside the concrete due to repetitious wetting and drying at the surface. Consequently, the corrosion rate of rebar is larger at the concrete surface than further inside the concrete.