

論文 水と中性化によるコンクリート中の鉄筋腐食速度への影響要因分析

轟 俊太郎*1・石田 哲也*2・上田 洋*3・田所 敏弥*4

要旨：かぶり 30mm 以下、中性化残り 10mm 以下で剥落が多数発生していた鉄道 RC 構造物を対象とし、鉄筋腐食速度に影響を及ぼす因子について検討した結果、雨掛かりが有る部位の鉄筋腐食速度は $0.4\sim 1.4\times 10^{-3}\text{mm}/\text{年}$ であった一方で、中性化が進行していても水が供給されなければ腐食は進行しにくく、雨掛かりの無い部位の鉄筋腐食速度は $0.3\sim 1.0\times 10^{-3}\text{mm}/\text{年}$ であった。排水不良により流水跡が見られた部位の鉄筋腐食速度は $0.8\sim 1.8\times 10^{-3}\text{mm}/\text{年}$ であり、中性化残りが 10mm 程度以下で、かつ水が供給される場合には鉄筋腐食速度が増加する可能性があることを明らかとした。

キーワード：水、中性化残り、鉄筋腐食、鉄筋腐食速度、鉄筋腐食深さ、剥落

1. はじめに

これまで、飛来塩分や凍害等を受けない一般環境におかれるコンクリート構造物中の鋼材腐食に対し、設計では、耐用期間中にコンクリートの中性化残りが 10mm 以上であれば、構造物の機能を損なうような鋼材腐食は発生した事例が少ないことから、中性化残りを指標として、鋼材腐食に対する照査を行ってきた。中性化に伴う鋼材腐食に対する照査が 1999 年制定の土木学会コンクリート標準示方書¹⁾に初めて記載されて以来、実態調査²⁾から中性化残りが 10mm 以下であっても水掛かりがなければ、変状が発生する可能性が低いこと等が明らかとなり、鉄筋位置の含水状態が鉄筋腐食の発生と進行に大きな影響を与えることが指摘されてきた³⁾。このことは、土木構造物だけでなく、建築物の維持管理においても指摘され⁴⁾、多少の塩化物イオンが含有されていたとしても鉄筋に水が十分に供給されなければ、鉄筋腐食が発生しない可能性があることも言及されている。これらの現状を踏まえ、2017 年制定の土木学会コンクリート標準示方書【設計編】⁵⁾(以降、土木学会示方書)において、各学会に先駆け、水を主要因として、鋼材の腐食深さを指標とする照査が導入された。

一方で、実態調査においては、コンクリート片の剥落の発生状況から捉えた定性的、経験的な面で鉄筋腐食に対する水の影響が議論されるに留まり、定量的な観点での議論は少ない⁶⁾。また、実構造物を対象として、土木学会示方書に新たに記載された鋼材腐食深さに対する照査を検証したものは無い。そこで、剥落等の変状が発生したコンクリート構造物を対象として(2章)、雨掛かりの異なる部位毎に、鉄筋腐食速度を推定する方法(3章)を用いて推定した鉄筋腐食速度と土木学会示方書に示さ

れる 1 年あたりの鋼材腐食深さ(以降、鉄筋腐食速度)の比較(4章)、および剥落発生箇所のかぶりと鋼材腐食深さに対する照査で算定されるかぶりとの比較(5章)を行うと共に、鉄筋腐食速度に影響を及ぼす要因について検討した。

2. 調査の概要

表-1 に、調査の対象とした部位の概要を示す。対象とした構造物は、凍結融解や飛来塩分を受けない地域に位置する鉄道 RC 高架橋である。対象とした部位は、一般的な雨掛かりの有るラーメン高架橋の柱外面および高欄外面と雨掛かりの無いラーメン高架橋の中間スラブ下面および T 形桁の主梁下面である。また、排水不良により流水跡が見られた柱外面および中間スラブ下面も対象とした。これらのかぶり 30mm 以下、中性化残り 10mm 以下の箇所、多くのかぶりコンクリートが剥離または剥落(以降、剥離と剥落をまとめて剥落と呼ぶ)していた。なお、豆板やコールドジョイントなど施工不良に起因したコンクリートの品質の低下は見られなかった。また、初期塩化物イオン濃度は、 $0.4\text{kg}/\text{m}^3$ 以下であり、鉄筋腐食に与える塩化物イオンの影響は小さいと考えられる。そのため、剥落の要因は、水の浸透とコンクリートの中性化による鉄筋腐食であると考えられる。

計測項目は、剥落の有無、かぶり、中性化深さであり、剥落が発生した最外縁の鉄筋を対象に、図-1 にラーメン高架橋の柱を例として示すように、最外縁の鉄筋の直上にメッシュを作成し、メッシュ毎にそれらを整理した。かぶりは測線上のメッシュには計測値を与え、それ以外のメッシュには既往の研究⁸⁾を参考として計測値からの補間値を与えた。中性化深さはメッシュ近傍で得られた計

*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 副主任研究員 修士(工学) (正会員)

*2 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

*3 (公財) 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 部長 博士(工学) (正会員)

*4 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 主任研究員 GL 博士(工学) (正会員)

表-1 対象部位の概要

対象部位	環境条件	調査時 経年 (竣工年)	かぶり ^{※1} mm	中性化 深さ mm	中性化 残り mm	初期塩化物 イオン濃度 ^{※2} kg/m ³	圧縮 強度 ^{※3} N/mm ²	推定 鉄筋腐食速度 ×10 ⁻³ mm/年	推定 水結合材比 ^{※4} %	推定鉄筋腐食 速度/式(2)の 鉄筋腐食速度
高欄外面	雨掛かり有	36(1979)	7~24	4~13	-0.4~11	0.23 以下	—	0.4~1.1	47~64	3~7
柱外面	雨掛かり有	36(1973)	10~20	8~19	-3~4	0.16~0.30	32, 38	0.5~1.4	55~75	3~8
	排水不良による流水跡有		23~29	16~25	-0.2~8			1.3~1.8	70~85	8~11
主梁下面	雨掛かり無	48(1962)	6~20	19~34	-28~6	0.19~0.40	30~41	0.3~1.0	59~74	2~6
中間スラブ下面	雨掛かり無	87(1927)	22~38	40~79	-42~8	—	23.8	0.5~1.0	70~99	3~6
	排水不良による流水跡有		27, 28	31, 42	-14, -4			0.8, 1.0	63, 71	6, 7

※1 鉄筋腐食速度を算定した各範囲内の平均値。

※2 集塵装置付きドリルを用いて、中性化による塩分濃縮の影響を受けていないコンクリート内部でドリル削孔粉を採取し、電位差滴定法 (JIS A1154) により測定。

※3 柱外面は現地採取したφ50mmのコンクリートコアによる圧縮試験値、主梁下面は東京都建築材料検査局式7による反発度からの推定値、中間スラブ下面は同一高架橋である文献⁹⁾に示される表-4中のC高架橋の値を参考。

※4 式(3)により推定した水セメント比。

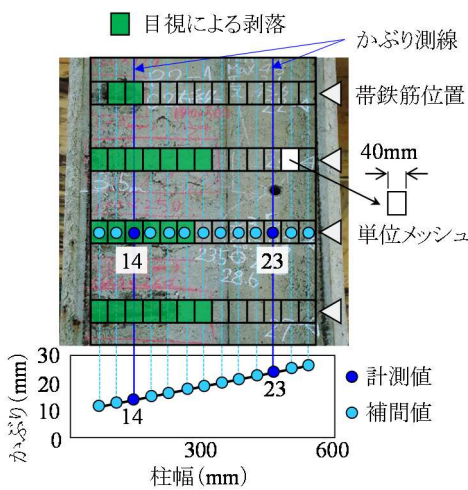


図-1 調査方法

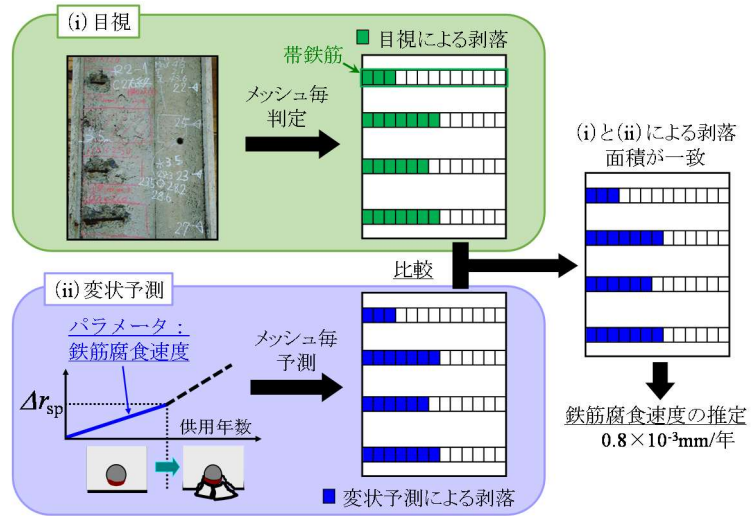


図-2 鉄筋腐食速度の推定法⁹⁾

測値とした。なお、かぶりは、最外縁の鉄筋を対象として、背面の鉄筋の影響を受けない位置に測線を設け、かぶり70mm程度までは±5mm以内の精度である電磁誘導法を用いて計測した⁸⁾。また、中性化深さはφ24mm程度のドリル孔にフェノールフタレイン1%溶液を噴霧した後に1孔内あたり上下左右4箇所計測したコンクリート表面から発色点までの距離の平均とした。

3. 鉄筋腐食速度の推定法

鉄筋腐食速度は、実際に発生しているコンクリート片の剥落の面積に整合するように、変状予測モデルを基にした逆解析から鉄筋腐食速度を求める方法⁹⁾を用いて推定した。図-2に、剥落発生状況に基づく鉄筋腐食速度の推定法を示す。

変状予測モデルには、鉄筋腐食速度、ひび割れ、剥落等の変状の発生過程および変状発生時の鉄筋腐食深さの設定が必要となる。本論では、図-2に示す変状予測モデルを用いた。従来、中性化残り10mmを鉄筋腐食の発生限界として潜伏期を設けてモデル化されることが多いが、本論では、4章以降で比較する土木学会示方書に示される鉄筋腐食速度式を参考に、潜伏期を設けずに鉄筋

腐食が進行するとした。本方法で推定された鉄筋腐食速度は、コンクリートの品質、水掛かり等これまで受けてきた環境履歴の影響の他、中性化(鉄筋位置のpHの低下)の影響も含んだものであると考えられる。なお、鉄筋腐食速度は、経時変化せず一定と仮定した。剥落発生時の鉄筋腐食深さ Δr_{sp} には、本調査の剥落箇所と同程度の30mm以下のかぶりを対象として、鉄筋間隔に応じたひび割れ形態から剥落発生時の鉄筋腐食深さを定式化した式を用いることとした¹⁰⁾。なお、剥落が発生していた箇所のかぶりは40mm以下と本対象とする各部位の鉄筋間隔150~300mmと比べて小さいため、剥落発生時の鉄筋腐食深さに与える鉄筋間隔の影響は小さいと考えられる。また、目視の剥落状況からも鉄筋間隔の影響を受けたひび割れは生じていなかった。そのため、鉄筋間隔の影響を受けない場合の式(1)を用いた。

$$\Delta r_{sp} = 2.58 \cdot 10^{-3} \cdot c \cdot (1 + 0.11 \cdot \phi) \cdot \{1 / (\alpha - 1)\} \quad (1)$$

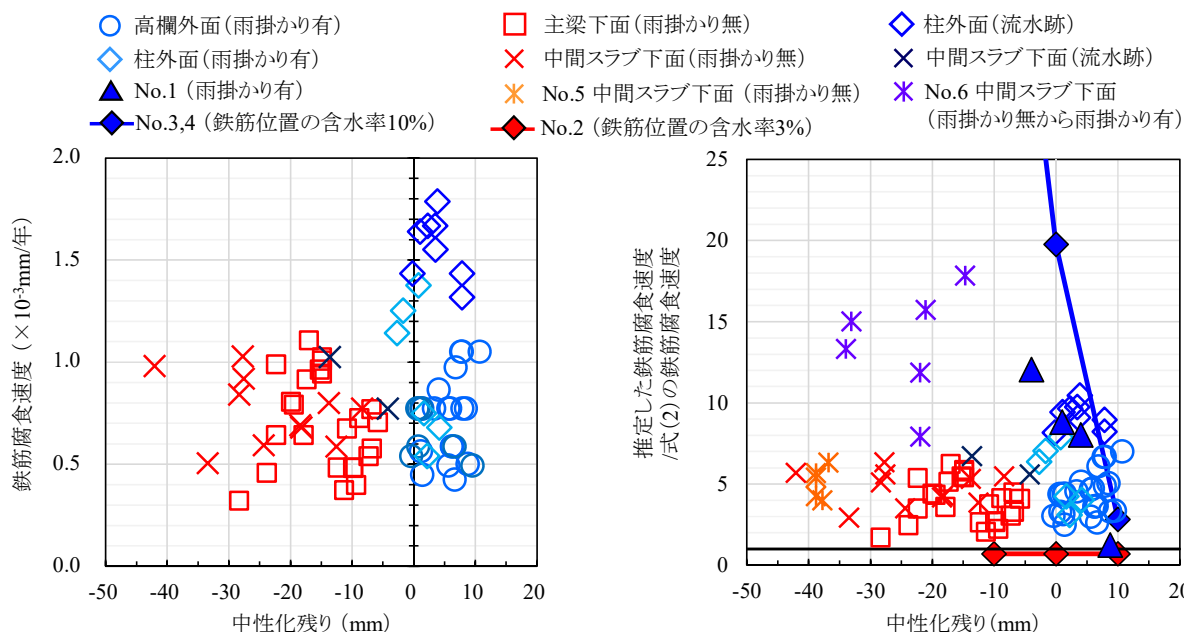
ここに、 Δr_{sp} : 剥落発生時の鉄筋腐食深さ(mm)

c : かぶり(mm)

ϕ : クリープ係数

α : 体積膨張倍率

ここではクリープ係数を0、体積膨張倍率を2.0とした。



(a) 推定した鉄筋腐食速度 (b) 土木学会示方書に示す鉄筋腐食速度との比較
 図-3 推定した鉄筋腐食速度

表-2 既往の研究による鉄筋腐食速度

No.	既往研究	試験方法	環境条件	かぶり mm	中性化深さ mm	中性化残り mm	鉄筋腐食速度 $\times 10^3$ mm/年	水結合材比 %	鉄筋腐食速度/式(2)の鉄筋腐食速度
1	鳥取ら ¹¹⁾	促進中性化後暴露試験	雨掛かり有	15, 24	11~19	-4~9	0.2~2.2	60, 70	8~12
2	鈴木ら ¹²⁾	促進中性化後水分浸透試験	鉄筋位置の含水率 3%	10	0~20	-10~10	0.1	60	0.7
3					20	-10	9.3		52
4					10	0	3.6		20
4					0	10	0.5		3
5	前原ら ⁶⁾	実構造物 中間スラブ下面 経年 87 年で切出し	雨掛かり無	25~30 平均 26	42~57	-34~-22	0.7~1.4	87~104*	4~8
6	前原ら ⁶⁾	実構造物 中間スラブ下面 経年 45 年で切出し後 10 年雨掛かり有で暴露試験	雨掛かり無から雨掛かり有	4~36 平均 19	52, 64	-47~-15	1.4~5.2	80~93*	8~28

※ 式 (3) により推定した水セメント比

剥落の面積を算出する範囲は、鉄筋 1 本毎を基本とした。なお、剥落が発生した時点の供用年数が特定できれば予測モデルを用いて鉄筋腐食速度を推定できるが、既設構造物では剥落した時点の供用年数が不明であることの方が多い。そこで、材料や施工、環境が同様と考えられる範囲を設定し、その範囲で目視と予測による剥落面積が整合するように、鉄筋腐食速度を推定する方法を用いた。推定した鉄筋腐食速度は、設定した範囲における平均的な値であると考えられる。

4. 推定した鉄筋腐食速度

図-3 (a)、表-1 に、推定した鉄筋腐食速度を示す。雨掛かりの有る高欄外面や柱外面の鉄筋腐食速度は $0.4 \sim 1.4 \times 10^3$ mm/年であった。対して、雨掛かりの無い、比較的乾燥していると考えられる主梁下面や中間スラブ下面の鉄筋腐食速度は、それよりも遅く $0.3 \sim 1.0 \times 10^3$ mm/年であった。排水不良により流水跡が見られた柱外面や

中間スラブ下面の鉄筋腐食速度は、それらよりも速く $0.8 \sim 1.8 \times 10^3$ mm/年であった。排水不良により流水跡が見られた柱外面では、中性化が進行し、かつ水が供給されたため、中性化と水の影響を受けて鉄筋腐食速度が増加した可能性がある。

図-3 (b) に、推定した鉄筋腐食速度と土木学会示方書に示される 1 年あたりの鋼材腐食深さの設計値(式(2))との比較を示す。なお、式 (2) に用いるかぶりは表-1 に示す鉄筋腐食速度を算定した範囲内の平均値とし、かぶりの施工誤差 Δc_e は 0mm とした。水結合材比 W/B は計測した中性化深さと計測時の経年から、式 (3) に基づき推定した表-1 に示す値を用いた。なお、柱外面や高欄外面では、ブリーディングによるコンクリートの品質低下の影響を γ_c で考慮するのが一般的であるが、ここでは γ_c を 1.0 とし、推定した W/B にその影響を反映させた。併せて、図中には、表-2 に示す既往の研究による鉄筋腐食速度と式 (2) との比較も示す。

$$s_{dy} = 1.9 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(-0.068 \cdot (c - \Delta c_c)^2 / q_d^2) \quad (2)$$

ここに、 s_{dy} : 1年あたりの鋼材腐食深さの設計値 (mm/年)。

c : かぶり (mm)。

Δc_c : かぶりの施工誤差 (mm)。

q_d : コンクリートの水分浸透速度係数の設計値 (mm/√時間)。 $q_d = \gamma_c \cdot q_k$

γ_c : コンクリートの材料係数。ここでは 1.0。

q_k : コンクリートの水分浸透速度係数の特性値 (mm/√時間) ここでは W/B の上下限無しとして、 $q_k = 31.25 \cdot (W/B)^2$ を用いた。

W/B : 水結合材比。式 (3) で推定した表-1, 2 に示す値。

$$W/B = 1/9 \cdot \{y / (\beta_c \cdot \gamma_c \cdot \sqrt{t}) + 3.57\} \quad (3)$$

ここに、 y : 計測した中性化深さ (mm)。

β_c : 環境作用の程度を表す係数。主梁下面および中間スラブ下面は乾燥しやすい環境であるため 1.6 とし、高欄外面および柱外面は乾燥しにくい環境であるため 1.0 とした。

γ_c : コンクリートの材料係数。ここでは 1.0。

t : 中性化深さの調査時の経年 (年)。

推定された鉄筋腐食速度は、雨掛かりの有る高欄外面や柱外面では、式 (2) で算定した鉄筋腐食速度と比べて 3~8 倍であった。対して、雨掛かりの無い主梁下面および中間スラブ下面では、2~6 倍程度であった。排水不良により流水跡が見られた柱外面および中間スラブ下面では、6~11 倍であった。

ところで、鈴木らの No.2~4 は、鉄筋位置の含水率が 3%の時の鉄筋腐食速度 (No.2) と、鉄筋位置の含水率が 10%となった時の鉄筋腐食速度 (No.3, 4) である。これらは、乾燥下での鉄筋腐食速度と、水および溶存酸素が十分に供給される湿潤下での鉄筋腐食速度と考えられる。一方で、実環境下の鉄筋腐食速度は、水掛かりの程度に応じて、水と溶存酸素が供給されるため、常に水と溶存酸素が供給される環境にはない。そのため、実環境下の鉄筋腐食速度は、乾湿繰り返しの程度に応じて、No.2 と No.3, 4 の間に包含されると考えられる。図-3 (b) から、雨掛かりの有る部位は No.3, 4 に、雨掛かりの無い部位は No.2 に近いことがわかる。これらは、鉄筋腐食の進行は水の供給程度に依存することを示し、水が供給されれば腐食が進行しやすくなり、対して、中性化が進行しても水が供給されなければ腐食が進行しにくいことを表していると考えられる。

図-3 (b) より、水が供給される場合、中性化残りが 10mm 以下より小さくなると、推定した鉄筋腐食速度/式 (2) の鉄筋腐食速度の比が増加する傾向にある。ただし、表-1 に示す鳥取 No.1 や鈴木ら No.2, 3 は促進中性化

後の鉄筋腐食速度であること、また前原らの No.6 は 45 年間雨が掛からない環境にあった中間スラブ下面を切り出した後 10 年間雨が掛かる状態として暴露した後の鉄筋腐食速度であることに留意する必要がある。No.1, No.6 や排水不良により流水跡が見られた柱外面および中間スラブ下面を除く、一般環境に置かれる構造物の水の供給と中性化、鉄筋腐食速度の関係を考えると、雨掛かりの有る部位 (高欄外面および柱外面) では、中性化の進行が遅く、中性化残りが大きいため、鉄筋腐食速度は遅い状態を保つと考えられる。対して、雨掛かりが無い部位 (主梁下面および中間スラブ下面) では、中性化の進行が速く、中性化残りが小さくなりやすいが、水が供給されないため、鉄筋腐食速度は遅い状態を保つと考えられる。そのため、本調査では結果的に雨掛かりが有る部位と無い部位で推定した鉄筋腐食速度と式 (2) の鉄筋腐食速度の比が同程度になったと考えられる。

一方で、式 (2) の鉄筋腐食速度は、中性化残り 10mm の場合に得られた No.4 の鉄筋腐食速度を基に定式化されており、中性化残りを考慮した鉄筋腐食速度にはなっていない。これは、式 (2) が想定する湿潤環境にある部位では、通常、中性化が進みにくいことを考えての判断とされている。また、現状では、従来の中性化深さに対する照査で定まるかぶりと大きな差がないように鉄筋腐食深さに対する照査の限界値に十分な余裕を持たせているため¹³⁾、結果的に耐用年数 100 年を経ても中性化残りが 10mm 程度以上となるかぶりが確保されていると考えれば中性化残りが 10mm 時の鉄筋腐食速度を用いて定式化することは適切であると考えられる。ただし、本調査対象のようにかぶりがある程度小さく、乾湿繰り返しの程度により中性化残りが 10mm 程度以下となる場合、かつ水が供給される場合には、鉄筋腐食速度が増加する可能性があると考えられる。

5. 剥落発生箇所のかぶり

図-4 に、排水不良により流水跡が見られた部位を除く、各部位における剥落箇所のかぶりを示す。なお、調査時に確認できた剥落が発生した時の供用年数は、不明であるため、調査時の経年としたが、これより前に、剥落が発生していることに留意が必要である。また、図中に、併せて、図-3 (b) に示す推定した鉄筋腐食速度と式 (2) の比の最大値を用いて補正した式 (4) および式 (1) の比 (*×式 (4) /式 (1)) が 1.0 となるかぶりを示す。*は、推定した鉄筋腐食速度と式 (2) の比の最大値であり表-1 で示す値を用いた。式 (1) の ϕ は 0 とし、 α は 2 とした。併せて、土木学会示方書に示される照査値⁹⁾ (式 (4) /式 (5)) が 1.0 となるかぶりを示す。なお、式 (4) 中の s_{dy} の算定で用いる W/B は、式 (3) で推定し

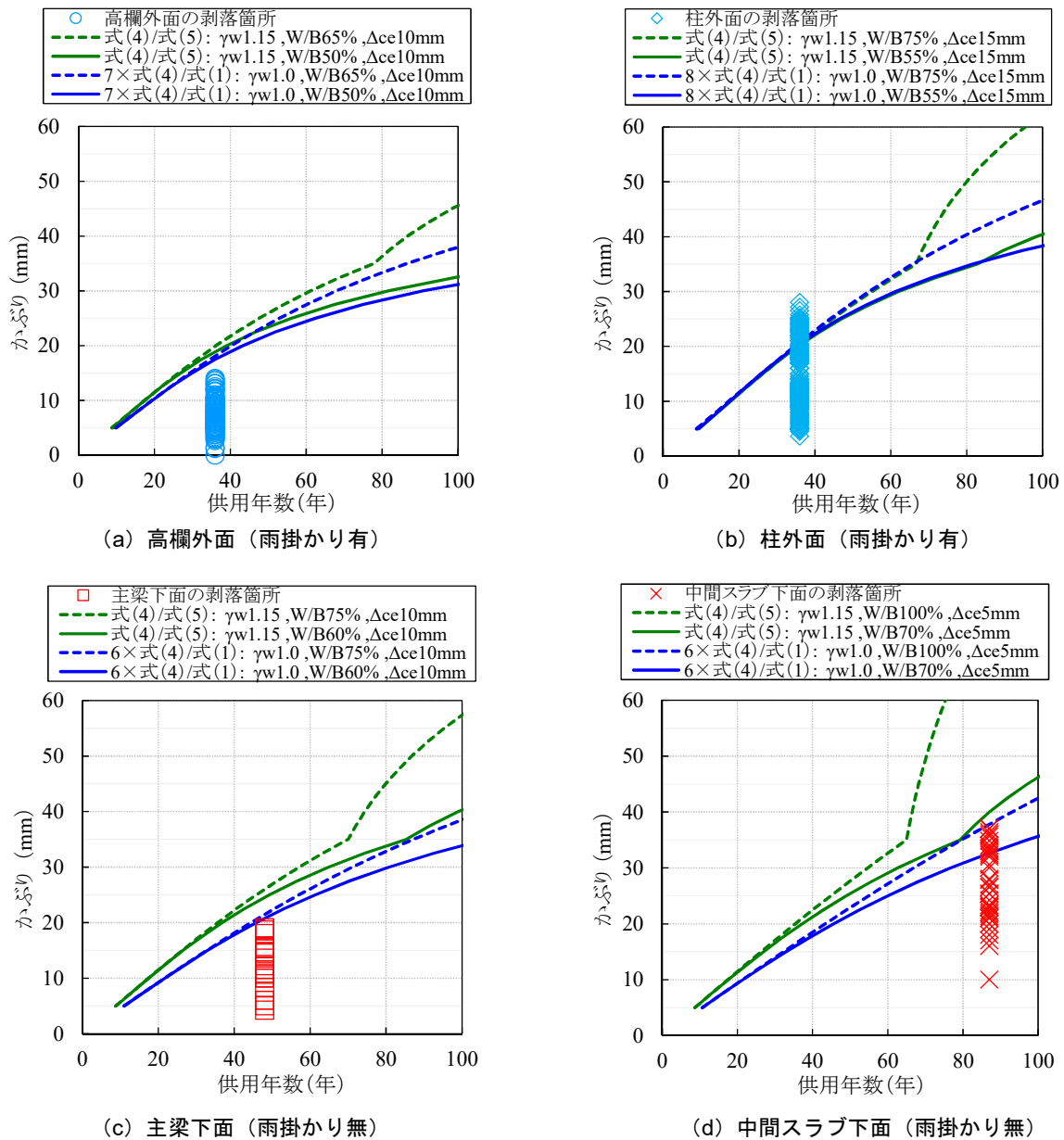


図-4 剥落箇所のかぶり

た表-1 に示す値の最小値と最大値を参考とした。その他、図中に示すように、式(4)/式(5)に用いる γ_w は1.15とし、*×式(4)/式(1)に用いる γ_w は各部位で推定した鉄筋腐食速度の最大値を用いるため1.0とした。かぶりの施工誤差 Δc_e には一般値を用いた⁵⁾。

$$s_d = \gamma_w \cdot s_{dy} \cdot t \quad (4)$$

$$s_{lim} = 1.27 \times 10^{-3} \cdot 0.3 \cdot c \quad (5)$$

$c > 35\text{mm}$ の場合、 $s_{lim} = 1.33 \times 10^{-2}$

ここに、 γ_w : 鉄筋腐食深さの設計値 s_d (mm) のばらつきを考慮した安全係数。

t : 供用年数 (年)。

s_{dy} : 式(2)。

s_{lim} : 鉄筋腐食深さの限界値 (mm)。

高欄外面の剥落は、算定したかぶりよりも小さなかぶりで発生している。一方で、柱外面の剥落は、それより

も大きなかぶりで発生している。この要因は、推定した鉄筋腐食速度が設定した範囲における平均的な値であることおよび推定した鉄筋腐食速度と式(2)の鉄筋腐食速度の比を算出した時のかぶりとその範囲内の平均値であることなどが考えられ、鉄筋腐食速度を推定する範囲の中でかぶりのばらつきが大きいと鉄筋腐食速度が一部で大きくなるためであると考えられる。

主梁下面および中間スラブ下面の剥落は、算定したかぶりよりも小さなかぶりで発生している。式(2)は雨掛かりが有る部位を想定して定式化されているため、主梁下面や中間スラブ下面のように雨掛かりが無い部位の鋼材腐食速度は、式(2)の考え方に基づくと雨掛かりが有る部位よりも遅くなると考えられる。よって、雨掛かりが無い部位のかぶりは雨掛かりを想定して算定した図-4(c)(d)に示す値よりも小さくてよいこととなる。し

かし、4章で示すように雨掛かりの有る部位と無い部位で鉄筋腐食速度は同程度であったことから、算定したかぶりと雨掛かり有る部位（高欄外面や柱外面）の剥落箇所のかぶりの差と比べて、それと雨掛かり無い部位（主梁下面や中間スラブ下面）の剥落箇所のかぶりの差は概ね同等であった。雨掛かりの無い部位が有る部位と比べて鉄筋腐食速度が同程度となった要因には、結露等による水の供給や中性化の影響等が考えられる。これらの影響や算定したかぶりよりも大きなかぶり剥落が生じていたことは今後検討が必要であるが、算定したかぶりよりも小さいかぶりでも概ね剥落が生じていた。

推定した鉄筋腐食速度の最大値および式(1)の比（*×式(4)/式(1)）と土木学会示方書に示される照査式（式(4)/式(5)）で得られたかぶりを比較すると、鉄筋腐食速度の最大値が6~8倍異なっている一方で、両者が同等であることがわかる。これは、土木学会示方書に示される鉄筋腐食深さの限界値 s_{lim} （式(5)）が照査の不確か性として0.3掛けの安全余裕度を持たせているため、また鉄筋腐食深さの設計値 s_d （式(4)）に、設計値のばらつきを考慮した係数 γ_w として1.15を考えているためである。この限界値に掛かる0.3の安全余裕度を限界値ではなく、設計値に考慮すると、設計値に1/0.3を掛けたことになり、 $\gamma_w=1.15$ も含めると、鉄筋腐食速度に約4倍の安全余裕度を見込んでいるとも考えることができる。また、鉄筋腐食速度の推定に用いた剥落発生時の鉄筋腐食深さ（式(1)）は、 $2.58 \times 10^{-3} \cdot c$ であり、式(5)から0.3掛けの安全余裕度を除いた $1.27 \times 10^{-3} \cdot c$ の約2倍である。この約2倍と約4倍の安全余裕度を鉄筋腐食速度に見込めば、推定した鉄筋腐食速度は、式(2)の約8倍でも適切であると考えられる。

6. まとめ

かぶり20mm以下、中性化残り10mm以下で剥落が多数発生していた雨掛かりの異なる部位を対象として、鉄筋腐食速度に影響を及ぼす因子について検討した。

- (1) 雨掛かりが有る部位の鉄筋腐食速度は $0.4 \sim 1.4 \times 10^{-3} \text{mm/年}$ であった一方で、中性化が進行していても水が供給されなければ腐食は進行しにくく、雨掛かりの無い部位の鉄筋腐食速度は $0.3 \sim 1.0 \times 10^{-3} \text{mm/年}$ であった。
- (2) 排水不良により流水跡が見られた部位の鉄筋腐食速度は $0.8 \sim 1.8 \times 10^{-3} \text{mm/年}$ であり、中性化残りが10mm程度以下で、かつ水が供給される場合には、鉄筋腐食速度が増加する可能性があることを明らかとした。
- (3) 推定した鉄筋腐食速度は、土木学会示方書に示される鉄筋腐食速度の2~8倍であったが、推定した鉄筋腐食速度により算定した鉄筋腐食深さと推定に用い

た剥落発生時の鉄筋腐食深さから算定したかぶりは、土木学会示方書に示される鋼材腐食深さに対する照査値が1.0となるかぶりと同程度であった。

参考文献

- 1) 土木学会：平成11年版 コンクリート標準示方書【施工編】—耐久性照査型—, 2000.1
- 2) 横山勇氣, 岸利治：雨水等の影響を受ける箇所におけるコンクリート片の剥落に対するかぶりとの中性化深さの関係性の検証：第71回セメント技術大会講演要旨, pp.206-207, 2017
- 3) 松田芳範：コンクリートの耐久性を定める「水」の制御①コンクリートの劣化・損傷に及ぼす水の影響について, コンクリート工学, Vol.51, No.10, pp.814-818, 2013
- 4) 古賀一八：建築物の維持管理と水, セメント・コンクリート, No.812, pp.36-42, 2014.10
- 5) 土木学会：2017年制定 コンクリート標準示方書【設計編】, 2018.3
- 6) 前原聡, 伊代田岳史：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, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.74, No.2, pp.80-87, 2018
- 7) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'18 [基礎編], pp.128-129, 2018.2
- 8) 松下将士, 轟俊太郎, 田所敏弥, 石田哲也：実RC構造物の鉛直部材を対象としたかぶりの推定手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.1303-1308, 2018
- 9) 轟俊太郎, 渡辺健, 鬼頭直希, 笠裕一郎：現地調査データを用いた鉄筋腐食速度への影響因子に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.919-924, 2015
- 10) 角野拓真, 轟俊太郎, 渡辺健, 田所敏弥：鉄筋コンクリート部材の鉄筋配置に応じた変状発生限界腐食深さに関する検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 第18巻, pp.161-166, 2018.10
- 11) 鳥取誠一, 宮川豊章：中性化の影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測, 土木学会論文集, No.767/V-64, pp.35-46, 2004.8
- 12) 鈴木浩明, 飯島亨, 上田洋：水分浸透とコンクリート中の鋼材腐食速度との関係, 第44回土木学会関東支部技術研究発表会, V-15, 2017
- 13) 土木学会：2017年制定 コンクリート標準示方書改訂資料 設計編・施工編, 2018.3