

水の浸透と中性化による コンクリート構造物中の鉄筋の腐食に関する設計法

轟 俊太朗* 石田 哲也** 上田 洋*** 田所 敏弥*

Design Method for Corrosion of Reinforcing Bars in Concrete Structures by Water Penetration and Carbonation Progress

Shuntaro TODOROKI Tetsuya ISHIDA Hiroshi UEDA Toshiya TADOKORO

The effect of water and carbonation on the corrosion of reinforcing bars was investigated by field surveys on members with different levels of water supply. In addition, a design method for corrosion of reinforcing bars due to water penetration was verified by comparison with the cover depth where spalling had occurred, or the design cover depth determined by consideration in terms of carbonation. Even if the un-carbonation depth (=cover depth – carbonation depth) becomes less than 10 mm, when water is not supplied, the risk of the spalling of concrete is low and the corrosion rate of the reinforcing bars is slow, thus, it is important to consider the impact of water supply for the reinforcing bars. It was also confirmed that the design method based on corrosion of reinforcing bars due to water penetration is applicable.

キーワード：鉄道コンクリート構造物，鉄筋の腐食，水掛かり，コンクリートの中性化

1. はじめに

コンクリート構造物中の鉄筋の腐食が進行した場合、コンクリートの剥落や耐荷力の低下を引き起こす可能性がある。そのため、腐食を抑制することがコンクリート構造物の耐久性を確保する上で重要となる。

建設直後でアルカリ性が保たれたコンクリート中の鉄筋は腐食しにくいですが、二酸化炭素によって鉄筋周辺のコンクリートが中性化していくと腐食しやすくなる。そのため、従来、コンクリートの中性化を指標とし、鉄筋の腐食に対応してきた。例えば、設計では、設計耐用期間において、鉄筋周辺が中性化しないようにかぶりを大きくすることなどをしてきた。一方で、鉄筋の腐食には、酸素、そして水が必要不可欠である。

中性化を指標とする設計法（中性化に関する検討¹⁾）では、水が掛からず乾燥する箇所の方が、中性化深さが大きく算出され（図1）、故に腐食や剥落が生じやすいとされる。対して、現場の実態では、水が掛かり濡れる箇所の方が、中性化は確かに進みにくいですが、設計とは逆に、腐食による剥落が多く生じる²⁾と指摘されてきた（図2）。つまり、中性化を指標とすると、実態と相反する対応となる可能性がある。

このように、主に経験で得られてきた腐食に対する水の影響を明らかとするため、水掛かりの異なる部位を対

象とした実態調査から腐食の速度など腐食に関わるデータを取得・推定し（2章）、腐食に対する水および中性化の影響について分析した（3章）。そして、実態と整合する設計法として、中性化ではなく、鉄筋の腐食を直

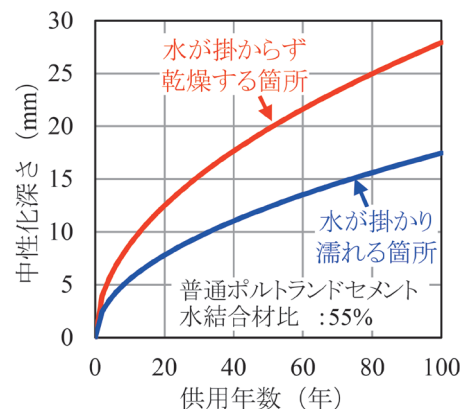


図1 水掛かりと中性化深さの計算値



図2 水掛かりとコンクリートの剥落状況³⁾

* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室
** 東京大学
*** 材料技術研究部

表 1 調査の対象とした部位の概要

高架橋	構造形式	対象部位	目視による水掛かりの有無	調査時経年(竣工年)	かぶり mm	中性化深さ mm	中性化残り mm	推定水結合材比 W/B ^{※3} %	初期塩化物イオン濃度 kg/m ³	圧縮強度 N/mm ²
A	ラーメン高架橋	柱外面	有 ^{※2}	36(1973)	4~68	8~30	-26~45	54~95	0.16~0.30	32, 38
B		高欄外面 ^{※1}	有	36(1979)	0~43	0~15	-13~37	40~67	0.23 以下	—
C		中間スラブ下面	無 ^{※2}	87(1927)	10~49	31~99	-66~9	63~113	—	24
D	T形桁	主梁下面	無	48(1962)	2~41	10~34	-29~29	50~74	0.19~0.40	30~41

※1 北面と南面

※2 一部に排水不良による流水跡有

※3 $W/B = 1/9 \cdot \{y_g / (\beta_e \cdot \gamma_c \cdot \sqrt{t}) + 3.57\}$, y_g : 中性化深さ (mm), β_e : 1.0 [高架橋 A, B] ・ 1.6 [高架橋 C, D], γ_c : 1.0, t : 調査時経年 (年)

接評価し、かつ水の影響を考慮した、水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討の導入に向け、剥落箇所のかぶりと中性化に関する検討、水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討で定まる設計かぶりを比較して、水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討の適用性を検証した(4章)。

2. 調査の概要

2.1 調査の対象

表1に、調査の対象とした部位の概要を示す。一部でコンクリートの剥離や剥落(以降、剥離と剥落をまとめて剥落)が生じていた水掛かりの異なる部位を対象とした。対象とした部位は外気に曝された部位であり、一般的に雨水が掛かる(水掛かり有)ラーメン高架橋の柱外面および高欄外面、およびこれらと比べて水が掛かる可能性が低い(水掛かり無)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。柱外面の一部(横梁下面から0.5~1.5m範囲)と中間スラブ下面の一部(縦梁側面から4.4~5.0m範囲)に排水不良により流水跡が見られた(図3)。

なお、対象とした構造物は、凍結融解や飛来塩分の影響を受けない地域に位置し、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。初期塩化物イオン濃度は0.4kg/m³以下であり、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。

2.2 調査の方法

2.2.1 データの取得方法

図4に示すように、最外縁の鉄筋(図4中は帯鉄筋)の直上にメッシュを作成し、メッシュ単位を1つの暴露試験体とみなし、かぶり、中性化深さ、剥落の有無を変

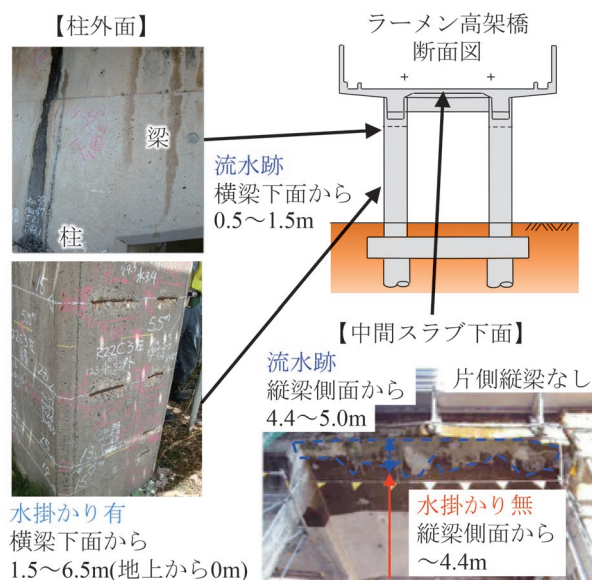


図3 柱外面と中間スラブ下面の概況

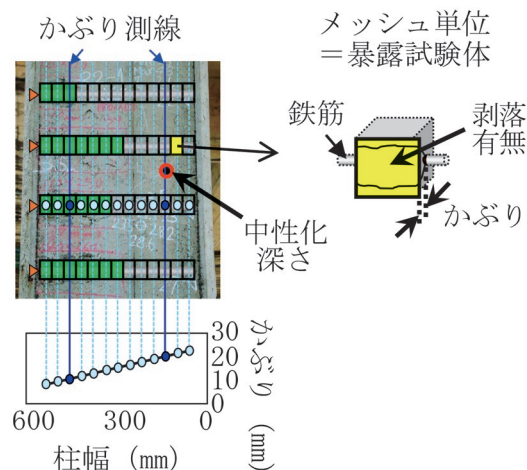


図4 データの取得方法

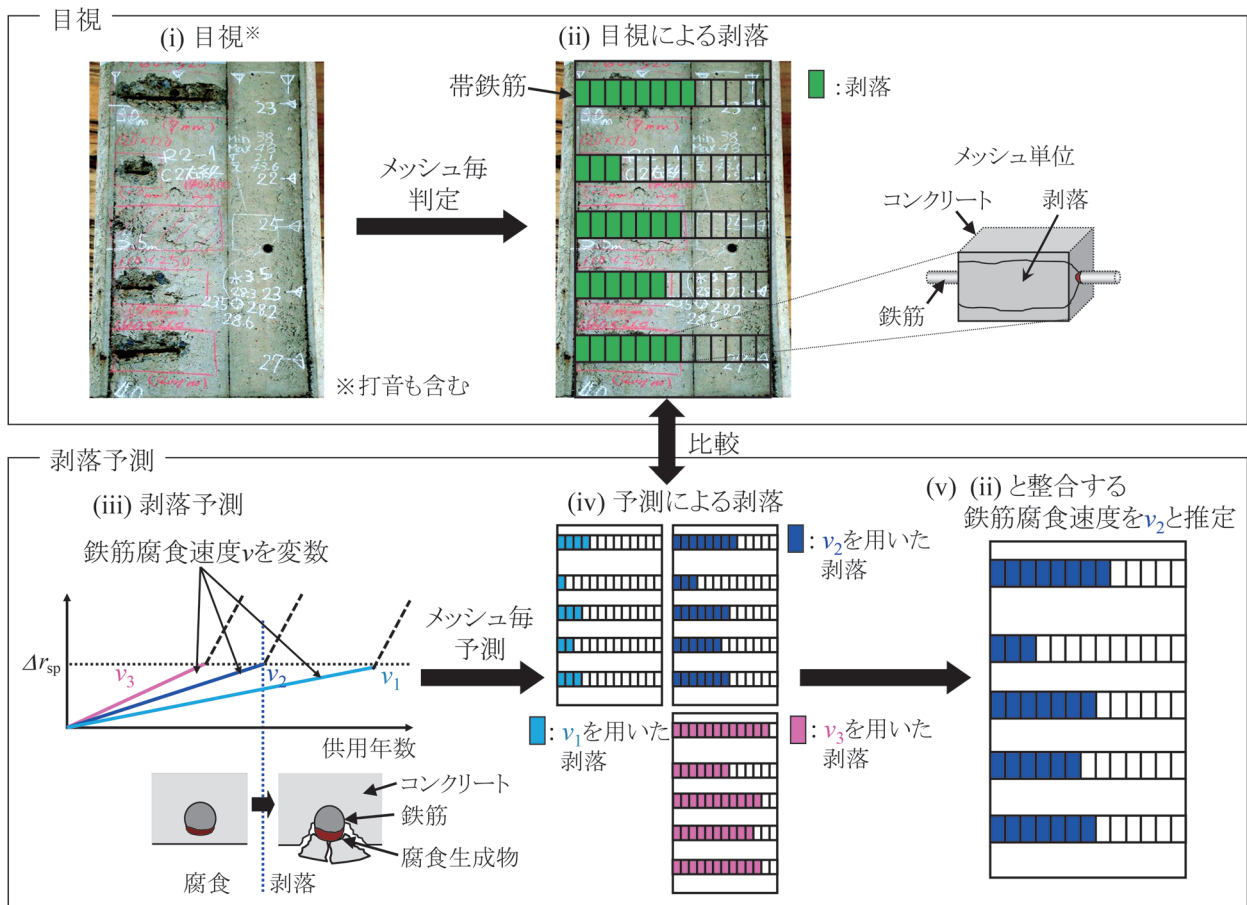


図5 鉄筋の腐食速度の推定方法

数とした複数の暴露試験体として、データを取得・分析した。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⁴⁾を参考に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測値とした。

なお、かぶりは、電磁誘導法を用いて計測した。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箇所コンクリート表面から発色点までの距離を計測し、それらの平均を計測値とした。

2.2.2 鉄筋の腐食速度の推定方法

図5に、鉄筋の腐食速度の推定法を示す。図4に示すメッシュ毎に、目視(図5(i))および剥落予測(図5(iii))を行い、剥落箇所と健全箇所で形成される面的なパターン(図5(ii)と図5(iv))が合うように、腐食速度を算定(図5(v))する方法である。メッシュ毎の剥落発生時の供用年数が特定できれば、剥落予測モデルを用いて、メッシュ毎に腐食速度を算定できる。しかし、剥落発生時の供用年数が不明であることから、剥落箇所と健全箇所形成される面的なパターンをもとに腐食速度を推定することとした。

剥落予測モデルには、腐食速度、剥落発生時の腐食深

さの設定が必要となる。腐食速度は、4章で検証する水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討で用いる腐食速度の式と同じく、一定とした。剥落発生時の腐食深さ Δr_{sp} の算定式には、本調査の剥落箇所と同程度の30mm以下のかぶりを対象とする式を用いた⁵⁾。

3. 腐食に対する水と中性化の影響

3.1 剥落箇所のかぶりと中性化残り、水掛かり

図6に、剥落箇所および健全箇所のかぶりと中性化残り(かぶりから中性化深さを引いた値)の関係を示す。なお、(d)主梁下面では、断面修復など鉄筋の腐食が要因で発生した変状に対して施されたと考えられる補修跡があった箇所は、剥落とは別に整理して示した。

剥落は、全ての部位で中性化残り10mm以下で発生していた。剥落が発生していた最大の中性化残りは、水掛かり有の柱外面と高欄外面、中間スラブ下面(流水跡有り)では1~10mmであるのに対して、水掛かり無の中間スラブ下面と主梁下面では-5mm、3mmと小さい。いずれの部位もかぶりや中性化残りが小さいほど、剥落が発生する傾向にある。水掛かり有の柱外面と高欄外面と比べて、水掛かり無の中間スラブ下面と主梁下面では、

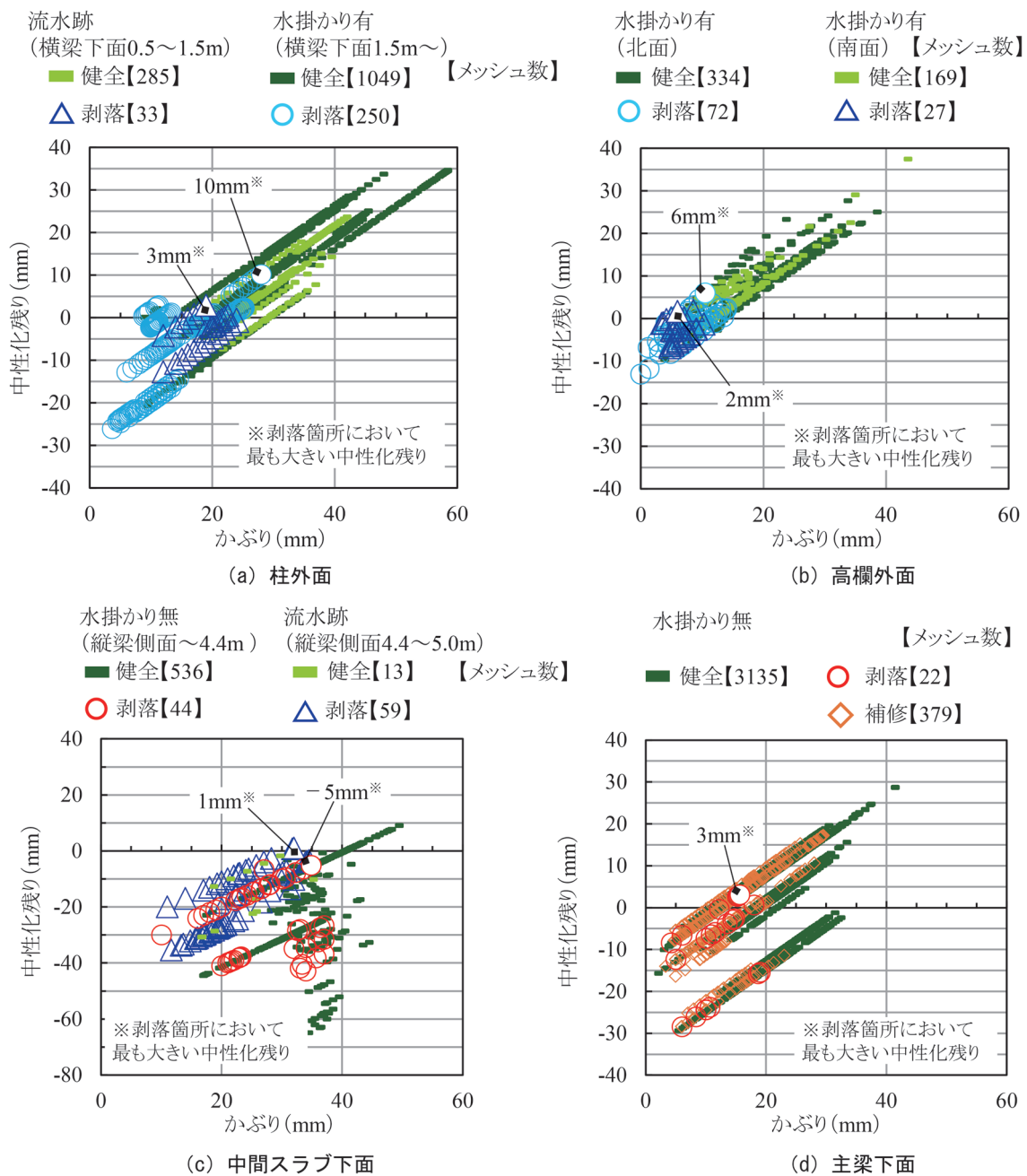


図6 剥落箇所のかぶりと中性化残りの関係

かぶりや中性化残りが小さくても健全な箇所が多く存在する。

3.2 水掛かりの異なる部位での剥落発生率

図7に、かぶりおよび中性化残りとの剥落発生率の関係を示す。剥落発生率は、かぶりおよび中性化残りを0mm~5mm, 5mm~10mmのように5mm区分にメッシュ毎に整理し、その区分内における剥落箇所のメッシュ数を健全箇所と剥落箇所の合計メッシュ数で割って求めた。なお、主梁下面の補修箇所は、剥落箇所とした。

かぶりに着目すると、かぶりが小さいほど剥落発生率が増加する。本調査時点では、水掛かりの有無によらず、

かぶりが30mm以下となると剥落が発生する傾向にあった。

中性化残りに着目すると、水掛かり有の柱外面と高欄外面では、中性化残りが10mm以下となると剥落が発生する確率が増加する。水掛かり無の中間スラブ下面と主梁下面では、中性化残りが10mm以下となると剥落発生率が増えるのは水掛かり有の部位と同様であるが、水掛かり無の部位の方が水掛かり有の部位と比べて中性化残りが10mm以下となっても剥落発生率が低い。本結果は、異なる構造物の異なる部位で得られた結果であり、材料の品質や環境などが同一でないため、単純に比較ができるものではないが、同一構造物中の水掛かり有

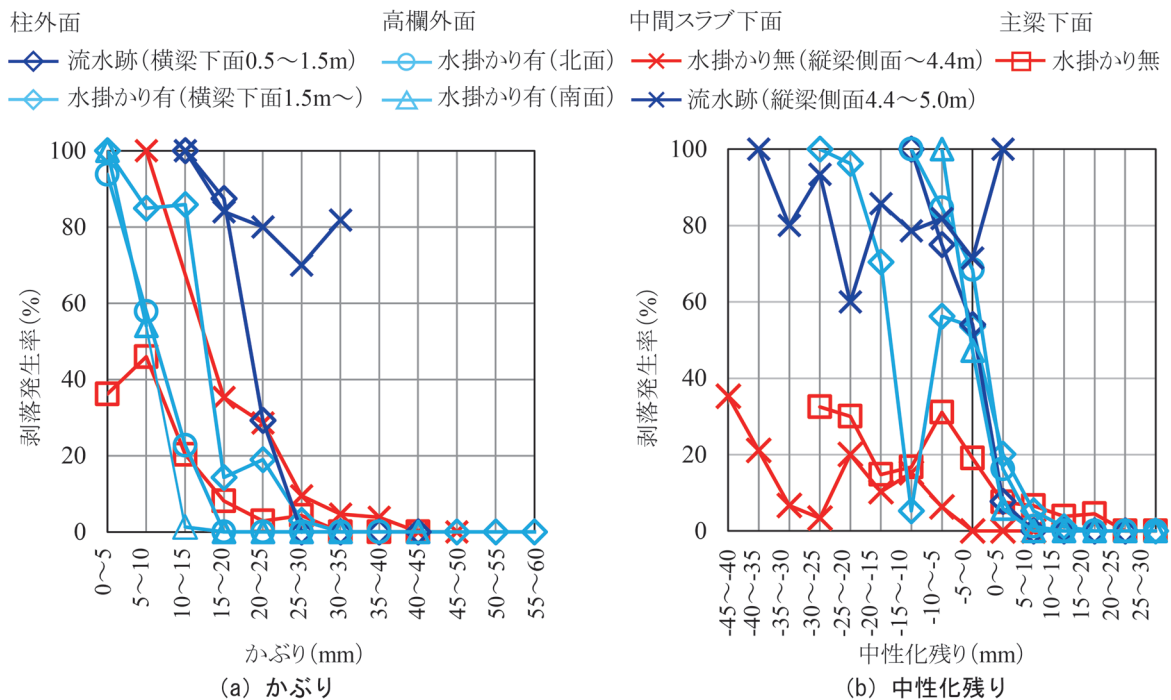


図7 かぶりおよび中性化残りと剥落発生率の関係

と無の部位での実態調査でも同じ結果が得られている⁶⁾。

中間スラブ下面の流水跡と水掛かり無の同一かぶりでの剥落発生率を比べると、流水跡が見られた箇所の方が高い。同様に、柱外面の流水跡と水掛かり有の同一かぶりでの剥落発生率を比べても、中間スラブと比べて明確ではないが、流水跡が見られた箇所の方が高い。両実態ともに、流水跡が見られた箇所で剥落が発生しやすい結果であった。

3.3 水掛かり、中性化残りと腐食速度

図8に、水掛かり、中性化残りと腐食速度の関係を示す。水掛かり有の高欄外面や柱外面の腐食速度は平均 $0.9 \times 10^{-3} \text{mm/年}$ ($0.4 \sim 1.4 \times 10^{-3} \text{mm/年}$) であり、水掛かり無の主梁下面や中間スラブ下面の腐食速度は平均 $0.7 \times 10^{-3} \text{mm/年}$ ($0.3 \sim 1.0 \times 10^{-3} \text{mm/年}$) であった。本論では、剥落が生じていた部位を調査対象としていることやかぶりが30mm以下と小さいことから、目視では水掛かりが無いと考えられる部位でも雨の吹込みやかぶりが小さく吸湿、結露の影響を受けるなど水の供給を受けやすい条件下にあった可能性がある。それでも水掛かり無の腐食速度は、水掛かり有の部位と比べて、平均で0.8倍ほど遅かった。水掛かりが無いと考えられる部位であっても、これらなどにより水が供給される可能性があることから、設計では、水掛かり有の部位と同等の腐食速度を考えるのが安全側であると考えられる。

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 $0.8 \sim 1.8 \times 10^{-3} \text{mm/}$

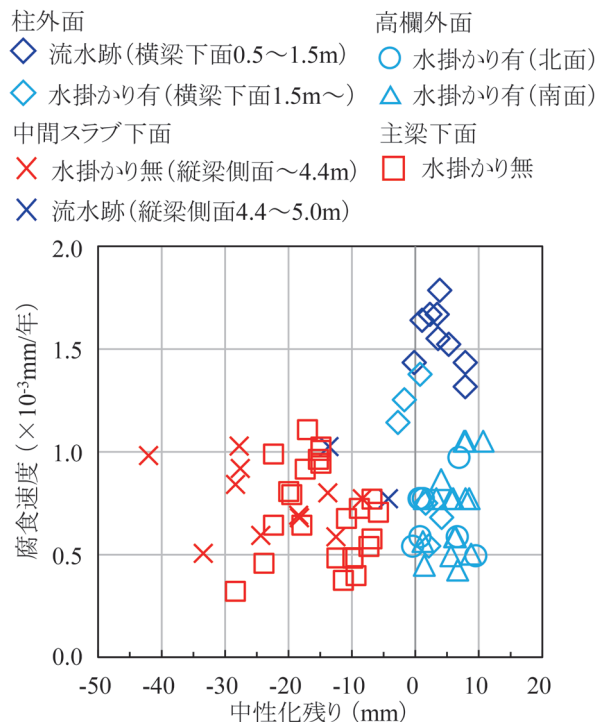


図8 水掛かり、中性化残りと腐食速度

年であった。一般的に、水が掛かりやすい箇所は中性化が進行しにくい、排水不良により流水跡が見られた箇所では、排水不良が生じる前に中性化が進行し、排水不良により水が供給されるようになったことにより、腐食速度が増加した可能性がある。

3.1節～3.3節より、中性化残りが10mm以下となった場合においても、水掛かりが無ければ、水が掛かる場合と比較して剥落発生確率は低くかつ腐食速度も遅いことから、鉄筋の腐食に対する水の影響を考慮することが重要である。

4. 水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討の適用性

4.1 剥落箇所のかぶりと水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討で定まる設計かぶり

図9に、排水不良により流水跡が見られた部位を除く、剥落箇所のかぶりを示す。剥落が発生した時の供用年数は不明であるため、調査時の経年をプロットした。併せて、水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討（土木学会 コンクリート標準示方書〔設計編〕に記載される鋼材腐食深さに対する照査⁷⁾）によって、腐食速度 s_{dy} に設計耐用年数 t を掛けて求めた腐食深さを設計値 s_d

(式(1))とし、限界値 s_{lim} (式(2))を定め、 s_d/s_{lim} が1.0となる設計かぶりを算出して示した。本式は、腐食の主要因を水とし、降雨により水が掛かる場合を想定し、乾湿が繰り返されることによって腐食が進行することを考慮して定式化されたものである。

$$s_d = \gamma_w \cdot s_{dy} \cdot t \quad (1)$$

$$s_{lim} = 3.81 \times 10^{-4} \cdot c \quad (2)$$

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

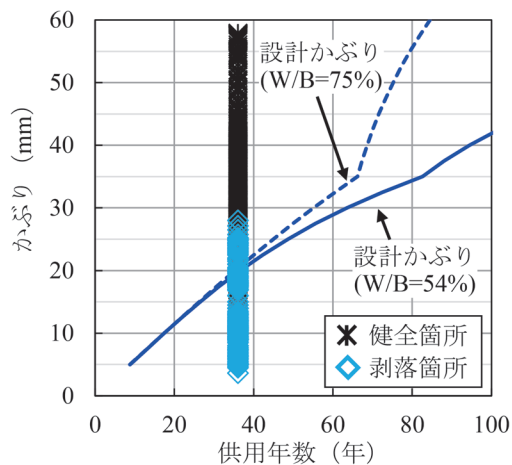
ここに、 s_d : 鉄筋腐食深さの設計値 (mm)

s_{lim} : 鉄筋腐食深さの限界値 (mm)

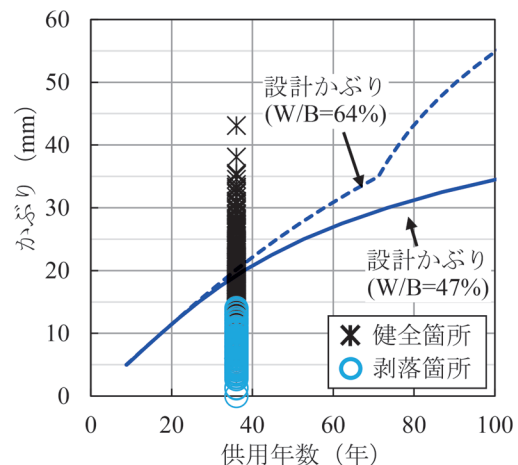
γ_w : 鉄筋腐食深さの設計値 s_d のばらつきを考慮した安全係数1.15

s_{dy} : 1年あたりの鋼材腐食深さの設計値(本論では、腐食速度と呼ぶ) (mm/年)

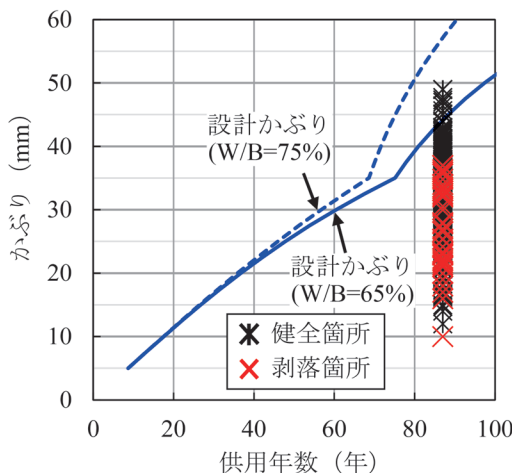
$$s_{dy} = 1.9 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(-0.068 \cdot (c - 4c_c)^2 / q_d^2)$$



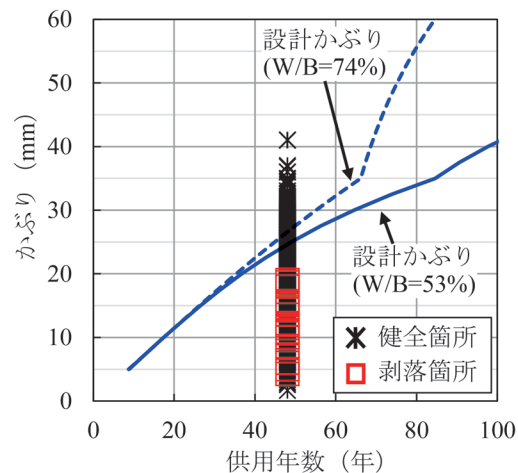
(a) 柱外面



(b) 高欄外面



(c) 中間スラブ下面



(d) 主梁下面

図9 剥落箇所のかぶりと水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討で定まる設計かぶり

- c : かぶり (mm)
- Δc_c : かぶりの施工誤差 (mm)
中間スラブは 5mm, 他は 10mm
- q_d : コンクリートの水分浸透速度係数の設計値 (mm/ $\sqrt{\text{時間}}$)
 $q_d = \gamma_c \cdot q_k$
- γ_c : コンクリートの材料係数 1.3
- q_k : コンクリートの水分浸透速度係数の特性値 (mm/ $\sqrt{\text{時間}}$)。ここでは W/B の上下限を設けず, $q_k = 31.25 \cdot (W/B)^2$ を用いた。
- W/B : 水結合材比。剥落箇所の中性化深さからの推定値 (表 1 の※ 3 より算出) の最小最大とし, 上限を 75% とした。
- t : 設計耐用年数 (年)。ここでは, 供用年数

図より, 水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討で定まる設計かぶりよりも剥落箇所のかぶりは概ね小さい。柱外面では, 水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討で定まる設計かぶりよりも一部大きなかぶり 20~30mm で剥落が発生していた。本柱外面は推定した W/B が大きく, 新設構造物の現状とは異なる低品質なコンクリートである可能性があるが, かぶり 20~30mm での剥落の割合は 5% 程度以下と小さい。

4.2 中性化に関する検討と水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討で定まる設計かぶり

図 10 に, 中性化に関する検討¹⁾と水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討 (4.1 節参照) で定まる設計かぶりの比較を示す。水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討で定まる設計かぶりは 30mm 以上 ($W/B=40\% \sim 60\%$) であり, 水掛かり有の場合 ($\beta_e=1.0$) の中性化に関する検討で定まる設計かぶりよりも大きい。中性化に関する検討では, 設計耐用期間において中性化残りが 10mm 以上となるように設計かぶりを定めており, 水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討で定まる設計かぶりが確保されているということは, 設計耐用期間の中性化残りは 10mm 以上を満たすこととなる。

中性化残りが 10mm 以上であれば, 鉄筋位置の pH は低下しておらず, 鉄筋位置の pH の低下により腐食速度が増加することはないと考えられる⁸⁾。そのため, この水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討で設計かぶりを定める場合には, 式中に鉄筋位置の pH の低下を陽な形で別途考慮しなくても, 中性化の影響も踏まえた設計かぶりが設定できると考えられる。

水掛かり無の場合の中性化に関する検討で定まる設計かぶりは, 水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討で定まる設計かぶりよりも $W/B=45\%$ 程度以上で大きくなっているが, 3 章より, 水掛かりが無ければ, 水が掛かる場合と比較して剥落が発生する確率は低くかつ腐食

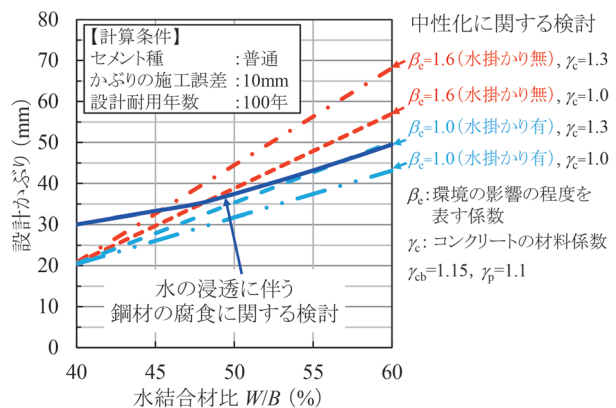


図 10 水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討と中性化に関する検討で定まる設計かぶり

速度も遅いことから, 水が掛からない場合には, 水が掛かる場合よりも設計かぶりは小さくてよい考えられる。設計においては, 水掛かり無と考えられる場合においても, 高架下利用や雨の吹込み, 他部位からの水の浸透, 吸湿, 結露など何らかの要因により水が供給される場合があることを考慮して設計かぶりを設定する必要がある。

5. まとめ

水掛かりの異なる部位を対象に実態調査を行い, 鉄筋の腐食に対する水およびコンクリートの中性化の影響を分析した。また, 剥落が生じていた箇所のかぶりや中性化に関する検討で定まる設計かぶりとの比較より, 水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討の適用性を検証した。

- (1) 中性化残りが 10mm 以下となった場合においても, 水掛かりが無ければ, 水が掛かる場合と比較して剥落が発生する確率が低くかつ鉄筋の腐食速度も遅いことから, 鉄筋の腐食に対する水の影響を考慮することが重要である。
- (2) 水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討で定まる設計かぶりよりも, 剥落が生じていた箇所のかぶりは概ね小さいことを確認した。また, 設計耐用年数 100 年とした水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討で定まる設計かぶりが確保されていれば, 中性化に関する検討も満たすことを確認した。よって, 水の浸透とコンクリートの中性化による鋼材の腐食に関する設計法として, 中性化に関する検討に代わり, 水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討を用いて, 設計かぶりを定めることとしてもよいと考えられる。

なお, 本論文は, 文献 9 と一部同じ内容を含んでいる。

文 献

- 1) 国土交通省鉄道局監修 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，丸善出版，2004.4
- 2) 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
- 3) 上田洋，飯島亨，鈴木浩明：コンクリート構造物への水分浸透の影響を調べる，RRR，Vol.71，No.6，pp.20-23，2014
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 田畑勝幸，石橋奈都実，轟俊太郎，田所敏弥：鉄道RC高架橋の実態調査に基づく剥落への雨掛かりとコンクリートの品質の影響，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.75，V-168，2020
- 7) 土木学会：2017年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕，2018.3
- 8) 轟俊太郎，上田洋，石田哲也，田所敏弥：水掛かりと鉄筋位置のpHが腐食による変状の発生に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.467-472，2021
- 9) 轟俊太郎，石田哲也，田所敏弥，上田洋：コンクリート中の鉄筋腐食に与える水とコンクリートの中性化の影響，土木学会論文集E2（材料・コンクリート構造），Vol.75，No.4，pp.226-238，2019