

論文 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

轟 俊太郎^{*1}・上田 洋^{*2}・石田 哲也^{*3}・田所 敏弥^{*4}

要旨：降雨により水掛かりを受ける鉄道 RC ラーメン高架橋の柱を対象に、鉄筋腐食による剥落等の変状の発生に及ぼす水掛かりと鉄筋位置の pH の影響について、コンクリートの pH や剥落等の実態および土木学会示方書に示される水の浸透による腐食速度式を基に提案した pH の影響を考慮した腐食速度式を用いて検討した。結果、水の浸透に伴う鉄筋腐食に対する照査を満たす設計かぶりが確保されていれば、中性化による鉄筋位置の pH の低下が変状の発生に及ぼす影響は小さいと考えられる。維持管理において、中性化が進み、かぶりが小さい箇所では変状予測する場合等には、鉄筋位置の pH の影響を考慮する必要があると考えられる。

キーワード：鉄筋腐食、水掛かり、コンクリートの pH、剥落、鉄道 RC ラーメン高架橋

1. はじめに

鉄筋の腐食速度は、中性化に伴う鉄筋位置の pH の低下により速くなることがわかっている¹⁾。一方で、2017年版の土木学会 コンクリート標準示方書[設計編]²⁾(以降、土木学会示方書)で導入された水の浸透に伴う鉄筋腐食に対する照査で用いる腐食速度式は、水掛かりの重要性を鑑み、降雨によって供給される水を主要因とした腐食に着眼して定式化されたものであり、鉄筋位置の pH の影響について明示されていない。

そこで、降雨により水掛かりを受ける鉄道 RC ラーメン高架橋の柱を対象としたコンクリートの pH や剥落等の実態および水の浸透に伴う鉄筋腐食に対する照査で用いる腐食速度に鉄筋位置の pH の影響を考慮した腐食速度式を用いて、水掛かりと鉄筋位置の pH が腐食により生じる剥落等の変状の発生に及ぼす影響を検討した。

2. 対象とした高架橋の概要および調査方法

表-1に、高架橋 A, B の概要を示す。対象部材は、柱である。漏水により水掛かりを受ける部位を除き、降雨により水掛かりを受ける部位を対象とした。これは、土木学会示方書に示される水掛かりによる分類 I (水がしばしばかかるが、水の供給が止めばすぐに乾燥が始まる部位) に相当する。両高架橋の高さ等の寸法は、概ね同様であり、写真-1に示すように周囲に高い建物など雨を遮るものはない。なお、豆板等の施工不良などによる変状がある場合等を除き、剥落の有無に関わらず、一定区間の柱を調査対象としている。

両高架橋共に、外的塩害および凍害を受ける地域にはない。また、初期塩化物イオン濃度は 0.23kg/m^3 以下と小さい。これらの要因および現地の変状状況を踏まえると、

剥落の要因は、水の浸透と中性化による鉄筋腐食であると考えられる。

調査は、剥落の有無、かぶり、コンクリートの pH 中性化深さ、配合推定、について実施した。かぶりは、電磁誘導法を用いて計測した。pH は、集塵装置付きドリルを用いて採取したコンクリート粉を試料とし、鶴田らが提案する方法³⁾を用いて測定した。実態調査において、この方法により測定した pH を用いて、pH 間の相対的な比較や中性化深さとの関係について検証を行い、その有用性を確認している⁴⁾。本論では、同様の方法により測定した pH と腐食速度の関係¹⁾を基に、鉄筋位置の pH の影響を考慮した腐食速度式を定式化することからも当該方法を用いることとした。試料の採取深さは、コンクリート表面から深さ 0~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~60, 60~80, 80~100mm とした。中性化深さは、pH 測定用の試料を採取した後のドリル孔内にフェノールフタレイン 1%溶液を噴霧した後にコンクリート表面から呈色境界までの距離を複数点で計測して、それらの平均値とした。配合推定は、セメント協会法 F-18 を用いて行った。

高架橋 A の年合計降水量は、日本の年合計降水量 1718mm^5 と比べて 3124mm と多く、対して高架橋 B の降水量は、 1234mm と少ない。また、 $\sqrt{t}$ 則に基づく中性化深さの推定式⁶⁾により推定した W/B 、また配合推定による W/B は、いずれも高架橋 A の方が高く算出されたことから、高架橋 A は、高架橋 B と比べて低品質なコンクリートであると考えられる。

これらを踏まえると、検討対象とした高架橋 A, B の特徴は、高架橋 A の調査箇所が高架橋 B の調査箇所よりも水の影響を受けやすく、また相対的に低品質な構造物であるということと考えられる。

*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 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*2 (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)

*3 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)

*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 高架橋 A, B の概要

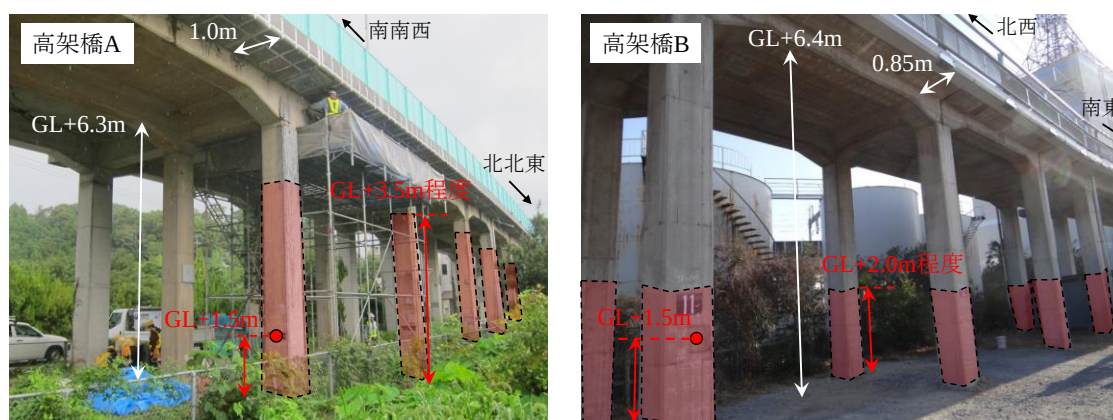
名称	調査時経年 (竣工年)	剥落とかぶり 調査数量	年合計 降水量※1	日平均気温 , 平均湿度※1	中性化深さ 【測定数】	かぶり 【測定数】	水結合材比 W/B	
							配合推定 【測定数】	$\sqrt{t}$ 則に基 づく推定※2 【測定数】
高架橋 A	36, 46 年 (1973 年)	柱 8 本	3124mm	16℃, 70%	19～26mm 平均 23mm 【10】※3	7～43mm 平均 28mm 【2189】	87%※4 【1】※3	70～82% 平均 77% 【10】※3
高架橋 B	52 年 (1967 年)	柱 21 本	1234mm	17℃, 64%	19, 24mm 平均 22mm 【2】	0～70mm 平均 44mm 【580】	55% 【1】	59, 63% 平均 61% 【2】

※1 年合計降水量, 日平均気温, 平均湿度は, 高架橋近傍における気象庁の観測データの過去 5 年平均。

※2 $W/B = 1/9 \cdot \{y_g / (\beta_k \cdot \gamma_c \cdot \sqrt{t}) + 3.57\}$ 。 y_g : 中性化深さ (mm), 高架橋 A: $\beta_k=1.0, \gamma_c=1.0$, 高架橋 B: $\beta_k=1.6, \gamma_c=1.0$, t : 調査時経年 (年)。

※3 調査時経年 46 年の測定結果。36 年の調査結果は, 剥落の有無とかぶりのみを使用。

※4 SEM-EDS 分析により高炉スラグ等の混和材が混入されていないことを確認している。



■ 剥落の有無, かぶり, ● コンクリートの pH, 中性化深さ, 配合推定

写真－1 高架橋 A, B の概況

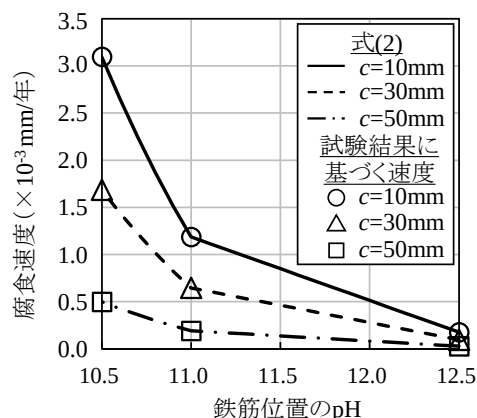
3. 鉄筋位置の pH の影響を考慮した腐食速度式

3.1 鉄筋位置の pH の影響に関する係数

土木学会示方書の腐食速度式(1)は, pH=12.5 の腐食速度を基に, 鉄筋位置への水の到達 1 回あたりの腐食深さに変換し, それに降雨の回数と継続時間から求めた 1 年あたりの鉄筋位置への水の到達回数を掛けて定式化されている。この基になった腐食速度と同じ論文中¹⁾の同条件の試験で得られた pH=11.0, 10.5 の腐食速度を基に式(1)の定式化と同じ方法で腐食速度を求め, それらと整合するように pH の影響に関する係数 η_{pH} を導き, pH の影響を考慮した腐食速度式(2)と定式化した。なお, α は, 剥落の実態に応じた修正係数として設定した (3.3 節)。

図－1 に, 式(2)で算定した腐食速度を示す。 $c=10, 30, 50\text{mm}$, $\Delta c_e=0, \gamma_c=1.0, W/B=55\%$, $\alpha=1.0$ の例である。試験結果に基づく腐食速度と式(2)が整合することがわかる。

なお, η_{pH} は, 2 つの関数で近似して定式化した。これは, コンクリート中の鉄筋腐食の化学反応が複雑であり, 1 つの適切な関数で表すことが現状では難しいことから, 実験結果を基に大きく逸脱しないものとしたためであり, 鉄筋位置の pH の影響を明らかにすることと本論の目的に適うものであると考えている。



図－1 腐食速度と鉄筋位置の pH

$$s_{dy} = 1.9 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(-0.068 \cdot (c - \Delta c_e)^2 / q_d^2) \quad (1)$$

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

c : かぶり (mm)

Δc_e : 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

q_k : コンクリートの水分浸透速度係数の特性値

$$(mm/\sqrt{\text{時間}})。 \quad q_k=31.25 \cdot (W/B)^2$$

W/B : 水結合材比。表-1に示す $\sqrt{t}$ 則による推定値を用いた。

$$s_{pH} = \eta_{pH} \cdot \alpha \cdot s_{dy} \quad (2)$$

s_{pH} : 鉄筋位置の pH の影響を考慮した腐食速度 (mm/年)

η_{pH} : 鉄筋位置の pH の影響に関する係数

pH > 11.0 の場合、

$$\eta_{pH} = 3.8 \cdot (12.5 - \text{pH}) + 1.0$$

pH ≤ 11.0 の場合、

$$\eta_{pH} = \{3.8 \cdot (12.5 - \text{pH}) + 1.0\} \cdot \{2.1 \cdot (11.0 - \text{pH}) + 1.0\}$$

pH : 鉄筋位置 (鉄筋中心位置) の pH

α : 剥落の実態に応じた修正係数

3.2 鉄筋位置の pH の予測式

鉄筋位置の pH は、初期の pH (pH_0) からフィックの第2法則から導かれる拡散方程式をコンクリート表面の pH が供用期間の平方根に比例して減少するとして差し引いた式(3)を提案し、これを用いて予測することとした。

$$pH = pH_0 - S\sqrt{t} \left[\exp\left\{-\frac{x^2}{4Dt}\right\} - \frac{x\sqrt{\pi}}{2\sqrt{Dt}} \left\{1 - \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)\right\}\right] \quad (3)$$

ただし、 $pH \geq pH_{\min}$ とする。

pH_0 : 初期の pH

$pH_{\min}$: pH の下限

S : コンクリート表面の pH の低下速度係数 ($/\sqrt{\text{年}}$)

D : 見かけの拡散係数 ($\text{mm}^2/\text{年}$)

t : 経過年数 (年)

x : コンクリート表面から鉄筋位置までの深さ (mm)

$\text{erf}(s)$: 誤差関数

pH を測定した箇所のうち、高架橋 A, B で各 1 つ例を挙げ、図-2 に pH の測定結果と式(3)による pH の予測結果を示す。また、図-2 に示す高架橋 A の例に対し、図-3 に式(3)で予測した pH の経時変化を、図-2 に示す例に対し、図-4 に式(3)から中性化深さ位置の pH に至る時の表面からの深さと経過年数を求めて中性化深さを予測した結果と $\sqrt{t}$ 則により中性化深さを予測した結果を示す。 $\sqrt{t}$ 則で用いる中性化速度係数は、現地で測定した中性化深さ y_g と調査時経年 t の比 ($y_g/\sqrt{t}$) で求めた。

S, D は、図-2 に示す各深さで測定した pH と式(3)で予測する各深さの pH の誤差の二乗和、および、図-4 に示す $\sqrt{t}$ 則により予測した各年の中性化深さと式(3)で予測した各年の中性化深さの誤差の二乗和を基に、それらが最小となるように算出した。 pH_0 は、中性化の影響を受けていない 80~100mm の pH とし、pH の下限は、0~10mm の pH の最小値とした。表-2 に、各測定箇所得られた $S, D, pH_0, pH_{\min}$ および中性化深さ位置の pH を示す。以降は、表-2 に示す S, D, pH_0 、中性化位置の pH の平均値、 $pH_{\min}$ を用いて検討した。

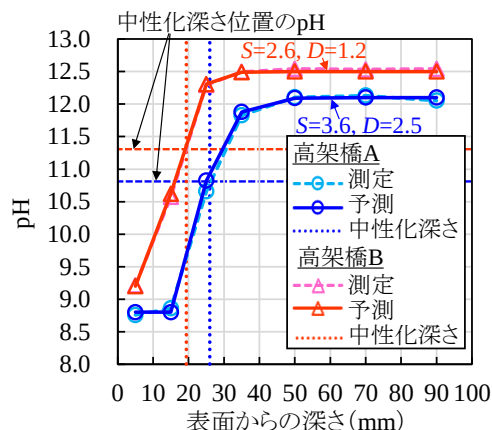


図-2 測定と予測式(3)による pH の例

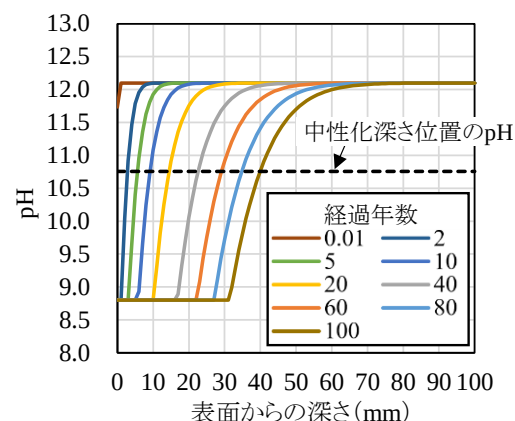


図-3 式(3)による pH の経時予測
(図-2 に示す高架橋 A の例)

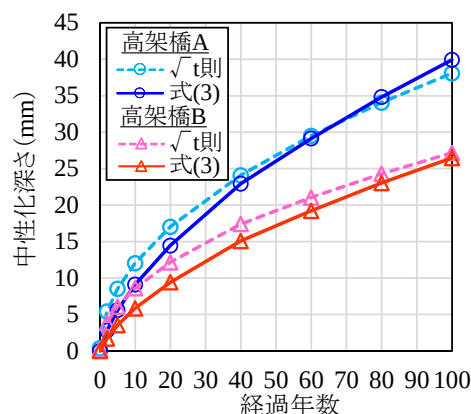


図-4 式(3)と $\sqrt{t}$ 則により予測した中性化深さ
(図-2 に示す箇所の例)

表-2 式(3)に用いる係数等

名称	高架橋 A	高架橋 B
【測定数】	【10】	【2】
S ($\sqrt{\text{年}}$)	平均 3.5 3.2~3.9	平均 2.3 2.0, 2.6
D ($\text{mm}^2/\text{年}$)	平均 1.5 0.9~2.5	平均 1.5 1.8, 1.2
pH_0	平均 12.1 12.1~12.2	平均 12.5 12.5, 12.5
$pH_{\min}$	最小 8.8	最小 9.2
中性化位置の pH	平均 11.4 10.5~12.0	平均 11.5 11.7, 11.3

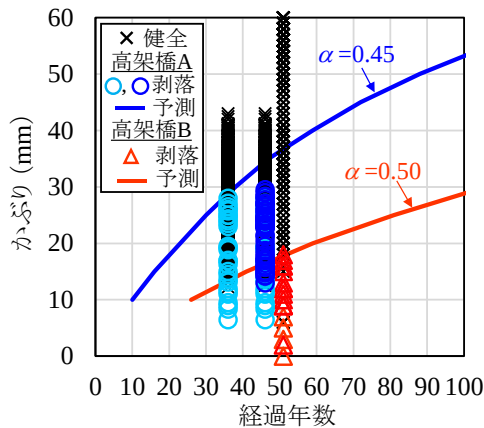


図-5 調査で得た剥落箇所のかぶりと予測による必要かぶり (α の設定)

式(3)で予測した鉄筋位置の pH を式(2)の η_{pH} の式に代入することで、鉄筋位置の pH の変化に応じた腐食速度を経時的に求めることができる。

3.3 剥落の実態に応じた修正

図-5 に、調査で得た剥落箇所のかぶりを示す。併せて、土木学会示方書の照査式(5)を基に、鉄筋位置の pH を考慮した腐食速度を用いて算定した最小かぶりを示す。ここでは、式(2)に修正係数 α を設け、この剥落の実態に基づき、 α を剥落箇所のかぶりを包含するように設定した。 α は、高架橋 A で 0.45、高架橋 B で 0.50 とした。

求めた α は、相対湿度や結露などを含む水の作用頻度の修正を主に想定した係数ではあるが、照査において設計値 (式(6)) と対になる限界値 (式(7)) にも依存した値である。

$$\gamma \cdot s_d / s_{lim} \leq 1.0 \quad (5)$$

$$s_d = \gamma_w \cdot s_{dy} \cdot t \quad (6)$$

$$s_{lim} = 3.81 \times 10^{-4} \cdot c \quad (7)$$

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

ここに、 γ : 構造物係数

γ_w : 鉄筋腐食深さの推定値 s_d のばらつきを考慮した安全係数

s_d : 鉄筋腐食深さの設計値 (mm)。本論で、鉄筋位置の pH を考慮した腐食速度を用いた場合には、式(8)を用いる。

$$s_d = \gamma_w \cdot \sum_{t=1}^{100} s_{pH}(t) \cdot t \quad (8)$$

ここでの t は、経過年数 (年)

t : 耐用年数 (年)

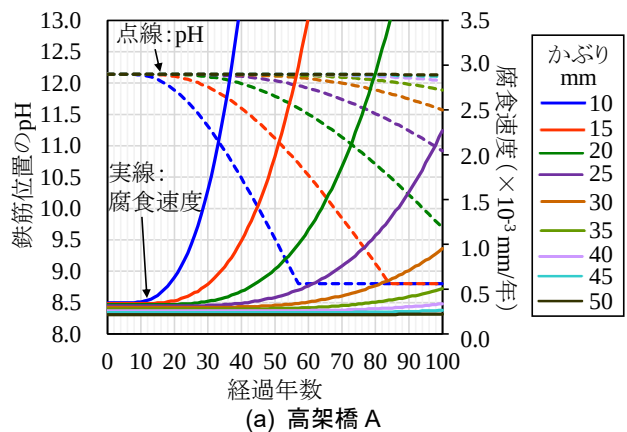
s_{lim} : 鉄筋腐食深さの限界値 (mm)

c : かぶり (mm)

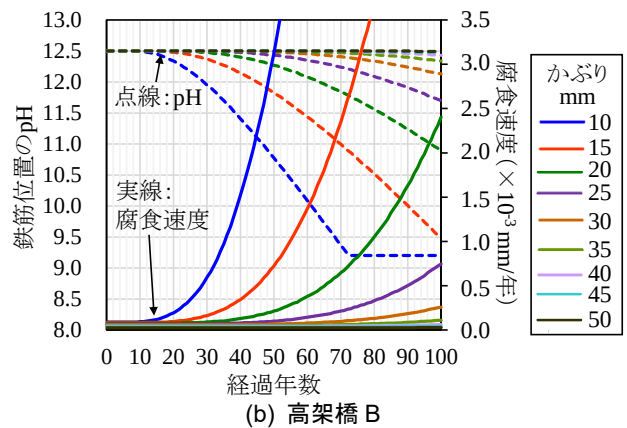
なお、本論で、鉄筋位置の pH を考慮した腐食速度を用いた場合には、 $\Delta c_e=0$, $\gamma_c=1.0$, $\gamma_s=1.0$, $\gamma_w=1.0$ とし、 s_{lim} の上限は設定していない。

3.4 鉄筋位置の pH と腐食速度の経時予測

図-6 に、定式化した腐食速度により予測した鉄筋位



(a) 高架橋 A



(b) 高架橋 B

図-6 鉄筋位置の pH と腐食速度

置の pH と腐食速度の経時変化を示す。鉄筋位置の pH が低下する前の腐食速度は一定であり、鉄筋位置の pH の低下に伴い腐食速度が増加している。

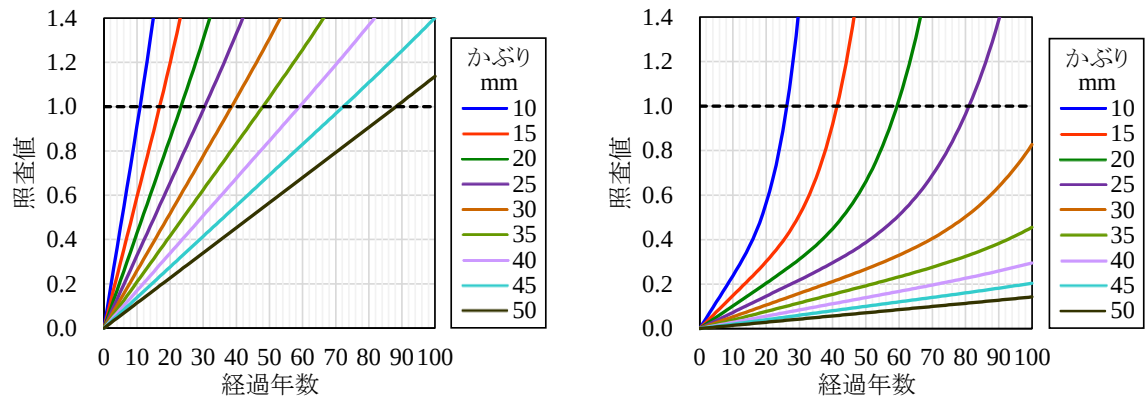
4. 水掛かりと鉄筋位置の pH の変状発生限界までの影響

図-7 に、鉄筋位置の pH を考慮した腐食速度式(2)を用いて算定した照査値 (式(5)) と経過年数の関係を示す。

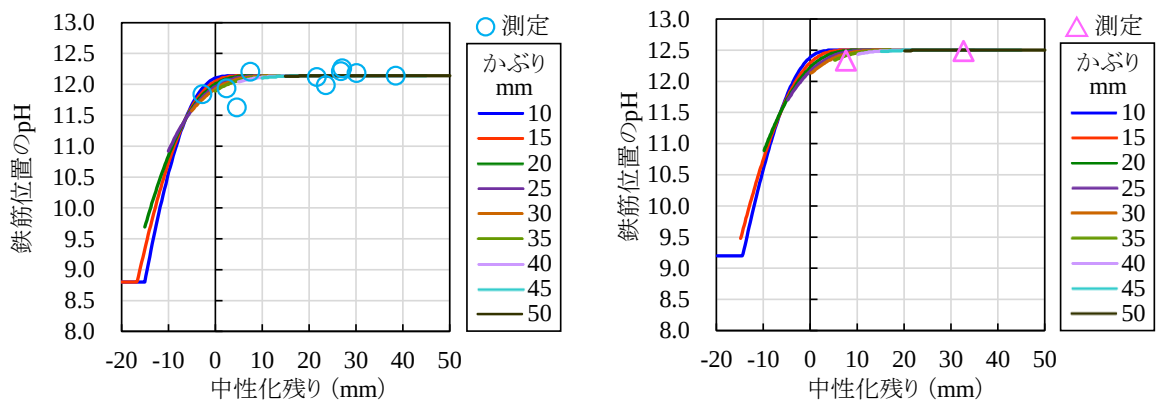
高架橋 A (図-7(a)) では、限界値に達するまで鉄筋位置の pH が低下せずに腐食速度が一定であるため、概ね線形で照査値が増加している。水の影響を受ける比較的低品質のコンクリートでは、鉄筋位置の pH が経時低下しなくても、腐食が進行して、変状が生じる可能性があると考えられる。

高架橋 B (図-7(b)) では、限界値に達するまでに鉄筋位置の pH の低下により、高架橋 A と比べて照査値が非線形に増していることがわかる。ただし、高架橋 A と比べて高架橋 B の方が、腐食速度が遅いため、限界値に達するまでの経過年数は長く、100 年後に限界値に達する際のかぶりも小さい。

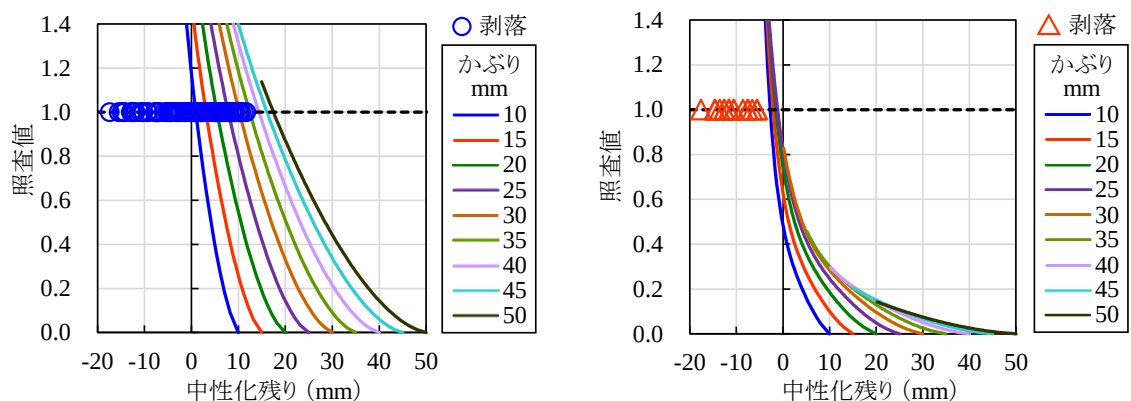
図-8 に、式(3)で求めた中性化残りと鉄筋位置の pH の関係を示す。中性化残りは、式(3)から pH を予測し、表-2 に示す中性化深さ位置の pH に至った表面からの深さと経過年数から中性化深さを算出して、かぶりから中性化深さを引いて算出した。併せて、調査で得た中性



(a) 高架橋 A (b) 高架橋 B
図-7 鉄筋位置の pH を考慮した腐食速度を用いた照査値



(a) 高架橋 A (b) 高架橋 B
図-8 鉄筋位置の pH と中性化残り (予測期間 100 年)



(a) 高架橋 A (b) 高架橋 B
図-9 鉄筋位置の pH を考慮した腐食速度を用いた照査値と中性化残り (予測期間 100 年)

化残りと鉄筋位置の pH をプロットした。かぶりには、pH と中性化深さの測定箇所近傍で測定した値を用いた。

予測結果および調査結果のいずれも、中性化残りが概ね 10mm 以下で、鉄筋位置の pH が低下することがわかる。そのため、中性化残りが 10mm 以上であれば、腐食速度に pH の影響を考慮する必要はないと考えられる。

図-9 に、鉄筋位置の pH を考慮した腐食速度を用いた照査値 (式(5)) と中性化残りの関係を示す。併せて、調査で得た剥落箇所の中性化残りを照査値 1.0 にプロットした。

調査で得た剥落箇所の中性化残りは、高架橋 A で 10mm 以下、高架橋 B で-5mm 以下である。これは、従来の中性化残り 10mm 以下で剥落が発生し、水掛かりが少ない方が剥落箇所の中性化残りが小さいといった既往の知見と整合する結果である。

鉄筋位置の pH を考慮した腐食速度を用いた照査値が 1.0 となる時の中性化残りは、この傾向を概ね捉えていることがわかる。このことは、鉄筋位置の pH が低下せず、水掛かりによって発生した腐食による変状であっても、従来から得られてきた剥落箇所の中性化残りとなるタイ

ミングが同等となることから、中性化残りに関係性があると捉えられる可能性があることを示唆している。

5. 土木学会示方書の照査で求めた最小かぶりとの比較

図-10に、調査で得た剥落箇所のかぶり、土木学会示方書の腐食速度式(1)を用いて求めた設計かぶり、鉄筋位置の pH の影響を考慮した腐食速度を用いて求めた必要かぶりを示す。なお、設計かぶりは、 $\Delta c_e=15\text{mm}$, $\gamma_c=1.3$, $\gamma_r=1.0$, $\gamma_w=1.15$, $W/B=60$, 80%を用いて求めた。

高架橋 A では、設計かぶりよりも一部大きなかぶり（経年 36 年：20～30mm, 46 年：25～30mm）で剥落が生じている。ただし、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ことに留意が必要であるとともに、図-11 からかぶり 20～30mm での剥落の割合は、5%程度以下と小さい。

高架橋 B では、限界値に達するまでの腐食深さに鉄筋位置の pH の低下の影響が認められたが（図-7(b)）、剥落が生じている箇所は、設計かぶりよりも十分に小さいかぶりである。これは、水の影響を受けにくい方が、腐食速度が遅く、設計値が限界値に達するのが遅いため、その期間に鉄筋位置の pH の低下の影響を受けることによると考えられる。

水の浸透に伴う鉄筋腐食に対する照査を満たす設計かぶりが確保されていれば、中性化による鉄筋位置の pH の低下の影響は小さく、土木学会示方書の照査式に鉄筋位置の pH の低下、つまり中性化の影響を加えて考慮しなくてもよいと考えられる。ただし、維持管理においては、中性化が進行しており、かぶりが小さい箇所で変状を予測する場合等には、測定あるいは中性化残りにより推定するなどした鉄筋位置の pH を用いて、鉄筋位置の pH の影響を考慮する必要があると考えられる。

6. まとめ

降雨により水掛かりを受ける鉄道 RC ラーメン高架橋の柱の実態調査および鉄筋位置の pH を考慮した腐食速度式に基づき、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を検討した。

- (1) 土木学会示方書に示される水の浸透による腐食速度式を基に、鉄筋位置の pH を予測し、鉄筋位置の pH の変化に応じた腐食速度を経時的に求めることができる腐食速度式を示した。
- (2) 水の浸透に伴う鉄筋腐食に対する照査を満たす設計かぶりが確保されていれば、変状の発生に及ぼす中性化による鉄筋位置の pH の低下の影響は小さいと考えられる。
- (3) 維持管理において、中性化が進行しており、かぶりが小さい箇所の変状を予測する場合等には、鉄筋位置の pH の影響を考慮する必要があると考えられる。

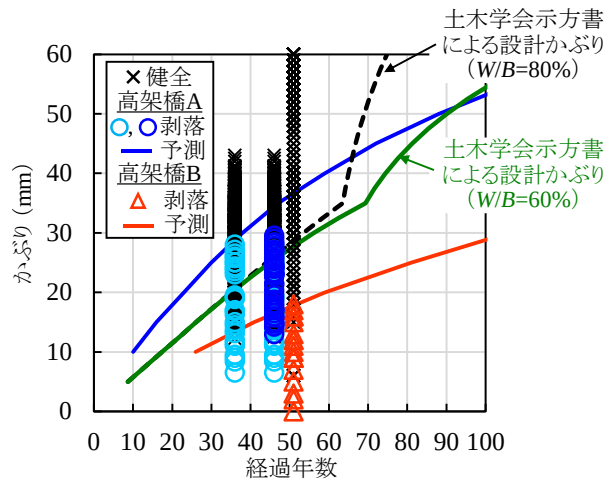


図-10 設計かぶりと剥落箇所のかぶり

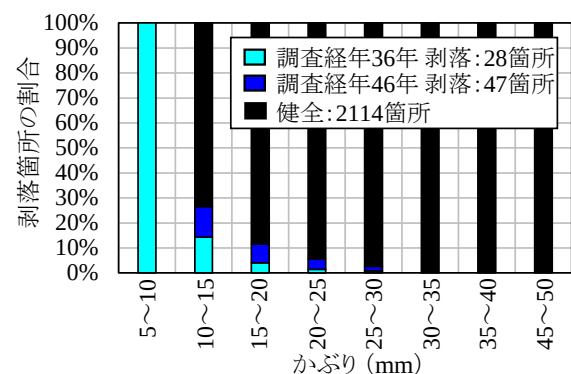


図-11 かぶりと剥落箇所の割合（高架橋 A）

参考文献

- 1) 鈴木浩明, 飯島亨, 上田洋: 水分浸透とコンクリート中の鉄筋腐食速度との関係, 第 44 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, V-15, 2017.3
- 2) 土木学会: 2017 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], 2018.3
- 3) 鶴田孝司, 上原元樹: アルカリシリカ反応によるモルタルの pH と膨張量, 無機マテリアル学会, 第 125 回学術講演会講演要旨, 2012.11
- 4) 石橋奈都実, 轟俊太朗, 山崎由紀, 田畑勝幸, 田所敏弥: 実態調査に基づくコンクリートの pH と中性化深さの関係, 第 75 回土木学会年次学術講演会講演概要集, V-665, 2020.9
- 5) 国土交通省: 水管理・国土保全局水資源部, 日本の水資源の現況, 平成 28 年版
- 6) 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, 2004.4
- 7) 轟俊太朗, 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, Vol.75, No.4, pp.226-238, 2019.11