

論文 実構造物を対象とした[Cl⁻]/[OH⁻]によるコンクリート中鉄筋の腐食性評価

並松 沙樹*1・伊藤 裕一*2・中山 一秀*3・岩波 光保*4

要旨：本論文では、55年以上供用されたRC高架橋を対象として、各種調査を実施し、各腐食因子と鉄筋腐食の関係性を考察するとともに、[Cl⁻]/[OH⁻]を用いた腐食性評価の有効性を検討した。その結果、水セメント比、単位セメント量、中性化深さ、pH測定値、含水率と腐食グレードの関係性は認められなかった。一方、塩化物イオン量と腐食グレードの関係性は認められたが、一部の橋りょうでは鉄筋位置における腐食発生限界濃度以下であっても実際には発錆していることを確認した。さらに、[Cl⁻]/[OH⁻]で評価してみると、塩化物イオン量のみに着目して評価するよりも腐食評価の精度が向上することを確認した。

キーワード：鉄筋腐食、塩化物イオン量、中性化、[Cl⁻]/[OH⁻]、維持管理

1. はじめに

高度経済成長期に建設された構造物の多くが、50～60年以上供用されている。我が国では、環境負荷低減やライフサイクルコスト削減の観点からスクラップアンドビルドではなく、適切な維持管理による構造物の長寿化が望まれている。

コンクリート構造物の耐久性は、鉄筋腐食と密接な関係がある。鉄筋表面には、緻密な酸化被膜である不動態被膜が形成されており、この被膜が破壊されると腐食が開始すると言われている。溶液中の鉄筋における腐食発生条件は、不動態被膜の破壊に付与するCl⁻と不動態被膜の形成に付与するOH⁻の関係で変化し、モル比[Cl⁻]/[OH⁻]を用いることで、鉄筋腐食の可能性を定量的に評価できる。しかし、既往の研究で報告されているコンクリート中の鉄筋における[Cl⁻]/[OH⁻]の閾値は、0.5～6程度と研究毎に大きく異なっている。これは、溶液中の鉄筋における[Cl⁻]/[OH⁻]とは異なり、コンクリート中では、配合条件や暴露環境により、鉄筋とコンクリート界面の状態が大きく変化することが影響していると考えられる。このように、閾値が明確でないことから、実構造物の鉄筋腐食評価に[Cl⁻]/[OH⁻]を用いた事例は多くはない。

また、長期間供用されたコンクリート構造物の鉄筋腐食に関しては、建設時の施工不良および著しい腐食環境下の構造物を対象とした調査やある特定の1箇所のみを対象とした調査が多い。そのため、比較的品质が良く、厳しい腐食環境下以外に供用されたコンクリート構造物の腐食調査に関する知見は少ない。

そこで、本研究では、供用後55年以上が経過した複数のRC高架橋を対象として、各種調査を実施し、[Cl⁻]/[OH⁻]を用いた腐食性評価の有効性を検討した。

2. 調査概要

2.1 対象橋梁

経年55年以上が経過した鉄道RC高架橋を対象に、塩化物イオン量を調査した結果および塩化物イオン量毎の橋りょう数を図-1に示す。図-1では、総延長520kmの路線において取得したデータを起点方から終点方へ順番に並べている。なお、対象構造物は、建設時の示方で、水セメント比は0.5、圧縮強度σ₂₈は240kg/cm²と定められている。

塩化物イオン量は、コンクリート表面からの深さ30～

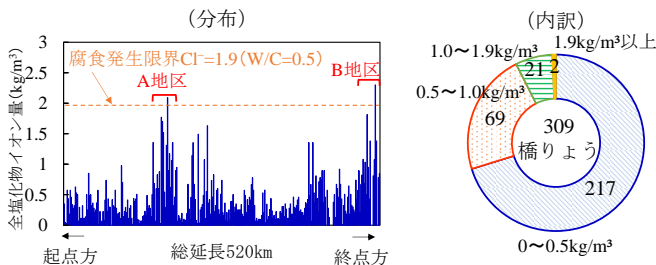


図-1 塩化物イオン量調査結果 (309橋りょう)

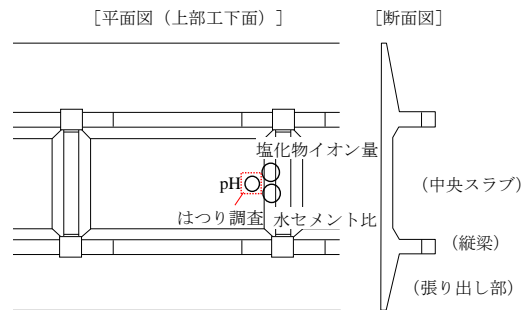


図-2 調査位置

- *1 東海旅客鉄道 (株) 総合技術本部 技術開発部 研究員 技術経営修士 (正会員)
- *2 東海旅客鉄道 (株) 総合技術本部 技術開発部 上席研究員 工博
- *3 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 助教 工博 (正会員)
- *4 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 教授 工博 (正会員)

40mmの部分でドリル法にて試料を採取し、JCISC5「硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易測定方法」(電位差滴定法)により測定した。

塩化物イオン量は、大部分が1.0kg/m³以下であるが、2橋りょうでコンクリート標準示方書²⁾より算出した腐食発生限界濃度1.9kg/m³(W/C=0.5, OPC)を超えた。また、この2橋りょうについては、その前後の橋りょうも塩化物イオン量が高い傾向が見られる。そこで、起点方をA地区、終点方をB地区とし、A地区2橋りょう、B地区6橋りょうの合計8橋りょうの中央スラブ下面を対象とし、詳細調査を実施することとした。各地区の範囲は10kmである。海岸からの距離は、A地区は2~5km、B地区は14~20kmであり、両地区とも海風に対する遮蔽物の多いことから、飛来塩分による影響が小さい地域である。また、太平洋側の比較的温暖な地域に位置することから付近の道路への凍結防止剤の散布はなく、構造物自体に散布した実績もない。

測定位置である中央スラブ下面には、浮き等の変状は発生しておらず、周辺の排水設備からの漏水や直接の雨掛かりは見られなかった。そのため、コンクリート表面からの水分の供給の影響は小さい箇所である。

2.2 調査項目

調査項目は、塩化物イオン量、細孔溶液中のpH、含水率、水セメント比、中性化深さである。調査位置を図-2に示す。

(1) 水セメント比および単位セメント量

水セメント比は、未中性化領域の試料を用いて、NDIS 3422「グルコン酸ナトリウムによる硬化コンクリートの単位セメント量試験方法」に基づき配合推定を行い、水セメント量および単位セメント量を推定した。過去の調査結果³⁾から除塩不足の骨材使用の疑いがあるため、本研究では、海砂の影響による誤差が生じにくいグルコン酸ナトリウム法を用いた。

(2) 中性化深さ

中性化深さ測定は、φ75×80mmのコアを採取し、JIS A 1152「コンクリートの中性化測定方法」に基づいて、中性化領域と未中性化領域の判断を行った。

(3) pH濃度

細孔溶液中のpHは、コンクリート表面から0~50mmの範囲において、10mm毎に試料を採取し、試料20gと純水20mlを攪拌した後、ガラス電極法による分析を実施した。

(4) 塩化物イオン濃度

塩化物イオン量は、コンクリート表面から0~50mmおよび70~80mmの範囲において、10mm毎に試料を採取し、JCISC5「硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易測定方法」(電位差滴定法)に基づき分析した。一般的

表-1 腐食判定基準⁶⁾

腐食グレード	状況
0	施工時の状態を保ち、以降の腐食が認められない。
I	部分的に腐食が認められる。軽微な腐食。
II	表面の大部分が腐食している。
III	鉄筋全周にわたり断面欠損がある。
IV	鉄筋の断面が当初の2/3~1/2位欠損している。

なコンクリート構造物の場合、中性化の影響を受けない深部における塩化物イオン量を建設時に混入した初期塩化物イオン量とできる。今回の調査では、中性化深さ測定の結果を踏まえ、コンクリート表面から70~80mmの位置における塩化物イオン量を建設時に混入した初期塩化物イオン量とした⁴⁾。

(5) 含水率

含水率は、電気抵抗式コンクリート・モルタル水分計を用いて行った。φ6mmの穴を30mm間隔で削孔し、電極を挿入し、コンクリート表面からの深さ10mm毎の含水率を測定した⁵⁾。

(6) 鉄筋はつり調査

鉄筋はつり調査では、図-2に示すpHコア削孔位置周辺の鉄筋かぶりおよび鉄筋腐食状態を確認した。鉄筋腐食グレードは、表-1に示す腐食度判定基準⁶⁾に基づいて判定した。

3. 調査結果および考察

各種調査結果を表-2に示す。No.3以外の橋りょうは表面保護施工済である。コンクリート深さ方向の塩化物イオン量およびpH分布と腐食状況写真を図-3に示す。図中の破線は中性化深さ、実線は鉄筋位置を示している。また、鉄筋写真の右側には、腐食グレードを記載した。

3.1 水セメント比

表-2より、水セメント比の測定値は、0.43~0.56の範囲であることを確認した。建設当時の示方では、水セメント比を0.50としているため、大部分で所定の水セメント比が確保できていることを確認した。また、高度経済成長期に建設されたコンクリート構造物では、水セメント比が0.55を上回っており、鉄筋腐食によるコンクリート片の剥離・剥落の可能性が高いとの報告⁷⁾もあるが、No.6以外の箇所では0.55以下であった。

次に、水セメント比と腐食グレードの関係を図-4に示す。水セメント比は、コンクリート中への劣化因子の浸透を左右する主要因であるが、腐食グレードと水セメ

表-2 調査結果

地区	橋りょう No.	W/C	C(kg)	中性化深さ (mm)	かぶり (mm)	初期 Cl ⁻ (kg)	鉄筋位置における			腐食グレード
							Cl ⁻ (kg/m ³)	pH	含水率(%)	
A 地区	1	0.45	276	18	24	0.27	0.36	12.2	2.2	I
	2	0.49	322	13	45	1.21	1.44	12.4	3.5	II
B 地区	3	0.43	320	18	42	0.35	0.46	12.4	3.0	I
	4	0.47	339	28	32	0.99	1.26	12.4	3.0	II
	5	0.48	333	20	32	0.95	1.51	12.6	2.2	III
	6	0.56	339	25	30	0.59	0.89	12.8	2.1	I
	7	0.52	334	28	30	0.78	0.82	12.5	2.1	I
	8	0.45	382	17	35	1.4	2.27	12.5	1.6	II

ント比に関連性は認められなかった。

また、水セメント比が最小である No.3 (W/C=0.43) と最大である No.6 (W/C=0.56) はともに腐食グレードIであった。その他の因子の影響も考慮する必要があるが、実構造物においては、配合条件よりもその後の暴露条件が腐食グレードに与える影響の方が大きいと考えられる。

3.2 単位セメント量

塩化物イオンは、腐食に起因する自由塩化物イオンと細孔組織に固定化している固定塩化物イオンに分類できる。同じ水セメント比であっても、単位セメント量が多いほど固定塩化物イオンが増えるので、内在塩分が混入したコンクリート構造物の場合、単位セメント量と腐食グレードの関係を確認する必要があると考えた。

表-2 より、単位セメント量は、No.1 および No.8 を除く 6 箇所に関しては、320~340kg/m³ の範囲にあることを確認した。標準設計では、単位セメント量を 350kg/m³ としているため若干下回る結果となった。また、No.1 は 276kg、No.8 は 382kg であるが、水セメント比はともに 0.45 であった。次に、単位セメント量と腐食グレードの関係を図-5 に示す。単位セメント量は、腐食グレードと単位セメント量に関連性は認められなかった。水セメント比と同様に、実構造物においては、配合条件よりもその後の暴露環境が腐食グレードに与える影響の方が大きいと考えられる。

3.3 中性化深さ

表-2 より、中性化深さは、13~28mm であった。また、全箇所において、中性化がかぶり位置まで到達していないことを確認した。

次に、中性化深さと腐食グレードの関係を図-6 に示す。腐食グレードと中性化深さに関連性は認められなかった。

各箇所鉄筋かぶり深さが異なることから中性化残りとの腐食グレードの関係を図-7 に示す。腐食グレードと中性化残りに関連性は認められなかった。

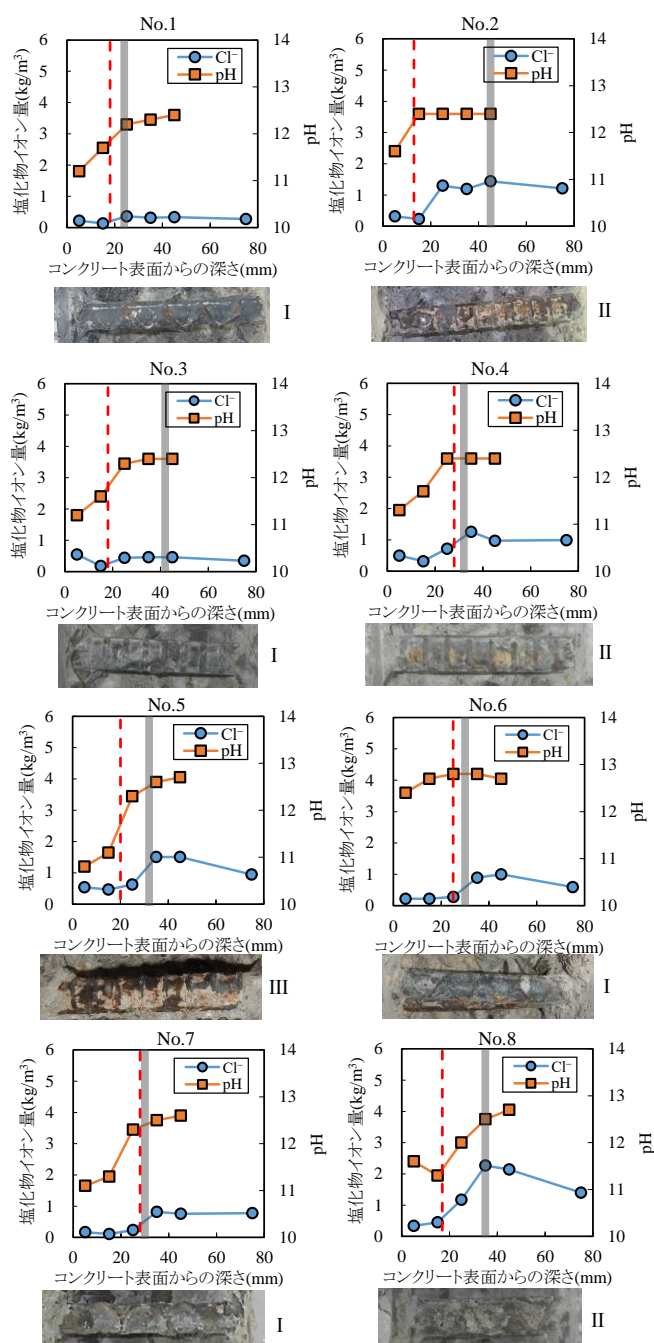


図-3 塩化物イオン量および pH 分布と鉄筋腐食写真

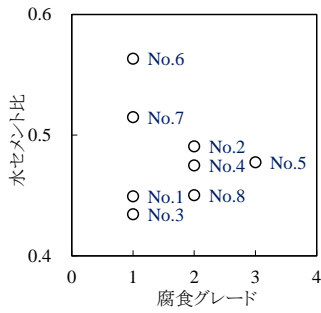


図-4 水セメント比の影響

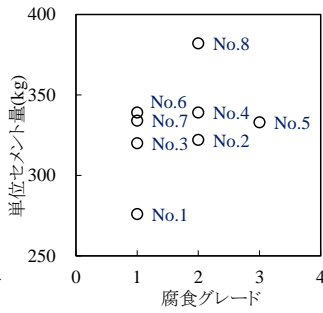


図-5 単位セメント量の影響

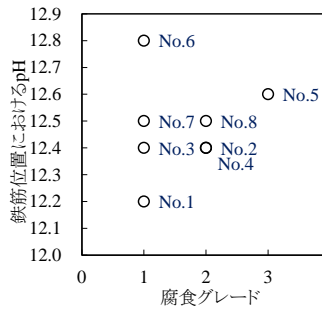


図-8 鉄筋位置における pH の影響

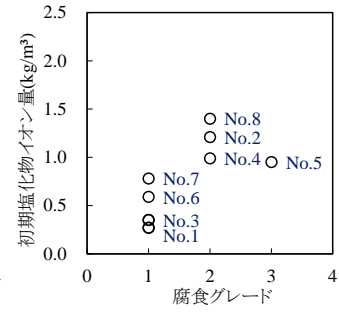


図-9 初期塩化物イオン量の影響

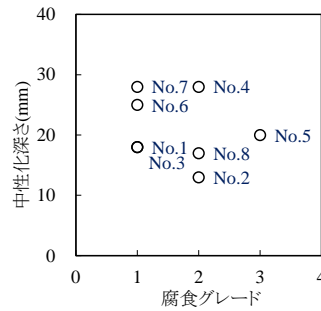


図-6 中性化深さの影響

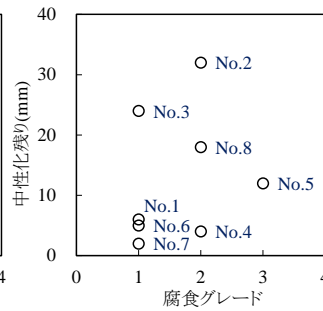


図-7 中性化残りの影響

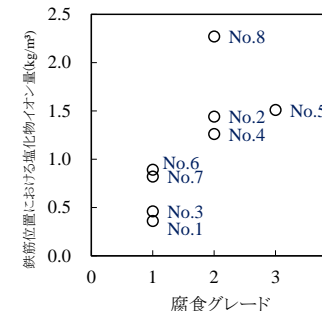


図-10 鉄筋位置における塩化物イオン量の影響

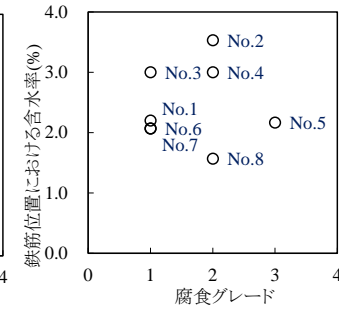


図-11 鉄筋位置における含水率の影響

以上より、適切な水セメント比が確保され、比較的品質の良い状態のコンクリート構造物の場合は、供用後 55 年以上経過しても中性化による影響は軽微であり、中性化が鉄筋腐食の主要因でないと考えられる。

3.4 pH 測定

図-3 より、全箇所において鉄筋位置における pH は 12.2~12.8 の範囲に分布していることを確認した。また、8 箇所の平均値より、コンクリート表面では pH=11.4、中性化箇所と未中性化箇所の境界では pH=12.0、未中性化部では pH=12.5 であった。

一般的に、健全なコンクリートの pH は 12~13、鉄筋腐食が発生する pH は 11 以下とされている⁸⁾。調査結果より、中性化が進行したコンクリート表面付近においては、pH=12 を下回っているが、鉄筋位置においては、pH=12 以上であり、高アルカリ環境下であることから鉄筋は不動態化しており、腐食しにくい状態であると言える。

次に、鉄筋位置における pH と腐食グレードの関係を図-8 に示す。腐食グレード I の pH がやや低い傾向を示したが、鉄筋位置における pH と腐食グレードに関連性は認められなかった。今回の測定橋りょうは、pH の値だけを見ると鉄筋腐食が発生しない環境と判定できるが、実際には腐食グレード II および III の箇所も見られた。そのため、鉄筋腐食の発生には、他の因子による影響が支配的であると考えた。

以上より、鉄筋付近の pH が 12 以上であれば、pH 自体が鉄筋腐食に及ぼす影響に大差はなく、その他の因子

の影響が大きいと考えられる。

3.5 塩化物イオン量

図-3 より、No.1 と No.3 を除く橋りょうでは、中性化領域と未中性化領域の境界付近で塩化物イオン濃度の移動・濃縮の傾向を確認した。

(1) 初期塩化物イオン量

初期塩化物イオン量と腐食グレードの関係を図-9 に示す。初期塩化物イオン量が高くなるにつれ、腐食グレードが II・III になる傾向を確認した。また、腐食グレード I と腐食グレード II・III の遷移域は、初期塩化物イオン量が 0.82~0.95kg/m³ の範囲に存在すると推定した。

腐食グレード I のうち、移動・濃縮が見られなかった橋りょうの初期塩化物イオン量は、No.1 は 0.27kg/m³、No.3 は 0.35kg/m³ であった。一方、移動・濃縮を確認した橋りょうの初期塩化物イオン量は No.6 は 0.59kg/m³、No.7 は 0.78kg/m³ であった。また、初期塩化物イオン量が少なく、移動・濃縮が見られなかった No.1 および No.3 では、その他の橋りょうと比較して、中性化領域と未中性化領域における塩化物イオンの濃度差が小さいことを確認した。

初期塩化物イオン量と腐食の関係については、初期塩化物イオン量が 0.6kg/m³ 以下であれば、中性化による濃縮が生じて鉄筋腐食に影響を及ぼさないとされており⁹⁾、本研究と概ね一致する結果となった。

(2) 鉄筋位置における塩化物イオン量

鉄筋位置における塩化物イオン量と腐食グレードの関係を図-10 に示す。初期塩化物イオン量と同様に、鉄

筋位置における塩化物イオン量が高くなるにつれ、腐食グレードがⅡ・Ⅲになる傾向を確認した。また、腐食グレードⅠと腐食グレードⅡ・Ⅲの遷移域は、鉄筋位置での塩化物イオン量が 0.89～1.26kg/m³ の範囲に存在すると推定した。一方、No.2, 4, 5 は腐食発生限界濃度 1.9kg/m³ 以下であるにもかかわらず腐食グレードはⅡ・Ⅲであり、実際には発錆を確認している。

以上の結果を踏まえて、鉄筋位置における塩化物イオン量と腐食グレードに関連性を認めたと、一部の橋りょうでは腐食発生限界濃度以下であっても実際には発錆していることを確認した。

3.6 含水率

表-2 より、鉄筋位置における含水率は、1.6～3.5%の範囲に分布していることを確認した。

次に、腐食グレードと鉄筋位置における含水率の関係を図-11 に示す。腐食グレードと鉄筋位置の含水率に関連性は認められなかった。

鉄筋腐食の進行に影響を与える因子として、水と酸素の供給条件を把握することが重要である。しかし、今回の調査では、一時的な含水率測定のみで、含水率の経時変化を捉えておらず、水の状況が腐食の進行性に与える影響について十分な考察ができなかった。そのため、今後の課題として、含水率の長期モニタリング等を行い、鉄筋腐食の進行について評価することを考えている。

4. [Cl⁻]/[OH⁻]による評価

4.1 前提条件

鉄筋の腐食性評価には、鉄筋腐食の化学的機構を正確にとらえている[Cl⁻]/[OH⁻]を用いることが良いとされている⁹⁾。しかし、腐食発生の閾値が明確でないことから実構造物の維持管理において、この指標を用いる機会は少ない。そこで、[Cl⁻]/[OH⁻]を用いた実構造物の腐食性評価の有効性を検証するため、前述の測定結果を用いて、[Cl⁻]/[OH⁻]を算出し、はつり出しにより目視確認した鉄筋腐食グレードと比較を行うこととした。

[Cl⁻]の算出においては、既往の論文^{9),10),11),12)}を用いて、全塩化物イオン量の測定値を自由塩化物イオンに換算し、その値と pH 測定結果を用いて[Cl⁻]/[OH⁻]を算出した。コンクリートの細孔容積は、過去の調査結果¹⁴⁾より中性化箇所で 13.0%、未中性化箇所で 13.3%であるため今回は、細孔容積を 13%として計算した。その他の条件として、コンクリートの単位体積質量を 2350kg/m³、Cl⁻分子量を 35.5 とした。

4.2 [Cl⁻]/[OH⁻]と腐食グレードの関係

腐食グレードと鉄筋位置における[Cl⁻]/[OH⁻]の関係を図-12 に示す。

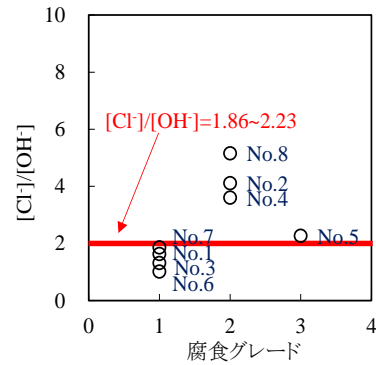


図-12 [Cl⁻]/[OH⁻]と腐食グレードの関係

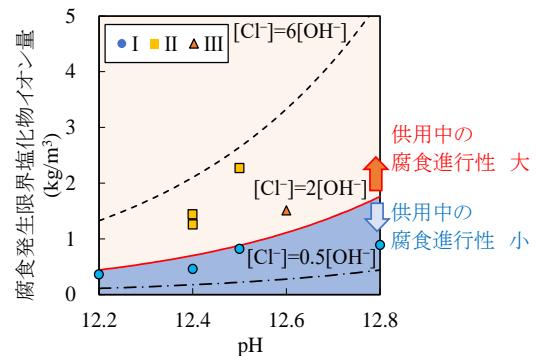


図-13 [Cl⁻]/[OH⁻]を用いた腐食進行評価

また、図-12 より腐食グレードⅠと腐食グレードⅡ・Ⅲの遷移域は、[Cl⁻]/[OH⁻]=1.86～2.23 と推定でき、既往の閾値⁹⁾[Cl⁻]/[OH⁻]=0.5～6 の範囲内に存在することを確認した。[Cl⁻]/[OH⁻]=2.0 を閾値とした場合、3.4 (1) で懸念された No.2, 4, 5 も[Cl⁻]/[OH⁻]の閾値を上回り、腐食が発生していると評価できた。

以上より、[Cl⁻]/[OH⁻]による腐食性の評価は、塩化物イオン量のみに着目した場合よりも発錆の有無を精度よく評価できており、実構造物の維持管理においても[Cl⁻]/[OH⁻]による腐食性評価が適用できる可能性があることを明らかにした。

4.3 [Cl⁻]/[OH⁻]の閾値と腐食グレードの関係

[Cl⁻]/[OH⁻]を用いた腐食進行性評価を図-13 に示す。図中には、前述の調査結果を腐食グレード毎にプロットした。また、[Cl⁻]/[OH⁻]を 0.5, 2, 6 とした場合の閾値を図中に線で示した。

閾値を[Cl⁻]/[OH⁻]=0.5 とした場合は、腐食グレードⅠの軽微な鉄筋腐食も閾値を上回る結果となった。一方、閾値を[Cl⁻]/[OH⁻]=6.0 とした場合は、本調査箇所で見られた腐食グレードⅠ～Ⅲのような著しい断面欠損が見られない腐食は、閾値を下回る結果となった。これらの結果より、抽出したい鉄筋腐食がどの程度かで設定すべき閾値が変化することを確認した。

4.4 供用中の腐食進行の評価

腐食グレードⅠと比較し、腐食グレードⅡ以上では、鉄筋の大部分で腐食が見られることから供用期間中に鉄筋

腐食が進行していると考えられる。そこで、腐食グレードIは供用中の鉄筋腐食の進行が軽微、腐食グレードIIおよびIIIは供用中に鉄筋腐食が進行していると定義した。これより、前述の閾値 $[Cl^-]/[OH^-]=2$ を用いて、供用中の鉄筋腐食の進行性の大小を評価した。

$[Cl^-]/[OH^-]=2$ を上回る領域では、供用中の鉄筋腐食の進行性が大きく、 $[Cl^-]/[OH^-]=2$ を下回る領域では、鉄筋腐食が穏やかに進行しており、鉄筋腐食の進行性が小さいと考えられる。

以上より、 $[Cl^-]/[OH^-]=2$ を閾値とした場合、供用中の鉄筋腐食の進行性の大小を評価できる可能性があることを確認した。

5. まとめ

本研究より以下の知見が得られた。

- (1) 水セメント比、単位セメント量、中性化深さ、pH測定値、含水率と腐食グレードの関係は認められなかった。一方、塩化物イオン量が高くなるにつれ、腐食グレードがII・IIIになる傾向を確認し、塩化物イオン量と腐食グレードの関係を確認したが、一部の橋りょうでは鉄筋位置における腐食発生限界濃度以下であっても実際には発錆していることを確認した。
- (2) 経年55年以上経過した実構造物の $[Cl^-]/[OH^-]$ を算出し、腐食グレードとの関連性を確認したところ、腐食グレードIと腐食グレードIIおよびIIIの遷移域は、 $[Cl^-]/[OH^-]=2$ 程度であり、既往の閾値 $[Cl^-]/[OH^-]=0.5\sim 6$ の範囲内に存在することを確認した。また、 $[Cl^-]/[OH^-]=2$ を閾値とした場合、塩化物イオン量のみに着目して評価するよりも腐食評価の精度が向上することを確認した。
- (3) 実構造物の腐食性評価への適用が容易でなかった $[Cl^-]/[OH^-]$ の閾値についても、適用条件を限定することで閾値の範囲を狭めることができた。
- (4) 本研究では、腐食グレード0およびIVのデータを取得できておらず、鉄筋腐食の発生無しおよび断面欠損を伴う鉄筋腐食の現状を把握できなかった。しかし、今後これらのデータを取得することで、抽出したい腐食グレードに合わせた $[Cl^-]/[OH^-]$ の閾値の提案および閾値設定の更なる精度向上が可能と考えている。
- (5) コンクリートの品質が比較的良く、腐食環境がそれほど厳しくない構造物を対象としたが、これ以外の条件についても検討し、 $[Cl^-]/[OH^-]$ の適用範囲を見極めていきたい。また、鉄筋腐食の進行に影響を与える因子を把握するためには、含水率の長期モニタリングを行う予定である。

参考文献

- 1) Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M. and Castro, P.: Chloride Threshold Values to Depassivate Reinforcing Bars Embedded in a Standardized OPC Mortar, Cement and Concrete Research, Vol.30, pp.1047-1055, 2000
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書（設計編），2017
- 3) 並松沙樹，吉田幸司，三村典正，中野松二：鉄道高架橋へ適用した間欠通電方式による電気防食工法の防食効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.947-952，2019
- 4) 松本光矢，曾我部正道，轟俊太朗，谷村幸裕：内的塩害と中性化の複合劣化を対象とした劣化予測に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，pp.1423-1428，2010
- 5) 前原聡，伊代田岳史：コンクリート中の含水率とかぶりが鉄筋の腐食速度に及ぼす影響，土木学会第72回年次学術講演会，V-153，pp.305-306，2017
- 6) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針2013，2013
- 7) 石橋忠良，古谷時春，浜崎直行，鈴木博人：高架橋等から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.125-134，2002.8
- 8) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'18，pp.32-35，2018
- 9) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説コンクリート構造物，2007.1
- 10) 堀口賢一，山口明伸，丸屋剛，武若耕司：腐食発生限界塩化物イオン濃度の測定方法とその定量評価に関する研究，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），Vol.71，No.2，pp.107-123，2015
- 11) 竹上浩史，石田哲也，前川宏一：高炉スラグ微粉末を混入したセメント硬化体中の塩化物移動・平衡則，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.633-638，2002
- 12) 石田哲也，丸屋剛，宮原茂禎：異なる鉱物組成ならびにセッコウ量を有するセメント硬化体の塩分平衡特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.849-854，2004
- 13) 石田健太，前田聡，武若耕司：鉄の腐食感受性および腐食発生限界塩化物濃度に関する一考察，土木学会第61回年次学術講演会 V-254，pp.505-506，2006
- 14) 山口竜大，生田周史，田中佑児，久保淳一郎：実構造物を対象とした鉄筋防錆材の電気化学的注入試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1097-1101，2011