

論文 水掛かりと構造物各部位における鉄筋腐食の関係

小平一徳^{*1}・本間美海^{*2}・佐伯竜彦^{*3}・斎藤豪^{*4}

要旨：コンクリート構造物を効率的に維持管理するために、構造物各部位における水掛かりと鉄筋腐食の関係の把握を試みた。実構造物を模した大型供試体を作製し、薄板モルタル供試体を用いた水掛かりの評価および環境作用・腐食電流等の測定を行った。その結果、コンクリートの含水率と腐食電流の間に相関関係が確認された。さらに、薄板モルタル供試体中性化深さと腐食電流の間にも負の相関関係が得られ、構造物各部位の中性化深さからコンクリート内部の含水状態を把握し、鉄筋腐食を予測できる可能性が示唆された。

キーワード：鉄筋腐食、水掛かり、中性化深さ

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の効率的な維持管理によるライフサイクルコストの最適化が求められており、そのためには、コンクリート構造物の劣化進行を正確に予測する必要がある。鉄筋コンクリートの主な劣化原因の一つに水と酸素がコンクリート中に侵入することによる鋼材の腐食がある。含水率が低い場合は腐食が抑制され、高すぎても酸素の拡散係数が減少するため進行しない。また含水率は気象条件によって変化する。以上のことから、コンクリート中の含水状態と腐食の関係把握することで、正確な腐食の進行予測が可能になる。

しかし、水掛かりや湿度の変動によるコンクリート内部の含水状態の変化とその影響を定量的に評価した研究は少なく、実構造物において水掛かりの影響を受け、経時的に変化する腐食電流を長期にわたって正確に把握することはできていなかった。

そこで本研究では実構造物を模した大型供試体を作製し、各部位における内部温度、水掛かりおよび腐食電流の経時的な測定、薄板モルタル供試体を用いた構造物各部位における水掛かりの把握を行い、局所的水掛かりと腐食電流の関係を検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

本研究で使用した供試体は写真-1, 2に示すように、T桁、箱桁を模したものである。供試体は普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比は50%とし、塩化物イオン濃度5kg/m³となるようにNaClをコンクリート練り混ぜ時に混入した。鉄筋は、D10の異形鉄筋を



写真-1 T桁供試体



写真-2 箱桁供試体

用いた。また、図-1及び図-3に示すように部位によってかぶりを5mmと30mmに変化させた。

供試体の寸法と以後本論文で用いるセンサおよび熱電対の位置と番号は、図-1, 2, 3, 4の通りである。以後本論文では、T桁供試体の1番センサはT①というように表記する。なお図には、供試体各部位における寸法(mm)を付記した。なお各供試体の奥行は、T桁型1600mm、箱桁型1930mmであり、センサおよび薄板供試体はT桁型では奥行800mm、箱桁型においては奥行140mm、1090mmに設置した。またT③, T④, 箱⑤, 箱

*1 新潟大学大学院自然科学研究科（学生会員）

*2 新潟大学工学部工学科 社会基盤工学プログラム

*3 新潟大学 工学部（フェロー会員）

*4 新潟大学 工学部（正会員）

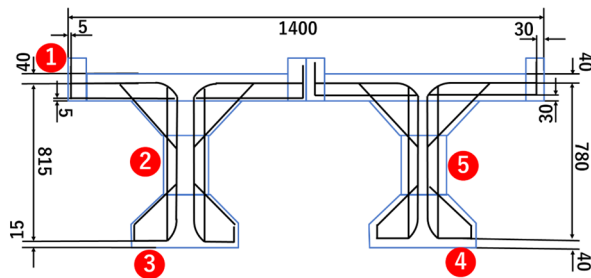


図-1 T桁センサ，熱電対の位置と番号(断面図)

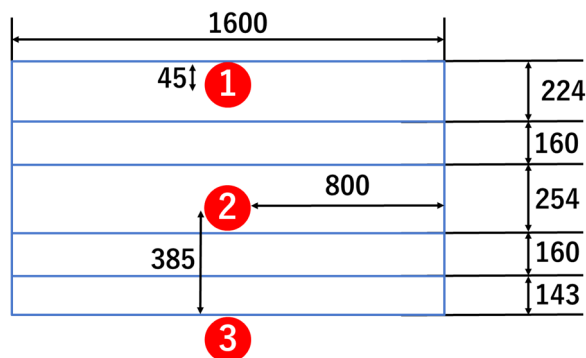


図-2 T桁センサ，熱電対の位置，番号(かぶり 5mm 側側面図)

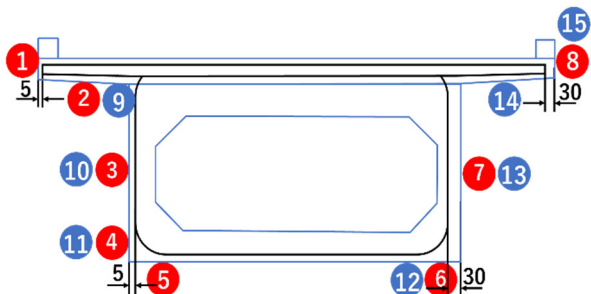


図-3 箱桁センサ，熱電対の位置と番号(断面図)

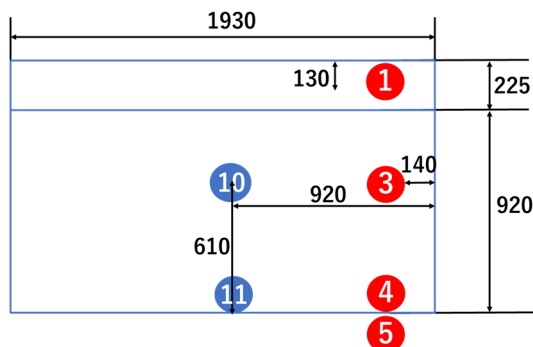


図-4 箱桁センサ，熱電対の位置と番号(かぶり 5mm 側側面図)

⑥，箱⑫センサは，供試体底部の鉄筋に設置したものである。

2.2 腐食電流および環境要因の測定方法

(1) 腐食電流測定

供試体内部の腐食電流および液抵抗の測定には埋設型ミニセンサリ（マルイ製）および腐食モニター（東方技研製）を用いた。ミニセンサを鉄筋表面にプラスチックベルト用いて固定し，腐食モニターと接続して1時間ごとに計測を行った。なお腐食センサの形状は，図-5に示す通りである。なおセンサの設置形式は図-6に示す通り，鉄筋上部に安全タイを用いて固定した。微弱電流を鉄筋に印加することによって鉄筋の分極抵抗とコンクリートの液抵抗を計測し，計測された分極抵抗を式(1)に代入することで腐食電流密度を求めた。なお計測を行う際の印加電圧は±50mv，設定周波数は5Hzから10000Hzの間で抵抗に応じて自動で設定される。

$$I_{corr} = \frac{K}{R_p} \quad (1)$$

ここで， I_{corr} :腐食電流密度(A/cm²)，K:定数， R_p :分極抵抗(Ω)である。本研究では $K=0.026(V)$ とした。

また求められた腐食電流密度を式(2)に代入することで腐食量を求めた。

$$V_t = m \times \frac{i_{corr}}{zF} \times h \quad (2)$$

ここで， V_t :腐食量(mg/cm²)，m:鉄の原子量(=55.8) z:鉄イオン価数(=2)，F:ファラデー定数(=96500)，h:経過時間(h)である。

(2) 内部温度測定

内部温度の測定には，熱電対を用いた。これを内部鉄筋におけるミニセンサ設置位置に固定することで1時間ごとに測定を行った。

(3) 中性化深さ測定

本研究では佐伯らの研究²⁾をもとに，薄板モルタル供試体を供試体壁面を伝う水を妨げることがないように各腐食センサの設置箇所から左右交互に4cmずらした位置に貼り付け，中性化深さを測定することで，水掛かりの評価を行った。暴露は，降雨の強い2023年7月3日～7月28日，10月4日～11月8日の二期間で行った。なお供試体は，普通ポルトランドセメントを用い，水セメント比80%とした。供試体の寸法は4×4×0.5cmであり4cm×4cmの面を除いた5面をシールし，水と二酸化炭素の侵入を1面からのみとした。薄板モルタル供試体の形状は，図-7に示す通りである。

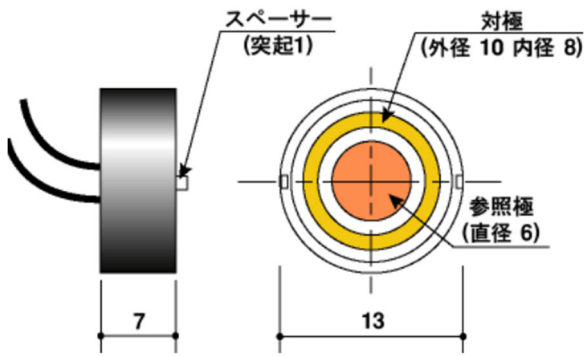


図-5 腐食センサ形状²⁾

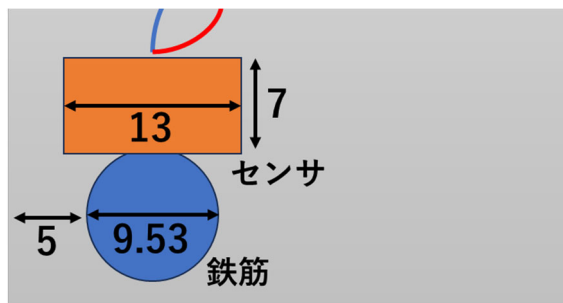


図-6 腐食センサ設置形式(かぶり 5mm)

3. 結果および考察

3. 1 温度の影響

図-8 に、T①における腐食電流と内部温度の測定結果の一例を示す。なお本測定期間においては、降雨は確認されなかった。図より、腐食電流の変動が温度と連動していることがわかる。なお、同様の結果がすべての測定点で確認された。

図の通り、鉄筋の腐食はコンクリート中の内部温度に大きな影響を受ける。そのため本研究では、水掛かりのみの影響を把握するため、式(3)で求められる係数³⁾を用いることで、20℃の値に換算した。

$$f_T = \exp \left\{ -\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_{cover}} - \frac{1}{T_0} \right) \right\} \quad (3)$$

ここで、 f_T :腐食電流温度補正係数、 E_a :活性化エネルギー(J/mol)、 R :気体定数(J/mol/K)、 T_{cover} :鉄筋位置の内部温度(K)、 T_0 :基準温度(K)である。なお鉄の活性化エネルギーは渡辺らの論文³⁾をもとに $E_a=50.0$ (kJ/mol/K)、基準温度は $T_0=293$ (K)とした。

液抵抗はコンクリート抵抗の温度依存性を表す式(4)⁴⁾により、20℃の値に換算した。

$$R_T = 1/2.5 \times 10^{-0.02T_{cover}} \quad (4)$$

ここで、 R_T :液抵抗温度補正係、 T_{cover} :鉄筋位置の内部温度(K)である。

以後、本論文に示す腐食電流密度および液抵抗は、20℃の値に換算したものである。

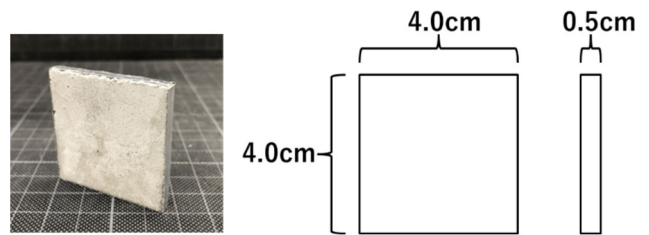


図-7 薄板モルタル供試体

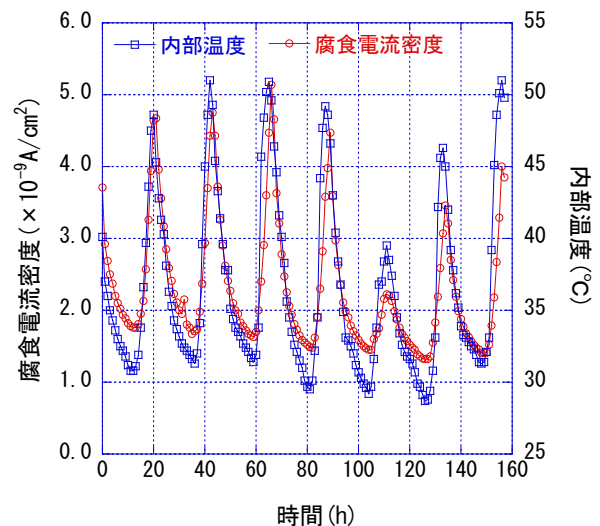


図-8 温度、腐食電流密度の経時変化(T①)

3. 2 水掛かりが腐食に及ぼす影響

(1) 短期間における水掛かりの影響

図-9 に、梅雨期間(6月19日～6月26日)に測定したT 桁供試体、箱桁供試体における腐食電流密度の経時変化を示す。ここでは雨を遮るものがなく、降雨の通りに水掛かりのあるT①、箱①の測定結果を、図中に降雨の有無を色分けして示した。水掛かりがあった場合に含水率が上昇し、それに伴い腐食電流の値も増大すると考えられていた。しかし、1週間程度の短期間においては水掛かりの有無による腐食電流の変動は確認されなかった。このことから短期間の降雨は腐食電流に大きな影響を与える含水率の変動をもたらしなないと考えられる。なお図においては温度補正を行っているにもかかわらず、腐食電流密度が一定周期で変動しているが、これは後述する湿度の影響が考えられる。

(2) 長期間における水掛かりの影響

図-10 に、7月初めから9月半ばにかけてのT①における腐食電流密度の変化と各週における降水時間を示す。横軸に示す日付は各週月曜日の日付であり、腐食電流密度は月曜日から日曜日まで1週間に測定された腐食電流密度の平均値である。図より、降水のほとんどない7月24日から8月21日にかけて腐食電流密度の値が小さくなり、降水時間の増加する8月28日以降で大き

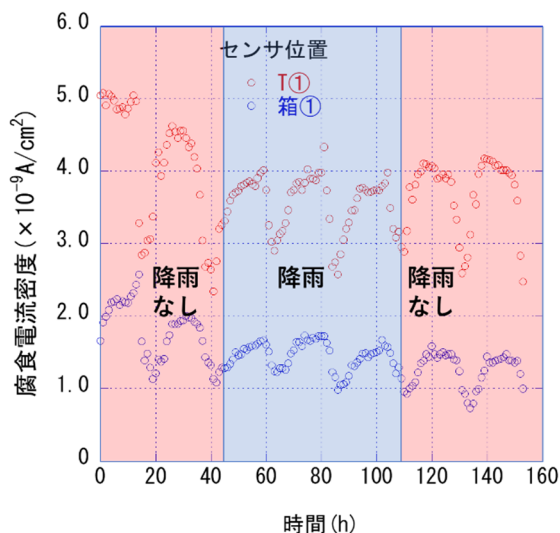


図-9 箱桁、T 桁供試体における降雨の有無および腐食電流密度の経時変化

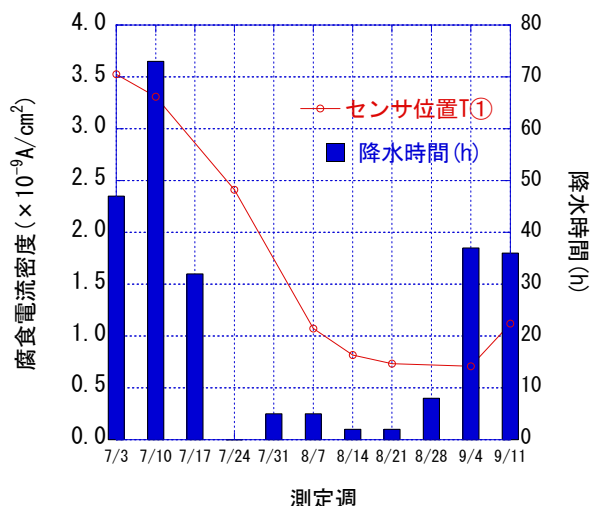


図-10 腐食電流密度の変化および各週における累計降水量 (T①)

くなっていることがわかる。この結果から水掛かりは、一ヵ月単位の長期的な傾向においては、腐食に影響を及ぼすものと考えられる。

(3) 湿度が腐食電流に与える影響

図-11 は、図-9 と同時期に測定した箱桁供試体各部位における腐食電流密度の測定結果である。箱③のような供試体の下部で腐食電流が非常に大きくなった。これらの部位は目視では水掛かりが確認されなかったが、腐食電流は大きかった。

この要因としては湿度の影響が考えられる。図-12 に温度補正をした箱①腐食電流と大気中の相対湿度を重ね合わせた結果を示す。図より腐食電流と相対湿度の間に強い相関があることがわかる。

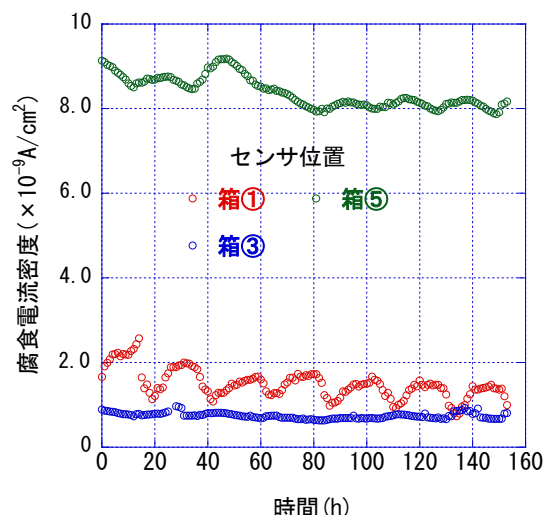


図-11 箱桁供試体各部位における腐食電流密度経時変化

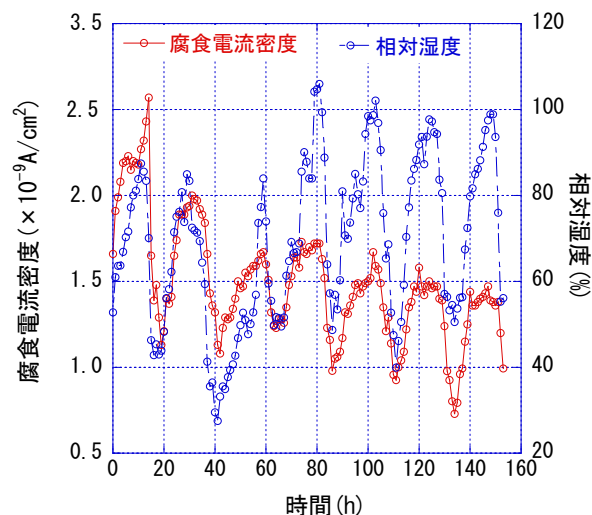


図-12 湿度、腐食電流密度の経時変化 (箱①)

図-13 に、降雨後における箱桁供試体各部位の表面から 1cm 離れた点における相対湿度変化の測定結果を示す。図に示す通り箱③は、降雨後においても他部位と比べて高湿度に保たれている。供試体を観察しても、箱③は常に日陰であり、乾燥しにくいと考えられる。これらの影響を受け腐食が促進されている可能性がある。そのため、今後は各部位における湿度の測定を継続し、腐食電流との関係を確認する必要がある。

(4) かぶりが腐食電流密度に与える影響

本研究では、腐食電流密度に対するかぶりの影響も確認された。一例として、箱桁供試体におけるかぶり 5mm、30mm の腐食電流密度を図-14 に示す。図より、かぶり 5mm の部位と比較して 30mm の部位は腐食電流の値が小さく、変動幅も小さくなっている。

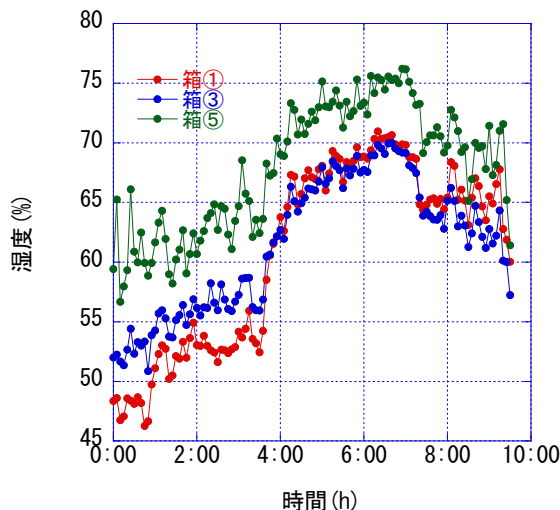


図-13 降雨後の箱桁供試体各部位における湿度変化

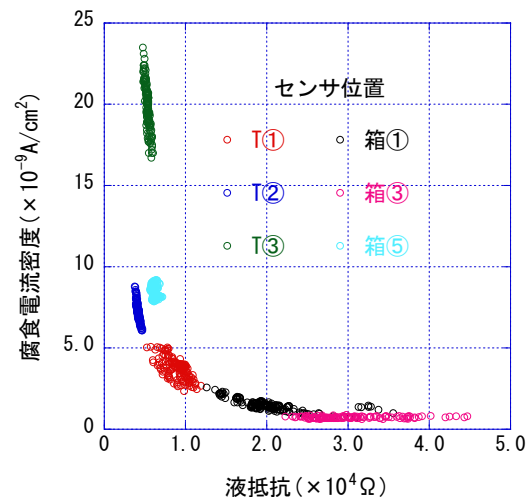


図-15 液抵抗と腐食電流密度の関係(かぶり 5mm)

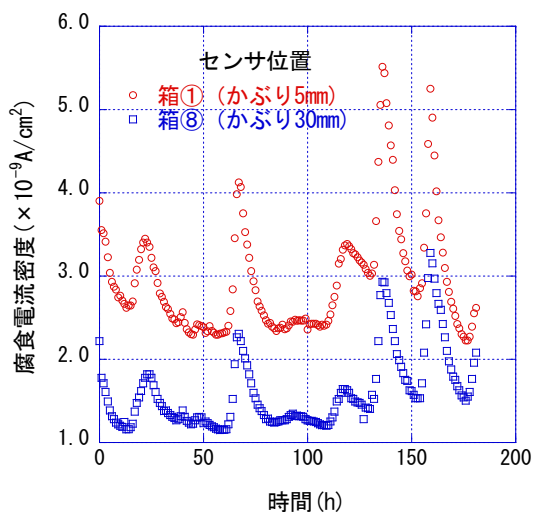


図-14 箱桁供試体におけるかぶりごとの腐食電流密度の経時変化

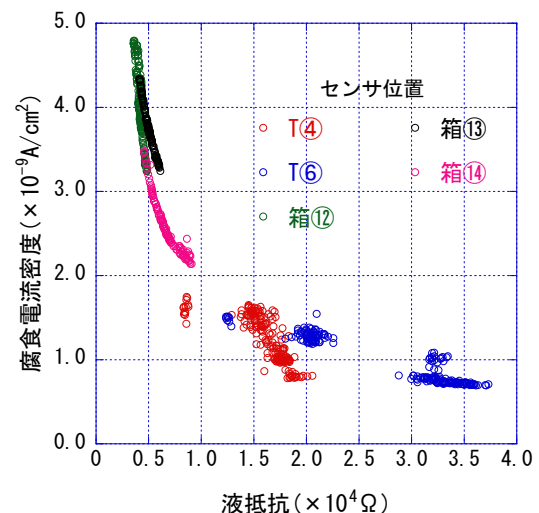


図-16 液抵抗と腐食電流密度の関係(かぶり 30mm)

(5) 腐食電流と液抵抗の関係

既往の研究⁹⁾より、液抵抗はコンクリート内部の含水率との間に負の相関があることがわかっている。そのため液抵抗と腐食電流密度の関係から含水率が腐食電流に与える影響を把握することができると考えられる。各部位における腐食電流と液抵抗の関係は、図-15 および図-16 のようになった。

図より液抵抗と腐食電流密度は、それぞれのかぶりにおいて供試体、部位によらず高い相関を持つことが分かった。以上より同じかぶりにおいては、それぞれ液抵抗によって含水率が腐食電流に与える影響を評価できる可能性があると考えられる。

3.3 中性化深さと腐食量の関係

コンクリート中の含水率は気象によって経時変化するため、ある時期の腐食の進行を把握するには期間中の含水率を測定し続ける必要がある。しかし、これは実

務においては難しいため、期間の積算値で評価を行うことが現実的である。そのため、ここでは箱⑤を除く箱①～⑫までにおける、腐食電流を積算した値である腐食量と中性化深さの関係についてかぶり別に検討した。腐食電流密度は供試体の含水状態との間に密接な関係がある。また薄板モルタル供試体の中性化深さは、水掛かりの増加に伴って小さくなることがわかっている²⁾。そのため水掛かりの多い部位においては腐食電流が小さくなり、中性化深さは小さくなるため中性化深さと腐食量の間には負の相関があると考えられる。

一例として、10月4日から11月8日の間の箱桁型供試体における測定結果を図-17 および図-18 に示す。図より、かぶり厚さに関わらず、薄板中性化深さと腐食量の間に負の相関関係がみられた。また本試験では中性化深さが2.5～3mmという狭い範囲に収まっているが、写真-3,4 に示す通り目視でその差を明確に確認することができるため、有意な差であると判断した。

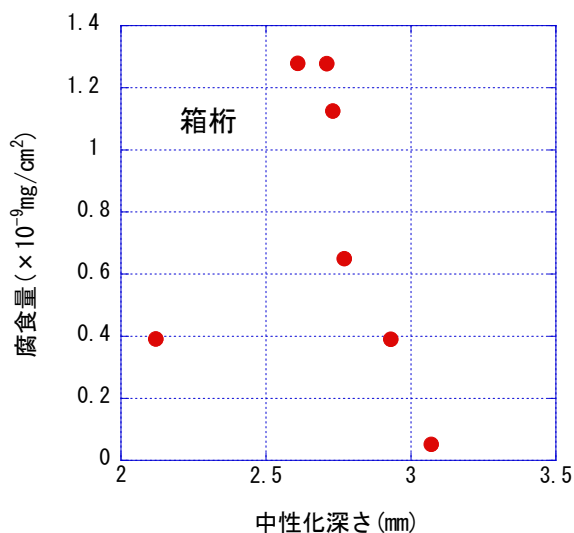


図-17 中性化深さと腐食量の関係(かぶり 5mm)

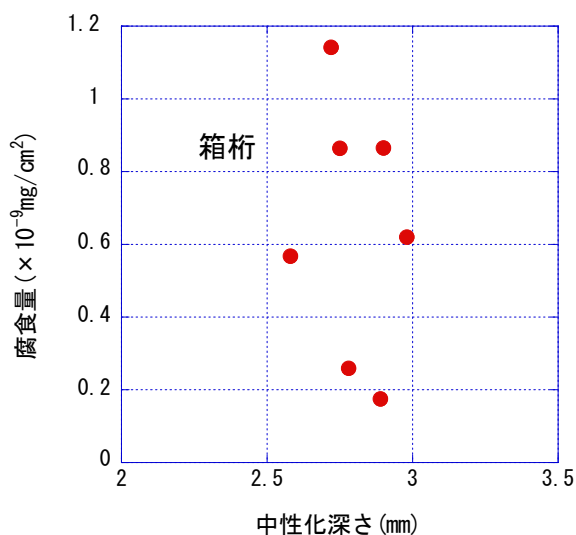


図-18 中性化深さと腐食量の関係(かぶり 30mm)



写真-3 中性化深さ測定結果例 1 (中性化深さ 2.53mm)

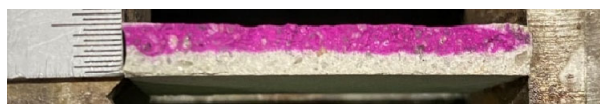


写真-4 中性化深さ測定結果例 2 (中性化深さ 2.89mm)

3.2.(5)よりコンクリート含水率と腐食電流密度の関係が確認されたため、この結果より構造物各部位の中性化深さより当該部位への水掛かりを把握し、鉄筋腐食を予測できる可能性があることが示唆された。

なお図-17 においては、中性化深さが小さくかつ腐

食量も小さくなっている点がある。この点は箱①であり、この要因としては供試体内部が高含水率に保たれることによって、鉄筋位置への酸素の侵入が妨げられたことが考えられる⁹⁾が、これについては今後検証を行う。

4. まとめ

本研究では橋梁上部構造を模擬した大型供試体を用いて各種測定を行うことで、構造物各部位における水掛かりと鉄筋腐食の関係について検討を行った。本論文で得られた知見を以下に示す。

- (1)実環境においては短期的な水掛かりではなく、湿度や長期的な水掛かりの傾向によって、コンクリート内部の含水率に変動し、それに伴って腐食電流が変化していることが確認された。
- (2)鉄筋位置の液抵抗と腐食電流密度の間に高い相関があることが確認された。このことからコンクリート内の含水状態から腐食電流密度を把握できると考えられる。
- (3)供試体各部位における薄板モルタル供試体の中性化深さと腐食量の間に負の相関が確認され、構造物各部位の中性化深さから水掛かりを把握し、各部位の鉄筋腐食を予測できる可能性が示唆された。

謝辞

本研究は JSPS 科研費(将題番号 22H01562)の助成を受けて行ったものである。ここに付記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 金光俊徳, 高谷哲, 山本悟, 竹子賢士郎, 山本貴士: Tafel 外挿法を用いた腐食モニタリングによるコンクリート中の鉄筋腐食進行評価, 材料と環境, Vol.67, pp.298-303, 2018
- 2) 佐伯竜彦, 山口肇, 斎藤豪: 構造物各部位の水掛かりの定量評価手法に関する研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.22, pp.445-450, 2022.10
- 3) 渡邊一旭, 下村匠, 藤本憲宏, 笠原久稔, 鈴木崇伸: 温湿度作用の詳細予測に基づく通信用マンホールのコンクリート中鉄筋の腐食予測, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.76, No.2, pp.78-88, 2020
- 4) 佐伯竜彦, 大即信明, 長滝重義: 中性化によるモルタル中の鉄筋腐食の定量的評価, 土木学会論文集 Vol.30, No.532, pp.55-66, 1996.2
- 5) 丸屋剛, 武田均, 堀口賢一, 小山哲, 許鎧麟: コンクリート中の鋼材のマクロセル腐食に関する解析手法の構築, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.4, pp.757-776, 2006.11