

論文 既存コンクリート構造物中の塩分浸透と鉄筋腐食

津村 浩三*1・藤田 弘昭*2・花崎 広英*3

要旨：コンクリート構造物中の塩分浸透状況と鉄筋腐食状態の対応関係について調べるため、青森県内の西向き海岸沿いの橋梁14橋において、塩化物イオン濃度の測定と鉄筋の腐食状態の観察をごく近い距離でペアとして行った。74組のデータについて検討し、このうちコンクリートが剥離していない64組のデータについては鉄筋位置での塩化物イオン濃度と鉄筋腐食グレードに正の相関が認められた。その傾向はPC部材とRC部材では異なり、PC部材における方が同じ塩化物イオン濃度でも腐食の進行程度が低い傾向が認められたので、それぞれの部材について鉄筋位置での塩化物イオン濃度と鉄筋腐食グレードの関係式を回帰的に求めた。

キーワード：鉄筋腐食、塩分浸透、橋梁、PC部材

1. はじめに

鉄筋コンクリート系構造物の維持管理において、塩分浸透は重大視される問題の一つである。塩分がコンクリート中に浸透し、コンクリート中の塩化物イオン濃度が高くなると鉄筋が腐食しやすくなり、腐食によって鉄筋の構造耐力上有効な断面積が減少し、このために構造物に求められる構造性能を満たさなくなることが大きな懸念材料となっている。ここで直接的には塩化物イオン濃度よりも鉄筋の状態が重要と思われるが、現在、塩害環境下のコンクリート系構造物の維持管理、修繕のための調査に際しては、コンクリート表面からの塩化物イオン濃度の分布の測定結果が実際の構造物内部の鉄筋の状況の観察よりも重用される傾向にある。この背景としては次の諸点が考えられる。鉄筋の観察に際しては鉄筋を傷つける恐れがある。観察箇所ごとの状態の違いが非常に大きい可能性があり、観察結果の代表性に疑問が残る。観察の結果、錆が発生していない場合、錆が発生していないという情報以外、それ以降の状況予測に結びつく情報が得難い。これに対し、塩化物イオン濃度の分布測定は、その結果から、将来の浸透状況を議論しやすいという利点がある¹⁾。

いずれにしても、塩化物イオン濃度分布の調査結果を有効に利用するためには塩化物イオン濃度の状況と鉄筋の腐食状況について精度の良い対応情報を持っていることが望ましい。塩化物イオン濃度分布などから鉄筋の状況がイメージできれば、説明が容易になるので、維持管理の推進に都合が良い。

このことについての実験室等における研究としては堀口ら²⁾の実験などが挙げられる。堀口らは鉄筋コンクリート供試体中の鋼材の腐食発生を自然電位の連続モニタリング計測によりとらえ、その時点での塩化物イオン濃度を測定した結果、水セメント比65%の普通ポルトラン

ドセメントコンクリートでの腐食発生限界塩化物イオン濃度の範囲を、 $0.9 \sim 3.5 \text{ kg/m}^3$ であるとした。一方、実構造物内での腐食状況に関する調査に基づく研究もいくつかなされている³⁾⁻¹⁰⁾。この種の調査は解体に伴って行われることが多いが、網野ら¹¹⁾は東京湾内の接する7つのドルフィン内の鉄筋の腐食状況と塩化物イオン濃度を調査した結果、腐食発生限界塩化物イオン濃度は概ね 2.0 kg/m^3 程度と報告している。こうした報告等が蓄積されていけば、それらからデータを集約して分析することにより総合的な知見が得られることが期待される。しかし、今のところ報告数は少なく、また、統一的なフォーマットに従ってデータが開示されているわけではないので、横並びに整理して比較するのが難しい状況にある。

そこで、ここでは供用期間が数十年にのぼる実橋において、異なる部位での測定データがある程度まとまった数量について検討することとした。鉄筋の腐食状況の観察と、塩化物イオン濃度の測定をごく近い距離でペアとして行い、このペアとしての測定を複数の橋梁の異なる部位において行うことにより、両者の関係とそれに及ぼす影響因子について調べた。

2. 調査概要とその内容

2.1 調査データの収集方法

本研究は塩分浸透状況と鉄筋の腐食状況を合わせて比較検討するものであり、補修補強のため行った調査から得られたデータから本研究の目的に沿ったデータを抜き出して整理し、必要に応じて調査を補足したものである。

2.2 調査の対象とした地域と橋梁

調査対象地域は青森県の西向きの沿岸である。ほとんどが日本海沿岸で、一部下北半島北部も含む。これらの地域は冬季に西寄りの強い風が吹くため塩害が懸念されている地域である。橋梁数は14橋である。

*1 弘前大学 理工学研究科准教授 博士（工学）（正会員）

*2 株式会社キタコン 博士（工学） 企画管理部（正会員）

*3 青森県 道路課（正会員）

2.3 調査データの概観

調査データの採取対象となった橋梁の施工年代の分布を明らかにするため、図-1に対象となった橋梁の竣工年ごとの採用データ個数の分布を示した。ここで、1個の採用データとは、塩分濃度測定用に抜き取った1個のコアと、その抜き取り箇所に近い所での鉄筋腐食観察用に削孔した1つの穴をペアとして採られたデータの集まりを指す。同図から分かるように、ほとんどの調査データは1966年から1980年の間に竣工した橋梁から採取されたものである。図-2に同橋梁の経年数分布を示した。本研究における経年数とは、調査データの採取対象となった橋梁の調査年から竣工年を差し引いたものである。同図より、経年数21年から40年のデータが、ほとんどを占めていることがわかる。なお、本調査では、最も古いもので経年数が46年、最も新しいものが21年、平均の経年数は33年である。前述のように補修補強を契機として行われた調査のデータが多いので、経年数の少ない新しいもののデータは無い。非常に古いもののデータが無いのは現存する古い橋梁数が少ないのと、既に補修補強等によりコンクリート表面を改質したものについては採用データに含めていないということなどの理由による。

図-3に道路橋示方書¹²⁾による塩害区分ごとのコア抜き取り本数（採用データ個数と同じ）の分布を示す。同示方書では、塩害の影響が及ぶ範囲を、海岸線から近い順番でそれぞれ S, I, II, IIIに区分している。同図より本調査におけるコア抜き取り箇所は、環境が厳しいとされる I 区分以上が9割程度を占める。

なお、塩分と中性化以外の複合的な劣化が疑われる構造物の調査データは採用していない。

調査用のコア抜き取り箇所の部位の内訳を図-4に示す。同図に示すように橋脚、橋台、床版はRC部材でデータ数は44個、主桁、横桁はPC部材でデータ数は30個である。

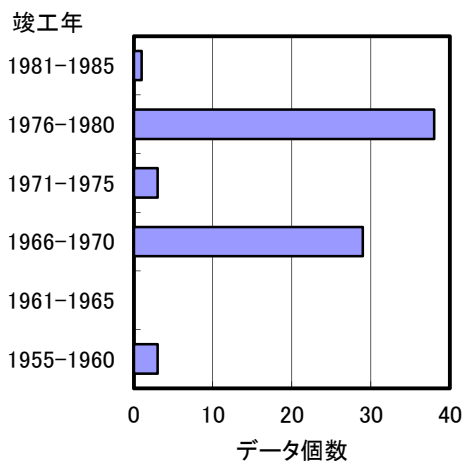


図-1 調査橋梁の竣工年ごとの採用データ個数

また、本研究では鉄筋腐食が対象なので、無筋コンクリート構造物は扱っていない。

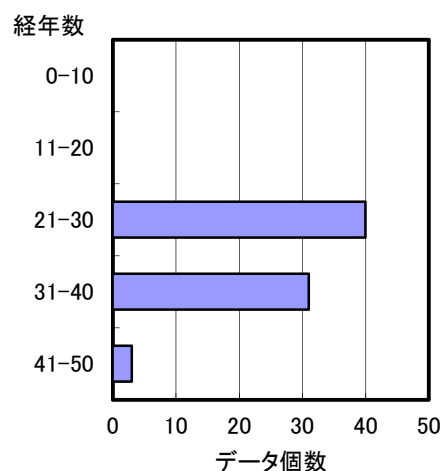


図-2 経年数ごとの採用データ個数

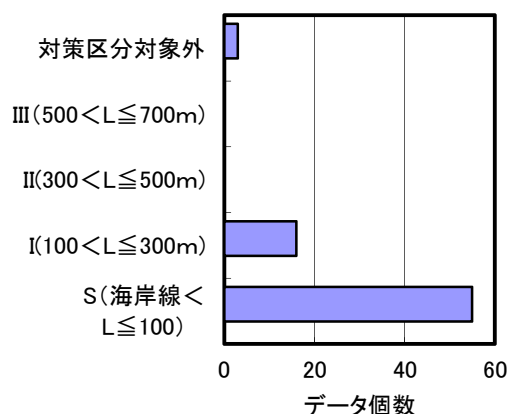


図-3 道路橋示方書による塩害区分ごとの採用データ個数

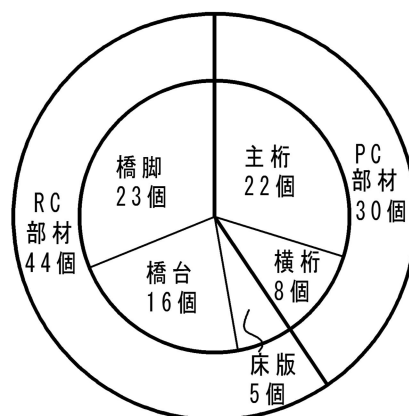


図-4 採用データの採取箇所（計74個）

3. 塩分浸透状況

3.1 コア抜き取り方法

塩分浸透調査用のコアはJCI-SC8に準拠して採取した¹³⁾。採取コアの直径は50mmを基本とした。コアの長さは、240mmを基本として抜き取り、現場事情などでやむを得ない場合は100mm程度とした。

図-5に下部工におけるコア採取位置の一例を示す。本調査における下部工コア採取位置は、塩化物イオンの浸透量が最も多いと考えられる橋脚、橋台躯体の海側面の地表から1.0～1.5m程度の高さとした。また、平面位置は雨水により表面塩化物イオンが流失する可能性の高い側面は避け、海側から陸側へ1.0～1.5m程度の位置とした。一方、上部工コア採取位置は、主桁ウェブ、横桁などで、PCケーブルや鉄筋に影響のない位置を選定した。採取は、コンクリート表面のひび割れ、剥離、ジャンカ、打ち継ぎ部、打ち継ぎ部直下、漏水部、漏水跡を避けて行った。近くに剥離のある場合は剥離と記録し採取した。また、塩害でない要因により劣化したと見られる部分も避けた。

採取した資料の塩化物イオン濃度の分析はJCI-SC4法¹³⁾に準拠し、電位差滴定法により全塩化物イオン濃度を測定した。コアのスライス間隔は20mmである。なお、コア長さが200mm以上の場合には、打設時からコンクリート中に含まれていた塩化物イオン濃度を推定するため200mm以深のコア試料より塩化物イオン濃度も計測し、これを初期塩化物イオン濃度とした。

3.2 調査結果とその傾向

見かけの拡散係数（以降、拡散係数と呼ぶ）、表面塩化物イオン濃度等の塩分浸透性状を表す指標を求めするため、Fickの拡散理論に基づいて開発された「コンクリート中の塩化物イオン濃度分布簡易分析シート」を用いた¹⁵⁾⁻¹⁷⁾。塩害地域での測定結果に良く見られるように、本測定においても塩化物イオン濃度は深さ方向に向かって指数関数的に減少する傾向が見られた。ただし、フェノールフタレイン溶液を用いて測定した中性化深さに10mm程度を足した範囲の塩化物イオン濃度測定値は、中性化の影響を受けている可能性があるため棄却した¹⁸⁾。その他、拡散理論式の値から大きく外れた測定値は棄却した。

図-6に調査の結果得られた拡散係数の頻度分布をPC部材とRC部材に分けて示す。拡散係数は対数をとってある。この図から、PC部材の拡散係数は、RC部材の拡散係数に比べて小さい傾向にあることが分かる¹⁾。なお、RC部材では山なりの分布となっている。

これに対し、PC部材では両脇が高い分布となっている。PC部材についてはコア採取位置としてPCT桁のウェブ部分が主であるが、横桁等も含まれているので、部位やコンクリート強度等が異なるごとに傾向が異なる可能性が

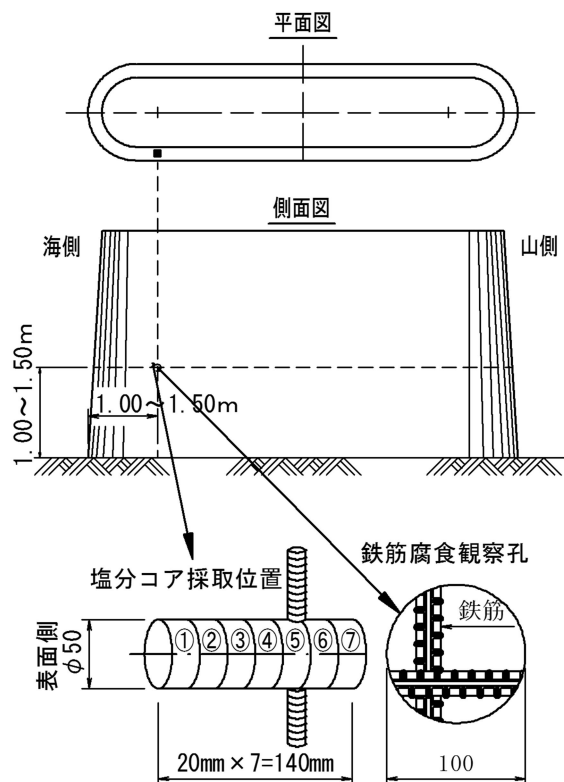


図-5 塩分浸透状況と鉄筋腐食状況の調査箇所の一例

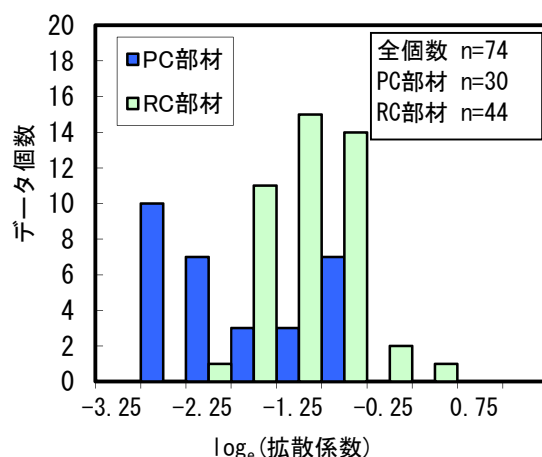


図-6 鉄筋腐食グレードの頻度分布

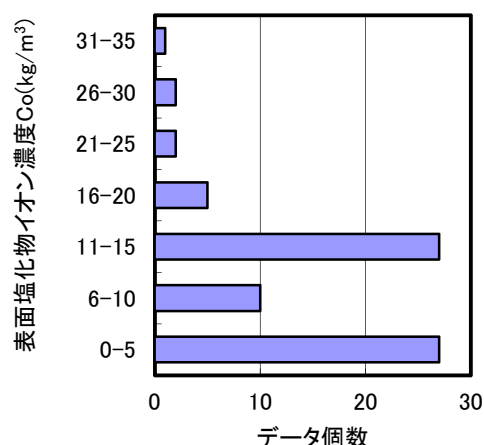


図-7 表面塩化物イオン濃度の頻度分布

考えられる。しかし、細かく分類するとそれぞれのサンプル数が少なくなるので、ここではまとめて取り扱うことにした。

図-7に調査の結果得られた表面塩化物イオン濃度 C_o の頻度分布を示す。 C_o は 0.5 から 35.0kg/m^3 の範囲であり、設計の際、飛沫帯に於ける耐久性照査で設定される 13.0kg/m^3 を超えるものが半数近くある。過酷塩害環境下にあるものがかなり多く含まれていることがわかる。

4. 鉄筋腐食状況

鉄筋腐食調査箇所を例を図-5に示す。図に示すように、鉄筋腐食調査箇所は塩分浸透状況を調べるためにコアを採取した箇所の近傍で、かぶりが薄いところにある鉄筋を鉄筋探査機により探して決定した。決定後、コアドリルを用いて鉄筋付近まで削孔したあと、鉄筋に損傷を与えないようにハンマドリルにより慎重にモルタルを除去し、直接鉄筋の腐食状況を観察した。観察結果から、表-1に示すコンクリート標準示方書¹⁴⁾の塩害による鋼材の腐食状態のグレード評価に従い、鉄筋の腐食状態をI～IVの4段階に区分した。

調査の結果得られた、鉄筋腐食グレードの頻度分布を図-8に示す。それぞれ鉄筋腐食グレードにおけるPC部材とRC部材の占める割合がわかるようにしている。すべてのグレードにPC部材とRC部材のデータが含まれており、分析には好都合なばらつきとなっている。

5. 塩分浸透状況と鉄筋腐食状況に関する分析と考察

5.1 鉄筋位置での塩化物イオン濃度

図-9には、採用したコアから求められる、観察した鉄筋位置での塩化物イオン濃度 C_t の頻度分布図を示した。74個のうち51個が鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度のひとつの指標である 1.2kg/m^3 を超えており、約7割の部分で腐食が懸念される状況にあることが判る。なお、ここで鉄筋位置での塩化物イオン濃度 C_t は塩分調査用のコアの塩化物イオン濃度の測定データのうち鉄筋位置に近いデータから内挿したもので、拡散方程式の解に回帰したものとはほぼ等しいことを確認している。

5.2 鉄筋位置での塩化物イオン濃度 C_t と鉄筋かぶりの関係

図-10に鉄筋のかぶり x と、その鉄筋位置での塩化物イオン濃度 C_t との関係を示す。図中には参考のためコンクリート標準示方書¹⁴⁾で鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度としてあげられている 1.2kg/m^3 のところを点線で示した。ここで、鉄筋のかぶりはコンクリート表面から観察した鉄筋表面までの距離(mm)で、実測値である。サンプルの経年数がデータごとに異なるので一概には言えないが、全般的なデータの散らばり具合からコンクリート

表-1 鉄筋の腐食程度の評価に使用した指標¹⁴⁾

腐食 グレード*	鋼材の状態
I	黒皮の状態、またはさびは生じているが全体的に薄い緻密なさびであり、コンクリート面にさびが付着していることはない。
II	部分的に浮きさびがあるが、小面積の斑点状である。
III	断面欠損は目視観察で認められないが、鉄筋の全周または全長にわたって浮きさびが生じている。
IV	断面欠損が生じている。

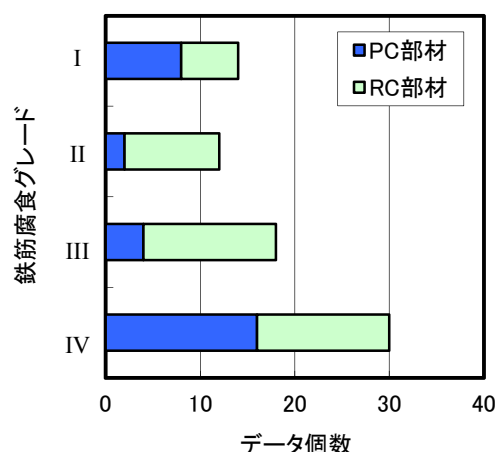


図-8 表面塩化物イオン濃度の頻度分布

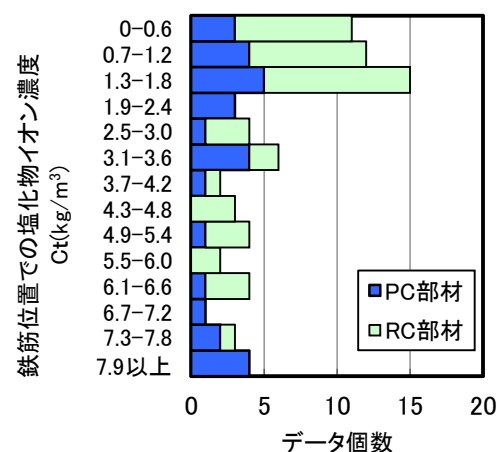


図-9 鉄筋位置での塩化物イオン濃度の頻度分布

表面から深くなるほど塩化物イオン濃度の高いものが減っており、拡散理論にそって塩分が浸透していく様子が見えてくる。図中のシンボルはその位置における鉄筋の腐食状況が分かるように、腐食グレードごとに違えて表示しており、塗りが濃いものほど腐食が進んでいることを示している。ただし、近くのかぶりコンクリートが剥

離したもののについては腐食グレードIVであるが、剥離していないものと区別してバツ印で示した。この図によると、グラフの左端近くに黒塗り四角印とバツ印（どちらもIV）が上下にひろがってちらばっており、かぶりが薄い鉄筋の多くが高い濃度の塩化物イオンにさらされていることが分かる。腐食グレードIVの鉄筋は、かぶりが40mm以下にしかなく、かぶりが10mm程度以下の部分ではすべて腐食グレードIVである。一方、腐食グレードIを表す白丸印はかぶりの薄いところから深いところまで広く分布している。とは言え、ほとんどの白丸印は $Ct < 2.0 \text{ kg/m}^3$ の部分にあり、 $Ct > 5.0 \text{ kg/m}^3$ の範囲ではすべて腐食グレードII以上であり、白丸印は無い。同図中には $Ct = 1.2 \text{ kg/m}^3$ の高さを表す破線より下にはグレードIを表す白丸印が多いが、グレードIIを表す三角印も数個あり、 1.2 kg/m^3 以下でも腐食が生じ得ることがわかる。

5.3 鉄筋位置での塩化物イオン濃度Ctと腐食グレード

(1) 全般

図-11には鉄筋位置での塩化物イオン濃度Ctと鉄筋腐食グレードとの関係を示した。PC部材はひし形、RC部材は三角でプロットしてある。ただし、コンクリート表面が剥離したものがあつたので、剥離したものは白抜き、剥離していないものは塗りつぶしている。この図によると、剥離したものの塩化物イオン濃度は大きくばらついており、これを除くと全般的に右肩上がり、つまり鉄筋位置での塩化物イオン濃度が高くなると腐食グレードが増す傾向が認められる。剥離したものは図-10によるとかぶりが薄いことから、特殊事情と考えて次項ではこれらを除いて検討する。

(2) 剥離したものを除いた検討

図中の塗りつぶした印の分布を見ると、PC部材とRC部材ではどちらも腐食グレードと塩化物イオン濃度との正の相関が認められるが、分布の範囲が異なる。例えば、 $Ct = 4.0 \text{ kg/m}^3$ のあたりを横に見るとPC部材を表す黒ひし形印は腐食グレードIのあたりにあるが、RC部材の黒三角印は、腐食グレードIIIかIVとなっている。つまり、同じ塩化物イオン濃度でもRC部材中の鉄筋と比べるとPC部材内では鉄筋の腐食は進んでいない。そこで、PC部材、RC部材それぞれについて図中に回帰直線を示した。傾きの大きい方がPC部材のもので、RC部材のものと大きく傾向が異なっていることがわかる。傾きが大きいと言うことは、腐食グレードをひとつ上げるのに塩化物イオン濃度を余計に上げなければならないので、PC部材内の方が腐食しにくいことを表していると考えられる。また、同図中に鉄筋腐食限界塩化物イオン濃度の高いほうの目安である $Ct = 2.5 \text{ kg/m}^3$ の破線を示した¹⁹⁾。腐食が認められる腐食グレードII以上のPC部材データはこの $Ct = 2.0 \text{ kg/m}^3$ 付近に腐食グレードIIのデータが一つあるのみで、他の7

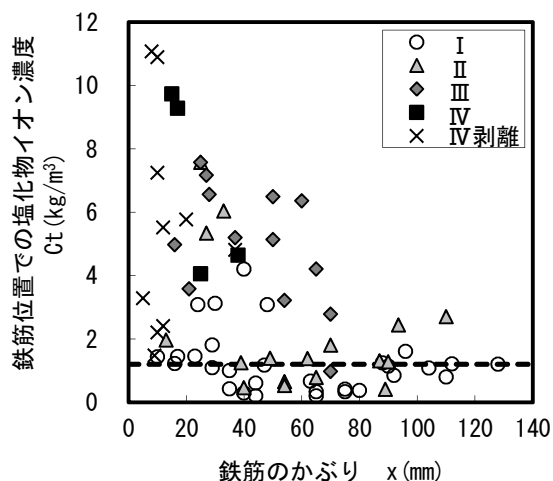


図-10 鉄筋位置での塩化物イオン濃度Ctと鉄筋かぶりとの関係

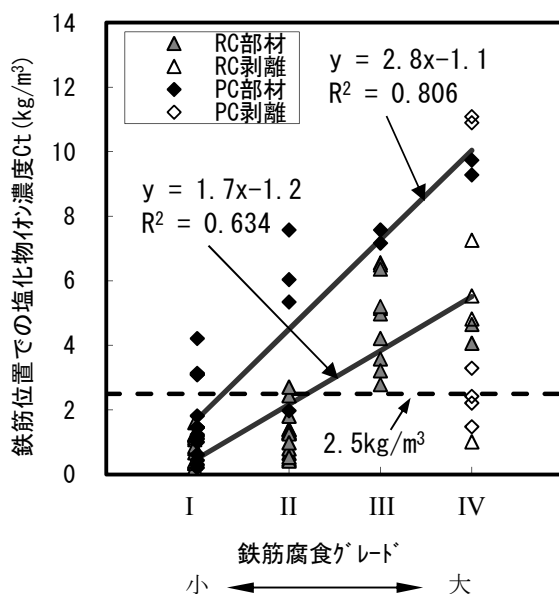


図-11 鉄筋位置での塩化物イオン濃度と鉄筋腐食グレードとの関係

つは 5.0 kg/m^3 を超えている。また、PC部材では塩化物イオン濃度が 4.0 kg/m^3 を超えても腐食グレードIのデータがあるのに対し、RC部材においては腐食グレードIIのデータ14個のうち 2.5 kg/m^3 以下のものが13個とほとんどで、 1.2 kg/m^3 未満のものが6個と、鉄筋腐食限界塩化物イオン濃度の低めの値としてよく参照される値以下でも腐食が認められた。このことからRC部材内では同じ塩化物イオン濃度においてRC部材内よりも腐食が進みやすいと言える。以下に回帰的に得られたCtとGの関係式をRC部材、PC部材の順に示す。

$$G = 0.59Ct + 0.7 \quad (1)$$

$$G = 0.36Ct + 0.4 \quad (2)$$

ここで、Gは鉄筋腐食グレード、Ctは鉄筋位置での塩

化物イオン濃度(kg/m³)である。

なお、回帰直線を引くにあたって鉄筋腐食グレードのIからIVまでの区分を、1から4までの量を表す数字として読み替えた。この値に関して、物理量としての裏付けは明確ではない(たとえばIとIIの間がなぜ1なのか)。しかし、塩化物イオン濃度との関係で見たときに、ある程度評価に有効であることが、この考察で分かった。つまり、塩化物イオン濃度の測定のみで、おおざっぱではあるが、ある程度、鉄筋の状態を推定することができる。今後データが増えれば、例えば腐食グレード2と3の間隔を調整するなど、より適切な変換則の模索も意味を持つであろう。

5. まとめ

コンクリート構造物中の塩分浸透状況と鉄筋腐食状態の対応関係について調べるため、青森県内の西向き海岸沿いの橋梁14橋において、塩化物イオン濃度の測定と鉄筋の腐食状態の観察をごく近い距離でペアとして行った。検討した74組のデータのうちコンクリートが剥離したデータ10組を除く64組のデータに関して以下のことが分かった。

- (1)鉄筋位置での塩化物イオン濃度と鉄筋腐食グレードには正の相関が認められた。
- (2)鉄筋位置での塩化物イオン濃度と鉄筋腐食グレードの関係はPC部材とRC部材では傾向が異なった。RC部材よりもPC部材における方が、同じ塩化物イオン濃度でも鉄筋の腐食が進んでいなかった。PC部材、RC部材それぞれにおける鉄筋腐食グレードと鉄筋位置での塩化物イオン濃度の関係についての回帰直線を求めた。
- (3)PC部材において、鉄筋腐食が認められたデータ8組のうち鉄筋位置での塩化物イオン濃度が2.5kg/m³以下のものは1組しかなかった。

参考文献

- 1) 藤田弘昭, 津村浩三, 相馬 基: 過酷塩害地域の実構造物調査結果に基づく維持管理計画, 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.7, pp. 47-54, 2007
- 2) 堀口賢一, 丸屋 剛, 武若耕司: 自然電位連続モニタリングによる発錆時期推定手法の検討と腐食発生限界塩化物イオン濃度の測定, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1007-1012, 2006
- 3) P. Sandberg and L. Tang: Field Study of the Penetration of Chlorides and Other Ions Into a High Quality Concrete Marine Bridge Column, Proceedings of Third International Conference on Durability of Concrete, SP145-29, pp.557-571, May 1, 1994

- 4) E. Stoltzner, B. Buhr, and S. Englund: Faroe Bridges-Chloride Penetration Rate Estimated on Basis of Measurements from 1988 to 1997, Proceedings of Fifth International Conference on Durability of Concrete, SP192-29, pp.471-486, April 1, 2000
- 5) Ragnar Palsson and M.Saeed Mirza: Mechanical Response of Corroded steel reinforcement of abandoned concrete bridge, ACI Structural Journal, Vol.99, No.2, pp.157-162, March-April 2002
- 6) 田中良樹, 河野広隆, 渡辺博志: 実構造物コンクリートのひび割れ部における塩分浸透, 土木学会論文集E, Vol.62, No.1, pp.38-51, 2006
- 7) 岩城 一郎, 上原子 晶久, 子田 康弘, 内藤 英樹, 皆川 浩, 鈴木 基行: 著しい塩害を受けた道路橋 PC 桁内部のコンクリートおよび鋼材の物性評価, 土木学会論文集E, Vol. 66, No. 4, pp.413-432, 2010
- 8) 山口貴幸, 下村匠, 田中泰司: 厳しい塩害環境下に約 80 年間晒され劣化した実橋 RC 桁の載荷試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.1405-1410, 2010
- 9) 横山和昭, 本莊清司, 葛目和宏, 藤原規雄: 道路橋 RC 床版の鉄筋腐食を伴う劣化機構の解明に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1687 - 1692, 2008
- 10) 加藤絵万, 岩波光保, 横田弘, 守分敦郎: 塩害を受けた栈橋上部工の劣化状況のばらつきに関する考察: コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.911-916, 2006
- 11) 網野貴彦, 大即信明, 斎藤 豪, 羽瀧貴士: ドルフィンコンクリートにおける鉄筋位置の塩化物イオン濃度が腐食進行に与える影響に関する一検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1051-1056, 2009
- 12) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 IV, 下部構造編, 2002
- 13) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案), 1987
- 14) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編], 2008
- 15) (独) 土木研究所「技術情報」ホームページ: <http://www.pwri.go.jp/team/structure/download/download.htm>
- 16) (独) 土木研究所: コンクリート中の塩化物イオン濃度分布簡易分析シート使用マニュアル, 2003
- 17) 古賀裕久, 河野広隆: コンクリート中の塩化物イオン濃度分布簡易分析シートを用いた塩害劣化予測の実用性検証, 土木技術資料, Vol.46, No.4, pp.56-61, 2004
- 18) 丸屋 剛, 上東 泰: 耐久性照査入門2耐久性照査の手法, コンクリート工学, Vol.49, No.7, pp.50-57, 2011
- 19) 国土交通省土木研究所: ミニマムメンテナンス PC 橋に関する共同研究報告書(Ⅲ), 第 270 号, pp.11-12, 2001