

コンクリートのはつり面における 塩分センサーを活用した塩化物イオン量推定技術

櫻庭 浩樹*1・西村 俊弥*2・古賀 裕久*3

塩害を受けた構造物を断面修復工法により補修する場合、塩化物イオンを多量に含む部位をはつり残すと再劣化のおそれがある。しかし、塩化物イオンを多量に含む部位を現場で簡易に確認する方法は確立されていない。そこで、本研究では、銀塩化銀電極を用いたセンサー（塩分センサー）による方法を開発している。まず、塩化物イオン量と塩分センサーにより測定される電極電位の関係を検討し、塩化物イオン量が増加するほど、電極電位が小さくなることを確認した。次に、測定条件について検討し、測定面の湿潤処理が必要なこと、補修面の露出から数か月経過した場合も影響は小さいことなどを示した。最後に、塩害を受けたPC部材を用いて検証実験を行い、塩化物イオンを多量に含む部位を検出できることを確認した。

キーワード：塩分センサー、補修面、塩化物イオン量、電極電位

1. はじめに

塩害を受けた構造物を断面修復工法により補修する場合、はつり後の補修面に多量の塩化物イオンが残存すると、再劣化のおそれがある。このため、補修面の塩化物イオン量を現地で確認し、多量に塩化物イオンを含む部位を除去できているかを確認しながら施工することが望ましい。

しかし、コンクリート中の塩化物イオン量の測定方法の規格である JIS A 1154（硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法）では、試験室での試料の調整、測定となり時間も要する。近年では、ドリル削孔粉を用いた簡易な測定方法なども検討されているが¹⁾、現状では、塩化物イオンを多量に含む部位を現場で簡易に確認する方法は確立されていないと考えられる。

これに対して、著者らは、銀塩化銀電極を用いたセンサー（塩分センサー）を活用し、補修面に残存する塩化物イオンを簡易に確認する方法を提案している²⁾。この方法は、塩分センサーにより測定される電極電位から、多量に塩化物イオンを含む補修箇所を現地で検出することができる。

本報告では、既報²⁾で検証した結果に加え、はつり作業直後に電極電位を測定できない場合や、塩分センサーによる測定後に、追加ではつり作業を実施した場合などについて検討した結果を示す。

2. 塩分センサーを用いた塩化物イオン量推定

本章では、塩分センサーによる塩化物イオン量の推定方法について述べる。まず、塩分センサーの特徴を説明する。その後、塩化物イオン量と塩分センサーにより測定される電極電位の関係を実験的に確認した結果を示す。最後に、含水状態の変化や、補修面の露出から塩分センサーによる測定までの日数が経過した場合の影響を検討した結果を示す。

す。

2.1 塩分センサーの特徴

図 - 1 に塩分センサーと基準電極を示す。塩分センサー（作用電極）は塩化銀で被覆した直径 0.5 mm の銀線をバネ状に巻いたものである。基準電極は、市販の飽和銀塩化銀電極である。

図 - 2 に塩分センサーを用いた測定の状況を示す。まず、電圧計のプラス端子に塩分センサーを、マイナス端子に基準電極を接続する。次に、基準電極をドリル孔内に挿入し、塩分センサーを測定したい位置に接触させて、電極間の電極電位を測定する。電極電位は、硬化コンクリート中の塩化物イオン量に応じて変化し、その値を推定することができる。

2.2 塩化物イオン量と電極電位の関係

塩分センサーによる電極電位と塩化物イオン量の関係は、測定対象とするコンクリート中の全塩化物イオン量を 30 kg/m³ 程度までと仮定し、ネルンスト式に基づいて導出すると式 (1) で表される²⁾。式 (1) より、塩化物イオン量が増加するほど、電極電位が小さくなる。

$$U = 0.418 T - 0.198 T \log_{10} \frac{C_{Cl^-}}{C_{\phi}}, \quad (\text{mV}) \quad (1)$$

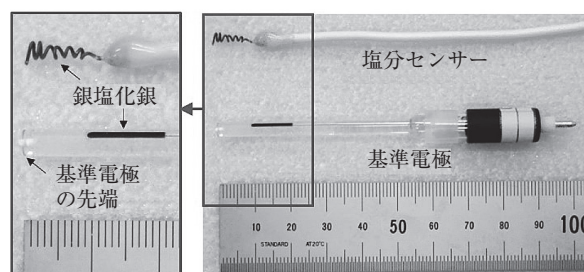


図 - 1 塩分センサーと基準電極

*1 Hiroki SAKURABA : (国研)土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 研究員

*2 Toshiyasu NISHIMURA : (国研)物質・材料研究機構 構造材料研究拠点 耐食合金鋼グループ 特別研究員

*3 Hirohisa KOGA : (国研)土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 上席研究員

表 - 1 コンクリートの配合

名称*	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混入した塩化物イオン量 (kg/m ³)
			W	C	S	G	
N	50	47	165	330	827	968	1.2, 2.5, 5.0, 10.0
B	50	47	165	330	827	968	
H	36	44	165	458	721	968	

※ N：普通ポルトランドセメントを使用，B：高炉セメント B種を使用，H：早強ポルトランドセメントを使用

ここで， U ：基準電極と作用電極間の電極電位， T ：コンクリートの絶対温度 (K)， C^ϕ ：基準塩化物イオン量 (= 1 kg/m³)， C_{Cl^-} ：塩分センサー接触部近傍のコンクリート中の塩化物イオン量 (kg/m³)

塩化物イオン量と電極電位の関係について，NaCl を混入したコンクリート円柱供試体 (以下，供試体) を用いて塩化物イオン量と電極電位の関係を確認した。

表 - 1 に実験に用いたコンクリートの配合を示す。混入した塩化物イオン量は 1.2, 2.5, 5.0, 10.0 kg/m³ で，供試体の養生条件は封緘養生で 28 日以上である。

図 - 3 に供試体を用いた塩分センサーの検証方法を示す。補修面を模擬するため，割裂面を用いて検証を行った。なお，塩分センサーによる測定は，割裂から 2 日後に実施した。

塩分センサーは，接触した箇所近傍の塩化物イオン量に応じた電極電位が測定されるため，割裂面において，確実にモルタル部に接触させて測定した。また，測定位置を湿潤状態とするため，測定直前に散水し，浮き水をウェスで拭き取った状態で測定した。

図 - 4 にこのように測定された電極電位と JIS A 1154 に準じた全塩化物イオン量の測定結果との関係を示す。電極電位の測定値は 5 回測定した平均値であり，エラーバーは標準偏差 (1 σ) の範囲を示す。ここで，電極電位 130 mV を閾値とすると，配合によらず，全塩化物イオン量がおおよそ 2.4 kg/m³ を超える場合を区別できている。全塩化物イオン量が 2.4 kg/m³ を超えると，塩害によって鉄筋が著しく腐食した事例もあるため³⁾，130 mV を閾値として検出することは補修後の劣化を防止するうえで重要と考えた。

そこで，コンクリートのはつり面で電極電位の測定を行って 130 mV を閾値として判定し，多量に塩化物イオン (全塩化物イオン量 2.4 kg/m³ 程度を超える範囲) が残存した補修面を検出する方法を提案した。なお，式 (1) を C_{Cl^-} について解くことで，電極電位を塩化物イオン量に換算することも可能である。しかし，塩化物イオン量が多くなると，電極電位の測定誤差の影響が大きくなるため²⁾，閾値を設定して判定する方法を用いることとした。

2.3 測定条件の影響

測定条件が，電極電位に及ぼす影響を検討するため，含水状態と割裂後の日数を変化させて実験を実施した。

(1) 含水状態

含水状態の影響を確認するため，配合 N の供試体については，散水をせずに乾燥した状態および散水後に浮き水がある状態でも測定した。

図 - 5 に含水状態の影響を示す。散水を行わずに測定

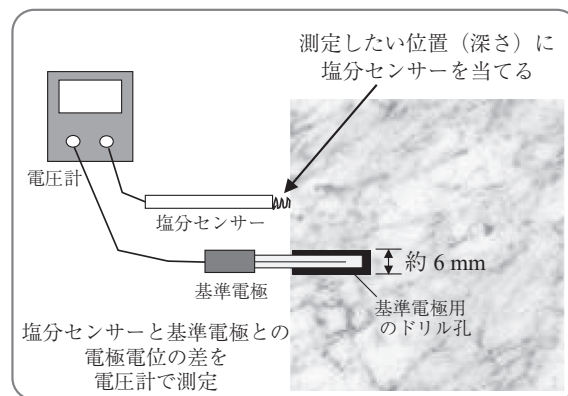


図 - 2 塩分センサーを用いた測定の状況

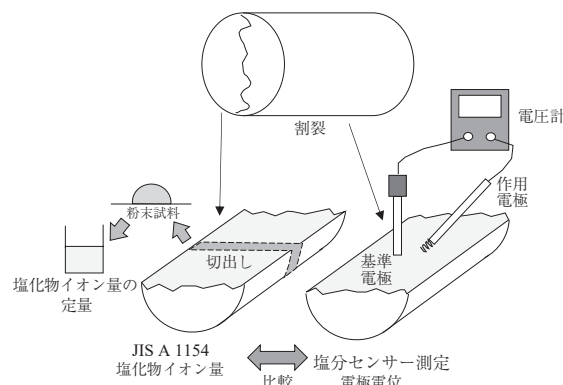


図 - 3 円柱供試体を用いた塩分センサーの検証

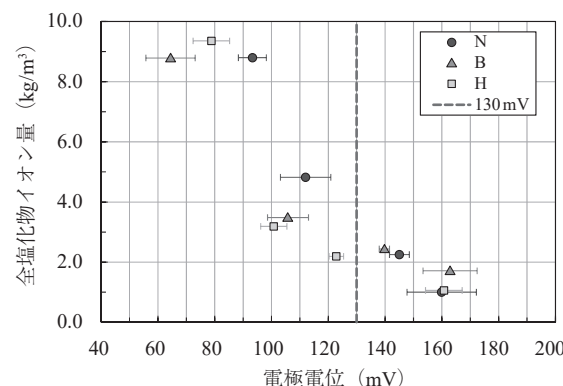


図 - 4 全塩化物イオン量と電極電位の関係

した場合 (乾燥状態) および散水後の測定面に浮き水がある場合 (浮き水有り) では，それぞれ，1 回ずつ測定した。湿潤状態の場合は，5 回測定した平均値と標準偏差 (1 σ) の範囲を示した。

乾燥状態で測定した場合、湿潤状態の平均値と比較して、電極電位が30～50 mV程度小さい。これは、測定面の含水状態が低い場合、見かけ上塩化物イオン量が大きくなることを示している。次に、浮き水有りとした場合、湿潤状態の平均値と比較して、電極電位が40～80 mV程度大きい。乾燥状態の場合と反対に、見かけ上塩化物イオン量が小さくなることを示している。よって、塩分センサーによる測定では、含水状態の調整が必要と考えられる。

(2) 割裂後の日数

補修の現場では、はつり作業の直後に電極電位の測定をできるとはかぎらない。補修面が露出して日数が経過すると、コンクリートの表層は中性化するため、これが電極電位に影響することも想定される。そこで、この影響について確認するために、供試体の割裂後から245日と長期間経過した後も測定した。この時、供試体の割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧した結果、ほとんど呈色しない状態であった。対象は、配合Nの供試体で、混入した塩化物イオン量が1.2, 2.5, 5.0 kg/m³のものとした。

図-6に割裂後の日数の影響を示す。割裂後245日の場合は、含水状態を湿潤状態とし、5回測定した平均値と標準偏差(1σ)の範囲を示している。

割裂後245日の場合にも、割裂後2日の結果と同程度の電極電位を示している。また、閾値を130 mVとした判定も変わらない。よって、塩分センサーによる測定では、はつり作業から日数が経過し、補修面の表層が中性化した場合の影響は小さいものと考えられる。

3. 塩害を受けたPC部材を用いた検証実験

3.1 PC部材の概要

測定対象とした撤去部材は、ポストテンション方式3径間PC単純T桁(2主桁)の側道橋で、本線の道路橋と並んで、16年間塩害環境で供用されていたものである⁴⁾。コンクリート表面には変状が見られず、目視点検では比較的健全と評価されていたが、本線の道路橋の架け替えにより2005年に撤去された。5m程度の長さの主桁を切断後、土木研究所の実験棟で保管されていたが、2010年頃に雨掛かりのある屋外ヤードに移設した(図-7)。この側道橋のコンクリートの圧縮強度は70 N/mm²程度であった⁴⁾。

3.2 実験方法

図-7に示す桁側面の600×600 mmの範囲をはつり面とし、ブレイカーを用いてはつり作業を行った。2章で述べた評価方法を検証するために、はつり深さに勾配を付けて、塩化物イオン量が異なる箇所を測定できるようにした。

塩分センサーによる測定位置は、図-8に示す6点とした。6点のはつり深さは、4～66 mmであった。なお、一部の測定箇所では、約2ヵ月後に追加ではつり作業を行い、再度塩分センサーによる測定を行った。

基準電極は、深さ30 mm程度のドリル孔に挿入し、その先端が塩分センサー測定位置から半径50 mm以内になるように設置した。図-8の測定箇所(2)については、基準電極の距離が電極電位に及ぼす影響を確認するため、基準電極からの距離が50 mmを超える場合(120, 303, 486

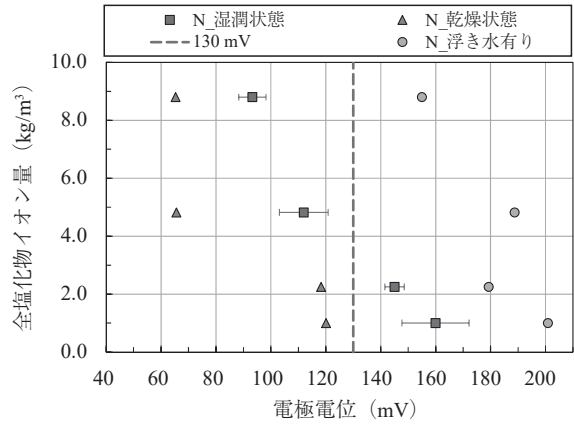


図-5 含水状態の影響

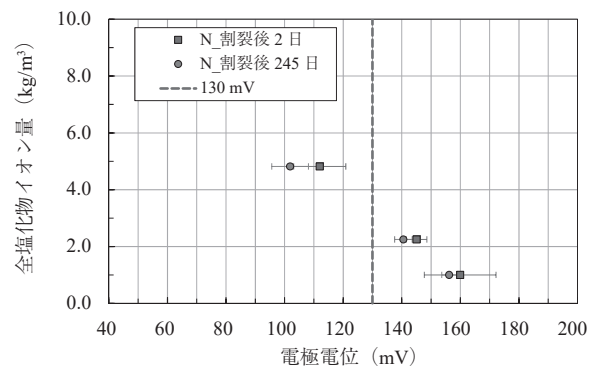


図-6 割裂後の日数の影響

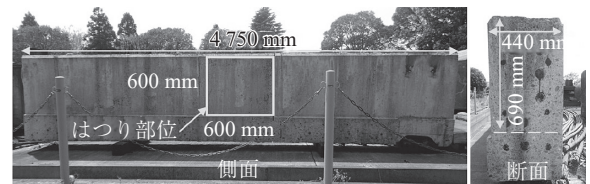


図-7 撤去部材の概要(桁の上下を反転して設置)

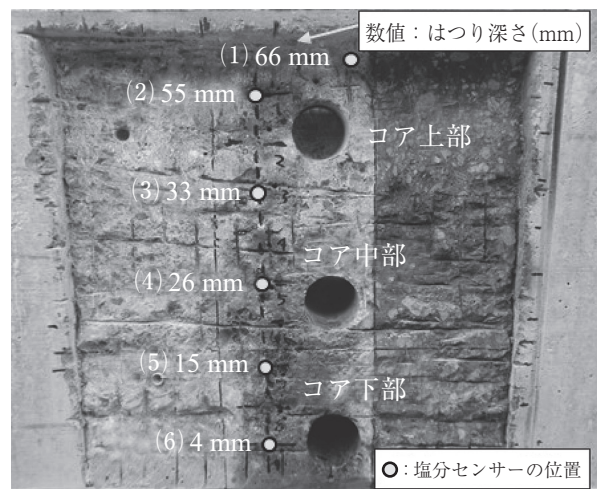


図-8 はつり深さ, 塩分センサー, コア採取位置

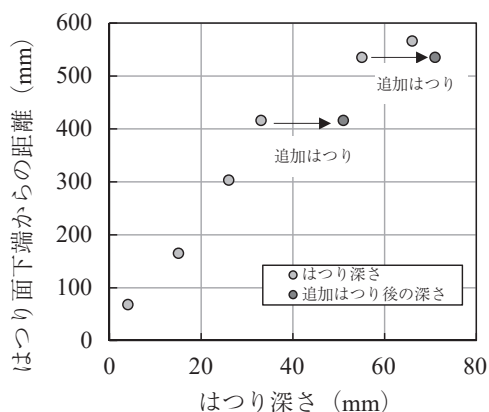


図 - 9 はつり深さの分布

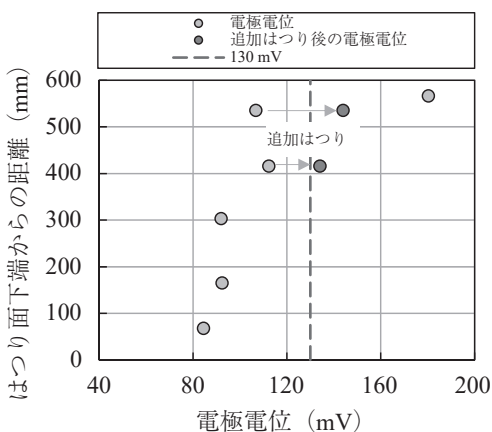


図 - 10 電極電位の分布

mm) も測定した。

図 - 8 に示す位置から、直径 75 mm のコアビットを用いてコア供試体を 3 本採取した。コア側面の 8 点で中性化深さを JIS A 1152 により測定し、8 点の平均を測定値とした。また、塩分センサーによる測定後、測定位置から半径 50 mm 程度の範囲から、直径 14.5 mm のドリルビットを用いて深さ 10 mm 程度を削孔（各測定位置周囲で 6 孔）して試料を採取し、全塩化物イオン量の測定に用いた。

3.3 実験結果と考察

(1) 塩分センサーを用いた測定の適用性の確認

上部、中央、下部から採取したコアの中性化深さは、それぞれ、2.2 mm、3.2 mm、2.5 mm であり、塩分センサー測定箇所のはつり深さは、中性化深さ以上であった。

はつり深さと電極電位の分布を図 - 9、10 に示す。図の縦軸は、図 - 8 に示したはつり面の下端からの距離である。はつり深さについては、はつり面の上部ほど深くなるようにはつりを行った。このはつり深さに対応する電極電位は、はつり深さ 55 mm までは 130 mV を下回り、はつり深さ 66 mm では電極電位は 180 mV 程度であった。

次に、コンクリート表面からの全塩化物イオン量の分布を図 - 11 に示す。ここで、表面からの深さは、はつり深さにドリル削孔深さの中央までの距離 (= 5 mm) を加えた値である。その結果、60 mm までは全塩化物イオン量

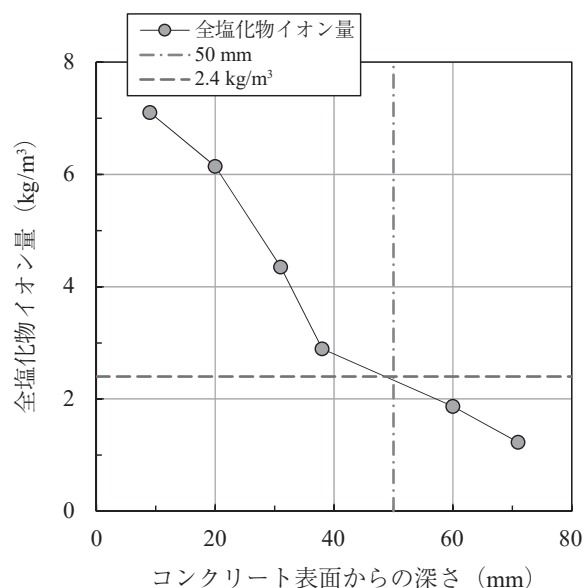


図 - 11 全塩化物イオン量の分布

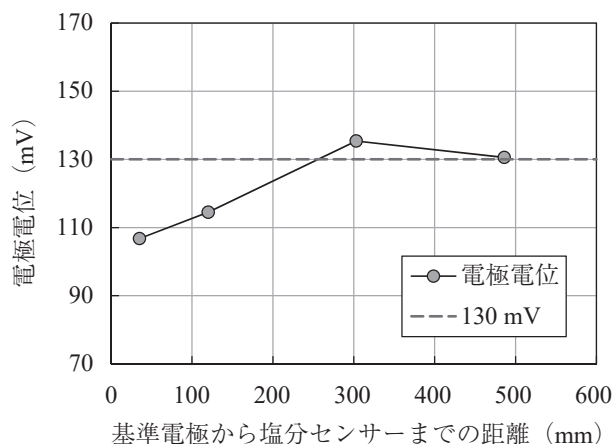


図 - 12 基準電極から塩分センサーまでの距離の影響

2 kg/m³ 程度以上の値を示し、71 mm では全塩化物イオン量は 1.2 kg/m³ 程度であった。

電極電位と全塩化物イオン量の分布を比較すると、電極電位が 130 mV を下回った位置では、全塩化物イオン量は 2 kg/m³ 程度以上となった。よって、2 章で述べた方法により、多量に塩化物イオンを含む部位を検出できたと考えられる。

(2) 追加はつりの試行

電極電位が 130 mV を下回った図 - 8 の測定箇所 (2)、(3) について、追加はつりを行った。図 - 11 に示した全塩化物イオン量の分布によれば、表面からの深さを 50 mm より大きくすれば、全塩化物イオン量 2.4 kg/m³ をおおよそ下回ると推測される。そこで、測定箇所 (3) では、50 mm より大きくなるように追加で 15 mm 程度はつりを行った。測定箇所 (2) については、初回のはつり時に既に 50 mm よりも大きかったが、追加で 15 mm 程度はつりを行った。追加はつり後、再度、塩分センサーによる測定を行った。

○ 研究報告 ○

図 - 9, 10 にその結果を示す。追加はつり後の電極電位は、130 mV を上回っている。追加はつりの前は、130 mV を下回っていたことから、追加はつりの効果を塩分センサーによる測定で確認できたと考えられる。

(3) 塩分センサーと基準電極の距離に関する検討

図 - 12 に、図 - 8 の測定箇所(2)を対象として、基準電極から塩分センサーまでの距離の影響を確認した結果を示す。なお、初回のはつり作業後に測定した結果である。

基準電極からの距離が長くなると、電極電位が大きくなる傾向がある。この箇所の場合、基準電極からの距離が 35 mm の場合は電極電位が 107 mV であったが、300 mm を超えると電極電位が 130 mV を上回り、評価にも影響した。基準電極と塩分センサーの間の距離が広がると、多量に塩化物イオンを含む部位を見落とす可能性がある。基準電極からの距離を半径 50 mm 程度以内に管理することが必要と考えられる。

4. ま と め

本報告のまとめを以下に示す。

塩分センサーによる測定は、電極電位の判定基準を 130 mV に設定することで、多量に塩化物イオンを含む部位(全塩化物イオン量で 2.4 kg/m³ 程度)を検出できる。

塩分センサーにより測定される電極電位は、含水状態の

影響を受けるため、測定前に湿潤処理が必要である。一方、補修面が露出して日数が経過し、ごく表層が中性化した場合の影響は小さいと考えられた。

塩害環境下で供用されていた撤去部材を用いて、はつり深さが異なる位置で塩分センサーの測定を行った結果、多量に塩化物イオンを含む部位を検出できた。また、多量に塩化物イオンを含む箇所を追加ではつり、その効果を塩分センサーによる測定で確認できた。

参考文献

- 1) 湯浅 昇, 笠井芳夫, 松井 勇: ドリル削孔粉を用いたコンクリート中の塩化物イオン量の現場試験方法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.1, pp.1303-1308, 1999
- 2) 櫻庭浩樹, 西村俊弥, 中村英佑, 古賀裕久: 塩分センサーを活用したはつり面の塩分量測定方法の提案, 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, 第 18 巻, pp.615-620, 2018
- 3) 土木研究センター: 建設省総合技術開発プロジェクトコンクリートの耐久性向上技術の開発, pp.21-33, 1988
- 4) 小松原健, 渡辺博志, 古賀裕久, 中村英佑: 塩害を受けたコンクリート構造物の塩化物イオン量の分布状況, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.2051-2056, 2006

【2019年7月5日受付】



刊行物案内

既設ポストテンション橋の PC 鋼材調査 および補修・補強指針

平成 28 年 9 月

本工学会「既設ポストテンション橋の PC グラウト問題対応委員会」において、ポストテンション方式の既設 PC 橋の実態把握(健全性・損傷事例の把握や規準等の整理)、PC グラウトの充填性調査手法の把握、PC 鋼材の健全性調査手法の把握、ポストテンション橋の健全性診断の方法検討、PC グラウト充填不足・PC 鋼材損傷の補修・補強の提案等の検討が行われ、その成果を指針としてまとめたものです。

定 価 4,444 円+税/送料 300 円

会員特価 3,700 円+税/送料 300 円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会