

P C 部材に実施する脱塩工法の適切な通電量の確認実験

(株) 高速道路総合技術研究所 正会員 ○ 野島 昭二
(株) 高速道路総合技術研究所 工修 宮永 憲一
電気化学工業(株) 正会員 松久保 博敬
東京工業大学 正会員 工博 大即 信明

Abstract : Application of desalination method to PC member may cause decrease adhesion between concrete and PC tendons. To understand this phenomena, the authors performed experiments on desalination method with different current densities, and evaluated the influence of current densities on the adhesion by the bending tests of pretension PC beams. As the results, desalination does not decrease the adhesion with the current densities lower than 2.5A/m^2 .

Key words : Desalination, PC structures, Adhesive, Current density

1. はじめに

高速道路3会社 (NEXCO) が管理する高速道路は、海岸線の近傍や山間部の積雪寒冷地を通過する機会が多い。このような立地環境にあるコンクリート構造物では、海からの飛来塩分、または冬期に散布される凍結防止剤が劣化の外力となり、塩害が顕著化する場合がある。鉄筋コンクリート (RC) 構造物の塩害対策としては、有害な塩化物イオンが侵入したコンクリート断面を除去して、新たな修復材料で置き換える断面修復工法が採用される¹⁾。一方、プレストレストコンクリート (PC) 構造物の場合、コンクリート断面にプレストレスが導入されているため、容易に断面を除去することはできないことから、効果的な対策工法が求められている。そこで、コンクリート断面を破壊することなく補修効果が期待できる電気化学的脱塩工法に着目して、鋼橋RC床版²⁾、プレテンションPC桁³⁾、およびポストテンションPC桁への適用性⁴⁾を検討したところ、劣化の進行過程が加速期程度であれば、予防保全対策として有効な工法であることをこれまでの研究で明らかにしてきた。本文では、脱塩工法がPC部材に与える影響をさらに検証するため、プレテンション方式のPC試験体に対して電流密度を変化させた脱塩工法を適用し、通電がPC鋼材とコンクリートの付着性状に与える影響を曲げ載荷試験により力学的に比較することとした。その結果、電流密度を 2.5A/m^2 以下に制御して脱塩工法を適用することにより、PC鋼材とコンクリートの付着に影響を与えることなく対策効果が得られることが明らかになった。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の形状は図-1に示すような長方形梁形状で、プレストレスはプレテンション方式で導入した。試験体のコンクリートは呼び強度 40N/mm^2 で表-1に示す配合とし、コンクリート中の塩化物イオン濃度が 9.0kg/m^3 となるように塩化ナトリウムを加えた練混ぜ水を用いてコンクリートを製造した。ここで、塩化物イオン濃度は、濃度が高いほど鋼材の付着力に影響を及ぼすことが明らかになっている⁵⁾ことから、これを参考に実際の塩害劣化が著しい構造物で通常想定される範囲のなかで決定した。使用したPC鋼材は7本より 12.7mm (SWPR7BL) で、コンクリート材齢が8日でプレストレスを導入した。導入プレストレス力は、下段で設計荷重作用時のPC鋼材の許容応力となる 109.8kN ($0.6\sigma_{pu}$ 相当) とし、上段はコンクリート上縁に引張応力が発生しないように 32.6kN ($0.18\sigma_{pu}$ 相当) とした。PC鋼材のみに通電させるためと、PC鋼材とコンクリートの付着性状を評価しやすいように、曲げ載荷の支点間には鉄筋を

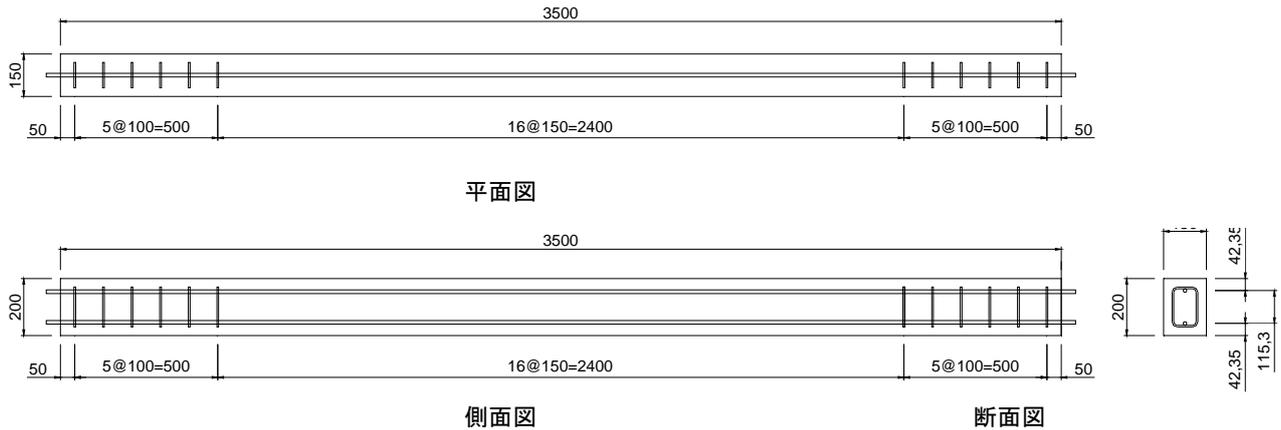


図-1 試験体の形状

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法	スランプ	空気量	水セメント比	細骨材率	単位量 (kg/m ³)					
					セメント	水	細骨材	粗骨材	高性能 AE 減水剤	塩化ナトリウム
20cm	8cm	4.5%	40.4%	43.9%	389	157	787	1024	4.86	14.83

配置していない。コンクリート側面の下段のPC鋼より線の位置には、導入プレストレスの確認、および脱塩工法の通電期間中のコンクリートひずみの変化の確認のために、コンクリートひずみゲージを設置した。

2.2 脱塩工法の通電条件

試験体の種類と脱塩工法の通電条件は表-2に示すように、電流密度をPC鋼材表面積あたり1.2, 2.5, 5.0A/m²の3条件とし、通電期間は施工実績例⁶⁾を参考に8週間の連続通電で統一してその影響を検証することとし、比較のため無通電(脱塩工法を実施しない)の条件を含めた。

脱塩工法の通電状況は写真-1に示すように試験体の支間中央部の1300mmの範囲を脱塩することとした。電解質溶液はほう酸と炭酸カリウムの混合水溶液を使用し、試験体下面から10mm程度の高さまで浸かるよう電解質溶液の水位を調整した。陽極材は脱塩用チタンメッシュで、コンクリート下面から10mm程度離れた電解質溶液中に設置した。通電のための直流電源装置は必要となる電源容量より4台使用することとし、No. 3, 4の1.2A/m²とNo. 5, 6の2.5A/m²はそれぞれが直列回路となるように接続して直流電源装置を接続し、No. 7とNo. 8は個別に直流電源装置を接続した。通電は

表-2 試験体の種類と脱塩工法の通電条件

試験体 No.	1, 2	3, 4	5, 6	7, 8
電流密度 (A/m ²)	—	1.2	2.5	5.0
通電期間 (週間)	—	8		
通電方法	—	連続通電		



写真-1 脱塩工法の通電状況

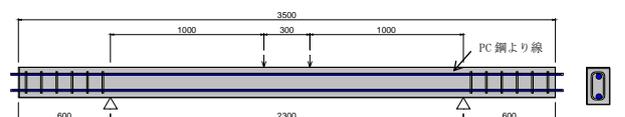


図-2 曲げ載荷試験の載荷方法

所定の電流密度を満足させるため、定電流方式で実施した。無通电のNo. 1, 2の試験体も脱塩工法を適用する試験体と同様に電解質溶液に1面のみ浸漬させた。

2.3 曲げ載荷試験

曲げ載荷試験の載荷方法は図-2に示すようで、桁長3500mmに対して支間長2300mm、等曲げ区間を300mm、せん断スパン長を1000mmとした。試験体には、図-3に示すようにコンクリートひずみゲージ、パイ型変位計、および変位計を設置して、載荷中の挙動を計測することとした。

載荷方法は図-4に示すような載荷パターンとした。すなわち、試験体にひび割れが発生した時点で一度除荷して、パイ型変位計を設置して載荷を再開する。載荷荷重37.8kN（ひび割れ発生荷重とPC鋼材が降伏点に達する荷重との間に相当する荷重）まで載荷したのちに4.7kN～37.8kNの10回繰返し載荷を実施して、試験体の挙動を観察し、PC鋼材とコンクリートの付着の影響に差異がないか確認する。さらに、各脱塩条件の2体ずつある試験体のうちの1体は、繰返し載荷のあとに破壊に至るまで載荷を実施することとした。

3. 実験結果と考察

3.1 脱塩工法の通电結果

脱塩工法の通电期間中の電圧と電流量の推移を図-5に示す。通电期間中の電圧はNo. 3, 4の1.2A/m²とNo. 5, 6の2.5A/m²が通电期間全般に渡り4V、および9Vの低い電圧で推移し変動が少な

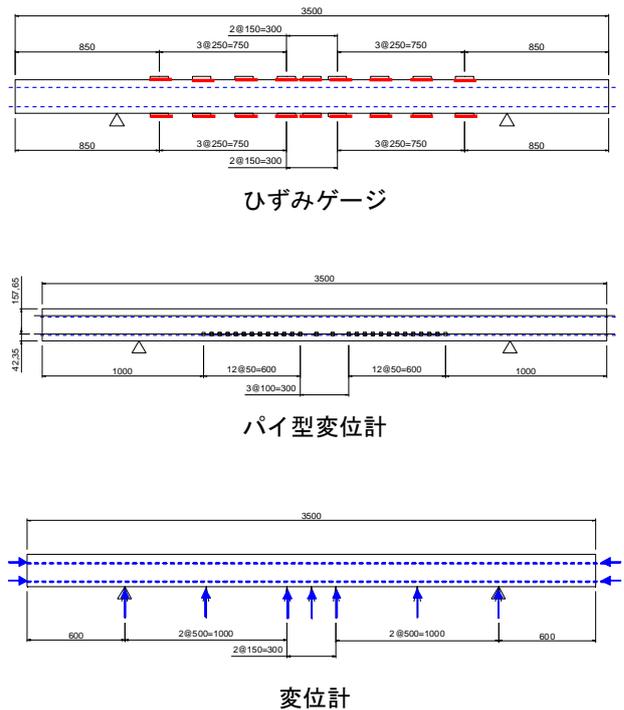


図-3 曲げ載荷試験時の計測位置図

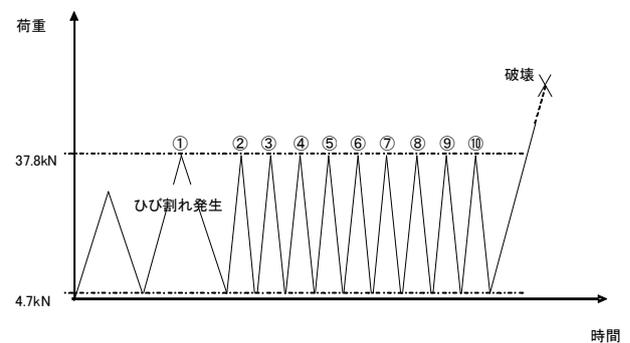
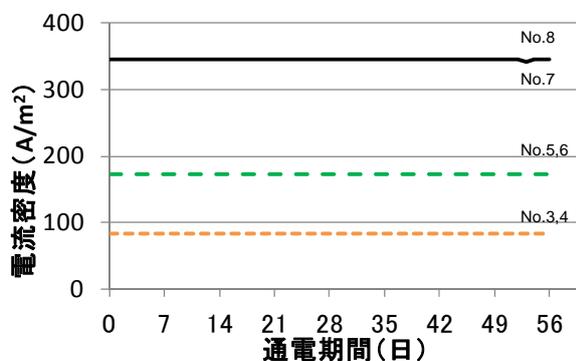
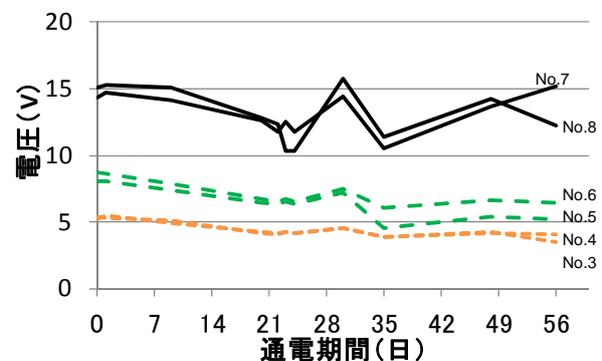


図-4 載荷パターン



電流量の推移



電圧の推移

図-5 通电期間中の電圧と電流量の計測結果

い。一方No. 7, 8の $5.0A/m^2$ は約10~16Vの範囲で推移しNo. 3~6に比べて電圧の変動が大きい。これは高い電流密度に伴い鋼材で発生する水素ガス量や電気分解に必要な水分量が多くなり、局所的な場所によって電氣的な抵抗の差異が生じたため鋼材に対して一律な電流密度が供給されにくくなったことが原因と考えられる。また、水の電気分解による電解質溶液の水位の低下、および電解質溶液の補充による水位の上昇によっても電圧が変動していると考えられる。しかしながら、PCT模擬供試体のファイバー法⁴⁾に比べると電圧の変動量は小さく安定した電流量が供給されている。これは、試験体を電解質溶液中に浸漬させているため、ファイバー法に比べて電解質溶液が均一に浸透しているためである。計画していた電流量はNo. 3, 4で83mA, No. 5, 6で172mA, No. 7, 8で345mAであり、いずれの試験体も通電56日間にわたり所定量の電流量を通電したことを確認した。

通電開始2週間前から8週の通電完了までの10週間のコンクリートひずみの変化は、電解質溶液に触れていない空中部で200~300 μ の収縮を示した。

電解質溶液に接触している部分では通電の影響により正常な計測ができなかった。これに対し、無通電の試験体のコンクリートのひずみ変化は、空中部で200~280 μ 、電解質溶液に接する部分で80~130 μ の収縮を示した。よって、通電の影響による顕著な違いは見られず、ひずみの変化は乾燥収縮によるものと判断できる。外観の目視確認でも、通電の有無、電流量の違いによるコンクリート表面の差異は確認できなかった。

3.2 曲げ載荷試験結果

荷重とたわみの関係を図-6、荷重と支間中央のコンクリート上縁ひずみとの関係を図-7、荷重と支間中央1500mm区間におけるPC鋼より線位置のコンクリート変形量(パイ型変位計の合計)との関係を図-8に示す。電流密度が $1.2A/m^2$ のNo. 3, 4と、 $2.5A/m^2$ のNo. 5, 6の試験体は、無通電の試験体No. 1, 2とたわみ、コンクリートひずみ、変形量の挙動において大差ないが、電流密度が $5.0A/m^2$ のNo. 7, 8については、耐荷力が低下している傾向がみられる。

ひび割れの発生状況は図-9に示すとおりで、左側の列が繰返し載荷のみの試験体、右側の列が繰返し載荷後に破壊まで載荷した試験体の状況である。破壊まで載荷した試験体は、いずれも曲げせん断破壊であった。No. 1(無通電) No. 3($1.2A/m^2$)でひび割れの本数が5本、No. 2(無通電), No. 4($1.2A/m^2$), No. 5($2.5A/m^2$), No. 6($2.5A/m^2$)で4本のひび割れが発生した。一方、 $2.5A/m^2$ のNo. 7およびNo. 8では、ひび割れ本数が3本でありNo. 1~No. 6と比較すると少ない本数である。PC鋼材とコンクリートとの付着が低

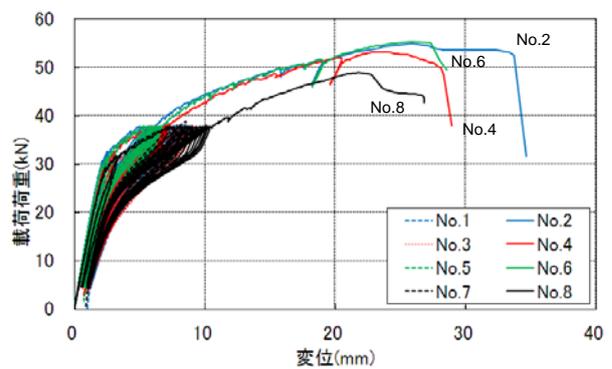


図-6 荷重-変位の関係

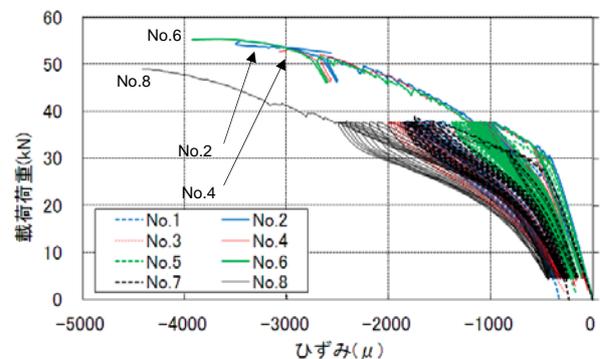


図-7 荷重-コンクリート上縁ひずみの関係

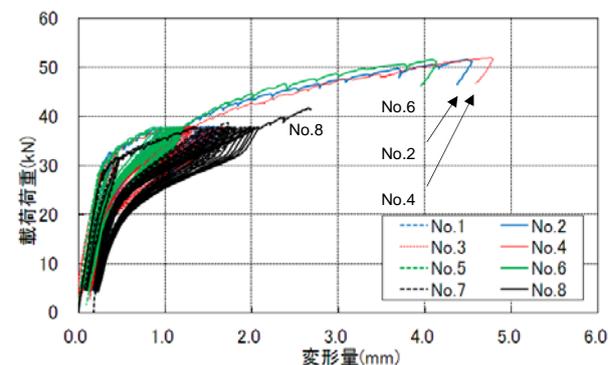


図-8 荷重-コンクリート変形量の関係

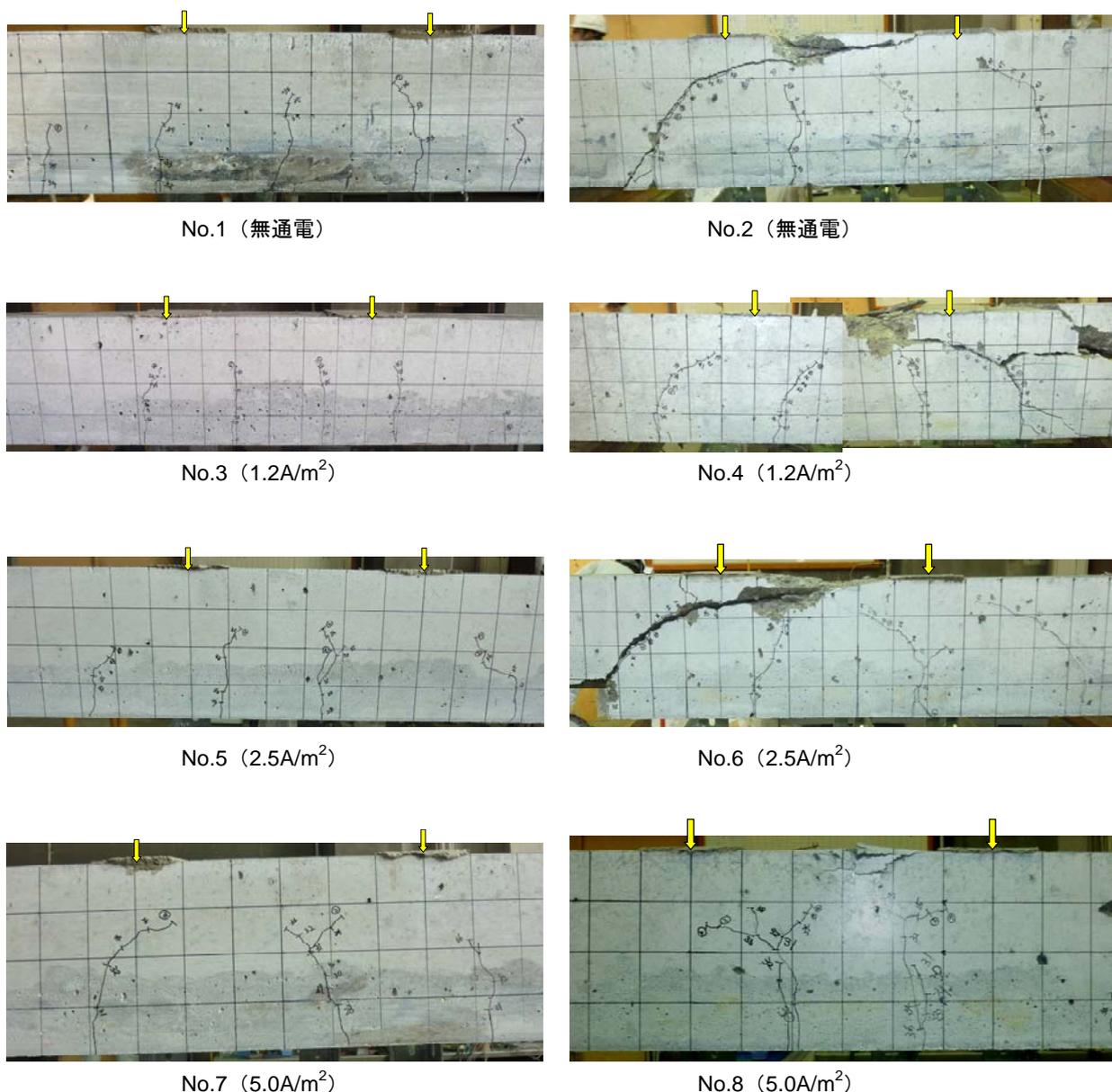


図-9 ひび割れの発生状況

下すると、ひび割れの分散が低下することから、電流密度が $5.0\text{A}/\text{m}^2$ のNo. 7, 8については、PC鋼材とコンクリートの付着が低下した場合の特徴が現れている。脱塩工法で通電を開始すると、陰極側であるコンクリート内部鋼材（この場合はPC鋼材）周辺には陽イオン(Na^+ , K^+ など)が集積し、鋼材周辺のアルカリ量が高くなる。この影響で、コンクリートが脆弱化することが知られており⁵⁾、コンクリートと鋼材の付着強度が低下したと推察できる。

曲げ載荷試験の挙動とひび割れ発生状況で、無通電の試験体No. 1, 2と、電流密度が $2.5\text{A}/\text{m}^2$ 以下の試験体No. 3~6は同等の結果が得られたことから、脱塩工法の通電によるPC鋼材とコンクリートの付着の影響は小さいものとみなせる。一方、電流密度が $5.0\text{A}/\text{m}^2$ の試験体No. 7, 8は、PC鋼材の付着切れが発生し、耐荷性状に影響がある結果が得られたことから、PC構造物では $2.5\text{A}/\text{m}^2$ を超える電流密度で脱塩工法を実施することは、構造物の安全性に影響を及ぼす恐れがあることが示唆された。

3.3 脱塩効果

脱塩実施後の試験体中の全塩化物イオン量の測定結果を図-10に示す。ここで、脱塩率とは塩化物イオン濃度測定深さ範囲 (7.5~52.5mm) の平均的な塩化物イオン濃度が無通電の試験体と比較して低減できた割合を示すものである。仮設陽極材を設置したコンクリート表面側の塩化物イオン濃度が高い傾向を示しており、適切に脱塩工法が実施できた直後の一般的な濃度勾配を示している。塩化物イオンの除去効果は、電流密度が高いほど大きい。電流密度が1.2A/m²と比べて2.5A/m²では電流密度の大きさの比に応じるように除去効果が大きくなるが、5.0A/m²ではそれほど除去効果が大きくはなっていない。高い電流密度が構造物に影響を与えるような場合は、塩化物イオンの除去効果が期待できる範囲で電流密度は低く設定した方がよいといえる。

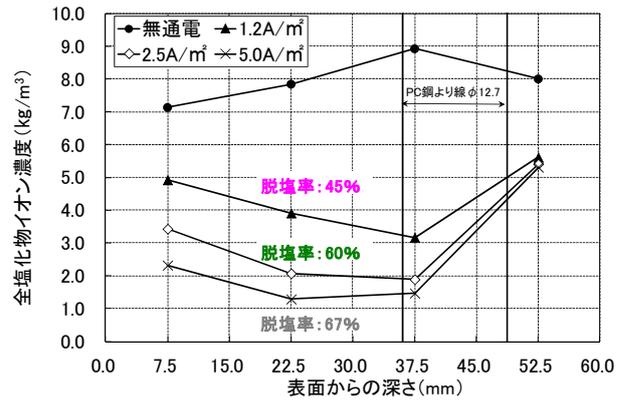


図-10 脱塩実施後の全塩化物イオン濃度の分布

4. 結論

本実験の範囲内で、次のことが明らかとなった。

- (1) 曲げ載荷試験によるたわみは、電流密度が2.5A/m²以下ではほぼ同様の挙動であるが、5.0A/m²ではひび割れ発生後のたわみの増加量が大きい。またコンクリートのひずみ、およびPC鋼材位置の変形量も同様に2.5A/m²以下ではほぼ同様の挙動であるが、5.0A/m²ではひび割れ発生後のひずみは増加傾向を示す。
- (2) ひび割れの発生本数は、繰返し載荷における最大荷重時において電流密度が2.5A/m²以下では4~5本であるが、電流密度が5.0A/m²となると3本となり、電流密度が過大になるとひび割れの分散性が低下する傾向が示された。これはPC鋼材とコンクリートの付着切れが発生している影響と推察できる。
- (3) 脱塩工法の適用にあたっては、現状の劣化レベルを考慮して、通電仕様を設定することが望ましい。その場合、PC部材としての耐荷性状に影響を与えないように、PC鋼材に流れる電流密度は2.5A/m²以下とし、かつ連続通電期間を8週間以下とすることが望ましい。

既往の研究成果と合わせると、PC構造物において電気化学的脱塩工法を安全で効果的に適用できる方法が提案できることが可能となり、塩害対策工法の選択肢が広がった。これらの成果をもとに、維持管理技術の基準類の整備を行う予定である。

参考文献

- 1) 東・中・西日本高速道路株式会社：設計要領第二集橋梁保全編，2012.7
- 2) 竈本武弘・野島昭二・松久保博敬・斎藤豪：塩害を受けた道路橋床版への電着工法・脱塩工法の試験施工，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.997-1002，2009
- 3) 松久保博敬・榎園正義・竈本武弘・野島昭二：プレテンションPCT桁への脱塩工法の適用検討，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.10，pp.329-334，2010.10
- 4) 松久保博敬・松井隆行・野島昭二・斎藤豪・大即信明：ポストテンションPCT桁端部の脱塩工法の適用検討，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.11，pp.545-550，2011.10
- 5) 上田隆雄・服部篤史・芦田公伸・宮川豊明：デサリネーションが鉄筋の付着挙動に与える影響，土木学会論文集，No.550/V-33，pp.53-62，1996.11
- 6) 土木学会：電気化学的防食工法設計施工指針（案），pp.126，2001.11