

論文 電気化学的脱塩工法の適用による PC 鋼材への影響

莖澤 絵理架^{*1}・徳光 卓^{*2}・石橋 孝一^{*3}・丸山 久一^{*4}

要旨：塩害等により既に断面欠損の生じた PC 鋼材を含む PC 部材に電気化学的脱塩工法を適用した場合、応力集中の生じる断面欠損部分で、水素吸蔵による鋼材の遅れ破壊（水素脆化）が生じる可能性があり、鋼材破断が懸念される。本研究では、プレテンション PC 部材に対する脱塩工法の適用性を実験的に確認することを目的とした。あらかじめ PC 鋼材を部分的に腐食させた供試体へ電流の大きさや通電期間を変数として脱塩工法を適用したところ、本実験の範囲では鋼材破断は確認されなかった。併せて PC 鋼材中の拡散性水素量、供試体中の残留塩分量、PC 鋼材の自然電位を測定し、脱塩処理後の効果についても確認した。

キーワード：電気化学的脱塩工法、プレストレストコンクリート、水素脆化

1. はじめに

塩害によって劣化したコンクリート構造物は多くの場合、内部の鋼材が部分腐食を生じているという¹⁾。PC 桁においては、既に PC 鋼材が腐食により断面欠損をしている場合、補修を行っても脆性的な破壊挙動を示すことが確かめられている²⁾。

図-1 に脱塩工法の原理を示す³⁾。電気化学的脱塩工法（以下、脱塩工法）は、塩害により劣化したコンクリート構造物の補修工法の一つであり、既にコンクリート中に浸透した塩化物イオンを電気泳動の原理で外へ排出させる工法である。脱塩工法は、鋼材腐食に起因するコンクリート構造物の劣化の根本的対策となり得る。しかしながら、PC 構造物への適用においては脱塩処理中に発生する水素を吸蔵することによる PC 鋼材の水素脆化が懸念されるため、実構造物への適用事例は数少ない。これまでの研究^{4),5)}により、PC 供試体に脱塩工法を適用した場合の影響について徐々に明らかになっており、新潟県の弁天大橋で、日本ではじめてプレテンション PC 構造物への脱塩工法が適用された⁶⁾。

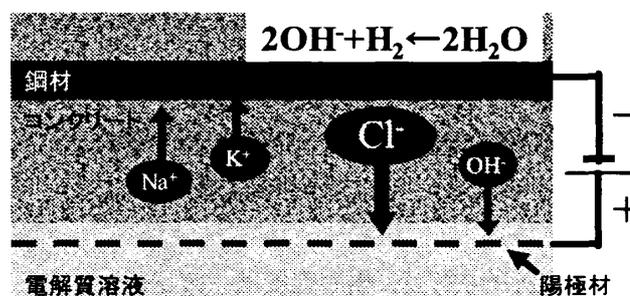


図-1 脱塩工法原理図

本研究では、塩害などにより既に断面欠損が生じ、PC 鋼材の断面欠損部に応力が集中した場合への脱塩工法の適用を想定し、電食により PC 鋼材を部分的に腐食させた PC 部材に脱塩処理を行い、プレテンション PC 部材に対する脱塩工法の適用性を実験的に検討した。脱塩工法の適用によって PC 鋼材には水素が吸蔵され^{4),5)}、鋼材に吸蔵された拡散性水素は、遅れ破壊中の原因となり得ることが知られている⁶⁾。そこで、本研究では、脱塩工法の適用による PC 鋼材中の拡散性水素量を測定した。また、脱塩工法適用後の供試体中の残留塩分量と PC 鋼材の自然電位を測定することで、脱塩効果および鋼材の腐食抑制効果を確認することを試みた。

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 (正会員)

*2 (株) 富士ピー・エス 技術本部 メンテナンス室 次長 工博 (正会員)

*3 電気化学工業 (株) セメント・特殊混和剤研究所 主任研究員 (正会員)

*4 長岡技術科学大学教授 環境・建設系 Ph.D. (正会員)

表-1 実験概要

鋼材種類	PC鋼より線 (SWPR7A)								
緊張レベル	60%								
断面欠損の程度	小								
目標電流密度 (A/m ²)	1 (連続)			3 (連続)			5→3 (間欠)		
処理期間(週)	4	8	12	4	8	12	4	8	12
化学分析 全塩化物イオン	○	○	○	○	○	○	○	○	○
吸蔵水素量測定	○	○	○	○	○	○	○	○	○
PC鋼材自然電位測定	○			○			○		

表-2 コンクリートの示方配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	粗骨材の最大寸法 (mm)	単位量 (kg/m ³)						
			水	セメント	細骨材		粗骨材	混和剤	塩化物イオン Cl ⁻
					(砕砂)	(川砂)			
42	45.4	20	161	383	408	411	1008	3.25	10.0

2. 実験概要

実験は、脱塩試験、脱塩処理後の PC 鋼材吸蔵水素量の測定、供試体片の化学分析からなる。これらの概要を表-1 に示す。

PC 鋼材の断面欠損の程度は、大小の 2 種類を設けた。本実験においては、電食により部分的に腐食を促進させたものを欠損大とし、PC 鋼材にとって厳しい応力状態での脱塩工法適用による鋼材破断を確認することを主たる目的とした。一方、欠損小に関しては、表-1 に示した各種試験を行った。

なお、本論文において、電流密度 (A/m²) は PC 鋼材表面積に対する値とした。

2.1 供試体の作製および通電方法

(1) コンクリートの配合

コンクリートの示方配合を表-2 に示す。早強セメントを用い、初期塩分として NaCl を内割添加した。NaCl は、練り混ぜ水に完全に溶解させてから使用した。塩分添加量は、コンクリート中の Cl⁻量では比較的厳しい塩害が生じた場合に見られる 10.0kg/m³を選んだ。

供試体はコンクリート打設後 1 日間蒸気養生し、その後、湿布養生した。圧縮強度試験による 28 日強度の平均は 77N/mm²であり、コンクリートの設計基準強度 50N/mm²を大きく上回って

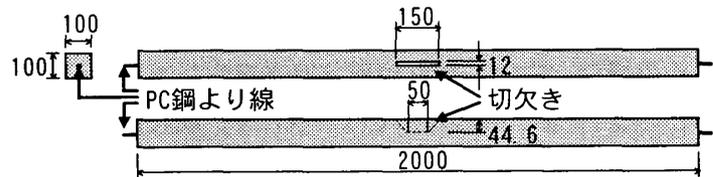


図-2 供試体概要 単位:mm

いた。

(2) PC 供試体

PC 供試体の概要図を図-2 に示す。供試体は 100×100×2000mm の直方体とし、正方形断面の中央にプレテンション方式で緊張した φ10.8 PC 鋼より線 (SWPR7A) を配した。供試体へは、様々な損失を考慮し、緊張後鋼材引張強度の 60%の緊張力が得られるように、あらかじめ割増して初期緊張力を導入した。

また、コンクリート打設後の腐食欠損の導入を考慮し、供試体長手中央部へ切欠きを設けた。塩害により劣化した PC 桁を模擬して、通電により腐食を促すことで (電食) 部分的に断面欠損させた。電食における積算電流量は、あらかじめ実施した予備試験での積算電流量と腐食量の関係から、PC 鋼材の断面欠損率が 7.7%となる値とした。本論文においては、電食により腐食を促進させたものを欠損大、腐食促進のための通電を行わず自然に孔食した程度のを欠損小

と表記する。

電食終了後は、切欠き内に析出した錆をワイヤブラシにてきれいに落とし、切欠き内に市販の早強タイプ断面修復材(コテ塗り用ポリマーセメントモルタル)を充填した。

養生および電食終了後、上面と下面を除く側面4面をエポキシ樹脂塗料にてシールした。

通电のためのリード線は、鋼材を磨き脱脂した後、鋼材端部へ直接接続した。その後、鋼材端部をエポキシ樹脂系接着剤で塗り固め、さらに塩ビ製のキャップを被せ完全に絶縁した。

(3) 通电方法

図-3に通电方法を示す。陽極材としてチタンメッシュを使用し、電解質溶液として飽和ホウ酸リチウム水溶液を用いた。供試体内部の鋼材を陰極に、容器の底に敷いたチタンメッシュを陽極にして、直流安定化電源にて電圧を印加した。供試体底面からの1面脱塩とし、液面高さは供試体高さの2/3とした。1日程度供試体を溶液に浸漬させた後、打設から107日後より通电を開始した。電流密度および通电期間を変数とし、定電圧制御にて目標電流密度が得られるように通电処理を行った。通电中は、電流量とひずみをモニタリングした。

脱塩処理終了後の供試体は、図-4に示すように切断した。

2.2 吸蔵水素量の測定

通电処理終了後、直ちに供試体中からPC鋼材をはつり出した。はつりだした鋼材は、分析を実施するまでの間、吸蔵された水素の拡散を防ぐためドライアイス雰囲気中に保管し冷凍保存した。水素吸蔵量の測定には、昇温脱離ガス分析装置(TDS)を用いた。

2.3 化学分析

(1) Cl^- の測定

塩化物イオンの分析は、JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」に準拠した。

(2) Na^+ および K^+ の測定

ナトリウムイオンおよびカリウムイオンの分

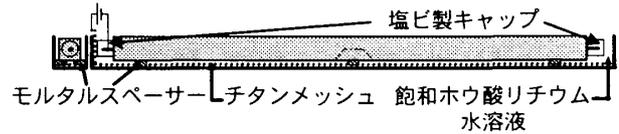


図-3 通电方法

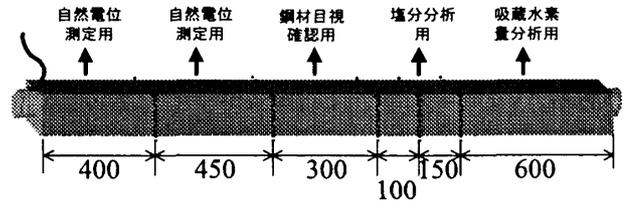


図-4 供試体解体図 単位: mm

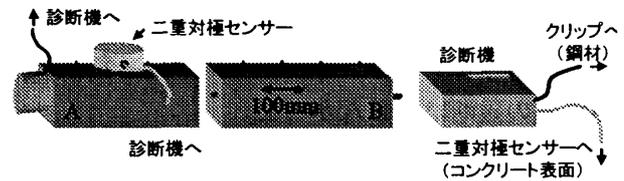


図-5 自然電位測定方法

析は、建設省総合技術開発プロジェクト「コンクリート中の水溶性アルカリ金属元素の分析方法(案)」に準拠した。

2.4 自然電位の測定

測定には、携帯型鉄筋腐食診断機を用い、照合電極として飽和塩化銀電極(Ag/AgCl)を用いた。脱塩処理面において、長手方向に100mmの間隔で測定した。測定方法を図-5に示す。

3. 実験結果及び考察

3.1 脱塩処理

(1) 電流密度の経時変化

脱塩処理中欠損小供試体の電流密度の経時変化を図-6に示す。通电した電流量は、電流密度(A/m^2)と通电期間(hr)の積である積算電流密度で表される。本試験においては、表-3に示す積算電流密度が得られた。

電流密度 $1\text{A}/\text{m}^2$ においては、終始安定した通电処理が行われていた。その他の電流密度では、通电開始後電流密度の低下が見られたが、12週間の通电が行われていたことが確認できた。目標電流密度での通电処理を維持するため、電流

密度の回復を期待し、目標電流密度 $5A/m^2$ は間欠通電方式に切り替えた。後に、間欠通電方式と連続通電方式の影響の違いを検討するため、目標電流密度 $3A/m^2$ は連続通電を続行した。

(2) 鋼材破断に関する検討

12 週間の通電処理によって欠損小供試体に流れた電流を積算電流密度で示したものが表-3 である。

積算電流密度が大きいほど、脱塩反応が促進されるので水素の発生量が多くなる。そのため、水素脆化による鋼材破断の危険性が高くなる。本脱塩処理により、最大で、 $4051A \cdot h/m^2$ の積算電流密度が通電されたが、PC 鋼材の破断は確認されなかった。また、断面欠損が大きい場合でも鋼材の破断は生じなかった。

3.2 吸蔵水素量

図-7 に脱塩処理終了後の PC 鋼材の吸蔵水素量を示す。図より、 $1A/m^2$ の通電を施した鋼材が最も水素を吸蔵していることがわかる。

また、水素放出曲線には $180^{\circ}C$ 付近に 1 つ、 $400^{\circ}C$ 付近に 1 つと計 2 つのピークが見られる。このうち、第 1 ピーク (低温側) で放出された水素が水素脆化に直接影響を与えるとされる拡散性水素である⁷⁾。表-4 に鋼材中に吸蔵された拡散性水素の量を示す。表より $1A/m^2$ の脱塩処理直後の拡散性水素量が最も多く、その値は $1.88 wt ppm$ であった。鋼材製造時の拡散性水素量は $0.000 wt ppm$ であることを確認しており、脱塩処

表-3 積算電流密度一覧

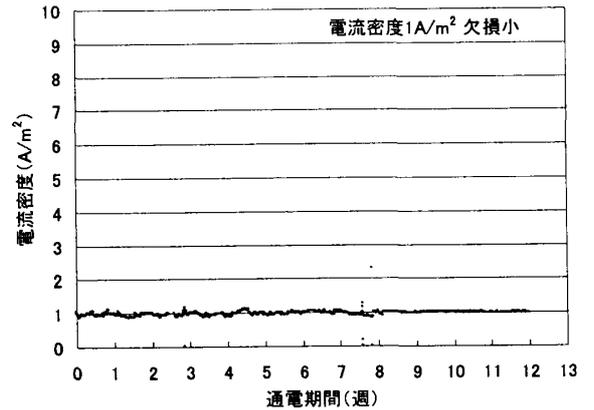
(a) 欠損大

通電期間 (週)	目標電流密度 (A/m^2)		
	1	3	5
12	1929	3271	3320

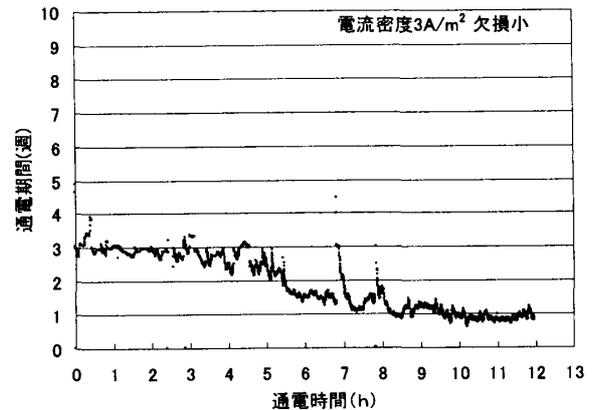
(b) 欠損小

通電期間 (週)	目標電流密度 (A/m^2)		
	1	3	5
4	617	1897	2563
8	1252	3005	3378
12	1940	3862	4051

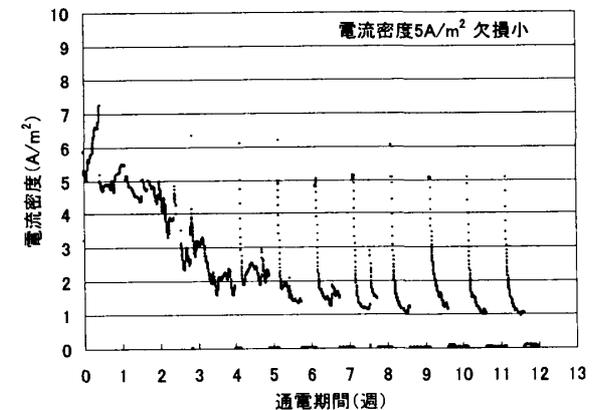
単位: $A \cdot h/m^2$



(a) 目標電流密度 $1A/m^2$



(b) 目標電流密度 $3A/m^2$



(c) 目標電流密度 $5A/m^2$

図-6 欠損小電流密度の経時変化

表-4 拡散性水素吸蔵量

目標電流密度 (A/m^2)	1	3	5
通電期間 (週)	12	12	12
積算電流密度 ($A \cdot h/m^2$)	1940	3862	4051
拡散性水素量 (wt ppm)	1.88	1.32	0.60

単位: wt ppm

理により鋼材中の拡散性水素量が増加していることがわかる。また、目標電流密度 $5A/m^2$ の拡散性水素量が極端に少なくなっているのは、間欠通電による休止期間に吸蔵水素量を測定したため、一旦鋼材中に吸蔵された水素が拡散⁹⁾したことによる。

12週間の脱塩処理において鋼材に吸蔵される水素量が明らかとなったとともに、この程度の吸蔵水素量であれば鋼材の破断は生じないことを確認した。

3.3 残留塩化物イオン量

本実験における脱塩効果を確認するために、脱塩処理後の供試体の残留塩化物イオン量を測定した。4週脱塩処理を施した、鋼材高さ位置での残留全塩化物イオン量の分布を図-8に示す。

図より、鋼材近傍では、脱塩処理によりかなりの塩化物イオン量の減少が見られ、その効果が顕著に見られる。しかしながら、全ての塩化物イオンは排出できなかった。

3.4 自然電位

脱塩処理より42日の静置期間後の鋼材自然電位を測定した。前項では、供試体内の鋼材近傍に塩分が残留していたため、脱塩処理後の静置により鋼材が再腐食する可能性があった。

図-9に4週間脱塩処理を施した後、42日静

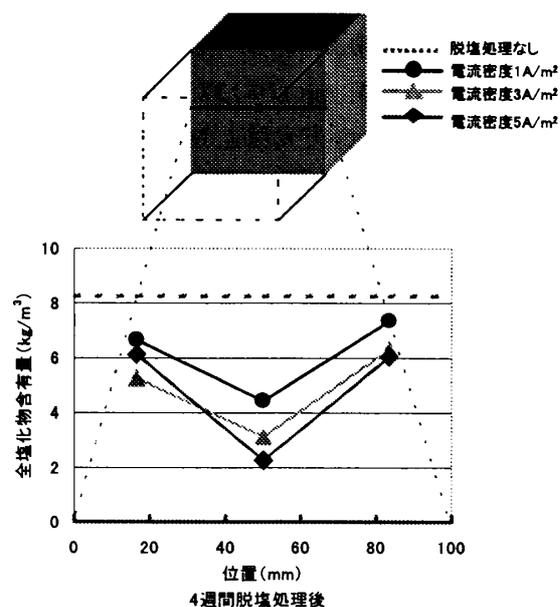
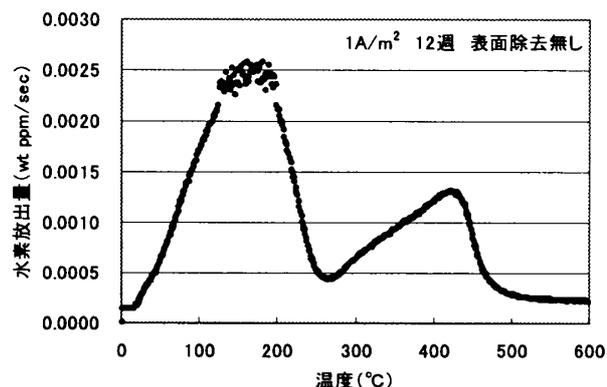


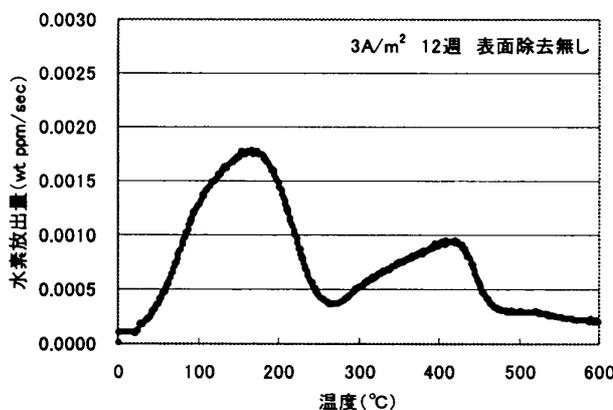
図-8 供試体中の残留塩分の分布

置した供試体の自然電位の分布を示す。図中の領域の区分は ASTM C 876-91 の判定基準である。ASTM の判定基準を表-5に示す。

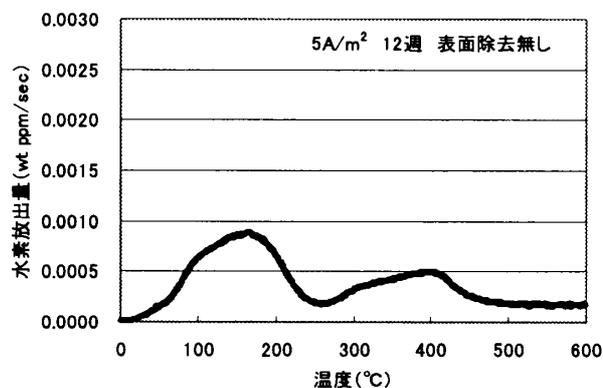
脱塩処理前、 $-500mV$ であった自然電位が脱塩処理を施すことで貴変し、「90%以上の確率で腐食なし」の領域へ移行している。また、電位のばらつきも少ないことから、マクロセル等の再劣化の可能性も小さくなったといえる。



(a) 目標電流密度 1A/m²



(b) 目標電流密度 3A/m²



(c) 目標電流密度 5A/m²

図-7 12週脱塩処理後の水素放出曲線

これらのことより、脱塩処理により PC 鋼材の腐食抑制性態が改善されたと考えられる。

4. 結論

プレテンション PC 部材への電気化学的脱塩工法の適用性を実験的に検討し、得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 脱塩工法の適用による PC 鋼材の破断は無かった。また、断面欠損の程度によらず、PC 鋼材は破断しなかった。
- (2) 脱塩処理直後の PC 鋼材の水素吸蔵量は、最大で 1.88 wt ppm であった。本実験の範囲内では、PC 鋼材の破断は生じないことが確認された。
- (3) PC 鋼材の自然電位の測定結果より、脱塩工法の適用による鋼材腐食抑制効果が確認できた。

また、本実験の範囲内で、連続通電の安全性が確認された。間欠通電の安全性も再確認された。脱塩工法適用中に標準電流密度での施工や積算電流量までの管理を行うことで通電を制御すれば、これまで避けられてきた連続通電による施工も可能になると考えられる。

PC 構造物に対して、連続的かつ大きな電流による脱塩処理を行うことは、工期短縮に直結しコストの縮減にも結びつく。本研究の範囲内において連続通電の有効性が確認されたことから、今後、PC 構造物へ連続通電を適用する際の糸口となるであろう。

参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所：土木研究資料既存コンクリート構造物の健全度実態調査結果-1999年調査結果-，pp.89-93，2002.3
- 2) 中村良樹ほか：塩害を受けたプレテンション PC 桁の耐荷性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.973-978，1999.6
- 3) 社団法人土木学会：コンクリートライブラリ

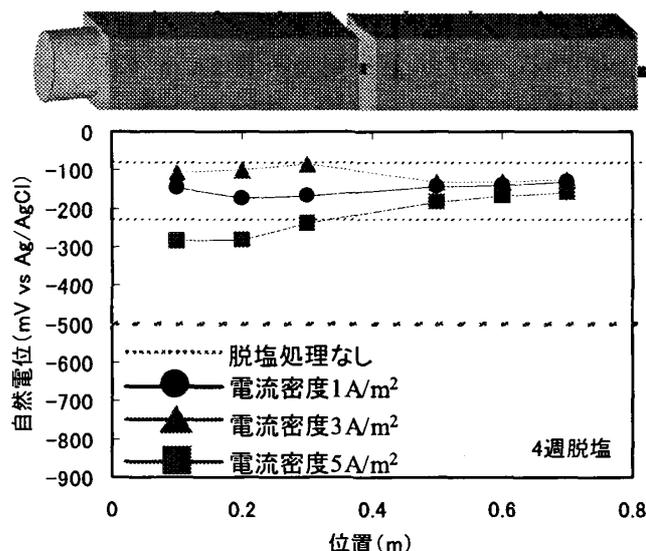


図-9 4週脱塩 42日静置後の自然電位の分布

表-5 鉄筋の自然電位と鉄筋腐食性の関係⁸⁾

自然電位 (E)	鉄筋腐食の可能性
$-200\text{mV} < E$	90%以上の確率で腐食なし
$-350 < E \leq -200\text{mV}$	不確定
$E \leq -350\text{mV}$	90%以上の確率で腐食あり

(銅/硫酸銅照合電極基準)

—107 電気化学的防食工法設計施工指針(案)，pp.117-147，2001

- 4) 上田隆雄ほか：デサリネーションが PC 部材の力学的挙動に与える影響，土木学会論文集，No.613，V-42，pp.189-199，1999.2
- 5) 芦田公伸ほか：デサリネーションによる PC 鋼材の水素吸蔵特性，土木学会論文集，No.620，V-43，pp.119-127，1999.5
- 6) 徳光卓ほか：弁天大橋における PC 橋のデサリネーション，構造物の診断と補修に関する第 14 回技術研究発表会論文集，pp.51-58，日本構造物診断技術協会，2002.11
- 7) 鈴木信一，石井伸幸，宮川敏夫：亜鉛メッキ高張力鋼の拡散性水素と遅れ破壊，鋼と鉄，Vol.72-77，1996
- 8) ASTM C 876-91