

測定からなる。これらの概要を表 - 1 に示す。なお、本論文において、電流密度 (A/m^2) 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 を内割添加することとした。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 $10.0kg/m^3$ 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 $77N/mm^2$ であり、コンクリートの設計基準強度 $50N/mm^2$ を大きく上回っていた。

(2) PC 供試体

PC 供試体の概要図 - 2 に示す。供試体は $100 \times 100 \times 2000mm$ 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 10.8 PC 鋼より線 (SWPR7A) を配した。様々な損失を考慮し、緊張直後鋼材引張強度の 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。通電をコントロールし、複数の供試体を一様に PC 鋼材欠損率 7.5% とした。なお、比

較用に電氣的に腐食を促進させないものも作製した。本論文の図表においては、通電により欠損率 7.7% としたものを欠損大、腐食促進のための通電を行わず自然に孔食した程度のも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び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高性能断面修復材 (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ドした。

通電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かぶせ完全に絶縁した。

(3) 通電方法

図 - 2 に通電方法を示す。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 日後より通電を開始した。電流密度および通電期間を変数として通電処理を行った。通電中は、電流量とひずみをモニタリングした。

脱塩終了後の供試体は、図 - 4 に示すように切断した。

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)	単用量 (kg/m^3)						
			水	セメント	細骨材		粗骨材	混和材	塩化物イオン Cl^-
					(砕砂)	(川砂)			
42	45.4	20	161	383	408	411	1008	3.25	10.0

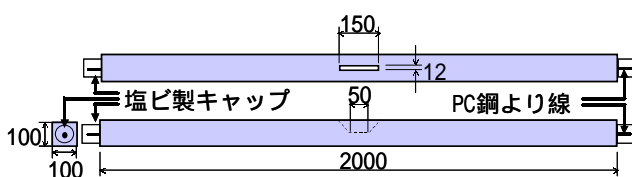


図 - 2 供試体概要 単位: mm

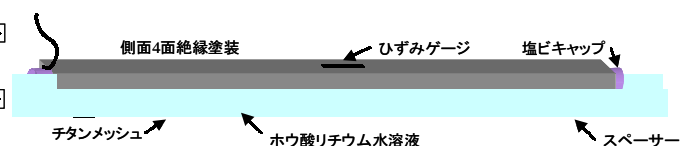


図 - 3 通電方法

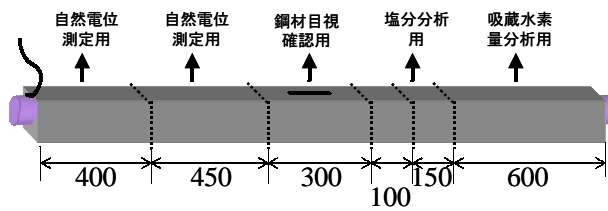


図 - 4 供試体解体図 単位：mm

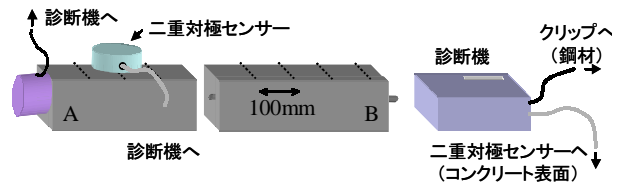


図 - 5 自然電位測定方法

2.2 吸蔵水素量の測定

通電処理終了後、直ちに供試体中から PC 鋼材をはつり出し、分析を実施するまでの間、はつりだした鋼材は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. 脱塩処理

3.1 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。通電した電流量は、電流密度 (A/m²) と通電期間 (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 に示す積算電流量が得られた。

電流密度 1A/m² においては、終始安定した通電処理が行われていた。その他の電流密度では、通電開始後電流密度の低下が見られたが、12 週間の通電が行われていたことが確認できた。

5A/m² は、間欠通電方式に切り替えた。

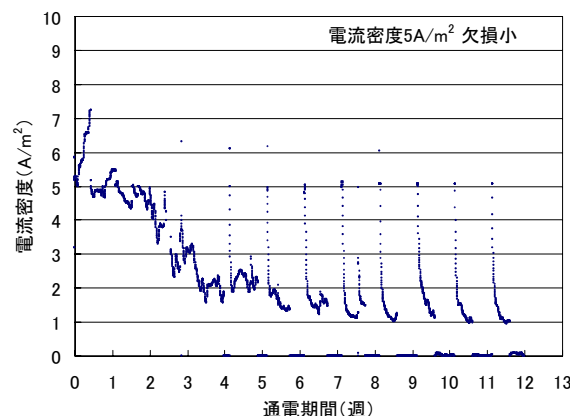
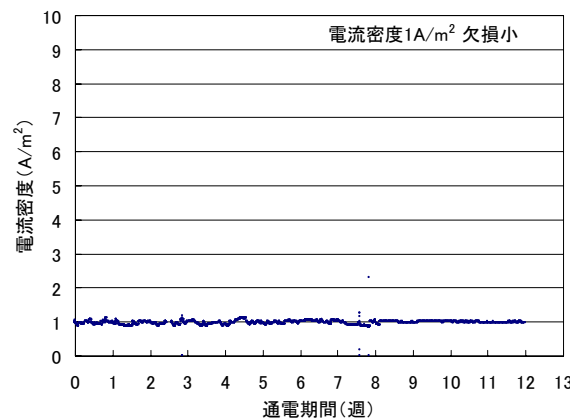
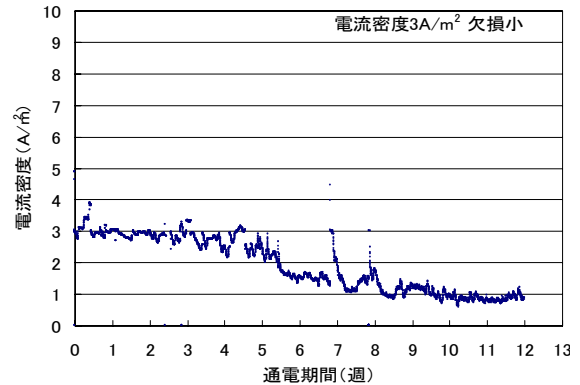


図 - 6 欠損小電流密度の経時変化

3.2 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、 $4051\text{A}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 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。

表 - 3 積算電流量一覧

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

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

単位： $\text{A}\cdot\text{h}/\text{m}^2$

4. 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、 $1\text{A}/\text{m}^2$ 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 付近に 1 つ、400 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⁶⁾。表 - 4 に積算電流密度と拡散性水素を示す。表より $1\text{A}/\text{m}^2$ 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 であるので、脱塩処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。

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。

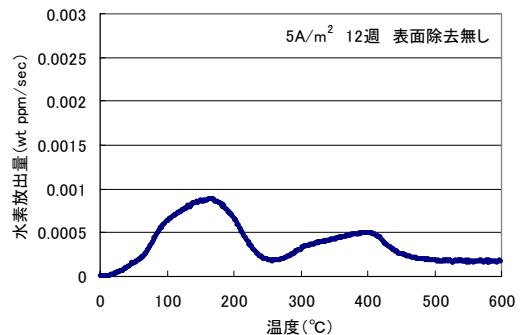
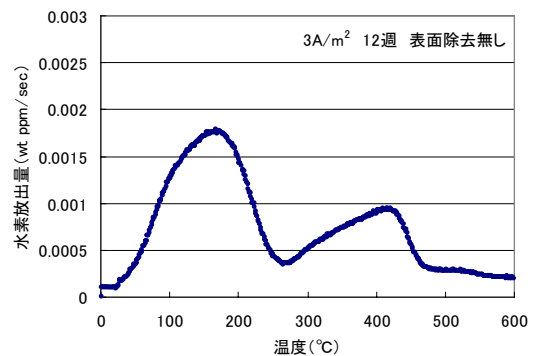
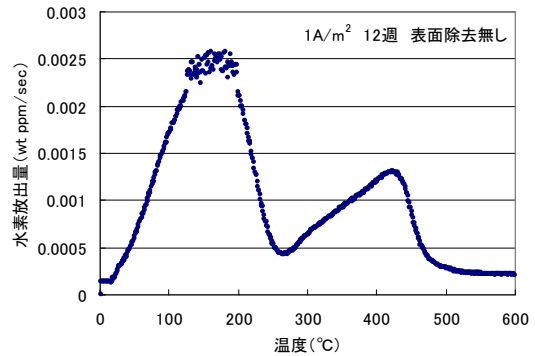


図 - 7 12 週脱塩処理後の水素放出曲線

表 - 4 吸蔵水素量一覧

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 ($\text{A}\cdot\text{h}/\text{m}^2$)	1940	3862	4051
拡散性水素量 (wt ppm)	1.88	1.32	0.6

5. 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が抽出できたわけではなかった。

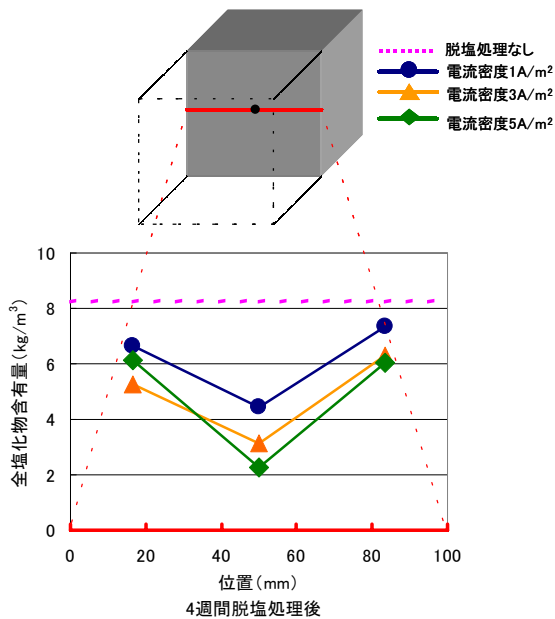


図-8 供試体中の残留塩分の分布

6. 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。

これらのことより、脱塩処理によるPC鋼材の腐食抑制効果が確認された。

表-5 鉄筋の自然電位と鉄筋腐食性の関係

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

(銅/硫酸銅照合電極基準)

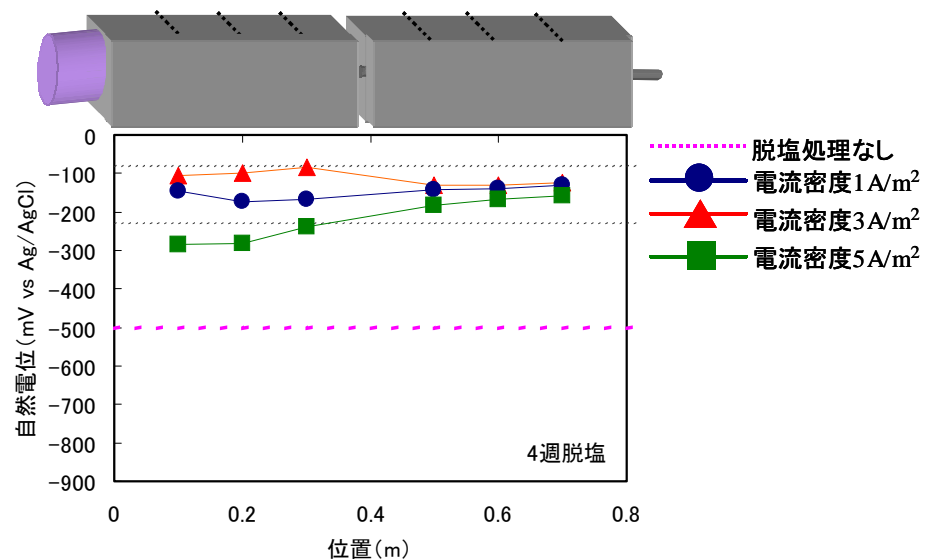


図-9 4週脱塩42日静置後の自然電位の分布

6. 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。この程度であれば、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、連続的に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。

謝辞

本研究の遂行にあたり、研究の全般におきましてご指導賜りました教授丸山久一先生に深く

感謝の意を表します。また、助教授下村匠先生、文部技官中村裕剛氏に深く感謝の意を表します。

材料の提供等多大なる協力をいただきました PC 脱塩研究会の皆様はこの場をお借りして御礼申し上げます。

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・河野広隆・渡辺博志・鈴木雅博：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ー-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，芦田公伸，溝口茂，宮川豊章：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，上田隆雄，溝口茂，宮川豊章：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) 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
- 7) ASTM C 876-91