

# デサリネーションがP C部材の 力学的挙動に与える影響

上田隆雄<sup>1</sup>・芦田公伸<sup>2</sup>・溝口 茂<sup>3</sup>・宮川豊章<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 徳島大学助手 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

<sup>2</sup>正会員 電気化学工業(株) 特殊混和材部 (〒949-0305 新潟県西頸城郡青海町 青海工場)

<sup>3</sup>正会員 高周波熱錬(株) 製品事業部 (〒254-0013 平塚市田村5893 平塚工場)

<sup>4</sup>フェロー 工博 京都大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

塩害によるコンクリート構造物の早期劣化問題が深刻化する中、電気化学的に脱塩を行う工法すなわちデサリネーションが新しい補修工法として期待されている。デサリネーションはこれまでRC構造物への適用が検討され、その効果が確認されつつあるが、PC鋼材の水素脆化問題のためにPC構造物への適用例は非常に少ない。本研究は、デサリネーションをPC部材に適用したときの力学的挙動への影響について、PC鋼材レベルおよびPCはり部材レベルから検討を加えたものである。

**Key Words :** desalination, electrochemical technique, hydrogen embrittlement, slow strain tensile test, hydrogen absorption, flexural test of beam

## 1. はじめに

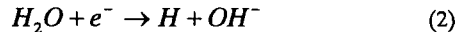
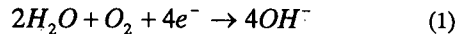
コンクリート構造物は、適切に設計施工された場合、きわめて耐久性に富む構造形式であるとされてきたが、近年塩害による早期劣化が問題となっている。デサリネーションはコンクリート中のCl<sup>-</sup>除去を目的とする電気化学的手法であり、現在代表的な電気化学的手法である電気防食の100倍近い電流を用いるものの、ある一定期間だけ通電すればよいという特色を有している。

RC構造物へのデサリネーションの適用事例は徐々に増加しており、処理後の耐久性などに課題を残しながらも<sup>1)</sup>、その効果が確認されつつあるのが現状である<sup>2)</sup>。一方、PC構造物への適用を考えた場合、カソード反応により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に、PC構造物へのデサリネーションの適用例は現在ほとんど報告されていない。

本研究では、塩化物を含んだプレテンション型PC供試体にデサリネーションを施すことにより、デサリネーションがPC鋼材の水素脆化に与える影響およびPCはり部材の力学的挙動に与える影響についての基礎的な検討を行うこととした。

## 2. 水素脆化のメカニズム

デサリネーション適用時に陰極となるPC鋼材の近傍では、以下に示すカソード反応が生じていると考えられる。



式(1)は陰極近傍に十分な酸素が存在し、かつ、カソード電位が水素発生電位よりも貴な場合に支配的な反応となるが、これらの条件が満たされない場合には式(2)の反応が支配的となるものと考えられる。水素発生電位はネルンスト式から計算される平衡電位よりも卑な値となるが、この平衡電位と水素発生電位の電位差である過電圧は電流密度、温度、鋼材の表面状態等により異なるため、その決定は難しいとされている<sup>3)</sup>。従来の研究から、この過電圧分を無視して、平衡電位を水素発生電位の目安とすることの妥当性が確認されている<sup>4)</sup>。一般に健全なコンクリート中細孔溶液のpHは12.5程度であることから、ネルンスト式を用いて計算される平衡電位は-934 mV vs Ag/AgClとなる。ただし、デサリネーションを施したコンクリート中の鉄筋近傍におけるpHはカソード反応により上昇するため、水素発生電位も若干

卑な方向に移行することが予想される。

式(2)の反応が卓越し、水素原子が発生すると、この水素原子はPC鋼材中の結晶格子中を拡散し、転位、原子空孔、粒界、介在物界面などのトラップサイトに集積することとなる。これらの水素の内、転位、原子空孔、粒界などに弱くトラップされた水素は、常温で拡散可能な拡散性水素と呼ばれ、水素脆化による遅れ破壊の直接的な原因であるといわれている<sup>5)</sup>。ただし、トラップサイトに吸蔵された微量の水素がどのようなメカニズムで水素脆化割れを誘発するのかという点に関しては、様々な説があり、未だ解明には至っていないのが現状である。

### 3. 実験概要

実験は、デサリネーション適用後のPC角柱供試体からはつりだしたPC鋼材の低ひずみ速度引張試験およびPCはり供試体の静的曲げ載荷試験からなる。これらの概要をTable 1に示す。各要因の供試体数は2体とした。なお、本研究では電流密度の値は鉄筋表面積に対する値として示す。

#### (1) 供試体の作製および通電方法

##### a) コンクリートの配合

コンクリートの示方配合をTable 2に示す。コンクリートの目標強度を40 MPaとしたところ、円柱供試体による28日強度は43 MPaであり、この値を満足していた。セメントは普通ポルトランドセメントを用い、練混ぜ時に混入する塩化物は精製塩 (NaCl, 純度99%) を用いた。コンクリート中のCl<sup>-</sup>量としては、比較的厳しい塩害が生じた場合に見られる、8.0 kg/m<sup>3</sup>を選んだ。

##### b) 角柱供試体

角柱供試体のコンクリート部分は15×15×40 cmの直方体とし、正方形断面の中央部分にプレテンション方式で緊張したPC鋼材を配した。なお、コンクリートのクリープと乾燥収縮によるプレストレスの損失を防止するために、コンクリートそのものへのプレストレス導入は行わず、鋼製の緊張棒にて反力を保持した。PC鋼材は高周波誘導加熱焼入れ焼戻しを施したPC鋼棒2種類 (φ13 mmのB種1号およびC種1号) と、冷間引抜加工を施した異形PC鋼線 (φ9 mm) の計3種類を用いた。本論文の図表においては、B種1号およびC種1号PC鋼棒をそれぞれB typeおよびC type、冷間加工PC鋼線をCD wireと表すこととする。PC鋼材の機械的性質および化学組成をそれぞれTable 3とTable 4に示す。鋼材の緊張応力としては、各鋼材引張強度の50%および60%を採用した。なお、比較用に無緊張および塩化

Table 1 Outline of test program

Type of Specimen	Type of Bar	Prestressing Force (%)	Current Density (A/m <sup>2</sup> )	Period of Treatment (weeks)	Period after Treatment	
Prism	B type	0	0.0	8	0	
		50	0.0			
			5.0			
		60	0.0	8	0, 3days, 7days, 1month, 6months, 1year	
			5.0			0.0
						5.0
	C type	0	0.0	8	0	
		50	0.0			
			5.0			
		60	5.0	0.0	8	0, 3days, 7days, 1month, 6months, 1year
				4		
				8		
CD wire	60	5.0	0.0	8	0, 7days, 1month	
			4			
			8			
Beam	B type	50	0.0	8	0	
			5.0			
		60	0.0			8
			5.0			
		C type	50	0.0	8	
				5.0		
	5.0					
	60	5.0	0.0	8	0, 1month	
			0.0			
			5.0			

Table 2 Mix proportion of concrete

W/C (%)	s/a (%)	NMS (mm)	Unit mass (kg/m <sup>3</sup> )					
			W	C	S	G	AEA	Cl
39	43	25	169	434	731	982	4.67	8

NMS : Nominal maximum size of aggregate

Table 3 Mechanical properties of prestressing bars

Type of Bar	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
B type (SBPR930/1080)	1047	1115	10.0
C type (SBPR1080/1230)	1228	1273	8.0
CD wire (SWPD1L)	1415	1603	6.5

Table 4 Chemical compositions of prestressing bars

Type of Bar	Chemical Composition (%)					
	C	Si	Mn	P	S	Cu
B type (SBPR930/1080)	0.35	1.74	0.74	0.016	0.006	0.01
C type (SBPR1080/1230)	0.35	1.74	0.74	0.016	0.006	0.01
CD wire (SWPD1L)	0.82	0.24	0.75	0.012	0.008	0.01

物無混入の角柱供試体も併せて作成した。角柱供試体の概略図をFig. 1に示す。

c) はり供試体

はり供試体は、幅10 cm、高さ20 cm、全長160 cmとし、有効高さ13.3 cmの位置にプレテンション方式で緊張したPC鋼棒（B種1号またはC種1号）を1本配した。また、せん断スパンには10 cm間隔でせん断補強筋を配した。せん断補強筋および組立て筋にはエポキシ樹脂塗装鉄筋D10 SD295Aを用いた。はり供試体の概略図をFig. 2に示す。

d) 通電および処理後の静置方法

角柱供試体は、緊張したPC鋼材の周囲にコンクリートを打設し、4週間の湿布養生を行った後に電極を取り付け、電解液中で電流を流した(Fig. 1参照)。

はり供試体は、打設後、4週間の湿布養生を行った後にコンクリートにプレストレスを導入し、電極を取り付け、電解液に浸して電流を流した。電解液はすべて飽和水酸化カルシウムとし、陽極は白金メッキチタンメッシュを用いた。

電流密度は鉄筋表面に対して $5.0 \text{ A/m}^2$ 、通電期間は8週間を基本レベルとした。また、電流密度の影響を検討するために、 $10.0 \text{ A/m}^2$ および $15.0 \text{ A/m}^2$ の通電処理を行うシリーズも設けた。通電方法は共に両側面からの2面通電とし、通電面以外はエポキシ樹脂を塗り絶縁した。なお、無処理の供試体も通電期間中は電解液中に保存した。

また、通電処理終了後の静置期間の影響を検討する供試体については、PC鋼材の緊張力を保持したまま、一定期間（3日、1週間、1ヶ月、6ヶ月、1年）静置した。なお、静置条件は温度 $20^\circ\text{C}$ 、湿度60%の恒温恒湿状態とした。

所定の通電期間および処理後の静置期間経過後に各種試験を行った。なお、角柱供試体からはりだしたPC鋼材については、はりだしてから試験を行うまでの期間中、通電処理によって鋼材に吸蔵された水素の気中への拡散放出を防ぐために、すべて $-30^\circ\text{C}$ 以下で冷凍保存した。

(2) 低ひずみ速度引張試験

所定の処理終了後、角柱供試体からはりだしたPC鋼材に対して低ひずみ速度引張試験を行った。

a) 遅れ破壊感受性評価試験

水素脆化による高強度鋼の特性変化で最大の懸念事項は、遅れ破壊感受性が増大することである。この遅れ破壊感受性を評価するための試験方法は大きく分けて、定荷重または定ひずみ試験方法と低ひずみ速度試験方法(SSRT)に分類することが出来る<sup>9)</sup>。FIP試験に代表される定荷重試験は、静的荷重下での

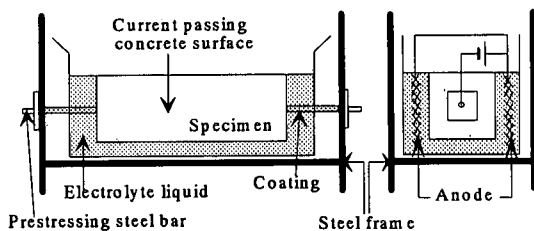


Fig. 1 Prism type specimen

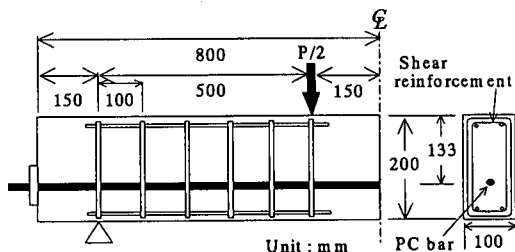


Fig. 2 Beam type specimen

割れの発生または破断時間の大小によって遅れ破壊感受性を評価する方法である。これに対して、低ひずみ速度試験は非常に小さなひずみ速度( $10^{-6}/\text{sec}$ 程度)で引張試験を行い、その時得られた特性によって遅れ破壊感受性を評価する方法である。

本研究では、実際に近い通電状況を再現するために、コンクリート疑似溶液中ではなくコンクリート中に埋め込まれた鋼材に対して通電処理を行い、さらに、水素を吸蔵した状態でのPC鋼材の特性変化を検討することを目標とした。このため、コンクリートからはりだしたPC鋼材から水素が逸散放出する前に、比較的迅速な評価が可能である低ひずみ速度引張試験を採用した。

b) 試験方法

鋼材は試験直前に冷凍室から取り出し、布で表面の霜をふき取ったものを試験体とした。なお、試験体の切削加工は行わなかった。引張試験のひずみ速度は、 $1.6 \times 10^{-5}/\text{sec}$ で一定とした。引張荷重を容量20 tfのロードセルで、PC鋼材のひずみを塑性ゲージで測定した。さらに、载荷を行った万能試験機のクロスヘッド変位量を容量50 mm (感量0.01mm)の変位計で測定した。また、破断後の鋼材絞り $\psi$ を次式により求めた。なお、鋼材断面積はJIS Z 2241に従い測定した。

$$\phi = (A_0 - A) / A_0 \times 100 (\%) \quad (3)$$

ここに、 $A_0$  : 原断面積 ( $\text{mm}^2$ )

$A$  : 破断後の最小断面積 ( $\text{mm}^2$ )

(3) PCはりの静的曲げ載荷試験

所定の処理が終了したPCはり供試体に対して以下の要領で静的曲げ載荷試験を行った。

#### a) 測定項目

載荷荷重を容量10 tfのロードセルで測定し、スパン中央たわみを容量25 mm(感量0.01 mm)の変位計で測定した。

また、主筋位置(d=13.3 cm)でのひび割れ幅を測定するために、曲げスパン側面に検長50 mm、容量2 mmのπ型ゲージ(感量0.001 mm)を6個連続させて貼り付けた。

#### b) 載荷方法

ひび割れ発生まで0.25 tfずつ載荷し、ひび割れ発生後、一旦0.25 tfまで除荷した。さらに0.25 tfずつ再び載荷し、降伏点に達した時点で変位制御に切り替え0.3 mmずつ載荷した。中央変位が5 mmを越えた時点からは0.5 mmずつ載荷し、荷重が最大荷重の8割以下になるまで載荷した。

6個のπ型ゲージはどれか一つが容量(2 mm)付近になったときにすべて取り外した。また、載荷終了後に曲げスパン主筋位置のひび割れ間隔を測定した。載荷時のスパン割りはすべての供試体に対してFig. 2に示した通りとした。

#### (4) 自然電位の測定

通電終了後、静置期間中の供試体に対して、PC鋼材自然電位の経時変化を測定した。照合電極には飽和塩化銀電極(Ag/AgCl)を用いた。

### 4. PC鋼材の自然電位

PCはり供試体に5.0 A/m<sup>2</sup>で8週間の通電処理を施した後に1ヶ月間、PC鋼材の自然電位の経時変化を測定した。60%で緊張したC種PC鋼材を使用したはりの測定結果をFig. 3に示す。図中の折れ線はそれぞれ1つの供試体に対応しており、領域の区分はASTMの判定基準にJCIにより規定された防食領域<sup>7)</sup>を加えたものである。

Fig. 3によると、無通電の場合にはPC鋼材は腐食環境にあるために自然電位は不確定領域および腐食領域にあるが、通電処理を行った場合には、処理終了直後の自然電位は防食領域にある。この場合、前述の水素発生電位よりも卑な電位となっており、処理終了後も電場の影響が強く残っていることが分かる。また、鉄筋近傍のpH上昇を考慮しても、通電期間中にカソード反応による水素が発生していたことは確実であり、PC鋼材の水素脆化が生じている可能性が高いものと考えられる。この後、外部からの酸素の供給とともに鋼材は不動態被膜に覆われ、鋼材の電位は徐々に貴化し、処理終了後5日ほどで水素発生電位よりも貴な電位となっている。

石井らは通電処理によりカソード分極されたPC

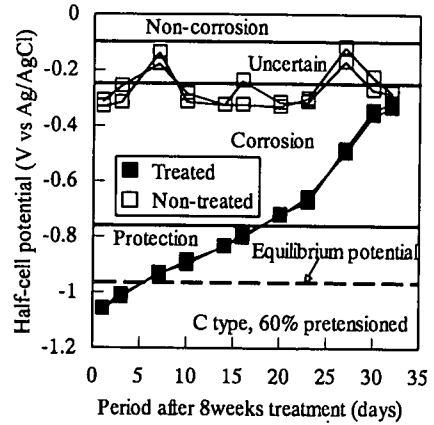


Fig. 3 Change of half-cell potential after 8 weeks treatment

鋼線に対して、通電停止後1週間までの時間経過と吸蔵水素量変動の関係を調べた結果、時間の経過に伴い拡散性水素のピークが小さくなり、水素脆化が回復する傾向にあることを報告している<sup>9)</sup>。処理後のPC鋼材の自然電位変化と拡散性水素の拡散放出現象および水素脆化の緩和回復現象との間に明確な関係があるかどうかについては、現段階では不明であるが、少なくともPC鋼材の自然電位が水素発生電位よりも貴な値であるかぎり、水素脆化による遅れ破壊の危険性は速やかに減少しつつあると判断できるであろう。

### 5. PC鋼材の低ひずみ速度引張試験

#### (1) 応力-ひずみ関係の推定

デサリネーション終了後、角柱供試体からはつりだしたPC鋼材の低ひずみ速度引張試験を行ったときに得られる、引張荷重、鋼材ひずみおよび万能試験機クロスヘッドのストローク量から、破断点までの応力-ひずみ曲線を近似的に求めることを試みた。

鋼材の引張による伸び挙動は、引張強度発現点近傍までの全体伸びの段階と、それ以降破断点までの局部伸びの段階に分けることができると考えられる。鋼材に貼り付けたひずみゲージは塑性ゲージを用いており、全体伸びの段階のひずみは測定可能であるが、局部伸びがゲージ貼り付け部分以外で進展すると、破断時までの測定は不可能となる。

各種鋼材の低ひずみ速度引張試験から得られた鋼材ひずみとクロスヘッドストローク量の関係をFig. 4に示す。これによると、弾性領域から塑性領域の初期にかけては、鋼材の断面縮小に伴うチャック(鋼材つかみ部分)の食い込みなどの影響で、ストローク量の増大が大きくなっているが、鋼材ひずみで3%から5%程度の塑性領域で両者の線形関係が現れて

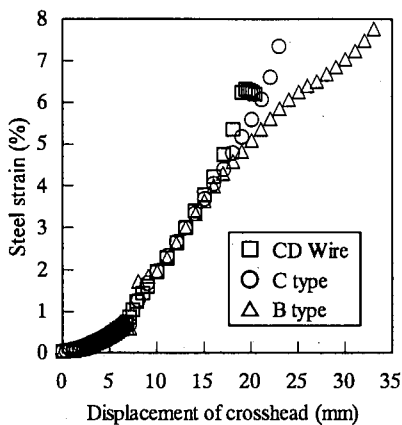


Fig. 4 Relation between steel strain and crosshead displacement (Original bars)

いることが分かる。さらに、その後ひずみが大きくなり、局部伸びが支配的になるとこの線形関係は再び崩れることになる。本研究ではこの3%から5%までの線形関係を用いて、5%以降の鋼材ひずみをストローク量から近似的に計算し、破断時までの応力-ひずみ曲線の概形を得ることとした。なお、近似式は鋼材によって異なるが、近似に用いたデータは鋼材ひずみが3%から5%の範囲で一定とした。

## (2) 各種PC鋼材の水素脆化挙動

60%の緊張を行い、8週間の通電処理を行った直後の応力-ひずみ曲線をFig. 5に、通電処理が鋼材破断時の絞りひずみに与える影響をFig. 6に示す。なお、比較用として、各種鋼材の製造時の状態における試験結果をOriginalとして併せて示した。Fig. 5によると、弾性領域および荷重降下が始まるまでの塑性領域において、通電処理の影響は非常に小さい。よって、鋼材の弾性係数、降伏強度および降伏ひずみ、引張強度といった特性値にはデサリネーションはほとんど影響を与えていない。通電処理の影響が明確に現れるのは、荷重降下を開始してから破断するまでの領域であり、荷重降下開始時のひずみ、荷重降下域の長さおよび絞りといった終局段階の特性値に変化が見られる。前述したように、この領域のひずみは近似計算を行っており、絶対値そのものを定量的に検討することは困難であるが、相対的な比較は可能であると考えられる。荷重降下開始点のひずみについてはB種およびC種の熱処理材の場合、通電処理により若干小さくなっている程度であるが、冷間加工材の場合、通電処理により大幅に減少している。また、荷重降下域の長さは鋼材の種類によらず、通電処理により製造時と比較して短くなっている。

Fig. 6によると、鋼材の種類によらず、通電処理に

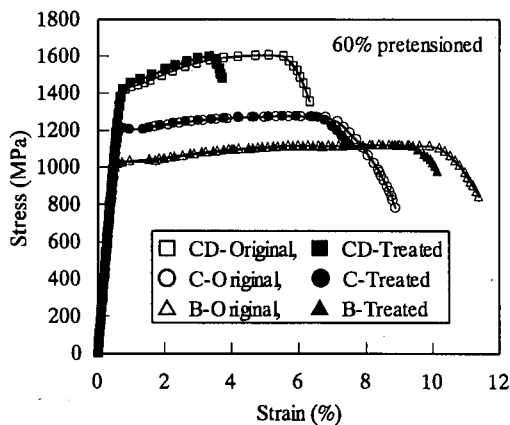


Fig. 5 Influence of treatment on stress-strain relation

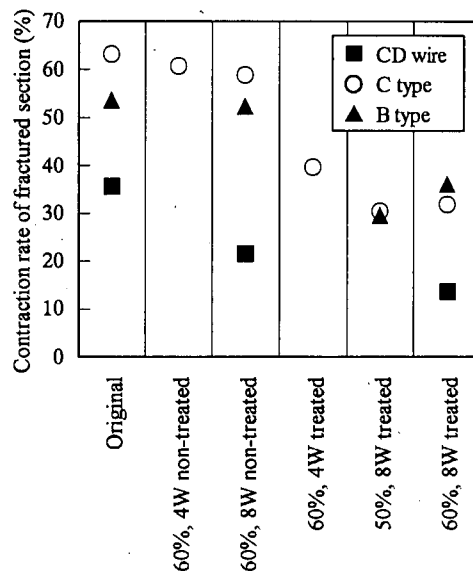


Fig. 6 Influence of treatment on contraction rate of fractured section

より絞りが低下しており、応力-ひずみ関係でも見られた脆性的な破断状況を示している。このような破断挙動の違いはデサリネーションによるPC鋼材の水素脆化に起因していると考えられ、健全な鋼材の場合との差が大きいほど水素脆化程度が厳しく、遅れ破壊の感受性が高い状態にあると考えられる。C種鋼材の場合に4週通電も行っているが、8週通電の場合の方が絞りの低下が大きいことから、4週通電の場合よりも8週通電の場合の方が水素脆化の程度が厳しくなっていると言える。

緊張力の影響に関しては、今回採用した引張強度の50%と60%の間で顕著な差は見られなかった。ただし、鈴木らは、鋼材に塑性ひずみが導入された場合、新しく水素のトラップサイトが生成されること

により、拡散性水素の浸入が増大することを報告している<sup>8)</sup>。今回採用した緊張力は道路橋示方書における、設計荷重作用時のPC鋼材許容引張応力度を参考にして決定しており、PC鋼材の弾性領域での挙動を前提としているが、過大な載荷履歴を持つ構造物に通電処理を行うような場合には遅れ破壊感受性が高くなることも考えられ、注意が必要であろう。

8週間の通電処理を行った直後の絞りと製造時鋼材の絞りの比をとり、各種鋼材の引張強度との関係をFig. 7に示す。なお、処理後7日間の静置を行った場合についても併せて示している。熱処理材と冷間加工材の遅れ破壊感受性を比較すると、一般に以下のような理由で冷間加工材の方が感受性が低いと言われている<sup>9)</sup>。

- ・強加工により導入された高密度転位が水素の有効なトラップサイトとなる。
- ・強加工による繊維組織が破断方向への亀裂進展の抵抗になる。

これに対して、今回の実験結果から、絞りの低下と水素脆化による遅れ破壊感受性を結びつけて考えると、Fig. 7に示したように冷間加工材の方が感受性が高いという結果になっている。この理由として、まず、今回採用した熱処理材が高周波誘導加熱による短時間焼き入れ焼き戻しを行っていることから、通常の焼き戻しマルテンサイト材に比べて以下のような理由<sup>10)</sup>で粒界結合力が強化され、遅れ破壊感受性が低くなっているものと考えられる。

- ・結晶粒が微細である。
- ・粒界にフィルム状のセメンタイトが析出しない。
- ・炭化物の析出量が少なく、析出した炭化物は微細である。

さらに、今回採用した各種鋼材は強度が異なることから、Fig. 7に示したように引張強度で整理すると、引張強度が大きいほど遅れ破壊感受性が高いという、製造過程に依らない統一的な解釈が可能になることが分かる。

高井らは本実験で使用したものと同様のPC鋼棒およびPC鋼線を用いたFIP試験を行い、負荷応力比(負荷応力/引張強度)と破断時間の関係をFig. 8のように示している<sup>9)</sup>。これより、PC鋼線の方が遅れ破壊限度応力比が高いことから、一般に言われているようにPC鋼線の方がPC鋼棒よりも耐遅れ破壊特性に優れているとしている。しかし、Fig. 8を破断時間の観点で見ると、PC鋼棒の方が全体に長いことが分かる。本研究で採用した低ひずみ速度引張試験は、FIP試験のような定荷重試験と異なり、強制的に鋼材を破断させるものであることから、Fig. 8における破断時間の特性を強調した可能性もある。

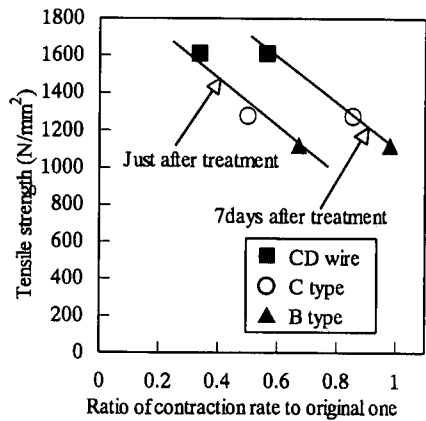


Fig. 7 Relation between contraction rate and tensile strength

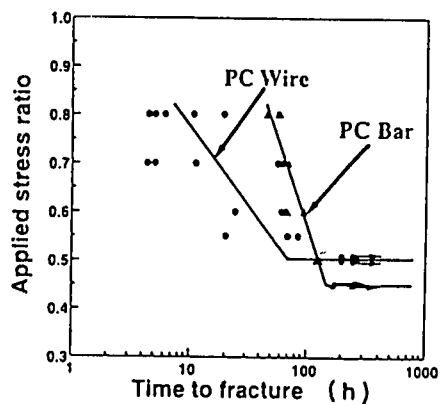


Fig. 8 Relationship between applied stress ratio and time to fracture of PC wire and PC bar in FIP test<sup>9)</sup>

この様なことも考慮して、今後は様々な観点から遅れ破壊特性を適切に判断していく必要がある。

### (3) Cl<sup>-</sup>混入の影響

本研究では、主として、通電処理によりPC鋼材に浸入する水素に起因する水素脆化について検討しているが、鋼材の腐食反応によっても水素の生成および鋼材中への吸蔵が可能であり、高強度鋼の遅れ破壊の原因となりうることが報告されている<sup>11)</sup>。

本実験の場合、デサリネーションを行った供試体からはつりだした鋼材については腐食が見られず、健全な状態であったが、無通電の場合には、鋼材表面が腐食生成物に覆われていた。Fig. 6によると、無通電の供試体は製造時の鋼材と比較して、破断時絞りの若干の低下といった現象が見られる。無緊張の状態では塩化物を混入したコンクリートと無混入のコンクリートに埋め込んだPC鋼棒に関して、8週間無通電静置したときの応力-ひずみ関係をFig. 9に、絞り測定結果をFig. 10に示す。これらの図によると、塩化物無混入の場合には製造時とほぼ同様の挙動を

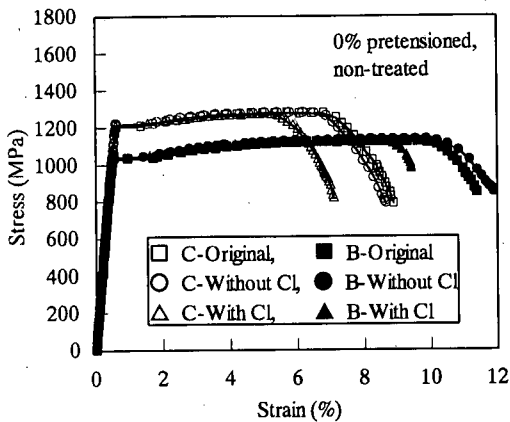


Fig. 9 Influence of  $\text{Cl}^-$  on stress - strain relation

示しているのに対して、塩化物を混入した場合には応力-ひずみ関係における荷重低下開始の早期化や破断時絞りの低下が見られる。

以上より、腐食環境にあるPC鋼材の場合には、たとえ通電処理の影響を受けなくても、腐食反応のカソード反応により生成される水素を吸蔵し、水素脆化による遅れ破壊を生じる可能性がある。ただし、この場合、腐食反応のアノード反応による孔食に起因する応力腐食の影響も考えられ、現時点ではこれらの明確な区別は困難であるものと考えられる。

#### (4) 高電流密度の影響

60%で緊張したC種鋼材を用いた供試体に関して、電流密度の大きさと鋼材破断時の絞りの関係をFig. 11に示す。通電期間は8週間で統一しているため、電流密度が大きいほど通過電荷量は大きく、カソード反応により発生する水素量も電流密度に比例して大きくなるはずである。ところが、Fig. 11によると、電流密度が $5.0 \text{ A/m}^2$ の場合の絞り低下程度と比較して、 $10.0$ および $15.0 \text{ A/m}^2$ の場合の低下程度の方が小さくなっている。これより、このような高電流密度の場合に、PC鋼材の吸蔵水素量が減少し、水素脆化程度が緩和されていることが考えられる。

馬庭らはプレテンション型PC供試体に過防食状態で通電処理を行ったところ、PC鋼材に沿った縦ひび割れがコンクリートに発生したことを報告しており、この原因として、鋼材周辺に発生する水素ガスの膨張圧を挙げている<sup>12)</sup>。

今回の場合、 $10.0$ および $15.0 \text{ A/m}^2$ の通電処理を行った場合でも、コンクリート表面にひび割れは観察されなかったが、PC鋼材近傍のコンクリートには高電流密度の影響で微細ひび割れが発生していたものと考えられる。これにより、カソード反応により発生した水素の鉄筋近傍における濃度が希釈される

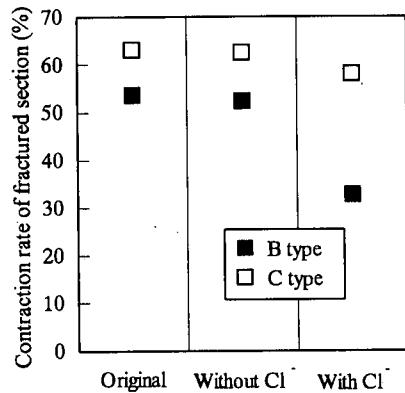


Fig. 10 Influence of  $\text{Cl}^-$  on contraction rate of fractured section (0% pretensioned, non-treated)

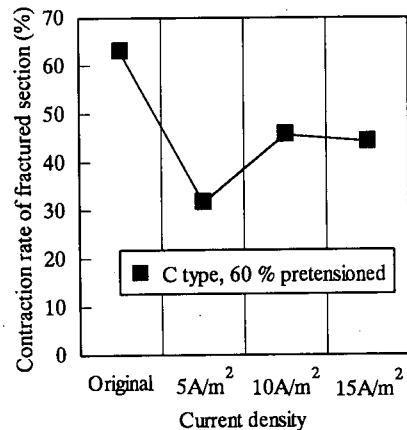


Fig. 11 Influence of current density on contraction rate

とともに、PC鋼材に対する水素ガス圧が低下し、PC鋼材の吸蔵水素量が小さくなったために、PC鋼材の水素脆化程度が緩和されたものと推察される。

#### (5) 処理後の水素脆化程度の緩和

鈴木らは水素チャージ後の鋼材を室温で保持することにより、鋼材中の拡散性水素量が減少することを報告している<sup>9)</sup>。デサリネーションは電気防食と異なり、一時的な通電処理で完了するため、処理終了後の拡散性水素の放出により、水素脆化程度が緩和されることが期待できる。

鋼材緊張力を60%とし、8週間通電処理を行った供試体に関して、応力-ひずみ関係および鋼材破断時の絞りの処理後経時変化をそれぞれFig. 12およびFig. 13に示す。Fig. 12によると、通電処理により短くなっていた荷重降下域の長さが1ヶ月間の静置により、長くなっている。また、冷間加工材の場合には荷重降下開始点のひずみも大きくなり、脆性的な破断挙動が改善されている。また、Fig. 13より鋼材

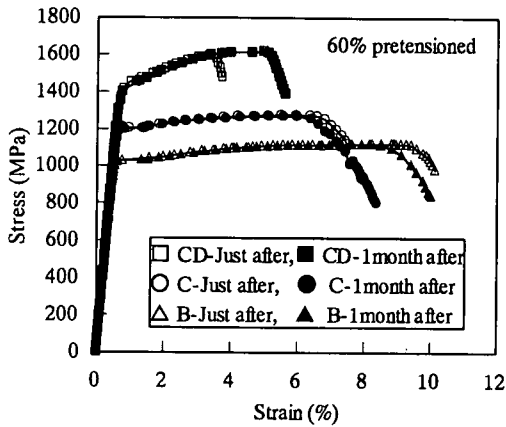


Fig. 12 Influence of keeping period on stress – strain relation

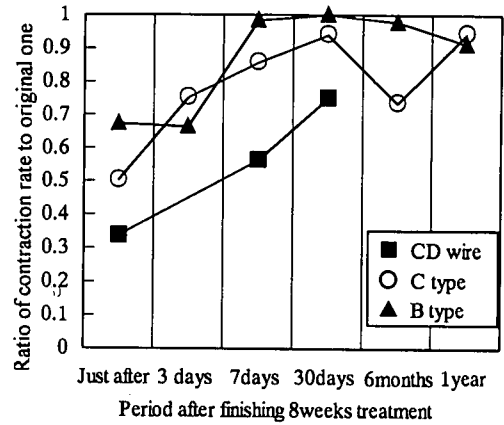


Fig. 13 Influence of keeping period on contraction rate

Table 5 Results of flexural test of PC beams

Type of bar	Prestressing force (%)	Current density ( $A/m^2$ )	Keeping period	Flexural cracking load (kN)	Maximum load (kN)	Average crack spacing (mm)	Number of cracks
C type	60	5	0	51.5	81.1	124	2
				56.2	82.3	150	3
		0	0	52.7	80.1	128	2
	50	5	0	51.7	75.5	125	2
				46.6	74.5	125	3
		0	0	45.3	77.8	190	2
B type	60	5	0	44.1	72.9	165	2
				44.9	76.5	202	2
	0	0	46.6	75.4	173	2	
			45.0	76.3	188	2	
C type	60	5	1month	46.6	74.1	184	2
				40.8	75.0	191	2
		0	0	47.0	78.8	188	2
	50	5	1month	50.8	80.9	165	2
				52.7	78.9	229	2
		0	0	54.6	72.5	202	2
B type	60	5	1month	51.5	77.4	151	3
				44.8	72.4	177	2
	0	0	45.7	68.2	*****	1	
				45.3	66.1	180	2

種類によらず、処理終了後の時間経過に伴い、水素脆化による絞りの低下が緩和されており、熱処理材においては1ヶ月間の静置により、製造時鋼材の絞りとはほぼ同程度まで回復している事が分かる。

ただし、C種鋼材で6ヶ月間静置の場合に、絞りが期待される値より小さくなっている。この供試体は、養生期間中に発生したと考えられる孔食が観察され、破断はこの腐食孔を起点にして進展していた。よって、この現象はデサリネーションによる水素脆化ではなく、腐食孔が応力集中源となることによる、脆性的な割れに起因していると考えられる。

実構造物にデサリネーションを適用する場合、通電処理開始時にPC鋼材が腐食しているケースが予想される。この様な場合、PC鋼材の腐食が進んで

いない場合と比較してより遅れ破壊の感受性が高くなる可能性があり、今後の十分な検討が必要である。

## 6. PCはりの静的曲げ載荷試験

デサリネーション終了後、直ちに載荷準備を行い、処理終了直後の載荷試験は、通電停止日の翌日および翌々日の2日間で完了した。この間、はり全体を冷凍保存することが出来なかったため、PC鋼材に吸蔵されていた水素が若干は放出したものと予想される。さらに、1ヶ月間の気中静置を経て残りののはりの載荷試験を行った。

破壊状況はすべての供試体が上縁コンクリートの圧壊による曲げ圧縮破壊を示した。また、水素脆化



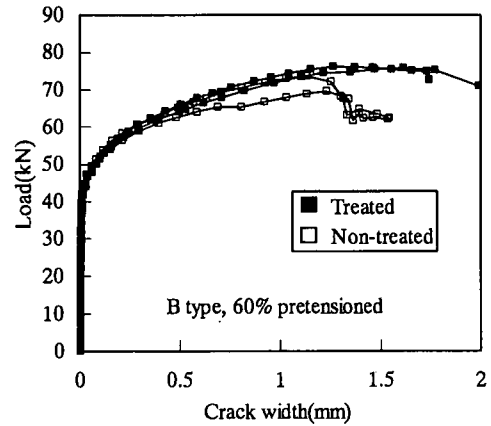
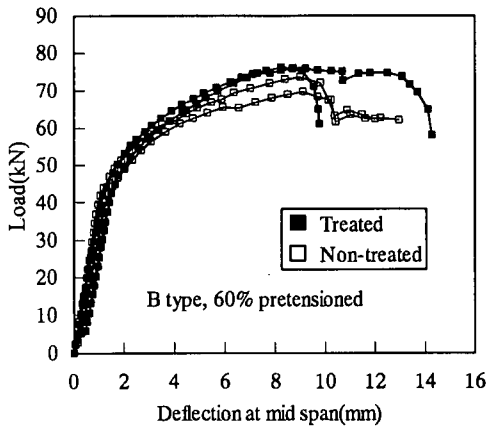
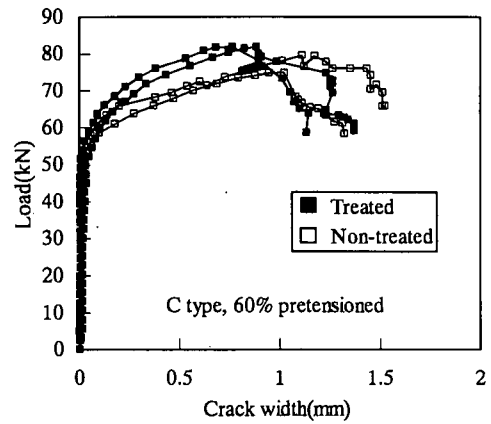
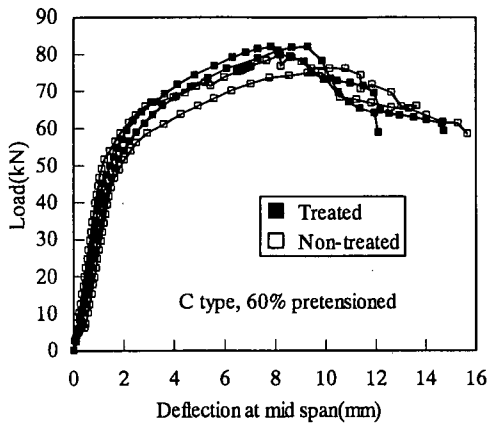


Fig. 14 Load - deflection relation at mid span

Fig. 15 Load - average crack width relation

によるPC鋼材の破断が心配されたが、今回の実験ではそのような現象は見られなかった。

すべての供試体の載荷試験結果をTable 5に示す。

#### (1) 荷重-変形状

緊張力60%の供試体について、処理終了直後の荷重とスパン中央変位の関係をFig. 14に示す。

Table 5およびFig. 14から通電処理による耐力低下や変位の増大といった悪影響は見られず、むしろ曲げ剛性や耐力がやや増大する傾向が見られる。また、曲げひび割れ発生荷重は、通電処理の大きな影響はないものの、総じて処理を行った方が大きくなっている。石井らは鋼材表面積当たり最大で40 mA/m<sup>2</sup>の防食電流を3年間流したPCはりの静的載荷試験を行っている<sup>13)</sup>。この結果、通電処理により変位が小さくなり、ひび割れ発生荷重および破壊荷重には顕著な影響は見られなかったとしており、本研究結果と概ね一致している。

石井らはPC鋼材に沿った軸方向ひび割れが認められなかったことを理由に、通電処理による付着劣化はなかったものと考察している<sup>13)</sup>が、一方、前述

したようにPC鋼材自身の低ひずみ速度引張試験からはPC鋼材の水素脆化による初期剛性変化や強度変化は見られなかったことを考えると、PC鋼材自身の特性変化は小さく、コンクリートとの付着界面状態の変化がPCはり部材としての力学的挙動に影響を与えているのではないかと考えられる。なお、載荷試験後のPC鋼材のはつりだしの結果、無通電供試体中のPC鋼材も腐食程度は軽微であり、腐食による耐力低下は考えにくい状況であった。

#### (2) ひび割れ挙動

Table 5に示した平均ひび割れ間隔およびひび割れ本数から、通電処理によるひび割れ分散性への影響に関して明確な傾向はつかみにくい。通電処理によりひび割れ分散性が明らかに低下する現象は見られず、むしろ若干向上しているように思われる。

Fig. 14に示した供試体について、荷重と平均ひび割れ幅の関係をFig. 15に示す。平均ひび割れ幅は曲げスパンに貼り付けられたπ型ゲージ6個の内、ひび割れを跨いだと判断されるゲージの値を平均したものである。これによると、全体的に通電処理を行

った場合の方が、無通電の場合と比較して、同一荷重に対するひび割れ幅が小さいことがわかる。これより、前述したような通電処理によりたわみが若干小さくなる現象は、曲げひび割れ発生後のひび割れ幅進展速度が小さいことによるものと考えられる。

著者らはデサリネーションをRC供試体に適用した場合に、鉄筋周りのセメントペーストが軟化することにより付着強度が低下することを報告した<sup>14)</sup>。一般に、付着力が低下するとひび割れ分散性が低下することによりひび割れ幅が大きくなるが、今回はRCの場合と比較してコンクリート強度が大きいこともあり、付着強度の低下は小さかったと考えられる。このため、ひび割れ分散性は低下せず、さらに、PC鋼材周りのセメントペーストが軟化することにより、無通電の場合と比較してひび割れの進展が緩やかになったものと推察される。

### (3) PC構造物へのデサリネーション適用可能性

今回のPCはりの静的曲げ載荷試験結果からは、デサリネーションの適用によりPCはり部材の力学的挙動が悪影響を受けるとい現象は見られなかった。ただし、PC鋼材の水素脆化で問題となるのは、主として遅れ破壊現象であり、今回のPCはりによる実験ではこの点に関する検討は十分とは言えないであろう。さらに、実構造物に適用する際には、鋼材腐食の進行したケースも考えられ、今後は、水素脆化割れと応力腐食割れとの相互関係も含めて、より詳細な検討が必要であろう。

## 7. 結 論

以下に本研究の範囲内で得られた結果を要約し、本論文の結論とする。

- (1) 電流密度 $5.0 \text{ A/m}^2$ で8週間の通電処理を行ったPCはり供試体中のPC鋼材自然電位は、処理終了直後において水素発生電位よりも卑な値を示しており、通電期間中のカソード反応による水素発生は確実な状況であった。ただし、処理後5日程度の気中静置により、PC鋼材自然電位は水素発生電位よりも貴な値に移行した。
- (2) 通電処理を行ったPC角柱供試体からはつりだしたPC鋼材に対して、低ひずみ速度引張試験を行った結果、無処理の場合と比較して、弾性挙動や強度特性に変化は見られなかったが、荷重降下域の減少や絞りの低下など、水素に起因すると考えられる破断挙動を示した。
- (3) PC鋼材の緊張力として、鋼材引張強度の50%および60%の2レベルを設定し、緊張力の影響を検討した結果、緊張力の違いが水素脆化挙動に与える

影響は小さかった。

(4) 熱処理材であるPC鋼棒と冷間加工材であるPC鋼線の水素脆化挙動を比較した結果、本実験で用いた鋼材に関しては、冷間加工材の方が厳しい水素脆化挙動を示した。この様な傾向は鋼材の引張強度により、統一的に解釈することができた。

(5) 塩化物を混入した供試体中のPC鋼材は無混入の場合と比較して、脆性的な破断挙動を示した。これより、通電処理による水素脆化を受けなくても、腐食環境にあるPC鋼材は遅れ破壊の危険性があることが確認された。

(6) 通電処理時の電流密度として、 $5.0$ 、 $10.0$ および $15.0 \text{ A/m}^2$ の3レベルを設定し、電流密度の影響を検討した結果、 $5.0 \text{ A/m}^2$ の場合が最も厳しい水素脆化挙動を示した。

(7) 通電処理終了後に供試体の気中静置を行うことにより、供試体中のPC鋼材の水素脆化程度が経時的に緩和される傾向を示した。これにより、通電処理による水素脆化に起因する遅れ破壊の危険性は速やかに減少するが、処理前に発生していた腐食孔を起点とする遅れ破壊の危険性は解消されていないことが確認された。

(8) 通電処理後のPCはり供試体に対する静的曲げ載荷試験の結果、水素脆化に起因するPC鋼材の破断などの脆性的な破壊状況は見られず、無処理の供試体と比較して、耐荷力や変形性能が低下する現象も見られなかった。

(9) 通電処理を行ったPCはり供試体の平均ひび割れ幅は、同一荷重における無処理の供試体の平均ひび割れ幅よりも若干小さい傾向を示した。これにより、はり全体としてのたわみも通電処理により若干抑制される傾向を示した。

謝辞：本研究の遂行に当たってご協力・ご指導いただいた高周波熱錬(株)田中典男氏および徳島大学工学部在学中、実験等にご協力いただいた西尾美典氏、山口洋幸氏、山下哲央氏に深く謝意を表します。

なお、本研究の一部は文部省科学研究費奨励研究(A)課題番号09750544によって行われたものである。

### 参考文献

- 1) 上田隆雄, 小川智広, 宮川豊章, 芦田公伸: デサリネーション適用後の鉄筋腐食挙動について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.1101-1106, 1996.
- 2) 例えば, Benett, J.E. and Schue, T.J., ELTECH Research Corporation: Electrochemical Chloride Removal from Concrete :A SHRP Contract Statues Report, *Corrosion 90*, Paper Number 316, 1990.

- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の電気防食法研究委員会報告書，1994.
- 4) 石井浩司，関 博，福手 勤，井川一弘，杉橋直行：P C鋼材の水素脆化に関する実験的研究，土木学会論文集，No.532/V-30，pp. 131-140，1996.
- 5) 鈴木信一，石井伸幸，宮川敏夫，原田宏明：鋼材の遅れ破壊特性評価試験法，鉄と鋼，Vol. 79，No. 2，pp. 227-232，1993.
- 6) 末広邦夫，山下英治，溝口 茂，谷村昌幸，島田 透：二，三のP C鋼材遅れ破壊試験方法の検討，材料，Vol. 32，No. 353，pp. 94-100，1983.
- 7) 日本コンクリート工学協会：海洋コンクリート構造物の防食指針（案），1990.
- 8) 鈴木信一，石井伸幸，土田 豊：高張力鋼の拡散性水素の挙動に及ぼす塑性ひずみの影響，鉄と鋼，Vol. 80，No. 11，pp. 855-859，1994.
- 9) 高井健一，関 純一，本間芳和：冷間伸線型および熱処理型PC鋼材の遅れ破壊過程における水素吸蔵特性の比較，鉄と鋼，Vol. 81，No. 10，pp. 1025-1030，1995.
- 10) 日本鉄鋼協会：遅れ破壊解明の新展開，1997.
- 11) 池野欣成，西村六郎，山川宏二：大気腐食環境下における炭素鋼の水素吸蔵，第42回腐食防食討論会講演集，pp. 565-568，1995.
- 12) 馬庭秀士，武若耕司：P C構造物における電気防食の適用性に関する実験的検討，土木学会第46回年次学術講演会講演概要集，第5部，pp. 360-361，1991.
- 13) 石井浩司，関 博，福手 勤，井川一弘：電気防食を施したプレテンションP C梁に関する実験的研究，第22回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集，pp. 91-96，1995.
- 14) 上田隆雄，服部篤史，芦田公伸，宮川豊章：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.

(1998. 4. 13 受付)

## INFLUENCE OF DESALINATION ON MECHANICAL BEHAVIOR OF PRESTRESSED CONCRETE MEMBERS

Takao UEDA, Masanobu ASHIDA, Shigeru MIZOGUCHI and Toyoaki MIYAGAWA

Recently, premature deterioration of concrete structures due to chloride induced corrosion of reinforcement has become serious problem. Desalination is aimed to remove chlorides from concrete structures and expected as the fundamental repair method. Desalination has been applied to RC structures positively but the application to PC structures has been considered difficult because of the hydrogen embrittlement problem. This paper describes the influences of desalination on both behavior of prestressing steel bars and PC beams.