

# PC鋼材の水素吸蔵特性に着目した デサリネーション処理方法の検討

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

<sup>1</sup>正会員 電気化学工業(株) 特殊混和材事業部(〒530-0001 大阪市北区梅田1-12-39)

<sup>2</sup>正会員 博士(工学) 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>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)

デサリネーションがコンクリートの塩害に対する有望な補修工法として注目されている。デサリネーションでは、コンクリート中の鋼材がカソードとして作用し、しかも、その電位が水素発生電位より卑となるため、鋼材表面で水素が発生するものと考えられる。そのため、PC鋼材の水素脆化への危惧から、PC構造物への適用が見送られてきた。本研究では、デサリネーションをPC構造物へ適用する場合、PC鋼材が孔食を有していたり、過大な緊張力が作用している場合、および、断続的な通電処理方法を適用した場合において、水素脆化の原因である拡散性水素のPC鋼材への吸蔵量について検討を行った。

*Key Words: desalination, electrochemical technique, hydrogen embrittlement, prestressed concrete, intermittent treatment*

## 1. はじめに

デサリネーションは、塩害により劣化したコンクリート構造物の補修方法として、コンクリート中の塩化物イオン(Cl<sup>-</sup>)を鋼材付近からコンクリート表面外へと電気泳動させ、コンクリート中の含有塩分量を大幅に低減させる電気化学的手法であり、近年注目されている工法である。それゆえ、鉄筋コンクリート構造物への適用は年々増加している。しかし、プレストレストコンクリート(PC)構造物への適用においては、陰極において発生する水素により、PC鋼材の水素脆化などが懸念され、実構造物での適用には未だ至っていない。

筆者ら<sup>1) 2)</sup>は、PC供試体にデサリネーション処理を適用した場合、通電処理によりPC鋼材に水素脆化の原因である拡散性水素が吸蔵され、PC鋼材の破断性状が変化すること、および、通電処理完了後直ちに吸蔵された拡散性水素がPC鋼材から放出され、PC鋼材の破断性状が回復し、力学的にも通電の影響が直ちに解消されること、ならびに、PC部材としたコンクリート梁の曲げ性状について、通電処理は影響を与えないこと、等の実験結果を既に

明らかにした。

本研究では、塩害による腐食等で断面欠損が生じ、PC鋼材に作用している緊張力が過大になった場合にデサリネーションを適用することを想定し、切欠きを有するPC鋼材を用いたデサリネーション処理を行なうと共に、デサリネーション処理として断続的な通電を行なうことにより、吸蔵される拡散性水素量を大幅に抑制できる可能性を明らかにすることを目的とした。

## 2. 実験概要

実験は、切欠きを有するPC鋼材を用いたPC供試体にデサリネーション適用後、PC供試体から取り出したPC鋼材の吸蔵水素量の測定(第1段階)、緊張力が過大な状態でのデサリネーション処理による吸蔵水素量の測定(第2段階)、および、断続的な通電処理による吸蔵水素量の測定(第3段階)、の3つの段階からなる。これらの概要をTable 1に示す。なお、本研究で用いる電流密度は、全てPC鋼材表面積に対する値とした。

Table 1 Outline of test program

[1st stage] Notched PC bar

Prestressing ratio(%)	Current density (A/m <sup>2</sup> )	Period of treatment (week)	Period after treatment	Depth of Notch (mm)	
60%	0.0	0	0	0.5	
				1.0	
				1.5	
				2.0	
	5.0	1	0	0	1.0
					1.0
		4	0 day, 14 days	0	0.5
					1.0
					1.5
					2.0
		8	0 day, 14 days	0	0.0
					0.5
					1.0
					1.5
				2.0	

(Note) Electrolytic solution = Ca(OH)<sub>2</sub> saturated solution

[2nd stage] Highly tensioned PC bar

Prestressing ratio(%)	Kind of electrolytic solution	Period of treatment (week)
60%	NH <sub>4</sub> SCN solution	1
		2
		4
		8
		8
70%	Ca(OH) <sub>2</sub> saturated solution	8
80%		2
88%		3
		4
		8

[3rd stage] Intermittent treatment (2 weeks on and 1 week off of desalination)

Prestressing ratio(%)	60%	
Kind of solution	Ca(OH) <sub>2</sub> saturated solution	
Total treatment period (week)	2	"2"
		"2" + ①
	4	"2" + ① + "2"
		"2" + ① + "2" + ①
	6	"2" + ① + "2" + ① + "2"
		"2" + ① + "2" + ① + "2" + ①
	8	"2" + ① + "2" + ① + "2" + ① + "2"

(Note) "2" : desalination is on for 2 weeks.

① : desalination is off for 1 week.

(1)供試体の作製および通電方法

a)コンクリート配合

実験に用いたコンクリートの示方配合を Table 2 に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを用

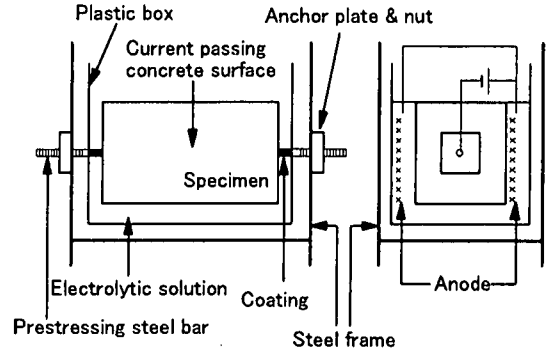


Fig. 1 Specimen and experimental set-up for desalination

Table 2 Mix proportion of concrete

W/C (%)	s/a (%)	Gmax (mm)	Unit mass (kg/m <sup>3</sup> )					
			W	C	S	G	WRA	Cl
39	43	25	169	434	731	982	4.67	8.0

Table 3 Mechanical properties of PC bar

Type of Bar	Yield strength (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
C type (SBPR1080/1230)	1228	1273	8

Table 4 Chemical compositions of PC bar(%)

Type of Bar	C	Si	Mn	P	S	Cu
C type (SBPR1080/1230)	0.35	1.74	0.74	0.016	0.006	0.01

い、練り混ぜ時に混入する塩化物は精製塩(NaCl 純度 99%)を用いて、練り混ぜ水に完全に溶解した。また、φ10cm×20cm の円柱供試体による標準養生の 28 日圧縮強度は平均 45 N/mm<sup>2</sup>であった。

b) PC 供試体

PC 供試体のコンクリート部分は、15×15×40cm の角柱とした。なお、既報<sup>2)</sup>と同様に、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、コンクリートへのプレストレスの解放は行わず、Fig.1 に示す緊張枠(Steel frame)にて、PC 鋼材に導入したプレストレスを支持した。

PC 鋼材の緊張力は、引張強度の 60%を基本としたが、過大な緊張状態(第 2 段階)では 60~88%とした。ただし、鋼材のリラクゼーションを 1.5%とし、割り増して緊張した。

PC 鋼材は、水素感受性の大きい高周波誘導加熱焼入れ焼戻し加工を施した PC 鋼棒 C 種 1 号を用いた。PC 鋼材の機械的性質、および、化学組成を Table 3 と Table 4 に示す。

なお、孔食が発生した PC 鋼材を模擬して、PC

鋼材に切欠きを入れた。孔食は、 $\phi 0.1\text{mm}$  のワイヤーソーにより切欠きを入れ、切欠き部分に1週間塩水噴霧を行ない、腐食を発生させることで模擬した。なお、P C鋼棒の直径が13mmであることを考慮して、切欠き深さを0.5, 1.0, 1.5, 2.0mmとした。

### c) 通電処理および通電完了後の静置方法

P C供試体は、所定の荷重で緊張したP C鋼材の周囲にコンクリートを打設し、4週間の湿空養生を行った後、チタンメッシュ電極の陽極を取り付け、通常用いられている飽和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  水溶液、および、P C鋼材への水素吸蔵量の大きい溶液である5%濃度のチオシアン酸アンモニウム( $\text{NH}_4\text{SCN}$ )水溶液にて、通電処理を実施した (Fig.1)。

通常のデサリネーションの電流密度は、陰極となる鋼材表面積当たりでは  $2.0\sim 3.0 \text{ A/m}^2$  と考えられるので、本実験では、P C鋼材表面積に対して通常の最大値と思われる  $5.0 \text{ A/m}^2$  とした。

通電方法は、P C供試体の両側面からの2面通電とし、通電面以外はエポキシ樹脂で電氣的に絶縁処理を施した。また、通電処理終了後の経時変化を調べるP C供試体は、P C鋼材の緊張力を保持した状態で、 $20^\circ\text{C}-60\%\text{RH}$  の恒温恒湿室に静置した。所定期間の通電処理終了後、および、通電処理後の静置期間経過後に、P C供試体からP C鋼材をはつり出し、吸蔵水素量の分析を実施した。なお、試験を実施するまでの時間に、通電処理によってP C鋼材に吸蔵された水素の大気中への拡散を防止するために、はつり出したP C鋼材は直ちにドライアイス雰囲気中に保管し、冷凍保存した。

### (2) 吸蔵水素量の測定

水素がP C鋼材に与える影響で最も懸念されるのは、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は、P C鋼材中に吸蔵される水素量、特に、400K近傍に放出ピークを有する拡散性水素量に支配される<sup>3)</sup>。吸蔵水素量の測定は、P C供試体からはつり出したP C鋼材に対して、熱分析法により実施した。

分析法の概略を Fig.2 に示す。はつり出したP C鋼材を冷凍状態にて、長さ5 cm に切断して分析用試料とした。この試料を Ar ガス(純度 99.999%) 雰囲気中において、 $100\text{K}/\text{Hr}$  の昇温速度にて加熱し、放出された水素量を5分間隔で、ガスクロマトグラフによって水素ガス濃度を測定した。なお、測定範囲は拡散性水素量が十分に把握できる領域である室温から  $700\text{K}(427^\circ\text{C})$  までとした。なお、水素脆化の直接原因である拡散性水素を  $300\sim 500\text{K}$  の積算量とし、この量が多い程、水素脆性破壊が起りやす

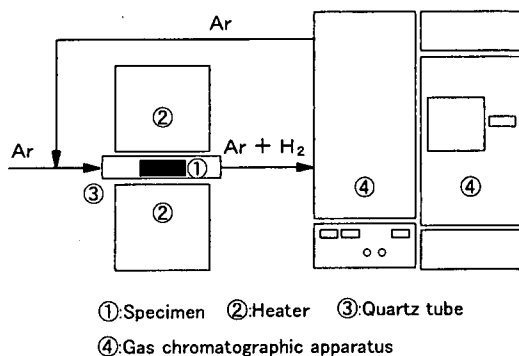


Fig. 2 Schematic diagram of hydrogen thermal analysis

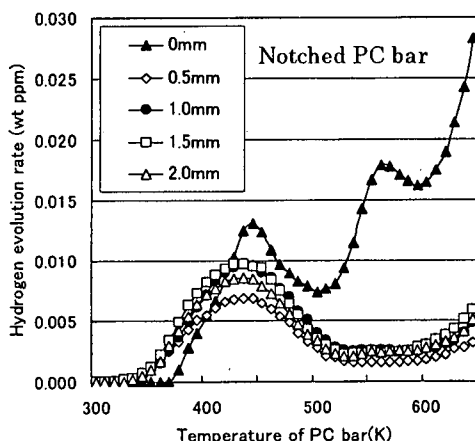


Fig. 3 Hydrogen evolution curve just after desalination

Table 5 The cumulative amount of diffusible hydrogen

Depth of notch(mm)	0	0.5	1.0	1.5	2.0
Diffusible hydrogen (wt ppm)	0.13	0.09	0.12	0.13	0.11
Temperature of peak(K)	440	440	430	430	430

くなる。

### 3. 吸蔵水素量

#### (1) 第1段階

##### a) 切欠き深さと吸蔵水素量

8週間の通電処理を完了した直後のP C鋼材の吸蔵水素量測定結果を Fig.3 に、さらに、水素脆化の直接原因である拡散性水素を  $300\sim 500\text{K}$  の積算量として Table 5 に示す。なお、切欠きの無いP C鋼材のデータを 0mm として併記する。

切欠きの有無で比較すると、Fig.3 に示すように、

切欠きがある場合は拡散性水素のピーク時の頂点がやや小さく、かつ、その放出速度が緩やかである。また、水素放出開始温度が330K付近となって、切欠きの無い場合の375Kより低温側となっている。しかし、Table 5 から分かるように、拡散性水素のピーク時温度や積算吸蔵量には顕著な差は認められない。また、同様に切欠き深さによる拡散性水素の積算吸蔵量についても顕著な差は認められない。すなわち、切欠きを作ることにより、拡散性水素のピーク時温度の頂点は低くなるが、それに相当する分だけ水素放出開始温度が低温側に移行し、全体として拡散性水素の積算量には変化が現れない。

一方、切欠きの無い場合に570K付近に見られる非拡散性水素のピークが切欠きのある場合には、650K以下でほとんど見られない。すなわち、切欠きのある場合、非拡散性水素のピークは650K以上に移行していると思われる。今回実験に用いたPC鋼材は、全断面有効として計算された引張強度の60%のプレストレスが与えられている。しかし、切欠きを有するPC鋼材は切欠き部に応力が集中し、切欠き部周辺の応力が高くなっていると考えられる。一般に、鋭利な亀裂(長さ $2c$ )を含有する弾性体の破壊応力 $\sigma_f$ は、破壊モードIの応力拡大係数 $K_{Ic}$ を用いて、式(1)で表される。

$$\sigma_f = K_{Ic} / \sqrt{\pi c} \quad (1)$$

$K_{Ic}$ は材料に固有の値であるから、亀裂長さ $c$ が大きくなると、破壊応力 $\sigma_f$ が小さくなる。式(1)より、切欠きを有するPC鋼材を全断面有効とした引張強度の60%で緊張すると、破壊応力 $\sigma_f$ は切欠きの無い場合より小さくなるため、結果的に切欠き部分に作用する引張応力度は60%より大きくなる。そのために、亀裂先端部には新たな塑性ひずみが導入され、水素の有効なトラップサイトが新たに形成されることになる。この形成されたトラップサイトに吸蔵された水素が650K以上の高温側に移行したことが、650K以下で非拡散性水素のピークが検出されなかった理由と考えられる。

#### b) 通電時間と拡散性水素量

切欠き深さ1.0mmのPC鋼材を用いて、電流密度を $5A/m^2$ 、通電期間を1週、2週、4週、6週、8週と変化させ、通電処理直後の吸蔵水素量の分析結果をFig.4に示す。また、通電期間4週、および、8週の処理を実施した後、静置期間2週間後の吸蔵水素量の分析結果をFig.5に示す。

Fig.4によると、通電処理による吸蔵水素は、4

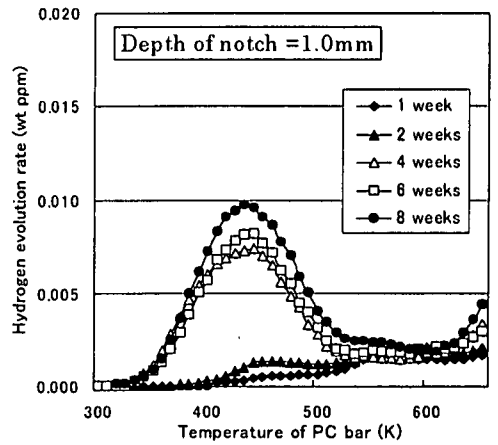


Fig.4 Hydrogen evolution curve due to treatment time

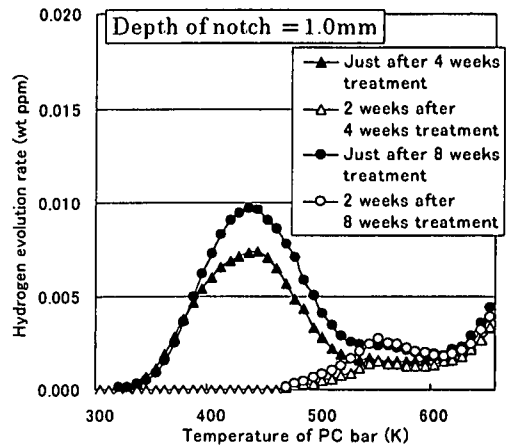


Fig.5 Hydrogen evolution curve after desalination

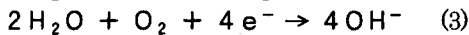
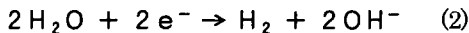
週間以上の通電処理では顕著に認められるが、2週間までの通電処理の場合には300~500Kで検出される拡散性水素はほとんど見られない。すなわち、2週間以内の通電処理、もしくは、これに相当する電気量以内であれば、水素脆化の程度は非常に小さいことを示唆している。一方、通電処理が4週間以上の場合、拡散性水素は通電処理時間に応じて増加する傾向が見られる。

Fig.5からは、4週通電でも、8週通電でも、通電処理により吸蔵された拡散性水素が処理後の静置期間により、速やかに消滅していることが示されており、筆者らが既に明らかにした切欠きの無いPC鋼材の場合<sup>2)</sup>と同じ挙動を示している。

すなわち、Fig.4とFig.5は、腐食による孔食を有するPC鋼材であっても、2週間程度の通電処理期間ならば、水素脆化の危険性が少ないこと、および、4週間以上の通電処理でも、通電処理完了後速やかに水素脆化の危険性が解消することを示唆している。

Fig.6は、切欠きの無いP C鋼材(0mm と表示)と切欠きを有するP C鋼材における 300~500K で検出された拡散性水素の積算値と通電処理期間との関係を示し、平均値を実線で表示する。また、通電期間4週間と8週間の処理完了後2週間静置の時点での拡散性水素量の積算値も併記した。

Fig.6 から、P C鋼材に吸蔵された拡散性水素は通電時間が増えるに従って、その積算量も増加している。しかし、通電期間2週間までは、鋼材に吸蔵される拡散性水素量は少なく、2週間から4週間にかけて急激に吸蔵量が増加し、4週間以降も吸蔵量は緩やかに増加する傾向が見受けられる。これは、一般に、通電処理によるカソード反応は式(2)に従い、水素を発生するはずであるが、通電処理開始直後では、デサリネーション処理に用いる電解質溶液中の溶存酸素が充分に存在しているため、式(3)の反応が卓越したものと考えられる。そして、電解質溶液中の溶存酸素量が減少し、式(2)が卓越反応となって水素ガスが発生し、鋼材に水素が吸蔵される。しかし、ある程度の水素量が鋼材に吸蔵されると、拡散で鋼材から抜け出す水素量が多くなり、吸蔵で増加する量と拡散で消失する量との均衡が成立するようになる。その結果、鋼材に吸蔵される水素の増加速度が低下したものと考えられる。



## (2)第2段階

### a)過大な緊張力の状態

切欠きのないP C鋼材を用いて、緊張力を降伏点強度付近となる88%とし、電流密度5A/m<sup>2</sup>、電解質溶液を飽和Ca(OH)<sub>2</sub>水溶液にて、通電期間2週、3週、4週、8週の通電処理終了直後の吸蔵水素量測定結果をFig.7に示す。なお、比較のために、緊張力60%のデータもFig.7に併記する。

緊張力88%と緊張力60%とを比較すると、Fig.7に示すように、緊張力88%はいずれも拡散性水素のピーク時頂点の幅が広く、かつ、その曲線の勾配が緩やかである。この形状はFig.3で示される切欠きを有するP C鋼材の場合と酷似しているが、全般に300~500K で検出される拡散性水素量は増加している。また、水素放出開始温度が350K 付近となり、緊張力60%の375K より低温側となっている。

一方、緊張力60%の場合に570K 付近に見られる非拡散性水素のピークが緊張力88%の場合には、650K 以下でほとんど見られないのも、切欠きを有するP C鋼材の場合と同様である。すなわち、緊張

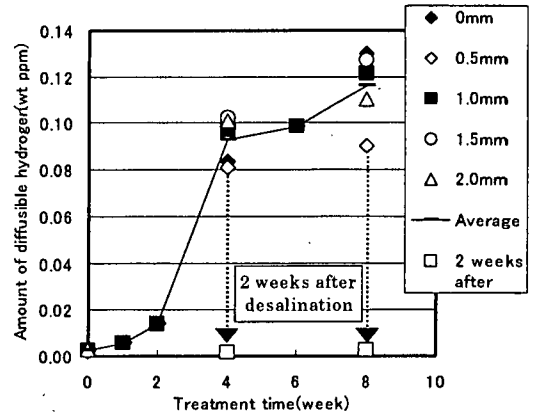


Fig.6 Relation between diffusible hydrogen and treatment time

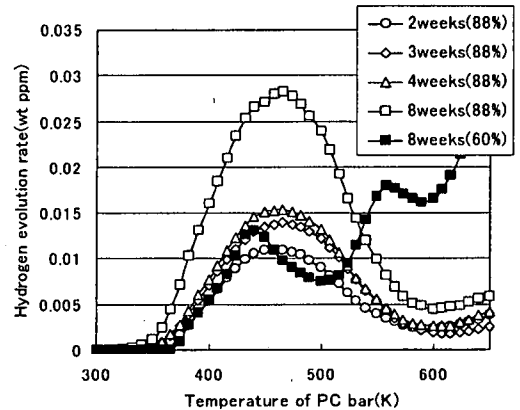


Fig.7 Hydrogen evolution curve of high tensioned PC bar

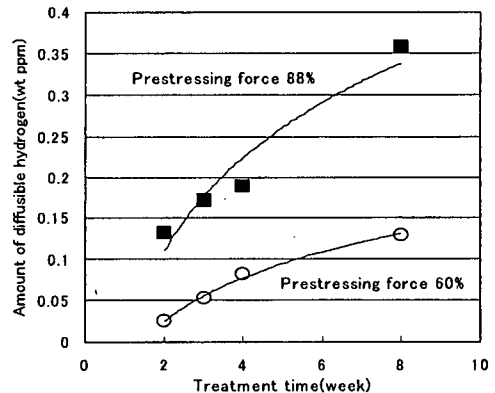


Fig.8 Relation between diffusible hydrogen and treatment time

力88%により導入された塑性ひずみが水素の有効なトラップサイトとなり、このトラップサイトに吸蔵された水素が650K 以上の高温側に移行したためと推測される。

Fig.8には、緊張力88%と緊張力60%のP C鋼材に吸蔵された300~500K で検出される拡散性水素

の積算量と通電期間の関係を示す。

通電処理期間 2 週, 3 週, 4 週, 8 週のいずれにおいても, 吸蔵された拡散性水素量は緊張力 88%の方が緊張力 60%よりも大きい。緊張力 60%の場合, 8 週通電で吸蔵される拡散性水素量が, 緊張力 88%時では 2 週間の通電処理で吸蔵されている。

すなわち, P C 鋼材に吸蔵される拡散性水素量は通電期間だけでなく, P C 鋼材に作用している応力度, 特に, 切欠き部先端の応力度に影響されることを示している。従って, 腐食により大きく断面を欠損し, 局部的に応力が大きく集中している P C 鋼材の場合, 同じ通電期間であっても, 吸蔵される拡散性水素量が腐食の無い P C 鋼材よりも増加することになる。

なお, 飽和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  水溶液を用いる通常のデサリネーション処理では, 緊張力 88%, 電流密度  $5\text{A}/\text{m}^2$  で 8 週間の通電処理を行って, P C 鋼材に拡散性水素を吸蔵しても破断することはなかったことを考えると, 通常用いられているデサリネーションの処理条件では, P C 鋼材が水素脆化して破断するのに必要な量である限界拡散性水素量には到達していないことになる。

#### b) $\text{NH}_4\text{SCN}$ 水溶液

緊張力 60%, 電流密度  $5\text{A}/\text{m}^2$ ,  $\text{NH}_4\text{SCN}$  水溶液にて, 通電期間を 1 週, 2 週, 4 週, 8 週とした時の通電終了直後の吸蔵水素量測定結果を Fig. 9 に示す。なお, 比較のために, 通常のデサリネーションである飽和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  水溶液 8 週間処理のデータも Fig. 9 に併記する。また, 電解質溶液として  $\text{NH}_4\text{SCN}$  水溶液を用いて, 緊張力を過大な値である 70%, 80%, 88% とし, 通電期間 8 週間の通電終了直後の吸蔵水素量測定結果を Fig. 10 に示す。

Fig. 9 は,  $\text{NH}_4\text{SCN}$  水溶液を用いた場合, P C 鋼材に吸蔵される水素のほとんどが 500K 以下にピークを持つ拡散性水素であることを示している。また, 拡散性水素のピーク高さは通電処理 2 週間で, 通常のデサリネーション処理の 8 週間を越える値であり,  $\text{NH}_4\text{SCN}$  水溶液の 4 週通電, 8 週通電では, さらに, ピーク高さが大きくなっている。一方, 非拡散性水素のピークは 650K 以下では検出されず, より高温側に移行していると推察される。

Fig. 10 は,  $\text{NH}_4\text{SCN}$  水溶液を用いた場合でも, 飽和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  水溶液を用いた場合と同様に, 拡散性水素は P C 鋼材の緊張力の影響を受けていることを示している。また, Table 6 に, Fig. 9 と Fig. 10 において拡散性水素を 300~500K の積算値として求めた値を示す。

緊張力 60% の場合, Table 5 の切欠き深さ 0mm

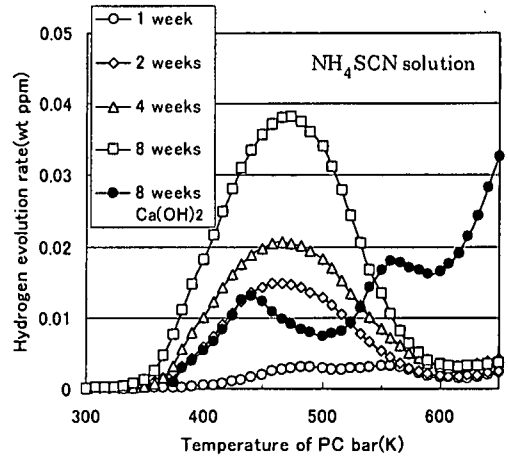


Fig. 9 Hydrogen evolution curve ( $\text{NH}_4\text{SCN}$  solution)

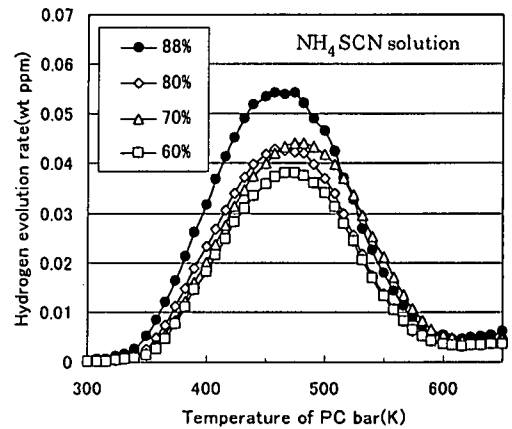


Fig. 10 Hydrogen evolution curve of high tensioned PC bar

Table 6 The cumulative amount of diffusible hydrogen

Prestressing ratio (%)	60				70	80	88
	1	2	4	8	8		
Diffusible hydrogen (wt ppm)	0.03	0.17	0.25	0.46	0.53	0.54	0.72

で示されている通常のデサリネーション処理 8 週間で吸蔵される拡散性水素の積算量が  $0.13(\text{wt ppm})$  に対して, Table 6 の  $\text{NH}_4\text{SCN}$  水溶液では 2 週で  $0.17(\text{wt ppm})$ , 4 週で  $0.25(\text{wt ppm})$ , 8 週で  $0.46(\text{wt ppm})$  となり, 通常処理の値を大きく上回っている。

また, 緊張力が過大な場合, 緊張力 60% よりも, 70%, 80%, 88% と緊張力が大きくなるに伴って, 拡散性水素の積算量も増えている。なお, 緊張力 88% の試験体は, 通電開始後 8 週間の時点において, 水素脆化によると思われる破断を引き起こした。

### c) 限界拡散性水素量

P C 鋼材に対する電流密度を  $5A/m^2$  とし、通電期間を最大 8 週間とした場合、通常のデサリネーション処理では P C 鋼材の緊張力が 88% であっても、P C 鋼材は水素脆化による破断は生じなかった。

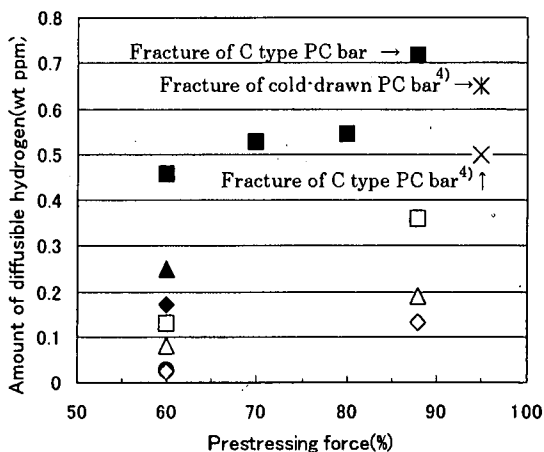
また、 $NH_4SCN$  水溶液を用いても、緊張力が 80% 以下では 8 週でも破断しないが、緊張力が 88% で、かつ、通電時間が 8 週間の場合のみ破断した。すなわち、同じ水溶液を用いているので、通電処理期間が同じであれば、水素の発生量も同じであるにも関わらず、80% 以下と 88% とで P C 鋼材破断の有無が生じている。従って、拡散性水素量に関して、本実験では、P C 鋼材に作用している応力状態によって、拡散性水素の吸蔵量が異なり、その結果、P C 鋼材が破断するのに必要な拡散性水素の下限值(以下、「限界拡散性水素量」という)も異なる可能性があること、および、緊張力 88% の限界拡散性水素量の値が C 種 1 号では最大 0.72(wt ppm) であることが明らかになった。また、緊張力 88% 未満の限界拡散性水素量は、0.72(wt ppm) よりもっと大きな値になると予測される。

山崎ら<sup>4)</sup>は、水素チャージ後に Cd をメッキする試験方法<sup>4)</sup>にて、「 $0.95 \times$ 引張強度」の緊張力で試験した結果、P C 鋼材が遅れ破壊する拡散性水素量の下限値は、P C 鋼棒 C 種相当で 0.50(wt ppm)、P C 鋼線の冷間加工材相当で 0.65(wt ppm) であると報告している。これらの値と比較して、 $NH_4SCN$  水溶液を用いて、緊張力 88%、通電期間 8 週で C 種 1 号が破断した時点の吸蔵拡散性水素量はやや大きな値であるが、緊張力が山崎らの実験よりも小さいことを考慮すると、ほぼ妥当な値と思われる。

Fig. 11 は、第 1 段階と第 2 段階の試験結果から得られた P C 鋼材に作用している緊張力と吸蔵された拡散性水素積算量との関係を示す。なお、山崎らの実験結果<sup>4)</sup>である「 $0.95 \times$ 引張強度」の条件下での C 種 0.50(wt ppm)、冷間加工材 0.65(wt ppm) も併記する。

一般に、P C 鋼材に作用している引張応力が大きければ大きいほど、より少ない拡散性水素量で水素脆化による破断に至ると考えられている<sup>5), 6)</sup>。本実験では、Fig. 10 における緊張力 88% において、300~500 K で検出される拡散性水素の積算値が 0.72(wt ppm) にて破断を引き起こし、山崎ら<sup>4)</sup>のデータでは緊張力 95% において 0.50(wt ppm) と 0.65(wt ppm) で破断している。従って、緊張力が 88% 未満の場合、水素脆化により破断に至る拡散性水素量、すなわち、限界拡散性水素量はこれらの値より大きいと考えられる。また、逆に緊張力が 95%

○● = 1 week treatment    ◇◆ = 2 weeks treatment  
△▲ = 4 weeks treatment    □■ = 8 weeks treatment



○◇△□ = Results of  $Ca(OH)_2$  solution  
●◆▲■ = Results of  $NH_4SCN$  solution  
Fig. 11 Relation between prestressing force and diffusible hydrogen

を越え、限りなく 100% に近い場合、限界拡散性水素量はこれらの値より小さいことになる。

一方、現実の P C 構造物では、コンクリートのクリープや乾燥収縮等により、P C 鋼材に作用している緊張力は 50~60% 程度と考えられる。故に、本実験の緊張力 88% で求めた 0.72(wt ppm) や山崎ら<sup>4)</sup> の 0.50(wt ppm)、0.65(wt ppm) を限界拡散性水素量の値と見なしても、安全側の判断となる。

### (3) 第 3 段階

切欠きのない P C 鋼材を用いて、緊張力 60%、電流密度  $5A/m^2$ 、飽和  $Ca(OH)_2$  の条件にて、「2 週間通電処理した後、1 週間通電休止」を 1 サイクルとした断続的な通電処理として、通算 2 週通電(1 サイクル)、通算 4 週通電(2 サイクル)、通算 6 週通電(3 サイクル)、通算 8 週通電(4 サイクル)を行った。

各サイクルの通電処理直後の吸蔵水素量分析結果を Fig. 12 に、各サイクルの 1 週間通電休止直後の吸蔵水素量分析結果を Fig. 13 に示す。また、各サイクルにおける拡散性水素の 300~500K の積算量と処理期間との関係を Fig. 14 に示す。なお、Fig. 12 と Fig. 14 には、連続通電として通常処理条件の結果も併記する。

Fig. 12 からは、8 週連続通電と比較して、断続通電とした場合、1 サイクル、2 サイクル、3 サイクル、4 サイクルの通電直後のいずれにおいても、P C 鋼材に吸蔵された水素量が大幅に低減していることが

示されている。特に、通算の通電期間が8週間となる4サイクルにおいても、8週連続通電よりも吸蔵された水素量が大幅に低減している。

Fig.13は、1サイクル、2サイクル、3サイクルにおける通電終了1週間後のP C鋼材の吸蔵水素量を示しており、いずれも各サイクルの通電直後よりも吸蔵水素量が減少している。すなわち、断続的な通電を行った場合でも、筆者らの既報<sup>2)</sup>、本論文のFig.5やFig.6に示されている様に、通電処理によりP C鋼材に吸蔵される拡散性水素は、腐食による孔食の有無に関わらず、通電処理終了後、極めて速やかに消滅する。

Fig.14は、通常の処理条件である連続通電の場合の積算拡散性水素量を■印で、断続通電の場合を●印で示している。連続通電では通電時間の経過に伴って、積算拡散性水素量が8週で0.13(wt ppm)にまで増加しているが、断続通電では積算拡散性水素量は0.02~0.06(wt ppm)の範囲を上下している。通電直後の値が上側に、1週間通電休止後の値が下側となっている。なお、サイクル数が増えるにつれて、通電直後の拡散性水素量の値が緩やかに増加する傾向が見受けられる。P C鋼材への拡散性水素の吸蔵と放出を繰り返した場合、繰り返し数が増えるにつれて、鋼材中のトラップサイトへの水素吸蔵が容易になるためと推測される。

通常、デサリネーション処理は、通電処理期間を設定すれば、その期間連続して通電処理を行っている。この理由は、連続して通電処理を行うことが最も短期間に処理が完了し、効率的であるからによる。しかし、Fig.12~Fig.14からは、断続的な通電処理方法は、P C鋼材に吸蔵される拡散性水素量を最小限に抑制し、水素脆化に対してより安全な処理方法であると言える。

#### 4. デサリネーション適用の可能性

デサリネーション処理をP C構造物に適用することを目的として吸蔵水素量に着目して実施した以上の検討の結果、P C鋼材の水素吸蔵について、4つの特性が明らかになった。すなわち、①デサリネーション処理により、P C鋼材に水素が吸蔵されること、②吸蔵された水素のうち、拡散性水素はデサリネーション処理終了後、短期間の内にP C鋼材から消滅すること、および、③緊張力88~95%における限界拡散性水素量が0.50~0.72(wt ppm)であること、さらに、④通電処理の方法を断続的に行なうことにより、P C鋼材に吸蔵される拡散性水素量を③の限界拡散性水素量以下に制御しながら、デサリ

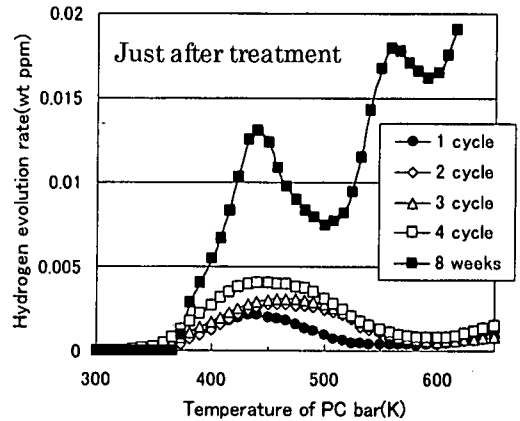


Fig.12 Hydrogen evolution curve just after desalination

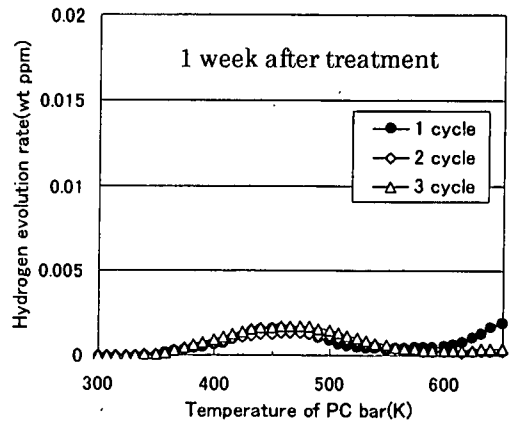


Fig.13 Hydrogen evolution curve at 1 week after desalination

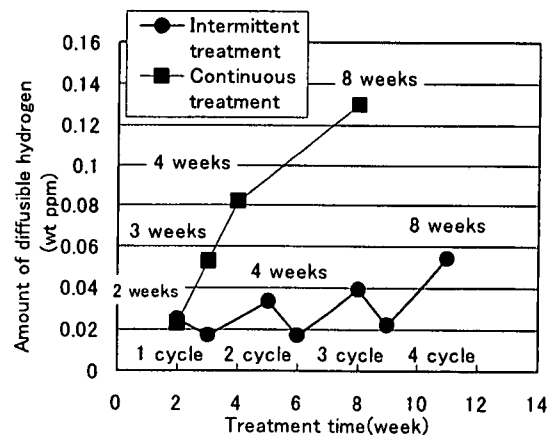


Fig.14 Relation between treatment method and diffusible hydrogen

ネーション処理が適用できることである。また、既往の研究では、デサリネーション処理を断続的に実



施しても、通電期間の積算値が等しければ、連続的なデサリネーション処理と脱塩効果は同等であると報告<sup>7)</sup>されていることより、断続的な手法の適用は可能である。

一般に、デサリネーション処理の適用を検討するP C構造物は、塩害劣化を受けており、P C鋼材などが腐食している場合があり、デサリネーション処理を適用する場合、以下のことが考えられる。

#### 1) P C鋼材が腐食していない場合や腐食が軽微の場合

P C鋼材に作用している緊張力は50~60%程度であるので、筆者らの既報<sup>2)</sup>から、8週間以内のデサリネーションは可能である。また、その間に吸蔵される拡散性水素量も0.13(wt ppm)程度であり、緊張力88~95%の限界拡散性水素量の値を適用しても、その限界値を大きく下回っている。

#### 2) P C鋼材に腐食が生じていて、孔食がある場合

第1段階の結果から8週間以内のデサリネーションは可能と思われるが、さらに、安全性を高めるために、通算処理期間を最大8週間とした断続的な処理が考えられる。

しかし、現実のP C構造物の場合、コンクリート中に埋設されているP C鋼材の腐食の有無や腐食の程度を非破壊検査等で調査し、1)の状態か、2)の状態かを判定することは、現時点では容易な作業ではない。従って、8週間の連続通電のデサリネーション処理が可能であったとしても、現実的には、通算処理8週間とした断続的な通電処理にて、吸蔵水素量を制御しながらデサリネーション処理を行うのが賢明な方法と考える。

#### 3) P C鋼材に激しい腐食が生じていて、P C鋼材が一部破断している、あるいは、破断に近い状態である場合

このような場合は事前の調査で劣化度合いが激しいことが判定できるので、デサリネーション処理を行う前に、構造的な検討を行い、耐荷力の改善等の補強が必要であると思われる。すなわち、構造的な補強等により、P C鋼材に作用している緊張力を低減し、構造物としての耐荷力を回復させることを前提として、デサリネーション処理の適用を検討すべきである。なお、通電処理の方法は、安全性を考慮して断続的な方法が望ましい。

## 5. まとめ

デサリネーション処理によりP C鋼材に吸蔵される水素量、特に、水素脆化に直接影響を及ぼす拡散性水素量の挙動に着目して実施した本研究において、得られた結果を以下にまとめる。

- (1) P C鋼材に孔食等の切欠きがある場合、電流密度5A/m<sup>2</sup>の通電処理により、切欠きの無いP C鋼材の場合と同様に、拡散性水素がP C鋼材中に吸蔵される。
- (2) 切欠きを有するP C鋼材に吸蔵された拡散性水素の放出開始温度は、切欠きの無い場合より低温側に移行するが、拡散性水素の積算吸蔵量は、切欠きの有無に関わり無く、ほぼ同じである。
- (3) 通電処理期間が2週間程度であれば、切欠きを有するP C鋼材でも、吸蔵される拡散性水素は僅かであり、水素脆化の危険性が少ない。また、4週間以上の通電処理でも、通電処理完了後に拡散性水素は速やかにP C鋼材から消滅する。
- (4) P C鋼材に吸蔵される拡散性水素量は、通電期間だけでなく、P C鋼材に作用している応力度にも影響される。従って、腐食等により部分的に断面欠損している場合、同じ通電期間であっても、拡散性水素の吸蔵量が増加する場合がある。
- (5) P C鋼材が破断するのに必要な拡散性水素量の下限値である限界拡散性水素量は、緊張力88%のC種鋼材の場合、0.72(wt ppm)であった。また、緊張力が88%未満の場合、限界拡散性水素量はこの値より大きくなり、逆に、緊張力が88%を超える場合、限界拡散性水素量が小さくなる可能性がある。
- (6) 「2週間通電処理した後、1週間通電休止」する断続的な通電処理を行なった場合、通算通電期間が8週間以内では、P C鋼材に吸蔵される拡散性水素量は0.02~0.06(wt ppm)であり、連続的に8週間通電した場合の0.13(wt ppm)より、P C鋼材に吸蔵された拡散性水素量は大幅に低減した。
- (7) 断続的な通電処理方法は、P C鋼材に吸蔵される拡散性水素量を制御しながら、デサリネーション処理を行なうことが可能であり、P C鋼材に吸蔵される水素量をより低減することができる。従って、デサリネーション処理を塩害劣化が懸念されるP C構造物に対して適用する場合、断続的な通電処理は、通常の処理より安全性の高い補修工法であると判断される。

謝辞：本研究を実施するに当たって、多大なる協力を頂きました高周波熱錬(株)田中典男氏に深く感謝の

意を表します。

#### 参考文献

- 1) 上田隆雄, 芦田公伸, 溝口 茂, 宮川豊章: 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, 土木学会論文集, No. 613/V-42, pp. 189-199, 1999. 2.
- 2) 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P C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.
- 3) 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.
- 4) 山崎真吾, 樽井敏三, 高橋稔彦, 児玉順一: P C鋼棒の耐遅れ破壊特性の定量的評価方法の検討-P C鋼棒の耐遅れ破壊特性向上技術の開発(1)-, 材料とプロセス, 日本鉄鋼協会, Vol. 9, pp. 1492, 1996.
- 5) 山崎真吾, 高橋稔彦, 石川房男: 耐遅れ破壊特性の定量的評価方法の検討, 材料とプロセス, 日本鉄鋼協会, Vol. 7, pp. 1594-1597, 1994.
- 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挙動と遅れ破壊, 鉄と鋼, Vol. 82, No. 2, pp. 72-77, 1996.
- 7) 久田 真: 通電によるコンクリート中のイオンの移動に関する研究, 東京工業大学学位論文, 1997.
- 8) 寺岡正人: 断続的な通電による脱塩効果の変化に関する研究, 徳島大学工学部建設工学科卒業論文, 1998.

(1999. 6. 23 受付)

## BASIC STUDY OF DESALINATION ON HYDROGEN STORED IN PRESTRESSING STEEL BARS

Masanobu ASHIDA, Takao UEDA, Shigeru MIZOGUCHI and Toyoaki MIYAGAWA

Nowadays, premature deterioration of concrete caused by chloride attack has become a severe problem. Desalination, which is an electrochemical treatment of chloride extraction from concrete, has been developed as an essential repair method. Steel bar embedded concrete acts as a cathodic electrode through desalination process and its potential is less than hydrogen occurring potential by electrolysis. Therefore, considering hydrogen embrittlement of prestressing steel bars, desalination has not been applied on prestressed concrete yet. In this study, diffusible hydrogen stored in notched and highly tensioned prestressing steel bars was investigated while desalination was continuously and intermittently applied on prestressed concrete.