

論文 切欠きを有する PC 鋼材の通電処理による水素脆化挙動

上田隆雄^{*1}・溝口 茂^{*2}・芦田公伸^{*3}・宮川豊章^{*4}

要旨：電気化学的脱塩手法であるデサリネーションの PC 構造物への適用性を評価するために、腐食により断面欠損を生じた PC 鋼材を想定して、切欠きを有する PC 鋼材の通電処理による水素脆化挙動を検討した。実験としては、あらかじめ塩化物を混入したプレテンション PC 供試体にデサリネーションを適用した後に、供試体より PC 鋼材をはつりだし、吸蔵水素量測定および低ひずみ速度引張試験を行った。この結果、切欠きの有無により拡散性水素の吸蔵量に大きな変化はなく、低ひずみ速度引張試験における PC 鋼材破断状況は切欠きの有無および切欠き深さによる影響が通電処理による影響よりも大きかった。

キーワード：デサリネーション, PC 構造物, 水素脆化, 孔食, 切欠き

1. はじめに

デサリネーションはコンクリート中の塩化物イオン (Cl^-) の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良いという特色を有している。コンクリート中の鉄筋を陰極とし、コンクリート表面に設置した陽極との間に直流電流が流されることにより、 Cl^- や OH^- などの陰イオンは陽極側に移動し、 Na^+ や K^+ などの陽イオンは陰極側に移動する。

デサリネーションはこれまで塩害により劣化した RC 構造物への適用が検討されており、PC 構造物への適用は見送られてきた。これは、デサリネーションを PC 部材に適用する際の最大の問題点として、PC 鋼材の水素脆化の可能性があるためである。

著者らがこれまで行ってきた検討の結果、デサリネーションレベルの通電処理を行うことにより、カソードである PC 鋼材は水素を吸蔵し、水素脆化による遅れ破壊の危険性があることが確認された¹⁾。ただし、処理終了後 1 ヶ月程度で

PC 鋼材に吸蔵された拡散性水素が逸散消失し、脆化による PC 鋼材の物性変化は緩和されることを指摘した。ただし、実構造物の補修を想定した場合、PC 鋼材に孔食を伴う腐食が発生していることも考えられ、この様な場合には孔食部分に応力が集中し、応力腐食と水素脆化の複合した割れが生じる可能性がある。そこで本研究では、あらかじめ腐食による食孔を模した切欠きを入れた PC 鋼材を用いて、通電処理による水素脆化の影響を検討した。

2. 実験概要

実験に用いた供試体は、コンクリート部分が $15 \times 15 \times 40$ cm の角柱供試体とし、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。供試体の概略図を図-1 に示す。また、本実験で用いたコンクリート配合および PC 鋼棒の諸性質をそれぞれ表-1 および表-2 に示す。

*1 徳島大学助手 工学部建設工学科 工修 (正会員)

*2 高周波熱錬(株)製品事業部営業部 (正会員)

*3 電気化学工業(株)特殊混和材事業部 (正会員)

*4 京都大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 工博 (正会員)

表-1 コンクリート配合

水セメント比 W/C %	細骨材率 s/a %	粗骨材の 最大寸法 mm	単位量 (kg/m ³)					
			セメント	水	細骨材	粗骨材	A E 剤	Cl
39	43	25	434	169	731	982	4.67	8

表-2 PC鋼棒の性質

	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び (%)	化学成分(%)		
				P	S	Cu
C種1号 SBPR 1080/1230	1228	1273	8	0.020	0.007	0.01

表-3 実験要因一覧

鋼材種類、緊張レベル	C種1号、60%														
電流密度 (A/m ²)	0.0				5.0										
処理期間 (週)	0				1	2	4				6	8			
切欠き深さ (mm)	0.5	1.0	1.5	2.0	1.0	1.0	0.5	1.0	1.5	2.0	1.0	0.5	1.0	1.5	2.0

コンクリート中のCl⁻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/m³を選んだ。PC鋼材は高周波誘導加熱焼入れ焼戻しを施したPC鋼棒とし、φ13 mmのC種1号を用いた。本実験で用いたPC鋼棒は、腐食孔を想定して、φ0.1 mmのワイヤーソーによる切欠きをPC鋼棒の中央部分に1カ所、あらかじめ導入した上で、切欠き部分に1週間の塩水噴霧を行うことにより、腐食を発生させた。切欠き深さは0.5、1.0、1.5および2.0 mmの4レベルを設定した。鋼棒の緊張力としては、引張強度の60%を採用した。コンクリートを打設後、4週間の湿布養生を行った後に陽極を設置し、通電処理を開始した(図-1参照)。電流密度は鉄筋表面に対して5.0 A/m²とし、通電期間は8週間を最大とする5レベルを選んだ。通電は両側面からの2面通電とし、電流を流さない面はエポキシ樹脂を塗り、絶縁した。電解液として飽和Ca(OH)₂を用い、無処理の供試体も通電期間中は電解液中に保存した。実験要因の一覧を表-3に示す。

今回のように切欠きを施したPC鋼材は、緊張することにより局部的に非常に大きな応力が負荷されることになるため、カソード反応による水素を吸蔵することにより、通電処理期間中

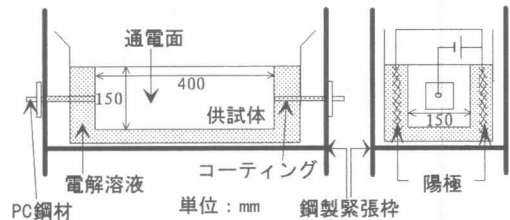


図-1 PC角柱供試体

に鋼材が破断する状況も考えられたが、今回の実験では鋼材が破断した供試体はなかった。

所定の通電処理終了後の試験項目としては、角柱供試体からはつりだしたPC鋼棒の吸蔵水素量測定および低ひずみ速度引張試験とした。なお、はつりだしてから測定を行うまでの期間は、水素の気中拡散を防ぐために、PC鋼棒を-30℃以下で冷凍保存した。

吸蔵水素量の測定は、ガスクロマトグラフを用いた昇温式の水素分析により行った。PC鋼棒の切欠き部分を冷却しながら約5 cm(質量約50 g)に切断した後、アセトン中で超音波洗浄したものを試験片とした。この試験片をアルゴンガス(50 ml/min)中で100℃/hrの昇温速度で室温から600℃(873 K)まで加熱し、その間に試験片から放出された水素を5分間隔で定量した。

低ひずみ速度引張試験を行う際に、試験体の切削加工は行わなかった。引張試験のひずみ速

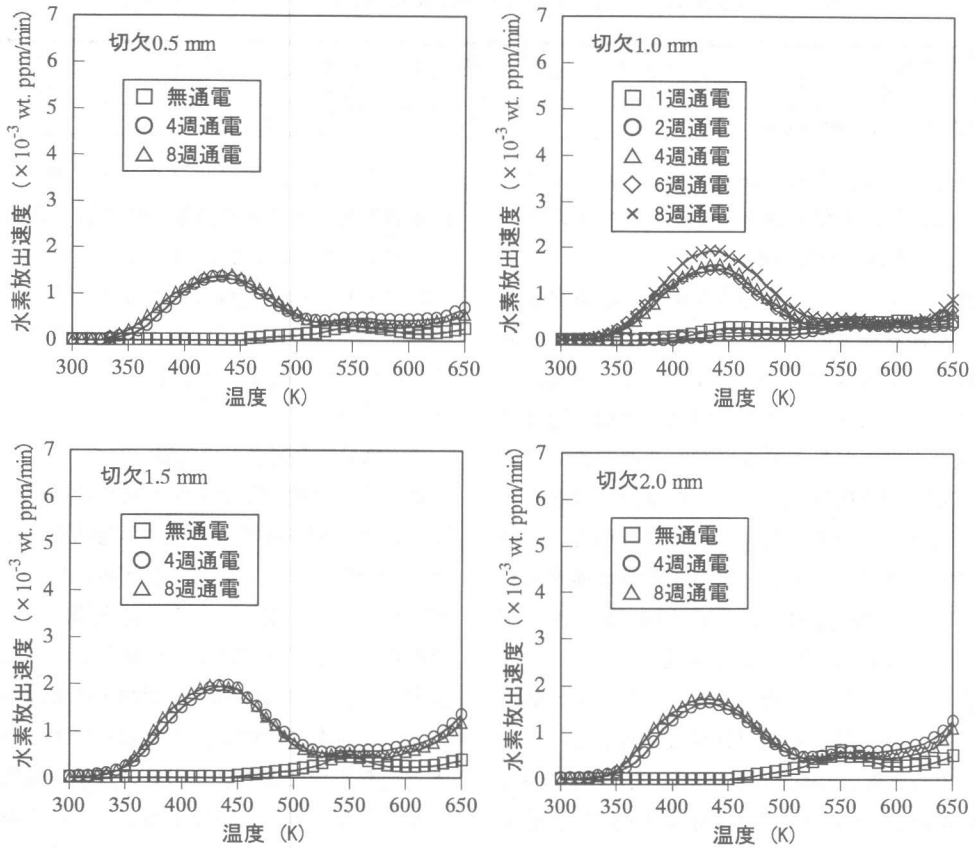


図-2 水素放出曲線

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鋼材切欠き部分のひずみを塑性ゲージ2枚の平均値として測定した。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 0.01 mm) の変位計で測定した。また、破断後の鋼材絞り ϕ 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。

$$\phi = (A_0 - A) / A_0 \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

ここに、 A_0 : 原断面積 (mm^2)、 A : 破断後の最小断面積 (mm^2)

3. PC鋼材の水素吸蔵状況

通電処理直後のPC鋼材水素放出曲線を図-2に、8週間の通電処理を行った時の切欠き深さと水素放出曲線の関係を図-3に示す。なお、

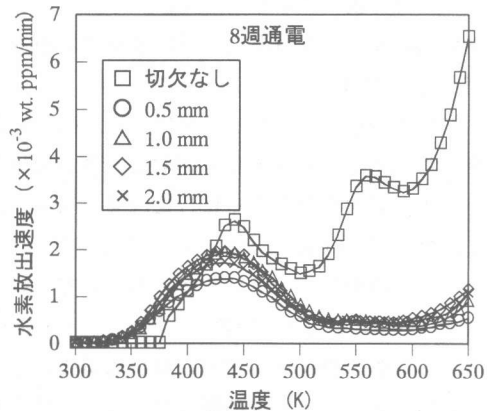


図-3 切欠き深さと水素放出曲線の関係

著者らが同様の条件で行った、切欠きを施さない鋼棒の場合のデータ¹⁾も図中に併せて示した。また、切欠き深さと第1ピーク放出水素量およびピーク時温度の関係を表-4に示す。ここでは、450 K 付近に最大点をとるピークを第1ピークとし、500 K 以降に最大点をとるピーク

表-4 切欠き深さと第1ピーク放出水素量およびピーク時温度の関係

切欠き深さ	0 mm	0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm
ピーク時温度 (K)	440	440	433	433	433
放出水素量 (wt. ppm)	0.13	0.09	0.12	0.13	0.12

を第2ピークとする。従来からこの第1ピークが水素脆化の直接的原因となる拡散性水素であることが指摘されている^{2),3)}。

図-2によると、無通電の場合には塩水噴霧による鋼材腐食のカソード反応に起因する水素吸蔵が550 K付近に見られる。また、通電処理による水素吸蔵状況は4週間以上の通電処理ではほとんど差が見られないが、2週間までの通電処理の場合には第1ピークの拡散性水素がほとんど検出されていない。このことから、連続通電処理期間を2週間とする断続的な通電処理により、水素脆化による遅れ破壊の危険性を回避できる可能性があるものと考えられる。

図-3によると、切欠きのない場合と比較して、切欠きを有する鋼材の場合、第1ピークのピーク時水素放出速度が若干小さく、350 Kから370 K付近で放出される不安定な水素が若干量検出されるなど、やや異なる水素放出曲線となっているが、表-4からわかるように、第1ピークにおけるピーク時温度や放出水素量に顕著な差は見られない。

これに対して、第2ピークについては、切欠きのない場合には570 K付近にピークが現れているが、切欠きを有する場合には図には示されていないが750 K付近にピークが現れている。これらの鋼材はすべて全断面有効として計算された引張強度の60%の緊張応力が与えられているが、切欠きを有する鋼材の場合には切欠き部分に応力が集中し、水素の新たなトラップサイトとなる塑性ひずみが導入されるものと考えられる。ここで形成されたトラップサイトに吸蔵された水素が、高温側に移行した第2ピークに対応しているものと考えられる。高井らが指摘しているように⁴⁾、水素の放出温度が高くなるということは、水素が安定化することに対応すると

考えられるため、第2ピークの高温側への移行は水素脆化による遅れ破壊の感受性を低減させる効果があるものと考えられる。

以上より、水素吸蔵状況からは、切欠きを入れることにより水素脆化による遅れ破壊の可能性が顕著に高くなったとは判断できない。

4. 低ひずみ速度引張試験

低ひずみ速度引張試験から得られた応力-ひずみ関係を図-4に、8週間の通電処理を行った時の切欠き深さと応力-ひずみ曲線の間隔を図-5に示す。図-4から、通電処理による影響を応力-ひずみ曲線から明確に読みとめることは難しい。このことから、鋼材の断面減少が生じている状況における、鋼材腐食による吸蔵水素と通電処理による吸蔵水素の、水素脆化に与える影響程度の大きさを議論することも考えられるが、この場合はむしろ、食孔を模して入れた切欠きの影響が大きかったと考えることが妥当であろう。

図-5によると、切欠き深さが応力-ひずみ関係に与える影響は大きく、切欠き深さが大きいほど荷重降下が開始するひずみは小さくなっている。特に、切欠き深さが1.5 mm以上の場合には降伏後の荷重増加がほとんど見られない。吸蔵水素量測定の結果では、第1ピークの拡散性水素量が切欠き深さに依らずほぼ一定であったことも勘案して、図-5から切欠き深さが大きいほど同一条件の通電処理による水素脆化程度が大きいと判断することは妥当ではなく、切欠き深さ自身の影響が大きかったと考えるべきであろう。

切欠きを有するPC鋼材の絞りと通電処理の関係を図-6に示す。なお、切欠きを施さない場合の結果も併せて示した。これによると、切

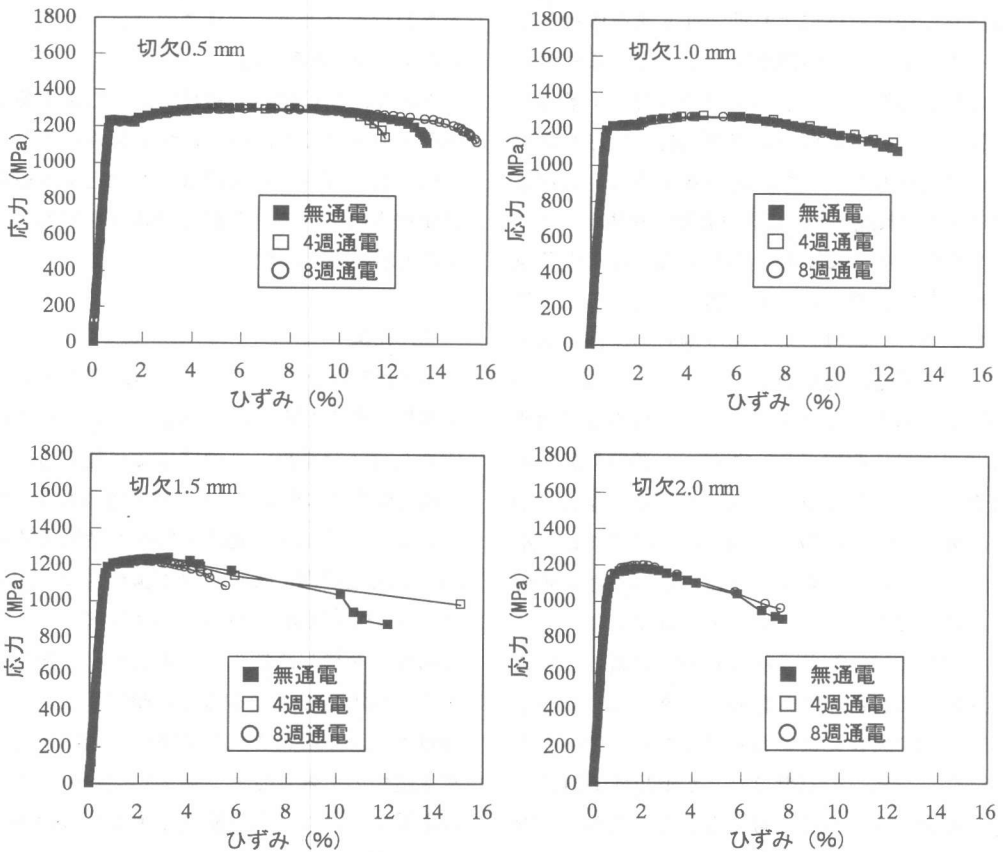


図-4 応力-ひずみ関係

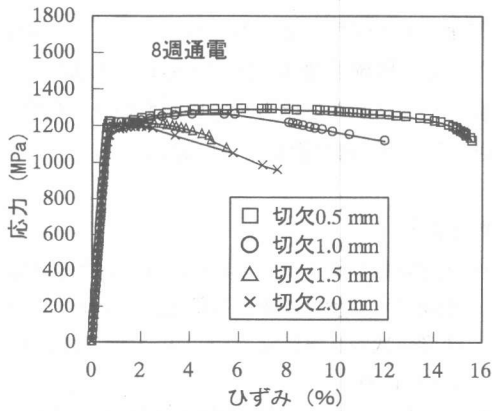


図-5 切欠き深さと応力-ひずみ曲線の関係

欠きを施さない場合には、無通電では比較的大きな絞りを示しており、通電処理期間が長くなるにしたがって絞りは大きく低下している。これは、通電処理による水素脆化の影響であると考えられる。

これに対して、切欠きを有する鋼材の場合

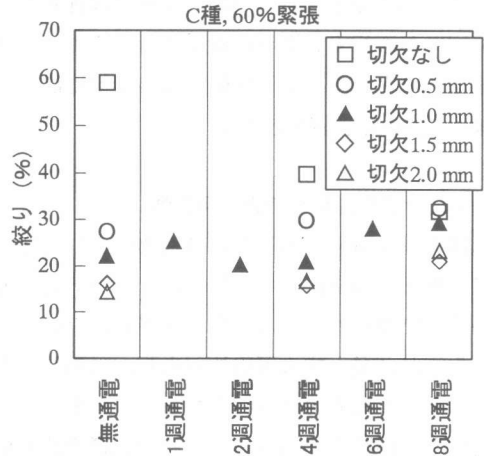


図-6 PC鋼材の絞りと通電処理の関係

は、無通電の状態ですでに小さな絞りを示しており、その後の通電処理による絞りの低下はほとんど見られず、むしろ無通電の場合より若干大きな絞りを示している場合が見られる。図-2および図-3に示したように、切欠きを有す

る鋼材も通電処理により拡散性水素を吸蔵していることから、水素脆化は発生しているものと考えられるが、この場合には切欠きの影響の方が強いために水素脆化の影響は打ち消されたものと考えられる。また、図-6からは、通電処理による水素脆化が、応力腐食割れを想定した、切欠きに起因する割れを助長するような現象は認められず、むしろ、若干緩和しているように思われる。これは、応力腐食割れの原因となる鋼材腐食反応が通電処理により停止したことが一因であるものと考えられるが、現時点では明確な理由は不明である。なお、8週間の通電処理を行った時の絞りは、切欠きのない場合と切欠き深さ0.5 mmまたは1.0 mmの場合でほとんど差がなく、この結果からは、遅れ破壊の感受性にはほとんど差がないものと判断できる。今回の実験では、割れを誘発しやすい鋭い切欠きを入れたために、この影響が大きくなったが、実際の鋼材腐食による食孔はこれほど鋭いものではなく、応力の影響で割れが進展する直前に鋭い亀裂が入るものと考えられる。このような場合には、通電処理により吸蔵された水素に起因する水素脆化割れが発端となって腐食孔部分で割れが進行するような状況も考えられる。今後はこのような、より実際に近い状況に関する検討を進める必要がある。

5. PC構造物への適用可能性

鋼材腐食環境にあるPC構造物においては、PC鋼材の腐食反応が進行し、アノード近傍での応力腐食割れ、およびカソード近傍での水素脆化割れが発生する可能性があり、両面からの遅れ破壊の危険性が考えられる。しかも、この危険性は経時的に増大する。今回、腐食孔を想定した切欠きを有するPC鋼材について検討を行った結果、今回の場合は通電処理に起因する水素脆化割れの危険性と比較して、腐食孔に起因する応力腐食割れの危険性の方が卓越していた。このような状況では、今後の応力腐食による遅れ破壊の危険性を増大させないためにも、

補強を行った上でデサリネーションを適用することが有効であると考えられる。

ただし、PC鋼材の種類によって水素脆化の感受性も大きく異なることが予想されるため、実構造物に適用する際には、対象とする構造物に使用されているPC鋼材の特性を把握しておくことが重要であろう。

6. 結論

本研究結果をまとめると次のようになる。

- ①鋼材表面積に対して 5.0 A/m^2 の電流密度で通電処理を行った結果、2週間までの通電処理の場合には拡散性水素がほとんど検出されなかった。これより、連続通電処理期間を2週間とする断続的な通電処理により、水素脆化による遅れ破壊の危険性を回避できる可能性がある。
- ②腐食孔を模した切欠きを入れたPC鋼材を用いて、通電処理による影響を検討した結果、通電処理により吸蔵された拡散性水素に起因する水素脆化の影響よりも、切欠きに起因する割れの影響が大きく、応力腐食による遅れ破壊の危険性が確認された。

謝辞：本研究を実施するにあたり、ご指導いただいた高周波熱錬(株) 田中典男氏、および、実験やデータ処理に協力していただいた、徳島大学 長本裕司君に謝意を表します。

参考文献

- 1) 上田隆雄ほか：デサリネーションによるPC鋼材の水素脆化に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.1101-1106，1997
- 2) 鈴木信一ほか：鋼材の遅れ破壊特性試験法，鉄と鋼，Vol.79，No.2，pp.227-232，1993
- 3) 石井浩司ほか：PC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
- 4) 高井健一ほか：耐遅れ破壊特性に優れたSi及びSi，Ca複合添加高強度鋼の水素吸蔵特性，鉄と鋼，Vol.80，No.3，pp.61-66，1994