

論文 デサリネーションがPCはり部材の力学的挙動に与える影響

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は、従来、塩害により劣化したRC構造物の補修工法として検討が進められてきた。PC構造物への適用を考える際に問題となるのが、カソード反応で生成する水素によるPC鋼材の水素脆化である。本研究では、あらかじめ塩化物を混入したプレテンションPCはり部材にデサリネーションを適用した後に、静的曲げ載荷試験を行うとともに、供試体よりPC鋼材をはつりだし、吸蔵水素量測定を行うことにより、通電処理による水素脆化の影響を検討した。この結果、通電処理によるPCはり部材の力学的挙動の変化は小さく、PC構造物へのデサリネーション適用可能性が示された。

キーワード:デサリネーション, PCはり部材, 水素脆化, 吸蔵水素量, 静的曲げ載荷試験

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、処理終了後の時間経過とともにP

C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。本研究では、この様なデサリネーションによるPC鋼材の力学的および化学的性状の変化がPCはり部材としての力学的挙動に与える影響を検討することとした。

2. 実験概要

実験に用いた供試体は、幅10 cm、高さ20 cm、全長160 cmのPCはりとし、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鋼棒を1本配した。供試体の一覧を表-1に、コンクリート配合およびPC鋼棒の諸性質をそれぞれ表-2および表-3に示す。コンクリートの圧縮強度は設計基準強度の40 MPaに対して、28日強度が42.8 MPaであった。

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/m^3 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、 $\phi 13 \text{ mm}$ のB種1号およびC種1号の2種類を用いた。鋼材の緊張力としては、引張強度の50%および60%を採用した。なお、PC鋼材のリラクセーションおよびコンクリートの

*1 徳島大学助手 工学部建設工学科 工修(正会員)

*2 高周波熱錬鋼製品事業部営業部(正会員)

*3 電気化学工業(株)青海工場セメント特殊混和材研究所(正会員)

*4 京都大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻 工博(正会員)

表－1 供試体一覧

電流密度 (A/m ²)	通電期間 (週)	緊張力 (%)	鋼材種類	本数
0.0	8	50	C種 1 号	2
		60	B種 1 号	4
			C種 1 号	4
5.0		50	C種 1 号	2
		60	B種 1 号	4
			C種 1 号	4

注) 供試体 4 本の内、処理終了直後と 1 ヶ月後に 2 本ずつ試験する。

表－2 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

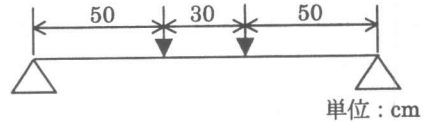
表－3 P C 鋼棒の性質

	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
B種1号 SBPR 930/1080	1047	1115	10	0.020	0.007	0.01

クリープ、乾燥収縮を見込んで、初期導入緊張力は 3 % 割り増した値とした。コンクリートを打設後、4 週間の湿布養生を行った後にコンクリートにプレストレスを導入し、通電処理を開始した。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 週間とした。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。

処理後の P C はり供試体に対して、静的曲げ載荷試験を行った。測定項目は載荷荷重、スパン中央たわみおよび主筋位置でのひび割れ幅とし、ひび割れ幅は、曲げスパンに検長 5 cm の π 型ゲージを 6 個連続させて貼り付けることにより測定した。 π 型ゲージはどれか一つが最大容量である 2 mm に近い値を示した時にすべて取り外し、その後、載荷荷重が最大荷重の 80 % まで低下した時に載荷を終了した。載荷時のスパン割りを図－1 に示す。

静的曲げ載荷試験の終了後、直ちに P C 鋼材をコンクリート中からはりだし、吸蔵水素量を測定した。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。P C 鋼棒を長さ 5



図－1 載荷時スパン割り

cm に切断した試験片をアルゴンガス中で 100℃/hr の昇温速度で室温から 600℃ (873K) まで加熱し、その間に試験片から放出された水素量を 5 分間隔で定量した。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、P C 鋼棒を -30℃ 以下で冷凍保存した。

また、通電終了後に 1 ヶ月間静置した供試体についても、同様の試験を行った。なお、静置条件は温度 20℃、湿度 60% の恒温恒湿状態とした。静置期間中、P C 鋼材の自然電位（照合電極：Ag/AgCl）を測定した。

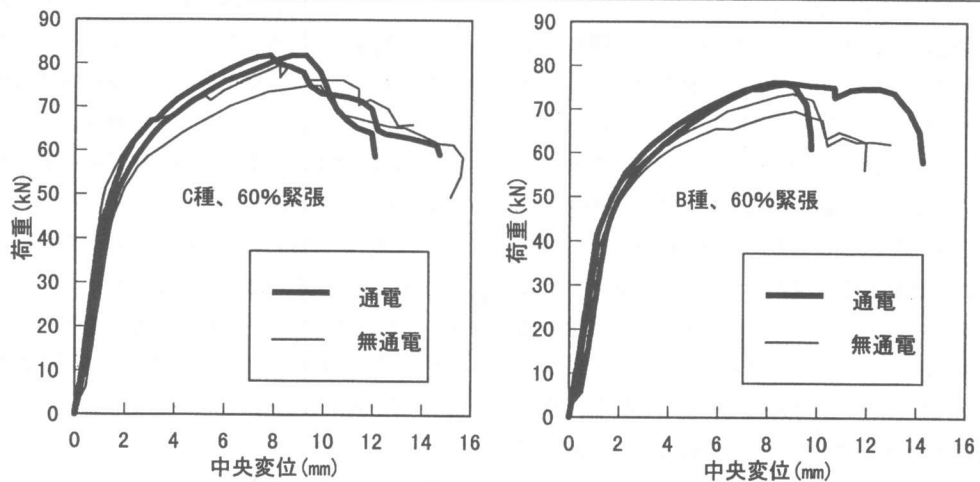
3. 試験結果および考察

3. 1 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、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

表－４ 静的曲げ載荷試験結果

供試体	曲げひび割れ発生荷重		最大荷重		平均ひび割れ間隔 (mm)	ひび割れ本数
	実験値(kN)	計算値(kN)	実験値(kN)	計算値(kN)		
C 60%通電直後-1	51.5	41.3	81.2	72.7	124	2
C 60%通電直後-2	56.2	41.3	82.3	72.7	150	3
C 60%無通電直後-1	52.7	41.3	80.1	72.7	128	2
C 60%無通電直後-2	51.7	41.3	75.5	72.7	125	2
C 50%通電直後-1	46.6	36.9	74.5	72.7	125	3
C 50%通電直後-2	45.3	36.9	77.8	72.7	190	2
C 50%無通電直後-1	44.1	36.9	72.9	72.7	165	2
C 50%無通電直後-2	44.9	36.9	76.5	72.7	202	2
B 60%通電直後-1	46.6	38.2	75.4	63.8	173	2
B 60%通電直後-2	45.0	38.2	76.3	63.8	188	2
B 60%無通電直後-1	46.6	38.2	74.1	63.8	184	2
B 60%無通電直後-2	40.8	38.2	75.0	63.8	191	2
C 60%通電後 1 月-1	47.0	41.3	78.8	72.7	188	2
C 60%通電後 1 月-2	50.8	41.3	80.9	72.7	165	2
C 60%無通電後 1 月-1	52.7	41.3	78.9	72.7	229	2
C 60%無通電後 1 月-2	54.6	41.3	72.5	72.7	202	2
B 60%通電後 1 月-1	51.5	38.2	77.4	63.8	151	3
B 60%通電後 1 月-2	44.8	38.2	72.4	63.8	177	2
B 60%無通電後 1 月-1	45.7	38.2	68.2	63.8	*****	1
B 60%無通電後 1 月-2	45.3	38.2	66.1	63.8	180	2



図－２ 荷重－中央変位曲線

することが出来なかったため、P C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。

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。水素脆化によるP C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。

すべての供試体の曲げ載荷試験の結果を表－４に示す。表中、供試体名の標記は、「鋼材種類・緊張力・通電有無・静置期間」とした。なお、計算値は土木学会コンクリート標準示方書にした

がって計算した。

(１) 荷重－中央変位関係

処理終了直後の供試体の荷重とスパン中央変位の関係を図－２に示す。

荷重－中央変位関係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

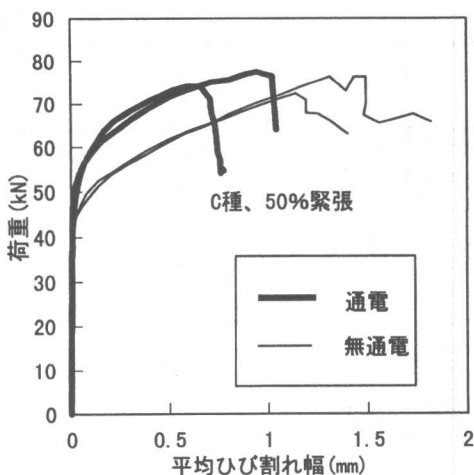
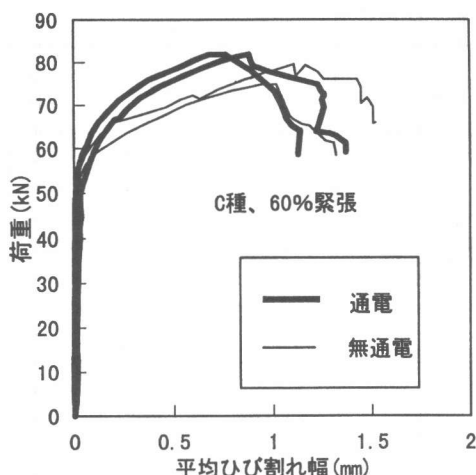


図-3 荷重-平均ひび割れ幅曲線

で 40 mA/m^2 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²⁾。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²⁾が、一方、
著者らによる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剛性変化や耐力変
化は見られなかった¹⁾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ものと考えられる。なお、
載荷試験後のPC鋼材のはつりだしの結果、無通
電供試体中の鋼材も表面に薄い錆層が見られる程
度の腐食状況であり、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

表-4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が、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。

荷重と平均ひび割れ幅の関係を図-3に示す。
ここで、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
がひび割れの開口が遅い（同一荷重に対するひび
割れ幅が小さい）ことがわかる。すなわち、前述
したような通電処理によりたわみが小さくなる現
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。

一般に、付着力が低下するとひび割れ幅は大き
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とともに、PC鋼材周
りのセメントペーストが軟化する³⁾ことにより、
付着界面に粘りが生じてひび割れの進展を遅らせ
たものと推察される。

3. 2 吸蔵水素量

曲げ載荷試験後のはりからはつりだしたPC鋼
材の吸蔵水素量測定結果を図-4に示す。なお、
角柱PC供試体からはつりだしたPC鋼材につい
て著者らが同様の検討を行った結果も併せて示し
た¹⁾。測定では873 Kまで昇温したが、図-4は一
般に水素脆化に影響を与えるとされる⁴⁾第1ピー
クおよび第2ピークを含む600 Kまでを示した。

図-4によると、角柱からはつりだしたPC鋼
材の場合、処理終了後3日経過した時点でまだ第
1ピーク（450 K付近）の拡散性水素が若干残っ

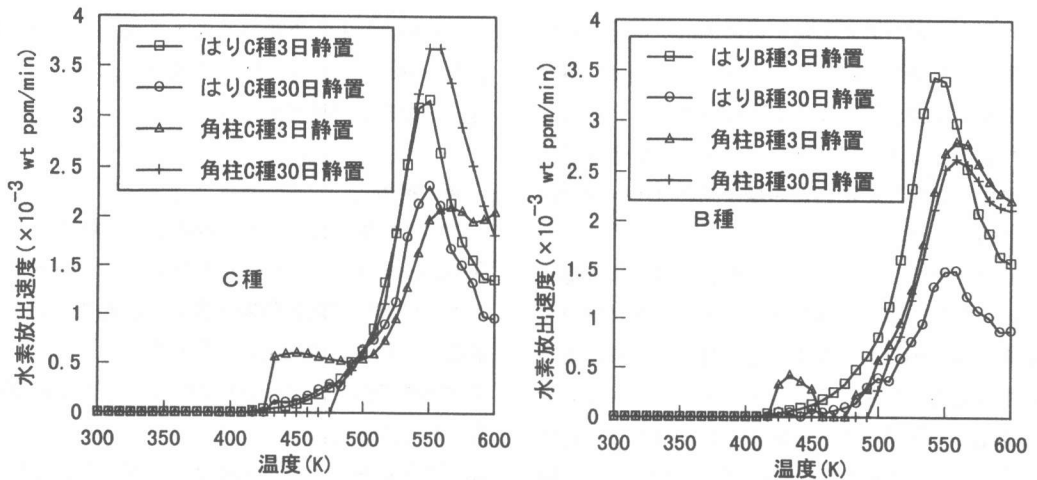


図-4 吸蔵水素量分布

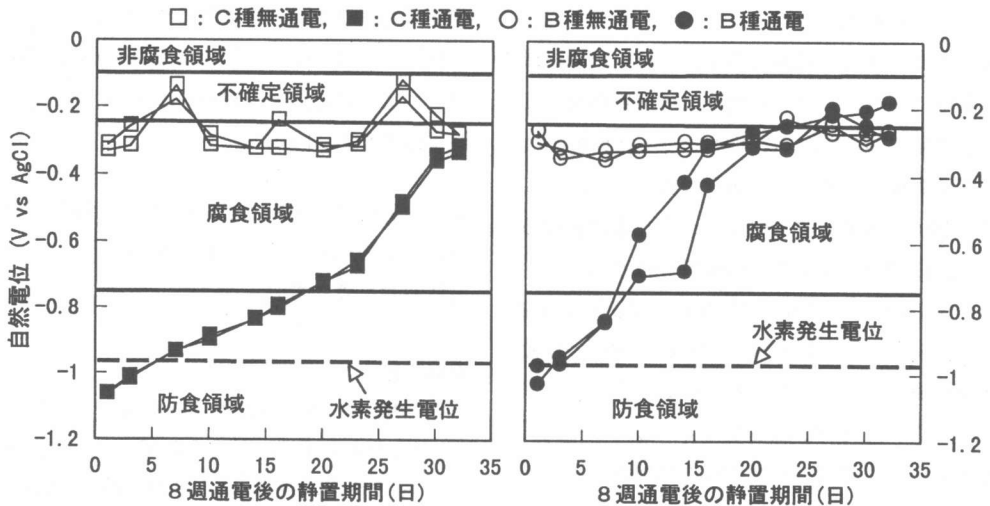


図-5 処理終了後の自然電位経時変化

ている。実際に、低ひずみ速度試験を行った結果を見ても、破断時の絞りが完全には回復しておらず、通電処理による水素脆化の影響が残っていることが報告されている¹⁾。これに対して、はりからのPC鋼材の場合、3日静置の段階で第1ピークに相当する水素はほぼ完全に消失している。

今回採用した通電条件は、電流密度、通電期間ともに角柱の場合と同じであり、コンクリートの配合およびかぶり厚さも同じであることから、通電処理による水素吸蔵状態が大きく異なることは考えにくい。条件として異なる点は、角柱の場合は通電処理期間および所定の静置期間が経過した段階ですぐにPC鋼材をはつりだして測定を行っ

たのに対して、今回は、はりの曲げ載荷試験を行った後にPC鋼材をはつりだして測定を行ったという点である。この載荷試験の影響でPC鋼材に塑性ひずみが導入され、転位や粒界に弱くトラップされていた拡散性水素がより安定な塑性ひずみに移動したのではないかと考えられる。これより、載荷前および載荷試験時にはPC鋼材は水素脆化の影響を受けていたが、載荷後の測定では拡散性水素が検出されなかったものと推測できる。

3. 3 自然電位の経時変化

デサリネーションの適用により陰極となるPC鋼材の近傍ではカソード反応により水素が発生し、

これがP C鋼材の水素脆化の原因になると考えられる。電気防食レベルの電流密度であれば、鋼材電位を水素発生電位よりも貴な値に制御することも可能であるが、デサリネーションの場合は電流密度が大きいために、このような制御は不可能であると考えられる。

石井らはネルンスト式から計算される平衡電位 ($\text{pH}=12.5$ の時 -934mV vs Ag/AgCl) を水素発生電位とし、鋼材がこれよりも卑な電位である場合に水素脆化が発生すると考えている⁵⁾。本研究では通電処理終了後1ヶ月間のP C鋼材の自然電位を測定した。この結果を図-5に示す。なお、図中の領域区分はASTMの判定基準に防食領域⁶⁾を加えたものである。

図-5によると、無通電の場合にはP C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。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するが、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。

処理後のP C鋼材の自然電位と拡散性水素の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P C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。

3. 4 P C構造物への適用可能性

今回のP Cはりの静的曲げ試験結果からは、デサリネーションの適用によりP Cはり部材の力学的挙動が悪影響を受けるという現象は見られなかった。ただし、P C鋼材の水素脆化で問題になるのは、主として遅れ破壊現象であり、今回の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、応力腐食割れと水素脆化割れの関係も含めて、より詳細な検討が必要であろう。

4. 結論

本研究結果をまとめると次のようになる。

- ① 8.0 kg/m^3 の Cl^- を混入したプレテンション型P Cはり供試体に通電処理を施し、静的曲げ載荷試験を行った。この結果、通電処理による耐荷力や曲げ剛性の低下、P C鋼材の破断などの悪影響は見られなかった。
- ② 通電処理を行った供試体は無処理の供試体に比べて平均ひび割れ幅が小さくなった。
- ③ 通電処理終了後の自然電位は速やかに貴な方向に移行し、水素発生の可能性が高い分極状態が解消された。また、P C鋼材の吸蔵水素量は、処理終了後速やかに減少した。

謝辞：本研究を実施するにあたり、実験やデータ処理に協力していただいた、徳島大学 山口洋幸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P C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) 石井浩司ほか：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
- 3) Locke, C.E. et al. : Effect of Impressed Current on Bond Strength between Steel Rebar and Concrete, Corrosion'83, Paper Number 178, 1983
- 4) 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
- 5) 石井浩司ほか：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
- 6) NASE Standard RP-01-69, Recommended Practice: Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems, Mater. Prot., 8, No.9, 1, 1969