

論文 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

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

要旨：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、低ひずみ速度引張試験および吸蔵水素量測定を行うことにより、通電処理が PC 鋼材の水素脆化に与える影響を検討した。この結果、通電処理による PC 鋼材の弾性挙動および引張強度の変化は小さかったが、破断時の挙動および絞りに影響が現れた。ただし、通電処理終了後の時間経過に伴い、拡散性水素は消失し、水素脆化による挙動の変化が緩和される傾向を示した。

キーワード：デサリネーション、水素脆化、引張試験、吸蔵水素量、処理後の回復

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。電気防食レベルの通電を PC 構造物に適用する試みはこれまでも見られたが、これらの基本方針は通電時の鋼材電位を水素発生電位よりも貴な値に制御するというものであり、水素の発生を回避する方策が採られている。

デサリネーションの場合、適用電流量が大きいために、鋼材近傍において水素が発生する可能性が高い。そこで、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 角柱供試体にデサリネーションを施した時の、PC 鋼材の力学的および化学的性状の変化を検討することとした。

2. 実験概要

実験に用いた PC 供試体は、 $15 \times 15 \times 40\text{cm}$ の角柱供試体とし、正方形断面の中心にプレテンション方式で緊張した PC 鋼棒を配した。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の導入は行わず、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。

*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)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 供試体数一覧

電流密度 (A/m ²)	0.0				5.0		
通電期間 (週)	4	8			4	8	
緊張力 (%)	60	0	50	60	60	50	60
B種1号		6	3	3		3	12
C種1号	3	6	3	3	3	3	12

注1) 供試体3本の内、1本は吸蔵水素量測定用とし、残りの2本は引張試験用とする。

注2) 供試体数6本の場合、半分の3本はCl⁻を含まないコンクリートに埋め込む。

注3) 供試体数12本の場合、処理終了直後、3日後、1週間後、1ヶ月後に3本ずつ試験を行う。

注4) 比較用として、B種およびC種鋼材の製造時のものについても検討する。

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	NaCl
39	43	25	434	169	731	982	4.67	13

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

緊張したP C鋼材の周囲にコンクリートを打設し、4週間の湿布養生を行った後に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週間を基本レベルとした。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。

処理後にP C鋼材をコンクリートからはつりだし、引張試験と吸蔵水素量測定を行った。はつりだしてから試験を行うまでの期間は、水素の気中拡散を防ぐために、すべてのP C鋼棒を－30℃以下で冷凍保存した。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。引張試験のひずみ速度は、 $1.6 \times 10^{-5}/\text{sec}$ で一定とし、引張荷重、P C鋼棒のひずみと万能試験機クロスヘッドの変位量を測定した。また、鋼材の絞り ϕ は次式により求めた。

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

ここに、 A_0 ：原断面積 (mm²)、 A ：破断後の断面積 (mm²)

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。P C鋼棒を長さ5 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。

また、通電終了後に緊張力を保持したまま、コンクリート中に一定期間 (3日、1週間、1ヶ月間) 静置したP C鋼材についても、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。

3. 試験結果および考察

3. 1 応力－ひずみ曲線

デサリネーション終了後、コンクリートからはつりだしたP C鋼材の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られると考えられる。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。B種およびC種の製造時鋼材の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図-1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の範囲は鋼材ひずみが3%から5%の範囲で一定とした。

3. 2 通電処理の影響

デサリネーション適用時に陰極となるP C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(2)は陰極近傍に十分な酸素が存在し、かつ、カソード電位が平衡電位（≒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(3)の反応が支配的となるものと考えられる。筆者らが過去に行った実験によると、デサリネーションを施したRC供試体の通電処理終了直後における鉄筋電位は-1000mV vs Ag/AgCl程度となっており、通電中の陰極電位はネルンスト式（pH=12.5の時）から計算される平衡電位（-934mV vs Ag/AgCl）よりも卑であると予想される。これより、式(3)の反応が卓越し、水素原子が発生すると、この水素原子はP C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、粒界などに強くトラップされた水素が水素脆化の原因であるといわれている[1]。

60%緊張を行い、8週間の処理を行った場合の応力-ひずみ曲線を図-2に、通電処理が鋼材破断時の絞りに与える影響を図-3に示す。図-2によると、弾性領域および荷重降下が始まるま

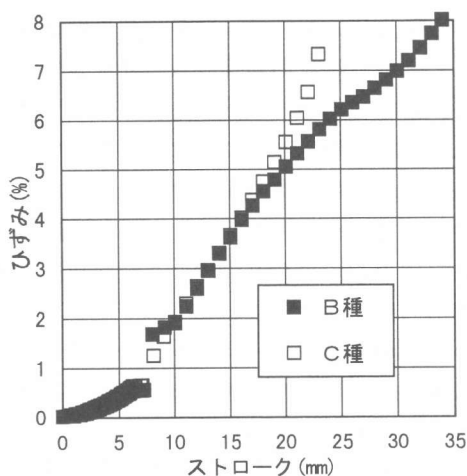


図-1 鋼材ひずみの近似

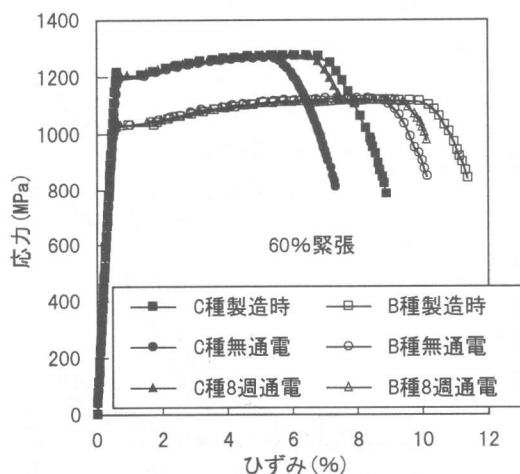


図-2 応力ひずみ関係(60%緊張, 8週処理)

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、破断強度、破断ひずみ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。3. 1 に示したように、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。B種の場合とC種の場合で傾向は似ており、荷重降下開始点のひずみは無通電の供試体が小さく、通電処理を行ったものは製造時の鋼材よりも若干小さい程度である。破断強度は製造時の鋼材と無通電供試体が同程度で、通電処理を行った場合はこれらに比べて大きい。さらに、図-3より、B種、C種ともに通電処理により絞りが低下しており、水素脆化の影響が見られる。C種の場合に4週通電も行っているが、通電期間が長くなると絞りの低下も増大している。また、50%と60%では緊張力の影響は小さい。

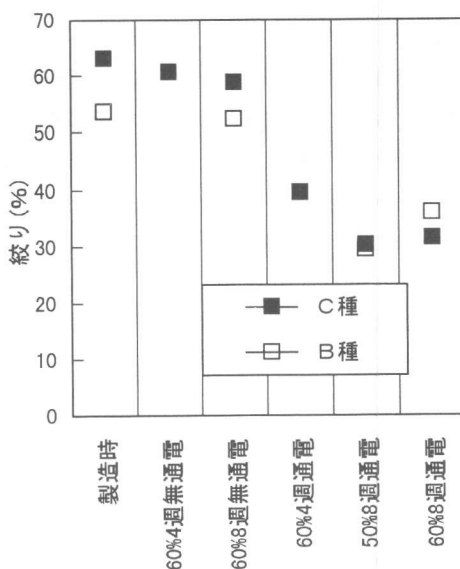


図-3 通電処理と絞りの関係

通電処理と吸蔵水素量の関係を図-4に示す。B種、C種ともに、製造時あるいは無通電の場合と比較して、通電処理を行った場合に吸蔵水素量の大幅な増加が見られる。特に注目される点は、470K付近（第1ピーク）と570K付近（第2ピーク）の2カ所に放出ピークを形成している点である。また、無通電供試体は550K付近に小さな放出ピークが1つ検出されている。4週通電と8週通電を比較すると、やはり通電期間が長い方が全体に吸蔵水素量は大きい、特に第2ピークまでは、その差は小さく、4週通電でほぼ飽和状態にあった事が予想される。また、緊張力の違いによる影響は小さい。

鈴木らによると、鋼材中に吸着された水素は、常温から523K(250℃)以下の温度で拡散可能であり、水素脆化に直接関係する不安定な拡散性水素と、523K(250℃)以上の高温で拡散し、水素脆化には直接関係しない安定した非拡散性水素に分類されるとしている[1]。これより、図-4におけ

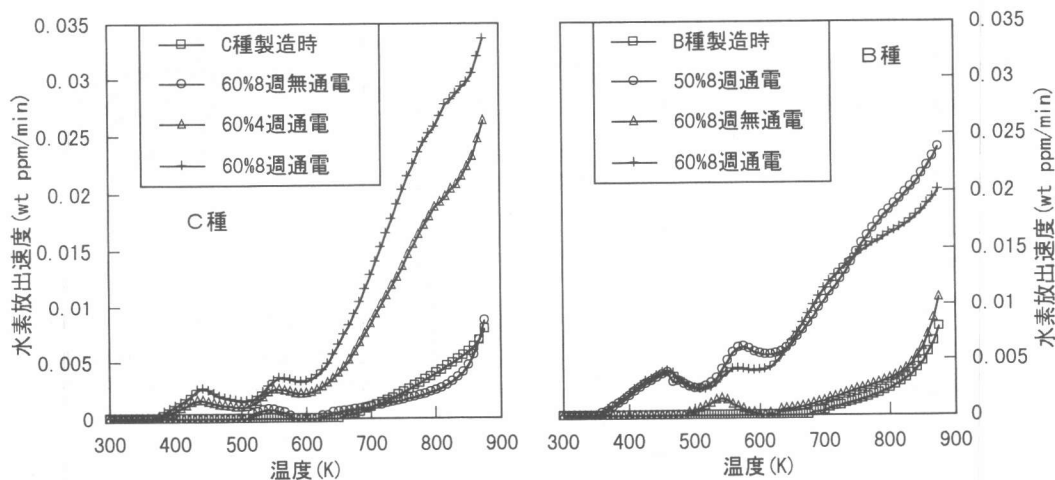


図-4 通電処理と吸蔵水素量の関係

る第1ピークの放出水素が、主として、P C鋼材の遅れ破壊に影響を与えるような水素脆化の原因となる拡散性水素であり、第2ピーク以降の高温側における放出水素は比較的拡散性の低い水素であると考えられる。

3. 3 Cl^- の影響

3. 2で、通電処理によりP C鋼材に浸入する水素に起因する水素脆化について述べたが、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事が報告されている[2]。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。図-4に示したように、無通電の場合には550K付近に腐食反応に起因すると考えられる水素の放出ピークが検出されており、図-2および図-3によると、無通電の場合は製造時の鋼材と比較して、引張試験における荷重降下開始の早期化や破断時の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鋼材の8週間無通電後の絞り測定結果を図-5に示す。これによると、塩化物無混入の場合には製造時とほぼ同等の絞りを確保しているが、塩化物を混入した場合には絞りの低下が見られる。

以上より、腐食環境にあるP C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。

3. 4 処理後の回復

石井らは通電停止後1週間までの時間の経過と水素量の変動の関係を調べ、時間の経過に伴い拡散性水素のピークが減少し、水素脆化が回復する傾向にあることを報告している[3]。本研究では、現在デサリネーション終了後1ヶ月静置までの検討を行っている。60%で緊張し、8週間通電処理後の応力ひずみ関係の経時変化を図-6、吸蔵水素量の経時変化を図-7、絞りの経時変化を図-8に示す。図-6および図-8より処理後の時間経過に伴い、水素脆化の影響が緩和されている事が分かる。すなわち、応力ひずみ関係では、荷重降下開始点のひずみは若干小さくなっているが、破断強度が徐々に低下しており、破断時の絞りは1ヶ月の静置によりB種、C種ともに製造時と同程度まで回復している。また、図-7によると、時間の経過に伴い、全体に吸蔵水素量が減少していることが分かる。特に、水素脆化に直接影響すると考えられる第1ピークの拡散性水素は処理後3日ではほぼ完全に消失している。ただし、第

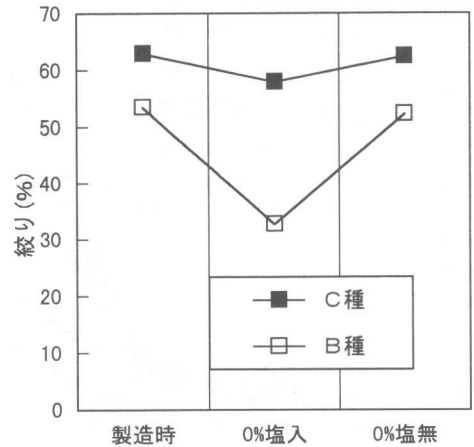


図-5 鋼材腐食と絞りの関係

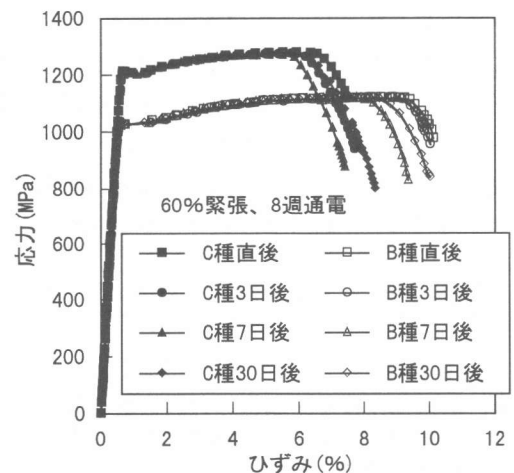
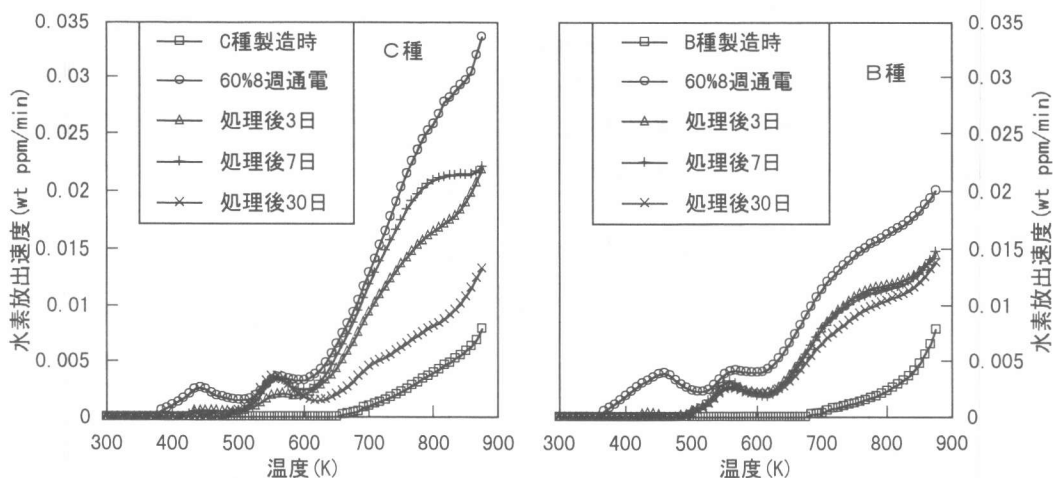


図-6 処理後の応力ひずみ関係の変化



図－7 処理後の吸蔵水素量の変化

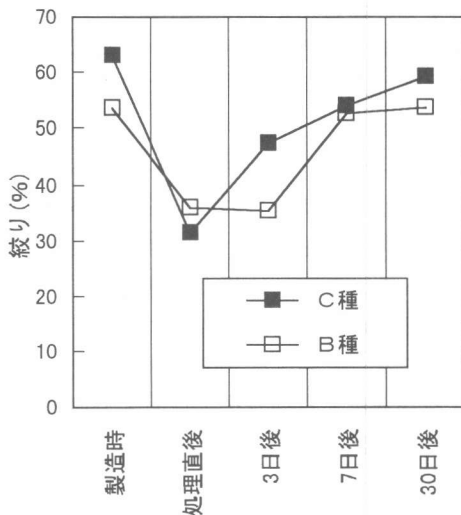
2 ピークについては、1 ヶ月静置後も残存しており、短期間での鋼材からの拡散は難しいと言える。以上より、デサリネーション適用後の静置により、第 1 ピークの拡散性水素は比較的速やかに拡散消失し、これに伴い水素脆化による遅れ破壊の可能性も非常に小さくなるものと考えられる。

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 供試体に通電処理を施し、低ひずみ速度引張試験を行ったところ、P C 鋼材の弾性挙動と引張強度に到るまでの塑性挙動に大きな影響は見られなかったが、破断強度、絞りなどに水素脆化の影響が現れた。
- ② 通電処理を行った供試体の P C 鋼材の吸蔵水素量測定の結果、拡散性水素の放出ピークが検出された。
- ③ 通電処理後に 1 ヶ月までの静置を行ったところ、拡散性水素の第 1 ピーク(470K 付近)が消失し、水素脆化による鋼材の破断挙動の変化も回復改善された。

以上より、デサリネーションを P C 構造物に適用することにより、通電期間中および処理後数週間程度において、水素脆化に起因する遅れ破壊の可能性はあるが、比較的短期間でこのような状況は改善され、さらに、塩害による劣化対策としても有効であることから、デサリネーションの P C 構造物への適用は有効であると判断できる。



図－8 処理後の絞りの変化

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 西尾美典君に謝意を表します。

参考文献

- [1] 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、pp227～232、1993
- [2] 池野欣成ほか：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、pp565～568、1995
- [3] 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、pp131～140、1996.2