

脱塩工法によるプレテンションPCT桁への影響と脱塩効果

電気化学工業 (株) 正会員 ○松久保 博敬  
 電気化学工業 (株) 工修 宮口 克一  
 (社) 施工技術総合研究所 榎園 正義  
 (株) 高速道路総合技術研究所 正会員 野島 昭二

Abstract : It is assumed about delay destruction according the desalination industrial methods as impact electrification for to PC strand, the fall of the bond strength of concrete, and the hydrogen embrittlement of PC strand. Then, the pre-tension PCT girder which passed for about 38 years was used, and after the amount of design load had loaded, continuation turning on electricity for eight weeks was carried out, and it verified about the influence of a pre-tension PCT girder with the current density of 5 A/m<sup>2</sup>. Consequently, compared with turning-on-electricity before, bending of a PCT girder showed the tendency which becomes large, and although the detailed crack of the bridge axis direction considered to be the influence by turning on electricity by the side of the bottom flange of the main girder occurred, serious influence was not able to be seen in the static bending destructive examination after turning on electricity

Key words : Desalination , Pre-tension girder , Continuous energizing , Effect of desalination

1. はじめに

PC 桁への脱塩工法による影響は、PC 鋼材とコンクリートの付着強度の低下と PC 鋼材の水素脆性による遅れ破壊が考えられる。現在これらの問題に対しては、鋼材表面積あたりの電流密度を 5A/m<sup>2</sup> 以下、通電期間を 8 週間以内で実施することにより鋼材とコンクリートの付着強度の低下の抑制対策、1 週間のうち 2 日間程度の通電を休止させる断続通電方式で PC 鋼材に吸蔵した水素を放出させ、水素脆性の影響を回避させる対策が取られている<sup>1)</sup>。さらに、近年の研究では腐食による損傷を模擬した PC 鋼より線に対して 1~5A/m<sup>2</sup> の電流密度による連続通電の検討がなされ、PC への連続通電の可能性について報告されている<sup>2)</sup>。しかしながら、プレテンション PC 桁への脱塩工法の適用実績が少ないのが現状である。

表-1 桁の諸元

構造物性	上部工形式	プレテンションPC単純T桁 (荷重分配桁)
	橋長	14.140m
	桁長	14.10m
	幅員	10.750m
	荷重	TL-20
	コンクリートの設計基準強度	主桁: 50N/mm <sup>2</sup>
	PC鋼材	PCより線 φ9.3
	PC鋼材の引張強度	1760N/mm <sup>2</sup>

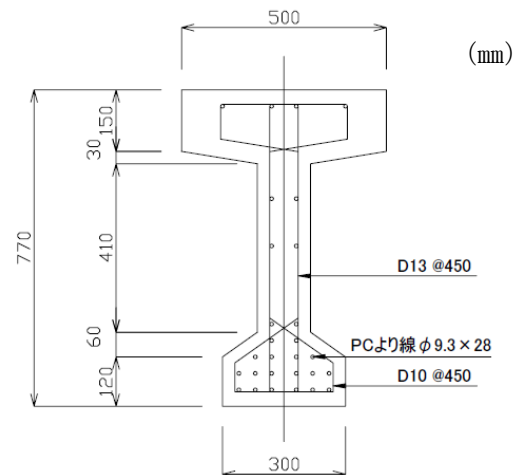


図-1 桁の断面

本試験は約26年間日本海沿岸で供用、その後約12年間太平洋側の内陸部で暴露されたプレテンションPCT桁（以下、「撤去桁」という。）の実造物を使用して、付着強度や水素脆性に対して厳しい条件である鋼材表面積あたり5A/m<sup>2</sup>の電流密度、8週間の連続通電を設計荷重相当が載荷した状態で脱塩工法を実施し、プレテンションPC桁の影響と脱塩効果について検討した。

2. 撤去桁

使用した撤去桁の諸元と断面を表-1, 図-1 に示す。撤去桁は橋長 14.1m（支間長 13.6m），桁高 0.77m のプレテンション PCT 桁（荷重分配桁）である。昭和 48 年 2 月に竣工し、昭和 57 年、昭和 61~62 年、および平成 4 年の計 3 回にわたり断面修復と表面被覆による補修が繰り返し実施されている。

本試験前に撤去桁のかぶり部分の一部をはつり取り、目視調査を実施したところ、スターラップの一部に断面欠損が存在したが、PC 鋼より線の断面欠損や激しい腐食などは確認されなかった。過去の部分断面修復と今回の調査で試験前に実施した断面修復面積は、あわせて脱塩施工範囲の 15%程度である。採取した 6 本のコアによるコンクリートの圧縮強度は平均 43.7N/mm<sup>2</sup>、標準偏差 10.9N/mm<sup>2</sup>であった。圧縮強度の平均値は当初設計の約 13%小さい値であった。

試験にあたっては、間詰めコンクリート部と桁両端の約 480mm の切断を行った後に試験を開始した。

3. 試験内容

撤去桁の載荷方法は単純支持 3 等分点載荷の静的曲げ試験とした。載荷重は荷重分配桁の最外桁に当初設計の最大荷重が載荷していることを想定した載荷値を設定した。載荷は継続的に実施することとし、撤去桁には載荷と同時に脱塩工法の通電を実施した。通電中は撤去桁の下フランジに設置したひずみゲージと変位計によって、ひずみとたわみを測定した。また通電中のひび割れや PC 鋼より線の破

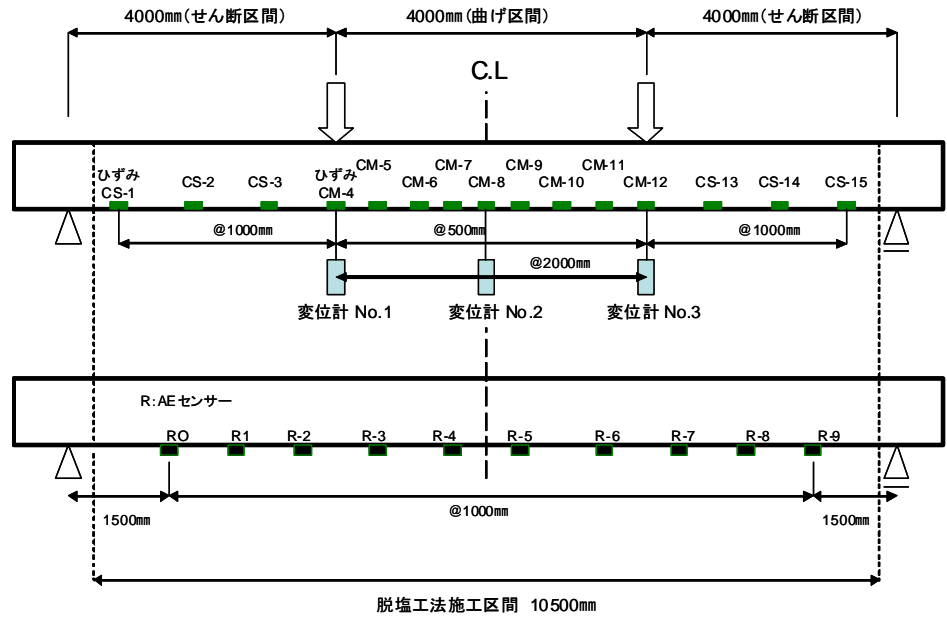


図-2 曲げ載荷試験の概要



写真-1 試験の状況

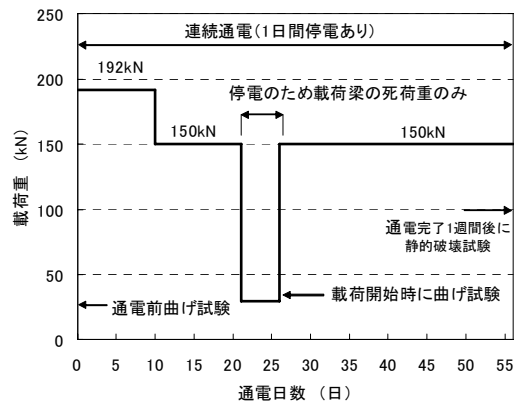


図-3 通電中の載荷の推移

断の検出<sup>3)</sup>を行うため、圧電素子を利用して製作した簡易な AE 計測システムによる連続的なモニタリングを実施した。曲げ載荷試験の概要と試験の状況を図-2、写真-1に示す。

静的荷重は、通電開始から 10 日間までは当初設計の最大応力相当が発生するよう 192kN (当初設計の PC 鋼より線  $\sigma_{pu} \times 0.55$  程度,  $\sigma_{ct} = 1.0 \text{N/mm}^2$  程度 (圧縮)) で実施したが、変位が徐々に大きくなる傾向を示したため、荷重を 150kN に低下させた。さらに通電 21 日目に停電が生じたため、約 5 日間は載荷梁の 30kN の死荷重のみが載荷された状態とした。試験中の載荷の推移を図-3に示す。脱塩工法は下フランジとウェブで異なる回路を構築し、2 台の定電流制御による直流電源装置を使用した。電解質溶液はほう酸と炭酸カリウムの混合水溶液を使用した。電解質溶液の保持はファイバー方式として陽極材は特殊コーティングされているチタンメッシュを使用した。通電の仕様は、鋼材表面積あたり  $5 \text{A/m}^2$  の電流密度で 8 週間の連続通電としたが、停電のため 1 日間通電が停止した。8 週間の通電完了後は脱塩工法の仮設材料をすべて撤去し、外観観察を行った後に静的曲げ破壊試験を実施した。

#### 4. 試験結果

##### 4. 1 通電中のひずみ・たわみ

通電中の継続載荷による等曲げ区間内のひずみとたわみの推移を図-4に示す。通電開始直後から CM-4, 5, 8 以外のひずみと変位計 No.1~3 のたわみ量が増加傾向を示した。通電 10 日後に荷重を 150kN に低下させた後はすべてのひずみ、たわみともほぼ安定した値で推移した。通電 30 日頃からは CM-6, 10 のひずみは著しく増加し、CM-7 は計測不可能となった。これは電解質溶液がコンクリート内部から染み出し、ひずみゲージの剥がれや絶縁不良を起こしたためである。通電完了まで計測出来たのは CM-4, 8, 11, 12 である。

通電前と通電 25 日後および通電完了後に実施した設計荷重相等までの静的載荷試験の荷重とたわみの関係を図-5に示す。通電 25 日後と通電後の載荷試験では、ともに通電前に比べ、同じ載荷荷重に対するたわみ量は増加傾向を示す。図-5よりたわみ量の増加は、通電前に対して荷重 150kN で通電 25 日後が約 1.03 倍、通電後が約 1.07 倍、192kN では通電後が約 1.27 倍を示した。これら撤去桁の剛性が低下した理由は以下のものと考えられる。図-4の通電 10 日頃までのたわみの大きな増分は、電流密度が高いものの積算電流量は鋼材表面積あたり

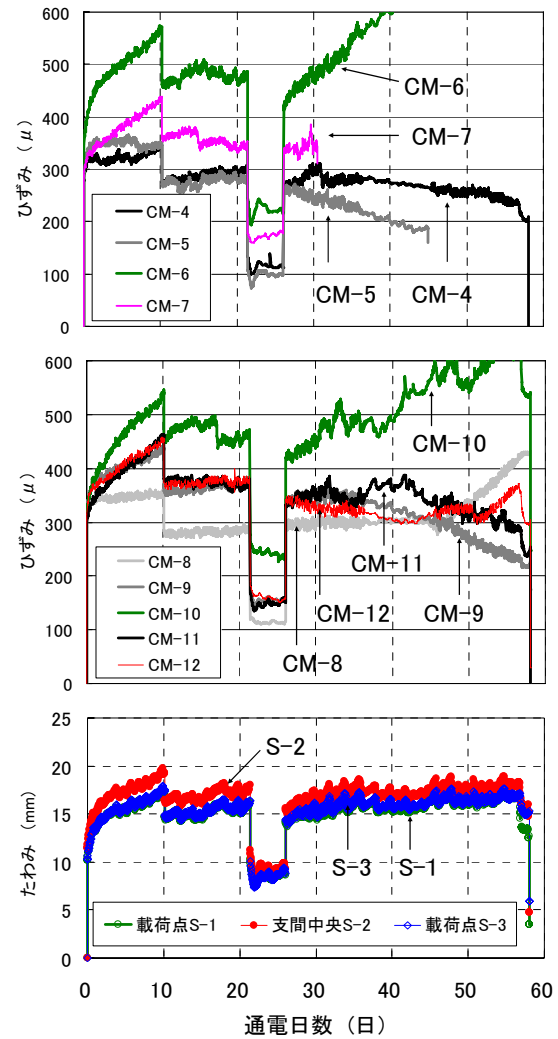


図-4 通電中のひずみとたわみの推移

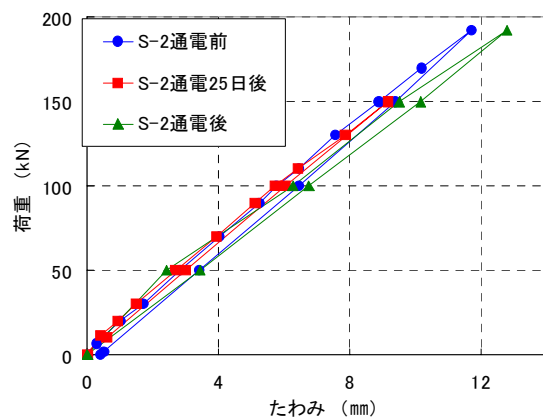


図-5 通電前・中・後の荷重とたわみ

約  $1200A \cdot h/m^2$  であり、既往の報告<sup>1)</sup>による付着強度低下を懸念する積算電流量 (約  $6720A \cdot h/m^2$  以上) の2割弱である。そのためPC鋼より線近傍のアルカリ集積量もまだ少ないと推察される。そこで撤去桁の諸元や事前調査結果から、約12年間の暴露中は、ほとんど荷重が載荷されていない状態であったこと、コンクリートの平均圧縮強度が当初設計より約13%小さく、標準偏差  $10.9 N/mm^2$  とばらつきが大きいことおよび脱塩施工範囲の約15%で部分断面修復が実施されていたことから、部分的に剛性の低い断面や付着が適正でない補修部分が存在し、最大設計荷重相等の大きな荷重が継続載荷したためひずみや変形が徐々に大きくなったものと推察される。本試験の通電後の積算電流量は  $6720A \cdot h/m^2$  に到達する。そのため通電10日以降の少量のたわみの増分は、PC鋼より線近傍のアルカリ集積量が徐々に多くなっていくため、PC鋼より線とコンクリートとの付着強度の低下による影響も想定される。

#### 4. 2 通電中のAE発生と通電後のひび割れ状況

通電後のひび割れ発生位置と通電中に検知したAE発生回数の累計を図-6, 7に示す。AEは既往の研究<sup>3)</sup>からAE信号を識別するために設けたしきい値(電圧レベル;  $\pm 6mV$  ( $10mV/div$ ))を超えた場合に、すべてのAEセンサーの信号を自動的に収録するシステムである。「AE振幅小:  $6 \sim 10mV$  未満」と「AE振幅大:  $10mV$  以上」の振幅例を図-8に示す。いずれもコンクリートの微小割れや亀裂の発生によるものと考えられるが、この振幅の差がどの程度の変状の差となるか定量的には分かっていない。AE発生回数は図-8のようにほぼ同時に発生したAE現象波形 ( $500 \mu sec$  以内) を1回としてカウントした。図-7より通電中のAE発生回数は振幅小・大合計して30回である。AE振幅小の発生累計と通

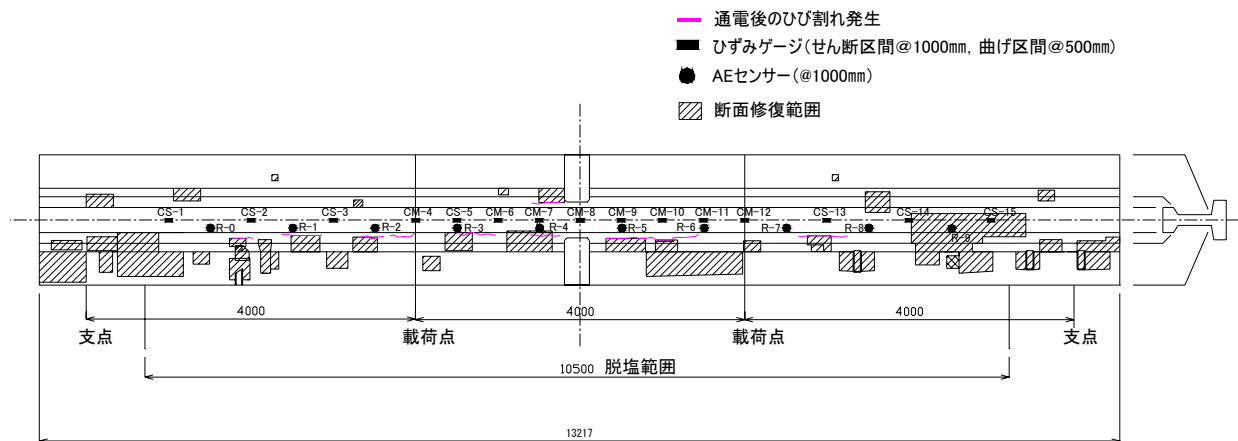


図-6 通電後のひび割れ位置

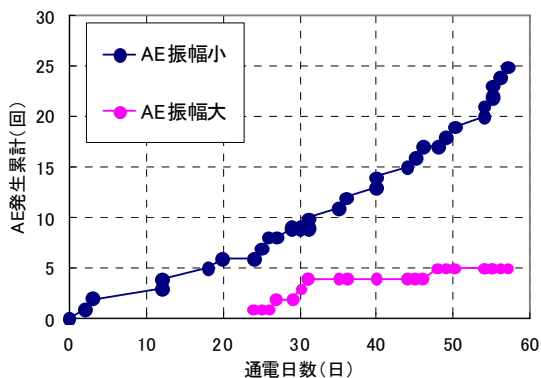


図-7 通電中のAE発生の推移

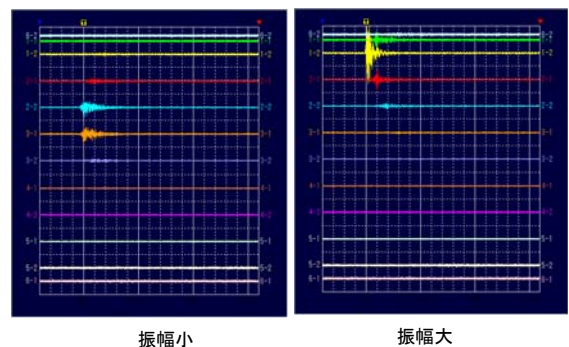


図-8 AE発生の振幅例

電日数とは比例関係があり、荷重を低減させた 10 日以降も AE の検知回数はほとんど変化がない。また AE 振幅大も通電の中～後半に発生しており、AE 発生は静的荷重ではなく積算電流量に依存すると思われる。

脱塩工法適用後の外観調査では、下フランジの側面に部分断面修復部の境界に沿ったかたちで橋軸方向にひび割れが発生していた。通電後のひび割れ幅はいずれも 0.1mm 以下であり、ひび割れが発生した範囲はほぼ脱塩範囲全般に渡っていた。下フランジ側面の PC 鋼より線のかぶりは、下フランジ底面に比べて小さく、部分断面修復範囲も多く存在する。そのため断面修復部と既設コンクリートの境界部の付着が完全でない部分に、高い電流密度が流れ込み、PC 鋼より線の陰極で発生した水素のガス圧がひび割れを誘発させたものと考えられる。橋軸直角方法の曲げひび割れは発生していないことから、通電中の AE 発生を検出はこの下フランジ側面に発生したひび割れを検出したものと考えられる。このひび割れの発生回数は、積算電流量に比例しているため、通電 10 日以降の少量のたわみの増分に影響を及ぼしている可能性も考えられる。

4. 3 通電後の静的曲げ破壊試験

通電後の静的曲げ破壊試験の荷重とたわみの関係を図-9、AE 振幅小・大の発生累計を図-10 に示す。目視によるひび割れ発生は 275kN で確認し、その後荷重の増加とともに桁の長手方向に対してほぼ左右対称に橋軸直角方向のひび割れが増加した。最大荷重 559kN を示した段階で、PC 鋼より線の破断と思われる音が発生し、変形量が増大して試験機のストロークが限界となったため、荷重を段階的に除去した。ひび割れは荷重の段階的な除去に伴い徐々に閉じた。最大荷重は、当初設計から試算される曲げ破壊荷重 500kN 以上を満足した。図-10 より荷重の増加に伴い AE 発生累計も増加しておりひび割れ発生荷重以降の載荷荷重とほぼ比例関係にある。これらは良好なひび割れ分散性を示しているものと推察される。試験後に AE センサーから PC 鋼より線が破断したと思われる位置をはつり取り、PC 鋼より線の破断状態を確認した。写真-2 に PC 鋼より線の破断状態を示す。

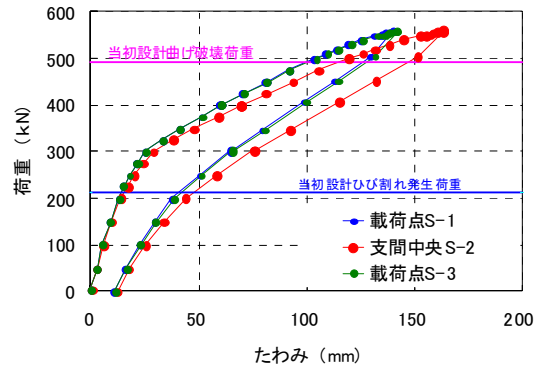


図-9 曲げ破壊試験の荷重とたわみ

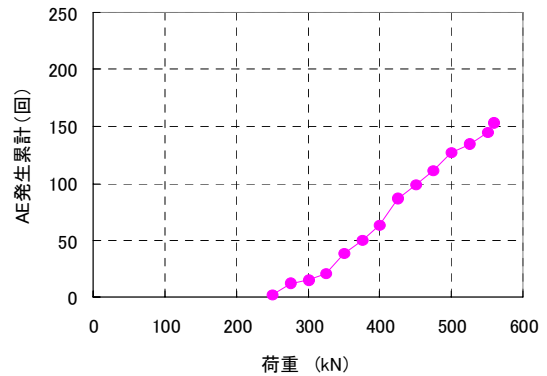


図-10 曲げ破壊試験時の AE 発生



写真-2 PC 鋼より線の破断状態

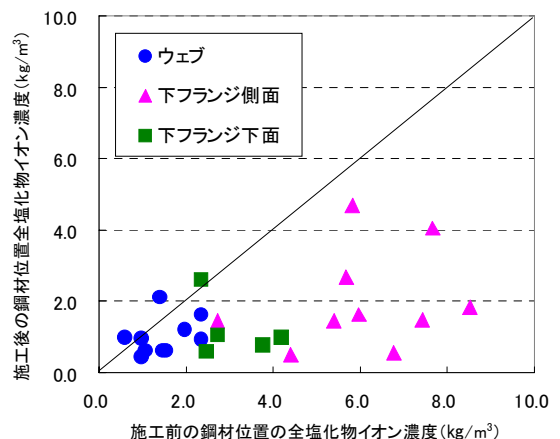


図-11 施工前後の全塩化物イオン濃度

PC 鋼より線が破断していた位置は、AE センサーの R1 と R2 の中間部のせん断区間内であった。破断した PC 鋼より線の近くには、事前の塩分量採取時に損傷したと思われる部分を 2 ヶ所確認しており、予め損傷していた断面部分が曲げ破壊試験で破断したものと考えられる。AE では各位置のセンサーで PC 鋼より線の破断と思われる「非常に大きな AE 波形振幅(±200mV 以上)」を捉えていた。そのため PC 鋼より線の破断位置を各センサーの波形状態からの伝播時間差を確認することで、おおよその位置が推定できる。

#### 4. 4 脱塩効果

通電前後のウェブ、下フランジ側面および下フランジ下面の PC 鋼より線の側部近傍 (PC 鋼より線から 20 mm 以内) の全塩化物イオン濃度とその平均値を図 1-11, 1-12 に示す。全塩化物イオン濃度の初期値が高い部分ほど除去される全塩化物イオン量が多くなった。脱塩率はウェブで約 11%、下フランジ側面と下フランジ下面で約 61% を示した。脱塩工法では、一般に全塩化物イオン濃度が高い部分ほど脱塩効率が良いため、部位別の濃度差は小さくなる。本試験でも同様の結果を示した。一部施工前より施工後の塩化物イオン量が多くなったが、施工前の塩化物イオン量が少ない位置であることから、試料採取位置やドリル法による試料採取の影響が生じたものと考えられる。

屋外暴露 1 年後の試験体から採取した PC 鋼より線近傍の pH を表 2 に示す。pH は PC 鋼より線近傍のコンクリートを微粉碎したものに純水をかけて pH メーターで測定した。未脱塩範囲のコンクリートは pH11.2 を示しているが脱塩範囲のコンクリートは pH13.4 と高いアルカリ雰囲気を示した。脱塩工法では陰極表面で水酸基イオンの発生により高いアルカリ性雰囲気を形成することから、PC 鋼より線のような心線と側面の隙間部分の腐食抑制対策には有効な対策と考えられる。

#### 5. まとめ

本試験結果から以下のことが分かった。

- (1) 通電前に比べて通電後は弾性域の変形が大きくなり撤去桁の剛性が低下した。これには補修や経年劣化などの要因が多く含まれており、通電による付着強度の影響は明らかに出来なかった。しかしながら、鋼材表面積あたりの電流密度 5A/m<sup>2</sup>、8 週間の連続通電の厳しい条件下でも静的曲げ破壊試験では著しい変状や水素脆性による遅れ破壊の影響は見られなかった。
- (2) 鋼材表面積あたりの電流密度 5A/m<sup>2</sup>では陰極で発生する水素のガス圧によると思われるひび割れが桁の下フランジ側面の橋軸方向に発生した。水素発生量は電流密度に依存することから、PC 部材への適用にあたっては出来るだけ低い電流密度が望ましい。

#### 参考文献

- 1) 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, 1996.11
- 2) 莖澤絵里香, 徳光 卓, 石橋孝一, 丸山久一: 電気化学的脱塩工法の適用による PC 鋼材への影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 1, 2004
- 3) 菅野 匡, 榎園正義: 30 年供用したプレテン桁の疲労試験における AE 計測の適用性, 日本非破壊検査協会大会講演概要集, pp. 389-392, 1994

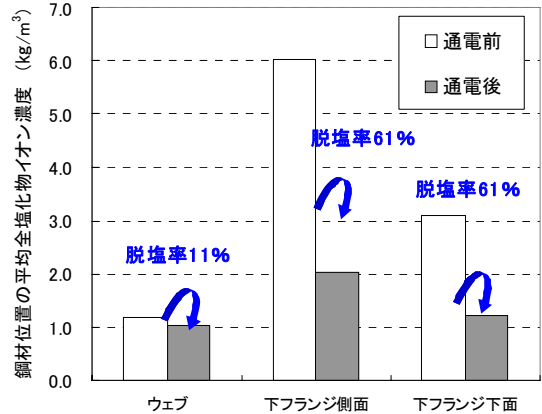


図-12 全塩化物イオン濃度の平均値

表-2 屋外暴露 1 年後の pH 値

区分	pH
未脱塩範囲	11.2
脱塩範囲	13.4