

(70) プレストレストコンクリート構造物への電気防食の適用に関する基礎研究(その2)

榎ピー・エス 技術研究所
 早稲田大学 理工学部土木工学科
 運輸省港湾技術研究所 構造部材料研究室
 中川防蝕工業㈱ RC技術部

正会員○石井浩司
 関 博
 福手 勤
 井川一弘

1. まえがき

プレストレストコンクリート構造物は、従来高品質でメンテナンスフリーと考えられてきたが、近年、塩害による早期劣化現象が報告されるようになってきた。コンクリート構造物に十分なかぶりがあり、密実なコンクリートが打設されていれば、基本的には鋼材は防食されている。しかしかぶりの不足、海水作用や海砂使用によるコンクリートへの塩化物の浸透により鋼材腐食が生じてることがある。

この対策として、断面修復、ライニング工法等様々な方法が研究、開発され、施工段階に至っている。しかし、一旦塩化物イオンがコンクリートに浸透した場合、鋼材腐食を抑制することは非常に困難となり、さらに確実な防食方法が望まれている。

最近、欧米において最も有効な防食方法として電気防食が注目されており、様々な研究発表や試験施工がなされており、我国においても研究、開発がおこなわれつつある。著者らはこの電気防食に注目し、海洋環境下での長期暴露試験、室内試験を通して

- ① 水素脆性に対する影響¹⁾
- ② 付着に対する影響
- ③ 梁部材の力学特性に対する影響
- ④ コンクリートの力学、材料特性に対する影響
- ⑤ 補修効果に対する評価
- ⑥ 各種アノード材料の適用試験^{2) 3)}

等様々な項目の試験を実施しており、総合的にプレストレストコンクリート構造物への電気防食の適用性を検討しようとしている。今回は、上記③の項目に関する試験結果の一部を報告する。

2. 試験概要

コンクリート構造物、とくにプレストレストコンクリート構造物に電気防食を適用しようとする場合、構造上最も問題となり得る点は、

- ① 通電によりコンクリート中の陽イオン(主にNa⁺, K⁺のアルカリイオン)がPC鋼材付近のコンクリートに集積し、コンクリートの軟化を引き起こすことで、コンクリートとPC鋼材との付着力を低下させる可能性がある。
- ② 過防食になった場合、PC鋼材表面上では水素発生反応が起こり、コンクリートとPC鋼材との付着力を低下させる可能性があるだけでなく、PC鋼材の水素脆化の可能性もある。

表-1 試験要因

TYPE	試験環境	NaCl量 (kg/m ³)	電流密度 (mA/m ²)
I	屋外放置	0	0
II	室内放置	1.5	2.0
III	海水噴霧	0	2.0
IV		1.5	0
V			0 → 2.0
VI			2.0
VII			4.0

等あげられる。そこでプレテンション方式の梁を製作し、外部電源方式により電気防食を長期間実施し、梁の力学的挙動を検討するとともにPC鋼材の分極状態、腐食状態もあわせて検討することにした。試験要因

は表-1に示すように、試験環境、NaCl量、電流密度とした。

3. 試験方法

3-1 使用材料と供試体の製作

使用したコンクリートは設計基準強度を500kg/cm²とし、その示方配合を表-2に示す。また腐食促進のためNaClを15kg/m³(コンクリート重量)練り混ぜ水に混入して使用した。

PC鋼材は7本より線(SWPR7A T9.3)を使用し、せん断補強筋としてFRP筋を使用した。

図-1に供試体諸元を示す。製作に際し、PC鋼材の初期引張応力は約120kg/mm²とした。有効プレストレス量は79kg/mm²と推定される。

電気防食による通電は梁下面からとし、一次電極に白金メッキチタン線、二次電極として導電性塗料を使用した。

3-2 試験方法

製作した供試体は、室内放置として恒温恒湿槽内、屋外放置として湾内の護岸沿いの屋外暴露試験所、海水噴霧として屋外放置と同条件で、さらに図-2に示すように一定のサイクルで海水を散布する場所に暴露した。暴露試験中は、PC鋼材の自然電位、分極抵抗、分極量、ひずみ、コンクリートの比抵抗を定期的に測定し、その一部を1年後に取り出し試験に供した。静的載荷試験、動的載荷試験は図-1に示すようにスパン160cm、せん断スパン60cmの2点載荷とし、破壊荷重、供試体のたわみ、ひびわれ幅等を測定した。なお動的載荷試験は、事前の静的載荷試験、動的載荷試験結果より破壊形式がPC鋼材破断となるよう上限荷重を1.3ton、下限荷重を0.6tonの片振りと設定した。

静的載荷試験の終了した供試体よりPC鋼材、その付近のコンクリートを採取して腐食面積の測定、含有塩分量、PC鋼材の引張試験を実施した。

4. 試験結果

4-1 PC鋼材の自然電位と分極量

図-3に電気防食を適用していない供試体($i = 0 \text{ mA/m}^2$)の自然電位、電気防食を適用した供試体($i = 20 \text{ mA/m}^2$)の通電時電位(以下ON電位とする)、分極量の一例を示す。一般に電気防食を適用する場合の防食基準の一つとして、「通電停止直後の電位(以下IO電位とする)と停止4時間後の電位との差を分極量とし、その分極量が100mV以上あれば防食状態にある。」⁴⁾がある。しかし環境条件により4時間で100mVの分極量を満足しない場合も報告されており⁵⁾、

表-2 示方配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スラアの 範囲 (cm)	空気量の 範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単 位 量 (kg)					
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	減水剤 A	その他
20.0	8.0±2.5	2.0±1.0	37.2	41.0	160.0	430	737	1076	5.160	---

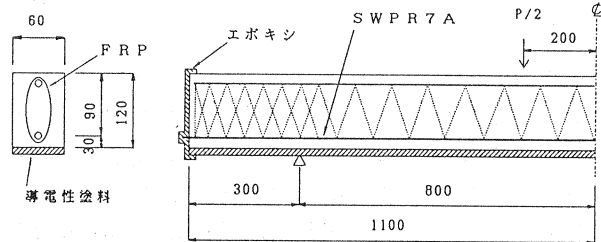


図-1 供試体諸元

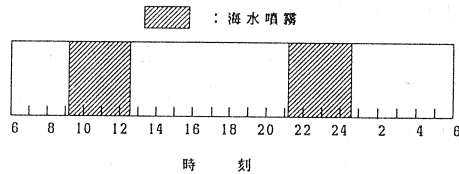


図-2 海水噴霧サイクル

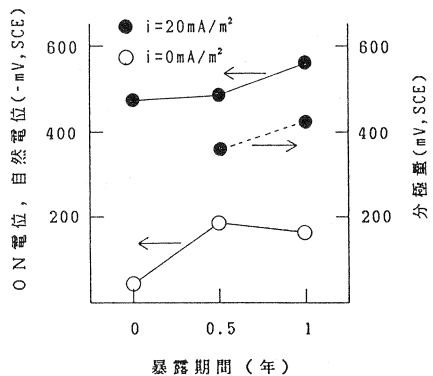


図-3 PC鋼材の自然電位と分極量 (NaCl=15kg/m³)

議論のあるところであるが本試験ではON電位から通電停止後24時間の電位の差を分極量とした。ただしON電位とIO電位との差は20~30mVであり、簡単のため省略した。図によると通電開始後1年経過しても分極量は約400mVと良好な防食状態と推定される。

4-2 梁の力学的挙動

(1) 静的荷重試験

電気防食の適用による静的荷重試験への影響を図-4~図-6に示す。図中暴露0年とは、電気防食の適用前に試験を実施した結果であり、一連の試験結果に対する基準とするものである。図-4に荷重とたわみの関係を示す。

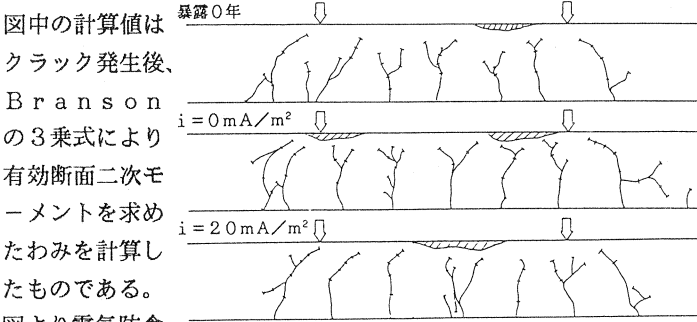


図-5 ひびわれ発生状況

(NaCl = 15 kg/m³)

図中の計算値はクラック発生後、Bransonの3乗式により有効断面二次モーメントを求めたたわみを計算したものである。図より電気防食の適用により大きな変化はなく計算値に近い値を示している。図-5にひびわれ発生状況を示すが付着切れと推定されるひびわれもなく、ひびわれ幅にも電気防食の適用による変化は見られなかった。図-6にひびわれ発生荷重、破壊荷重の暴露0年(1.2 ton, 2.69 ton)の試験結果に対する比を示す。ひびわれ発生荷重に関しては差があるものの破壊荷重に関してはほとんど電気防食の適用による変化は見られなかった。

(2) 動的荷重試験

電気防食の適用に対する動的荷重試験への影響を表-3, 図-7, 図-8に示す。表-3に示すように破壊形式はいずれもPC鋼材破断となっており、これは試験終了後、破断位置等もあわせて確認している。図-7に残留および上限荷重時の中央点たわみと繰り返し回数Nとの関係を示すが、電気防食の適用による変化は見られない。また図-8にひびわれ発生状況を示すが、付着切れと推定されるひびわれも見られず、ひびわれ幅についても電気防食の適用による変化は見られなかった。

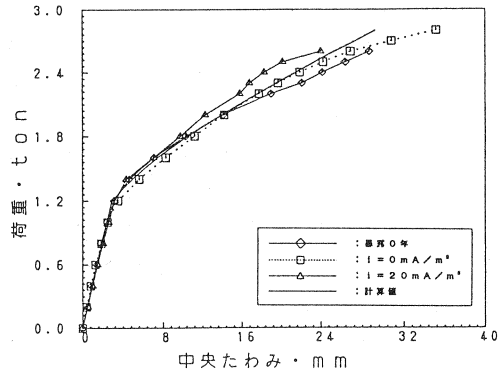


図-4 荷重-たわみ曲線

(NaCl = 15 kg/m³)

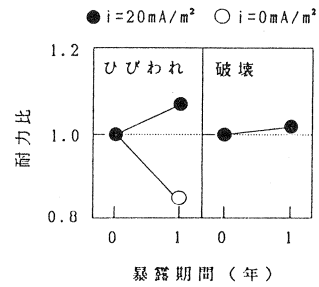


図-6 耐力比の経時変化

(NaCl = 15 kg/m³)

表-3 動的荷重試験結果

TYPE	破壊回数 (x 10 ⁴)	破壊形式
暴露0年	50 : 70	PC鋼材破断
III	55 : 120	PC鋼材破断
IV	90 : 40	PC鋼材破断
VI	35 : 40	PC鋼材破断

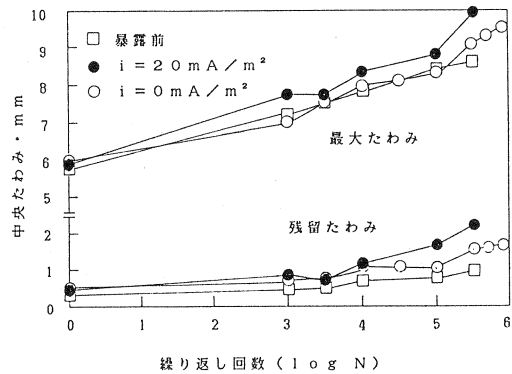


図-7 たわみと繰り返し回数の関係

(NaCl = 15 kg/m³)

4-3 PC鋼材の腐食状況と塩分量

静的荷重試験終了後、PC鋼材を取り出し腐食面積を測定した。測定はPC鋼材に透明なシートを巻き、腐食部を写し取り光電管プラニメーターで測定した。腐食面積より面積率を算出した。(PC鋼材を円柱と仮定) その結果、NaClを 15 kg/m^3 混入した供試体に関して、電気防食を適用した場合は6%、適用しない場合は14%となっており、電気防食の効果が明確である。

次に図-9にPC鋼材付近のコンクリートの含有塩分量を示す。塩分分析は日本コンクリート工学協会「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」(JCI-SC4)に従い全塩分を測定した。これによると、電気防食を適用することによりPC鋼材付近の全塩分量が減少することがわかる。つまり、電気防食を適用するとPC鋼材を防食し、さらにPC鋼材付近のコンクリートの環境を改善していることがわかる。

5. まとめ

プレテンション方式のプレストレストコンクリート梁に電気防食を適用し、暴露1年目の試験結果をまとめると、

(1) 電流密度 20 mA/m^2 で分極量は約 400 mV となり良好な防食状態と推定される。

(2) 静的荷重試験、動的荷重試験を実施したところ、電気防食の適用による力学的挙動への影響は見られなかった。

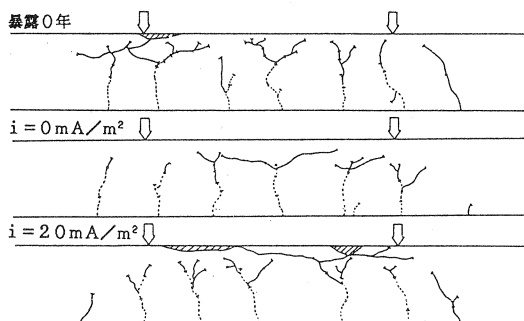
(3) 電気防食による腐食抑制効果は、腐食面積より明確であった。

(4) 電気防食を適用した場合、PC鋼材付近の全塩分量が減少しコンクリートの環境を改善している。

以後、2年、3年と試験を実施し、さらに詳細な試験結果を蓄積する予定である。

(参考文献)

- 1) 石井, 関, 杉橋, 福手, 千葉: PC部材の電気防食における鋼材の水素脆化に関する実験的研究, 第45回セメント技術大会講演集, p598~p601, 1991
- 2) 関, 福手, 阿部, 千葉, 井川, 石井: プレストレストコンクリート港湾構造物への電気防食の適用に関する基礎実験, 第37回腐食防食討論会, p113~p116, 1990
- 3) 関, 福手, 井川, 石井: プレストレストコンクリート構造物への電気防食の適用に関する基礎研究, 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集, p362~p363, 1991
- 4) R. A. Gummow: Cathodic protection criteria-A critical review of NACE Standard RP-01-69, Materials Performance, p9~p16, September, 1986
- 5) 井川, 小熊: 港湾コンクリート構造物の鉄筋の電気防食試験(第2報), 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集, p358~p359, 1991



破線：処女荷重 実線：破壊までの繰り返し荷重
図-8 ひびわれ発生状況
(NaCl = 15 kg/m^3)

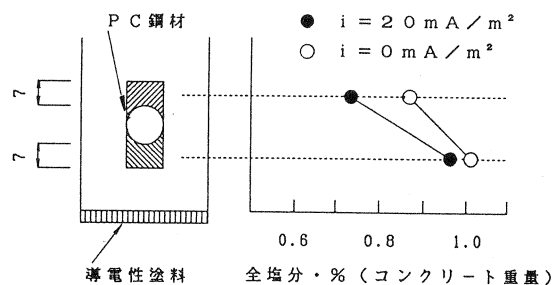


図-9 コンクリート中の含有塩分量