

(70) 電気防食を適用したPC部材の力学挙動

榎ピー・エス 技術研究所

正会員○石井浩司

早稲田大学 理工学部土木工学科

関 博

運輸省港湾技術研究所 構造部材料研究室

福手 勤

榎ナカボーテック RC技術部

井川一弘

1. まえがき

コンクリート構造物の鋼材は、コンクリートの高アルカリにより不動態化し腐食から保護されていると言われている。しかし、コンクリート中への塩化物イオンの浸透等により鋼材腐食が開始する。アメリカでは Schupack¹⁾らがプレストレストコンクリート構造物の塩害による劣化を報告しており、我国においても近年報告されるようになってきた。この塩害に対する対策として、断面修復、ライニング工法等様々な手法が提案されており、施工段階にも至っている。しかし、Vassie²⁾らが報告しているように、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、最も有効な防食方法として電気防食が注目されている。この電気防食は主として鉄筋コンクリート構造物に試験的に多く適用されており、現在までのところ問題が生じたと言う報告は見当らない。しかし、この電気防食をプレストレストコンクリート構造物に適用する場合、鉄筋コンクリート構造物とプレストレストコンクリート構造物の構造上の相違により、検討し解決しておかなければならない問題点がある。

そこで著者らは、下記のような様々な試験を実施しており、

- ① 水素脆性に対する影響
- 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 防食基準の妥当性に関する研究
- ⑦ 各種アノード材料の適用試験

総合的に検討を行いプレストレストコンクリート構造物への信頼性のある電気防食を確立しようとしている。現在も試験は進行中であるが、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

鉄筋コンクリート構造物とプレストレストコンクリート構造物の構造上の相違により電気防食適用に対して問題となり得る点は、①陽イオン集積によるコンクリートの軟化、PC鋼材とコンクリートの付着力の低下(図-1)。②過防食になった場合の水素発生によるPC鋼材の水素脆化とPC鋼材とコンクリートとの付着力の低下。(図-2)などあげられる。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適用し、梁の

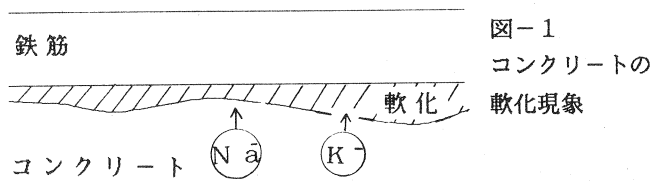


図-1
コンクリートの
軟化現象

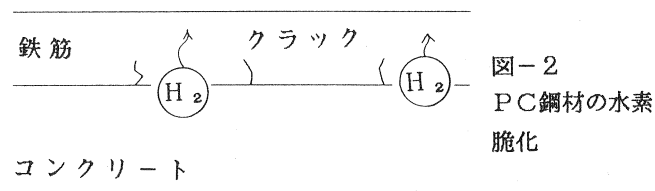


図-2
PC鋼材の水素
脆化

力学挙動を検討するとともに、電気化学測定、塩分の移動等もあわせて検討することにした。

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 500 kg/cm^2 W/Cを37.2%とした。また腐食促進のためNaClを 15 kg/m^3 (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。

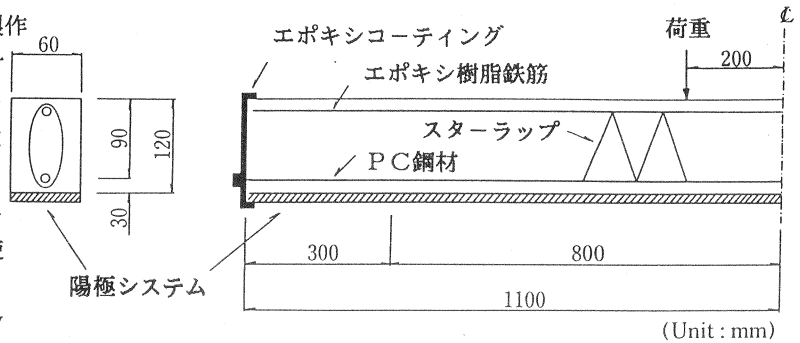


図-3 供試体概要

図-3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 120 kg/mm^2 とした。有効プレストレス量は 79 kg/mm^2 と推定される。梁の両端部から塩化物イオンの浸透を防ぐため、エポキシ樹脂によりコーティングした。電気防食システムとして、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。なお、通電は定電流方式とし、電流密度は0, 26(20), 40 mA/m^2 (PC鋼材表面積)とした。

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1日2回、3時間程度の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(無通電供試体)、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、所定の暴露期間終了後供試体を取り出し試験に供した。静的載荷試験、動的載荷試験は図-3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の片振りとして設定した。

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 電気化学測定結果

図-4に無通電供試体($i = 0 \text{ mA/m}^2$)の自然電位、分極抵抗、通電供試体($i = 20 \text{ mA/m}^2$)の分極量、分極抵抗の一例を示す。無通電供試体の自然電位は $-100 \sim -200 \text{ mV}$ と腐食傾向を示していなかった。通電供試体の分極量は暴露期間1年以降小さくなる傾向にあったが、これは電流密度の変化、海水散布の中断によるものと考えられる。しかし、 100 mV 以上の分極量があり良好な防食状態にあると推定される。分極抵抗に関しては電気防食によるPC鋼材上の還元反応のためか、通電供試体の分極抵抗は無通電供試体のそれと比べ小さい傾向にあ

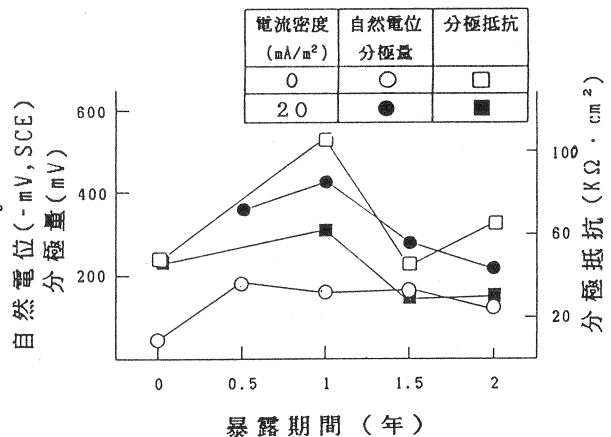


図-4 電気化学測定結果の一例

つた。

4-2 梁の力学的挙動

(1) 静的载荷試験

電気防食の適用による静的载荷試験への影響を図-5~図-7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-5に荷重とスパン中央の変位の関係の一例を示す。図中の理論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わみを計算したものである。図より通電供試体の変位は、無通電供試体、理論値のそれと比べて若干小さくなる傾向にあった。ひびわれ幅の変化を比べると、通電供試体のほうが若干小さい傾向にあり、これらを考慮にいれるとPC鋼材とコンクリートの界面に変化が生じた可能性が考えられるが、明確ではなく今後追求する予定である。図-6にひび

荷重・ton

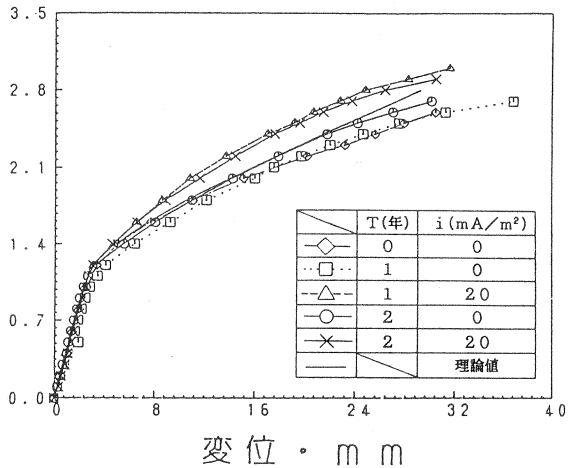


図-5 荷重-変位曲線の一例

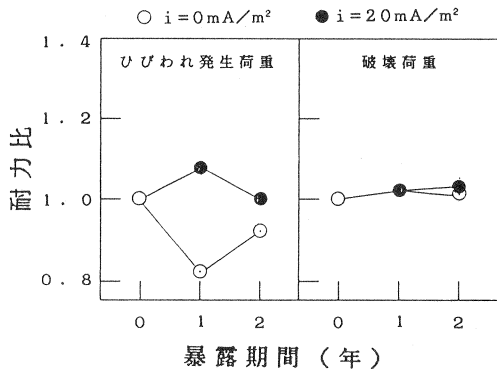


図-7 耐力の経時変化

われ発生状況の一例を示すが、付着切れと推定されるひびわれもなく、電気防食の適用による変化は認められなかった。図-7にひびわれ発生荷重、破壊荷重の暴露0年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認められなかった。

(2) 動的载荷試験

電気防食の適用に対する動的载荷試験への影響を図-8に示す。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-8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認められなかった。またひびわれ発生状況を見ると、付着切れと推定されるひびわれも

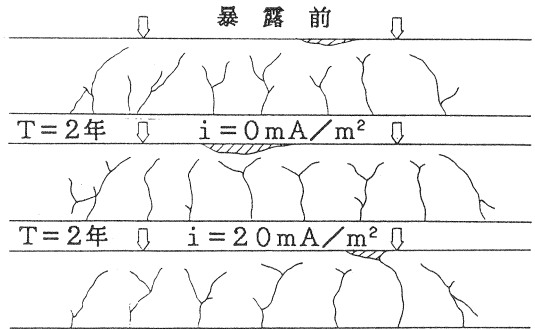


図-6 ひびわれ発生状況の一例

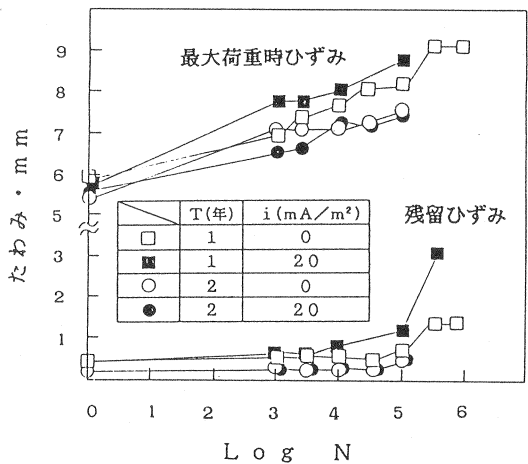


図-8 変位と繰り返し回数の関係

認められず、ひびわれ幅に関しても電気防食の適用による変化は認められなかった。

4-3 PC鋼材の機械的性質と塩分量

静的荷重試験終了後、PC鋼材を取り出し腐食面積測定、引張試験を、PC鋼材付近のコンクリート中に含まれる全塩分分析を実施した。図-9に引張試験結果を示す。電気防食の適用により引張強さ、降伏強さには変化は認められないものの、無通電供試体のPC鋼材の伸びは低下しているのが認められた。これはPC鋼材の破断部分が孔食形態を有する腐食部分であることによるものと考えられる。このことより、電気防食が腐食を抑制していることが明かである。図-10にコンクリート中の塩分量の経時変化を示す。無通電供試体の塩分量は経時的に増加する傾向が認められ、海水散布による塩化物イオンが浸透していることがわかる。一方、通電供試体のそれは減少する傾向が認められ、塩化物イオンが電流によりコンクリート表面へ移動したことがわかる。このことより、電気防食を適用した場合は鋼材付近のコンクリート環境を改善することがわかる。

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2年目まで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 100 mV 以上であ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悪影響は認められなかった。しかし、静的荷重試験における変位に若干の変化が認められた。
- (3) 電気防食による腐食抑制効果は、PC鋼材の引張試験結果より明確であった。
- (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、試験を継続し、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) M. Shupackら: Some recent corrosion embrittlement prestressing system in the United States, PCI Journal, 27 (2), p38~55
- 2) P. R. Vassieら: Concrete coatings: do they reduce ongoing corrosion of reinforcing steel?, Third Int. Symp. on Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, Society of Chemical Industry, p21-24, 1990

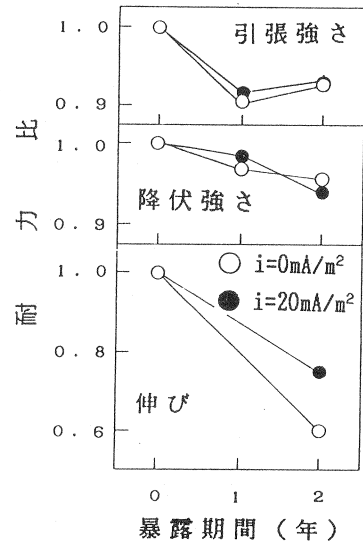


図-9 引張試験結果

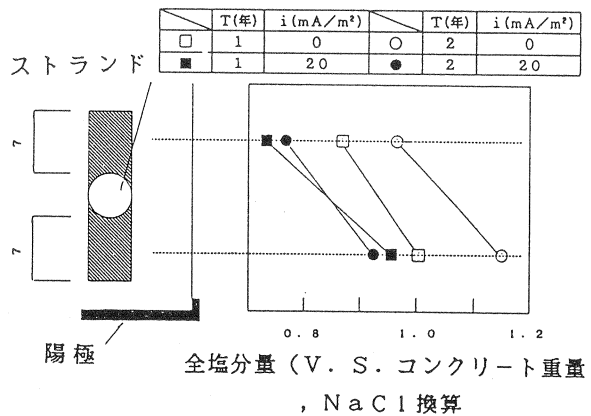


図-10 塩分分析結果