

論文 塩害によるポステン式 PC 梁の劣化予測

中村 典昭^{*1}・睦好 宏史^{*2}・Ha Minh^{*3}・西岡 友樹^{*4}

要旨：本研究は塩害環境下に供用される PC 橋梁を対象として，鋼製シースを用いたポステンション式プレレストコンクリート（以下 PC）梁の電食実験を行い，供試体の劣化状態を実環境下における供用年数と関連づけるための解析的検討を行った。その結果，電流密度 $557 \mu A/cm^2$ で 3 週間の通電を行ったとき，劣化程度は東京湾の最も厳しい飛沫帯で 18 約年供用された場合と同程度であると推定された。この時，PC 鋼材の断面減少及び機械的性質の低下，腐食ひび割れ幅拡大によるシースと梁の付着力の低下により，耐荷力が健全な状態に比べ 50～54% 低下することが明らかとなった。

キーワード：塩害，鋼製シース，ポステン式 PC，電食実験，供用年数

1. はじめに

近年，コンクリート構造物を適切な維持管理を行うことの重要性が認識され始めている。そのために耐久性評価方法や劣化予測手法の確立は不可欠であるが，ポステン式 PC 橋梁の場合シースやグラウトの存在により劣化メカニズムは複雑なものとなる。たとえばコンクリート内部に鋼製シースが使用された部材の場合，シースが腐食して構造物の劣化性状に影響を及ぼすために劣化メカニズムは複雑化する。また，グラウトの施工不良もこのような要因として挙げられる。

本研究は，塩害環境下において鋼製シースを用いたポステン式 PC 橋を対象として電食実験を行い，この種の部材の劣化メカニズムについて実験及び解析的に検討することを目的としている。実験は鋼製シースを用いたポステンション式 PC 梁の電食実験を行い，劣化性状を明らかにした。さらに実験供試体の劣化状態が実環境下における PC 橋の何年分に相当するかを解析的に評価した。

2. 電食実験について

2.1 実験概要

電食に用いた供試体の形状寸法を図-1 に示す。供試体は断面 $100mm \times 300mm$ ，全長 $1720mm$ で，図に示すようにかぶり $40mm$ とし鋼製スパイラルシース（ $20mm$ ）を実橋と同じように偏心配置させ，その中に 7 本より PC 鋼より線 SWPR7A

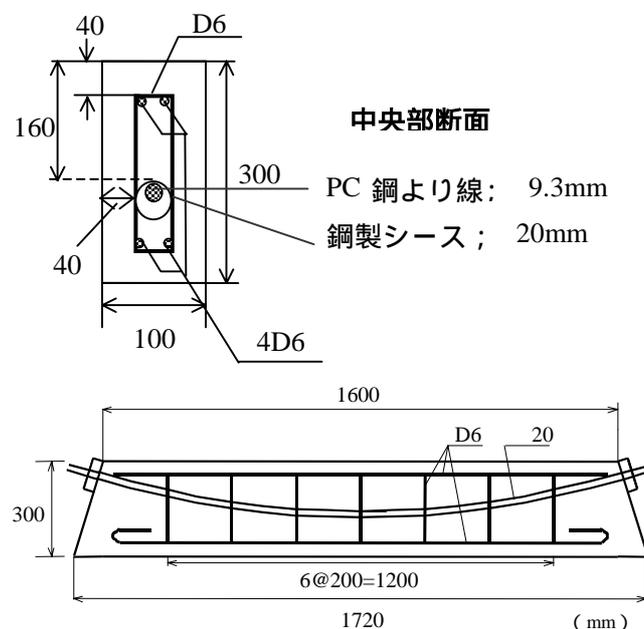


図-1 供試体寸法

*1 埼玉大学 理工学研究科 建設工学専攻 (正会員)

*2 埼玉大学 大学院 教授 工博 (正会員)

*3 埼玉大学 大学院 助手 工博 (正会員)

*4 埼玉大学 工学部 建設工学科

9.3mm (引張強さ 1720N/mm²) を 1 本配置した。その他に供試体長軸方向に上下各々 2 本ずつ D6 鉄筋を配置し、せん断補強筋として D6 鉄筋を供試体中央から供試体長軸方向に各々 3 本ずつの計 7 本配置した。これらは、腐食しないようにエポキシ樹脂 (KC ライナー #300) でコーティングした。コンクリートの圧縮強度は約 40N/mm² である。シース及び PC 鋼材の腐食を促すため、全供試体のコンクリートには予め 3kg/m³ 塩化物イオンを混入した。実験要因は供試体中央部でグラウト充填高さがシース径の 0% , 50% , 100% とした。ただしシースは偏心配置であるため、中央部以外ではどの供試体も完全にグラウトが充填されている。それぞれの供試体を 2 体作製し、電流密度をシースの表面積に対して 557 μA/cm² とし、2 週間及び 3 週間の通電を行った。

腐食促進試験の概略図を 図-2 に示す。各供試体を質量パーセント濃度 5% の NaCl 溶液の入ったアクリル製プール内に設置し、PC 鋼より線を陽極に、供試体の底面に設置したチタンメッシュを陰極として通電を行った。実験は温度 20℃ , 湿度 60% 一定とした恒温室内で行われた。通電中に適宜腐食ひび割れ幅の計測を行い、通電終了後は載荷試験により耐荷力を検討した。 図-3 に示すように載荷方法は油圧ジャッキによる静的 2 点載荷とし、載荷スパンは 300mm とした。さらにその後供試体を解体し、PC 鋼材腐食減量を計測した。

2.2 実験結果

実験要因と併せ通電後の PC 鋼材の質量減少計測結果及び載荷試験結果を表-1 に、載荷試験の応力変位関係を 図-4 に示す。PC 鋼材質量減少率、PC 鋼材断面残存率、終局耐力残存率とは各データを、通電を行っていない健全な供試体から得られた値で除したものである。載荷試験後に供試体を破壊して鋼材の腐食状況を観察したところ、全ての供試体において梁の長手方向中心付近 40cm の領域で腐食が生じていた。これはシースを偏心させたために梁の中央部でシース

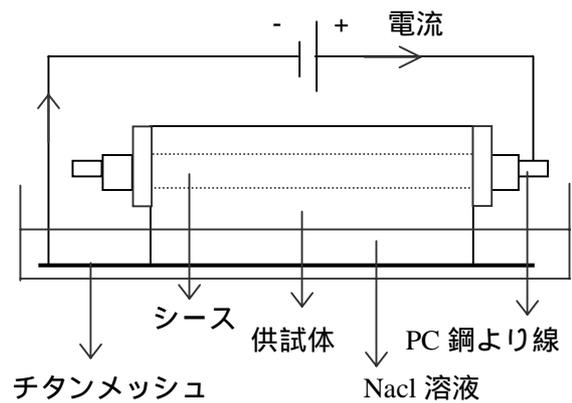


図-2 腐食促進試験

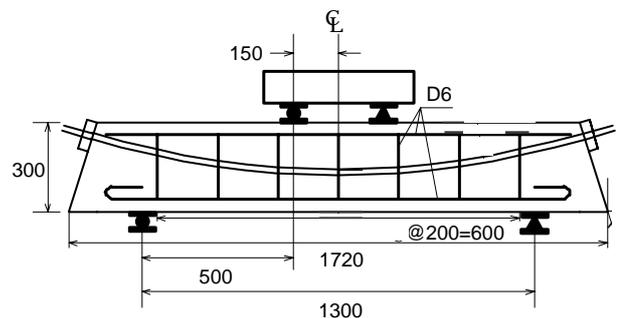


図-3 載荷試験概要

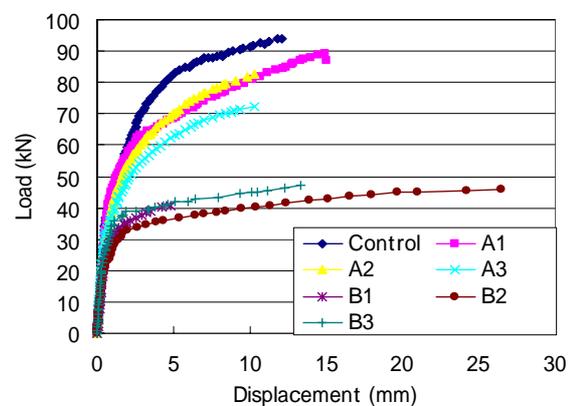


図-4 応力変位曲線

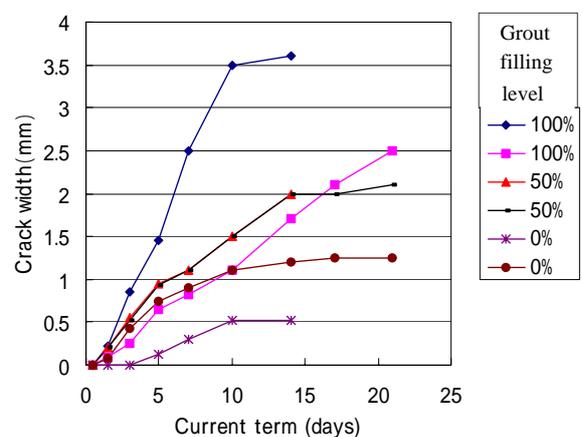


図-5 ひび割れ幅-通电日数関係

表-1 実験要因及び載荷試験結果一覧

NO.	グラウト 充填率 (%)	通電日数 (日)	終局耐力 (kN)	PC鋼材 質量減少率 (%)	PC鋼材 断面残存率 (%)	終局耐力 減少率 (%)
A1	0	14	89.8	0.31	99.1	4.5
A2	50		82.5	0.77	97.7	12.2
A3	100		72.3	0.62	96.3	23.1
B1	0	21	43.2	5.54	83.8	54.0
B2	50		45.8	5.08	85.1	51.3
B3	100		47.0	3.54	89.5	50.0

と電極との距離が近くなり、コンクリートの電気抵抗が端部に比べ小さくなったためと考えられる。こうして中央部に電流が集中したために腐食が局所化する結果となった。これは長手方向に一樣に腐食する一般的な電食実験に比べ、より実際の現象に近い腐食形態を再現しているといえる。

通電 2 週間の段階では質量減少率が 0.31 ~ 0.77%の微小な値となっていることから、この時点が PC 鋼材の腐食開始直後の状態であることが推測される。この時、PC 鋼材の質量減少率が微小であるにもかかわらず全ての供試体で耐力が減少しており、特にグラウト 100%の A3 供試体は 23%もの耐力が失われている。これは鋼製シースの腐食に伴う腐食ひび割れ幅の拡大によるものと考えられる。図-5 に腐食ひび割れ幅と通電日数の関係を示す。腐食ひび割れ幅の検討には梁の中央部のデータのみを用いた。錆汁の流出により多少のばらつきを有するものの、著者らの既往の研究結果と同様に¹⁾グラウト充填率が高いほど腐食ひび割れを生じ易い傾向が得られている。載荷試験ではひび割れ幅が拡大したほど耐力の低下も著しい結果となった。すなわち、腐食ひび割れの拡大が著しいほどシースとコンクリート間の付着力が低下

し、耐力の低下を引き起こしたといえる。

通電 3 週間後の段階では、PC 鋼材の腐食はある程度進行しており、グラウト充填率が低いものほど質量減少率が大きい結果となった。これはグラウト充填が不十分なものほど、腐食ひび割れ部などから供給される酸素や水分などの外的要因に曝されやすくなり、断面減少及び機械的性質の低下を引き起こしたためである。

以上のことから、腐食劣化の初期段階ではグラウト充填率の高いほど耐力が低下する傾向にあるものの、その後は外的要因の影響でグラウト充填率の低いものほど著しく耐力が失われることが明らかとなった。

3. 劣化予測について

3.1 劣化過程の定義

ボステン式 PC 部材において鋼製シースが使用されている場合、コンクリート表面からの塩化物イオンの浸透により、シース界面に形成されていた不動態皮膜が破壊され、シースの腐食が開始する。そしてシースの腐食膨張圧によりコンクリートに内部から圧力がかかり、コンクリート表面に生じる引張応力がコンクリートの引張強度に達した時に腐食ひび割れが発生する。この時点では PC 鋼材はまだ腐食しておらず、そ

表-2 劣化過程の定義

名称	相当する期間
シース腐食潜伏期	供用開始 ~ シースの腐食開始
進展期	シースの腐食開始 ~ 腐食ひび割れの発生
PC鋼材腐食潜伏期	腐食ひび割れ発生 ~ PC鋼材の腐食開始
加速期	PC鋼材の腐食開始以降

の後の腐食ひびわれ部から塩化物イオン，酸素，水分などが供給されることにより腐食が促され，やがてグラウト内に塩化物イオンが浸透し，PC鋼材位置の塩化物イオン濃度が腐食発生限界量に達した時，PC鋼材の腐食が開始する。このようなPC部材の劣化過程を表-2に示すような各ステップに分類し，それぞれが相当する実環境下における供用年数を解析的に算定した。このようにして実験供試体の劣化程度を評価した。

3.2 シース腐食潜伏期

フィックの拡散方程式として知られる，(1)式によりシース近傍の塩化物イオン濃度を求め，これが腐食発生限界量に達した瞬間に腐食が開始すると考えた。コンクリート表面における想定塩化物イオン量は，コンクリート標準示方書施工編より飛沫帯を想定して 13.0kg/m^3 とした。腐食発生限界塩化物イオン濃度については，示方書や文献²⁾を参考に 1.8kg/m^3 とした。

$$C_c(X_t, t) = C_0 \cdot (1 - \text{erf}[\frac{0.1 \cdot X_t}{2\sqrt{D_c \cdot t}}]) \dots \dots \dots (1)$$

ここに，

$C(X_t, t)$ ：深さ $x(\text{mm})$ ，時刻 t (年)における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

D_c ：拡散係数 (cm^2/year) ($0.637\text{cm}^2/\text{year}$ とした)

C_0 ：コンクリート表面における想定塩化物イオン量 (kg/m^3)

erf ：誤差関数

(1)式より，実験供試体のかぶり40mm，水セメント比40%を適用すると，供用年数5.6年に相当することが明らかとなった。これは，電食実験開始以前に供試体は既に飛沫帯で5.6年間供用された状態にあることを意味している。なぜなら，供試体のコンクリート内には腐食発生限界量を上回る 3kg/m^3 の塩化物イオンが混入されているからである。すなわち，本電食実験では通電開始直後にシースの腐食が開始すると仮定した。

3.3 進展期

表-3 解析に用いた材料特性

圧縮強度	40(N/mm ²)
引張強度	2.69(N/mm ²)
破壊エネルギー	0.106(N/mm)
腐食生成物の体積膨張率	3

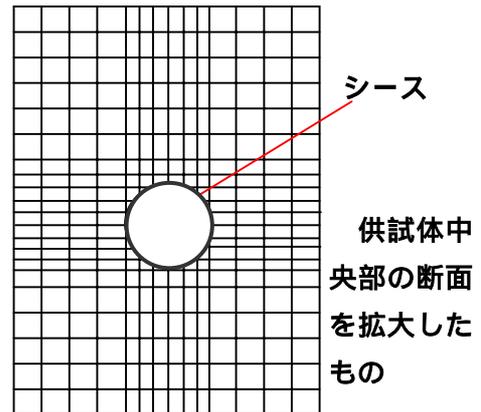


図-6 断面の要素分割例

二次元有限要素法汎用プログラム WCOMD を用いて，腐食ひび割れ発生までに要するシース腐食量を算出した。シース内部を空隙であると想定し，腐食膨張をシースの周囲に作用する強制変位として与える変位制御型の増分解析を行った。解析対象は，供試体中央部の断面とし，奥行きは単位長さとした。供試体断面の要素分割例を図-6に示す。また，解析に使用した材料特性を表-3に示す。本電食実験は，供試体底面に設置したチタンメッシュを電極としているため，シースの腐食は電極に近い部位から徐々に進行する。そこで，解析においても電極に近い位置にある要素から順に強制変位を与えることとした。飯泉らの研究³⁾を参考に，(2)式により与えた変位量をシース腐食量に換算した。なお，シース腐食量は奥行きを単位長さとした場合のシース表面積に対する値とする。

$$W_c = \frac{\gamma}{\rho - 1} u_2 \dots \dots \dots (2)$$

ここに，

- Wc : 鉄筋腐食量 (mg/mm²)
- u₂ : 鉄筋の半径方向に増大した厚さ (mm)
 - : 鉄の密度 (7.85mg/mm³)
 - : 腐食生成物の体積膨張率 (3.0 とした)

ここで、実環境下における鋼材の腐食速度より、この期間の実橋における供用年数を求める。腐食速度は、既往の研究⁴⁾より東京湾の飛沫帯における断面減少率 0.35%/year を用い、シースが 20mm の鉄筋と同様に腐食すると仮定すると、(3)式⁵⁾から質量減少量として 21.9mg/cm²/year が得られる。これより、かぶり 40mm の実験供試体はシースの腐食が開始してから腐食ひび割れが発生するまでに 1.6 年を要することがわかる。因みに、潜伏期の計算値 5.6 年と足し合わすと 7.2 年となる。すなわち、供用開始後約 7 年で腐食ひび割れが発生すると推定される。

$$\zeta = \left\{ 1 - \frac{(\varphi/2 - x/\gamma)^2}{\varphi/2^2} \right\} \times 100[\%] \dots \dots (3)$$

- ここで、
- ζ : 断面減少率 (%)
- : シース径 (cm)
- x : 質量減少量 (mg/cm²)
- : 鉄筋密度 (mg/cm³)

3.4 PC 鋼材腐食潜伏期

PC 鋼材の腐食開始時期を論理的に定義するには、グラウト内に塩化物イオンが浸透し始める時期や、腐食ひび割れ発生による外来塩分の影響などの不確定な要因を考慮しなければならない。そこで、電食実験の結果において通電 2 週間の時点で PC 鋼材が 0.31 ~ 0.77% の微小な質量減少を生じていることから、通電 2 週間の時点 PC 鋼材の腐食開始時期と仮定した。ファラデーの理論式(4)により、流した積算電流量が全てシースの腐食反応に使われたとすると PC 鋼材の腐食が開始する時点におけるシースの腐食量が

算出される。

$$G = \frac{M}{2Fa} \int I_{corr} dt \quad (I_{corr} = I/S) \dots \dots (4)$$

- ここで、
- G : 腐食量(g/cm²)
- M : 鉄の原子量(55.8)
- Fa : ファラデー数 (96500)
- S : シースの表面積 (cm²)
- I : 腐食電流(A)
- I_{corr} : 腐食電流密度(A/cm²)

電流密度をシースの表面積に対する値として計算した結果、シース腐食量が 173mg/cm² に達した時に PC 鋼材の腐食が開始することが明らかとなった。さらにこの値を実橋の供用年数に換算することにする。横田らの研究⁶⁾では、ひび割れ発生後の腐食速度は発生前の約 3 倍に増大している。これを先程の腐食速度 13.7mg/cm²/year に適用すると腐食速度は 41mg/cm²/year となり、この期間は実橋における供用年数は 4.2 年と推定することができる。

3.5 加速期

これ以降シースの腐食とともに PC 鋼材の腐食が進行する。この期間も第二潜伏期と同様にファラデーの理論式を用い、所要の通電時間を腐食量に換算する。ただし、ここではシースと PC 鋼材がともに腐食するため、電流密度はシースと PC 鋼材の表面積の和に対する値とした。計

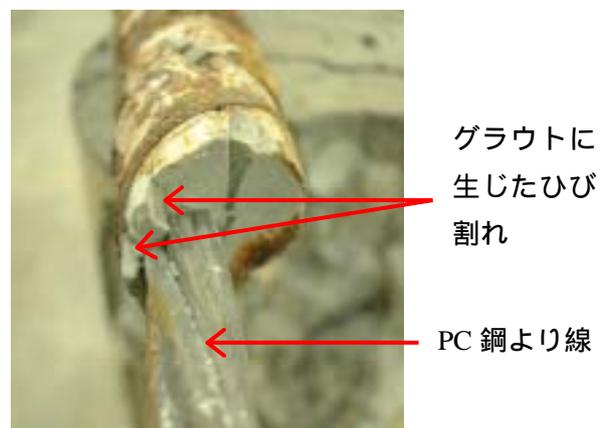


図-7 劣化後のシース内部

算の結果、PC 鋼材の腐食量 $181\text{mg}/\text{cm}^2$ が得られた。これを実橋における供用年数に換算する。図-7のように電食実験後の目視観察によると、PC 鋼材の腐食によりグラウトに生じる腐食ひび割れは亀裂程度の微小なものであったため、腐食速度の増大に寄与するものではないと判断した。そこで、進展期と同様に腐食速度として断面減少率 $0.35\%/year$ を用いて PC 鋼材の腐食量を計算する。断面減少量 0.35% を、PC 鋼材径 9.3mm を考慮して(3)式により質量減少率に換算すると $12.9\text{mg}/\text{cm}^2$ となり、腐食速度 $12.9\text{mg}/\text{cm}^2/year$ が得られる。したがって、実験期間に相当する実橋における加速期の供用期間は 6.3 年となる。

3.6 解析結果の検討

以上の各ステップの実橋換算供用年数を足し合わせた結果、21 日間通電した実験供試体が相当する実橋の供用年数はおよそ 18 年となった。これは最も厳しい塩害環境を想定した上で得られた推定値であるため、一般には安全側の評価として劣化状態の目安とすることができる。

以上のように、電食による腐食促進実験と実構造物の相関を様々な仮定のもとで関係づけることを試みた。今後はさらに精度をあげて、構造物劣化シミュレータを開発する予定である。

4. まとめ

本研究により以下のことが明らかとなった。

- (1) 偏心シースに対して電食実験を行うことで長手方向に腐食が局所化し、より実際の現象に近い腐食劣化を再現できる。
- (2) グラウト充填率が高い部材は低いものに比べひび割れを生じやすいため、シースとコンクリート間の付着力の低下により、腐食初期段階では耐荷力が低下する。
- (3) 腐食ひび割れ幅が拡大すると、酸素や水分の供給量が増加することにより PC 鋼材の腐食が促進され、特にグラウト充填率が低い部材において耐荷力が急激に低下する恐れがある。
- (4) シース表面積に対する電流密度 $557\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$

で 3 週間の通電を行ったとき、劣化程度は東京湾の飛沫帯で約 18 年間供用された場合と同程度であると推定された。

謝辞

本研究を行うにあたって、鈴木金属工業(株)より PC 鋼材、定着具、油圧ジャッキをご提供頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 中村典昭, 睦好宏史, Ha Minh, 谷口 博胤: グラウト充填率が PC 梁の腐食劣化に及ぼす影響, コンクリート工学, Vol.27, No.1, pp.661-666, 2005.6
- 2) 松島学, 堤知明, 関博, 松井邦人; 塩害環境下における RC 構造物の設計かぶり, 土木学会論文集, Vol.23, No.490, pp.41-49, 1994
- 3) 飯泉興平, 関博, 薛昕: 塩化物と中性化の複合作用を受ける RC 部材の鉄筋腐食とかぶりコンクリートに発生するひび割れに関する研究, コンクリート工学年次論文集, vol.27, No.1, 2005
- 4) 堤知明, 白井伸一, 安田登, 松島学; 塩害劣化に関する影響要因の実データに基づく定量的評価, 土木学会論文集, No.544/V-32, 33-41, 1996.8
- 5) 高橋稔明, 酒井通孝, 関博, 松島学; 塩害環境下における RC 構造物の LCC 算定と補修工法選定システムの開発, コンクリート工学論文集, 第 16 巻第 3 号, pp21-29, 2005.9
- 6) 横田優, 佐々木孝彦, 飯島享, 松島学; 塩害により鉄筋が腐食したコンクリートの劣化予測, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, 2004