

## 論文 グラウト充填率が PC 梁の腐食劣化に及ぼす影響

中村 典昭<sup>\*1</sup>・ 睦好 宏史<sup>\*2</sup>・ Ha Minh<sup>\*3</sup>・ 谷口 博胤<sup>\*4</sup>

要旨：本研究は，グラウト充填の不十分な PC 梁について腐食劣化を進行させ，グラウト充填率と PC 鋼材腐食の関係について実験的検討を行った。また，腐食ひび割れモデルを用いて腐食劣化に伴う腐食ひび割れ幅拡大挙動に対し数値的検討を行った。その結果，グラウト充填率が低いほど PC 鋼材の腐食が生じやすいことが実験的に明らかとなった。また，ここで用いた腐食ひび割れモデルが実際の腐食ひび割れ挙動をある程度の精度で表現できることが明らかとなった。

キーワード：グラウト充填率，腐食促進試験，腐食ひび割れ幅，腐食減量

## 1. はじめに

既設のインフラをはじめとするコンクリート構造物の多くは，第二次世界大戦後の高度経済成長期に，「速く，安く，大量に」というコンセプトのもとに造られたものである。現在，これらは建設後数十年が経過しており，鋼材腐食等による構造物の劣化が懸念されはじめ，既設構造物の耐用年数の推定方法や適切な補修時期の算定方法などが求められるようになってきているが，この分野の研究は未だ発展途上にあるのが現状である。

ポストテンション式 PC 構造物の場合，塩害やグラウト施工不良による PC 鋼材腐食が問題視されているが，シースの存在やシーソ内グラウト充填状況などの差異から，RC 構造物に比べ腐食劣化挙動が複雑であり，その劣化状態を推定するのはさらに困難であるといえる。

そこで，本研究は実橋のグラウト施工不良状況を模擬したポステン式 PC 梁に対し，通電による腐食促進試験を行うことにより，グラウト充填率が PC 鋼材腐食に及ぼす影響を実験的に明らかにすると共に，腐食ひび割れモデルを用いて腐食ひび割れが発

展する挙動を数値的に検討したものである。

## 2. 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 300mm×300mm，長さ 400mm で，図に示すようにかぶりを 40mm として鋼製シーソ(20mm)を配置し，その中に 7 本より PC 鋼より線 SWPR7A 9.3mm (引張強さ 1720N/mm<sup>2</sup>)を 1 本配置した。本研究では腐食ひび割れをできるだけ上面に発生させるために，他の面に対するかぶりは大きくとるようにした。また，供試体の長さが非常に短いため，プレストレスが腐食ひび割れ幅拡大に影響することを避けるためプレストレスの導入は行わなかった。コンクリートの圧縮強度は 40.0 N/mm<sup>2</sup>である。シーソ及び 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/m<sup>3</sup> 塩化物イオンを混入した。

実験要因は，シーソ内のグラウト充填高さをシーソ径の 0, 1/3, 2/3, 1, の 4 種類として，それぞれをグラウト充填率 0%(G-1), 33%(G-2), 66%(G-3), 100%(G-4)と定義した。

\*1 埼玉大学大学院 理工学研究科 建設工学専攻 (正会員)

\*2 埼玉大学工学部 建設工学科 教授 工博 (正会員)

\*3 埼玉大学大学院 理工学研究科 生産科学専攻 工修 (正会員)

\*4 埼玉大学大学院 理工学研究科 建設工学専攻

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、0.14A の一定電流を直流電流装置により2~4週間通電した。実験は温度20℃、湿度60%一定とした恒温室内で行われた。測定項目は腐食ひび割れ幅、PC 鋼材腐食量とした。腐食ひび割れ幅は、1.5 mm以下のものはクラックスケール、それ以上のものはノギスを用いて計測した。

腐食促進試験終了後に PC 鋼材をはつり出し、質量パーセント濃度10%クエン酸二アンモニウムに2日間浸けて除錆した後に質量を測定した。この時、通電していない健全な PC 鋼より線質量との差を腐食減少量と定義した。また、腐食減少量を健全な PC 鋼より線の質量で除したものを腐食減少率と定義している。

### 3. PC 梁の腐食メカニズム

ポストテンション式 PC 梁の場合、シー스가存在するため RC 梁とは腐食メカニズムが異なる。

実構造物の場合、コンクリート中に外部から塩化物イオンが浸透し、やがてシース界面に到達する。ここで、アルカリ環境下で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。シースが徐々に腐食劣化し、亀裂などが生じた部分から塩化物イオンがグラウト内に浸透し、やがて PC 鋼材界面に到達する。ここでシースの腐食と同様の現象が PC 鋼材においても起こり、PC 鋼材の腐食が開始して梁の耐荷力低下に起因する結果となる。

すなわち、ポストテンション式 PC 梁における一連の腐食はシースから始まり、その後 PC 鋼材へ移行する。

本実験においても腐食進行のプロセスは同様であり、電気を流すことにより PC 鋼材を陽極、供試体底面に配置されたチタンメッシュを陰極とする電池が形成されるため、コンクリート内に予め混入されている塩化物イオン ( $3\text{kg}/\text{m}^3$ ) の浸透を助長する結果となる。

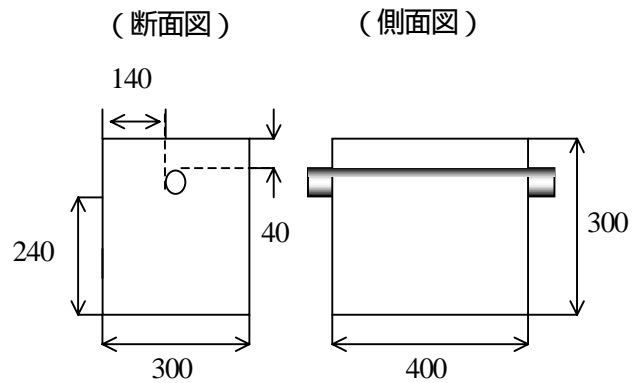


図-1 供試体寸法

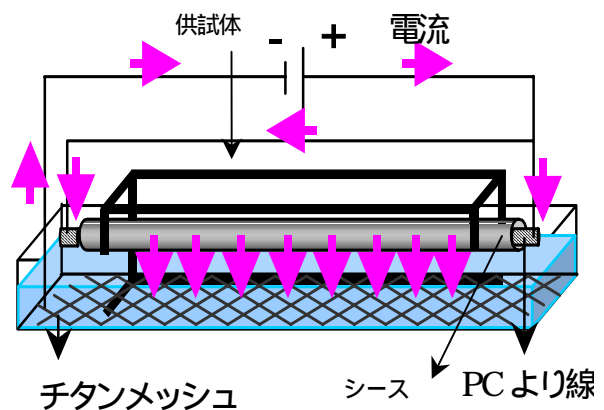


図-2 腐食促進試験

### 4. 腐食ひび割れに対する検討

腐食ひび割れ幅と通電期間の関係を図-3 に示す。供試体上面の長手方向に、シースに沿って生じた腐食ひび割れ幅を等間隔に5点計測し、これらの平均値を腐食ひび割れ幅と定義した(図-4)。G-1、G-2 は実験の都合上、通電期間をそれぞれ2週間及び3週間とし、G-3、G-4 は4週間とした。

ひび割れ観察の結果から、G-2、G-3、G-4 は通電開始から1.5日目で、G-1 では3日目に腐食ひび割れが確認された。これはグラウト充填が不十分な場合、内側に空隙部分が存在するために、シース腐食によって生じる腐食膨張圧が、グラウト充填が十分にされている場合に比べて小さくなるためであり、既往の実験結果<sup>1)</sup>の傾向とも一致している。すなわち、グラウトを100%充填した場合、シース腐食による腐食ひび割れ幅は充填率が低い場合と比べて大きくなるのである。

しかし、本実験においてはグラウト充填率の違いと腐食ひび割れ幅の間に明確な関係は認められなかったが、通電 28 日後において G4 の最終腐食ひび割れ幅が G3 よりもかなり大きくなっており、グラウト充填率が高い場合において卓越して腐食ひび割れを生じる結果となった。

さらに、通電日数 7 日目に着目すると、各供試体ともひび割れ幅の推移に変化が見られ、特に G-3、G-4 に関してはその変化が顕著に見られる。これは、上面に生じた主腐食ひび割れの他に、主腐食ひび割れの拡大に伴い、鋼材位置から供試体側面方向へと伸びる副ひび割れの発生が大きく影響しているものと考えられる。

図-5 は供試体正面を写したものであるが、副ひび割れが供試体正面において鋼材位置から側面まで伸びている様子がわかる。この副ひび割れは、ひび割れ計測 7 日目から 14 日目の間に確認されており、図-3 においてひび割れ幅の推移に変化が見られた通電日数 7 日目の変曲点とも一致する。

以上のことから、副ひび割れの発生により腐食ひび割れ拡大傾向が変化するものと考えられる。

## 5. グラウト充填率と PC 鋼材腐食性状

表-1 に腐食促進実験における腐食減量の値を示す。著者らの既往の研究<sup>1)</sup>から腐食ひび割れを介して外部から供給される酸素や湿分が一連の腐食メカニズムに大きく寄与することが明らかとなっている。ここで各供試体の最終ひび割れ幅と腐食減少量を比較すると、G2、G3 は最終腐食ひび割れ幅がそれぞれ 2.38mm、5.18mm となっており、G3 の腐食ひび割れ幅がより卓越しているものの、腐食減少量はどちらも 16% となっている。同様に、G3、G4 は最終腐食ひび割れ幅がそれぞれ 5.18mm、5.98mm となっており、G4 の腐食ひび割れ幅がより卓越しているものの、最終腐食ひび割れ幅は G3 の 16% に対し、G4 は 14% にとどまっている。

また、G2 および G3 ののはつり出しの結果から、シーす内部においてグラウトの充填がなされていない部分、すなわちシーす内において空隙部がある部分

表-1 最終腐食ひび割れ幅と腐食減少量

供試体名	グラウト充填率 (%)	最終腐食ひび割れ幅 (mm)	腐食減少量 (%)
G1	0	1.1	0
G2	33	2.38	16
G3	66	5.18	16
G4	100	5.98	14

の PC 鋼材の方が、グラウト充填されていた側に比べ著しく腐食が進行していたことが確認された。はつり出しの際に、シーす内部が非常に高い湿潤状態であったことが確認されており、腐食促進試験中にグラウトの無い空隙部分が非常に腐食しやすい環境であったことが推測される。

これらのことから、グラウトの PC 鋼材腐食保護としての役割が実験的に明らかになったといえる。しかし、G4 においても PC 鋼材腐食が認められており、グラウト充填が十分にされていても PC 鋼材腐食を生じる可能性があることを示す結果となった。

## 6. 腐食ひび割れモデルについて

一般に、構造物の劣化診断では外観調査が多く用いられ、コンクリート表面状況から部材の残存耐力や供用寿命が推定できることが望ましい。そこで、腐食ひび割れ幅から部材内部の様子を推定するために、腐食ひび割れモデルを用いて数値的に腐食ひび割れの推移について検討した。

図-6 にモデル概念図を示す。堤等のモデル<sup>3)</sup>では、鉄筋腐食により生成する錆を弾性体の中空円筒と仮定し、外側に腐食膨張圧力  $q_1$ 、内側に腐食膨張圧力  $q_0$  が発生するものとして、腐食膨張圧による錆内部の鉄筋変位量および錆外部のコンクリート変位量から変位の適合条件により腐食膨張圧を算定している。本モデルでは、ファラデーの理論式(1)から得られる鋼材腐食量を用いて、グラウト施工不良状態を想定した PC 梁断面に対する腐食ひび割れモデルにより腐食ひび割れ幅の解析を行っている。

$$G = \frac{M}{2Fa} \int I_{curr} dt \quad \dots (1)$$

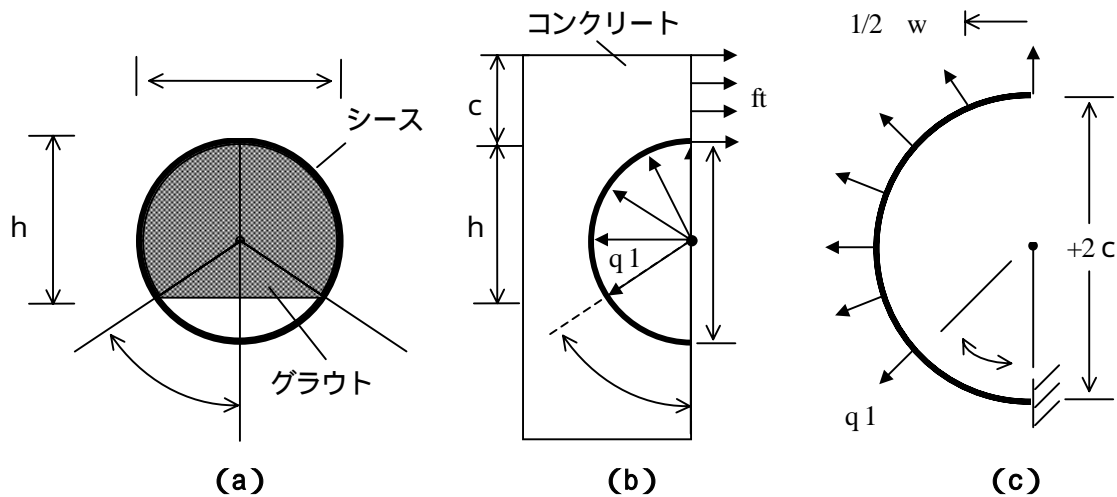


図-6 モデル概念図

ここで、

M：鉄の原子量 (=55.8)

Fa：ファラデー数 (=96500 クーロン)

Icurr (=I/S)：腐食電流密度 (A/cm<sup>2</sup>)

I：腐食電流量 (A)

S：鋼材表面積 (cm<sup>2</sup>)

G：鋼材腐食量 (g/cm<sup>2</sup>)

まず、図-6 (a) に示すように、鋼製シースとグラウトからなるモデルと仮定する。シース内のグラウト高さ h からグラウト充填率 を定め、(1) 式により角度  $\alpha$  を算定する。

$$\beta = \frac{h}{\phi}$$

$$\alpha = \cos^{-1}(2 \cdot \beta - 1) \dots \dots \dots (2)$$

ここで、

φ：シース径 (mm)

h：シース内グラウト高さ (mm)

β：グラウト充填率

次に、シース内空隙部分は腐食膨張圧力  $q_1$  を反力として受け持たないと仮定して、得られた  $\alpha$  の値からひび割れ発生の有無及びひび割れ幅の算定を行った。

モデルでは腐食ひび割れ発生条件を図-6 (b) に示すように仮定している。すなわち、腐食膨張圧  $q_1$

が図のように分布し、その合力がコンクリート引張強度  $f_t$  を上回った時に腐食ひび割れが発生するとして式 (2) により求めている。

$$f_t = 0.23 f_c^{(2/3)} \dots \dots \dots (3)$$

$$f_{tave} = \frac{q_1 \cdot \phi \cdot (3 - \cos \alpha) \cdot (1 + \cos \alpha)}{4 \cdot c} \dots \dots (4)$$

ここで、

$f_t$ ：コンクリートの引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)

c：かぶり (mm)

$f_{tave}$ ：かぶり部に生じる引張応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$$J_r(t) = f_t - f_{tave} \dots \dots \dots (5)$$

(5) 式より  $J_r(t)$  がゼロとなる t を腐食ひび割れ発生時間とした。

腐食ひび割れ幅 w は図-6 (c) のように、かぶりコンクリートを半円筒の片持ち梁と仮定し、等分布荷重  $q_1$  による梁先端部の変位として定義し、式 (6) により求めている。

$$\delta w = ((3\pi - 2\alpha + \alpha \cos \alpha + \sin \alpha) \cdot (c + \phi)^3 \cdot (2c + \phi) \cdot q_1) / (E \cdot I) \dots \dots (6)$$

ここで、

E：コンクリートのヤング率 (N/mm<sup>2</sup>)

I：単位厚さの断面 2 次モーメント (mm<sup>4</sup>)

なお、既往の実験結果<sup>(1)</sup>から PC 鋼材腐食は通電7日～14日目に生じていることが明らかとなったため、本モデルでは14日目にPC鋼材腐食が始まると仮定し、通電日数14日目以降はシース腐食による腐食膨張圧力とPC鋼材腐食による腐食膨張圧力を重ね合わせて全腐食ひび割れ幅として算定した。

## 7. 解析値の検討

図-7に実験値と解析値との比較を示す。ここで用いた腐食ひび割れ幅とは供試体上面の腐食ひび割れ幅である。解析値は実験のひび割れ幅の推移を比較的良く表しているものと思われ、通電日数にして7日目まで(シース腐食量;  $93\text{mg}/\text{cm}^2$ )であればおおそ腐食ひび割れの推定が可能であるといえる。ただし、本モデルではグラウト充填率が0%の時は、シース内部にグラウトがないために、シース腐食による腐食膨張圧に対する反力がコンクリートに作用しないと仮定した。したがって、G-1における解析値のひび割れ幅は0となった。

通電日数14日目に着目すると、解析値はグラウト充填率が低いほど実際の腐食ひび割れ幅を過小評価する傾向が見られる。これは、PC鋼材腐食発生時期が解析値と実験値で異なるためであると推測される。

グラウト充填率が低いほどPC鋼材腐食を生じ易いことが実験的に明らかとなっているが、解析値はいずれのケースも通電日数14日目からPC鋼材腐食が開始すると仮定している。すなわち、腐食ひび割れ幅を過小評価しているG-1,G-2に関しては通電日数14日目以前に、一方、過大評価となっているG-3,G-4に関しては通電日数14日目以降にPC鋼材腐食が始まったものと推測される。

以上のことから、今後はグラウト充填率とPC鋼材腐食開始時期の関係が明確になれば、より精度よい腐食ひび割れ挙動を数値的に求めることができるといえる。

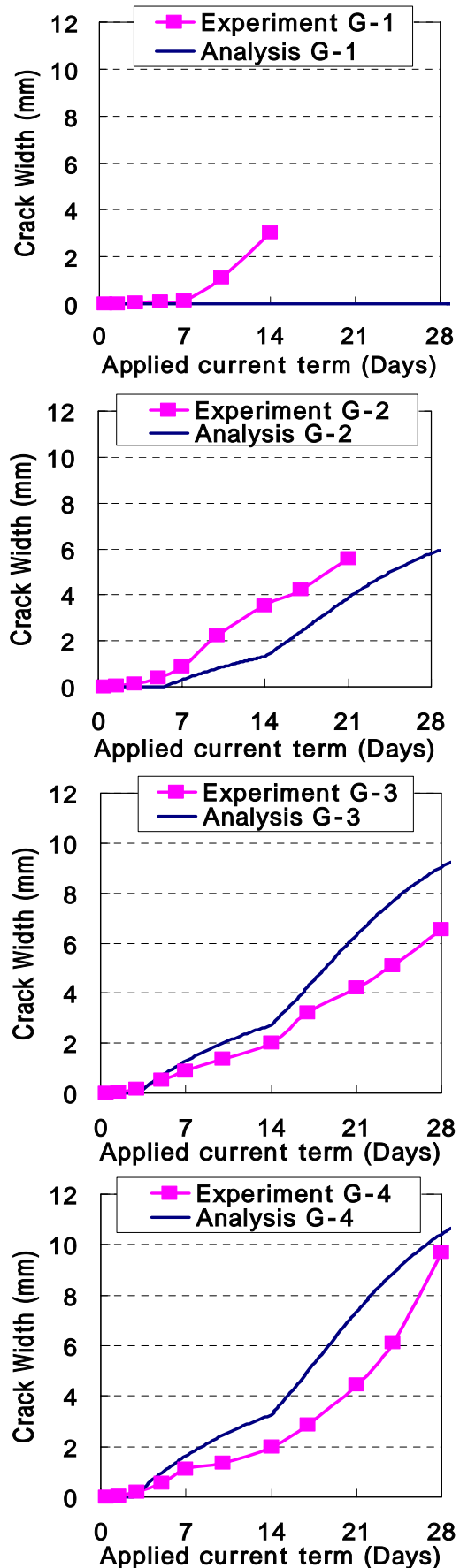


図-7 実験値と解析値の腐食ひび割れ幅比較

## 8. ひび割れ発生限界腐食量について

松島ら<sup>3)</sup>の研究では、電食試験及び物理モデルの腐食ひび割れ限界腐食減量は50~100mg/cm<sup>2</sup>であり、コンクリート標準示方書で示されている10mg/cm<sup>2</sup>より大きいとしている。本研究では、解析値においてG-1では74 mg/cm<sup>2</sup>、G-4では36 mg/cm<sup>2</sup>となっており、グラウト充填率が高いほど腐食ひび割れ限界腐食量が小さくなった。実験値では腐食ひび割れ限界腐食減量は20~40mg/cm<sup>2</sup>の間にあり、本研究においては実験値、解析値ともに示方書に示されている値よりも腐食ひび割れ発生限界量が大きいという結果が得られた。電食の場合、腐食生成物はシース長手方向に対して一様に生じるが、シース周囲に対してはPC鋼材とチタンメッシュ間で腐食電池が形成されるため、チタンメッシュ側のシースに卓越して錆が生じる傾向がある。一方解析では、シース周囲に対して同心円状に一様に腐食生成物を生じる。これにより、実験の方が解析値よりも腐食ひび割れ幅は概して大きな値となる。

## 9. まとめ

本研究ではグラウト充填が不十分な場合におけるPC梁の腐食劣化を電食試験により短期間で再現し、グラウト充填率とPC鋼材腐食の関係について実験的検討を行い、さらに物理モデルによる数値的検討を行った。この結果以下のことが明らかとなった。

- (1) グラウト充填率が高い場合において卓越してシースによる腐食ひび割れが発生する傾向はあるが、PC鋼材腐食保護としてのグラウト充填の重要性が実験においても確認された。しかし、完全なグラウト施工でもPC鋼材腐食を生じる可能性を示唆する結果となった。
- (2) 主腐食ひび割れの拡大により発生する副ひび割れが生じると、腐食ひび割れ拡大傾向が変化する。
- (3) 本腐食ひび割れモデルは、実際の腐食ひび割れ挙動をある程度の精度で表現できる事が明らかとなった。
- (4) 腐食ひび割れ限界腐食減量は解析値では36~74 mg/cm<sup>2</sup>、実験値が20~40mg/cm<sup>2</sup>となっており、コンクリート標準示方書で示されている10mg/cm<sup>2</sup>より大きい値となった。

## 謝辞

本研究を行うにあたって、鈴木金属工業(株)よりPC鋼材をご提供頂いた。本研究は、PC技術協会「PCグラウト規準作成委員会」の活動の一環として行われたものである。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 谷口 博胤, 睦好 宏史, 今野 洋一, Ha MINH, 二井谷 教治: グラウトの充填度がPC鋼材腐食に及ぼす影響, PC構造物の現状の問題点とその対策, 第2部シンポジウム論文集, pp309-314, 2003.6
- 2) 堤 知明, 安田 登, 松島 学, 大賀 宏行: 腐食生成物によるひび割れ幅のモデル化に関する研究, 土木学会論文集, 585, V-38, pp69-77, 1998.2
- 3) 松島 学, 横田 優, 関 博: 鉄筋腐食膨張によるひび割れ発生時の腐食量, コンクリート工学年次論文集 vol.26 No.2 pp1669-1674 2004