

腐食ポストテンション方式PC梁の曲げひび割れ発生以前の挙動

高知工業高等専門学校 ○中谷 明登
 高知工業高等専門学校 正会員 近藤 拓也
 高知工業高等専門学校 正会員 横井 克則
 CORE技術研究所(株) 正会員 西 弘

Abstract : In this study, a specimen in which the steel sheath arranged in concrete was corroded by salt attack was prepared, and the flexural performance in this condition was evaluated. Corrosion simulation was carried out by electrically corrosion. As a result, the flexural cracking load decreased with increasing axial crack width of the concrete surface by sheath corrosion. Also accompanied by this, prestress was also reduced. Therefore, the cause was thought to be due to the progress of internal cracks.

Key words : flexural cracking, Post tensioning PC, electrically corrosion, strain distribution
 Prestress-loss

1. はじめに

近年、沿岸部や凍結防止剤の散布される山中などの塩害環境下で供用されているポストテンション方式PC構造物は、外部からの塩化物イオンの侵入により、鋼製シースに沿ったひび割れが発生することもある¹⁾。鋼製シースは設計計算上、耐荷力に影響を与えないことから、コンクリート表面にシース腐食ひび割れが発生しても曲げ耐荷性能に影響を与えないと考えられてきた。しかし、シース腐食による軸方向ひび割れの発生により、腐食ひび割れを挟んで梁が分断される状態、いわば重ね梁状態になっている可能性がある結果も報告されている²⁾。重ね梁状態になると見かけの梁高が低下し、曲げひび割れ発生荷重が低下する可能性がある。

そのため本研究では、これら既往の研究で明らかとなっていない、曲げひび割れ発生以前の挙動に着目し、ポストテンション方式PC構造物を模擬した梁を作製し、曲げ載荷前および載荷後の梁の高さ方向のひずみ分布の測定、および残存プレストレス割合の算出を行ない、鋼製シースが腐食したポストテンション方式PC構造物の曲げひび割れ発生以前の挙動を検討した。

2. 試験概要

2.1 試験パラメータ

試験パラメータは、シースの減少量による梁の曲げ挙動変化を確認するため、25h・Aシース電食、45h・Aシース

表-1 供試体のコンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					AE減水剤 (ℓ/m ³)
		W	C	S	G	NaCl	
40	55	170	425	706	911	21.8	1.063

表-2 グラウトの配合

W/C (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	空気量 (%/m ³)	AE減水剤 (ℓ/m ³)
55	605	350	30	16.5

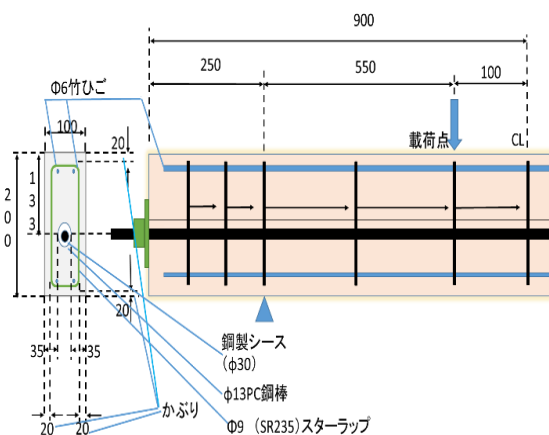


図-1 供試体概要 (図中単位 : mm)

ス電食，45h・Aシース電食+20h・A PC鋼棒電食2体，健全供試体の計5体で評価を行なった。以後，45h・Aシース電食+20h・A PC鋼棒電食供試体は，判別を付けるため，①②と表記した。

2.2 供試体概要

本研究で使用したコンクリートの配合を表-1に，グラウトの配合を表-2に示す。またコンクリートの圧縮強度はJIS A 1108「コンクリートの圧縮試験方法」に準じて実施し，目標圧縮強度は約50N/mm²程度とした。なおコンクリート内には電食効率を上げるため細骨材量の1%を食塩置換した。

供試体概要を図-1に示す。供試体は100mm×200mm×1800mmのポストテンション方式PC構造物を模擬した梁とし，図-1に示すように鉄筋かぶりを20mmとし，鋼製スパイラルシース（φ30mm）を供試体軸方向に配置した。鋼製シース内にはPC鋼棒B種1号SBPR φ13mm（引張強度1080N/mm²）を1本配置した。その他に供試体長軸方向にせん断補強筋φ9mmを計11本配置した。曲げせん断耐力比 $V_u \cdot a / M_u$ は1.16とした。せん断補強筋については，電食により腐食しないように絶縁テープを巻いた。梁供試体へのプレストレス導入は，コンクリートが圧縮強度40N/mm²に達していることを確認して行なった。プレストレスは，PC鋼棒に引張強度の70%の緊張力を作用させることにより導入した。

鋼製シース内へのグラウト注入作業はプレストレス導入後速やかに行なった。その後電食を行なった。電流密度はシースの表面積に対して0.20A/m²とした。電食の概略図を図-2に示す。各供試体を質量パーセント濃度3%のNaCl溶液を湿らした吸水スポンジを供試体上面に設置し電食を行なった。鋼製シースを陽極，供試体上面に設置した亜鉛メッキ金網を陰極として通電を行なった。なお，NaCl溶液については2回/日適宜補充を行なった。PC鋼棒電食供試体については，鋼製シース電食終了後速やかにPC鋼棒を陽極として入れ替え，再度通電を行なった。

2.3 試験方法

(1) 腐食ひび割れ幅

電食終了後，供試体軸方向50mm間隔でメッシュ線を引き，クラックスケールにより100mm間隔で腐食ひび割れ幅を測定した。

(2) 電食前後の梁高ひずみ分布

電食開始前に図-3に示すように標点間距離を200mmとし，高さ方向に50mm間隔でコンタクトチップを貼り，電食前後で長さ測定を行い，梁高方向でひずみ分布を測定した。なお，今回の評価については，クリープや，

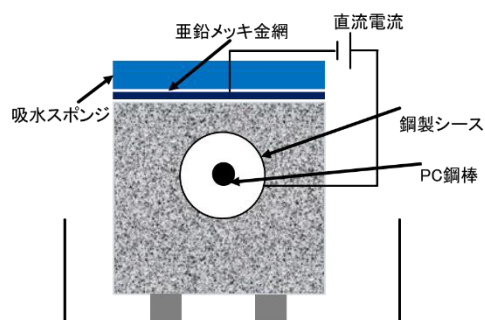


図-2 電食概要図（シース電食時）

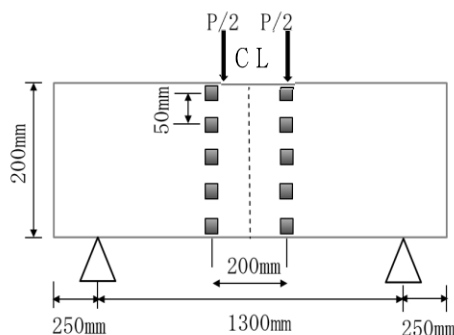
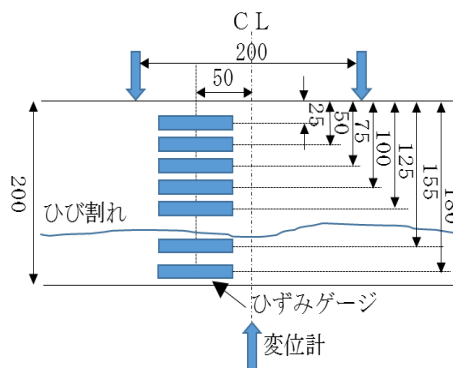
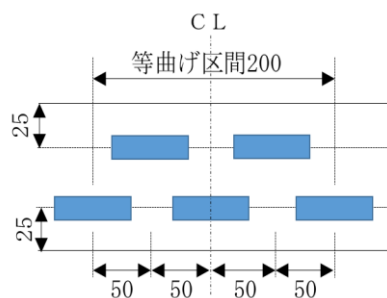


図-3 コンタクトチップ貼付状況



(a) 側面の状況



(b) 底面の状況

図-4 曲げ試験時の計器状況（単位：mm）

温度の補正は行っていない。

(3) 曲げ載荷

曲げ試験の概要および、計器類取付状況を図-4に示す。支間中央には、高感度変位計を設置し、たわみを測定した。等曲げ区間内においては曲げひび割れ発生荷重を測定するため、供試体底面にひずみゲージを5枚貼り付けた。曲げひび割れの影響を避けるため側面には等曲げ区間の梁高方向のひずみ分布の測定を行なうことを目的に、支間中央から30mm離れた位置で梁高さ方向25mm間隔に、長さ60mmのひずみゲージを貼り付けた。

(4) シースの腐食減少率

曲げ載荷後の試験体を破砕し、取出したシースと健全供試体との質量差の百分率をシースの腐食減少率とした。

3. 試験結果

3.1 平均腐食ひび割れ幅と曲げひび割れ発生荷重

各供試体の平均腐食ひび割れ幅の結果を表-3、シースの腐食減少率を表-4、載荷時に得られた曲げひび割れ発生荷重の結果を表-5に示す。平均腐食ひび割れ幅は軸方向100mm間隔で腐食ひび割れ幅を測定し、それを測定箇所数で除したものを平均腐食ひび割れ幅と定義した。表-3および表-4の結果より電食期間が長い供試体ほど、平均腐食ひび割れ幅が増加し、シースの腐食減少率が増加する傾向を示した。この理由として、既往の研究³⁾により、電食期間が長いほどシースの腐食量が多くなり平均ひび割れ幅が増加するという研究結果があるが、それと同様の現象が起こったと考えられる。またPC鋼棒を電食した供試体では、平均腐食ひび割れ幅が増大している。これはPC電食の際に短絡回路を形成し、シース腐食が進んだためと考えられる。試験終了後、供試体を解体しPC鋼棒の状況を確認したが、大きく電食が進行していなかった。そのため、今後はシース電食の影響のみ検討を行う。また、表-5より平均腐食ひび割れ幅が増加するほど曲げひび割れ発生荷重が低下する傾向を示した。これは、ひび割れ幅の増加により梁が分断し、重ねばりのような挙動を示したことで

表-3 平均腐食ひび割れ幅

	平均腐食ひび割れ幅 (mm)
健全供試体	0
25h・Aシース電食	0.072
45h・Aシース電食	0.107
45h・Aシース電食+ 20h・A PC電食①	0.160
45h・Aシース電食+ 20h・A PC電食②	0.770

表-4 シースの腐食減少率

	シースの腐食減少率 (%)
健全供試体	0
25h・Aシース電食	16
45h・Aシース電食	20
45h・Aシース電食+ 20h・A PC電食①	32
45h・Aシース電食+ 20h・A PC電食②	58

表-5 曲げひび割れ発生荷重

	曲げひび割れ発生荷重 (kN)
健全供試体	14.0
25h・Aシース電食	9.90
45h・Aシース電食	6.05
45h・Aシース電食+ 20h・A PC電食①	5.02
45h・Aシース電食+ 20h・A PC電食②	3.00

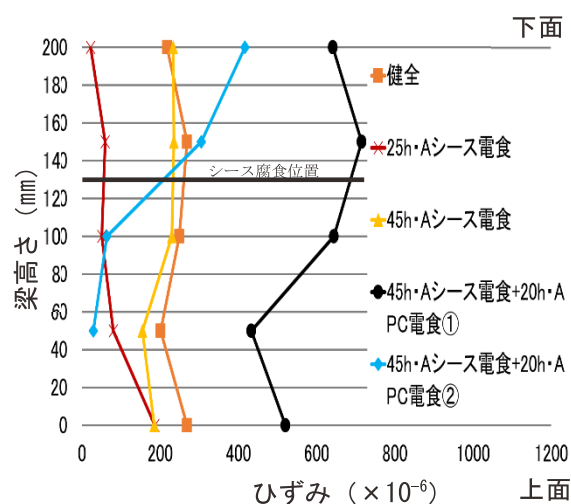


図-5 電食前後の発生ひずみ

曲げひび割れ発生荷重が低下した可能性が考えられる。

このことより、ポストテンション方式PC構造物において、シース腐食により耐荷力低下に影響しないと考えられてきたが、曲げひび割れ発生荷重は低下する可能性があるため、シース腐食時にはこの考慮が必要であると考えられる。

3.2電食終了後の梁高方向のひずみ分布

コンタクトチップ法により得られた、電食前後の発生ひずみの分布を図-5に示す。45h・Aシース電食+20h・A PC電食②以外については、シース腐食位置の上下でひずみの挙動に変化は見られず、ひずみ分布はほぼ垂直となる傾向を示した。しかし、45h・Aシース電食+20h・A PC電食②については、シース腐食位置を境にひずみの挙動が垂直ではない挙動を示した。これは表-3に示すように、45h・Aシース電食+20h・A PC電食②では、シースに沿ったひび割れが非常に大きいため、腐食ひび割れを挟んで、梁が一体とならない収縮・膨張挙動を示したものと考えられる。さらにPC鋼棒を電食した供試体には、図-2に示すように、電食期間中、梁底面にのみ水分を供給したため、断面内の水分状況が梁下面と上面で異なるこ

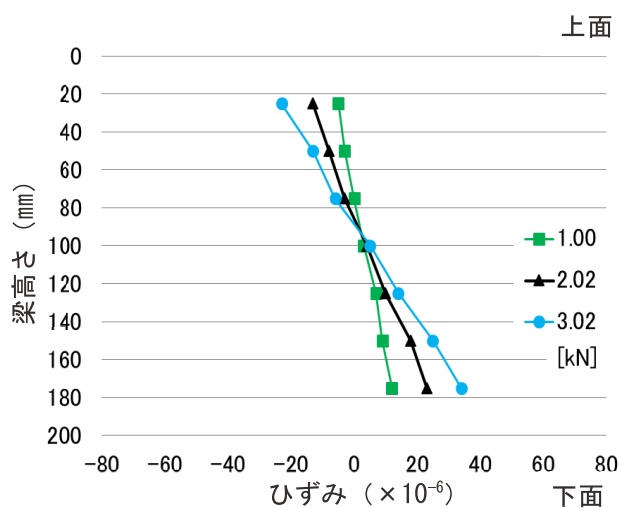
とから、腐食ひび割れを挟んで、ひずみ差が大きく表れた一因になっているものと考えられる。非載荷時に、腐食ひび割れを挟んで異なる挙動を示される可能性を示したことから、曲げ載荷時の挙動への影響について、次節以降で検証する。

3.3曲げひび割れ発生以前の梁高方向のひずみ分布

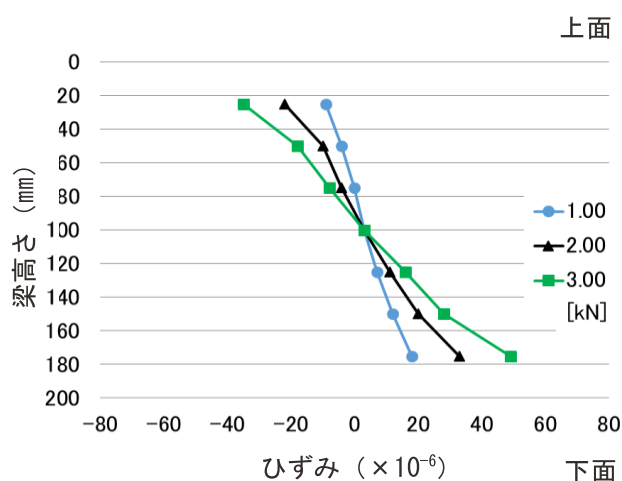
曲げ試験時における、曲げひび割れ発生荷重以前の梁高方向のひずみ分布の一例を図-6に示す。曲げひび割れ発生以前では、45h・Aシース電食、45h・Aシース電食+20h・A PC電食②ともにシース腐食ひび割れ発生の有無に関わらず、ひずみ分布は垂直となる傾向を示し、既往の研究¹⁾と同じ結果となった。このことから、曲げひび割れ発生以前の梁高方向のひずみ挙動については、外力に対して断面が一体となって抵抗していることが確認できる。しかし3.2において、45h・Aシース電食+20h・A PC電食②については、シース腐食ひび割れを境に梁高方向のひずみ分布が異なる挙動を示しているため、曲げ荷重が載荷されていない状況との相違については、さらに検討が必要である。

3.4曲げひび割れ発生荷重以前の曲げモーメント-曲率関係

各供試体の曲げひび割れ発生以前の曲げモーメント-曲率関係の結果を図-7に示す。なお、曲率については(式-1)より算出した。



(a) 45h・A シース電食



(b) 45h・A シース電食+20h・A PC電食②

図-6 曲げひび割れ発生以前の梁高方向のひずみ分布

$$\phi = \frac{M}{EI} = \frac{1}{\rho} \cdots \cdots \text{(式-1)}$$

ここに、

ϕ : 曲率 (rad/m)

ρ : 曲率半径 (m)

M : 曲げモーメント (kN・m)

E : ヤング係数 (kN/mm²)

I : 断面二次モーメント (mm⁴)

図-7より電食の種類に関わらず各供試体の曲げ剛性（M- ϕ 曲線の傾き）に大きな変化は見られなかった。シース腐食により重ね梁となっていれば見かけの梁高が低下するため、断面二次モーメントが低下するが、図-6の曲げひび割れ発生以前における梁高方向のひずみ分布からは見かけの梁高が低下したとは考えにくい結果を示した。久保らは、ASRにより膨張ひび割れが生じたコンクリート供試体を用いて、ヤング係数の検討を実施している⁴⁾が、 1000×10^{-6} 程度の膨張量で、ヤング係数は60%程度低下している。今回の検討ケースにおいても、鋼製シースの電食によって生じるひび割れにより、局所的に大幅なヤング係数の低下が生じているものと考えられる。しかし、今回の試験の曲げひび割れ発生以前のM- ϕ 曲線のデータを線形回帰することにより得られた曲げ剛性の最大値と最小値の差は約15%であり、Iを一定とした場合、上記のASRの場合と比較するとコンクリートのヤング係数の影響を大きく受けたとは言い難い結果であった。そのため、鋼製シースの腐食が曲げひび割れ発生以前の曲げ剛性に与える影響は大きくないものと考えられる。

3.5 残存プレストレス割合

健全供試体を100%とした場合の各供試体の推定残存プレストレス割合を表-6に示す。残存プレストレス割合は、曲げひび割れ発生モーメントMおよびコンクリートの引張強度 σ を(式-2)に代入して、得られたプレストレス力Pと当初導入したプレストレス力との割合を残存プレストレス割合と定義した。

$$\sigma = \frac{M}{I} y + \frac{P}{A} \cdots \cdots \text{(式-2)}$$

ここに、 σ : コンクリートの引張強度 (N/mm²)、M : 曲げモーメント (kN・m)、I : 断面二次モーメント (mm⁴)、Y : 中立軸の高さ (mm)、P : 導入プレストレス (kN)、A : 梁の断面積 (mm²)

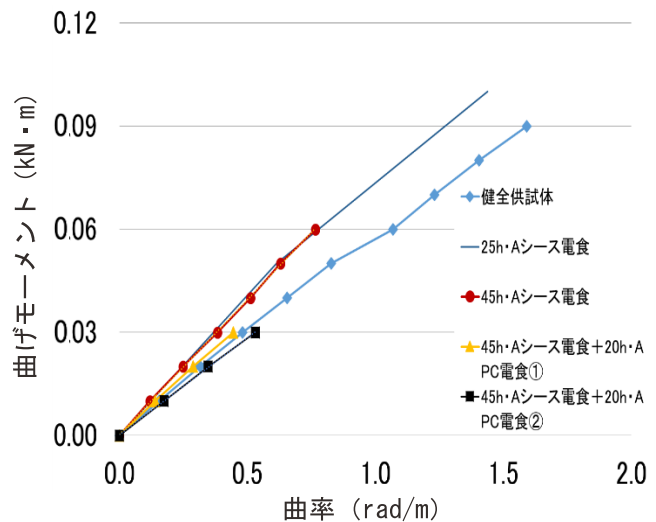


図-7 曲げモーメントー曲率関係

表-6 残存プレストレス割合

	残存プレストレス割合 (%)
健全供試体	100
25h・Aシース電食	87
45h・Aシース電食	74
45h・Aシース電食+20h・A PC電食①	71
45h・Aシース電食+20h・A PC電食②	70

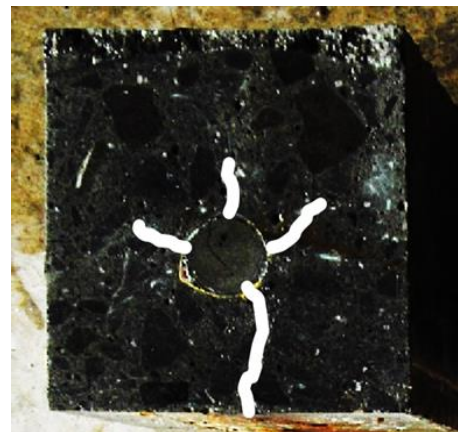


写真-1 内部ひび割れ進展状況⁵⁾

電食期間が長い供試体ほど本式で示される、残存プレストレス割合が減少する傾向を示した。電食期間が長いほど、(式-2)で示される、残存プレストレス割合が低下した理由としては2点考えられる。近藤らの既往の研究¹⁾において、写真-1のように供試体内部に目視では確認できない内部ひび割れが進展して、通常の曲げ載荷より早い段階で曲げひび割れが生じている可能性を指摘しているが、それと同様の現象が起こったと考えられる。また、シース腐食発生により見かけの梁高が低下したことにより梁が分断した重ね梁の可能性もあるため、残存プレストレス割合が低下した可能性が考えられる。しかし、本試験における曲げひび割れ発生以降、曲げひび割れはしばらく開口せず、目視で明らかに曲げひび割れが大きくなった荷重は、電食有無に関わらずほぼ同一であったことから、本計算式で得られたような大きなプレストレスロスは考えにくい。そのため、内部で発生した腐食ひび割れが載荷により進展したことがこの原因になったものと考えられる。

ただし、実構造物において鋼製シースが過度に腐食した場合、活荷重載荷時に、あたかも曲げひび割れが発生したようなひび割れが発生する可能性がある。そのため、これらの現象の発生原因については、さらに検討を進めたい。

4. おわりに

本論文では電食により、ポストテンション方式PC構造物を模擬した梁を作製し、曲げひび割れ発生以前の梁の挙動についての検討を行った。以下に、本論文で得られた結果を示す。

- 1) 電食期間が長い供試体ほど平均腐食ひび割れ幅が増加する傾向を示し、曲げひび割れ発生荷重も低下する傾向を示した。
- 2) コンタクトチップ法により得られた電食前後での発生ひずみ分布の結果では、ひび割れをはさんで、異なるひずみ挙動を示すケースもあった。
- 3) 曲げ試験における曲げひび割れ発生以前の梁高方向のひずみ分布は、シース腐食ひび割れ発生の有無に関わらずひずみ分布は垂直となる傾向を示し、外力に対して断面が一体となって抵抗する傾向を示した。
- 4) 曲げモーメントー曲率関係の結果から、曲げひび割れ発生以前については鋼製シース腐食ひび割れが梁の曲げ剛性に与える影響は小さいと考えられる。

謝辞

本研究は、(一社)四国クリエイト協会、2016年度「建設事業に関する技術開発・調査研究」の助成を受け実施したものである。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 近藤拓也：ポストテンション方式PC鉄道構造物の腐食に着目した維持管理方法に関する研究，京都大学博士論文，2012.3
- 2) 近藤拓也，奥野喜久，山本貴士，宮川豊章：シース腐食がPC梁の曲げ耐荷性能に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.1429-1434，2012.7
- 3) 中谷明登，近藤拓也，横井克則，川谷泰山：かぶり厚さがシース腐食ひび割れに与える実験的検討，土木学会四国支部，jsce7-017，2016.5
- 4) 久保善史，上田隆雄，黒田保，野村倫一：アルカリ骨材反応による膨張がコンクリートの力学的性能に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1691-1696，2006.7
- 5) 西弘，近藤拓也，中谷明登，大西弘志：PC部材のシースの腐食ひび割れに与えるシース径とかぶりの影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.2，pp.1267-1272，2017.7