

## 腐食劣化したPC鋼材を有するポステンPC梁の力学的性状

埼玉大学 正会員 工修 ○横田 敏広  
 埼玉大学 Isuru WIJAYAWARDANE  
 埼玉大学 正会員 工博 睦好 宏史

Abstract : Rupture of the tendons due to corrosion is the main cause of damage in the prestressed concrete (PC) bridges and the degree of corrosion in the PC bridges influences the load carrying capacity. Therefore, it is important to establish an appropriate evaluation method to make clear the performance of the damaged PC girders, so that they can be repaired efficiently. In this study, bending tests were carried out for PC beams having damaged tendons. The test variables were the loading type, rupture or damaged location of the tendons and the degree of damage in the PC tendons. Accelerated corrosion test was conducted to have different degree of damage in the tendons. Furthermore, bending tests for the PC beams with insufficient grout filling and grout re-filling were carried out and the load carrying capacity were compared with the non-damaged PC beams.

Key words : PC tendon rupture , Performance evaluation , Accelerated corrosion test , Grout re-filling

## 1. はじめに

PC橋の塩害についてはコンクリート内部のPC鋼材の腐食や破断などの損傷が耐荷性能自体に影響を及ぼしている場合があり、このような塩害劣化したPC橋の性能評価に関する研究が精力的に進められている<sup>1)</sup>。これらの性能評価を行う上で、PC鋼材腐食度や損傷箇所がPC桁全体の構造特性に与える影響を明らかにする必要があるが、PC鋼より線を用いたポステンPC桁については十分に研究されていない状況である。本研究ではポステンPC梁供試体を対象として、腐食促進実験により劣化の箇所および程度を変化させて供試体内部のPC鋼材を腐食損傷させた後に曲げ載荷実験を実施することで、それらが耐荷性能に与える影響を確認した。また、部分的にグラウト未充填箇所を設けたPC梁と鋼材破断後にグラウト再注入を実施した梁についても同様に曲げ載荷実験を実施し、グラウト再注入による耐荷性能の回復効果を確認した。

## 2. 損傷桁の曲げ載荷実験概要

実験供試体の断面図を図-1に、PC鋼材の腐食箇所と載荷方法を図-2に示す。CASE-1, 2, 3, 4はPC鋼材の損傷箇所および損傷度が耐荷性能に与える影響を検討するケースであり、CASE-0が基本となる健全な梁である。PC鋼より線SWPR7BL12.7mmを使用し、腐食促進実験を実施した後に曲げ載荷実験を行った。

CASE-5, 6はグラウト未充填区間でのPC鋼材破断およびその後のグラウト再注入が耐荷性能に与える効果を確認するケースである。断面内3本のインデントPC鋼線SWPD1Lφ7mmのうち左右2本を対象に、図-2に示すとおりグラウト未充填区間を設けたうえで、梁側面からφ15mmのコンクリートコアボーリングを用いて機械的に切断することで損傷を与えた。CASE-5はグラウト未充填区間でPC鋼材を切断した状態、CASE-6はCASE-5に対してグラウト再注入を行った状態に対して曲げ載荷実験を実施した。使用

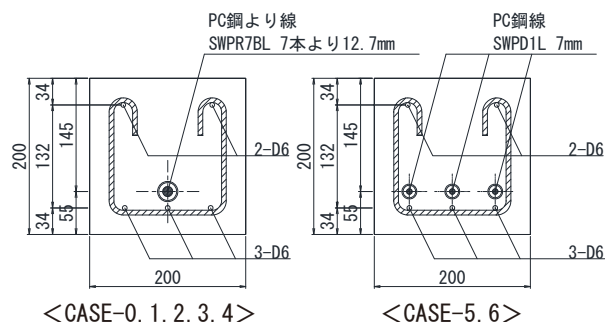


図-1 供試体断面図

した状態、CASE-6はCASE-5に対してグラウト再注入を行った状態に対して曲げ載荷実験を実施した。使用

表-1 コンクリートの材料諸元

	圧縮強度 $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 $E_c$ (N/mm <sup>2</sup> )
CASE-0	42.9	25,570
CASE-1	43.8	25,120
CASE-2	41.9	27,210
CASE-3	44.5	29,150
CASE-4	44.0	27,410
CASE-5	42.7	29,100
CASE-6	42.1	24,310

表-2 PC 鋼材の材料諸元

	降伏強度 $\sigma_{py}$ (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 $\sigma_{pu}$ (N/mm <sup>2</sup> )	断面積 $A_p$ (mm <sup>2</sup> )
SWPD1L 7mm	1,435	1,653	38.48
SWPR7BL 12.7mm	1,580	1,853	98.71

したコンクリートおよびPC鋼材の材料諸元を表-1, 表-2に示す。鉄筋は全てSD345 (D6) であるが引張試験における降伏応力は475N/mm<sup>2</sup>相当である。

### 3. 腐食促進実験

#### 3.1 実験方法

CASE-1, 2, 3, 4に対して実施した電食法による腐食促進実験の概要を図-3に示す。供試体を質量濃度5%のNaCl溶液内に浸したうえで、チタンメッシュを陰極として供試体底面および側面に配置し、腐食対象であるPC鋼材を陽極として直流安定化電源を用いて通電を行った。ここで、CASE-1, 2およびCASE-3, 4は同一の腐食箇所および荷条件において異なる腐食損傷度とするため、目標とする腐食度を質量減少率で20%程度と40%程度を目安として設定した。また、上記の各ケースに対する腐食促進実験に着手する前に、同じ断面構造を持つ長さ500mmの小型供試体を用いた予備実験を実施し、ひび割れや錆汁など外観の変状と積算電流量との関係を確認することで、各供試体における目標の腐食量となるよう積算電流量を管理した。なお、本実験では腐食対象範囲外のPC鋼材、鉄筋およびコンクリート表面にエポキシ樹脂塗装による防錆処理を行うことで、対象箇所のPC鋼材みを局所的に腐食させるものとした。

#### 3.2 実験結果

写真-1にCASE-2の腐食促進試験後のひび割れ状況を示す。梁底面および梁側面にPC鋼材に沿ったひび割れが生じており、梁底面の最大ひび割れ幅は0.25mm程度である。いずれの供試体においても、同様にPC鋼材に沿った水平方向のひび割れが生じる結果となった。

写真-2にCASE-1のPC鋼材の腐食状況として、曲げ荷実験後に内部の鋼材をハツリ出した状況を示す。また、写真-3にCASE-2, 3, 4の実験後のPC鋼材の状況を示す。写真-3は、いずれも曲げ荷実験後に供試体から抽出したものであり、クエン酸水素二アンモニウム10%溶液に浸漬して除錆した後の状況である。写真の右側に示す記号のうち、[N]は破断が生じなかった鋼線、[F]は曲げ荷実験によって破断したと考えられる鋼線、[C]は腐食促進実験によって破断したと考えられる鋼線を示しており、[F]と[C]の区別については、破断面の発錆状況および荷中の破断音発生回数から推定した結果である。いずれの供試体においても、PC鋼材の腐食範囲は20cm程度以内に収まっており、7本より線のうち中央に配置されたPC鋼線は、ほとんど腐食が生じていない状態であった。

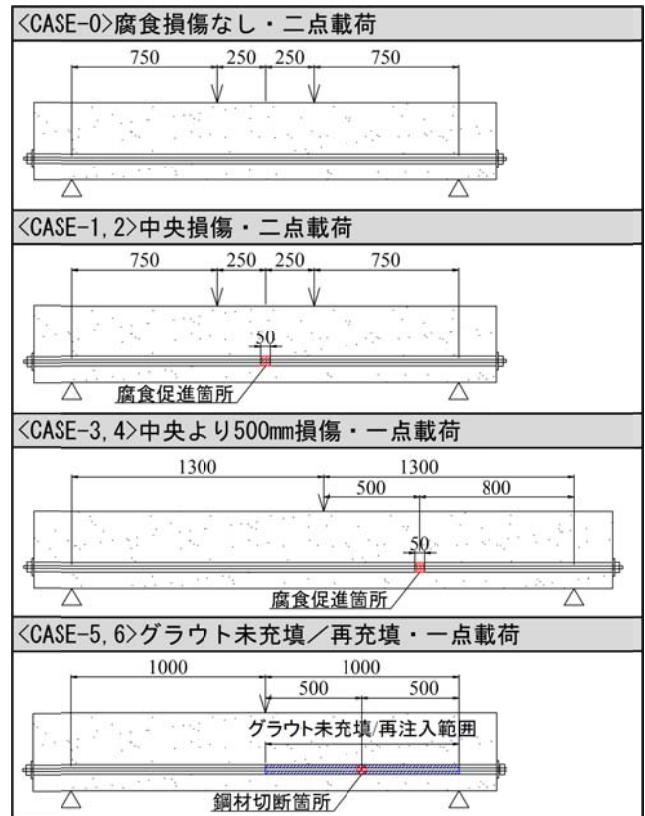


図-2 各ケースの損傷箇所と荷方法

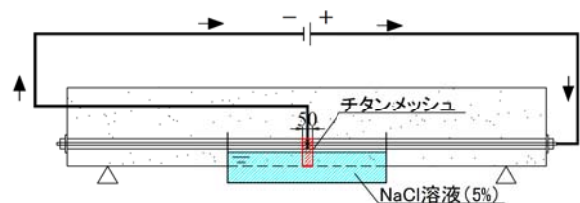
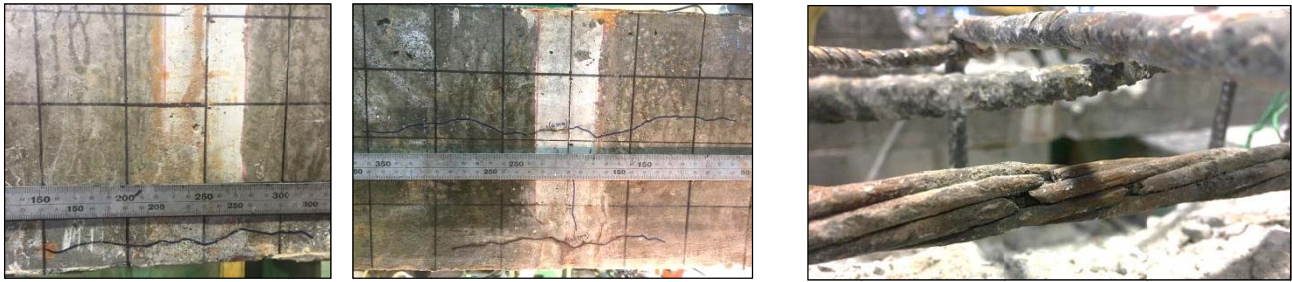


図-3 腐食促進試験概要



＜梁側面＞

＜梁底面＞

＜曲げ载荷実験後＞

写真-1 ひび割れ状況 (CASE-2)

写真-2 鋼材の腐食状況 (CASE-1)



＜CASE-2＞

＜CASE-3＞

＜CASE-4＞

写真-3 実験後のPC鋼材

腐食に伴うPC鋼材の質量減少率を図-4に示す。ここで、質量減少率は実験後の供試体から取り出して除錆した長さ200mmのPC鋼より線の質量と腐食前の質量より算定した値である。CASE-1, 2, 4が約20%前後に対してCASE-3のみ26.2%であり、質量減少率の差は僅か7%程度であるが、写真-3で確認できるように、PC鋼材の腐食による破断状況は大きく異なっている。

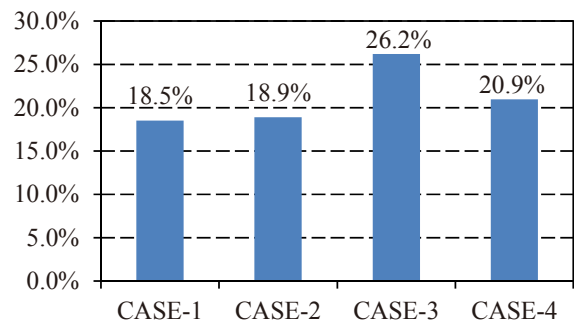


図-4 PC鋼材の質量減少率

#### 4. 曲げ载荷実験結果

##### 4.1 腐食損傷度が耐荷性能に与える影響

図-5にCASE-0, 1, 2, 3, 4の曲げ载荷実験結果として、支間中央の曲げモーメント～鉛直変位関係を示す。CASE-0, 1, 2とCASE-3, 4はスパンが異なるので変形性能は比較できないが、梁の抵抗モーメントを比較する上で縦軸を支間中央の最大モーメントとした同一グラフに示したものである。また、グラフ上の「健全」は断面計算で得られたCASE-0の破壊抵抗曲げモーメント、「6本破断」は7本より線の代わりに素線1本相当の断面積を用いて計算した破壊抵抗曲げモーメントの値である。

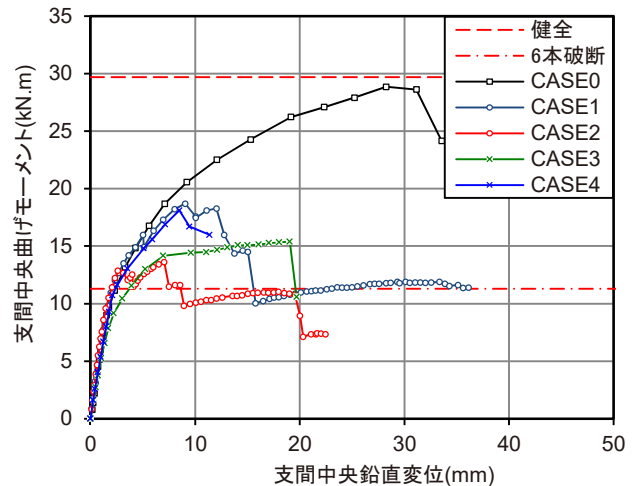


図-5 曲げ载荷実験結果 (CASE-1, 2, 3, 4)

CASE-1, 2, 3, 4については、载荷に従い鋼材の破断と伴に耐荷力の低下を繰り返す、最終的にコンクリートの圧壊に至る結果となった。CASE-1, 2はほぼ同等の質量減少量であるが、鋼材破断のタイミングは大きく異なる。これは、各素線毎で考えた場合に腐食損傷に伴い生じる応力集中の発生度合が異なるためと考えられる。CASE-1, 2は素線の破断を繰り返した後、最終的に7本より線のうち6本が破断して中央に配置された素線1本と主鉄筋のみの耐荷機構となっており、CASE-2がCASE-1よりも小さいのは主鉄筋も破断したためである。

CASE-3は载荷前にPC鋼材の大半が破断しているため、CASE-4に比べてひび割れ発生モーメントの低下と、ひび割れ後の鉄筋およびPC鋼材の降伏に伴う剛性低下が顕著に現れている。実験終了時の抵抗

モーメントは、CASE-3では7本全てのPC鋼材が破断しているが「6本破断」の計算値と同等、CASE-4は5本のPC鋼材が破断しているが「6本破断」より50%程度大きな値を示している。これは、CASE-3,4の腐食損傷個所が支間中央から離れており、支間中央部の断面においては破断したPC鋼材の付着が回復して引張抵抗材としてある程度機能しているためと考えられる。

#### 4.2 グラウト未充填および再注入の影響

CASE-5,6の曲げ載荷実験結果として、図-6に支間中央の曲げモーメント～鉛直変位関係を示す。ここで、グラフ上の「健全」および「切断」は過去に実施した実験結果<sup>1)</sup>であり、「健全」はCASE-5,6と同じ供試体でグラウト、鋼材ともに健全な状態、「切断」は健全な状態に対してCASE-5,6と同位置のPC鋼材を切断した状態を示している。図-7は図-6に示した結果のうち最大モーメントに着目し、健全な状態を100%として示した結果である。PC鋼材の切断だけでは89%程度の耐荷力を保持していたが、グラウト未充填区間で切断したCASE-5は支間中央部まで切断の影響が生じるため、50%に低下した。一方で、グラウト再注入したCASE-6については切断した鋼材も引張抵抗材として機能するため68%まで回復する結果となった。

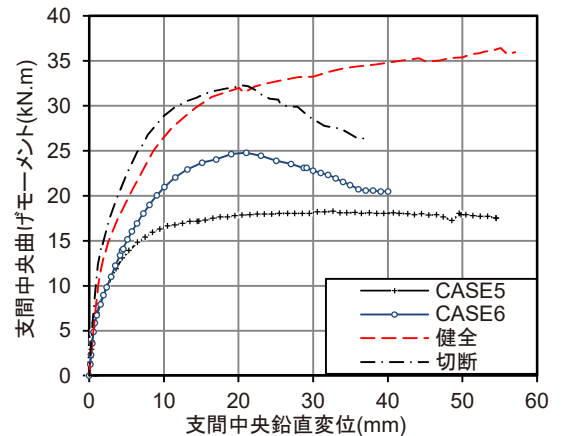


図-6 曲げ載荷実験結果 (CASE-5, 6)

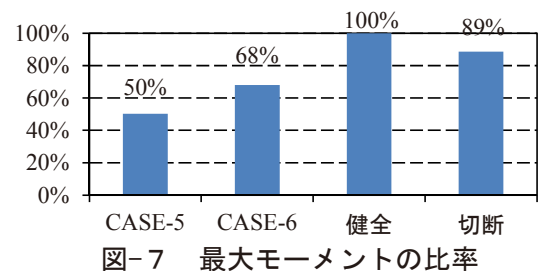


図-7 最大モーメントの比率

#### 5. まとめ

本実験的研究から得られた結論を以下に示す。

- (1) 腐食範囲200mmあたりの質量減少率に着目した場合、本実験ではわずか7%程度の差で腐食によるPC鋼材破断状況が大きく異なり、質量減少率20～25%程度を境として破断が生じていると考えられる。
- (2) 腐食したPC鋼材を有するPC梁は、同等の質量減少率であってもPC鋼材の破断荷重にバラつきが生じる。これは、PC鋼より線の素線単位で腐食度合が異なるためと考えられる。
- (3) 質量減少率26.2%の供試体CASE-3では、他のケースに比べて腐食によるPC鋼材破断の影響が大きく、ひび割れ発生モーメントの低下、鉄筋およびPC鋼材の降伏に伴う剛性低下が顕著となった。
- (4) PC鋼材の腐食損傷箇所が支点寄りになった場合は、破壊抵抗曲げモーメントの低下が小さくなった。これは、破断したPC鋼材も支間中央では付着を回復し、引張抵抗材として機能するためである。
- (5) グラウト再注入により耐荷力がある程度回復する効果がある事を確認した。本実験での再注入グラウトの充填度は未確認であり、腐食を伴う鋼材に対しての効果についても更なる検討が必要である。

#### 謝辞

本研究は科学研究費補助金（基盤（B）, 代表：睦好宏史）により行ったものである。本実験に際しては、PC鋼材を神鋼線工業（株）、ショーボンド建設（株）から材料をご提供頂いた。また、埼玉大学卒論生の本田美樹氏、石田悟士氏、修論生の徳田裕美氏、塩野誠氏、Nguyen Thi Mai氏、Khieu Hai Hoang氏には多大な協力を頂いた。ここに記して御礼申し上げる次第である。

#### 参考文献

- 1) 例えば、田中泰司：塩害劣化橋梁の性能評価，コンクリート工学 Vol155 No.1, PP.10～PP.15, 2017.1
- 2) 横田敏広，Isuru WIJAYAWARADANE，睦好宏史：破断したPC鋼材を有するPC梁の力学的性状，第25回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム 論文集 PP.567-572, 2016.10