

## 破断したPC鋼材を有する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 : The maintenance and renewal of the bridges are becoming serious issues now. In prestressed concrete (hereafter PC) bridges constructed under severe corrosive environments, corrosion and break of the PC tendons sometimes occur due to insufficient filling of grout. It is important to establish an appropriate non-destructive inspection method to detect the damage of the tendon and make clear the performance of the damaged PC girders, so that, the PC beams can be repaired efficiently. In this study, bending tests and Magnetic Flux Leakage test were carried out for PC beams, whose tendons were cut intentionally. The flexural performance of the PC beams and the applicability of the non-destructive inspection method are discussed in this paper.

Key words : PC tendon rupture , Performance evaluation , Magnetic flux leakage test , Non-destructive inspection method

### 1. はじめに

社会資本の維持管理・補修・補強および更新が重要課題となっている。PC橋の代表的な損傷事例としては、施工時のグラウト充填不足や凍結防止剤散布に伴う鋼材腐食があり、近年では写真-1に示すようにPC鋼材の破断事例も報告されている<sup>1)</sup>。このような損傷を伴うPC橋は、詳細点検とともに性能評価を実施し、供用に耐えられない場合には交通規制等の荷重制限や、外ケーブルなどを用いた耐力補強、モニタリングによる経過観察などの処置が必要となる。これらを判断するうえでは、鋼材腐食を伴うPC橋の性能照査手法と鋼材破断を検知する合理的な検査手法を確立していくことが必要不可欠である<sup>2)</sup>。



写真-1 PC鋼材の破断事例<sup>1)</sup>

そこで、本研究ではポストテンションPC梁を対象として、PC鋼材の破断箇所および破断量、載荷方法をパラメータとした載荷実験を行い、これらがPC梁の曲げ性状に及ぼす影響について、PC鋼材の付着に着目して検討を行った。また、鋼材の破断を検知する非破壊検査手法の1つである漏洩磁束法<sup>3),4)</sup>について、比較的小規模なPC梁供試体を用いて、その適用性を確認した。

### 2. PC鋼材を破断させた梁の実験概要

実験に用いた梁供試体の断面図を図-1に、側面図を図-2に、PC鋼材の切断箇所と載荷点の概要を図-3に示す。各梁には3本のPC鋼材 (SWPD1L φ7) を配置し、ケース毎に切断本数および切断箇所と載荷点の位置関係を変化させて載荷実験を実施した。使用材料の諸元および各供試体の導入時のプレス

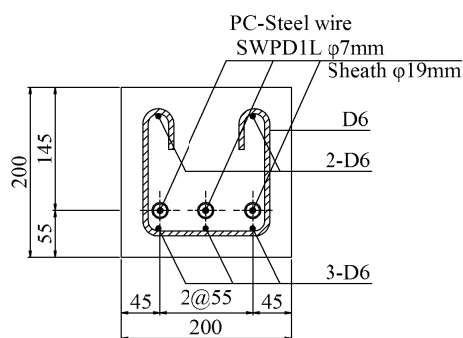


図-1 供試体断面図

トレス量を表-1に示す。使用したPC鋼材は単線で付着を有するインデント鋼材で、鋼製シース内(φ18)に配置して緊張後にグラウトを充填したポストテンション方式のPC梁とした。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。PC鋼材の破断については、φ15mmのコンクリートコアボーリングをPC梁側面から実施し、PC鋼材の切断後にモルタルを充填した。

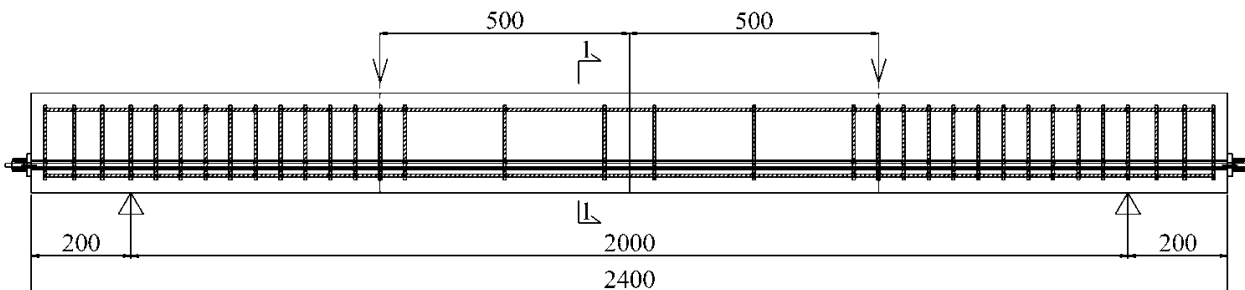
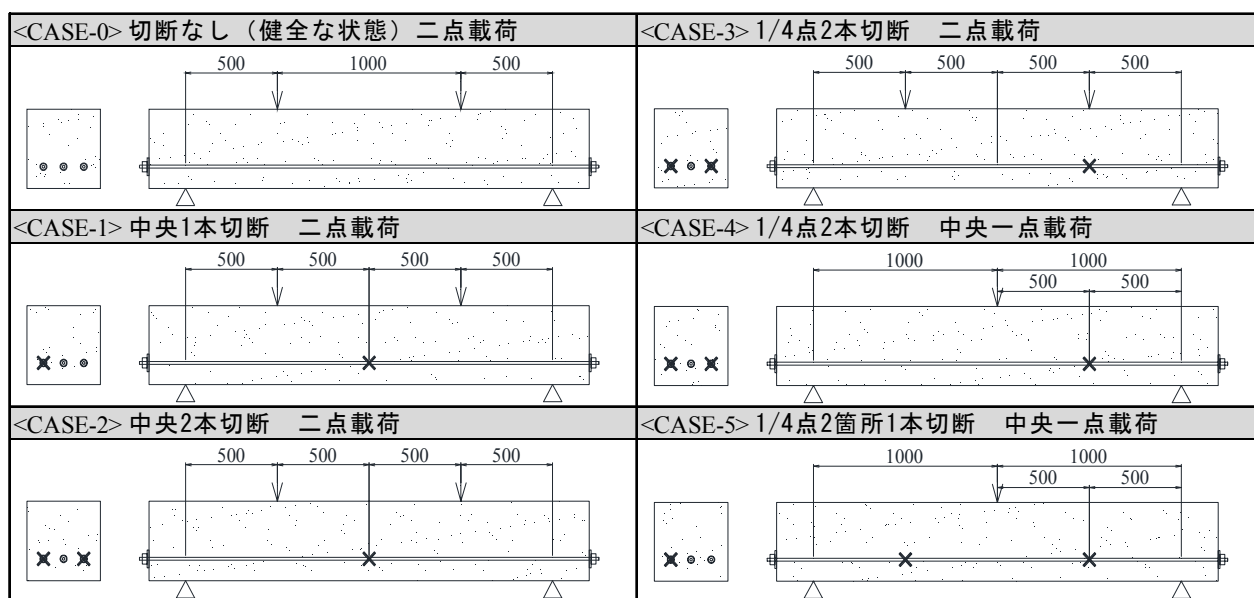


図-2 供試体側面図 (CASE0)



注: "x"印はPC鋼材の切断箇所を示す

図-3 各ケースの鋼材切断箇所と載荷点位置

表-1 使用材料およびプレストレス

CASE	コンクリート 圧縮強度	グラウト 圧縮強度	鉄筋 (SD345 D6)		PC鋼材 (SWPD1L φ7)			プレストレス
	$f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_g$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{sy}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_s$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{py}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{pu}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$A_p$ (mm <sup>2</sup> )	
CASE-0	54.9	74.4	475	215	1,435	1,653	38.48	758
CASE-1	56.5	91.0						809
CASE-2	56.6	89.8						721
CASE-3	57.4	93.5						782
CASE-4	56.3	94.1						830
CASE-5	57.7	89.1						743

### 3. 漏洩磁束法による破断位置の推定

#### 3.1 漏洩磁束法の概要

漏洩磁束法はPC鋼材が強磁性体であることを利用し、コンクリート表面から永久磁石により内部の鋼材を磁化(着磁)し、測定した磁束分布波形から鋼材破断部の漏洩磁束の有無を判定することで鋼材の損傷を診断する非破壊検査手法<sup>3)</sup>である。検査装置としては、永久磁石を用いた着磁装置と、コンクリート表面で磁束密度を測定する磁気計測ユニットの2つで構成される。図-4は漏洩磁束法にお

る磁束密度の測定結果のイメージである。健全な鋼材であれば緩やかなカーブを描くが、破断部がある場合には破断箇所にてN-Sのピークを持つS字状の磁束波形を検出する。

### 3.2 試験方法

試験状況を写真-2に示す。着磁はコンクリート表面にスペーサーで50mmの離隔を確保して着磁装置を設置し、これを梁軸方向に鋼材に沿って移動させることで行った。計測も同様に計測ユニットを梁軸方向に移動させて実施した。本実験ではCASE-1, 2, 4, 5は、コンクリートコアボーリングによるPC鋼材切断後に着磁を行い、CASE-3は着磁を行ってからコアボーリングによりPC鋼材を切断する手順とした。

### 3.3 試験結果

CASE-2, 3, 4の測定結果を図-5に、CASE-1, 5の測定結果を図-6に示す。X座標の原点は支点位置であり、CASE-1, 2ではX=1000、CASE-3, 4ではX=500、CASE-5ではX=500とX=1000がPC鋼材の切断箇所である。CASE-2, 3, 4は、いずれもPC鋼材3本のうち2本を切断した状態での測定結果であり、図から緩やかであるがS字状態のピークを持つ磁束波形を確認できる。一方で、CASE-1, 5については、いずれもPC鋼材3本のうち1本を切断した状態での測定結果であり、特にCASE-1では破断に伴うS字状の磁束波形は明確には確認出来なかった。

同一の破断本数に対して磁束波形のピークの現れ方が異なった結果は、既往の研究<sup>4)</sup>より破断した鋼材の離隔が影響していると考えられる。また、切断前に着磁したCASE-3は、切断後に着磁したCASE-2, CASE-4に比べてより明瞭にピークが表れている。この結果より、破断前の健全な状態での着磁についても、後の破断を検出する事が可能であると考えられる。一方で、本実験ではPC鋼材をコンクリートコアボーリングで機械的に切断しており、金属同士の摩擦による磁化への影響が生じている可能性も考えられる。健全な状態での着磁の効果については、着磁後の経年的な磁束密度の変化の有無と合わせて、更なる検証が必要である。

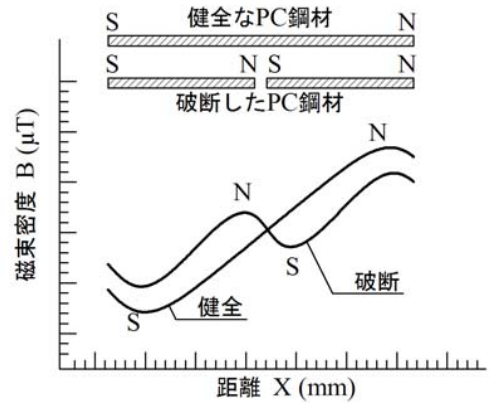


図-4 漏洩磁束法の概念図

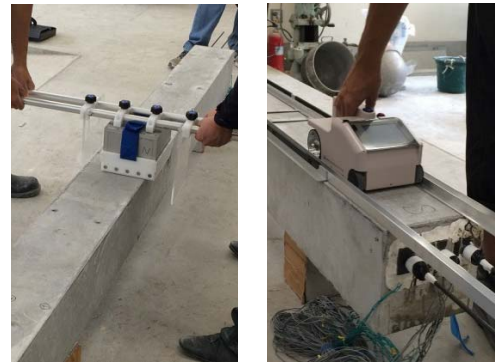


写真-2 漏洩磁束法検査状況

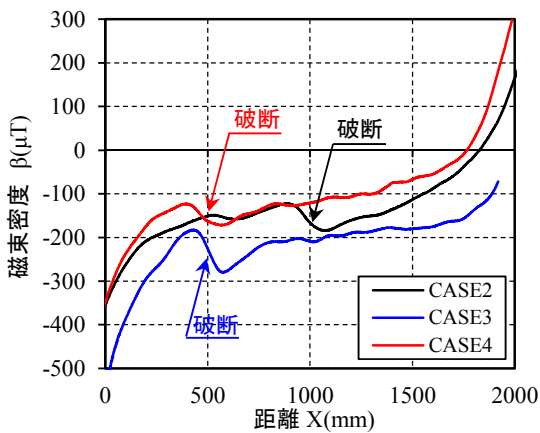


図-5 CASE2, 3, 4 測定結果

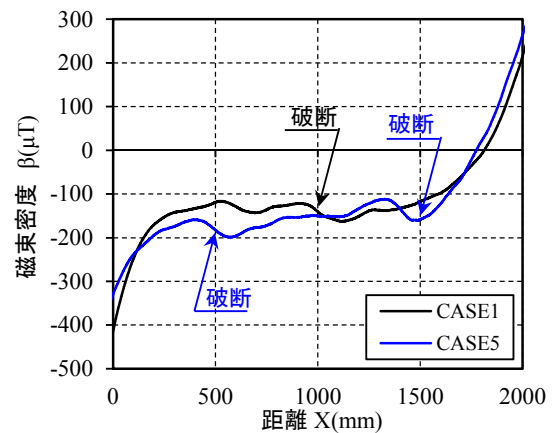


図-6 CASE1, 5 測定結果

## 4. 載荷実験結果

### 4.1 破断によるPC鋼材のひずみ変化

CASE-2において支間中央の鋼材切断箇所から200mm間隔でPC鋼材にひずみゲージを貼り、鋼材切断前後のひずみ変化を直接計測することで、切断に伴うプレストレス損失の影響を確認した。図-7に切断箇所からの距離と鋼材切断前後のPC鋼材のひずみ変化量の関係を示す。これより、破断箇所から400mm(57φ程度)離れた箇所では切断前後のひずみ変化は78μと十分小さく、PC鋼材とコンクリートの付着が確保されプレストレスが回復することが明らかとなった。

図-8には、別途実施したPC鋼材の付着試験結果を示す。付着試験の供試体は載荷実験と同様に鋼製シース内にPC鋼材を配置してグラウト充填しており、コンクリート端部(X=0)から100mm間隔で設けたひずみゲージによりPC緊張力の段階毎に鋼材ひずみを計測して付着長の変化を確認した。

図-8と図-7を比較すると、図-8の521Mpaの結果が付着長400mm程度で図-7の結果に近似していることが分かる。このとき、表-1のプレストレス(721Mpa)よりも小さい鋼材応力度で同等の付着長となっているのは、付着試験で用いた供試体のグラウト強度が70N/mm<sup>2</sup>で、載荷実験で用いたグラウト強度より低いと考えられる。また、図-8でPC鋼材応力度が1262Mpaの場合は付着長が700mm程度となっている。よって、PC鋼材破断に伴うプレストレスの損失や付着切れの影響を考慮する場合、供用限界状態と終局限界状態においては、それぞれ適切に影響範囲を考慮する必要があると考えられる。また、PC鋼材がより線の場合には一般的に単線よりも付着長が短くなるため、より速やかにプレストレスが回復すると考えられる。

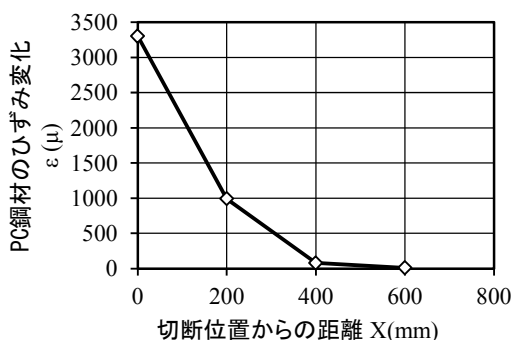


図-7 切断した PC 鋼材のひずみ変化量

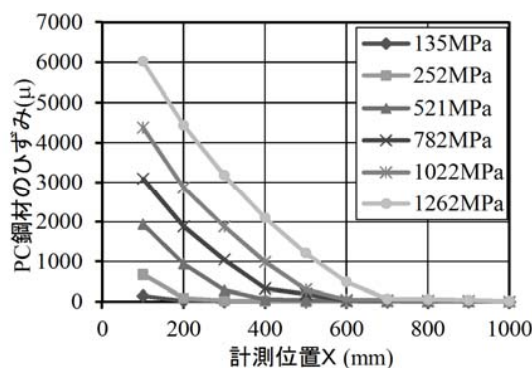


図-8 PC 鋼材の付着試験結果

#### 4.2 荷重～変位関係および最大曲げモーメント

各ケースの載荷実験結果について、荷重から換算した支間中央部の曲げモーメント～変位関係を図-9に示す。また、支間中央部の最大モーメント(実験値)とPC鋼材破断面における破壊抵抗曲げモーメント(計算値)の比較を図-10に示す。図-9に着目すると、PC鋼材を1本切断したCASE-1の最大モーメントは鋼材破断が無いCASE-0に対して約70%程度、PC鋼材を2本切断したCASE-2, 3は約50%程度に低下している。この結果は、図-10で示すとおり、断面計算によるPC鋼材破断面の破壊抵抗曲げモ

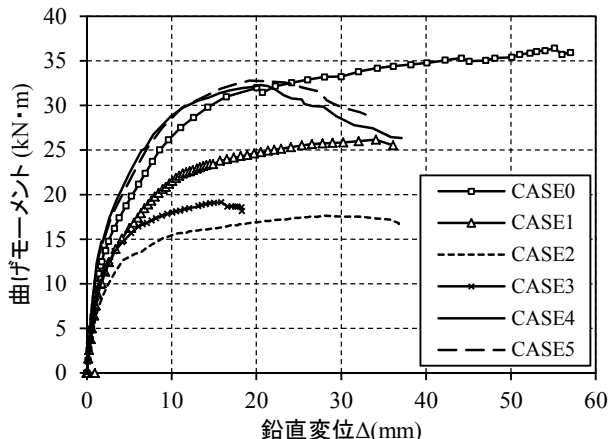


図-9 支間中央の曲げモーメント～鉛直変位関係

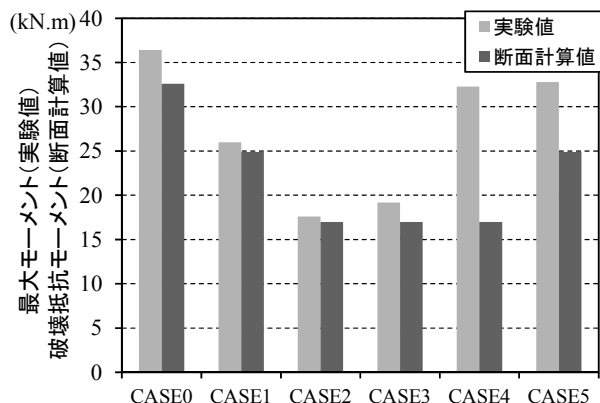


図-10 最大モーメントと破壊抵抗モーメント

ーメントの結果と比較的精度良く一致する。一方で、図-9に示されるCASE-4,5の最大モーメントはCASE-0の約90%程度となっており、この結果は図-10に示されるとおり、断面計算によるPC鋼材破断面の破壊抵抗曲げモーメントよりも大きな値を示した。これは図-11に示すように、破断箇所が作用モーメントの最大を示す支間中央から離れ、破断面での抵抗モーメントの減少よりも作用モーメントの減少の方が卓越したためである。曲げ破壊が生じた支間中央付近については、破断したPC鋼材も付着が確保されて引張抵抗材として有効に作用したために、断面計算による抵抗モーメントよりも大きな最大モーメントを示したと考えられる。

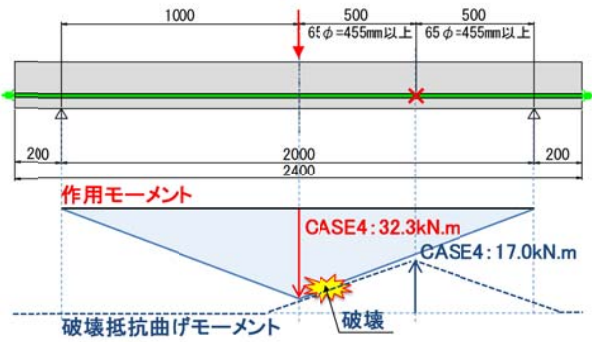
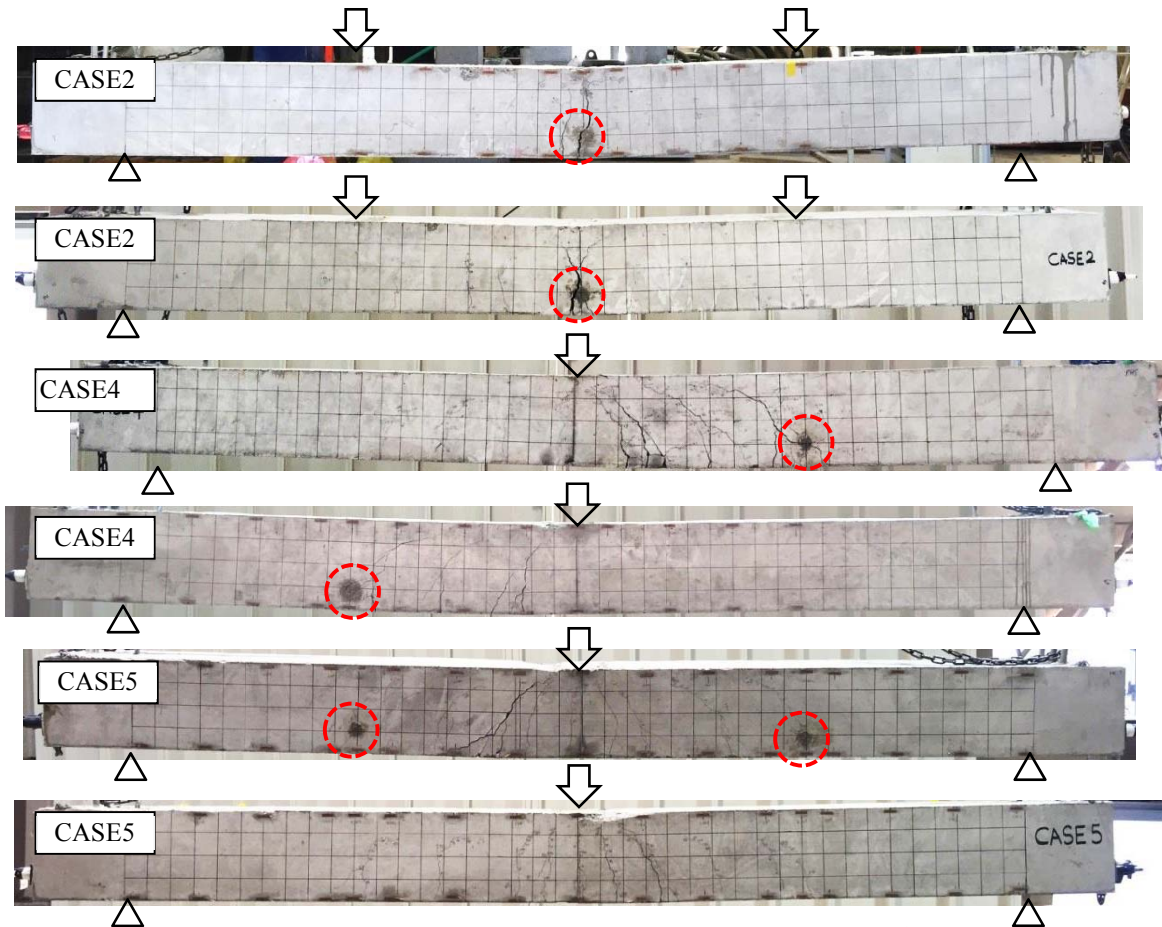


図-11 鋼材破断を伴う曲げ破壊の概念図

また、CASE-4,5の最大モーメントがCASE-0に比べて10%程度減少した理由としては、前述のとおり破断箇所が作用モーメントの最大を示す支間中央から離れたことに加え、終局状態における破断した鋼材の付着低下（鋼材の抜け出し）が影響していると考えられる。すなわち、終局状態ではPC鋼材応力が降伏応力を超えるため、4.1に示したように支間中央部まで付着低下の影響が生じたと考えられる。

### 4.3 ひび割れ性状

PC鋼材破断を伴うPC梁の損傷状況について、代表して、鋼材破断箇所での破壊が明確に示されたCASE-2、破壊性状が複雑なCASE-4, CASE-5について試験後の供試体を写真-3に示す。CASE-2では支間



○: PC鋼材の切断箇所

写真-3 載荷実験後のひび割れ状況

中央の鋼材切断箇所ではひび割れが卓越し上縁の曲げ圧縮破壊に至った。CASE-4では支間中央よりもPC鋼材を切断した方に損傷が偏っていることが分かる。また、CASE-2に比べてひび割れ損傷が分散していることが分かる。最大ひび割れは、支間中央よりもPC鋼材の破断方向に150mm程度離れた箇所で生じている。CASE-5では、鋼材を破断させた側面ではせん断ひび割れが1か所で非常に卓越しており、反対側の側面では支間中央から180mm程度離れた箇所の曲げひび割れが卓越している。CASE-5では断面について非対称に損傷させたことでより複雑な破壊性状を示しており、片方の側面で曲げひび割れ、反対側の側面でせん断ひび割れが卓越したが、曲げひび割れが卓越した側の圧縮縁で終局破壊に至った。

## 5. まとめ

本研究では、破断したPC鋼材のひずみを計測して破断の影響範囲を確認するとともに、破断箇所と破断量が梁の曲げ性状に与える影響を載荷実験により明らかにした。また、鋼材破断を検知する非破壊検査手法として漏洩磁束法の適用性について検討した。本実験から得られた結論を以下に示す。

(1) 漏洩磁束法は、本実験で使用したような細径のPC鋼材に対してもかぶりや破断量によっては適用できることが明らかとなった。また、破断前の着磁についても有効性を確認したが、本実験における鋼材切断時の金属摩擦の影響については更なる検証が必要である。

(2) 破断したPC鋼材のひずみ変化を直接測定し、破断箇所から離れるに従って付着によりプレストレスが回復される（本実験の場合、400mm離れた箇所で97%程度回復する）事が明らかとなった。

(3) PC鋼材の破断量が同一であっても、破断箇所によりPC梁の終局曲げ耐力が異なる。これは、破断断面から離れた箇所では、付着により破断鋼材も引張抵抗材として有効に働いているためと考えられる。

(4) 破断位置を考慮した耐荷力評価を行う場合には、破断箇所だけでなく破断箇所から離れた位置での抵抗モーメントを考慮し、作用モーメントとの関係から推定する必要がある。今後は破断を考慮した抵抗モーメントの算定方法および梁モデル等による解析的評価手法を検討する必要がある。

(5) 本実験ではPC鋼材をコアボーリングにより人為的に切断しているが、実際の塩害では、グラウト充填不良や腐食による鋼材断面積の減少を伴い破断に至る。今後は、これらの差違を考慮した検討を行う必要がある。

## 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）からご提供頂いた。また、漏洩磁束法の検査機材を（株）高速道路総合技術研究所より貸与頂いた。また、漏洩磁束法の計測に際して（株）四国総合研究所の廣瀬誠氏にご協力を頂いた。また、埼玉大学修論生の徳田裕美氏、塩野誠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) 宮下孝, 小林憲一, 大平英生, 齋藤玄: 妙高大橋のPCケーブル損傷における調査結果と今後の対応について, 平成23年度国土交通省北陸地方整備局事業研究発表会
- 2) 青木圭一, 渡邊晋也, 三加崇, 宮永憲一, 睦好宏史: 供用後40年経過したPC桁の性状から推定されるPC橋の性能評価, 土木学会論文集E2, Vol. 71, No. 3, PP. 283-302, 2015
- 3) 廣瀬誠, 青木圭一, 宮川豊章: 漏洩磁束法によるポストテンション実橋におけるPC鋼材破断調査, 第23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. 467-470, 2014. 10
- 4) 萩原直樹, 宮永憲一, 青木圭一: 実験による漏洩磁束法の適用性検証, 第24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. 283-286, 2015. 10