

# グラウト充填不良を有する PC 桁の 鋼材破断後の耐力評価法

渡辺 健\* 田所 敏弥\* 谷村 幸裕\*  
轟 俊太郎\* 前田 友章\*\* 徳永 光宏\*\*

## Evaluation Method for Load-carrying Capacity of Incompletely-grouted PC Girders with Broken Tendons

Ken WATANABE Toshiya TADOKORO Yukihiko TANIMURA  
Shuntaro TODOROKI Tomonori MAEDA Mitsuhiro TOKUNAGA

Since low-grade material had been used for grouting of sheath in PC girder, some PC girders initially constructed in 1950s include sheaths being not fully filled with grout. The exposure of PC tendon in the sheath will corrode and break PC tendons, and reduce the load capacity of PC girders. This research focused on the interface bond between PC tendons and grout in sheath through the loading test and FEM analysis in order to explain the loading capacity of deteriorated PC girders.

キーワード：PC 桁，グラウト充填不良，PC 鋼材破断，付着，残存プレストレス量，曲げ耐力

### 1. はじめに

我が国初のポストテンション式プレレストコンクリート (PC) として、1954 年の第一大戸川橋梁が建設されて以降、10,000 連以上の PC 桁が鉄道橋として供用されている。このような PC 桁では、PC 鋼材の劣化を防止するためにシーすと PC 鋼材の隙間をグラウトで充填することが必須である。しかしながら、様々な理由によりグラウトがシーす内部に完全には充填しておらず、その結果、鋼材が腐食し、破断した事例が報告されている<sup>1)</sup>。鋼材の劣化は、PC 桁の力学性能を大きく変化させ、構造物の使用性や安全性<sup>2)</sup> を脅かすことから、PC 鋼材が破断した PC 桁の力学性能を評価し、それに応じた補修・補強を実施することが重要である。

ポストテンション式 PC 桁では、PC 鋼材の定着機構の設置により導入プレストレス量が十分確保されている。したがって、PC 鋼材の破断は、鋼材の定着機能を消失させるとともに残存プレストレス量を大きく変化させ、構造物の力学性能を大幅に劣化させる可能性がある。しかし一方で、グラウトがシーすに充填されていると、PC 鋼材が破断しても鋼材とグラウトの付着力の存在により、鋼材の緊張力が PC 桁に伝達するために、プレストレス力が PC 桁に部分的に確保される可能性がある。し

たがって、より合理的に PC 桁の力学性能を評価するためには、残存プレストレス量を評価することが必須であるため、グラウトと PC 鋼材の付着特性を把握することが重要となる。これまで、鉄筋の付着試験を参考にした PC 鋼材の引抜試験結果が報告されているが<sup>3)</sup>、鋼材のひずみ情報を考えると、本研究の対象である破断後の鋼材を適切に再現できないと考えられる。

ところで、PC 桁の耐久性評価に関して、グラウトの充填評価に対する非破壊検査技術の開発や PC 鋼材の腐食メカニズムが国内外において報告されている。さらに残存プレストレス評価法を開発し、これらの既往の成果を統合することで、PC 桁の部材性能を直接的に評価できる可能性がある。

そこで本研究は、安全性の視点からグラウト充填不良を有する PC 桁が、PC 鋼材破断後に有する曲げ耐力を、鋼材とグラウトの付着特性に着目することで、適切に残存プレストレス量を評価することを目的とした。すなわち検討では、一軸供試体の PC 鋼材破断実験を行い、PC 鋼材の種類およびグラウト強度の関数とした PC 鋼材とグラウトの付着特性を取得することで、鋼材破断後に PC 桁に残存するプレストレス量を把握した。そして、残存プレストレス量を用いたグラウト充填不良を有する PC 桁の鋼材破断後の曲げ耐力評価法を提案し、この評価法を PC 桁の載荷試験結果と比較することで検証した。

\* 構造物技術研究部 (コンクリート構造)

\*\* 前 構造物技術研究部 (コンクリート構造)

特集：構造物技術

2. PC 鋼材破断後の残存プレストレスの評価

2.1 一軸供試体による PC 鋼材の破断試験

図1に、供試体概要を示す。供試体は、250×250 mm もしくは 400×400 mm の矩形断面を有する PC 部材であり、鋼材を破断するために、端部に開口部が設置されている。コンクリートの目標圧縮強度は 50 N/mm<sup>2</sup> である。鋼製シース (径 38, 65mm) 内部には、グラウトが十分充填されており、シースの周囲には軸方向鉄筋 (D16) が4本、および横方向鉄筋 (D13) が 100 mm 間隔で配置されている。また、ひずみゲージを貼付した異形鉄筋 (D6) を、シースに沿って試験体内部に配置した。

表1に、本研究で用いた9体の供試体の諸元を示す。本研究では、鋼材とグラウトの付着特性に影響を及ぼす、グラウトの圧縮強度 (グラウト強度) と PC 鋼材の種類をパラメータとした<sup>3)</sup>。試験では、打設後 10 日でプレストレスを導入し、打設後 30 日に図2に示す通りグラインダを使用して PC 鋼材を破断した。

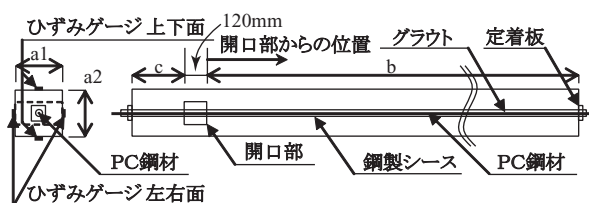


図1 供試体形状

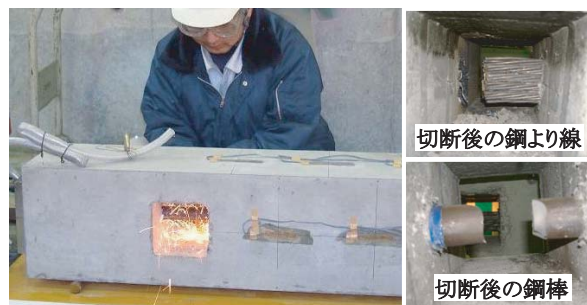


図2 鋼材切断状況および切断後の鋼材

表1 供試体諸元の一覧

供試体 No.	寸法					PC 鋼材			グラウト			コンクリート		有効プレストレス力 (kN)		
	a1 (mm)	a2 (mm)	b (mm)	c (mm)	シース径 (mm)	種別	本数-φ (mm)	$f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_g$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_c$ (kN/mm <sup>2</sup> )				
1-1	250	250	3000	280	38	鋼より線	1T9.3	1683	48.8	15.4	53.6	32.0	58			
1-2														30.3	12.7	108
1-3							1T12.7	1824	48.8	15.4			114			
1-4							SWPR7AL		67.0	16.8			106			
1-5							SWPR7BL	1T15.2	1875	48.8			15.4	192		
1-6	400	400	10000	450	65	丸鋼 SBPR	12T12.7	1883	26.8	10.9	54.5	40.0	1192			
1-7												44.6	15.5	54.5	39.0	1193
1-8	250	250		280	38		丸鋼 SBPR	φ 32	813	26.8	10.9	54.5	40.0	558		
1-9																

φ: 鋼材径,  $f_t$ : PC 鋼材の引張降伏強度,  $f_c$ : グラウトの圧縮強度,  $E_g$ : グラウトのヤング係数,  $f_c$ : コンクリートの圧縮強度,  $E_c$ : コンクリートのヤング係数

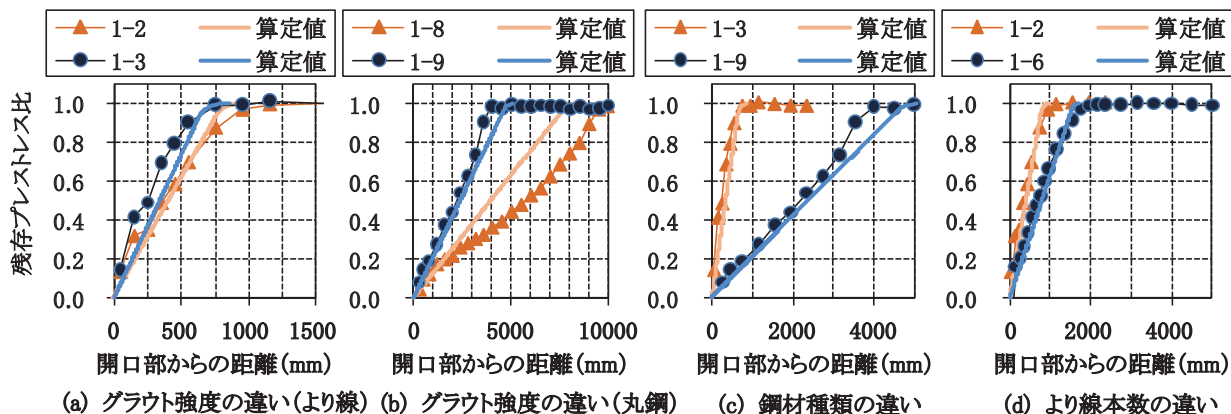


図3 鋼材破断後のプレストレス残存割合

### 2.2 残存プレストレス比

載荷実験では、開口部の鋼材を切断して緊張力を解放することによる残存プレストレス量を、試験体内部の鉄筋に配置したゲージにより測定した。鋼材破断前後で計測したひずみを用いて算出した残存プレストレス比を、図3に示す。図3 (a) に、1-2および1-3の試験結果を比較することにより、グラウト強度が残存プレストレス比に及ぼす影響を示す。グラウト強度の増加により鋼材とグラウトの付着力が増加したことで、プレストレス減少区間が小さくなるのがわかる。特に、図3 (b) に示す1-8および1-9の結果から、丸鋼を利用したPC供試体のプレストレス減少区間に対する、グラウト強度の影響は顕著である。さらに図3 (c) において、PC鋼材に丸鋼を利用した1-9とより線を用いた1-3の結果の比較から、プレストレス減少区間は鋼材種別に強く依存して変化することを確認した。さらには図3 (d) から、複数のより線(12T12.7)を使用したPC桁では、複数のより線を近接して配置した影響により、平均的な付着力が低下するため、破断後のプレストレスが変化する範囲が増加することがわかった。

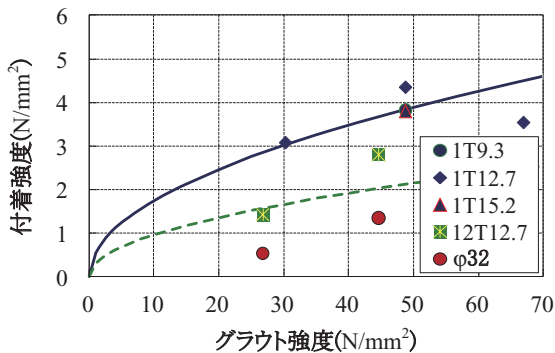


図4 供試体の付着強度 (凡例は表1を参照)

### 2.3 残存プレストレスの計算

図3に示す試験結果より、得られた破断位置近傍のプレストレス減少区間において、残存プレストレス量と破断位置からの距離の関係を線形と仮定することができる。このことは、微小区間に対するプレストレス減少量は一定であり、すなわち鋼材とグラウトの付着応力は一定と考えることができる。そこで、これを付着強度としてプレストレス減少範囲の有効プレストレスを、鋼材とグラウトの付着面積で除すことによって算出した。

図4に、実験より得られた付着強度とグラウト強度の関係を示すが、グラウト強度の増加に伴い付着強度が増加する傾向が確認できる。

そこで、より線とグラウトの付着に関する既往の研究<sup>3)</sup>における付着強度とコンクリート強度との関係を参考に、グラウトとPC鋼材の付着強度をグラウトの圧縮強度 $f_g$ の関係として定めることとした。これは、既往の研究<sup>3)</sup>の対象は、コンクリートからの鋼材の引抜試験に基づき得られた付着現象であるのに対して、本研究が対象とした現象は、緊張した鋼材の応力解放に伴う付着力の発生であるため、鋼材の伸びあるいは縮みに伴うグラウ

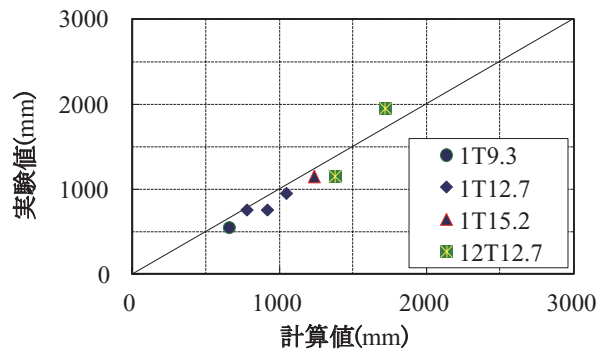


図6 プレストレス減少範囲

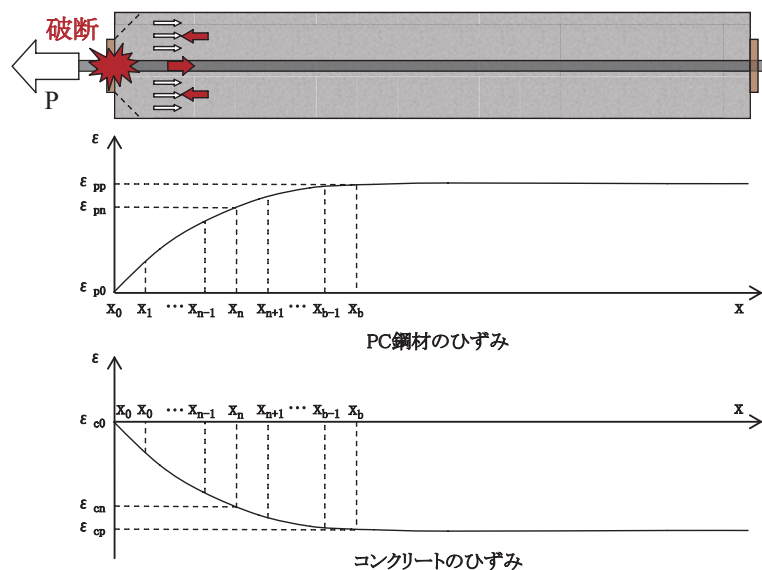


図5 鋼材破断後のプレストレスおよび鋼材ひずみの算定モデル

ここに、  
 $P$ :有効プレストレス (N)  
 $\epsilon_p$ :鋼材のひずみ  
 $\epsilon_c$ :コンクリートのひずみ  
 $s$ :すべり…コンクリートと鋼材を相対的に見た場合の鋼材の動き (mm)  
 $x$ :部材軸方向の破断面からの位置  
 $\Delta x = x_n - x_{n-1}$  (mm)  
 $A_p$ :鋼材断面積 (mm<sup>2</sup>)  
 $E_p$ :鋼材のヤング率 (kN/mm<sup>2</sup>)  
 $D$ :鋼材の公称直径 (mm)  
 $A_c$ :コンクリート断面積 (mm<sup>2</sup>)  
 $E_c$ :コンクリートのヤング率 (kN/mm<sup>2</sup>)  
**【境界条件】**  
 (切断位置)  $x_0 = 0, \epsilon_{p0} = 0, \epsilon_{c0} = 0$   
 (プレストレスがロスしていない位置)  
 $\epsilon_{pp} = P / (E_p \cdot A_p), \epsilon_{cp} = -P / (E_c \cdot A_c)$   
 $s_b = 0, \tau_{pb} = 0, \tau_{cb} = 0$

特集：構造物技術

トとの付着特性という点で、2つの現象は異なると考えられる。しかしながら、本研究の範囲では実験結果を十分精度よく表す関数形式が決定できなかったため、既往と同様の関数形式を使用することとしたものである。

また、図3 (d) にも示した通り、1本のより線の試験体と複数のより線 (12T12.7) からなる試験体では、プレストレスの減少範囲が異なることを確認した。したがって、グラウトとPC鋼材の付着強度を、より線の本数に従いそれぞれグラウトの圧縮強度 $f_g$ の関数として、式(1), (2)のように定めた。式(1), (2)による算定値と実験より得られた付着強度を図4に比較して示す。

$$\tau_1 = 0.55\sqrt{f'_g} : 1本より線 \quad (1)$$

$$\tau_2 = 0.30\sqrt{f'_g} : 複数より線 (12T12.7) \quad (2)$$

より線の本数およびグラウトの圧縮強度から、式(1)または式(2)を用いて算出される付着強度とした、2直線で示した付着応力-すべり ( $\tau-s$ ) 関係を得た。

図5に、鋼材破断後のPC梁における、コンクリートおよび鋼材のひずみ分布の模式図を示す。ある微小区間における力のバランスを考えると、PC鋼材の破断に伴い鋼材とグラウトの間に付着力が発生するが、これが微小区間における鋼材に作用する力の減少分と等しくなることから、以下の式(3)~(6)が仮定できる。

$$s_{n-1} = s_n + \left( \varepsilon_{pp} - \frac{\varepsilon_{pn} + \varepsilon_{pn-1}}{2} \right) \Delta x - \left( \varepsilon_{cp} - \frac{\varepsilon_{cn} + \varepsilon_{cn-1}}{2} \right) \Delta x \quad (3)$$

$$\tau_{cn-1} = \frac{E_c (\varepsilon_{cn-1} - \varepsilon_{cn}) A_c}{\pi D \Delta x} \quad (4)$$

$$\tau_{pn-1} = \frac{E_p (\varepsilon_{pn} - \varepsilon_{pn-1}) A_c}{\pi D \Delta x} \quad (5)$$

$$\tau_{cn} = \tau_{pn} \quad (6)$$

さらに、式(3)~(6)が成立するときの供試体の残存プレストレス比を算出した。算出結果を図3に併記するとともに、図6にプレストレス減少範囲の算定値と試験値を比較して示すが、算定値は試験結果を良好に再現できることが確認できる。すなわち、得られた付着応力-すべり ( $\tau-s$ ) 関係および式(1)~(6)により、鋼材破断後の残存プレストレス量について、その絶対値およびプレストレス低減区間を精度よく評価できた。

### 3. 鋼材が破断したPC部材の曲げ耐力の評価

#### 3.1 鋼材が破断したPC梁の曲げ載荷試験

PC鋼材を切断したPC梁の静的載荷試験を行い、曲げ耐力とPC鋼材破断量の関係の検討を行う。表2に本研究で用意した供試体および使用した材料の諸元を、図7に供試体の概要を示す。PC鋼材は、鋼より線SWPR7BL

表2 供試体諸元の一覧

供試体 No.	試験体諸元				実験および計算結果					
	コンクリート		有効プレストレス力 (kN)	切断割合 (%)	降伏荷重			曲げ耐力		
	$f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_c$ (kN/mm <sup>2</sup> )			$P_y$ (N)	$P_{y1}$ (N)	$P_y/P_{y1}$	$P_{max}$ (N)	$P_{mu}$ (N)	$P_{mu}/P_{max}$
2-1	58.1	39.5	1213	0	448	439	1.02	714	675	1.06
2-2			1268	50	381	401	0.95	698	594	1.18
2-3	57.0	40.1	1174	75	355	276	1.28	600	430	1.40
2-4			1217	0~67	-	356	-	615	544	1.13

$f'_c$ : コンクリートの圧縮強度,  $E_c$ : コンクリートのヤング係数,  $P_y$ : 軸方向鉄筋降伏時の荷重,  $P_{y1}$ : 破壊断面に曲げ降伏耐力 ( $M_{y1}$ ) 相当の曲げモーメントを作用させるための荷重の計算値,  $P_{max}$ : 曲げ耐力の実験値,  $P_{mu}$ : 破壊断面に曲げ耐力 ( $M_u$ ) 相当の曲げモーメントを作用させるための荷重の計算値

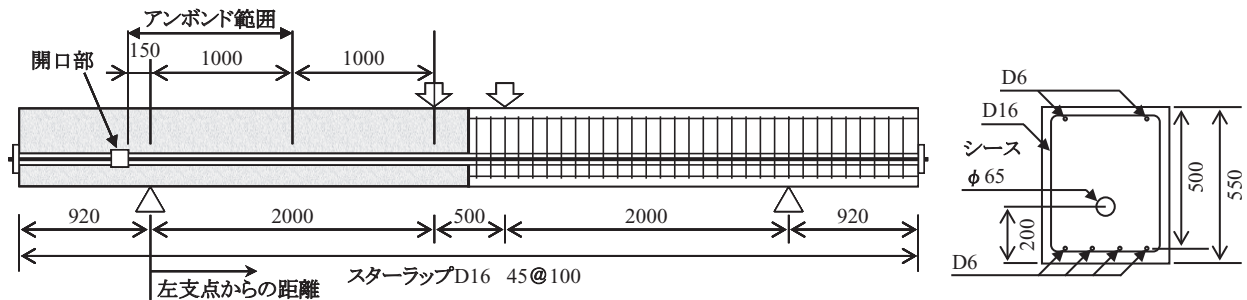


図7 試験体形状 (単位: mm)

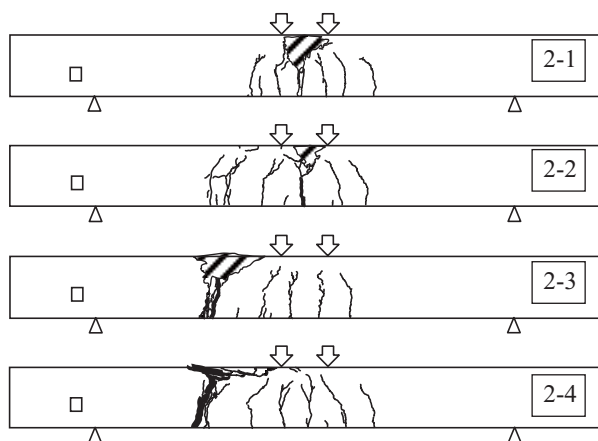


図8 供試体破壊状況

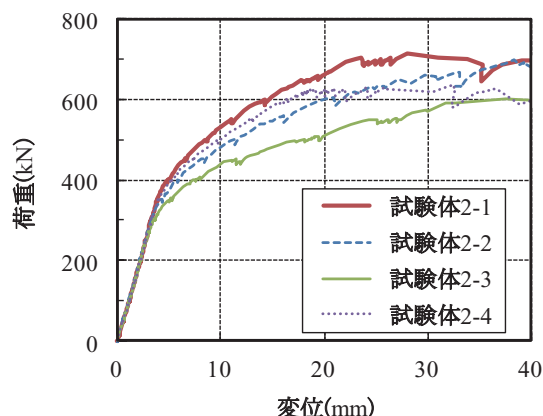
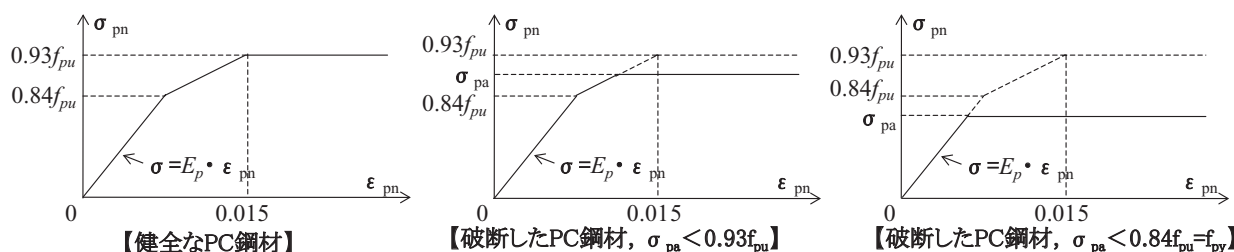


図9 荷重－変位関係



ここに、

$\sigma_{pa}$  : PC鋼材がすべり出す時の鋼材応力度 (N/mm<sup>2</sup>), ここでは,  $\sigma_{pa} = (\tau_1 \text{ or } \tau_2) \cdot \phi \cdot \pi \cdot L_a / A_p$   
 $L_a$  : 検討部材断面から鋼材破断位置までの距離 (mm)

図10 PC鋼材の応力－ひずみ関係

(12T12.7)であり、PC鋼材の引張降伏強度 ( $f_{py}$ ) は1849 N/mm<sup>2</sup>、PC鋼材の引張強度 ( $f_{pu}$ ) は2020 N/mm<sup>2</sup>、PC鋼材のヤング係数 ( $E_p$ ) は194 N/mm<sup>2</sup>である。また軸方向鉄筋には公称直径が12.7 mmである異形鉄筋 (引張降伏強度 ( $f_{sy}$ ) : 370 N/mm<sup>2</sup>、ヤング係数 ( $E_s$ ) : 194 kN/mm<sup>2</sup>)、せん断補強鉄筋には公称直径が15.9 mmである異形鉄筋 (引張降伏強度 ( $f_{wy}$ ) : 345 N/mm<sup>2</sup>、ヤング係数 ( $E_w$ ) : 194 kN/mm<sup>2</sup>) を使用した。

また、シースは鋼製であり直径は65mmである。シース内部は圧縮強度34.1 N/mm<sup>2</sup>であるグラウトを充填したが、片側支点より1000 mm区間にはテープをPC鋼材に巻きつけることで、PC鋼材とグラウトの付着を完全に除去したアンボンド区間を設定した。

供試体はPC鋼材を破断していない2-1、および50～75%のPC鋼材を切断した2-2～2-4の計4体を用意した。ただし、2-2、2-3では、荷重直前に所定の割合のPC鋼材を切断したが、2-4は2-2および2-3の耐力を参考に荷重(620kN)を持続的に作用させた状態でPC鋼材を徐々に切断する試験とした。

図8に、各供試体の破壊状況を示す。全ての供試体の破壊形態は、梁の圧縮縁のコンクリートがはく離することで荷重の最大値に至る、曲げ破壊型であった。また、表2に、実験結果および計算値をまとめる。ひび割れ発生時

の荷重は252～346 kNであり、鋼材の切断量の増加に伴い曲げひび割れが増加した。終局断面をみると、2-2は、曲げひび割れ発生後、支間左側のせん断スパンに曲げひび割れが発生し増加したが、コンクリートの圧縮破壊位置は支間中央近傍となった。2-3は、曲げひび割れ発生後、支間中央より左側のせん断スパンに曲げひび割れが発生および進展し、左支点から1300mm付近において圧壊した。2-4では、荷重に従い中央付近に曲げひび割れが発生した。その後、鋼材の切断量の増加に伴い支間左側において曲げひび割れが増加し、左支点から1200～1800mm付近で試験体上縁のコンクリートが圧縮破壊した。また、破断による面外方向の変位は観察されなかった。

図9に、供試体の荷重－変位関係を比較する。切断量が大きい供試体ほど、荷重の最大値が小さくなるのがわかる。なお、2-4については、切断本数が56本(切断割合で67%)となった時点で荷重620kNを維持できなくなった。また、曲げひび割れ発生までの剛性は、各供試体ともほぼ等しいが、曲げひび割れ発生後は、切断量の増加に伴い剛性が小さくなるのがわかった。

### 3.2 残存する曲げ耐力の評価

PC鋼材が破断したPC部材の曲げ耐力は、平面保持の仮定および断面の力の釣り合い条件から算定した<sup>4)</sup>。

## 特集：構造物技術

$$C' = \int_0^x \sigma'_c(u) \cdot b(u) du \quad (7)$$

$$T_p = \sum A_{pm} \cdot \sigma_{pm} \quad (8)$$

$$T_s = A_s \cdot \sigma_s \quad (9)$$

ここに、

$C'$  : コンクリートによる圧縮力の合力 (kN)

$T_p$  : PC 鋼材による引張力の合力 (kN)

$T_s$  : 引張鉄筋の合力 (kN)

$\sigma'_c(u)$  : 中立軸から高さ  $u$  におけるコンクリートの圧縮応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$b(u)$  : 中立軸から高さ  $u$  での部材幅 (mm)

$A_{pm}$  :  $n$  番目の PC 鋼材の断面積 (mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{pm}$  :  $n$  番目の PC 鋼材重心位置の PC 鋼材応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$A_s$  : 引張鉄筋の断面積 (mm<sup>2</sup>)

$\sigma_s$  : 引張鉄筋重心位置の引張鉄筋応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

断面内の釣り合い条件を考慮して、式(10)から圧縮縁から部材断面の中立軸位置までの距離  $x$  を算出し、さらに式(11)により曲げ耐力  $M_u$  を算定することとした。

$$N'_d = C' - T_s - T_p \quad (10)$$

$$M_u = C'(d_s - e_s - \beta_x) + T_s \cdot e_s + \sum A_{pm} \cdot \sigma_{pm} \cdot e_{pm} \quad (11)$$

$$\beta_x = x - \frac{\int_0^x \sigma'_c(u) \cdot b(u) \cdot u \cdot du}{C'} \quad (12)$$

ここに、

$N'_d$  : 軸方向力 (kN)

$M_u$  : 残存曲げ耐力 (kN・m)

$d_s$  : 圧縮縁から引張鉄筋重心までの距離 (mm)

$e_s$  : 断面重心から引張鉄筋重心までの距離 (mm)

$e_{pm}$  : 断面重心から  $n$  番目の PC 鋼材重心までの距離 (mm)

$x$  : 圧縮縁から中立軸位置までの距離 (mm)

ただし、破断した PC 鋼材の有効プレストレスによる PC 鋼材ひずみ  $\epsilon_{pm}$  は、図 10 に示すとおり、PC 鋼材とグラウトの付着力を考慮することで、すべりが発生した際の鋼材に作用する応力を用いることとした。

### 3.3 実験結果との比較による算定値の検証

プレストレス力が部分的に開放された PC 桁の曲げ耐力の算定は、試験体全長において載荷による作用曲げモーメントが曲げ耐力を上回る位置を破壊断面とし、その際の曲げ耐力として算出した。なお、破壊断面位置は、試験結果におけるコンクリートが圧縮破壊した断面位置とほぼ一致している。

表 2 に、3.2 節に従い算出した曲げ耐力の算定値と、載荷実験で得られた載荷荷重の最大値を比較して示す。ここで、供試体 2-4 については、載荷荷重 620kN を持続的に作用させたまま切断割合を 67% とした時点で載荷荷重 620kN の低下がみられた。したがって、供試体 2-4 の実験結果から、切断割合が 67% である供試体の載荷荷重の最大値を 620kN とした。算定値と実験値を比較した結果、おおむね曲げ耐力の計算値は試験値に近い値を示したが、その比は 1.13~1.40 となり、破断量が大きいほど、残存耐力を過小評価することがわかった。

内部に配置したひずみゲージにより、試験体におけるひずみ分布の計測を試みたが、載荷中のひび割れ発生により正確な追跡ができなかった。やや過大に安全側を示す結果となった要因として、破断 PC 鋼材が定着されていないことで載荷に伴う鋼材応力の増加によるすべりの発生、グラインダによる鋼材破断の際の付着切れ、および PC 桁にモーメントが作用することによる鋼材とグラウトとの付着強度の向上など、プレストレス量が変動している可能性があげられる。しかしながら、本研究で提案した評価法を用いることで、PC 鋼材が破断した PC 桁の力学性能を精度よく評価することができることから、より合理的な補修・補強を可能とするものであると考える。

## 4. 結論

- (1) プレストレスの変化を測定する PC 鋼材の破断試験より、各種要因がプレストレスの減少に及ぼす影響を把握し、鋼材破断後のプレストレスの評価法を提案した。
- (2) 鋼材破断に伴うプレストレスの減少を考慮した PC 桁の曲げ耐力の評価法を提案し、鋼材を切断した PC 梁の静的載荷試験により妥当性を検証した。さらに、PC 桁の健全度評価における残存耐力の評価法を示した。

## 文献

- 1) 石橋忠良: PC 鉄道構造物の劣化事例と対策, プレストレスコンクリート, Vol.45, No.1, pp.72-75, 2003.1
- 2) 睦好宏史: PC グラウトの現状と問題点, プレストレスコンクリート, Vol.48, No.2, pp.22-25, 2006.3
- 3) 是永健好, 渡辺英義: PC 鋼より線とグラウト材の付着特性評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp.1083-1084, 1999.9
- 4) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造物), 2004