

論文 鋼材破断時の付着特性に着目した PC 梁の曲げ耐力に関する一考察

前田 友章*1・徳永 光宏*1・田所 敏弥*2・谷村 幸裕*3

要旨: プレストレストコンクリート桁においては、PC グラウト充てん不良に起因した PC 鋼材の腐食や破断事例が報告されている。PC 鋼材の破断は、桁の落橋に至る危険性があるため、PC 鋼材の破断が桁の耐力に及ぼす影響を把握することが重要となっている。そこで、本研究では、PC 鋼材破断がプレストレスに及ぼす影響について、PC 鋼材と PC グラウトの付着特性に着目した実験により検討した。さらに、PC 鋼材を切断した PC 梁の静的載荷実験により、PC 鋼材が破断した PC 梁の曲げ耐力の評価法を示した。

キーワード: PC 梁, PC 鋼材破断, プレストレス, 付着, 曲げ耐力

1. はじめに

プレストレストコンクリート桁（以下、PC 桁とする）は、その特徴からスパンの長い橋梁に多く用いられている。近年、PC 桁における PC 鋼材の破断が報告され、調査の結果、PC グラウト（以下、グラウトとする）のブリーディングや施工不良などに起因するグラウト充てん不良から、PC 鋼材の腐食が進展し、破断に至っていることがわかっている¹⁾。PC 鋼材の破断割合が増加すると、落橋に至る危険性があるため、PC 鋼材の破断が PC 桁の耐力に及ぼす影響を把握することが必要である。

本研究では、PC 鋼材切断実験を実施し、切断前後のひずみ量の変化から、プレストレスの減少範囲と残存割合を検討した。また、PC 鋼材を切断した PC 梁の静的載荷実験を実施し、曲げ耐力に及ぼす PC 鋼材破断の影響を検討し、前述したプレストレスの減少範囲と残存割合を考慮した曲げ耐力の評価方法を提案した。

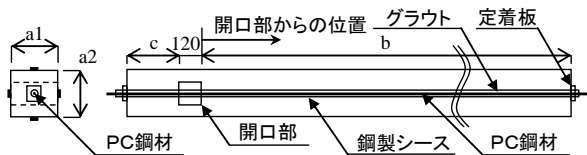


図-1 供試体概要 単位(mm)

2. PC 鋼材切断実験

2.1 実験概要

図-1に供試体概要、表-1に供試体寸法、PC 鋼材種別、材料特性値を示す。供試体材料は、既設鉄道 PC 桁で最も多いと想定される PC 鋼材種別、コンクリート強度とし、グラウト強度は従来タイプの基準値である 20N/mm²以上を参考に 30, 50, 70N/mm²とした。

供試体には、PC 鋼材を切断するために、供試体端部付近に開口部を設け、PC 鋼材に一定のプレストレスを導入し、ノンブリーディング超低粘性型グラウトを充てんした矩形断面の PC 梁を製作した。なお、有効プレストレス力は、PC 鋼材緊張時の引張力にコンクリートの弾性変形、クリープおよび PC 鋼材のリラクゼーションによる減少分を考慮したプレストレス力で、土木学会コンクリート標準示方書²⁾に従い算定した。

実験では、図-1に示す開口部の PC 鋼材をディスクグラインダーで切断することにより、プレストレスを解放した。コンクリート表面のひずみゲージは、供試体の上下と左右の表面に交互に設置し、コンクリート内部のひずみゲージは、鋼製シースの約 30mm 直上に D6 鉄筋を配置し、そこにひずみゲージを設置、計測を行った。

表-1 供試体寸法、PC 鋼材種別、材料特性値

供試体	寸法					PC鋼材				グラウト		コンクリート		緊張時の引張力	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_{py} (N/mm ²)	E_p (kN/mm ²)	f_g (N/mm ²)	E_g (kN/mm ²)	f_c (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)							
1-1	250	250	3000	280	38	鋼より線 SWPR7AL SWPR7BL	1T9.3	1683	219	48.8	15.4	53.6	32.0	PC鋼材 f_{py} の80% 程度	58.4					
1-2																		107.6		
1-3																			113.5	
1-4																			105.7	
1-5																			191.8	
1-6	400	400	10000	450	65		12T12.7	1883	191	26.8	10.9	54.5	40.0		1191.6					
1-7																			1192.8	
1-8																				1211.6
1-9										550	4470	650								1113.8

※ φ:鋼材径 f_{py} :PC鋼材の引張降伏強度 E_p :PC鋼材のヤング係数

f_g :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

*1 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造研究室研究員 工修 (正会員)

*2 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造研究室副主任研究員 博(工) (正会員)

*3 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造研究室室長 博(工) (正会員)

2.2 実験結果

結果の一例として、供試体 1-3 のコンクリートの内部ひずみ量を図-2 に示す。なお、ここで測定したひずみは、PC 鋼材緊張前を 0μ として、圧縮を正としている。

図-2 に示されるように、緊張後の内部ひずみ量はほぼ一定であったことから、各断面に同等のプレストレス力が作用していることが確認できた。また、切断前後の内部ひずみ量は開口部から 750mm まで内部ひずみ量に差があり、この範囲のプレストレスの減少を確認できた。

緊張後と切断前のひずみ量を比較すると、切断前の内部ひずみ量が大きく測定された。これはコンクリートの乾燥収縮やクリープの影響により、ひずみ量が増加しているものと推測される。ここで、コンクリートの乾燥収縮やクリープの影響を排除するため、PC 鋼材切断後のプレストレスの残存割合 r をひずみ量から求めた。

$$r = (\varepsilon_{pin} - \varepsilon_{pde}) / \varepsilon_{pin} \quad (1)$$

ここに、 r : プレストレスの残存割合

ε_{pin} : PC 鋼材の緊張によるひずみの増加分 (μ)
 = 緊張前のひずみ量 - 緊張後のひずみ量

ε_{pde} : PC 鋼材切断によるひずみの減少分 (μ)
 = 切断前のひずみ量 - 切断後のひずみ量

図-3 に供試体 1-3 のプレストレス残存割合を示す。各断面のプレストレス残存割合は、コンクリート内部と表面でほぼ一致し、各断面のコンクリート内部と外部のプレストレスが同様に減少していることが確認できた。

ここで、プレストレス残存割合が 1.0 未満のひずみ測定点の回帰直線を求め、回帰直線のプレストレス割合が 1.0 となる範囲までをプレストレス減少範囲 (区間 1) とした。各供試体のプレストレス減少範囲を PC 鋼材径で除した結果を図-4 に示す。グラウト強度が小さいほど、プレストレスの減少範囲は大きくなる傾向となった。また、グラウトが同強度であっても、PC 鋼より線を 1 本単独で配置した供試体よりも、PC 鋼より線を 12 本束ねた供試体の方がプレストレスの減少範囲が大きくなった。

3. PC 鋼材を切断した PC 梁の静的荷重実験

3.1 実験概要

図-5 に供試体概要、表-2 に供試体材料特性値、パ

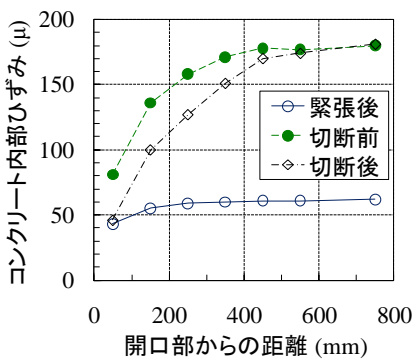


図-2 内部ひずみ(供試体 1-3)

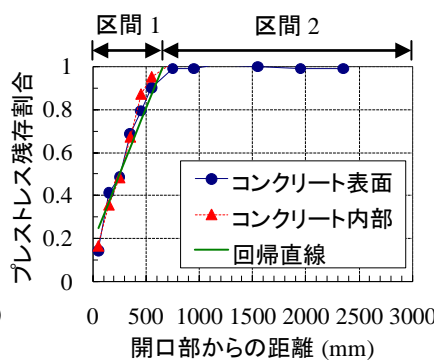


図-3 プレストレス残存割合(供試体 1-3)

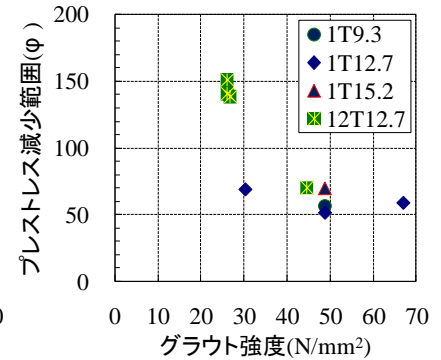


図-4 プレストレス減少範囲

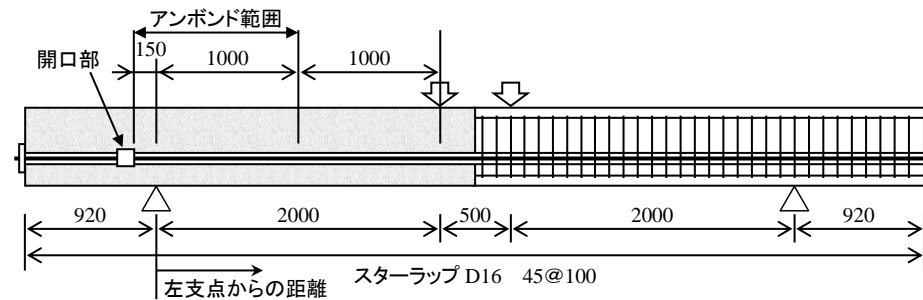


図-5 供試体概要

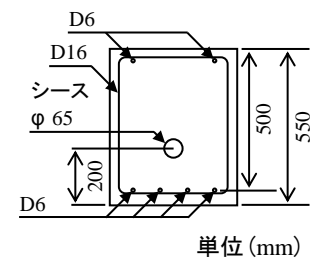


表-2 供試体材料特性値、パラメータ

供試体	PC鋼材			軸方向鉄筋		スターラップ		グラウト		コンクリート		有効プレ ストレス 力 (kN)	切断割合		
	種別	本数-φ	f_{py} (N/mm ²)	f_{pu} (N/mm ²)	E_p (kN/mm ²)	f_{sy} (N/mm ²)	E_s (kN/mm ²)	f_{wy} (N/mm ²)	E_w (kN/mm ²)	f_g (N/mm ²)	E_g (kN/mm ²)			f_c (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)
2-1	鋼より線 SWPR7BL	12T12.7	1849	2020	194	370	194	345	194	34.1	12.9	58.1	39.5	1213	0%
2-2												1268	50%		
2-3												1174	75%		
2-4												57.0	40.1	1217	0~100%

※ φ : 鋼材径 f_{py} : PC 鋼材の引張降伏強度 f_{pu} : PC 鋼材の引張強度 E_p : PC 鋼材のヤング係数

f_{sy} : 軸方向鉄筋の引張降伏強度 E_s : 軸方向鉄筋のヤング係数 f_{wy} : スターラップの引張降伏強度 E_w : スターラップのヤング係数

f_g : グラウトの圧縮強度 E_g : グラウトのヤング係数 f_c : コンクリートの引張降伏強度 E_c : コンクリートのヤング係数

ラメータを示す。供試体は、PC 鋼材の切断割合、切断方法をパラメータとした。供試体 2-1~2-3 は、PC 鋼材を表-2に示された切断割合となるよう切断し、2 点の静的荷重を実施した。供試体 2-4 は、載荷荷重が 620kN の状態で PC 鋼材を徐々に切断していく方法で実施した。

供試体には、PC 鋼材を切断するために、供試体端部付近に開口部を設け、PC 鋼材に一定のプレストレスを導入し、グラウトを充てんした矩形断面の PC 梁を製作した。なお、供試体にはグラウト充てん不良区間を想定したアンボンド区間を設けた。アンボンド区間の PC 鋼材には、写真-1に示すように周囲に熱収縮チューブを巻き付け、グラウトを充てんすることで、PC 鋼材とグラウトが付着しないようにした。

3.2 実験結果

各供試体破壊時の状況を写真-2に示す。どの供試体も圧縮縁が圧壊し、曲げ破壊した。

また、どの供試体もスパン中央付近に最初の曲げひび割れが発生した。ひび割れ発生時の載荷荷重は 252~346kN であり、切断割合の大きな供試体ほど、ひび割れ発生時の載荷荷重は小さくなった。供試体 2-2 は、曲げひび割れ発生後、スパン中央より左側の躯体に曲げひび

割れが増加したが、圧壊はスパン中央付近の圧縮縁となった。供試体 2-3 は、曲げひび割れ発生後、スパン中央より左側の躯体に曲げひび割れが増加、進展し、左支点から 1300mm 付近の圧縮縁が圧壊した。供試体 2-4 は、載荷荷重が 620kN に増加するまではスパン中央付近の曲げひび割れが進展した。その後、PC 鋼材を切断するに従い、スパン中央より左側の躯体の曲げひび割れえが増加、進展し、左支点から 1200~1800mm の圧縮縁付近のコンクリートが剥がれた。

各供試体の荷重-変位関係を図-6に示す。切断割合が大きい供試体ほど、最大荷重が小さくなる傾向が見られた。なお、供試体 2-4 については、切断本数が 56 本(切断割合 66.7%)となった時点で載荷荷重 620kN を維持できなくなった。また、曲げひび割れ発生までの各供試体の剛性はほぼ同等であったが、曲げひび割れ発生後は、切断割合の大きな供試体ほど剛性が小さくなった。

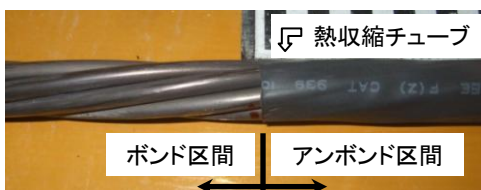


写真-1 熱収縮チューブ巻き付け状況

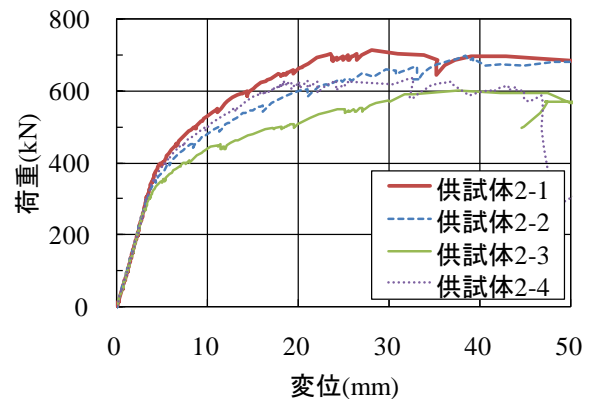


図-6 荷重-変位関係

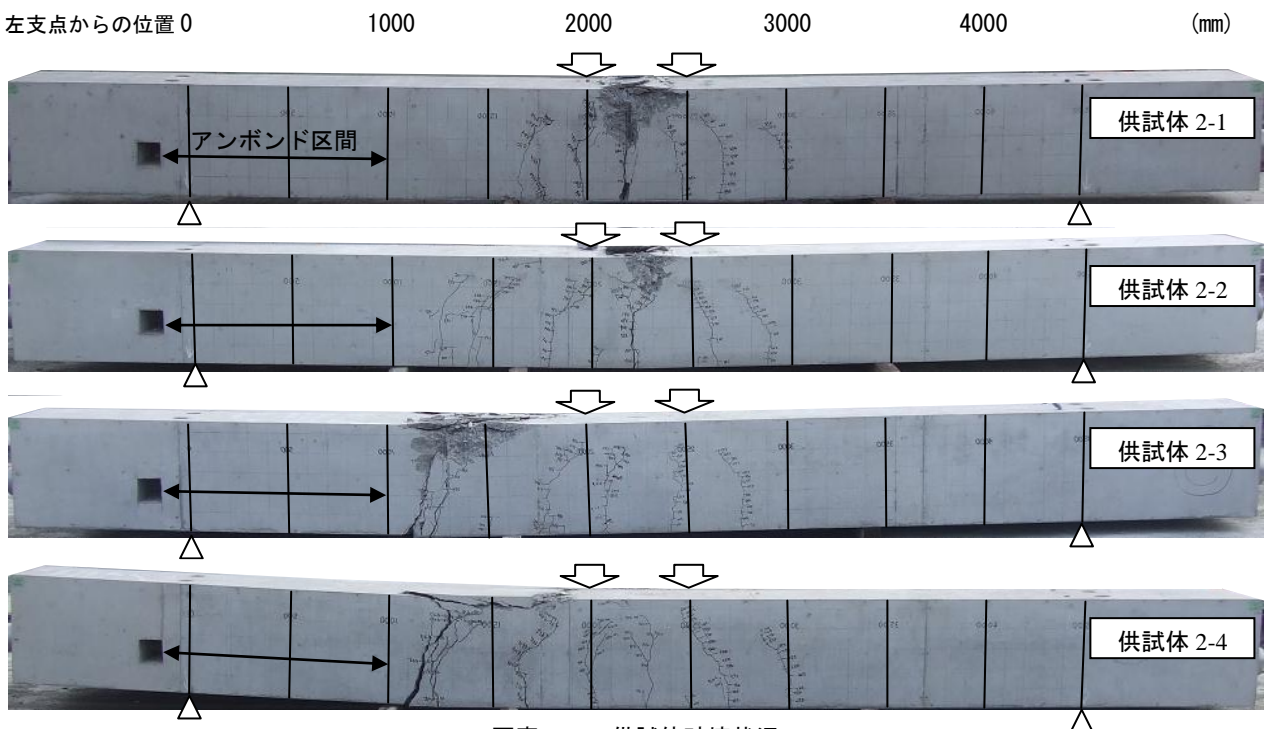


写真-2 供試体破壊状況

4. PC 鋼材が破断した PC 梁の曲げ耐力評価

PC 鋼材が破断した PC 梁の曲げ耐力を評価するため、まず、PC 鋼材破断時の PC 鋼材とグラウトの付着応力度、各断面での残存有効プレストレス、PC 鋼材のひずみ量を算定した。次にその結果を用い、平面保持の仮定、および部材断面内の力の釣り合い条件から、曲げ耐力を算定した。以下に、詳細な算定方法を述べる。

4.1 PC 鋼材破断時の付着特性

PC 鋼材切断実験結果から、PC 鋼材破断時の付着特性を検討した。図-3から、プレストレス残存割合の実験結果は、

区間 1：プレストレス残存割合が 1.0 未満のひずみ測定点の回帰直線区間

区間 2：プレストレス残存割合が 1.0 で一定の直線区間のバイリニアと概ね一致する。区間 1 では、開口部からの距離とプレストレス残存割合がほぼ比例関係であることから、区間 1 の微小区間で減少するプレストレス力は、どの微小区間でもほぼ一定であると考えられる。PC 鋼材切断時の PC 鋼材とグラウトの付着力が、PC 鋼材切断により減少するプレストレス力を負担することから、区間 1 の PC 鋼材とグラウトの付着応力度は、ほぼ一定であると推測される。そこで、表-2に示された有効プレストレス力を区間 1 の PC 鋼材とグラウトの付着面積で除することで、各供試体の付着応力度を求めた。付着応力度とグラウト強度の関係を図-7、表-3に示す。

既往の研究³⁾から、一軸引張実験における PC 鋼より線とグラウトの付着応力度の最大値がグラウト強度の 1/2 乗に比例することが明らかにされている。図-7から、PC 鋼より線 12 本の供試体の付着応力度が、PC 鋼より線 1 本の供試体よりも小さいことが確認された。これは、PC 鋼より線 1 本の場合と異なり、それぞれの PC 鋼より線が接するため、1 度に切断した場合に PC 鋼より線とグラウトの付着が完全に確保できないためであると考えられる。そのため、それぞれの付着応力度算定式を実験結果から最小二乗法により求めた。

$$\tau_1 = 0.55 f_g'^{1/2} \quad (2)$$

$$\tau_{12} = 0.30 f_g'^{1/2} \quad (3)$$

ここに、 τ_1 ：PC 鋼より線(1 本)の付着応力度(N/mm²)

τ_{12} ：PC 鋼より線(12 本)の付着応力度(N/mm²)

f_g' ：グラウト強度(N/mm²)

また、区間 1 での PC 鋼材のすべり量は、区間 1 の始点で最大、区間 1 の終点でほぼ 0 となっている。また、PC 鋼材のすべり量が 0 の位置での付着応力度は 0 であるため、PC 鋼材を切断した際の付着応力度 τ - すべり量 s 関係は、図-8のようなバイリニアになると推測される。

4.2 PC 鋼材破断時のプレストレス減少範囲と残存割合

前節で導いた付着応力度算定式を用い、各断面でのプ

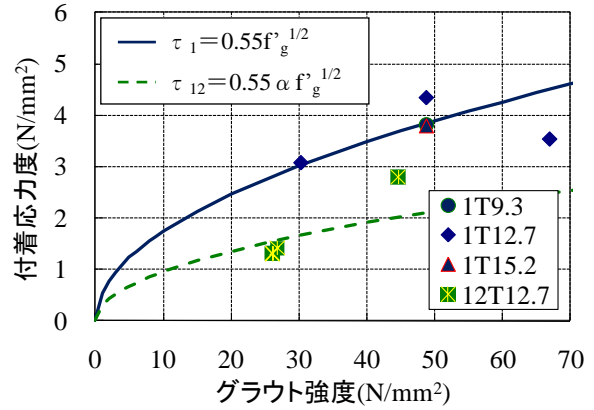


図-7 区間 1 の付着応力度

表-3 プレストレス減少範囲、区間 1 の付着応力度

供試体	グラウト強度 (N/mm ²)	プレストレス減少範囲		区間1の付着応力度 τ_{exp} (N/mm ²)
		実験値(区間1) (mm)	計算値 (mm)	
1-1	48.8	524	660	3.82
1-2	30.3	878	1050	3.07
1-3	48.8	655	920	4.34
1-4	67.0	749	780	3.54
1-5	48.8	1058	1240	3.80
1-6	26.8	1757	1720	1.42
1-7	44.6	891	1380	2.80
1-8	26.1	1917	1760	1.32
1-9	26.1	1785	1640	1.30



図-8 PC 鋼材の τ - s 関係

レストレスの減少範囲と残存割合を求めるための算定モデルを図-9に示す。ここで、PC 鋼材破断時、微小な区間の PC 鋼材とグラウトの付着力および PC 鋼材のプレストレスロスが釣り合うことから、以下の関係が成り立つと仮定した。

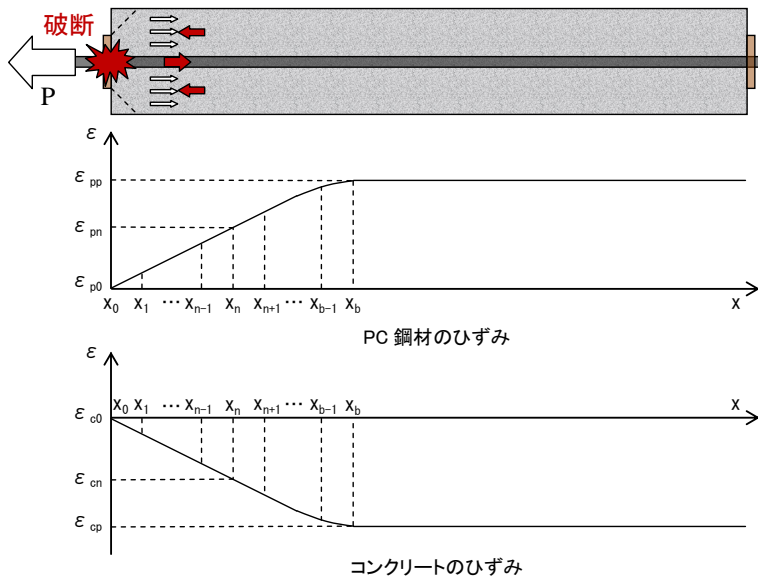
$$s_{n-1} = s_n + \left(\varepsilon_{pp} - \frac{\varepsilon_{pn} + \varepsilon_{pn-1}}{2} \right) \Delta x - \left(\varepsilon_{cp} - \frac{\varepsilon_{cn} + \varepsilon_{cn-1}}{2} \right) \Delta x \quad (4)$$

$$\tau_{cn-1} = E_c (\varepsilon_{cn-1} - \varepsilon_{cn}) A_c / \pi D \Delta x \quad (5)$$

$$\tau_{pn-1} = E_p (\varepsilon_{pn} - \varepsilon_{pn-1}) A_p / \pi D \Delta x \quad (6)$$

$$\tau_{cn} = \tau_{pn} \quad (7)$$

図-8に示す付着応力度 τ - すべり量 s 関係から、境界条件および式(4)~式(7)が成り立つ際の供試体 1-3、供試体 2-2 のプレストレス残存割合を求めた結果を図-10、図-11に示す。なお、図-8の付着応力度 τ が 0 から τ に至るまでの τ - s 関係は既往の一軸引張実験⁴⁾の結果を用いた。供試体 1-1~1-9 のプレストレスの減少範囲に



ここに、
 P :有効プレストレス力(N)
 ϵ_p :鋼材のひずみ
 ϵ_c :コンクリートのひずみ
 s :すべり量…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(mm²)
 E_p :鋼材のヤング率(kN/mm²)
 D :鋼材の公称直径(mm)
 A_c :コンクリート断面積(mm²)
 E_c :コンクリートのヤング率(kN/mm²)
【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)
 $\epsilon_{pp}=P/(E_p \cdot A_p), \epsilon_{cp}=-P/(E_c \cdot A_c)$
 $s_b=0, \tau_{pb}=0, \tau_{cb}=0$

図-9 PC鋼材破断時のプレストレスおよびPC鋼材ひずみ量算定モデル

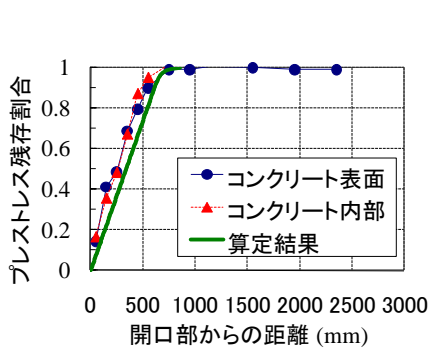


図-10 プレストレス残存割合 (供試体 1-3)

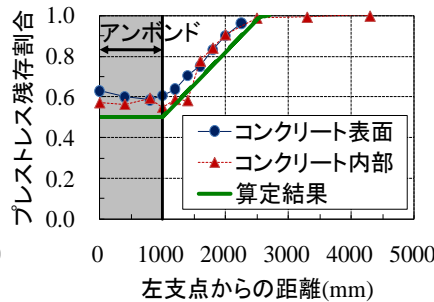


図-11 プレストレス残存割合 (供試体 2-2)

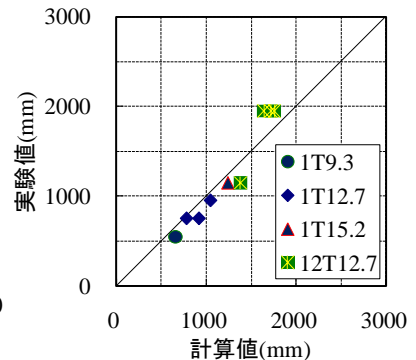


図-12 プレストレス減少範囲の計算値と実験値

ついて、実験値と計算値を比較を表-3、図-12に示す。実験値/計算値は、平均0.97、変動係数14.7%であり、算定結果と実験結果は概ね一致した。

4.3 PC鋼材が破断したPC梁の曲げ耐力

PC鋼材が破断したPC梁の曲げ耐力については、図-13に示す平面保持の仮定、および部材断面内の力の釣り合い条件から、算定することとした。

$$C' = \int_0^x \sigma'_c(u) \cdot b(u) \cdot du \quad (8)$$

$$T_p = \sum A_{pn} \cdot \sigma_{pn} \quad (9)$$

$$T_s = A_s \cdot \sigma_s \quad (10)$$

部材断面内の釣り合い条件が満足することから、式(11)から x を求め、式(12)により残存曲げ耐力 M_u を算定することとした。

$$N'_d = C' - T_s - T_p \quad (11)$$

$$M_u = C' \cdot (d_s - e_s - \beta x) + T_s \cdot e_s + \sum A_{pn} \cdot \sigma_{pn} \cdot e_{pn} \quad (12)$$

$$\text{ここに、} \beta x = x - \frac{\int_0^x \sigma'_c(u) \cdot b(u) \cdot u \cdot du}{C'}$$

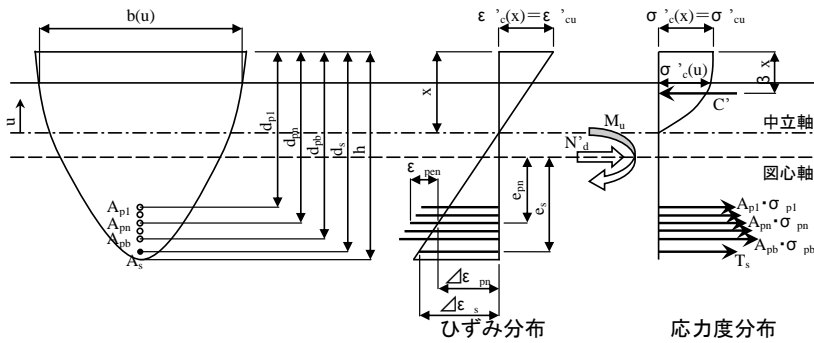
ただし、破断したPC鋼材の有効プレストレスによるPC鋼材ひずみ ϵ_{pen} は、前節の算定方法により算定した

プレストレスの残存割合から求めることとした。また、健全なPC鋼材の応力-ひずみ関係は、土木学会コンクリート標準示方書²⁾に準じ、破断したPC鋼材の応力-ひずみ関係は、PC鋼材とグラウトの付着から求まるPC鋼材がすべり出すときの応力度を考慮した応力-ひずみ関係(図-14)を用いることとした。なお、図-14では、 $f_{py} \leq \sigma_{pa} < 0.93f_{pu}$ であっても、図-8に示す付着応力度-すべり量関係が成り立つものと仮定した。

以下に、PC鋼材を切断したPC梁の静的荷重実験の供試体について、算定結果と実験結果の比較を示す。

図-11に供試体2-2のプレストレスの残存割合を求めた結果を示す。アンボンド区間で実験結果が算定結果を上回ったものの、概ね一致した。

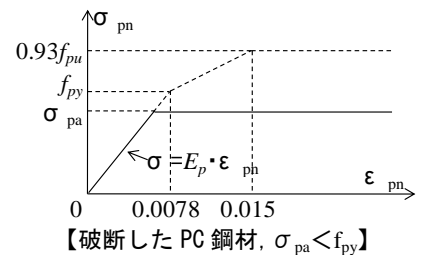
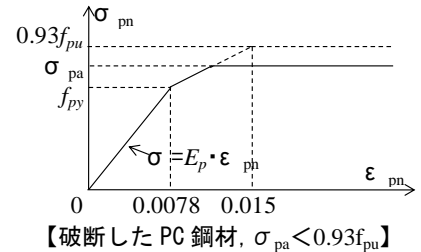
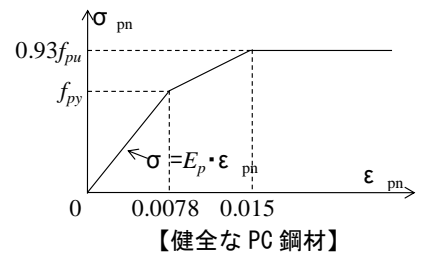
供試体2-1~2-4について、算定した残存有効プレストレス、PC鋼材のひずみ量、PC鋼材とグラウトの付着応力度を用いて、破壊断面位置、破壊断面の曲げ耐力を算定した。算定結果と実験結果の比較を表-4に示す。ここで、供試体2-4については、切断割合が66.7%となった時点で荷重荷重620kNを維持できなくなったことから、その時点での最大荷重荷重を実験値とした。PC鋼材が一



ここに、

- h : 梁高 (mm)
- d_{pn} : 圧縮縁から n 番目の PC 鋼材図心位置までの距離 (mm)
- d_s : 圧縮縁から引張鉄筋図心位置までの距離 (mm)
- A_{pn} : n 番目の PC 鋼材の断面積 (mm^2)
- A_s : 引張鉄筋の断面積 (mm^2)
- x : 圧縮縁から部材断面の中立軸位置までの距離 (mm)
- e_{pn} : 部材断面の図心軸位置から n 番目の PC 鋼材図心位置までの距離 (mm)
- e_s : 部材断面の図心軸位置から引張鉄筋図心位置までの距離 (mm)
- ϵ'_{cu} : コンクリートの圧縮縁位置における圧縮終局ひずみ
- $\Delta \epsilon_{pn}$: n 番目の PC 鋼材図心位置の PC 鋼材のひずみ増加量
- ϵ_{pen} : n 番目の PC 鋼材図心位置の有効引張応力度による PC 鋼材のひずみ
- ϵ_{pn} : n 番目の PC 鋼材図心位置の PC 鋼材のひずみ $\epsilon_{pn} = \epsilon_{pen} + \Delta \epsilon_{pn}$
- $\Delta \epsilon_s$: 引張鉄筋図心位置の引張鉄筋のひずみ増加量
- σ'_{cu} : コンクリートの圧縮縁位置における圧縮終局ひずみ時の応力度 (N/mm^2)
- C' : コンクリートの圧縮応力度の合力 (kN)
- T_p : PC 鋼材の合力 (kN)
- T_s : 引張鉄筋の合力 (kN)
- N'_d : 軸方向力 (kN)
- σ_s : 引張鉄筋図心位置の引張鉄筋応力度 (N/mm^2)
- σ_{pn} : n 番目の PC 鋼材図心位置の PC 鋼材応力度 (N/mm^2)

図-13 曲げ耐力算定時のひずみ分布と応力度分布の仮定



ここに、
 σ_{pa} : PC 鋼材がすべり出す時の鋼材応力度 (N/mm^2)
 ここでは、 $\sigma_{pa} = \tau_1 \cdot D \cdot \pi \cdot L_q / A_{pn}$
 L_q : 検討部材断面から鋼材破断位置までの距離 (mm)

図-14 PC 鋼材の応力-ひずみ関係

定割合切断した供試体の破壊断面位置、破壊断面の曲げ耐力について、供試体 2-3 の曲げ耐力の計算値が小さいものの、計算値は実験値に概ね一致した。

5. まとめ

本研究で実施した PC 鋼材切断実験、PC 鋼材を切断した PC 梁の静的荷重実験から得られた知見を以下に示す。

- (1) PC 鋼材切断実験から、PC 鋼材切断時の PC 鋼材とグラウトの付着応力度-すべり量関係は、バイリニアになると推測される。
- (2) PC 鋼材を切断した PC 梁の静的荷重実験から、PC 鋼材の切断割合が大きな供試体ほど、曲げひび割れ発生後の剛性と曲げ耐力が小さくなることがわかった。
- (3) PC 鋼材破断時の PC 鋼材とグラウトの付着力および PC 鋼材のプレストレスロスの釣り合い関係から、プレストレスの減少範囲と残存割合の算定方法を提案し、算定結果と実験結果と比較し、有用性を確認した。
- (4) 破断した PC 鋼材のひずみ分布や応力-ひずみ関係を別途検討し、PC 鋼材が破断した PC 梁の曲げ耐力を算定する際にその影響を考慮する方法を提案し、算定結果と実験結果と比較し、有用性を確認した。

表-4 PC 梁の曲げ耐力

供試体	実験結果		計算結果			
	破壊断面左支点から mm	P_{max} kN	破壊断面左支点から mm	破壊断面での M_u kN・m	P_{mu} kN	P_{max}/P_{mu}
2-1	2250	714	2000~2500	680	680	1.05
2-2	2250	698	2000	594	594	1.18
2-3	1250	600	1000	215	430	1.40
2-4	1250	615	1000	272	544	1.13

M_u : 曲げ耐力, P_{mu} : 破壊断面に M_u 相当の曲げモーメントを作用させる荷重

なお、本研究は国庫補助により実施した実験の成果を一部含んでいる。

参考文献

- 1) 中村雅之, 立神久雄: 診断の基本(1), プレストレストコンクリート, pp.119-124, No.1, Vol.51, 2009
- 2) (社) 土木学会: コンクリート標準示方書, 2008.3
- 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
- 4) 徳永光宏, 前田友章, 田所敏弥, 谷村幸裕: PC 鋼材の付着特性に及ぼす鋼材種別の影響, 土木学会第 63 回年次学術講演会概要集第 5 部, pp.1185-1186, 2008