

圧着型PC梁の荷重-変形関係上の材料損傷点に関するマクロモデルによる解析的検討

オリエンタル建設(株) 大阪支店 正会員 ○浅川 弘一
 大阪大学大学院 工学研究科 正会員 工博 中塚 侑
 (株) ピーエス三菱 大阪支店 正会員 寒川 勝彦

1. はじめに

耐震設計の性能規定化に伴い、架構及び部材の荷重-変形：(P-R) 関係を明確にし、部材やその構成材料の損傷度と関連づけて評価することが不可欠となる。本報告はプレキャスト圧着型PC梁の荷重-変形関係ならびに同関係上における各種材料損傷点、すなわち、かぶり部およびコア部コンクリートの圧縮強度歪み時およびストレスブロック係数 $k1k3max$ 時、PC鋼材降伏時、さらには部材変形に対する耐荷力(曲げ耐力)の発現度、降伏後のPC鋼材塑性歪み等が、PC鋼材の付着特性およびPC鋼材有効導入力によってどのような影響を受けるのかを、同梁のマクロモデルを用いた解析によって調べたものである。

2. 解析モデルの概要と仮定

本モデルは図-1に示す様に圧着面における中立軸深さ： Xn の α 倍 (本報では $\alpha=1.0$ と仮定) に想定したコンクリート潜在的圧縮破壊領域の圧縮変形量： ΔLc と、付着特性に依存する引張側PC鋼材の抜け出し変形量： ΔLt とが中立軸を介して変形適合し回転を起こすと仮定するモデルであるので、解析基本式は表-1の(1)、(2)式で与えられる。本報告でのマクロモデルは既往の基本モデル^{4),5)}をさらに発展させ適用できる付着強度の範囲を広げ、また変形初期からスリップ領域(抜け出し量積分長： $xL1, xL2$)を逐次追跡できるように改良をしたものである。

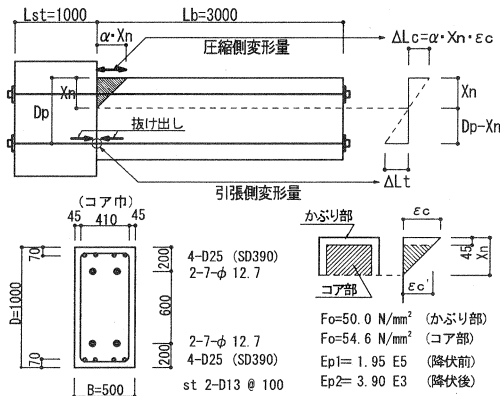


図-1. マクロモデルの概要

表-1 マクロモデル 基本式

変形適合	$\Delta Lt = \alpha \cdot \epsilon_c \cdot (D_p - X_n)$ (1)
軸力の釣り合い	$\sum C = \sum T$ (2)
R	$R = R_p + R_e = \alpha \cdot \epsilon_c + \frac{P \cdot (L_b - \frac{\alpha \cdot X_n}{2})^3}{L_b \cdot 3 \cdot E_c \cdot I_c}$ (3)

表-2. 抜け出し量： ΔLt の計算

A $T_{pc} < P_y : xL1 < L_{st}$	$\Delta T = r1 \cdot \Phi \cdot xL1$ $\Delta Lt = \frac{r1 \cdot \Phi \cdot xL1^2}{Ep1 \cdot Ap}$ $\Delta Lst = \Delta L / 2$ <small>(ΔLst: スタブからの抜け出し量)</small>
B $T_{pc} < P_y : xL1 > L_{st}$	$\Delta T = r1 \cdot \Phi \cdot xL1$ $\Delta Lt = \frac{r1 \cdot \Phi \cdot xL1 \cdot L_{st}}{Ep1 \cdot Ap} - \frac{r1 \cdot \Phi \cdot L_{st}^2}{2 \cdot Ep1 \cdot Ap} + \frac{r1 \cdot \Phi \cdot xL1^2}{2 \cdot Ep1 \cdot Ap} + \Delta Lst$
C $T_{pc} < P_y : xL1 > L_b$	$\Delta Ts = r1 \cdot \Phi \cdot L_{st}$ $\Delta Tb = r1 \cdot \Phi \cdot L_b$ $\Delta Lt = \frac{2 \cdot \Delta T \cdot L_{st} - r1 \cdot \Phi \cdot L_{st}^2}{2 \cdot Ep1 \cdot Ap} + \frac{2 \cdot \Delta T \cdot L_b - r1 \cdot \Phi \cdot L_b^2}{2 \cdot Ep1 \cdot Ap}$ <small>(ΔLst)</small>
D $T_{pc} > P_y : (L1 + xL2) < L_{st}$	$\Delta T = r2 \cdot \Phi \cdot xL2 + Y_o$ $\Delta Lt = \frac{r2 \cdot \Phi \cdot xL2^2}{Ep2 \cdot Ap} + \frac{2 \cdot Y_o \cdot xL2}{Ep1 \cdot Ap} + \frac{Y_o \cdot L1}{Ep1 \cdot Ap}$ $\Delta Lst = \Delta L / 2$
E $T_{pc} > P_y : (L1 + xL2) > L_{st}$	$\Delta T = r2 \cdot \Phi \cdot xL2 + Y_o$ $\Delta Lt = \frac{r2 \cdot \Phi \cdot xL2^2}{Ep2 \cdot Ap} + \frac{Y_o \cdot L_{st}}{Ep1 \cdot Ap} - \frac{r1 \cdot \Phi \cdot L_{st}^2}{2 \cdot Ep1 \cdot Ap} + \frac{Y_o \cdot xL2}{Ep1 \cdot Ap} + \frac{Y_o \cdot L1}{2 \cdot Ep1 \cdot Ap}$ <small>(1) (2) (3) (4) (5)</small> $\Delta Lst = (2) - (3) + (4) / 2$
F $T_{pc} > P_y : (L1 + xL2) > L_b$	$\Delta T = r2 \cdot \Phi \cdot xL2 + Y_o$ $\Delta Lt = \frac{r2 \cdot \Phi \cdot xL2^2}{Ep2 \cdot Ap} + \frac{2 \cdot Y_o \cdot L_{st} - r1 \cdot \Phi \cdot L_{st}^2}{2 \cdot Ep1 \cdot Ap} + \frac{2 \cdot Y_o \cdot L_b - r1 \cdot \Phi \cdot L_b^2}{2 \cdot Ep1 \cdot Ap}$ <small>(1) (2)</small> $\Delta Lst = (1) / 2 + (2)$
G $T_{pc} > P_y : xL2 < (L_b - L_{st} - L1)$	$\Delta T = r2 \cdot \Phi \cdot xL2 + Y_o$ $\Delta Lt = \frac{2 \cdot r2 \cdot \Phi \cdot xL2 \cdot L_{st} - r2 \cdot \Phi \cdot L_{st}^2}{2 \cdot Ep2 \cdot Ap} + \frac{Y_o \cdot L_{st}}{Ep1 \cdot Ap} + \frac{r2 \cdot \Phi \cdot xL2^2}{2 \cdot Ep2 \cdot Ap} + \frac{Y_o \cdot (2 \cdot xL2 + L1)}{2 \cdot Ep1 \cdot Ap}$
H $T_{pc} > P_y : xL2 > (L_b - L_{st} - L1)$	$\Delta T = r2 \cdot \Phi \cdot xL2 + Y_o$ $\Delta Lt = \frac{2 \cdot r2 \cdot \Phi \cdot xL2 \cdot L_{st} - r2 \cdot \Phi \cdot L_{st}^2}{2 \cdot Ep2 \cdot Ap} + \frac{Y_o \cdot L_{st}}{Ep1 \cdot Ap} + \frac{r2 \cdot \Phi \cdot xL2^2}{2 \cdot Ep2 \cdot Ap} + \frac{2 \cdot Y_o \cdot L_b - r1 \cdot \Phi \cdot L_b^2}{2 \cdot Ep1 \cdot Ap}$
I $T_{pc} > P_y : xL2 > L_b$	$\Delta T = 2 \cdot \Delta T_V \cdot (L_{st} + L_b) - r2 \cdot \Phi \cdot (L_{st}^2 + L_b^2)$ $\Delta Lt = \frac{2 \cdot \Delta T_V \cdot L_{st} - r2 \cdot \Phi \cdot L_{st}^2}{2 \cdot Ep2 \cdot Ap} + \frac{Y_o \cdot (L_{st} + L_b)}{Ep1 \cdot Ap}$ $\Delta Lst = \frac{2 \cdot \Delta T_V \cdot L_{st} - r2 \cdot \Phi \cdot L_{st}^2}{2 \cdot Ep2 \cdot Ap} + \frac{Y_o \cdot L_{st}}{Ep1 \cdot Ap}$

すなわち、本解析の基本となる表-1中の(1)式の引張側PC鋼材抜け出し量： ΔLt を、表-2中の各図で示したPC鋼材張力分布に従って、PC鋼材降伏前は付着強度： τ_1 と抜け出し量積分長： $xL1$ 、降伏後は τ_2 、 $xL2$ とし、 $xL1$ 、 $xL2$ のスタブエンドまたはビーム先端への到達の有無などにより区分されるA～Iの9パターンについて求めた。解析断面は図-1に示すように上下対称断面とした。圧縮鉄筋はカットオフ筋であるが実験結果⁶⁾に従い降伏するまでは歪み適合係数： $Frc=1.0$ で応力負担をすと考え、圧縮側PC鋼材の歪み適合係数は実験結果⁶⁾を参考に付着強度に関係なく $Fpc=0.2$ と仮定した。曲げ圧縮領域のコンクリートはかぶり部(プレーン)と

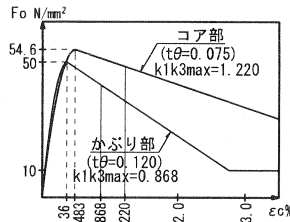


図-2. コンクリートのS-S関係

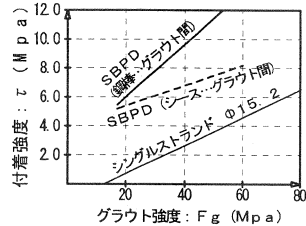


図-3 τ-Fg関係

コア部(コンファインド)で構成されるとし、それぞれの応力-歪み:(S-S)関係は実験結果⁶⁾を参考に図-2のように仮定した。PC鋼材のS-S関係はバイリニア型とし降伏後の2次勾配は初期勾配の1/50と仮定した。部材変形角は塑性ヒンジ部回転角： Rp と弾性変形による変形角： Re との和とし表-1の(3)式より求めた。表-3に解析パラメータとその水準を示す。図-3に最近の研究^{7,8)}による付着強度-グラウト強度:(τ - Fg)関係を示す。付着強度は同図を参考に、アンボンド鋼材およびストラッドを想定して $\tau_1=0.1\sim 4.0\text{Mpa}$ とした。PC鋼材降伏後の τ_2 は τ_1 の1/3と仮定した。引張側PC鋼材の周長は図-4に示す様により線束として最小となる $\Phi p=159.6\text{mm}$ とした。PC導入力は長期有効張力として考えられる最大値の $Po=850\text{kN}$ 、摩擦損失考慮なしでの現実的な値 700kN 、および、ある程度考慮した 550kN とした。



$$\Phi p = 12.7 \cdot \pi \cdot \frac{2}{3} \cdot 6 = 159.6 \text{ mm}$$

$$A_p = 691 \text{ mm}^2$$

$$P_y = 1092 \text{ kN}$$

図-4 PC鋼材周長

3. 解析結果と考察

図-5は Po が 700kN で τ を $0.1, 1.0, 2.0, 4.0\text{Mpa}$ と変化させた時の、および図-6は $\tau=4.0$ と 0.1Mpa で Po を $850, 700, 550\text{kN}$ と変化させた時の荷重-変形角:(P-R)関係、中立軸深さ: Xn -R関係を示したものである。同図よりコンクリートの損傷点は、かぶり部強度時歪み： $p\epsilon o$ 、コア部強時歪み： $cf\epsilon o$ 、かぶり部ストレスブロック係数最大： $pk1k3max$ 、コア部： $cfk1k3max$ の順で出現しており、その出現時の変形角はそれぞれ約 $R=0.5, 0.87, 1.0, 1.9\%$ ($1/200, 1/115, 1/100, 1/52$)前後であった。また、これらの損傷点は付着強度： τ 、PC導入力： Po の変化によってあまり大きな影響は受けていない。これは共通のコンクリートの限界歪みに対し、本解析断面では Xn -R関係が τ 、 Po にかかわらずほぼ同様の関係を示すためと考えられる。一方、PC鋼材降伏前のP-R関係、およびPC鋼材降伏時(Py 時)は非常に大きな影響を受けている。 τ 、 Po が小さくなると Py 時以前のP-R関係の勾配は緩くなって、変形増加に対する耐荷力の発現度が低い。また、 Py 時は変形が大きい方向に顕著に移動し、その範囲は $R=0.29\sim 2.55\%$ ($1/350\sim 1/35$)となり、 $p\epsilon o$ 時以前 $\sim cfk1k3max$ 時以降までにおよぶ。表-4に引張側PC鋼材の張力は Py 、圧縮側は Po として求めた曲げ耐力計算値： $Mucal$ とその時の荷重： $Pcal$ を示す。図-7は $R=0.5, 1.0, 1.5, 2.0\%$ における耐荷力解析値： P と

表-3 解析パラメーター

付着強度 【τ】	降伏前	τ_1 (Mpa)	0.1	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0
	降伏後	τ_2 (Mpa)	$\tau_2 = \tau_1 / 3$					
PC 導入力 【Po】	Po (kN)	(導入力) * (η)						σ (Mpa)
	850 kN (0.78· P_y)	$> 0.90 \cdot P_y * 0.85 = 0.77 \cdot P_y$						6.80
	700 kN (0.64· P_y)	$\approx 0.80 \cdot P_y * 0.85 = 0.68 \cdot P_y$						5.60
	550 kN (0.50· P_y)	$[0.64 \cdot P_y * 0.78 = 0.50 \cdot P_y]$						4.40

※は摩擦損失想定値

表-4 各PC導入力での曲げ耐力の計算値

$$M_{ucal} = (Dp1 - 0.42 \cdot Xn) \cdot 2 \cdot P_y + (Dp2 - 0.42 \cdot Xn) \cdot 2 \cdot P_o$$

$$X_{ncal} = (2 \cdot P_y + 2 \cdot P_o) / (0.83 \cdot B \cdot F_o)$$

$$P_{cal} = M_{ucal} / L_b$$

Po (kN)	Xncal (mm)	MUcal (kNm)	Pcal (kN)
850	187.2	1781.9	594.0
700	172.7	1767.2	589.1
550	158.3	1748.9	583.0

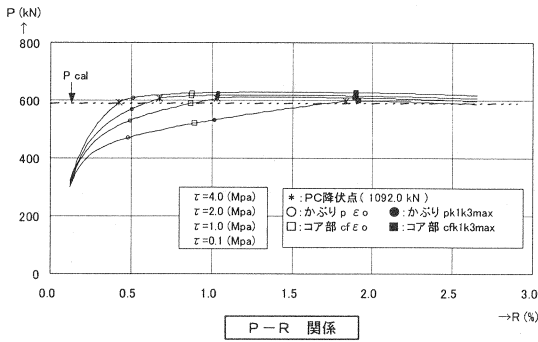


図-5 Po=700kN : τ=0.1・1.0・2.0・4.0

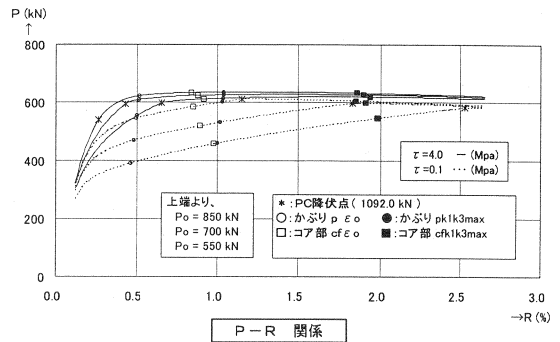


図-6 τ=4.0・0.1 : Po=850・700・550kN

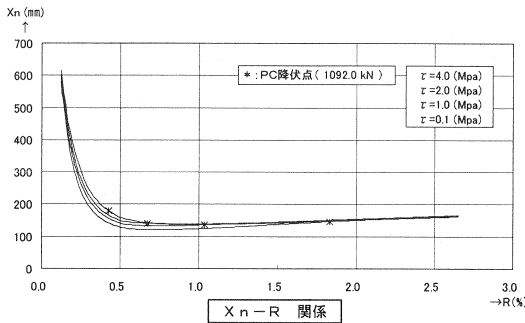


図-5 Po=700kN : τ=0.1・1.0・2.0・4.0

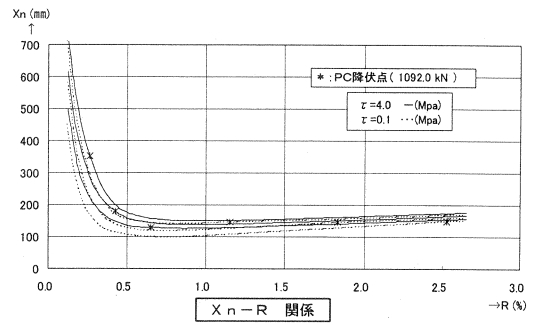


図-6 τ=4.0・0.1 : Po=850・700・550kN

Pcal との比: (P/P_{cal}) を、横軸に τ をとり P_o をパラメーターとして示したものである。同図より $\tau=1.0\text{Mpa}$ の時、 P_{cal} をほぼ満足する変形角は $P_o=850, 700, 550\text{kN}$ で $R=0.5\%$ ($\approx p\epsilon_o$ 時), 1.0% ($\approx pk1k3max$ 時), 1.5% ($1/67$) となるが, $\tau < 1.0\text{Mpa}$ では P_{cal} 発現時変形はさらに大きくなる。グラウト強度が低い, 摩擦損失が大きい場合等で τ, P_o が小さい場合, $R=0.5\sim 1.0\%$ ($1/200\sim 1/100$) 程度の変形時には, 設計で想定している曲げ耐力の $70\sim 80\%$ 程度の耐荷力しか発現しないこと。また, τ が小さい場合に小変形角での耐荷力の確保には P_o の増大が有効であること等が分かる。

図-8 は, P_y 時変形角 (R_{py}) を, 横軸に τ をとり P_o をパラメーターとして示したものである。 R_{py} は τ の減少に伴って急速に大きくなり, P_o の減少に対して増大する。 $R < 1.0\%$ ($1/100$) で PC 鋼材を降伏させない

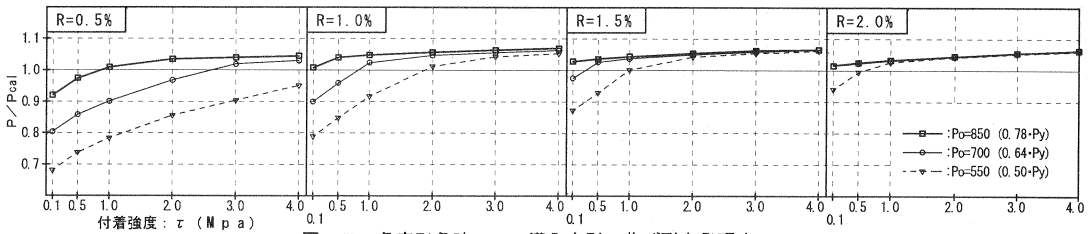


図-7 各変形角時のPC導入力別 曲げ耐力発現度

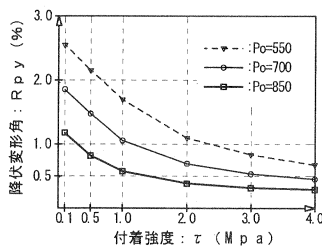


図-8 $R_{py} - \tau$ 関係

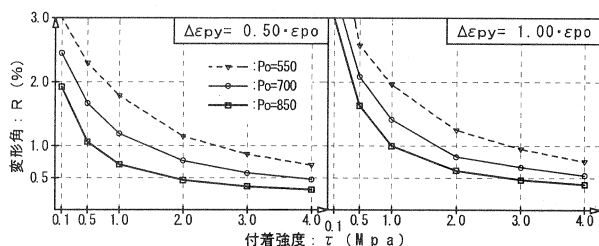


図-9 各塑性歪み ($\Delta\epsilon_{py}$) 時 $R - \tau$ 関係

とするなら、 $P_o=700\text{kN}$ では $\tau < 1.0\text{Mpa}$ 、 $P_o=550\text{kN}$ では $\tau < 2.0\text{Mpa}$ とする必要があることが分かる。

図-9はプレストレスの減退に直接関係するPC鋼材降伏以降の鋼材塑性歪みの増大量： $\Delta \epsilon_{py}$ が P_o に対応する弾性歪み： ϵ_{po} の50%、100%になる時の変形角を、横軸に τ をとって P_o をパラメーターに示したものである。先に述べた $P_o=700\text{kN}$ 、 $\tau=1.0\text{Mpa}$ 、および $P_o=550\text{kN}$ 、 $\tau=2.0\text{Mpa}$ の条件では、 R_{py} の1.15～1.05倍程度の変形で $\Delta \epsilon_{py}$ は ϵ_{po} の50%に達する。同変形からの除荷によって50%程度のプレストレスの減退が、さらに、 R_{py} の1.35～1.15倍程度の変形からの除荷によって100%近いプレストレスの減退が生じると推測される。言い換えれば、PC鋼材降伏後のわずかな変形増大によってプレストレス減退が大きく生じることが推測される。

4. まとめ

既往のモデルを広い範囲の付着強度に適応できるように改良したマクロモデルにより、圧着型PC梁の荷重-変形関係と材料損傷点を、付着強度： τ とPC導入力： P_o をパラメーターとした解析によって調べた。限られた断面および解析仮定下についての結果であるが、以下のことが分かった。

- 1) コンクリートの損傷点である、かぶり部 (p: プレーン)、コア部 (cf: コンファインド) 圧縮強度歪み時、ストレスブロック係数最大時は、 $p \epsilon_o$ 、 $cf \epsilon_o$ 、 $pk1k3max$ 、 $cfk1k3max$ の順に、変形角がほぼ $R=0.5$ 、 0.87 、 1.0 、 1.9% ($1/200$ 、 $1/115$ 、 $1/100$ 、 $1/52$) 時に出現した。
- 2) コンクリート損傷点の出現時変形は、 τ 、 P_o が変化しても大きな影響は受けない。
- 3) 変形に対する耐荷力の発現度は τ 、 P_o に大きく影響され、 τ 、 P_o が小さくなるとその発現が遅れてくる。 τ と P_o が小さい場合、 $R=0.5\sim 1.0\%$ ($1/200\sim 1/100$) 程度の変形時には設計で想定している曲げ耐力の70～80%程度の耐荷力しか発現しない。
- 4) PC鋼材降伏時変形： R_{py} は τ と P_o の影響を大きく受け、 τ の減少で急速に大きくなり、 P_o の減少で増大する。
- 5) 降伏後のPC鋼材塑性歪みはプレストレス減退に大きく影響するが、鋼材降伏後のわずかな変形増大によって塑性歪みが増大し、大きなプレストレス減退が生ずることが推測される。

強度設計が主流なためこれまでやや等閑視されてきた鋼材付着は、性能評価型設計に不可欠な荷重-変形関係、材料損傷度、PC鋼材残存緊張力などに大きな影響を及ぼす。したがって今後、各種PC鋼材の付着特性とグラウト特性との関係、および、設計での想定部材変形と発現耐荷力、PC鋼材塑性化の程度、コンクリート損傷度との対応を一層明確にしていく必要があると考えられる。

[追記]

本研究は「PC付着研究会」(構成:大阪大学, 明石高専, 高周波熱錬(株), 神鋼鋼線工業(株), 住友電工スチールワイヤー(株), オリエンタル建設(株), ドーピー建設工業(株), (株)ピーエス三菱)の活動の一環として行ったものである。

[参考文献]

- 1) 阿波野, 中塚, 上東, 石井「丸形PC鋼棒圧着型PC梁に対する提案マクロモデルによる荷重-変形関係の推定」日本建築学会近畿支部研究報告集 1999年7月
- 2) 石井, 中塚, 阿波野, 上東「等価塑性ヒンジ長さと断面曲げ解析によるPC梁の荷重-変形関係の推定」プレストレストコンクリート技術協会 第9回シンポジウム論文集 1999年10月
- 3) 阿波野, 中塚, 中川「圧着型PC梁の部材性能のマクロモデルによる推定」日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) 2001年9月
- 4) 中塚, 阿波野「丸形PC鋼棒圧着型片持ちPC梁の荷重-変形関係のマクロモデルによる推定」日本建築学会構造系論文集 No555 2002年5月
- 5) 浅川, 中塚, 寒川, 阿波野「圧着型PC梁部材の設計用歪み適合係数と等価塑性ヒンジ長についてのマクロモデルによる解析的検討」日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸) 2002年8月
- 6) 大林, 中川, 島田, 中塚「圧着型PC梁のマクロモデルにおける材料特性についての実験的研究(その1), (その2)」日本建築学会大会学術講演梗概集(東海) 2003年9月
- 7) 細居, 市来, 中塚「グラウト-PC鋼材の付着強度試験法に関する検討」コンクリート工学年次論文集 第24巻, 2号 2002年6月
- 8) 巽, 田坂, 第39回PC付着研究会資料, 資料No39-2 2004年5月