

PC 梁の荷重－変形関係の推定法 その1

－ マクロモデルによる解析 付着強度が小さい鋼材を有する圧着PC梁の場合 －

浅川 弘一*1・中塚 信*2

1. はじめに

ポストテンション型プレストレストコンクリート（以下PCと略記）の荷重－変形関係をはじめとする構造性能は、PC鋼材の付着特性によって大きく異なることが知られている。写真-1はPC丸形鋼棒を用いたPC圧着型梁の例であるが、付着がないアンボンド鋼材、比較的付着強度が小さい丸形鋼棒、ストランド等を用いた梁では荷重の増大に対し、圧着面の曲げひび割れのみが大きく開口するが、梁部分にはごくわずかな曲げひび割れは発生するものの曲げせん断ひび割れは発生せず、梁変形のほとんどが圧着目地部に集中して生じる。また、最終の破壊状況では圧着面近傍の限定された梁圧縮部に圧縮破壊が観察されるなどの特徴が見られる。

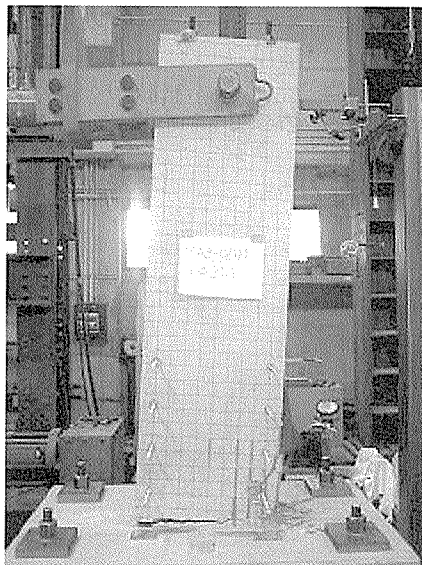


写真-1 丸形PC鋼棒の実験

本論では、以上に述べたような特徴を有する圧着型PC梁の荷重－変形関係を推定するためのマクロモデル²⁾を用いて、同関係ならびに梁構成材料の損傷度におよぼす諸要因の影響を解析的に検討する。

1.1 マクロモデルにおける仮定と概要

本マクロモデルは、実験の観察結果に基づく以下の仮定に従う図-1のようなモデルである。

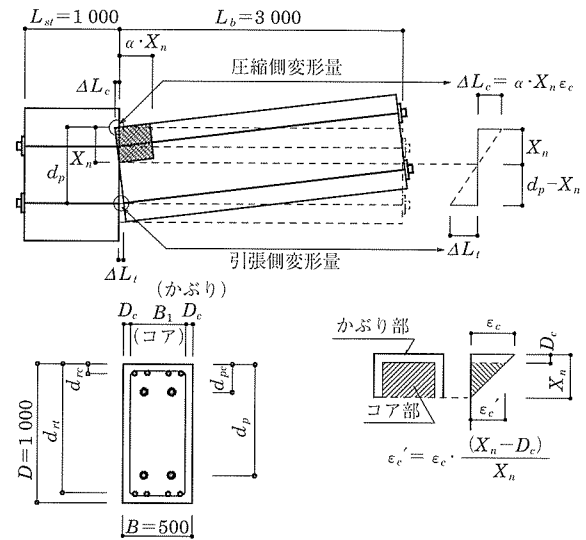


図-1 マクロモデルの概要

- ①圧縮側コンクリートには圧縮ひずみの一様な潜在的圧縮破壊領域（長さ： $\alpha \cdot X_n$ ）が存在する。
- ②潜在的圧縮破壊領域の圧縮変形量（ ΔL_c ）と引張側PC鋼材抜け出し変形量（ ΔL_i ）とが圧着面の中立軸位置を中心とし回転変形を起こし変形適合する。

1.2 解析基本式

本マクロモデルの解析基本式は、圧縮ひずみが一様であるとする仮定①での潜在的圧縮破壊領域（長さ： $\alpha \cdot X_n$ ）の圧縮変形量（ $\Delta L_c = \alpha \cdot X_n \cdot \epsilon_c$ ）と、付着強度に依存する引張側PC鋼材の抜け出し変形量（ ΔL_i ）とが仮定②での変形適合条件を満足することを示す(1)式と、圧着断面における力の釣り合い条件の(2)式である。

$$\Delta L_i = \Delta L_c \cdot (d_p - X_n) / X_n = \alpha \cdot \epsilon_c \cdot (d_p - X_n) \dots (1)$$

$$\Sigma C = \Sigma T \dots (2)$$

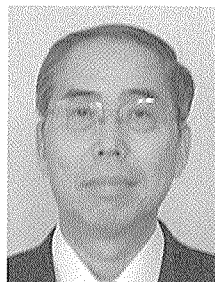
ここで、表-1の各図は部材内でのPC鋼材張力分布を示したもので、各ケースの分布図の囲む面積が ΔL_i となる。

ΔL_i はスタブ側とビーム側とから、PC鋼材降伏前は付着強度（ τ_1 ）と抜け出し積分長（ ${}_xL_1$ ）、降伏後は（ τ_2 、



*1 Hirokazu ASAKAWA

オリエンタル建設(株) 大阪支店
技術部 建築設計チーム



*2 Tadashi NAKATSUKA

大阪大学大学院 工学研究科
地球総合工学専攻助教授・工学博士

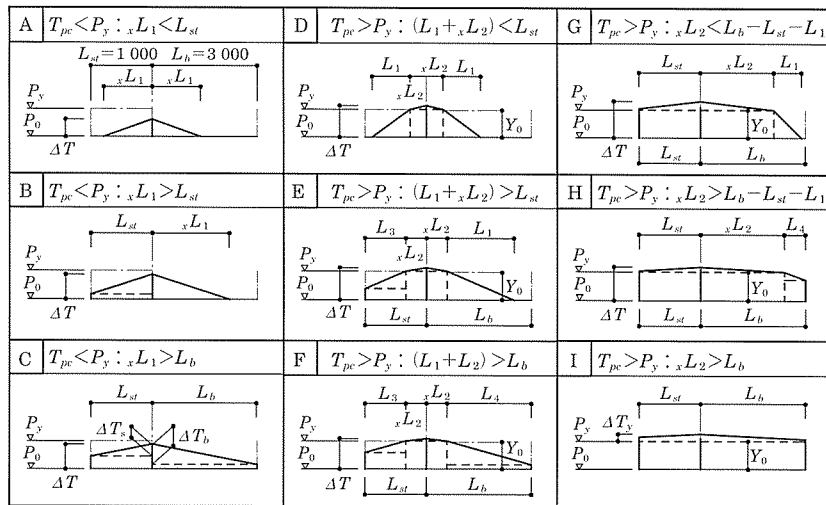


表 - 1 部材内の PC 鋼材張力分布

xL_2) とし, xL_1 , xL_2 のスタブエンドまたはビーム先端への到達の有無により A ~ I の 9 パターンについて与えられる。

この張力分布図の勾配は後述の解析仮定における付着強度に直接関係し, xL_1 , xL_2 の長さに関わるため, ΔL_i (=部材変形) の解析結果に大きく影響することとなる。

また, 部材角 (R) は, 塑性ヒンジ部回転角 (R_p) と弾性変形による変形角 (R_e) との和とし (3) 式より算出する。

$$R = R_p + R_e = \alpha \cdot \varepsilon_c + \frac{Q \cdot (L_b - \frac{\alpha \cdot X_n}{2})^3}{L_b \cdot 3 \cdot E_c \cdot I_c} \quad \dots (3)$$

2. 各種要因が荷重－変形関係におよぼす影響の解析的検討

2.1 解析対象梁と仮定

解析対象の梁は表 - 2 に示す No. 1 ~ No. 3 の断面をもつ図 - 1 のような $L_b = 3\,000$ mm の圧着型片持ち梁で, 解析パラメーターとしては, 付着強度 ($\tau = 0.1 \sim 7.0$ MPa), 鋼材係数 ($q_{pr} = 0.087 \sim 0.215$), 有効導入力 ($P_o = 0.50 \sim 0.78 \cdot P_y$) を取り上げた。また, 解析には以下の仮定を設定した。

モデルの仮定①での変形適合係数は実験結果^{1), 3)}の平均

	No.1		No.2			No.3		
							4-D25 かぶり: $D_c = 45$ (SD390) 鉄筋: $d_{rc} = 70$ PC 鋼材: (7- $\phi 12.7$) 4-D25	
F_c (MPa)	50.0		50.0			50.0		T_{ty} : 引張側 PC 降伏荷重
PC 鋼材	7- $\phi 12.7$		14- $\phi 12.7$			21- $\phi 12.7$		T_{co} : 圧縮側 PC 有効張力
P_y (kN)	1 092 ^{*1}		1 092 ^{*2}			1 092 ^{*3}		T_{cy} : 圧縮側 PC 降伏荷重
P_o (kN)	700 ^{*1}	550 ^{*2}	700 ^{*2}	850 ^{*2}	700 ^{*3}	0.64 $\cdot P_y$ (0.50 $\cdot P_y$, 0.78 $\cdot P_y$)		
σ_u (MPa)	4.37	4.40	5.60	6.80	8.40	$4 \cdot P_o / A_c$		
q_{pr}	*0.087	0.131	0.143	0.155	0.215	$(T_{ty} + T_{co}) / (B \cdot D \cdot F_c)$		
q_{cr}	0.228	0.228			0.228	1983 センター指針		
ランク	FA	FA			FA			
q_N (旧)	0.087	0.175			0.262	$(T_{ty} + T_{cy}) / (B \cdot D \cdot F_c)$		
q_{sp} (旧)	0.094	0.188			0.282	$(T_{ty} + T_{cy}) / (B \cdot d \cdot F_c)$		
X_n (mm)	*105.3	86.4	158.3	172.7	187.2	259.1	$T = T_{ty} + T_{co} (T_{cy})$	
M_u (kNm)	*995.5	948.6	1 748.9	1 767.2	1 781.9	2 455.8	$Q_{cut} = M_u / L_b$	
Q_{cut} (kN)	*331.8	316.2	583.0	589.1	594.0	818.6		
λ	1.00		1.00			1.00	圧着	

(共通) $X_n = (T_{ty} + T_{co}) / (0.83 \cdot b \cdot F_c)$, $M_u = (0.80 - 0.42 \cdot X_n) \cdot T_{ty} + (0.20 - 0.42 \cdot X_n) \cdot T_{co}$ [*印は T_{co} を T_{cy} にて算定。]

表 - 2 解析断面

的な値として ($\alpha = 1.0$) とした。

鋼材の付着特性は、鋼材の弾性域および降伏域に対し一定の強度値 (τ_1, τ_2) をもつものとした。また、付着強度としては、図 - 2 に示す最近の研究^{4)~5)} による付着強度-グラウト強度 ($\tau - F_g$) 関係を参考に、アンボンド鋼材およびストランド (束) を想定して $\tau_1 = 0.1 \sim 4.0$ MPa, 比較用に 7.0 MPa を採用した。降伏後の τ_2 は付着劣化を考慮して τ_1 の 1/3 とした。引張側 PC 鋼材の周長は図 - 3 に示すように、より線束として最小となる $\phi_p = 159.6$ mm とした。

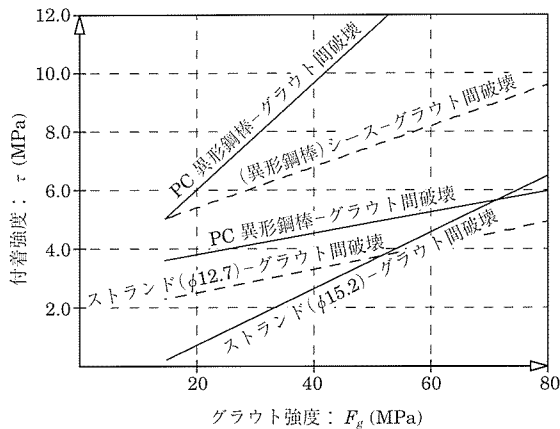
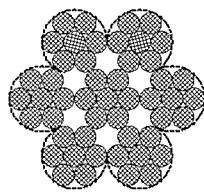


図 - 2 $\tau - F_g$ 関係



$$\phi_p = 12.7 \cdot \pi \cdot \frac{2}{3} \cdot 6$$

図 - 3 PC 鋼材の周長

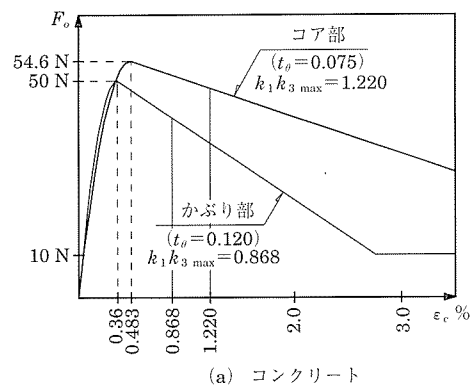
曲げ圧縮領域のコンクリートは、かぶり部 (プレーン：略号 p) とコア部 (コンファインド：略号 c) とで構成されると考え、それぞれの応力-ひずみ (S - S) 関係は実験結果³⁾ を参考に図 - 4 (a) のように仮定した。同様に鉄筋、PC 鋼材の S - S 関係は、完全弾塑性型およびバイリニヤ型 (同図 (b)) とした。

圧縮鉄筋はカットオフ筋であるが梁断面でのひずみ適合係数が $F_c = 1.0$ で、圧縮側 PC 鋼材は $F_{pc} = 0.2$ ($q_{pr} = 0.087$ の場合は $F_{pc} = 0.05$) で応力負担すると仮定した。

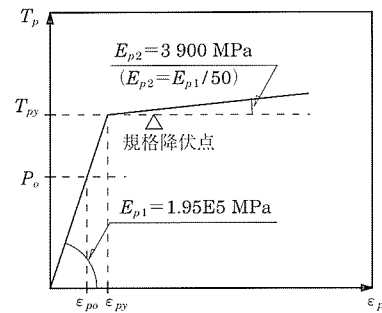
2.2 荷重-変形関係と各種損傷特性点への影響

本項では、荷重-変形 (Q - R) 関係および同関係上に出現する各種損傷特性点におよぼす解析パラメータの影響について考察する。

図 - 5 の (a) は、 P_0 が 700 kN で q_{pr}, τ をパラメータとした場合の、同図 (b) は $q_{pr} = 0.143$ で P_0, τ をパラメータとした場合の Q - R 関係の解析結果を示す。



(a) コンクリート



(b) PC 鋼材

図 - 4 S - S 関係

図中には鋼材、コンクリートの損傷特性点である圧縮鉄筋降伏点 (C_{ry}), PC 鋼材降伏点 (T_{py}), かぶり部 (プレーン), コア部 (コンファインド) の強度時ひずみとなる時点 ($p\epsilon_o, c\epsilon_o$), および、コンクリートストレスブロック係数最大時 ($p k_1 k_3 \max, c k_1 k_3 \max$) をプロットしている。また、図 (a) には表 - 2 で示した計算耐力 Q_{cal} も併記している。

これらの図より、次のようなことが分かる。 τ が減少するといずれの q_{pr} をもつ断面でも、Q - R 関係の立ち上がり初期からの勾配が小さくなって、図 (a) に併記された計算耐力を満足する部材角が急激に大きくなる。そのため付着が悪い場合には、 $R = 1/200$ 程度の変形時では、設計で想定する計算耐力が発現できないことが予想される。

一方この結果は、 τ の減少に伴い PC 鋼材降伏点が大変形側に大きく移動することに対応し、大変形時まで緊張力が保持されて、PC の特徴である高復元性を発揮することを推測させる。これに対し、 τ が 4.0 MPa 以上で付着がある程度良好な場合には、 $R = 1/200$ 前後で PC 鋼材降伏が生じ、 $R = 1/100$ 前後の変形時には、PC 鋼材は塑性域に入って残存緊張力は減少し、復元性が低下すると推測される。

また、 τ が 7.0 MPa の場合、いずれの q_{pr} の Q - R 関係も τ が 4.0 MPa のそれらとあまり差は見られず、 $P_0 = 700$ kN ($0.64 \cdot P_y$) の本例では影響限界の τ は 4.0 MPa 程度と考えられる。

これは、 P_0 の大きさ (逆に見れば鋼材の降伏までの余張力) にも依存するが、 τ がある程度大きい範囲では鋼材の抜け出し量は、 τ の変化ほどには差を生じないことを示唆していると思われる。

図 - 5 (b) は、 P_0 が Q - R 関係におよぼす影響を示したものである。同図によれば、Q - R 関係への τ の影響は P_0

が小さい方が顕著であることが分かる。

以上の結果によれば、付着強度 (τ) には有効導入力 (P_o) に依存して決まる限界値的なものが存在し、 τ をその値以下で変化させることによって、 $Q-R$ 関係や PC 鋼材降伏点が制御できることが推測される。

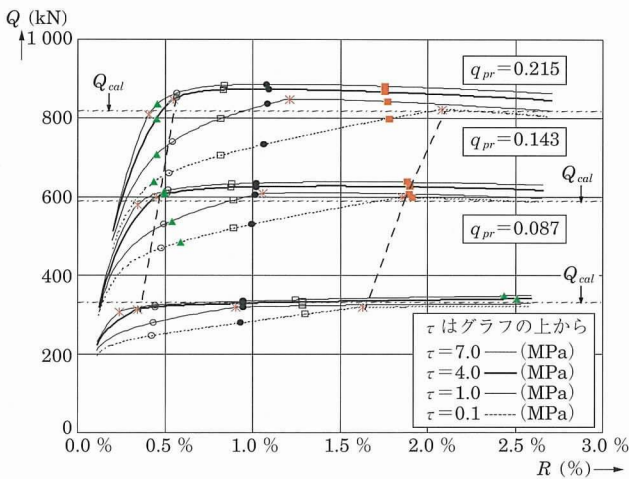
次に図 - 5 (a), (b) における材料損傷点について見ると、以下のようなことが分かる。コンクリートに関する材料損傷点の変動は小さく、付着強度 (τ)、鋼材係数 (q_{pr})、有効導入力 (P_o) の影響をあまり受けていない。いずれの場合でも、コンクリートの損傷点である $p \varepsilon_o$, $cf \varepsilon_o$, $p k_1 k_3 \max$, $ck_1 k_3 \max$ はこの順で発現し、その発現時の部材角は、平均的にほぼ $R = 1/200, 1/115, 1/100, 1/52$ となっている。これらの値は RC 造での想定値⁶⁾と若干異なるが、詳細については今後の検討が必要である。

3. 曲げ耐力発現度と PC 鋼材降伏時部材角

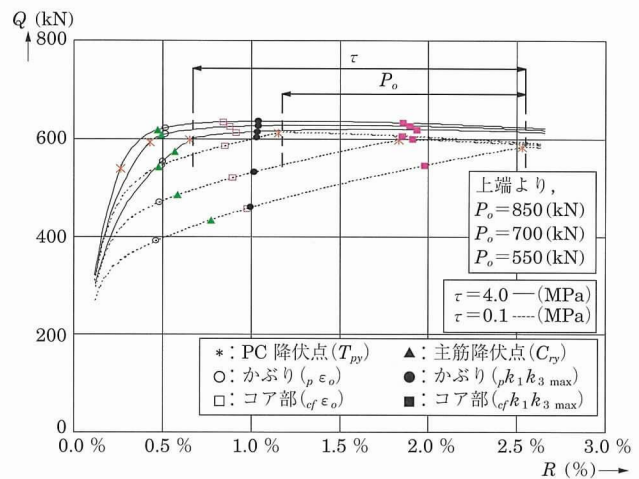
本節では、付着がおよぼす影響の具体例として、所要部材角における曲げ耐力の設計曲げ耐力に対する発現度および PC 鋼材降伏時部材角を示す。

図 - 6 は部材角 R が $1/200, 1/100, 1/67, 1/50$ における解析支持荷重 (Q) と表 - 2 に示す計算耐力 (Q_{cal}) との比 (Q/Q_{cal}) を、横軸に τ を取り、 P_o をパラメーターとして表したものである。

同図によれば、いずれの R, q_{pr}, P_o の場合でも、付着強度の低下によって Q/Q_{cal} は減少し、曲げ耐力の発現が遅れることが分かる。たとえば $R = 1/200$ 程度では、グラウト強度が低く、かつ、摩擦損失が大きく P_o が小さい場合には、計算曲げ耐力の 80% 程度しか耐力が発現しないことが分かる。逆に $R = 1/200$ で曲げ耐力を発現する τ は、 $P_o = 850$,



(a) $P_o = 700$ $q_{pr} = 0.215, 0.143, 0.087$



(b) $q_{pr} = 0.143$ $P_o = 850, 700, 550$ $\tau = 4.0, 1.0$

図 - 5 荷重-変形 ($Q-R$) 関係

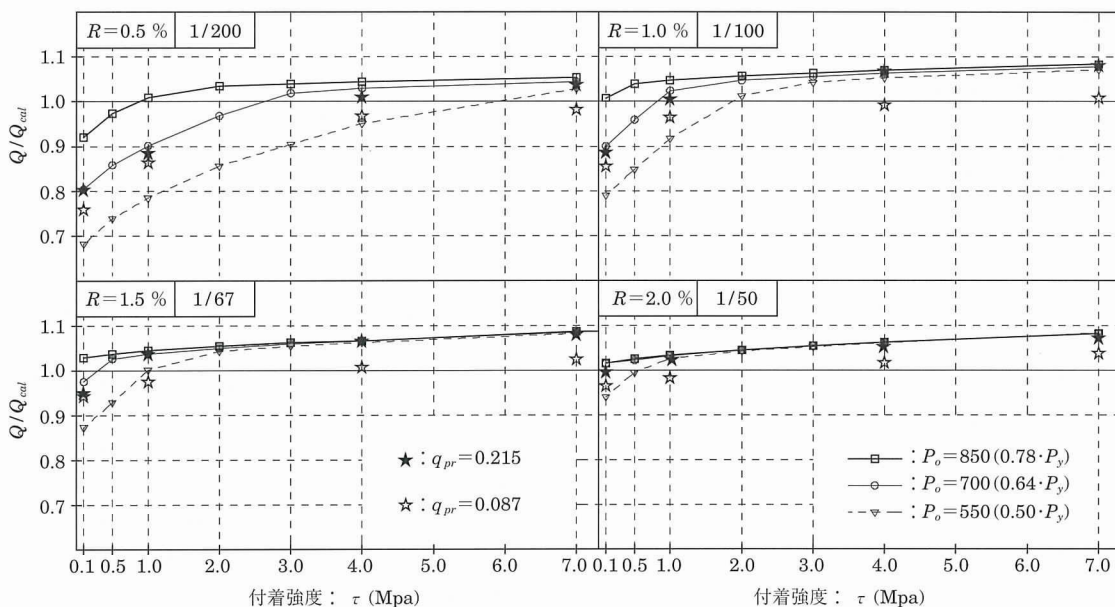


図 - 6 各部材角時 曲げ耐力発現度

700 kN においては $\tau \geq 2.0, 3.0$ MPa で、 $P_o = 550$ kN においては $\tau \geq 5.0$ MPa となるが、この場合でも $\tau \geq 3.0$ MPa であれば $R = 1/100$ 以降で曲げ耐力は発現されている。したがって本解析では、曲げ耐力の早期発現に必要な付着強度の下限は $\tau = 3.0$ MPa 程度と考えられる。

次に、図 - 7 は PC 鋼材降伏時部材角 (R_{py}) についての結果である。同図によれば、 R_{py} は P_o が小さい方がより顕著であるが、 τ の低下に伴って急速に減少し、 $\tau = 2.0 \sim 4.0$ MPa で $R = 1/200$ 前後の値にほぼ収束する傾向が見られる。このことは上述の結果と同様、小変形時における曲げ耐力の確保には $2.0 \sim 4.0$ MPa 以上の τ が必要であることを示すが、逆に復元性に密接に関係する PC 鋼材の塑性化も小変形時に生じることを示唆している。

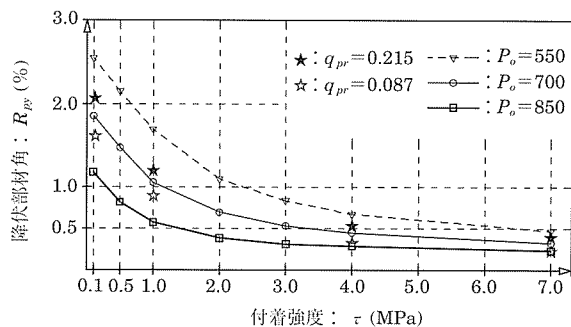


図 - 7 PC 鋼材降伏時部材角 (R_{py})

4. 等価塑性ヒンジ長さ (L_{eq}) と引張側 PC 鋼材ひずみ適合係数 (F_{pt})

マクロモデル解析によれば、梁部材の荷重-変形関係、柱梁圧着面位置における見掛けの曲率と PC 鋼材のひずみとが計算される。

したがって、それらの結果を用いれば実験での誘導過程と同様に、部材の荷重-変形関係を推定する簡便な算定法である等価塑性ヒンジ法に必要な等価塑性ヒンジ長さ (L_{eq}) および引張側 PC 鋼材ひずみ適合係数 (F_{pt}) が求められる。

等価塑性ヒンジ長さ (L_{eq}) を、塑性ヒンジ領域における回転角 (R_p) と潜在的圧縮破壊領域における曲率とから算出すると、本モデルでは $R_p = \alpha \cdot \epsilon_c$ ((3) 式) で与えられるので、 L_{eq} は (4) 式のように中立軸深さ (X_n) に等しくなることになる。

$$L_{eq} = R_p / \phi = \alpha \cdot \epsilon_c \cdot X_n / \epsilon_c = \alpha \cdot X_n = X_n \quad (4)$$

図 - 8 は、2.1 項のモデルの仮定に従い $\alpha = 1.0$ とした時の、部材角 R による L_{eq} の変化を q_{pr} 、 τ をパラメータとして示したものである。同図によれば、 L_{eq} は R の増加に伴って減少し収束していくという実験結果と定性的に一致する傾向を示し、その傾向は付着特性にあまり影響されないものであった。

次に、 F_{pt} は (5) 式に示すように、マクロモデル解析での圧縮部コンクリートのひずみ分布から計算される引張鋼材位置ひずみ ($\Delta \epsilon p_2$) に対する、クリティカル断面位置での増分鋼材ひずみ解析値 ($\Delta \epsilon p_1$) の比として求めた。

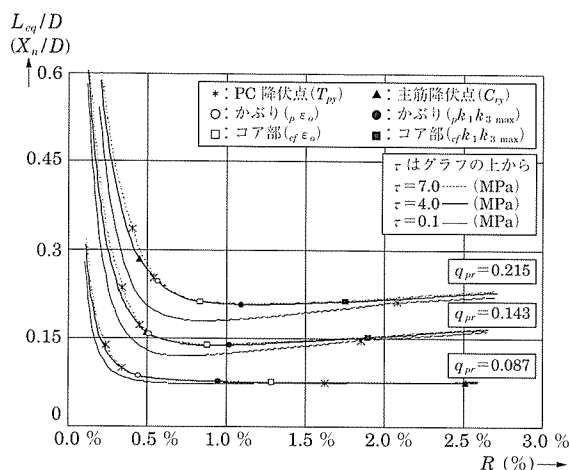


図 - 8 $L_{eq} - R$ 関係

$$F_{pt} = \Delta \epsilon p_1 / \Delta \epsilon p_2$$

$$\Delta \epsilon p_1 = \Delta T / (E_p \cdot A_p) \dots \dots \dots (5)$$

$$\Delta \epsilon p_2 = \epsilon_c \cdot (D_p - X_n) / X_n$$

図 - 9 は τ をパラメータに部材角 R による F_{pt} の変化を示したものである。同図によれば、いずれの τ の場合でも F_{pt} は R の増加に対し減少していくが、途中、PC 鋼材の降伏によるひずみの急増に起因すると推定される極点をもって、 τ の大きさに依存する値に収束する傾向が見られた。

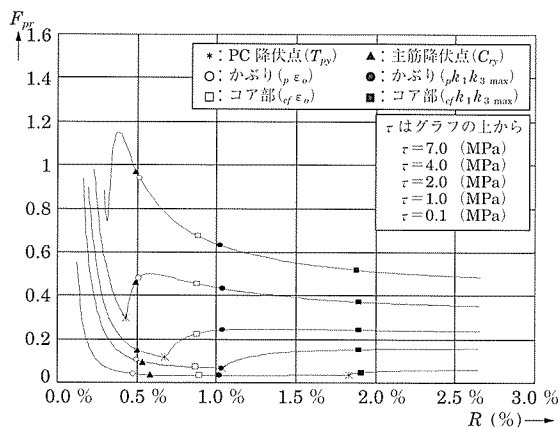


図 - 9 $F_{pt} - R$ 関係

5. ま と め

圧着型片持ち梁というかぎられた架構ではあるが、マクロモデル解析を用いれば、性能評価型設計に不可欠な荷重-変形 ($Q - R$) 関係と同関係上に出現する部材構成材料の各種損傷特性点が推定できることを示し、同時に、それらにおよぼす諸要因の影響も解析的に考察した。

得られた主な結果を以下に示す。

- 1) $Q - R$ 関係における PC 鋼材の損傷点である PC 鋼材降伏時点は、付着強度 (τ)、有効導入力 (P_o)、鋼材係数 (q_{pr}) 等の影響を大きく受ける。これに対し、コンクリートに関する材料損傷点は (τ , P_o , q_{pr}) の影響を

まり受けないことが分かった。

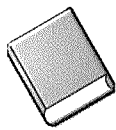
- 2) 降伏までの余張力とも関連する P_0 に依存して決まる τ の限界値 (本解析例では 4.0 MPa 程度) 以下において、 $Q-R$ 関係や PC 鋼材降伏点は τ の影響を大きく受けることが示された。
- 3) 小変形時における曲げ耐力の確保は、 τ が大きい場合には容易であるが、 τ が小さい場合には PC 鋼材降伏時変形が大きくなるため難しくなる。
- 4) マクロモデルによれば、等価塑性ヒンジ法における塑性ヒンジ長さ、引張鋼材のひずみ適合係数などが算定できることを示した。

なお、本論は文献 6), 7) の内容を適宜再構成したものである。詳細についてはそちらを参照されたい。

参考文献

- 1) 中塚・阿波野：接合形式 (圧着型・一体型) と PC 鋼材種 (丸形・異形) の異なる片持 PC 梁の耐荷・変形機構と力学性能に関する実験的研究, コンクリート工学論文集 vol.11, No3 pp.97-110 2000 年 9 月
- 2) 中塚・阿波野：丸形 PC 鋼棒圧着型 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, 第 555 号, pp.141-148, 2002 年 5 月
- 3) 古林・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, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海) C-2 pp.1019-1022 2003 年 9 月
- 4) 石橋・溝口・中塚・小山内・是永・加藤・高松・木内：PC 鋼材の S-S 特性および付着特性, PC 共同研究 最終年度研究報告書 II-2 pp.226-261 1999 年 3 月
- 5) 細居・市来・中塚：グラウト-PC 鋼材の付着強度試験法に検討, コンクリート工学年次論文集 第 24 巻 2 号 pp.811-816 2002 年 6 月
- 6) 日本建築学会 PC 部材終局性能・設計法小委員会：プレストレスト (鉄筋) コンクリート部材の終局性能評価手法, 第 2 章 PC 部材の荷重-変形関係推定法と同関係上における各種材料損傷点, pp.15 ~ 34, pp.95 ~ 103
- 7) PC 技術協会・鋼材付着制御による PC 構造性能改善研究委員会：付着が拓く PC 構造の近未来-構造性能評価における鋼材付着の役割に関するシンポジウム, 4.4.2 項 2005.06

【2005 年 5 月 10 日受付】



刊行物案内

今求められる PC 技術

第 33 回 PC 技術講習会

(平成 17 年 2 月)

頒布価格 会員特価：5 000 円 (税込み・送料別途 500 円)
非会員価格：6 000 円 (税込み・送料別途 500 円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会