

論文 PC 圧着関節工法を用いた骨組の履歴性状に関する研究

坂上肇^{*1}・瀬戸俊明^{*1}・坂田弘安^{*2}・松崎育弘^{*3}

要旨：筆者らは建築物の損傷を制御する方法として PC 圧着関節工法を提案している。これまでに本工法を用いた土形部分架構・柱脚部・ト形部分架構・十字形部分架構実験ならびに断面解析を行い、力学的性状を把握した。しかし、本工法を用いた骨組の履歴に関する検討はまだ十分には行われていない。本工法を用いた架構の変形性能の大半は PC 鋼材の抜け出しにより決定されるため、本研究では PC 鋼材の付着特性を用いて梁・柱関節部の圧着部モーメント M-回転角 θ 関係履歴のモデル化を行った。モデル化した M- θ 関係履歴を用いて部分架構の層せん断力 Q-層間変形角 R 関係履歴を算定し、精度良く表現出来ることを示した。

キーワード：損失制御構造, PC 圧着関節工法, 骨組, 履歴性状, PC 鋼材, 付着特性

1. 背景および目的

PC 圧着関節工法とはプレキャストプレストレストコンクリート(PCa/PC)部材を圧着させる構造において、PC 鋼材の抜け出しを許容し、圧着部(関節部)に弾性回転を形成して、『非線形弾性』の特性を有する架構を実現することにより、損傷を圧着部近傍に集中させ、損傷制御を実現する工法である。筆者らはこれまでに本工法を用いた土形部分架構¹⁾・柱脚部²⁾・ト形部分架構³⁾・十字形部分架構⁴⁾実験を行い、前述の特性を有することを確認し、本工法を用いた架構の変形性能の大半は PC 鋼材の抜け出しにより決定されることを把握した。そこで本研究では、PC 鋼材の付着特性を用いて梁・柱圧着部のモーメント M-回転角 θ 関係履歴のモデル化を行い、本工法を用いた部分架構の層せん断力 Q-層間変形角 R 関係履歴を算定することを目的とする。

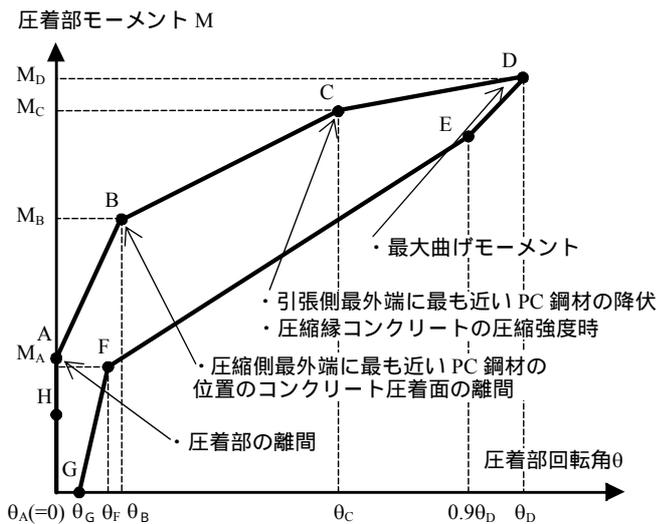


図-1 圧着部 M- θ 関係における基準履歴

2. 圧着部モーメント M-回転角 θ 関係基準履歴

2.1 圧着部 M- θ 関係基準履歴の概要

圧着部 M- θ 関係において基準となる履歴(以下、基準履歴とする。)を図-1に、各 M- θ 関係算定点のチャートを図-2に示す。図-1, 図-2に示す A~F 点は PC 鋼材の抜け出しを考慮した断面解析により算出する。G 点の θ_G は除荷時の残留回転角を表し、PC 鋼材の抜け出し量を既往の実験結果^{1),2),3)}から求め算出する。H 点は D 点から除荷し、再載荷した時の離間モーメントであり、G 点時の歪分布を用いて断面解析により算出する。

以上の算定点を元に圧着部 M- θ 関係履歴のモデル化を行う。

載荷時	A	圧着部離間時:中立軸 X_n が d_1 時
	B	圧縮側最外端に最も近い PC 鋼材の位置のコンクリート圧着面の離間時:中立軸 X_n が d_4 時 ²
	C	圧縮縁コンクリート圧縮強度時 or 引張側最外端に最も近い PC 鋼材の降伏時 ³
	D	最大曲げモーメント到達時
除荷時	E	回転角が $0.9\theta_D$ 到達時
	F	D 点時の圧縮側最外端に最も近い PC 鋼材の抜け出し量が $\gamma \delta_2$ となった時 ^{4, 5}
	G	D 点時に引張側最外端に最も近い PC 鋼材の抜け出し量が $\gamma \delta_1$ となった時
再載荷時	H	G 点時の歪分布を用いたときの圧着部離間時:中立軸 X_n が d_1 時

- 1:図-3参照
- 2:B で示す位置のコンクリート圧着面が離間しない時は M_A と M_D の中点を折れ点とする。
- 3:CD 間で圧縮側最外端に最も近い PC 鋼材の位置のコンクリート圧着面が離間した時は M_A と M_D の中点を点 B とする。
- 4:B の折れ点が M_A と M_D の中点となった場合、点 F は M が M_A に到達したときとする。
- 5: γ :D 点の PC 鋼材の抜け出し量に対する図-6,7 に示す除荷完了時の抜け出し量の比

図-2 各 M- θ 関係算定点のチャート

*1 東京工業大学 大学院生 (正会員)

*2 東京工業大学 建築物理研究センター 准教授 工学博士 (正会員)

*3 東京理科大学 工学部建築学科 教授 工学博士 (正会員)

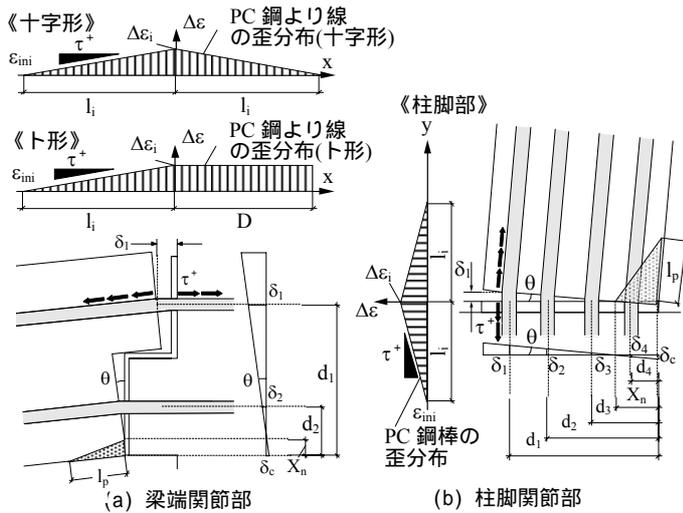


図 - 3 柱・梁関節部危険断面の変形状態

2.2 圧着部 M-0関係基準履歴の算出方法

ここでは、前節において概要を説明した圧着部 M-0 関係基準履歴における算定点を断面解析により算出する方法の説明を行う。

[載荷時] まず、基準履歴の A~D 点を求める。A 点:引張側最外端に最も近い PC 鋼材位置のコンクリート圧着面が離間を始める時(θ_A, M_A)、B 点:圧縮側最外端に最も近い PC 鋼材位置のコンクリート圧着面が離間を始める時(θ_B, M_B)、C 点:圧縮縁コンクリートが圧縮強度時もしくは引張側最外端に最も近い PC 鋼材の降伏時(θ_C, M_C)、D 点:断面解析中に圧着部のモーメントが、最大耐力に達した時(θ_D, M_D)とする。尚、最大モーメントが算出された後のモーメントの値は一定とする。また、圧縮側最外端に最も近い PC 鋼材位置のコンクリート圧着面が離間しない時、もしくは CD 間で離間した場合は、第 2 折れ点である B 点は M_A と M_D の中点とする。柱、梁部材のコンクリートの応力度-歪関係はコンクリートの材料試験結果を普通強度から高強度まで比較的精度良く表現できるといわれている Popovics 式を用いた。

図 - 3 に柱・梁関節部危険断面の変形状態と PC 鋼材の歪分布モデルを示す。各折れ点のモーメントは圧着部におけるコンクリート断面の変形平面保持を用い、算出を行う。本算定では、コンクリート断面のみに平面保持を用いており、PC 鋼材 - コンクリート間は付着応力度を考慮しているため PC 鋼材に関しては平面保持が成り立っていない。引張側から i 段目(以下、 i 段目とする。)の鋼材の抜け出し量 δ_i は回転角 θ と中立軸位置から圧縮縁までの距離 X_n を用い、式(1)より算出する。また、PC 鋼材の歪分布を図 - 3 のように十字形の PC 鋼より線と柱脚部の PC 鋼棒では左右対称な三角形分布、ト形の PC 鋼より線では柱内部で歪分布は一定、梁側は三角形分布とする。この歪分布を十字形、柱脚部では式(2)、ト形では式

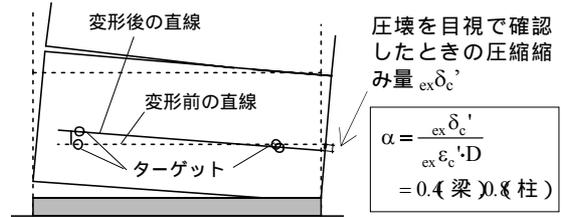


図 - 4 圧縮縮み量 ϵ_c の導出

δ_i :引張側から i 段目の鋼材の抜け出し量、 τ^+ :載荷時の PC 鋼材とコンクリートの付着応力度、 θ :圧着部回転角、 l_p :塑性長さ、 X_n :圧縮縁から中立軸までの距離、 d_i :引張側から i 段目の鋼材の位置から圧縮縁までの距離、 $\Delta\epsilon_i$:引張側から i 段目の鋼材の危険断面位置における離間後の増分歪、 l_i :引張側から i 段目の鋼材の付着長さ、 D :柱せい

(3)により積分することで PC 鋼材の抜け出し量を算出する。式(2)、式(3)の付着長さ l_i は式(4)から求めた。これらより、 δ と X_n を変数とした各段の PC 鋼材の増分歪 $\Delta\epsilon_i$ が十字形、柱脚部では式(5)、ト形では式(6)より求まる。

$$\delta_i = \theta \cdot (d_i - X_n) \quad (1)$$

$$\delta_i = \Delta\epsilon_i \cdot l_i \quad (2)$$

$$\delta_i = \frac{\Delta\epsilon_i \cdot l_i}{2} + \Delta\epsilon_i \cdot D \quad (3)$$

$$l_i = \frac{E \cdot n_i \cdot A \cdot \Delta\epsilon_i}{n_i \cdot \psi \cdot \tau^+} \quad (4)$$

$$\Delta\epsilon_i = \sqrt{\frac{\theta \cdot \psi \cdot \tau^+ \cdot (d_i - X_n)}{E \cdot A}} \quad (5)$$

$$\Delta\epsilon_i = \frac{-D \cdot \tau^+ \cdot \psi + \sqrt{(D \cdot \tau^+ \cdot \psi)^2 + 2E \cdot A \cdot \tau^+ \cdot \psi \cdot \theta (d_i - X_n)}}{E \cdot A} \quad (6)$$

ここで、 δ_i : i 段目の PC 鋼材の抜け出し量、 θ :圧着部回転角、 d_i : i 段目の PC 鋼材の位置から圧縮縁までの距離、 X_n :圧縮縁から中立軸までの距離、 $\Delta\epsilon_i$: i 段目の PC 鋼材の増分歪、 l_i : i 段目の PC 鋼材の付着長さ、 n_i : i 段目の PC 鋼材の本数、 ψ :PC 鋼材の周長、 τ^+ :PC 鋼材とコンクリートの載荷時の付着応力度、 E :PC 鋼材のヤング係数、 A :PC 鋼材の断面積とする。

コンクリート圧縮縁の変形から歪を求めるため、図 - 3 に示す圧縮縁コンクリートの塑性長さ l_p を梁せいおよび柱せいの α 倍で表せるものと仮定した。この塑性長さ係数 α は図 - 4 に示すように実験時において目視により圧壊を確認したときのターゲットの位置から得られる圧縮縁の縮み量 ϵ_c' と、材料試験結果から得られた圧縮強度時の歪 ϵ_c と部材せい D を用い、式(7)より梁端部、柱脚部それぞれ 0.4、0.8 と求めた。これらの値を用いることで、圧縮縁コンクリートの歪 ϵ_c は式(8)で求めること

ができる。

$$\alpha = \frac{\epsilon_{ex} \delta_c'}{\epsilon_{ex} \epsilon_c' \cdot D} \quad (7)$$

$$\epsilon_c = \frac{\delta_c}{l_p} = \frac{\theta \cdot X_n}{\alpha \cdot D} \quad (8)$$

ここで、 α :塑性長さ係数、 $\epsilon_{ex} \delta_c'$:実験結果から得た梁端部および柱脚部の圧縮縁コンクリート圧壊時の縮み量、 $\epsilon_{ex} \epsilon_c'$:材料試験結果から得た梁部材および柱部材のコンクリート強度時の歪、 D :梁せいおよび柱せい、 δ_c :コンクリート圧縮縁の縮み量、 l_p :塑性長さとする。

これらの値を用い、式(9)により断面力がつり合う X_n を求め、式(10)で断面に生じるモーメントを算出する。

$$C = \sum T_i + N = E \cdot A \cdot \sum (n_i \cdot \epsilon_i) + N \quad (9)$$

$$M = \sum (T_i \cdot j_i) + C \cdot j_c = E \cdot A \cdot \sum (n_i \cdot \epsilon_i \cdot j_i) + C \cdot j_c \quad (10)$$

ここで、 C :コンクリートの圧縮合力、 T_i : i 段目の PC 鋼材の引張力、 N :軸力、 ϵ_i : i 段目の PC 鋼材の歪、 M :圧着部モーメント、 j_i : i 段目の PC 鋼材位置から断面図心までの距離、 j_c :コンクリート圧縮合力から断面図心までの距離とする。

[除荷時] 次に除荷中の E、F 点を求める。尚、除荷中のコンクリートの応力度-歪関係は、図-5に示すように除荷時剛性は $E_{c1/3}$ とした。図-6に十字形の PC 鋼より線と柱脚部の PC 鋼棒の歪分布モデル、図-7にト形の PC 鋼より線の歪分布モデルを示す。図-6 図-7中の ϵ_{ini} は PC 鋼材の初期導入歪を示す。図-6に示すように十字形の PC 鋼より線、柱脚部の PC 鋼棒では、ともに左右対称な三角形分布モデルで歪が減少していくモデルとする。また、ト形では、図-7に示すように柱内部の歪分布は一定、梁側は三角形分布で減少するものとする。除荷完了時には、各段の PC 鋼材には、残留抜け出しが生じ、導入されていた初期導入歪に減少が生じる。この時に各段の PC 鋼材の圧着部における減少歪は、最大モーメント時に生じていた増分歪 $\Delta \epsilon_i$ を用いて $-\beta \Delta \epsilon_i$ まで減少するモデルとした。この係数 β は、提案する歪分布モデルを積分して除荷完了時の残留抜け出し量を算出する際に、実験により得られた残留抜け出し量を再現出来るように設定したものであり、式(11)、式(12)により表せる。また、式中の γ の値は、最大モーメント時の抜け出し量に対する除荷時の残留抜け出し量の比であり、架構形状により異なり、十字形梁の PC 鋼材では土形部分架構実験¹⁾、柱脚部の PC 鋼材では柱脚部実験²⁾、ト形梁の PC 鋼材ではト形部分架構実験³⁾の実験結果より、層間変形角 $1/100\text{rad}$ 時のピーク時と除荷完了時の PC 鋼材の歪分布を積分し、抜け出し量を求め、部材形状により係数 γ を求めた [γ :十字形=0.045,柱脚=0.02,ト形=0.05]。この値

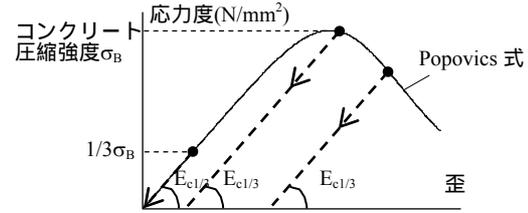


図-5 コンクリートの応力度-歪関係

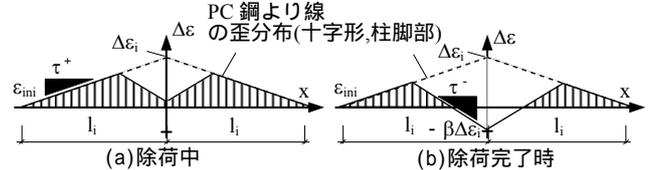


図-6 除荷時の歪分布(十字形:PC 鋼より線, 柱脚:PC 鋼棒)

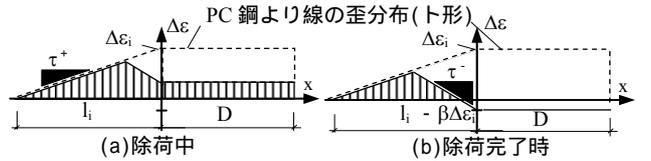


図-7 除荷時の歪分布(ト形:PC 鋼より線)

を用いて式(11)、式(12)を計算することで β の値を得ることが出来る。

$$\beta = -1 + \sqrt{1 - \frac{(1-\gamma)\tau^- + \gamma\tau^+}{\tau^+}} \quad (11)$$

$$\beta = \left\{ 1 + \frac{\psi D (\tau^+ - \tau^-)}{\Delta \epsilon_i EA} \right\} + \left\{ \left(1 + \frac{\psi D (\tau^+ - \tau^-)}{\Delta \epsilon_i EA} \right)^2 - \left[\frac{\gamma(\tau^+ - \tau^-) + \tau^-}{\tau^+} + \frac{2\gamma\psi D (\tau^+ - \tau^-)}{\Delta \epsilon_i EA} \right] \right\} \quad (12)$$

ここで、 γ :最大モーメント時の抜け出し量に対する除荷時の残留抜け出し量の比、 τ^- :PC 鋼材とコンクリートの除荷時の付着応力度とする。

E 点は圧着部回転角が $0.9\theta_D$ の時とする。F 点は D 点時の圧縮側最外端に最も近い PC 鋼材の増分歪(4 段の場合は $\Delta \epsilon_4$)が除荷によって $-\beta \Delta \epsilon_4$ まで減少したときとする。ただし、載荷時の B 点を M_A と M_D の中点としたときの F 点は、 $M_F = M_A$ の時とする。除荷完了時の G 点では引張側、圧縮側最外端に最も近い各 PC 鋼材の残留抜け出し量を十字形、柱脚部では式(11)、ト形では式(12)を用いて歪分布モデルを積分することで求める。ただし、PC 鋼材が圧縮側にあり、離間していないときの除荷完了時の PC 鋼材の抜け出し量 δ_i は 0 とする。

[再載荷時] H 点は G 点時の PC 鋼材の歪分布を用いて載荷した時に、中立軸位置 X_n が引張側最外端に最も近い PC 鋼材の位置 d_i に到達したときのモーメントとする。

尚、以上の算出に用いた付着応力度は、十字形では土形部分架構実験¹⁾の PC 鋼より線 (τ^+ : 1.1N/mm^2 , τ^- : -1.3N/mm^2)、柱脚部では柱脚部実験²⁾の PC 鋼棒 (τ^+ : 1.4N/mm^2 , τ^- : -0.6N/mm^2)、ト形ではト形部分架構実験³⁾の PC 鋼より線 (τ^+ : 0.5N/mm^2 , τ^- : -0.6N/mm^2)の付着応

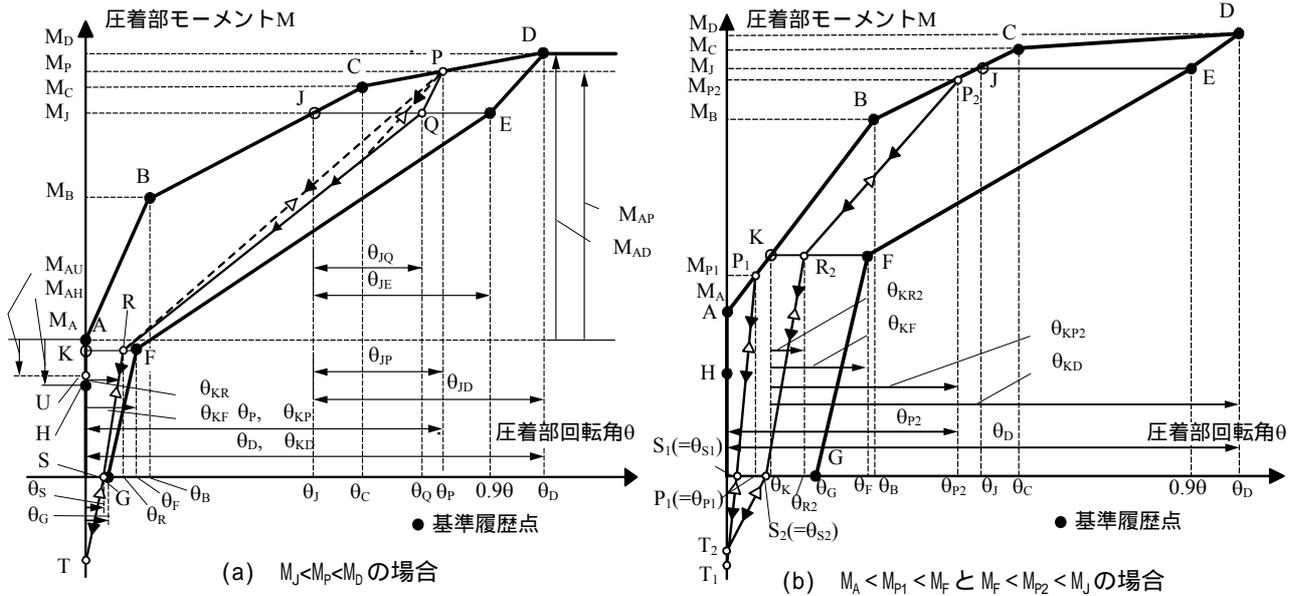


図 - 8 圧着部履歴モデル($\theta < \theta_0$)

力度を用いた。また、載荷中の付着応力度 τ^+ は層間変形角 $1/100\text{rad}$ 。ピーク時、除荷中の付着応力度 τ は層間変形角 $1/100\text{rad}$ から除荷し、十字形では $1/2855\text{rad}$ 、柱脚部では $1/2604\text{rad}$ 、ト形では $1/3087\text{rad}$ の時の歪分布から付着応力度を求め、本算定に用いた。

3. 圧着部履歴性状のモデル化

3.1 包絡線からの除荷のモデル化

本提案モデルでは前述した ABCDEFGH の履歴を元に全体の履歴を決定する。図 - 8 に圧着部回転角 θ (以下、 θ とする。) が θ_D 未満、図 - 9 に θ が θ_D 以上の載荷包絡線上からの除荷の圧着部履歴モデルを示す。載荷包絡線上からの除荷時の折れ点は E 点と J 点を結ぶ直線上、F 点と K 点を結ぶ直線上とする。J 点、K 点はそれぞれ E 点、F 点から θ 軸に平行に直線を引き、載荷包絡線との交点とする。

Case1) θ が θ_D 未満の包絡線上からの除荷を包絡線上の任意点 $P(\theta_P, M_P)$, $P_1(\theta_{P1}, M_{P1})$, $P_2(\theta_{P2}, M_{P2})$ を用いて説明する。

【 $M_J < M_p < M_D$ の場合】図 - 8(a) に示す圧着部履歴モデルを用いて説明する。P 点からの除荷開始後の第 1 折れ点は JE 上の Q 点とする。Q 点は、 $\Delta\theta_{JD}$ に対する $\Delta\theta_{JP}$ の比と $\Delta\theta_{JE}$ に対する $\Delta\theta_{JQ}$ の比が同一となる点とし、式(13)より求める。

$$\Delta\theta_{JQ} = \Delta\theta_{JP} \cdot \Delta\theta_{JE} / \Delta\theta_{JD} \quad (13)$$

第 2 折れ点 R は、 $\Delta\theta_{KD}$ に対する $\Delta\theta_{KP}$ の比と $\Delta\theta_{KF}$ に対する $\Delta\theta_{KR}$ の比が同一となる点とし、式(14)より求める。

$$\Delta\theta_{KR} = \Delta\theta_{KP} \cdot \Delta\theta_{KF} / \Delta\theta_{KD} \quad (14)$$

除荷完了時の S 点は、 θ_D に対する θ_P の比と θ_G に対する θ_S の比が同一となる点とし、式(15)より求める。

$$\theta_S = \theta_P \cdot \theta_G / \theta_D \quad (15)$$

そして、モーメントが反対方向に生じたときの離間点 T に指向する。

再載荷時の離間点 U は ΔM_{AD} に対する ΔM_{AP} の比と、 ΔM_{AH} に対する ΔM_{AU} の比が同一となる点とし、式(16)より求める。

$$\Delta M_{AU} = \Delta M_{AP} \cdot \Delta M_{AH} / \Delta M_{AD} \quad (16)$$

尚、 θ が θ_D 未満のときの離間点は最大経験モーメント M_{MAX} によって決まることとする。

【 $M_A < M_{p1} < M_F$ と $M_F < M_{p2} < M_J$ の場合】図 - 8(b) に示す圧着部履歴モデルを用いて説明する。P₁ 点から除荷が生じた時は S₁ 点に指向し、S₁ 点の θ_{S1} は式(17)より求める。

$$\theta_{S1} = \theta_{P1} \cdot \theta_G / \theta_D \quad (17)$$

また、P₂ 点から除荷が生じた時は R₂ 点を通り、S₂ 点に指向することとする。R₂ 点は式(18)により、S₂ 点は式(19)により求める。

$$\Delta\theta_{KR2} = \Delta\theta_{KP2} \cdot \Delta\theta_{KF} / \Delta\theta_{KD} \quad (18)$$

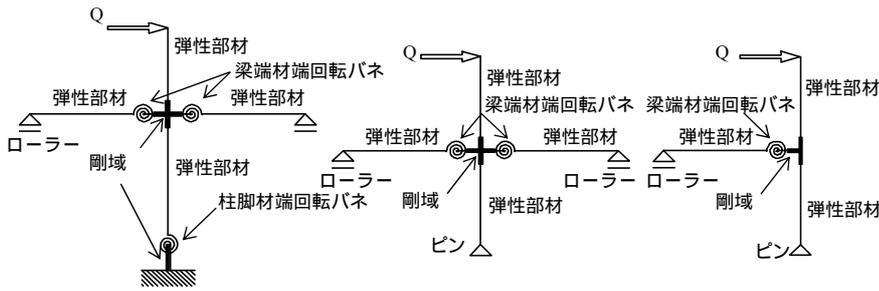
$$\theta_{S2} = \theta_{P2} \cdot \theta_G / \theta_D \quad (19)$$

S₁, S₂ 到達以降はモーメントが反対方向に生じたときの離間点 T₁, T₂ に指向する。

Case2) 次に、 θ が θ_D 以上の載荷包絡線上の任意点 $P(\theta_P, M_P)$ からの除荷を図 - 9 を用いて説明する。

P 点からの除荷開始後の第 1 折れ点 Q は E 点から θ 軸に平行に引いた直線と P 点から DE に平行に引いた直線との交点とする。第 2 折れ点 R は F 点から θ 軸に平行に引いた直線上にあり、R 点は $\Delta\theta_{DP}$ の m 倍とする。[m: 十字形=0.6, 柱脚=0.35, ト形=0.85] また、除荷完了点 S も第 2 折れ点同様 $\Delta\theta_{DP}$ の n 倍とする。[n: 十字形=0.1, 柱脚=0.025, ト形=0.15] して S 点以降はモーメントが反対方向に生じたときの離間点 T に指向する。

再載荷時の離間点 U を求める。ここで H' 点を $(0, M_A/2)$



(a)土形部分架構の骨組モデル (b)十字形部分架構の骨組モデル (c)ト形部分架構の骨組モデル
図 - 1 1 Q-R 関係を求めるための骨組モデル

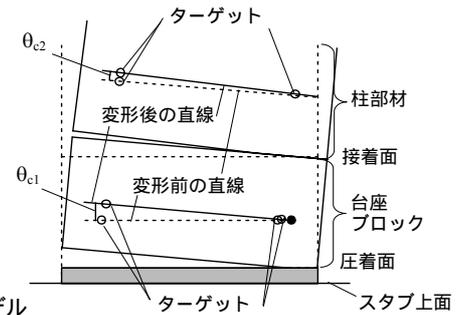
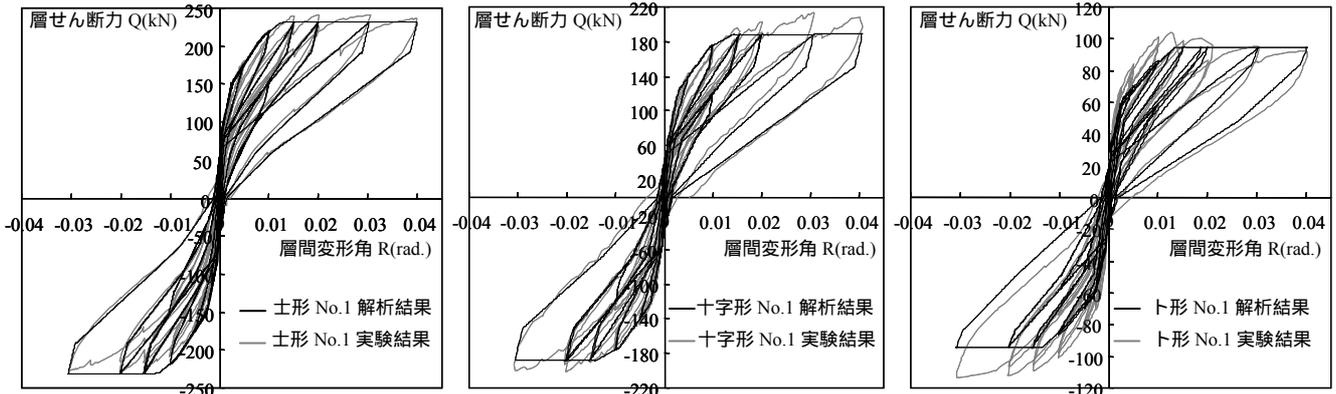


図 - 1 2 柱脚部回転角の導出



(a)土形部分架構実験 No. 1¹⁾との比較 (b)十字形部分架構実験 No. 1⁴⁾との比較 (c)ト形部分架構実験 No. 1³⁾との比較
図 - 1 3 提案モデルと実験結果 Q-R 関係の比較

後の直線のなす角度 θ_{c2} の合計値として算出した。また、曲げモーメントは、台座ブロック上面において算出を行った。これらの方法で求めた値を用いて、1 階柱脚部 M- θ 関係を算出した。骨組モデルにおいて 1 階柱脚部をモデル化するには、実験結果と比較することを考慮し、台座ブロック上面以下に生じる変形を無視し、ここまでの長さ(160mm)を剛域として、この位置に提案する柱脚関節部の材端回転バネを取り付けた。

図 - 13(a)に土形部分架構実験¹⁾, (b)に十字形部分架構実験⁴⁾, (c)にト形部分架構実験³⁾の Q-R 関係の実験結果と本提案履歴モデルを用いた解析結果との比較を示す。図 - 13(a) ~ (c)に示すように、提案する履歴モデルは、概ね実験結果を表現できているといえる。

5. 結論

PC 鋼材の付着特性を考慮した断面解析を行い、柱、梁関節部の圧着部モーメント M-回転角 θ 関係履歴のモデル化を行った。提案した圧着部モーメント M-回転角 θ 関係履歴モデルを用いた部分架構の骨組モデルにより算定した結果、本工法を用いた架構の層せん断力 Q-層間変形角 R 関係の実験結果を精度良く表現することができた。

しかしながら、現在の問題点として、付着応力度に部

分架構実験^{1),2),3)}より得られた歪分布から算出した値を使用していることが挙げられる。そこで、既往の研究で行われている PC 鋼より線の引き抜き実験⁵⁾による付着応力度を使用するなど、部分架構実験に比べ簡便に実験が可能な PC 鋼材の引き抜き実験から付着応力度を算出し、これらの値を使用することを現在検討中である。

参考文献

- 1) 瀬戸俊明ほか：PC 圧着関節工法を用いた柱脚部を含む『土形』架構の構造性能に関する研究, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp475-480, 2007
- 2) 今井孝ほか：PC 圧着関節工法における PC 鋼棒および PC より線の付着特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp469-474, 2007
- 3) 中井敏文ほか：PC 圧着関節工法を用いたト形部分架構の構造性能に関する実験研究, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp535-540, 2006
- 4) 坂田弘安ほか：PC 圧着関節工法による損失制御架構の力学的性状に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集, No.576, pp125-136, 2004.2
- 5) 松崎育弘ほか：エポキシ防錆被膜された PC 鋼より線とセメントグラウトの付着性状に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集, No.600, pp163-170, 2006.2