

(29) 緊張材の付着特性を考慮したプレストレストコンクリート圧着骨組の  
曲げ挙動に関する解析研究

京都大学大学院 工学研究科

○足立 将人

同

上

正会員

西山 峰広

1. はじめに

断面内に普通強度鉄筋が存在しないプレストレストコンクリート(以下PC)圧着骨組において、緊張材の降伏またはコンクリートの圧壊によるプレストレス力の減退は、PC部材特有である原点指向性の強いループ形状がスリップ型に変わり部材の変形が残留する、あるいは圧着面でのせん断ずれが発生するなど原因となる。

ここで部材の曲げ挙動を追跡する際によく用いられる断面の平面保持仮定を用いてPC骨組の曲げ解析を行い、プレストレス力の減退を追跡することは適切でない。緊張材として多く用いられているストランドの付着特性では異形鋼のような機械的作用による付着抵抗が小さいと言われており、平面保持の仮定が成り立たないと考えられるためである。

本研究では、緊張材の付着特性を考慮に入れた分割要素法に基づくPC圧着骨組の曲げ解析<sup>1)</sup>を行い、プレストレス力の減退に影響を及ぼす要因を検討する。

2. 解析手法

解析手法は小阪らが行った分割要素法<sup>1)</sup>に基づいた。本手法で用いられる基本仮定は以下の三点である。

- ① 個々の分割要素内での応力度及びひずみ度は一定
- ② 部材軸に直交する断面内のコンクリートには平面保持の仮定が成立
- ③ せん断による変形は考慮に入れない

よって本解析では部材の変形は曲げ及び軸方向力のみにより生じ、また曲げひび割れの発生による緊張材のすべり方向の逆転も考慮していない。

付着剛性の取り扱い方法の概要は以下の通りである。

図1にj要素とj-1要素間のj接点での応力釣合条件を示す。j接点での付着応力度増分 $\Delta\tau_j$ は、これら二つの要素で緊張材に加わる応力増分 $\Delta\sigma_{p,j}E_pA_p$ と $\Delta\sigma_{p,j-1}E_pA_p$ の差から次式を用いて算定する。

$$\Delta\tau_j = -2(\Delta\sigma_{p,j}E_pA_p - \Delta\sigma_{p,j-1}E_pA_p) / \{\phi_p(l_j + l_{j-1})\} \quad \dots\dots\dots \text{式1}$$

ここで $\phi_p$ : 緊張材の周長である。

図2にj接点とj+1接点間のj要素での変形適合条件を示す。変形前には $l_j$ であったj要素のコンクリート及び緊張材の長さは、変形後にはそれぞれ $(1+\Delta\epsilon_j)l_j$ 、 $(1+\Delta\epsilon_p)l_j$ となる。これらの差がj+1接点すべり量増分 $\Delta S_{j+1}$ とj接点すべり量増分 $\Delta S_j$ の差と等しいことから次式が成立する。

$$\Delta S_{j+1} - \Delta S_j = (\Delta\epsilon_j - \Delta\epsilon_p)l_j \quad \dots\dots\dots \text{式2}$$

また緊張材の付着性状を付着剛性 $K_j$ を用いて次式で表す。

$$\Delta S_j = \Delta\tau_j / K_j \quad \dots\dots\dots \text{式3}$$

式2に式1及び3を代入することで $\Delta\epsilon_p$ を $\Delta\epsilon_j$ で表現することができる。

小阪らの解析手法では、各要素点の滑り量の仮定値と計算結果との差を収束させていく方法が採られたが、本解析では材端入力変位に対して全要素のひずみ、各要素点のすべり量が一意に求められる形で計算を行った。

解析時に使用した、コンクリートの応力度-ひずみ度関係はNewRCプロジェクトで提案されたモデル<sup>2)</sup>を単調荷重時の曲線とし、これに繰り返しルール<sup>3)</sup>を加えたものである。コンクリートの引張抵抗は無視する。緊張材の応力度-ひずみ度関係にはMenegotto-Pinto式<sup>4)</sup>を用いた。

3. 実験結果との比較

過去に行われたプレキャスト梁柱ト型圧着骨組の荷重実験より得られた実験結果<sup>5)</sup>と

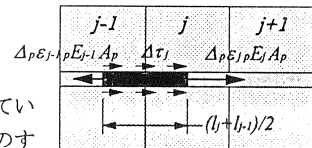


図1 応力釣合条件

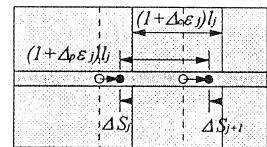


図2 変形適合条件

解析結果の比較検討を行う。この実験では、緊張材の配置位置(偏心距離)、グラウトの有無が実験変数とされている。実施された8体の試験体から、ボンド試験体B2及びアンボンド試験体U2の2体を解析対象とし図3にその形状を示す。試験体B2、U2では共に試験体形状、緊張材位置、各種材料特性、導入プレストレス応力は等しく、緊張材の付着の有無のみが変数である。

実験では梁の材端変位を測定する際に柱の曲げ変形を無視する形で測定治具が設置されているため、解析では図3で示すように試験体が梁部分とスタブ部分の2部材から構成されているものとし、柱梁仕口部を除く柱部分を剛とした。またスタブ部分ではコンクリートの変形を無視した。解析時の要素分割状況についても同図に示してある。

ボンド試験体B2を解析する際に用いた緊張材の付着応力度-すべり量( $\tau$ -S)関係は、是永らによって行われたストランドの付着すべり実験<sup>[7]</sup>で得られた単調引き抜き時の $\tau$ -S関係を採用し、繰り返しは森田・角式<sup>[8]</sup>を簡略化したものである。図4に $\tau$ -S関係の例及び採用した各種特性値を示す。アンボンド試験体U2では緊張材の定着端間(くさび間)距離を考慮した上で付着特性を線形弾性型とし、その剛性は十分に小さな値とした。解析時に使用した材料諸特性は文献6に示されている値とした。

梁材端での荷重-部材角(以下 $P-\theta$ )関係の実験結果と解析結果とを比較したものを図5に示す。解析結果は実験結果と同様、両試験体共に最終ループ( $\theta=3\%$ )まで原点指向性を示す。解析結果はB2試験体について実験結果を良く追跡できているが、U2試験体については解析での荷重が実験での荷重を10%程度上回った。

各試験体について部材角 $\theta=1\%$ 、 $3\%$ 時の3ループ目の荷重、部材角と共にそのループでの正側最大荷重と最大変位で無次元化した実験結果を破線で、解析結果を実線で図6に示す。いずれの場合でも解析より得られた原点近傍での剛性が実験結果を上回っているが、常にU2試験体のループ幅がB2試験体よりも細くなり、履歴エネルギー吸収能が低い点は解析結果によっても表現されている。

実験では緊張材端部に取り付けたロードセルにより緊張材の応力変動が得られている。U2試験体のスタブ定着端位置での緊張材応力度-部材角関係の実験値及び解析値を図7に示す。載荷時の同一部材角で到達する最大緊張材応力について解析値は実験値を上回った。しかし載荷時と除荷時の緊張材応力度が等しい勾配で増加、減少している点や部材角0時の残存プレストレス力が一致している点、逆方向への載荷の際に緊張材は圧縮応力を殆ど受けていない点など解析値は実験値と非常に良く一致した。

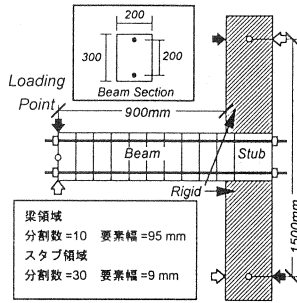


図3 解析対象試験体形状

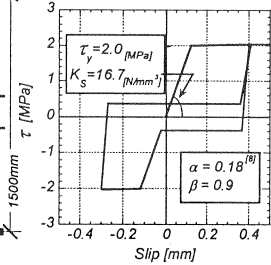


図4 緊張材 $\tau$ -S関係

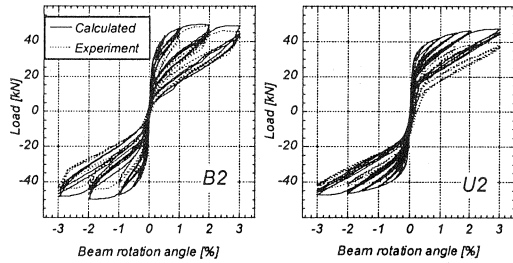


図5 梁端荷重-部材角関係

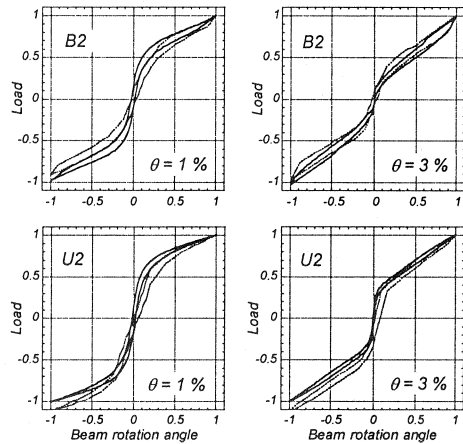


図6 梁端荷重-部材角ループ形状

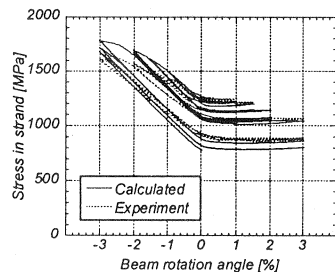


図7 緊張材応力度-部材角関係

#### 4. パラメトリックスタディ

##### 4.1 圧着力の減退に影響を与える要因

載荷後の残留圧着力量に影響を及ぼす要因として部材形状から生じるものがある。例として以下の点が挙げられる。  
 ・緊張材有効導入応力度と0.2% オフセット降伏応力度との比(導入力レベル:  $\lambda_p$ )

$$\lambda_p = \sigma_{pe} / \sigma_{py}$$

ここで  $\sigma_{pe}$  : 緊張材有効導入応力度、 $\sigma_{py}$  : 0.2% オフセット降伏応力度である。 $\lambda_p$  が高いほど緊張材が降伏し、その塑性歪みが進行しやすいために圧着力の減退は大きい。

・断面コンクリートが受ける軸力レベル ( $\lambda_N$ )

$$\lambda_N = (N + \Sigma P_e) / (D B f'_c)$$

ここで  $N$  : 軸力 (梁の場合  $N=0$ )、 $P_e$  : 緊張材への有効導入応力、 $D$  : 部材せい、 $B$  : 部材幅、 $f'_c$  : コンクリート有効圧縮応力度である。 $\lambda_N$  が高い場合には、コンクリートの圧壊によって断面の中心軸ひずみが圧縮側に進展することがある。この現象に伴って圧着力が減退する。

・緊張材の偏心率 ( $e_p$ )

$$e_p = e / (D/2)$$

ここで  $e$  : 断面中心軸からの緊張材偏心距離である。 $e_p$  が大きいとその付着性状に関わらず緊張材が受ける塑性歪みの進行も大きい。そのため圧着力の減退は大きい。

今回の解析では、 $\lambda_N=0.1$ 、 $e_p=0.8$  で統一した。これらの値は緊張材の降伏によってプレストレス力の減退が決まるレベルである。また  $\lambda_p$  の値は 0.4, 0.6, 0.8 の 3 種類を設定し、これらを Case-0.4, Case-0.6, Case-0.8 とする。それぞれの Case に対して緊張材の付着性状が及ぼす影響を調べた。解析対象となる試験体形状は 3 章で取り扱ったものと同形状 (図 3) とし、材料特性は表 1 に示された値を用いた。

緊張材付着性状を特徴づける変数として付着初期剛性  $K_s$  及び付着降伏応力度  $\tau_y$  を採用した。 $\tau_y$  を固定し  $K_s$  を実験変数とした解析をシリーズ I とし、逆に  $K_s$  を固定値、 $\tau_y$  を変数とした解析をシリーズ II とする。それぞれの実験変数が PC 部材の曲げ挙動及びプレストレス力の減退に与える影響を検討する。

#### 4.2 シリーズ I : 緊張材の付着初期剛性 $K_s$ が部材の P- $\theta$ 関係に及ぼす影響

シリーズ I では緊張材の付着特性を弾性 ( $\tau_y = \pm\infty$ ) とし、 $K_s$  を変化させて計算を行った。その結果全ての Case で  $K_s \geq 100$  (N/mm<sup>2</sup>) の条件下では平面保持を仮定して計算を行った場合とほぼ同一の P- $\theta$  関係を示した。また同様に  $K_s \leq 0.01$  (N/mm<sup>2</sup>) の条件で  $K_s$  を変化させても P- $\theta$  関係に大きな影響は現れなかった。この状態は緊張材がアンボンドと等価であると考えられる。

これらの計算結果を基に  $K_s = 100, 1.0, 0.01$  (N/mm<sup>2</sup>) を仮定した際の P- $\theta$  関係を図 8 (a) ~ (c) に示す。

図 8 によると  $\lambda_p$  が大きな Case ほど  $K_s$  が部材の P- $\theta$  関係に及ぼす影響が小さく、Case-0.8 では  $K_s$  の値に関わらずほぼ同程度の最大耐力が得られた。これは梁柱危険断面で生じた緊張材のすべりが梁全体に分布する以前に危険断面の緊張材が降伏するためである。これに対し  $\lambda_p$  の小さい Case-0.4 では  $K_s$  が小さいほど曲げひび割れ発生後の P- $\theta$  剛性が大きく低下している様子が分かる。

#### 4.3 シリーズ II : 緊張材の付着降伏応力度 $\tau_y$ が部材の P- $\theta$ 関係に及ぼす影響

緊張材の初期付着剛性は  $K_s = 10$  (N/mm<sup>2</sup>) で一定値とし、 $\tau_y = 10, 1.0, 0.1$  (MPa) をそれぞれ仮定した際の P- $\theta$  関係を図 9 (a) ~ (c) に示す。その結果、全ての Case

表 1 解析時に仮定した材料特性

コンクリート圧縮強度	MPa	35
導入プレストレス力	kN/本	105
緊張材降伏応力度	MPa	1800
緊張材初期弾性係数	GPa	210
緊張材偏心距離	mm	120

		Case-0.4	Case-0.6	Case-0.8
緊張材断面積	mm <sup>2</sup>	145.8	97.22	72.92
導入力レベル	$\lambda_p$	0.4	0.6	0.8

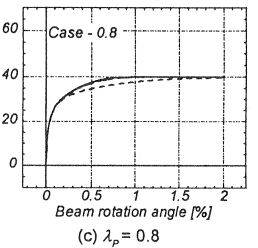
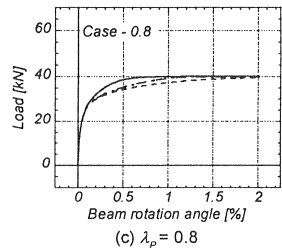
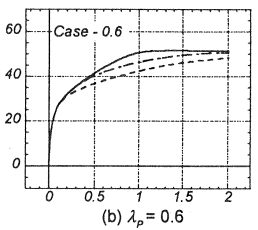
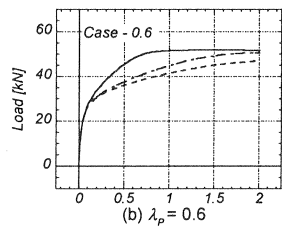
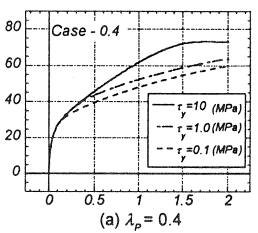
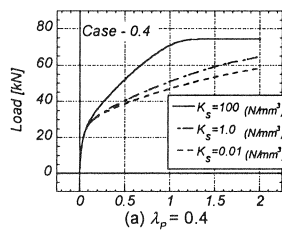


図 8 P- $\theta$  関係  
シリーズ I 実験変数:  $K_s$

図 9 P- $\theta$  関係  
シリーズ II 実験変数:  $\tau_y$

で  $\tau_y = 10$  (MPa) の条件下では最終部材角2%までに  $\tau_y$  に達した要素点は存在しなかった。逆に  $\tau_y = 0.1$  (MPa) の場合には梁材端を除く全ての要素点で  $\tau_y$  に達した。

Case-0.8ではシリーズIで  $K_s$  の影響が小さかった点と同様に  $\tau_y$  の影響が少なかった。これも梁部材中の接点が付着降伏するよりも危険断面緊張材降伏が先行するためである。

次にCase-0.6に対して、 $K_s = 10$  (N/mm<sup>3</sup>) で固定、 $\tau_y = 10, 1.0, 0.1$  (MPa) をそれぞれ仮定し、正負交番荷重を与えた  $P-\theta$  関係を図10(a)~(c)に、梁柱危険断面でのプレストレス合力-梁部材角関係を図11(a)~(c)にそれぞれ示す。載荷履歴は梁部材角で0.5, 1及び2%の各ステップに対して正負二回ずつとした。緊張材の付着履歴性状は3章と同条件とした(図4)。

図10及び11によると、梁部材角が0.5、1%の小さな範囲では  $P-\theta$  関係、プレストレス合力-梁部材角関係共に  $\tau_y$  による影響が小さい。しかし梁部材角2%では、残留プレストレス合力の大きさが  $\tau_y$  の値に大きく依存していることが分かる。 $\tau_y = 10$  (MPa) を仮定した図11(c)では梁部材角2%で緊張材引張降伏のために変形が0近傍で完全にプレストレス合力が消失し、図10(c)のループ形状がスリップ型に変化している。

また  $\tau_y = 1 \sim 5$  (MPa) を設定し図10,11と同様に正負交番荷重を行った。この計算結果に基づいて、図12に  $\tau_y$  を横軸に各ステップ終了後の梁柱危険断面におけるプレストレス合力の残留率:  $\eta_p (= \Sigma P_{rsd} / \Sigma P_e)$  を縦軸に採った関係を示す。ここで  $P_{rsd}$ : 各ステップ終了後の残留プレストレス力である。

図12によると梁部材角0.5%終了後では  $\tau_y$  に関わらず圧着プレストレス合力の減退量は少なく、98%以上の残留率を示した。しかし梁部材角2%終了後には  $\tau_y$  が上昇するに連れ残留率が減少し、 $\tau_y = 3$  (MPa) 以上の条件でほぼプレストレス合力が消失してしまうという結果となった。

5. まとめ

分割要素法による緊張材の付着性状を考慮した解析をPC圧着骨組に適用した結果、以下の知見が得られた。

1. 初期付着剛性  $K_s$  及び付着降伏応力度  $\tau_y$  を緊張材の付着性状を定める変数として採用し単調載荷解析を行った結果、両者共に値が小さいほど曲げひび割れ発生後の荷重-部材角関係剛性が低下した。
2. 緊張材の付着性状が部材に及ぼす影響は緊張材有効導入応力度と0.2%オフセット降伏応力度との比  $\lambda_p$  によって左右され、 $\lambda_p$  が大きいほどその影響は小さくなる。

参考文献

[1] 足立・西山: 緊張材の付着特性を考慮したプレストレストコンクリート骨組の履歴挙動解析, JCI年次論文報告集, Vol.21 No.3 pp.895-900, 1999.7. [2] 小阪他: エンドクロニック理論による鉄筋コンクリートの非弾性解析 一第1報 解析方法一, AIJ論文報告集第326号, pp.78-90, 1983.4. [3] 崎野他: 直線型横補強材により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係, AIJ構造系論文集第461号, pp.95-104, 1994.7. [4] F. Watanabe, J.Y.Lee, M. Nishiyama: Structural Performance of Reinforced Concrete Columns with Different Grade Longitudinal Bars, ACI Structural Journal, Vol.92 No.4 pp.412-418 1995.7-8. [5] 西山他: PC鋼棒の応力度-ひずみ度関係のモデル化, AIJ大会学術講演梗概集, C-2構造IV, pp.885-886, 1997.9. [6] 河野他: 繰り返し荷重を受けるプレストレストコンクリート梁・柱圧着接合部の残存せん断耐力, JCI年次論文報告集, Vol.19 No.2, pp.1185-1190, 1997.7. [7] 是永他: PC鋼より線の付着実験, 大成建設技術研究所報, 第27号, pp.111-116, 1994. [8] 森田・角: 繰り返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究, AIJ論文報告集第229号, pp.15-24, 1975.3 (AIJ: 日本建築学会, JCI: 日本コンクリート工学協会)

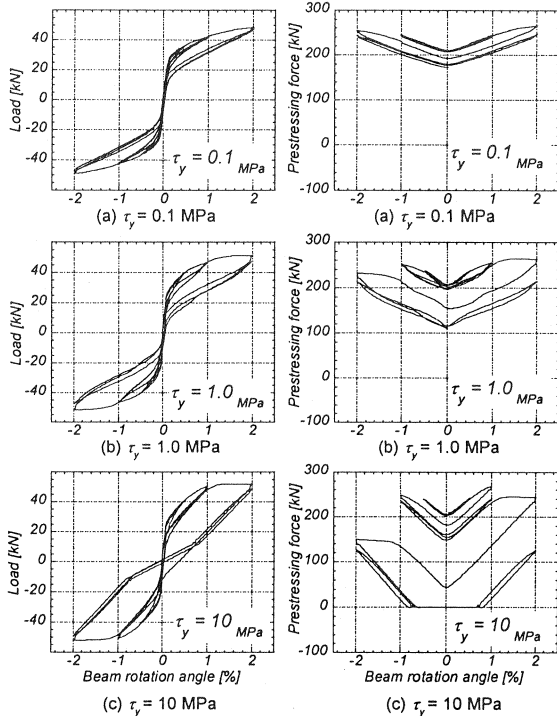


図10 P-θ関係  
シリーズII 実験変数:  $\tau_y$

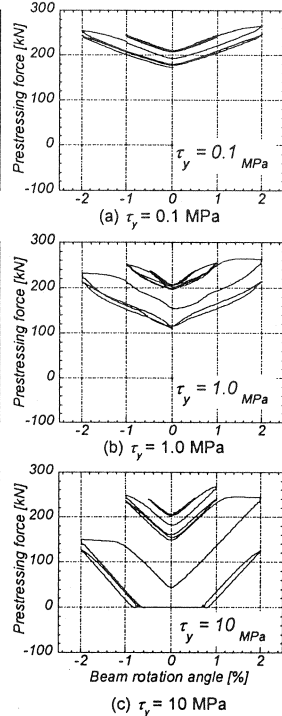


図11 プレストレス合力-部材角関係  
シリーズII 実験変数:  $\tau_y$

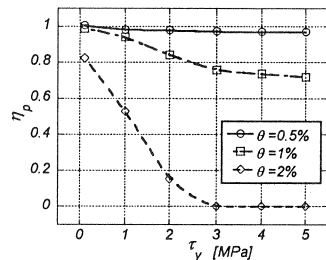


図12 プレストレス合力残留率-緊張材付着降伏応力度関係