

論文 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

足立将人*1・西山峰広*2

要旨: 緊張材の付着特性を考慮に入れた分割要素法によるプレストレストコンクリート骨組の解析を行った。初期付着剛性及び付着降伏応力度が骨組の単調載荷時の曲げ特性点あるいは曲げ履歴挙動に及ぼす影響を調べ、さらに過去に実施された実験結果との比較検討も行った。

キーワード: 付着特性、プレストレス、曲げ、履歴挙動、コンクリート、解析

1. はじめに

建築構造部材の曲げ耐力を算定する際には、各種構成材料の応力度-ひずみ度関係に基づき、断面の平面保持が仮定される場合が殆どである。しかし、鉄筋とコンクリートという異種材料から構成されるコンクリート構造物では、その間で十分な応力伝達が行われなければ平面保持の仮定は満足されない。すなわち、鉄筋とコンクリート間での付着すべり剛性が低いと、平面保持により仮定されるひずみ度と実際の鉄筋のひずみ度との間に差が生じる。

この点について鉄筋コンクリート（以下RC）構造の分野では、主筋として用いられている異形鋼の付着特性のモデル化が行われており解析で用いられている。一方プレストレストコンクリート（以下PC）構造で緊張材として用いられるストランドの付着特性は異形鋼のような機械的作用による付着抵抗が小さく、丸鋼と異形鋼の中間的な性状であると言われているが、未だその性状は定量化されていない。

本研究の目的はPC鋼材とコンクリート間の付着性状がPC部材履歴特性へ及ぼす影響を把握することにある。緊張材に用いられるストランドの付着-すべり履歴特性を考慮に入れた分割要素法によるPC部材の曲げ解析を行い、その結果を検討する。

2. 解析手法

解析手法は小阪らが行った分割要素法¹⁾に基

づいた。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ている。

本解析手法に用いられている基本仮定は以下の通りである。

① 個々の分割要素内での応力度及びひずみ度は一定とする。

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する。

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って生ずる。さらに曲げひび割れの発生による緊張材のすべり方向の逆転についても考慮していない。

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で提案されたモデル²⁾を単調載荷時の曲線とし、これに繰り返しルール³⁾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⁴⁾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への載荷実験より得られた実験結果⁵⁾と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、

*1 京都大学大学院 工学研究科建築学専攻 工修（正会員）

*2 京都大学助教授 工学研究科建築学専攻 工博（正会員）

ボンド試験体B 2及びアンボンド試験体U 2の2体を解析対象とし、図1にその形状を示す。試験体B 2、U 2共に試験体形状、緊張材配置位置、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となる。

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1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B 2を解析する際に用いた緊張材の付着応力度—すべり量関係は、是永らによって行われたストランドの付着すべり実験⁶⁾で得られた単調引き抜き時の付着応力度—すべり量関係を採用し、繰り返しは森田・角式⁷⁾を

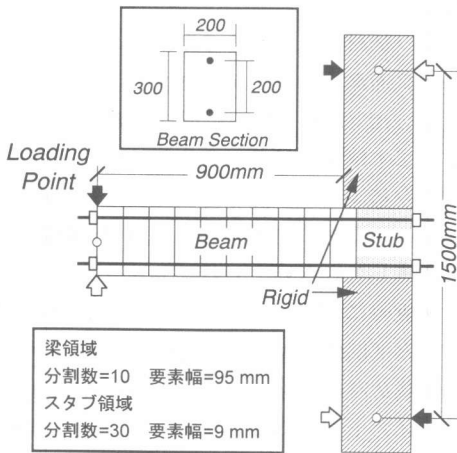


図1 解析対象試験体形状

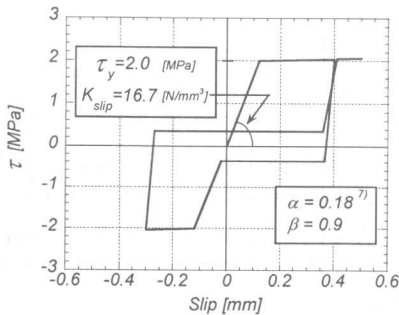


図2 緊張材の付着応力度—すべり量関係

簡略化したものである。図2に付着応力度—すべり量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U 2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5に示されている値とした。

梁材端での荷重—部材角(以下P—θ)関係の実験結果と解析結果との比較を図3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(部材角3%)まで原点指向性を示す。解

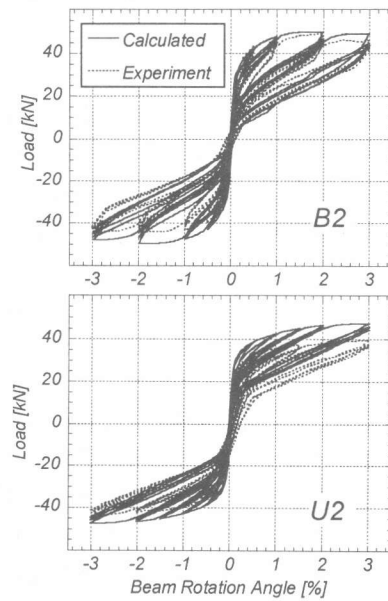


図3 梁端荷重—部材角関係

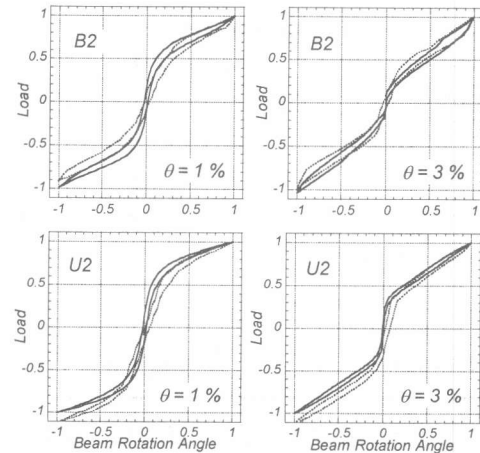


図4 荷重—梁部材角関係ループ形状

析結果はB 2 試験体について実験結果を良く追跡できているが、U 2 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、部材角を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4に示す。いずれの場合でも原点近傍での解析より得られた剛性が実験値を上回っているが、常にU 2 試験体のループ幅がB 2 試験体よりも細くなっており、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。U 2 試験体のスタブ定着端位置での緊張材応力度一部材角関係の実験値及び解析値を図5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貫している点、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ている。

今回得られた解析結果は、最大耐力など応力に関する数値で実験値を若干上回る傾向にあったが、部材挙動の性状を追跡することは十分可能である。以下の章では、この解析手法を用いてパラメトリックスタディを行う。

4. パラメトリックスタディ

前述したようにPC部材で緊張材として一般に用いられているストランドの付着性状を明らかにする研究は少なく、その初期付着剛性あるいは付着降伏応力度など不明な点が多い。ここでは緊張材の付着性状を特徴づける変数として、初期付着剛性 K_{slip} (N/mm^3) 及び付着降伏応力度 τ_y (MPa) を採用し、これらの変数がPC部材の挙動に及ぼす影響を検討する。

4. 1 初期付着剛性の変化が部材のP- θ 関係に及ぼす影響

付着性状の問題を簡略化するために付着応力

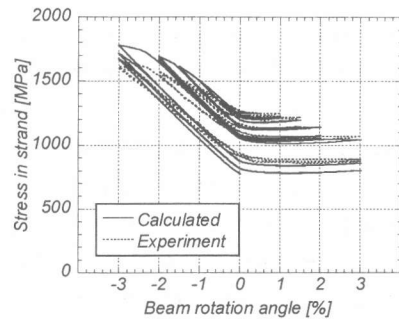


図5 緊張材応力度—部材角関係

表1 パラメトリックスタディでの材料特性

コンクリート圧縮強度	MPa	35
せん断補強筋降伏応力度	MPa	350
緊張材降伏応力度	MPa	1800
緊張材初期弾性係数	GPa	210
緊張材断面積	mm ²	97.22
導入プレストレス力	kN/本	105
緊張材偏心距離	mm	100

度—すべり量関係を線形弾性と仮定して解析を行った。検討対象とする試験体の形状は3章で取り扱ったものと同様に、剛なコンクリートスタブ部分と梁の2部材から構成されており、その材料特性は文献5と同等とするが、コンクリート圧縮強度など表1で示す材料特性は統一した。また緊張材に導入した有効プレストレス応力度は実際の0.2%オフセット降伏点応力度の60%とした。これは緊張材の規格降伏応力度と0.2%オフセット降伏点応力度との差、PC規準に示されている定着完了時のPC鋼材許容応力度の上限値、及びプレストレス力の有効率を考慮し、設定した。

まず緊張材の初期付着剛性 K_{slip} が部材のP- θ 関係に大きな影響を及ぼす値の範囲を限定するために、その値は $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^4$ (N/mm^3) まで段階的に変化させた。この中から $K_{slip} = 1.0 \times 10^{-2} \sim 1.0 \times 10^2$ (N/mm^3) の初期付着剛性を仮定した解析結果及び平面保持を仮定して得られた解析結果の単調載荷時P- θ 関係を図6にまとめて示す。

平面保持を仮定した解析結果と比較すると、初期付着剛性が低くなるに連れて曲げひび割れ以降のP- θ 関係の剛性が著しく低下してい

る。図6から K_{slip} が 1.0×10^2 (N/mm³)となるとP- θ 関係が平面保持を仮定した解析結果と近い曲線となることが分かる。一方、 K_{slip} が 1.0×10^{-2} (N/mm³)以下の場合にもP- θ 曲線に変化が見られずほぼ同じ曲線を示しており、これによって初期付着剛性の低下によるP- θ 関係への影響にも漸近する曲線があることが分かり、この状態はアンボンド緊張材を用いた場合に対応すると考えられる。

RC構造物の主筋として一般に用いられる異形鋼の初期付着剛性が 2.0×10^2 (N/mm³)以上⁷⁾であることから、繰り返し载荷による付着剛性の低下、あるいは付着割裂などによる急激な付着劣化が生じず、十分な付着性能が保証される範囲では平面保持の仮定を用いて断面算定を行うことは妥当であると考えられる。一方、PC緊張材として用いられるストランドの初期付着剛性は一般に定量化されるに至ってはいない。しかしながら文献6によると $3.0 \sim 5.0 \times 10^1$ (N/mm³)程度であり、図6から緊張材のすべりによる影響を考慮する必要があると言える。

ここで曲げを受ける圧着部材の各種特性点を曲げひび割れ発生点(Cr点)、降伏点(Y点)及び最大耐力点(U点)の三点で評価する。これらの特性点を定義する方法については、過去に多く議論されてきており、特にPC部材においてY点の評価方法が問題となっている。本研究では、以下のように定義する。

Cr点 危険断面での引張側コンクリート縁ひずみ度が0になったときの部材角 θ_{cr} 及び荷重 P_{cr} とした。

Y点 過去に多くの指摘があるように、PC部材ではRC部材のように明確な降伏点が存在しない。今回対象とした試験体では、普通強度鉄筋が危険断面に存在しないために、特に緊張材の応力変動が部材の曲げ挙動に大きな影響を及ぼす。そのため緊張材降伏時の部材角 θ_y 及び荷重 P_y をもってY点とした。

U点 解析中に部材が最大耐力を発揮した時点の部材角 θ_u 及び荷重 P_u をU点とした。

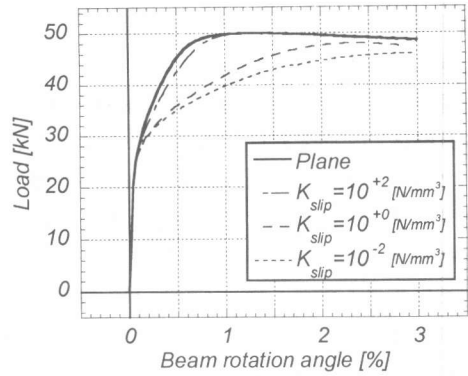


図6 付着剛性の荷重—部材角関係への影響

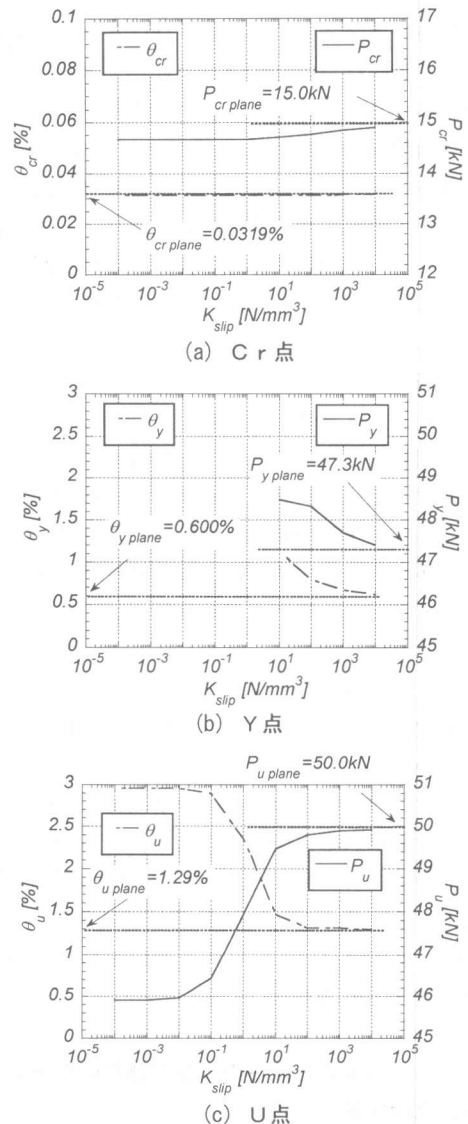


図7 各曲げ特性点への付着剛性の影響

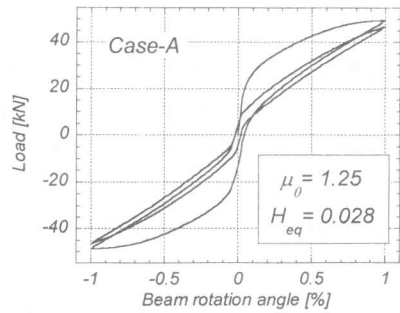
図6で示された計算結果を基に、これらの定義に基づいて得られた各種特性点の荷重、部材角をY軸に、初期付着剛性をX軸にプロットしたものを図7(a)~(c)に示す。また図中には緊張材を含めた断面の平面保持を仮定して得られた荷重及び部材角を破線で示し、その数値を書き加えた。(例 $P_{cr\ plane}$ 、 $\theta_{cr\ plane}$)

図7(a)によるとCr点では初期付着剛性の影響が見られなかった。これは曲げびび割れが発生し緊張材位置コンクリートひずみ度が引張側に移行してから初期付着剛性の影響が大きく発現し始めるためである。

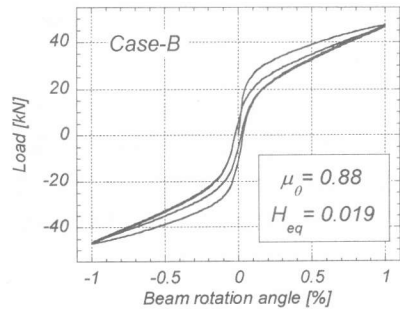
図7(b)にはY点についての荷重・部材角-初期付着剛性関係が示されているが、 $K_{slip} = 1.0 \times 10^1 (N/mm^3)$ 未満の範囲ではY点が存在していない。これは、初期付着剛性が高い範囲ではCr点の直後にY点が生じるが、初期付着剛性が低くなるに連れてY点の部材角はU点に近づいていき、ついには最終部材角に至ってもストランドが降伏しない、すなわちY点が存在しないという結果となるためである。Y点が存在する範囲では、Y点の荷重・部材角共に初期付着剛性が高いほど低い。

初期付着剛性が低い場合は高い剛性を仮定した場合の計算結果と比べて最大耐力が8%程度下回った。これは部材の曲げ破壊が緊張材の引張降伏先行型からコンクリート圧壊型に移行することが原因となっている。またU点の部材角は、 $K_{slip} = 1.0 \times 10^2 (N/mm^3)$ の場合と比較して $K_{slip} = 1.0 \times 10^2 (N/mm^3)$ の場合は約2.3倍となり、初期付着剛性が低いほど部材角が増大する傾向にある。図7(c)によると K_{slip} が $1.0 \times 10^2 (N/mm^3)$ 以上となると荷重、変位共にほぼ平面保持を仮定して得られたものに近い値を示しており、同様に K_{slip} が $1.0 \times 10^2 (N/mm^3)$ 以下の場合にも荷重、部材角共にほぼ同じ値を示している。これらは図6から得られた結論と一致する。

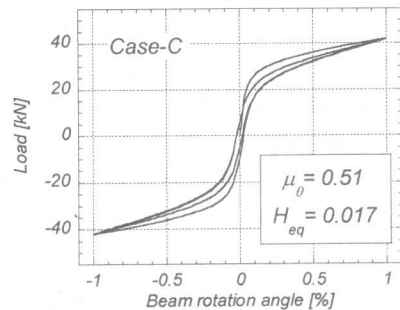
次に異なる初期付着剛性に対して梁部材角1%で2回正負交番荷履歴を与えた。その中から初期付着剛性に $K_{slip} = 1.0 \times 10^2 (Case-A)$ 、 $1.0 \times 10^1 (Case-B)$ 、 $1.0 \times 10^0 (Case-C)$ の3種類を仮定した際のP- θ 関係を図8に示す。各Caseにお



(a) Case-A $K_{slip} = 1.0 \times 10^2 (N/mm^3)$



(b) Case-B $K_{slip} = 1.0 \times 10^1 (N/mm^3)$



(c) Case-C $K_{slip} = 1.0 \times 10^0 (N/mm^3)$

図8 付着剛性が荷重—部材角ループ形状に及ぼす影響

いて梁部材角1%に相当する緊張材降伏時を基準とした部材角靱性率 μ_θ 及び第二ループでの等価粘性減衰定数 H_{eq} を同図に併記する。

$\mu_\theta = 1.25$ であったCase-Aでは部材角1%に至るまでの緊張材ひずみ度増分が大きかったためにプレストレス力が除荷と共に減少し、直線的な第二ループとなっている。一方 $\mu_\theta < 1.0$ であったCase-B及びCでは第二ループが湾曲性の強いS字型となった。

Case-Aでは残留プレストレス力が小さかった

にも関わらずその第二ループから得られた等価粘性減衰定数は0.028と非常に小さな値を示している。これは本解析対象部材に普通強度鉄筋が配置されなかったことが原因となっている。

4. 2 付着降伏応力度の変化が部材のP-θ関係に及ぼす影響

過去の実験結果からストランドの付着応力度-すべり量関係には初期付着剛性から二次付着剛性へと移り変わる折れ曲がり点が存在する。これを付着降伏点(S_y, τ_y)とし、 τ_y が部材のP-θ関係に及ぼす影響を検討する。

4. 1と同様に初期付着剛性は $K_{slip} = 1.0 \times 10^2$ (Case-A), 1.0×10^1 (Case-B), 1.0×10^0 (Case-C)とし、二次付着剛性はそれぞれの初期付着剛性の1/100とした。各Caseに対して付着降伏応力度 $\tau_y = 0.1, 1, 10$ (MPa)の三種類を仮定して τ_y の差に対応した単調載荷時の部材のP-θ関係を検討する。他の材料特性は4. 1と同じとした。

図9にそれぞれのCaseでのP-θ関係を示す。 $\tau_y = 10$ (MPa)の条件下では付着降伏点すべり量 S_y が十分に大きな値となるため、全てのCaseで最終部材角2%までに付着降伏点に達した要素点は存在しなかった。これとは対照的に $\tau_y = 0.1$ (MPa)の場合には梁材端を除く全ての要素点で付着降伏に達した。また $\tau_y = 1$ (MPa)の場合では危険断面から梁端に向かって順に付着降伏が進行し、材端を除く全要素点で付着降伏が発生した後は、 $\tau_y = 0.1$ (MPa)を仮定したP-θ曲線と平行に荷重が上昇していく様子が分かる。

初期付着剛性の大きいCase-A及びBでは $\tau_y = 1, 10$ (MPa)を仮定したそれぞれのP-θ曲線の差が大きいが、Case-Cでは $\tau_y = 1, 10$ (MPa)の条件間のP-θ曲線に大きな違いが見られない。これはCase-A, Bと比較してCase-Cでは S_y の値が大きくなり、 $\tau_y = 1$ (MPa)を仮定した場合でも $\tau_y = 10$ (MPa)の場合と同様に部材中の要素点で付着降伏が生じにくいためである。

文献6を参照するとストランドの付着降伏応力度は $\tau_y = 3 \sim 5$ (MPa)程度であり、先述したストランドの初期付着剛性も考慮すると τ_y の値が部材のP-θ関係に及ぼす影響は大きい。

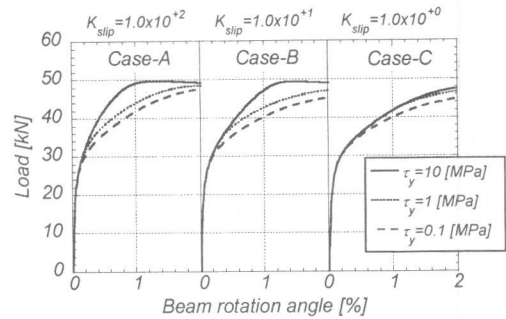


図9 付着降伏応力度 τ_y が荷重-部材角関係に及ぼす影響

5 まとめ

緊張材の付着-すべり性状を考慮に入れた解析研究により以下の結果が得られた。

- ① 初期付着剛性が 1.0×10^2 (N/mm²)以上で平面保持仮定時、 1.0×10^2 (N/mm²)以下でアンボンド状態と一致し、大きな付着劣化が生じない範囲では異形鋼を用いた場合、平面保持の仮定が妥当であり、ストランドを用いた場合にはそのすべりを考慮する必要がある。
- ② 過去に行われたストランドの付着すべり実験結果に基づく、付着降伏応力度及び初期付着剛性の値が部材の荷重-変形関係に及ぼす影響は共に大きい。

参考文献

- 1) 小阪義夫・谷川雄雄・山田和夫: 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 ー第1報 解析方法一、日本建築学会論文報告集第326号、pp.78-90、1983.4
- 2) 崎野健治・孫玉平: 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、日本建築学会構造系論文集第461号、pp.95-104、1994.7
- 3) Fumio Watanabe, J.Y.Lee, Minehiro 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
- 4) 三隅哲志・田川浩之・西山峰広: PC鋼棒の応力度-ひずみ度関係のモデル化、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、C-2構造IV、pp.885-886、1997.9
- 5) 河野進・三牧祐輔・田中仁史: 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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19 No.2、pp.1185-1190、1997.7
- 6) 是永健好・渡辺英義・小林淳: 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
- 7) 森田司郎・角徹三: 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、日本建築学会論文報告集第229号、pp.15-24、1975.3