

論文 柱梁接合部における主筋の付着すべりを考慮した RC 平面骨組の履歴挙動解析

齊藤 隆典^{*1}・越川 武晃^{*2}・上田 正生^{*3}・菊地 優^{*4}

要旨：本論文は，柱梁接合部の内部における主筋の付着すべりを表現可能な RC 接合部要素を提示し，この要素と著者等の付着すべりを考慮した RC 梁・柱要素とを併用した RC 平面骨組の材料非線形解析について報告するものである。本論では更に，既往の実験結果を対象とした解析例によって解の妥当性を検証し，特に繰り返し荷重を受ける RC 平面骨組の変形挙動に及ぼす付着すべりの影響について考察を行っている。

キーワード：付着すべり，柱梁接合部，履歴挙動，材料非線形解析，有限要素法

1. はじめに

梁曲げ降伏型の RC 骨組の変形挙動は，梁端部に集中する塑性回転変形に特徴付けられる。この塑性回転変形の集中は，梁端部の断面抵抗と接合部や梁からの主筋の抜け出しとの複合的な作用によってもたらされる現象である。付着劣化を引き起こす主筋の抜け出しは，特に，RC 骨組が地震力等の繰り返し荷重を受ける場合には，その変形挙動に大きな影響を及ぼすことが知られている。そのため，この種の構造の変形挙動を適切に評価するためには，梁から接合部内へと通じる主筋の連続的に変化する付着すべり現象を精度良く表現することが重要であると考えられる。

本研究は，著者等の既往の「補強材の付着すべりを考慮した鉄筋コンクリート梁部材の曲げ解析法」¹⁾に接合部要素を新たに導入し，繰り返し荷重を受ける RC 骨組の材料非線形解析への適用を試みるものである。本論文ではまず，非線形解析にあたっての梁・柱要素の有限要素法への定式化と接合部要素の概要について記述し，次いで，この種の部材の履歴挙動を精度良く表現するために採用した材料モデルの概要につい

て示す。更に，既往の実験結果との比較・考察を行い，特に解析結果に及ぼす主筋の付着特性の影響について検証している。

2. RC 梁・柱要素の定式化

ここでは，本解析法の基本となる付着すべりを考慮した RC 梁・柱要素の有限要素法への定式化の概要について記述する。定式化にあたり設定した基本仮定事項は以下に示す通りである。

- 1) 梁，柱には軸力と曲げが作用するものとする。コンクリート断面には，鉄筋のすべりに拘らず平面保持が成立すると仮定し，この仮定に基づく微小変形理論が適用できる。
- 2) RC 梁・柱の断面を，図 - 1 に示すようにそれぞれの部材丈方向に層状 (n 層) に仮想分割して取り扱う積層要素で表示する。
- 3) 各層の補強材とコンクリート間には，材軸方向の付着すべりが生じ得るものとし，ある位置における個々の補強材層のすべり変位は，平面が保持されるその位置のコンクリート断面からの相対変位で表示できる。
- 4) 各部材内の個々のコンクリート層と補強材層の材料性状は，各要素の各層ごとに，その至履

*1 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

*2 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 助手 博士(工学) (正会員)

*3 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

*4 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 助教授 博士(工学)

歴の状態に応じて各解析ステップごとに変化するが、個々の層内では一定の性状を有するものとする。

2.1 変位場

前項の仮定に基づき、定式化に際して設定しなければならない変位場は、図 - 2 に示すように、RC 梁・柱の軸方向変位 u 、鉛直変位 w 、および各層材断面内に配筋されている補強材層 (m 層) のすべり変位 $S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_m$ の計 $(2+m)$ 個の変位である。非線形解析にあたっては、これらは増分形式で表示されることになる。

2.2 定式化に必要な歪増分および応力増分

(1) コンクリート層の歪増分と応力増分

基準軸 (x 軸) から z_i だけ離れた任意のコンクリート層 i の歪増分 $\Delta\varepsilon_{ci}$ は次式で表される。

$$\Delta\varepsilon_{ci} = \frac{d\Delta u}{dx} - z_i \frac{d^2\Delta w}{dx^2} \quad (1)$$

従って、この層の応力増分は次のようになる。

$$\Delta\sigma_{ci} = E_{ci}\Delta\varepsilon_{ci} \quad (2)$$

但し、 E_{ci} : コンクリート層 i の接線剛性

(2) 補強材層の歪増分と応力増分

梁・柱断面内に m 層配筋されている補強材のうち、任意の i 層の歪増分 $\Delta\varepsilon_{si}$ は次式で表される。

$$\Delta\varepsilon_{si} = \frac{d\Delta u}{dx} - h_{si} \frac{d^2\Delta w}{dx^2} + \frac{d\Delta S_i}{dx} \quad (3)$$

但し、 h_{si} : 補強材層 i の基準軸からの鉛直距離

従って、この層の応力増分は次のようになる。

$$\Delta\sigma_{si} = E_{si}\Delta\varepsilon_{si} \quad (4)$$

但し、 E_{si} : 補強材層 i の接線剛性

(3) 補強材層の付着応力増分とすべり変位増分

補強材層のすべり変位増分と付着応力増分の間には、次の関係が成立する。

$$\Delta\tau_{bi} = K_{bi}\Delta S_i \quad (5)$$

但し、 $\Delta\tau_{bi}$: 付着応力増分、 K_{bi} : i 層における鉄筋の接線付着係数、 ΔS_i : すべり変位増分

2.3 RC 梁・柱の有限要素方程式

RC 梁・柱を構成する各層に係る内部エネルギー増分を求め、主筋の付着すべりを考慮した RC 梁・柱のための増分表示された全ポテンシャル・エネルギー汎関数 $\Delta\Pi$ を導くと、次のよう

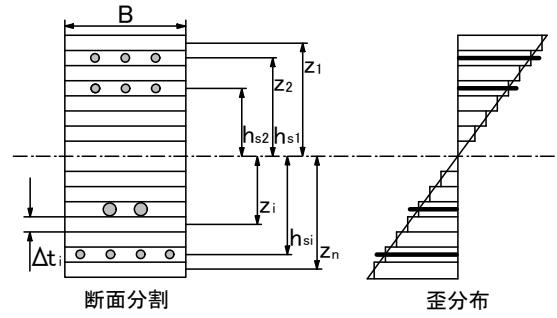


図 - 1 断面の積層要素分割および歪分布

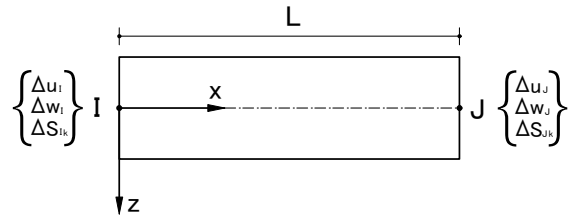


図 - 2 梁・柱要素

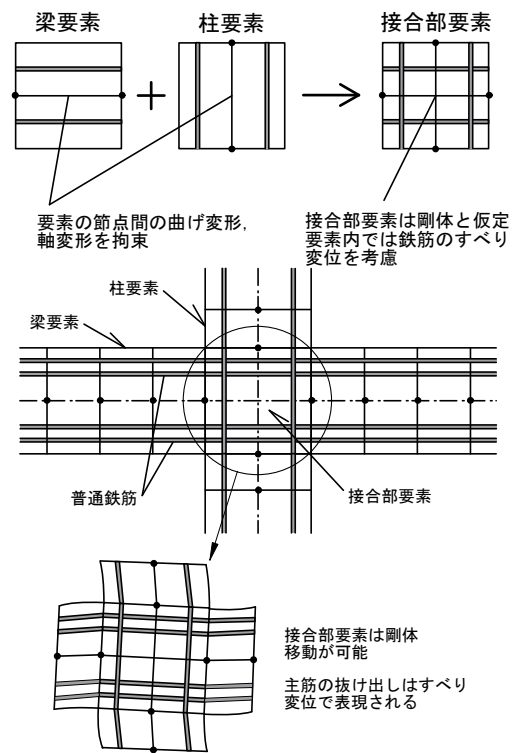


図 - 3 接合部要素

に表すことができる。

$$\Delta\Pi = \Delta U - \Delta V$$

$$= (\Delta U_{cn} + \Delta U_{st} + \Delta U_{bs}) - \Delta V \quad (6)$$

但し、 ΔU : 増分内部エネルギー、 ΔV : 外力による増分負荷エネルギー、 ΔU_{cn} : コンクリートに係る内部エネルギー増分、 ΔU_{st} : 補強材に係る内部エネルギー増分、 ΔU_{bs} : 付着すべりに係る内部エネルギー増分
また、各要素の変位増分 Δu 、 Δw 、 ΔS_i (但し、

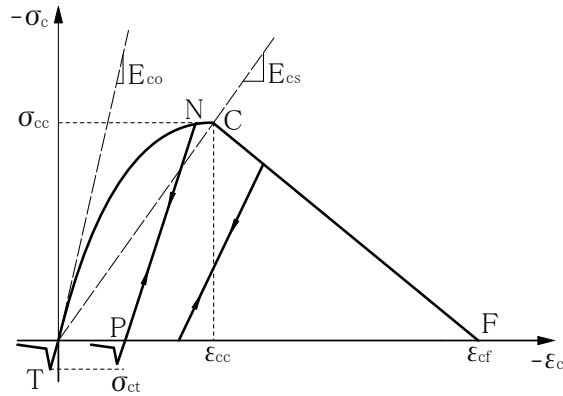


図 - 4 コンクリートの応力 - 歪関係

$i = 1 \sim m$) の変位関数をそれぞれ一次, 三次, 一次と設定し, (6) 式に基づいて有限要素法への定式化を行うと, 次の有限要素方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} K_{uu} & K_{uw} & K_{uS} \\ K_{uw}^T & K_{ww} & K_{wS} \\ K_{uS}^T & K_{wS}^T & K_{SS} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta u \\ \delta w \\ \delta S \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \delta P_u \\ \delta P_w \\ \delta P_S \end{Bmatrix} \quad (7)$$

但し, $\{\delta_u\}$: 変位 u に関する節点変位ベクトル増分, $\{\delta_w\}$: 変位 w に関する節点変位ベクトル増分, $\{\delta_S\}$: すべり変位 S_i に関する節点すべり変位ベクトル増分

3. RC 梁・柱要素をベースとした接合部要素

RC 骨組における接合部を介した主筋の連続的な付着すべり現象を表現し得るように, 本論では, 梁・柱要素をベースとした接合部要素を解析に導入し, 非線形解析への適用を行う。図 - 3 に, 接合部要素の概要について示す。図からも分かる通り, この接合部要素はともに付着すべりを考慮した RC 梁要素と RC 柱要素の 2 つの要素で構成されたものである。このため接合部要素の各節点における自由度数は隣接する RC 梁・柱要素のものと同一となり, すべり変位を含めた全ての変位の連続性は確保されている。接合部要素の変形については, コンクリート部分には剛体を, 補強材にはすべり変位のみが生じるものと仮定し, 接合部の 4 節点は要素が平行移動および回転した後も互いの距離を保持するように設定した。即ち, この接合部要素では, RC 骨組の接合部からの主筋の抜け出しが各節点におけるすべり変位で表現されることになる。尚, ここでは簡単のため, 接合部におけるせん

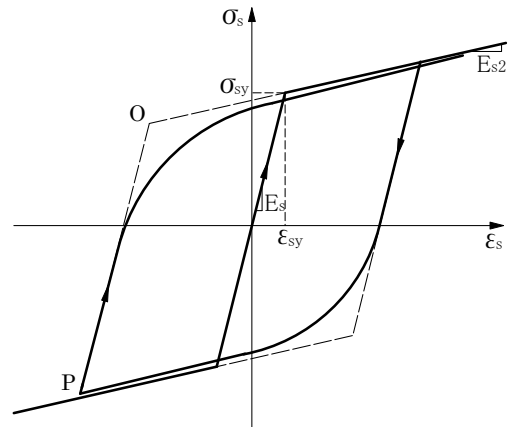


図 - 5 補強材の応力 - 歪関係

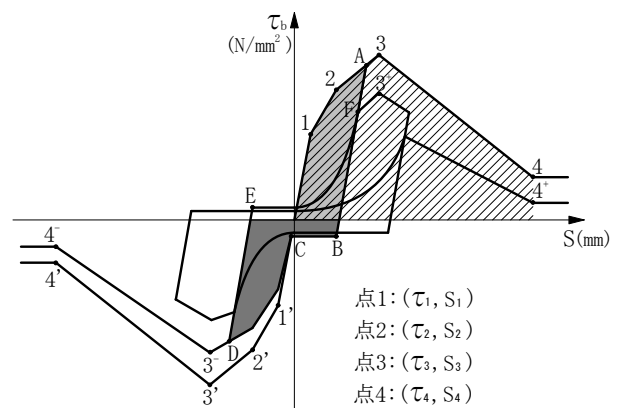


図 - 6 付着応力 - すべり変位関係

断ひび割れやせん断変形の影響は考慮していない。

4. 材料特性の仮定と構成関係

4.1 コンクリートの応力 - 歪関係

図 - 4 は, 本解析で用いる著者等既往のコンクリートの応力 - 歪関係²⁾を示したものである。単調載荷時のコンクリートの構成関係については, 引張側では, 引張強度 σ_{ct} に達するまでは線形弾性が成立し, 応力を二段階に低減させる 1/4 モデルを採用する。圧縮側においては, 圧縮強度 σ_{cc} に到達するまでは次に掲げる Saenz 式で表示するものとし, 圧縮強度以降は直線的に遞減するものと仮定する。

$$\sigma_c = \frac{E_{co}\varepsilon_c}{1 + \left(\frac{E_{co}}{E_{cs}} - 2\right)\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}}\right) + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}}\right)^2} \quad (8)$$

但し, E_{co} : 初期接線係数, E_{cs} : 圧縮強度時の割線係数, ε_{cc} : 圧縮強度時の歪
また, 本解析では, 実験データが与えられている場合を除き, E_{co} には E_{cs} の 2 倍の値, ε_{cc} に

は 0.2 % の値を仮定する。

繰り返し載荷経路については、圧縮側では除荷開始点 N と残留歪点 P とを結ぶ直線経路とする。引張側においては、再載荷点から点 P を目指す直線経路を通り、点 P 到達後、圧縮側経路に復帰するものと設定している。

4.2 補強材の応力 - 歪関係

図 - 5 に、本解析で用いる補強材の応力 - 歪関係を示す。単調載荷経路においては bilinear 型の応力 - 歪関係を設定することにし、降伏強度 σ_{sy} 以降の接線剛性 E_{s2} を初期弾性係数 E_s の $\frac{1}{100}$ と仮定する。また、図に示すように、繰り返し載荷経路に関しては、補強材降伏後に生じる Bauschinger 効果をより実現象に近い形で表現可能な Menegotto-Pinto モデル³⁾を採用する。ここで、載荷反転点 P より始まる履歴曲線は次式により与えられる。

$$\sigma^* = R_s \varepsilon^* + \frac{(1 - R_s) \varepsilon^*}{(1 + \varepsilon^* R_b) \frac{1}{R_b}} \quad (9)$$

ここで、

$$\sigma^* = \frac{\sigma_s - \sigma_r}{\sigma_o - \sigma_r}, \quad \varepsilon^* = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_r}{\varepsilon_o - \varepsilon_r}, \quad R_s = \frac{E_{s2}}{E_s}$$

但し、 R_s : 歪硬化係数、 E_s : 補強材の初期弾性係数、 E_{s2} : 補強材の降伏後の接線係数、 R_b : Bauschinger 効果を表す係数、 σ_r, ε_r : それぞれ載荷反転点 P の応力と歪、 σ_o, ε_o : それぞれ履歴曲線の載荷反転点での接線と漸近線との交点 O の応力と歪

4.3 付着応力 - すべり変位関係

単調載荷時の補強材とコンクリートの間の付着応力 - すべり変位関係は、図 - 6 に示すように、点 1, 2, 3, 4 (点 1', 2', 3', 4') を通る経路を仮定する。ここで示される各付着応力値は CEB-FIP MODEL CODE 1990⁴⁾ に準拠して設定する。

繰り返し載荷経路については、載荷サイクルの進展に伴う付着劣化の影響を扱うことのできる Elmorsci 等⁵⁾ が提案したモデルを採用する。いま、図中の点 A で 1 サイクル目の除荷が開始され、点 D での再載荷の後、点 F に至る ($A \sim F$ の順) 経路をたどる場合を考える。点 A より点 B (または、点 $D \sim E$) までの直線経路については、採用モデルでは直線勾配 $200N/mm^3$ を仮定している。このモデルではサイクル数の増加

に伴う付着応力の遞減を表現可能であり、 N サイクル目の付着応力 (図中、点 $3^+, 3^-, 4^+, 4^-$) は次式で与えられる。

$$\tau_3(N) = \tau_3(1 - d) \quad (10)$$

$$\tau_4(N) = \tau_4 \left(1 - \frac{d}{2 - d} \right) \quad (11)$$

ここで、

$$d = 1 - e^{-(1.2)(E/E_o)(1.1)}$$

但し、 $\tau_3(N)$: N サイクル後のすべり変位 S_3 における付着応力、 $\tau_4(N)$: N サイクル後のすべり変位 S_4 における付着応力、 d : 付着応力遞減を表す係数、 E : 図中の薄灰色および濃灰色部分の面積、 E_o : 図中の斜線部分の面積

再載荷点 D は、この低減された線上に乗ることになる。また、除荷時・再載荷時の曲線部 (図中、点 E から点 F に至る経路) は次式で表すことができる。

$$\tau = \tau_a + (\tau_n - \tau_a) \left(\frac{S - S_a}{S_n - S_a} \right)^4 \quad (12)$$

但し、 τ_a : 曲線部開始点 (図中点 E) における付着応力、 S_a : 曲線部開始点におけるすべり変位、 τ_n : 曲線部終点 (図中点 F) における付着応力、 S_n : 曲線部終点におけるすべり変位

5. 北山等の十字型柱梁接合部試験体の実験結果との比較

ここでは、北山等⁶⁾ が行った十字型柱梁接合部試験体のうち、接合部にせん断亀裂が発生する前に梁降伏するように設計された試験体 (試験体名: J6) を対象として、実験結果と解析結果との比較を行うことにする。図 - 7 に試験体の概要と材料性状および要素分割状態を示す。実物の約 1/2 スケールを持つこの試験体には、一定の鉛直荷重が加えられた後、繰り返し水平荷重が載荷されている。試験体の両梁端はピンローラー支持、下柱はピン支持である。解析を行うにあたって、図中に示すような要素分割を行い、梁と柱の断面はそれぞれ 30 層の分割とした。また、付着特性に関しては、実験結果が明示されていないために、全ての梁と柱の主筋に対して、図 - 8 のような付着応力 - すべり関係を設定した。

解析は、変位増分法を用いて行った。図 - 9 と図 - 10 にそれぞれ層せん断力 - 層間変位関係

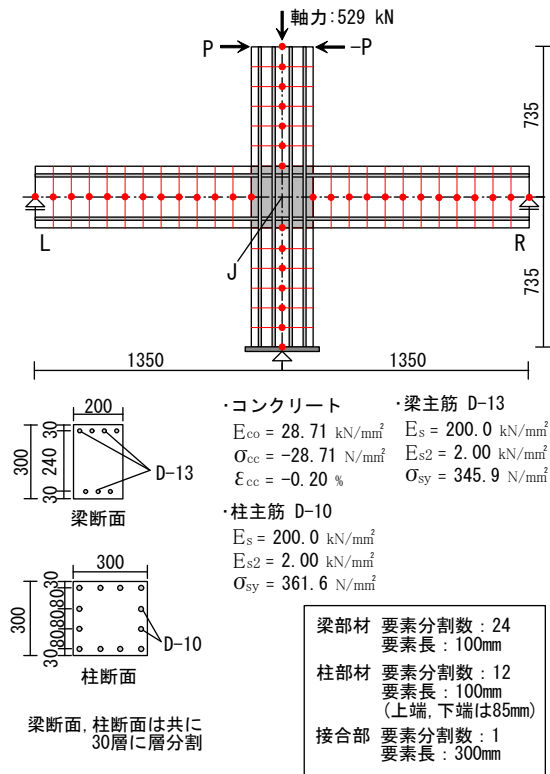


図 - 7 解析対象試験体の概要および要素分割

の実験値と本解析値を示す。図 - 10 の (a) は付着すべりを考慮した解, (b) は全てのすべり変位を拘束した完全付着の解である。実験では梁の曲げ降伏後に接合部内での主筋の付着劣化が生じ, 大变位域では接合部にせん断ひび割れが生じ, せん断変形が卓越したために逆S字型の履歴ループ形状を示しているが, 接合部のコンクリートの変形を拘束した本解析値はいずれも紡錘型の履歴形状を示している。しかしながら, 図 - 10 の (a) と (b) を見比べてみると明らかに, 本解析値は完全付着の解よりも遥かに低いエネルギー吸収能を呈しており, 実験値の全体的な変形挙動を捉えていることが分かる。

図 - 11 は付着すべりを考慮した本解析における下端鉄筋の歪分布を主筋の降伏前後に分けて示したものである。図中に示された Stage1 ~ 4 までの各変形段階は, 図 - 10 の (a) に示されたものと対応している。本解析では, 右梁主筋の引張歪につられる形で接合部内の主筋に引張歪が生じ, 鉄筋降伏後では, 更にその外側の左梁内の主筋の歪も若干ではあるが引張側へと移行していく様相を呈しており, 载荷の初期段階

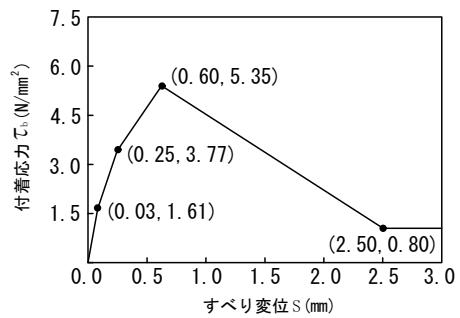


図 - 8 仮定付着応力 - すべり変位関係

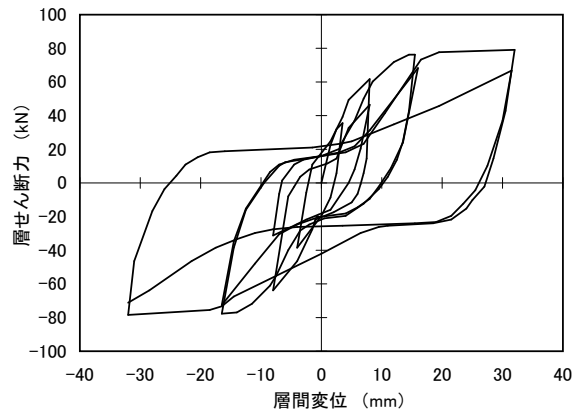
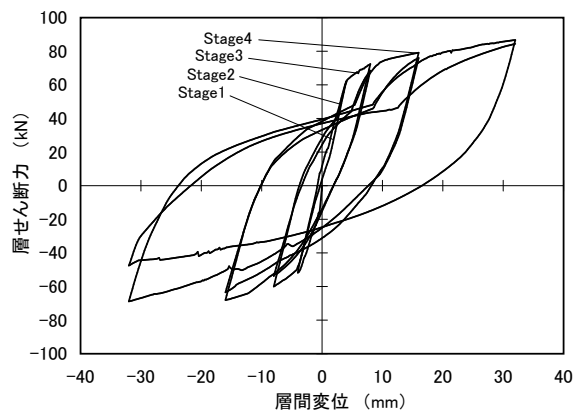
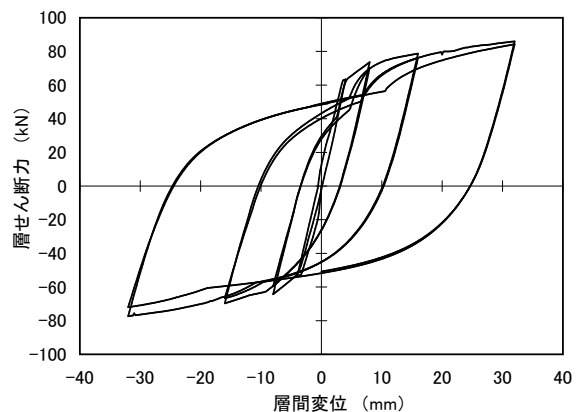


図 - 9 実験結果

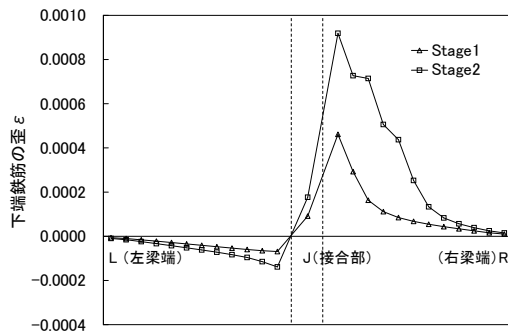


(a) 付着すべりを考慮した解析値

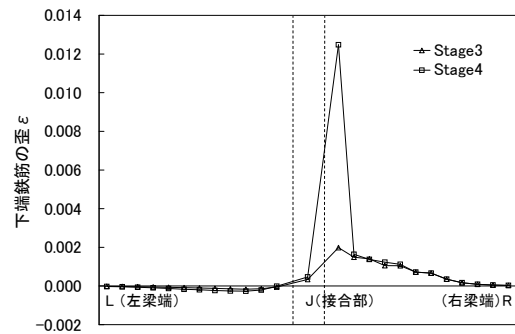


(b) 完全付着を仮定した解析値

図 - 10 本解析値

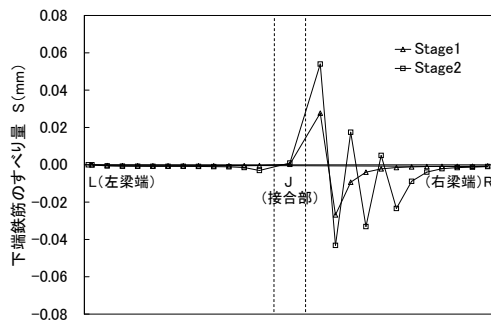


(a) 鉄筋降伏前

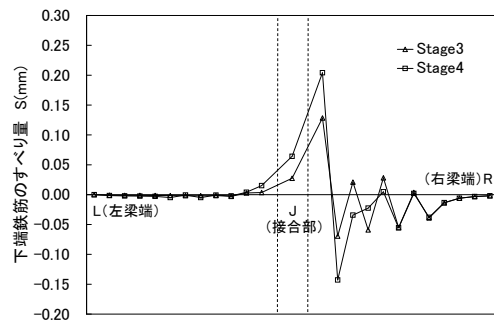


(b) 鉄筋降伏後

図 - 11 下端鉄筋の歪分布



(a) 鉄筋降伏前



(b) 鉄筋降伏後

図 - 12 下端鉄筋のすべり量分布

から付着すべりを考慮した効果が現れている。

また、図 - 12 には、図 - 11 に対応した下端主筋のすべり量分布が示してある。符号は右方向へのすべりを正側とした。図の結果から、主に引張側となる主筋においてすべりが生じていることが分かる。これはコンクリートに発生する引張亀裂に起因したものである。大変位域となる Stage3,4 では、引張側の主筋のすべりが接合部内にも進展し、特に Stage4 では圧縮側となる左梁にもすべりが生じており、本解析における付着劣化の進行過程を窺い知ることができる。

6. まとめ

本論文では、「接合部内における主筋の付着すべりを考慮した繰り返し荷重を受ける RC 架構の材料非線形解析法」について論じた。即ち、まず本解析手法について概述し、次いでこの種の部材の全体的な変形挙動を精度良く表現するための材料の構成関係ならびに部材のモデル化について記述した。次いで、本解析法による数値計算例を掲げ、既往の実験結果との比較により、

本解析法が完全付着の解析に比べてより実験結果に即した RC 平面骨組の履歴エネルギー吸収能を表現し得ることを明らかにし、更に解析結果における主筋の歪分布およびすべり分布の推移について検証した。

参考文献

- 1) 上田正生, 土橋由造: 補強材の付着すべりを考慮した鉄筋コンクリートはり部材の曲げ変形解析, 土木学会論文集, 第 372 号/V-5, pp.55-64, 1986.8
- 2) 越川武晃, 齊藤隆典, 上田正生, 菊地優: 緊張鋼材の付着すべりを考慮した圧着型 PCaPC 梁 - 柱部材の履歴挙動解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, 2004
- 3) 堺淳一, 川島一彦: 部分的な除荷・再載荷を含む履歴を表す修正 Menegotto-Pinto モデルの提案, 土木学会論文集, No.738, I-64, pp.159-169, 2003.7
- 4) Roy E.Rowe, Rene Walther: CEB-FIP MODEL CODE 1990, CEB, 1990
- 5) Mostafa Elmorsi, M.Reza Kianoush, and W.K. Tso, : Moderating bond-slip deformations in reinforced concrete beam-column joints, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.27, pp.490-505, 2000
- 6) 北山和宏, 栗栖浩一郎, 小谷俊介, 青山博之: 梁主筋の付着をよくした柱梁接合部の耐震性能, 第 7 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.605-608, 1985