

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立体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、接合部内部に通し配筋された主筋の付着すべりを表現可能な3次元RC接合部要素を新たに提案し、この要素を用いたRC立体骨組の材料非線形解析法について報告するものである。本論文ではまず、新たに提案する3次元RC接合部要素の構成手法を中心としたRC立体骨組の解析法について論じている。更に、既往の実験結果を対象とした数値計算例より本解析法の妥当性の検証を行い、特に2方向载荷を受けるRC立体骨組において、柱梁接合部を含む部材中の主筋の付着すべりが骨組全体の变形挙動に及ぼす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, RC立体骨組, 材料非線形解析, 有限要素法

1. はじめに

鉄筋コンクリート(RC)骨組に外力が作用する場合、柱梁接合部や曲げヒンジ領域となる梁端部からの主筋の抜け出しが発生し、これが部材内部の付着劣化にまで発展すると、骨組全体の耐震性能を低下させる可能性がある。この主筋のすべり現象は、コンクリートと鉄筋とが力学的に相互に影響し合った結果生じるため、骨組が実際の地震力のような、多方向から同時に外力を受ける場合には、柱梁接合部周囲の応力負担がより大きくなり、骨組の变形挙動に及ぼす主筋のすべりの影響がより顕著になると推測される。そのため、解析を用いてこの種の構造の耐震性能をより精度良く評価するためには、鉄筋の付着すべり現象等の非線形挙動を適切に考慮するとともに、柱梁接合部を介した立体的なRC骨組モデルを用いた検討を行う必要があるものと思われる。

著者等はこれまでに、接合部における主筋の付着すべりを表現可能なRC平面骨組の解析法について報告している¹⁾。本論文は、この著者等既往の解析法で提案した2次元RC接合部要素を立体骨組に適用し得るように拡張し、この要素を用いたRC立体骨組の材料非線形解析法について報告するものである。本論文ではまず、本解析法の基本となる鉄筋の付着すべりを考慮した3次元RC梁・柱要素の有限要素法への定式化について概説し、次いで、新たに提案する接合部内部の付着すべりを表現可能な3次元RC接合部要素の構成手法について論じている。更に、既往の実験結果を対象とした比較・考察を通して、本解析法の妥当性の検証と2方向载荷を受けるRC立体骨組の变形挙動に及ぼす主筋の付着すべりの影響について検証を行っている。

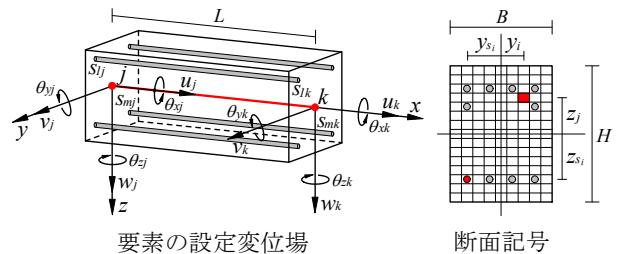


図-1 3次元RC梁・柱要素

2. 鉄筋の付着すべりを考慮した3次元RC梁・柱要素

ここでは、本解析手法の基本となる鉄筋の付着すべりを考慮した3次元RC梁・柱要素の有限要素法への定式化について概説する。図-1は、3次元RC梁・柱要素の概要について示したものである。この要素の特徴を挙げると以下ようになる。

- (1) 梁、柱には、軸力と2方向曲げ、ねじりが作用するものとする。コンクリート断面には平面保持を仮定し、この仮定に基づく微小変形理論を適用する。
- (2) 梁・柱断面を層状に仮想分割して取り扱う、ファイバーモデルで表示する。
- (3) 断面のねじり変形に関しては、要素軸方向に一定のねじり率を仮定するSt.Venantのねじり理論に従う。
- (4) 要素各節点に鉄筋のすべり変位を設定し、鉄筋の付着すべり現象を直接的に取り扱うことが可能である。

2.1 変位場および歪増分・応力増分

(1) 変位場

この問題の定式化に際し、設定しなければならない変位場は、図-1に示すように、要素のx軸方向変位 u 、y軸方向変位 v 、z軸方向変位 w 、各部材断面内に配筋された鉄筋層 (m 層) のすべり変位 s_1, \dots, s_m 、断面のねじり

*1 北海道大学大学院工学研究科 大学院生 修士(工学) (正会員)
 *2 北海道大学大学院工学研究科 助教 博士(工学) (正会員)
 *3 北海道大学大学院工学研究科 教授 博士(工学) (正会員)
 *4 北海道大学大学院工学研究科 准教授 博士(工学)

り変位 θ_x の計 $(4+m)$ 個の変位である。非線形解析にあたって、これらは増分形式で表示される。

(2) コンクリート層の歪増分・応力増分

要素軸から y 軸方向に y_i 、 z 軸方向に z_j の距離だけ離れた任意のコンクリート層 ij の歪増分 $\Delta\varepsilon_{c_{ij}}$ 、応力増分 $\Delta\sigma_{c_{ij}}$ は次式で表すことができる。

$$\Delta\varepsilon_{c_{ij}} = \frac{d\Delta u}{dx} - y_i \frac{d^2\Delta v}{dx^2} - z_j \frac{d^2\Delta w}{dx^2} \quad (1)$$

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

但し、 $E_{c_{ij}}$: コンクリート層 ij の接線剛性

(3) 鉄筋層の歪増分・応力増分

梁・柱断面内に m 層配筋されている鉄筋層のうち、任意の i 層の歪増分 $\Delta\varepsilon_{s_i}$ 、応力増分 $\Delta\sigma_{s_i}$ は次式のように表すことができる。

$$\Delta\varepsilon_{s_i} = \frac{d\Delta u}{dx} - y_{s_i} \frac{d^2\Delta v}{dx^2} - z_{s_i} \frac{d^2\Delta w}{dx^2} + \frac{d\Delta s_i}{dx} \quad (3)$$

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

但し、 y_{s_i} : 鉄筋層 i の要素軸からの y 軸方向への距離、 z_{s_i} : 鉄筋層 i の要素軸からの z 軸方向への距離、 E_{s_i} : 鉄筋層 i の接線剛性

(4) 鉄筋層の付着応力増分・すべり変位増分

任意の鉄筋層 i の付着応力増分 $\Delta\tau_{b_i}$ とすべり変位増分 Δs_i との間には、次の関係が成立する。

$$\Delta\tau_{b_i} = K_{b_i} \Delta s_i \quad (5)$$

但し、 K_{b_i} : 鉄筋層 i の接線付着剛性

2.2 RC 梁・柱要素の有限要素方程式

鉄筋の付着すべりを考慮した 3 次元 RC 梁・柱要素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 $\Delta\Pi$ は、次のように表される。

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

但し、 ΔU_{cn} : コンクリートに係る内部エネルギー増分、 ΔU_{st} : 鉄筋に係る内部エネルギー増分、 ΔU_{bs} : 鉄筋の付着すべりに係る内部エネルギー増分、 ΔV : 外力によるエネルギー増分
また、要素の各変位増分 Δu 、 Δv 、 Δw 、 Δs_i 、 $\Delta\theta_x$ の要素内における変位関数をそれぞれ 1 次、3 次、3 次、1 次、1 次と設定すると、図-1 の要素両節点 j 、 k における各節点変位ベクトル増分 $\{\delta u\}$ 、 $\{\delta v\}$ 、 $\{\delta w\}$ 、 $\{\delta s_i\}$ 、 $\{\delta\theta\}$ は、各変位増分を用いて次のように表される。

$$\{\delta u\} = \{\Delta u_j \ \Delta u_k\}^T \quad (7)$$

$$\{\delta v\} = \{\Delta v_j \ \Delta\theta_{z_j} \ \Delta v_k \ \Delta\theta_{z_k}\}^T \quad (8)$$

$$\{\delta w\} = \{\Delta w_j \ \Delta\theta_{y_j} \ \Delta w_k \ \Delta\theta_{y_k}\}^T \quad (9)$$

$$\{\delta s_i\} = \{\Delta s_{ij} \ \Delta s_{ik}\}^T \quad (10)$$

$$\{\delta\theta\} = \{\Delta\theta_{x_j} \ \Delta\theta_{x_k}\}^T \quad (11)$$

但し、 θ_z : z 軸まわりの回転変位を表す項で、 $\theta_z = \frac{dv}{dx}$ 、

θ_y : y 軸まわりの回転変位を表す項で、 $\theta_y = \frac{dw}{dx}$

式(6)を式(7)~(11)で表される各節点変位ベクトル増分

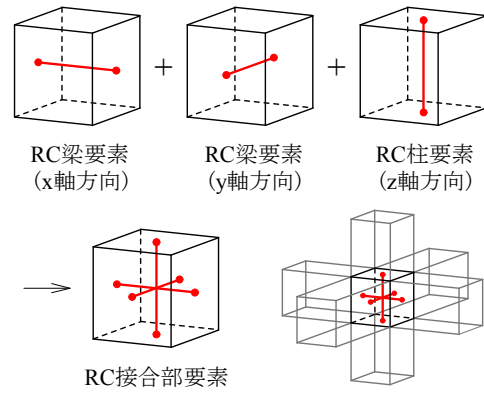


図-2 3次元 RC 接合部要素

に関してそれぞれ変分を取り整理すると、次式で表される有限要素方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} K_{uu} & K_{uv} & K_{uw} & K_{us} & 0 \\ K_{uv}^T & K_{vv} & K_{vw} & K_{vs} & 0 \\ K_{uw}^T & K_{vw}^T & K_{ww} & K_{ws} & 0 \\ K_{us}^T & K_{vs}^T & K_{ws}^T & K_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta u \\ \delta v \\ \delta w \\ \delta s \\ \delta\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta P_u \\ \delta P_v \\ \delta P_w \\ \delta P_s \\ \delta P_\theta \end{bmatrix} \quad (12)$$

但し、 $[K]$: 各節点変位ベクトル増分に対応した部分剛性マトリクス、 $\{\delta s\}$: すべての鉄筋の節点すべり変位ベクトル増分、 $\{\delta P\}$: 各節点変位ベクトル増分に対応した節点荷重ベクトル増分

3. RC 梁・柱要素をベースとした 3 次元 RC 接合部要素

図-2 は、本論文で新たに提案する 3 次元 RC 接合部要素の概要を表したものである。この要素は、要素軸方向を x 軸、 y 軸とする RC 梁要素および RC 柱要素の計 3 要素を組み合わせて接合部要素を構成し、接合部のコンクリート部分が剛体となるように各 6 節点の変位に拘束条件を設け、互いに関連付けを行ったものである。RC 梁・柱要素をベースとしているため、接合部における鉄筋の付着すべりについても直接的に考慮することができ、文献 1) と同様に要素内部にすべり変位を表す節点を付加することで、接合部内部の付着すべり分布についても表現することが可能である。

接合部におけるコンクリート部分の剛体の設定手法は、著者等既往の 2 次元 RC 接合部要素¹⁾での設定と基本的には同様であるが、本論文では、3 次元 RC 接合部要素にこれを適用するため、変位の拘束条件が異なっている。図-3 は、接合部コンクリートの剛体を表現するために、3 次元 RC 接合部要素に設定した変位の拘束条件の概要を示したもので、ここでは拘束条件を二段階に分けて表示している。これらの拘束条件はそれぞれ節点変位の関係式として表すことができる。まず、剛体の設定を行う第一段階(図中の Step1)として、接合部要素を構成する 3 要素において、2 節点間の軸方向変位、回転変位、ねじり変位を同値とする関係式、2 方向曲げに

係る変位については要素の幾何学的関係性より得られる関係式を導く。次に、第二段階（図中の Step2）として、各3方向の要素を要素中心で互いに直交するように配置し、且つその直交関係を保持するように、図中の青線部分で結ばれた節点間において、鉄筋のすべり変位を除く変位に関して、要素の幾何学的関係性より得られる関係式を導く。一方、ここまで得られた節点変位の関係式を解析法に導入するために、変位の変換を行う。ここで、変位変換後の接合部要素が持つ6節点の変位ベクトル増分 $\{\delta'_{joi}\}$ は次式のように表すことができる。

$$\{\delta'_{joi}\} = [T_{joi}]\{\delta_{joi}\} \quad (13)$$

但し、 $[T_{joi}]$: 接合部コンクリートの剛体を表現するために設定した変位変換マトリクス、 $\{\delta_{joi}\}$: 接合部要素が持つ6節点の変位ベクトル増分式(13)中の $[T_{joi}]$ は、一連の節点変位の関係式より得ることができる。式(13)と前章の式(12)より、変位変換後の接合部要素の有限要素方程式は次式で表すことができる。

$$([T_{joi}^{-1}]^T [K_{joi}] [T_{joi}^{-1}])\{\delta'_{joi}\} = ([T_{joi}^{-1}]^T)\{\delta P_{joi}\} \quad (14)$$

但し、 $[K_{joi}]$: 接合部要素が持つ6節点の剛性マトリクス、 $\{\delta P_{joi}\}$: 接合部要素が持つ6節点の節点荷重ベクトル増分

また、この変換では接合部要素に接続する梁・柱要素の変位にも影響を及ぼすため、これらの要素の変位を含めた上で変換を行う必要がある。

最終的には、式(14)の $\{\delta'_{joi}\}$ のうち、先の変位の関係式を設けた変位について、解析における通常の拘束条件の設定と同様に変位が0となるような操作を行い、この式を解くことにより、接合部のコンクリート部分の剛体を満足した変位状態を得ることが可能となる。尚、鉄筋のすべり変位については、いずれの軸方向に関しても一連の変位の変換とは無関係であるため、剛体を設定した接合部のコンクリート断面からの相対変位として表示することができる。

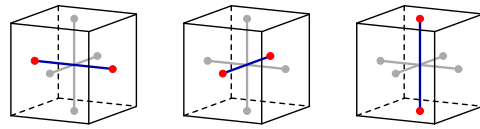
4. RC 梁・柱要素と RC 接合部要素の材料モデル

4.1 コンクリートの応力-歪関係

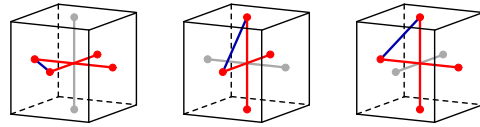
図-4は、本解析で用いる著者等既往のコンクリートの応力-歪関係¹⁾を示したものである。単調載荷時の引張側では、引張強度 σ_{ct} に達するまでは線形弾性が成立し、その後の経路に応力を二段階に低減させる1/4モデルを採用する。圧縮側においては、圧縮強度 σ_{cc} に到達するまでは次式で表される Saenz 式を用い、圧縮強度以降は直線的に応力逓減する経路を設定する。

$$\sigma_c = \frac{E_{co}\varepsilon_c}{1 + \left(\frac{E_{co}}{E_{cs}} - 2\right)\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}}\right) + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}}\right)^2} \quad (15)$$

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



Step1: RC梁・柱要素の各節点変位の拘束



Step2: 2要素間の直交関係の拘束

図-3 3次元 RC 接合部要素に設定した拘束条件

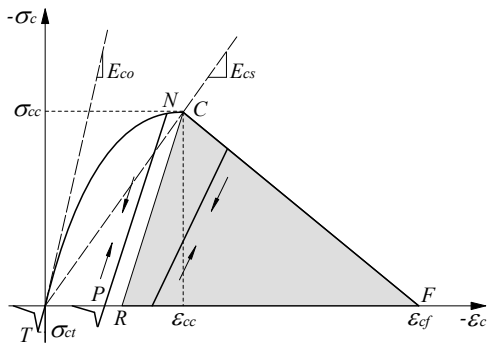


図-4 コンクリートの応力-歪関係

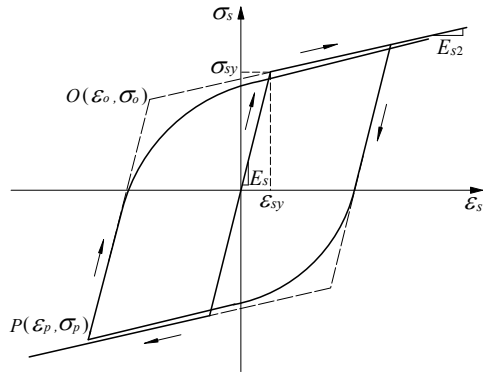


図-5 鉄筋の応力-歪関係

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 E_{cs} の2倍の値、 ε_{cc} に0.2%の値を仮定する。

4.2 鉄筋の応力-歪関係

図-5に本解析で用いる鉄筋の応力-歪関係を示す。単調載荷時の経路については bi-linear 型の応力-歪関係を設定し、降伏強度 σ_{sy} 以降の接線剛性 E_{s2} を初期剛性 E_s の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鉄筋降伏後に生じる Bauschinger 効果をより実現現象に近い形で表現し得る Menegotto-Pinto モデル²⁾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。

$$\sigma^* = R_s \varepsilon^* + \frac{(1 - R_s) \varepsilon^*}{(1 + \varepsilon^* R_b) \frac{1}{R_b}} \quad (16)$$

ここに、 $\sigma^* = \frac{\sigma_s - \sigma_p}{\sigma_o - \sigma_p}$ 、 $\varepsilon^* = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_p}{\varepsilon_o - \varepsilon_p}$ 、 $R_s = \frac{E_{s2}}{E_s}$

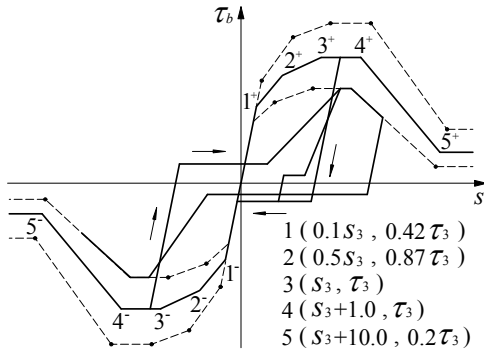


図-6 鉄筋の付着応力-すべり変位関係

但し、 R_s : 歪硬化係数、 E_s : 鉄筋の初期剛性、 E_{s2} : 鉄筋降伏後の接線剛性、 R_b : Bauschinger 効果を表す係数、 σ_p, ε_p : それぞれ荷重反転点 P における応力と歪、 σ_o, ε_o : それぞれ履歴曲線の荷重反転点での接線と漸近線との交点 O における応力と歪

4.3 鉄筋の付着応力-すべり変位関係

図-6は、本解析で用いる鉄筋の付着応力-すべり変位関係を示したものである。単調荷重時については図中の点1~5を通る経路を設定し、各点の値を付着強度点 τ_3 を基準として決定する。繰り返し荷重経路については、図中に示すような森田等の研究³⁾に基づいてモデル化した経路を用いる。また、鉄筋の付着強度は鉄筋に関わる種々の影響要因により変化することが予想されるため、本論文では τ_3 の値を算定するにあたり、各種要因による付着強度の増減を表現可能な Lowes 等が提案する付着強度式⁴⁾を採用する。本解析では、この提案式を基にして増減した付着強度 τ_3 及びその時点でのすべり量 s_3 を以下の式¹⁾で設定する。

$$\tau_3 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot \tau_3' [N/mm^2] \quad (17)$$

$$s_3 = \tau_3 / 20.0 [mm] \quad (18)$$

$$\text{ここに、} \tau_3' = 1.05 \sqrt{f_c}$$

但し、 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$: それぞれ各種要因が鉄筋の付着強度に及ぼす影響を表す係数、 f_c : コンクリートの圧縮強度

5. 深澤等の試験体の実験結果^{5),6)}との比較

ここでは、本解析法の妥当性を検証するため、深澤等が行った RC 立体骨組の実験結果のうち、梁曲げ降伏型の内部柱梁接合部試験体 BJ-3D-0 を取り上げ、実験結果と本解析値との比較を行ってみる。図-7は、対象とする試験体 BJ-3D-0 の概要と解析上の要素分割・材料性状について示したものである。この試験体は、直交梁を有する実大の約 40% スケールの縮小試験体で、柱部材に一定の軸力を荷重した後、各 x, y 方向の梁両端部において、鉛直方向荷重の正負交番繰り返し荷重が行われている。

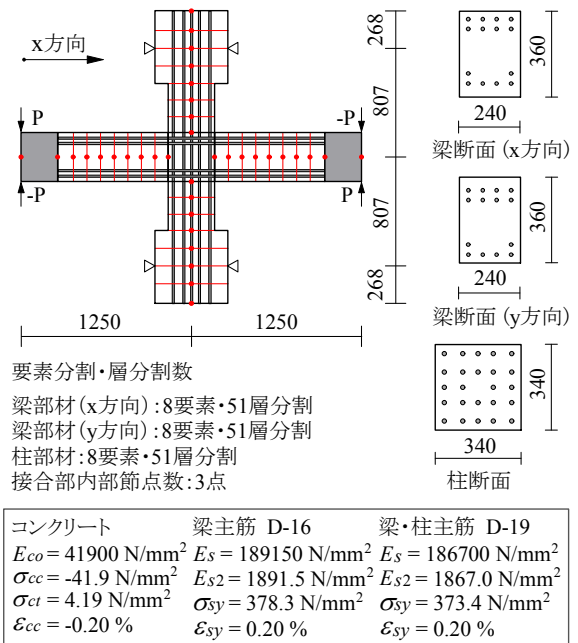


図-7 深澤等の試験体 BJ-3D-0 の概要

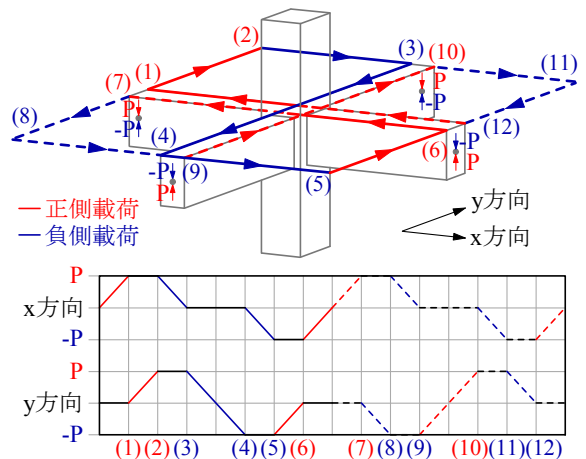


図-8 荷重パターン

この繰り返し荷重については、図-8に示すように、田字型の荷重パターンであり、層間変形角 $1/250, 1/100, 1/50, 1/25$ のサイクルを変位制御により行われている。また、図中の番号は各 x, y 方向、加力の正負の別による、荷重の順序を示している。

解析は変位増分法を用いて行った。解析にあたっては基本要素長を 100 mm とし、各 x, y 方向の梁部材、柱部材をそれぞれ 8 要素に分割、断面を 51 層に分割した。また、梁両端部には荷重用金具が取り付けられており、図-7中の灰色部分の要素を剛体と仮定した。接合部内部の付着すべり分布を表す内部節点数は 3 点を設定した。

図-9は、 x 方向の梁部材における梁せん断力-層間変形角関係の実験結果と解析結果との比較を示したものである。ここで、梁せん断力は文献⁵⁾と同様に梁両端部の荷重の和として表示している。また、解析結果としては、本解析値とともに、すべての鉄筋のすべりを拘束し

た完全付着の解析値についても併記してある。まず、実験結果と本解析値について比較すると、本解析値は実験結果に比べて、いずれのサイクルにおいても剛性をやや過大に評価しているものの、全体的な履歴ループ形状や最大耐力を良好に追跡可能なことが読み取れる。実験結果の除荷経路（正側から負側に至る経路）では、 x 方向梁と直交した y 方向梁に荷重した状態で、 x 方向梁に加力が行われており、直交方向の荷重に伴う梁せん断力の低下する現象が見られるが、この傾向は本解析値でも同様に表れており、本解析法が2方向荷重を受けるRC立体骨組の荷重-変形応答を概ね表現可能であることがわかる。また、完全付着の解析値についても比較すると、弾性域である層間変形角 $1/250$ rad では本解析値とほぼ同様であるが、 $1/100$ rad 以降ではエネルギー吸収能力に富んだ紡錘形の履歴ループ形状を示しており、最大耐力についても過大に評価する等、本解析値との明確な差異が認められる。この解析結果の相違は、鉄筋の付着すべりを考慮しない完全付着の仮定のもとで解析を行った場合、骨組の耐震性能を実際に比べて過大に評価する可能性があることを示唆している。

図-10は、 x 方向の梁部材において、1方向および2方向荷重時の引張側主筋の歪分布について、実験結果と本解析値とで比較したものである。この図の(a)は弾性域である層間変形角 $1/250$ rad、(b)は主筋降伏後の層間変形角 $1/100$ rad における比較をそれぞれ示している。尚、図中の()内の数字は、図-8中の荷重時点を表しており、(1)は x 方向梁のみの正側荷重、(2)は x 、 y 方向梁ともに正側荷重が行われた時点での値を示している。この図より、本解析値では層間変形角 $1/100$ rad 時において、引張側となる梁端部の1要素で歪値を過大に評価する結果となっているが、この点を除けば、 $1/250$ rad、 $1/100$ rad ともに、実験結果が示す主筋の歪分布を接合部内部を含めて良好に捉えていることがわかる。また、実験結果に示されているように、いずれの層間変形角でも荷重時点(1)、(2)でほぼ同じ歪値を表しているが、この傾向は本解析値でも見られ、直交方向(y 方向)梁への荷重による、 x 方向梁主筋の歪への影響は少ないことが、解析的にも確認することができる。

図-11は、接合部近傍の x 、 y 方向梁要素、柱要素におけるコンクリート断面の応力コンタ図を表したもので、層間変形角 $1/100$ rad 時の本解析値および完全付着の解析値での比較である。この図のうち、(a)、(b)は x 方向のみに正側荷重を行った時点〔荷重時点(1)〕、(c)、(d)は x 、 y 方向の2方向で正側荷重を行った時点〔荷重時点(2)〕での比較を示している。まず、(a)、(b)について見てみると、(a)の本解析値は、(b)の完全付着の解析値に比べ、 x 方向梁断面、柱断面の圧縮域の面積がやや増加

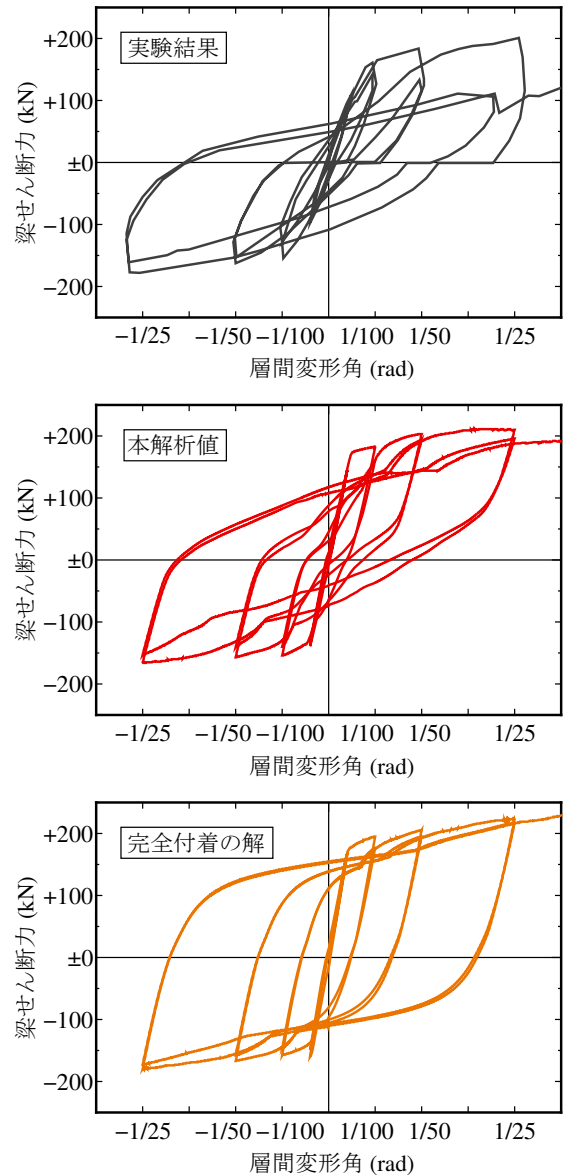


図-9 梁せん断力-層間変形角関係の比較

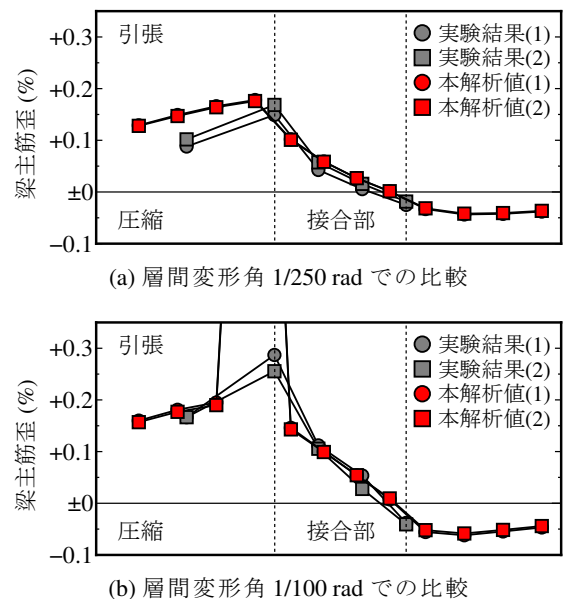


図-10 x 方向梁主筋の歪分布の比較

していることがわかる。これは主筋のすべりにより断面の応力状態が変化し、鉄筋の応力負担が緩和された分、コンクリートの負担が増加したことを意味している。次に、同図(c), (d)を見ると、いずれの解析結果でも、2方向荷重により柱断面の隅角部で圧縮応力が集中していることが視覚的に読み取れる。更に、1方向荷重時の(a), (b)に比べ、 x 方向梁断面の圧縮応力が低下している様子が認められるが、これは、 y 方向梁への荷重により接合部を介した応力分担が生じ、 x 方向梁の負担が若干緩和されたことを示している。また、すべての柱断面について比較すると、主筋のすべりを考慮し、2方向荷重の状態の(c)が最も応力集中の度合いが顕著となっていることがわかる。以上の結果と図-9での考察を併せて考えると、2方向荷重を受けるRC立体骨組のような接合部周囲の応力状態がより複雑になると想定される場合には、主筋のすべりが骨組の変形挙動に及ぼす影響はより大きくなり、解析を用いてより精度良く性能評価を行うには、主筋の付着すべりの考慮が不可欠であると思われる。

6. まとめ

本論文では、「接合部における主筋の付着すべりを考慮したRC立体骨組の材料非線形解析法」について論じた。即ち、まず、鉄筋の付着すべりを考慮した3次元RC梁・柱要素の有限要素法への定式化と、RC梁・柱要素をベースとした3次元RC接合部要素の構成手法を中心にRC立体骨組の解析法について論じた。更に、既往の実験結果と本解析値との比較・考察から、2方向荷重を受ける梁曲げ降伏型RC立体骨組において、本解析値が完全付着の解に比べてより実験結果に即した履歴挙動を表現可能であり、主筋のすべりの発生が部材断面のコンクリートの応力負担、応力集中の度合いを増加させ、骨組の変形挙動に大きな影響を及ぼすことを解析的に示した。

参考文献

- 1) 齊藤隆典, 越川武晃, 上田正生, 菊地優: 柱梁接合部内主筋の付着すべり分布を考慮したRC骨組の履歴挙動解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.85-90, 2006
- 2) 堺淳一, 川島一彦: 部分的な除荷・再荷重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
- 3) 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
- 4) Laura N. Lowes, Jack P. Moehle, Sanjay Govindjee: Concrete-Steel Bond Model for Use in Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures, ACI Structural Journal, Vol.101, No.4, pp.501-511, 2004.7-8

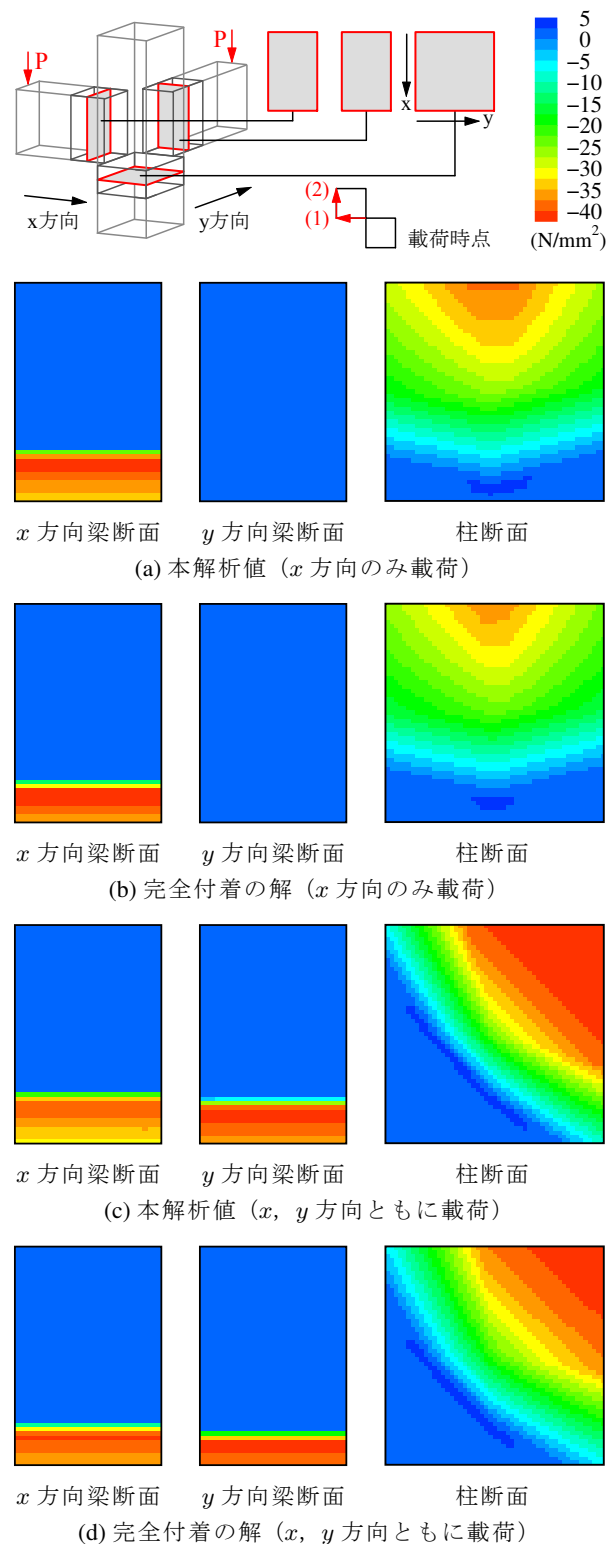


図-11 応力コンタ図の比較 (層間変形角 1/100 rad 時)

- 5) 深澤協三, 立花正彦, 見村博明, 中野清司, 松井邦人: 2方向地震力を受ける立体鉄筋コンクリート構造骨組の挙動に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第498号, pp.113-120, 1997.8
- 6) 深澤協三, 中野清司, 松井邦人, 吉村鉄也: RC内柱一はり接合部の二方向加力による実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, pp.745-750, 1994