

# 三次元断面接合要素による柱基部周りの 局所変位と応答解析

土屋智史<sup>1</sup>・青戸拡起<sup>2</sup>・前川宏一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) (株)コムスエンジニアリング (〒113-0031 東京都文京区根津二丁目 20-1-701)

<sup>2</sup>正会員 修士(工学) (株)フォーラムエイト 宮崎支社 (〒889-2155 宮崎市学園木花台西二丁目 1-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 東京大学大学院 工学系研究科 教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目 3-1)

RC棒部材接合部の不連続な変形を三次元のもので考慮するための断面接合要素を提案し、部材応答に占める接合面の影響を三次元のもので骨組み解析から検討した。ファイバーモデルを基本とし、断面直交方向に一次元応力場、および相対する断面間の平面相対変位を仮定して接合要素を得た。一方向繰り返し並びに三次元多方向載荷実験の結果を用いて提案手法の検証を行うとともに、局所変形が躯体損傷や部材変位に及ぼす影響と接合部の非線形多軸応答について検討した。

**Key Words:** 3D nonlinear frame analysis, fiber model, joint element, RC column, local deformation

## 1. 序論

2002 年制定のコンクリート標準示方書耐震性能照査編<sup>1)</sup>では、時刻歴非線形応答解析の効用を耐震性能照査に活かす基軸が提示され、材料の力学モデルが例示された。棒部材からなる構造物が対象である場合には、ファイバーモデルに基づく三次元有限要素骨組み解析を有効に活用できる道筋が開かれたといえる。断面内に展開する直ひずみの線形分布を仮定し、材料の力学モデルから断面力と断面変形との関係を与えるモデルを本文でファイバーモデルと定義する。材料の力学モデルは簡便な一軸モデルであるが、構造応答を履歴に応じて三次元的に評価できる点に特色があり、十分にせん断補強された比較的細長の RC 棒部材が対象であれば、躯体変形を崩壊領域まで追跡することも可能となりつつある。

構造物の地震時応答を評価するには、RC 躯体のみならず構造系全体を適切にモデル化しなければならない。部材接合部での不連続な変形も条件によっては考慮すべき対象であり、部材接合部での内部履歴についても配慮が必要である。筆者らは鉄筋コンクリート構造物の三次元非線形構造解析手法<sup>2)</sup>の開発を進めており、多角的な検証とモデル評価を繰り返すことで適用範囲の拡張を図ってきた。部材間接合面や柱基部とフーチング間に現れる局所変形

に関しては、専ら一方荷重に対して検討を重ねてきた。本稿では、接合面の三次元応答にまで検証の幅を広げることが研究の第一の目的とした。併せて柱基部接合部における変形と部材損傷について考察し、多軸曲げを受ける柱基部接合部での局所応答について解析的に検討を行うものである。

## 2. 解析手法の概要

材料非線形に立脚した解析モデルは、複数のひび割れを含む領域を空間平均化して扱う分散ひび割れモデルと、個々のひび割れを個別に扱う離散ひび割れモデルに大別される。分散ひび割れモデルは、ひび割れの集合がもたらす非線形性を平均的に表現するものであり、ひび割れ位置での鉄筋降伏後の付着劣化や塑性ひずみの局所化を、比較的大きな要素を用いても精度良く表現できる利点を有している。離散ひび割れモデルは、少数本のひび割れが部材挙動に支配的である場合や部材接合部に適用すると、少ない自由度で効率的に精度を上げることができる。ただし、ひび割れ発生位置が特定されない場合や多方向に多数配筋されている場合には、要素分割を細かく設定し、ひび割れと鉄筋の交差角によって変動する付着劣化性状に留意しなければなら

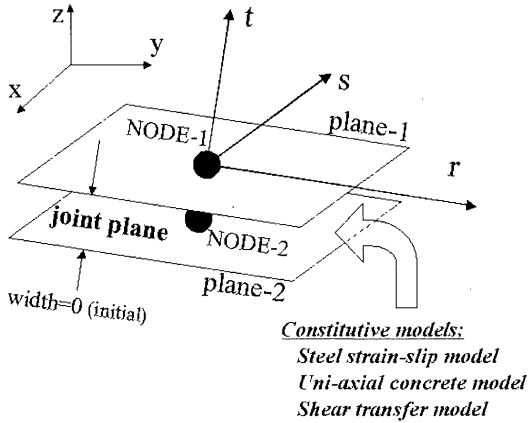


図-1 接合面に設定された局所座標系<sup>2)</sup>

ない。本稿では既存の手法<sup>2),3)</sup>を踏襲し、RC 躯体には分散ひび割れモデルに基づく RC 要素を、部材接合部には離散ひび割れモデルに基づく接合要素を選択的に適用するものである。

RC 要素では、断面を微小セルに分割し、各々のセルを構成するコンクリートおよび鉄筋に材料の力学モデルを適用する。コンクリートに対して圧縮・引張・ひび割れ再接触および履歴減衰を考慮したモデルを、鉄筋に対しては加藤モデル<sup>4)</sup>と等価な簡略化モデルを採用している。また、鉄筋の座屈モデルを採用するとともに、横拘束筋によるコンクリートの拘束効果も断面平均的に考慮した。これら解析および材料モデルの詳細やその適用性については、参考文献<sup>2),5)</sup>などに詳しいので本稿では省略する。

接合部の不連続な変形は、断面諸元、特に鉄筋の径と配置間隔の詳細設計の影響を受けるため、材料構成則から出発した解析的検討<sup>2),3),6),7)</sup>などが実施されてきた。例えば、機構が複雑となる面部材を主対象として、二次元平面解析に適用する接合要素が提案され、その精度が検証されるとともに、三次元立体解析にも適用可能な形に拡張されている。ここでは、鉄筋の抜け出し、接合面でのせん断ずれ、支圧応力が集中する領域のめり込みごとに載荷経路依存型の構成則が与えられ、これらの組み合わせから応答が算出される<sup>2),3)</sup>。本研究ではこの手法を踏襲し、ファイバーモデルに基づく骨組み解析に適用可能な三次元断面接合要素を提案するものである。

図-1 に示す通り、二面の RC 断面が相対している場合を考える。それぞれの面は部材端部の断面を代表しており、ここでは二面は同一断面形状と鋼材配置を有するものと仮定する。各断面(1,2)の並進移動  $u$  と回転角  $\phi$  は全体座標系  $(x,y,z)$  における節点自由度  $(u_x, u_y, u_z, \phi_x, \phi_y, \phi_z)$  で規定される。ここで、断面に沿って設定される局所直交座標系  $(r,s,t)$  上に節点並

進と回転角を座標変換し、相対する二面(1,2)の相対並進と相対回転角から、断面内局所点  $(r,s)$  における  $(r,s,t)$  軸方向の相対自由度を次のように与えることができる。

$$\begin{aligned} \Delta u_r &= (u_r^1 - u_r^2) - (\phi_1^1 - \phi_1^2) \cdot s \\ \Delta u_s &= (u_s^1 - u_s^2) + (\phi_1^1 - \phi_1^2) \cdot r \\ \Delta u_t &= (u_t^1 - u_t^2) + (\phi_1^1 - \phi_1^2) \cdot s - (\phi_2^1 - \phi_2^2) \cdot r \end{aligned} \quad (1)$$

断面内  $(r,s)$  の局所相対変位ベクトル  $(\Delta u_r, \Delta u_s, \Delta u_t)$  から二面間に発生する伝達応力ベクトル  $(\sigma_r, \sigma_s, \sigma_t)$  を算定すれば、伝達節断面力は下記のように与えられる。

$$\begin{aligned} V_r &= \int \sigma_r dA, \quad V_s = \int \sigma_s dA, \quad N_t = \int \sigma_t dA \\ M_r &= \int \sigma_r \cdot s dA, \quad M_s = -\int \sigma_r \cdot r dA \\ M_t &= \int (\sigma_r \cdot s - \sigma_s \cdot r) dA \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 $M_t$  は断面直交  $t$  軸周りのねじりモーメントであり、 $M_r$ 、 $M_s$  は接合面曲げモーメントである。

断面内のすべての点で材料構成則を規定し、局所相対変位ベクトル  $(\Delta u_r, \Delta u_s, \Delta u_t)$  から伝達応力ベクトル  $(\sigma_r, \sigma_s, \sigma_t)$  を求めることで、式(1)から式(2)が求められる(図-1)。式(2)を全体座標系に変換することで断面接合要素の一般化節点ベクトルを得る。式(2)の節点自由度に関する微分係数は接合要素の剛性行列に相当する。局所と全体座標間の座標変換と積分変換は、アイソパラメトリック要素のガウス積分法と同一であり、詳細は他書に譲る<sup>2)</sup>。

断面内直応力  $\sigma_t$  は、断面直交方向の相対変位  $\Delta u_t$  より算定することができる。断面内の点  $(r,s)$  に鉄筋が配置されている場合には、相対変位は引き抜け変位あるいは押し込み変位に相当するので、鉄筋の抜け出しと鉄筋応力の関係<sup>2),3),4)</sup>を用いて算定する。なお島らの研究から、鉄筋の抜け出しに主筋配置間隔の影響を考慮した<sup>8)</sup>。また、 $\Delta u_t$  が負、すなわち二面が閉合重なりの場合には、閉合相対変位を支圧特性長さ  $l$  で除した平均ひずみに対してコンクリートの応力-ひずみ関係<sup>2)</sup>を適用した。支圧特性長さは相対する面近傍の局所支圧応力分布に対応する<sup>3)</sup>。

断面内のせん断応力成分  $\sigma_r, \sigma_s$  は、せん断変位  $\Delta u_r, \Delta u_s$  のみならず、開口変位  $\Delta u_t$  の関数でもある。本研究では  $r$  と  $s$  方向それぞれに Li, Maekawa の接触面密度関数に基づくひび割れ面の応力伝達モデル<sup>3),9)</sup>を適用し、二面の開口変位とせん断変位から伝達せん断応力を算定した。ただし、連結部材のせん断スパン比が大きく、相対的に大きなせん断を受けないのであれば、ファイバー両面のせん断ズレは無視できる範囲に留まることが実証されている。詳細は文献<sup>3)</sup>に譲る。

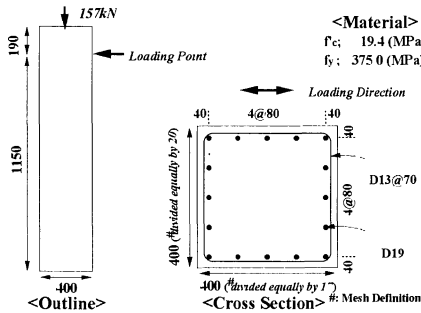


図-2 実験供試体の断面諸元<sup>10)</sup>

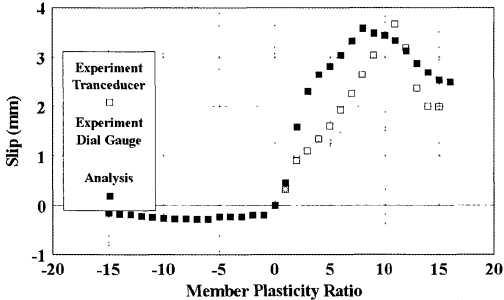


図-4 部材塑性率－主筋抜け出し量関係<sup>10)</sup>

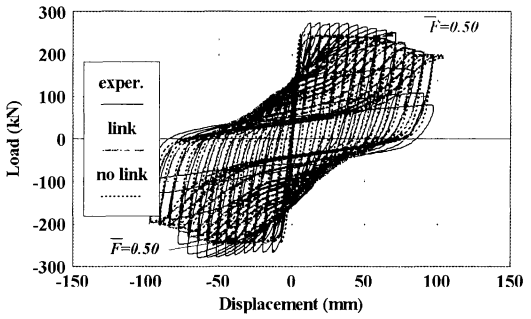


図-3 水平荷重－水平変位関係(実験と解析)<sup>10)</sup>

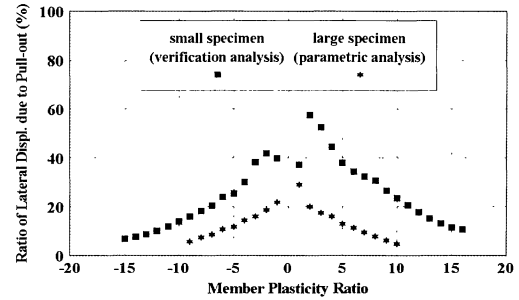


図-5 主鉄筋の抜け出しに起因する水平変位の割合

### 3. 一方向繰り返し载荷に対する検討

小型の矩形 RC 柱供試体の一方向静的正負交番繰り返し载荷実験<sup>10)</sup>を対象とした非線形骨組み解析を実施し、接合要素モデルの検証を行う。この実験をモデル検証の対象に選定したのは、接合部での主筋抜け出し量が詳細に計測されていること、および計測結果の信頼性から判断した。供試体の諸元は図-2に示す通りであり、実橋相当の構造諸元を有する柱部材に比べ、断面に対する主鉄筋の径が相対的に大きい。解析では幾何学的非線形性 (Total Lagrangian 型) を考慮し、最大モーメント領域の要素長をコンクリートの圧縮軟化域の特性寸法<sup>11)</sup>を考慮して 200 mm とした (以下、同じ)。

図-3 の解析から得られた水平荷重－水平変位関係をみると、実験結果と同様に、曲げ降伏に至り徐々に荷重値と履歴エネルギー吸収量が低下していく様子が伺える。一方で、降伏荷重・曲げ耐力とも同様の割合で幾分低めに評価している。この差は小さいものの現段階で理由は明らかでないが、解析で得られた耐力値は文献<sup>10)</sup>に示されている計算値にはほぼ一致している。最大モーメント断面の平均弾性剛性残存率<sup>11,5)</sup>の 0.500 到達は、+9 $\delta_r$ 時であった。

図-4 は部材塑性率と主筋抜け出し量 (slip) の関係であり、正側载荷時に引張側となる隅角部の鉄筋挙動を示している。引張側には、変位計とダイヤルゲージを使った二通りの方法による計測結果<sup>10)</sup>も併記したが、フーチングからの主筋の抜け出し挙動を

妥当な精度で追跡できていることが分かる。特に、大変形領域で抜け出し量が減少に転じていることが解析においても評価されている点は、検証の観点から着目に値する。解析結果は引き伸ばされた主鉄筋が圧縮履歴を経験することを示しており、载荷履歴を考慮することの重要性が再確認できる。

ここで、全水平変位に占める主鉄筋の抜け出しに起因する水平変位の割合を求めた (図-5)。主鉄筋の抜け出しに起因する水平変位は、式(3)を仮定して算定した。この変位量を分離する作業は、後述する大型供試体と比較し、接合面の変形の影響度を把握することを目的としている。図-5 より、降伏変位程度では抜け出しの影響が大きいこと、並びにその影響は応答変位が大きくなるにつれて小さくなる傾向が伺える。これは、既往の実測結果と一致する<sup>10,12)</sup>。

$$\delta = \delta_0 + \delta_1 = \delta_0 + L\theta \quad (3)$$

ここに、 $\delta$ ；全水平変位、 $\delta_0$ ；躯体の変形に起因する水平変位、 $\delta_1$ ；主鉄筋の抜け出しに起因する水平変位、 $L$ ；せん断スパン、 $\theta$ ；断面相対回転角である。

比較検討のために、接合要素を適用しない解析も実施した。図-3 に併記した水平荷重－水平変位関係では、接合要素を適用すればひび割れ発生から降伏に至る剛性が低下して応答変位が増大するが、この他には接合要素の有無による大きな差は見られない。ただし、大変形領域における柱躯体の変形と損傷に着目すると、接合要素の有無により差が生じている。最大モーメント断面の平均弾性剛性残存率の

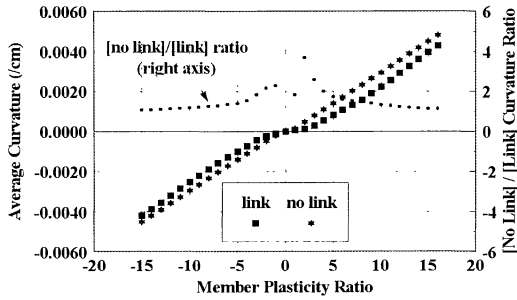


図-6 柱基部要素の平均曲率(接合要素ありとなし)

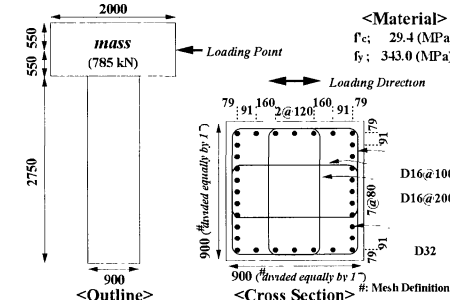


図-8 鉄道橋脚理想柱の断面諸元<sup>13)</sup>

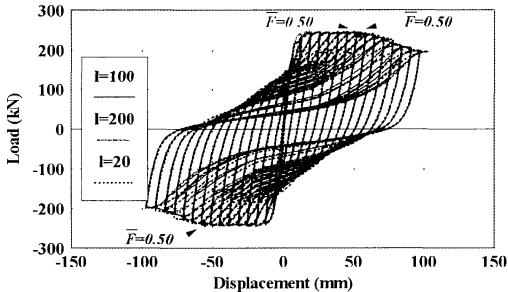


図-10 水平荷重-水平変位関係(l値変動)

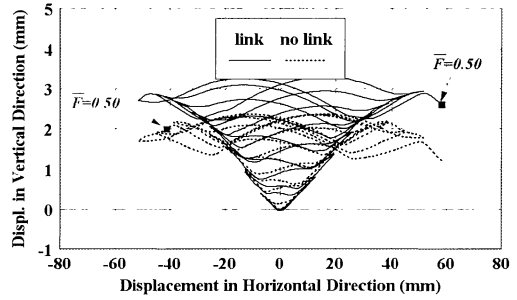


図-7 水平変位-鉛直変位関係(接合要素ありとなし)

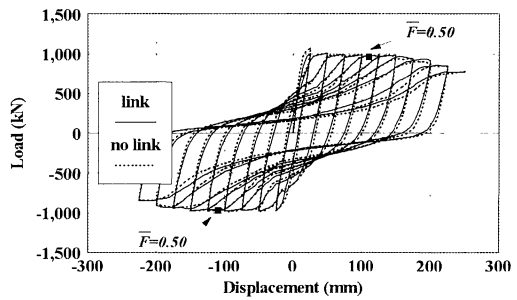


図-9 水平荷重-水平変位関係

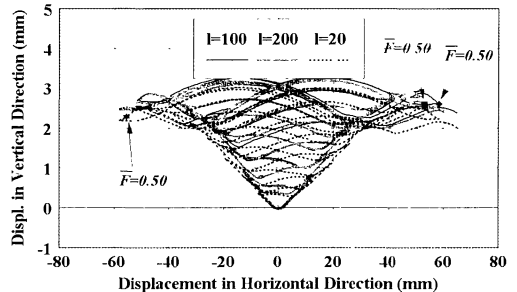


図-11 水平変位-鉛直変位関係(l値変動)

0.500 到達時を比較すると、接合要素を適用しない場合には、 $-7\delta_y$  に向かうループの $-40$  mm 付近時であり、接合要素を適用する場合に比べ早くなっている。また、柱基部要素の要素長 $200$  mm の平均曲率(図-6)および軸ひずみも、接合要素を適用しない場合の方が大きくなっていることを確認している。

図-7 では、柱頂頭部の鉛直変位を比較した。水平変位 $\pm 4\delta_y$  程度までは、接合要素の有無による鉛直変位に大きな差は見られない。しかし、 $+5\delta_y$  程度から乖離し始め、 $+9\delta_y$  時には鉛直変位で約 $1$  mm の差が生じている(水平変位が大きくなるに従い、鉛直変位は負側に転じているが、判別が容易となるよう、図-7 では $+9\delta_y$  までを示した)。なお、鉛直変位が減少に転じ始めた点は、最大モーメント断面の平均弾性剛性残存率 $0.500$  到達点と概ね一致している。

次に、寸法と構造諸元の影響について検討するため、一方方向静的繰り返し荷重を受ける実橋脚相当の矩形 RC 柱供試体の非線形骨組み解析を実施した。鉄道系の橋脚を参考に対象部材の諸元を図-8 のよ

うに設定し<sup>13)</sup>、載荷点水平変位を $\pm 25$  mm の整数倍として、正負交替による強制変位を与えた。図-9 の水平荷重-水平変位関係より、接合要素を適用すれば、前例と同じく、ひび割れ発生から降伏に至る剛性が低下するが、この他には接合要素の有無による大きな差はない。

大型供試体の場合の全水平変位に占める主鉄筋の抜け出しに起因する水平変位の割合を、式(3)に従って算出し、図-5 に併記した。傾向は同じであるが、割合の絶対量については、前例と比較してかなり小さい値となっており、既往の知見と一致する。最大モーメント断面の平均弾性剛性残存率の $0.500$  到達時、および柱基部要素の要素長 $200$  mm の平均曲率については、接合要素の有無によって生じる差が小型供試体柱に比べて小さくなっていた。柱頂頭部における鉛直変位を比較すると、水平変位 $+75$  mm 程度から徐々に乖離し始め、 $+150$  mm 時で約 $1$  mm の鉛直変位の差が生じていた。この例でも、鉛直変位が減少に転じ始めた点は、平均弾性剛性残存率が

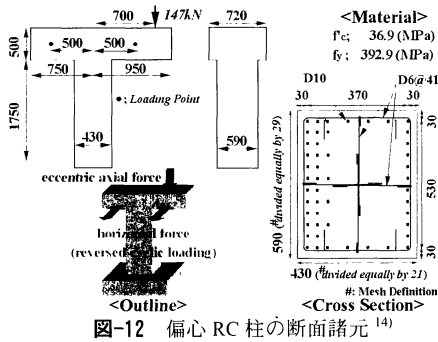


図-12 偏心 RC 柱の断面諸元<sup>14)</sup>

0.500 に到達する点とほぼ一致していた。

離散ひび割れ面の支圧特性長さ  $l$  の差異が応答値に及ぼす影響についても検討した。フーチングへのめり込みと支圧応力の分布から  $l$  値を 100 mm としてきたが<sup>2)</sup>、倍の 200 mm と最大骨材寸法程度の 20 mm とした解析も併せて実施した。 $l$  値を変化させることにより、接合部における局所的な挙動も変化するが、部材全体の水平荷重－水平変位関係に及ぼす影響は小さいことが再確認できる (図-10)。図-11 の鉛直方向の変形では、大変形域で若干の乖離が生じているが、鉛直方向変位は  $l$  値の大小と一義の関係となっていないことが分かる。少なくともフーチングに直結した RC 柱の耐震性能照査には一般に  $l$  値を 100 mm 程度としてよいことが確認された。

本稿ではコンクリートの拘束効果を立体三次元解析と等価な方法で考慮しているが<sup>5)</sup>、接合部のコンクリートに対しては、支圧強度に相当する高い圧縮強度と緩やかな軟化挙動を便宜的に設定した。拘束効果を考慮せずに過少な  $l$  値を仮に設定した場合、コンクリートの圧縮強度以降の軟化領域で多数繰り返し荷重を与えるとき、解析の途中で解の発散振動が稀に発生することがあった。しかし拘束効果を考慮すれば  $l$  値の大小にかかわらず、数値計算上の不安定性が回避されることを経験している。以上の解析精度を踏まえ、次章で多軸三次元方向に荷重を受ける柱供試体を対象とした骨組み解析を実施し、局所変形挙動と部材損傷について考察する。

#### 4. 三次元多方向荷重に対する検討

図-12 の偏心軸力によるモーメントと直交方向に正負交番で水平力を加えた既往の実験供試体<sup>14)</sup>を対象とした非線形骨組み解析を実施し、多軸曲げと局所変形について検討する。三次元的に開閉口を繰り返す接合部での局所挙動に着目するものである。多軸応答を呈する RC 柱の接合部変形挙動に着目し

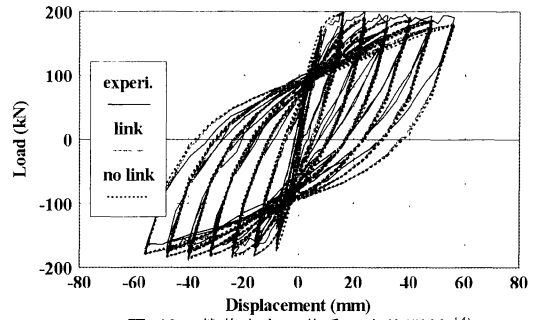


図-13 荷重方向の荷重－変位関係<sup>14)</sup>

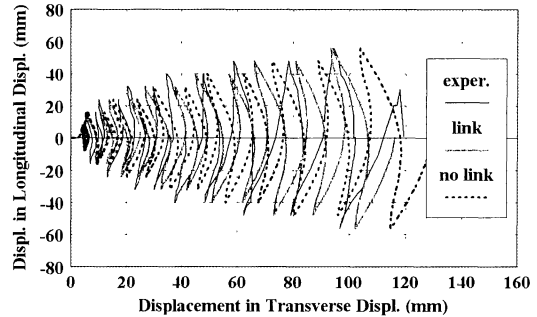


図-14 荷重直交方向変位－荷重方向変位関係<sup>14)</sup>

た例は少ない。既報<sup>14)</sup>でも解析的検討を実施しているが、全体変位に及ぼす効果が小さいことから、接合要素を適用していない。本稿では、既報で考慮していないかぶりコンクリートの剥落と主筋座屈、コアコンクリートの拘束効果の三点<sup>2)</sup>を新たに解析に取り入れて躯体の解析精度を上げ、接合面の三軸挙動をより詳細に検討することとした。

図-13 の荷重方向の荷重－変位関係によれば、接合要素の導入でひび割れ発生から降伏に至る剛性は幾分低下するが、水平一方向の応答と同様に大差はない。図-14 の荷重直交方向変位－荷重方向変位関係をみると、偏心軸力の存在により水平力と直交方向に残留変位が蓄積されていくことが分かる<sup>14)</sup>。ここで注目すべき点は、接合要素を導入することで、かえって残留変位が有意に小さくなることである (本例では、残留変位が実験結果に近づく結果ともなっている)。この傾向は単一方向荷重の場合とは全く逆である。鉄筋ひずみ－すべり関係が塑性変形以降の圧縮すべり戻し域までモデル化されていることが、偏心軸力によるモーメント方向の剛性を高める結果に現れている。多方向に応答する RC 柱の場合には、接合部の局所的な挙動が部材応答に及ぼす影響は複雑となり、各方向単独では変形成分の単純足し合わせが成立しないと言える。三軸多方向に荷重履歴を受ける対象に対しては、接合要素を含めた非線形解析を性能照査に用いることが、単方向荷重の場合以上に重要となってくることを意味する。

## 5. 結論

ファイバーモデルに基づく三次元骨組み解析に適用する三次元断面接合要素を提案し、多軸作用を受ける柱部材接合部の局所変形を妥当な精度で追跡できることを示した。さらに接合要素を用いた解析的検討により、局所変形が躯体損傷や部材変位に及ぼす影響を確認するとともに、多軸曲げを受ける場合には柱部材とフーチング間の局所変形の存在が必ずしも全体変位を大きくするとは限らないことを示唆した。今後は、耐力以後の解析手法の適合性について詳細な検証を行うとともに、主筋座屈モデルと接合部での抜け出し挙動とを物理的に関連付けた検討が求められる。

**謝辞：**本検討を行うにあたり、貴重な実験データを御提供頂いた石橋忠良博士、小林薫博士(東日本旅客鉄道株式会社)に感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 土木学会：2002年制定 コンクリート標準示方書[耐震性能照査編]，2002.12.
- 2) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H. : Nonlinear mechanics of reinforced concrete, *SPON Press*, 2003.
- 3) 岡村甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1991.5.
- 4) Kato, B. : Mechanical properties of steel under load cycles idealizing seismic action, *Bulletin D'Information*, No.131, CEB, AICAP-CEB symposium, pp.7-27, 1979.
- 5) 土屋智史，前川宏一：RC棒部材断面の損傷指標と耐震性能評価，土木学会論文集，No.718/V-57, pp.45-57, 2002.11.
- 6) 田島徹也ほか：主筋抜け出しを考慮した応答解析に基づくRC建物の地震損傷解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20, No.3, pp.31-36, 1998.
- 7) Niwa, J., Chou, L., Shima, H. and Okamura, H. : Nonlinear spring element for strain-slip relationship of a deformed bar, *US-Japan seminar on finite element analysis of reinforced concrete structures*, Vol.2, pp.227-235, 1985.
- 8) 島弘，篠原賢至，森岡芳弘：フーチングに定着した鉄筋の引き抜き量に及ぼす鉄筋間隔の影響，コンクリート構造物の靱性と配筋方法に関するシンポジウム論文集，日本コンクリート工学協会，pp.109-114, 1990.5.
- 9) Li, B., Maekawa, K. and Okamura, H.: Contact density model for stress transfer across cracks in concrete, *Journal of the Faculty of Engineering*, The University of Tokyo (B), Vol. XL, No.1, pp.9-52, 1989.
- 10) 石橋忠良，小林薫，海原卓也：大変形領域の交番荷重を受けるRC橋脚のフーチングからの鉄筋の抜け出し量算定法に関する研究，土木学会論文集，No.648/V-47, pp.43-54, 2000.5.
- 11) Lettsrisakulrat, T., Watanabe, K., Matsuo, M. and Niwa, J. : Localization effects and fracture mechanism of concrete in compression, *Proc. of JCI*, Vol. 22, No. 3, pp.145-150, 2000.
- 12) 梶隈順一ほか：鉄筋コンクリート橋脚の変形性能に及ぼす断面寸法の影響に関する研究，土木学会論文集，No.669/V-50, pp.215~232, 2001.2.
- 13) 渡辺忠朋，谷村幸裕，瀧口将志，佐藤勉：鉄筋コンクリート部材の損傷状況を考慮した変形性能算定手法，土木学会論文集，No.683/V-52, pp.31~45, 2001.8.
- 14) 土屋智史，津野和宏，前川宏一：常時偏心軸力と交番ねじり・曲げ/せん断力を複合載荷したRC柱の非線形三次元有限要素立体解析，土木学会論文集，No.683/V-52, pp.131-143, 2001.8.

(2003. 10. 24 受付)

## LOCAL DISPLACEMENT AROUND COLUMN BASE AND RESPONSE ANALYSIS USING THREE-DIMENSIONAL CROSS SECTION JOINT ELEMENT

Satoshi TSUCHIYA, Hiroki AOTO and Koichi MAEKAWA

Three-dimensional Cross-sectional joint element to consider discontinuous deformation around RC column base is proposed, and the influence of joint phase to member's response is numerically investigated using frame analysis. The joint element is obtained based on the fiber technique, by assuming that uni-axial stress along member's direction is prominent and plane on relative displacement remains plane. The proposed method is verified through comparison with uni-axis and multi-axes cyclic loading experiments, and multi-axes response at joint are discussed.