

論文 柱梁接合部の力学的特性を変数としたRCフレーム構造のパラメトリック解析

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、柱梁接合部における力学的挙動を表現可能な著者等既往の解析法を用いて、柱梁接合部のせん断特性と付着特性を変数としたパラメトリック解析を行い、RCフレーム構造の性能評価に及ぼす影響について解析的な考察を行ったものである。本論文ではまず、RCフレーム構造の解析法について概述し、既往の実験結果を対象としたパラメトリック解析を行った結果、柱梁接合部における力学的挙動は相互に作用を及ぼし合い、特に接合部のせん断特性がRCフレーム全体に及ぼす影響が大きいこと、主筋の付着性状が接合部のせん断変形に影響を及ぼす可能性があること等について解析的に示した。

キーワード: 付着すべり、せん断変形、相互作用、柱梁接合部、RCフレーム構造、材料非線形解析

1. はじめに

近年、構造材料の高強度化によって従来に比べてよりスレンダーな梁・柱部材をRCフレーム構造に適用するケースが増えつつある。このようなRC部材を用いた場合には必然的に柱断面が縮小化されるため、柱梁接合部には従来に比べより過度の応力負担が強いられることになり、結果として柱梁接合部にせん断変形等による損傷が生じてRCフレーム全体の変形挙動に大きな影響を及ぼす可能性がある。

更に、このような柱梁接合部周囲の応力レベルが高い状態となる場合には主筋の抜け出しについても顕著となる場合が多く、これが付着劣化にまで発展してコンクリートと主筋の一体性が損なわれれば、主筋の付着力を介した応力伝達作用が変化するものと想定される。即ち、柱梁接合部における主筋の付着性状とパネルのせん断変形との間には密接な関連性があるものと推察でき、より高精度なRCフレーム構造の性能評価を行うためには、これら力学的挙動の相互作用による影響を適切に把握・評価する必要があると思われる。

著者等はこれまでに柱梁接合部の主筋の付着すべり・パネルのせん断変形を考慮したRCフレーム構造の材料非線形解析法¹⁾について報告している。本論文はこの解析法を用いて、柱梁接合部における変形挙動を特徴付ける上述の力学的挙動の特性を変数とするパラメトリック解析を行った結果について報告するものである。本論文ではまず、柱梁接合部の力学的挙動を表現可能な著者等既往の解析法の概要について記述し、次いで、既往のRCフレーム構造の実験結果を対象としたパラメトリック解析を実施し、柱梁接合部における主筋の付着すべり現

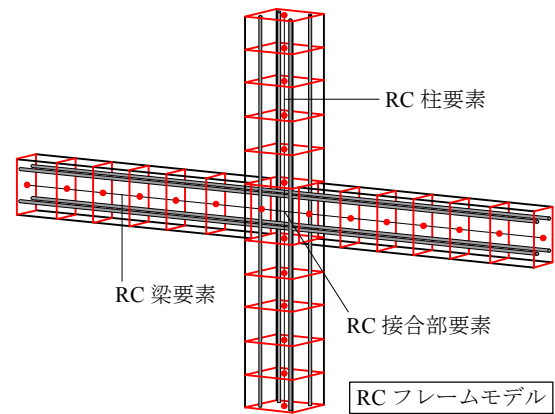


図-1 RCフレームモデルの基本構成

象とパネルのせん断変形との間の関係性がRCフレーム構造全体の耐震性能評価に及ぼす影響について考察を行っている。

2. 柱梁接合部の力学的挙動を考慮したRCフレーム構造の材料非線形解析法

本論文で用いる柱梁接合部の力学的挙動を考慮したRCフレーム構造の材料非線形解析法¹⁾の概要について記述する。本解析法では、図-1に示すような「RC梁・柱要素」と「RC接合部要素」の2つの解析モデルを組み合わせることでRCフレーム構造をモデル化する。各解析モデルの概要を以下に示す。

2.1 鉄筋の付着すべりを考慮したRC梁・柱要素

図-2は、本解析法の基本構成要素である鉄筋の付着すべりを考慮したRC梁・柱要素²⁾について示したものである。この要素は図に示すように、要素断面を仮想分

*1 北海道大学大学院工学研究科 日本学術振興会特別研究員 PD 博士(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 名誉教授 博士(工学) (正会員)
 *4 北海道大学大学院工学研究科 教授 博士(工学)

割して取り扱うファイバーモデルを用いたもので要素各節点には配筋された任意の数の鉄筋のすべり変位を設定可能であり、鉄筋の付着すべり現象を直接表現することが可能である。

2.2 鉄筋の付着すべり・パネルのせん断変形を考慮した RC 接合部要素

図-3は、鉄筋の付着すべり・パネルのせん断変形を考慮したRC接合部要素¹⁾の概要について表したものである。この要素は図中の点線で示すような様なせん断変形を仮定した4節点を持つ平面パネル要素と、鉄筋のすべり変位を自由度として設定した鉄筋要素で構成したものである。平面パネル要素には、図中の4つの節点 l, r, b, t を設定しており、パネル部分のせん断歪増分 $\Delta\gamma$ を x 軸、 z 軸方向におけるせん断変形の成分の重ね合わせとして次式のように表現し、この関係を解析法に組み込むことで、接合部パネルのせん断変形を表現する。

$$\Delta\gamma = (\Delta u_b - \Delta u_t)/H + (\Delta w_r - \Delta w_l)/W \quad (1)$$

但し、 H : 柱梁接合部の高さ、 W : 柱梁接合部の幅
鉄筋要素の両端部の節点に設定したすべり変位については、図のようにせん断変形が生じる接合部断面からの相対変位量として表現する。また、接合部内部には鉄筋のすべり変位を表す任意の内部節点を設定することで、内部のすべり分布についてもより詳細に表現可能である。

2.3 解析に用いた材料モデル

本解析法で用いた材料モデルは、コンクリートおよび鉄筋の応力-歪関係、鉄筋の付着応力-すべり変位関係、接合部パネルのせん断応力-せん断歪関係の4種である。前者2種については著者等の既報告²⁾と同様であり、ここではパラメトリック解析に関係した後者2種の材料モデルについて概説する。

(1) 鉄筋の付着応力-すべり変位関係

図-4は本解析で用いた鉄筋の付着応力-すべり変位関係を示したものである。単調載荷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 τ_3 を基準として決定する。繰り返し載荷経路については、繰り返し荷重下の鉄筋の付着応力-すべり変位関係を引抜供試体を用いて実験的に計測し、実験結果から履歴則のモデル化を行っている森田等の研究³⁾に基づく図中に示すような経路を用いている。また、鉄筋の付着強度は周囲のコンクリートの応力状態や鉄筋の歪の状態等の種々の影響要因により変化することが予想されたため、本解析法では付着強度 τ_3 を算定するにあたっては、各種要因による付着強度への影響を係数 $\alpha_{1\sim5}$ によりそれぞれ表現し、それらを考慮したLowes等が提案する付着強度式⁴⁾を採用する。本解析法では、この提案式を基にして各種影響要因が考慮された付着強度 τ_3 およびその時点でのすべり量 s_3 を次式¹⁾により設定する。

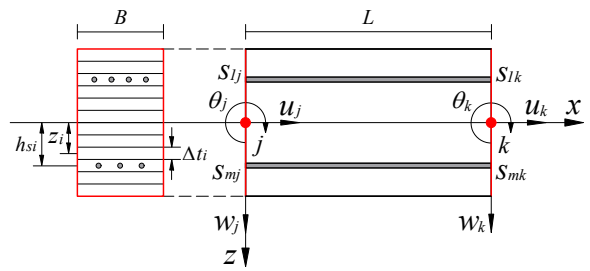


図-2 RC梁・柱要素

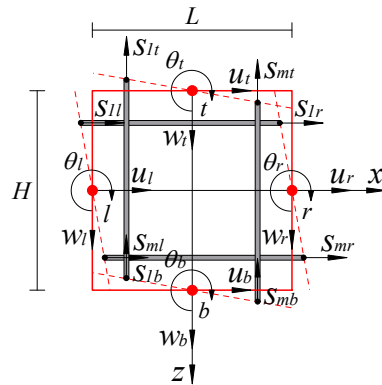


図-3 RC接合部要素

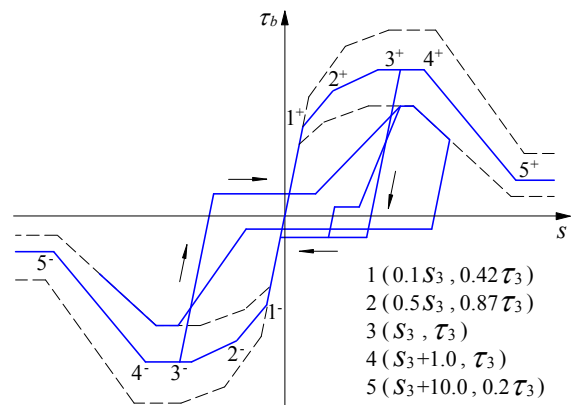


図-4 鉄筋の付着応力-すべり関係

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

$$s_3 = \tau_3 / 20.0 [mm] \quad (3)$$

$$\text{ここに、} \tau_3' = 1.05 \sqrt{f_c} [N/mm^2]$$

但し、 $\alpha_{1\sim5}$: それぞれ各種要因が付着強度に及ぼす影響を表す係数 (α_1 : 鉄筋周囲のコンクリート応力状態、 α_2 : 鉄筋の歪、 α_3 : 鉄筋のすべり履歴、 α_4 : 鉄筋径、 α_5 : 鉄筋のかぶり厚さ)、 f_c : コンクリートの圧縮強度

この提案式を用いて解析実行中に付着強度を逐次更新することで、図中の実線で表した単調載荷時の基本経路は、破線で表すような付着強度が増減した経路に再設定されるものとする。

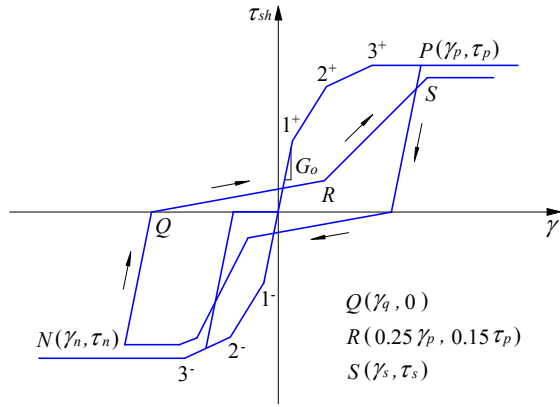


図-5 接合部パネルのせん断応力-せん断歪関係

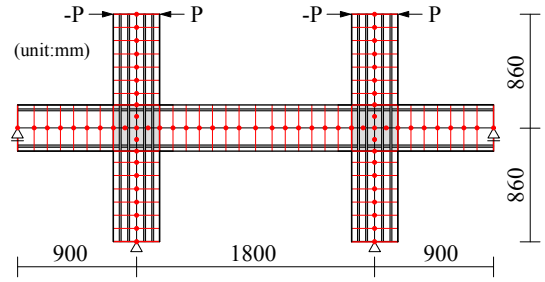
(2) 接合部パネルのせん断応力-せん断歪関係

図-5は本解析法で用いた接合部パネルのせん断応力-せん断歪関係について表したものである。単調荷重経路には正側、負側ともに最大せん断応力(図中の点3)までを図のようなトリリニア型の経路で設定し、点3以降については最大せん断応力で一定値とする経路を仮定する。この最大せん断応力に至るまでの図中の点1~3の値を決定するにあたっては、Vecchio, Collins等の提案する修正圧縮場理論⁵⁾を用いた予備解析を別途行い、得られた曲線を近似して設定する。修正圧縮場理論は、対象とするRC部材を平均的な歪・応力が作用する様な要素として捉え、収束計算によって、部材中に配筋されている主筋、せん断補強筋の力の釣合い条件と要素の変形の適合条件を満足するような解をせん断特性として算定可能な手法である。尚、予備解析で用いたコンクリート、鉄筋の材料特性については文献5)で用いられているものと同様とする。繰り返し荷重経路については、接合部パネルの繰り返し荷重によるせん断応力の低下や応力復帰時の剛性低下を考慮することで、柱梁接合部における損傷を表現可能なLowes等の提案したモデル⁶⁾を採用する。このモデルでは点Q, R, Sで表される代表的な除荷・再荷重経路上の各点の値は図中のように設定されており、応力復帰点Sのせん断応力 τ_s 、せん断歪 γ_s は次式で表される。

$$\tau_s = (1 - d_t) \tau_p = \{1 - 1.11 (g_m)^{0.32}\} \tau_p \quad (4)$$

$$\gamma_s = (1 + d_g) \gamma_p = \{1 + 0.12 (g_m)^{0.23}\} \gamma_p \quad (5)$$

但し、 d_t : 最大せん断応力の低減を表すための変数で、 $d_t \leq 0.125$ 、 d_g : 再荷重時剛性の低減を表すための変数で、 $d_g \leq 0.95$ 、 g_m : 接合部パネルの損傷度合を表すための変数で、 $\left| \frac{\gamma^+}{\gamma_s} \right|, \left| \frac{\gamma^-}{\gamma_s} \right|$ のうち最大値、 γ^+ : 正側において経験した最大せん断歪、 γ^- : 負側において経験した最大せん断歪
尚、本解析では除荷時の剛性に初期剛性 G_o を設定する。



コンクリート	初期剛性: 34104 N/mm ²
	圧縮強度: -44.5 N/mm ²
	引張強度: 3.35 N/mm ²
	圧縮強度時歪: -0.26 %
梁主筋 D-16	初期剛性: 188302 N/mm ²
	二次剛性: 1883.0 N/mm ²
	降伏強度: 346.1 N/mm ²
	降伏時歪: 0.1838 %
柱主筋 D-22	初期剛性: 192774 N/mm ²
	二次剛性: 1927.7 N/mm ²
	降伏強度: 363.2 N/mm ²
	降伏時歪: 0.1884 %
接合部補強筋 D-10	初期剛性: 175924 N/mm ²
	降伏強度: 409.2 N/mm ²
	降伏時歪: 0.2326 %

接合部の仮定せん断特性
 1 (0.009%, 2.214 N/mm²)
 2 (0.328%, 4.325 N/mm²)
 3 (1.220%, 5.207 N/mm²)
 図-5中の各特性点の値を表す特性点(せん断歪, せん断応力)

図-6 試験体 M1 の要素分割と材料特性

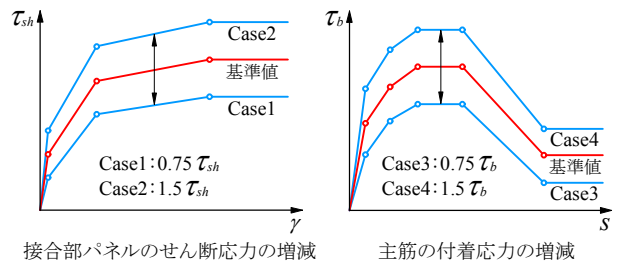


図-7 各解析 Case のパラメータ

3. 姜・北山等の RC フレーム試験体 M1 を対象としたパラメトリック解析

姜・北山等の行った実験結果のうち RC フレーム試験体 M1⁷⁾を取り上げ、接合部パネルのせん断特性と主筋の付着特性の値を変数としてパラメトリック解析を行う。図-6に解析対象とする試験体 M1 の要素分割、材料性状および修正圧縮場理論を用いた予備解析から得られた接合部パネルのせん断特性について示す。この試験体は柱梁接合部を2つ有するサ型の RC フレーム試験体であり、内法スパンが 1450mm の中央梁を有している。試験体は梁曲げ降伏先行型の設計が行われているが、梁スパンが比較的小さいため曲げ降伏後に柱梁接合部におい

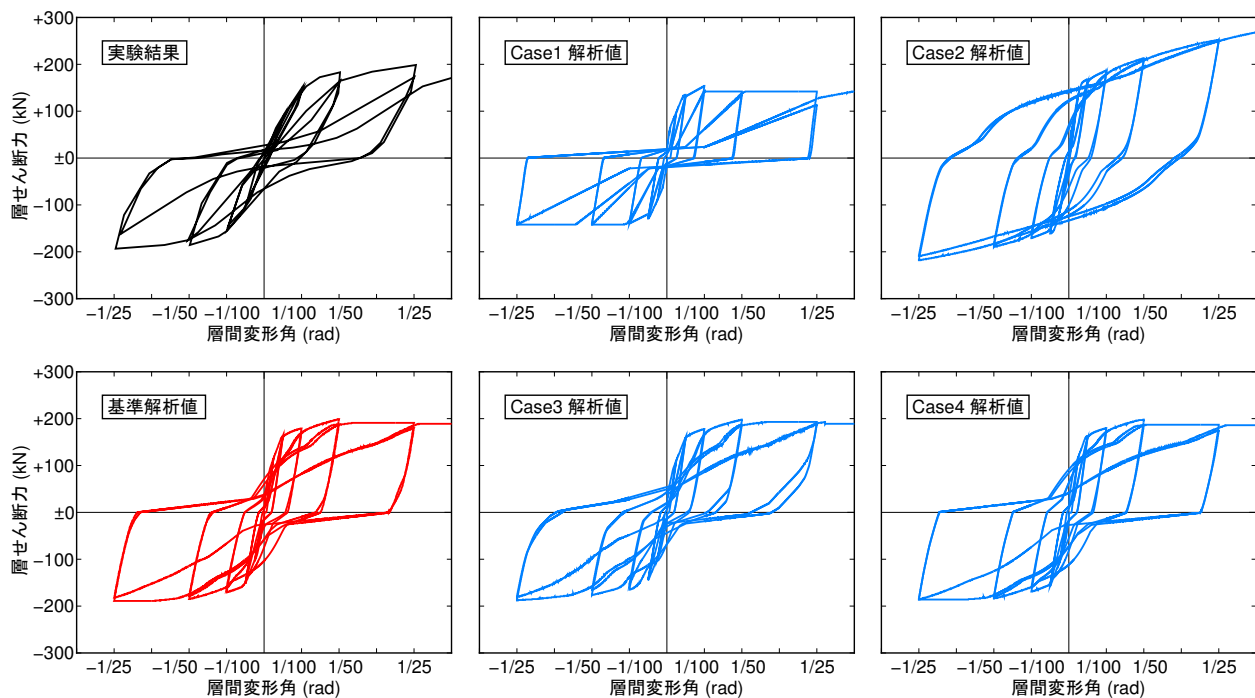


図-8 層せん断力-層間変形角関係の比較

てせん断変形による損傷が生じている。試験体の支持条件は柱脚がピン支持、梁端部がピンローラー支持であり、柱頭部分での正負交番繰返し载荷が層間変形角 $1/400$ rad で1サイクル、 $1/200$ rad、 $1/100$ rad、 $1/50$ rad、 $1/25$ rad で各2サイクルを変位制御により行われている。また、柱軸力は加えられていない。

解析は変位増分法を用いて行い、解析にあたっては梁・柱部材を要素長 100 mm を基本として、左右梁部材、柱部材を7要素、中央梁については14要素に要素分割した。また、梁・柱の断面はいずれも51層に分割し、接合部内部の付着すべり分布を表示するための内部節点数については3点を設定した。

図-7にパラメトリック解析にあたり設定したパラメータについて示す。本解析で用いるパラメータは、(1)接合部パネルのせん断特性、(2)主筋の付着特性の2種類であり、図のように応力値をそれぞれ基準値から増減させたものを設定する。このときの基準値は、接合部パネルのせん断特性については修正圧縮場理論に基づく予備解析より得られたトリリニア型の経路の値、主筋の付着特性については(4)、(5)式より定まる図-4中の点1~5で表した各経路の値とした。尚、主筋の付着特性のパラメータの設定による増減についてはRCフレーム全体の主筋に適用するものとする。以下に本解析で設定した各解析Caseについて記述する。

- Case1 : 接合部の基準せん断応力値を0.75倍に低下
- Case2 : 接合部の基準せん断応力値を1.5倍に増加
- Case3 : 主筋の基準付着応力値を0.75倍に低下

Case4 : 主筋の基準付着応力値を1.5倍に増加

図-8に実験結果と各解析結果における層せん断力-層間変形角関係の比較を示す。図中には各パラメータの基準値を用いた場合の基準解析値¹⁾についても併記してある。まず、接合部パネルのせん断特性を変化させた場合のCase1、Case2の解析値について比較を行う。パネルのせん断特性を基準値よりも低く設定した場合のCase1では、基準解析値に比べて層せん断力を約25%程度過小に評価し、履歴ループも直線的な形状となっている。これはせん断応力を低下させたことによって接合部パネルのせん断変形がフレーム全体の変形挙動に対して支配的となったために、この影響が表れたものである。特にループ形状に関しては実験結果、基準解析値ともに明確に異なっている。続いてCase2について見ると、履歴ループ形状はより紡錘形となり、最大耐力についても実験結果や基準解析値に比べて過大に評価していることが読み取れる。この結果は接合部パネル部分を剛体と仮定した場合の解析値¹⁾とほぼ一致する。これらの解析結果は換言すると、パネルのせん断特性はRCフレーム構造の応答に関して、特に履歴ループ形状に影響するとともに、柱梁接合部の損傷度合に起因した最大耐力の評価に大きく影響するものと考えられる。

続いて、主筋の付着特性を変化させた場合のCase3、Case4の解析値についての比較を行う。まず、主筋の付着応力を基準値の0.75倍として低下させたCase3では、除荷・再載荷時の剛性が途中から低下していることが見てとれ、層間変形角 $1/50$ rad 以降で特に基準解析値との

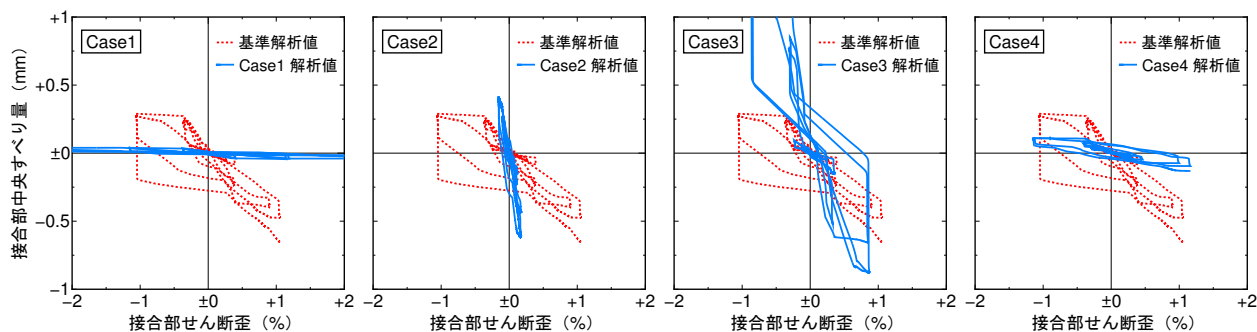


図-9 接合部中央位置の上端主筋のすべり量-接合部せん断歪関係の比較

違いが表れている。これはパネルのせん断変形の影響による逆S字型のスリップ形状が表れていることに加えて、主筋のすべりが生じたことによって更にエネルギー吸収能力が低下したことを示しているものと考えられる。次にCase4を見ると、主筋の付着状態をより良好に設定したことで基準解析値と比べると若干異なる箇所もあるものの、両者はほぼ同一の形状を表しており、主筋の付着性状を向上させて抜け出しを抑制した場合についてもパネルのせん断変形がRCフレーム全体に及ぼす影響が大きく表れていることを示している。

パラメトリック解析により得られたRCフレームの変形挙動の相違を明確にするため、図-9に接合部中央位置における梁上端主筋のすべり量と接合部パネルのせん断歪の関係について各解析Caseで示す。図中に表記してある点線は基準解析値での結果を表している。また、本解析では基準解析値において層間変形角1/25rad以降では接合部パネルのせん断歪を過大に評価する傾向が見られたため、ここではすべて層間変形角1/50radまでの結果を表している。まず、接合部パネルのせん断応力値を変化させたCase1, Case2の解析値について見てみると、基準値よりせん断応力を低下させたCase1における解析値では接合部のせん断歪が増加し、これに伴って柱梁接合部内部では主筋のすべり量が大幅に減少している様子が読み取れる。この結果は先の層せん断力-層間変形角関係における比較でも示したように、全体変形のうち接合部パネルのせん断変形の占める割合が支配的となったことで梁の曲げ変形が抑制され、梁端部での主筋の抜け出し量も低下したことを示しているものと考えられる。続いて、Case2の解析結果ではパネルのせん断応力を基準値から増加させたことでせん断変形が大幅に減少している様子が示されているが、主筋のすべり量に関しては基準解析値との大きな相違は認められない。この原因としては、解析対象とした試験体が梁曲げ降伏後に接合部での損傷が顕著となるタイプのRCフレーム構造であり、Case2の解析においても接合部パネルのせん断変形の影響が大きく表れ始める層間変形角1/50rad程度

までは梁の曲げ変形が基準解析値と同程度生じたことに起因するものと推察される。

次に、主筋の付着特性を変化させたCase3, Case4の解析結果について見てみる。まず、Case3では付着状態を悪くしたことで早期に付着劣化が生じており、主筋のすべり量が大幅に増加している。また、パネルのせん断変形量については基準解析値に比べて若干減少している様子が読み取れるが、これは付着応力を低下させたことによって、柱梁接合部パネルに生じるせん断力が変化したことによるものと考えられる。続いて、Case4の解析結果を見ると付着応力値を増加させることで主筋のすべり量が抑制されるとともに、パネルのせん断変形量は若干増加することが読み取れ、層間変形角1/50rad時点では基準解析値に比べて接合部パネルのせん断歪の値で0.2%程度の増加が見られた。この現象は、Case3の解析結果の場合とは逆に主筋の付着状態を良好とすることで柱梁接合部で生じる主筋の抜け出しは減少し、抜け出しによるRCフレーム全体の性能低下は抑制される反面、接合部パネルのせん断変形については増加傾向となる可能性があることを示唆したものである。

図-10は各解析Caseにおける全体変形角に占める各部材の変形割合の比較について示したものである。変形の内訳は接合部パネルのせん断変形、柱梁接合部からの梁・柱主筋の抜け出しによる付加回転変形、梁・柱の曲げ変形で分けた表示としている。梁・柱主筋の抜け出しによる変形割合については、文献8)の考え方を参考に、解析結果で得られた柱梁接合部端部の引張側となる主筋のすべり変位を柱梁接合部からの抜け出し量と仮定し、付加回転変形を求める方法で算出した。まず、接合部パネルのせん断応力を低下させた(a)Case1の解析値について見てみると、層間変形角1/400radの段階から接合部のせん断変形の割合が30%程度を占め、その後も変形は増加傾向にある。また、载荷初期の層間変形角1/400radでは梁・柱ともある程度の曲げ変形が生じているものの、その後の接合部のせん断変形の増加によりそれぞれ減少傾向にあることが読み取れる。(b)Case2の解析値で

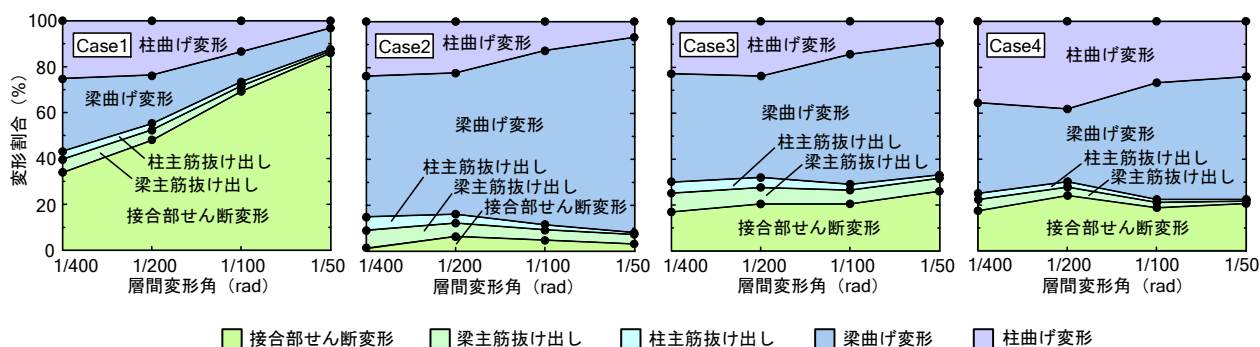


図-10 全体変形角に占める各部材の変形割合の比較

は接合部のせん断応力を増加させたことでパネル部分のせん断変形が大幅に抑制されている。Case2では全体を通して梁の曲げ変形が全体に占める割合が60~80%と高く、梁曲げ降伏の影響が顕著に表れた結果となっており、先の図-8で表示した履歴ループ形状や最大耐力の相違の原因がここに表れている。次に、主筋の付着特性を変化させたCase3, Case4の解析値について比較を行う。それぞれの解析値についてまず主筋の変形割合について注目すると、付着特性を低下させたCase3では抜け出しによる変形が全般的に大きく、これに対して付着状態を良好としたCase4では抜け出し変形が減少しており、ごく妥当な結果が得られている。また、先の図-9における比較でも指摘したように、主筋の付着特性を変化させることで接合部のせん断変形が全体変形に占める割合も変化しており、柱梁接合部における力学的挙動の相互作用の影響がここに表れているものと考えられる。

4. まとめ

本論文では、「柱梁接合部における力学的特性を変数としたRCフレーム構造のパラメトリック解析」について論じた。即ちまず、柱梁接合部における主筋の付着すべりと接合部パネルのせん断変形を表現可能な著者等既往のRCフレーム構造の解析法の概要について記述し、この解析法を用いて柱梁接合部における力学的特性値を変数としたパラメトリック解析を行った。その結果、接合部パネルのせん断特性と主筋の付着特性は相互に影響を及ぼすことを解析的に確認し、特に接合部のせん断特性はRCフレーム全体の履歴ループ、最大耐力に大きな影響を及ぼすこと、柱梁接合部における主筋の付着性状を良好に保持することで抜け出しによる損傷が抑制できる反面、接合部パネルのせん断変形を増長させる可能性があること等について示した。

参考文献

- 1) 齊藤隆典, 越川武晃, 上田正生, 菊地優: 接合部のせん断変形を考慮したRC骨組の非線形挙動解析, 日本建築学会構造系論文集, 第622号, pp.99-106, 2007.12
- 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梁部材の材料非線形解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.37-42, 2004.7
- 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
- 5) Frank J. Vecchio, Michael P. Collins: The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, Vol.83, No.2, pp.219-231, 1986.3-4
- 6) Laura N. Lowes, Arash Altoontash: Modeling Reinforced-Concrete Beam-Column Joints Subjected to Cyclic Loading, Journal of Structural Engineering, Vol.129, No.12, pp.1686-1697, 2003.12
- 7) 姜柱, 北山和宏, 香山恆毅, 古田智基: 鉄筋コンクリート骨組内の梁通し筋の付着特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp.297-302, 1995.
- 8) 村上秀夫, 藤井栄, 森田司郎: 鉄筋コンクリート造内部柱・梁接合部単位架構の変形性能に関する検討(接合部データベース解析その2), 日本建築学会構造系論文集, 第523号, pp.103-110, 1999.9