

論文 境界条件をパラメトリックに考慮したRC偏心柱・梁接合部に関する解析的研究

村山 聡^{*1}・吉澤 徳康^{*2}・柏崎 隆志^{*3}・野口 博^{*4}

要旨：RC偏心柱・梁接合部に関して、3次元非線形FEM解析を行い実験結果との比較を行なった。また実際の構造体の中での偏心柱・梁接合部の挙動について検討するため、偏心接合部を上下に3層連結させることによって互いの層が与えあう振りを考慮した条件下で解析を行なった。さらに振りを伝え合う相互伝達メカニズムについて検討するため、軸力をパラメトリックに考慮し振り剛性を変化させることにより偏心と軸力の影響を総合的に把握することを目的とした。結果として、単層のみの試験体では振り挙動を過大に評価し、実際の構造体における偏心接合部よりも耐力低下の傾向が明確に見られることが分かった。

キーワード：RC、偏心接合部、FEM、繰返し荷重

1. はじめに

偏心接合したRC柱・梁接合部が水平力を受けた場合、接合部に振りモーメントが発生し、その影響を受けせん断強度が低下することが既往の研究で指摘されている。また、地震力を受けた際、柱梁接合部は隣接する部材の影響を受け3次的で複雑な挙動を示す。しかし既往の研究のように独立した部分架構試験体では上下、左右に隣接する部材からの影響を考慮することは困難である。

そこで本研究では偏心接合部における偏心率、断面形状が接合部の損傷へ与える影響について、広沢ら¹⁾が行なった実験試験体を用いて解析的研究を行なった。また、実際に実験が行なわれた試験体だけではなく、各層の相互作用の影響について考察を行なうため試験体を3層に重ねた仮想試験体を作成し、各層の相互作用の影響について考察を行なった。

2. 解析モデル

本研究では、余・野口らにより開発され、洪により改良された3次元FEM解析プログラム²⁾を用いた。コンクリート要素はアイソパラメトリック8節点ソリッド要素、構成則には Darwin-Pecknold²⁾の等価一軸ひずみに基づく直交異方性非弾性モデルを3次元に拡張したモデルを用いた。破壊曲面は Willam-Warnke²⁾の5パラメータモデルを用いて表現し、Kupferらの基礎実験データを使用し曲面を作成した。応力-ひずみ関係は圧縮側の上昇域では高強度コンクリートモデルの Fafitis-Shah 式³⁾、下降域では横補強筋の拘束効果を考慮した Kent-Park 式⁴⁾により定義した。引張側の下降域では、Tension Stiffness 効果を

考慮した白井式⁵⁾により定義した。ひび割れたコンクリートの圧縮強度低減には飯塚式⁶⁾、ひび割れモデルは回転ひび割れモデル、ひび割れ方向のせん断伝達特性には Al-Mahaidi モデル⁷⁾を使用した。また、鉄筋要素は鉄筋軸方向のみに剛性を有する2節点トラス要素、応力-ひずみ関係には Bi-linear モデルを用いた。鉄筋とコンクリート間の付着の応力-すべり関係には森田・角モデル⁸⁾を用いた。

3. 偏心柱・梁接合部に関するFEM解析

3.1 解析概要

解析対象試験体は、広沢らによって実験が行なわれた偏心柱・梁接合部とした。E000 は非偏心試験体、E085 はE000 と柱断面は同じだが、梁を柱の側面に揃えた偏心量 85mm の試験体、E135 は柱の強軸と弱軸を入れ換え、さらに梁を柱の側面に揃えて偏心させた $e=135\text{mm}$ の試験体である。図-1 に試験体形状、表-1 に各試験体柱断面、表-2 に試験体一覧、表-3 に材料特性を示す。

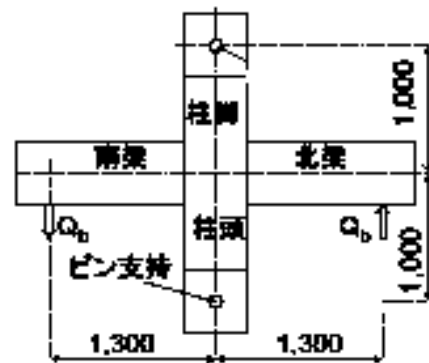


図-1 試験体形状

*1 株式会社 日立システムアンドサービス (前千葉大学 大学院自然科学研究科 建築専攻) 工修 (正会員)
 *2 千葉大学 大学院工学研究科 建築・都市科学専攻建築学コース 大学院
 *3 千葉大学 大学院工学研究科 建築・都市科学専攻建築学コース 助教 工修 (正会員)
 *4 千葉大学 大学院工学研究科 建築・都市科学専攻建築学コース 教授 工修 (正会員)

表-1 柱断面一覧

柱断面			
	試験体 01-E000	試験体 01-E085	試験体 01-E135

表-2 試験体一覧

試験体名	01-E000	01-E085	01-E135
柱断面(mm×mm)	500×400	500×400	300×500
横補強筋量	D10@100	D10@100	D10@100
梁断面(mm×mm)	230×500	230×500	230×450
引張主筋量	6-D19(二段)	6-D19(二段)	4-D19(二段)
偏心量(mm)	0	85	135

表-3 材料特性

コンクリート	ヤング係数(N/mm ²)		コンクリート強度(N/mm ²)	
		1.68×10 ⁴		23.3
主筋(D19)	ヤング係数(N/mm ²)		降伏強度(N/mm ²)	
	2.05×10 ⁵		384	
横補強筋(D10)	ヤング係数(N/mm ²)		降伏強度(N/mm ²)	
	2.05×10 ⁵		358	

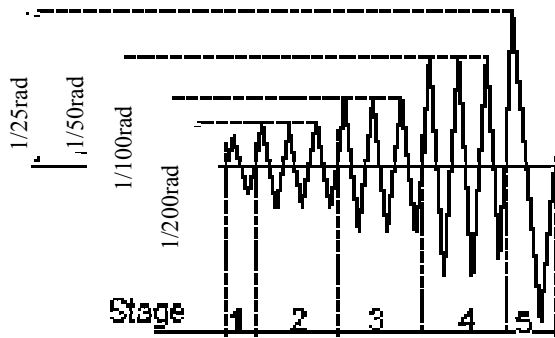


図-2 加力履歴

加力方法は応力度 ($\sigma_0=5.88\text{MPa}$) の圧縮軸力を加え一定に保持し、その後加力梁の両端部に正負繰返し荷重を与える。加力サイクルは、第一サイクルにおいて層間変形角 $R=1/400$ を一サイクル、以降 $R=1/200$ 、 $1/100$ 、 $1/50$ においてそれぞれ正負各三回、 $R=1/25$ で正負各一回の繰返し載荷が行なわれた。図-2 に加力履歴を示す。

3 解析結果

(1) 層せん断力-層間変形角関係

図-3 に層せん断力-層間変形角関係を示す。全ての試験体に関して初期剛性が実験結果よりもやや高くなったが、最大耐力は実験結果と良好な対応を示した。試験体 01-E000 は、一段目梁主筋降伏後に接合部横補強筋が降伏し、その後最大耐力に至った。試験体 01-E085 に関しては、試験体 01-E000 と同じく、一段目梁主筋降伏後に接合部横補強筋が降伏したが、最大耐力は試験体 01-E000 の 90% になった。偏心接合による振りモーメントが発生し、接合部のせん断耐力の低下につながったためと

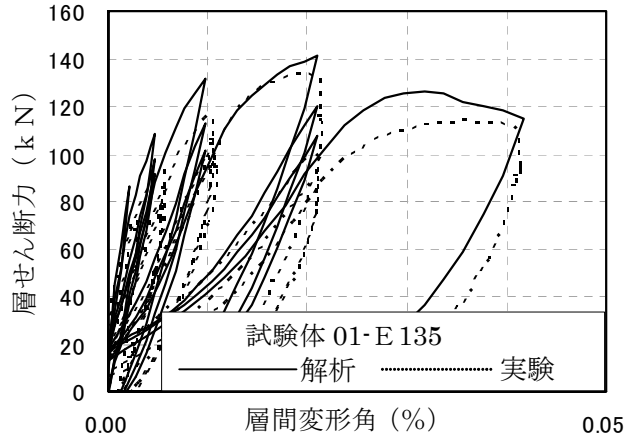
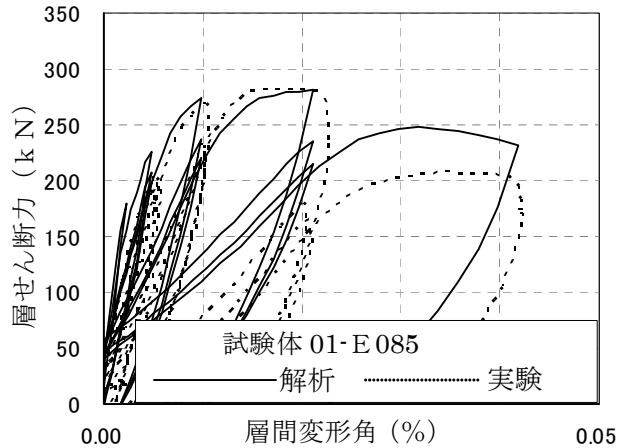
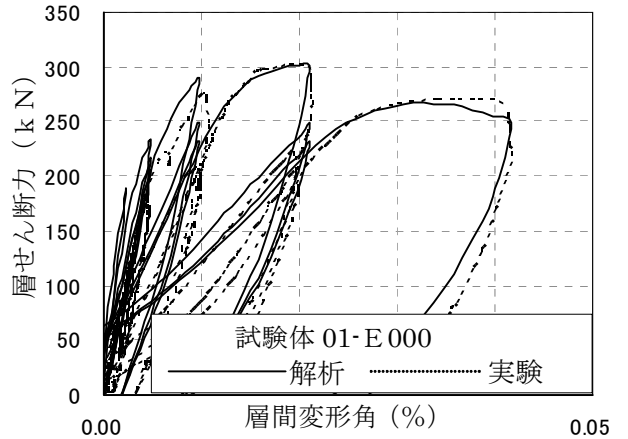


図-3 層せん断力-層間変形角関係

考えられる。試験体 01-E135 に関しては、梁主筋の降伏は発生せず、接合部コアコンクリートのせん断破壊が進行しせん断補強筋の降伏後、脆性的な耐力低下を示した。

(2) 累積消費ひずみエネルギー

各試験体の部材ごとの累積消費ひずみエネルギー各部材負担率を図-4 に示す。試験体 01-E000 について最終サイクルでは接合部の負担率が梁負担率を若干上回り、全体の 6 割程を負担した。試験体 01-E085 では梁の負担率は徐々に減少するが、接合部負担率は最終サイクルにおいては全体の 6 割程度を負担した。接合部のせん断破壊が進行し消費ひずみエネルギーが接合部に集中したことが分かる。試験体 01-E135 に関しては梁部材は

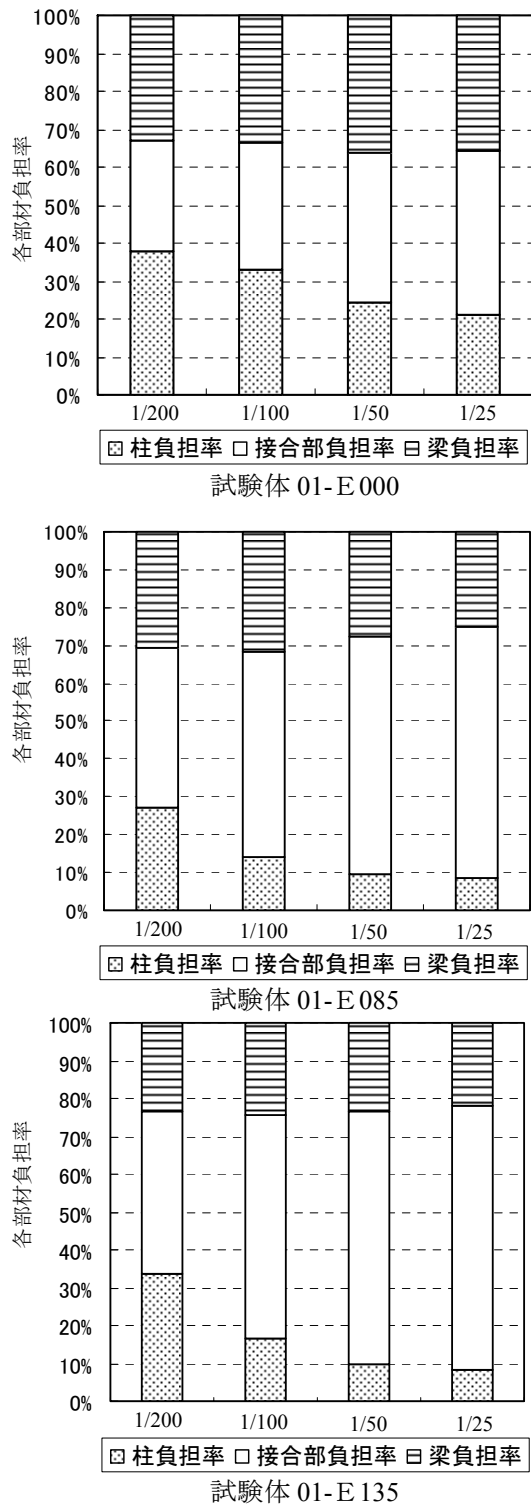


図-4 各部材の累積消費ひずみエネルギー負担率

どのサイクルにおいてもほぼ一定の負担率を保ち、接合部のせん断破壊が進行したと考えられる。

(3) 最大耐力時接合部内最小主応力図

各試験体の最大耐力時における接合部内最小主応力分布を図-5 に示す。破線で囲った部分に圧縮域が集中しており、試験体 01-E000 では両側の梁の付に発生した圧縮域を結ぶように圧縮ストラットが形成されている。試験体 01-E085 では圧縮域は概ね偏心側に偏っている

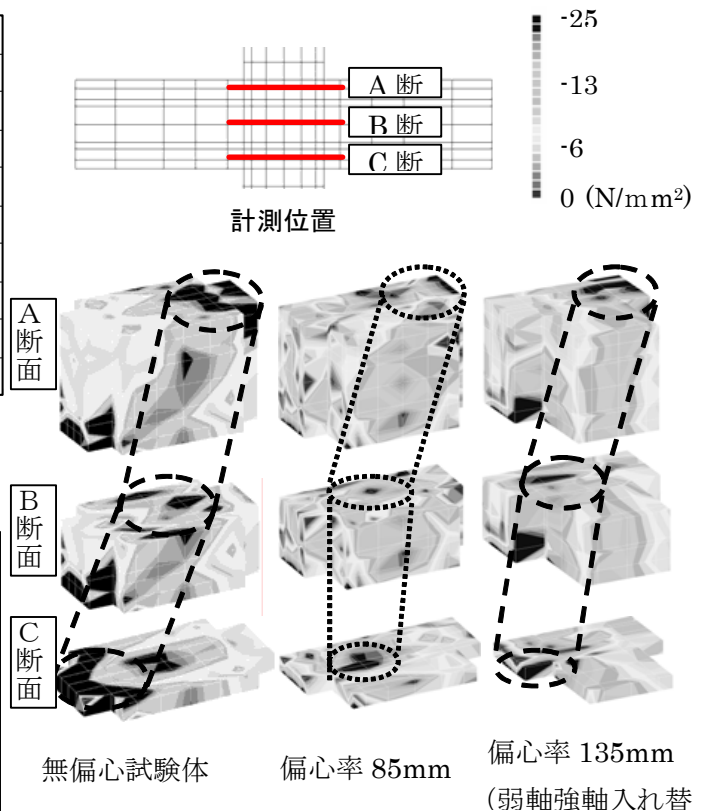


図-5 接合部内最小主応力分布

が圧縮域の分布はまばらであり、明確な圧縮ストラットではない。試験体 01-E135 では偏心側にストラット状の圧縮域を明確に見ることが出来る。

4 3層試験体に関するFEM解析

4.1 解析概要

解析対象試験体は、3章で用いた試験体を上下に3層連結させた3層試験体全3体とする。軸力は各層ごとに作用させ、2層部に作用させる軸力を単層試験体と等しく作用させ、両試験体の比較検討を行なう。最下層の柱脚をピン支持、最上層柱頭をローラ支持し、上下層から与えられる振りの影響を考慮し、試験体全体の曲げ変形を防ぐため各層の境界にZ方向のローラ支持を加えた。単調載荷解析とする。図-6に要素分割図を示す。

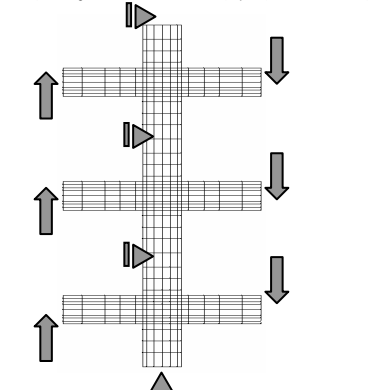


図-6 3層試験体要素分割図

4.2 解析結果

(1) 層せん断力－層間変形角関係

図-7 に3層試験体2層部と単層試験体の層せん断力－層間変形角関係を示す。全ての試験体について、初期剛性は単層試験体と3層試験体はほぼ一致しているという結果になった。試験体 01-E 000 に関して、最大耐力の差は10kN 程となった。試験体 01-E 085 に関して、3層試験体の最大耐力は単層試験体の1.14 倍になった。試験体 01-E 135 の試験体に関して最大耐力は3層試験体の方が約1.25 倍という結果になった。単層試験体と3層試験体における最大耐力の差と偏心量は比例関係にあり、偏心量が大きいほど3層試験体は単層試験体より大変形時に最大耐力となった。

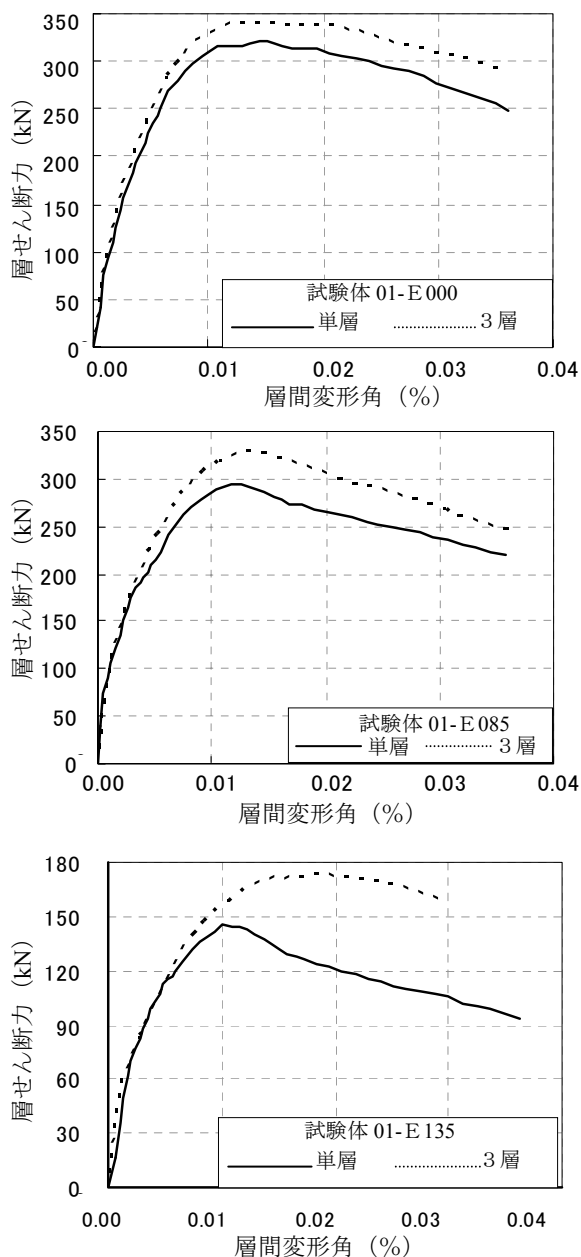


図-7 層せん断力－層間変形角

(2) 振り率

図-8 に試験体 01-E 085、01-E 135 の3層試験体2層部と単層試験体の振り率を示す。なお、試験体 01-E 000 では無偏心の試験体のため振りは殆ど発生していなかった。

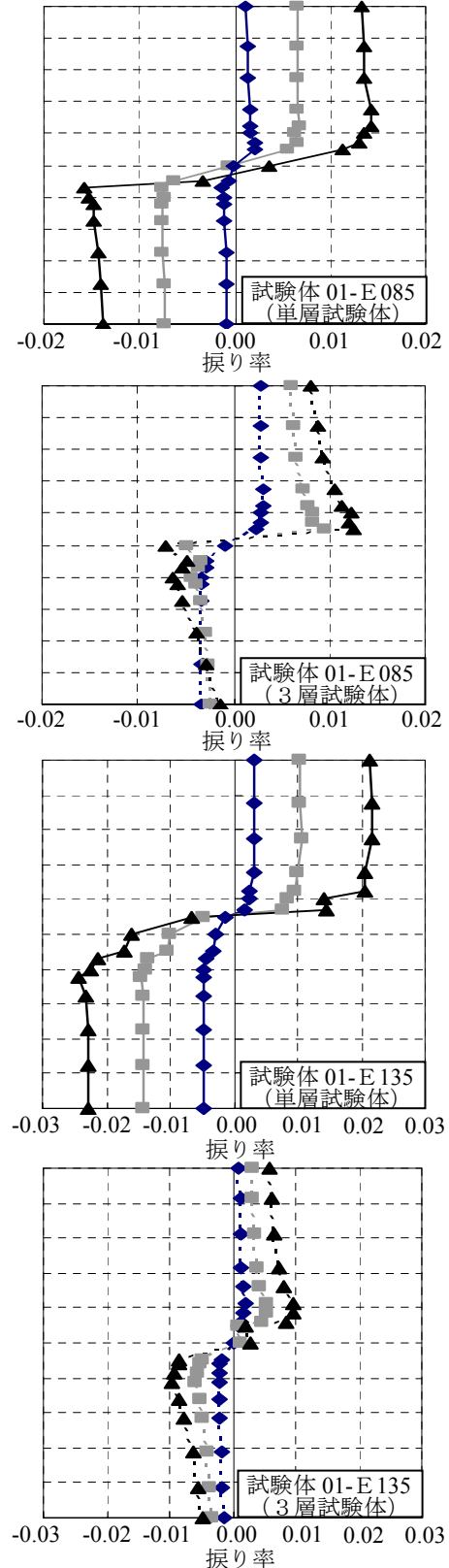


図-8 振り率

試験体 01-E085、01-E135 どちらも単層試験体が3層試験体よりも大きく振れている。また単層試験体と3層試験体に見られる振り率の差は層間変形角の増加とともに大きくなった。3層試験体では柱を通して上下の偏心接合部から逆向きモーメントが作用し、それが伝達されることにより2層部の接合部に発生する振りを小さくしたと考えられる。2層部接合部に発生する振りを減少させる傾向は偏心量が大きいほど、強く見られる結果となり、試験体 01-E135 ではどの層間変形角時においても単層試験体の 1/3 程度の振り率になるという結果になった。

4.3 軸力比をパラメトリックに考慮した解析結果

軸力比を変化させることで剛性は変化し、振りの相互伝達メカニズムに多様な影響を与えることが分かっている。偏心率と軸力の関係を検討するため、軸力をパラメトリックに変化させ3層及び単層試験体の比較検討を行なうことを目的とする。

(1) 層せん断力—層間変形角関係

図-9 に試験体 01-E085、01-E135 において単層試験体の軸力比 0.3 時の最大耐力を 1 とした場合の両試験体の各軸力比の最大耐力比を示す。試験体 01-E085 について、軸力比 0.3 の時に単層試験体と3層試験体の最大耐力の差は最大となり、軸力比の増大とともにその差は小さくなった。試験体 01-E135 では軸力比の増大とともに最大耐力の差が増大した。層せん断力—層間変形角関係でも軸力比 0.3 時では最大耐力以降緩やかに耐力低下していく様子が見られたが、軸力比 0.4、0.5 時では最大耐力以降一定の耐力を保ったまま、変形が進行していくという結果になり、軸力比 0.3 時では接合部せん断破壊型、軸力比 0.4、0.5 時では梁主筋降伏型と破壊パターンの違いが考えられる。

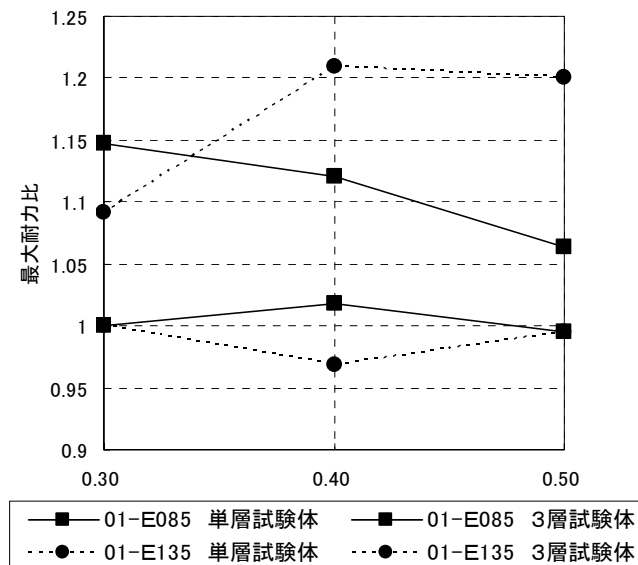


図-9 最大耐力比—軸力比関係

(2) 接合部内振り率—層間変形角関係

図-10 に試験体 01-E085、01-E135 の3層試験体2層部と単層試験体の各軸力比別の接合部内振り率—層間変形角関係を示す。試験体 01-E085 では軸力比の増大とともに単層試験体と3層試験体の接合部内振り率の差は大きくなった。特に軸力比 0.5 時では3層試験体において接合部内振り率が大きく減少していることが分かる。軸力の増大とともに剛性は大きくなり接合部振り率が小さくなったと考えられる。一方で接合部コアコンクリートの圧縮破壊が助長されたため図-7 で見られたような耐力低下につながったと考えられる。試験体 01-E135 については試験体 01-E085 と逆の傾向が見られ、軸力比の増大とともにその差は縮小していく傾向が見られた。3層試験体ではどの軸力比でも同じ傾向を示すが単層試験体では軸力が大きくなるほど、振り率が小さくなっていく結果となった。柱断面の弱軸と強軸を入れ替

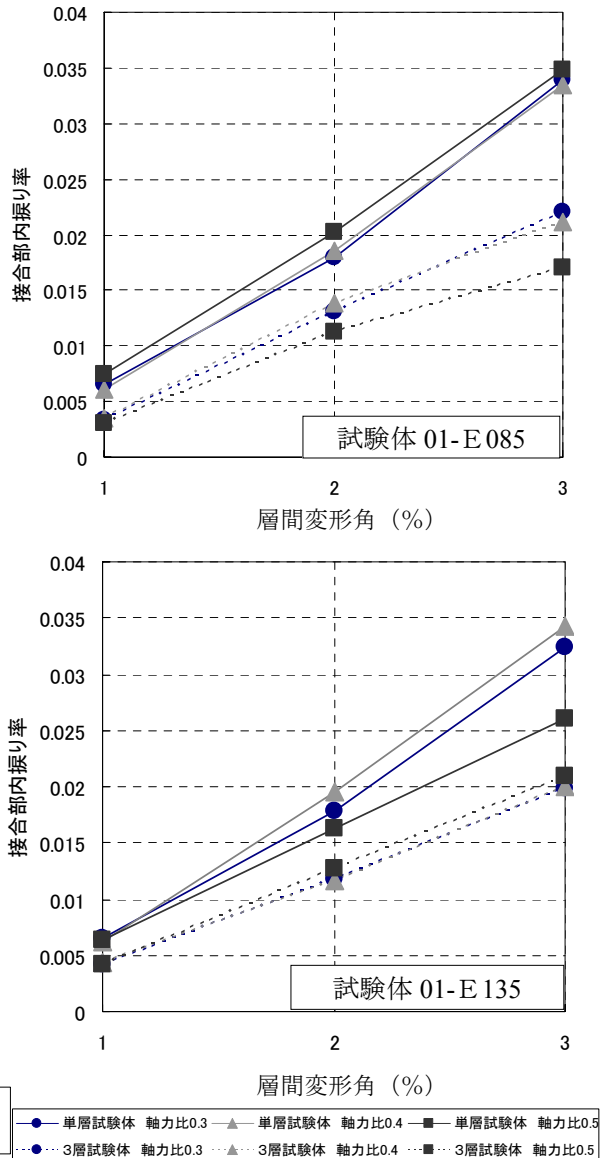


図-10 接合部内振り率—層間変形角関係

えているためこういった結果になったと考えられる。3層試験体では軸力比に関係なく上下の層からの振り抑制の影響を受けやすいということ、また単層試験体では、軸力の増大とともに振り剛性が増加したということが影響している。

(3) 累積消費ひずみエネルギー

3.4 累積吸収ひずみエネルギーおよび変形

累積吸収ひずみエネルギーの定義は以下の式 (1) による。

$$\Delta U = \int_V \int_{\epsilon_i}^{\epsilon_j} \sigma_{ij} \cdot d\epsilon_{ij} \cdot dV$$

$$U = \sum \Delta U \quad (1)$$

なお、式 (1) の記号は、 U : 累積吸収ひずみエネルギー

、 V : 要素体積、 σ_{ij} : 微小区間の平均応力、 ϵ_{ij} : ひずみ増分である。

コンクリート要素のひずみエネルギーは、各積分点ごとに計算を行う。RC としての累積吸収ひずみエネルギーは、鉄筋要素と付着要素のエネルギーをコンクリート要素のエネルギーへ加えることにより、定量的に求めた。

図-11 に試験体 01-E085、01-E135 の累積消費ひずみエネルギーの3層試験体における単層試験体との差を示す。どちらの試験体においても接合部に発生したひずみエネルギーは単層試験体よりも減少し、梁の負担エネルギーが増加するという結果となった。その傾向は軸力比と比例し大きくなった。試験体 01-E135 では上下に連結させることで明確な差を導く結果となった。偏心率が大きく上下から逆向きの振りモーメントが伝わりやすいためと考えられる。

5.まとめ

(1) 3次元FEM解析を用いてRC偏心柱・梁接合部の振りによるせん断強度低下の特徴をとらえることが出来た。

(2) 3層試験体と単層試験体との比較を行ない、実際の挙動により近い条件下において、検討を行なうことが出来た。

(3) 単層試験体のみの実験、解析では実際の構造体よりも振り挙動を過大に評価し、破壊パターンが接合部せん断破壊型になりやすいといえる。

参考文献

1) 近藤龍哉, 黒澤亮太郎, 佐藤学, 広沢雅也: RC造偏心柱梁接合部のせん断及び振り変形と応力に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.2, pp.367-372, 2002 2) 余勇, 柏崎隆志, 野口博: RC構造部材の3次元繰返し載荷時のFEM解析プログラム

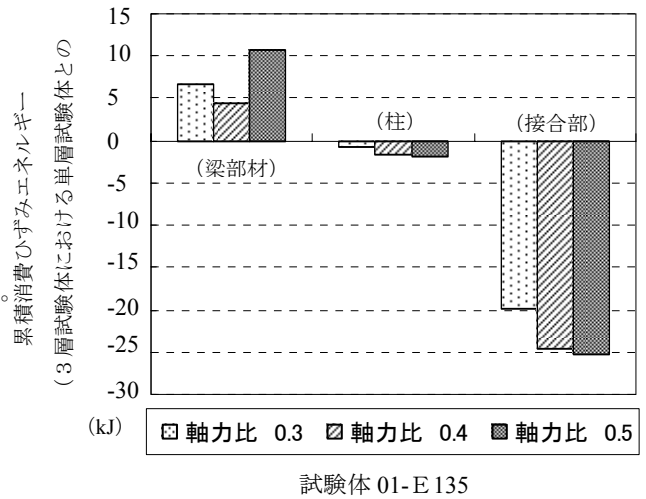
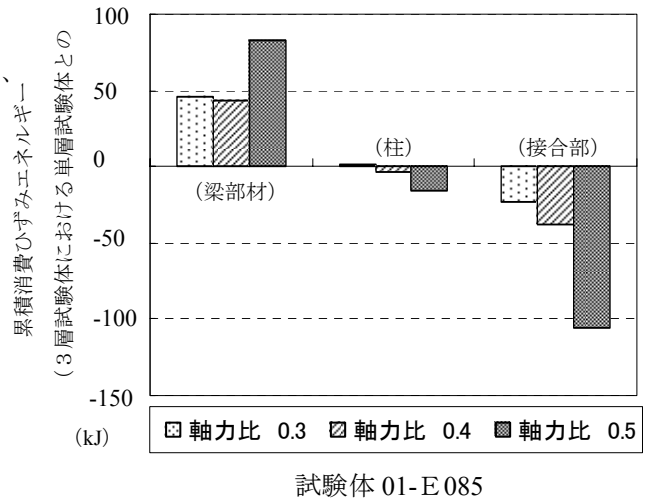


図-11 累積消費ひずみエネルギー

の開発 (その1, 2), 日本建築学会大会(北海道)学術講演梗概集, C-2, pp.67-70, 2004年8月3) Fafitis, F., and Shah, S.P.: Lateral Reinforcement for High Strength Concrete Columns, ACI Journal, pp.213-232, 1985. 4) Kent, D.C., and Park, R.: Flexural Members with Confined Concrete, Proceedings of ASCE, Vol.97, No.ST7, pp.1969-1990, 1971. 5) 佐藤稔雄, 白井伸明: 鉄筋コンクリート造耐震壁の弾塑性性状に関する研究(その6), (その7), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1615-1618, 1978 6) 飯塚崇文: 普通強度から高強度までの材料を用いた鉄筋コンクリートの構成則と有限要素解析に関する研究, 千葉大学学位論文, 1992 7) Al-Mahaidi, R. S. h.: Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, Report No.79-1, Department of Structural Engineering, Cornell University, Jan.1979 8) 森田司郎, 角徹三: 繰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 No.299, pp.15-24, 1975.3