

平成 21 年 5 月 27 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560563
 研究課題名（和文） 3次元有限要素法による繰り返し載荷時のRC柱・梁接合部の耐震性能評価法の開発
 研究課題名（英文） Seismic Performance Evaluation of Reinforced Concrete Beam-Column Joints using Three-Dimensional Finite Element Method
 研究代表者
 氏名（ローマ字）：柏崎 隆志（KASHIWAZAKI TAKASHI）
 所属機関・部局・職：千葉大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号：40251178

研究成果の概要：

鉄筋コンクリート（RC）建物を対象とした従来の許容応力度設計法は、社会基盤構築に対して多大なる貢献を果たしてきた。一方、実験的研究に基づく許容応力度設計法は、その実験範囲の制約や経済的負担等の問題点も指摘されている。最近の性能評価設計法への移行の中、許容応力度設計法の問題点の解決策として、有限要素法（FEM）等の解析的研究による合理的な耐震性能評価法の開発が求められている。

本研究では、繰り返し載荷時のRC柱・梁接合部の3次元非線形FEM解析を行い、接合部の地震時挙動に影響を与える各種因子のパラメータ解析を実施した。FEM解析から得られるコンクリートや鉄筋の応力、ひずみ状況の詳細な考察や接合部の損傷、劣化の定量化を行い、柱・梁接合部の耐震性能評価法の開発について検討した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：鉄筋コンクリート構造

科研費の分科・細目：建築学、建築構造・材料

キーワード：鉄筋コンクリート、柱・梁接合部、耐震、性能評価、有限要素法、3次元解析

1. 研究開始当初の背景

RC 靱性保証型耐震設計指針（1997）や RC 構造計算規準（1999）では、柱・梁接合部の耐震規定として、（1）接合部せん断入力制限、（2）柱・梁主筋の付着劣化の制限、（3）接合部内の最小横補強筋比の制限等により、脆性的な接合部せん断破壊を防止し、隣接部材の安全性能の確保を目的としている。具体

的には、既往の実験的研究により蓄積されたデータを用いて統計的処理を行い、柱・梁接合部のせん断耐力や柱・梁主筋の付着強度の下限推定式を定める。次に、この下限推定式を設計時の短期許容応力度とし、地震時の柱・梁接合部のせん断応力度や柱・梁主筋の付着応力度が、この短期許容応力度を超えないことを確認する。すなわち、従来の柱や梁

のせん断設計法に準じた、いわゆる許容応力度設計法に基づいている。わが国では、中低層 RC 建物の構造設計は、許容応力度設計法によりこれまで行なわれてきており、非常に有用な構造設計法ではあるが、一方、設計時に重要な精度の高い許容応力度を求めるためには、実験的研究によるデータの蓄積が不可欠であり、その実験範囲の制約や経済的負担などの問題点も指摘されている。

また、最近の RC 構造設計の分野では、従来の許容応力度設計法から限界状態設計法、更には性能評価設計法への移行が望まれる動きがある。これは、従来の許容応力度設計法では不明確であった構造物の各種限界状態（使用、設計、終局限界状態）あるいは耐震性能を明確にし、設計対象建物の性能評価を的確に行えるようにすることが目的であり、柱・梁接合部の部材設計においても耐震性能評価法の確立が必要である。

さらに、性能評価設計法への移行の動きとともに、柱・梁接合部等の構造部材の耐震性能を把握するために有効な解析的アプローチが、前述の許容応力度設計法の問題点を解決する一つ的手段として注目されている。つまり、実験は構造部材の基本的な地震時挙動を把握することを目的として必要最低限に抑え、実験を補完するために有限要素法（FEM）等の解析的研究により、構造部材の地震時挙動を解明し、応力伝達機構に基づく合理的な耐震性能評価法の開発が可能である。

RC 柱・梁接合部のせん断抵抗機構に関する先駆的な研究としては、R. Park と T. Paulay（1975）による研究が挙げられる。R. Park と T. Paulay は、コンクリートストラット機構とトラス機構の累加が接合部せん断抵抗機構であると提案している。また、国内では、実験データに基づく接合部せん断耐力の提案が上村（1975）によって行われた。市之瀬（1988）、藤井（1989）、塩原（1991、2000）は、詳細な実験結果に基づく接合部内部応力の釣り合いからせん断抵抗機構のマクロモデルを提案しているが、せん断破壊の再現やせん断耐力の予測までには至っていない。

FEM 解析例としては、大和田（1979～）、林（1984）、野口（1984）、柏崎、野口（1994、1996、1997、2000）、李、小谷（1995）による研究がなされているが、2次元 FEM による検討が殆どである。3次元 FEM による検討は、柏崎、野口（2001、2004～2006）により行われているが、主に単調荷重による解析のため、繰り返し荷重時の性能評価は今後の課題とされている。3次元 FEM による繰り返し荷重時の検討として、米澤、長沼（2002）による解析例が挙げられるが、接合部の損傷、劣化の定量化や性能評価法の開発

には至っていない。

2. 研究の目的

本研究では、繰り返し荷重時の RC 柱・梁接合部を対象として 3次元非線形 FEM 解析を行い、接合部の地震時挙動に影響を与える各種因子のパラメータ解析を実施する。FEM 解析から得られる接合部周辺のコンクリートや鉄筋の応力、ひずみ状況の詳細な考察から応力伝達機構を考察する。また、繰り返し荷重時の柱・梁接合部の履歴吸収エネルギー、等価粘性減衰特性や残留変形などから、柱・梁接合部の損傷、劣化の定量化を行い、各種限界状態との関連について解明し、合理的な柱・梁接合部の耐震性能評価法の開発に寄与することを目的とする。

3. 研究の方法

繰り返し荷重時の RC 柱・梁接合部を対象として 3次元非線形 FEM 解析を行い、接合部の地震時挙動に影響を与える各種因子のパラメータ解析を実施した。FEM 解析から得られる接合部周辺のコンクリートや鉄筋の応力やひずみ状況、ひび割れ等の損傷状況の詳細な考察から応力伝達機構を考察した。また、既存の計算機能力を向上させる高速な演算能力と大容量の記憶装置を有するワークステーションを購入して、解析的な研究を実施するための環境を整備した。特に、非線形 3次元有限要素解析では、大容量の入力データの処理、膨大な計算結果の処理などを合理化することが必要であり、入力データ作成や解析結果のデータ抽出、視覚化等のプレ・ポストプロセッサ処理も含めて、その計算環境の整備を行った。

研究代表者である柏崎隆志は、RC 及び PC 柱・梁接合部の耐震性能の解明を目的として、これまで研究を行ってきた。本研究では、研究総括と FEM 解析の計画立案、ならびにその実施を行った。具体的には、繰り返し荷重時の柱・梁接合部の解析を実施し、応力伝達機構の解明や応力伝達機構に基づく接合部せん断耐力モデルの検討を行った。また、耐震性能評価法の開発計画立案を行った。研究分担者である野口博は、長年にわたり鉄筋コンクリート構造を対象とした非線形 3次元有限要素解析プログラムを開発し、その妥当性を検証してきた。その経験と実績を活かし、本研究では、研究目的を確実に遂行するための合理的な FEM 解析の計画立案、ならびに耐震性能評価法の開発計画立案を担当した。

4. 研究成果

本研究の主な成果等について、テーマ毎に分類し、以下で簡潔に述べる。

(1) 一方向地震入力時の RC 柱・梁接合部の耐震性能に関するパラメータ解析

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：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合う振りを考慮した条件下で解析を行った。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て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。

繰返し載荷時の直交部材付き RC 偏心柱・梁接合部の耐震性能に関する解析的研究：柱心と梁心が偏心して接合した柱・梁接合部について、直交梁およびスラブの有無をパラメータとして取り上げ、正負交番繰返し載荷時の3次元FEM解析を行い、直交梁およびスラブが偏心側および非偏心側に付く場合や、偏心のない柱・梁接合部の片側および両側に付く場合の荷重変形関係やせん断耐力、ひび割れの発生状況、接合部内部のせん断変形、振り変形、圧縮主応力の伝達やせん断応力分布について検討を行った。

解析結果から、偏心接合した場合に偏心側に偏って高応力度で圧縮応力が伝達されることや、直交梁およびスラブが付くことにより応力集中が緩和されてせん断耐力が改善されるなどの知見が得られた。

3次元FEM解析によるRC造柱・梁接合部のせん断強度に関する研究：柱と梁の偏心接合以外に、接合部での梁主筋の付着性状や横補強筋量をパラメータとした接合部せん断破壊型のRC造平面柱・梁接合部について3次元FEM解析を行い、接合部コンクリートの圧壊や有効圧縮強度に関する検討以外に、ストラット方向の応力成分に関する定量的分析を行った。

解析的検討より、パラメータに関係なく最大耐力時の接合部内部にはほぼ同程度の圧縮力を伝達する領域が存在すること、付着性状は主にストラットせい方向の応力分布に、横補強筋量と偏心接合は主にストラット幅方向の応力分布に影響を及ぼすことなどを示した。またこれらの成果に基づいて偏心接合を含む柱・梁接合部のせん断強度式を提案した。

(2) 多方向地震入力時の RC 柱・梁接合部の耐震性能に関するパラメータ解析

3次元FEMによる2方向載荷時のRC外柱・梁接合部の耐震性能に関する解析的研究：2方向加力を受ける外柱・梁接合部の既

往の実験試験体を対象として、実験結果との比較により解析手法の検証を行うとともに、直交方向の梁の拘束効果、床スラブの影響、2方向載荷履歴等の各影響因子を評価することを目的として3次元FEM解析を実施した。さらに、累積吸収ひずみエネルギーによる性能評価を行い、立体柱・梁接合部の柱、梁、接合部のエネルギー吸収状況の検討を行った。

梁主筋付着性状を変化させたRC立体柱・梁接合部の解析的研究：接合部破壊型スラブ無しRC平面・立体柱・梁接合部試験体を対象として、3次元FEM解析を行った。実験結果との比較により解析手法の検証を行うとともに、実験では観察が難しい内部応力の検討などを行った。

解析結果は、実験より剛性が高いものの、最大耐力は実験とよい対応を示した。接合部内付着の有無により、試験体の破壊性状に差異が認められた。圧縮主応力分布について、立体試験体では対角断面などの検討によりストラットの形成状況に平面試験体と同様な傾向が確認された。

(3) RC骨組内の柱・梁接合部の耐震性能に関するパラメータ解析

3次元FEMによる降伏型が異なるRCスラブ付きフレームの耐震性能に関する解析的研究：実験では確認することの難しいRCスラブ付きフレームの立体的な変形や応力状態を把握するために、スラブ付き2層1スパンラーメンを対象として、3次元非線形FEM解析を行った。梁降伏先行型と柱降伏先行型の2体を解析し比較することにより、降伏型の違いがどのように解析できるかを検討した。

梁降伏型と柱降伏型の応力分布、変形の違いが3次元的に表現できたことに加え、ひびわれ進展状況や累積吸収ひずみエネルギーの検討から、柱降伏型では柱への損傷が集中することが解析的にわかった。

RC立体骨組内の偏心柱・梁接合部の耐震性能に関する解析的研究：地震力を受けるRC立体骨組内の柱・梁接合部は、周辺部材と相互に連動し合うため、柱・梁接合部単体の挙動とは異なると考えられる。特に、偏心柱・梁接合部は、ねじりモーメントやスラブ、直交梁の拘束効果等の影響を受けるため、周辺部材との相互関係を把握することが重要である。本研究では、3次元非線形FEM解析により、梁の偏心量が柱・梁接合部の耐震性能に与える影響について解析的に検討した。

FEM解析により実験結果の検証を行い、さらに偏心梁による柱・梁接合部のねじれは、スラブの取り付け領域が大きいほど抑制されることを確認した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計7件)

三浦浩太、坂下智幸、柏崎隆志、野口博：梁主筋付着性状を変化させたRC立体柱・梁接合部の解析的研究、コンクリート工学年次論文集、31-3、2009年、査読有(掲載決定)

洪杰、柏崎隆志、野口博：3次元FEM解析によるRC造柱・梁接合部のせん断強度に関する研究、コンクリート工学年次論文集、31-3、2009年、査読有(掲載決定)

洪杰、柏崎隆志、野口博：繰返し載荷時の直交部材付きRC偏心柱・梁接合部の耐震性能に関する解析的研究、コンクリート工学年次論文集、30-3、pp.331-336、2008年、査読有

村山聡、吉澤徳康、柏崎隆志、野口博：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、コンクリート工学年次論文集、30-3、pp.355-360、2008年、査読有

柏崎隆志、高橋誠、野口博：RC立体骨組内の偏心柱・梁接合部の耐震性能に関する解析的研究、コンクリート工学年次論文集、30-3、pp.379-384、2008年、査読有

加藤恒樹、柏崎隆志、野口博：3次元FEMによる2方向載荷時のRC外柱・梁接合部の耐震性能に関する解析的研究、コンクリート工学年次論文集、29-3、pp.265-270、2007年、査読有

月山由紀子、柏崎隆志、野口博：3次元FEMによる降伏型が異なるRCスラブ付きフレームの耐震性能に関する解析的研究、コンクリート工学年次論文集、29-3、pp.301-306、2007年、査読有

[学会発表](計5件)

吉澤徳康、村山聡、柏崎隆志、野口博：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(その1：単層試験体に関する検討)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造、B、pp.315-316、2008.9

村山聡、吉澤徳康、柏崎隆志、野口博：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(その2：3層試験体(仮想試験体)に関する検討)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造、B、pp.317-318、2008.9

三浦浩太、洪杰、柏崎隆志、野口博：繰返し載荷時の直交部材付きRC偏心柱・梁接合部の耐震性能に関する解析的研究(その1：解析概要および層せん断力-層間変形角関係)、日本建築学会大会学術講演梗概

集、構造、C、pp.185-186、2008.9

洪杰、三浦浩太、柏崎隆志、野口博：繰返し載荷時の直交部材付きRC偏心柱・梁接合部の耐震性能に関する解析的研究(その2：解析結果の検討)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造、C、pp.187-188、2008.9

高橋誠、柏崎隆志、野口博：梁偏心接合を有するRC骨組内の柱・梁接合部の耐震性能に関する解析的考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造、C-2、pp.623-624、2007.8

6. 研究組織

(1)研究代表者

柏崎 隆志 (KASHIWAZAKI TAKASHI)
千葉大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：40251178

(2)研究分担者

(3)連携研究者

野口 博 (NOGUCHI HIROSHI)
千葉大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：20107535