

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360248

研究課題名(和文) 力学モデルによる鉄筋コンクリート柱・梁接合部の耐震設計法の確立

研究課題名(英文) Development of seismic design for reinforced concrete beam-column joint based on mechanical model

研究代表者

塩原 等 (SHIOHARA HITOSHI)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：50272365

研究成果の概要(和文)：鉄筋コンクリート構造の耐震設計における定説とは相異なり、柱と梁の強度の比が一般的な構造設計の目標値とされる 1.0 から 1.5 程度では、主筋量の多寡やコンクリート強度によらず柱と梁の交差部が破壊し、構造物が従来の予測を下回る耐震性能しか発揮しない現象とその原因を理論的な力学モデルにより予測・解明し、幅広い変数を有する十字形とト形柱梁接合部試験体の実験により検証し、さらに、これらの知見に基づいて鉄筋コンクリート柱梁接合部の新しい耐震設計法を提案した。

研究成果の概要(英文)：It is discovered that reinforced concrete beam-column joints failure is inevitable and lateral capacity and ductility of the structure are inferior to what expected by current design codes, provided that the column-to-beam strength ratio is in the range of from 1.0 to 1.5, which has been common range in design and construction practice for reinforced concrete building structure. It is also found that the increase in joint shear capacity margin and concrete strength can not alter the beam-column joint performance. This is significantly contrary to the established knowledge to date for four decades on seismic design of reinforced concrete structure. It is proved theoretically by a new mechanical model and experimentally by comprehensive series of seismic tests of beam-column joint specimens with wide variety of design parameters. Based on the fact discovered, a safer, more reliable and more rational seismic design method has been proposed.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|------------|
| 2008年度 | 5,100,000 | 1,530,000 | 6,630,000 |
| 2009年度 | 3,400,000 | 1,020,000 | 4,420,000 |
| 2010年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 総計 | 9,100,000 | 1,730,000 | 11,830,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造材料

キーワード：コンクリート構造

1. 研究開始当初の背景

(1) 鉄筋コンクリート柱・梁接合部は、現在にいたるまで、日本・米国を含めて各国の柱・梁接合部の設計法が、実験に基づく経験的・工学的判断による評価による方法に留ま

ってきた。また、柱梁接合部には接続する部材の種類、寸法、形状、柱・梁の配筋量、接合部のアスペクト比、直交部材の有無、などの極めて多くのバリエーションがあり、作用する外力も、梁偏心、緊張力の有無、柱梁内の

反曲点位置の変動、2方向加力など多くのバリエーションがあるが、それらのパラメータの影響を推定する手法はなかった。そのため、申請者らは解析的研究を進め、柱・梁接合部に関する理論的な力学モデルを提案し、これらの理論を適用した解析結果から、上述の種々の因子が及ぼす影響を明確にすることができることを示した。

また、この理論的研究から予測されたことのうち、実務上の重要な問題点は、現行の耐震設計法で採用されている接合部せん断応力や接合部補強筋量などの諸制限をすべて満たしていても、柱梁曲げ強度比が1.5程度未満になると、接合部の強度が梁の強度を10～20%下回り、設計で期待される架構の強度が発揮されず、その上、接合部変形成分の割合が一方向的に増大し接合部損傷が集中することが予測され、耐震性能が大幅に低下することである。

(2) 一方、我が国の柱・梁接合部の現状の設計の現状は、超高層建物を除けば、ほとんどが柱梁曲げ強度比として1.0から1.5を目標として設計されており、多くの場合、耐震性能が想定通り発揮されない可能性があり極めて憂慮される状況にある。現行の経験式に基づく耐震設計法では柱梁曲げ強度比が全く考慮されないばかりか、柱梁曲げ強度に関する制限や柱梁曲げ強度比が1.0に近い場合の設計上の配慮の方法は全くされていない。これは、現行の設計法が実験を経験的に整理した経験式に基づくものであり、実験の中に柱梁曲げ強度比として1.0から1.5のものが含まれておらず、しかも、力学モデルに基づいていないところに最大の原因がある。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、鉄筋コンクリート造、や、プレストレストコンクリート造の十字形、ト字形柱梁接合部を対象として、上述の理論的なモデルに基づく推定結果が妥当であることを、実験により検証し、その精度が幅広いパラメータに関して十分であることを確認しておくために、柱梁曲げ強度比が主に1.0から1.5の場合の柱梁接合部の耐震実験を行い、柱梁接合部の各種設計変数がその強度・剛性・靱性・復元力特性に及ぼす影響に関する実験データを得るとともに、従来の経験式に基づく方法に代わる、力学モデルに基づいた統一的で首尾一貫した新しいより信頼性が高く合理的な耐震設計法を確立し提案することにある。

3. 研究の方法

(1) 現行の柱梁接合部における柱梁曲げ強度比の設計の目標とされる1.0から1.5程度の柱梁接合部を中心として、幅広い設計パラメ

ータを組み合わせ、柱梁接合部の縮小モデル試験体により、地震時の作用を想定した静的繰返し破壊実験を行う。

(2) 実験の変数は、十字形柱梁接合部においては、1)柱梁曲げ強度比、2)接合部せん断余裕度、3)コンクリート強度、4)柱せいと梁せいの比(アスペクト比)、5)柱幅とはり幅の比、6)梁芯と柱芯のずれ、7)通し主筋の付着性能等とし、ト字形柱梁接合部においては、1)柱梁曲げ強度比、2)接合部せん断応力度、3)梁主筋の定着長さ、4)折り曲げ定着・機械式定着の違い、5)柱せいと梁せいの比などとした。

(3) 実験結果を使い、上記の実験変数が、柱梁接合部の剛性・強度・靱性・復元力特性に及ぼす影響を分析するとともに、既に提案されている接合部終局強度に関する力学モデル及び設計式の検証を行う。

(4) 既往の柱梁接合部に関する実験結果について、文献調査により収集し、データベースを構築して、現行の設計法による評価の妥当性を検討する。また、データベースを使って新しい力学モデルの妥当性の検証を行い、既往の設計法との精度の比較を行う。

(5) これらの知見に基づいて、経験式に基づく現行の柱梁接合部の耐震設計法に代わる力学モデルに基づく合理的な耐震設計法と具体的な設計式を定式化して示す。

4. 研究成果

(1) 鉄筋コンクリート造十字形柱梁接合部の部分架構の水平加力実験により得られた主な知見は、以下のとおり。

①柱梁曲げ強度比が1.0～1.5の場合、柱の曲げ強度が梁の曲げ強度より大きい場合であっても柱主筋の降伏が生じる。接合部せん断力が小さい場合であっても、梁および柱の主筋降伏後に接合部の破壊が生じる。梁主筋の降伏荷重、架構の最大耐力は曲げ理論に基づく計算値よりも小さく、同形状、同配筋の梁であっても架構の強度は柱梁曲げ強度比が1に近いほど小さい。接合部破壊が生じた場合でも急激な耐力低下は生じない。履歴ループはエネルギー吸収能に乏しいスリップ型となり、柱の曲げ強度を大きくすることで等価粘性減衰定数は大きくなる。

②柱梁曲げ強度比が2.0程度の場合、架構の最大耐力はほぼ梁曲げ強度時の耐力となる。梁主筋および接合部横補強筋の降伏後に接合部に損傷が集中し、履歴ループはスリップ型である。

③柱せいが梁せいより大きい場合、柱梁曲げ強度比が1に近いと、接合部せん断余裕度にかかわらず梁および柱の主筋降伏後に接合部破壊が生じる。柱せいと梁せいが等しい場合に比べて接合部横補強筋および梁主筋の降伏が生じにくい。柱せいを大きくすることで梁の通し主筋の付着応力に関する余裕度を大きくしても履歴性状の改善はみられない。

④ 終局強度の計算値について。従来の接合部せん断強度に基づく設計法では、特に柱の曲げ強度と梁の曲げ強度が近い場合に架構の終局強度を過大に評価する。接合部の曲げ抵抗機構に基づく終局強度は、従来の設計法では考慮していない影響因子の効果も定量的に評価できる。

(2)鉄筋コンクリート造ト形柱梁接合部の部分架構の水平加力実験により得られた主な知見は、以下のとおり。

①最大層せん断力は、十字形柱梁接合部と同様に柱梁強度比の影響を大きく受ける。最大層せん断力は梁が同じであっても、柱梁強度比が1に近いほど小さくなる。横補強筋量が最低補強量程度の場合、梁主筋の定着長さで柱せいの比が0.8の試験体では、接合部せん断余裕度にかかわらず柱梁曲げ強度比1.5以下の試験体の最大層せん断力は梁曲げ終局時と接合部せん断強度時の計算値を下回った。梁主筋の定着長さで柱せいの比が0.65の場合では、柱梁曲げ強度比が1.8程度でも最大層せん断力が計算値を下回る試験体もあった。また、接合部せん断余裕度が1以上でも梁主筋の定着長さが大きいほど最大層せん断力は大きく、柱梁曲げ強度比が小さいほどその影響は顕著であった。

②最大層せん断力は、接合部横補強筋および接合部近傍の柱帯筋の量の影響を受ける。折り曲げ(U字型)定着とした試験体では、同配筋の機械式定着の試験体より10%~20%高い。従って、梁曲げ強度を発揮するために必要な柱梁強度比は、横補強筋量が多い場合や、折り曲げ定着では小さくなる。

③終局強度の計算値は、従来の設計法で採用されているものは、実験値を過大に推定し危険側となった。現行の設計法における架構の最大耐力の推定値は、設計で変動する柱-梁曲げ強度比、接合部の横補強筋量などの影響が考慮されていない。特に柱の曲げ強度の2倍と梁の曲げ強度が近い場合には、実際の架構の最大耐力は設計法における推定値を下回る。

④ト形柱梁接合部の力学モデルに基づいて求めた接合部の終局モーメントの実験結果に対する適合性はよく、設計における変動因子の影響も定量的に評価できている。

⑤接合部および柱の横補強筋量を現行の設計法で求められる最低補強筋量程度とした場合には、架構の最大耐力を梁曲げ強度時のものとするためには梁主筋の定着長さを柱の有効せいとして求めた柱の曲げ強度を梁曲げ強度に対して1.3倍程度以上とする必要がある。

(3) 既往の柱梁接合部の実験結果に関する実験のデータベースの分析により得られた知見は次の通り。

①既往の十字形柱梁接合部の実験データベースでは、現行の設計法の安全性を確認したとされる梁曲げ破壊型(B型)となった試験体のほとんどは柱梁曲げ強度比1.6以上にのみ分布しており、1.6を下回るものはなかった。そのほとんどが柱梁曲げ強度比が2.0を超えていた。柱梁曲げ強度比が1.6より小さい実験は全体の中での割合が極めて小さかった。新しい力学モデルに基づく柱梁接合部の終局強度式の妥当性と信頼性が確かめられた。

②既往のト形柱梁接合部の実験データベースでは、柱と梁の曲げ強度の比が1.5以下の試験体は全体の13%で少なかった。接合部せん断余裕度が1.0以上かつ柱と梁の曲げ強度の比が1.0~1.5の試験体で梁曲げ破壊となった試験体は全体の4%で、残りの試験体は接合部に損傷が集中する破壊となった。梁主筋が降伏しているにも関わらず梁の曲げ終局強度に達しない試験体が見られ、これらの試験体の60%が柱と梁の曲げ強度の比が2.0以下であった。

(4) 現行の接合部せん断強度の経験式ならびに通し主筋の付着応力度の制限に基づく柱梁接合部の耐震設計法を置き換えることのできる方法として、上記の実験的・理論的研究成果により得られた、力学モデルに基づいて、柱梁接合部の終局モーメント式と釣合破壊時の主筋量の算定式を用いて、合理的で首尾一貫した柱梁接合部の耐力と柱梁接合部の靱性能評価する方法を提案することができた。これらの発見と新しい設計法は、我が国のみならず世界各国の既存新築を問わずすべての鉄筋コンクリート造建物の耐震性を高めるために極めて有用な知見と技術である。

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6件)

- ① 楠原文雄, 塩原等. 鉄筋コンクリート造十字形柱梁接合部の終局モーメント算定法. 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第75巻第657号, 2010, pp. 2027-2035.
- ② 楠原文雄, 塩原等他. 柱と梁の曲げ強度の比が小さい鉄筋コンクリート造十字形柱梁接合部の耐震性能. 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第75巻第656号, 2010年, pp. 1873-1882.
- ③ 楠原文雄, 田崎渉, 塩原等. 柱と梁の曲げ終局強度が等しい十字形鉄筋コンクリート造柱梁接合部の破壊性状. コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 31, No.2, 2009, pp.313-318.
- ④ 塩原等. 鉄筋コンクリート柱梁接合部: 梁曲げ降伏型接合部の耐震設計. 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第74巻第640号, 2009年, pp. 1145-1154.
- ⑤ 塩原等. 鉄筋コンクリート柱梁接合部: 終局強度と部材端力の相互作用. 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第74巻第635号, 2009年, pp. 121-128.
- ⑥ 塩原等. 鉄筋コンクリート柱梁接合部: 見逃された破壊機構. 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第73巻第631号, 2008年, pp. 1641-1684.

[学会発表] (計8件)

- ① 楠原文雄, 塩原等. 鉄筋コンクリート十字形柱梁接合部の終局強度に及ぼす設計因子の影響. 第13回日本地震工学シンポジウム論文集, つくば国際会議場, 2010年11月, pp. 1398-1405.
- ② 朴星勇, 楠原文雄, 塩原等. 鉄筋コンクリート十字形柱梁接合部の復元力特性の骨格曲線. 第13回日本地震工学シンポジウム論文集, つくば国際会議場, 2010年11月, pp. 1390-1397.
- ③ Hitoshi Shiohara, 'Reinforced Concrete Beam-Column Joints: Seismic Design Based on an Overlooked Failure Mechanism,' 2011 ACI Fall Convention Pittsburg, 2010.10.25
- ④ 塩原等, 楠原文雄他. 鉄筋コンクリート造外部柱梁接合部の耐震性能に及ぼす設計因子の影響に関する実験 (その1~その5). 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造, 北陸, 2010年9月, pp. 391-400.
- ⑤ Hitoshi Shiohara and Fumio Kusuhara.

An Overlooked Failure Mechanism of Reinforced Concrete Beam-column Joints. Proc. 9th NCEE, July 25-29, Toronto, Canada, Paper No. 822.

- ⑥ 楠原文雄, 塩原等他. 鉄筋コンクリート造柱梁接合部の終局強度に及ぼす梁および柱主筋量の影響(その1~その4). 日本地震工学会大会-2009 梗概集, 東京, 2009年11月, pp. 28-35.
- ⑦ Hitoshi Shiohara and Fumio Kusuhara. Comprehensive Series of Tests on Seismic Performance of Reinforced Concrete Beam-column Joints. Proc. of the 3rd International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering October 15-16, 2009 San Francisco
- ⑧ 加藤史明, 田崎渉, 楠原文雄, 塩原等, 田尻清太郎, 福山洋. RC造十字型柱梁接合部の耐震性能に及ぼす柱・梁曲げ強度比と主筋間距離の影響に関する実験 (その1~その2). 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造, 東北, 2009年8月, pp.397-400.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計◇件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.rcs.arch.t.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

塩原等 (SHIOHARA HITOSHI)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号: 50272365

(2) 研究分担者

楠原文雄 (KUSUHARA FUMIO)

東京大学・大学院工学系研究科・助教
研究者番号: 50361552