

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 16 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760519

研究課題名(和文) 鉄筋コンクリート梁柱接合部の3次元応力伝達を考慮した耐震設計法の確立

研究課題名(英文) ESTABLISHMENT OF SEISMIC DESIGN METHOD FOR REINFORCED CONCRETE BEAM-COLUMN JOINTS BY CONSIDERING THREE-DIMENSIONAL STRESS TRANSFER

研究代表者

西村 康志郎(NISHIMURA, Koshiro)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00343161

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：鉄筋コンクリート造建物の構造的な自由度を広げるために、鉄筋コンクリート梁柱接合部の3次元応力伝達を考慮した耐震設計法について実験的および解析的な研究を行った。実験では隅柱梁接合部材の繰返し加力実験、解析では外柱梁接合部材のFEM解析を行った。その結果、接合部周りにおけるねじり応力などの3次元応力伝達のために、3方向の補強筋の配置や細径の鉄筋の採用が有効であること、接合部の損傷が柱軸回りのねじり剛性低下を引き起こす場合があること、などの知見を得られ、これらを基に設計時に注意すべき要点をまとめた。

研究成果の概要(英文)：In order to develop a structural adaptability in seismic design of a reinforced concrete building, experimental and numerical studies were carried out. In these studies, three-dimensional stress transfer in a beam-column joint was focused, and static cyclic loading tests of corner beam-column joints and numerical analysis of exterior joints with FEM were conducted. As results of the studies, important knowledge was found as follows: three directional arrangement of reinforcing bars and adopting of thin reinforcing bars were effective for the three-dimensional stress transfer such as torsional stress; damages at the joint could cause degradation of torsional stiffness around the column axis; etc. Based on the knowledge, recommendations in seismic design of reinforced concrete beam-column joints were pointed out.

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：鉄筋コンクリート 隅柱梁接合部 扁平梁 接合部補強筋 ねじり

### 1. 研究開始当初の背景

通常の鉄筋コンクリート(RC)造ラーメンは、柱に梁が多方向から取り付く、梁幅が柱幅よりも狭い、床スラブや壁(構造壁および非構造壁)が取り付く、などのディテールにより複雑な形状をしている。現状の設計法では主に梁幅が柱幅よりも狭い場合を対象としており、接合部を等価な直方体に置き換えて耐力を評価する、剛域と柱梁の線材から成る骨組として剛性を評価するなどの仮定を用いている。

一方、集合住宅などにおいて開放的な居住空間を簡便に実現する目的で、建物の階高を変えずに梁下有効寸法を大きくするために、梁成の小さい扁平梁が採用されることがある。扁平梁構法は、通常の梁を幅広で梁成の小さい扁平梁に置き換えることで、従来の設計方法を大きく変えることなく適用可能な構法である。この扁平梁構法では、接合部において梁の一部が柱からはね出す形状になる。このような接合形式を可能にするために、梁柱接合部付近の配筋を工夫し、梁の塑性ヒンジ位置を柱面から少し離すことで、接合部の損傷を防ぐ方法が採用される。扁平梁構法は、実験研究で十分な耐震性能を有することを確認されたが、接合部のはね出し部の応力伝達など不明な点もあり、適用範囲が限られている。この開発研究を進展させ、より自由な梁断面や柱断面を採用して魅力的な居住空間を実現するには、接合部での3次元応力伝達を明らかにし、合理的な設計方法を確立する必要がある。通常のRCラーメンでも柱部分のはね出ししているため、3次元応力伝達を考慮することは重要である。

### 2. 研究の目的

鉄筋コンクリート梁柱接合部の3次元応力伝達を考慮した耐震設計法の確立のために、前述した扁平梁構法で残された課題を解決し、メリットはさらに発展させ、耐震設計法を進展させる。以下に具体的な目的を挙げる。

(1) 接合部のひび割れ後の鉄筋の効果や、はね出し部の捩りの問題など、接合部のはね出し部での応力伝達機構を解明する。接合部内での鉄筋の付着や定着などのディテールの問題も残されており、それを含めて接合部の応力伝達機構の問題として取り扱う。実験とFEM解析により、接合部の3次元応力伝達を明らかにする。

(2) 梁の塑性ヒンジ位置を、より効果的、且つ、より確実に制御できるようにする。効果のあった対策のひとつとして、梁の塑性ヒンジ位置を柱面から少し離す方法が挙げられる。扁平梁の場合は接合部の体積が小さくなるため、そこが弱点になり易い。また、高強度コンクリートを使用する場合、例えばコンクリートの圧縮強度が2倍になってもせん断強度は1.3~1.5倍程度にしかならず、大きな

せん断力が作用する接合部は相対的に弱くなる。しかし、塑性ヒンジ位置を接合部から離すことで、接合部のひび割れなどの損傷を軽減できる。塑性ヒンジ位置を柱面から離す場合、柱面付近の梁部分を補強するために梁端部で大きな曲げ応力を負担できるようにし、骨組の降伏耐力を高めることが出来る。この研究では、直交梁、垂壁、腰壁など周辺部材の影響も考察する

(3) 床スラブや壁といった周辺部材との取り合いを含めて、柱と梁の間の応力伝達が円滑になるような設計法をまとめる。塑性ヒンジ位置をコントロールすることで、損傷を許容する部分と許容しない部分を制御できるようにする。また、それを実現するための配筋方法を示す。

### 3. 研究の方法

(1) 鉄筋コンクリート隅柱・梁接合部材を対象に、梁降伏型の設計方法について検証する。隅柱・梁接合部では柱に互いに直交する2本の梁が取り付いている。2つの梁に逆向きのせん断力が作用するときに、柱降伏やせん断破壊に先行して梁降伏となる条件を実験的に検証する。そのためには、柱の45°方向の曲げ耐力評価、接合部せん断耐力評価、梁主筋の定着の検定方法、などを解決する必要がある。接合部せん断耐力の評価については過去の研究成果を利用して検討する。柱の曲げ耐力と梁主筋の定着については、実験により検討する。梁の曲げ強度に対する柱の曲げ強度の比率をパラメータとし、隅柱・通常梁接合部材試験体の加力実験を行う。実験結果より、必要な柱強度と接合部強度、梁主筋の定着などを検討する。

(2) 外柱梁接合部内の応力伝達機構を把握するために、FEM解析を行う。接合部において、梁主筋からコンクリートへの応力伝達を再現できる梁主筋定着部モデルを提案し、それを用いて柱梁接合部材の解析を行う。解析結果を基に、有効な配筋方法や梁柱接合部材の剛性評価方法を検討する。

(3) 梁幅が柱幅よりも広い扁平梁を隅柱梁接合部に適用することを目的として、2体の試験体を作成して加力実験を行う。隅柱・扁平梁接合部では、接合部周りでのねじれ応力伝達など、3次元の応力伝達を可能とする配筋が必要になる。実験結果より、扁平梁を用いた架構の合理的な設計法について検討する。

(4) 鉄筋コンクリート造建物の垂壁や腰壁といった雑壁の効果を検討する。近年、雑壁を構造躯体と切り離すために柱と壁の間にスリットを設けるなどの方法が採られる。利点としては力の流れが明確になることで地震時の挙動の予測精度が上がること、欠点としては想定外の外力に対する余力が失われ

る場合があること、などが挙げられる。

#### 4. 研究成果

(1) 柱梁接合部では圧縮ストラットが形成され、梁主筋の定着は圧縮ストラットを横切ることが基本であるが、隅柱梁接合部の2方向加力の場合は図1に示すように梁主筋の定着が圧縮域の外となるケースが考えられる。

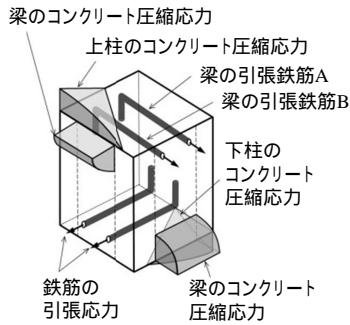


図1 斜め方向加力を受ける接合部の応力

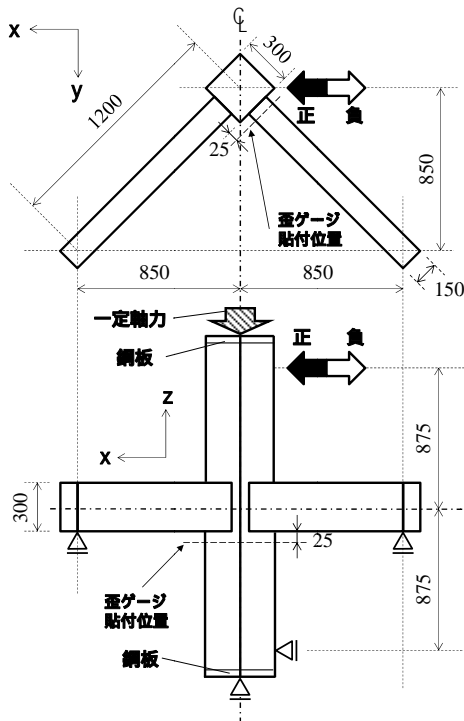


図2 隅柱梁接合部材の加力実験方法

梁曲げ降伏型ラーメンを実現するには、梁主筋を確実に定着する必要がある。接合部内の横領伝達機構を把握する目的で、図2に示すように、隅柱梁接合部試験体を3体作製して繰返し加力実験を行った。柱・梁曲げ強度比は1.15倍程度とし、実験パラメータを梁曲げ強度に対する接合部せん断強度の比率（接合部せん断余裕度）および梁主筋径とした。実験結果より次の知見を得た。

接合部せん断強度評価式は、梁曲げ降伏型に設計するための指標にはなり得たが、梁主筋降伏を伴った接合部強度を評価するには十分ではないと考えられる。

2方向加力では、接合部の損傷により柱軸回りのねじれ剛性が著しく低下する。梁曲げ降伏型であっても梁主筋径が大きいと、大変形時の接合部の損傷によりねじれ剛性が低下する場合がある。

2方向加力の履歴曲線は、1方向加力と比較して、スリップ性状も少なく良好なループを描いた。折曲げ定着された梁主筋の滑りは直交梁主筋によって抑制させる可能性がある。

接合部横補強筋を増量させると接合部の損傷を抑えられるが、梁端部に損傷が集中するため、梁端部あば筋も同時に増量させたほうが望ましい。ただし、接合部せん断余裕度が1.4倍程度の試験体でも、梁主筋径が大きいと、2方向加力では梁曲げ降伏後の大変形時に接合部が損傷し、履歴ループにスリップ性状が見られる場合がある。外柱梁接合部で梁主筋を折曲げ定着させる場合、2方向加力を考慮すると、主筋径を小さくすることは接合部材の靱性確保に有効と考えられる。

(2) 2方向加力を受ける外柱梁接合部内の立体的な応力伝達機構を把握し、有効な配筋方法を模索するために、有限要素法による解析を行った。

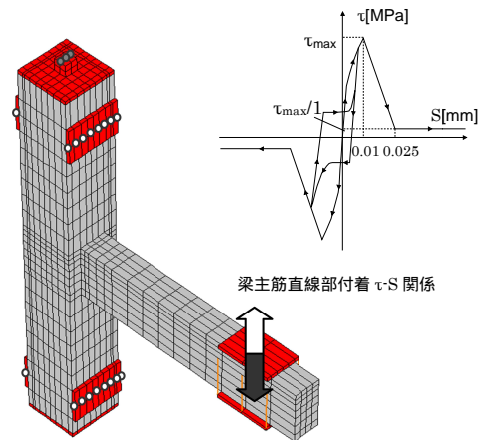


図3 RC外柱梁接合部モデル

解析では、接合部内のコンクリート圧縮域と梁主筋の定着位置の関係に着目した。定着筋の性能は、周囲のコンクリートの応力状態に影響され、コンクリートが圧縮されていると定着性能がよい。一方で、柱の曲げび割れ梁主筋定着位置に生じることで、梁主筋の直線定着部の付着性能が低下することも考えられる。解析では、定着筋の性能が接合部の損傷に与える影響を有限要素法で明らかにすることを目的とした。まず、過去に行った鉄筋の引抜実験結果を基に、折り曲げ定着筋の直線部分とフック部分のモデル化を行った。いずれのモデルもリンク要素で作成し、それらの構成側を実験結果に対応するように設定した。設定したモデルを外柱梁接合部材に適用し、実験結果と比較した。対象の試験体は梁曲げ降伏型のもので、梁曲げ後の接

合部の損傷(ひずみ)に着目した。その結果、接合部内の梁主筋の直線部分の付着強度は、梁内の付着強度に比べて低くした方が、接合部横補強筋のひずみが実験結果に近くなることがわかった。すなわち、梁曲げ定着筋の直線部分の性能が接合部の損傷にかなりの影響を与えることが分かった。一般に鉄筋径が大きいと付着に不利に働くので、接合部の設計において定着する鉄筋径を考慮する必要があることが示唆された。

(3) 鉄筋コンクリート造ラーメンに扁平梁を採用できるように、図4に示す隅柱 - 扁平梁接合部の2方向加力実験を行った。隅柱で扁平梁が直交する接合部では、柱の無い部分での扁平梁主筋の定着が難しく、設計法も確立していない。また、扁平梁が直交して取り合っているため、梁が曲げ降伏する塑性ヒンジ位置が明確でなく、その決定方法もない。本実験では、図5に示すように、通常の梁の配筋を幅方向へ単純に広げた試験体と、接合部周りの応力伝達が円滑になるように配筋を工夫した試験体を作製し、構造性能を比較した。配筋の工夫の要点は、梁端部の主筋を増やして塑性ヒンジ位置を直交梁と交差しない箇所まで離すこと、接合部で柱からはね出している梁部分のねじり応力を伝達するように3方向の補強筋を配置したことである。互いに直交する梁の主筋を網目状に交差させ、鉛直方向にも補強筋を配置したもので、補強筋は閉鎖型ではなく、梁主筋は定着起点を柱面とした直線定着とした。加力方向は、図4に示す2方向加力とした。これははね出し部の梁主筋の定着がより厳しくなる条件を想定している。

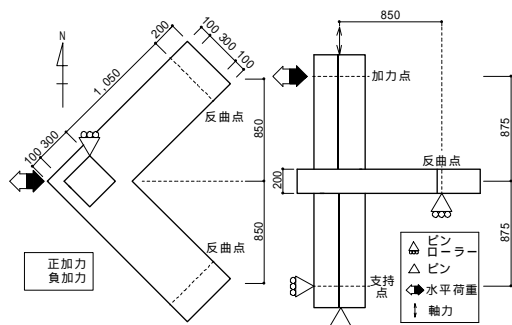
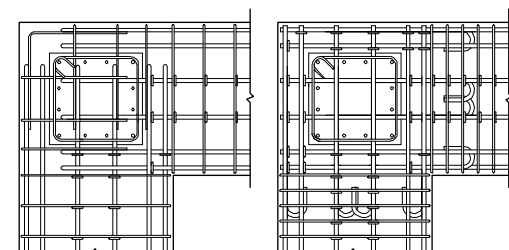


図4 隅柱 - 扁平梁接合部材の加力実験



i) 通常梁を広げた配筋 ii) 3方向の補強  
図5 接合部周りの配筋

実験結果より、梁の塑性ヒンジ位置を柱面から離すことで梁曲げ計算強度を発揮すること、および、接合部において、ねじり応力を円滑に伝達されるために3方向に補強筋を配置することが有効であることを確認した。また、通常の梁を用いた外柱梁接合部材と同等以上のエネルギー消費能力を示し、十分な性能を発揮した。

(4) 2方向加力を受ける鉄筋コンクリート梁柱接合部の3次元応力伝達を考慮すると、接合部の配筋などについて次に挙げる点に注意して設計する必要がある。

2方向加力を受ける場合は梁主筋の定着に対して条件が厳しくなるため、余裕のある設計が必要であり、梁主筋径は小さくすることが望ましい。

接合部周りにおいて、ねじり応力伝達のためには、3方向に補強筋を配置することが肝要である。また、ねじり応力伝達の問題は扁平梁柱接合部だけでなく、杭とパイルキャップの接合部や柱と梁が偏心して取り付けられた接合部など、様々な箇所での問題である。3方向の補強筋量の算出方法については今後の課題の一つである。

隅柱梁接合部の損傷が柱軸回りのねじり剛性を著しく低下させる。接合部におけるねじり剛性の低下が建物全体の地震応答に与える影響については今後の課題であるが、接合部に隣接する床スラブや壁(袖壁、垂壁、腰壁などを含む)はねじりを抑制する可能性が十分に考えられる。柱のせん断破壊を避けるために壁と柱の間にスリットを設けることが多くなってきているが、少なくともスリットは接合部のねじり抑制には寄与しないと考えられる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

西村康志郎、村岡 瞬、柳浦 嵩史、大西 直毅、梁曲げ降伏する鉄筋コンクリート隅柱梁接合部の応力伝達に関する実験研究、日本建築学会構造系論文集、査読有、79巻699号、2014、621-630

田邊 祥平、西村康志郎、後藤 康明、堀田 淳司、FEM解析におけるRC梁主筋定着部の簡易なモデル化に関する研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、35巻2号、2013、55-60

〔学会発表〕(計3件)

西村康志郎、RC造ラーメンの隅柱における扁平梁構法の適用に関する実験研究、日本建築学会大会学術講演会、2014年9月、神戸大学(神戸市)

西村康志郎、Experimental Study on Stress Transfer in Reinforced Concrete Corner Column and Beam Joints、The 14th World Conference on Earthquake Engineering、2012年9月27日、Lisbon Congress Center(ポ

ルトガル共和国)

西村康志郎、Experimental Study on Stress Transfer around Anchorages in R/C Corner Column and Beam Joints、Joint Conference of 9th International Conference on Urban Earthquake Engineering and 4th Asia Conference on Earthquake Engineering、2012年3月7日、東京工業大学(東京都目黒区)

〔その他〕

ホームページ等

<http://labs.eng.hokudai.ac.jp/labo/nikou/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

西村 康志郎 (NISHIMURA, Koshiro)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：00343161