

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02284

研究課題名（和文）地震により損傷した柱梁接合部を含む鉄筋コンクリート造骨組の残存耐震性能評価法

研究課題名（英文）Residual Seismic Capacity of Reinforced Concrete Beam-Column Moment-resisting Frames Damaged with Joint-hinging Failure

研究代表者

楠原 文雄（Kusuhara, Fumio）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：50361522

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：事前加力により損傷を与えた柱梁接合部を含む十字形およびト形部分架構の水平加力実験により、過去に経験した変形域では剛性と耐力が著しく低下すること、新しく経験する変形域では損傷の影響はほとんどないことを明らかにし、実験結果をもとに柱梁接合部の損傷度を定義した。柱梁接合部が損傷する骨組の地震応答解析では、接合部降伏が生じる柱梁接合部が層の40%程度までは骨組の地震応答が梁降伏型骨組に比べて著しい増加はないこと、柱梁接合部の靱性指標は1.5～4程度となること、1回目の地震時に柱梁接合部の変形が0.5%程度生じる損傷があると、2回目の地震に対する応答に影響を及ぼすことなどを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鉄筋コンクリート骨組の柱梁接合部に生じたひび割れなどの損傷の程度を表す損傷度を定義した。また、損傷度と柱梁接合部の残存耐震性能の関係、柱梁接合部の損傷の程度と骨組としての耐震性能の低下の関係に関する知見を得ることによって、地震により柱梁接合部が損傷した場合の鉄筋コンクリート造の建物の安全性を把握する手法を導くことができるようになった。

研究成果の概要（英文）：The test results of specimens of RC interior and exterior beam-column joints those were damaged with joint-hinging failure by preliminarily loading indicate that 1) restoring force, stiffness, and energy dissipation deteriorate significantly due to the preliminary damages in the range of experienced deformation, and 2) the damages do not affect the restoring force characteristics in the range of deformation that has not been experienced and limit deformation. In addition, damage classes for RC beam-column joints based on damage on reinforcing bars and concrete such as cracking, yielding, and crushing are defined. In the seismic response analysis of RC frames where the beam-column joint is damaged, (1) response deformation of frames does not increase significantly compared to the beam-hinging type frame if the ratio of joint-hinging columns in the story is 40% or less, and (2) the ductility index for the beam-beam joint is about 1.5 to 4.

研究分野：建築構造

キーワード：鉄筋コンクリート 柱梁接合部 接合部降伏 損傷度 耐震性能低減係数 残存耐震性能

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

1995年兵庫県南部地震以降、わが国では鉄筋コンクリート（RC）造骨組の柱梁接合部の地震による損傷が広く認識されるようになった。2016年4月に発生した熊本地震においても柱梁接合部の損傷が報告され、現行の設計基準に従って設計された建物においても接合部破壊に至ったものもあった。柱梁接合部の破壊を防止するため、日本建築学会の耐震設計指針等には柱梁接合部についての規定が設けられており、接合部パネルに生じる接合部せん断力を制限されている。しかし、近年この接合部せん断力の制限だけでは、柱梁接合部の破壊を防ぐことができず、また柱梁接合部は変形しない剛な部分とする従来の仮定を保証するにも不十分で地震時の骨組の応答推定には柱梁接合部の非線形挙動を考慮する必要があることが明らかになっている。この近年になって明らかとなった柱梁接合部の破壊形式は接合部降伏破壊と呼ばれ、従来の耐震規定では制限が設けられていない柱梁接合部に接続する柱と梁の曲げ強度の比（柱梁強度比）が1に近いと、柱梁接合部に作用するモーメントによって生じる。

新設建物の設計にあたっては耐震規定を満足した設計とすることにより所定の耐震性を確保することが可能で、前述のように耐震規定も最新の知見を反映したものになりつつある。一方、地震により損傷を受けた建物の継続使用の可否や補修・補強の判断には、損傷した建物の耐震性の評価が必要となる。一般に地震により損傷が生じた鉄筋コンクリート造架構の残存耐震性能は、地震後の調査により確認されたひび割れ幅やコンクリートの剥落の情報から判断している。しかし、特に接合部降伏破壊が生じる場合に関しては、柱梁接合部に生じたひび割れなどの損傷の程度を表す損傷度は定義されておらず、また、損傷度と柱梁接合部の残存耐震性能の関係に関する知見はいまだない。また、柱梁接合部の損傷の程度と骨組としての耐震性能の低下の関係に関する知見もまったくない状態であった。

2. 研究の目的

本研究では、地震により柱梁接合部が損傷した骨組の残存耐震性能の評価法の確立を目的とする。具体的には、①柱梁接合部部分架構の水平加力実験により地震後に観察されるひび割れ等の損傷の程度を表す指標と柱梁接合部の部材としての構造性能の低下の程度との関係の定量化する。さらに、②柱梁接合部の構造性能の低下が骨組の耐震性能に及ぼす影響の把握し、③柱梁接合部における損傷度とそれに基づく骨組の残存耐震性能評価法を構築する。

これらに加え、部分高強度化鉄筋を用いて強度境界位置にて降伏ヒンジを形成することで継続使用を目指した柱梁接合部の損傷度及び耐震性能の低下の確認、非接触方式の損傷量計測技術として、光学機器によるひび割れ量の画像計測技術の開発を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 柱梁接合部を含む部分架構の水平加力実験を行った。試験体は形状や配筋が同一のものを2～3体ずつ製作し、まず1体を無損傷の状態から加力を行い、損傷レベルと層間変形角の関係を確認する。この結果に基づき残りの試験体には損傷レベルを変えて事前加力を行う。このようにして損傷のレベルが異なる同一諸元の複数の試験体を用意した。これらに対して地震力を模擬した水平力を加力する。これにより損傷と柱梁接合部の構造性能の低下の関係を把握した。

(2) 接合部降伏破壊を含む柱梁接合部の非線形挙動を表すことができるように開発された柱梁接合部のマクロエレメントを用いた地震応答解析を行い、柱梁接合部が損傷した後の骨組の崩壊余裕度を明らかにする。柱梁接合部のマクロエレメントは、様々な条件によって変化する柱梁接合部に作用する力と変形との関係を直接モデル化するのではなく、コンクリートと鉄筋およびコンクリートと鉄筋の間の付着すべりを表す1軸の非線形ばねの組み合わせによって柱梁接合部をモデル化するものである。この地震応答解析では、骨組内の部分的な接合部降伏が骨組に与える影響や、耐震診断や被災度区分判定に柱梁接合部を組み込むことを想定し、柱梁接合部の靱性指標についても検討した。

(3) ひび割れが生じた鉄筋コンクリート部材の撮影画像データを用いて、①一般画像処理にもとづく手法（RGB値の二値化処理、幾何形状計算とマスクングに基づくノイズ除去、ひび割れ領域の抽出と定量化演算）、および、②深層学習を用いた領域抽出手法（Classificationによる非ひび割れ部・ノイズ除去、Semantic Segmentationによるひび割れ領域の検出、ひび割れ領域の定量化演算）の両手法について技術的検討を行うとともに、適切な画像計測環境について分析を行った。

(4) 部分高強度化鉄筋を柱、梁主筋に使用した試験体で、強度境界位置で明瞭なヒンジを形成し、梁曲げ降伏破壊型となった試験体を基準試験体として、柱高さのみ430mm短くし、再度製作し、梁主筋が強度境界位置で降伏する層間変形角2%まで載荷を行った。その後ひび割れ補修材用エポキシ樹脂材を使用し、梁部材の修繕を行った。柱部材については、損傷が軽微だったため修繕は行わず、接合部部分は、通常だと直交梁等が付随しているため修繕は行えないとして施工を行わないものとした。



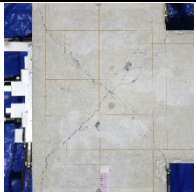
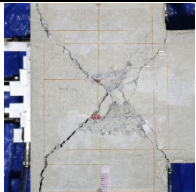
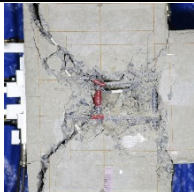
4. 研究成果

(1) 柱梁接合部を含む部分架構の損傷度と耐震性能低下率

事前損傷を与えた十字形およびト形部分架構の静的加力実験から以下の知見を得た。

- ① 事前加力で経験していない変形域においては、無損傷試験体と比べて復元力特性の差異はほとんどなく、限界変形にも事前損傷の影響は見られなかった。
- ② 事前加力で経験した変形域においては、無損傷試験体と比べて割線剛性が著しく小さく、低い耐力しか発揮しない。そのため、損傷がある場合は小さい振幅の揺れに対してかなり変形しやすくなる。また、架構の消費エネルギーについても事前加力で経験した変形域では無損傷試験体と比べて小さい値で推移し、事前損傷の影響によりエネルギー吸収能も低下する。
- ③ 接合部降伏によって柱梁接合部が損傷する場合について、ひび割れ発生から柱梁接合部内での主筋降伏までを損傷度Ⅰ、主筋降伏から最大耐力までを損傷度Ⅱ・Ⅲ、最大耐力から限界変形までを損傷度Ⅳとする柱梁接合部の損傷度を示した。
- ④ 損傷度の判定にあたり、梁主筋の降伏は柱梁接合部の入隅部から生じて鉛直方向に伸展したひび割れ幅により、接合部横補強筋の降伏は柱梁接合部パネル中央の斜めひび割れ幅により判定可能である。その閾値は1/3 スケールの本研究の試験体では0.10~0.20mmであった。また、最大耐力への到達は柱梁接合部パネル中央のかぶりコンクリートの剥落によって判定可能である。
- ⑤ 十字形およびト形柱梁接合部部分架構の、ひずみエネルギーに基づく耐震性能低減係数 η は、被災度区分判定基準に示された曲げ型柱の η によって安全側に評価ができた。ただし、履歴性状の影響は加味されておらず、骨組としての耐震性能の低下が同程度であるかの検討は今後の課題である。

表1 柱梁接合部の損傷度と実験における損傷状態

損傷度	I	II	III	IV	V
実験での損傷状態					
損傷内容	微細なひび割れ	主筋もしくは接合部横補強筋の降伏	比較的大きなひび割れ、ごくわずかなコンクリートの剥落	大きなひび割れ多数、コンクリートの剥落により鉄筋が露出	コアコンクリートの顕著な圧壊

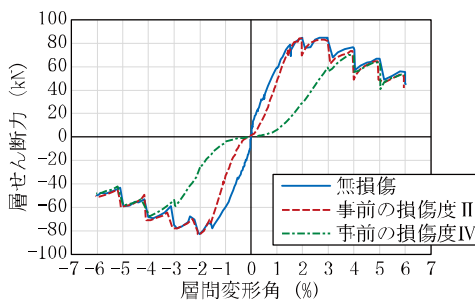


図1 事前損傷と荷重変形関係の包絡線

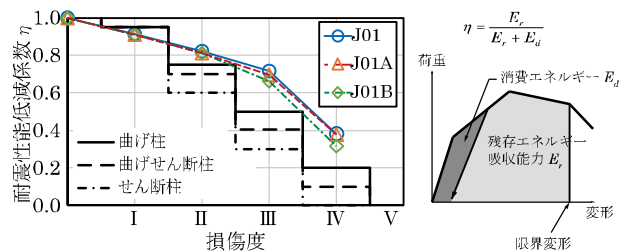


図2 柱梁接合部の損傷度と耐震性能低減係数

(2) 柱梁接合部降伏が生じる骨組の地震応答性状

柱梁接合部をコンクリート、鉄筋、付着力を表す一軸ばねで構成したマクロエレメントでモデル化した無限均等骨組および3スパン骨組の非線形増分解析および地震応答解析により以下の知見を得た。

- ① ある層に接合部降伏型柱と梁降伏型柱が混在する場合、接合部降伏型柱における耐力低下により梁降伏型柱の柱せん断力が増大し、ある層の柱のうち接合部降伏型柱の割合が60%程度となると梁降伏型柱においても柱ヒンジもしくは接合部降伏が生じる場合があり層崩壊が生じる可能性がある。
- ② ある層の接合部降伏型柱の割合が60%程度を超えると極めて稀に発生する地震に対する応答変形が梁降伏型骨組に対して著しく増大する。崩壊荷重(崩壊が生じる地震動の大きさ)については、接合部降伏型柱の割合が20%までは影響は小さく、40%を超えると崩壊荷重は低下しはじ

め、80%を超えると接合部降伏型骨組と同程度となる。

③ 多層骨組の高さ方向に接合部降伏する柱梁接合部を含む階が複数存在すると、それらの階の間に部分崩壊機構が形成される。この場合、地震動に対する応答変形が増大し、崩壊荷重(崩壊が生じる地震動の大きさ)は低下する。接合部降伏する階が近く部分崩壊機構に含まれる層が少ないほど崩壊荷重の低下は大きい。

④ 中柱が複数ある骨組においては、崩壊荷重におよぼす影響は中柱の柱梁強度比および接合部横補強筋が大きく、外柱のそれらの影響は小さい。そのため、中層骨組では、変動軸力によって接合部降伏が生じやすい引張側の柱での接合部降伏は、骨組の応答変形、崩壊荷重に与える影響は小さい。

⑤ 接合部降伏型骨組が崩壊する地震動の大きさは、1回目の地震動による損傷の影響により大きく低下する場合がある。無損傷の場合と比べた応答変形の増大は、過去の地震動に対する応答で柱梁接合部の変形角が0.5%を超えると生じた。

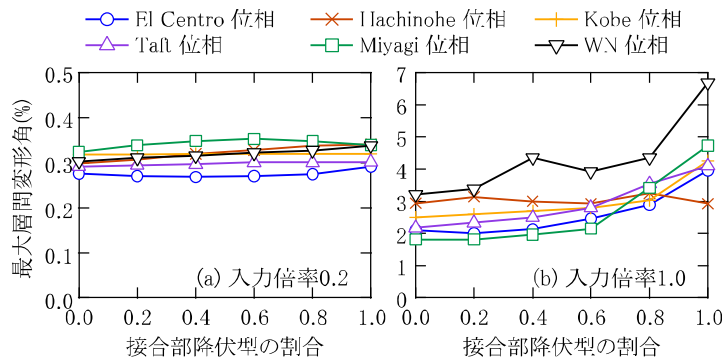


図3 接合部降伏型の割合と最大層間変形角の関係

(3) 柱梁接合部の靱性指標

接合部降伏型骨組と柱降伏型骨組の地震応答の比較により、接合部降伏型骨組の靱性指標を検討し、以下の知見が得た。

① 接合部降伏型骨組が終局限界に達する地震動の大きさは、柱梁強度比が1より小さい場合には柱梁強度比および接合部横補強筋量の影響は小さく、接合部横補強筋比0.4%以上となると柱梁強度比および接合部横補強筋量の増大により大きくなる。

② 接合部降伏型骨組の靱性指標は1.5~4.0と算出され、柱梁強度比が1より小さい場合には柱梁強度比、接合部横補強筋量の影響は小さく、2.5~3.5程度となった。

③ 接合部横補強筋量が少なくなると柱梁強度比を大きくすると、強度指標の増加によって靱性指標が減少することがある。

④ 柱梁強度比が1より大きいときに横補強筋は靱性指標の増加に寄与する。

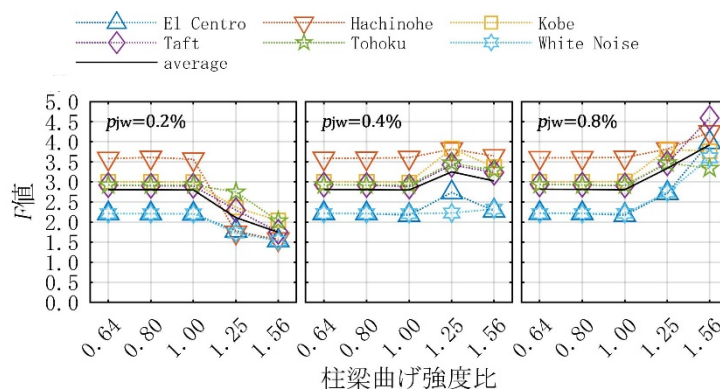


図4 柱梁接合部の靱性指標の算定結果

(4) 柱梁接合部の損傷量の計測技術




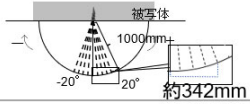
① 一般画像処理に基づく手法において、ひび割れコーナー部の幅計測アルゴリズムを新たに構築することにより、接合部内に見られるような複雑なひび割れ形状にも対応可能なひび割れ量計測のための形態学的演算処理が可能になった。

② 深層学習を用いた領域抽出手法を活用してひび割れ幅計測を行った結果、目視計測と同等の最大ひび割れ幅計測を可能とするひび割れ幅分布の評価方法を構築した。

光学計測に必要な撮影環境条件を検討し、以下の対応表を得た。

表 2 画像処理に基づく損傷量計測に必要な撮影条件

▼ 損傷度 I (ひび割れ幅0.2mm以下程度) 以上の場合の撮影環境条件

項目	留意点	具体例
カメラ	有効画素数約2000万画素以上	 デジタルカメラ/UAV搭載カメラ相当
画角	広角レンズの場合0.55m×0.37m以内を確保する 標準レンズの場合0.55m×0.37m以内を確保する 望遠レンズの場合0.18m×0.12m以内を確保する	 ※ 10円玉を画角に含める (画素キャリブレーションのため)
撮影距離	光学ズームを使用しない場合、距離を1m以内 にすることで条件を満足する(広角レンズ使 用時)	 1m:新聞紙の対角線の長さ 2Lペットボトル 3本分
撮影角度	正対(撮影角度0度)を標準とする (誤差左右20度以内までを許容する)	 左右20度以内 →水平方向に約30cm以内
明るさ (照度)	フラッシュは使用せず500ルクス以上 ⁴⁾	室内:一般的な事務室 屋外:晴天時の日没 ⁴⁾

(5) ヒンジリロケーションによる柱梁接合部の損傷抑制

部分的に高強度化した鉄筋を柱・梁主筋に用いた十字形柱梁接合部の実験を行い、試験体を修繕し、再度載荷を行い下記の知見が得られた。

①接合部横補強筋を高強度にした試験体より、梁主筋を二段配筋とした試験体が接合部の損傷を低減でき、梁の強度境界位置に明瞭なヒンジを形成した。

②接合部横補強筋が高強度の試験体では修繕後に接合部の斜めひび割れが顕著となった。梁が二段配筋の試験体では強度境界位置のひび割れが顕著となった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 楠原文雄, 土本真人	4. 巻 42
2. 論文標題 一部でのみ接合部降伏が生じる多スパンRC骨組の地震時応答	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 235-240
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 高橋賢作, 高橋典之, 千田紘之	4. 巻 42
2. 論文標題 RC部材の地震損傷画像計測のための撮影環境に関する考察	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 895-900
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 土本真人, 藤川真, 楠原文雄	4. 巻 43
2. 論文標題 接合部降伏の高さ方向分布が8層RC骨組の地震応答に与える影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 145-150
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 森旦陽, 楠原文雄	4. 巻 44
2. 論文標題 柱梁接合部降伏するRC骨組の靱性指標に関する解析的研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 村上研・岸田慎司	4. 巻 44
2. 論文標題 部分的に高強度化した鉄筋を用いたRC造十字形柱梁接合部の部材修繕に関する実験的研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 岡田徹也, 平岩直暉, 楠原文雄
2. 発表標題 接合部降伏破壊により損傷した鉄筋コンクリート十字形柱梁接合部の耐震性能に関する実験
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤井一貴, 梅田颯, 楠原文雄
2. 発表標題 接合部降伏破壊の生じる鉄筋コンクリート造ト形柱梁接合部の残存耐震性能に関する実験
3. 学会等名 日本建築学会大会東海支部研究集会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	岸田 慎司 (Kishida Shinji) (10322348)	芝浦工業大学・建築学部・教授 (32619)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	高橋 典之 (Takahashi Noriyuki) (60401270)	東北大学・工学研究科・准教授 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関