

令和 4 年 5 月 28 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02282

研究課題名(和文) 鉄筋のカットオフ・継手と貫通孔を有するRC梁の複合的破壊を考慮した設計法

研究課題名(英文) Design Method of RC Beam with Openings, Cut-off Longitudinal Bars, and Lap Splice by Considering Combined Failure Mode

研究代表者

西村 康志郎(Nishimura, Koshiro)

東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授

研究者番号：00343161

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：鉄筋コンクリート造建物の梁では配管用などの貫通孔を設ける場合があり、地震を受けると弱点になり得る。本研究では、貫通孔の数と配置や、鉄筋のカットオフや継手といった配筋の不連続が梁の構造性能に与える影響を把握するために、部材実験などを行った。梁の変形モニタリングを目的として、MEMS加速度センサを用いた多点観測による変形測定法を実験で検証した。梁内のコンクリート圧縮応力伝達を把握するために有限要素解析を行った。実験と有限要素解析の結果を基に、貫通孔を有する梁の開孔部分と無開孔部分のせん断設計法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

貫通孔を有する鉄筋コンクリート梁の実験研究では、これまで開孔部の破壊に着目させることがほとんどであった。本研究では、無開孔部での圧縮応力伝達の変化を実験により示唆できたことが学術的意義の一つであり、開孔部分と無開孔部分の両方について設計方法を提案したことは社会的意義と言える。また、MEMS加速度センサを用いた多点観測により、梁の変形をモニタリング可能なことを実証したことは、建物の維持管理技術の進展に資する成果と言える。

研究成果の概要(英文)：Openings for plumbing are often constructed in the reinforced concrete beam, and the beam may suffer damages when the building is subjected to a strong earthquake. We conducted the experimental tests to investigate the influences of the number and location of the openings, cut-off longitudinal bars, and lap splices on the structural performance of the RC beam. The measurement method using MEMS accelerators were also verified in the tests. The numerical model of the RC beam was analyzed by the Finite Element Method to discuss the compressive stress transfer in concrete. We proposed the design method for the portions with the opening and without the opening of the RC beam based on the experiment and the numerical results.

研究分野：建築構造

キーワード：鉄筋コンクリート梁 貫通孔 せん断耐力

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

建物が地震で被災したとき、一部の弱点部材の損傷が原因で取り壊しとなる場合がある。鉄筋コンクリート (RC) 造建物の梁には配管用の貫通孔、鉄筋の継手やカットオフなどが設けられ、構造性能に影響を及ぼし、弱点となり得る。また、部材端部が曲げ降伏しない基礎梁では、部材端部に貫通孔を設ける特殊な構法もあるが、梁端部の貫通孔の影響は不明な点が多く、一般的には認められていない。さらに、これまでの研究では貫通孔のある断面の構造性能に着目されたものが多く、貫通孔による梁内の無開孔部分への影響については明らかにされていないのが現状である。現行の設計では、RC 梁は脆性破壊しないことを目標に設計されており、RC 梁の脆性破壊は、せん断破壊と付着割裂破壊に大別される。設計では、梁のせん断破壊と付着破壊をそれぞれ検討し、貫通孔の影響は断面欠損による耐力低減、継手やカットオフ鉄筋は局所的な付着の確認を行うため、複合的な破壊に対する性能評価の精度不足や、実際に生じる破壊の見落としが起り得る。地震被害では、せん断ひび割れと付着ひび割れを伴う複合的な破壊も多い。また、貫通孔や鉄筋のカットオフにより、梁の耐力や変形能力が低下する実験結果もこれまで報告されている。

2. 研究の目的

貫通孔を有する RC 梁試験体や鉄筋の重ね継手を有する部材試験体の加力実験、RC 梁の有限要素法 (FEM) の数値解析により、以下の目的で研究を行った。

- (1) 貫通孔の大きさ・配置、鉄筋のカットオフによる付着抵抗の低下、鉄筋の重ね継手が与える相互的な影響を分析し、生じ得る破壊メカニズムを明らかにする。
- (2) 地震による被災を検出することを目的として、モニタリングのために損傷や変形の測定方法を開発する。
- (3) 複合的な破壊に対する耐力評価のために、簡易な評価モデルによる設計法と、FEM 解析による詳細な検討を組み合わせた設計法を提案する。

3. 研究の方法

鉄筋コンクリート梁試験体を 9 体作製し、正負交番で繰り返し逆対称曲げ加力実験を行った。梁断面は 300×500mm で、内法スパンは、曲げ降伏型の 3 体は 2150mm、せん断破壊型の 6 体は 1750 mm で、通常の梁なら 1/2、基礎梁なら 1/3 程度の縮尺である。主な実験パラメータは、貫通孔の数と配置、鉄筋のカットオフや重ね継手といった配筋の不連続箇所の有無、孔周囲補強筋の形状とした。貫通孔の数と配置は、中央に 1 箇所、梁スパン両側に各 1 箇所合計 2 箇所、梁スパン片側に 1 箇所、梁両端部に各 1 箇所合計 2 箇所、梁両端部に各 1 箇所と中央に 1 箇所合計 3 箇所、そのほか無開孔の梁試験体も作製した。孔周囲補強筋の形状は、高強度鉄筋を用いた閉鎖形と普通強度鉄筋を用いた開放形で、開放形は部材内で補強筋が直線定着されるため、補強筋は広い範囲に配置される。実験では、荷重やたわみ角のほか、ひずみゲージを用いた鉄筋のひずみ測定、使用限界状態や損傷限界状態でのひび割れ幅の測定などを行った。

重ね継手については単純梁試験体を別途作製し、4 点曲げの単調加力実験を行った。重ね継手は、梁幅方向に 5 組、せん断力を生じない純曲げ区間に設けた。実験パラメータは横補強筋比、中子筋の有無、継手の向きとした。

孔周囲の鉄筋の効果を確認するため、梁端部に開孔を設けた試験体の加力実験や部分的に高強度化した鉄筋を用いた鉄筋コンクリート有孔梁に関する実験の結果を基に、開口上下補強筋、開口際補強筋、水平補強筋の影響の分析を行った。

部材の変形や損傷をモニタリングする方法を開発するため、光ファイバセンサと MEMS 加速度センサを用いた試験を行った。光ファイバセンサはコンクリート内の鋼材の軸ひずみをモニタリングするために用い、コンクリート壁試験体内の鋼材にセンサを設置して計測した。MEMS 加速度センサは部材のたわみを測定するために用い、重力加速度の向きからセンサの回転角 (傾斜角) を計測する原理を利用した。RC 梁試験体のスパン方向にセンサを複数点設置し、仮定したたわみ曲線と同定することで梁の変形を計測した。

FEM 解析ではまず、コンクリート、鉄筋、鉄筋とコンクリート間の付着のモデル化を行い、実験での観測データと比較することでモデルの妥当性を確認した。その後、実験で観測できていない応力性状を把握し、実験パラメータ以外のパラメータでの解析を行った。耐力評価方法では、せん断力伝達機構としてアーチ・トラスモデルを基本とし、FEM 解析の併用を検討した。

4. 研究成果

(1) 梁部材や重ね継手の実験により得られた主な知見は以下のとおりである。なお、横補強筋は上端主筋と下端主筋を拘束するせん断補強筋、孔周囲補強筋は貫通孔 (開孔) 周囲の補強筋で、部材内で定着されているものをいう。

(貫通孔の配置の影響)

- ・日本建築学会の終局せん断耐力評価式は、無開孔部よりも開孔部のほうが安全率は高い。また、

梁端部の開孔は耐力と変形性能を低下させるため、付加的な補強が必要である。

- ・孔周囲補強筋がせん断に対して抵抗するため、開孔を増やすことが必ずしも耐力低下を生じさせるとは限らない。実験では、片側開孔の梁よりも、梁スパン中央に対して対称に開孔を有するほうが耐力は高い結果も得られた。無開孔の梁と比較すると、片側開孔は耐力が低く、両側開孔では耐力が高い結果となった。開孔部を十分に補強した場合、無開孔部のコンクリート圧縮応力ストラットの角度を考慮することが耐力評価の上で重要である。

(配筋の影響)

- ・貫通孔が十分に補強されている場合、鉄筋のカットオフは、最大耐力には大きな影響を与えないが、最大耐力までの変形性状に若干の影響を与える。貫通孔の近くの主筋がカットオフされると、カットオフされない場合に比べ、孔周囲補強筋の応力負担が減り、横補強筋の負担が増えるため、カットオフ筋周囲の横補強筋は増量する必要がある。過去の無開孔梁の実験でも観測されているように、有孔梁においても2段目のカットオフ筋の付着強度評価式の安全率は通し筋よりも高く、残された1段目通し筋のほうが付着破壊しやすい傾向にある。

- ・孔周囲補強筋がせん断に抵抗するため、最大耐力後の変形性能は無開孔梁よりも上昇することがある。したがって、貫通孔を十分な余裕度で補強すれば、無開孔梁と同等以上の性能を確保し得る。また、開放型の孔周囲補強筋は定着部を有するため、閉鎖型に比べてせん断抵抗への寄与が大きい。

- ・開口上下補強筋を配筋することにより、開口部上側接線方向のひび割れを抑え、靱性が大きくすることが可能である。孔上下補強筋は孔上下部分のひび割れを抑制し、大変形時に降伏することで最大耐力が大きくなり、曲げ型の破壊形式に近づくと考えられる。また、孔際補強筋は孔際部分だけでなく、孔上下部分に入るひび割れを抑制する役割があると考えられる。

- ・重ね継手は、許容応力度設計を行っていけば、局所的な破壊を生じる懸念は少ないと考えられる。重ね継手の終局強度評価では横補強筋の効果を考慮するが、継手区間のせん断力の大きさが重ね継手強度に影響する可能性がある。また、重ね継手強度に対する中子筋の効果は、これまで言われているほど高くない場合がある。

(使用限界状態と損傷限界状態の評価)

- ・貫通孔周囲が鉄筋で十分に補強されていけば、使用限界におけるひび割れ幅や損傷限界における残留ひび割れ幅に与える主筋カットオフの影響は小さい。

- ・貫通孔周囲の初期せん断ひび割れ発生荷重は、無開孔梁よりのものよりも低かったが、孔周囲補強筋の効果で、短期残留ひび割れ幅は無開孔梁よりも狭く、およそ0.1mm以下であった。貫通孔周囲のひび割れは、孔周囲補強筋で制御可能と考えられる。

- ・有孔梁のせん断耐力評価では、開孔比(梁せいに対する開孔高さの比率)に低減率を乗じたものを控除する方法が採用されているが、日本建築学会の許容せん断耐力式の低減率は1.00で、終局せん断耐力式での1.61よりも小さい。短期荷重後に除荷されたときのひび割れ幅は、有孔梁試験体においても許容される範囲内であったが、無開孔梁と同程度に制御するには、低減率を終局せん断耐力式と同程度の引き上げる必要がある。

(2) 部材損傷のモニタリングに関する主な知見は以下のとおりである。

- ・コンクリート壁試験体内の鋼材に光ファイバセンサを設置して計測した結果、部材角0.01rad時まで鋼材軸ひずみを計測でき、降伏箇所を明確に示すことができた。また、光ファイバで計測した軸ひずみは従来のひずみゲージによる計測結果とほぼ同値で十分な精度を有することが確認できた。ただし、光ファイバセンサは長距離に渡って設置され、どこか一箇所でも破損すると計測に支障をきたす場合があるため、実際のモニタリングでは工夫が必要である。

- ・RC梁試験体の材軸方向に、複数のMEMS加速度センサを設置し、各観測点のセンサの回転角(傾斜角)を測定した(図1)。たわみ曲線を仮定して各センサの回転角と同定することで(図2)、梁のたわみを計測した結果、十分な精度で計測可能であることが確認できた(図3)。また、観測点を増やすことで、開孔位置での変形の集中を検出できる可能性があることも分かった。この方法では、複数点の観測結果をたわみ曲線と同定するため、いずれかのセンサが破損した場合でも、たわみ曲線における境界条件の仮定を増やすなど同定方法を工夫すれば、一定の精度で計測可能という利点がある(図4)。

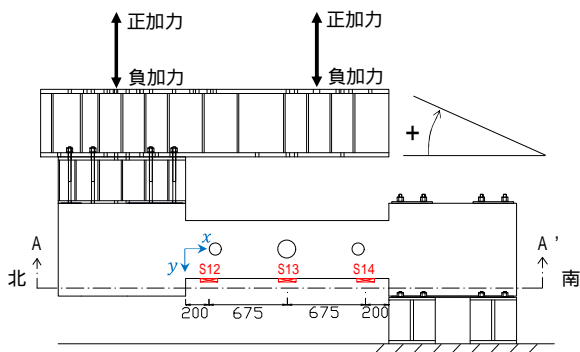


図1 センサの設置位置と加力方法

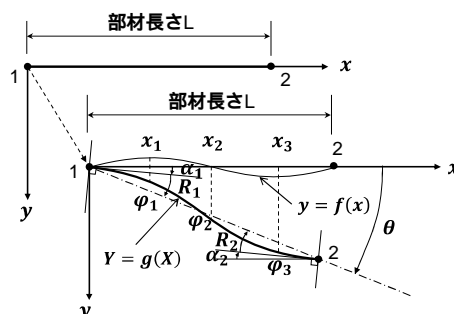


図2 たわみ曲線との同定方法

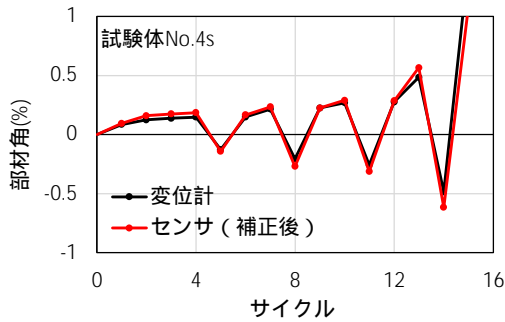


図3 センサ5箇所の結果

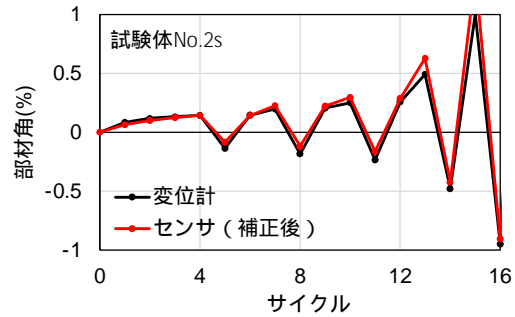


図4 境界条件追加でセンサ3箇所の結果

(3) FEM解析による成果および耐力評価方法に関する主な知見は以下のとおりである。

- ・FEM解析により、鉄筋のカットオフにより、梁内のコンクリート圧縮ストラットの角度は大きくなることが確認された。また、カットオフ筋の長さを短くすると、残された通し筋の付着応力は高くなることが確認された。

- ・FEM解析により、梁中央部で主筋を減じた場合、繰り返し変形の影響でその区間のせん断補強筋の引張応力度が上昇する傾向が確認された。そのため、主筋のカットオフで主筋量が減った区間で横補強筋を増やすことは有効である。

- ・日本建築学会の終局せん断耐力式のうち、アーチ・トラスモデルを用いた耐力評価ではコンクリート圧縮ストラットの角度に応じて算出される。コンクリート圧縮ストラットの角度は横補強筋量とコンクリート強度によって決定されるが、角度の下限を 26.6° としている。今回の梁の実験における主筋ひずみの挙動より、貫通孔によりコンクリート圧縮ストラットの角度が変化することが示唆された。つまり、コンクリート圧縮ストラットの角度が大きくなることで横補強筋の引張抵抗の領域が狭くなり、梁スパン内の一部で横補強筋の降伏が先行するため、せん断耐力が低下するというメカニズムが考えられる。貫通孔により耐力が低下した試験体の実験値から、アーチ・トラスモデルのストラット角度の下限を推定すると、現行の評価式よりも1割程度大きい 30° 程度となる。

- ・貫通孔を有する梁の設計方法としては以下の通りとなる。まず、貫通孔のある断面のせん断耐力を孔周囲補強筋によって確保する。補強筋量の算定に用いる耐力式は、終局せん断耐力は現行のもので良いが、ひび割れ幅制御の観点から許容せん断耐力は開孔低減率の修正が必要である。開孔補強が十分であれば、主筋のカットオフによる開孔部への影響は小さいと考えられ、付着破壊の防止は既往研究の方法(引用文献)で良い。つまり、主筋位置でのせん断破壊面を考慮したせん断耐力評価によって付着割裂破壊を防止する。重ね継手は、許容応力度設計を行うことで局所破壊を防止できる。貫通孔の大きさや配置ならびに主筋のカットオフは、無開孔部分のコンクリート圧縮ストラットの角度に影響を与えるため、FEM解析により、無孔梁に対する有孔梁のストラット角度の変化率を推定する。アーチ・トラスモデルに推定したストラット角度変化率を適用して終局せん断耐力を算定する。それを有孔梁における無開孔部分のせん断耐力と考え、無開孔部分のせん断補強を行えばよい。

<引用文献>

西村 康志郎, 市之瀬 敏勝, 大西直毅: 多段配筋 RC 梁のサイドスプリット型付着割裂耐力に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.729, pp.1903-1912, 2016.11

Toshikatsu Ichinose, Koshiro Nishimura: Side Splitting Failure of RC Beams and Columns under Seismic Action as a Form of Shear Failure, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.19, pp.1212-1226, 2021.12, doi:10.3151/jact.19.1212

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 杉原季弥登, 西村康志郎	4. 巻 44
2. 論文標題 RC 梁の上端筋と下端筋に用いた重ね継手の付着性状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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 柴尾海斗, 西村康志郎	4. 巻 86
2. 論文標題 貫通孔と鉄筋のカットオフを有するRC梁の構造性能に関する実験的研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	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) 10.3130/aijs.86.1095	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高橋尚人, 鄭 家斉, 西村康志郎
2. 発表標題 RC 梁のせん断耐力に及ぼす貫通孔の配置の影響に関する実験研究, その1実験概要及び結果
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鄭 家斉, 高橋尚人, 西村康志郎
2. 発表標題 RC 梁のせん断耐力に及ぼす貫通孔の配置の影響に関する実験研究, その2梁端部の貫通孔の影響
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久内康頌, 鄭家齊, 原甲己, 杉原季弥登, 西村康志郎
2. 発表標題 梁端部に貫通孔を有するRC基礎梁の静的加力実験, その1実験概要
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鄭家齊, 久内康頌, 原甲己, 杉原季弥登, 西村康志郎
2. 発表標題 梁端部に貫通孔を有するRC基礎梁の静的加力実験, その2 実験結果
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 眞田健伍, 岸田慎司, 村田義行
2. 発表標題 部分的に高強度化した鉄筋を用いた鉄筋コンクリート有孔梁に関する実験研究, その9孔周囲補強筋量による破壊性状への影響
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Benyoussef A., Thusoo S., Obara T., Kono S., Murata Y., Iihoshi F., Akimoto K., Kawano H., Sakakibara H., Mukai D.
2. 発表標題 Bond behavior of RC beams with high strength shear reinforcement (Part 1-3)
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 眞田健伍, 岸田慎司, 村田義行
2. 発表標題 部分的に高強度化した鉄筋を用いた鉄筋コンクリート造有孔梁の開孔補強に関する実験研究
3. 学会等名 コンクリート工学年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 梶原僚太, 柴尾海斗, 中田幹久, 西村康志郎
2. 発表標題 鉄筋のカットオフ・重ね継手を有するRC梁の静的加力実験, その1 開口を有する梁の実験概要
3. 学会等名 日本建築学会大会(関東)学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柴尾海斗, 中田幹久, 梶原僚太, 西村康志郎
2. 発表標題 鉄筋のカットオフ・重ね継手を有するRC梁の静的加力実験, その2 開口の影響
3. 学会等名 日本建築学会大会(関東)学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 植村一貴, 小原拓, 河野進, 柴山淳
2. 発表標題 PC鋼材の緊張力に着目したアンボンドPCaPC造壁の曲げ耐力に関する実験的研究
3. 学会等名 日本建築学会大会(関東)学術講演会
4. 発表年 2020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)	
研究分担者	河野 進 (Kono Susumu) (30283493)	東京工業大学・科学技術創成研究院・教授 (12608)	
研究分担者	小原 拓 (Obara Taku) (50845451)	東京工業大学・科学技術創成研究院・助教 (12608)	

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
---------	---------