

令和元年6月3日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04446

研究課題名(和文)地震力を受ける鉄筋コンクリート靱性骨組架構の限界変形点の定量化に関する基礎的研究

研究課題名(英文) Development of drift capacity model for seismic design of reinforced concrete moment resisting frame structures

研究代表者

塩原 等 (SHIOHARA, Hitoshi)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：50272365

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：曲げ降伏型に設計される鉄筋コンクリート建物の極大地震動に対する耐震余裕度に及ぼす設計因子の影響を定量化するため、18体の曲げ降伏する片持ち梁と6体の十字形柱はり接合部部分架構耐震実験を実施した。その結果、梁端部の曲変形成分がシアスパン比のみで決まる一定値を越えると、曲げ圧縮主筋のタボ作用のせん断伝達性能が低下して曲げ変形成分の増大が停止し、かつ、最大耐力に達すること、その後、さらにせん断変形成分が増大して横補強筋量により定まる一定値に達すると、圧縮主筋が塑性座屈して急激耐力低下が始まる機構が見られることを明らかにし、耐震余裕度の定量的推定モデル開発の基礎的知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

梁曲げ降伏型の鉄筋コンクリート造ラーメン架構は、梁端の安定した履歴エネルギー吸収により大地震に対する倒壊余裕度を有する構造形式である。しかし、建物の倒壊余裕度を定量化するには、曲げ降伏する梁の変形限界点や耐力低下の現象を地震応答シミュレーションに組み込むことが必要となるが、未だ十分な説明はなされてない。そこで、本研究では、部材の設計因子を網羅的に取り込んだ系統的な鉄筋コンクリート部材の耐震実験が行われ、耐力低下の原因となる物理的現象が解明された。将来は、その成果を組み込んだ地震応答シミュレーションのためのモデルが開発され、建物全体の倒壊余裕度が合理的に算出されるようになることが期待される。

研究成果の概要(英文)：Seismic tests on 18 scaled RC cantilever beams and 6 RC beam-column joint subassemblages which were designed to have ductile flexural behavior were carried out to investigate the seismic collapse safety margin and to develop a model to predict story drift capacity for RC frame buildings. It was observed commonly in the tests that the flexural component of story drift surpassing a limit value, which is a function of shear-to-span ratio, caused the reduction of dowel action of flexural compressive rebars at critical section, which capped the increase of the flexural component of story drift and further increase of shear deformation component beyond a limit which is the function of the amount of stirrups, triggered the formation of plastic buckling of axial reinforcing bar then progressive reduction of strength began.

研究分野：建築構造

キーワード：コンクリート構造

1. 研究開始当初の背景

梁曲げ降伏型に設計される鉄筋コンクリート造ラーメン架構は、梁の曲げ降伏ヒンジの安定した復元力特性によって、設計地震力を超える大地震に対して、一定の倒壊安全余裕度を有する優れた構造形式と考えられている。しかしながら曲げ降伏する梁であっても、一定の限界変形点を超えると耐力低下が始まることが避けられないため、倒壊安全余裕度を定量化するためには、梁の曲げ降伏後の限界変形点を定量化することが課題となっている。しかし、目標を明確に絞り込んだ首尾一貫した実験計画に基づく体系的な実験研究が少ないため、限界変形点の推定手法の精度の信頼性は低い。今後、耐震倒壊余裕度を評価する手法の信頼性を高めるために、柱梁強度比や主筋量、軸力、横補強筋量など骨組の設計因子の組み合わせが、履歴特性と架構の変形限界値に及ぼす影響を定量的かつ精度よく推定できる方法を確立するというブレークスルーが必要とされている。

2. 研究の目的

本研究では、梁曲げ降伏型の鉄筋コンクリート靱性骨組架構を構成し、地震力による繰返し載荷を受ける曲げ降伏型はりを対象とし、a) 主筋径、b) ヒンジ領域の横補強筋量、c) 横補強筋量の強度、d) シアスパン比、及び、f) コンクリート強度を変数とし、片持ち試験体を多数作成して静的繰返し載荷実験を行い、急激に耐力低下が進行する限界変形点に至る過程を詳細に計測・記録し、限界変形点の変形を定量的に確かめるための系統的な実験を行い、影響因子の分析を行う。さらに、同断面の梁を有する縮小柱梁接合部分架構を対象として、柱梁接合部の柱梁耐力比と接合部横補強筋量の組み合わせを変数として、梁曲げ降伏型の十字形柱梁接合部分架構試験体を行い、静的繰返し載荷実験を行い、限界変形点に及ぼす影響の分析を行う。

3. 研究の方法

(1) 「鉄筋コンクリート梁の繰返し載荷による終局変形性能に関する実験」

試験体は、図1と図2に示すように、断面が幅180mm、せい240mmの長方形梁で、スケールが1/3、上端下端同配筋の鉄筋コンクリート片持ち梁18体とした。実験は、SAシリーズ3体(2016年度)、SBシリーズ11体(2017年度)、SCシリーズ4体(2018年度)に実験を行い、5種類の実験変数を、a) せん断スパンは700mm、1000mm、1300mm、b) 引張鉄筋比は1.31%と1.96%、c) 横補強筋比は0.26%、0.52%、1.04%、2.35%、d) 横補強筋降伏点は366MPaと749MPa、e) コンクリートの圧縮強度は呼び強度を24MPaと50MPa、として、これらの組合せにより諸元を設定した。試験体の固定端側は、曲げ補強筋とせん断補強筋を十分に配置して弾性範囲内となるようにしている。試験区間は加力点付近を除き、一様に横補強筋を配置している。

試験体の加力は部材角による変位制御で行い、部材角0.25、0.5%を1回ずつ載荷した後、0.75、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、7.0、8.0%をそれぞれ3サイクルずつ同一振幅で正負繰返した。片持ち梁の変形の計測は、片持ち梁のたわみと曲げ回転角計測し、歪ゲージを危険断面位置の主筋に貼付した他、損傷観察のために試験体に間隔50mmのグリッドを書き写真を撮影し記録し画像処理による変形計測を行った。

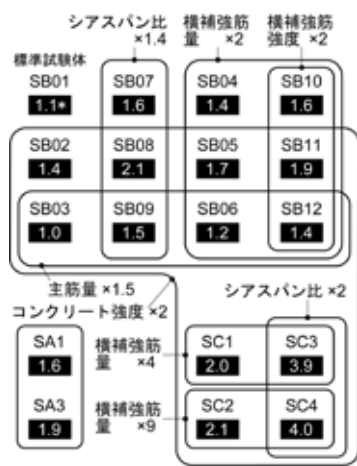


図1 実験変数の関係

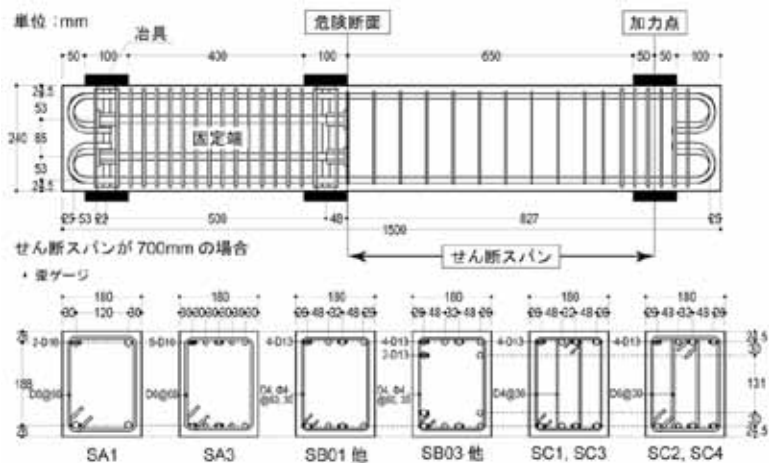


図2 片持ち試験体の形状寸法、配筋

(2) 「柱梁強度比と接合部横補強筋量の異なる鉄筋コンクリート造十字形接合部の破壊性状」

柱梁強度比と接合部横補強筋量を実験変数とした 1/3 スケール（梁幅 180mm, 梁せい 240mm）の十字形柱はり接合部 6 体を作製した（2018 年度）。梁主筋は接合部内を通し配筋とした。柱と梁のせん断補強筋はせん断補強筋比をいずれも 1.06%とし、曲げ降伏後でも部材端の損傷による耐力低下が生じにくい設計とした。柱梁強度比は、1.24, 1.47, 1.88 の 3 レベルであり、接合部横補強比は、0.55%, 0.82%, 1.06%の 3 レベルとした。試験体の加力は部材角による変位制御で行い、部材角 0.25, 0.5% を 1 回ずつ载荷した後、0.75, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0% をそれぞれ 2 サイクルずつ同一振幅で正負繰返した。

4. 研究成果

(1) 「鉄筋コンクリート梁の繰返し载荷による終局変形性能に関する実験」

実験の結果、全試験体で曲げ降伏型の挙動を確認した。鉄筋に貼付した歪ゲージから、全試験体で梁主筋の降伏が確かめられた。図 3 に層せん断力と層間変形角の関係を、図 4 にひび割れ状況を示す。曲げ降伏する部材角は 0.4 から 1.0% の範囲にあった。最大せん断力点の部材角は、SA シリーズは 4.0%, SB シリーズは 2.0 から 4.0%, SC シリーズは 5.0 から 7.0% であり、研究の目的としていた鉄筋コンクリート部材の限界変形点の変形を定量的に確かめるための系統的な実験より、耐力低下が進行する限界変形点に至る過程、曲げ変形・せん断変形成分のそれぞれの履歴特性が得られた。また、曲げ降伏領域の写真画像の画像処理による詳細な歪分布に関する詳細なデータが得ることができ、影響因子の分析を行った。今後これらのデータを活用して履歴特性と架構の変形限界値を定量的かつ精度よく推定できるモデルの確立に進めていく予定としている。

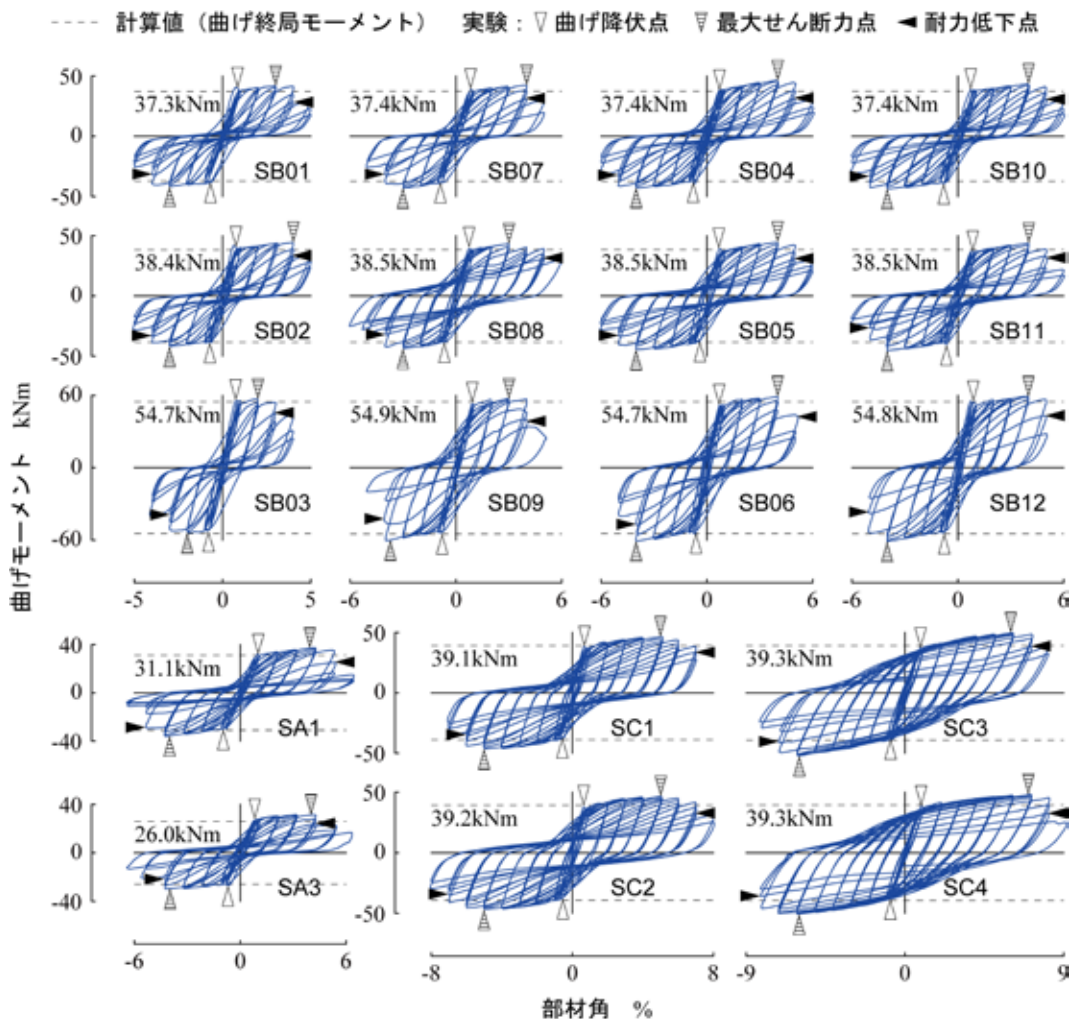


図 3 部材角と危険断面の曲げモーメントの関係



図4 最大せん断力点（正）直後で変位 0mm 時の写真

耐力低下点の部材角に最も影響を及ぼす因子は横補強筋比であり、本実験においてはせん断余裕度よりも耐力低下点の部材角との強い相関を示していた。また SC シリーズの実験結果から、せん断スパンが大きい場合に限り、耐力低下点の部材角の影響因子になると推測される。引張鉄筋比、横補強筋降伏点、コンクリート強度は耐力低下点の部材角に及ぼす影響はほとんどなかった。

(2) 「柱梁強度比と接合部横補強筋量の異なる鉄筋コンクリート造十字形接合部の破壊性状」

最大耐力は概ね梁曲げ終局強度を上回り、柱梁強度比が 1.88、接合部横補強比が 1.06%では、層間変形角 4% でも梁のたわみと梁端回転が全体の約 7 割を占め、梁曲げ降伏ヒンジが形成され柱はり接合部の損傷は第変形時にいたるまで小さかった。残りの組み合わせでは、柱梁強度比が小さいほど、接合部横補強比が少ないほど、大変形時に柱はり接合部の変形成分は増加した。また、層せん断力-層間変形角に関する、履歴形状はすべてスリップ性状を示した。接合部横補強比が 1.06%の試験体では、梁主筋が層間変形角 1.0%で降伏した後に接合部横補強筋の中段で降伏しているが、その他の試験体では梁主筋降伏直前（梁曲げ耐力時の 80%程度の時）に接合部横補強筋が引張り降伏した。これらのデータは、今後、接合部降伏破壊を考慮した柱梁接合部の短期許容設計法の確立が必要とされる現状において、接合部横補強量を降伏させないための、柱はり接合部の必要横補強量を定めるために活用される有用なデータが得られた。

<引用文権>

- ① 吉田優一朗, Trivedi Shubham, 塩原等, 田尻清太郎 (2018). 鉄筋コンクリート梁の繰返し載荷による終局変形性能に関する実験, 第 15 回日本地震工学シンポジウム梗概集, pp. 1111-1120.
- ② 大西 直毅, 塩原 等. 柱梁強度比と接合部横補強筋量の異なる鉄筋コンクリート造十字形接合部の破壊性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), 2019 年 9 月, (発表予定)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① 齋藤真也, 向井智久, 塩原等. 2016 年熊本地震により被災した鉄筋コンクリート造庁舎の柱梁接合部に関する検討. コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, No. 2, 2018 年 7 月, pp. 1039-1044.
- ② 塩原等, 小林楓子, 佐藤友佳, 楠原文雄. 鉄筋コンクリート造多層平面骨組の地震応答と柱梁接合部の耐震設計. 日本建築学会構造系論文集, 第 82 巻, 第 739 号, 2017 年 9 月, pp. 1437-1447.
- ③ 土佐内優介, 佐藤栄児, 福山國夫, 井上貴仁, 梶原浩一, 塩原等, 壁谷澤寿海, 長江拓也. 大型震動台による 10 階建て鉄筋コンクリート造建物の三次元振動実験(2015) -基礎すべり建物の実験方法と応答-, 日本建築学会構造系論文集, 第 83 巻 第 750 号, 2018 年,

pp. 1139-1149.

- ④ Suhee Kim, Fumio Kusahara and Hitoshi Shiohara. Analysis of RC slab-beam-column sub-assemblages subjected to bidirectional lateral cyclic loading using a new 3D macro element, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 46(11), May 2017. DOI: 10.1002/eqe.2916
- ⑤ 小林楓子, 楠原文雄, 塩原等. 2016年熊本地震時の観測記録を用いた8層鉄筋コンクリート造平面骨組の地震応答解析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 39, No. 2, 2017年7月, pp. 241-246.
- ⑥ Hitoshi Shiohara. A New AIJ Standard for Seismic Capacity Calculation: Recent Advances in Beam-Column Joint Design and Seismic Collapse Simulation on Reinforced Concrete Frame Buildings, ACI SP-313, Proc. Of the First ACI&JCI Joint Seminar: Design of Concrete Structures Against Earthquake and Tsunami Damage, pp. 7.1-7.10.

〔学会発表〕(計10件)

- ① 吉田優一郎, TRIVEDI Shubham, 塩原等, 田尻清太郎. 横補強筋量の異なる鉄筋コンクリート造梁の写真測定法による残留ひび割れ幅, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), 2019年9月, (発表予定)
- ② 大西直毅, 塩原等. 柱梁強度比と接合部横補強筋量の異なる鉄筋コンクリート造十字形接合部の破壊性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), 2019年9月, (発表予定)
- ③ Shubham TRIVEDI, Hitoshi SHIOHARA, and Seitaro TAJIRI, “Experimental Investigation on Ultimate Drift Capacity Of RC Beams Subjected To Reverse Cyclic Loading: Photogrammetric Observations.” Proc. of the 15th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp. 1091-1100, December 6-8, 2-18, Sendai, Japan.
- ④ 吉田優一郎, Trivedi Shubham, 塩原等, 田尻清太郎. 鉄筋コンクリート梁の繰返し荷荷による終局変形性能に関する実験, 第15回日本地震工学シンポジウム梗概集, pp. 1111-1120.
- ⑤ 齋藤真也, 塩原等, 田尻清太郎, 向井智久. 2016年熊本地震により大破した鉄筋コンクリート造建築物の被害要因の検討, 第15回日本地震工学シンポジウム梗概集, pp. 1864-1873. 2018年12月6~8日, 仙台.
- ⑥ S. Trivedi, N. Kurita, Y. Yoshida, H. Shiohara, and S. Tajiri. “Experimental Investigation on Ultimate Drift Capacity Of RC Beams Under Cyclic Loading (ID 448).” Eleventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering, June 25-29, 2018, Los Angeles, California.
- ⑦ H. Shiohara. Seismic Response of Multi-Story Rc Frame Structures And Reinforcing Detail of Beam-Column Joints (ID 1418). Eleventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering, June25-29, 2018, Los Angeles, California.
- ⑧ Hitoshi Shiohara: Large-Scale Shake-Table Test on Ten-Story Reinforced Concrete Building, ACI Fall 2017 Convention in Anaheim, CA.
- ⑨ 塩原等. 最近の米国の建築物耐震設計基準. 日本建築学会構造部門研究協議会資料, 2018年9月, pp.1-14
- ⑩ 塩原等. 米国の超高層 RC 造建物の耐震設計. 日本建築学会構造部門(RC 構造)PD 資料, 2017年9月, pp.41-50.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

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

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名: 田尻清太郎

ローマ字氏名: TAJIRI Seitaro

所属研究機関名: 東京大学

部局名: 大学院工学系研究科

職名：准教授

研究者番号（8桁）：10466013

(2)研究協力者

研究協力者氏名：大西 直毅

ローマ字氏名：ONISHI Naoki

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。