

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420573

研究課題名(和文)鉄筋コンクリート柱のせん断破壊を許容できる耐震設計手法に関する研究

研究課題名(英文)Structural Design for Reinforced Concrete Buildings with Shear-failing Columns

研究代表者

中村 孝也 (NAKAMURA, TAKAYA)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：50305421

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は鉄筋コンクリート(RC)建物を対象として、新規に建設される建物の構造設計において、せん断破壊型の柱部材を許容した耐震設計法の開発および建物の耐震性評価を行うことを目的とし、実験および解析の両面からの検討を行ったものである。実験により軸力再配分により挙動が変化するRC柱の崩壊性状を明らかにし、解析により曲げ破壊型柱とせん断破壊型柱が混在するRC建物において、せん断破壊型柱の存在が耐震性能の向上に役立ちうることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We studied the structural design method for newly-constructed reinforced concrete (RC) buildings that include the shear-failing RC columns with a large amounts of the longitudinal reinforcement and the transverse reinforcement. The collapse test of shear-failing RC columns considering axial-load redistribution and the earthquake response analysis of RC buildings which consist of the flexural columns and the shear-failing columns were conducted. The study reveals that the shear-failing RC columns contribute to the improvement of the structural performance of RC buildings.

研究分野：鉄筋コンクリート構造

キーワード：鉄筋コンクリート構造 新規建物 せん断破壊型柱 構造設計

1. 研究開始当初の背景

RC 建物の耐震性を評価する場合、電算機を用いた静的漸増荷重解析や非線形地震応答解析を実施することは極めて有効である。ただし、その解析精度が保証されるのは、過去の膨大な実験の蓄積によって破壊性状が明らかにされている靱性部材からなる建物のみであり、せん断破壊するような脆性部材を含む建物の解析結果の信頼性は低いと言わざるを得ないのが現状であった。理由は、そのような脆性部材の挙動、特に最大耐力後に耐力が低下して軸力保持能力喪失（以下、崩壊と呼ぶ）に至るまでの挙動が十分に明らかにされていないことによる。ただし、建設年代が古い、いわゆる旧基準建物については、RC 柱の崩壊に関する実験や、建物が崩壊に至るまでの解析が精力的に行われて研究成果が蓄積されて来ている。一方、新規建物のように鉄筋量が多い部材のせん断破壊性状は十分に明らかになっていない状況であった。ここで、現行の構造設計ではせん断破壊する部材は基本的には許容されないのであるが、もしせん断破壊型部材が許されるのであれば、以下のようなメリットが考えられる。

1)せん断破壊部材は曲げ破壊部材よりも最大耐力と剛性が高く、それらを生かした設計をすることができる。2)構造設計者が曲げ破壊とせん断破壊を選択することができ、設計の自由度が拡大する。

2. 研究の目的

まずせん断破壊型柱の崩壊現象について明らかになっていない点を実験により明らかにし、次に地震応答解析によりせん断破壊型柱を含む新規建物の挙動を把握し、構造設計に対して知見を提供すること、それが本研究の目的である。具体的には、次の(1)と(2)についてそれぞれを研究目的とした。

(1) RC 柱の軸力再配分

複数の種類の柱からなる RC 建物では地震時に、脆弱な柱が先にせん断破壊した後、柱の変形が進むと軸力が梁を介して移動し、脆弱な柱の軸力は減少し、周囲の比較的靱性のある柱の軸力が上昇する。本研究では、このような軸力再配分に伴い軸力が上昇する柱の崩壊性状を把握することを目的とする。既往の研究により、加力の途中で軸力を上昇させるとその直後から破壊が進み、上昇前の軸力で一定軸力荷重した場合と比べて崩壊が早まることが分かっている。ここで、軸力上昇するときの水平変形は先に破壊する柱に依存するため様々であるといえるが、それと柱の崩壊性状の関係は明らかになっていない。そこで、比較的靱性のあるせん断破壊型 RC 柱を対象として崩壊実験を行い、軸力上昇時の水平変形が柱の崩壊性状に及ぼす影響を検討する。

(2)せん断破壊型柱を有する RC 建物の挙動

現行の RC 建物の設計においてせん断破壊型柱は、地震時に軸力保持能力を喪失して崩壊する恐れがあることから使用が避けられている。しかし、せん断破壊型柱を含む建物ではその高い耐力と剛性が耐震上有利に働く可能性も考えられる。特に、部材の鉄筋量（主筋、せん断補強筋）が多い場合にはせん断破壊型柱であっても大変形領域まで安定して軸力を保持できることが過去の実験により分かっており、靱性型建物の一部にせん断破壊型柱を含めた設計の可能性も考えられる。しかしながら、そのような場合の建物の構造性能は十分に明らかになっていない。そこで、現行基準による建物を対象として、曲げ破壊型柱のみからなる建物と、その一部をせん断破壊型柱に置き換えた建物の地震応答を比較し、耐震性評価を行う。

3. 研究の方法

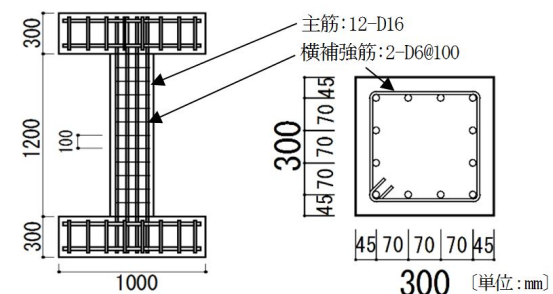
以下、2 テーマに分けて、研究結果を含む研究方法の概要を述べる。

(1) RC 柱の軸力再配分

(1)-1 試験体概要

本研究の対象は、地震時の軸力再配分により軸力が上昇する柱である。試験体は3体とした（試験体名：N2-30A45、N2-30A25、N2-30B09）。ここで、過去の一定軸力の試験体（No.1 と No.4）および軸力上昇させた試験体（N2-30A と N2-30B）も併せて検討対象とした。なお、試験体 No.1 は軸力上昇試験体における上昇前の軸力比（0.2）で、試験体 No.4 は上昇後の軸力比（0.3）でそれぞれ一定軸力荷重を行い崩壊させたものである。

試験体は約 1/2 スケールとした（図(1)-1）。各試験体の形状、配筋は同一で、柱断面寸法は 300mm×300mm、内法高さは 1200mm、主筋比 $P_g=2.65\%$ （12-D16）、横補強筋比 $P_w=0.21\%$ （2-D6@100）とした。鉄筋は主筋が D16、横補強筋が D6（どちらも SD345）である。本実験の試験体における材料強度は、コンクリート強度 $\sigma_B=30.1 \text{ N/mm}^2$ 、鉄筋降伏強度 σ_y は D16 が 351 N/mm^2 、D6 が 385 N/mm^2 である。これらの強度は過去の試験体と同程度である。



図(1)-1 試験体形状

実験変数は軸力上昇時の水平変形とした。前述のように、どこで軸力が上昇するのかは

相手の脆弱な柱に依存するため、軸力上昇点として3種類の水平変形時を設定した。すなわち、N2-30A45では4.5%、N2-30A25では2.5%、N2-30B09では0.9%（柱中央部のせん断破壊発生直後）である。軸力比はそれらの変形時において0.2から0.3に上昇させた。

加力は逆対称変形を保つ形式とし、試験体に軸力を作用させた状態で水平方向加力を行い、最終的に崩壊（軸力保持能力喪失）するまで行った。荷重履歴は、水平変形 $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 1\%$ 、 $\pm 2\%$ を各1サイクル加えた後、軸力を保持できなくなるまで正方向に押し切る荷重とした。ここで水平変形は柱内法高さで割った部材角で表す。

(1)-2 実験結果

各試験体の水平力-水平変形関係を図(1)-2に示す。なお、N2-30A45とN2-30A25は加力装置の限界により崩壊まで加力できなかったが、水平力が最大耐力の1割まで減少した時（以下、耐力10%時と呼ぶ）の水平変形を1.26倍することにより崩壊水平変形を推定した。

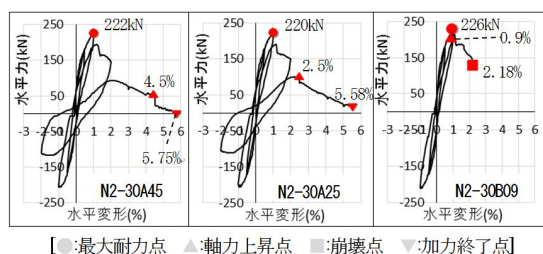
N2-30A45は水平変形1.0%の時に主筋に沿うようにひび割れが生じ始め、1.33%のときに柱中央部にせん断破壊が発生した。水平変形3.42%からひび割れ幅が拡大し、3.67%からはコンクリートの剥落も目立ち始めた。水平変形4.5%で軸力を上昇させた直後からせん断ひび割れが更に拡大し、急激に水平力が低下したが、崩壊することなくその後も軸力を保持し続けた。その後、加力装置の限界まで加力も崩壊には至らず、水平変形5.75%で加力を終了した。前述の通り耐力10%時水平変形から崩壊水平変形を推定すると5.73%となる。

N2-30A25は水平変形が1.08%の時に主筋に沿うようにひび割れが生じ始め、1.23%の時に柱中央部にせん断破壊が発生した。水平変形2.5%で軸力を上昇させた直後から付着割裂ひび割れの延長、ひび割れ幅の拡大が進み、付着割裂破壊が卓越した。水平変形4.67%からは大規模なコンクリートの剥落も発生した。N2-30A45と同様に、水平変形5.58%で加力を終了した。前述の通り耐力10%時水平変形から崩壊水平変形を推定すると6.48%となる。

N2-30B09は柱中央部のせん断破壊発生直後に軸力を上昇させることを目的とし、それが生じた水平変形0.9%の時に軸力を上昇させたが（これは最大耐力前だった）、軸力を上昇させている最中から、せん断ひび割れの拡大が進み、軸力比が0.3に到達した直後から主筋に沿うようにひび割れが生じ始めた。その後はせん断ひび割れが伸び、水平変形2.18%の時に崩壊した。なお、計器の不具合によりN2-30B09は $\pm 2.0\%$ のサイクルを行わずに押し切を行った。崩壊時のひび割れは、他の2試験体よりも小さかった。

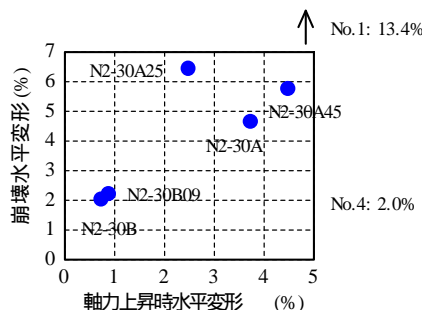
どの試験体も崩壊時にはせん断ひび割れ

とともに、主筋に沿うように鉛直方向に付着割裂ひび割れが生じた。



図(1)-2 水平力-水平変形関係

軸力上昇時水平変形と崩壊水平変形の関係を図(1)-3に示す。軸力上昇した試験体の崩壊水平変形は、上昇前の軸力比で一定軸力荷した試験体No.1より小さくなった。また、上昇後の軸力比で初めから一定軸力荷した試験体No.4と比べて崩壊水平変形は同じ、または大きな値となった。更に、軸力上昇時水平変形が大きいほど崩壊水平変形が大きくなる傾向が見られた。ただし、N2-30A25はその傾向から外れ、崩壊水平変形が大きめであった。これは前述のように付着割裂破壊が卓越したためと考えられる。



図(1)-3 軸力上昇時水平変形と崩壊水平変形の関係

(2)せん断破壊型柱を有するRC建物の挙動

(2)-1 解析手法

解析モデルは1自由度質点系とした。

柱は、曲げ破壊型のF柱を基本とした。F柱はトリリニア型の復元力特性を有するものとした（図(2)-1）。降伏時剛性は $K_y = \alpha_y K_0$ ($\alpha_y = 0.3$)とし、降伏時の接線剛性は $K_0/100$ とした（ K_0 は初期剛性）。なお、F柱は変形が大きくなっても崩壊しないものと仮定した。

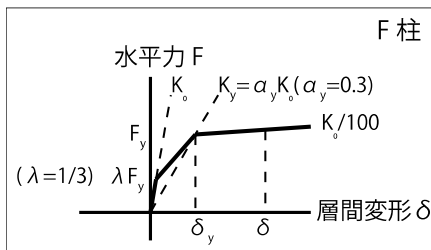
これに対して、せん断破壊型のS柱は、過去の鉄筋量が多い試験体PG3.0（せん断補強筋比 $P_w = 0.53\%$ 、主筋比 $P_g = 3.0\%$ 、軸力比0.18）の実験結果を基にして4折れ線型の復元力スケルトンを設定した（図(2)-2）。建物階高3600mm、内法高さ2400mmを想定して、復元力モデル上の各折れ点時の層間変形角を設定した。最大耐力時変形は0.67%、第3折れ点時水平変形2.0%、崩壊水平変形は11.4%となり、せん断破壊する短柱であって

も、大変形領域まで軸力を保持できるものとした。S柱の最大耐力と初期剛性は、F柱の曲げ降伏時耐力と初期剛性の2倍と仮定した。

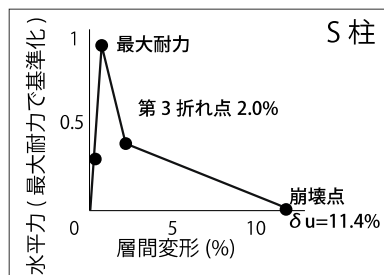
これらの柱の繰り返し応答に対する履歴特性は過去の実験結果に適合するように武田スリップ型のモデルとした。

解析ではF柱のみからなるモデルを基本とし(以降モデルF)、ベースシア係数 C_B を0.3、一次固有周期を0.25秒、0.5秒、0.75秒、1.0秒とした。それに対して比較のためF柱とS柱が混在するモデル(以降モデルF+S)を設定し、F柱の50%がS柱に置き換わると考えて、せん断バネを並列させる建物を基本とした。これにより、前述のモデルFから一次固有周期はそれぞれ0.21秒、0.41秒、0.61秒、0.82秒となり、 C_B は0.45に上昇する。なお、モデルF+Sで一次固有周期0.61秒と0.82秒の時、復元力モデルが適正なものになるようにS柱の最大耐力時変形をそれぞれ1.37%、2.68%とした。

解析に際して、運動方程式の数値積分にはNewmarkの β 法($\beta=1/4$)を用いた。粘性減衰は初期剛性比例型とし、減衰定数は0.02とした。



図(2)-1 曲げ破壊型柱復元力モデル



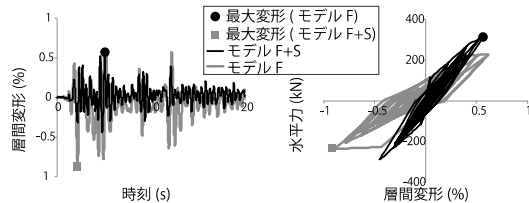
図(2)-2 せん断破壊型柱復元力モデル

入力地震動として、神戸海洋気象台 NS (JMA, 1995年、兵庫県南部地震、地動最大速度 82.6cm/s)、El Centro NS (ELC, 1940年、Imperial Valley地震、同 33.6cm/s)、東北大学 NS (TOH, 1978年、宮城県沖地震、同 41.6cm/s)、K-net 熊本 NS3 (2016年、熊本地震、同 66.9cm/s)の4波を用いた。

現行のRC建物の設計において塑性率は2~4程度であると想定し、上記の4波をモデルFでのそれぞれの一次固有周期で塑性率が2, 3, 4になるように入力レベルを変化させて用いた。

(2)-2 解析結果

一次固有周期0.25秒のモデルにELCを入力し、モデルFで塑性率が2となる時の層間変形の時刻歴と荷重変形関係を図(2)-3に示す。入力レベルは同じであるが最大層間変形はモデルFでは0.89%、モデルF+Sでは0.57%であり、後者の方が変形が小さくなった。これは、S柱により C_B が上昇したためと考えられる。つまり、モデルF+Sの方が最大層間変形が小さく抑えられ(モデルF+S/モデルF=0.63)、モデルFよりもモデルF+Sの方が構造的に有利であるといえる。



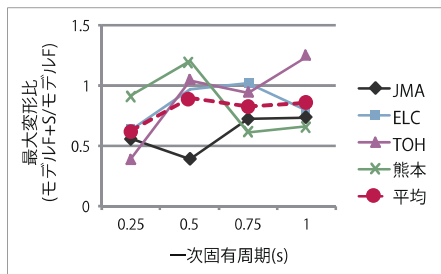
図(2)-3 層間変形角の時刻歴と荷重変形の関係 (ELC, $T=0.25s$, 塑性率2)

塑性率2, 3, 4の一次固有周期ごとの最大変形の比較を図(2)-4に示す。最大変形比はモデルF+Sの最大層間変形をモデルFの最大層間変形で除した値である。

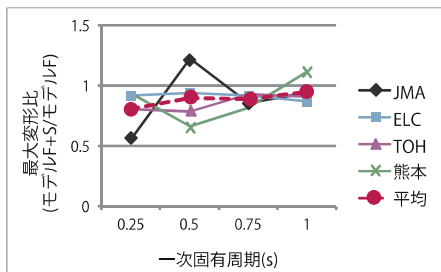
塑性率2では、一次固有周期0.25秒の時、いずれの地震波でも最大変形比が1より小さい、つまりモデルF+Sの変形の方が小さくなった。最大変形比が1より大きい値となったものは最大でも1.2程度であった。4波の平均値をみると、最大変形比は0.6から0.8程度であった。いずれの一次固有周期に対しても最大変形比は1より小さく、せん断破壊型柱を配置すると変形が抑えられた。

塑性率3では、JMAを除く地震波では同程度の最大変形比となった。平均値はいずれの一次固有周期でも0.8から0.9程度であり、せん断破壊型柱を配置すると変形が抑えられた。このとき、一次固有周期0.25秒の時に最大変形比は最も小さくなり、一次固有周期1秒の時に最も大きくなった。

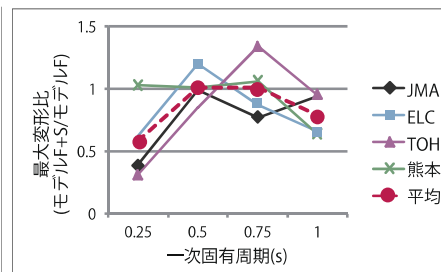
塑性率4では、一次固有周期0.25秒の熊本の地震波で最大変形比は1.11となった。この点は、塑性率2と3では一次固有周期0.25秒の時は最大変形比が1を上回る地震波がなかったことと若干異なった。塑性率2と3に比べて塑性率4の時では、最大変形比が1を上回る地震波が多くなった。平均値は、一次固有周期0.25秒と1秒では1より小さく0.6から0.8程度であるが、0.5秒と0.75秒ではほぼ1であり、モデルFとモデルF+Sで最大変形は同程度であった。



(a) 塑性率 2



(b) 塑性率 3



(c) 塑性率 4

図(2)-4 固有周期と最大変形比

4. 研究成果

以上、2 テーマに分けて研究の概要を示した。それぞれについて得られた成果を以下にまとめる。

(1) RC 柱の軸力再配分

せん断破壊直後の水平変形が小さいときに軸力上昇させた試験体 N2-30B09 は水平変形 2.18% で崩壊した。一方、最大耐力後に軸力上昇させた試験体 N2-30A45 と N2-30A25 について耐力 10% 時水平変形から崩壊水平変形を推定したところ、N2-30A45 では 5.73%、N2-30A25 では 6.48% となった。

軸力上昇させた試験体は、初めから上昇前の軸力で一定軸力載荷した試験体 No.1 よりも崩壊水平変形が小さくなった。

軸力上昇時水平変形が大きいほど崩壊水平変形が大きくなった。ただし、付着割裂破壊が卓越した試験体 N2-30A25 はその傾向から外れて崩壊水平変形が大きめとなったため今後の検討が必要である。

(2) せん断破壊型柱を有する RC 建物の挙動

モデル F+S における F 柱と S 柱の比率が 1 対 1 の場合 (F 柱 50% S 柱 50%)、最大変形比 (モデル F+S/モデル F) は 0.6 から 0.9 程度であった。これより せん断破壊型柱を含むモデル F+S の方が曲げ破壊型柱のみからなるモデル F よりも最大変形が小さく抑えられるといえる。

以上の成果は、新規設計する鉄筋コンクリート造建物の構造設計法の拡張に資するところ大と考えている。

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 1 件)

1) 中村孝也: 連続する巨大地震に対する既存鉄筋コンクリート建物の地震応答評価 - 短周期地震と長周期地震に対する応答解析 - , 構造工学論文集, Vol.63B, pp.433-440, 査読有, 2017.3

〔学会発表〕(計 7 件)

1) 佐藤舞子, 中村孝也: せん断破壊型の柱材を含む靱性的な RC 造建物の耐震性評価, 日本建築学会北陸支部大会研究報告集, 第 60 号, 査読無, 2017.7.9, 信州大学 (長野市)

2) 武田尚之, 林 恭正, 中村孝也: せん断破壊型 RC 柱の軸力上昇を考慮した崩壊実験 - 軸力上昇時水平変形が柱の崩壊性状に与える影響 - , 日本建築学会北陸支部大会研究報告集, 第 60 号, 査読無, 2017.7.9, 信州大学 (長野市)

3) Takaya Nakamura and Takayuki Takeda: Seismic Performance Variation of Reinforced Concrete Columns with Increased Axial Load, Proceedings of the New Zealand Society for Earthquake Engineering 2017 Conference, Reference Number 0099, 査読有, 2017.4.28, Wellington, New Zealand

4) Takaya Nakamura and Ayumu Kawami: Intermediate-story Collapse of Reinforced Concrete Buildings Considering Aftershocks, Proceedings of the sixteenth World Conference in Earthquake Engineering, Paper No.2709, 査読有, 2017.1.11, Santiago, Chile

5) 武田尚之, 中村孝也: 曲げ降伏後せん断破壊する RC 柱の軸力上昇を考慮した崩壊性状 その 1 実験計画と崩壊過程, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 IV, pp.33-34, 査読無, 2016.8.24, 福岡大学 (福岡市)

6) 中村孝也, 武田尚之: 曲げ降伏後せん断破壊する RC 柱の軸力上昇を考慮した崩壊性状 その 2 実験結果の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 IV, pp.35-36, 査読無, 2016.8.24, 福岡大学 (福岡市)

7) Takaya Nakamura, Daisuke Imori and Manabu Yoshimura: Collapse Time of Old Reinforced Concrete Buildings, SECED 2015 Conference, Earthquake Risk and Engineering towards a Resilient World, 査読無, 2015.7.9, Cambridge, UK

〔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〕

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

中村 孝也 (NAKAMURA TAKAYA)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：50305421

(2)研究分担者

なし ()

(3)連携研究者

なし ()

(4)研究協力者

武田 尚之 (TAKEDA TAKAYUKI)

佐藤 凱 (SATO GAI)

林 恭正 (HAYASHI YASUMASA)

渡辺 文智 (WATANABE FUMITOMO)

佐藤 舞子 (SATO MAIKO)