

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420584

研究課題名(和文) 制震性能を部材内部に内蔵する次世代鉄筋コンクリート構造を目指した挑戦的研究

研究課題名(英文) A seismic design methodology and technique on reinforced concrete structure buildings such as vibration control structure

研究代表者

塩屋 晋一 (Shioya, shinichi)

鹿児島大学・理工学域工学系・教授

研究者番号：80170851

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：鉄筋コンクリート構造を対象にして、大地震時に大変形を経験しても、構造体の損傷を軽微にとどめ、残留変形角を抑制する技術の研究を行った。

梁では上端筋に高強度鉄筋を配筋して、下端筋の普通鉄筋が降伏した以降は、その高強度鉄筋が弾性抵抗して、二次剛性を発揮し、変形依存型の制震構造の履歴特性に類似の履歴特性を発揮する梁を開発して、その履歴特性の評価モデルを構築した。また、1階の柱では、残留変形を制御できる指標として、復元モーメント比を開発して、その履歴特性の評価モデルを構築した。

これらの残留変形を抑制できる柱と梁からなる建物の弾塑性振動解析を行い、建物の大地震後の残留変形の抑制状況を解析的に明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We researched a seismic structural design methodology and technique on reinforced concrete structure buildings, which would suppress damages and residual leaning deformation in them.

Beam, in which was arranged high strength deformed steel bars at top reinforcement, performed well hysteresis loop such as vibration control structure building with secondary stiffness of the structure just after yielding of hysteresis damping device. Column, in which is designed to be with relevant righting moment due to axial force, also was found to performed well re-centering.

Moreover, reinforced concrete buildings composed of these beams and columns, was also revealed to perform well re-centering even if several big earthquakes attack them, by time history response analysis.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：鉄筋コンクリート構造 制震構造 残留変形 耐震設計 高強度鉄筋

1. 研究開始当初の背景

鉄筋コンクリート造(RC造)や鉄骨造の耐震構造は地震時には構造体の降伏や損傷により振動エネルギーを吸収するため、地震後に損傷や変形が残る。これらを軽減することが、耐震構造の今後の重要な課題である。特に建物の残留変形を戻す補修工事は困難になる。

残留変形を積極的に抑制する構造としては、制震構造と免震構造がある。エネルギー吸収要素と弾性抵抗要素を混合した構造である。エネルギー吸収要素が変形依存型の完全弾塑性型履歴特性(図1(a))であれば、建物の履歴特性は、弾性抵抗要素(図1(b))と合わせて図1(c)の履歴特性になる。図1(c)の弾性剛性 $k_1$ に対して降伏後の二次剛性 $k_2$ を与えることにより残留変形を抑制できる。これは最大応答変形後の残存振動と建物の履歴特性の相乗効果により生じる。耐震構造でも、構造体自体の履歴特性を図1(c)にできると、制震構造や免震構造と同様に残存振動により残留変形を抑制する効果が発揮される可能性がある。

本研究はRC造の柱・梁・耐震壁の履歴特性を図1(c)にし、建物全体の履歴特性を制震構造の図1(c)に近づけ、残留変形を抑制する効果を発揮させる。この発想の研究はこれまでに全く行われていない。

耐震構造で残留変形を抑制する研究は鋼構造文献やプレストレストコンクリート構造文献でプレストレストを導入して行われている。しかし、プレストレスト導入の作業と管理や、プレストレスト導入によりPC鋼線が弾性抵抗できる範囲が小さくなることなどの問題がある。

一方、鉄筋コンクリート構造では残留変形を評価する研究文献にとどまり、柱や梁および耐震壁などの構造体の力学的特性で残留変形を積極的に抑制する研究は全くない。残留変形を抑制するためには先ず、コンクリートの損傷抑制が必要である。RC部材の損傷抑制はヒンジ領域の主筋の付着を無くしてコンクリートの劣化を防ぐ優れた方法文献が提案されている。しかし、その方法には残留変形を抑制する性能は付加されていない。本研究はその損傷抑制方法も利用して残留変形を抑制する性能をRC造の柱や梁の内部に内蔵させる。

塩屋は、図2の降伏機構を想定して梁と柱の曲げ降伏ヒンジの残留回転角を抑制して残留変形を抑制する方法を開発している。これまでの成果と着想に至った経緯を記す。

(1)梁の研究結果：上端筋に高強度鉄筋を配筋し、これを1/40rad.まで弾性抵抗させ、一方、下端筋は普通鉄筋にして1/200rad.程度で降伏させ、これ以降、エネルギー吸収させる方法を提案している。1/40rad.までは図1(c)の履歴特性を発揮させて残存振動により梁の残留変形角を1/800rad.

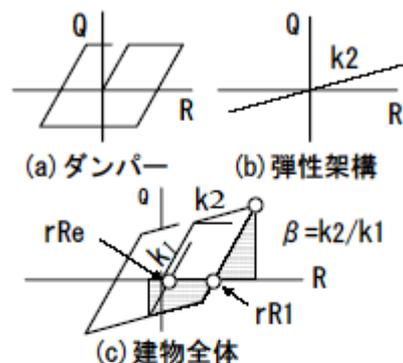
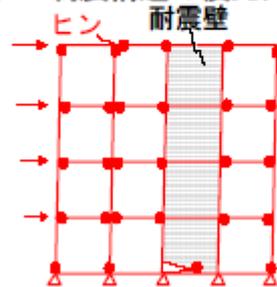
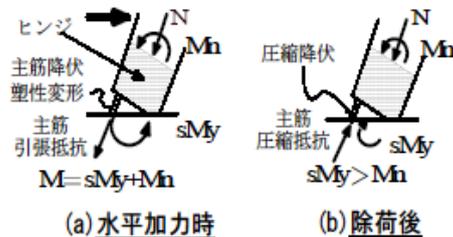


図1 制震構造の復元力特性



ヒンジ領域以外は許容応力度の範囲に設計して損傷を抑制

図2 降伏機構とヒンジ位置



$$M_n \approx 0.5 \cdot N \cdot D \cdot (1 - \eta), \quad sMy \approx 0.8 \cdot a_t \cdot \sigma_y \cdot D$$

$M_n$ : 柱軸力の復元モーメント

$sMy$ : 主筋の抵抗モーメント

$$\gamma = \frac{M_n}{sMy} \quad \gamma \gg 1: \text{残留回転角は減少}$$

$$\gamma = \frac{M_n}{sMy} \quad \gamma \ll 1: \text{残留回転角は残る}$$

図3 復元モーメント比と柱脚の残留回転角の抑制

以下に抑制できることを実験と解析により立証している。

- (2)柱の研究結果：柱脚が曲げ降伏する1階の柱では長期荷重により鉛直のプレストレストが存在する。図3(b)に示すように長期荷重の軸力Nによるモーメント $M_n$  (以後、復元モーメント)が除荷後の柱脚の残留回転角を減少させ、更に、上記の梁と同様に残存振動も柱の残留回転角を抑制することを実験で立証している。
- (3)時刻歴応答解析の成果：上記の梁と同じ履歴特性を有する1質点モデルで図1(c)の二次剛性比 $\beta$ を5%以上にすると残留変形がほぼ零になることを検証している。

これらの成果から、開発を目指す技術

は目標とする性能を実現できる可能性が高いと判断して計画に至った。

## 2. 研究の目的

- (1) 二次剛性  $k_2$  を調整した RC 梁の残留変形の抑制効果と評価方法を解明する。  
 上端筋を全て高強度鉄筋とすると、二次剛性  $k_2$  が大きくなり大変形域でせん断力が増大し図 4(c)、梁のせん断設計や柱の設計が厳しくなる。上端筋に高強度鉄筋と普通鉄筋を併せて配筋し、高強度鉄筋の量と位置を調整して  $k_2$  を小さくする場合を明らかにする。
- (2) 低軸力または高軸力を受ける RC 柱の残留変形の抑制方法と評価方法を解明する。柱では長期軸力の復元モーメントが残留回転角を減少させる。しかし長期軸力が小さくて不足する場合は、変動軸力により高軸力と曲げを受けてコンクリートが損傷する可能性がある。これらの場合でも残留変形を抑制できる配筋方法と残留変形の評価方法を明らかにする。
- (3) 柱や梁で残留変形が抑制された RC 造ラーメン架構の残留変形の抑制性能を検証する。残留変形が抑制された柱と梁からなるラーメン架構の残留変形の抑制効果を、地震動を用いて時刻歴応答解析により明らかにし、代表的なラーメン架構の加力実験で検証する。

## 3. 研究の方法

地震後の RC 造建物の残留変形を抑制できる梁と柱の設計方法を開発できるように計画した。

- (1) 梁では、上端主筋の一部を高強度鉄筋を用いて、その配筋量と位置により、普通鉄筋が降伏した以降の二次剛性を調整する場合の梁の残留変形の抑制効果と損傷抑制効果を、地震時の最大応答後を想定した部材の準静的加力実験を行って明らかにした。
- (2) 柱では低軸力に対して復元モーメント比  $\gamma$  と高強度鉄筋による二次剛性を調整した場合、高軸力に対して圧縮抵抗筋を配筋した場合、柱の残留変形の抑制効果と損傷抑制効果を、それぞれ、地震時の最大応答後を想定した部材の準静的加力実験を行って明らかにした。
- (3) 残留変形が抑制された履歴特性を有する梁と柱からなるラーメン架構の非線形時刻歴応答解析と準静的加力実験を行い、架構全体での残留変形の抑制効果を明らかにした。

## 4. 研究成果

- (1) 梁の履歴特性と復元性  
 上端筋に高強度鉄筋を配筋して、

1/200rad. 程度で下端筋が降伏した以降、その高強度鉄筋を弾性域まで弾性抵抗さ

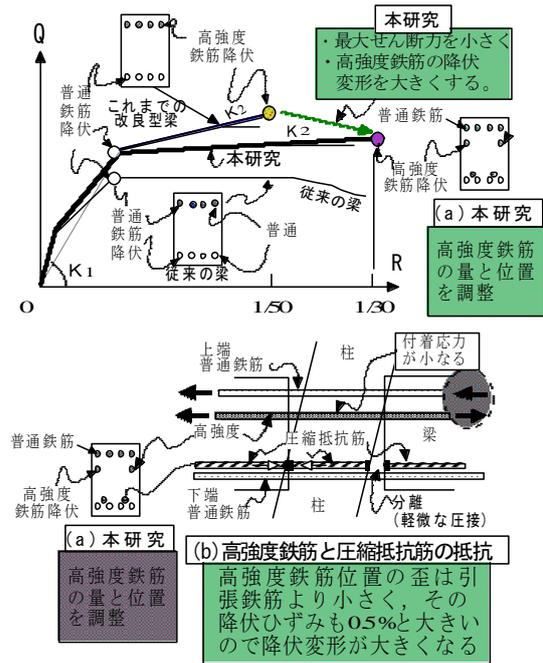


図5 開発するRC梁の荷重-変形関係の二次剛性と高強度鉄筋の降伏変形の調整方法

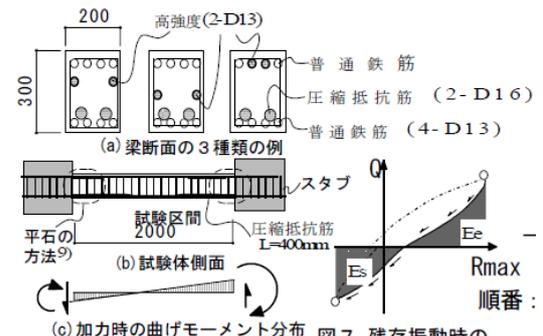
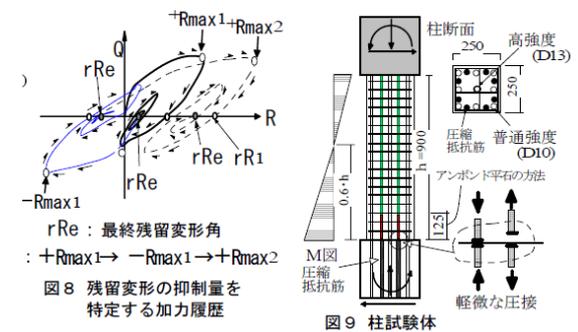


図6 梁試験体の形状・応力



せて、二次剛性を発揮させて制震構造と同様に残留変形を抑制できることを加力実験により実証した。また、RC スラブの影響と、エネルギー吸収を促進する減衰筋の効果を明らかにした。スラブは、スラブ筋が降伏することにより、残留変形の抑制効果を、多少、弱める。また、減衰筋は、極小的に変形を生じさせるため、1/50rad. で破断した。減衰筋の破断を大変形までに遅らせるためには、減衰筋の降伏区間と梁

全体の剛性を評価して設計すれば、降伏区間の破断の変形は制御できる。

大変形での梁の履歴ループを再現できる力学モデルを構築した。そのモデルによる履歴ループと実験の履歴ループの比較を図10に示す。上端筋と下端筋を全て普通鉄筋にした従来の梁と、上端筋に高強度鉄筋を配筋した梁の、鉄筋の特性だけを変化させるだけで、履歴ループを精度良く再現できた。図11に上端筋の高強度鉄筋の本数を変化させた場合の二次剛性と残留変形の抑制状況を示す。梁の主筋の本数は、上端筋と下端筋とも、それぞれ4本の場合である。上端筋を3本以上にすると、二次剛性はあまり変化しなくなり、残留変形抑制も3本と4本とでは殆ど差は無く、残留変形を抑制できる明らかになった。

(2) 柱の履歴特性と復元性

柱の軸力が高軸力、低軸力の場合の大変形での残留変形の抑制状況を加力実験に明らかにした。提案している復元モーメント比により残留変形抑制が変化することが明らかになった。大変形での梁の履歴ループを再現できる力学モデルを構築した。そのモデルによる履歴ループと実験の履歴ループの比較を図12と図13に示す。図12は高軸力の場合で、図13に軸力が零の場合である。解析モデルで大変形の履歴ループを評価できた。図14に最大変形角が1/50rad.の場合の残留変形角と復元モーメント比の関係を、解析値と実験値を比較して示す。残留変形も精度良く評価できることを明らかにした。

(3) 建物の大地震時の残留変形抑制

上記の梁と柱の評価モデルを用いて、5階建てと10階建ての鉄筋コンクリートラーメン構造の建物の振動解析を行い、残留変形を抑制できることを明らかにした。この成果は現在、まとめて、論文を作成している段階である。

(4) 連層耐震壁の復元性

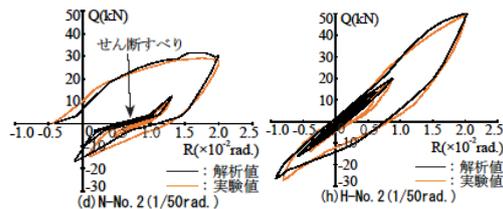
図2に中にある連層耐震壁の復元性も復元モーメント比により説明できることを明らかにした。連層耐震壁は早期に柱主筋が破断するメカニズムが存在することを明らかにした。

5. 主な発表論文等

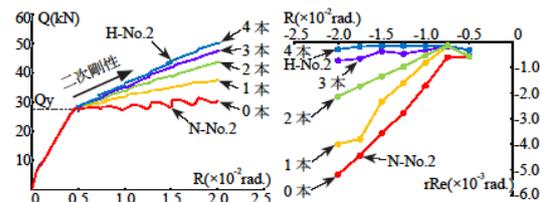
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

- ① 楠本繁治, 塩屋晋一, 公文祐斗, 超小型試験体による復元性の高いRC造連層耐震壁の水平加力実験, コンクリート工学年次論文集, 査読有, 2018, Vol. 38, No. 2, 掲載決定

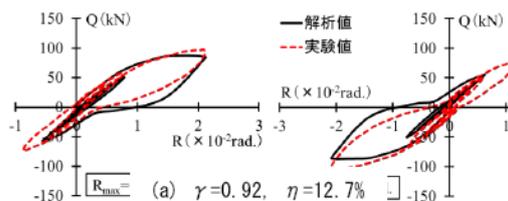


(a) 従来の梁 (b) 上端が高強度鉄筋  
図10 大変形時の自由振動加力による復元履歴特性

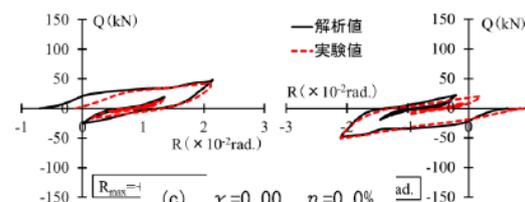


(a) 二次剛性の変化 (b) 残留変形の変

図11 梁の上端の高強度鉄筋量により二次剛性と残留変形の感星効果



(a) 正加力側 (b) 負加力側  
図12 高軸力の柱の復元性ループの解析と実験の結果の比較



(a) 正加力側 (b) 負加力側  
図13 軸力が零の柱の復元性ループの解析と実験の結果の比較

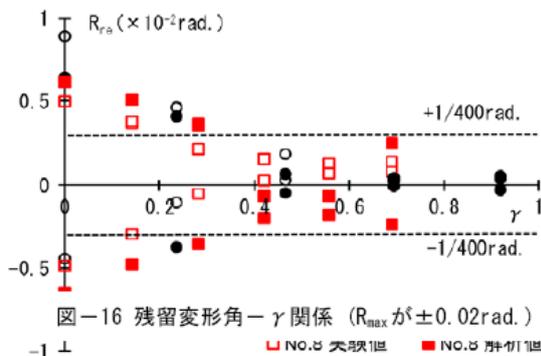


図-16 残留変形角- $\gamma$ 関係 ( $R_{max}$ が $\pm 0.02$ rad.)

図14 大変形時の自由振動加力による復元履歴特性

- ② 公文祐斗, 塩屋晋一, 川添敦也, 残留変形抑制機能を内蔵する RC 梁の解析モデルに関する研究, コンクリート工学年次論文集, 査読有, 2018, Vol. 38, No. 2, 掲載決定
- ③ 川添敦也, 塩屋晋一, 公文祐斗, 残留変形角の評価を目的とする RC 柱の解析モデルに関する研究, コンクリート工学年次論文集, 査読有, 2018, Vol. 38, No. 2, 掲載決定
- ④ 公文祐斗, 塩屋晋一, 他 2 名, 制震性能を内蔵する鉄筋コンクリート造梁の加力実験 C 梁の実験的研究, コンクリート工学年次論文集, 査読有, 2015, Vol. 37, No. 2, pp. 235-240
- ⑤ 川添敦也, 塩屋晋一, 残留変形抑制機構を部材に内蔵する鉄筋コンクリート造建物の時刻歴応答解析 コンクリート工学年次論文集, 査読有り Vol. 36, No. 2, 2014, 31-36
- ⑥ 河邊亮介, 塩屋晋一, 他 2 名, 高軸力または低軸力を受ける鉄筋コンクリート造柱の残留変形抑制に関する加力実験, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 36, No. 2, 2014, 103-108
- ⑦ 公文祐斗, 塩屋晋一, 他 2 名, 制震性能を部材内部に内蔵する鉄筋コンクリート造梁の加力実験, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 36, No. 2, pp. 169-175, (2014)

[学会発表] (計 5 件)

- ① 公文祐斗, 塩屋晋一, 川添敦也, 制震性能を内部に内蔵する鉄筋コンクリート梁の構造性能と履歴特性の評価モデルに関する研究, 日本建築学会研究報告 九州支部, 第 55 号・1 構造系, 2016, 485-490
- ② 楠本繁治, 塩屋晋一, 公文祐斗, 復元性の高い鉄筋コンクリート造連層耐震壁の開発, 日本建築学会研究報告 九州支部, 第 55 号・1 構造系, 2016, 537-544
- ③ 楠本繁治, 塩屋晋一, 公文祐斗, 川添敦也, 制震性能を内蔵する鉄筋コンクリート造梁の開発, 日本建築学会研究報告 九州支部, 第 54 号・1 構造系, 2015, 505-512
- ④ 公文祐斗, 塩屋晋一, 川添敦也, 制震性能を部材内部に内蔵する鉄筋コンクリート造梁の加力実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), 構造 IV, 2014, 607-608
- ⑤ 公文祐斗, 塩屋晋一, 川添敦也, 阿部友樹, 制震性能を部材内部に内蔵する鉄筋コンクリート造梁の加力実験, 日本建築学会研究報告九州支部, 第 53・1 号構造系, 2014, 481-488

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :  
 発明者 :  
 権利者 :  
 種類 :  
 番号 :  
 出願年月日 :  
 国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :  
 発明者 :  
 権利者 :  
 種類 :  
 番号 :  
 取得年月日 :  
 国内外の別 :

[その他]  
 ホームページ等  
 該当無し

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

塩屋晋一 (SHIOYA, Shinichi)  
 鹿児島大学・学術研究院・理工学域工学系・教授  
 研究者番号 : 8 0 1 7 0 8 5 1

### (2) 研究分担者

澤田樹一郎 (SAWADA, Kiichirou)  
 鹿児島大学・学術研究院・理工学域工学系・准教授  
 研究者番号 : 9 0 2 8 4 1 6 6

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号 :