

令和 2 年 7 月 2 日現在

機関番号：57701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06665

研究課題名(和文) 低予算で鉄筋コンクリート造建物の残留変形の抑制を可能にする設計方法の確立

研究課題名(英文) Establishment of design method enables to suppress residual deformation of reinforced concrete building with low cost

研究代表者

川添 敦也 (KAWASOE, Atsuya)

鹿児島工業高等専門学校・都市環境デザイン工学科・教授

研究者番号：50710290

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：鉄筋コンクリート造建物を大地震後も継続使用するためには、残留変形を抑制することが不可欠である。建物の変形の抑制には様々な構法が実用化されているが、梁の上端筋の一部を高強度鉄筋に置き換える簡単な方法で残留変形の抑制が可能である。

本研究では、加力実験により提案する梁の構造特性を明らかにし、建物に適用したときの効果を応答解析により明らかにした。さらに、補修後の構造性能についても実験を行い、継続使用の可能性について検証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

梁の上端筋を高強度鉄筋を用いると、下端筋が降伏した後も上端筋は弾性を保つために制震構造と同様の二次剛性を発揮し、残留変形の抑制に効果を発揮する。梁の上端筋をすべて高強度鉄筋とした場合、大変形時に部材応力が大きくなり、結果的に建物の層せん断力が上昇することにより柱のせん断設計が困難になる可能性がある。

本研究では、梁の上端筋の一部だけを高強度鉄筋とすることにより、部材応力の上昇と残留変形の両方を抑制する設計方法を提案した。

研究成果の概要(英文)： In order to continue to use reinforced concrete building after a large earthquake, it is essential to suppress residual deformation. Although various construction methods have been put to practical use for suppressing deformation of buildings, residual deformation can be suppressed by a simple method in which part of the upper bar of the beam is replaced by high-strength reinforcing bars.

In this study, the structural characteristics of the proposed beam were clarified by loading tests, and the effect when applied to a building was clarified by response analysis. Furthermore, we also conducted experiments on the structural performance after repairs and verified the possibility of continued use.

研究分野：建築構造

キーワード：残留変形 高強度鉄筋 二次剛性 復元モーメント

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

新耐震設計法は、建物が大地震を受けても入力した地震エネルギーを建物の構造躯体にバランスよく吸収させることによって、建物を倒壊に至らせないという考え方に基づいている。この設計法では結果的に人命を守ることができても、建物の継続使用はできなくなる可能性がある。新耐震基準が1986年に施行され、30年以上経て社会のニーズは大きく変化した。高度経済成長期のスクラップアンドビルトの経済活動に対し、経済が低成長の現代では、建設資本を保全しながら長く使っていくという考え方に变化しており、大地震により建物が被災しても、解体せずに継続使用できることが社会的要請になった。免震構造や制震構造の研究が進み、重要度の高い建築物や高層建築を中心に採用されている。しかし、免震・制震構造は非常に高価なため、一般の建築物に採用される事例は多くない。1995年の兵庫県南部地震以降、2011年の東日本大震災や今年の熊本地震など、日本列島付近は地震の活動期に入っている。簡便で安価な施工法によって、地震後の損傷を抑制し、継続使用できる建物が求められている。

2. 研究の目的

最大層間変形角が1/50rad.に達する大地震を受けても、残留層間変形角が1/400rad.に留まる、RC造の開発を目指している。従来の全体崩壊形のRCラーメン骨組が、地震により大変形すると、塑性ヒンジが形成されることにより、地震エネルギーを吸収する。塑性ヒンジの変形角が大きいままの状態地震が収まると、建物が傾いた状態の残留変形が生じ、地震後の使用が困難になる場合がある。これまでの研究により、梁の上端に高強度鉄筋を用い、かつ、最下階の柱軸力による復元モーメントの作用により、建物全体の残留変形が抑制されることを明らかにしている。梁については、上端筋をすべて高強度鉄筋とした改良型の梁について加力実験を行っているが、上端筋をすべて高強度鉄筋とすると、残留変形は無視できる程度に抑制できる一方、大変形時の部材応力の上昇が大きくなる。本研究では、大地震時の残留変形および部材応力の上昇を抑制することを目的に、上端筋の一部を高強度鉄筋としたRC梁を提案し加力実験および解析モデルの作成を行った。さらに、残留変形の評価を目的とした柱・梁部材の解析モデルを組み込んだ、新しいRCフレームの設計法の開発を目的とする。

3. 研究の方法

(1) RCフレームの時刻歴応答解析

梁の上端筋をすべて普通鉄筋とした従来型の梁と、上端筋をすべて高強度鉄筋とした改良型の梁を用いたRCフレームの時刻歴応答解析を行った。これまでの実験結果にもとづき、柱・梁部材の解析モデルを作成している。これらの解析モデルを組み込んだRCフレームの解析モデルを作成した(図-1)。解析対象は、2層1スパンのフレームとした。塑性ヒンジをマルチスプリング(以下、MS)、鉄筋の拔出しを回転バネ、せん断すべりをせん断バネでモデル化した。塑性ヒンジ以外の弾性部分は、コンクリートのひび割れによる剛性の低下を考慮した。

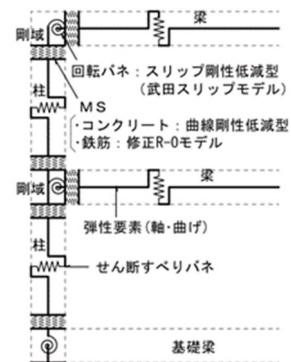


図-1 解析モデル

(2) 梁の上端筋の一部を高強度鉄筋とした改良型梁の実験

従来型の試験体と梁の上端筋をすべて高強度鉄筋とした試験体については、すでに実験を終了し、解析モデルを作成している。これらの試験体に対し、梁の上端筋の配置と本数は変えずに、高強度鉄筋の割合を変化させた試験体について実験を行った(図-2)。試験体は2体とし、上端筋の高強度鉄筋の割合をそれぞれ50%と25%とした。実験は試験体の目標変形角を $\pm 2 \times 10^{-2}$ rad.に達するまで漸増変形させた。それぞれの目標変形角に達した後は、最大応答後の自由振動を想定した準静的加力を行った。

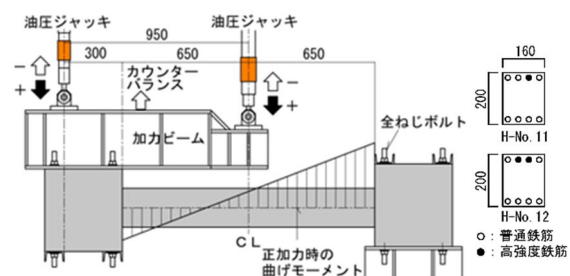


図-2 実験方法

(3) 多質点系モデルによる地震応答解析

梁降伏型のRC造建物では、梁の履歴特性が建物全体の挙動に大きく影響する。実験結果から得られた梁試験体の履歴特性を武田モデルによりモデル化し、建物の各層の履歴特性とみなして、多質点系の等価せん断型モデルによる時刻歴応答解析を行った。建物の各層のせん断力と層間変形角の関係における降伏後の二次剛性比(=二次剛性/一次剛性)に着目して、上端主筋に使用する高強度鉄筋の割合が建物に及ぼす影響について明らかにした。さらに、単に部材断面を大きくした場合と、上下の主筋をすべて高強度鉄筋とした場合を想定した履歴モデルについて解析を行い、提案する改良型梁の有効性を明らかにした。

(4) 梁の上端筋の一部を高強度鉄筋とした改良型梁の補修性能に関する実験

大地震後もRC建物の継続使用を可能にするためには、簡単な補修によって被災後前の状態に

近づくことが望ましい。梁の上端筋の一部を高強度鉄筋とした改良型梁の補修性能を明らかにするための実験を行った。試験体の材端は、塑性ヒンジ領域の損傷防止の為、塑性ヒンジ領域の主筋の付着を無くした。これによって、ひび割れを梁端に集中させ、コンクリートの損傷を抑制できる。実験後の塑性ヒンジ領域のひび割れは、スタブフェイスに集中しており、スタブフェイスには1mmを超える残留ひび割れが生じた。それ以外の残留ひび割れはすべて0.15mm未満であり、補修は行わなかった。スタブフェイス部のひび割れの補修方法には自動式低圧樹脂注入工法を採用した。補修材料には、ひび割れ幅に応じた中粘度のエポキシ樹脂を使用した。実験は前の補修前の実験と同様の方法により行った。

4. 研究成果

(1) RC フレームの時刻歴応答解析

従来型の RC フレームと、梁の上端に高強度鉄筋を使用した改良型梁を有する改良型の RC フレームについて、実験結果から得られた柱梁部材の解析モデルを使って応答解析を行った。

i) 柱脚の復元モーメント比は残留変形角を $1/400\text{rad}$. 未満に抑制する条件 (0.4) を満たしていないが、改良型梁の残留変形抑制の効果により、層間変形角が $1/50\text{rad}$. に達してもフレームの残留変形は $1/800\text{rad}$. 未満に抑制できた。

ii) 改良型梁をフレームに適用することにより、大地震後のたわみの抑制効果が期待できる。層間変形角が $1/50\text{rad}$. では、改良型の梁中央のたわみは、従来型の $1/3$ 程度に抑制された。

iii) 改良型フレームのベースシアは、梁が降伏後、層間変形角が大きくなるに従い、従来型との差が徐々に大きくなる。層間変形角が $1/50\text{rad}$. に達した時、従来型よりも最大 25.1% 増加した。

(2) 梁の上端筋の一部を高強度鉄筋とした改良型梁の実験

上端の主筋の一部を高強度鉄筋に置き換えた梁試験体について、準静的加力による加力実験を行った。

残留変形は上端の高強度鉄筋の割合が大きいほど抑制された(図-3)。目標変形角が $\pm 2 \times 10^{-2}\text{rad}$. の場合で従来型と比較すると、上端筋の高強度鉄筋の割合が 25% と 50% の場合、それぞれ平均で 14% および 36%、残留変形は抑制された。

試験体のせん断力と変形角の関係における二次剛性比は、高強度鉄筋の割合が大きくなるほど増加した(図-4)。上端筋の高強度鉄筋の割合が 25% と 50% の場合で、それぞれ 10% および 15% となった。

試験体の負側加力の時の二次剛性および残留変形は、正側加力の時よりも高強度鉄筋の効果が小さかった。高強度鉄筋のスタブへの定着が十分でなかったことが影響したと考えられるため、対策が必要である。

(3) 多質点系モデルによる地震応答解析

RC 梁の上端筋に使用する高強度鉄筋の割合が、建物の残留変形等に及ぼす影響を調べるため、実験結果に基づいた復元力特性を使って多質点系モデルによる解析を行った。15 階建のモデルで従来型と改良型の解析結果を比較すると、梁の上端主筋をすべて高強度鉄筋に置き換えることにより、残留変形が平均で 73% 減少したが、ベース

シアは平均で 21% 増加した。一方、上端主筋の 50% を高強度鉄筋に置き換えた場合、残留変形が平均で 54% 減少し、ベースシアは平均で 13% の増加に留まった。

(4) 梁の上端筋の一部を高強度鉄筋とした改良型梁の補修性能に関する実験

地震後の残留変形を抑制しながらせん断力の上昇を抑えることを目的に、梁の上端筋の一部を高強度鉄筋を用いた改良型梁を提案しているが、このような梁の補修後の構造性能を調べるために、簡単なひび割れの補修を施した試験体で加力実験を行った。

いずれの試験体でも最大変形角が $\pm 1/50\text{rad}$. に達する変形を経験しても、補修後、変形角が $\pm 1/40\text{rad}$. に達しても安定して構造性能を發揮した。また、初期載荷時の剛性は、補修直前の状態から大きく改善した。

残留変形は補修前と同様に、目標変形角が大きくなるにつれて大きくなり、補修前の残留変形に加算される形で増加した。

梁のひび割れの状況は補修前の状況と大きく変わらないが、スタブにもひび割れが生じた。補修後も梁のスタブフェイス部分にひび割れを集中させるためには、スタブを適切に補強する必要がある。

エネルギー吸収能力は補修前に比べ低下するものの、目標変形角が大きくなるにつれて、安定してエネルギー吸収量は増加した。

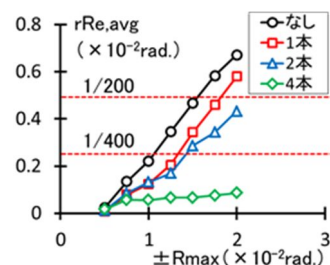


図-3 目標変形角 - 残留変形角

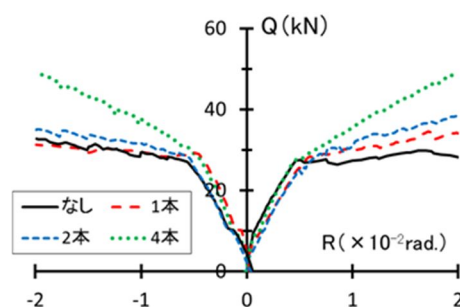


図-4 Q - R 関係の包絡線

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 3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 外園侑樹, 川添敦也, 塩屋晋一	4. 巻 59
2. 論文標題 上端筋の一部に高強度鉄筋を使用した鉄筋コンクリート梁に関する研究 その3 補修後の構造性能	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会研究報告 九州支部	6. 最初と最後の頁 553 ~ 556
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 無
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 松元健人, 川添敦也, 塩屋晋一	4. 巻 58
2. 論文標題 上端筋の一部に高強度鉄筋を使用した鉄筋コンクリート梁に関する研究 その1 実験結果と考察	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会研究報告 九州支部	6. 最初と最後の頁 505 ~ 508
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 無
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 津之地愛理, 川添敦也, 塩屋晋一	4. 巻 58
2. 論文標題 上端筋の一部に高強度鉄筋を使用した鉄筋コンクリート梁に関する研究 その2 多質点系モデルによる地震応答解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会研究報告 九州支部	6. 最初と最後の頁 509 ~ 512
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 無
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 西谷政彦, 内村孝兵, 塩屋晋一, 川添敦也	4. 巻 41
2. 論文標題 復元性の高いRC造連層耐震壁の残留変形抑制に関する振動解析	5. 発行年 2019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 337 ~ 342
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 川添敦也, 塩屋晋一	4. 巻 41
2. 論文標題 上端筋の一部に高強度鉄筋を用いる鉄筋コンクリート梁の履歴性状	5. 発行年 2019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 211~216
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 川添敦也, 塩屋晋一	4. 巻 57
2. 論文標題 残留変形抑制機構を内蔵する鉄筋コンクリートフレームの解析的研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本建築学会研究報告 九州支部	6. 最初と最後の頁 557~560
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 無
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 川添敦也, 塩屋晋一	4. 巻 40
2. 論文標題 残留変形抑制機構を内蔵する鉄筋コンクリート造フレームの時刻歴応答解析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本コンクリート工学会年次論文集	6. 最初と最後の頁 751~756
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0件

〔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	塩屋 晋一 (SHIOYA Shinichi) (80170851)	鹿児島大学・理工学域工学系・教授 (17701)	

