

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04717

研究課題名(和文) 現行耐震基準で設計される建物の地震時機能保全耐震性の分析

研究課題名(英文) Seismic performance analysis of buildings designed to current seismic standards from the viewpoint of functional maintenance

研究代表者

衣笠 秀行(kinugasa, hideyuki)

東京理科大学・理工学部建築学科・教授

研究者番号：00224999

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：建物への被害を減らし、大地震による社会への被害を最小限に抑えるためには、建物の安全性と地震後の機能維持を考慮した設計手法の開発が求められている。本研究では、地震後機能継続性の観点から耐震性を分析する手法の開発と、それを用いて、現行耐震基準で設計される建物の機能停止に対する耐性(対機能保全耐震性)の現状についての分析を試みた。具体的には、次の4つの研究項目、A.部材損傷度評価モデルの構築、B.建物の修復時間評価法の確立、C.対機能保全耐震性能評価、そしてそれとの、D.対人命保全耐震性との比較、に取り組んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建築基準法上、大地震に対しては、人命保全は求められるが、建物の機能保全は求められていない。特に高層建物において現在、損傷を建物全体に分散させることで十分な安全性を確保する設計(靱性型・全体崩壊型)が推奨されているが、過大な修復費用が生じると同時に、修復に長期間を要することで機能回復が困難となることが懸念されている。このような設計法の高度化によって、現行耐震基準の求める耐震性と機能停止限界から要求される耐震性の乖離が生じている。

本研究は、建物の機能回復性の評価方法についての提案を行い、この手法を用いて、現行耐震基準で設計される建物の機能停止に対する耐性の現状について分析を行ったものである。

研究成果の概要(英文)：Developing design methods that consider the safety and post-seismic functional maintenance of buildings is required to reduce damage to buildings and minimize damage to society from major earthquakes. In this study, a method to analyze seismic performance from the viewpoint of continuity of building function after disasters was developed. And the seismic performance of buildings designed to current seismic standards was investigated from the viewpoint of post-seismic functional maintenance. Specifically, the following four research items were carried out, i.e. damage evaluation method for members, repair time evaluation method for buildings, evaluation of seismic performance for post-seismic functional maintenance, and comparison of seismic performance for functional maintenance and that for safety.

研究分野：建築構造、都市防災、レジリエンス性能、経済性

キーワード：対機能保全耐震性 損傷度評価モデル 修復時間評価法 地震後機能継続性 機能回復性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

最近の地震被害において、構造体の損傷は小さく安全性に問題はなくても、非構造部材を含めた建物の損傷が大きいため、経済活動や人々の生活に支障が生じるケースが報告され(文献1) 耐震設計における機能回復性の観点から要求される耐震性(対機能保全耐震性)の検討の必要性が強く認識されるようになった。

建築基準法上、大地震に対しては、人命保全は求められるが、建物の機能保全は求められていない。特に高層建物において現在、損傷を建物全体に分散させ、より大きな地震エネルギーを吸収することで十分な安全性を確保する設計(靱性型・全体崩壊型)が推奨されている。このような設計コンセプトは昨今の高層化する都市の建築物において特に必要不可欠なものとなっている。しかし、このような設計による安全性向上は地震時の損傷発生を引き替えにして得たものとも言え、過大な修復費用が生じると同時に、修復に長期間を要することで機能回復が困難となることが懸念されている。

機能が停止することにより生じる損失を「機能停止損失」と呼ぶ。機能停止損失は、

$$\text{機能停止損失} = \text{機能停止時間(日)} \times 1 \text{日の単位床面積あたりの収益} \times \text{建物規模} \quad (1)$$

で算出され次の特徴がある。(1)規模が大きく収益率の高い経済活動上重要な役割を果たしている建物で損失が大きくなる、(2)都市の発達に伴い損失が巨大化し深刻になる。すなわち、
・機能停止損失は、都市の規模や経済活動が活発になるほど大きくなり、都市の成長とともに今後益々増大する。経済活動の活発化にともなって状況は刻々悪化している。
・上述した設計法の高度化によって、現行耐震基準の求める耐震性と機能停止限界から要求される耐震性の乖離が生じている。

2. 研究の目的

本研究は、近年増大する大地震に対する都市の脆弱性への懸念を背景に、現行耐震基準で設計される建物の機能停止に対する耐性の現状、地震時機能維持の観点から付与すべき耐震性レベルを、分析する手法の構築を目的とした。建築基準法で求められる耐震性能は人命保全を目的としたものであり機能保全に対してはさらに高い耐震性能が求められる。地震後機能継続性の観点から要求される耐震性能(対機能保全耐震性)レベルを、建築基準法が要求する安全性に対する耐震性能(対人命保全耐震性)との関係で明らかにする方法の構築が求められている。

地震時の機能低下が引き起こす経済損失の大きさは一般に、式(1)で定義される機能停止損失で評価される。しかしながら、機能停止損失の単位は円であり工学単位ではないことから、工学性能である耐震性とこれを結びつけることは困難である。地震時機能停止損失の低減を目標とした設計では、耐震工学と経済学を繋ぐ、設計目標を与えることのできる、工学単位をもつ指標(工学損傷指標)が必要不可欠となる。本研究は、「修復時間」を工学損傷指標として用いた新しい耐震設計法の確立を試みるものである。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、地震後機能継続性の観点から対機能保全耐震性を分析する手法の開発と、それを用いて、現行耐震基準で設計される建物の機能停止に対する耐性(対機能保全耐震性)の現状についての分析を試みた。具体的に次の4つの研究項目、A.部材損傷度評価モデルの構築、B.建物の修復時間評価法の確立、C.対機能保全耐震性能評価、D.対人命保全耐震性との比較、に取り組んだ。

「A.部材損傷度評価モデルの構築」では、部材の損傷度を評価する指標である「時間剛性」の提案を行い、これを用いた、RC袖壁付き柱とRC柱の損傷性状の比較を行った。また、実験データから時間損傷度(部材の修復時間)を得ることには限界があることから、理論的時間損傷度算出方法を提案した。「B.建物の修復時間評価法の確立」では、建物の修復時間等を、1質点系および多質点系モデルの動的解析から算出する方法を示した。また、地震時の層間変形角の増加に伴い発生する労務量(修復時間の算出における基本情報)の増加を推定するモデルを構築した。

「C.対機能保全耐震性能評価」と「D.対人命保全耐震性との比較」では、高層建物の機能回復性に注目して、規模および構造形式の異なる建物での地震応答解析を行い、建物の「損傷量」と「損傷の広がり」がどのように増加し、また機能回復性にどのように影響を与えるのかについて分析を行った。また最近、建物のレジリエンス性能の評価の重要性が指摘されているが具体的な評価方法は確立されていないことから、理想修復時間IRTの概念を使い、崩壊形の違いが、建物のレジリエンス性能に及ぼす影響について検討を行った。また、建築基準法が要求する対人命保全耐震性を満足する建物の修復時間や機能停止面積を上で得られた成果を基に算出し、対機能保全耐震性能と対人命保全耐震性との関係性について検討を行った。

4. 研究成果

上で述べた研究項目において得られた成果を以下にまとめる。

(1) 部材損傷度評価モデルの構築

時間剛性を用いた部材の耐損傷性能評価

耐損傷性能(荷重に対して修復時間を抑える性能)の確保のために部材に求められる、荷重に対して変形を抑える性能(剛性)と、変形に対して修復時間を抑える性能(修復性)、を総合的に評価する指標である「時間剛性」の提案を行い、これを用いた RC 袖壁付き柱の耐損傷性能評価を実施し次の知見を得た。

- ・袖壁付き柱試験体の耐損傷性能は矩形柱試験体に比べて劣るという結果になった。袖壁の付帯は、剛性の上昇という利点を生むが同時に損傷の増加という欠点も生じさせ、必ずしも、耐損傷性を上昇させるとは限らないことが示唆された。
- ・袖壁の壁厚と配筋量の増加が、袖壁付き柱部材の耐損傷性の改善に効果的であること、また、その具体的な性能の上昇量(時間剛性が2.4倍)を算出することが出来た。
- ・腰壁垂壁有の袖壁付き柱試験体は、腰壁垂壁無のものとは比べて、剛性は高いが、修復性で劣り、耐損傷性能は特に小変形において劣っているという結果が得られた。

理論的時間損傷度算出方法の構築

既に行われた実験データから時間損傷度を得ることには、限界があるため、部材寸法などの条件を変えた場合等において理論的に時間損傷度の変化を予測する手法が必要と考えられる。そこで、本研究では、文献2で提案されているひび割れ長さ評価モデルと本研究で提案する真ひび率比のモデル式を用いた理論的、時間損傷度算出方法を提案し、実験値との比較検討を行った。以下に本研究の成果をまとめる。

- ・前田モデル(文献2)と真ひび率により実験結果の時間損傷度を精度よく表現できた。
- ・材長や断面積が異なることによる時間損傷度の変化を示した。
- ・ヒンジ領域面積比を用いた時間損傷度の略算法を示し、この方法の高い精度を確認した。
- ・以上の成果から、実験データの蓄積のない、寸法などの異なる多様な部材の時間損傷度の評価が可能となることが示された。

(2) 建物の修復時間評価法の確立

1 質点系モデルを用いた修復時間算出法

1 質点系モデルを用いた修復時間の算出法を提案した。なお、ここでは、1 質点系モデルとフレームモデルを比較する際、フレームモデルは一質点縮約時の等価高さ位置(以下、等価高さ)での変位を用いている。

以下の知見が得られた。

- ・フレームモデルを1 質点系モデルに縮約し、修復時間を算出する方法を提案し、非構造量を変化させた場合のフレームモデルの動的解析から得られる修復時間と、フレームモデルの静的解析と1 質点系モデルの動的解析から算出される修復時間の精度比較を行い、手法の妥当性を示した。
- ・目標とする修復時間に到達する地震動の大きさ(地震動倍率)の算出方法を提案しその妥当性を示した。

多質点系モデルを用いた修復時間算出法

実務の構造設計では、多質点系モデルを利用した、建物の耐震安全性評価が一般的に行われることから、多質点系モデルを用いた修復時間の算出法についても提案を行った。

得られた知見を以下にまとめる。

- ・最大層間変形角が1/100以下の時、フレームモデルの静的解析と質点系モデルの動的解析を用いる、提案法は地震動倍率と対応する修復時間等を高い精度で算出可能である。
- ・修復時間を設計目標として定められた際に、それに達する地震動の大きさ(地震動倍率)を推定することが可能である。

地震時に建物の層に発生する労務量を推定するモデルの構築

最近、修復性の観点から損傷の深刻度評価を試みる研究が活発に行われているが、修復性の評価のためには、基本情報である労務量を評価する手法の構築が求められる。そこで、構造部材・非構造部材の各種の部材が損傷によって生じさせる労務量の増加特性分析を行い、単位床面積あたりの労務量Lと層間変形角Rの関係(以下、L-R関係)を構築するために必要な基礎情報を得た。次にフレーム構造を対象に、構造の量と破壊モード、非構造量が異なる建物のL-R関係を算出し、層の労務量の増加特性の考察を行うとともに、上記の各種パラメータがL-R関係に及ぼす影響について分析し、L-R関係モデルを簡便な2あるいは3直線でモデル化することの可能性を示した。

(3) 対機能保全耐震性能評価と、これに基づく対人命保全耐震性との比較

現行耐震基準で設計される建物(対人命保全耐震性を有する建物)の「損傷の量」と「損傷の

広がり」が機能低下量と機能回復時間に及ぼす影響

高層建物では一般に十分な安全性を確保することを目的に、全体崩壊形を計画している。しかしこのことは、地震時における建物への「損傷の量」及び全層への「損傷の広がり」を大きくし、建物の修復にかかる時間と費用を増加させる。ここでは、階数の異なる架構モデルを3つ(4・8・12階架構)設定し、地震動BCJ-L2による地震応答解析を行い、建物の「損傷の量」と「損傷の広がり」がどのように増加し、またレジリエンス性能にどのような影響を与えるのかについて分析、考察を行った。

得られた知見を以下にまとめる。

- ・最大層間変形角 1/50 における、各架構モデルの総労務量の比率は、床面積の比率よりも大きくなる傾向があり、逆に修復時間の比率は小さくなる傾向がある。
- ・地震動倍率が 1 未満では、各架構モデルで損傷面積 / 延床面積の に対する増加率が同じであるが (損傷分散過程)、その後 が大きくなると、損傷分散が終了し、損傷床面積は大きくなる (損傷は広がらなくなる)。
- ・建物規模が大きくなるにつれて、損傷面積 / 延床面積の上限値が小さくなっていく可能性が示された。

最大作業員数に着目した修復時間・機能停止面積・作業員数の算出法の構築

地震時のレジリエンス性能の評価を、修復時間・機能停止面積・作業員数の3つの指標に基づき行った。これら3指標間に、ある関係性が存在することを示し、この性質に基づき、最大作業員数 m_s に着目した、地震後の修復作業が引き起こす機能低下の観点からのレジリエンス性能評価法の提案と試算を行い、以下の知見を得た。

- ・非構造なし及び各層の非構造量が変化した場合の各解析ケースにおいて、修復時間・機能停止面積・作業員数・失われる機能の総量と、総労務量との間には、ある関係性が存在することが見出された。
- ・総労務量が与えられれば、修復時間・機能停止面積・作業員数・失われる機能の総量を、全体変形角 1/50rad での静的解析結果から得られる最大作業員数 m_s をもとに算出可能であることを示した。

現行耐震基準で設計される建物(対人命保全耐震性を有する建物)の対機能維持耐震性(レジリエンス性能)の分析

都市レベルの災害を考えた時、膨大な数の建物のレジリエンス性能の評価が求められる。一棟一棟の実地調査による評価は困難であることから、人工衛星の利用が考えられ始めている。人工衛星によって多くの建物の頂部変形を瞬時に計測可能である。この頂部変形と修復時間・機能低下量の関係性が明確になっていけば、人工衛星による短時間での多くの建物の評価が可能となる。崩壊形、損傷の集中、非構造部材量の有り無しを変更した場合の、頂部変形角と修復時間・機能低下量等との関係性を分析し、以下の知見が得られた。

- ・居住用建物を想定した非構造部材量が存在することで、同じ頂部変形角において、全層崩壊形では修復時間は最大 2.5 倍、修復作業面積は最大 2.4 倍、作業員数は最大 1.5 倍に増加することを示した。
- ・部材耐力を変えて崩壊層を変化させたモデル A では崩壊形が異なっても頂部変形角に対応する修復作業面積、修復時間、作業員数の値はほぼ同じであること示した。このことは非構造有りと無しで同じ結果であった。
- ・剛性を変えて損傷を集中させたモデル B では、修復作業面積、作業員数の値が崩壊形ごとに異なるが、修復時間は1層崩壊を除き比較的差が小さくなった。
- ・モデル A では頂部変形角からの作業員数評価の可能性が示されたが、モデル B では最大値は計算できるものの、その値に達する頂部変形角の推定が今後の課題である。

<引用文献>

- 日本建築学会：2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報，丸善出版株式会社，2011.7
五十嵐さやか・前田匡樹：曲げ降伏先行型 RC 梁・柱部材の損傷量評価に関する研究，その1 ひび割れ長さ評価モデルの構築，日本建築学会構造系論文集，第75巻，第652号，pp.1121-1127，2016.6

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9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 R. Uchida, H. Kinugasa, T. Mukai, Y. Matsuda	4. 巻 Paper No. 2c-0036
2. 論文標題 DAMAGE EVALUATION OF RC COLUMNS WITH WING WALLS FROM THE VIEWPOINT OF REPAIR TIME	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020 17WCEE Proceedings (the 2020 Proceedings of the 17th World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan - September 13th to 18th 2020)	6. 最初と最後の頁 12 pages
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 H. Kinugasa, T. Mukai	4. 巻 Paper No. 2c-0037
2. 論文標題 DAMAGE EVALUATION OF RC BUILDINGS FROM THE VIEWPOINT OF FUNCTIONAL RECOVERY USING IDEAL REPAIR TIME	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020 17WCEE Proceedings (the 2020 Proceedings of the 17th World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan - September 13th to 18th 2020)	6. 最初と最後の頁 12 pages
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 大山智頌, 衣笠秀行, 向井智久	4. 巻 構造
2. 論文標題 機能回復性能と安全性能を確保する損傷コントロール設計確立のための基礎的研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 435-436
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 山村匠, 衣笠秀行, 向井智久	4. 巻 構造
2. 論文標題 RC 部材のひび割れ長さ評価モデルとひび割れ長さ比を用いた時間損傷度評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 439-440
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 柴田 蓮, 衣笠秀行, 向井智久, 崔ホンボク	4. 巻 構造
2. 論文標題 損傷の量と広がりに着目したRC低・中・高層建物のレジリエンス性能に関する研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	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 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 小中 翼, 衣笠秀行, 向井智久, 崔ホンボク	4. 巻 構造
2. 論文標題 1質点系モデルを用いた地震時の修復時間評価法の開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	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 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 鈴木喜裕, 衣笠秀行, 向井智久, 崔ホンボク	4. 巻 構造
2. 論文標題 RC建物の最大作業員数に着目したレジリエンス性能評価法の開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	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 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 大山智頌, 衣笠秀行, 向井智久, 崔ホンボク	4. 巻 構造
2. 論文標題 崩壊形の違いがRC建物のレジリエンス性能へ及ぼす影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	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 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 内田怜汰・衣笠秀行・向井智久・松田頼征	4. 巻 Vol.66B
2. 論文標題 機能回復性の観点からのRC袖壁付き柱部材の耐損傷性能評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 473-482
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6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 柴田蓮, 衣笠秀行, 向井智久, 崔ホンボク
2. 発表標題 「時間剛性」を用いたRC袖壁付き柱部材の耐損傷性能評価
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小中翼, 衣笠秀行, 向井智久, 崔ホンボク
2. 発表標題 柱・梁曲げ破壊部材の理論的時間損傷度評価法の開発
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 千葉大雅, 衣笠秀行, 向井智久, 崔ホンボク
2. 発表標題 多質点系モデルを用いた地震時の機能回復性評価方法の開発
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 張 夏睿, 衣笠秀行, 向井智久, 崔ホンボク
2. 発表標題 REDi rating systemで算出される修復時間と理想修復時間IRTの比較研究
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木 喜裕, 衣笠秀行, 向井智久, 崔ホンボク
2. 発表標題 RC建物の地震時損傷エリアに着目した機能回復性評価法の開発
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久保 海斗, 衣笠秀行, 向井智久, 崔ホンボク
2. 発表標題 建物規模と構造形式の異なるRC 建物の地震時機能回復性能に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

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