

令和元年5月25日現在

機関番号：32660

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18930

研究課題名(和文)地震時の限界機能停止時間から要求される耐震性能レベル

研究課題名(英文)Seismic performance level required from critical recovery time

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) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、阪神淡路大震災など近年の地震被害を教訓に、地震時機能継続性の観点から決まる耐震性能(地震時機能継続性能)について論じたものである。この耐震性能は、限界機能停止時間に達する地震動の大きさ(地震動倍)で定義される。地震時機能継続性能の特性を明らかにする目的で、現在の耐震基準で求められる耐震性能(安全性)との比較を行った。この結果、地震時機能継続性能は、規模が大きく重要な建物で、安全性能を下回る傾向にあることが明らかになり、地震後の都市機能維持を考えると、耐震設計を行う際に地震時機能継続性能を考慮することが重要であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

最近の地震被害において建物の地震後継続使用に支障をきたすケースが多く報告されている。建物の機能停止による損失は、都市の規模拡大や経済活動の活発化に伴い大きくなることから、都市の成長とともに今後益々増大することが考えられる。しかしながら限界機能停止時間から決定される耐震性の現状を明らかにした研究はこれまでにない。事業継続性の観点から、経済活動を支える事務用途や住居用途建物の耐震性の現状を知ることが重要である。

研究成果の概要(英文)：In this study, the characteristics of the seismic performance required from the view point of post-seismic functionality was investigated, based on lessons from the damage of recent earthquakes such as the Great Hanshin-Awaji Earthquake. The seismic performance was defined by the design basis earthquake magnification at the limit recovery time. In order to analyze the characteristic of the performance, we compared the level of the seismic performance with that of the safety performance which is currently required. As a result, it was revealed that the seismic performance for significant and large buildings, in which ductility design is adopted, tends to become smaller than the safety performance, indicating that the performance should be considered in seismic design to prevent opportunity loss expected at large earthquake in the future.

研究分野：建築物の構造性能評価

キーワード：地震時機能継続性 限界機能停止時間 耐震性能 都市機能維持

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

兵庫県南部地震(1995)の経済損失は10兆円に達し、中央防災会議は首都圏直下型地震が発生した場合に国家予算に匹敵する経済損失が発生する可能性があるとの発表を行った。大地震に対する都市の脆弱性と、経済活動停止が引き起こす莫大な損失に懸念が集まっている。このような中著者は、建物経営破綻に対する地震時許容限界修復費用を算出し、延床面積・階数および、土地単価の異なる不動産間の相対比較を行った結果、大規模・高立地条件の経済活動上の重要物件の許容限界が予想に反してむしろ小さくなりがちであることが明らかとなった。

2. 研究の目的

本研究は、事務所用途や住居用途建物の事業継続性に着目し大地震が引き起こす機能停止に対して要求される耐震性能レベルを明らかにすることを目的とする。具体的には、

1. 公開されている不動産データをもとに、建物経営の観点から大地震時に建物に許容される限界機能停止時間を推定する。

2. この限界から要求される耐震性能レベル(対機能維持耐震性能)を、建築基準法が要求する安全性に対する耐震性能レベル(対人命保全耐震性)との関係で明確化する。

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、都市を構成する建物の機能停止に対する耐性の現状と、付与すべき耐震性能レベルを明らかにするものである。

3. 研究の方法

本研究の目的は、建物機能維持の観点から要求される耐震性能レベル(対機能維持耐震性能)を、建築基準法が要求する安全性に対する耐震性能レベル(対人命保全耐震性)との関係で明確化することにある。この目的のために以下の3つアプローチによって研究を進めた。

(1) 収益用不動産を対象として、NPV(正味現在価値)の観点から導かれる限界補修期間 T_{max} (限界機能停止時間)を、J-REIT 所有の1269物件について算出し、これを既往の研究において示されている兵庫県南部地震で生じた補修期間と比較した。そして、補修期間が限界値 T_{max} を上回り易くなる建物について考察した。また、この研究において必要となる、修復費用と修復時間の関係性について、兵庫県南部地震のデータをもとに分析した。

(2) 地震後の建物機能停止が原因で発生する付加価値生産の減少を抑え、社会全体の生産活動を守るという観点から、建物に許容される限界機能停止時間を定義し、これに対応する耐震性(対機能維持耐震性能)を算出した。得られた対機能維持耐震性能を、建築基準法が求める対人命保全耐震性と比較し、対人命保全耐震性能は確保されているが、対機能維持耐震性能が十分ではないケースがどのような場合に起こりえるのかを分析した。

(3) 機能継続性の観点から建物内に発生する種々の損傷の深刻度を統一的に比較する指標「時間損傷度」をもとに、近年の大地震において機能継続性の阻害要因となっている方立壁を対象に部材性能評価を行った。さらに、時間損傷度をもとに算出される建物の修復時間を、建物用途(マンション・学校・事務所)および、崩壊形の異なるRC造建物を対象に求め、対機能維持耐震性(修復性)・対人命保全耐震性そして、建物の機能性の観点から要求される耐震性能およびその特性の分析を行った。

4. 研究成果

「3. 研究の方法」で述べた3つの研究アプローチの結果得られた成果を以下にまとめる。

(1) J-REIT 物件を対象とした限界機能停止時間から決定される耐震性の評価と特徴分析

諏訪[1]は兵庫県南部地震で被害を受けたRCおよびSRC建物の分析を行い、損傷レベルの異なる建物の補修期間 T [日]と延床面積 S との関係性、および、小破・中破・大破の補修費用が延床面積の大きさを元に算出可能であることを示している。このことを利用し、延床面積 $S=2500 \sim 25000$ [m²] に対してそれぞれ小破・中破・大破の補修費用と補修期間を算出し、プロットしたものが図1である。この図から、RC・SRC造建物における補修費用(単位:百万円)は補修期間 T と明確な関係性を持つことが分かった。この関係性を基にして、経済耐震性を計る指標の開発を目的に、収益用不動産を対象として、投資判断指標として一般的によく使用されているNPVの観点から導かれる限界補修期間 T_{max} (限界機能停止時間)を、J-REIT 所有の1269物件について算出した。また、これを既往の研究において示されている兵庫県南部地震で生じた補修期間との比較を行った(図2)。この結果、建物の規模が大きくなるほど経済耐震性が低くなる傾向(図3)が見出され、この原因として次の2つが考察された。

投資家は収益効率よりも投資で得られる全体の量を重要視する傾向にある。

同じ損傷レベルでも建物規模が大きくなるに伴い補修期間が増大するが、この傾向が損傷の大きい中破・大破において顕著である。

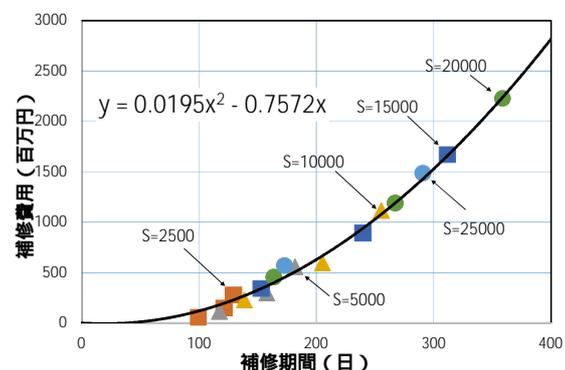


図1 補修費用と補修期間の関係

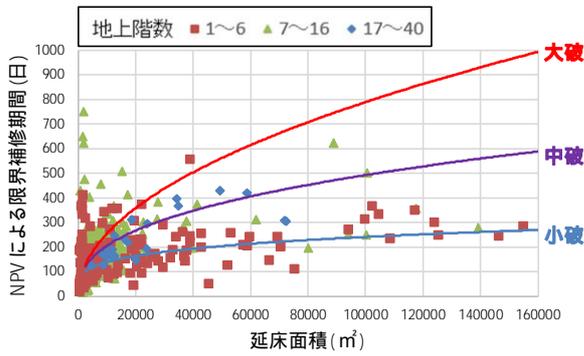


図2 限界補修期間と延床面積との関係

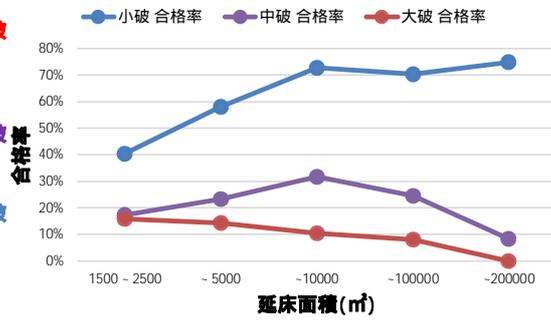


図3 地震時補修期間に対する合格率

(2) 地震時の生産継続性能から定まる耐震性能の評価と対人命保全耐震性との比較

地震後の安定的な経済活動の継続を目的とした耐震性能評価法の枠組みの提案を行った。阪神淡路大震災の被害を教訓に、建物が行う付加価値生産の機会損失に着目し、この損失の限界値を設定したときの耐震性能を生産継続性能と定義した。この生産継続性能と現在の大地震に対する要求性能である安全性能（対人命保全耐震性）との相対的關係性比較（図4）を行い、以下の知見を得た。

建物階数を変えず建物の規模を増加させた場合、規模の増加に伴う損傷部材数の増加によって機能停止時間が増加するため生産継続性能は著しく低下する。

柱間隔を小さくし剛性及び耐力を高くした場合、安全性能は高くなるが生産継続性能は僅かしか増加しないことがわかった。これは剛性及び耐力を高くするために部材数を増やしたため、損傷の量が増加したことが原因と考えられる。

部材数が同じ建物の場合、強度・剛性の増加は安全性能と生産継続性能の双方を上昇させるが、靱性改善は安全性能のみを上昇させる。図4(3)に示すように変形能力を2倍（ R_{sup} が1/100radから1/50rad）にすると、安全性能と生産継続性能は大きく乖離（ P_{M-s} の値が0.28から-0.72に減少）する。生産継続性能の検討は靱性型建物で特に重要になる。

建物内産業（表1）の重要度 V （1日1人当たりの付加価値生産額（図5））が高く社会に対する貢献度の高い建物の場合、生産継続性能は平均的な重要度 V のものと比較しておおよそ半分程度となる。

以上のことから規模が大きく重要な建物に対して靱性設計を採用した場合、とりわけ安全性能に比べ生産継続性能が小さく生産継続性能に配慮すべきケースが発生しやすいことが示唆された。近年、経済活動が活発な地域への一極集中が進み、規模が大きく社会的に重要な建物が増加する傾向にあり、今後ますます生産継続性能を考慮した耐震性能評価が重要になる可能性がある。

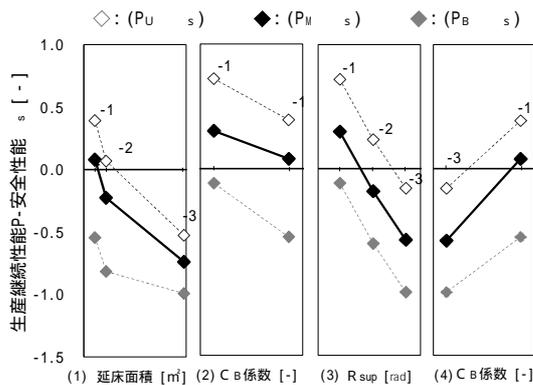


図4 生産継続性能と安全性能の比較

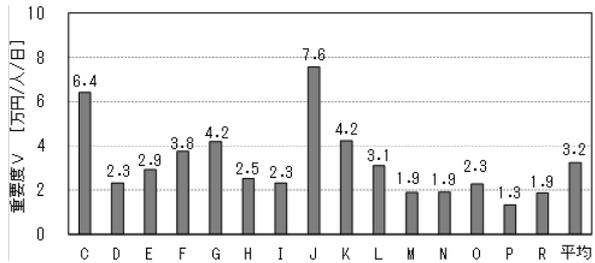


図5 産業別重要度 V

表1 日本産業大分類

A 農業、林業	K 不動産業、物品賃貸業
B 漁業	L 学術研究、専門・技術サービス業
C 鉱業、採石業、砂利採取業	M 宿泊業、飲食サービス業
D 建設業	N 生活関連サービス業、娯楽業
E 製造業	O 教育、学習支援業
F 電気・ガス・熱供給・水道業	P 医療、福祉
G 情報通信業	Q 複合サービス事業
H 運輸業、郵便業	R サービス業（他に分類されないもの）
I 卸売業、小売業	S 公務（他に分類されるものを除く）
J 金融業、保険業	T 分類不能の産業

(3) 時間損傷度に基づく耐震性分析および、修復性・安全性・機能性の関係性分析

方立壁を対象に時間損傷度(種々の損傷の深刻度を統一的に評価する指標)を用いた耐損傷性能評価を行い、以下の知見が得られた。

方立壁部材の時間損傷度にもっとも影響を及ぼすものは反曲点比、次にせん断補強筋比であり、軸力は大きな影響を及ぼさなかった。

せん断余裕度の小さい領域で時間損傷度の変動が大きいことから、破壊モードが時間損傷度と大きく関連していることが推察された。

曲げ破壊型では非構造部材(方立壁)の時間損傷度が構造部材(柱)をやや上回ったが、大きな差はないのに対し、せん断破壊型の方立壁と柱の間には明確な差が見られた。

方立壁の時間損傷度は柱に比べ破壊モードの影響が大きい。

せん断破壊型の方立壁を有するフレーム(図6)は無いものと比較し、時間損傷量(損傷がもたらす機能損傷の量)が約3.0倍程度となった(図7)。

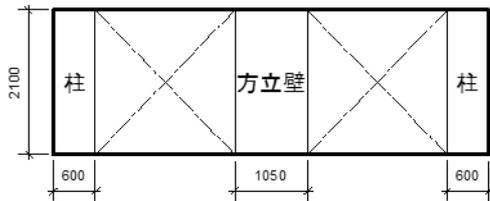


図6 試算で想定したフレーム

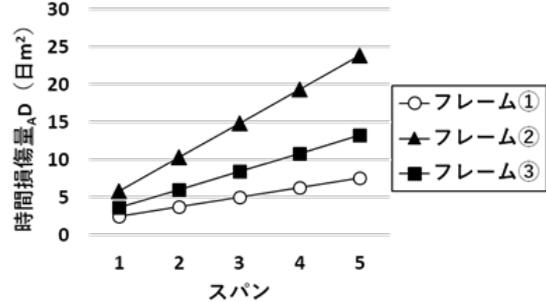


図7 時間損傷量の比較

時間損傷度をもとに算出される建物の修復時間を、崩壊形および非構造量の異なるRC造建物(図8)を対象に求め、対機能維持耐震性(修復性)・対人命保全耐震性そして、建物の機能性の観点から要求される耐震性能について分析を行った。

修復性の評価には修復時間を指標として用い、安全性の評価には安全限界層間変形角(1/50radを仮定)に達する地震動倍率を指標として用いる。ここで修復性と安全性に影響を与える要因として建物の崩壊形に着目して分析する。また、機能性の評価には非構造部材量を指標として用いる。このことは、多くの機能を持つ建物(機能性が高い建物)は多くの非構造部材を有すると仮定していることになる。なお、ここで機能性レベル(非構造部材量)は、建物用途(マンション・学校・事務所)の違いを考慮した3レベル(表2)と、非構造量をゼロとしたものの合計4レベルとした。

図9は解析の結果得られた、修復性(IRT),安全性(地震動倍率),機能性(非構造量)の関係図である。青部分は想定した要求を満たしている領域である。ここでは仮に修復時間の許容値を60日と仮定し、許容される変形に達する地震動倍率をKobe(NS)地震動の0.8倍の地震規模と仮定してその範囲を作図した。どの性能を重視するかによって、この領域のどこを目標とするかが決まる。建物所有者が安全性を重視した場合、非構造量1倍の全層崩壊を採用する。機能性を重視した場合、非構造量2倍の2層崩壊を採用する。このように性能間のバランスをとれる崩壊形と非構造量を模索する設計法が考えられる。

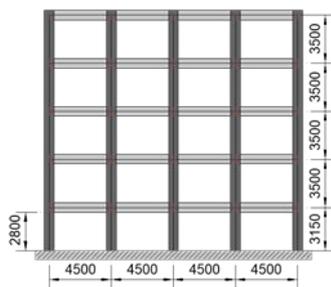


図8 解析対象建物の軸組図

表2 非構造量変更モデル一覧表

モデル名	非構造倍率	単位非構造部材量[m ² /m ²]					
		外壁	内壁	外壁開口部合計	内壁	内扉	天井
M-5A	1倍	0.817	0.817	0.090	1.100	0.070	1.000
				0.030 0.060			
M-5B	2倍	0.727	0.727	0.180	2.200	0.140	1.000
				0.030 0.151			
M-5C	3倍	0.637	0.637	0.270	3.300	0.210	1.000
				0.030 0.240			

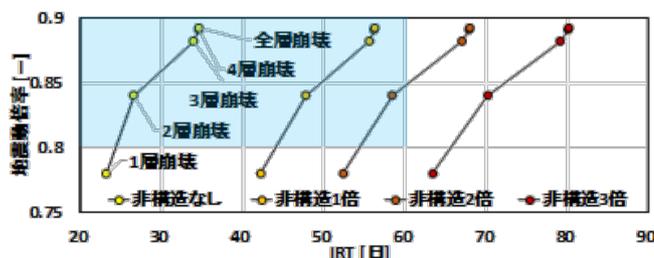


図9 地震動倍率-非構造量-IRT 関係

崩壊形と非構造量を変化させた場合の安全性・機能性・修復性への影響を分析した結果、3つの性能にはトレードオフ関係があり、性能間のバランスを図る設計法が重要であることを示した。また、安全性と修復性のトレードオフの強さは非構造量の増加によって弱まる傾向が確認できた。

以上、本研究課題に対する3つの研究アプローチによって得られた成果をまとめた。これら成果は、世界的に注目が集まる、地震時の建物機能停止によって引き起こされる損失の低減を目的とした耐震設計法を確立する上で必要な、基本事項（すなわち、A．限界機能停止時間の特性と現状、B．建物に生じる機能停止時間の特性と評価法）について論じたものであり、今後の対機能維持耐震性能研究に対する足がかりを与えるものと言える。

<引用文献>

諏訪仁，神田順：兵庫県南部地震の被害データを用いた建物補修期間の統計的検討，構造工学論文集，Vol.53B，pp. 311-316，2007.3

5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

平見圭祐，衣笠秀行，向井智久，松田頼征：建物の付加価値生産継続性能の確保を目的とした耐震性能評価法の提案，構造工学論文集，Vol.65B，pp321-327，2019.03，査読有

利根川洗一，衣笠秀行，向井智久，松田頼征：機能回復性能の観点からのRC方立壁部材の耐損傷性能評価，構造工学論文集，Vol.65B，pp329-335，2019.03，査読有

衣笠秀行，向井智久：RC及びSRC収益用不動産を対象とした地震後の限界機能停止期間に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集，構造，No. 20013，pp.25-26，2018.09，査読無

平見圭祐，衣笠秀行，向井智久：建物の付加価値生産継続性能の確保を目的とした耐震性評価法の提案、日本建築学会大会学術講演梗概集，構造，No. 23237，pp.473-474，2018.09，査読無

〔学会発表〕(計3件)

韓威，衣笠秀行，向井智久，松田頼征，平見圭祐：RC造建物の修復性確保を目標とした耐震設計に及ぼす安全性と機能性の影響分析、日本建築学会大会、2019

衣笠秀行，向井智久：RC及びSRC収益用不動産を対象とした地震後の限界機能停止期間に関する研究、日本建築学会大会、2018

平見圭祐，衣笠秀行，向井智久：建物の付加価値生産継続性能の確保を目的とした耐震性評価法の提案、日本建築学会大会、2018

〔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：

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：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6．研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

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。