経済損傷指標に基づく収益用建築物の耐震性能評価

INVESTIGATION ON SEISMIC PERFORMANCE OF FOR-PROFIT BUILDINGS IN TERMS OF ECONOMICS

衣笠 秀行*

Hideyuki KINUGASA

For-profit buildings in cities such as commercial buildings for rent play a significant role in urban economic activities, and their failure would cause enormous economic loss. To reduce such losses in the event of a severe earthquake, it is necessary to clarify the damage limits of for-profit buildings in terms of business continuity.

This paper investigates the seismic performance of for-profit buildings in terms of economics by introducing an economic damage indicator and discusses the following issues. ①Permissible repair cost for buildings derived from property information such as construction cost, projected revenues and discount rate, and a resulting “damage limit” for failure in business continuity. ②Upper-bound investment for earthquake resistance derived from a balance between cost for earthquake resistance and its benefit, and resulting “inevitable damage” in terms of economics. ③Vulnerability of urban for-profit buildings with low business risk to earthquakes, compared with rural for-profit buildings with high business risk. ④Significance of establishing a design procedure that considers the “damage limit” and “inevitable damage” in order to reduce economic losses caused by failure in business continuity of urban commercial buildings due to earthquakes.

Keywords: economic damage indicator, repair cost, damage limit, inevitable damage, for-profit buildings, economic loss, economic seismic performance
経済損傷指標, 修復費用, 損傷限界, 不可避損傷, 収益用建築物, 経済損失, 経済的耐震性

1. 研究目的

1995年の阪神大震災における経済損失は10兆円に達し、中央防災会議は、来る関東直下地震の経済損失が112兆円に達する可能性を示した¹⁾。近年、地震がもたらす経済損失の重大性が注目を浴びるようになってきている。これまで、大地震に対する耐震設計は人命保全を主目的として行われてきた。耐震目標として安全性、すなわち人命の保護がもっとも重要であることに議論の余地はない。しかしながら、建築構造物が単に住むための器ではなく経済活動の場として重要な役割を担っていることを考えると、大地震時における耐震目標を安全性（人命保護）だけにとどめることが出来ないのは明白である。大地震が社会に及ぼす経済的なダメージを小さくし経済損失を低減するためには、構造物の耐震性を経済性の観点から適切に評価することが求められる。

一方、2005年に発生した耐震偽装事件では経済至上主義社会における耐震性能の極端な軽視が白日の下にさらされた。この背景には耐震性能の経済的価値が十分認識されていないこと、また、経済社会において、経済的価値を見いだせない性能は無視あるいは極端に

軽視される現状がある。

経済社会において建築物の耐震化を進めるためには、経済性の観点から耐震性能の重要性を明確にする手法の確立が必要不可欠であり、このために耐震工学と経済学の融合が求められることになる。

近年、不動産の証券化が進み、賃貸料等による収益を目的とした建築物（以下、収益用建築物）が急増している²⁾。収益用建築物は都市の経済活動の場を提供する重要建築物であり、これらの機能停止は莫大な経済損失を引き起こす。地震に強い都市づくりを考える上で、これら建築物の耐震性を明らかにすることは重要である。

本研究の目的は、収益用建築物を対象として、地震時の損傷の経済的深刻度を適切に評価する指標（経済損傷指標）の提案を行うことにある。これに基づき本論文では、収益用建築物の採算性の観点から定まる許容される限界の損傷量（限界修復費用）と、経済的要因から決まるこれ以上小さくできない限界の損傷量（不可避修復費用）について考察を行い、都市に存在する収益用建築物の経済的観点から見た耐震性（経済的耐震性）について論じるものである。

* 東京理科大学理工学部建築学科 教授・工博

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Technology, Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

2. 事業継続性の観点からの耐震性能評価

2.1 収益用建築物

都市を形成する建築物は単に住むためのものではなく経済活動の場として重要な役割を担っている。貸しビルなどの経済活動の場を提供することを目的として都市に存在する建築物（収益用建築物）には次のような特徴がある。

- ①都市部の経済活動の場を提供する重要建築物であり、これら建築物の機能停止は都市の経済活動の停止を意味する。
- ②収益用建築物の存在価値は収益性（構造物への投資と収益のバランス）によって決まる（図1）。地震等による修復費用の発生によって過大な投資が必要となった場合、経済的な存在価値が薄れ、機能停止に至る。
- ③不動産の証券化によって自社ビルの割合が減り、特に都市部において収益用建築物が近年急増している。

都市の経済活動の場を提供する収益用建築物の耐震性を適切に評価することは、地震に強い都市を実現する上で非常に意義のあることである。

最近、収益用建築物の価値をDCF法に基づき評価することがよく行われるようになった。DCF法は価値 V を供用期間中の収益を総和することによって次式で計算するものである^{2),3)}。

$$V = \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{(1+r)^i} + \frac{1}{(1+r)^n} \cdot V_s \quad (1)$$

この式は n 年の所有の後に建築物を売却することを想定したものとなっており、 n : 所有期間(年)、 V_s : n 年後の売却価格である。 a_i は i 年における年純収益であり、第1項は n 年間にあがる純収益の総和を意味している。ただし、同じ収益でも現在と i 年後では価値が異なることからこの補正（現在価値への割引）を割引率 r を用いて行っている。第2項は n 年後における売却収益を意味しており、ここでも割引率 r による現在価値への補正が行われている。なお、割引率 r は経済的リスクの小さなもののほど小さく、逆にリスクの高いもののほど大きく設定され、その範囲はおおよそ4～10%程度であるとされる^{2),21)}。

すなわち、DCF法では建物の価値を、その建物が売却益も含む供用期間中に生む利益の総和として定義しており、建設費用を A としたとき、これを投資と考え、

$$\text{投資 } A < \text{価値 } V \quad (2)$$

の関係が成り立てば、この建物は収益を生む、すなわち、経済的に存在価値のある建物と判断されることになる。

一方、所有期間中に地震が発生し修復費用などの経済損失が発生した場合、価値 V はその分損なわれることになり、もし、この結果式(2)の符号が逆転し、次式のようになれば、この建物の経済的価値は消失することになる。

$$\text{投資 } A > \text{価値 } V - \text{地震時経済損失} \quad (3)$$

2.2 修復費用に基づく耐震性能評価

収益用建築物の耐震性能評価を表1に示すような分析と性能評

価の2ステージで行うことを考える。分析のステージでは耐震工学上と経済学上の2種の分析が行われる。前者では設計地震動の設定とそれによる損傷量の推定、後者では経済的リスクとこれに基づく収益性の分析が行われる。性能評価のステージでは、これら耐震工学上および経済学上の分析をもとに、推定された損傷の経済的な深刻度に対する評価を行う。つまり、ここでの耐震性能評価は、地震によって生じた損傷を修復費用の形で再評価することになる。

米国では、1989年ロサンゼルス地震、1994年ノースリッジ地震の後、西海岸の大都市が膨大な経済損失を被ったことを背景に、第1世代の性能評価型設計であるVision2000及びFEMA356が、人命保護だけでなく建物の機能性の保全を目的に作成された。現在、第2世代の性能評価型設計法がATCおよびPEERにおいて開発されつつあり、そこでは、地震による「機能停止時間」や「修復費用」が性能評価の重要な指標として扱われている^{4),5),6)}。また、国内においても、このような経済性の観点から建築物の耐震性を論じる研究が近年多く発表され^{例えば7-10),17),18),22)}、さらに、不動産取引においても、不動産適性価格の評価（建物適正評価）における地震リスク分析に際して、世界的な標準であるPML(Probable Maximum Loss: 再現期間475年相当の地震が発生した場合の、90%非超過確率に相当する補修工事費の総建替え工事費に対する割合)が使用されるようになっている¹¹⁾。

地震時の修復費用の推定方法には未解決な部分も多く、確立された方法はないが、修復費用に基づく耐震性能評価は世界的趨勢になりつつあると言える。

本章で提案する経済損傷指標は、表1で示す損傷の経済的深刻度の評価を、2.1で述べた収益用建築物の経済的価値喪失の観点から行うことを目的としたものである。この指標は、①耐震性・収益性の異なる構造物に対して適用可能なものであること、②この指標によって、「損傷に対する強さ」、「損傷の受けやすさ」などの経済的耐震性能の分析が可能であること、また、③この指標は耐震工学と経

図1 収益を目的とした建築物

表1 修復費用に基づく耐震性能評価

	分析	性能評価
耐震性	地震動 ⇨ 損傷量 ⇨ 修復費用	損傷の
経済性	経済的リスク ⇨ 収益性	経済的深刻度

済学の接点としての役割を果たすものであり、経済学で一般に使用される指標や尺度との連続性を有するものであること、が求められる。

2.3 既往の経済損傷指標

地震時修復費用の経済的深刻度を測る、あるいは、許容される修復費用の限界値を論じる際に用いられる指標（経済損傷指標）とし

て次式がある。

$$I = \frac{B}{A} \quad (4)$$

ここに、A：建設費用、B：地震による損傷を修復するために必要な費用（修復費用）である。以下ではこの指標をB/A指標と呼ぶこととする。

B/A指標は修復費用Bの大きさを建設費用Aとの比で評価するものであり、修復費用が建設費用に対して小さいものほどその損傷の経済的深刻度は小さいとするものである。また、損傷を受けた時点でも建設時と同じ額で再建築できると仮定すると、この値が大きくなると修復よりも建てなおしを選択した方が有利となることから、しばしば、修復と建て替えの判断指標として用いられる。先に述べたPMLはこの指標の考え方を基に修復費用Bの推定に確率論を導入したものと考えることが出来る。

一方、B/A指標が初期投資Aに対する地震損失によって生じる投資Bの比であるのに対して、投資総額を問題とする次式に基づく考え方もよく用いられる。以下ではこれをA+B指標と呼ぶこととする。

$$I = A + B \quad (5)$$

耐震性の高い構造物を建設すれば、修復費用は相対的に小さくなるが、その分建設費用も大きく、総額(A+B)が大きくなってしまっただけでは意味がない。逆に、修復費用Bが大きくてもその建設費用Aが小さければ、構造物への投資という意味では有利と言うことになる。また、総投資額の上限が存在する場合には、この指標から投入可能な修復費用の上限を定めることが出来る。

すなわち、この指標は、修復費用B単独の大小ではなく、総投資額であるA+Bの大小で修復費用の経済的深刻度を判断するものである。この考え方は構造物の供用期間中の総投資額を問題とするライフサイクルコストの研究で用いられている（文献^{例えば12)}）。

以下の3章で経済損傷指標の提案を行い、既往の経済損傷指標との比較を通して、2.2節で挙げた3つの観点から、提案指標の妥当性と有用性について考察を行うこととする。

3. 経済損傷指標

3.1 収益性分析に基づく経済損傷指標

建設のm年後(m<n)に地震による修復費用Bが生じた場合の収益用建築物の価値V'は以下のように計算される。

$$V' = \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{(1+r)^i} + \frac{1}{(1+r)^n} \cdot V_S - \frac{B}{(1+r)^m} \quad (6)$$

ここに、m:建設から地震の発生までの経過年数。

この式は式(1)で示した収益用建築物の本来の価値Vから修復費用Bを差し引いたものとなっており、既に説明したと同様の現在価値への変換が行われている。

一方、事業の収益性を分析する際、次式に示す資本収益率がよく用いられる¹³⁾。

$$\text{資本収益率} = \frac{\text{収益}}{\text{投資}} \quad (7)$$

資本収益率は投下した資本の特定の経営期間内における収益性を示す指標であり、企業等の収益性を分析する際に用いられるものである。いうまでもなくこれが1より大きいと投資を上回る収益が上がったことを意味しており、その事業は一応の成功を収めたことになる。

建設費用Aを投資と考え、収益をその建物が生む価値である式(6)で示したV'で与えると求める経済損傷指標Iとして次式が得られる。

$$I = \frac{V'}{A} = \left[\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{(1+r)^i} + \frac{1}{(1+r)^n} \cdot V_S - \frac{B}{(1+r)^m} \right] \frac{1}{A} \quad (8)$$

修復費用Bが過大となり、指標Iが1を下回った場合、採算割れを起こしたこととなり、収益用建築物は経済的に破綻を来したと判断される。提案指標は、バブル崩壊後に急速に普及したDCF法による不動産価値評価の概念を取り入れたものとなっていること、また、経済学における収益性分析の手法に則った形となっていることが特徴である。

なお、本論文では、次のような簡略化の仮定を行ったが、これらの設定は指標の使用目的によっては適宜変更し使用することが望まれる。

1. 所有期間nを30年とする
2. 年間純収益 a_i はiによらず一定($a_i = a$)とする
3. 売却額 V_S を次式で与える

$$V_S = \chi \cdot V_0 \quad (9)$$

V_0 :社会的・物理的な劣化がなく年間純収益aが永久に続くとしたときの売却額で下式で計算する。 χ :社会的・物理的な劣化に起因する減価係数で石塚の研究¹⁴⁾を参考に0.7(30年後の減価率)とした。

$$V_0 = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{a}{(1+r)^i} = \frac{a}{r} \quad (10)$$

提案指標で使用されている所有期間nは、見積期間や分析期間と呼ばれており、収益の見積精度の問題から減損会計では20年を上限としており¹⁵⁾、不動産鑑定では一般的には10年程度が採用されているようである²¹⁾。本研究では収益予測に重点をおくわけではないので、小松らの研究¹⁶⁾を参考に建築物の取り壊しまでの平均寿命である30年で設定した。

以下では、3.2節で述べる経済損傷指標検討用経済モデルを用いて、続く3.3節で、既往の指標との定性的特性比較を通して、提案指標の特徴および妥当性の検討を行うこととする。

3.2 経済損傷指標検討用経済モデル

ここでは提案指標の特性分析を行う上で必要な経済モデル（建設費用、修復費用、年純収益）の概要を述べる。なお、これらを厳密に設定することは大変困難であるので、ここでは過度の推定精度は求めず、出来るだけ簡単でかつ、定性的な増減の特徴を捉えたものとする事とした。

修復費用は、エネルギー一定則を仮定した式(11)によってベースシア係数 C_0 から応答塑性率 μ を求め、これを基に、高橋・塩原らの

研究^{17),18)}を参考に式(12)から修復費用Bを決定する。式(11)と式(12)をグラフ化したものをそれぞれ図2(1)(2)に示した。

天井材などの非構造部材の損傷の大小は層間変形ではなく加速度の大きさに左右されることが知られている。ここで問題とする修復費用は変形に起因するものであり、加速度に起因する損傷が顕著となる建築物は対象外としていることになる。

$$\mu = \left\{ \left(\frac{1}{C_B} \right)^2 + 1 \right\} \frac{1}{2} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} B &= 0 & \mu &\leq 1 \\ B &= (0.25\mu - 0.25)A & 1 \leq \mu \leq 5 \\ B &= A & 5 \leq \mu \end{aligned} \quad (12)$$

建設費用Aを以下の式で求めることとした。

$$A = F \cdot k \cdot \beta \quad (13)$$

ここにF：延床面積、k：床面積当たり単価、 β ：耐震性向上による価格上昇係数である。ベースシア係数 C_B が0.25程度から2倍になると建設費用はおおよそ5～10%程度増加する傾向にあることが知られている^{19),20)}。ここでは、これを参考に、 $C_B=0.3$ で1.0となる次式で β を表現することとした。

$$\beta = \frac{0.25C_B + 0.9}{0.975} = 0.256C_B + 0.923 \quad (14)$$

貸しビルで代表される収益用建築物の年純収益は延床面積Fとおおよそ比例して大きくなることが考えられることから、ここではこ

れを式(15)の形で与えることとした。すなわち、年純収益を $F \times k$ に比例すると仮定したことになる。なお、文献21では年純収益を建設費用との関係で与える方法が示されており、 γ はおおよそ0.1程度の数値であることが示されている。

$$a = F \cdot k \cdot \gamma \quad (15)$$

以下では、本項で仮定した経済モデルを用いて検討を行うが、特に記述がない場合、 $\gamma=0.1$ 、割引率 $r=0.08$ 、地震発生年(建設年からの経過年数) $m=15$ を仮定することにする。

3.3 提案指標の定性的特性分析

建設費用Aは「守るべき資産の大きさ」と「耐震性確保のための投資」の両方の側面を持ち、修復費用Bの評価をどちらに対して行うのかで判断が異なってくる。2.3節で述べた既往の指標と提案指標間の特性の違いを明確にするため、異なる要因で建設費用が変化する次の3つのケース(図3)を考えることとする。

ケース① 規模(延床面積)は同じであるが耐震性(ベースシア係数)が異なるために建設費用Aが変化し、これにともない修復費用Bも変化するケース(図3(1))。

ケース② ベースシア係数は同じ(0.45)であるが、規模(延床面積)が異なるために建設費用Aが変化し、これにともない修復費用Bも変化するケース(図3(2))。

ケース③ 規模(延床面積)が大きくなるため建設費用Aが増加するが、ベースシア係数を大きく(0.55→0.84)することによって修復費用Bが一定に維持されるケース(図3(3))。

なお、修復費用Bの経済的深刻度は、B/A指標、A+B指標では指標値が大きいかほど大きいと判断されるが、提案指標では指標値が小さいほど深刻度は大きいと判断される。そこで、以下の

図4～6での定性的挙動比較では、修復費用Bの経済的深刻度が大きくなる向きが各指標値で同じ(下向き)となるように、B/A指標とA+B指標(図4～6の(2)(3))の縦軸の正の向きを逆(下向き)に示してある。また、比較を容易にするため以下の検討において、修復費用Bはすべての指標において2.1節で述べた現在価値への割引を行っている。

図2 ベースシア係数からの修復費用の推定

図3 建設費用Aが変化する3つの解析ケース

図4 (2) (3)はそれぞれ、ケース①におけるB/A指標とA+B指標の結果を示している。B/A指標(同図(2))ではベースシア係数 C_B が大きくなるにつれて深刻度が単調減少(右上がり)しているのに対して、A+B指標(同図(3))では $C_B=0.69$ を境に深刻度が減少から増加に転じている(上に凸)。

耐震投資によって予想損失が非常に小さくなったとしても投資Aと修復費用Bのトータルが大きくなっては意味がない。すなわち、 C_B の増加に対して深刻度が単調減少を示すB/A指標はこのケースに対する指標として不適切であり、A+B指標が定性的に正しい評価を与えていると考えられる。

図4 耐震性(C_B)が異なるケースにおける定性的挙動比較

図5 資産価値(延床面積)の異なるケースにおける定性的挙動比較

図6 耐震性・資産価値が異なるケースにおける定性的挙動比較

図5 (2) (3)はそれぞれ、ケース②におけるB/A指標とA+B指標の結果を示している。B/A指標(同図(2))では延床面積の増加に係わらず一定値を維持しているのに対し、A+B指標(同図(3))は深刻度が単調増加(右下がり)しており、両者は全く異なる評価を与えている。

C_B が変化せず耐震のための投資(価格上昇係数 β)が一定であるこのケースでは、損傷の深刻度はその建築物の資産の大きさとの関係で評価される。修復費用Bが増加してもその分A(資産)が大きければ、深刻度の上昇は抑えられるはずである。このケースでは、AとBは一定比率を維持して変化することから、指標値が一定となるB/A指標の結果が妥当であり、A+B指標は規模の異なる(資産価値の異なる)構造物間の比較には向いていないことが分かる。

B/A指標は「守るべき資産の大きさ」としてのAに対するBの評価なのに対し、A+B指標は「耐震性確保のための投資」としてのAに対するBの評価であることがこれら2つのケースに対する適・不適を生み出していると考えられる。すなわち、資産の大きさに変化する(延床面積が変化する)ケース②に対しては「守るべき資産の大きさ」としてのAに対するBの評価であるB/A指標が適しており、資産の大きさの変化がなく耐震投資が変化する(C_B が変化する)ケース①に対しては、「耐震性確保のための投資」としてのAに対するBの評価であるA+B指標が適していると考えられる。

図4 (1)および図5 (1)は提案指標による両ケースの結果である。ケース①ではA+B指標と、ケース②ではB/A指標と定性的に同じ傾向を与えており、提案指標は耐震性・資産の大きさ(規模)の異なる構造物に対して定性的に妥当な挙動を示していると言える。

図6 (1) (2) (3)はそれぞれ、ケース③における提案指標、B/A指標、A+B指標の結果を示している。このケースでは、耐震性と資産の大きさ(規模)の両方が変化する。B/A指標(同図(2))では延床面積の増加とともに深刻度が単調減少を示している(右上がり)のに対し、A+B指標(同図(3))は単調増加(右下がり)、提案指標では深刻度が減少から増加に転じる上に凸の曲線となっており、三者は異なる評価傾向となっている。

ケース③では建設費用Aが増加しているにもかかわらず修復費用Bが一定に維持され、Bの大きさはAに対して相対的に小さくなることから、深刻度

(1)年純収益の影響 (2) 割引率の影響
図7 許容限界修復費用に及ぼす年純収益と割引率の影響

図8 大都市に存在する収益用建築物の許容限界修復費用

が常に増加する A+B 指標の結果は適当なものとは言えない。また、このケースでは B を一定に維持するためにベースシア係数を増加させており、ケース①で述べた耐震化費用と修復費用低減のバランスの観点から考えて、深床度が常に減少（右上がり）する B/A 指標の結果も不自然である。A に対する B の大きさが小さくなることによって初期は深床度が低下、その後、耐震化による費用効率が低下し増加に転じる、提案指標の結果がもっとも妥当なものと考えられる。

建設費用 A と修復費用 B は共に事業者にとっては投資であり、B/A 指標は「投資／投資」、A+B 指標は「投資＋投資」の形となっているのに対して、提案指標は、収益の項を導入し、「収益／投資」の資本収益率の形となっていることが、耐震性・収益性の異なる構造物の定性的比較を可能にしたと言える。

4. 収益用建築物の経済耐震性能の検討

4.1 許容限界修復費用

経済損傷指標の提案を行い、この値が 1 以下では収益用建築物の経済的価値が失われることを述べた。式(8) = 1 として、これを B について解くことによって経済的価値消失に対する許容限界修復費用 B_{max} を次式のように導き出すことができる。

$$B_{max} = \left[\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{(1+r)^i} + \frac{1}{(1+r)^n} \cdot V_S - A \right] \times (1+r)^m \quad (16)$$

許容限界修復費用 B_{max} が小さい構造物は損傷に対して経済的価値を失いやすいものであり、構造的力学的な観点ではなく、経済的観点から見た「損傷に弱い構造物」である。

図7は年純収益と割引率が B_{max} に及ぼす影響をグラフ化したも

のである。割引率は経済的リスクと関連しており、経済的リスクが小さい場合に小さな値が設定される。年純収益が大きく経済リスクが小さい（割引率が小さい）、経済的に有利なものほど B_{max} は大きくなる事が分かる。

3.1 で述べたように社会的・物理的劣化がなく年純収益 a が永久に続く収益用建築物の価値は式(10)で与えられる。割引率 r は経済リスクの大小、 a は収益の大小を表すが、ハイリスク・ハイリターン

の原則¹³⁾から、 r が大きい（経済リスクが大きい）と収益 a が大きく、逆に r が小さい（経済リスクが小さい）と収益 a は小さくなる事が知られている。一般的に都市部では経済的リスクは低く $r = 4\%$ 程度、郊外では経済リスクが大きく $r = 8\%$ 程度の値が設定される²⁾。

ここで、表2に示す大都市・小都市・郊外（地震発生リスクは同じ）の3つのケースを考える。割引率 r は経済的リスクの小さい大都市型で小さく、リスクの大きい郊外型では大きく設定してある。これに対して、年純収益 a は、リスクの小さい大都市型では小さく（ローリスク・ローリターン）、リスクの大きい郊外型では大きく（ハイリスク・ハ

イリターン）し、式(10)で示した社会的・物理的劣化のない収益用建築物の価値 V_0 が各ケースで等しくなるように設定した。

図8(1)は建設後15年の時点で地震が発生した場合の各ケースにおける許容限界修復費用 B_{max} を求めた結果である。 B_{max} はローリスク・ローリターンの都市型建築物でハイリスク・ハイリターンの郊外型より小さくなっていることが分かる。また、この差は同図(2)から分かるように地震発生年が大きくなるほど顕著である。

すなわち、ローリスク・ローリターンの都市型の収益用建築物は、経済的観点から見て「損傷に弱い構造物」であり、地震による損失が生じた場合、採算性が悪化し機能停止に陥りやすいと言える。都市部の収益用建築物は経済的リスクが小さく、地震等の突発的な損失（リスク）に対する経済的備えが小さくなっていることが、この原因と考えられる。

表2 収益タイプの異なる3つのケース

	大都市型	小都市型	郊外型
割引率 r	0.04	0.06	0.08
年純収益 a 式(15)	$0.05 \times F \cdot k$	$0.075 \times F \cdot k$	$0.1 \times F \cdot k$
$V_0 = a/r$ 式(10)	$1.25 \times F \cdot k$		

F:床面積、k:床面積あたりの建設単価

4.2 不可避修復費用

図4(1)で示したように C_B が増加するにつれて、提案指標値 I は増加するがある点を境に減少に転じる。耐震化のための投資は I 値が最大になるときが最適であり、これ以上の投資は、 I 値の低下を生む採算の合わない行為であり経済性に重きを置く収益用建築物において実行は困難である。すなわち、経済性の観点から C_B には上限

図9 耐震化費用増加率が不可避修復費用に及ぼす影響

図10 修復費用増加率が不可避修復費用に及ぼす影響

図11 修復費用増加挙動が不可避修復費用に及ぼす影響

が存在することになる。一方、修復費用は一般に C_B が大きくなるほど小さくできることから、経済性に起因する、低減できる限界の修復費用（不可避修復費用 B_{min} ）が存在することになる。不可避修復費用が大きい構造物は経済的観点から考えて損傷を受けやすい構造物であると言える。

ここでは、 C_B を0.01 ずつ0.3 から1.0 まで変化させ、I 値が最大となるとき修復費用Bの値（不可避修復費用 B_{min} ）を数値計算的に求めることとした。なお、I 値が最大となるとき C_B が1.0 以上となる場合には、これ以上の C_B は特別な建築物を除き現実的でないことから、 $C_B = 1.0$ 以下の範囲でI 値が最大になる時のB値で B_{min} とした。

図9 (2)は同図(1)に示す耐震化費用増加率 p （図中の直線の傾き）の変化の際の不可避修復費用 B_{min} の推移を示したものである。

ベースシア係数を増加させるために必要な費用が大きくなる（耐震化の投資効率が低下する）につれて、 B_{min} は大きくなり、不可避修復費用が増大していることが分かる。すなわち、不可避修復費用 B_{min} は、耐震投資が大きな効果（修復費用の低減）を生むものほど小さくなる傾向にあるといえる。

図10(2)は同図(1)に示す修復費用増加率 q （図中の直線の傾き）の変化の際の不可避修復費用 B_{min} の推移を示したものである。修復費用増加率が大きくなるに従い B_{min} は小さくなっていく。一見、同じ塑性率で大きな補修費用が生じる場合の方が不可避損修復費用を小さくできるのはおかしな結果のような気がする。しかしながら、修復費用増加率の増加は、少ない耐震化費用（ベースシア係数を大きくする費用）で大きな修復費用低減効果を生むことにつながり、耐震投資効率が向上し、結果として B_{min} を小さくできたと考えられる。

図11(2)は同図(1)に示す3つの修復費用増加タイプにおける不可避修復費用 B_{min} の比較を行ったものである。TypeB, Cの修復費用増加率はそれぞれ0.25と0.125で一定で、修復費用は塑性率に比例して増加するのに対して、TypeAでは塑性率1において修復費用がほぼ瞬間的に $0.2 \times F \cdot k \cdot \beta$ に達し、それ以降の修復費用増加率は小さくなっている。図11(2)から、TypeAの B_{min} は、TypeB, Cと比較し相対的にかなり大きな値となっていることが分かる。このことは、損傷の激しさに係わらず修復を行う際に一定に必要となる費用が存在する場合に B_{min} が大きくなることを示唆している。

修復費用には、RC構造におけるひび割れ補修やモルタル充填工事のような直接工事のための費用と、修復工事を行うに当たって必要な準備工事（例えば、調査・仮設工事・仕上げ撤去復旧工事・養生など）のための費用が存在する²³⁾。文献10では兵庫県南部地震における修復状況が分析され、準備工事の費用が全修復費用に占める割合が決して小さくないことが示されている。準備工事は直接工事に取りかかるために事前に必要となる工事であり、修復工事を行う際には損傷の激しさの大小に関係なく、修復範囲が同じならば同じ費用が必要となってくる。TypeAはこのような準備工事費が大きくなるケースの修復費用増加傾向を表すものと考えられる。

準備工事の費用が大きくなるケースとして、高層構造物など高所での修復工事のために仮設足場が必要になる場合や、執務継続での修復を余儀なくされ仮設間仕切りや養生を多く必要とする場合、また、高級な仕上げ等が施されており調査や修復のためのこれら仕上げの撤去・復旧費用が大きくなる場合、近接構造物の存在などによ

り作業スペースや資材置き場の確保に費用が発生する場合などが挙げられる。

これらのことは、修復作業にあたって制約条件が多くなる都市部の建築物において不可避修復費用が大きくなりがちであることを示唆するものと思われる。

5. まとめ

本研究は、収益用建築物を研究対象として、地震損傷の経済的深刻度を適切に評価する経済損傷指標の提案を行ったものである。この指標の特徴として、①耐震性・資産価値(収益性)の異なる構造物に対して適用可能なものである、②この指標によって「損傷に対する強さ」、「損傷の受けやすさ」などの経済的耐震性能の分析が可能である、③DCF 法や収益性分析など経済学で一般に使用される指標や尺度との連続性を有するもの(耐震工学と経済学の架け橋の役割をはたすもの)である、ことが挙げられる。

提案指標に基づき、経済性の観点から定まる許容限界損傷量(許容限界修復費用)と、経済的要因(耐震化投資効率)から決まる、これ以上小さくできない限界の損傷量(不可避修復費用)について検討を行い、次の知見を得た。

- 1)経済的リスクが小さく、かつ、収益の大きなもののほど、限界修復費用 $B_{\max}$ は大きくなる。
- 2) ローリスク・ローリターン都市型の収益用建築物の $B_{\max}$ はハイリスク・ハイリターンの郊外型のものより小さくなる傾向にある。
- 3) 不可避修復費用 $B_{\min}$ は耐震投資が大きな効果(修復費用の低減)を生むものほど小さくなる傾向にある。
- 4) 修復作業にあたっての制約条件が多く、準備工事のための費用が大きい建築物ほど、不可避修復費用は大きくなる傾向にある。
- 5)経済的観点から見た大都市に存在する収益用建築物は郊外のものと比較し、地震による損失が生じた場合、採算性が悪化し機能停止に陥りやすい「損傷に弱い構造物」であり、また、修復費用を抑えることが難しい「損傷を受けやすい構造物」である可能性がある。

今後の課題として、①経済的耐震性の観点から都市に存在する収益用建築物に与えるべき適切な性能(耐力・変形能力・剛性)のレベルを明らかにすること、②より精度の高い経済的耐震性分析を可能とするために、地震時損傷と修復費用の関係の詳細な分析および合理的なモデル化法の開発を行うこと、などが挙げられる。

謝辞：本研究の一部は科学研究費補助金(平成19年 萌芽研究(課題番号19656139:研究代表者 衣笠秀行:課題名『地震時の経済活動継続性から見た都市型収益用建築物の損傷限界』))によりました。

参考文献

- 1)中央防災会議、「東海地震に関する専門調査会報告」、「東南海・南海地震等に関する専門調査会報告」、「首都直下地震対策専門調査会報告」
- 2)久恒新：不動産鑑定評価の考え方と実践、日本経済新聞社
- 3)塚本勲：不動産 DCF 法、東洋経済新報社
- 4)Structural Engineers Association of California: VISION 2000 – Performance Based Seismic Engineering of Buildings, 1995.3
- 5)Federal Emergency Management Agency: NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA 273, 1997.10
- 6)American Society of Civil Engineers: Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA 356, Federal Emergency

Management Agency, 2000.11

- 7)平川倫生・神田順：終局限界状態以前に発生する破壊時費用の評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 I、pp.69-70、1997.9
- 8)神田順・平川倫生：限界状態設計における設計荷重のための最適目標信頼性指標、日本建築学会構造系論文集、第 523 号、pp.39-46、1999
- 9)神田順：阪神・淡路大震災における建物の被災度と修復コスト、(財)建築保全センター、RE、No.120、pp.29-37、1999.7
- 10)諏訪仁：兵庫県南部地震における地震被害データを用いた建物の地震リスク評価法に関する研究、東京大学学位論文、2007.9
- 11)建築・設備維持保全推進協会(BELCA)：不動産投資・取引におけるエンジニアリング・レポート作成に係わるガイドライン(2007 年版)、2007
- 12)建設大臣官房庁営繕部；改訂 建築物のライフサイクルコスト、経済調査会、2000
- 13)石野雄一：ざっくり分かるファイナンス、光文社新書
- 14)石塚義高：首都圏の主要路線主要駅の下設マンションと戸建住宅の価格と不動産使用価値投資評価法価格の比較分析、日本建築学会大会学術講演梗概集、F-1、pp.1271-1272、2006.9
- 15)栗原学：減損会計、エクスメディア
- 16)小松幸夫・島津護：竣工記録に基づいた事務所建物の寿命調査、日本建築学会計画系論文集、第 565 号、pp.317-322、2003.3
- 17)高橋典之・塩原等・小谷俊介・東川敬子：鉄筋コンクリート建築構成要素のライフサイクル修復経費に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.24、No.2、pp.43-48、2002
- 18)高橋典之・中埜良昭・塩原等：地震発生シナリオを考慮した RC 建物の安全性と修復性の相互関係、コンクリート工学年次論文集、Vol.29、No.3、pp.1033-1038、2007
- 19)神田順：限界状態設計法への挑戦、株式会社 建築技術
- 20)神田順他：設計用地震荷重と建設費との相関に関する一考察、structure、No.58、1996
- 21)都市・建築・不動産企画開発マニュアル 2004～05、エクスナレッジ
- 22)岩田善裕・杉本浩一・桑村仁：鋼構造物の修復限界-鋼構造建築物の性能設計に関する研究その 2-、日本建築学会構造系論文集、第 588 号、pp.165-172、2005.2
- 23)国土交通省大臣官房官庁営繕部 監修・(財)建築コスト管理システム研究所 編集発行：公共建築改修工事の積算マニュアル、2006

(2008年6月9日原稿受理、2008年11月10日採用決定)