

既存超高層建築のリスク評価手法を用いた制振補強による費用対効果に関する研究

工学院大学 中西真子

1. はじめに

近年、超高層建築には従来のL1, L2地震動に加え、余裕度を見込んだL3地震動を考慮した耐震性能の評価が求められている¹⁾。また、米国では安全性だけでなく経済・復旧性を見込んだ耐震性能評価法が提案され、優良な建物を積極的に評価・認証する制度が始まっている(例えば²⁾)。筆者らは東京・新宿に建つ既存超高層建築である工学院大学新宿校舎(以下、大学棟)を対象とし、現有の耐震性能とダンパーによる補強効果の評価を行った³⁾。

本研究では更に制振による耐震性能向上を経済性によって評価する試みとして、まず非制振状態の現状モデルと制振補強モデル³⁾を用いて損傷費用の比較を行い、地震リスク評価を行う⁴⁾。次に地震発生確率を考慮し、供用期間を通じたライフサイクルコスト(以下、LCC)を評価する。その際の確率評価法として、工学的判断によるL1~L3地震の発生確率に加え、地震学的な知見を取り込んだ地震動予測地図⁵⁾を使用し、評価結果の比較検討を行う。

2. 対象建物及び3次元立体フレームモデル

2.1 対象建物概要

図1に示す大学棟(1989年竣工)は東京・新宿に建つ、地下6階・地上28階の鉄骨造超高層建築である。軸組図に示すように東西コアはブレースを有し、2つのコアは25.6mの大スパン梁で接続されている。16階と21階は階高が他階よりも高く、ブレースによるスーパートラスを配置し、その階では東西方向に高い層剛性を有する。一方、立面・平面図に赤で示す位置に加速度計が設置されている。

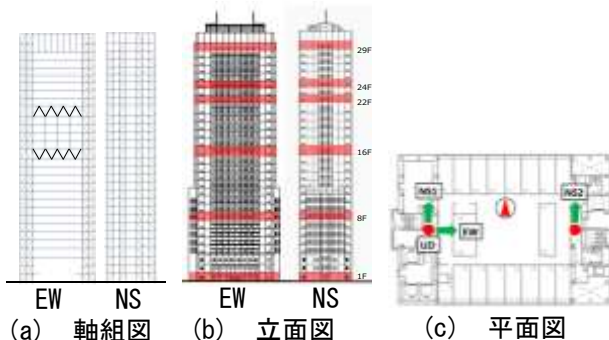


図1 対象建物(赤は加速度計位置)

2.2 3次元立体フレームモデル概要

大学棟の3次元立体フレームモデルを地震応答解析ソフトSNAP Ver.7(構造システム社)を用いて地上部の構造部材のみ作成している³⁾。立体モデルの妥当性は東日本大震災(以下、311地震)の観測記録と応答解析結果の比較により位相・振幅共に一致することを確認した。立体モデルの固有周期と減衰定数を表1に示す。

表1 固有周期と減衰定数

方向	次数	固有周期(s)		減衰定数	方向	次数	固有周期(s)		減衰定数
		立体モデル	311地震観測				立体モデル	311地震観測	
NS	1	3.038	3.08	0.019	EW	1	2.936	2.96	0.012
	2	0.966	0.95	0.012		2	1.015	0.99	0.012
	3	0.496	0.47	0.03		3	0.543	0.502	0.03

3. 損傷費用期待値の算出方法

文献の手法⁴⁾を参考に式(1)から損傷費用期待値 $E[C_D]$ を算出する。ここで式中の $P[Safe]$ 、 $E[C_D|Safe]$ はそれぞれ、建物が修理可能な場合の確率と損傷費用期待値、一方、 $P[Fail]$ 、 $E[C_D|Fail]$ は建物が修理不可能な場合の確率と損傷費用期待値である。 $P[Safe]$ 、 $P[Fail]$ は図2のように構造部材のフラジリティ曲線により定める。なお、結果のバラツキを考慮するために、複数サンプルの $E[C_D]$ を算出し、それらを平均化して損傷費用期待値を評価する。

$$E[C_D] = P[Safe]E[C_D|Safe] + P[Fail]E[C_D|Fail] \quad \dots(1)$$

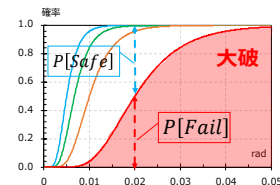


図2 修理可能・不可能な確率の評価法

3.1 損傷費用期待値の算出方法

修理可能な損傷費用は式(2)より評価する⁴⁾。ここで、 $C_{建物}$ 、 $C_{収容物}$ 、 $C_{収益損失}$ はそれぞれ、建物と収容物の損傷費用、建物復旧期間中の収益損失額である。

$$C_{建物} + C_{収容物} + C_{収益損失} \quad \dots(2)$$

3.1.1 建物の損傷費用 (C_{建物})

確率的リスク評価手法により算出する⁴⁾。この手法は、各層の「損傷状態確率」と対象建物の「修理・再調達費用」、「損傷状態と修理・再調達費用率⁴⁾」の3つを乗じることで各層の損傷費用を算出し、全層の損傷費用を合計し、建物全体の損傷費用を算出する。「損傷状態と修理・再調達費用率との関係」は文献4)を参考に表2の値に設定した。また、「修理・再調達費用」は大学棟新築工事の請負代金内訳書より表3のように設定した。図3に本研究で用いる「修理・再調達費用」を示すが、本研究では高層建築に特有な修理・再調達費用の割り増しを考慮し⁶⁾、得られた費用を2割増した金額を直接費として使用する。

表2 損傷状態と修理・再調達費用率の関係⁴⁾

修理・再調達費用率	0%	2%	10%	50%	100%
被害度	無被害	軽微	小破	中破	大破
損傷度	—	損傷度1	損傷度2	損傷度3	—

表3 修理・再調達費用 代金内訳

	判定の指標	請負代金書項目	各階比例
非構造部材(加速度)	加速度	天井	面積
非構造部材(変形)	層間変形角	外壁・内壁	面積
各種設備	加速度	電気・空調・給排水衛生設備	面積
構造部材	層間変形角	地上躯体・鉄骨	面積+部材数

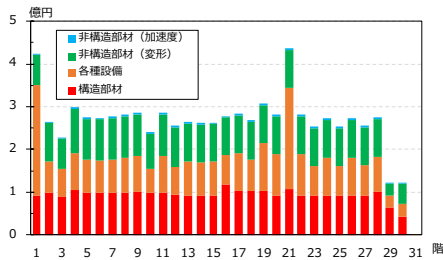


図3 各階の修理・再調達費用

3.1.1.2 フラジリティ曲線の作成

本研究で用いるフラジリティ曲線を図4に示す。曲線は対数正規分布とし、対数中央値は表4の値を設定し、標準偏差 $\sigma = 0.4$ として作成した。

表4 対数中央値

状態		損傷度1	損傷度2	損傷度3	—
		軽微	小破	中破	大破
非構造部材	変形依存型(rad)	1/150	1/60	1	—
	加速度依存型(cm/s/s)	150	300	1200	—
各種設備(cm/s/s)		250	500	1000	1500
構造部材(rad)		1/200	1/150	1/100	1/50

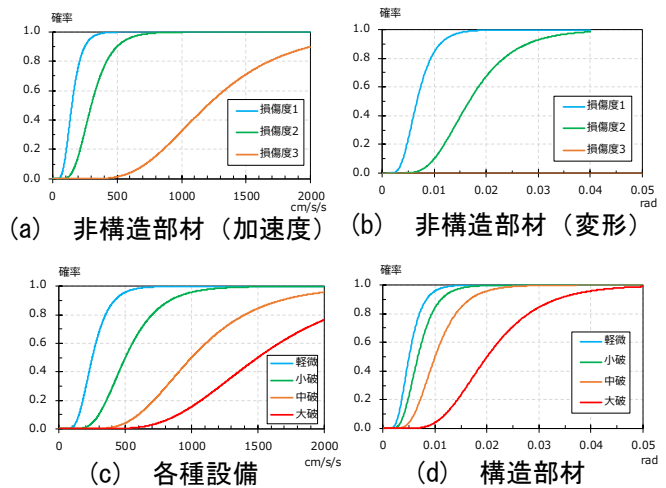


図4 各フラジリティ曲線

3.1.2 収容物の損傷費用 (C_{収容物})

建物の損傷費用と同様の方法で算出する。ここで修理・再調達費用は建物と収容物とで同額と仮定し⁴⁾、フラジリティ曲線は図4-(c)を用いる。また、損傷状態と修理・再調達費用率は表5とする⁴⁾。

表5 損傷状態と修理・再調達費用率の関係⁴⁾

損傷度	無被害	軽微	小破	中破	大破
修理・再調達費用率	0%	0.01%	0.05%	0.25%	0.50%

3.1.3 収益損失額 (C_{収益損失})

対象建物がオフィスビルであると仮定し、地震被害で生じる修復期間中の使用不可による賃料の収益損失額を用い、式(3)より算出する⁴⁾。

$$C_{\text{収益損失}} = E_0 \times D_{\text{lost}} \quad \dots (3)$$

ここで、式中の E_0 は平常時一日あたりの収益、 D_{lost} は建物の損傷による累積損失日数である。収益 E_0 は、 $=0.056$ 億円/日とし、累積損失日数 D_{lost} は、損傷比率 DF ($\text{Damage Factor} = \text{建物の損傷費用} / \text{建物の損傷費用}$) から図5より算出する。

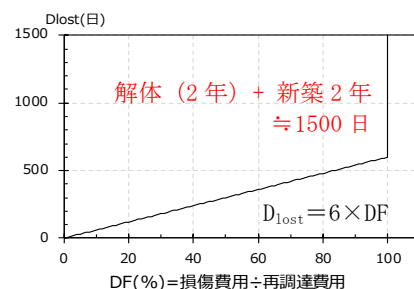


図5 本研究で用いる損傷費用—累積損失日数関係

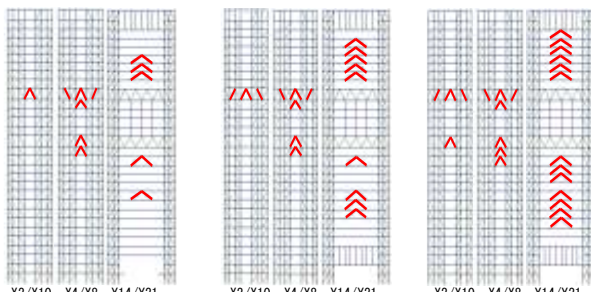
3.2 修理不可能な場合の損傷費用 ($E[C_D|Fail]$)

修理不可能な場合、建物と収容物を全て再調達すると仮定した。さらに建物修復期間中の収益も損失されるので、損傷費用 ($E[C_D|Fail]$) は、建物の再調達費用+収容物の再調達費用+修復期間 (1500日) ×売上高 E_0 (0.056億円/日) より算出する。

4. 応答解析による対象建物の損傷費用期待値算出

4.1 使用立体モデル

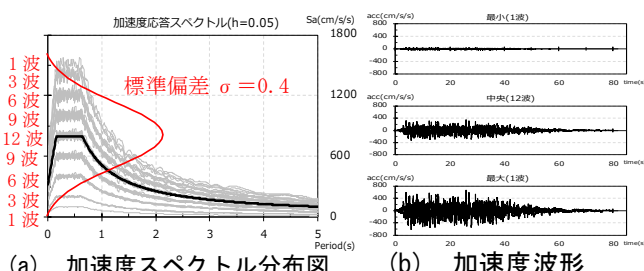
以上の方法より、補強無しの現状モデル (以下、D00) と、図 6 に示す文献 3) で設定した 44 本・64 本・88 本のダンパーで制振補強を行ったモデル (以下、D44, D64, D88) を用い損傷費用の比較を行う。



(a) D44 モデル (b) D64 モデル (c) D88 モデル
図 6 軸組図 ダンパー設置位置³⁾ (赤色)

4.2 入力地震動

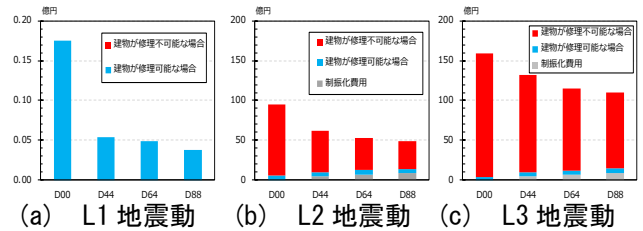
振幅を告示スペクトルの中央値から変化させ、Jennings 型の包絡関数に適合する模擬地震動⁷⁾を、ランダム位相を用いて複数波作成した。地震動レベルは、従来の L1, L2 に加え、L2 の 1.5 倍の L3 とした。また、ランダム位相と振幅のバラツキを考慮するため、12 種類の乱数を用い、対数正規分布 (標準偏差 $\sigma = 0.4$) で振幅にバラツキを与えた 50 波を用いて検証を行う。図 7 に L2 地震動を対象とした加速度応答スペクトル ($h=0.05$) の分布図と、中央値と最小・最大値を示した加速度波形を示す。



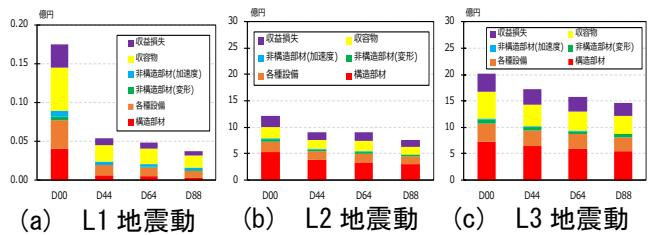
(a) 加速度スペクトル分布図 (b) 加速度波形
図 7 入力地震動 L2

4.3 応答解析による損傷費用期待値の算出

以上のモデルと入力地震動を用いた応答解析により損傷費用期待値を算出した。結果を図 8 に示す。どの地震動レベルにおいても制振補強を行うことで損傷費用期待値が低減した。L2, L3 地震動では、制振化費用をダンパー一基当たり 1,000 万円と仮定すると、制振化費用を見込んでも補強のメリットがあった。また、図 9 に修理可能な場合の各損傷費用の内訳を示す。L1 地震動では各種設備や収容物、L2・L3 地震動では構造部材の占める割合が大きい。また、どのモデルにおいても構造部材のみならず、各種設備や収容物の損傷費用も大きな割合を占めている。



(a) L1 地震動 (b) L2 地震動 (c) L3 地震動
図 8 損傷費用期待値結果 (億円)



(a) L1 地震動 (b) L2 地震動 (c) L3 地震動
図 9 修理可能な場合の損傷費用内訳 (億円)

5. ライフサイクルコスト評価

得た損傷費用期待値と地震発生確率から、建物の供用期間と期待 LCC の関係を算出する⁴⁾。使用する地震発生確率のモデルは、東京都の設計指針¹⁾による工学的判断に基づくモデル (以下、工学モデル)、および地震学の知見を踏まえた地震動予測地図⁵⁾による東京都心部の地震ハザードを考慮したモデル (以下、地震学モデル) の 2 つを用いる。地震発生確率の値として、工学モデルは表 6 に示す値を、地震学モデルは J-SHIS によるデータを使用する⁵⁾。図 10 に工学モデルと地震学モデルから評価した最大速度振幅と年超過確率の関係を示す。両者を比較すると、地震学モデルの確率は非常に高いと言える。

図 11 に、L1~L3 地震動の各 50 サンプルによる入力地震動の最大速度と、損傷費用期待値との関係を制

振モデル別に示す。以上の関係を対数正規分布として表7に示す対数中央値と標準偏差で曲線近似した。LCCの計算はこの近似式を使用する。

表 6 構造設計指針¹⁾の地震動レベル別年超過確率

地震動レベル	超過確率	年発生確率	再現期間	入力波最大速度振幅の平均値
L1	50年で50%	0.0138	72.6年	8.9cm/s
L2	50年で10%	0.0021	475年	44.3cm/s
L3	50年で2%	0.000404	2475年	66.5cm/s

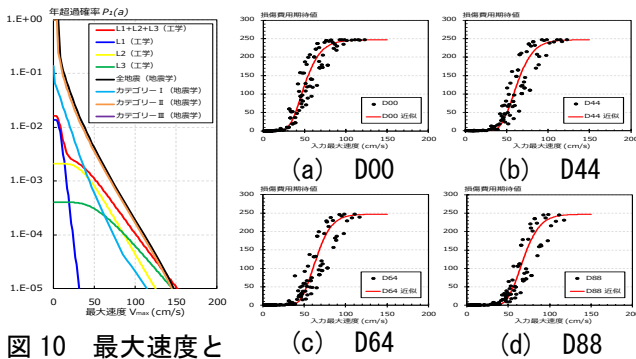


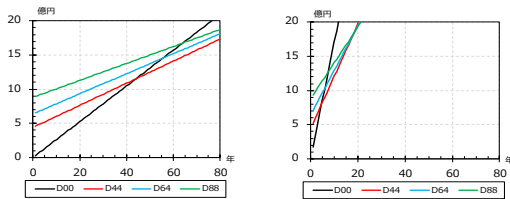
図 10 最大速度と年超過確率関係

図 11 損傷費用と最大速度関係

表 7 図 13 近似化 対数中央値と標準偏差

モデル名	D00	D44	D64	D88
対数中央値	50cm/s	62cm/s	64cm/s	68cm/s
標準偏差	0.3	0.25	0.23	0.23

図 11 の近似式から損傷費用期待値を評価し、建物の供用期間と期待 LCC の関係を算出した。図 12 に地震学モデルでは「全地震」を、工学モデルでは「L1+L2+L3」の地震発生確率を使用した結果を示すが、両者で結果が大きく異なっていることが分かる。

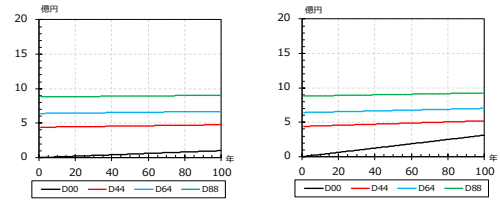


(a) 工学モデル (b) 地震学モデル

図 12 供用期間-期待 LCC の比較

図 12 に示すように工学と地震学モデルで大きく異なったのは、東京都心部での地震発生確率が非常に高く評価されているためである。そこで比較のため J-SHIS の公開データ⁵⁾より、発生確率が低く評価されている 2 地点の地震ハザードカーブを使用し、同様に供用期間-期待 LCC 関係の評価を行った。対象地域は長崎県佐世保市 (以下、長崎) と、北海道小樽市 (以下、北海道) とした。「全地震」による結果を図 13 に示すが、供用期間 100 年以内で D00 の

期待 LCC を下回ることにはなかった。



(a) 長崎

(b) 北海道

図 13 地震学モデル比較 供用期間-期待 LCC

6. まとめ

非制振と制振補強モデルを用いて損傷費用期待値を算出した結果、ダンパー本数増大に伴い、損傷費用の低減を確認した。費用別では構造部材の他、設備類や収容物等も大きな割合を占め、設備機器や非構造部材の耐震対策の実施も効果的であると考え。次に、地震発生確率を考慮した LCC 評価を行った。工学モデルでは供用期間が約 45 年、地震学モデルでは、わずか 5 年で D00 の期待 LCC を下回る結果となった。しかしこれは、地震学モデルにおいて対象地域の地震発生確率が高く評価されていることが影響し、確率が低い地域のデータを用いた場合、供用期間 100 年以内で D00 の期待 LCC を下回ることにはなかった。レジリエンスベースドデザイン等の促進のためには最大速度振幅での評価だけでなく、応答スペクトルなどの評価を組み合わせることや、工学と地震学が融合した確率評価モデルの作成が今後重要であると考え。

謝辞

本研究作成にあたり、防災科学研究所 J-SHIS のデータを使用させて頂きました。

参考文献

- 1) 東京都財務局；東京都臨海部に建設される超高層建築物等の設計目標の目安，構造設計指針，2018.
- 2) Federal Emergency Management Agency : HAZUS99 technical manual, 1999.
- 3) 中西真子ほか：長周期・長時間地震動や活断層近傍の強震動など極大地震動を考慮した都心に建つ既存超高層建築の制振補強に関する研究，日本地震工学会論文集，第 18 巻 第 2 号，2018.
- 4) 高橋雄司ほか：地震危険度の高い地域の建物を対象とした地震リスクマネジメント，日本建築学会構造系論文集 第 591 号 pp. 25-33, 2005.
- 5) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：全国地震動予測地図 2018 年度版，2018.
- 6) 国土交通省：マンションの修繕積立金に関するガイドライン，2011.
- 7) 工学院大学 久田研究室：公開プログラムデータ