DB16040 井上佳那子

1 研究背景

近年、米国では性能設計の研究が進められ、修復費、 修復期間などから建物を評価する制度が始まっている¹⁾。 日本でも地震リスク評価およびリスクマネジメントに関 する研究は兵庫県南部地震以降活発になりつつあるが、 その数は十分ではなく手法の確立には至っていない。手 法を検討する上で、建築的な視点だけでなく確率・統計 学的な視点からの考慮も重要である。中西ほか(2019)²⁾ では、東京・新宿に建つ既存超高層建築物である工学院 大学新宿校舎高層棟(以下、大学棟)を対象に、制振ダン パーによる耐震性能向上を経済性により評価する研究が 行われた。L1~L3 地震に対してクライテリアを設定し、 非制振状態・制振補強状態の3次元立体フレームモデル を用いて損傷費用を算出することで、地震リスク評価を 行っている。しかしながら、損傷確率評価曲線(Fragility Curve: 以下、 FC)の作成に用いる対数標準偏差、損傷 費用算出方法は、検討段階であることが確認出来ている。

本研究は入力地震動を確率・統計学的視点を考慮した 複数の模擬地震動とし、現存する非制振状態・制振補強 状態の3次元立体フレームモデル³⁾を用いて応答解析を 行う。FC 作成に用いる対数標準偏差は一般に被害事例 と解析結果から算出するが、大学棟では構造部材に被害 が生じた事例がないことから、感度解析を行い損傷費用 の算出方法の再検討を行う。

2. 対象建物及び3次元立体フレームモデル概要

2.1 対象建物概要

図1、2に示す大学棟は東京・新宿に建つ、1989年に 竣工された地下6階・地上28階の鉄骨造超高層建築であ る。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階では、東西 方向にブレースによるスーパートラスを配置しており、 その階では東西方向に高い層属性を有している。(図1) 一方、図2,3の立面・断面図に赤で示す位置に強震計が 設置されており、竣工以来強震観測を行なっている。



2.2 3次元立体フレーム

本研究では、地震応答解析ソフト SNAP ver.74)を用い て作成された既存の3次元立体フレームモデル³⁾を利用 する。地下部は硬質な工学的基盤上の直接基礎であり、 SRC/RC 造の非常に高い剛性になっているため、本モデ ルでは1階脚部を固定端と仮定し、地上部の構造部材の みモデル化している。建物重量は構造図及び構造計算書 により算出したが、2011年東北地方太平洋沖地震(以下、 311 地震)の観測記録の主要動における固有周期と適合 させるため、構造設計書による重量を1割増しにしてい る。梁は床スラブを考慮した剛性梁とし、断面2次モー メント及び正負で異なる全塑性モーメントは合成構造設 計指針の数式により算出している。柱は、曲げと軸力に よる弾塑性範囲内でのせん断変形をそれぞれ考慮してい る。ブレースは座屈を考慮した若林・柴田⁵⁾の履歴特性 を、柱・梁のパネルゾーンは弾性範囲内でのせん断変形 をそれぞれ考慮している。また、減衰定数は311 地震の 観測記録から同定した NS1 次 1.9%、3 次 3.0%、EW1 次 1.2%、3 次 3.0%のレーリー型減衰としている。

表1 固有周期(立体モデルと観測)と減衰定数

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

3. 損傷費用期待値の算出方法

文献²⁾⁶⁾の手法を参考に、式(1)から損傷費用期待値 $E[C_D]$ を算出する。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。修復限界確率は構 造部材のFCより算出する。修理不可能となる確率 P[Fail]は、少なくとも一層で構造部材が大破となる確 率とし、P[Safe]、P[Fail]それぞれ式(2)(3)で示す。 ここで x_n は各階の大破の確率とする。

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

$$\int P[Safe] = \prod_{n=1}^{31} P_n[Safe] \qquad \cdots (2)$$

 $P[Fail] = 1 - P[Safe] \qquad \cdots (3)$

3.1 損傷費用期待値の算出方法

修理可能な損傷費用は建物と収容物の損傷費用、建物 復旧期間中の収益損失額を合計し評価する。

3.1.1 建物の損傷費用

修理可能な場合の建物の損傷費用は、文献の手法 ⁶⁾に より算出する。この手法では、複数の入力地震動を設定 して応答解析を行い、各層の応答値とフラジリティ曲線 から得られた損傷確率、建物の修理・再調達費用、修理・ 再調達費用率から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 ⁶⁾⁷⁾を参考に表 2 の値 に設定している。

表2損傷状態と修理・再調達費用率の関係

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	損傷	損傷度	_
		1	度 2	3	

3.1.1.1 対象建物の修理・再調達費用

修理・損傷費用の推測は昨年度までの研究で示された 方法 2)をベースに行う。文献 7)を参考に、対象建物の新 築工事の請負代金内訳書により表3のように設定してい る。表3の「非構造部材(加速度)」はフラジリティ曲線 が最大加速度に依存する部材であり、ここでは天井の代 金を各階面積に、「各種設備」は加速度依存型として電気 設備工事・空調設備工事・給排水衛生設備工事の代金を 各階面積に、「構造部材」は地上躯体・鉄骨の代金を各階 面積と部材数に応じそれぞれ比例して分布するものとし ている。対象建物は超高層建築であり、施工方法が低層・ 中層建築と異なることから、高層建築に特有な修理・再 調達費用の割り増しを考慮する。表3に示す国土交通省 の修繕積立の見込み金額のガイドライン⁸⁾によると、15 階未満のマンションと、20階以上のタワーマンションを 比較したとき、後者が平均で16%ほど高額になる。よっ て、得られた修理・再調達費用を2割増した金額を直接 費として使用している。

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	天井	面積
(加速度)			
非構造部材	層間変形角	外壁・内壁	面積
(変形)			
各種設備	加速度	電気・空調・給	面積
		排水設備	
構造部材	層間変形角	地上躯体・鉄骨	面積+部材数

3.1.1.2 フラジリティ曲線(FC)の作成

FC とは、応答解析から得られた各階応答値を適合さ せ各事象の発生確率を算出する対数累積分布関数であり、 以下の式で表す。

$$F(x) = \int_0^a \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta x} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \ln \mu}{\delta}\right)^2\right\} dx \qquad \dots (4)$$

$$\begin{bmatrix} a: 作用地震動の中央値\\\delta: 対数標準偏差\\x: 作用地震動の応答値\\\mu: 中央値 \end{bmatrix}$$

以上のように、FC は 2 種類の変数(対数標準偏差 δ、中央値 μ)を設定することで作成出来る。表 4 に示す 中央値は、文献 ⁶⁾⁷⁾を参考に設定した。対数標準偏差は 妥当性の確認が出来ないため、4 章で検討を行う。

表 4 中央値

状態		損傷度	損傷度	損傷度	-	
		1	2	3		
		軽微	小破	中破	大破	
非	変形	1/150	1/60	1	-	
構	依存型					
造	(rad)					
部	加速度	150	300	1200	-	
材	依存型					
	(cm/s/s)					
各種設備		250	500	1000	1500	
(cm/s/s)						
構造部材		1/200	1/150	1/100	1/50	
	(rad)					

3.1.2 収容物の損傷費用

建物の損傷費用と同様の方法で算出する。ここで修理 費用・再調達費用は建物と収容物とで同じと仮定し、FC は各種設備を用いる。また、損傷状態と修理費用・再調 達費用率は表5とする。

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	0%	1%	5%	25%	50%
費用率					

3.1.3 収益損失額

収益損失額は既往の文献²⁾と同様に行う。対象建物が オフィスビルであると仮定し、式(5)より算出する。*Eo* は平常時1日あたりの収益、*Dlost* は建物の損傷による累 積損失日数である。収益*Eo* は新宿のオフィスビル家賃 相場が約3万円/坪程度であり、対象建物の収益面積が約 200 坪/階×28 階であることから 0.056 億円/日とし、累 積損失日数 *Dlost* は、式(3)より算出する。

$$C_{\text{W} \pm \text{H} \pm} = E_0 \times D_{lost} \qquad \dots (5)$$

D_{lost} = 6× (損傷費用/ 再調達費用×100) ... (6)

3.2 修理不可能な場合の損傷費用

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 *Eo*(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 使用モデル

ダンパー補強無しの現状モデル(以下、D00)で設定した44本のダンパーで制振補強を行なったモデル(以下、D44)を用いる。D44はL2地震動で層間変形角を1/100以内に抑える基本モデルである。図4に軸組図、図5に平面図でのダンパー設置位置を赤色で示す。使用しているオイルダンパーはBDH型制振オイルダンパーである。



4.2 入力地震動

既往の研究 2)では、ランダム位相と振幅のバラツキを 考慮するため、12 種類の乱数を用いているが、よりラン ダム性を考慮するため 50 種類の乱数を用いて対数正規 分布 (標準偏差 σ = 0.4)で振幅にバラツキを与えた 50 波 を用いて検証を行なっている。50 種類の乱数は、100 種 類のランダム位相を用いた告示波を用いて応答解析を行 い、算出された層間変形角の平均に近いものを取り出し た。地震動レベルは、従来の L1(希に発生する地震)、 L1 の 5 倍とした L2(極めて希に発生する地震)、L2 の 1.5 倍である L3¹⁰を設定する。



図 6 入力地震動 L2 応答スペクトル(左)と加速度波形(右)

4.3 応答解析

以上のモデルと入力地震動を用いて応答解析を行った。 モデル D00,D44、入力地震動 L1,2,3 の各 50 波におけ る応答解析結果のうち、一例として入力地震動を L2 と した場合の D00,D44 の最大絶対加速度と最大層間変形 角を図 7 に示す。



4.4 損傷費用結果

3章で示した手法と 4.1,4.2,4.3 で示した地震応答解析 の結果から算出した損傷費用を表 6 に示す。

表 6 損傷費用期待値

モデル		D00		D44				
地震動レベル	L1	L2	L3	L1	L2	L3		
損傷費用C	0.3	13.5	28.1	0.8	11.6	19.4		
修理可能な確率	1.0	0.6	0.4	1.0	0.8	0.5		
修理可能な場合の 損傷費用	0.3	6.0	6.4	0.8	6.5	5.3		
修理不可能な場合の 損傷費用	0.6	89.0	158.5	0.0	58.1	124.2		
損傷費用期待値	0.9	95.0	164.9	0.9	64.6	129.5		

5. 対数標準偏差の検討

5.1 感度解析

超高層建築において構造部材の被害事例が存在しない ため、対象建物の立体フレームモデルに 311 地震波を入 力し、得られた応答解析結果を各パラメータの FC に適合 させ、損傷確率を算出し、実際の被害事例と比較するこ とで妥当性の高いパラメータを絞る。表6に、各パラメ ータ、各部材における各事象の発生確率を示す。311 地 震時、構造部材に損傷は見られなかったことから、対数 標準偏差が 0.7、0.8 では不整合が生じてしまう。また、 311 地震時、広範囲でシステム天井の被害が見られた¹⁰⁾ ことから、天井板落下の可能性が生じる損傷度2以上が 0%となる対数標準偏差 0.3 以下では不整合が生じてし まう。以上より、対象建物における FC のパラメータは 0.4~0.6 の範囲であると仮定し、検討を行う。311 被害 事例との整合性から FC のパラメータは 0.4~0.6 である と推測できる。それぞれのパラメータごとに算出した損 傷費用期待値は次のようになる。ここでは D00L2 の結 果を示す。

表 7 311 地震適合結果

対数標準偏差		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
	無被害	98%	75%	65%	62%	60%	58%	58%	56%
<u> </u>	軽微	2%	24%	25%	23%	22%	17%	15%	14%
^{桶迫部} 材	小破	0%	1%	10%	13%	13%	15%	16%	15%
	中破	0%	0%	0%	2%	5%	9%	10%	13%
	大破	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	2%
非構造	無被害	30%	40%	45%	3%	7%	11%	15%	18%
部材	損傷度1	70%	60%	55%	42%	41%	36%	32%	31%
(加速度	損傷度2	0%	0%	0%	55%	52%	52%	50%	46%
依存)	損傷度3	0%	0%	0%	0%	0%	1%	3%	5%

以上より絞ったパラメータ(0.4~0.6)で作成した FC を 用いて算出した結果を図8に示す。図より、損傷費用期 待値の全体のうち、修理不可能な場合の割合が非常に高 い。修理不可能な場合の損傷費用期待値は、「建物の新築 工事代金、収容物の再調達費用、解体・新築の工事期間 に発生する収益損失」の和に修理不可能な場合の確率を 乗じることで算出出来る。修理不可能な場合の確率、つ まり修復限界確率は構造部材の FC から算出することか ら、構造部材の FC の対数標準偏差設定の影響が非常に大 きいといえる。



5.2 課題点を考慮した手法の提案

感度解析の結果把握できた課題点を考慮した、損傷費 用算出方法の見直し、つまり修復限界確率を決める FC の作成を行う。岩田ほか(2005)¹³において、鋼構造の修 復限界の工学的手法として、残留変形角について地震応 答解析を用いて容易に算出できるように簡易的な評価法 が提案されている。兵庫県南部地震時の鋼構造建築物の データ(修復建物8件、解体建物2件)より、設計用の修 復限界を決める最大残留変形角は1/90 と算出されてい る。また、文献より最大残留変形角は最大層間変形角の 1/2 倍と推定できる。これより、再検討後の修復限界確 率を決める中央値は1/45 と仮定する。また、対数標準偏 差は文献の対象建物の各事象内の損傷状況より 0.24 と 仮定する。以上の手法で算出した損傷費用期待値を図 9 に示す。





6 まとめ

バラツキを考慮した L1,2,3 の模擬地震動 50 波を制振 補強あり・なしの 2 種類のモデルに入力し、応答解析に よる損傷費用期待値の算出を行なった。既往の研究では FC 作成時に用いる対数標準偏差は文献を参考に設定を 行っているが、FC は結果に強く影響する。算出結果よ り構造部材の FC の変数の設定の影響の強さから、修復 限界確率算出用の FC の再検討を行ったが、手法の妥当 性は検討段階である。

参考文献

- FEMA: Seismic Performance Assessment of Building, FEMA P-58, 2018
- 2)中西真子: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、工学院大学修士論文
- 3)中西真子,久田嘉章,山下哲郎,笠井和彦: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 震補強に関する研究,日本地震工学論文集,第18巻2号,2018
- 構造システム社: SNAP ver.7,任意形状立体フレームの弾塑性解析プロ グラム
- 5) 若林實,柴田道生:高層筋違付架構の履歴復元力特性に関する研究,京大防災研究所年報 第22号 B-1,1979
- 高橋雄司: 簡易シミュレーションによる建築物の地震リスク分析、日本 建築学会構造工学論文集、Vol.50B、pp.453-463、2004.
- 7)日本建築学会:長周期地震動と超高層階の対応策-専門家として知って おきたいこと-,2003

8)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

- 9) 北村春幸ほか:性能設計における性能判断基準値に関する研究 時刻歴 応答解析に基づく JSCA 耐震性能メニューの検証,日本建築学会構造論 文集 第 576 号, pp.47-57, 2004
- 10) 小泉秀斗,坂本有奈利,久田嘉章,山下哲郎: 振動台を用いたシングルラ イン天井の天井落下実験~その2: 天井落下と加速度の関係,日本建築学 会学術講演梗概集(北海道)構造 I, pp.1001-1002, 2013.
- 11) 久田研究室プログラムデータ http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp
- 12) 日本建築学会:各種合成構造設計指針·同解説 第2版, 2010
- 13) 岩田善裕,杉本浩一,桑村仁:鋼構造建築物の修復限界―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, 165-172,2005.