論文 RC 建物の非構造部材と設備機器類がライフサイクル耐震修復経費 に与える影響

池末 雄太*1・高橋 典之*2・塩原 等*3

要旨:鉄筋コンクリート建物のライフサイクル耐震修復経費の算出において,建物全体の 耐震修復経費に対して非構造部材要素および設備要素の占める割合は高く,建物の耐震修 復性に与える影響は大きい。多種多様な非構造部材要素および設備要素に対して簡便かつ 総合的な耐震修復性能評価を行なうために,簡単な損傷モデルを用い,ライフサイクル耐 震修復経費の試算を行なった。その際,構造特性に応じて各非構造部材要素および設備要 素がライフサイクル耐震修復経費に与える影響を検討した。

キーワード:非構造部材,設備機器,耐震修復性

1. はじめに

建築物の耐震設計に性能設計の概念が導入さ れるようになり,建築主が欲する要求性能とし て建物の資産価値を担保するには,設計段階で 地震時の損失額を把握する必要がある。特に, 非構造部材および設備要素の損傷は,建物全体 に占める資産価値の高さゆえに,耐震性能評価 に大きく関係するものである。

そこで本研究では,鉄筋コンクリート建物の 耐震修復性能を評価する検討対象として,多種 多様な非構造部材要素および設備要素を考慮す るために,出来るだけ簡単な地震時挙動モデル を考案し,ライフサイクル耐震修復経費¹⁾の試 算結果を示した。

2. 非構造部材要素および設備要素

2.1 全修復費用に占める各要素の割合

耐震修復性を地震被災後の修復経費の大小で 評価する場合,非構造部材および設備要素の修 復経費の影響は無視できない。Miranda らは²⁾, 1994 年 Northridge 地震の被害調査から,例えば ホテルでは豪華な内装を用いるために非構造部 材の被害額が全被害額の 70%と大きな割合を

*1 東京大学大学院 工学系研究科 (正会員)

*2 東京大学大学院 工学系研究科 修士(工学)(正会員)

*3 東京大学大学院 工学系研究科 助教授 工博 (正会員)

占め,病院では特殊設備が多いため設備要素の 被害額が全被害額の44%を占めると報告して おり(図-1),建物用途によっては,耐震修復 性の評価に与える非構造部材要素および設備要 素の影響が構造部材要素の影響をはるかに上回 る可能性を示唆している。



2.2 対象要素の損傷モデル

建築物の構成部材は表 - 1 のように分類される。ここで,非構造部材のうち構造要素に含ま

れる RC 非耐力壁は,構造物の構造特性に影響 を及ぼすものもあるため³⁾,表-1 の非構造部 材の中で,構造特性に与える影響が少ないと考 えられる表-1の網点部分を対象とした。

非構造部材の損傷は,建物の最大層間変形角 あるいは床最大応答加速度に応じて決まる。非 構造部材の耐震設計施工指針・同解説⁵⁾では, 非構造部材の主体構造との接合状態に応じて, 床応答加速度による慣性力に対する検討と,層 間変形角による強制変形に対する検討を別々に 行い,それぞれが設計目標を満足することを指 針としている。本来は,各非構造部材ついて, 主体構造との接合状態,慣性力に対する適切な

区分	分類		大項目	小項目	
主体構造		博法休	構造上主要な部分	柱,横架材,基礎,杭	
	構造要	伸迫冲	主要構造部	屋根,柱,梁,床,階段	
		工作物	指定工作物	煙突(H>6m)等	
	素	その他	2次部材	PCa 板受鉄骨	
			RC 非耐力壁	袖壁,垂壁,腰壁	
	非構造部材 建築要素		建築物の部位	屋根,外壁,天井,内壁	
∃E			建物よりの突出物	広告塔,看板類等	
┼構造部材			家具及び什器	家具,什器,美術品等	
			主体構造に付属するもの	Exp. Joint 等	
			建物外の部位	塀,柵等	
	非構造部材 設備要素		機器	機器本体	
			配管・ダクト等	縦配管,横引配管等	
			その他の設備	EV,エスカレーター	

表 - 1 建築物の構成部材の分類⁴⁾

表-2 損傷モデル化条件の分類

指復亜田	最大床応答加速度	最大層間変形角		
很汤女凶	(慣性力)	(強制変形)		
シーター	破損 / すべり / 転倒	小破 / 中破 / 大破など		
	限界加速度 A_0	層間変形角 IDR _i		
侣 /伊伦速矽	無損復 十功	無損傷 小破 中破		
<u>損</u> ത 小 恐 虐 ゆ	無損 汤 入阪	大破…		
(一部材)	(状態変化1回)	(状態変化 n 回)		
フラジリティ	各要素につき	各要素につき		
曲線の数	1本	n 本		
	家具および機器類の転	構造体への接合箇所が		
	倒および滑り出し	複数点以上のほぼ全て		
모 / + /피		の非構造部材の損傷遷		
具14191	乾式石張りの留め金具	移(小破:目地変形,中		
	破損 ,建物よりの突出物	破:部分欠損,大破:脱		
	留め金具破損	落破損など)		

目標値,強制変形に対する適切な目標値,各目 標値の相関関係を調べた上で,耐震修復性を評 価する必要があるが,多種多様な非構造部材す べてについて,正確な損傷の遷移状況を把握す るのは事実上不可能である。

そこで本研究では,非構造部材および設備要素に簡単な損傷モデルを仮定した。現在,建物の被害に関するマクロな式として,対数正規分布 関数を利用したフラジリティ曲線の推定⁶⁾が一般 的に行なわれている。

$$F(X) = \Phi\left(\frac{\ln(X) - \lambda}{\zeta}\right) \tag{1}$$

ここに、X:地震動指標(最大加速度,最大速度等), F(X):地震動Xにおける建物の被害確率, $\Phi(x)$:xに 関する標準正規分布の累積確率分布関数, λ :ln(X) の平均値, ζ :ln(X)の標準偏差である。これより, フラジリティ曲線の平均値は $\exp(\lambda + \zeta^2/2)$,分散は $\exp(2\lambda + 2\zeta^2)$ - $\exp(2\lambda + \zeta^2)$,中央値は $\exp(\lambda)$ と表される。 このフラジリティ曲線を非構造部材および設備要 素の損傷モデルとして適用するために,表-2の ようなモデル化条件を仮定した。

まず,フラジリティ曲線による被害確率は,一 要素部材について,建物中で使用されている全数 に対して特定の損傷状態となっている部材個数の 比率を表すものとする。そして,最大床応答加速 度,最大層間変形角の2つの損傷要因で損傷モデ ルを大別する。損傷が最大床応答加速度に従う 非構造部材は,主体構造との接合状態が1点また は単線による「吊り下げ」または「自立」の形 態であるため,ある限界加速度A₀を超えると, 倒れる,外れるなどの危険を生じる。従って, 損傷状態が無損傷からすぐ大破に遷移するもの と仮定し,各要素につき描かれるフラジリティ 曲線は1本になる。一方,損傷が最大層間変形角 に従う非構造部材は,主体構造との接合状態が 複数点,複数線,面接合の形態であるため,あ る層間変形角IDRiを超えると無損傷だったもの が危険な状態に急変するとは考えにくく、小破、 中破,大破などと損傷状態が複数回遷移するも のと仮定した。この損傷状態の遷移回数をn回と

すると,各要素につき描かれるフラジリティ曲線はn本になる。

このモデルに従い,損傷が最大床応答加速度 に従う非構造部材および設備要素のフラジリテ ィ曲線は図 - 2(a)のように,損傷が最大層間変 形角に従う非構造部材および設備要素のフラジ リティ曲線は図 - 2(b)のようになる。具体的に は,損傷確率分布の中央値および変動係数(標準 偏差/平均値)を与えることで,パラメータ λ, ζ が確定し,フラジリティ曲線が決定する。



3. 耐震修復経費指標の算出方法

ライフサイクル耐震修復経費の算出方法は既 に提案しているが¹⁾,簡単に概略を説明する。 3.1 算出手順

初期建設費用に対する耐震修復経費の比であ る耐震修復経費指標は,図-3のような階層状 のモデルを逐次適用して算出する。

(1) 入力地震動のモデル

建築物荷重指針・同解説⁷⁾にある上下限を有 する極値分布に従う地震活動度曲線に基づき, 供用期間年超過確率 P₀%の地震動を最大に,地 震動の大きい順に *i* 番目の N 年超過確率 P_iが,

$$P_i = 1 - \frac{(1 - P_0)}{e^{i - 1}} \tag{2}$$

で表されるものとして,東京第 I 種地盤の地表 面最大速度および頻度を仮定した(図-4)。告 示波の設計用応答スペクトルに合わせた模擬地 震動(位相特性:神戸海洋気象台 1995(NS), El





図 - 3 耐震修復経費指標算出プロセス



Centro 1940 (NS), 八戸港湾 1968(EW), 東北大 学 1978 (NS)の4波)に,最大速度に合わせた倍 率を乗じ入力地震動とした。建物の供用期間を 100年,最大地震動の供用期間年超過確率 P₀を 10%(地表最大速度で 22.04[cm/sec]に相当)と して,入力地震動シナリオを作成した。

(2) 構造物の地震応答モデル

建物を多質点等価せん断バネ系と見なし,各層の復元力特性にはTri-linear型を,履歴則にはTakeda モデルを用いた⁸⁾。建物の減衰は瞬間剛性比例型とし,減衰定数を一次固有周期に対して2%とした。各層とも降伏強度の1/3をひび割れ点強度とし,降伏時剛性低下率を0.3,降伏後の剛性を初期剛性の0.01倍とした。また,ひび割れ点を超えるが降伏変形に至らず次の地震動を受ける時は経験した最大変位を指向するように初期剛性が低下するものとし,降伏点をこえた場合は構造物の損傷を補修して元の性能に戻すものと仮定した。

(3) 建物の応答 - 損傷関係のモデル

非構造部材および設備要素の損傷は 2.2 節で 述べたモデルを適用した。同種の非構造部材で もその性能は多様で,損傷に関する工学的閾値 を具体的かつ一意に決めるのは難しいが,代表 的な非構造部材および設備要素について文献 5) を参考に,フラジリティ曲線の中央値を表-3, 変動係数を表-4のように仮定した。

(4) 損傷 - 費用関係のモデル

修復費用は,該当する非構造部材および設備 要素の新設費用で除して規準化した耐震修復経 費指標Rで表し,各損傷状態の補修にかかる費 用を表-5のように仮定した⁹⁾。ただし,構造 物が倒壊にいたる場合は,耐震修復経費指標R を1と仮定した。構造部材の場合は損傷の累積 を考慮するが,非構造部材および設備要素の場 合,損傷を放置することは稀なので,発生した 損傷は全て補修するものと仮定した。

(5) 年耐震修復経費指標

供用期間を通じた耐震修復経費指標 R の総和 をライフサイクル耐震修復経費指標とし,その 値を供用期間年数で除したものを年耐震修復経 費指標とする。

表-3 フラジリティ曲線の中央値

損傷状態	小破 中央値	中破 中央値	大破 中央値
(a) PC カーテンウォール	1/300	1/120	1/40
(b) ALC パネル帳壁	1/180	1/90	1/40
(c) 石膏ボード	1/250	1/50	1/15
	限界加速度中央値		
(d) 書棚	180		
(e) 冷蔵庫	380		

表-4 フラジリティ曲線の変動係数

損傷の遷移状態	無損傷 小破	小破 中破	中破 大破
損傷が最大層間変形 角に従う要素	0.5	0.4	0.3
	無損傷 大破		
損傷が最大床応答加 速度に従う要素	0.4		

表-5 規準化補修費用

損傷状態	小破	中破	大破
耐震修復経費指標 R	0.1	0.16	0.4

3.2 解析対象

解析対象は,地上7階建てのRC事務所建物 を想定し,降伏時層せん断力がAi分布に従うせ ん断バネモデルとした。解析パラメータとして 各層終局塑性率µiが異なる3タイプの建物モデ ルを検討した。その際,各建物モデルについて, 降伏時層せん断力と各層の終局塑性率との間に Newmarkのエネルギー一定則が成り立つもの とした。ここで,エネルギー一定則は,

$$Q_y = \frac{1}{\sqrt{2\mu - 1}} Q_l \tag{3}$$

で表されるものとする。ここに, Q_y :降伏せん 断力, Q_i :弾性せん断力, μ :塑性率である。各 建物モデルに対する,各層の層せん断力係数 C_i , 降伏時層せん断力 Q_{yi} ,降伏時線形剛性 K_{yi} を表 - 6 にまとめた。ただし,解析対象とする全て の建物モデルについて,各層重量 $m_i=500$ [tf],各 層階高 $h_i=3$ [m],各層降伏点変位 $\delta_{yi}=1.5$ [cm]が共 通であると仮定し,パラメータである各層の終 局塑性率 μ_i については,各建物モデルにおいて 全層共通であると仮定した。

4. 年耐震修復経費指標算出結果

図 - 5 は,内陸型の神戸海洋気象台 1995(NS), El Centro 1940 (NS),海洋型の八戸港湾 1968 (EW),東北大学 1978(NS)に従う位相特性を持つ 模擬地震動による年耐震修復経費指標値から平 均値を算出し,非構造部材要素別に各階の年耐 震修復経費を図示したものである。本報告で用 いた建物モデルにおいては,損傷が最大層間変 形角に従うと仮定した非構造部材要素は,各層 の年耐震修復経費指標にあまり大きな差は生じ なかったが,損傷が最大床応答加速度に従うと 仮定した非構造部材および設備要素は,最上階 の7階で年耐震修復経費が最大となり,特に強 度型の建物モデルでは,7 階の年耐震修復経費 指標が1階の年耐震修復経費指標の10倍以上に なるものもあった。

表-6 各建物モデルの設定

塑性率µ _i	階数	C_i	$Q_{\mathrm{y}i}[\mathrm{kN}]$	$K_{yi}[kN/m]$
	7	0.71	3473	173674
	6	0.58	5719	285965
1.5	5	0.52	7603	380173
1.5 (強度刑)	4	0.47	9208	460413
(强反至)	3	0.43	10565	528278
	2	0.40	11691	584583
	1	0.37	12596	629816
	7	0.58	2836	141805
	6	0.48	4670	233489
2	5	0.42	6208	310410
(/ 種准刑)	4	0.38	7519	375926
(标午至)	3	0.35	8627	431337
	2	0.32	9546	477310
	1	0.30	10284	514243
	7	0.38	1857	92833
	6	0.31	3057	152855
	5	0.28	4064	203211
4 (知姓田)	4	0.25	4922	246101
(動性型)	3	0.23	5648	282376
	2	0.21	6249	312473
	1	0.20	6733	336651







図 - 6 は, 各層の年耐震修復経費指標の総和 を建物モデルごとに図示したものである。規準 化されている年耐震修復経費指標の絶対値は, 新設費用単価を乗じて初めて異なる非構造部材 要素間で比較できると考えられるが、ここでは 各非構造部材要素について建物モデルによる比 較検討のみを行なう。損傷が最大層間変形角に 従うと仮定した非構造部材要素では、強度型モ デルで年耐震修復経費指標が小さく,靭性型モ デルで大きくなった (図 - 6(a))。 一方,損傷が 最大床応答加速度に従うと仮定した非構造部材 および設備要素では,強度型モデルで年耐震修 復経費指標が大きく, 靭性型モデルで小さくな った(図-6(b))。構造部材要素の年耐震修復経 費指標の求め方は文献 10)に従うものとして紙 面の都合上ここでは割愛するが,変形が降伏点 を超えたときに構造部材を補修する場合の構造 部材要素に対する年耐震修復経費指標を求める と, 各モデルともほぼ同じ値であった(図-6(c))

5. まとめ

本報の建物モデルにおいて,損傷が層間変形 角に従う非構造部材要素では,層ごとの年耐震 修復経費指標に大きな差は見られず,建物モデ ルの違いによる年耐震修復経費指標の変化が大 きかった。一方,損傷が床応答加速度に従う非 構造部材および設備要素では,層ごとの年耐震 修復経費指標に大きな差が生じる一方,建物モ デルの違いによる年耐震修復経費指標の変化の 割合は,損傷が層間変形角に従う非構造部材要 素ほど大きくなかった。

このことから,損傷が層間変形角に従う非構 造部材要素の耐震修復経費指標は,構造物の最 適な強度と靭性のバランスを検討する際に有効 な指標になると考えられる。また,損傷が床応 答加速度に従う非構造部材および設備要素の耐 震修復経費指標は,家具・設備機器類の固定お よび補強など,耐震修復性能の向上に最も費用 効果がある対策を適切に計画する際に有効な指 標になると考えられる。

参考文献

- 高橋典之,塩原等,小谷俊介:鉄筋コンクリート構造物のラ イフサイクル耐震修復経費,第11回日本地震工学シンポジ ウム講演論文集,pp.2355-2358,2002.11.
- Shahram Taghavi, Eduardo Miranda : Seismic Performance and Loss Assessment of Nonstructural Building Components ,7NCEE , Jul. 2002.
- 三宅辰哉,小山雅人,鷲津篤夫,花井勉:低層鉄骨造住宅の 実大振動実験,日本建築学会大会学術講演梗概集,B-2, pp.1023-1024,1998.9.
- 若林博,長瀬正,坪内信郎,藤村勝,上田忠男:非構造部材の設計用地震力についての研究,日本建築学会大会学術講演 梗概集,B-1,pp.51-52,1997.9.
- 5) 日本建築学会:非構造部材の耐震設計施工指針・同解説およ び耐震設計施工要領,日本建築学会,2003.1.
- 6) 日本建築学会災害委員会:地震動の特性と建築物の被害 経 験と予測 兵庫県南部地震による被害率曲線,日本建築学 会大会(九州)パネルディスカッション資料,1998.9.
- 7) 日本建築学会:建築物荷重指針・同解説,日本建築学会, 1993.6.
- T. Takeda, M. A. Sozen, N. N. Nielsen : Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal of the Structure Division, ASCE, Vol. 96, No.ST12, pp.2557-2573, Dec. 1970.
- 9) 神田順:損失費用モデルを用いた最適信頼性に基づく設計用 地震荷重,(財)日本建築センター助成研究 No.9313,1998.6.
- 10) 高橋典之,塩原等,小谷俊介:鉄筋コンクリート建物の補修 シナリオを考慮したライフサイクル耐震修復経費,2002年度 日本建築学会関東支部研究報告集 I,pp.351-354,2003.3.