

論文 RC 建物中の非構造部材要素の損傷を考慮するライフサイクル修復経費算出方法

川久保 樹^{*1}・高橋 典之^{*2}・塩原 等^{*3}

要旨：鉄筋コンクリート建物の供用期間中に発生が予想される中小地震を含む複数回の地震動に対して、修復経費の期待値をライフサイクル耐震修復経費指標として推定し、非構造部材要素に対してその適用を試みた。対象となる各非構造部材要素を整理し、ライフサイクル耐震修復経費指標の算出方法の提案および試算結果を示した。非構造部材要素ごとに仮定した損傷を許容する層間変形角および床応答加速度が試算結果に大きく影響した。

キーワード：ライフサイクル耐震修復経費指標、非構造部材要素

1. はじめに

建築物の耐震設計は性能設計法あるいは性能指向型設計法と呼ばれる設計法へと移行しつつあり、安全性の確保に加え、建築主が欲する要求性能として、建物の機能・財産（資産価値）の保護が求められている。特に、構造体の変形により生じる非構造部材の損傷は性能評価に大きく関係している。

そこで本報では、鉄筋コンクリート建物のライフサイクル耐震修復経費¹⁾の算出において、非構造部材要素の損傷を考慮した簡単なライフサイクル耐震修復経費の算出方法を提案し、それをを用いた試算結果を示した。

2. 非構造部材要素の扱い

2.1 補修費用中の非構造部材要素の割合

耐震修復性を修復経費の大小で表現する場合、非構造部材の修復経費の影響は無視できない。前田らの研究²⁾では、1995年兵庫県南部地震により被害を受けた鉄筋コンクリート造学校建物の修復費用の内訳は、構造躯体の補修費が全体の20～40%を占め、それに仕上げ関係の補修費を含めると60～70%程度になると報告している。また、平川・神田らは³⁾、1995年兵庫県南部地

震により被害を受けた210棟の鉄筋コンクリート建物の補修工事について、総工費に対する躯体工事費が40%、非構造部材工事費が40%、その他設備工事費が20%であったとしている。またMirandaらは⁴⁾、1994年Northridge地震の被害調査から、建物用途別に被害額を構造部材、非構造部材、設備の3種類に分類し、非構造部材の被害額が全被害総額の70%を占める建物もあると報告している(図-1)。

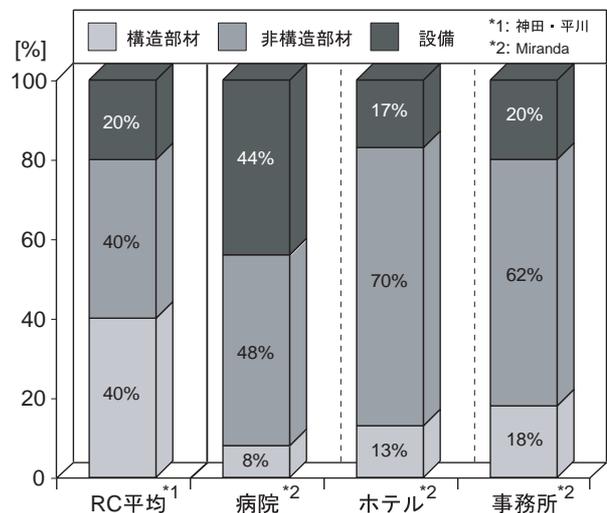


図 - 1 補修費用の建物構成要素別割合

このように、非構造部材要素の修復費用は、

*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 東京大学大学院助教授 工博 (正会員)

構造部材要素の修復費用と同じかそれ以上になると予想され、耐震修復性の評価に与える非構造部材要素の影響が大きい。

2.2 対象とする非構造部材要素

建築物の構成部材は表 - 1 のように分類される。しかし、鉄筋コンクリート非構造部材の種類によっては、構造物の構造特性を変え、最大応答に影響を及ぼすものもある⁶⁾。ここでは、表 - 1 の非構造部材の中で構造要素に分類されている鉄筋コンクリート非耐力壁を除き、非構造部材のうち構造要素に含まれない表 - 1 の網点部分を対象とし、構造性能に影響を及ぼさずに主体構造の応答から損傷を予測できるものを取り扱うものとする。

表 - 1 建築物の構成部材の分類⁵⁾

区分	分類	大項目	小項目
主体構造	構造体	構造上主要な部分	柱,横架材,基礎,杭
		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
	その他	2次部材	PCa 板受鉄骨
非構造部材	非構造部材 建築要素	RC 非耐力壁	袖壁,垂壁,腰壁
		建築物の部位	屋根,外壁,天井,内壁
		建物よりの突出物	広告塔,看板類等
		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
	非構造部材 設備要素	建物外の部位	塀,柵等
		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

3. 耐震修復経費指標の算出方法

構造部材要素に対する耐震修復経費の算出方法は既に提案しているが¹⁾、非構造部材要素に適用した場合の方法をここで紹介する。

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 - 2 のように建築物の固有の情報に基づいて、(i)入力地震動のモデル、(ii)構造物の地震応答モデル、(iii)建物の応答 - 損傷関係のモデル、(iv)損傷 - 費用の関係のモデル、という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⁾の上限を有する極値分布から、再現期間 400 年の地震動を最大に、以下 Hazen 法に基づく超過確率に従う乱数を利用して、東京第 I 種地盤の地表面最大速度を模擬して作成した(図 - 3)。最大速度に合わせて、強震記録(神戸海洋気象台 1995(NS), El Centro 1940 (NS), 八戸港湾 1968(EW), または、東北大学 1978 (NS))に倍率を乗じ入力地震動とした。

建築物の固有の情報(地域、地盤、構造、材料)

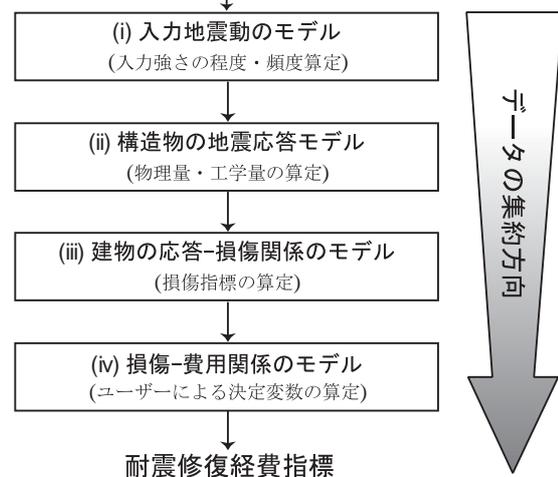


図 - 2 耐震修復経費指標算出プロセス

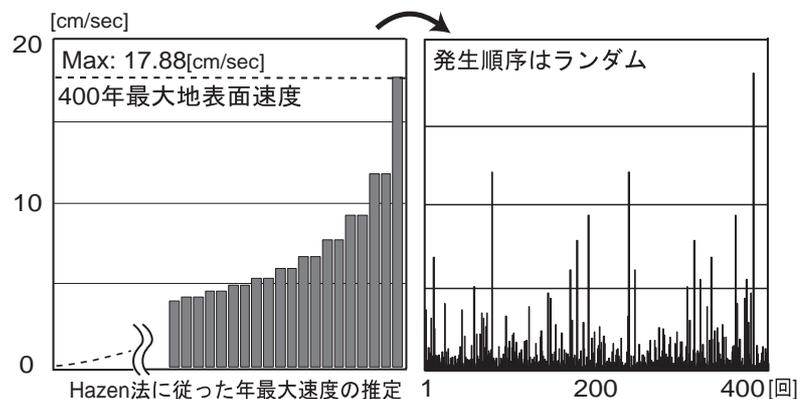


図 - 3 入力地震動最大速度の時刻歴

(2) 構造物の地震応答モデル

建物を弾塑性多自由度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 0.001 倍とした。また、ひび割れ点を越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(図 - 4)。

(3) 建物の応答 - 損傷関係のモデル

非構造部材の損傷の程度は、その種類に応じて、建物の最大層間変形角もしくは床最大応答加速度に応じて決まると考えられる。構造体との連結部分が面に近い(タイル張り仕上げのような)非構造部材要素の損傷は主に最大層間変形角に従い、構造体との連結部分が点に近い(吊り天井のような)非構造部材要素の損傷は主に床応答加速度に従うものと考えて、代表的な非構造部材要素例について、補修および部分の取り替えが必要な損傷が発生しはじめる層間変形角を Δ_{cr1} [rad]、床応答加速度を SA_{cr1} [gal] とし、完全に取り替える必要のある極めて重大な損傷に至る層間変形角を Δ_{cr2} [rad]、床応答加速度を SA_{cr2} [gal] とし、非構造部材の耐震設計指針・同解説⁹⁾を参考に、それぞれの値を表 - 2 のように仮定した。これらを用いて、非構造部材要素

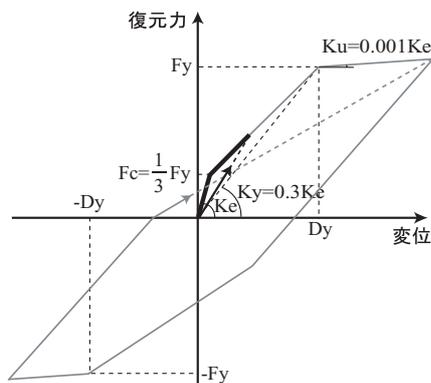


図 - 4 層の復元力特性

の損傷指標 D_N が区間{0,1}の線形な関係になるように仮定した(図 - 5)。

(4) 損傷 - 費用関係のモデル

建物の各層ごとに損傷指標 D_N が生じたら非構造部材を補修するものと仮定した。修復費用は、該当する非構造部材の新設工事費用で除して規準化した耐震修復経費指標 R で表し、損傷指標 D_N に比例するものとした(図 - 6)。損傷指標 D_N が 1 を超えた場合は、耐震修復経費指標を 1 とした。

(5) 年耐震修復経費指標

供用期間中に発生すると仮定した複数回の地震動に対する耐震修復経費指標 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。非構造部材の損傷は各層の層間変形角および床応答加速度によるため、各層ごとに年耐震修復経費指標を算出した。これは、例えば構造部材の損傷制御目的で設計された建物で、地震エネルギーを吸収させる特定の部位・層に

表 - 2 非構造部材要素の損傷上限 / 下限値例

非構造部材要素	Δ_{CR1} [rad]	Δ_{CR2} [rad]
(a) PCa カーテンウォール	1/700	1/40
(b) 石張り・レンガ張り	1/200	1/200
(c) ALC パネル帳壁	1/180	1/15
(d) 乾式間仕切壁	1/250	1/50
(e) サッシ	1/250	1/15
(f) タイル張り仕上げ	1/8000	1/500
(g) Exp.ジョイント	1/200	1/50
	SA_{CR1} [gal]	SA_{CR2} [gal]
(h) システム天井	200	600

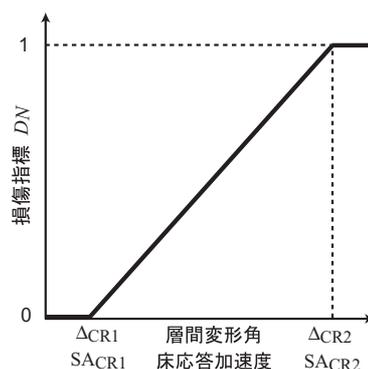


図 - 5 損傷指標の設定

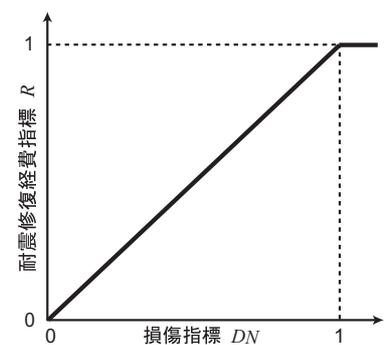


図 - 6 耐震修復経費指標の設定

ある程度の変形を許容する場合，構造部材の損傷は制御できても，特定の部位・層に取り付いている非構造部材の耐震修復経費が大きく算出されてしまう可能性があるため，その部位を特定して非構造部材要素の取付工法の改善を検討するのに適した表示方法の一例と考えている。

3.2 解析対象

非構造部材要素の年耐震修復経費指標の算出に用いる建物のモデルは，1995年兵庫県南部地震で被災した「ジュネス六甲」という単身者向けワンルームマンションとした¹⁰⁾。地上9階建て鉄筋コンクリート造ラーメン構造で，平面形は桁行方向が5.5m×6スパン，梁間方向が6.0m×1スパンである。北西隅にエレベータコアおよび階段室があり，階高は1階が3.8m，2～8階が2.625m，軒高は24mである（図-7，図-8）。1986年設計のこの建物は，1次固有周期が0.95秒で，降伏点変位が比較的大きいため，本報で用いた入力地震動シナリオに対して，構造部材に損傷は生じないが，層間変形角もしくは床応答加速度に応じて決まる非構造部材に生じる損傷が耐震修復性に大きく影響する典型的な建物であると考えられる。

建物を多質点せん断系でモデル化し，当該骨組をセットバックのない6階までとするが，北側セットバック階の影響を考慮し，7階以上の荷重は全て6階に加えることとした。各層の重量，階高，および外力分布に A_i 分布を仮定した場合の降伏時せん断力，降伏時等価線形剛性を表-3にまとめた¹⁰⁾。

4. 年耐震修復経費指標算出結果

4つの強震記録（神戸海洋気象台1995(NS)，El Centro 1940(NS)，八戸港湾1968(EW)，および，東北大学1978(NS)）を用いた再現期間400年の地震動に対する構造物の最大層間変形角および最大床応答加速度の平均値を図-9に示す。検討対象とした建物では，中間階の3階で最も層間変形角が大きく，1階で最も層間変形角が小さい。一方，床応答加速度は，最上階の6階

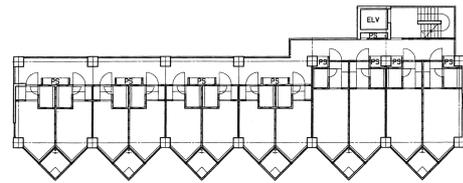


図-7 基準階平面図

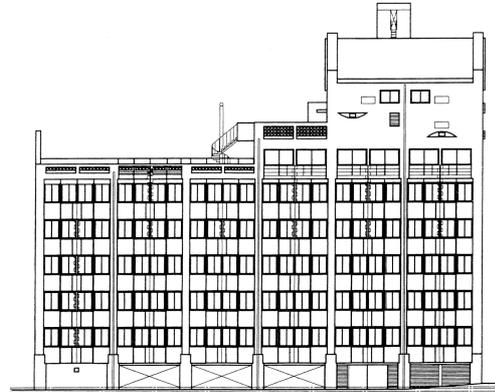


図-8 立面図(東面)

表-3 建物の各階設定

階	W_i [kg]	Q_y [kN]	H[m]	K_y [kN/m]
6	745140	4447.04	2.6250	292559.4
5	367700	5863.83	2.6250	295313.2
4	377990	7093.24	2.6250	297861.2
3	379570	8123.32	2.6250	322939.4
2	380370	8964.35	2.6875	389785.2
1	412150	9668.97	3.8000	518557.2

W_i : i 階重量， Q_y : 降伏時層せん断力， H : 階高， K_y : 降伏時等価線形剛性

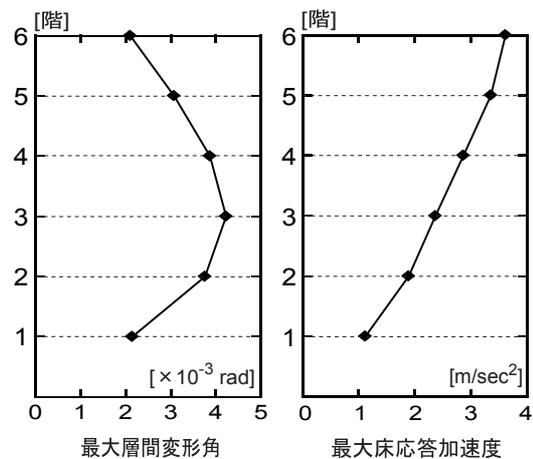


図-9 再現期間400年地震動に対する応答

で最も大きく，1階で最も小さい。耐震修復性を1回の地震動から評価した場合，図-9の応

答にほぼ比例するような値の耐震修復経費指標の算出が予想される。しかし、供用期間を通じた中小地震を含む複数回の地震動に対する耐震修復経費指標は、必ずしも1回の地震動に対する応答結果から単純に予想されるものではないと考えられる。図-10は、4つの強震記録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图示したものである。年耐震修復経費は、「建築施工単価」¹¹⁾に掲載されている各非構造部材要素の交換にかかる費用から修復費用単価を仮定し(表-4)、年耐震修復経費指標に乗じて求めた。修復費用単価は、同一の非構造部材要素でも高級品から廉価版まで価格に相当の開きがあるため、最高額と最低額の2種類の年耐震修復経費を图示した。

年耐震修復経費の大小は、損傷の発生および終局状態を仮定した層間変形角の上・下限値の小さい(f)タイル張り仕上げで最も大きく、層間変形角上・下限値が大きく修復費用単価の小さい(e)サッシュで最も小さくなった。損傷の発生を仮定した層間変形角下限値、損傷の終局状態を仮定した層間変形角上限値、修復費用単価のそれぞれが、年耐震修復経費の大小に影響していると考えられる。

年耐震修復経費の各階分布は、損傷が最大層間変形角に従うものと仮定した非構造部材要素では、いずれも中間階の3階で年耐震修復経費が最大となり、損傷が最大床応答加速度に従うものと仮定した非構造部材要素では、最上階の

表-4 各非構造部材要素の修復費用単価

非構造部材要素	修復費用単価
(a) PCaカーテンウォール	交換：¥17200-83700 /m ²
(b) 石張り・レンガ張り	交換：¥9200-197000 /m ²
(c) ALCパネル帳壁	交換：¥5900-11700 /m ²
(d) 乾式間仕切壁	交換：¥1130-3280 /m ²
(e) サッシュ(アルミ)	交換：¥2480-4480 /m ²
(f) タイル張り仕上げ	内装張替：¥5710-59900 /m ² 外装張替：¥5550-59900 /m ²
(g) Exp.ジョイント	カバー：¥6780-32000 /m
(h) システム天井	下地：¥720-4820 /m ² 仕上：¥880-13600 /m ²

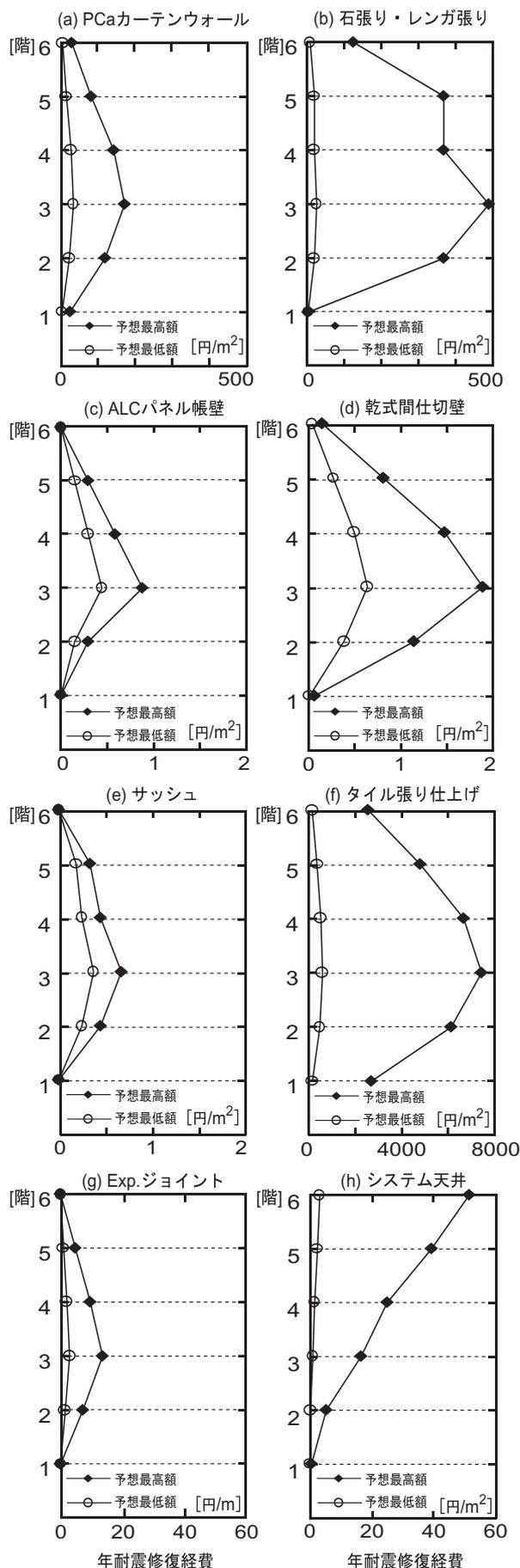


図-10 非構造部材別の年耐震修復経費

6 階で年耐震修復経費が最大となった。損傷の発生および終局状態を仮定した層間変形角の小さい(f)タイル張り仕上げでは、再現期間 400 年の地震動 1 回に対する最大層間変形角の各層分布(図 - 9)と各階の年修復経費指標とがほぼ比例していると言えるが、損傷の発生および終局状態を仮定した層間変形角が等しい(b)石張り・レンガ張りなど、再現期間 400 年の地震動 1 回に対する最大層間変形角の各層分布から、非構造部材要素ごとの各階年耐震修復経費を画的に推定するのは難しいと考えられる。

5. 考察

本報では、各非構造部材要素の修復費用に単純な線形モデルを仮定した。本来であれば、損傷に対する補修工法の選択および補修工法ごとの修復費用単価に関して損傷 - 費用関係のモデルを決定することが望ましい。図 - 10 の年耐震修復経費は各非構造部材要素の交換にかかる費用から修復費用単価を仮定して求めたものであるが、実際の非構造部材要素の補修は、損傷の生じている非構造部材要素を交換する以外にも、損傷の程度に応じて、取付け金物の交換、シーリング補修、パテ補修など、様々な補修工法が考えられる。従って、より実際に即した非構造部材の耐震修復性を表すためには、損傷の程度に応じた適切な補修工法の選択を考慮した損傷 - 費用関係のモデルを検討する必要があると考えられる。

また、図 - 10 の年耐震修復経費は損傷の発生および終局状態を仮定した層間変形角または床応答加速度を表 - 2 のように仮定して求めた値であるが、実際には同一の非構造部材要素でも取付け工法などによって構造体に対する追従性、すなわち損傷の発生および終局状態に対する許容層間変形角または許容床応答加速度が様々な異なると考えられる。より正確な耐震修復性能の評価のためには、構造体への非構造部材要素の取付け方・取付け工法から、許容層間変形角または許容床応答加速度が詳細に定義できるよ

うにする必要があると思われる。

6. まとめ

RC 建物の供用期間中に発生が予想される中小地震を含む複数回の地震動に対して、耐震修復性を評価する際に対象となる各非構造部材要素を整理し、ライフサイクル耐震修復経費指標を算出した結果、以下の知見を得た。

(1)本報で用いた入力地震動のシナリオで構造部材要素に損傷を生じない建物でも、非構造部材要素の耐震修復経費は算出されるため、建物全体の耐震修復性の考慮には非構造部材要素を考慮する必要がある。

(2)損傷の発生および終局状態を仮定した層間変形角および床応答加速度、修復費用単価のそれぞれが、年耐震修復経費の大小に影響していた。また、1 回の地震動に対する構造体の応答性状からは、各階のライフサイクル耐震修復経費を予測できない非構造部材要素があった。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 前田匡樹、本多祐子、康大彦：地震被害を受けた鉄筋コンクリート造学校建物の被災度と修復コスト、第 11 回日本地震工学シンポジウム講演論文集、pp.2103-2106、2002.11
- 3) 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、pp.69-70、1997.9.
- 4) Shahram Taghavi, Eduardo Miranda : Seismic Performance and Loss Assessment of Nonstructural Building Components, 7NCEE, Jul.2002.
- 5) 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、pp.51-52、1997.9.
- 6) 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、pp.1023-1024、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.
- 8) 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) 日本建築学会：非構造部材の耐震設計指針・同解説および耐震設計・施工要領、日本建築学会、1985.11.
- 10) 新井組技術本部技術研究部：平成 7 年(1995 年)兵庫県南部地震被災調査報告書 - ジュネス六甲 - , 新井組技術研究報告書、第 8 号、1995.10.
- 11) (財)経済調査会：建築施工単価 2002 年 冬号、(財)経済調査会、2002.1.