

論文 RC 構造物の耐震修復性評価におけるライフサイクル影響係数

高橋 典之^{*1}・塩原 等^{*2}

要旨：鉄筋コンクリート建築構造物の耐震修復性評価にあたりライフサイクルを考慮すると、入力地震動の時刻歴シナリオ、補修の程度および有無による構造物特性の変化などが影響し、1回の簡単な応答解析ではその評価が難しい。本論文は、簡単なモデルを用いて、ライフサイクルの効果を簡単な影響係数として表すことを試みた。

キーワード：鉄筋コンクリート構造、耐震修復経費、ライフサイクル

1. はじめに

建築物の構造設計において、性能設計法に対する概念が様々な検討されている。1995年兵庫県南部地震以降、安全性の確保は当然のことながら、建物を財産として見た場合の資産価値の保護が重要な問題となり、損傷した建物の修復の容易さを耐震修復性として評価する研究が試みられている¹⁾。また、環境問題への関心の高まりから建物の長寿命化が求められており、長寿命化により遭遇する確率が増大する中小地震に対する耐震修復性の評価が重要になってくる。その際には、供用期間中に発生が予想される中小地震のレベルと頻度を考慮した入力地震動シナリオ²⁾が必要となる。

本研究では、RC構造物のライフサイクル耐震修復性の評価に適した入力地震動シナリオを考案し、入力地震動シナリオによるライフサイクルの効果を簡単な影響係数として表すことを試みた。

2. 入力地震動シナリオ

2.1 性能評価と入力地震動レベル

本来の性能設計は、建物に起こりうるあらゆる事象を対象に設計されるべきだが、設計地震動レベルに関しては、実用的な観点から離散化したレベルを検討しているものが多い。地震動レベルの設定は、日本建築センターの高層建築

表 - 1 地震動レベルと性能マトリックスの例

地震動レベル	性能レベル			
	全機能維持	機能維持	人命保護	崩壊寸前
30年超過確率50% (再現期間43年)	○			
50年超過確率50% (再現期間72年)	○			
50年超過確率10% (再現期間475年)	○	○		
50年超過確率5% (再現期間970年)	○	○	○	

基本性能目標

物構造評定委員会でレベル1地震動、レベル2地震動³⁾を定義しているほか、性能設計を念頭に置いた地震動レベルの設定として、離散化した地震動レベルと損傷度による性能レベルを表-1のようなマトリックスで表示するものがある⁴⁾。表-1では、50年超過確率10%の入力地震動レベルに対して、建物の最低限の性能として人命の保護が要求され、建物のグレードが上がると、機能維持、全機能維持が要求されるようになる。すなわち、建物の損傷をどのくらい許容できるのかを判断するための耐震修復性能は、50年超過確率10%の大きさの入力地震動で評価することが求められていることになる。

しかし、このような方法では、規定レベルの地震動に対する建物の損傷評価が修復性評価に直結し、供用期間が異なる場合の地震動レベルの変化、補修の要否判断に伴う損傷の累積などを考慮できない。ライフサイクル耐震修復性を

*1 東京大学大学院 工学系研究科 修士(工学)(正会員)

*2 東京大学大学院 工学系研究科 助教授 工博(正会員)

評価するためには、損傷の累積や供用期間の違いが考慮できる複数回の地震動シナリオを用いる必要がある。

2.2 耐震修復性評価用の入力地震動シナリオ

一般に地震動の大きさに対応する年超過確率をプロットしたものを「地震ハザード曲線」と呼ぶ。これまで、過去の地震記録を統計処理した地震ハザード曲線が幾つか提案されているが(例えば⁵⁾、建築物荷重指針・同解説⁶⁾にある東京の地震活動度の評価例も、年超過確率を再現期間で表現した地震ハザード曲線の一つと考えられる。本研究では、荷重指針にある上下限を有する極値分布により得られた東京第一種地盤の地震表面最大速度と再現期間との関係⁷⁾を、地震ハザード曲線として用いた(図-1)。

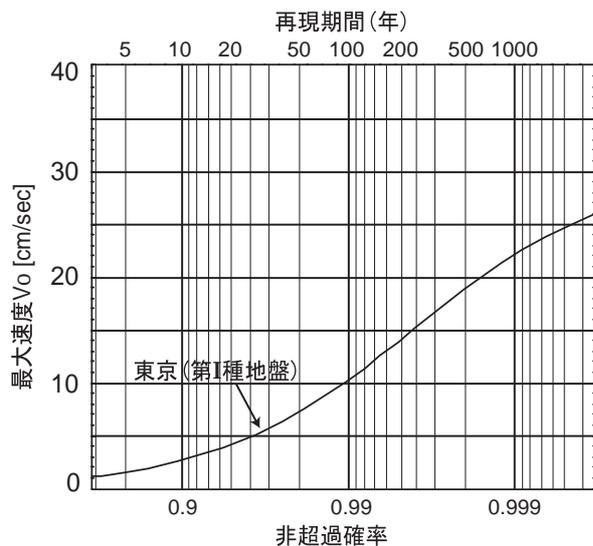


図-1 地震ハザード曲線

地震ハザード曲線から、供用期間中に発生する複数回の地震動シナリオを仮定することは、年超過確率または年非超過確率のシナリオを仮定することに他ならない。例えば、図-1の地震ハザード曲線のプロット方法であるHazen法に基づき非超過確率のシナリオを仮定すると、表-2のようになる。Hazen法⁸⁾では、 N 個の観測値に対して、観測値の大きい順に i 番目の非超過確率 $F_X(x_i)$ が、

$$F_X(x_i) = 1 - \frac{2i-1}{2N} \quad (1)$$

表-2 Hazen法に従う非超過確率の組合せ

地震の大きさ順	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$...	$i=50$
非超過確率 $F_X(x_i)$	0.99	0.97	0.95	0.93	...	0.01
再現期間 $r(i)$ [年]	100.0	33.3	20.0	14.3	...	1.01
50年超過確率	39.3%	77.7%	91.8%	97.0%	...	100%

(供用期間50年の場合)

表-3 考案した方法による非超過確率の組合せ

地震の大きさ順	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$...	$i=50$
非超過確率 $F_X(x_i)$	0.998	0.978	0.958	0.938	...	0.018
再現期間 $r(i)$ [年]	475	45.2	23.7	16.1	...	1.02
50年超過確率	10.0%	66.9%	87.8%	95.5%	...	100%

(供用期間50年の場合)

と表される。このHazen法に従うと、地震動の年最大速度を N 個観測した場合、最大地震動の再現期間は $2N$ 年(N 年超過確率39.3%)となる。この方法による地震動シナリオの仮定は、規定レベルの地震動に対する建物の修復性評価と異なり、供用期間が異なる場合の地震動レベルの変化を考慮することができるという特徴がある。一方で、前節に示したように、建物の耐震修復性能は50年超過確率10%(再現期間475年)程度の大きさの地震動で評価することが検討されており、想定供用期間をRC造の法定耐用年数50年と仮定すると、Hazen法で計算される最大地震は、耐震修復性能を評価するための地震動としては小さな地震動となる。

そこで、供用期間 N 年超過確率が $P_0\%$ となる地震動を最大とし、 N 個の地震動からなる地震動シナリオを新たに考案した。その際、供用期間 N 年に対する地震動シナリオが実観測値に対して過大とならないように、シナリオ地震動の各非超過確率 $F_X(x_i)$ の和が、Hazen法による年最大速度 N 個の観測値の非超過確率 $F_X(x_i)$ の和とほぼ等しくなるように、非超過確率のシナリオを決めた。考案した方法では、地震動の大きい順に i 番目の N 年超過確率 P_i が、

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

と表されるものとした。ここに、 P_0 ：耐震修復性能評価用の N 年超過確率最小値 = 10% である。これを非超過確率 $F_X(x_i)$ で書き換えると、

$$F_X(x_i) = 1 + \frac{\ln(1 - P_i)}{N} \quad (3)$$

と表され、非超過確率のシナリオを仮定すると表 - 3 のようになる。本方法による地震動シナリオの仮定は、供用期間に応じた地震動レベルの変化に対応できると同時に、供用期間年超過確率が $P_0\%$ なる最大地震動を含む合理的な地震動シナリオの作成が可能になる。

3. 耐震修復経費指標の算出手順

3.1 耐震修復性評価手順の概略

筆者らは、建物のライフサイクル耐震修復性能をライフサイクル耐震修復経費指標⁹⁾として算出する方法を提案しているが、その簡単な概略を説明する(図 - 2)。

(1) 入力地震動のモデル

2章の手順で、供用期間 50 年および 100 年とした場合の、東京第 1 種地盤の地表面最大速度および非超過確率の組合せを作成した(図 - 3)。各地震動の最大速度に合わせて国土交通省告示 1461 号の設計用応答スペクトルに適合する模擬地震動に倍率を乗じ入力地震動とした。模擬地震動の位相特性は神戸海洋気象台 1995(NS)、El Centro 1940 (NS)、八戸港湾 1968(EW)、東北大学 1978 (NS)の 4 つを用いた(図 - 4)。

(2) 構造物の地震応答モデル

建物を 1 自由度系と見なし、非線形地震応答解析をした。復元力特性を Tri-linear 型とし、履歴則に Takeda モデル¹⁰⁾を用いた。建物の減衰は瞬間剛性比例型とし、減衰定数を 2% とした。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。補修しない場合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、補修後は構造物の剛性を元に戻すものと仮定した。

(3) 建物の応答 - 損傷関係のモデル

建物の損傷は Park & Ang の損傷モデル¹¹⁾で表されるものとした。

$$D = \frac{\delta_M}{\delta_u} + \frac{\beta}{Q_y \delta_u} \int dE \quad (4)$$

ここに、 D ：損傷指標、 δ_M ：地震時最大変形、 δ_u ：単調載荷時限界変形、 Q_y ：降伏強度、 β ：正定数 0.05、 dE ：履歴エネルギー吸収増分。(4)式第 1 項を補修される損傷 D_R 、第 2 項を累積損傷 D_E とおき、損傷指標 D が 1 を超えると崩壊とみなした。

(4) 補修のモデル

本報では、これまでに提案してきた補修シナリオ¹²⁾のうち、構造物の最大変位が降伏点を超えると補修する場合を検討した。損傷指標 D_R は補修後ゼロに戻すものとし、累積損傷 D_E は損傷指標 D が 1 を超えたときに補修してゼロに戻

建築物の固有の情報(地域、地盤、構造、材料)

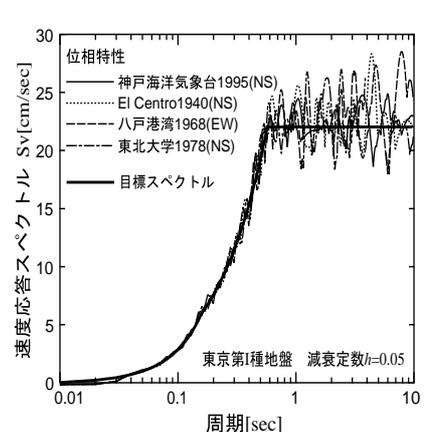
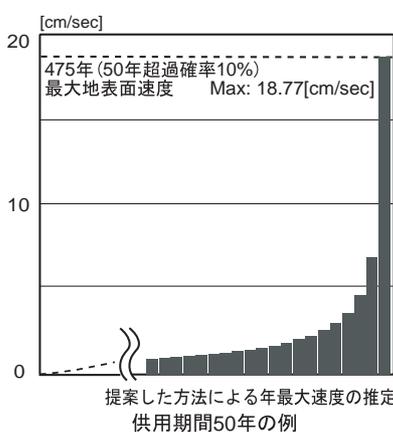
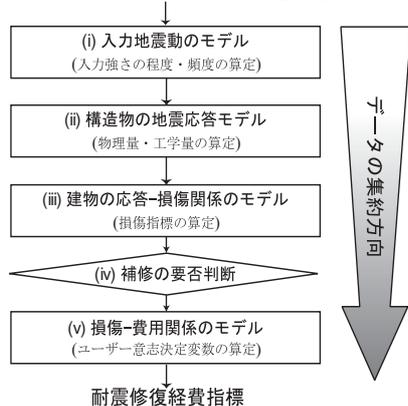


図 - 2 耐震修復経費指標算出過程

図 - 3 最大速度のシナリオ

図 - 4 模擬地震動の速度スペクトル

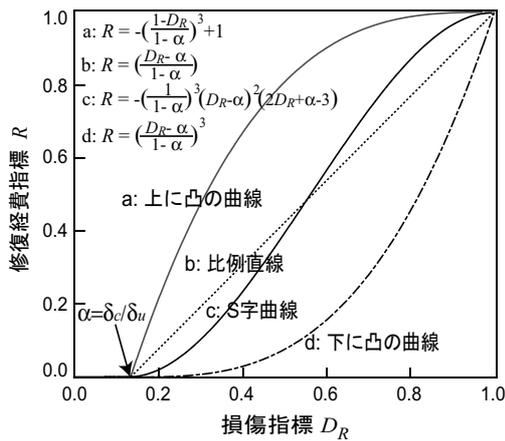


図 - 5 損傷 - 費用関係のモデル

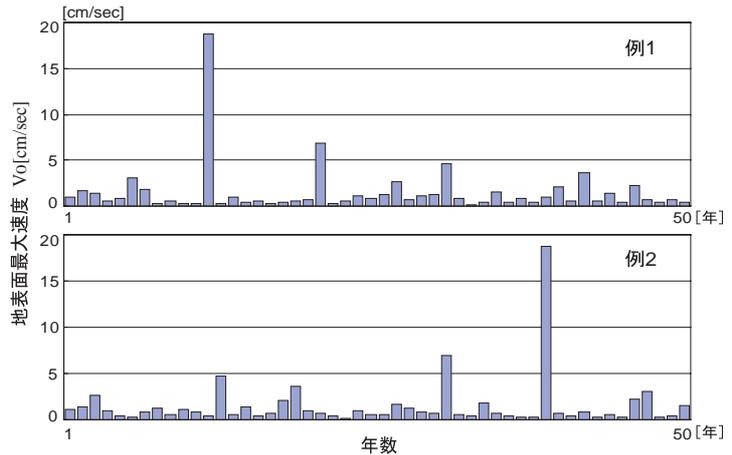


図 - 6 発生順序が異なる地震動シナリオの例

すものとした。

(5) 損傷 - 費用関係のモデル

修復費用を建設初期費用で除して規準化し、ひび割れ点前の修復経費をゼロ、補修で減らすことのできた損傷指標 D_R ($\alpha < D_R < 1$: ひび割れ点到達時の損傷指標値を α とする) に応じて、構造部材の損傷の伸展および修復経費の特性を簡単な式でモデル化¹³⁾した耐震修復経費指標 R を図 - 5 のように仮定した。損傷指標 D が 1 を超えた場合は耐震修復経費指標 R を 1 とした。

3.2 解析パラメータ

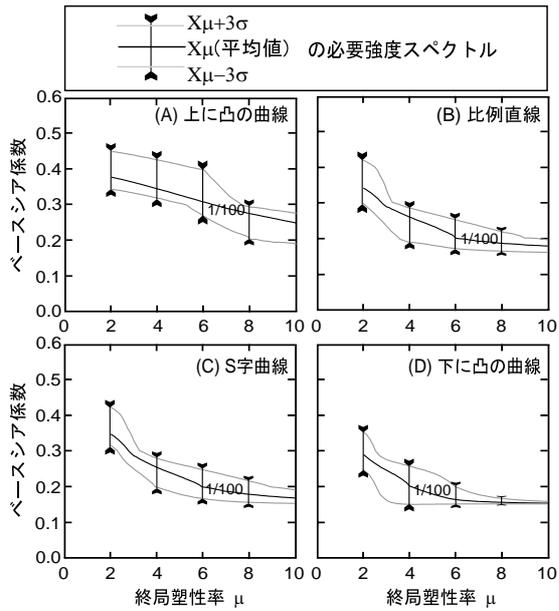
1 自由度振動系の弾性固有周期を 0.3 秒とした。建物重量に対する水平せん断耐力の比であるベースシア係数 C_0 を 0.1 から 0.6 まで 0.1 刻みの 6 通り、終局塑性率 μ を 2 から 10 まで 1 刻みの 9 通りとした。

4. 耐震修復経費指標算出結果

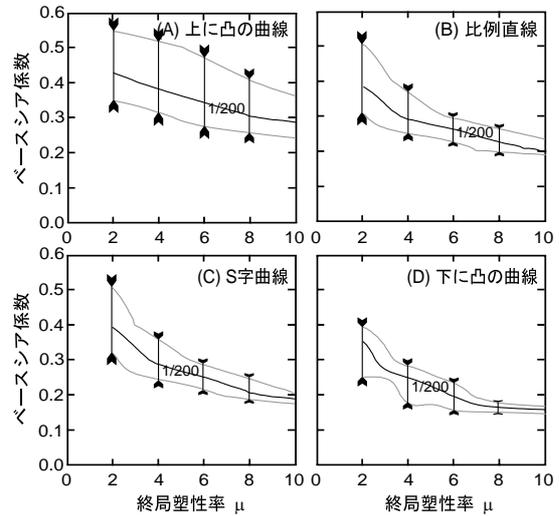
図 - 3 に示した大きさに従う地震動をランダムな順序で発生させ (図 - 6)、ライフサイクル耐震修復経費指標を算出した。算出したライフサイクル耐震修復経費指標を供用期間年数で除した年耐震修復経費指標について、各解析パラメータにおける年耐震修復経費指標の計算値を補間して、縦軸をベースシア係数 C_0 、横軸を終局塑性率 μ とした平面上に等高線を作成し、この等高線を必要強度スペクトルと呼ぶ。図 - 7 に 4 つの模擬地震動による年耐震修復経費指標の平均値 X_μ から求められる必要強度スペクト

ルを示した。あわせて、発生順序の異なる 50 通りの地震動シナリオによって計算結果に生じたバラつきを標準偏差 σ として求め、正規分布を仮定すれば 99.7% が領域内に納まる 3 シグマ範囲 (区間 $[X_\mu - 3\sigma, X_\mu + 3\sigma]$) を、必要強度スペクトルの上限・下限として図 - 7 に重ねて示した。ちなみに、田中らの研究¹⁴⁾によると、地震被災度と新築費用に対する修復費用の比の関係は、損傷度 III の (コンクリートに幅 1~2mm 程度のひび割れが生じている) とき 0.4 程度になることが報告されている。そこで、複数回の地震動シナリオを対象としている本研究では、ライフサイクルを通じた耐震修復経費指標が 0.5 (ライフサイクル修復費用が建設初期費用の半分) となる年耐震修復経費指標値の等高線を、ライフサイクル耐震修復性を表すひとつの目安として示した。

損傷 - 費用関係モデルに (a) 上に凸の曲線を用いた場合、建物の靱性が上がっても地震動の発生順序の違いによるバラつきがあまり変わらないのに対して、それ以外の損傷 - 費用関係モデルでは、建物の靱性が上がると地震動の発生順序の違いによるバラつきが小さくなった。特に、(b) 比例直線、(c) S 字曲線、(d) 下に凸の曲線の順でバラつきが小さくなっている。これは、靱性抵抗型の建物では、補修の要・不要を決める境界の損傷指標値 D が小さく見積もられるため、累積損傷によって補修の有無が変わっても修復費用の差が大きくならなかったと考えられ

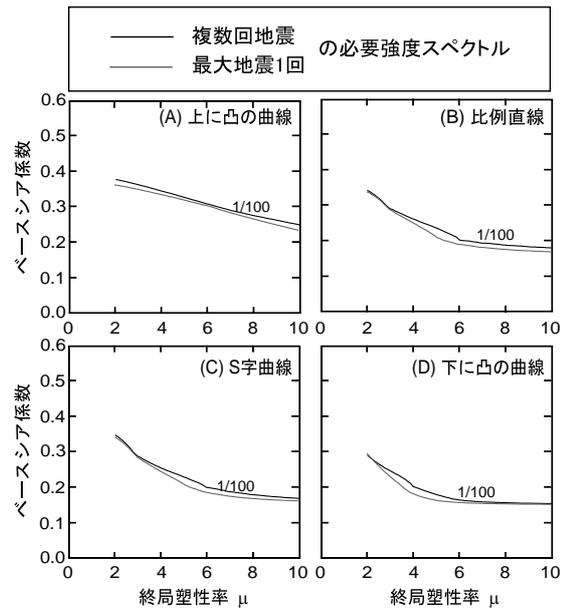


(a) 供用期間 50 年

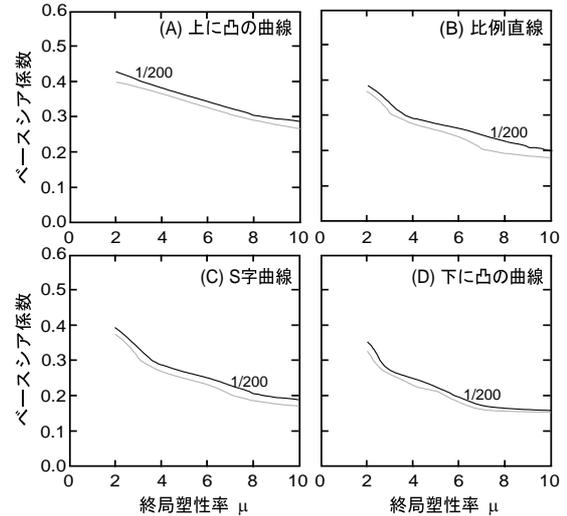


(b) 供用期間 100 年

図 - 7 地震発生順序の違いによるばらつき



(a) 供用期間 50 年



(b) 供用期間 100 年

図 - 8 ライフサイクルの影響による必要強度の差

る。特に、中小地震による損傷の補修費用を小さく見積もる費用曲線モデルほど、その傾向が強くなるものと考えられる。

図 - 8 に、本研究で用いた入力地震動シナリオによる耐震修復経費指標から求められる必要強度スペクトルと、供用期間年超過確率 10%の地震動 1 回による耐震修復経費指標から求められる必要強度スペクトルを示した。複数回の入力地震動シナリオによる必要強度スペクトルのほうが、供用期間年超過確率 10%の地震動 1 回による必要強度スペクトルよりも、わずかに高い強度を必要としているが、その差は極めて小

さい。そこで、供用期間年超過確率 10%の地震動 1 回による耐震修復経費に対する複数回入力地震動シナリオによる耐震修復経費の比を、ライフサイクル影響係数として図 - 9 に示した。ベースシア係数 C_0 が 0.2 から 0.5 の間では、ライフサイクル影響係数はおおよそ 1.0 倍から 1.6 倍の間に収まっていた。(d)下に凸の費用曲線モデルのように、耐震修復経費指標の絶対値が小さな値で算出される場合、耐震修復経費の比率として表される影響係数の変動が他のモデルに比べて大きく表れやすく、定量的な影響係数の評価は難しくなるが、本研究で用いたモデルに

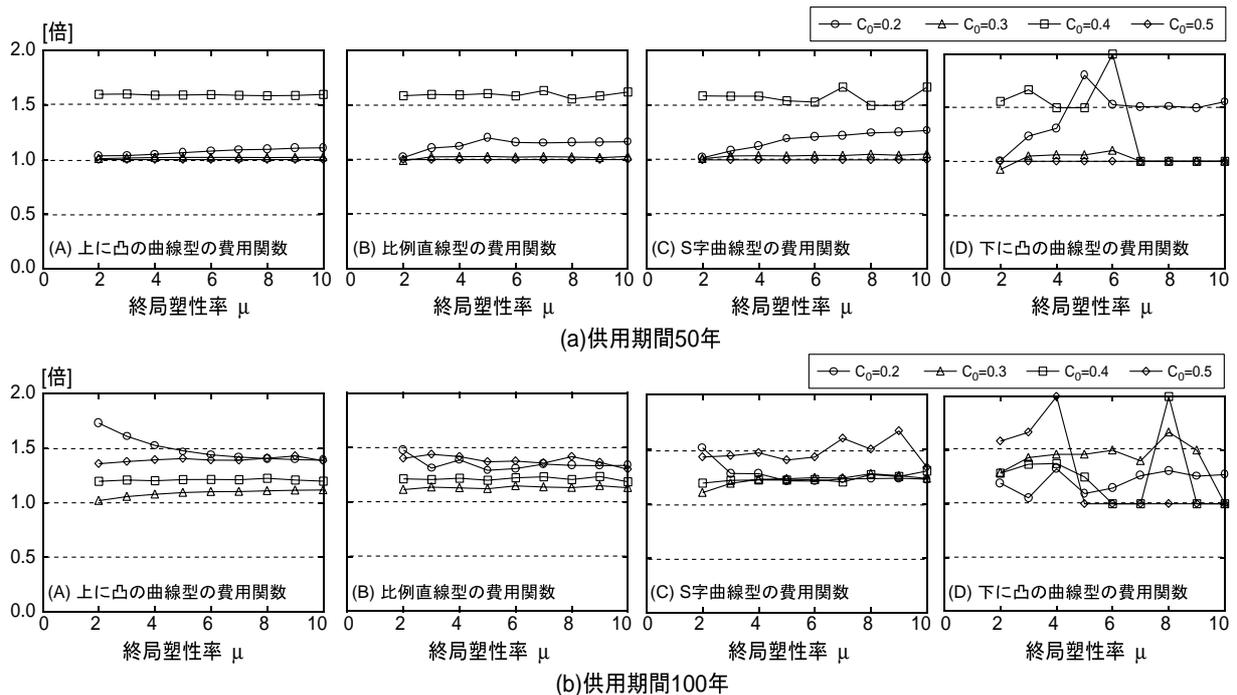


図 - 9 ライフサイクル影響係数

においては、ライフサイクル影響係数の平均値 1.24 倍で供用期間年超過確率 10%の地震動 1 回による耐震修復経費から複数回入力地震動シナリオによるライフサイクル耐震修復経費をおおよそ推定できるものと思われる。

6. まとめ

- (1) RC 構造物のライフサイクル耐震修復性の評価に適した独自の入力地震動シナリオを考案した。
- (2) 建物の靱性が上がると地震動の発生順序の違いによるばらつきが小さくなった。特に、(b)比例直線、(c)S 字曲線、(d)下に凸の費用曲線モデルの順でばらつきが小さくなった。
- (3) 耐震修復経費に与えるライフサイクルの影響を影響係数として表すと、おおよそ 1.0 から 1.6 の間であった。ライフサイクルの影響を定量的に評価するのは難しいが、本研究に用いたモデルでライフサイクル影響係数の平均値を計算すると 1.24 であった。

参考文献

- 1) 田原慎一郎：鉄筋コンクリート構造物の損傷評価，東京大学大学院工学系研究科修士論文，2001.2.

- 2) 朴哲敏，高橋典之，塩原等：RC 建物のライフサイクル耐震修復経費に及ぼす地震動シナリオの影響(その 1) ライフサイクルを考慮した地震動シナリオについて，日本建築学会学術講演梗概集(東海)，C-2，pp.973-974，2003.9.
- 3) 高層建築物構造評定委員会：高層建築物の動的解析用地震動について，ビルディングレター，pp.49-50，1986.6
- 4) SEAOC Vision 2000 Committee: Vision 2000 - Performance Based Seismic Engineering of Buildings, Sacramento, CA, 1995.4.
- 5) 諏訪仁，吉田伸一，野畑有秀，関松太郎：複数建物の地震リスク特性に関する検討，第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.2349-2354，2002.11.
- 6) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，日本建築学会，1993.6.
- 7) 壇一男，神田順：上下限を有する極値分布を用いた地震危険度解析，日本建築学会構造系論文報告集，第 363 号，pp.50-56，1986.5.
- 8) Hazen, Allen: Flood Flows, A study of Frequencies and Magnitudes, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1930.
- 9) 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論文集，pp.2355-2358，2002.11.
- 10) 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.
- 11) Park, Y. J. and Ang, A. HS.: Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.111, No.4, pp.722-739, Apr.1985.
- 12) 高橋典之，塩原等，小谷俊介，東川敬子：鉄筋コンクリート建物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.43-48，2002.6.
- 13) 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 p.351-354，2003.3.
- 14) 田中仁史ほか：鉄筋コンクリート造建築物の修復費用に基づく地震被災度判定基準の提案と費用の算定，日本建築学会大会梗概集(東北)，C-2，pp.891-894，2000.9.