

論文 「ライフサイクル修復経費指標」による鉄筋コンクリート構造物の修復性評価システム

高橋 典之*1・塩原 等*2・小谷 俊介*3

要旨：鉄筋コンクリート構造物において、供用期間中に複数回発生する中小地震による損傷の累積と補修を考慮した損傷モデルを用いることで、設計段階でライフサイクルに対する修復経費を算出し、定量化された指標をライフサイクル修復性ととらえることにより、修復性を評価するシステムを提案し、簡単なモデルとして一質点系モデルを構造物に見たてて修復性の試算を行った結果を示した。

キーワード：修復性、ライフサイクル経費

1. はじめに

耐震設計の目標は、従来の「建物の倒壊から人命を保護する」最低限の基準から「建築主のニーズに応じた機能・財産の保持保全」も考慮しなければならない段階に入った。大地震のあと、倒壊はしないが被害が生じた被災建物の修復の容易さを建物の元の性能に戻すために必要な経費によって定量化し評価を行う修復性能の修復経費指標による評価が提案されている¹⁾。

しかし、中小地震による損傷の累積や、補修しても完全には元の性能に戻らない場合などを考慮しないと、設計段階で想定した建物のライフサイクルに対する修復性能を評価できない。

供用期間中に想定される地震動に対する損傷と補修の必要量をあらかじめ修復コストとして算出できれば、建築主のニーズと建物の供用期間に応じた、構造システムの選択が可能になる。本研究では、建物のライフサイクルを考慮した履歴エネルギー吸収型損傷モデルによる修復性能の修復経費指標評価システムを提案する。

2. 準備

2.1 入力地震動の設定

(1) 入力地震荷重の算定

供用期間中の入力地震荷重を設定する際、過去の地震記録を利用する方法と、確率的に処理された大きさと頻度を持つ地震を用いる方法を考えた。

①記録地震

宇佐美らによる日本被害地震一覧のデータ²⁾をもとに、東京山の手における過去400年間の地震の発生時刻歴を推定した。発生箇所の緯度・経度とマグニチュードから、震源深さを余震半径を与える飯田式の $1/2^3)$ と仮定し、地表最大加速度を求める修正金井距離減衰式⁴⁾を用いて地震動の最大加速度を推定した。

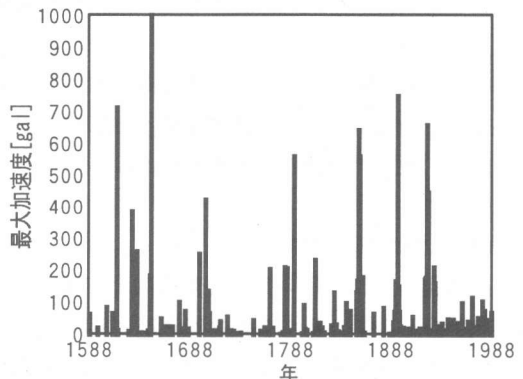


図-1 記録地震による最大加速度の発生時刻歴

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 (正会員)

*2 東京大学助教授 大学院工学系研究科建築学専攻 工博 (正会員)

*3 東京大学教授 大学院工学系研究科建築学専攻 Ph.D 工博 (正会員)

②確率分布地震

建築物荷重指針・同解説⁵⁾にある上下限を有する極値分布を利用し、目的の供用期間が再現期間となる地震動を最大に、以下 Hazen 法に基づく超過確率に従った発生頻度と大きさの入力地震荷重データを作成した。その際、荷重指針⁶⁾に基づき、東京の第 I 種地盤の地表最大加速度を算定した。

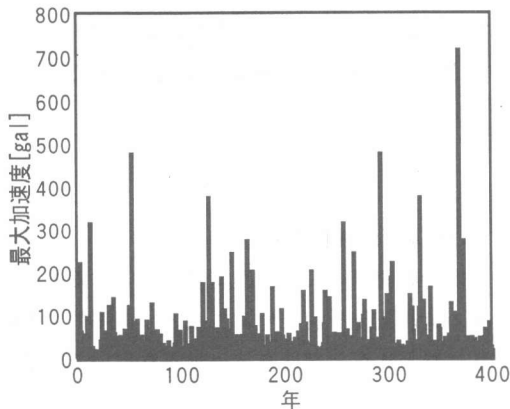


図-2 確率分布地震による最大加速度の発生時刻歴
記録地震を用いる場合は、「実際に起こった」という実証の見地から有効であるが、任意の長さの目標供用期間を考える場合、過去の記録のどの期間を用いるかで地震動の強さと回数が異なってしまう。

確率処理された地震を用いる場合は、供用期間に対して恣意的な仮定を必要としないが、実際の地震発生をどの程度再現しているのか判断しにくい。

図-1、図-2 から、記録地震に比べて、確率分布地震は、毎年発生する中小地震の影響が評価に大きく反映すると考えられる。

(2) 入力地震波の設定

修復性評価に用いる入力地震動を作成するには、(1) で算出された最大加速度となるように強震記録に倍率を乗じて求める。この際地震波を複数組合わせて用いる場合と、単一で用いる場合が考えられる。複数の地震波を組合わせて用いる場合は、特定の地震波を用いる際に、結果が地震波の特性に強く影響されることが少な

くなる。単一の地震波を用いる場合は、修復性を評価する尺度として単純になる利便性が考えられる。

2.2 履歴エネルギー吸収型損傷モデル

実際の建物の損傷を模擬するかわりに、ここでは簡単な 1 質点振動系を建物のモデルとする。

Park らは、履歴エネルギーの吸収を考慮した損傷モデルを提案した⁶⁷⁾。

$$D = \frac{\delta_M}{\delta_u} + \frac{\beta}{Q_y \delta_u} \int dE \quad (1)$$

ここに D : 損傷指標, δ_M : 地震時最大応答変形, δ_u : (単調載荷) 限界変形, Q_y : 降伏強度, β : 正の定数, dE : 履歴エネルギー吸収増分。損傷指標 D が 1 をこえると崩壊, 全体損傷を意味するとしている。Park の研究によれば RC 構造の場合 $\beta=0.05$ が部材破壊実験データに適合するとしている。本研究では、架構を便宜的に 1 質点振動系にモデル化しているが、実際には架構の一部のみが損傷するため必要な修復は小さいと見なし、簡単な値として $\beta=0.01$ を仮定した。

2.3 補修のモデル

応答解析で算出された(1)式第 1 項を補修可能損傷(ひび割れ等), 第 2 項を累積損傷(鉄筋の歪み等)とした。補修可能損傷については変形が降伏点を越えた場合に算出され即時修復し、累積損傷については常時積算され損傷指標 D が 1 を越えたときに修復されると仮定した。

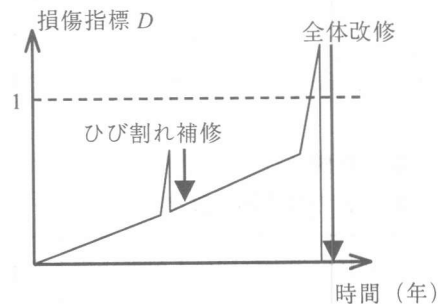


図-3 補修のモデル

2.4 修復経費のモデル

損傷指標を経費指標に変換する際は、同一建築の新規建設費用を1として修復経費を規準化し、補修可能損傷項の損傷指標に応じて修復経費が図-4 のようになると仮定した。ただし、損傷が累積し、損傷指標 D が1を越え崩壊に至る場合は、直前の損傷の程度に関わらず、修復経費指標を1とした。

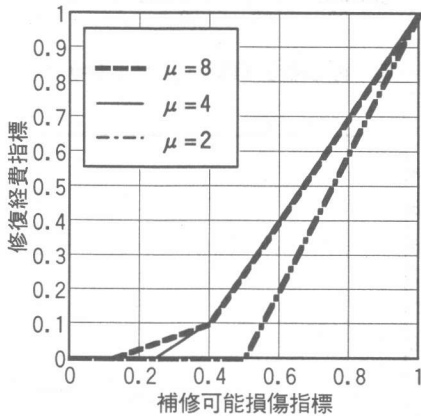


図-4 修復経費の仮定

3. 解析方法

3.1 入力地震動のシナリオ

本研究では、入力地震荷重に確率分布に基づく地震の地表最大加速度を用い、入力地震波に単一の地震波、神戸海洋気象台 1995(NS)を用いると仮定した。地震波の最大加速度に対する入力地震荷重データの最大加速度の比を倍率として乗じたものを入力地震動とした。

3.2 地震応答解析モデル

1 質点系バネモデルの非線型地震応答解析プログラム sdf を用いた。履歴モデルは *takeda* モデルを用いた。減衰定数 $h=0.02$ とした。建物固有周期は弾性剛性の $1/4$ とする割線剛性から求まると設定し、復元力特性と建物固有周期の関係を図-5 に示す。

建物の性質の違いが修復性とどのような関係になるかを見るため、終局塑性率 $\mu=8$ 、降伏

強度を重量の 30%とした靱性型建物、終局塑性率 $\mu=4$ 、降伏強度を重量の 44%とした中間型建物、終局塑性率 $\mu=2$ 、降伏強度を重量の 67%とした強度型建物を想定し、建物固有周期 $T=0.3(s)$ と $T=0.6(s)$ の場合について、解析を行った。

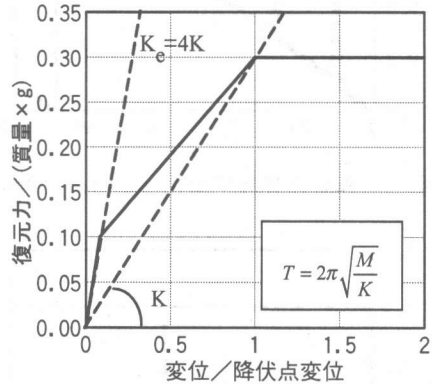


図-5 復元力特性と固有周期 ($\mu=8$ の例)

4. 結果

目標供用期間 100 年、建物固有周期 $T=0.3(s)$ とした場合の強度型、中間型、靱性型の損傷指標の経年変化を、図-6、図-7、図-8 に示す。塑性型の方が強度型より回数では多く補修を要しているが、強度型は一気に大きく壊れている。ただし、図-6、図-7、図-8 では、このような供用期間中の修復に対する建物の挙動の違いが表現されているに過ぎない。

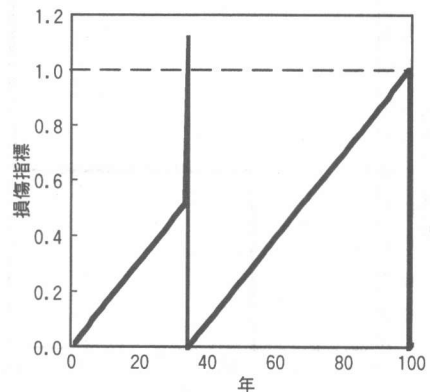


図-6 損傷指標経年変化 ($\mu=2$, $T=0.3(s)$)

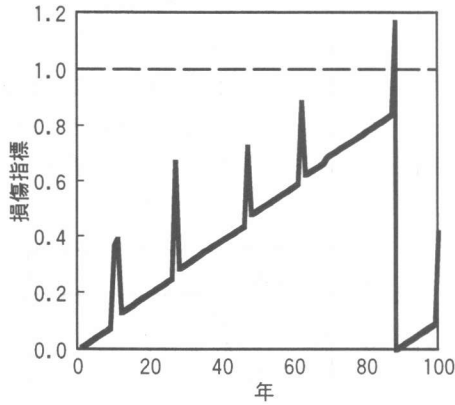


図-7 損傷指標経年変化 ($\mu=4$, $T=0.3(s)$)

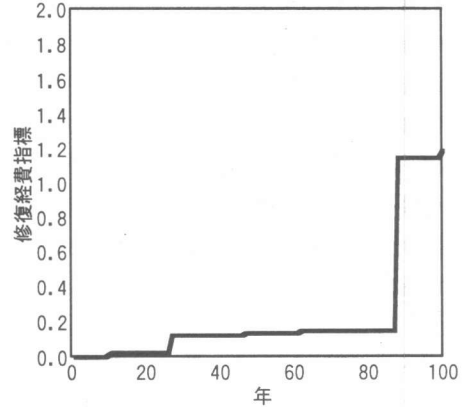


図-10 修復経費指標 ($\mu=4$, $T=0.3(s)$)

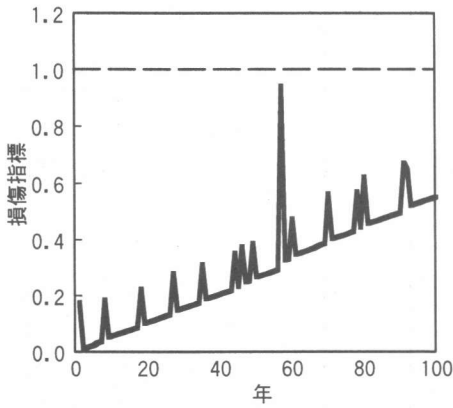


図-8 損傷指標経年変化 ($\mu=8$, $T=0.3(s)$)

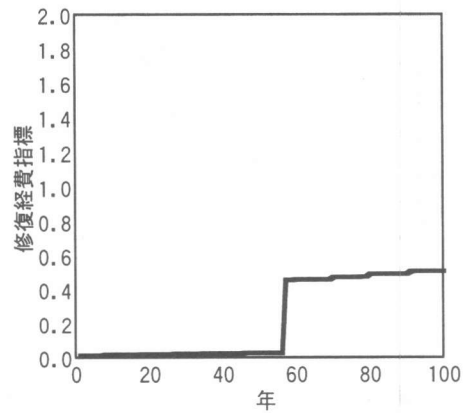


図-11 修復経費指標 ($\mu=8$, $T=0.3(s)$)

これを修復経費指標による表現にすると図-9, 図-10, 図-11 を得る. 修復経費指標値が供用期間を通して累積されている.

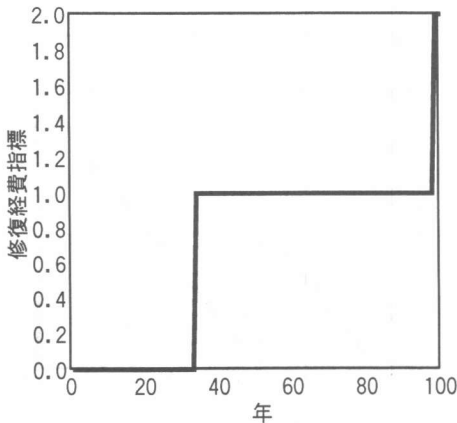


図-9 修復経費指標 ($\mu=2$, $T=0.3(s)$)

そこで, 目標供用期間中に計算された修復経費指標の累積値を「ライフサイクル修復経費指標」と呼ぶことにする. 例えば, 図-9 から図-11 まで示した, 建物固有周期 $T=0.3(s)$ の強度型, 中間型, 靱性型の建物を 100 年間使いつづける場合の「ライフサイクル修復経費指標」は, それぞれ強度型=2.00, 中間型=1.19, 靱性型=0.51, であるという結果が得られた. また, 同様に建物固有周期 $T=0.6(s)$ について目標供用期間 100 年の場合と 200 年の場合で解析を行い, それぞれの「ライフサイクル修復経費指標」の結果を表-1 にまとめた.

降伏強度と塑性率の関係から耐震安全性はほぼ等価と考えられる設定の強度型, 中間型, 靱性型のモデルを用いたが, 今回の検討では必ず

しも、強度型は「ライフサイクル修復経費指標」が小さいわけではなかった。

表-1 ライフサイクル修復経費指標

周期	年数	強度型	中間型	靱性型
T=0.3(s)	100	2.00	1.19	0.51
T=0.6(s)	100	0.29	0.07	0.11
T=0.6(s)	200	1.86	1.50	1.61

5. 考察

入力地震荷重の値は、同じ目標供用期間であれば確率式から同様のデータを導き出す。その際、例えば100年間で期待される最大加速度が1年目に起こるのも100年目に起こるのも確率的には同じである。100年最大加速度で損傷指標 D が1を越えてしまうような性能の建物の場合、確率的には1年目で崩壊しても100年目で崩壊しても同じことなのに、評価に際して損傷指標で判断すると、1年しか持たない建物と判断されたり、100年持つ建物と判断されたりすることになる。

そこで、確率的に得られた最大加速度のデータの発生順序が修復性の評価を恣意的にしてしまわないためにも、「ライフサイクル修復経費指標」で評価するのが良い。

地震最大加速度のデータの発生順序が異なるように設定した建物固有周期 $T=0.3(s)$ の場合の中間型のモデルについて3通りの解析例を示す。1つ目の例は、既に4章の図-7, 図-10に示してある。残りの2つは図-12から図-15に示す。損傷指標の経年変化のグラフからは、88年目に崩壊、83年目に崩壊、64年目に崩壊、とそれぞれ異なる結果が得られるだけで、ここから修復性を評価するのは難しい。しかし、「ライフサイクル修復経費指標」として100年目に予想される修復経費指標は3例ともほぼ同じで、順に1.19, 1.13, 1.13, である。ただし建物の崩壊後も続けて修復経費を計算していくなど、「ライフサイクル修復経費」の算出方法を含め、得られた結果には現実的でない部分も多く、今後十分な検討を要するものである。

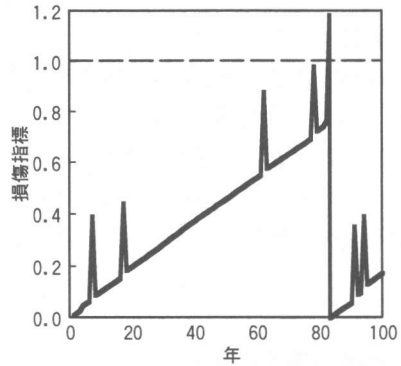


図-12 損傷指標経年変化 (中間型, 例②)

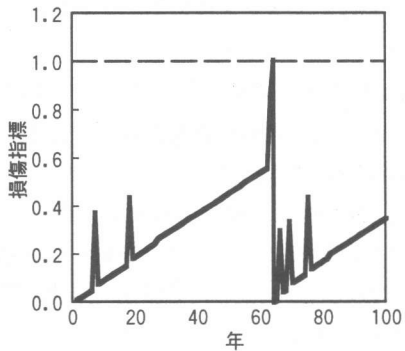


図-13 損傷指標経年変化 (中間型, 例③)

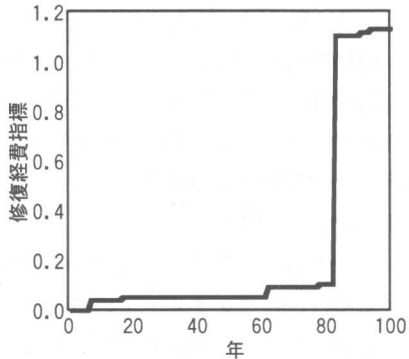


図-14 修復経費指標経年 (中間型, 例②)

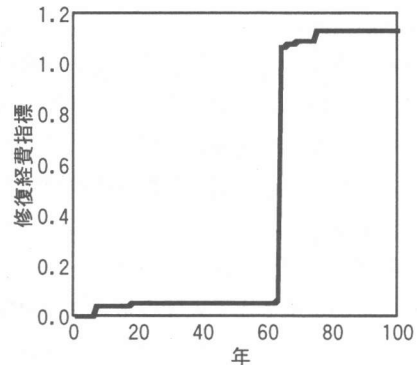


図-15 修復経費指標経年 (中間型, 例③)

6. 結論

設計段階で建物の供用期間を考慮して修復性を評価する方法を提案した。「ライフサイクル修復経費指標」という規準を設定することで、供用期間中の複数回の中小地震による損傷と修復の必要量の、実際の表現を試みることができた。

7. 将来の検討課題

将来の鉄筋コンクリート構造の修復性の評価システムは、大きく3つのステップから成り立つであろう。

[step 1]: 建物の供用期間中に発生する地震の、中小地震も含めた地震動の最大加速度発生時刻歴を設定する。

[step 2]: 建物を振動系にモデル化し、非線形地震応答解析により部材の経験する応力と変形を求める。これを用いて部材や非構造部材の損傷を算出する。

[step 3]: 得られた損傷に応じた補修方法を設定し、その際の補修費用と損傷を対応させる。必要な補修費用を建物すべてについて総和を求め修復経費指標を算出する。供用期間中の地震発生時刻歴に従った損傷応答から修復経費指標を積算し、最終的な累積値「ライフサイクル修復経費指標」を算出する。

それぞれの段階に必要な、モデルを十分に検討し、実際の鉄筋コンクリート構造物の修復に適合する適切なモデルや仮定を構築していかなければならないだろう。

今後の検討事項は、入力については、①「確率分布地震荷重」と「単一地震波」の組み合わせの方法、②仮定した確率分布に従う年最大加速度のモデルが中小地震の影響をどれだけ反映させているのか、③強震記録地震波の種類の影響などが挙げられる。

応答解析に関する検討事項については、現在1質点系バネモデルで実際の構造物の損傷を模擬しているのを、多質点系モデルに発展させ、最終的には実際の構造物を3Dでモデリングし

たもので評価できるようにすることが挙げられよう。そうすれば、具体的に個々の建築主のそれぞれの建物について個別的な評価が可能になるであろう。

解析結果の評価に関しては、本研究では構造材のみを対象に考えているが、実際の建物の修復においては、非構造材が修復性に大きく影響するので、これを踏まえた、より実情を精確に反映した修復性の評価システムの高度化を考えていかなければならないであろう。

参考文献

- 1)塩原等, 建築構造物の性能評価型設計法の実用化にむけて, 第2回アジアの建築国際交流シンポジウム論文集, 日本建築学会, pp. 143-148, 1998. 9.
- 2)宇佐美龍夫編著, 建築のための地震工学, 市ヶ谷出版社, 267 p., 1990. 3.
- 3)飯田汲事, 地震の余震体積, エネルギー密度の時間的变化, 特に東南海および三河地震の場合について, 地震, II-23, pp.321, 1970.
- 4)金井清, 基盤における地震動の最高速度振幅の期待値, 震研彙報, 46, pp.663, 1968.
- 5)日本建築学会, 建築物荷重指針・同解説, 日本建築学会, 1997. 7.
- 6)Park. Y. J. *et al.*: Damage-limiting aseismic design of buildings. *Earthquake Spectra*, 3,1, pp.1-26, 1987
- 7)Park. Y. J. and Ang A. M. -S. : Mechanistic seismic damage model of reinforced concrete. *American Society of Civil Engineers, Journal of Structural Engineering*, Vol. 111, No.1, pp.722-739, 1985