

論文 鉄筋コンクリート建築構造物の耐震修復経費算出を目的とした損傷評価

高橋 典之^{*1}・塩原 等^{*2}・小谷 俊介^{*3}

要旨：鉄筋コンクリート建築構造物の耐震修復性の評価手法として，ユーザーが目的に応じて補修の要否判断および補修工法を選択できるように，地震時の構造部材要素に生ずる損傷の種類および量を推定する損傷モデルを用いたライフサイクル耐震修復経費の算出方法を検討し，ライフサイクル耐震修復経費の試算を行なった。

キーワード：鉄筋コンクリート構造，ライフサイクル耐震修復経費指標，補修の要否判断

1. はじめに

建物の耐震修復性能を修復コストで評価する研究が試みられている¹⁾。しかし，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する損傷およびその累積を検討したものは少ない。本来の性能設計体系は，建物の用途，ライフサイクル，美観，その他諸条件を考慮して，ユーザーと技術者が建物の継続使用にあたり合理的な補修の要否判断を行うことが望ましい。今後，このようなユーザーによる意志決定を反映した耐震修復性能評価法が必要になると考えられる²⁾。

これまで，耐震修復性能の評価にあたり，補修の要否判断が異なる場合を考慮した例がないことから，本研究では，RC 構造物のライフサイクル耐震修復経費算出を目的とした，ユーザーによる補修の要否判断規準を定量的に表す損傷評価モデルを検討した。

2. ライフサイクル耐震修復性と補修

1995 年兵庫県南部地震コンクリート系建物被害調査報告書³⁾では，RC 建物の被災度別にその後の処置方法を追跡調査した結果がまとめられている（図 - 1）。同じ被災度でも，放置，補修，補強など，ユーザーの意志決定によって異

なる措置が取られている。特に，被災度が軽微な建物の半数以上，小破の建物の 35%が，被災後に特別な工事を施さない放置を選択している。一方，中破あるいは大破の建物で放置を選択している場合も 20～30%存在している。これらの建物の存在は，ユーザーによって補修の要否判断基準（以下，補修シナリオと呼ぶ）が異なることを表している。

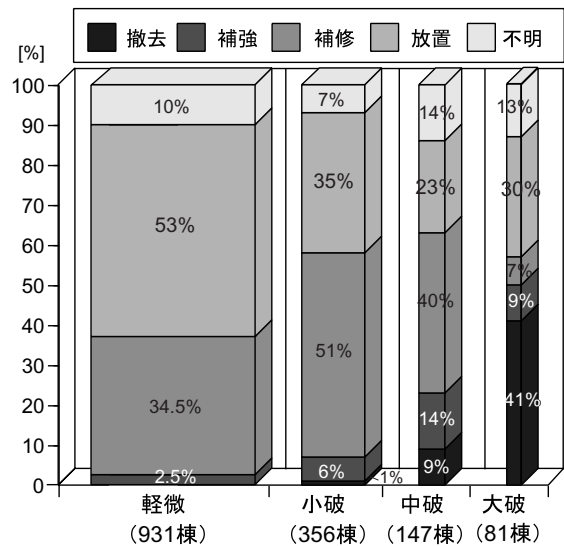


図 - 1 建物被災度とその後の処置

ユーザーが合理的な補修シナリオを選択できるようにするためには，複数回の中小地震で発生した軽微な損傷を補修せずに継続使用する場

*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）
 *3 東京大学大学院 工学系研究科 教授 工博 Ph.D（正会員）

合の不具合はどのようなもので、補修する場合に改善される建物の性能は何か、つまり補修の目的は何を改善するためなのかを明確しておく必要がある。

震災建築物の被災度区分判定基準⁴⁾では、部材の耐震性能低減係数 η を図-2の様に定義し、既往の実験による参考値として各部材の損傷度に対する部材の耐震性能低減係数 η の値を表-1のように設定している。各損傷度が想定している部材の損傷状態については表-2のようにまとめられており、補修のシナリオは、損傷度III以降は構造補修を要するとしている。つまり、安全性を満たさない建物に生じた損傷などの特別な場合を除いて、損傷度IIまでの軽微なひび割れについては、構造耐力上補修が必要な損傷ではないとしている。

損傷度III以上の損傷は構造上の安全性の観点から必ず補修が必要であると定め、損傷度II以下の損傷についてユーザーによる補修シナリオの選択を検討する。鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針⁵⁾では、地震で生じるひび割れについて、鉄筋と直角方向のひび割れの場合、長期的にみて鉄筋の腐食速度はひび割れ幅に依存せず、鉄筋の断面欠損が著しくない状態では外観上の老朽度が著しくても構造性能の低下は殆ど見られないとしている。一方、鉄筋と斜め方向あるいは材軸方向に入るひび割れの場合、鉄筋腐食による爆裂からかぶりコンクリートの剥落を引き起こす可能性が否定できないと指摘している。地震で生じたひび割れによる不具合は、構造上の問題よりも、防水性など機能性に対する不具合、美観上の不具合、ひび割れの入り方によっては耐久性の不具合が問題になり、補修の目的は、機能性・美観・耐久性の確保にあると考えられる。このように、補修のシナリオはその目的に応じて異なるものが用いられる可能性が充分にある。

3. 耐震修復経費指標の算出手順

筆者らは、既に耐震修復経費指標の算出方法

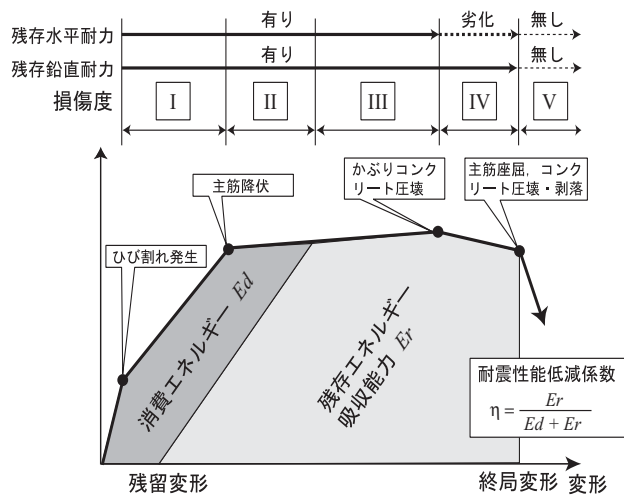


図-2 耐震性能低減係数 η の定義および概念

表-1 部材の耐震性能低減係数 η の参考値

損傷度	せん断柱	曲げ柱	柱なし壁	片側柱つき壁	両側柱つき壁
I	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
II	0.6	0.75	0.6	0.6	0.6
III	0.3	0.5	0.3	0.3	0.3
IV	0	0.1	0	0	0
V	0	0	0	0	0

表-2 各損傷度における損傷内容

損傷度	損傷内容
I	近寄らないと見えにくいひび割れ(幅0.2mm以下)
II	肉眼ではっきり見えるひび割れ(幅0.2~1mm程度)
III	比較的大きなひび割れ(幅1~2mm程度)が生じているが、コンクリートの剥落は極わずかである
IV	大きなひび割れ(幅2mmを超える)が多数生じ、コンクリートの剥落著しく、鉄筋がかなり露出
V	鉄筋が曲がり、内部のコンクリート崩れ落ち、一見して柱(耐力壁)の高さ方向や水平方向に変形が生じている。沈下や傾斜が見られる。鉄筋の破断が生じている場合もある。

を提案しているが⁶⁾、補修シナリオの考慮を新たに導入した方法をここに紹介する。

3.1 耐震修復性評価手順の各モデル

耐震修復性は、耐震修復経費指標の大きさと表現されるものとする。新しく建築される建築物の耐震修復経費指標の算出は、図-3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)補修の要否判断,(v)損傷-費用の関係のモデル,というプロセスを通じて算出する。

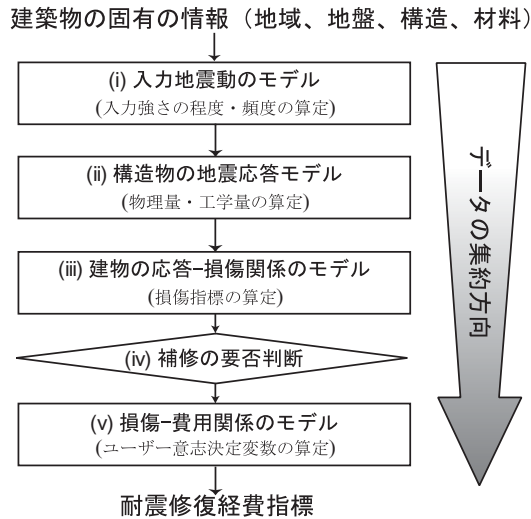


図 - 3 耐震修復経費指標算出プロセス

(1) 入力地震動のモデル

入力地震動については、建築物荷重指針・同解説⁷⁾の上下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、東京第種地盤の地表面最大速度を模擬して作成した(図-4)。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。

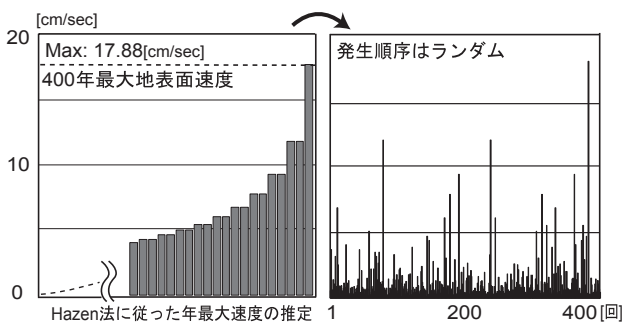


図 - 4 入力地震動最大速度の時刻歴

(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。復元力特性には Tri-linear 型を、履歴則には Takeda モデル⁸⁾を用いた。標準

的な構造部材の特性が反映される建物を想定し、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0.001倍とした。また、補修せずに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、補修する場合は、構造物の性能を元に戻すと仮定した。

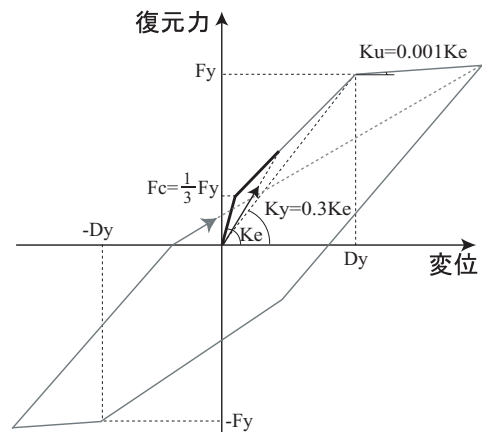


図 - 5 復元力特性と履歴のモデル

(3) 建物の応答-損傷関係のモデル

建物の損傷を応答時刻歴と関係付けるために、履歴エネルギーの消費を考慮した Park & Ang の損傷モデル⁹⁾を採用した。

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

ここに、 D : 損傷指標、 δ_M : 地震時最大変形、 δ_u : 単調載荷時限界変形、 Q_y : 降伏強度、 β : 正の定数0.05、 dE : 履歴エネルギー吸収増分。損傷指標 D が1を超えると崩壊する。

(4) 補修のモデル

補修のシナリオを3種類仮定した。はじめに、地震発生後の損傷が損傷度I以上に相当する場合(変形がひび割れ点を超えた状態)に、主に防水性などの機能性を確保する目的で補修するモデル。次に、地震発生後の損傷が損傷度II以上に相当する場合(変形が降伏点を超えた状態)に、主に耐久性・美観を確保する目的で補修するモデル。最後に、地震発生後の損傷が損傷度III以上に相当する場合(コンクリートの剥落が

始まる状態)に、主に構造物の安全性を確保する目的で補修するモデルを検討した。

損傷指標と補修の関係は、式(1)の第1項をコンクリートのひび割れ等の補修で減らすことのできる損傷 D_R とし、第2項を鉄筋の疲労等の累積損傷と想定した。損傷指標 D_R は補修後ゼロに戻るものとし、累積損傷は損傷指標 D が1を超えたときに補修してゼロに戻るとした。

(5) 損傷 - 費用関係のモデル

本来修復費用は、損傷状態に応じた補修工法の選択および補修工法に応じた修復費用単価から具体的に算出されるものである。しかし、損傷指標値 D が同じでも部材特性によって具体的な損傷状態は異なると考えられるため、損傷指標と修復費用の関係に簡単なモデルを導入し、部材特性及び補修方法の違いを表すものとした。修復費用を建設初期費用で除して規準化し、損傷度 I の損傷から補修シナリオを考慮できるように、ひび割れ点を超えた損傷から修復経費を想定した。具体的には、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、修復経費指標 R を図 - 6 のように仮定した。なお、損傷指標 D が1を超えた場合は修復経費指標 R を1とした。

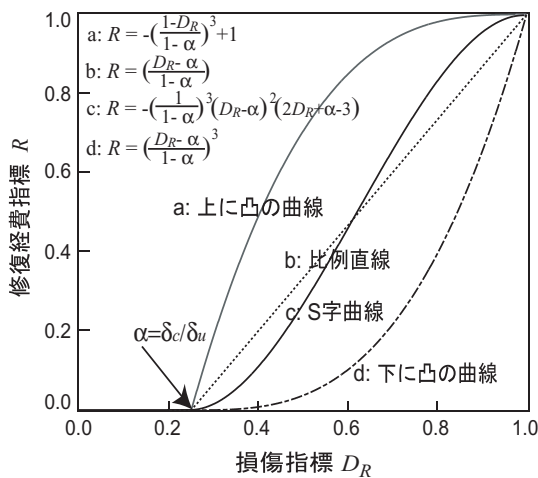


図 - 6 損傷 - 費用関数モデル

3.2 解析パラメータ

1 自由度振動系の弾性固有周期は 0.3 秒とした。ベースシア係数を 0.1 倍から 0.65 倍まで 0.05

刻みの 12 通り、終局塑性率 μ を 2 から 12 まで 1 刻みの 11 通りとした。

4. 補修モデルのための損傷評価

耐震修復経費指標算出手順における補修のモデルにおいて、主に耐久性・美観の確保のために補修する場合と、構造安全性確保のために補修が必要な場合とを分ける境界が、損傷度 II と損傷度 III の間にあると考える。損傷度 II と損傷度 III の具体的な損傷状態の違いは、表 - 2 より、損傷度 III から、ひび割れの他にコンクリートの剥落が生じる点にある。この損傷度 II と損傷度 III の境界は、Park の損傷指標からは判断できないので、耐震性能低減係数 η を用いると、表 - 1 より、曲げ柱で 0.75 から 0.5 の間、その他の部材で 0.6 から 0.3 の間にあると考えられるが、具体的な境界値はわからない。

田原は¹⁾、ひび割れと表面欠損とを分離した損傷指標を提案している。ひび割れについては部材表面での単位面積あたりのひび割れ長さを表す「ひび割れ率」で、表面欠損については部材表面での単位面積あたりの欠損面積を表す「欠損率」で損傷量を指標化している。ひび割れ率の傾きを θ_{Cr} 、ひび割れ率の上限を Cr_{max} 、欠損率が増加をはじめる塑性率を D_{Dr0} 、欠損率の増加部分の傾きを θ_{Dr} として、以下のように評価式を示している (図 - 7)。

$$\theta_{Cr} = 0.993\gamma(1+0.214p_w \times 100) - 0.867 \quad (2)$$

$$Cr_{max} = 1.49\gamma(1+0.525p_t \times 100) - 1.24 \quad (3)$$

$$D_{Dr0} = \frac{Cr_{max}}{\theta_{Cr}} \quad (4)$$

$$\theta_{Dr} = 0.0686\gamma(1+0.688p_w \times 100) - 0.0672 \quad (5)$$

ここに、 γ : 曲げ強度とせん断強度の比 Q_{mu}/Q_{su} 、 p_t : 引張鉄筋比、 p_w : せん断補強筋比とする。

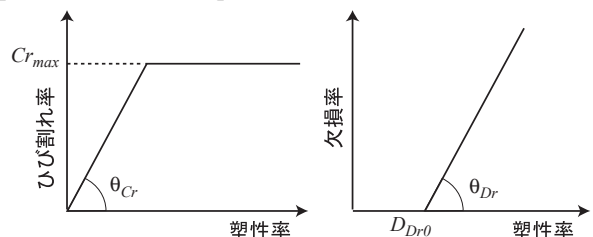


図 - 7 塑性率と損傷量の関係のモデル

田原の評価式を用いると、ひび割れ量が増加する損傷状態 II とコンクリートの剥落が増加する損傷状態 III の境界にあたるコンクリートの剥落の開始点が塑性率 D_{Dr0} で表されることがわかる。しかし、本報の耐震修復経費指標算出過程においては、部材特性に応じて適切な塑性率 D_{Dr0} を求めるために必要な情報 (γ : 曲げ強度とせん断強度の比 Q_{mu}/Q_{su} , p_t : 引張鉄筋比, p_w : せん断補強筋比) を用いていないため、そのままでは損傷度 II と損傷度 III の境界を表す具体的な数値を求められない。そこで、塑性率 D_{Dr0} を耐震性能低減係数 η に換算するとどれくらいの数値になるのかを簡単に推測する。

文献 10) の WS シリーズ柱試験体の実験結果から、田原の評価式に基づき塑性率 D_{Dr0} を算出し、各試験体の記録されている最終破壊状況の塑性率を終局塑性率 μ_u と仮定した。図 - 5 で示した復元力特性に従い、終局塑性率 μ_u に対して応答が塑性率 D_{Dr0} に到達した場合の残存エネルギー吸収能力から、耐震性能低減係数 η を算定した (表 - 3)。

塑性率 D_{Dr0} から耐震性能低減係数 η への換算が大まかな仮定に基づいているため、正確な値は実際にはわからないが、損傷度 II と損傷度 III の境界を表す耐震性能低減係数 η の値として表 - 3 で算出された η の平均値 0.6 を、構造安全性確保のための補修が必要となる損傷の境界値として採用することとした。ただし、建物を 1 自

由度振動系ではなく各部材の情報に基づき架構として地震応答解析を行う場合には、上記のような換算をせずに、田原の評価式のような損傷状態の遷移を表現できる損傷指標を各部材に直接適用することが望ましい。

5. 耐震修復経費指標算出結果

算出された耐震修復経費指標を供用期間年 (地震発生回数と同じ 400 年を仮定) で除した一年あたりの耐震修復経費指標値を年耐震修復経費指標とする。年耐震修復経費指標は、新規建設費用を乗じることで一年あたりの耐震修復経費の期待値が求まるので、保険料率の算定などに役立つと考えて用いることにした。縦軸をベースシア係数、横軸を終局塑性率とし、4 つの強震記録による年耐震修復経費指標の平均値から求めた等高線を図 - 8 に示した。等高線は、格子点上における年耐震修復経費指標の計算値を補間して求めた。

損傷度 I から補修する補修シナリオでは、建物の靱性が上がると修復経費が減少し、損傷 - 費用関係モデルによる差が大きい。一方、損傷度 III から補修する補修シナリオでは、建物の靱性が上がっても修復経費は殆ど減少せず、損傷 - 費用関係モデルの違いによる差も殆ど見られない。また、損傷 - 費用関係モデルに (a) 上に凸の曲線、(b) 比例直線を用いた場合、損傷度 I から補修する補修シナリオの耐震修復経費指標

表 - 3 塑性率 D_{Dr0} と耐震性能低減係数 η の推定

試験体名	b (cm)	D (cm)	F _c (kg/cm ²)	N/bD (kg/cm ²)	主筋		せん断補強筋		Q _{mu} (kN)	Q _{su} (kN)	D _{Dr0}	μ _u	η
					p _t (%)		p _w (%)						
WS1B	25	25	273.6	52.5	0.34	6-D10	1.24	2-D10@46	192.8	200.6	1.31	4	0.87
WS3B	25	25	273.6	26.25	0.34	6-D10	0.36	2-D6@71	135.5	148.7	3.34	8	0.70
WS2A0.33	25	25	273.6	70	0.34	6-D10	0.76	2-D6@33	111.1	129.1	2.14	4	0.67
WS2B0.33	25	25	273.6	70	0.34	6-D10	0.38	2-D6@67	111.1	109.8	2.44	6	0.74
WS2A	25	25	273.6	52.5	0.34	6-D10	0.57	2-D6@45	96.3	116.0	3.76	4	0.26
WS2B	25	25	273.6	52.5	0.34	6-D10	0.28	2-D6@91	96.3	99.6	3.03	4	0.45
WS5B0.25	25	25	273.6	52.5	0.61	6-D13	2.42	2-D13@42	257.8	257.8	1.14	4	0.91
WS5B	25	25	273.6	26.25	0.61	6-D13	1.14	2-D10@50	200.6	201.0	1.98	4	0.71
WS6A0.33	25	25	273.6	70	0.61	6-D13	1.51	2-D10@38	143.1	167.2	1.72	4	0.77
WS6A0.25	25	25	273.6	52.5	0.61	6-D13	1.14	2-D10@50	128.9	150.8	2.34	4	0.62
WS6B0.25	25	25	273.6	52.5	0.61	6-D13	0.57	2-D10@45	128.9	124.6	2.78	6	0.69
WS6B	25	25	273.6	26.25	0.61	6-D13	0.26	2-D6@100	100.3	99.8	3.95	4	0.21
WS7A0.33	25	25	273.6	70	0.96	6-D16	2.26	2-D13@45	166.6	203.3	1.75	4	0.77
WS7B	25	25	273.6	52.5	0.96	6-D16	0.83	2-D10@67	151.8	147.2	3.16	4	0.42
WS8B	25	25	273.6	26.25	0.96	6-D16	0.46	2-D6@56	123.2	119.1	4.12	4	0.17

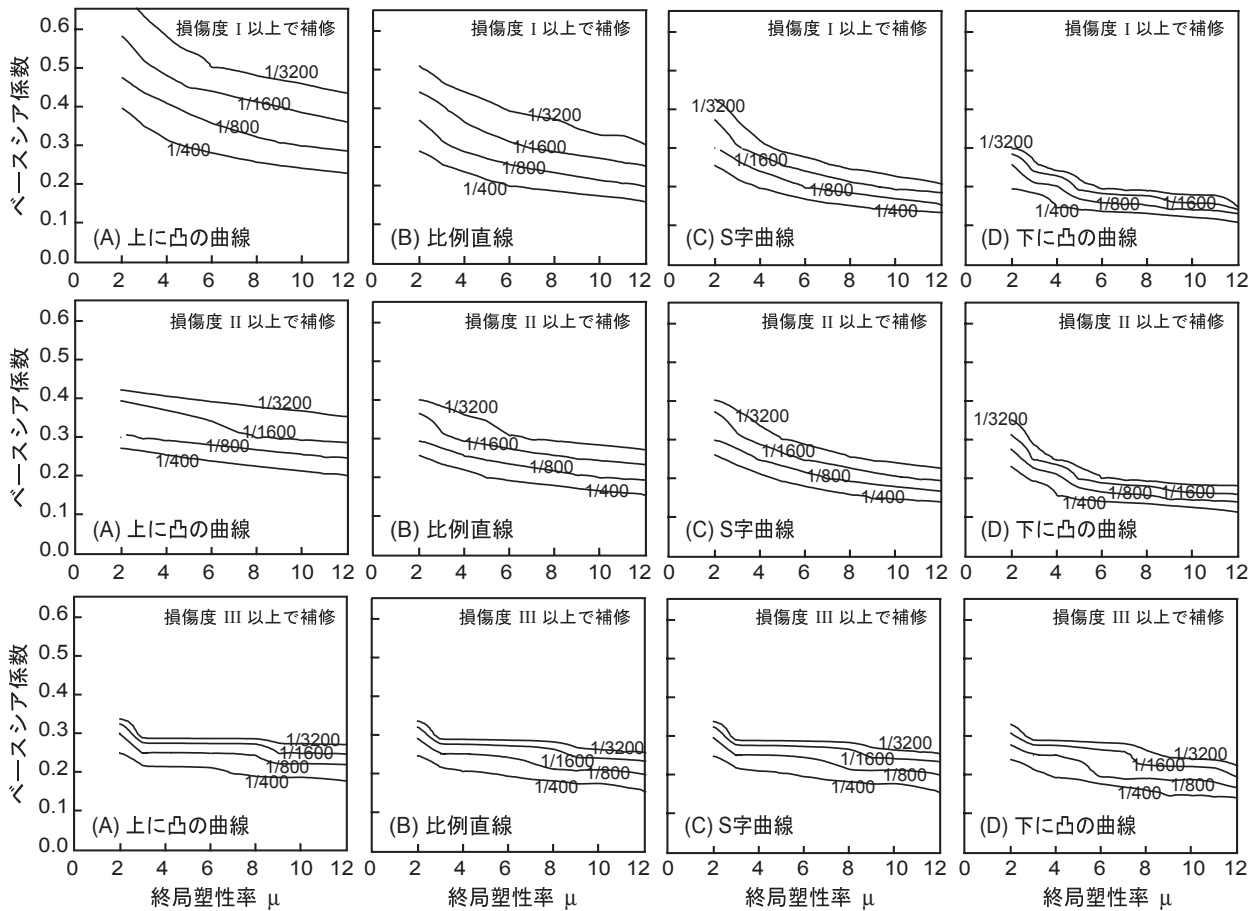


図 - 8 年耐震修復経費指標の等高線表示

値を等しくする必要強度は他の補修シナリオよりも高く、損傷度 III から補修する補修シナリオの必要強度は低くなる。一方、損傷 - 費用関係モデルに(c)S字曲線を用いた靱性がある建物の場合、および、(d)下に凸の曲線を用いた場合では、損傷度 III から補修する補修シナリオの必要強度が高く、損傷度 I から補修する補修シナリオの必要強度が低くなった。

6. まとめ

RC 建築構造物の耐震修復性評価において、ユーザーが合理的に補修シナリオを選択できるように、地震時に生ずる損傷の種類および量を推定するモデルを検討し、ライフサイクル耐震修復経費を試算した。本研究で用いたモデルを前提とした場合、僅かな損傷の補修にかかる費用が小さい構造では損傷度 I から補修し、僅かな損傷の補修にかかる費用が大きな構造では損傷度 III まで放置するほうが、耐震修復性が良

くなった。今後の課題として、残存耐力だけでなく具体的な損傷状態が推定できる損傷指標を精確なモデルにより検討する必要がある。

参考文献

- 1) 田原慎一朗：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) 赤石沢総光，吉田郁政，佐藤博，鈴木修一，荒川武久：地震リスクを考慮した杭基礎構造物の耐震補強に関する意志決定支援，第 11 回日本地震工学シンポジウム講演論文集，pp.2107-2112，2002.11.
- 3) 日本建築学会近畿支部鉄筋コンクリート構造部会：1995 年兵庫県南部地震コンクリート系建物被害調査報告書，日本建築学会，1996.7.
- 4) 日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針，日本建築防災協会，2001.9.
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針（案）・同解説，日本建築学会，1997.1.
- 6) 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.
- 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) 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.
- 10) 吉岡研三：鉄筋コンクリート柱の強度と変形能，東京大学学位論文，1978.4.