

論文 鉄筋コンクリート造建築物の長期的耐震修復経費に基づく要求スペクトル表示

高橋 典之^{*1}・中埜 良昭^{*2}・塩原 等^{*3}

要旨：本論文では，一自由度系に縮約できる鉄筋コンクリート造建築構造物の供用期間を通じた耐震修復経費の期待値に基づき，構造物に要求される耐力と変形能の関係を要求スペクトルとして表示する方法を提案した。また，要求スペクトルを用いて，目標とする耐震修復性能を有する構造物に必要な構造特性を推定する手法について検討を行った。

キーワード：鉄筋コンクリート構造，耐震修復経費，要求スペクトル

1. はじめに

地震多発地域における建築物は，供用期間中に複数回の地震を経験する。現行の耐震設計法に従う建築物は，地震時の塑性変形に伴う損傷を許容する設計となっており，供用期間中に地震損傷が複数回生じる可能性がある。そのような建築物の目標供用期間を全うするには，供用期間中に発生した損傷を修復しながら建築物を使い続けることになる。特に，兵庫県南部地震以降，地震損傷の修復にかかるランニングコストを意識した耐震設計が一般の建築主・ユーザーから求められるようになり¹⁾，建築物の性能を明示する性能設計法の考え方を耐震設計法に導入すべく，建築物の耐震修復性能を評価する方法が検討されてきた。

しかし，現在検討されている性能評価型の耐震設計法は²⁾，設計された建物について所定の性能を満たしているか否かの確認を行い，性能が満たされていない場合，設計段階に手戻りして性能評価を繰り返すことになり，所定の性能を得るための予備設計方法が示されているわけではない。次世代型の性能設計法では，所定の性能を直接的に設計に反映できるような手法の開発が求められる³⁾。

そこで本研究では，構造物を簡単な1自由度

系と見なせる整形な鉄筋コンクリート建物について，供用期間を通じた耐震修復経費を推定するパラメトリックスタディを行い，予備設計を念頭に置いた耐震修復性能評価結果の表示方法について検討を行った。

2. 供用期間を通じた耐震修復性能の評価手法

2.1 耐震修復経費指標の算出手順

筆者らが提案している耐震修復経費指標⁴⁾は，供用期間中に発生が予想される複数の地震動のレベルと頻度を統合的に考慮した「ライフサイクル入力地震動」⁵⁾と，地震動ごとに算出される損傷程度に応じた補修の要否判断および損傷の累積をモデル化した「補修シナリオ」⁶⁾を用いて算出する，初期建設費用あるいは建替え費用に対する耐震修復経費の比を表す無次元数であり，耐震修復性能の直接的な表示方法のひとつと考えている。以下に，耐震修復経費指標の算出方法の概略を簡単に説明する。

耐震修復経費指標は，図-1に示したフローに従って，建築物の固有の情報に基づき，(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，という過程を通じて算出されるものとする。

*1 東京大学生産技術研究所 助手 博士(工学)(正会員)

*2 東京大学生産技術研究所 教授 工博(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)

2.2 入力地震動のモデル

地震動強さの上下限值が定められている上下限を有する極値分布⁷⁾により得られた東京第種地盤の地表面最大速度と再現期間との関係を用いて(図-2), 供用期間中に生じる地震動の大きさおよび発生確率を考慮するライフサイクル入力地震動シナリオを作成した。

ライフサイクル入力地震動シナリオは, 供用期間を通じた地震の年非超過度数セットを仮定し, 各年非超過度数に応じた地震動強さを地震ハザード曲線(図-2(1)式)から求めることで, 供用期間中に予想される大きさ・頻度の異なる複数回の地震動強さの組合せに置き換えたものである。

年非超過度数のセットは, Hazen のプロットング・ポジション公式⁸⁾を用いて,

$$F(x_i) = 1 - \frac{i - \alpha}{N + 1 - 2\alpha} \quad (2)$$

と表されるものとする。ここに, N : 観測値総数, i : 観測値を降順に並べ替えたときの順番, x_i : i 番目の観測値, $F(x_i)$: 非超過確率である。(2)式の年非超過度数をもつ地震動の発生が, 定常更新過程であるポアソン過程に従うものと仮定すると, (2)式の α は,

$$\alpha = \frac{(N + 1) \ln(1 - P(i)) + iT}{2 \ln(1 - P(i)) + T} \quad (3)$$

と表される。ここに, $P(i)$: 降順 i 番目の観測値の T 年超過確率である。(3)式を(2)式に代入したプロットングポジション公式によって, 「降順 i 番目の観測値の T 年超過確率が $100P(i)\%$ となる地震動を含む N 個の地震動年非超過度数群」を得る。

本研究では, ライフサイクル入力地震動シナリオとして 50 年超過確率が 10%(再現期間 475 年)となる地震動強さを最大とする 50 個の地震動年非超過度数群を作成し, 既往の研究により耐震修復性能評価に与える影響が支配的であると考える上位 4 組の地震動強さを選び⁹⁾, 東京第種地盤の地表面最大速度セットのシナリオとした(図-3)。

建築物の固有の情報(地域、地盤、構造、材料)

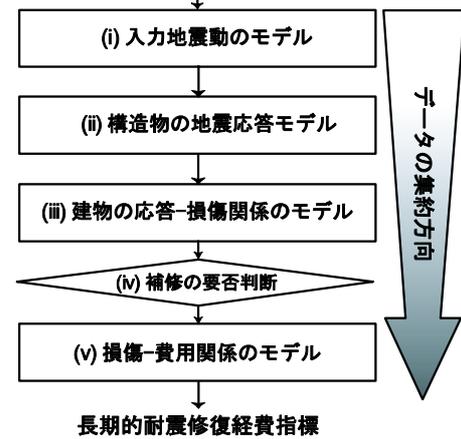


図-1 耐震修復経費指標算出過程

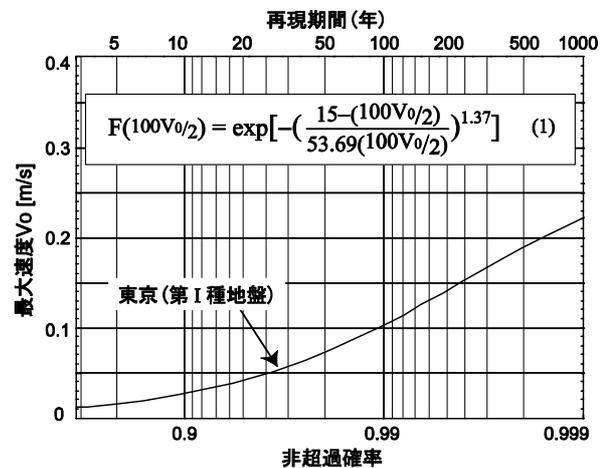


図-2 地震ハザード曲線の例

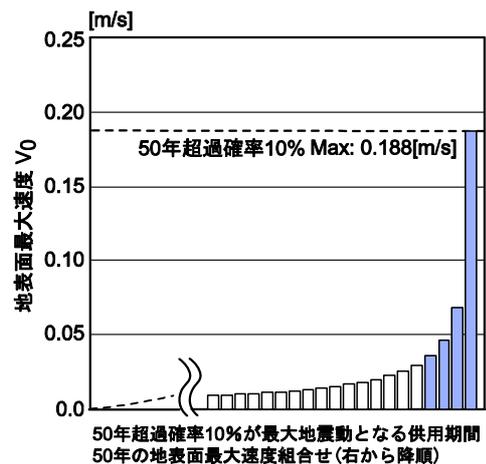


図-3 最大速度の組合せ(降順)推定例

図-3のライフサイクル入力地震動シナリオに基づき, 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たものを入力

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)。

2.3 構造物の地震応答モデル

対象建築構造物が 1 自由度振動系に見なせるものとして非線形地震応答解析を行なった。系の復元力特性に Tri-linear 型，履歴則に Takeda モデル¹⁰⁾を用いた。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 (図 - 5)。

2.4 損傷モデル

構造物の損傷は，履歴エネルギーの吸収を考慮した Park & Ang の損傷モデルを用いた¹¹⁾。

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

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 ：正の定数 (0.05)， dE ：履歴エネルギー吸収増分である。損傷指標 D が 1 を超えると大破・崩壊とみなした。

2.5 補修のモデル

補修のモデルには，文献 6)で提案した補修シナリオのうち，構造物の最大経験変位が降伏点を超えると補修するシナリオ (補修シナリオ II と呼ぶ) を用いた (図 - 6)。本論文では構造物を 1 自由度系とみなしているが，これが全体崩壊系の架構を仮定している場合，主筋が降伏して変形が増大する状態に至ってから補修する「補修シナリオ II」が意味するところは，補修が技術的に難しい梁端ヒンジ箇所の損傷が伸展する間は補修工事に踏み切らず，柱に損傷が生じた段階で補修工事に踏み切るシナリオであると考えられる。

ここで，最大経験変位に依存する(4)式の第 1 項を，ひび割れなどの補修される損傷 D_R と仮定し，履歴吸収エネルギーに依存する(4)式の第 2 項を鉄筋のサイクル疲労などの補修されない

累積損傷 D_E と仮定し，補修される損傷指標 D_R は補修後ゼロに戻し，累積損傷 D_E は損傷指標 D が 1 を超えるまで累積され， D が 1 を超えた場合は構造物の建替えに相当する修復により全ての損傷指標がゼロに戻るものとした。また，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，補修後は復

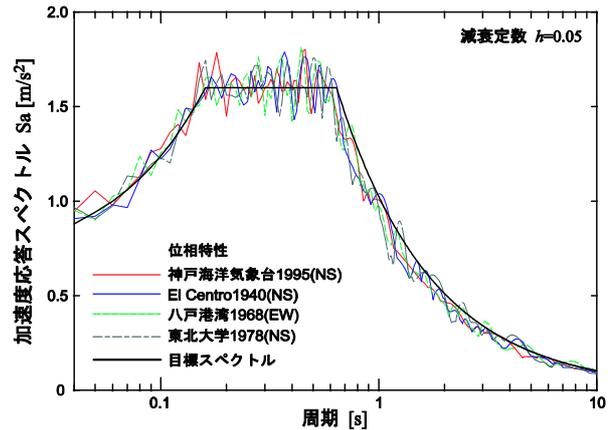


図 - 4 模擬地震動の加速度応答スペクトル

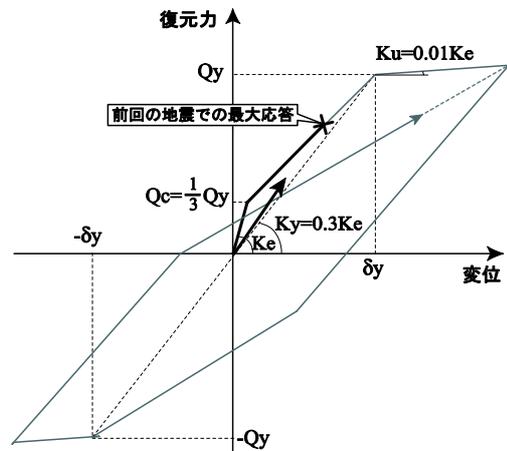


図 - 5 復元力特性

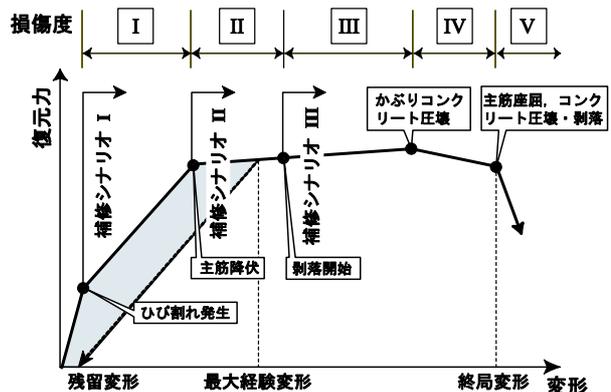


図 - 6 補修シナリオの概念図^{2), 6)}

元力特性を初期状態に戻すものと仮定した。ただし実際の補修では、耐力を初期状態に近づけることが出来ても、剛性も併せて初期状態に戻すことは難しく、この仮定はあくまでも理想化されたモデルであることを付記しておく。

2.6 修復費用モデル

修復費用を新築費用あるいは建替え費用で除して規準化した無次元数を耐震修復経費指標 R と定義した。ひび割れ前の耐震修復経費指標 R をゼロと仮定し、ひび割れ点以降は、ひび割れ点到達時の損傷指標 D_R を γ と置くと、補修される損傷指標 D_R ($\gamma < D_R < 1$) に対する修復経費指標 R の関係が図 - 7 に示したような簡単な式で表わされるものと仮定した。また、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 と仮定した。このとき、仮定した修復費用モデルが実際の補修工事単価から求められる修復費

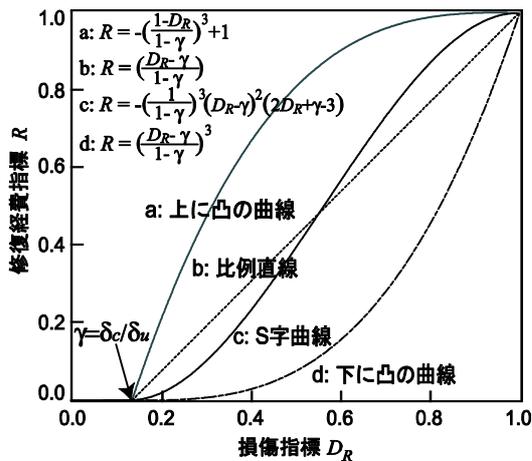


図 - 7 損傷 - 修復費用関数モデル

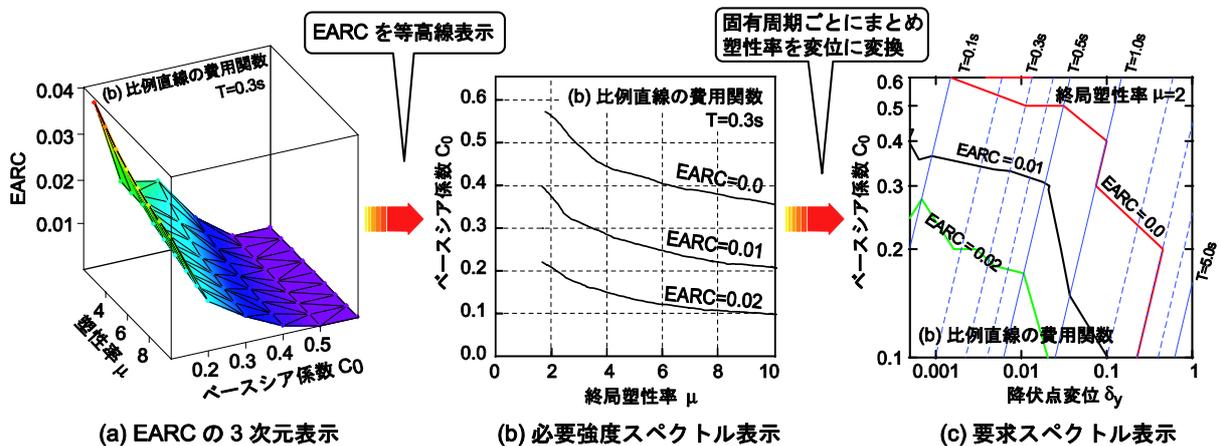


図 - 8 耐震修復経費指標を要求スペクトルに変換する概念図 (地震動シナリオ固定)

用関数¹²⁾を模擬していることが望ましい。

2.7 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 の総和であるライフサイクル耐震修復経費指標値を供用期間年数 N で除した値を年耐震修復経費指標 $EARC$ (Expected value of Annual Repairing Cost index) と定義する。ただし本論文では、供用期間 50 年の経年劣化で耐震性能が低下する(中性化がかぶり厚を超えて進行する)ような建物は想定していない。また、経年劣化による資産価値の低下について割引率を仮定していない。

3. 解析パラメータ

1 自由度振動系の降伏点割線剛性から求められる固有周期を 0.05 秒, 0.1 秒, 0.3 秒, 0.5 秒, 1.0 秒, 3.0 秒, 5.0 秒とパラメトリックに増大させ、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 1 から 10 まで 1 刻みの 10 通り設定した。

また、設定した構造パラメータに対して年耐震修復経費指標 $EARC$ を求めるにあたっては、入力地震動の発生順序全順列 (4! = 24 通り) に対して、模擬地震動の位相特性 4 通りを各々検討し、全ての算出結果の平均をとることとした。

4. 解析結果

4.1 耐震修復経費指標の要求スペクトル表示

各解析パラメータに対応する年耐震修復経費

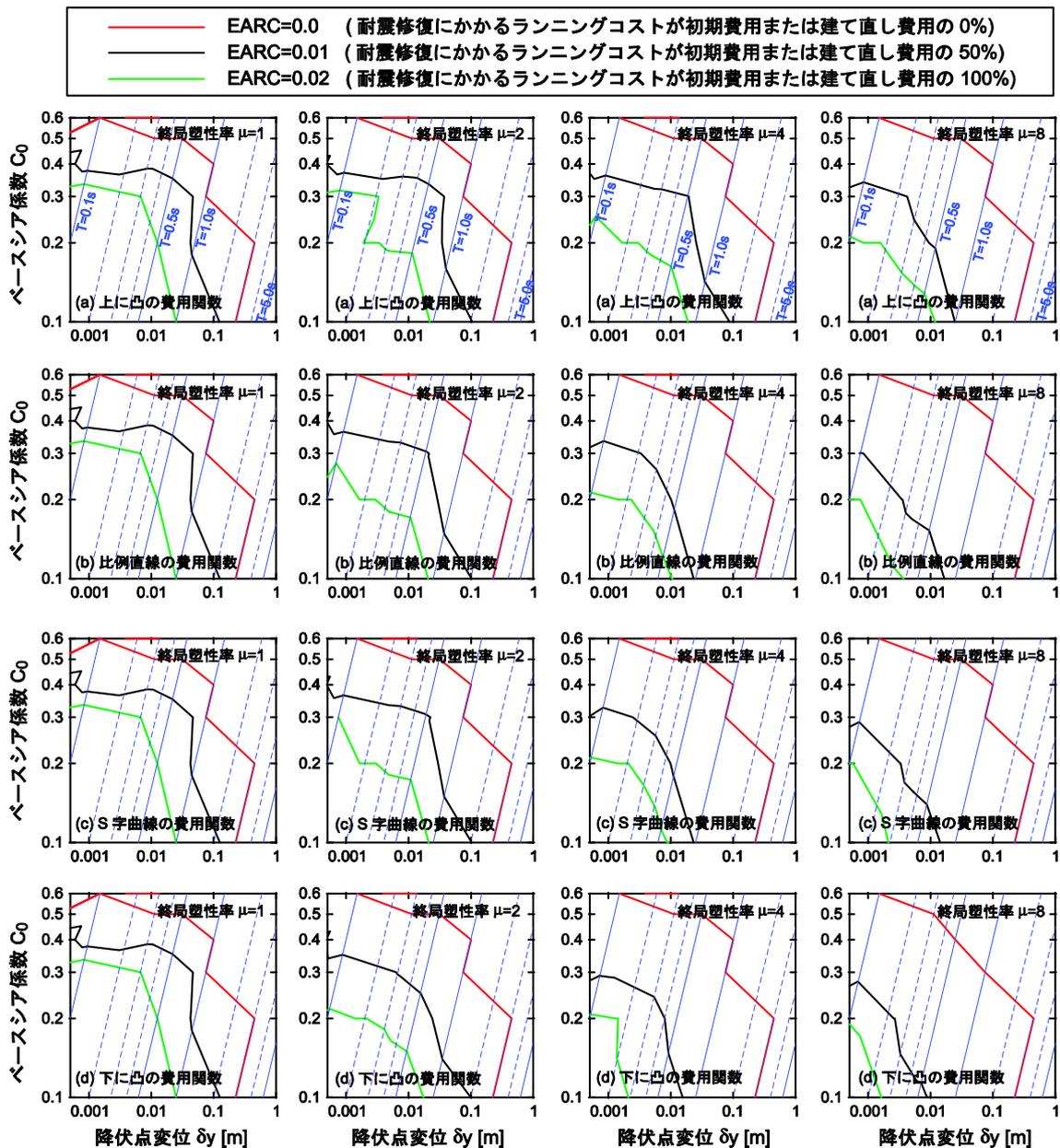


図 - 9 耐震修復経費指標に基づく要求スペクトル表示例

指標 $EARC$ の算出結果から、水平縦軸にベースシア係数 C_0 を、水平横軸に終局塑性率 μ をとり、鉛直軸に年耐震修復経費指標 $EARC$ をとった 3 次元のグラフが描ける (図 - 8(a))。このグラフは、年耐震修復経費指標 $EARC$ の等高線を水平面上に投影することで必要強度スペクトル表示に変換できる (図 - 8(b))。ここで終局塑性率 μ を一意に定めると、1 自由度振動系の固有周期ごとに算出された年耐震修復経費指標 $EARC$ に対して、水平縦軸をベースシア係数 C_0 、水平横軸を降伏点変位 δ_y とした同様の等高線が描かれる (図 - 8(c))。本論文ではこれを年耐震修復経

費指標 $EARC$ の要求スペクトル表示と呼ぶことにする。

図 - 9 は、50 年超過確率 10% の地震動を最大地震動とするライフサイクル入力地震動シナリオに対して計算された要求スペクトルを終局塑性率 μ および損傷 - 修復費用関数モデル別に示した図である。ここで、 $EARC=0.0$ の等高線は、設定した入力地震動シナリオに対して修復を必要としない (即ち使用限界状態にある) グレードの建物の変形能に応じた必要強度の関係を表している。また $EARC=0.01$ の等高線は、設定した入力地震動シナリオに対して、供用期間を

通じた耐震修復費用が初期費用あるいは建直し費用の 50%となるグレードの建物の変形能に応じた必要強度の関数を表している。さらに、 $EARC=0.02$ の等高線は、設定した入力地震動シナリオに対して、供用期間を通じた耐震修復費用が初期費用あるいは建直し費用と同等となるグレードの建物の変形能に応じた必要強度の関数を表している。ただし、ライフサイクル地震動に対する耐震修復費用が初期費用あるいは建直し費用と同等となることと、1 回の入力地震動に対して耐震修復費用が初期費用あるいは建直し費用と同等となること（即ち安全限界状態となること）は必ずしも同義ではない点に注意が必要である。

図 - 9 より、本論文の補修シナリオでは、終局塑性率 μ が 1 だと修復費用関数モデルによる違いは生じず、終局塑性率 μ が大きくなるにつれ費用関数モデルによる影響が大きくなる。これは、塑性化した後の損傷伸展域が長いほど修復費用関数の設定が結果に大きな影響を与えることを意味している。また、 $EARC=0.0$ の等高線では終局塑性率 μ による差が殆ど認められないが、 $EARC$ が大きくなるにつれ終局塑性率 μ による等高線位置の差が明確になる。これは、建物の靱性能が使用性能に殆ど影響しない一方、耐震修復性能および安全性能に影響することが定量的に表れた結果と言える。

4.2 要求スペクトルによる必要強度の推定

図 - 10 は、耐震性能設計にむけた予備設計において、要求スペクトル表示を用いる方法を概

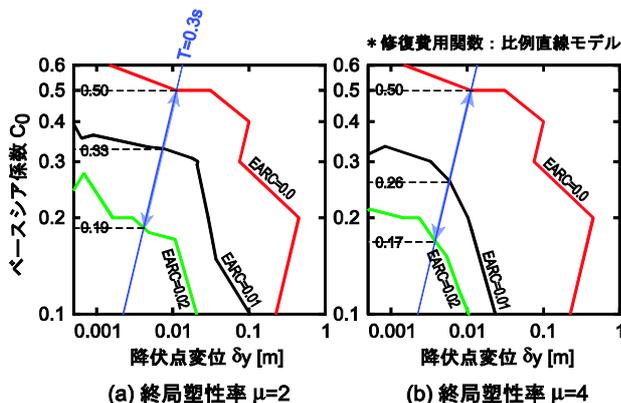


図 - 10 要求スペクトルの使用例

念的に表したものである。図 - 10 では、損傷費用関数が比例直線でモデル化され、固有周期が 0.3 秒、終局塑性率が $\mu=2$ および $\mu=4$ となる建物を例に、目的の耐震修復性能を有する構造物のベースシア係数 C_0 を推定することが出来る。例えば、供用期間を通じた耐震修復費用が初期費用あるいは建直し費用の 50%となるグレードの建物を作るには、固有周期が 0.3 秒で終局塑性率 $\mu=2$ の建物の場合はベースシア係数 C_0 が 0.33、終局塑性率 $\mu=4$ の建物の場合はベースシア係数 C_0 が 0.26 必要であることが分かる。

5. まとめ

鉄筋コンクリート建築構造物の供用期間を通じた耐震修復経費指標を用いて、構造物に要求される変形能と耐力の関係を要求スペクトルとして表示し、目標の耐震修復性能を有する構造物に必要な構造特性を推定する手法について提案した。

参考文献

- 1) 福山洋：技術基準における性能目標と限界状態の現状，日本地震工学会 性能規定型耐震設計法 性能目標と限界状態はいかにあるべきか 平成 16 年度報告書，日本地震工学会，pp.13-24，2005.3.
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物耐震性能評価指針（案）・同解説，日本建築学会，2004.1.
- 3) R. Hamburger, C. Rojan, J. Moehle, C. Comartin and A. Whittaker: The ATC-58 Project: Development of Next-generation Performance-based Earthquake Engineering Design Criteria for Buildings, Proc. of the 13th WCEE, Paper No. 1819, Aug.2004.
- 4) 高橋典之，塩原等，小谷俊介：鉄筋コンクリート建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.
- 5) 高橋典之，塩原等：耐震修復性能設計を視野に入れたライフサイクル地震動シナリオ，日本地震工学会 第 1 回性能規定型耐震設計に関する研究発表会講演論文集，pp.39-44，2004.5.
- 6) 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.
- 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集，第 363 号 pp.50-56，1986.5.
- 8) A. Hazen: Flood Flows, A Study of Frequencies and Magnitudes, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1930.
- 9) 高橋典之，塩原等，中埜良昭：RC 構造物の長期的耐震修復性能評価における地震動発生順序に関する検討，日本建築学会大会梗概集（近畿），C-2，pp.701-702，2005.9.
- 10) T. Takeda, M. A. Sozen and N. N. Nielsen: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.96, No.ST12, pp.2557-2573, Dec. 1970.
- 11) Y. J. Park and A. HS. Ang: 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，楠原文雄：鉄筋コンクリート構造物の耐震修復性能評価における修復費用関数，コンクリート工学年次論文集，Vol.27, No.2，pp.1543-1548，2005.6.