

# 複数回の地震動を受ける RC 構造物の耐震性能評価における限界状態の互換表示

## A COMPATIBLE EXPRESSION AMONG EACH LIMIT STATE OF R/C STRUCTURES SUFFERING MULTIPLE EARTHQUAKES

高橋典之<sup>\*</sup>, 塩原 等<sup>\*\*</sup>, 中埜良昭<sup>\*\*\*</sup>

*Noriyuki TAKAHASHI, Hitoshi SHIOHARA and Yoshiaki NAKANO*

The recent performance-based seismic design procedure has aimed to define and estimate the building performance in multiple levels using quantified parameters like an occurrence probability of earthquake. Though the occurrence probability of earthquake is a reasonable expression for the life-safety performance and the immediate-occupancy performance, it is still inconvenient to express the performance of reparability. The reparability relates to the economic sense, therefore the idea of the equivalent seismic loss spectrum has been proposed and developed for the expression of reparability. The equivalent seismic loss spectrum is visualized from the expected running cost to repair a building structure damaged by earthquakes through its lifetime, where the spectrum represents the economic loss after earthquakes as a kind of seismic demand of the building. In this research, the equivalent seismic loss spectrum is extendedly applied to the expression of the life-safety performance and the immediate-occupancy performance for R/C building structures.

**Keywords:** Performance-based design, Equivalent seismic loss spectrum, R/C structures

性能設計法, 必要強度スペクトル, 鉄筋コンクリート構造物

### 1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以降, 性能設計の概念に基づく建築物の耐震設計法が検討されるようになり, 鉄筋コンクリート造建物については, 2004年に日本建築学会から「鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説」<sup>1)</sup>が刊行され, 性能評価型の耐震設計法に関する共通認識が構造設計者ならびに研究者の間に普及しつつある。特に建物の耐震性能として, 人命の保護を確保すべき性能とした安全性能, 建築物の機能および居住性を確保すべき性能とした使用性能, 建築物の資産価値を確保すべき性能とした修復性能が採用されるようになってきた。このうち, 安全性能および使用性能は建築物に直接要求される物理的な基本性能であると考えられる一方, 修復性能は建築主にとって建物が容易に修復可能か否かを判断基準とするため, 社会的・経済的な価値を含めたメタ性能あるいは経済性能であると考えられる。

現在検討されている性能評価型設計法は, 特定の強さの地震動(例えば50年超過確率10%の地震動)を受けた建物のある性能が限界状態を超えるか否かを確認する手法, あるいは, 建物のある性能を限界状態に至らしめる地震動強さを確率的に表現する手法により, 建物の性能水準が明示されるものと考えている。具体的には, 前者の手法は, 特定の強さの地震動設計用スペクトルを構造物の復元力特性上にある各限界状態点を超えるか否かを確認することで性能を評価する研究<sup>2)</sup>などに見られる手法であり, 後者の手法は, 建物が限界状態に到達する地震動強さを漸増させて求め, その発生確

率により性能を明示する研究<sup>3)</sup>などに見られる手法である。いずれの手法も性能評価結果の使用目的に応じた利点があるが, 安全性能や使用性能の評価結果と同じツールで, 社会的・経済的な価値を含む修復性能を評価するには問題があると考えられる。

一方, 筆者らは供用期間を通じた耐震修復性能評価手法の開発を目的とした一連の研究<sup>4), 5)</sup>などにおいて, 等価な耐震修復性能を表す構造物の強度と靱性の関係を示した「必要強度スペクトル」による性能表示方法を提案している。本研究では, 供用期間を通じた修復経費の期待値に応じて描かれる必要強度スペクトルを, 安全限界状態あるいは使用限界状態における性能を表示する方法に拡張することを目的として検討を行なった。

### 2. 長期的耐震修復性能評価モデル

#### 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<sup>4)</sup>とは, 地震多発地域において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」<sup>6)</sup>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」<sup>6)</sup>を用いて算出した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, 修復性能の直接的な表示方法のひとつである。耐震修復経費指標をもとに必要な強度スペクトルを作成する方法は後述するので, ここでは耐震修復経費指標の算出方法の概略を簡単に説明する。

\* 東京大学生産技術研究所 助手・博士(工学)

\*\* 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 助教授・工博

\*\*\* 東京大学生産技術研究所 教授・工博

Research Associate, Institute of Industrial Science, The Univ. of Tokyo, Dr. Eng. Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., The Univ. of Tokyo, Dr. Eng. Professor., Institute of Industrial Science, The Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

耐震修復経費指標は、図 1 に示した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、という過程を通じて算出されるものとする。

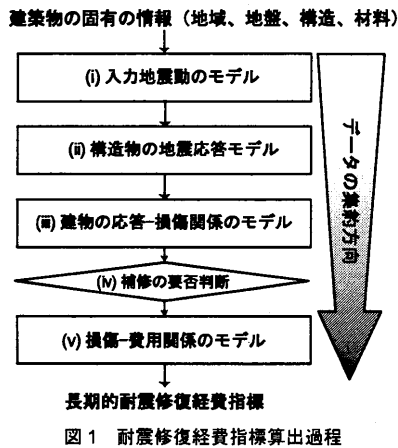


図 1 耐震修復経費指標算出過程

## 2.2 入力地震動のモデル

地震ハザード曲線として、地震動強さの上下限値が定められている上下限を有する極値分布<sup>7)</sup>により得られた東京第 I 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、基本的に地震動強さに関するシナリオである。供用期間を通じた地震の年非超過数セットを仮定し、各年非超過数に応じた地震動強さを地震ハザード曲線から求めて、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がライフサイクル入力地震動シナリオである。

年非超過数セットは、Hazen のプロットング・ポジション公式<sup>8)</sup>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 $\alpha$ 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。(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 2% (再現期間 2475 年)、5% (再現期間 970 年)、10% (再現期間 475 年)、50% (再現期間 72 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数群をそれぞれ作成し、既往の研究<sup>9)</sup>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

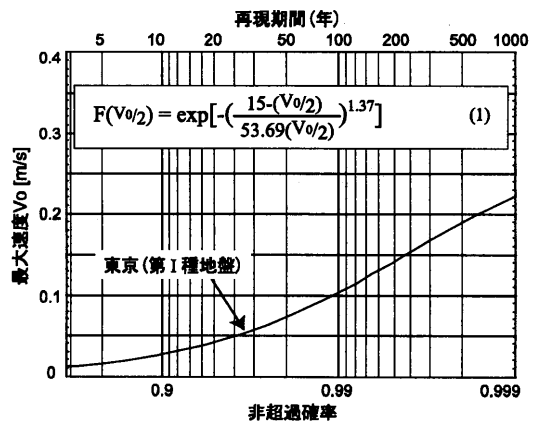


図 2 地震ハザード曲線の例

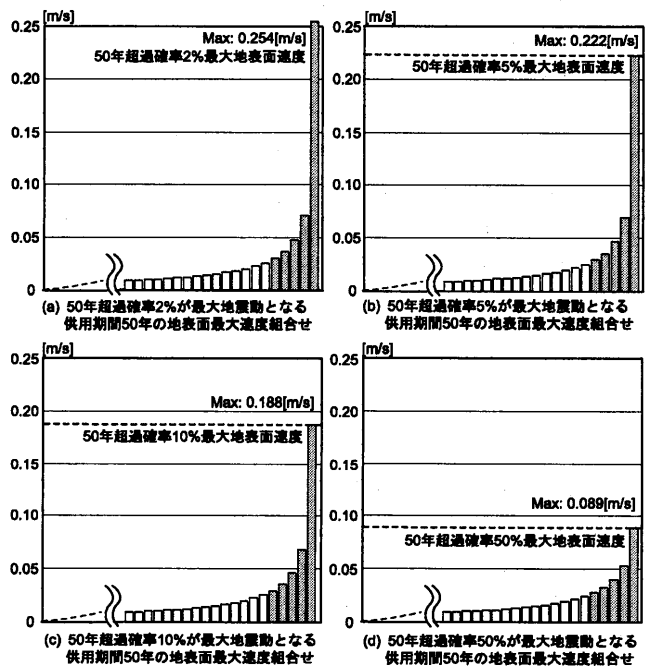


図 3 最大速度の組合せ (降順) 推定例

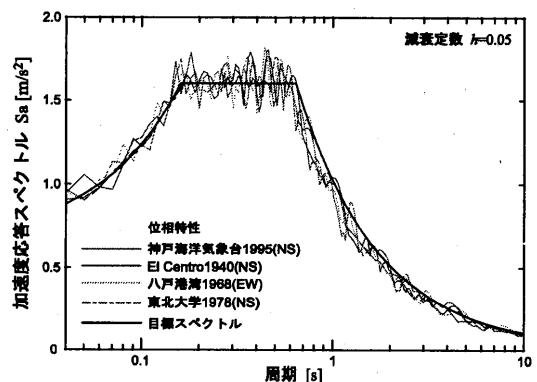


図 4 模擬地震動の加速度応答スペクトル

えられる上位 5 組の地震動強さを選び、東京第 I 種地盤の地表面最大速度セットのシナリオを作成した(図 3)。こ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

建築物を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<sup>10)</sup>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(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の損傷モデルを採用した<sup>11)</sup>。

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

ここに、 $D$ : 損傷指標,  $\delta_M$ : 地震時最大変形,  $\delta_u$ : (単調載荷時)限界変形,  $Q_y$ : 降伏強度,  $\beta$ : 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を超えると崩壊とみなした。

### 2.5 補修のモデル

本報では、既に提案した補修シナリオ<sup>9)</sup>のうち、構造物の最大経験変位が降伏点を超えると(損傷度がII以上になると)補修するシナリオを用いた(図6)。本論文では構造物を1自由度系とみなしているが、架構としてみた場合、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のヒンジ箇所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状態に近いシナリオであると考えられる。

ここで、最大経験変形に依存する(4)式の第1項を、ひび割れなどの補修される損傷 $D_R$ とおき、履歴吸収エネルギーに依存する(4)式の第2項を補修されない累積損傷 $D_E$ とおき、補修される損傷指標 $D_R$ は補修後ゼロに戻し、容易に補修されない累積損傷 $D_E$ 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は可能でも、剛性を初期状態に戻すのは難しく、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。ひび割れ点到達時の損傷指標 $D_R$ を $\gamma$ とし、ひび割れ前の耐震修復経費指標 $R$ をゼロ、ひび割れ点を超えると補修される損傷指標 $D_R$  ( $\gamma < D_R < 1$ )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した耐震修復経費指標 $R$ を図7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。ただし、このきわめて単純な仮定は、新築費用と建替え費用のどちらを規準化に用いたのか、あるいは、修復費用に直接工事費のほか諸経費を含めるのか等の設定で大きく異なってくることが予想される。

### 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 Repair Cost index)と定義する。

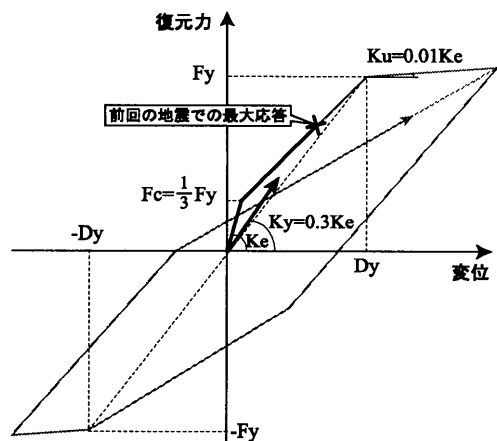


図5 復元力特性

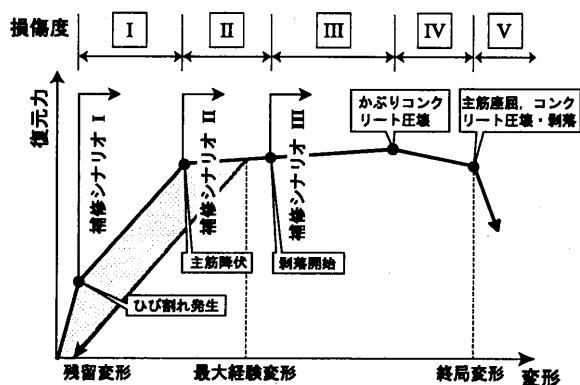


図6 補修シナリオの概念図<sup>1),9)</sup>

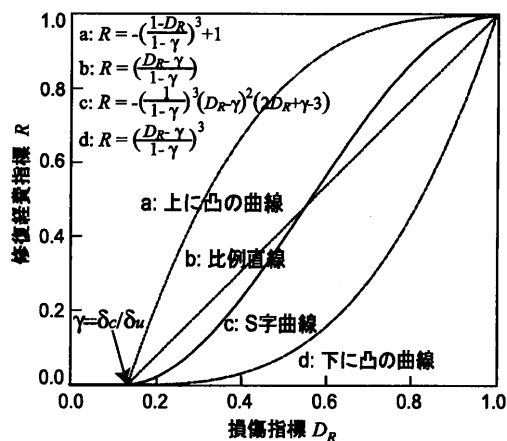


図7 損傷指標-耐震修復経費指標関係の関数モデル

## 3. 解析パラメータ

入力地震動モデルに関する解析パラメータは、供用期間を50年とし、ライフサイクル入力地震動シナリオ(50年超過確率が2%, 5%, 10%, 50%となる地震動強さを最大とする地震動年非超過度数群の各々降順5つ)について、地震動強さの順列をランダムに50通り、異なる位相特性の模擬地震動4通りを検討し、各々の算出結果の平均をとることとした。

構造特性に関する解析パラメータは、1自由度振動系の弾性固有周期を0.3秒とし、建物重量に対する水平せん断耐力の比であるべ

ベースシヤ係数  $C_0$  を 0.1 から 0.6 まで 0.1 刻みの 6 通り, 終局塑性率  $\mu$  を 2 から 10 まで 1 刻みの 9 通りとした。

#### 4. 解析結果

##### 4.1 必要強度スペクトル表示

水平横軸に終局塑性率  $\mu$  を, 水平縦軸にベースシヤ係数  $C_0$  をとり, 鉛直軸に年耐震修復経費指標  $EARC$  をとった 3 次元のグラフに対して, 年耐震修復経費指標  $EARC$  の等高線を水平面上に描いたものを必要強度スペクトルとする。図 8 は年耐震修復経費指標  $EARC$  を必要強度スペクトルに変換する概念図である。ただし実際には, 線形補間により等高線を得ているため, 格子点数が比較的少なく, 耐震修復経費指標の等しい格子点が複数存在する場合, 等高線が格子点を取り巻くように階段状になる場合がある。

入力地震動シナリオを設定したときの年耐震修復経費を推定する場合の表現方法としては, 図 8(i) を図 8(ii) の形式に変換した表現が適していると考えられる。また, ある限界状態を設定したときの, その状態に至らしめる入力地震動の超過確率を推定する場合の表現方法としては, 最大の地震動強さが異なる入力地震動シナリオに基づく図 8(ii) を集積して, 図 8(iii) の形式に変換した表現が適していると考えられる。

図 9 は, 前章までのモデルに従い算出した年耐震修復経費指標  $EARC$  に基づいて限界状態を 4 つ設定したときの, 図 8(iii) の表示形式に相当する必要強度スペクトル表示例である。図 9 の一番左側に示している年耐震修復経費指標  $EARC$  が 0.02 の必要強度スペクトルは, 供用期間 50 年を通じた耐震修復経費が初期建設費用と同じになる構造物の強度と靱性の関係を表しており, 必要スペクトル上の構造物は, 凡例に示した各地震動強さを最大とするライフサイクル入力地震動シナリオに対して, 建替えに等しい損傷状態, すなわち, 安全限界状態相当であると考えられる。図 9 より, 本研究で想定しているパラメータにおいては, ベースシヤ係数が 0.2 以上であれば, 50 年超過確率 2% の地震動強さを最大とするライフサイクル入力地震動シナリオに対しても安全限界状態を超えないものと推定される。また, 図 9 の中央 2 列に示している年耐震修復経費指標  $EARC$  が 0.01 および 0.002 の必要強度スペクトルは, 供用期間 50 年を通じた耐震修復経費すなわち耐震修復にかかるランニングコストが, 初期建設費用あるいは建替え費用に対してそれぞれ 50% および 10% になる構造物の強度と靱性の関係を表している。図 9(B) の中央 2 列より, 50 年超過確率 10% の地震動強さを最大と

するライフサイクル入力地震動シナリオに対して, 耐震修復にかかるランニングコストが初期費用あるいは建替え費用の 50% になる例として, ベースシヤ係数  $C_0=0.3$ , 終局塑性率  $\mu=3$  の構造物に着目すると, この構造物の耐震修復性能を向上させて耐震修復経費を初期費用あるいは建替え費用の 10% に抑えるには, ベースシヤ係数  $C_0$  を 0.4 にするなどの対策が必要であると推察される。同様に, 図 9 の一番右側の列に示している年耐震修復経費指標  $EARC$  が 0 の必要強度スペクトルは, 供用期間 50 年を通じて耐震修復経費がかからない構造物の強度と靱性の関係を表しており, 必要スペクトル上の構造物は補修の必要がない限界状態, すなわち, 使用限界状態相当であると考えられる。図 9 より, 本研究で想定しているパラメータにおいては, 50 年超過確率 50% の地震動強さを最大とするライフサイクル入力地震動シナリオに対して, ベースシヤ係数が 0.3 以上であれば使用限界状態を超えないものと推定される。

##### 4.2 必要強度スペクトルを用いた限界状態の互換表示

図 8(ii) の表示形式と図 8(iii) の表示形式を応用し, 耐震性能評価における安全性能, 使用性能および修復性能の本質的な意味を考慮しながら, 必要強度スペクトルを用いた限界状態の互換表示例を図 10 に示す。

本来, 耐震性能評価において, 物理的な応答量と直接関連付けられる安全限界および使用限界と, 社会的・経済的な価値を含む修復限界とは, 評価基準が異なるものと考えられる。

物理的な応答量と直接関連付けられる安全性能の評価においては, 構造物を倒壊直前の限界状態に至らしめる最大地震動の発生確率を用いて定量的に性能を評価するのが合理的であると考えられ, 同様に使用性能の評価においては, 構造物が使用上問題のない状態に納まる限界の最大地震動の発生確率を用いて定量的に性能を評価するのが合理的であると考えられる。なぜならば, 入力地震動のもつ物理量  $IM$  (Intensity Measure: 加速度などの入力強さ) と各限界状態を表す量  $EDP$  (Engineering Demand Parameter: 応答層間変形角などの工学的応答) が直接的に対応し, 入力地震動の発生確率がそれぞれの性能を表しうる直近の指標になるからである。

一方, 修復性能の評価においては, 設定した修復費用の限界状態に至らしめる最大地震動の発生確率を用いて性能を定量的に評価する場合, 供用期間中に稀に発生する地震動強さに対する修復費用の期待値を用いて定量的に性能を評価する場合が考えられるが, 修復性能が本質的に社会的・経済的な意味をもつ性能であることを考慮すれば, 修復費用の期待値  $DV$  (Decision Variable: 費用, ダウ

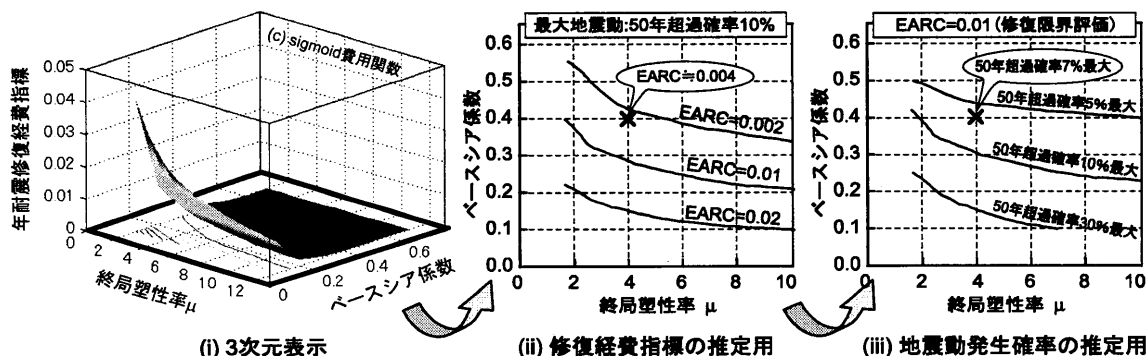


図 8 年耐震修復経費指標から必要強度スペクトルへの用途別変換概念図

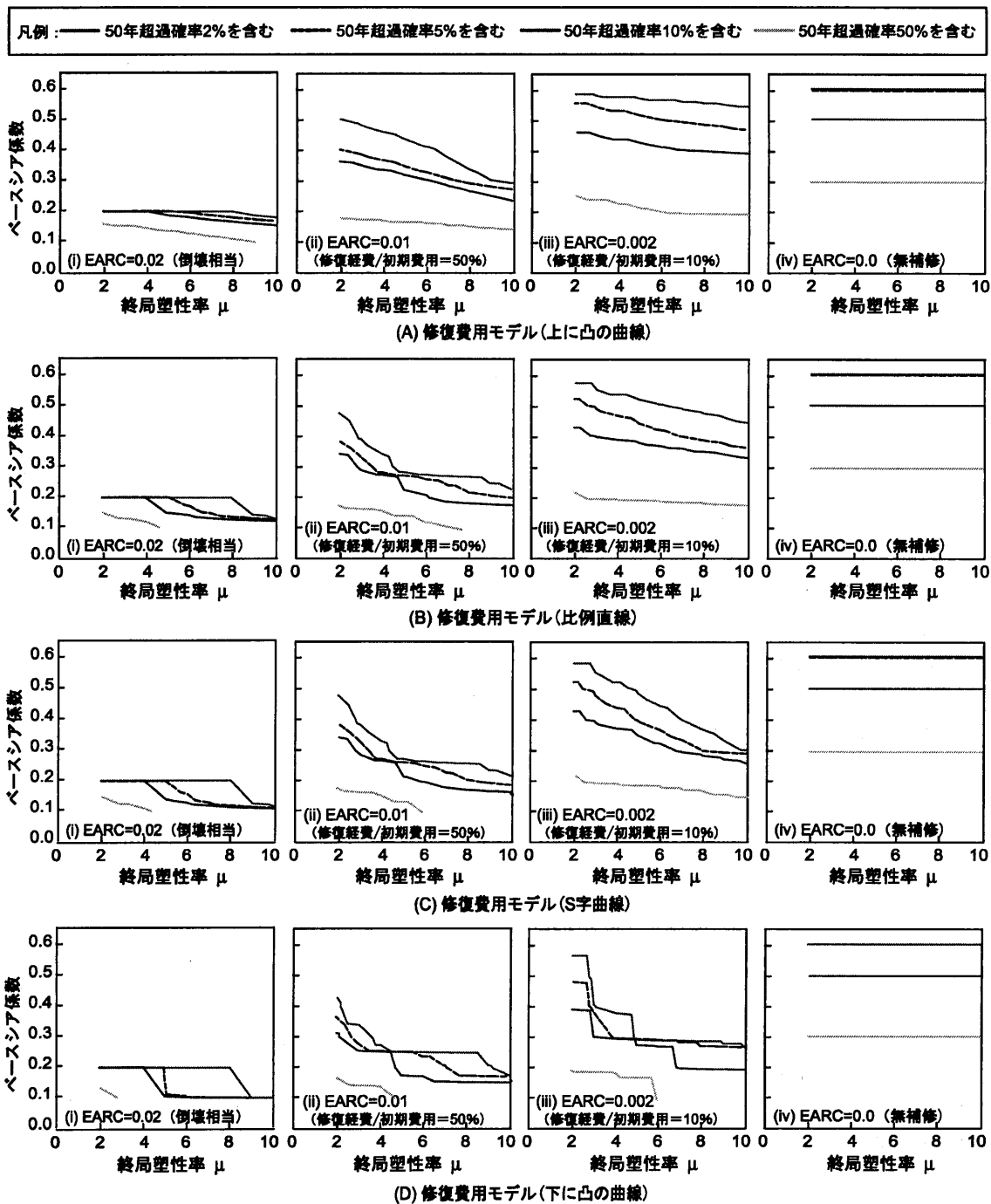


図9 必要強度スペクトルによる各限界状態での地震発生確率の等高線表示

ンタイムなど建築主が限界状態を判断するための意思決定変数)によって性能を定量的に評価するのが合理的であると考えられる。

図10では、安全限界状態に至らしめる最大地震動の発生確率、使用限界状態に至らしめる最大地震動の発生確率、および、供用期間中に稀に発生する地震動強さに対する修復費用の期待値を表す必要強度スペクトルが、ベースシア係数 $C_0=0.3$ 、終局塑性率 $\mu=4$ の構造物を表す点で交差している。図10の必要強度スペクトルのうち、修復費用モデルが(B)比例直線モデルの場合を例に、各限界状態を互換すると、安全性能については「安全限界状態に至らしめる地震動の発生確率が50年超過確率0.5%」と表され、使用性能については「使用限界状態に至らしめる地震動の発生確率は50年超

過確率50%」と表され、修復性能については「年耐震修復経費指標EARCが0.006、すなわち、耐震修復にかかるランニングコストが初期費用あるいは建替え費用の30%」と表されることになる。

ただし、安全性能の検証においては、ライフサイクル入力地震動シナリオの最大地震動1つを入力地震動として用いた結果である点に注意が必要である。ライフサイクル入力地震動シナリオを用いる本研究においては、供用期間を通じた修復経費積算値および累積損傷を考慮しているため、耐震修復経費指標 $R$ が1.0(年耐震修復経費指標EARCで1/供用期間年数)になっても必ずしも安全限界状態とは限らず、安全限界状態に到達することなく修復しながら使用され続けることで耐震修復経費指標の積算値が1.0を超える場合

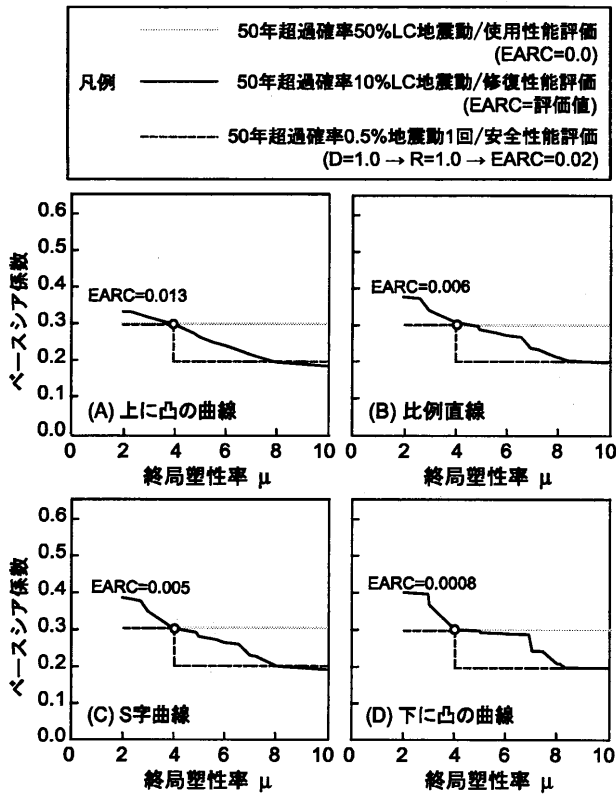


図10 必要強度スペクトルを用いた各限界状態の互換表示

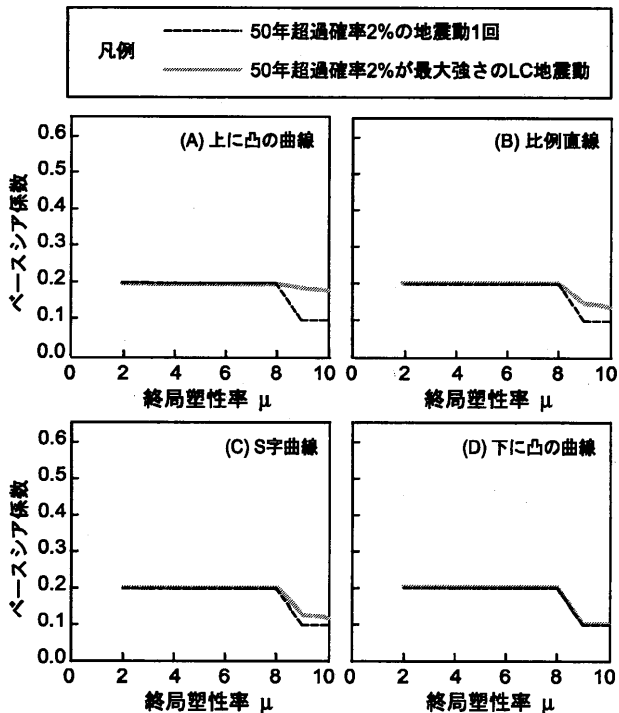


図11 安全性能評価における最大地震動1回とライフサイクル地震動の差

も起こりうる。そのため、図10では物理量として確実に安全限界状態に至ったことを確認するために、最大地震動1つによる安全性能の検証を行なった。

実際に、安全性能の検証においてライフサイクル入力地震動シ

ナリオを用いた場合と最大地震動1つを用いた場合との必要強度スペクトルの差を図11に示した。50年超過確率2%の地震動強さを最大とするライフサイクル入力地震動シナリオを用いた場合、ライフサイクル入力地震動による必要強度スペクトルが最大地震動一回による必要強度スペクトルと終局塑性率8までは同じになり、終局塑性率8以上ではやや必要強度が高く描かれた。これは、地震動を複数回経験することによって、実際には安全限界状態に到達していても、耐震修復経費指標の積算値が1.0を超えた例が含まれたことによると考えられる。

## 5. まとめ

安全性能および使用性能の評価においては構造物を限界状態に至らしめる最大地震動の発生確率を用いて定量的に性能を評価することが、修復性能の評価においては修復費用の期待値を用いて定量的に性能を評価することが、それぞれ合理的であると仮定し、必要強度スペクトルを用いた各限界状態の互換表示を提案した。

本研究で対象としたパラメータに対してベースシア係数  $C_0=0.3$ 、終局塑性率  $\mu=4$  の構造物を例に性能評価を行うと、安全性能については「安全限界状態に至らしめる地震動の発生確率が50年超過確率0.5%」、使用性能については「使用限界状態に至らしめる地震動の発生確率は50年超過確率50%」、修復性能については修復費用モデルに(B)比例直線モデルを用いた場合「耐震修復にかかるランニングコストが初期あるいは建替え費用の30%」と表された。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説、日本建築学会、2004.1
- 2) 坂下雅信、河野進、渡辺史夫：RC造骨組構造物における補修前後の性能比較に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 27, No. 2, pp.1525-1530, 2005.6
- 3) 長江拓也、林静雄、Helmut Krawinkler、中島正愛：層降伏するピロティ階の確率的地震応答評価、コンクリート工学年次論文集、Vol. 27, No. 2, pp.43-48, 2005.6
- 4) N. Takahashi, H. Shiohara and S. Otani: Effect of the Model Correlating Structural Damage to Repairing Cost on Structural Demand Spectra Based on Life Cycle Economic Loss in High Seismic Zone, Proc. of the Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Paper 587, Jul. 2002
- 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、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1, 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, 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) Y. J. Park and A. H. S. Ang: Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.111, No.4, pp.722-739, Apr. 1985