論文　ＲＣ造建物の復旧性能評価手法の構築および地震リスク低減型設計への応用

町田　隆祐[*1]・梨本　優也[*1]・鈴木　裕介[*2]・前田　匡樹[*3]

要旨：被災建物の復旧性能は，重要な耐震性能の一つである。本論では各種評価データベースと復旧性能評価体系を用いて地震リスク評価を行い，復旧性能に重きを置いた耐震性能評価手法への応用を試みた。「供用期間中の震災復旧」を想定して，各種耐震改修の費用対効果についての比較・検討を行った。結果，建物の用途特性・残存供用年数によって最高効用を示す改修案が変化しうる可能性について示した。「設計段階のアセスメント」を想定して，復旧性能評価を取り入れた地震リスク低減型設計について提案した。結果，目標復旧性能を達成するための設計条件を明示的に出力する例を示し，その有用性について述べた。

キーワード：RC 造，損傷量，復旧性能，地震リスク評価，耐震改修，性能設計

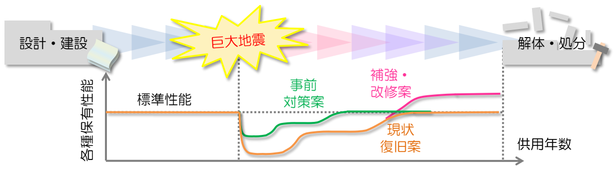
1. はじめに

近年の震災では，建物の構造安全性にも増して，その復旧性能が重要な性能として注目されている。例えば，構造部材や非構造部材の過大な損傷の補修に掛かる莫大な費用と時間，また設備機器の破損に起因する建物機能の低下などが挙げられる（**図－1** 参照）。これらは建物内の人命保護という観点からはさして問題にならないが，建物運営にあたっての経済性・機能性という観点からは無視できない事項を多く孕んでいるのが実状である。

向井ら [1),2),3)]は，災害後における建築物の迅速な機能回復を目標として掲げ，実際の復旧事例や，部材の損傷実験結果をもとにデータベースを構築しており，当該データを用いた修復性や機能性の評価を実施している。

また筆者は，既報 [4)]において向井らのデータベースを基に適宜に実験結果を追加して，復旧性能評価を行うための体系を構築した。また，当該体系を利用して，耐震構造特性によってその補修費用や人工など各種復旧性能がどのような影響を受けるかについて，基礎的な解析を行った。

そこで本論では，既報で筆者が提案した手法 [4)]を利用して，長期的視野から耐震改修を有効的に実施するための基礎的な知見を得ること，および復旧性能に重点をおいた地震リスク低減型設計の方法について検討することを目的とする。



図－1　ライフサイクルにおける建物保有性能の変化

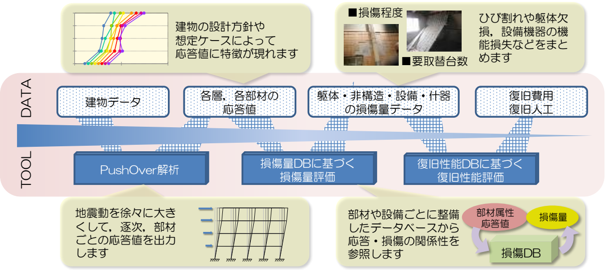
2. 損傷量評価および復旧性能評価

2.1 損傷量評価データベース

損傷項目は構造部材，非構造部材，設備機器とし，各々について応答値と損傷量の関係性を纏めている（以降，損傷量評価 DB）。これらのデータの詳細は向井ら [1),2),3)]の研究を参照されたい。ここでは建物の PushOver 解析の結果として得られる各種応答値を，該当する属性の損傷項目に照合することで損傷量評価（構造部材のひび割れ，設備機器の破損確率などを推定）を行っている。

2.2 復旧性能評価データベース

ここでは主に実務で用いられる積算基準資料などから単位復旧費用と単位復旧人工に関する資料を収集・体系化している。詳細は筆者の既報 [4)]を参照されたい。前述の損傷量評価によって得られた各種項目の損傷程度を復旧性能の尺度に換算している（以降，復旧性能評価 DB）。



図－2　損傷量評価・復旧性能評価のフロー

*1 東北大学大学院　工学研究科　都市・建築学専攻　博士課程前期　(学生会員)
*2 東北大学　災害科学国際研究所　助教　博士(工学)　(正会員)
*3 東北大学大学院　工学研究科　都市・建築学専攻　教授　博士(工学)　(正会員)

3. 地震リスク評価概要

3.1 建物モデルの設定

評価対象の建物は図－3 のような 4 層 4×4 スパンの RC造建物とし，ベースシア係数は0.3に設定している（荷重変形関係を図－4 に示す）。建物用途は事務所とし，文献[4]を参考に標準的な保有設備を付加するものとする。

3.2 地震ロス関数の設定

最大地動加速度 a と損失の関係を示す関数を地震ロス関数と称す。前述の損傷量評価 DB・復旧性能評価 DB に則って解析した漸増していく損傷を累積損傷，建物の崩壊による建物総資産の損失，両者を確率的に重み付けした損失の期待値を地震ロス関数 $C_{Loss}(a)$ として式(1)のように定義する。

$$C_{Loss}(a)=\left(1-P_{Collapse}(a)\right)\cdot C(a)+P_{Collapse}(a)\cdot A \qquad (1)$$

ここに， $P_{Collapse}(a)$ ：終局変形に至る確率，
$C(a)$ ：累積損傷費用， A ：建物総資産
なお， $P_{Collapse}(a)$ は終局変形角を中央値とした対数正規分布を用いて算出している。

3.3 最大地動加速度に関する確率モデルの構築

東京大学地震研究所では過去に発生した地震の発生日時と場所，マグニチュード，その他詳細について纏め，「気象庁一元化地震カタログ」[5]として公開している。本論では当該データベース中，1923～2013 年，北緯 32～38° 東経 138～143° の抽出記録（関東近郊，図－5 参照）を用いて，多点震源を想定した確率分布を作成することにした。まず微小マグニチュード区間ごとに発生度数を累計し，1km² 当たり 1 年間当たりの平均度数 $n(M_i)$ を算定する。続いてマグニチュード M_i の地震によって地動加速度 a の地震が到達する最大距離 $\Delta(a,M_i)$ を式(2)（文献[6]による）で算定する。

$$\Delta(a,M_i)=\left(\frac{a}{1073\cdot 10^{0.221M_i}}\right)^{-\frac{1}{1.25}}-30 \quad [km] \qquad (2)$$

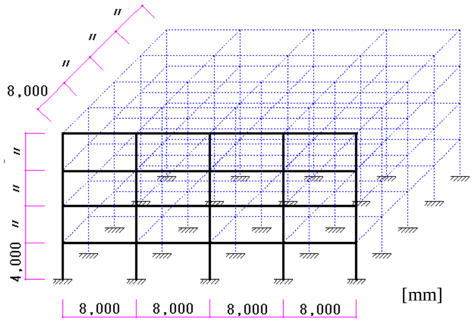
従って，ある 1km² の領域で 1 年間に地動加速度 a 以上の地震が観測される平均度数 N_a は式(3)で表わされる。

$$N_a=\sum_{M_i}\left\{n(M_i)\cdot\pi\cdot\Delta(a,M_i)^2\right\} \qquad (3)$$

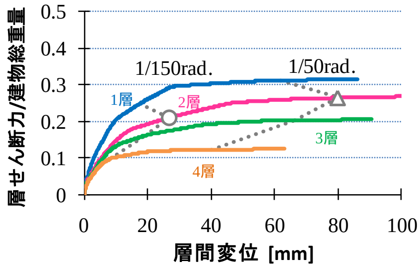
地震の発生過程はポアソン過程に従うものとし， y 年間における最大地動加速度の確率分布 $F_{a\,max}(y,a)$ は式(4)で算定する。

$$F_{a\,max}(y,a)=\left\{exp\left(-\frac{N_a}{N}\right)\right\}^{y} \qquad (4)$$

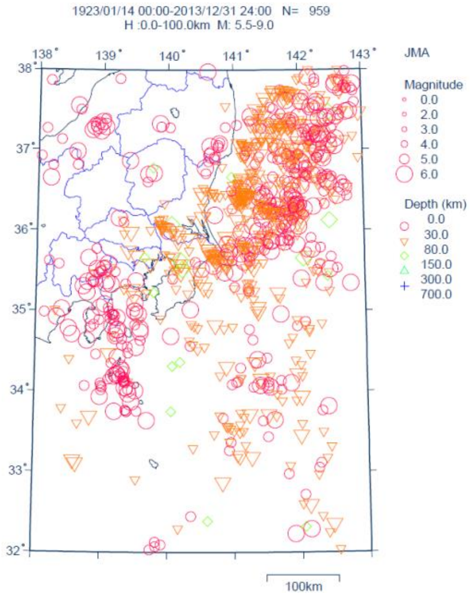
ここに， N ：合計度数
確率密度関数 $f_{a\,max}(y,a)$ は式(4)を微分したものを用いる。算定した関数曲線を図－6 に示す。



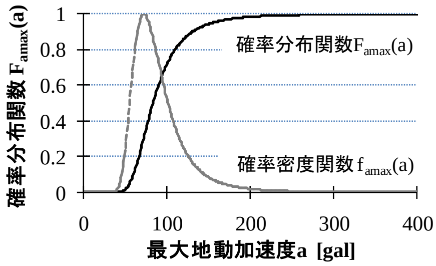
図－3　建物モデル概要



図－4　建物モデルの荷重変形関係



図－5　関東近郊の震源マップ



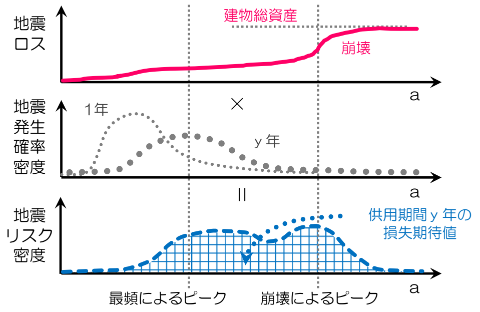
図－6　最大地動加速度に関する確率分布

3.4 損失期待値の算定

地震ロス関数 $C_{Loss}(a)$ と確率密度関数 $f_{amax}(y,a)$ の積を地震リスク密度関数と称す。損失期待値 $L(y)$ は地震リスク密度関数を最大地動加速度 a について全域で積分した値であり式(5)で算定する（図－7 参照）。

$$L(y) = \int C_{Loss}(a) \cdot f_{a\,max}(y,a)da \qquad (5)$$

ここに，$L(y)$：y 年間の損失期待値，$f_{amax}(y,a)$：y 年間の最大地動加速度に関する確率密度関数



図－7　損失期待値の算定

3.5 構造性能向上と復旧性能の関係

本節では構造性能の向上によって，建物の復旧性能にどのような影響が現れるかについて試算を行う。ただしここでは前述の損失期待値が小さいほど復旧性能が大きいとみなして議論を進める。

標準モデルに加えて，ベースシア係数 C_B を増加させた強度型，終局変形角 R_u を増加させた靭性型，計 3 種について解析を行う。解析結果の地震リスク密度関数を図－8 に示す。強度型では全域で低くなっている傾向が見られる。一方，靭性型では建物の終局変形に起因するピークが顕著に低くなっている。次に供用年数 y を軸にとったときの損失期待値 $L(y)$ の推移を図－9 に示す。標準からのリスク低減を比較すると，強度型は供用期間の早い段階で，靭性型は遅い段階で大きな効果を示していることが分かる。これは強度型の損失の抑制は崩壊リスクの低減に加え，高頻度で発生しうる中小地震による累積損傷の増加を大きく防いでいる結果といえる。一方で靭性型は長い供用期間で一度発生するような大地震による崩壊リスクを大きく減少させていると思われる。

4. 耐震改修効用の定量化と比較

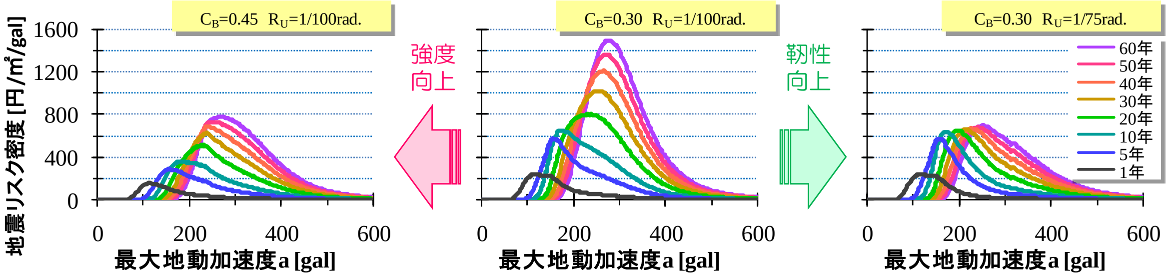
4.1 建物用途特性の設定

図－10 のように建物が保有する資産の内訳はその用途によって大きく異なり，非構造部材や設備機器に関してはこの傾向が特に顕著である。本節では保有資産の構成，また後述の営業損失の大小が，構造特性から様々な影響を受けることを考慮して，これらの比重が特徴的な表－1 に示す 5 種の建物用途を取り上げた。このような用途による復旧性能の差異（以降，建物用途特性）を考慮して，各種項目について文献 [7)] を参考に補正を行った。

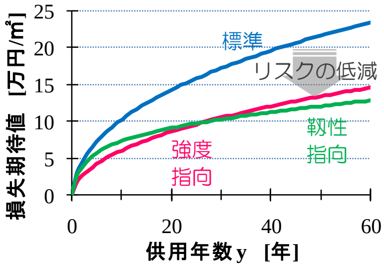
表－1　建物用途特性

建物用途	非構造部材	設備機器	営業損失
事務所	○	○	○
集合住宅	○	△	△
物販店	△	△	◎
宿泊施設	◎	◎	○
製薬工場	△	◎	◎

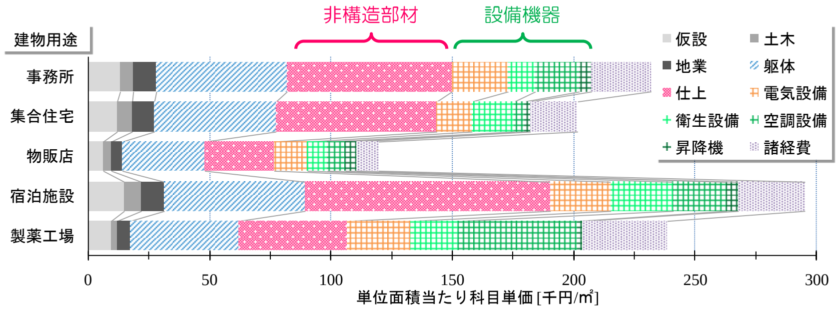
比重 ◎大きめ ○標準的 △小さめ



図－8　地震リスク密度関数



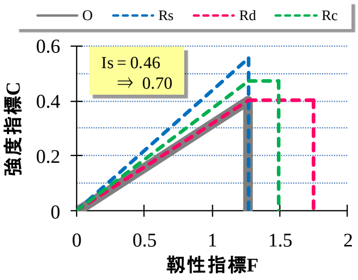
図－9　供用年数－損失期待値関係



図－10　建物用途ごとの保有資産ウェイト

4.2 改修モデルの設定

改修前と改修後の耐震性能をモデル化する。耐震性能は耐震診断 [8]の強度指標 C と靱性指標 F を用いて記述する。形状指標は整形建物を考えて $S_D=1.0$，経年指標については改修前 $T=0.9$，改修後 $T=1.0$ を用いるものとする。改修前を O モデルとし，改修後は強度型改修の Rs モデル，靭性型改修の Rd モデル，混合型改修の Rc モデルの計 4 モデルについて設定した。改修後モデルはいずれも Is 値は 0.70 となるように図－11，表－2 のように設定した。



図－11　改修前後の C-F 関係図

表－2　耐震改修による耐震性能に係る諸元

		累積強度指標 C_T	終局時靱性指標 F_U	Is値	Is値増分	改修費用 [万円/㎡]
改修前	O	0.40	1.27	0.46	-	-
改修後	Rs	0.55	1.27	0.70	0.24	1.00
	Rd	0.40	1.75	0.70		
	Rc	0.47	1.49	0.70		

4.3 改修費用の設定

建物の改修費用はその工法や施工箇所によって異なるが，一般的にその耐震性能の向上に追従する。本論では前川の研究 [9]を参考に， Is 値の増分に対してこれを算定するものとする。単位面積当たりの Is 値を 1 だけ増加させるために必要な費用を耐震補強費用係数 α_{cs} と呼び，式(6)で算定する。

$$\alpha_{cs}=\frac{C_{Restore}}{\Delta Is\cdot A} \tag{6}$$

ここに，α_{cs}：耐震補強費用係数，$C_{Restore}$：補強費用，ΔIs ：補強による Is 値の増分， A ：延べ床面積

前川は都内の耐震改修事例について耐震補強費用係数を算定し，その分布について考察している。本来は補強工法によってこの値は異なるが， 純粋に C 値，F 値の増分に対して改修費用を関係付けることは難しい。厳密な関連付けは今後の課題であるが，本論では改修案ごとに代表的な補強工法を想定して（強度型は耐震壁，靭性型は炭素繊維補強など），略算的にその結果として得られた平均値 $\alpha_{cs}=4.18$ [万円/㎡/ΔIs]を準用させて頂く。

4.4 改修効用係数 *CRE* の定義

耐震改修による実質的な費用対効果を比較するための指標として改修効用係数 CRE を式(7)のように定義する。

$$CRE=\frac{L_{Original}(y)-L_{Restore}(y)}{C_{Restore}+\beta\cdot L_{Suspend}\cdot T_{Restore}} \tag{7}$$

ここに， $L_{Original}(y)$：現状ケースの損失期待値，$L_{Restore}(y)$：改修ケースの損失期待値， $T_{Restore}$：改修工期， β ：事業影響度係数， $L_{Suspend}$ ：事業停止による一日当たりの営業損失

式(7)は分母に投資損失（耐震改修に要する費用）を，分子に耐震改修によるリスクの低減分をとっており，大きければ大きいほど改修効果が大きいとみなせる。事業影響度係数 β はその改修工事が建物本来の業務機能をどの程度阻害するかを表す係数である。各諸元は文献 [10]を参考に，表－3，表－4 のように設定した。

表－3　耐震改修による営業損失に係る諸元

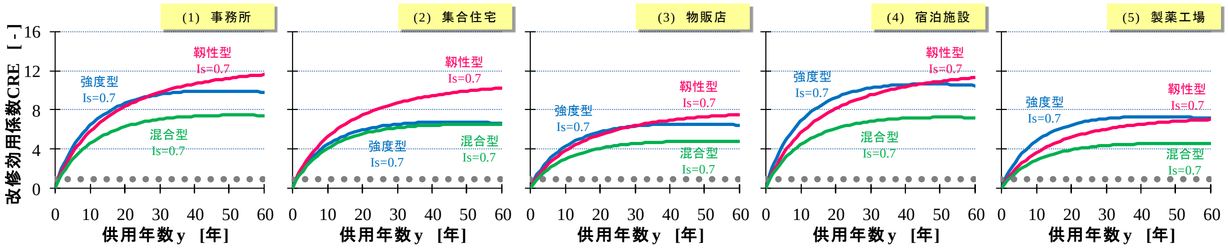
	補強･改修に要する建設費用 $C_{Restore}$ [万円/㎡]	事業影響度係数β	補強･改修に要する日数 $T_{Restore}$ [日]
Rs	1.00	0.2	60
Rd		0.6	40
Rc		0.6	40

表－4　建物用途ごとの営業損失

	一日当たりの営業損失 $L_{Suspend}$ [円/㎡/月]
(1) 事務所	20,000
(2) 集合住宅	2,700
(3) 物販店	20,400
(4) 宿泊施設	35,000
(5) 製薬工場	58,000

4.5 解析結果

建物用途ごとに算定した改修効用係数 CRE の推移を図－12 に示す。全体的な傾向として混合型改修 Rc は比



図－12　建物用途ごとの供用年数－改修効用係数の関係

較的低い効用を示していることが分かる。その理由として，混合型改修は *Is* 値が増加しやすい一方で，各々の性能の増加分は比較的低い，同程度の *Is* 値増分では投資損失（特に営業損失）が比較的大きいなどの原因が考えられる。すなわち本解析結果を用い，復旧性能の向上に比重を置き改修する場合には，強度型または靱性型のいずれかを選択した方が高い効用を得られることが分かる。強度型改修と靱性型改修の効用の大小傾向については以下のように大別される。

(a) 恒常的に強度型改修が最高効用となる場合

製薬工場が該当する。耐震改修に伴う営業損失が大きいことが大きな原因であり，比較的事業影響度の低い（部分的な耐震壁の増設など）強度型改修 Rs の方が高効用となった。

(b) 恒常的に靱性型改修が最高効用となる場合

集合住宅が該当する。建物の付加価値が総合的に低い場合には，建物の崩壊による資産損失が支配的になり易く，靱性型改修 Rd が最高効用となった。

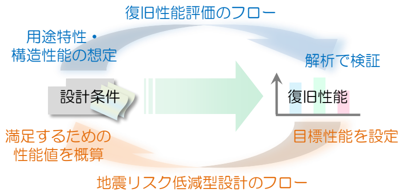
(c) 短期：強度型改修，長期：靱性型改修が最高効用

事務所，物販店，宿泊施設が該当する。(a)と(b)の中間程度の性質の場合には，このように想定している供用年数によって最高効用案が入れ替わる傾向が見られる。特に非構造部材のウェイトが大きい宿泊施設は，変形依存型の損傷項目が大きいため，比較的強度型改修 Rs が大きい効用を示している。

5. 地震リスク低減型設計の提案

5.1 地震リスク低減型設計の考え方

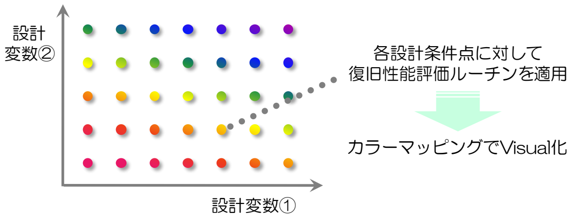
ある復旧性能指標が平均的には目標値を満足するように事前に設計条件を決定する設計方法を，本論では「地震リスク低減型設計」と呼ぶ（**図－13** 参照）。現在の日本の保険業界ではリスク管理の観点から PML（予想最大損失額：Probable Maximum Loss）の考え方が広く利用されている。これは予期される大きな地震被害に対して損失額の程度を目標値以下に収めるという考え方で，本論ではこれを踏襲して，PML と設備機能維持の 2 つの観点から地震リスク低減型設計を評価することにした。



図－13　地震リスク低減型設計の概念図

5.2 解析方法と出力方法

解析における入力外力は，建物の供用年数 *y* 年間において 90%非超過確率に相当する最大地震動である。よって，供用年数 *y* の増加に伴って入力加速度も大きくなる。**図－14** のように設計変数を 2 つまで想定し，各々の設計状態点に対して復旧性能評価ルーチンを適用する。得られた復旧性能指標の程度をカラーコードに換算し，2 次元座標に順次プロットしていくことで図化するものとする。

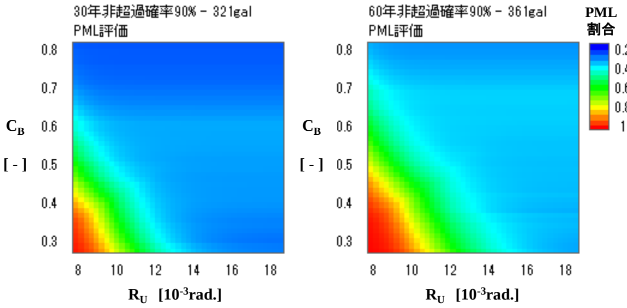


図－14　設計条件と復旧性能の関係の図化処理

5.3 解析結果

(1) PML 評価

設計変数は建物の強度と靱性を代表する尺度として，ベースシア係数 C_B と終局変形角 R_u を用いる。ここで再調達費用に対する物的損失額の割合を PML 割合と称し復旧性能指標として採用する。供用年数を 30 年，60 年に変化させた時の PML 割合に関するカラーマッピングを**図－15** に示す。等性能線は線形に現れる傾向にあり，供用年数を大きくすることで設計条件が厳しくなっていることが分かる。



図－15　PML と設計条件のカラーマッピング

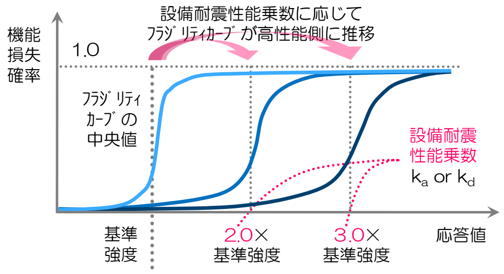
(2) 設備機器の機能維持評価

設備機器の耐震性能は，加速度依存型は床（あるいは天井）応答加速度，変形依存型は層間変形角で規定している [11]。前述の解析で使用したモデルの設備機器はいずれも防振装置を付加しないような比較的弱い耐震性能のものを想定している。従って実際には様々な器具による耐震補強が考えられる。そこで，建物のベースシア係数 C_B は 0.3 に固定し，標準的な耐加速度性能および耐変形性能に乗じる乗数を設計変数（それぞれ k_a，k_d とおく，**図－16** 参照）として設定する。ここでライフラインを経

由して電力が供給される全階平均確率を機能維持率 $FR(a)$ として式(8)で定義する。

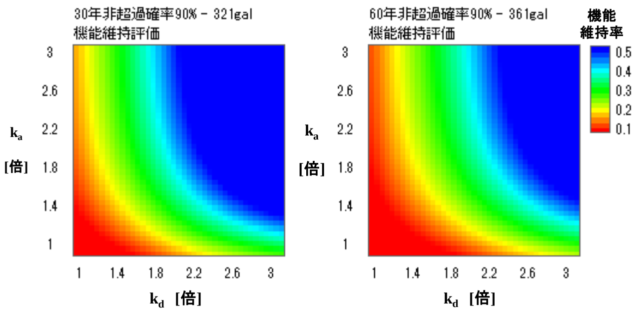
$$FR(a) = 1 - \frac{1}{m}\sum_{m}\prod_{i}\left(1 - F_{Ei}(a)\right) \tag{8}$$

ここに， E_i $(i = 1, \cdots, n)$：電気系統を構成する各要素，$F_{Ei}(a)$：最大加速度が a のときの要素 E_i の機能損失確率，m ：階数



図－16　設備耐震性能乗数について

同様に供用年数を 30 年，60 年に変化させた時の機能維持率 $FR(a)$ に関するカラーマッピングを図－17 に示す。等性能線は曲線として現れ，加速度性能と変形性能をバランスよく向上させることが効果的であると思われる。



図－17　機能維持率と設計条件のカラーマッピング

6. まとめ

本研究では復旧性能評価の応用という位置付けで，「供用期間中の震災復旧」および「設計段階のアセスメント」への応用を試みた。その結果として以下のような知見を得た。

(1) 建物の高強度化は比較的短期の供用期間に対して，高靭性化は比較的長期の供用期間に対しての地震リスク低減効果が大きい。

(2) 費用対効果の観点からは混合方針よりも単一方針の耐震改修の方が高い効用を得られる場合がある。

(3) 建物の用途と想定される供用年数によって最高効用を示す改修案は異なり，本論の手法によってその程度を比較することができた。

(4) 地震リスク低減型設計を提案し，本手法を用いることで，設定した供用年数に対する目標性能を満足するための設計条件の例を示した。

謝辞

本研究では「災害後の建築物の機能維持・早期回復を目指した構造性能評価システムの開発」の一環として構築された損傷評価 DB を有効に活用させて頂きました。建築研究所，向井智久様をはじめ，関係者各位に紙面を借りて御礼申し上げます。

参考文献

1) 向井智久ほか，「災害後の建築物の機能維持・早期回復を目指した構造性能評価システムの開発」，成果報告書，建築研究所，2011.1

2) 向井智久ほか：建築物の災害後の機能維持／早期回復を目指した構造性能評価システムの開発（その７ 損傷評価・修復性評価・機能性評価に資するデータベースの構築），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.63-64，2010.7

3) 衣笠秀行ほか：建築物の災害後の機能維持／早期回復を目指した構造性能評価システムの開発（その８ 修復性評価データベースに基づく修復費用・修復時間の算出），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.65-66，2010.7

4) 町田隆祐：復旧費用・復旧人工の積算による鉄筋コンクリート造建物の修復性評価の基礎研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.531-532，2014.9

5) 気象庁一元化地震カタログ：http://wwweic.eri.u-tokyo.ac.jp/db/jma1/index-j.html

6) 日本建築学会編：Excel で学ぶ地震リスク評価，技報堂出版

7) 財団法人建設物価調査会：ジャパン・ビルディング・コスト・インフォメーション，2010

8) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準同解説，2001 年改訂版

9) 前川直之：耐震補強工法のコストと効果の分析，東京第学 2004 年度修士論文

10) 財団法人経済調査会：積算資料ポケット版マンション Re2012

11) 建築設備耐震設計・施工指針 2005 年版，（一財）日本建築センター