

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

Establishment of a restoration performance evaluation method for RC buildings and application in the design to decrease earthquake risks

町田 隆祐 (性能制御システム学分野)
Ryusuke MACHIDA

Abstract

In recent years, not only “Seismic safety” but also “Seismic restorability (that means a restoration performance of the damaged building by earthquakes)” is considered as one of the important performance demanded for RC building. For example, repair costs of structures, including non-structures, and downtime of equipments are regarded as one of important issues.

Therefore, in this paper,

- 1) The “Damage evaluation database” and “Restorability evaluation database” are constructed based on many papers and materials
- 2) “Restoration performance evaluation system” is proposed for RC buildings, by using the databases
- 3) The effect of seismic retrofit from the perspective of restorability and risk evaluation is evaluated aimed at different building types
- 4) The design method in order to decrease earthquake risks is proposed

Keywords : Reinforced concrete, Damage, Restoration performance, Earthquake risk evaluation,

Seismic retrofit, Performance design

鉄筋コンクリート, 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含んでいるのが実状である。

そこで本論では、建物の復旧性能(復旧損失や復旧人工など復旧の難しさを表す程度)の定量化を目標に、まず復旧性能の基本単位を評価するためのデータベースを構築する。また、それらの応用という位置付けから、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して各々検討を行う。

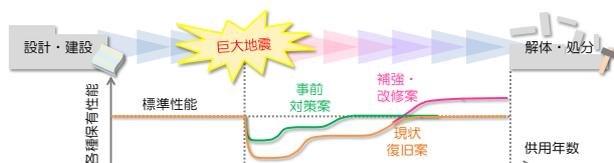


図-1 ライフサイクルにおける建物保有性能の変化

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DB¹⁾)。DBから損傷量を評価するには建物のPushOver解析で得られる応答値(層加速度・層間変形など)を、該当する属性の損傷項目に照合することで行うこととしている。

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・DB化しており、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)。評価体系(図-2参照)の詳細については、紙面の都合上、割愛させて頂く。

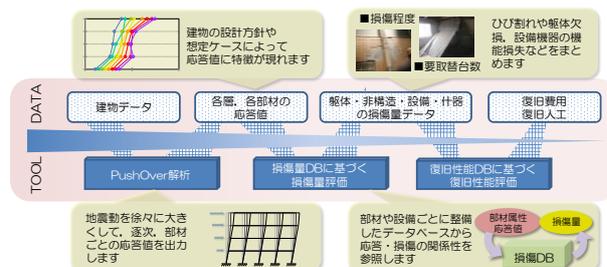


図-2 損傷量評価・復旧性能評価のフロー

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）。建物用途を事務所としたときの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。解析による応答値に基づいて損傷量評価 DB・復旧性能評価 DB から算出した損失を累積復旧損失、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として式(1)のように定義する。

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

ここに、 $C_{Loss}(a)$ ：地震ロス関数、 $P_{Collapse}(a)$ ：終局変形に至る確率、 $C(a)$ ：累積復旧損失、 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」²⁾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、関東周辺の領域を対象に、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)で算定する。

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

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。

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

地震発生過程はポアソン過程に従うものとし、 y 年間最大地動加速度の確率分布 $F_{amax}(y, a)$ は式(4)で算定する。

$$F_{amax}(y, a) = \left\{ \exp\left(-\frac{N(a)}{y}\right) \right\}^y \quad (4)$$

ここに、 N ：合計度数

確率密度関数 $f_{amax}(y, a)$ は式(4)を微分したものを用いる。算定した関数曲線を図-5示す。

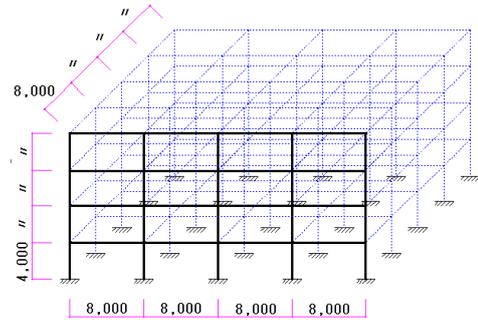


図-3 建物モデル概要

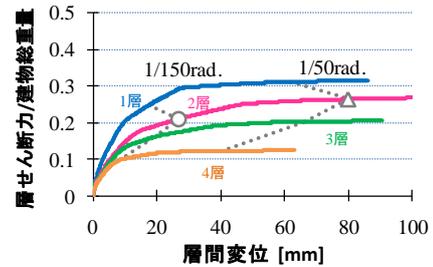


図-4 建物モデルの荷重変形関係

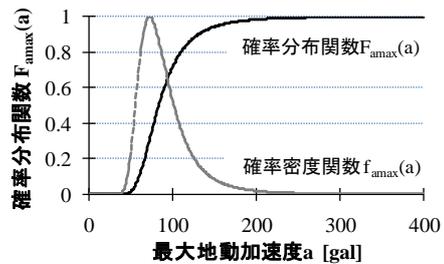


図-5 最大地動加速度に関する確率分布

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。

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

ここに、 $L(y)$ ： y 年間の損失期待値

3.5 構造性能向上と復旧性能の関係

ここでは構造性能の向上によって、地震リスク密度と損失期待値がどのように影響を受けるかについて試算を行う。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 を増加させた靱性型、計3種について解析を

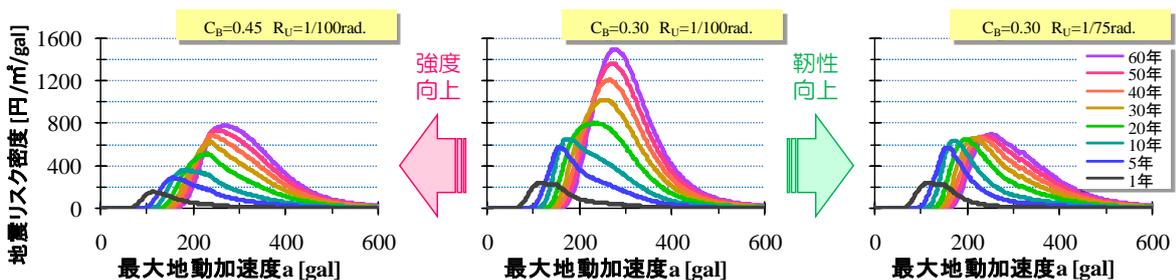


図-6 地震リスク密度関数

行う。解析結果の地震リスク密度関数を図-6示す。強度型では全域で低くなっている傾向が見られ、靱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 を横軸にとったときの損失期待値 $L(y)$ の推移を図-7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短い範囲で、靱性型は長い範囲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。一方で靱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-8のように建物が保有する資産の内訳は、その用途によって構成が大きく異なる。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、表-1参照）を考慮して、特にその傾向が大きい非構造部材と設備機器の項目については文献⁹⁾を参考に補正を行った。

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⁴⁾で使用される強度指標 C と靱性指標 F を用いて記述する。形状指標は $S_D = 1.0$ 、経年指標は改修前 $T = 0.9$ 、改修後 $T = 1.0$ 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、靱性型改修の Rd モデル、混合型改修の Rc モデルとし、改修後モデルはいずれも I_s 値が 0.70 となるように図-9のように設定した。

4.3 改修費用の設定

建物の改修費用 $C_{Restore}$ は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⁵⁾を参考に I_s 値の増分に対してこれを算定するものとし、結果として得られた平均値 $4.18[\text{万円}/\text{m}^2/\Delta I_s]$ を準用する。

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(6)のように定義する。

$$CRE = \frac{L_{Original}(y) - L_{Restore}(y)}{C_{Restore} + \beta \cdot L_{Suspend} \cdot T_{Restore}} \quad (6)$$

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(6)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、大きいほど改

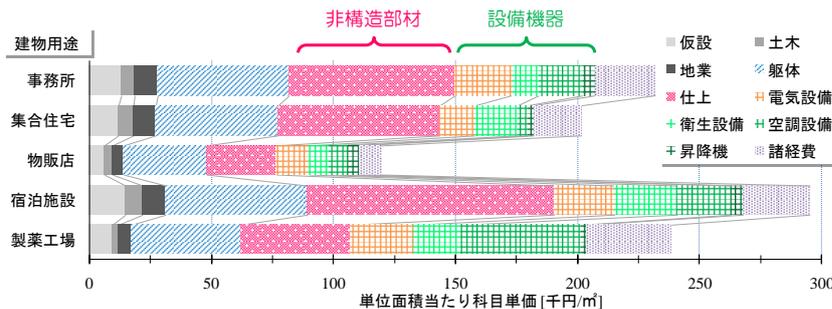


図-8 建物用途ごとの保有資産ウエイト

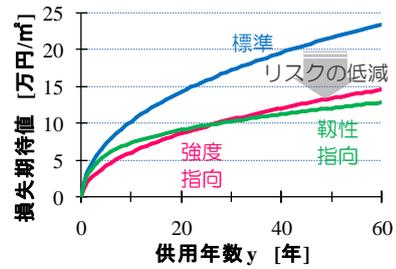


図-7 供用年数-損失期待値関係

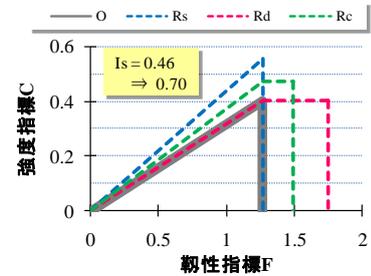


図-9 改修前後の C-F 関係図

表-2 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/ m^2]	事業影響度係数 β	補強・改修に要する日数 $T_{Restore}$ [日]
Rs	1.025	0.2	60
Rd	1.022	0.6	40
Rc	1.025	0.6	40

表-3 建物用途ごとの営業損失

	一日当たりの営業損失 $L_{Suspend}$ [円/ m^2 /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

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り、文献⁹⁾を参考に、表-2、表-3のように設定した。

4.5 解析結果

建物用途毎に算定した改修効用係数 CRE の推移を図-10に示す。全体的な傾向として混合型改修 Rc は比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 I_s 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などの原因が考えられる。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。

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

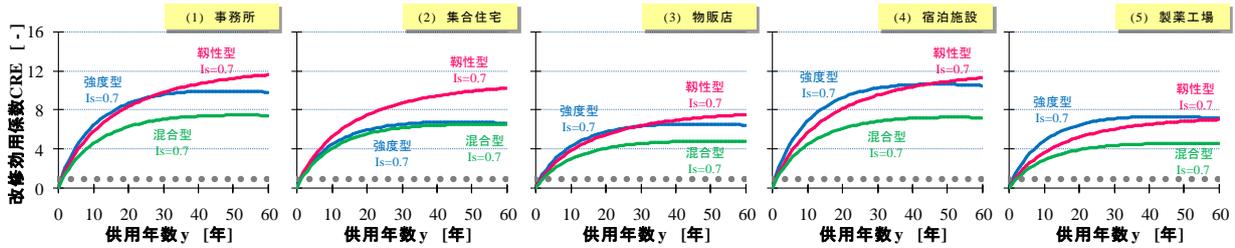


図-10 建物用途ごとの供用年数-改修効用係数の関係

(a) 恒常的に強度型改修が最高効用となる場合

耐震改修に伴う営業損失が大きいことが主原因であり、比較的事業影響度の低い強度型改修 R_s 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

建物の付加価値が低い場合には、崩壊による資産損失が支配的になり易く、靱性型改修 R_d 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

(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期間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、比較的強度型改修 R_s 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。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) 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た PML、並びに設備機能維持の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。

5.2 解析方法と出力方法

解析における入力外力は、建物の供用期間 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。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大きさを RGB コードに換算し、2次元座標に順次プロットする。

(1) PML 評価

設計変数は建物のベースシア係数 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復旧性能指標として採用する。

(2) 設備機器の機能維持性能評価

設備機器の耐震性能は、加速度依存型は層応答加速度、変形依存型は層間変形角で規定している。また、設備機器は耐震補強による耐震性能の割増が考えられる。そこで、建物のベースシア係数 C_B は0.3に固定し、最低ランクの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) 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 $FR(a)$ として定義し、この値を復旧性能指標として考える。

5.3 解析結果

供用期間を30年、60年に変化させた時の PML に関する

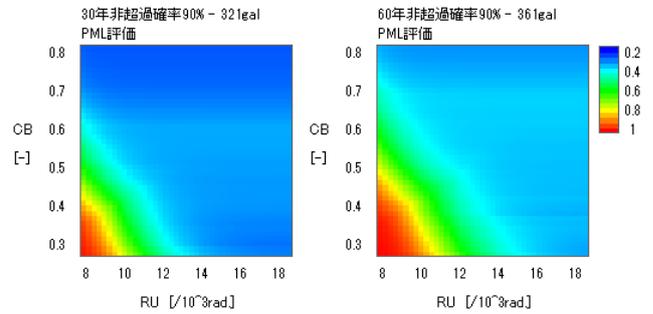


図-11 PML と設計条件のカラーマッピング

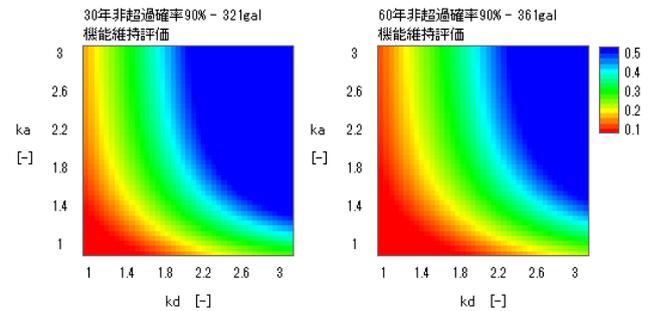


図-12 機能維持率と設計条件のカラーマッピング

カラーマッピングを図-11に示す。等性能線は線形に現れる傾向にあり、供用期間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。同様に供用期間に対する機能維持率 $FR(a)$ に関するカラーマッピングを図-12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。

6. まとめ

本研究では以下のような知見を得た。

- (1) 建物の高強度化は短期供用期間に対して、高靱性化は長期供用期間に対しての地震リスク低減効果が大きい。
- (2) 建物の用途と想定される供用期間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。
- (3) 地震リスク低減型設計を提案し、本手法を用いることで、設定した供用期間に対する目標復旧性能を満足するための設計条件の例を示した。

【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」, 建築研究所, 2011.1
- 2) <http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/db/jmal/index-j.html>
- 3) 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
- 4) 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解説, 2001年改訂版
- 5) 前川直之: 耐震補強工法のコストと効果の分析, 東京大学2004年度修士論文
- 6) 財団法人経済調査会: 積算資料ポケット版マンション Re2012