

地震リスク・マネジメント手法を活用した耐震性能評価手法に関する研究

○国土交通省大臣官房官庁営繕部整備課

課長補佐 末兼徹也

独立行政法人建築研究所住宅・都市研究グループ

研究員 高橋雄司

1. はじめに

1. 1 背景

平成7年1月の阪神・淡路大震災においては、官公庁施設も少なからず被害を受け、設備機器の被害、ライフラインの途絶等により、行政サービスの提供のみならず、情報の収集、伝達等、保有すべき地震災害応急対策のために必要な機能が発揮できなかつた事例も見受けられた。

阪神・淡路大震災を踏まえ、政府の中央防災会議においては、災害対策基本法に基づき定められる防災基本計画の必要な改定を行うとともに、平成15年5月に「東海地震対策大綱」を策定、同年12月には、「東南海・南海地震対策大綱」を策定する等、建築物の耐震化への取組等大地震への対策が推進されている。また、経済機能等の首都機能の確保対策をはじめとした首都直下地震対策をより強力なものとするため、平成15年9月から中央防災会議に「首都直下地震対策専門調査会」が設置され、平成17年7月に検討結果が報告されたところである。

官庁施設については、防災基本計画においても、被害が生じた場合に災害応急対策活動等にとって著しい妨げとなるおそれがある建築物等について、重要度を考慮し、高レベルの地震動に際しても他の構造物・施設等に比べ耐震性能に余裕を持たせることを目標とすることが規定されているところであり、国土交通省では、「官庁施設の総合耐震計画基準」（平成8年10月）を定め、耐震安全上の重要度に応じた耐震性能を目標として、施設整備を行っている。

1. 2 目的

既存の官庁施設については、「官庁施設の総合耐震診断・改修基準」¹⁾（平成8年10月）を定め、これに基づき耐震診断を実施し、その結果、所要の耐震性能を満足していないことが判明した施設は、緊急性の高いものから順次耐震改修を行うこととしている。

緊急性の判断については、耐震診断結果のほか、耐震安全上の重要度等を踏まえた総合的判断によっているが、改修が必要と判断される施設が多数あり、耐震改修の優先順位のより適切な判断のための新たな手法が求められている。本研究においては、耐震改修の優先順位付けにおける効果的、合理的な判断に資する耐震性能評価手法を作成することを目的とする。

1. 3 概要

近年、民間の不動産評価等においても、地震リスク・マネジメント手法を活用した評価手法が開発されてきており、平成17年3月には、政府の地震調査研究推進本部地震調査委員会により、「全国を概観した地震動予測地図」が報告されたところである。

本研究においては、この地震動予測による地震リスクを踏まえた耐震性能評価手法を作成する。個々の官庁施設については、「官庁施設の総合耐震診断・改修基準」に基づき耐震診断を行っているが、施設が位置する場所の地震活動の予測状況を踏まえ、この診断過程で算出するデータを用いて、予測される地震動に対する建築物の状況を限界耐力計算の考え方により想定し、倒壊又は崩壊の危険性（確率）として評価することとする。

1. 4 構成

第2章では、既存官庁施設の耐震診断について紹介する。第3章では、地震活動について述べる。第4章では、耐震性能評価へのリスク・マネジメント手法の活用方法を提案し、第5章において、その適用事例を示す。まとめを第6章に記す。

2. 官庁施設の耐震診断

基準¹⁾により耐震診断を行う場合においては、定量的な評価方法として、建築基準法施行令第82条の4に規定される保有水平耐力の検討を準用した方法を採用している。

その際、「構造体の耐震診断は、構造体全体を対象とし、設計図書に基づくとともに、現地調査により、立地、敷地状況、施工状況、劣化状況、増改築、改修の有無等を十分考慮して実施する。」との診断基準の規定を踏まえ、施行令に基づく保有水平耐力の検討に、劣化係数等のほか、昭和56年の建築基準法改正により導入された、いわゆる新耐震設計法の仕様規定への適否による補正係数を追加考慮し、構造耐震指標を算出することとしている。

2. 1 構造耐震指標

耐震性能の評価は、各階及び各方向別に次式により行う。

$$G I_s (\text{構造耐震指標}) = \frac{Q_u}{I \cdot \alpha \cdot Q_{un}} \quad (1)$$

Q_u : 保有水平耐力

Q_{un} : 必要保有水平耐力

I : 重要度係数

α : 必要保有水平耐力の補正係数

2. 2 保有水平耐力の算定

保有水平耐力の算定においては、構造計算プログラムを用いた荷重増分解析法により計算されることが多いが、鉄筋コンクリート造又は鉄骨鉄筋

コンクリート造で、低層かつ大きな偏心がない建築物については、次の略算式を用いて耐震診断を行なってもよいこととしている。

また、この場合においては、必要保有水平耐力の算定に用いる構造特性係数 (Ds) は、鉄筋コンクリート造では、0.75、鉄骨鉄筋コンクリート造では、0.7 とする。

$$Q_u = \max(Q_{u1}, Q_{u2}) \cdot \frac{F_c}{20} \quad (2)$$

$$Q_{u1} = 2.5 A_{w1} + 0.7 (1.0) (A_c + A_{w2})$$

$$Q_{u2} = 1.35 (1.5) A_{w1} + 1.35 (1.5) A$$

※参考文献1)の式をS I単位化している。()内数値は、鉄骨鉄筋コンクリート造の場合に適用する。

3. 地震活動

政府の地震調査研究推進本部地震調査委員会は、活断層調査、地震の発生可能性の長期評価、強震動予測等を踏まえ、日本各地が将来発生する地震によってどの程度の揺れに見舞われるか、あるいは今後の一定期間内に強い揺れに見舞われる可能性が各地でどの程度あるかといった予測情報を地震動予測地図としてまとめ、平成17年3月に「全国を概観した地震動予測地図」として公表している²⁾。

4. 地震リスク・マネジメント手法の活用

これまでに開発してきた地震リスク・マネジメント手法^{3),4)}を、既存施設の耐震性能評価に活用する。4.2節では、これまでのLCC(ライフサイクル・コスト)の定式化³⁾と同様に、建築物の崩壊確率を定式化する。ここでは、崩壊確率の計算の際に、施設周辺の地震活動として、「全国を概観した地震動予測地図」²⁾等の最新情報を直接導入できるように定式化を試みる。また、地震動、地盤増幅、建築物の地震応答について、関連研究分野(地震学、地盤工学、構造工学など)の最新のシミュレーションモデルを利用できるような式を導く。特に、建築物の地震応答解析には、限界耐力計算⁵⁾を援用できるフレームワークを構築する。

4.1 入力データ

耐震性能評価への入力データとして、第2章において紹介した耐震診断¹⁾の結果のうち、以下の構造特性を利用する。

- ・ 各層の終局強度 (Qu) → 変形-荷重曲線 (4.4節)
- ・ 各層の重量 (W) → 変形-荷重曲線 (4.4節)
- ・ 建築物高さH (1次固有周期) → 変形-荷重曲線 (4.4節)
- ・ 各層の構造特性係数 (Ds値) → フラジリティ曲線 (4.5節)

4.2 崩壊確率の定式化

一般に、建築物は複数の震源域に囲まれている(図1)。また、一つの震源域に注目しても、一般に、異なるマグニチュードの地震が発生する。したがって、ある建築物の崩壊確率を算出する際には、複数の地震を考慮する

必要がある。建築物が、全ての震源域における全てのマグニチュードの地震によって（少なくとも1回は）崩壊する確率は(3)式で求められる¹⁾。

$$P_{Fail}(t_{life}) = 1 - \prod_{All\ EQ} \{1 - P_{Fail}(EQ, t_{life})\} \quad (3)$$

$P_{Fail}(t_{life})$: 全ての地震 EQ を考慮した場合の t_{life} 年間の崩壊確率
 $P_{Fail}(EQ, t_{life})$: 特定の地震 EQ に対して、建築物が t_{life} 年間で（少なくとも1回は）崩壊する確率（= 1 - 安全確率）

(3)式における $P_{Fail}(EQ, t_{life})$ は、下式で求められる。

$$P_{Fail}(EQ, t_{life}) = \sum_{n=1}^{\infty} P_{EQ}(n, t_{life}) \{1 - P_{Safe}(EQ)^n\} \quad (4)$$

$P_{EQ}(n, t_{life})$: t_{life} 年間に地震 EQ が n 回発生する確率
 $P_{Safe}(EQ)$: 地震 EQ が発生した際の建築物の安全確率（= 1 - 崩壊確率）

(4)式における $P_{EQ}(n, t_{life})$ は、第3章で述べた「全国を概観した地震動予測地図」などで使用されている地震発生の確率モデルを使って求めることが出来る。具体的には、ポアソン・モデルやBPT（Brownian Passage Time）モデルである。

$P_{Safe}(EQ)$ は、特定の地震 EQ に対する安全確率であるから、断層破壊から建築物の地震応答までの一連の事象（図2）をシミュレーションすることにより算出できる。つまり、確定的な地震 EQ を想定した、シナリオ解析である。このシミュレーションを行う際には、地震学、地盤工学、構造工学などで開発された最新のモデルを活用できる。

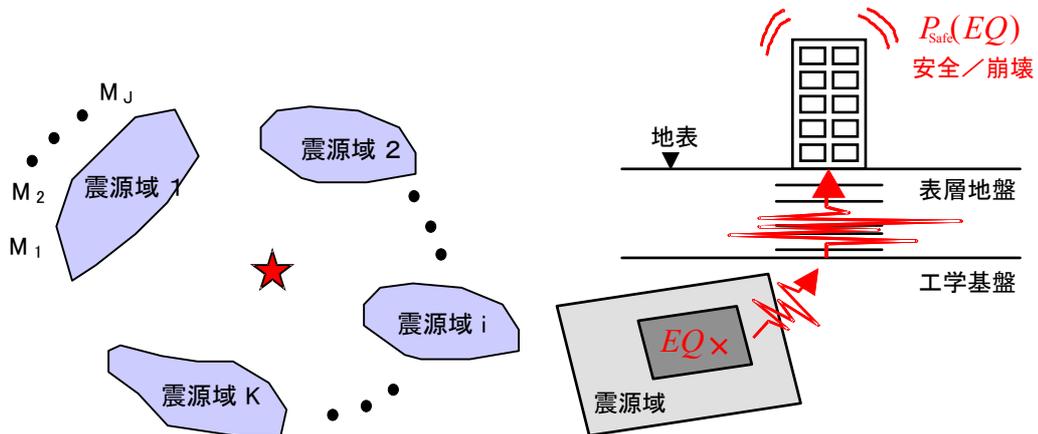


図1 建築物位置(★)と周辺の震源域

図2 地震発生から建築物の安全/崩壊までの事象

4. 3 限界耐力計算による安全確率評価

4.2節で述べた通り、(4)式における $P_{Safe}(EQ)$ を算出する際には、理論上、如何なるシミュレーションモデルでも用いることが出来る。しかしながら実用上は、シミュレーションに掛けられる費用や時間を考慮して、どのようなモデルを使うかが決められる^{3), 4)}。これまで筆者らは、時刻歴応答解

析（詳細法）³⁾や限界耐力計算（簡易法）⁴⁾により、LCC評価を行ってきた。

本稿では、限界耐力計算により、建物の安全確率 $P_{Safe}(EQ)$ を評価する（図3）。はじめに、距離減衰式⁶⁾により、地盤増幅を考慮した地震応答スペクトル（Demand Spectrum）を設定する。次に、建築物の等価1質点系の変形－荷重関係（Capacity Curve）を層毎の変形－荷重曲線を設定することにより求める。以上の Demand Spectrum と Capacity Curve を用いて、限界耐力計算により、等価1質点系の応答変位 S_d を求める。(5)式のモード展開により、各層の最大層間変形 δ_i を計算する。

$$\delta_i = \beta (u_i - u_{i-1}) S_d \quad (5)$$

- δ_i : i 層の層間変形
- β : 1 次の刺激係数
- u_i : 1 次モードベクトルの i 番目の要素
- S_d : 等価1質点系の応答変位

各層の最大層間変形 δ_i を塑性率 μ_i に変換し、図4のように、 fragility 曲線により、各層の安全確率 $P_{Safe,i}(EQ)$ を計算する。建物全体の安全確率 $P_{Safe}(EQ)$ は、(6)式のように各層の安全確率の総積として計算でき、これを(4)式に代入する。

$$P_{Safe}(EQ) = \prod_{i=1}^N P_{Safe,i}(EQ) \quad (6)$$

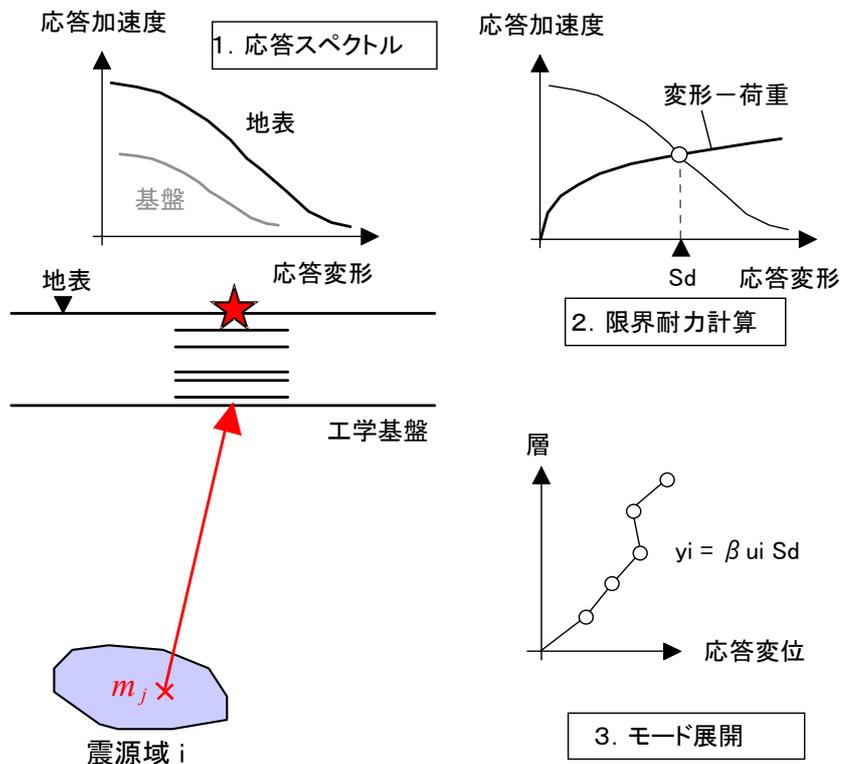


図3 限界耐力計算による地震応答解析

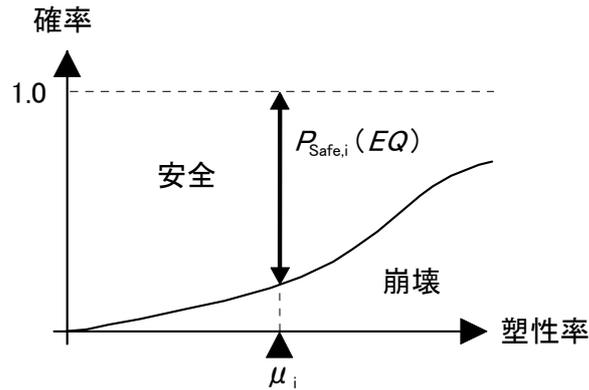


図4 フラジリティ曲線(各層の塑性率－崩壊確率)

4. 4 等価1質点系の変形－荷重関係 (Capacity Curve) の設定

建築物の等価1質点系の変形－荷重関係 (Capacity Curve) を層毎の変形－荷重曲線を設定することにより求める。高さ方向の荷重係数分布は、1次モード分布に比例とする⁵⁾。層毎の変形－荷重曲線の設定には、耐震診断結果を利用する。4.1節のとおり入力データとして、各層の終局強度 Q_u 、各層の重量 W 及び建築物高さ H (1次固有周期) を用いる。これらを踏まえ、各層の変形－荷重関係を図5のように設定する。各層の初期剛性 K は、終局強度 Q_u に比例するとし、1次固有周期により定める。モード展開の際には、この多質点モデル (弾性) の1次刺激関数を用いる。各層の初期剛性 K を終局強度 Q_u に比例させることで、モード展開の際に、終局強度の高低を応答変形に反映できる⁵⁾。つまり、強度の低い層の応答変形は大きく、強度の高い層の変形は小さくなる。

4. 5 フラジリティ曲線の設定

フラジリティ曲線は、対数正規分布とする。対数標準偏差は0.4程度とし、中央値 μ_0 は、建築物各層の構造特性係数 (D_s 値) に基づいて設定する。

$$\mu_0 = \frac{1 + D_s^2}{2D_s^2} \quad (6)$$

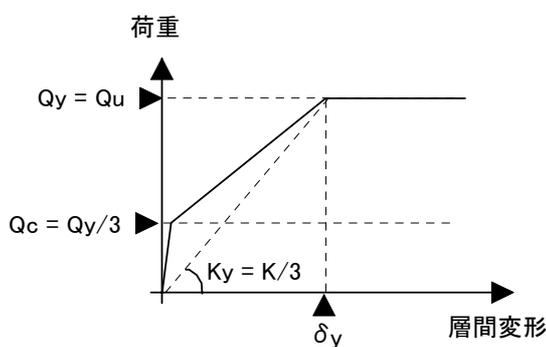


図5 各層の変形－荷重関係

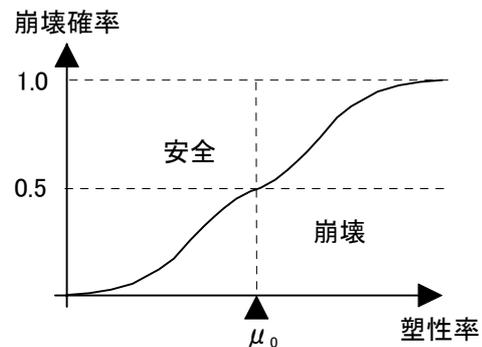


図6フラジリティ曲線

5. 事例研究

第4章で提案した耐震性能評価手法の事例研究として、本章では、ほぼ同規模の2施設の崩壊確率を計算する。これらの施設は、第3章で説明した耐震診断が実施され、同等の耐震性能を有しているとの結果が得られている。しかしながら、施設の建設地点が異なり周辺の地震環境に大きな違いがあることから、崩壊確率に差異が生じることが予想される。

5.1 施設概要

2施設の位置を図7に、概要を表1に示す。両施設の規模および耐震診断結果は同程度である。



図7 施設の位置(★)、プレート境界地震(□)および活断層(—)

表1 対象施設の概要

| | 庁舎 A | 庁舎 B |
|---------------------|-----------|-----------|
| 所在地 | 埼玉県さいたま市 | 茨城県水戸市 |
| 構造 | 鉄筋コンクリート造 | 鉄筋コンクリート造 |
| 規模 | 地上5階 | 地上5階 |
| 重要度係数 (I) | 1.0 | 1.0 |
| 耐震診断結果 (G_{Is}) | 0.30 | 0.36 |

5.2 想定地震

想定地震として、「全国を概観した地震動予測地図」²⁾を使用しているが、現在、導入作業を進めているところであり、本事例研究では、2003年に発表された国総研の地震活動モデル⁷⁾を利用する。

図7に、国総研資料⁷⁾に掲載されている震源域のうち、プレート境界地

震と活断層を示す（今回は、バックグラウンド地震を考慮しない）。庁舎Aおよび庁舎Bの崩壊確率算出においては、それぞれの位置から半径 100 km以内の震源域を考慮する。庁舎Aおよび庁舎Bの解析に考慮した地震（名前、マグニチュード、年発生率）を、それぞれ表2と表3に示す。図7からは、庁舎Bに比べて、庁舎Aの周辺には多くの震源域があり、地震危険度が高いことが分かる。

表2 庁舎A(さいたま市)に考慮した震源域

| No. | 震源域名 | M | 年発生率 | $P_{\text{Fail}}(EQ)$ (%) | $P_{\text{Fail}}(EQ,30)$ (%) |
|-----|--------------|-----|---------|---------------------------|------------------------------|
| 1 | 関東地震 | 7.9 | 0.0045 | 99 | 13 |
| 2 | 鴨川低地断層帯 | 7.3 | 4.3e-04 | 6.6e-04 | 8.6e-06 |
| 3 | 関谷断層帯 | 7.5 | 0.0018 | 2.1e-03 | 1.0e-04 |
| 4 | 内ノ笹断層 | 6.6 | 1.1e-04 | 0.0e+00 | 0.0e+00 |
| 5 | 深谷断層 | 7.0 | 2.5e-04 | 1.2e-03 | 9.0e-06 |
| 6 | 平井一櫛引断層帯 | 7.0 | 1.6e-04 | 4.9e-07 | 2.3e-09 |
| 7 | 荒川断層 | 7.0 | 1.3e-04 | 85 | 3.2e-01 |
| 8 | 越生断層 | 6.7 | 4.8e-05 | 8.0e-03 | 1.1e-05 |
| 9 | 立川断層帯 | 7.0 | 2.0E-04 | 1.1e-01 | 6.4e-04 |
| 10 | 鶴川断層 | 7.8 | 1.1e-05 | 53 | 1.7e-02 |
| 11 | 長者舎断層 | 6.6 | 5.9e-04 | 1.1e-07 | 1.9e-09 |
| 12 | 伊勢原断層 | 7.0 | 3.0e-04 | 1.3 | 1.2e-02 |
| 13 | 玄倉一塩沢断層帯 | 6.9 | 0.0034 | 9.8e-06 | 1.0e-06 |
| 14 | 東京湾北部断層 | 6.8 | 7.7e-05 | 11 | 2.5e-02 |
| 15 | 綾瀬川断層帯 | 7.2 | 1.5e-04 | 99 | 4.5e-01 |
| 16 | 北武一武山断層帯 | 6.8 | 6.7e-05 | 3.6e-06 | 7.2e-09 |
| 17 | 神縄一國府津一松田断層帯 | 9.0 | 3.3e-04 | 100 | 9.9e-01 |
| 18 | 丹那断層帯 | 7.4 | 8.3e-04 | 8.5e-02 | 2.1e-03 |
| 19 | 扇山断層 | 7.1 | 5.6e-05 | 7.6e-02 | 1.3e-04 |
| 20 | 曾根丘陵断層帯 | 6.6 | 5.3e-04 | 0.0e+00 | 0.0e+00 |
| 21 | 五日市断層 | 6.5 | 6.3e-04 | 4.2e-07 | 7.9e-10 |
| 22 | 大菩薩嶺西側 | 6.7 | 4.5e-05 | 5.3e-12 | 7.2e-15 |

表3 庁舎B(水戸市)に考慮した震源域

| No. | 震源域名 | M | 年発生率 | $P_{\text{Fail}}(EQ)$ (%) | $P_{\text{Fail}}(EQ,30)$ (%) |
|-----|----------|-----|---------|---------------------------|------------------------------|
| 1 | 関東地震 | 7.9 | 0.0045 | 10 | 1.4 |
| 2 | 双葉断層帯 | 6.7 | 9.1e-05 | 0.0e+00 | 0.0e+00 |
| 3 | 三群森断層帯 | 7.0 | 3.0e-04 | 7.0e-10 | 6.4e-12 |
| 4 | 川桁山断層 | 7.0 | 3.3e-04 | 8.2e-11 | 8.2e-13 |
| 5 | 大阪一足沢断層帯 | 6.8 | 8.3e-05 | 1.2e-10 | 2.9e-13 |
| 6 | 二ツ前断層 | 6.6 | 5.9e-04 | 3.6e-11 | 6.3e-13 |
| 7 | 井戸沢断層 | 6.9 | 3.4e-05 | 1.4e-04 | 1.4e-07 |
| 8 | 白河西方断層帯 | 6.9 | 3.7e-05 | 1.1e-07 | 1.2e-10 |
| 9 | 大内一倉村断層 | 6.5 | 1.3e-04 | 2.2e-14 | 8.4e-17 |
| 10 | 関谷断層帯 | 7.5 | 0.0017 | 9.0 | 4.5e-01 |
| 11 | 内ノ笹断層 | 6.6 | 1.1e-04 | 4.6e-11 | 1.5e-13 |
| 12 | 深谷断層 | 7.0 | 2.5e-04 | 4.1e-08 | 3.0e-10 |
| 13 | 荒川断層 | 7.0 | 1.3e-04 | 2.1e-07 | 8.0e-10 |
| 14 | 東京湾北部断層 | 6.8 | 7.7e-05 | 2.3e-09 | 5.2e-12 |
| 15 | 綾瀬川断層帯 | 7.2 | 1.5e-04 | 1.0e-03 | 4.6e-06 |
| 16 | 関口一黒磯 | 6.5 | 6.3e-05 | 8.3e-07 | 1.6e-09 |
| 17 | 関口一米平 | 6.5 | 6.3e-05 | 2.7e-04 | 5.1e-07 |

5. 3 崩壊確率の算出

第4章の手法により、庁舎Aおよび庁舎Bの崩壊確率 $P_{\text{Fail}}(t_{\text{life}})$ を計算する。はじめに、表2あるいは表3の各地震について、限界耐力計算（4.3節）により安全確率 $P_{\text{Safe}}(EQ)$ を計算する。各地震が起きた場合の破壊確率

$P_{Fail}(EQ)$ ($= 1 - P_{Safe}(EQ)$) を、表 2 および表 3 の 5 列目に示す。次に、 $P_{Fail}(EQ)$ と $P_{EQ}(n, t_{life})$ を (4) 式に代入し、 $P_{Fail}(EQ, t_{life})$ を計算する。 $P_{EQ}(n, t_{life})$ は、各地震の年発生率 (表 2 および表 3 の 4 列目) から算出したが、地震の発生は全てポアソン・モデルと仮定している。各地震について計算した $P_{Fail}(EQ, t_{life})$ を、表 2 および表 3 の 6 列目に示す (例として $t_{life} = 30$ 年の値を示す)。各地震による崩壊確率 $P_{Fail}(EQ, t_{life})$ は、全ての地震を考慮した崩壊確率 $P_{Fail}(t_{life})$ への影響度を示す。

各地震の $P_{Fail}(EQ, t_{life})$ の値を (3) 式に代入し、全ての地震を考慮した崩壊確率 $P_{Fail}(t_{life})$ を計算したものが図 8 である。両施設の崩壊確率を比較すると、耐震診断結果はほぼ同程度 ($G_{Is} = 0.3$ 強) であるにも関わらず、庁舎 A の方が有意に高い値となっていることが認められる。これは、5.2 節で述べた通り、庁舎 A の近傍により多くの震源域が存在し、地震危険度が高いためである。

以上のように、施設の耐震性能評価においては、施設の構造特性だけではなく、周辺の地震環境を考慮できる地震リスク・マネジメント手法を活用して評価することができる。

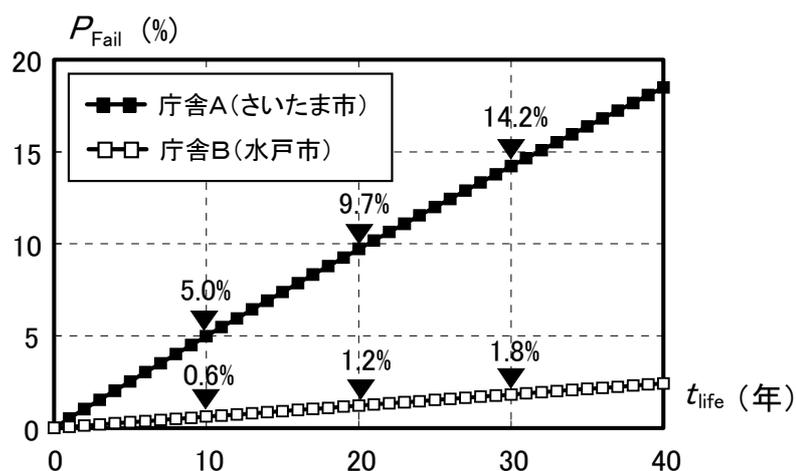


図8 想定期間-崩壊確率

6. まとめ

本研究においては、既存の耐震性に関するデータを用いて、できるだけ簡便に評価する手法を検討した。さらに精度の高い評価が必要な場合は、真に荷重増分解析を行い、限界耐力計算を実施することにより得られるはずである。

本稿は、既存施設の耐震性能評価に地震リスク・マネジメント手法を活用する研究の第一報である。今後の検討課題は次の通りである。

はじめに、建築物各層の変形-荷重関係の設定方法 (4.4 節) について、更に詳しく検討する。次に、地震ハザードとして、今回は国総研データ⁷⁾を用いたが、「全国を概観した地震動予測地図」²⁾のデータを導入して再解析を行う。その際には、地震発生の確率モデルについて、ポアソン・モデルだけではなく、

BPTモデルを導入する。今回の事例研究では、全てのパラメータを固定したが、不確実で結果への影響度が大きいと思われるものについては、感度解析を実施する。最後に、第5章では2棟の比較を紹介したが、日本各地にある多数の既存施設の評価を行う予定である。

日本国内では、どこでもある程度の規模の被害を伴う地震が発生する危険性があり、大きな地震の発生する可能性が低いと思われていた福岡において、平成17年3月に最大震度6弱の揺れを生じさせた福岡県西方沖地震が発生したことも記憶に新しいところである。

本研究は、耐震改修が必要な多くの建築物について、耐震改修の優先順位の判断のためのひとつの資料として役立つことを意図したものであり、今後も全国的に地震災害対策を行う必要があることは言うまでもない。

[参考文献]

- 1) 建設省大臣官房官庁営繕部建築課「官庁施設の総合耐震診断・改修基準」1996.10
- 2) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会「「全国を概観した地震動予測地図」報告書 <分冊1：確率論的地震動予測地図の説明>」、2005.3
- 3) 地震リスク・マネジメント研究会「地震対策の普及を目的とした地震リスク・マネジメント手法の実用化」建築研究資料、No.103、独立行政法人建築研究所、2005.7
- 4) 高橋雄司「簡易シミュレーションによる建築物の地震リスク分析」第50回構造工学シンポジウム、日本建築学会構造工学論文集 Vol. 50B、pp.453-463、2004.3
- 5) 国土交通省建築研究所「改正建築基準法の構造関係規定の技術的背景」ぎょうせい、2001.3
- 6) 山内洋志・山崎文雄・若松加寿江・Khosrow T. Shabestari「応答スペクトルの距離減衰式に基づく地点増幅特性と地形・表層地質分類との関係」土木学会論文集、No.682/I-56、pp.195-205、2001.7
- 7) 中尾吉宏・日下部毅明・村越潤・田村敬一：確率論的な地震ハザードマップの作成手法、国土技術政策総合研究所 研究報告、第16号、2003.10