Institute of Social Safety Science

構造特性を考慮した一様ハザードスペクトルによる地震リスク評価

Risk analysis based on uniform hazard spectra which reflect structural characteristics

○大峯 秀人[1]，林 孝幸[1]，矢代 晴実[1]，福島 誠一郎[2]
Hideto OMINE[1], Takayuki HAYASHI[1], Harumi YASHIRO[1] and Sei'ichiro FUKUSHIMA[2]

[1]東京海上日動リスクコンサルティング株式会社
Tokio Marine & Nichido Risk Consulting, Co., Ltd.
[2]東電設計株式会社
Tokyo Electric Power Services, Co., Ltd.

The seismic risk analysis consists of seismic hazard analysis and seismic fragility analysis. In the current study on seismic hazard analysis, some attenuation relations for spectral accelerations have been proposed. On the other hand, fragility of buildings may differ according to their inelastic characteristics though they are designed based on the same design code. In this study, seismic risks of buildings with different skelton curve are evaluated for seven sites in Japan by employing uniform hazard spectra for the sites and by constrcucting load-deflection relations for each buildings.

***Key Words** : Risk Analysis, Seismic hazard, Uniform hazard spectrum, Return period, Structural characteristics*

1. はじめに

近年，不動産投資のデューデリジェンスや保険の付保目的で地震 PML が評価されるなど，建物の保有する地震リスクを評価することが一般的になりつつある．また一方で，昨今の耐震偽装問題が発覚し，建物の設計者や販売者は，建物の耐震性能に関する説明責任をより求められることが多くなってきた．今後，こうした動きは加速し，建物の保有する地震リスクを明らかにすることは重要な役割を担うことになると考えられる．

建物の地震リスクを評価する際は，その地点でどのような地震動が起こりうるか，建物がどのような耐震性能を保有しているかが評価上必要な情報となる．一般的な地震リスクの評価の過程では，それらは地震ハザード評価と建物の損傷度評価という形で表される．

地震リスク評価における地震ハザード評価は，地震の揺れの強さを表現するものとして最大加速度や最大速度などの地震動強度指標を採用することが多い．その場合，経験的距離減衰式などの簡便な手法を採用することとなるが，昨今では，加速度応答スペクトルに関しても経験的距離減衰式が提案されており[例えば 1)]，周期を考慮した地震ハザードも評価可能となっている．またこの地震ハザードを用いて，建物の損傷度評価に建物の振動時の固有周期や塑性変形などの特性を考慮した地震リスク評価手法[2)]も提案されつつある．

一方で，建物の損傷度評価を実施する場合，建物の耐震性能を精緻に評価する必要があり，建築基準法に定める耐震性能を明確にしなくてはならない．建築基準法における耐震規定では，地域係数を用いて地域ごとに地震荷重が決定されているが，地域係数は 4 種類しか規定されておらず，広い地域において同一の地震荷重を設定している．また，設計の考え方により強度型や靭性型の性能が存在し，このような構造特性の違いが結果として地震リスク量に与える影響も大きい．

そこで本研究では全国 7 都市の再現期間を考慮した周期特性を持つ地震ハザードに対して，現行の耐震基準により設計された建物の構造特性を考慮した復元力特性をパラメータとして地震リスク評価を行い，地域間および構造特性間での地震リスク量を比較し，その相違を明らかにする．

2. 地震ハザード評価

地震ハザード評価は，札幌，仙台，新潟，東京，名古屋，大阪，福岡の 7 都市を対象とし，文献 3)に従い，所与の年超過確率に対応した一様ハザードスペクトル（UHS：Uniform Hazard Specrum）を応答スペクトルとして用いた．図 1 に各都市の UHS を示す．

応答加速度レベルに関して地点間で大きな差が生じており，応答スペクトル形状も地点間の特性が生じている．

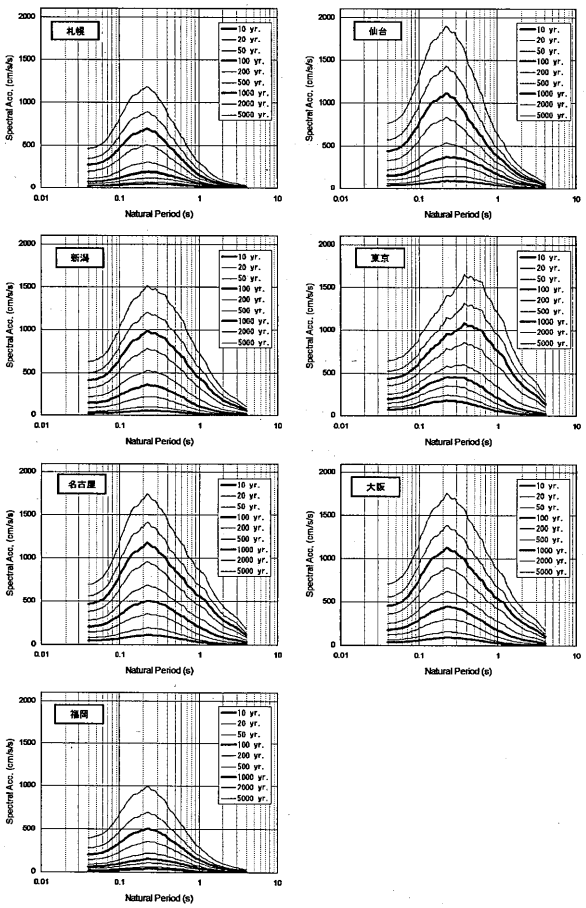

図 1　各都市の UHS の評価

NII-Electronic Library Service

Institute of Social Safety Science

3. 構造特性のモデル化

(1) 現行の耐震設計

1981 年より施行されている「新耐震設計法」の特徴は，従来の地震力により建築物各部に発生すると予測される応力度が材料の所定の許容応力度以内であることを確かめる計算（いわゆる「一次設計」）に加えて，更に大きな地震力に対して，許容応力度，弾性限界応力度を超えた塑性領域においても建物の変形能力が確保できることを確かめる計算（いわゆる「二次設計」）といえる．

現行の二次設計の設計ルート 3 では，部材の塑性化を考慮したモデル化を行い静的荷重増分解析等から，建物の変形能力が確保される時点での保有水平耐力 Q_u を計算し，必要保有水平耐力 Q_{un} を上回ることを求めている．Q_{un} は(1)式で示される．

$$Q_{un} = D_s \cdot F_{es} \cdot Q_{ud} \qquad (1)$$

D_s ：構造特性係数
F_{es} ：形状係数
Q_{ud} ：地震力により生ずる水平力（$C_0 = 1.0$ 以上）

この中で，構造特性係数 D_s は建物の変形能力によって決まり，基準法では構造種別，架構の形式より，鉄筋コンクリート造では $D_s = 0.30 \sim 0.55$，より靭性があると考えられる鉄骨造と鉄骨鉄筋コンクリート造では $D_s = 0.25 \sim 0.50$ と規定されている．

現行の二次設計により耐震設計された建物は，変形能力の高い架構においては，小さな水平抵抗強度を持てば良いとされ，例えば図 2 のように O 点と C 点(δ_E,Q_E)を結ぶ弾性変形のみによる構造体の歪エネルギーである三角形 OCD と，弾性限界耐力 A 点(δ_Y,Q_Y)で塑性化し，限界変形 B 点(δ_U,Q_Y)までの構造体の歪・塑性エネルギーである台形 OABE が等価な場合は，耐震設計上，同じ性能であると捉えられている．

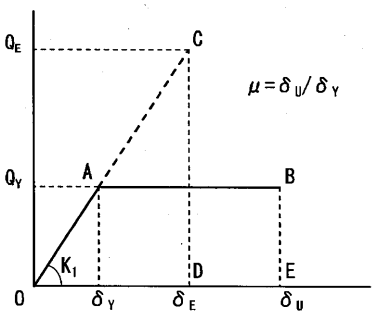

図 2　建築物の強度と変形能力

また，三角形 OCD の弾性歪エネルギーと等価となる完全弾塑性履歴の Q_Y と δ_U の関係は，$\mu = \delta_U / \delta_Y$ を用いると下式のように示される．

$$Q_Y / Q_E = 1/\sqrt{2 \cdot \mu - 1} \qquad (2)$$

(2) 検討モデルの設定

本検討では，(1)項で示した構造特性係数 D_s と同義である Q_Y / Q_E をパラメータとした構造特性の異なる建物を対象とし，地震時の建物応答を捉えるため，1 質点系の耐力-変位関係である復元力特性により建物の構造特性をモデル化し，1 章で定義した UHS を用いて，等価減衰を考慮した応答スペクトル法により応答値を推定し，その損傷度評価を行う．

解析パラメータは Q_Y / Q_E は 0.2～1.0 までの 0.2 刻みとし，各ケースの建物の限界変形 δ_U は，図 2 における弾性変形の歪エネルギー（三角形 OCD）と等価になるように(2)式を用いてして設定する．エネルギー量計算の基となる弾性耐力 Q_E は必要保有水平耐力の規定より $C_0 = 1.0$ 以上とされていることから，質点の質量 m に $1\,g$ を乗じた値として定義する．

検討モデル建物は地上 7 階建，階高 3.2m を想定し，建物高さ H より，建物の固有周期 T を建築基準法の鉄筋コンクリート造の略算式である $0.02 \cdot H$ から算定する．

以上より建物の固有周期から初期剛性 K_1 を定義し，パラメータである Q_Y / Q_E ごとに弾性限界耐力 Q_Y と限界変形 δ_U を算出し，また弾性限界変形 δ_Y を Q_Y / K_1 として算出する．表 1 に各パラメータの諸元を示し，図 3 に耐力 Q を質量 m で除して無次元化した復元力特性を示す．グラフ中の×印は，弾性変形の歪エネルギーと等価となる各ケースの限界変形 δ_U を示す．

表 1　各パラメータの諸元

	Q_Y / Q_E	μ	δ_Y (cm)	δ_U (cm)
Case1	1.0	1.0	5.08	5.08
Case2	0.8	1.3	4.07	5.21
Case3	0.6	1.9	3.05	5.76
Case4	0.4	3.6	2.03	7.37
Case5	0.2	13.0	1.02	13.22

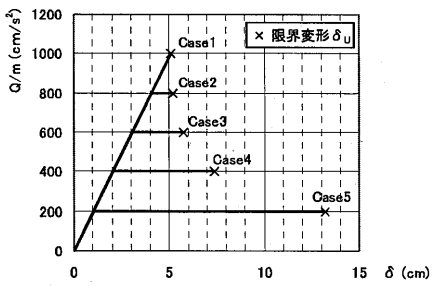

図 3 各パラメータの復元力

4. 損傷度評価

(1) 最大応答の推定方法

建物の損傷度評価は地震時の最大応答（変形）から定義する．与えられた UHS に対する最大応答を推定するため，各指標を変形 - 加速度関係として説明する．まず，2 章で評価した地震ハザード UHS の加速度 - 周期関係を変形 - 加速度（S_d - S_a）応答スペクトルへ変換し，3 章で評価した質量を無次元化した復元力特性との関係から 1 質点系の代表変位を推定する．

また建物の塑性変形による履歴減衰の効果を考慮するため各変形状態で規定される加速度低減率 F_h を S_d - S_a 応答スペクトルに乗じることで考慮する．履歴減衰と粘性減衰を含めた 1 質点系の等価減衰乗数 h_{eq} は(3)式で定義し，これより加速度低減率 Fh を(4)式にて評価する．

以上は，建築基準法で定められた限界耐力設計の手法[4]による．

図 4 に応答値推定の模式図を示す．

$$h_{eq} = 0.25\left(1 - 1/\sqrt{\mu}\right) + 0.05 \qquad (3)$$

$$F_h = \frac{1.5}{1 + 10 h_{eq}} \qquad (4)$$

NII-Electronic Library Service

Institute of Social Safety Science

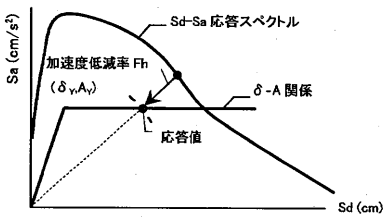

図 4　応答値推定の模式図

(2) 最大応答の推定

各ケースの 7 都市における各再現期間 S_d - S_a 応答スペクトルに対する最大応答の推定結果を図 5 に示す.

各都市間により S_d - S_a 応答スペクトルの強度・形状が異なり，また建物の復元力特性が異なるため，応答値に差異が生じている.

仙台と東京で比較した場合，S_a 強度はいずれも高いレベルを示しているが，再現期間が長くなるに従い同レベルの S_a に対して東京の S_d が大きくなり，より長周期側に強度がある応答スペクトル形状となっていることがわかる．これより東京における建物の応答はより大きな履歴減衰を求められ，大きな塑性変形が生じているのがわかる．また名古屋・大阪と新潟を比較すると，短周期帯では各応答スペクトルの強度・形状が類似しているが，長周期帯において名古屋・大阪の S_d 成分が大きくなっている．これより塑性後の等価周期が長くなる **Case4,5** の応答に関して名古屋・大阪が新潟に対して大きくなっているのがわかる.

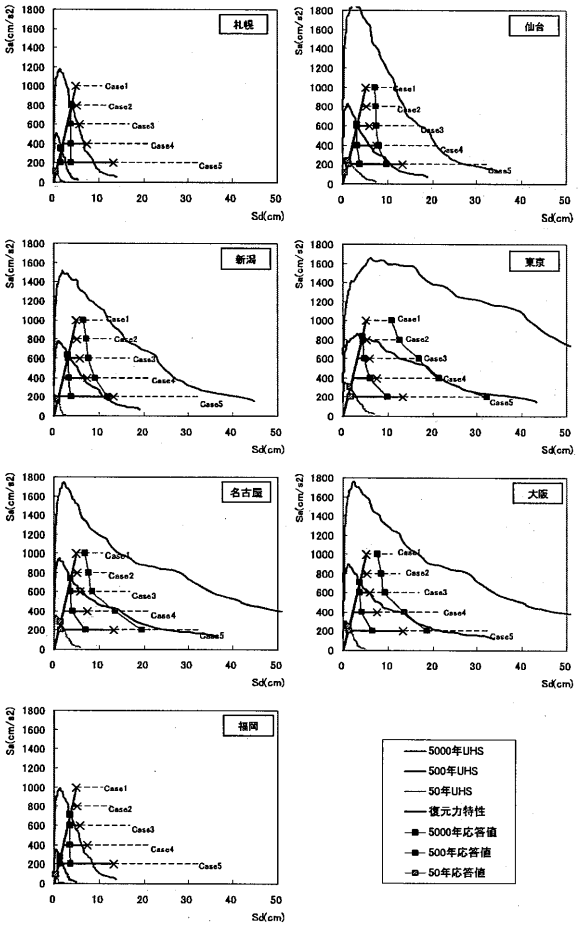

図 5　各都市の応答結果

(3) 損傷確率の算出

本検討では応答のばらつきを考慮するため，推定した最大応答を応答の中央値として捉え，対数標準偏差を **0.4** とした対数正規分布に倣うと仮定した．以上の応答分布に対して表 1 の各ケースの限界変形 δ_U を超過する確率を損傷確率と定義した.

図 **6** に各ケースにおける各都市，各再現期間の損傷確率を示す．各ケースとも再現期間 **100** 年程度を超える地震ハザードから損傷が発生し，各都市間で損傷確率の差異が生じている．これより構造性能が同じでも建設地により地震ハザードである応答スペクトルの強度・形状が異なるため建物の保有する地震リスクが異なることがわかる.

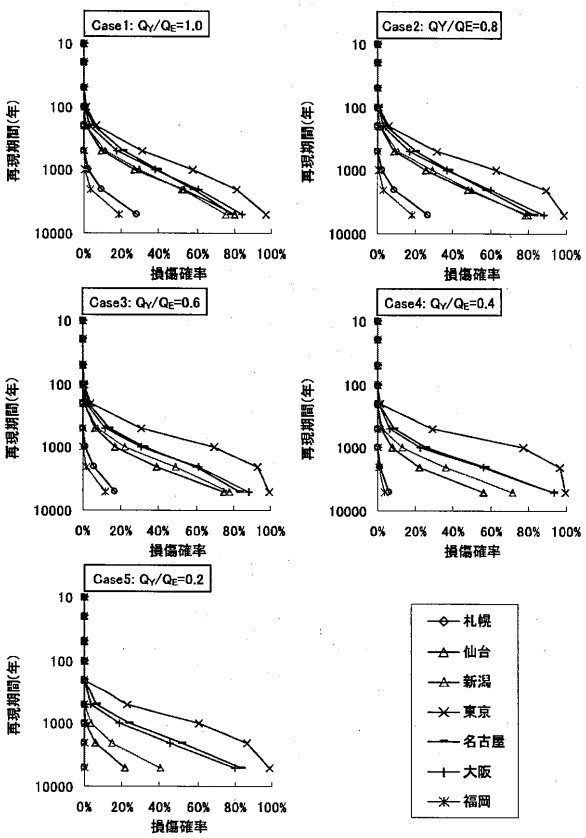

図 6　各都市，各再現期間の損傷確率

図 **7** に代表的な再現期間における各都市，各ケースの損傷確率を示す．前述したように再現期間の短い地震ハザードでは，各都市，各ケースともに損傷確率が小さい．これに対して再現期間が長くなると各都市間の損傷確率が定量的に差異が大きくなる.

また各ケース間においても損傷確率が異なっている．(2)項で示した通り，東京では再現期間が長くなると長周期側に強度がある応答スペクトル形状となり，建物塑性後の等価周期が長くなる **Case4,5** に関して応答が大きくなり，他の都市に比べて大きな損傷確率となっている.

これに対して仙台・新潟は，再現期間が長くても短周期側に強度がある応答スペクトル形状となっており，等価周期の短い **Case1,2** の損傷確率は大きいが，**Case4,5** に関しては損傷確率が小さくなっている.

以上から，ある地点の同じ地震ハザードに対して，現行耐震設計による建物としても，その構造性能に違いがある場合，保有する地震リスクが異なることがわかる.

NII-Electronic Library Service

Institute of Social Safety Science

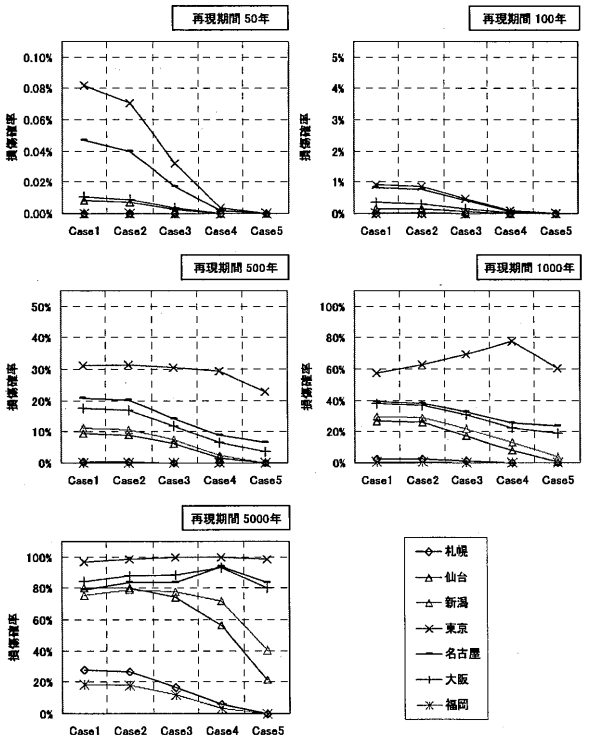

図 7　各都市における各ケースの損傷確率

4. まとめ

全国 7 都市の再現期間ごとの一様ハザードスペクトルを地震ハザードとし，現行耐震基準による構造特性を考慮した建物の地震リスク評価を行った結果，以下の知見を得た．

① 地震ハザードを一様ハザードスペクトルで表現した場合，各都市間で応答スペクトルの強度・形状に違いがあり，これにより同じ構造特性を持つ建物でも地域間で地震リスクが異なってくる．また再現期間が長くなるとその差異が顕著になってくる．

② ある地点の地震ハザードを一様ハザードスペクトルで定義した場合，現行の耐震基準を満たす建物であっても，等価周期の短い強度型の建物や，等価周期が長くなる靭性型の建物などその建物の持つ固有の構造特性によって異なる地震リスクを保有する．

参考文献

1) 安中正・山崎文雄・片平冬樹：気象庁 87 型強震計を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案，第 24 回地震工学研究発表会講演論文集，1997，pp.161-164

2) 坪田正紀他：限界耐力計算法を活用した簡易地震 LCC 分析プログラムの開発，日本建築学会技術報告書　第 24 号，2006

3) 福島誠一郎：設計用スペクトルの確率論的相互比較，日本建築学会シンポジウム「建築・土木構造物の要求性能と地震荷重」，2006，pp.33-40

4) 国土交通省住宅局建築指導課他：「2001 年版　限界耐力計算法の計算例とその解説」，2001

NII-Electronic Library Service