

一様ハザードスペクトルに関する基礎的考察

中島正人¹・In-Kil CHOI²・大島靖樹³

¹ (財) 電力中央研究所 地球工学研究所地震工学領域 (〒 270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)
E-mail:masato@criepi.denken.or.jp

² Korea Atomic Energy Research Institute, Integrated Risk Assessment Center (P.O. Box 105, Yuseong, Daejeon, 305-600 Korea) E-mail:cik@kaeri.re.kr

³ (財) 電力中央研究所 地球工学研究所地震工学領域 (〒 270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)
E-mail:ootori@criepi.denken.or.jp

重要構造物の地震 PSA (確率論的安全性評価) においては, 対象地点の基本的な地震ハザード情報として, 地震動強度と t 年超過確率の関係を示す地震ハザード曲線だけではなく, 一様ハザードスペクトル (等確率スペクトル) を評価する例が多い. しかしながら, 一様ハザードスペクトルの適用性, あるいは地震ハザード再分解のような詳細な地震ハザード評価との関連は未だ十分には検討されていない. 本報告では, 地震発生源モデルが比較的単純な韓国を対象として確率論地震ハザード解析を実施し一様ハザードスペクトルを評価する. 次に一様ハザードスペクトルと既往の方法に基づく設計スペクトルを比較することにより, 両者の特徴および相違について基礎的な考察を行う.

Key Words: *Seismic PSA, probabilistic seismic hazard, uniform hazard spectrum, design spectrum*

1. はじめに

重要施設・構造物の地震リスクや耐震性能を定量的に評価する際には, 地震 PSA (Probabilistic Safety Assessment: 確率論的地震時安全性評価) が有用な方法であり, 入力地震動評価としては確率論的地震ハザード解析が用いられている. この地震ハザード解析では, 地震動指標として PGA 等の地動最大加速度だけではなく, 応答加速度等の指標とした距離減衰式を用いることにより, 注目する超過確率に対応したスペクトル応答値を結ぶことにより, 一様ハザードスペクトル (等確率スペクトル) を得ることができる. この一様ハザードスペクトルは, 米国では地震 PSA で fragility 評価を行う際に入力地震動として用いられおり (例えば ASCE¹⁾), 地震ハザード曲線と同様に実務上有用な情報を得ることが可能である. また, 確率論的地震ハザード解析に基づき, 対象地点 (対象構造物) の設計用あるいは耐震性能照査用のスペクトルを規定する, 最も簡便な方法として用いることも期待できる.

しかしながら, 耐震設計あるいは耐震性能照査という観点から一様ハザードスペクトルの適用性, あるいは地震ハザード再分解のような詳細な地震ハザード評価との関連は十分に検討されているとはいえない. 本報告では, 日本と比較して地震発生源モデルが比較的単純な韓国を対象として確率論地震ハザード解析を実

施し一様ハザードスペクトルを評価する. 次に一様ハザードスペクトルと既往の方法に基づく設計スペクトルを比較することにより, 両者の特徴および相違について考察を行う.

2. 地震ハザード解析のための解析条件・解析モデル

ここでは, 韓国内地点の地震ハザード解析を行うための, 地震発生源モデルおよび地震動評価モデルについて説明する.

(1) 地震ハザード解析手法

地震ハザード解析手法は, 全ての地震の発生時系列は定常ポアソン過程に従うと仮定したポアソン型モデル (Cornell²⁾) を用いる. 解析対象地点周辺を地震活動度や地震発生様式が一様とみなせる領域 (地震活動域または地震発生源) に分割した後, 地震発生時系列はポアソン過程に従う, 規模別発生頻度は Gutenberg-Richter 式に従う, 地震発生位置は各地震活動域内で一様ランダムと仮定している.

(2) 地震発生源モデル

地震発生源モデルは, 文献³⁾に示されているモデルを用いた. この文献では EPRI の方法⁴⁾に習い, 4つ

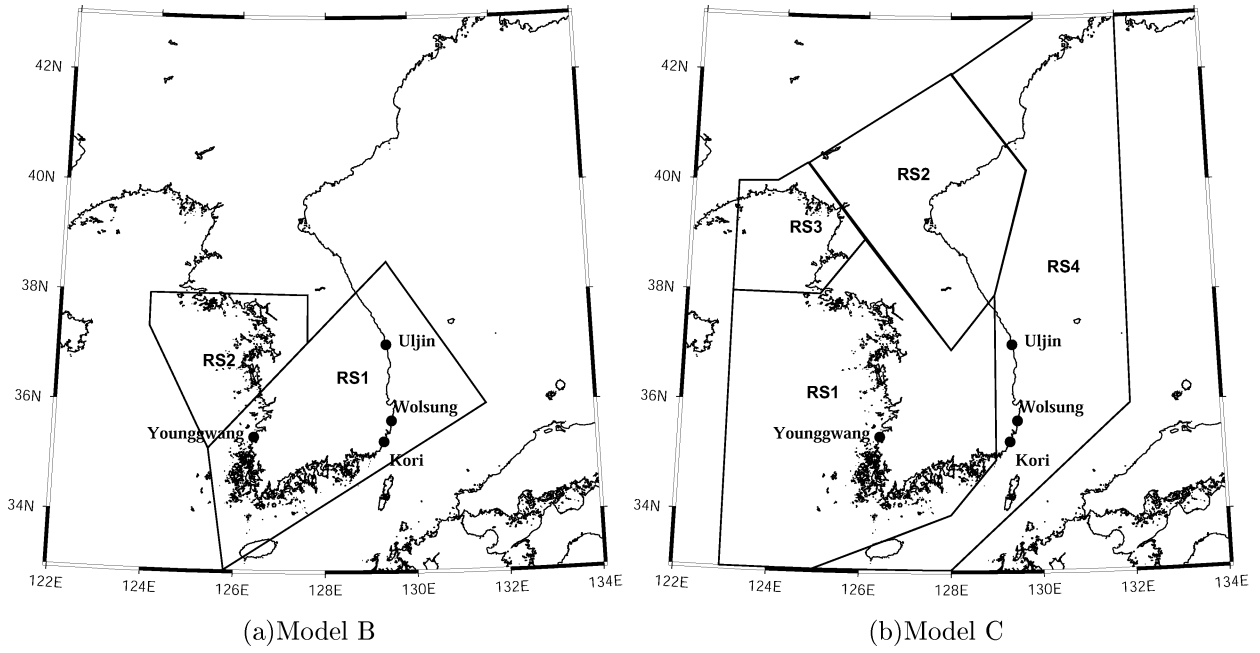


図-1 韓国の地震発生源モデル

表-1 地震発生源モデル活動度パラメータ (モデル B)

Source No.	a	b	w_1	M_{max}	w_2
RS1	2.96	0.83	0.6	6.7	0.7
RS2	2.53	0.75	0.6	6.5	0.6

a, b : G-R 式の係数 (a, b 値)
 w_1 : (a, b) に関する重み係数
 M_{max} : 最大マグニチュード
 w_2 : M_{max} に関する重み係数

の地質学専門家グループ (Team A, Team B, Team C, Team D) が, Expert opinion としてそれぞれのチームから一つずつモデルを提案し, 合計 4 つのモデルが設定されている. 本論文では, 上記 4 チームによるモデルをそれぞれモデル A~D を呼ぶこととする. 地震発生源モデルの活動度に関するパラメータ例を表-1 に, 形状および位置関係を図-1 に示す.

(3) 地震動距離減衰式

韓国を対象とした地震ハザード評価では, 米国で開発された地震動距離減衰式を用いる例が多かったが, 今回の解析では, Yun and Park により開発された地震動距離減衰式⁵⁾を用いた. この距離減衰式は, 韓国内の 4 つの地点 (図-1 中に示す Wolsung, Kori, Uljin, Younggwang) 毎に開発され, 3 種類の地震動指標 (PGA, PGV, 応答加速度 S_A) を対象としている. 地震動指標が応答加速度の場合の式を以下に示す.

$$\ln(Y(S_A(g))) = C_1 + C_2 M_w + (C_3 + C_4 M_w) \log(R_{epi} + \exp(C_5)) + C_6 (M_w - 6.0)^2 + C_7 \ln(\min(R, 50)) + C_8 (\max(R, 50)) \quad (1)$$

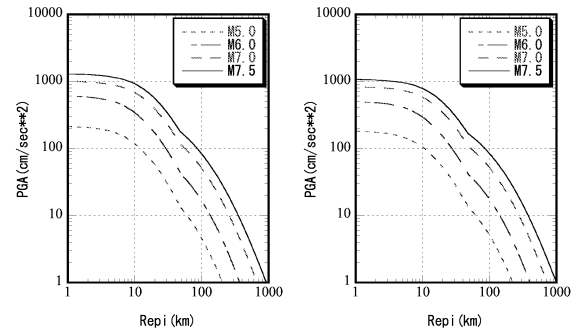


図-2 Yun and Park による距離減衰式⁵⁾の特性

$$\begin{aligned}
 R &= \sqrt{R_{epi}^2 + 9.8^2} \quad (M_w \leq 6.5) \quad (2) \\
 &= \sqrt{R_{epi}^2 + 9.8^2 \exp\{2.0(-1.25 + 0.227 M_w)\}} \quad (M_w > 6.5) \quad (3)
 \end{aligned}$$

M_w はモーメントマグニチュード, R_{epi} は震央距離, $C_1 \sim C_8$ は回帰係数を表す.

本論文では, Wolsung (129.4773° E, 35.7127° N) と Younggwang (126.4186° E, 35.4124° N) を解析対象地点とした. ここで Wolsung と Younggwang に注目したのは, Wolsung, Kori, Uljin は韓国の東海岸に位置するのに対して, Younggwang は西海岸に位置しており, 韓国内の地震ハザードの地域差を把握するためである. 図-2 に対象とする二地点用の式の特性を示す. この Yun and Park の式は, R が 50(km) の点を境に距離減衰の傾向が変化し, 米国東部・中央部用の距離減衰式の特性に近いといえる.

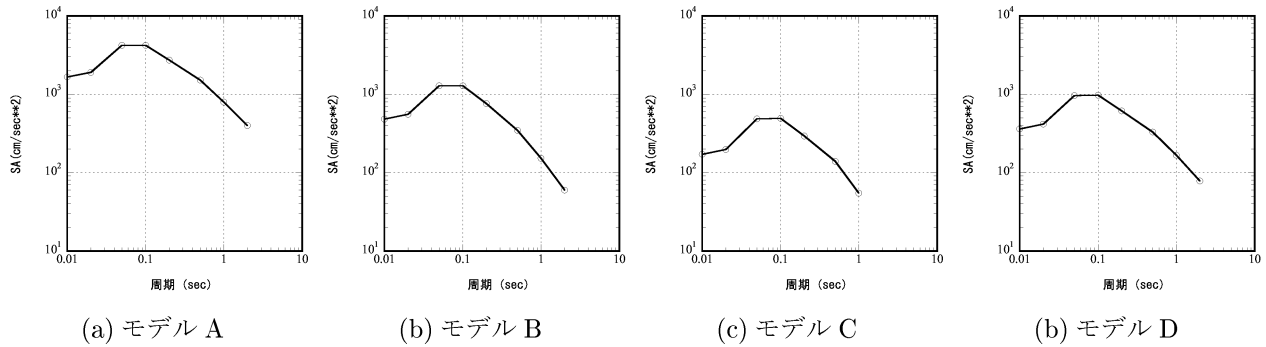


図-3 Wolsung を対象とした一様ハザードスペクトル (年超過確率 10^{-4})

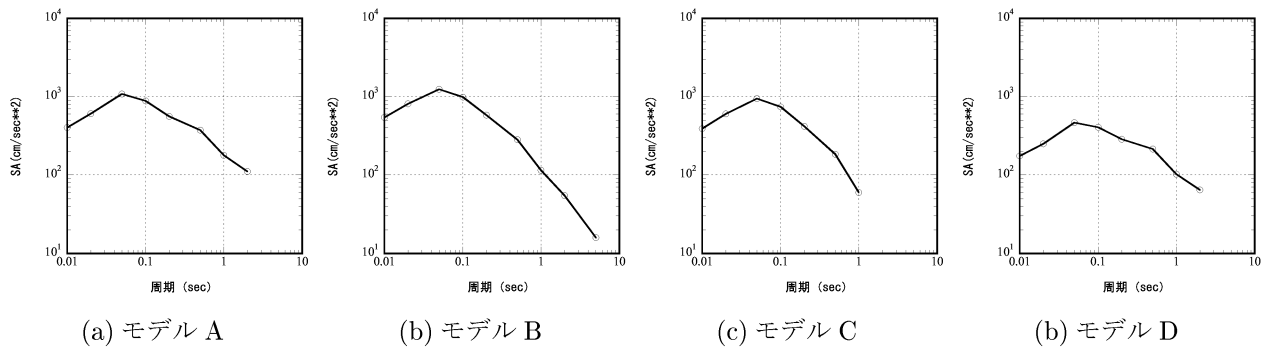


図-4 Younggwang を対象とした一様ハザードスペクトル (年超過確率 10^{-4})

3. 地震ハザード解析結果

2. で示した解析方法・解析条件に基づき実施した対象地点の地震ハザード解析結果を示す。

(1) 対象地点の一様ハザードスペクトル評価

9つの周期 (0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.5, 1.0, 2.0 5.0sec) を対象とした、地震ハザード解析結果に基づき、重みが最も大きいケースについて一様ハザードスペクトルを算出した。注目する年超過確率は、原子力施設を対象とした地震 PSA で用いられることが多い 10^{-4} とした。

Wolsung の場合 (図-3)，モデル B およびモデル D を用いた一様ハザードスペクトルは、振幅・形状ともにほぼ同じといえる。一方、モデル A のスペクトルは、形状はモデル B・モデル D のスペクトルに似ているが、0.1sec で約 4000Gal の大きさであり非常に大きい。また、モデル C のスペクトル形状は似ているが、0.1sec で約 500Gal と対照的な結果になった。

Younggwang の場合 (図-4)，モデル A とモデル D では長周期側の減少が小さく形状がほぼ同じといえる。一方、モデル B とモデル C は 0.05sec をピークに振幅は急激に小さくなる。4つのモデルともに、モデル A，モデル B，モデル C は周期 0.05sec で約 1000Gal のピーク値に達する。この傾向は他の 3 地点とは大きく異なる。今回の解析により、重みが最も大きい地震活動度パラメータを用いた場合、4地点の一様ハザードスペクトルは、モデルの違い、地点の違いにより、形状・振幅

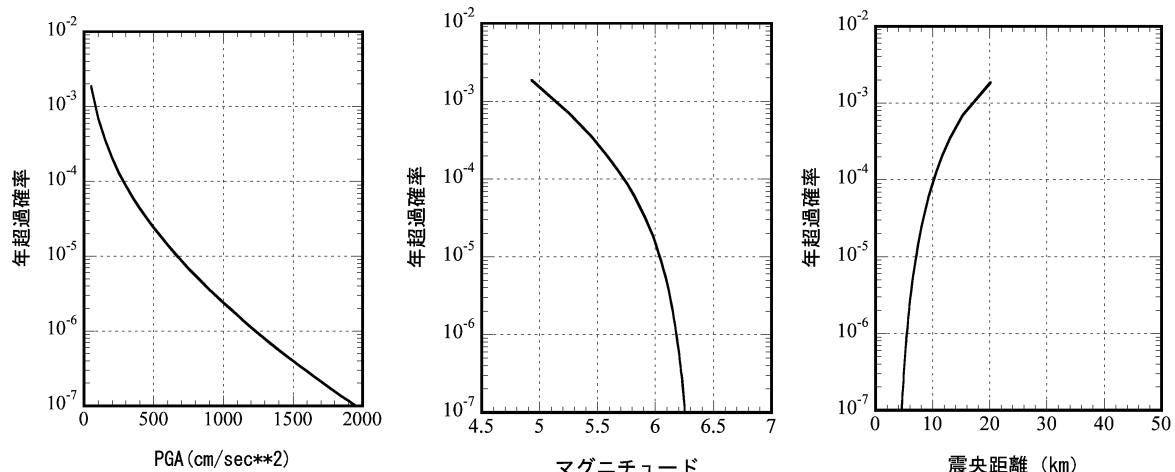
ともに異なることが明らかになった。

(2) 設計用スペクトルとの比較例

前節までに得られた一様ハザードスペクトルと、設計用スペクトルについて比較を行う。4地点のうち Younggwang を対象地点として、地震発生源モデルは地震ハザード解析結果が中程度の大きさであったモデル B (図-1) を用いた。地震動距離減衰式は、Yun and Park による PGA の距離減衰式 (Younggwang 地点用) 2) を用いた。図-5 に Younggwang 地点の地震ハザード曲線および確率論的想定地震の方法⁶⁾の算出結果を示す。今回の解析では年超過確率 10^{-4} を参照確率として設定した。図-5(b)(c) より、年超過確率 10^{-4} に対応する確率論的想定地震の諸元は、マグニチュード M が 5.7、震央距離 Δ が 10km である。次に、この想定地震 (M5.7, Δ 10km) に基づき、日本の原子力施設・構造物の耐震設計用応答スペクトルとして用いられている、以下の 2 種類の応答スペクトルを作成した。

- (方法 1) 大崎による方法⁷⁾に基づき評価した応答スペクトル (図-6(a))
- (方法 2) Nishimura et al. による方法⁸⁾に基づき評価した応答スペクトル (図-6(b))

二つの方法で評価したスペクトルを比較すると、短周期帯域では両者はほぼ同じであるが、周期 0.1sec より長い帯域では、耐震スペクトルで評価した応答スペクトルの方が、大崎スペクトルで評価した応答スペクトルよりも大きいことがわかる。



(a) 地震ハザード曲線

(b) ハザード適合マグニチュード

(c) ハザード適合震央距離

図-5 Younggwang 地点の地震ハザード解析結果

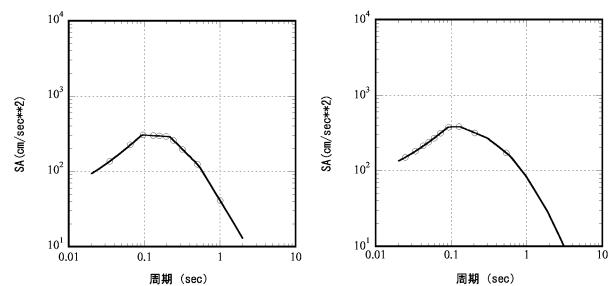
Younggwang 地点の一樣ハザードスペクトル（図-4(b)）と、図-6 で示すスペクトルでは、先ず応答スペクトルの全体形状が異なっていることがわかる。すなわち、一樣ハザードスペクトルの方がピークが短周期側にあり、設計用スペクトルは中～長周期領域が一樣ハザードスペクトルより大きい傾向があることがわかる。本節の比較より、地震発生源モデルがランダム地震域のみでモデル化された場合という限定的なケースの結論であるが、重要構造物の地震時安全性評価において一樣ハザードスペクトルを用いる場合、想定する地震のイメージを明確化した設計用スペクトルとは一致しない場合があることが明らかになった。

4. まとめ

一樣ハザードスペクトルの特性評価を目的として、地震発生源モデルが単純な韓国内地点を対象に、地震活動度パラメータの信頼度を考慮した確率論的地震ハザード解析を実施した。

(1) 各地点用に開発された応答加速度の距離減衰式を用いた地震ハザード解析に基づき、対象地点に対して、年超過確率 10^{-4} に対応する一樣ハザードスペクトルを評価した。評価された一樣ハザードスペクトルを比較した結果、地震発生源モデルが単純なケースでも、スペクトルのピーク値が出現する周期および長周期領域での減少傾向が韓国東側地点と西側地点では異なること、同一地点でも地震発生源モデルにより特徴が異なることを明らかにした。

(2) Younggwang 地点の解析結果より、同じ地点に対する一樣ハザードスペクトルと設計用スペクトルとは一致しない場合があることを明らかにした。設計用スペクトルを確率論的地震ハザード評価の結果と対応付ける場合、一樣ハザードスペクトルだけを用いて単純比較することは難しいケースがあり、地震ハザード再分解により可能となる、発生確率に対応した対象地点で想定すべき地震の情報が重要であることを意味している。



(a) 方法-1

(b) 方法-2

図-6 既往の方法に基づく Younggwang 地点の設計スペクトル評価例

参考文献

- 1) ASCE: ASCE/SEI 43-05 Seismic Design Criteria for Structures, Systems, and Components in Nuclear Facilities, 2005.
- 2) Cornell, C.A.: Engineering Seismic Risk Analysis, Bulletin of Seismological Society of America, Vol.58, No.5, pp.1583-1606, 1968.
- 3) Korea Electric Power Research Institute: An Evaluation of Inputs to the Probabilistic Seismic Hazard Analysis, Technical Report TR.96NJ21.J1999.72, 1992.
- 4) U.S. Electric Power Research Institute: Seismic Hazard Methodology for the Central and Eastern United States, EPRI NP-4726, 1988.
- 5) Yun, K.-H. and D.-H. Park: Development of Site-Specific Ground-Motion Attenuation Relations in Korea -Examples for the Nuclear Power Plant sites-, The 5th International Workshop on the Fundamental Research for Mitigating Earthquake Hazards, 2005.
- 6) 亀田弘行・石川 裕・奥村俊彦・中島正人: 確率論的想定地震の概念と応用, 土木学会論文集 No.577/I-41, pp.75-87, 1997.
- 7) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会,

1994.

8) Nishimura, I., S.Noda, K.Takahashi, M.Takemura, S.Ohno, M.Tohdo and T.Watanabe: Response Spectra for Design Purpose of Stiff Structures on Rock Sites, SMiRT 16, Washington DC, Paper #1133, 2001.

(2007.06.29 受付)

BASIC STUDY ON EXAMINATION OF UNIFORM HAZARD SPECTRUM

Masato NAKAJIMA, In-Kil CHOI and Yasuki OHTORI

Uniform hazard spectrum (UHS) has been used in performing seismic Probabilistic Safety Assessment for existing important structures and facilities. The objective of this paper is to discuss basic characteristics of the UHS and to compare the UHS and design spectrum. UHS are evaluated for sites in Korea where all seismic sources are area-source models, and we clarify the differences between the UHS and design spectra based on the conventional methods in a case where simple seismic sources models are employed.