

地震ハザード解析に基づく 構造物の地震リスク評価方法に関する基礎的検討

中島正人¹・平田和太²

¹ (財) 電力中央研究所 我孫子研究所地盤耐震部 主任研究員 (〒 270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)
E-mail: masato@criepi.denken.or.jp

² (財) 電力中央研究所 我孫子研究所地盤耐震部 上席研究員 (〒 270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)
E-mail: hirata@criepi.denken.or.jp

構造物の地震 PSA を行う場合、地震ハザード曲線と構造物の脆弱性曲線を用いて損傷確率を求める方法が多く用いられてきた。しかしながら、構造物の動的信頼性評価の精度を高めるためには、最大地動だけでなく、地震動の周波数特性や継続時間などの情報を考慮した損傷確率評価方法が必要である。本論文では、地震ハザード解析に基づき設定した想定地震より作成した地震動を用いて構造物の年損傷確率を評価する方法と、地震のマグニチュードや震源距離などを考慮しつつも地震ハザード曲線を用いず直接的に構造物の年損傷確率を評価する方法について検討した結果について示す。

Key Words: Deaggregation of seismic hazard, probabilistic scenario earthquake, structural failure probability, failure criteria

1. はじめに

構造物の耐震信頼性評価においては、地震動の設定から構造応答評価まで、各々の過程で不確定性を含んでいる。特に地震動評価は大きな不確定性を含んでおり、その評価方法としては従来、確率論的地震ハザード解析による最大地動（加速度、速度）や応答スペクトルが用いられることが多かった。従来の地震ハザード解析からは、地震動強度（最大加速度、最大速度等の最大地動や応答スペクトル）とその超過確率との関係を示した地震ハザード曲線が得られる。この地震ハザード曲線は年超過確率に対応して地震動強度を与えることが可能であり、米国における地震 PSA (Probabilistic Safety Assessment : 確率論的地震時安全性評価) (例えば¹⁾) 等で用いられてきたが、構造物の非線形応答を考慮した耐震信頼性評価に必要な、地震動のより詳細な情報（周期特性、継続時間等）を与えることは出来ない。

構造物の動的信頼性評価の精度を高めるためには、最大地動だけではなく、地震動強度の年超過確率（あるいは再現期間）に対応した、マグニチュードや震源（震央）距離のような地震の諸元が応答値に与える影響の定量的な検討が必要である。本論文では、(i) 確率論的地震ハザード解析に基づき設定した想定地震より発生

させた地震動を用いて構造物の損傷確率評価を行なう、(ii) 地震のマグニチュードや注目地点との距離を考慮するが、地震ハザード曲線を用いず直接的に構造物の損傷確率を求める、二つの方法について検討した結果を示す。

2. 地震ハザード再分解に基づく損傷確率評価

ここでは、従来の確率論的地震ハザード解析およびその拡張から得られる情報を基に構造物の損傷確率を評価する方法について検討した結果を示す。

(1) 評価手順

検討方法の手順を以下に示す（図-1）。

(ステップ 1) 注目地点（サイト）周辺の地震発生源モデルを設定し、Cornell 流の確率論的地震ハザード解析²⁾を実施する。

(ステップ 2) 確率論的地震ハザード解析に基づき地震動強度の年超過確率毎に想定地震のマグニチュード、距離を評価する。確率論的地震ハザード解析に基づき想定地震の諸元を評価する方法としては、我が国では亀田・石川³⁾、米国では McGuire⁴⁾、U.S.NRC⁵⁾ 等により幾つかの方法が提案がされているが、本検討では亀田・石川による「確率論的想定地震³⁾」を用いる。こ

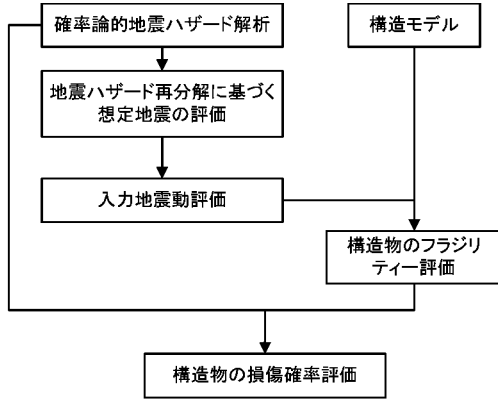


図-1 損傷確率評価手順（その1）

の確率論的想定地震は確率論的地震ハザード解析を拡張することにより、再現期間に応じて地震の諸元（マグニチュードの条件付き期待値 $\bar{M}$ 、距離の条件付き期待値 $\bar{\Delta}$ ）が次式より算出される。

$$\bar{M}(p_0) = \frac{\sum_{k=1}^n E_k(M|Y \geq y(p_0)) \cdot w_k(p_0)}{\sum_{k=1}^n w_k(p_0)} \quad (1)$$

$$\bar{\Delta}(p_0) = \frac{\sum_{k=1}^n E_k(\Delta|Y \geq y(p_0)) \cdot w_k(p_0)}{\sum_{k=1}^n w_k(p_0)} \quad (2)$$

ここで $w_k(p_0)$ は、地震活動域 k で発生する地震の中で注目地点に $y(p_0)$ 以上の地震動をもたらす地震の年発生率を示す。

このように確率論的地震ハザード解析を拡張することにより、各ハザードレベル毎に想定され得る地震の諸元（規模、距離で表されることが多い）を評価する概念は、“Deaggregation of seismic hazard” と呼ばれている。確率論的想定地震の概念と McGuire による概念は、別個に提案されたものであるが同じ方法論に属していると考えられる。本論文ではこの概念の総称として「地震ハザードの再分解」と呼ぶことにする。

（ステップ3）算出した $(\bar{M}(p_0), \bar{\Delta}(p_0))$ より設定した応答スペクトルに適合する模擬地震動を、各ハザードレベル p_0 毎に複数個発生させる。

（ステップ4）構造モデルを設定し、（ステップ3）で発生させた地震動を入力し時刻歴応答解析を行う。

（ステップ5）地震応答解析結果より構造物の破壊確率を計算しフラジリティー（脆弱性）曲線を作成する。その後、地震動の超過確率情報と得られたフラジリティーの情報を基に以下の式より年損傷確率を評価する。

$$P_{f/year} = \int_0^\infty p_f(a) \cdot p_H(a) da = - \int_0^\infty p_f(a) \frac{\partial H(a)}{\partial a} da \quad (3)$$

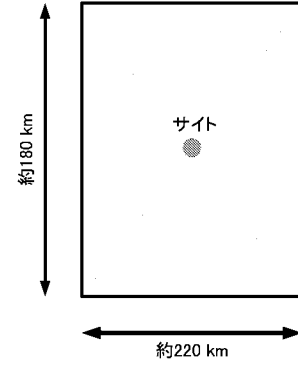


図-2 地震発生源モデル（ランダム地震域）

ここで $p_f(a)$ は、地震動強度 a における構造系の破壊確率を示すフラジリティー曲線、 $p_H(a)$ は地震動強度値 a に対する確率密度関数、 $H(a)$ はハザード関数（曲線）を示す。 $p_f(a)$ は、構造系の強度変数 R と荷重変数 S が互いに独立であると仮定すると、以下の式から算定される。

$$\begin{aligned} p_f(a) &= p(R - S \leq 0) = \int_0^\infty \int_0^s f_{R,S}(r, s) dr ds \\ &= \int_0^\infty f_S(s) \left\{ \int_0^s f_R(r) dr \right\} ds \quad (4) \end{aligned}$$

式中の $f_{R,S}(r, s)$ は、変数 (R, S) の結合確率密度関数、 $f_S(s)$ 、 $f_R(r)$ はそれぞれ変数 S, R の確率密度関数を表す。

3. 損傷確率評価例

ここでは、地震ハザードの再分解に基づく構造物の損傷確率評価例について示す。

(1) 地震ハザード解析手法

本解析では構造物の損傷確率評価方法の検討を目的としているため、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を用いている。

(2) 地震活動域のモデル化

ここでは、各域内での地震の規模別発生頻度は Gutenberg-Richter 式に従い、発生位置が一様ランダムに分布すると仮定したランダム地震域を地震発生源モデルとして設定した。このランダム地震域の活動度を示すパラメータは、最大マグニチュード $M_u=8.2$ 、最小マグニチュード $M_l=5.0$ 、Gutenberg-Richter 式の b 値は 0.9 、単位面積当たりの地震発生数は 2.51×10^{-5} と設定した。ランダム地震域の形状・大きさとサイトの位置関係を図-2 に示す。

(3) 地震動距離減衰式

本解析では地震動の距離減衰式としては Fukushima and Tanaka による PGA（地動最大加速度）について

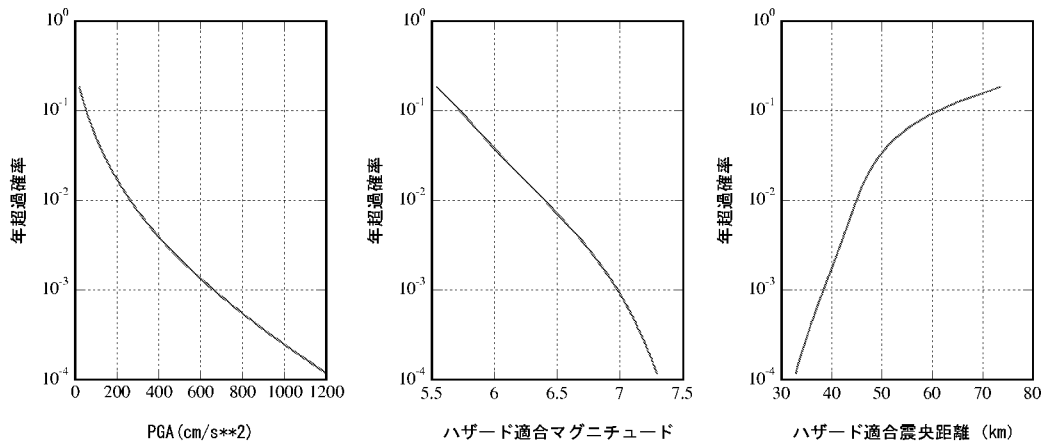


図-3 地震ハザード解析結果

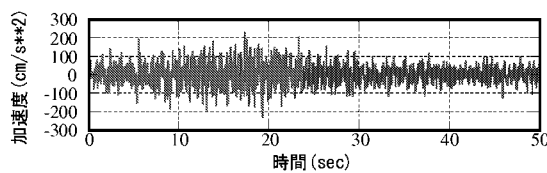


図-4 想定地震より作成した地震動波形例

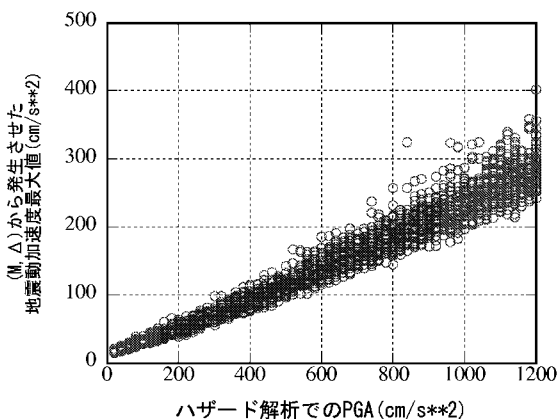


図-5 ハザード解析における PGA と入力地震動波形の最大値の関係

の式⁶⁾を用いることにする。距離減衰式のばらつきは、対数標準偏差 0.4835 の対数正規分布でモデル化し、分布の裾は中央値から $\pm 2.5\sigma$ で打ち切っている。

(4) 構造モデル

本検討では、構造モデルとして線形構造モデルと非線形構造物モデルの二種類を想定した。線形構造モデルについては固有周期 0.2sec、減衰定数 0.05 の値の 1 質点系を設定した。非線形構造モデルは固有周期 0.2sec、減衰定数 0.05、復元力特性が完全弾塑性履歴モデル（降伏震度 0.41(=400/980)、降伏変位の 1.5 倍の値で終局変位）の 1 質点系を用いた。

(5) 地震ハザード評価・地震動評価

地震ハザードは、地震動指標とした PGA について $20(\text{cm/s}^2)$ から $1200(\text{cm/s}^2)$ まで $20(\text{cm/s}^2)$ 刻みで 60 段階のハザードレベルの計算を行い、各 PGA のレベルで地震ハザード曲線、ハザード適合マグニチュード $\bar{M}$ 、ハザード適合距離 $\bar{\Delta}$ を算出した（図-3）。次にステップ $k(=1, 2, \dots, 60)$ に対応する $(\bar{M}(k), \bar{\Delta}(k))$ を想定地震の諸元として、速度応答スペクトル^{7), 8)}を設定し、そのスペクトルに適合する地震動波形を各ステップで 40 波ずつ作成した。作成したサンプル地震動の一つを図-4 に示す。今回のハザード解析における PGA と発生させた時刻歴波形の最大値には図-5 のような関係が見られた。地震ハザード曲線の算出においては、各地震発生源で発生する地震の（マグニチュード、距離等）を距離減衰式に代入して、各々の地震動強度レベルを超える確率を算定する。その際、距離減衰式のばらつきを考慮しているため、地震の諸元を代入して得られる値（中央値）より大きい地震動強度の発生も考慮している。このため今回の解析では、ハザード解析での PGA と地震ハザード再解析で得られた (M, Δ) から予測する地震動の PGA に差が生じている。本章で示す損傷確率評価では、図-5 の縦軸で示される値が fragility 評価における入力地震動の値となる。

(6) 損傷確率評価結果

最大応答値を破壊規範とした場合の線形構造モデルの fragility 曲線を図-6 に示す。fragility 曲線の横軸は、図-5 より各ハザードレベル毎に発生させた 40 個の波形群の平均値を用いた。ここでは（4）で述べた線形構造モデルを用い、応答変位が非線形モデルの降伏変位に達した時点で損傷が生じたものとする。この場合、年損傷確率は（3）式より 2.350×10^{-2} と算出された。

次に非線形系の累積塑性ひずみエネルギーを破壊規範とした場合を考える。非線形構造モデルを想定し、累積塑性ひずみエネルギーを破壊規範とした場合の fragility 曲線を図-7 に示す。強度変数の平均値は、超過確率が 10%/50 年（再現期間 500 年）の地震動に対

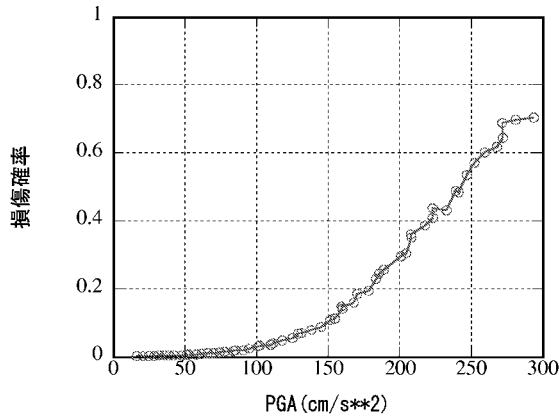


図-6 フラジリティー曲線（線形構造モデルの場合）

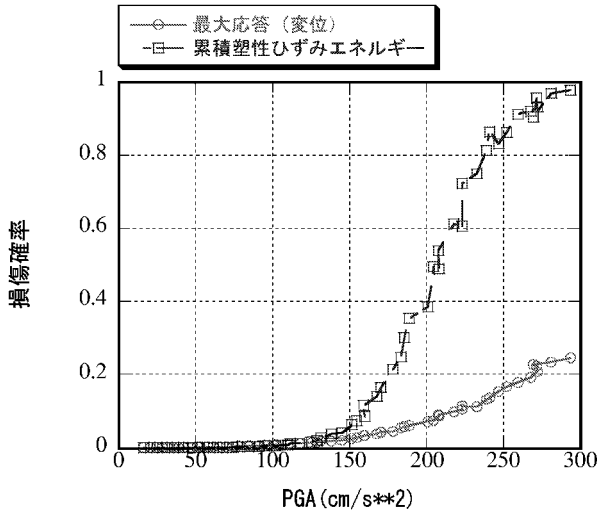


図-7 フラジリティー曲線（非線形構造モデルの場合）

して、最大変位を破壊規範とした場合の安全率（終局変位／応答変位）と同じ安全率（限界累積塑性ひずみエネルギー／応答累積塑性ひずみエネルギー）を有するように定めた限界値とした。図-7には線形モデルの場合と比較するため、終局変位を破壊規範（降伏変位の1.5倍）とした場合の結果も示している。年損傷確率は最大応答の場合は 4.263×10^{-3} 、累積塑性ひずみエネルギーの場合は 1.671×10^{-2} という結果であった。

この方法では破壊規範が最大応答の場合に限らず、エネルギーを規範とした場合でも損傷確率を評価できる利点がある。また今回は地震発生源を1個に限定したが、複数の地震発生源（ランダム地震域、活断層、プレート境界地震等）がサイトに影響を与えている場合に、これらを考慮した確率論的想定地震を評価して同様の評価を行うことも可能である。しかしながら、想定地震の諸元としてハザード適合マグニチュード、ハザード適合距離を用いて地震動を評価した場合、ハザード解析における地震動強度と発生させた地震動波形の最大値に差が生じる点に注意が必要である。今回の解析で

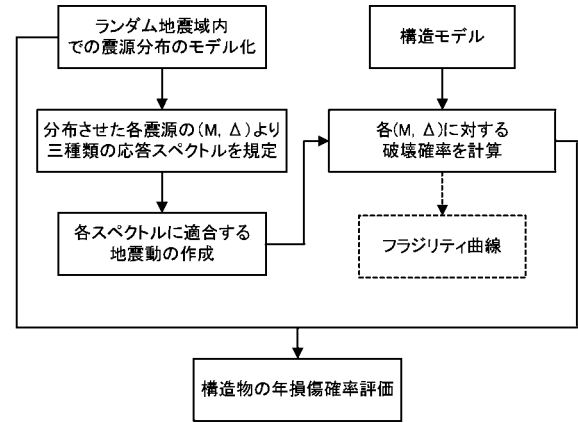


図-8 損傷確率評価手順（その2）

は $(\bar{M}, \bar{\Delta})$ という期待値のみ用いたが、マグニチュードと距離の確率分布から他の (M, Δ) 組み合わせを抽出して地震動評価を行なうことも可能である。

4. ハザード曲線を介さない損傷確率評価方法

ここでは、図-8に示すようなハザード曲線を介さず年損傷確率を求める方法について検討した結果について述べる。

(1) 評価手順

以下に提案方法の概要を示す。

（ステップ1）図-9に示すように、対象とするランダム地震域をグリッド状に分割した各格子内に震源をランダムに配置し、サイトとランダム地震域内に分布させた震源とサイトの距離 R を評価する。各地震のマグニチュード M の確率密度関数 $f_M(m)$ は Gutenberg-Richter 式より評価する。

（ステップ2）離散値で与えるマグニチュード $m_i (i = 1, \dots, n)$ 、距離 $r_j (j = 1, \dots, k)$ の組み合わせ (m_i, r_j) 毎に速度応答スペクトルを設定し適合する地震動を1波形作成する。さらに (m_i, r_j) から設定した平均値スペクトル $S_V(i, j)$ 、 $S_V(i, j) + \sigma$ と $S_V(i, j) - \sigma$ に適合する地震動をそれぞれ1波形ずつ作成する。

（ステップ3）作成した $i \times j \times 3$ 個の地震動を用いて構造物の地震応答解析を行なう。地震 (m_i, r_j) から発生させた地震動に対して得られる3点の応答値 $y_{\mu_x}, y_{\mu_x + \sigma}, y_{\mu_x - \sigma}$ を用い、多点推定法により地震 (m_i, r_j) に対する応答値 y の分布の平均値 μ_y および分散 σ_y を推定する。

（ステップ4）応答値の平均値、分散を基に分布形を推定し、推定した平均値 μ_y および分散 σ_y を用い、地震 (m_i, r_j) に対して応答値がある閾値を超える確率 $P_f(i, j)$ を計算する。

以上の情報を基に構造物の年損傷確率は以下の式で求められる。

$$P_{f/year} = \nu \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k f_M(m_i) \cdot P_f(i, j) dm \quad (5)$$

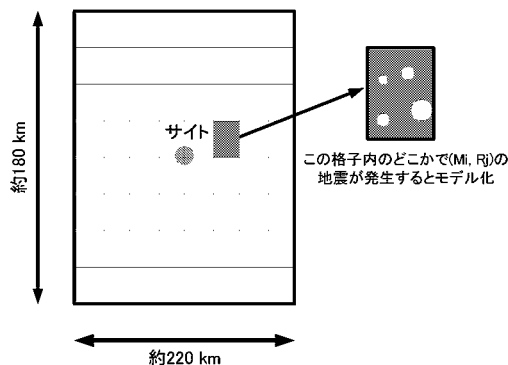


図-9 ランダム地震域内での地震 (M_i, R_j) の発生方法

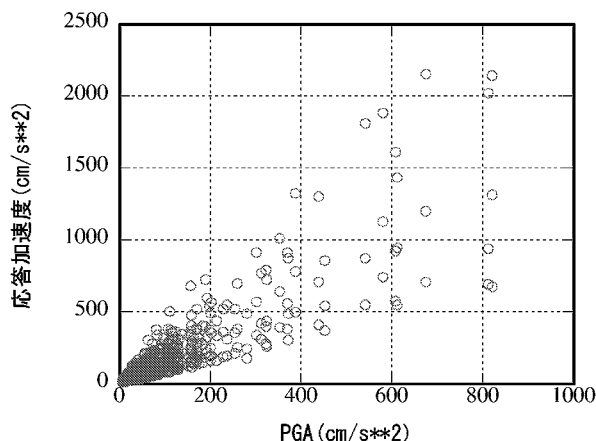


図-10 地震動波形の最大加速度と応答加速度の関係

上式中、 ν はランダム地震域で発生する地震の年平均発生個数を表す。

(2) 評価例

3.(1) で示したランダム地震域を対象に図-8 で示した方法を用いて構造物の損傷確率を評価した。まず図-9 に示すようにランダム地震域を $10\text{km} \times 10\text{km}$ の格子状に分割し、各格子内で規模別発生頻度が Gutenberg-Richter 式に従う地震が発生すると仮定する。サイトから格子内の地震源までの距離は今回は格子内の中心点とサイトの距離で代表させる。Gutenberg-Richter 式の a 値、 b 値、最小・最大マグニチュードは 3.(1) で設定したモデルと同じ値を想定する。構造モデルとしては 3.(4) で示した線形構造モデル、破壊規範と同じものを用いた。モデル化した震源から文献 7), 8) の方法を用いて発生させた地震動の最大値と時刻歴応答解析結果との関係を図-10 に、この提案方法では使用しないが fragility 評価結果を参考のために図-11 に示す。(5) 式により求めた年損傷確率は 2.975×10^{-2} であり、評価条件が一部同じではないものの地震ハザード再分解に基づく方法による年損傷確率 2.350×10^{-2} とほぼ等価な値が得られた。

本章で提案した方法は、地震ハザード曲線および地震ハザード再分解の結果を用いず、直接的に構造物の年損傷確率を求めるものである。3 章で示した方法が想

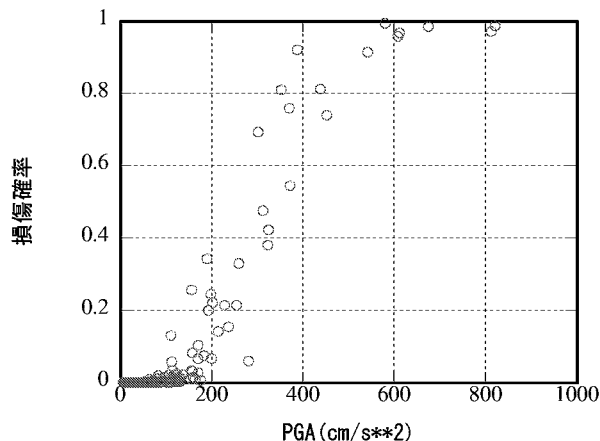


図-11 フラジリティ評価結果

定地震の諸元を条件付期待値という代表値で設定し地震動評価を行うのに対し、4 章の方法は、ハザード解析で考える地震全体を考慮して地震動評価を行っている。この方法は、地震発生源モデルとしてランダム地震域の他、活断層やプレート境界地震を想定した場合でも、また多質点系の非線形構造に対しても、最大応答値、エネルギー等、様々な破壊規範の損傷確率を比較的簡単に評価できる可能性がある。構造物の損傷確率評価においては、4 章で提案した方法は有用と考えており、地震ハザード再分解との関連付けを行いながら、さらに手法の洗練を図っていく予定である。

5. おわりに

本論文では、地震動強度の年超過確率と構造系の破壊確率の双方を考慮することで、構造物の年損傷確率を評価する方法を示した。今回示した二つの手法を用いれば、入力地震動に単一のパラメータを用いる従来の構造信頼性評価方法と比較して、損傷確率の精度を向上できる可能性があること、入力地震動として時刻歴波形を用いているため、様々な破壊規範に対して損傷確率評価が可能であると考えられる。ただし、今回解析で用いた地震発生源モデル、構造モデル、破壊形態は単純かつ理想化したモデルであり、今後、構造物の物性に関するパラメータのばらつきも考慮した構造物の地震リスク評価方法を構築する。

参考文献

- 1) Kennedy, R.P. and M.K. Ravindra: Seismic Fragilities for Nuclear Power Plant Risk Studies, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.79, pp.47-68, 1984.
- 2) Cornell, C.A.: Engineering Seismic Risk Analysis, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol.58, No.5, pp1173-1194, 1968.
- 3) 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.
- 4) McGuire, R.K.: Probabilistic seismic hazard analysis

and design earthquakes: closing the loop, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol.85, No.5, pp.1275-1284, 1995.

5) U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: REGULATORY GUIDE 1.165 (Draft was DG-1032) Identification and Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion, 1997.

6) Fukushima, Y. and T. Tanaka: A New Attenuation Relation for Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan, *Shimizu Technical Research Bulletin*, No.10, pp.1-11, 1991.

7) 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.

8) 武村雅之, 大野 晋, 高橋克也: 強震記録から見た震源近傍での硬質地盤上における地震動—レベル 2 地震動の共通基準—, 第 25 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.61-64, 1999.

2003.7.11 受付

BASIC STUDY ON SEISMIC RISK EVALUATION METHOD OF STRUCTURES BASED ON SEISMIC HAZARD ANALYSIS

Masato NAKAJIMA and Kazuta HIRATA

The purpose of this paper is to propose two methods which are capable of considering not only peak ground motions but also more detailed information on seismic ground motion such as frequency properties and duration time in order to improve the accuracy of reliability evaluation for structures. One method is characterized by adopting scenario earthquakes determined by Probabilistic Seismic Hazard Analysis. The other method can evaluate directly structural failure probabilities by taking information on earthquake magnitude and source-site distance into consideration, although it does not use conventional seismic hazard curves.