

PGAとPGVを用いた地震損傷度評価手法の構築

Fragility analysis method using both PGA and PGV

○大峯 秀人¹, 林 孝幸¹, 矢代 晴実¹, 福島 誠一郎²Hideto OMINE¹, Takayuki HAYASHI¹, Harumi YASHIRO¹ and Sei'ichiro FUKUSHIMA²¹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.

In order to improve the accuracy of risk analysis, authors propose a seismic fragility analysis method using two ground motion intensity measures; peak ground acceleration (PGA) and peak ground velocity (PGV), for which many attenuation relations have been developed. Monte-Carlo simulation is carried out to obtain the fragility planes that show the relationship among PGA, PGV and the conditional probability of failure for model RC building. It is found that PGV is adequate in expressing the fragility for severe damage though both PGA and PGV are adequate for slight damage.

Key Words : Fragility Analysis, Index of Seismic Motion, PGA, PGV, Application

1. はじめに

昨今、構造物の地震損傷度評価は、BCP 策定時の地震被害想定や不動産投資のデューデリジェンスなど様々な用途に用いられており、その精度向上が重要な課題となっている。一般的に、構造物の地震損傷度評価では、小破、中破、大破などで表される各損傷状態の発生確率を地震動強度と関係づけた地震損傷度曲線が用いられる。地震動強度としては、構造物の被害と相関の高い最大加速度 (PGA) や最大速度 (PGV) など単一の指標が用いられるが、本来、地震動波形で表される地震動特性の情報が欠落することを免れない。そこで、複数の指標を用いて地震損傷度を評価する手法が提案されている。例えば、Bazzurro¹⁾らは構造物の1次と2次の固有周期に対応したスペクトル加速度を指標に用いて建物の損傷度評価を行っている。しかし、強震動により構造物が損傷した場合には、構造躯体が塑性化し固有周期が伸びることから、弾性時の固有周期を用いることは必ずしも適切ではなく、より広帯域の特性を表現できるような指標の採用が望ましいと考えられる。

そこで、本研究では、地震動の短周期成分が支配的なPGAと比較的に長周期成分が支配的なPGVを用いて構造物の地震損傷度を評価する手法を提案する。また、試算として、モデル建物についてPGA、PGVと条件付損傷確率の関係を示す地震損傷度曲面を作成し、その特性について考察する。

2. 地震損傷度解析手法の提案

(1) 単一指標による損傷度評価

ある損傷状態に対する地震損傷度曲線が地震動強度で表された耐力 A の累積確率分布であることから、当該耐力の確率分布を求めることで、地震動強度 a とその損傷確率 $p(a)$ を関係付けることができる。例えば、耐力 A の確率分布として対数正規分布を仮定するなら、 $p(a)$ は、その対数平均 λ_A と対数標準偏差 ξ_A を用いて次式で表される。

$$p(a) = \Phi[(\ln(a) - \lambda_A)/\xi_A] \quad (1)$$

ここに、 $\Phi(\cdot)$ は標準正規分布関数である。

一方、地震動強度 a に対する応答 $R(a)$ と耐力 C についても対数正規分布を仮定し、その対数平均と対数標準偏差を $\lambda_R(a)$ と $\xi_R(a)$ 、 λ_C と ξ_C とするならば、 a と $p(a)$ は定義により、次式で関係付けられる。

$$p(a) = \Phi\left[(\lambda_A(a) - \lambda_C)/\sqrt{\xi_R(a)^2 + \xi_C^2}\right] \quad (2)$$

(1)式と(2)式が与える $p(a)$ が a によらずに同一であるとする、 λ_A と ξ_A は次式により与えられる。

$$\lambda_A = \lambda_C - \lambda_R(a) + \ln(a) \quad (3)$$

$$\xi_A^2 = \xi_R(a)^2 + \xi_C^2 \quad (4)$$

(3)式により一意に λ_A が定められるためには、 $\lambda_R(a) - \ln(a)$ が一定値でなくてはならず、これは、入力と応答が線形であることを意味する。このため、(3)式により λ_A を求めるためには非線形性の影響を別途耐力側に見込むことが必要である。ただし、ニューマーク式等では、損傷集中を考慮することができない。また、(4)式は、応答のばらつきが a によらず一定であることを示すが、その妥当性については判断し難い。

そこで、筆者らは図1に示すような数値実験に基づく損傷度曲線評価を採用する²⁾。数値実験により得られた損

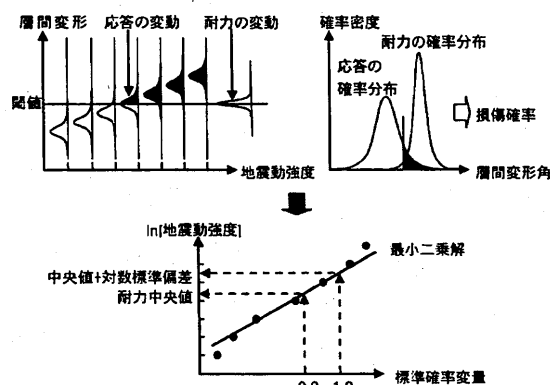


図1 数値実験に基づく損傷度曲線評価の概念

傷確率から標準確率変量 s を求め、 s と $\ln a$ を次式のように線形回帰し、 λ_A と ξ_A を得る。

$$\ln a = \xi_A s + \lambda_A \quad (5)$$

(2) PGA と PGV を用いた損傷度評価への拡張

図 1 に示した方法を 2 指標 (PGA 及び PGV) に拡張する。すなわち、所与の PGA と PGV の組み合わせを与えるような地震動波形群を作成し、数値実験により条件付損傷確率 $p(a, v)$ を求める。ここに、 a は PGA を、 v は PGV を示す。これを示すのが図 2 である。よって、PGA と PGV の二変数に対する累積確率分布として表すことができるので、 $p(a, v)$ は損傷度曲面となる。

ところで、2 指標の場合は、確率 $p(a, v)$ に相当する標準確率変量 s を求めても、それに対する a と v を一意に求めることはできない。そこで、本研究では、(5) 式をまず次式のように書き換える。

$$s = (1/\xi_A) \ln a - \lambda_A / \xi_A \quad (6)$$

(6) 式は陽な形で損傷度曲線の特徴値を与えるものではないが、入力地震動強度に対する標準確率変量を直接求めることができるものである。次に、(6) 式を 2 変数に拡張する。

$$s = (1/\xi_A) \ln a + (1/\xi_v) \ln v - \Lambda \quad (7)$$

$\ln a$ の回帰係数の逆数が PGA についての対数標準偏差、 $\ln v$ の回帰係数の逆数が PGV についての対数標準偏差となる。なお、 $s=0$ として求められる定数 Λ は、次式を満たす (a, v) の集合となる。

$$\Lambda = (1/\xi_A) \ln a + (1/\xi_v) \ln v \quad (8)$$

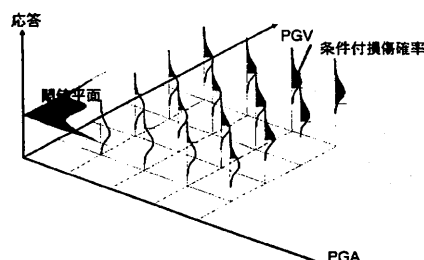


図 2 PGA と PGV を用いた損傷度曲面評価の概念

3. 入力波形群の作成

前述したように、本評価手法では、任意の PGA と PGV の組合せを持つ地震動波形を作成する必要がある。ところで、任意の PGA と PGV を与えるような地震動波形の作成方法に関しては、確立された方法が無いのが現状である。そこで、本研究では、(9) 式及び図 3 に示す応答スペクトルを設定し、規定する諸変数を持つ乱数として与えて大量の地震動波形を作成し、所与の PGA と PGV の組合せとなるような地震動波形を抽出することとした。

$$S(T) = 1.0 + \frac{X - 1.0}{T_1 - T_{\min}} (T - T_{\min}) ; T_{\min} \leq T < T_1 \quad (9a)$$

$$S(T) = X ; T_1 \leq T < T_2 \quad (9b)$$

$$S(T) = \frac{X \cdot T_2}{T} ; T_2 \leq T < T_{\max} \quad (9c)$$

入力波形群の作成は、下記を確率変数としたモンテカルロシミュレーションによって行った。

- ① 周期 T_1 : 0.1 ~ 1.0 秒
- ② 周期 T_2 : 0.1 ~ 5.0 秒 (ただし、 $T_1 < T_2$)
- ③ 応答倍率 X : 1.0 ~ 4.0
- ④ 最大加速度 : 50 ~ 5000 cm/s/s ($T_{\min}$ 時)

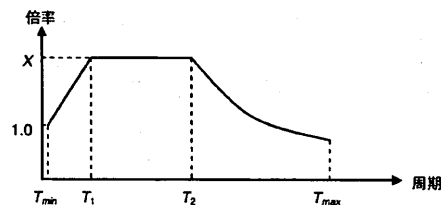


図 3 応答スペクトルを規定する変数

上記の確率変数は、対数軸上で一様分布とした。また、作成する応答スペクトルの最短周期は 0.02 秒、最長周期は 10.0 秒とし、その間を対数軸上で 100 等分した計 101 点をコントロールポイントとした。なお、波形の継続時間は 60 秒 (時間刻み 0.01 秒) とし、位相特性は乱数位相とした。

モンテカルロシミュレーションでは、目標スペクトル形状に適合しないもの (収束しなかったもの) を除き、計 9000 の波形を作成し、PGA と PGV の比 (A/V) が現実的でない組合せを除いた 5546 波を入力波形群とした。

さらに入力波形群による応答の確率分布を求めるため、PGA と PGV の組合せ区分を 441 ($=21 \times 21$) に分類し、統計サンプル処理の均質性から、波形が 10 波以上の区分を採用し、上限を 20 波として最終的に計 3551 波を解析に用いる波形群とした。

図 4 に解析に用いる波形群の区分分布を示す。同図より、ある程度広い範囲に波形群が分布していることが分かる。

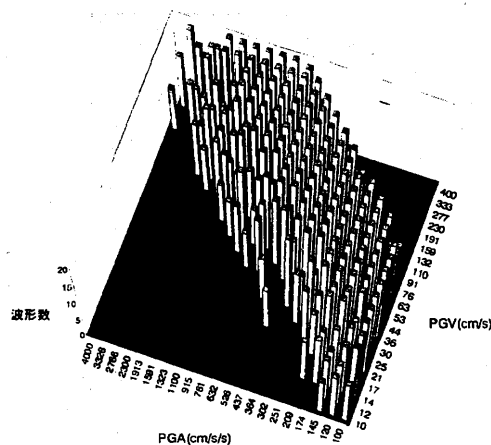


図 4 解析に用いる波形群の分布

4. モデル建物の設定

(1) 建物概要

モデル建物は、RC 造中層建物とし、表 1 に示す諸元を有するものとする。

(2) モデル化概要

応答解析モデルは図 5 に示すように、非線形せん断ばねで連結された集中質点系とする。自由度は並進方向のみとし、基礎は固定とする。

表1 モデル建物の概要

構造種別	RC造
階数	地上7階
層せん断力係数の高さ方向分布	Ai分布
Is値	0.6
階高	3.5m（全層で一律）
層重量	100tonf（全層で一律）

非線形せん断ばねの復元力特性は、修正 Takeda モデルとし、その骨格曲線は終局耐力 Q_u を変数として規定されるものとする。 Q_u の評価においては、新耐震設計法に基づいて必要保有水平耐力 Q_m を各層について求め、さらに表 1 に示した所与の I_s 値が実現されるように、各層一律の定数を乗じた。

骨格曲線の諸変数を図 6 に、応答解析モデルの諸元を表 2 にまとめる。

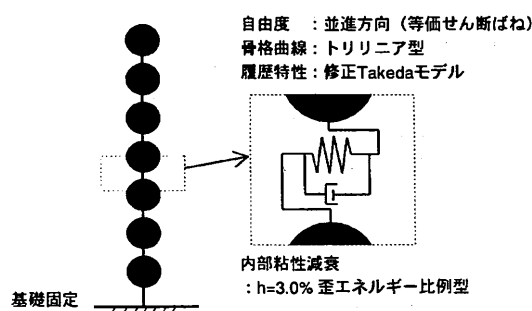


図5 応答解析モデル

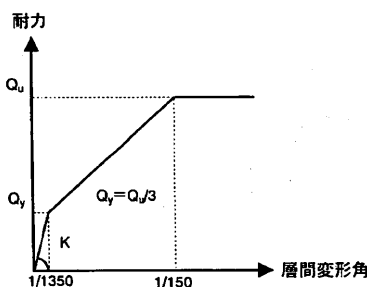


図6 非線型バネの骨格曲線

表2 応答解析モデルの諸元

階	地上高 (m)	層重量 (tonf)	K (t/m)	Q_y (tonf)	Q_u (tonf)
7	24.5	100.0	12668	32.8	98.5
6	21.0	100.0	17395	45.1	135.3
5	17.5	100.0	20820	54.0	161.9
4	14.0	100.0	23991	62.2	186.6
3	10.5	100.0	27000	70.0	210.0
2	7.0	100.0	29653	76.9	230.6
1	3.5	100.0	31780	82.4	247.2

5. 応答解析結果

本研究では、層間変形角により損傷の判断を行う。そこで、3章で作成した PGA と PGV の組合せ区分された入力波形群による応答解析を行い、層間変形角の応答値から、各区分の中央値と対数標準偏差を求めた。PGA と

PGV の各組合せに対する層間変形角の中央値を図 7 に、PGA と PGV の各組合せに対する層間変形角の対数標準偏差を図 8 に示す。

層間変形角の中央値を見ると、PGA と PGV の増加につれて変形角が増加すること、PGA より PGV についてより単調な関係がみられること、等がわかる。一方、対数標準偏差については、必ずしも PGA や PGV と単調な関係にはないことがわかる。

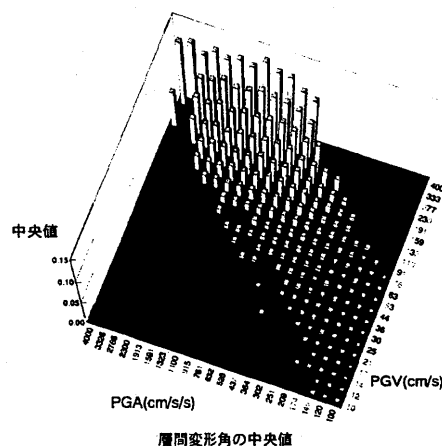


図7 応答解析結果（層間変形角の中央値）

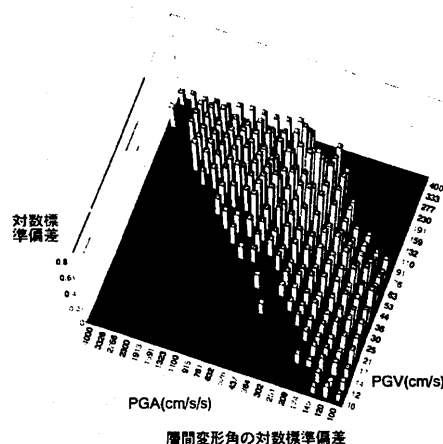


図8 応答解析結果（層間変形角の対数標準偏差）

6. 損傷度評価

(1) PGA と PGV の組み合わせによる損傷確率

所与の (a, v) の組合せに対する損傷確率 $p(a, v)$ は、次式で与えられる。

$$p(a, v) = \Phi[\ln\{r(a, v)/\bar{r}\}/\xi(a, v)] \quad (10)$$

ここに、 $r(a, v)$ は層間変形角の中央値、 $\xi(a, v)$ は層間変形角の対数標準偏差、 $\bar{r}$ は所与の閾値で表 3 のように設定した。 $\Phi(\cdot)$ は標準正規分布関数である。

表3 損傷の閾値

被害程度	小破	中破	大破	倒壊
層間変形角	1/240	1/120	1/60	1/30

(2) 損傷確率分布の回帰

2章に示した(7)式の各変数を回帰して求めた。その結果を表 4 に示す。また、表 5 と 6 に小破と大破の損傷確

表4 得られた回帰係数

被害程度	回帰係数		
	ζ_A	ζ_V	Λ
小破	0.408	0.401	23.75
中破	0.740	0.345	21.32
大破	0.884	0.240	27.39
倒壊	0.863	0.214	31.82

表5 損傷確率（小破）

損傷確率		速度(cm/s)		
		20	50	100
加速度 (cm/s ²)	200	0.000	0.156	0.763
	500	0.146	0.891	0.998
	1000	0.741	0.998	1.000

表6 損傷確率（大破）

損傷確率		速度(cm/s)		
		50	100	150
加速度 (cm/s ²)	500	0.000	0.114	0.686
	1000	0.000	0.338	0.897
	1500	0.002	0.516	0.958

率を示す。これによれば、被害程度が小さいほど PGA の説明性が高く（ばらつきが小さい）、被害程度が大きいほど PGV の説明性が高くなることがわかる。損傷度評価では、短周期構造物には PGA の説明性が高く、長周期構造物（塑性化に伴う長周期化を含む）には PGV が適切と言われており、前述の傾向と調和的である。

(3) 損傷度曲面の作成

(7)式及び表4の回帰係数を用いることで、任意の PGA と PGV の組み合わせに対する各損傷状態ごとの損傷確率を求めることができる。図9に得られた損傷度曲面を示す。これらの面は回帰により決定しているため、PGA が小さいが PGV が大きい領域や、逆に PGV は小さいが PGA が大きい領域についても、少なからず損傷確率が存在する。しかし、構造物の地震による損傷確率は、地震動強度の発生確率と掛け合わせて評価されるものであり、そのような非現実的な地震動については、その過程で無視できるものとする。

7. まとめ

本研究では、損傷度評価の精度向上を目的に、PGA と PGV を指標とした損傷度評価手法を提案した。また、モデル建物における解析例を示し、以下の知見を得た。

- ①確率特性値を PGA と PGV の関数として表すことで、損傷度曲面を表現することが可能である。
- ②モデル建物では被害程度が小さい場合には、PGA、PGV ともに損傷の表現に優れるが、被害程度が甚大になるに従い、PGV の損傷表現がより優れてくる。

参考文献

- 1) Bazzurro P, Cornell CA. : Vector-valued probabilistic seismic hazard analysis(VPSHA), Proceedings 7th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Boston, MA, 2002.7.
- 2) Sato, I., Yashiro, H., Ota, K., Fukushima, S.: Fragility curves for any damage state based on capacity index, Proc. of 100th Anniversary Earthquake Conference, CD-ROM, 2006.4

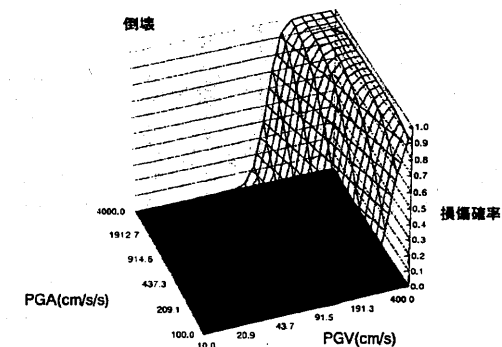
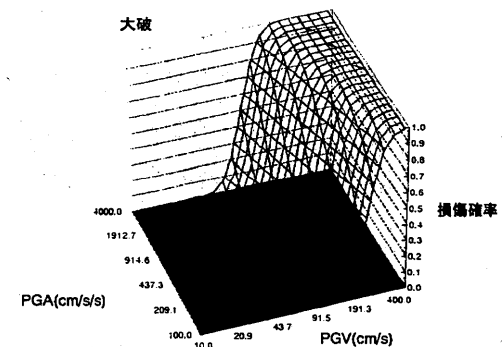
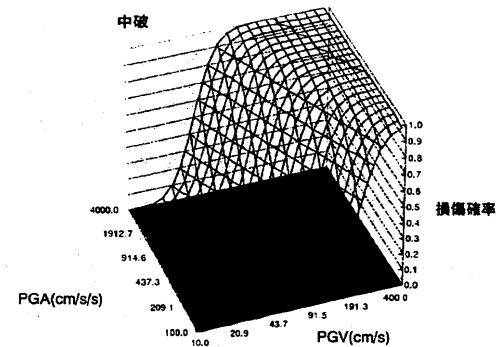
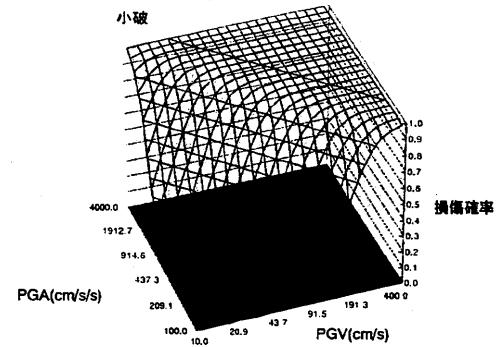


図9 モデル建物の損傷度曲面