

PGA と PGV を用いた地震損傷度評価手法の構築
(その 1) 手法の提案と入力波形群の作成

正会員 ○福島 誠一郎*
同 上 大峯 秀人**
同 上 林 孝幸**
同 上 佐藤 一郎**

損傷度評価 地震動指標 PGA
PGV

1. はじめに

地震損傷度評価においては、地震動指標として最大加速度 (PGA) や最大速度 (PGV) を用いることが多い。しかしながら、入力地震動の特性を単一の指標で代表させるために、損傷度評価には大きな不確実性が存在する。この不確実性を低減させる方法の 1 つとして、複数の地震動指標を用いることが考えられる。

本研究では、既存の推定式が充実していること、対象とする建造物の影響を受けないこと、周期の広い範囲で地震動を特徴付けられることを根拠として、PGA と PGV を指標として用いた地震損傷度評価手法を提案する。(その 1) では、手法の提案と評価に用いる地震動波形について述べる。

2. 地震損傷度解析手法の提案

2.1 単一指標による損傷度評価

単一指標による地震損傷度は、地震動強度 a と当該地震強度に対する条件付損傷確率 $p(a)$ の関係として求められる。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、 a と $p(a)$ を関係付けることができる。例えば、 A の確率分布として対数正規分布を仮定するならば、その対数平均 λ_A と対数標準偏差 ζ_A を用いて次式で表される。

$$p(a) = \Phi \left[\frac{\ln(a) - \lambda_A}{\zeta_A} \right] \quad (1)$$

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 $R(a)$ ならびに耐力 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 $\zeta_R(a)$ ならびに λ_C と ζ_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。

$$p(a) = \Phi \left[\frac{\lambda_R(a) - \lambda_C}{\sqrt{\zeta_R(a)^2 + \zeta_C^2}} \right] \quad (2)$$

(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と、 λ_A と ζ_A は次式により与えられる。

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

$$\zeta_A^2 = \zeta_R(a)^2 + \zeta_C^2 \quad (4)$$

ところで、(3)式により一意に λ_A が定められるためには、 $\lambda_R(a) - \ln(a) = const.$ 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。一般に損傷度解析では建物が強非線形領域に入るような地震レベルまでを対象とするため、(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、ニューマーク式のように塑性化に伴うエネルギー吸収能を見かけ上の耐力上昇として見込むためには、各層が均等に塑性化することを要求し、非線形応答で特徴的な損傷集中を考慮することができない。

また、(4)式では、応答のばらつきが a によらず一定であることを要求するが、強非線形時には挙動が不安定になるため、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提案した¹⁾。数値実験により得られた損傷確率から標準確率変量 s を求め、 s と $\ln a$ の線形回帰の結果として λ_A と ζ_A を得る。これを示すのが次式である。

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

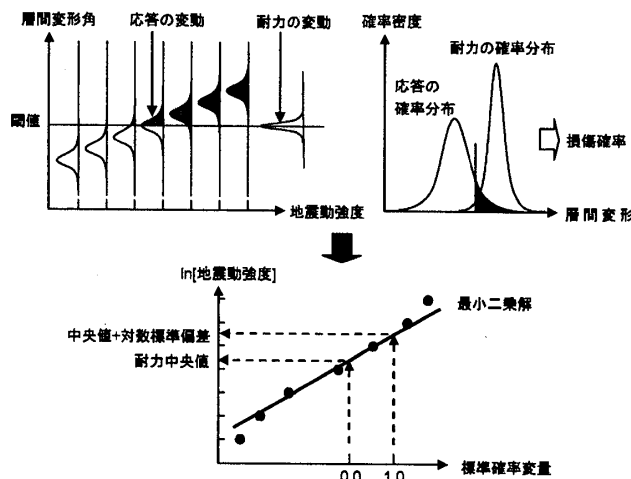


図 1 数値実験に基づく損傷度曲線評価の概念

2.2 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。

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。

$$s = \frac{1}{\zeta_A} \ln a - \frac{\lambda_A}{\zeta_A} \quad (6)$$

(6)式は陽な形で損傷度曲線の特性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。

$$s = \frac{1}{\zeta_A} \ln a + \frac{1}{\zeta_V} \ln v - \lambda \quad (7)$$

$\ln a$ 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、 $s=0$ として求められる対数平均 λ は、次式を満たす (a,v) の集合となる。

$$\lambda = \frac{1}{\zeta_A} \ln a + \frac{1}{\zeta_V} \ln v \quad (8)$$

3. 入力波形群の作成

3.1 作成の方針

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 2 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。

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

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

$$S(T) = \frac{X \cdot T_2}{T} ; T_{min} \leq T < T_1 \quad (9c)$$

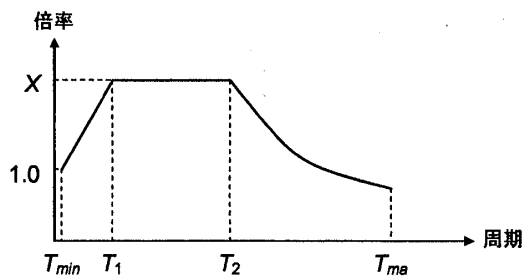


図2 応答スペクトルを規定する変数

3.2 作成結果

入力波形群の作成は、下記を確率変量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: 50~5000cm/s/s (T_{min} 時)

上記の確率変量は、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 (=21×21) に分類した。図 3 に入力波形群の区分分布を示す。これよりある程度の範囲に波形群が分布していることが分かる。

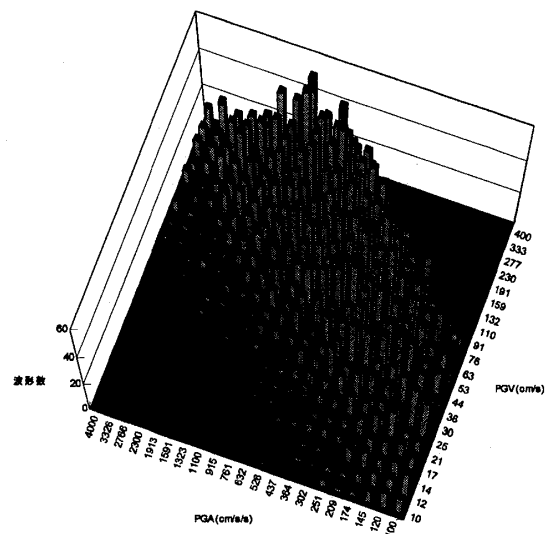


図3 作成した入力波形群の分布

4. まとめ

本研究 (その 1) 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するとともに、評価に用いる入力波形群を作成した。

参考文献

- 1) 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

*東電設計株

**東京海上日動リスクコンサルティング

*Tokyo Electric Power Services, Co., Ltd.

**Tokio Marine & Nichido Risk Consulting, Co., Ltd.