

モンテカルロ法による重力式岸壁のフラジリティカーブの合成

独立行政法人港湾空港技術研究所地盤・構造部 正会員 一井康二

1. はじめに

地震動の大きさに応じた被災確率を評価する方法として、フラジリティカーブ (Fragility Curve) が用いられることが多い (例えば、¹⁾)。本研究では重力式岸壁に対して被災レベル指標を設定し、各被災レベルに対する Fragility Curve を合成した。Fragility Curve の設定においては、実際の被災事例に対し最尤法を適用して求めることが多いが、本研究では被災事例そのものではなく、数値解析による簡易変形予測チャートにモンテカルロ法を適用して合成した事例に対し最尤法を適用して求めた。

2. 復旧費用にもとづく重力式岸壁の被災レベル設定

まず、被災/無被災の判定のために、重力式岸壁の被災レベル指標を設定した。1993年釧路沖地震における釧路港と1995年兵庫県南部地震における神戸港の復旧費用の実績から、図-1に示すように4段階の被災レベルの設定を行った。ここで、被災レベルの指標としては被災変形率 (海側変位量を岸壁高さで割ったもの: d/H) を用いている。岸壁の大きさや復旧工法の違いにより復旧費用は大きくばらついたが、岸壁の被災による経済被害等を考慮していないこともあり、その復旧費用をほぼ包絡するように被災レベルを設定した。

3. モンテカルロシミュレーションによる被災事例の合成

一般にフラジリティカーブの合成においては被災事例を元に行われることが多いが、被災事例を用いる場合、地震動レベルや地盤条件等の推定精度に結果が大きく依存するという欠点がある。つまり、ある特定の条件下 (例えば液状化対策下) におけるフラジリティカーブを求めたい場合、対応する事例が十分に、また精度よく得られなければ合理的な設定が行えない。一方で数値解析結果から材料の強度のばらつき等を考慮してフラジリティカーブを設定する場合、実際の被災事例との整合性の確保が困難である。そこで、数値解析による簡易変形予測手法を用いて、被災事例と予測結果の整合性を元に、モンテカルロシミュレーションにより被災事例を合成し、フラジリティカーブを設定することにした。

図-2は重力式岸壁の簡易変形予測チャートの一例である²⁾。これは、各種の地盤条件 (基礎地盤の砂層の厚さ: $D1/H$ と液状化強度: 港湾の液状化判定で用いられる等価N値で表現) や設計震度 (ケーソンのアスペクト比: W/H で表現) に対し、各地震動レベル (基礎の最大加速度) でどの程度の被災 (被災変形率) が発生するかを示したものである。本チャートの精度は釧路沖地震と兵庫県南部地震の事例により検証されており、図-3に示すように推定値を+30%したものが最も観測値との整合性がよい。

本研究では図-3に示す推定値と観測値のばらつきをもちいてモンテカルロシミュレーションを行った。推定値と観測値のばらつきの評価には下記の2通りの式を用いた。

$$d/H_{\text{observed}} = b_1 (d/H_{\text{estimated}}) + \varepsilon \quad (1)$$

$$d/H_{\text{observed}} = (b_1 + \varepsilon') (d/H_{\text{estimated}}) \quad (2)$$

この式を用いて、1000ケースの被災事例を合成した結果の例が図-4である。加速度レベルについても100Galから600Galまでの範囲でランダムに与えている。式(1)ではばらつきが大きすぎ、加速度レベルの増加に伴い変形が増えていく形にあまりならないため、式(2)をもちいてばらつきを表現することとした。また、ばらつきが大きいため海側変位量がマイナスになる例が発生するが、これは変位ゼロとして扱うこととした。

4. フラジリティカーブの合成

このように合成した被災事例から最尤法を用いてフラジリティカーブを合成する。まず、加速度 a における被災確率はパラメータ c および ζ により次の式であらわされると仮定する。

$$F(a) = \Phi \left[\ln(a/c) / \zeta \right] \quad (3)$$

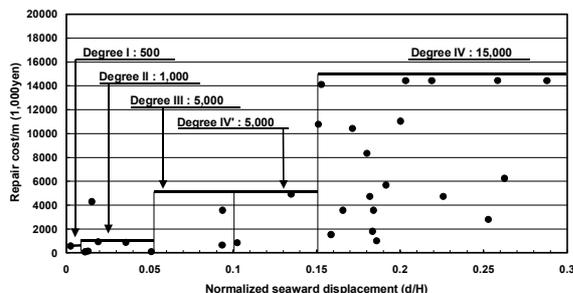


図-1 重力式岸壁の被災レベル設定

キーワード：フラジリティカーブ、重力式岸壁、モンテカルロシミュレーション
連絡先 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1, Tel:0468-44-5058, Fax:0468-44-0839)

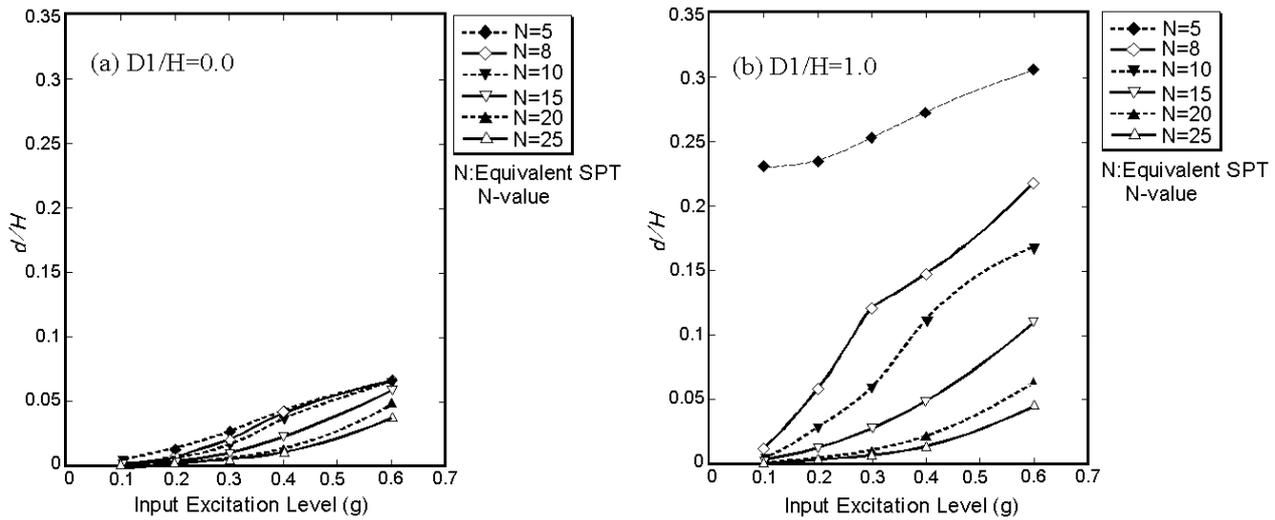


図-2 重力式岸壁の簡易変形予測チャートの一例 (W/H=0.9)

したがって、尤度関数は、N個の被災および無被災事例に対し各々 $x_i = 1$ または 0 として、次の式であらわされる。

$$L = \prod_{i=1}^N [F(a_i)]^{x_i} [1-F(a_i)]^{1-x_i} \quad (4)$$

したがって、パラメータ c および ζ は、下記の式を満たすように求めればよい。

$$\frac{d \ln L}{dc} = \frac{d \ln L}{d\zeta} = 0 \quad (5)$$

実際に 1000 ケースの合成した例に対し fragility カーブを求めた例が図-5 である。参考までに、100 Gal 毎の被災確率を示しているが、概ね整合している。また、4段階の被災レベルに対し各々求めた例が図-6 である。

6. まとめ

簡易チャートを利用したモンテカルロ法による fragility カーブの合成法を提案した。重力式岸壁の信頼性設計法および性能設計法を議論する際などに有効であると考えられる。

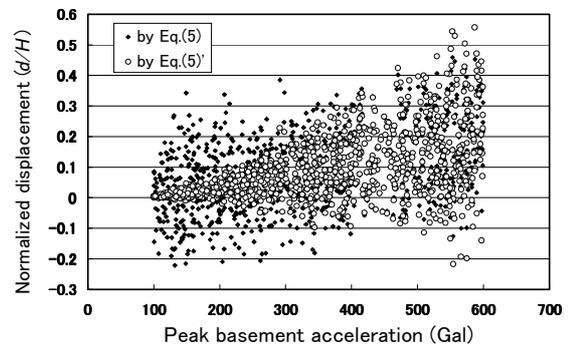


図-4 モンテカルロ法により合成した被災事例の例

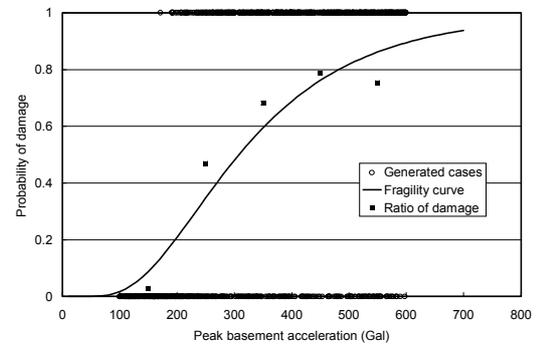


図-5 fragilityカーブの合成の例

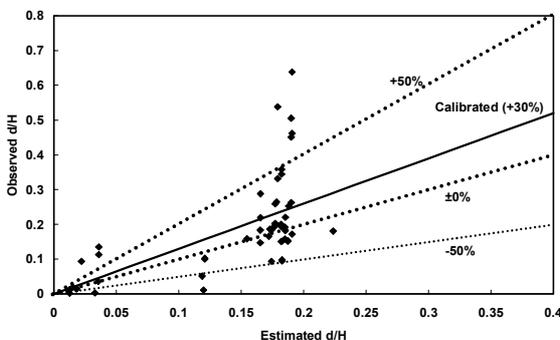


図-3 簡易チャートのばらつきの評価

(参考文献)

1) Shinozuka et al.: Nonlinear static procedure for fragility curve development, Journal of engineering mechanics, Vol.126, No.12, ASCE, pp.1287-1295, 2000.

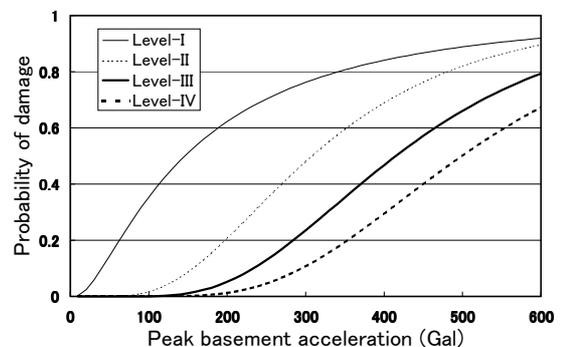


図-6 各被災レベルにおける fragilityカーブの例

2) Ichii et al.: Seismic performance evaluation charts for gravity type quay walls, Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, JSCE, (in printing)