

地盤強度のばらつきに着目した 重力式岸壁の残留変形量に関する 地震時信頼性指標の簡易評価法

A STUDY ON THE SIMPLE ESTIMATION METHOD OF SEISMIC RELIABILITY
INDICES FOR GRAVITY TYPE QUAY WALLS IN TERMS OF RESIDUAL
DEFORMATION CONSIDERING THE VARIATION OF THE SHEAR MODULUS
OF THE SOIL

安田 将人¹・長尾 毅²
Masato YASUDA and Takashi NAGAO

¹正会員 株式会社エコー (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

²正会員 工博 国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

This study aims at establishing the simple method for the estimation of reliability indices for gravity type quay walls against the level-one earthquake ground motion in terms of residual deformation. The previous study evaluated the reliability indices by using First-Order Second Moment (FOSM) method and showed the simple method for the evaluation of reliability indices by using the result of the two-dimensional earthquake response analysis. The method was easy to be implemented for the practical design because the designers need to conduct the two-dimensional earthquake response analysis only once. However, the estimation error is unavoidable and it may lead to a very conservative design. In this study, we proposed a method that is simple enough and more precise compared with the previous method. The proposed method uses one result of the two-dimensional earthquake response analysis and estimates the residual deformation of quay walls by use of shear deformation of the ground.

Key Words : Reliability index, First-order second moment method, gravity type quay wall, deformation

1. はじめに

港湾基準¹⁾におけるレベル1地震動は、確率的ハザード解析によって得られる一様ハザードスペクトルをもとにした時刻歴波形であり確率的な作用であることから、照査方法も確率論に基づいた信頼性設計法によるべきである。ただし、港湾構造物の代表的な構造である重力式及び矢板式岸壁は被災モードが変形であり、変形量を求めるためには2次元地震応答解析を行わなければならない、変形に対応した確率的照査を解析的に行うことは困難である。長尾ら²⁾は1次近似2次モーメント法(以下FOSMと記す)により数回の2次元地震応答解析(以下2次元解析)で変形量が規定値を超過する確率を信頼性指標として評価しており、また計算負荷低減の観点から1回のみの2次元解析により信頼性指標を簡易に評価する方法(以下既往の簡易評価法と記す)についても検討している。ただし、既往の簡易評価法は計算負荷が低い反面、限られた解析結果での変形量と限界状態関数の勾配の関係から最大勾配を設定することで安全側の信頼性指標を得ており、評価精度

に向上の余地がある。

本研究では、レベル1地震動に対する重力式岸壁の残留変形量に関する信頼性指標をFOSMで評価するにあたり、2次元解析は1回のみとすることで、計算負荷を低減し、信頼性指標を簡易に評価する方法を検討する。後述するように、FOSMにより信頼性指標を評価するためには、限界状態関数の平均値と確率変数の変化に伴う限界状態関数の勾配を求める必要があり、重力式岸壁の残留変形量に関する信頼性指標を評価するためには、確率変数の平均に対する残留変形量と、確率変数の平均±標準偏差に対する残留変形量が必要である。本研究では、確率変数の平均での残留変形量を2次元解析により求め、地盤のせん断変形量を用いることで確率変数の平均±標準偏差に対する残留変形量を推定する方法を検討する。なお、確率変数としては地盤のS波速度の推定誤差を取り扱うこととし、その確率分布形状は既往の研究²⁾と同様とする。

3. 残留変形量の整理と推定方法の検討

表-3に設定した μ 及び $\mu \pm \sigma$ の条件について2次元解析を実施し、水平方向の残留変形量を図-2に示す①壁体傾斜量、②マウンド変形量、③地盤変形量に分けて整理し、各変形量が残留変形量に与える影響を確認した。なお、マウンドのS波速度のばらつきは考慮していないことから、マウンド変形量と地盤変形量は分けて整理した。図-3に水深-11.0m、震度0.15、地盤Case1、苫小牧港波での変形量と T_g の関係を示す。なお、多層地盤の固有周期は、各層内での波動伝播時間の和として式(3)で簡易に評価する。

$$T_g = \sum \frac{4H_i}{V_{s_i}} \quad (3)$$

ここで、 T_g ：地盤の固有周期(s)、 H_i ： i 層における層厚(m)である。図-3の直線は μ 及び $\mu \pm \sigma$ での残留変形量について最小自乗法による回帰分析を行った結果である。残留変形量の3点はほぼ直線上にあり、直線近似が可能である。これは、既往の研究同様、重力式岸壁の信頼性指標の評価にFOSMが適用可能であることを示すもので、後述するようにこの直線の勾配が限界状態関数の勾配 $|\partial g / \partial T_g|$ である。また、残留変形量に対して地盤変形量の影響が大きいことが確認できる。なお、地震動の作用による重力式岸壁の変形は、壁体下の地盤のせん断変形の影響が大きいことから、地盤変形量と地盤のせん断変形量（以下せん断変形量と記す）の関係を整理し、図-4に示す。せん断変形量 δ_s は2次元解析の壁体中央の地盤における各要素のせん断ひずみ γ_{xy} （加振後の残留せん断ひずみと自重解析後の初期せん断ひずみの差）と要素高さ Δy の積を鉛直方向で合算したものとし、式(4)のように表わす。

$$\delta_s = \sum (\gamma_{xy} \cdot \Delta y) \quad (4)$$

水深によってせん断変形量と地盤変形量の関係は異なるが、両者の関係は相関が高く、また前述のように残留変形量に対して地盤変形量の影響が大きいことから、せん断変形量から残留変形量を推定することとする。本研究では、照査用震度算出式¹⁾を参考に、残留変形量を目的変数とし、せん断変形量等を説明変数とした重回帰分析により残留変形量推定式（式(5)）を求めた。

$$d_{est} = 53.827 k_{hk}^{0.613} \left(\frac{\alpha_c}{g} \right)^{0.260} \left(\frac{\delta_s}{\delta_{sR}} \right)^{0.807} \quad (5)$$

ここで、 d_{est} ：推定残留変形量(cm)、 k_{hk} ：照査用震度、 α_c ：地表面補正加速度(Gal)、 g ：重力加速度(980Gal)、 δ_s ：地盤のせん断変形量(cm)、 δ_{sR} ：基準せん断変形量(5cm)である。式(5)の照査用震度のべき数は正の値であるが、これは説明変数としてせん断変形量を用いた場合に、せん断変形量の変化に対する全変形量の変化は、岸壁の照査用震度が大きい

ほど大きいということを意味しているものであり、決して単純に照査用震度が大きいほど変形量が大いということを示しているものではないことに注意が必要である。残留変形量の推定結果を図-5に示す。推定誤差は-1.7~2.7cm（-64~39%）である。

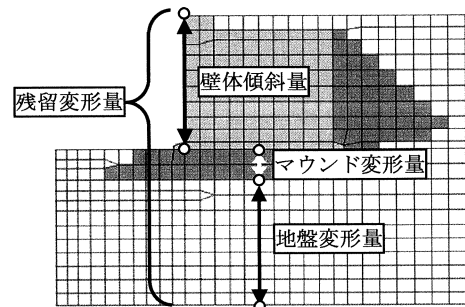


図-2 残留変形量と各変形量

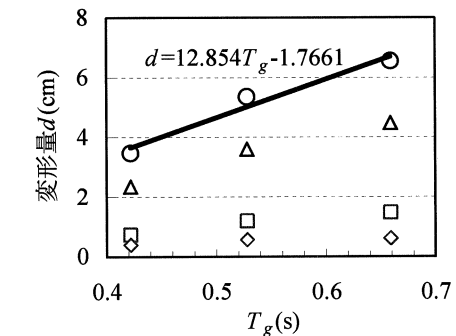


図-3 地盤の固有周期と変形量の関係

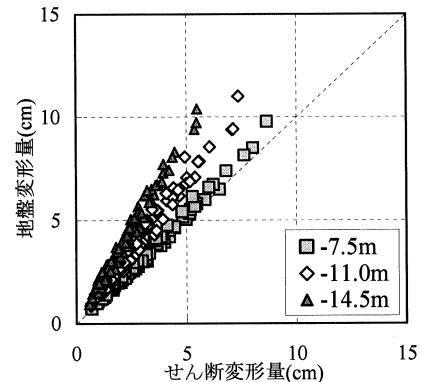


図-4 せん断変形量と地盤変形量の関係

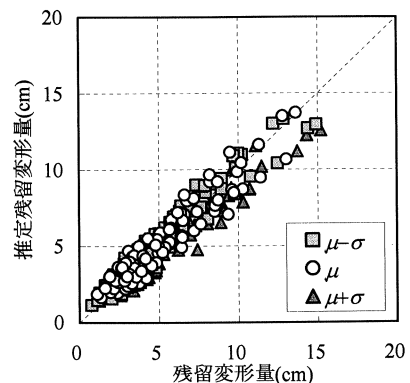


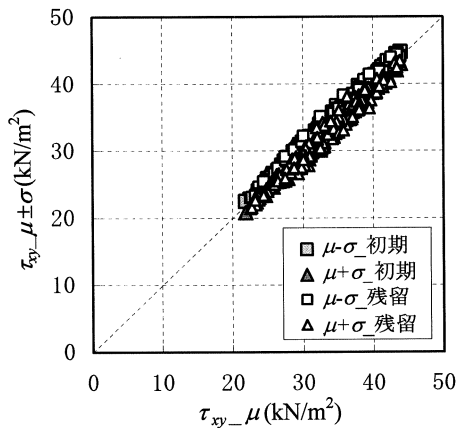
図-5 残留変形量の推定結果

4. 地盤のせん断変形量の推定方法の検討

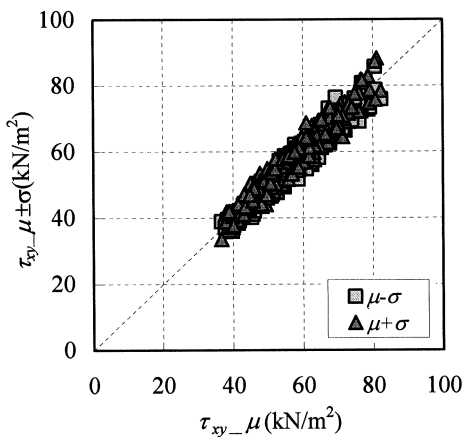
(1) 2次元解析壁体下の応力状態の確認

せん断変形量の推定を行うにあたり、2次元解析での壁体下の地盤のせん断応力及び平均有効拘束圧を確認する。図-6に初期、 γ_{xy} 最大時、残留のせん断応力を示す。 μ と $\mu \pm \sigma$ の差は、初期で-2.4～1.5kN/m²、 γ_{xy} 最大時で-6.1～7.1kN/m²、残留で-2.2～1.5kN/m²であり、大きな差がないことから、 $\mu \pm \sigma$ のせん断応力は μ と等しいとする。

次に、初期自重解析後の壁体下の地盤の平均有効拘束圧を μ と $\mu \pm \sigma$ で比較すると、差は-1.8～1.3kN/m²とわずかである(図-7)。さらに、八戸港波を対象とした水深-11.0m、震度0.15、地盤Case1、 μ の検討断面について、2次元解析の壁体下原地盤における平均有効拘束圧の時刻歴を図-8に示す。平均有効拘束圧は解析時間を通してほぼ一定である。よって、本研究では $\mu \pm \sigma$ の平均有効拘束圧は μ の平均有効拘束圧と等しいとするとともに、初期、 γ_{xy} 最大時、残留で平均有効拘束圧は等しいとする。



(a)初期及び残留



(b) γ_{xy} 最大時

図-6 せん断応力の比較

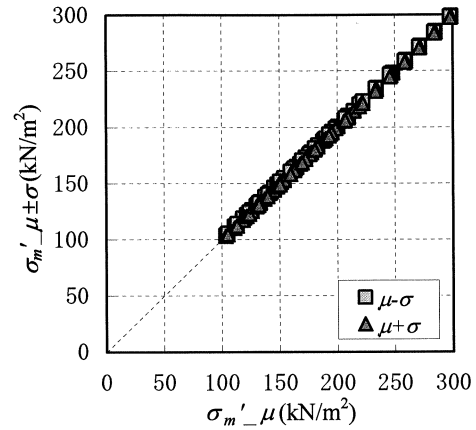


図-7 初期平均有効拘束圧 σ'_m の比較

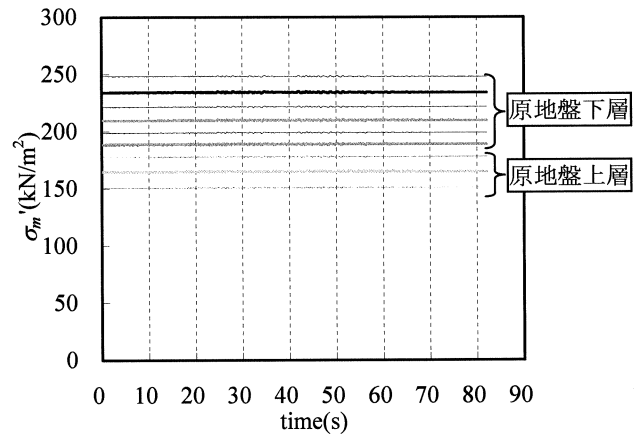


図-8 壁体直下の原地盤要素の平均有効拘束圧時刻歴

(2) 双曲線モデルによるせん断ひずみの推定

ここでは、地盤のせん断応力-せん断ひずみ関係(以下 τ_{xy} - γ_{xy} 関係と記す)をモデル化し、せん断応力からせん断ひずみ、せん断変形量を算出することで、 $\mu \pm \sigma$ の残留変形量を推定する。本研究では、地震応答解析に用いているFLIP同様、土要素の τ_{xy} - γ_{xy} 関係を双曲線モデルで表現する。双曲線モデルによる骨格曲線を式(6)で表わす。初期及び γ_{xy} 最大時の γ_{xy} は骨格曲線とせん断応力(τ_{xy_ini} 及び τ_{xy_max})により算出することができる(図-9)。なお、Towhataら⁵⁾に準じて地盤のせん断剛性は $2/\pi$ 倍する。

$$\gamma_{xy} = \tau_{xy} \left/ \left[\frac{2}{\pi} G_0 \left(1 - \frac{\tau_{xy}}{\tau_f} \right) \right] \right. \quad (6)$$

$$\tau_f = \sigma'_m \sin \phi'_f \cos \phi'_f$$

ここで τ_f :せん断強度であり、 τ_f は μ と $\mu \pm \sigma$ で同値となる。また前述のように μ と $\mu \pm \sigma$ の初期及び γ_{xy} 最大時の τ_{xy} が等しいとすると、式(6)で表される μ のせん断ひずみ γ_{xy_mu} と $\mu \pm \sigma$ のせん断ひずみ $\gamma_{xy_mu \pm \sigma}$ の比は μ と $\mu \pm \sigma$ の地盤のせん断剛性の比となり、 $\gamma_{xy_mu \pm \sigma}$ は初期及び γ_{xy} 最大時それぞれについて式(7)で算出できる。

$$\gamma_{xy_mu \pm \sigma} = \frac{G_{0_mu}}{G_{0_mu \pm \sigma}} \gamma_{xy_mu} \quad (7)$$

次に、双曲線モデルによる下降曲線をMasing則に従うものとし式(8)で表す。残留の γ_{xy} は下降曲線と残留せん断応力(τ_{xy_fin})により算出することができる(図-9)。

$$\gamma_{xy} = \frac{\frac{2}{\pi} G_0 \gamma_{xy_max} + (\tau_{xy} - \tau_{xy_max}) \left[1 + \left(\gamma_{xy_max} \frac{2}{\pi} G_0 \right) / 2\tau_f \right]}{\frac{2}{\pi} G_0 \left(1 + \frac{\tau_{xy} - \tau_{xy_max}}{2\tau_f} \right)} \quad (8)$$

ここで、 γ_{xy_max} ： γ_{xy} の最大値、 τ_{xy_max} ： γ_{xy} 最大時の τ_{xy} である。なお、残留においても μ と $\mu \pm \sigma$ で τ_{xy} 及び τ_f は等しいため、 μ と $\mu \pm \sigma$ で式(8)の右辺中 G_0 、 γ_{xy_max} 以外は等しく、残留の γ_{xy_mu} と $\gamma_{xy_mu \pm \sigma}$ の比を $\gamma_{xy_mu \pm \sigma}$ について解くと、式(9)のように表わすことができる。

$$\gamma_{xy_mu \pm \sigma} = \frac{A/(2/\pi)/G_{0_mu \pm \sigma} + B\gamma_{xy_max_mu \pm \sigma}}{A/(2/\pi)/G_{0_mu} + B\gamma_{xy_max_mu}} \gamma_{xy_mu} \quad (9)$$

$$A = \tau_{xy_fin} - \tau_{xy_max}, \quad B = 1 + \frac{A}{2\tau_f}$$

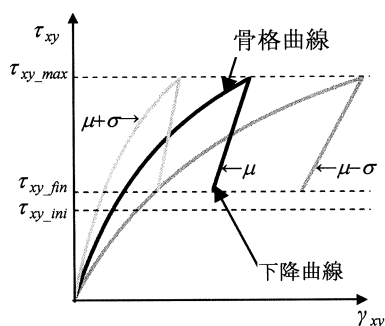


図-9 双曲線モデルのイメージ

(3) 推定結果の評価

式(7)及び式(9)で算出したせん断ひずみから式(4)により推定したせん断変形量 δ_{S_est} を図-10に、推定したせん断変形量をもとに式(5)で算出した残留変形量を図-11に示す。せん断変形量は、 $\mu \pm \sigma$ のせん断応力を μ と等しいと仮定したため、 $\mu - \sigma$ でせん断変形量を過大評価し、 $\mu + \sigma$ では過小評価する。また、残留変形量は-5.0~3.3cm (-68~53%)の推定誤差がある。

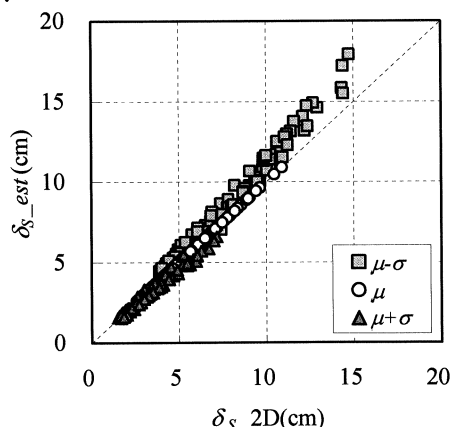


図-10 せん断変形量の推定結果

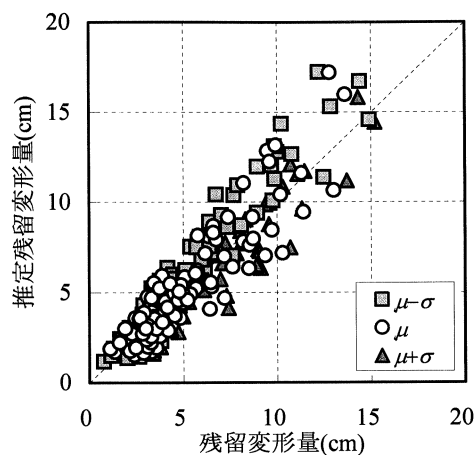


図-11 残留変形量の推定結果

5. 信頼性指標の評価

FOSM による信頼性指標 β は式(10)により算出される。なお、FOSM の特徴は、確率分布を不問にして簡易に信頼性指標を評価する点であり、性能関数が線形の場合には FOSM による信頼性指標は誤差を有さない。

$$\beta = \frac{\mu(g)}{\sigma(g)}$$

$$\mu(g) = d_a - d(\overline{T_g}) \quad (10)$$

$$\sigma(g) = \left| \frac{\partial g}{\partial T_g} \right| \sigma_{T_g}$$

ここに、 d_a ：変形量許容値（供用の観点から一つの目安として30cmと設定）、 $|\partial g / \partial T_g|$ ： T_g の変化に伴う限界状態関数の勾配、 σ_{T_g} ： T_g の標準偏差である。なお、岸壁の供用の観点からは回転方向の変形（傾斜角）についても評価が必要であるが、変形諸量は相関があり設計実務の観点からは水平変形量のみに着目してこれを一定の値に制御することで岸壁の供用性を確保することが現実的である。このため本研究では水平変形量のみを対象として議論をする。

2次元解析3回の残留変形量により評価した信頼性指標（以下 $\beta-t$ と記す）と、 $\mu \pm \sigma$ についてせん断変形量から推定した残留変形量により評価した信頼性指標（以下 $\beta-e1$ と記す）の比較を行うとともに、既往の簡易評価法による信頼性指標（以下 $\beta-e0$ と記す）を併せて比較する。既往の簡易評価法は、図-12に示すように地盤の固有周期に平均の残留変形量を地盤の固有周期の標準偏差で除した値（ $\mu d / \sigma_{T_g}$ ）と3点近似における偏微分係数（ $\partial g / \partial T_g$ ）から、安全側の推定を行う観点から両者の関係の最大勾配を設定し、地盤の固有周期の平均の残留変形量と地盤の固有周期の標準偏差からこの勾配を推定して信頼性指標を式(11)で評価する。本研究では図-12から $\alpha=0.54$ とした。

$$\beta-e0 = \frac{d_a - d(\overline{T_g})}{\alpha \cdot d(\overline{T_g})} \quad (11)$$

水平軸を μ の残留変形量、鉛直軸を信頼性指標とし、 $\beta-t$ 、 $\beta-e0$ 、 $\beta-e1$ を比較した結果を図-13に示す。 $\beta-t$ は残留変形量が増加するにしたがい、双曲線的に減少していることが分かる。 $\beta-e1$ は $\beta-t$ に比べ信頼性指標を小さく、安全側に評価する。これは、残留変形量の推定において多くのケースで $\mu-\sigma$ の残留変形量を過大評価し、 $\mu+\sigma$ の残留変形量を過小評価しており（図-11）、限界状態関数の勾配を大きく評価するためである。

次に、 μ の残留変形量が5cm以上のケースについて、水平軸を μ の残留変形量、鉛直軸を $\beta-t$ と $\beta-e0$ 、 $\beta-e1$ の差とし、 $\beta-e0$ と $\beta-e1$ の信頼性指標の推定誤差を比較した結果を図-14に示す。

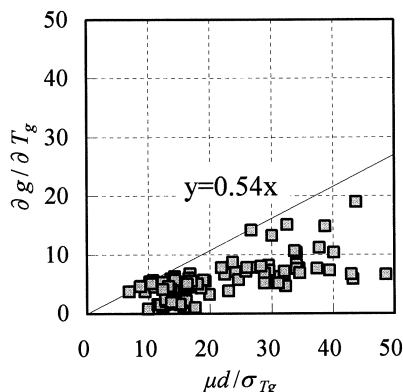


図-12 既往の簡易評価法の係数評価

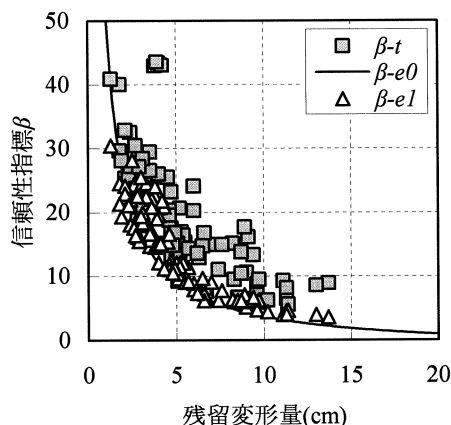


図-13 残留変形量と信頼性指標

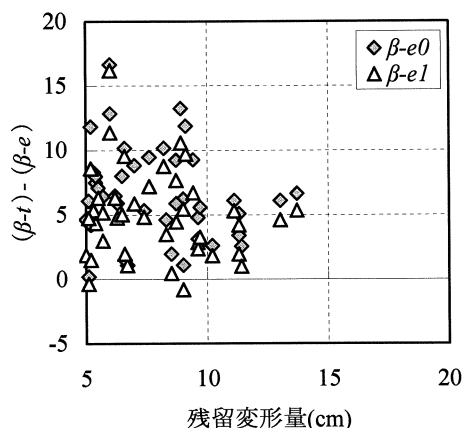


図-14 信頼性指標の比較

ほとんどのケースで $\beta-e1$ は $\beta-e0$ に比べ下側にプロットされており、本研究による簡易評価法は既往の簡易評価法に比べ信頼性指標の評価精度が向上していることが分かる。

なお、本研究での簡易評価法は、 γ_{xy} 最大時のせん断応力が μ 及び $\mu\pm\sigma$ で等しいと仮定しているが、地震動等にはばらつきを考慮する場合、 γ_{xy} 最大時のせん断応力の違いが地盤のせん断ひずみの違いとなり、 γ_{xy} 最大時のせん断応力の違いを評価するためには、地震応答解析を行う必要がある。よって、本研究による簡易評価法は地震動のばらつきを考慮した信頼性指標の評価には適用できないことに注意が必要である。

6. まとめ

本研究では、地盤強度のばらつきに着目した重力式岸壁の残留変形量に関する地震時信頼性指標を1回の2次元解析で簡易に評価する方法を検討した。地盤のせん断剛性の違いを双曲線モデルによりせん断変形量の違いとして評価することにより、3回の2次元解析で評価する信頼性指標に比べ、安全側に信頼性指標を評価するとともに、計算負荷が低減できる。なお、本研究で用いた地震応答解析コードFLIPは、本研究で対象とした重力式岸壁では過去の地震被災の再現に概ね成功しているものの、変形量の少ない範囲については精度の検証事例が比較的少ない。検証事例としては、釧路港試験重力式岸壁の2003年十勝沖地震における変状調査結果をもとにした解析⁹⁾があり、20cm程度の実測変形量に対して解析では20%程度の変形量の差が認められている。このような解析精度の不確定性を考慮した信頼性指標の評価は今後の課題である。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修, (社)日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007.
- 2) 長尾 毅: 岸壁の残留変形量に関する地震時信頼性指標の簡易評価法, 構造工学論文集 Vol.53A, pp.351-359, 2007.
- 3) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Report of The Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990.
- 4) 森田年一, 井合 進, Liu Hanlong, 一井康二, 佐藤幸博: 液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメタの簡易設定法, 港湾技研資料, No.869, 1997.
- 5) Towhata, I. and Ishihara, K.: Modelling soil behavior under principal stress axes rotation, Proc. 5th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Nagoya, Vol.1, pp.523-530, 1985.
- 6) 笹島隆彦, 窪内 篤, 大塚夏彦, 森政信吾, 三浦均也: 2003 十勝沖地震における釧路港試験重力式の2次元FEM解析, 第39回地盤工学研究発表会, CD-ROM, 2004.