

地盤反力によるせん断変形の増加を考慮した重力式岸壁の簡易耐震照査法に関する研究

パシフィックコンサルタンツ株式会社 正会員○宮下健一朗
国土技術政策総合研究所 正会員 長尾 毅

1. はじめに

現行の港湾基準は性能規定型の設計体系となっており、レベル1地震動に対する岸壁の設計を行う場合は、岸壁天端の残留変形量の照査が必要となる。残留変形量を精度良く算出する方法としては2次元地震応答解析による方法などがあるが、計算負荷が大きく設計実務には適していない。そこで港湾基準では、付属書において岸壁の許容変形量をパラメータとした照査用震度による設計法が示されており、間接的に残留変形量の照査を行うことができるようになっている。しかしながら、この設計法は従来の震度法による設計法を踏襲した形となっており、実際の変形メカニズムに即した設計法ではなく、照査の精度に問題を残している。本研究は、重力式岸壁のレベル1地震動作用時を対象として、計算負荷が少なく変形メカニズムに即し、精度良く残留変形量を算出できる簡易耐震性能照査方法について検討を行ったものである。なお、レベル1地震動作用時を対象としているため、液状化が起る場合は対策が実施されていることを前提として、液状化は発生しない条件で検討を行っている。

2. 重力式岸壁の変形メカニズムと簡易耐震性能照査方法の概要

図-1に2次元地震応答解析で得られた重力式岸壁の変形図を示す。2次元地震応答解析には解析コードFLIP[®]を使用している。重力式岸壁は直下地盤が図-2に示すようにせん断による変形及び傾斜による変形を起こして全体が変形しており、震度法で想定しているいわゆる滑動によって変形していないことが分かる。そこで本研究における簡易耐震性能照査方法はせん断変形量と傾斜による変形量をそれぞれモデル化し、足し合わせることによって、全体の変形量を求めるモデルとする。

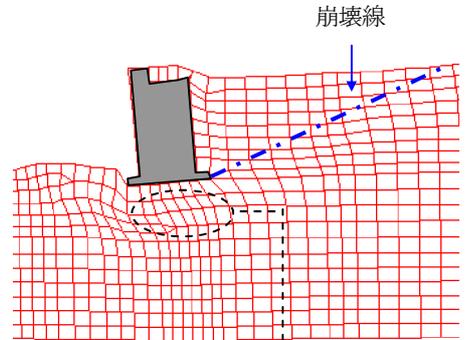


図-1 重力式岸壁残留変形図 (倍率 10倍)

3. せん断による変形量のモデル化

2次元地震応答解析による重力式直下地盤のせん断応力 τ_{xy} とせん断ひずみ γ_{xy} の履歴曲線を図-3に示す。図には式(1)で求めた静止土圧状態における水平成層地盤での τ_{xy} の

$$\tau_{xyf} = \sqrt{\tau_f^2 - \tau_d^2} \quad (1)$$

$$\tau_f = \sigma_m \sin \phi \quad (2)$$

$$\tau_d = 0.5(1 - K_0)\sigma_v \quad (3)$$

$$U = \frac{1}{\rho H^2} \sum \tau_{xy} (\sum \tau_{xy}) \quad (4)$$

上限値 τ_{xyf} も示している。ここに、 τ_f : 最大せん断強度(kN/m²)、 τ_d : 軸差応力(kN/m²)、 σ_m : 拘束圧(kN/m²)、 ϕ : せん断抵抗角(°)、 K_0 : 静止土圧係数(=0.5)、 σ_v : 有効上載圧(kN/m²)である。図より、2次元地震応答解析の τ_{xy} は水平成層地盤での τ_{xyf} に比べ非常に小さい値で頭打ちとなっていることが分かる。これは、2次元地震応答解析では重力式岸壁からの大きな地盤反力により τ_d が増加し、式(1)で求められる τ_{xyf} が小さくなるためと考えられる。そこで本研究では、まず重力式直下を想定した地盤モデルの1次元の地震応答解析を行い、各要素の τ_{xy} - γ_{xy} 履歴曲線を整理する。次に地盤モデルの各要素の τ_d 時刻歴をモデル化して式(1)に式(3)の代わりにこれを代入し、 τ_{xyf} 時刻歴を求める。最後に、求めた τ_{xyf} を上限値とした場合の τ_{xy} - γ_{xy} の骨格曲線を整理し、1次元の地震応答解析における τ_{xy} が時刻歴の中で過去最大になった時に図-4に示すように、1次元の地震応答解析におけるひずみエネルギーとエネルギーが等しくなる γ_{xy} を求め、 τ_d 増加による γ_{xy} の増加分を求める。また、地盤反力によって τ_d だけではなく τ_{xy} も増加するため、各要素の地盤反力による増加 τ_{xy} 時刻歴もモデル化し、式(4)によって、 τ_{xy} 増加による運動エネルギーを求め、これと等しいひずみ

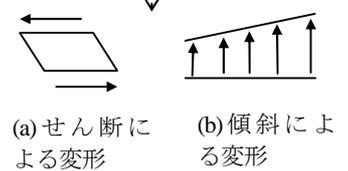


図-2 直下地盤の変形モード

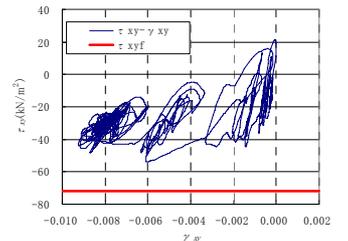


図-3 履歴曲線

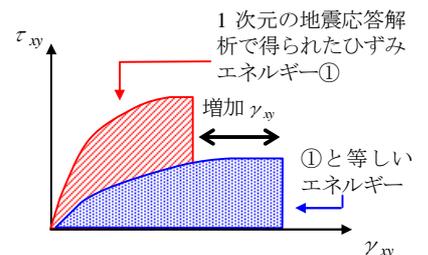


図-4 増加 γ_{xy}

キーワード 重力式岸壁, 岸壁, 耐震設計

連絡先 〒206-8550 東京都多摩市関戸 1-7-5 パシフィックコンサルタンツ (株) 港湾部 TEL042-372-6180

エネルギーの増加が起こるとして、 τ_{xy} 増加による γ_{xy} の増加分を求める。ここで、 U : 運動エネルギー(kNm)、 ρ : 単位体積質量(t/m³)、 H : 地盤モデルにおける要素高(m)である。

4. 傾斜による変形量のモデル化

傾斜による変形量は、図-5 に示すように、直下地盤各要素の傾斜角の曲率を求め、曲率を2階積分することにより求める(式(5))。曲率は直下地盤に働く σ_y をモデル化し、岸壁中心周りの岸壁幅内の σ_y によるモーメントから求める。対象としている変形量は残留変形量であるため、式(6)に示すように最大地盤反力作用時の曲率から初期勾配で増加モーメント分の曲率を減少させて求める。ここに、 U_r : 傾斜による変形量(m)、 ϕ_{res} : 残留時の傾斜角の曲率(1/m)、 ϕ_{max} : 最大地盤反力作用時の傾斜角の曲率(1/m)、 ΔM : 最大地盤反力作用時の増加モーメント(kNm)、 E_{ini} : 初期の地盤弾性係数(kN/m²)、 E_{max} : 最大地盤反力作用時の地盤弾性係数(kN/m²)、 I : 岸壁中心まわりの岸壁底面の断面2次モーメント(m⁴)である。

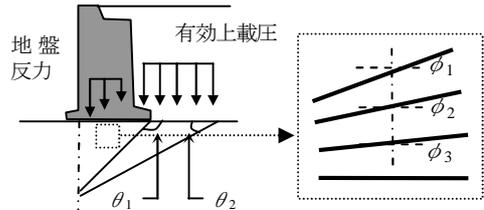


図-5 傾斜による変形量

$$U_r = \iint \phi_{res} dy \quad (5)$$

$$\phi_{res} = \phi_{max} - \frac{\Delta M}{E_{ini} I} \quad (6)$$

$$\phi_{max} = \frac{\Delta M}{E_{max} I} \quad (7)$$

$$\sigma_y = \frac{P}{\pi} \{ (\theta_2 - \theta_1) + \sin(\theta_2 - \theta_1) \cos(\theta_2 + \theta_1) \} \quad (8)$$

$$\tau_{xy} = \frac{P}{\pi} \sin(\theta_2 - \theta_1) \sin(\theta_2 + \theta_1) \quad (9)$$

$$\sigma_x = K_0 \sigma_y \quad (10)$$

$$\phi_{mo} = \sin^{-1}(0.65 \sin \phi) \quad (11)$$

$$\phi_r = \sin^{-1}(0.9 \sin \phi) \quad (12)$$

5. 地盤内応力のモデル化

上記までの変形量を求めるにあたって必要となる直下地盤の地盤内応力は、図-6 に示すように、地盤反力及び重力式背後の埋立地盤の有効上載圧によって水平成層地盤からの増分が発生するとし、 σ_y, τ_{xy} は式(8)式(9)のBussinesqの弾性応力解によって、 σ_x は静止土圧として式(10)により求める。ここで、 p : 地盤反力及び埋立地盤の有効上載圧(kN/m²)である。

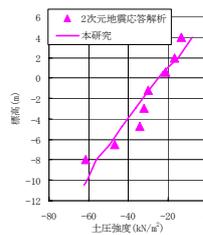


図-7 土圧比較

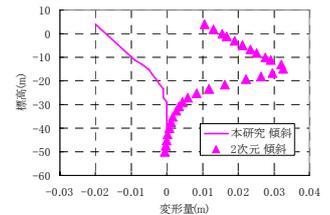
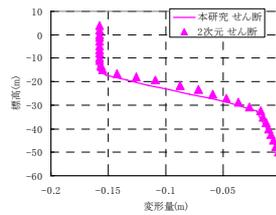


図-8 変形量比較

6. 地盤反力のモデル化

地盤反力は土圧、岸壁自重及び慣性力、動水圧の力の釣り合いから三角形もしくは台形分布として求める。土圧は2次元地震応答解析結果との見合いから、物部岡部土圧をやや修正し、崩壊角を式(11)によるせん断抵抗角によって求め、崩壊角内の土塊の滑り線上の抵抗角を式(12)とした時の物部岡部土圧を用いることとした。地盤反力最大時の2次元地震応答解析とモデルの土圧の比較を図-7 に示すが、概ねモデルは2次元地震応答解析を再現できている。また、この方法によるモデル土圧の崩壊角は35°程度と比較的小さい値となったが、この結果は図-1に見られる崩壊角に近い結果となっている。

7. モデルの精度比較

図-8 に水深-11m岸壁におけるモデルと2次元地震応答解析結果のせん断変形量と傾斜変形量の比較を示す。せん断変形量においてはモデルは2次元地震応答解析結果を良く再現出来ているが、傾斜による変形量は2次元地震応答解析の結果に比べて大きく、過大評価する結果となった。2次元地震応答解析結果の傾斜変形量は地盤の深い位置で一度陸側に変形するが、モデルはこれが再現できておらず、過大評価の原因となっている。2次元地震応答解析結果が陸側に一度変形するのは岸壁背後の埋立地盤の有効上載圧によって、陸側に大きく傾くためであり、本モデルではこの効果を取り入れていないため過大評価となっている。図-9 に水深-7.5m, -11m, -14.5mに2種類の地盤条件(地盤の固有周期0.8sと1.2s)を組み合わせさせた6断面に周波数特性の異なる5つの波形を入力した時の2次元地震応答解析結果と本モデルのせん断変形量、傾斜変形量、全体の変形量の比較図-9を示す。傾斜変形量の精度が低く全体変形量の精度の低下を招いている。傾斜変形量の精度の向上が今後の課題である。

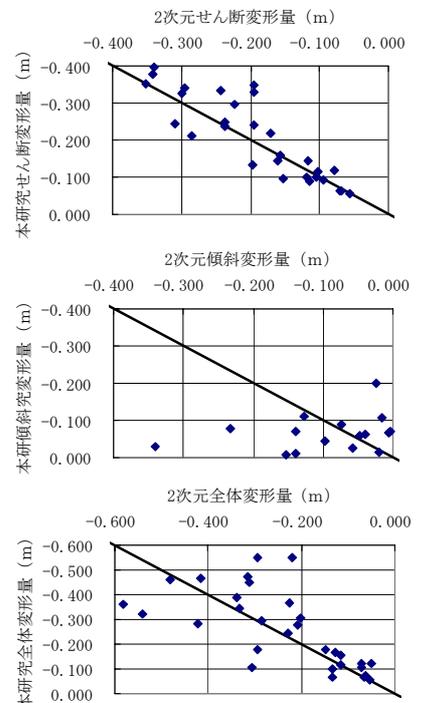


図-9 精度検討

参考文献

1) Iai, S. et al. : Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Report of The Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990