

安定化 ISPH 法を用いたケーソン式防波堤の浸透崩壊シミュレーション

九州大学大学院 学生会員 ○合田 哲朗
九州大学大学院 正会員 浅井 光輝

1. 目的

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う巨大津波は、防波堤をはじめとする多くの港湾施設に甚大な被害を与えた。今後発生が危惧される大型津波に備えるためにも、ハード面からの防災・減災対策の再考は急務とされる。これまで、防波堤に関する被害メカニズムの解明に向けて数多くの研究が行われてきた。その中でも被災の主原因として、I.防波堤前面と背面の水位差に起因して作用する水平力、II.防波堤の越流水ならびに目地で発生する流水による捨石マウンドの洗掘、III.浸透流による捨石マウンドの支持力の低下に伴うパイピング破壊の3点が判明している。本研究ではIIIにのみ焦点を当て、浸透流解析により得られたピエゾ水頭分布の妥当性を水理実験との比較により検証した。加えて、Terzaghiの限界動水勾配の理論値を閾値として、ピエゾ水頭の勾配から算出される動水勾配を評価することで、マウンド崩壊現象の再現を試みた。解析手法には、地表流と浸透流を統一的に解くために独自に定式化された安定化 ISPH 法¹⁾を採用した。

2. 解析手法

2.1. 安定化 ISPH 法

ISPH法は非圧縮性流体の支配方程式を予測子修正子法に基づく射影法と呼ばれる分離型解法によって時間離散化し、その分離された方程式をSPH法の基礎式に基づいて空間離散化を行う手法である。本論文では詳細な定式化を文献¹⁾に委ね、解析に用いた2つの支配方程式についてのみ簡単に記述する。

$$\frac{C_r(\varepsilon)}{\varepsilon} \frac{D\mathbf{v}_D}{Dt} = -\frac{1}{\varepsilon\rho} \nabla P + \frac{\mathbf{g}}{\varepsilon} + \nu_E(\varepsilon) \nabla^2 \mathbf{v}_D - a(\varepsilon) \mathbf{v}_D - b(\varepsilon) \mathbf{v}_D |\mathbf{v}_D| \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v}_D = 0 \quad (2)$$

式(1)は、ナビエ・ストークス式および拡張ダルシー則の両者を考慮し定式化されており、地表流に関しては間隙率 ε が1となりナビエ・ストークス式に従い、一方浸透流に関しては ε が1より低い値となり拡張ダルシー則に従う。式(2)は、質量保存則であり非圧縮流体の仮定のもと密度の時間微分項をゼロとして導出される。また、両式中の \mathbf{v}_D はダルシー流速と呼ばれ $\mathbf{v}_D = \varepsilon \mathbf{v}$ と定義される。

2.2. マウンド層の物理量および限界動水勾配の与え方

まず、ピエゾ水頭は P_i を水粒子の圧力、 Δz_i を基準面からの高さとしたとき以下の式で評価される。

$$Piezo = \frac{P_i}{\rho g} + \Delta z_i \quad (3)$$

動水勾配は、SPHの勾配に対する近似作用素を用いて式(3)で得られたピエゾ水頭より次式で計算する。

$$i_i = \langle \nabla Piezo_i \rangle = (\varepsilon\rho)_i \sum_j m_j \left(\frac{Piezo_j}{(\varepsilon\rho)_j^2} + \frac{Piezo_i}{(\varepsilon\rho)_i^2} \right) \nabla W(r_{ij}, h) \quad (4)$$

判定の閾値として用いられる Terzaghi の限界動水勾配の理論値は文献²⁾より以下のように定義される。

$$i_c = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (5)$$

ここでの G_s 、 e はそれぞれ、マウンド粒子の比重 ($G_s = \rho_s / \rho_w$) と間隙比 ($e = \varepsilon / (1 - \varepsilon)$) である。

得られた動水勾配の大きさを算出し、その値が限界動水勾配の理論値を超えた場合にマウンド粒子が破壊したものと見なし、固定条件から移動条件へと移行させることとした。

キーワード 粒子法, 浸透流, 防波堤

連絡先 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 ウエスト 2 号館 11 階 1102 号室構造解析学研究室 TEL
092-802-3370

3. 解析モデル

解析ツールの精度を検証するために、笠間ら³⁾により行われた実験を参照し、図-1に示すような解析モデルを作成した。解析モデルに排水機能が付与されているのは、水位差 Δh を常に 145mm に保つためである。また、実験ではマウンド内の 25 個の水圧計においてピエゾ水頭が観測された。本解析モデルにおいても、実験と同様の位置に観測点を設け、図-1に示すように右上から左下にかけて①から②までの番号を割り振った。粒子径 1cm で離散化を行い、総粒子数約 90 万個である。また、時間増分は 0.001s とした。加えて、マウンド粒子の比重 G_s は実験より 2.03 とした。

4. 解析結果

図-2に浸透流解析により得られた解析値と実験値の比較を示す。ここでの浸透流解析においては、マウンド粒子の位置は完全に固定されているということに注意していただきたい。図-2より、解析値が実験値と概ね同様の傾向を持つことが分かる。何点かの計測点において若干の誤差が見られたが、これは解析において水位差のコントロールが厳密にできていないこと（想定した高さから 1~2cm の誤差が生じることがあること）が原因であると考えられる。続いて、図-3はケーソン倒壊時における解析と実験の比較図である。本解析においては、ケーソンの運動については考慮していないことから、ケーソンは初期位置に固定されている。先述したように本研究は動水勾配より簡易的にマウンド粒子の破壊を表現したものにすぎないが、ケーソン直下部および背部からマウンドの崩壊が発生するということを定性的に示せた。

5. 結論

本解析ツールを用いた浸透流解析において、実験結果と同等のピエゾ水頭分布が得られることを確認した。さらに、限界動水勾配を基準にして、粒子法の拡張によりマウンド崩壊現象が定性的に表現可能であることを確認した。今後、マウンド崩壊シミュレーションの精度向上のため、ケーソンの運動の表現に加え、マウンドとケーソンの接触現象までモデル化する必要がある。前者に関しては、ケーソン表面粒子上での圧力を観測することで回転・並進運動の取り扱いを可能とする解析ツールを開発中である。また、後者に関しては、DEMの基礎概念であるバネ・ダッシュポットモデルを取り入れることで接触力の評価を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 森本敏弘, 浅井光輝, 笠間清伸, 藤沢和謙, 井元佑介: 安定化 ISPH 法による拡張ダルシー則とナビエ・ストークス方程式の統一解法, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.70, No.2(応用力学論文集 Vol.17), I_213-I_221, 2014.
- 2) (社)地盤工学会: 地盤工学ハンドブック, 第3章土質力学, 1999.
- 3) 笠間清伸, 善功企, 春日井康夫: 浸透流に着目したケーソン式混成防波堤の安定性に関する水理模型実験, 第60回海岸工学講演会, 2013.11.1.

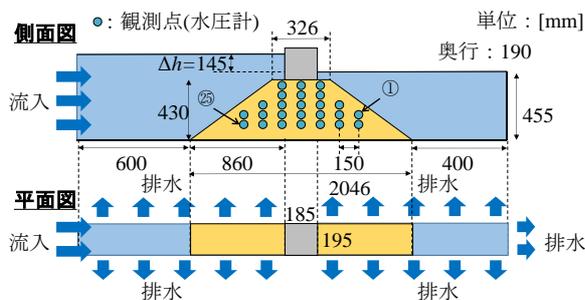


図-1 解析モデル

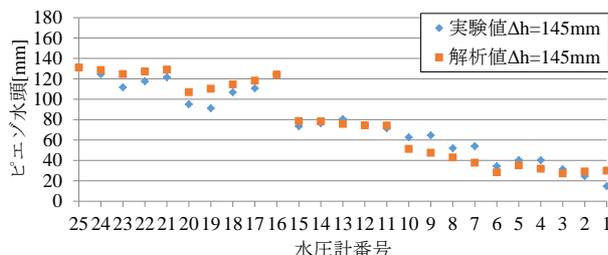


図-2 各水圧計でのピエゾ水頭

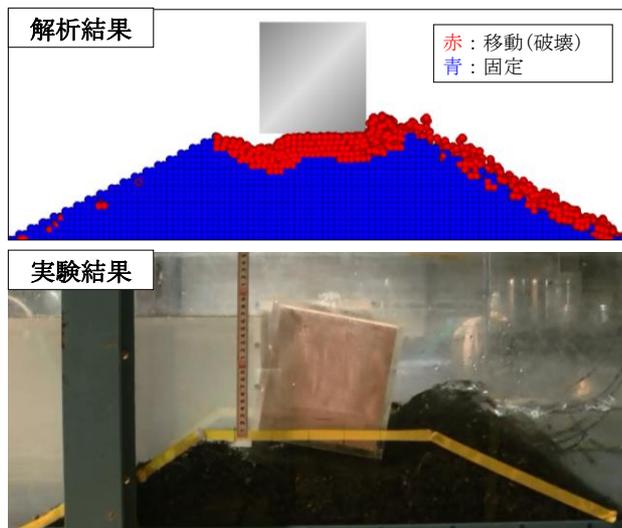


図-3 ケーソン倒壊時のマウンド形状の比較図