

安定化 ISPH 法による滑動離脱過程を有する洗掘現象の基礎検討

九州大学 学生会員 ○原崎 健輔
九州大学 学生会員 野上 智隆
九州大学 正会員 浅井 光輝
中央大学 正会員 有川 太郎

1. 目的

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震において防波堤を含む多くの港湾構造物が津波により甚大な被害を受けた。今後の津波防災・減災のためには、粘り強い防波堤が望まれており、防波堤の津波対策は急務である。既往の様々な研究より防波堤の崩壊の原因として、1)防波堤前後での水位差による水平力、2)越流波および防波堤の目地における捨石マウンドの洗掘、3)水位差に起因する浸透流による捨石マウンドの支持力低下によるパイピング破壊などが主な原因と考えられている。なかでも2011年の被害報告では防波堤背面での地盤崩壊が多く報告されていることから、本研究では2)越流波による洗掘現象の解明に焦点をあて、粒子法シミュレーションを通してそのメカニズム解明を試みた。

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。本研究ではナビエ・ストークス式と以下の質量保存則を支配方程式として用いた。

$$\nabla \cdot \mathbf{v}_D = 0 \quad (1)$$

ISPH法の離散化された圧力ポアソン方程式に粒子分布の平滑化に作用する項を付加し、粒子分布の不均一性に起因する空間近似作用素の精度低下を防ぐ安定化ISPH法という手法を用いる。安定化ISPH法では、圧力ポアソン方程式は次のように離散方程式を定める。

$$\langle \nabla^2 P_i^{n+1} \rangle \approx \frac{C_r(\varepsilon_i)}{\varepsilon_i} \left(\frac{\rho_i^0}{\Delta t} \langle \nabla \cdot \mathbf{v}_{Di}^* \rangle + \alpha \varepsilon_i \frac{\rho_i^0 - \langle \rho_i^n \rangle}{\Delta t^2} \right) \quad (2)$$

なお、 α は0~1までの値をとる安定化パラメータであり、本解析では $\alpha = 0.01$ とした。

2.2. 洗掘判定式

既存の流砂量式の多くは経験則によって定義されている。各流砂量式が流砂の運動方程式の代わりとなっていることを考慮すると、それぞれの式に対象となる運動形態が存在する。本章では、その中でも洗掘現象を再現するのに適しているものと思われる滑動離脱過程における簡便な流砂量式を使用する。滑動離脱過程においては駆動力である揚力と抗力、抵抗力である重力の関係により移動限界流速を推定でき、洗掘の判定基準となる。砂粒子の移動限界流速 u_{limit} は次式により与えられる。

$$u_{limit} = \sqrt{\frac{2A_3(\mu_f \cos \theta - \text{sign}(\vec{v} \cdot \vec{t}) \sin \theta)(\sigma/\rho - 1)gd}{(C_D + \mu_f C_L)A_2}} \quad (3)$$

ここで、 C_D :抗力係数、 C_L :揚力係数、 ρ :流体の密度、 σ :砂粒子の密度、 d :砂粒子の粒径、 u_d :砂粒子の中心における流速、 A_2 :砂粒子の2次元形状係数($A_2 d^2$ は砂粒子1個の投影面積)、 A_3 :砂粒子の3次元形状係数($A_3 d^3$ は砂粒子1個の体積)、 α :傾斜角、 μ_f :静止摩擦係数、 \vec{v} :解析によって算出される砂粒子の持つ流速の方向、 \vec{t} :地盤表面の接線ベクトルである。

2.3. 地盤粒子に働く流流速の算出

壁面近傍における流束分布は変化が激しくなるため、解像度の粗い水粒子で砂粒子への流速を算出するのは困難である。そのため地盤表層から一定の距離 r だけ離れた地点(境界層内部とする)の流速を観測し、その地点から地盤粒子までは対数分布則に従い流速が変化するものと仮定する。

3. 越流実験による検証

前述した解析モデルを用いて、越流実験にて検証を行った。解析対象モデルには有川らによって行われた、防波堤背面における洗掘現象の影響を検討した小型の水利模型実験を採用した。実験ケースとして堤防の補

強策の有無を考慮した、無対策ケース(図.1)と腹付ケース(図.2)の2ケースで検証を行った。各解析数値については表1の通りである。解析結果として無対策ケースにおいて洗掘開始から12.5秒後の形状(図1.1)を比較すると、洗掘形状については実験と類似の結果を得ることが出来た。しかし、堆積形状までは再現することが出来なかった。腹付ケースにおいても実験における堆積過程が再現できず、実験と異なる洗掘形状(図2.1)を得た。そのため堆積過程のモデル化に問題があることを確認するために、洗掘堆積過程が比較的安定した実験の途中段階における地盤形状を再現し、解析(図2.2)を行った。結果としては、水の流れ、洗掘形状の実験との類似性を確認した。図2.3に見られるようにいくつか洗掘判定がされた地盤粒子はいくつか存在したものの、マウンドの大きな形状変化は見られず、安定したマウンドの形状維持が確認でき、マウンドの複雑形状下での洗掘判定の妥当性を確認した。以上2ケースの検証より、地盤に対して洗掘開始を与える地盤の離脱条件に関しては適用可能であることが確認できた。しかし、洗掘後の土粒子の浮遊・沈降・堆積過程の再現までは出来ていなく、そのため腹付ケースに見られて様に、堆積過程が流体挙動に大きく働き、地盤の洗掘現象に影響を及ぼすようなモデルにおいては実験と解析との間で大きな違いが生じた。だが、マウンド形状の再現が成されれば、その後の洗掘の有無や形状の再現できることとなる。

4. 結論

洗掘判定として移動限界時のせん断流速を判定基準とした洗掘判定式を採用し、実験との比較検証を実施することで、その有効性を確認した。しかし、洗掘判定後の地盤を密度流としてモデル化していることから、特に腹付ケースにおいては地盤の流出からの浮遊・沈降・堆積過程の再現が出来ていない。今後は、洗掘判定後の地盤粒子のモデル化に改良を加えることで、より高精度な洗掘予測シミュレーション手法へと発展させる。

表1：解析条件と移動限界パラメータ

総粒子数	542722個	静止摩擦係数	0.83
粒子径	1[cm]	砂粒子の粒径	1.3[cm]
時間増分	$\Delta t = 0.001$	砂粒子の密度	1.6[g/cm ³]
安定化パラメータ	$\alpha = 0.01$	抗力係数	0.4
境界条件	非すべり条件	揚力係数	0.4



図.1.1 解析結果と実験結果

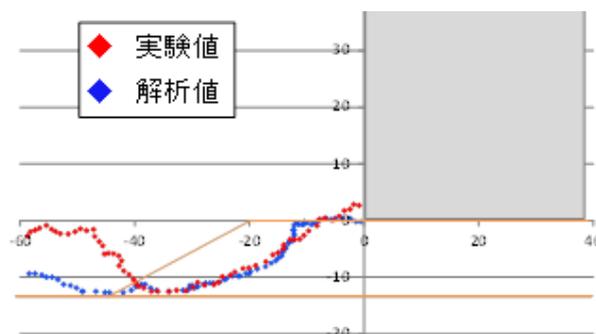


図.1.2 洗掘形状の比較



図.2.1 解析結果と実験結果



図.2.2 解析結果と実験結果

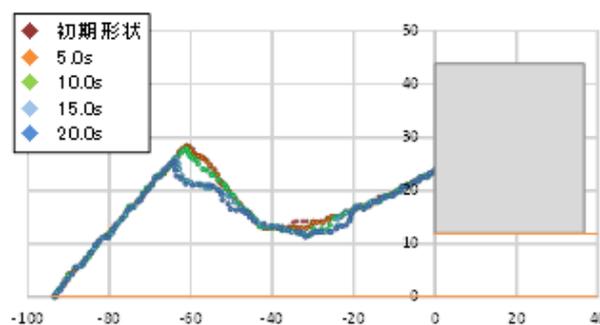


図.2.3 初期形状との比較