

津波による捨石マウンドー海底地盤への押し波・引き波浸透が及ぼす混成堤の不安定化

名古屋工業大学 学 ○今瀬 達也 正 前田 健一
東洋建設(株) 正 三宅達夫 正 澤田 豊
正 鶴ヶ崎和博 角田紘子

1. はじめに

世界各地で過去幾多に渡り発生した津波災害は、沿岸域に大きな被害をもたらしている。我が国においても津波被災は後を絶たず、悲痛にも 2011 年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震では、津波による被害が甚大であった。今後も津波の発生が予想されており、対策の見直しと沿岸域の強化を必要とする。津波に対するハード対策のひとつに津波防波堤がある。防波堤の津波流体力に対する安定性は、既往の研究で多く検討されてきた。しかし、近年の研究報告では、防波堤の安定性を検討する上で、津波力と防波堤の相互作用に加え、透水性の高い捨石マウンドやそれを支持する海底地盤への津波影響を考慮する必要があると指摘されている¹⁾。そこで、本研究では津波ー防波堤ー海底地盤の相互作用に着目した理論的な被災メカニズムの解明と一連の現象を解析できる数値シミュレーションが必要不可欠と考えた。特に、津波による捨石マウンドおよび海底地盤への浸透現象や乱流現象に伴う浸食、洗掘、液状化、噴石・噴砂、支持力崩壊といった大変形へと展開する現象を検討する必要があると考える。現象を再現するにあたり、粒子法のひとつで大領域解析に適用可能な SPH 法を用いて数値解析手法の開発を行った。また、検証に伴い、差分解析法で海岸工学分野では一つのベンチマーク解析とされる数値波動水路²⁾も活用した。本稿では、津波による捨石マウンドおよび海底地盤への浸透とダイレイタンシーに伴う過剰間隙水圧の変動が、地盤の剛性や支持力低下をもたらす現象に着目し、検討した結果について報告する。さらに、通常考慮されてきた沖から打ち寄せる波(押し波)に加え、沿岸域に遡上した波が沖に引き返す際に発生する波(引き波)の影響についても考慮した。

2. 解析手法

(1) SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法

キーワード 津波、混成堤、浸透現象、SPH 法、数値波動水路

連絡先 〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町

SPH法は、宇宙物理分野から発達した手法で、運動する粒子素片(半径 h)を用いたLagrange的手法である。注目する粒子素片 i の中心 $\mathbf{x}_i$ における物理量 $f(\mathbf{x}_i)$ は、影響範囲内にある粒子素片 j の物理量 f_j を平滑化関数によって内挿し求める。以下に連続の式と運動方程式を示す。

$$\rho_i = \sum_{j=1}^N m_j \frac{\rho_j}{\rho_i} W_{ij} = \sum_{j=1}^N m_j W_{ij} \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = - \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\boldsymbol{\sigma}_i}{\rho_i^2} + \frac{\boldsymbol{\sigma}_j}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \mathbf{I} \right) \nabla W_{ij} + \mathbf{f}_i \quad (2)$$

ここで、粒子素片 i の質量 m_i 、密度 ρ_i 、速度 $\mathbf{v}$ 、応力テンソル $\boldsymbol{\sigma}$ 、物体力 $\mathbf{f}_i$ である。平滑化関数 W については3次B-spline関数を用いている。また、 $\mathbf{I}$ は単位行列、 Π_{ij} は人工粘性項である。流体は状態方程式を、固体は弾完全塑性モデルを導入して、混合体理論に基づき土水連成解析を行っている³⁾。ただし、本稿では浸透現象の評価に焦点を絞るため、地盤は変形しないものとした。

(2) 数値波動水路(CADMAS-SURF)

数値波動水路は海岸工学分野で広く用いられ、信頼性が高い。差分解析法で非圧縮粘性流体を対象とした、連続の式とNavier-stokes方程式が用いられている。

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = S_p \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = \\ - \frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} \\ - D_x u + S_u - R_x \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = \\ - \frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \\ - D_z w + S_w - R_z - \gamma_z g \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、式中の記号は参考文献²⁾に詳しい。数値解法にスタガード格子を用い、SMAC法により陰的に解く。また、自由表面モデルにVOF法が適用されている。

3. 解析結果および考察

(1) 透水性構造物内の津波流動評価

SPH 法において防波堤の剛体運動モデルを導入し、捨石マウンドの異なる透水係数による浸透力が防波堤の変動量に与える影響について考察した(図1)。その結果、透水係数が大きくなるに従い、マウンド内の水圧が増加し、防波堤の滑動を助長することがわかった。

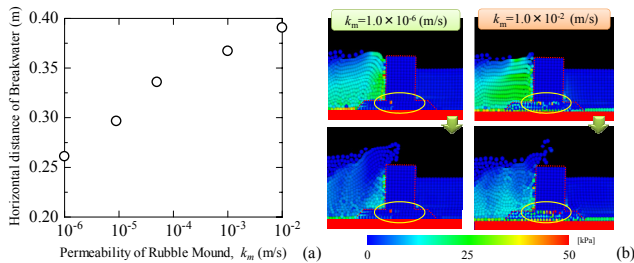


図1 マウンド透水係数と防波堤変動量の関係:(a)とマウンド内の動水圧変動:(b); SPH法による解析結果

(2) 広領域海岸部を想定した津波流動場のモデル化

実規模相当の海岸モデル化を行い(図2)、入射波高約7mの津波が襲来した際の混成堤に与える影響について考察した。格子サイズは1mの矩形とし、捨石マウンドおよび海底地盤は透水性不動構造とした。

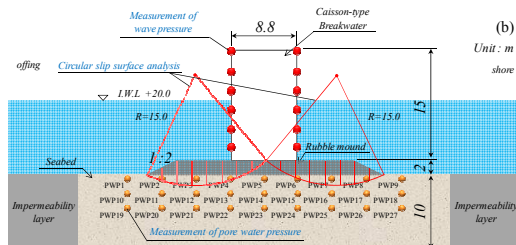
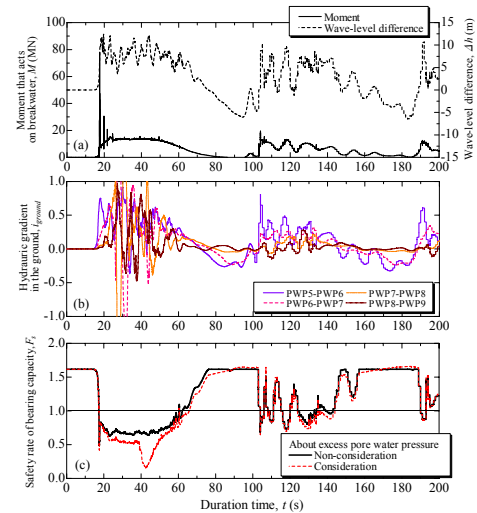
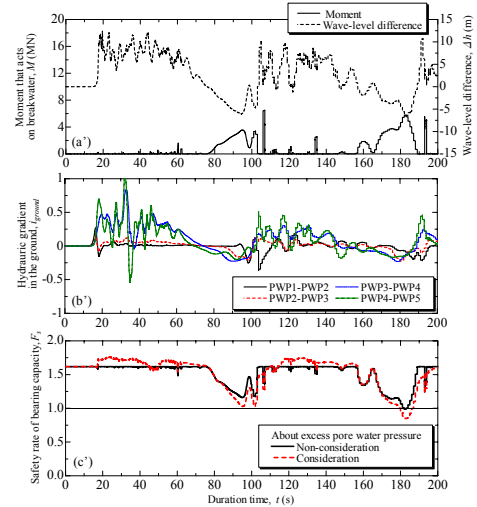


図2 支持力安定に着目した混成堤のモデル化

図3の(a)-(c)は押し波について、(a')-(c')は引き波について検討したもので、(a),(a')は防波堤に作用するモーメント、(b),(b')は地盤表層の動水勾配、(c),(c')はマウンド・海底地盤の過剰間隙水圧を考慮した防波堤の支持力に対する安全率を示している。押し波時では、初期の衝撃段波圧によって防波堤の滑動・転倒に対する安全率が一気に低下し、さらに岸側地盤の過剰間隙水圧発生により地盤強度が低下し、安全率が一層低下した。動水勾配では、初期では防波堤の沖側で上昇が見られ、その後の持続波圧により中央から後方岸側で上昇し、持続する傾向がわかった。また、引き波においても沖側地盤の強度低下による支持力低下を招き、海底地盤や捨石マウンドを基とした構造の不安定化が発生する。



押し波浸透方向に対する検討(a)-(c)



引き波浸透方向に対する検討(a')-(c')

図3 捨石マウンド・海底地盤への浸透および支持力安定性についての評価、防波堤に作用する総モーメント(上)、地盤表層の動水勾配(中)、防波堤の支持力に対する安全率(下); 数値波動水路による解析結果

4. おわりに

防波堤に作用する津波力に加え、捨石マウンドや海底地盤への津波浸透が支持力強度を低下させ、混成堤構造の不安定化を引き起こすことがわかった。

参考文献

- 1) 三宅達夫 他 (2009): 津波の遠心力場における実験手法の開発とケーソン式防波堤への適用, 海洋開発論文集, Vol.25, pp.87-92.
- 2) (財)沿岸開発技術研究センター: 数値波動水路の研究・開発, 沿岸技術ライブラリー, No.12.
- 3) 今瀬達也 他 (2010): 津波襲来時における海底地盤の変形に起因した防波堤の不安定化, 第22回中部地盤工学シンポジウム, pp.101-108.