

津波の越流による海岸堤防背後の洗掘と被覆工への作用力に関する一考察

名古屋大学大学院工学研究科 学生会員 ○ 根笹 裕太
名古屋大学高等研究院 正 会 員 中村 友昭
名古屋大学大学院工学研究科 フェロー 水谷 法美

1. はじめに：2011 年の東北地方太平洋沖地震に伴う津波に代表されるように、津波は海岸保全施設に甚大な被害をもたらす。その中でも、津波の越流により被覆工が流出したり、その背後が洗掘されたりして海岸堤防の安定性が損なわれる事例が報告されている。現在までに、主に水理実験からそれらの機構が検討されている（例えば、小竹・磯部，2012；鳩貝ら，2012）ものの、被覆工にかかる作用力の時間変化を詳細に評価した事例はほとんど見受けられない。本稿では、そのような現象を対象に、津波・構造物・地形変化間の相互作用と地盤内の応力変動が解析可能な 3 次元連成数値計算モデル（中村・水谷，2013）を適用し、水理実験結果との比較により同モデルの再現性を検証するとともに、洗掘発生時の被覆工への作用力を考究する。

2. 数値モデルの概要：3 次元流体・構造・地形変化・地盤連成数値計算モデル（中村・水谷，2013）を用いて解析を行った。同モデルは、メインソルバーと 4 つのモジュールから構成されている。メインソルバーは、可動構造物や地形変化を取り扱えるように拡張した連続式と Navier-Stokes 方程式に基づく LES（Large-Eddy Simulation）である。その LES に、気液界面を追跡する VOF（Volume of Fluid）モジュール、構造物の運動を取り扱う埋め込み境界モジュール、浮遊砂の解析を行うとともに、掃流砂と浮遊砂の輸送に伴う地形変化を追跡する底質輸送モジュールが、流体・構造・地形変化間の相互作用を考慮できるように Two-Way カップリング手法により組み込まれている。また、 u - p 形式の Biot 式に基づく 3 次元有限要素法解析モジュールが One-Way カップリング手法により組み込まれている。同モデルの詳細は中村・水谷（2013）を参照されたい。

3. 計算条件：本稿では、図-1 に示すように小竹・磯部（2012）の水理実験に倣って計算領域を作成した。同図に示すように水槽内に不透過斜面及び不透過水平床を設け、その上に中央粒径 $d_{50} = 0.17 \text{ mm}$ の細砂からなる地盤（長さ 1.0 m、深さ 0.22 m）と、アクリル板（厚さ 10 mm）で被覆された海岸堤防の模型（高さ 0.08 m、長さ 0.40 m）を設置した。対象とする波は沖波波高 $H_0 = 0.11 \text{ m}$ 、周期 $T = 37.0 \text{ s}$ の引き波初動の長周期波である。本稿では計算負荷軽減のために不等間隔格子を用いている。計算時間は波がおさまるまでの 60 s 間を対象とした。

4. 計算結果および考察：図-2 に水理実験と数値計算の水位変動 η の比較を示す。水理実験において、W6 では水位計が空気中に露出し、水位を正しく計測できなかったと考えられることから、数値計算では水位の低下を過大評価している。しかし、堤体に最も近い W3 では高い再現性が見られることから、堤体背後の洗掘現象における波浪場の再現性は高いと考えられる。

図-3 に、水理実験と数値計算における津波作用後の最終的な地形の様子を示す。計算から求められた堤体背後の洗掘深は実験値を若干過小評価している。また、数値計算では堤体前面及び背後（ $x = 80 \sim 100 \text{ cm}$ 付近）において、洗掘を若干過大評価している。しかし、最大洗掘深の発生位置やその広がり方とい

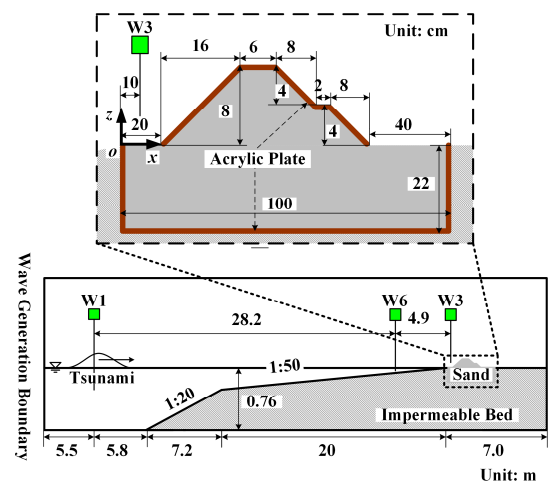


図-1 計算領域の概略図

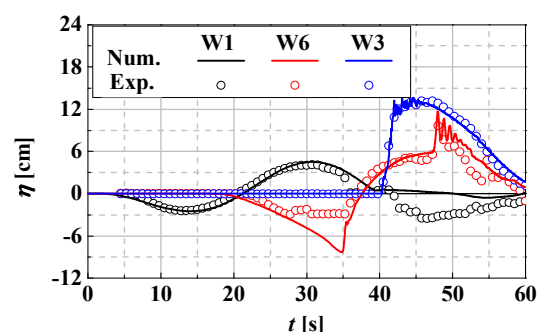


図-2 水位変動 η の比較

った傾向には一致が認められる。

続いて、被覆工に作用する力について検討するために、図-4 のように分割した部分に作用する岸向きを正とする単位高さ、単位奥行きあたりの水平力 F_h と上向きを正とする単位長さ、単位奥行きあたりの鉛直力 F_v の時系列変化を図-5 に示す。なお、これらの力に自重の影響は含まない。同図(a)より、表法の被覆工には波の作用によって地盤に近い部分ほど大きな岸向きの F_h が作用しているが、波が引き始めると減少し、上部では冲向きに転じる。これは、波が引いたことで岸向きの力が減少し、加えて堤体内の圧力が高い状態を保持していたためである。一方、 F_v は地盤からの高さとともに増加する傾向がある。これは、上述のような堤体内の高い圧力に加えて、高い位置では到達する水塊の量が減り、下向きの力が減少したからだと考えられる。また、同様の理由で、同図(b)から、天端や腰掛け部には表法よりも大きな F_v が働いていることが分かる。さらに、同図(c)から、法尻を除く裏法では、表法や天端よりも大きな F_h 、 F_v が作用している。また、腰掛け部の上部と下部それぞれにおいて、地盤から離れるほど作用する F_h 、 F_v も大きくなっている。ここで、法肩付近の S_i や S_m において特に大きな F_h 、 F_v が作用しているのは、堤体内の高い圧力に加えて、法肩付近を通過する流れの剥離に伴う圧力の低下が原因だと考えられる。以上のように、被覆工には鉛直上向きの力が作用し、さらに水平力として表法上部には冲向き、裏法には岸向きの力も作用することから、被覆工の安定性を検討する際にそれらを考慮する重要性が示唆される。

5. おわりに：津波越流に伴う海岸堤防背後の洗掘に関する数値解析を行い、被覆工の安定性を検討する際には、鉛直上向きの力を考慮することや、裏法ではそれに加えて岸向きの水平力も考慮することが重要であることを示した。今後は、被覆工の安定性や地盤の波浪応答についてさらなる検討を行う所存である。

謝辞：本研究は、河川砂防技術研究開発（代表者：水谷法美）の補助を受けて行われた。また、水理実験データを東洋建設株式会社・小竹様より提供を受けたことを付記し、謝意を表する。

参考文献：[1] 小竹・磯部（2012）：土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 68, No. 2, pp. I_891-I_895. [2] 中村・水谷（2013）：土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 69, No. 2, pp. I_1026-I_1030. [3] 鳩貝・諏訪・加藤（2012）：土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 68, No. 2, pp. I_406-I_410.

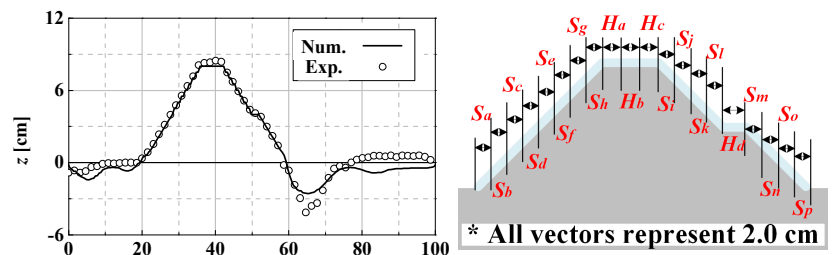


図-3 最終的な地形の様子

図-4 分割した被覆工の凡例

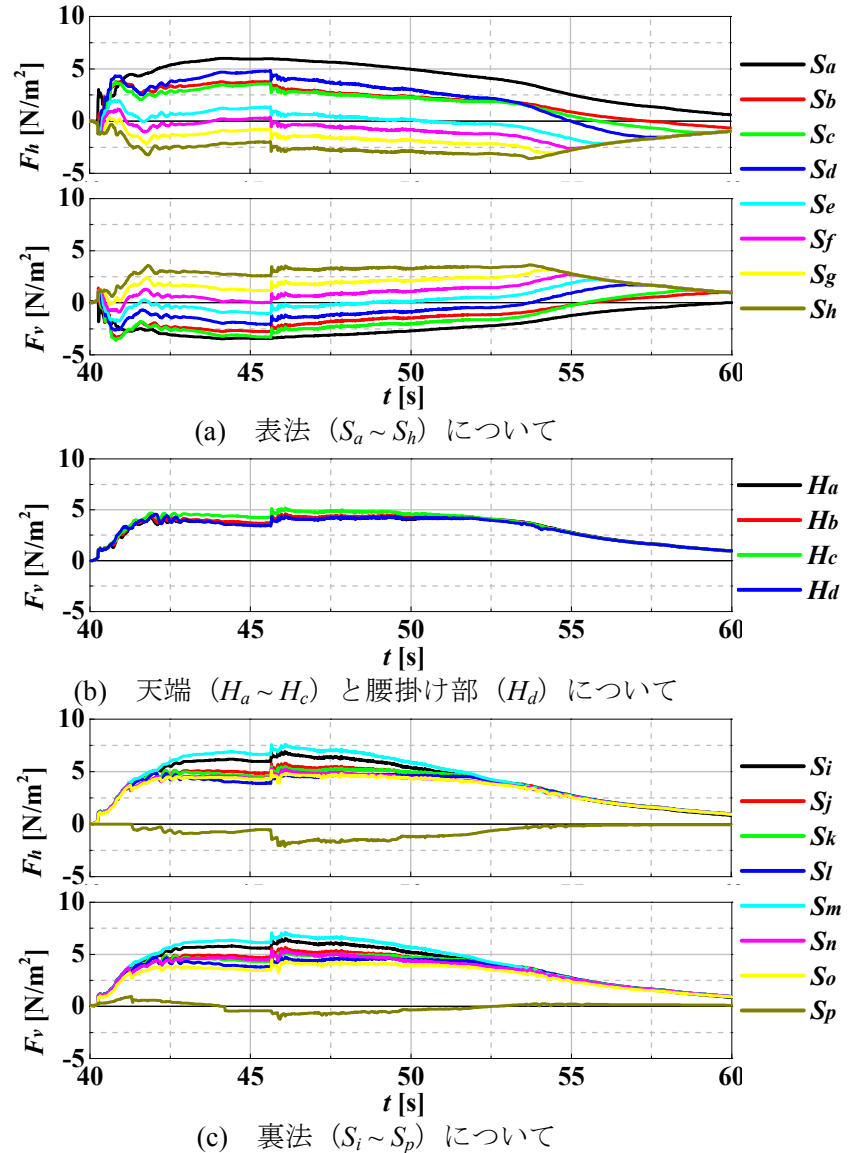


図-5 被覆工にかかる力