

津波による防波堤直下の捨石マウンドの浸透破壊に関する水理模型実験

九州大学 学生会員 ○武末 晃洋 九州大学大学院 フェロー 善 功企
九州大学大学院 正会員 陳 光斉 九州大学大学院 正会員 笠間 清伸

1. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では、津波により防波堤や防潮堤などの港湾施設が甚大な被害を受けた。これまで、さまざまな研究者^{1) 2)}により防波堤や防潮堤の被害メカニズムが研究されてきたが、津波による防波堤直下の捨石マウンド内に発生する浸透流に起因した破壊は十分な検討がされていない。本文では、防波堤に來襲する津波を模擬した水理模型実験を実施し、津波により発生する防波堤直下の捨石マウンドの間隙水圧を実験的に調べた。その結果を用いて、防波堤直下の捨石マウンドの浸透流破壊に着目して、地盤工学的観点から防波堤の安定性を評価した。

2. 内容

2.1 実験概要

図-1 に実験装置の概略と実験器具の配置図を示す。模型防波堤は釜石湾口防波堤南堤をモデルに作成し、縮尺は 1/100 とした。捨石マウンドは、2mm～35mm の碎石を用い、飽和密度は 1.90g/cm^3 であった。模型防波堤の大きさは、高さ 195mm、幅 185mm、奥行き 190mm、密度 2.03g/cm^3 とした。

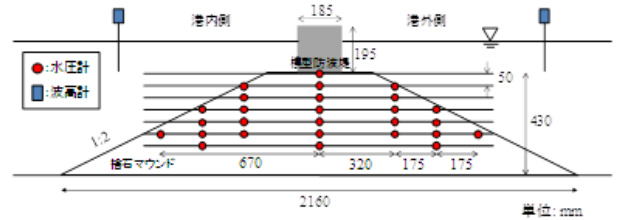


図-1 実験装置の概略と実験器具の配置

実験において、津波は、ポンプを用いて模型防波堤の前後で水位差を作ることによって表現した。水位差は約 130mm であり、約 13m に相当する津波を再現した。本文では、水位が上昇、下降した方をそれぞれ港外側、港内側と呼ぶ。水位差を作用させた状態で図-1 の水圧計の位置で、捨石マウンド内の水圧分布を計測し、水圧分布から捨石マウンド内の動水勾配を計算した。

2.2 浸透破壊のメカニズム

図-2 に捨石マウンドに動水勾配 i が作用した時の浸透破壊の考え方を示す。

面積 A に作用する浸透力 F 、水平浸透力 F_x および鉛直浸透力 F_y は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} F &= \sum (i \cdot \gamma_w) A \\ F_x &= \sum (i_x \cdot \gamma_w) A \\ F_y &= \sum (i_y \cdot \gamma_w) A \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

捨石マウンドの底面に作用する抵抗力 T_f は、次のようになる。

$$T_f = c \cdot B + (W - F_y) \tan \phi \quad (2)$$

ここで、 B : 捨石マウンドの単位幅、 c : 粘着力、 ϕ : 内部摩擦角、 A : 捨石マウンドの面積、 W : 有効上載荷重である。

したがって、安全率は次のようになる。

$$F_{sx} = T_f / F_x \quad (3)$$

今回は、捨石マウンドに碎石を用いたので $c=0$ 、 $\phi=35^\circ$ と仮定した。

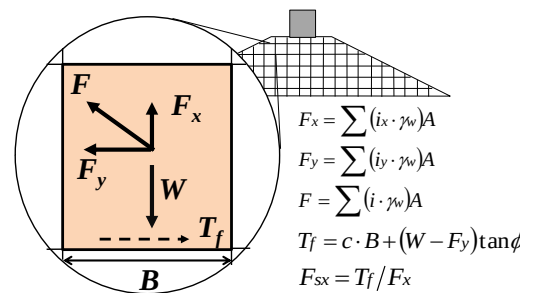


図-2 浸透破壊の考え方

3. 実験結果および考察

3.1 水圧と動水勾配

図-3 に、実験から得られた全水頭の分布図を示す。模型防波堤の右側に水位差 H の津波が作用したとして表した。捨石マウンド内には、なめらかな水頭の変化が見られ、その水頭差は、鉛直方向よりも水平方向の変化が顕著であった。これは、捨石マウンド内は水平流が卓越することを意味する。捨石マウンド上部では水頭の変化が急であり、捨石マウンド下部では緩やかであった。

図-4 に、図-3 の全水頭分布から計算した水平方向の動水勾配 i_x のコンター図を示す。左方向を正とした。水平方向の動水勾配 i_x の分布は、ほぼ対称であり、捨石マウンドの両上肩に著しく大きな値が見られた。捨石マウンドには、水平方向の動水勾配 i_x に起因して、左方向の浸透力が発生するため、この範囲には、水が左向きに速く流れており、大きな力が働いていると考えられる。港外側の捨石マウンドの安定性に変化はないが、港内側は水平方向に捨石マウンドが動く可能性がある。

図-5 に、図-3 の全水頭分布から計算した鉛直方向の動水勾配 i_y のコンター図を示す。上方向を正とした。港外側の捨石マウンドの動水勾配は負であり、水が下方向へ流れたことを表している。防波堤直下約 50mm(実スケールでは 5m)の範囲で鉛直方向に流れが生じ、それ以下ではあまり流れが生じていない。捨石マウンド内では、防波堤直下約 50mm(実スケールでは約 5m)の範囲で水の鉛直方向の流れが著しく、港内側の捨石マウンドでは、上方向に浸透力を受ける。よって、パイピングの様な崩壊が起こる可能性がある。

3.1 安全率

図-6 に式(3)による捨石マウンドの浸透破壊に関する安全率のコンター図を示す。捨石マウンドの不安定化が予想される港内側のみ示す。これによると、捨石マウンドの深さで 62.6mm(実スケールでは約 6.26m)付近から不安定化するという結果となった。

捨石マウンド内の水平および鉛直方向の動水勾配が大きかった、捨石マウンドの上部で、安全率が低く、1 を下回った。捨石マウンド内部や下部では安全率は大きくなった。理論的には、図-6 の 1 以下の範囲で不安定化が起きているが、実験では、捨石マウンドが破壊される様子は観察されなかった。これは、今回用いた浸透破壊の考え方に、模型防波堤の重量や捨石マウンド全体の重量を考慮する必要があると考える。また、浸透力が理論値よりも小さな値をとったことも考えられる。

4. まとめ

- (1)港内側の捨石マウンドの上部で水平方向および鉛直上方向の動水勾配の値が大きくなった。
- (2)水平方向の動水勾配 i_x に起因して、左方向の浸透力が発生し、港内側の捨石マウンドが動く可能性がある。また、防波堤直下約 50mm(実スケールでは約 5m)の範囲で水の鉛直方向の流れが著しく、港内側の捨石マウンドでは、上方向に浸透力を受ける。そのため、パイピングの様な崩壊が起こる可能性がある。
- (3)地盤の浸透破壊を考えると、捨石マウンドの深さで 62.6mm(実スケールでは約 6.26m)付近から不安定化すると予想された。今後、浸透破壊の考え方を再検討する必要がある。

参考文献 1)今瀬達也ら：捨石マウンドー海底地盤への津波浸透による混成堤の不安定化，土木学会論文集 B2(海岸工学)Vol. 67, No. 2, 2011, I_551-I_555

2)長尾毅ら：防波堤の支持力照査法に関する実験的研究，国土技術政策総合研究所資料，No.453, 2008, YSK-N-152

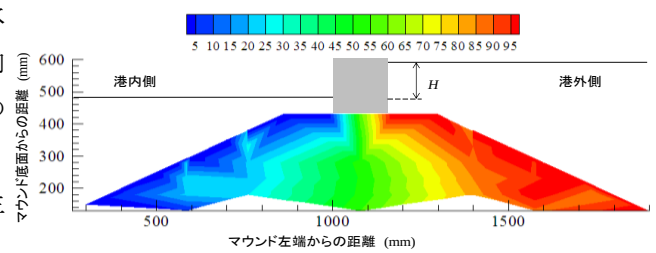


図-3 実験から得た全水頭分布図

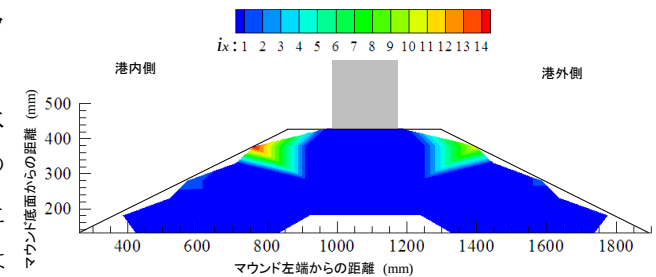


図-4 水平方向の動水勾配のコンター図

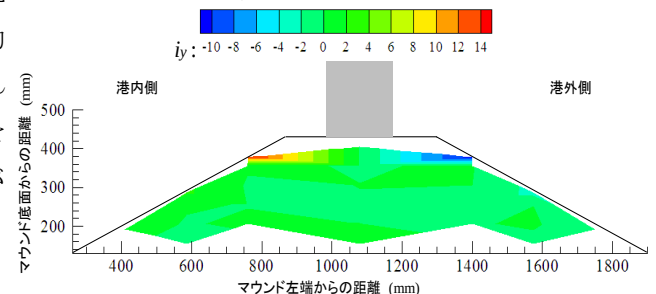


図-5 鉛直方向の動水勾配のコンター図

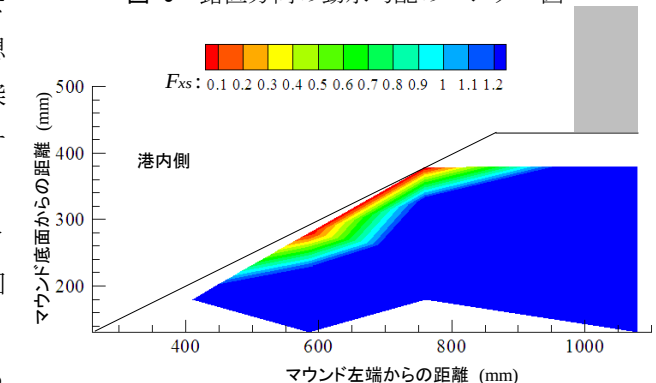


図-6 浸透破壊に関する安全率のコンター図