

津波による防波堤の複合破壊機構に関する遠心模型実験と解析

京都大学大学院 学会会員 ○矢追祐士

京都大学防災研究所 正会員 井合進

京都大学防災研究所 正会員 飛田哲男

1. はじめに

2011年3月11日14時46分、M9.0の地震が東北地方太平洋沖で発生した。この地震によって発生した津波により、津波のハード対策の一つである防波堤は甚大な被害を受けた¹⁾。そこで本研究では、ケーソン式防波堤を対象に遠心模型実験と2次元有効応力解析を実施し、津波による防波堤の破壊機構について考察する。

2. 遠心模型実験

2-1. 実験方法

遠心模型実験には京都大学防災研究所現有の遠心力載荷装置(半径2.5m)を使用した。実験は、図1に示す擬似津波発生土槽で実施した。この土槽では、遠隔操作により貯水槽のバルブを開くことで擬似津波が発生し、実験模型に擬似津波を作用させることが可能である。

実験は実物スケールで高さ21mの防波堤を対象に、拡張型相似則を適用して200分の1の模型を作成し、25gの遠心力場で、マウンド材料と初期水位を変更して全4ケース行った(表1)。主な計測項目は津波の水位を計測するための間隙水圧計と側面からの高速度カメラである。マウンドは、実物の捨石の約200分の1の平均粒径を有する珪砂1号と、マウンド内の浸透流を抑えるために珪砂4号の2種類の試料を使用し、水中落下法を用いて相対密度が60%になるように作成した。なお、間隙流体には水を使用した。

2-2. 実験結果

図2に示すCase 2とCase 4の高速度カメラ画像の継時変化の比較より、防波堤の前後面に水位差が作用する際に、Case 2では防波堤背後の水面に泡が見られるのに対して、Case 4では、泡の発生は確認できない(図2(a-1)(b-1))。これは、Case 2では粒径の大きいマウンド材料が用いられているため、マウンドの透水係数が大きくなり、浸透流による影響が卓越するからである。そのためCase 2では、マウンド内の浸透流により、マウンド材料に作用する有効応力が低下し、マウンドがせん断変形することでケーソンが滑動する。(図2(a-2)(a-3))。一方、Case 4では、ケーソンが波圧で転倒することによりマウンドにせん断変形が進行し、ケーソンが滑動する。滑動後は両ケースとも波圧によりケーソンが転倒する(図2(b-2)(b-3))。以上より、防波堤の破壊機構にはマウンド内の浸透流とケーソンに作用する波圧が影響を与えることが示された。

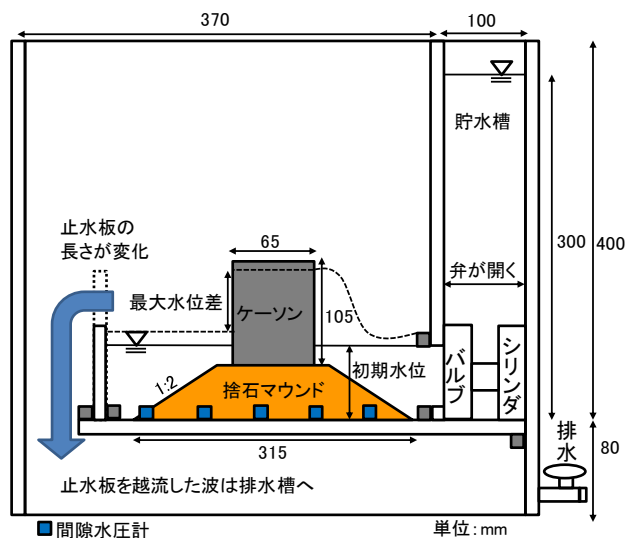


図1 実験システムの概要

表1 実験ケース

実験ケース	マウンド材料	相対密度	初期水位	最大水位差
Case 1	珪砂1号	55.5%	6.23m	14.4m
Case 2	珪砂1号	60.3%	12.6m	10.3m
Case 3	珪砂4号	58.0%	8.15m	15.2m
Case 4	珪砂4号	65.8%	13.0m	10.9m

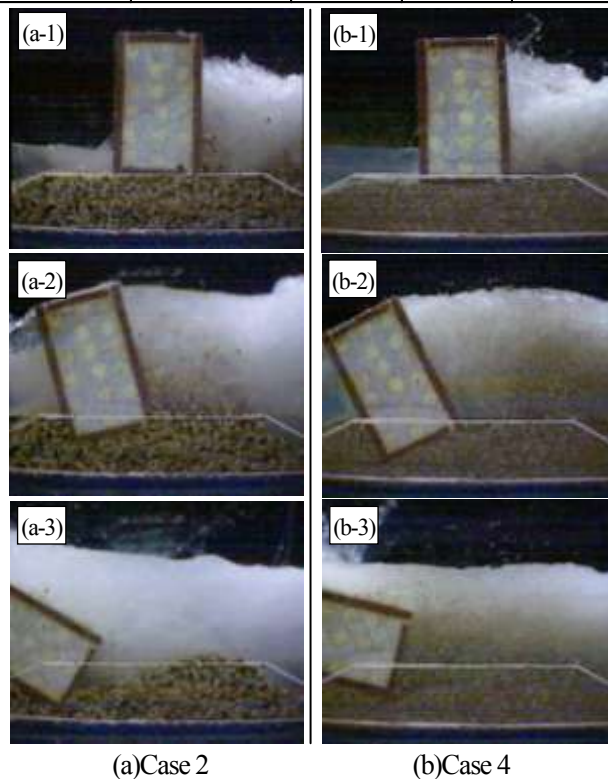


図2 Case 2とCase 4の高速度カメラ画像の継時変化

キーワード 津波、ケーソン式防波堤、遠心模型実験

連絡先 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄京都大学防災研究所 宇治地区研究所本館 E TEL0774-38-4093

3. 2次元有効応力解析

3-1. 解析手法

数値解析には多重せん断ばねモデルに基づく有効応力法による有限要素プログラム²³⁾を使用した。解析モデルは実験との比較を行うため、遠心模型実験のプロトタイプを基に設定した(図 3)。また、ケーソン底部にはジョイント要素を用いることで、ケーソンと地盤の滑動と剥離を再現した。解析モデルで自重解析を行った後、津波力を強制間隙水圧と分布荷重として、それぞれ各接点と各要素に与えて解析を実施した(図 4)。なお、津波力は谷本ら⁴⁾で提案されている津波力算定式を用いて遠心模型実験で得られた水位差を基に算出する。また、遠心模型実験との比較を行うため、表 2 に示すように解析は、マウンド材料、初期水位を変更して全 4 ケース実施した。なお、地盤のパラメータは、非排水繰返し中空ねじり試験と定水位透水試験より表 3 に示すように設定した。

3-2. 解析結果

図 5 に示す Case 2 の有効応力比分布より、ケーソン直下の港外側と港内側でマウンド材料に作用する有効応力の低下が見られる。これは、防波堤前面と背後の水位差によって発生するマウンド内の浸透流の影響によるものであると推察される。また、Case 2 の安全率の逆数分布よりマウンド材料に作用する有効応力の低下に伴い、マウンドの支持力が低下することでマウンドにせん断変形が進行する様子が確認できる(図 5(b))。また、Case 2 の最終変形図より、ケーソンの水平変位量、鉛直変位量はそれぞれ 1.91m、0.779m となった(図 5(c))。以上より、防波堤前面と背後の水位差により浸透流が発生し、マウンド材料に作用する有効応力が低下し、マウンドが支持力低下に伴いせん断変形するといった一連の破壊機構を確認することができた。

4. まとめ

ケーソン式防波堤を対象に遠心模型実験と 2 次元有効応力解析を行った。その結果、津波来襲時の防波堤の崩壊原因は、津波の波力だけでなく、マウンド内の浸透流による有効応力の低下も原因の一つであることが示唆された。今後は、実際の防波堤の設計断面を対象に実験を行うことで、浸透流による破壊機構が見られるかを調べる必要がある。

参考文献

1)独立行政法人港湾空港技術研究所. 2011 年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査報告(港湾空港技術研究所資料 No.1231). 2011. 2)Iai, S. Matsunaga, Y. and Kameoka, T. (1990): Strain space plasticity model for cyclic mobility, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 29, No. 4, pp. 27-56, 1990. 3)Iai, S. Matsunaga, Y. and Kameoka, T. (1990): Parameter identification for a cyclic mobility model, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 29, No. 4, pp. 57-83, 1990.

4)谷本勝利, 鶴谷広一, 中野晋. 1983 年日本海中部地震津波における津波力と埋立護岸の被災原因の検討. 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 257-261. 1984.

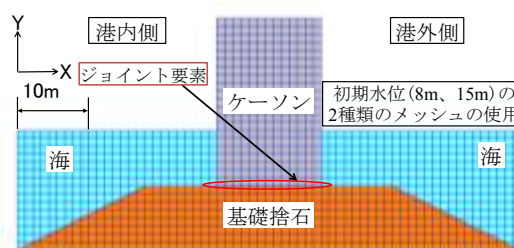


図 3 解析モデル

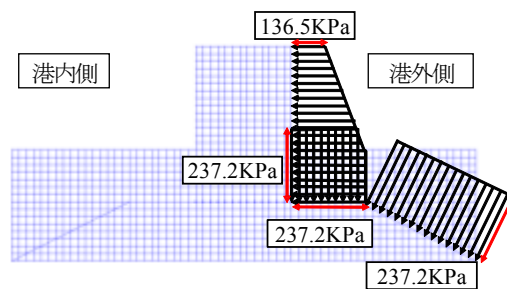


図 4 津波力の与え方(Case 2, Case 4 の場合)⁴⁾

表 2 解析ケース

解析ケース	マウンド試料	初期水位	最大水位差
Case 1	珪砂1号	8m	15m
Case 2	珪砂1号	15m	11m
Case 3	珪砂4号	8m	15m
Case 4	珪砂4号	15m	11m

表 3 地盤のパラメータ

試料名	質量密度	透水係数	初期せん断剛性	内部摩擦角	粘着力
単位	(t/m ³)	(m/s)	(kPa)	(°)	(kPa)
珪砂1号	1.91	7.06×10^{-2}	6.15×10^4	40.8°	0.0
珪砂4号	1.90	1.56×10^{-3}	7.67×10^4	38.7°	0.0

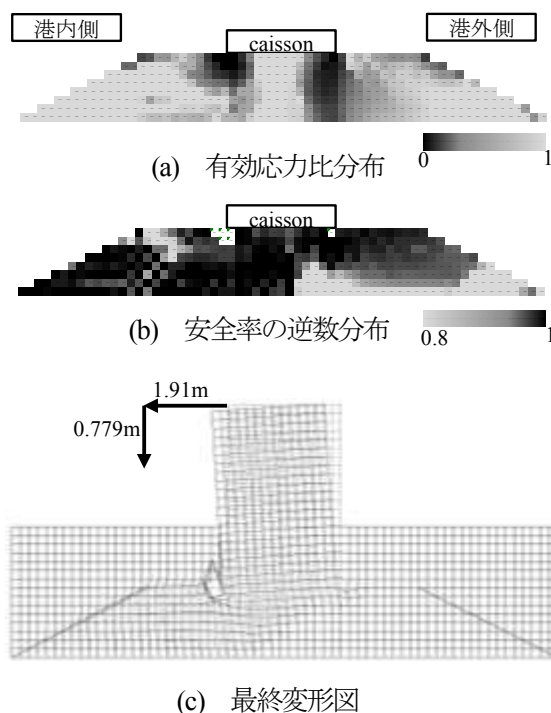


図 5 Case 2 解析結果