

津波時の杭基礎構造物の転倒に関する実験と解析

京都大学防災研究所 正会員 ○飛田哲男
東日本高速道路(株) 大内俊介
京都大学防災研究所 正会員 井合 進

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日午後 2 時 46 分、マグニチュード 9.0 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、宮城県女川町では杭基礎 S 造構造物の転倒が数件発生したことが報告されている¹⁾。同構造物の被災要因については津波の波力、地盤の液状化、地盤変状に伴う杭の抜けや破断といった複合的な要因が考えられる。そこで本研究では、この被災要因が地盤液状化と津波による複合的な要因であると仮定し、遠心模型実験と二次元有効応力解析を行い検証する。

2. 遠心模型実験

遠心模型実験には京都大学防災研究所の遠心力载荷装置(半径 2.5m)を使用した。実験土槽(図 1)は、遠隔操作により貯水槽のバルブを開き津波を発生させる。実験は拡張型相似則²⁾を用いて 1/200 模型(遠心場の縮尺を 1/20, 1g 場の縮尺を 1/10)に対して行った。表 1 に示すように、杭長と過剰間隙水圧の残留の有無をパラメータとして全 6 ケース実施した。杭基礎構造物模型は図 1 のように、液状化による構造物の沈下を防止するためアルミブロック上に設置した。杭は上部構造物に剛結されている。またアルミブロックと同じ層厚の密地盤を設け、その上に液状化地盤(Dr=50%)を水中落下法により作成した。液状化地盤の深さはケース毎に杭長と等しくなるように変化させた。土中の間隙流体には拡張型相似則により粘性が約 113 cSt の粘性流体を使用した。津波には水道水を使用した。地盤の変形を観察するために朱塗りした蕎麦をマーカーとして土槽のガラス面に張り付け、高速度カメラを用いて 4000 コマ/秒で土槽側面から撮影し地盤の変形を観察した。

図 2 に高速度カメラで撮影した Case 1-1 と Case 1-2 の実験模型の側面を示す。両ケースともに、津波の水位が構造物の高さの半分程度に達した時点で陸側に約 5° 傾く[図 2(a-2) (b-2)]。その後、Case 1-1 ではさらに傾き、水位が低下した後も傾斜が進行し[図 2(a-3)]、最終的には約 45° 傾いて止まる[図 2(a-4)]。一方 Case 1-2 では、水位が上昇してもそれ以上傾くことはなく、水位が低下し始めると海側に回転し[図 2(b-3)]、最終的にはほぼ元の位置へ戻る[図 2(b-4)]。また、下部地盤に着目すると、Case 1-1 では構造物下部の地盤が陸側へ変動していることが確認できるが、Case 1-2 ではほとんど変動が見られない。本実験により、過剰間隙水圧の残留と地盤面に作用する水圧による地盤の変状を確認することができた。杭長を変えたケースでも同様の結果となったが、杭が長いほど建物

の傾斜角が小さくなる傾向にあることがわかった。

以上の実験結果より、地盤が液状化し杭の横抵抗および周面摩擦力が減少している状態で津波が到達することで、波力を受けた杭基礎構造物が転倒するメカニズムが確認できた。また、地盤面に水圧が作用することで周辺地盤が変形することを確認した。

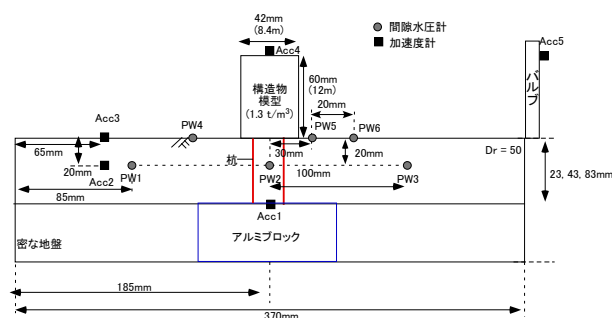
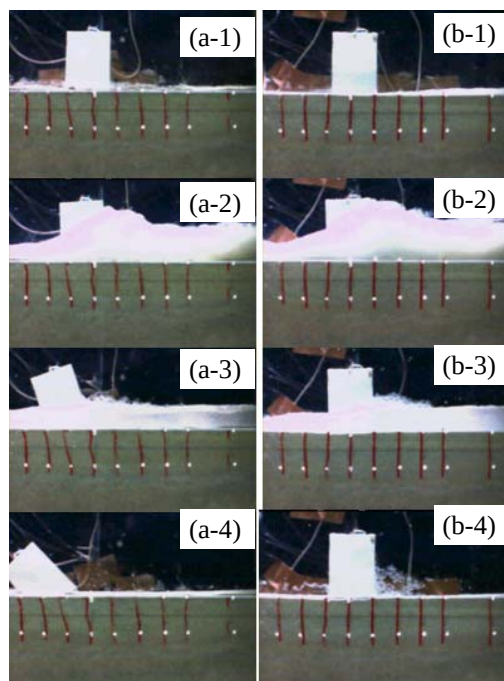


図 1 杭基礎構造物の実験模型, () 内は実物換算値

表 1 実験ケース

実験ケース	杭長(mm)	過剰間隙水圧	転倒
Case 1-1	43	残留	○
Case 1-2	43	消散	×
Case 2-1	23	残留	○
Case 2-2	23	消散	×
Case 3-1	83	残留	○
Case 3-2	83	消散	×



(a) Case 1-1

図 2 模型構造物の継時変化

キーワード 津波，遠心模型実験，有効応力解析，液状化，杭基礎

連絡先 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 京都大学 防災研究所 地盤防災解析分野 TEL 0774-38-4091

3. 2次元有効応力解析

数値解析には土の応力ひずみ関係を多重せん断ばねモデル（カクテルグラスモデル）で表現する大変形有効応力解析法³⁾を使用する．解析メッシュは遠心模型の実物スケールをもとに図3のように設定した．また，建物底部，杭と液状化地盤との間にはジョイント要素を用い滑動と剥離を再現する．建物と杭の接続部は変位と回転を固定する．津波は図4に示すように，静水圧を強制間隙水圧として海側地表面に分布荷重として与え，波力は，谷本ら⁴⁾による津波波力算定式により求め，建物海側の側面に与える．表2に示すように解析は，加振の有無を考慮した2ケース実施した．加振には正弦波（継続時間20秒）を用い，Case1では加振終了後10秒後に水位上昇を開始した．津波の水位は40秒間で6mとなるよう漸増させた．用いた地盤パラメータは，模型実験で用いた砂に対して実施した非排水繰返し中空ねじり試験と定水位透水試験より決定した．

図5に水位上昇直後(a-1, b-1)，水位上昇完了時(a-2, b-2)，水位上昇開始から90秒後(a-3, b-3)の変形図と過剰間隙水圧比の分布図を示す．まず建物変形に着目すると，やはり地盤が液状化しているときに波力が作用する(Case1)と，液状化していない場合(Case2)と比較して，建物の傾斜は大きくなることがわかる．また，津波による地盤の変形についても同様の傾向にあることがわかる．しかし，遠心実験結果とは異なり，本解析では建物は転倒には至らなかった．次に，過剰間隙水圧比に着目すると，Case2において海側の建物直下部に水圧比が高い領域が現れている．これは静水圧（浸透流）と波力を同時に与えたことにより建物が傾斜し，局部的に有効上載圧が減少した為であると思われる．地盤が液状化している場合は(Case1)，建物の傾斜により地盤がせん断変形を受け建物の前面と背面地盤の水圧比が小さくなっている．

以上より，液状化による過剰間隙水圧が残留している場合，下部地盤が内陸側へ変形するとともに，建物の傾斜角が大きくなることを確認した．

表2 解析ケース

	加振	過剰間隙水圧
Case 1	加振する	残留
Case 2	加振しない	—

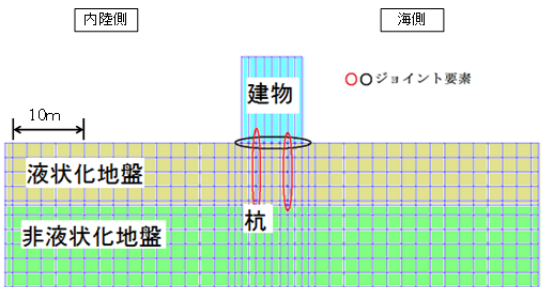


図3 解析メッシュ

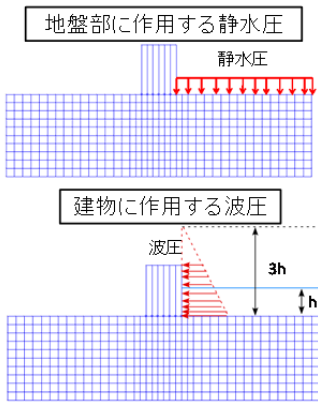


図4 解析における津波の与え方

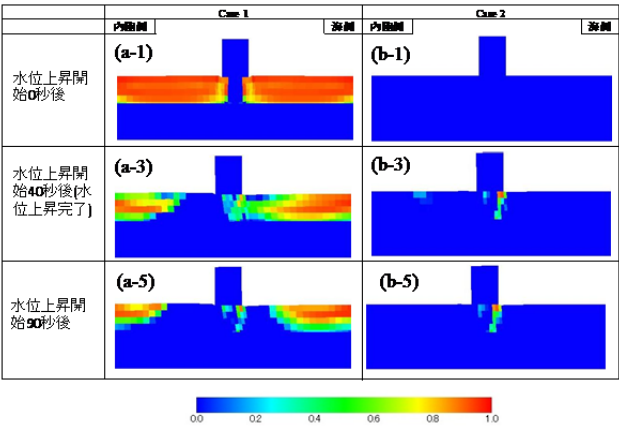


図5 水位上昇時の変形と過剰間隙水圧比の比較

4. 結論

杭基礎構造物に対する遠心模型実験と数値解析により液状化と津波による複合破壊機構について考察した．本研究で明らかになった複合破壊機構は以下のとおりである．

- a) 地盤の液状化による支持力の喪失
- b) 杭の横抵抗および周面摩擦力の減少
- c) 津波の水位（静水圧）による地盤変形
- d) 建物側面に作用する波力

これら複数の要因がほぼ同時に作用することで建物が倒壊することを確認した．ただし，本研究では建物内部の空洞にトラップされた空隙による浮力の効果は考慮していない．その影響を無視できるかどうかは不明であり，今後明らかにしたい．

参考文献 1)土木学会，2011，東日本大震災被害調査団緊急地震被害調査報告書． 2) Iai, S. Tobita, T. and Nakahara, T., Generalised scaling relations for dynamic centrifuge test, Geotechnique, 55(5), pp.355-362, 2005. 3)上田恭平，砂の力学モデルとしての多重せん断モデルの大変形解析の定式化およびその適用性に関する研究，京都大学博士学位論文，2010. 4)谷本勝利，鶴谷広一，中野，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.