

浮力を考慮した防波堤の地震時応答解析

株式会社 ニュージェック 楠謙吾, 曾根照人, ○栞原直範
(独)港湾空港技術研究所 菅野高弘, 大矢陽介, 小濱英司

1. はじめに : 防波堤は高潮や津波から背後地の資産や生命を護るための重要な施設である。将来, 来襲するであろう津波や高潮に対する防護機能を確保するために実施する, 設計や防災計画を検討する上では, 地震時の防波堤の沈下量を適切に把握することが非常に重要である。沈下量を精度よく把握する手法としては, 有限要素法による2次元地震応答解析(以下, 2次元解析)が挙げられるが, この手法では, 防波堤の沈下の進行に伴い増加する, 堤体に作用する浮力をうまく表現できないのが現状である。一方, 実現象を考えると, 防波堤の設置圧は, 沈下の進行に伴い浮力が大きくなるため, 徐々に小さくなっていくと考えられる。そこで, 本検討では沈下の進行に応じた浮力の変化を考慮可能なモデルを提案し, 模型実験, 被災事例を対象に2次元解析を行い, モデル化の妥当性について検討した。また, 長継続時間地震動に対して, 浮力の考慮の有無が沈下量に与える影響を解析的に検討した。

2. 提案モデル : 使用した解析コードは, 港湾構造物に適用事例の多いFLIP¹⁾とした。沈下に応じて増加する浮力は, 防波堤に軸方向非線形バネ(以下, 浮力バネ)を配することでモデル化した。浮力バネを配す位置は, 防波堤天端の全節点に配すパターン(以降, 多点モデル)と防波堤重心位置に配すパターン(単点モデル)の2つとした(図.1 参照)。浮力バネの非線形特性は, 浮力バネ係数を(浮力バネの負担幅(m))×(解析モデルの奥行き(m))×(水の単位体積重量(kN/m³))とし, 沈下方向の変曲点変位は(海面~天端までの距離(m))として, 防波堤が完全に水没した後は一定の浮力が作用するようにした。また, 浮力バネの2つの節点の水平方向変位が等しくなるように拘束条件を設けた。



図.1 浮力のモデル化

3. モデル化の妥当性検証 : 兵庫県南部地震で被災した神戸港第7防波堤, および防波堤の1G場の模型振動実験²⁾を対象にモデル化の妥当性について検証した。神戸港第7防波堤は, 捨石直下約25mを神戸まき土により置換した施設であり。兵庫県南部地震では置換層で液状化が発生し1.6m~2.4m沈下した³⁾。また, 1G場の模型振動実験では, ケーソン高500mmに対し, 捨石マウンド直下の液状化層厚は1000mmであり, 加振後のケーソンの残留沈下量は56.6mmである²⁾。神戸港第7防波堤については文献3), 4)を参考に解析メッシュを新たに作成し, 文献4)と同じ解析物性値とした。1G場の模型振動実験については文献2)の解析モデル, および解析物性値を用いた。また, 過剰間隙水圧発生モデル, 非線形反復計算法は文献2)を参考に従来法, および従来型とした。

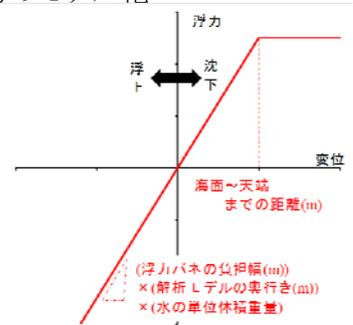


図.2 バネの非線形特性

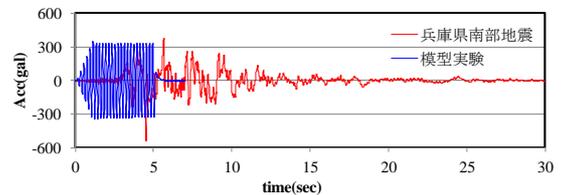


図.3 入力波形

なお, 浮力バネの減衰はゼロとし, 図.3 に示す入力波形を用いて解析した。解析結果として沈下量, および神戸港第7防波堤については傾斜角も表.1 に示す。浮力を考慮した場合も, 被災量や実験結果と比べ極端に沈下や傾斜が小さくなるような問題は見られず概ね

表.1 解析結果(その1)

| 対象 | 被災沈下量 実験沈下量 | 沈下量および傾斜角 | | |
|--------------|----------------|---------------|----------------|---------------|
| | | 浮力バネなし | 多点モデル | 単点モデル |
| 神戸港 第7防波堤 | 1.6m~ 2.4m | 2.45m (6°) | 2.29m (10°) | 2.26m (9°) |
| 模型振動実験 | 56.6mm | 53.5mm | 52.6mm | - |

キーワード : 防波堤, 地震時沈下量, 有効応力解析, 浮力

被災や実験結果と整合した。よって、浮力バネを用いたモデル化は兵庫県南部地震等の比較的継続時間の短い地震動に対しては適用可能であると考えられる。また、浮力を考慮しない場合との沈下量の差は神戸第7防波堤で約15cm、模型振動実験では0.9mmでありその差は小さく、浮力を考慮しなくても解析結果と被災量、実験結果はよく整合している。なお、神戸港第7防波堤については、単点モデルでの解析も実施した。図.4に、多点モデルの左端浮力、右端浮力および単点モデルの浮力の時刻歴を示す。なお、図.4に示す浮力は、各浮力バネの負担幅が異なるため、単位幅当たりの浮力に換算している。図.4をみると多点モデルでは、ケーソンの振動により浮力も変動するが、単点モデルでは滑らかに浮力が増加している。このような差はみられるが、浮力の差は小さく沈下量の差もほとんどない。

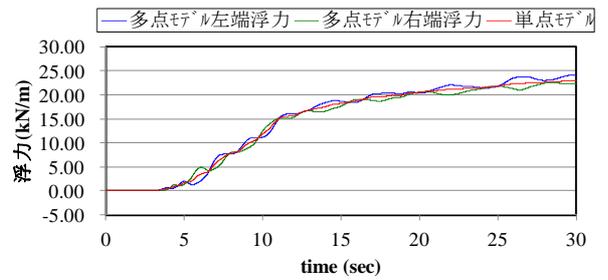


図.4 浮力の時刻歴

4. 長継続時間地震動に対する検討：表.1をみると浮力のモデル化による沈下量の差は小さい。これは、兵庫県南部地震や模型実験で用いた入力波形は、継続時間が比較的短い地震動であるため液状化後に変形が進行する時間が短く、浮力があまり影響しなかったと考えられる。

そこで、神戸港第7防波堤のモデルを用いて、図.5に示す継続時間およそ150秒の地震動を用いて検討を行い、沈下が長時間継続する場合の浮力の影響を検討した。検討結果として、ケーソン天端沈下量の時刻歴を図.6に、ケーソン天端の残留変位を表.2に示す。浮力を考慮することにより、地震発生後約70sec(主要動開始から約40sec後)から沈下量に差が生じ始め、最終的な沈下量の差は約80cm(沈下量のおよそ15%)であった。このことから、長継続時間地震動に対する解析では、浮力を考慮する・しないで沈下量に大きな差が生じることがわかる。また、多点モデルと単点モデルでは、沈下量はほとんど変わらない。

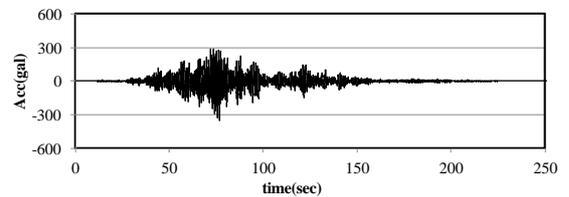


図.5 入力波形(その2)

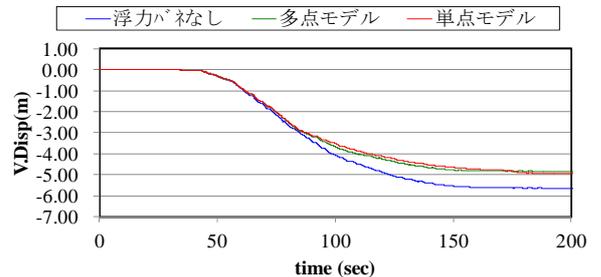


図.6 ケーソン沈下量の時刻歴

表.2 検討結果(その2)

| 対象 | 沈下量および傾斜角 | | |
|--------------|----------------|----------------|----------------|
| | 浮力バネなし | 多点モデル | 単点モデル |
| 神戸港 第7防波堤 | 5.74m (16°) | 4.93m (12°) | 4.98m (13°) |

5. おわりに：兵庫県南部地震等の比較的継続時間短い地震動に対しては、浮力バネにより浮力をモデル化することの妥当性が確認された。また、モデル化の方法による沈下量の差は小さくどのモデルも被災量、および沈下量とよく整合した。一方で、継続時間が長くなると、浮力の有無により80cm程度沈下量に差が生じており、今後は長継続時間に対する適用性について検討していきたいと考える。

(参考文献)

- 1)Iai,S., Matsunaga,Y. and Kameoka, T.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Report of Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990.
- 2)大矢ら：防波堤基盤地盤の地震時変形特性に関する1g場模型振動実験と有効応力解析, 港湾空港技術研究所資料 No.1227, 2011
- 3)稲富ら：1995年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告, 港湾技研資料 No.857, 1997
- 4)佐藤ら：非排水有効応力地震応答解析における捨石材のモデル化に関する検討, 第46回地盤工学シンポジウム, 2001