

液状化地盤の透水・沈下と動的相互作用を考慮した2次元動的有効応力解析

東電設計 正会員 〇溜 幸生 明窓社 正会員 小堤 治
京都大学 正会員 井合 進 沿岸技術研究センター 関谷千尋

1. 目的

近年、港湾構造物等の設計において、地震時の液状化による構造物被害予測プログラムFLIP¹⁾を用いた動的有効応力解析が実務的に行われるようになってきた²⁾。従来のFLIPは、飽和土に非排水条件を仮定していたが、最近、砂の繰返し載荷時の挙動を表現するひずみ空間多重せん断モデル（以下、「カクテルグラスモデル³⁾」）がFLIPに導入され、排水条件の取扱いが可能となった。さらに、土のモデルに対応する杭―地盤相互作用ばねが導入され⁴⁾、相互作用が適切に考慮できるようになった。本検討では、カクテルグラスモデルによる杭基礎の動的挙動や地表面沈下量に関する妥当性を明らかにするため、筆者らが非排水条件で行った大型振動台実験の有効応力解析⁵⁾と同様のモデルを用いて、透水を考慮した2次元動的有効応力解析を行った。

2. 検討方法

筆者らが行った既往の解析検討⁵⁾は、液状化地盤と杭基礎の動的相互作用の解明を目的に実施された大型振動台実験を対象に行っている。実験モデルの概要を図-1に、解析モデルを図-2に示す。実験モデルでは大型せん断土槽内に作成された模型地盤（霞ヶ浦砂、相対密度 $Dr=60\%$ ）に、4本杭の杭基礎3基と直接基礎1基が設置されている。本検討の解析は、既往の解析検討と同様に、鋼管杭を用いた杭基礎Cに着目し、模型地盤作成後の最初の加振実験（入力加速度：公称150gal）を対象として行った。ここで、飽和土はカクテルグラスモデルとし、間隙水の透水性を考慮した。また、杭と地盤の節点は相互作用ばね⁴⁾で連結した。土の解析パラメータは、既往の室内試験結果等⁶⁾を参考に表-1のとおり設定した。設定したパラメータによる液状化強度曲線および最大せん断ひずみと体積収縮量の関係を図-3に示す。鋼管杭等のパラメータを表-2に示す。解析では最初に初期自重解析を行い、次に、図-4(c)に示す振動台加速度をモデル底面に入力した動的有効応力解析を $\Delta t=0.001$ 秒として30秒間行った。その後、過剰間隙水圧の消散解析を1200秒まで行った。

3. 検討結果

解析結果として代表箇所の過剰間隙水圧比、地表面沈下量の時刻歴を図-4(a)(b)に示す。解析終了時において水圧は完全に消散していないが、解析の1200秒時点での沈下量は実務的な算定式⁷⁾による沈下量程度となっている。基礎の動的変位の時刻歴を図-5に示す。最大変位の発生時刻は異なり、解析による振幅は実験の1.4倍程度となったが、動的変位が共振により増幅する挙動が再現されている。最大変位発生時刻のずれは、繰返し回数10回程度の液状化強度が試験結果よりやや大き目の設定であり、図-4(a)に示すように水圧の上昇する時間が遅れたために発生したものと考えられる。

4. まとめ

カクテルグラスモデルを導入したFLIPにより、透水と沈下を考慮した2次元動的有効応力解析を行った。本検討におけるパラメータの設定では、液状化後の沈下量や基礎の最大変位は概ね妥当と考えられたが、最大変位の発生時刻が異なった。液状化強度曲線の設定をより厳密に行うことにより、過剰間隙水圧の上昇の時間や最大変位発生時刻の再現性がさらに実際に近くなるものと思われる。

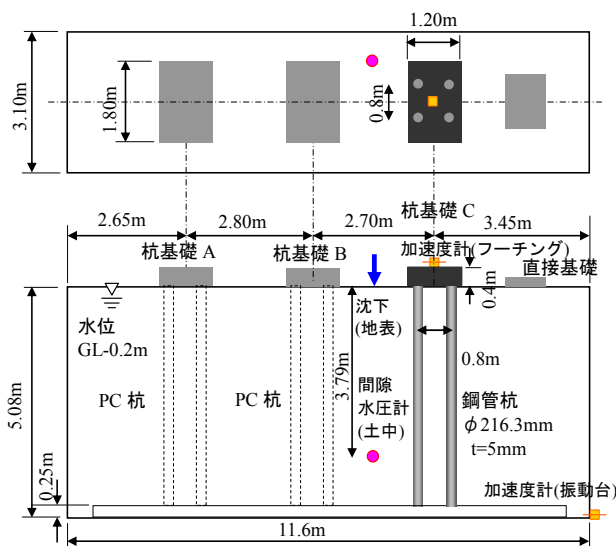
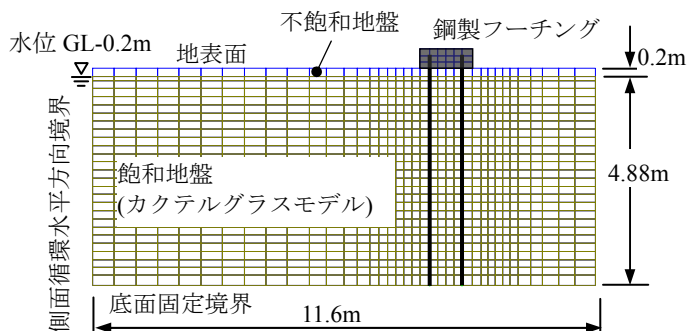
表-1 霞ヶ浦砂の解析パラメータ
(FLIP、カクテルグラスモデル)

解析パラメータ		Dr=60%
基準平均有効応力 σ_{ma}' (kPa)		7.9
基準初期せん断剛性 G_{ma} (kPa)		18170
体積弾性係数（正規圧密） K_{LA} , （過圧密） K_{UA} (kPa)		47380
体積弾性係数（間隙水） K_f (kPa)		2.2×10^6
最大減衰比 H_{max}		0.24
内部摩擦角 $\phi_f(^{\circ})$		43.5
変相角 $\phi_p(^{\circ})$		28.0
ダイレイタンスーに関するパラメータ	ε_{dc}	0.2
	r_{dc}	1.0
	r_d	0.4
	q_1	1.0
	q_2	1.34
	r_0	0.1
	S_l	0.001
体積圧縮特性に関するパラメータ	l_k	2.0
	r_k	0.5
液状化抵抗曲線の下限を制御するパラメータ		γ_{co}
透水係数(m/sec)		k
		6.31×10^{-5}

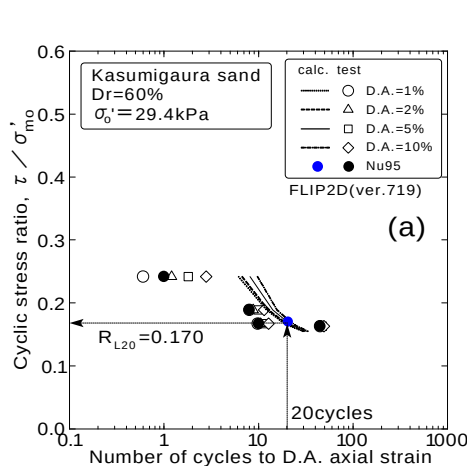
拘束圧依存の係数： $mG=0.5$, $nk=0.5$ （共通）
動的解析のレーレー減衰： $\alpha=0.0$, $\beta=0.0002$

キーワード 透水 沈下 有効応力解析 杭 動的相互作用

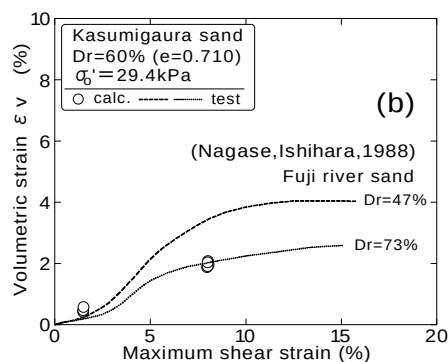
連絡先 〒110-0015 東京都台東区東上野3丁目3-3 東電設計（株） TEL 03-6372-5111

図-1 振動台実験の概要図⁵⁾図-2 解析モデル⁵⁾に追記表-2 鋼管杭(φ216.3mm, t=5.8mm)等のパラメータ⁵⁾

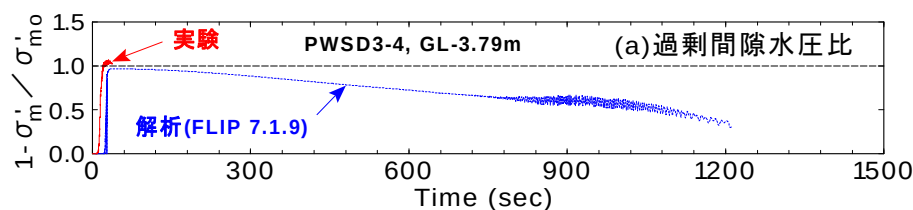
ヤング係数(GPa)	206	(鋼製フーチングに適用)
ポアソン比 ν	0.3	"
質量密度 ρ_t (t/m ³)	7.85	"
断面積(m ²)	0.00384	
曲げ剛性 (kNm ²)	4375	



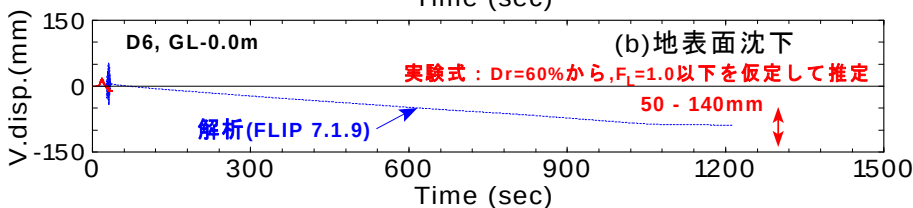
(a)



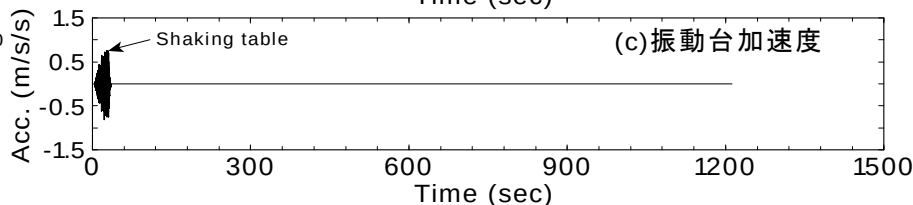
(b)



(a) 過剰間隙水圧比



(b) 地表面沈下



(c) 振動台加速度

図-4 過剰間隙水圧、沈下、加速度の時刻歴

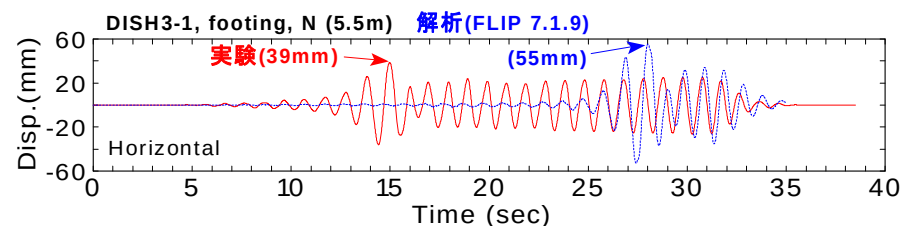


図-5 基礎の動的変位時刻歴

図-3 設定したパラメータによる

液状化強度曲線と体積収縮ひずみ

謝辞：本検討は FLIP の改良と高度利用法の研究を推進する目的で設立された FLIP 研究会（事務局：(財)沿岸技術研究センター）の活動の一環として実施されたものである。関係者の方々に謝意を表します。

参考文献 1) Iai, Matsunaga, Kameoka : Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992. 2) (財)沿岸技術研究センター：港湾構造物設計事例集(平成19年改訂版), 2007. 3) 井合進・小堤治・飛田哲男：ひずみ空間多重せん断モデル(カクテルグラスモデル系)による粒状体の誘導ファブリックの表現, 第45回地盤工学研究発表会, 2010(投稿中). 4) 小堤治・溜幸生・井合進・川崎栄久・鈴木明憲：カクテルグラスモデルにおける杭-地盤相互作用ばねの適用, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集Ⅲ, 2010(投稿中). 5) 溜幸生・小堤治・井合進・芥川博昭：液状化地盤と杭の相互作用を考慮した大型振動台実験の2次元有効応力解析, 第42回地盤工学研究発表会, 平成19年度発表講演集, pp.1665-1666, 2007. 6) H.Nagase, K.Ishihara : Liquefaction-induced compaction and settlement of sand during earthquakes, Soils and Foundations, Vol. 28, No.1, 65-76, 1988. 7) 高圧ガス保安協会：高圧ガス施設等耐震設計指針 レベル2耐震性能評価解説編, 2000.