

重力式岸壁の遠心模型振動実験と有効応力解析

伊藤 浩二¹・森 拓雄²

1 正会員 工修 (株)大林組技術研究所 土木第五研究室 (〒 204-0011 東京都清瀬市下清戸 4-640)
2 正会員 (株)大林組技術研究所 土木第一研究室 (〒 204-0011 東京都清瀬市下清戸 4-640)

液状化地盤における重力式岸壁の地震時ならびに地震後の挙動を把握するために、ケーソン岸壁、一様な砂で作製した背後地盤と支持地盤で構成される遠心加速度35Gの模型振動実験を行った。1995年1月17日兵庫県南部地震のポートアイランドで観測された地震波を入力し、液状化から過剰間隙水圧の消散に至るまでのケーソン岸壁と周辺地盤の変形挙動を検討した。振動実験で使用した砂の室内試験で得られた液状化、液状化後の変形特性を考慮した地盤構成モデルを用いた有効応力解析では、模型振動実験と同様に、ケーソン岸壁の直下地盤で液状化は生じず、ケーソン岸壁、背後地盤の水平移動、沈下は、主に地震力の作用時に生じることが示された。

Key Word : quay wall, centrifuge modelling, sand, liquefaction, residual deformation, effective stress analysis

1. はじめに

兵庫県南部地震では、埋立人工島、臨海部の重力式岸壁等で、ケーソンの迫り出しや背後地盤の沈下等の大きな被害が生じた。その被災要因解明のため、各機関において、ケーソン、背後地盤、支持地盤で構成される重力場、遠心力場の模型振動実験^{1,2)}、ならびに地震応答解析による解析的検討³⁾が精力的に行われている。本報では、ケーソン背後の裏込め碎石、直下のマウンド碎石、置換砂等を考慮しない単純な実験条件において、比較的大型の模型地盤を用いた遠心力場の模型振動実験を行い、ケーソン、ケーソン周辺地盤の消散過程までの過剰間隙水圧特性、残留変形特性を検討した。次に、模型振動実験で使用した地盤材料の力学試験から設定した定数を用いて、消散過程までの有効応力解析を行い、模型実験で得られた残留変形との比較からその適用性を検討した。

2. 実験概要

図-1に模型地盤と計器配置を示す。実験は剛土槽(1750 mm × 500 mm × 900 mm)を用い、遠心加速度を35Gとした。ケーソン(150 mm × 200 mm × 297 mm)は、碎石と水により $\rho_s=2.0\text{ t/m}^3$ に重量調整した3体のアルミニウム製の函体とし、土槽側壁との摩擦軽

表-1 物理・力学定数(ネバダ砂)

土粒子密度 (t/m ³)	ρ_s	2.638
最大間隙比	$e_{\max}$	0.884
最小間隙比	$e_{\min}$	0.527
平均粒径 (mm)	D_{50}	0.168
初期間隙比	e_0	0.716
相対密度 (%)	D_r	47
乾燥密度 (t/m ³)	ρ_d	1.537
湿潤密度 (t/m ³)	ρ_t	1.955
透水係数 (cm/sec)	k	6.6×10^{-3}

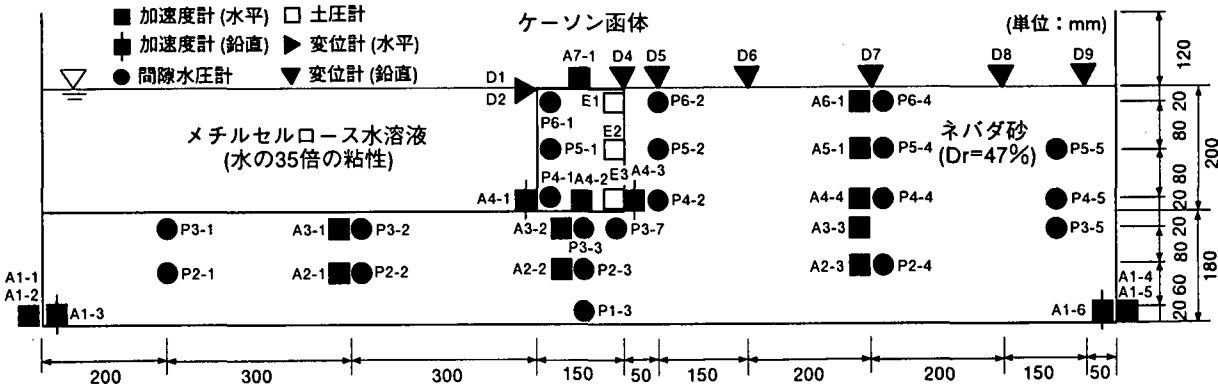


図-1 模型地盤と計器配置

減のため2体をダミーとし、中央ケーソンに計器を取り付けた。地盤には表-1のネバダ砂を用い、相対密度が47%になるように空中落下法で模型地盤を作製し、地盤の中央、土槽側面の2断面で、残留変位測定用の色砂を格子状に配置した。間隙流体は、透水の相似率を満たすように水の35倍の粘性をもつメチルセルロース水溶液を用い、水面は地表面とした。

計測は、加速度、間隙水圧、土圧、ケーソンの変位、背後地盤の鉛直変位とし、加振後の過剰間隙水圧が消散するまでデータ収録を行った。間隙流体を排水した後、色砂の移動量から残留変位を測定した。

入力地震波は、神戸市開発局による兵庫県南部地震のポートアイランド鉛直アレー観測記録⁹⁾を用いて、G.L-32 mの速度記録のオービットから推定した主軸方向N38.8Wへ合成した水平加速度記録(最大値713 gal)を用いた。土槽底板で計測された平均の加速度の時刻歴を図-2に示す。

3. 実験結果

海側、陸側、ケーソン背面、直下地盤の過剰間隙水圧の時刻歴を図-3に示す。海側、陸側、ケーソン背面地盤では、加振終了後初期有効土被り圧 σ'_v 相当の過剰間隙水圧が生じるが、ケーソン背面では陸側地

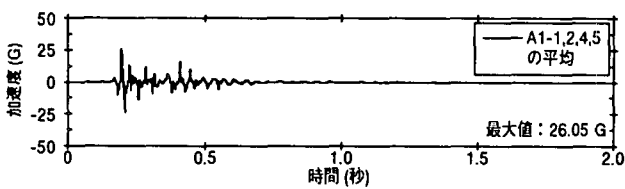


図-2 入力加速度の時刻歴

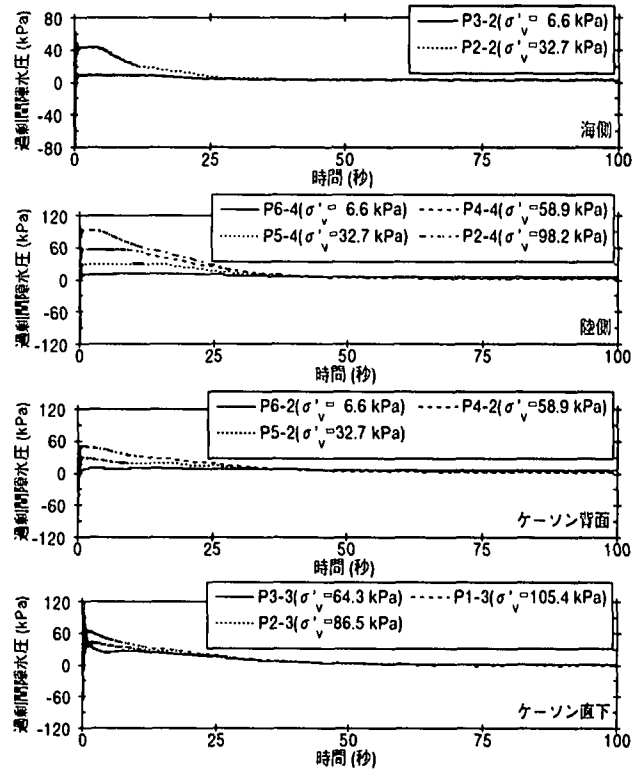


図-3 過剰間隙水圧の時刻歴

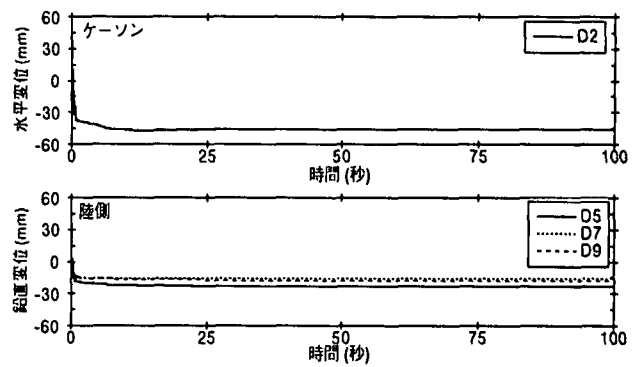


図-4 変位の時刻歴

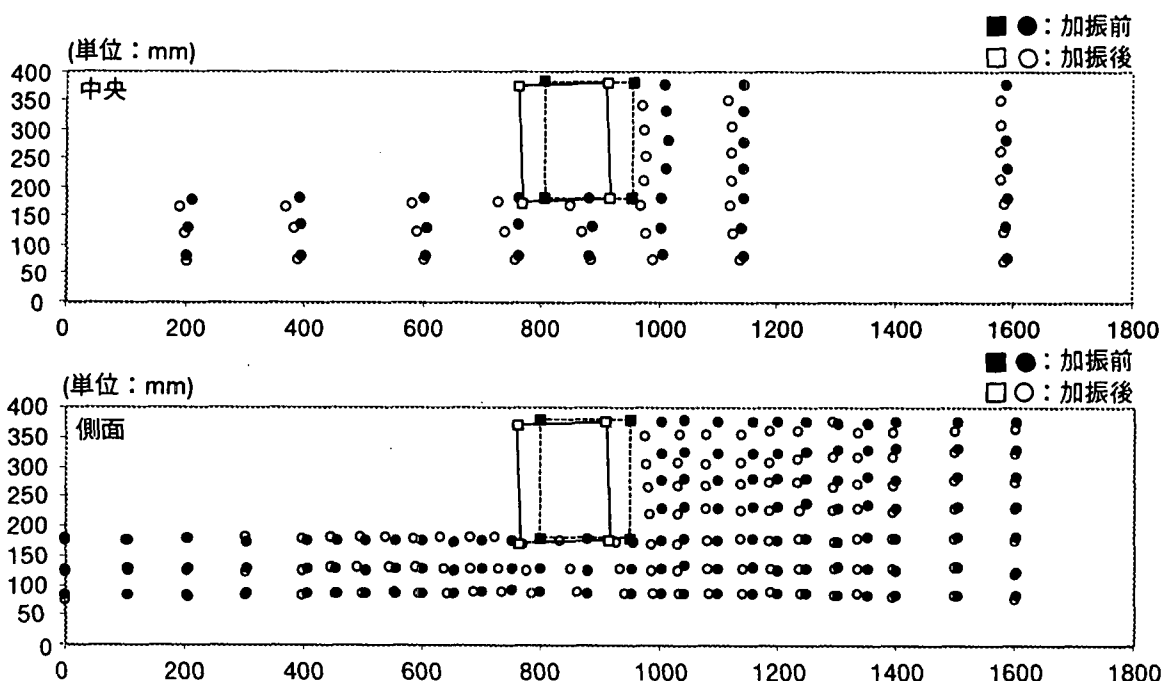


図-5 色砂による残留変位の分布

盤と比較して消散が速やかに生じている。ケーソン直下地盤の過剰間隙水圧は、加振終了後自重解析から推定した σ'_v まで生じず、液状化は生じていない。

ケーソンの水平変位、陸側地盤の鉛直変位の時刻歴を図-4に示す。ケーソンは海側に47 mm 迫り出し、ケーソンの移動は概ね加振中に生じている。陸側地盤ではケーソン背面で24 mm、遠方で17 mm の沈下が生じ、大部分の沈下はケーソンの移動と同様に加振中に生じている。色砂による地盤の残留変位の分布を図-5に示す。最大変位はケーソン直下地盤で生じ、ケーソンの移動は、沈下、傾斜と比較して水平変位が支配的である。陸側地盤の水平変位、沈下は、ケーソンから離れるに伴い小さくなっている。

4. 地盤定数の設定

有効応力解析で用いる構成モデル⁹⁾の定数を得るために、相対密度47 % のネバダ砂の圧密排水三軸圧縮試験、圧密応力 $\sigma'_c = 58.8 \text{ kPa}$ の非排水繰返しせん断試験と m_v 試験、過剰間隙水圧比 $\Delta u / \sigma'_c = 0.38, 0.66, 0.84$ の m_v 試験を行った。

圧密排水三軸圧縮試験から得られた応力-歪率ダイレイタンスー関係に相当するモービライズド面のせん断応力比-塑性ひずみ増分比関係を図-6に示す。ダイレイタンスーパラメータ λ, μ は図-6の勾配と切片で定義され、 $\lambda = 1.2, \mu = 0.2$ と得られる。

圧密排水三軸圧縮試験から得られた最大せん断応力比-最大塑性せん断ひずみ関係を図-7に示す。硬化パラメータ k_s は図-7の初期勾配の逆数で定義され、図-7より平均有効応力 $(\sigma'_m)^{0.5}$ に比例して設定した。内部摩擦角は、図-7より $\phi'_i = 33.7^\circ$ と得られる。

力学試験の初期の圧密過程の体積ひずみ ε_v -圧密圧力 $(\sigma'_m)^{0.5}$ 関係、 m_v 試験の体積ひずみ ε_v -平均有効応力 $(\sigma'_m)^{0.5}$ 関係の勾配で定義した圧縮指数 $C_c / 1 + e_0$ と平均有効応力の関係を図-8に示す。初期の圧密過程、 $\Delta u / \sigma'_c = 0.38, 0.66, 0.84$ の m_v 試験の $C_c / 1 + e_0$ は平均0.008、非排水繰返しせん断試験後の m_v 試験の $C_c / 1 + e_0$ は平均0.035であり、液状化により約4.5倍まで増加している。解析で用いる $C_c / 1 + e_0$ は、図-8に示すように、初期の $(C_c / 1 + e_0)_i$ から液状化後の $(C_c / 1 + e_0)_l$ まで平均有効応力に依存して評価した。

骨格弾性係数 E_0 、膨張指数 $C_s / 1 + e_0$ は、力学試験で得られた微小ひずみレベルでのせん断弾性係数 G_0 と骨格ポアソン比 ν を仮定して設定した。

表-2にモデル定数の一覧を示す。ここで、非排水繰返しせん断試験から得られた軸ひずみ両振幅 $DA = 5 \%$ の液状化強度比は、液状化までの繰返し回数が $N_c = 20, 5$ でそれぞれ $R_{20} = 0.135, R_5 = 0.165$ である。

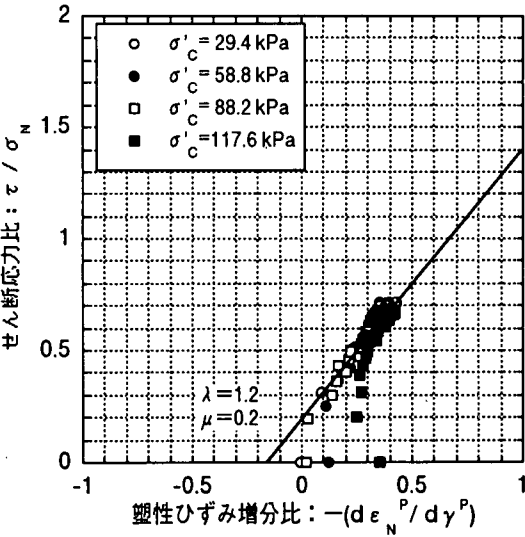


図-6 せん断応力比-塑性ひずみ増分比関係

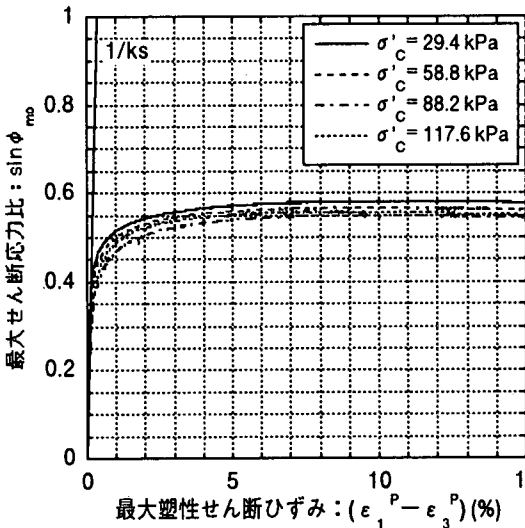


図-7 最大せん断応力比-最大塑性せん断ひずみ関係

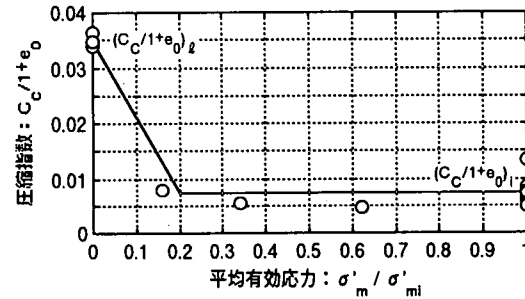


図-8 圧縮指数-平均有効応力関係

表-2 モデル定数

骨格弾性係数(kPa)	E_0	$14974 \times (\sigma'_m)^{0.5}$
骨格ポアソン比	ν	0.33
硬化パラメータ	k_s	$0.0001 \times (\sigma'_m)^{0.5}$
ダイレイタンスー パラメータ	λ	1.2
	μ	0.2
内部摩擦角(°)	ϕ'_i	33.7
圧縮指数	$(C_c / 1 + e_0)_i$	0.0076
	$(C_c / 1 + e_0)_l$	0.0348
膨張指数	$(C_s / 1 + e_0)$	0.0013

5. 有効応力解析

海側、陸側、ケーソン背面、ケーソン直下地盤の過剰間隙水圧の時刻歴を図-9に示す。陸側、ケーソン背面地盤では、加振終了後初期有効土被り圧 σ'_v 相当の過剰間隙水圧が生じ、実験結果と比較して消散までの時間は長いものの同様の傾向を示している。ケーソン直下地盤では、実験結果と同様に、加振終了後液状化は生じていない。

ケーソンの水平変位、陸側地盤の鉛直変位の時刻歴を図-10に示す。ケーソンは海側に38 mm移動し、陸側地盤ではケーソン背面で22 mm、遠方で15 mmの沈下が生じ、実験結果と同様に大部分の移動、沈下は加振中に生じている。解析終了時の地盤の残留変形を図-11に示す。ケーソン直下地盤では大きな水平変位が生じ、海側地盤では図-5の土槽側面の残留変位分布と同様の隆起が生じている。ケーソンの移動は水平変位が支配的で、陸側地盤の水平変位、沈下はケーソンから離れるに伴い小さくなり、図-5の残留変位分布と同様の傾向を示している。

6. まとめ

液状化地盤における重力式岸壁の地震時ならびに地震後の挙動は、遠心模型振動実験と有効応力解析で同様に、ケーソン直下地盤では液状化が生じず、ケーソン、背後地盤の水平移動、沈下は、主に地震力の作用時に生じると考えられる。

謝辞：遠心模型振動実験は、カリフォルニア大学デービス校の遠心載荷装置で実施したものであり、ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 金谷守、河井正、栃木均、石川博之、武田智吉：護岸構造物の模型振動実験－その3電中研における1 g振動台を用いた実験－、地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関するシンポジウム論文集、pp.205-210、1998。
- 2) 桑野二郎、高橋章浩、廣岡明彦、山内公介：護岸構造物

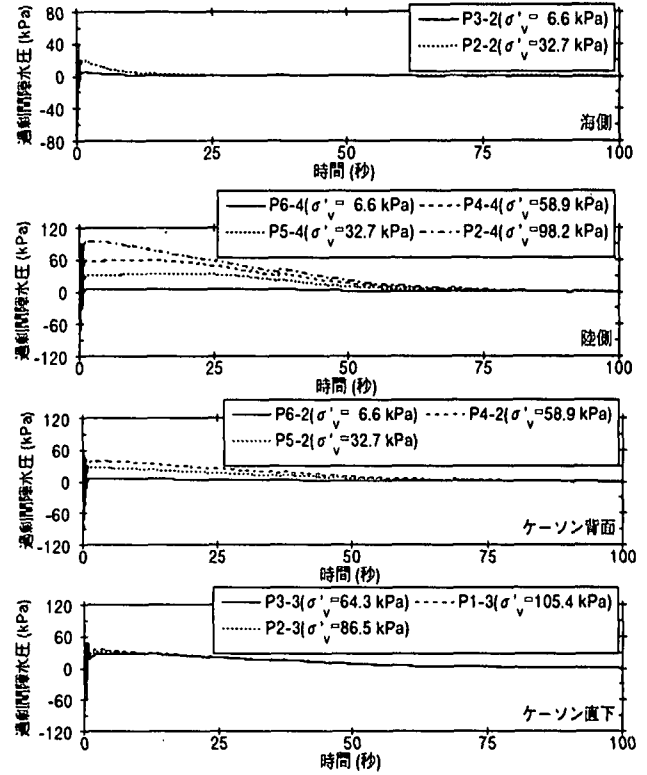


図-9 過剰間隙水圧の時刻歴

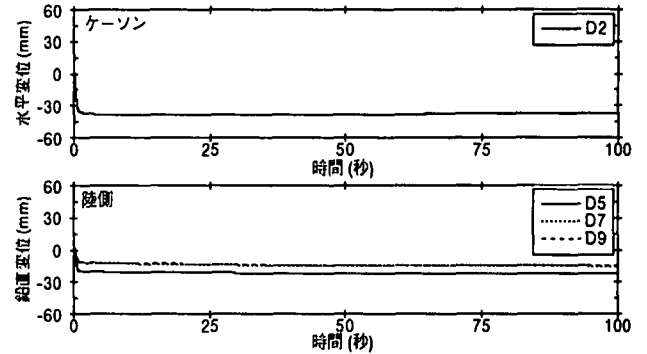


図-10 変位の時刻歴

の模型振動実験－その3東京工業大学における遠心力載荷装置を用いた実験－、地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関するシンポジウム論文集、pp.241-246、1998。

3) 沢田俊一、小堤治、井合進：護岸構造物の残留変形解析－FLIPによる解析－、地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関するシンポジウム論文集、pp.247-256、1998。

4) 神戸市開発局：兵庫県南部地震による埋立地地盤変状調査(ポートアイランド、六甲アイランド)報告書、1995。

5) 伊藤浩二：動的有効応力解析プログラム「EFFECT」(その1)－基礎理論と地盤構成モデル－、大林組技術研究所報、No.51、pp.7-14、1995。

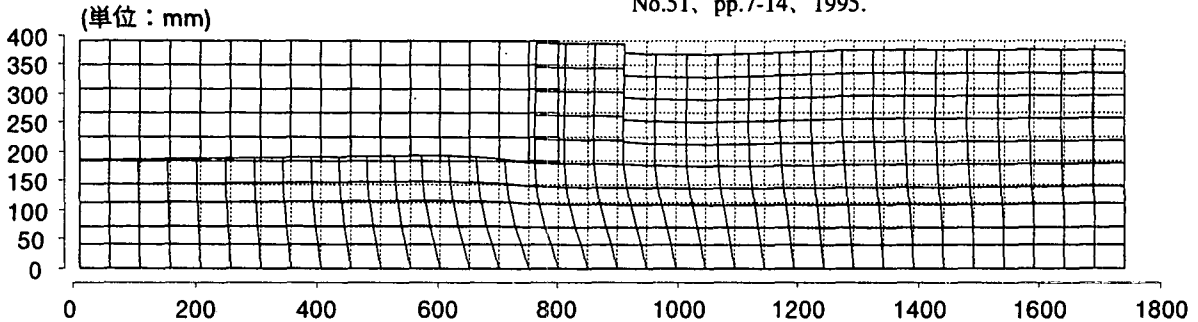


図-11 解析終了時の残留変形