

ケーソン岸壁および杭基礎の液状化被害の動的遠心実験 に関する三次元有効応力解析

清水建設(株) 佐藤 正義*

清水建設(株) 大槻 明*

埋立地などにおいて液状化に伴うケーソン岸壁の数メートルにもおよぶ水平変位の被害、および地盤の側方流動により護岸の近くに建設された構造物の基礎杭に多くの被害が発生した。この現象を想定した遠心振動実験を数値解析により検討した。解析は、ケーソン岸壁と杭基礎を忠実にモデル化するため、著者らの開発した三次元有効応力法の解析コード(HiPER)を用いた。解析結果により、ケーソン岸壁周辺の地盤が液状化に至る状況を概ね再現できること。地震後の側方流動によるケーソンと地盤の変形のモード、および地盤変形に支配されて杭に大きな曲げ変形が発生している現象を概ね表現できることを示した。

1 はじめに

阪神・淡路大震災では、埋立地などにおいて液状化に伴うケーソン岸壁の数メートルにもおよぶ水平変位と沈下の被害が発生した^{1) 2) 3)}。また、地盤の側方流動により護岸の近くに建設された大型橋梁の基礎杭が損傷し^{4) 5) 6)}、建築物では極端な場合には基礎杭が折損する被害^{7) 8)}が発生し、重要な研究課題となっている。著者らはこの現象の実証的研究として、遠心力場の液状化実験⁹⁾によるシミュレーションを実施し、ケーソン岸壁の変形発生メカニズムを明らかにするとともに、ケーソン岸壁に近接する杭基礎の被害を発生させる要因を把握した。本文では、実験で得られた現象の地盤変形の発生メカニズムと杭基礎の被害を、数値解析により検討した。これまで、液状化に伴うケーソン岸壁の水平変位については、一井ら¹⁰⁾および森田ら¹¹⁾が二次元の有効応

力解析法を用いて詳細に検討しているが、本文ではケーソンのみならずケーソン岸壁近傍の杭基礎構造物もあわせて検討するため、三次元の有効応力解析法を用いた。

解析結果により、ケーソンおよび地盤の変形のモードを概ね再現できること、側方流動による地盤変形に支配されて杭に大きな曲げ変形が発生している現象を概ね表現できることを示した。

2 遠心力場における液状化振動実験の概要

(1) 実験方法

遠心振動実験に使用した試験体を図-1に示す。せん断土槽の内寸法は、長さ77cm(加振方向)、幅47.5cm、深さ37cmである。この実験に適用した相似則の一覧を表-1に示す。実物との縮尺比は1/30を想定した。実験において、海底地盤および裏込め地盤に用いた砂は、平均粒径 $D_{50}=0.09\text{mm}$ の硅砂であり、ケーソン下部の基礎捨石は小砂利を敷き詰めた。模型地盤は、空中落下法により相対密度40%で作製し、間隙流体にはシリコンオイル30csを使用した。

Key Words : liquefaction, caisson type quay wall, pile foundation, three dimensional effective stress analysis

* 技術研究所 地下技術研究部, 03-3820-5521

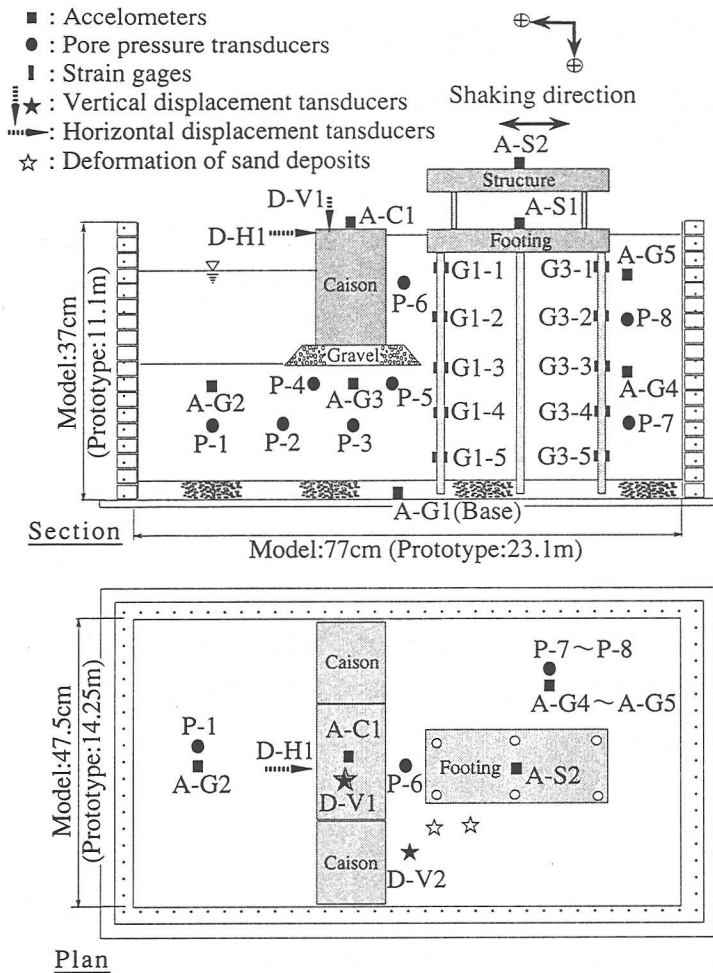


図-1 試験体および計器配置

ケーソンは実物換算で高さ4.5m、幅3.0mであり、比重は約2.1としこれは実際の重力式ケーソンとほぼ等しい。杭は直径30cm、厚さ8mmの鋼管杭を対象にモデル化した。杭頭はフーチングに剛結し、杭下端は支持杭基礎を模擬するために、砂礫の支持層に杭径の約2.5倍を根入れした。構造物モデルは、一質点系のせん断変形が卓越するようにモデル化した。

液状化実験の加振は、遠心加速度30gの状態、繰返し回数30回のサイン波を、実地盤換算で2Hz、約380galの入力となるように設定して行った。

(2) 実験結果の概要

加振中の実験結果によると、ケーソンは振動回数の増加に伴って徐々に水平方向に変位しながら、沈下が発生した。加振終了後においてケーソンの水平変位は緩やかに増加した。これは、液状化による地

表-1 相似則の一覧

	Symbol	Scale ratio	Unit	Prototype	Model	
Sand stratum	Thickness	H_g	$1/\lambda$	m	10.8	0.36
	Density	ρ_t	1	g/cm^3	1.73	1.73
	Permeability	k	$1/\lambda$	cm/s	3×10^{-3}	9×10^{-4}
Bearing stratum	Thickness	H_b	$1/\lambda$	m	0.6	0.02
Cason	Height	H	$1/\lambda$	m	4.5	0.15
	Thickness	L	$1/\lambda$	m	3.0	0.1
Pile	Density	ρ_t	1	g/cm^3	2.1	2.1
	Length of pile	L	$1/\lambda$	m	9.6	0.32
	Diameter	D	$1/\lambda$	cm	30	1
	Thickness	t	$1/\lambda$	mm	8	1.0 (0.27)
	Young's modulus	E	1	MN/m^2	206000	73000 (206000)
	Geometrical moment of inertia	I	$1/\lambda^4$	cm^4	7828	0.029 (0.0097)
	Bending stiffness	EI	$1/\lambda^4$	MNm^2	16.1	2.12×10^{-3} (2.0x10 ⁻³)
Footing	Mass	m_f	$1/\lambda^3$	kg	45900	1.7
	Length	L_f	$1/\lambda$	m	6x2	0.2x0.1
Structure	Mass	m_s	$1/\lambda^3$	kg	110700	4.1
	Natural frequency	f_s	λ	Hz	2	60
	Damping ratio	h_s	1	%	5.0	5.0
	Exciting accleration	α	λ	g	0.35	10.5

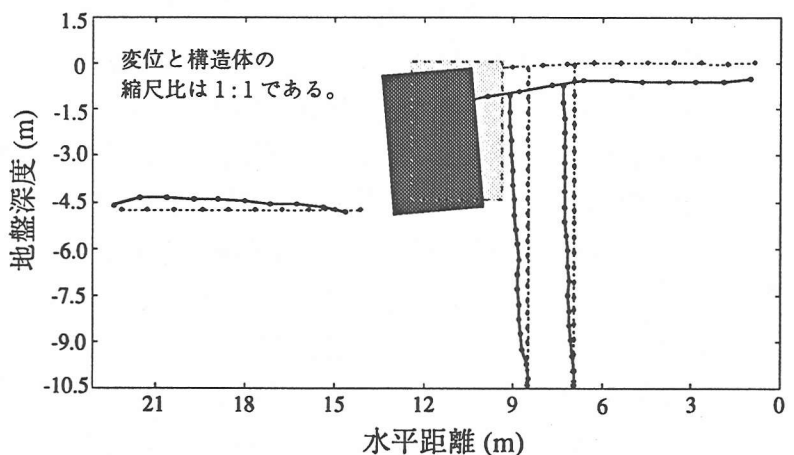


図-2 遠心振動実験後のケーソンおよび地盤の変形

盤のせん断剛性低下に伴う地盤の側方流動である。ケーソン加速度、水平変位と背面地盤の過剰間隙水圧に関する時刻歴の実験結果から、ケーソンに水平変位を生じさせた主要因はケーソンの慣性力であり、ケーソン背後地盤の過剰間隙水圧の上昇は支配的ではないことが分かった。図-2 に実験終了後のケーソンの水平変位と沈下、ならびに地表や地盤内

部の変位分布を示す。図中の波線は実験開始前、実線が実験終了後の形状である。図において、ケーソンは海側へ約5度傾斜しているが、実際のケーソンの傾斜も3～6度が多くほぼ対応している。

杭の曲げモーメントの時刻歴には振動成分とシフト成分がみられた。振動成分は構造物の慣性力と地盤震動によるものであり、シフト成分は永久変形となる地盤の側方流動によるものである。岸壁側の杭Aと陸側の杭Cで同深度における曲げモーメントのシフト成分は異なり、杭の設置位置による違い、すなわち地盤の側方流動量による違いが顕著に現れていた。加振終了後も杭の曲げモーメントが緩やかに増加した。これは、液状化に伴う地盤の側方流動により生じたものである。

実施した遠心力場の液状化実験は、兵庫県南部地震で被災したケーソンや背後地盤の変形状況、護岸近くの杭基礎被害の状況を、比較的簡潔なモデルを用いて比較的良く再現できた。

3 三次元有効応力法によるシミュレーション

(1) 解析方法

前述の遠心液状化実験を対象として三次元有効応力法によるシミュレーションを行い、地震時における地盤やケーソン岸壁および杭基礎の応答、さらに液状化に伴う地盤の側方流動と杭の変形の関係について検討した。本文では、遠心実験において対象とした実物をシミュレーションすることとした。

解析には、著者らの開発した三次元有効応力解析コード(HiPER)¹²⁾を用いた。この解析コードは、水は土粒子骨格に比べてほとんど体積変化がないものとして水の体積弾性係数を十分大きく評価し、水と土とは一体となって振動すると仮定している。土のせん断応力・せん断ひずみ関係として、三次元に拡張した修正R-Oモデルを、ダイランシーはおわんモデル¹³⁾のダイランシー部分を用いている。非排水条件を課することにより過剰間隙水圧を求めているが、地盤の透水性や自重の影響は考慮していない。運動方程式の直接積分法としては、陽解法を使用している。

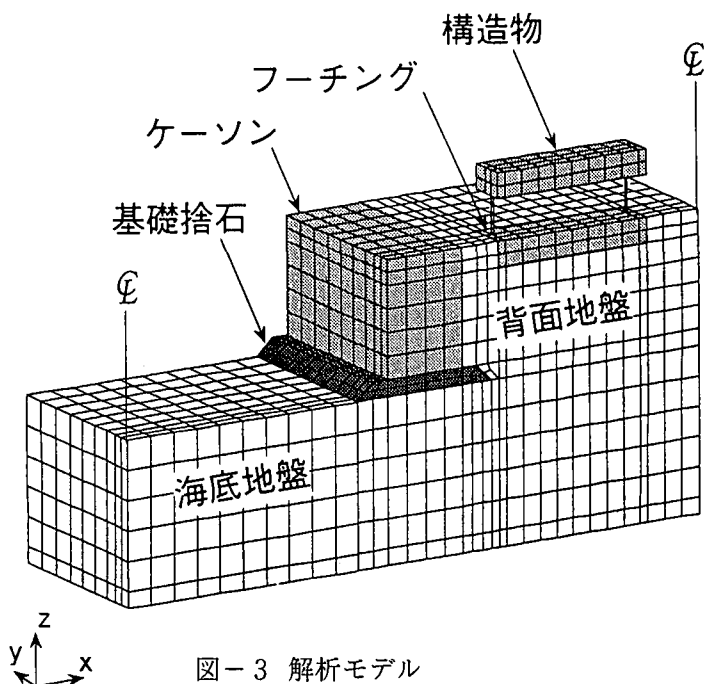


図-3 解析モデル

表-2 解析定数の一覧

		G_{0i} (tf/m ²)	$\gamma_{0.5i}$ ($\times 10^{-6}$)	h_{max}
液状化解析に用いるパラメーター	液状化地盤	1500	0.0002	0.3
	基礎捨石	1580	0.00013	0.3
(G_{0i} および $\gamma_{0.5i}$ は $\sigma_m = 1$ tf/m ² のときの値)				
		過剰間隙水圧比	せん断剛性	
自重解析に用いるせん断剛性の低減率		0.9 以上	$G_{0i} / 1000$	
		0.5 ~ 0.9	$G_{0i} / 100$	
		0.5 以下	$G_{0i} / 10$	

解析は、(1)地震時の液状化解析と(2)地震後の地盤のせん断剛性低下を考慮した自重解析の2ケースを行った。地震時の液状化解析は、ケーソン岸壁周辺の地盤が液状化に至る状況を把握するため、解析時間を6秒とした。

(2) 解析モデルと解析定数

解析に用いた三次元FEM解析モデルを図-3に示す。加振軸に対して左右対象であるので、1/2モデルを使用した。ケーソン、構造物のフローアおよびフーチングは剛体要素、杭および構造物の柱は三次元の梁要素とした。地震時の液状化解析では、土槽側壁部における境界条件は水平ローラー、底面の境界は固定とした。地震後の自重解析では、せん断土槽の周辺と地盤間に剥離要素を設置した。また、

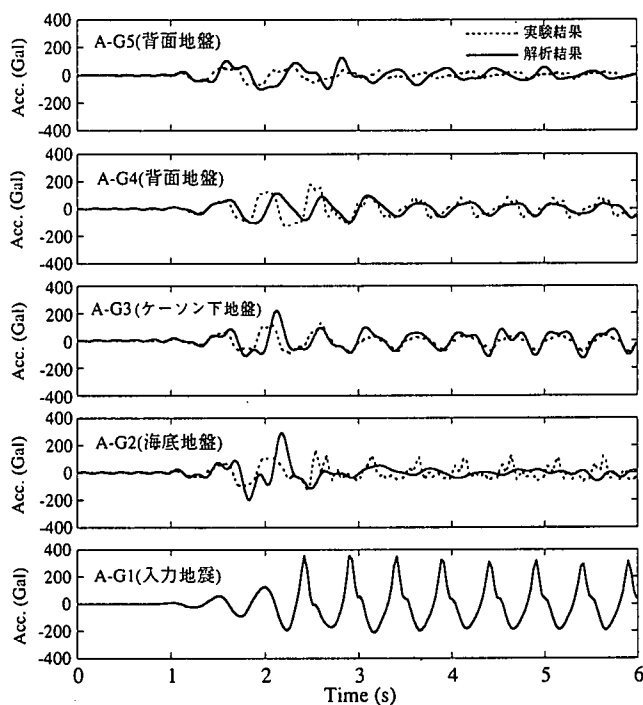


図-4 地盤加速度の実験と解析の比較

ケーソンと背面地盤および基礎捨石マウンドの間にも剥離要素を用いた。

本解析では、海底地盤および背面地盤に用いた珪砂の特性が最も重要であるため、その地盤の初期せん断剛性および減衰は中空ねじり繰り返し変形試験、液状化強度は中空ねじり液状化試験を行い決定した。地震時の液状化解析および地震後の自重解析に用いた定数の一覧を表-2に示す。

地震後の自重解析では液状化後の沈下および側方流動変位を概略評価する。そのための自重解析に用いる地盤のせん断剛性の低下率に関する考え方には幾つかの方法があるが、ここではYasuda et al.¹⁴⁾の方法に基づき表-2のように設定した。

(3) 実験結果と解析結果の比較検討

地震加振中における地盤の加速度応答について解析結果と実験結果を比較したものを図-4に示す。図中の波線は実験結果、実線が解析結果である。地盤の加速度応答については、実験結果が加振初期に比較的大きな応答を示し、地盤液状化により加速度応答が低下する様子を解析結果は比較的良く再現できている。構造物・フーチングおよびケーソンの加

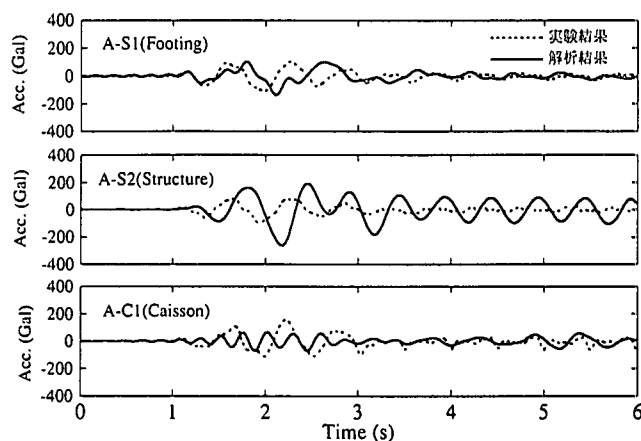


図-5 構造物・フーチングとケーソンの加速度の実験と解析の比較

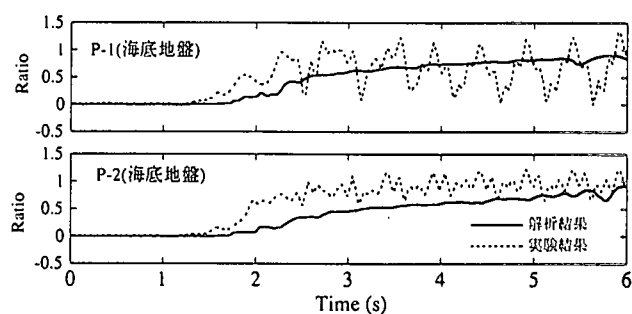


図-6 地盤の過剰間隙水圧の実験と解析の比較

速度応答について、解析結果と実験結果を比較したものを図-5に示す。構造物およびフーチングの加速度応答は、地盤液状化により加速度応答が低下する様子を、解析結果は比較的良くとらえているが、加振初期の応答に位相のずれ、ケーソンの加速度応答は振動の周期が異なっている傾向が認められる。地盤の過剰間隙水圧比について、解析結果と実験結果を比較したものを図-6を示す。地盤の過剰間隙水圧比は、その上昇過程を解析結果は実験結果を概ね再現できている。実験結果に振動成分がみられるのは、土槽境界等の影響がでていることが一つの要因として考えられる。ケーソン直下の地盤の過剰間隙水圧比については、実験結果では負になっていたが、解析的にはこの様な現象は再現できないため、今回は比較していない。この様な現象の解析的な再現については、今後の課題の一つであろう。図-4から図-6によりケーソン岸壁周辺の地盤が液状化

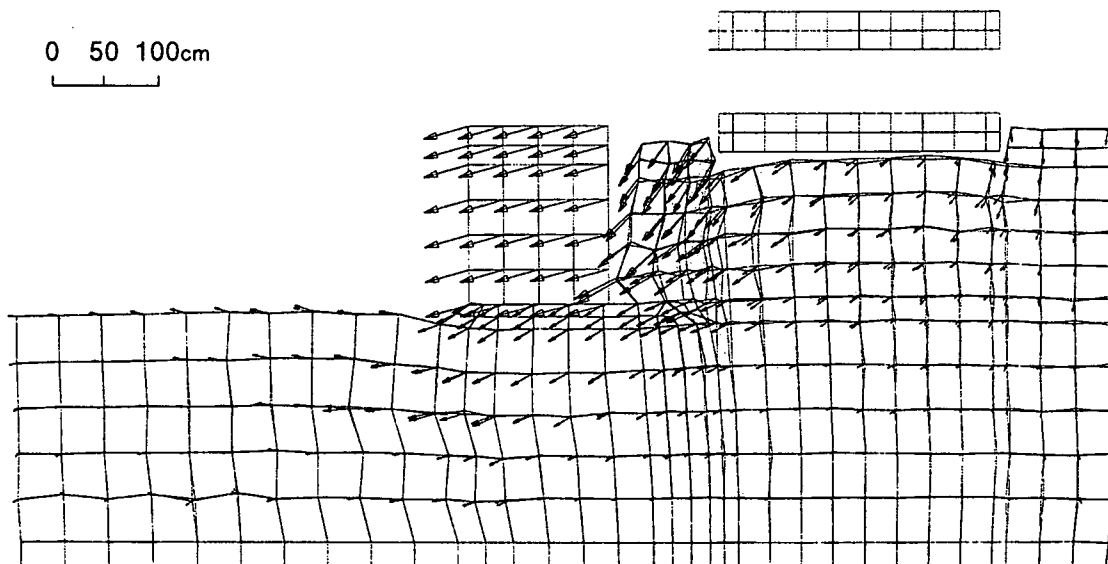


図-7 ケーソンの水平変位と沈下および地盤の解析結果の変形図

に至る状況を、液状化解析により概ね再現できていると考える。

図-7に実験終了後に対応する自重解析結果のケーソンの水平変位と沈下および地盤の変形図を示す。変位のベクトルにより、ケーソン背後地盤の水平変位、ケーソン直下地盤のせん断変形、ケーソン前面の海底地盤が隆起している様子は、図-2に示した実験結果における地盤の変形モードを比較的良く再現できている。また、ケーソンが前傾し水平変位が発生している様子も実験結果の傾向をとらえている。ケーソンの傾斜は実験結果では約5度であり、解析結果でも約5度であり一致している。

自重解析結果の地震終了後における杭の曲げモーメント分布について、解析結果と実験結果の比較を図-8に示す。岸壁側の杭Aでは杭中間部に大きな曲げモーメントが発生しており、陸側の杭Cでは杭頭部に大きな曲げモーメントが発生していることより、解析結果は実験結果を再現できている。これにより解析結果は、岸壁側と陸側の地盤変形の違いによる杭の曲げモーメント分布形状の違いを概ね再現できているといえる。

自重解析結果により、ケーソン周辺地盤の変形の状態を概ね良く再現できること、側方流動に伴う地盤変形に支配されて杭に大きな曲げモーメントが発生している現象を概ね表現できることを示した。

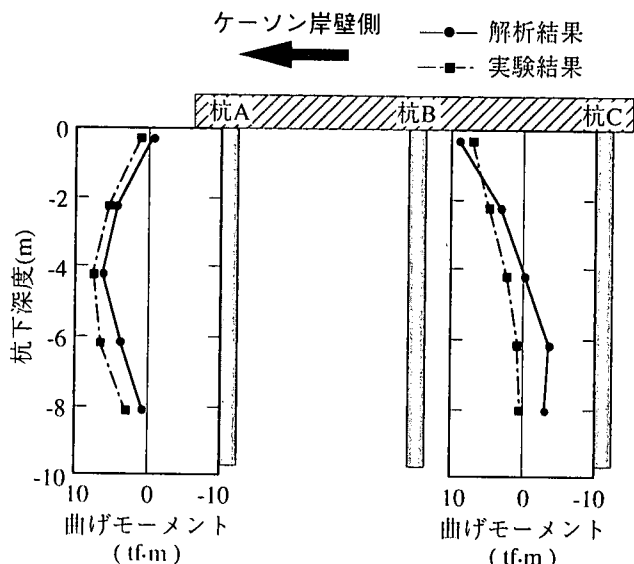


図-8 杭の曲げモーメント分布の解析と実験の比較

4 まとめ

三次元の有効応力法の解析結果により、ケーソン岸壁周辺の地盤が液状化に至る状況を概ね再現できること、ケーソン周辺地盤の変形および側方流動に伴う地盤変形に支配されて杭に大きな曲げモーメントが発生している現象、さらに岸壁側と陸側の地盤変形の違いによる杭の曲げモーメント分布形状の違いを概ね表現できることを示した。

【参考文献】

- 1) 阪神・淡路大震災報告書(解説編) 5.3 岸壁・護岸の被災状況, 社団法人地盤工学会 阪神大震災調査委員会, pp.231-245, 1996年3月
- 2) Inagaki, H., S. Iai, T. Sugano, T. Yamazaki, and T. Inatomi: Performance of Caisson Type Quay Walls at Kobe Port, Special Issue of Soils and Foundations, pp.119-136, 1996. 1.
- 3) 松永康男, 及川研, 輪湖建雄: 阪神・淡路大震災による重力式港湾工絵像物の基礎地盤部の変形, 土木学会, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.383-390, 1996年1月
- 4) 兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書, 兵庫県南部地震道路橋被災対策委員会, pp.48-55, 1995年12月
- 5) 南莊淳, 足立幸郎: 阪神高速道路における基礎構造物の損傷調査, 橋梁と基礎, pp.152-155, 1996年8月
- 6) 岡下勝彦, 小島省一, 馬川和典: ハーバーハイウェイ基礎の増し杭, 橋梁と基礎, pp.73-77, 1996年8月
- 7) 兵庫県南部地震による建築基礎の被害調査事例報告書, 日本建築学会近畿支部基礎構造部会 兵庫県南部地震建築基礎被害調査委員会, 1996年7月
- 8) 兵庫県南部地震における液状化・側方流動に関する報告書(平成7年度), 建築基礎における液状化・側方流動対策検討委員会, 1996年3月
- 9) 佐藤正義, 社本康広, 後藤茂, 桂 豊, 木全宏之: ケーソン岸壁および杭基礎の液状化被害に関する遠心振動実験, 土木学会, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.391-396, 1996年1月
- 10) 一井康二, 井合進, 森田年一: 有効応力解析によるケーソン式岸壁の被災原因の解析, 土木学会, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.397-404, 1996年1月
- 11) 森田年一, 井合進: 平成7年兵庫県南部地震による重力式岸壁の被災数値シミュレーション解析, 土木学会, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.405-412, 1996年1月
- 12) 大槻明, 福武毅芳, 藤川智, 佐藤正義: 液状化時群杭挙動の三次元有効応力解析, 土木学会論文集, No.495, I-28, pp.101-110, 1994年7月
- 13) 福武毅芳・松岡元: 任意の方向単純せん断におけるダイランシーイの統一的理解, 土木学会論文集, No.412/3, pp.240 ~248, 1989年
- 14) Yasuda, S., H. Kiku and Y. Uchida: The Mechanism and a Simplified procedure for the Analysis of Procedure for the Analysis of Permanent Ground Displacement due to Liquefaction, Soils and Foundations, pp.103-109, 1989.

3-D Effective Stress Numerical Modeling for Centrifuge Test of Seismic Liquefaction Damage to Caisson Type Quay Wall and Its Neighboring Pile Foundations

Masayoshi SATO and Akira OHTSUKI

Seismic liquefaction damage to caisson type quay wall and its neighboring pile foundation have successfully been reproduced by larger scale dynamic centrifuge tests. This study presents a numerical simulation for the deformation behavior of the model wall-soil-pile foundation system, based on a dynamic analysis of three-dimensional effective stress developed by the authors. Good agreement is shown in numerical analysis and model test observation. It suggests that the present numerical model and method can provide a satisfactory result for evaluation of liquefaction behavior of soil deposits, lateral spreading of the wall toward sea side, and deformation modes of piles dependent on the magnitude and distribution of horizontal ground displacements.