

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

清水建設(株) 佐藤 正義* 社本 康広*
清水建設(株) 後藤 茂* 桂 豊*
清水建設(株) 木全 宏之**

液状化によるケーソン岸壁および水際線近傍における杭基礎の被害原因について検討するため、ケーソン岸壁および杭基礎を含む模型地盤をせん断土槽中に作成し、実地盤との透水性の相似則を満足させるため模型地盤の間隙流体にシリコンオイルを用いて、遠心力場の液状化実験を行った。実験結果により、(1)ケーソンの水平変位・沈下の状況に関して兵庫県南部地震の被害状況を定性的に再現していること、(2)ケーソン水平変位の原因は、ケーソン背面地盤の側圧上昇よりも、ケーソン慣性力による下部地盤のせん断変形のほうが支配的であること、(3)ケーソン近傍に構築された杭基礎は、ケーソン下部地盤の側方流動現象により杭頭部だけでなく中間部でも損傷すること、が分かった。

1. はじめに

兵庫県南部地震では、埋立地などにおいて液状化に伴う被害が数多く発生し、特にケーソン岸壁の数メートルにもおよぶ水平変位・沈下という被害が発生した^{1) 2) 3)}。また、これに伴ってケーソン背後地盤の側方流動により基礎杭の被害が多く発生した。ケーソン岸壁および水際線近傍に構築される杭基礎の被害対策のためには、液状化に伴う地盤の側方流動がケーソンと杭に及ぼす影響を把握する必要がある。しかし、地盤の側方流動の発生メカニズムは十分には研究されておらず不明な点も多い。

ケーソン岸壁の被災原因を明らかにするために、菅野ら⁴⁾は今回の兵庫県南部地震におけるケーソン岸壁の被災を1g場の振動台実験により検討している。しかし、この模型振動実験は実地盤に比較して

非常に小さい拘束応力下での実験である。実地盤の拘束圧に近い遠心力場の振動実験により、ケーソン岸壁の液状化時の耐震性を検討したものとしてX.Zeng⁵⁾の研究があるが、剛体土槽を用いていること、間隙流体に水を用いているため、実地盤の液状化現象を必ずしも再現できていないと思われる。また、ケーソン背後地盤の側方流動による杭基礎の被害については、模型実験による実証的検討がほとんどなされていない。

このような背景から、液状化に伴う側方流動によるケーソン岸壁および水際線近傍における杭基礎の被害原因について検討するため、せん断土槽を用い相似則を満足させた遠心力場の液状化実験を行った。

2. 遠心模型実験の概要

(1) 遠心力場の振動実験装置およびせん断土槽

遠心力場の振動実験装置⁶⁾の仕様は、振動台設置時の有効回転半径3.11m、テーブルサイズは950×650mm、遠心加速度50g場で最大搭載質量300kgである。加振能力は、正弦波スイープ加振により周波数を50~350Hzの範囲で連続的に変化させた場合の

Key Words : centrifuge test, liquefaction, caisson
type quay wall, pile foundation

* 技術研究所 地下技術研究部, 03-3820-5521

** 土木本部 土木設計一部, 03-5441-0591

最大加振加速度は5gで、ランダム波加振の場合は最大加振加速度10gである。

せん断土槽は、高さ26mm、幅40mm、厚さ1.2mmの長方形中空スチール角パイプを14段積み重ねたもので、各々の角パイプ間には厚さ2mmの平型ベアリングを設置している。土槽の内寸法は、長さ77cm(加振方向)、幅47.5cm、深さ37cmである。

(2) ケーソン岸壁および構造物の模型

ケーソンおよび杭を有する構造物の模型は図-1に示すとおりであり、実物との縮尺比は1/30を想定している。ケーソン模型は、高さ15cm・幅10cmの中空の剛体鉄箱で、比重は約2.1であり実際の重力式ケーソンと同程度にした。また、基礎捨石として小砂利を高さ20mmで敷き詰めた。

構造物模型は、一質点系のせん断変形が卓越するようにモデル化し、構造物の減衰定数は約5%である。杭は、外径10mm、厚さ1mmのアルミニウム製で6本設置している。

(3) 模型地盤

海底地盤および裏込め地盤には同じ砂を用い、その平均粒径が約0.09mmの珪砂8号、ケーソン下部の基礎捨石は小砂利で平均粒径は約6.0mm、海底地盤下部の支持地盤は珪砂3号で平均粒径は約1.5mmである。模型地盤は、最初に海底地盤に相当する水平地盤を空中落下法により相対密度40%で作成し、土槽全体を真空容器に入れ模型地盤の間隙を真空にした後、約15時間かけてせん断土槽の底部から間隙流体をいれて飽和させた。透水性の相似則を満足させるため間隙流体には水の約30倍の粘性を持つシリコンオイルを使用している。次に、大気中で基礎捨石およびケーソンを設置し、裏込め地盤を乾燥状態で作製した。その後、海に相当する部分にシリコンオイルを入れ、30gの遠心力場で浸透により裏込め地盤を飽和させた。

兵庫県南部地震で被災した実際のケーソン岸壁の多くは、基礎捨石の下の海底地盤は逆台形に海底粘土を掘削し、置換砂で埋戻しされていたが、本実験では条件を単純化するため水平液状化層とした。

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
	Height	H	$1/\lambda$	m	4.5	0.15
Cason	Thickness	L	$1/\lambda$	m	3.0	0.1
	Density	ρ_t	1	g/cm ³	2.1	2.1
Pile	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^{-4} (2.0×10^{-4})
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	σ	λ	g	0.35	10.5	

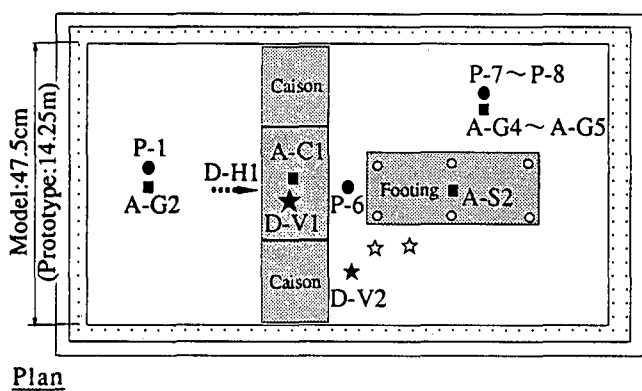
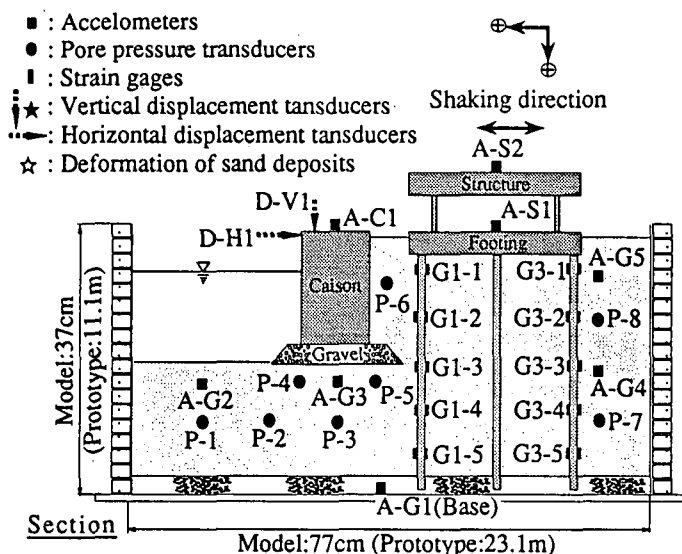
(4) 相似則

実験に用いた相似則の一覧を表-1に示す。実験で想定したケーソンのサイズは高さ4.5m、幅3.0mである。これは、阪神地区の人工島や埠頭に設置されていた実際のケーソンよりもかなり小さい。以後に示す時刻歴および変形図の数値は、相似則により実物に換算して表示する。

(5) 計器配置および加振

計測位置の詳細は、図-1に示す通りである。計測は、地盤内、構造物、ケーソンに加速度計を設置し、地盤内に間隙水圧計を埋設した。構造物の加速度応答を把握するため構造物天端およびフーチングに加速度計を、杭の曲げひずみを測定するために杭の両面にひずみゲージを貼った。また、ケーソンの水平・垂直変位、および地盤の垂直変位の測定のため、非接触のレーザー変位計を設置した。レーザー変位計は、遠心装置本体に固定している。液状化による深度方向の地盤変位分布を把握するため、地盤内に鉛直にチェーンを設置している。

加振は、遠心加速度30gにおいて実地盤換算で入力加速度約380ガル、繰返し回数30回、2Hzのサイン波である。



Plan

図-1 試験体および計器配置

3. 実験結果と考察

(1) ケーソンおよび地盤の液状化時の挙動

裏込め地盤(A-G4)・ケーソン下部地盤(A-G3)・海底地盤(A-G2)および支持地盤(A-G1)の加速度時刻歴を図-2に示す。また、海底地盤(P-2)・ケーソン下部(P-3)・ケーソン背面(P-6)および裏込め地盤G.L.-2.1m(P-8)における過剰間隙水圧の時刻歴を図-3に示す。地盤の加速度応答は何れも支持地盤への入力加速度よりも小さく、完全な液状化に至っていないが、過剰間隙水圧の上昇により地盤の剛性はかなり低下している。図-3から判断すると、加振中に海底地盤や裏込め地盤は液状化が発生しているが、ケーソン下部地盤は液状化していない。ケーソン下部の地盤では海底地盤の過剰間隙水圧が上昇した後に低下する傾向がみられる。この原因は、海底地盤の剛性低下によってケーソン下部の地盤に大きなせん断変形が生じ、これによって正のダ

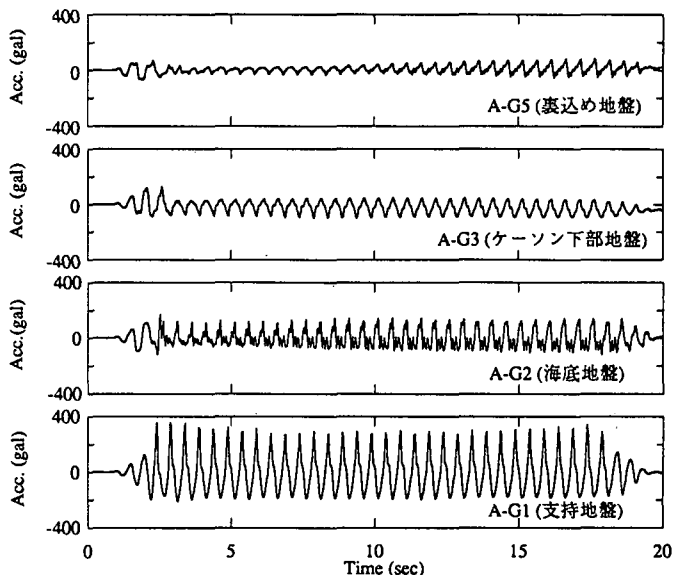


図-2 地盤加速度の時刻歴

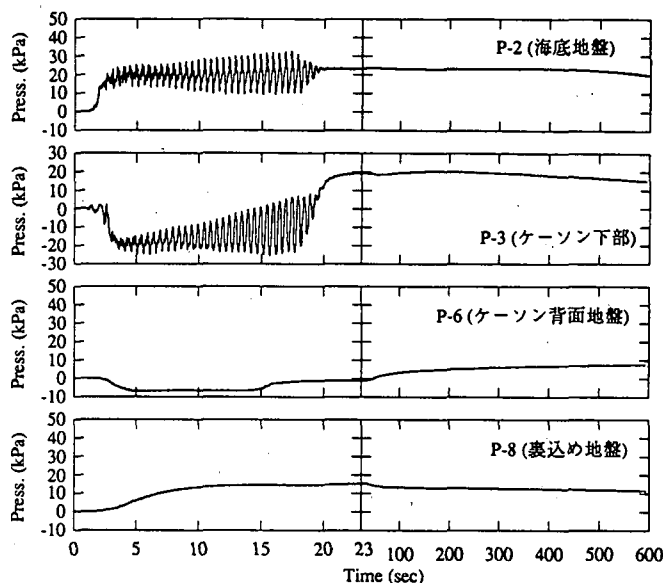


図-3 過剰間隙水圧の時刻歴

イレイタンスーが発生するためであると考えられる。ケーソンの水平変位に伴い、ケーソン背面地盤にもせん断変形が発生し、ケーソン下部地盤と同様に過剰間隙水圧の低下がみられる。

図-4はケーソン水平(D-H1)と鉛直(D-V1)の変位の時刻歴を示したものである。ケーソンは、振動回数の増加に伴って徐々に水平方向に移動し、時刻19秒の加振終了後には水平変位は約600mm、沈下は約200mm生じている。図-4に示すケーソン変位は、地盤とケーソンの加速度応答および加振の繰返し回数に依存するため、実現象との定量的な比較は困難である。

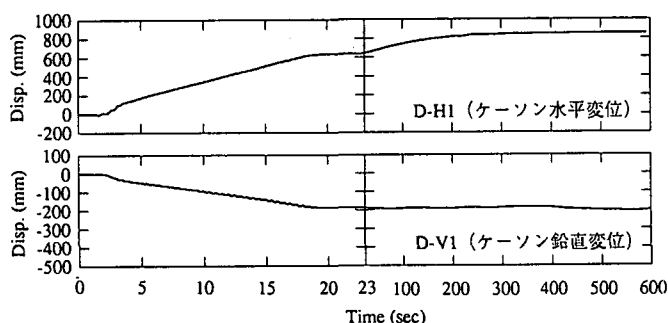


図-4 ケーソン水平および鉛直変位の時刻歴

ここでは、ケーソンの水平変位の原因を検討する。図-5はケーソンの水平変位、ケーソン背面地盤の過剰間隙水圧、ケーソン加速度、支持地盤の時刻歴を示すものである。図-6は同様の試験体を作成し、約470ガルの加振加速度で行った実験結果を示している。この実験では、地盤全体に液状化が発生してケーソンの加速度応答が非常に小さくなっている。図-5ではケーソンの加速度応答が継続している間に、ケーソン水平変位は増加して続けている。この時、ケーソン背後地盤の過剰間隙水圧は低下している。一方、図-6では時刻6~9秒に液状化によりケーソンの加速度応答が低下し、これに対応してケーソン水平変位の増加が小さくなっている。この時、ケーソン背後地盤の過剰間隙水圧は上昇し続けている。図-5,6の結果から、ケーソンの水平変位を発生させた主要因は、ケーソン背後地盤の過剰間隙水圧の上昇による側圧増加よりも、ケーソンの慣性力により蓄積されるケーソン下部地盤の繰返しせん断変形のほうが支配的であることが分かる。

(2) 地盤およびケーソンの残留変形

図-7は実験終了後の試験体の写真であり、図-8はその際のケーソンの水平変位・沈下、地表および地中地盤の変形である。図中の波線は実験開始前であり、実線が実験終了後の形状である。地盤内部の変形は、鉛直に設置したチェーンを実験終了後に掘り出し、地盤内の残留変形を測定したものである。図-7に見られるように、ケーソン背後地盤の地表面には水際線と平行にクワックが生じ、ケーソン背面の地盤が約0.8m沈下しているが、この様子は

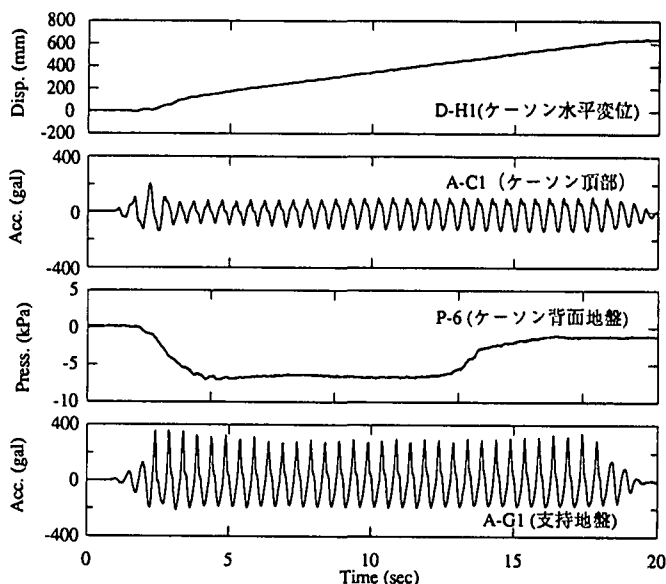


図-5 ケーソン水平変位および加速度と背面地盤の過剰間隙水圧の時刻歴(加振加速度: 約380ガル)

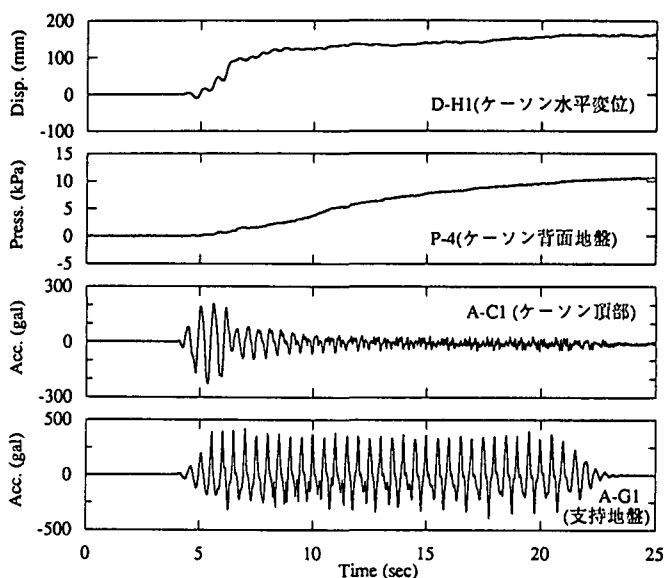


図-6 ケーソン水平変位および加速度と背面地盤の過剰間隙水圧の時刻歴(加振加速度: 約470ガル)

兵庫県南部地震において実際の護岸近くに発生した被害状況¹⁾と類似している。図-8において、ケーソン前方の海底地盤が隆起しているのが特徴的であり、特に注目する点はケーソン下部地盤の水平変位量が多いことである。このことは、ケーソン前方の海底地盤の液状化によりケーソン下の地盤が海底地盤の方へ大きく変形したことを示している。

本実験結果を基にケーソンおよび裏込め地盤の被害原因をまとめると、次のようになる。

- ①ケーソン水平変位：ケーソン背面地盤の側圧上昇よりも、海底地盤の液状化したに伴うケーソンの

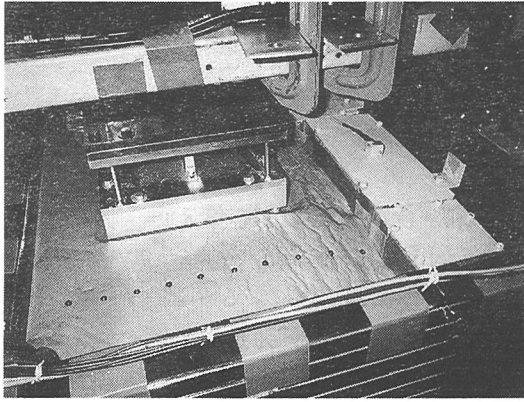


図-7 実験終了後の試験体

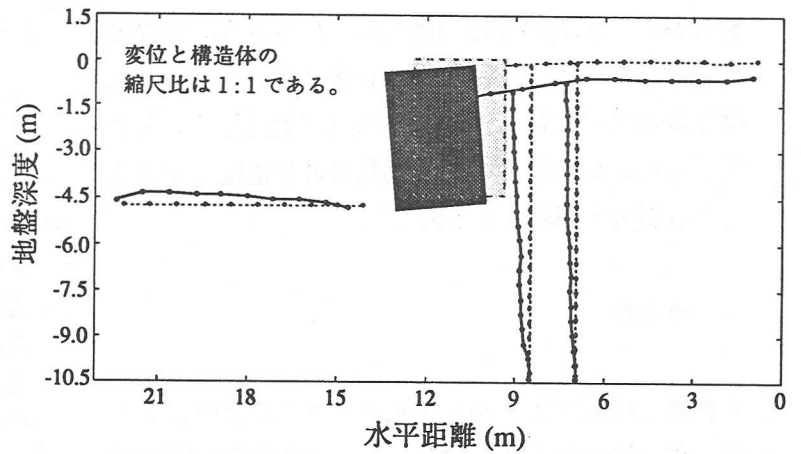


図-8 実験終了後のケーソンおよび地盤の変形

慣性力による下部地盤のせん断変形のほうが支配的である。

②ケーソン沈下：海底地盤の液状化によりケーソン下地盤の支持力が低下したために発生した現象である。

③ケーソン傾斜：基礎地盤の支持力低下によるケーソンのロッキング振動が主要因である。

なお、図-3、4には加振後における地盤の過剰間隙水圧およびケーソンの変位の時刻歴も示している。加振終了後に生じるケーソン水平変位は本実験の場合、加振時に生じた変形に比べ約200mmと小さい。このように、本実験では加振終了後に生じる地盤変形をある程度再現できたが、模型実験は限られた箱の内部だけで発生する液状化現象であるため、境界の影響があり、実現象との定量的な比較は困難である。

以上のように、実験結果は兵庫県南部地震においてケーソン岸壁に発生した水平変位・沈下や背後地盤の被災状況を、定性的には良く再現していると考えられる。

(3) 杭基礎および側方流動による杭ひずみ

構造物頂部(A-S1)、フーチング(A-S2)の加速度時刻歴を図-9に示す。過剰間隙水圧の上昇により地盤の剛性が低下したため構造物およびフーチングの応答は著しく減少している。杭頭部の曲げひずみの振動成分は、構造物の加速度に対応している。

加振中と加振後における杭の曲げひずみ分布を

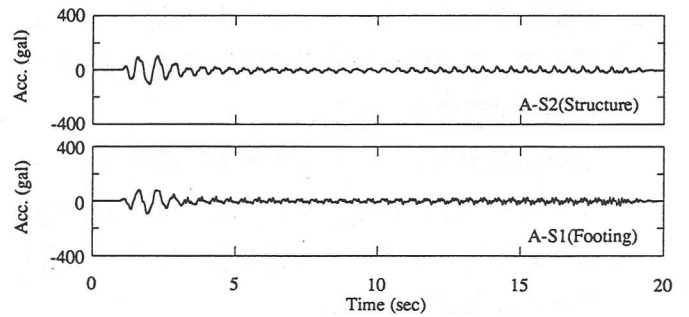


図-9 構造物およびフーチング加速度の時刻歴

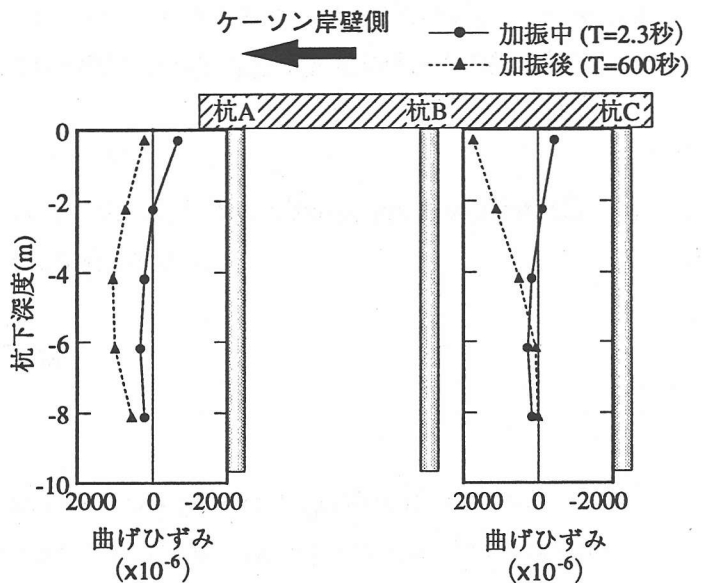


図-10 加振中と加振後における杭の曲げひずみ分布

図-10に示す。注目すべき点は、加振後では杭Aでは杭中間部に、杭Cでは杭頭部に地盤の変形に対応した曲げひずみが発生していることである。このような曲げひずみに対応する杭の被害状況は、今回の地

震において水際線近傍の杭基礎に見られる。加振後の曲げひずみは、図-8に見られるようにケーソン地盤下部の水平変位に伴う側方流動に起因していると考えられ、杭は地盤の側方流動により杭頭のみでなく中間部でも損傷すると言える。

4. まとめ

液状化現象により甚大な被害の生じたケーソン岸壁と構造物の杭基礎に対し、遠心力場の振動実験により被害原因を検討した結果、以下のような点を明らかにすることができた。

- 1) 実験結果におけるケーソンの水平変位・沈下の状況は、兵庫県南部地震の被害状況と定性的には良く再現できている。
- 2) 実験結果から、ケーソン水平変位の原因はケーソン背面地盤の側圧上昇よりも、ケーソン慣性力による下部地盤のせん断変形のほうが支配的であることが分かった。
- 3) 加振終了後に生じる地盤変形に伴う杭の変形は実際の杭基礎の被害を再現できている。
- 4) ケーソン近傍に構築された杭基礎は、ケーソン下部地盤による側方流動現象に伴い、杭頭部だけでなく中間部でも損傷する。

参考文献

- 1) 上部達生：阪神・淡路大震災特集-第1回- 兵庫県南部地震による港湾施設等の被害, 土木学会誌, pp.6-10, 1995年6月
- 2) 井合進：阪神・淡路大震災特集-第3回- ケーソン式岸壁の被害の特徴, 土木学会誌, pp.46-49, 1995年4月
- 3) 嘉門雅史：兵庫県南部地震によるウォーターフロントの被害, 第30回土質工学研究発表会 特別セッション阪神大震災調査報告-都市直下型地震と地盤工学的諸問題-, 社団法人地盤工学会, pp.25-36, 1995年7月
- 4) 菅野孝弘, 三藤正明, 稲富隆昌：(67)兵庫県南部地震により被災したケーソン式岸壁に関する実験的研究, 土木学会第23回地震工学研究発表会講演概要, pp.257-260, 1995年7月
- 5) X. Zeng (1994) : Seismic response of gravity type quay wall, Proceedings of The International Conference Centrifuge 94, Singapore, pp.191-196.
- 6) M. Sato (1994) : A new dynamic geotechnical centrifuge and performance of shaking table tests, Proceedings of The International Conference Centrifuge 94, Singapore, pp.157-162.

Centrifuge Reproduction of Seismic Liquefaction Damage to Caisson Type Quay Wall and Its Neighboring Pile Foundation

Masayoshi SATO, Yasuhiro SHAMOTO, Shigeru GOTO,
Yutaka KATSURA and Hiroyuki KIMATA

Dynamic centrifuge modeling has been conducted to reproduce the liquefaction damage behavior of caisson type quay wall and its neighboring pile foundation. The model including a gravity type wall, a 2 x 3 piles supported structure and a saturated sand deposit was constructed in a larger laminar container. The test results show that the (1) lateral deformation and settlements of the model are qualitatively consistent with the actual damage behavior observed in the field during the 1995 Hyogoken Nanbu earthquake; (2) the reason resulting in lateral deformation of the caisson is attributed to large shear deformation of the soil deposits beneath it; and (3) piles near the quay wall are likely to be damaged not only at their heads, but also at their medium parts when large lateral deformation of the caisson occurs.