

ケーソン式岸壁の入力地震力による動的挙動とそのメカニズムの一考察

Study on Effect of Input Motion on The Behavior of Caisson Quay Wall

濱田 純次*、宮田 正史**、菅野 高弘***

Junji HAMADA, Masafumi MIYATA and Takahiro SUGANO

* 工修	運輸省港湾技術研究所構造部	研修生	(〒 239 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)
** 工修	同	上	研究官 (同 上)
*** 工博	同	上	構造振動研究室室長 (同 上)

The underwater shaking table test was carried out to investigate the seismic response of caisson type quay wall. As the results, it can be seen that the phase of the inertia force of the caisson and the earth pressure are reversed depending on the characteristics of input seismic wave. And also, the frequency 2 or 3 times as high as the incident sinusoidal waves was included at the acceleration response of the caisson. The friction force in between quay wall bottom and mound rubble, the force due to passive earth pressure during earthquake was calculated from experimental data, and the influence of the incident acceleration was analyzed. The simple 2 mass - spring model and these experimental data make it clear that the proper oscillation of the ground is important to decide the response of the caisson and bottom friction force.

Key Words: seismic response analysis, underwater seismic experiment, phase

1. はじめに

重力式岸壁の代表であるケーソン式岸壁の耐震設計は、通常、震度法により行われており、このときの地震時土圧は、物部¹⁾、岡部²⁾が提案した式が用いられており、ケーソン慣性力と地震時土圧を同位相と考えている。また、野田ら³⁾はケーソン式岸壁を対象とし、震度法に適應させた場合のケーソンに作用する慣性力を、被災事例をもとに適切に見積もっており設計に活かされている。

しかし、既往の実験によると地震時土圧分布が深度方向には必ずしも大きくなり、中央部分や上部で大きくなる結果が得られ^{4) 5) 6)}、ケーソン慣性力と地震時土圧の位相に関しても同位相とは限っていない^{6) 7) 8)}。乾燥砂での風間ら⁶⁾の実験では、ケーソン慣性力と地震時土圧が逆位相となっており、小濱ら⁸⁾は、地盤が液状化すると同位相に変化することを実験により確認している。このことは、地震時のケーソンの動揺メカニズムは、設計とは全く異なっている可能性を示している。

ケーソン背後地盤が乾燥砂で無い場合は、地盤のせん断剛性が入力地震動の大きさにより大きく変化し、その剛性がケーソン慣性力と背面地盤反力との位相に影響してくる。また、入力地震動が大きくなると非線形性の影響が大きくなって来るものと思わ

れる。ケーソン慣性力と背面地盤反力との位相差は、ケーソン底面に働く摩擦力に大きく影響し、すなわちケーソンの滑動の有無に効いてくる。

本研究では、ケーソン式岸壁を対象にし、水中振動台を用いた模型振動実験を行った。正弦波入力地震力を変化させた実験を行い、入力レベルの増加によるケーソンの動特性の変化を調べ、ケーソン及び地盤の応答の特徴を明らかにした。また、ケーソンと地盤を簡単なバネ-質点系モデルと想定し、実験データより地盤のせん断バネ定数、ケーソン背面バネ定数及び底面摩擦の推定を入力加速度別に行った。更に、同モデルにより、地盤の固有周期、ケーソンの固有周期、入力地震波周期、ケーソンと背後地盤間の反力バネによるケーソンの動特性を示し、実験から得られた定数等を用い、入力加速度レベルの増加によるケーソン慣性力と背後地盤反力との位相の逆転現象のメカニズムを明らかにした。

2. 振動実験

本実験は、ケーソンに作用する慣性力、地震時土圧、底面摩擦力の特性を調べるため実施した風間ら⁶⁾、菅野ら⁹⁾の模型と同様に荷重板が底面と背面に取り付けられた模型を用い、ケーソンと地盤間の荷重、ケーソンの慣性力、地盤の慣性力、動水圧、土圧、

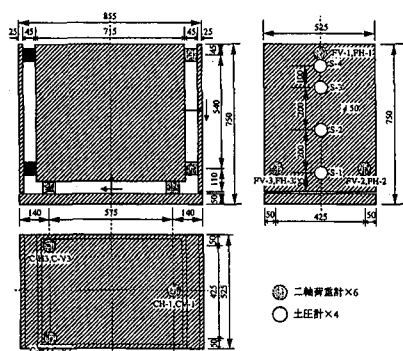


図1 模型の緒元

間隙水圧、変位を測定した。

2.1 実験模型

模型振動実験には、大型水中振動台を用い、設計震度0.25相当の12.7mケーソン式岸壁を1/22縮尺した模型を用いた。模型の緒元は図1の通りである。

2.2 実験条件

実験は、入力加速度を100Gal、200Gal、400Gal、600Gal、800Galの5段階に変えて行った。各ケースとも模型、地盤はすべて同じもので、まず最初に100Galで加震し、順に加速度レベルを上げていった。入力波はすべて振動数10Hzの正弦波を20波とし、水平方向加震を行った。これは井合¹⁾の相似則によると、実規模で約1Hzに相当する。支持地盤は堅固な地盤、裏込は締固め砂（絶乾相馬砂を気中で足踏みにより締固め、水位をゆっくり上げた飽和地盤）、基礎捨石マウンドは碎石4号を用いた。また、ケーソン底面には、摩擦係数0.7となるよう摩擦増大マットが設置してある。図2に実験断面図と計器の取り付け位置を示す。

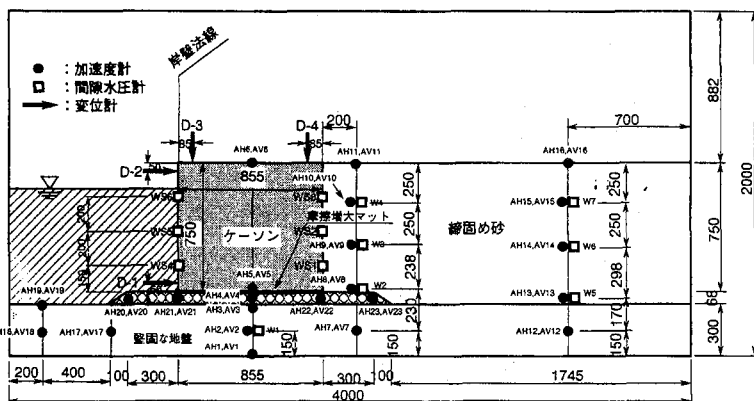
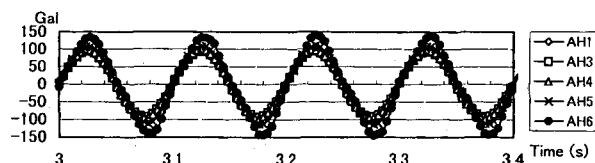
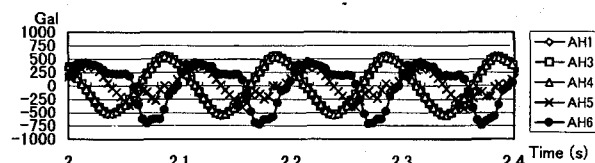


図2 実験断面図と計測位置



a) 入力加速度 100Gal 時



b) 入力加速度 600Gal 時

図3 ケーソン中心列での応答加速度

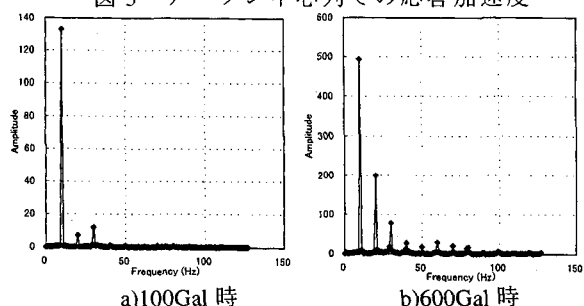


図4 ケーソン上端の応答加速度スペクトル

3. 実験結果

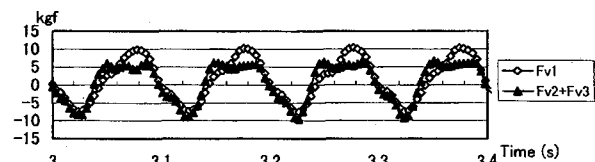
以下に得られた結果の一部を示す。

3.1 加速度応答

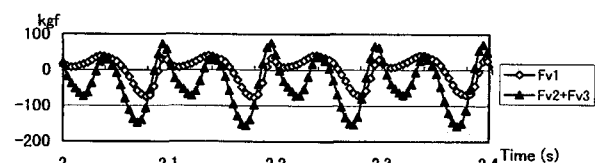
図3a), b)に100Gal、600Gal時のケーソン中心列での水平応答加速度を示す。また、図4a), b)にケーソン上端の応答加速度スペクトルを示す。入力加速度を大きくしていくと非線形応答により応答が高振動数側にシフトし、2倍、3倍振動数の波が含まれてき、最大応答加速度値より入力振動数成分の振幅値は小さくなっている。

3.2 ケーソンに働く土圧の応答

図5にケーソン背面の土圧合力($Fv1$ 、 $Fv2+Fv3$)、図6にケーソン底面での地盤反力($Cv1$ 、 $Cv2+Cv3$)を示す。ここで、圧縮が負である。入力加速度の増加に伴い、背面の上下及び、下面の左右で位相が異なり、ケーソンのロッキングがより顕著に見られる。また、加速度値と同様に非線形性が強くなってくる。

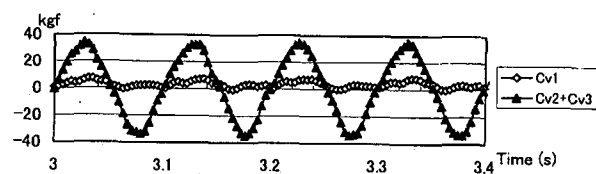


a) 入力加速度 100Gal 時

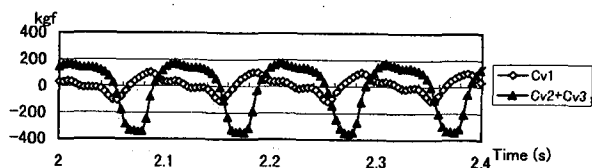


b) 入力加速度 600Gal 時

図5 ケーソン背面土圧合力



a) 入力加速度 100Gal 時



b) 入力加速度 600Gal 時

図 6 ケーソン底面反力

3.3 間隙水圧

本実験では、背後地盤を締め固めているためすべての入力加速度において完全液状化には達していないが、200Gal 以下と 400Gal 以上とでは過剰間隙水圧の大きさが大きく異なっている（図 7）。ここでの過剰間隙水圧は加振中の最大値である。また、過剰間隙水圧比に換算すると W3 で次のようであった。100Gal 時 0.01、200Gal 時 0.04、400Gal 時 0.31、600Gal 時 0.36、800Gal 時 0.29。これより、有効応力が 400Gal 以上では幾分低下していると考えられる。

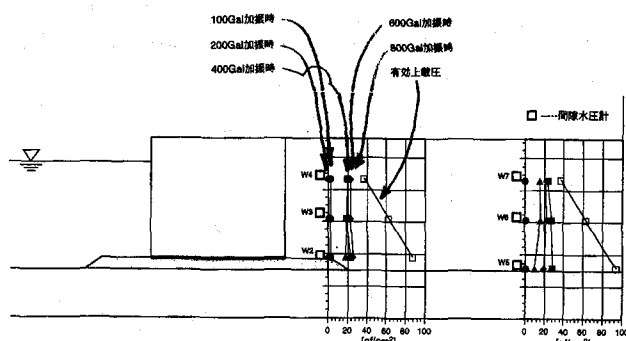


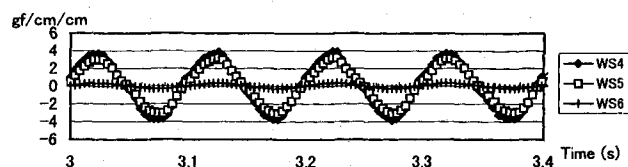
図 7 過剰間隙水圧

3.4 動水圧

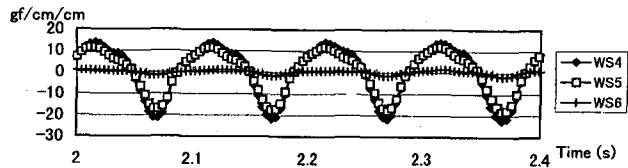
動水圧は、ケーソンの海側面では、ケーソンの慣性力と同一方向の力が作用するが、ケーソンの陸側面では地盤の影響のため、ケーソンの慣性力と反対方向の力が作用していた。図 8 に図 3 の加速度に相当する動水圧を示す。動水圧は計測用ケーソンの両側に設置したダミーケーソンにより測定した。

3.5 変形特性

ケーソンの前面の上下と天端面の前後の 4 ケ所に変位計が取り付けられている。図 9 にケーソンの水平変位（陸側変位を正）を示す。入力加速度の増加により残留変位（残差変位）を生じながら海側にはらみ出しているのが分かる。

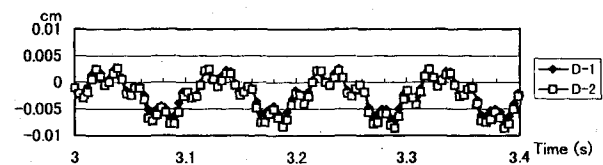


a) 入力加速度 100Gal 時

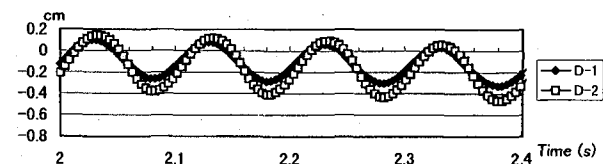


b) 入力加速度 600Gal 時

図 8 ケーソン前面での動水圧



a) 入力加速度 100Gal 時



b) 入力加速度 600Gal 時

図 9 ケーソンの水平変位

4. データ処理および解析

得られた実験データを組み合わせ、荷重の釣合いや地盤せん断剛性、地盤反力、ケーソンの非線形応答性等を調べた。

4.1 荷重の釣合い

まず、荷重計、加速度計、動水圧計より測定されたデータを用い、力の釣合いを検討した。ここでは、水平方向の釣合いのみを示す。図 10 に定常状態でケーソン慣性力が最も海側に作用した状態と最も陸側に作用した状態の力の配分を示す。ケーソンの変形は見やすいよう拡大して示してある。表 1 に各荷重値と釣合いからの偏位（誤差）をまとめた。荷重値はすべて陸側方向ベクトルを正とした。

ケーソンに作用する荷重は荷重計値から荷重板の慣性力を差し引いた値となり、この時の荷重板の加速度は、ケーソン自身の応答加速度と等しいものとした。また、荷重板とケーソン本体との間に水が含まれているがこの隙間は小さいため動水圧も小さいとし、無視した。

水平力の釣合い図より、100Gal、200Gal ではケーソンの慣性力の方向と背面地震時土圧の方向が反対方向であるが、400Gal 以上になると同一方向に作用

している。この原因については後に詳しく述べる。ここでいう背面地震時土圧は荷重板で測定されており、背面に作用する動水圧も含んでいる。

また、400Gal 以上ではケーソン慣性力が陸側に作用したときのせん断力が約 170kgf で頭打ちとなっているが、これはケーソン背面土圧がケーソンの陸側への動きを止めるように働いているためである。つまり、400Gal 以上では、ケーソン慣性力が海側に作用するときには地震時土圧も海側に作用し、陸側に作用するときには一度、地震時土圧も陸側へ引く張るように作用するが、最もケーソン慣性力が陸側に作用した時にはケーソンの動きを止めるように働いている。

次に入力加速度レベルによる背面土圧合力とケーソン慣性力の位相の相違を定量的に調べた。表 2 に土圧合力、ケーソン水平慣性力のフーリエスペクトルにより求めた入力振動数成分の力の関係を示す。ここで F_P : 背面土圧合力、 F_I : ケーソン慣性力 + 動水圧、 F_F : 底面摩擦力である。図 10 で見られるように、 F_P/F_I の位相は 200Gal と 400Gal で大きく変化しているものの、完全には 400Gal で同位相になっておらず、入力加速度の増加に伴い、徐々に同位相に近づいている。一方、 F_F/F_I は、すべての加速度レベルに対してほぼ逆位相であった。

表 1 荷重釣合い

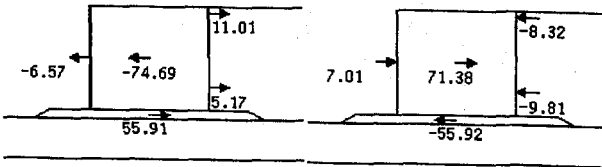
荷重項目	100Gal 時		600Gal 時	
	海側へ	陸側へ	海側へ	陸側へ
慣性力	- 74.7	71.4	- 263.2	231.8
背面土圧	16.2	- 18.1	- 206.5	- 64.1
底面摩擦	55.9	- 55.9	375.3	- 151.8
動水圧	- 6.6	7.0	- 30.4	24.2
誤差	- 9.2	4.4	- 124.8	40.1

unit : kgf

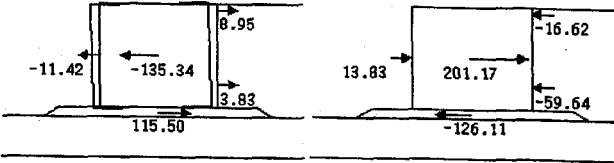
表 2 F_P/F_I 、 F_F/F_I の関係

Gal	F_P/F_I	F_P/F_I の 位 相	F_F/F_I	F_F/F_I の 位 相
100	0.206	167.2	0.664	173.7
200	0.199	- 176.1	0.657	172.5
400	0.157	- 33.8	0.897	172.4
600	0.261	18.4	0.961	- 177.7
800	0.243	14.9	0.922	- 179.5

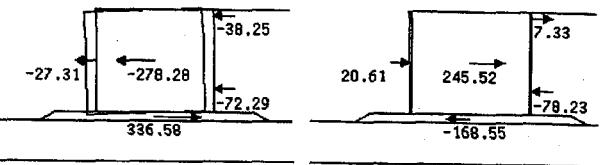
unit: phase (deg)



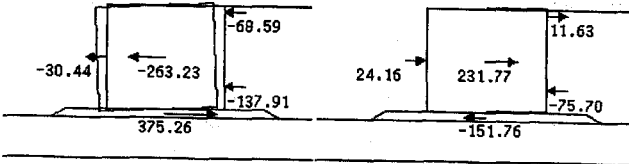
a) 100Gal 時 (変位 100 倍表示)



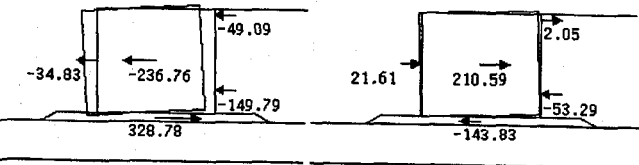
b) 200Gal 時 (変位 100 倍表示)



c) 400Gal 時 (変位 20 倍表示)



d) 600Gal 時 (変位 20 倍表示)



e) 800Gal 時 (変位 20 倍表示)

図 10 荷重釣合い図 (左: ケーソン慣性力が海側に作用した状態、右: 慣性力が陸側に作用した状態)

4.2 地盤のせん断剛性

背後地盤の加速度計 (AH12 ~ 16) より得られた地盤各層の加速度データをフーリエ解析し、入力振動数成分 (10Hz) のみを用いて地盤のせん断バネ定数を見積もった。加速度計の設置してある周辺の地盤を質点 (m_j) で置き換え、各質点間の剛性はバネ (k_j) とダッシュポッド (c_j) でモデル化した (図 11)。入力波を $ae^{-i\omega t}$ とおき、各 j 層での応答を $b_j e^{-i\omega t}$ とすると、解く運動方程式は式 (1) となり各振動数毎の複素バネ定数 ($k_j - i\omega c_j$) が求まる。ここで $i = \sqrt{-1}$ 、 ω : 角振動数、 t : 時間である。各質点の地盤質量は、地盤を適当に各層に分割し、層厚と各地盤の単

位体積重量より見積もった。計算に用いた各点の複素振幅値を図 12 に示す。これらの図より、100Gal 時での応答には入力と地表面の応答にあまり位相差が見られないが、入力加速度が増加するに連れて位相差が大きくなっているのがはっきりと見られる。今回のように正弦波を用いた実験では、この位相差が地盤内の減衰に相当し、減衰が無い場合は入力加速度の複素振幅値と原点を結んだ線上に各点の応答値が来る。

図 13 に複素バネ定数の絶対値を示す。この図より、入力加速度の増加に伴い、せん断剛性が著しく低下しているのがわかる。

$$\begin{pmatrix} a-b_1 & b_2-b_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_1-b_2 & b_3-b_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_2-b_3 & b_4-b_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_3-b_4 & b_5-b_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_4-b_5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_1-i\omega c_1 \\ k_2-i\omega c_2 \\ k_3-i\omega c_3 \\ k_4-i\omega c_4 \\ k_5-i\omega c_5 \end{pmatrix} = -\omega^2 \begin{pmatrix} m_1 b_1 \\ m_2 b_2 \\ m_3 b_3 \\ m_4 b_4 \\ m_5 b_5 \end{pmatrix} \quad (1)$$

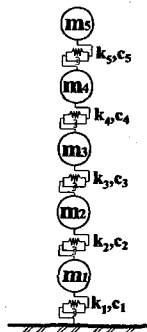


図 11 地盤のマス・バネモデル

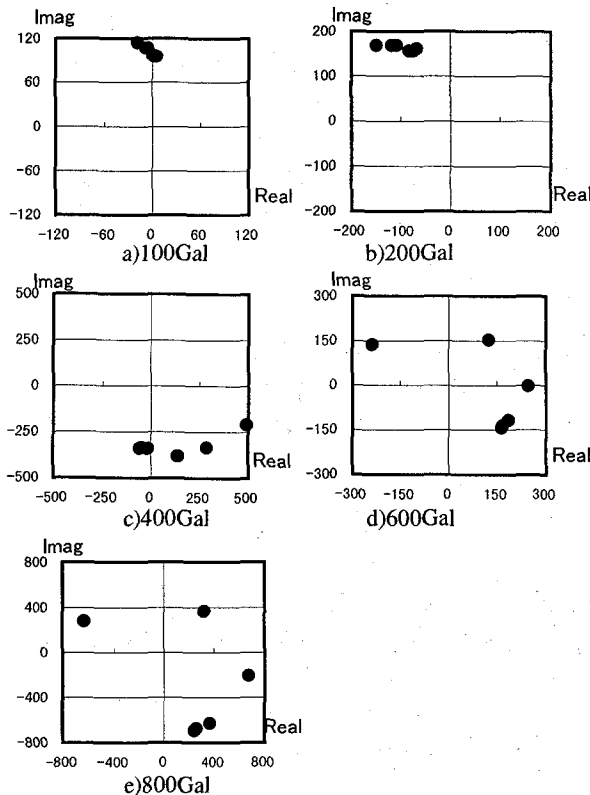


図 12 各質点の複素振幅値

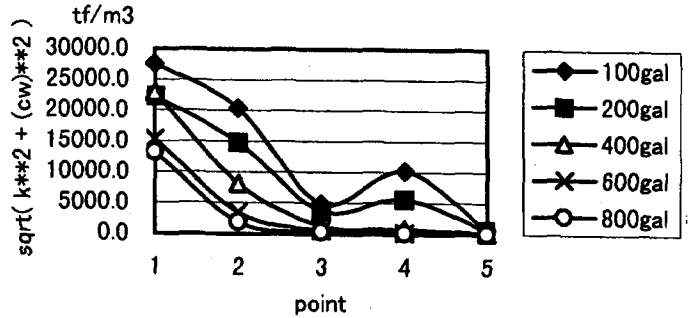


図 13 地盤せん断複素バネ定数

4.3 ケーソン背面の地震時バネ定数

ケーソン及び背後地盤の加速度計、背面荷重板の荷重計、それと荷重板の慣性力を考慮して地盤反力バネ定数を求めた。得られた加速度データ (AH5, AH6, AH8, AH11) より低振動数成分をカットし、変位データに変換し、ケーソンと背面地盤との相対変位を計算する。そして荷重計の値から荷重板の慣性力を考慮して実際にケーソンと土との間に作用している荷重を推定し、それを相対変位で除すれば地震時バネ定数が計算される。

ところが、ケーソン、地盤とも残留変位を生じながら運動しており、この結果、ケーソン上方では入力加速度の増大と共に荷重値がわずかに引っ張り側にずれ、下方では圧縮側にずれてきている。

そこで、相対変位を計算したときと同様に荷重値も低振動数成分をカットしたものを用いて計算した。尚、ケーソンの変位または地盤荷重値は、上下の平均値をとり、水平運動成分を用いた。上の方法で算定したバネ定数の時系列を図 14 の - ◆ - に示す。減衰による位相差のため単純なバネ定数にはなっていないが入力加速度の違いによる大方のバネ定数が求まり、入力加速度の増加に伴い、バネ定数の低下が見られる。また、圧縮時と引っ張り時でバネ定数の傾向が 200Gal 以上では異なっている。

表 3 に荷重データ、相対変位データの加振振動数 (10Hz) 成分のフーリエスペクトルを用いて計算した $k = \text{real}(F/x)$, $c = -\text{imag}(F/x)/\omega$ を示す。ここで F : 作用した荷重、 x : 相対変位、 ω : 入力角振動数、 k : バネ定数、 c : 粘性減衰係数である。図 14 から推測したバネ定数と概ね一致している。400Gal 以上でバネ定数が負になっているが、これは、ケーソン背面の上方と下方で位相が異なる為である。つまり、上方で引っ張り、下方で圧縮であれば、地表付近の地盤反力が小さい為に平均すると圧縮状態にある。しかし、相対変位は、ケーソン上方で引っ張りとなっており、バネ定数としては負になる。

4.4 ケーソン底面の摩擦バネ定数

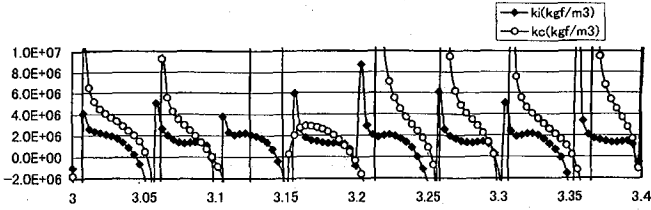
4.3と同様な方法で底面の摩擦バネ定数を推定した。図 14 の -○- に得られた摩擦バネ定数の時系列図を重ねて示す。背面バネ定数と同様、入力加速度の増加に伴い、バネ定数の低下が見られる。しかし、背面バネ定数と異なり、海側へケーソンが変位した時と陸側へ変位した時とでバネ定数の違いは見られない。

また、表 3 に 4.3 と同様な方法で得られた底面摩擦バネ定数と粘性減衰係数を示す。

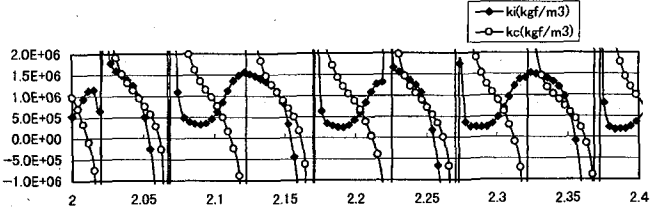
表 3 ケーソン背面反力バネと底面摩擦バネ

入力加速度	ケーソン背面反力		ケーソン底面摩擦	
	バネ定数	粘性減衰係数	バネ定数	粘性減衰係数
100Gal	1.5×10^6	8.9×10^3	3.1×10^6	3.1×10^4
200Gal	6.1×10^5	4.1×10^3	8.7×10^5	1.0×10^4
400Gal	-1.1×10^5	-4.1×10^5	3.6×10^5	4.5×10^3
600Gal	-2.9×10^5	3.1×10^3	3.0×10^5	3.1×10^3
800Gal	-1.7×10^5	1.1×10^3	2.2×10^5	2.3×10^3

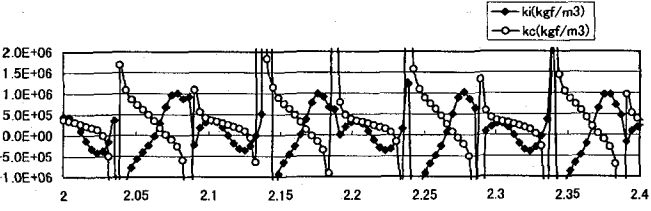
unit: k (kgf/m³), c (kgf/m³/s)



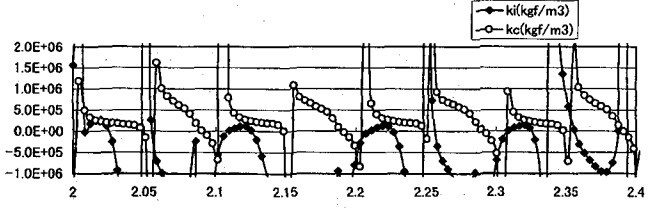
a) 入力加速度 100Gal 時



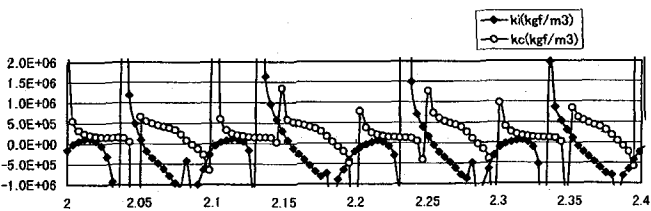
b) 入力加速度 200Gal 時



c) 入力加速度 400Gal 時



d) 入力加速度 600Gal 時



e) 入力加速度 800Gal 時

図 14 ケーソンの背面および底面地震時バネ定数

4.5 ケーソン応答加速度の非線形性

入力加速度の大きな場合、ケーソンの応答加速度には入力振動数成分の整数倍の振動数成分が含まれており、このときの応答波形を見ると上下非対称の波形（図 15）や、負から正への転換時に少し戻る現象（図 16）が見られる。

この原因を明らかにすべく、単純なテスト計算を行った。用いた方法は $F = m\ddot{x} + kx + c\dot{x}$ 式を差分展開し、外力 $F = A\sin(\omega t)$ に対しての応答 $\ddot{x}$ を求めた。

実際、ケーソンには外力が多点、多方向より作用しているが、ケーソンと入力基盤間のすべてのものをまとめてバネ定数（ k ）と粘性減衰係数（ c ）と置くと以上の仮定ができる。

図 17 に用いた k の特性と応答 $\ddot{x}$ を示す。上下非対称となる原因の一案として圧縮バネと引張バネの剛性が異なっている可能性が考えられる（図 17(a)）。戻りが生じる原因としては、滑り等のひずみに対してバネの働かない状態が考えられる（図 17(b)）。また、負から正への転換時のみに戻りが見られる原因は海側にケーソンが行くときと陸側にケーソンが行くときで応力経路が異なり、図 17(c) の様に考える事ができる。

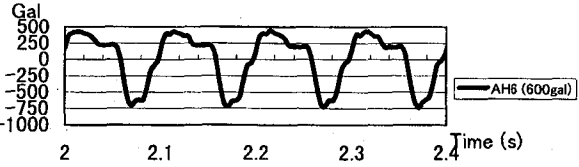


図 15 応答加速度（上下非対称波形）

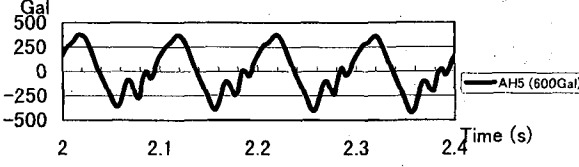


図 16 応答加速度（転換時、戻り波形）

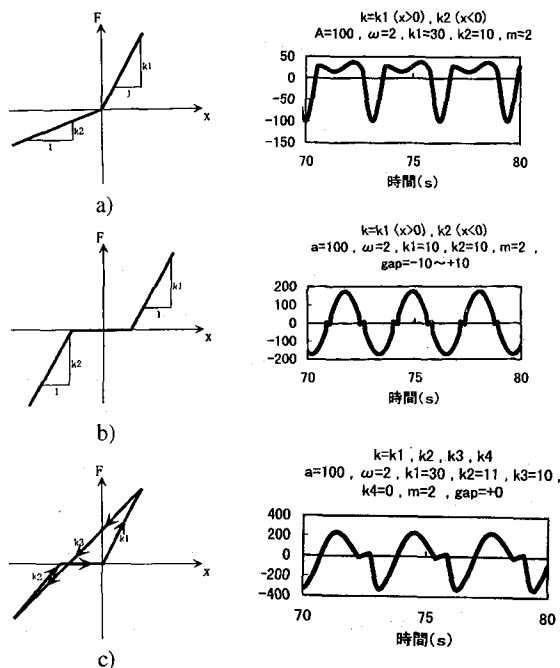


図 17 非線形バネとその時の応答加速度

4.6 動水圧

ケーソンの加速度計と動水圧計のデータを用いてケーソン海側前面の動水圧の検証を行った。まず、ポテンシャル理論¹¹⁾よりケーソンの動きと動水圧の関係を調べた。これによると、ケーソンの水平運動に関しては、設計で用いられている動水圧の推定式である Westergaard の簡略式と大方の一致を示している（図 18）。また、図 19 には、ケーソン中心周りに回転した時の動水圧を示しており、ケーソンのロッキング運動は殆ど動水圧に効いてこない事がわかる。従って、ケーソンの水平慣性力成分とポテンシャル理論からの係数を用いて動水圧を推定し、実験データと比較検討した。

その結果を図 20 に示す。100Gal, 600Gal 共、すべての地点で位相、振幅とも良く一致している。このことは、ケーソンの水平加速度データにより、ケーソンに作用する動水圧を十分な精度で見積もることができることを示している。

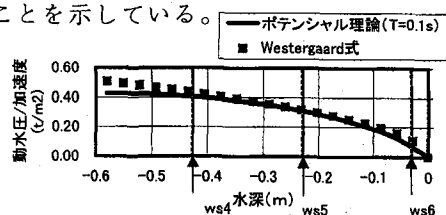


図 18 ケーソン水平運動による動水圧

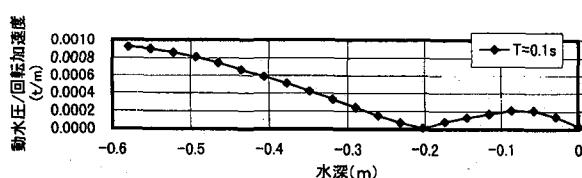
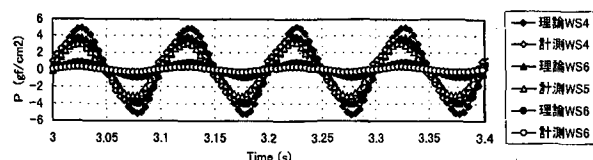
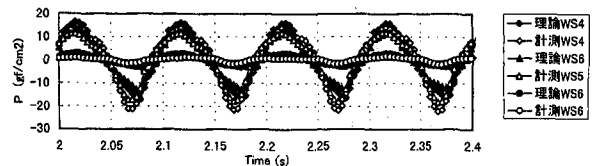


図 19 ケーソンロッキング運動による動水圧



a) 入力加速度 100Gal 時の動水圧



b) 入力加速度 600Gal 時の動水圧

図 20 動水圧の実験値と理論値の比較

5. 2 質点モデルによる理論解析

本章では、ケーソンの動特性を決定する要因を明確にする為、ケーソンの水平慣性力と背面の地震時土圧合力およびケーソン底面の摩擦力のみをモデル化できる最もシンプルなモデルを作成し、解析及び検討を行った。実際には、3.2 で示した通り、ケーソンはロッキング運動もしているが、ケーソン水平運動がいかなる力により釣り合っているかを調べることにした。

5.1 モデル化

図 21 に示すようにケーソン、背後地盤を各 1 質点でモデル化し、ケーソンの底面摩擦力、背面反力、地盤のせん断力をバネ、ダッシュポッドでモデル化した。運動方程式は下式の通りシンプルなものとした。

$$m_c \ddot{x} = k_c(x - X_c) + k_i(X_s - X_c) + c_i(\dot{x}' - \dot{X}_c') + c_i(X_s' - X_c') \quad (2)$$

$$m_s \ddot{x}_s = k_s(x - X_s) - k_i(X_s - X_c) + c_s(\dot{x}' - \dot{X}_s') - c_i(X_s' - X_c') \quad (3)$$

ここで m_c : ケーソンの質量、 m_s : 背後地盤の質量、 k_i : ケーソンと背後地盤間のバネ定数、 k_c : ケーソンと底面地盤間のせん断バネ定数、 k_s : 1 質点で置き換えたときの背後地盤のせん断バネ定数、 c_i , c_c , c_s はそれぞれに対応した粘性減衰係数である。 x は入力地盤の変位、 X_c , X_s はそれぞれケーソン、背後地盤の変位である。

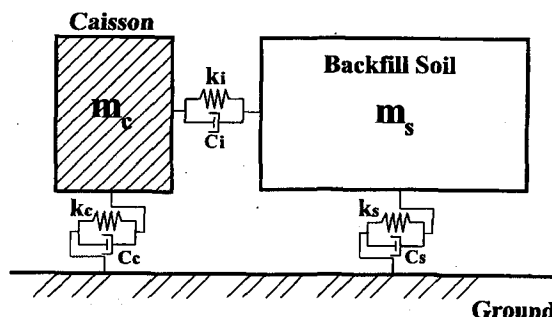


図 21 2 質点モデル

5.2 背面動土圧合力、底面摩擦力、慣性力の特徴

背面動土圧合力 (F_I)、底面摩擦力 (F_F)、ケーソン慣性力 (F_P) を式 (3), (4), (5) として導いた。ここで $F_I = -(F_F + F_P)$ であり、ケーソンに対して右方向の作用力を正とした。また、入力地震動を $ae^{-i\omega t}$ 、ケーソン、背後地盤の応答をそれぞれ $bce^{-i\omega t}$ 、 $b_e e^{-i\omega t}$ とした。背面動土圧合力と底面水平方向反力をそれぞれ慣性力で除したものを式 (6), (7) に示す。

$$F_I = \omega^2 b c e^{-i\omega t} m_c \quad (3)$$

$$F_F = -(b_c - a)(k_c - i\omega c_c)e^{-i\omega t} \quad (4)$$

$$F_P = -(b_c - b_s)(k_i - i\omega c_i)e^{-i\omega t} \quad (5)$$

$$F_F/F_I = \frac{-1}{m_c \omega^2} \left(1 - \frac{a}{b_c}\right) (k_c - i\omega c_c) \quad (6)$$

$$F_P/F_I = \frac{-1}{m_c \omega^2} \left(1 - \frac{b_s}{b_c}\right) (k_i - i\omega c_i) \quad (7)$$

ここで

$$\left(1 - \frac{a}{b_c}\right) = \frac{\begin{Bmatrix} (m_s k_i + m_c k_s + m_c k_i) \omega^2 \\ -i(m_s c_i + m_c c_s + m_c c_i) \omega^3 \\ -m_c m_s \omega^4 \end{Bmatrix}}{\{A - m_s k_c \omega^2 - i(B - m_s c_c \omega^3)\}}$$

$$\left(1 - \frac{b_s}{b_c}\right) = \frac{\begin{Bmatrix} (m_c k_s - m_s k_c) \omega^2 \\ +i(m_s c_c - m_c c_s) \omega^3 \end{Bmatrix}}{\{A - m_s k_c \omega^2 - i(B - m_s c_c \omega^3)\}}$$

$$A = (k_c k_s + k_i k_s + k_i k_c) - \omega^2 (c_c c_s + c_i c_s + c_i c_c)$$

$$B = \omega (k_s c_c + k_s c_i + k_c c_s + k_i c_s + k_i c_c + k_c c_i)$$

減衰のないときはそれぞれ式 (8), (9) となる。

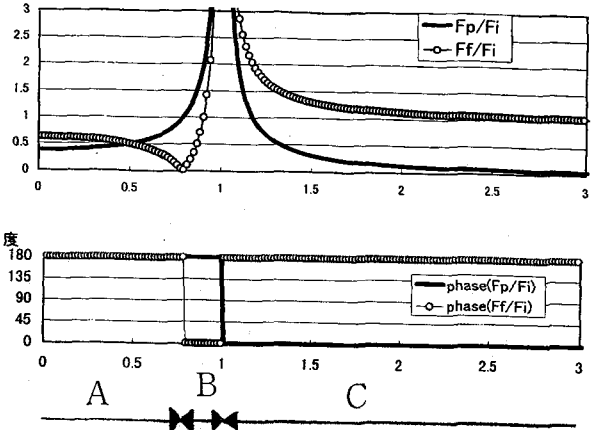
$$F_F/F_I = -\frac{m_s k_i k_c + m_c k_c (k_s + k_i) - m_c m_s k_c \omega^2}{m_c k_i k_s + m_c k_c (k_s + k_i) - m_c m_s k_c \omega^2} \quad (8)$$

$$F_P/F_I = -\frac{m_c k_i k_s - m_s k_i k_c}{m_c k_i k_s + m_c k_c (k_s + k_i) - m_c m_s k_c \omega^2} \quad (9)$$

以上の式より、地盤はケーソンの動きによる影響がないとすると、地盤の固有周期 (T_s) がケーソンの固有周期 (T_c) より短い時と長い時でケーソンの動特性が異なる。地盤が堅い場合 ($T_s < T_c$)、入力地震波角振動数 (ω) が地盤の固有角振動数 (ω_s) の $\sqrt{(k_i + k_c)/k_c}$ 倍より小さい領域では、ケーソン慣性力と背面土圧合力が反対方向に作用している。地盤が軟

らかい場合 ($T_s > T_c$) はこの逆の傾向となる。この様子を図 22 に示す。横軸は入力角振動数 (ω) を $\omega \sqrt{(k_i + k_c)/k_c}$ で無次元化している。

$T_c > T_s$ の時



$T_s > T_c$ の時

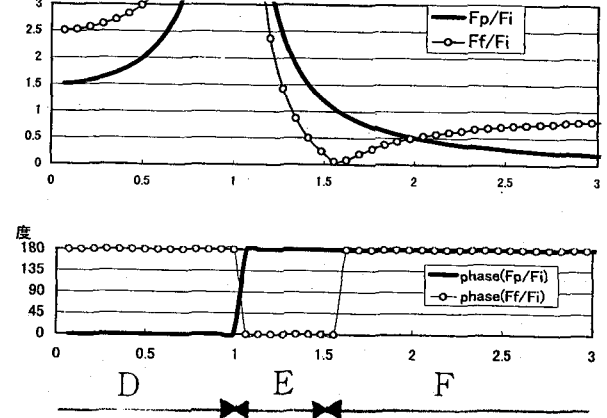


図 22 背面土圧と底面摩擦力の特性

領域 A, F ではケーソン慣性力方向と反対方向に背面土圧合力および底面摩擦力が作用しており、C, D では同一方向に作用している。B, E では、狭域であるがケーソン慣性力と底面摩擦力が同一方向に作用している状態である。

本実験では、入力加速度レベルを大きくしていくと 400Gal 以上でケーソンの慣性力と背面動土圧合力の向きが同一方向となった (図 10, 表 2)。この理由は地盤が軟らかくなった事が原因と推測できる。これは、入力加速度レベルの増加による地盤のせん断剛性の低下でも明らかである (図 13)。また、200Gal と 400Gal とでは、過剰間隙水圧比の大きさも顕著に異なっていた (図 7)。

5.3 実験の検証シミュレーション

実験から得られたバネ定数等を用いてこの極めて単純なモデルでどこまでシミュレートできるか検討した。用いた材料定数は表 4 の通りである。

表 4 材料定数

Gal	100	200	400	600	800
m_c	67.4	67.4	67.4	67.4	67.4
m_s	2.3×10^4	2.3×10^4	2.3×10^4	2.3×10^4	2.3×10^4
k_i	5.5×10^5	2.2×10^5	-4.1×10^4	-1.0×10^5	-6.2×10^4
c_i	3.2×10^3	1.5×10^3	-1.3×10^3	1.1×10^3	4.1×10^2
k_c	1.4×10^6	3.9×10^5	1.6×10^5	1.3×10^5	1.0×10^5
c_c	1.4×10^4	4.6×10^3	2.0×10^3	1.4×10^3	1.1×10^3
k_s	4.5×10^8	3.1×10^8	9.7×10^7	6.8×10^7	4.1×10^7
c_s	6.4×10^6	5.2×10^6	2.4×10^6	1.9×10^6	1.4×10^6

unit: $m(\text{kg})$, $k(\text{kgf/m})$, $c(\text{kgf/m/s})$

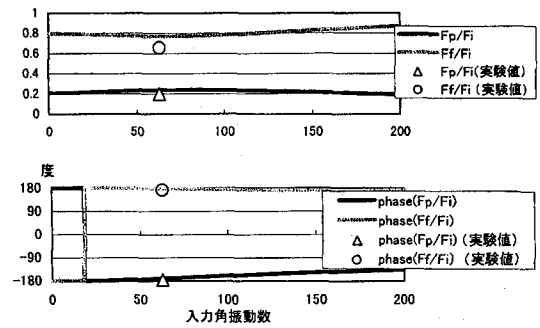
ここで m_c はケーソン本体の質量に動水圧分の付加質量を足し合わせた質量を用いた。本実験の場合、ポテンシャル理論より付加質量係数は 0.143 である。 m_s 、 k_s 、 c_s は 4.2 の 1 質点系の場合に相当し、地盤の運動はケーソンの影響を受けないよう地盤領域を 100 m^2 と大きくした。また、 k_i 、 c_i 、 k_c 、 c_c は 4.2、4.3 から計算したものをを用いた。

図 23 に実験値と表 4 を用いて計算した算定値を比較する。実験値の F_i も算定値と同様に動水圧分を考慮している。実験値は表 2 と対応している。200Gal 時は慣性力、底面摩擦力、位相とも良く一致している。他のケースについても概ね一致しているといえる。

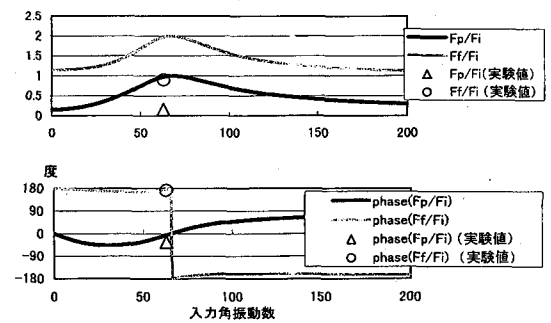
表 5 に地盤の固有角振動数 ($\omega = \sqrt{k_i/m_i}$)、ケーソンの固有角振動数 ($\omega_c = \sqrt{k_c/m_c}$)、 $\omega_s = \sqrt{(k_s+k_i)/m_s}$ を示す。 $\omega_s = \sqrt{(k_s+k_i)/m_s}$ は、減衰が無い場合、位相特性が変化するパラメータであるが、400Gal 以上で本実験の入力角振動数 ($\omega = 62.8$) より小さくなっており、位相が逆転したことを裏付けている。この様子は図 22 で A 状態から D 状態に変化したのではなく、A 状態から C 状態への変化に対応している。これは、図 12 の 800gal 時の複素振幅値で入力波と地盤表面の応答が逆位相になっていることから入力角振動数 ω が地盤固有角振動数 ω_s より大きくなっている事がわかる。

表 5 地盤およびケーソンの角振動数

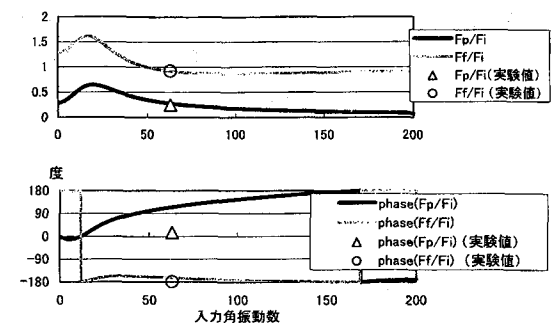
Gal	100	200	400	600	800
ω_c	143.6	75.8	48.5	43.8	38.4
ω_s	139.9	116.1	64.9	54.4	42.2
$\omega_s = \sqrt{(k_s+k_i)/m_s}$	165.1	145.1	48.0	26.1	25.7



a) 200Gal



b) 400Gal



c) 800Gal

図 23 背面土圧と底面反力
(実験値と理論値の比較)

6. 結論

水中振動台を用いた 1/22 スケールのケーソン式岸壁模型実験を行い、入力地震動とケーソンの動的応答に関する考察を行った。ケーソン式岸壁を 2 質点系バネモデルと想定し、加速度データと荷重計値を用いることにより地盤のせん断剛性及びケーソン-地盤間のバネ定数を求めることができた。また、入力加速度の違いにより、地盤の剛性が変化し、地盤が軟らかくなるとケーソンの慣性力と背後地盤の地震時土圧合力の作用する向きが同一方向となる現象が見られた。理論解析により地震波卓越周期が地盤

の固有周期の $\sqrt{\quad}$ （（ケーソン底面摩擦バネ定数+ケーソン背後地盤反力バネ定数）/ケーソン底面摩擦バネ定数）倍より大きい小さいかで、また、地盤の固有周期がケーソンの固有周期より大きい小さいかでケーソンに作用する背後地盤の影響が異なることが明らかとなった。本実験で、入力加速度の増加に伴いケーソン慣性力と背後地盤の地震時土圧の位相が変化したのは、地盤の固有周期が入力波周期をより大きくなったものの、ケーソンの固有周期を越えて大きくないことがわかった。

謝辞：本研究を進めるにあたって、港湾技術研究所の（故）稲富隆昌特別研究官をはじめ、構造部地震防災研究室、地盤震動研究室、構造振動研究室の研究員各位にご指導頂いた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 物部長穂（1924）：地震上下動に関する考察並に振動雑論、土木学學會誌、第10巻、第5號、pp.1063-1094.
- 2) Sabro Okabe（1924）：General Theory on Earth Pressure and Seismic Stability of Retaining Wall and Dam、土木学學會誌、第10巻、第6號 pp.1277-1323
- 3) 野田節男、上部達生、千葉忠樹（1976）：重力式岸壁の震度と地盤加速度、港研報告、第14巻、第4号、pp.67-111.
- 4) 市原松平（1966）：裏込め土砂の塑性平衡時における動的土圧について、第2回日本地震工学シンポジウム、pp.121-126.
- 5) Ohara, S.（1970）：Experimental studies of seismic active and seismic passive earth pressure、第3回日本地震工学シンポジウム、pp.137-144.
- 6) 風間基樹、稲富隆昌、大塚幸治（1990）：ケーソンに作用する地震時土圧に関する模型振動実験とその解析、港研報告、第29巻、第2号、pp.177-217.
- 7) 大原資生（1979）：地震時土圧研究に関する現況と課題、土木学会誌、1979年5月号、pp.28.
- 8) 小濱英司、三浦均也、岡宣克、笹島隆彦、大塚夏彦（1996）：重力式岸壁の地震時挙動の振動台実験、第31回地盤工学研究発表講演集、pp.1199-1200.
- 9) 菅野高弘、宮田正史、三藤正明、稲垣紘史、及川研、飯塚英寿（1996）：平成7年兵庫県南部地震時の港湾・海岸施設設の挙動に関する研究、第43回海講論文集、pp.1311-1315.
- 10) S. Iai（1988）：Similitude for Shaking Table Tests on SoilStructureFluid Model in 1 G Gravitational Field, Report of the Port and Harbour Res. Inst., Vol.27, No.3, pp.324.
- 11) 清川哲志（1984）流体の圧縮性を考慮した軸対象構造物の付加質量解析、第31回海岸工学論文集、pp.471-475.

（1997年9月26日受付）