

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1021      June 2002

ケーソン式岸壁に設けた弱層の免震効果

森川	嘉之
山崎	浩之
三藤	正明
亀山	和弘
小池	二三勝

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,  
Port and Airport Research Institute, Japan



## 目次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	4
2. 免震材の検討 .....	4
2.1 実験概要 .....	4
2.2 実験結果 .....	5
2.3 まとめ .....	6
3. 大型水中振動台模型実験 .....	7
3.1 実験概要 .....	7
3.2 実験結果 .....	10
3.3 まとめ .....	18
4. 大型水中振動台模型実験の地震応答解析 .....	18
4.1 解析概要 .....	18
4.2 解析結果 .....	20
4.3 まとめ .....	21
5. 結論 .....	21
6. あとがき .....	22
謝辞 .....	22
参考文献 .....	22

# Seismic Isolation effect of thin layer with low shear modulus on a Box Caisson Type Quaywall

**Yoshiyuki MORIKAWA\***  
**Hiroyuki YAMAZAKI\*\***  
**Masaaki MITO\*\*\***  
**Kazuhiro KAMEYAMA\*\*\***  
**Fumikatsu KOIKE\*\*\*\***

## Synopsis

This technical note is devoted to present the effect of a seismic isolation layer, which is a soft thin layer located in ground in order to isolate seismic waves. In this study, a series of shaking table tests was carried out on the model of a box caisson type quaywall with various seismic isolation layers. The following results were obtained.

- 1) In the case of the model with no isolation layer, maximum acceleration larger than about 350Gal was reduced at the boundary of the rubble mound and caisson. This result implies sliding of the caisson.
- 2) In the case of the model with the isolation layer between the caisson and the mound, the maximum acceleration was very small because of reduction of acceleration wave in the isolation layer.
- 3) The residual horizontal displacement of caisson was decreased to 50% by the seismic isolation layer.

**Key Words:** seismic isolation, caisson Type quaywall, shaking table test, seismic response analysis

---

\* Senior Researcher, Geotechnical and Structural Engineering Department, PARI

\*\* Head, Soil Dynamics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department, PARI

\*\*\* PENTA-OCEAN Construction Corp. LTD.

\*\*\*\* Researcher, Soil Dynamics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department, PARI

PARI = Independent Administrative Institute, Port and Airport Research Institute

# ケーソン式岸壁に設けた弱層の免震効果

森川 嘉之\*  
山崎 浩之\*\*  
三藤 正明\*\*\*  
亀山 和弘\*\*\*  
小池 二三勝\*\*\*\*

## 要 旨

本資料では弱層の免震効果について報告する。弱層とは、周辺地盤に比べて剛性の低い材料を地盤内に層状に設置したもので、地震時の水平加速度の低減及び長周期化を狙ったものである。この技術は建物などに用いられている免震技術を応用したもので、弱層によりマウンドおよびケーソンに作用する地震力を低減させ、ケーソンの残留変位を抑制するものである。

本研究では大型水中振動台を用いた模型実験を行い以下のような結論を得た。

- 1) 基礎捨石天端の最小応答加速度が 350Gal を超えると、基礎捨石天端～ケーソン底面間の応答加速度の減衰量が増加した。これは、ケーソンが滑動したためと考えられる。
- 2) 基礎捨石直下に弱層を設けることによって、800Gal までの入力加速度を弱層で 350Gal 程度に低減させることができた。これにより、ケーソンに作用する慣性力の低減を図ることができる。また、基礎捨石天端～ケーソン底面間の応答加速度の減衰量も小さく、ケーソンの滑動を防ぐことができたと考えられる。
- 3) ケーソン背面と基礎捨石直下の両方に弱層を設けた場合では、500～800Gal の加振レベルに対して、50%以上の残留変位低減効果が発揮された。

キーワード：免震，ケーソン式岸壁，振動台実験，地震応答解析

---

\* 独立行政法人港湾空港技術研究所地盤・構造部主任研究官

\*\* 独立行政法人港湾空港技術研究所地盤・構造部動土質研究室長

\*\*\* 五洋建設（株）

\*\*\*\* 独立行政法人港湾空港技術研究所地盤・構造部動土質研究室研究員

## 1. まえがき

平成7年1月に発生した兵庫県南部地震において、神戸港では岸壁構造の多くを占めるケーソン式岸壁が滑動、前傾、沈下を生じ、港湾機能が麻痺状態に陥った（港湾施設被害検討委員会編(1997)）。同地震以降、大規模地震にも堪えうる港湾の必要性が認識され、他の施設においても耐震性向上に関する研究が各研究機関で行われてきている（土木学会地震工学委員会編(2000)）。

震災後の神戸港のケーソン式岸壁を対象とした被災原因の調査研究では、ケーソン式岸壁の水平移動に関する影響度について、「過大な慣性力と土圧による影響約50%、埋立て地盤のせん断抵抗の低下による影響約20%、置換土槽のせん断抵抗の低下による影響約30%と考えられる（一井ら(1997)）」という報告がなされている。ケーソンに作用する慣性力が被災要因の一つとなっているのである。

一方、軟弱地盤や液状化した地盤では地震の水平加速度が著しく減少することが地震観測記録及び数値解析から明らかにされている（例えば、土質工学会軟弱地盤における地震増幅と被害に関する研究委員会編(1994)）。兵庫県南部地震では、液状化した地盤の表層での加速度が、基盤加速度に対して半分程度まで減少したことが観測されている（國生ら(1995)）。これは液状化による地盤のせん断剛性の低下に伴って、地盤の固有周期が長くなるとともに履歴減衰が増加したためであると考えられる。このような軟弱地盤や液状化した地盤がもつ地震波の低減・長周期化の効果を人工的に狙った工法は、建築の分野で免震工法として既に用いられている。土木の分野でも橋梁などに用いられるようになってきたが、さらに近年では、地下トンネルなどの地下構造物にも適用が検討され、設計法ガイドライン(案)が策定されている（土木学会地震工学委員会減震・免震・制震小委員会編(2002)）。

このような状況を踏まえて、本研究ではケーソンに作用する慣性力を低減させることを目的に、免震技術のケーソン式岸壁への導入を試み、大型水中振動台を用いた模型振動実験を実施した。免震技術のケーソン式岸壁への導入にあたっては、ケーソン式岸壁の周辺に部分的に剛性の低い免震層を地震波の伝達経路に設置し、ケーソンに作用する慣性力の低減を図る方法を考え、まず、小型の振動台を用いて予備実験を行い免震層の材料を決めている。そして、その材料を免震層に用いて、大型水中振動台で模型振動実験を行った。大型模型振動実験は、免震層を設置しない場合と、免震層有りの場合について実施し、応答加速度、応答変位に着目して実験結果の比

較検討を行った。また、免震層有無のケースについて地震応答解析を実施し、実験結果との比較検討を行った。

## 2. 免震材の検討

本章では、大型水中振動台実験の予備実験として行った、模型実験について述べる。予備実験では弱層の材料や形状（厚さ、幅）、位置について検討した。なお、弱層の材料については、現在適当な用語がないため本章では免震材と記述する。

### 2.1 実験概要

実験は、小型の振動台と高さ65cm×幅60cm×奥行き60cmのせん断土槽を用いて行った。実験で用いた模型地盤を図-2.1に示す。図中の■は加速度計を設置した位置を示している。模型地盤は豊浦砂を用いて空中落下法で作成した。ただし、弱層の効果を明確にするため、模型地盤が液状化しないように、乾燥した豊浦砂を用いている。模型地盤の作成手順は次のようである。まず、弱層下の地盤に試料を投入後、相対密度が約100%となるまで土層に振動を加えた。その上に弱層を設置した。弱層上の地盤も同様に、所定の量の砂を投入した後、相対密度が約40%となるまで土層に振動を加えた。そして、地盤中央にケーソンを設置し、最後に裏埋め部分を作成し

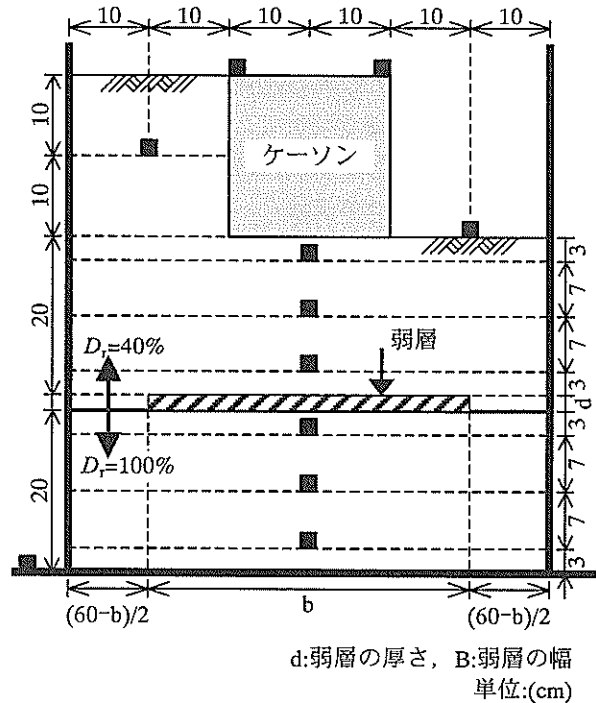


図-2.1 模型地盤(弱層の位置:土槽底面から20cm)

た。

実験は免震材，厚さ，幅，位置を変えて行っている。免震材の物性を表-2.1に，実験ケースを表-2.2に示す。それぞれのケースについて，4種類の最大加速度(100, 200, 500, 900Gal)×4種類の周波数(10, 30, 60, 90Hz)の16回の加振を行っている。

## 2.2 実験結果

図-2.2～4に，免震材，弱層の形状，位置の違いによる免震効果の比較を示す。図はすべて模型地盤に最大加速度100Gal，周波数30Hzの正弦波を加えた場合である。プロットの縦軸の値が試験ごとに多少異なっているが，これは弱層の厚さと位置によって加速度計の高さが異なるためである。また，横軸は各点の最大加速度を入力波の最大加速度で無次元化したものである。

### (1) 免震材による免震効果の比較

図-2.2は免震材による免震効果の違いを比較したものである。弱層の形状は，厚さ1cm，幅40cmで，位置は図-2.1に示した通りである。

図-2.2からわかるように，いずれの場合も入力波より応答加速度が減衰するまでにはいたらなかった。しかし，硬度0°(214L)の場合は，若干ではあるが，弱層で加速度が減衰している。また，緩い地盤や地表面，裏埋め内での加速度も他の場合に比べてかなり小さくなっている。

このことから，硬度0°の免震材については免震効果が期待できると思われる。免震材の硬度が0°以外の場合，特に硬度60°(614L)の場合は，弱層がない場合(000-)と同程度の応答加速度の増幅が見られた。

硬度0°の免震材のせん断剛性は，模型地盤の縮尺を1/50とすると，現場スケールで1000～1500kN/m<sup>2</sup>となる。

### (2) 弱層の形状による免震効果の比較

図-2.3に免震材の形状による免震効果の違いを示す。免震材の硬度はすべて0°である。

図-2.3から，弱層の厚いほうが，また，幅の広いほうが免震効果のあることがわかる。さらに，図-2.3を見ると，弱層の幅によって免震効果が大きく異なっている。弱層の幅の広いほうが，全体的に加速度の増幅を押さえる傾向にある。このことから，弱層の厚さより幅のほうが免震効果に与える影響は大きいことがわかる。したがって，分厚い弱層よりも幅の広い弱層を設置したほうがより免震効果が得られると考えられる。

表-2.1 免震材の物性

免震材	硬度(°)*	せん断剛性(kN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比	単位体積重量(kN/m <sup>3</sup> )
エラストマー	0	20～30	0.5	8.0
ゴムシート	40	680	0.5	10.4
ゴムシート	60	1420	0.5	11.1

\* 免震材の硬度は JIS-A 硬度(JIS K6301)

表-2.2 実験ケース

試験名	弱層			
	免震材(硬度)	厚さ(cm)	幅(cm)	位置
000-	なし	—	—	—
212L	エラストマー(0°)	1	20(ケ-リン幅)	下
214L	エラストマー(0°)	1	40(ケ-リン幅×2)	下
222L	エラストマー(0°)	2	20	下
224L	エラストマー(0°)	2	40	下
224M	エラストマー(0°)	2	40	中
224U	エラストマー(0°)	2	40	上
412L	ゴムシート(40°)	1	2	下
414L	ゴムシート(40°)	1	4	下
422L	ゴムシート(40°)	2	2	下
612L	ゴムシート(60°)	1	2	下
614L	ゴムシート(60°)	1	4	下
622L	ゴムシート(60°)	2	2	下

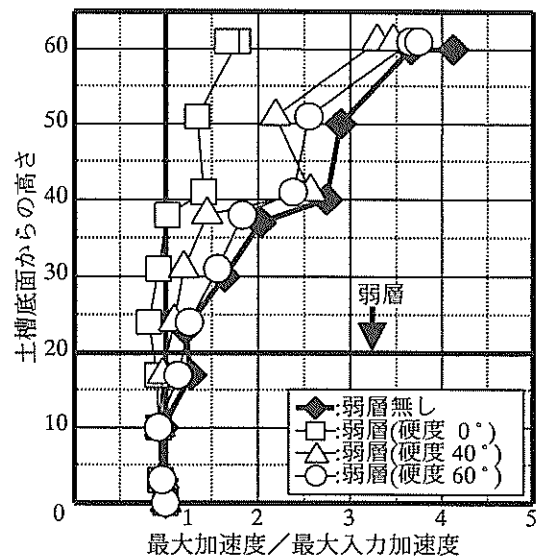


図-2.2 加速度の増幅(免震材による比較)  
(100Gal-30Hz 正弦波,弱層:厚さ1cm,幅40cm,位置下)

(3)弱層の位置による免震効果の比較

図-2.4 は免震材の位置による免震効果の違いを比較したものである。免震材はすべて硬度 $0^\circ$ のもの、弱層の形状は図-2.3 で一番効果のあったもの(厚さ 2cm, 幅 40cm)である。弱層の位置は、それぞれ土槽底面から 20, 30, 34cm であり、図中に矢印と太線で示している

図-2.4 を見ると、本実験においては弱層の位置による免震効果の違いは見られなかった。

2.3 まとめ

本実験により以下のことがわかった。

- ・弱層の厚さ、幅の大きいほうが、効果が大きい、免震効果は弱層の厚さよりも幅に影響を受ける。
- ・今回の実験では、弱層の位置による免震効果の違いは見られなかった。

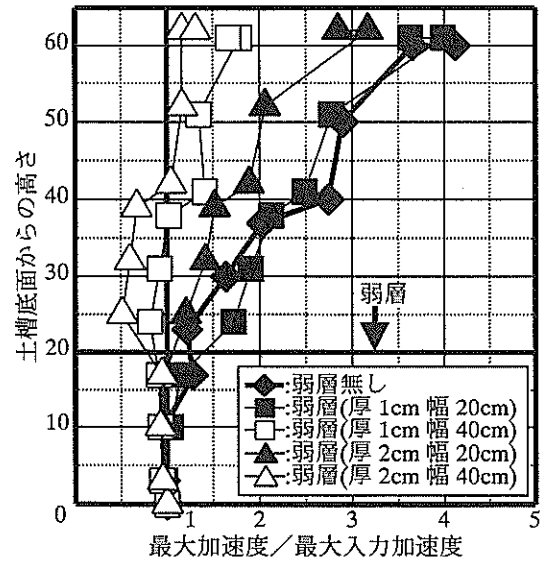


図-2.3 加速度の増幅(弱層の形状による比較)  
(100Gal-30Hz 正弦波,弱層:硬度 $0^\circ$ ,位置 下)

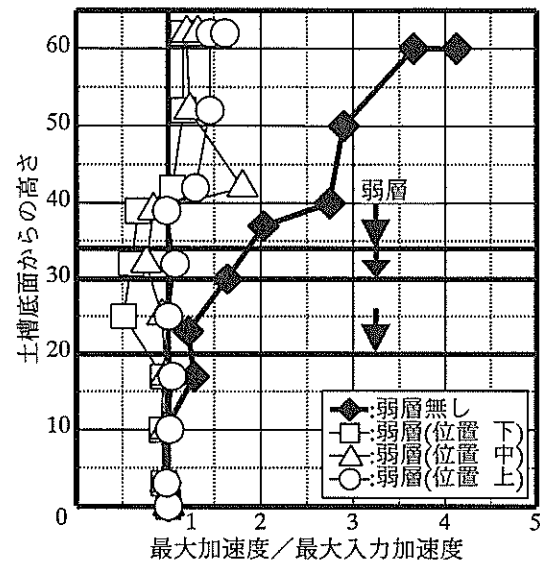


図-2.4 加速度の増幅(弱層の位置による比較)  
(100Gal-30Hz 正弦波, 弱層: 硬度 $0^\circ$ ,厚さ 2cm,幅 40cm)

### 3. 大型水中振動台模型実験

前章では、小型振動台を用いた模型実験結果について説明した。模型実験結果から、地盤中に十分に軟らかい弱層（せん断剛性の小さい層）を設けた場合に加速度の増幅が抑えられることがわかった。そこで、もう少し現実に近い模型地盤で弱層の免震効果を確認するために、大型水中振動台を用いた模型実験を行った。

本章では、大型水中振動台を用いた模型実験について、弱層による応答加速度およびケーソンの残留水平変位の低減効果に着目して実験結果を比較検討する。

#### 3.1 実験概要

##### (1) 実験ケース

本研究では、大型水中振動台を用いた模型振動実験を4ケース実施した。表-3.1に実験ケース一覧を示す。ケース1では、現設計における地震時挙動を把握するために、弱層を設置していない。そして、ケース2では基礎捨石直下、ケース3ではケーソン背後、ケース4では基礎捨石直下とケーソン背後の両方に弱層を設置した。

##### (2) 適用相似則

模型振動実験において重要な検討事項として模型と

実物間の縮尺による種々の物理量の相似則が挙げられる。相似則によって模型と実物間の物理量の関係を全て記述することができないため、対象の地震時挙動の支配的要因や必要とされる情報に応じて適切な相似則を選定し、模型製作、実験実施をする必要がある。

今回の実験では、表-3.2に示すような1G場における相似則（Iai (1988)）を適用する。相似比については振動台および鋼製枠の寸法を考慮して $\lambda=1/12$ （模型の長さに関する相似比）と決定した。相似比 $\lambda$ を $1/12$ とした場合の実験における各物理量の相似比は表-3.2に合わせて示している。

なお、本実験は水中振動台を用いた実験であるが、水の粘性を上げる処置を行っていないため、過剰間隙水圧に関しては実物と比較して早く消散しているものと考えられる。

##### (3) 入力地震動

本実験では、1968年十勝沖地震八戸波（S-252NS Base）の加速度波形を用いて加振を行った。加振方向は模型法線直角方向の一方方向とし、最大、最小加速度により生じる慣性力のうち絶対値の大きい方が海側に作用する様に正負を考慮して波形を入力した。以下、加速度は陸側（海側に慣性力を作用させる向き）を正とする。加振方法は、入力地震動の目標最大加速度を100Gal, 200Gal, 350Gal, 400Gal, 500Gal, 600Gal, 700Gal, 800Galの8ステップのステップ加振とした。

表-3.1 実験ケース

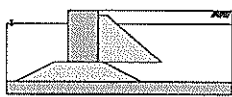
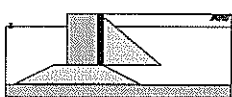
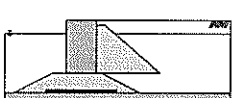
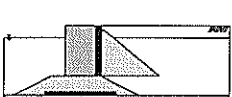
ケース	模型地盤断面図 (黒い部分が弱層)	弱層の位置
1		無
2		ケーソン背面 (層厚 3cm)
3		基礎捨石直下 (層厚 2cm)
4		ケーソン背面 (層厚 3cm) + 基礎捨石直下 (層厚 2cm)

表-3.2 各物理量の相似則

パラメータ	実物/模型	$\lambda=12$ の場合の縮尺
長さ	$\lambda$	12
密度	1	1
時間	$\lambda^{0.75}$	6.45
応力	$\lambda$	12
間隙水圧	$\lambda$	12
変位	$\lambda^{1.5}$	41.57
速度	$\lambda^{0.75}$	6.45
加速度	1	1



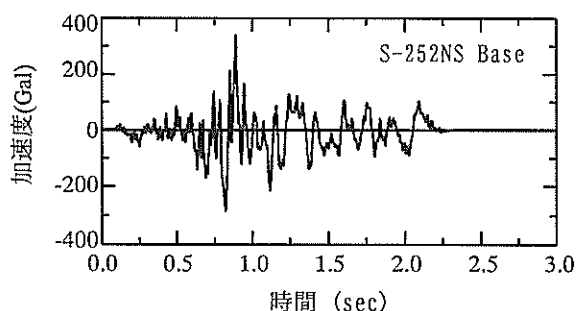


図-3.1 入力地震動（八戸波：S-252NS Base）

また、模型振動実験において波形を振動台に入力する際は、表-3.2 に示した相似比にしたがって時間軸を1/6.45 に圧縮した。加振入力波の時刻歴を図-3.1 に示す。

(4) 模型地盤

本実験では大型水中振動台を用いている。大型水中振動台は、長さ 15m×15m、深さ 2m の水槽底面中央に直径 5.65m の三次元振動テーブルが設置されたものである。

模型地盤が地震時における地盤と水および構造物の相互作用をより忠実に再現するために、模型地盤作成後、水槽に注水して加振を行っている。

模型地盤は、三次元振動テーブル上に設置した幅 3.5m、高さ 2.0m、奥行き 1.5m の鋼製枠内に作製した。鋼製枠の側面のうち一方はアクリル製で断面が可視化仕様となっている。振動台上に設置した鋼製枠の前面（海側）は高さ約 0.2m の鋼製パネルで封鎖した。この部分には透水性はない。背面は（陸側）エキスバンドメタルに不織布を貼付けたもので全面を封鎖し、透水性を持たせてある。

本実験で用いた模型地盤の材料および作成方法を表-3.3 に、断面図および平面図を図-3.2 に示す。

基礎地盤は相馬硅砂 5 号に 3% の超早強セメントを事前混合し、緩速注水して固化することにより模擬した。ケーソン背後地盤および表層地盤は相馬硅砂 5 号を空中落下して足踏みにより締め固めた。なお、ケーソン背後地盤については、模型地盤完成後、緩速注水して飽和させている。また、基礎捨石は碎石 4 号、裏込石は碎石 6

表-3.3 試料の投入量と模型地盤の密度一覧

ケース	地盤	材料および作成方法	試料投入重量 $W_s(\text{kN})$	地盤作成時の体積 $V(\text{m}^3)$	乾燥単位体積重量 $\gamma_d(\text{kN/m}^3)$	間隙比 $e$
ケース 1~4	基礎地盤	相馬硅砂 5 号+超早強セメント、注水固化	17.21	1.199	14.35	0.784
ケース 1	背後地盤	相馬硅砂 5 号、空中落下、締め固め後注水	28.99	2.043	14.19	0.805
	表層地盤	相馬硅砂 5 号、空中落下、締め固め	8.45	0.583	14.49	0.767
	基礎捨石	碎石 4 号	8.93	0.606	14.73	0.743
	裏込石	碎石 6 号	8.69	0.602	14.44	0.780
ケース 2	背後地盤	相馬硅砂 5 号、空中落下、締め固め後注水	32.14	2.040	15.75	0.625
	表層地盤	相馬硅砂 5 号、空中落下、締め固め	8.83	0.611	14.45	0.770
	基礎捨石	碎石 4 号	9.41	0.625	15.05	0.709
	裏込石	碎石 6 号	7.97	0.556	14.33	0.792
ケース 3	背後地盤	相馬硅砂 5 号、空中落下、締め固め後注水	29.95	2.053	14.59	0.755
	表層地盤	相馬硅砂 5 号、空中落下、締め固め	8.49	0.583	14.56	0.757
	基礎捨石	碎石 4 号	9.21	0.605	15.23	0.689
	裏込石	碎石 6 号	8.24	0.613	13.44	0.912
ケース 4	背後地盤	相馬硅砂 5 号、空中落下、締め固め後注水	29.67	2.051	14.46	0.770
	表層地盤	相馬硅砂 5 号、空中落下、締め固め	8.54	0.589	14.51	0.765
	基礎捨石	碎石 4 号	9.08	0.594	15.29	0.681
	裏込石	碎石 6 号	8.36	0.541	15.45	0.663

号でそれぞれ模擬した。弱層については、前章の小型振動台実験で最も効果のあった、超軟質エラストマー（10cm×10cm×10cm）を用いた。ケーソン背面の弱層（ケース2、4）については、高さ方向8列、奥行き方向15列を3層にして計360枚設置した。基礎捨石直下の弱層（ケース3、4）については、模型法線直角方向11列、奥行き方向15列を2層にして計330枚設置した。ケーソン模型は三函設置した。ケーソンの単位体積重量は気中で20.6kN/m<sup>3</sup>となるように調整している。

模型地盤には、間隙水圧計、加速度計、変位計、荷重計、土圧計が取り付けられている（荷重計、土圧計の結果については本資料では触れない）。ケーソン模型のうち中央のケーソン模型は計測用で荷重計と土圧計が搭載されている。変位計は、計測用ケーソンの奥行き方向中央に4箇所（天端2箇所、前面2箇所）取り付けられている。なお、変位計は鋼製枠に剛に設置した治具に取り付けたため、計測される変位は、鋼製枠に対する相対変位である。間隙水圧計と加速度計は、鋼製枠設置後、地盤内部

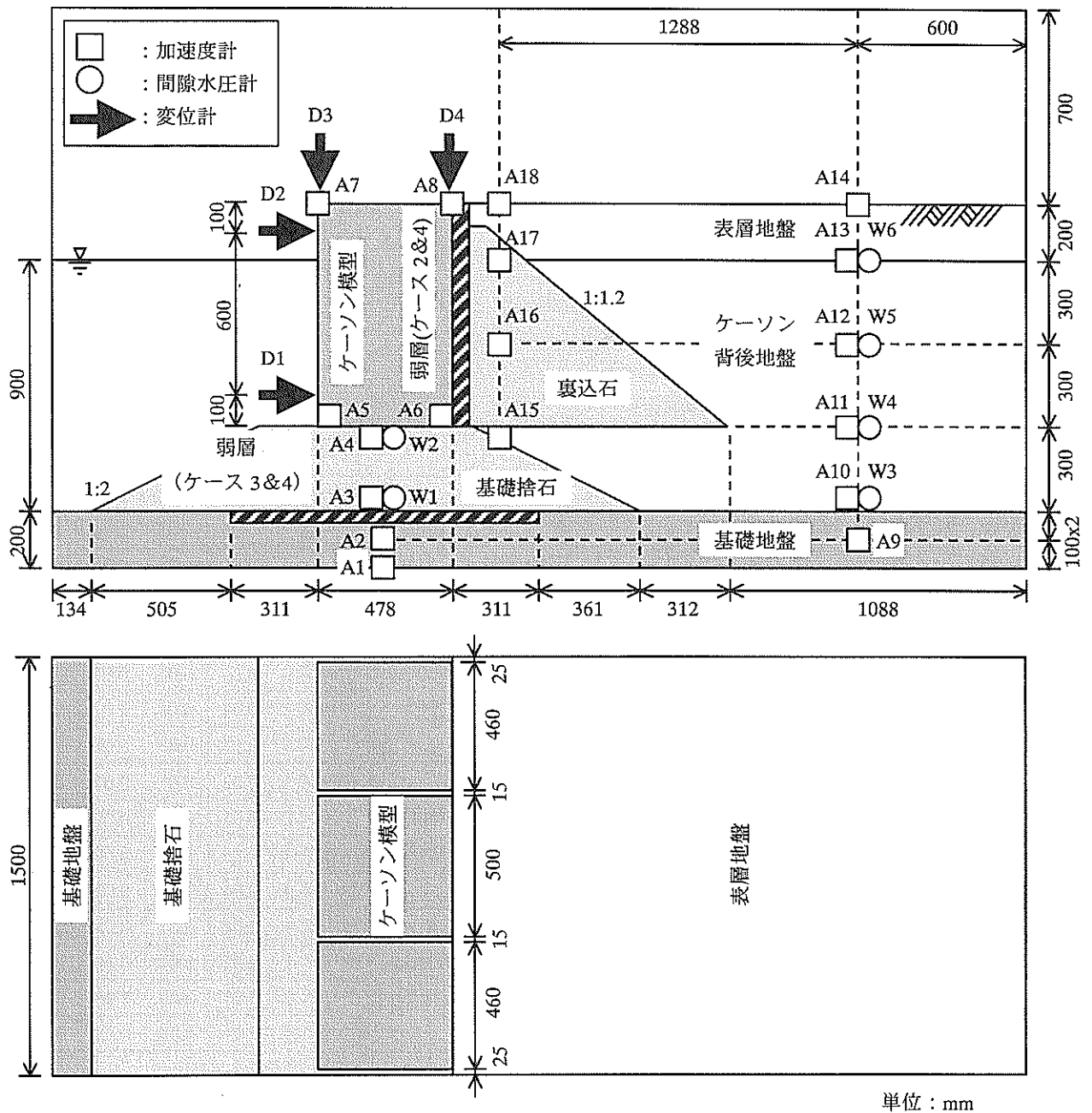


図-3.2 模型地盤断面図および平面図

の所定の位置に吊り糸で指示して設置している。

(b) はケース間で差は見られなかった。

### 3.2 実験結果

#### (1) 過剰間隙水圧比の検討

加振時に模型地盤に液状化が発生すると、模型地盤が非線形化して剛性が小さくなり、模型地盤自体が地震波の低減効果を発揮すると考えられるので、弱層の効果が明確にはならない。そこで本実験では、弱層の免震効果を明確にするために、模型地盤に液状化が発生しないように基礎地盤をセメントで固化し、ケーソン背後地盤、表層地盤については締め固めを行っている。

本項では各ケースで発生した過剰間隙水圧について検討し、模型地盤に液状化が発生しなかったかどうかを確認する。表-3.4に各ケースで加振に伴い背後地盤に発生した過剰間隙水圧比の一覧を示す。表中の記号 W3~6 は、背後地盤に設置された間隙水圧計の番号である（図-3.2 参照）。W3 は最も下の間隙水圧計である。過剰間隙水圧比は最大過剰間隙水圧と有効上載圧の比として求めている。ただし、最大過剰間隙水圧は過剰間隙水圧の時刻歴に 2Hz のローパスフィルタをかけ、動水圧成分を取り除いたものから求めた。表-3.4を見ると、最大加速度 800Gal の八戸波で加振した場合にもすべてのケースで過剰間隙水圧比が 0.1 以下であり、全加振結果においてもほぼ 0.1 以下に収まっている。これより、全加振ステップにおいて模型地盤に液状化による非線形化は生じていないと考えられる。

#### (2) 応答加速度の比較

##### a) 応答加速度分布

図-3.3(a)~(h)に最大応答加速度（慣性力を海側へ作用させる方向の加速度）分布の比較を加振ステップごとに示す。

図-3.3(a)~(h)のケーソン背後地盤の最大応答加速度分布（A9~14）を見ると、弱層の有無、配置に関わらずほぼ同じ分布形態を示している。このことから、各ケースともほぼ同程度の模型地盤が作製でき、同一条件において実験が行われたと判断できる。また、各ケースとも最大加速度が極端に減衰することなく、直線的に分布していることから、加振に伴う模型地盤の軟化はほとんど進行しなかったと思われる。

裏込石における最大応答加速度分布（A15~18）についても、各ケースに多少の差があるが、背後地盤と同様にほぼ直線的な分布形態を示した。

ケーソン設置部における最大応答加速度分布（A1~7）については、100、200Gal で加振した場合（図-3.3(a),

表-3.4 過剰間隙水圧比

加振 ステップ	実験 ケース	過剰間隙水圧比			
		W3	W4	W5	W6
100Gal 加振	ケース 1	0.00	0.00	0.00	0.00
	ケース 2	0.00	0.00	0.00	0.03
	ケース 3	0.00	0.00	0.00	0.00
	ケース 4	0.00	0.00	0.00	0.01
200Gal 加振	ケース 1	0.00	0.00	0.01	0.06
	ケース 2	0.00	0.01	0.01	0.12
	ケース 3	0.00	0.01	0.00	0.04
	ケース 4	0.00	0.01	0.02	0.17
350Gal 加振	ケース 1	0.01	0.01	0.04	0.10
	ケース 2	0.01	0.04	0.05	0.30
	ケース 3	0.01	0.03	0.02	0.07
	ケース 4	0.01	0.04	0.04	0.11
400Gal 加振	ケース 1	0.02	0.00	0.04	0.10
	ケース 2	0.01	0.04	0.04	0.20
	ケース 3	0.01	0.03	0.02	0.06
	ケース 4	0.02	0.04	0.02	0.05
500Gal 加振	ケース 1	0.02	0.00	0.05	0.07
	ケース 2	0.02	0.05	0.06	0.12
	ケース 3	0.02	0.05	0.02	0.08
	ケース 4	0.03	0.05	0.02	0.09
600Gal 加振	ケース 1	0.03	0.00	0.06	0.06
	ケース 2	0.03	0.05	0.07	0.05
	ケース 3	0.04	0.06	0.02	0.11
	ケース 4	0.03	0.05	0.02	0.03
700Gal 加振	ケース 1	0.03	0.01	0.07	0.03
	ケース 2	0.03	0.06	0.09	0.05
	ケース 3	0.05	0.08	0.02	0.07
	ケース 4	0.04	0.07	0.02	0.04
800Gal 加振	ケース 1	0.04	0.01	0.08	0.01
	ケース 2	0.03	0.07	0.10	0.08
	ケース 3	0.05	0.09	0.03	0.06
	ケース 4	0.05	0.08	0.02	0.09

次に、350~600Gal で加振した場合(図-3.3(c)-(f))は、基礎捨石直下に弱層を設けたケース3、4では、弱層で最大応答加速度が減衰している。このため基礎捨石内部における最大応答加速度は、基礎捨石直下に弱層の無いケース1、2に比べて小さくなった。

最後に700、800Gal で加振した場合は(図-3.3(g),(h))、350~600Gal で加振した場合と同様に、基礎捨石直下に弱層を設けたケース3、4で、弱層を通過する際に最大応答加速度が大きく減衰している。

図-3.3(c)-(h)から、応答加速度の減衰の程度は加振レベルが大きくなるにつれて明確になると考えられる。ケーソン底面における応答加速度は各ケースでほぼ同じ値となっているが、基礎捨石天端とケーソン底面の間で応答加速度の変化が異なっている。ケース3、4では応答加

速度がほぼ減衰することなく伝達されている。これに対して、ケース1、2では大きく減衰している。これは、ケーソンが捨石に対して海側への相対加速度を持つことを意味しているから、ケーソンが滑動したと考えられる。以上のことから、基礎捨石直下の弱層が、基礎捨石に伝達される応答加速度を減衰させ、ケーソンの滑動を防ぐ効果のあることがわかる。

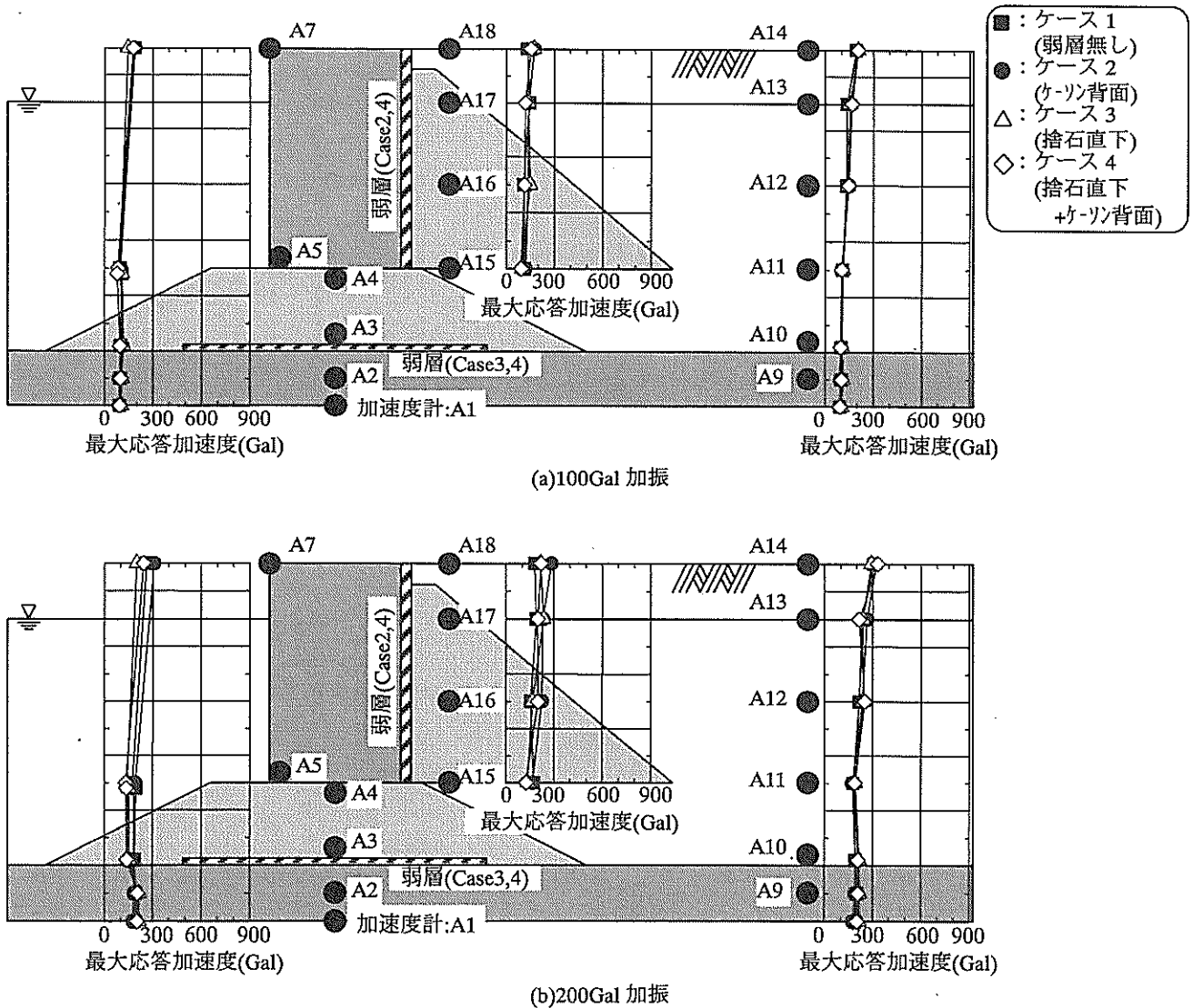
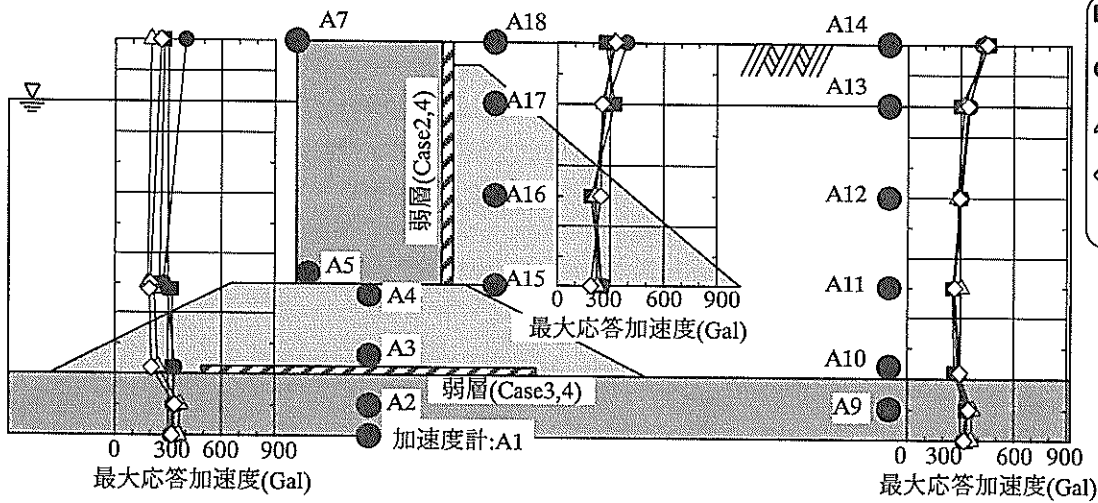
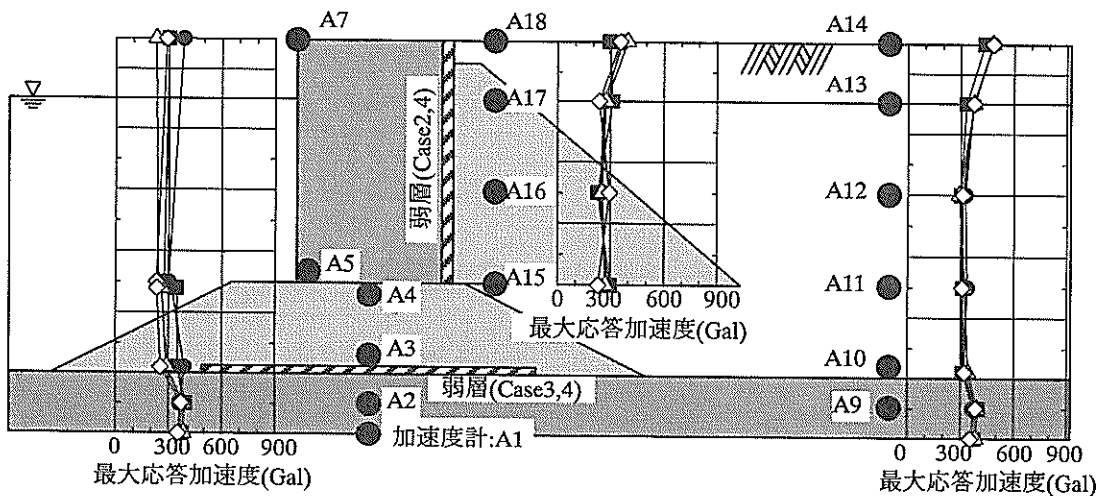


図-3.3 最大応答加速度分布

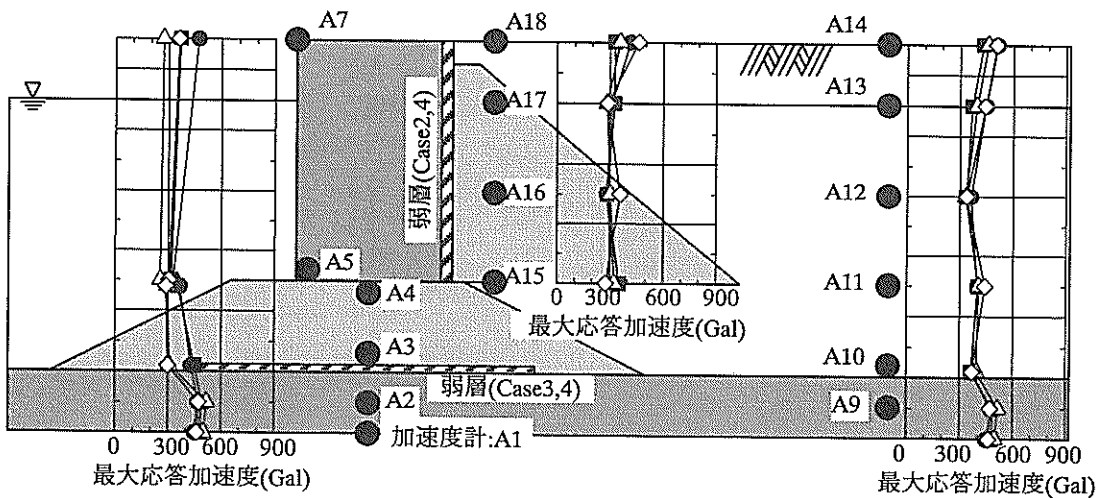
- : ケース 1  
(弱層無し)
- : ケース 2  
(ケ-ツ背面)
- △ : ケース 3  
(捨石直下)
- ◇ : ケース 4  
(捨石直下  
+ケ-ツ背面)



(c)350Gal 加振

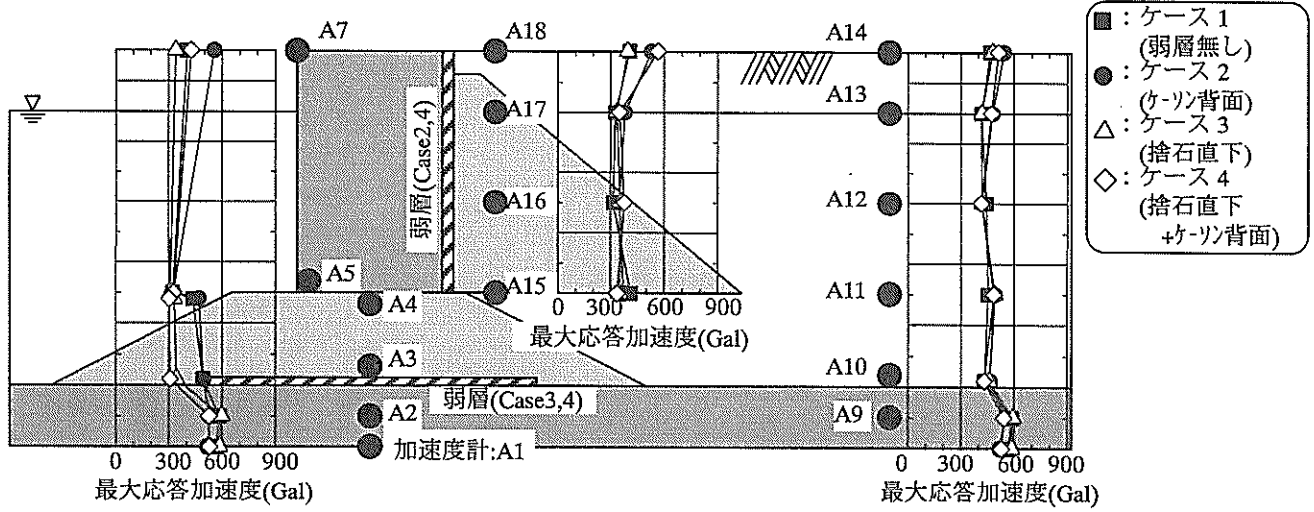


(d)400Gal 加振

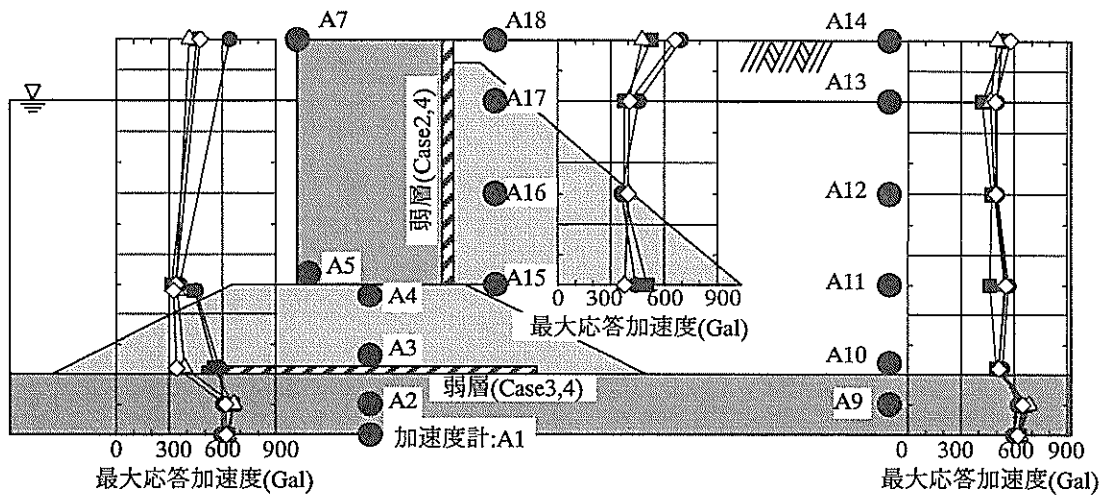


(e)500Gal 加振

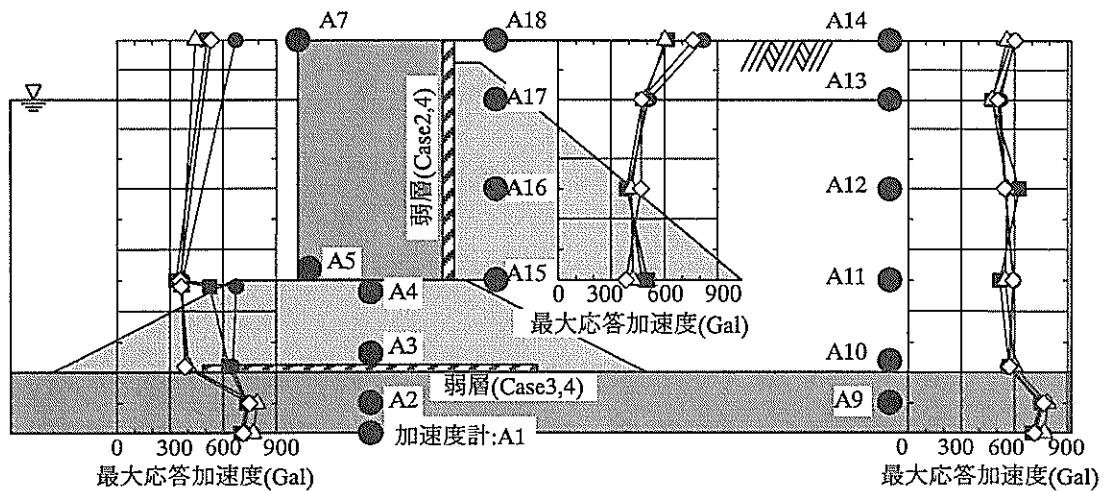
図-3.3 最大応答加速度分布



(f)600Gal 加振



(g)700Gal 加振



(h)800Gal 加振

図-3.3 最大応答加速度分布

b) 基礎捨石天端~ケーソン底面間の応答加速度の低減

基礎捨石直下に設置した弱層の加速度低減効果の説明として、基礎捨石天端の最大応答加速度(A4)と基礎捨石天端~ケーソン底面間の最大応答加速度の減衰量(A4-A5)の関係を図-3.4に示す。図には全ての加振レベル(100~800Gal)の結果を示している。図-3.4より、基礎捨石天端における応答加速度が350Gal程度まではケーソン底面に伝達する際の減衰量は数十Gal程度である。このため、基礎捨石とケーソンはおおむね連続体として挙動したと考えられる。しかし、基礎捨石天端における応答加速度が350Gal程度を超えると捨石天端の応答加速度と減衰量が右上がりの直線関係となっている。この減衰量の増加は、基礎捨石とケーソンとの不連続挙動、つまりケーソンの滑動が原因であると考えられる。

また、ケース別に見ると、基礎捨石直下に弱層を設けた場合(ケース3,4:白抜きのプロット)、基礎捨石天端の応答加速度がすべての加振レベルで350Gal程度までに減衰している。これは前述したように、基礎捨石直下の弱層によるものである。また、ケース3,4の基礎捨石天端~ケーソン底面間の応答加速度の減衰量はすべて50Gal以内に収まっており、ケーソンの滑動はほとんど生じていないと思われる。これに対して、基礎捨石直下に弱層のない場合(ケース1,2:黒のプロット)では、基礎捨石天端の応答加速度は入力地震動の最大加速度(100~800Gal)とほぼ同じ範囲に値が分布している。また、基礎捨石天端の応答加速度が350Gal程度を超えると、基礎捨石天端とケーソン底面で応答加速度が大きく減衰し、ケーソンが滑動していることがわかる。

以上のことから、この基礎捨石直下の弱層の有無による基礎捨石天端の応答加速度の違いはケーソンの残留水平変位の低減効果に大きく影響するものと思われる。

(3) ケーソン天端の水平変位

a) 時刻歴の比較

本目では、ケーソン天端水平変位を回転成分と水平移動成分に分け、それぞれの成分について実験結果の比較を試みた。加振に伴うケーソン重心の水平変位、鉛直変位、回転角をそれぞれ  $u_G$ ,  $v_G$ ,  $\alpha$  とする。加振前のケーソンの傾斜角を無視すると、図-3.5に示すケーソン変位の模式図から次のような関係が得られる。

$$D_2 = X_1' - x_1, \quad Y_1' = y_1, \quad (1)$$

$$D_1 = X_2' - x_1, \quad Y_2' = y_2. \quad (2)$$

ここで、 $D_1$ ,  $D_2$  はそれぞれケーソン前面に設置された変位計の計測値である。

上式からケーソン重心の回転角  $\alpha$  および水平移動成分  $D_h$  (=重心の水平移動成分  $u_G$ ) は次のようになる。

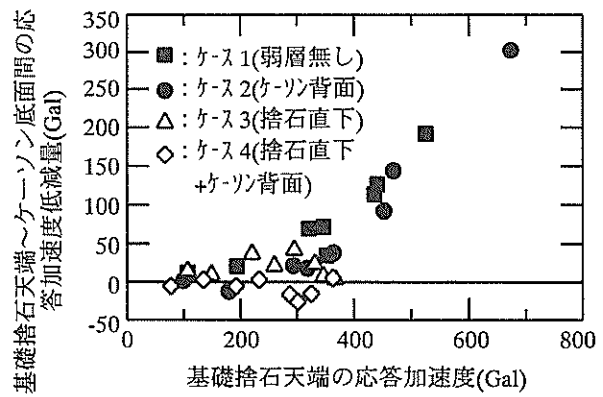


図-3.4 基礎捨石天端の応答加速度と基礎捨石天端~ケーソン底面間の応答加速度低減量の関係

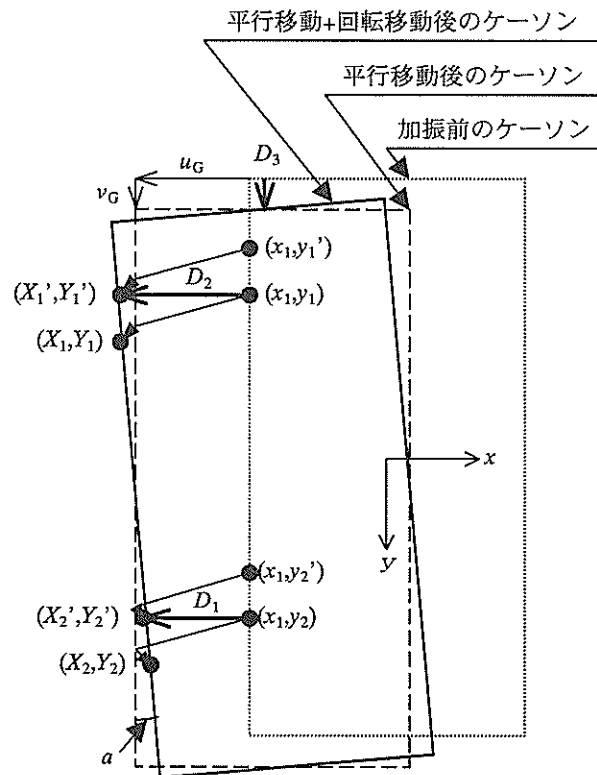
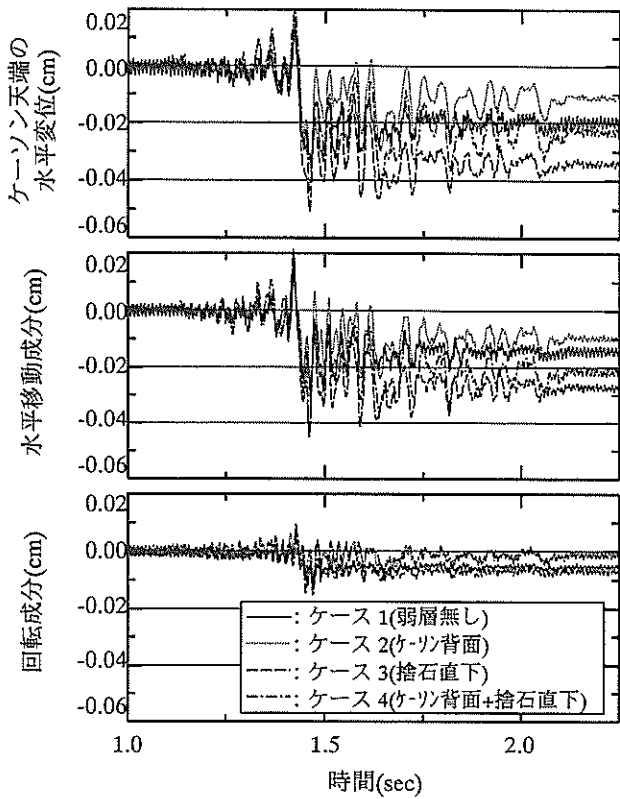


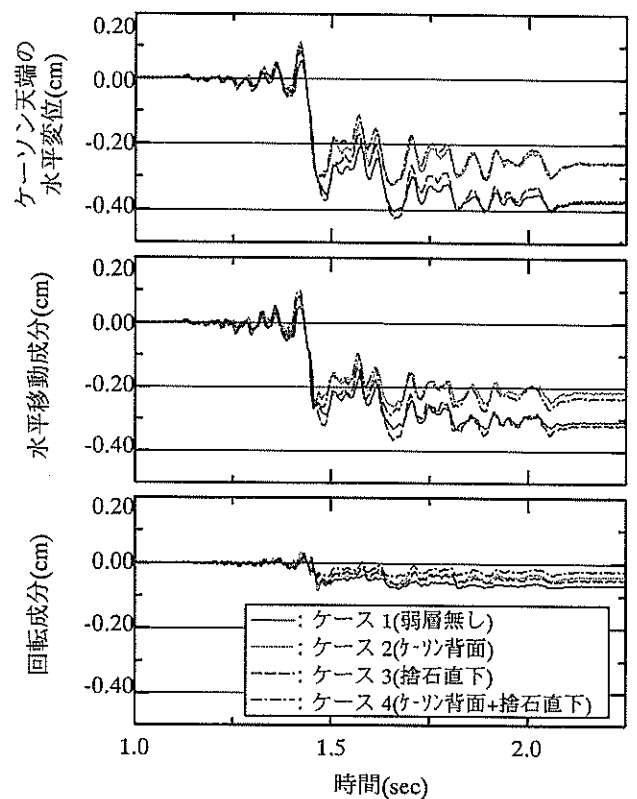
図-3.5 ケーソン変位の模式図

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{D_2 - D_1}{y_2 - y_1} \right), \quad (3)$$

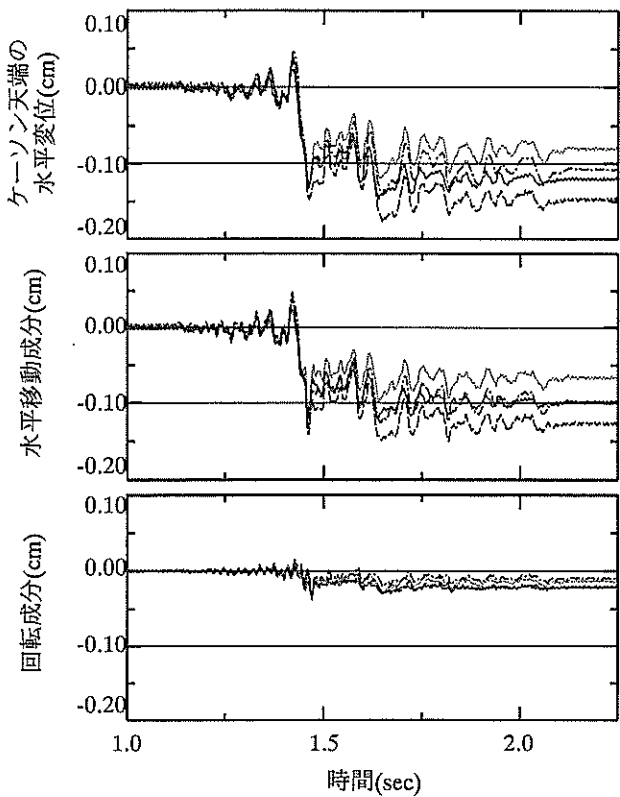
$$D_h = D_2 - (1 - \cos \alpha) x_1 + \tan \alpha (y_1 - v_G + x_1 \sin \alpha). \quad (4)$$



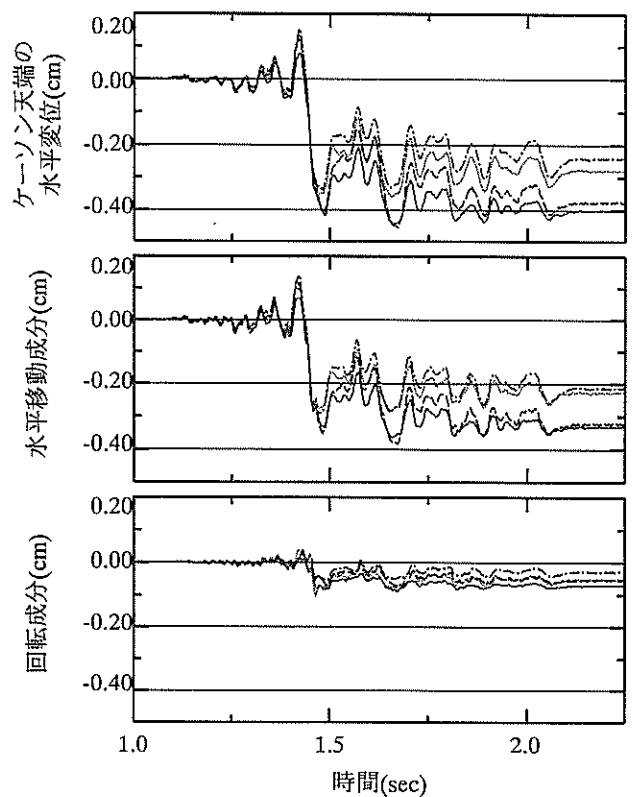
(a)100Gal 加振



(c)350Gal 加振



(b)200Gal 加振

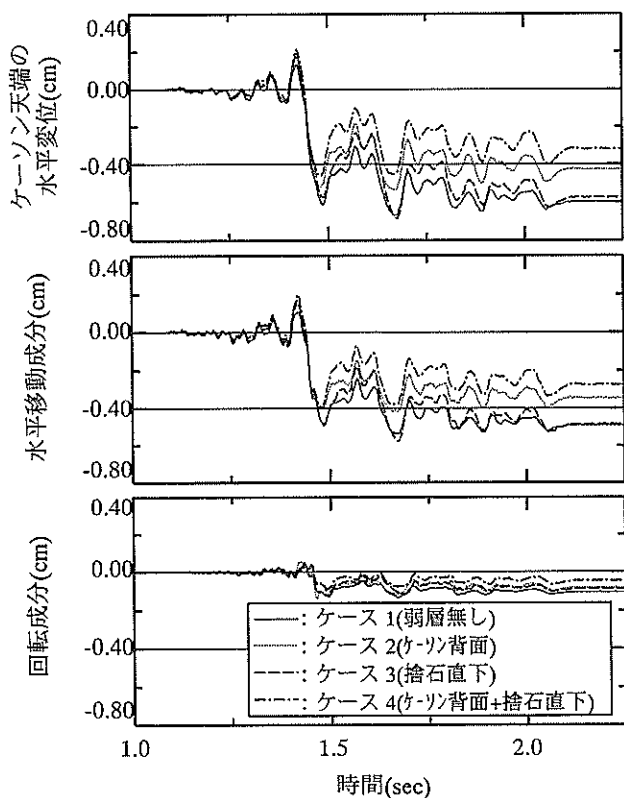


(d)400Gal 加振

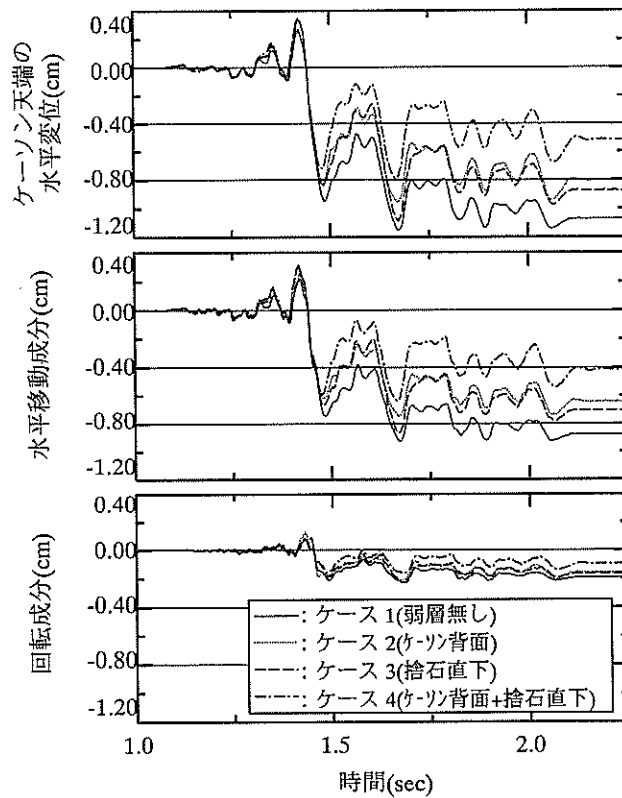
図-3.6 ケーソン天端の水平変位の時刻歴

図-3.6 ケーソン天端の水平変位の時刻歴

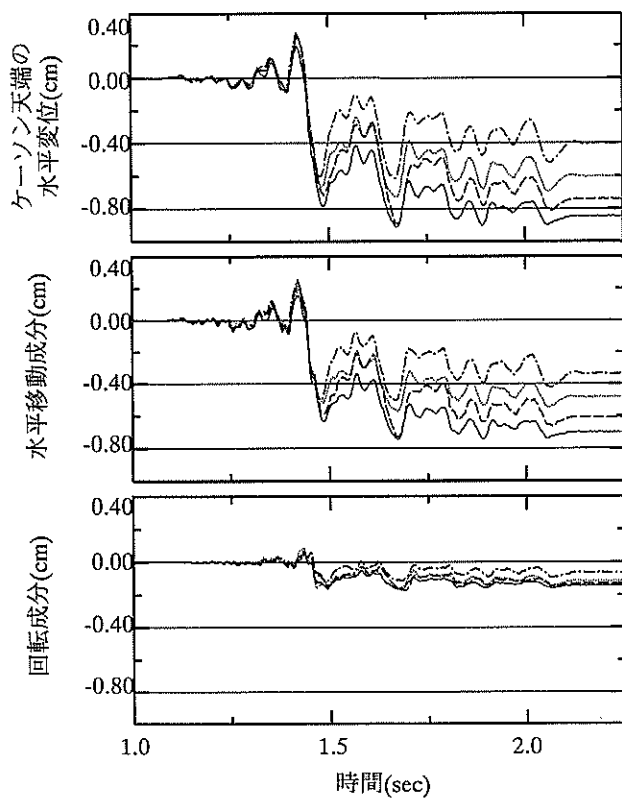




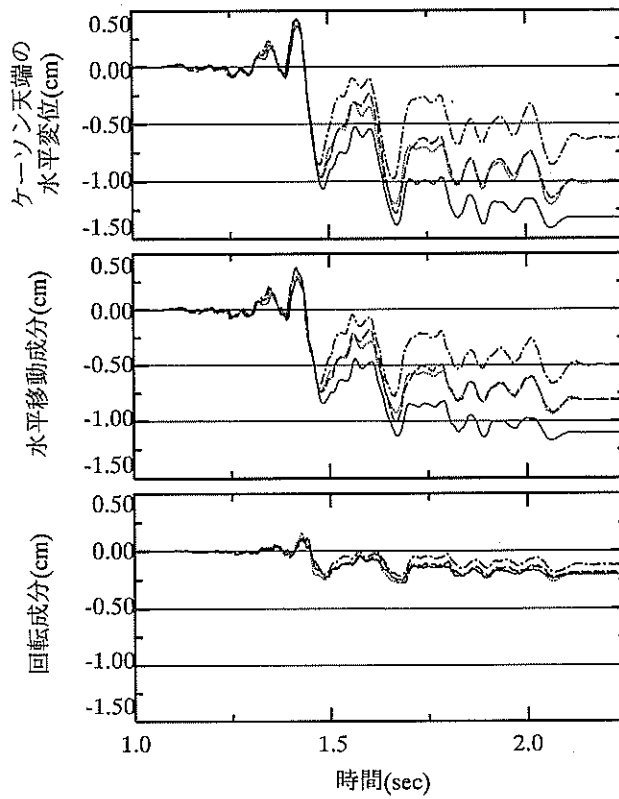
(e)500Gal 加振



(g)700Gal 加振



(f)600Gal 加振



(h)800Gal 加振

図-3.6 ケーソン天端の水平変位の時刻歴

図-3.6 ケーソン天端の水平変位の時刻歴

模型振動実験結果からケーソン前面の鉛直変位は  $y_1$ ,  $y_2$  と比較して小さかった。よって、加振ステップごとの  $y_1$  の変化を無視した。また、ケーソン重心の鉛直変位  $v_G$  については、ケーソン前面に設置した鉛直方向の変位計の計測値  $D_3$  で代用した。ケーソン天端の水平変位のうち回転成分  $D_r$  は、

$$D_r = D_2 - D_h \quad (5)$$

より算出した。

図-3.6 にケーソン天端の水平変位時刻歴の比較を加振ステップごとに示す。各加振ステップの図は、上からケーソン天端水平変位 ( $D_2$ )、水平移動成分 ( $D_h$ )、回転成分 ( $D_r$ ) である。図中の線は実線がケース 1、点線がケース 2、破線がケース 3、一点鎖線がケース 4 の結果である。また、縦軸は正が陸側、負が海側への変位を表している。図-3.6(a)~(h) からケーソン天端の水平変位のうち、水平移動成分 (重心の水平変位) の方が、回転成分よりも卓越していることがわかる。これは、残留変位の小さいケース 4 でも同様であった。また、水平移動成分、回転成分ともに、各ケース間の大小関係が、ケーソン天端の水平変位 ( $D_2$ ) の大小関係と概ね一致した。

b) ケーソン天端の残留水平変位低減効果

図-3.7 に最大入力加速度とケーソン天端の残留水平変位の関係を示す。縦軸は累積の残留水平変位ではなく各加振ステップでの残留変位である。図を見ると、200~400Gal の加振レベルではケース 1 とケース 3 の残留水平変位量がほぼ同程度である (ケース 3 に残留水平変位低減効果が見られない)。これに対して、ケース 2 とケース 4 は残留水平変位の低減効果が現れている。500Gal 以上の加振レベルについては、ケース 3 の残留水平変位がケース 1 よりも小さくなり残留水平変位低減効果が見られる。ケース 2 はケース 4 よりも残留水平変位が大きくなり、ケース 3 に近い値となっている。ケース 4 は 500Gal 以上の加振レベルにおいて大きな残留水平変位低減効果が見られた。

図-3.8 にケーソン天端における残留水平変位の低減率を示す。残留水平変位の低減率は次式、  
低減率(%)

$$= \frac{\text{ケース1の残留水平変位} - \text{各ケースの残留水平変位}}{\text{ケース1の残留水平変位}} \times 100 \quad (6)$$

を用いて定義した。各加振ステップの最大入力加速度が一致しないため、図-3.8 の横軸は各加振ステップの最大入力加速度の目標値 (図中では目標最大入力加速度) としている。

ケース 2 は 100Gal の低加振レベルから 30~40%程度

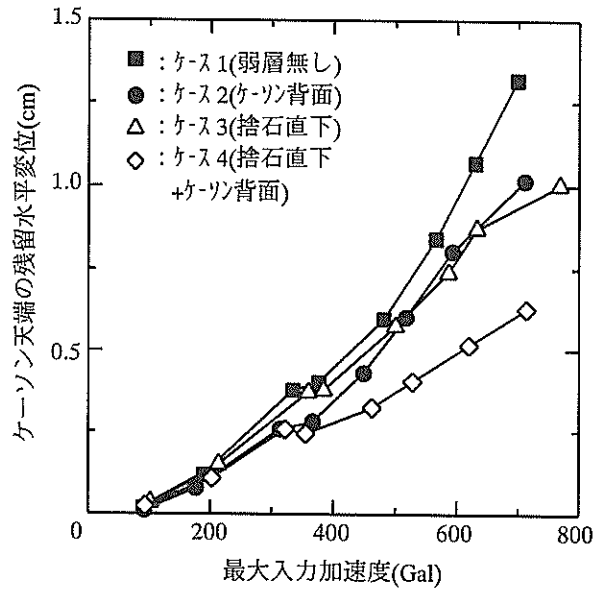


図-3.7 ケーソン天端の残留水平変位

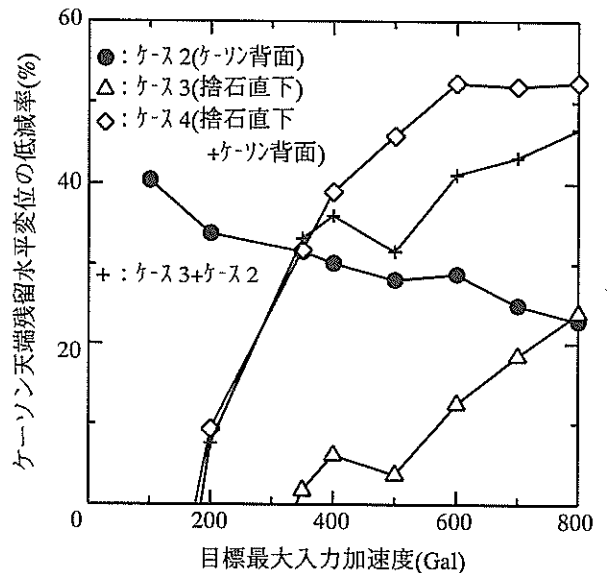


図-3.8 ケーソン天端における残留水平変位の低減率

の残留水平変位の低減効果が現れている。ただし、加振レベルが大きくなるにしたがって低減率は小さくなり、350Gal 以上の加振レベルでは 20~30%程度に低下している。ケース 3 では 350Gal の加振レベルまでは残留水平変位の低減効果が発揮されていない。100~200Gal の加振レベルではむしろ残留水平変位が大きくなった (図-3.7 からわかるように残留水平変位の絶対値が小さいことに留意されたい)。しかし、350Gal から加振レベル

が大きくなるにつれて残留水平変位低減効果が発揮されはじめ、700～800Galの加振レベルに対しては20%程度の低減効果があった。ケース4については、350～400Galの加振レベルに対する残留水平変位の低減率は30～40%とケース2とほぼ同程度であった。しかし、加振レベルが大きくなるとケース2とは逆に低減効果は増大し、500Gal以上の加振レベルでは50%程度の低減効果を発揮した。

また、100～400Galの加振ステップでは、ケース2とケース3の低減率を足し合わせると(図-3.8中の“+”プロット)、ケース4の低減率とよく似た傾向を示した。なお、ケース3の低減率が30%程度(増幅率が30%程度)であったため、ケース2+ケース3の200Galのプロットは、ケース2の低減率よりも小さくなっている。これより、ケーソン背面と基礎捨石直下の弱層はそれぞれ独立にケーソンの残留水平変位の低減効果に寄与しているものと考えられる。ただし、500Gal以上の加振ステップでは、ケース2の低減率とケース3の低減率の和よりもケース4の低減率の方が大きくなっている。これは、基礎捨石直下に設けた弱層で800Galまでの入力加速度が350Gal程度に低減するため、ケース4のケーソン背面の弱層に伝達する加速度がケース2の弱層に伝達する加速度よりも小さくなることを考えると、400Gal以上の加振レベルでは、ケーソン背面の弱層と基礎捨石直下の弱層に相互作用が生じていると考えられる。

### 3.3 まとめ

大型水中振動台の実験結果より以下のことがわかった。

- ・基礎捨石天端の最大応答加速度が350Galを超えると、基礎捨石天端～ケーソン底面間の応答加速度の減衰量が増加した。これは、ケーソンが捨石に対して海側の相対加速度を持ったことを意味しており、ケーソンが滑動したと考えられる。
- ・基礎捨石直下に弱層を設けることによって、800Galまでの入力加速度を弱層で350Gal程度に低減させることができた。これにより、ケーソンに作用する慣性力の低減を図ることができる。
- ・ケーソン天端の水平変位のうち、水平移動成分の方が、回転成分よりも卓越していた。
- ・ケーソン背面のみに弱層を設けた場合、加振レベルの増大に伴ってケーソンの残留水平変位の低減効果が小さくなった。これに対して、基礎捨石直下のみに弱層を設けた場合は350Galより大きい加振レベルで残留変位低減効果を発揮し、加振レベルの増大に伴って

効果が大きくなった。ケーソン背面と基礎捨石直下の両方に弱層を設けた場合では、500～800Galの加振レベルに対して、50%以上の残留変位低減効果が発揮された。

- ・100～400Gal加振のステップで、ケース2(ケーソン背面にのみ弱層)、ケース3(基礎捨石直下にのみ弱層)の残留変位低減率を足し合わせると、ケース4(ケーソン背面と基礎捨石直下の両方に弱層)の残留変位低減率とほぼ同じ値となった。このことから、100～400Gal程度の加振レベルでは、ケーソン背面と基礎捨石直下の弱層がそれぞれ独立にケーソンの残留水平変位低減効果に寄与していると考えられる。
- ・500Gal以上の加振レベルについては、ケース4の低減率は、ケース2とケース3の残留変位低減率の和よりも大きくなった。これは、基礎捨石直下の弱層とケーソン背面の弱層に相互作用が生じたためと考えられる。

## 4. 大型水中振動台模型実験の地震応答解析

### 4.1 解析概要

有限要素法による地震応答解析を用いて模型振動実験をシミュレートし、弱層を設置した重力式岸壁の地震時挙動を評価した。解析にはFLIP(井合ら(1990a), 井合ら(1990b))プログラムを使用した。FLIPは平面ひずみ状態を対象とする有限要素法に基づく地震応答解析プログラムである。解析対象とした実験は、3章で報告したケーソン式岸壁の模型振動台実験の弱層無しの場合と弱層有り(ケーソン背面:層厚3cm, 基礎捨石直下:層厚2cm)の場合である。両ケースとも最大加速度を700Galに調節した八戸波を入力した場合について解析を実施した。解析対象の模型地盤の断面は表-3.1の実験ケース1, 4と同じである。

解析はまず弱層無しの場合を対象に、土槽の地下水面以下の部分の間隙水圧要素の有無、基礎捨石の仮想粘着力の有無およびレイリー減衰パラメータ $\beta$ を変化させ、地震時挙動を最もよく説明する解析モデルを検討した。検討の結果を表-4.1に示す。表-4.2に解析定数一覧を示す。

表-4.1 解析モデル検討結果

基礎捨石の粘着力	間隙水圧要素	レイリー減衰パラメータ $\beta$
1.63kPa	有	0.001

す。また、液状化パラメータについては模型振動実験結果から、過剰間隙水圧の上昇が生じなかったものと判断し0としている。

表-4.2 解析に用いたパラメータ

マルチスプリング要素												
	基準となる平均有効拘束圧 $\sigma_{mo}$ (kPa)	初期せん断剛性 $G_{mo}$ (kPa)	初期体積剛性 $K_{mo}$ (kPa)	$mG^*$	$mk^*$	ポアソン比 $\nu$	湿潤密度 $\rho_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	間隙率 $n$	最大減衰 $h_{max}$	せん断抵抗角 $\phi'$ (deg.)	仮想粘着力 $c$ (kPa)	液状化パラメータ
背後地盤	9.763	18900	49288	0.5	0.5	0.33	18.54	0.447	0.24	38	0	0
表層地盤	9.763	14310	37318	0.5	0.5	0.33	14.04	0.452	0.24	38	0	-
基礎捨石	6.377	53789	140274	0.5	0.5	0.33	19.15	0.412	0.24	40	1.63	0
裏込石(気中)	2.433	22672	59125	0.5	0.5	0.33	14.23	0.446	0.24	40	0	-
裏込石(水中)	2.433	29641	77298	0.5	0.5	0.33	18.61	0.446	0.24	40	0	0

線形平面要素			
	ヤング率 $E$ (kPa)	ポアソン比 $\nu$	単位体積重量 $\rho_t$ (kN/m <sup>3</sup> )
ケーソン	2.23E+07	0.17	20.60
基礎地盤	1.76E+06	0.33	20.05

ジョイント要素				
	鉛直方向剛性 $K_n$ (kPa)	接線方向剛性 $K_t$ (kPa)	粘着力 $c$ (kPa)	摩擦角 $\phi$ (deg.)
ケーソン底面	1.00E+06	1.00E+06	0.0	31
ケーソン背面	1.00E+06	1.00E+06	0.0	15

レイリー減衰パラメータ	
$\alpha$	$\beta$
0	0.001

境界条件	
底面境界	固定境界
側面境界	鉛直ローラー(初期自重解析), 水平ローラー(地震応答解析)

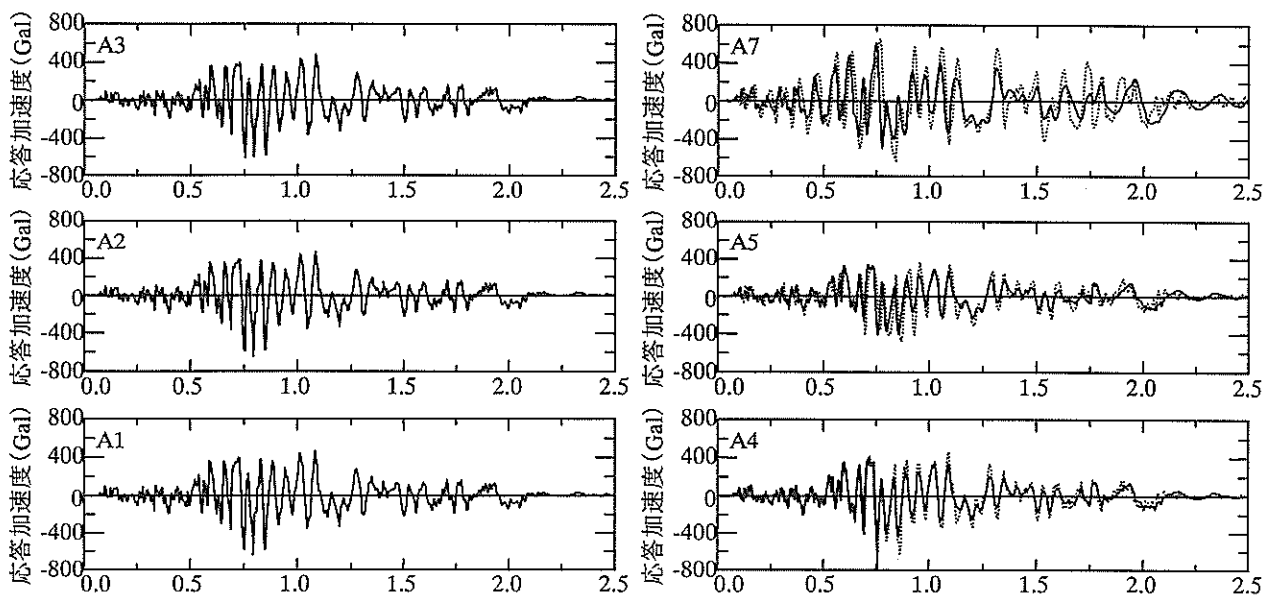


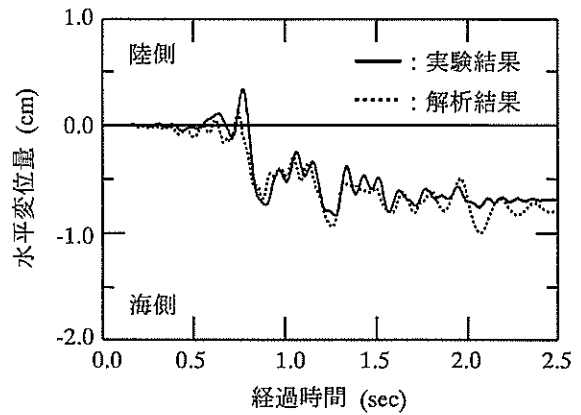
図-4.1 弱層がない場合のケーソン部の実験結果と解析結果の比較(点線:実験結果, 実線:解析結果)

## 4.2 解析結果

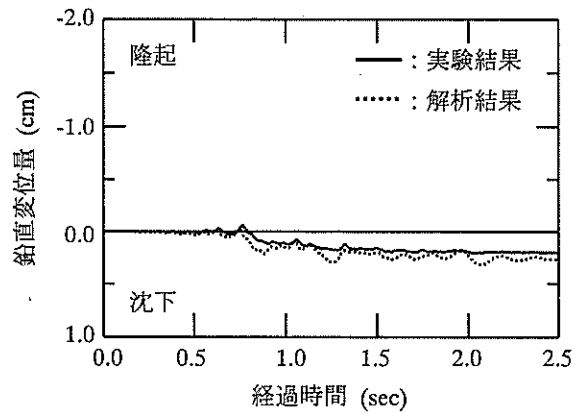
図-4.1 に弱層がない場合のケーソン部（加速度計 A1～A5, A7）の応答加速度に関する実験結果と解析結果の比較を示す（A1～A5, A7 の位置は図-3 と同じ）。図-4.1 より A2 から基礎捨石下部(A3)については両者の波形はよく一致している。基礎捨石上部(A4)では負方向の振幅が実験結果に対して小さくなるが、解析結果は実験結果をよく表しており、表-4.1, 2 に示した解析モデルの妥当性が示されたといえる。ケーソン下部(A5)では主要動付近で解析結果の位相が実験結果よりも幾分早くなっており、ジョイント要素による基礎捨石とケーソン間の不連続性のモデル化に幾分問題があると思われるが、ケーソン（A5, A7）においても解析結果は実験結果をよく表していると思われる。

図-4.2 にケーソン天端の応答変位時刻歴に関する実験結果と解析結果の比較を示す。変位は陸側を正、ケーソン天端鉛直変位は沈下を正としている。図より、水平変位、鉛直変位ともに解析結果から得られた残留変位量は実験結果とほぼ同等であった。

図-4.3 に弱層を設けた場合（ケーソン背面：層厚 3cm, 基礎捨石直下：層厚 2cm）のケーソン部の応答加速度に関する実験結果と解析結果の比較を示す。弱層は線形平面要素でモデル化し、ヤング率を 120kPa としている。図-4.3 より弱層下部(A2)については両者の波形はよく一致している。弱層上部の A3 においては、解析結果、実験結果ともに、絶対値の最大値が 300Gal 程度減少した。また、ケーソン（A5, A7）においても解析結果は実験結



(a) 水平変位



(b) 鉛直変位

図-4.2 ケーソン天端の応答変位時刻歴の比較（弱層なし）

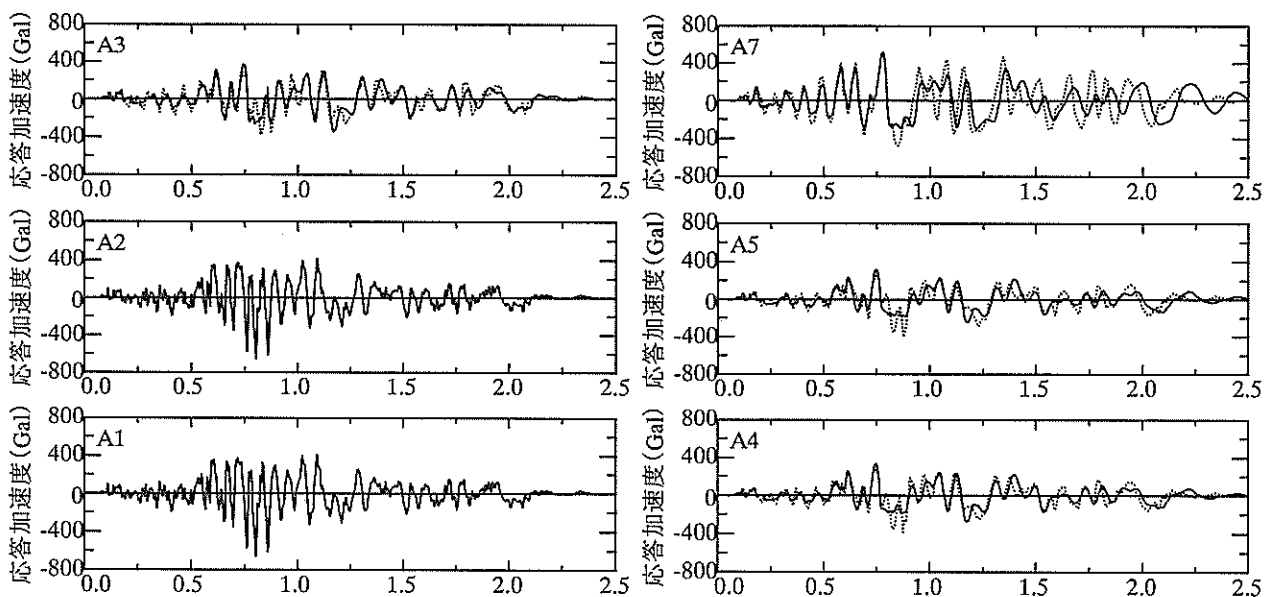


図-4.3 弱層を設けた場合のケーソン部の実験結果と解析結果の比較（点線：実験結果、実線：解析結果）

果をよく表していると思われる。

図-4.4 にケーソン天端の応答変位に関する実験結果と解析結果の比較を示す。図からわかる通り、解析結果は実験結果と定量的に大きく異なった。さらに、応答変位の解析結果について弱層有りの場合と弱層無しの場合を比較すると、図-4.4 に示すように、弱層有りの場合の方が弱層無しの場合よりも残留水平変位量が大きくなった。したがって、本モデルでは弱層によるケーソンの残留変位低減効果は表現できなかった。

#### 4.3 まとめ

有限要素法による地震応答解析を用いて模型振動実験をシミュレートした結果、次のような結論が得られた。

- ・弱層無しの場合を対象に、地下水面以下の部分の間隙水圧要素の有無、基礎捨石の仮想粘着力の有無およびレイリー減衰パラメータ $\beta$ を変化させ、地震時挙動を最もよく説明する解析モデルを検討した。その結果、

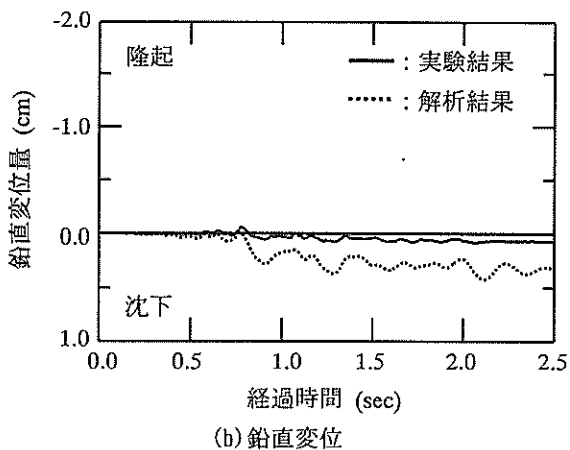
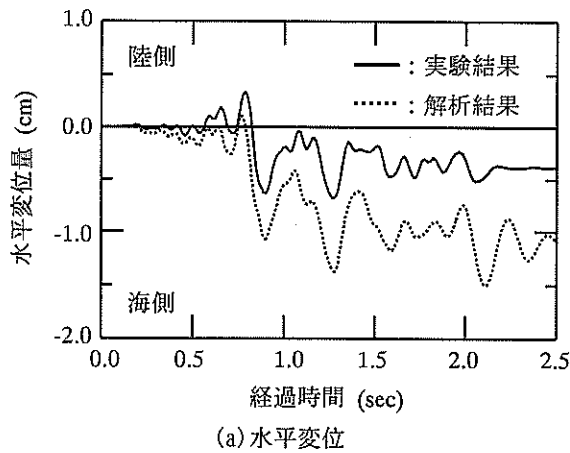


図-4.4 ケーソン天端の応答変位時刻歴の比較  
(弱層あり(捨石直下, ケーソン背面))

表-4.1, 2 で示した解析モデルで応答加速度, 応答変位の実験結果をよく表現できた。

- ・弱層有りの場合の解析結果については、応答加速度に関して解析結果は実験結果をよく表現できた。しかし、応答変位については弱層によるケーソンの残留変位低減効果は表現できなかった。

#### 5. 結論

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- ・小型振動台実験では、弱層の位置による免震効果の違いは見られなかったが、大型振動台実験では、捨石直下とケーソン背面の両方に弱層を設けた場合に、応答加速度およびケーソンの残留変位の低減に大きな効果が得られた。
- ・基礎捨石天端の最大応答加速度が 350Gal を超えると、基礎捨石天端～ケーソン底面間の応答加速度の減衰

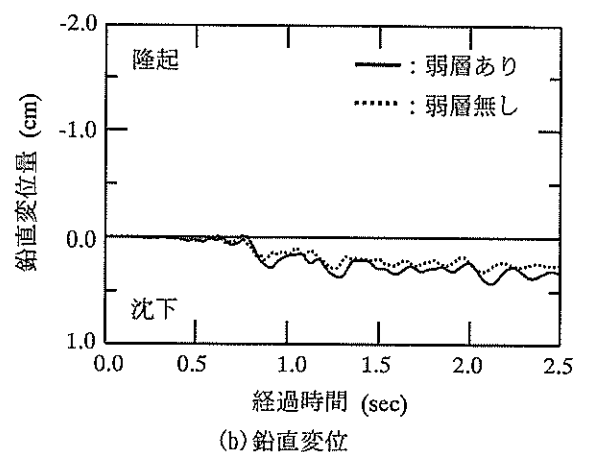
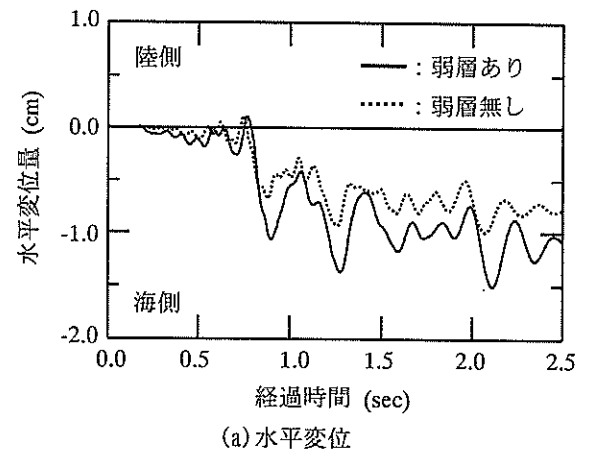


図-4.5 応答変位時刻歴の比較(解析結果)

量が増加しはじめるが、基礎捨石直下に弱層を設けることによって、800Gal までの入力加速度を弱層で350Gal 程度に低減させることができた。これにより、ケーソンに作用する慣性力が低減でき、ケーソンの滑動を低減できる。

- ・ケーソン天端の水平変位のうち、水平移動成分の方が、回転成分よりも卓越していた。捨石直下に弱層がある場合にも回転が卓越することはなかった。
- ・ケーソン背面と基礎捨石直下の両方に弱層を設けた場合では、500～800Gal の加振レベルに対して、50%以上の残留変位低減効果が発揮された。
- ・100～400Gal 程度の加振レベルでは、ケーソン背面と基礎捨石直下の弱層がそれぞれ独立にケーソンの残留水平変位低減効果に寄与していると考えられる。
- ・500Gal 以上の加振レベルについては、ケース2とケース3の残留変位低減率の和は、ケース4の低減率よりも小さくなった。これは、基礎捨石直下の弱層とケーソン背面の弱層に相互作用が生じたためと考えられる。

## 6. あとがき

今回行った実験で、ケーソン式岸壁に設けた弱層の免震効果について検討し、弱層の応答加速度およびケーソン天端の残留変位の低減効果を確認することができた。しかし、加速度と同時に変位が低減するメカニズムについてはまだ明らかになっていない。地震応答解析においても、応答加速度については弱層の効果を表現できたが、応答変位については実験結果を説明するに至らなかった。

実用化に向けての問題は、免震材の開発が挙げられる。今回の実験に用いた免震材は、品質を一定に保つために超軟質エラストマーを用いたが、環境面、経済面からも問題がある。免震材については、廃棄物の利用や液化化層の部分改良（薄い未改良層を残す）なども視野に入れてゆく必要があると考えられる。

(2002年2月14日受付)

## 謝辞

本研究は運輸施設整備事業団の「運輸分野における基礎的推進制度」に基づき採択された共同研究で得られた成果を取りまとめたものである。共同研究は運輸施設整備事業団、港湾空港技術研究所、(財)沿岸開発技術研究センター、五洋建設(株)の関係研究機関の協力を得て進められた。関係機関ならびに貴重なご意見を頂きました皆様に深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 一井康二・井合進・森田年一(1997): 兵庫県南部地震におけるケーソン式岸壁の挙動の有効応力解析, 港湾技術研究所報告, Vol. 36, No. 2, pp.41-86.
- 建設省土木研究所(1996): 地下構造物の免震設計に適用する免震材の開発に関する共同研究報告書(その1).
- 港湾施設被害検討委員会編(1995): 兵庫県南部地震による港湾施設の被災考察, 港湾技研資料, No. 813.
- 港湾施設被害検討委員会編(1997): 1995年兵庫県南部地震による港湾施設等被災報告, 港湾技研資料, No. 857.
- 國生剛治・佐藤清隆・松本正毅(1995): 1995年兵庫県南部地震での地盤の非線形振動特性, 土と基礎, Vol. 34, No. 9, pp.39-43.
- 土質工学会軟弱地盤における地震増幅と被害に関する研究委員会編(1994): 軟弱地盤における地震動増幅シンポジウム, 地盤工学会.
- 土木学会地震工学委員会編(2000): 日本地震あれからこれから(1995年兵庫県南部地震5周年特別企画), 土木学会.
- 土木学会地震工学委員会減震・免震・制震小委員会編(2002): 減震・免震・制震構造設計法ガイドライン(案), 地下構造物・地盤編, pp.101-166, 土木学会.
- S. Iai(1988): Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure Model in 1G Gravitational Field, Report of the Port and Harbor Research Institute, Vol. 27, No. 3, pp. 3-24.
- S. Iai, Y. Matsunaga and T. Kameoka(1990a): Parameter Identification for a Cyclic Mobility Model, Report of the Port and Harbor Research Institute, Vol. 29, No. 4.
- S. Iai, Y. Matsunaga and T. Kameoka(1990a): Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Report of the Port and Harbor Research Institute, Vol. 29, No. 4.

港湾空港技術研究所資料 No.1021

2002.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 0468(44)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社ポートサイド印刷

Copyright © (2002) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。