

港湾技術資料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 753 June 1993

段積み形式大水深護岸の耐震性に関する模型振動実験

長 田 信
上 部 達 生
高 野 剛 光

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	3
2. 実験概要	6
2.1 模型	6
2.2 碎石試料	9
2.3 実験の種類	9
2.4 計測システム，測定記録の処理	9
2.5 振動台	10
3. 静的引張り試験	10
3.1 せん断強度試験	10
3.2 中詰め of 抜き出し強度試験	13
4. 模型振動実験	15
4.1 実験内容	15
4.2 S波速度結果と密度管理結果	22
5. 振動実験結果	24
5.1 応答加速度分布	24
5.2 動水圧特性	31
5.3 動的せん断強度	32
5.4 破壊形状	35
5.5 動間隙水圧特性	37
6. 結論	40
あとがき	41
参考文献	41
記号表	41

Shaking Table Tests on The Earthquake Resistance of Stack Type Revetment in Deep Sea

Makoto OSADA*
Tatsuo UWABE**
Takemitsu TAKANO*

Synopsis

It is under examination to adapt a cellular block revetment and a steel plate cellular revetment with floor slab to a revetment constructed in deep sea. As these structures are made by stacking two or three blocks, each blocks might move separately during earthquake. The cellular block revetments have been constructed occasionally on shallow seabed ground. The steel plate cellular revetment with floor slab is a new type structure. Therefore it is necessary to investigate behavior of these structures during earthquake. In this study, model tests have been conducted by using a shaking table to examine characteristics of vibration, hydrodynamic pressure and failure mode of these structures.

The following conclusions were obtained:

- 1) The vertical distributions of the response acceleration and the phase changed considerably at the boundary of each blocks in case of the cellular block type.
- 2) The hydrodynamic pressure on the cellular block type and on the steel plate cellular type can be estimated by Zanger's formula and Westergaard's formula, respectively.
- 3) Each blocks moved horizontally in the direction of water side at the residual deformation of the cellular block type. The displacement of the blocks increased with increase in height. The main failure mode of steel plate cellular type was sliding on the mound.
- 4) In case of large permeable backfilling, the dynamic pore water pressure during sliding could be estimated by the relative velocity of the structure and the permeability of the backfilling.

Key Words : Cellular Block, Shearing Strength, Shaking Table Model Test, Hydrodynamic Pressure, Dynamic Pore Water Pressure.

* Member of Earthquake Disaster Prevention Laboratory, Structural Engineering Division
** Chief of Earthquake Disaster Prevention Laboratory, Structural Engineering Division

段積み形式大水深護岸の耐震性に関する模型振動実験

長 田 信*
上 部 達**
高 野 剛 光*

要 旨

大水深護岸の構造形式の一つとしてセルラブロック式および底版付き鋼板セル式護岸が検討されている。セルラブロック式護岸は施工実績が少なく、大半は設置水深が浅い。また、底版付き鋼板セル形式は新しい構造であり、地震時挙動に関する検討は行われていない。何れの構造形式も段積み構造のため耐震性に不明な点が多く、今後の大水深護岸の設計に際し、これらを明かにする必要がある。そこで、本研究では各形式について模型振動実験を実施し、振動特性、前面に作用する動水圧、破壊形状等について検討を加えた。得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) セラブロック式では、入力加速度の増加にともない各ブロックの境界で応答加速度、位相が著しく変化した。これらは隔壁間隔が大きな場合ほど顕著であった。
- (2) 前面の動水圧は、セラブロック式ではZangerの式が、鋼板セル式ではWestergaardの式がそれぞれ適応できる。
- (3) セラブロック式では各ブロックがほぼ水平に、上部ほどやや大きくせり出した形で破壊した。底版付き鋼板セル式では本体が滑動することで破壊した。
- (4) 透水性の大きな裏込めの場合、滑動時の動間隙水圧は構造物の相対速度と裏込めの透水係数を用いておよそ評価できる。

キーワード：セラブロック、せん断強度、模型振動実験、動水圧、動間隙水圧

1. まえがき

大都市圏における港湾では、船舶の大水深化および輸送方式のコンテナ化に対応するため、沖合いに人工島を建設し、大規模な物流基地とするケースが増えている。たとえば、神戸の六甲アイランド、ポートアイランド、あるいは横浜の大黒埠頭や計画中の南本牧埠頭等がこの例としてあげられる。また昨今では、都市圏で発生する大量の産業廃棄物を処理するための施策として、人工島の建設が進められる例も多い。このような大水深に人工島を建設する機会は今後益々増加することが予想され、それに適応した安全かつ経済的な護岸の開発を進める必要がある。

現行の港湾構造物の耐震設計では震度法が用いられている。構造物の水深が浅い場合、高さ方向の揺れ方

の変化は小さいため、この考えはおよそ妥当と考えられる。ところが、構造物が大きくなれば、地震の際の構造物の揺れ方は高さ方向で大きく異なり、一つの震度で揺れ方を表す震度法では妥当性を欠くと考えられる。このため、たとえば大水深の防波堤である大船渡湾口防波堤（設置水深-35.5m）では修正震度法による耐震設計が導入されている。また、釜石港の湾口防波堤（設置水深-60m）では地震応答解析によって耐震設計を行う方法が検討されている¹⁾。これに対し護岸では設置水深の深いものは少ない。表-1は既存の比較的深い位置に設置された護岸を示すが、深いものでも-20mほどであり、その設計に際しては現行の震度法で対応してきた。しかし、さらに深い位置に設置する場合には、大水深防波堤と同様に地震応答解析等による設計を行うべきであろう。

大水深護岸の構造形式として様々な形式が強度面ある

* 構造部 地震防災研究室
** 構造部 地震防災研究室長

表一 大水深護岸の施工事例

No	港名	施設名	最大水深 (m)	マウンド水深 (m)	構造形式
1	八戸港	八太郎1号埠頭先端護岸	-13.0	-12.0	ケーソン式
2	女川港	東北電力女川原子力発電所防波護岸東側	-12.0		捨石式
3	小名浜港	7号埠頭先端護岸	-16.0	-13.0	直立消波ケーソン式
4	千葉港	廃棄物処理場埋立護岸	-14.0	-9.0	二重矢板式
5	東京港	中央防波堤外側廃棄物処理場護岸	-10.0	-5.0	二重矢板式
6	川崎港	廃棄物埋立護岸	-17.0	-7.0	鋼矢板セル式
7	横浜港	本牧埠頭廃棄物外周護岸	-24.0	-13.0	鋼矢板セル式
8	横浜港	大黒埠頭緑地護岸, 廃棄物護岸	-17.0	-6.0	鋼矢板式ケーソン式
9	横須賀港	夏島地区I護岸	-12.0	-6.0	L型ブロック式
10	神戸港	ポートアイランド防波護岸	-13.0	-10.0	ケーソン式
11	大阪港	北港(南地区)廃棄物処理護岸	-11.5	-7.5	直立消波ケーソン式
12	日高港	関西電力(株)御防発電所護岸	-18.0	-14.0	ケーソン式
13	北九州港	響灘地区廃棄物埋立護岸	-12.0		捨石式
14	伊万里港	浦の崎地区廃棄物埋立護岸	-22.0		ケーソン, 直立消波ブロック
15	大分空港	北側拡張部埋立護岸	-14.5	-7.0	ケーソン式
16	宮崎空港	東側防波護岸	-9.5	-7.0	ケーソン式, 被覆消波ブロック
17	油津港	東地区護岸(防波)	-19.0	-12.0	ケーソン式

いは経済面から比較検討されている。たとえば、ケーソン式として、従来型、ハイブリッド型、台形ケーソン、半円形ケーソン等があり、その他の構造としてセルラブロック式、鋼板セル式などの重力式のものや、ジャケット式、鋼管矢板式等様々である。このうちケーソン式と矢板式が通常水深での設置例も多く、過去の大地震による被災事例も蓄積されていることから、これらを参考にして大水深護岸に関して地震応答解析による設計を導入し易いと考えられる。一方、本研究で対象としたセル

ラブロック式や底版付き鋼板セル式護岸は施工実績が少なく、そのほとんどは水深が浅い位置に設置されている。「底版付き鋼板セル」は「鋼製円筒ケーソン」と同じものであるが、ここでは「底版付き鋼板セル」という名称を用いている。これらの形式を大水深に適用した場合、図一1、図一2のような形状が考えられるが、いずれも多段積み構造であることから、地震時には各ブロックが必ずしも一体としての挙動を示さないことが予想される。また、特にセルラブロック式では下段ほど前に突出し

ていることから、前面に作用する動水圧の設定が難しい。さらに地震により破壊する際の破壊形状がどのようなものであるか等、耐震性に関し不明な点が多い。このため、地震応答解析を行うに際し、解析条件の設定が難しい状況にある。

め材料を用いれば、壁体の一体性が保持される。
 ⑤段積みなので目地が多く、吸出防止対策が煩雑である。底版付き鋼板セル式護岸は円筒形の鋼板セルと鉄筋コンクリート底版を結合した新しいタイプのケーソン構造物である。マウンド上に一列に設置した鋼板セル式ケー

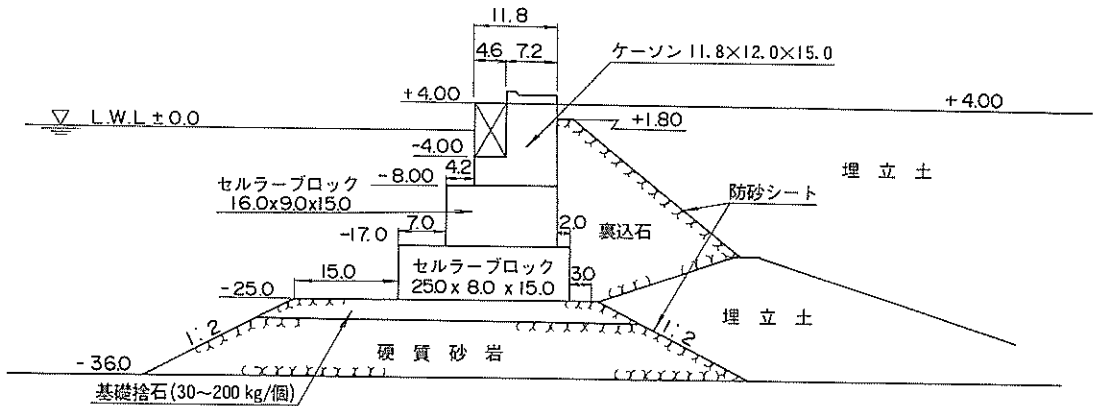


図-1 セルラブロック式護岸

セルラブロック式護岸の特徴は以下のようにまとめられる。

- ① 施工設備がケーソンに比べて簡単であり、二、三段積みによれば、クレーン船も特に大きな能力を必要とせず、時には底部に仮蓋をして浮かせて運搬することもできる。
- ② 底版のない場合は、ケーソンに比べて良質の中詰め材を用いなければならないが、底部の摩擦抵抗は大きくなる。
- ③ 他の重力式構造物と比較して、不同沈下に弱い。
- ④ プレパックドコンクリート、水中コンクリートの中詰

ソング間に鋼板製アークをはめ込み、壁体を構築し、壁体内には中詰めを投入して重力式構造物とする。その特徴は以下の通りである。

- ① コンクリートケーソンに比べ自重が小さく小型起重機船で設置可能である。
- ② 自重が小さいため浮遊時の吃水が小さく浅い海域での浮上曳航が可能である。また、コンクリート底版により、重心位置が低くなり曳航時の安定性がよい。
- ③ セル下端は底版と結合されており、中詰め材が流出することがない。
- ④ コンクリート底版によってセルの変形が拘束されるた

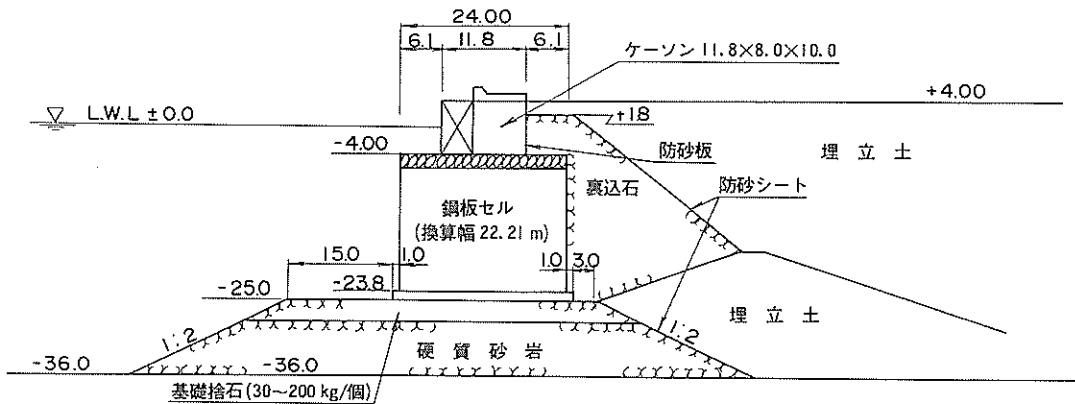


図-2 底版付き鋼板セル式護岸

め、置きセルに比べて変形しにくく、施工時の安定性が高い。

- ⑤セルの中詰めとして砂を利用することができる。
- ⑥目地がないため中詰めの吸い出しは生じにくい。
- ⑦通常ケーソンに比べて製作工期が短くて済む。

このように各形式とも大水深護岸に適用した場合、通常のケーソン式と比較して施工面に長所があり、今後の大水深護岸の選定に際し一つの選択肢になると思われる。

こうした背景を受けて本研究ではセルラーブロック式および底板付き鋼板セル式護岸の模型振動実験を実施し、動的な挙動に関するデータを収集した。実験結果からとくに、各ブロック間の位相差、振動の増幅、動水圧分布および破壊形状等について検討を加えた。

2. 実験概要

2.1 模型

実験では図-1、図-2に示したセルラーブロック式護岸と鋼板セル式護岸の形状を想定して模型を製作した。表-2に製作した実験用模型の一覧を示す。模型の種類は大別して2種類ありセルラーブロック式と鋼板セル式である。ケーソンとセルラーブロックはモルタル製とし、それぞれ単位体積重量が2.2g/cm³、2.45g/cm³となるよう配慮して製作した。鋼板セル式模型の底板の製作では、模型の強度を増すためにモルタル中に金網を入れて

表-2 模型の諸元

	重量 (kg)	体積 (cm ³)	単位体積重量 (g/cm ³)
上段ケーソン (セルラーブロック式)	62.7	26036.4	2.41
上段ケーソン (鋼板セル式)	25.37	10828.2	2.34

			重量 (kg)	中詰め体積 (cm ³)	単位体積重量 (g/cm ³)
中段ブロック	A	①	13.265	28575.6	2.47
		②	12.592	28430.0	2.36
	B	①	22.81	23522.2	2.20
		②	23.12	23431.8	2.27
下段ブロック	a	17.86	40131.2	2.48	
	b	31.06	33201.8	2.23	
	c	23.16	36424.4	2.45	
鋼板セル		39.73	141233.5		

補強した。

(1) セルラーブロック式模型

上段ケーソンは図-3に示す寸法のもの3個製作した。このうち1個は計測用として、水圧計設置用にあらかじめ前面に図に示すように深さ3cm、幅2cmの溝を設けた。また、上段ケーソンのダミーとして幅が半分の模型を2個製作した。

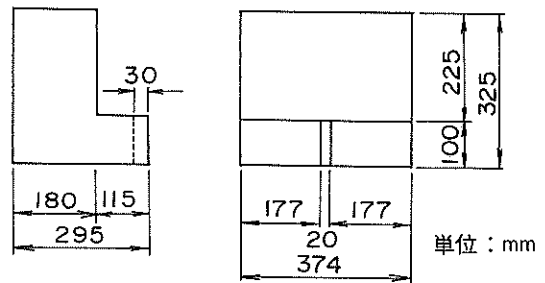
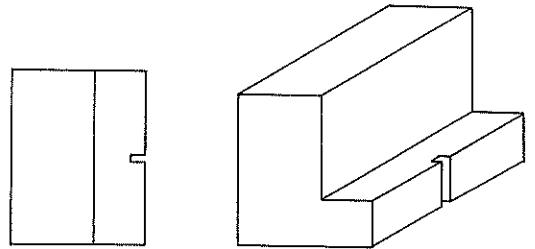


図-3 セルラーブロック式用上段ケーソン

中段セルラーブロックはA、Bの2種類製作した。Aは図-4-1に示すように隔壁がない模型であり、Bは図-4-2に示すように隔壁がある模型である。これらA、Bの模型をそれぞれ4個製作した。このうち2個ずつは計測用模型として、模型前後面の中央に2つつ直径8.2mm程度の孔を設けた。

下段セルラーブロックはa、bの2種類製作した。aは図-5-1に示すように隔壁間隔が大きい模型、bは図-5-2に示すように隔壁間隔が小さい模型である。これら、a、bの模型をそれぞれ3個製作した。このうち1個ずつは計測用模型として、模型の前後面の中央に2つつ直径8.2mm程度の孔を設けた。下段セルラーブロックのダミーとして図-5-3に示す模型を2個製作した。

(2) 底板付き鋼板セル式模型

底板付き鋼板セルは図-6-1に示す模型を3個製作し、一つを計測用、他をダミーとして使用した。鋼板セルは厚さ0.35mmの亜鉛鉄板を使用し、底板はモルタル製

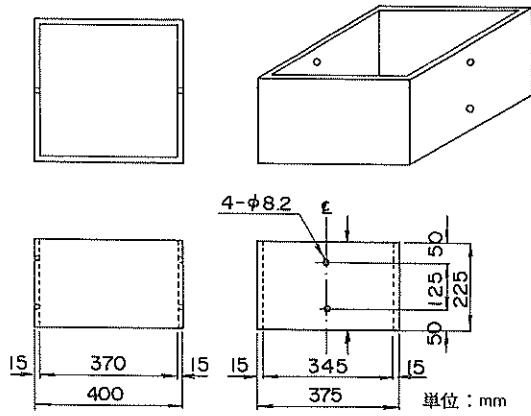


図-4-1 中段セルラブロックA

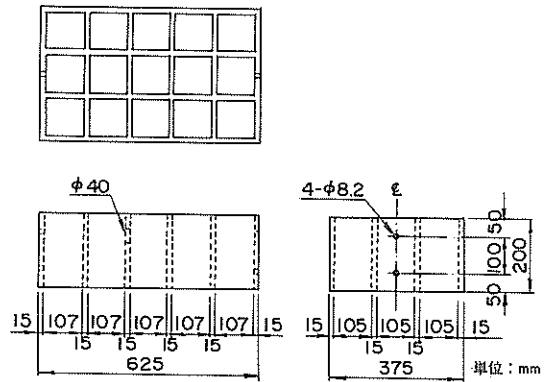


図-5-2 下段セルラブロックb

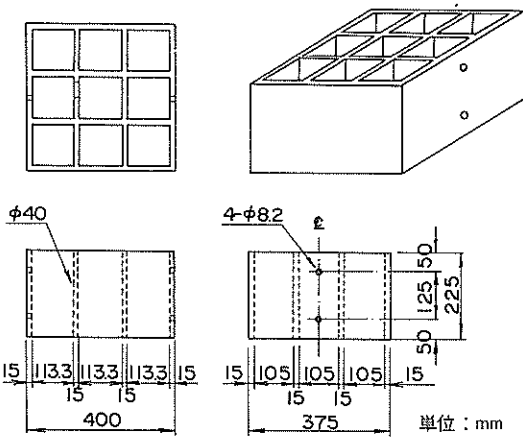


図-4-2 中段セルラブロックB

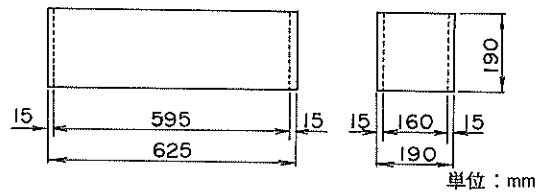


図-5-3 下段セルラブロック ダミー

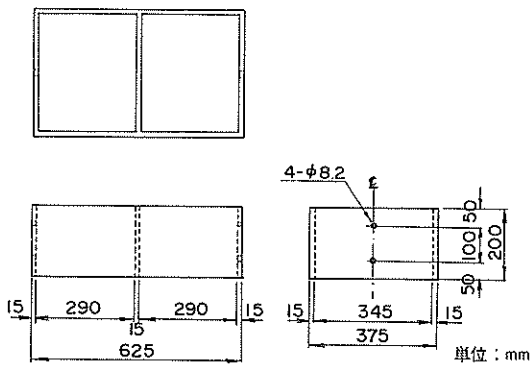
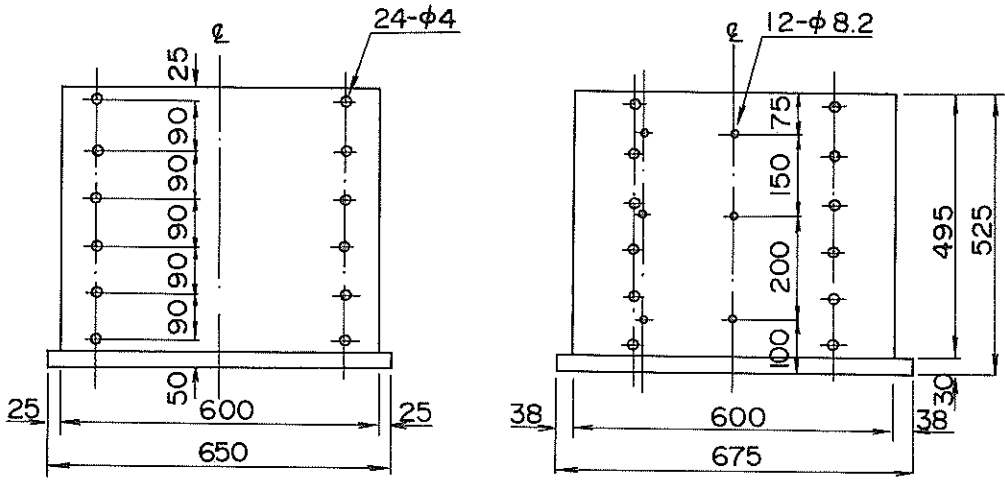


図-5-1 下段セルラブロックa

とし全重量が38.2kgになるように配慮した。計測用模型の表面にはアーク部接続用の孔24個と、水圧計設置用の孔12個をあらかじめ開けた。ダミー模型にはアーク部接続用の孔12個を開けた。

図-6-2に示す各模型をつなぐアーク部を4枚製作した。アーク部は厚さ0.18mmの亜鉛鉄板を使用し、銅板セルとの接合のために端をそれぞれ2cm曲げ、この部分に直径4mmの孔を6個ずつ開けた。4枚のアーク部の内2枚については、水圧計設置の孔を3個ずつ開けた。アーク部を接合する際に使用する当て板は、図-6-3に示すように厚さ2mmの鉄板を使用し、直径4mmの孔を6個ずつ開けた。アーク部の接合は図-7のように両側から当て板ではさみ、ボルトで固定した。

上段のケーソンは図-8に示す寸法で8個製作し、単位体積重量が所定の値になるよう配慮した。



単位：mm

図-6-1 底版付き鋼板セル模型

アーク部 (4枚)

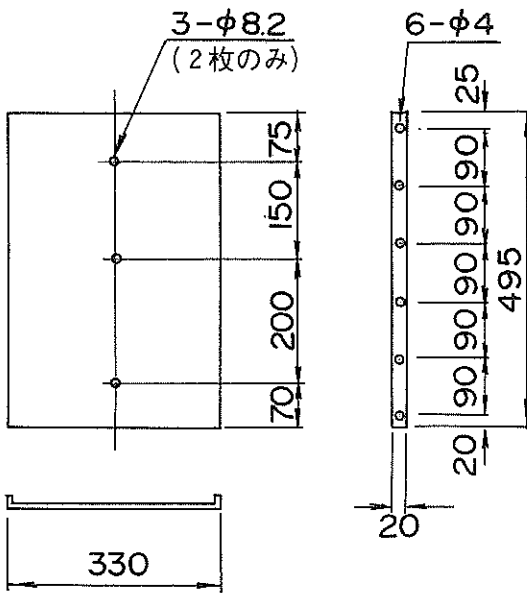


図-6-2 アーク部

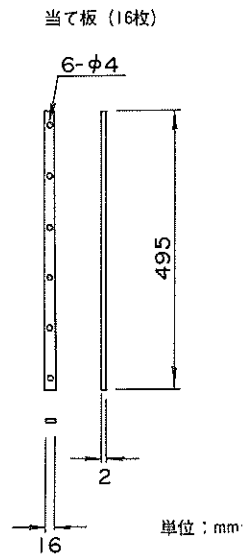


図-6-3 当て板

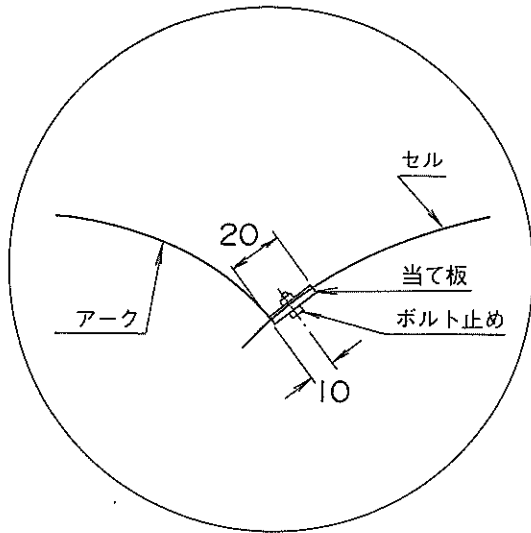


図-7 アーク部の接合

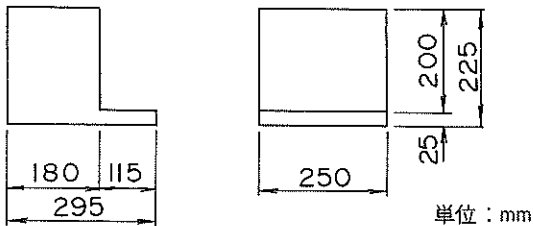
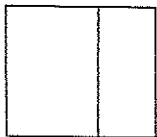


図-8 鋼板セル式用上段ケーソン

2.2 砕石試料

マウンド作成用として単粒度6号砕石を1.5m³、セルラブロックの中詰めおよび裏込め材として単粒度7号砕石を4.5m³準備した。これら6号および7号砕石は東京都青梅市で採取されたものである。実験に先立ってこれらの砕石の粒度試験、最大密度、最小密度に関する室内試験を行った。その結果、6号砕石はほぼ単粒度の分布を示していたので水洗いは実施しなかった。一方、7号砕石は細粒分をかなり含んでいたため水洗いを行うとともに現場で粒度試験ならびに突き固め試験を実施し、粒度分布等に関するデータを収集した。各砕石の物性値を

表-3に粒度加積曲線を図-9にそれぞれ示す。実験前に行ったこれらの試験以外に、実験途中および実験後も一連の室内試験を行い、合計3回室内試験を実施した。

表-3 砕石の物性値

	6号砕石	7号砕石
比重	2.635	2.714
e _{min}	0.914	1.111
e _{max}	0.633	0.762
D ₁₀ (mm)	3.7	1.7
U _c	2.49	1.94

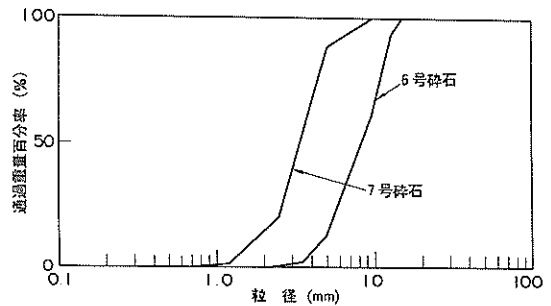


図-9 砕石の粒度加積曲線

2.3 実験の種類

一連の実験は以下のように大別される。

- (1) 静的引張り試験
- (2) 模型振動実験
 - ①セルラブロック式模型・隔壁間隔大
 - ②セルラブロック式模型・隔壁間隔小
 - ③底版付き鋼板セル式模型

振動実験に先立ってまずセルラブロック模型の基本的な特性を把握するために静的引張り試験を実施した。静的引張り試験はセルラブロック相互のせん断強度を測定するものと、セルラブロックの中詰めが抜出するときの強度を測定するものを実施した。この後各護岸模型を振動台上に作成し破壊実験を行った。このとき裏込めがある場合とともに裏込めがない場合についても実験を行った。

2.4 計測システム 測定記録の処理

全実験を通じて使用した計測器を表-4にまとめて示す。

表-4 計測器一覧

計器名	形式	容量	数量
加速度計	ASW-2A	2 G	33
	ASW-5A	5 G	4
間隙水圧計	P306AV-2	200gf/cm ²	24
変位計	TR5050W	50mm	2
	TR5050R	50mm	1
荷重計	LT-2TF	2 tf	1
	TCLZ200K	200kgf	1

振動実験において、模型の振動性状は加速度計により測定し、模型前面に作用する動水圧、および裏込め内の間隙水圧の測定は小型水圧計（φ=8mm）を使用した。また模型の変位量はストローク長50mmの変位計を使用して測定した。

各センサーからの信号は増幅器を通じてデジタルデータレコーダに記録した。このときのサンプリング間隔は0.005sとした。また、実験中は電磁オシログラフを用いて波形のモニターを行った。

2.5 振動台

本報告の一連の実験を通じて使用した振動台は運輸省港湾技術研究所所有の水中振動台である。振動台の主要諸元を表-5に示す。この振動台は可動部分が大なる水槽の底部にあり、海底地盤が地震によって揺れる様子の再現に適している。振動台の駆動方式は電気、油圧サー

ボ式で、制御はデジタルコンピュータにて行い、高精度で波形を再現できる。

3. 静的引張り試験

静的引張り試験はセルラブロック模型を対象に実施した。この試験は各模型間のせん断強度を測定する試験と、セルラブロック内部に詰められた砕石が抜出す時の強度を測定する試験とに分けられる。以下では、それぞれの試験について述べる。

3.1 せん断強度試験

3.1.1 試験内容

せん断強度試験では6号砕石と模型間および各模型間の静的せん断強度を求めるために以下の7ケースに関してそれぞれ3回試験を実施した。

- ①6号砕石 ~ 下段セルラブロック模型 a
- ②6号砕石 ~ 下段セルラブロック模型 b
- ③6号砕石 ~ 下段セルラブロック模型 c
- ④下段セルラブロック模型 a
~ 中段セルラブロック模型 A
- ⑤下段セルラブロック模型 b
~ 中段セルラブロック模型 B
- ⑥中断セルラブロック模型 A ~ 上段ケーソン
- ⑦中断セルラブロック模型 B ~ 上段ケーソン

ここで、下段セルラブロック式模型 c とは、比較のために行ったもので、図-10のように模型底に底版がある。外寸は他の下段セルラブロックと同じである。

表-5 水中振動台の諸元

水槽寸法	23m×13m		
水深	最大1.8m		
振動台位置	水槽底面		
振動箱内寸	3m×3m×(深)1.5m		
振動箱上蓋	3.4m×3.4m		
積載重量	最大60tf		
加振方向	水平加振		
	鉛直加振		
	水平・鉛直同時加振		
防水シール	補強布入り合成ゴム (メイン・バックアップ 共通)		
加振能力	項目 \ 加振方向	水平加振	鉛直加振
	最大変位	±200mm	±100mm
	最大速度	40kine	20kine
	最大加速度 (最大積載時)	0.8G	1.5G
	許容転倒モーメント	75tf・m	40tf・m
許容ヨーイングモーメント	20tf・m		
加振振動数	DC - 50Hz		
加振方式	電気・油圧サーボ方式		
加振入力波形	正弦波・地震波		
作動油	水グリコール系作動油		

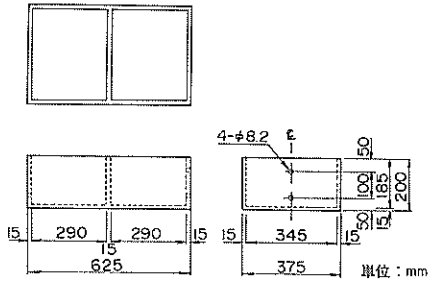


図-10 下段セルラブロック

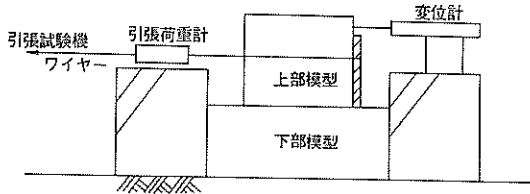


図-11 静的せん断強度試験概要

表-6 静的せん断強度試験の砕石密度一覧

実験の種類	上部模型		下部模型		
	砕石単位体積重量 (g/cm ³)	含水比 (%)	砕石単位体積重量 (g/cm ³)	含水比 (%)	
下段-a ~マウンド	1回目	1.29	1.3	1.51	1.3
	2回目	1.32	1.3		
下段-b ~マウンド	1回目	1.24	1.3	1.51	1.3
	2回目	1.28	1.3		
下段-c ~マウンド	1回目	1.33	1.3	1.51	1.3
	2回目	1.33	1.3		
中段A ~下段-a	1回目	1.13	4.0	1.29	4.0
	2回目	1.21	4.0	1.29	4.0
中段B ~下段-b	1回目	1.29	3.9	1.30	3.9
	2回目	1.32	3.9	1.30	3.9
上段ケソン ~中段A				1.24	2.87
上段ケソン ~中段B				1.31	3.36

実験概要を図-11に示す。6号砕石と下段模型 a, b, c の間の試験では、コンクリートブロックの枠内に砕石層を作り、この上に模型を設置した。セルラブロック模型は7号砕石を用いて中詰めをした。この模型後面に当て板をしてワイヤーを巻き、引張荷重計を通して引張試験機に接続した。模型 a~A, b~B間の試験および模型 A, B~上段ケソンの試験では下部模型の上に上部模型を積み上げ、砕石と模型間の試験と同様にワイヤーを引張試験機につないだ。これらの一連の試験では模型後面に変位計を1個、引張荷重計を1個配置した。

砕石層の作成では投入した総重量と含水量を測定するとともに出来上がりの体積を算出した。模型に関しては中詰め重量と含水量を測定した。なお、この試験では砕石層、中詰め砕石共に締めめは実施していない。このため、表-6に示すように各試験での砕石層、中詰め砕石の単位体積重量は後述する振動実験よりも小さい。

実験では引張荷重計と変位計の値をアナログデータレコーダに記録させるとともに電磁オシログラフに出力させ、このオシロの結果を見ながら試験状況を把握した。

3.1.2 試験結果

図-12-1~図-12-3にマウンド~下段, 下段~中段, 中段~上段の各試験結果の一例をそれぞれ示す。なお縦軸は荷重計によって計測したせん断力を模型の全重量で除した値を示している。この値を以下ではせん断強度と呼ぶ。マウンド~下段セルラブロックでは隔壁間隔の小さい下段-bが最もせん断強度が大きく、下段-a, 下段-cの順となっている。したがって、主たるせん断抵抗が砕石~砕石間で発揮される底版のない場合のせん断強度が、砕石~モルタル間のせん断強度（摩擦係数）より大きい。下段-bのせん断強度が下段-aより大きい理由は、隔壁間隔が小さいため中詰め砕石の水平変形に対する拘束が大きいためと考えられる。

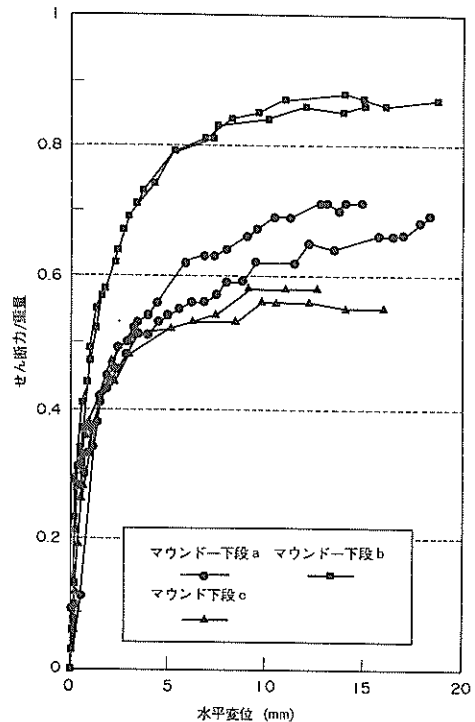
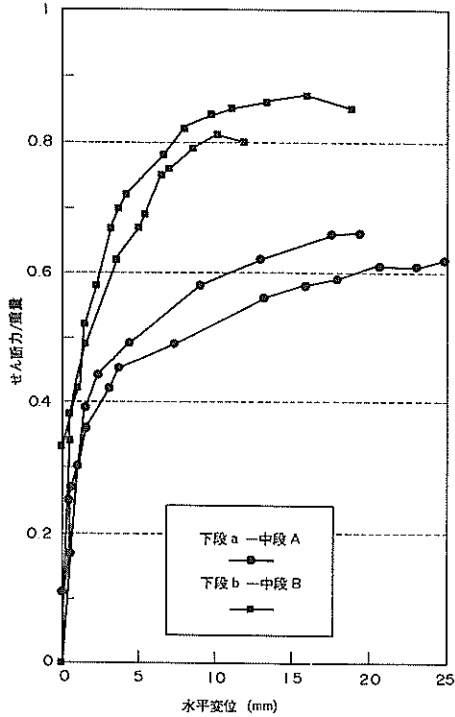
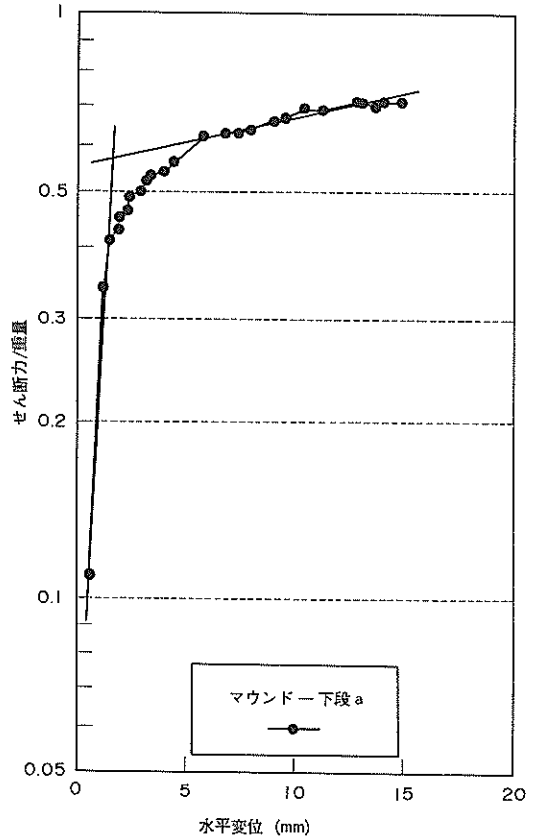


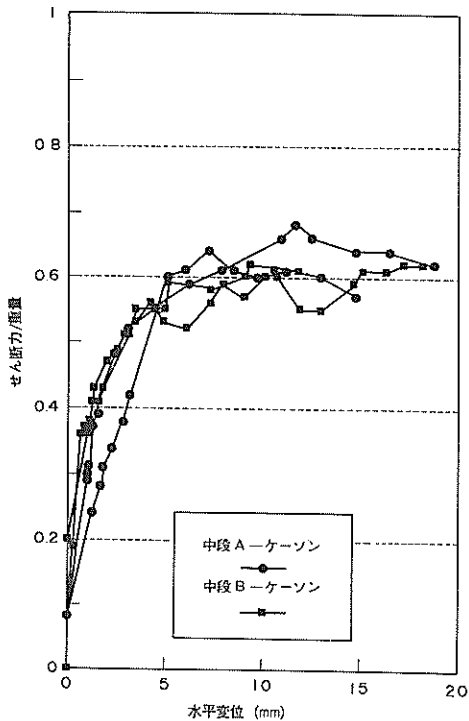
図-12-1 静的せん断強度試験結果 (マウンド~下段模型)



図一12-2 静的せん断強度試験結果
(下段模型～中段模型)



図一13 降伏せん断強度の求め方



図一12-3 静的せん断強度試験結果
(中段模型～上段ケーソン)

下段セルラーブロック～中段セルラーブロックでも同様に、隔壁間隔の小さい中段-Bのせん断強度が大きい。したがって、両者のせん断強度の差は隔壁間隔の違いによる中詰め碎石の水平変形に対する拘束の違いによるものと考えられる。一方、中段セルラーブロックと上段ケーソン間のせん断強度では、隔壁間隔の違いによる影響はあまり見られない。

せん断強度～変位曲線の形状は隔壁間隔で異なり、図一12-1において下段-bでは変位がある程度大きくなると強度の増加がほとんどないのに対して、下段-aでは緩やかではあるが増加を続けている。同じことが図一12-2において中段セルラーブロックについても云える。このことを明確にするために、以下の方法で降伏せん断強度を定義し、最大せん断強度との比を求めた。まず、図一13のようにせん断強度～変位曲線を片対数紙上にプロットし直した。得られた曲線を2直線で近似し、それらの交点を降伏せん断強度とした。各試験ケースに於ける最大せん断強度、降伏せん断強度の平均値および両者の比を図一14に示す。マウンドと下段-aおよび下

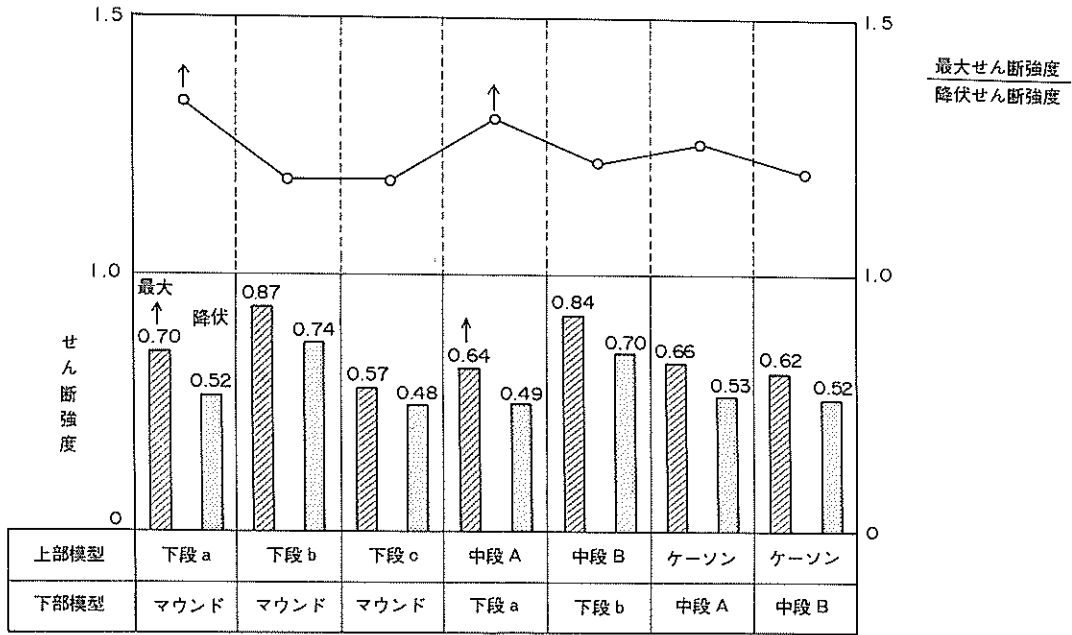


図-14 最大および降伏せん断強度

段-aと中段-Aの場合には変位の測定可能範囲で最大値をとらなかったため、図中矢印を付けた。隔壁間隔が小さい場合には、両者の比は1.15程度であり、降伏せん断強度と最大せん断強度の差は小さく、碎石~モルタル間と同じ傾向を示す。隔壁間隔が大きい場合、両者の比は1.3を上回っている。現行設計では捨石~捨石間の摩擦係数は0.8であるが、今回の試験ではマウンド~下段-b、下段-b~中段-Bの最大せん断強度だけがこの値を上回っている。また、捨石~コンクリート間の摩擦係数は0.6であるが、マウンド~下段-c、中段模型~上段ケーソンの最大せん断強度はほぼこれに対応している。前述したように、今回の試験では碎石の締固めを実施していない。しかし、碎石~碎石間のせん断強度は、締固めにより間隙比が減少すればさらに大きくなる可能性があると思われる。

3.2 中詰めの抜出し強度試験

3.2.1 試験内容

図-15に中詰めの抜出し強度測定試験の実験概要を示す。セルラブロックを固定するための外枠を下段、中段セルラブロック用にそれぞれ作成した。この外枠は

セルラブロックのモルタル部分だけを支持し、中詰めは拘束しないようにした。枠内にセルラブロックを固定し、その中に所定量の碎石を詰め込んだ。このとき中詰めの締固めの状況と、強度との関係を調べるために中詰めの間隙比をいくつか変化させ、それぞれについて数回の試験を実施した。

外枠上部に引張試験機からのワイヤーを固定し、変位計を設置した後、徐々に上方へ引き上げた。このときの荷重、変位を静歪測定器で記録した。

3.2.2 試験結果

各模型の試験結果の一例を図-16-1~図-16-4に示す。図の縦軸は引張り荷重を模型の総重量(模型本体+碎石)で除した比を示している。各模型とも間隙比が小さいほどこの荷重比が大きい。また、荷重比~変位曲線の形状は、降伏点を過ぎるとすぐに荷重比が一定となり、先ほどのせん断強度と比較して降伏後の増加の割合が小さい。この傾向は間隙比が小さいほど明確である。

各模型の最大抜出し荷重からセルラブロック本体の重量を引いた値と中詰めの碎石の重量との比を中詰め碎石の抜出し強度と定義する。この値と間隙比との関係を

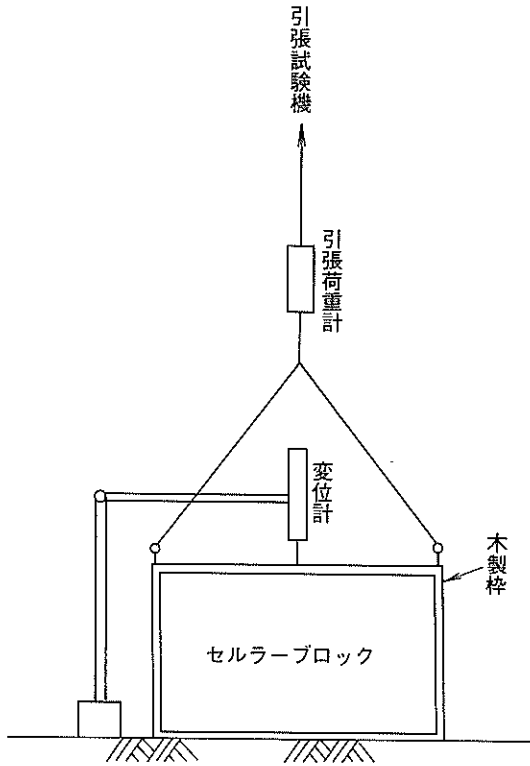


図-15 中詰め抜き強度試験概要

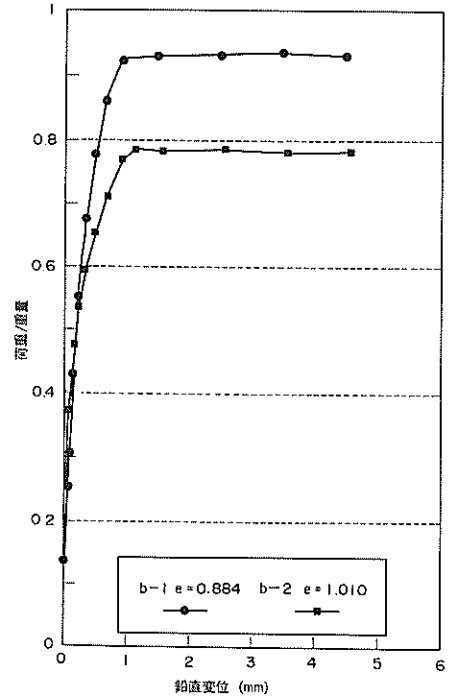


図-16-2 抜き強度試験結果 (下段-b)

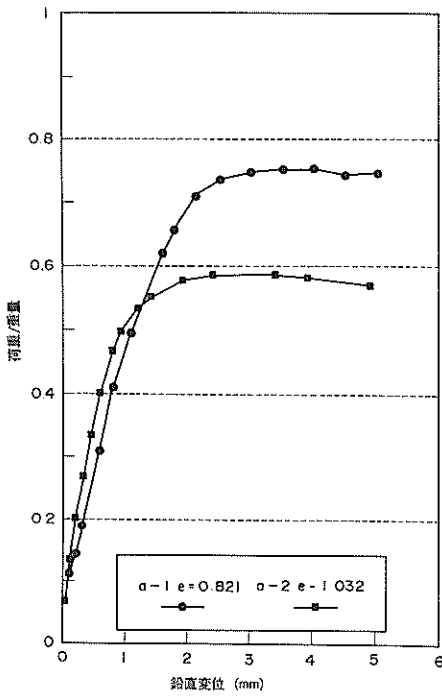


図-16-1 抜き強度試験結果 (下段-a)

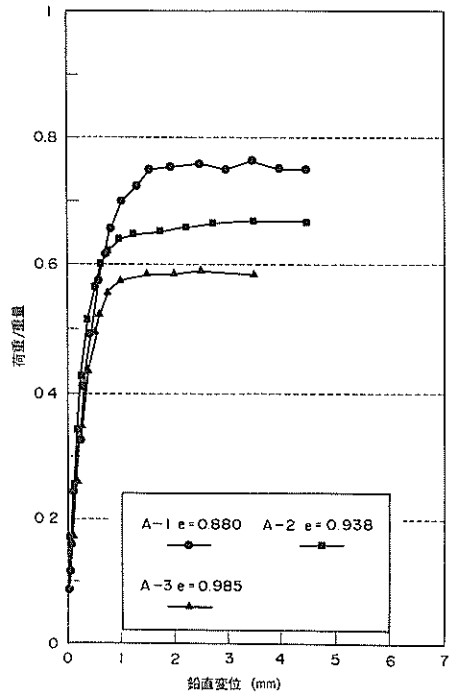
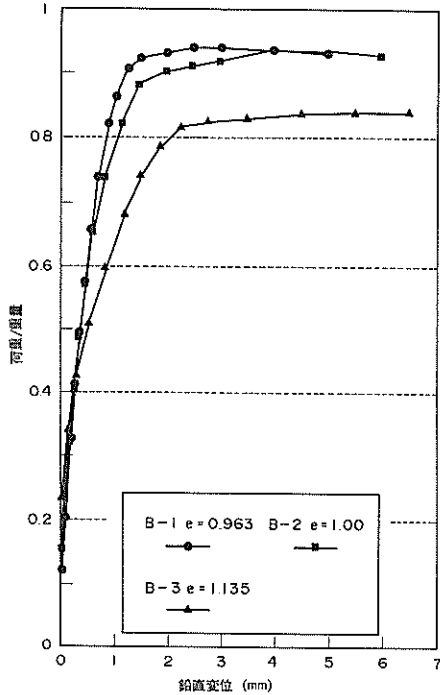
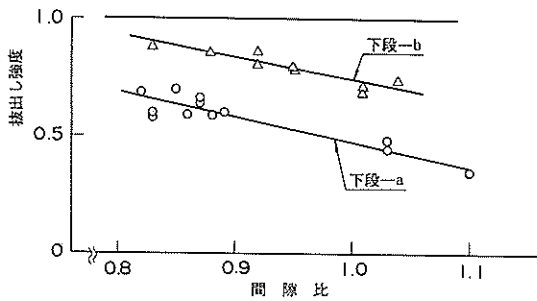


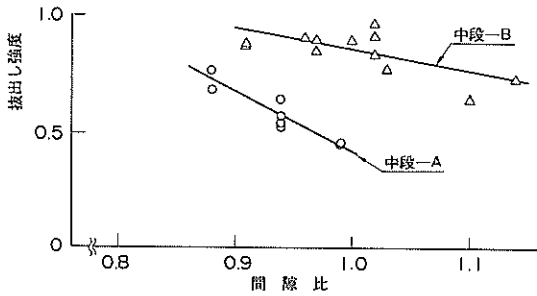
図-16-3 抜き強度試験結果 (中段-A)



図一六—4 抜き強度試験結果
(中段-B)



図一七—1 抜き強度と間隙比
(下段模型)



図一七—2 抜き強度と間隙比
(中段模型)

図一七—1, 図一七—2に示す。図中の直線は各試験値に最小二乗法を適用して得たものである。下段セルラブロック, 中段セルラブロックとも同じ間隙比であれば, 隔壁間隔の小さい方が抜き強度は大きい。抜き強度の結果においてもせん断強度と同様に隔壁間隔が小さい場合が碎石を拘束し, 一体として挙動する傾向にあると考えられる。

4. 模型振動実験

4.1 実験内容

4.1.1 模型振動実験の手順

図一八—1, 図一八—2に示すセルラブロック式護岸模型および底板付き鋼板セル式護岸模型に関して,

a-1:セルラブロック式

(中段-A, 下段-a, 裏込め無し)

a-2:セルラブロック式

(中段-A, 下段-a, 裏込め有り)

b-1:セルラブロック式

(中段-B, 下段-b, 裏込め無し)

b-2:セルラブロック式

(中段-B, 下段-b, 裏込め有り)

c-1:底板付き鋼板セル式(裏込め無し)

c-2:底板付き鋼板セル式(裏込め有り)

の6種類について実験を行った。実験では, 振動台に固定した鋼製枠組み(長さ3m, 高さ1.2m)中に模型を製作した。鋼製枠の幅はセルラブロック式では1.8m, 鋼板セル式では2.3mとした。裏込め碎石が有る場合は掛け矢で振動台をたたき, S波速度実験を実施した。模型振動実験では, まず共振実験を行い模型護岸の固有振動数に関するデータを収集した。つづいて, 入力加速度の最大値を徐々に増加させて破壊実験を行った。

4.1.2 セラブロック式護岸模型の作成手順

マウンドは6号碎石を用いて作成し, ホッパーで投入するようになるべく均一に敷き均すとともに突き棒を用いて締固めを行い, 乾燥単位体積重量 $\gamma_d=1.55\text{g/cm}^3$ 程度になるよう配慮した。出来上がりの体積を求めるために3断面について20cmピッチで高さを計測した。また, 平均の含水比を求めるためホッパーより3回程度投入することに含水比を測定した。

セラブロックは所定の位置に設置するために, 計測を行いながら配置した。セラブロック式護岸模型は図一十九のように上段, 中段, 下段の各ブロックが互層となるように積み上げた。セラブロックの中詰めは7号碎石を用い, あらかじめ碎石の含水比を推定して投入重量を算定し, 3回に分けて中詰めした。また, 中詰

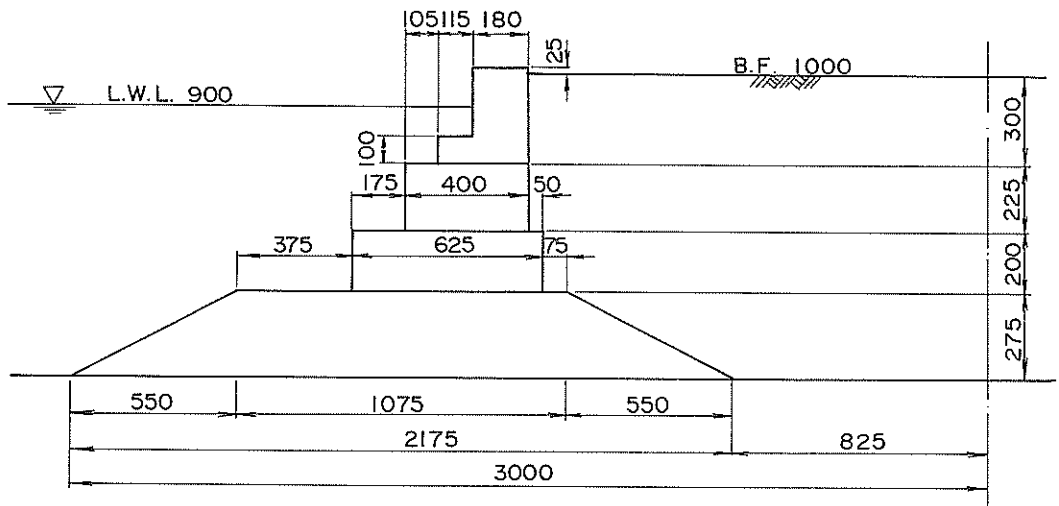


図-18-1 セルラーブロック式護岸模型

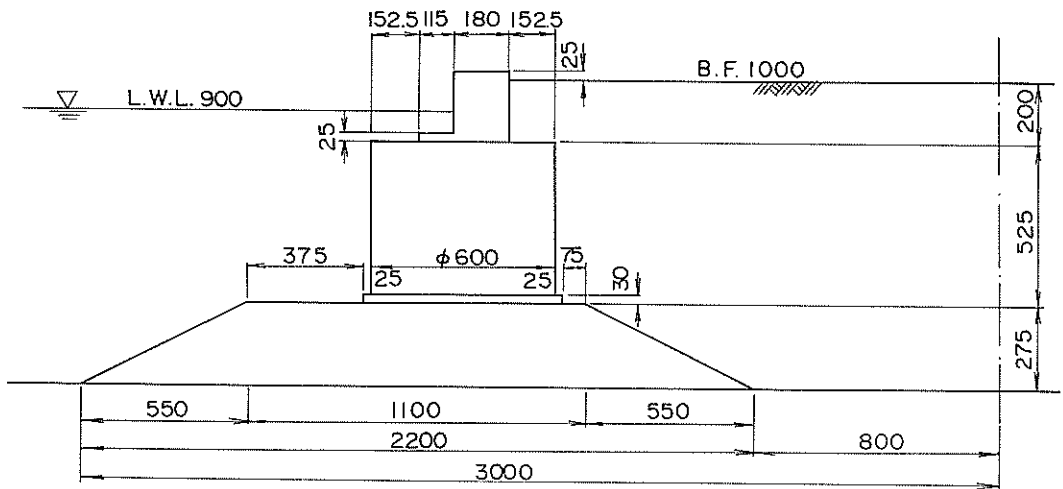


図-18-2 底版付き鋼板セル式護岸模型

めするごとに突き棒を用いて締固めを行い、乾燥単位体積重量 $\gamma_d=1.45\text{g/cm}^3$ になるよう配慮した。中詰め砕石中の計測器は、所定の位置に設置するために計測を実施しながら配置した。

裏詰め砕石は7号砕石を用いて作成し、ホッパーで投入するごとに均一に敷き均しならすとともに突き棒を用いて締固めを行い、乾燥単位体積重量 $\gamma_d=1.45\text{g/cm}^3$ 程度になるよう配慮した。出来上がりの体積を求めるために3断面について20cmピッチで地盤高さを計測した。また、平均の含水比を求めるためホッパーより4回程度投入するごとに含水比を測定した。

		上段ケーソン 計測用	ダミー	半幅
		中段セルラーブロック 計測用	計測用	ダミー
		下段セルラーブロック 計測用	計測用	ダミー
				半幅
マウンド				

図-19 セルラーブロック式模型正面図

4.1.3 底版付き鋼板セル式護岸模型の作成手順

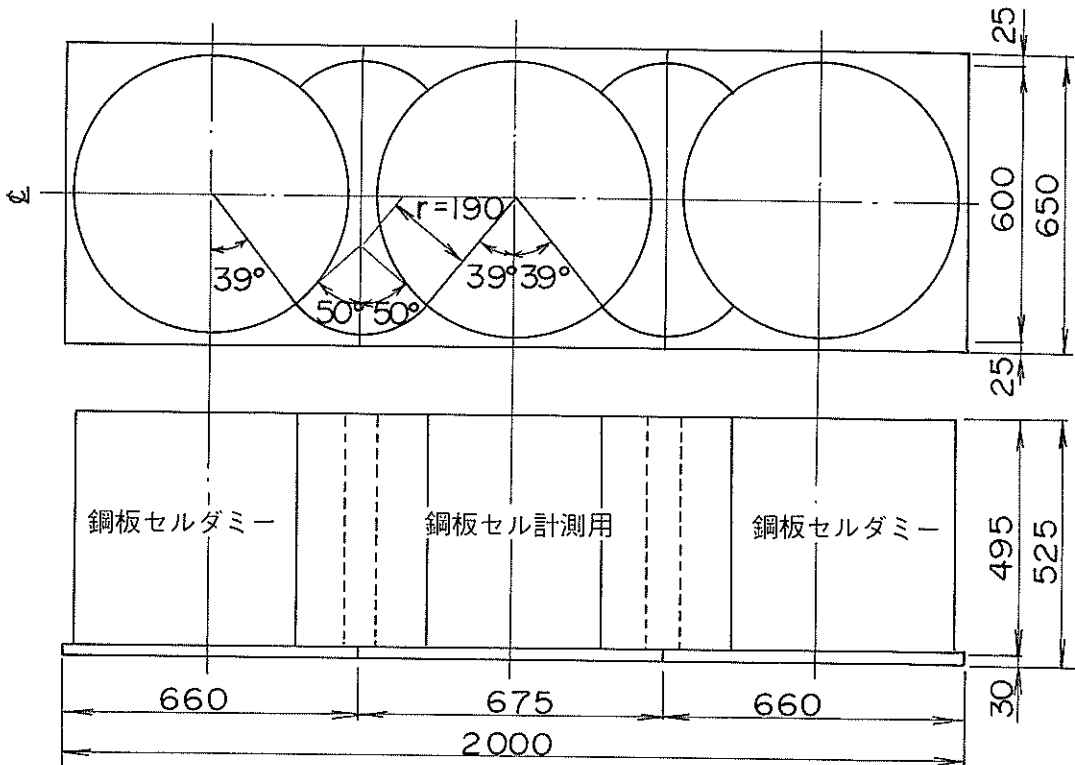
マウンドの作成、模型の設置および中詰め砕石の投入、裏込め砕石の投入に関する一連の護岸作成手順、およびマウンドと裏込め砕石の密度管理に必要となるデータの計測はセルラブロック式と同じである。実際の構造物ではマウンド上にアスファルトマットを敷いて底版との摩擦係数を増加する方法も考えられるが、この実験では用いていない。

計測を行いながら鋼板セルを所定の位置に設置した後、アーク部と鋼板セルの接合部を実験時にゆるみが発生しないように、あらかじめ用意していたボルトで充分締め付けた。このとき鋼板セルおよびアーク部の亜鉛鉄板が変形しないように配慮した。図-20に鋼板セル模型の平面図と正面図を示す。

鋼板セルおよびアーク部の中詰めは7号砕石を用い、あらかじめ砕石の含水比を推定して投入重量を算定し、鋼板セルは11回、アーク部は4回に分けて中詰めした。また、中詰めするごとに突き棒を用いて締め固めを行い、乾燥単位体積が 1.45g/cm^3 になるよう配慮した。

4.1.4 計測器の配置

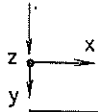
セルラブロック式護岸模型の裏込めが有る場合の計測器の配置を図-21-1に示す。セルラブロック式では変位計を上段ケーソン、中段および下段セルラブロックの水側前面に合計3箇所配置した。底版付き鋼板セル護岸模型の裏込め砕石が有る場合の計測器の配置を図-21-2に示す。鋼板セル式では変位計を中央セルの水側前面の中心部に上部および下部の2箇所を設置した。裏込めがない場合にはこの部分の計測器がない他は裏込め



単位：mm

図-20 鋼板セル式模型平面図・正面図

銅製棒左端



凡例

- ; 加速度計
- ; 水圧計
- +; 変位計

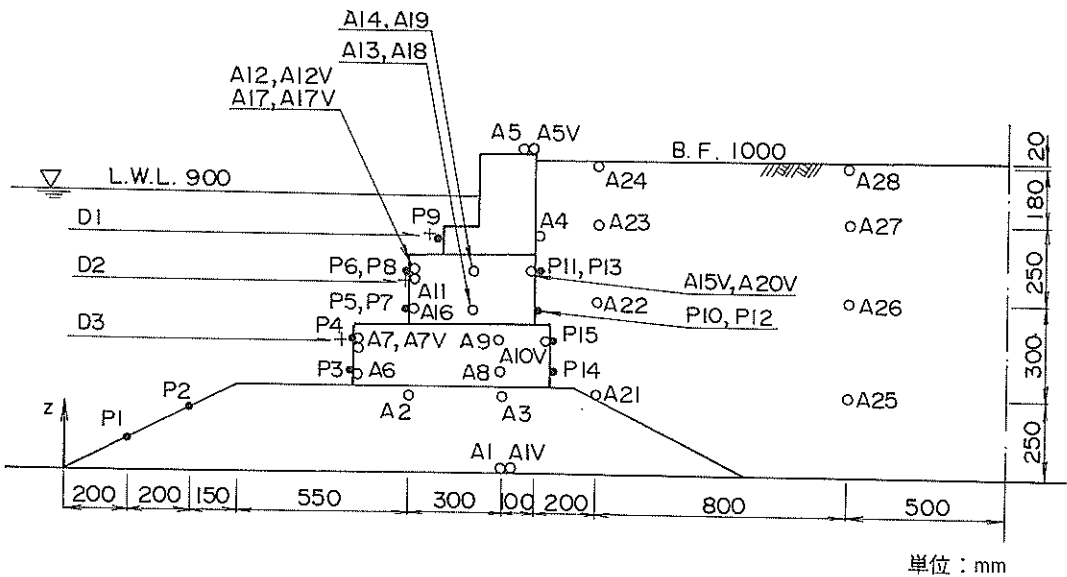
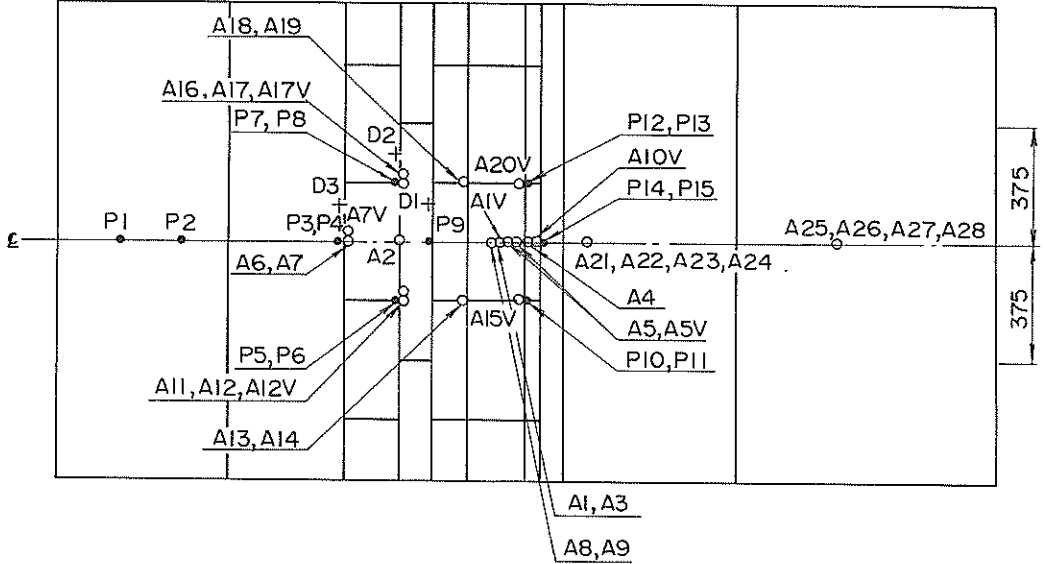


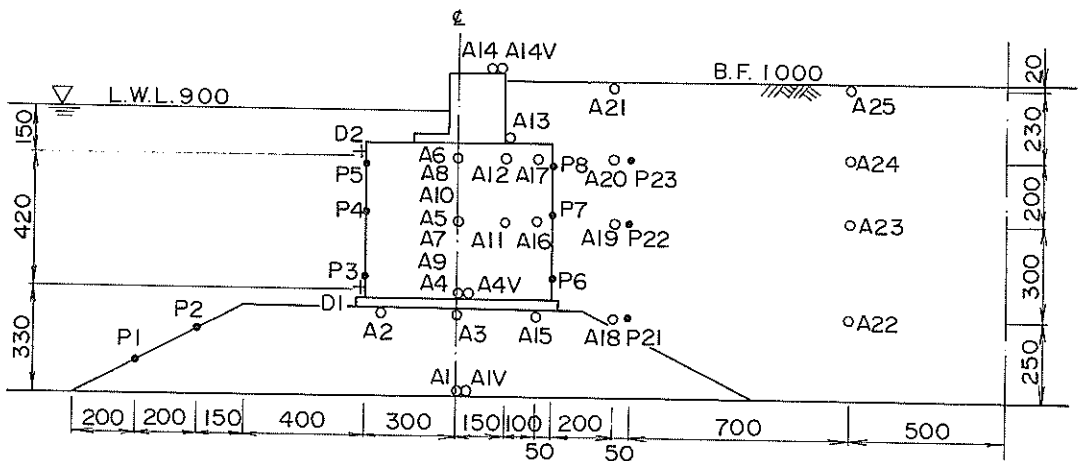
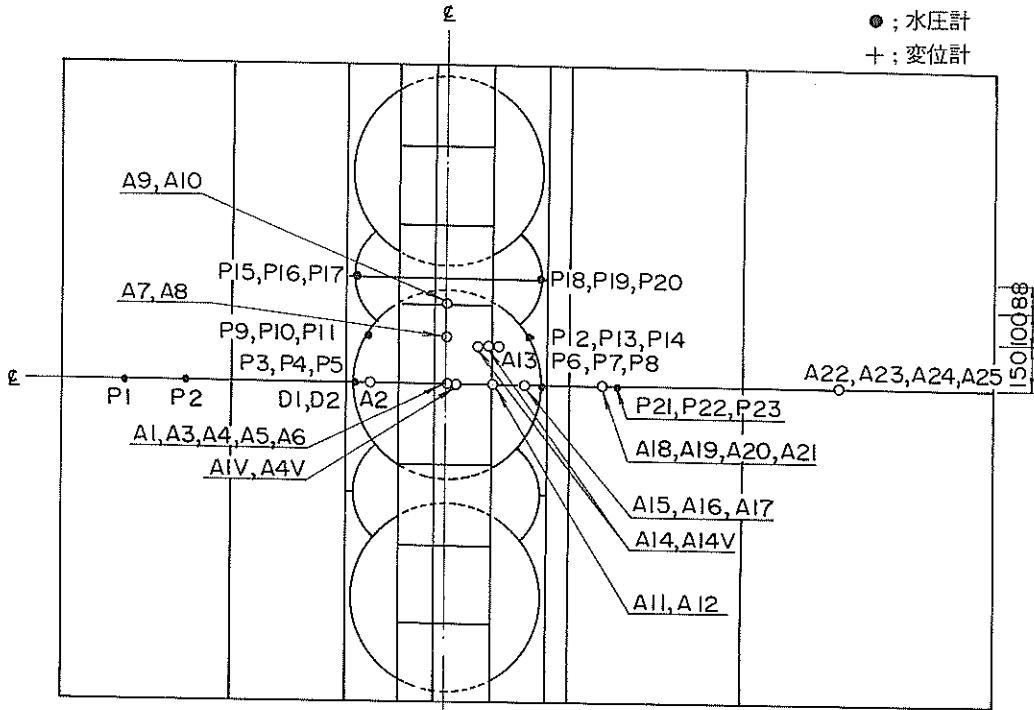
図-21-1 セルラブロック式計測点配置
(裏込めがある場合)

凡例

○ ; 加速度計

● ; 水圧計

+ ; 変位計



単位 : mm

図-21-2 鋼板セル式計測点配置
(裏込めがある場合)

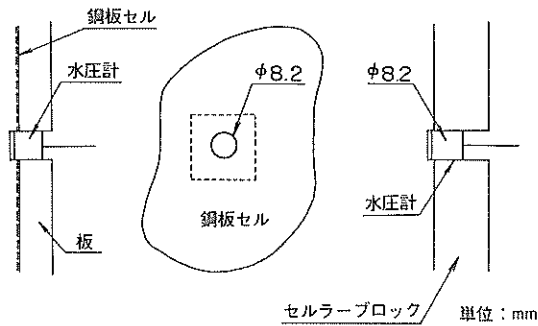


図-22-1 間隙水圧計固定方法

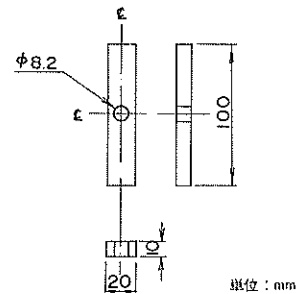


図-22-2 間隙水圧計固定板（上段ケーソン）

表-7 振動実験の実施状況

実験の種類	波 形	振動台 加速度 (Gal)	セルラブロック 中段A, 下段 a		セルラブロック 中段B, 下段 b		鋼板セル	
			a-1	a-2	b-1	b-2	c-1	c-2
			共振実験	正弦波1~50Hz 各10波	40	○	○	○
破壊実験	正弦波 3Hz 10波	60	○	○	○	○	○	○
		130	○	○	○	○	○	○
		200	○	○	○	○	○	○
		270		○	○	○		○
		330		○		○		

がある場合と同様である。

水圧計の設置方法は、セルラブロック式の場合はあらかじめ模型に開けた孔に挿入して固定した。鋼板セル式の場合は、図-22-1に示すように水圧計固定用の板をセルの内側に接着し、水圧計が動かないように固定した。上段ケーソンの水圧計は図-22-2のように板にはめ込み、あらかじめ設けておいたケーソンの溝に埋めて設置した。

加速度計は砕石中に設置する場合には固定用のアクリル板を付けて所定の位置に配置した。その他の加速度計は模型に接着した。

変位計は、鋼製棒に剛結した変位計設置用の鋼製支柱にねじ止めした。また、模型と接する部分には磁石をつ

け、模型上に鉄の小片をはりつけ、模型が沈下しても計測が可能ないようにした。

4.1.5 入力波形

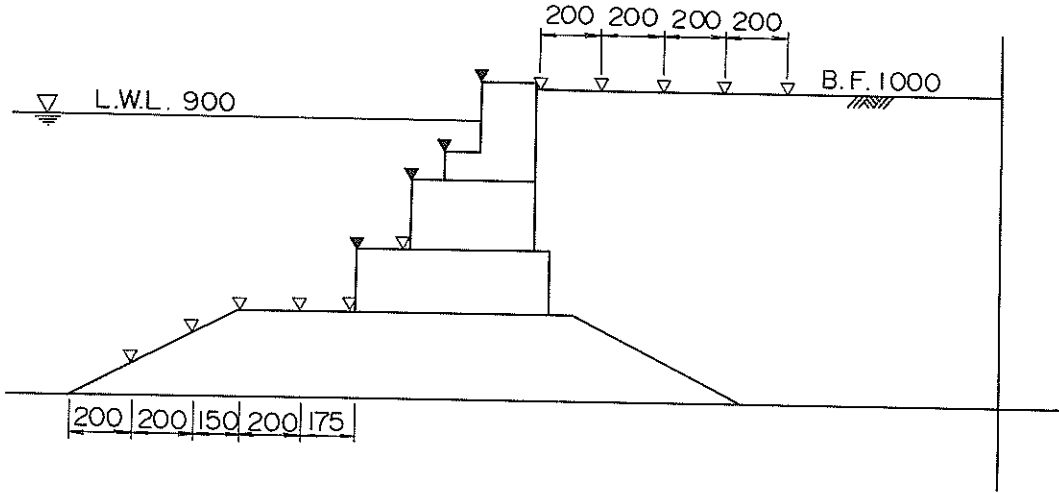
実験ではまず模型の振動特性を把握するために共振実験を実施した。共振実験の入力波は、最大加速度40Gal、周波数1~50Hzの正弦波を各10波ずつ入力した。ついで実施した破壊実験では周波数3Hzの正弦波10波を使用し、最大加速度を約60Galから徐々に増加させた。模型の残留変位が10mm程度になった時点で破壊したと判断し実験を終了した。最終的な振動実験の実施状況を表-7にまとめて示す。

4.1.6 最終変形状態の計測

護岸模型全体の破壊後の変形状態を把握するために、

凡例

- ▽ ; マウンドおよび裏込め天端
- ▼ ; 構造物天端

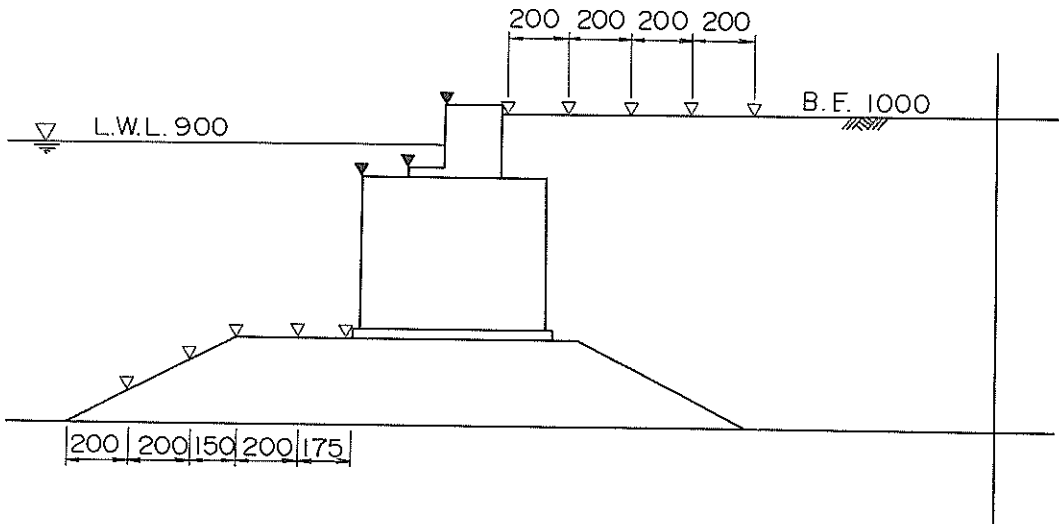


単位 : mm

図-23-1 セラブロック式残留変位計測点
(裏込めがある場合)

凡例

- ▽ ; マウンドおよび裏込め天端
- ▼ ; 構造物天端



単位 : mm

図-23-2 鋼板セル式残留変位計測点
(裏込めがある場合)

計測目標点を設け水平および鉛直変位量を求めた。セルラブロック式の計測目標点を図-23-1に、鋼板セル式の計測目標点を図-23-2にそれぞれ示す。計測方法は護岸模型の作成後砕石中の計測目標点にゴルフのティーを押し込み目印とした。このときティーにシリコンを付け、砕石とティーが一体として動くように配慮した。また、模型上の計測目標点に関しては、マジックで印を付けておいた。これらの点のX、YおよびZ座標値を求め、初期座標値とした。座標値は鋼製枠およびL型鋼を

利用して目印の位置に下げ振りをセットし、鋼製枠の左端上部を原点として求めた。実験終了後は初期座標値の位置に下げ振りをセットし、下げ振りと目印の距離を計測し、平面の移動量を求めた。一方、深度方向はこの方向の座標値を求め、初期座標からの差により変位量を算出した。

4.2 S波速度結果と密度管理結果

裏込め砕石がある場合の本実験に関しては、S波速度に関するデータを収集した。その結果を表-8に示す。

表-8 S波試験結果

実験条件		実験ケース	S波速度 Vs(m/sec) (A1~A25)	固有振動数 f=Vs/4H (H=0.98m)	共振実験の 固有振動数
セルラ ー式	中段-A, 下段-a	a-2	98.0	25	23
	中段-B, 下段-b	b-2	108.0	27	23
鋼板セル式		c-2	103.0	26	18

表-9 振動実験の砕石密度一覧

項目		セルラブロック式 (中段-A, 下段-a)		セルラブロック式 (中段-B, 下段-b)		鋼板セル	
		裏込め無 (a-1)	裏込め有 (a-2)	裏込め無 (b-1)	裏込め有 (b-2)	裏込め無 (c-1)	裏込め有 (c-2)
マウンド	総重量 (kg)	1265.1	1293.4	1270.0	1228.3	1602.0	1622.4
	体積 (cm ³)	789194.0	794396.0	783416.0	783932.0	1002752.0	1057426.4
	含水比 (%)	3.7	3.1	3.1	3.1	3.0	2.9
	湿潤単位体積重量 (g/cm ³)	1.60	1.63	1.62	1.57	1.60	1.53
	乾燥単位体積重量 (g/cm ³)	1.54	1.58	1.56	1.52	1.55	1.49
下段セルラ ー中詰め (計測用)	総重量 (kg)	57.9	58.8	48.0	48.9	211.0	211.2
	体積 (cm ³)	40131.2	40131.2	33201.8	33201.8	141233.5	141233.5
	含水比 (%)	5.8	4.9	5.2	4.2	4.9	4.8
	湿潤単位体積重量 (g/cm ³)	1.47	1.47	1.45	1.47	1.50	1.50
	乾燥単位体積重量 (g/cm ³)	1.39	1.40	1.38	1.41	1.43	1.43
中段セルラ ー中詰め (計測用)	総重量 (kg)	42.0	42.9	33.6	34.5	69.0	77.5
	体積 (cm ³)	28575.6	28575.6	23522.2	23522.2	46459.4	50130.0
	含水比 (%)	5.8	4.9	5.2	3.5	4.9	4.8
	湿潤単位体積重量 (g/cm ³)	1.47	1.50	1.43	1.47	1.49	1.55
	乾燥単位体積重量 (g/cm ³)	1.39	1.43	1.36	1.42	1.42	1.48
裏込め	総重量 (kg)		3720.2		3826.6		4866.7
	体積 (cm ³)		2453000.0		2438000.0		3190000.0
	含水比 (%)		5.4		5.2		6.2
	湿潤単位体積重量 (g/cm ³)		1.52		1.49		1.53
	乾燥単位体積重量 (g/cm ³)		1.44		1.42		1.44

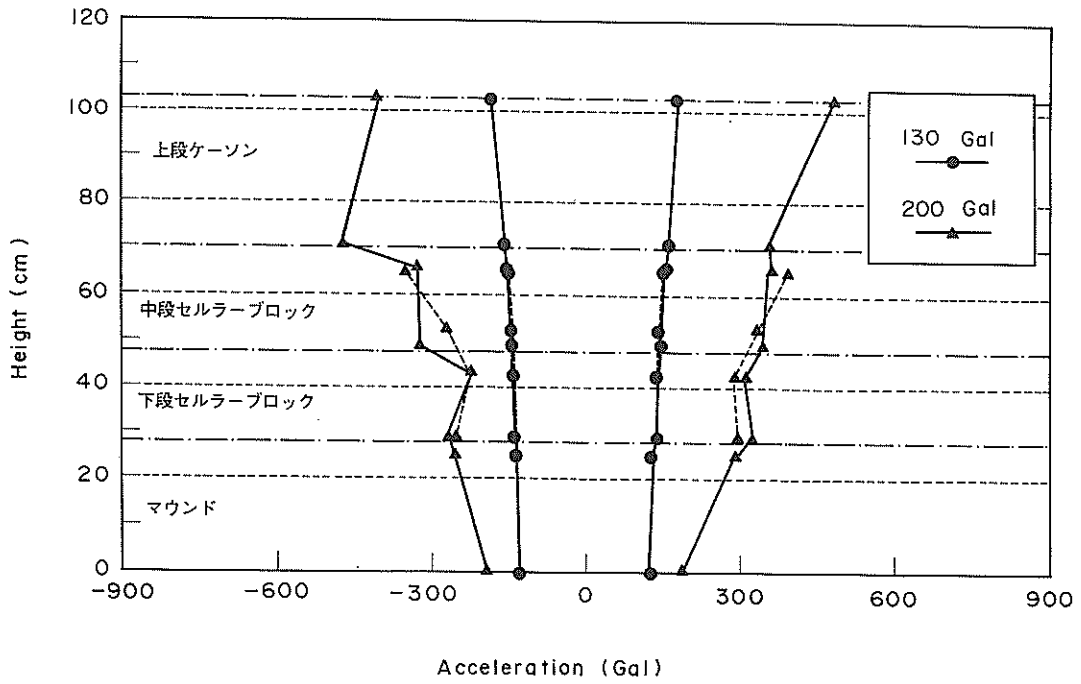


図-24-1 応答加速度分布 (a-1)

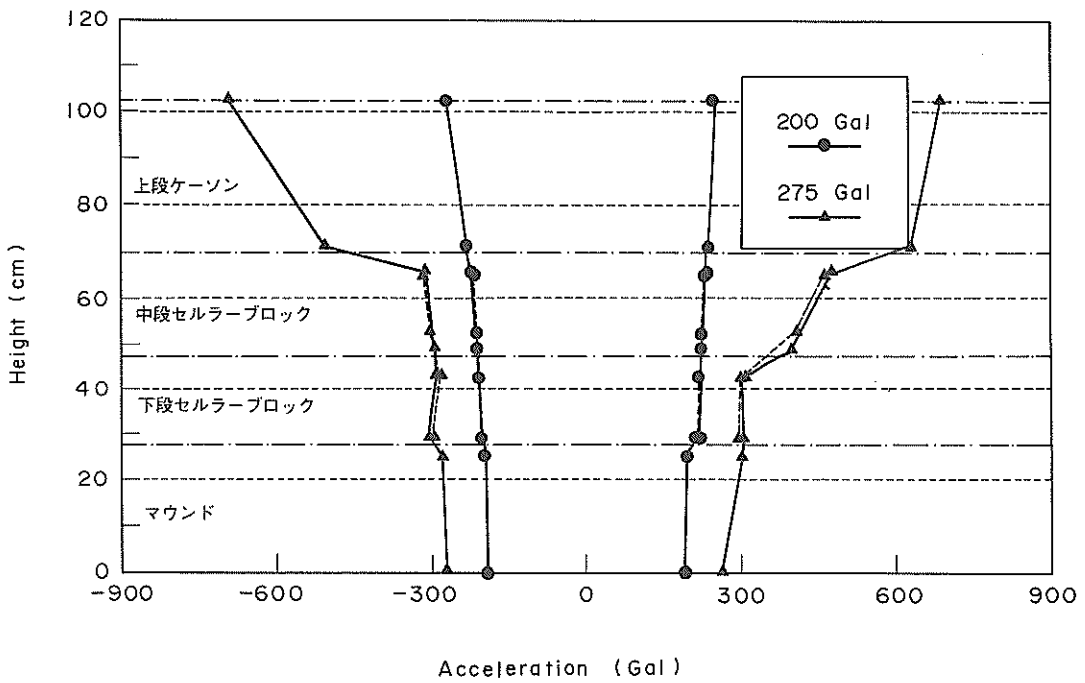


図-24-2 応答加速度分布 (b-1)

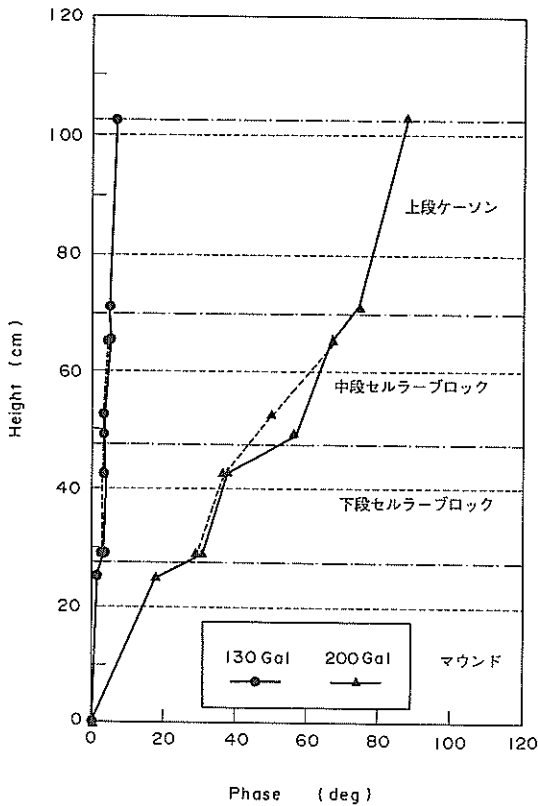


図-25-1 位相分布 (a-1)

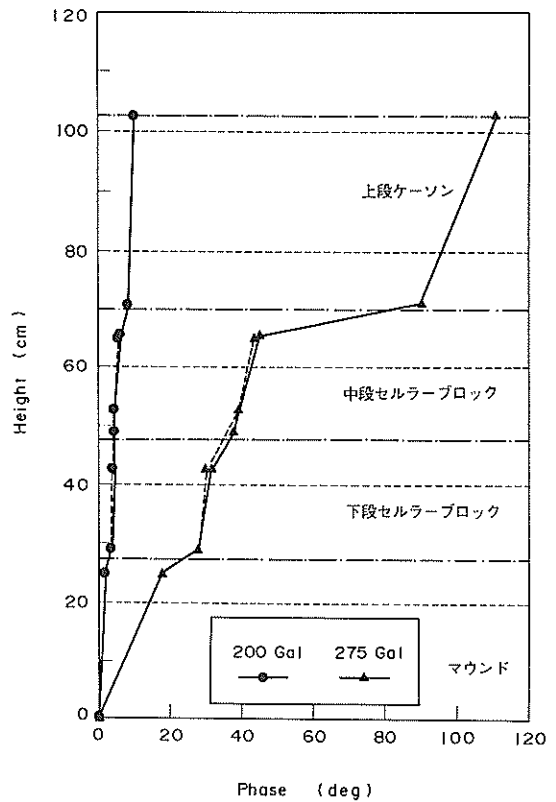


図-25-2 位相分布 (b-1)

このS波速度試験では振動台の加速度計A1と裏込め砕石中の加速度計A22~A25の応答波形を電磁オシロに出力させ、A1から地表部A25までの伝播時間よりS波速度を算出した。表よりせん断波速度 $V_s=100\text{m/sec}$ 程度の値が得られている。次式よりせん断波速度より固有振動数が求められる。

$$f = \frac{V_s}{4H} \quad (1)$$

ここに、 f : 固有振動数 (HZ)

V_s : せん断波速度 (m/s)

H : 層厚 (m)

固有振動数についてせん断速度より求めた値と共振実験結果を比較すると、セルラブロック式は両者は良い対応を示している。一方、鋼板セル式では共振実験の値がやや小さい。

セルラブロック式実験および鋼板セル式実験に関する砕石密度管理を表-9に示す。マウンドの密度管理で目標とした乾燥単位体積重量 $\gamma_d=1.55\text{g/cm}^3$ に比べて実験

c-2は小さ目の値が得られているが、これら以外はほぼ目標値に近い値が得られている。模型の中詰めに関しては、目標値 $\gamma_d=1.45\text{g/cm}^3$ に比べて実験a-1, b-1が小さ目であり、他に比べてやや緩い中詰め状態になったと考えられる。これは、含水比が5%程度あったため締固めが十分行われなかったためであろう。裏込めの目標密度は $\gamma_d=1.45\text{g/cm}^3$ であるが、ほぼ同じ地盤が出来上がったものと考えられる。

5. 振動実験結果

5.1 応答加速度分布

5.1.1 裏込めのない場合

図-24-1, 図-24-2にセルラブロック模型の裏込めのない場合(ケースa-1, b-1)の最大加速度分布を示す。各々の図では最終加振時(破壊時)とその直前の加振時を示した。図中セルラブロック位置の破線で示した分布はセルラブロック内の砕石部分に置いた加速度計(A8, A9, A13, A14)を表し、実線はセルラブロックに固定した加速度計(A6, A7, A

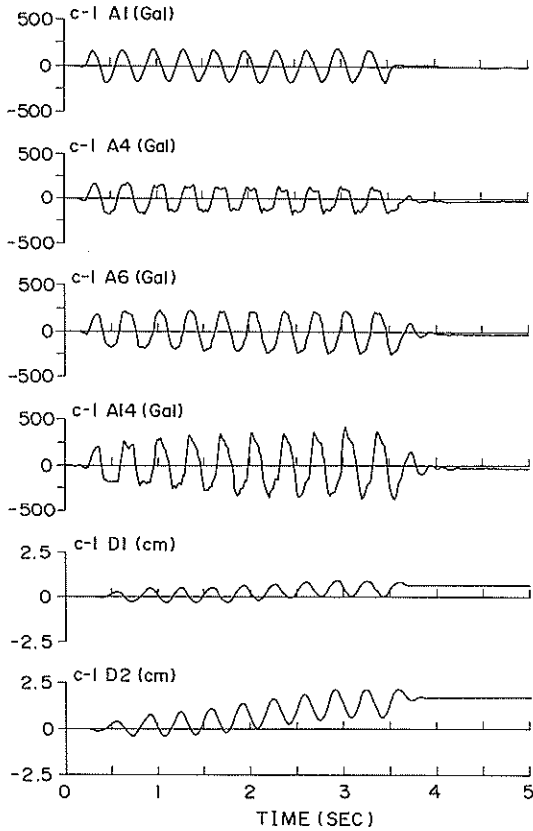


図-26 計測波形の例 (c-1)

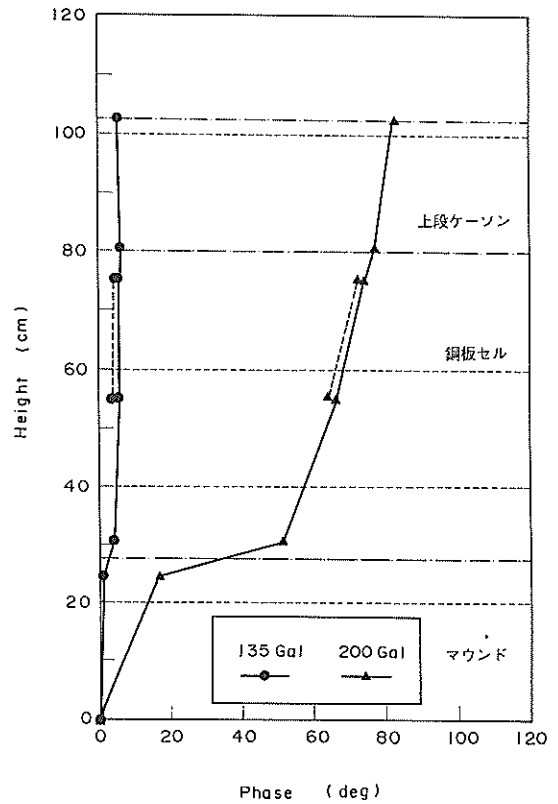


図-28 位相分布 (c-1)

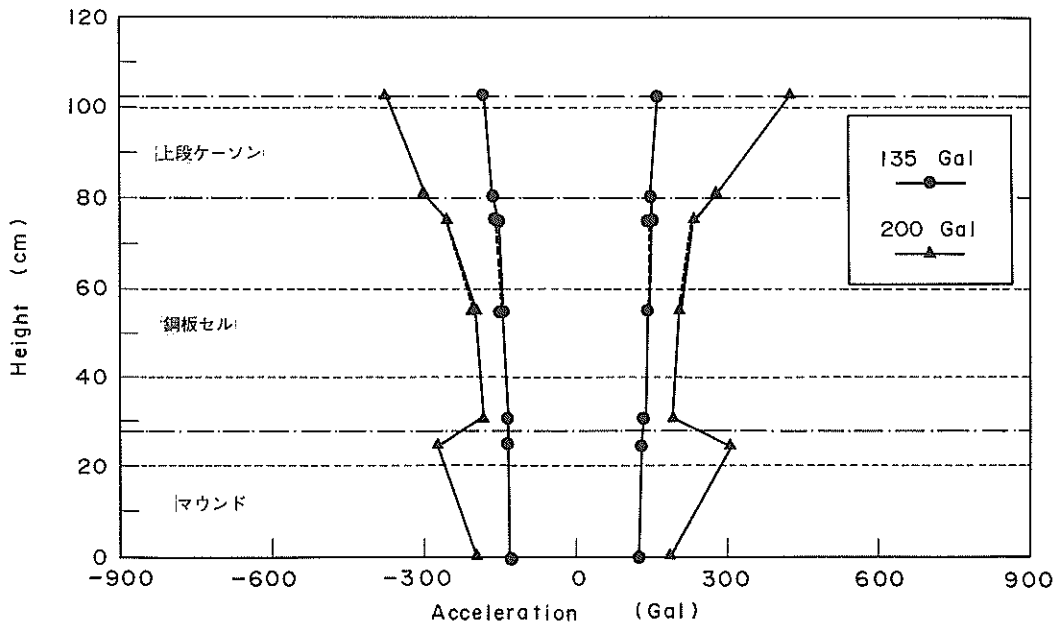


図-27 応答加速度分布 (c-1)

11, A12) を表す。正方向は慣性力が水側に働く方向であり、負方向は裏込め側に働く場合である。また、図-25-1, 図-25-2 は各加振時における振動台上面の加速度計と各位置との位相分布を示している。

破壊時の加速度分布では、a-1, b-1 ともに各ブロックが接する部分で大きく変化している。このことは位相分布において明確で、各セルラブロックやケーソンの上部と下部との位相差に比べ、各ブロックが接する部分での位相差が明かに大きくなっている。とくに隔壁間隔が小さい b-1 に比べ、間隔の大きい a-1 においてこの傾向は明確である。このことから、ブロック同士が接する部分での剛性がブロック本体と比べ相対的に小さく、その大きさは隔壁間隔によって異なり、内部の碎石をより強く拘束する方が幾分強いことが伺える。この結果は静的引張り試験の結果と同様である。

低加速度加振時ではセルラブロック本体と内部碎石とは a-1, b-1 ともにほぼ一体となって振動している。これに対し、a-1 の破壊時の分布では碎石内部の加速度が全体的に小さい。中段セルラブロック上部の加速度は上段ケーソンがロッキングを起し、このときの衝撃によってやや大きく出たものと考えられる。位相分布でも碎石内部の位相遅れがセルラブロック本体に比べて小さく、連続的に変化しているように見える。隔

壁間隔が大きな場合、碎石を拘束する力が小さいため、碎石が比較的変形しやすい。セルラブロック間の力の伝達は碎石を通して行われると考えられ、碎石が変形するために、セルラブロック本体が動くまでに時間差がでるものと思われる。一方、隔壁間隔が小さい b-1 の破壊時の分布では、応答加速度、位相ともセルラブロック本体と内部碎石とに明確な差は見られない。

図-26 に鋼板セル (c-1) の破壊時の加速度波形と変位波形を示す。また、図-27 および 図-28 にはセルラブロックと同様に最大加速度分布と位相の分布をそれぞれ示す。分布図において鋼板セル部分の実線の分布は鋼板セル中央の加速度計 (A5, A6) を表し、破線はセル殻付近の加速度計 (A9, A10) を表す。破壊時の鋼板セル模型の加速度波形は波形の頂部が切断されたような形状をしており、模型がマウンド上を滑動したことを示している²⁾。このため、分布図ではマウンド上部に比べ鋼板セルの応答が極端に小さく、この部分での位相差が大きく出ている。鋼板セル内部の各位置における加速度応答の差はほとんどなく、中心部での位相がセル殻に比べてわずかに遅れる程度である。

5.1.2 裏込めがある場合

裏込めがない場合と同様に、図-29-1, 図-29-2 および 図-30-1, 図-30-2 に裏込めがある場合 (ケ

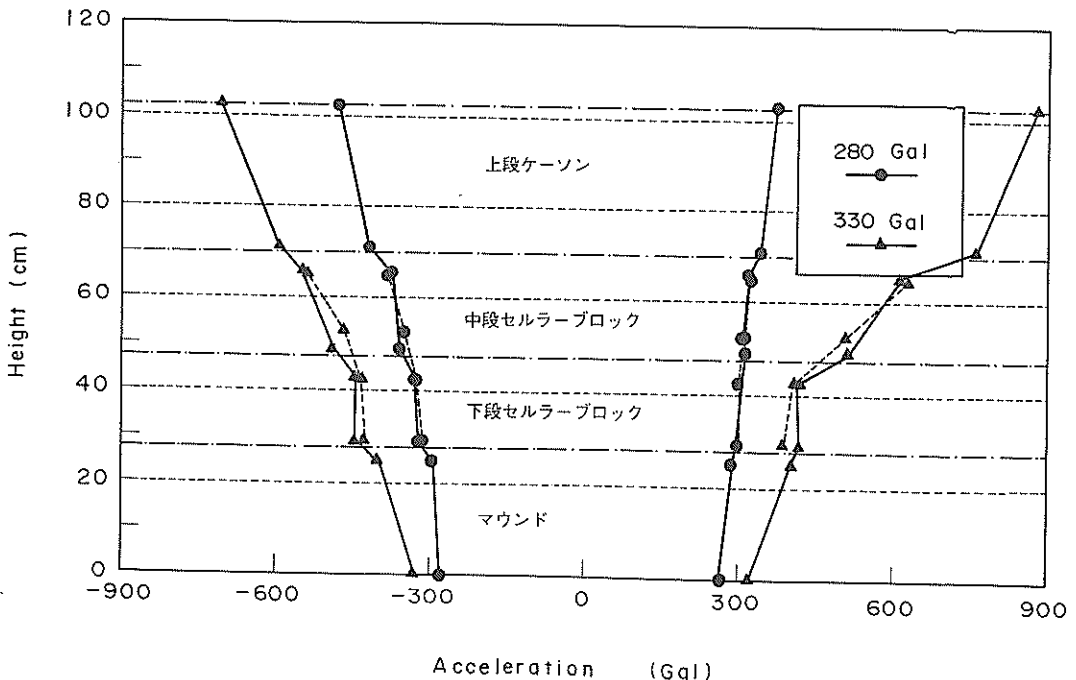


図-29-1 応答加速度分布 (a-2)

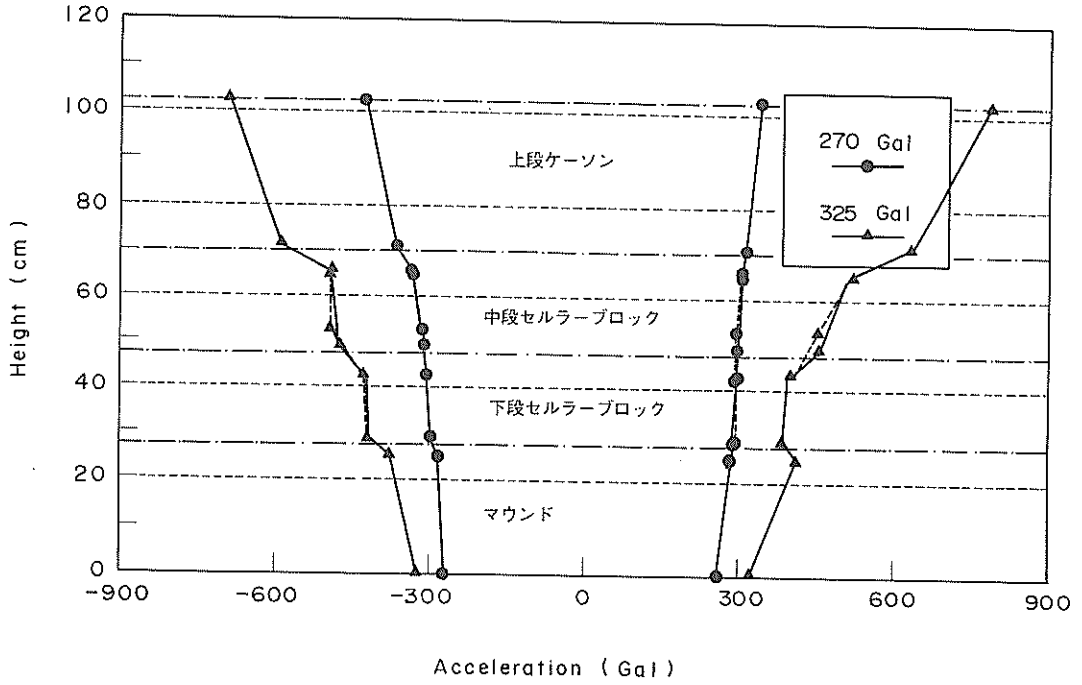


図-29-2 応答加速度分布 (b-2)

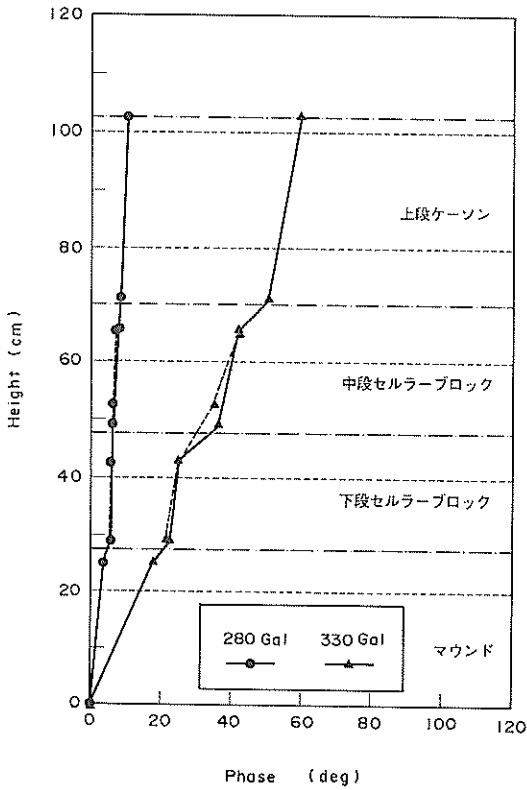


図-30-1 位相分布 (a-2)

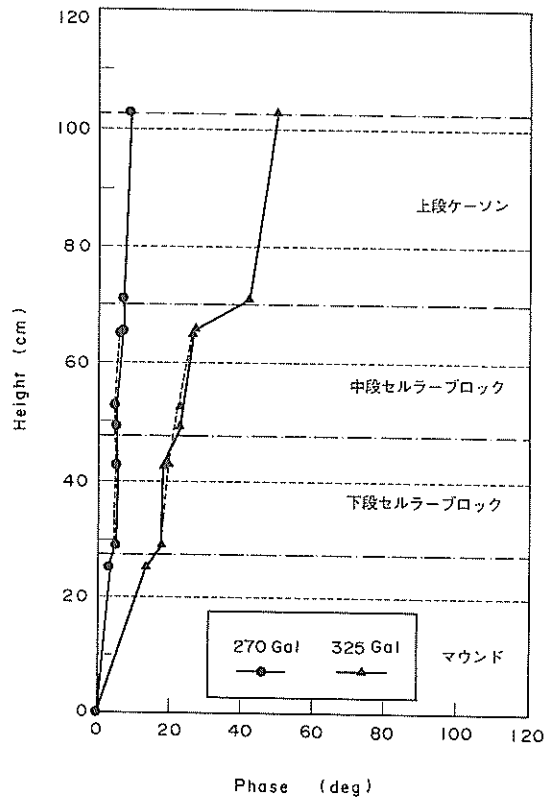
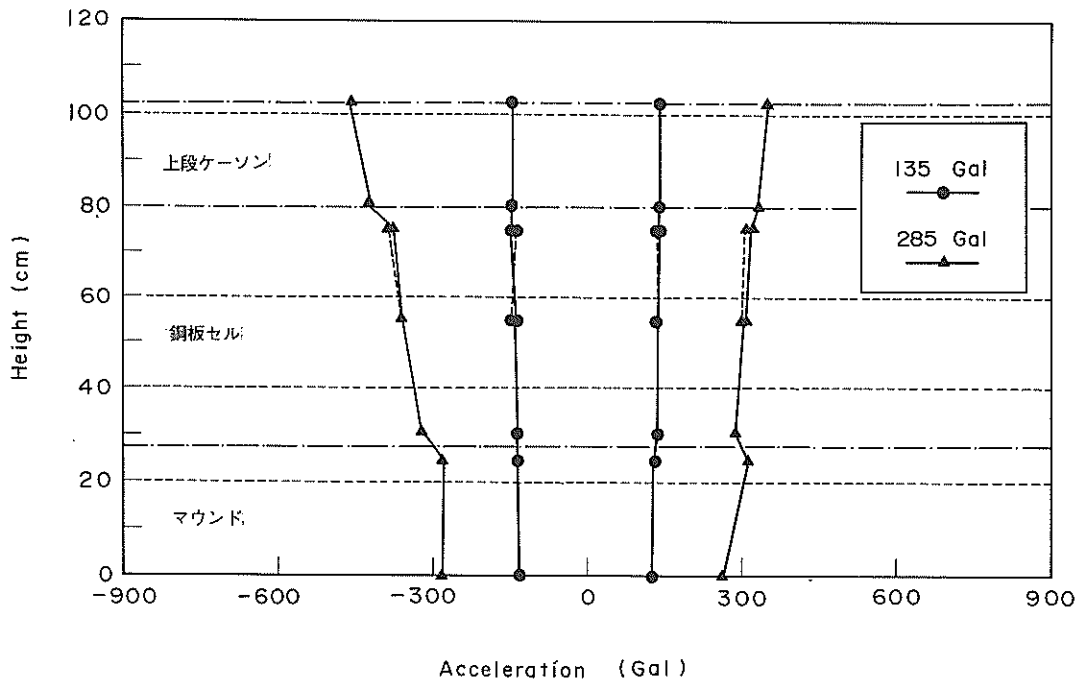
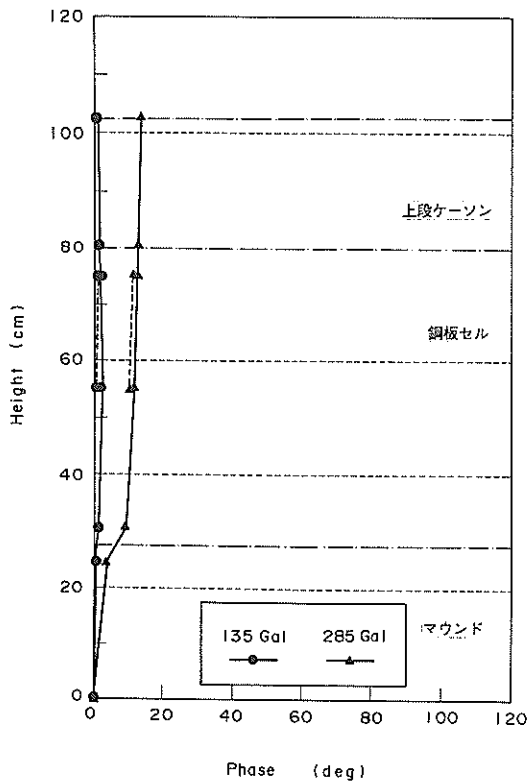


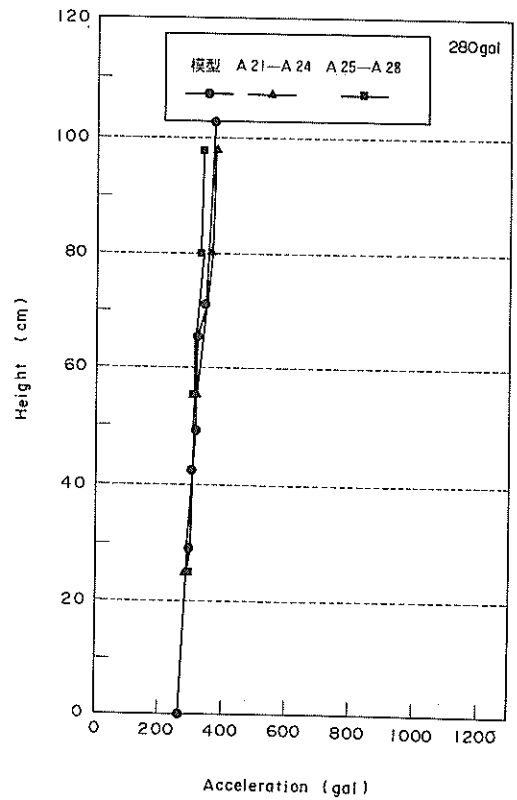
図-30-2 位相分布 (b-2)



図一31 応答加速度分布 (c-2)



図一32 位相分布 (c-2)



図一33 裏込めの応答加速度分布 (a-2, 低加速度時)

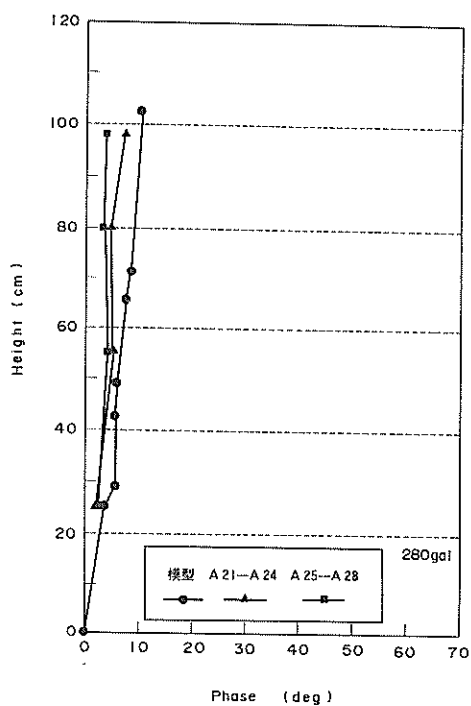


図-34 裏込めの位相分布
(a-2, 低加速度時)

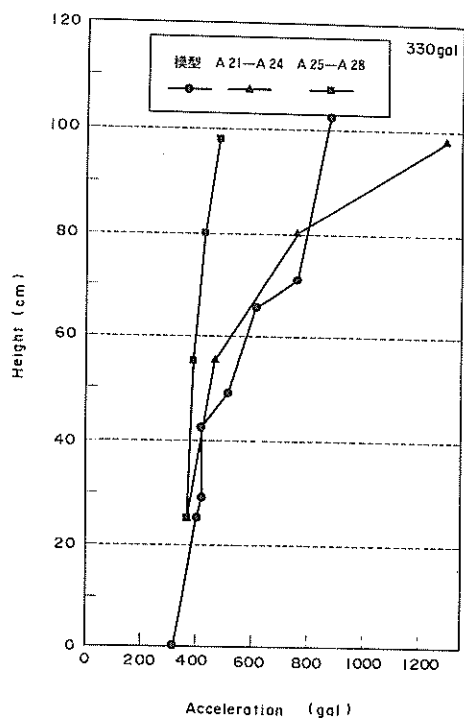


図-35-1 裏込めの応答加速度分布
(a-2, 破壊時)

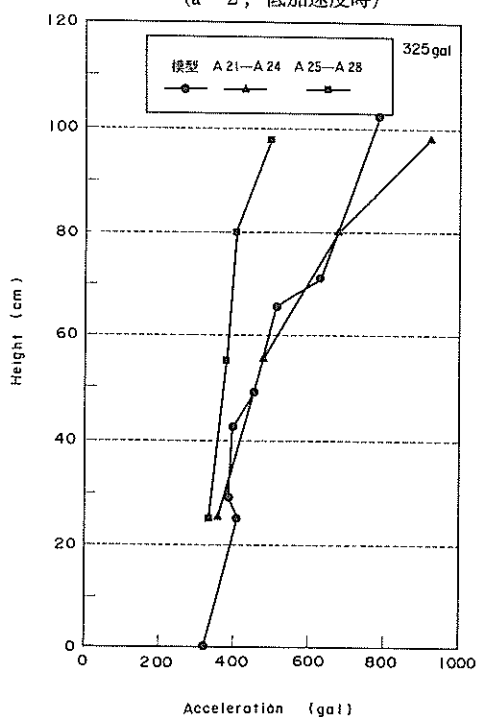


図-35-2 裏込めの応答加速度分布
(b-2, 破壊時)

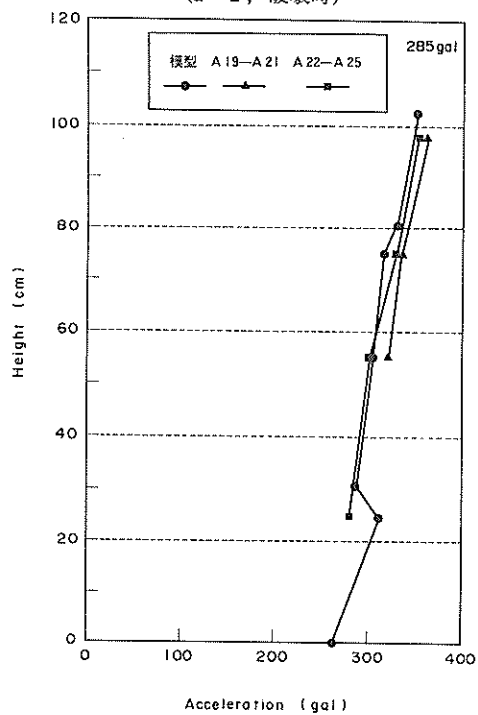


図-35-3 裏込めの応答加速度分布
(c-2, 破壊時)

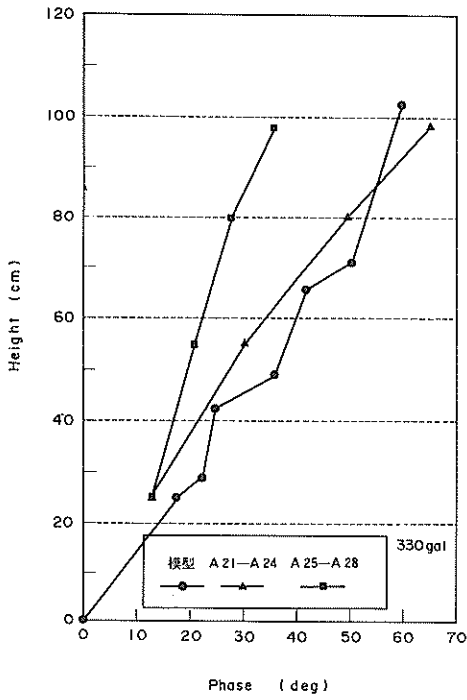


図-36-1 裏込めの位相分布 (a-2, 破壊時)

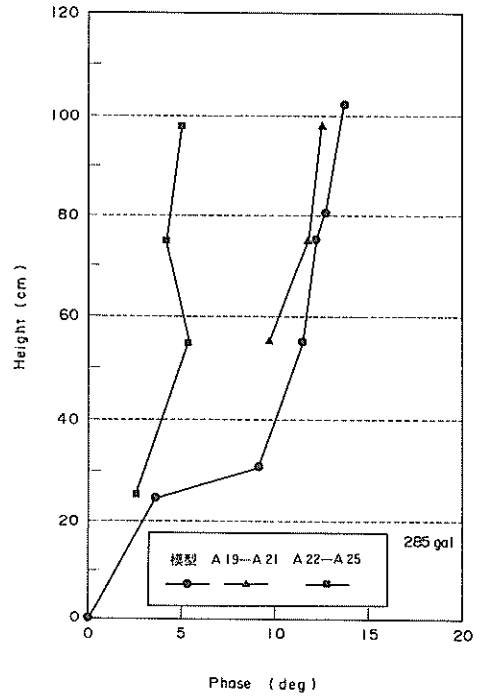


図-36-3 裏込めの位相分布 (c-2, 破壊時)

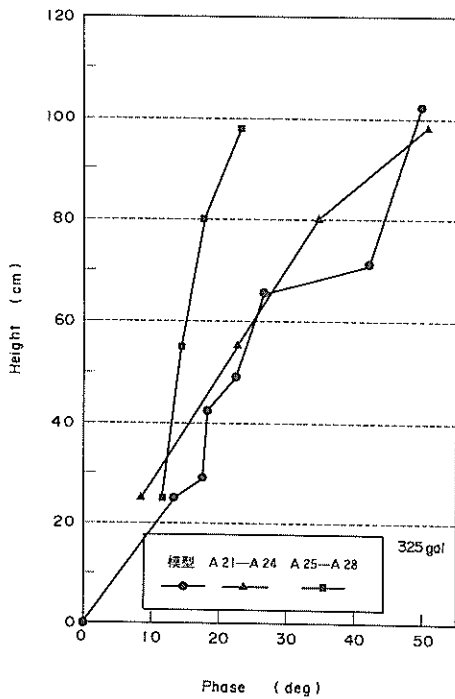


図-36-2 裏込めの位相分布 (b-2, 破壊時)

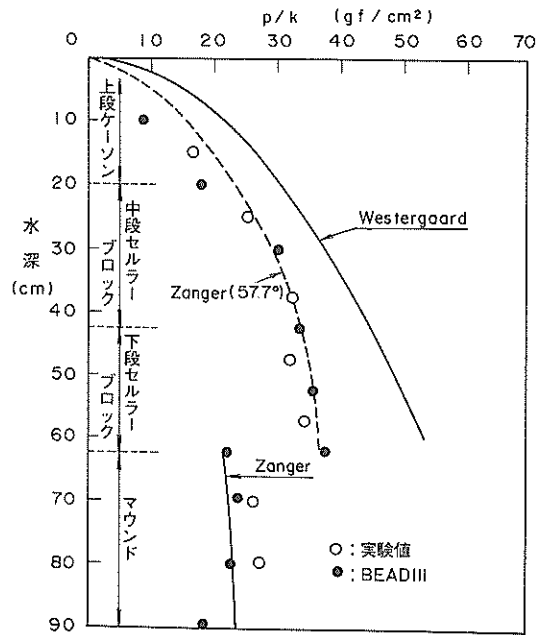


図-37-1 動水圧分布 (セルラーブロック式)

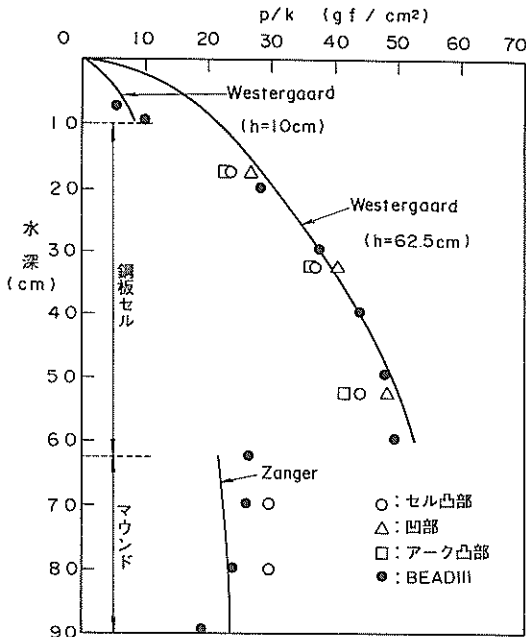


図-37-2 動水圧分布 (鋼板セル式)

ース a-2, b-2) の加速度分布および位相差の分布を示す。裏込めがある場合、裏込めを含めた模型全体の剛性が大きくなるため、裏込めがない場合と比較して大きな加速度まで実験を行うことができた。加速度分布および位相差分布とも裏込めがない場合と同様に、各セルラブロック間において、加速度、位相ともに大きく変化している。ただし、その変化量は裏込めのない場合より幾分小さい。また、セルラブロック本体と内部碎石との応答の違いも同様に見られる。

鋼板セル式の場合 (c-2) の加速度分布、位相分布を図-31、図-32にそれぞれ示す。水側に慣性力が働く場合、マウンド上面より鋼板セル本体の加速度がやや小さく、この場合も滑動したものと思われる。裏込め側に慣性力が働く場合には、裏込めが模型本体の変位を拘束するため、応答加速度はマウンドよりも大きい。

裏込めの加速度計は図-21に示したようにセルラブロック式では上段ケーソンから20 cmおよび100 cmの位置に、鋼板セル式では鋼板セルの凸部から20 cmおよび95 cmの位置に鉛直に設置した。図-33および図-34はケース a-2 における低加速度加振時での裏込めの加速度分布と位相の分布を示す。加速度分布は各位置でほとんど差がない。位相分布では模型本体が裏込めより遅れている。実験では裏込めの作成用に鋼製枠を使用した

ため、これに近いほど振動台面との位相差が小さく出たためであろう。この傾向は b-2, c-2 でも同じであった。同様に図-35-1 ~ 図-35-3, 図-36-1 ~ 図-36-3 は各ケースの破壊時における加速度分布と位相の分布を示している。セルラブロックの場合には模型本体とそのすぐ背後の裏込めとが加速度、位相ともほぼ一致しており、一体として挙動している様子が伺える。これに対し、模型本体から離れた位置の裏込めは加速度、位相ともかなり小さく、異なった挙動をしている。鋼板セルでは加速度分布は3つの位置とも同程度であるが、位相分布では模型本体とその背後部分はかなり遅れている。鋼板セルの滑動に伴ってすぐ背後の裏込めも一体となって滑ったためと思われる。

5.2 動水圧特性

セルラブロック式は前面が階段状であり、また鋼板セル式は前面が曲面であるため、模型前面に作用する動水圧分布の検討を行った。ここでは、模型の形状による効果を明確にするため、模型全体がほぼ剛体運動をしている低加速度加振の場合を対象に解析を進めた。このため、セルラブロックの隔壁間隔の大小による差については検討していない。

水圧計測定値の最大値を震度 (模型の応答加速度/重力加速度) で除し、その鉛直分布を求めた。図-37-1, 図-37-2 にセルラブロック式および鋼板セル式の場合をそれぞれ示す。図には併せて、式 (2) で表される。Westergaardの近似式³⁾にマウンドまでの水深を当てはめた結果および水-構造物連成系の地震応答解析プログラム (BEAD-III) の計算結果も示した。このプログラムの適用性は既往の研究において確認されている⁴⁾⁵⁾。

$$p = \frac{7}{8} \cdot k \cdot \gamma_w \cdot \sqrt{H} z \quad (2)$$

ここに、 p : 鉛直面に働く動水圧
 k : 震度
 γ_w : 水の単位体積重量
 H : 水底までの深さ
 z : 水面からの深さ

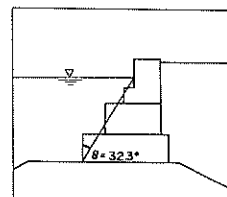


図-38 仰角の求め方

図一37-1に見られるようにセルラブロック式の場合には、Westergaardの近似式の分布よりも動水圧がかなり小さい。BEAD-Ⅲの計算結果は実験結果とほぼ一致している。セルラブロック式ではその前面が階段状のため、斜面に作用する動水圧と同様の効果をもたらしたためと思われる。そこで図一38のように下段セルラブロック下端から上段ケーソンの水際までの仰角を求め、斜面に作用する動水圧の設計式であるZanger式⁶⁾に当てはめた。Zanger式は式(3)で示される。

$$p = C \gamma_w k H \quad (3)$$

ここに、

$$C = \frac{C_m}{2} \left| \frac{z}{H} \left(2 - \frac{z}{H} \right) + \sqrt{\frac{z}{H} \left(2 - \frac{z}{H} \right)} \right|$$

p : 傾斜面に働く動水圧

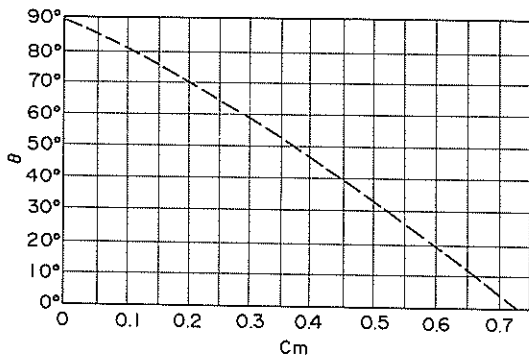
z : 水面からの深さ

H : 水底までの深さ

C : 圧力係数

C_m : 与えられた斜面上におけるCの最大値

(図一39参照)



図一39 Zanger 式の係数

図中に示した結果から、動水圧の測定結果とほぼ一致していることが分かる。このことから、実験で使用した形状のセルラブロック式模型に作用する動水圧はZanger式を用いて評価できる。

一方、図一37-2に見られるように、鋼板セル式模型に作用する動水圧はほぼWestergaardの近似式の分布に一致している。鋼板セルおよびアークの凸部よりもセルとアークの接続部の動水圧が若干大きい、顕著な差とは言えない。このような鉛直な円弧を連ねたような曲面に作用する動水圧については、既往の実験結果においても、部分的な応力の集中はあっても、その合力はWestergaard

の式で表されることが示されている⁷⁾。BEAD-Ⅲの計算結果も実験結果に一致している。但し、上段ケーソンが鋼板セルよりも内側にあるため、鋼板セル上部の動水圧はわずかにWestergaard式より小さいが、これも顕著な差とは云えない。また、計算結果では上段ケーソンに作用する動水圧は鋼板セル上面までを水深とするWestergaard式にほぼ一致している。

以上の結果から、鋼板セルに作用する動水圧はマウンド上面を水深とするWestergaard式で、上段ケーソンに作用する動水圧は鋼板セル上面を水深とする同式でそれぞれ評価できる。

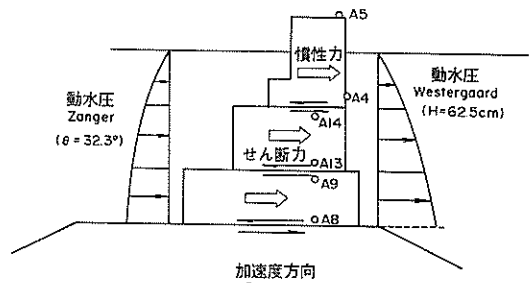
5.3 動的せん断強度

5.3.1 セラブロック間の動的せん断強度

セラブロック間のせん断強度を静的引張り試験結果と裏込めがない場合の実験結果とで比較した。振動中の各ブロックにはその底面にせん断力が作用し、この力とブロックの慣性力、動水圧の合力とがつりあう(隣接するブロックからの力は受けないとする)。すなわち、マウンドから下段セラブロックに作用するせん断力は模型全体に作用する動水圧と慣性力の和に等しく、下段セラブロックから中段セラブロックに作用するせん断力は中段セラブロックおよび上段ケーソンに作用する動水圧と慣性力の和に等しい。そこで、慣性力と動水圧を以下の方法で求め、これらの和から振動中のせん断力を算定した。

①慣性力：セラブロック内の碎石は飽和単位体積重量を用いる。各ブロックの全重量を重力加速度で除し質量を算定する。応答加速度の時刻歴はブロック毎の一つとし、上段ケーソンについては加速度計A4とA5、中段セラブロックについては同A13とA14、下段セラブロックは同A8とA9の平均値を各々用いる。

②動水圧：前面および背面の動水圧はそれぞれZanger式、Westergaard式によって評価できるものとし、各ブロックには図一40に示すように各ブロックの水深に対応する各



図一40 各ブロックへの動水圧のかけ方

分布の区間の合力が作用するものとする。加速度時刻歴は慣性力と同様とする。

得られた動的せん断力の時刻歴を静的引張り試験と同様に模型の水中重量で除し無次元化する。この値を以下では静的せん断強度と対比する意味で動的せん断強度と呼ぶ。結果の例としてケース a-1 の場合を図-41-1、図-41-2 に示す。図には参考として、中段セルラブロックと下段セルラブロック間の相対変位 (D2 の測定値から D3 の測定値を引く) およびマウンドと下段セルラブロック間の相対変位 (D3 の測定値) も示した。各時刻歴とも振動分だけを表すように、1~10Hz のフィルターをかけてある。なお、これらの値はいずれも模型全体のロッキングによる変位を含んでおり、また D3 についてはマウンドの変形による変位も含んでいるために、実際の各ブロック間におけるせん断方向の相対変位より大きいと思われる。動的せん断強度の時刻歴から最大値を読み取り、3. の静的せん断強度~変位図に重ねると図-42-1~図-42-4 のようになる。図中①線が模型が大きく変形した破壊時を示し、②線がその直前の加振時を示す。この場合にはほとんど相対変位はない。③線は変位が小さい位置で静的せん断強度曲線と交わり、①線はいずれも最大せん断強度を上回っている。振動実験では碎石の締固めを行っているため、静的試験に比べ大きな値を示していると思われるが、定性的には静的試験と振動実験とは対応していると判断できる。今回の実験では正弦波加振で、加振時間も短い。このため、静的試験結果から直接振動時のせん断強度を評価することは困難である。しかし、中詰めの密度を変化させるなど、種々の場合について両者の関係を測定すれば、静的せん断強度の試験結果から動的なせん断強度をある程度推定できるとと思われる。

5.3.2 鋼板セルとマウンド間の動的せん断強度

セルラブロックの場合と同様に鋼板セル模型の慣性力、作用する動水圧から鋼板セル模型とマウンド間の動的せん断強度 (摩擦係数) を算定する。慣性力、動水圧は次のように求めた。

①慣性力：鋼板セルと上段ケーソンそれぞれについて重量を重力加速度で除し質量を算定する。応答加速度の時刻歴は、鋼板セルについては加速度計 A4、A5、A6 の平均値を使用し、上段ケーソンについては同 A13 と A14 の平均値を用いる。

②動水圧：鋼板セルに作用する動水圧はマウンド上面を水深とし、上段ケーソンに作用する動水圧は鋼板セル上面を水深とする Westergaard 式の分布が前面と背面にそれぞれ作用すると考える。

得られたせん断力を同様に模型の水中重量で除して動的せん断強度の時刻歴を求める。図-43-1、図-43-2 にほとんど変位がない場合、および滑動した場合を示す。滑動している場合のせん断強度時刻歴の極値は 0.6 付近であり、コンクリート~捨石間の摩擦係数や、碎石層~下段-c の静的試験の結果と対応している。

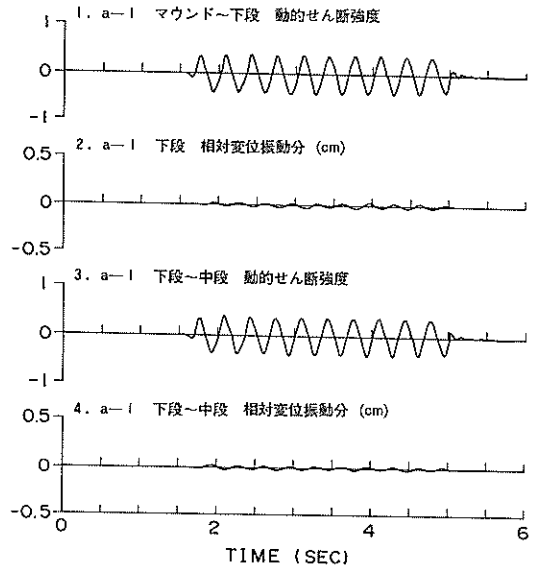


図-41-1 動的せん断強度
(a-1, 低加速度時)

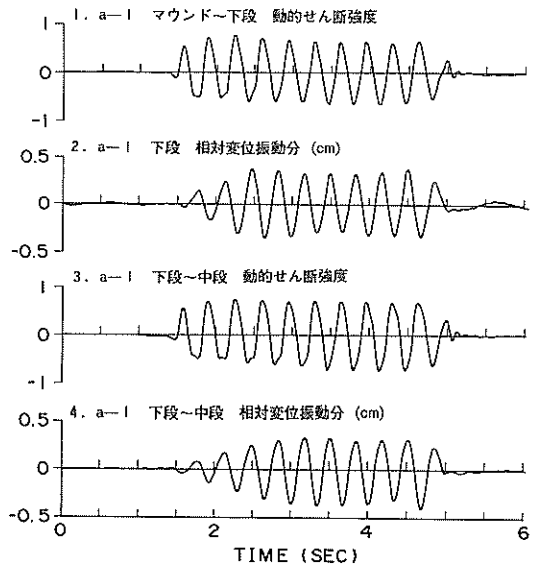


図-41-2 動的せん断強度
(a-1, 破壊時)

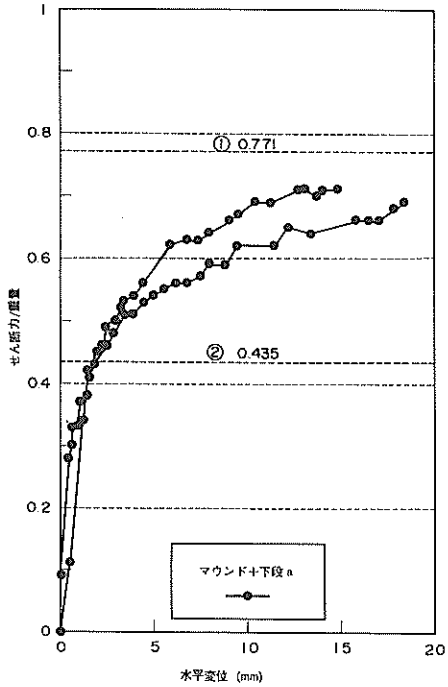


図-42-1 静的せん断強度と動的せん断強度の比較
(マウンド～下段-a)

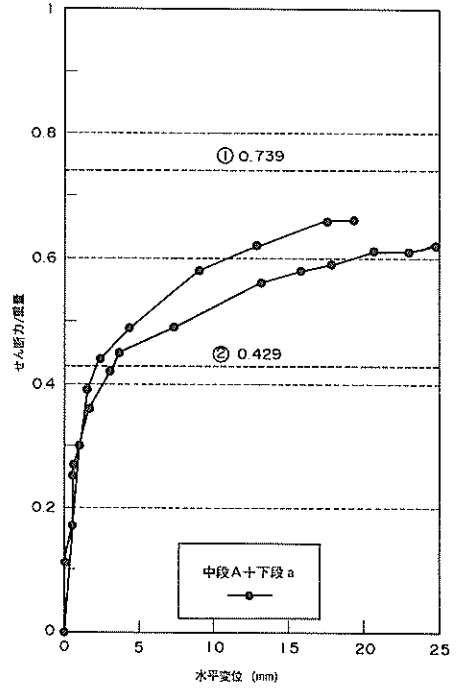


図-42-3 静的せん断強度と動的せん断強度の比較
(下段-a～中段-A)

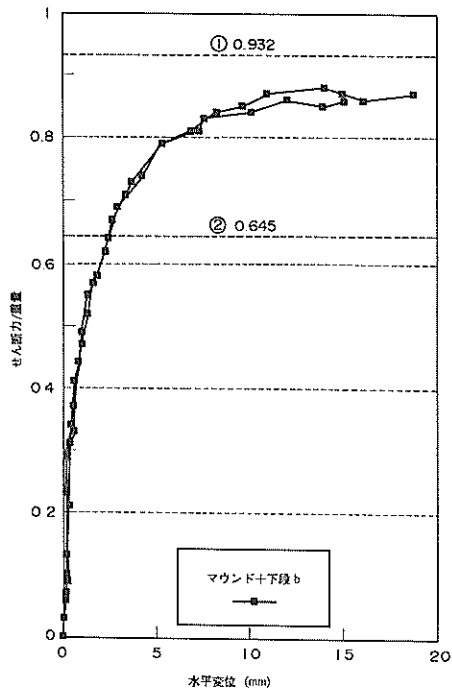


図-42-2 静的せん断強度と動的せん断強度の比較
(マウンド～下段-b)

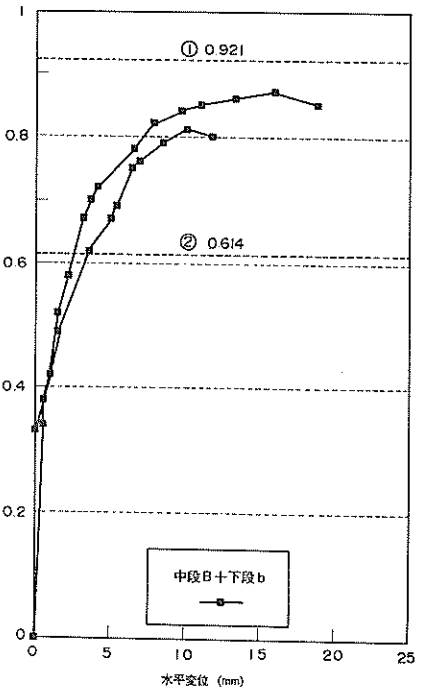


図-42-4 静的せん断強度と動的せん断強度の比較
(下段-b～中段-B)

5.4 破壊形状

破壊時の変位計時刻歴の例として、図-44-1、図-44-2にb-2、c-2の場合を示す。图中負側は模型が水側へ変位した場合を指す。模型は水側に動くだけでなく、水-裏込め両方向に振動しながら徐々に水側に変位する。その振動幅は模型頂部ほど大きい。裏込めのある場合の各ケースについて実験後の最終変形状態を図-45-1～図-45-3に示す。セルラブロック式模型では、各ブロックがほぼ水平を保ったまま前に押し出された形で破壊している。水平残留変形量は模型上部ほど大きい。また、隔壁間隔が小さい場合のほうが、幾分水平変位は小さ目に抑えられている。鉛直方向には全体的にやや沈下しているが、中詰めの抜出しは見られなかった。鋼板セル式模型の場合もほぼ同様で、セル全体が前に滑り出している。

セルラブロック式では裏込めは模型の移動にともない沈下し、沈下量は模型に近いほど大きい。鋼板セル式では上段ケーソンとセル本体との相対変位がほとんどなかったため、セル本体の上部にある裏込め部分はあまり

沈下せず、上段ケーソンから40cm付近の沈下量が最も大きかった。

各場合について入力加速度を重力加速度で除した値を震度 k とし、この震度を式(4)の港湾の施設の技術上の基準・同解説に示されている水中震度の提案式⁹⁾にあてはめ、得られた水中震度から現行設計法の裏込めの崩壊角を算定した。

$$k' = \frac{\sum \gamma h + \gamma_w h_w + w}{\sum \gamma h + w} \cdot k \quad (4)$$

ここに

γ : 土の単位体積重量

γ_w : 海水の単位体積重量

h : 土層の厚さ

h_w : 土層の水に浸かっている深さ

w : 単位面積当りの載荷重

このとき、土層は単一とし、上載荷重はゼロとした。また裏込めの崩壊角の算定では、模型壁面は鉛直とし、砕石の内部摩擦角は 40° 、壁面摩擦角は 0° とした。結果を

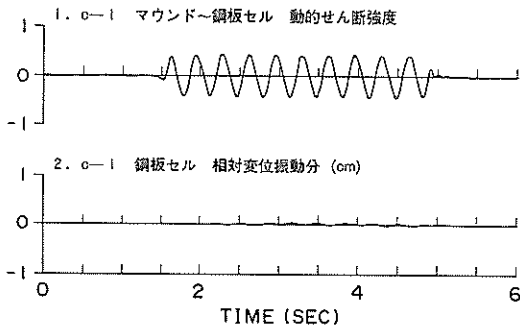


図-43-1 動的せん断強度
(c-1, 低加速度時)

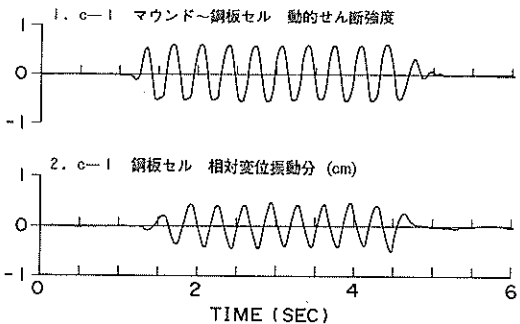


図-43-2 動的せん断強度
(c-1, 破壊時)

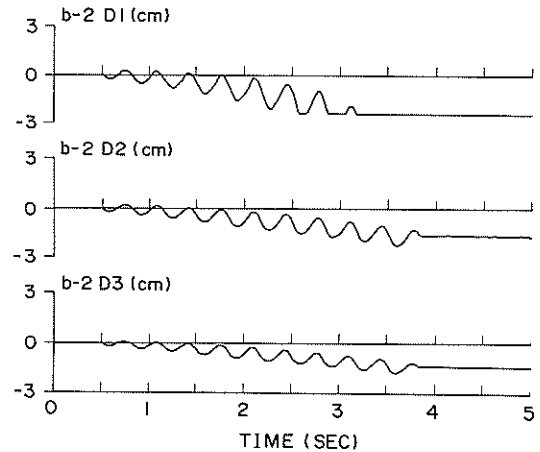


図-44-1 破壊時の相対変位波形
(b-2)

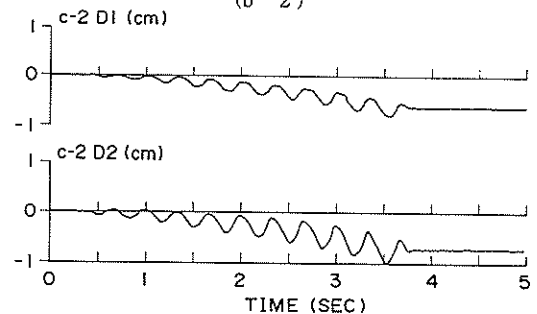


図-44-2 破壊時の相対変位波形
(c-2)

セルラーブロック式 (中段 A、下段 a、裏込め有り)

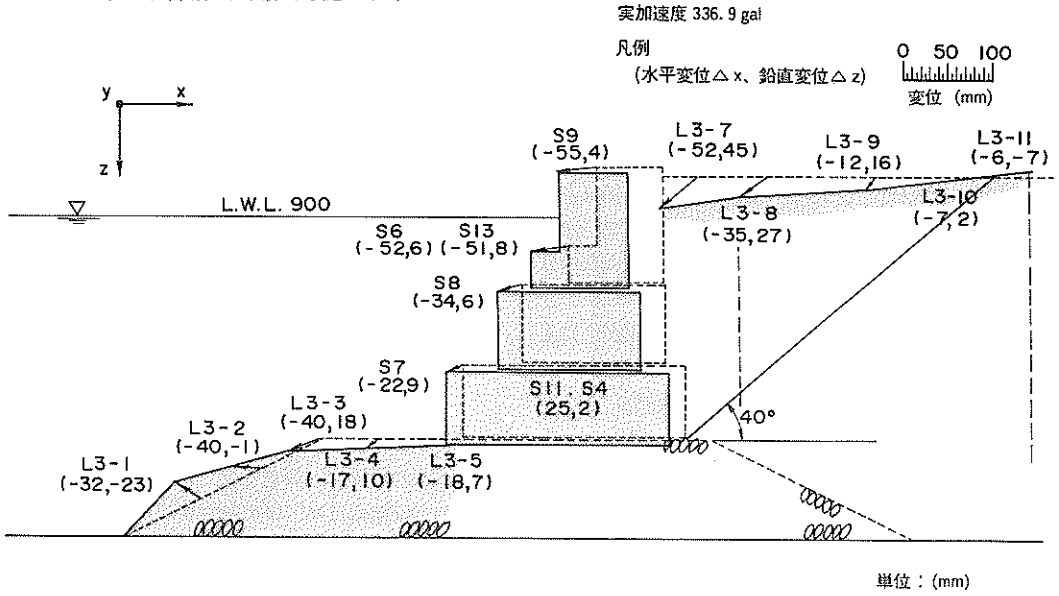


図-45-1 破壊形状 (a-2)

セルラーブロック式 (中段 B、下段 b、裏込め有り)

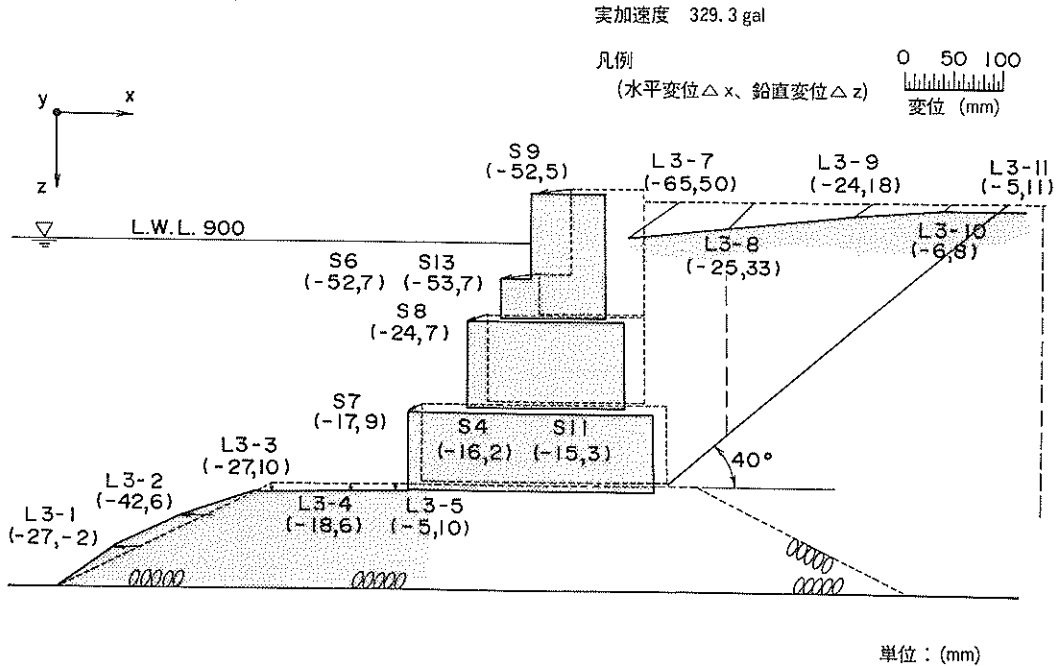


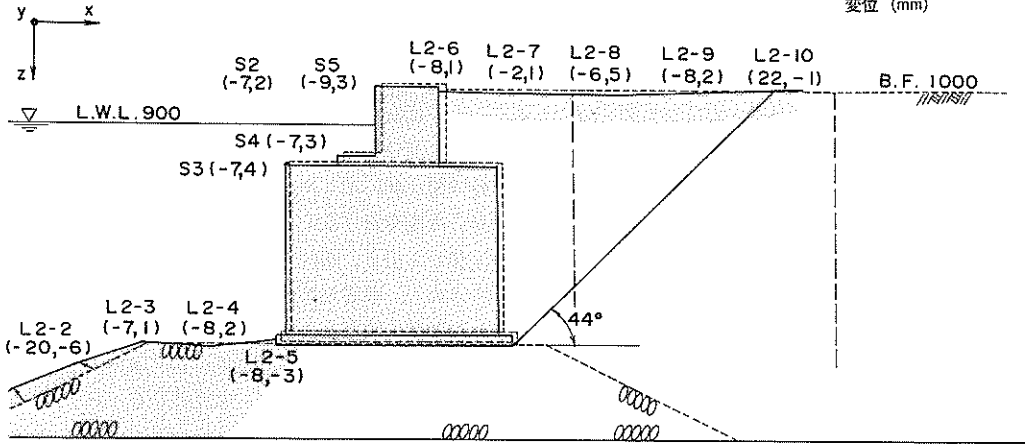
図-45-2 破壊形状 (b-2)

底板付き鋼板セル式（裏込め有り）

実加速度 282.5 gal

凡例
(水平変位 Δx 、鉛直変位 Δz)

0 50 100
変位 (mm)



単位：(mm)

図-45-3 破壊形状 (c-2)

図中に併せて示す。各崩壊線はある程度裏込めの変形状況を表現していると思われる。図-35に示す加速度分布で見たように、模型のすぐ背後の裏込めは模型と一体となって挙動している。また、離れた位置では加速度、位相差ともに小さく、異なった挙動をしていた。図-45中に示した破線は各加速度計位置を示しているが、算定した崩壊線は両者の間に位置しており、この結果からも計算値は比較的妥当な値と思われる。

5.5 動間隙水圧特性

5.5.1 動間隙水圧分布

裏込めがある場合の実験では模型や裏込め内に設置した水圧計によって動間隙水圧の測定を行った。しかし、水圧計が小型のため検圧部分についた気泡が取れず、セルラブロック式護岸の実験では精度よい観測値は得られなかった。このため、その後実施した鋼板セル式護岸の実験ではあらかじめ水給で検圧部を覆い、注水後暫く時間を置き、水給が溶け出すのを待って加振した。

図-46に滑動を起こしていない場合と滑動を起こした場合の最大動間隙水圧の分布を示す。図中P6～P8は鋼板セルの裏込め側に設置した水圧計であり、P21～P23は鋼板セルからやや離れた裏込め内に設置した水圧計である。また、破線は前面の動水圧を示す。動間隙水圧も動水圧と同様に水圧計測定値を震度で除した形で示してある。

非滑動時の動間隙水圧は前面の動水圧よりかなり小さ

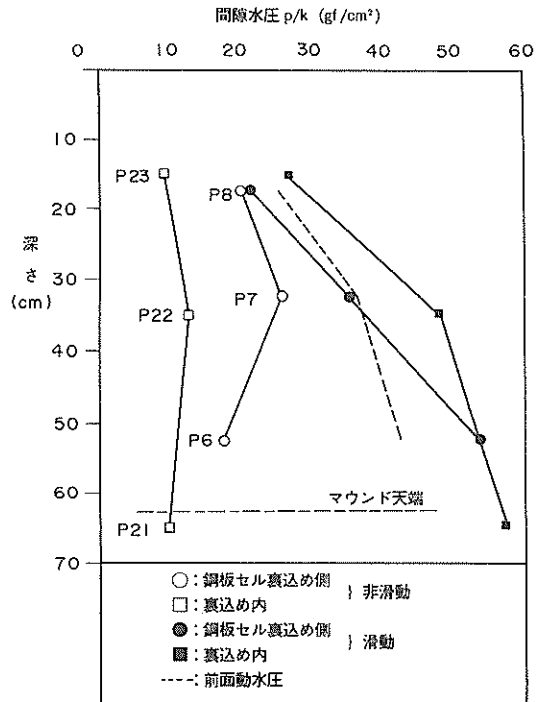


図-46 動間隙水圧分布 (c-2)

い。松尾ら⁹⁾の研究や松澤ら¹⁰⁾の研究では、裏込め土の透水性が大きければ動間隙水圧はほぼ動水圧に等しいとしている。この研究成果と実験結果は食い違っているが、その理由としてマウンドと裏込め間で発生する動間隙水圧の影響が挙げられる。実験ではマウンドに6号砕石を、裏込めに7号砕石をそれぞれ使用し、各々の透水係数は10 cm/s、5 cm/s程度と推定された。この透水性の違いから、マウンドと裏込めが接する部分でも図-47のように鋼板セルの裏込め側とは反対の動間隙水圧が発生する。この影響により鋼板セル下部の動間隙水圧が小さくなったと考えられる。

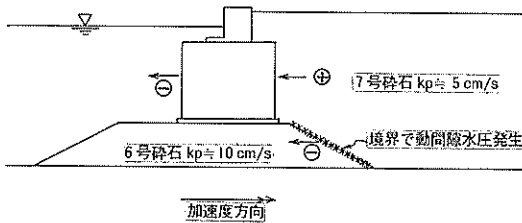


図-47 動間隙水圧の発生

示した動間隙水圧 (P 6) と相対速度 (D 1 の時刻歴を微分したもの) の位相差はあまりない。このため、相対速度に伴って大きな動間隙水圧が発生したと思われる。

5.5.2 動間隙水圧と相対速度との関係

滑動時の動間隙水圧は応答加速度に起因する部分と相対速度に起因する部分とが足し合わされて計測されたと考え、応答加速度に起因する部分を取り除き、相対変位に起因する部分だけを取り出した。応答加速度に起因する部分は図-46に示した非滑動時の動間隙水圧に滑動時の模型の震度を掛けることで算定した。これを動間隙水圧測定値から引き、相対速度に起因する動間隙水圧の時刻歴を求めた。各時刻歴からピーク値を読み取り、相対速度との関係を図化すると図-49-1～図-49-3のようになる。このとき各水圧計位置の相対速度は模型全体のロッキング振動を考慮して、水圧計 P 6、P 7、P 8 の高さの相対変位をそれぞれ、D 1、D 1 と D 2 の平均、D 2 と考え、各時刻歴を微分して求めた。図中引張り側とは鋼板セルが水側に滑動するとき動間隙水圧が負圧

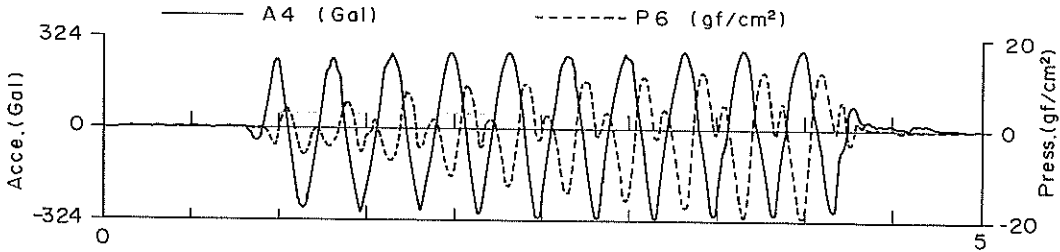


図-48-1 動間隙水圧と加速度との位相差 (A4～P6)

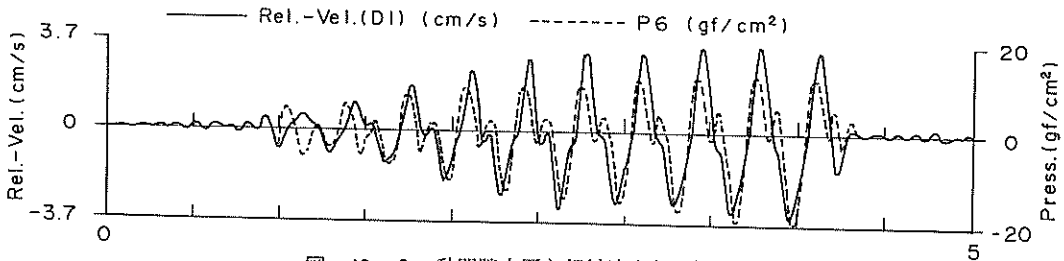


図-48-2 動間隙水圧と相対速度との位相差 (D1～P6)

一方、滑動時の動間隙水圧は滑動していない場合と比べかなり大きい。剛基礎上のケーソンの滑動実験では、滑動時の動間隙水圧は加速度の影響と共に滑動に伴う基礎とケーソンとの相対速度の影響が強くと現れるという結果が得られている¹¹⁾。今回の実験結果でも、図-48-1に示した動間隙水圧 (P 6) と応答加速度 (A 4) の時刻歴の位相はほぼ反転しているのに対し、図-48-2に

となる場合を指し、圧縮側は逆に鋼板セルが裏込め側に滑動する際の正圧を指す。いずれの動間隙水圧とも滑動を妨げるように働く。図に示されたように、相対速度と動間隙水圧とはほぼ線形関係にあるが、引張り側と圧縮側とでは引張り側の方がかなり値が大きい。この原因は明かではないが以下のように推測できる。水側への滑動にともない模型付近の裏込めが崩れ、この部分の間隙比

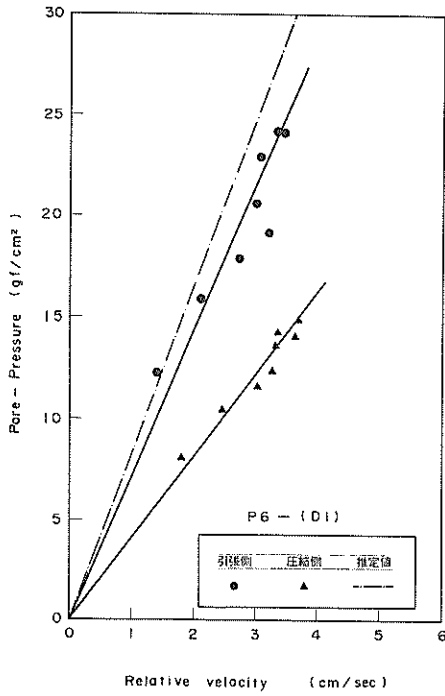


図-49-1 動間隙水圧と相対速度 (D1 ~ P6)

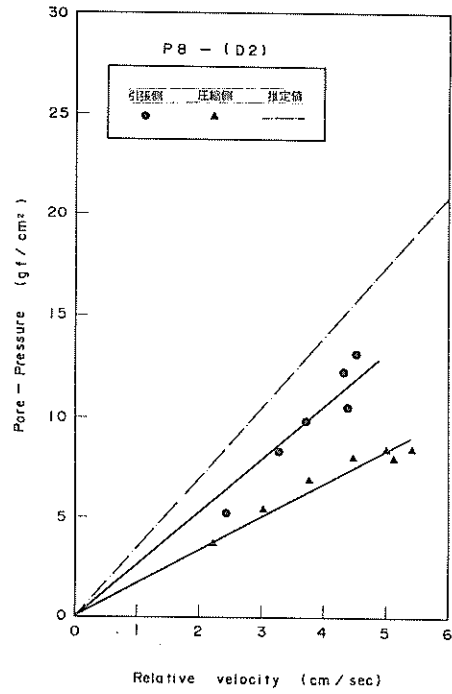


図-49-3 動間隙水圧と相対速度 (D2 ~ P8)

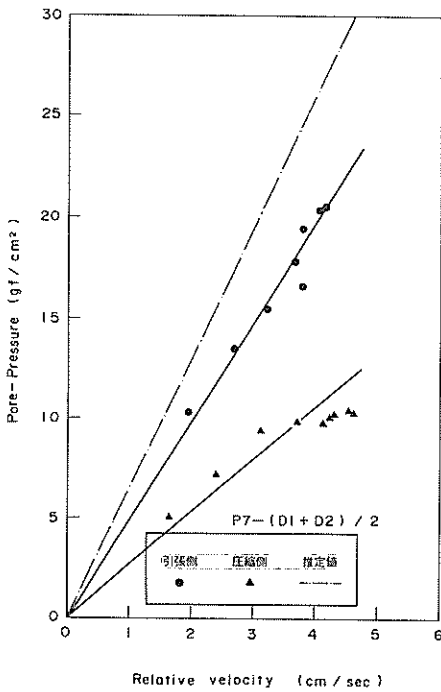


図-49-2 動間隙水圧と相対速度 ((D1 + D2) / 2 ~ P7)

が大きくなる。このためこの部分の透水性が増し、逆に模型が裏込め方向へ動く場合には、間隙水が流れ出る際の抵抗が小さくなる。この点に関しては今後の検討課題と云える。

5.5.3 動間隙水圧の評価

重力式構造物が地震時にどの程度滑動するかを推定する手法がいくつか検討されている^{12), 13), 14)}。地震時の護岸構造物には慣性力その他、底面の摩擦力、前面の動水圧および背面の土圧・動間隙水圧が作用するため、滑動量の推定に際してはこれらの値を明かにする必要がある。このうち滑動時の動間隙水圧については検討例が少く、定量的な把握が難しい状況にある。そこで滑動中の動間隙水圧の大きさを以下の方法で推定した。

いま図-50のような筒の中に碎石がある状態を考える。筒の端にあるピストンがある方向に動けば、水が碎

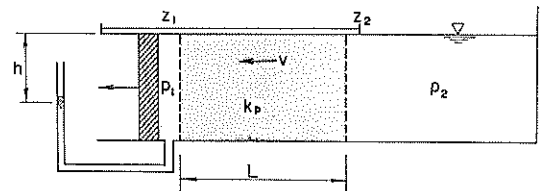


図-50 水圧差の説明

石層を流れる。このときダルシー則が成り立てば水頭差 h を用いて式 (5) と表せる。

$$v = k_p \cdot h / L \quad (5)$$

ここに v : 流速

k_p : 透水係数

h : 水頭差

L : 透水長

水頭差 h はベルヌーイ式の水頭が両端で等しいものとすれば、式 (6) で示される。

$$h = \left(\frac{p_2}{\gamma_w} + z_2 \right) - \left(\frac{p_1}{\gamma_w} + z_1 \right) \quad (6)$$

ここに z_1, z_2 : 碎石層両端の位置水頭

p_1, p_2 : 碎石層両端の圧力水頭

γ_w : 水の単位体積重量

よって両端の圧力差は次式で示される。

$$p_2 - p_1 = \gamma_w \left\{ \frac{v}{k_p} \cdot L - (z_2 - z_1) \right\} \quad (7)$$

この関係を振動実験模型に当てはめる。ただし振動実験では模型の相対変位にともなってあらゆる方向から水が流れ込むため、流速 v や透水長 L を一つに決めることはできない。このため、2次元の浸透流解析が必要となるが、ここでは滑動により拡張した部分に入る水は水面から供給されるものと仮定し、以下のように各値を定める。まず、流速 v は模型の相対速度とする。また、透水長 L は水面から模型表面の任意地点まで流速 v で水が流れるときその損失水頭が最も小さくなるように定める。このときマウンドの透水性も考慮して、水面からの深さ z の位置では図-51のように①か②の経路のうち損失水頭が小さい方をとる。位置水頭差 ($z_2 - z_1$) は模型の相対変位の変動分 (d) を用いる。この値は相対変位の向きで異なり、水側へ滑動する時には経路①の場合は $-d$ 、経路②の場合は $+d$ とし、裏込め側に動くときは各々 $+d$ 、 $-d$ とする。

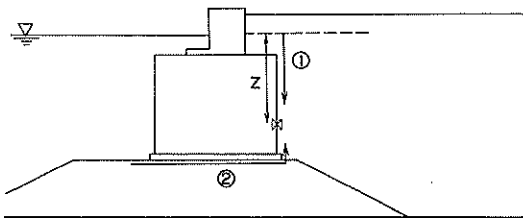


図-51 間隙水の流れの方向

裏込めの透水係数を 5 cm/s 、マウンドの透水係数を 10 cm/s 、 p_2 を 0 gf/cm^2 (水面) とし、模型の相対変位は振動数 3 Hz の単振動とする。このときの相対速度と動間隙水圧の関係を推定値として図-49に併せて示す。全体に引張り側の実験結果よりやや大きい、P6ではかなり近い値を示しており、相対速度と透水係数の関係からある程度滑動中の動間隙水圧を評価できそうである。ただし、ここでの仮定はかなり大まかなものであり、今後さらに2次元的な解析によって確認する必要がある。

6. 結論

セルラブロック式および底板付き鋼板セル式 (鋼製円筒ケーソン) 護岸の耐震性を検討するために模型振動実験を実施した。得られた結論は以下の通りである。

(1) マウンドとセルラブロック間および各セルラブロック間の静的せん断強度は碎石とモルタル間のそれより大きな値を示した。また、隔壁間隔が小さい方がより大きな静的せん断強度を示した。隔壁間隔が大きな場合には変形量がかなり増加しないと最大せん断強度に達しなかった。この理由として隔壁間隔が小さいと中詰めの変形を強く拘束することが挙げられる。

(2) 中詰め材の抜き強度に関しても隔壁間隔が小さい方が大きな値を示した。このとき中詰め材の間隙比が大きければそれだけ大きな抜き強度を示した。

(3) セラブロック式では加速度の増加にともない各ブロックの境界で応答加速度、位相が著しく変化した。これらは隔壁間隔が大きな場合ほど顕著であった。また、隔壁間隔が大きな場合、セラブロックと中詰め材との間に応答加速度、位相の差が認められた。鋼板セルは碎石マウンドとの摩擦係数が小さいこともあって、マウンド上を滑動した。

(4) セラブロック式護岸に作用する動水圧は下段セラブロック下端から上段ケーソンの水際までの仰角を求め、これをZanger式に当てはめることで評価できる。鋼板セルに作用する動水圧はマウンド上面を水深とするWestergaard式で、上段ケーソンに作用する動水圧は鋼板セル上面を水深とする同式で評価できる。

(5) 振動時の慣性力と作用する動水圧の合力から、セラブロック間の動的せん断強度を算定し、この値を静的せん断強度試験結果と比較した。その結果、振動時の相対変位があまりない低加速度加振時には、得られた最大動的せん断強度は静的せん断強度～変位曲線に変位が小さい位置で交わった。また、振動時の相対変位が大きい破壊時の最大動的せん断強度は最大静的せん断強度を上回った。同様の方法で求めた鋼板セルとマウンドとの

せん断強度は約0.6であり、現行設計法のコンクリートと捨石間の摩擦係数に対応した。

(6) セルラーブロック式護岸の破壊性状は各ブロックがほぼ水平に上部ほどやや大きくせりだした形状を示した。鋼板セル式護岸では本体が前面方向に滑動することで破壊した。港湾の施設の技術上の基準に示されている水中震度の提案式から得られた水中震度を現行設計法に当てはめて、裏込めの崩壊角を算定した。この角度は実験の最終変形状態や裏込めの応答加速度測定結果と良い整合性を示した。

(7) 滑動を伴う場合、透水性の大きな裏込め内の動間隙水圧は、応答加速度に起因する部分を取り除けば、模型の地盤に対する相対速度と線形関係にあった。また、ダルシー則とベルヌーイの式を使って計算した動間隙水圧は実験値よりやや大きいものの現象をおよそ説明できることから、相対速度に起因する動間隙水圧は相対速度と透水係数より推定可能であると考えられる。

あとがき

セルラーブロック式、底版付き鋼板セル式とも施工実績が少ない。このため、実構造物の地震時の被災事例も少なく、地震時挙動を検討する資料に乏しい。本報告で得られた成果は当該構造物の耐震性を検討する上で必要な振動特性、破壊形状および動水圧を評価するために活用できる。また、滑動時の動間隙水圧の評価方法は地震による重力式構造物の滑動量推定手法を検討する際に活用できる。ただし、本研究の振動実験は正弦波加振で、継続時間が比較的短い。このため、実構造物の地震時の挙動に関する検討では、ここで得られた成果を考慮した地震応答解析を実施することが望まれる。

(1993年3月31日受付)

謝辞

模型振動実験は第二港湾建設局の港湾事業費によった。静的実験に使用した引張り試験機は土質部基礎工研究室から借用した。また、上田茂構造部長には本報告の取りまとめに際して貴重な助言を頂いた。

最後ではあるが、これら関係者各位に心から謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本港湾協会、釜石湾口防波堤耐震調査委員会：釜石湾口防波堤の耐震性調査報告書、1981年2月。
- 2) たとえば、上部達生・榎垣典弘：水中の剛構造物の地震時滑動と動水圧の実験的研究、港湾技術研究所

報告、Vol.23, No. 3, 1984年9月, pp.153-186.

- 3) Westergaard, H. M. : Water Pressures on Dams during Earthquakes, Trans. ASCE, 98, 1933, pp.418~434.
- 4) 上部達生・野田節男・千葉忠樹・榎垣典弘：水との連成を考慮した大型混成式防波堤の振動特性と動水圧、港湾技術研究所報告、Vol.20, No. 4, 1981年12月, pp.41-81.
- 5) 上部達生・守屋正平：砂地盤上の大水深混成式防波堤の大型模型振動実験と地震応答解析、港湾技術研究所資料、No.589, 1987年6月, 61p.
- 6) Zanger, C. N. :Hydrodynamic Pressures on Dams due to Horizontal Earthquakes, Proc. Exper. Stress Analysis, Vol.10, No. 2, 1953.
- 7) Uwabe,T.,Osada,M.:Shaking Table Tests for Hydrodynamic Pressure acting on Double Cylindrical Caisson Type Breakwater in Deep Sea, Proc. of 10WCEE,July 1992, pp.2775-2780.
- 8) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、平成元年3月, pp. 2-180~181.
- 9) 松尾春雄・大原資生：重力式岸壁の耐震性についての一考察、土木学会論文集, No.71, 1960年, pp. 1-7.
- 10) Matsuzawa,H.,Ishibashi,I. and Kawamura,M.:Dynamic Soil and Water Pressures of Submerged Soil, Proc. of ASCE, Journal of G.E., Vol.111, No.10, Oct.1985, pp.1161-1176.
- 11) 上部達生・長田信・高野剛光：重力式擁壁の水中における地震時滑動挙動、第26回土質工学研究発表会概要集, 1991年7月, pp.939-940.
- 12) 藤野陽三・佐々木有三・伯野元彦：地震動による物体の滑りについて、地震研究所彙報, Vol.53, 1978, pp.461-480.
- 13) 土岐憲三・佐藤忠信・三浦房紀：地震時における地盤と構造物の間の剥離と滑動、土木学会論文報告集, No.302, 1980年10月, pp.31-41.
- 14) 上部達生・守屋正平・工藤勝己：剛基礎上の重力式係船岸の地震時滑動量推定手法の実験的研究、港湾技術研究所報告, Vol.27, No. 2, 1988年6月, pp.211-240.

記号表

- | | |
|----------|-----------------|
| C | : Zanger式の圧力係数 |
| C_m | : 与えられた斜面のCの最大値 |
| D_{10} | : 通過率10%粒径 |
| d | : 相対変位の振動分 |
| e | : 間隙比 |

f	: 固有振動周波数
g	: 重力加速度
H	: 水深
h	: 水頭差
h_w	: 水面下の層厚
k	: 縫度
k_p	: 透水係数
k'	: 見掛けの縫度
L	: 透水長
p	: 動水圧, 動間隙水圧
p_1, p_2	: 圧力水頭
U_c	: 均等係数
v	: 間隙水の流速
v_s	: せん断波速度
w	: 単位面積当りの載荷重
z	: 水面からの深さ
z_1, z_2	: 位置水頭
γ	: 裏込めの単位体積重量
γ_d	: 裏込めの乾燥単位体積重量
γ_w	: 水の単位体積重量
θ	: 斜面の傾斜角

港湾技研資料 No.753

1993・6

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 横浜ハイテクプリンティング株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.

Copyright © (1993) by P.H.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a
maching language without the written permission of the Director General of P.H.R.I.

この資料は、港湾技術研究所所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複
写は、港湾技術研究所所長の文書による承認を得ずしてこれを行なってはならない。