

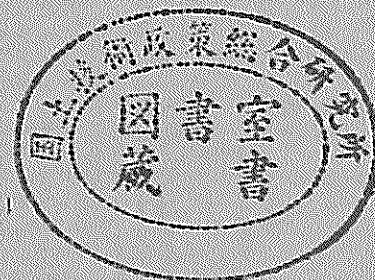
港湾技研資料

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

No. 891 Dec. 1997

鋼製円筒ケーソンの模型振動実験

上 中 柳 今	部 山 本 井	達 種 泰	生 清 伴 誠
------------------	------------------	-------------	------------------



運輸省港湾技術研究所

目 次

1. まえがき	5
2. 鋼製円筒ケーソンの概要	5
2.1 鋼製円筒ケーソンの構造	5
2.2 鋼製円筒ケーソンに関する技術課題	6
(1) 類似構造物	6
(2) 全体安定機構	6
(3) 壁体	6
(4) 底版	6
3. 模型振動実験内容	8
3.1 実験概要	8
3.2 測定項目	8
(1) 加速度	8
(2) セルの変位	8
(3) セル・アーク鋼殻のひずみ	9
(4) 中詰底面土圧	9
(5) 裏埋め土圧	9
3.3 鋼製円筒ケーソン護岸模型	9
(1) 鋼製円筒ケーソン模型	9
(2) 土圧計の取付	10
(3) 模型の設置	11
(4) 中詰および裏埋め投入	11
3.4 実験装置	13
(1) 振動台	13
(2) 計測機器	13
3.5 中詰および裏埋め砂の性質	14
(1) 粒度分布	14
(2) 土粒子の比重	14
(3) 単位体積重量	14
(4) 含水比	14
(5) 内部摩擦角	14
3.6 加振方法	15
(1) スイープ試験	15
(2) 加振载荷実験	15
3.7 測定方法	15
(1) 加振時の測定	15
(2) セルの天端形状測定	17
4. 実験結果および考察	17
4.1 スイープ試験結果	17
4.2 加振時測定結果	17
(1) データ整理方法	17

(2) 加速度測定結果	19
(3) 堤体の変位	19
(4) 裏埋め土圧	20
(5) 中詰底面土圧	22
(6) セル・アーク鋼殻の鉛直応力	23
(7) セル鋼殻の水平応力	24
(8) セル鋼殻の主応力	25
(9) 作用力と反力の同一時刻分布	25
(10) セルの天端形状	26
4.3 作用モーメントと抵抗モーメント	27
(1) 作用モーメントの算定	27
(2) 抵抗モーメントの算定	28
(3) 作用モーメントと抵抗モーメント	28
4.4 底版へのモーメント伝達の分担	29
5. 有限要素法による解析	30
5.1 解析概要	30
5.2 解析内容	31
(1) 解析手法	31
(2) 解析モデル	31
(3) 外力	31
5.3 解析結果	32
(1) セル・アーク鋼殻の下端部の鉛直応力度	32
(2) 中詰底面土圧	32
5.4 底版へのモーメント伝達の分担	33
6. まとめ	33
7. あとがき	33
参考文献	34
主要記号表	34

Shaking Table Test on Cylindrical Steel Caisson Model

Tatsuo Uwabe*
Tanekiyo Nakayama**
Yasutomo Yagimoto***
Makoto Imai****

Abstract

Shaking table model tests were conducted in order to reveal the stress on such a cylindrical steel caisson used for a seawall or a quaywall during earthquakes. The seawall model is composed of three pieces of steel-plate models which are connected by arc-plates with sand filling. The diameter, height and thickness of the steel-plate model are 900mm, 1100mm and 0.5mm respectively. In the tests, measurements were taken of the displacement and the stress of the steel-plate and the arc-plate, the response acceleration of the sand filling, the earth pressure at the base of sand filling, the backfill earth pressure, etc. As a result, it was revealed that most of backfill earth pressure and seismic force that act on the wall travel through the steel shell to the bottom slab and that it is conservative enough if the effective inertia coefficient of 0.8 - 1.0 in sand filling during earthquakes vibration is used for seismic design.

Key Words : Cylindrical Steel Caisson, Shaking Table Mode Test,
Cell type structures, Earth pressure during earthquakes.

*Chief, Earthquake Disaster Prevention Laboratory, Structural Engineering Division

Address: 3-1-1, Nagase, Yokosuka 239, JAPAN Tel: + 81-468-44-5030 Fax: + 81-468-44-0839 E-mail address: uwabe@cc.phri.go.jp

**General Manager at Civil Engineering & Steel Bridge Technology Department, Sumitomo Metal Industries Ltd.

***Manager of Civil Engineering Laboratory, Sumitomo Metal Industries Ltd.

****Tokyo Civil Engineering Steel Structure Development & Design Section, Sumitomo Metal Industries Ltd.

鋼製円筒ケーソンの模型振動実験

上部 達生*
中山 種清**
柳本 泰伴***
今井 誠****

要 旨

護岸または岸壁として利用される鋼製円筒ケーソンの地震時に生ずる応力を明らかにするため、直径 900mm、高さ 1,100mm、板厚 0.5mm の鋼板セル模型 3 体をアークで連結し、中詰砂を投入した護岸模型を作成し、振動台により水平加速度を与える模型実験を実施した。実験では鋼板セルおよびアークの変位と応力、中詰砂の応答加速度、中詰底面土圧、裏込土圧などを測定した。その結果、壁体に作用する裏込土圧と地震力の大部分は鋼殻から底版に伝達されること、ならびに中詰砂の振動時の有効質量係数を 0.8 ～ 1.0 として設計すれば安全側であることがわかった。

キーワード：鋼製円筒ケーソン，模型振動実験，セル構造，地震時土圧

*構造部 地震防災研究室長

所在地：〒239 横須賀市長瀬 3-1-1, TEL:(0468)44-5030, FAX:(0468)44-0839, E-mail アドレス：uwabe@cc.phri.go.jp

**住友金属工業㈱ 土木・橋梁技術部専任部長

***住友金属工業㈱ 土木研究室長

****住友金属工業㈱ 東京土木鉄構開発・設計室

- ①自重が小さく、陸上ヤードで製作する場合でも比較的小型の起重機船で吊り上げ・進水させることが可能である。
- ②軽量であるため浅い海域での浮上曳航が可能である。また、台船を用いての運搬も容易である。
- ③鉄筋コンクリートは底版のみであるため配筋等の手間が少なく、また、鋼板セルやアークは工場等で製作されるため、現場作業の省力化および工期短縮が図れる。

2.2 鋼製円筒ケーソンに関する技術課題

(1) 類似構造物

前述のように、鋼製円筒ケーソン構造物は、中詰を有する鋼板製のセル・アークから成る壁体と、鉄筋コンクリート製の底版から成り、鋼板セルは底版と一体化されている。ここで、壁体は、「根入れ鋼板セル構造物」あるいは「置き鋼板セル構造物」と類似した構造であり、また、コンクリート製の底版を有する構造物として「コンクリートケーソン構造物」と類似しているとも考えられる。これらの構造物との鋼製円筒ケーソンの構造的な比較を表-1に示す。

(2) 全体安定機構

表-1に示すように、鋼製円筒ケーソンは中詰を含む重量により壁体として安定する重力式構造物であり、コンクリートケーソンと同様である。従って、全体安定はコンクリートケーソンと同様の方法で設計すればよく、実験等で確認が必要な要素は少ない。

一方、従来の鋼板セル式構造物では、次のような耐力機構を前提としており、鋼製円筒ケーソンとは異なる。

- ①根入れ鋼板セルでは、壁体全体を剛体とみなし重力式構造物として扱っているものの、根入れ部の側方地盤反力を期待している。
- ②置き鋼板セルでは、中詰のせん断抵抗と、セル鋼殻に接する部分の中詰が壁面摩擦力によってセル鋼殻にぶらさがることによる重量の効果によって、作用モーメントに抵抗する。

(3) 壁体

従来の鋼板セルにおけるセル鋼殻およびアーク鋼殻は、根入れの有無にかかわらず、中詰土圧による円周方向のフープテンションのみにより肉厚を決定し、前趾反力等による鉛直応力は問題にならないものとして無視している。フープテンションに関しては、鋼製円筒ケーソンも同様と考えられるが、鋼殻下端における固定条件が従来の鋼板セル構造と異なるため、底版から壁体に作用する

鉛直反力によっては、セル鋼殻に作用する鉛直応力が無視できないことも考えられる。そこで、従来の鋼板セルと鋼製円筒ケーソンのセル部下端部に作用する鉛直反力の考え方を表-2に示す。

根入れ鋼板セルでは、中詰を含む壁体を剛体とみなし、反力分布は3角形分布（もしくは台形分布）と仮定している。従って、地盤反力のほぼ総てが中詰に作用し、セル鋼殻の鉛直応力は無視し得ることとなる。これは、根入れ鋼板セルではセル下端が地盤中にあり、完全には固定されていないため、押し込み力が作用した場合にセル鋼殻に微小な沈下が生じることにより地盤反力が中詰に配分されることによると考えられる。

また、置き鋼板セルでは、転倒に至る極限状態において(2)②に記述したセル鋼殻への中詰のぶらさがりが生じ、セル鋼殻前趾に鉛直力が作用するものとしている。これは、一般に置き鋼板セル構造物が捨石等のマウンド上に設置されるため、根入れ鋼板セルのようなセル鋼殻の微小沈下が生じず、前趾を中心としてセル鋼殻が回転し、セル鋼殻の後趾側が持上がるような挙動を示すためと考えられる。

一方、鋼製円筒ケーソンではセル鋼殻が底版に固定されているため、セル鋼殻の微小沈下による中詰への反力分配や、中詰のセル鋼殻へのぶらさがりは考えられず、鉛直反力分布は従来の鋼板セル構造物とは異なると考えられる。すなわち、壁体に作用する土圧等の外力によって生じるモーメントは、次の反力により底版へ伝達されると考えられる。

- ①セル鋼殻沖側の圧縮力、裏埋め側の引張り力による底版への伝達。
- ②中詰反力が台形（三角形）分布になることによる底版への伝達。

セル鋼殻と中詰の剛性等を考慮すると、②に比べて①が卓越すると予想されるが、セル鋼殻の剛性はコンクリートケーソンのようには大きくなく、②も無視し得ないとも考えられる。

(4) 底版

鋼製円筒ケーソン底版には次の荷重が作用する。

- ①底版下面に作用する地盤反力。
- ②壁体から底版上面に伝達される荷重。

このうち①については、底版の剛性が地盤パネと比較して十分に大きく、コンクリートケーソンと同様の反力分布になると考えられる。一方、②については、(3)で述べた壁体から底版へのモーメント伝達機構を明らかにする必要がある。本研究の模型振動実験は、この点に関する検討に主眼をおいている。

表-1 鋼製円筒ケーソンと類似構造物との比較

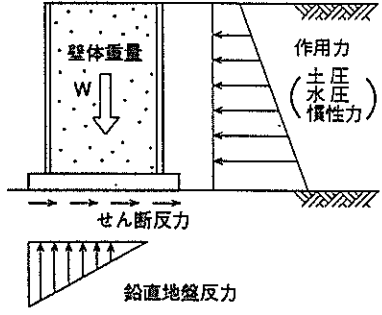
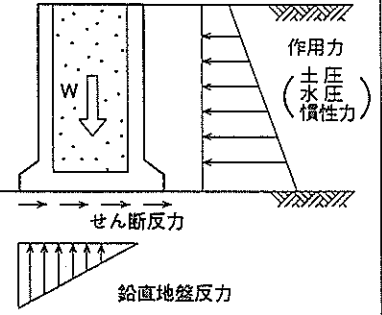
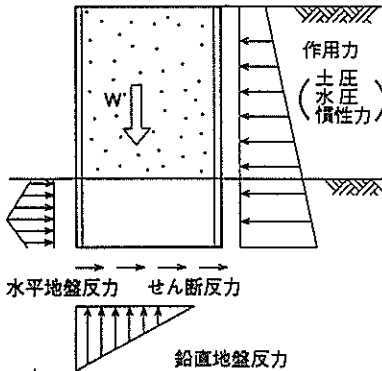
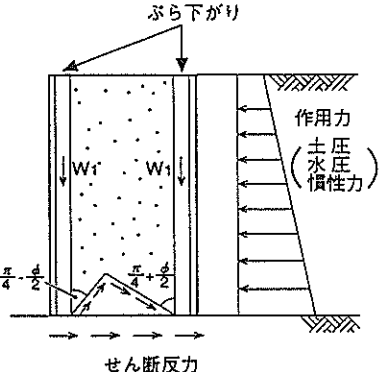
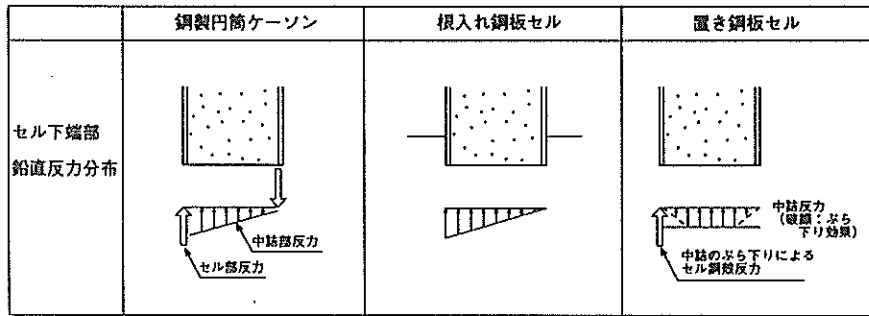
項目		鋼製円筒ケーソン	コンクリートケーソン
構造概要			
耐力機構	滑り出し	重量	重量
	転倒	重量	重量
項目		根入れ鋼板セル	置き鋼板セル
構造概要			
耐力機構	滑り出し	重量、根入れ部土圧反力	重量
	転倒	重量、根入れ部土圧反力	中詰のせん断抵抗、中詰重量の一部 (ぶら下がり効果)

表-2 セル体下端部鉛直反力分布



3. 模型振動実験内容

3.1 実験概要

鋼製円筒ケーソンの設計に必要な壁体から底版へのモーメント伝達機構を明らかにする目的で、模型振動実験を行った。

鋼製円筒ケーソンに関する研究として、静的載荷実験¹⁾がある。この実験における中詰の底面土圧分布をみると、載荷点（後趾側）に近いほど土圧が大きくなっている。一方、根入れ鋼板セルの実験結果²⁾によれば中詰底面土圧分布は前趾側が大きい台形もしくは三角形分布となっており、この結果と逆になっている。これは鋼製円筒ケーソンではセル鋼殻の下端が底版に固定されているため、作用モーメントの大部分をセル鋼殻が負担し、モーメント反力としての中詰底面土圧が小さかったのに対し、集中荷重による載荷のため、載荷点においてセル鋼殻が局部的に変形（陥没）し、中詰の体積が減少して圧縮力が発生したため、載荷点に近い後趾側の中詰底面土圧が大きく現れたものと考えられる。これは、文献 1) における載荷重に対する後趾側底面土圧の増加率が、セル径が大きく載荷点と土圧計位置が遠いほど小さいことから裏付けされる。また、文献 1) には記述されていないが、同じセル径でも載荷点が高いほど後趾側土圧の増加率が小さいことも確認されている。このことから壁体から底版へのモーメント伝達機構を明らかにするためには、集中荷重載荷による実験では困難と考え、本振動実験では裏埋めを有する壁体模型を正弦波により水平加振し、裏埋め砂振動土圧と壁体に作用する慣性力による載荷実験とした。

実験は直径 900mm の鋼製円筒ケーソン模型 3 連をアークで連結した構造とし、中詰および裏埋めには乾燥砂を用いて、加速度、中詰底面土圧、鋼板応力等を測定し

た。また、実験の目的が壁体と底版間のモーメント伝達機構にあるため、構造物全体の滑動や転倒が生じないように底版を振動箱に固定した。

図-3に実験の概要を示す。ここで、中央セルの中心を原点に、岸-沖方向をY方向（沖向き：正）、護岸法線方向をX方向、セル下端レベルから鉛直上向きをZ方向とする。また、鋼板セルは裏埋め側からみて左から、C1、C2、C3とする。

3.2 測定項目

測定項目は次のとおりである。

(1) 加速度

加振時の壁体および裏埋めの振動挙動把握のため、模型各位置の応答加速度の測定を行った。

(2) セルの変位

鋼製円筒ケーソンの変位は、①底版の滑動、②底版の回転、③壁体の変形、によるものの合計となるが、今回の実験では底版を固定しているため、滑動や回転は生じない。従って、セルの変位測定結果は壁体の変形のみによって生ずるものである。

測定項目一覧表

記号	測定項目	点数	摘要
■	裏埋め水平土	4	中央セル壁面
■	裏埋め水平土	4	左アーク部壁面
⊙	中詰鉛直土圧	6	中央セル底面
⊙	中詰鉛直土圧	2	左アーク部底面
◇	裏埋め水平加速度	2	中詰土槽中央
◇	中詰水平加速度	1	中央セル土中部
◇	振動箱ベース加速度	1	基準波計
●	セル壁体ひずみ	8×2段	2軸
●	セル壁体ひずみ	2×2段	3軸
●	アーク壁体ひずみ	4×2段	2軸
◀	セル頂部水平変位	3	

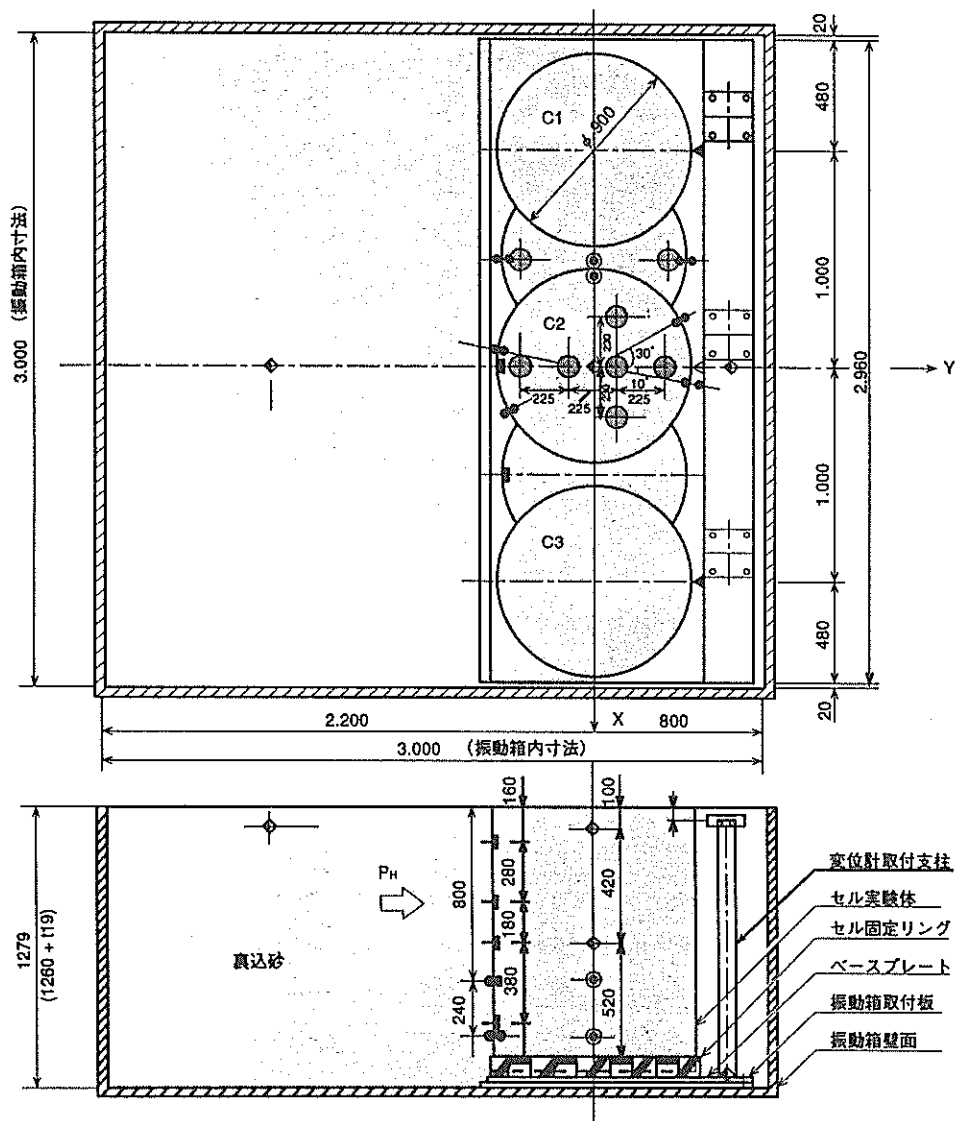


図-3 振動実験概要図

(3) セル・アーク鋼殻のひずみ

壁体部から底版に伝達されるモーメントのうち、セルおよびアーク鋼殻が分担する反力を定量的に把握するため、ひずみ量を測定した。

(4) 中詰底面土圧

セル鋼殻と同様、中詰が分担するモーメント反力を把握するため、中詰底面土圧を測定した。測定位置はセル中詰とアーク中詰の両底面とした。

(5) 裏埋め土圧

加振時に壁体に作用する裏埋め土圧を測定するため、セル部およびアーク部の背面での土圧を測定した。

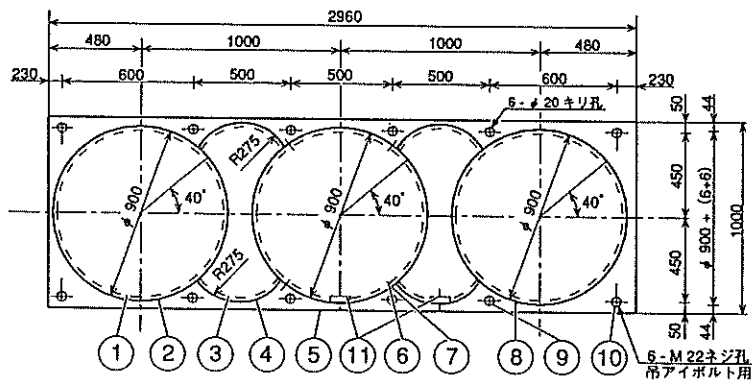
3.3 鋼製円筒ケーソン護岸模型

(1) 鋼製円筒ケーソン模型

鋼製円筒ケーソン模型は図-4に示すように、3連の鋼板セルとそれらを連結する2対のアーク鋼殻および底版からなる。

セル鋼殻は図-5に示すように直径900mm、高さ1,219mm、板厚0.5mmの亜鉛鉄板製の円筒であり、所要の大きさに切断した鉄板をハンダ付けで接合して製作した。中央のセル鋼殻裏埋め側には、土圧計設置のため直径28mmの孔を鉛直方向に4箇所設けている。

アーク鋼殻は図-6に示すように、半径275mm、中心角100度、高さ1,138mmの円弧状板部と、セル鋼殻へ接合するための20mmの折曲げ部からなり、板厚および材



品番	名称	数量	材質寸法記事
①	セル本体	3	JISG3302 亜鉛鉄板 t 0.5mm x 1219w x 3048L
②	セル固定リング	3	R 6.0 x φ 901 x 100H
③	アーク部	4	JISG3302 亜鉛鉄板 t 0.5mm x 1138w x 480L
④	アーク部モルタル止め	4	R 6.0 x 488L x 100H
⑤	ベースプレート	1	R 20 x 1000w x 2960H
⑥	アーク固定プレート	8	止ネジ孔 28 - φ 6 x 40 R 3.2 x 16w x 1140
⑦	アーク固定ネジ	224	M 6 - 12s ナットワッシャー付
⑧	セル固定ネジ	72	M 6 - 16s ナットワッシャー付
⑨	取付ボルト	12	M 18 - 35s ナットワッシャー付
⑩	吊アイボルト	6	M 22
⑪	土圧計取付枠	8	R 0.5 x 60w x 65s x 10H

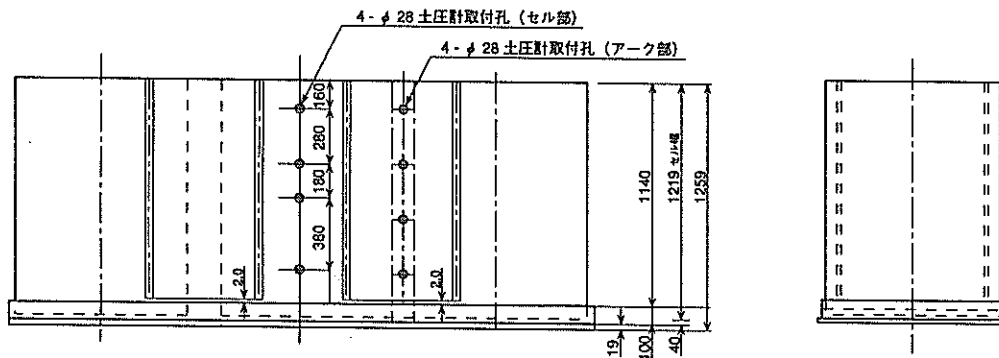


図-4 鋼製円筒ケーソン模型

質はセル鋼殻と同様である。また、4枚のアーク鋼殻のうち1枚にはセル鋼殻と同様に土圧計設置用の孔を設けている。

底版には、幅1,000mm、長さ2,960mm、板厚19mmのベースプレートを用いた。ベースプレートには、内径1,000mm、高さ100mm、板厚6mmのセル固定リングが1,000mmピッチで3箇所、また、固定リング間を連結する2対の円弧状帯鋼（高さ100mm、板厚6mm）が溶接されている。ベースプレートとセル鋼殻との固定は次のように行った。まず、セル固定リングの内側にセル鋼殻を79mmの深さで挿入し、セル鋼殻と固定リングをビスで固定した上、さらにハンダ付けを行った。その後、セル固定リングおよび円弧状帯鋼内に厚さ100mmのモルタルを打設し、中詰部底版とした。底版部モルタルには中詰底面土圧計固定用の塩ビ管（125A）を、中央セル部内に6箇所、アーク部内に2箇所固定した。

セル鋼殻を固定した後、セル鋼殻間をアーク鋼殻で連結した。アーク鋼殻はセル鋼殻と上端高さが一致する位

置にビスを用いてセル鋼殻に固定した。アーク鋼殻下端と底版部モルタル上面との間には2mmの隙間を設けている。これは、実際のアーク鋼殻が、セル鋼殻に設けた継手金物に落としこむ施工となり、底版と完全には面接触しないことが予想されるためである。

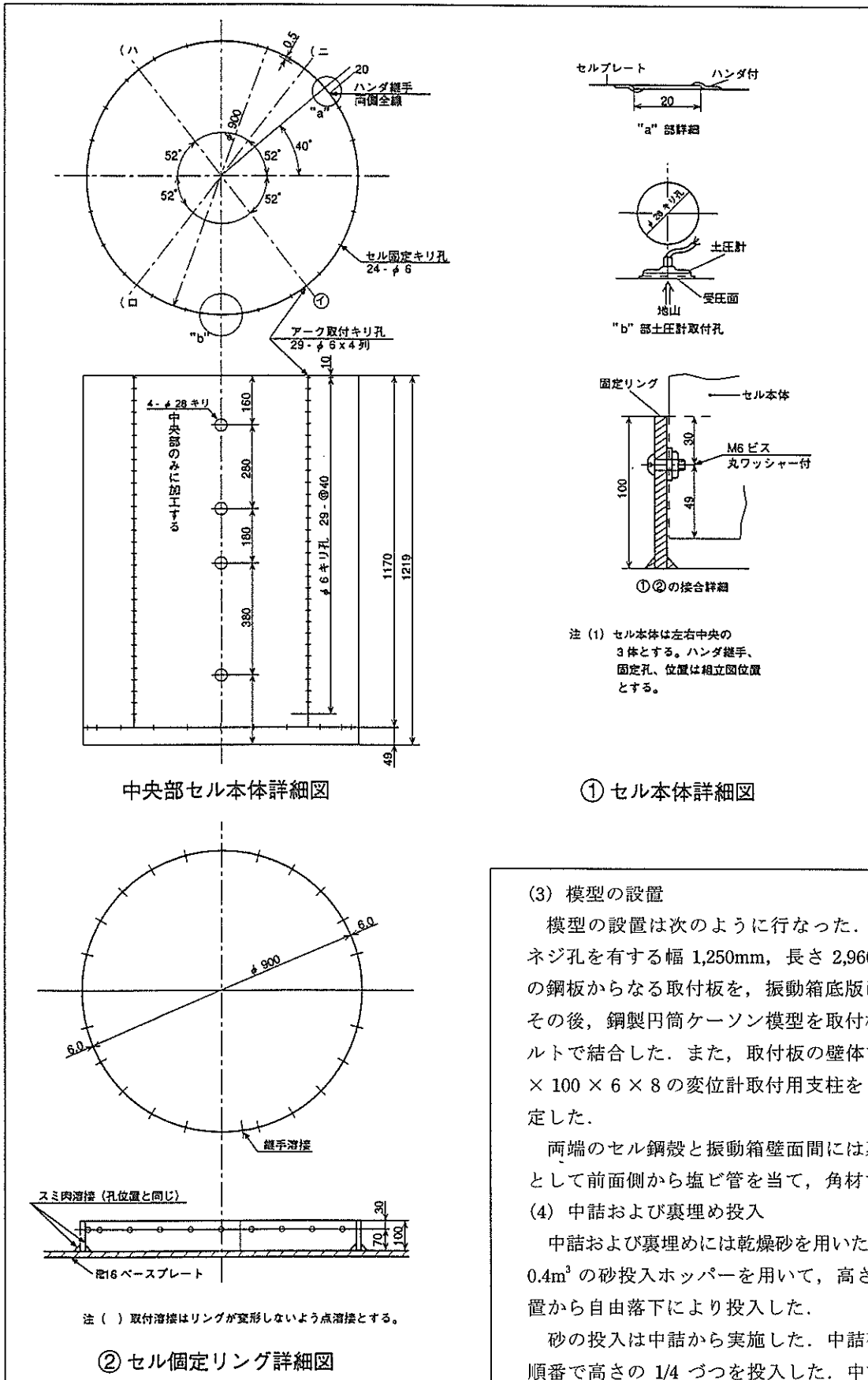
以上の組み立てにより、底版モルタル上面からセル鋼殻およびアーク鋼殻上端までの高さは1,140mmとなる。

(2) 土圧計の取付

裏埋め土圧計は図-7に示すように、土圧計取付枠内にエポキシ樹脂を充填して固定した後、セル鋼殻およびアーク鋼殻に接着剤で固定した。その際、セル鋼殻・アーク鋼殻外面と土圧計受圧面が一致するように考慮した。

中詰底面土圧計は図-8に示すように、土圧計を100Aの塩ビ管内にモルタルで固定した上、底版モルタルに埋め込まれた125Aの塩ビ管内に収納しシリコン樹脂を用いて固定した。

図-5 セル殻模型



(3) 模型の設置

模型の設置は次のように行なった。まず、12箇所
のネジ孔を有する幅 1,250mm、長さ 2,960mm、板厚 19mm
の鋼板からなる取付板を、振動箱底板に接着接合した。
その後、鋼製円筒ケーソン模型を取付板上に設置し、ボ
ルトで結合した。また、取付板の壁体前面側に、H 100
× 100 × 6 × 8 の変位計取付用支柱を 3本のボルトで固
定した。

両端のセル鋼殻と振動箱壁面間には裏埋めの流出防止
として前面側から塩ビ管を当て、角材で固定した。

(4) 中詰および裏埋め投入

中詰および裏埋めには乾燥砂を用いた。砂は容量約
0.4m³の砂投入ホッパーを用いて、高さ 40 ~ 50cm の位
置から自由落下により投入した。

砂の投入は中詰から実施した。中詰砂は、図-9に示す
順番で高さの 1/4 づつを投入した。中詰砂の投入が完了

した後、裏埋め砂を投入した。裏埋め砂は全高さの 1/4 づつ均しながら投入した。

裏埋め砂の投入後、ピーク加速度約 50Gal, 周波数 20 ~ 30Hz の Y 方向正弦波水平振動を振動箱に加えること

により砂の振動締固めを行ない、その後、沈下分の砂を新たに補充した。締固めによる沈下量の平均は、中詰で 19mm, 裏埋めで 26mm であった。

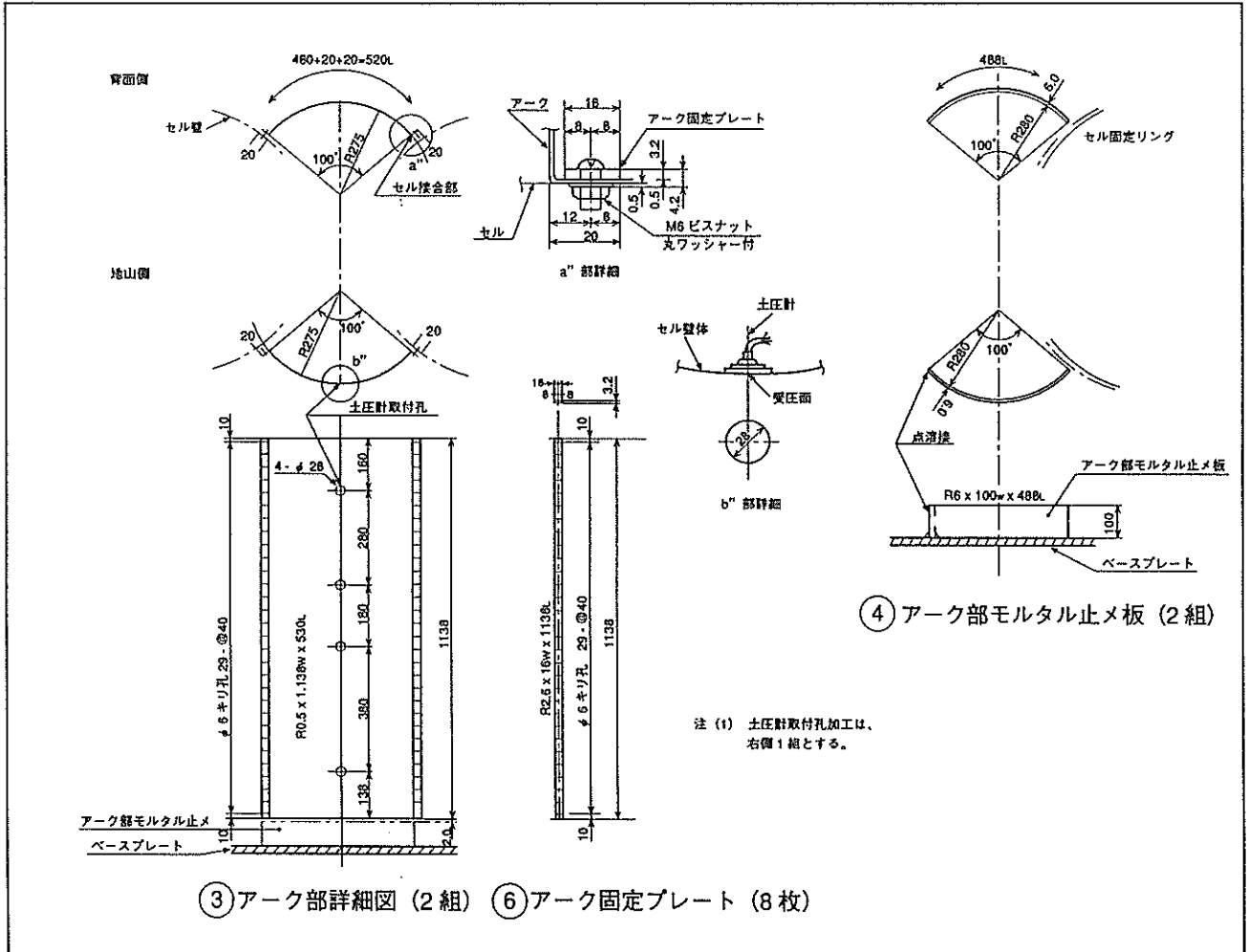


図-6 アーク模型

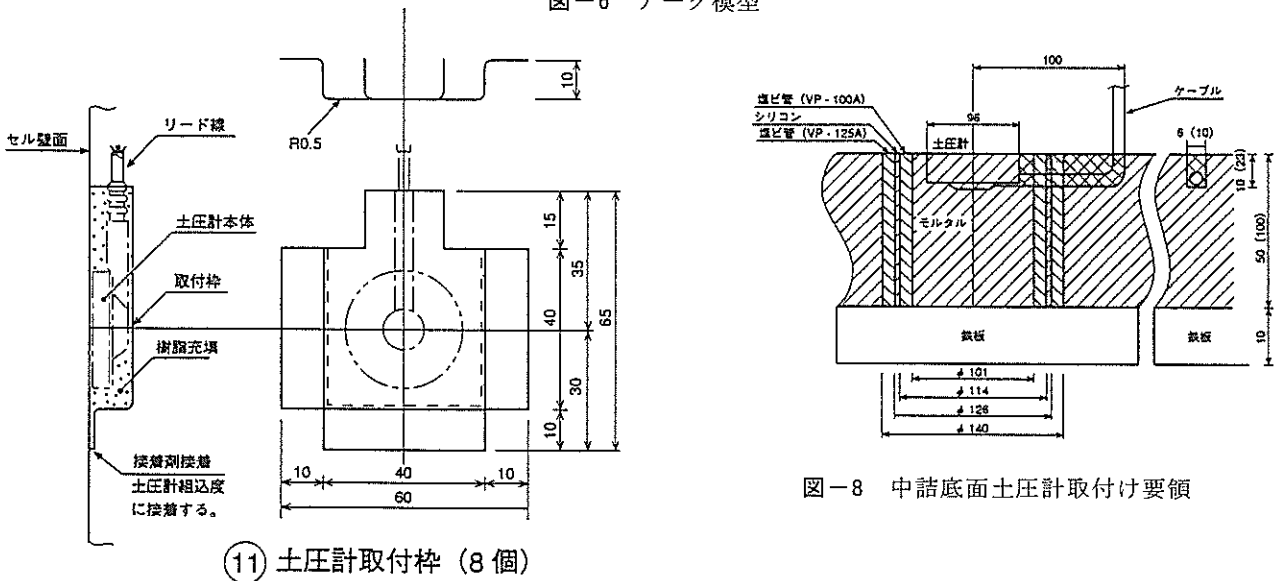


図-7 裏埋め土圧計取り付け要領

図-8 中詰底面土圧計取り付け要領

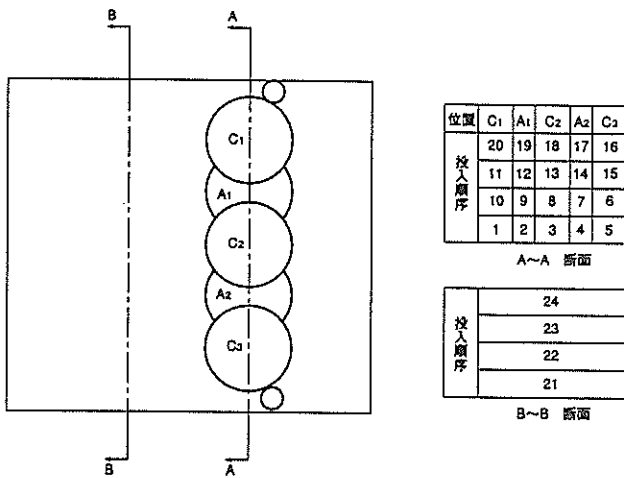


図-9 中詰砂および裏埋め砂の投入順序

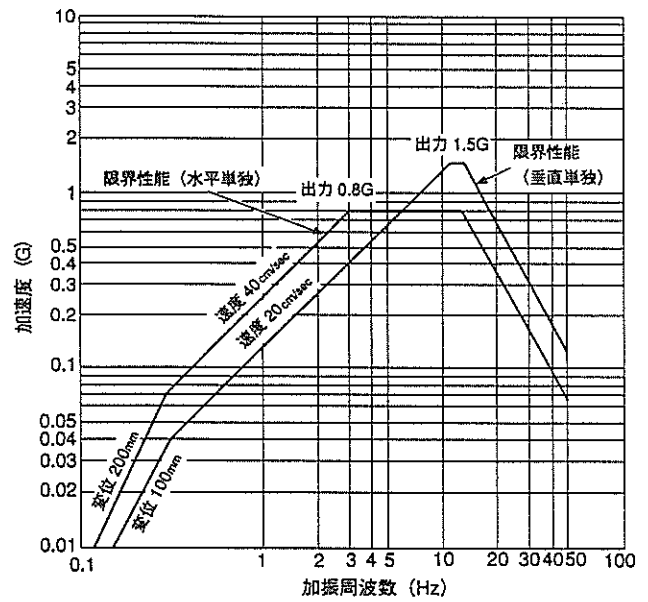
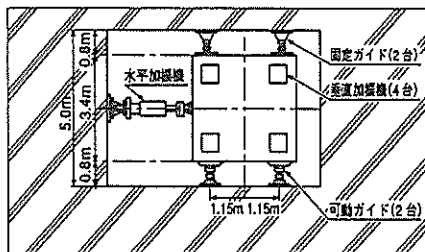


図-11 振動台の限界性能曲線

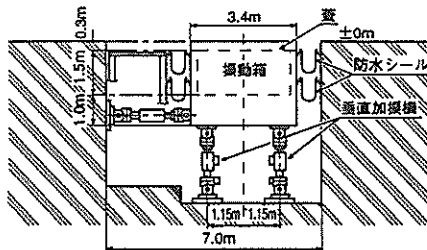
3.4 実験装置

(1) 振動台

今回の実験に用いた振動台の構造概要を図-10に、主要諸元を表-3に、限界性能曲線を図-11にそれぞれ示す。この振動台は水槽の底面に埋め込まれており、水槽に水を入れることにより水中振動実験が可能な構造となっているが、今回は水槽に水を入れずに、図-10に示した振動箱の蓋を取り外した上、振動箱の中に模型を設置した。なお、振動箱の内法寸法は、平面形状が 3m × 3m、深さが 1.5m である。



(a) 水平断面



(b) 鉛直断面

図-10 振動台構造概要

表-3 振動台主要諸元

水槽寸法	23m X 13m	
水深	最大 1.8m	
振動台位置	水槽底面	
振動箱内寸	3m X 3m X (深) 1.5m	
振動箱上蓋	3.4m X 3.4m	
積載重量	最大 60tf	
加振方向	水平、鉛直、水平と鉛直同時	
加振能力	最大変位	水平±200mm、鉛直±100mm
	最大速度	水平 40cm/sec、鉛直 20cm/sec
	最大加速度 (最大積載時)	水平 0.8G、鉛直 1.5G
	許容転倒モーメント	水平 75tf・m、鉛直 40tf・m
加振振動数	DC~50Hz	
加振方向	電気、油圧サーボ方式	
加振入力波形	正弦波、地震波	
防水シール	補強布入り合成ゴム	
作動油	水グリコール系作動油	

(2) 計測機器

実験において使用した計測機器を表-4~表-8に示す。また、計測システム図を図-12に示す。

表-4 データ集録装置仕様一覧

名称	項目	性能・仕様
データ集録装置	動ひずみ測定器 DPM-11A	適用ゲージ ブリッジ電源 応答性 非線形性 出力 メーカー (株)共和電業
	デジタル データレコーダー DR-20008	測定点数 A/D出力形式 総合精度 サンプリング周波数 磁気テープ装置 記録密度 使用テープ メーカー 64ch (アナログ) 12bit ±0.2% 20kHz~1Hz、14段階 MT-800 1600bit 1/2インチ幅、2400ft テアック (株)

表-8 ひずみゲージ仕様一覧

型式名	形状	ゲージ 長×幅	抵抗 (Ω)	適用
FCA-5-SLT-11 (東京測器)	2軸 90° クロス	5×2.3	120	中央セル内側6、中央セル外側6 左側アーク内側2、左側セル外側2 合計16
FRA-5-SLT-11 (東京測器)	3軸 45°、90° クロス	5×2.3	120	中央セル内側1、中央セル外側1 合計2

3.5 中詰および裏埋め砂の性質

中詰と裏埋めには、同じ砂を乾燥して用いた。使用した砂の性質を以下に示す。

(1) 粒度分布

粒径加積曲線を図-13に示す。平均粒径 $D_{50} = 0.44\text{mm}$ 、均等係数 $U_c = 1.8$ であった。

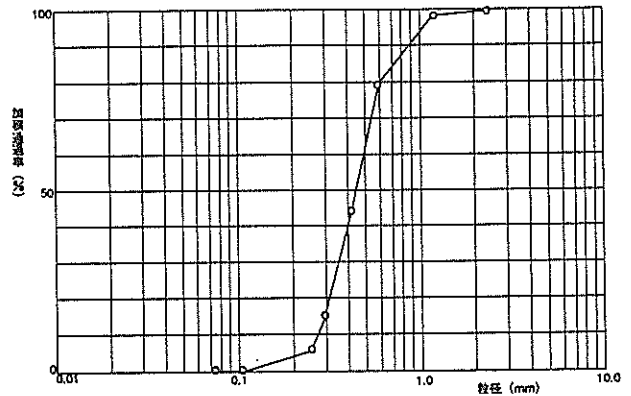


図-13 実験に用いた砂の粒径加積曲線

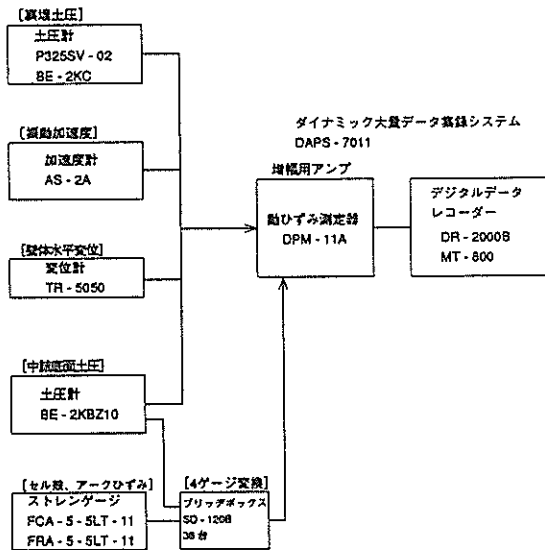


図-12 計測システム図

表-5 加速度計仕様一覧

型式名	容量	定格出力 (ひずみ 10^{-4})	寸法 (mm)	適用
AS-2A (共和電業)	±2g	1000	27×30	裏埋土1、中詰土(中央セル)2、振動台1 合計4

表-6 変位計仕様一覧

型式名	容量 (mm)	定格出力 (ひずみ 10^{-4})	全長 (mm)	適用
TR5050 (総合計数)	50	4.000	330	左セル1、中央セル2、右セル1 合計4

表-7 土圧計仕様一覧

型式名	容量 (kg/cm ²)	定格出力 (ひずみ 10^{-4})	外径 (mm)	適用
BE-2KC (共和電業)	2	500	φ30	裏埋水平土圧下部2段 (中央セル2、右アーク2、合計4)
P325SV-02 (三針エンジニアリング)	0.2	5.000	φ25	裏埋水平土圧上部2段 (中央セル2、右アーク2、合計4)
BE-2KBZ10 (共和電業)	2	2.000	φ94	中詰土鉛直土圧 (中央セル6、左アーク2、合計8)

(2) 土粒子の比重

土粒子の比重 G_s は、2.643 であった。

(3) 単位体積重量

実験終了後に C1 セルの中詰を掘出して測定した中詰砂重量と鋼板セルの体積から算定した結果、中詰砂の単位体積重量は $\gamma_s = 1.54\text{tf/m}^3$ であった。また、裏埋めの単位体積重量は、投入方法が中詰と同様であったことから、中詰砂と同一とした。

(4) 含水比

砂は炉で乾燥して使用した。含水比 W は 0.36% であった。

(5) 内部摩擦角

実験に用いた砂の締固め状態を変え、圧密排水3軸圧縮試験を行なって内部摩擦角を求めた。このときの、単位体積重量 γ_s (tf/m^3)、内部摩擦角 ϕ (度) の測定結果を表-9および図-14に示す、これから ϕ と γ_s の関係は次式で近似できる。

$$\phi = 40.32 \gamma_s - 26.83 \quad (1)$$

ここで、 $\gamma_s = 1.54\text{tf/m}^3$ であったことから、 $\phi = 35^\circ$

とした。

表-9 3軸圧縮試験結果

ケース	γ_d (tf/m ³)	内部摩擦角 ϕ (度)
1	1.57	35.13
2	1.61	36.25
3	1.68	41.99

3.6 加振方法

(1) スイープ試験

模型の振動特性を把握するとともに、加振载荷実験での入力振動数を設定するため、スイープ試験を行なった。スイープ試験では加速度 50Gal の Y 方向正弦波水平振動を① 1 ~ 10Hz, ② 11 ~ 30Hz, ③ 31 ~ 50Hz の 3 段階

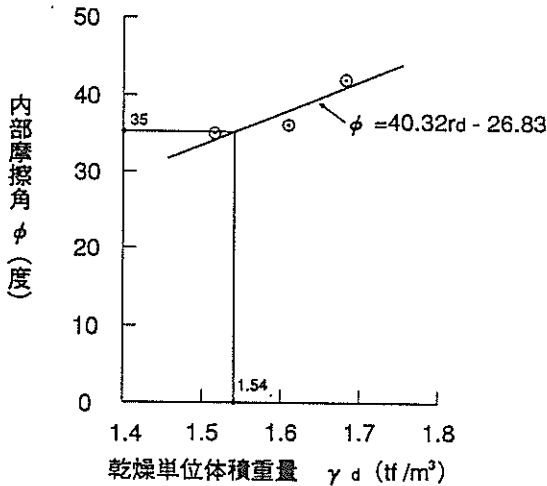


図-14 砂の単位体積重量と内部摩擦角の関係

に分け、それぞれ振動数を 1Hz ピッチに連続的に変化させて実施した。

(2) 加振载荷実験

加振载荷実験では、岸沖方向 (Y 方向) に正弦波水平加振とした。その際の入力振動数は、後述するスイープ試験結果から模型が共振を起こさないことを考慮して 3Hz とした。

ピーク加速度は① 50Gal, ② 100Gal, ③ 150Gal, ④ 200Gal, ⑤ 250Gal, ⑥ 300Gal, ⑦ 400Gal を目標とし、この順番で各ケースごとに 10 波の加振を行なった。なお、400Gal の加振時に 1 部のセンサーでスケールオーバーが生じたため、増幅器の設定を変更した上、2 回の

追加加振を行なった。このため、400Gal の加振は 3 回実施している。

3.7 測定方法

(1) 加振時の測定

加振時には、①振動箱、中詰、裏埋めの加速度、②壁体の水平変位、③セル部、アーク部の中詰底面土圧、④セル部、アーク部に作用する裏埋め土圧、⑤セル鋼殻、アーク鋼殻のひずみを測定した。それぞれの測定位置を図-15~19に示す。

加振時測定のデータサンプリング間隔は 0.005sec とした。

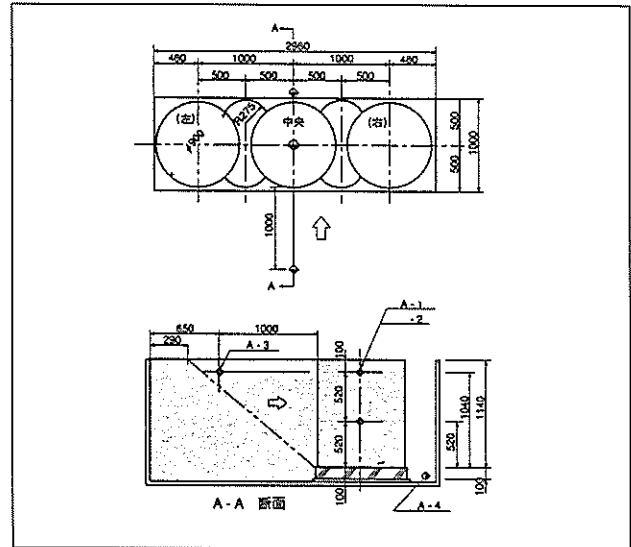


図-15 加速度測定位置図

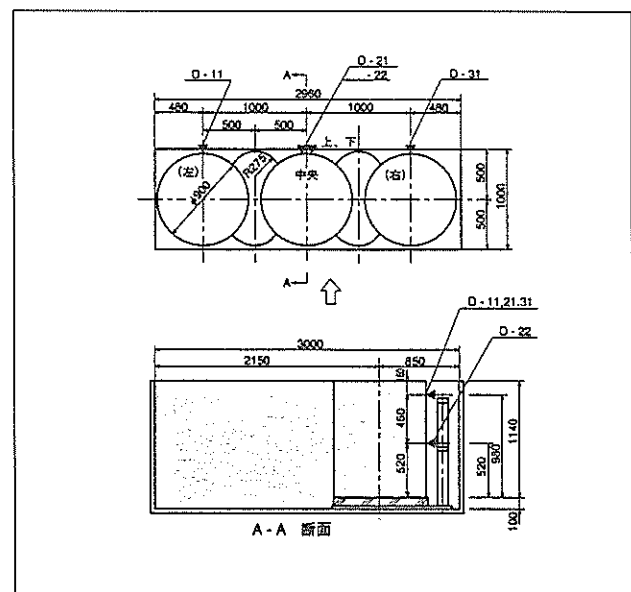


図-16 水平変位測定位置図

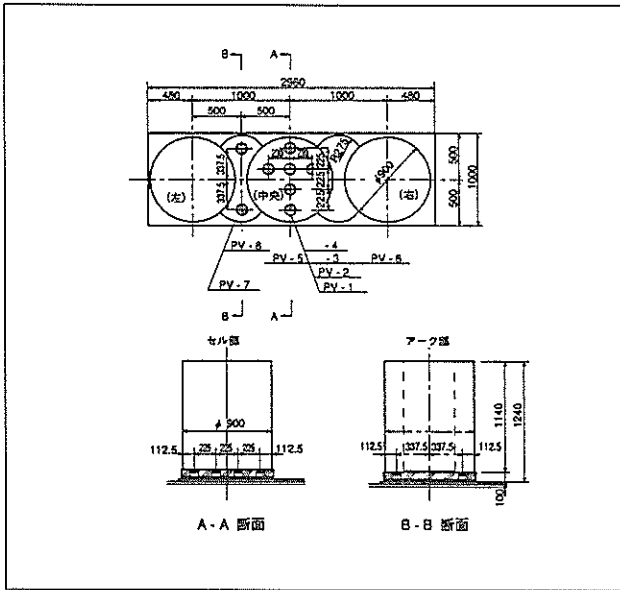


図-17 中詰底面土圧測定位置図

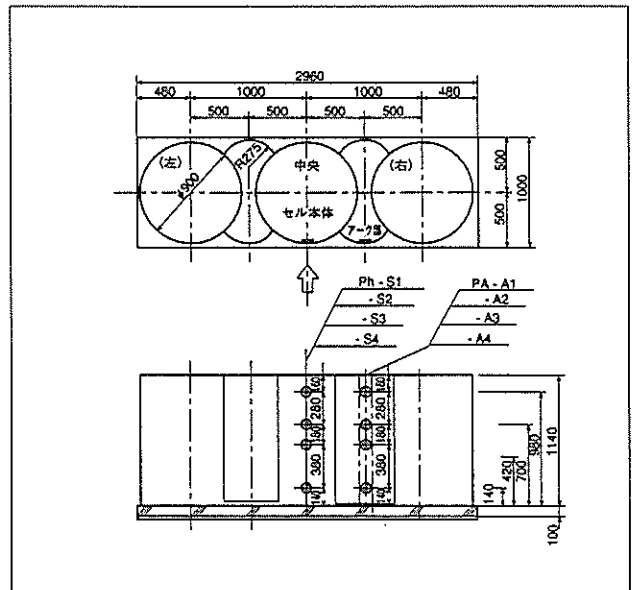


図-18 裏埋め土圧測定位置図

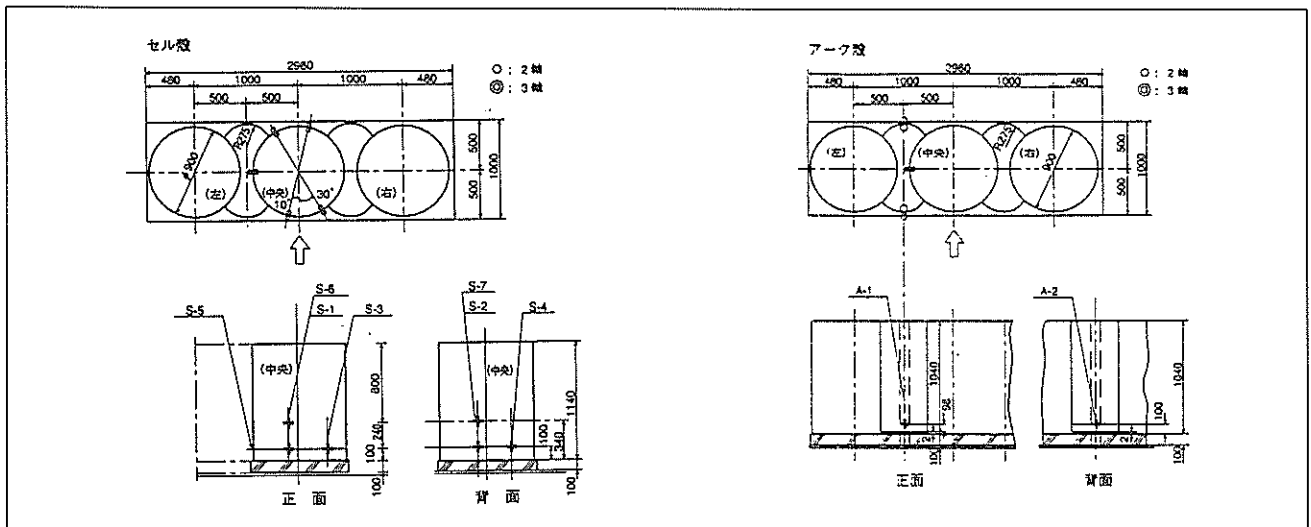


図-19 鋼殻のひずみ測定位置図

(2) セルの天端形状測定

セル天端におけるセル径の測定を行なった。セル天端には円周の12等分点にあらかじめマーキングし、実験前後における6方向のセル径をスケールで測定した。

スイープ試験の結果得られたパワースペクトル密度および振動箱底面の振動に対する各センサーの周波数伝達関数を図-20に示す。これらの図によれば、セル部中詰および裏埋めの固有振動数はそれぞれ26Hz、29Hzであった。

4. 実験結果および考察

4.2 加振時測定結果

4.1 スイープ試験結果

(1) データ整理方法

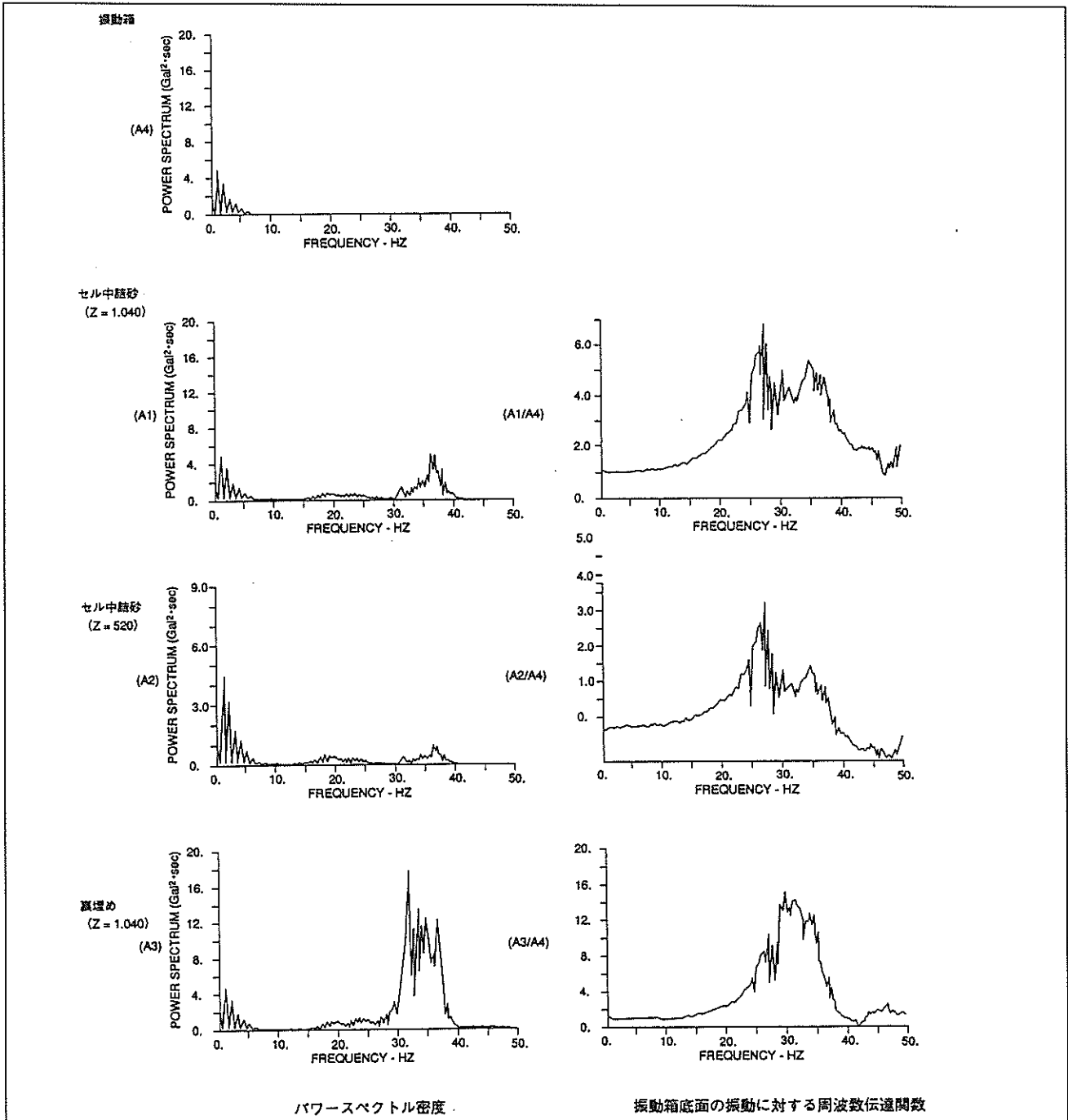


図-20 パワースペクトル密度および周波数伝達関数

a) 初期値の設定

各加振においては、加振直前の値を初期値ゼロとしてデータを整理した。従って、測定結果は加振による変動成分のみを示し、静土圧や静ひずみなどの静的な成分は含んでいない。

b) ピーク値の算定方法

加速度波形の 1 例を図-21に示す。この例に示すように加振波数は 10 波であり、各センサーの正・負ピーク値も 10 箇所ずつ得られることとなる。振動が定常状態に達した後のデータを採用するため、8 波目の正・負ピーク値を代表値として採用した。

また、目標加速度 400Gal のケースでは前述のように 3 回の加振を行なっているが、以下においては 3 回目のデータを採用している。

なお、ピーク値の分布形状を示すグラフにおいては、正の加速度(裏埋め側から沖側へ向かう加速度)作用時における測定値を実線で、負の加速度作用時における測定値を破線で結んでいる。これを慣性力で表現すると、正の慣性力(裏埋め側から沖側へ向かう慣性力)作用時が破線、負の慣性力作用時が実線となる。

c) 同一時刻測定値

同一時刻における作用力、反力の分布を調べるため、代表時刻における各センサー出力を求めた。代表時刻は、図-22に示すように、振動箱底版における加速度測定結

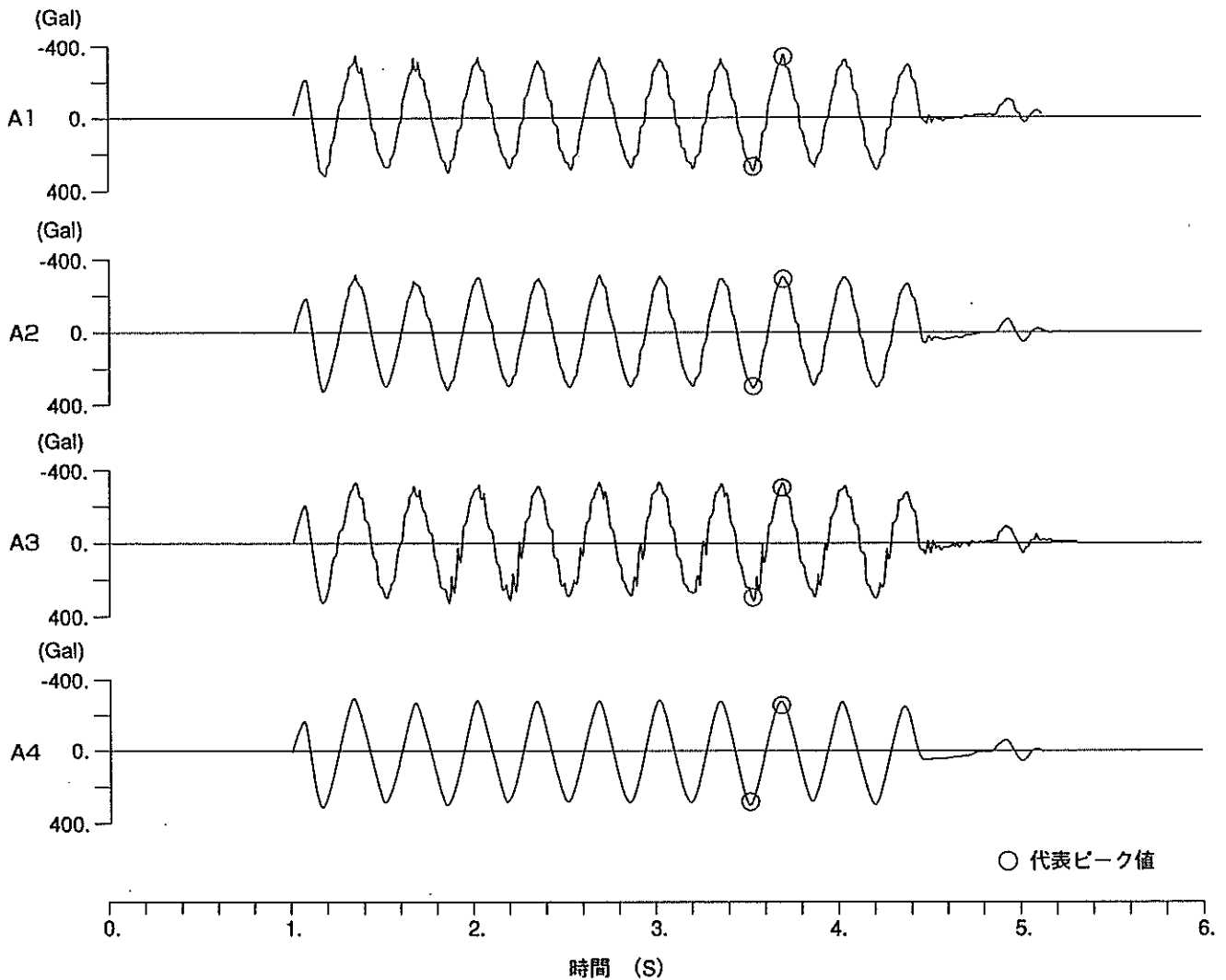


図-21 加速度波形例 (300Gal 加振時)

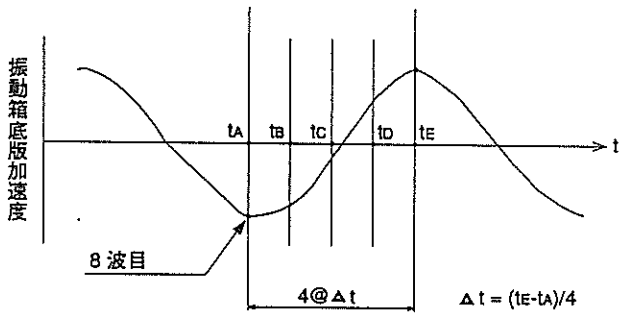


図-22 代表時刻の設定方法

果において8波目の正負極値間を4等分して設定した。

d) 残留値

加振直前の値を初期値ゼロとした場合の、各加振後における残留値を測定した。

(2) 加速度測定結果

各加振における振動箱底面の最大加速度の値の測定結果を、表-10に示す。実験において作用した加速度は目標加速度より、若干小さめであった。

表-10 振動箱の加速度のピーク値測定結果

ケース	正 (Gal)	負 (Gal)	平均 (Gal)	目標加速度 (Gal)
1	-49	46	47	50
2	-83	85	84	100
3	-147	147	147	150
4	-193	188	190	200
5	-245	234	241	250
6	-303	284	293	300
7	-367	387	377	400

図-23、図-24にセル中詰、および、裏埋めの加速度ピーク値鉛直方向分布を示す。この図において、正の加速度とは裏埋め側から沖側に向かう加速度を示す。この図から、ピーク加速度の大きさにかかわらず、中詰、裏埋めともにピーク加速度は振動箱とほぼ同様の値であったことがわかる。このことから中詰および裏埋めとも、振動箱とほぼ同じ動きをしていたといえる。

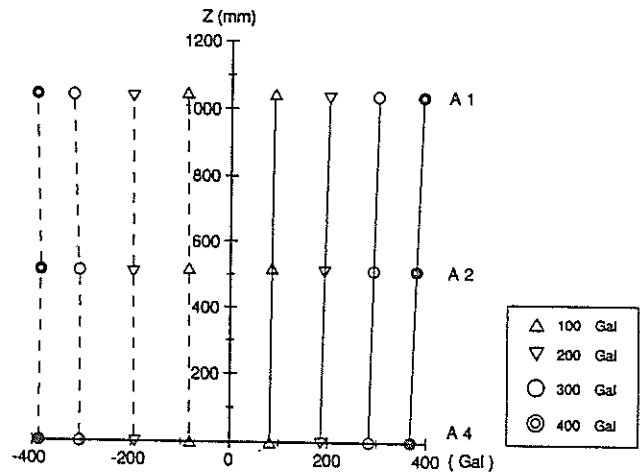


図-23 セル中詰の加速度ピーク値の鉛直方向分布

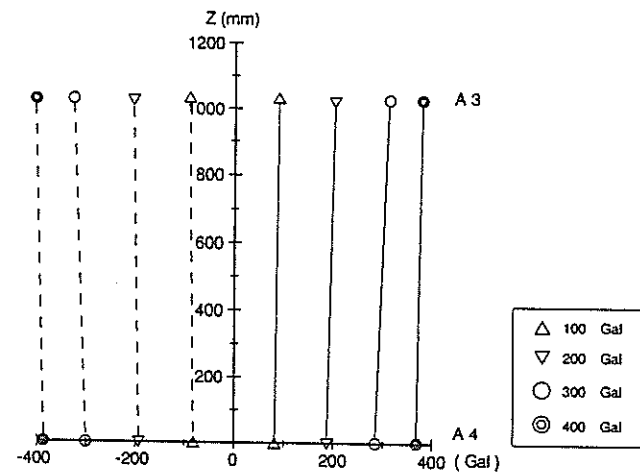


図-24 裏埋めの加速度ピーク値の鉛直方向分布

(3) 堤体の変位

図-25に、セル天端の水平変位ピーク値の水平分布を示す。

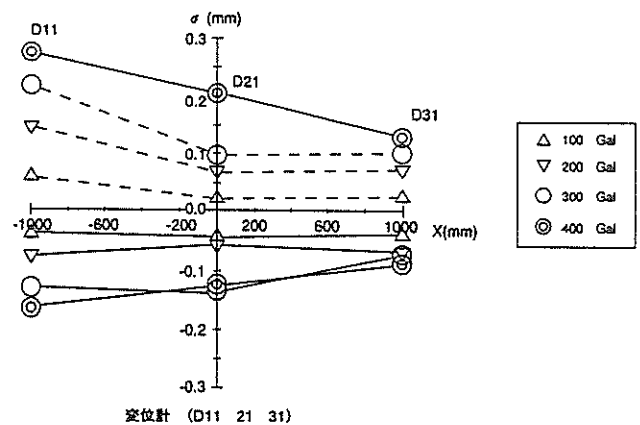


図-25 水平変位ピーク値の水平分布

示す。ここで、正の変位は裏埋め側から沖側への変位を意味する。これによれば左側(C1)セルの正方向天端変位が他のセルと比べて大きくなっている傾向がみられる。

一方、連続壁体における平均的な挙動を示していると考えられる中央セルの変位のみ注目して、中央セルの水平変位ピーク値の鉛直分布を示したのが図-26である。ここで、鋼製円筒ケーソン下端は振動箱に固定されていたため、セル下端 (Z=0) では変位が 0 である。図-26より、以下のことがわかる。

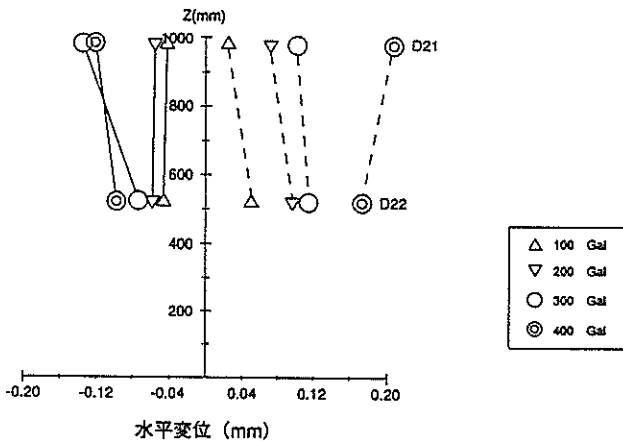


図-26 水平変位ピーク値の鉛直分布

① 壁体の変位は概ね加振加速度の増加とともに大きくなっている。400Gal における変位の最大値は沖側で 0.20mm、裏埋め側で 0.12mm である。従って、天端はらみ出し (変位) 量 δ_τ とセル壁高 H の比 δ_τ/H は、最大で 0.02 % となる。根入れ鋼板セルでは、過去の地震被害報告などに基づく重力式や矢板式構造物の天端はらみ出し量と被災度の関係から、 δ_τ/H を 1.5 % 以下とすることが望ましい⁹⁾と規定されているのに対し、測定された変位は無視し得るほど小さい。これは、今回の実験では模型底版を振動箱底面に固定したため、測定された変位には、支持地盤の変形による回転や、底版と地盤間の滑り出しによる変位を含まず、壁体の変形成分だけであったことによる。このことから、この鋼製円筒ケーソンにおける模型壁体の変形は無視し得るほど小さく、今回の実験においては、コンクリートケーソンと同様に、壁体を剛体とみなしても問題ないと考えられる。

② 変位の鉛直分布をみると、加振加速度が大きい場合を除いてセル天端の変位が中段の変位と比べて同等、あるいは小さくなっている。セル下端が固定されてい

たことから、この変形形態は若干不自然であるが、変位量が非常に小さかったため、変位計を固定した治具の変形やノイズ等の影響が現れたことも考えられる。

図-27に累積残留変位を示す。いずれの変位計も沖側への残留変位が生じている。また、他の残留変位と比較して、右側(C3)セル天端変位残留値が大きな値となっているが、その値は 400Gal 加振時で 0.019mm と十分に小さい。

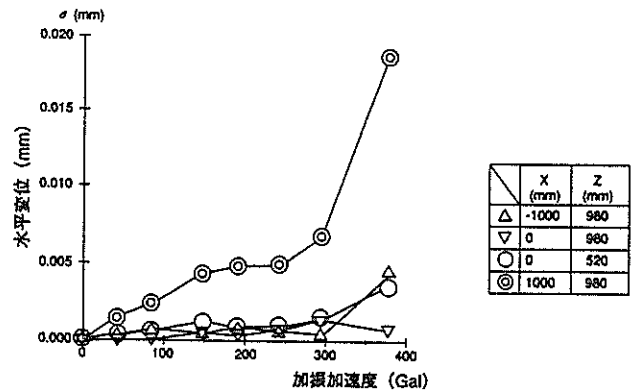


図-27 水平変位の累積残留値

(4) 裏埋め土圧

図-28、29にセル部とアーク部の裏埋め土圧ピーク値の鉛直分布を示す。ここで、正の土圧は裏埋め側から沖側への土圧を意味する。セル裏埋め土圧をみると、必ずしも3角形分布とはなっておらず、上部の2点と下部の2点それぞれほぼ同等の土圧で、上部に比べて下部の土圧が大きくなっている。また、300Gal 以上では最下部付近よりも Z=400mm 付近の土圧が大きくなっている。

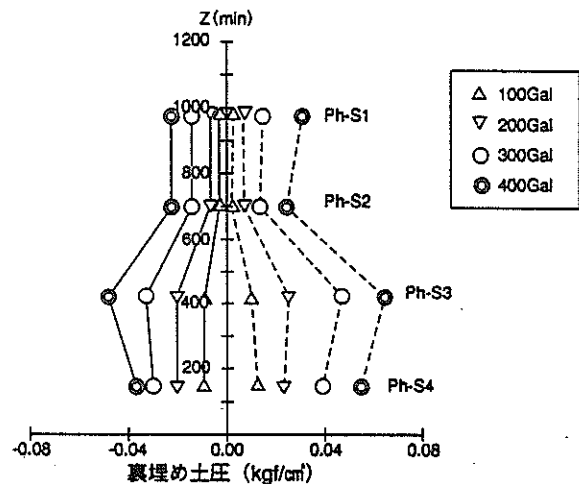


図-28 セル部裏埋め土圧ピーク値鉛直分布

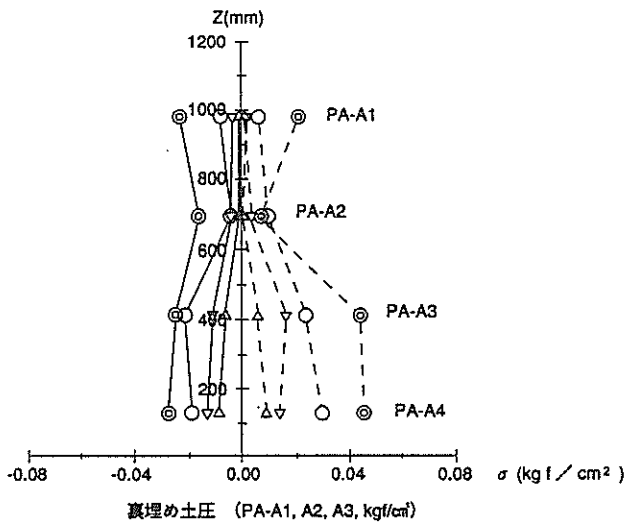


図-29 アーク部裏埋め土圧ピーク値鉛直分布

一方、アーク部の土圧分布はセル部とほぼ同様の分布形状であったが、全体的に小さな土圧となっている。

重力式護岸の設計に用いられている裏埋め土圧と比較するため、加速度 300Gal における実測値を、基準⁵⁾による地震時主働土圧と比較したのが図-30である。ここで、実測値には正の慣性力作用時における動的成分ピーク値に 0.5 γ h で求まる静止土圧を加えている。また、

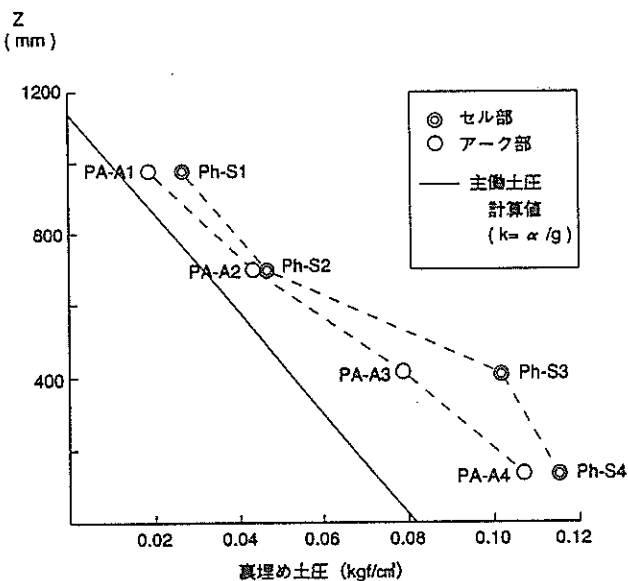


図-30 裏埋め土圧と地震時主働土圧計算値

地震時主働土圧の算定にあたっては、次式により震度を求めた。

$$k_H = \alpha / g \quad (2)$$

ここで、 k_H ; 震度

α ; 地盤加速度 (Gal)

g ; 重力加速度 (980Gal)

後述するように、地盤加速度と重力式岸壁の震度との関係式が野田ら⁶⁾により提案されているが、この関係式を用いると、主働土圧の計算値は(2)式により求めたそれより小さくなる。

この図より、裏埋め土圧の実測値は、主働土圧の計算値より大きな値となっていることがわかる。これは今回の実験では底版を振動台底面に固定しており壁体の滑動や転倒が生じず、また、セル天端の変位も小さいため、壁体には主働土圧ではなく静止土圧が作用したためと考えられる。

図-31, 32に各加振後の残留裏埋め土圧の累積値を示

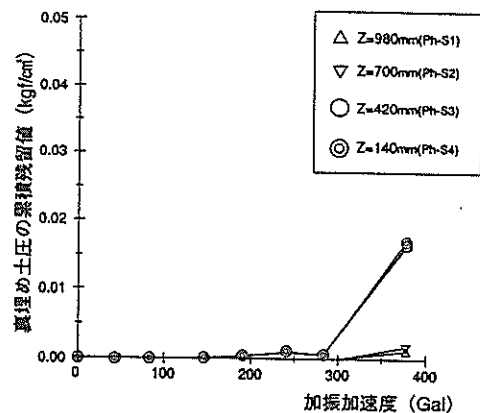


図-31 セル部裏埋め土圧の累積残留値

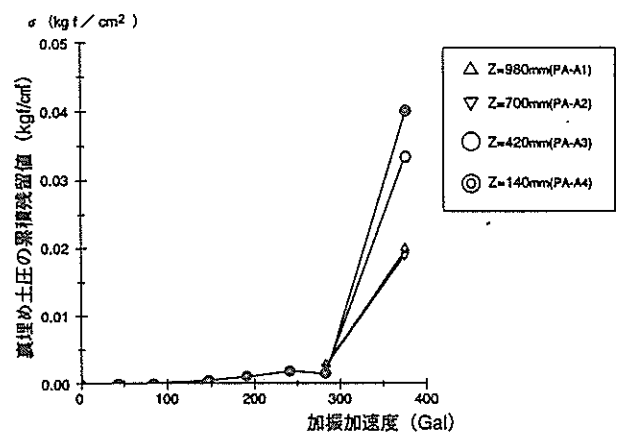


図-32 アーク部裏埋め土圧の累積残留値

す。残留土圧の累積値は加振加速度の増加とともに増加していることがわかる。その値は 300Gal まではセル部で最大 0.001kgf/cm²、アーク部で最大 0.003kgf/cm² 程度と比較的小さいが、400Gal の加振においては急激に増加し、セル部で 0.017kgf/cm²、アーク部で 0.041kgf/cm² の最大残留土圧が生じている。また、この残留土圧は、上部の 2 測点と比べて、下部の 2 測点における値が大きくなっている。これらの残留土圧増加は、土圧計前面の砂が加振により締め固まったことによると考えられるが、上部と下部との違いには、使用した土圧計が異なることの影響も含まれるとも考えられる。

(5) 中詰底面土圧

図-33にセル部中詰底面土圧ピーク値の、セル中心(X=0)での加振方向分布を示す。ここで、正の土圧は圧縮方向の土圧を意味する。なお、Y=112.5 における中詰底面土圧は土圧計の不調により測定不能となったため、参考までに X=± 230, Y=112.5 における測定値の平均をプロットしている。このため、本図では Y=112.5 におけるデータを線で結んでいない。図-33によれば、正の加速度作用時には、前趾側で引張りで後趾側で圧縮の底面土圧が作用し、一方、負の加速度作用時には逆方向の底面土圧が作用する分布を示している。ここで、壁体に作用する慣性力は、加速度とは逆方向に作用していることから、慣性力によるモーメントに対応して、中詰から底版にモーメントが伝達されていることがわかる。前趾および後趾の土圧値は、前趾側の 400Gal 作用時の負土圧を除いて、加速度の増加とともに増大している。分布形状をみると、ほぼ直線的な形状をしており、セル中心からの距離に比例してその絶対値が増加している。特に、設計上重要な負の加速度作用時（正の慣性力作用時、破線）において、直線分布が明確である。

前趾および後趾における負の底面土圧の動的成分の最大値は - 0.017 ~ - 0.024kgf/cm² であり、中詰高さ(114cm)と中詰砂の単位体積重量(1.54tf/m³)から想定される底面土圧の静的成分(0.18kgf/cm²)と較べて十分に小さく、加速度 400Gal 程度では、中詰が浮上がり状態に至ることはない判断される。

図-34にセル部中詰底面土圧の Y=112.5 における加振直角方向分布を示す。ここで、前述のように X=0 では測定不能であったため、X=0 における Y=- 112.5 および Y=337.5 の測定値の平均をプロットしている。200Gal の加振までは、左右ではほぼ同等の土圧であったが、300, 400Gal では差が生じている。

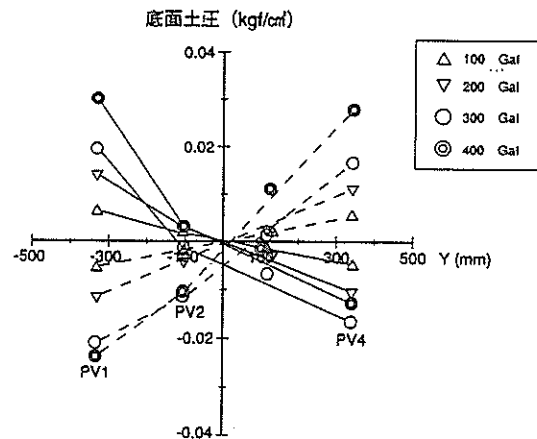


図-33 中詰底面土圧ピーク値の加振方向分布

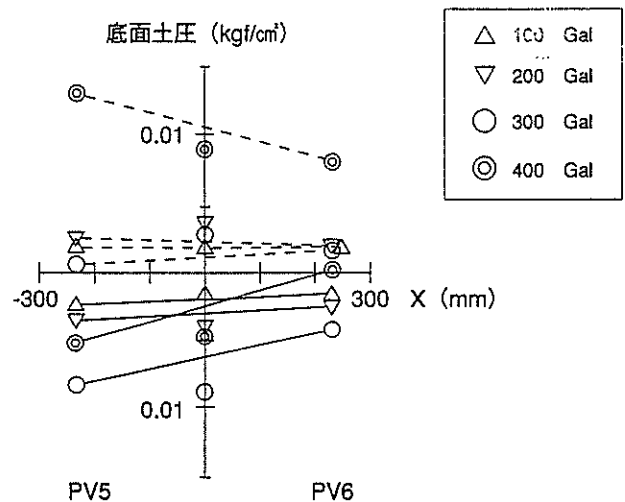


図-34 中詰底面土圧ピーク値の加振直角方向分布

図-35に沖側(Y=337.5)におけるセル部(X=0)およびアーク部(X=- 500)の中詰底面土圧を示す。両者を比較すると、いずれの加振においてもアーク部における土圧の絶対値が大きく、特に引張りにおいて顕著である。これは、アーク鋼殻の下端を底版に固定せずに 2mm の隙間を設けたため、アーク鋼殻下端が変位し、中詰とアーク鋼殻間の摩擦力を通じて中詰底面土圧に影響を与えたためと考えられる。この現象が圧縮よりも引張りで顕著に現れたのは、圧縮側では底版との隙間に噛み込んだ中詰砂によりアーク鋼殻下端の変位がある程度拘束されるのに対し、引張側では拘束が小さいためアーク鋼殻下端の変位が生じ易かったためと考えられる。なお、アーク部後趾側(X=500, Y=- 337.5)の中詰底面土圧に関しては、

土圧計の不調により計測不能であった。

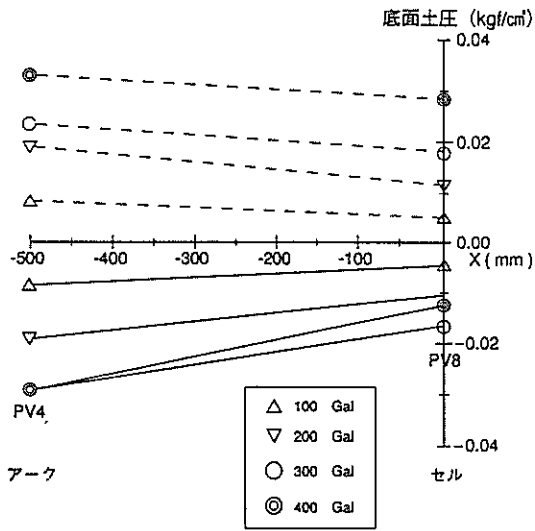


図-35 セルとアークの中詰底面土圧

図-36に中詰底面土圧の累積残留値を示す。250Galの加振までは比較的小さいが、300Gal以上で大きくなり、400Galでは最大 -0.015kgf/cm^2 の引張り側残留土圧が生じている。

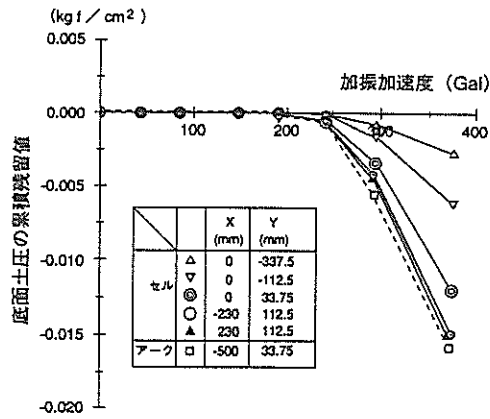


図-36 中詰底面土圧の累積残留値

(6) セル・アーク鋼殻の鉛直応力

図-37に中央セルおよびアーク鋼殻下端部(Z=100)の鉛直応力の加振方向分布を示す。ここで、裏埋め側のアーク鋼殻鉛直応力はゲージの不調により測定不能であったため、図-37から除いている。正の応力は引張りを負の応力は圧縮を意味する。セル鋼殻においては、正の加速度(裏埋め側から沖側に向かう加速度)作用時に、沖側

で引張り応力、裏埋め側で圧縮応力が、負の加速度(沖側から裏埋め側へ向かう加速度)作用時には逆方向の鉛直応力が作用している。200Gal以上の加振においては、正の加速度作用時の沖側最大引張り応力が、前趾(Y=450)付近ではなく、アークとの接続部に近いY=390付近で生じているものの、全体的な分布形状はほぼ直線的であり、特に設計において重要となる負の加速度作用時(破線)では直線分布が明確である。中立軸の位置はセル中心より若干裏埋め側の、Y=-50~-100付近である。裏埋め側と沖側の鉛直応力を比較すると、圧縮についてはほぼ同等の応力であるが引張りでは裏埋め側の応力が沖側を上回っている。

一方、沖側アーク鋼殻の鉛直応力は、圧縮応力で最大 28.1kgf/cm^2 、引張り応力で最大 7.4kgf/cm^2 と、圧縮応力が卓越している。また、セル前趾と比べると圧縮、引張りとも、小さな応力となっており、400Galで比較すると、圧縮側で約1/3、引張り側で約1/10となっている。これらの現象はアーク下端が底版に固定されずに、2mmの隙間を設けたことによる。すなわち、引張り力に対しては拘束が小さく、反力がほとんど発生しなかったこと、および、圧縮力に対しては隙間に噛み込んだ中詰砂を介して底版に拘束されることで反力が生じたものの、セル下端ほどには拘束が大きくなり、反力も小さく現れたことによる。

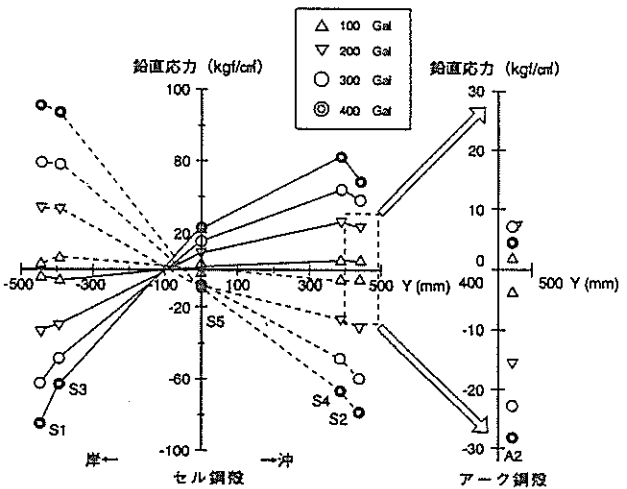


図-37 セルとアークの鋼殻下端部の鉛直応力の加振方向分布

図-38, 39にセル鋼殻の沖側(Y=443)および裏埋め側(Y=-443)における鉛直応力の鉛直分布を示す。ここで、縦軸はセル鋼殻下端からの高さを示す。いずれの加

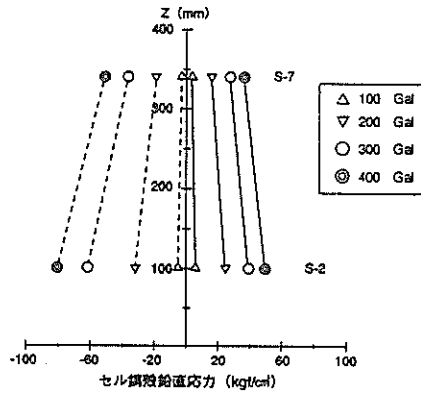


図-38 沖側セル鋼殻鉛直応力の鉛直分布

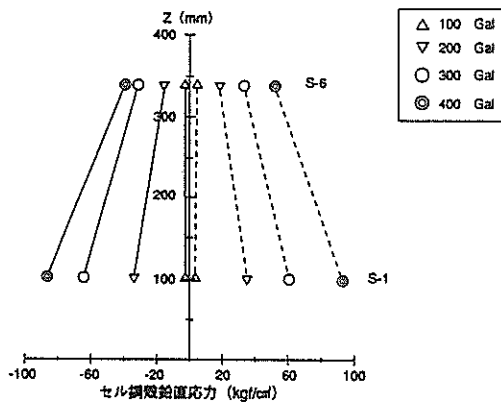


図-39 裏埋め側セル鋼殻の鉛直応力の鉛直分布

振においても Z=100 における応力が Z=340 における応力を上回っているものの、沖側の引張りに関してはその差が小さい。これは、図-37にみられたように Z=100 における沖側の最大引張り応力が、前趾(Y=443)で生じなかったことの影響と考えられる。また、裏埋め側では、圧縮応力と引張り応力がほぼ同等であるが、沖側においては圧縮応力が卓越している。

図-40 に鋼殻鉛直応力の累積残留値を示す。300Gal の加振までは、加速度の増加と共に圧縮応力の残留値が増加しているが、400Gal においては逆に引張り側に移動している。また、いずれの測点においても残留応力は 3kgf/cm^2 以下と小さい。

(7) セル鋼殻の水平応力

図-41にセル鋼殻下端(Z=100)における水平応力の円周方向分布を示す。図では、計測点に対してY軸対象となる位置も線で結んでいる。正の加速度作用時には、裏埋め側から側部にかけては引張応力が、沖側では圧縮応力が生じ、負の加速度作用時には符号が逆転する応力分布となっている。また、裏埋め側と沖側を比較すると裏

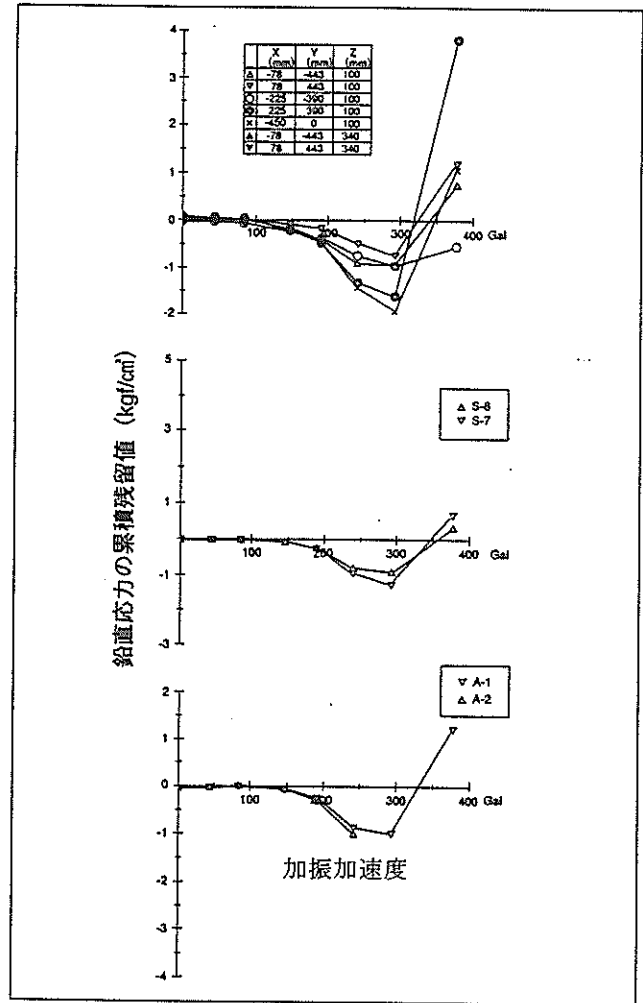


図-40 鋼殻の累積残留鉛直応力

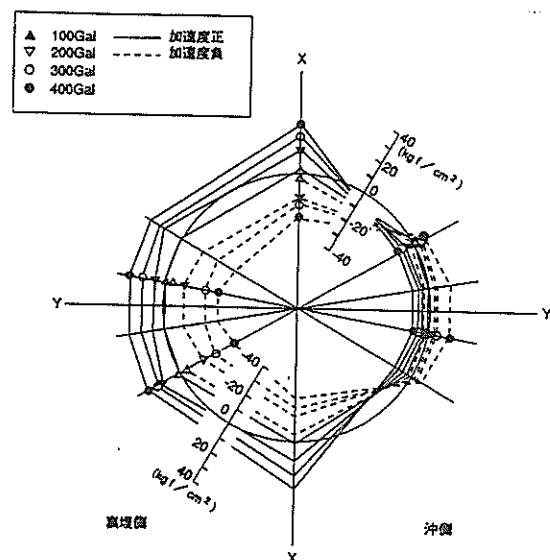


図-41 セル鋼殻の水平応力の円周方向分布

埋め側の発生応力が大きい。これは、正の加速度作用時には慣性力が負方向に作用するため、沖側においては、静止状態で作用している中詰の土圧が軽減され、見掛け上鋼殻に負方向の力が作用することになるとともに、裏埋め側鋼殻においては中詰の慣性力に加え裏埋め土圧の軽減による負方向力が重なって作用したことによる。水平応力の最大値は、鉛直応力の最大値の 1/3 ~ 1/4 程度であり鉛直応力度と比較して小さい値となっている。

図-42, 43にセル鋼殻沖側および裏埋め側における水平応力の鉛直分布を示す。この図より、Z=340 における水平応力が Z=100 における応力を上回っていることが分かる。これは、セル鋼殻下端付近では底版により変形が拘束されていることの影響と考えられる。一方、沖側と裏埋め側を比較すると、裏埋め側の応力が沖側を上回っている。

図-44にセル鋼殻水平応力の累積残留値を示す。鉛直応力と同様に 300Gal の加振までは、加速度の増加と共に圧縮応力残留値が増加しているが、400Gal において引張側に移動している。

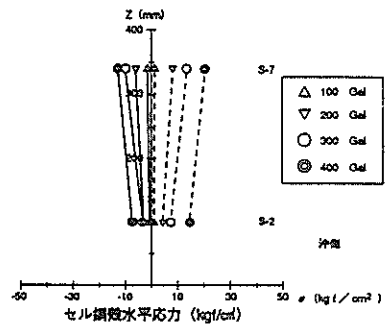


図-42 沖側セル鋼殻の水平応力の鉛直分布

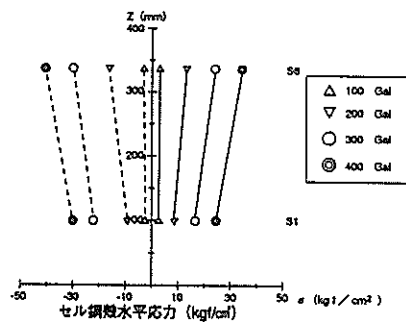


図-43 裏埋め側セル鋼殻の水平応力の鉛直分布

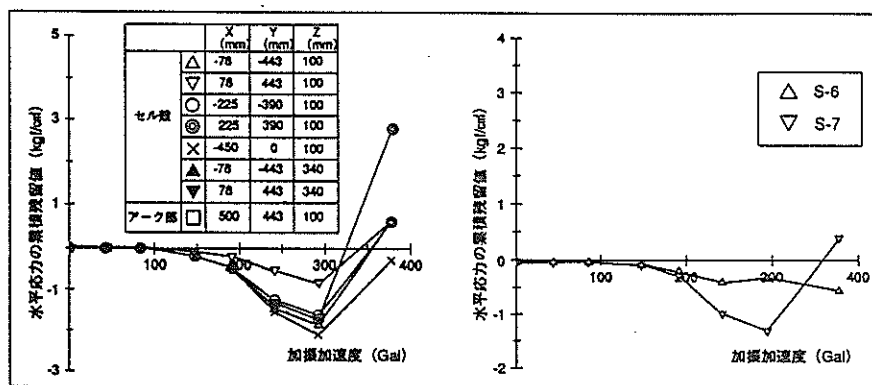


図-44 セル鋼殻の累積残留水平応力

(8) セル鋼殻の主応力

図-45に 300Gal 加振時におけるセル鋼殻側面の主応力度ピーク値の大きさおよび作用方向を示す。加速度の作用方向によらず、主応力の作用方向はほぼ 45°である。

図-46に各加振時における主応力ピーク値を示す。これによれば、主応力は引張り、圧縮共、作用加速度にほぼ比例して大きくなっている。主応力ピーク値の最大値は正方向加速度作用時には引張り側に、負方向加速度作用時には圧縮側に生じ、それらの絶対値はほぼ同等である。

(9) 作用力と反力の同一時刻分布

300Gal 加振時の加速度、土圧、変位、セル鋼殻鉛直応力の同一時刻分布を図-47に示す。負方向加速度作用時には正方向の慣性力および裏埋め土圧が作用するため、正方向の変位が生ずるとともに、中詰底面土圧およびセル鋼殻下端鉛直応力は沖側で圧縮、裏埋め側で引張りとなる。一方、正方向加速度作用時には作用力が逆転し、変位および発生力も逆転している。これらの作用力および発生力は概ね同一位相となっていることがわかる。

同様に 300Gal 加振時のセル鋼殻下端部付近の円周方向応力の同一時刻分布を図-48に示す。図では、計測点に対してY軸対象となる位置も線で結んでいる。この図より、加速度が負から正に変化するに伴い、裏埋め側から側部にかけては圧縮から引張り応力へ、沖側では引張りから圧縮応力へ変化していることがわかる。

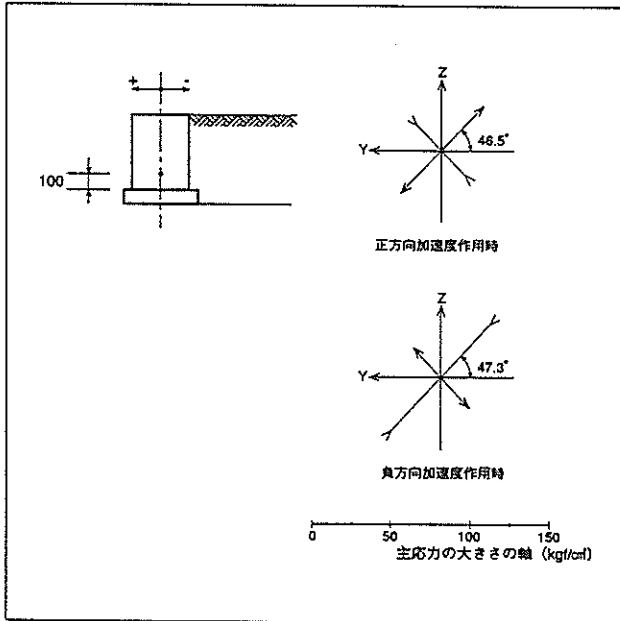


図-45 セル鋼殻側面の主応力 (300gal)

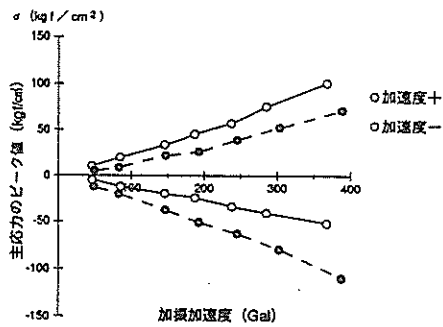


図-46 セル鋼殻側面主応力のピーク値

(10) セルの天端形状

400Gal までの加振実施後に測定した中央セル天端形状の変化を図-49に示す。加振直角方向の径が約 10mm 大きくなっているものの加振方向にはほとんど変化していない。

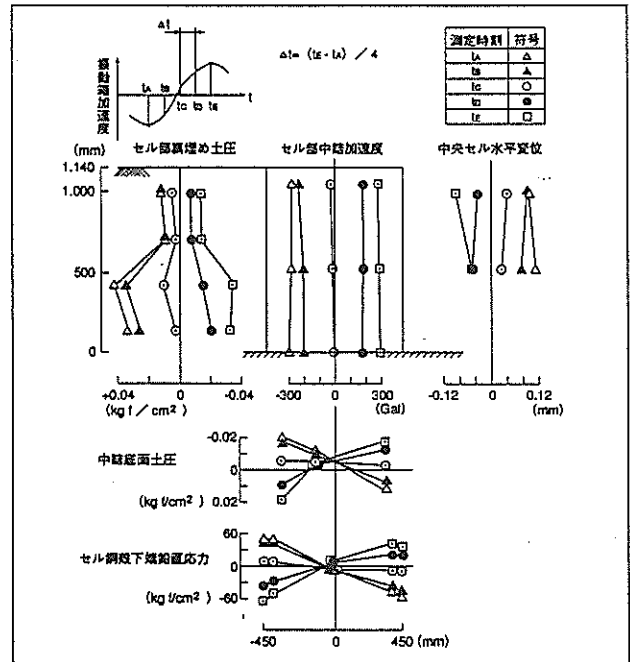


図-47 同一時刻分布 (X=0)

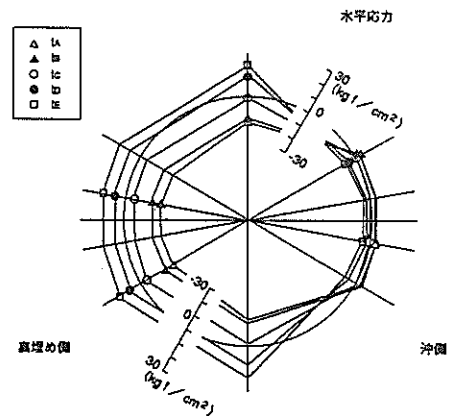


図-48 セル鋼殻円周方向応力の同一時刻分布

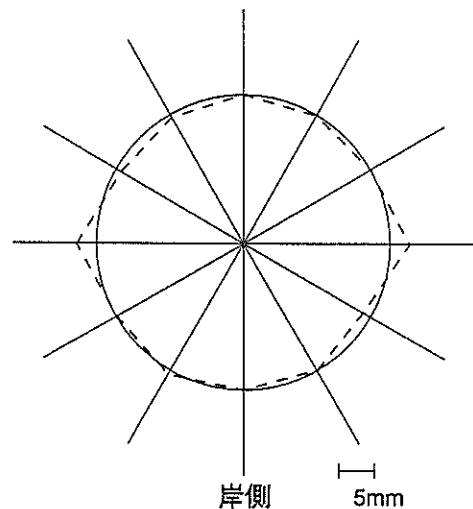


図-49 セル天端形状の変化

4.3 作用モーメントと抵抗モーメント

実測値から壁体と底版の接合部における作用モーメント M_L と抵抗モーメント M_R を算定し、両者を比較する。

(1) 作用モーメントの算定

作用モーメント M_L は加速度の実測値から求まる壁体の慣性力と、裏埋め土圧の実測値を用いて算定する。

a) 慣性力による作用モーメント

加速度の測定値から震度を求め、次式により慣性力によるモーメントを算定する。

$$M_i = (H/2) k_H \xi W_s \quad (3)$$

ここに、

M_i ; 壁体下端における慣性力モーメント

H ; 壁体の高さ ($H = 114\text{cm}$)

k_H ; 震度

ξ ; 中詰砂の有効質量係数

W_s ; 中詰砂の重量

震度 k_H は、一般に下式により求まる。

$$k_H = \alpha / g \quad (4)$$

ここに、 α ; 振動台の実測加速度

g ; 重力加速度

ここで、野田ら^{6), 7)}によれば、重力式岸壁の地震時被災の解析から、設計震度が 0.2 以上においては次式により震度を換算すると現行設計法による安定計算結果と被災の実状がよく合うことが報告されている。

$$k_H = (1/3) \cdot (\alpha/g)^{1/3} \quad (5)$$

ただし、 $\alpha \geq 0.2 g$

一方、鋼板セルのように粒状体を中詰した構造物が振動を受ける場合、壁体に作用する慣性力は中詰土の全質量と加速度の積より小さくなることが知られている。そこで、慣性力に寄与する見かけの質量(有効質量)と、全質量の比として有効質量係数 ξ を定義する。鋼板セルに砂が中詰された場合の有効質量係数は、実験結果の上限値より求めた次式を用いることが提案されている⁷⁾。

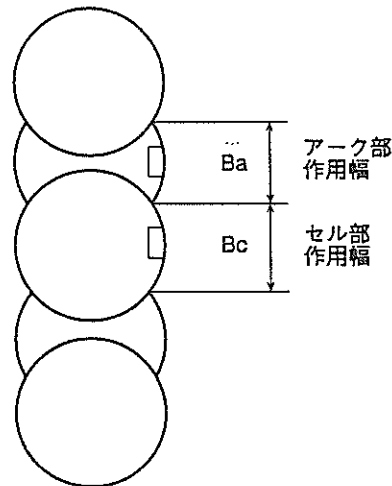
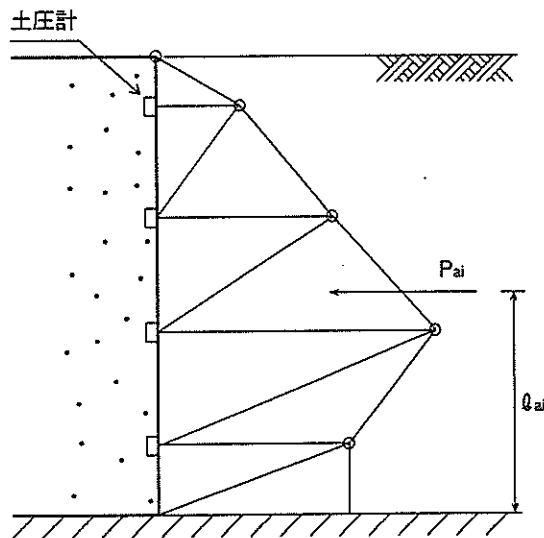
$$\left. \begin{aligned} \xi &= 1.0 - k_H & k_H \leq 0.2 \\ \xi &= 0.8 & k_H > 0.2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

以上の点を踏まえ、震度換算の有無および有効質量係数考慮の有無により、表-11に示す 4 ケースの作用モーメント M_L を算定した。

中詰砂の重量 W_s はセル部とアーク部それぞれの容積と、中詰砂の単位体積重量の積により求めた。

表-11 作用モーメントの算定ケース

ケース	震度 (k_H)	有効質量係数 (ξ)
1	α/g	考慮せず ($\xi = 1.0$)
2	式 (5) による	考慮せず ($\xi = 1.0$)
3	α/g	式 (6) により考慮
4	式 (5) による	式 (6) により考慮



$$M_e = B_a \sum P_{ai} Q_{ai} + B_c \sum P_{ci} Q_{ci}$$

- P_{ai} ; i 層のアーク部に働く裏埋め土圧
- P_{ci} ; i 層のセル部に働く裏埋め土圧
- Q_{ai} ; i 層のアーク部裏込め土圧の底面からの作用距離
- Q_{ci} ; i 層のセル部裏込め土圧の底面からの作用距離

図-50 裏埋め土圧による作用モーメントの算出方法

b) 裏埋め土圧による作用モーメント

裏埋め土圧の測定結果から作用モーメント M_e を算定した方法を図-50に示す。地表面位置の土圧を 0、壁体の下端位置における土圧を、最も下に位置する ($Z=140$) の土圧計の測定値と同様と仮定し、各土圧測定値を直線で結びそれを土圧分布として、壁体下端位置におけるモーメントを算定した。また、セル部とアーク部の裏埋め土圧の測定値の作用幅は、裏埋めと接するセル、アークそれぞれの加振方向の投影幅とした。

以上の方法により、裏埋め側から沖側に向かう慣性力作用時（負の加速度作用時）のピーク値から算定した作用モーメントを図-51に示す。

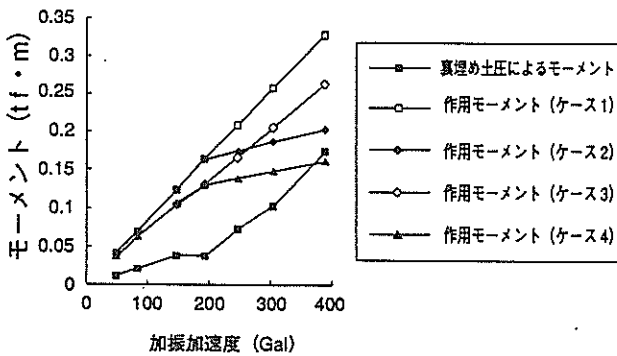


図-51 作用モーメント

(2) 抵抗モーメントの算定

抵抗モーメント M_R は、セルおよびアーク鋼殻下端部の鉛直応力測定値と中詰底面土圧の測定値から、壁体中心軸 ($Y=0.0$) 回りモーメントとして算定した。

セル鋼殻による抵抗モーメントは、下端部の鉛直応力が加振方向距離 ($Y = 0.0$ の位置からの距離) に対して直線的な分布をしていた (図-37) ことから、最小二乗法により求めた応力と加振方向距離との回帰直線を基に、鋼殻全周について積分して算定した。

セル中詰底面土圧による抵抗モーメントに関しても、図-33に示した $X=0.0$ における加振方向の中詰底面土圧の測定値より、底面土圧と加振方向距離に関して最小二乗法で回帰直線を求め、セル部底面積について積分して算定した。

一方、アーク部に関しては、裏埋め側の鋼殻下端部の鉛直ひずみ及び中詰底面土圧が計器の不調により測定不能であったため、裏埋め側の測定波形は沖側の測定波形の位相を逆転したものと同様であると仮定して抵抗モーメントを算定した。すなわち、裏埋め側の値は、逆位相時における沖側測定値と同様と仮定し、沖側測定値と直線で結んで加振方向分布を求めた。この直線分布を用い

て、鋼殻に関しては沖側と裏埋め側それぞれの周長について、また、中詰底面土圧に関してはアーク部底面積について積分して算定した。

以上の方法により、裏埋め側から沖側に向かう慣性力作用時（負の加速度作用時）のピーク値から算定した抵抗モーメントを図-52に示す。

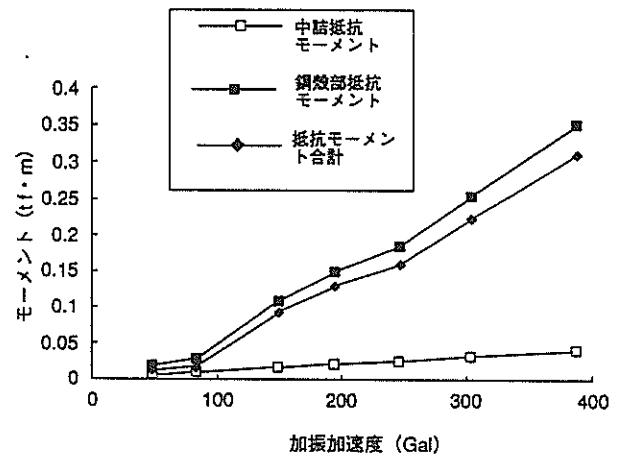


図-52 抵抗モーメント

(3) 作用モーメントと抵抗モーメント

裏埋め側から沖側に向かう慣性力作用時（負の加速度作用時）の各センサーのピーク値から算定した作用モーメントおよび抵抗モーメントを図-53に、目標加速度 300Gal 加振時の同一時刻測定結果から求めた作用モーメントおよび抵抗モーメントを図-54に示す。この内、作用モーメントは、前述のように震度の換算および有効質量係数考慮の有無により 4 ケースについてプロットしている。ここで、抵抗モーメントは鋼殻のひずみと底面土圧の測定値から直接算定した値であり、実際に作用したモーメントにほぼ等しいと考えられる。一方、作用モーメントのうち裏埋め土圧については測定値から直接算定しているものの、慣性力については、(1)に記載した方法により、加速度測定値から間接的に算定している。従って、それぞれの慣性力算定方法に基づく作用モーメントと抵抗モーメントを比較することにより、鋼製円筒ケーソンに作用する慣性力算定方法の妥当性を評価することができる。

図-53、54のいずれも、震度の換算および有効質量係数の考慮をしていないケース 1 では、作用モーメントが抵抗モーメントを大きく上回っており、壁体に作用する慣性力を過大評価していることがわかる。同様に、震度の換算のみを考慮したケース 2、中詰砂の有効質量係数のみを考慮したケース 3 のいずれも作用モーメントが上

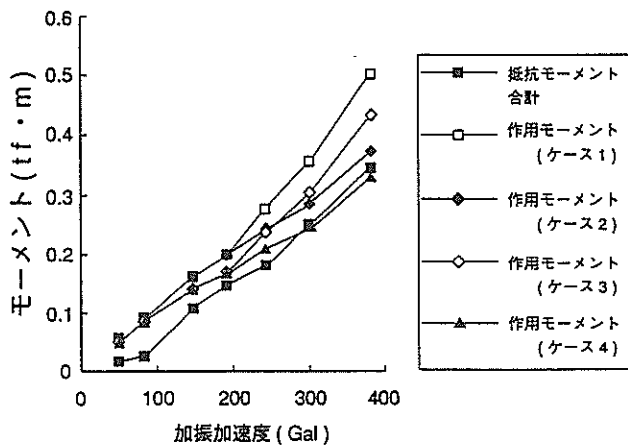


図-53 作用モーメントと抵抗モーメント (ピーク値)

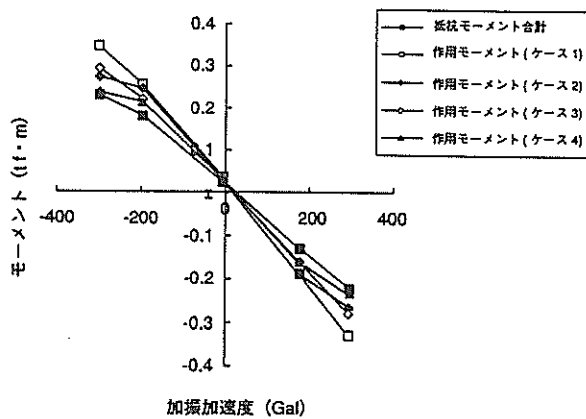


図-54 作用モーメントと抵抗モーメント
(同一時刻分布)

回っている。一方、震度の換算および中詰有効質量を同時に考慮したケース 4 では、200Gal 以上の加振において両モーメントは比較的一致している。また、ケース 4 における作用モーメントは、図-53の 400Gal を除いて、いずれも抵抗モーメントを上回っている。実際の構造物における設計加速度は 300Gal 以下であることから、設計に際しては、式 (5) と式 (6) により慣性力を算定することができるものと考えられる。

なお、震度を換算し、さらに中詰砂の有効質量係数を考慮することについては、震度の換算式(2)が、有効質量係数が 1.0 に近いと考えられるコンクリートケーソンやコンクリートブロックなどを対象に導かれたものであり、壁体の大部分が砂などの粒状体で構成される鋼板セルに式 (5) と式 (6) を同時に用いることに問題はないとされている⁷⁾。

4.4 底版へのモーメント伝達の分担

壁体に作用した水平力は、モーメントととして、セル部とアーク部それぞれの鋼殻および中詰砂により底版へ伝達される。この際の分担率を明らかにするため、セル部およびアーク部における鋼殻および中詰砂のモーメント分担率を図-55に示す。ここで、図-55は裏埋め側から沖側に向かう慣性力作用時の各センサーのピーク値から求めたモーメント分担率であり、4.3(2)に記載した方法で算定した抵抗モーメントの分担率として算定した。

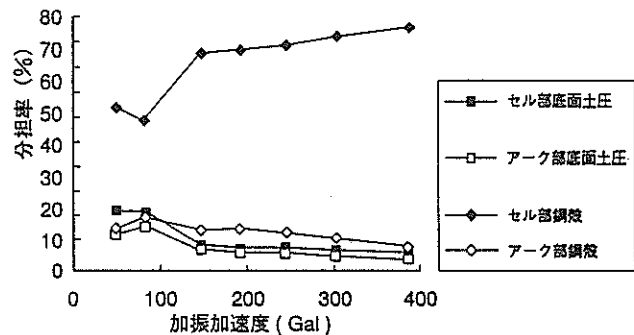


図-55 各部のモーメント分担率

この図より、次のことがわかる。

- ① セル鋼殻の分担率は 100Gal までの加振においては 50 %程度であるが、150Gal の加振において急激に上昇し 72 %となる。その後、加速度の増大とともに分担率も若干上昇し、400Gal においては 80 %となる。
- ② 一方、アーク鋼殻の分担率は、100Gal において 17 %と最大となるが、その後加速度の増加と共に減少する傾向を示し、400Gal の加振時で 9 %となる。
- ③ 中詰底面土圧の分担率は、100Gal 以下ではセル部で約 20 %、アーク部で約 13 %であるが、150Gal において急激に減少した後はほぼ一定となり、セル部で 7 ~ 8 %、アーク部で 4 ~ 6 %となる。

鋼殻と中詰の分担に注目し、壁体全体および壁体を構成するセル部とアーク部それぞれにおける鋼殻と中詰の分担率をプロットしたのが図-56である。壁体全体における鋼殻のモーメント分担率をみると、加速度が 100Gal 以下では 67 ~ 68 %であるが、150Gal で急激に上昇した後は加速度によらず一定となり、85 %から 89 %である。すなわち、150Gal 以上の加振時には、壁体に作用したモーメントの約 90 %が鋼殻により底版へ伝達され、中詰による伝達は 10 %程度であったことがわかる。一方、セル部、アーク部それぞれにおける鋼

殻の分担率をみると、150Gal で急激に上昇した後、ほぼ一定となる傾向は同様であるが、セル部では 100Gal 以下で 72 ~ 73 %、150Gal 以上で 90 ~ 92 % であるのに対し、アーク部では 100Gal 以下で 53 ~ 55 %、150Gal 以上で 67 ~ 70 % と、セル部に比べて小さい分担率となっている。これは、アーク部では鋼殻下端を底版に固定せずに 2mm の隙間を設けていることにより、鋼殻と底版間の拘束が小さいため、中詰の分担率が上昇したことによる。

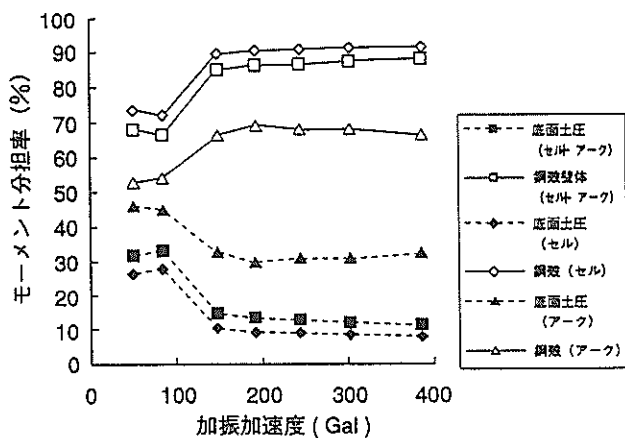


図-56 鋼殻と中詰のモーメント分担率

一方、セル部とアーク部の分担に注目し、全抵抗モーメントおよび抵抗モーメントを構成する鋼殻と中詰それぞれにおけるセル部とアーク部の分担率をプロットしたのが図-57である。全抵抗モーメントにおけるセル部の分担率をみると加速度が 100Gal 以下では 68 ~ 74 % であるが、150Gal で 80 % に急激に上昇した後は加速度とともに微増する傾向を示し、400Gal 加振時で 87 % となる。すなわち、150Gal 以上の加振時においては、壁体

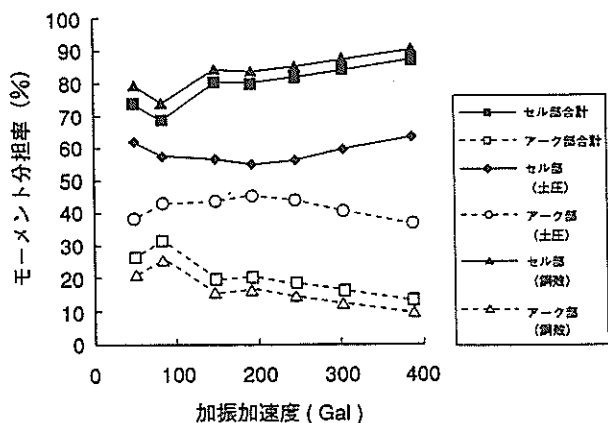


図-57 セル部とアーク部のモーメント分担率

に作用したモーメントの約 80 ~ 90 % がセル部により底版へ伝達され、アーク部による伝達は 10 ~ 20 % 程度であったことがわかる。

鋼殻、中詰それぞれにおけるセル部の分担率をみると、鋼殻の場合は全抵抗モーメントにおける場合より若干大きいものの傾向としては同様で、100Gal 以下で 74 ~ 79 %、150Gal で 85 % に急激に上昇した後、微増して 400Gal 加振時で 90 % となる。一方、中詰におけるセル部の分担率をみると、加速度によらずほぼ一定で、55 ~ 63 % であり、鋼殻の場合と比較してかなり小さい値となっている。

セル部とアーク部それぞれにおける鋼殻と中詰の断面二次モーメントの比率は、表-12 に示す通りであり、セル部とアーク部とで底版へのモーメント伝達機構が同じであるならば、分担率もこれらとほぼ同様になるはずである。実際の分担率を表-12 と比較すると、鋼殻においてはセル部の分担率が、中詰においてはアーク部の分担率が、それぞれ幾何学的な比率を上回っている。また、この傾向は鋼殻においては顕著であるが、中詰においてはさほど顕著には現れていない。これは、アーク鋼殻の下端が底版に固定されていないため、アーク部ではセル部と比べて、①鋼殻の鉛直応力が圧縮、引張りとも大きく下回っている(図-37)、②中詰底面土圧は、圧縮側ではほぼ同等であるが、引張り側では上回っている(図-35)、ことによる。

表-12 セル部とアーク部の断面 2 次モーメント比率

項目	セル部	アーク部	合計
鋼殻	63.9%	36.1%	100%
中詰	66.5%	33.5%	100%

5. 有限要素法による解析

5.1 解析概要

鋼製円筒ケーソンの模型振動実験を対象に、加速度 100Gal, 200Gal, 300Gal, 400Gal の 4 ケースについて三次元有限要素法による数値解析を実施し、模型振動実験より得られた結果と比較検討した。

5.2 解析内容

(1) 解析手法

汎用有限要素解析プログラム「ANSYS®」を用い、線形三次元有限要素法解析を行った。

(2) 解析モデル

図-58に示すように、振動実験で使用した模型の内、セル部およびアーク部の各々の1/2を取り出したモデルとし、その切断面は対称境界とした。

鋼殻には4節点6自由度の四辺形シェル要素を、中詰砂には6節点6自由度の六面体ソリッド要素を使用した。表-13に解析で使用した要素諸元を示す。

表-13 各要素タイプと要素諸元

		セル・アーク鋼殻	中詰土
タイプ	-	四辺形シェルモデル (6自由度)	六面体ソリッドモデル (6自由度)
ヤング率	E (kgf/cm ²)	2.1×10 ⁶	56
ポアソン比	ν	0.3	0.49
単位体積重量	γ (kgf/cm ³)	7.85×10 ⁻³	1.54×10 ⁻³
厚さ	t (cm)	0.05	-

表-14 境界条件

		変位			回転		
		x (r)	y (θ)	z (z)	x (r) 軸回り	y (θ) 軸回り	z (z) 軸回り
底面部 z=0	セル殻	固定	固定	固定	-	(固定)	(固定)
	陸側アーク	-	-	-	-	-	-
	沖側アーク	-	-	固定	-	-	-
対称面 x=0,50cm	中詰土	-	-	固定	-	-	-
	全要素	固定	-	-	-	固定	固定

() 内に示されているものは、円筒座標系を示す。
r; 半径方向、θ; x軸からの角度

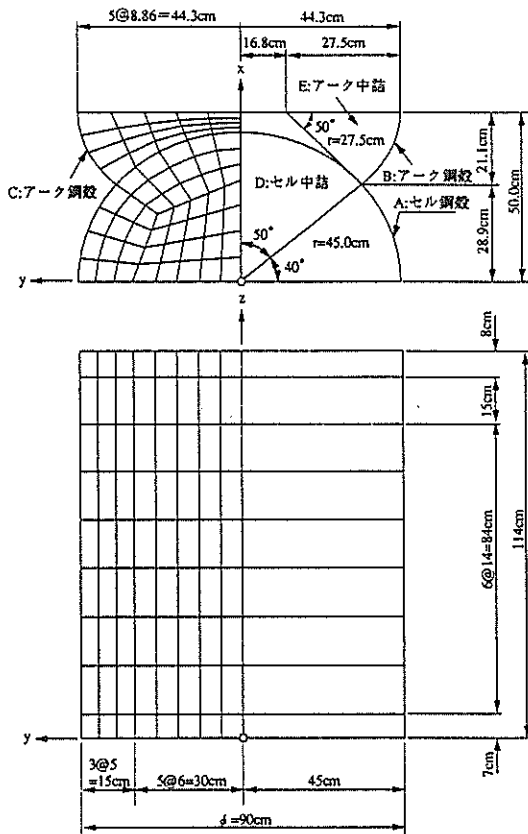


図-58 計算モデルと要素分割状況

表-14に底面部 (z=0) および対称面 (x=0,50cm) における境界条件を示す。アーク鋼殻の底面部の境界条件は4.2(6)に述べたアーク鋼殻下端部の鉛直応力状態を考慮して、岸側アーク鋼殻については鉛直変位の拘束はせず、沖側アーク鋼板のみ鉛直変位を拘束した。

なお、鋼殻と中詰砂とが接する面ではシェル要素とソリッド要素の節点を共有接点とし、同一な挙動を示すこととした。

(3) 外力

慣性力は、負方向の実測加速度 (表-10) から算定して、+y方向に作用させた。

裏埋め土圧は、セル部およびアーク部の実測値から図-59に示す鉛直分布を仮定し、これを作用面積 (x-z平面投影面積) を考慮した集中荷重に置き換え、鋼板部の各要素節点に入力した (図-60)。この際、セル部とアーク部の境界は図-61に示す通りとした。

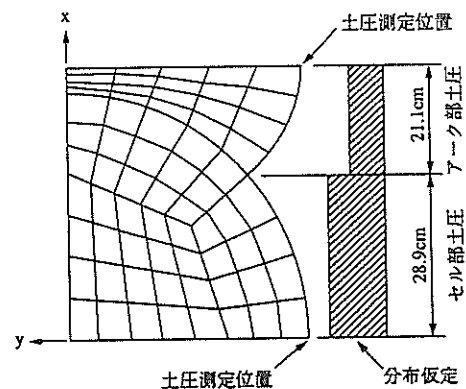


図-59 裏埋め土圧測定位置とその分布仮定と計算時載荷位置

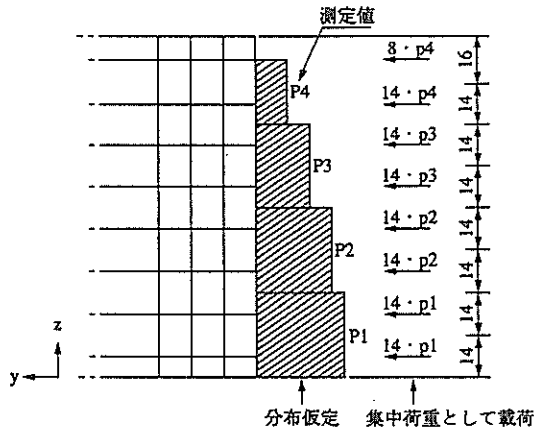


図-60 計算時の裏埋め土圧の載荷位置

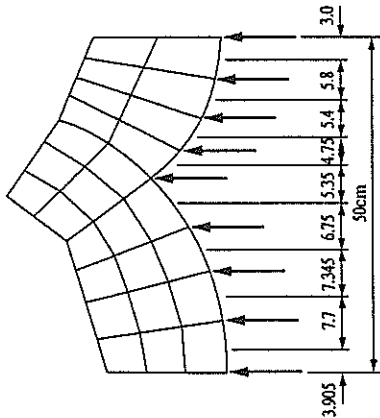


図-61 裏埋め土圧測定位置と分布仮定

5.3 解析結果

解析した結果、各加速度ケースともほぼ同一の傾向を示した。このため代表ケースとして加速度 300Gal の場合について記載する。

(1) セル・アーク鋼殻の下端部の鉛直応力度

図-62に鋼殻下端部鉛直応力加振方向分布の実験値と解析値の比較図を示す。ここで、正の応力は引張を意味する。

セル鋼殻の場合、解析値は実験値と同様に直線分布を示し、その絶対値は沖側で実験値より若干小さな値を示しているものの比較よく一致している。

アーク鋼殻について、下端部の鉛直変位を固定した沖側アークについて比較すると、解析値では実験値より大きな圧縮応力が発生している。これは、実験における鉛直変位の拘束条件が解析で用いた完全固定よりもゆるやかであったことが原因と考えられる。

$y = \pm 34.47\text{cm}$ 付近は、セル鋼殻とアーク鋼殻の接合

部であり、境界条件の変化点となっている。この影響を受けて応力分布形状がこの付近では不連続になっている。

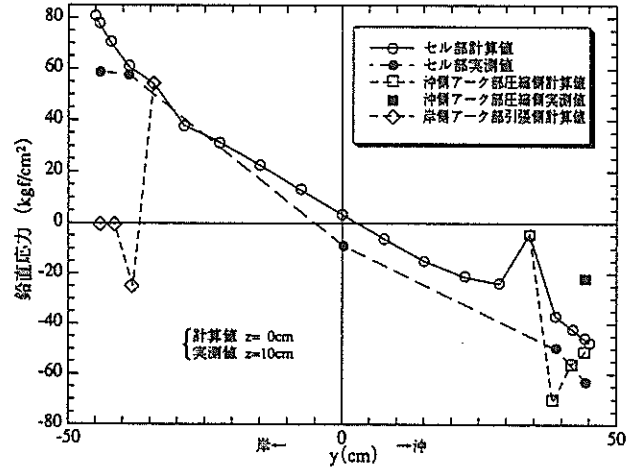


図-62 鋼殻下端部の鉛直応力の加振方向分布 (実験値と解析値)

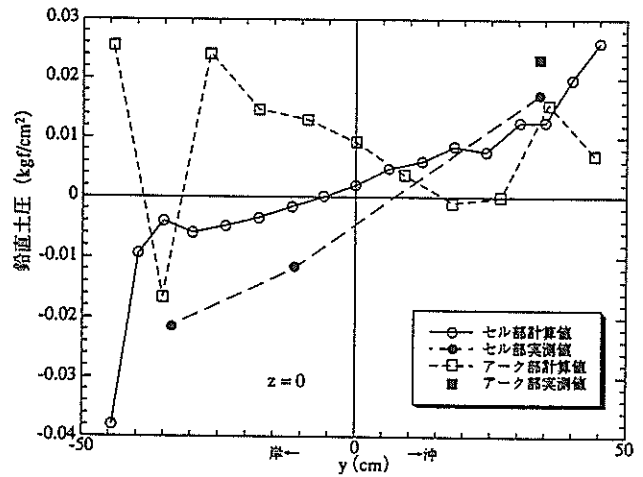


図-63 中詰底面土圧の加振方向分布 (実験値と解析値)

(2) 中詰底面土圧

図-62にセル部中心 ($x = 0$) およびアーク部中心 ($x = 50\text{cm}$) における中詰底面土圧加振方向分布の実験値と解析値の比較図を示す。ここで、正の土圧は圧縮方向の土圧を意味する。

セル部解析値は、岸側端部を除いて概ね直線分布である。実験値と比較すると、沖側ではほぼ一致した土圧を示しているが、岸側は端部では実験値よりも小さな引張土圧となっている。

アーク部解析値は、セル部のように直線分布とはなっ

ていない。特に岸側の土圧も圧縮の値を示している。これは岸側アーチ鋼殻の下端部を固定していないため中詰が圧縮変形したことが原因と考えられる。

5.4 底版へのモーメント伝達の分担

下端部の鋼殻応力および中詰土圧の解析値より、抵抗モーメントを求めた。ここで、抵抗モーメントは図-64に示すように鋼殻および中詰土の各要素節点における発生鉛直応力および土圧に、各要素節点の分担面積およびx軸からの距離を乗じて算定した。

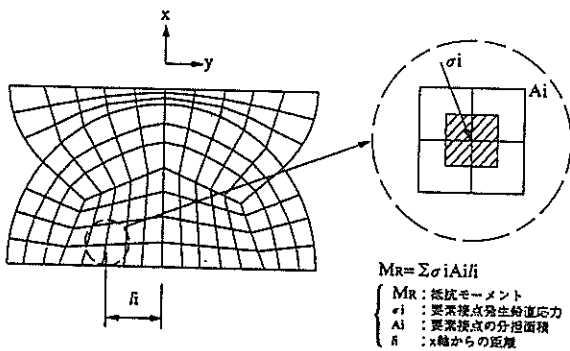


図-64 解析値による抵抗モーメント算出方法

全抵抗モーメントのうち鋼殻部（セル，アーチ，鋼殻全体）の分担率について、実験値と解析値を比較したものを図-65に示す。

セル，アーチ鋼殻それぞれについてみると、実験値では加速度が増加するにつれセル鋼殻の分担率は増加し、逆にアーチ鋼殻の分担率が減少しているのに対し、解析値はほぼ一定値である。

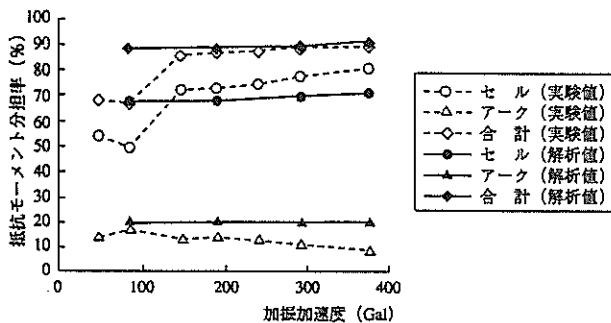


図-65 鋼殻部モーメント分担率（実験値と解析値）

鋼殻全体による分担率は、実験値では、100Gal から150Gal にかけて約70%から90%に増加した後一定値を示しているのに対し、解析値では全加速度ケースにおいて約90%で一定である。比較的大きな加速度においては、実験値および解析値とも鋼殻の抵抗モーメント分担率は約90%でよく一致しているといえる。

以上のことから、鋼製円筒ケーソンでは作用外力に対する抵抗力として発生する鋼殻の鉛直応力が約90%の分担率を示しているのこの鉛直応力は無視できないことがわかる。

6. まとめ

模型振動実験結果を整理解析した結果、以下のことが明らかとなった。

(1) セル天端の水平変位を測定した結果、この鋼製円筒ケーソン模型における壁体の変形は無視し得るほど小さく、今回の実験においては、壁体を剛体とみなしても問題ないと考えられる。

(2) 裏埋め土圧および慣性力から算出した作用モーメントと、鋼殻下端部の鉛直方向応力および中詰砂の底面土圧の計測結果から算出した抵抗モーメントとを比較した。その結果、野田ら^{6) 7)}が提案しているように、壁体の実測加速度を震度に換算して、さらに鋼板セルに作用する慣性力に有効質量係数を考慮することが実験結果を最も良く説明できることがわかった。

(3) セル鋼殻の下端部鉛直方向応力および中詰土圧は、岸沖方向に概ね直線分布を示す。

(4) 壁体に作用したモーメントの慣性力が比較的大きい場合（加速度が200Gal以上）、約90%が鋼殻から、約10%が中詰土から底版に伝達された。この結果は、三次元有限要素法による数値解析によっても確認された。

7. あとがき

従来の鋼板セルにおける鋼板の板厚は、中詰土圧による円周方向のフープテンションのみにより決定している。しかし、鋼製円筒ケーソンでは、鋼殻の鉛直応力が無視出来ないことが新しくわかった。こうした点および、現在、敦賀港鞠山北地区のフェリー埠頭で施工された鋼製円筒ケーソンの現場計測結果⁹⁾の解析とも合わせ、適切な設計手法の提案のために研究を進めている。

(1997年9月30日受付)

謝辞

本資料をまとめるにあたり、下記の方には模型振動実験およびデータ整理などで多大な協力を頂いた。

環境庁水質保全局水質規制課(元運輸省港湾技術研究所構造部地震防災研究室) 長田 信 室長補佐

参考文献

- 1) 張晶旭, 沢口正俊, 山田恭央, 柳本泰伴: 鋼製円筒ケーソンの水平変位に関する模型実験と理論的考察, 土と基礎, Vol.41, No.6, 1993年, pp.41 ~ 46.
- 2) 北島昭一, 野田節男, 中山種清: 根入れ鋼板セルの静的挙動, 港湾技研資料, No.375, 1981年, 212p.
- 3) 野田節男, 倉田栄一, 長田信: 水中振動台の開発, 地震工学研究発表会講演概要, 第20回, 1989年, pp.345 ~ 348.
- 4) 財団法人沿岸開発技術研究センター: 根入れ式鋼板セル設計指針, 1985年, 48p.
- 5) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 第2編, 第14章, 土圧及び水圧, 1989年, pp.上210 ~ 222.
- 6) 野田節男, 上部達生, 千葉忠樹: 重力式岸壁の震度と地盤加速度, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第4号, 1975年, pp.67 ~ 111.
- 7) 野田節男, 北澤壮介, 飯田毅, 森信夫, 田淵博: 根入れ式鋼板セルの耐震性に関する実験的検討, 港湾技術研究所報告, 第21巻, 第3号, 1982年, pp.79 ~ 167.
- 8) ANSYS, Inc., 1994, "ANSYS User's Manual for Revision 5.1"
- 9) 藤井敏, 田端竹千穂, 中谷内信一, 柳本泰伴, 北村卓也: 鋼製円筒ケーソンの開発と現場観測, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, 1996年

主要記号表

H	: 壁体高さ
h	: 地表からの深さ
M_0	: 裏埋め土圧による作用モーメント
M_1	: 壁体下端における慣性力モーメント
M_L	: 作用モーメント
M_R	: 抵抗モーメント
W	: 壁体重量
W_1	: 中詰砂の内, 鋼殻へぶら下がる砂の重量
W_s	: 中詰め砂の重量
g	: 重力加速度
k_H	: 水平震度
α	: 地盤加速度
γ	: 単位体積重量
γ_d	: 乾燥単位体積重量
δ_T	: 天端はらみ出し量
ξ	: 中詰砂の有効質量係数
ϕ	: 内部摩擦角

港湾技研資料 No.891

1997. 12

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

印刷所 阿部写真印刷株式会社

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

Copyright ©(1997)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 machine 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。