

港湾技研資料

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

No. 681 Sept. 1990

二重円筒ケーソンに作用する
動水圧に関する模型振動実験

上 部 達 生
長 田 信

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	3
2. 模型	5
2. 1 二重円筒ケーソンの構造	5
2. 2 模型	5
3. 模型振動実験	6
3. 1 振動台	6
3. 2 模型振動実験の内容	7
3. 3 計測項目	7
3. 4 模型の設置	8
3. 5 加振条件, 測定記録の処理方法	9
4. 模型振動実験結果	10
4. 1 最大加速度の分布	10
4. 2 二重円筒ケーソン模型に作用する動水圧の分布	11
4. 3 二重円筒ケーソン模型に作用する動水圧の合力	24
5. 結論	31
参考文献	33
記号表	33

Shaking Table Tests for Hydrodynamic Pressure acting on Double Cylindrical Caisson

Tatsuo UWABE*

Makoto OSADA**

Synopsis

Shaking table tests were conducted to investigate characteristics of hydrodynamic pressure acting on a double cylindrical caisson, which was developed to construct a reasonable structure of breakwater in deep sea. This caisson is composed of a permeable outer cylinder whose upper part has a number of openings and a impermeable inner cylinder.

The size of caisson model made of acrylic boards was 50cm in height and 50cm in diameter. The opening of outer cylinder were made within the 20cm limit below the top of the model. Opening ratio of 10% and 25% were used. These models were called as a permeable type. The model which has a permeable half-circle in front side of cylinder and a impermeable half-circle in rear side was made and called as a wave dissipating type. In the experiments, hydrodynamic pressures were measured under the conditions of single cylinder type and cylindric wall type.

In case without opening, the hydrodynamic pressure acting on the cylindric wall of the model near the contact points of cylinders showed large value, and the hydrodynamic pressure acting on the same points of single type model as the contact point of the cylindric wall is zero. The resultant force of hydrodynamic pressure acting on the cylindric wall measured here was almost equal to the value of Westergaard's formula for the wall whose width is the same as the diameter of outer cylinder.

In case with openings, the hydrodynamic pressure on the outer cylinder under the opening decreases with increase of the opening ratio. This tendency was clear at the point near the opening. The resultant force of hydrodynamic pressure on the permeable type model with 25% opening was about 0.7 times of that on the model without opening. The ratio of resultant force on the wave dissipating type model with 25% opening to that on the model without opening was above 0.9.

Key Words : Hydrodynamic Pressure, Model Test, Double Cylindrical Caisson, Opening

* Chief of Earthquake Disaster Prevention Laboratory, Structural Engineering Division

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

二重円筒ケーソンに作用する動水圧に関する 模型振動実験

上部 達生 *

長田 信 **

要 旨

大水深海域の波浪制御を目的とした防波堤構造物として開発が進められている、開口部がある二重円筒ケーソンに作用する動水圧特性を模型振動実験により検討した。

実験では高さおよび直径が50cmの亚克力製の模型を使用した。開口部分は外側円筒の天端から20cmの範囲とし、開口率をいくつか変化させ、単一の円筒および複数の円筒が連続した円筒壁に作用する動水圧を計測した。模型は、外側円筒の全周に開口部を設けた透過型と外側円筒前面だけを透過とし、後面を不透過とした消波型を用いた。

実験結果によれば、開口部がない円筒壁面に作用する動水圧の深さ方向の分布形状は Westergaard の理論式の形状と類似しており、各円筒ケーソンに作用する動水圧の合力は、Westergaard の理論式を円筒直径と同一幅に適用した場合とほぼ一致した。円筒壁に作用する動水圧の大きさは単一の円筒に比べかなり大きく、とくに円筒が接する辺りで圧力が集中する様子が見られた。これを緩和するように、各円筒間に間隔を開けると、作用する動水圧は著しく減少した。透過型の場合では、外側円筒の不透過部分に作用する動水圧は、開口率が大きくなるにしたがって小さくなったが、開口部内側の内側円筒に作用する動水圧は大きくなる傾向が見られた。さらに、透過型の場合では、単一の円筒、円筒壁ともに、25%の開口率を設けることで、作用する動水圧の合力は開口部のない場合の約7割に減少した。しかし、消波型の場合では、開口率の増加にともなう動水圧合力の減少程度は小さく、開口部のない場合の9割程度の値であった。

キーワード：動水圧、模型実験、二重円筒ケーソン、開口部

1. まえがき

臨海地域の開発整備が強く要請されるなか、沖合いの海域の有効利用を目指して、港湾や空港および都市施設等のための大水深大規模構造物が建設されようとしている。しかし、これらの地域には軟弱地盤が多く、また、大水深ゆえに波高の高い波が発生しやすく、構造物に作用する地震時動水圧も極めて大きくなる。このような険しい自然条件の下で建設される構造物には、技術的および経済的な課題が多い。

港湾施設のなかで、防波堤は波浪制御構造物として港内の静穏を維持し、船舶の航行・停泊の安全、港内施設の保全を図るだけでなく、津波防波堤のように海に接す

る人々の生活の安全保障に至るまで、その機能は多岐にわたっている。また、防波堤はその性格上、港湾施設の最前列に位置するため、他の施設以上に大水深化を進める必要があるといえる。わが国では、この防波堤の構造形式として、捨石マウンド上にコンクリートケーソンを備え付けた混成堤が一般的であるが、この混成堤を大水深域に建設する場合には、構造断面が大きくなり、工費が著しく増加する難点がある。とくに、基礎捨石の工費に占める割合が大きくなりやすく、その低減を図るため、背の高いケーソンの開発、導入が必要となる。

このような大水深波浪制御構造物の建設例として釜石湾口防波堤が挙げられる。この防波堤は最大水深が60mを越える地点に建設されるもので、安全性、施工性、

* 構造部 地震防災研究室長

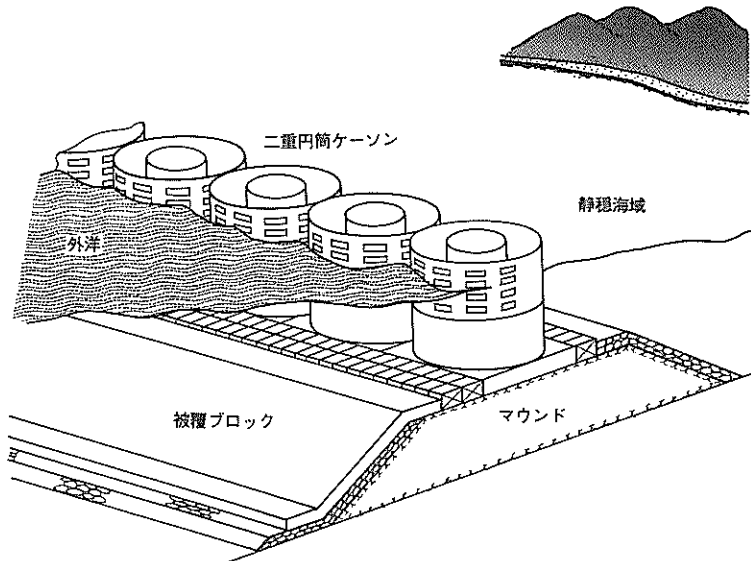
** 構造部 地震防災研究室

経済性等の判断から、高さ約30mのマウンド上に高さ約30mの台形型のケーソンを設置する混成堤が採用されている。この台形型のケーソンでは、前後の斜面に作用する動水圧および波圧の鉛直成分が滑動に対する安全性増加に寄与するので、従来型のケーソンに比べ重量を大きく軽減できる。また、この台形型のケーソンは従来型のケーソンに比べ作用する動水圧合力も幾分小さいので、大水深防波堤に利用されるケーソンとして適した形状といえる。

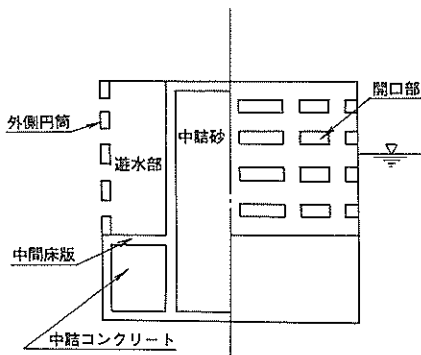
本研究で対象とした開口部がある二重円筒ケーソンも、このような大水深波浪制御構造物の一つとして考案されたものである。このケーソンは二重の円筒から構成され、外側の円筒の上部には波浪制御用の開口部が設けられている。従来型の矩形ケーソンと比べ、少ない表面積で、滑動に対して必要な重量を確保するための容積を

得ることができ、型枠等の材料の節減が十分図れる。また、二重円筒構造とすることで外側と内側の円筒間に遊水部を設けることができ、消波機能の向上が期待できるなど様々な利点がある。

一般的な防波堤の設計では、多くの場合、波圧によって構造断面が決定される。しかし、大水深防波堤では、作用する動水圧が著しく増大するので、この動水圧が構造断面を決める主要な外力となる。現行の設計法では、通常の港湾構造物に作用する動水圧の算定式として、剛な鉛直壁の場合には Westergaard の近似式が、剛な斜面の場合には Zanger の式がそれぞれ用いられている。上部・野田・千葉・檜垣²⁾によれば、矩形ケーソンを用いた混成式の防波堤の場合、ケーソンが大きく応答しない条件のもとでは、ケーソンに作用する動水圧は Westergaard の近似式で算定できるとしている。また、上部・



図一 二重円筒ケーソン堤の概要



図二 二重円筒ケーソンの構造概要

工藤・長田³⁾はマウンドの高さや勾配、天端幅および矩形ケーソンの高さ等を変化させた模型振動実験から、種々の断面形状の混成式防波堤に作用する動水圧を検討している。

一方、円柱構造物に作用する動水圧に関しては橋梁の基礎を対象として、比較的多くの研究がなされている。桜井⁴⁾は比較的細長い円柱が軸に対して直角に並進運動する場合について、たわみ振動も考慮した振動方程式から円柱に作用する動水圧の一般解を求めている。また、後藤・土岐⁵⁾は波動方程式から求めた速度ポテンシャルをオイラーの圧力方程式に代入し、三次元的に動水圧を算定している。しかし、これらの研究は、開口部をもた

ない単一の円筒に関するものであり、ここで対象としたような開口部がある円筒構造物に作用する動水圧についてはこれまで検討例がない。さらに、防波堤として円筒構造物を用いる際には、円筒を連ねた円筒壁に作用する動水圧を算定する必要があるが、その算定法は現行の港湾構造物の設計基準には記述されていない。こうした背景を受けて、本研究では開口部のある二重円筒ケーソンに作用する動水圧の分布と合力を、単一の円筒の場合および円筒壁とした場合について模型振動実験により検討した。

本報告書の内容は以下のとおりである。まず、実験に用いた模型および実験の内容について説明する。次に、開口部のない模型を用いた実験結果として、単一の円筒の場合、円筒壁の場合、および円筒間に間隔を開けて円筒列とした場合を示すとともに、作用する動水圧と理論解との比較を行う。さらに、開口部がある模型を用いた実験について、単一の円筒の場合と円筒壁の場合における動水圧分布および動水圧合力の測定結果を示し、開口率と動水圧の関係について検討を行う。

2. 模型

2.1 二重円筒ケーソンの構造

本報告で対象とした二重円筒ケーソン堤の概要を図-1、図-2に示す。このケーソンは従来の矩形ケーソンと同様の機能を持たせた場合、①必要な容積が効率的に

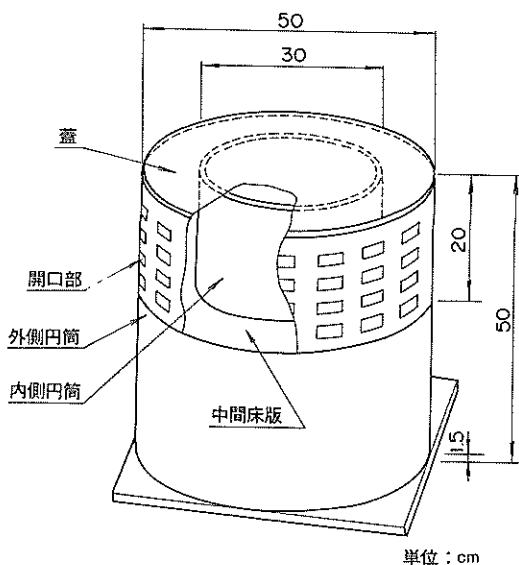


図-3 二重円筒ケーソン模型

得られること、②材料の節減が図れること、③表面積を小さくできること、④透過型、消波型の選択の自由度が大きいこと等の利点があり、大水深域における防波堤構造として極めて有利と考えられている。さらに将来的には、単体として、海洋調査基地や海洋資源採取基地等の巨大コンクリート構造物への適用も可能で、技術開発の発展性は高い。

この構造物は二重の円筒から構成されている。外側円筒は中間床版をはさんで上部と下部に大別され、上部には多くの開口部が開けられており、海水が透過できる構造となっている。この開口部によって波力を緩和し、外側円筒と内側円筒の間にある遊水部分に消波機能を持たせている。開口率は開口部分の面積と外側円筒上部の面積との比であらわされる。一方、外側円筒下部と内側円筒は不透透性で、その内側にはコンクリートや砂が中詰めされている。

2.2 模型

模型は二重円筒ケーソンとして通常考えられる構造断面を想定し、それを模型振動実験として適切な大きさに縮小して作成した。本実験は円筒壁に作用する動水圧の検討を主眼としており、二重円筒ケーソンの構造断面についての詳細な検討はしていない。実験では計測用模型1個とダミー模型2個を使用した。ダミー模型は円筒列、円筒壁の実験を行う際に計測用模型の両側に配した。模型は厚さ10mmの亚克力板を用いて作成し、図-3に

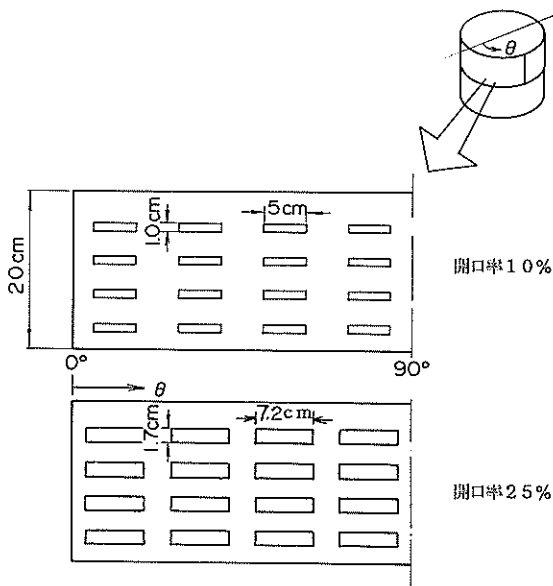


図-4 開口部の形状

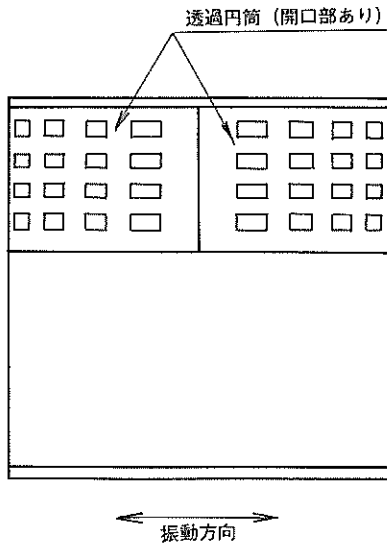


図-5(a) 透過型模型

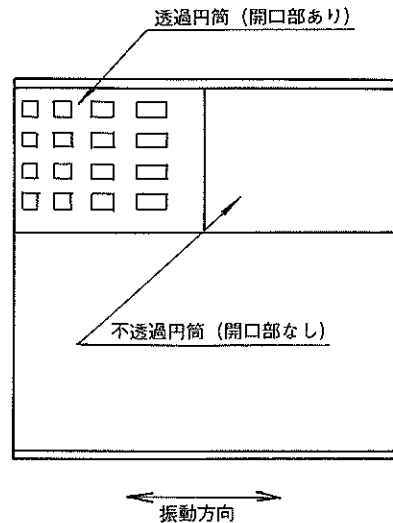


図-5(b) 消波型模型

示すように外側円筒の外径を50cm, 内側円筒の外径を30cm, 高さ50cmとした。円筒の上端には外側円筒と内側円筒をつなぐ蓋があり, 下端には分力計に模型を固定するためのアクリル板がある。

開口部は外側円筒上に模型の天端から下方20cmの範囲に設けた。開口部の形状は矩形とし, 図-4のように, 縦に4個ならべたものをケーソン周囲に均等に16列, 合計64個開けた。開口率はこの部分の面積比で0%, 10%, 25%, 100%とした。なお, ここでいう開口率0%とは開口部がない場合をさし, 開口率100%というのは模型の天端から20cmの範囲の外側の円筒を取り去り, 内側円筒だけとした場合をさす。さらに実験では振動方向に対して, 模型前面の外側円筒の半円部分だけに開口部を設け, 後方の半円部分を開口部のない円筒とした模型についても検討を行った。以後, 前者の模型を透過型, 後者の模型を消波型と呼ぶ(図-5(a), (b))。また, 便宜上, 開口部のない模型を開口率0%の透過型模型として扱う。模型の重量は, 最も重い0%透過型で31.8kgf, 最も軽い100%透過型で26.2kgfである。透過型の模型を4種類(開口率0, 10, 25, 100%), 消波型模型を3種類(開口率10, 25, 100%)の合計7種の模型についての実験を実施した。

3. 模型振動実験

3.1 振動台

本報告書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粘性土層振動試験装置および

水中振動台である。実験では主に粘性土層振動試験装置を使用した。この振動台の駆動方式は動電型で, 広い周波数範囲でひずみの少ない精度よい波形を発生させることができる。表-1にこの振動台の性能諸元を示す。なお, 実験では振動台上に設置する長さ3m×幅3m×高さ1.2mの振動箱の幅方向の中央を壁で仕切り, その片方に模型を設置し, 注水して実験を行った。したがって, 長さ3m×幅1.5m×高さ1.2mの振動箱を用いたことになる。

水中振動台は大水深海洋構造物の模型振動実験用に新たに開発されたものである⁹⁾。この振動台は従来型の振動台と異なり, 可動部分が大きな水槽の底部に位置して

表-1 粘性土層振動試験装置の性能諸元

	粘性土層振動試験装置
振動方向	水平1方向
最大加振力 (tf・G)	18
最大可動部重量 (tf)	40
振動箱内のり (m)	長さ3×幅3×高さ1.2
最大変位 (cm)	±5
最大速度 (cm/s)	25
最大加速度(全載荷時, G)	0.45
振動波形	任意波形
振動数範囲 (Hz)	1~100

表-2 水中振動台の主要諸元

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

いるため、海底地盤が震動する実際の地震の様子を、より忠実に再現できる特徴がある。振動台の駆動方式は電気・油圧サーボ方式で、デジタル制御により高精度の波形を再現できる。振動台の主要諸元を表-2に示す。

3.2 模型振動実験の内容

振動実験では、まず模型の振動特性を調べるために、開口部のない模型を用いて、水のない状態で共振実験を実施し、その後、動水圧測定実験を行った。動水圧測定実験では最初に開口部のない模型を用いた場合を行い、続いて開口部のある模型の実験を実施した。各々の実験内容は大きく分けると次のようである。

(1) 開口部のない場合

- i) 単一の円筒に作用する動水圧の測定
- ii) 円筒列に作用する動水圧の測定
- iii) 円筒壁に作用する動水圧の測定

(2) 開口部のある場合

- i) 単一の円筒に作用する動水圧の測定
(開口率10, 25, 100%)
- ii) 円筒壁に作用する動水圧の測定
(開口率10, 25, 100%)

ここで、単一の円筒に作用する動水圧の測定実験とは、計測用模型だけを水槽中央に設置した場合をさし、円筒壁とは計測用模型の両側に2個のダミー模型を配し、円筒を連ねた状態とした場合をさす。また、開口部のない模型を用いた実験では、円筒列に作用する動水圧の実験も実施した。これは単一の円筒と円筒壁の中間的な場合として、計測用模型とダミー模型の間に隙間を開け、この間隔と作用する動水圧の関係を調べる実験である。開口部のある場合の実験では各開口率

の透過型と消波型の模型について検討を行った。

3.3 計測項目

実験では模型に作用する動水圧と、模型の応答加速度を計測した。動水圧の測定は模型表面に設置した小型水圧計を用いた。この計測結果から模型表面の動水圧分布の把握および作用する動水圧の合力の推定を行うこととした。しかし、開口部がある場合にはこの部分での水圧計による計測が難しいので、動水圧合力の推定が困難となる。そこで、模型に作用する動水圧の合力を測定することとし、4個の分力計上に模型を固定して、分力計により動水圧合力の計測を行った。なお、この場合についても、開口部以外の部分には小型水圧計を配して、動水圧分布の測定を実施した。本実験で用いた加速度計、水圧計、分力計の規格を表-3に示す。

開口部のない円筒ケーソン模型の水圧計、加速度計、分力計の取り付け位置を図-6(a)に示す。模型は円筒形のため、振動方向に対し前後、左右に対称である。そこで水圧計の設置範囲を振動方向から片側90°の外側円筒表面とし、深さ方向に6個ずつ並べたものを3列配置し

表-3 使用計測器一覧

使用機器名	形式	容量	数量
加速度計	UA-2G	2 G	2
加速度計	ASW-2A	2 G	2
加速度計	AS-2C	2 G	2
小型間隙水圧計	P306AV-02	0.2kgf/cm ²	18
防水型2分力検出器	LMC-2505-150	150kgf	4

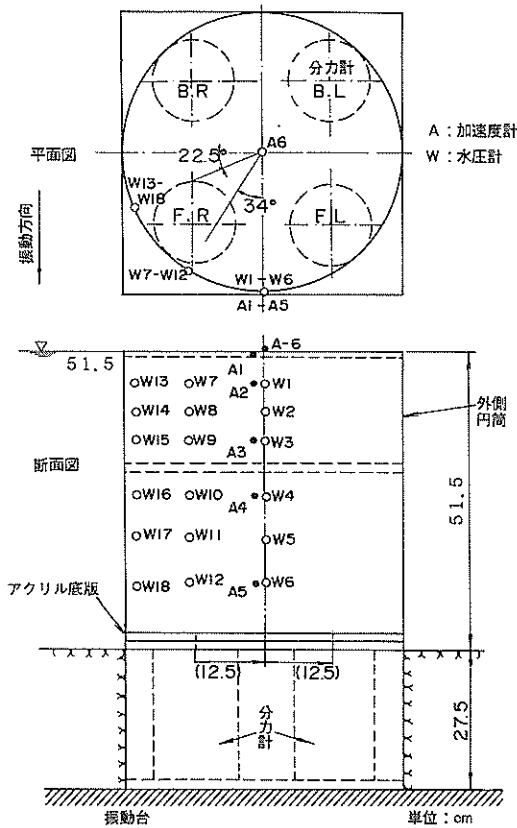


図-6(a) 計測器取付け状況 (開口部なし)

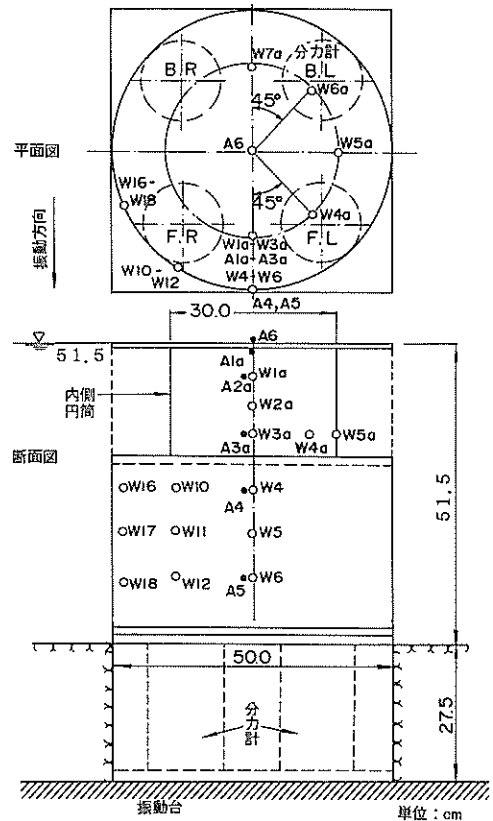


図-6(b) 計測器取付け状況 (開口部あり)

た。それぞれの深さ方向の列の、振動方向からの角度は 0° 、 34° 、 67.5° である。模型に設置する加速度計は合計6個用意し、5個を振動方向から 0° の位置に深さ方向一列に並べ、外側円筒の内側に固定し；残りの1個を模型の天端中央に固定した。

開口部のある円筒ケーソン模型の計測器の取り付け位置を図-6(b)に示す。水圧計の設置位置は、下部の不透過部分では開口部のない場合と同様であるが、開口部分については内側円筒に設置することとした。振動方向から 0° の位置で深さ方向に3個とし、最下端の位置では円周方向に 45° ピッチで4個配置した。加速度計は水圧計と同様の位置の内側円筒の内面に固定した。なお、消波型模型の実験では、外側円筒の水圧計を設置した側に開口部のある半円部分がくるようにした。

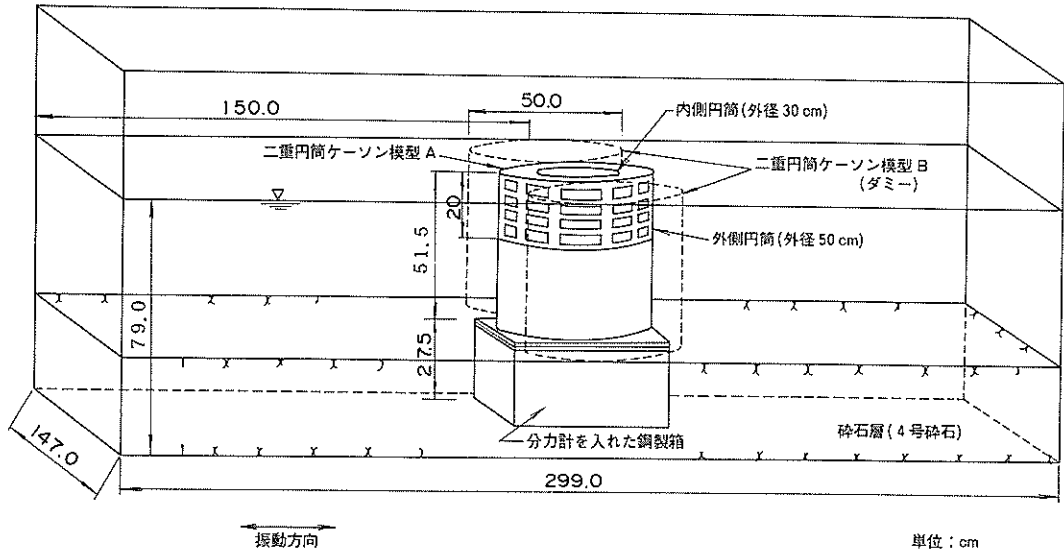
3.4 模型の設置

図-7に水槽内の模型の設置状況を示す。分力計は鋼製の収納箱の中に固定し、その上に計測用の模型を設置した。分力計収納箱の両側は碎石を投入して二重円筒ケーソン模型の下端が水底となるようにした。ダミー模

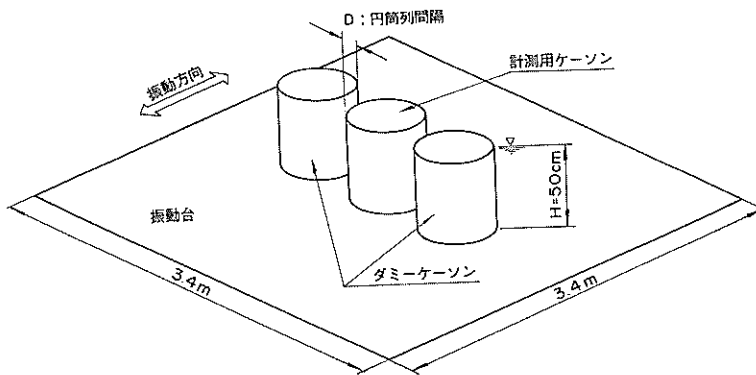
型は碎石上に設置した鋼板の上に接着し、さらに上からアームで固定して、加振中のダミー模型のぐらつきがないように注意した。なお、分力計を用いた一連の実験では、計測用模型だけが分力計に支持される必要があったため、計測用模型と分力計収納箱間および、計測用模型とダミー模型間にわずかの隙間を開け、両者が接触しないようにした。このため、模型に作用する動水圧が幾分小さくなることが予想されたが、分力計を用いた実験は、開口率と動水圧合力の変化の関係を調べるのが目的であり、得られた結果からこのことに関する検討は可能であると考えた。

実験では以上のような分力計を用いた設置条件の他に、碎石、分力計等の影響を排除した動水圧分布の測定を行うために、二重円筒ケーソン模型を直接水槽の底面に固定した条件の実験も実施した。

一方、開口部のない模型の円筒列の実験では水中振動台を使用した。図-8のように各模型を水中振動台上に固定して、所定の高さまで水を入れて実験を行った。なお、振動箱を用いた実験と水中振動台を用いた実験の比



図一七 模型の設置状況



図一八 円筒列模型の設置状況

較検討のために、開口部のない単一円筒の場合および円筒筒壁の場合についても、水中振動台を使用した実験を行った。

3.5 加振条件、測定記録の処理方法

振動台への入力波形としては正弦波を用いた。最初に行った共振実験では最大振幅100Gal、波数が10波の正弦波を1 Hz から50Hz まで1 Hz 間隔で順次入力した。動水圧測定実験で用いた正弦波は振動数が5 Hz で、波数は3 波または10 波とした。入力加速度は50、100、

200Gal の3 種とした。計測方法としては、各センサーからの信号を増幅器を通し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0.002sec とした。水圧計の実験記録には高周波数のノイズが乗っていたため、45Hz のローパスフィルターを通した波形を解析した。また、実験中は電磁オシログラフを用いて波形をモニターした。表一4 に以上の実験条件をまとめて示す。

表-4 実験内容一覧

(1)共振実験

	透過型
	0% (開口部なし)
単一円筒 (水なし)	A - c
入力加速度	100Gal
測定項目	応答加速度

[注]

設置条件

- A : 粘性土層振動試験装置使用 (分力計使用の場合、および直接振動台上に固定した場合の両方実施)
- B : 水中振動台使用 (直接台上に固定した場合のみ実施)

入力波形

- a : 正弦波 5 Hz 10波
- b : 3波
- c : 正弦波 1 ~ 50Hz 各10波

(2)動水圧測定実験

	透過型				消波型		
	0% (開口部なし)	10%	25%	100%	10%	25%	100%
単一円筒	A - a B - b	A - a	A - a	A - a	A - a	A - a	A - a
円筒列 間隔: 0.5cm 間隔: 4.0cm	B - b B - b	-	-	-	-	-	-
円筒壁	A - a B - b	A - a	A - a	A - a	A - a	A - a	A - a
入力加速度	50, 100, 200Gal						
測定項目	応答加速度, 動水圧						

4. 模型振動実験結果

4.1 最大加速度の分布

(1) 共振実験結果

共振実験の加速度波形の一例として、分力計がある場合の5 Hz および18Hz (共振点付近) の時刻歴を図-9に示す。これらの時刻歴から振動台上の加速度計A0を入力とし、模型天端の加速度計A6を出力とした伝達関数を求め、共振実験の結果をまとめた。なお、伝達関数は次式で求めた。

$$A(f) = Z_{yx}(f) / P_x(f) \dots\dots\dots (1)$$

$$Z_{yx}(f) = \sqrt{P_{yy}^2(f) + Q_{yx}^2(f)} \dots\dots\dots (2)$$

- ここに、 $A(f)$: 周波数伝達関数
- $Z_{yx}(f)$: クロススペクトルの絶対値
- $P_x(f)$: 入力のパワースペクトル
- $P_{yy}(f)$: コスペクトル
- $Q_{yx}(f)$: クオドラチャスペクトル

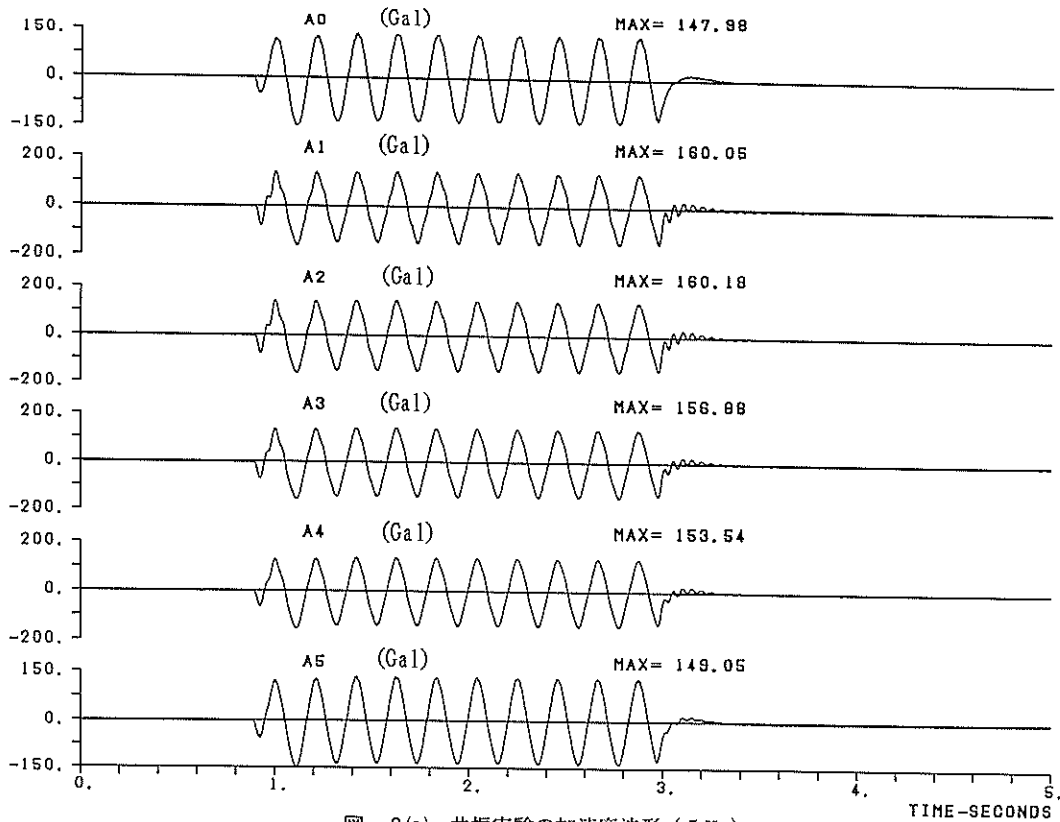


図-9(a) 共振実験の加速度波形 (5 Hz)

図-10(a), (b)は模型を直接に振動箱底面に固定した場合と、分力計をつけた場合の共振実験の結果を示す。振動箱底面に固定した場合、および分力計がある場合の各々の一次共振振動数は36Hzおよび18Hz付近で、動水圧の測定実験の入力正弦波に用いた5 Hzでは、模型はほぼ剛体運動をしていると判断される。ただし、水中の実験では水の付加質量によって、共振振動数が低下するため、予備実験として模型の応答加速度の鉛直分布がほぼ一様であることを確認した後、動水圧測定実験を行った。

(2) 動水圧測定実験結果

動水圧測定実験の加速度波形の一例を図-11に示す。各加速度の最大値を読み取り、その鉛直分布を求めた。この鉛直分布の一例として、入力加速度200Galのときの開口部のない模型および開口率10%の透過型、消波型模型の測定結果を、単一円筒の場合と円筒壁の場合について図-12~図-14に示す。

このうち図-12(a)~(c)は模型を水槽に固定した場合の結果を示しているが、いずれも高さ方向に加速度の増幅はなく、ほぼ一様に振動している様子がわかる。図-13は分力計をつけて、水のない状態で加振した結果を示している。A1 ~ A5の値はほとんど等しく、

先ほどの共振実験の結果と同様である。一方、図-14(a)~(c)は水がある状態についての結果を表しているが、この場合、A1の最大加速度はA5よりやや大きい値となっている。この傾向は単一の円筒に比べ円筒壁としたときがやや強く、また、透過型、消波型、開口部なしの順で増加している。しかし、最も差が大きかった場合でも、A1とA5の比は1.1程度で、分力計がある場合についてもケーソン模型はほぼ剛体として振動しているものと考えられる。

4. 2 二重円筒ケーソン模型に作用する動水圧の分布

模型を振動箱底面に直接固定した実験結果から、二重円筒ケーソン模型に作用する動水圧の分布について検討を行う。図-15に動水圧時刻歴の一例を示す。水圧計測定値は加振にともない波の影響等で波形が乱れやすくなるので、図中に示すように第2半波と第3半波のピークを動水圧測定値 p として採用した。また、前述したように動水圧測定実験において模型はほぼ一様に振動していると考えられるので、以下では模型に設置した加速度計の平均値を模型の応答加速度とした。この応答加速度を重力加速度で除した値を震度 k とし、この k で各動水圧の測定値 p を除した値を用いて実験結果をまとめた。

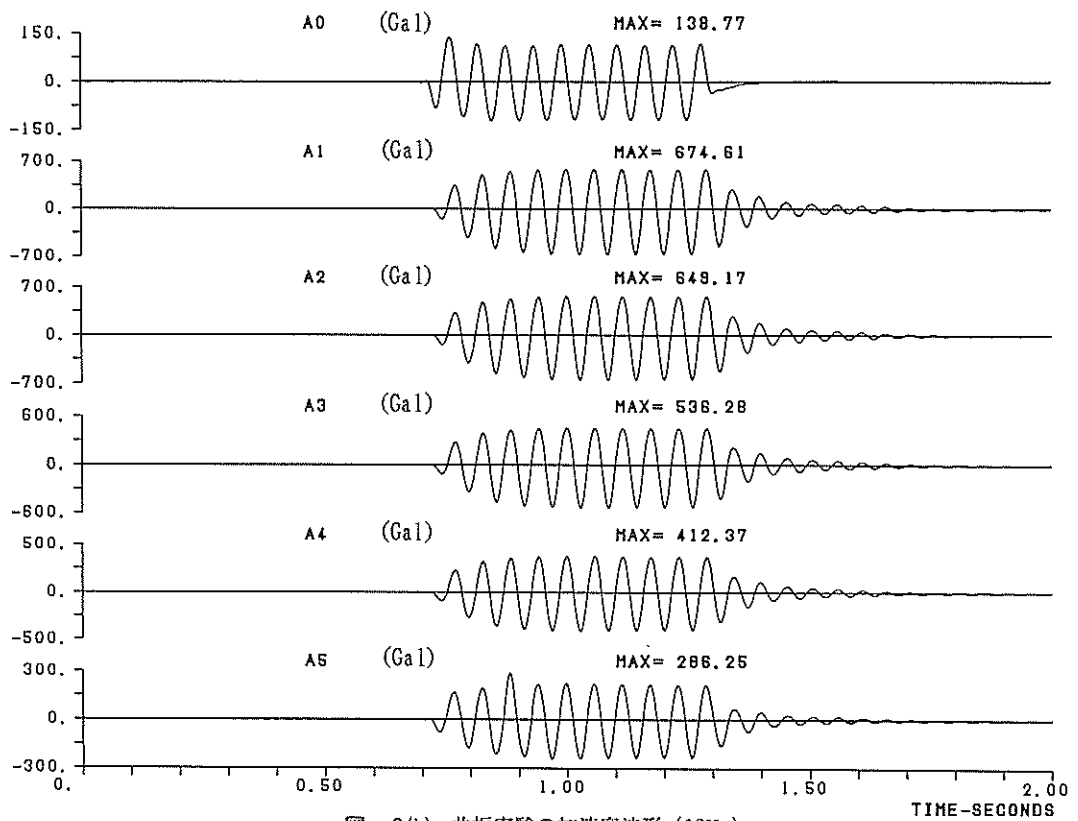


図-9(b) 共振実験の加速度波形 (18Hz)

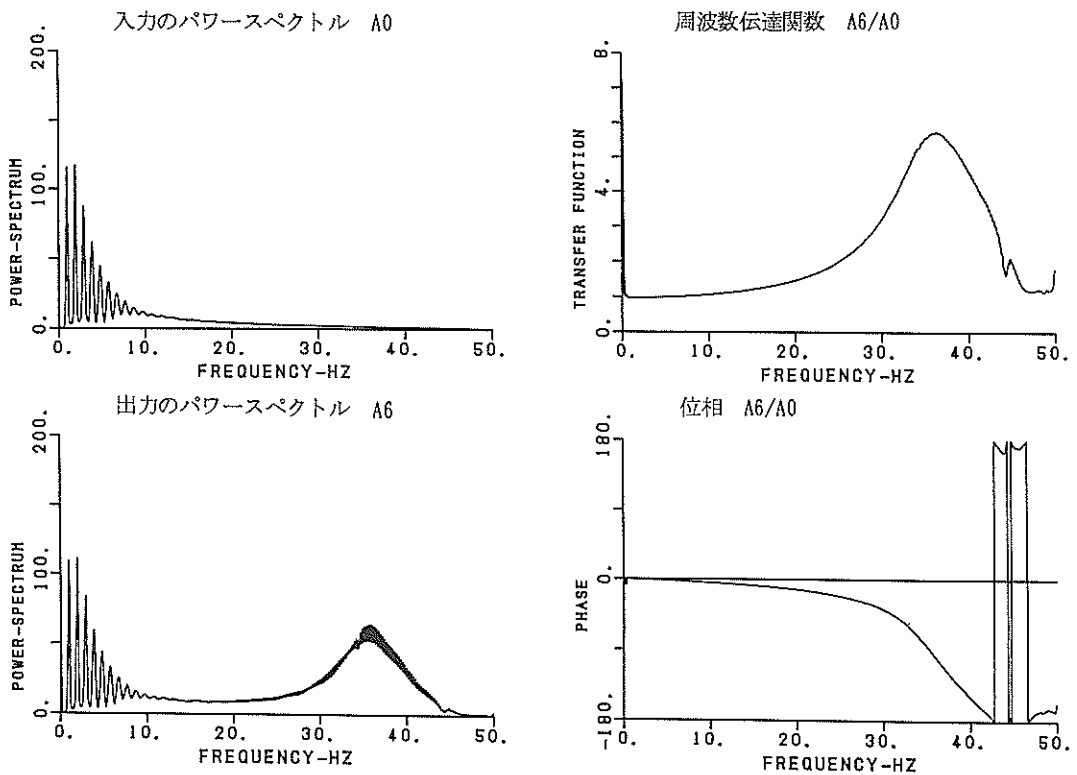


図-10(a) 共振実験結果 (振動箱底面に直接固定した場合)

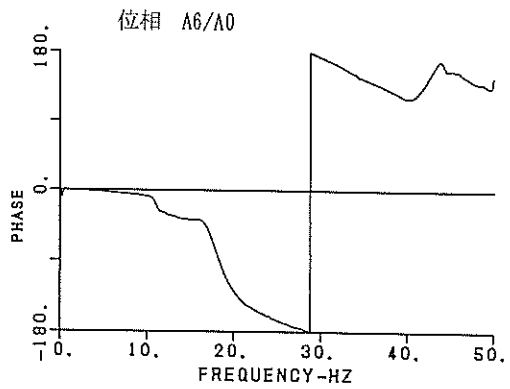
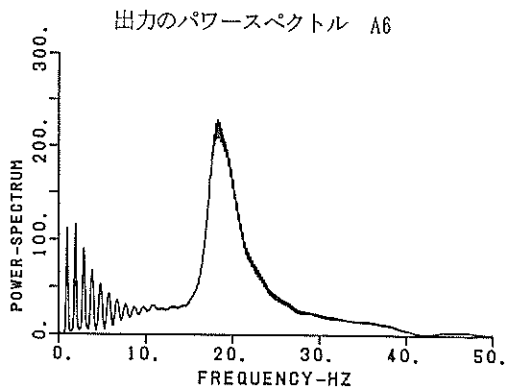
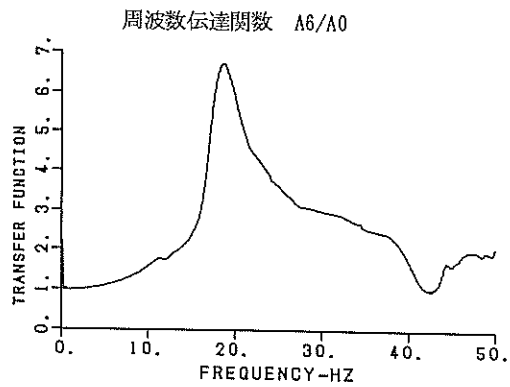
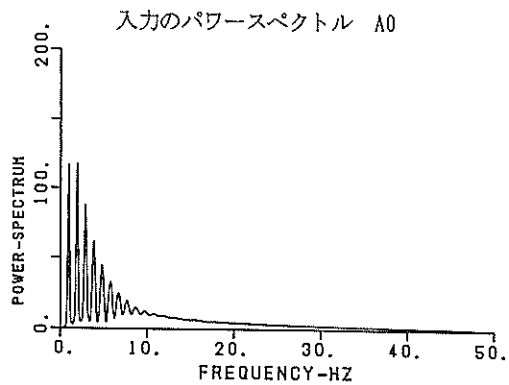


図-10(b) 共振実験結果 (分力計がある場合)

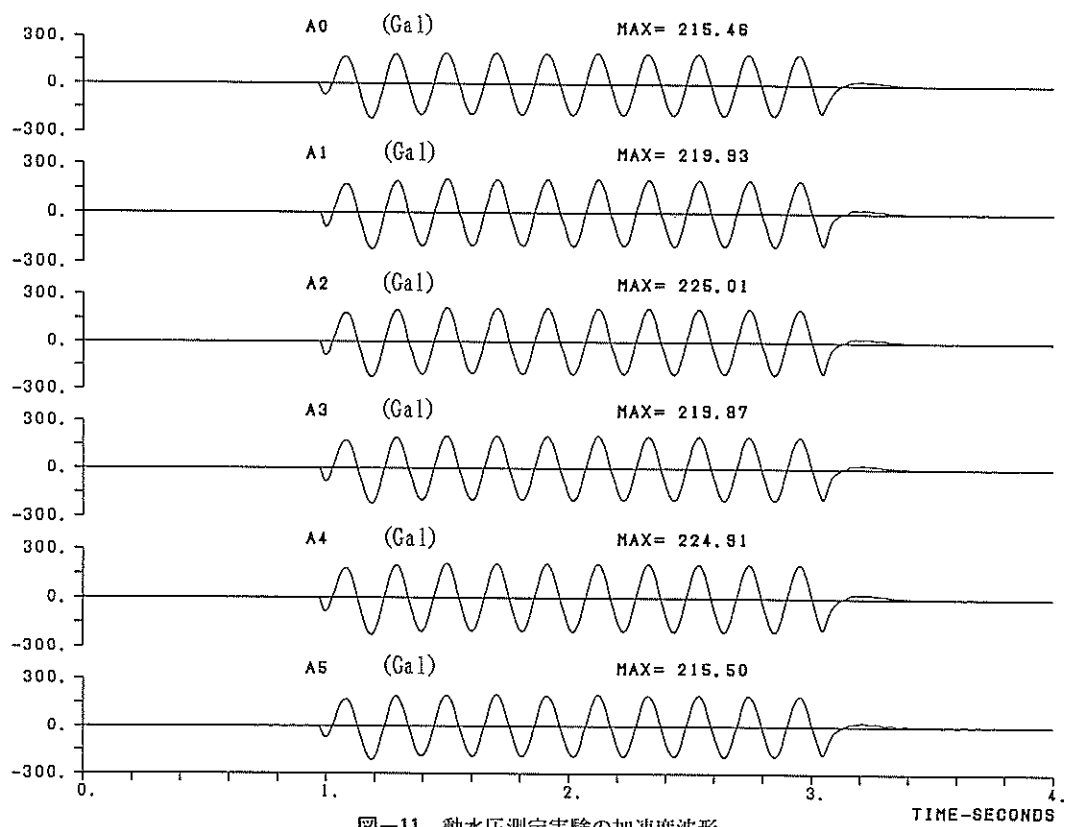


図-11 動水圧測定実験の加速度波形

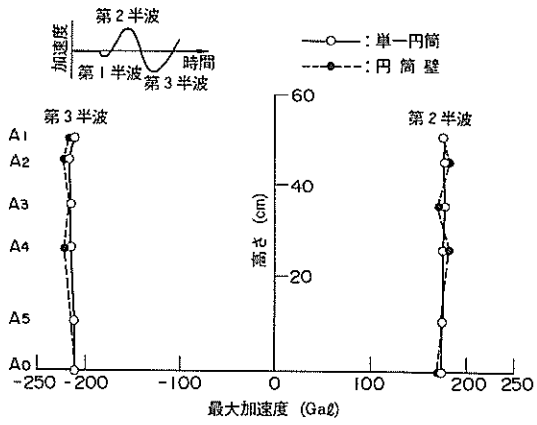


図-12(a) 最大加速度の鉛直分布
(0%, 直接固定, 水あり)

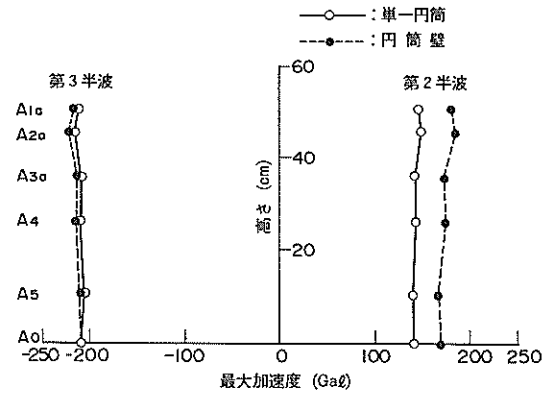


図-12(b) 最大加速度の鉛直分布
(10%透過型, 直接固定, 水あり)

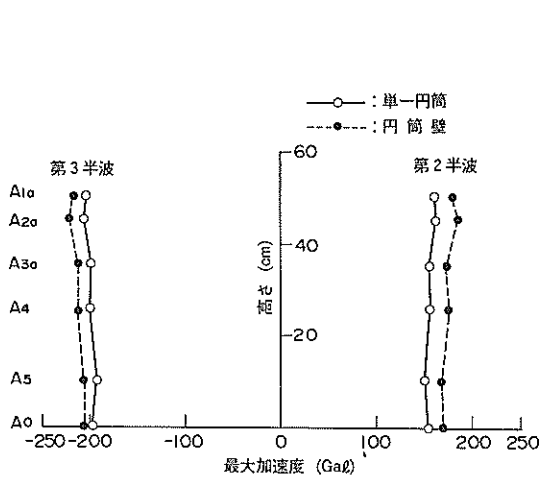


図-12(c) 最大加速度の鉛直分布
(10%消波型, 直接固定, 水あり)

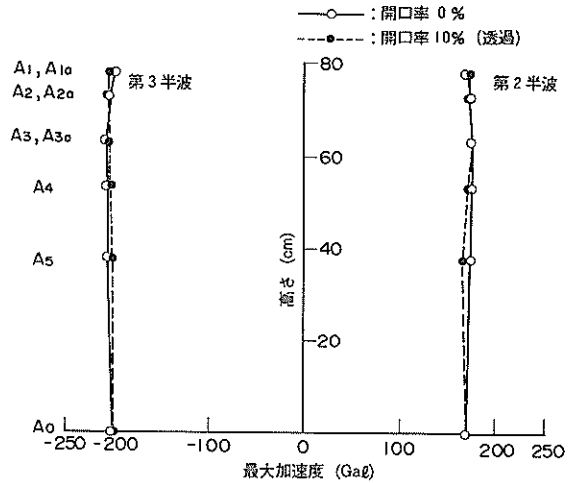


図-13 最大加速度の鉛直分布 (分力計あり, 水なし)

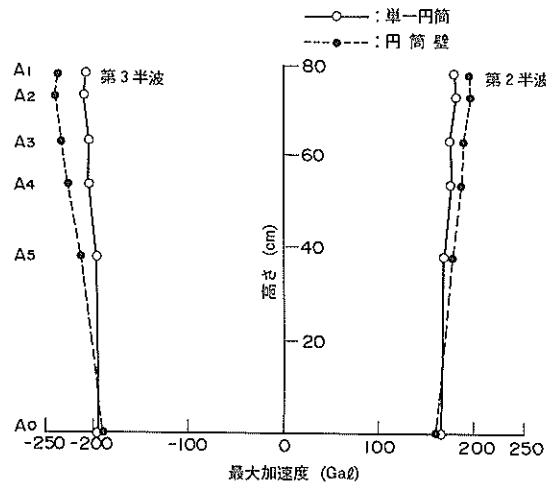


図-14(a) 最大加速度の鉛直分布
(0%, 分力計あり, 水あり)

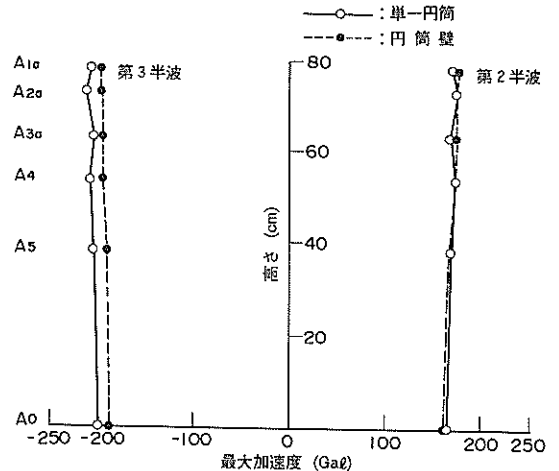


図-14(b) 最大加速度の鉛直分布
(10%透過型, 分力計あり, 水あり)

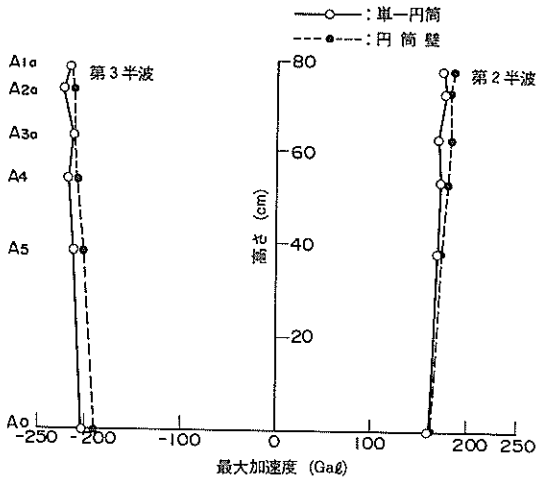


図-14(c) 最大加速度の鉛直分布
(10%消波型, 分力計あり, 水あり)

入力加速度と動水圧の関係の一例として、図-16(a), (b)に開口率10%の透過型および消波型模型での測定結果を示す。なお、図中の直線は各水圧計の p/k の平均値を示している。外側円筒上での動水圧測定値 (W6, W18) はほぼ直線上に乗っており、各入力加速度における p/k の値はほぼ一定である。また、内側円筒上での動水圧 (W3a, W4a) も、外側円筒に比べて、やや平均値周りに分散しているが、加速度に対して線形的に増加していると考えられる。この傾向は他の実験結果においても同様に見られた。そこで、以後の検討では p/k の平均値を使用することとした。

(1) 開口部のない場合の動水圧の分布

図-17(a)-(d)は円筒壁とした場合、円筒列とした場合および単一円筒の場合の、模型に作用する動水圧の測定値の深さ方向の分布状況を示している。図-17(a)~(c)に示すように円筒壁の状態から模型間隔が大

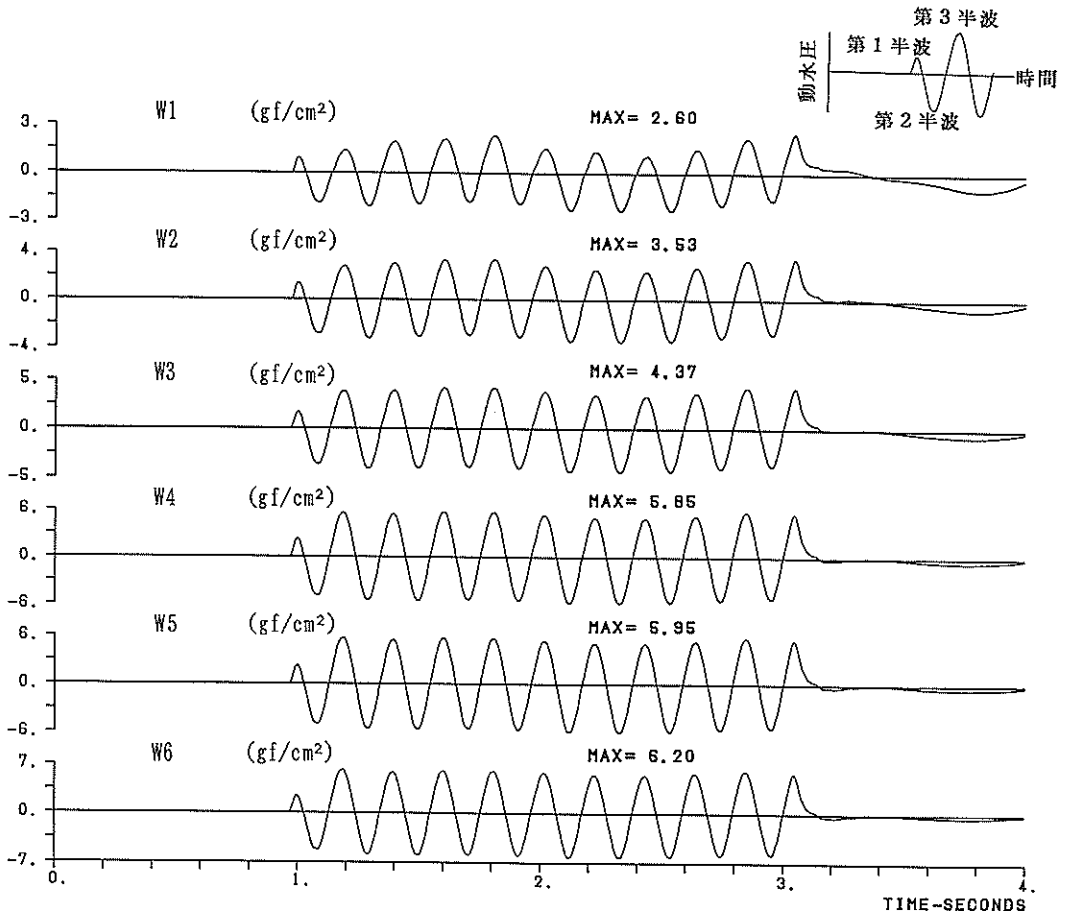


図-15 動水圧時刻歴波形の一例 (0%, 円筒壁)

きくなるにしたがって、動水圧の値が小さくなっている様子がわかる。その減少の割合は、振動方向からの角度が 0° の位置が最も小さく、角度が増加するほどに大きくなっている。

また、図-17(d)に示す単一の円筒では、振動方向からの角度が増加するに従って動水圧の値が低下しているのに対し、図-17(a)に示す円筒壁では逆に増加の傾向がみられる。これらを明確に示したのが図-18で、高さ17cm位置における動水圧の円周方向の分布を表している。この結果から、円筒壁とした場合、各円筒の接点部分に動水圧が集中しやすく、ここに隙間を開けることで、かなり圧力の集中が緩和されることがわかる。

(2) 動水圧の鉛直分布形状の比較

振動方向からの角度と動水圧の鉛直分布形状の変化の様子を検討する。各列の水圧計の測定値のうち最上

および最下位置の測定値を除いた中4つの値の平均値を各々算出し、これを各列の平均測定値 \bar{p} とする。この値と各列のそれぞれの水圧計測定値との比をもとめ、図-19(a)~(d)に示す。各図とも振動方向からの角度の増加にともなって、分布形状の傾きが緩やかになっているが、その差はそれほど顕著でない。また、Westergaardの理論式⁷⁾の分布形状と比較してみると、0cm,0.5cm,4.0cm間隔の場合にはかなり類似しているのに対し、図-19(d)に示す単一の円筒の場合にはWestergaardの分布形よりやや傾きが急である。この相異を明らかにするために、円筒間の間隔の増加にともなう動水圧の鉛直分布の変化の様子を、振動方向につけた水圧計について示すと図-20のようになる。0cm,0.5cm,4.0cm間隔およびWestergaardの分布についてはほとんど差がないが、単一円筒は傾きがやや急となっている。

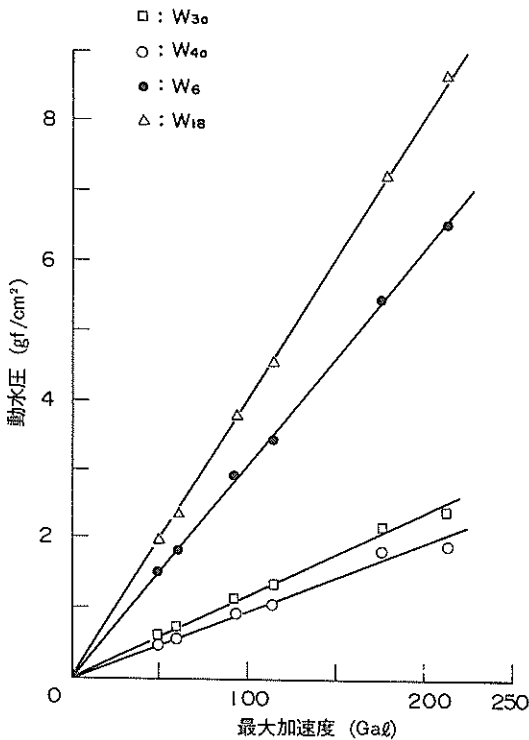


図-16(a) 入力加速度と動水圧の関係
(10%透過型, 円筒壁)

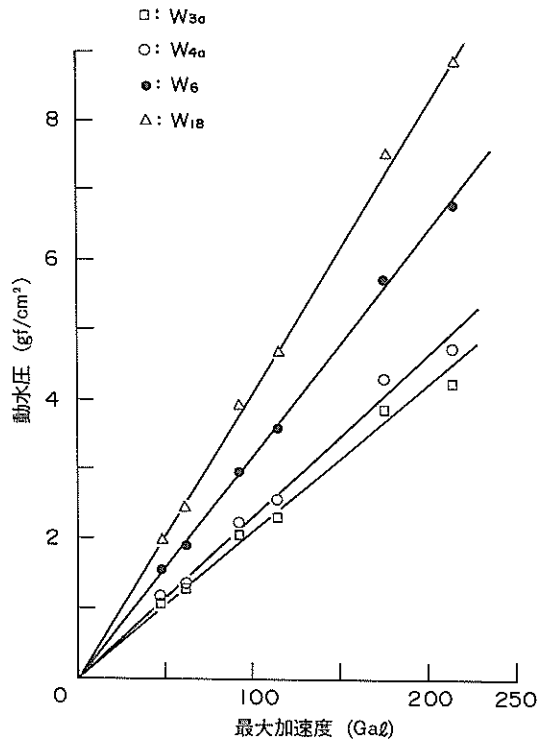


図-16(b) 入力加速度と動水圧の関係
(10%消波型, 円筒壁)

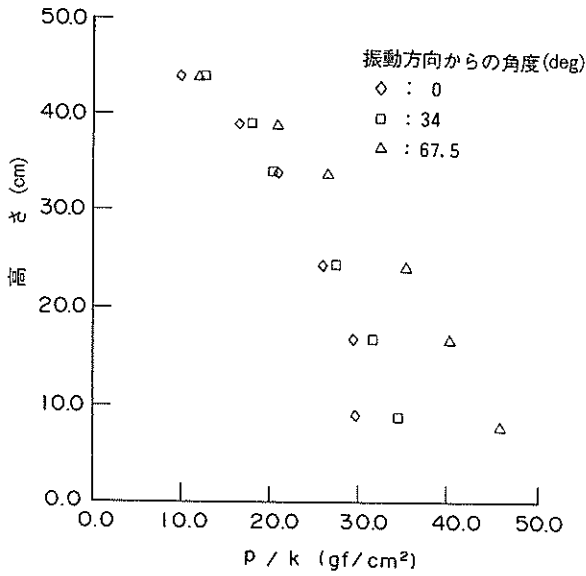


図-17(a) 動水圧の鉛直分布 (0%, 円筒壁)

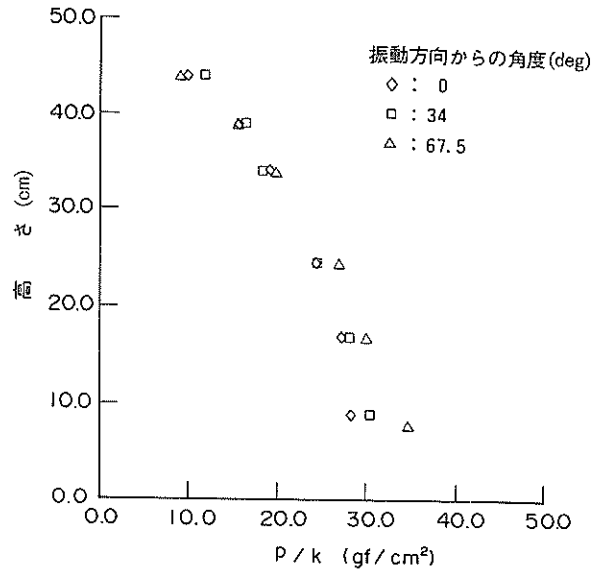


図-17(b) 動水圧の鉛直分布 (0%, 円筒列 (0.5cm))

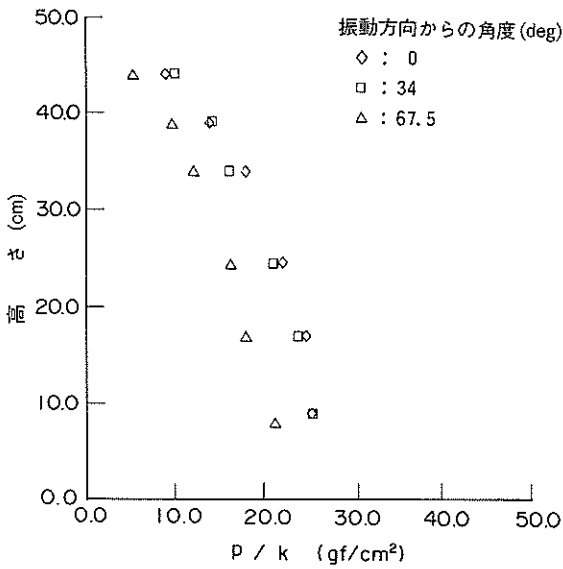


図-17(c) 動水圧の鉛直分布 (0%, 円筒列 (4.0cm))

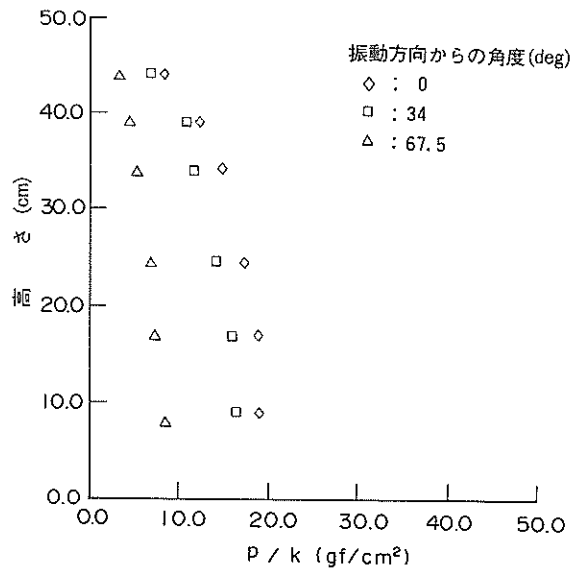


図-17(d) 動水圧の鉛直分布 (0%, 単一円筒)

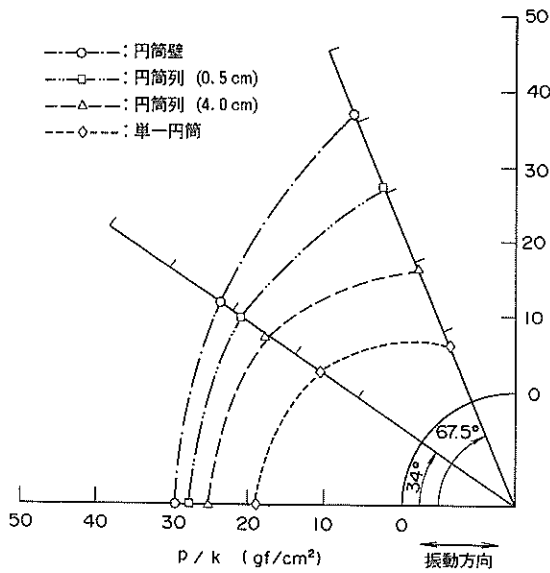


図-18 円周方向の動水圧分布 (0%, 高さ17cm)

以上の結果から、単一の円筒と円筒壁では作用する動水圧の深さ方向の分布形状がやや異っており、円筒壁では剛な鉛直壁の場合と同様になることがわかる。

(3) 動水圧合力の近似

実験で得られた計測値は模型の円筒表面に垂直な動水圧であるので、これより模型に作用する動水圧の振動方向成分を近似的に算定し、この値の鉛直方向の分布を求めた。近似の方法の概要を図-21に示す。まず、図-21(a)のように水面の動水圧を0とし、この点と各水圧計測定値を6次曲線で結ぶ。水底の動水圧は模型の最下端の水圧計の測定値とし、この間は一定と仮定した。次に図-21(b)のように動水圧の分布曲線を鉛直方向に N 等分して、ある高さの位置で切った各断面の面積を求める。ここでは振動方向から 90° 位置での動水圧の値を0とし、この点と各角度の位置の動水圧の値にその位置の角度の余弦を掛けた値を3次曲線で結びこれを円筒方向に積分した(図-21(c))。模型は振動方向に対して前後、左右に対称であるから、各面

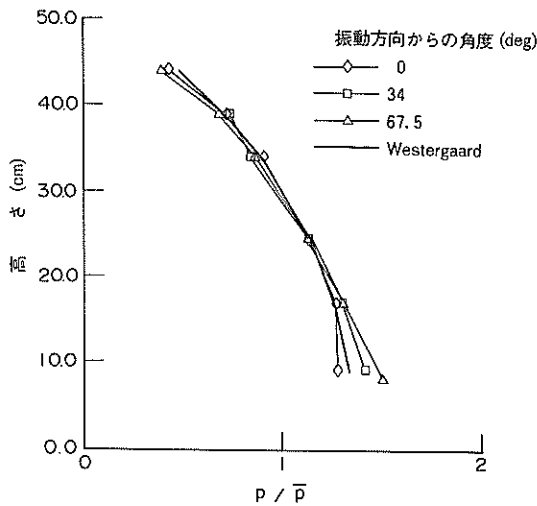


図-19(a) 動水圧の鉛直分布形状の比較 (0%, 円筒壁)

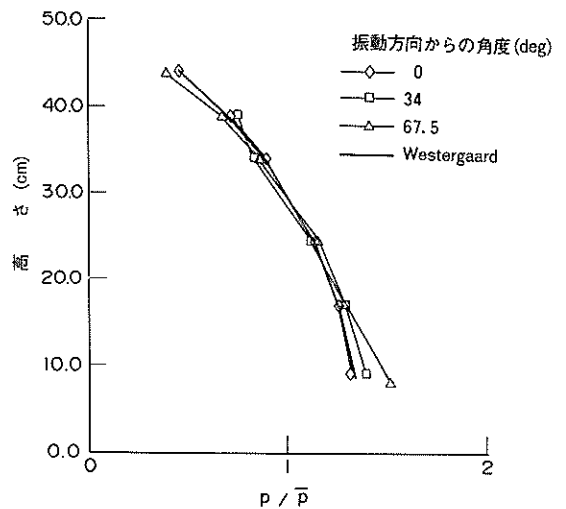


図-19(b) 動水圧の鉛直分布形状の比較 (0%, 円筒列 (0.5cm))

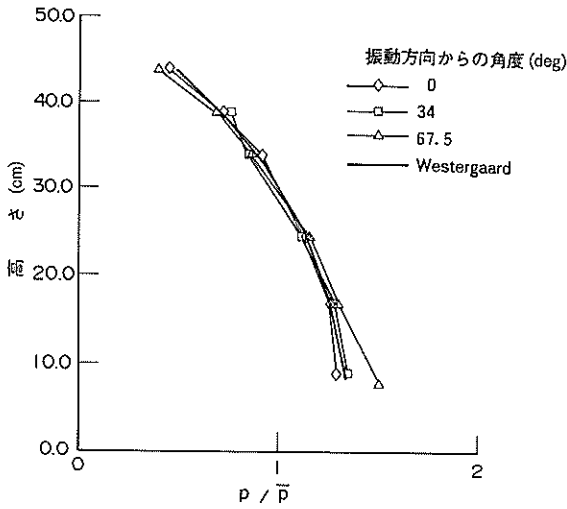


図-19(c) 動水圧の鉛直分布形状の比較
(0%, 円筒列 (4.0cm))

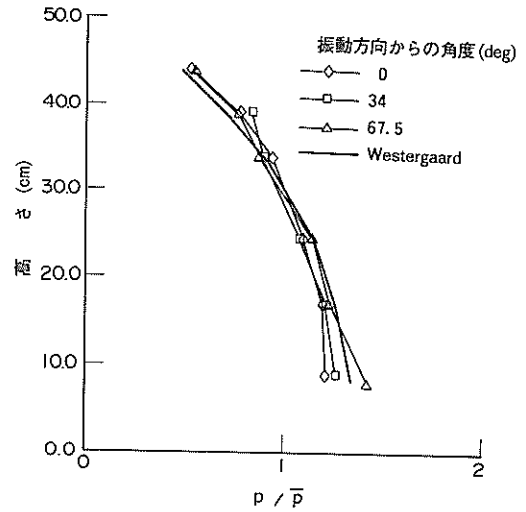


図-19(d) 動水圧の鉛直分布形状の比較
(0%, 単一円筒)

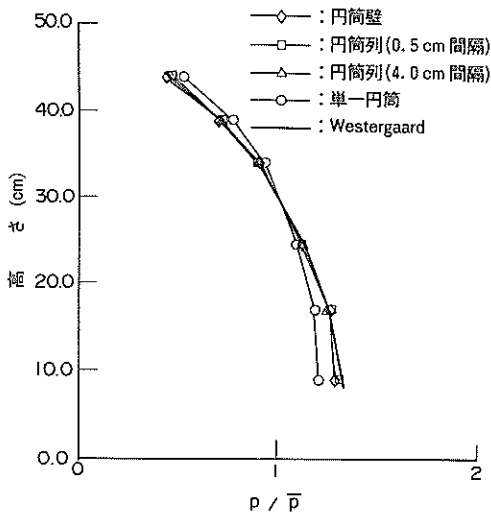


図-20 設置状況による動水圧形状の比較
(0%, $\theta = 0^\circ$)

積を4倍して、その高さにおける動水圧の合力 P を求め、図-21(d)のように直線で結んだ。

図-22には $N=50$ のときの結果と後藤・土岐の式による分布および Westergaard の理論式による動水圧分布を示す。なお、この Westergaard の値については模型の前面と後面を考慮する必要があるので、外側円筒の直径と等しい幅50cmに作用する動水圧の合力を2倍したものを用いた。単一の円筒面に作用する動水圧については後藤・土岐の分布と非常に良い一致を示しているのがわかる。また、円筒壁に作用する動水圧の分布形については、ほぼ Westergaard の分布に一致しており、開口部のない円筒壁に作用する動水圧は Westergaard の理論式で表すことができると考える。模型間を開けた場合の動水圧の値は、円筒壁と単一円筒の中間的な結果となっているが、模型直径のわずか1% (0.5cm) および8% (4.0cm) に相当

$p(h, \theta)$: 深さ h , 振動方向からの角度 θ の位置の動水圧

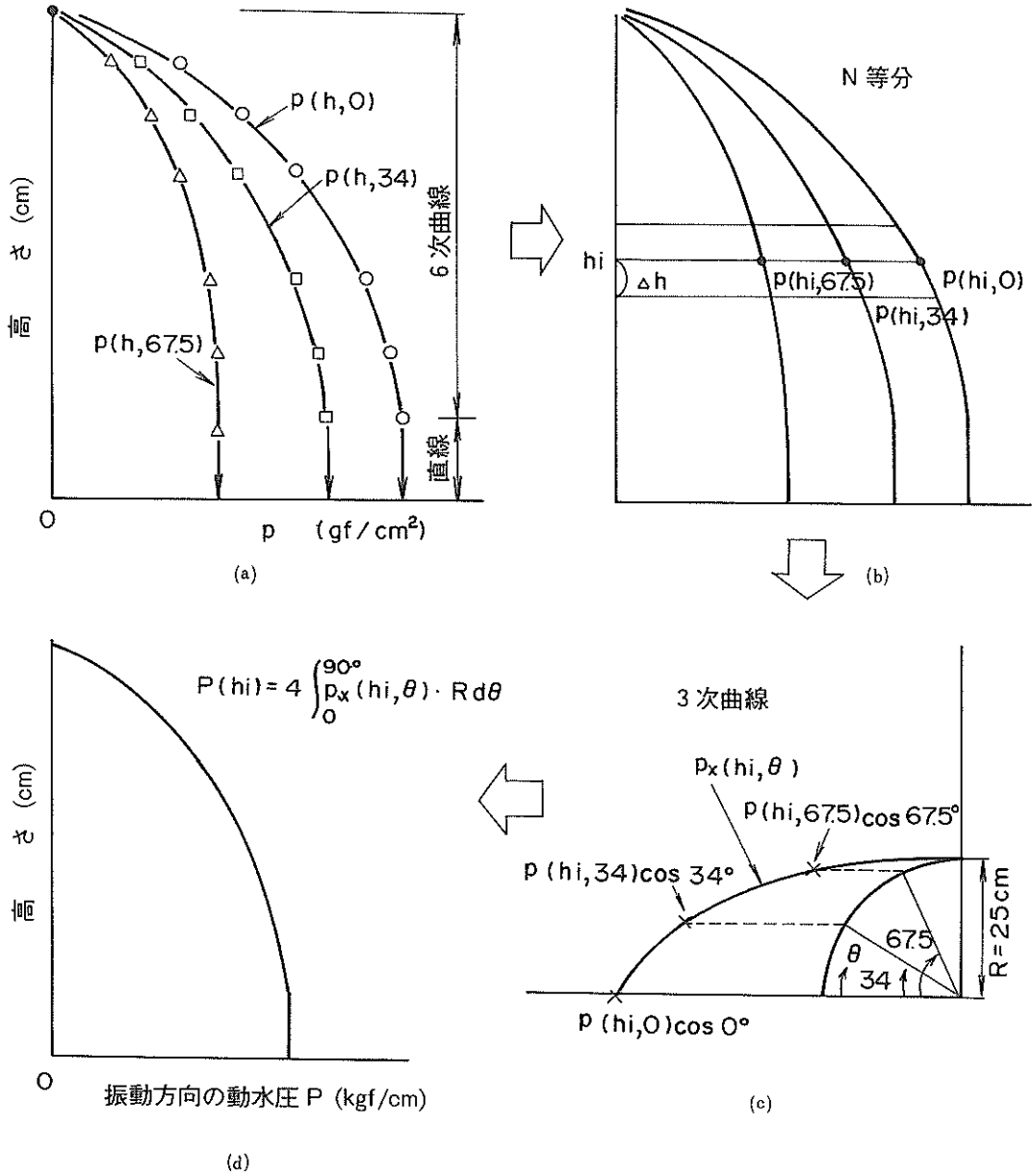


図-21 近似方法の概要

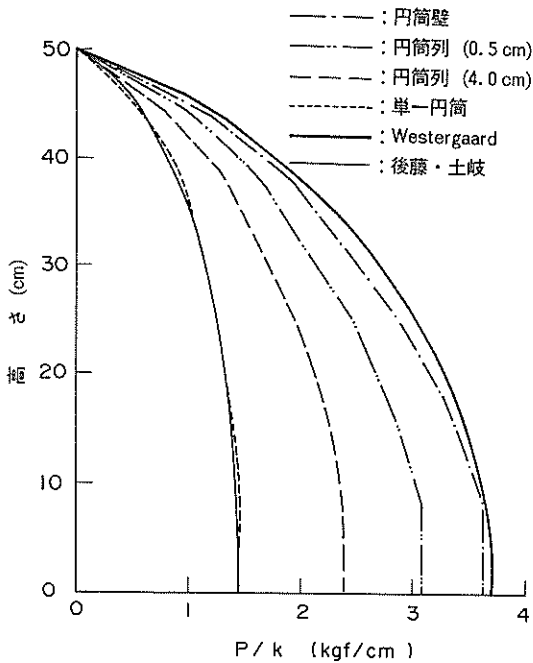


図-22 動水圧合力の鉛直分布

する隙間を設けるだけで、動水圧が大きく減少する様子が見えてくる。

各高さの動水圧合力に高さ方向の分割幅をかけ、高さ方向に足し合わせることで、円筒全体に作用する動水圧合力を算定した。円筒壁に作用する動水圧の合力を1として、各条件の動水圧合力を表すと表-5のよ

うになる。動水圧合力は直径の8%の隙間で67%程度に減少し、単一の円筒では43%となっている。

(4) 開口部のある場合の動水圧の分布

図-23(a)は各開口率の単一の円筒について、振動方向から0°の位置における動水圧の深さ方向の分布を示している。なお、ここで示す水深20cmまでの動水圧は内側円筒に取り付けた水圧計による測定値である。また、参考のために開口率0%の測定結果についても図中に示した。開口率が大きくなるにしたがって内側円筒の水圧計 W1a ~ W3a の値は増加しているが、内側円筒より下の部分の外側円筒に設置された水圧計 W4 ~ W6 の値は小さくなっている。さらに、水圧計 W4 ~ W6 の測定値の開口率の増加による減少程度は開口部との境に近い位置ほど大きくなる傾向が認められる。円筒壁の場合を図-23(b)に示すが、水圧計 W4 ~ W6 の測定値がかなり大きくなるものの、単一の円筒と同じ傾向にあるといえる。この現象は、外側の円筒では、開口部を設けることで円筒の上部に作用する動水圧がかなり小さくなり、この影響を下部の動水圧が受けた結果と思われる。また、内側の円筒では、開口率の増加にともなって遊水部分の水と外側の水が一体として挙動する傾向が増し、動水圧が増加したと見ることができる。

図-23(c), (d)に示す消波型の場合では、透過型に比べ内側の円筒に作用する動水圧の各開口率間の差が小さくなり、円筒壁ではあまり差がなくなっている。また、下部の外側円筒についても開口率にともなう減少の程度は透過型より小さくなっているが、傾向として

表-5 動水圧合力の比較

	測定値				理論値	
	円筒壁	円筒列		単一円筒	Westergaard	後藤・土岐
		0.5cm	4.0cm			
動水圧合力 (kgf)	133.1	113.6	89.5	57.3	138.6	55.8
割合	1	0.853	0.672	0.431	1.04	0.419

は同じと考えられる。消波型の場合、開口部のない外側円筒の影響で開口部がある外側円筒表面での動水圧が透過型に比べると大きくなると推定される。しかし、開口率が0%の場合よりは小さく、この結果、下部の動水圧も開口率が0%の場合よりやや小さくなるものと思われる。

図-24(a), (b)は高さ26cm位置での外側円筒の円周方向の動水圧分布を透過型、消波型の場合について示している。34°, 67.5°位置における動水圧が開口率にもなって減少している様子は0°の位置における動水圧の場合と同じである。また、消波型とした場合には透過型と比べ各開口率間の動水圧の差が小さく

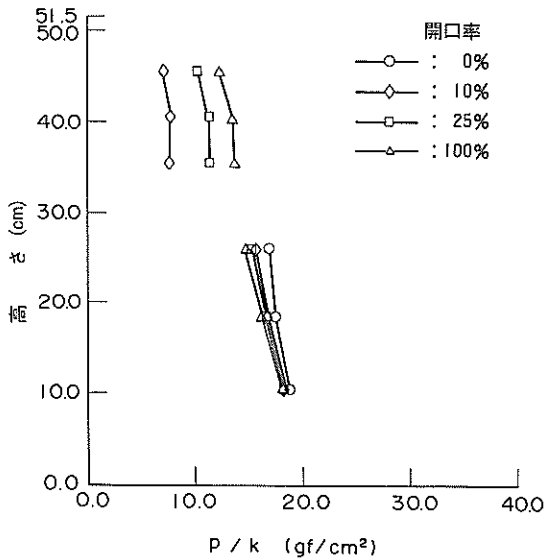


図-23(a) 各開口率の動水圧分布
(透過型, 単一円筒, $\theta = 0^\circ$)

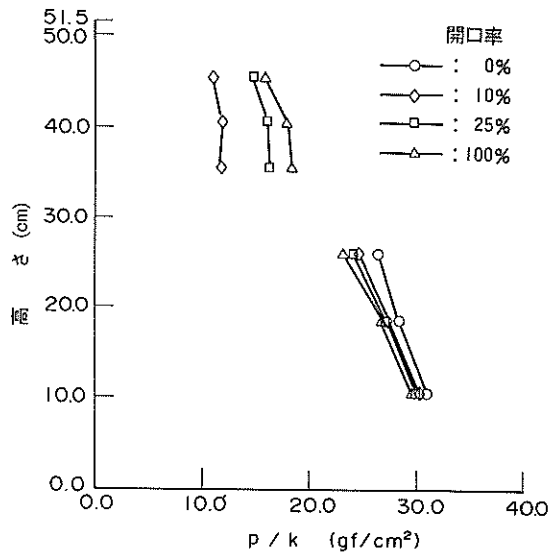


図-23(b) 各開口率の動水圧分布
(透過型, 円筒壁, $\theta = 0^\circ$)

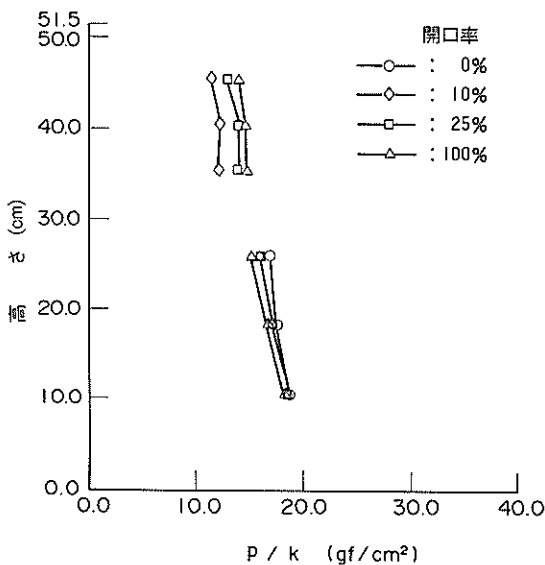


図-23(c) 各開口率の動水圧分布
(消波型, 単一円筒, $\theta = 0^\circ$)

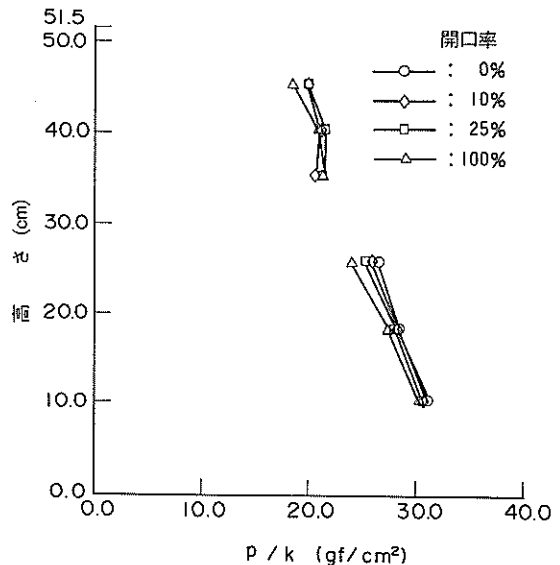


図-23(d) 各開口率の動水圧分布
(消波型, 円筒壁, $\theta = 0^\circ$)

なっている様子が明確になっている。

各開口率における消波型と透過型の動水圧の深さ方向の分布を比較すると図-25(a)~(c)のようになる。なお、この図も振動方向から 0° 位置の列の水圧計の測定値を示している。消波型の方が水圧計の値は大きめであるが、W4~W6についてはその差はわずかである。また、W1a~W3aの動水圧の値は開口率が大き

くなるにしたがって透過型と消波型の差が小さくなっていた。以上の単一の円筒に作用する動水圧の傾向は円筒壁の場合についても同様であった。

次に、内側円筒に作用する動水圧の円周方向の分布をみる。図-26(a), (b)に高さ35.5cm位置の内側円筒に設置した水圧計測定値の時刻歴波形の一例を、透過型および消波型の場合について示す。透過型の場合に

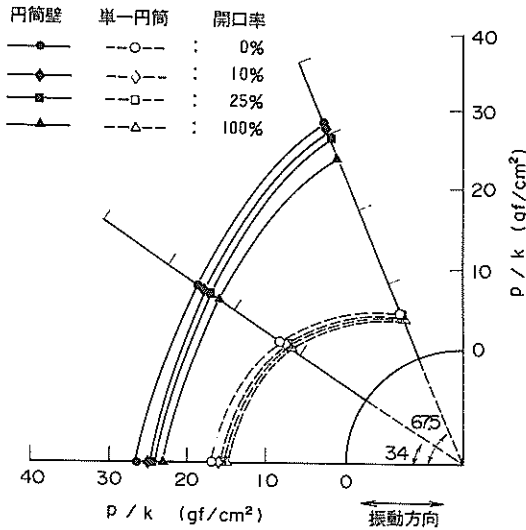


図-24(a) 円周方向の動水圧分布 (透過型, 高さ26cm)

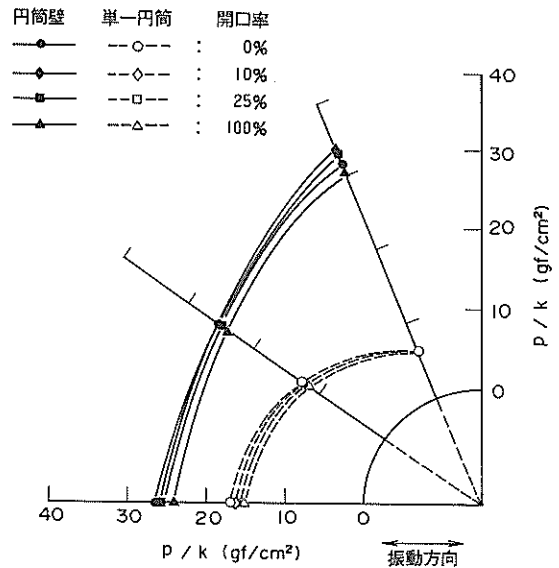


図-24(b) 円周方向の動水圧分布 (消波型, 高さ26cm)

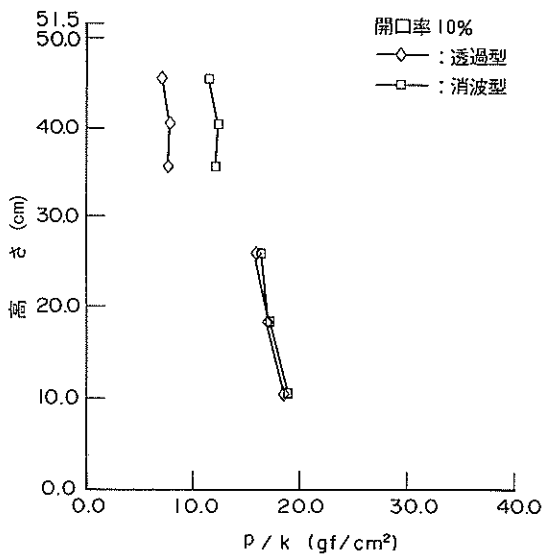


図-25(a) 透過型と消波型の比較
(10%, 単一円筒, $\theta = 0^\circ$)

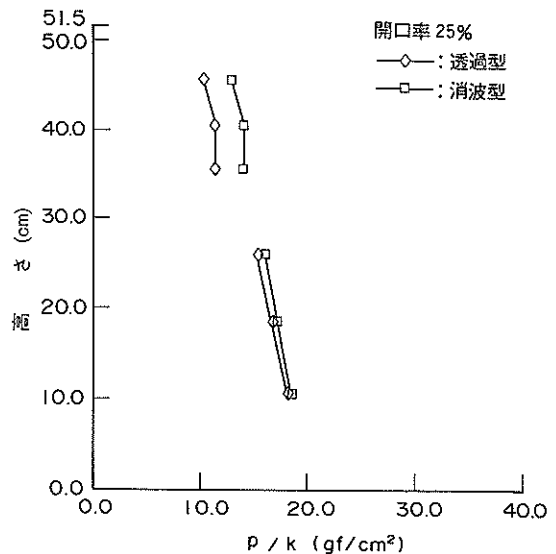


図-25(b) 透過型と消波型の比較
(25%, 単一円筒, $\theta = 0^\circ$)

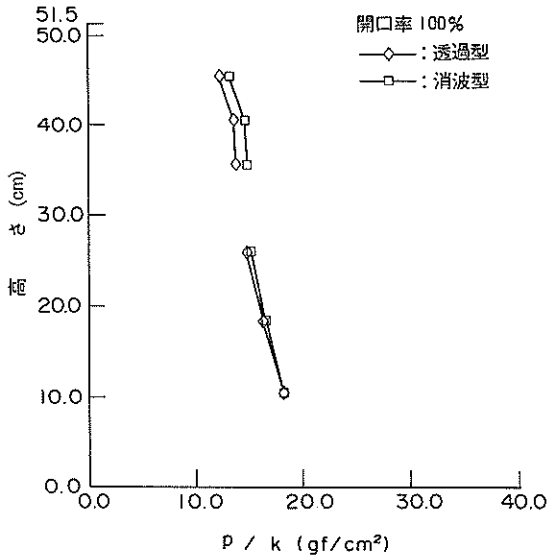


図-25(c) 透過型と消波型の比較
(100%, 単一円筒, $\theta=0^\circ$)

は W5a を境に W4a と W6a, W3a と W7a が対称となっているのに対し、消波型では符号が同じであり、かつ W7a の値が最も大きくなっている。図-27(a)はこの様子を単一円筒の各開口率の場合について表してい

る。透過型の場合には 90° を中心にほぼ対称形をなしており、開口率の増加にしたがってその絶対値が大きくなる傾向にある。これに対し消波型の場合には 0° 位置での動水圧の絶対値が小さく、測定位置の角度とともに増加している。また、開口率との関係を見ると、 0° 位置では開口率100%が最も大きな値を示しているが、 45° を上回る角度の位置では開口率の小さな場合の方が大きな動水圧を示す結果となった。円筒壁でも図-27(b)に示すように測定値の絶対値が大きくなるものの、単一の円筒の場合と同様の傾向がみられた。

4. 3 二重円筒ケーソン模型に作用する動水圧の合力

分力計の測定値から開口率の変化に伴う動水圧合力の相違を検討する。動水圧合力測定実験では分力計および碎石を使用したため、動水圧に対するこれらの影響を検討する必要がある。とくに、直接水槽に固定する場合と比べ、模型の天端と下端とで加速度の差がややあること、分力計上に計測用模型のみを支持するために、分力計収納箱と計測用模型下端の分力計固定板との間、および計測用模型とダミー模型の間に若干の隙間を設けたため、動水圧の分布形が変化することが考えられたので、ここでもまず、分力計を設置したときの各模型の動水圧分布を調べることにした。この結果と模型を直接水槽に固定

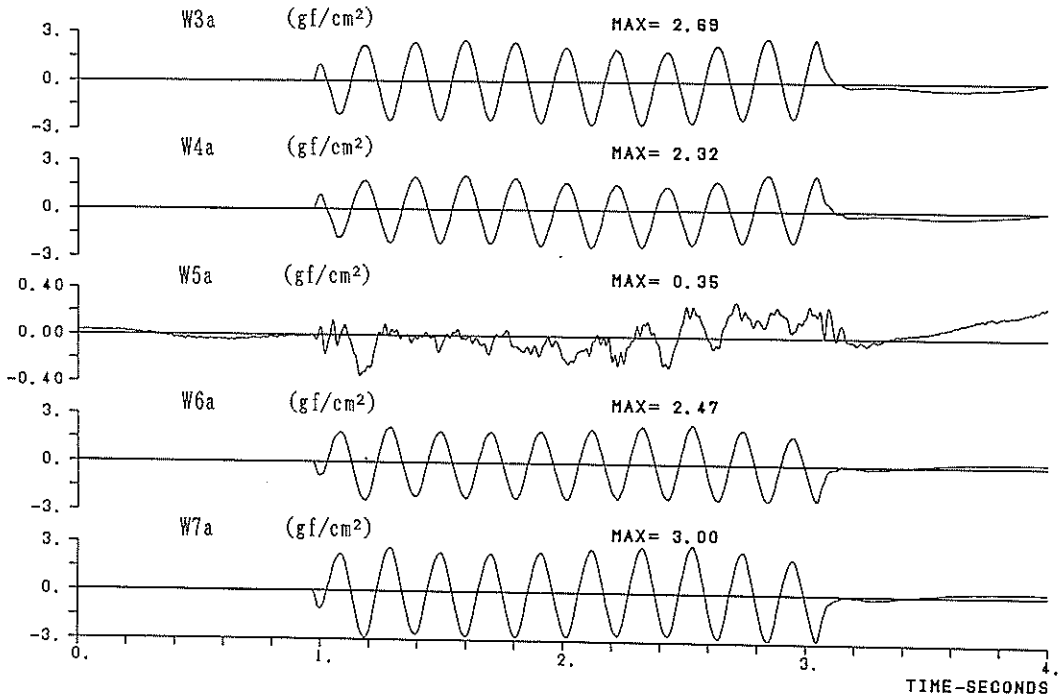
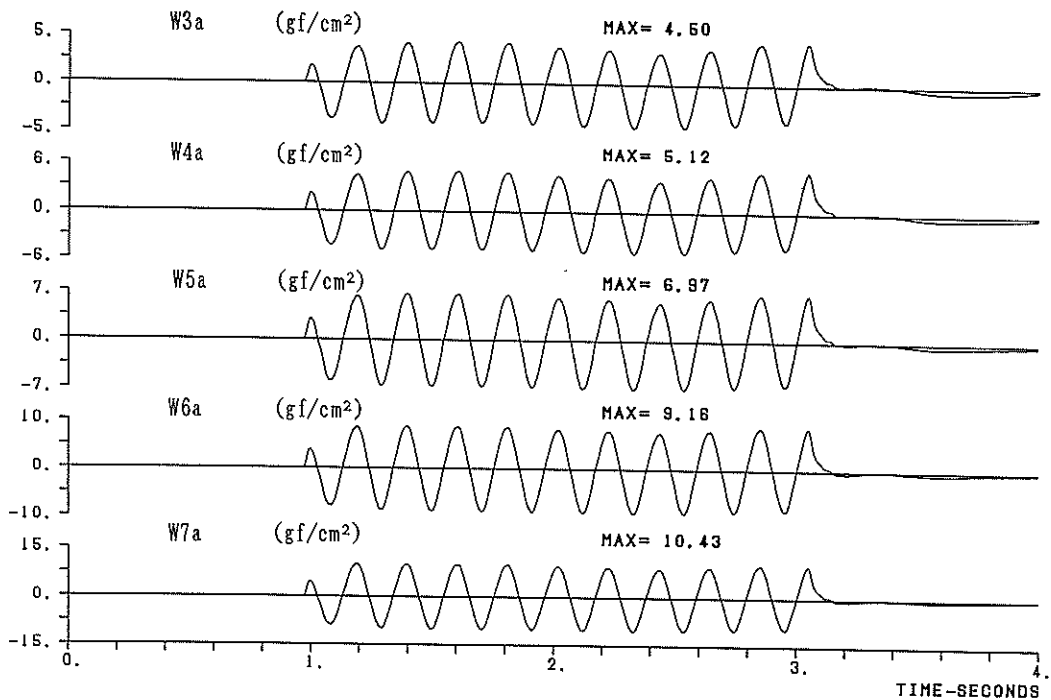
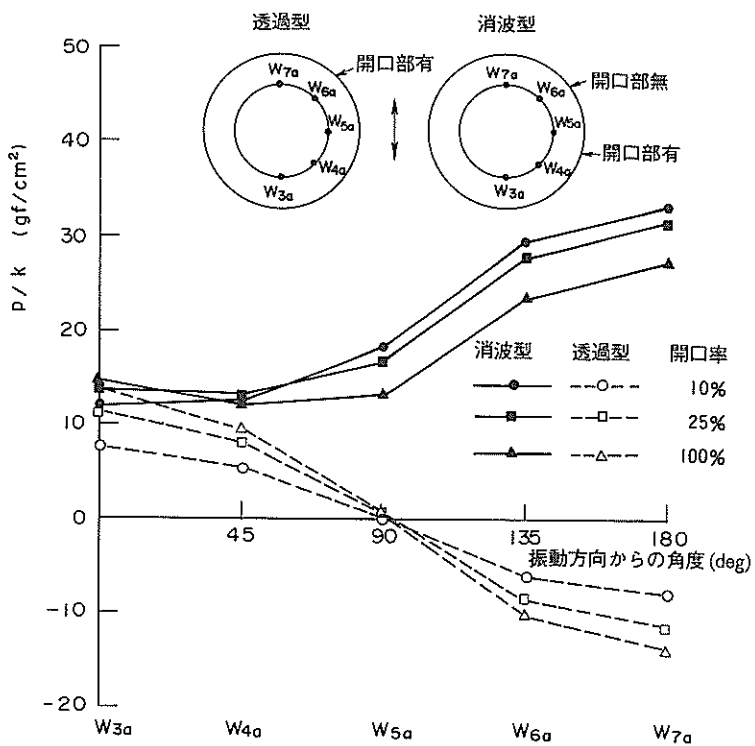


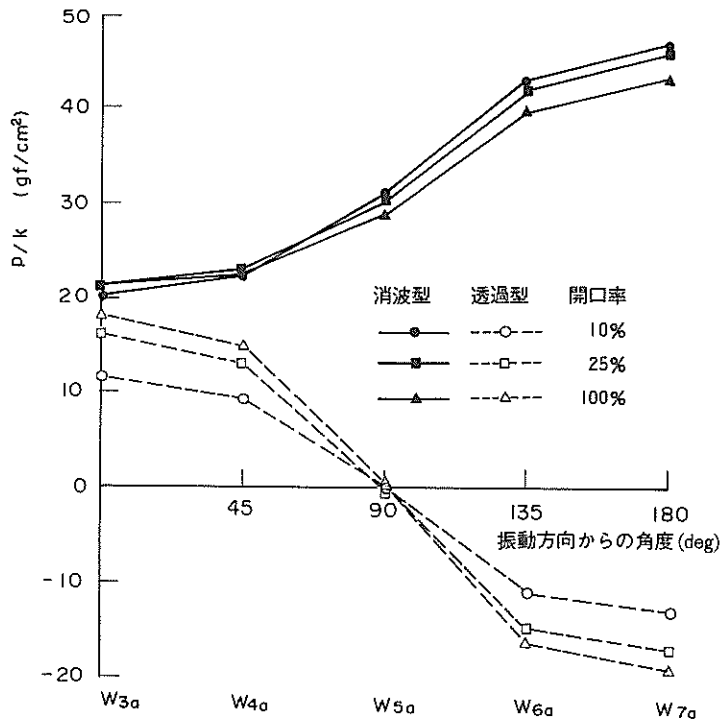
図-26(a) 動水圧時刻歴波形 (10%透過型, 円筒壁, 高さ35.5cm)



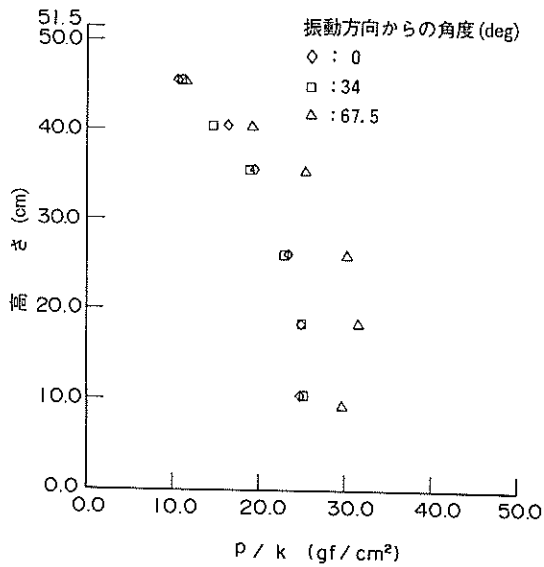
図一26(b) 動水圧時刻歴波形 (10%消波型, 円筒壁, 高さ35.5cm)



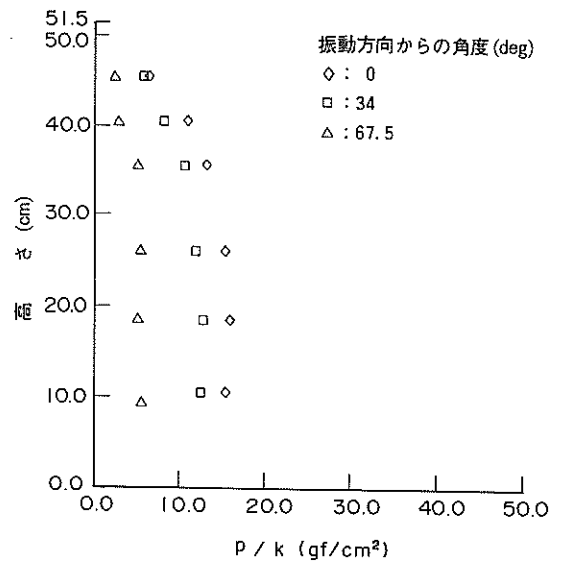
図一27(a) 円周方向の動水圧分布 (単一円筒, 高さ35.5cm)



図一27(b) 円周方向の動水圧分布 (円筒壁, 高さ35.5cm)



図一28(a) 動水圧の鉛直分布 (0%, 円筒壁, 分力計あり)



図一28(b) 動水圧の鉛直分布 (0%, 単一円筒, 分力計あり)

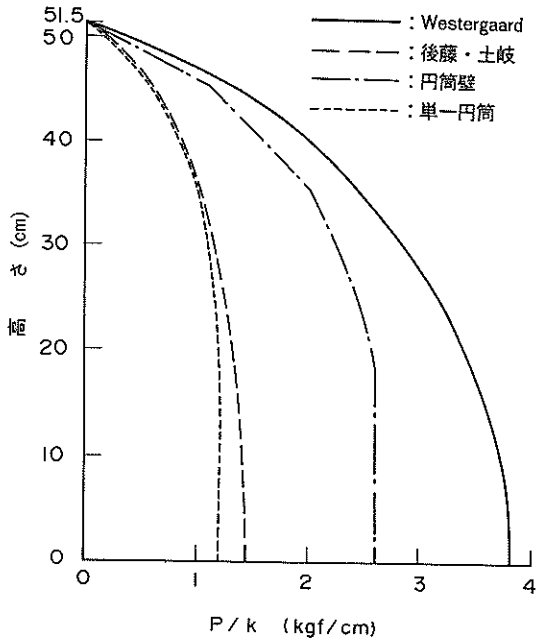


図-29 動水圧合力の鉛直分布 (分力計あり)

した場合とを比較し、その後、動水圧合力の検討を行った。

(1) 動水圧分布

図-28(a), (b)に開口率0%の円筒壁の場合および単一の円筒の場合の動水圧分布を示す。図-17(a), (d)に

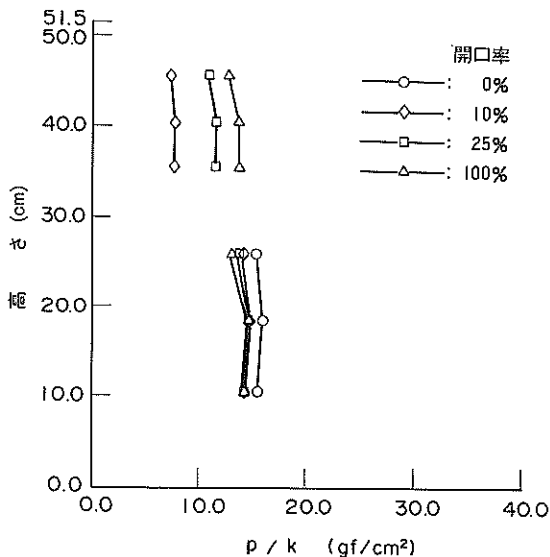


図-30 各開口率の動水圧分布 (単一円筒, 透過型, $\theta = 0^\circ$, 分力計あり)

示す模型を直接固定した場合と比べ、全体的に値が小さくなっており、とくに最下端およびその上の水圧計の減少の程度が大きい。これは、前述のように分力計収納箱と模型との間の隙間の影響と思われる。また、円筒壁の場合にはダミー模型との間隔も影響していると考えられる。分力計のない場合と同様の近似方法を用いて、円筒に作用する動水圧の振動方向成分の鉛直分布を示すと図-29のようになる。後藤・土岐の式(と単一円筒)および Westergaard の式の分布形と円筒壁をそれぞれ比較するといずれも実験値のほうが小さくなっている。さらにこの分布から得られた動水圧合力は、単一の円筒では52.2kgf, 円筒壁では108.9kgfとなり、表-5の結果と比較して、小さめとなっている。なお、これらの値は模型下端部分の動水圧を鉛直に下ろしているため、実際の値より少し大きめに評価しているものと思われる。

次に、開口部のある場合について、動水圧分布の比較を行う。図-30は透過型の場合について、振動方向から 0° 位置における動水圧の深さ方向の分布を示している。開口率が大きくなるにしたがって、W4 ~ W6の値は小さくなり、その程度は開口部に近いほど大きいこと、およびW1a ~ W3aの値が増加していることは図-23に示した直接固定した場合と同様である。消波型の場合についても増加および減少の程度は小さいが同様の傾向がみられた。図-31は開口率10%の場合について消波型と透過型の動水圧の深さ方向分布を示して

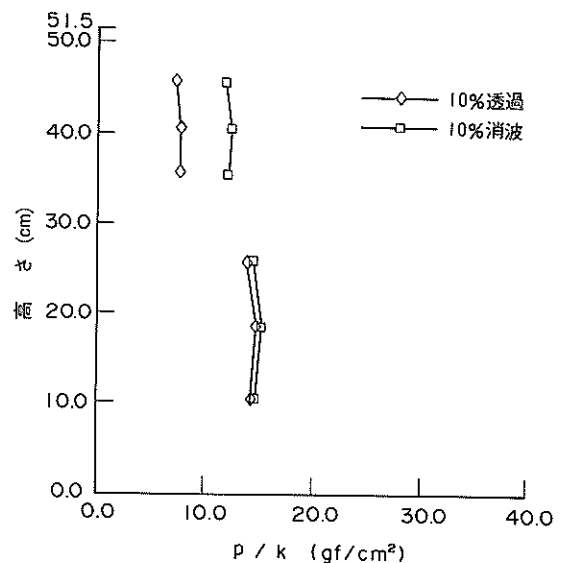


図-31 透過型と消波型の比較 (10%, 単一円筒, $\theta = 0^\circ$, 分力計あり)

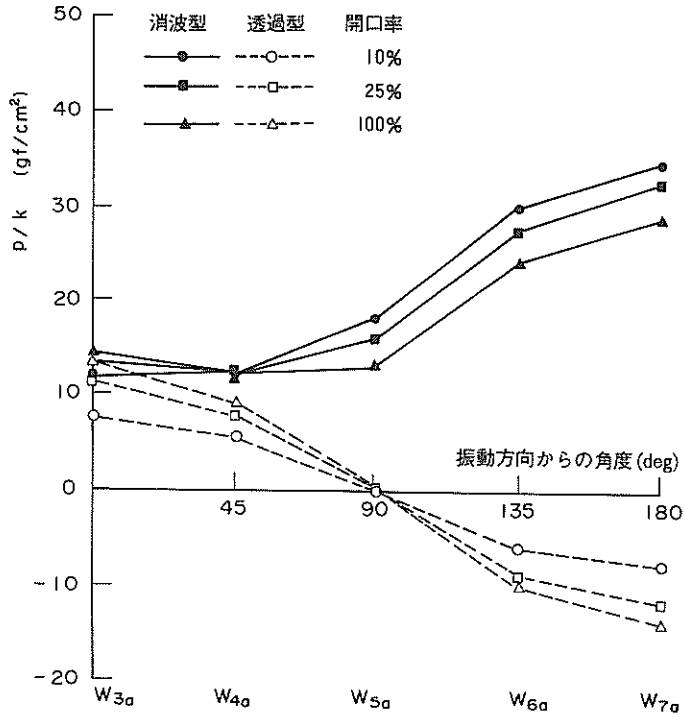


図-32(a) 円周方向の動水圧分布 (単一円筒, 高さ35.5cm, 分力計あり)

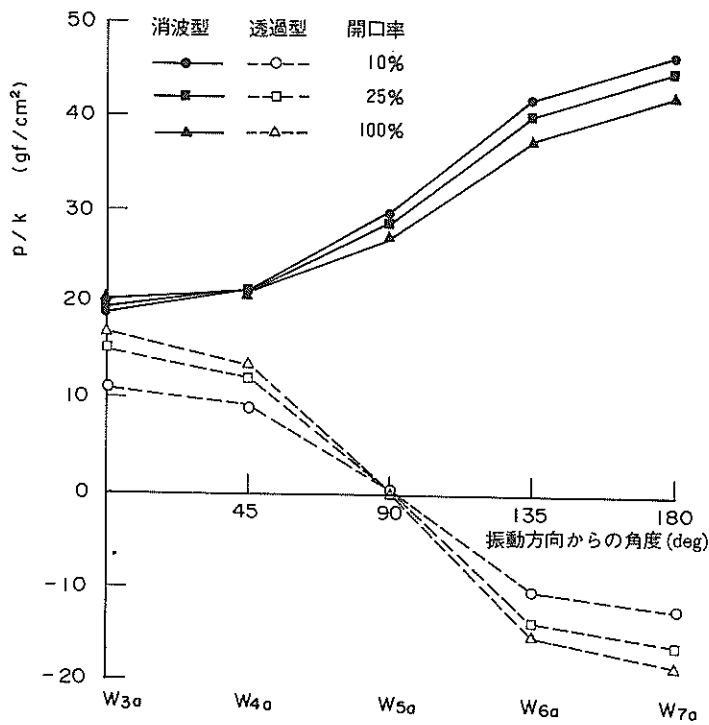


図-32(b) 円周方向の動水圧分布 (円筒壁, 高さ35.5cm, 分力計あり)

いるが、W4 ~ W6 の値が消波型の方がわずかに大きいことが図-25と同様にここでもわかる。高さ35.5cm位置における内側円筒の円周方向の動水圧分布を図-32(a), (b)に示す。開口率にともなう変化の状況は図-27に示した直接固定の場合と変わらない。

以上の結果から、分力計を用いた実験では模型を直接水底に固定した場合と比較して、全体的に水圧計の測定値が小さく、とくに模型と分力計収納箱との隙間に近い位置ではこの影響を受けて動水圧の測定値が小さいことが確認された。このように、分力計を用いた実験では、実物に作用する動水圧と異なることが推測されるが、分力計を用いた実験では作用する動水圧の値そのものでなく開口率の変化による動水圧合力の変化率を検討するので、この点に関しては模型を直接水底に固定した場合とほぼ同じであると考えられる。したがって以下の分力計の実験結果は実物の構造物に適用可能であると判断した。

(2) 動水圧合力

分力計の測定結果から模型に作用する動水圧合力を算定する。動水圧測定実験では、模型内部に水を満たした状態で加振したため、分力計の測定値には動水圧の他に、模型内部の水の質量による慣性力、模型および分力計の慣性力も含まれている。そこで、振動実験ではまず水がない状態で加振し、続いて水を入れて加振した。この両測定値の差を求めることで、模型と分力計の慣性力を取り除いた。さらに、この値から模型内部の水の質量による慣性力をひいて円筒ケーソンに作用する動水圧合力とした。ただし、この場合、遊水部分の水の影響を開口部のある模型では動水圧として考慮するのに対し、開口部のない模型では慣性力として扱うことになる。このため、両者を比較する場合、開口部のない模型については、外側円筒に作用する動水圧と遊水部分の慣性力を足し合わせ、動水圧合力とした。

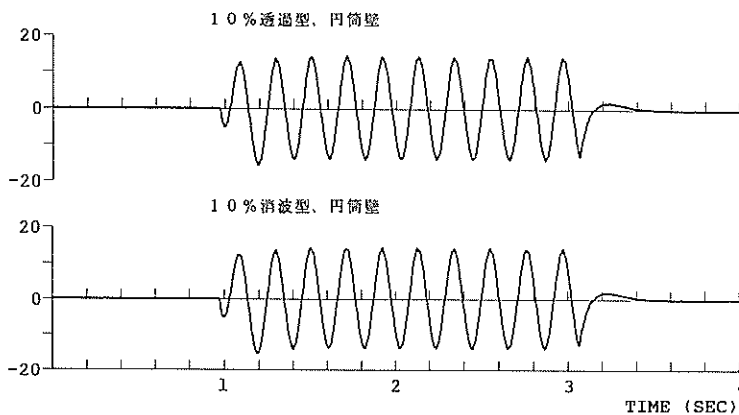


図-33(a) 分力計時刻歴波形 (水のない場合)

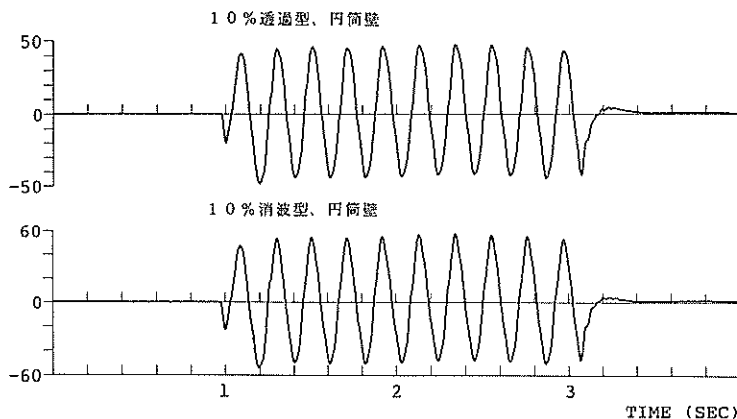


図-33(b) 分力計時刻歴波形 (水のある場合)

図-33に各実験条件での分力計の時刻歴波形の一例を示す。なお、この波形は4つの分力計時刻歴を足し合わせたものである。水のない状態での波形は比較的きれいであるが、水がある状態ではやや乱れる傾向にある。そこで、水圧計と同様に結果の整理には第2半波と第3半波のピークを採用することとし、これらを震度で除して用いた。図-34にいくつかの実験でのピーク値と加速度との関係および平均値の直線を示す。実験結果にあまりばらつきはなく、ほぼ平均値の直線に乗っていることから、この平均値を各条件での動水圧合力とした。各条件での動水圧合力を表-6に示す。遊水部の慣性力を含まない場合の開口部のない単一の円筒が45.8kgf、同円筒壁が107.8kgfであり、(1)で述べた水圧計の測定結果からの近似値(52.2kgf、108.9kgf)にはほぼ一致する。このことから、分力計の測定値は作用する動水圧を良好に測定しているといえる。また、円筒壁と単一の円筒の動水圧合力の比をとると、1:0.425となり表-5に示した直接固定の場合とほぼ等しくなっている。

図-35は単一の円筒あるいは円筒壁の場合の開口率の増加による動水圧合力の変化を示している。図の縦軸は、各開口率の動水圧合力の測定値を開口部のない場合の値で除した比を百分率で示している。開口部のない場合の値には、前述の通り遊水部分の慣性力が含まれている。単一の円筒の透過型の場合、開口率10%で動水圧合力は約72%に低下し、同100%では約62%と漸減している。また、円筒壁で透過型の場合では開

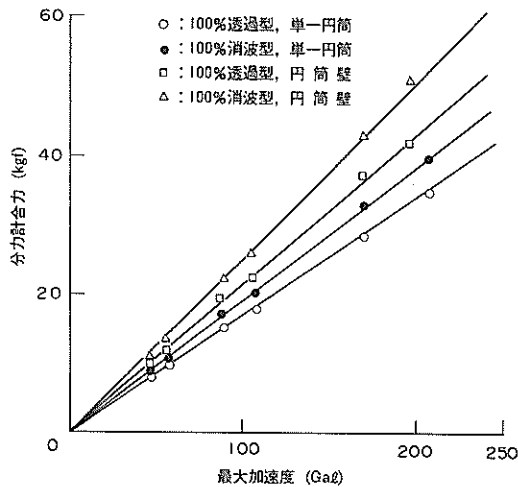


図-34 入力加速度と分力計測定値の関係

口率10%で動水圧合力は約78%に低下し、同100%では約66%となり、ほぼ単一の円筒と同様の傾向を示している。一方、消波型の場合は開口率の増加による減少の程度は比較的小さく、単一の円筒では開口率100%で90%程度である。円筒壁の場合でも開口率25%の値がやや小さめであるが、開口部のない場合の90%ほどの値となっている。

(3) 結果の検討

(2)に示した開口率と動水圧低減の関係の妥当性を検討するために、100%透過の単一円筒に作用する動水圧を、後藤・土岐の理論式から近似的に算定し、開口部がない場合との比を計算した。近似は以下の方法で行った。なお、値はいずれも震度で除した形で示している。

- (1) 上部の内側円筒に作用する動水圧合力は直径30cm、高さ20cmの円柱に作用する動水圧を考える。
- (2) 下部の外側円筒に作用する動水圧合力については、直径50cm、高さ51.5cmの円柱に作用する動水圧の20cm以深の合力を計算する。しかし、この値は上部の透過性を無視しているため、かなり大きめの値と考えられる。そこで、次のように補正係数を求めた。
- (3) 4.2において用いた水圧計測定値から動水圧合力を算定する方法(図-21参照)を応用し、上から4番目の水圧計の位置(天端より25.5cm)以深に作用した動水圧合力を算定する。
- (4) 直径50cm、高さ51.5cmの円筒の天端より

表-6 動水圧合力の比較

開口率 (%)	単一円筒		円筒壁	
	透過型 (kgf)	消波型 (kgf)	透過型 (kgf)	消波型 (kgf)
0	65.7 (45.8)	—	127.7 (107.8)	
10	47.0	61.4	99.5	121.1
25	44.4	60.4	90.0	115.4
100	40.8	59.0	84.2	118.4

[注] () は遊水部分は慣性力を含まない値

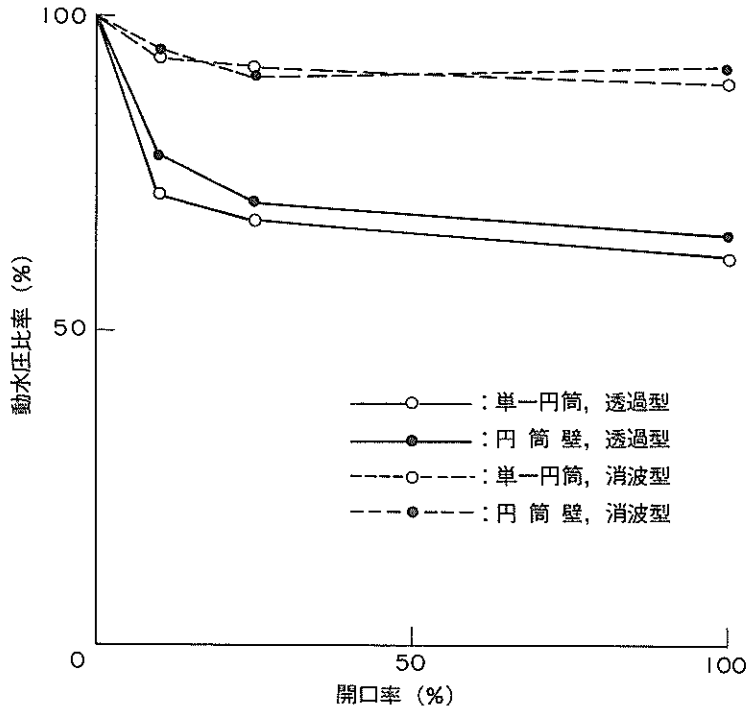


図-35 各開口率の動水圧合力の比率

25.5cm以深の位置に作用する動水圧を、後藤・土岐の式から計算する。この値と(3)との比を補正係数とする。

以上の方法から、100%透過の単一円筒に作用する動水圧合力は46.0 (kgf)となった。一方、直径50cm、高さ51.5cmの円柱に作用する動水圧合力の理論値は遊水部の慣性力を含めると78.2 (kgf)であり、両者の比をとると58.9%となる。この値と分力計測定結果(約62%)とはほぼ等しく、分力計測定結果は妥当なものと判断される。

5. 結論

開口部がある二重円筒ケーソンに作用する動水圧を検討するために模型振動実験を実施した。実験結果より得られた結論は以下のとおりである。

1. 円筒面に作用する動水圧の水平分布をみると、単一の円筒では、振動方向からの角度が増加するに従って動水圧が小さくなるのに対して、円筒壁では大きくなり、隣合うケーソンの接する部分において圧力が集中する傾向にある。
2. 開口部のない円筒に作用する動水圧を動水圧測定値の平均値で無次元化し、その鉛直分布形状を単一円筒と円筒壁の場合で比較すると、円筒上部では単

一円筒の方が大きく、下部では円筒壁の方が大きい。また、円筒壁の場合、各円筒ケーソンに作用する動水圧の分布形状は Westergaard の理論式の分布形状とほぼ等しく、剛な鉛直壁の場合と同様となる。

3. 開口部のない円筒壁の場合、各円筒ケーソンに作用する動水圧合力は Westergaard の理論式を円筒直径と同一幅に適用した場合とほぼ一致する。
4. 円筒壁の状態から円筒模型間の間隔が大きくなるにしたがい円筒模型に作用する動水圧は減少する。その程度は振動方向からの角度が増すほど大きくなる。円筒列の実験では、円筒間の間隔を直径の1%開けることで動水圧の合力は85%に減少した。さらに8%では、67%程度となり、わずかの間隔で動水圧が大きく減少する様子が示された。
5. 透過型の場合、外側円筒の開口部の下部に作用する動水圧は、開口率が大きくなるにしたがって小さくなる。その程度は開口部に近い位置ほど大きい。一方、開口部内側の内側円筒に作用する動水圧は開口率にしたがって大きくなる傾向にある。これらは消波型の場合にも同様であるが、増加および減少の程度は透過型に比べ小さめである。
6. 透過型の場合、内側円筒に作用する動水圧は振動方向で対称形をなしており、その大きさの絶対値は

開口率が大きいほど大きくなっている。一方、消波型の場合には、振動にともなって内側円筒の周囲がすべて正圧または負圧となり、その絶対値は開口部がない側の振動方向位置で最も大きくなっている。また、この絶対値と開口率との関係を見ると、開口部がある側の振動方向0°位置では開口率100%の場合が最も大きい動水圧を示し、45°を上回る角度では開口率の小さな場合が大きな動水圧を示した。

7. 透過型の場合には単一の円筒、円筒壁ともに、25%の開口率を設けることで、動水圧の合力は開口部がない場合の約7割に減少する。しかし、消波型の場合では、開口率の増加にともなう動水圧合力の減少程度は小さく、最も動水圧合力の小さかった開口率100%の場合でも、開口部のない場合の9割程度の値となっている。

二重円筒ケーソンを用いた大水深混成式防波堤の耐震設計を行う上で、防波堤に作用する動水圧は構造断面を決める重要な外力となるが、本報告はこの動水圧の算定を行う際の基礎資料となる。実験結果から、開口部を設けることで動水圧の低減効果があり、この点からも大水深防波堤のケーソンとして有望であると考えられる。ただし、実験ではケーソンだけを対象として動水圧の測定を行ったので、防波堤構造としてマウンド上に設置した場合のケーソンに作用する動水圧についてはさらに検討を加える必要がある。

(1990年6月29日受付)

謝辞

模型振動実験は運輸技術研究開発調査費によった。

振動実験は元地震防災研究室の工藤勝己技官（現東京都）の協力を得た。実験で使用した分力計は水工部耐波研究室、第二港湾建設局横浜調査設計事務所から借用した。また、野田節男構造部部長には本報告の取りまとめに関して貴重な助言をいただいた。

最後であるが、これら関係各位の方々に対し心からの謝意を表します。

参考文献

- 1) 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-下-227 - 2-下-232
- 2) 上部達生，野田節男，千葉忠樹，檜垣典弘：水との連成を考慮した大型混成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
- 3) 上部達生，工藤勝己，長田信：混成式防波堤に作用する動水圧の模型振動実験，港湾技術研究所資料，No. 641, 1989年3月
- 4) 桜井彰雄：水中に立てられた柱状構造物の振動，土木技術16巻6号，1961年
- 5) 後藤尚男，土岐憲三：水中橋脚の振動と耐震設計に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，No. 100号，1963年12月，pp. 1-8
- 6) 野田節男，倉田栄一，長田信：水中振動台の開発，第20回 地震工学研究発表会概要集，1989年7月，pp. 345-348
- 7) Westergaard, H. M. : *Water Pressures on Dams during Earthquakes*, Trans. ASCE, 98, 1933, pp. 418-434

記号表

$A(f)$: 周波数伝達関数
D	: 円筒列間隔
d	: 円筒の外径
H	: 水深
h	: 水底からの高さ
$\triangle h$: 水深を分割数で除した値
k	: 震度
N	: 分割数
$P_x(f)$: 入力のパワースペクトル
$P_{yx}(f)$: コスペクトル
P	: ある高さにおける動水圧合力
p	: 動水圧測定値
\bar{p}	: 各水圧計列の平均測定値
$p(h, \theta)$: 高さ h ，振動方向からの角度 θ 位置の動水圧
$p_x(h, \theta)$: 動水圧の振動方向成分
$Q_{yx}(f)$: クオドラチャスペクトル
R	: 外側円筒の半径
$Z_{yx}(f)$: クロススペクトルの絶対値
θ	: 振動方向からの角度

港湾技研資料 No.681

1990.9

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.