

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

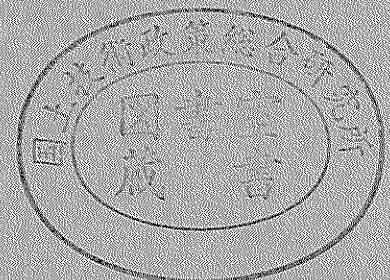
No.1027      September 2002

サクシヨン基礎防波堤の耐波安定性に関する水理模型実験

下 迫	健一郎
中 川	将 秀
黒 田	豊 和
藤 原	隆 一

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,  
Port and Airport Research Institute, Japan



## 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	4
2. サクシヨン基礎構造物の概要 .....	4
2.1 サクシヨン基礎の概要 .....	4
2.2 サクシヨン基礎防波堤の概要 .....	4
3. 小型模型実験 .....	5
3.1 実験方法 .....	5
3.2 地中部に作用する波力の算定式 .....	6
3.3 実験結果 .....	7
4. 大型模型実験 .....	15
4.1 実験方法 .....	15
4.2 実験結果 .....	18
5. まとめ .....	22
謝辞 .....	22
参考文献 .....	23

# Hydraulic Model Experiments on the Stability against Wave Actions of a Breakwater using the Suction Foundation

Kenichiro SHIMOSAKO\*

Masahide NAKAGAWA\*\*

Toyokazu KURODA\*\*\*

Ryuichi FUJIWARA\*\*\*\*

## Synopsis

The breakwater using the suction foundation has several advantages over conventional composite breakwater, i.e., it has high stability against wave actions, can be constructed without rubble mound foundation, and also need not special construction machine. Therefore, the construction period and cost will be reduced compared with composite breakwater.

A series of small scale and large scale hydraulic model experiments were conducted to investigate the characteristics of the breakwater using the suction foundation, and the calculation method of wave forces acting on the suction foundation was proposed. Major conclusions are as follows:

- 1) Wave pressure on the caisson can be calculated by Goda's pressure formula.
- 2) Wave pressure acting on the offshore side of suction foundation can be theoretically obtained supposing that the pressure is exponentially reduced in seabed.
- 3) Even in the clay bed, wave pressure on the suction foundation should be considered except the uplift force.
- 4) Wave pressure on the suction foundation does not necessarily become maximum value when the pressure on the caisson is maximum, however, the time-lag of wave forces between the caisson and the suction foundation should not be considered in the design.

**Key Words:** suction, foundation, breakwater, model experiment, wave force, uplift

---

\*Head of Maritime Structures Division, Marine Environment and Engineering Department

\*\*Trainee of Maritime Structures Division, Marine Environment and Engineering Department (Toyo Construction Corp.)

\*\*\* Maritime Structures Division, Marine Environment and Engineering Department

\*\*\*\* Toyo Construction Corp.

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-468-445043 Fax : +81-468-427846 e-mail:shimosako@pari.go.jp

# サクシヨン基礎防波堤の耐波安定性に関する水理模型実験

下迫健一郎\*  
中川 将秀\*\*  
黒田 豊和\*\*\*  
藤原 隆一\*\*\*\*

## 要 旨

サクシヨン基礎を用いた防波堤は、通常の混成堤に比べて以下のような特長を有している。

- 1) マウンドが不要で堤体断面を小さくできる。
- 2) 軟弱地盤であっても、地盤改良なしに設置が可能である。
- 3) 基礎が引き抜かれようとする力に対して発生するサクシヨン力や、滑動に対する抵抗力として働く基礎背面の土圧などにより、耐波安定性が高い。

このようなサクシヨン防波堤について、砂質土および粘性土に適用する場合の耐波安定性の違いや根入れ長の影響を検討することを目的として、小縮尺 ( $S=1/50$ ) の水理模型実験を実施した。また地盤中の波圧特性を詳細に検討するとともに、縮尺の影響についても検討することを目的として、大縮尺 ( $S=1/10$ ) の水理模型実験を行った。実験においては、堤体に作用する波圧および地盤中の土圧、間隙水圧を測定するとともに、堤体の変位についても測定した。本研究における主要な結論は以下のとおりである。

- 1) ケーソンおよびサクシヨン基礎の海底地盤上部に作用する波圧は、重複波および碎波の波圧に対する合田式にて算出することができる。
- 2) サクシヨン基礎前面に作用する圧力は、地盤内での圧力が指数関数的に減少すると仮定した式により、理論的に求めることができる。粘性土地盤の場合でも、サクシヨン基礎と地盤の空隙からの圧力伝播や基礎の変位による間隙水圧の増大等の影響により、砂質土地盤の場合と同様の圧力を考慮する必要がある。
- 3) サクシヨン基礎底面に作用する揚圧力は、通常の混成堤と同様に岸側において0となる三角形分布の圧力を考える。ただし、粘性土地盤の場合には、揚圧力は考慮しなくてよい。
- 4) ケーソン部に作用する波圧と基礎前面に作用する波圧には位相差があるが、波浪条件、構造条件、地盤条件によって位相差は大きく変化するため、設計においては安全側となるよう位相差を無視して同時に波力が最大になると考えるのがよい。

キーワード：サクシヨン，基礎，防波堤，模型実験，波力，揚圧力

\* 海洋・水工部耐波研究室長

\*\* 海洋・水工部耐波研究室元研修生（東洋建設㈱）

\*\*\* 海洋・水工部耐波研究室

\*\*\*\* 東洋建設㈱

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所

電話：0468-44-5043 Fax：0468-42-7846 e-mail:shimosako@pari.go.jp

## 1. まえがき

サクシヨン基礎とは、図-1に示すような風呂桶を引っ繰り返したような構造物を、基礎内の水を強制排水することにより発生する基礎内外の水圧差を利用して、海底地盤内に根入れした基礎である。

サクシヨン基礎を用いた構造物としては、1980年代以降、北海における石油掘削用リグの基礎としていくつかの適用例がある。港湾構造物への適用としては、防波堤、岸壁、護岸などの基礎や、係留ブイのサクシヨンアンカー、浮体構造物の基礎、洗掘防止のための根固めなどが考えられる。ただし、実際にサクシヨン基礎を用いた港湾構造物としては、1960年代に神戸港において類似の施工を行った事例が1件あるのみで、具体的な設計・施工法は確立されていなかった。

そこで、旧第一港湾建設局では、平成10年12月から翌年8月にかけて、新潟県の直江津港作業基地防波堤の一部にサクシヨン基礎防波堤2函を施工し、現地実証試験を実施した。これにより、設計・施工に関する貴重な実証データが得られ、サクシヨン基礎防波堤の実用化への期待が高まっている（北陸地方整備局，2001）。

ただし、サクシヨン基礎防波堤の耐波安定性に関しては、地中部の波力等について、いまだ未解明な点も残されている。一般に、根入れ式の構造物の場合、地中部に作用する波力については考慮しないことが多いが、サクシヨン基礎構造の場合、比較的根入れが浅く、地中部の波力についても無視できないと考えられる。

本研究では、サクシヨン基礎防波堤の耐波設計法の確立を目指し、水理模型実験を行った。まず縮尺1/50程度を想定した小型実験により、粘性土地盤の場合と砂質土地盤の場合の違いについて検討した。次に、縮尺1/10程度を想定した大規模実験を実施し、小型実験と比較することにより模型スケールの影響について検討した。なお、大規模実験においては、耐波安定性だけでなく実際の現地と同様にサクシヨン力を利用して沈設を行い、その際の安定性についても検討しているが、本資料では沈設後の耐波安定性についてのみ述べるものとする。

## 2. サクシヨン基礎構造物の概要

### 2.1 サクシヨン基礎の概要

サクシヨン基礎の沈設方法は、まず基礎の開口部を下にして海底地盤上に設置する。基礎内側が海底面によって密閉されたところで、ポンプを使って内部の水を強制排水すると、基礎の内側と外側とで水圧差が生じる。こ

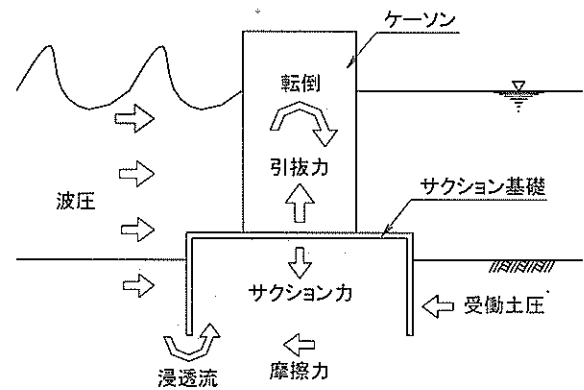


図-1 サクシヨン基礎防波堤

の水圧差により発生するサクシヨン力を地盤内への押し込み力として利用することにより、短時間で基礎を沈設することができる。

基礎の形状としては、円筒形と矩形が考えられる。構造的には円筒形のほうが有利で、矩形に比べて部材厚を小さくできるが、施工性では矩形のほうが優れている。また、矩形の場合、沈設時に隅角部で水みちが発生しやすい。なお、円筒形、矩形いずれの場合も、基礎内に隔壁を設置する構造も考えられる。これにより、床版、側壁等の部材断面を縮小でき、さらに沈設時に各室のサクシヨン力を調整することで、傾斜を調整できる。ただし、沈設時の貫入抵抗力は大きくなる可能性がある。

サクシヨン基礎の使用材料としては、RC製、PC製、鋼製、ハイブリッド製などが考えられる。代表的な材料としてRC製と鋼製を比較した場合、RC製は側壁がある程度の厚さをもつため貫入抵抗力が大きくなるが、剛性が高いため沈設サクシヨン圧作用時に円周方向の座屈を考慮しなくてよく、耐腐食性にも優れている。一方、鋼製は側壁が薄く、貫入抵抗力が小さいことなどが特長である。

### 2.2 サクシヨン基礎防波堤の概要

サクシヨン基礎防波堤の構造としては、サクシヨン基礎と上部構造物が一体となった一体型構造と、サクシヨン基礎と上部構造物（ケーソン）を分離して製作・据え付けを行う分離型構造の2種類がある。

一体型構造の場合、上部構造物の縮小・軽量化が可能である。また、基礎の沈設と上部工の据付けが一度に行われるので、施工期間が短い。ただし、沈設の傾斜が構造物自体の据え付け精度に反映されるため、沈設時における施工管理に十分な注意が必要である。

一方、分離型構造の場合、構造形式が単純で製作が容易である。また、個々の躯体重量が軽いため、起重機等

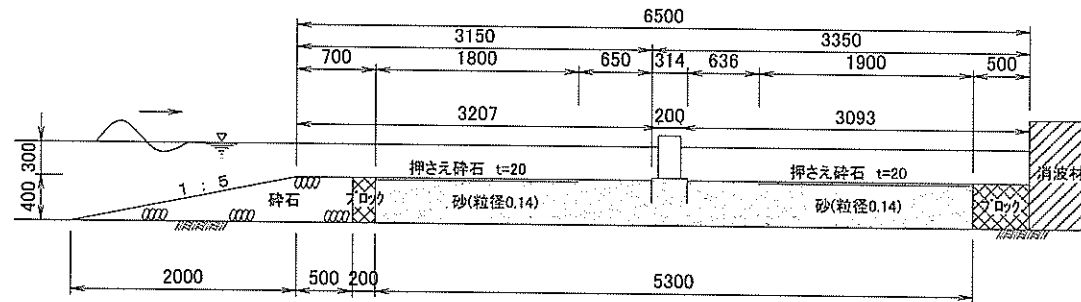


図-2 実験断面図 (砂質土地盤)

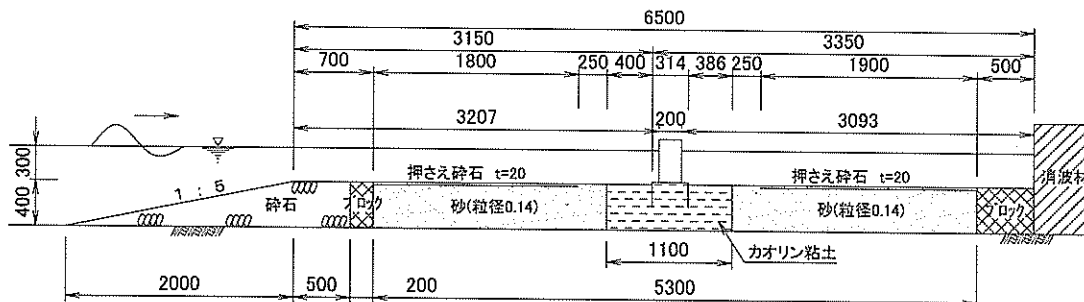


図-3 実験断面図 (粘性土地盤)

の機械能力が小さくてよい。さらに、基礎沈設後、上部構造物によって法線の出入り、回転、傾斜等に対する調整が可能であり、壁体としての連続性の確保が容易である。なお、分離型構造では、上部構造物の滑動を防ぐため、サクシオン基礎上面(床版)にせん断キーと呼ばれる突起構造を設けることにより、上部構造物の縮小・軽量化を図ることが可能である。

サクシオン基礎防波堤は、通常の混成防波堤に比べて以下のような特長を有している。

- ①床掘・置換や捨石マウンドを必要としないため、構造断面を小さくでき、工期短縮が可能である。
- ②基礎部と上部構造物を一体化することにより、地盤内に根入れした基礎の受動抵抗を滑動に対する抵抗力として見込むことができ、上部構造物の軽量化が可能である。
- ③基礎内部が密閉されているため、水平外力による転倒モーメントで生じる引き抜き力に対して、基礎内の地盤中にサクシオン圧が発生し、抵抗力として作用する。
- ④海底地盤が軟弱粘性土の場合、十分な支持力を確保できるところまで根入れすることにより、地盤改良を行わなくても上部構造物からの作用荷重を支持することが可能である。

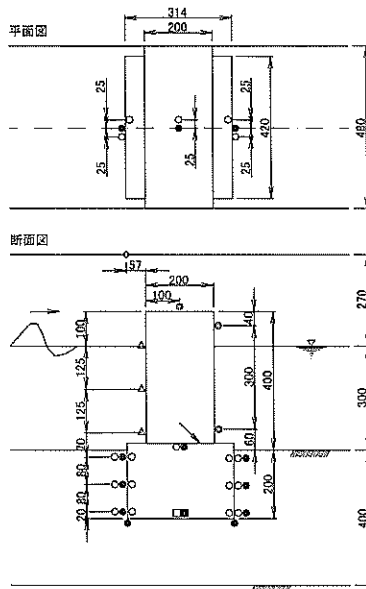
### 3. 小型模型実験

#### 3.1 実験方法

#### (1) 実験水路と堤体断面

砂質土地盤と粘性土地盤による圧力伝播の違いや、根入れ長の影響等を調べることを目的として、まず小型模型による実験を行った。実験に用いた水路は長さ38.5m、幅0.48m、深さ1.0mの片面ガラス張りの2次元造波水路である。実験断面は現地に対する縮尺を1/50程度と想定し、模型の形状等は、原則として直江津における実証試験に用いたものと相似になるようにした。ただし、サクシオン基礎の形状については、直江津の場合には円筒形であったが、円筒形の場合、水路幅によって大きさが制限され、側壁の影響も受けやすいため、小型実験においては矩形とした。サクシオン基礎模型は厚さ12mmの亚克力製で根入れ長が異なる2種類を用意した。また、ケーソン模型も亚克力製とし、実験時は基礎とケーソンが一体となるようボルトで固定した。ケーソンの内部には錘を入れて重量を確保した。その際、重心がケーソンの中心に一致するよう、錘の位置を調整している。

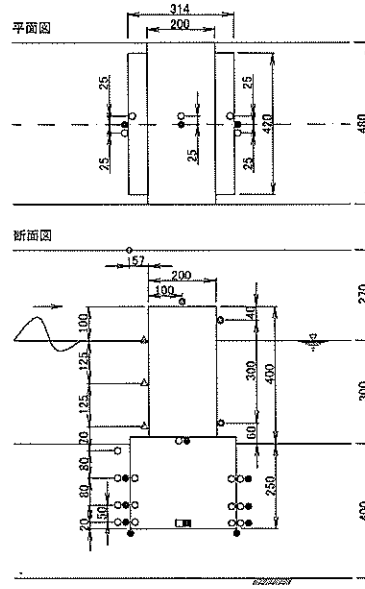
実験は、砂質土地盤と粘性土地盤の2種類について行った。砂地盤は相馬珪砂6号(平均粒径0.14mm程度)を使用した。図-2は、砂地盤の場合の堤体断面を示したものである。一方、粘性土地盤は市販のカオリン粘土を $5.88\text{kN/m}^2$ に圧密して使用した。ただし、水路全体を粘性土とすることは不可能なので、幅45cm、長さ110cm、高さ40cmの鋼製の容器内で圧密した粘性土地盤を、図-3に示すように容器ごと水路内に埋め込んだ。なお、実験水深



(根入れ長20cm)

(測定箇所)	
基礎頂版内側	土圧 × 1
基礎頂版内側	間隙水圧 × 1
基礎先端	土圧 × 2
基礎前面	土圧 × 3
基礎前面	間隙水圧 × 3
基礎前面内側	間隙水圧 × 3
基礎背面	土圧 × 3
基礎背面	間隙水圧 × 3
基礎背面内側	間隙水圧 × 3
基礎内部地盤	土圧 × 1
基礎内部地盤	間隙水圧 × 1
ケーソン前面	波圧 × 3
ケーソン前面	波高 × 1
ケーソン天端	変位 × 1
ケーソン背面	変位 × 2
Atype	計 31ch

- 土圧計(模型に取付)
- 土圧計(地盤中に設置)
- 間隙水圧計(模型に取付)
- 間隙水圧計(地盤中に設置)
- △ 圧力計(模型に取付)
- ⊙ 変位計(模型に取付)
- ◇ 波高計(水槽に設置)



(根入れ長25cm)

(測定箇所)	
基礎頂版内側	土圧 × 1
基礎頂版内側	間隙水圧 × 1
基礎先端	土圧 × 2
基礎前面	土圧 × 3
基礎前面	間隙水圧 × 4
基礎前面内側	間隙水圧 × 3
基礎背面	土圧 × 3
基礎背面	間隙水圧 × 3
基礎背面内側	間隙水圧 × 3
基礎内部地盤	土圧 × 1
基礎内部地盤	間隙水圧 × 1
ケーソン前面	波圧 × 3
ケーソン前面	波高 × 1
ケーソン天端	変位 × 1
ケーソン背面	変位 × 2
Btype	計 32ch

- 土圧計(模型に取付)
- 土圧計(地盤中に設置)
- 間隙水圧計(模型に取付)
- 間隙水圧計(地盤中に設置)
- △ 圧力計(模型に取付)
- ⊙ 変位計(模型に取付)
- ◇ 波高計(水槽に設置)

図-4 計測器取り付け位置

表-1 実験ケース一覧 (小型模型実験)

地盤	根入れ長(cm)	波浪条件	周期(s)	波高(cm)	Case	
砂質土	20		1.1		6.0	Case1
					9.0	Case2
					12.0	Case3
砂質土	25		1.7		14.3	Case4
					6.0	Case5
粘性土	20		1.7		10.0	Case6
					14.0	Case7
				17.4	Case8	

は、すべて30cmで一定とした。

模型の設置は、砂質土地盤については砂をある程度掘った状態で模型を埋め込み、その後砂を埋め戻した。また、粘性土地盤については地盤を壊さないよう注意しながら上から手で押し込み、所定の深さまで沈設した。いずれの場合も、埋め込みはサクシオン基礎の底版を取り外してから行った。

計測器は、土圧計、間隙水圧計、圧力計、変位計、波高計を用い、ケーソン前面およびサクシオン基礎周辺の各点に作用する圧力を測定するとともに、ケーソンの変位についても計測した。図-4は、根入れ長20cmおよび25cmの場合における計測器の配置を示したものである。なお、計測システムの都合により最大で32chまでしか計測できないため、根入れ長25cmの場合には、基礎根入れ部前面の間隙水圧計を1個だけ追加した。

#### (2) 実験波と実験ケース

実験波は規則波を用い、周期は1.1sと1.7s(現地換算

で8.0sと12.0s)の2種類、波高は6.0cm~17.4cm(現地換算で3.0m~8.7m)の範囲で、周期ごとにそれぞれ4段階に変化させた。データの解析は、波高がほぼ一定となる波のみを対象とした。この有効波数は1.1sでは17波、1.7sでは11波程度であり、圧力等については原則としてこれらの平均値で整理した。実験は、地盤条件およびサクシオン基礎の根入れ長を変えた3種類について行った。表-1は、実験ケースの一覧である。

#### 3.2 地中部に作用する波力の算定式

ここで、根入れ部前面に作用する波力の考え方について述べる。防波堤直立部に働く波力の計算には、一般に合田式が用いられ、サクシオン基礎上のケーソンに働く波力も、合田式における波圧分布(日本港湾協会, 1999)を適用できる。しかしながら、サクシオン基礎根入れ部前面に作用する波圧については合田式では想定できない。そこで、高橋ら(1996)の研究において示されているように、地盤表面での圧力が指数関数的に減少する次式の分布形を仮定した。

$$p = p_0 \exp\{a(-2\pi z/L)\} \quad (1)$$

$p_0$ : 合田式から求まる地盤面での波圧強度

$a$ : 比例定数,  $z$ : 地盤面からの深さ,  $L$ : 波長

ここで、比例定数  $a$  は透水係数の関数で、砂地盤の場合は1.0であり、粘性土地盤の場合には、1.0よりも大きくなる。この理論値と実験結果について比較を行う。

一方、基礎底面に作用する揚圧力については、理論的

に求めることは難しいが、通常の混成堤における揚圧力の考え方を準用して、式(1)から求まる沖側のサクシオン基礎根入れ先端の値と、岸側のサクシオン基礎根入れ先端を0として直線で結んだ三角形分布を仮定した。

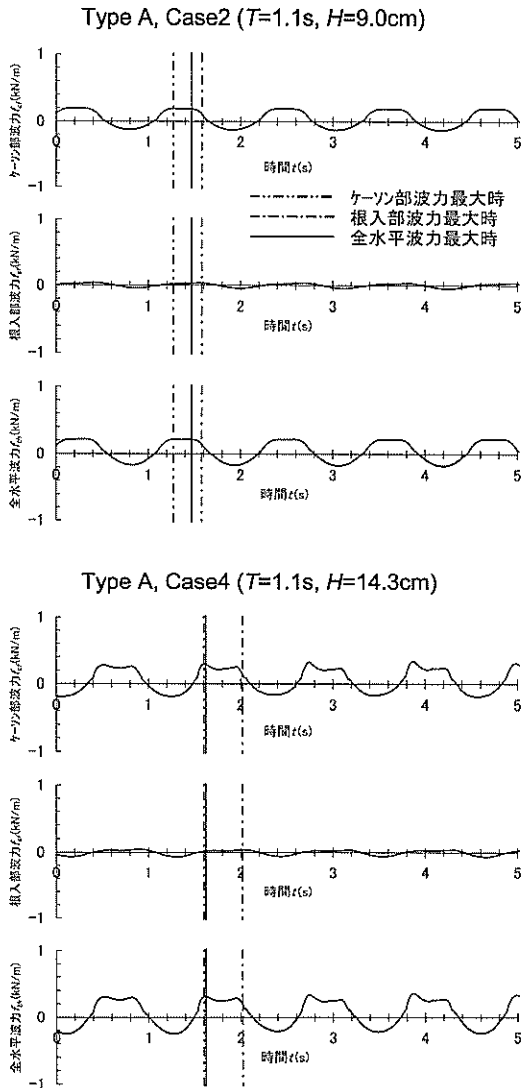


図-5 構造物各部に作用する波力の時間変化

### 3.3 実験結果

#### (1) ケーソンと基礎前面における波力の位相関係

図-5は、ケーソン部に作用する単位幅あたりの波力 $f_{cf}$ 、サクシオン基礎前面根入れ部に作用する波力 $f_{sf}$ 、ケーソンおよび基礎前面に作用する全水平波力 $f_{th}$ の時間変化を示したもので、砂質土地盤、根入れ長20cm、周期1.1sで波高9.0cm (Case2) および14.3cm (Case4) の例である。根入部波力はケーソン部波力に比べて非常に小さく、また、最大となる時刻にずれがあることがわかる。したがって、通常はCase4のように、ケーソン部波力が最大となる時、全水平波力も最大となる。この傾向は、基本的

に地盤条件や根入れ長の違い、波浪条件に関係なくほぼ同じである。ただし、ケーソン部の波力波形が二山形となり、最初のピークと2番目のピークの値がほとんど同じ場合には、Case2のように、根入れ部に作用する波力の影響によって、ケーソン部波力が最大になる位相と、全水平波力が最大となる位相が異なることもある。なお、ケーソン部波力が最大となる時刻と根入れ部波力が最大となる時刻の位相差の程度は、地盤条件等によって異なる。これについては後述する。

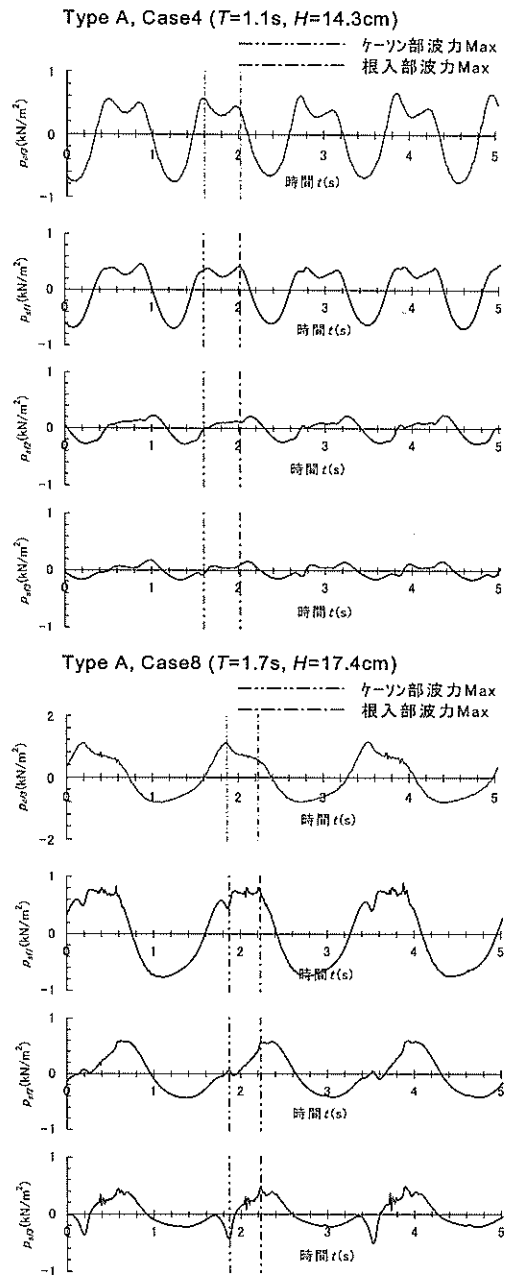


図-6(1) サクシオン基礎前面波圧の時間変化 (砂質土地盤、根入れ長20cm)



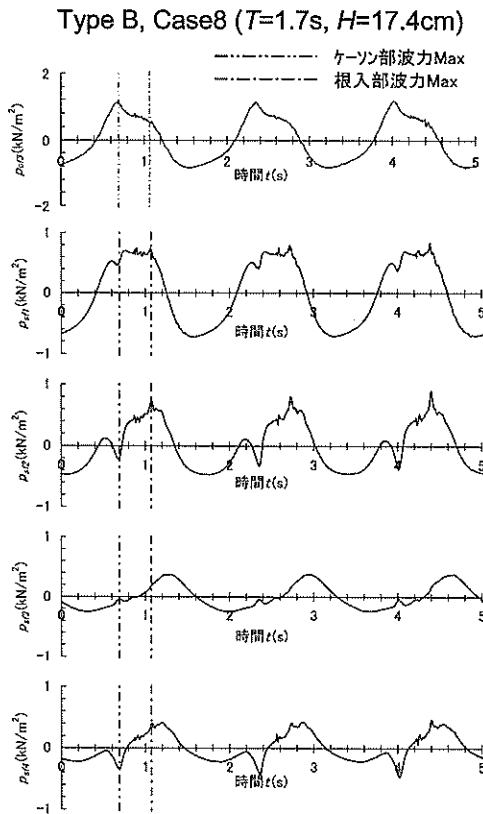
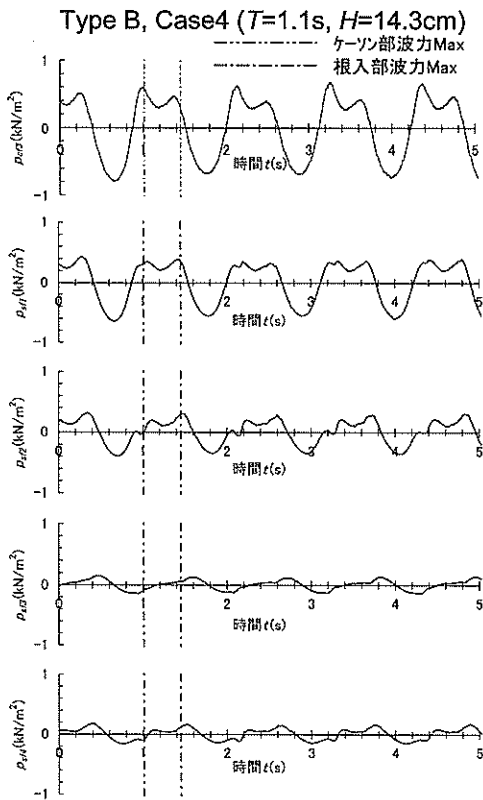


図-6(2) サクシヨン基礎前面波圧の時間変化  
(砂質土地盤, 根入れ長25cm)

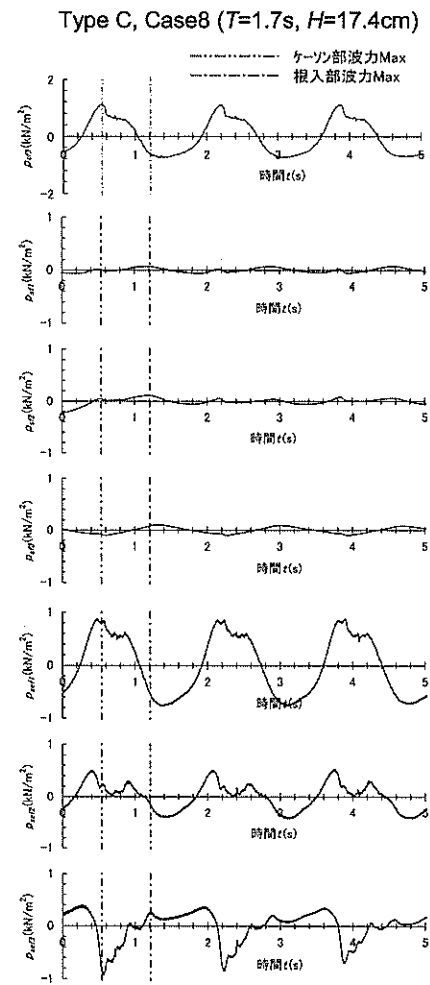
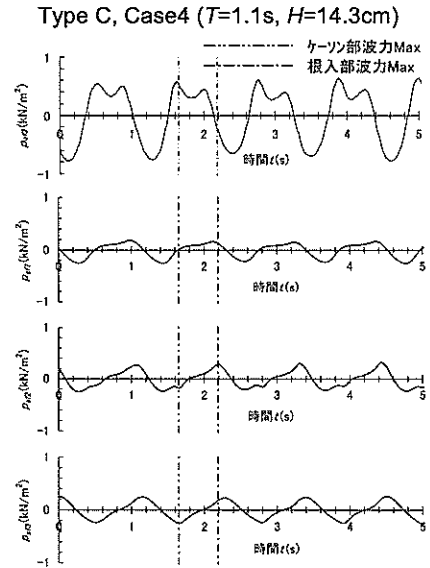


図-7 サクシヨン基礎前面波圧の時間変化  
(粘性土地盤, 根入れ長20cm)

(2) サクシオン基礎前面に作用する圧力の時間変化

a) 砂質土地盤

図-6(1)は、砂質土地盤、根入れ長20cmの場合 (TypeA) について、周期1.1s、波高14.3cm (Case4) および周期1.7s、波高17.4cm (Case8) における基礎前面の各点での圧力 (間隙水圧) の時間変化を示したものである。サクシオン基礎前面の圧力は、上から順に  $p_{sf1}$ ,  $p_{sf2}$ ,  $p_{sf3}$  であり、比較のため、ケーソン前面の一番下の測点における波圧  $p_{cf\beta}$  も合わせて示している。図には、ケーソン部および根入れ部の波力が最大となる時刻も示している。

基礎前面の圧力は、ケーソン部の波圧に比べて全体的に下に行くほど減衰していることがわかる。特に、二山波形の最初のピークで減衰が大きく、Case8の場合には、 $p_{sf3}$  では、ケーソン部波力が最大となる時、負の圧力が生じている。これは、基礎部の微小な変位によって地盤内の空隙が広がり、間隙水圧に瞬間的に負圧が発生するためと考えられる。なお、この現象については、大型実験のところでもさらに詳しく検討する。

基礎前面根入れ部の波力が最大となるのは、 $p_{sf1}$  の値が最大となる二山波形の2番目のピーク付近であり、 $p_{sf2}$  および  $p_{sf3}$  が最大となる時刻は、 $p_{sf1}$  が最大となる時刻よりもやや遅れている。

図-6(2)は、根入れ長25cmの場合 (TypeB) について同様に示したものである。全体的に根入れ長20cmの場合と大きな違いは見られない。なお、根入れ長20cmの場合の  $p_{sf2}$  と根入れ長25cmの場合の  $p_{sf3}$  において、あまり大きな負圧の発生が見られないが、これらは同じ間隙水圧計を用いており、センサー固有の影響と思われる。

b) 粘性土地盤

図-7は、粘性土地盤の場合 (TypeC) について、図-6と同様に、周期1.1s、波高14.3cm (Case4) および周期1.7s、波高17.4cm (Case8) における基礎前面の各点での圧力 (間隙水圧) の時間変化を示したものである。なお、粘性土の実験においては、実験を続けるにしたがって間隙水圧計のフィルターが徐々に目詰まりを起こし、圧力が正確に測定できなくなった。Case4については、 $p_{sf1}$  でやや値が小さくなっているようであるが、他の点はほぼ正確に測定できていると思われる。

一方、Case8では、すべての間隙水圧計で値が小さくなっており、データとして使用できない。そこで、参考として同じ位置における土圧計の波形  $p_{sef1} \sim p_{sef3}$  も合わせて示した。ただし、土圧計では間隙水圧と土圧 (有効応力) の合力が計測されるため、基礎が変位した場合の土圧の変動も含まれている。

粘性土地盤の場合も、二山波形の最初のピークにおい

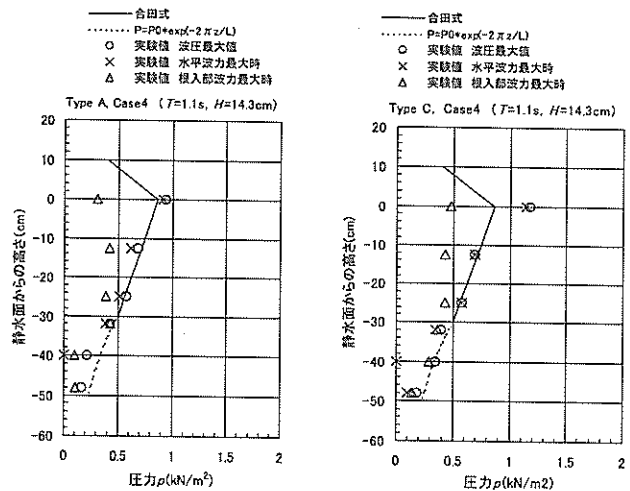


図-8 ケーソンおよび基礎前面に作用する圧力分布

て、基礎部の微小な変位によるものと思われる負圧が発生している。また、砂質土地盤に比べてケーソン部波力最大時と根入れ部波力最大時の位相差がさらに大きく、特に下の点ほど圧力が最大となる時刻が遅くなっている。

(3) ケーソンおよび基礎前面に作用する圧力の分布

図-8は、ケーソンおよびサクシオン基礎前面に作用する圧力分布を、各点における圧力の最大値、全水平波力最大時における各点での圧力、根入れ部波力最大時における各点での圧力についてプロットしたもので、砂質土地盤、根入れ長20cmおよび粘性土地盤、根入れ長20cmの周期1.1s、波高9.0cm (Case2) の例である。図には、ケーソン部については、合田式の計算値、根入れ部については式(1)の計算値も合わせて示している。なお、ここでは粘性土地盤についても比例定数  $a$  は1.0としている。

ケーソン部については、波圧最大値は合田式の値とほぼ一致している。一方、基礎前面についても、多少のばらつきはあるものの、砂質土地盤、粘性土地盤ともに、最大値で見ると計算値とほぼ同じかやや小さめの値となっている。また、粘性土地盤については砂地盤に比べて減衰が大きいはずであるが、そのような傾向は見られなかった。これは、粘性土の場合にも波の作用によってケーソンおよび基礎部に微小な変位が生じて圧力変動が発生するためと考えられる。なお、ここには示していないが、周期および波高を変化させても、圧力分布の傾向としてはあまり大きな変化は見られなかった。

(4) サクシオン基礎全体に作用する圧力

サクシオン基礎の周囲には、前面以外にも圧力が作用する。図-9は、前面も含めた基礎周辺の圧力の時間変化を、砂質土地盤、根入れ長20cmで、周期1.1s、波高14.3cm (Case4) および周期1.7s、波高17.4cm (Case8)、粘性土

地盤、根入れ長20cmで、周期1.1s、波高14.3cm (Case4) について示したものである。ここに、 $p_{sf}$ は基礎前面内側、 $p_{sr}$ は基礎背面外側、 $p_{sfi}$ は基礎背面内側、 $p_{sfi}$ は基礎底版内側での圧力、また、 $p_{sfi}$ は基礎先端と同じ深さの基礎中央での圧力を表している。

砂質土地盤の場合、Case4では前面以外の各点に作用する圧力はきわめて小さいのに対して、Case8では比較的大きな圧力が作用している。これは、周期が長いほうが地中での圧力の減衰が小さいためである。Case8では、港外側基礎内面下 $p_{sfi}$  ( $p_{sfi}$ の裏)でも、前面と同様に負圧が発生している。また、港内側の基礎外面上 $p_{sri}$ でも比較的大きな圧力が発生しているが、これは地盤内からの伝播よりも基礎の変位による圧力変化の影響が大きいと考えられる。なお、ここには示していないが、砂質土地盤で根入れ長が25cmの場合もほとんど同じである。

粘性土地盤については、周期1.7sのケースでは間隙水圧計フィルターの目詰まりにより正確な値が測定できなかったため、圧力の傾向は不明であるが、Case4で見る限りにおいては、砂質土地盤よりも小さくなっている。

図-10は、図-9に示したケースについて、各測点における圧力の最大値と、全水平波力最大時における各点での圧力の分布を示したものである。ケーソン前面、基礎前面および底面については、3.2で示した計算値を破線で示している。各点における最大値のみに着目すると、前項で述べたケーソン前面および基礎前面だけでなく、基礎底面の揚圧力についても、3.2で示した通常の防波堤における揚圧力と同様の考え方をを用いてよいと考えられる。また、基礎内部や港内側についても、周期が長い場合には比較的大きな圧力が生じることもあることがわかる。

一方、全水平波力最大時では、基礎前面の圧力および底面の揚圧力はいずれも計算値よりもかなり小さく、また、基礎内部や港内側にはほとんど圧力は作用しない。

#### (5) サクシオン基礎全体の変位

波作用時においては、一体化されたケーソン部と基礎部がわずかに変位(動揺)する。また、波高が大きくなると、波作用後に残留変位が生じる場合もある。図-11は、波作用時における動揺量について、ケーソンの上部1か所と背面2か所で計測した変位をもとに、ケーソンの重心位置における水平変位、鉛直変位、回転変位に換算し、それぞれの振幅を示したもので、横軸には波形勾配 $H/L$ をとっている。動的な変位量としては最大でも1mm未満であり、かなり小さい。また、水平変位と回転変位に関しては、周期の長いほうが値が大きくなっている。砂質土地盤の場合、根入れ長の長さはほとんど影響していないことがわかる。一方、粘性土地盤(TypeC)の場合、砂質土

地盤と比べて全体的にやや変位量が大きくなっている。

図-12は、各ケースごとの波作用終了後の残留変位を示したものである。砂質土地盤で根入れ長20cmの場合には、残留変位はほとんど見られない。また、根入れ長25cmの場合でも、最終的に沖側へ0.4mm移動するとともに0.2mm沈下した程度で、残留変位は小さい。

一方、粘性土地盤の場合、砂質土地盤と比べて残留変位が大きく、最終的には地盤が破壊して大きく岸側に傾いた。地盤が破壊すると、基礎部と地盤の間に隙間が生じ、圧力が変化することが考えられるが、今回の実験においてはCase8の途中において特に波形の変化はみられなかった。このことから、地盤が破壊する前でも基礎の変位によって微小な隙間が生じ、圧力が基礎前面に作用していると考えられる。この傾向は、現地であれば相対的に変位が大きくなり、さらに顕著になると思われる。なお、最初に沖側へ傾斜したのは、前面と背面の水位差の影響と思われる。すなわち、模型背後の距離が短く、波高の大きいケースでは、越波水によって模型背後の水位が上昇して前面よりも高くなったためである。

#### (6) 設計波圧の考え方

これらの実験結果から、分離型構造でサクシオン基礎部単体としての安定性を検討する場合、基礎前面の圧力については、砂質土地盤、粘性土地盤ともに、3.2で示したとおり、式(1)において、 $\alpha=1.0$ とした計算値を設計に用いてよいと考えられる。一体型構造の場合、全体の安定性に対してこの計算値を用いるとかなり安全側の値となるが、もともと基礎部の波力はケーソン部に比べて小さいこと、また、ケーソン部と基礎部の位相差は波浪条件等によって変化する可能性があることから、便宜上は位相差を考慮せず、式(1)の計算値を使うほうがよいと考えられる。

なお、揚圧力については、計算値で示しているサクシオン基礎先端を結ぶ線上での圧力ではなく、基礎内部の底版裏での圧力で検討するほうが現実的である。砂質土地盤の場合、底版裏の圧力は最大値としては計算値に近く、全水平波力最大時の値は計算値よりも小さく、0に近い場合もある。実際の設計においては、安全側を考えて基礎前面と同様に3.2で示した計算値をそのまま用いてよいと考えられる。

一方、粘性土地盤の場合、底版裏の圧力の最大値はやはり計算値に近いものの、全水平波力最大時との位相差が砂質土地盤よりも大きく、ここでは示していないが、波高が比較的小さい場合には、基礎前面圧力最大時とも位相差が異なる場合がある。一般に粘性土地盤のほうが砂質土地盤よりも圧力の減衰が大きく、さらに全水平波

Type A, Case4 ( $T=1.1s, H=14.3cm$ )

- - - ケーソン部波力Max  
 - - - 根入部波力Max

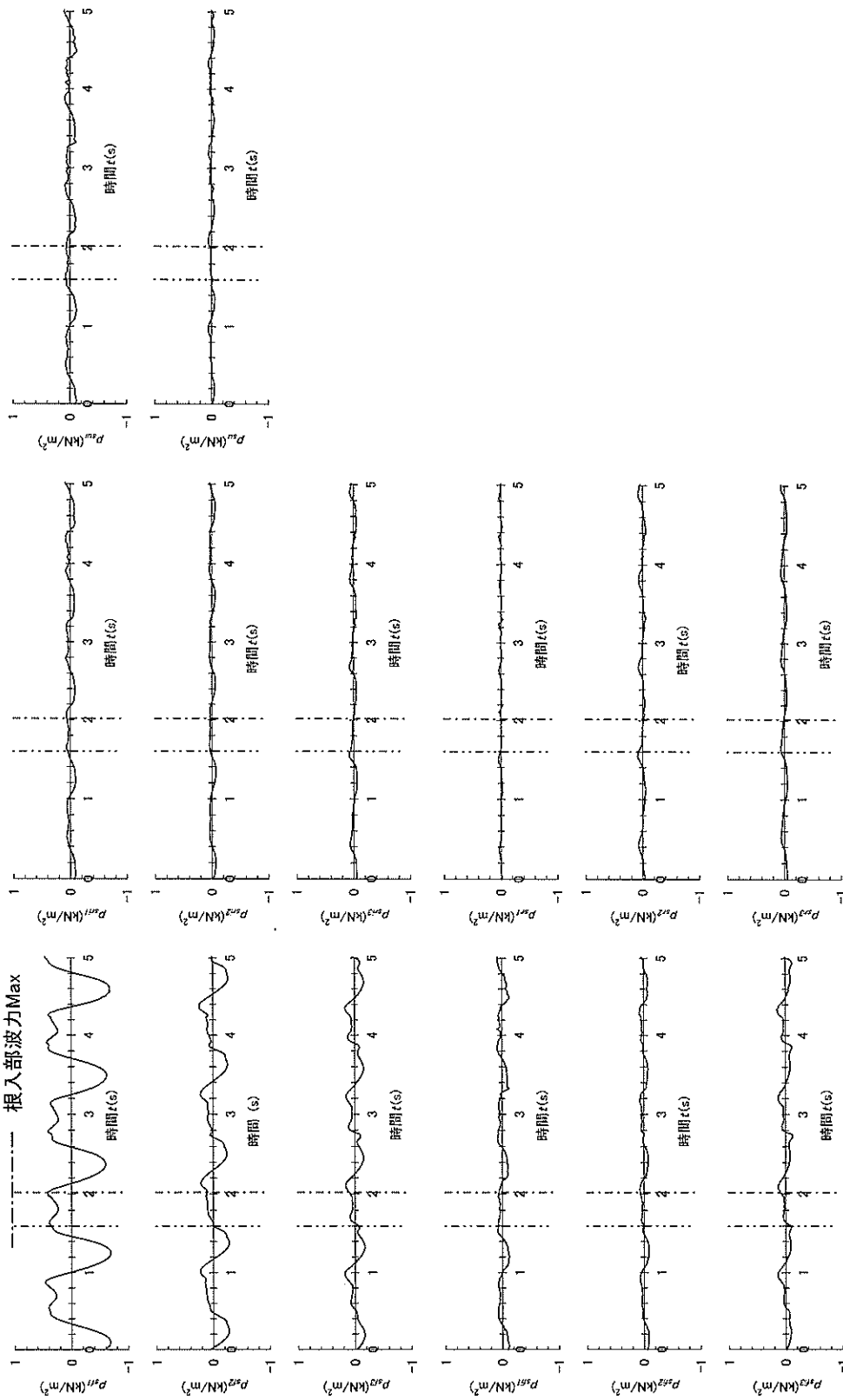


図-9(1) サクシヨン基礎周辺の圧力の時間変化

Type A, Case8 (  $T=1.7s, H=17.4\text{ cm}$  )

- - - ケーソン部波力Max  
 - - - 根入部波力Max

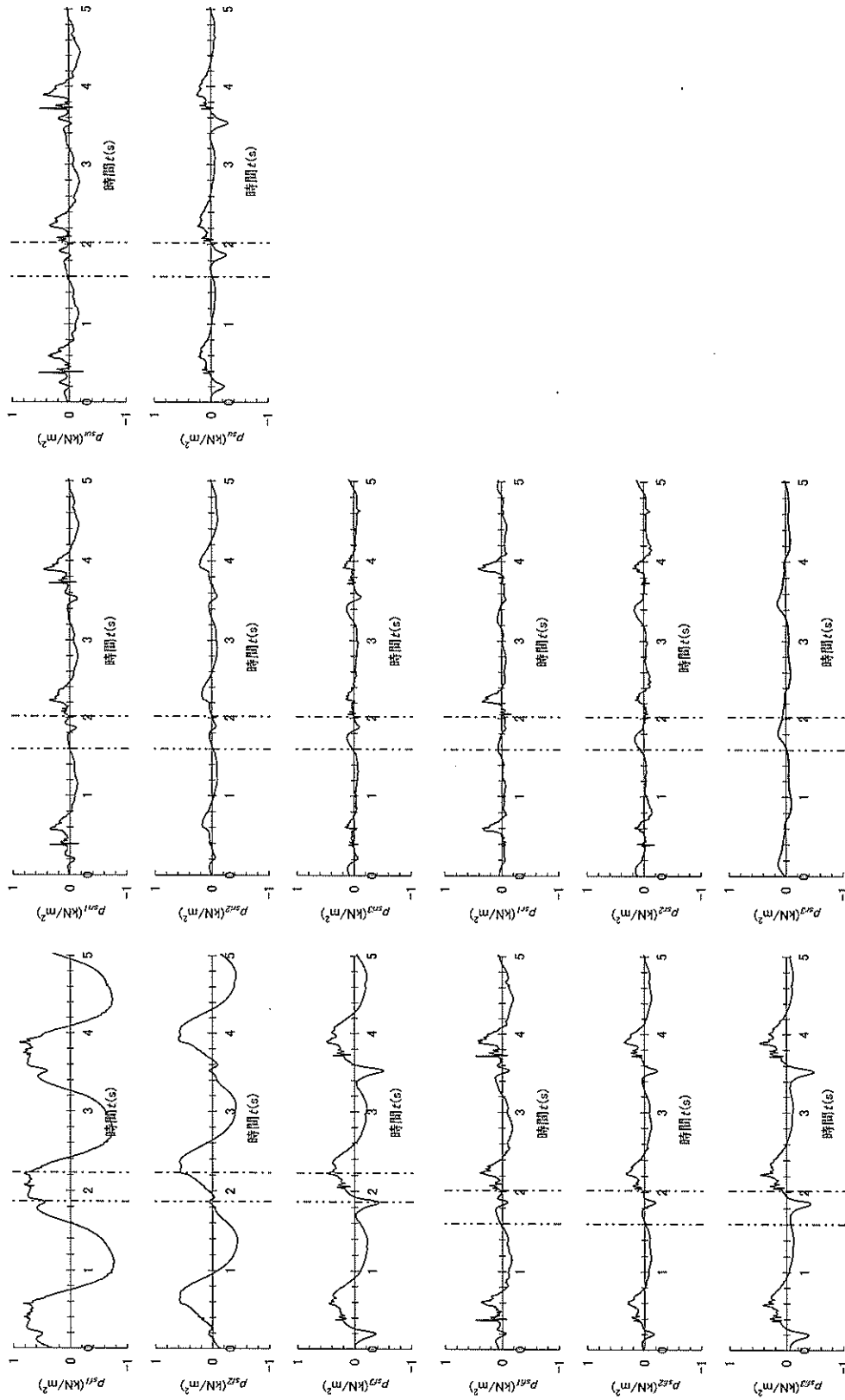


図-9(2) サクシヨン基礎周辺の圧力の時間変化

Type C, Case4 ( $T=1.1s, H=14.3cm$ )

----- ケーソン部波力Max  
 - - - - - 根入部波力Max

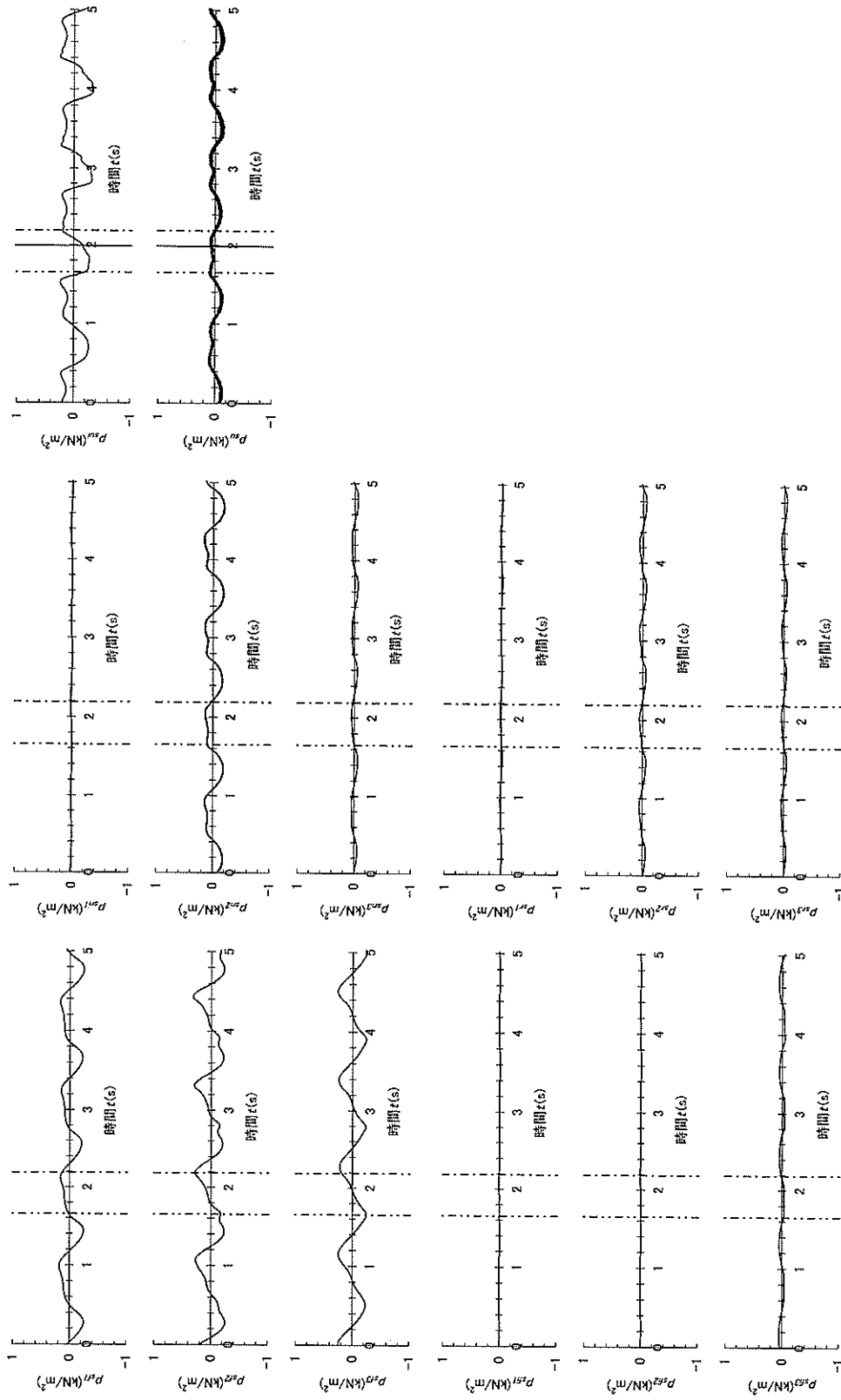


図-9(3) サクシヨン基礎周辺の圧力の時間変化

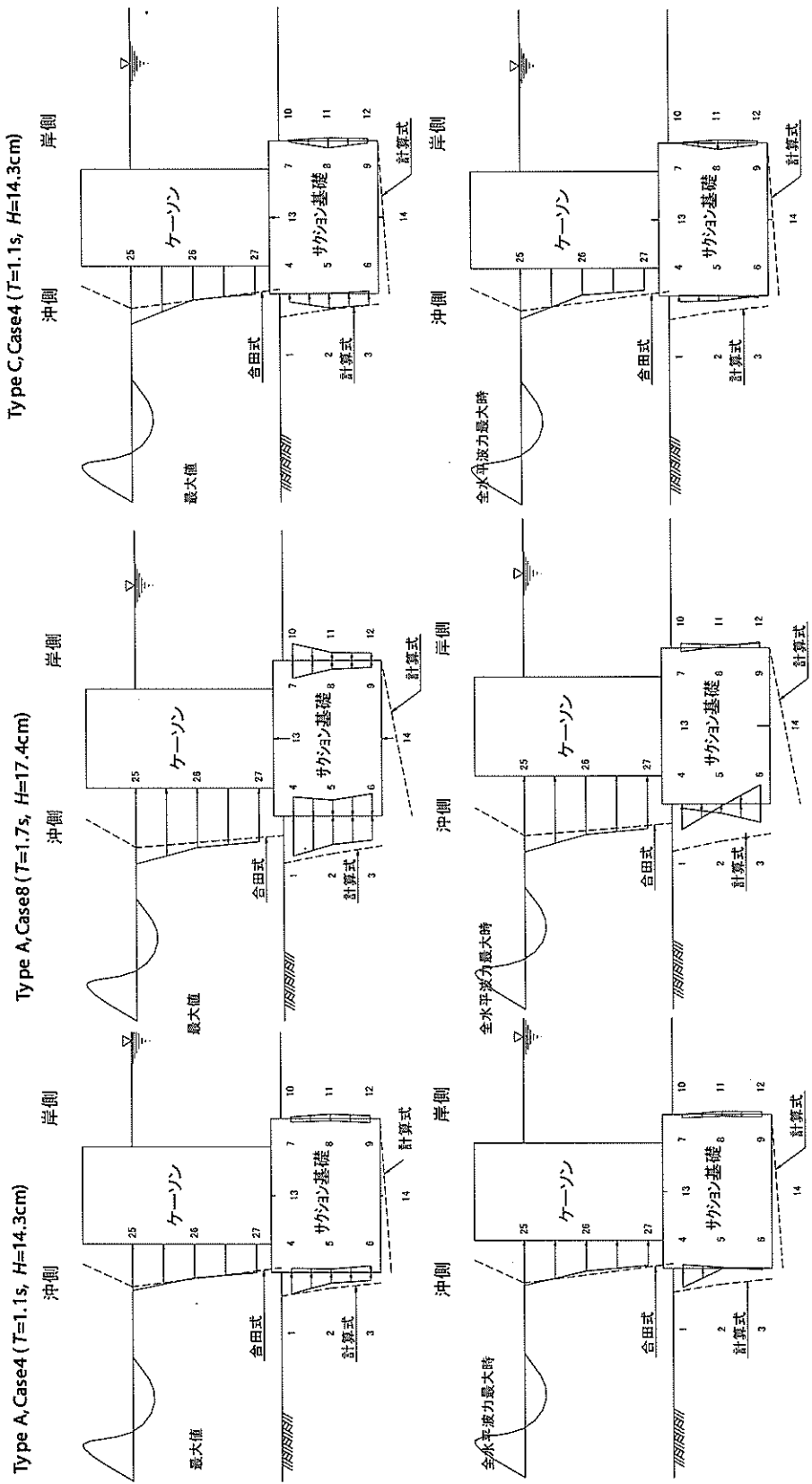


図-10 各測点における圧力分布

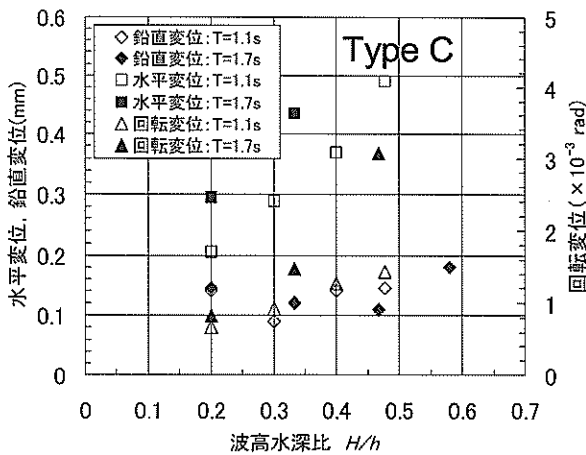
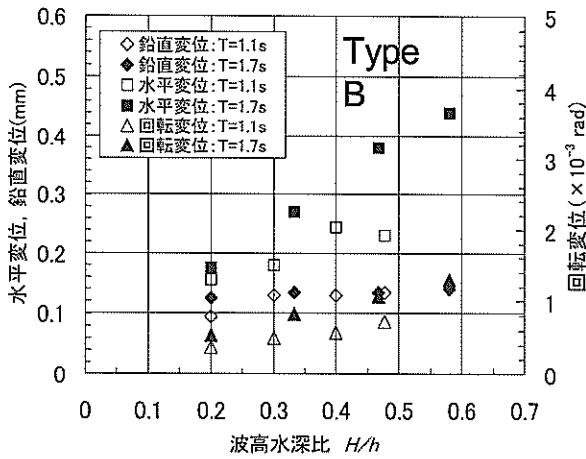
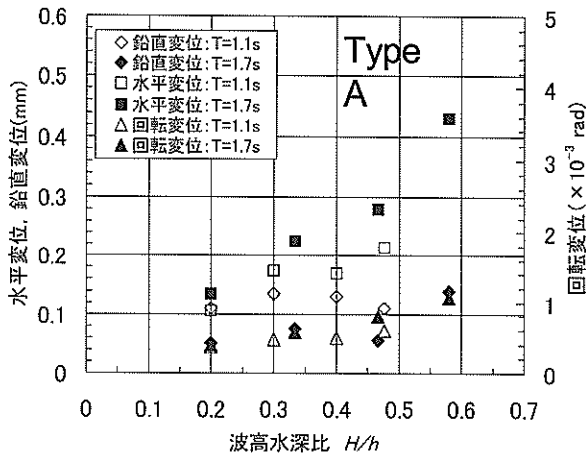


図-11 波作用時における動揺量

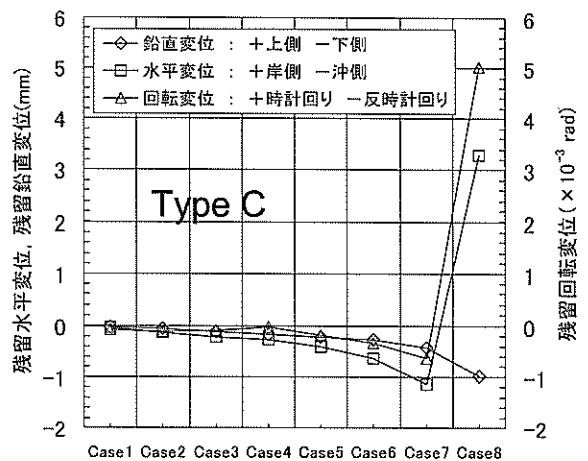
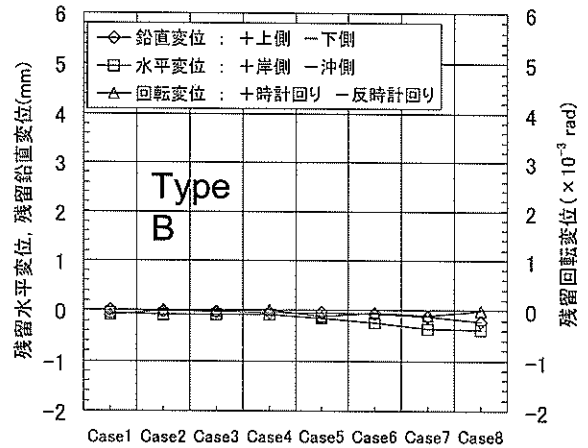
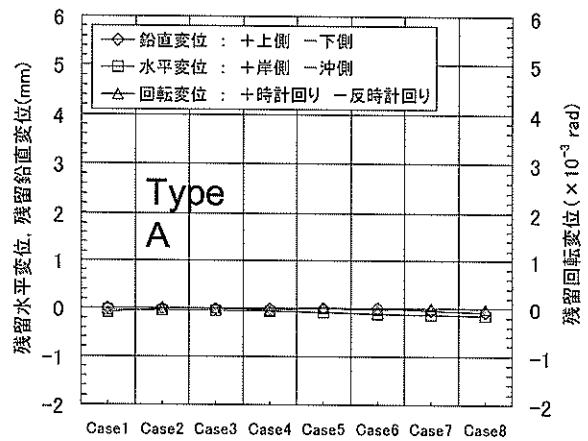


図-12 波作用後の残留変位

力最大時には底版裏の圧力は負の値となっていることも考慮すると、粘性土地盤については、安全側に考えても、揚圧力は設計においては考慮しなくてよいと考えられる。

#### 4. 大型模型実験

##### 4.1 実験方法

##### (1) 実験水路と堤体断面

小型模型実験によって、砂質土地盤と粘性土地盤それぞれの圧力伝播特性が明らかになり、また、根入れ長については、多少長さが変わってもほとんど影響が見られないことがわかった。こうした小型実験の結果を踏まえて、相似則の影響などについても検討することを目的として、大型の模型実験を実施した。

実験は、長さ184m、幅3.5m、深さ12mで、厚さ4mの砂地盤層を持つ大規模波動地盤総合水路を使用した。砂地盤



はオーストラリア産フラタリーサンド（平均粒径0.2mm程度）を使用している。現地に対する模型縮尺は1/10程度を想定し、実験条件は原則として小型実験と相似になるよう設定した。ただし、サクシオン基礎模型形状は、直江津と同じく円筒形とした。また、サクシオン基礎、ケーソンともに鋼製としており、部材厚および根入れ長についても相似ではない。実験時はケーソン部と基礎部が一体となるようボルトで固定した。

模型の設置は、現地と同様にサクシオン圧を用いて行った。用いた計測器は小型実験と同様で、土圧計、間隙水圧計、圧力計、変位計、波高計を用い、ケーソン前面およびサクシオン基礎周辺の各点に作用する圧力を測定するとともに、ケーソンの変位についても計測した。実験断面は1種類のみとし、計測器の配置は図-13に示しておりである。

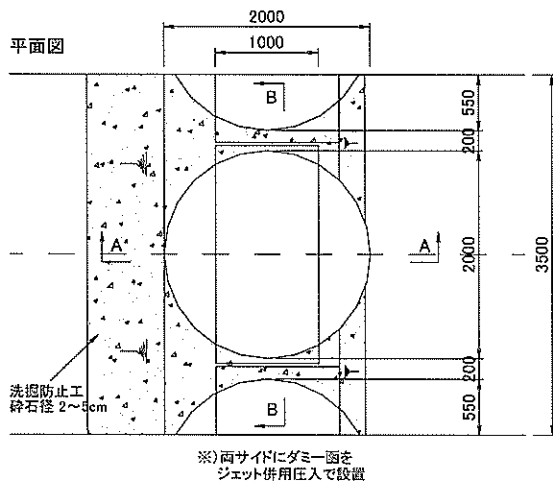
(2) 実験波と実験ケース

表-2は、実験ケースを示したものである。実験波は規

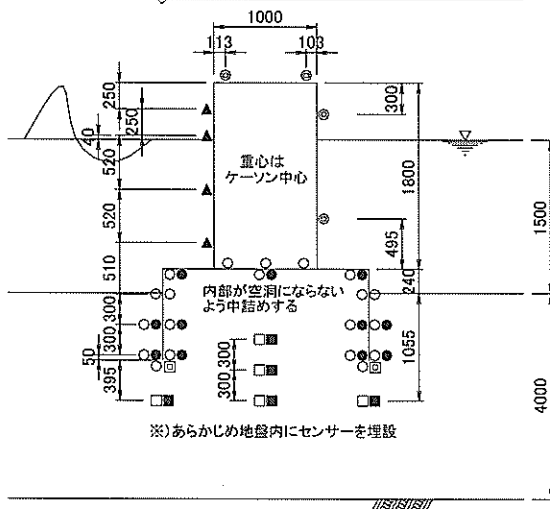
則波を用い、周期は2.5sと3.8s（現地換算で8.0sと12.0s）の2種類、波高は20.0cm～65.0cm（現地換算で2.0m～6.5m）の範囲とした。なお、CaseCは波高を大きくするために水深を大きくしており、この条件では計算上は破壊が生じる設定となっている。

表-2 実験ケース一覧（大型模型実験）

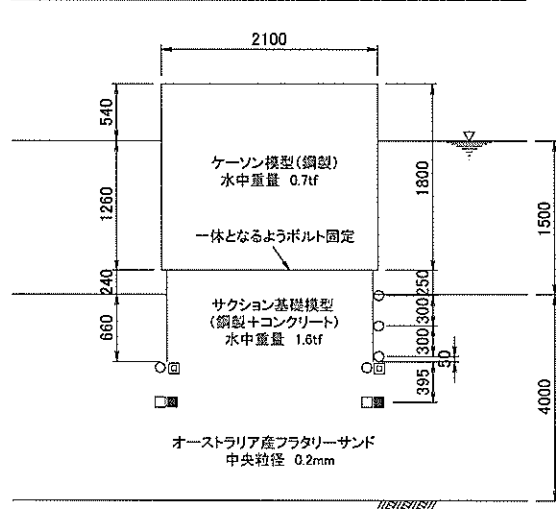
水深(m)	周期(s)	波高(cm)	Case
		20.0	CaseA1
1.5	2.5	30.0	CaseA2
		40.0	CaseA3
		50.0	CaseA4
		58.9	CaseA5
		3.8	20.0
26.0	CaseB2		
33.0	CaseB3		
40.0	CaseB4		
46.9	CaseB5		
1.7	3.8	65.0	CaseC



A-A断面図



B-B断面図



測定箇所	計測器	センサー容量
基礎頂板内側	圧力 × 3	1 kgf/cm <sup>2</sup>
	間隙水圧 × 3	0.5 kgf/cm <sup>2</sup>
基礎先端	土圧 × 4	5 kgf/cm <sup>2</sup>
	間隙水圧 × 4	0.5 kgf/cm <sup>2</sup>
基礎側面内側	土圧 × 4	0.5 kgf/cm <sup>2</sup>
	間隙水圧 × 6	0.5 kgf/cm <sup>2</sup>
基礎側面外側	土圧 × 4	0.5 kgf/cm <sup>2</sup>
	間隙水圧 × 9	0.5 kgf/cm <sup>2</sup>
基礎内部地盤	土圧 × 2	2 kgf/cm <sup>2</sup>
	間隙水圧 × 2	2 kgf/cm <sup>2</sup>
下方地盤	土圧 × 5	2 kgf/cm <sup>2</sup>
	間隙水圧 × 5	2 kgf/cm <sup>2</sup>
ケーソン前面	波圧 × 4	0.5 kgf/cm <sup>2</sup>
	波高 × 2	
ケーソン天端	変位 × 2	15 cm
ケーソン背面	変位 × 2	15 cm
ケーソン底面	間隙水圧 × 3	0.5 kgf/cm <sup>2</sup>
計		64ch

- 土圧計(BPR-A-S フィルター無)
- 土圧計(BP-B フィルター無)
- 土圧計(BE-D)
- 間隙水圧計(BPR-A-S)
- 間隙水圧計(BP-B)
- ▲ 波圧計(BPR-A-S フィルター無)
- ◎ 変位計(ノボ式 水中仕様)
- ◇ 波高計(容量式)

図-13 計測器取り付け位置

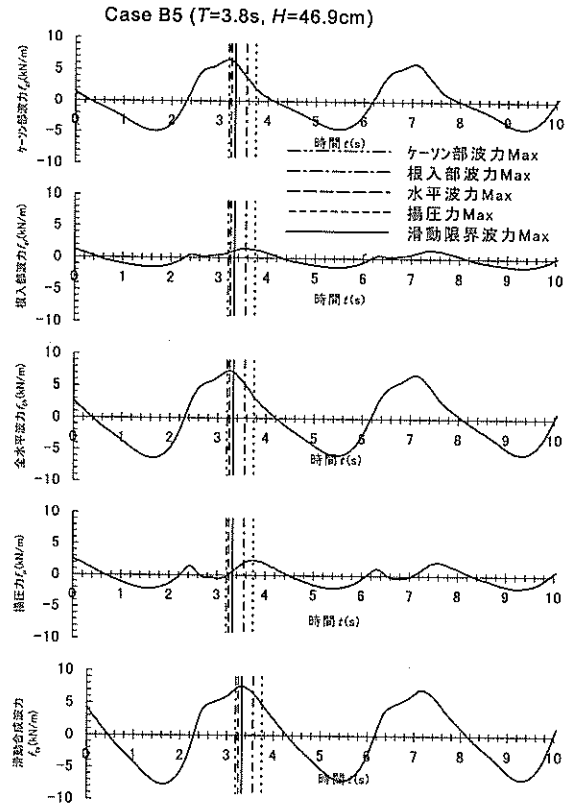
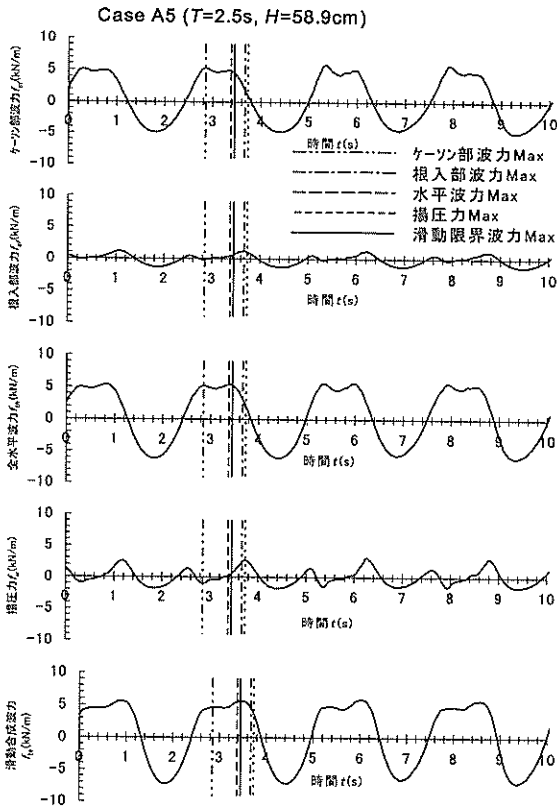


図-14 構造物各部に作用する波力の時間変化

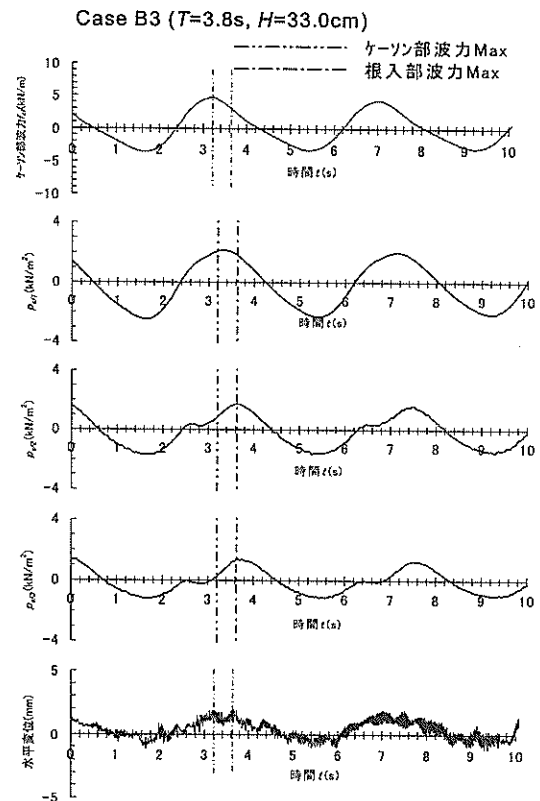
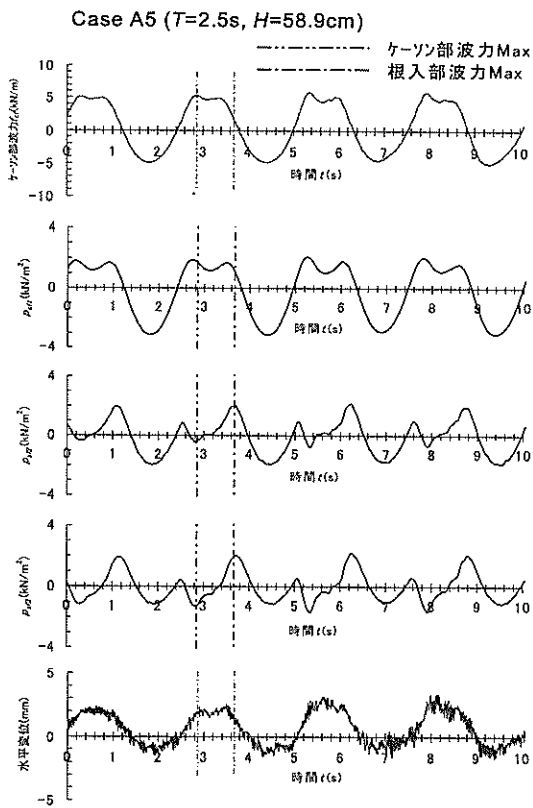


図-15 サクシオン基礎前面波圧の時間変化

## 4.2 実験結果

### (1) ケーソンと基礎前面における波力の位相関係

図-14は、ケーソン部に作用する単位幅あたりの波力 $f_{cf}$ 、サクシオン基礎前面根入れ部に作用する波力 $f_{sf}$ 、ケーソンおよび基礎前面に作用する全水平波力 $f_{th}$ 、底面に作用する揚圧力 $f_{su}$ 、滑動合成波力 $f_{s}$ の時間変化を示したもので、周期2.5s、波高58.9cm (CaseA5) および周期3.8s、波高46.9cm (CaseB5) の例である。なお、ここで示した揚圧力は、サクシオン基礎先端の沖側と岸側2つの間隙水圧計から求めた値である。また、滑動合成波力とは、全水平波力と、揚圧力に摩擦係数( $\mu=0.6$ )をかけた値の和であり、構造物全体の滑動安定性を検討する際に用いられる波力である。

CaseB5の場合、ケーソン部波力は一山型の波形であり、波力が最大となる時刻は、全水平波力、滑動合成波力が最大となる時刻と比較的近い。一方、CaseA5の場合、ケーソン部波力が二山型となっており、しかも、二つのピークの値にあまり差がない。そのため、ケーソン部波力については最初のピークで最大となっているが、全水平波力および滑動合成波力については2つめのピーク付近で最大となっている。いずれの場合についても、根入れ部波力が最大となる時刻はこれらよりも遅く、揚圧力が最大となるのはさらに遅れている。これらの位相関係や、根入れ部波力がケーソン部波力に比べてかなり小さいことなど、基本的には小型実験の結果と同様である。

### (2) サクシオン基礎前面に作用する圧力の時間変化

図-15は、周期2.5s、波高58.9cm (CaseA5) および周期3.8s、波高33.0cm (CaseB3) における基礎前面の各点での圧力(間隙水圧)の時間変化を示したものである。比較のため、ケーソン部波力とケーソンの重心位置における水平変位の波形も合わせて示している。また、図にはケーソン部および根入れ部の波力が最大となる時刻も示している。なお、変位のデータについてはノイズが大きいが、これは、測定レンジが20cmの変位計でmmオーダーの微小な変位を測定しており、分解能が低く相対的にノイズが大きくなったものである。

CaseA5の場合、基礎前面上側の間隙水圧 $p_{sf1}$ についてはケーソン部波力とほとんど同じ波形となっている。これは、センサーが地盤表面ぎりぎりに位置しているため、地盤表面での圧力変化がほとんどそのまま伝わっているものと考えられる。一方、ある程度深い位置にある $p_{sf2}$ および $p_{sf3}$ については、ケーソン部波力が最大となる時刻の付近で、小型実験においても確認された負圧の発生が見られる。このときの水平変位を見ると、岸側へ最大で2.5mm程度変位する途中であり、構造物の岸側への移動速

度が最大である。したがって、変位によって地盤内の空隙が広がり、間隙水圧が低下したと考えられる。また、根入れ部前面の波力が最大となる時刻では、 $p_{sf2}$ および $p_{sf3}$ の値が $p_{sf1}$ よりも大きくなっている。これは、地盤内での圧力減衰と矛盾しているが、このときの水平変位を見ると、今度は沖側へ戻る途中であり、沖側への移動速度が最大である。したがって、広がっていた地盤が元に戻ることによって間隙水圧が上昇したと考えられる。

CaseB3の場合、CaseA5ほど顕著ではないが、よく見るとやはり多少の負圧が発生していることがわかる。値が小さいのは変位が小さく、しかも周期が長いいため移動速度がより小さくなるためである。

こうした構造物の変位による負圧の発生および戻り時の圧力増加は、構造物の移動速度によって決まり、変位が大きく時間が短いほど、すなわち波高が大きく周期が短いほど顕著に現れることになる。したがって、波形勾配 $H/L$ をパラメータとして整理できると考えられる。なお、現地の場合、周期の変化に比べて相対的に変位の増加が大きく、模型実験と比べて移動速度がより速くなるため、こうした圧力変動の影響はいっそう大きくなる。

### (3) ケーソンおよび基礎前面に作用する圧力の分布

図-16は、ケーソンおよびサクシオン基礎前面に作用する圧力分布を、各点における圧力の最大値、全水平波力最大時における各点での圧力、根入れ部波力最大時における各点での圧力について小型実験における図-7と同様にプロットしたものである。

波圧最大値で見ると、ケーソン部については合田式の値とほぼ同じかやや小さい程度であり、よく一致している。一方、基礎前面については、波高が小さいうちは計算値よりやや小さい値となっており、波高の大きい場合には下側の点において計算値よりも大きな値となっている。これは、前項で述べたようにケーソンの変位による圧力増加の影響であり、波形勾配 $H/L$ が0.04以上になるとこのような傾向が現れている。また、滑動合成波力最大時における基礎前面の値については、すべて計算値よりも小さくなっている。

### (4) サクシオン基礎全体に作用する圧力

図-17は、前面も含めた基礎周辺の圧力の時間変化を、周期3.8s、波高58.9cm (CaseA5) について示したものである。左上から順に、基礎前面外側 ( $p_{sf1} \sim p_{sf3}$ )、基礎前面内側 ( $p_{sfi1} \sim p_{sfi3}$ )、基礎背面内側 ( $p_{sri1} \sim p_{sri3}$ )、基礎背面外側 ( $p_{sri1} \sim p_{sri3}$ )、基礎側面外側 ( $p_{sm1} \sim p_{sm3}$ )、基礎底版内側 ( $p_{sm1} \sim p_{sm3}$ )、ケーソン下面 ( $p_{cut} \sim p_{cus}$ )、基礎前面先端 ( $p_{su1}$ )、基礎背面先端 ( $p_{su2}$ ) での圧力を表している。小型実験では圧力、変位ともに小さかったため

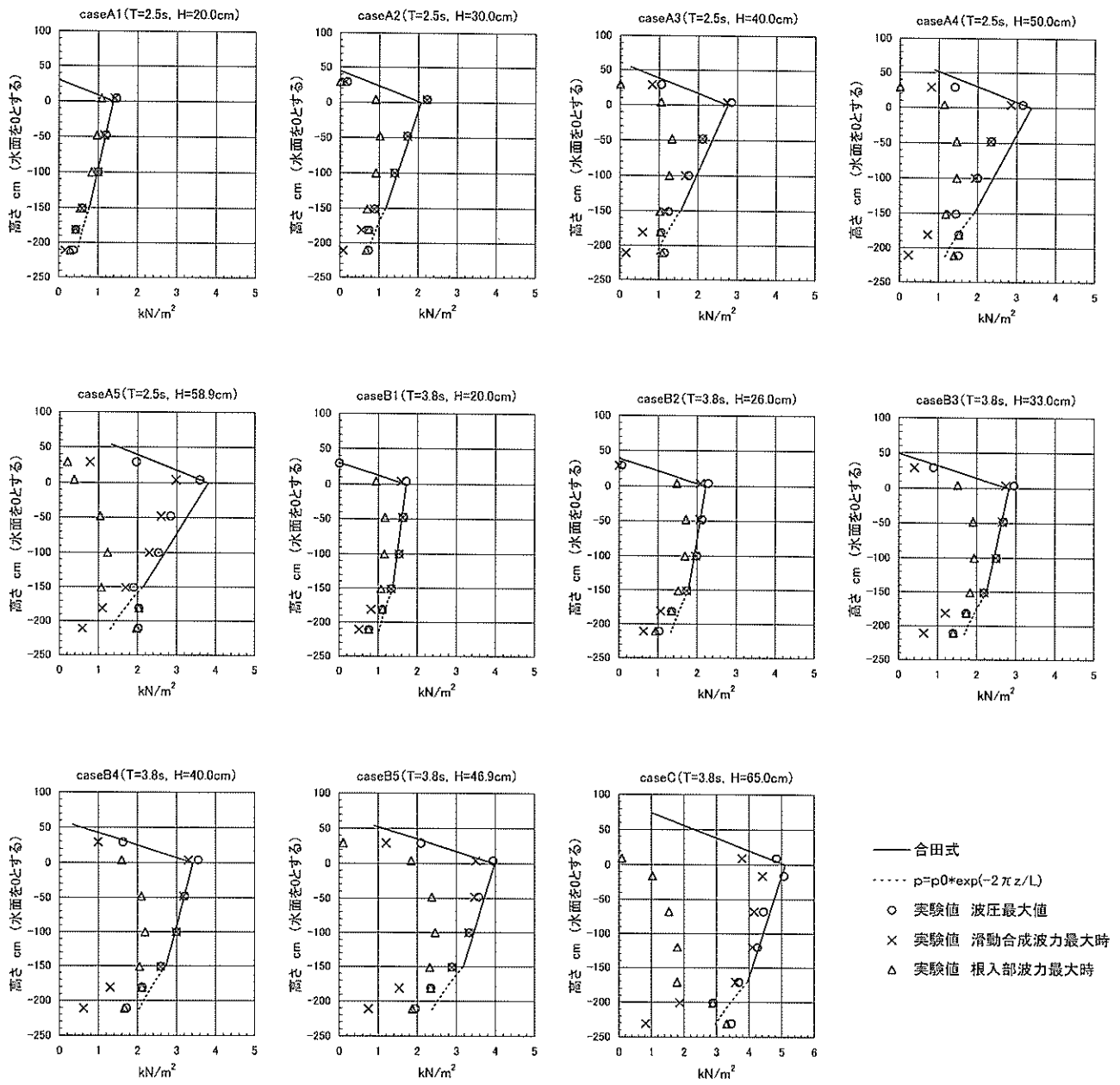


図-16 ケーソンおよび基礎前面に作用する圧力分布

Case A5 ( $T=2.5s, H=58.9cm$ )

ケージ上部波力 Max  
根入部波力 Max

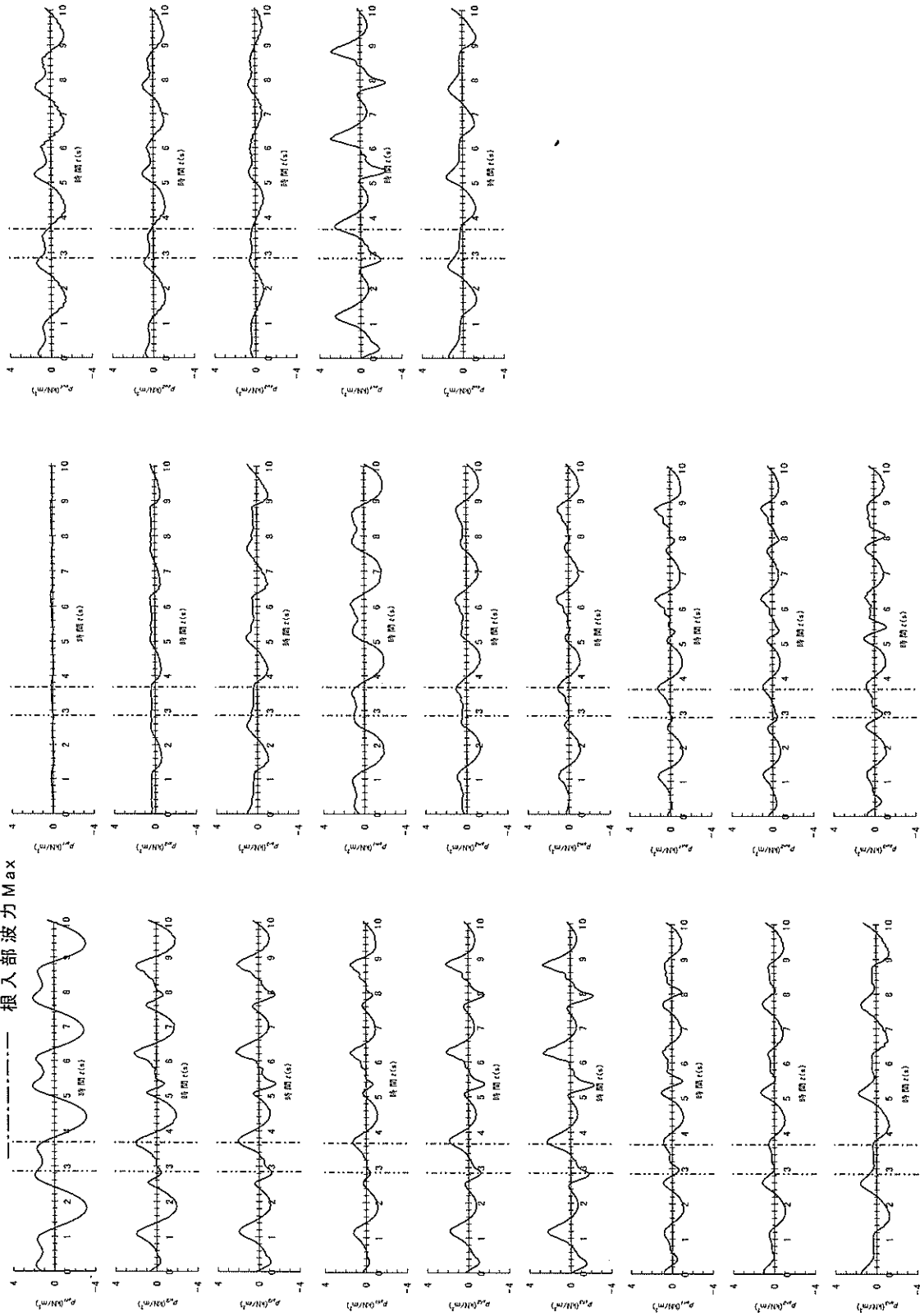


図-17 サクシヨン基礎周辺の圧力の時間変化

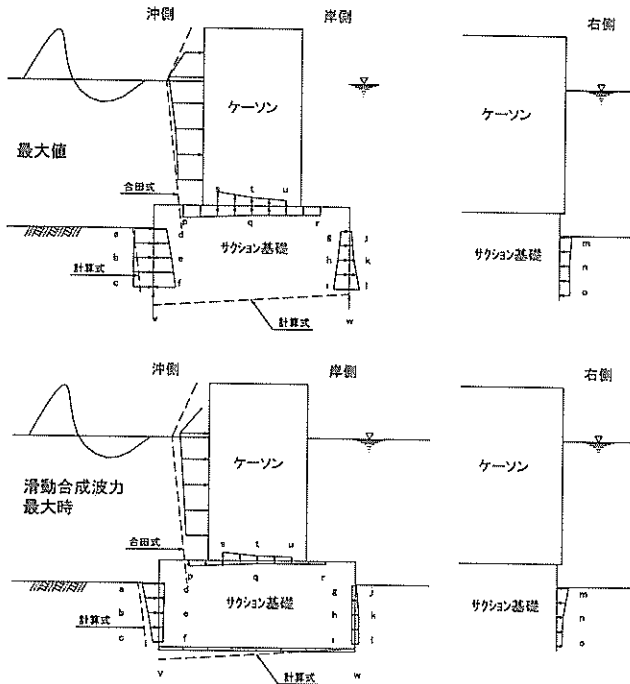


図-18 各測点における圧力分布

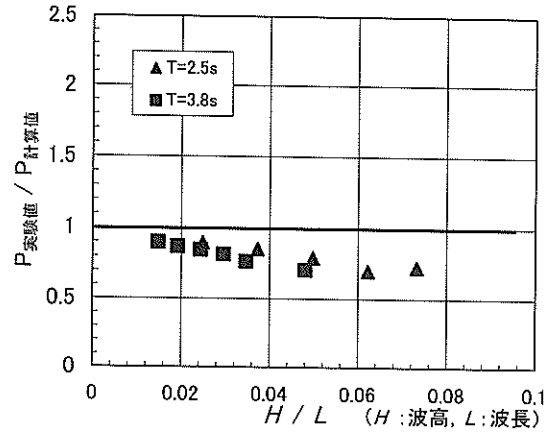


図-19 滑动合成波力の実測値と計算値

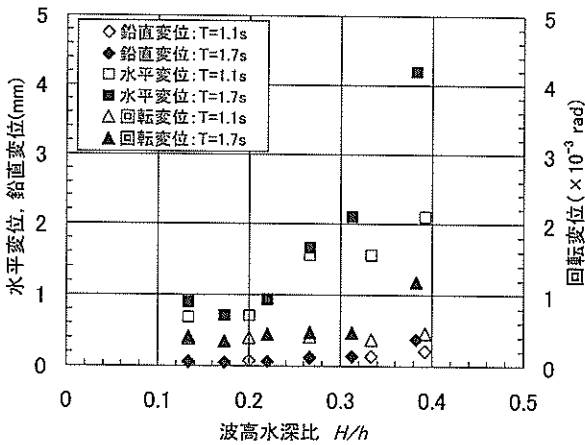


図-20 波作用時における動揺量

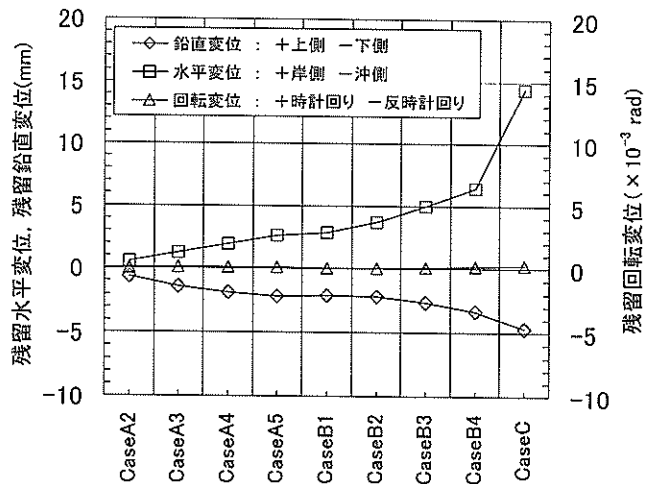


図-21 波作用後の残留変位

あまり顕著ではなかったが、サクション基礎周辺のほとんどの点において、変位による圧力減少および圧力増加がはっきりと見られる。

図-18は、図-17と同じケースについて、各測点における圧力の最大値と、滑动合成波力最大時における各点での圧力の分布を示したものである。各点における最大値については、変位による圧力増加の影響もあって、各点で比較的大きな圧力が見られ、基礎前面下側の圧力および基礎先端での揚圧力については、計算値を超えている。

ただし、底版裏での揚圧力は、基礎先端での値よりも小さい。一方、滑动合成波力最大時においては、基礎前面の圧力および揚圧力はいずれも計算値よりも小さく、その他の点に作用する圧力もかなり小さくなっている。

前述したように、構造物の変位によって生じる圧力は、変位の速度に依存するため、現地においては、相対的にさらに大きな圧力となると考えられる。しかしながら、こうした圧力は、いったん岸側へ変位した構造物が沖側へ戻るときに生じるものであり、変位が止まれば直ちに

なくなることから、構造物の安定性にはあまり影響しないと考えてよい。

図-19は、滑動合成波力について実測の最大値と計算値とを比較したものである。全体として実験値は計算値より小さく安全側の設計値となっており、特に、波形勾配が大きくなるほどその傾向が大きくなる。なお、ケーソン部と基礎部との位相差は、条件によって多少変化することもあり、位相差が小さい場合、滑動合成波力はやや大きくなる。これらのことを考慮すると、実際の設計においては、式(1)の計算値を用いることにより、ほぼ妥当な外力を推定できると考えられる。

#### (5) サクシオン基礎全体の変位

すでに述べたように、大型実験の場合、小型実験に比べてかなり大きな変位が見られた。図-20は、波作用時における動揺量について、ケーソンの上部2か所と背面2か所で計測した変位をもとに、ケーソンの重心位置における水平変位、鉛直変位、回転変位に分解し、それぞれの振幅を示したもので、横軸には波形勾配 $H/L$ をとっている。小型実験と同様に、水平変位と回転変位に関しては、周期の長いほうが値が大きくなっており、水平変位の最大振幅は4mm以上になっている。

図-21は、各ケースごとの波作用終了後の残留変位を示したものである。小型実験の場合と異なり、水平変位は岸側へのみ進行している。最終的に岸側へ15mm程度変位するとともに、5mm程度沈下しており、回転変位はほとんど見られなかった。CaseCにおいて水平変位が一気に増加しており、外力が地盤の抵抗力をかなり上回って、塑性変形が生じたと考えられる。ただし、小型実験の場合と同様に、CaseCの途中で特に波形の変化はみられなかった。このことから、地盤に塑性変形が生じる以前から、基礎の変位によって地盤との間には微小な隙間が生じ、圧力が基礎前面に作用していると考えてよい。

なお、地盤の変形がさらに大きくなって完全に破壊した場合、圧力の減衰がほとんどなくなり、基礎部に働く圧力がさらに大きくなることも考えられるが、今回の実験では最大の波でも地盤の破壊まで至らなかったため、こうした現象は確認できなかった。いずれにしても、基礎部が港内側へ急激に変位しようとする時、瞬間的に負圧が働くことによって変位にブレーキがかかるため、大きな変位が一気に生じる可能性は比較的小さいと考えられる。

## 5. まとめ

サクシオン基礎防波堤に対する設計波力の算定法につ

いて、小型模型実験および大型模型実験による検討を行った。主要な結論を以下に示す。

- ①ケーソン部に作用する波圧は、通常の混成堤と同様に合田式を用いて計算する。
- ②サクシオン基礎前面に作用する圧力は、地盤内での圧力が指数関数的に減少する形の式(1)で求めることができる。根入れ長の違いによる波力の変化は特に見られない。
- ③粘性土地盤の場合、理論上は砂地盤に比べて地盤内での圧力減衰が大きいが、実際には波の作用によってサクシオン基礎が変位し、わずかな隙間が生じてそこから圧力が伝播するため、設計においては砂地盤の場合と同様の波圧を考えるのが妥当である。
- ④ケーソン部に作用する波圧と基礎前面に作用する圧力には位相差があるが、波浪条件、構造条件、地盤条件によって位相差は大きく変化するため、設計においては安全側となるよう位相差を無視して同時に波力が最大になると考える。
- ⑤揚圧力についても、設計においては位相差を無視して、通常の混成堤と同様に三角形分布の圧力を考えるものとする。ただし、粘性土地盤の場合には、揚圧力は考慮しなくてよい。

今後の課題としては、構造物前面の洗掘対策を確立する必要がある。サクシオン基礎防波堤の場合、海底地盤に直接設置するため、前面の地盤が洗掘を受けやすく、直江津における実証試験においても、前面の洗掘が確認されている。また、サクシオン基礎の目地部には速い流れが生じるため、目地部についても洗掘対策が必要である。今回の研究においても、目地部に捨石を設置して洗掘を防止する方法などについて一部検討を行ったが、実験ケースの制約などにより十分なデータが得られなかったため、本論文では特に触れていない。また、あらかじめ洗掘されることを想定して、根入れ長を割り増しておく方法も考えられるが、現状では洗掘量を適切に推定することは困難である。今後は、これらの点についてもさらに検討が必要である。

## 謝辞

本研究は、港湾空港技術研究所、九州大学、沿岸開発技術研究センターおよび民間20社で構成される「サクシオン基礎を活用した構造物に関する共同研究」の成果であり、九州大学善功企教授をはじめ、関係者の皆様から多大なご協力を得ている。また、本研究の実施に当たっては、高橋重雄海洋・水工部長から有益な助言を得ている。さらに、直江津港における現地実証試験に関して、

国土交通省北陸地方整備局新潟港湾空港技術調査事務所の白石哲也前所長をはじめとする関係者の皆様から貴重なご意見を頂いている。ここに記して、感謝の意を表する次第である。

(2002年5月30日受付)

#### 参考文献

- (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1999年，pp.140-143.
- 高橋重雄・鈴木高二朗・徳渕克正・岡村知光・下迫健一郎・善 功企・山崎浩之：護岸の吸い出しに関する水理模型実験，港湾技術研究所報告，第35巻第2号，1996年，pp.3-58.
- 北陸地方整備局新潟港湾空港技術調査事務所：サクショ  
ン基礎構造物設計・施工マニュアル（案），2001年，  
345p.



港湾空港技術研究所資料 No.1027

2002.9

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

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

印刷所 株式会社ポートサイド印刷

Copyright © (2002) by PARI

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

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