

サクシヨン基礎を用いた防波堤 の耐波安定性実験

HYDRAULIC MODEL EXPERIMENTS ON THE STABILITY AGAINST WAVE ACTIONS OF A BREAKWATER USING THE SUCTION FOUNDATION

下迫健一郎¹・藤原隆一²・中川将秀³・黒田豊和⁴
Kenichiro SHIMOSAKO, Ryuichi FUJIWARA, Masahide NAKAGAWA,
and Toyokazu KURODA

- 1正会員 独立行政法人港湾空港技術研究所 耐波研究室長(〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)
2正会員 博(工) 東洋建設株式会社 土木設計部課長(〒101-8463 東京都千代田区神田錦町3-7-1)
3正会員 工修 東洋建設株式会社 土木エンジニアリング部(〒101-8463 東京都千代田区神田錦町3-7-1)
4正会員 独立行政法人港湾空港技術研究所 耐波研究室(〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

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, and 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.

Key Words : suction, foundation, breakwater, large scale experiment, wave force, uplift, Goda pressure formula

1. はじめに

サクシヨン基礎とは図-1のような風呂桶を引っ繰り返したような構造物を地盤内に根入れした基礎であり、これを用いた防波堤は図-2のような従来の混成堤に比べて、床掘・置換や捨石マウンドを必要としないため、構造断面が小さく、工期短縮を図ることができる。

サクシヨン基礎防波堤では、基礎内部が密閉されているため、転倒する際の引き抜き力に対してサクシヨン力が発生して抵抗する。また、根入れ部の土圧は滑動に対する抵抗力として作用すると考えられる。

しかしながら、サクシヨン基礎を用いた防波堤については、いまだ未解明な点が多く、設計法が確立されていない。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。そこで、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、水理模型実験による検討を行った。

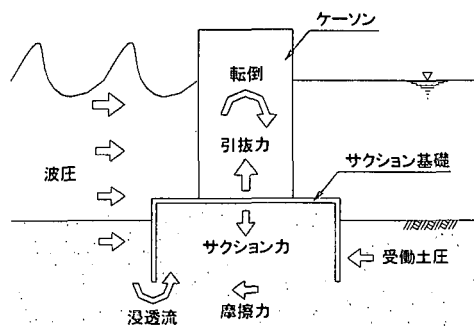


図-1 サクシヨン基礎防波堤

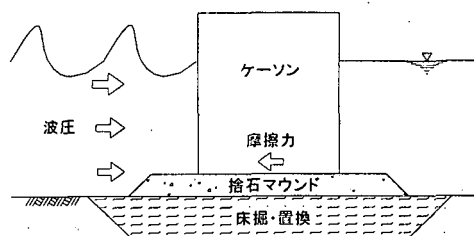


図-2 従来の混成堤

2. 地中部に作用する波力の算定式

防波堤直立部に作用する波力の計算には、一般に合田式が用いられ、サクシヨ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¹⁾を適用できる。しかしながら、サクシヨン基礎根入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、高橋らの研究²⁾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。

基礎底面に作用する揚圧力については、式(1)から求まる沖側のサクシヨン基礎根入れ先端の値と岸側のサクシヨ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。

3. 小型模型実験

(1) 実験条件

水路は長さ38.5m、幅0.48m、深さ1.0mの片面ガラス張りの二次元造波水路を使用した。実験断面は現地に対する縮尺を1/50程度と想定し、サクシヨン基礎模型形状は矩形とした。サクシヨン基礎模型は厚さ12mmの亚克力製で根入れ長が異なる2種類を用意した。ケーソン模型も亚克力製で、内部に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。実験時はケーソン部と一体となるようボルトで固定した。

計測器は、土圧計、間隙水圧計、圧力計、変位計、波高計を用い、図-3に示すとおり配置した。表-1は、実験の種類を示したもので、地盤条件およびサクシヨン基礎の根入れ長を変えた3種類について行った。砂地盤は相馬硅砂6号(平均粒径0.14mm程度)を使用した。粘性土地盤は市販のカオリン粘土を5.88kN/m²に圧密して使用した。

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の範囲で、周期ごとにそれぞれ4段階に変化させた。

(2) 実験結果・考察

図-4は、ケーソン部に作用する波力、サクシヨン基礎前面根入れ部に作用する波力、ケーソンおよび基礎前面に作用する全水平波力の時間変化を示した例である。

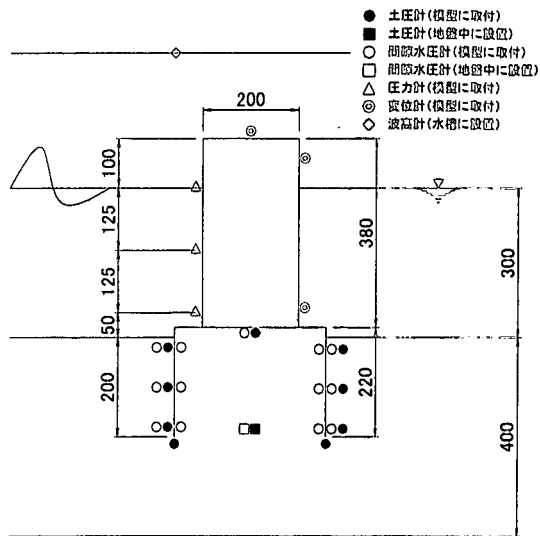


図-3 実験断面(標準タイプ)

表-1 実験の種類

タイプ	地盤条件	根入れ長
Atype	砂地盤	20.0cm
Btype	砂地盤	25.0cm
Ctype	粘性土地盤	20.0cm

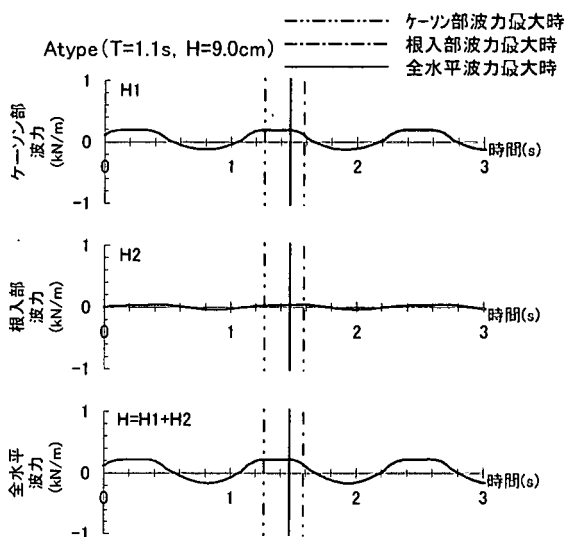


図-4 波力の時間変化の例

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。ただし、この例ではケーソン部の波力が非常に緩やかに変化しているため、基礎部の波力の影響により、ケーソン部波力と全水平波力の最大となる時刻がややずれている。

図-5は、ケーソンおよびサクシヨン基礎前面に作用す

る波圧分布を各点での波圧最大値・全水平波力最大時の波圧・根入部波力最大時の波圧についてプロットした図である。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、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おり、式(1)を設計式として用いてもよいと考えられる。なお、A type, B typeともに計算値と実験値が良く合っており、今回の実験においては根入れ長の影響は認められなかった。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、ケーソンおよび基礎部が波の作用によって微小な変位を繰り返すため、基礎と

地盤との間にわずかな空隙が生じて圧力が伝播するためではないかと思われる。

図-6は、基礎前面および底面の各点における波圧の時間変化を示したもので、前面上から順に a,b,c (B type では d まで)、基礎底面裏が e である。粘性土地盤の場合、砂地盤に比べて位相差が大きく現れており、前面の上と下とで最大となる時刻のずれが大きい。また、揚圧力については位相差がさらに大きく、基礎前面上の波圧とほぼ逆位相になっている。この波形が波力の伝播によるものであれば、前面の圧力に比べてかなり減衰するはずであるが、最大値で見るとほぼ同じ大きさであり、ケーソンおよび基礎部の微小な変位による内部水圧の変動ではないかと思われる。なお、粘性土の場合、揚圧力は全水平波力最大時に負の値となっており、安全側に考えても設計においては考慮しなくてよい。

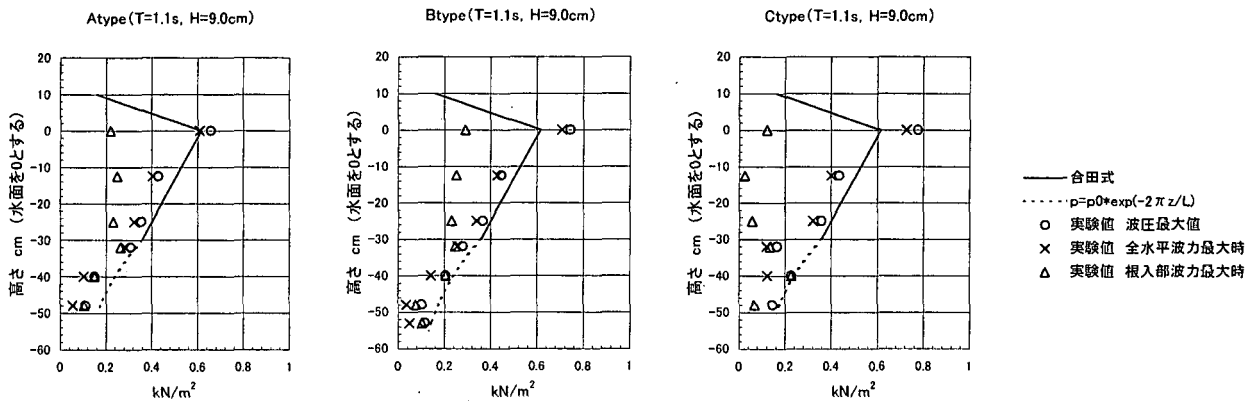


図-5 ケーソンおよびサクシオン基礎前面に作用する波圧分布

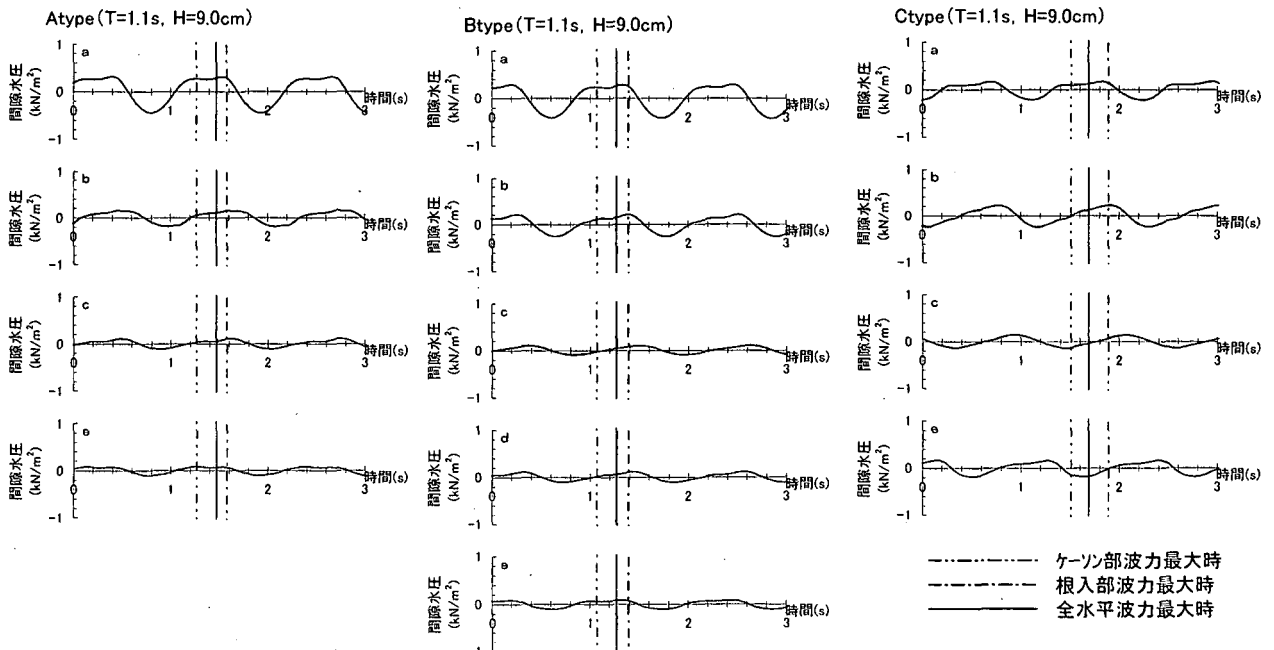


図-6 サクシオン基礎前面および底面に作用する波圧の時間変化

4. 大型模型実験

(1) 実験条件

小型実験における結果を踏まえて、相似則の影響についても検討を行うため、より大型の模型実験を行った。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型水路を使用した。現地に対する模型縮尺は1/10を想定し、サクシオン基礎模型形状は円形とした。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。用いた計測器は小型実験と同様であり、図-7に示すように配置した。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）を使用した。実験断面は1種類のみとし、表-2に示すように、水深と周期を変えた3ケースについて行った。なお、Case Cの波では計算上では破壊が生じる設定となっている。

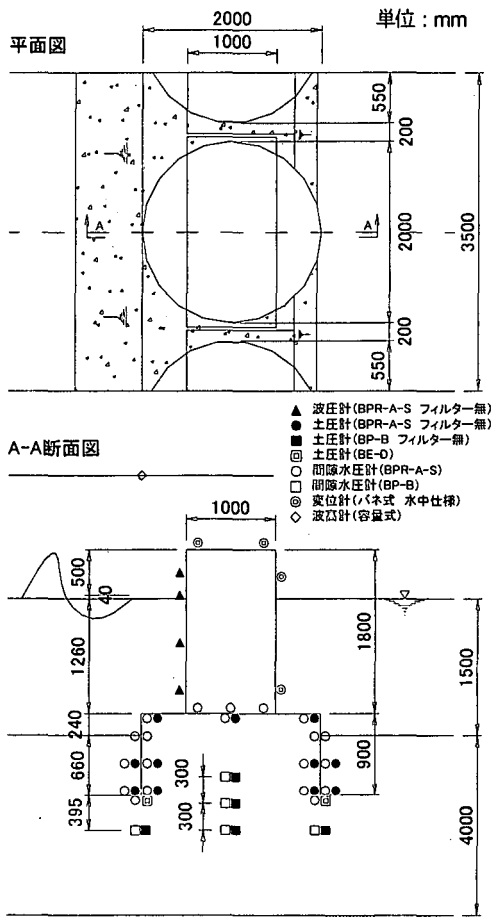


図-7 実験断面および計測位置

表-2 実験ケース

ケース	水深	周期	波高
Case A	150cm	2.5s	20.0~58.9cm
Case B	150cm	3.8s	20.0~46.9cm
Case C	170cm	3.8s	65.0cm

(2) 実験結果・考察

図-8は波力の時間変化の例を示したものである。滑動合成波力とは全水平波力と、揚圧力に摩擦係数 ($\mu=0.6$) をかけた値との和である。滑動合成波力最大値は小型模型実験と同様にケーソン部波力でほぼ決まる。揚圧力は根入部波力最大時にほぼ最大となり、滑動合成波力最大時には小さくなっている。

図-9は、ケーソンおよびサクシオン基礎前面に作用する波圧分布について、各点での波圧最大値、滑動合成波力最大時の波圧、根入部波力最大時の波圧について示したものである。ケーソン部では小型模型実験と同様に合田式の計算値と良く合っている。一方、基礎前面については、波高が大きくなると式 (1) から求まる計算値と異なり、下へいってもほとんど減衰しない場合が見られる。紙面の都合により波形は示していないが、これらの場合には、他のケースに比べて波力が最大となる位相がかなり遅れており、小型実験でも述べたように、ケーソンの変位によって生じる隙間の影響と思われる。

図-10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。

図-11は、揚圧力について実測の最大値および滑動合成波力最大時の値と計算値を比較したものである。最大値は波形勾配0.04以上で計算値より大きくなっており、これもケーソンの変位による間隙水圧の増加と考えられる。一方、滑動合成波力最大時の値については計算値の半分程度であり、かなり安全側の値となっている。

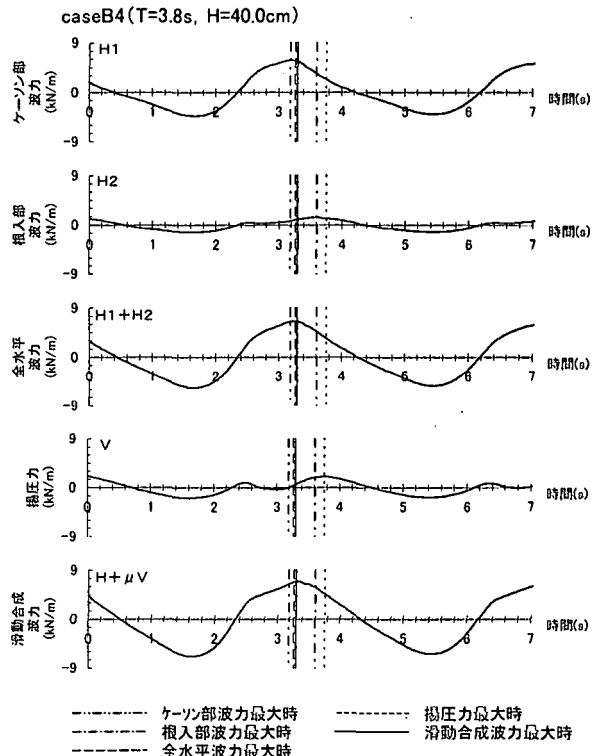


図-8 波力の時間変化

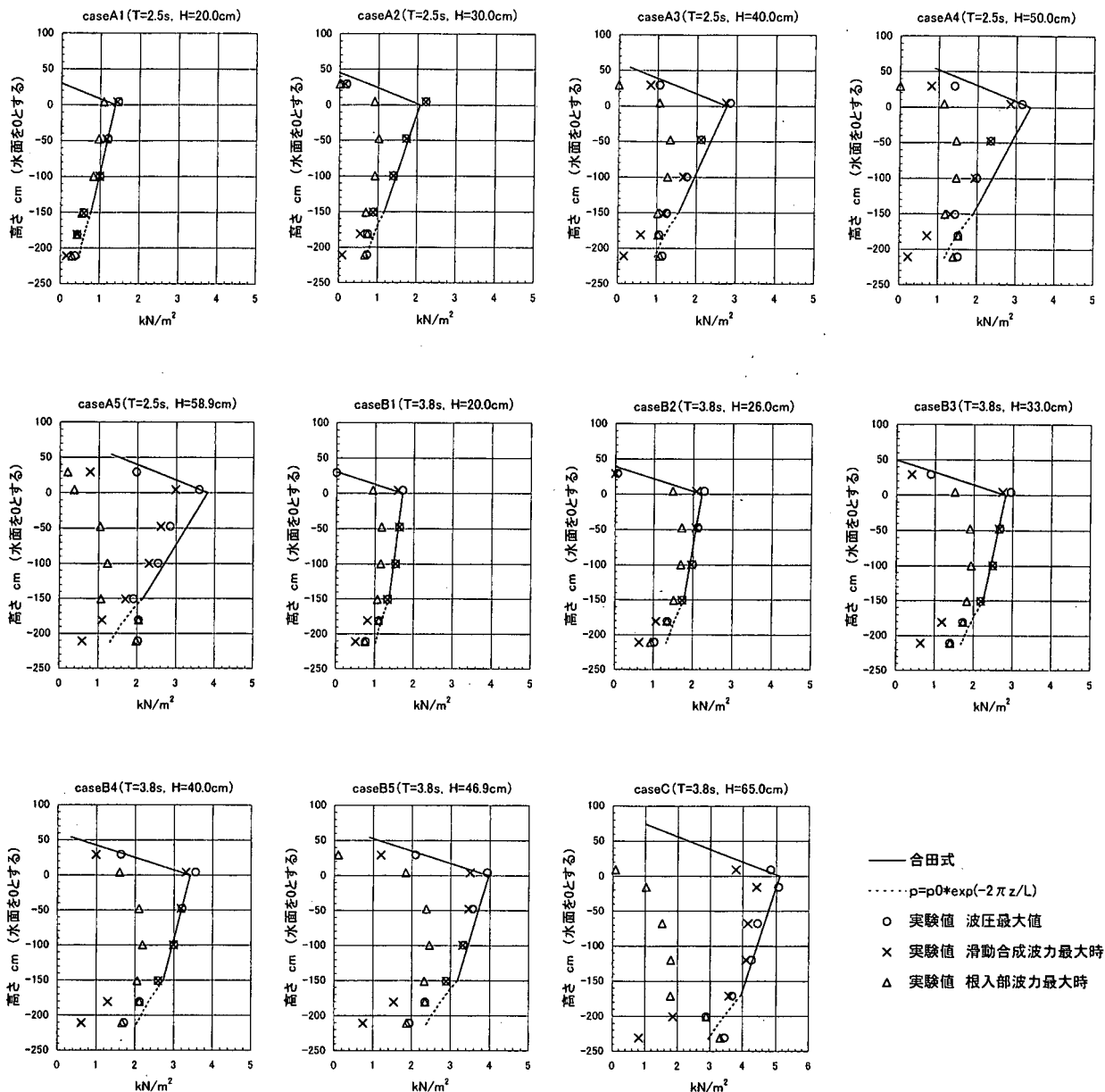


図-9 ケーソンおよびサクシオン基礎前面に作用する波圧分布

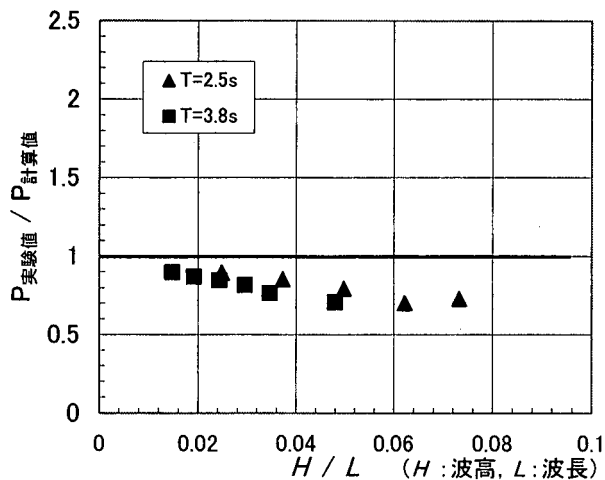


図-10 滑動合成波力の実験値と計算値

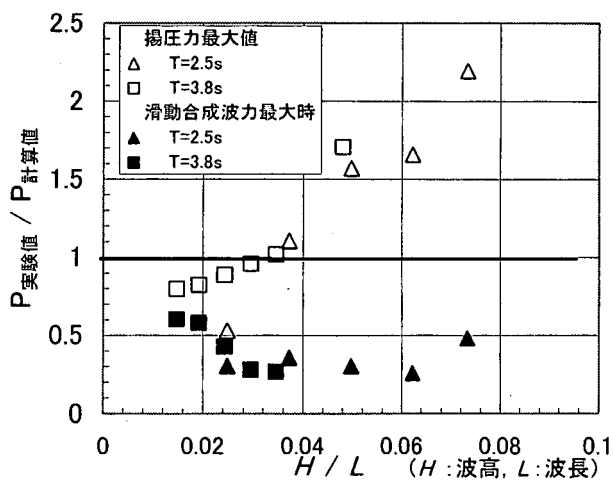


図-11 揚圧力の実験値と計算値

caseB4(T=3.8s, H=40.0cm)

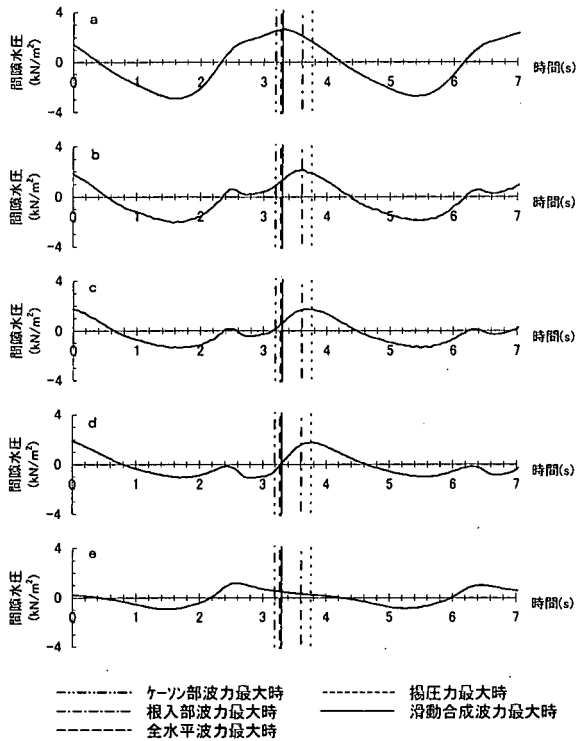


図-12 基礎前面および底面に作用する波圧の時間変化

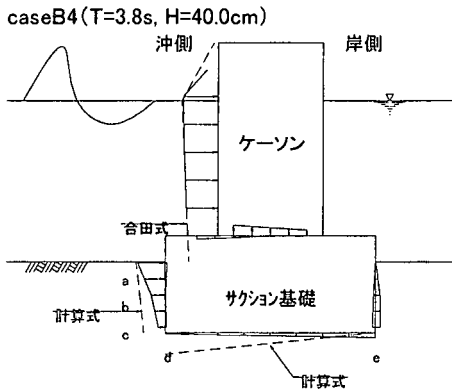


図-13 滑動合成波力最大時の波圧分布

図-12は、基礎前面および底面に作用する波圧の時間変化の例であり、図-13は、同じケースについて滑動合成波力最大時の各点における波圧分布を示したものである。図-13にも示しているとおり、a~cが前面、d,eは底面（基礎先端）での圧力を示している。すでに述べたように、基礎前面波力および揚圧力が最大となる時刻は滑動合成波力最大時よりも遅れている。特に、揚圧力については、揚圧力最大時には前面側で大きく背面側でほぼ0となる三角形分布となっているが、滑動合成波力最大時には値がかなり小さく、等分布あるいは逆三角形分布に近づいている。

5. まとめ

サクシヨ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。

- ・ 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にて算出する。
- ・ サクシヨン基礎前面に作用する波圧は、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。
- ・ 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ヨン基礎が変位し、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。
- ・ 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。
- ・ 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。

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「サクシヨ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、関係者の皆様から多大なご協力を得ている。また、サクシヨン基礎を用いた防波堤は、国土交通省北陸地方整備局により、直江津港において現地実証試験が実施されており、本研究の実施に当たっては、新潟港湾空港技術調査事務所を初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。

参考文献

- 1) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1999。
- 2) 高橋重雄・鈴木高二朗・徳淵克正・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，pp.3-58，1996。