

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No. 564

January 2010

ケーソン式防波堤の大変形メカニズムに関する実験的研究

宮田正史・吉田誠・安野浩一朗

Experimental Study on Large Deformation Mechanism of Caisson Type Breakwater
Subject to Extreme Wave Load

Masafumi MIYATA, Makoto YOSHIDA, Kouichirou ANNO

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

ケーソン式防波堤の大変形メカニズムに関する実験的研究

宮田正史*・吉田誠**・安野浩一朗***

要 旨

本研究では、偶発波浪荷重を受けた際の防波堤の大変形メカニズムを把握するために、ケーソン式防波堤（混成堤および消波ブロック被覆堤）を対象とした水理模型実験および静的載荷実験を実施した。これらの実験結果から、ケーソン式防波堤の大変形過程におけるケーソンに作用する波力や揚圧力の変化、ケーソンの変位特性、捨石マウンドの破壊形態、およびケーソンの変位特性と捨石マウンドの破壊形態との関係など、ケーソン式防波堤の大変形メカニズムに関する基礎的な知見が得られたため、速報として報告するものである。

キーワード：ケーソン式防波堤、偶発波浪、大変形メカニズム、水理模型実験、静的載荷試験

* 港湾局技術企画課技術監理室課長補佐（前港湾研究部港湾施設研究室主任研究官）

** 五洋建設株式会社 技術研究所係長

*** 五洋建設株式会社 技術研究所主任

〒100-8918 東京都千代田区霞が関2-1-3

電話：03-5253-8681 Fax：03-5253-1652 e-mail: miyata-m92y2@mlit.go.jp

Experimental Study on Large Deformation Mechanism of Caisson Type Breakwater Subject to Extreme Wave Load

Masafumi MIYATA*

Makoto YOSHIDA**

Kouichirou ANNO***

Synopsis

In order to investigate the mechanism of large deformation mechanism of caisson type breakwaters subjected to extreme wave loads, we performed a series of hydraulic model experiments and static-loading experiments. Two types of caisson type breakwater, caisson type composite breakwater and caisson covered with wave-dissipating block were tested in the condition of large displacement of the caisson and the rubble mound foundation. This report shows the experiment results with some considerations.

Key Words : caisson type breakwater, extreme wave load, large deformation mechanism, hydraulic model experiment, static-loading experiment

* Engineering Administrative Office, Engineering Planning Division, Ports and Harbours Bureau
(Ex-Senior Researcher of Port Facilities Division, Port and Harbor Department)

** Assistant-Manager, Institute of Technology, Penta-Ocean Construction Co., Ltd.

*** Research-Engineer, Institute of Technology, Penta-Ocean Construction Co., Ltd.
2-1-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo, 100-8918 Japan

Phone : +81-3-5253-8681 Fax : +81-3-5253-1652 e-mail: miyata-m92y2@mlit.go.jp

目 次

1. はじめに	1
2. 二次元模型実験	1
2.1 水理模型実験	1
2.2 静的載荷実験	3
3. 実験結果および考察	4
3.1 代表ケースの実験結果	4
3.2 実験結果の考察	8
4. おわりに	28
参考文献	28

1. はじめに

2007年に港湾の技術基準が改正され、性能規定型の基準へと移行した（日本港湾協会，2007）．人命や社会経済活動等に重大な影響を及ぼすと判断された防波堤については、施設にとって最も危険な波浪として定義される偶発波浪による性能照査が規定された．しかしながら、我が国の防波堤の設計で考慮すべき偶発波浪の定義については現在検討中の段階にある（例えば、平石ら，2008）．さらに、防波堤の安定性について多くの研究が行われているが（例えば、下迫ら，2003），設計で想定された波力を超過するような波力（港湾基準の規定では、偶発波浪荷重と呼ばれる）を受けて防波堤に大きな変形が発生する場合の変形メカニズムについては十分な知見がない状況にある．

過去の被災事例（例えば、宮井ら，1993）の中には、捨石マウンドの破壊が要因とみられる被災や堤体がマウンドから滑り落ちる例も報告されており、性能設計の枠組みの中で、このようなケーソン式防波堤の大変形メカニズムを考慮できる被災予測手法の構築が今後必要となると考えられる．また、堤体が大きく変位すると、ケーソンに作用する外力も変化し、累積する滑動変形量や最終的な防波堤の破壊形態に影響を及ぼすことが考えられる．しかしながら、防波堤の変形に伴う作用外力の変化に関しても、ほとんど検討がなされていない．

本研究では、偶発波浪荷重を受けた際の防波堤の大変形メカニズムを把握するために、ケーソン式防波堤（混成堤および消波ブロック被覆堤）を対象とした水理模型実験および静的載荷実験を実施した．これらの実験結果から、ケーソン式防波堤の大変形過程におけるケーソンに作用する波力や揚圧力の変化、ケーソンの変位特性、捨石マウンドの破壊形態、およびケーソンの変位特性と捨石マウンドの破壊形態との関係など、ケーソン式防波堤の大変形メカニズムに関する基礎的な知見が得られたため、速報として報告するものである．

2. 二次元模型実験

2.1 水理模型実験

(1) 全体概要

水理模型実験は造波水路（長さ 50m，幅 0.6m，高さ 1.2m）にて実施した．造波水路および模型の配置イメージを図-2.1 に示す．実験模型は、造波装置から 35m 位置に設置し、背面には消波装置を設置した．なお、実験時には越波による模型前背面での水位勾配の発生を防ぐ

ため、消波装置背面に越波柵を別途設置して実験を行った．模型縮尺は 1/30 とし、ケーソン形状およびマウンドの高さは、大変形破壊に至った防波堤の被災事例（宮井ら，1993）を参考に仮想的な断面として設定した．実験は消波ブロックがある場合とない場合のケースについてそれぞれ実施した．

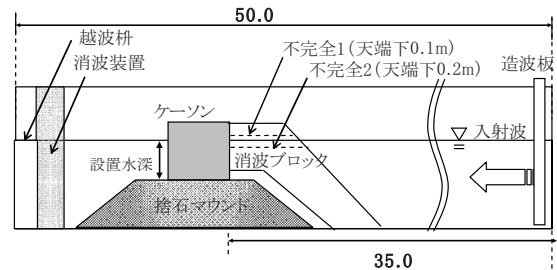


図-2.1 実験全体図（単位：m）

表-2.1 に実験模型の概要を示す．本研究においては、ケーソン規格・設置水深の異なる Type1 および Type2 の断面について実験を行った．Type1 では、ケーソン前面にブロック荷重計測用の計測器を設置した幅の広いケーソンを使用し、Type2 ではブロック荷重計測用の計測器を撤去したケーソンを使用した．また、Type1 と Type2 の実験ではマウンド高さを一定とした．ケーソンの水中重量は、2つの Type の実験模型が概ね同じ比重となるように調整したため、Type2 の水深は Type1 よりも 0.075m 増した状態として実施を実施した．

表-2.1 実験模型の概要

実験ケース	単位	Type1	Type2
縮尺・波浪条件	—	1/30・波高 0.325m，周期 2.14s	
ケーソン規格	m	B0.466×H0.483 ×L0.60	B0.39×H0.483 ×L0.60
水中質量	kN	1.47	1.32
設置水深	m	0.328	0.408

表-2.2 に実験ケース一覧を示す．実験は、Type1 および Type2 について消波ブロックを設置しない混成堤断面と消波ブロックを設置した断面について実施している．消波ブロックの規格は、現地換算で 64t 型テトラブロックを使用した．消波ブロックの被覆状態は、ケーソン天端面までを被覆した状態を完全断面とし、その断面に対して天端面のブロックを 1 段、および 2 段分取り除いた断面をそれぞれ不完全 1、および不完全 2 と定義した．

実験におけるマウンドの高さは 0.367m（現地換算で約 11m）とした．肩幅は、ケーソン背後からマウンド法肩までの距離と定義し、肩幅大が 0.25m（現地換算で約

7.5m), 肩幅小 0.167m (現地換算で約 5.0m), および肩幅狭で 0.127m (現地換算で約 3.8m) と設定した。

実験 No.5~No.8 については, ケーソンの大変形を含む破壊実験の再現性を確認するために, 計測器を設置していないケーソン模型を用いて同じ条件の実験を 3 回試行したものである。

波浪条件については, 本実験の開始前に, 波高および周期を変えた予備実験を実施し, 今回の実験対象断面において防波堤が大きく変形する条件を試行的に決定したものである。この結果, 波高 0.325m, 周期 2.14s の規則波を 50 波作用させることとした。なお, 表-2.2 に示す滑動安全率とは, 実験で得られた計測水平波力, ケーソン水中重量および摩擦係数を用いて算出した安全率である。

表-2.2 実験ケース一覧

No	模型	消波工	マウンド肩幅	実験回数	滑動安全率	摘要		
1	TYPE 1	無	小	1	0.96	本実験		
2		無	大	1				
3		不完全 1	大	1			0.92	
4		不完全 2	大	1			0.94	
5		無	小	3	0.96		再現性確認 (Case1)	
6		無	大	3			再現性確認 (Case2)	
7		不完全 1	小	3			0.92	再現性確認 (Case3)
8		不完全 2	小	3			0.94	再現性確認 (Case4)
9	TYPE 2	無	小	1	0.89	本実験		
10		無	狭	1				
11		不完全 1	小	1			0.76	

(2) 模型諸元の詳細

被災事例の防波堤に使用されていた基礎捨石は, 5~100kg/個であり, このとき, 捨石の土粒子密度を 2.6, 形状を球体と仮定した場合, 粒径は 154mm~419mm となる。したがって, 縮尺 1/30 の実験模型では, 捨石マウンドの材料として, 概ね相似粒径となる単粒度砕石 6 号 (粒径 5-13mm) を使用した。また, 捨石マウンドの洗掘防止のため, マウンド表面に被覆ブロックおよび被覆石 (砕石 1 号) を設置した。なお, Type1 の断面では, ケーソンの挙動を妨げないように捨石マウンドの陸側には被覆ブロックを設置していない。ケーソン底面には不

織布を貼付し, 摩擦係数を調整した。

実験時には, ケーソンおよびマウンドの変形量を詳細に計測するために, ケーソンにマーキングを行うとともに, マウンド内に着色した石 (ターゲット砕石) を置き, 変位計測用ターゲットを設置した。図-2.2 に実験模型の概要を示す。また, 写真-2.1 に実験状況写真を示す。

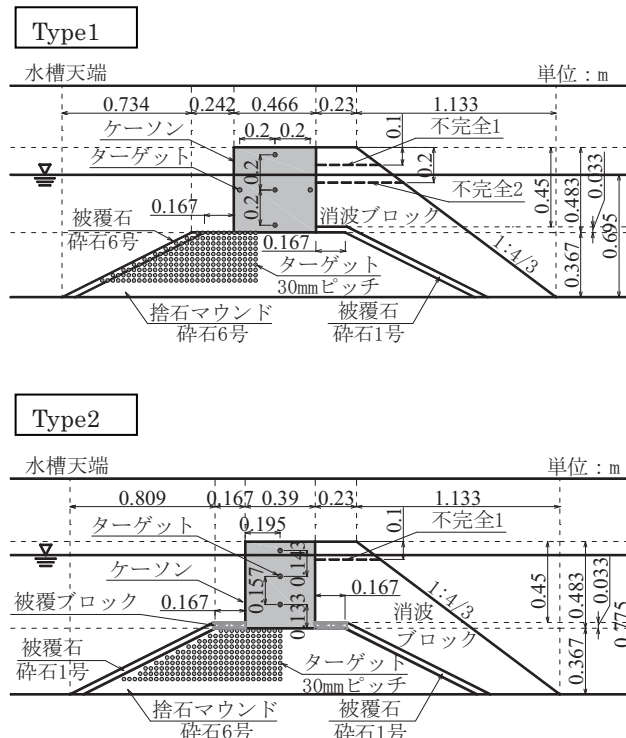


図-2.2 実験模型の概要

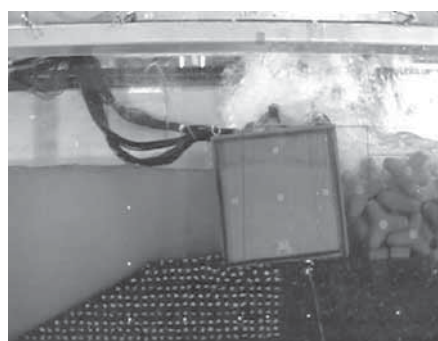


写真-2.1 実験状況

(3) 計測装置の概要

図-2.3 に Type1 ケーソンの計測器の配置図を示す。ケーソン模型には, 埋込式の波圧計, 加速度計および荷重計を設置した。波圧計はケーソン前面, 天端面および底面に設置し, 加速度計はケーソン内に 2 箇所設置した。荷重計は, 捨石マウンドからケーソン底面に作用するせん断力計測用と鉛直荷重計測用の 2 種類を設置した。せん断力計測用の荷重計は, ケーソン下部に 5 列×2 個設置し, 各列のロードセル下側に幅 78mm の受圧版を 1 枚

ずつ設置した。鉛直荷重計測用の荷重計は、受圧版の底面に設置し、受圧版1枚あたり2列×14個を設置した。鉛直荷重計は全136個であり、地盤反力分布を詳細に計測するために設置したものである。また、ケーソン前面には消波ブロックによる寄りかかり荷重を計測する荷重計を別途設置した。なお、Type2ケーソンには、消波ブロックの荷重計測用の計測機は設置されていない。

ケーソンおよび捨石マウンドの変形計測は、ターゲットをデジタルビデオカメラで撮影し、画像解析により各々の変位量を算出して行った。実験時における計測サンプリング数は500Hzとし、画像解析は30Hzとした。

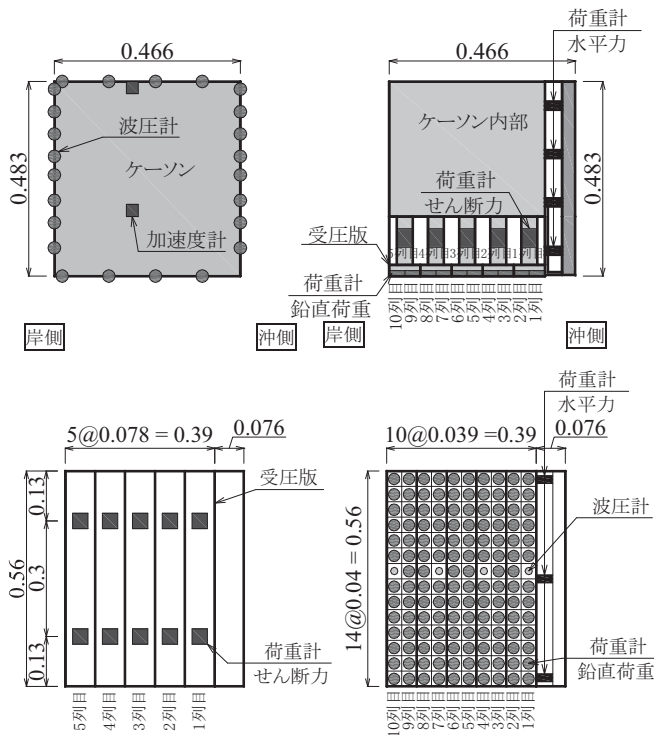


図-2.3 計測器の配置 (Type1)

2.2 静的載荷実験

静的載荷実験は、水理模型実験の Type1 と同じ模型断面を対象に、ケーソンに水平荷重を静的に載荷する 2 種類の実験を行った。一つ目はケーソンと捨石マウンドとの摩擦係数の確認試験、二つ目は荷重の着点の高さを変えて載荷し、水理模型実験との比較を行う実験である。後者の実験では、肩幅小(肩幅 0.167m)と肩幅大(肩幅 0.250m)の 2 ケースについて実施し、ケーソンの変位・傾斜に追従可能なローラー付の油圧ジャッキを用いて載荷を行った。図-2.4 に油圧ジャッキによる載荷位置図を示す。また、写真-2.2 に実験状況写真を示す。なお、荷重着点の高さは、水理模型実験においてケーソンに作

用した押波時の、地盤反力(鉛直力、水平力)を除く組合せ荷重(水平力、鉛直力およびモーメント)を考慮して次のように決定した。

まず、水理模型実験の押波時において、模型ケーソンで計測している波力、揚圧力、消波ブロックからの荷重(以後、ブロック荷重)およびケーソン水中重量の4つの計測値から、ケーソンに作用する合力としての水平力、鉛直力およびケーソン後趾まわりのモーメントのそれぞれの最大値を算出する。その上で、静的載荷実験の荷重着点高さは、静的載荷実験におけるケーソンに作用する油圧ジャッキによる載荷重およびケーソン水中重量の2つの力から算出される合力としての水平力、鉛直力およびケーソン後趾まわりでのモーメントのそれぞれが、先に算出した水理模型実験での最大値に概ね等しくなるように設定した。ただし、着点高さを決定するにあたって、静的載荷実験における載荷重は、水理模型実験における波力あるいは波力とブロック荷重の合力に等しいと仮定した。また、静的載荷実験におけるケーソン水中重量は、水理模型実験におけるケーソン水中重量から揚圧力を除いた重量とした。

最終的に、静的載荷実験での荷重着点高さは、肩幅小のケースでは、水理模型実験 Case1 (消波工なし、肩幅小) および Case4 (消波工不完全 1, 肩幅小) に相当する高さとして、0.227 m および 0.277 m とした。さらに、これらの着点より低い点 (0.177 m) と高い点 (0.4 m) を加え、全部で 4 ケースの高さを設定した。

一方、肩幅大のケースでは、水理模型実験 Case2 (消波工なし、肩幅大) に相当する高さとして、0.242 m を設定した。さらに、この着点より低い点 (0.192 m) と高い点 (0.292, 0.4 m) を加え、全部で 4 ケースの高さを設定した。

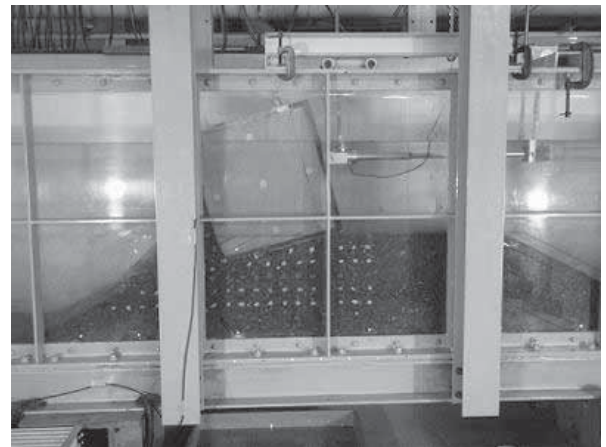


写真-2.2 実験状況

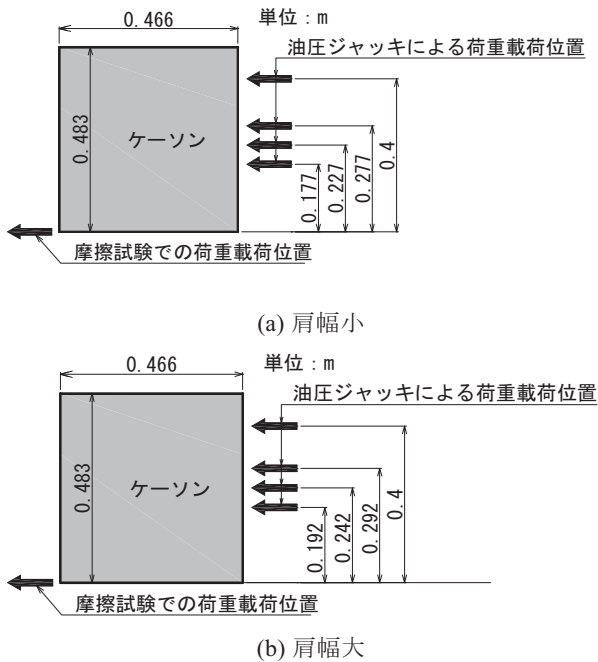


図-2.4 荷重着力点（静的荷重実験）

3. 実験結果および考察

3.1 代表ケースの実験結果

本節では、防波堤の大変形過程を把握するために、代表的な4ケースとして、消波ブロック無しの場合のうち肩幅小（Case1）と肩幅大（Case2）の結果、および消波ブロック有りのケースのうち、不完全1（Case3）と不完全2（Case4）の実験結果の概要を示す。

(1) Case1（消波ブロック無，肩幅小）

写真-3.1に実験後の破壊状況写真，また図-3.1に計測波力およびケーソン水平・鉛直変位・傾斜角の時刻歴を示す。

図-3.1中の水平波力および揚圧力については波圧計による計測値と受圧面積から合計値を算出し，ケーソン変位・傾斜角はケーソン中心位置の動画解析結果を用いて整理した結果である。また，ケーソン底面に作用する鉛直力は，鉛直力計測用の荷重計による計測値の列毎の合計値であり，ケーソン底面に作用するせん断力はせん断力計測用の荷重計により計測した結果である。なお，荷重は単位奥行き当たりの荷重として評価している。

実験後のケーソンの状態は，水平変位が0.2m，傾斜角が10°程度発生していた。ケーソン後趾はマウンド内に貫入しており，ケーソン中心位置の沈下量は0.03m程度であった。また，背面のマウンドはケーソンの変位発生の影響により大きく隆起していた。

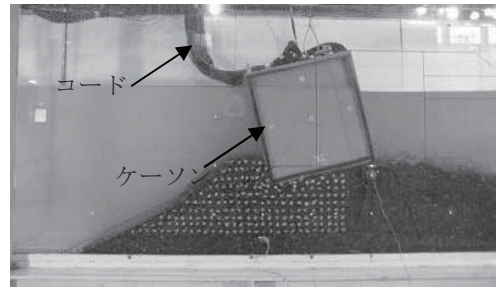


写真-3.1 実験後の破壊状況 Case1

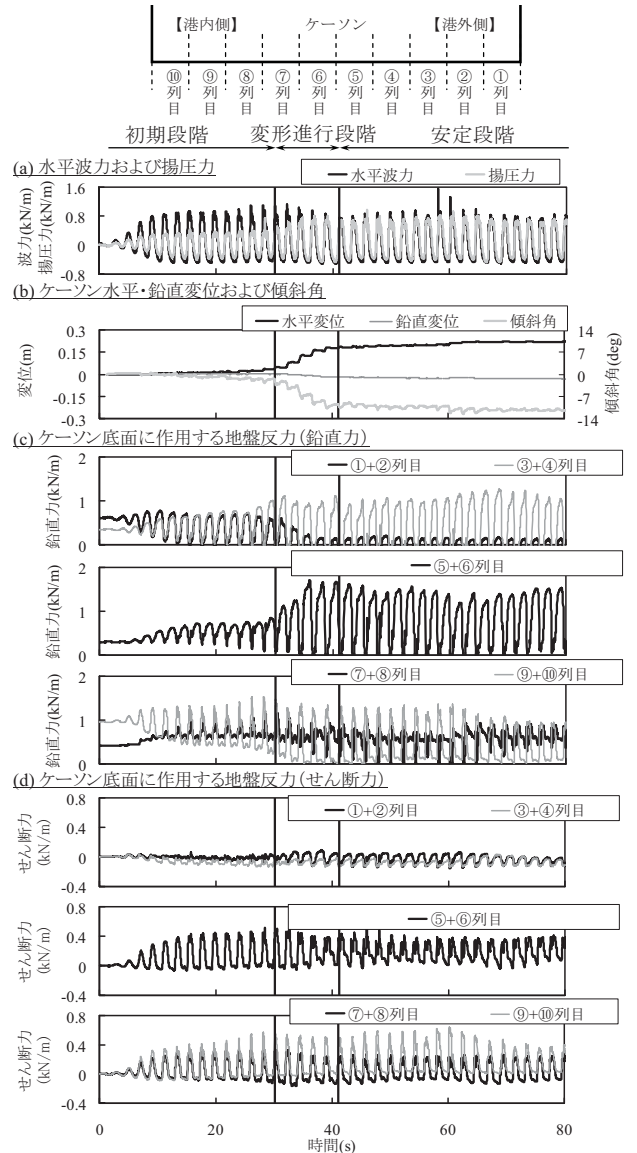


図-3.1 波力およびケーソン水平・鉛直変位・傾斜角の時刻歴 (Case1 消波ブロック無，肩幅小)

図-3.1に示すように，ケーソン式防波堤の大変形過程において，ケーソン本体の変位は，便宜的な分類ではあるが，初期段階，変形進行段階および安定段階の3つの変形段階を経ていることが明らかになった。この変形過程

については、3.2(7)~(9)で詳述するが、以下のとおりである。まず初期段階では、ケーソン後趾付近のマウンド表層の変形が主要因となり、ケーソンの変位がわずかに進行する。変形進行段階では、マウンドの大規模破壊によってケーソンが水平および鉛直方向に著しく変形し、マウンドの法肩付近がケーソンによって水平方向に押し出されて隆起する。その後、マウンドの大きく隆起した部分にケーソンが寄りかかった状態で、ケーソン変位はほとんど進行しない安定段階となる。なお、その他の実験ケースにおいては、実験条件の違いにより多少の変位特性の相違は見られたが、すべてのケースについて、この3つの変形段階が発生していた。

なお、各変形段階の境界となる時刻は、基本的にケーソン水平変位の変位速度が大きく変化する時刻と定義しているが、以下に示す事項も確認して総合的に決定した。

- ・ケーソン鉛直変位の時刻歴波形の変化
- ・ケーソンおよび捨石マウンドの形状の変化
- ・水平波力・揚圧力、ケーソン底面に作用する地盤反力の時刻歴波形の変化
- ・ケーソン底面に作用する地盤反力分布の変化

上記の方法で決定した初期段階と変形進行段階の境界、および変形進行段階と安定段階の境界となる時刻の目安は、それぞれケーソンの水平変位が残留水平変位の約15%、約80%となる時刻である。

計測した水平波力は初期段階で一定値であるが、変形進行段階・安定段階に移行すると、波力はばらつく結果となった。この理由は3.2(3)で詳述するが、ケーソン自体がロッキング等により運動することによる影響である。揚圧力は、変形進行段階から安定段階に移行するにつれて急激に大きく増加する傾向を示していた。この理由も3.2(3)で詳述する。

ケーソン底面に作用する鉛直力の変化は、マウンドの破壊段階に対応しており、初期段階でケーソン底面後趾付近の鉛直力(底面荷重計:⑨+⑩列目)は波力とともに徐々に増加し、後趾の鉛直力が約1.5kN/mに達した時点で、ケーソンの著しい変位の進展とともに、後趾の鉛直力が低下している。また、底面中央部の鉛直力(⑤+⑥列目)は、ケーソン変位の進展に伴い、顕著に増大している。これは、マウンドの破壊の進行とともにケーソン中央部を支持点とした支持形態に移行し、ケーソンのロッキング挙動が卓越する変形モードに移行しているためと考えられる。一方、ケーソン前し(①+②列目)においては、ケーソンの傾斜とともに捨石マウンドとケーソン前し部分が接触しなくなるため、変形進行段階から安定段階にかけて鉛直力は発生していない。ケーソン底面に作用する

せん断力は、ケーソン後趾(⑨+⑩列目)においては、(a)計測水平波力のばらつきに連動して変動している。

(2) Case2 (消波ブロック無, 肩幅大)

写真-3.2に肩幅大のケースにおける実験後の破壊状況写真, また図-3.2に波力およびケーソン水平・鉛直変位・傾斜角の時刻歴を示す。

肩幅大のケースでは、安定段階におけるケーソンの変位・傾斜角が肩幅小のケースよりも比較的小さい結果となった。

実験後のケーソンの状態は、水平変位が0.1m、傾斜角が5°程度発生しており、Case1(肩幅小)の実験結果に対して約50%の変位量に留まっており、ケーソン傾斜角についても同様であった。ケーソン後趾はマウンド内に貫入しており、ケーソン中心位置の沈下量は0.01m程度であった。また、背面のマウンドはCase1と異なりほとんど隆起していない。

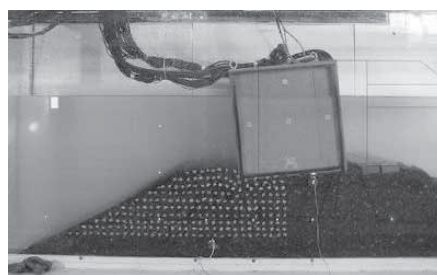
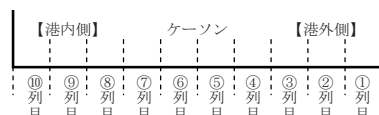


写真-3.2 実験後の破壊状況 Case2



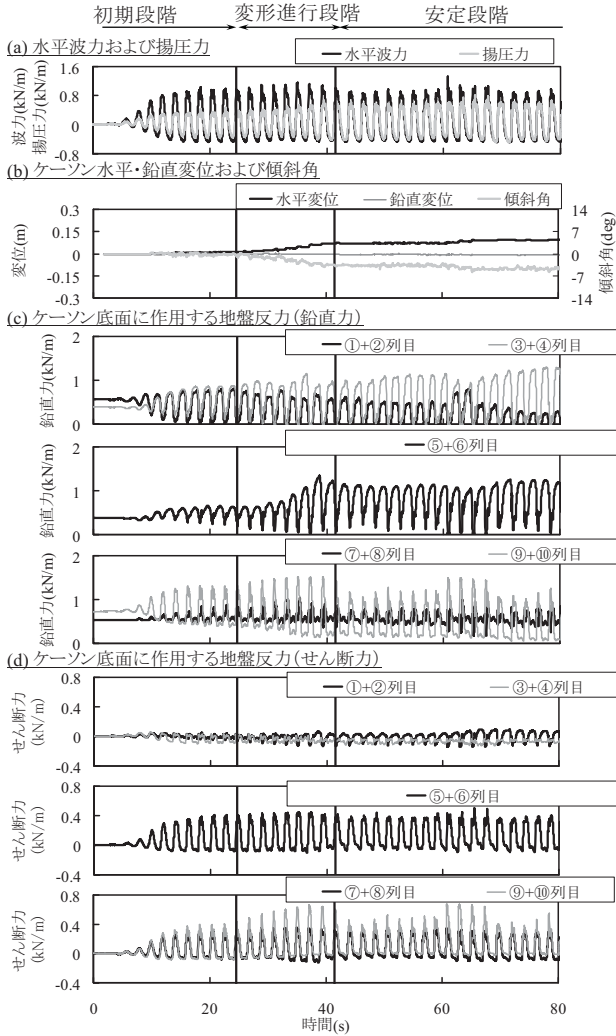


図-3.2 波力およびケーソン水平・鉛直変位・傾斜角の時刻歴(Case2 消波ブロック無, 肩幅大)

図-3.2に示す3つの変形段階に応じたケーソンの変形特性は、3.2(7)~(9)で詳述するが、以下のとおりである。初期段階では、ケーソン後趾付近のマウンド表層の変形に起因して、ケーソンの変位がわずかに進行する。変形進行段階では、ケーソンがマウンド内に貫入し水平および鉛直方向に大きく変位する。しかし、Case1のようなマウンド法肩付近の大規模破壊は発生していないため、その後、ケーソン変位はほとんど進行しない安定段階となる。

計測した水平波力は初期段階で概ね一定値であるが、変形進行段階・安定段階に移行すると、ケーソンのロッキング等による運動の発生に起因して、波力はばらつく結果となった。揚圧力は、変形進行段階から安定段階に移行するにつれて急激に大きく増加する傾向を示していた。これらの理由は3.2(3)で詳述する。

ケーソン底面に作用する鉛直力の変化は、マウンドの破壊段階に対応しており、初期段階でケーソン底面後趾

付近の鉛直力(底面荷重計:⑨+⑩列目)は波力とともに徐々に増加し、後趾の鉛直力が約1.3kN/mに達した時点で、ケーソンの変位が大きく進展するとともに、後趾の鉛直力が増加している。また、底面中央部の鉛直力(⑤+⑥列目)は、ケーソン変位の進展に伴い、顕著に増大している。これは、Case1と同様にマウンドの破壊の進行にともなうケーソン中央部を支持点とした支持形態に移行したためと考えられる。一方、ケーソン前し(①+②列目)においては、ケーソンの傾斜とともに捨石マウンドとケーソン前し部分が接触しなくなるため、変形進行段階以降に鉛直力は漸減した。ケーソン底面に作用する水平力は、ケーソン後趾(⑨+⑩列目)においては、(a)計測水平波力のばらつきに連動して変動している。

(3) Case3 (消波ブロック不完全1, 肩幅小)

写真-3.3に消波ブロック不完全1のケースにおける実験後の破壊状況写真, また、図-3.3に波力およびケーソン水平・鉛直変位・傾斜角の時刻歴を示す。

実験後のケーソンの状態は、水平変位が約0.1m, 傾斜角が4°程度発生していた。ケーソン中心位置の沈下量は0.01m程度であった。ケーソン後趾がマウンド内にやや貫入するのみで、背面のマウンドはほとんど隆起していない。

図-3.3に示す、3つの変形段階応じたケーソンの変形特性は、3.2(7)~(9)で詳述するが、以下のとおりである。まず初期段階では、ケーソン後趾付近のマウンド表層の変形が主要因となり、ケーソンの変位がわずかに進行する。変形進行段階においては、背面のマウンド法肩表層付近の変形とともに、ケーソンがマウンド内にやや貫入し水平および鉛直変位が大きくなる。しかし、Case1のようなマウンド法肩付近の大規模破壊は発生していない。その後、ケーソン変位はほとんど進行しない安定段階となる。

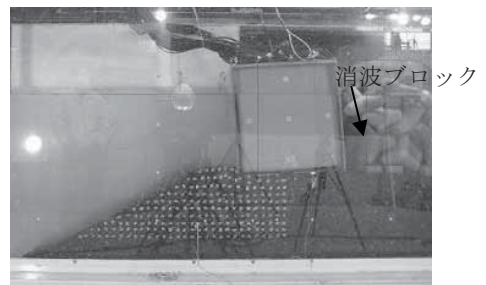


写真-3.3 実験後の破壊状況 Case3



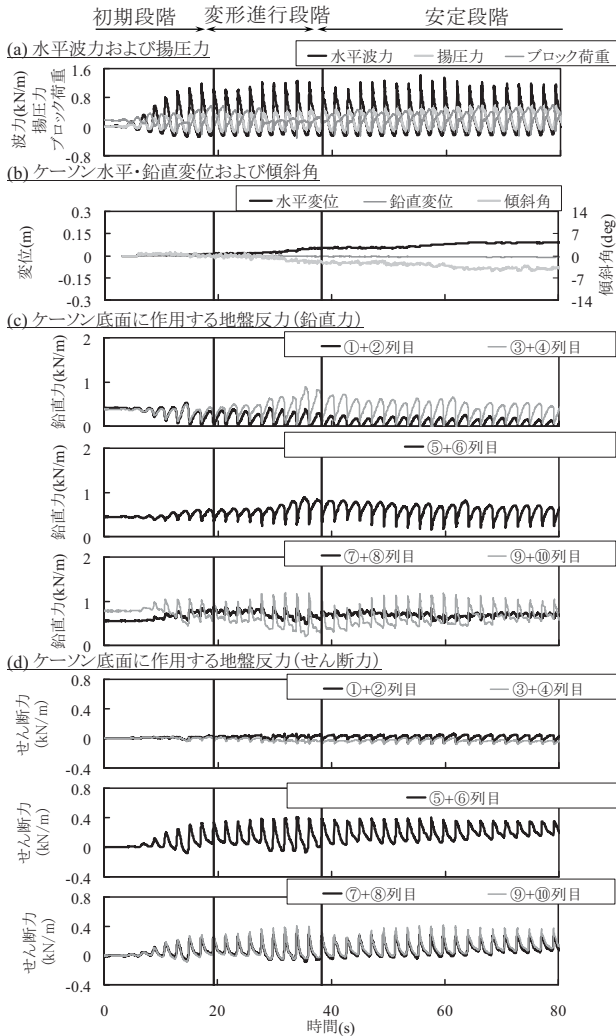


図-3.3 波力およびケーソン水平・鉛直変位・傾斜角の時刻歴(Case3 消波ブロック不完全1、肩幅小)

計測水平波力および計測揚圧力については、破壊の進行に伴いやや低下する傾向を示していた。これは、3.2(4)で後述するが、ケーソンの変位とともに消波工が崩れ、消波ブロックとケーソンに一定の距離が生じたことによって消波ブロックが潜堤として機能したため、計測波力が低減したと推察される。また、計測水平波力および計測揚圧力には、消波ブロック無しの場合と異なりスパイク状のピーク値の発生が見られた。一方、ブロック荷重は、引波時に最大値を示していた。これは、押波時にケーソンが岸側へ動いて消波ブロックと離れ、引波時に戻って来たケーソンが消波ブロックと衝突したためである。

ケーソン底面に作用する鉛直力は、マウンドの破壊段階に対応しており、ケーソンの変位が進展するとともに変形進行段階でケーソン底面後趾付近の鉛直力(底面荷重計：⑨+⑩列目)が波力とともに徐々に増加している。また、底面中央部の鉛直力(⑤+⑥列目)は、ケーソン変位の進展に伴い、顕著に増大している。これは、マウン

ドの破壊の進行にともないケーソン中央部を支持点とした支持形態に移行したためと考えられる。一方、ケーソン前し(①+②列目)においては、ケーソンの傾斜とともに捨石マウンドとケーソン前し部分が接触しなくなるため、変形進行段階以降に鉛直力は漸減した。ケーソン底面に作用する鉛直力およびせん断力の波形は、計測水平波力の波形形状と対応しており、スパイク状のピーク値の発生が見られた。

(4) Case4 消波ブロック不完全2、マウンド高、肩幅小
写真-3.4に消波ブロック不完全2のケースにおける実験後の破壊状況写真、また、図-3.4に波力およびケーソン水平・鉛直変位・傾斜角の時刻歴を示す。

実験後のケーソンの変位量・傾斜角は、0.25m程度の変位量、12°程度もの傾斜角が発生しており、ケーソンと消波ブロック群とはほぼ接触しない状態まで破壊が進行した。ケーソン中心位置の沈下量は0.03m程度であった。背面のマウンドはケーソンの変位発生の影響により大きく隆起していた。

図-3.4に示す、3つの変形段階応じたケーソンの変形特性は、3.2(7)~(9)で詳述するが、以下のとおりである。初期段階では、ケーソン後趾付近のマウンド表層の変形に起因して、ケーソンの変位がわずかに進行する。変形進行段階では、マウンドの大規模破壊によってケーソンが水平および鉛直方向に著しく変形し、マウンドの法肩付近がケーソンによって水平方向に押し出されて隆起する。このようにケーソンが著しく変位する現象は他のケースでは1回のみだったが、Case4では2回発生した。その要因は以下の通りであると考えられる。最初に、ケーソン変位が大きく増加した後は、3.2(4)で後述するが、消波ブロックとケーソンに一定の距離が生じて消波ブロックが潜堤として機能し、水平波力が減少する。

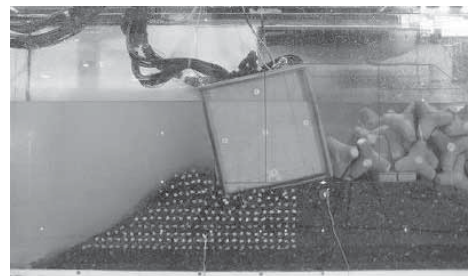
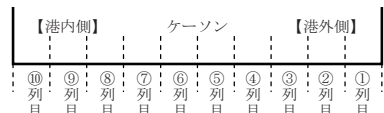


写真-3.4 実験後の破壊状況 Case4



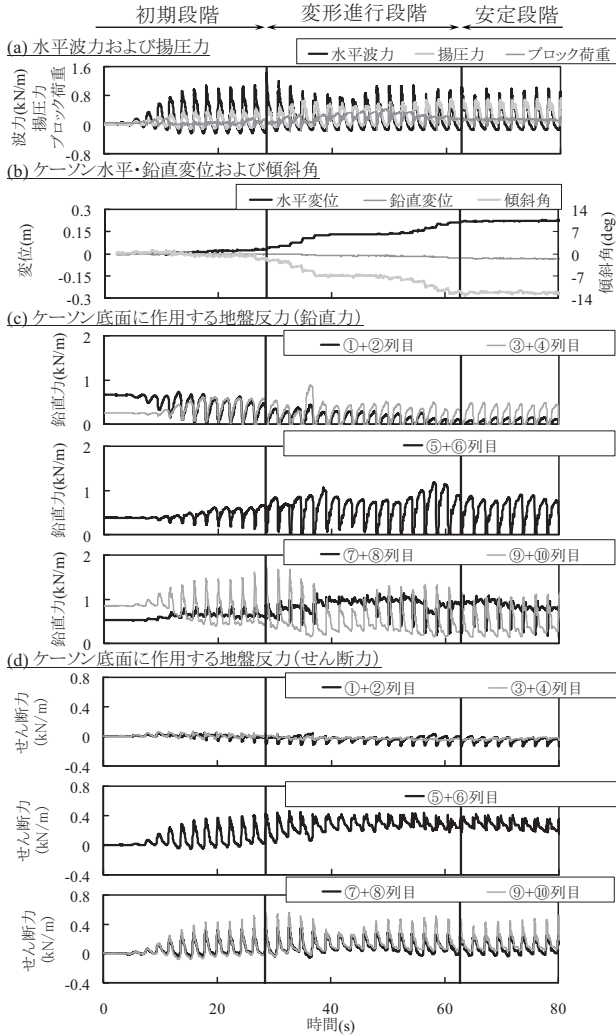


図-3.4 波力およびケーソン水平・鉛直変位・傾斜角の時刻歴(Case4 消波ブロック不完全2、肩幅小)

次に、ケーソンとの距離が生じた消波ブロックは不安定な状態となり、天端付近のブロックの落下や移動が発生し、潜堤としての機能が低下し始める。そのため、堤体への透過波がやや大きくなり変形が再度進行したと推察される。その後、隆起したマウンドによる抵抗力の増加とケーソンへの作用力がつりあって、ケーソン変位はほとんど進行しない安定段階にいたる。

一方、ブロック荷重は、Case3と同様に引波時にケーソンが消波ブロックに衝突したため、引波時に最大値を示したと判断される。

ケーソン底面に作用する鉛直力は、マウンドの破壊段階に対応しており、ケーソンの変位が進展するとともに変形進行段階でケーソン底面後趾付近の鉛直力（底面荷重計：⑨+⑩列目）が波力とともに徐々に減少し、その後再び増加している。また、底面中央部の鉛直力（⑤+⑥列目）は、変形進行段階でケーソンの支持形態が中央部を支持点とした形態に移行したため、ケーソン変位の進展

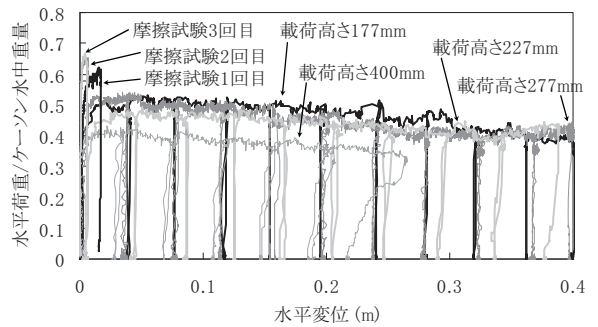
に伴い顕著に増大している。一方、ケーソン前し(①+②列目)においては、ケーソンの傾斜しケーソン前し部分がマウンドと接触しなくなるため、変形進行段階以降に鉛直力は漸減した。ケーソン底面に作用する鉛直力およびせん断力の波形は、Case3と同様に計測水平波力の波形形状と対応しており、スパイク状のピーク値の発生が見られた。

3.2 実験結果の考察

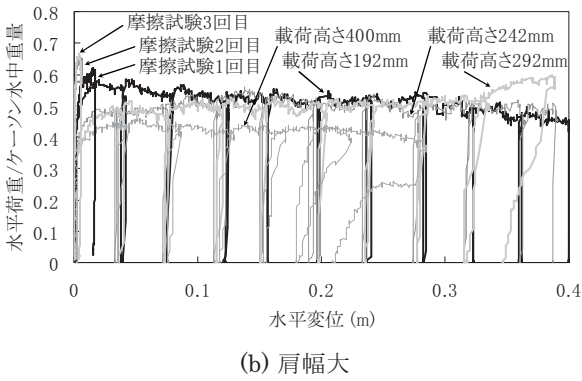
(1) 静止摩擦係数

図-3.5 に静的載荷実験の結果を示す。摩擦試験は3回実施しており、ケーソン下端を水平に引くときに得られる水平荷重とケーソン水中重量の比を算出し、最大値を摩擦係数とした。3回の実験で得られた摩擦係数は、各々0.66、0.65および0.62で、平均0.64であった。なお、摩擦試験では、捨石マウンド内の砕石はほとんど移動せず、ケーソンがマウンド上を滑る移動形態であった。一方、荷重着力点を高くした実験では、ケーソンが変位した時に、捨石マウンド自体も変形しており、変位が生じた砕石は載荷高が高くなる程、マウンド内部まで及んでいた。

水平荷重とケーソン水中重量の比の最大値は、荷重着力点が高いほど小さくなる傾向を示しており、同じ水平荷重の作用下でも、モーメントの作用が加わるとケーソンの滑動抵抗が低下することを示している。なお、この傾向は、以下に示す柴田ら(1995)の検討結果と整合している。



(a) 肩幅小



(b) 肩幅大
図-3.5 ケーソン水平変位と水平荷重に対するケーソン水中重量の比の関係 (静的載荷実験)

柴田らは、Nova ら(1991)が提案している(1)式の支持力式に基づいてケーソンに作用する水平荷重と鉛直荷重の比と着点高さの関係式(滑動抵抗式)を導いている。Nova ら(1991)が提案している(1)式の支持力式は、水平砂質地盤上の剛基礎に対する室内支持力実験の結果に基づいており、幾何学的には、図-3.6 に示す荷重空間 (V, H, M/B) における支持力曲面を表している。

$$\left(\frac{H}{\mu V_m}\right)^2 + \left(\frac{M/B}{\phi V_m}\right)^2 = \left(\frac{V}{V_m}\right)^2 \left(1 - \frac{V}{V_m}\right)^{2\beta} \quad (1)$$

ここに、V: 有効鉛直荷重(kN), V_m : 鉛直載荷支持力(kN), H: 水平力(kN), M: 底面中心周りのモーメント, B: 基礎幅(m), β, μ, ϕ : パラメータ値, である。

(1)式をケーソン式混成堤に適用すると、図-3.7 に示すように、外力モーメント M は、鉛直荷重 V と水平力 H および、水平力の着点高さ d を用いて算出できるため、(2)式の滑動抵抗式が導かれる。

$$\frac{H}{V} = \frac{\mu \left\{ (1 + D^2) (1 - V/V_m)^{2\beta} - E^2 \right\}^{1/2} - D \cdot E}{1 + D^2} \quad (2)$$

$$D \equiv \left(\frac{d}{B}\right) \left(\frac{\mu}{\phi}\right) \quad (3)$$

$$E \equiv \frac{e_c}{B\phi} \quad (4)$$

ここに、d: 着点高さ(m), e_c : 有効地盤反力 V/V_m の鉛直成分の偏心量(m)である。

通常のケーソン式防波堤は、D および V/V_m にくらべて E の影響は小さい場合が多いため、 $E = 0$ とおくと、(5)式が導かれる。

$$\frac{H}{V} = \frac{\mu(1 - V/V_m)^\beta}{(1 + D^2)^{1/2}} \quad (5)$$

静的載荷実験における水平荷重/ケーソン水中重量および載荷高さが、それぞれ式(5)の H/V および式(3)の d に相当し、式(5)から、着点高さ d が大きいほど (D が大きいほど)、 H/V が小さくなることがわかる。

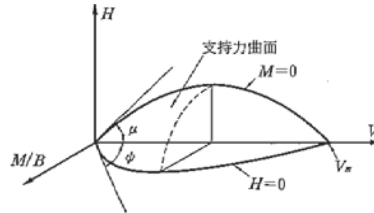


図-3.6 NOVAら(1991)の支持力曲面の例($\beta=1.0$)

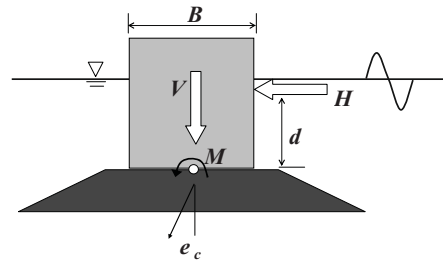


図-3.7 ケーソン式防波堤に作用する外力

(2)大変形実験の再現性 (Case5~Case8)

a)消波ブロック無の場合 (Case5 および Case6)

本実験においては、ケーソンの大変形を含む破壊状況の再現性に関する確認を行った。再現性の確認は、同じ実験断面に対し 3 回実験を行い、ケーソン変位、捨石の破壊状況のばらつきを把握することで行った。なお、Case5~Case8 の再現性の確認実験は、計測機を設置していない矩形のケーソン模型(重心位置、水中重量は計測機を設置した模型とほぼ同値となるように調整している)を用いて行っており、Case1~Case4 までの本実験に用いた模型とは異なっている。図-3.8 および図-3.9 に消波ブロック無のケースにおける実験後の破壊状況の比較例を示す。

肩幅小 (Case5) の実験においては、1回目の実験結果が他の2回の実験よりも破壊の度合いがやや小さいが、マウンドの崩壊を伴う大変形破壊は3回の実験すべてにおいて発生している。また、背面のマウンドの外形状は概ね同じような形状で破壊しているとともに、ケーソン中心位置の軌跡も3回とも同じ軌跡を辿っている。肩幅大 (Case6) の実験においてもCase5と同様な傾向を示

しているが、各試行における実験結果のばらつきはCase5よりも大きい。

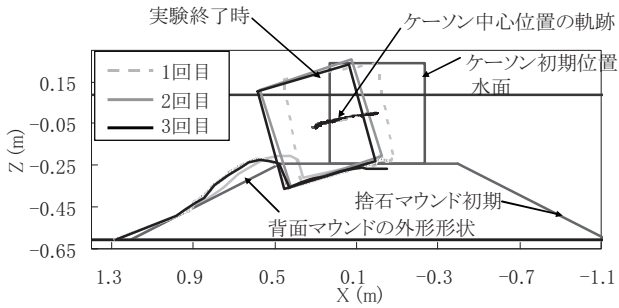


図-3.8 波作用後のケーソン・マウンドの破壊状態 (Case5 消波ブロック無, 肩幅小)

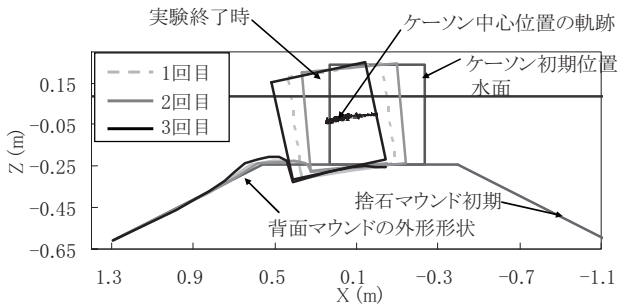


図-3.9 波作用後のケーソン・マウンドの破壊状態 (Case6 消波ブロック無, 肩幅大)

図-3.10および図-3.11に消波ブロック無のケースにおけるケーソン変位・傾斜角の時刻歴を示す。なお、参考までに本実験の結果(Case1およびCase2)も合わせてプロットしている。

図-3.10のCase5の場合は、ややばらつきは生じているものの、どの試行においても30s付近からケーソン変位が急激に増加し、60s程度で概ね安定段階に到達する傾向を示している。Case6においても同様の傾向が見られる。

以上に示したとおり、マウンドを含む混成堤の大変形過程を対象とした水理模型実験の実験再現性は、比較的良いものであることが分かった。

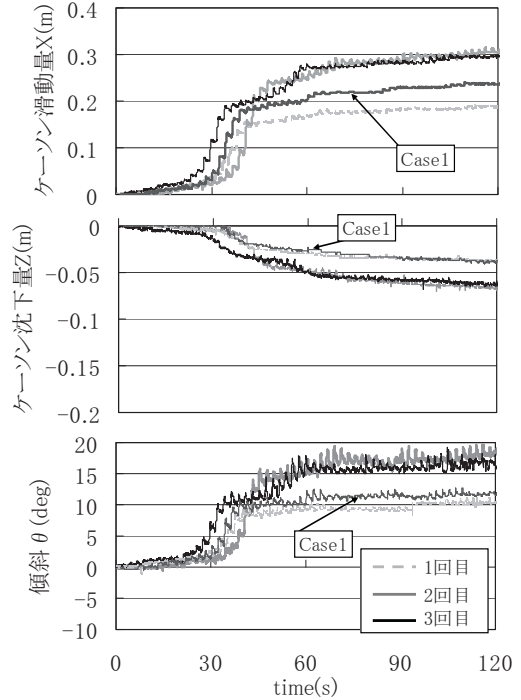


図-3.10 ケーソン変位・傾斜角の時刻歴 (Case5 消波ブロック無, 肩幅小)

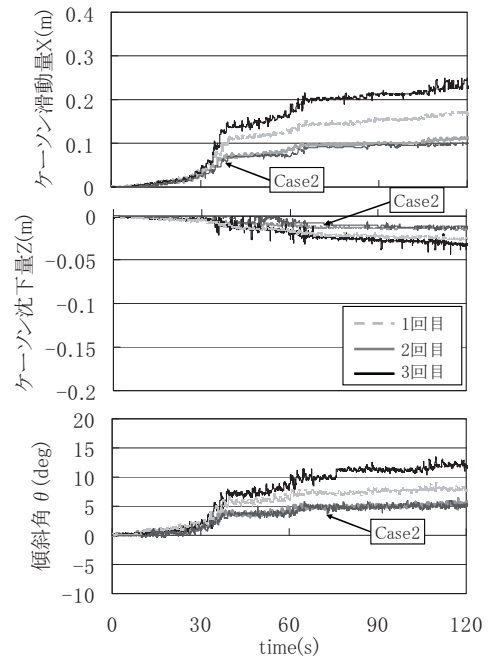


図-3.11 ケーソン変位・傾斜角の時刻歴 (Case6 消波ブロック無, 肩幅大)

b)消波ブロック不完全の場合 (Case7 および Case8)
 図-3.12 および図-3.13 に消波ブロック不完全被覆のケー

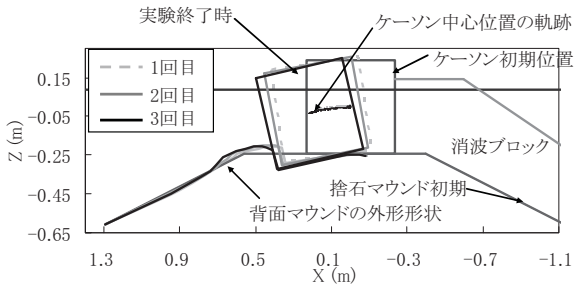


図-3.12 波作用後のケーソン・マウンドの破壊状態 (Case7 消波ブロック不完全1, 肩幅小)

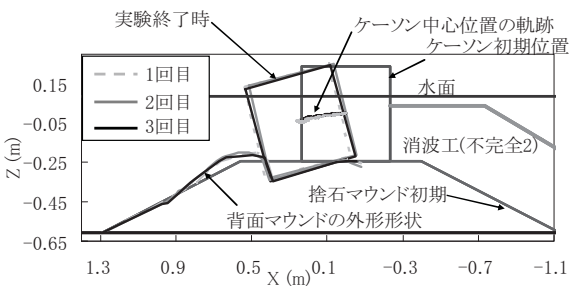


図-3.13 波作用後のケーソン・マウンドの破壊状態 (Case8 消波ブロック不完全2, 肩幅小)

スにおける実験後の破壊状況の比較を示す。

図-3.12 に示す消波ブロック不完全1を対象とした実験では、実験後のケーソンの変位状況にやや差異が生じているものの、ケーソン中心位置はどの試行においても概ね同じ軌跡を辿っている。図-3.13 に示す消波ブロック不完全2における実験後の状況は、全体的にほぼ一致している。

図-3.14 および図-3.15 に消波ブロック不完全のケースにおけるケーソン変位・傾斜角の時刻歴を示す。なお、参考までに本実験の結果(Case3 および Case4)も合わせてプロットしている。試行毎に1波当りの変位増加量には違いが生じているものの、どのケースにおいても一様に30s 前後からケーソン変位が急激に増加し、70s 後には安定段階に到達する傾向を示している。破壊の進行状況やケーソンの軌跡等についてはどの実験断面においても非常に再現性が高いことがわかる。1 波当りの変位にばらつきが生じる要因は、破壊後の背面捨石による影響と考えられる。実験においては大きく隆起した背面捨石の一部が滑動抵抗へ寄与する様子が確認されており、実験途中の滑動抵抗への寄与率が試行毎に若干異なるためであると考えられる。

以上に示したとおり、消波ブロック被覆堤においてもマウンドを含む大変形過程を対象とした水理模型実験における実験再現性は、比較的良好のものであることが分かった。

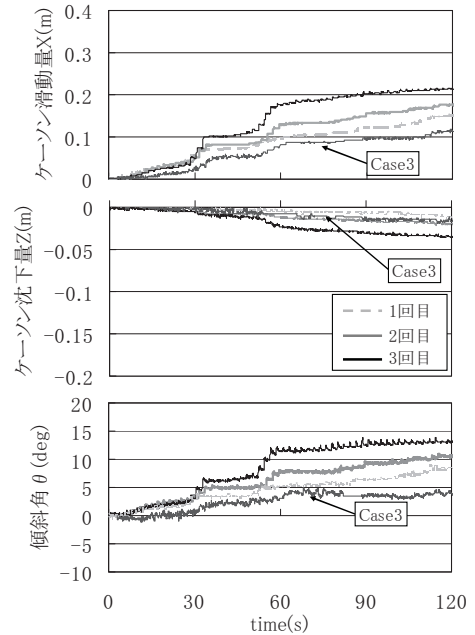


図-3.14 ケーソン変位・傾斜角の時刻歴 (Case7 消波ブロック不完全1, 肩幅小)

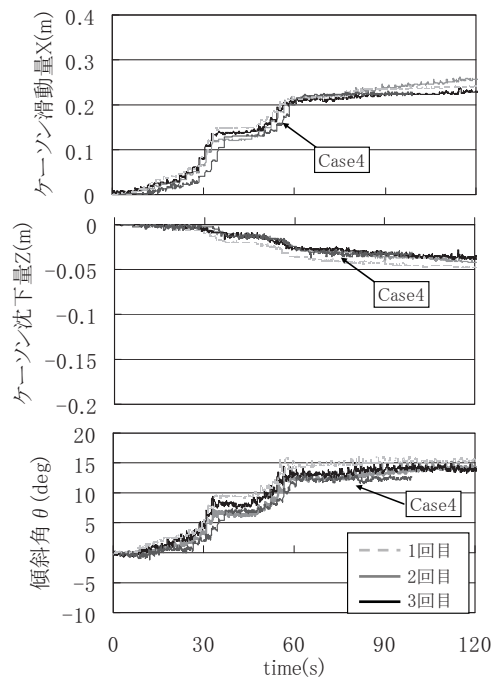


図-3.15 ケーソン変位・傾斜角の時刻歴 (Case8 消波ブロック不完全2, 肩幅小)

(3)作用波力 (消波ブロック無)

a)計測波力の時刻歴特性 (消波ブロック無 (Case1))

図-3.16 に変形進行段階における押波前後の各波圧計測値の時刻歴例を示す。

図-3.16 中の固定時とは、ケーソンが動かないようにケーソンを水槽に固定した状態で同じ波浪を作用させた

実験結果である。個々の波圧計における変形進行段階の計測水平波力は、固定時の計測波力に対してやや増加する傾向を示し、一方の変形進行段階の揚圧力は際立った増加傾向を示している。その要因として、3.2(4)および(5)に後述するが、計測水平波力は青木ら(1995)が理論的に明らかにしているとおおり、ケーソンの移動に伴う水の慣性力による影響であることがあげられる。また、揚圧力については、ケーソンの沈下と傾斜の発生によりケーソン底面に隙間が生じるためである。

なお、図には示していないが、Case2 についても同様の傾向を示していた。

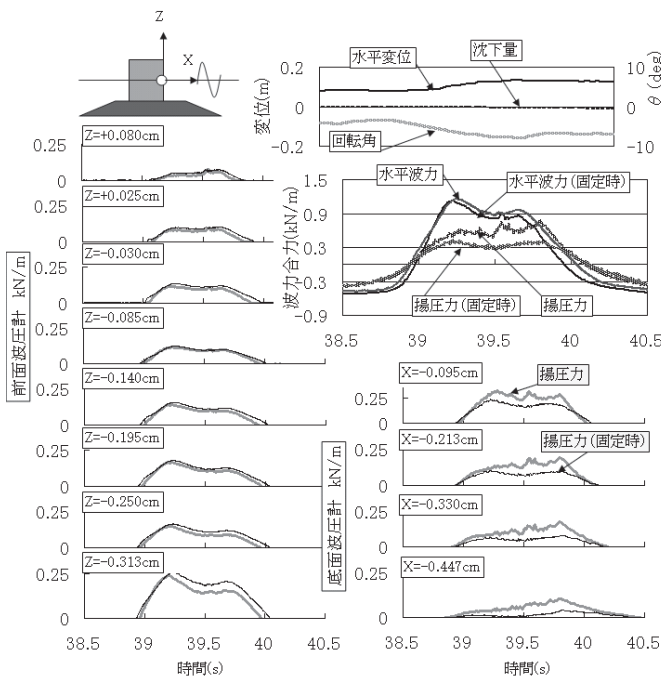
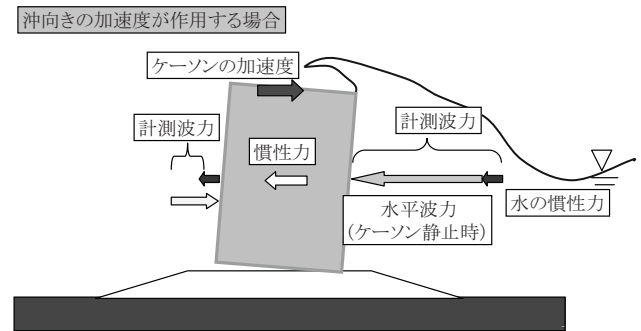


図-3.16 1波当りの各波圧計の計測値
(Case1 消波ブロック無, 肩幅小)

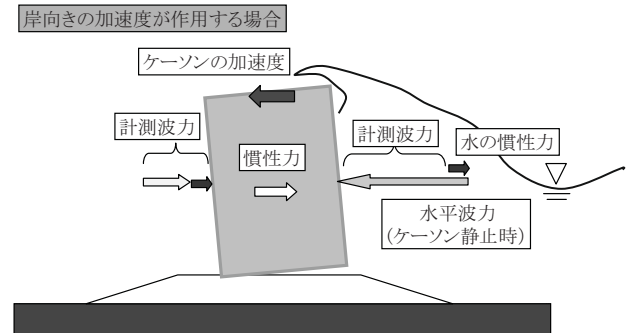
b) ケーソンの変位進行に伴う水平波力の変化

次に、実験結果における水平波力について詳細な検討を行った。検討ではまず、青木ら(1995)を参考にして計測水平波力からケーソンの移動に伴い発生する水の慣性力を差し引いた混成式ケーソン堤への正味の水平波力の変化を確認した(以降においては、計測波力から慣性力成分を差し引いた値を水平波力と定義する)。なお、水の慣性力の算出方法は、ケーソン内部に2箇所設置した加速度計の計測値と各時刻の傾斜による影響を考慮して評価し、ケーソンの沖向き方向の加速度を正として整理した。図-3.17 に計測波力と水の慣性力の作用イメージを示す。また、図-3.18 に Case1 における計測水平波力と慣性力の時刻歴例を示す。図-3.18 より、水平波力の

最大値(押し波時)は、ケーソンが変位しても概ね一定値を保つことが分かる。なお、ケーソン底面のせん断力も計測した値から水の慣性力およびケーソンの慣性力を差し引いた値は概ね一定値を保っていた。



(a) 沖向きの加速度が作用する場合



(b) 岸向きの加速度が作用する場合

図-3.17 波力の作用イメージ

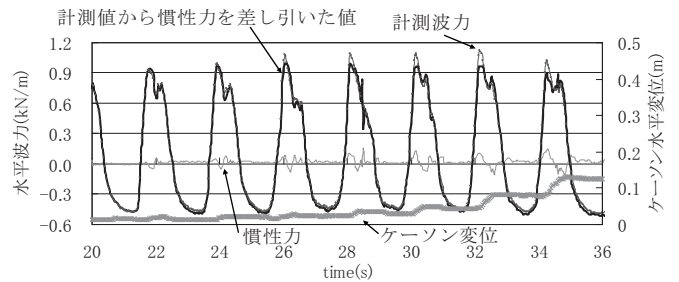


図-3.18 計測水平波力および慣性力の時刻歴
(Case1 消波ブロック無, 肩幅小)

次に、この傾向が他ケースにも当てはまるかについて確認を行った。図-3.19 に、消波ブロック無しの場合の全4ケース(Case1, Case2, Case9, Case10)における、押し波時の水平波力ピーク値とケーソンの水平変位量の関係を示す。図-3.19 より、ケーソン幅の異なる Type1 と Type2 とで計測波力には大きな差異が見られるものの、計測波力から慣性力を差し引いた値は、3つのケーソン変形段

階を通じて概ね一定値となっており、先に示した結果が一般性のあるものであることが確認された。

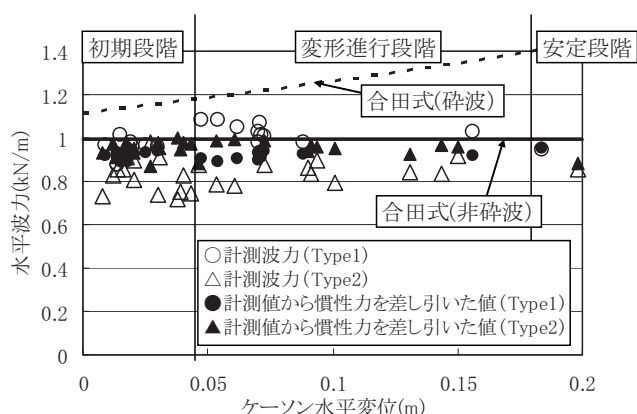


図-3.19 ケーソン水平変位と水平波力の関係

Type1 と Type2 での計測波力の相違について以下に考察する。Type1 の場合は、ケーソン水平慣性力は水平波力と反対方向（逆位相）に作用していたため、水平波力は計測水平波力よりも小さくなった（図-3.17(a)）。一方、Type2 の場合は、Type1 とは異なり、計測したケーソン前面（沖側）水平波力のピーク時に、ケーソンに作用する水平慣性力は水平波力と同じ方向（同位相）に作用していたため（図-3.17(b)）、水平波力は計測水平波力よりも大きくなった。まず、実験事実として、Type1 と Type2 では、計測波力のピーク時におけるケーソンの加速方向（慣性力の方向）が逆向きであり、これが理由で計測水平波力と水平波力の大小関係が規定されていることがわかる。

ケーソンに作用する計測水平波力のピーク時におけるケーソンの加速方向に影響を及ぼす要因としては、複数の要因があげられる。例えば、ケーソンの重量や慣性モーメントの違い、捨石マウンドの破壊に伴うケーソンとマウンドの接触状態の変化や地盤反力の作用状況の違い、越波水によってケーソン天端面から下方へ作用する鉛直力の作用、ケーソンと地盤との相互作用によるロッキング挙動特性（固有振動数等）、滑動安全率の相違（図-3.20 に示すように Type1 と Type2 で堤体の滑動安全率が異なるため、滑動開始時期や滑動継続時間に違いが発生し、その相違がケーソン挙動へ及ぼす影響）などの要因が考えられる。実験結果として得られたケーソンの挙動は、これらの複数の要因が複雑に影響した結果であると考えられるが、その定量的な評価は難しく、今後の検討課題であると言える。

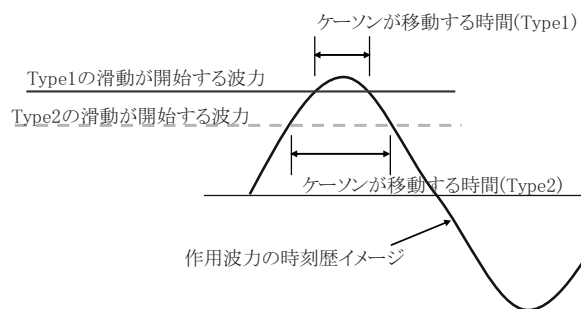


図-3.20 Type1 と Type2 の作用波力のイメージ

最期に、参考として、合田による波力公式と実験結果との比較を行う。図-3.19 に示す合田式（砕波）とは、ケーソン変位に応じてマウンド肩幅 BM の割り増しを行った衝撃砕波係数 α_I を用いて合田式により波力を計算した結果であり、合田式（非砕波）は、 α_I を用いなかった非砕波条件における結果である。今回の水理模型実験の条件下では、合田式（砕波）が適用されるが、本実験においては衝撃砕波力が作用していないため、計測値から慣性力を差し引いた値は概ね一定値となり、合田式（非砕波）と同様の傾向を示していた。

以上の結果から、非砕波条件の水平波力については、ケーソンの破壊の進行による影響を受けず、ケーソンが大きく変形したとしても破壊前の波力が維持されるものとして評価できると考えられる。なお、高橋ら(1993)によると、衝撃砕波の発生時には底面せん断力の数倍から数十倍の波力が計測される場合があり、その要因は地盤に働くバネの効果によるものと推定し、ケーソンの滑動に実際に寄与する有効波力は計測波力よりも小さくなることを指摘している。本実験においては、水平波力とケーソン底面のせん断力を比較すると、両者に大きな差は生じていないため、本実験では、高橋ら(1993)が指摘する地盤バネの効果は小さく、計測した水平波力は有効波力に等しいと考えられる。

c) ケーソンの変位進行に伴う揚圧力の変化

次に、ケーソンの変位進行に伴う揚圧力の変化について考察する。図-3.21 はケーソンの変位進行に伴い増加するケーソンの傾斜角毎に、水平波力最大時の底面圧力分布を示したものである（Case1, Case2）。本検討では、揚圧力をケーソン底面に垂直に作用する向きとして定義した。また、図中の静水圧補正後とは、各波圧計の計測値からケーソンの沈下量、傾斜角に応じた静水圧の変化分を考慮し、動水圧成分のみを抽出したものである。

補正前の揚圧力は、変形進行段階および安定段階において急激に増加し、等分布荷重に近くなる傾向を示して

いる。ケーソンの沈下量、傾斜角に応じた静水圧の補正を行うと、破壊段階にかかわらずケーソン陸側の圧力は概ね 0 に近づくため、陸側の圧力増加は、ケーソンの破壊の進行に伴うケーソンの沈下および傾斜による影響が支配的であることがわかる。静水圧補正後の陸側の圧力が 0 に近づく要因は、破壊段階の進行が進むにつれて、ケーソンの陸側底面は崩壊した捨石マウンド内にめり込むようになるため、動水圧が伝達しなくなるためであると考えられる。一方、沖側の圧力は破壊段階の進行に伴い増加し、安定段階では、初期段階に対して約 2 倍程度にまで達しており、ケーソンの沈下と傾斜による影響だけでは説明できないことがわかる。

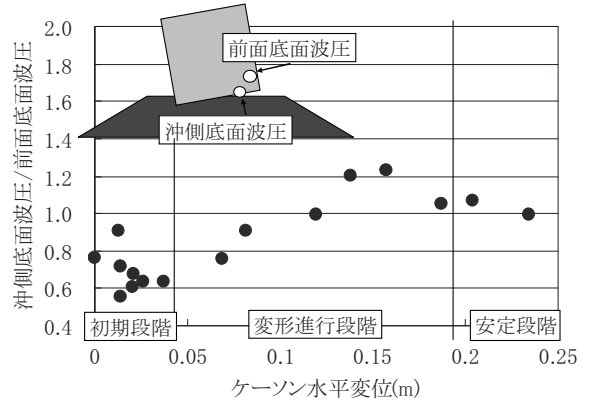
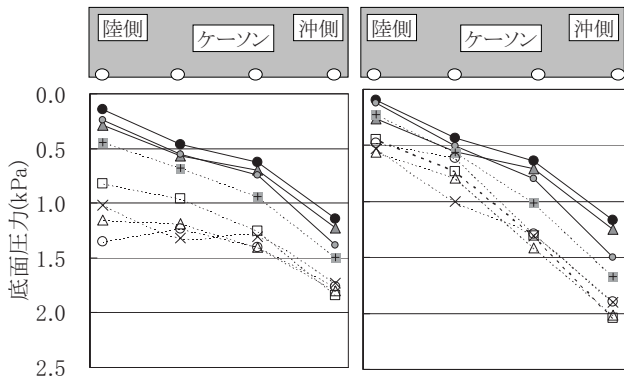


図-3.22 ケーソン水平変位と沖側底面波圧の増減 (Case1 および Case2)

▲ 傾斜角0°	● 傾斜角1°	○ 傾斜角3.1°	初期段階
■ 傾斜角5.1°	□ 傾斜角7.4°	× 傾斜角8.4°	変形進行段階
△ 傾斜角10.1°	◇ 傾斜角12.2°		安定段階



(a) 補正前 (b) 静水圧補正後

図-3.21 底面への作用波圧分布(Case1 および Case2)

図-3.22 にケーソンの水平変位と沖側底面波圧に対する前面底面波圧比の関係を示す。沖側の底面波圧と、前面側の底面付近に取り付けた水平力測定用の波圧計の値との波圧比は、変形進行段階において急激に増加した。なお、本実験においては、合田式による初期段階の波圧比は約 0.7 であった。変形進行段階において波圧比が 1.0 を上回る場合があるのは、ケーソンの沖向の傾斜運動によりケーソン底面と捨石マウンドとの空間が狭まることと、水が閉じ込められる効果による局所的な底面圧力の高まりによるものと考えられる。安定段階においては、ケーソンの沖側底面と捨石マウンドとで隙間が生じるため、波圧比は再度低下し、概ね 1.0 となる。なお、揚圧力については、ケーソン底面とマウンドとの接触状況により実験条件ごとに大きく結果が異なる可能性があるため、注意が必要である。

d) 数値波動水路による再現計算

ケーソンの変形段階毎の波力の変化を詳細に把握するために、数値波動水路 (CADMAS-SURF.ver.5.1) を用いて変形途中の断面をモデル化 (Case1) し、実験と解析による水平波力、揚圧力の比較を行った。主な解析条件を付録 A に示す。解析では、初期段階、変形進行段階、安定段階についてそれぞれ実験時のケーソン沈下量、傾斜角およびマウンドの形状をモデル化して行った。図-3.23 に安定段階の水平波力最大時における実験と解析の比較結果を示す。なお、両者は静水圧補正前の状態を比較した結果である。図-3.23 から、解析結果の前面側の水平波力、底面の揚圧力は、計測値から慣性力を差し引いた値と概ね一致している。

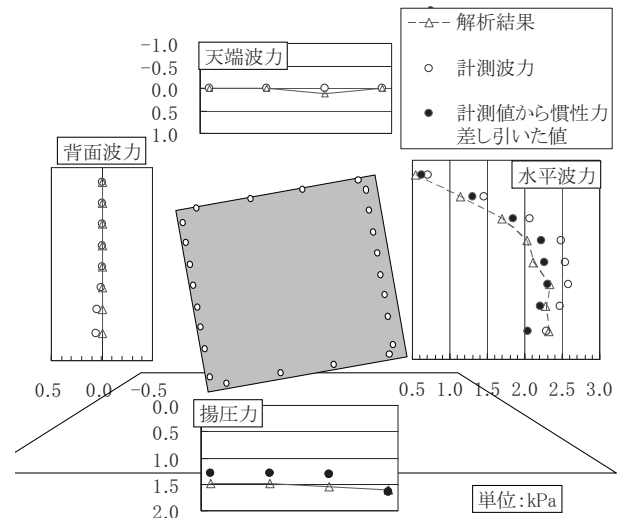


図-3.23 数値解析と実験との比較(消波ブロック無, 肩幅小) (Case1 安定段階, 傾斜角 12.2°)

なお、ケーソン底面の揚圧力は、ケーソンの傾斜による加速度に底面積を乗じた値を慣性力として、計測した揚圧力から差し引いて整理したが、計測した揚圧力とほぼ同値であった。また、ケーソン背面波力（岸側）は、沖側と同様に慣性力を差し引いた波力と解析結果を比較すべきである。しかしながら、実験時には造波時間の経過に伴って、ケーソン岸側の水槽端から反射波がわずかに発生していたとともに、ケーソン前背面での水位差もやや生じていたため、解析時と実験時のケーソン背面の状態は異なっていると考えられる。このため、ケーソン背面については、実験結果の再現性の検証対象とはせず、参考までに計測値のみをプロットした。

図-3.24 に破壊段階毎の実験と解析の波力の比較を示す。なお、実験結果の波力は、水平波力については計測値から慣性力を差し引いた波力であり、揚圧力については、慣性力および静水圧補正後の値である。解析結果による波力は、それぞれの破壊段階における実験結果と概ね一致しており、また、破壊段階の進行に伴い揚圧力が増加する傾向も合わせて再現できている。

これらの結果から、防波堤の大変形破壊時において、ケーソンへの作用波力の経時変化を数値解析により適切に評価できる可能性が高いと考えられる。

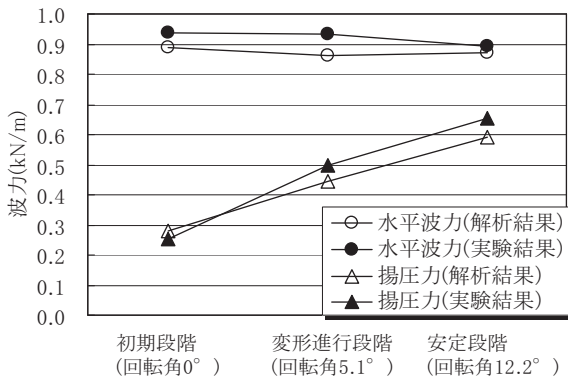


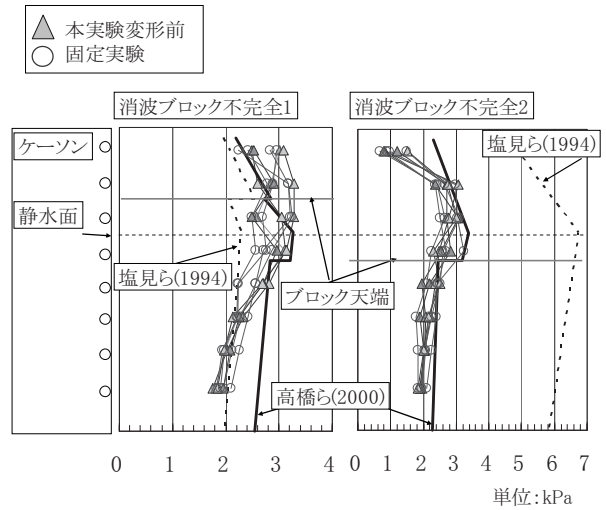
図-3.24 破壊段階毎の実験と解析の比較(Case1)

(4)作用波力（消波ブロック被覆堤）
（不完全1および不完全2）

a)ケーソンが変位する前の水平波圧分布

消波ブロック不完全断面における波力算定手法はいくつか提案されているものの、それらの適用性については明確にはなっていない。ここではまず、既往の波力算定式の適用性について検討を行うこととした。

検討は、初期段階時の4波を対象に水平波力について被覆断面毎に既往の波力算定式（塩見ら, 1994; 高橋ら, 2004）と比較することにより行った。



(a) Case3 不完全1 (b) Case4 不完全2

図-3.25 消波ブロック不完全断面における波圧分布

図-3.25 に押波時の水平波圧分布と各波圧算定式との比較結果を示す。また、図-3.25 中の固定実験とはケーソンを実験水槽に固定した状態（慣性力が作用しない状態）にて同様の波浪を作用させた実験における波圧分布を示している。本図より、塩見ら(1994)の式よりも高橋ら(2000)の手法の方が実験結果との整合が高くなる傾向を示しており、不完全2のケースではその差が特に明確であった。以上より、本実験条件下では、消波ブロック不完全被覆状態における作用波圧は、高橋ら(2000)の手法の方がより良好な対応を示していると考えられる。

b) 計測波力の時刻歴特性（消波ブロック不完全）

図-3.26 に変形進行段階における押波前後の各波圧計測値の時刻歴例を示す。前面波圧計における各波圧計はどちらのケースにおいても、消波ブロック無の場合よりもスパイク状のピーク値の発生が見られる。また、進行段階における押波ピーク値は固定時の実験よりもやや低減し平坦化する傾向を示している。

揚圧力については、消波ブロック無のケースと同様に進行段階において増加する傾向を示している。なお、図には示していないが、消波ブロック不完全1のケースにおいては、沈下量・傾斜角の発生が比較的小さかったため、図-3.26 に示すような固定時と変形進行段階とでの有意な差を確認することができなかった。

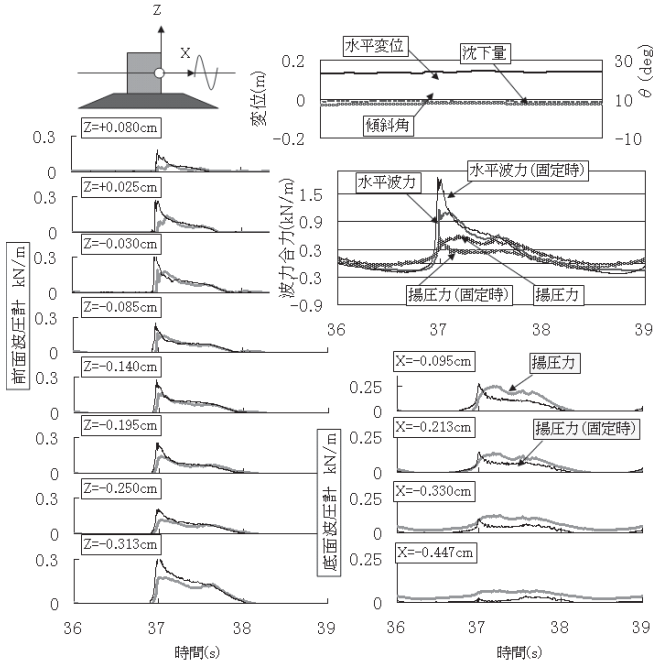


図-3.26 1波当りの各波圧計の計測波力
(消波ブロック不完全2, 肩幅小)

c) ケーソンの変位進行に伴う水平波力の変化

次に、破壊段階の進行に伴う水平波力の変化について検討を行った。図-3.27 にケーソン水平変位と波力低減係数の関係を示す。なお、波力低減係数は、破壊前の消波ブロックがない状態の水平波力最大平均に対する比として定義した。

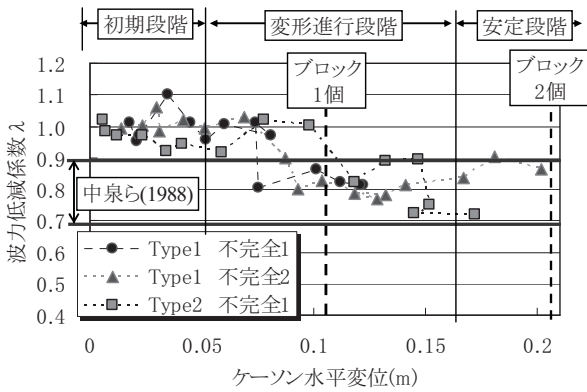


図-3.27 ケーソンの水平変位量と波力低減係数の関係

消波ブロック被覆式ケーソンは、ケーソン水平変位の増加に伴い、水平波力が低減する傾向を示しており、安定段階においては、波力低減係数が0.7~0.9まで低下している。波力の低減は、消波ブロック1個の高さ(0.11m)に相当する程度の水平変位が発生した時点で現れているため、変形進行段階への移行にしたがうというよりもむしろブロックの規格に依存していると考えられる。ブ

ックの規格に依存すると考えられる要因としては、ブロック1個程度の水平変位が発生すると、ケーソンとブロックとの隙間へブロックが入り込みやすくなり、消波工の変形が助長されるなどが挙げられる。

さらに、この低減効果は、中泉ら(1988)の潜堤とケーソンとの距離をパラメータとした実験結果と概ね同様の値を示していることから、消波ブロックとケーソンに一定の距離が生じたことによって、消波ブロックが潜堤として機能し、水平波力が低減されたと考えられる。

以上の結果は、消波ブロック被覆式ケーソンの変形過程を再現するためには、ケーソンの変形過程における消波工の変形を考慮するとともに、消波ブロックによる波の変形の効果を考慮する必要があることを示唆するものであった。

(5)消波ブロックの寄り係り荷重

(消波ブロック被覆堤)

a) 作用荷重の時刻歴特性

ケーソンに作用する消波ブロックの寄りかかり荷重(ブロック荷重)について検討を行った。

図-3.28 および図-3.29 にケーソン水平変位が増加する前後におけるブロック荷重、計測水平波力、計測底面せん断力の時刻歴を示す。なお、ブロック荷重は、4枚の荷重版による計測値から合力を算出した結果である。図-3.28 および図-3.29 より、ブロック荷重は計測水平波力の引波ピーク時に最大値となる傾向を示していることがわかる。また、ブロック荷重の最大値は各波に対してばらつきが大きく、ブロック荷重の最大値が増加する場合には、底面せん断力も大きく増加している。

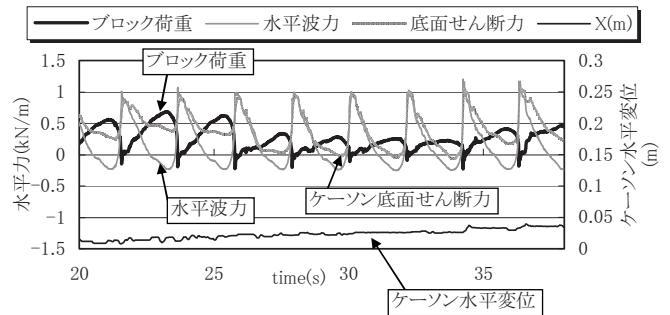


図-3.28 ブロック荷重・水平波力・底面せん断力の時刻歴
(Case3, 消波ブロック不完全1, 肩幅小)

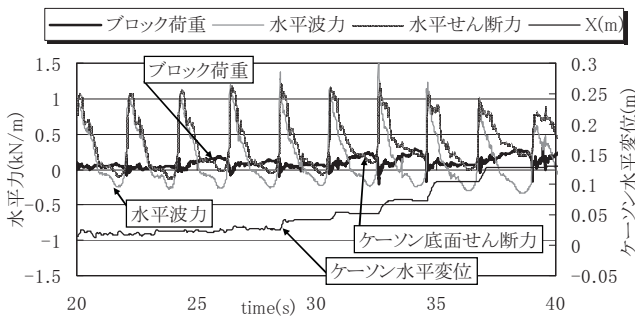


図-3.29 ブロック荷重・水平波力・底面せん断力の時刻歴 (Case4, 消波ブロック不完全2, 肩幅小)

b) ブロック荷重の作用分布

図-3.30 および図-3.31 に引波時のブロック荷重比を示す。なお、ブロック荷重比は、引き波時にブロック荷重が最大となることから、引き波時に作用する前面波力の合力に対する比として定義した。

本図より、不完全1断面においては、上から2段目の荷重板への荷重が集中する傾向を示す一方で、不完全2断面では下側の2段に集中していた。荷重の分布形状の相違については、ブロック高さの違いによる影響やケーソンの変位発生に伴う消波ブロックの移動に起因して変動性の高いものであると考えられる。また、変位量の増加による荷重比の変化はあまり見られない。なお、実験結果におけるブロック荷重比の最大値は概ね1.2であった。

ケーソンの部材設計においては、一般的にブロックの寄りかかり荷重は考慮しないこととなっている。その要因は、既往の研究においてケーソンを固定した状態でブロックの寄りかかり荷重を計測した実験結果に基づき以下の結論が導かれているからであると考えられる。まず、静水状態における初期荷重は引波波力よりも小さい。次に、波浪作用による荷重の増分は初期荷重に対して十分小さい。しかしながら、本実験のようなケーソン変位が発生する条件下では、引波波力以上のブロック寄りかかり荷重が作用する場合があることがわかった。以上から、今後、ケーソンの変位を許容した設計を行う場合においては、変位が発生した際の消波ブロックによる寄りかかり荷重の影響を適切に評価する必要がある。

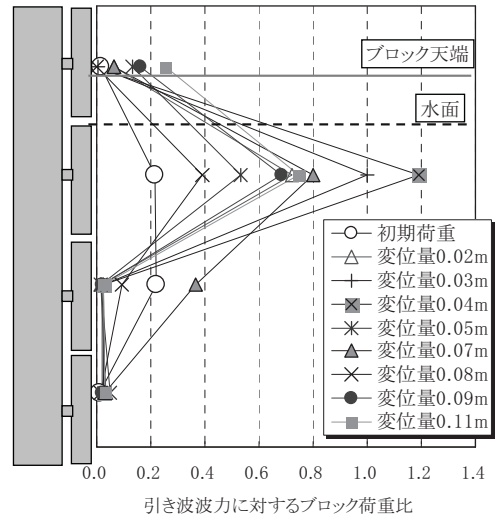


図-3.30 引波波力に対するブロック荷重比 (Case3, 消波ブロック不完全1, 肩幅小)

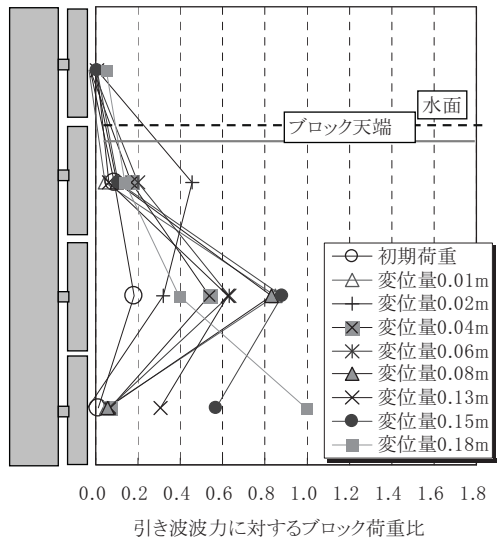


図-3.31 引波波力に対するブロック荷重比 (Case4, 消波ブロック不完全2, 肩幅小)

c) 引き波波力との相関

図-3.32 に引波波力とブロック荷重初期値の合計とブロック荷重最大値の関係を示す。1波毎のブロック荷重の最大値は、静水状態におけるブロック初期荷重に引波波力を加えた値に概ね一致する傾向を示している。なお、本実験におけるブロック初期荷重は、田中ら(1985)の実験結果と概ね一致していた。図中の直線より下側に位置するプロット値はケーソンの岸側への移動に伴いブロックの接触点が少なくなったことによる。一方、上側に位置するものは、引波時にケーソンがブロックに寄りかかり、ケーソンの自重がブロック荷重に寄与したためであると考えられる。ケーソン自重の寄与によるブロック荷重

の増加は、ケーソン変位が小さい時にも発生する場合があります、その際には、ケーソンの底面せん断力も大きく増加していた。

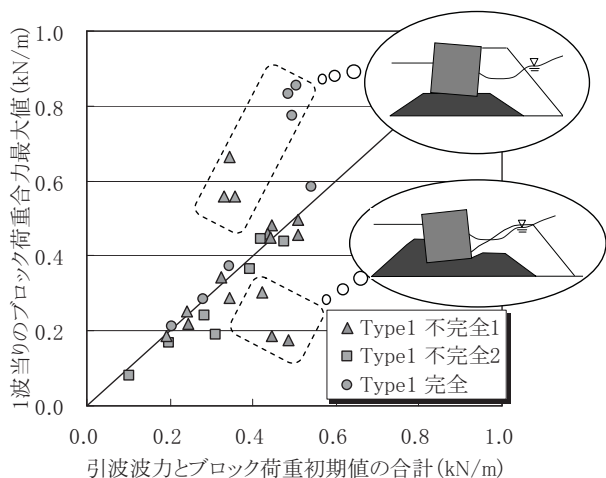


図-3.32 ブロック荷重と引波波力およびブロック荷重初期値の合計

(6)地盤反力分布

ケーソン底面の地盤反力の分布特性に関する実験結果を示す。図-3.33～図-3.36に前面波力最大時および最小時におけるケーソン底面の地盤反力分布（鉛直，せん断）を初期段階および変形進行段階に分けて示す。初期段階では、前面計測波力の押波時および引波時において、鉛直力は設計で想定している三角形分布（台形分布）に近い分布となっている。せん断力は鉛直力に比例しており、鉛直力と同じ分布形状になることがわかった。ケーソンの変位が特に大きいCase1とCase4では、変形進行段階に移行すると、押波時の計測波力におけるケーソン後趾付近の鉛直力が低下するとともに、引波時にケーソン中央付近の鉛直力が顕著に増加している。これは、マウンドの破壊の進行とともにケーソン中央部を支持点とした支持形態に移行し、ケーソンのロッキング挙動が卓越する変形モードと対応していることを示す結果である。

ケーソンの変位が小さいCase2およびCase3では、変形進行段階において上記のような傾向（前面押波時の計測波力最大時におけるケーソン後趾部分の鉛直応力の低下およびロッキングに伴うケーソン中央付近への鉛直応力の顕著な集中）はCase1とCase4に比較すると顕著ではなかった。なお、Case4では変形進行段階における波力最大時の鉛直応力分布がばらついているが、波力と地盤反力に位相差が生じているためである。

次に、図-3.37～図-3.40に初期段階、変形進行段階のそれぞれ代表的な1波の時刻歴を示す。さらに、押波時

の計測波力およびケーソン後趾の地盤反力（⑨+⑩列目）最大時における地盤反力分布（鉛直，せん断）をそれぞれ示している。時刻歴波形を見ると、消波ブロック無しのCase1およびCase2では、初期段階および変形進行段階で共通して、計測波力最大時にケーソン後趾の地盤反力が最大値に近い値を示していることがわかる。一方、消波ブロック不完全のCase3およびCase4では、変形進行段階においてケーソン後趾の地盤反力と波力に位相差があり、地盤反力の位相が遅れている。特にCase4（不完全2）の位相差が大きい。この位相差については、(c)地盤反力分布を見ても、計測波力最大時の分布とケーソン後趾の地盤反力最大時の分布が消波ブロック無のCase1およびCase2では概ね一致しているのに対して、Case3およびCase4では変形進行段階において計測波力最大時のケーソン後趾の地盤反力が小さい分布となっていることからわかる。特に消波ブロック不完全2のCase2では、分布形状の違いが顕著である。これらの位相差の発生については、先述したとおり、様々な要因が複雑に影響した結果であると考えられ、単純に実験結果の解釈をすることが難しい。このため、本資料では実験結果の報告のみとし、位相差の発生に関する実験結果の詳細検討は今後の課題とする。

(7)マウンドの破壊形態

a)概要 (Case1～Case4)

Case1（消波ブロック無，マウンド肩幅小）の水利模型実験の結果として、図-3.41にケーソンに作用する前面計測波力とケーソンの水平・鉛直変位・傾斜角の時刻歴、図-3.42にケーソンとマウンドの各変形段階毎における変形状況を変位ベクトル・せん断ひずみ分布と併せて示す。また、Case2～4の同様の結果を図-3.43～図-3.48に示す。

Case1の結果によると、ケーソン式防波堤の大変形過程において、ケーソン本体の変位は、捨石マウンドの破壊形態に応じて、以下に示す3つの変形段階を経ていることがわかる。初期段階では、ケーソン後趾付近のマウンド表層の局所的なせん断変形が主要因となり、ケーソンは水平変位が卓越する。このため、徐々にマウンドの肩幅が減少する。その後、ケーソンが水平に約4cm変位（現地換算で約1.2m）した時点でせん断ひずみが下方領域に進展し、マウンドが破壊して、著しく変形が増加する変形進行段階に移行する。この段階では、マウンドの法肩付近がケーソンによって水平方向に押し出されて隆起し、ケーソンはマウンド内に貫入しながら著しく変位する。その後、マウンドの大きく隆起した部分がケーソン

ン背後に受動抵抗として作用するため、ケーソン変位はほとんど進行しない安定段階となる。

Case4 (消波ブロック不完全 2, 肩幅小) では、Case1と同様に变形進行段階において、マウンドの法肩付近全体が水平方向に大きく移動しており、このマウンドの挙動がケーソンの大きな変位進展に繋がっている。

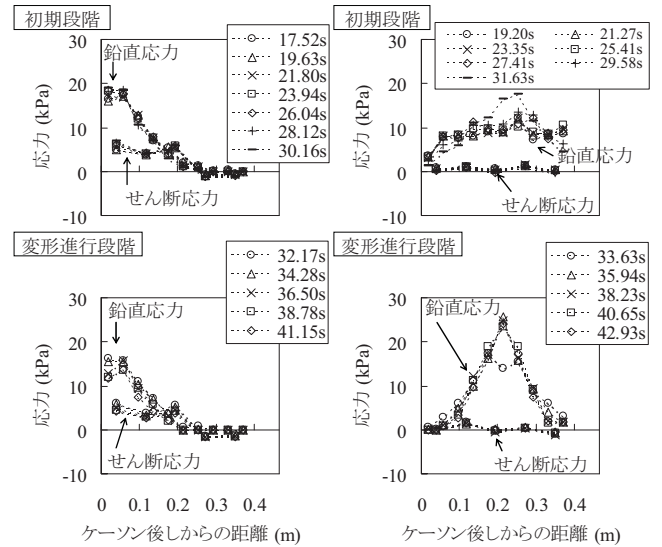
一方、Case2 (消波ブロック無, 肩幅大) および Case3 (消波ブロック不完全 1, 肩幅小) では、初期段階におけるケーソン後趾付近のマウンド表層の局所的なせん断変形の発生は同様に発生しているが、その後の变形進行段階においてはマウンド法肩全体が側方へ移動するような大規模なマウンドの破壊は発生していない。このため、これらのケースでは、ケーソンの変位が小さく留まっていると考えられる。

以上の結果は、ケーソン背面のマウンド肩幅を大きく設定し、上述したマウンド法肩付近の大規模破壊を防ぐことにより、既存防波堤を偶発波浪等の作用に対して、より粘り強い構造へと簡単に変質させることができることを示唆するものであり、興味深い結果である。

b) ケーソン直下の捨石ターゲットの変位特性

ケーソン変位とケーソン直下のマウンドの变形との関係を把握するために、図-3.49～図-3.52 に実験開始前、初期段階終了時および变形進行段階終了時におけるケーソンの位置とケーソン直下に配置したターゲット碎石の位置を示す。なお、ターゲット碎石の位置は鉛直分布として示している。この結果、ケーソンが変位する際には必ず碎石の変位を伴っており、ケーソン変位はケーソン直下のマウンドの变形が主要因で発生することを明瞭に示している。

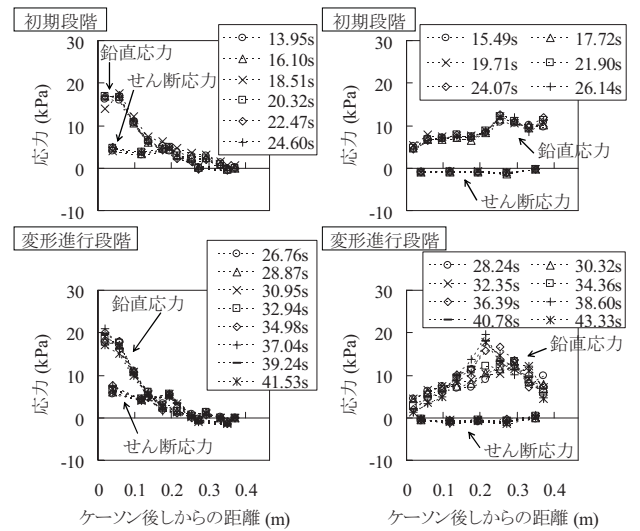
さらに、マウンド表層の变形特性を把握するために、図-3.53～図-3.54 にケーソン底面に最も近い深度にあるターゲット碎石の水平変位とケーソン底面の水平変位との比を、ターゲット碎石の初期水平位置との関係で示す (Case1 および Case2)。ケーソン直下の表層碎石は、ケーソン後趾に近いほど、ケーソン底面の移動に引きずられるように移動する傾向にあることがわかる。また、ケーソン中心に向かうほど、逆に碎石の変位は小さくなり、ケーソンが捨石上を滑动する量が増加する傾向にあることがわかる。特に变形進行段階ではケーソン後趾において、ケーソンと碎石の水平変位がほぼ同じとなっている。



(a) 前面波力最大時 (b) 前面波力最小時

図-3.33 地盤反力分布

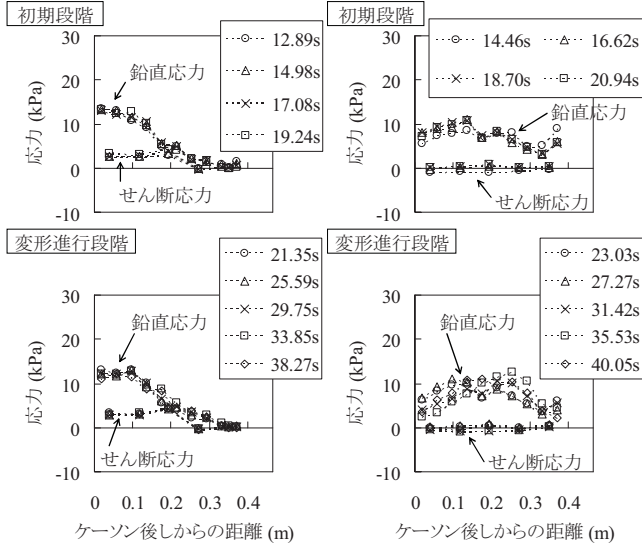
(Case1 消波ブロック無, 肩幅小)



(a) 前面波力最大時 (b) 前面波力最小時

図-3.34 地盤反力分布

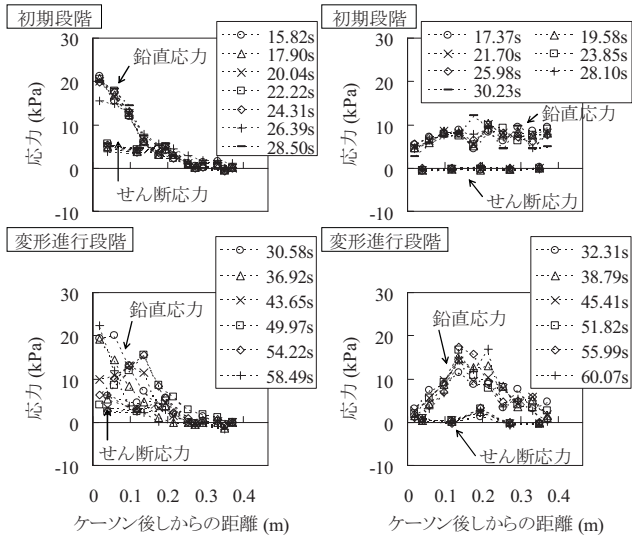
(Case2 消波ブロック無, 肩幅大)



(a) 前面波力最大時 (b) 前面波力最小時

図-3.35 地盤反力分布

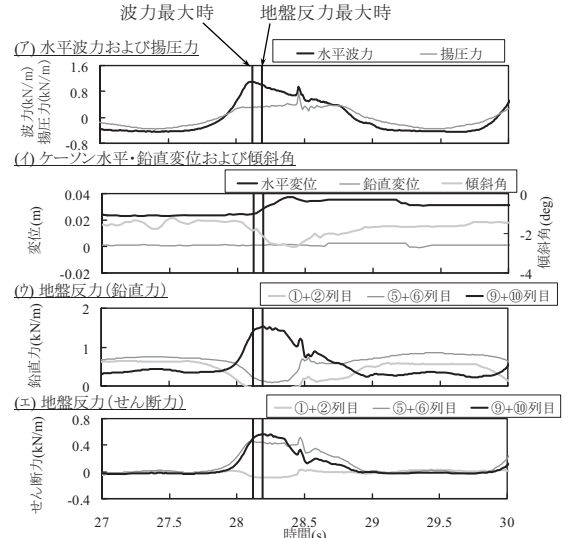
(Case3 消波ブロック不完全1, 肩幅小)



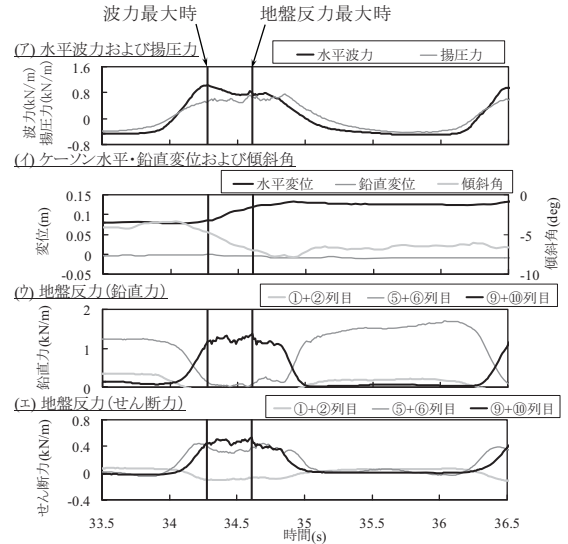
(a) 前面波力最大時 (b) 前面波力最小時

図-3.36 地盤反力分布

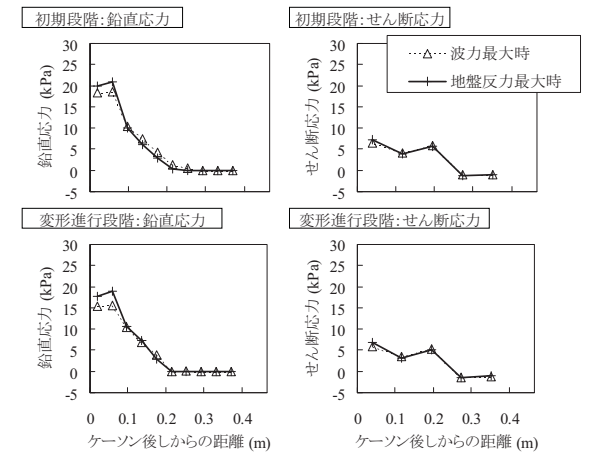
(Case4 消波ブロック不完全2, 肩幅小)



(a) 時刻歴 (初期段階)



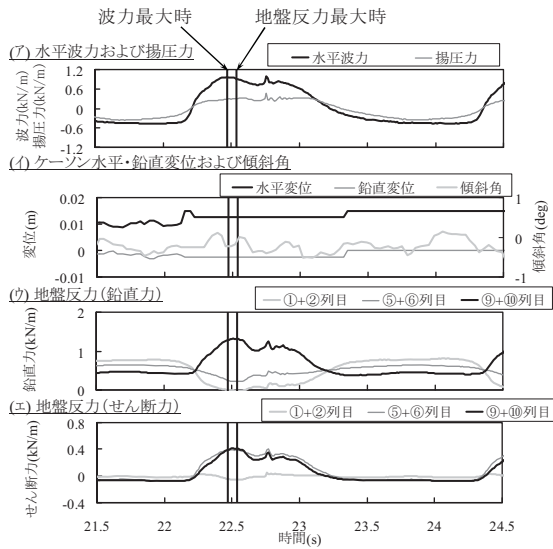
(b) 時刻歴 (変形進行段階)



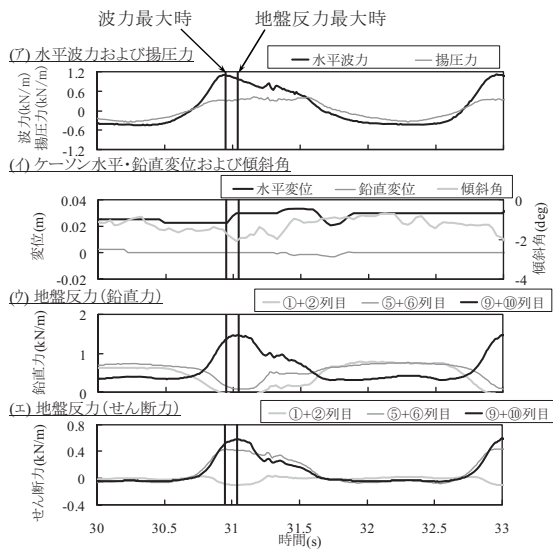
(c) 地盤反力分布

図-3.37 1波あたりの地盤反力分布の経時変化

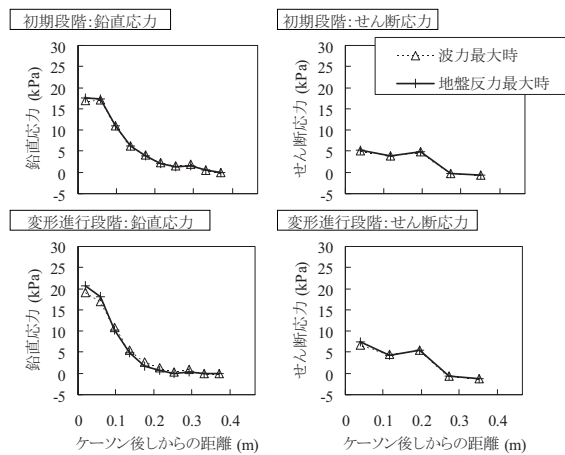
(Case1 消波ブロック無, 肩幅小)



(a) 時刻歴 (初期段階)

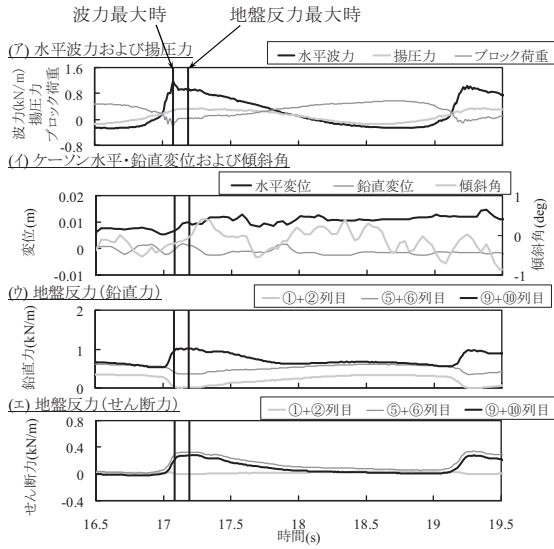


(b) 時刻歴 (変形進行段階)

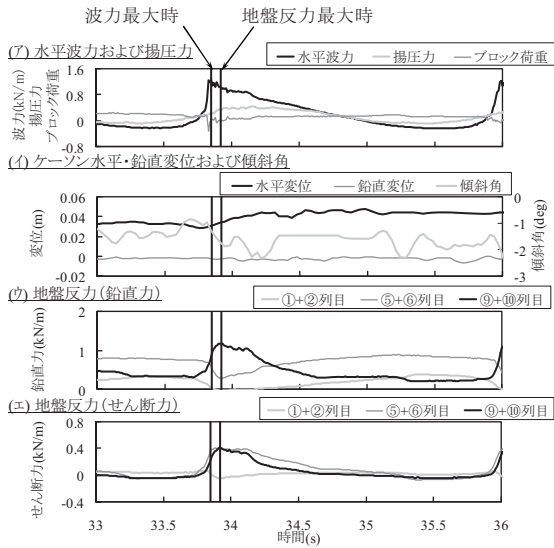


(c) 地盤反力分布

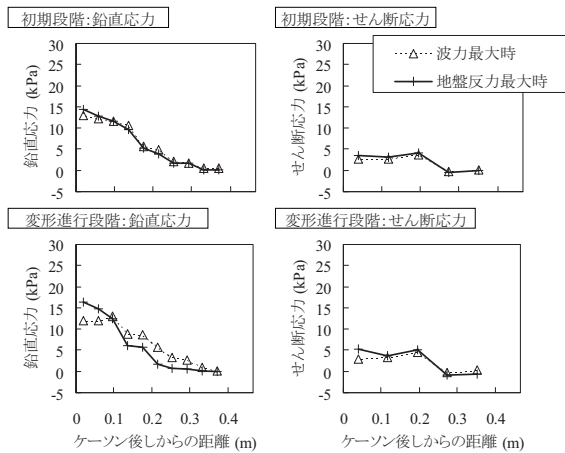
図-3.38 1波あたりの地盤反力分布の経時変化 (Case2 消波ブロック無, 肩幅大)



(a) 時刻歴 (初期段階)

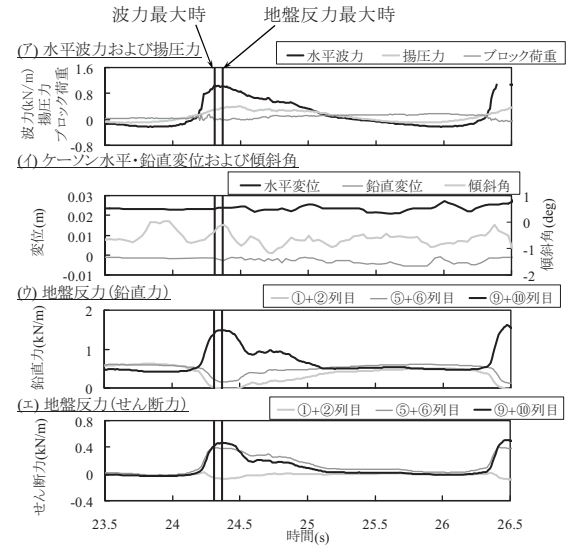


(b) 時刻歴 (変形進行段階)

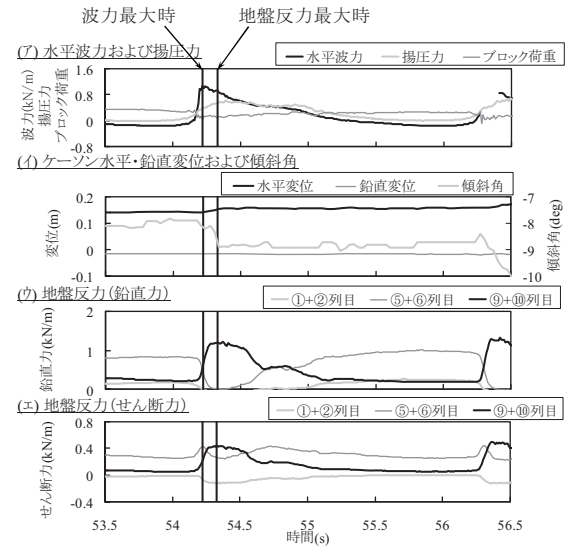


(c) 地盤反力分布

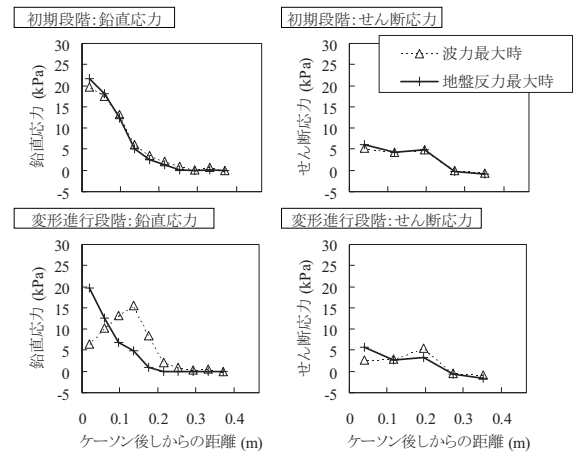
図-3.39 1波あたりの地盤反力分布の経時変化 (Case3 消波ブロック不完全1, 肩幅小)



(a) 時刻歴 (初期段階)



(b) 時刻歴 (変形進行段階)



(c) 地盤反力分布

図-3.40 1波あたりの地盤反力分布の経時変化 (Case4 消波ブロック不完全2, 肩幅小)

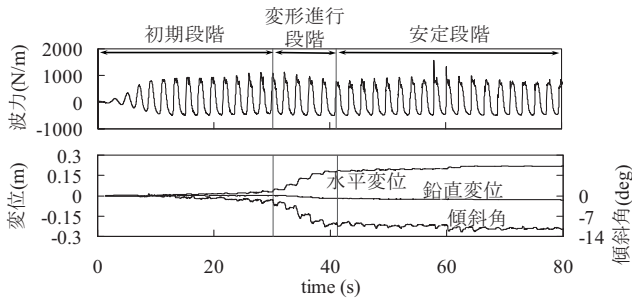


図-3.41 波力およびケーソン水平・鉛直変位・傾斜角の時刻歴 (Case1 消波ブロック無, 肩幅小)

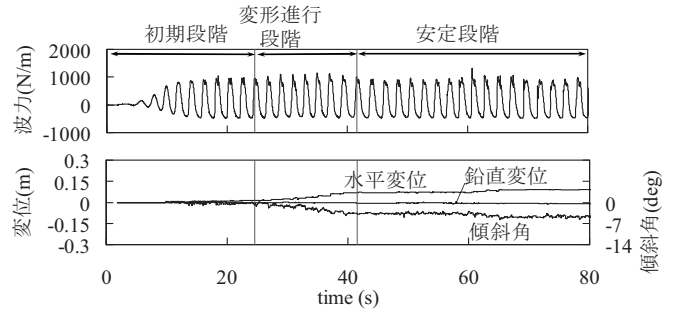


図-3.43 波力およびケーソン水平・鉛直変位・傾斜角の時刻歴 (Case2 消波ブロック無, 肩幅大)

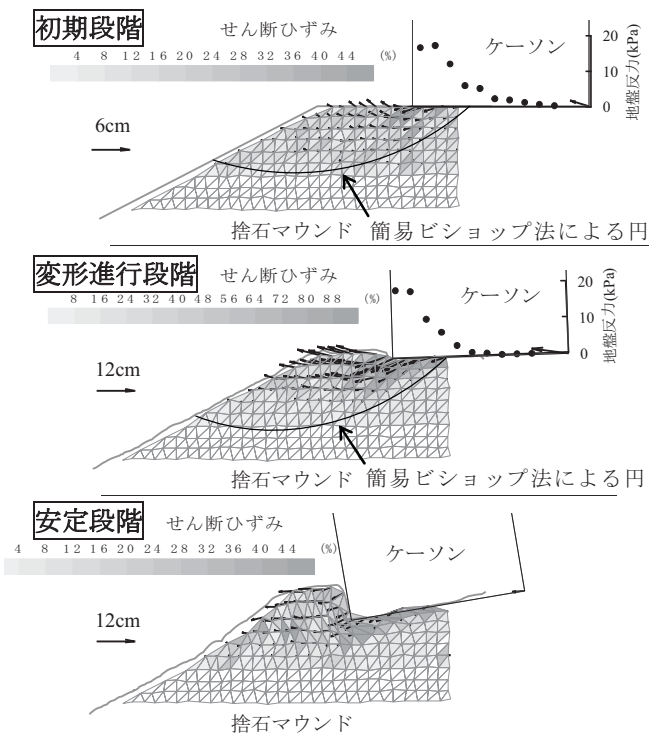


図-3.42 マウンド変位ベクトル・せん断ひずみ分布・地盤反力分布 (Case1 消波ブロック無, 肩幅小)

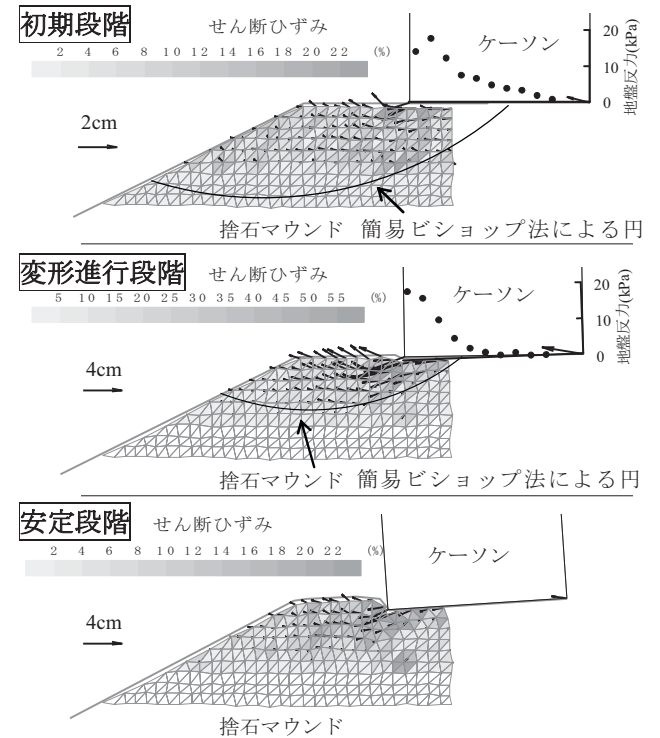


図-3.44 マウンド変位ベクトル・せん断ひずみ分布・地盤反力分布 (Case2 消波ブロック無, 肩幅大)

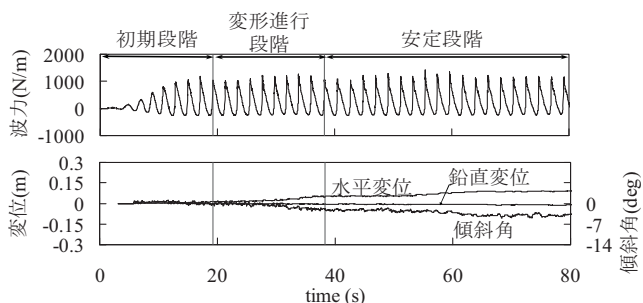


図-3.45 波力およびケーソン水平・鉛直変位・傾斜角の時刻歴 (Case3 消波ブロック不完全1, 肩幅小)

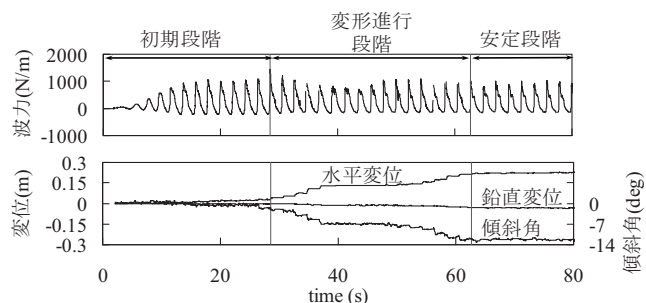


図-3.47 波力およびケーソン水平・鉛直変位・傾斜角の時刻歴 (Case4 消波ブロック不完全2, 肩幅小)

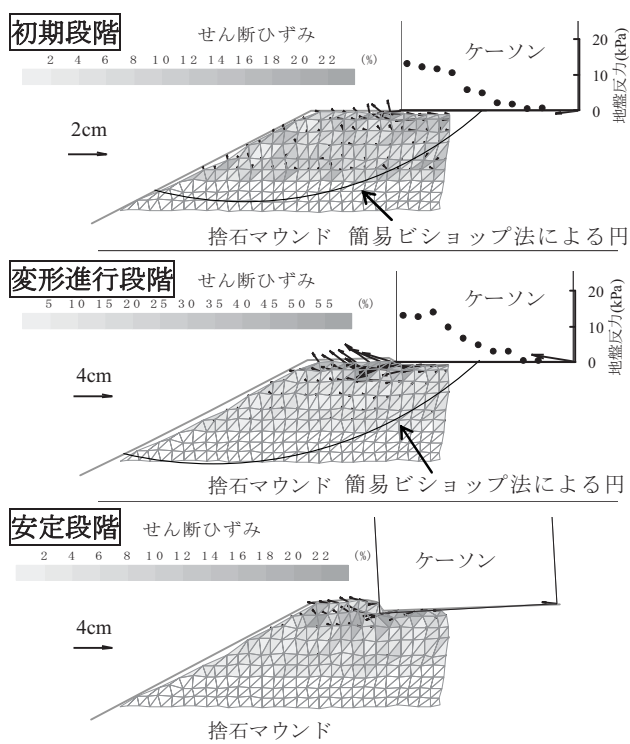


図-3.46 マウンド変位ベクトル・せん断ひずみ分布・地盤反力分布 (Case3 消波ブロック不完全1, 肩幅小)

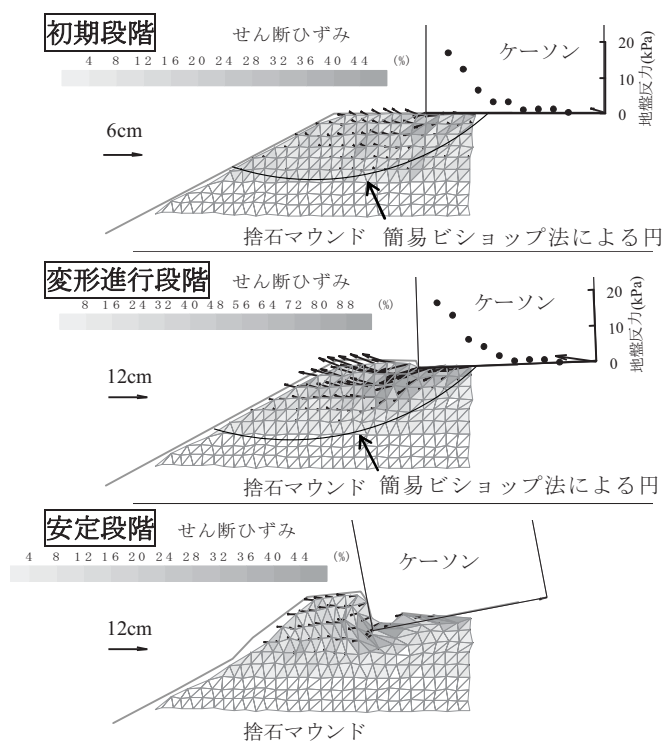


図-3.48 マウンド変位ベクトル・せん断ひずみ分布・地盤反力分布 (Case4 消波ブロック不完全2, 肩幅小)

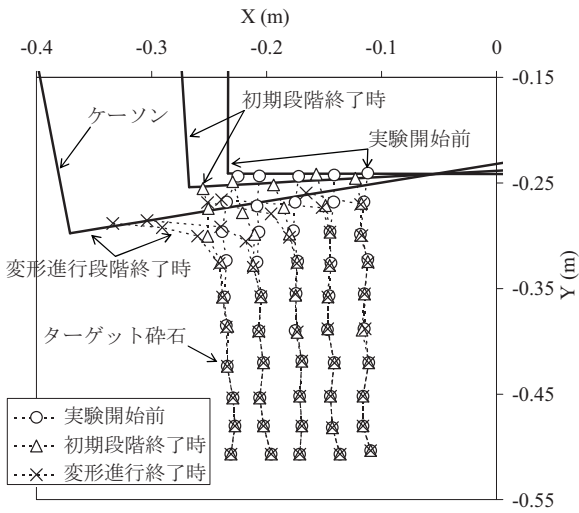


図-3.49 ケーソンの位置とケーソン直下のターゲット砕石の位置 (Case1 消波ブロック無, 肩幅小)

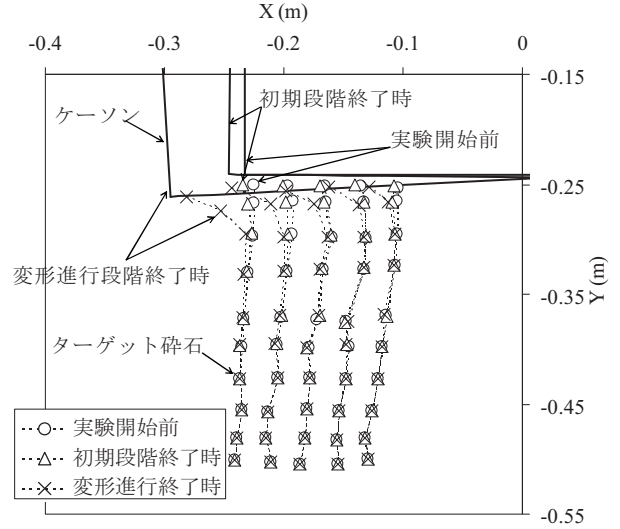


図-3.51 ケーソンの位置とケーソン直下のターゲット砕石の位置 (Case3 消波ブロック不完全1, 肩幅小)

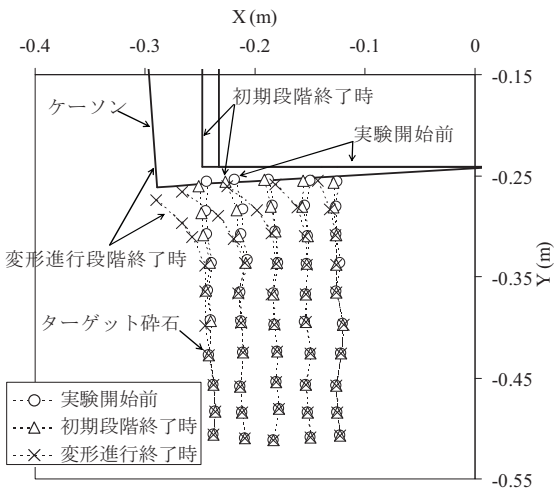


図-3.50 ケーソンの位置とケーソン直下のターゲット砕石の位置 (Case2 消波ブロック無, 肩幅大)

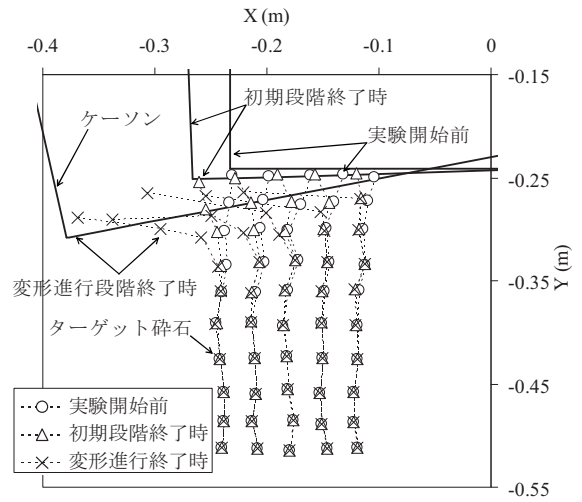


図-3.52 ケーソンの位置とケーソン直下のターゲット砕石の位置 (Case4 消波ブロック不完全2, 肩幅小)

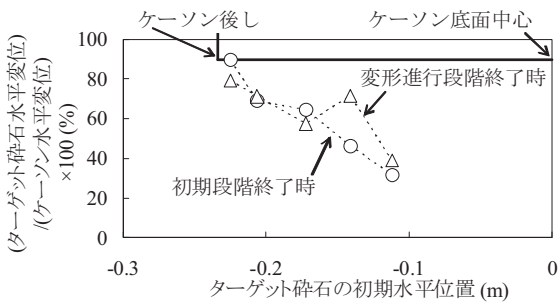


図-3.53 ターゲット砕石の水平変位とケーソン底面の水平変位との比 (Case1 消波ブロック無, 肩幅小)

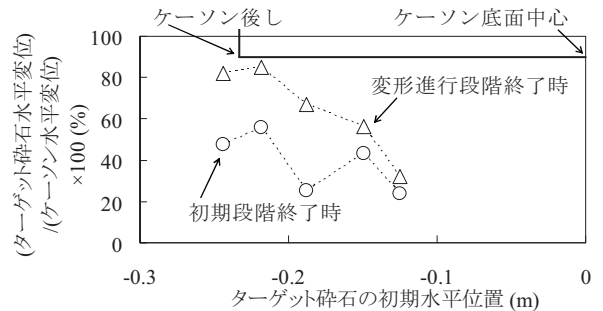


図-3.54 ターゲット砕石の水平変位とケーソン底面の水平変位との比 (Case2 消波ブロック無, 肩幅大)

(8) ケーソンの変形特性

a) 水理模型実験

図-3.55 に水理模型実験および静的載荷実験におけるケーソン水平変位と鉛直変位・傾斜角の関係を、ケーソンの変形特性として示す。図中の○印は水理模型実験の終了時を示している。

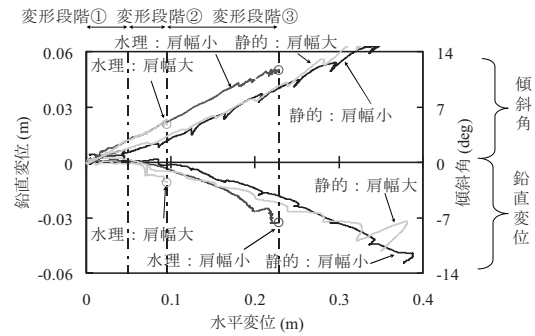
なお、静的載荷実験を実施した結果、水理模型実験 Case1 (消波工なし, 肩幅小) における組合せ荷重 (水平力, 鉛直力, モーメント) と調和する荷重着力点高さは 0.277 m であり, 当初想定した着力点高さ 0.227 m と異なる結果となった。同様に Case2 (消波工なし, 肩幅大) の結果と調和する荷重着力点高さは, 当初想定した 0.242 m ではなく, 0.292 m となった。このことから, 図-3.55 に示す静的載荷実験の結果は, 水理模型実験 Case1 における組合せ荷重と調和する着力点高さの結果とした。

水理模型実験の結果に着目し, 図-3.55 (a) の消波ブロック無のケースについて見ると, 肩幅が大きい場合は, 変形進行段階でケーソンの変位は若干進行するものの, マウンド法肩付近の大規模な側方変位は発生せず, ケーソンの変位は大きく抑制される結果となった。マウンド肩幅の大小に関わらず, 水平・鉛直変位・傾斜角の関係 (以後, 「骨格曲線」と呼ぶ) は, ケーソン変位が小さい範囲ではほぼ同じであることがわかる。

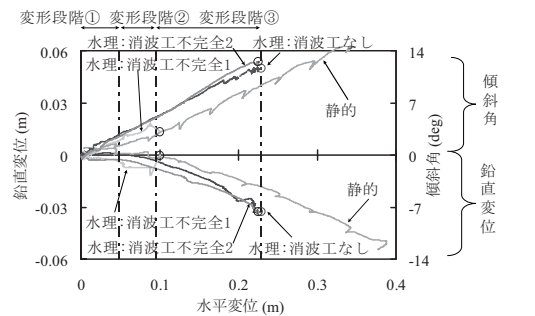
同様に, 水理模型実験の結果に着目し, 図-3.55 (b) の肩幅小のケースについて見ると, 消波ブロックの天端が高い場合 (消波ブロック不完全1) は, 図-3.55 (a) の肩幅大のケースと同様に, マウンドの大規模破壊は発生せず, ケーソンの変位が抑制された。消波ブロックの有無や消波ブロック天端高さに関わらず, 骨格曲線はケーソン変位が小さい範囲ではほぼ同じであることがわかる。

次に, 捨石マウンドの変形挙動について比較する。図-3.56 にケーソンの水平変位増分を基準とした場合の, ターゲット砕石の水平変位増分の比 (%) を示す (以後, 「基準化水平変位」と呼ぶ)。図中には, 変形段階① (図中○印), 変形段階② (△印) および変形段階③ (◇印) の3区間 (図-3.56 中に一点鎖線で境界を示す) ごとの結果を示している。変形段階①~③の最終変位は, それぞれ, 水理模型実験 Case1 (消波ブロック無, 肩幅小) において設定した初期段階終了時, Case2 (消波ブロック無, 肩幅大) の実験における実験終了時, および Case1 での変形進行段階終了時のケーソン水平変位と定義した。また, ターゲット砕石一列分の鉛直分布を示したグラフは, すべての実験結果について, ケーソン後趾を起点として概ね同じスケールで左右に配置している。なお, 静的載荷実験については, 水理模型実験 Case1 (消波ブ

ック無, 肩幅小) および Case2 (消波ブロック無, 肩幅大) における組合せ荷重 (水平力, 鉛直力, モーメント) と調和するケースとして, それぞれ荷重着力点高さ 0.277 m および 0.292 m の結果を示している。図-3.56 によると, 変形段階①ではマウンド表層付近の基準化水平変位が大きくなっており, 僅かな変位であってもケーソンが変位する際は, 捨石マウンドの変形も同時に伴うことを明瞭に示している。このことは, 初期段階から捨石マウンドの支持力破壊が発生していることを示唆している。変形段階② (マウンド肩幅大の実験終了時の水平変位) までは, マウンド肩幅の大小, 消波ブロックの有無や消波ブロック天端高さに関わらずマウンド内の基準化水平変位は同様の分布を示しており, 肩幅の大きさによる変形挙動の違いは見られない。変形段階③に移行し変形がさらに進行すると, ケーソンの変位に伴い岸側の肩幅が狭くなり, マウンド全体が深い領域まで大きく斜面側に水平変位し, 法肩付近の全般的な水平移動を伴う破壊が発生していることがわかる (図-3.56 (a), (d))。



(a) 消波ブロック無のケース



(b) 肩幅小のケース

図-3.55 水理模型実験および静的載荷実験によるケーソン水平変位と鉛直変位・傾斜角の関係

以上のことから, 偶発波浪荷重を受けるケーソン式防波堤の終局状態の変形量照査手法を構築する際には, ケーソン変位が比較的小さい場合でも, 捨石マウンドの変形を伴う支持力破壊として問題を捉え, そのメカニズムを反映したモデル化が必要であると考えられる。さらに,

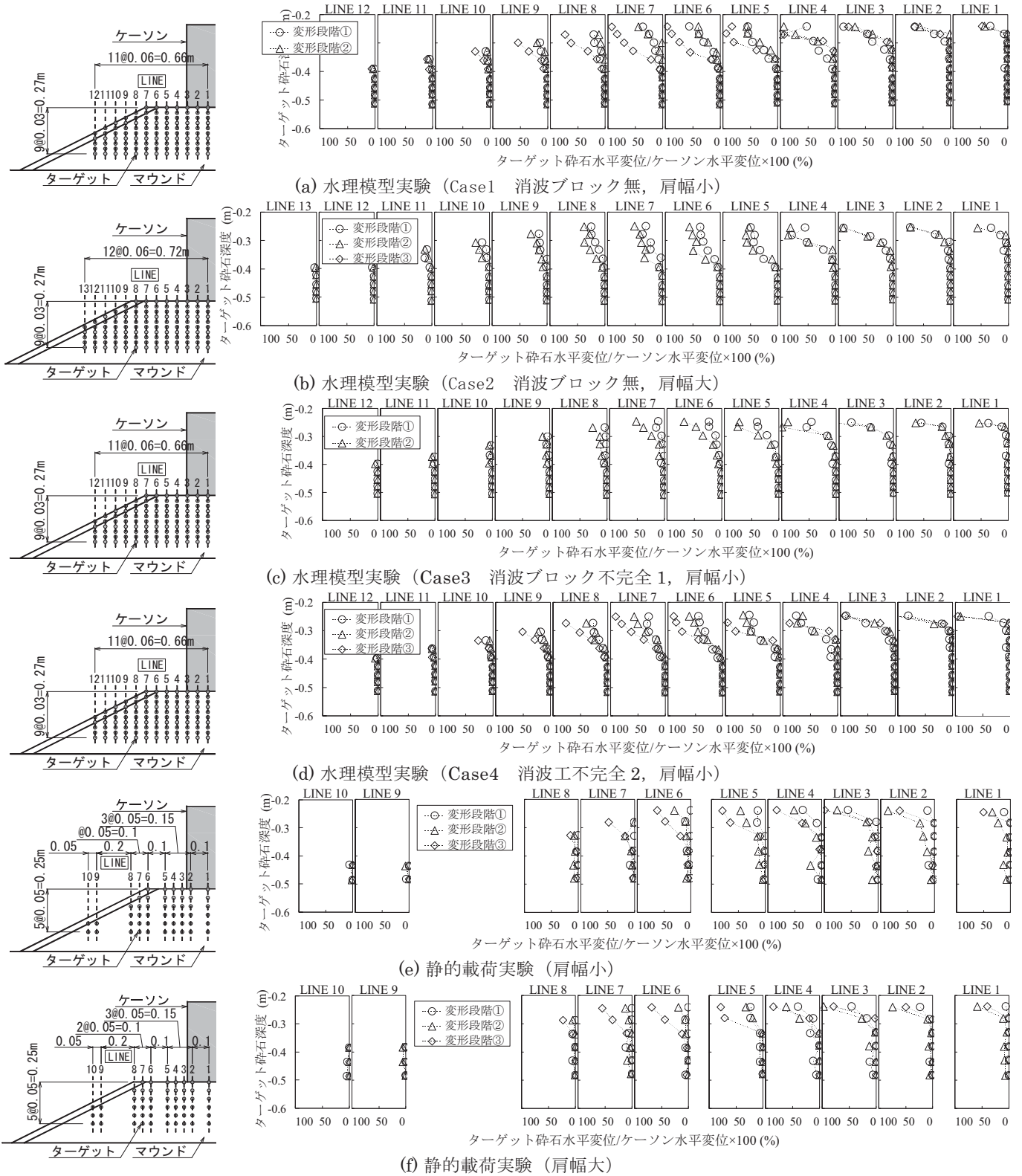


図-3.56 ケーソンの水平変位増分に対するターゲット砕石の水平変位増分の比の分布

ケーソンの変位が大きくなると、法肩付近の全般的な水平移動を伴う破壊が発生するようになるが、この大規模破壊の発生の有無によりケーソンの終局変位量が大きく影響される。このため、この大規模破壊が発生した場合の変形進展程度を再現できることが変形量照査を行う上で重要になると考えられる。これらの破壊メカニズムの詳細については、数値解析等を援用してさらに解明を進めていく必要があるが、先に示した捨石マウンドの変形挙動を再現できる手法であることを確認しながら、今後検討を実施する必要がある。

b) 水理模型実験と静的載荷実験との比較

次に水理模型実験と静的載荷実験の結果を比較する。なお、静的載荷実験については、水理模型実験 Case1 (消波ブロック無, 肩幅小) および Case2 (消波ブロック無, 肩幅大) における組合せ荷重 (水平力, 鉛直力, モーメント) と調和するケースとして、それぞれ荷重着点高さ 0.277 m および 0.292 m の結果を示している。両者の実験結果を比較すると、ケーソン変位の進行状況の特徴は両実験において整合的であることがわかる。さらに、静的載荷実験と水理模型実験における基準化水平変位を比較すると (図-3.56 (a) と 図-3.56 (e), 図-3.56 (b) と 図-3.56 (f)), 各段階における分布は概ね一致していることがわかる。この結果は、静的なアプローチにより、波浪作用を受けるケーソン式防波堤の変形特性 (骨格曲線) を再現できる可能性があることを示唆するものであった。

c) 既往の被災事例からみるケーソンの変形特性

図-3.57 にケーソン式防波堤の大規模被災事例について、変形特性 (骨格曲線) の特徴を整理した結果を示す。

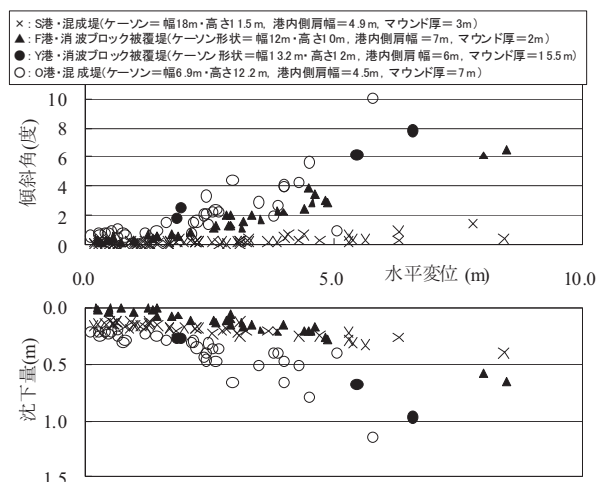


図-3.57 ケーソン水平変位と鉛直変位・傾斜角の関係 (被災事例)

収集した事例は、比較的多数のケーソン函体が大変位した4つの被災事例である。この結果、ケーソンの水平変位量と傾斜角・沈下量は地点毎で概ね一つの曲線関係を示しており (図-3.57), 柴田ら (1995) の結果と整合する。模型実験においても同様の傾向を示しており、これらの結果は、堤体条件に基づく骨格曲線の算出と外力の特定により、沈下と傾斜角を含めたケーソン変位の定量的な評価が可能となる見通しを与えるものであった。

4. おわりに

本研究では、偶発波浪荷重を受けた際の防波堤の大変形メカニズムを把握するために、ケーソン式防波堤 (混成堤および消波ブロック被覆堤) を対象とした水理模型実験および静的載荷実験を実施した。これらの実験結果から、ケーソン式防波堤の大変形過程におけるケーソンに作用する波力や揚圧力の変化、ケーソンの変位特性、捨石マウンドの破壊形態、およびケーソンの変位特性と捨石マウンドの破壊形態との関係など、ケーソン式防波堤の大変形メカニズムに関する基礎的な知見を得ることができた。

今後は、本研究で明らかになった、防波堤の大変形過程における波力特性や支持力特性に関する知見に基づき、防波堤の変形量予測手法について、さらに検討を進めたいと考えている。

(2009年10月30日受付)

参考文献

(社)日本港湾協会(2007): 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上) P.198.
 塩見雅樹・山本浩・津川昭博・黒沢忠男・永松宏一(1994): 消波ブロック不連続部の波力増大による防波堤の被災とその対策に関する研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.791-794.
 下迫 健一郎・高橋重雄(1994): 混成防波堤の期待滑動量の計算, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.785-790.
 高橋重雄・下迫健一郎・上部達夫・谷本勝利(1993): 衝撃砕波力に対する混成堤防波堤の動的応答の計算, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.766-770.
 高橋重雄・大木 泰憲・下迫 健一郎・諫山 貞雄・石貫 国朗(2000): 台風 9918 号による護岸の被災とその対策に関する水理模型実験, 港湾技術研究所資料, No.973, pp.35-50.
 青木伸一・奥部綾子(1995): 防波堤直立部の滑動シミュレーション, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.861-865.
 田中昌光・山本正昭・間辺本分 (1985): 消波ブロック被覆堤ケーソンに作用する水平荷重の評価, 海岸工学論文集, 第32巻, pp.490-494.

- 中泉昌光・山本正昭・間辺本文(1988)：潜堤付防波堤の波力に対する実験的研究，海岸工学論文集，第35巻，pp.632-636.
- 宮井真一郎・大平勝司・塩見雅樹(1993)：被災防波堤集覧（その4），港研資料，No.765，pp.45-128.
- 宮田正史・吉田誠・安野浩一郎・三好俊康・三藤正明・熊谷健蔵(2009)：偶発波浪荷重を受けるケーソン式防波堤の大変形メカニズムに関する実験的研究，海岸工学論文集，第56巻，pp.886~890.
- 柴田徹・関口秀雄(1995)：地盤の支持力，鹿島出版会，pp.173~177.
- 下迫健一郎・土田孝・増田慎太郎・渡部要一・藤井敦(2003)：混成防波堤におけるマウンドの支持力破壊に関する大規模水理模型実験，海洋開発論文集，第19巻，pp.499-504.
- 日本港湾協会(2007)：港湾の施設の技術上の基準・同解説
- 平石哲也・平山克也・加島寛章・春尾和人・宮里一郎(2008)：偶発波浪荷重による被害例とその特性，海岸工学論文集，第55巻，pp.981-985.
- 宮井真一郎・大平勝司・塩見雅樹(1993)：被災防波堤集覧（その4），港研資料，No.765，pp.45-128.
- 宮田正史・安野浩一郎・吉田誠・関本恒浩・大久保陽介(2009)：ケーソン式防波堤の大変形破壊に伴う作用波力の変化に関する実験的研究，海岸工学論文集，第56巻，pp.881-885.
- 小林正樹・寺師昌明・高橋邦夫・中島謙二郎(1987)：捨石マウンドの支持力の新しい計算法，港湾技術研究所報告，Vol.26，No.2.

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 564 January 2010

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019