

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

---

VOL. 35    NO. 2    June 1996

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I)

第35巻 第2号 (VOL.35, No.2) 1996年6月 (June 1996)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 護岸の吸い出しに関する水理模型実験  
.....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 ..... 3  
(Hydraulic Model Experiments on the Settlement Failure of Caisson-Type  
Seawalls  
.....Shigeo TAKAHASHI, Kojiro SUZUKI, Katsumasa TOKUBUCHI,  
Tomomitsu OKAMURA, Kenichiro SHIMOSAKO, Koki ZEN, and  
Hiroyuki YAMAZAKI)
2. 壁式深層混合処理地盤の滑動破壊挙動について  
.....北詰昌樹 .....65  
(Sliding stability of wall type improved ground by Deep Mixing Method  
.....Masaki KITAZUME)
3. 未充填部を有するサンドイッチ部材の曲げ及びせん断特性  
.....清宮 理・木村秀雄・小島朗史 .....105  
(Mechanical Properties of Incompletely Filled Composite Sandwich Members  
.....Osamu KIYOMIYA, Hideo KIMURA, and Roushi OJIMA)
4. ファジィ制御によるドラグサクシオン浚渫船の自動化  
.....加藤英夫・福本裕哉・佐藤勇二・谷本祐史・岡山義邦 .....147  
(Automatic Operation System with Fuzzy Control for Trailing Suction  
Hopper Dredger  
.....Hideo KATO, Hiroya FUKUMOTO, Yuji SATO,  
Hirofumi TANIMOTO, and Yoshikuni OKAYAMA)

## 1. 護岸の吸い出しに関する水理模型実験

高橋 重雄\* 鈴木高二郎\*\*  
徳淵 克正\*\*\* 岡村 知光\*\*  
下迫健一郎\*\*\*\* 善 功企\*\*\*\*\*  
山崎 浩之\*\*\*\*\*

### 要 旨

ケーソン式の防波護岸に関する水理模型実験を行った。実験は、当所の大型造波水路で行い、防波護岸の大型模型を設置して波を作用させ、その変形を観察するとともに、間隙水圧を測定している。

実験では、現地の吸い出し災害の再現を試みるとともに、そのメカニズムの検討を行っている。また、二、三の吸い出し防止工法についても実験的にその有効性を検討した。実験では、通常の裏込石があるものだけでなく、裏込石がなく直接埋立土がある場合についても、測定を行っている。さらに、施工時に対応する、埋立土がない状況についても実験を行っている。得られた主要な結論は以下の通りである。

- 1) 防砂シートに穴がある際には、波が作用するとマウンド透過波でシート付近の砂がゆるみ、その後の引き波で砂が吸い出され、空隙の大きい裏込石内に埋立砂が落下する様子が見られる。その結果、埋立砂内には空洞ができ、さらに空洞が大きくなると地盤の陥没になる。
- 2) ケーソン全面の波圧は容易にマウンドを透過して裏込石内に到達し、裏込石内には大きな圧力が発生する。マウンド透過波による裏込石内に発生する間隙水圧は意外に大きく、ケーソン全面波圧の70～80%にも及ぶ。さらに、越波によって護岸背後が冠水した場合には埋立砂の空隙が水で満たされて裏込石内の密閉度が高くなり、ケーソン全面波圧とほとんど変わらない間隙水圧が裏込石内に発生する。このようなマウンド透過波による強大な圧力を減衰させるため、裏込石を埋立地盤の天端まで延ばして解放すると、圧力を標準的断面の30%まで減衰でき、有効な圧抜き工法となる。
- 3) 埋立土の土盛りが小さく、埋立天端に比して静水面の位置が高い場合には、マウンド透過波による強大な揚圧力により埋立土が持ち上げられ、埋立砂がボイリング状態となって破壊する場合がある。
- 4) ケーソン間の目地にはケーソン前面から水塊が入り込み、目地板には大きな衝撃的な波圧が働く危険性がある。この波圧は目地内の波面が空気を閉じ込め、これを衝撃的に圧縮して発生するもので、 $2w \cdot H$ を越えることもある。しかし、この衝撃的な波圧は減勢目地板を設けることによりかなり低減することができる。
- 5) 裏込石が無く埋立砂が直接ケーソン背後に置かれる場合は、目地板が破損するとすぐ砂が吸い出されて危険である。また、越波や降水によって埋立砂の地下水位が容易に上がるためケーソンの安定性にも問題となる可能性がある。マウンド内の圧力は埋立砂によって密閉度が高くなるため、ケーソン前面の90%程度とかなり高くなる。

キーワード：防波護岸、吸い出し、波圧、間隙水圧、裏込石、埋立砂、防砂シート、目地

\* 水工部 耐波研究室長  
\*\* 水工部 耐波研究室  
\*\*\* 水工部 耐波研究室研修生 (㈱シバタ工業)  
\*\*\*\* 水工部 主任研究官  
\*\*\*\*\* 土質部 特別研究官  
\*\*\*\*\* 土質部 主任研究官

## 1. Hydraulic Model Experiments on the Settlement Failures of Caisson-Type Seawalls

Shigeo TAKAHASHI \*                      Kojiro SUZUKI \*\*  
Katumasa TOKUBUCHI \*\*\*                Tomomitsu OKAMURA \*\*  
Kenichiro SHIMOSAKU \*\*\*\*            Koji ZEN \*\*\*\*\*  
Hiroyuki YAMAZAKI \*\*\*\*\*

### Synopsis

The recent utilization of reclaimed land provides large-area, man-made island, e.g., those used for airports, has necessitated their construction in relatively deep seas, which naturally requires them to be surrounded by seawalls that are directly exposed to strong waves since no protective berakwaters are present. Consequently, failures frequently occur during and after construction. The settlement of reclaimed land behind the seawalls is considered to be responsible for most, it does lead to land-usage problems and expensive long-term maintenance requirements. As the failure mechanism has not yet been clarified, this led to the present study which investigates settlement failures by reproducing them using a series of model experiments in a large wave flume. In addition, experiments were performed to elucidate possible countermeasures.

By combining our experimental results with those from field surveys, various mechanisms were found to cause leakage of reclaimed soil, with this loss of soil subsequently leading to seawall failure by settlement. The main results are described as follows.

- 1) As the possibility of settlement increases if the sheet fails to stop reclaimed soil leakage, it must be secured against direct wave action during the construction period.
- 2) Measurements showed that a high pore water pressure on the stone backfill will substantially increase leakage through the damaged sheet. In comparison with the toe pressure at the front of the vertical wall, backfill pore water pressures were about 20% lower, and quickly damped out into the reclaimed soil (sand). However, if all the soil surrounding the backfill is under saturated conditions, the backfill pore water pressures are much greater. A new method is proposed in which a pressure relief gravel filter situated on the top of the stone backfill is used to effectively reduce the pore pressure.
- 3) Boiling occurs in the reclaimed soil when the soil above the backfill has a small thickness and is saturated, which may result when wave overtopping is large and/or tides are high.
- 4) High impulsive pressures occur on the joint plate connecting two caissons. These pressures are generated by water plunging into the gap between the walls, which can crack the plate and in turn lead to damaging the geotextile sheet. Based on the experimental results, methods are described to (i) estimate the pressure and (ii) practically reduce the pressure.

**Keywords :** Caisson-Type Seawall, Reclaimed Soil leakage, Wave Force, Pore Water Pressure, Backfill, Reclaimed Sand, Geotextile Sheet, Gap between the Caissons

---

\* Chief of Maritime Structure Lab, Hydraulic Engineering Div.  
\*\* Member of Maritime Structure Lab, Hydraulic Engineering Div.  
\*\*\* Trainee of Maritime Structure Lab, Shibata Corp, Hydraulic Engineering Div.  
\*\*\*\* Senior Research Engineer, Hydraulic Engineering Div.  
\*\*\*\*\* Chief of Soil Dynamics Lab., Soils Div.  
\*\*\*\*\* Senior Research Engineer, Soils Div.

# 目 次

要 旨	3
1. まえがき	7
2. 実験の目的と方法	7
2.1 ケーソン式防波護岸とその埋立土の吸い出しの発生原因	7
2.2 実験の目的	8
2.3 実験水路と護岸模型	8
2.4 実験波	9
2.5 実験ケース	9
2.6 捨石マウンドと裏込石および埋立砂の透水係数	13
2.7 埋立砂内の圧力減衰	13
3. 被災再現実験	14
3.1 シートのめくれ・穴からの砂の吸い出し	14
3.1.1 シートのめくれ	14
3.1.2 シートに穴があいている場合	15
3.1.3 シートを静水面付近にしか設置していない場合	17
3.1.4 シートを設置しない場合	17
3.2 フィルター材による吸い出し防止工	18
3.3 舗装板の効果	19
3.4 目地板の破壊	20
3.4.1 ケーソン上部の目地板の破壊	20
3.4.2 ケーソン後部の目地板の破壊	20
3.5 まとめ	21
4. 護岸背後への圧力と流速に関する実験	21
4.1 埋立砂設置前を対象とした実験	21
4.1.1 防波堤時	21
4.1.2 裏込石投入時	23
4.1.3 マウンド透過波によるシートの挙動について	24
4.2 埋立砂設置後の実験	28
4.2.1 裏込石が密閉されている場合（護岸完成時）	28
4.2.2 越波・雨水で埋立天端が冠水した場合	32
4.2.3 裏込部の天端上に埋立砂がない場合（埋立時断面）	35
4.3 埋立砂のボーリング	37
4.4 圧抜き工法	40
4.4.1 裏込石を埋立天端上に露出させて圧力を解放させた場合	40
4.4.2 開口部を持つケーソンによる圧抜き	42
4.4.3 圧抜きによる裏込部内の水位変動の変化	42
4.5 まとめ	44
5. 目地板に作用する波圧とその低減工法	44
5.1 目地板に作用する波圧	44
5.2 減勢目地板による波圧低減工法	48
5.3 まとめ	51
6. 裏込石を用いず直接埋立砂を置く場合	52
6.1 目地板の隙間からの砂の落下	52
6.2 圧力の伝播	52
6.3 対策工法	54
6.4 まとめ	57
7. 結 論	57
8. あとがき	58
参考文献	58

## 1. まえがき

近年、沖合人工島や空港用の埋立地などが、比較的波浪の厳しい海域に造られるようになってきている。このような人工島や埋立地などでは、防波堤を設けず強大な波力を直接受ける「防波護岸」が造られることが少なくない。その設計では、護岸本体の耐波安定性の確保や越波対策の確立などいくつかの課題について十分な検討が必要であるが、特に重要なものの一つに護岸背後の沈下防止がある。すなわち、埋立土砂が吸い出しを受け、背後地の局所的な陥没や場合によっては全体的な沈下が発生する事がある。写真-1.1ではエプロンに大きな穴があいている。(写真は巻末P59以降にまとめて掲載)また、写真-1.2はケーソン式護岸の被災の一例を示すものであり、図-1.1はこの時の被災断面である。エプロンの各所に陥没が多数見られる。一方、写真-1.3は、護岸施工中に被災したものであり、埋立砂が沈下し、大きな穴があいている。

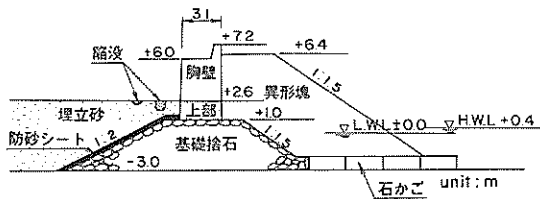


図-1.1 ケーソン式護岸の被災断面の一例

こうした被災事例は、年間の港湾施設の被災の中でも件数としてはかなり大きな割合を占めている。また、施工中に発生する被災としても、その件数は少なくない。ただ、一件一件の被災としては比較的規模が小さく被災額も小さいこともあり、また被災を受けるのは施工上の問題とされて、設計上の問題としては従来あまり重視されていなかった。しかしながら、近年大規模な防波護岸が数多く造られるようになっており、比較的規模の大きな被災も多くなっている。したがって最近では、これを設計上の問題としてとらえ、多くの関係機関で検討されるようになってきている。

本研究は、比較的大型の水理模型実験を行って、ケーソン式の防波護岸についてこうした被災の発生のメカニズムを検討するものである。実験では、防波護岸の模型に波を作用させ、被災を再現するとともに、間隙水圧等を測定して、被災の原因を考察している。また、対策工法についても実験を行っている。ただし、ここでは、今回実施した水理模型実験の範囲で検討しており、現在著

者等が実施している数値計算などの結果を含む解析を行っていない。護岸の吸い出しの問題は、材料や土質などを含む複雑な問題であり、総合的に検討する必要がある。

## 2. 実験の目的と方法

### 2.1 ケーソン式防波護岸とその埋立土の吸い出しの発生原因

防波護岸に主として用いられるケーソン式護岸は、一般に図-2.1に示すような断面となっている。すなわち、捨石マウンド上にケーソンを設置し、ケーソン背後には土圧軽減用の裏込石を投入し、その上に埋立土を投入する。裏込石と埋立土の境界には埋立土が裏込部に落下することがないように防砂シートが敷設される。防砂シートには一般にナイロンなどの化学繊維性の不織布、あるいは織布が用いられる。ケーソンとケーソンの目地部には目地板が設けられ、裏込石や埋立土の流失を防いでいる。

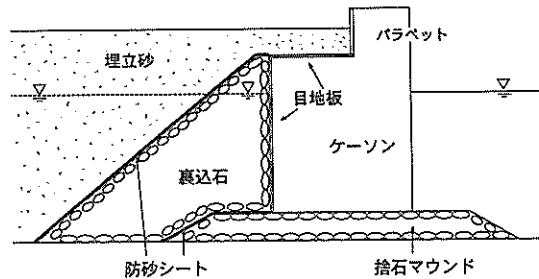


図-2.1 ケーソン式防波護岸の断面形状

防波護岸における地盤の陥没や沈下災害は、基本的には埋立土が裏込部や目地部に落下したり、ケーソン前面に流失することによるが、その一つの原因は、防砂シートや目地板の損傷によるものと考えられる。図-2.2は、防波護岸における埋立土の吸い出しの発生原因についてとりまとめたものである。たとえば、施工時に波の作用によって防砂シートがめくれ上がり、そのまま埋立された場合、完成後に波の作用によって防砂シートの隙間から砂が吸い出されて埋立地盤の陥没に至ると考えられる。また、シートに隙間ができるのは、施工時の埋立土の落下衝撃や完成後の波による繰り返し荷重によることも指摘されている。あるいは、完成後波の作用によってケーソン上部の目地板が損傷し、そこから埋立土が漏れ出すことも考えられる。また、今回の水理実験でも明らかになった、ボイリング（液状化）による施工中や施工後の埋立地盤の崩壊もあると思われる。

図-2.2からも分かるように、吸い出しには様々な要

因が関係しており、種々の検討が必要であるが、水理模型実験によって検討できる項目も少なくない。今回の水理模型実験では、図-2.2に示した発生原因の整理に基づいて実験項目等を決定している。

## 2.2 実験の目的

この研究の最終的な目的は、すでに述べたように、防波護岸の吸い出しに対する設計法を確立することであり、この水理模型実験は、今後の総合的な検討の一段階として、波に関連する検討を行うものである。実験は、ケーソン式護岸を対象にして、埋立土が砂の場合を取り扱っている。実験は、以下の4項目に分けることができる。

### ① 被災再現実験

防砂シートや防砂板に損傷が発生した場合を想定し、そのときの埋立砂の吸い出しなどの被災の再現を行うことによって、被災の原因について検討する。実験では、越波や降水によって冠水した場合の影響についても検討している。

### ② 護岸背後への圧力と流速に関する実験

波による護岸への影響を検討するための基本的な実験であり、波が作用した場合の護岸背後への圧力（間隙水圧）の伝播とそれに伴う流れや水面の変動について実験的に調べる。このとき、裏込部の密閉度による圧力や流れの違いに注目して実験を行う。また、護岸施工段階の断面（防波堤時や裏込石投入時）や越波や降水による冠

水がある場合についても実験を行う。さらに、裏込部内の間隙水圧を減少させる圧抜き工法についても実験的に検討する。

### ③ 目地に関する実験

目地部の破壊につながる、衝撃的なものを含む目地板に対する波圧について調べる。また、目地板への波圧を減少させる、減勢目地工法についても検討する。

### ④ 裏込石を用いず直接埋立砂を置いた断面に関する実験

裏込石は、ケーソンへの土圧の軽減のために用いられているが、波力が大きく土圧が問題とならないときには、裏込石を設けず、直接埋立砂を置く場合がある。実際には、裏込石は間隙水圧の緩和など吸い出しを防止する役割も果たしているため、これがない場合には吸い出しが発生しやすい。従って、こうした特殊な断面についても上述した一連の実験を行う。

## 2.3 実験水路と護岸模型

実験は、図-2.3に示す当所の105m造波水路で実施した。水路は3mの幅で、その内の80cmの測定水路内に図-2.4(1)に示すようなケーソン式護岸の模型を設置し、揚圧力計（波圧計）および間隙水圧計を設置した。なお、図-2.4(1)に示した断面は、本実験における基本断面であり、完成時の標準断面と呼んでおり、この図にその場合の圧力センサーの設置位置を示している。

図-2.4(1)のケーソンは幅100cm、高さ112cmで、こ

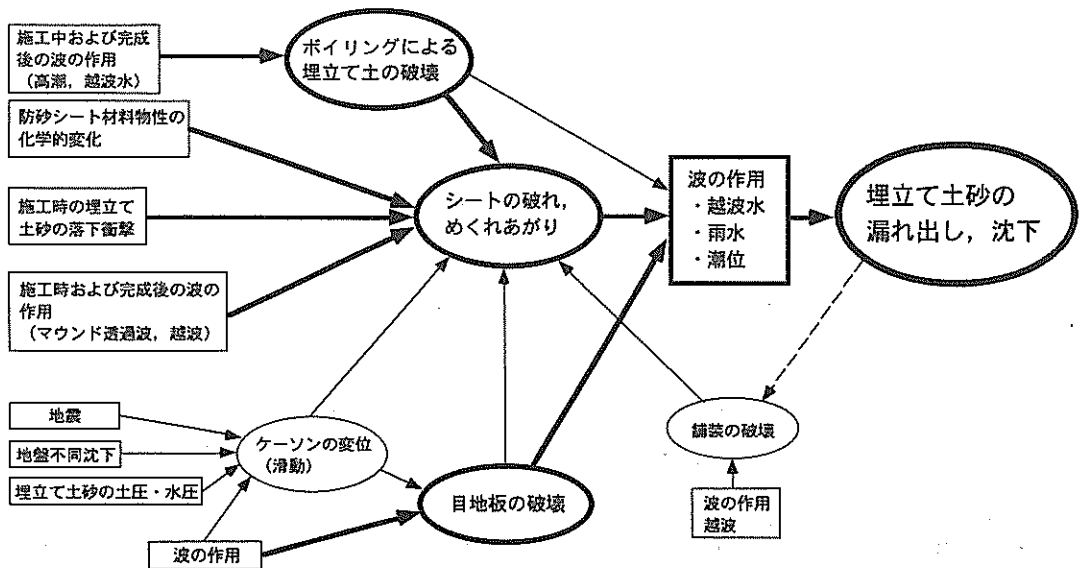


図-2.2 吸い出しの発生原因

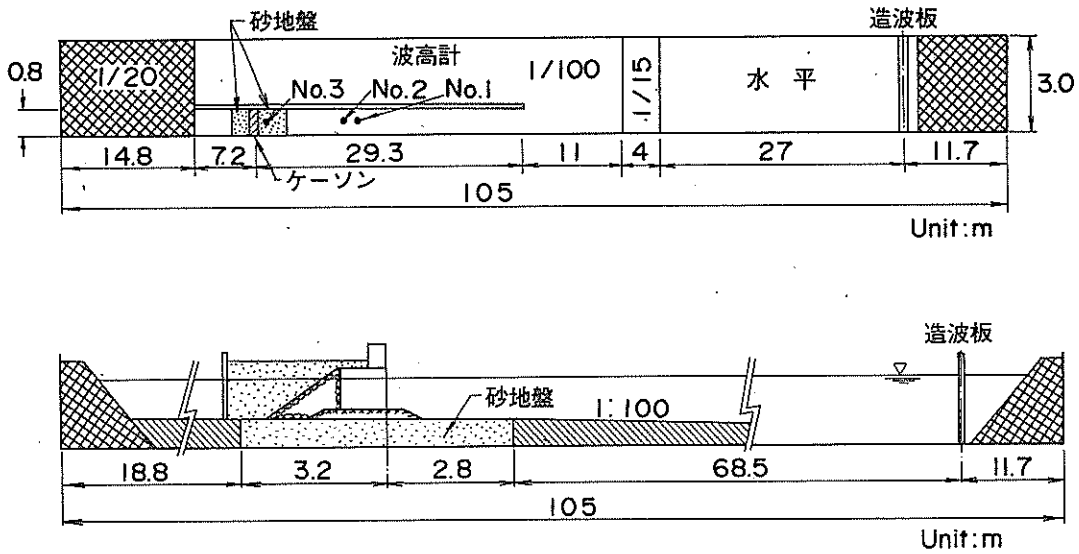


図-2.3 実験水路と模型

の上にバラベツトとして高さ30.5cmの2つの箱を置いている。マウンドの厚さは20cmであり、裏込部の斜面の勾配は1:1.2となっている。水深 $h$ は104.4cmであるので、バラベツトの天端高が88.6cmであり、裏込部の天端幅が10cm、静水面での裏込部の幅が43.1cmとなる。マウンドと裏込部には碎石、埋立土には砂を用い、防砂シートは厚さ1.5mmの透水性を有する不織布のシートを用いた。マウンドと裏込部の碎石および埋立砂の諸元は表-2.1に示しており、防砂シートの特性は表-2.2に示している。この模型断面は、特に対象とした現地はないが、1/20の縮尺とすると、水深が20.88mとかなり大水深の護岸となる。1/10の縮尺を考えると水深が10.44mとなり、一般的な護岸の水深となる。

図-2.4(2)は、もう一つの代表的な断面であり、埋立砂が裏込石の天端まで達していない埋立途中の断面である。この断面の特徴は、裏込石の天端が開放されていることであり、またバラベツトの天端が58.1cmと低く越波しやすい断面であることである。なお、防砂シートとして厚さ1mmの不透水性のビニールシートを用いている。この断面は、主として被災再現実験において用いている。

なお、実験ケースによっては、これらの断面形状やセンサーの配置と異なっているものもあるが、それについては、各章で説明する。また、越波や降水による冠水の影響を見る場合には、ポンプで護岸天端上に給水し、冠水高さを一定に保っている。

#### 2.4 実験波

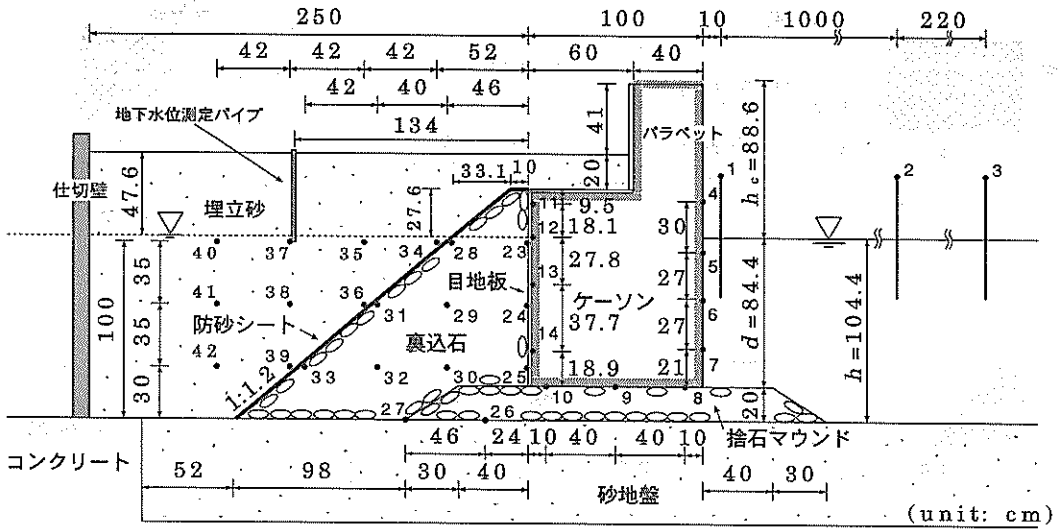
実験において模型に作用させた波は、表-2.3に示した周期 $T$ が2.1~3.48sで波高 $H$ が23.8~61.9cmの規則波である。このほか同じ周期の不規則波も用いている。模型縮尺を1/20とすると周期は9.4~15.6s、波高は4.76~12.38mとなり、1/10とすれば周期が6.6~11.0s、波高が2.38~6.19mとなる。

実験波の中で周期3.04s、波高52.4cmのものを「基準実験波」と呼んでおり、この実験波の結果を中心的に解析している。基準実験波は、縮尺を1/20とすると周期 $T$ が13.6sで波高が10.48mとなる。

#### 2.5 実験ケース

図-2.5は、各実験ケースの断面形状の概略を示すものであり、実験の目的で示した4つの実験項目別に示している。図-2.5(a)は、被災の再現実験に関する実験ケースであり、シートのめくれ状況を見るケース、シートの穴から砂の落下を見るケース、シートの敷設範囲の影響を見るケース、舗装板の影響を見るケース、目地が破損した場合の砂の落下を見るケースがある。なお、実験は、2ヶ年にわたっているため、断面形状に統一がとれていないところもある。基本的には先に図-2.4(1)に示した完成時の標準断面を基本としているが、図-2.4(2)に示す埋立砂が裏込石天端までしかならない形状（裏込部天端が解放されている断面、埋立時断面）も混在していることに留意していただきたい。





1~3:波高計 4~7:波圧計(ケーソン前面) 8~10:波圧計(揚圧力) 11~14:波圧計(目地板) 23~42:間隙水圧計

図-2.4 (1) 実験断面と測定器 (完成時標準断面)

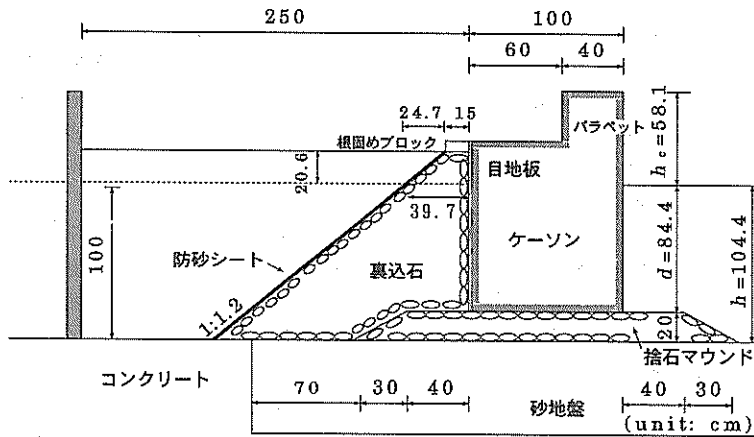


図-2.4 (2) 実験断面と測定器 (埋立時断面)

表-2.1 裏込部とマウンド部の碎石および埋立砂の諸元

対象		埋立砂	裏込砂
空隙率	n	0.445	0.529
湿潤密度	$\gamma$ , g/cm	1.90	1.74
乾燥密度	$\gamma_d$	1.49	1.21
実質部分の秘密	$\gamma_s$	2.70	2.58
10%粒径	mm	0.13	—
平均重量/個	g	—	19.5

表-2.2 実験に用いた防砂シートの特性

目付 (g/m <sup>2</sup> )	厚さ (mm)	引張強度 (kg/5cm)		破断伸度 (%)		引裂強度 (kg)		透水係数 (m/s)
		タテ	ヨコ	タテ	ヨコ	タテ	ヨコ	
150	1.5	44	33	65	65	10	10	0.30

素材: ポリエステル100%

表-2.3 実験波

周期 T (s)	波高 H (s)
2.10	23.8、33.3、42.8、52.4
2.60	33.3、42.8、52.4、56.3
3.04	33.3、42.8、52.4、61.9
3.48	33.3、42.8、52.4、61.9

(b)は護岸ケーソン背後への圧力の伝播と流れに関する実験ケースであり、施工時断面、完成標準断面、冠水がある断面、裏込部天端が解放されている断面（埋立時断面）、ボーリングしやすい断面、圧抜き開口部を設けて圧力の低減を検討する断面等について実験している。

また、(c)は目地に関する実験のケースであり、完成標準断面の他に、目地板への波圧を減らす減勢目地板を付けた断面について実験を行っている。

さらに、(d)は裏込石を用いず直接埋立砂を置いた断面に関する実験のケースであり、対策断面としてケーソンに圧力を抜く開口部を設けたケースもある。

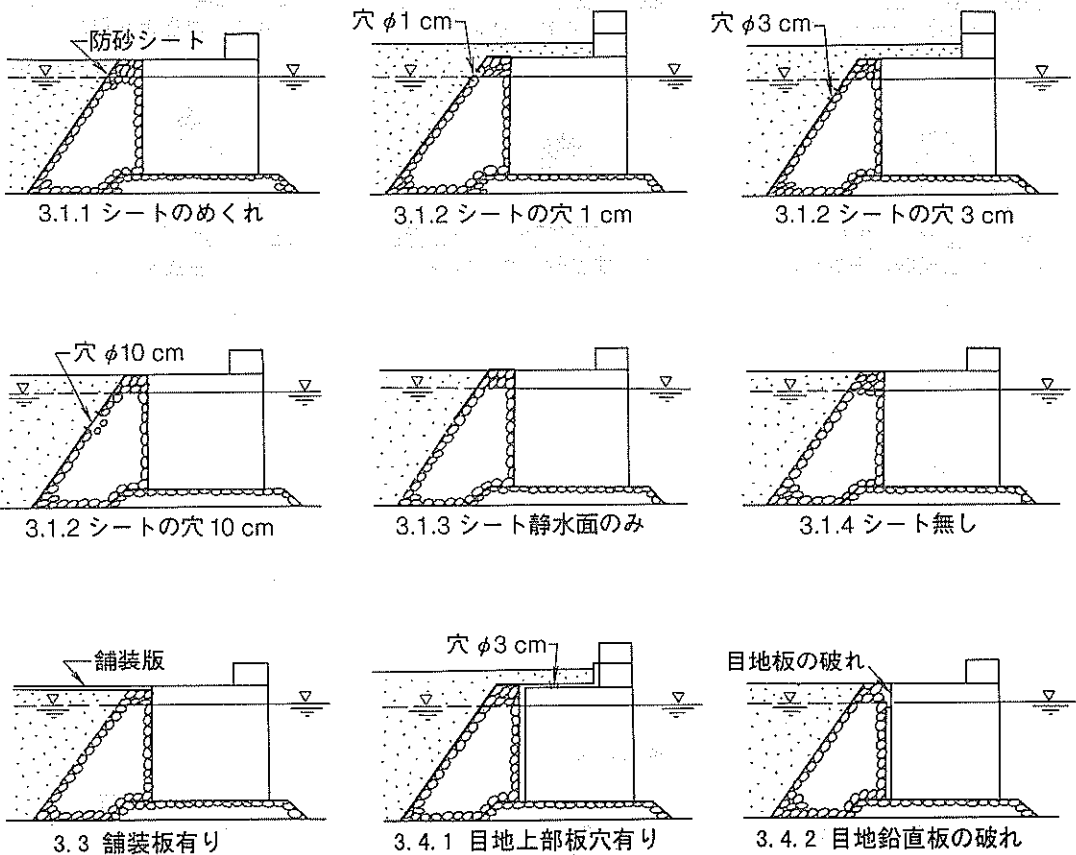


図-2.5(a) 実験ケース：被災再現実験

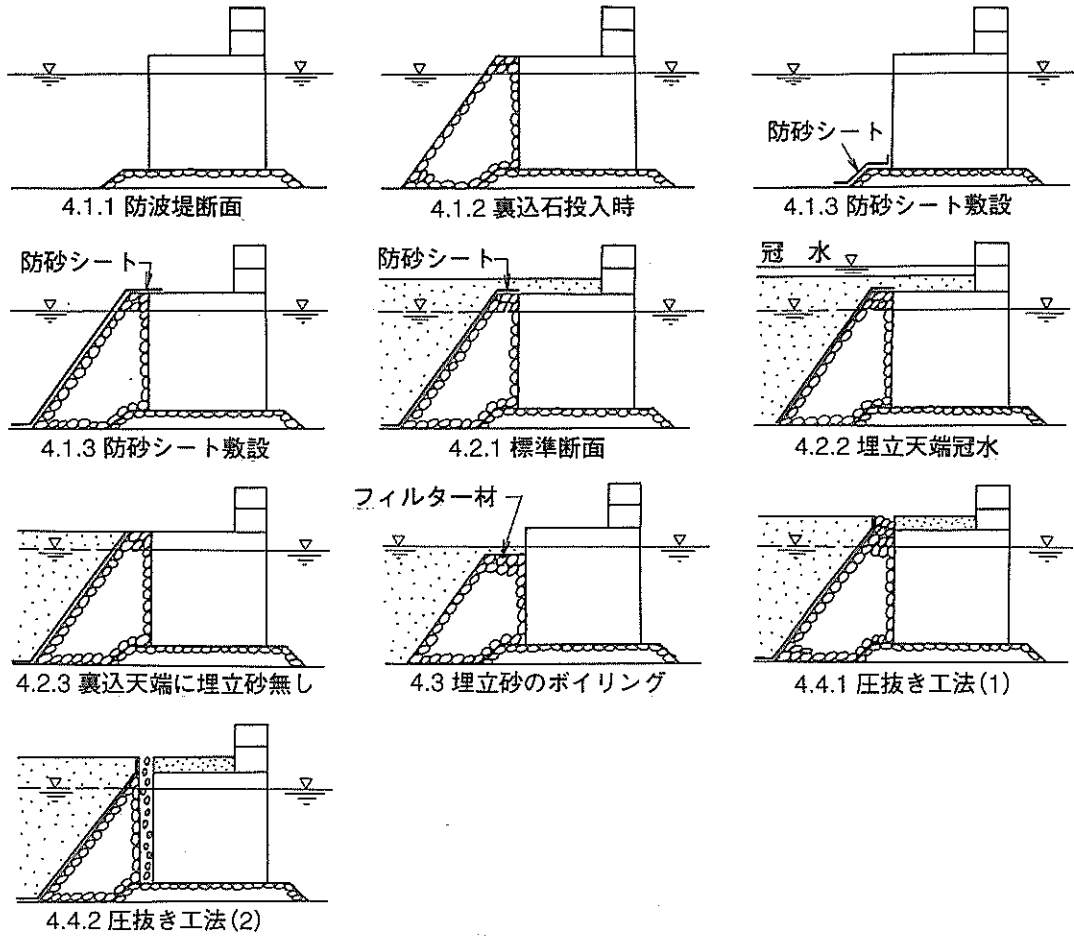


図-2.5(b) 実験ケース：護岸背後への圧力と流速に関する実験

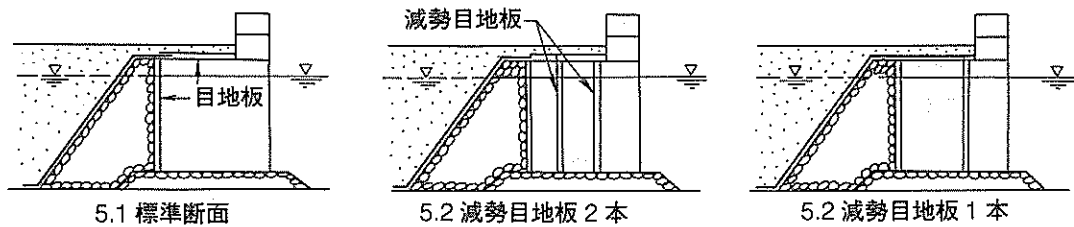


図-2.5(c) 実験ケース：目地に関する実験

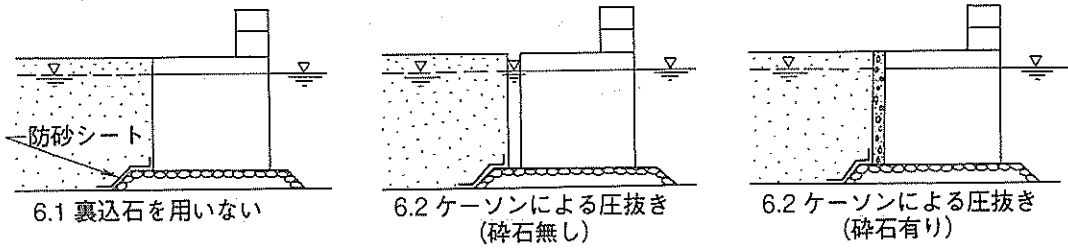


図-2.5(d) 実験ケース：裏込石を用いず直接埋立砂を置く場合

2.6 捨石マウンドと裏込石および埋立砂の透水係数

捨石マウンドや裏込石内の流れは、基本的にはそこでの圧力差によっている。埋立砂の場合のように流れが層流状態であれば、いわゆるDarcy則が成り立ち、動水勾配  $i$  と流速  $u$  は比例関係になり、その比例定数を透水係数  $k$  と呼ぶ。すなわち、

$$u = k i \tag{1}$$

となる。透水係数は砂で、 $10^{-2} \sim 10^{-5} \text{ m/s}$  であり、れきはそれ以上で細砂やシルトはそれ以下となる。ただし、れきや捨石では、乱流状態となるため、こうした動水圧と流速の比例関係は成り立たず、抵抗が流速の2乗に比例することを考慮する必要がある。

Dupuit-Forchheimer (デュブイ・フォルヒハイマー) 則はこうした場合の流速を与えることができる (Williams, et al. 1992)。すなわち、

$$i = u (a + b |u|) \tag{2}$$

ここに、

$$a = \alpha_0 \{ (1-n)^3 / n^2 \} \{ \nu / g D_{15}^2 \} \tag{3}$$

$$b = \beta_0 \{ (1-n) / n^3 \} \{ 1 / g D_{15} \} \tag{4}$$

ここで、 $n$  : 空隙率、 $g$  : 重力加速度、 $D_{15}$  : 15% 粒径、 $\nu$  : 水の動粘性係数 ( $10^\circ\text{C}$  で  $0.0131 \text{ cm}^2/\text{s}$ ) であり、 $\alpha_0$  と  $\beta_0$  は定数で石の場合1500と1.8を用いている。

なお、式(2)は、透水係数  $k$  で表示すれば

$$k = 1 / (a + b |u|) \tag{5}$$

となる。すなわち、流速が大きくなると抵抗が大きくなり、透水係数が小さくなることを意味している。

図-2.6は、横軸を動水勾配にとって上式によって流

速を計算したものであるが、模型におけるマウンドや裏込部の石の大きさを考慮して、 $D_{15}$  が  $1.0 \text{ cm}$  ( $1.35 \text{ g}$ ) と  $2.4 \text{ cm}$  ( $19.5 \text{ g}$ ) の場合について計算している。この図から、流速の範囲は  $D_{15}$  が  $2.4 \text{ cm}$  としても最大  $20 \text{ cm/s}$  程度であり、やはり動水勾配が大きいと流速が頭打ちになる傾向が認められる。透水係数で表せば、 $D_{15} = 2.4 \text{ cm}$  で動水勾配が  $0.5$  で  $30 \text{ cm/s}$  程度、 $1.0$  で  $20 \text{ cm/s}$  となる。

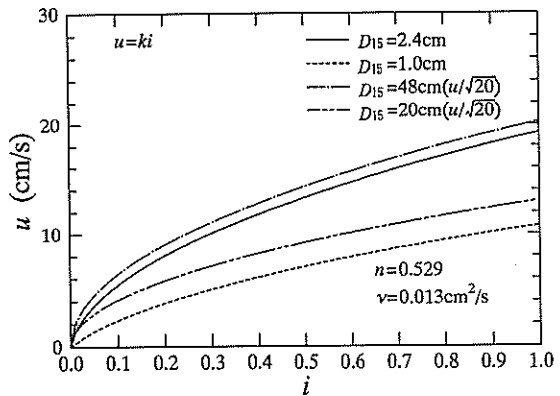


図-2.6 動水勾配とマウンド内の流速

また、同じ図に、模型縮尺を  $1/20$  と仮定したときの現地の石 (20倍の直径、 $48 \text{ cm}$  [ $156 \text{ kg}$ ]、 $20 \text{ cm}$  [ $10.8 \text{ kg}$ ]) について流速を計算し、これを  $1/\sqrt{20}$  倍した模型量で示している。図中の模型と現地の計算結果はよく一致しており、これは現地と模型の間にフルードの相似則がほぼ成り立つことを意味している。すなわち、現地の石と模型の石の幾何学的縮尺が満たされていれば、流速の場が通常の水理模型実験で相似できることを意味しており、この図は今回の実験の有効性を証明している図といえよう。

2.7 埋立砂内の圧力減衰

埋立砂内では、間隙水圧は急激に減衰すると考えられ

る。図-2.7は、Biotの二相弾性体の理論（山本・高橋，1985）によって計算された間隙水圧の線形減衰率  $k_{w2}$  である。すなわち、間隙水圧  $p$  は、初期圧力  $p_0$ 、減衰距離を  $z$  として

$$p = p_0 \text{EXP} [-k_{w2} z] \quad (6)$$

と表される。ただし、この減衰係数は、砂の透水係数と飽和度、そして波の周期の関数である。これは、無限深さの海底砂地盤上に波が進行する場合に対する砂地盤中の間隙水圧の線形減衰率であり、必ずしも埋立砂内の間隙水圧の伝播とは同じではないが、参考にすることができる。 $k_{w2}$  は、間隙水圧の伝播に関係する遅い圧縮波（Slow Compressional Wave）の複素波数の虚数部であるが、図ではこれを波の波数  $k_w$  との比で示しており、飽和度100%として、 $T=13.6\text{s}$ の波に対して模型の場合と現地の場合について計算している。

例えば、透水係数が  $10^{-3}\text{m/s}$  であれば、 $k_{w2}/k_w$  は現地でも模型でも、1.0であり、波の波長を  $L$  とすると、 $z=0.25L$  で圧力が20%まで小さくなる。この場合は現地と模型がフルードの相似則を満たすことになる。一方、透水係数が細砂やシルトの場合の  $10^{-6}\text{m/s}$  であれば、 $k_{w2}/k_w$  はやや大きくなり、模型と現地でやや異なっている。すなわち  $k_{w2}/k_w$  が現地では10であり、模型では  $k_{w2}/k_w$  が6程度であるから、現地に比して減衰が約1/2となることがわかる。

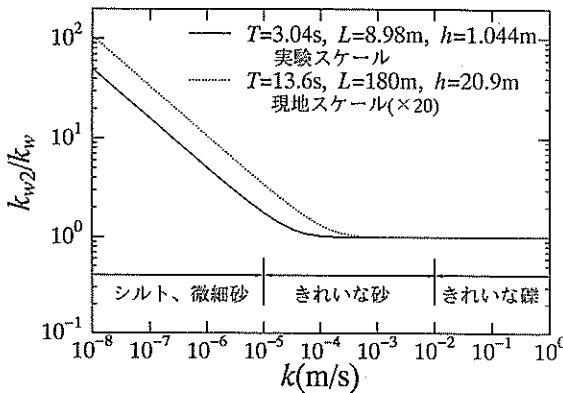


図-2.7 埋立砂内の圧力減衰

### 3. 被災再現実験

#### 3.1 シートのめくれ・穴からの砂の吸い出し

##### 3.1.1 シートのめくれ

##### (1) 実験断面

図-3.1は、被災の再現実験の中で一番最初に行った実験の断面図で、埋立時断面（護岸の裏込部が埋立天端上に露出し解放されている場合）を対象としたものである。またケーソンのパラベットの天端高は58.1cmとし、越波しやすくしてある。

防砂シートとしてはこのときは不透水性のビニールシートを用いているが、この防砂シートには穴等の破損箇所が無い。ただし、防砂シートは、観測部のガラス面に接着させておらず、シートは裏込部斜面にただ載せただけの状態としており、こうした場合のシートと裏込石、そして埋立砂の挙動を見ている。写真-3.1は、水路に設置された模型護岸を示すものである。

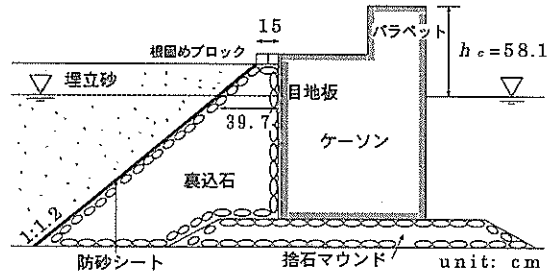


図-3.1 実験断面（防砂シートのめくれに関する実験）

##### (2) 実験状況

波高が比較的小さく越波があまり無い条件でも、マウンドからの透過波によって裏込部の水面が変動し、それによって静水面付近の防砂シートとガラス面との間に隙間ができ、そこから波の作用によって砂粒が落下している。波の作用を繰り返し、あるいは波高を大きくしていくと隙間は大きくなり、そこからの砂粒の落下が大きくなる。さらに波高を  $H=61.9\text{cm}$  と大きくすると越波が比較的激しくなり、図-3.2に示すように、越波水によって天端上の埋立砂が削られて後方に運ばれるようになる。同じ波高で実験を6回繰り返し、その都度埋立砂の天端をなおしているが、どの場合も越波水により9から13cm削られている。このような埋立砂が削られた部分のシートとガラス面との間には大きな隙間ができ、そこから埋立砂が越波水とともに流れるようにして裏込石内に落下するようになる。写真-3.2は波作用後の様子であり、埋立砂が落下の途中、裏込石の間に引っかかるようにし

てたまっているのがよく分かる。また、埋立砂天端がかなり陥没していることも分かる。

このようにマウンド透過波や越波水によって容易に防砂シートがめくれ、埋立砂が落下することが分かる。従って、以後の実験では特に断らない限り、すべて防砂シートを図-3.3のようにガラス面および水路壁で折り曲げ、その上に埋立砂を設置することで、ここでみられたようなシートのめくれによる土砂の吸い出しを抑えることとした。

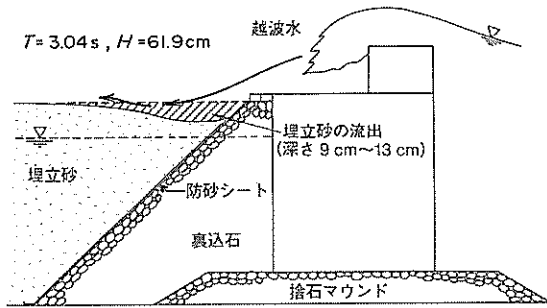


図-3.2 越波水の作用と埋立砂の流失

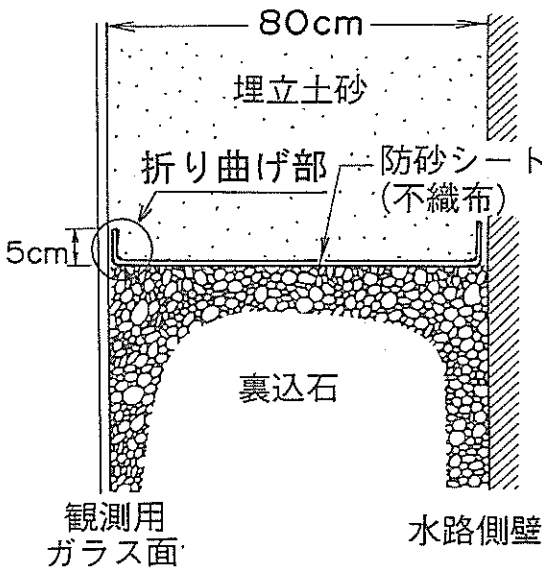


図-3.3 防砂シートの実験水路における設置方法

### 3.1.2 シートに穴があいている場合

施工中の埋立土の落下衝撃、施工後の波の作用等で防砂シートが破損してシートに穴が開き、埋立土砂がその穴から波の作用によって吸い出されるという現象は、吸

い出し災害の主たる原因と考えられる。こうした現象を再現する実験を実施した。この実験では観測用ガラス面付近の防砂シートにあらかじめ穴を開け、穴から埋立砂が吸い出される様子を目視で観察すると共にビデオに撮影した。穴の大きさとしては、直径1cm、3cm、10cmの穴を試したが、それぞれパラベットの天端高さ、ケーソン前面水深等の断面諸元を変えて実験を行ったため、ここではそれぞれの穴の大きさの場合について、順に述べることにする。

#### (1) 穴の直径1cmの場合

##### (a) 実験断面

図-3.4は、シートに直径1cmの穴を開けた場合の実験断面である。この全体形状は、完成時の標準断面と同じであり、パラベットの天端高を88.6cmとして越波をできる限り抑制している。実験は、埋立砂天端上を冠水させない場合と、冠水高5cmの場合について行っている。なお、冠水は先に述べたように越波や降水の影響を見るためであるが、埋立砂天端上にポンプで給水して一定の冠水高さを保つようにしている。この冠水時の埋立砂内の地下水位は、図に示すように冠水させない場合より22cm上がっているが地表面には達していなかった。また、シートの穴の位置は、静水面の高さである。

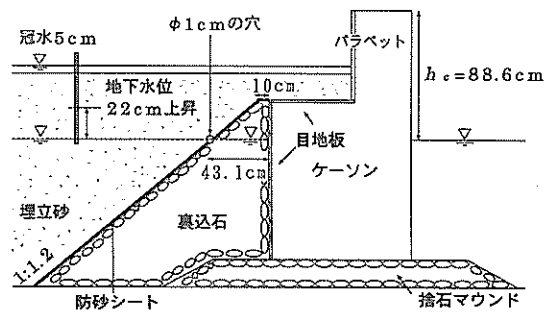


図-3.4 実験断面 (防砂シートに1cmの穴を開けた場合)

##### (b) 実験状況

周期は2.10sと3.04sで、波高を23.8cmから61.9cmまで変化させて実験しているが、穴の径(1cm)と裏込石の径が比較的近いので、石と石の隙間から極く少量しか吸い出される様子は見られない。しかしながら、埋立砂天端に水を注入して冠水させると、急に埋立砂が裏込石内に落ち始めた(水の注入を始めてから約2分後)。波を作用させるとさらに吸い出しが激しくなり、写真-3.3のように裏込石内の波面が穴の位置より下になっても常に砂

が落下する。実験において、しばらくすると防砂シートとガラス面の接着が一部はがれ、この間に隙間ができ、ここからも砂が吸い出されるようになった。写真-3.4は  $T=3.04s$ ,  $H=61.9cm$  の場合で隙間から砂が吸い出される様子である。

(2) 穴の直径3cmの場合

(a) 実験断面

図-3.5は、シートに直径3cmの穴がある実験断面で、基本的には直径1cmの穴がある場合と同じであるが、ケーソン前面水深を5cm高くして109.4cmとし、シートの穴が、裏込石内の静水面から5cm下になるようにした。また、直径1cmの実験でみられたようなシートとガラス面の隙間ができないようにするため、実験では穴の付近のシートを粘着テープで抑えている(図-3.6)。なお、この実験でも埋立砂天端上を冠水させたケースも実施しているが、この時の天端上の冠水高は5cmで、埋立砂内の地下水位の高さは23.5cmであった。

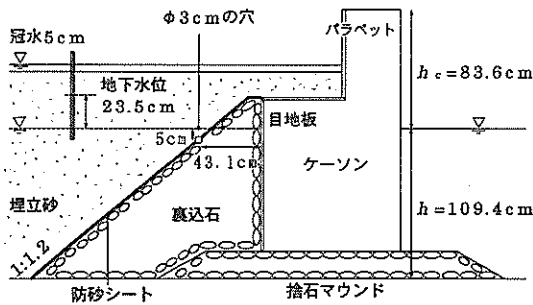


図-3.5 実験断面 (防砂シートに3cmの穴を開けた場合)

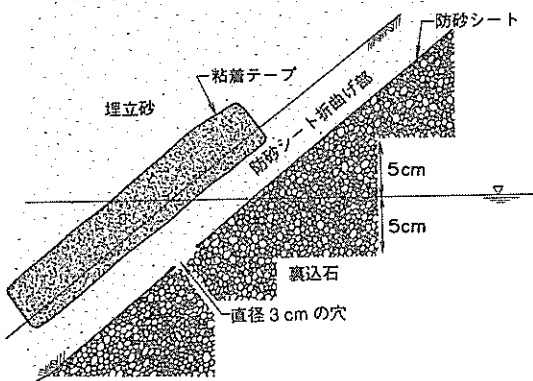


図-3.6 防砂シート穴付近の拡大図 (ガラス面へのシートの固定)

(b) 実験状況

実験では、まず周期  $T=2.10s$  で波高  $H$  を 23.8, 42.8, 52.4 cm と徐々に大きくしていった。波を作用させると波高が小さくともすぐに砂が吸い出されており、穴を大きくしたためであると思われる。波高を大きくすると吸い出される量はさらに大きくなり、 $H=52.4cm$  では穴の上の埋立砂内に写真-3.5に見られるような空洞が発生する。空洞は徐々に大きくなり、シートを粘着テープで抑えた部分より大きくなると、ガラス面と防砂シートの間に隙間ができた(写真-3.6)。その結果、裏込石内の空気がこの隙間を通して激しく出入りするようになった。

一方、多量の砂の落下により、写真-3.7に見られるように砂が穴付近の裏込石の隙間にたまって穴を塞ぐようになる。ここで、写真-3.6の空洞を埋めなおし、改めて冠水させて波をかける実験を行ったが、このような穴付近の裏込石の隙間にたまった砂の堆積(写真-3.7)は意外に安定で、少しずつ砂の落下はあるものの空洞を埋めなおす前と比較するとかなり少なく、数回波をかけたが新たな空洞が発生するには到らなかった。

(3) 直径10cmの穴

(a) 実験断面

図-3.7は、シートに直径10cmの穴を開けた場合の実験断面である。これは、前掲図-3.1とほぼ同じ埋立時断面であり、裏込部天端が解放されており、またパラベット天端が低く越波しやすい断面である。なお、穴の中心位置は静水面より15cm下である。

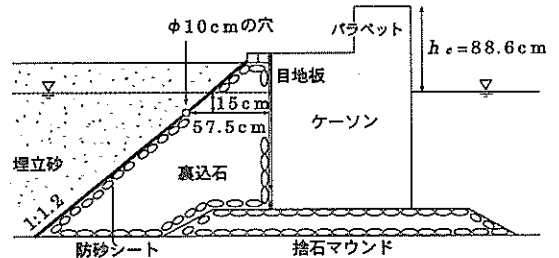


図-3.7 実験断面 (防砂シートに10cmの穴が開いた場合)

(b) 実験状況

波を作用させる前から、裏込石内への埋立砂の落下は顕著で、写真-3.8に示されるような大きな空洞(直径約25cm)が穴の上に発生し、落下した砂は写真の下の方にたまっている。なお、この実験ではケーソンを据え付けた後、裏込石、防砂シート、埋立砂を設置し、その後に水路に水を入れており、この空洞は水路に水を注入する

際に発生したものである。(なお、模型断面の製作方法は2種類で、3.1.1、3.1.2、3.1.4、3.2、3.3.2は上記の通りであり、その他の実験ではケーソンを据え付けた後、水路に水を入れ、その後に裏込石と埋立砂を投入している。)

水路に水を入れ終わった後に、空洞を埋めなおし、波を作用させる実験を実施した。周期 $T=3.04s$ 、波高 $H=33.3cm$ では、越波は少なく、透過波の作用によって埋立砂が吸い出され再び穴の上に空洞が発生した(写真-3.9)。波高 $H=42.8cm$ では最初のうち砂が激しく吸い出され空洞が大きく発達したが、しばらくして越波水が埋立砂天端上にたまと空洞内に上から水が流れだし、空洞上の砂が落ち込むことで空洞はなくなった。その後、越波水の浸透によってシートの穴からの吸い出しが促進され、埋立砂の吸い出しはさらに大きくなった。写真-3.10は波作用後( $T=3.04s$ 、 $H=52.4cm$ )の埋立砂天端の様子であるが、シートに穴がない場合(写真-3.2)に比べ、シートの穴の位置上部における沈下が大きいことが分かる。

### 3.1.3 シートを静水面付近にしか設置していない場合

#### (1) 実験断面

裏込石内の流れやそれによる埋立砂の流失は、静水面付近に近いところが問題であると思われる。静水面付近だけにシートを敷設して、それより深いところは、埋立砂が施工時に落下して目詰まり状態になると考え、シートを静水面付近にしか設置しない断面に関する実験を実施した。

実験断面の全体形状は完成後の標準断面であり、図-3.8に示すようにシートを静水面付近だけに設置している。この場合も冠水ありとなしの場合を試した。この時の冠水高は5cmであり、埋立砂内部の地下水位は静水面上29cmである。

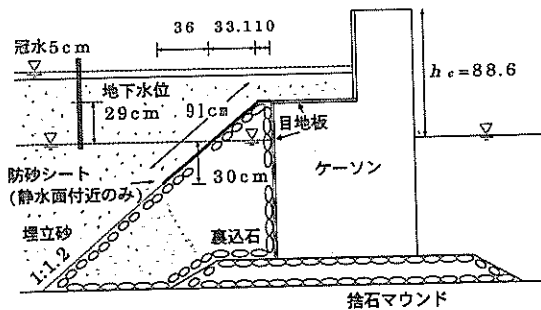


図-3.8 実験断面(防砂シートを静水面付近だけに敷設した場合)

#### (2) 実験状況

この実験でも水路内に水を入れた後、埋立砂を投入している。その埋立砂投入時にシートがないところからの砂の裏込石内への落下は顕著で、投入を完了した直後では、写真-3.11に示すように裏込部の下部に砂がたまっている。しかし、埋立砂で裏込石内部が完全に満たされたわけではなく、この状態で波を作用させたところ再び少しずつ砂が落下し始めた。さらに、埋立砂天端上を冠水させると砂の落下は激しくなり、最終的には写真-3.12に示すように埋立砂が裏込石内部にたまっている。今回の実験ではマウンド内の砂は一度堆積すると安定し、沖側への移動は顕著ではなかった。しかしながら、越波水が多くてマウンドを通しての冲向きの流れがある場合などは、砂が沖側に吸い出される危険性がある。

### 3.1.4 シートを設置しない場合

#### (1) 実験断面

次に、シートを全く敷設しない場合の実験を行った(図-3.9)。この断面は、埋立時断面であり、裏込部天端は根固めブロックがあるだけの状態となっており、またパラペット天端が低く越波水がケーソン背後に作用している。

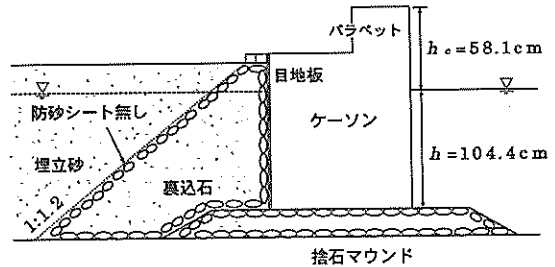


図-3.9 実験断面(防砂シート無しの場合)

#### (2) 実験状況

越波が少ない場合( $T=3.04s$ 、 $H=42.8cm$ )にも、マウンド透過波によって砂は裏込石内に容易に落下し、特に静水面付近での落下が著しく、埋立砂の中に写真-3.13に示すような直径10cm程度の明確な空洞ができる。波高 $H=52.4cm$ では越波が激しくなり、図-3.10に示すように越波水が裏込部天端をたたいて破壊した後、越波水が引く際に裏込石内に勢よく流れ込み、埋立砂が運ばれている(写真-3.14)。このように越波が大きくなると、天端付近だけでなく、同時に越波水の浸透によって砂が裏込石の中に入っていき、写真-3.15は波高 $H=61.9cm$ の場合で、砂を補給してこれを繰り返すとケーソン



ンのすぐ後ろの部分を除いて裏込部は砂でほぼ充填されたようになる。また、この時の透過波及び越波水によるケーソン背後からケーソン前面への裏込め部とマウンド内の流れは非常に大きく、埋立砂はケーソン下のマウンドの中にまでたまっている。このような流れにより埋立砂がケーソン前面にまで達する可能性があるが、今回の実験ではこのような様子を確認するまでには至っていない。

なお、この時の裏込部の混合砂礫をサンプリングして砂と碎石をふるい分けたとこ、砂と碎石の重量比が1:1.61となっており、碎石間の空隙の88%が砂（砂の空隙率0.445を仮定）で埋められたと考えられる。

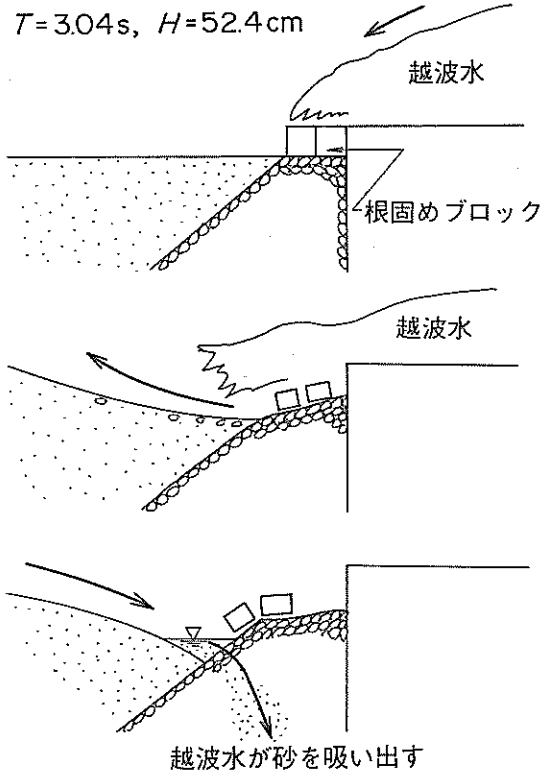


図-3.10 越波水による護岸天端の破壊（防砂シート無しの場合）

### 3.2 フィルター材による吸い出し防止工

3.1.2(2) で述べたように吸い出された埋立砂が裏込石の隙間に溜まることで安定し、それ以上吸い出されなくなる現象がある。この現象は図-3.11のように表され

るものと考えられる。

空隙内での砂の溜まりが十分でない場合には図-3.11(a)のように押し波時の波力で持ち上げられ、引き波時に吸い出されてしまう。しかし、砂が図-3.11(b)のようにたまって砂どうしのかみ合わせが良くなり、架橋構造のようなものを作ると、押し波や引き波の圧力に耐えて安定する。従って、このような架橋構造ができる場合には、架橋構造の耐力と波力の大小で、吸い出しが発生するかどうかが決まるものと推察される。

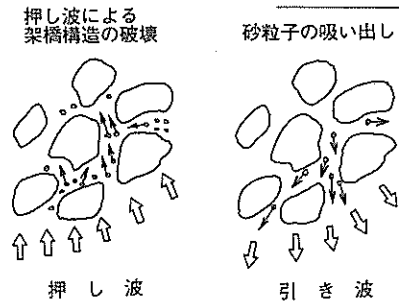


図-3.11(a) マウンド透過波により砂が吸い出される機構

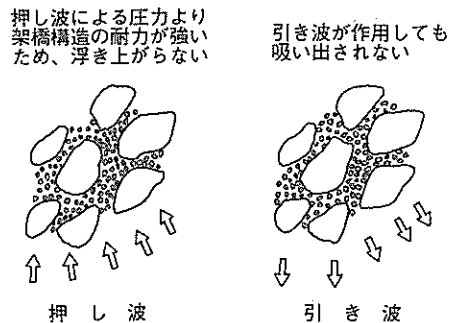


図-3.11(b) 埋立砂と裏込石との架橋構造による安定化

上記のような架橋構造を作りやすくし、埋立砂の裏込石内への流出を防ぐ方法として、埋立砂と裏込石の中間的粒度をもった土、いわゆるフィルター材を両者の間に介在させてやる方法が考えられる。

図-3.12、3.13は埋立時断面と完成標準断面の実験断面で、埋立地断面ではフィルター材の層厚を20cm、完成標準断面では5cmで実験を行った。また、フィルター材としては5mm以下で調整された碎石を用いている。ただし、マウンド石は平均粒径が2.4cm、埋立砂は $d_{10}=0.13$ mmの条件である。



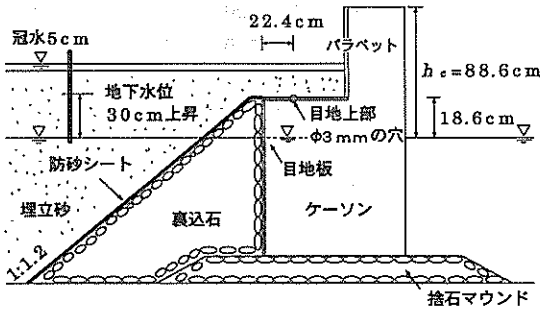


図-3.15 実験断面 (ケーソン上部目地の破壊に関する実験)

### (2) 実験状況

舗装板を設けると、埋立砂への越波の直接的な作用はなくなるが、舗装目地からの流れによる砂の流出が問題になる。断面(a)ではビニールシートが完全に砂を囲っているため砂の流出は無かったが、断面(b)ではケーソンとベニヤ版、ベニヤ版と観測部のガラス面との隙間から越波水が流れ込み、写真-3.18 (ベニヤ版をはずして砂の流出状況をみたもの) に示すようにケーソンに近い埋立砂が流出している。ただし、断面(c)のようにケーソンとベニヤ版との隙間を無くすると、こうした大きな砂の流出は無くなるが、それでもケーソンとベニヤ版の間で側壁に接する部分が弱く隙間ができて、この部分の砂が流出した。やはり、完全に隙間をなくすことは困難であり、どこからか弱いところから隙間ができ、そこから水みちができてその付近の砂が流失する危険性がある。したがって、逆にあらかじめ一部に隙間(排水溝等)を造り、越波水をそこから裏込石内部に排水する必要があるものと思われる。

また、この断面では、裏込部の天端上に薄い埋立砂がある状態となっていた。これは後述するボイリングによる破壊の危険性が高い断面であり、実験では越波水的作用もあって明確ではなかったが、ここを通して空気が噴出するなど、液状化の特徴的な現象も認められている。

## 3.4 目地板の破壊

### 3.4.1 ケーソン上部の目地板の破壊

#### (1) 実験断面

ケーソン上部に埋立砂を置く場合、ケーソン上部の目地板が破れその付近の埋立砂が流失することも考えられる。図-3.15は、この実験断面を示すものであり、全体の形状は完成時の標準断面であるが、ケーソン上部の目地板の図に示す位置に直径3mmの穴を開けている。なお、

ケーソン上部の目地板としてはアクリル版を用い、ガラス面と密着させ、さらにシリコン材を用いて遮水している。実験ではケーソン天端に埋立砂を設置しない場合も比較のために行っており、さらに埋立砂を設置した場合には埋立天端上を冠水させない場合とさせた場合を比較している。

なお、実験波としては $T=2.10, 3.04s$ で $H=23.8, 33.3, 42.8, 52.4cm$ である。

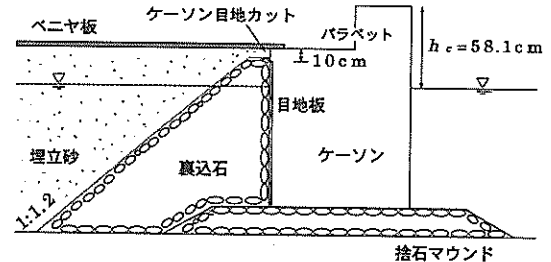


図-3.16 実験断面 (ケーソン後部目地の破壊に関する実験)

### (2) 実験状況

ケーソン天端に埋立砂がない場合には、目地板の穴から激しく水が吹き上げる様子が見られた。埋立砂を設置すると波高が小さい場合( $H \leq 42.8cm$ )には穴を通して水が埋立砂内に進入する様子が見られたが、わずかしき吸い出しは観察できなかった。

今回の実験断面では越波量が比較的少ないが、 $H=52.4cm$ 以上ではケーソン天端上が水で浸される程度の越波水がある。ケーソン天端上の砂が越波水で浸され、さらに目地内部の波面がケーソン上部の目地板に接触すると波面が引き始めた時に砂が流れ出した。

越波水の影響をさらに調べるため埋立砂上部を冠水して実験したところ、波高 $H=23.8cm$ という比較的波高の小さい条件でも目地内の波面が目地板に接触すると吸い出された。写真-3.19は周期 $T=3.04s$ 、波高 $H=52.4cm$ の場合に見られた吸い出しの様子である。

### 3.4.2 ケーソン後部の目地板の破壊

#### (1) 実験断面

ケーソン後部の目地板が破れた場合を考え、図-3.16に示すような静水面より上の位置の目地板を取り除いて実験を行った。この断面の全体形状は、埋立時断面とほぼ同じであるが、舗装板があるとともに裏込天端上に薄い厚さの埋立砂がある。なお、この実験は、シートを設けずに波を作用させた実験の後に行っており、裏込石

内部には大量の埋立砂がたまっていた。

(2) 実験状況

目地の破れからの波の浸入は激しく、目地の破れ付近の埋立砂はかなり洗い流され、舗装板の下に空洞ができている(写真—3.20)。また、浸入したかなりの量の水塊による流れによって、破れた目地より下の砂も洗われ、裏込石内を落下していく様子が見られた。この実験は、防砂シートが無い状態で行ったが、目地板を破壊するような圧力では、シートも破損を免れなくこうした吸い出しが発生する危険性がある。

3.5 まとめ

被災再現実験に関する主要な結論は以下のとおりである。

- 1) 防砂シートは、波の作用によって静水面付近がめくれ上がる危険性がある。また、シートの天端が十分保護されていないと、越波によってここがめくれ上がる危険性がある。これらは、現地でも認められている現象である。
- 2) 防砂シートの破損部分から砂は流失する(吸い出される)が、静水面付近(静水面よりやや下)に破損がある場合に砂の流失は大きい。もちろん破損部分が多いほど吸い出し量は大きくなる。大きな吸い出しが発生すると、埋立砂内に空洞ができ、これが大きくなると地盤の陥没になることが実験でも確かめられた。
- 3) 波による砂の吸い出しは、越波や降水による冠水があると、さらに大きくなる。冠水すると、埋立砂内の水位(地下水水位)が上がり、この静水圧の上昇分と流れによって吸い出しは大きくなると考えられる。
- 4) 防砂シートが無いと埋立砂は裏込部の空隙が砂で満

たされるまで落下する。ただし、最初は大量に落下するがある程度落下するとそのスピードはかなり低下する。また、裏込部に入った砂は波の作用によってマウンドを通して護岸前面に運ばれる危険性があり、吸い出しは必ずしも止まるわけではないようである。シートが静水面付近にしかない場合でも、同様な傾向が認められる。

- 5) 舗装板があれば、越波水が埋立砂などを直接破壊する危険性はなくなるが、舗装板の目地やひび割れ部からの越波水などの流入の危険性を考える必要がある。
- 6) 目地板が損傷を受けると、ここからも埋立砂の落下(吸い出し)があり、冠水によってこれが促進される。

4. 護岸背後への圧力と流速に関する実験

4.1 埋立砂設置前を対象とした実験

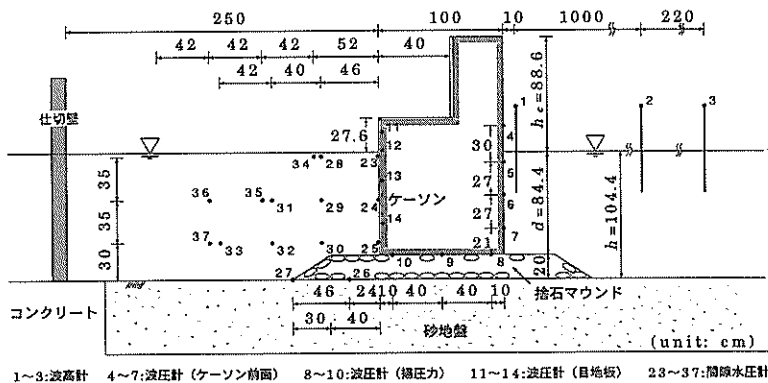
4.1.1 防波堤時

(1) 実験断面

図—4.1は、捨石マウンド上にケーソンが設置された防波堤状態を対象とした実験断面である。マウンド透過波による圧力(波圧、あるいは間隙水圧)の伝播を調べることが主目的としたため、ケーソンの天端高を高くし、越波水がケーソン背後に侵入するのをできるだけ抑えた。なお完成断面の実験時に、ケーソン背後に埋立砂を入れる都合上、ケーソンから250cmの位置に仕切り板が設けられている。

(2) 基準実験波の場合の圧力と流速

図—4.2は、測定波形(時系列波形)の一例であり、周期 $T=3.04s$ 、波高 $H=52.4cm$ の実験波(基準実験波と呼ぶ)の場合である。ケーソン前面下部(ch7)には、



図—4.1 実験断面(防波堤時)

重複波圧特有の双峰型の波圧が作用しているが、マウンド内(ch9,10)を透過するにつれて大きく減衰しており、特に第1ピークが減衰し、第2ピークで最大値をとるようになるのが特徴的である。また、ケーソン背後(ch31)では、さらに減衰している。このch31の波形は、10倍に拡大しているが、1波1波の変動は小さく、その短周期変動より静水圧が上昇している様子が大きく認められる。これは後掲図-4.18に示すように、実験波の波群特性によるものであり、大きな波高が続く場合には、ケーソン背後でのこうした静水圧の上昇が認められて興味深い。これについては、4.2.1でさらに言及する。

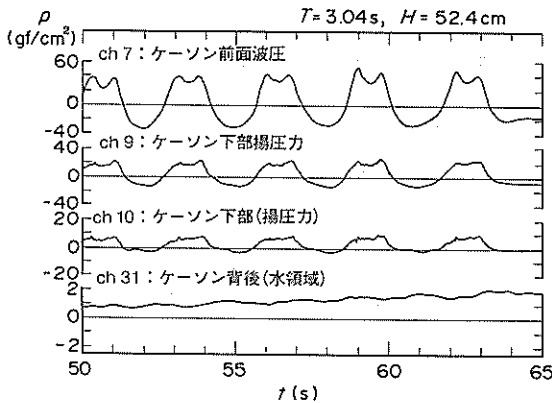


図-4.2 測定波形 (防波堤時)

図-4.3は圧力(波圧、及び間隙水圧)の分布図の一例であり、周期 $T=3.04$  s、波高 $H=52.4$  cmの場合で、正のピーク値と負のピーク値を示している。矢印は変動圧力の正のピーク値とその位相を時計回りで表しており、

位相はch7のピーク時刻を0として規準にとっている。また、長周期成分による水圧のゼロレベルの上昇量(静水圧上昇分と呼ぶ)を円の大きさと表している。図中の数値は、正あるいは負のピーク値を波高で無次元化したものであるが、上段の小さい文字で示すのは一波一波による変動成分(短周期変動分)の正のピーク値であり、やや大きい文字で示したものが静水圧上昇分を含む正のピーク値である。ただし、負のピーク値の場合は短周期変動成分を表している。

やはりよく知られているように、マウンド内の正の圧力は、ケーソン前趾ではほぼケーソン前面下部での圧力に等しく、ケーソン後趾ではほとんど0となっており、静水圧上昇分がわずかに認められるのみである。位相についてみれば、マウンド内では第1ピークが減衰してピークの位相が第2ピークへ移動しているため、ch7からch9にかけてピークの位相が約 $90^\circ$ ずれているが、すでに前掲図-4.2の時系列波形でみたように波形全体では位相差はほとんどない。負の圧力についても同様であり、後趾では、ほぼ0となっている。

ケーソン前趾と後趾の圧力差でマウンド内に流速が発生するが後趾での圧力がほぼ0であるためマウンド内の流速はかなり速いと思われる。実験では流速を直接計測していないが、計測された圧力(ケーソン前趾と後趾との圧力差)とマウンド砕石の粒径( $D_{15}=2.4$  cm)より前掲図-2.6から推定すると、動水勾配 $i$ が0.42であり流速は約 $12$  cm/sである。また現地では、マウンド材の粒径( $D_{15}=48$  cm)を考慮して図-2.6から推定すると $58$  cm/sとなる。なお、この流速を $\pi H/T$ で無次元化すると、0.22となる。

また、基準実験波に対してガラス面に沿ったch29に

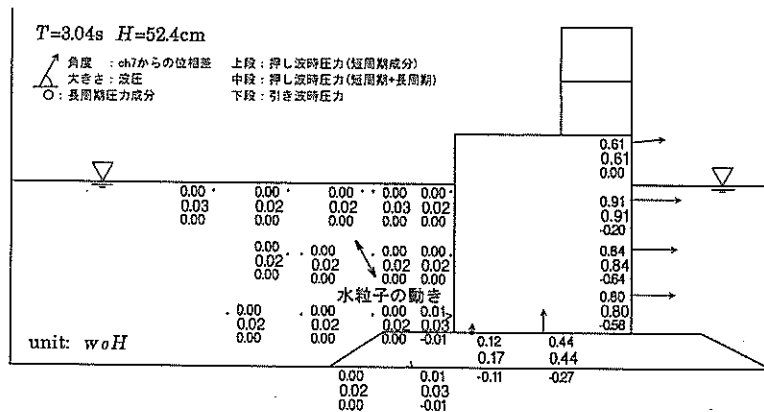


図-4.3 圧力分布 (防波堤時)

相当する位置で染料を流し目視で観測したところ、染料は前掲図-4.3に示されるように全振幅約10cmで直線的に往復運動していた。周期が3.04sの正弦運動であることを考えると、ケーソン背後領域のこの点での流速のピーク値は約10cm/sであり、縮尺を1/20とすると現地では45cm/sにもなる事がわかる。この値は、マウンド内の推定流速に近い値であるが、流れの広がり等を考慮すると、やや大きいようにも思われる。

今回の実験ではケーソンとケーソンの間の目地内の波圧を計測するために、水路ガラス面とケーソンの間隔をあけて(1.5cm)実験している。通常の防波堤時ではケーソンとケーソンの間の目地板はないが、今回の測定時にはこれがあつたため、目地板下部付近の圧力によって、目地下部での流速が予想以上に大きくなり、写真-4.1に示されるように目地板下部のマウンドが大きく削られた。こうした目地板が無くても、ケーソンとケーソンの目地部の流れは、マウンド内の流れより速いが、こうした場合はさらに早くなるため目地部のマウンド石の洗掘には注意が必要である。

(3) 波高・周期と圧力

図-4.4は、波高 $H$ とケーソン前面下部ch7, マウンド内(ケーソン後趾)ch10, ケーソン後面ch23, ケーソン背後ch31での正負の無次元波圧強度 $p/w_0H$ 、 $H$ の関係であり、それぞれ周期が2.1, 2.6, 3.04, 3.48sの場合である。ただし圧力は、短周期成分だけでなく、静水圧の上昇分

を含むものであることに留意されたい。

全体に波高による変化は小さく、周期が長くなれば圧力はやや大きくなる傾向になる。また、いずれの波高や周期の場合にも、ケーソン後趾での圧力はごく小さくなっており、ケーソン背後ではほとんど0となっている。ただし、周期2.10sではケーソン背後で弱冠圧力が出ている。これはマウンドからの透過波が共振していたためであり、仕切り板で囲まれたケーソン背後水領域の長さは2.5mと波長 $L$ (ここでは5.64m)の約1/2に相当しているためである。通常の現地では、この距離が長いためにこうした現象は発生しないが、前掲図-4.2で見たようにマウンド透過波には長周期成分があるため、この成分波の共振も考えられることに留意する必要がある。

4.1.2 裏込石投入時

(1) 実験断面

図-4.5は、裏込石投入時を対象とした実験断面図である。裏込石は、その静水面での幅が43.1cm、法面勾配は1:1.2である。この実験では裏込砕石としてマウンドに用いた砕石と同じものを使用しており、マウンドと裏込石の境界は実際には無い状態にある。

(2) 基準実験波での圧力と流速

図-4.6は規準実験波における圧力の正負のピーク値分布である。マウンド内の圧力は防波堤時より大きいが、これは当然、裏込石によってマウンド透過波の動きがや

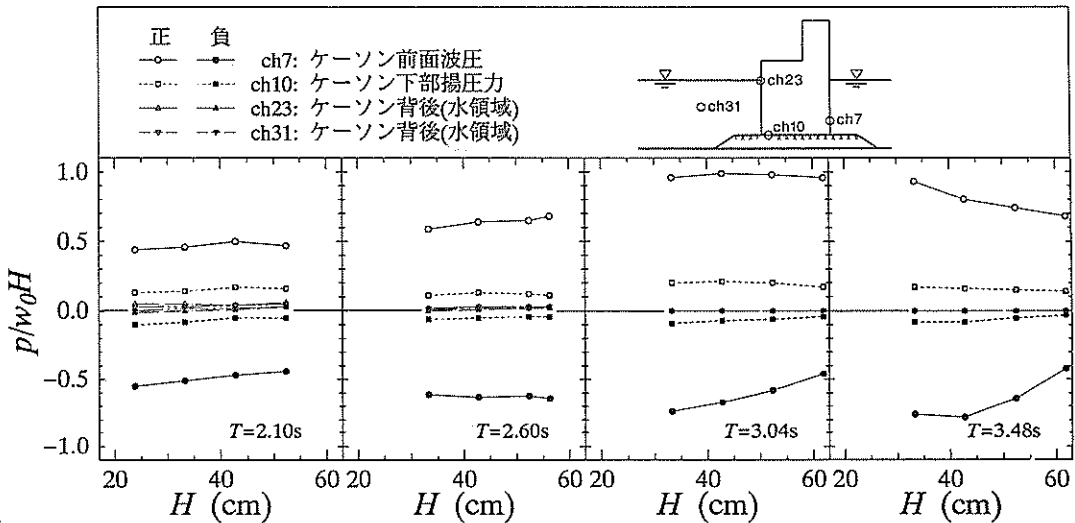


図-4.4 圧力のピーク値と波高および周期 (防波堤時)

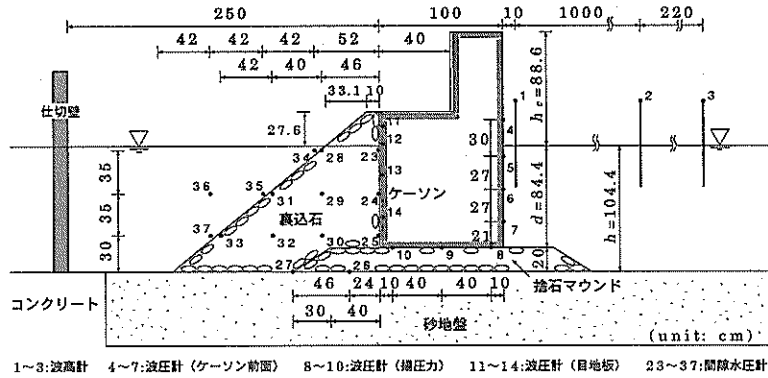


図-4.5 実験断面 (裏込石投入時)

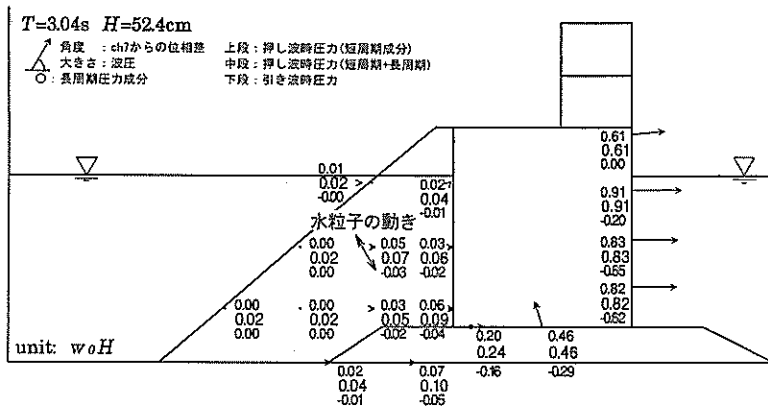


図-4.6 圧力分布 (裏込石投入時)

や抑えられて圧力が大きくなっているためである。ただし裏込部では、図中に示すような静水面に向かうような経路で圧力が伝播しており、裏込部の法面下部では圧力がほとんど無いことがわかる。

なお、裏込石によってケーソン後趾の圧力がやや上がったため、マウンド内の流速は低下する。ケーソン前後趾での圧力差による動水勾配を0.37とすると、マウンド内の流速は前掲図-2.6から11cm/sと推定され、防波堤時に比して92%となる。現地の透水係数を考慮した現地のマウンド内の流速は、54cm/sとなる。

### (3) 波高・周期と圧力

図-4.7は、波高とマウンドや裏込部の圧力の関係とを周期ごとに示すものである。波高に対する変動はばらついているが、周期が長くなると全体に圧力は上昇する。マウンド内のケーソン後趾付近(ch10)での圧力は、ケー

ソン前面の20~30%にも達しているが、裏込石内では3~10%程度とかなり小さい。ただし周期にかかわらず、自由表面に近いch23の方がch31より大きく、やはり圧力がケーソンにそって伝播していると思われる。なお、防波堤時の実験断面でみられた周期2.10sにおける背後水面の共振状態は裏込石投入後にも認められた。

### 4.1.3 マウンド透過波によるシートの挙動について

#### (1) 実験断面

裏込石のマウンド内への沈下および埋込砂の裏込部への沈下を防ぐために、一般に防砂シートや防砂マットあるいは防砂板を用いる。しかしながら、防砂シートを設け、まだ埋込を行っていない状態は、施工の途中でのウィークポイントとなり、重要な検討項目となる。4.1.1、4.1.2で述べたように、防砂シート敷設箇所には波高が大きい際には波によるかなり大きな流れが発生する。

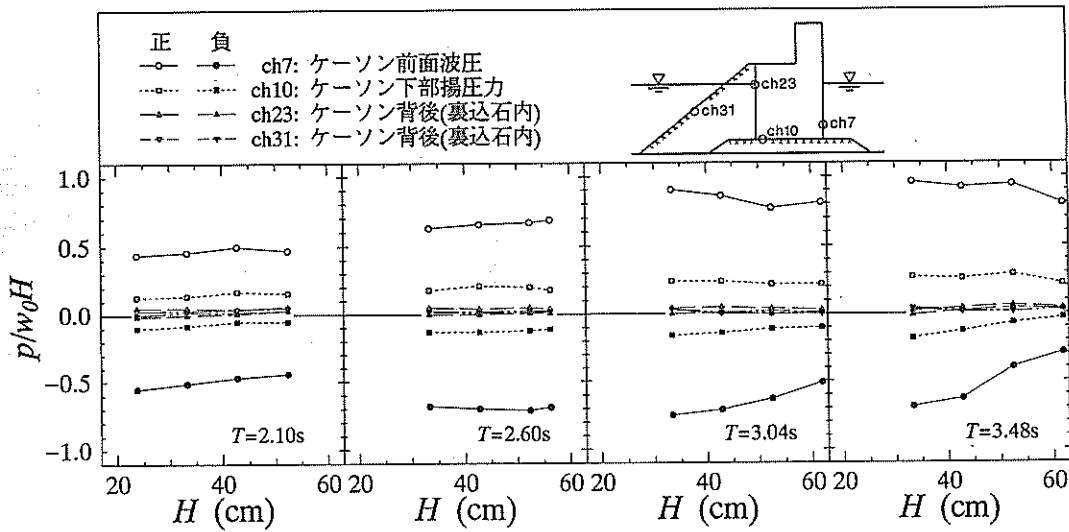


図-4.7 圧力のピーク値と波高および周期 (裏込石投入時)

そのため敷設した防砂シートが浮き上がったたり、流されたりして施工が困難になるほか、防砂シートに隙間ができ、埋立砂が投入後に吸い出される可能性がある。

実験は、図-4.8(1)に示す防波堤時の断面と図-4.8(2)の裏込石設置時を対象に、厚さ1.5mmの防砂シート(不織布、透水性)を敷設して行った。ただし、マウンド透過波によるシートの舞上がり状況を調べるために、図-4.9に示すような幅30cm(防波堤断面では長さ80cm、裏込石有りの場合は220cm)のシートに20cm間隔でチェーンを縞状のメッシュに組んだシート(シートA)と10cm間隔で網目状のメッシュに組んだシート(シートB、C)を用いた。シートAは、横置きと縦置きの種類がある。なお、チェーンの重量は50gf/mであり、シートAでは単位面積当たりの水中重量が0.021gf/cm<sup>2</sup>であり、シートBとCでは0.087gf/cm<sup>2</sup>である。なお、シートをただ単に砕石上に敷設した場合と天端近くをケーソンに固定した場合がある。

(2) 防波堤断面

たとえば、シートAを固定せずに横置きにして基準実験波を作用させた場合、図-4.10に示すようにケーソンに接していた部分が盛り上がり、ケーソンから離れて浮き上がってしまった。しかしながら、法肩から法尻にかけては全く動かなかった。また、シートAを縦においた場合には、図-4.11に示すようにチェーン間のシートが盛り上がり、次第にシート全体が中央によってくる様子

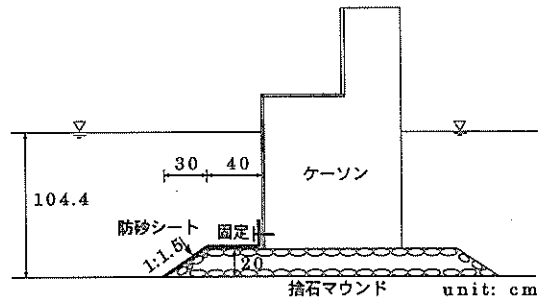


図-4.8(1) 防砂シートの敷設状況 (防波堤時)

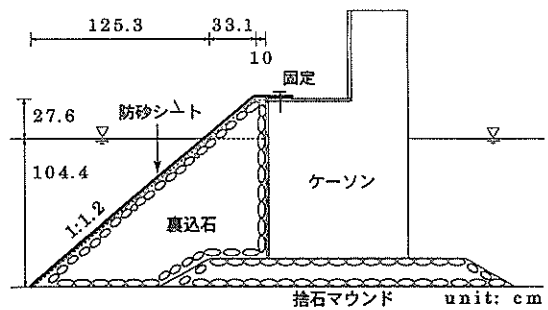


図-4.8(2) 防砂シートの敷設状況 (裏込め投入時)

が見られた。この場合もマウンド天端付近での動きが激しかった。これは、やはり流れはマウンド天端面を通る



ものが大きく、法肩から法尻にかけてはそれほど大きくないためと思われる。従って、マウンド天端面でシートを如何に固定するかが重要であり、法肩から法尻にかけてはさほど問題にならないものと推察される。また、目地部付近での流れが大きいためこの部分の対策も考える必要がある。

さらに実験では、シートをケーソン後面下部に固定して波を作用させている。図-4.12は波高 $H$ と浮き上がったシート面積 $S$ の関係であり、シートBを用いて実験した結果である。ここで、 $b$ :シートの幅、 $h_a$ :シートの長

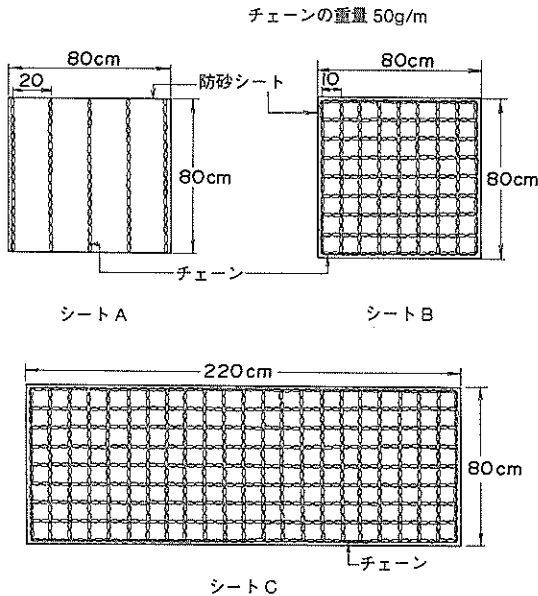


図-4.9 実験に用いたチェーン付き防砂シート

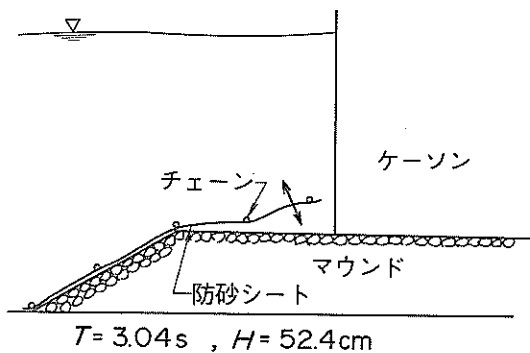


図-4.10 防砂シートの盛り上がり  
(防波堤時、シートA横置き、固定無し)

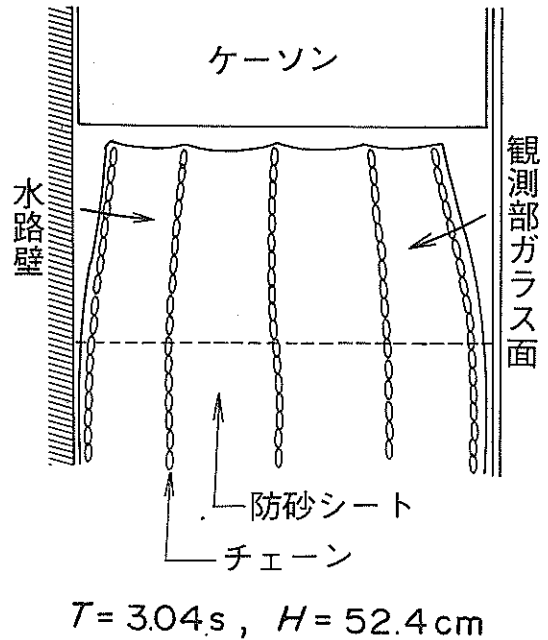


図-4.11 防砂シートの移動  
(防波堤時、シートA縦置き、固定無し)

さである。シートBでもシートAの横置き実験と同様に全実験を通してマウンド天端部分だけが舞い上がっており、この部分の面積がほとんどである。

波高が小さくてもシートは、わずかではあっても浮き上がり、基準実験波(周期  $T=3.04s$ 、波高  $H=52.4cm$ )のように大きな波高では、大きく浮き上がる。図を見ると、同じ波高でも周期が長い方が浮き上がりやすい

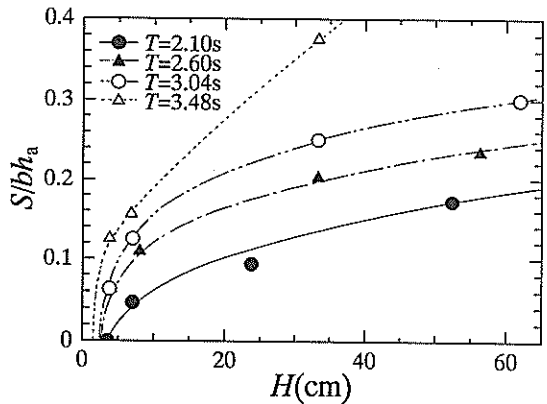


図-4.12 防砂シートの盛り上がり面積と波高  
(防波堤時、シートB)

ことが分かる。これは、周期が長い方がケーソン前面での圧力（波圧）が大きいことによる。

(3) 裏込石投入時の断面

裏込石投入時の断面についてもシートCをケーソン壁と水路側壁に固定し、波高とシートの浮き上がり面積を調べた。シートは図-4.13に示すように水面下から斜面の間中あたりまでが変位しており、斜面下部での動きは少ない。これはシートに力が作用するのは静水面下であり、静水面付近で水の動きが大きいと思われる。

図-4.14は波高 $H$ とシートの浮き上がり面積 $S/bh_a$ の関係である。この場合も周期が長い方が舞い上がり面積が大きい。

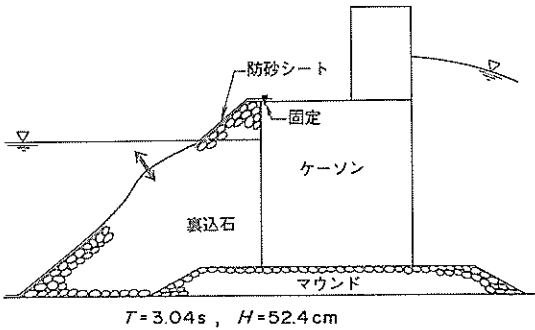


図-4.13 防砂シートの盛り上がり  
(裏込め投入時、シートC)

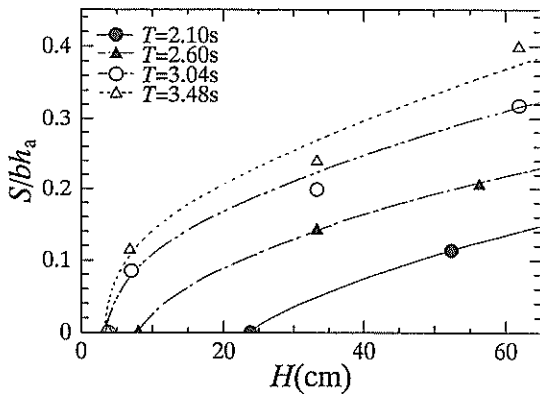


図-4.14 防砂シートの盛り上がり面積と波高  
(防波堤時、シートC)

(4) シートの安定性

シートの安定性はシートに働くマウンド透過波による力とそれに対するシートの抵抗（重量やケーソンへの固定する力、あるいはマウンド石との摩擦抵抗）との釣り合いで決まる。

シートとマウンド石が図-4.15に示すように直列に並んでおり、完全にシートがマウンドを覆っている条件では、シートとマウンド内を流れる流量は一定であり、断面積を一定として単純化すると一定流速 $v$ で流れることになる。この時の流速 $v$ はダルシー則より

$$v = k_v * p_1 / (l_a * \gamma_w) \quad (1)$$

と表される。ここで、 $p_1$ はマウンド前面に作用する波圧であり、マウンド透過波力はシートを出たところで0となる。一方、 $k_v$ は式(2)で表現されるマウンドとシートの合成透水係数であり、 $k_1$ 、 $k_2$ はそれぞれマウンドとシートの透水係数である。また、 $l_{a1}$ 、 $l_{a2}$ はそれぞれマウンド、シートの厚さで、 $l_a$ はその和( $l_{a1} + l_{a2}$ )であり、 $\gamma_w$ は水の単位体積重量である。

$$k_v = l_a / (l_{a1} / k_1 + l_{a2} / k_2) \quad (2)$$

波力はマウンドを透過するにつれて小さくなり、シートには $p_2$ の波圧が働いているとすると、シート内のダルシー則より、 $p_2$ は式(3)で表される。

$$p_2 = v * l_{a2} * \gamma_w / k_2 \quad (3)$$

したがって、 $p_1$ が分かれば、 $v$ 及び $p_2$ が計算できる。

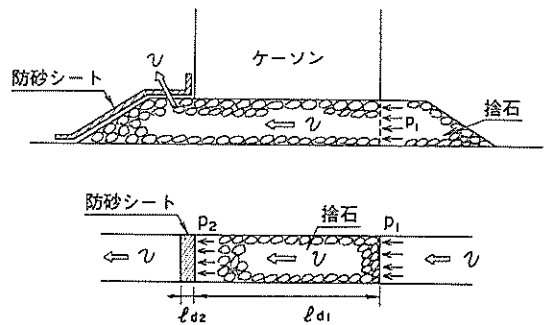


図-4.15 シートとマウンド内を透過する波力

一例として、今回の実験でのシートの安定限界について考える。図-4.12はマウンド上に防砂シートを敷設し、

マウンド透過波によるシートの浮き上がり面積を調べたものであるが、浮き上がりの面積が0になるときとその安定限界である。図より周期2.10s、波高約3cmで安定限界になっていることが分かる。

この時の諸元はマウンド厚 $h_{d1}=100\text{cm}$ 、シート厚 $h_{d2}=0.15\text{cm}$ 、マウンドの透水係数 $k_1=30\text{cm/s}$ ( $D_{15}=2.4\text{cm}$ )、シートの透水係数 $k_2=0.3\text{cm/s}$ である。式(2)より、 $k_v=26.1\text{cm/s}$ となる。一方、ケーソン前面下部に働く波圧は図-4.4より $0.45\mu H$ と考えると、 $1.4\text{gf/cm}^2$ である。よって、式(1)より $v=0.35\text{cm/s}$ であり、式(3)よりシートに働くマウンド透過波圧 $p_2$ は $0.18\text{gf/cm}^2$ 程度となる。チェーンを取り付けたシートの重量が $0.087\text{gf/cm}^2$ であることを考えるとほぼ2倍にあたる。このような状態でもシートが安定しているのはマウンドを覆っているシートの一部から圧力が抜け、シートにかかる圧力が小さくなっているためであると考えられる。

また、現地の場合の例として、断面の縮尺が上記の実験の20倍に当たる場合を考える。マウンド厚 $h_{d1}=20\text{m}$ 、シート厚 $h_{d2}=6.5\times 10^{-3}\text{m}$ 、マウンドの透水係数 $k_1=1.0\text{m/s}$ 、シートの透水係数を $k_2=5.0\times 10^{-3}\text{m/s}$ とする。シートについては現地で施工されているシートの例(長繊維不織布)を用いている。また、周期は9.4s、波高は60cmで、 $p_1=0.27\text{tf/m}^2$ の波圧がマウンド前面に作用した場合を考える。このとき、 $k_v=0.939\text{m/s}$ 、 $v=0.012\text{m/s}$ 、 $p_2=0.016\text{tf/m}^2$ となる。この値はマウンド前面に働く波力の6%程度であるが、2mのメッシュでシートにおさえのチェーンを取り付けるとすると、水中重量で $16\text{kgf/m}$ の重さのチェーンをシートに取り付ける必要があることを示している(ここではシートの重量を無視して考えている)。

以上の考察はマウンドにシートを取り付ける場合であるが、裏込石投入後にシートを裏込石に敷設する場合には、圧力が静水面から抜けるため、シートにかかる圧力 $p_2$ は小さくなる。しかしながら、ケーソン背後にもマウンド透過波による流れがあり、裏込石上部に据え付けられるシートはこの流れによる圧力を受ける。この時のシートにかかる圧力はケーソン背後での水面の動きが分かれば次式で概略推定ができる。

$$p_2 = v * h_{d2} * \gamma_w / k_2 \quad (4)$$

現地のデータの一例として、沖波周期7.0s、波高1.0mの際に、ケーソン背後で周期7.4s、波高0.05mで水面が動いている場合を考える。また、シートは先程と同じ厚さ $h_{d2}=6.5\times 10^{-3}\text{cm}$ 、 $k_2=5\times 10^{-3}$ のシートとする。

この時、水面が上下する際の流速は、水面の動きが正弦運動であると考えたとおおまかに、 $v=H/2*2*\pi/T=2\text{cm/s}$ と見積もられ、シートにかかる圧力は $26\text{kgf/m}^2$ となる。よって、2mメッシュでシートにチェーンを取り付けるとすると $26\text{kgf/m}$ のかなり大きなチェーンが必要である。ただし、シートを設置することによる水の動きの変化やシート自体の動きによる圧力の低下等も考えられ、さらに検討が必要である。

## 4.2 埋立砂設置後の実験

### 4.2.1 裏込石が密閉されている場合(護岸完成時)

#### (1) 実験断面

図-4.16は護岸完成時を対象とした実験断面(完成時標準断面)である。裏込石上に防砂シート(厚さ1.5mmの不織布)を敷き、この上に埋立砂を静水面上47.6cmの高さまで設置している。この埋立砂は、ケーソンの天端上にも設置しているが、砂がケーソン目地部から落下しないように目地板を設けている。パラベット天端は、88.6cm( $h_c/h=0.85$ )と高く、越波は少ない。また通常の埋立地では、ケーソン付近は、エプロンとして舗装されていることが多いが、この実験では、舗装がない状態を対象にしている。

#### (2) 基準実験波の場合の圧力と流速

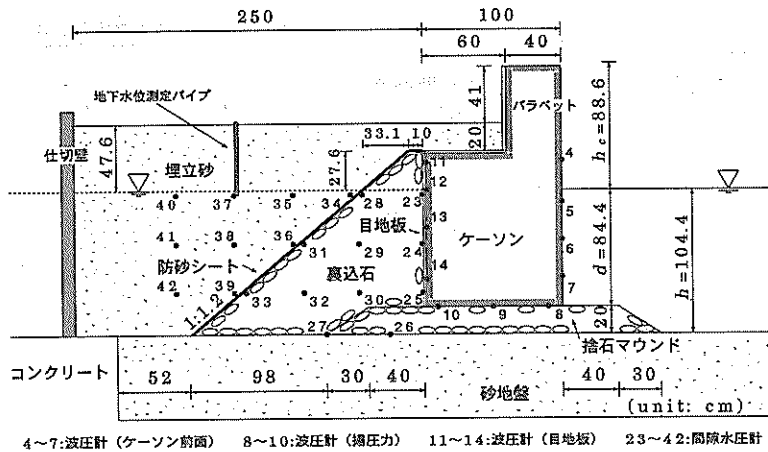
圧力(波圧)はマウンドを透過して裏込部に間隙水圧として伝わり、防砂シートを透過した後埋立砂に伝播する。基準実験波(周期 $T=3.04\text{s}$ 、波高 $H=52.4\text{cm}$ )の場合、水面(裏込部の水面)が全振幅4~9cm程度で変動している。このとき、裏込部の静水面上の部分の空気が動かされるが、埋立砂の中を出入りしていると思われる。

図-4.17はこの時のケーソン前面での波圧(ch7)およびマウンド内(ch9、10)、裏込石内(ch23、30、31、36)、埋立砂内(ch38、ch41)での圧力(間隙水圧)の時系列波形の例であり、基準実験波の場合である。

ケーソン前面(ch7)にはこれまでのケースと同様に双峰型の重複波圧が作用している。マウンド、裏込石へと伝播するにつれてこの圧力は減衰するが、第1ピークと比べると第2ピークの減衰が大きい。この現象は防波堤時の断面に関する実験で第1ピークが減衰するのとは逆の現象である。また、裏込石内部では圧力の減衰が防波堤時より少ないのが分かる。また、埋立砂内部では静水圧が次第に上昇しているが、これは長周期波成分によるものである。

この長周期波成分についてさらに検討したのが、図-4.18である。ただし、長周期波の影響が更に顕著な波高

護岸の吸い出しに関する水理模型実験



図一4.16 実験断面 (完成時標準断面)

が61.9cmの場合を示している。ケーソン前面の水位、ケーソン前面の波圧、マウンドおよび裏込め内の間隙水圧、そして埋立砂内の間隙水圧が示してあり、これに裏込部の水位のピーク値をビデオから読みとって示している。

この図を見ると、ケーソン前面の圧力が大きいところで裏込め内部の水位 $\eta_B$ が上昇しており、これが周期40s程度の比較的長い周期で変動している。その半振幅は、7cm程度であり、一波一波の短周期成分の半振幅4cmに比しても大きい。この水位と埋立砂内の間隙水圧がほぼ対応していることが興味深い。ケーソン前面の波圧変動の周期である40sという値は、明確ではないがこの実験水路(105m水路)特有の値であると思われる。この水路では造波板と模型ケーソンの間が71mあり、この間の平均水深を1.4mにとると水路の共振周期がほぼ38.5sとなる。なお、埋立砂内部では短周期の波が減衰しているため、相対的に長周期成分が大きくなって見える。ただし、防波堤時に比べると裏込部におけるこの長周期成分はやや大きくなっているようである。なお、裏込内部の水位はビデオ撮影からとったピーク値であり、その位相は正確でない。

図一4.19は基準実験波での正負の圧力分布である。図中の数値は、圧力のピーク値を波高で無次元化したものであるが、上段に示したものが長周期波成分を取り除いた、短周期成分の正のピーク値であり、中段が長周期成分を含む正のピーク値である。したがって、長周期成分(静水圧の上昇分)は両者の差となる。

正の圧力はマウンド、裏込石と伝播するにつれて減衰しているがその程度はさほど大きくなく、裏込部ではほぼ全域で $0.6u_b H$ (前面波圧の70%程度)とかなり大き

な値をとっている。一方、防砂シートの前後、すなわち裏込石から埋立砂が変わるところ(ch28とch34、ch36とch31)では圧力が10~20%程度減衰しており、さらに埋立砂内部では圧力の減衰率が大きく、25cm内部で75%程度減衰している。裏込砂による圧力減衰はかなり大きいことが分かる。ピーク値の位相を見ると、マウンドや裏込部ではケーソン前面波圧との位相差が少ない。しかし、埋立砂内では、波形が双峰型でなく滑らかになるため位相差が大きくなっていることが分かる。また、埋立砂内ではやはり長周期成分が大きいことが分かる。

下段の数値が負の圧力の短周期成分のピーク値であり、負の圧力も同様な傾向が認められるが、裏込部の圧力を見ると正の圧力の場合より減衰の割合が大きい。前掲図一4.17の時系列波形を見ると、圧力が正から負が変わるときに一旦ゼロ付近の圧力が続いているのが分かる。ここを短周期成分のゼロレベルと考えると、明らかに正に比べ負の圧力の低減が大きい。これは、静水面上の空気が圧縮される場合と膨張する場合の様子の違いの可能性がある。正の圧力の時は裏込め上部の水圧と土圧によって空気が閉じこめられやすいが、負の時は逆に抜けやすくなっていると推察されるが、明確ではない。

すでに述べたように、裏込部から埋立砂に入ると圧力は急激に低減する。この圧力の低減は、一次元的な砂内の圧力の伝播を考えると、2.7ですでに述べたように $\exp(-k_2 z)$ の関数で減衰すると考えられる。ここで測定された圧力の減衰率から求められる減衰係数 $k_2$ は $5.5m^{-1}$ ( $k_2/k_w=7.9$ )程度であり、図一2.7において透水係数が $10^{-7} \sim 10^{-8} m/s$ の場合の値に対応している。

マウンド内の流速については直接測定していないが、

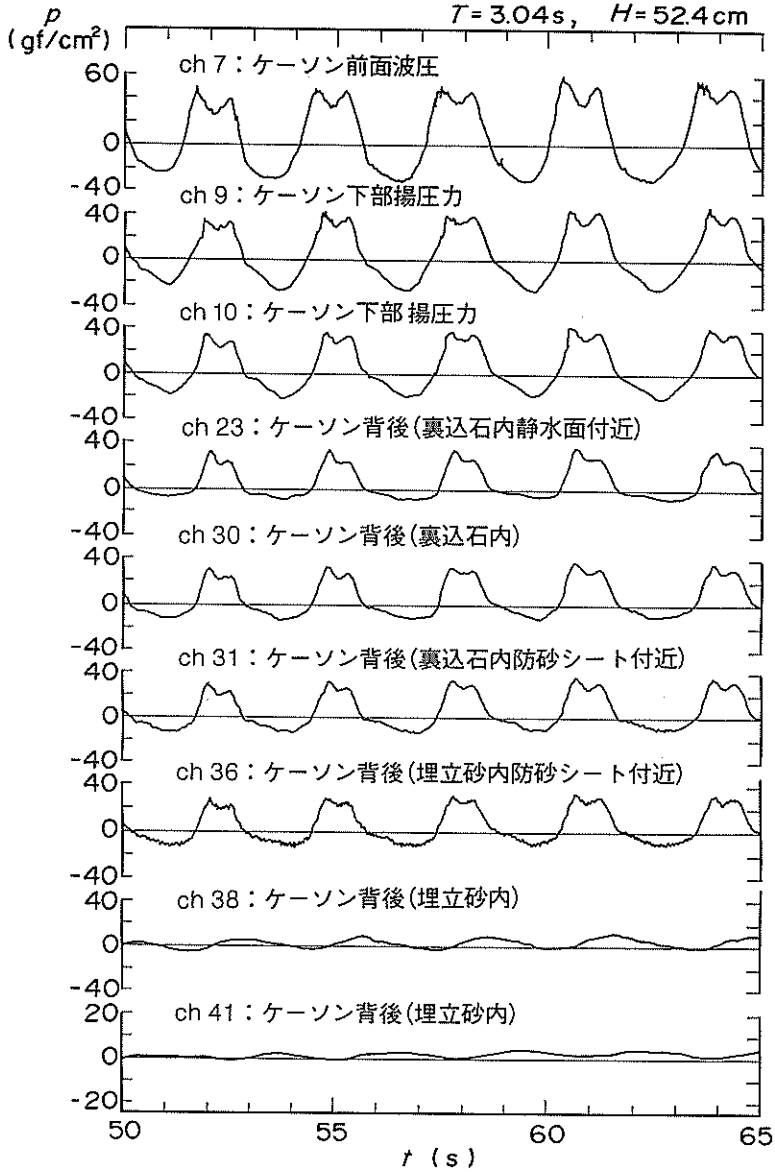


図-4.17 測定波形 (完成時標準断面)

ケーソン前後趾 (マウンド内) の圧力差から推定できる。防波堤時に比べると圧力差はかなり小さくなっている。したがってマウンド内の流速も小さい。基準実験波の場合、圧力差は $10 \text{ gf/cm}^2$ であり、前掲図-2.6から流速は $5 \text{ cm/s}$ と推定される。この流速と静水面における水面の変動量 $H_B=7 \text{ cm}$ は、ほぼ対応している。

(3) 波高・周期と圧力及び流速

図-4.20は各周期における波高 $H$ とケーソン前面ch7、マウンド内ch10、裏込内ch23、ch31の正負の圧力ピーク値の関係である。やはり、防波堤時に比べると、マウンド内の圧力の減衰は少ないが、負の圧力の減衰はそれに比べると大きいことが分かる。また、周期が長くなるほど全体に圧力が大きくなる傾向などは、防波堤時と同

護岸の吸い出しに関する水理模型実験

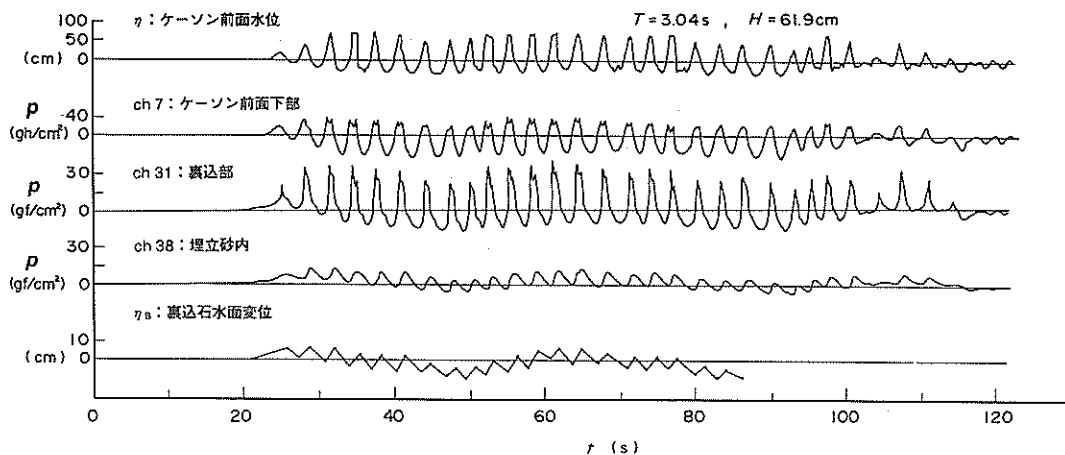


図-4.18 入射波と裏込部や埋立砂内に発生する長周期波成分

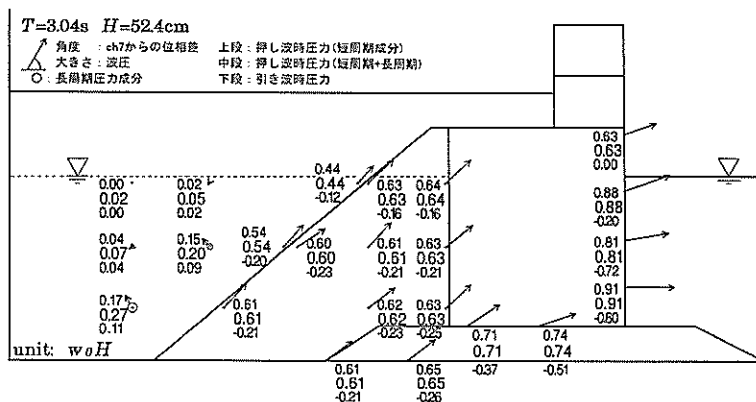


図-4.19 圧力分布 (完成時標準断面)

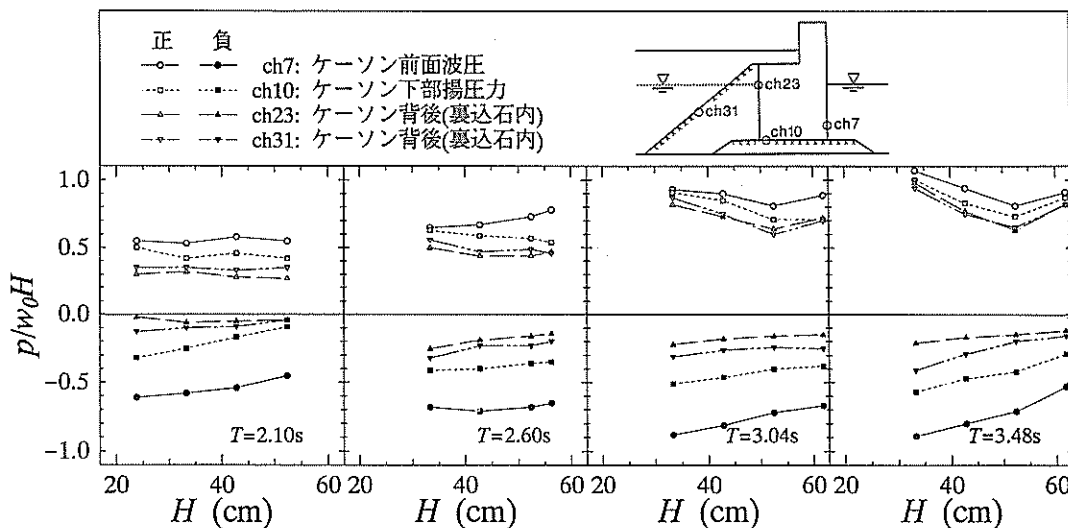


図-4.20 圧力のピーク値と波高および周期 (完成時標準断面)

じである。

図-4.21は波高 $H$ と裏込石内部の水面変位の全振幅 $H_B$ との関係を示すものであり、周期2.10sの場合は測定波中18波目、周期3.04sの場合は測定波中14波目のデータを取った。 $H_B/H$ は0.1~0.2であり、周期が長い方が大きい値を取っている。基準実験波での裏込石の水面変動は先に述べたように約7cmであり、水面の流速は水面変動から類推すると7cm/s程度である。波高が大きくなるにつれて $H_B/H$ が小さくなる傾向にあるが、この原因は裏込石内部の水位が変動する際に裏込石の空気を圧縮・膨張させねばならず、水位変動が大きいかほど空気の圧力を受けやすいためであると考えられる。

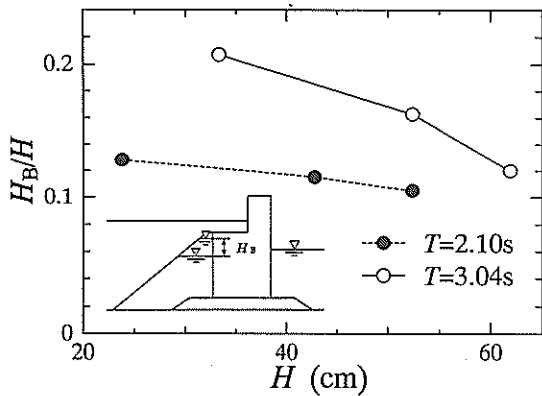


図-4.21 裏込石の水面変動 (完成時標準断面)

#### 4.2.2 越波・雨水で埋立天端が冠水した場合

##### (1) 実験断面

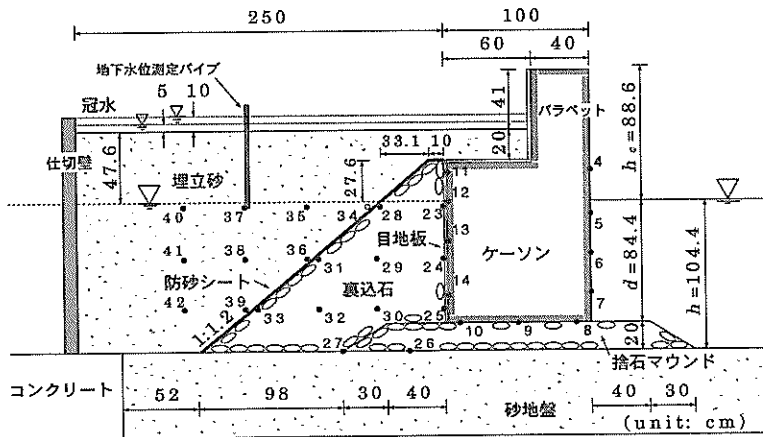
前節までの検討によって、裏込石の静水面上の空気が裏込石の圧力に大きく影響し、空気が閉じこめられるほど大きな圧力になると想定される。越波や雨水によって裏込石の天端上の埋立砂が飽和すると、空気が閉じこめられる危険性があり、これについて実験した。

図-4.22は、完成時標準断面とはほぼ同じで、多量の越波水あるいは雨水がケーソン背後に溜まった場合を想定した実験の断面図である。実験では、埋立砂上の冠水高が5cmと10cmの場合について検討している。冠水高さを一定に保つためには、ポンプで水を供給するとともに、ケーソン背後の仕切り壁の高さを調節して、余分な水を抜いている。また、埋立砂内部の水位 (地下水位) を調べるため、ガラス面に沿った埋立砂内部の箇中の位置に計測用パイプを入れて水位を測定した。

##### (2) ポンプによる注水時の埋立砂内部水位と水圧の上昇

図-4.23は、測定パイプにおける水位の変化と測定パイプ付近(ch37) およびその下(ch35, ch28) の間隙水圧の時系列波形をみたものである。まずポンプで注水し始めて冠水高さ5cmに保った後、ポンプを停止した。次に再度注水し冠水高さ10cmに保ち、そして水を抜いた。さらにもう一度注水し冠水高さ10cmとして、その後ポンプを停止して地下水面が元に戻るまで計測している。

注水し始めると埋立天端上では所定の冠水高さにすぐ達し、地下水位、間隙水圧も一気に上昇して、定常な状



4~7:波圧計 (ケーソン前面) 8~10:波圧計 (掘圧力) 11~14:波圧計 (目地板) 23~42:間隙水圧計

図-4.22 実験断面 (冠水がある場合)

態になる。当然のことではあるがこの時のch37の間隙水圧水頭は測定パイプ内の地下水位と一致している。この時の地下水位の上昇量は冠水高が5cmでは31.4cmであり、冠水高が10cmでも34cmであった。これらはいずれも埋立砂の天端高さより低く、地下水位が埋立天端上に達して冠水高と一致することはなかった。この理由は明確ではないが、埋立砂内にある空気の影響ではないかと思われる。また、この地下水位で上からの水の供給と下方および裏込部への水の流出がバランスするからとも思われる。

ポンプからの注入を止めると少しずつ圧力が減少するが、少したつと図のように急に圧力が減少する様子が見られる。この時刻はちょうど埋立天端から水がひいて地面が露出する時刻に相当している。その後、地下水位の低下の速度は緩やかになり、完全に冠水前の状態になるには1時間以上を要した。すなわち、越波や降水で地下

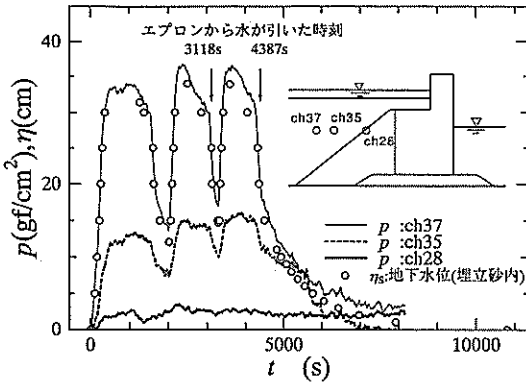


図-4.23 ポンプによる給水時の埋立砂内の圧力と地下水位の変動

水位は比較的簡単に上昇し、元に戻るのに時間がかかることが分かる。

図-4.24は冠水高5cmの場合における静水圧の分布であり、ケーソンに近づくほど小さくなっている。埋立砂内の地下水面はその測定パイプ付近ではほぼ水平であるが、裏込石に近づくほど低下しているものと考えられる。また、埋立天端から下になるにつれて圧力が裏込石内に抜けるとともに、埋立砂から裏込部、そしてマウンド内を通る流れが発生していることがわかる。一方、裏込石内部の静水位は埋立砂から常に水が流れ込んでいたにもかかわらず、静水位にほとんど変化が見られず、図-4.24のように圧力も裏込石内では非常に小さくなっている。

(3) 冠水断面での波圧の伝播と裏込部での水面の動き

図-4.25は正負の圧力のピーク値分布の一例であり、周期  $T=3.04s$ 、波高  $H=52.4cm$  の基準実験波の場合である。ただし、圧力は冠水した状態で造波前の間隙水圧を0として考えている。

正の圧力についてみると、裏込石内部では冠水のない場合の前掲図-4.19と比較すると、位相差はあまり変わり無いが、全体に2~3割程度圧力が上昇している。一方、埋立砂内では裏込石に近い部分で圧力が大きくなっている。また、負の波圧についても冠水のない場合より大きい。冠水がないときと同様に負の圧力の減衰が正に比して大きいことが興味深い。

図-4.26は各周期における波高  $H$  と各測点ch7、ch10、ch23、ch31の正負の圧力ピーク値との関係である。やはり、マウンド内や裏込め部内ch10、ch23、ch31の正のピーク値は全体に大きく、短い周期 ( $T=2.10s$ ) で波高が小さい場合にはケーソン前面の波圧ch7のピーク値

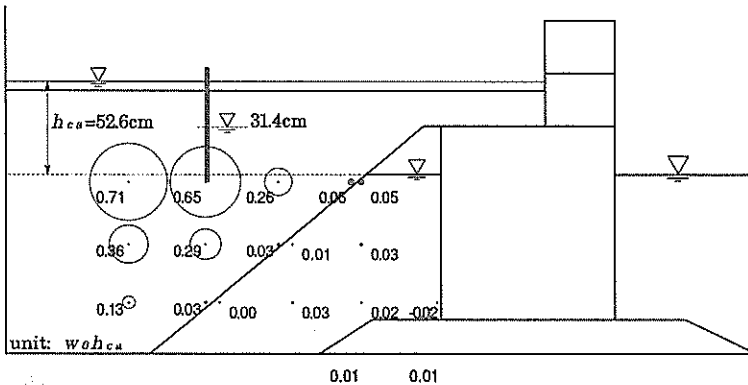


図-4.24 冠水時波作用前の圧力分布と地下水位



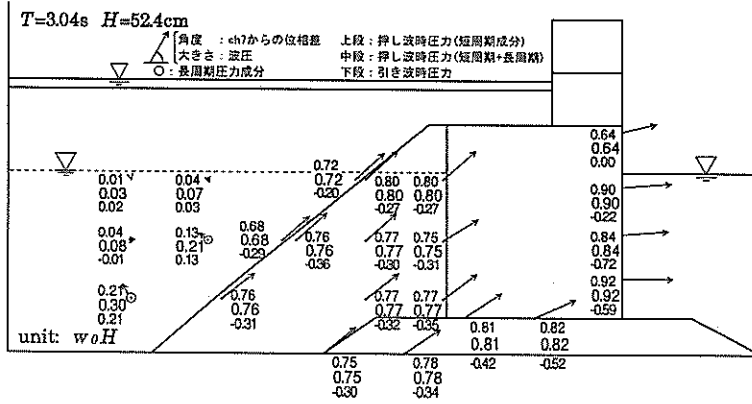


図-4.25 圧力分布 (冠水時、波作用下)

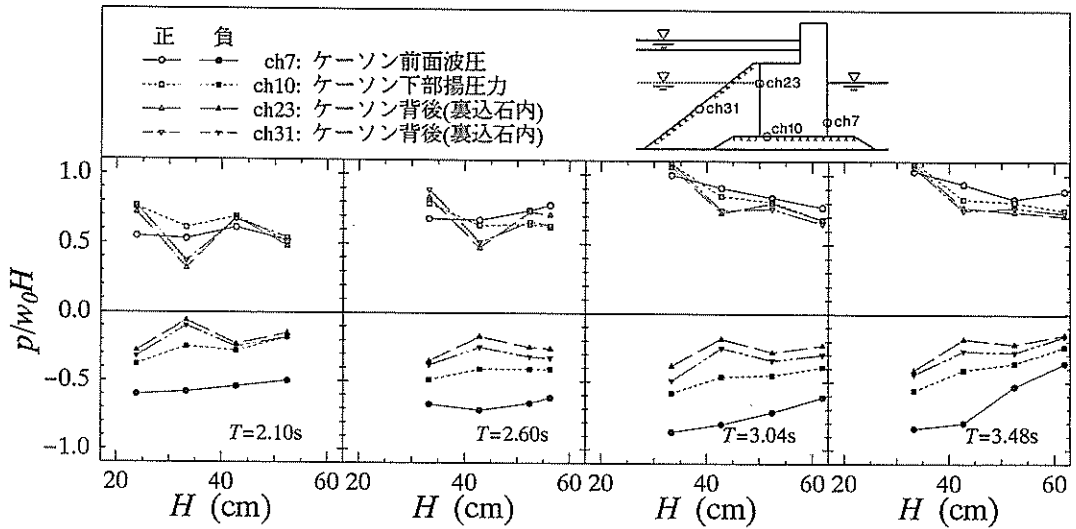


図-4.26 圧力のピーク値と波高および周期 (冠水がある場合)

より大きくなっているケースもあった。

このように裏込部の間隙水圧が大きくなるのは、冠水により裏込石上部の埋立砂内部に水が浸透して空隙をふさぎ、裏込部に伝播した波圧が裏込部から外部へ抜けにくくなっているため（密閉度が高くなっているため）であると考えられる。

埋立砂内部の空隙がふさがれることにより裏込石内部の水位の変動は小さくなっている。図-4.27は、波高  $H$  に対する地下水水位変動量  $H_B/H$  を示しており、この値は0.1より小さく、冠水無しの場合のほぼ1/2以下である。ただし、周期  $T=3.04s$  で波高  $H$  が大きくなるにつれて  $H_B/H$  が大きくなり、冠水のない場合とほぼ等し

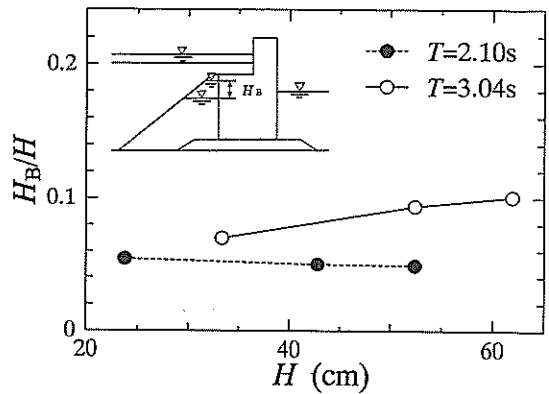


図-4.27 裏込部の水面変動 (冠水がある場合)

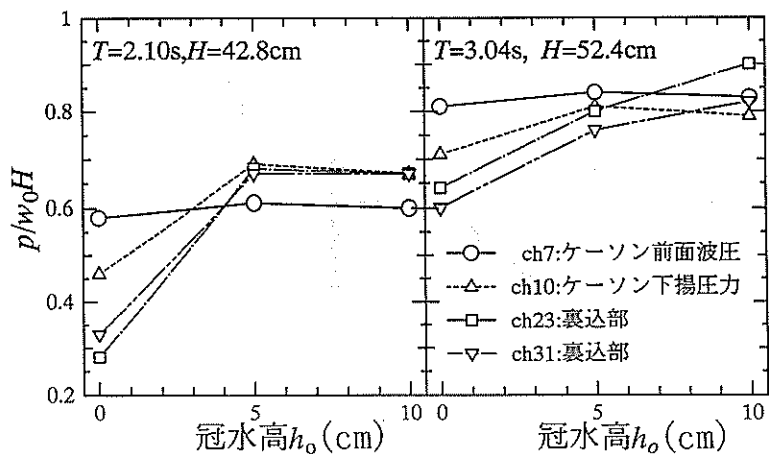


図-4.28 冠水高と間隙水圧

くなっている。これは、裏込石上部の埋立砂が裏込石で発生する大きな間隙水圧によって液状化し、圧力の一部が埋立砂上部に抜けたためであり、実験ではいわゆる埋立砂のボイリングが観察された。これについては、3.3でさらに検討する。

#### (4) 冠水高さと圧力

図-4.28は冠水高  $h_o$  と裏込部 (ch23, ch31) の間隙水圧ピーク値  $p/w_o H$  の関係であるが、周期が短いときには、冠水高  $h_o$  の違いではあまり圧力に変化はないが、周期が長い場合は冠水高が大きいほど圧力は大きくなっている。

#### 4.2.3 裏込部の天端上に埋立砂がない場合 (埋立時断面)

##### (1) 実験断面と越波流量

図-4.29は裏込部の上部には埋立砂が無く、裏込石が露出した状況を対象にした実験断面である。この断面は、完成時にもあるが施工時に多いと考えられ、埋立時断面と呼んでいる。ここでは、天端を低くし、越波水がケーソン背後に流入しやすくした断面形状にして、越波の影響も同時に検討している。

図-4.30は  $T=3.04s$  での波高  $H$  と平均越波量  $q$  の関係である。波高が61.9cmの場合には52.4cmの場合より越波量が低下している。これは61.9cmの場合に重複波の峰が崩れる砕波状態になっているためと考えられる。天端高  $hc$  は59.6cmであり、 $H=61.9cm$  のケースであっても  $hc/H=0.96$  と比較的高いが、規則波であるため平均越波量は  $52.7cm^3/s/cm$  と大きい。実験では透水性の大きい裏

込部に越波水が流れ込んでいったが、越波量が大きいため14波程度で裏込部が水で満たされ、最終的に実験模型のケーソン天端上には約7cmの水が溜まった。

##### (2) 基準実験波における圧力と裏込部の水位変動

図-4.31は、基準実験波 (周期  $T=3.04s$ 、波高  $H=52.4cm$ ) の場合の裏込石内部の水位と圧力の測定波形である。裏込部の水位については、越波によりゼロレベルが上昇し、天端上にまで達していることが分かる。裏込石内部が越波水で満たされるとマウンドを透過してきた波により裏込石部分から水が吹き上げる様子が認められた。圧力の測定波形を見ると、裏込石や埋立砂さらにはマウンド内においても圧力のゼロレベルが上昇しており、越波水による影響が認められる。また、間隙水圧は裏込石上部に埋立砂がある場合と比較すると、かなり小さくなっており、圧力が抜けやすい断面になっていることが分かる。また、裏込石部の圧力の波形を見ると、双峰型波圧の第一のピークが小さくなっており、これも圧力が抜けやすい場合の波形の特徴の一つである。

図-4.32はこの時の正負の圧力のピーク値分布である。図中の○で示す水圧のゼロレベルの上昇量 (静水圧上昇分) は、裏込石、埋立砂ともに  $0.2w_o H$  ( $11gf/cm^2$ ) 程度となっている。越波の影響で、越波がほとんどない前掲図-4.19に比べて大きくなっている。一方、裏込石内部の圧力変動は天端上に埋立砂がある場合に比べると、やはり小さくなり、 $0.35w_o H$  程度で地表面に近くなるほど小さくなっている。ただし、負の圧力の減衰が正の圧力に比して大きいことはない。

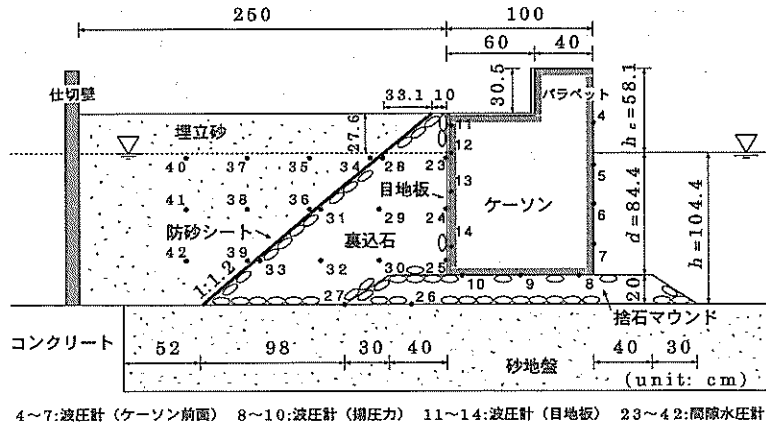


図-4.29 実験断面(埋立時)

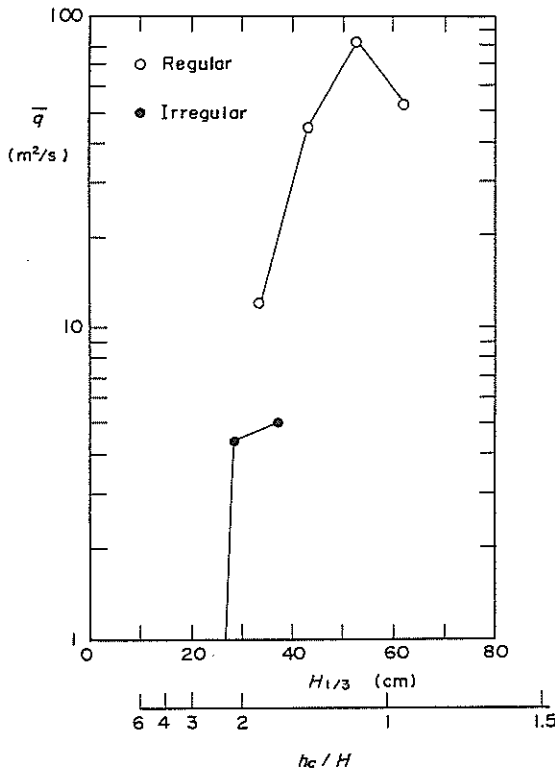


図-4.30 波高と越波流量の関係

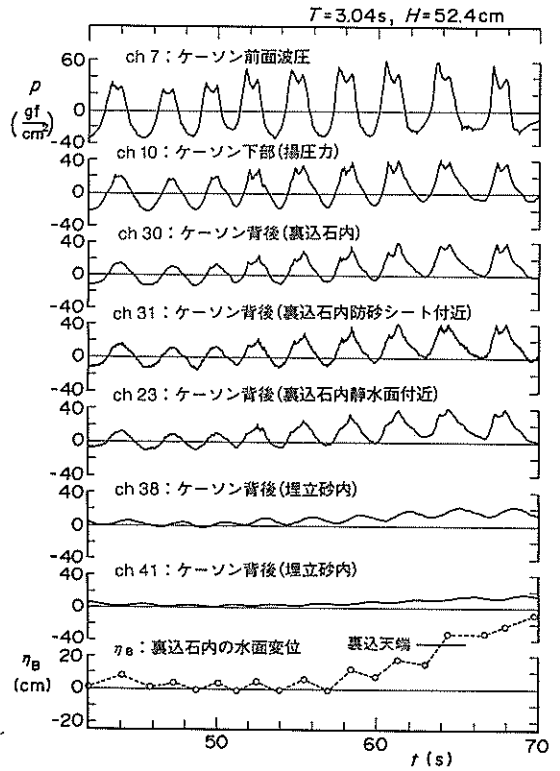


図-4.31 測定波形(埋立時)

護岸の吸い出しに関する水理模型実験

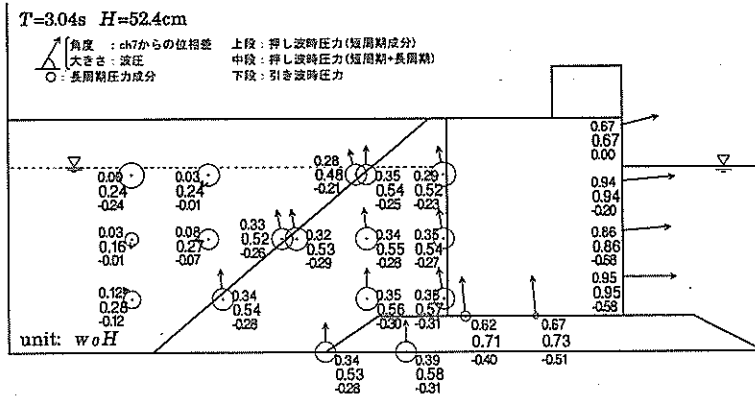


図-4.32 圧力分布 (埋立時)

(3) 波高・周期と圧力

図-4.33は周期  $T$  が2.1sと3.04sにおける波高  $H$  と各測点ch7、ch10、ch23、ch31での正負の圧力ピーク値との関係である。裏込石上部に埋立砂がなく圧力が抜けやすくなっているため、波高が小さく越流量が小さい場合には、裏込部の圧力(ch23、ch31)のピーク値は小さくなっている。波高が大きくなる( $H \geq 52.4$  cm)と裏込石内部の圧力は大きくなり、マウンド内部(ch10)と同じ程度の圧力が発生しているが、これは越波水による静水圧上昇分があるためである。また、越波水によって静水面上の裏込部が満水になると裏込部天端の幅が狭いためここにでの抵抗が大きくなり圧力が大きくなると考えられる。

4.3 埋立砂のボイリング

(1) ボイリングの条件

飽和砂に下からの間隙水圧が加わり、この圧力が大きく砂の粒子間応力がゼロとなると、一つ一つの砂粒が浮遊し、水中に浮遊するボイリング状態、すなわち砂が液状化する。ボイリングが発生すると、当然そこでの防砂シートも破壊され、また舗装などを含む上部の構造も破壊される。また、液状化しているためシートなどの隙間から砂が流失しやすい。したがって、ボイリングはこうした護岸の吸い出し災害の一つの原因となっていると思われる。

図-4.34は埋立砂に波が作用したときの模式図であり、引き波の際には砂の有効応力が増して安定するが、押し波時に有効応力が減少し、波による圧力が大きいと、ついには0となりボイリング状態になる。すなわち、ボイリングが発生する条件として以下の式が考えられる。

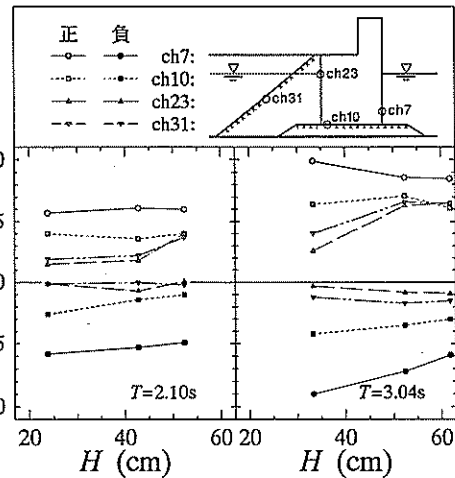


図-4.33 圧力のピーク値と波高および周期 (埋立時)

$$p^+ \geq \gamma_s (h_s - h_w) + \gamma' h_w \quad (9)$$

ただし、この図では簡単のために静水面が埋立砂内にある場合を考えている。ここに、 $p^+$ :裏込部天端での間隙水圧の正のピーク値、 $h_s$ :裏込部天端上の土かぶり高さ、 $h_w$ :飽和している部分の埋立砂の高さ、 $\gamma_s$ :砂の単位体積重量、 $\gamma_w$ :水の単位体積重量、 $\gamma'$ :土の水中単位体積重量 ( $=\gamma_{sat} - \gamma_w$ )、 $\gamma_{sat}$ :飽和砂の単位体積重量であり、 $h_s = h_w$  であると  $p^+ \geq \gamma' h_w$  となる。ただし、 $h_w$  は  $h_s$  以上の場合でも、上式では、 $h_w$  までの値を用いる。

従って、間隙水圧が大きく、裏込石上部の埋立砂の土被り圧が小さいほど、そして静水面が高いほど、ボイリ

ングが発生しやすいものと推定される。ただし、実際の護岸では、舗装などの上載荷重があるが、これも考慮する必要がある。なお、間隙水圧がこの条件に達しなくても、ある程度近づくと、その埋立地盤の強度が低下すると考えられる。

(2) 実験断面

ケーソン式護岸においても、埋立砂の施工時や、潮位が異常に高い場合等では、押し波時の裏込め部の間隙水圧によって埋立砂がボイリング状態にいたる可能性がある。4.2.2で述べたように、埋立砂が裏込部天端上にあっても冠水した実験断面において、一部ボイリングが認められている。そこでボイリング状態をよりはっきりと再現するため、図-4.35のように埋立砂の高さをケーソン

前面の水位と同じとし、しかもその厚さが20cmと比較的薄い断面で実験を行った。実験では、防砂シートではなく、粒調碎石（粒径5mm程度の石）を敷いて埋立砂が裏込部に沈下しないようにしている。この断面では  $h_s = h_w = 20.0\text{cm}$ 、 $\gamma' = 0.9\text{gf/cm}^3$  であるから、 $p^+ = 18\text{gf/cm}^2$  が理論上のボイリング発生条件である。

(3) 間隙水圧とボイリング

写真-4.2、4.3は基準実験波の場合で、ボイリングが発生し埋立砂が吹き上げている様子である。図-4.36に示されるように、波高を少しずつ大きくしていくと、最初一部でボイリングが発生し始め、大きな波高では全体的に持ち上がるようにボイリングが発生する様子が見られる。どの時点をもって液状化が発生していると判断す

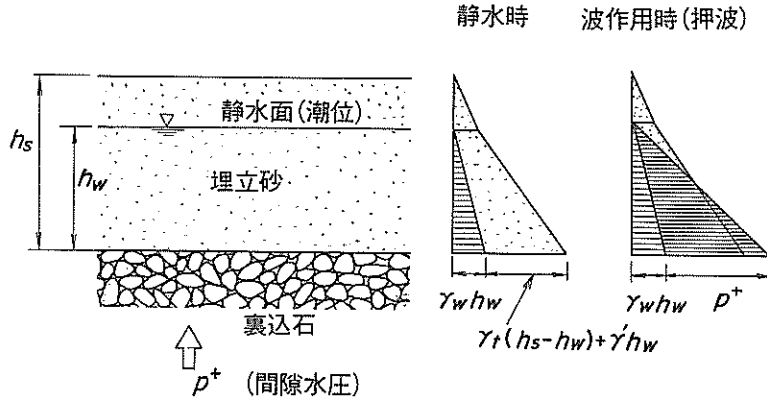


図-4.34 波による圧力と埋立砂のボイリング

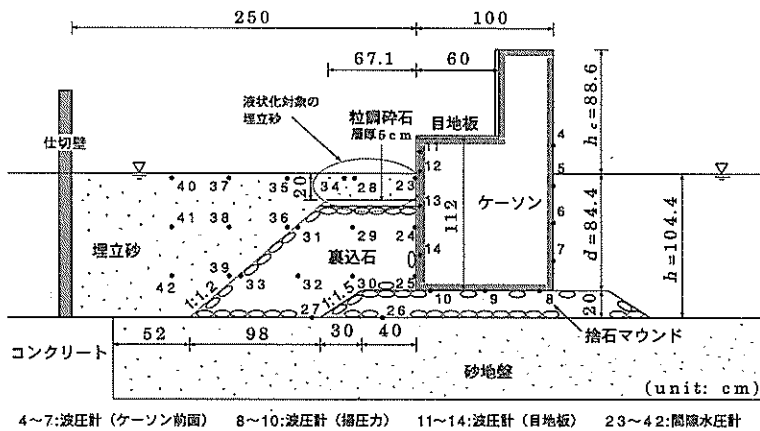


図-4.35 実験断面 (ボイリング実験)

護岸の吸い出しに関する水理模型実験

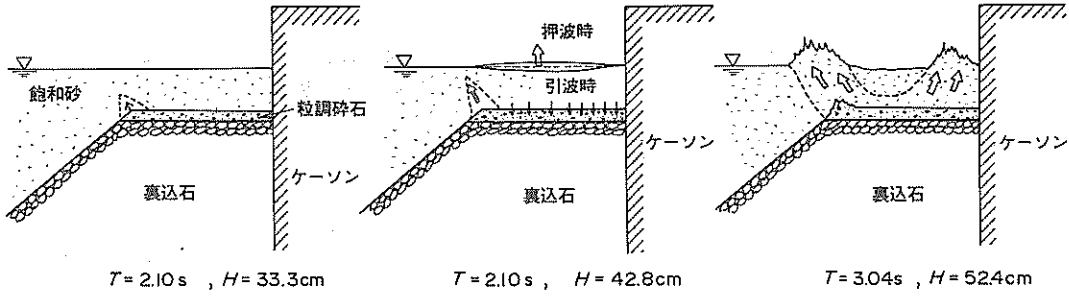


図-4.36 ボイリングの発生状況

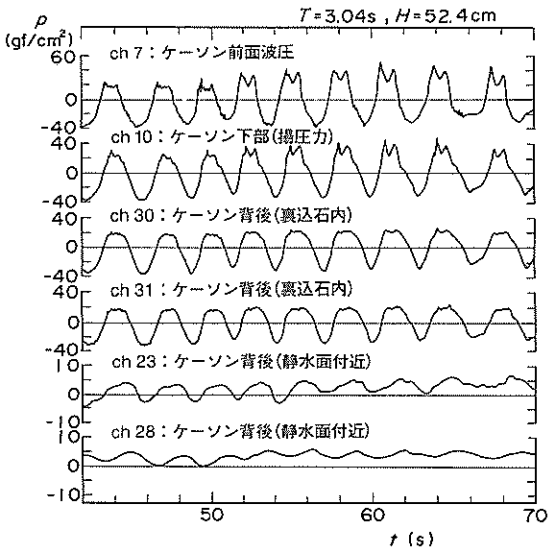


図-4.37 測定波形 (ボイリング実験)

るか難しいところであるが、粒調碎石の上の埋込砂が全体に浮き上がるようになった時点点を液状化発生限界と考えると、周期  $T=2.1s$  では波高  $H=42.8cm$  以上、周期  $T=3.04s$  では全てのケースで液状化していた。この時の裏込石内部の圧力は  $17\sim 21gf/cm^2$  で、上述のボイリング発生条件にはほぼ一致する。

図-4.37は基準実験波の場合の測定波形である。裏込石天端上の埋込砂内ch23では、 $t=56s$ 程度から負圧が発生しなくなり、埋込砂の流動化に関連した興味深い現象が表れている。また、裏込部の圧力(ch30、ch31)は押し波時に短周期成分が除かれたなだらかな波形となり、負の谷が深い波形となっており、4.2.1や4.2.3で述べた完成時標準断面の場合と比較すると大きく異なっている。

図-4.38は基準実験波の場合の空隙水圧のピーク値と位相差の分布であり、砂がボイリングすることで正の圧力が静水面に抜け、空隙水圧がやや小さくなっていることが分かる。一方、負の圧力は大きく、冠水時よりも大

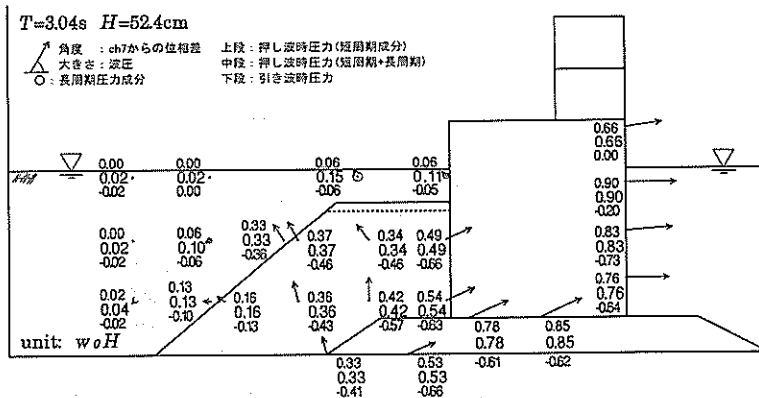


図-4.38 圧力分布 (ボイリング実験)

きくなっていることが分かる。押し波時に液状化している、引き波時には砂地盤が締まるのが観察されており、これが負の波圧が大きくなる原因である。

図-4.39は周期2.10sと3.04sにおける波高 $H$ と各測点ch7、ch10、ch23、ch31の圧力のピーク値の関係である。裏込部ch31の圧力は意外に大きく、周期が短い $T=2.10$ sの場合にはケーソン前面の圧力と同程度の圧力が発生している。周期が短く埋立砂が液状化していない場合にはマウンド上に埋立砂があることで圧力が封じ込まれ、裏込石内部で大きくなっているものと考えられる。

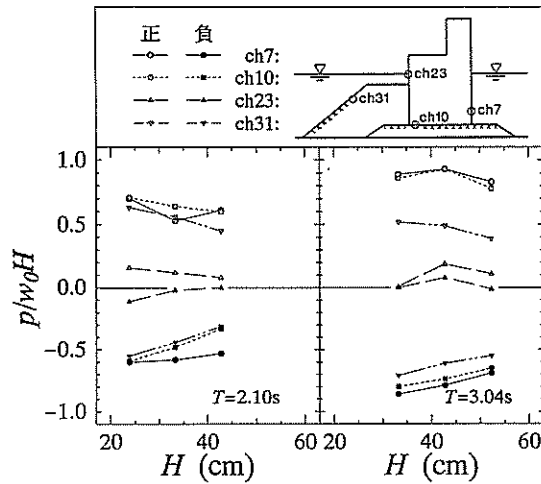


図-4.39 圧力のピーク値と波高および周期 (ポイリング実験)

#### 4.4. 圧抜き工法

##### 4.4.1 裏込石を埋立天端上に露出させて圧力を解放させた場合

###### (1) 実験断面

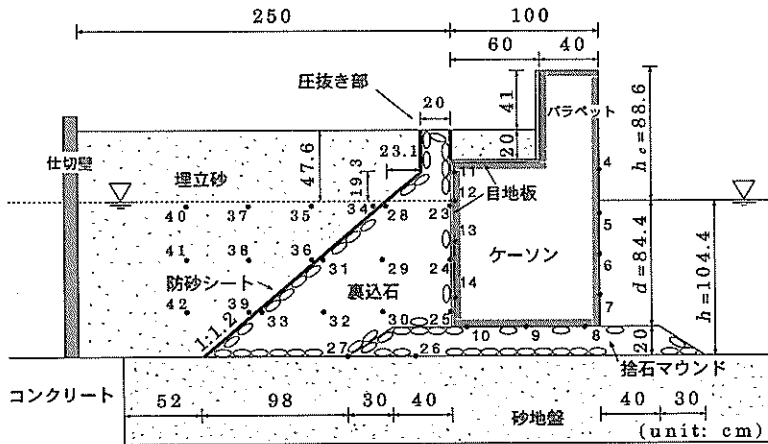
埋立砂の吸い出しや沈下の危険性を低減する一つの方法は、裏込部の圧力を低下させることである。前掲図-4.16のように埋立砂が裏込部の天端上にある場合には、密閉度が高く間隙水圧は大きくなり、特に埋立砂が冠水した場合には、間隙水圧はかなり大きくなる。一方、前掲図-4.29のように裏込部の天端が解放されていれば、圧力はそれほど大きくならない。

図-4.40は、裏込部を幅20cmで埋立天端上に解放した断面であり、裏込め開口部による圧抜き工法の一つである。開口部の大きさは、圧抜きの効果に大きく影響するが、ここではかなり大きい場合を想定している。開口部が比較的小さい条件は、すでに前掲図-4.29の場合が相当するが、それは天端が低い状態であったことに注意が必要である。

###### (2) 圧抜きの効果

図-4.41はこの場合の時系列波形の一例である。開口部があることによって大きく圧力が減衰している。なお、ケーソン前面下部ch7の双峰型波形のうち、第1ピークがマウンドch10や裏込部ch30、ch23で減衰していき、ch23ではほぼ正弦的になっている。

図-4.42は、この場合の圧力の分布図の一例であり、基準実験波の場合である。やはり、圧力は低減しており、裏込石と埋立砂の境界部では正の圧力のピーク値は0.16



4~7:波圧計(ケーソン前面) 8~10:波圧計(揚圧力) 11~14:波圧計(目地板) 23~42:間隙水圧計

図-4.40 実験断面(裏込部に圧抜き開口部がある場合)

$w_0H$ まで下がり、ケーソン前面 (ch7) の波圧の約20%まで減少している。特に裏込石内部の自由表面に近いch23では圧力の減少が顕著である。前掲図-4.20の冠水した場合はもちろん、そうでない裏込石内に埋立砂がある場合に比して圧力は大きく低下しているのが分かる。図において、マウンド内部の圧力のピークの位相がケーソン前面の波圧のピークの位相とほぼ1/4周期も違うのはピークの位相が第1ピークから第2ピークへとシフトしたためであり、裏込石が密閉されていない、圧力の低減が大きい場合の圧力波形の特徴である。なお、負の圧力についても低減効果は顕著である。

図-4.43は波高と圧力の関係であり、周期が2.1sと3.04sについて示している。やはり、周期が長い方が圧力は全体に大きく、波高による無次元圧力の変化は比較的小さい。なお、前掲図-4.33の裏込め天端が解放されているものと比較すると、やはり全体的に、その天端の開口幅が大きいため圧力が小さいように見える。しかしながら詳しく見ると、越波がない、波高が小さい場合を比較すると、あまり変わらず、越波が多い場合に差がでてくる。すなわち、越波の影響がなければ、開口幅はそれほど必要ではなく、越波量と開口部による越波の排水能力によって、効果が変わってくる可能性を示唆して

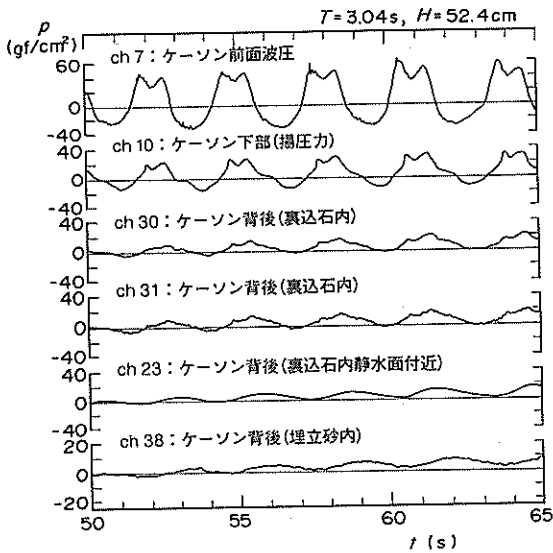


図-4.41 測定波形 (裏込部圧抜き開口部がある場合)

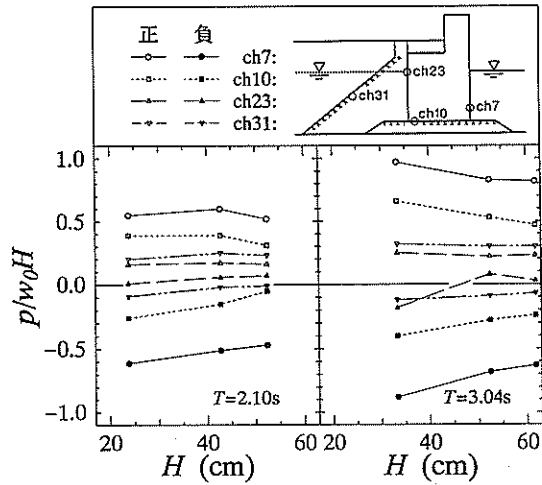


図-4.43 圧力のピーク値と波高および周期 (裏込部に圧抜き開口部がある場合)

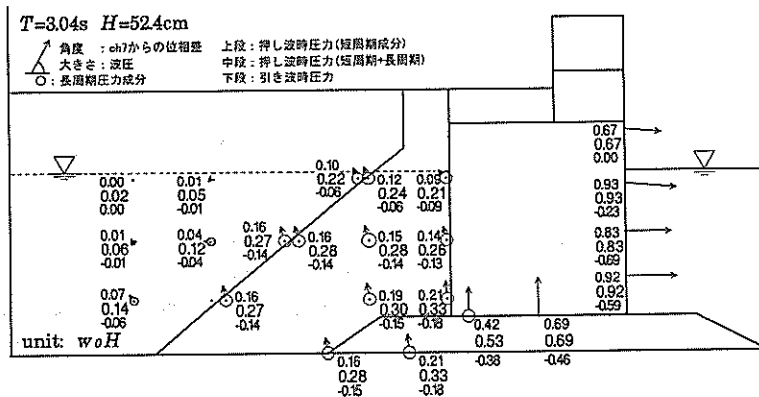


図-4.42 圧力分布 (裏込部に圧抜き開口部がある場合)



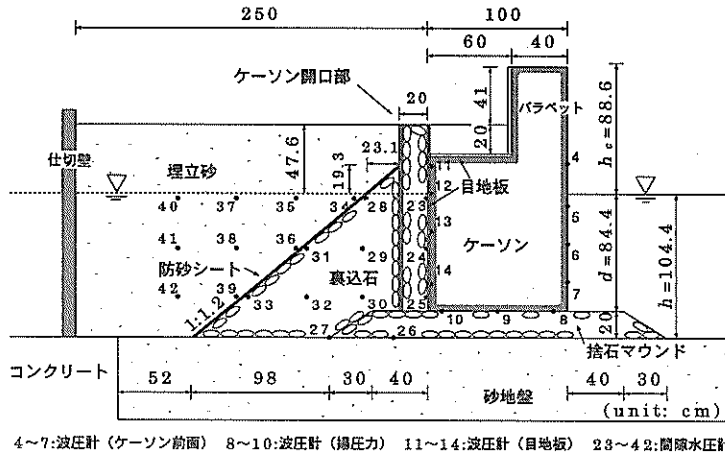


図-4.44 実験断面 (ケーソンに圧抜き開口部がある場合)

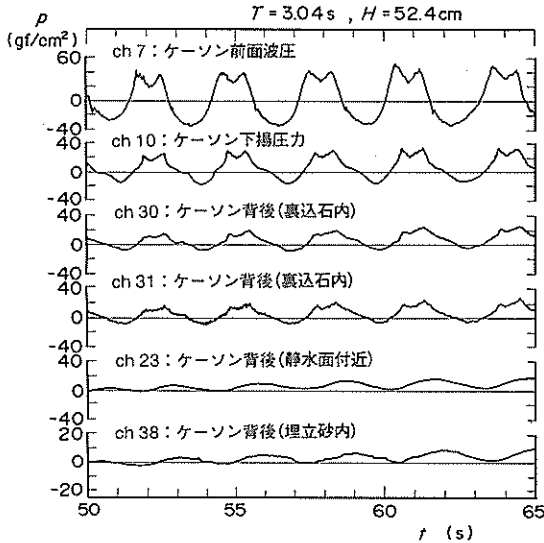


図-4.45 測定波形 (ケーソンに圧抜き開口部がある場合)

いる。これについては、ここでは十分な検討は行えなかった。

#### 4.4.2 開口部を持つケーソンによる圧抜き

##### (1) 実験断面

圧抜き工法の一つとして、ケーソン部に圧抜き用の開口部を持つことが考えられる。図-4.44は、ケーソン部に幅20cmの開口部を持つもので、この開口部は、裏込石と同じ碎石によって充填されている。

##### (2) 圧抜きの効果

図-4.45は、基準実験波 (周期  $T=3.04s$ 、波高  $H=52.4cm$ ) の場合の測定波形の例を示している。波形については、裏込部の天端を解放した埋立時断面の場合とほぼ同様な圧力波形が得られている。

図-4.46は基準実験波の場合の圧力の分布を示すものである。ケーソンの開口部によってマウンド内の圧力は低下しているが、裏込部では、結果的にケーソン壁と埋立砂によって閉じこめられた形状となっているため、圧力はほぼ一定で減衰は少ない。このため、圧力の低下の程度は、裏込石部の天端を解放したものよりやや小さくなっている。

図-4.47は、各周期について波高と各測点での圧力の関係を調べたものである。やはり、周期が長い方が全体的に圧力が大きく、波高に対する無次元圧力の変化は小さい。裏込め部天端上に開口部がある埋立時断面の場合 (前掲図-4.43) と比べ、裏込石部の圧力の低下が少ないことが分かる。

#### 4.4.3 圧抜きによる裏込部内の水位変動の変化

圧抜き部があることで圧力が減衰することが明らかになったが、一方で裏込石内部、あるいはケーソン開口部内の水位変化が大きくなっている。図-4.48は裏込石部の上に埋立砂がある完成時の標準的な断面の場合、エプロンが冠水した場合、裏込石部天端上が露出し圧力が解放されている場合、およびケーソンに開口部がある場合について、波高と水位変動 (全振幅) の関係を示すものである。なお、周期は  $T=2.1s$  と  $3.04s$  の2ケースであり、ケーソン内に開口部がある断面では開口部内部の水位変

護岸の吸い出しに関する水理模型実験

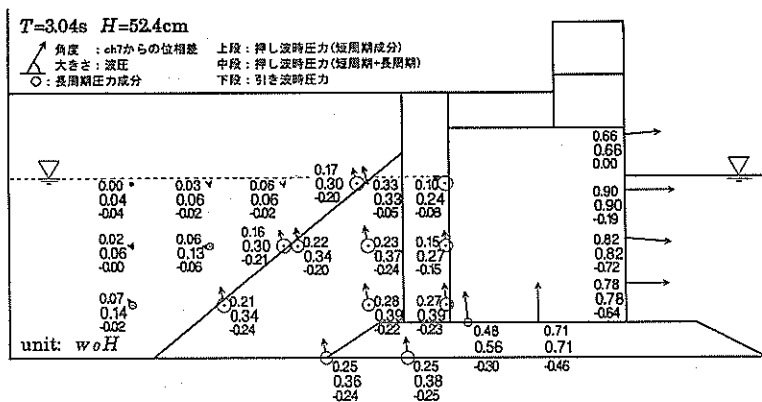


図-4.46 圧力分布 (ケーソンに圧抜き開口部がある場合)

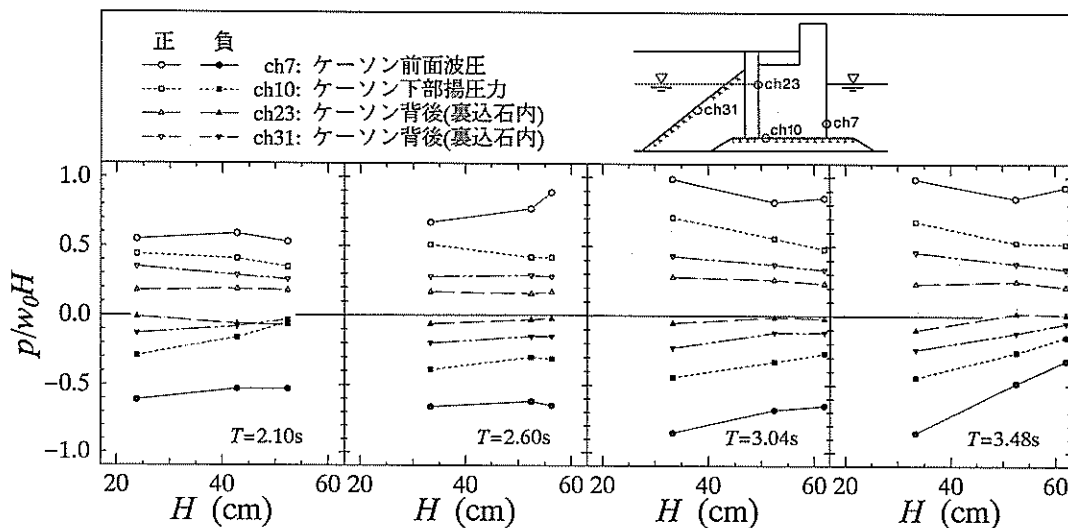


図-4.47 圧力のピーク値と波高および周期 (ケーソンに圧抜き開口部がある場合)

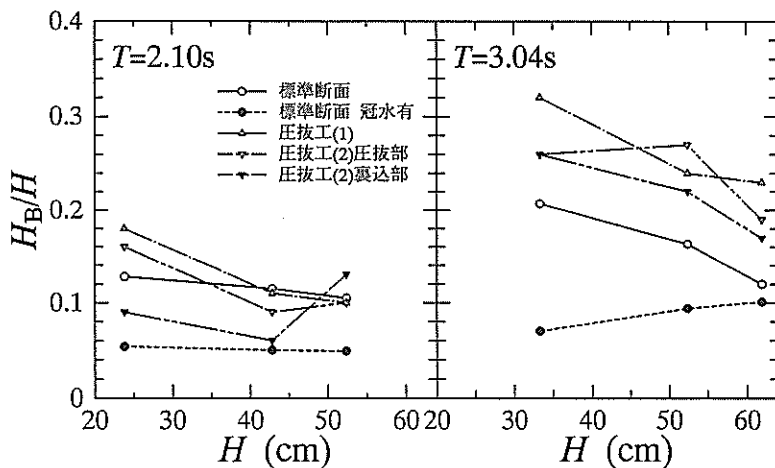


図-4.48 圧抜き開口部による裏込部およびケーソン開口部内の静水面の変動

動とケーソンと埋立砂で囲まれた裏込石部での水位変動の両者を示した。

やはり、密閉度が高い埋立砂上部が冠水している場合が最も水位変動が小さく、 $T=3.04s$ の場合でも入射波高の10%以下であり、 $T=2.1s$ では5%と小さい。これに対して、裏込天端が解放されていた場合がもっとも水位変化が大きく、ケーソンに開口部がある断面、基本的な断面の順に小さくなっており、ちょうど圧力と反対の関係にある。裏込石部天端上が解放された断面で $T=3.04s$ 、 $H=61.9cm$ の際に最も裏込石内部の水位変動の絶対量が大きく、模型量で15cm（入射波高の23%）となる。

#### 4.5 ま と め

本章の主要な結論は以下のとおりである。

- 1) 施工時で防波堤形状の場合、ケーソン後趾ではマウンド透過波の圧力がほぼ0となる。裏込石を投入すると、ここでの圧力はやや上がるが、それほど大きくない。マウンド内に発生する流れは、ケーソンの前後趾の圧力差から推定される。たとえば防波堤形状の場合、 $T=3.04s$ で $H=52.4cm$ のとき12cm/s程度となる。
- 2) マウンドや裏込部に敷設される防砂シートは、施工時の波の作用でめくり上がりやすい。防砂シートに作用する力は、その位置での流速とシートの透水係数によって算定することができ、その安定性を確保するにはかなり大きなシートを抑えるチェーンの重量やシートをケーソンに固定する力が必要となる。
- 3) 通常の完成時の断面では、裏込部の圧力は比較的大きく、正のピーク値では前面の波圧の70~80%に達する。マウンド内の流速は、比較的大きく、防波堤の場合の40~50%となる。
- 4) 裏込部の圧力は、冠水によって裏込部の空気が閉じこめられるほど大きくなり、正のピーク値では前面の波圧の90%程度にもなる。マウンド内の流速は、圧力差が小さくなるほど当然小さくなる。  
逆に、圧抜き開口部を設けたり、裏込部の天端が解放されている場合は、圧力はかなり小さくなる。ただし、越波や降水によって開口部が水で満たされるとその効果が低減するようである。
- 5) 埋立砂内の圧力は、裏込め部からはなれるほど急激に低減するが、その線形減衰率 $k_2$ と波の波数 $k_0$ との比は、7.9程度であり、波の周期によるが波長の3%の距離で20%程度に減衰すると考えられる。
- 6) 裏込部や埋立砂内の間隙水圧に興味ある点として、今回の実験で以下の点も明らかとなっている。

##### ① 静水圧成分の上昇

これは、来襲波の長周期成分に対応しており、とくに短周期成分が減衰する場合に顕著となる。もちろん、越波や降水等によっても静水圧成分の上昇が顕著となる。

##### ② 波圧波形

裏込部の密閉度が低い場合には、裏込部の波圧は減衰するが、特に双峰型の重複波圧波形のうち、最初のピークの減衰が顕著となる。

##### ③ 負の波圧の減衰

正の波圧が減衰する場合には、負の波圧も同様に減衰するが、裏込部の密閉度が高く、正の波圧があまり減衰しない場合でも負の波圧はある程度減衰する。

- 7) ボイリングは、裏込部の密閉度が高く、埋立天端に比して静水面の位置が高い場合に発生しやすい。この発生限界は通常のボイリングの発生限界で表すことができる。

## 5. 目地板に作用する波圧とその低減工法

### 5.1 目地板に作用する波圧

#### (1) 実験断面

現地のケーソン式護岸では、隣接するケーソン相互の間隔(目地間隔)として3cm~20cm程度の隙間がある。ここからの裏込石や埋立砂の流出を防止するため、防砂板やシートあるいは水中コンクリートを使用して土砂漏れ防止工が施されている。ここには、大きな波圧が作用すると考えられるが、特にケーソン天端上に埋立砂を置き、そのために水平な目地板をここに設置すると、衝撃的な揚圧力が作用する危険性がある。

実験では、図-5.1に示されるようにケーソンと水路のガラス面に隙間を設けて目地とした。この時の目地の隙間は15mmで、縮尺を1/20とすると現地では30cmに相当し、1/10では15cmとなる。目地板としてはアクリル板を用い、図-5.1に示すようにケーソン天端と後面に取り付けた。なお、ケーソン後部に取り付けた目地板には波圧計が取り付けられている。

#### (2) 測定波形の一例

図-5.2は、周期 $T=2.60s$ 、波高 $H=52.4cm$ でケーソン後部の目地板に発生した測定波形(時系列波形)の一例であり、静水面上の測点ch11とケーソン底面付近の測点ch14をケーソン前面の測点とともに示している。

図-5.3はこの時の様子を図示したもので、ケーソン前面の水面が上昇するとそれに伴って目地内の水位が上昇する。その後、目地内の波面が上昇してパラベット後

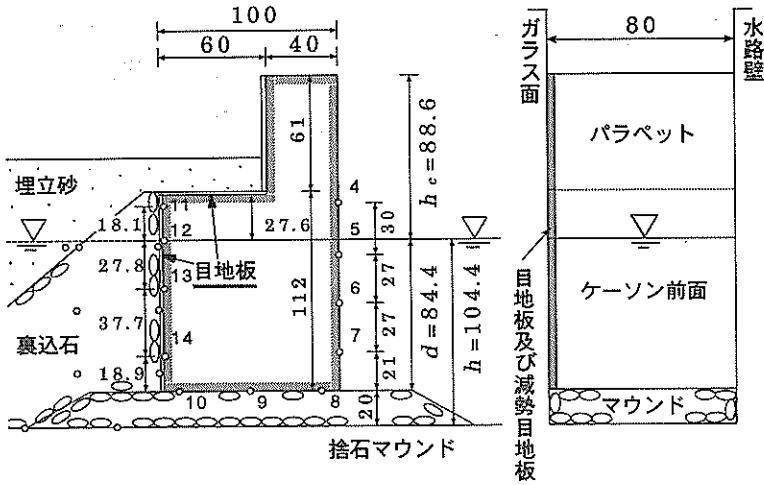


図-5.1 実験断面（目地板に作用する波圧に関する実験）

面の下端に近づくとも目地内の空気が圧縮され、この付近から漏れ出すが、一部の空気は取り残され、波面の上昇により圧縮されるようになる。

静水面上18cmの位置に設置したch11の測定波形では一旦極大値が発生し、その後多少下がった後、さらに大きな170gf/cm<sup>2</sup>(3.2w<sub>0</sub>H)にも及ぶ波圧のピークが発生している。これは空気圧縮によって波形が振動した後、さらに波面が目地板に衝突して強大な衝撃力が発生したものと考えられる。このような衝撃力はケーソン後部だけでなく、センサーの設置していなかったケーソン上部の目地板、さらにその接点である隅角部にも作用してい

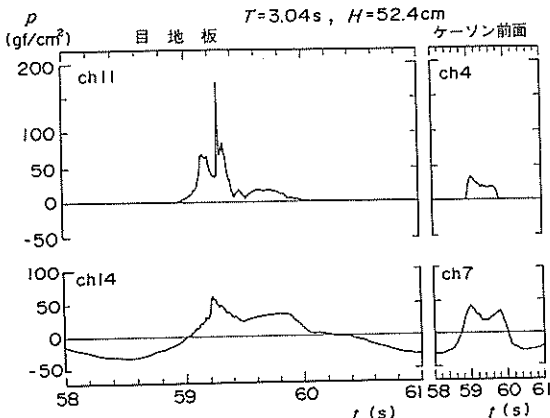


図-5.2 測定波形（目地板に作用する波圧に関する実験）

るものと推察される。実験ではこの様な衝撃力によって水路のガラス面が大きく膨らむ様子が観察された。なお、ケーソン前面の波面が下がり始め、パラペットの付け根付近に達すると目地内には再び空気が入り始め、目地内の波面もケーソン前面の波面に引きずられるようになり下がり始める。

### (3) 波高・周期と圧力

図-5.4は、波高Hと目地板（ch11、12、13、14）での無次元平均波圧強度 $p/w_0H$ の関係であり、それぞれ周期が2.1、2.6、3.04、3、48sの場合である。無次元波圧強度は波高が大きくなるにつれて小さくなってはいるが、周期によらず1~2w<sub>0</sub>Hほども出ている。図-5.4には、局所的に最も波圧が大きく観測されたch11での無次元波圧強度 $p/w_0H$ も示している。ここでの圧力は非常に大きく、平均波圧強度の2倍ほどあり、ばらつきも大きい。ただし、波高が大きくなるほど無次元波圧強度が小さくなる傾向は同じである。

図-5.5はケーソン前面（ch4、5、6、7）の平均波圧と目地板（ch11、12、13、14）での平均波圧の関係であり、目地板にはケーソン前面の2~3倍の波圧が働いていることが分かる。ただし、やはり、波高が大きくなるとやや頭打ちになっている。

図-5.6はケーソン前面下部ch7と目地板下部ch14での負圧のピークの絶対値の関係である。周期2.60sと3.04sでは波高が小さい場合に目地板での負圧の絶対値の方

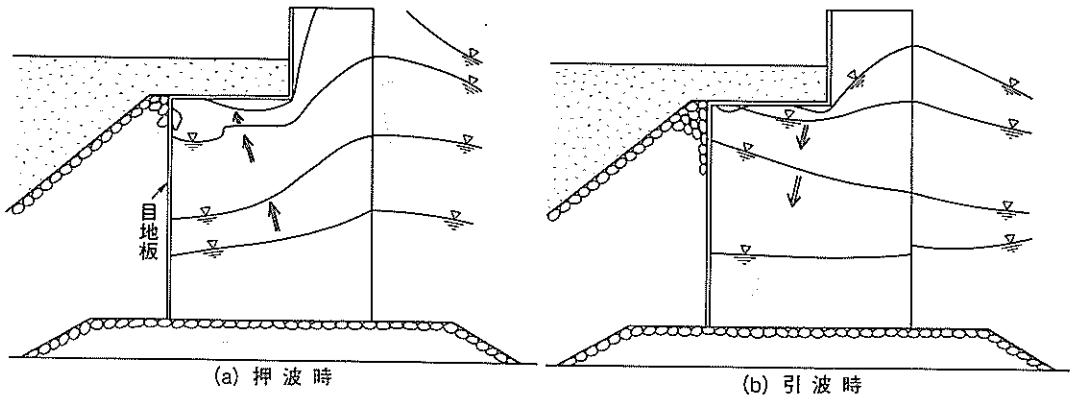


図-5.3 目地板に作用する波の状況

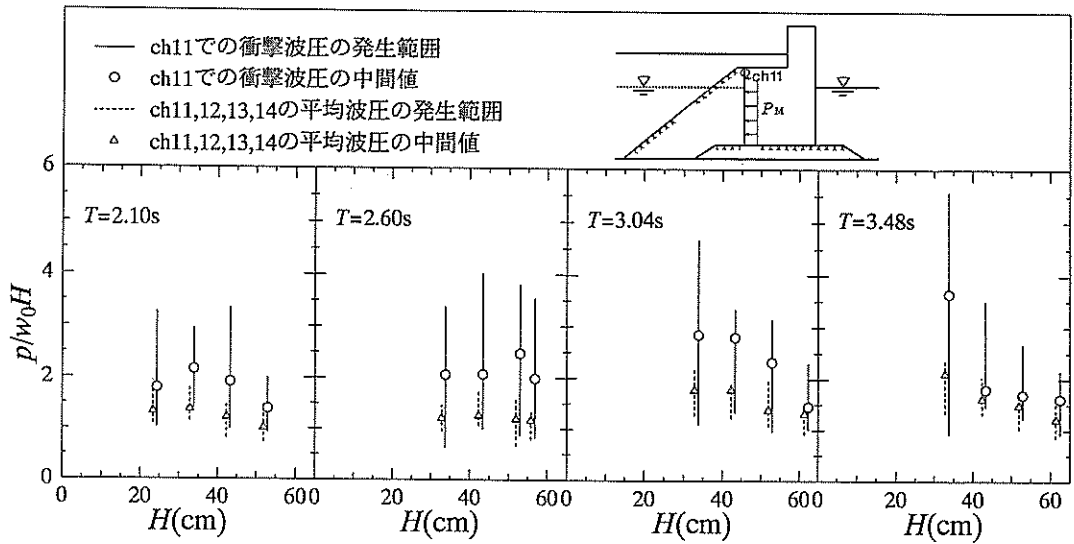


図-5.4 波圧と波高及び周期

が大きくなっており、押し波時だけでなく引き波時でも大きな波圧が発生していることがわかる。

図-5.7は周期2.10s、波高23.8cmの場合のch11の波形である。ch11は静水面より上部にあり、水面がセンサーより下になれば圧力は0になるものと考えられるが、にもかかわらず負圧が発生している。このような負圧は目地内の波面が下がる際に目地板に接していた水塊が目地板からはがれるようにして落下するために発生するものと推測され、静水面上でも負の波圧が発生することに注意が必要である。

#### (4) 衝撃的な揚圧力の発生とその大きさ

このように、目地板に作用する波圧は大きいですが、これは栈橋の上部工（伊藤等，1967）や上床版がある直立消波ケーソンの上床版（高橋等，1984）に働く衝撃的な揚圧力と同じものであり、上昇する波面による空気塊の圧縮や波面の直接的な目地板への衝突によるものと思われる。波圧の強度として局所的に $4w_0H$ となっているのもこれまでの栈橋や直立消波ケーソン堤での測定波圧とほぼ同じである。

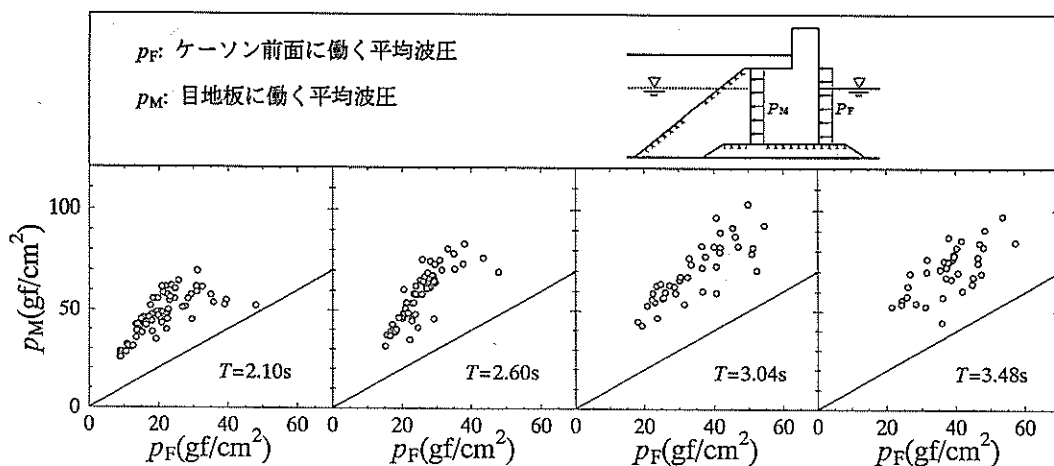


図-5.5 ケーソン前面の平均波圧と目地板に働く平均波圧

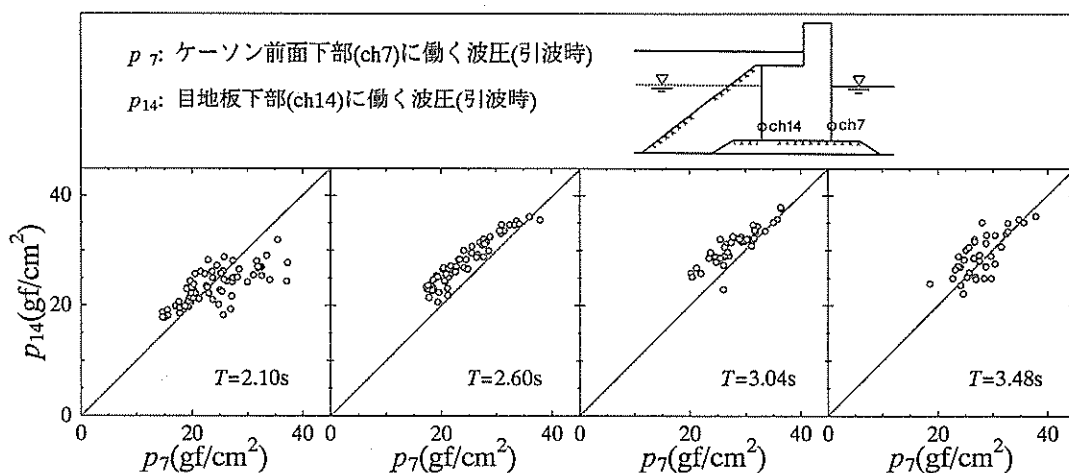


図-5.6 ケーソン前面下部の波圧と目地板下部の波圧

この衝撃的な揚圧力は、空気を閉じこめて発生する場合、その空気層が薄いほど、上昇する波面の速度が大きいほど大きい。したがって、波圧自体は波高が大きいほどやや大きくなる。ただし、波高が大きくなると、閉じこめる空気層が大きくなるとともに、上昇速度がピークになるより前に空気を閉じこめるため無次元波圧強度としてはやや小さくなる。なお、空気の圧縮圧力はフルードの相似則にはあてはまらず、模型実験では、大きくすることに注意する必要がある。

この衝撃的な揚圧力は、静水面と目地板とのクリアランスによってかわり、クリアランスが0以下では、必ず

空気を閉じこめて発生するが、クリアランスがやや大きくなると、空気の閉じ込める量が減るとともに上昇速度も増して最も危険となる。クリアランスがそれ以上では、当然波面が作用しにくくなり圧力は小さくなる。通常の目地板は、静水面付近にあり、最も危険なクリアランスに近いが、ややそれより小さい程度と考えられる。

衝撃的な揚圧力の算定は、基本的には上床版に作用する揚圧力の計算法で求められ、その圧力の大きさはほぼ同じ程度と考えられる。上床版では、空気圧縮の相似則を考慮して、上床版とその位置の後壁に  $2w \cdot H$ 、後壁の底面で  $1w \cdot H$ の波圧を考えており、これが参考にな

と思われる。ただし、これについては護岸の大きさや波高によっても異なり、さらに検討が必要である。

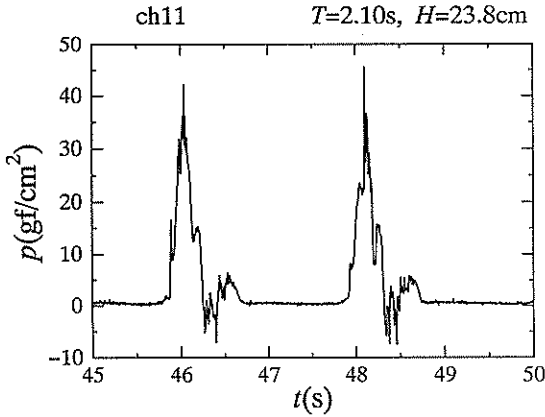


図-5.7 目地板の静水面付近における波圧

## 5.2 減勢目地板による波圧低減工法

### (1) 実験断面

前節で示されたように、目地内にはケーソン前面から波が入り込み、目地板に作用することで強大な波力が発生する。そこで、目地内への波の進入を低減することを目的として、図-5.8に示すようにケーソンにアクリル

の板を取り付け、局所的に目地の隙間を小さくした。以後、この板を減勢目地板と呼ぶ。このような減勢目地板を用い局所的に隙間を小さくすることによって、ここで渦を発生させて目地内への水塊の量と勢いを減衰させ、目地板に衝突する波面の速度を低減させることを期待している。

実験は、パラベット後部の目地板の延長上に減勢目地をとりつけた場合と、さらにもう一本とりつけた場合の2ケースを行った。なお、減勢目地板にはケーソン背後の目地板と同じ高さの位置に波圧計をとりつけてある。また、この時の目地の隙間は15mmであり、減勢目地部での隙間は5mmと小さくなる。

### (2) 基準実験波の場合の圧力

図-5.9は、減勢目地1本で基準実験波（周期  $T=3.04$  s、波高  $H=52.4$  cm）の場合に、ケーソン後部の目地板に発生した測定波形（時系列波形）である。また、図-5.10はこの時の様子を图示したものである。押し波時にケーソン前面の水面が上昇するとそれに伴って目地内の水位は上昇するが、減勢目地で波の出入りが抑えられるため減勢目地背後の水位変化は減勢目地の前の水位変化より位相が遅れる。減勢目地の前面水位がパラベットの下端の位置を超えると、減勢目地背後には空気塊が閉じこめられる。この空気塊がクッションになり、液面上の

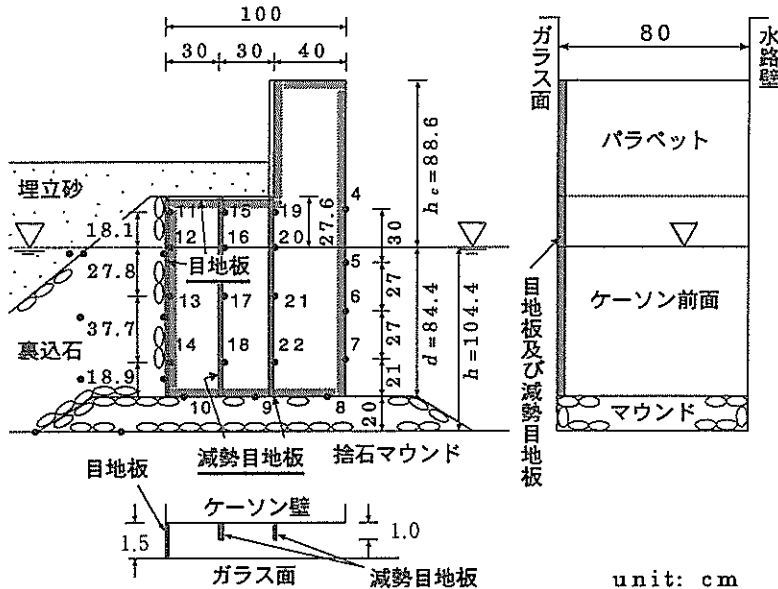


図-5.8 実験断面（減勢目地板がある場合）

昇を抑えることで、ケーソン背後とケーソン上部の接点部以外では、波面がケーソン上部の目地板に衝突することはなくなり、目地板での衝撃力はかなり抑えられている。しかし一方で、減勢目地には空気塊の影響もあって波面が激しく衝突し、 $100\text{gf}/\text{cm}^2$  ( $2w_0H$ ) ほどの圧力が発生している。

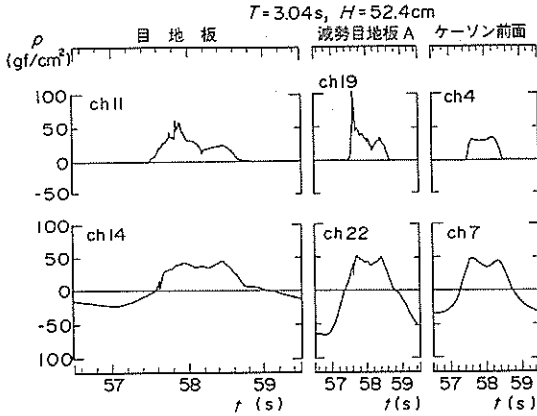


図-5.9 測定波形（減勢目地板1本の場合）

図-5.11は減勢目地2本の場合で基準実験波での測定波形の一例である。外側の一本目の減勢目地板、二本目の減勢目地板、目地板と波圧が段階的に小さくなって作用していることが分かる。目地内に入ってくる水塊が減勢目地で勢いを失うだけでなく、2本面の減勢目地と目地板の間に閉じこめられた空気塊が減勢目地1本の場合よりさらに逃げにくくなり、クッションの役割が大きくなることで、目地板に作用する波圧はさらに小さくなっ

ているものと思われる。

一方、引き波時では減勢目地板背後の水が抜けにくくなっていて、目地板に作用する負の圧力は減勢目地板1本の場合も2本の場合もケーソン前面の $1/2$ 程度になっている。しかしその一方で、1本目の減勢目地板にはかなり大きな負圧が働いている。

また、実験では波圧計が冲向きに向けられていたため減勢目地板に働く冲向きの波力が計測されていないが、減勢目地板にはケーソン背後の目地板からの反射した波面による衝撃的な波力が作用していることに留意する必要がある。

### (3) 波高・周期と圧力

まず、減勢目地1本の場合について述べる。図-5.12は波高 $H$ と目地板(ch11, 12, 13, 14)の無次元平均波圧強度 $p/w_0H$ の関係であり、それぞれ周期が2.1, 2.6, 3.04, 3.48sの場合である。周期が大きくなると無次元平均波圧強度は大きくなる関係にあり、ばらつきも大きくなるが、減勢目地板がない場合と比較すると $0.5\sim 1.5w_0H$ とかなり減少しており、また、波高が大きくなると小さくなっている。

図-5.12には、静水面より18cm上の目地板に設置してあるch11での無次元平均波圧強度も示している。衝撃力が緩和されることで周期が短い場合にはほぼ $1w_0H$ 以下になっている。しかしながら、周期が大きい( $T=3.04, 3.48\text{s}$ )場合には減勢目地板がない場合に比較してかなり減衰しているものの $2w_0H$ 前後の波力が作用する場合もある。

図-5.13は減勢目地板2本の場合である。全体に波圧は小さく、ばらつきも小さくなっており、減勢目地板の

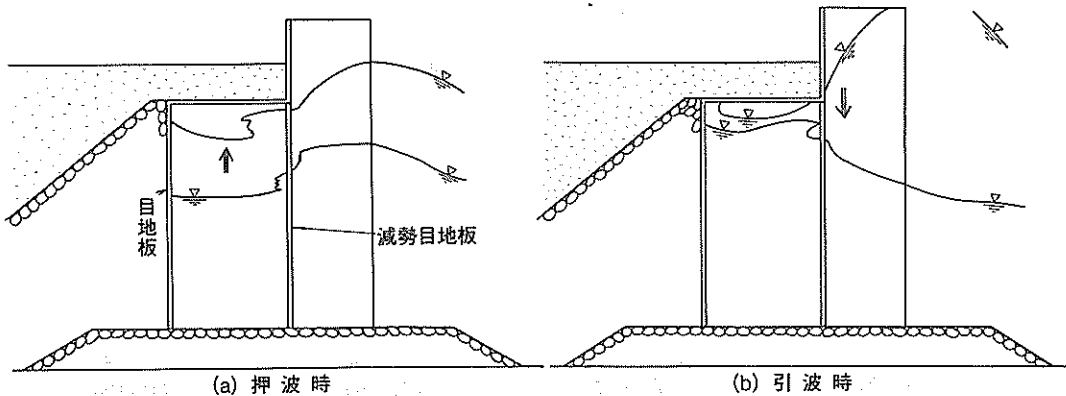


図-5.10 目地板に作用する波の状況



効果によって衝撃的な波力が小さくなっていることが分かる。

図-5.14は、ケーソン前面波圧(ch5)と目地板での波圧(ch11、12)の関係であり、減勢目地板の効果を見るものである。減勢目地板が無い場合にはch11の方が波

圧が大きいが、減勢目地板によって衝撃力が緩和される場合には静水面付近のch12の方が波圧が大きくなる。そこでここでは減勢目地板無しの場合はch11、有りの場合はch12のピーク値を示した。どの周期でも減勢目地によって波圧が顕著に減衰している。なお、減勢目地

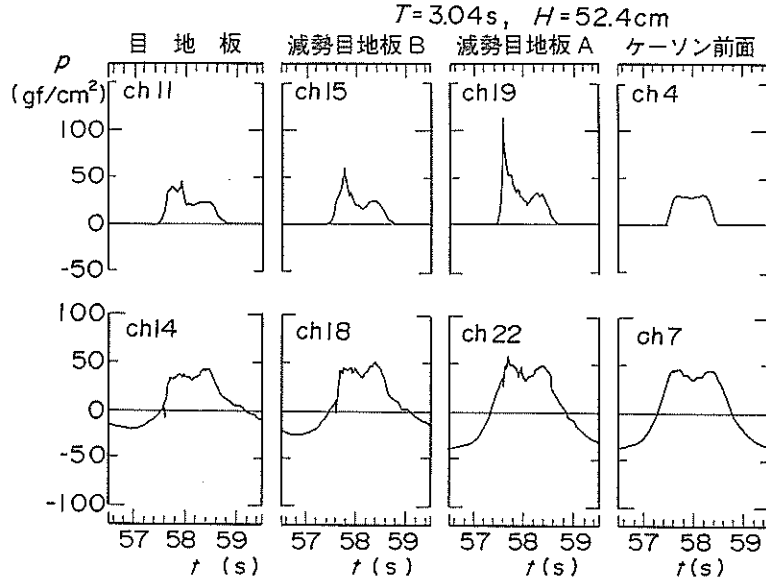


図-5.11 測定波形 (減勢目地板2本の場合)

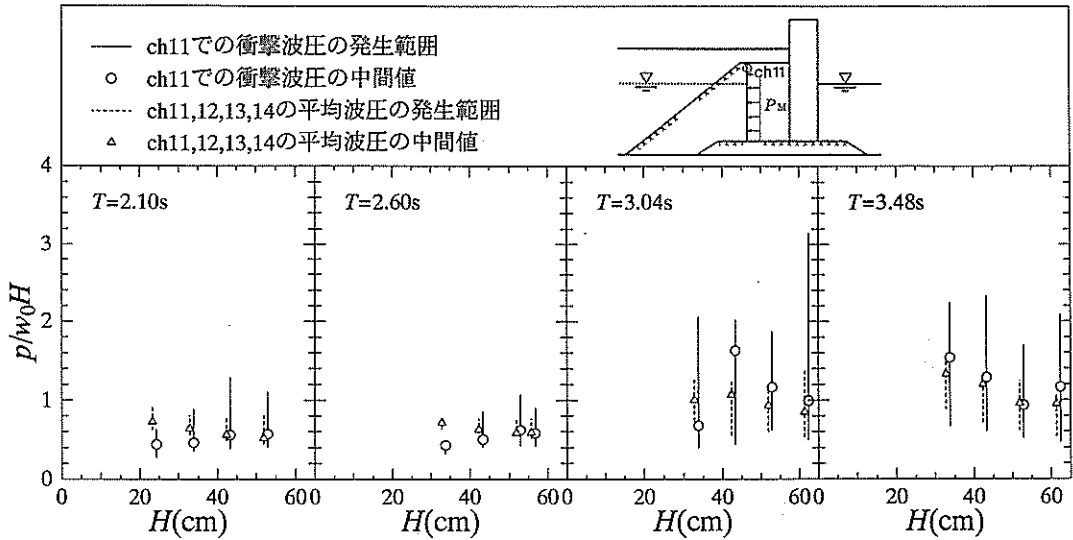


図-5.12 平均波圧と波高及び周期 (減勢目地板1本の場合)

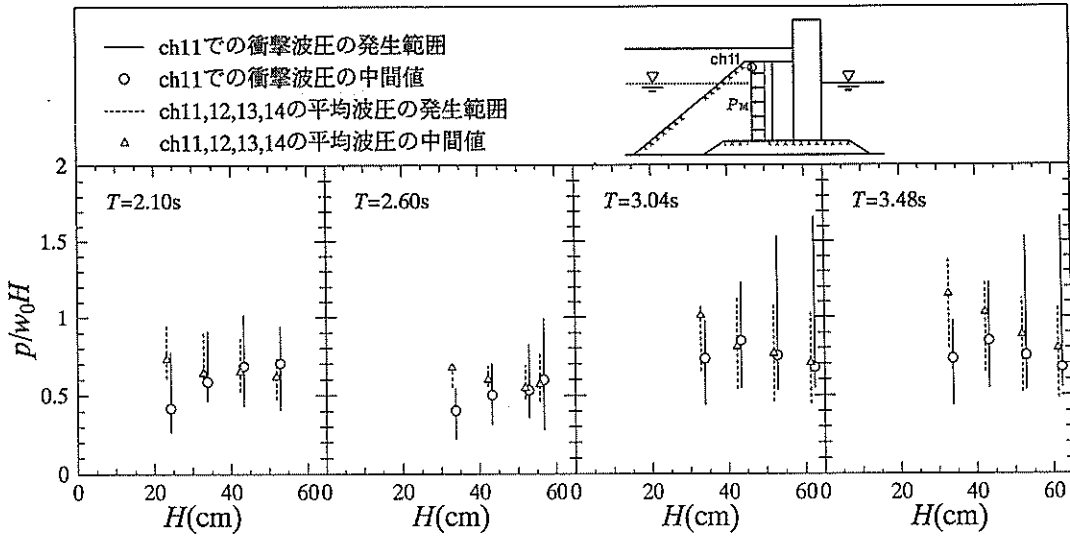


図-5.13 静水面付近の波圧と波高及び周期（減勢目地板1本の場合）

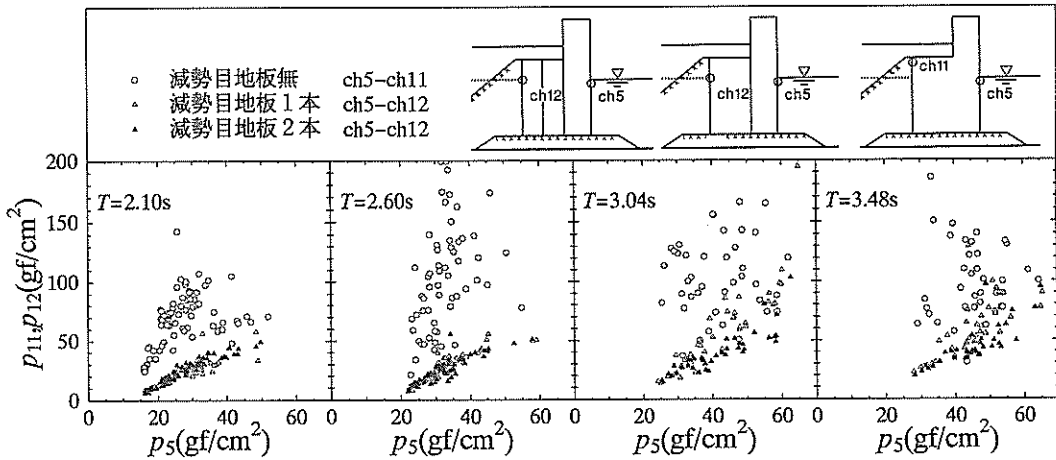


図-5.14 ケーソン前面波圧と目地板での波圧

板2本の方が1本の場合より波圧が小さくなっているが、大幅に減少しているわけではないことに留意する必要がある。

### 5.3 まとめ

5章の主要な結論は以下のとおりである。

- 1) 目地板には、大きな衝撃的な波圧が働く危険性がある。この波圧は、目地内の波面が空気を閉じこめ、これを衝撃的に圧縮して発生する。この波圧の大きさは

条件によって異なるが、 $2w_0H$ を越えることもある。  
 2) この衝撃的な波圧は、減勢目地板を目地内に設けることによってかなり低減することができる。減勢目地板が2本の場合は1本の場合より低減効果は大きい、その差は小さい。

6. 裏込石を用いず直接埋立砂を置く場合

6.1 目地板の隙間からの砂の落下

(1) 実験断面

図-6.1は、裏込石を設けず、直接埋立砂をケーソン背後に置く場合である。埋立砂の静水面上の高さは他のケースと同じである。ケーソンの目地板には、目地板を設け、ここから砂が落下しないようにしている。ただし、目地板には、すでに述べたように大きな波力が作用し、ここが破壊されると裏込石がないため直接埋立砂がここから吸い出される危険性がある。したがって、目地板の静水面から25cm下の位置に隙間を設け、ここから砂が流失する様子を観察している。

(2) 波の作用と砂の落下

写真-6.1は基準実験波の場合であり、目地板から砂が吸い出されている様子を示している。押し波時に目地板に波が作用するとその圧力によって目地板とケーソンとの間の隙間が広がり、その後引き波時に波面が下がり隙間の部分に達すると砂が吸い出されている。目地板の隙間から吸い出された砂は目地下部のマウンド内に写真-6.2のように堆積した。吸い出しは、波高が小さいときにも発生し、波高が大きくなるほど大きくなる。

写真-6.3は、波高が比較的小さく越波しない条件(周期  $T=2.10s$ 、波高  $H=33.3cm$ ) で、一連の波を数回作用させた後の状態で、静水面より上の埋立砂内に空隙が発生している。さらに波高を大きくすると、越波水がケーソン背後に達し、目地板で砂が吸い出されるとともに、

越波水の作用によって埋立砂の天端が沈下し、写真-6.4に示すように埋立砂天端面に地割れが発生した。ただし、この過程で写真-6.3のような空隙は越波水の浸透によって無くなっている。

一方、越波量が多い場合、埋立砂内の地下水面は波作用直後、図-6.2に示すようにケーソン直背後でケーソン天端まで上昇しており、ケーソン背後134cmでも地下水面が3cm程度上昇している。裏込石の場合と違い、埋立砂は透水係数が小さいため、一旦このように上昇した地下水面はなかなか下がらなかった。なお、ケーソンには地下水面の上昇分の水圧が作用することになり、滑動に対して危険となることに留意する必要がある。

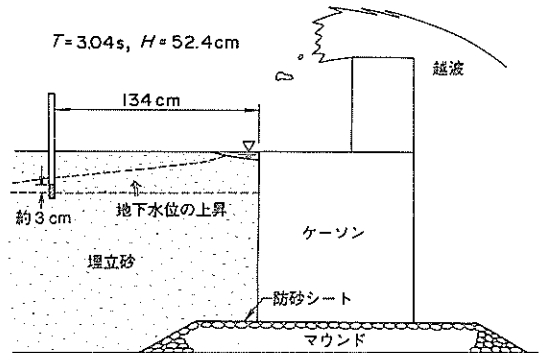
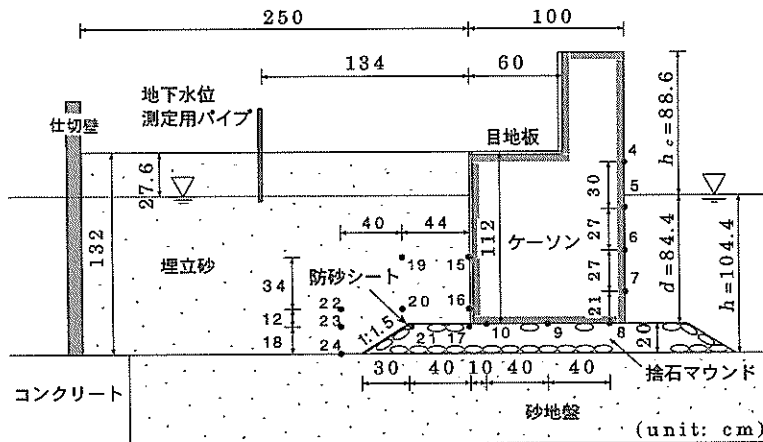


図-6.2 越波による地下水水位の上昇の状況

6.2 圧力の伝播

(1) 基準実験波の場合の圧力と流速



4~7: 波圧計 (ケーソン前面) 9~10: 波圧計 (揚圧力) 15~24: 間隙水圧計

図-6.1 実験断面 (裏込石が無い場合)

図-6.3は測定波形の一例であり、基準実験波の場合である。マウンド内での圧力の減衰はそれほど大きくないが、埋立砂内での減衰は著しい。マウンド内において、重複波の双峰型波形のうち第1ピークの減衰が認められる。またケーソン背後の埋立砂内ch15では、越波によって静水位が上昇している様子が認められる。なお、基準実験波の前に数ケースすでに実験を行っているため、埋立砂内では図-6.2のような地下水面の上昇がすでにあり、波を作用させた時点でも完全にもとの静水面まで地下水面は下がってはいなかった。したがって、圧力の測定はこの時点の圧力をゼロとして行っている。

図-6.4は基準実験波の場合の正負の圧力分布であり、この場合は目地部の隙間を完全に塞いでいる。マウンド

内の圧力は全体に大きくなっており、ケーソン背後に埋立砂があることでマウンド内の圧力が押し込まれていることが分かる。たとえば、ケーソン後端部では $0.78w_0H$ の圧力が発生しており、静水圧の上昇分を含めると $0.91w_0H$ とケーソン前面の波圧よりも大きい。一方、圧力が埋立部に達するとマウンドからの距離に従って大きく減衰している。また、埋立砂でのピーク値の位相は裏込石のある基本断面と比べるとかなり遅れていることに気づく。

なお、ケーソン直背後の埋立砂内 (ch15、16、17) の静水圧上昇分が大きく、越波による地下水面の上昇効果だけでなく、波の長周期成分の影響が大きいことにも留意する必要がある。

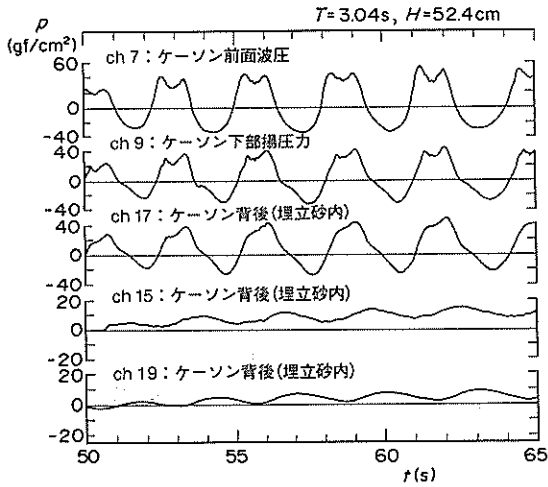


図-6.3 測定波形 (裏込石が無い場合)

(3) 波高・周期と圧力

図-6.5は各周期における波高と各測点の圧力との関係を示すものである。マウンドと埋立砂の境界にあるch21では前面の波圧の約0.8倍もの圧力が周期や波高に関わらず発生しており、それが埋立砂内で急激に減衰しているのがよく分かる。埋立砂内での圧力は、指数関数的に減衰していると考えると、その減衰係数 $k_2$ は、 $6.1\text{m}^{-1}$  ( $k_2/k_w=8.7$ ) 程度となり、図-2.7で透水係数を $10^{-6} \sim 10^{-7}\text{m/s}$ として計算した値となっている。

負の圧力を見ると、マウンド内では正の圧力と同様にあまり低減していない。これは、同じように密閉度が高く正の圧力の減衰が少ない完成時の標準断面や冠水がある場合と比べて大きく異なる点である。この場合は、埋立砂の高さが大きく、負の圧力の場合にも密閉度が高く、減衰しなかったと考えられる。

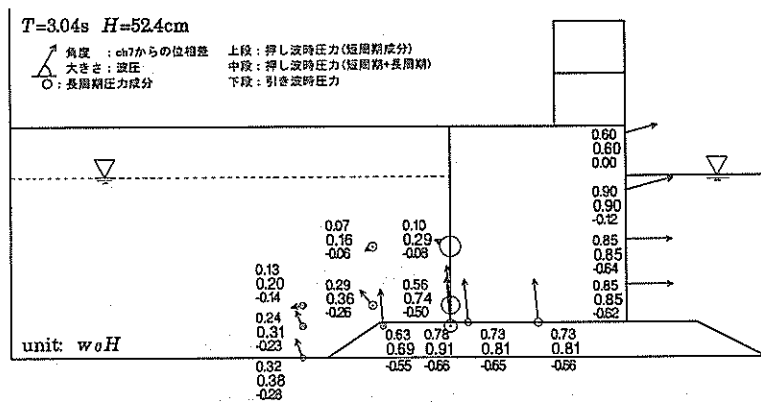


図-6.4 圧力分布 (裏込石が無い場合)

### 6.3 対策工法

#### (1) 実験断面

前節で述べたように裏込石を用いずに埋立砂を直接置いた断面では、マウンドと埋立砂の境界部に強大な圧力が作用する。また、目地部付近の埋立砂にも大きな圧力が作用する。従って、ここでは5.3で用いたケーソンに開口部を設ける方法による圧力緩和対策について実験した。ただし、実験ではケーソンの開口部の内部に砕石を投入した断面と投入しなくて水面のままの断面を検討し

ている。図-6.6は、開口部に砕石をいれない断面であり、開口部の幅が20cmである。開口部に砕石を入れた場合は、マウンドと同じ砕石を入れている。なお、この場合目地板は、開口部の前面側と背後側と二重となり、前面側が破損しても、埋立砂は直接流されない構造となっており、そうした意味においても対策工法となっている。

#### (2) ケーソン開口部に砕石が無い場合

図-6.7は、正負の圧力の分布図であり、基準実験波

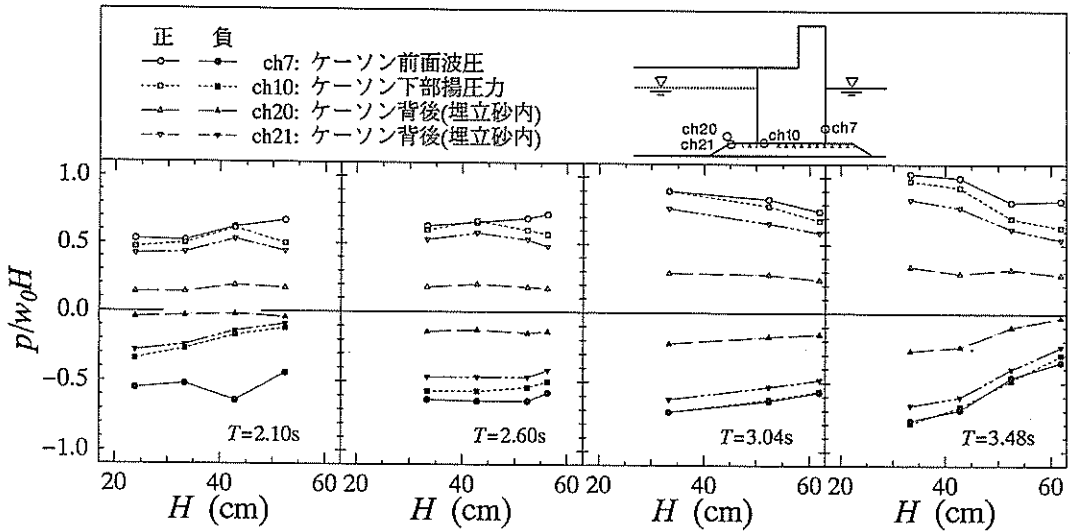
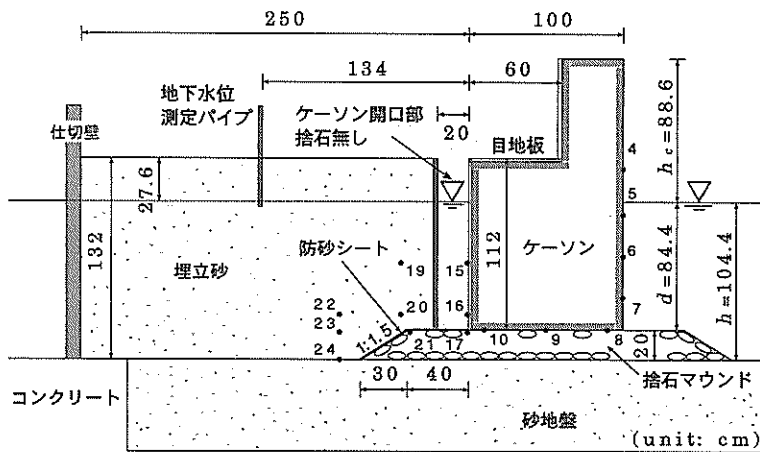


図-6.5 圧力のピーク値と波高および周期 (裏込石が無い場合)



4~7:波圧計(ケーソン前面) 9~10:波圧計(揚圧力) 15~24:間隙水圧計

図-6.6 実験断面 (ケーソンに開口部がある場合)

( $T=3.04s$ 、 $H=52.4cm$ ) の場合である。開口部があることによって、圧力が流れに変わり、マウンド内やケーソン開口部そして埋立砂内の正の圧力が著しく減少していることが分かる。マウンド内の正のピーク値の位相についてみても、減衰が大きい場合の特徴である、双峰型が正弦的になる現象のため $90^\circ$  ほどおけている。また、静水圧の上昇分は、圧力の短期変動成分に比して大きい。さらに、負のピーク値についてみても圧力の減衰は顕著である。

図-6.8は各周期における波高と代表測点での圧力との関係を示すものである。前掲図-6.5と比べても明ら

かにマウンド内や埋立砂内での圧力の減少は顕著であり、周期・波高に関わらず圧抜き開口部の効果が現れている。

(3) ケーソン開口部に碎石を充填した場合

図-6.9は、基準実験波における正負の圧力分布を示すものである。前掲図-6.7の碎石が充填されていない場合に比べマウンド内の圧力はかなり大きくなり、その結果マウンドとの境界部の埋立砂の圧力も大きくなっている。もちろん、開口部がない前掲図-6.4の場合に比べれば圧力は減少しているが、その程度は十分とはいえないようである。負のピーク値についてもほぼ同様であ

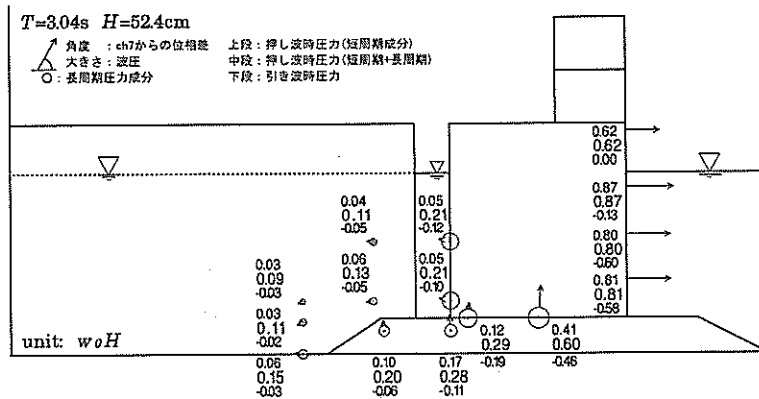


図-6.7 圧力分布 (ケーソンに開口部がある場合、碎石無し)

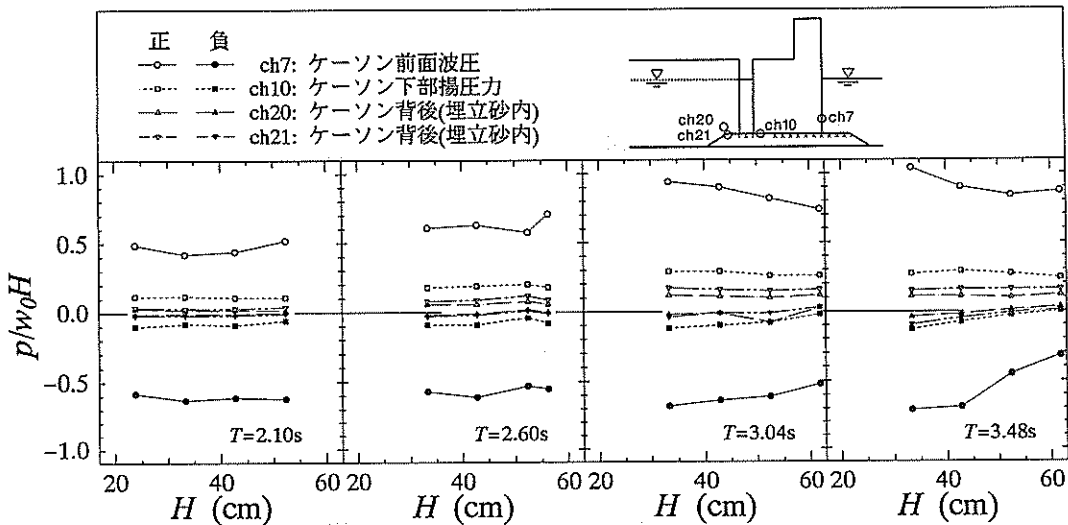


図-6.8 圧力のピーク値と波高および周期 (ケーソンに開口部がある場合、碎石無し)

る。

図-6.10は各周期における波高と代表測点の圧力との関係である。やはり、全体的に前掲図-6.8の砕石で充填していない場合より圧力は大きくなっており、特にマウンドと埋立砂の境界(ch21)では前面の波圧(ch7)の0.50~0.6倍程度になっている。

端上が解放されている場合についても示している。測定は目視であるため誤差が大きいと思われるが、砕石の有り無しに関わらず水面変位にはあまり変化がない。

いづれにしても、裏込石を用いない場合、圧力低減のために、ケーソンに圧抜き開口部を用いるのは有効な方法であり、このとき開口部を砕石で充填しない方がその効果が大きい。

(4) ケーソン開口部内の水位変動

図-6.11は、ケーソン開口部内における水面変位の関係で、ここを砕石で充填した場合と充填しなかった場合を示した。ただし、参考のために裏込石があってその天

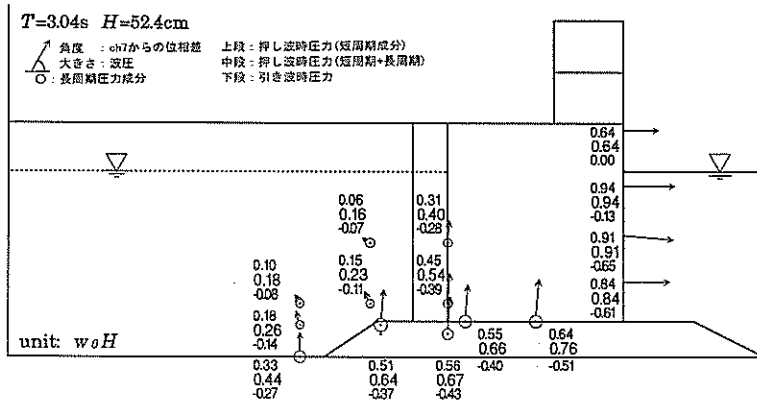


図-6.9 圧力分布 (ケーソンに開口部がある場合、砕石有り)

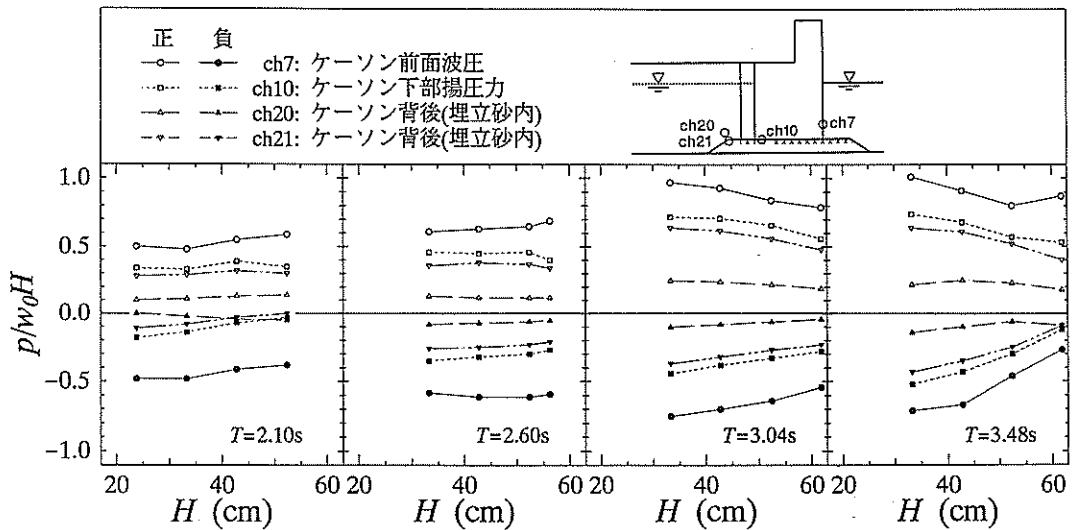


図-6.10 圧力のピーク値と波高および周期 (ケーソンに開口部がある場合、砕石無し)

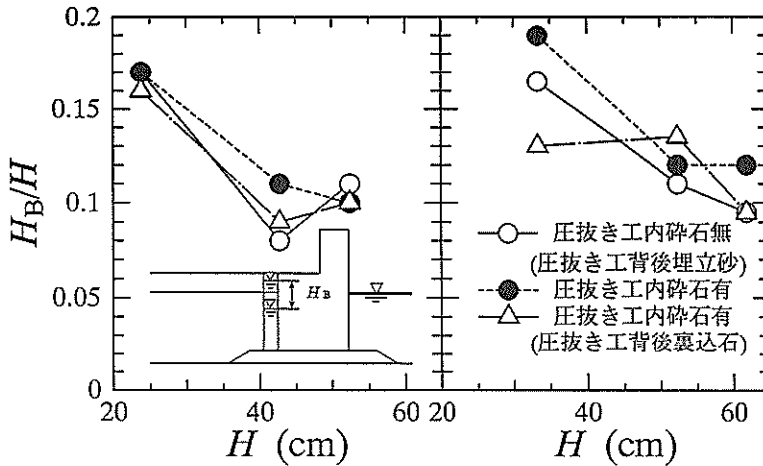


図-6.11 ケーソン開口部内における水面変動

#### 6.4 まとめ

第6章の主要な結論は以下のとおりである。

- 1) 裏込石が無く埋立砂が直接ケーソン背後に置かれる場合は、目地板が破損するとすぐ砂が吸い出されて危険である。また、越波や降水によって埋立砂の地下水位が容易に上がるため吸い出しだけでなくケーソンの安定性にも問題となる危険性がある。
- 2) マウンド内の圧力は裏込石がある場合より大きくなる。これは、埋立砂によって密閉度が高くなったためであり、ケーソンの前面での波圧の90%程度とかなり高くなる。ただし、埋立砂内の減衰は裏込石がある場合と同じように大きい。
- 3) ケーソン後部に開口部を設けると、圧力は大きく低減する。ただし、ここを碎石で充填すると圧力の低減効果はかなり小さくなる。

#### 7. 結論

防波護岸の水理模型実験を行い、吸い出しに関する主要な水理的現象について検討を行った。主要な結論は以下の通りである。

- 1) 防砂シートに穴がある場合には、波が作用するとマウンド透過波の押し波でシート付近の砂がゆるみ、その後の引き波で砂が吸い出され、空隙の大きい裏込石内の空隙に埋立砂が落下する様子が見られた。その結果、埋立砂内には空洞ができ、さらに空洞が大きくなると地盤の陥没になることが確かめられた。シートの破損部分が大きいと吸い出し量も大きくなるのはもち

ろんだが、特に静水面付近に破損がある場合に砂の流出が大きい。

一方、越波があって護岸背後が冠水するとより流出量が大きくなることも確かめられた。

- 2) ケーソン前面の波圧は容易にマウンドを透過して裏込石内に到達し、裏込石内には大きな圧力が発生する。マウンド透過波による裏込石内に発生する間隙水圧は意外に大きく、ケーソン前面波圧の70~80%にも及ぶ。さらに、越波によって護岸背後が冠水した場合には埋立砂の空隙が水で満たされて裏込部の密閉度が高くなり、ケーソン前面波圧とほとんど変わらない間隙水圧が裏込石内に発生することも判明した。
- 3) ボイリングによる埋立砂の破壊の発生が明らかになった。埋立砂の土被りが小さく、埋立天端に比して静水面の位置が高い場合、マウンド透過波による揚圧力により埋立砂が持ち上げられ、埋立砂がボイリング状態となり破壊する現象も見いだされた。これは今までのいくつかの大規模な護岸の被災の有力な原因の一つと考えられる。
- 4) 以上のようなマウンド透過波による強大な圧力を減衰させるため、裏込石を埋立地盤の天端まで延ばして圧力を解放すると、圧力が標準的断面の30%にまで減衰し、有効な圧抜き工法となることを確認した。
- 5) 目地板には、大きな衝撃的な波圧が働く危険性がある。この波圧は、目地内の波面が空気を閉じこめこれを衝撃的に圧縮して発生する。この波圧の大きさは、条件によって異なるが、 $2w_0H$ を越えることもある。しかし、この衝撃的な波圧は、減勢目地板を目地内に



- 設けることによってかなり低減することができる。減勢目地板が2本の場合1本より低減効果は大きい、その差は小さい。
- 6) 裏込石が無く埋立砂が直接ケーソン背後に置かれる場合は、目地板が破損するとすぐ砂が吸い出されて危険である。また、越波や降水によって埋立砂の地下水位が容易に上がるため吸い出しだけでなくケーソンの安定性についても問題となる危険性がある。また、マウンド内の圧力は裏込石がある場合より大きくなり、前面波圧の90%程度とかなり高くなる。
8. あとがき
- 以上のように護岸の吸い出しに関わる主要な水理現象がほぼ明らかとなった。吸い出し現象の解明には、こうした水理模型実験だけでなく、土質実験や材料実験、さらには現地調査など多くの調査研究が必要であり、総合的に検討することによって解明が進むことが期待される。実験にあたって、運輸省港湾局・第一港湾建設局の方々や運輸省航空局の方々のご指導とご援助を得ている。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。
- 7) 高橋重雄, 下迫健一郎, 山本 悟, 善 功企, 山崎浩之 (1994) : ケーソン式護岸背後の沈下災害に関する一実験, 海洋開発論文集, Vol.10, pp.201-206.
- 8) 高橋重雄 (1991) : 大水深・高波浪海域における新形式構造物の開発, 人工島施工技术, 土木学会, pp.13-20.
- 9) 谷本勝利 (1993) : 耐波設計技術 (護岸の構造と越波), 人工島, 土木学会誌, Vol.78-12.別冊, pp.67-70.
- 10) ダム設計基準, 日本大ダム会議 (1978)
- 11) 朴 佑善, 高橋重雄, 鈴木高二朗 (1995) : 防波護岸に関する数値計算, 護岸シンポジウム論文集, 港湾技術研究所.
- 12) 前野賀彦, 山本方人, 遠藤泰司 (1990) : 緩傾斜護岸裏込砂の吸出し機構, 海岸工学論文集, Vol.37, pp.499-503.
- 13) 門司剛至 (1980) : 埋立護岸における裏込め砂の浄化効果に関する実験的研究, 港研報告, 第19巻2号.
- 14) 山本督夫, 高橋重雄 (1985) : Wave damping by soilmotion, ASCE, WW, Vol. 111, No.1, pp.62-77.

#### 参考文献

- 1) Williams, A. F., Burcharth, H. F., den Adel H (1992) : The Permeability of rubble mound breakwaters. New measurements and new ideas, Proceedings of 23rd International Conference on Coastal Engineering, A,S,C, E, pp.1720-1733.
- 2) Engering, F.P.H. and Spierenburg (1992) : Com-puter model for water motion on and inside a rubble mound breakwater, Delft Geotechniques, 84p.
- 3) Brauns, J., Heibbaum, M. and Schuler, U (1993) : Filtersin Geotechnical and Hydraulic Engineering, A.A. Balkema, 403p.
- 4) 伊藤喜行, 竹田英章 (1967) : 栈橋に作用する波の揚圧力, 港研報告第6巻第4号, pp.37-68.
- 5) 善 功企 (1993) : 海底地盤の液状化に関する研究, 港研資料, No755, 112p.
- 6) 高橋重雄, 谷本勝利 (1984) : 直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力 (第2報) —現地観測データの解析—, 港研報告, 第23巻第2号, pp.3-25.

護岸の吸い出しに関する水理模型実験

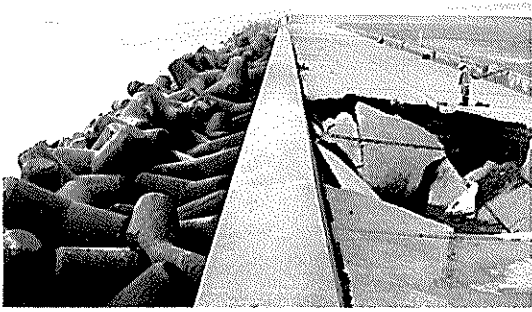


写真-1.1 護岸天端の陥没 (ケーソン式護岸)

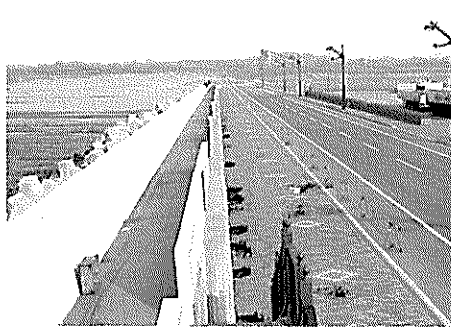


写真-1.2 護岸天端舗装板の陥没 (鋼矢板式護岸)

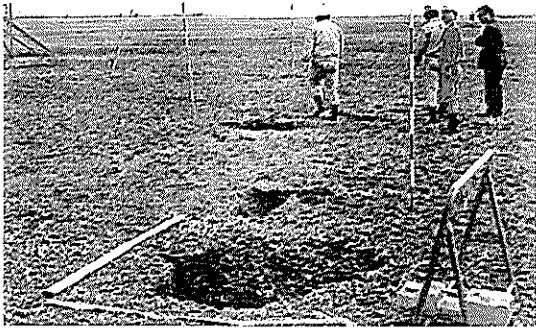


写真-1.3 施工時の埋立地の陥没

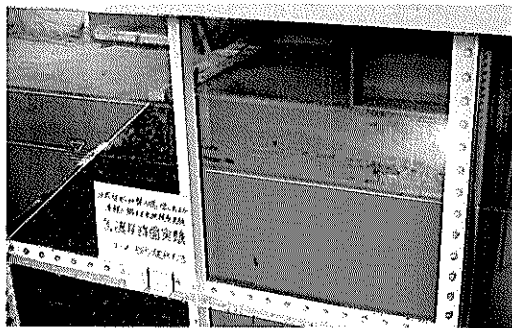


写真-3.1 水路に設置された護岸模型

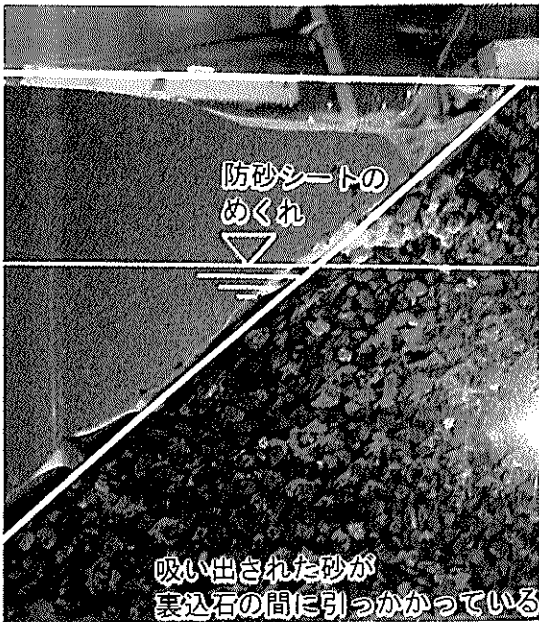


写真-3.2 波作用後の状況  
(防砂シートのめくれがある場合)



写真-3.3 防砂シートの穴からの砂の落下  
(1 cmの穴、冠水がある場合)



写真-3.4 防砂シートの穴からの砂の落下  
(1cmの穴、波高が大きい場合)

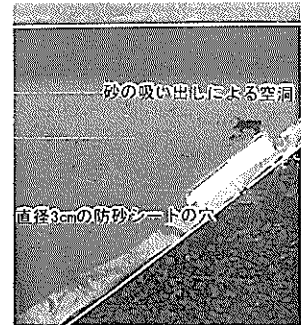


写真-3.5 防砂シートの穴の上の埋立砂にできた空洞  
(3cmの穴の場合)



写真-3.6 空洞の拡大とガラス面とシートの間のできた隙間 (3cmの穴の場合)



写真-3.7 防砂シートの穴付近の裏込石に溜まった砂  
(3cmの穴の場合)

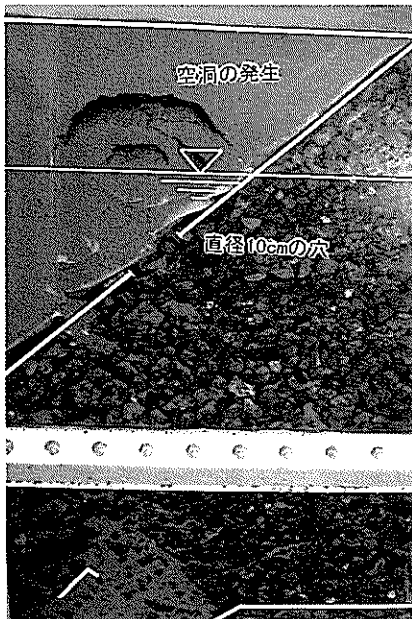


写真-3.8 防砂シートの穴の上のできた大きな空洞  
(波作用前、10cmの穴の場合)

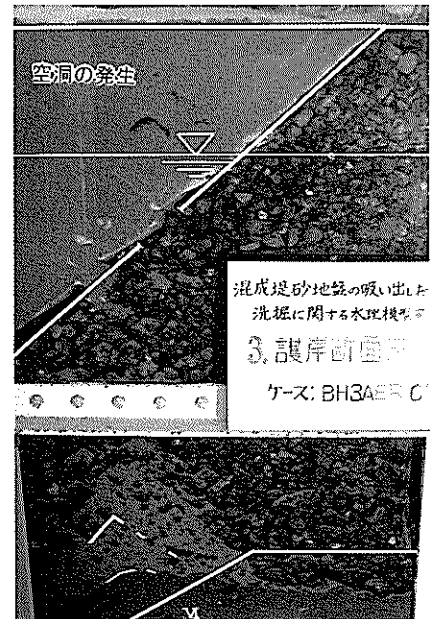


写真-3.9 防砂シートの穴に再びできた大きな空洞  
(波作用中、10cmの穴の場合)



写真-3.10 埋立地盤の沈下と裏込石内に溜まった砂 (10cmの穴の場合)

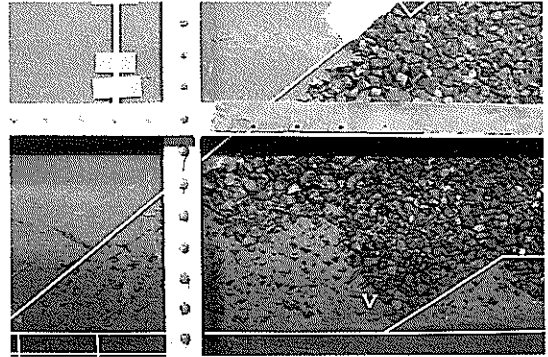


写真-3.11 防砂シートが無い部分からの砂の落下 (波作用前、静水面付近だけの防砂シートの場合)

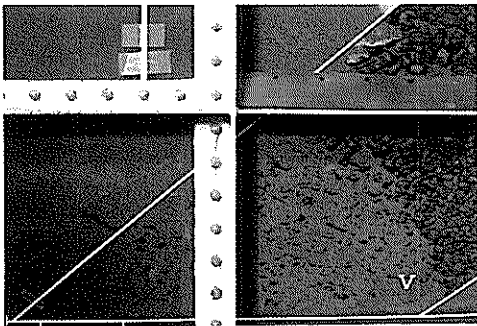


写真-3.12 裏込石内に溜まった砂 (波作用後、静水面付近だけの防砂シートの場合)

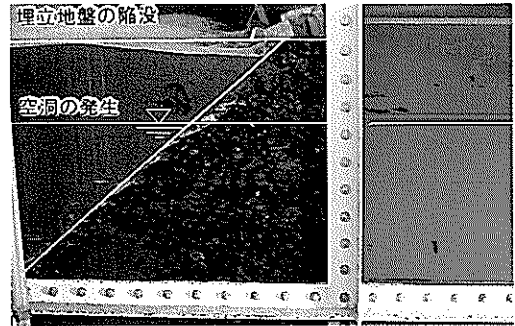


写真-3.13 静水面付近にできた空洞 (波作用後、防砂シート無しの場合)



写真-3.14 越波水による護岸天端の破壊と埋立砂の吸い出し (防砂シート無しの場合)

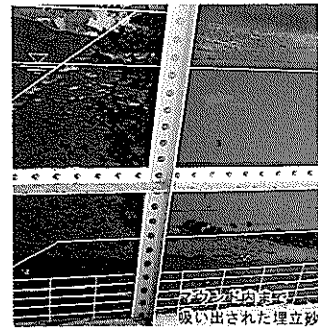


写真-3.15 裏込石とマウンド内まで吸い出された埋立砂 (防砂シート無しの場合)

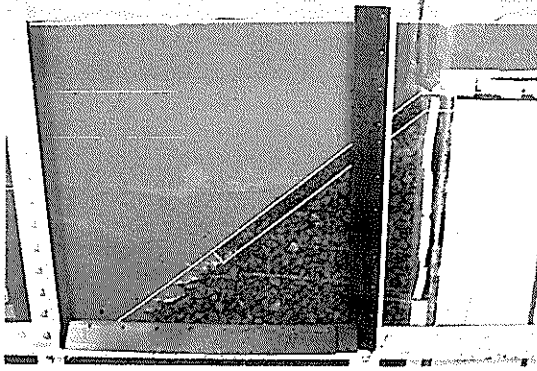


写真-3.16 フィルターによる吸い出しの防止  
(完成断面)



写真-3.17 越波とマウンド透過波の作用によりフィルター内に吸い出される埋立砂 (埋立時断面)

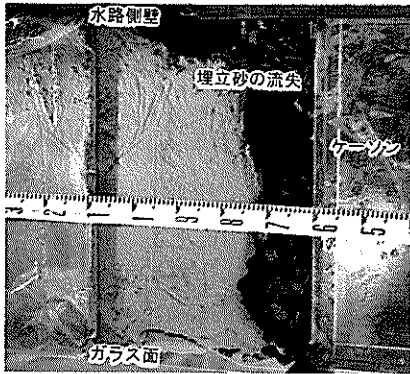


写真-3.18 舗装版下の埋立砂の流失

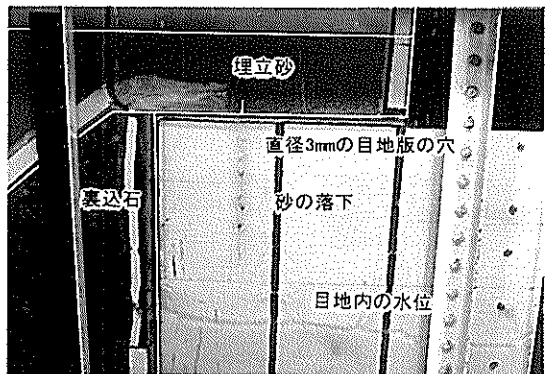


写真-3.19 上部目地板の隙間からの砂の落下



写真-3.20 目地板を切った場合の埋立砂の流失  
(舗装板下の砂が吸い出されている)

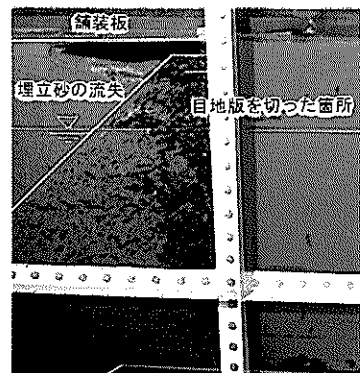


写真-4.1 目地板下部の捨石の洗掘

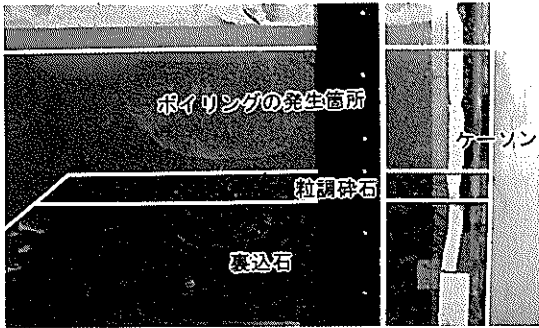


写真-4.2 ボイリングの発生状況（断面）

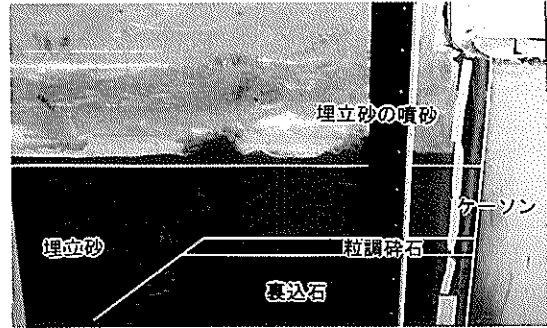


写真-4.3 ボイリングの発生状況（埋立天端面）

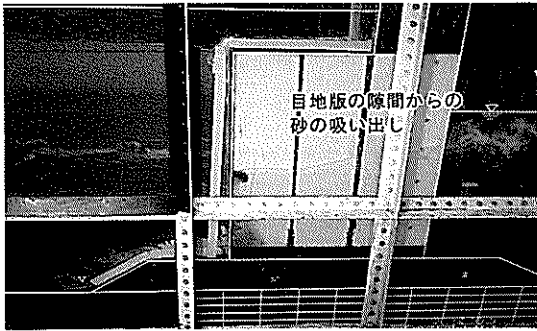


写真-6.1 目地板の隙間からの砂の落下

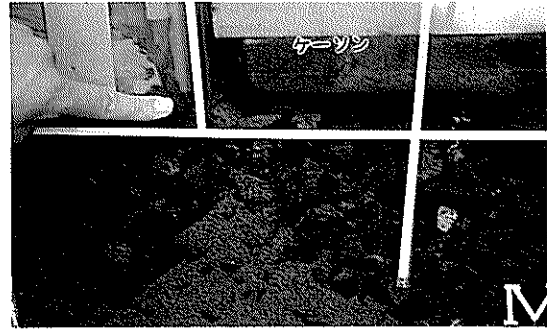


写真-6.2 マウンド内に堆積した砂



写真-6.3 埋立砂内の空洞

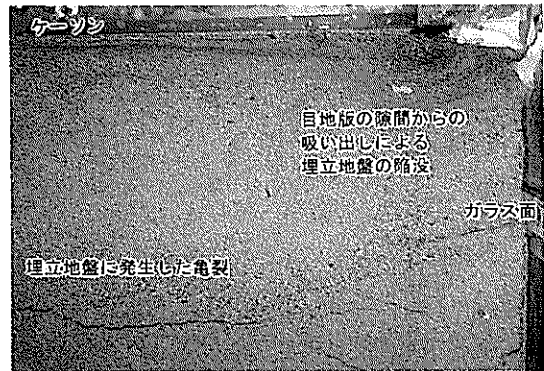


写真-6.4 埋立砂天端上に現れた亀裂