

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1251 March 2012

釜石湾口防波堤の津波による被災メカニズムの検討
—水理特性を中心とした第一報—

有川 太郎
佐藤 昌治
下迫健一郎
富田 孝史
辰巳 大介
廉 慶善
高橋 研也

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	4
1. はじめに	5
1.1 津波による防波堤の被災事例	5
(1) 被災形態の分類	5
(2) 被災状況	5
1.2 釜石湾口防波堤	6
(1) 概要	6
(2) 被災の様子	7
(3) 被災要因	8
1.3 本報告書の構成	9
2. 開口部周辺の被災メカニズムの検討	9
2.1 実験手法	9
(1) 模型断面	9
(2) 検定	10
(3) 再現実験における計測場所	11
(4) 実験条件	11
2.2 実験結果	11
(1) 滑動状況	11
(2) 波力	13
(3) 洗掘	13
2.3 まとめ	17
3. 堤幹部の被災メカニズムの検討	17
3.1 検討方法	17
3.2 摩擦検定試験	17
(1) 試験方法	17
(2) マウンド目地の洗掘が無い状態の結果	18
(3) マウンド目地の洗掘を設けた状態の結果	19
3.3 目地幅を様々組み合わせた水理模型試験	19
(1) 実験模型	19
(2) 計測方法	20
(3) 実験条件	20
(4) ケーソンの変位と波力	21
(5) 目地流速	24
(6) 目地における捨石の安定性	25
(7) 現地での目地流速と捨石安定性	25
(8) 考察	26
3.4 目地幅を狭くした水理模型試験	26
(1) 実験模型	26
(2) 計測方法	27

(3) 実験条件	27
(4) 目地流速	27
(5) ケーソンの変位と波力	27
(6) マウンドの状況	29
(7) 考察	32
3.5 目地幅を広くした水理模型試験	33
(1) 実験模型	33
(2) 計測方法	33
(3) 実験条件	33
(4) 目地流速	34
(5) ケーソンの変位と波力	34
(6) マウンドの状況	36
(7) 考察	40
3.6 数値シミュレーションを用いた水位差の検討	40
(1) 計算条件	40
(2) 計算結果	41
(3) 滑動安全率の検討	41
(4) マウンド洗掘について	42
(5) 考察	43
3.7 まとめ	43
4. 対策に対する検討	43
4.1 目的	43
4.2 実験方法	43
(1) 実験断面	43
(2) 計測方法	44
(3) 実験条件	44
(4) ケーソンの滑動と波力	45
4.3 越流対策	47
(1) 被覆ブロックの大型化	47
(2) 上部工の工夫による越流対策	48
4.4 腹付け効果の定量化	51
5. 結論	52
謝辞	52
参考文献	52

Investigation of the Failure Mechanism of Kamaishi Breakwaters due to Tsunami -Initial Report Focusing on Hydraulic Characteristics-

Taro ARIKAWA*, **Masaharu SATO****, **Ken-ichiro SHIMOSAKO*****, **Takashi TOMITA******,
Daisuke TATSUMI*****, **Gyeong-Seon YEOM******* and **Kenya TAKAHASHI*******

Synopsis

Many breakwaters were damaged by the March 11, 2011 Tohoku Earthquake off the Pacific coast. The majority of the breakwaters were destroyed or deformed under tsunami overflow; however, the failure mechanism under tsunami overflow is not clear. It is supposed that caissons slid from the mound under tsunami overflow from video analysis of Kamaishi breakwaters, of which about half were damaged. Therefore, with the main objective of this report being to clarify the stability of breakwaters under tsunami overflow, hydraulic model experiments were conducted with Kamaishi Bay as the subject, and disaster mechanisms of the head and trunk of the breakwaters as well as the countermeasures were examined. The following are the main results.

- Failure mechanism of the mouth of the port

At the mouth of the port, submerged breakwaters are washed away by the primary positive waves, exposing the counterweight. Then, it is thought that scouring, especially near the head of breakwaters is caused by outgoing flow, and finally, the head of breakwater is caused to tilt.

- Failure mechanism of the trunk of breakwaters

The experimental results have shown that negative pressure on the backside of the caissons under tsunami overflow, rather than the difference of pressure due to the water level difference between the sea side and harbor side, caused the horizontal force on the caissons to increase. This experiment made clear that in this tsunami, the ratio of increase is about 10% of the pressure of water level difference. In addition, it indicates that the dispersion of sliding resistance force of the rubble mound and the negative pressure on the backside make the difference of damage level of breakwaters.

- Countermeasures

This experiment showed that installing the counterweight behind the caisson is an effective method to increase the sliding stability, but protection from scouring due to overflow is still necessary.

Keyword: Tsunami breakwaters, Tsunami, Sliding, Overflow, Countermeasure

* Research Director, Coastal and Ocean Engineering Field
** Researcher, Maritime Structures Group, Coastal and Ocean Engineering Field
*** Director, Coastal and Ocean Engineering Field
**** Research Director, Asia-Pacific Center for Coastal Disaster Research
***** Researcher, Marine Environmental Division, Coastal and Marine Department
National Institute for Land and Infrastructure Management
***** Researcher, Asia-Pacific Center for Coastal Disaster Research
***** Research Trainee, Asia-Pacific Center for Coastal Disaster Research
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan Port and Airport Research Institute
Phone : +81-46-844-5043 Fax : +81-46-842-7846 e-mail:arikawa@pari.go.jp

釜石湾口防波堤の津波による被災メカニズムの検討 —水理特性を中心とした第一報—

有川太郎*・佐藤昌治**・下迫健一郎***・富田孝史****・
辰巳大介*****・廉慶善*****・高橋研也*****

要 旨

2011年3月11日に生じた東北地方太平洋沖地震津波によって多くの防波堤が被災したが、その大半は、津波越流時に破壊・変形したが、一方で、防波堤における津波越流時の安定性は、これまで研究されておらず、そのメカニズムは明らかではない。約半分のケーソンがマウンドから滑落した釜石防波堤では、ビデオ解析から津波越流時にケーソンが滑落したと推測されている。そこで、本研究では、主に津波越流時の防波堤の安定性を検討することを目的として、釜石の湾口防波堤を対象とした水理模型実験を行い、堤頭部ならびに堤幹部の被災メカニズムおよび対策工について検討した。その結果を以下に示す。

○開口部周辺の被災メカニズム

開口部に生じる押波時の強い流れによって、開口部の潜堤が滑落し、捨石部が露出した。そのため、引波時における流れによって特に堤頭部周辺のマウンドが洗掘され、堤頭部が傾斜するという被災が生じたと考えられる。

○堤幹部の被災メカニズム

ケーソンに生じる水平力は、越流により背面に負圧が生じることで、港内外の水位による圧力差よりも増大することがわかった。その増大率は、今回の津波では、水位差による水平力の10%程度であることが実験から明らかになった。また、基礎マウンドの滑動抵抗力や背面の負圧のばらつきによって、ケーソンの被災の状態にばらつきが生じることもわかった。

○対策工法

ケーソン背面に捨石を設置する腹付け工法は、滑動安定性を向上させる方法として有効であることがわかった。ただし越流による洗掘対策が必要である。

キーワード：湾口防波堤，津波，滑動，越流，対策

* 海洋研究領域 上席研究官（耐波設計担当）
** 海洋研究領域耐波研究チーム 研究官
*** 海洋研究領域長
**** アジア・太平洋沿岸防災研究センター 上席研究官
***** 国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部海洋環境研究室 研究官
***** アジア・太平洋沿岸防災研究センター 研究官
***** アジア・太平洋沿岸防災研究センター 依頼研修生
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5043 Fax：046-842-7846 e-mail:arikawa@pari.go.jp

1. はじめに

1.1. 津波による防波堤の被災事例

(1) 被災形態の分類

2011年3月11日に生じた東北地方太平洋沖地震津波によって多くの防波堤が被災した。その被災事例は、東北港湾における津波・震災対策技術検討委員会(委員長、高山知司)における資料でまとめられており、定性的には、津波波力型、越流洗掘型、堤頭部洗掘型、引波水位差型の4つに分類された。

津波波力型は、津波の水平力が、主たる要因となって滑動する被災タイプであり、図-1.1に示す通りである。水平力としては、波としての波力、段波津波力だけでなく、港外・港内側の水位差によって生じる水平力もある。

越流洗掘型は、津波が防波堤を越流することによりケーソン背後が洗掘され、ケーソンが転倒する被災タイプであり、図-1.2に示されるようなものである。

堤頭部洗掘型は、主に堤頭部で生じる現象であり、マウンド部が流れによって洗掘を受け、ケーソンが傾倒する被災タイプである。

引波水位差型は、引波時における港内水位と港外水位の差によって、ケーソンが被災するタイプである。特に防波堤背後の面積が狭い場合、押波時においては、港内水位がすぐに上昇することで、港外・港内水位差が大きくなりやすいが、引波時において、港内側に水がたまっていた一方で港外水位が引いていくと、港内水位が港外水位よりも高くなる状況が発生する場合がある。津波波力型とは逆方向の現象となる。

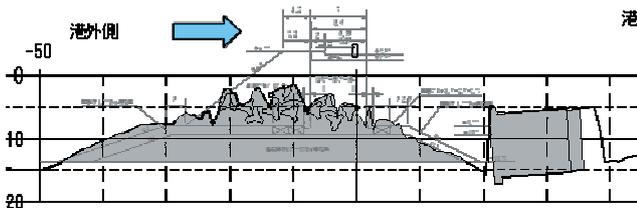


図-1.1 津波波力型の事例(八戸港八太郎防波堤(ハネ部))(東北地方整備局提供)

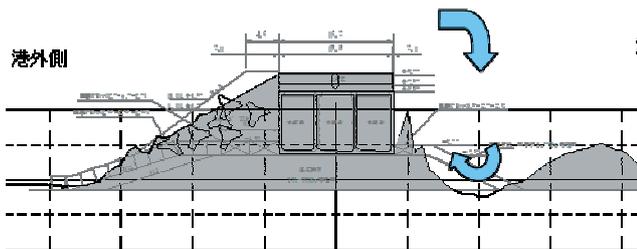


図-1.2 越流洗掘型の事例(八戸港八太郎防波堤(中央部))(東北地方整備局提供)

(2) 被災状況

表-1.1に被災した防波堤の事例と、そのときの津波高、被災状況ならびに推定される被災形態の分類を示す。津波波力型とされる被災事例が半分程度を占めていることがわかる。津波波力型の多くは、港外・港内水位差によるものであると推定されているが、今後詳細に調査する必要がある。

表-1.1 防波堤の被災状況(東北地方整備局提供)

港名	地区	施設名	主な被災状況	津波高(m)	被災形態
八戸	八太郎	北/基部	消波ブロック移動	6.2	越流洗掘
	八太郎	北/中央部	港内マウンド洗掘	6.2	越流洗掘
	八太郎	北/ハネ部	滑動	6.2	津波波力
	外港	中央	暫定堤頭部が洗掘・倒壊	6.2	堤頭部洗掘
	外港	第二中央/先端部	暫定堤頭部が洗掘・倒壊	6.2	堤頭部洗掘
	外港	第二中央/中央部	被覆ブロック・割石の散乱	6.2	越流洗掘
久慈	半崎	波除堤	滑動、倒壊	8.5	津波波力
	湾口	南・北堤	洗掘	—	堤頭部洗掘
	出崎	出崎	滑動、倒壊	8.5	津波波力
宮古	竜神崎		堤頭部が洗掘・倒壊	7.5	堤頭部洗掘
	藤原	藤原	堤頭部が洗掘・倒壊	8.5	堤頭部洗掘
	藤原	(Ⅱ)	堤頭部が洗掘・倒壊	8.5	堤頭部洗掘
	藤原	宮古木材港南	ケーソン等滑動、滑落	8.5	津波波力
	藤原	宮古木材港北	地殻変動による沈下	—	—
	神林	神林北	ケーソン等滑動、滑落	8.5	津波波力
	藤原	藤原埠頭船溜	ケーソン等滑動、滑落	8.5	津波波力
	藤原	第1波除堤	地殻変動による沈下	—	—
釜石	藤原	第2波除堤	ケーソン等滑動、滑落	8.5	津波波力
	湾口	湾口/南	ケーソン等滑動、滑落	12.34	津波波力
	湾口	湾口/北	ケーソン等滑動、滑落	13.64	津波波力
	湾口	開口部	ケーソン等滑動、滑落	—	津波波力
大船渡	湾口	南、北	ケーソン等滑動、滑落	10.28	津波波力
	湾口	開口部	鋼セル滑動、滑落	10.28	津波波力
相馬	本港	沖	ケーソン等滑動、滑落	14.38	津波波力
女川			ケーソン等滑動、滑落	12.88	引波水位差

図-1.3、図-1.4に大船渡港の防波堤の被災状況を示す。多くは、港内側に滑落している。一方で、基礎部のマウンドは大きく削られており、港内側よりむしろ港外側に広がっていることがわかる。また、港外側に移動しているケーソンも3箇所あり、引波時においても強い流れが生じていたことが推測される。よって、ここでは、押波の水平力によって流されるとともに、引波時においても、相当な力を受けていたと考えられる。

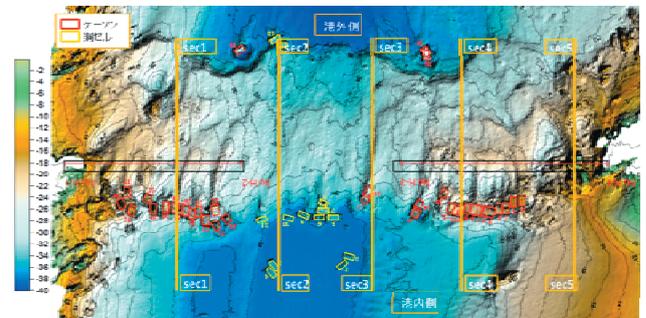


図-1.3 大船渡湾口防波堤 被災状況図(ナローマルチ測量結果)(東北地方整備局提供)

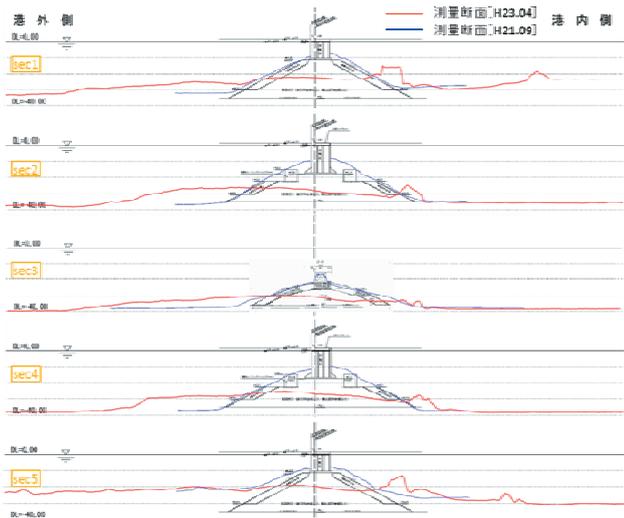


図- 1.4 大船渡湾口防波堤被災状況断面図(東北地方整備局提供)

写真- 1.1 は、相馬港の被災状況の全景写真である。沖側にある防波堤の半分程度が被災を受けていることがわかる。写真- 1.2 は、堤頭部付近のケーソンの様子である。堤頭部は軽微な被害であるが、残りのケーソンは傾斜もしくは滑落していた。図- 1.5 は、被災状況の断面図である。ケーソンが滑落していることがわかる。No.126 の断面では、越流洗掘が生じていた可能性があることもうかがえる。



写真- 1.1 相馬港全景(被災後、東北地方整備局撮影)



写真- 1.2 相馬港堤頭部付近(東北地方整備局撮影)

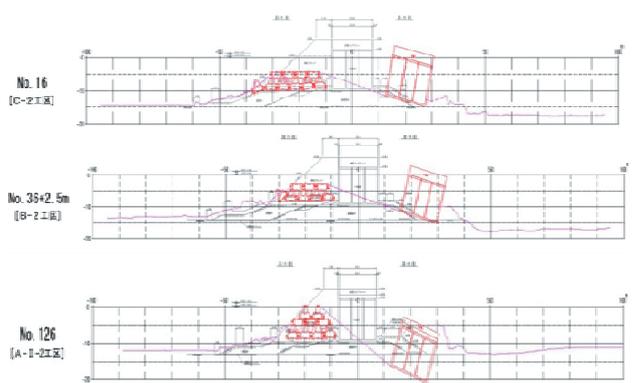


図- 1.5 相馬港沖防波堤被災状況断面図(東北地方整備局提供)

1.2. 釜石湾口防波堤

(1) 概要

釜石湾口防波堤は、写真- 1.3 で示す通り、北堤 990m、南堤 670m、開口部 330m で構成される防波堤であり、水深はもっとも深くて 63m ある。

南堤は、堤頭部から 3 函が台形型のケーソンであり、残りの部分は図- 1.6 に示す矩形型のケーソンとなる。天端高さは、D.L.+6.0m であり、水深-55m から-22m までが基礎マウンドで構成されている。北堤は、深部においてはほとんどが、図- 1.7(1)に示される台形型のケーソンであり、-60m から-27m までが基礎マウンドで構成されている。また、-30m 程度の深部においては、南堤と同じ矩形型のケーソンとなる。浅部においても、(3)に示すとおり矩形型であるが、ケーソンの高さも 10m から 15m 程度である。

開口部においては、図- 1.8～図- 1.10 に示すとおり、潜堤を設置し、開口部の水深を D.L.-19.0m とし、周囲に被覆ブロックを入れた構造となっている。

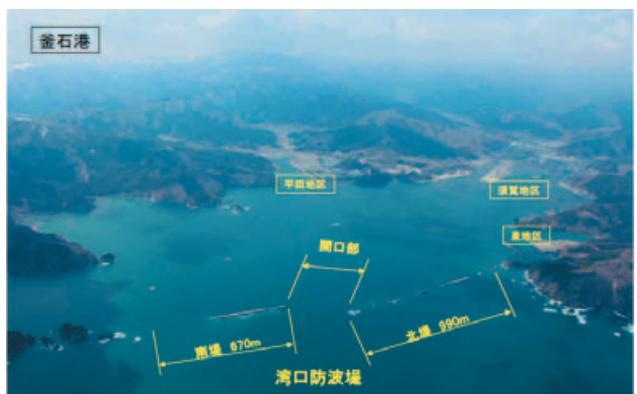


写真- 1.3 釜石湾口防波堤の様子(東北地方整備局撮影)

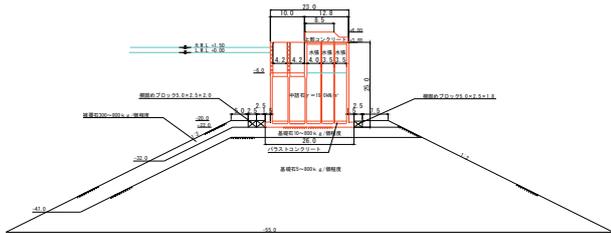
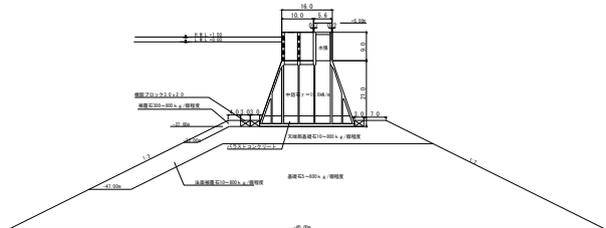
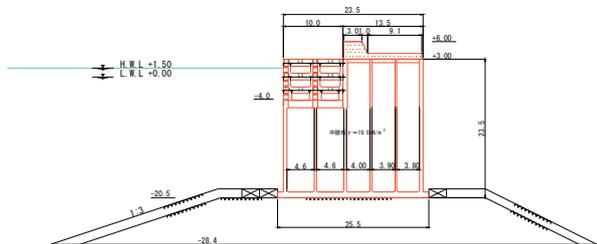


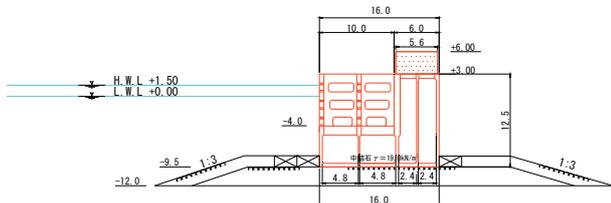
図- 1.6 現地防波堤標準断面図(南堤深部3区)



(1) 深部3区



(2) 深部1-2区



(3) 浅部1-2区

図- 1.7 現地防波堤標準断面図(北堤)

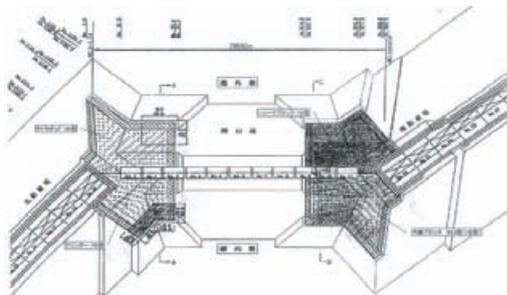


図- 1.8 開口部の平面配置

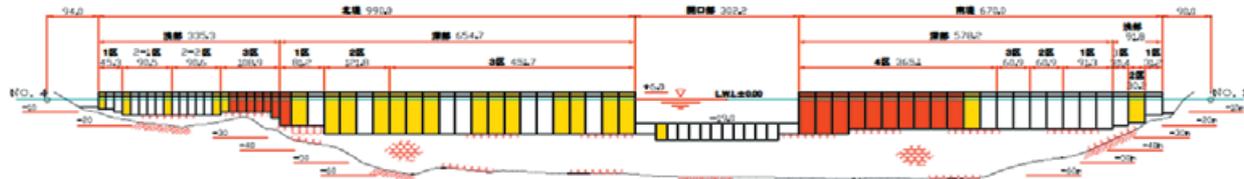


図- 1.11 ケーソンの被災状況 (赤：無被害, 黄：傾斜, 白：滑落)

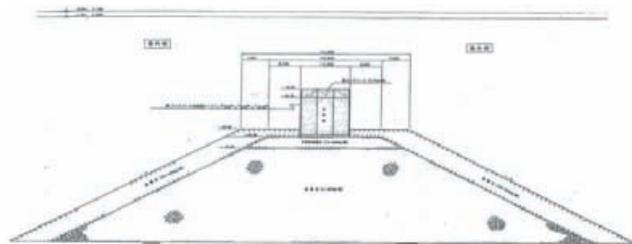
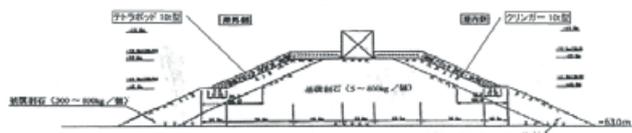
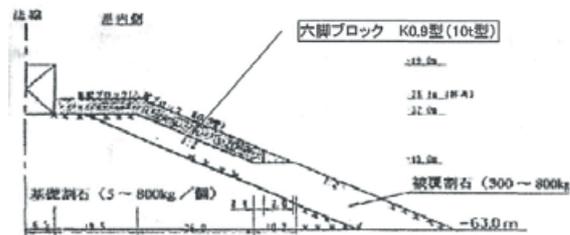


図- 1.9 潜堤部の断面図



(1) A-A 断面



(2) B-B 断面



(3) C-C 断面

図- 1.10 マウンド被覆材の断面図

(2) 被災の様子

東北地方整備局で調査した結果における滑动および傾斜したケーソンを図- 1.11 に示す。

北堤では、深部22函のうち、7函が滑落し、14函が傾斜、1函が無被害であった。また、図面を見るとわかるが、歯抜けのような状態で滑落した。浅部においては、22函のうち11函が抜け、5函が傾斜し、6函が無被害となった。無被害であった6函のうち5函には摩擦増大マットが敷設されていた。

開口部では、13 函の潜堤のうち 1 函を残してすべて滑落していた。南堤では、深部 19 函のうち、8 函が滑落、1 函が傾斜、10 函が無被害であり、浅部は 2 函が滑落し、1 函が傾斜していた。

図- 1.12 に防波堤全体の被災状況を、図- 1.13 にはケーソンの詳細な滑動状況を示す。北堤については、滑動後転倒せずそのまま滑落しているものが見られ、一方で、南堤では、残存しているケーソンに近い方は滑動後転倒しているように見える。

総じて、浅部は摩擦増大されていない場所では、滑落もしくは傾斜し、一方で深部では、半分程度が滑落し、北堤においては、残ったものも傾斜するという被害となっていた。

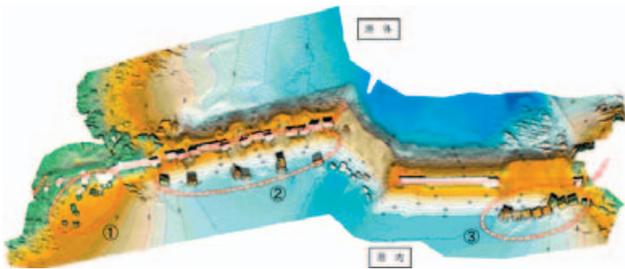
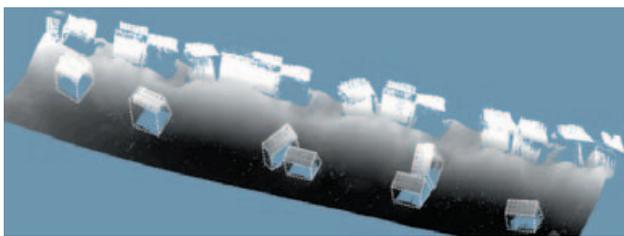


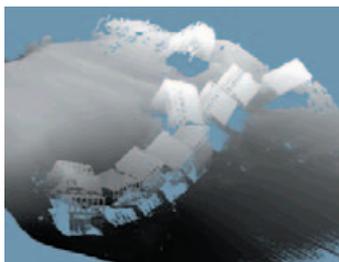
図- 1.12 被災状況図(ナローマルチ測量結果)



(1) 北堤浅部(図- 1.12①)



(2) 北堤深部(図- 1.12②)



(3) 南堤(図- 1.12③)

図- 1.13 ケーソンの被災状況

図- 1.14 および図- 1.15 は、被災後と被災前の断面の差である。北堤ではマウンドが 5m から 10m 程度掘られていることがわかる。北堤、南堤ともに、港内側のマウンドの法尻部に大きな変化はなく、ケーソンがマウンドを滑っていった様子がわかる。図- 1.16 に北堤の被災状況の拡大図を示す。ほぼ、マウンドの下部まで滑落していることがわかる。

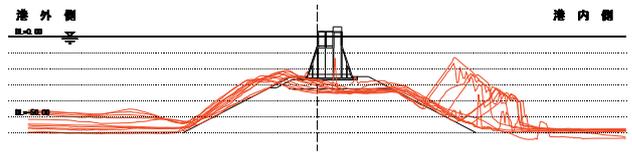


図- 1.14 北堤深部 3 区の防波堤被災断面状況

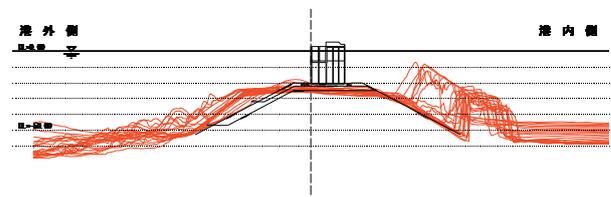


図- 1.15 南堤深部 1 ~ 3 区の防波堤被災断面状況

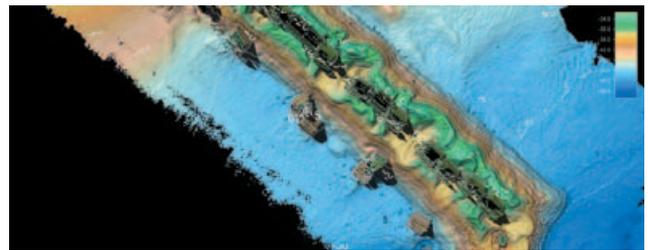


図- 1.16 北堤の被災拡大図

(3) 被災要因

防波堤の津波による被災の要因は、大きく 4 つ考えられる。津波による水平力、マウンドの洗掘による下部の不安定性の増大、マウンドの支持力の破壊そして基礎地盤の洗掘である(図- 1.17)。釜石では基礎地盤が洗掘を受けた様子が見受けられないため、津波力、マウンド洗掘およびマウンド破壊が被災の主たる要因として考えられる。そこで、本研究では、水理模型実験により、要因を定量的に評価し、被災メカニズムを検証する。

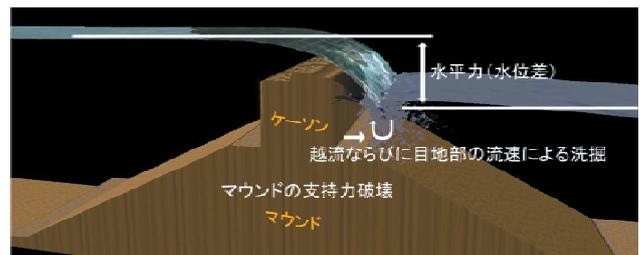


図- 1.17 主な被災要因

1.3. 本報告書の構成

本報告書では、大きく分けると3つの構成で成り立つ。1つ目は堤頭部の被災メカニズムの検討(第2章), 2つ目は堤幹部の被災メカニズムの検討(第3章), そして最後が対策についての検討(第4章)である。

それぞれについて、水理模型実験を実施する。津波条件としては、数値シミュレーションによる結果を使用した。数値シミュレーションはSTOCを用いた検討であり、詳細は高橋ら(2011)に詳しい。水理模型実験は、縮尺1/60とし、幅10m、長さ50m、標準水深1.8mの総合沿岸防災施設を用いている。ここでは、循環流を発生させることにより、実際の津波の開口部の流れや、防波堤の越流状況を再現し、検証することとした。

2. 開口部周辺の被災メカニズムの検討

2.1. 実験手法

(1) 模型断面

模型縮尺1/60として、図-2.1のように開口部を中心として、北堤・南堤を堤頭部より150mずつ入れる形で模型を設置した。本実験で用いた断面を図-2.2に示す。それぞれにはスリット部があるが、その部分は、津波力の低減に寄与しないとして、本実験においては製作しなかった。また、南堤深部4区の台形ケーソンは、北堤深部3区台形ケーソンと同じ断面である。設置した堤体模型の諸元は、表-2.1に示す。潜堤模型の目地幅は2mm(現地換算量12cm)とした。防波堤模型の目地幅は10mm(現地換算量60cm)である。

北堤と南堤の堤頭部周辺に消波ブロック2層積みによるマウンド被覆を行った。図-2.3には、平面的な配置を示し、また表-2.2にそのときの被覆ブロックの大きさと種類を現地と比較したものを示す。ここでは、縮尺に相当すると考えられるブロックを使用し、種類は影響しないと考え、大きさをあわせることで代用したものもある。

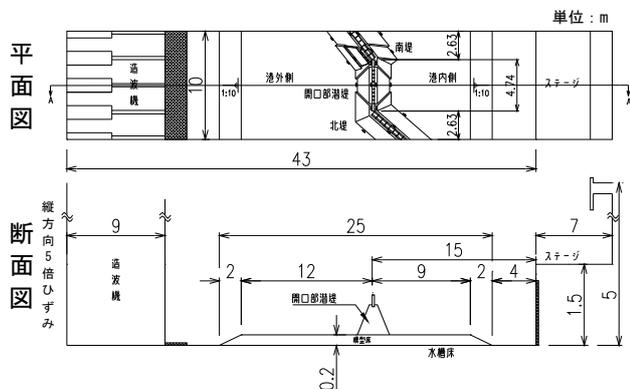
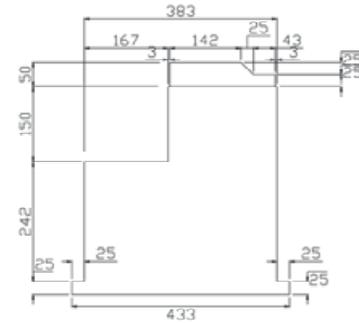
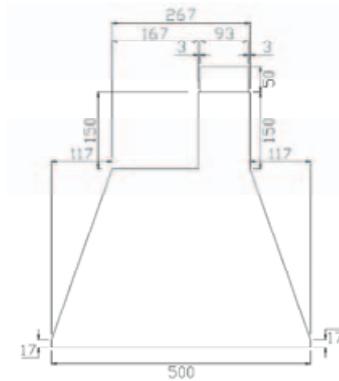


図-2.1 実験模型断面



(1) 南堤深部4区標準函



(2) 北堤深部3区台形ケーソン

図-2.2 実験模型の形状と寸法(単位:mm)

表-2.1 堤体模型の諸元(数値は模型量)

施設	断面	図-2.9の番号	堤体諸元			
			質量(kg)	長さ(m)	高さ(m)	幅(m)
南堤	深部4区標準函_2	S-5	145.1	0.5		
	深部4区標準函_1	S-4	144.8	0.5		
	深部4区台形函_3	S-3	185.0	0.5		
	深部4区台形函_2	S-2	185.4	0.5		
	深部4区台形函_1	S-1	184.5	0.5		
潜堤	端部南	C-12	41.1	0.667	0.133	0.217
	標準函_1	C-11	31.8	0.333	0.217	0.217
	標準函_2	C-10	31.7	0.333	0.217	0.217
	標準函_3	C-9	32.2	0.333	0.217	0.217
	標準函_4	C-8	32.0	0.333	0.217	0.217
	標準函_5	C-7	31.7	0.333	0.217	0.217
	標準函_6	C-6	32.5	0.333	0.217	0.217
	標準函_7	C-5	31.9	0.333	0.217	0.217
	標準函_8	C-4	32.2	0.333	0.217	0.217
	標準函_9	C-3	32.1	0.333	0.217	0.217
北堤	端部北	C-1	41.1	0.667	0.133	0.217
	深部3区_1	N-1	183.7	0.5		
	深部3区_2	N-2	184.3	0.5		
	深部3区_3	N-3	184.6	0.5		
	深部3区_4	N-4	185.8	0.5		
深部3区_5	N-5	184.0	0.5			

表-2.2 堤頭部における被覆ブロック

現地	模型
テトラポッド10t型	テトラポッド高さ41mm
クリンガー10t型	クリンガー高さ40mm
シェークブロック10t型	ホールブロック高さ41mm
六脚ブロックK0.9型	六脚ブロック高さ43mm

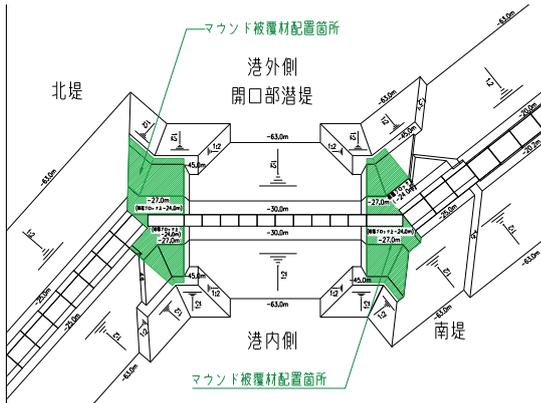


図-2.3 防波堤堤頭部のマウンド被覆材の配置

(2) 検定

ここでは、流れ発生装置を用いて流速を与えるため、流れ発生装置のポンプ出力と、開口部で生じる流速との関係を調べなければならない。そこで、検定を行った。ポンプの定格は 142m³/分であり、2 台設置されている。

検定では、図-2.4 に示すように計測器を配置した。水位は図中の WG1, WG2, WG3 の 3 地点で計測した。WG1 は潜堤法線の沖側 7m(模型量)地点、WG2 は潜堤の天端上、WG3 は潜堤法線の岸側 7m 地点である。

流速は電磁流速計を用いて、図中の V1, V2, V3 の 3 地点で平面 2 成分を計測した。3 地点とも潜堤の天端上であり、計測高さは潜堤の天端から上に 5cm である。

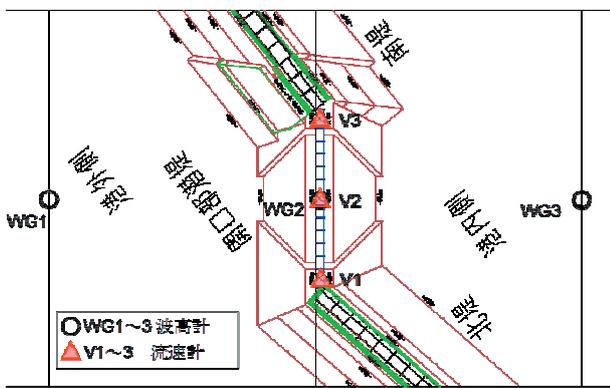


図-2.4 検定時における計測器の配置

初期水位として潜堤天端上の水深を 0.38m(現地換算で 22.8m)とし、流れの向き及び循環流ポンプの出力を、順流 20%、逆流 20%、順流 40%、逆流 40%、順流 60%、逆流 60%、順流 80%、逆流 80%の順で作用させた。なお、順流は押波流れ(東から西)、逆流は引波流れ(西から東)の向きとなる。また、東西方向を x 方向(東から西をプラス)、南北方向を y 方向(北から南をプラス)とする。流れの作用時間は、押波流れは 120s、引波流れは 150s とした。なお、循環流ポンプを駆動した後は流速が徐々

に大きくなるので、流速が安定するのは駆動開始の約 60s 後であった。表- 2.3 に計測時間の代表値の平均値を示す。代表値の解析区間は、順流:計測開始 70s~130s(60s 間)、逆流:計測開始 70s~160s(90s 間)とした。この解析区間は、ポンプによる流れ安定後から流れの継続時間内で設定した。なお、順流 60%以降は潜堤部が滑動したため、滑動後の解析結果となる。合成流速の符号は東西方向に合わせた。図-2.5 にその結果をグラフ化したものを示す。北堤堤頭部の流速(V1)は順流時に、南堤堤頭部の流速(V3)は逆流時に、それぞれ防波堤の延長方向(南北方向)の流速が大きくなる特徴があり、これは谷本ら(1988)の結果とも一致する。

表-2.3 代表値の解析結果

流 出 力	水位 (cm)			流速 (成分別) (cm/s)						合成流速 (cm/s)		
	WG1	WG2	WG3	V1x	V1y	V2x	V2y	V3x	V3y	V1	V2	V3
20	0.3	-0.5	-1.6	45.8	22.7	14.7	-6.3	56.0	-8.1	51.1	16.0	56.6
40	1.2	-1.5	-5.3	91.4	43.6	88.0	-8.0	125.2	-23.6	101.3	88.4	127.4
60	1.6	-1.9	-6.7	97.5	48.7	103.1	-4.1	114.5	-30.2	109.0	103.2	118.4
80	2.7	-3.3	-13.0	119.6	69.6	141.5	-4.5	147.8	-33.8	138.4	141.6	151.6
20	-0.3	-0.5	1.1	-55.2	13.1	-23.0	2.5	-45.6	-14.4	-56.7	-23.1	-47.8
40	-1.4	-0.7	4.5	-94.2	25.6	-51.7	-7.5	-68.7	-32.0	-97.6	-52.2	-75.8
60	-1.9	-0.4	5.3	-96.8	39.6	-110.5	3.7	-80.4	-53.7	-104.6	-110.6	-96.7
80	-3.4	-0.6	7.8	-117.6	44.4	-131.4	3.8	-91.9	-81.7	-125.7	-131.5	-123.0

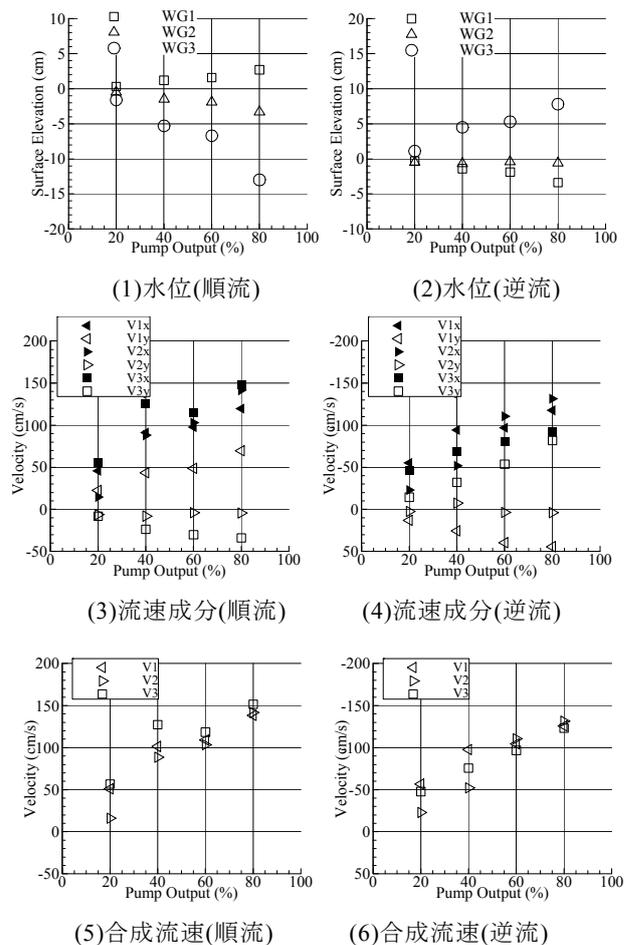


図-2.5 ポンプの出力と水位、流速の関係

(3) 再現実験における計測場所

次に現地における津波来襲時の再現実験を行った。水位、流速、波圧(圧力)の計測を行い、計測地点は図-2.6に示すとおりとした。

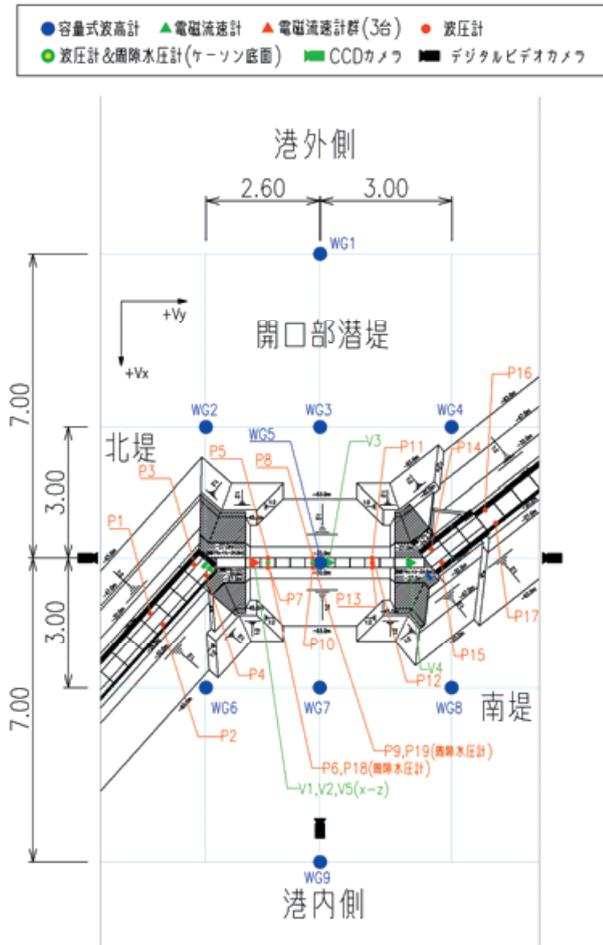


図-2.6 計測機器配置

(4) 実験条件

数値計算において、釜石港湾口防波堤の潜堤上における水位および流速は、図-2.7および図-2.8に示す結果が得られている(高橋ら, 2011)。図は、湾口防波堤の中央部に位置する点の結果であり、縮尺 1/60 の模型量として提示している。

東西方向が押波、引波の流れの方向であり、図-2.8では、プラス側(東から西)が押波時の向きを表している。これらの図より、釜石湾口部には、引波、押波、引波の順に作用していることがわかる。なお、水路では、押波が順流、引波が逆流となる。

計算結果と、検定結果から、本実験では流れの向き及び循環流ポンプの出力を、逆流 30%、順流 70%、逆流 80%とした。流れの作用時間は、逆流 30%が 120s、順流

70%が 120s、逆流 80%が 150s とした。潜堤天端上の初期水深は 0.38m とした。

逆流 80%時における流速は、表-2.3の検定結果から考えると、数値計算の流速より小さくなっているが、これは数値計算の条件では、潜堤滑動後、潜堤が無いものとして計算されていないことから、第1波の押波の後の引波時は、流速が数値計算の結果より小さくなっていたのではないかと考えたためである。なお、逆流 80%を 150s 作用させた後に、計算結果と同等程度とするため、逆流 90%を 30s 作用させることとした。

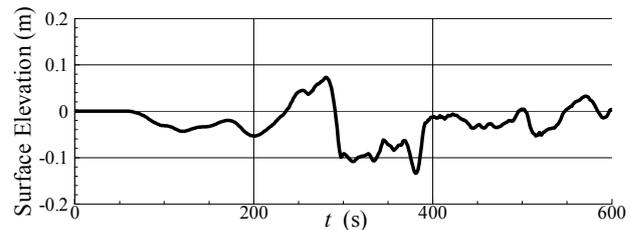


図-2.7 北堤堤頭部から 156.25m(模型量で 2.60m, ほぼ中央)における水位の時系列分布(縮尺 1/60)

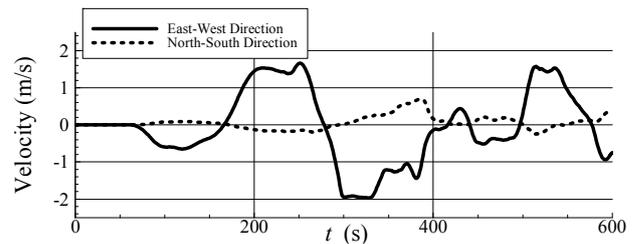


図-2.8 北堤堤頭部から 156.25m(模型量で 2.60m, ほぼ中央)における流速の時系列分布(縮尺 1/60)

2.2. 実験結果

(1) 滑動状況

実験中の堤体模型の状態の変化を表-2.4に示す。表中の空欄部分は、目立った変化が認められなかった箇所である。変化の内容を表-2.5に示す。最初の引波流れ(逆流)30%では、目立った変化は認められなかった。

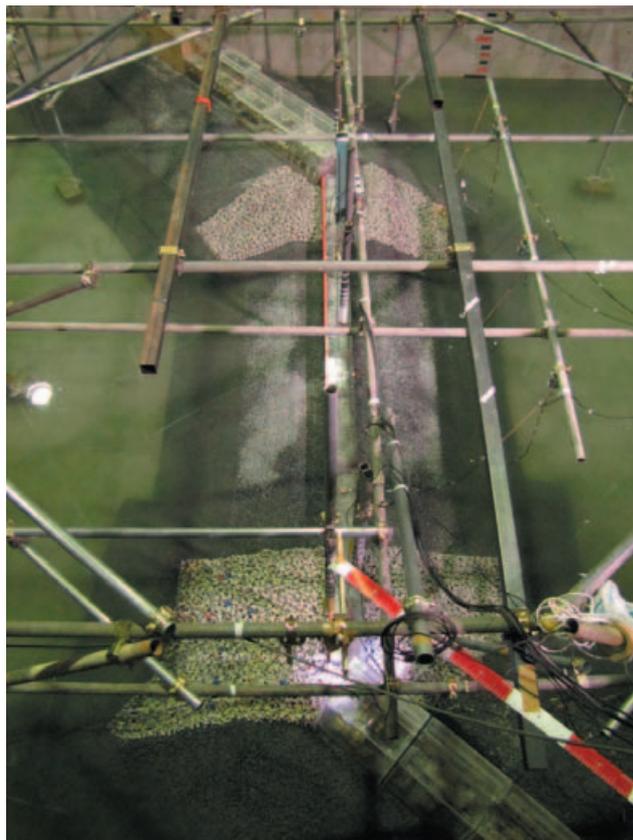
押波流れ(順流)70%では、時間差(最初の潜堤が滑動し始めてから最後の潜堤が滑動し始めるまでは、およそ 10s)をもって潜堤がマウンドから滑落するとともに(写真-2.1), 防波堤堤頭部のケーソンに微少な傾斜とそれともなう目地の開きが見られた。

ひとつの潜堤が滑動し始めてから滑落に至るまでの時間はおよそ 2 秒程度であった。これは現地の時間に換算すると、フルード則を適用すると約 16 秒であるため、現地においては、津波の継続時間が 20 秒以上生じていれば、滑落に至る可能性が高いことがわかる。

最後は引波の流れで、まず堤頭部におけるケーソンの下部基礎が洗掘されたため、堤頭部のケーソンが傾斜した。次に、堤頭部とその隣の函との目地が広がったため、その目地において洗掘が生じ、その影響でケーソンが傾斜した。写真-2.2は実験前後の比較をしたものである。

表-2.4 実験中の堤体模型の状態の変化

施設	断面	実験条件		
		逆流 30%	順流 70%	逆流 80-90%
南堤	深部4区標準函_2			
	深部4区標準函_1			
	深部4区台形函_3			傾斜
	深部4区台形函_2		微小傾斜	傾斜
	深部4区台形函_1		傾斜	傾斜
潜堤	端部南		滑落	
	標準函_1		滑落	
	標準函_2		滑落	
	標準函_3		滑落	
	標準函_4		滑落	
	標準函_5		滑落	
	標準函_6		滑落	
	標準函_7		滑落	
	標準函_8		滑落	
	標準函_9		滑落	
	標準函_10		滑落	
北堤	端部北		沈下	
	深部3区_1		微小傾斜	傾斜
	深部3区_2			傾斜
	深部3区_3			
	深部3区_4			
	深部3区_5			



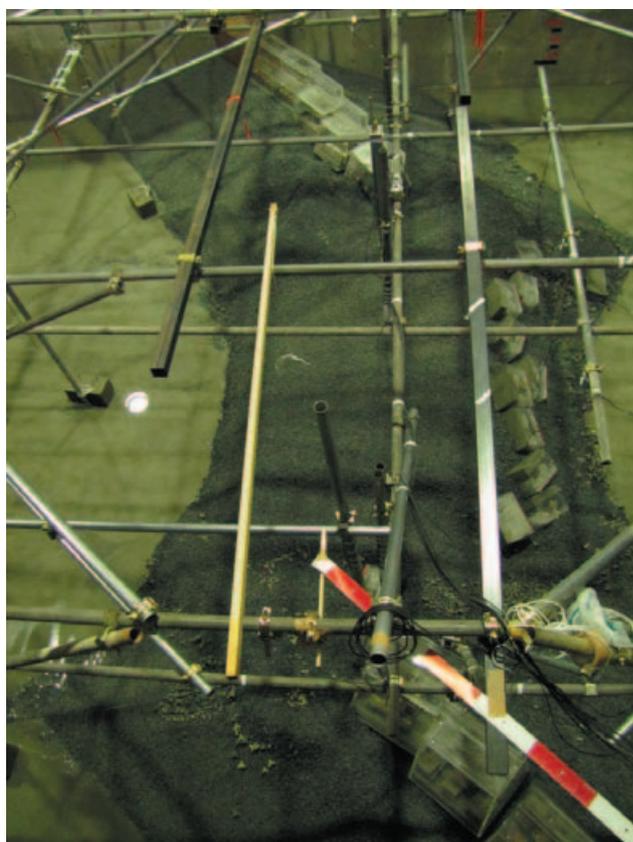
(1) 実験前(模型設置直後, 注水中)

表-2.5 実験中の堤体模型の変状の内容

流向	出力	北堤		開口部潜堤		南堤	
		時間	状態	時間	状態	時間	状態
逆流	30		変化なし		変化なし		変化なし
順流	70			61s ~ 69s	開口部潜堤が滑動・転倒する	163s	堤頭函沖側に傾斜
		作用後の確認	堤頭函の目地幅が10mm広がる。上部工天端で5mm沖側にずれる(ケーソンが沖側に傾斜)			作用後の確認	2 函目が法線先端方向に少し傾斜した。 2 函目と3 函目の目地幅が上部工天端岸端で17mm, 台形天端沖端で16mm
逆流	80 90	165s	堤頭函沖側に傾斜				



写真-2.1 開口部における潜堤が滑動し始める状況



(2) 実験後(排水後)

写真-2.2 実験前後の実験模型の状態

(2) 波力

潜堤が滑動する直前の流速と水位及び波圧の測定結果を表- 2.6 に示す。潜堤天端上の流速(V3)は1.57m/s(現地換算で12.2m/s)程度で、天端水深(WG5)の変化量は-3.4cmであったため、0.35m(現地換算で21.0m)となった。表中に示した波圧の変化量と初期値を足し合わせて求めたものが、表中の滑動直前波力である。なお、標準函2は底面の波圧を計測していなかったが、標準函6と標準函9に大きな差がなかったため、その平均値を適用した。

摩擦係数を0.6と想定して、前出表- 2.1 に示した堤体質量に対する滑動安全率を求め、右端列に示す。標準函2の滑動安全率は1.05であるが、仮に、底面の波圧変化が標準函9と同程度であった場合、1.02であり、滑動したところで不思議ではないことがわかる。

中央に位置する潜堤ほど圧力の変化量が大きくなっている。これは、水位変化によるものだけではなく、流速による動圧の変化によるものと考えられる。しかし、水位の変化は開口部においては、延長方向にほぼ変わらないことから、圧力の変化量の違いは、流速による影響が大きいと考えられる。特に、上面部の波圧は、中央部の函が一番大きく、これは流れが中央に集中していくためだと考えられる。また、背面部の波圧も同様に、中央の函のほうのほうが大きく変化している。その一方で、底面部の圧力の違いは小さくなく、これは、潜堤と捨石の間を流れる流速がほとんどなかったことに起因すると考えられる。

表- 2.6 潜堤滑動直前の計測結果

潜堤 No.	波圧変化量(gf/cm ²)				滑動直前波力(kgf)				滑動安全率
	前面	上面	背面	底面	前面	上面	背面	底面	
標準函 2	0.1	-10.9	-8.3		35.4	19.6	29.3	40.6	1.05
標準函 6	2.6	-19.1	-13.0	-4.0	37.2	13.7	25.9	40.2	0.32
標準函 9	0.4	-14.5	-8.7	-3.1	35.6	17.0	29.0	40.9	0.75

(3) 洗掘

流れの作用前と作用後に、図- 2.9 に示す地点においてマウンドの測量を実施した。測量結果を図- 2.10 から図- 2.22 に示す。図中のケーソンの番号は表- 2.1 に示すとおりである。

防波堤ケーソンの滑動を生じていない北堤の N-3 と N-4 の目地部のマウンド天端は、港外側と港内側のどちらも変形を生じていない(図- 2.10)。

北堤の堤頭函は港内側に向かって傾斜しており、ケーソンの港内側は洗掘し、港外側は堆積している(図- 2.13)。

潜堤部では、潜堤ケーソンが港内側に滑落し、港内側のマウンドの肩が全体的に低くなっている(図- 2.16)。また、全体的に、港外側のマウンドが堆積していることが

わかる(図- 2.17, 図- 2.18, 図- 2.19)。これは、潜堤が滑落した後、むき出しになったマウンドの捨石が、引波流れ(逆流 80-90%)によって流されたと考えられる。

南堤堤頭函はケーソン下部の石材が吸い出されてケーソンが沈下し、ケーソンからやや離れた個所にマウンド石材が凸型に堆積している(図- 2.19)。

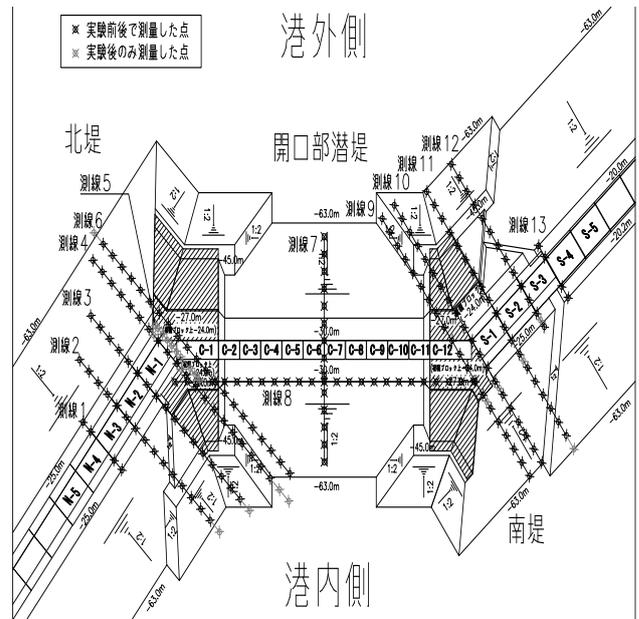


図- 2.9 実験実施前後のマウンド測量地点

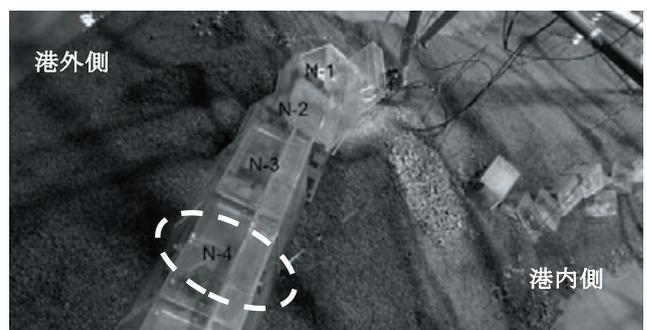
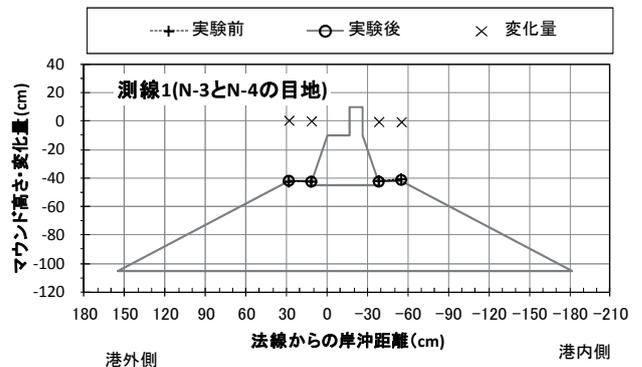


図- 2.10 北堤目地部(N-3 と N-4)の横断測量結果

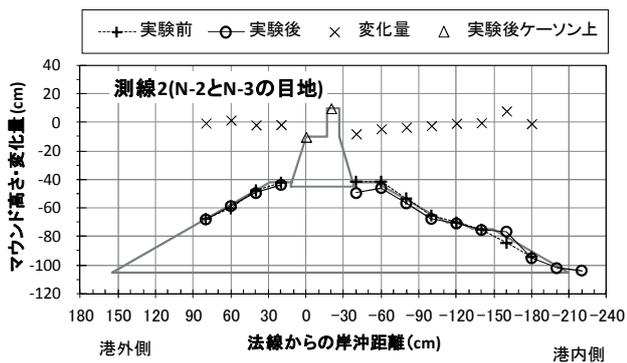


図- 2.11 北堤目地部(N-2 と N-3)の横断測量結果

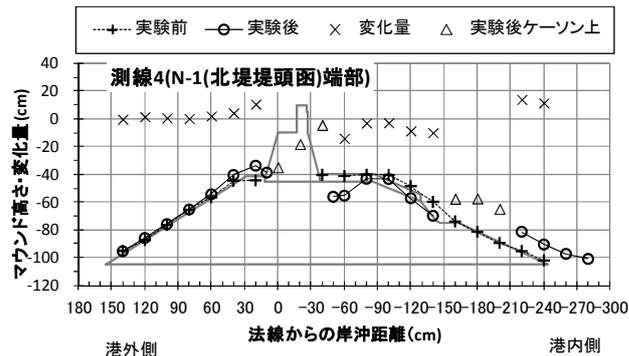


図- 2.13 北堤法線先端の横断測量結果

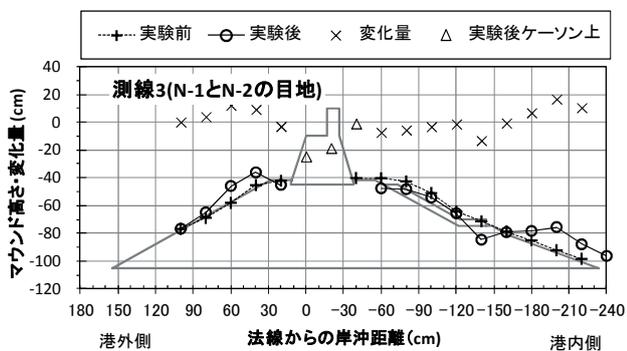


図- 2.12 北堤目地部(N-1 と N-2)の横断測量結果

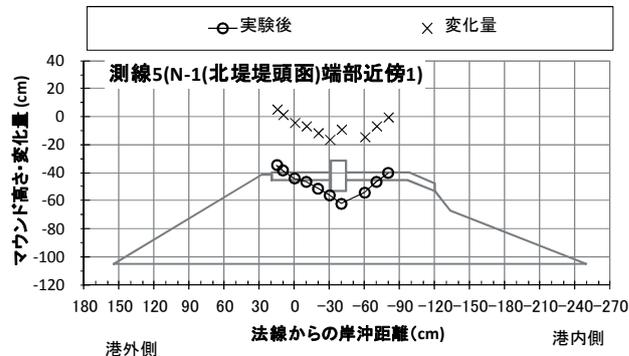


図- 2.14 北堤法線先端の前面の横断測量結果

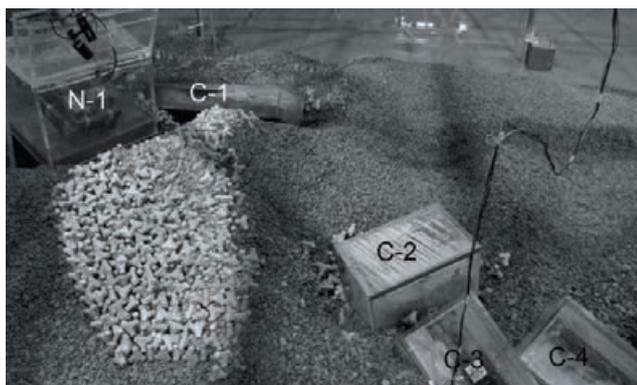
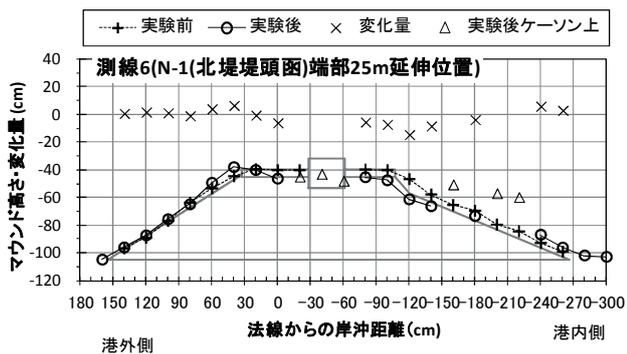


図-2.15 北堤法線先端の40cm沖の横断測量結果

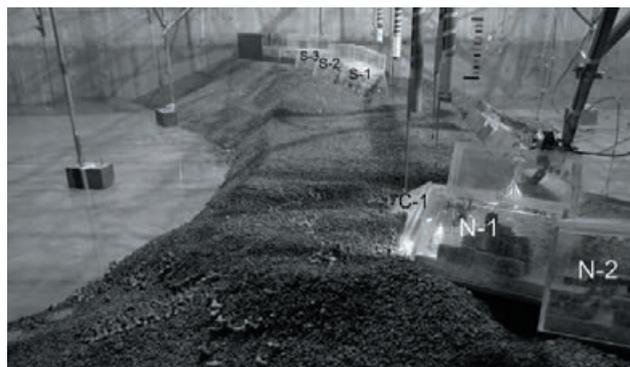
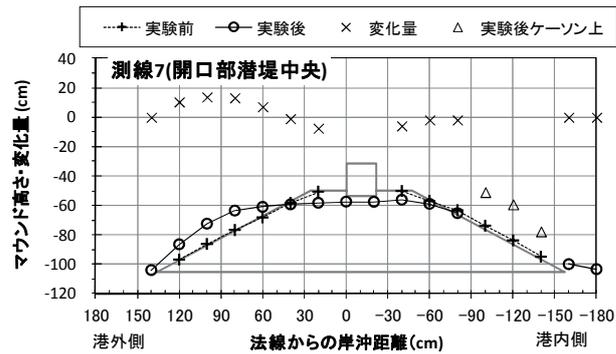


図-2.17 潜堤中央の横断測量結果

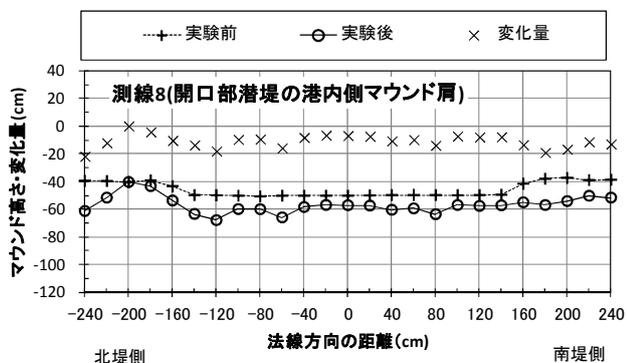


図-2.16 潜堤港内側マウンド法肩の縦断測量結果

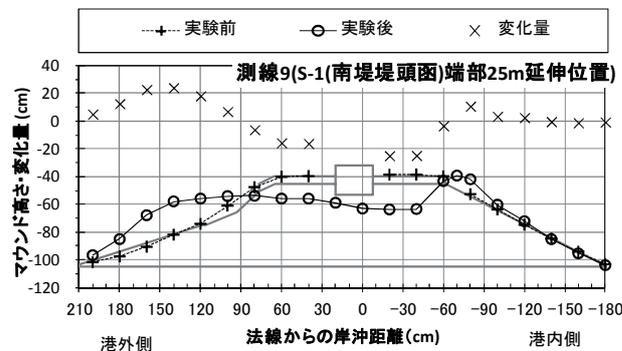


図-2.18 南堤法線先端の40cm沖の横断測量結果

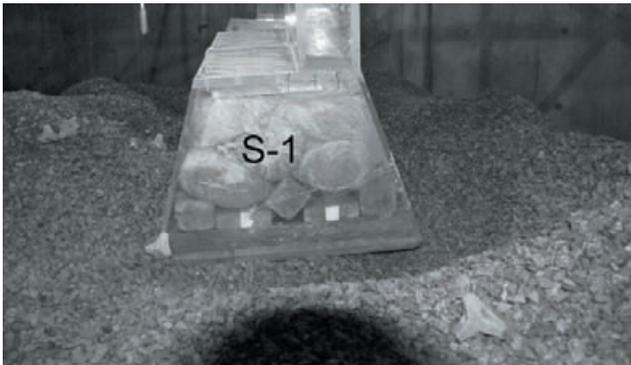
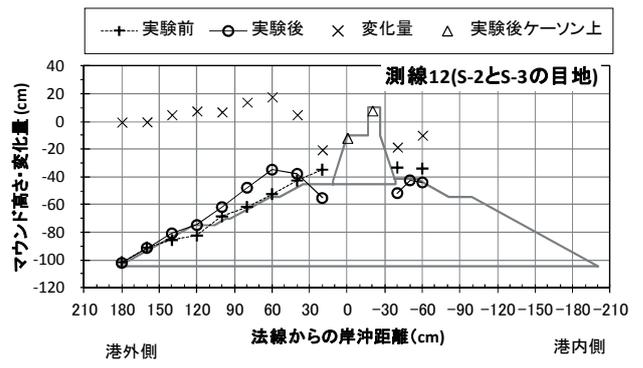
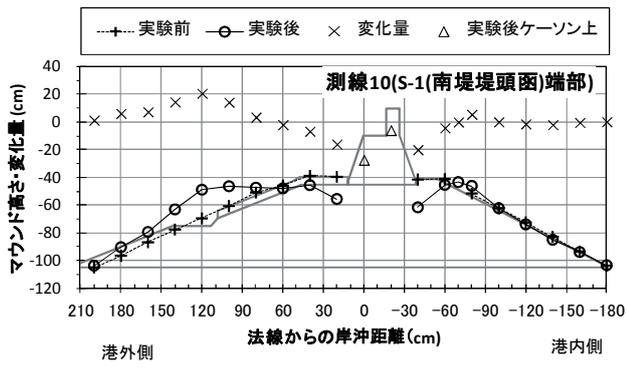


図-2.19 南堤法線先端の横断測量結果

図-2.21 南堤目地部(S-2とS-3)の横断測量結果

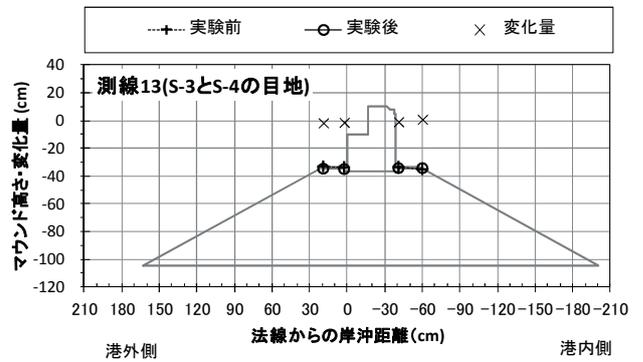
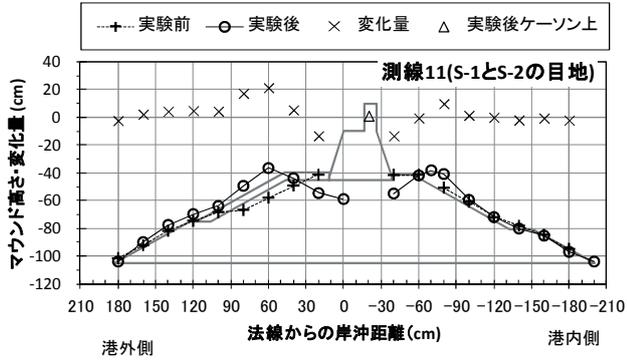


図-2.20 南堤目地部(S-1とS-2)の横断測量結果

図-2.22 南堤目地部(S-3とS-4)の横断測量結果

2.3. まとめ

本実験では、潜堤のケーソンがほぼすべて港内側のマウンド先付近まで転落した。この状況は被災後の測量結果とほぼ一致している。また、北堤の堤頭函が港内側に傾斜したことは、写真-2.3に示す現地の状況とほぼ一致している。一方で、実験では南堤の堤頭部も傾斜しているが、これは、洗掘量が多すぎたためであると考えられる。現地では、マウンドは削られたものの、ケーソンは傾斜に至らなかったということになる。

以上より堤頭部における被災状況としては、まず、押波時に潜堤部が流され、その後、引波時において、堤頭部の周りが洗掘され、傾斜したと考えられる。さらに、傾斜したケーソンと隣のケーソンとの目地が広がり、そこでさらに洗掘が生じ、隣のケーソンを傾けるという連鎖が発生したと考えられる。また、第2波目以降も洗掘は繰り返されているため、それに伴って目地における洗掘被害が大きくなったことが推測される。



写真-2.3 現地被災状況(北堤堤頭部)

3. 堤幹部の被災メカニズムの検討

3.1. 検討方法

堤幹部においては、ケーソンは津波が越流する際に滑動したと考えられることから、越流時におけるケーソンに作用する水圧、目地部の影響、洗掘と摩擦係数の関係を明らかにすることを目標とした。そこで、水の無い状態でのケーソンの滑動抵抗力試験を行い、摩擦係数について調べるとともに、水槽内で、ポンプによって、沖側に水を与え、岸側から水を抜くことで、ケーソンの前面と背面で水位差を作り、津波による越流状態を擬似的に再現し、ケーソンに対する作用力等を調べた。

また、現地の目地幅は、施工完了後において 0.3m から 1.0m 程度であり、フルードの相似則では 1/60 縮尺模型において 0.5cm 程度から 1.6cm 程度となる。しかし、縮小模型においては水の粘性が変わらないことから、フルード則と同程度の目地幅の場合、流れの状態によっては、ケーソンの壁面摩擦等が大きくなる可能性がある。

そこで、目地幅を変えた模型実験を実施し、目地の影響を検討することとした。目地幅を様々な幅にしたケース、目地幅をすべての函で一定としたケースとして幅が狭いケースと広いケースを行い、それぞれ比較した。

3.2. 摩擦検定試験

(1) 試験方法

摩擦検定試験は、図-3.1に示すような実験装置を用いて実施した。図からもわかるように、この装置では積載板におもりを載荷することで、試験体である堤体模型に水平方向の引張力を作用させる。おもりを積載板に徐々に載荷していき、ケーソンの滑動が生じたときの載荷荷重を確認し、滑動限界時の滑動抵抗力とした。また、設定した堤体質量を得られた滑動抵抗力で除することにより、堤体模型と模型マウンド石材の摩擦係数を確認する。

滑動抵抗力確認実験は、実験で使用する台形ケーソン、矩形ケーソン、開口部潜堤ケーソンについて実施した。台形ケーソンおよび矩形ケーソンについては、図-3.2に示すように引張荷重の載荷位置を3種類変更して実施した。開口部潜堤ケーソンは、中央位置のみとした。模型の底板はモルタルであり、その粗度の違いの影響をみるため、台形ケーソンは2個異なる模型を用いて行った。

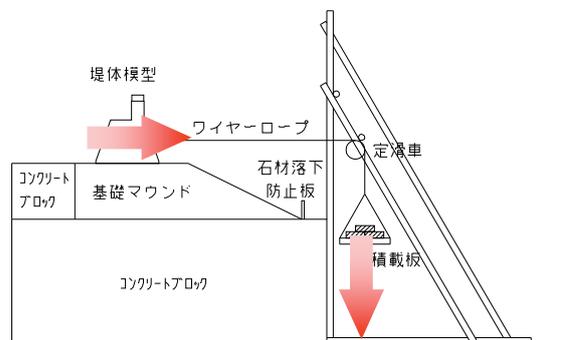


図-3.1 滑動抵抗力確認実験装置の概略図

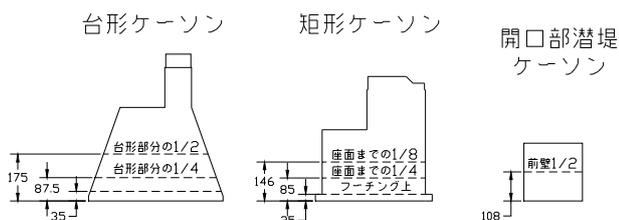


図-3.2 堤体模型への引張位置

(2) マウンド目地の洗掘が無い状態の結果

表-3.1から表-3.3に示す。おもりを重くしていくと、ある重さでケーソンは数mm動くが止まり、それよりさらに重くしていくと、一気に滑り出すように動く。そのため、どの荷重を限界荷重とするかは難しいが、津波による滑動は大きく変位する状態であると考えられるため、大きく滑り出した荷重を限界荷重として定めた。測定においては、10mm以上滑動すると多くのケースで大変位となるため、その荷重を滑動限界点とした。

写真-3.1に、台形ケーソン引張位置35mmおよび台形ケーソン引張位置175mmの滑動後の様子を示す。全体的には、175mmの引張位置のほうが、マウンドを削るように滑動していることがわかる。一方で摩擦係数は、3種類のケーソンの摩擦係数を確認すると、摩擦係数はコンクリート(モルタル)と石材の一般的な摩擦係数である0.6にほぼ等しくなっていることがわかる。図-3.3に摩擦係数の度数分布を示す。これを見ると、平均は0.6より若干小さく0.57から0.58の間であり、かつ、0.52から0.68の間までばらついており、1割以上のばらつきが生じていることがわかる。



写真-3.1 滑動後の様子(左：台形ケーソン引張位置+35mm, 右：+175mm)

表-3.1 摩擦係数試験結果(潜堤ケーソン)

引張位置(底面からの高さ)	回数	堤体重量 W(kgf)	滑動抵抗力 F(kgf)	摩擦係数(W/F)
+108mm (前壁の1/2)	1	32.0	17.60	0.550
	2	32.0	19.65	0.614
	3	32.0	18.70	0.584
	4	32.0	20.05	0.627
	5	32.0	18.00	0.563
	6	32.0	19.05	0.595

表-3.2 摩擦係数試験結果(台形ケーソン)

ケーソン形状	引張位置(底面からの高さ)	回数	堤体重量 W(kgf)	滑動抵抗力 F(kgf)	摩擦係数(W/F)
模型1	+35mm	1	166.0	105.20	0.634
		2	166.0	94.75	0.571
		3	166.0	98.00	0.590
		4	166.0	95.85	0.577
		5	166.0	91.30	0.550
模型2	+35mm	1	166.0	93.30	0.562
		2	166.0	111.55	0.672
		3	166.0	107.35	0.647
		4	166.0	102.90	0.620
		5	166.0	100.65	0.606
		6	166.0	100.70	0.607
模型1	+87.5mm (台形部分の1/4)	1	166.0	95.60	0.576
		2	166.0	91.50	0.551
		3	166.0	87.00	0.524
		4	166.0	91.50	0.551
		5	166.0	91.55	0.552
		6	166.0	101.15	0.609
		7	166.0	98.95	0.596
模型2	+87.5mm (台形部分の1/4)	1	166.0	98.35	0.592
		2	166.0	109.55	0.660
		3	166.0	93.95	0.566
		4	166.0	96.15	0.579
		5	166.0	95.05	0.573
模型1	+175mm (台形部分の1/2)	1	166.0	96.75	0.583
		2	166.0	106.65	0.642
		3	166.0	111.15	0.670
		4	166.0	93.05	0.561
		5	166.0	93.35	0.562
		6	166.0	89.55	0.539
模型2	+175mm (台形部分の1/2)	1	166.0	98.10	0.591
		2	166.0	100.60	0.606
		3	166.0	96.15	0.579
		4	166.0	105.10	0.633
		5	166.0	96.10	0.579

表-3.3 摩擦係数試験結果(矩形ケーソン)

引張位置(底面からの高さ)	回数	堤体重量 W(kgf)	滑動抵抗力 F(kgf)	摩擦係数(W/F)
+25~30mm (フーチング上)	1	144.0	88.25	0.613
	2	144.0	84.65	0.588
	3	144.0	83.40	0.579
	4	144.0	83.40	0.579
	5	144.0	76.20	0.529
+85mm (座面までの1/4)	1	144.0	90.30	0.627
	2	144.0	89.30	0.620
	3	144.0	89.00	0.618
	4	144.0	86.40	0.600
	5	144.0	81.35	0.565
+146mm (座面までの1/2)	1	144.0	82.50	0.573
	2	144.0	84.95	0.590
	3	144.0	86.10	0.598
	4	144.0	84.10	0.584
	5	144.0	91.30	0.634
	6	144.0	84.10	0.584

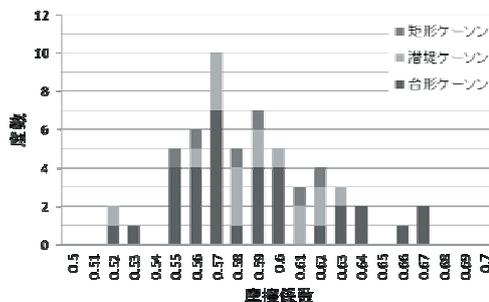


図-3.3 摩擦係数の度数分布

(3) マウンド目地の洗掘を設けた状態の結果

次に、目地における洗掘が生じた際における滑动抵抗力を実験した。片側 5cm, 7.5cm, 10cm, 12.5cm 掘られた場合と仮定して、ケーソンの端を掘り、その状態を擬似的に作った。写真- 3.2 は、洗掘幅が片側 12.5cm のケースである。なお、引張り位置は、+55mm で行った。

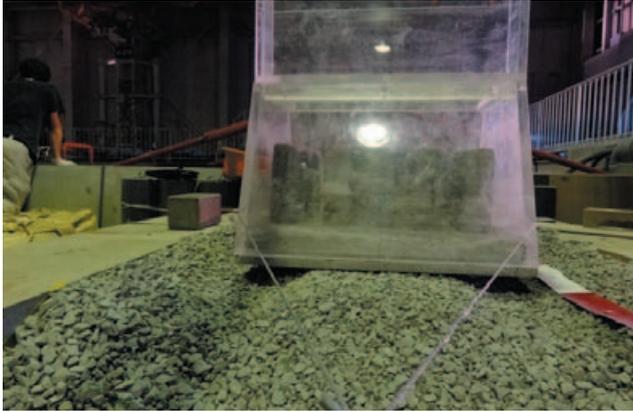


写真- 3.2 目地洗掘幅 12.5cm のときの様子(実験前)

写真- 3.3 は片側目地幅 12.5cm の滑动後の様子である。碎石が削られるように盛り上がっていることがわかる。表- 3.4 に摩擦係数の結果を示す。削られ方としては、中央部に捨石が盛り上がっているようになる。左右に広がるような様子は全体的になかった。図- 3.4 に摩擦係数のばらつきと平均を示す。これを見ると、洗掘幅が 10cm より大きくなると若干平均値としては下がっているようにも見えるが、摩擦係数自体は、面積によらないと考えられるため、ケーソン前面の捨石の支持力の低下にも依存するものと考え、「見かけ上」という言葉を軸につけた。また、図- 3.5 は目地洗掘幅と度数分布であり、0cm は表- 3.2 の結果をすべて加えたものである。データは多くはないものの、ばらつきの具合に大きな差は無いと考えられる結果であり、目地洗掘が摩擦係数に与える影響は、ほぼないと考えられる。



写真- 3.3 目地洗掘幅 12.5cm での滑动後の様子

表- 3.4 台形ケーソンにおける目地幅の違いによる摩擦検定試験結果

目地洗掘幅 (片側, cm)	回数	堤体重量 (kgf)	滑动抵抗力 (kgf)	摩擦係数
0	1	166	98.35	0.592
	2	166	109.55	0.660
	3	166	93.95	0.566
	4	166	96.15	0.579
	5	166	95.05	0.573
5	1	166	100.3	0.604
	2	166	101.9	0.614
	3	166	98.55	0.594
	4	166	95.05	0.573
	5	166	105.1	0.633
7.5	1	166	97.25	0.586
	2	166	99.45	0.599
	3	166	92.6	0.558
	4	166	96	0.578
	5	166	107.2	0.646
10	1	166	86.7	0.522
	2	166	101.95	0.614
	3	166	108.55	0.654
	4	166	91.7	0.552
	5	166	101.9	0.614
12.5	1	166	98.75	0.595
	2	166	92.5	0.557
	3	166	95.9	0.578
	4	166	97	0.584
	5	166	94.8	0.571

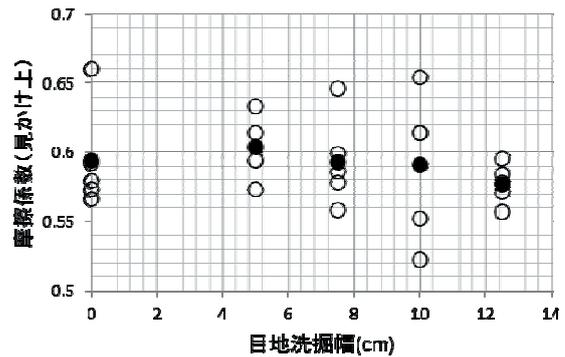


図- 3.4 目地洗掘幅と摩擦係数の結果(黒丸は平均)

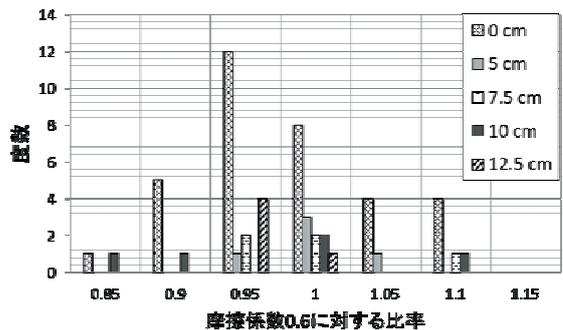


図- 3.5 目地洗掘幅と度数の関係

3.3. 目地幅を様々組み合わせた水理模型試験

(1) 実験模型

堤幹部における実験では、図- 3.6 に示すように流れの発生方向(長手方向)と直交するように、直線状に防波堤

模型を配置した。ここでは、北堤深部3区の台形ケーソンならびに、南堤深部4区の標準函を用いた。ケーソンの断面は、図-2.2に示す通りである。

本ケースにおいては、目地幅が現地においても一定ではないことと目地幅での摩擦損失の影響を見るために、目地幅を0.5cm, 1.0cm, 2.0cm, 3.0cmの組み合わせとした。設置した堤体模型の諸元は、表-3.5のとおりである。堤体質量は、本ケースを開始する時点で把握していた情報に基づき設定したが、結果的に堤体質量が、現地に比べて約1割重かった。基礎マウンドは6号砕石を用いた。質量は0.3gから5.6gであり、現地換算では、70kgから1200kgに相当する。また、粒径は5mm~13mmである。現地では、被覆石が300kgから800kgであり、若干大きいものの、ほぼ同程度の大きさと考え使用した。

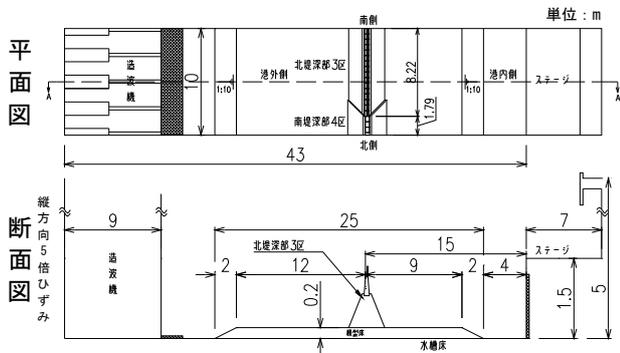


図-3.6 堤幹部実験の模型配置

表-3.5 堤体模型の諸元(数値は模型量)

水槽の場所	ケーソン種類	No.	断面の工区	質量(kg)	目地幅(cm)
南側	台形ケーソン	1	深部4区台形函	184.1	
		2	深部4区台形函	183.4	0.5
		3	深部4区台形函	183.9	0.5
		4	深部3区	183.5	
		5	深部3区	183.7	1
		6	深部3区	183.5	1
		7	深部3区	183.4	
		8	深部3区	184	2
		9	深部3区	183.3	2
		10	深部3区	183.6	
		11	深部3区	183.3	0
		12	深部3区	184	0
		13	深部3区	185.8	
		14	深部3区	184.6	3
		15	深部3区	184.3	3
		北側	矩形ケーソン	17	深部4区標準函
18	深部4区標準函			144.8	1

(2) 計測方法

水位、流速、波圧の測定と、水中ビデオおよびビデオカメラ(気中)によるビデオ撮影を行った。

水位測定には容量式波高計を用いた。容量式波高計による水位測定は、図-3.7の中に“波”と示した位置に設置した。図中においてケーソン上に“波”と示してある箇所は、模型ケーソンの遊水室部分の中央部において水

位計測を行った。

流速測定には電磁流速計を用いた。目地部の流速を把握するために、目地部の直前に流速計を設置した。流速計の設置高さはマウンド被覆材の表面から4cm程度の高さである。図-3.7において着色したケーソンでは、圧力測定を行った。圧力測定には小型波圧計を使用した。圧力計測場所は図-3.8に示すとおりである。

図-3.7の中にケーソン上から矢印で示した個所には、アクリルケーソン内に水中ビデオカメラを設置し、目地部前面のマウンド被覆材の状況の撮影を試みた。

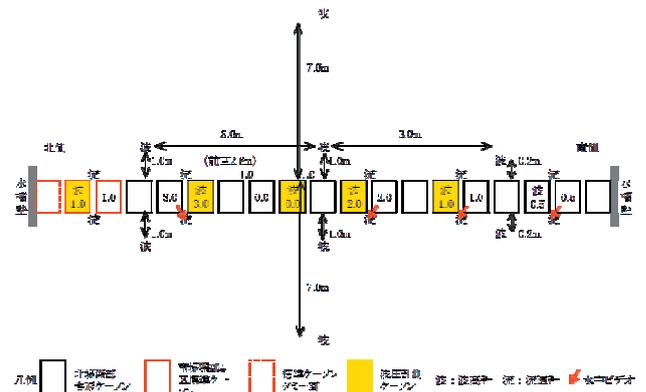


図-3.7 計測機器配置

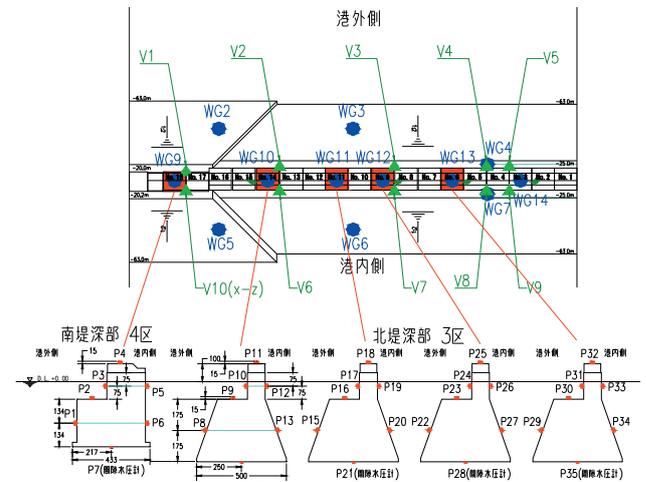


図-3.8 波圧計測位置

(3) 実験条件

越流時におけるケーソンの変位状況を見るために、押波流れ(順流)のみとした。現地の水位差を参考とするため、数値計算による港内外水位の結果を用いた(高橋ら, 2011)。ここでは、もっとも水位差の大きかった1波目の押波の波形を用いた(図-3.9)。

港外の高い水位の継続時間は60s程度であるので、循環流装置の緩起動時間の60sと合わせて、循環流装置の運転時間を120sとした。初期水位と循環流ポンプの出力

は、実験結果を確認しながら設定したが、最終的には、初期水位とポンプ出力を変更しながら7つの条件で実験を行った。各条件におけるポンプ出力と初期水位および港内外水位と水位差の結果を表-3.6に示す。

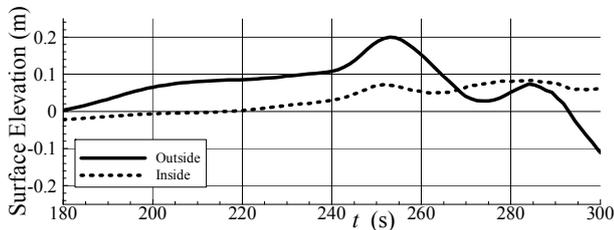


図-3.9 数値計算による港内外水位(北堤堤頭部より約400m地点の結果, 図中の数値は模型量)

表-3.6 実験条件ならびに港内外水位差の結果

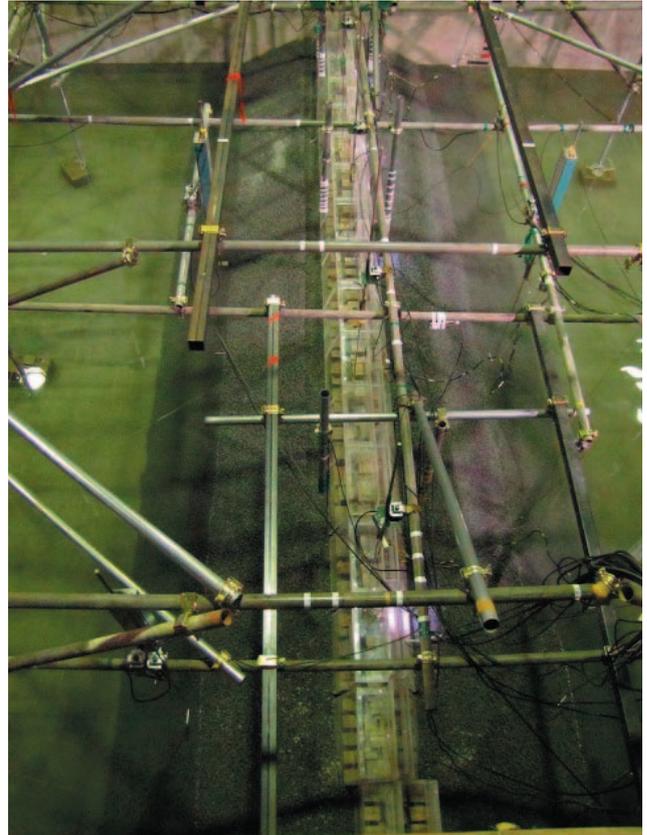
条件	模型量				現地換算				解析区間 (s)			
	ポンプ出力 (%)	水位 (cm)			水位差 (cm)	水位 (m)			水位差 (m)	計測開始からの経過時間		解析区間長
		初期	港外	港内		初期	港外	港内		開始	終了	
		η_s	η_o	η_i		Δh	η_s	η_o				
1	10	5.2	6.8	2.2	4.6	3.1	4.1	1.3	2.8	80	200	120
2	20	5.2	10.9	-5.8	16.7	3.1	6.5	-3.5	10.0	80	200	120
3	15	8.2	10.8	2.6	8.2	4.9	6.5	1.6	4.9	90	160	70
4	20	8.2	12.4	-0.2	12.6	4.9	7.4	-0.1	7.5	90	150	60
5	25	11.2	15.6	2.7	12.9	6.7	9.4	1.6	7.8	90	150	60
6	30	14.2	17.8	7.4	10.4	8.5	10.7	4.4	6.3	90	150	60
7	60	14.2	20.7	0.7	20.0	8.5	12.4	0.4	12.0	75.7	76.7	1

(4) ケーソンの変位と波力

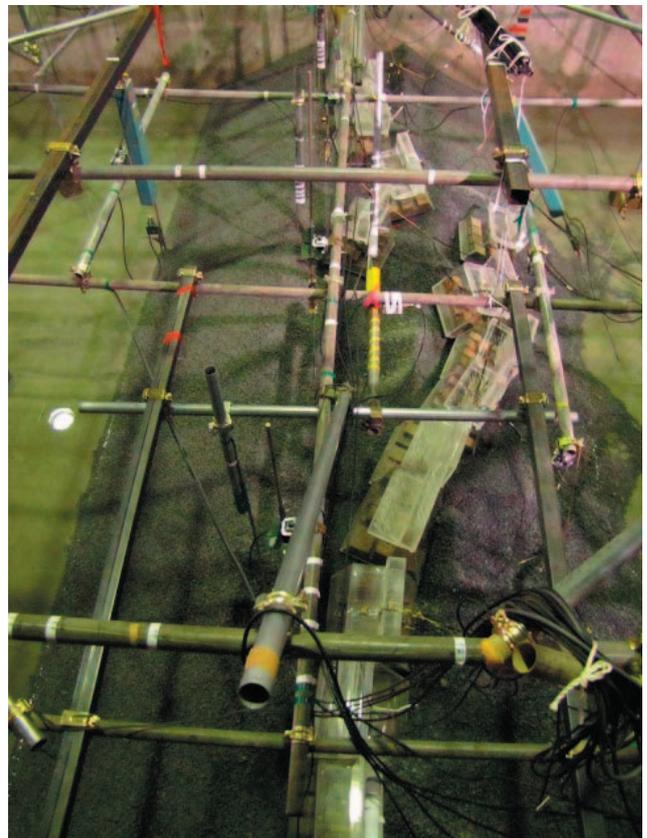
実験中のケーソンの状態の変化を表-3.7に、実験前と終了後の実験模型の状態の比較を写真-3.4に示す。ここで、「変位」と示しているのは、水平変位および回転変位(傾斜含む)の意味である。

表-3.7 実験中のケーソンの状態の変化

ケーソン No.	目地幅 (cm)	条件	1	2	3	4	5	6	7	
		初期水位 (cm)	5.2	5.2	8.2	8.2	11.2	14.2	14.2	
		ポンプ出力 (%)	10	20	15	20	25	30	60	
		越流状況	なし	微小	あり	あり	最初から水没			
1									越流洗掘	
2		0.5							越流洗掘	
3		0.5							越流洗掘	
4									変位	
5		1							変位	
6		1							変位	
7									変位	
8		2							変位	
9		2							変位	
10									変位	
11		0							変位	
12		0							変位	
13									変位	
14		3	目地掘れ						変位	
15		3							変位	
16									変位	
17		1							沈下	
18		1							沈下	



(1) 実験前(模型設置直後, 注水前)



(2) 実験後(排水後)

写真-3.4 実験前と実験終了後の実験模型の状態

条件1では、台形ケーソンの目地幅3.0cmの港内側で、マウンド被覆石の洗掘が目視で認められたが、2.0cm以下の目地では洗掘が認められなかった。目視では、目地洗掘幅は数cm程度で、洗掘深さは1cm未満であると思われる。なお、条件1では、越流を生じていない。

条件2では、ごくわずかに越流が生じた。この条件では、目地幅3.0cm部分のケーソン(No.15)が変位(傾斜)した。変位状況は、ケーソンが港内側に傾斜しながら沈降するような変位であった。ケーソンの移動距離は10cm程度と短く、天端は5cm以上下がった。その後、No.15ケーソンに隣接するNo.14ケーソンおよびNo.13ケーソンが順に変位したケーソン側に傾斜しながら変位した。なお、この時点において、マウンド下まで滑落することはなかった。

表-3.8は、No.15のケーソンが変位した瞬間の各ケーソンの波圧の結果である。表中の滑动安全率の算定にあたっては、摩擦係数0.6を用いた。一方で、滑动安全率を1.0としたときに、力のつり合い式から算定される摩擦係数を推定摩擦係数の欄に表示した。

表-3.8 No.15ケーソン滑动直前の結果(条件2)

ケーソンNo.		No.18	No.14	No.11	No.9	No.6	
ケーソンの種類		矩形	台形	台形	台形	台形	
水位(cm)	港外側	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8	
	港内側	-5.6	-5.6	-5.6	-5.6	-5.6	
ケーソン上		10.8	10.8	10.8	10.7	10.7	
波圧強度(計測値) (gf/cm ²)	港外側前面	5.6	6.5	6.2	5.6	5.9	
	スリット部底面	6.2	6.2	5.9	5.9	5.6	
	スリット部直立壁	6.3	6.5	6.1	5.8	6.1	
	天端面	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	
	背面(上)	-7.0	-7.8	-8.2	-7.1	-7.5	
	背面(下)	-11.6	-11.0	-10.7	-10.4	-10.5	
	底面	-1.8	-3.0	-2.9	0.2	-1.7	
波圧強度(初期補正後) (gf/cm ²)	港外側前面	10.8	11.7	11.4	10.8	11.1	
	スリット部底面	12.9	12.9	12.6	12.6	12.3	
	スリット部直立壁	11.5	11.7	11.3	11.0	11.3	
	天端面	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	背面(上)	-1.8	-2.6	-3.0	-1.9	-2.3	
	背面(下)	-6.4	-5.8	-5.5	-5.2	-5.3	
	底面	3.4	2.2	2.3	5.4	3.5	
単位幅波力(gf/cm)	港外側前面	水平	288.4	409.5	399.0	378.0	388.5
		鉛直	-	143.9	140.2	132.8	136.5
	スリット部底面	水平	215.4	215.4	210.4	210.4	205.4
		鉛直	230.0	234.0	226.0	220.0	226.0
	天端面	水平	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		鉛直	-12.2	-10.1	-12.6	-8.0	-9.9
	背面(下)	水平	-152.3	-203.0	-192.5	-182.0	-185.5
		鉛直	-	-71.3	-67.6	-64.0	-65.2
	底面	水平	147.2	110.0	115.0	270.0	175.0
		鉛直	682.9	856.6	830.1	788.0	809.9
模型排除体積	V	64662	73995	74070	74070	74095	
ケーソン模型質量	W	144800	184600	183300	183,300	183,500	
浮力	PB	-64662	-73995	-74070	-74,070	-74,095	
水平合力	F	34145	42830	41505	39,400	40,495	
鉛直合力	N	83548	119505	117630	109,690	114,490	
滑动安全率(摩擦係数0.6)		1.47	1.67	1.70	1.67	1.70	
推定摩擦係数	μ	0.41	0.36	0.35	0.36	0.35	

摩擦係数を0.6としたときの滑动安全率を見ると、台形ケーソンの滑动安全率はおおよそ1.7程度であり、変

位した時点での波力は、滑动しない程度の大きさであることがわかる。したがって、No.15では、マウンドが洗掘され、基礎部が不安定になることで傾斜した現象であると考えられる。

次に、ケーソン滑动直前における圧力の計測結果の分布について、目地幅の違いによる比較結果を図-3.10に示す。港外側、スリット部底面、天端面、港内側では、いずれも同様の波圧が作用しており、目地幅による作用圧力の違いは見られないことがわかる。また、底面では3gf/cm²程度の違いが生じており、目地幅3cmの底面圧力が負圧側で最も大きい。なお、底面圧力と目地幅について相関は見られなかった。

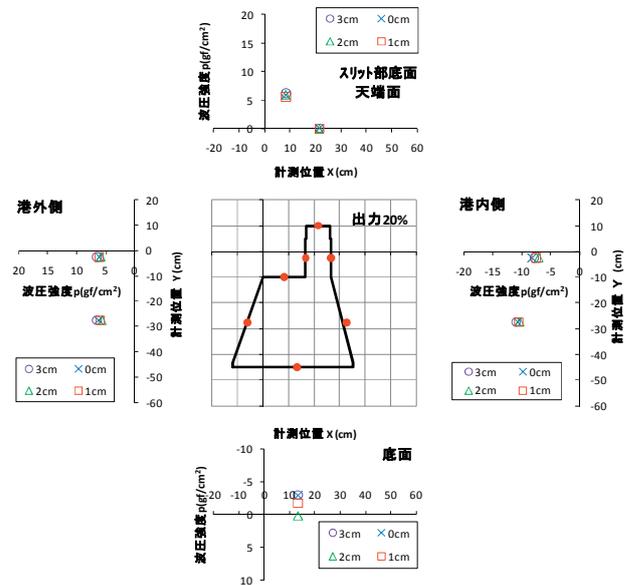


図-3.10 目地幅の違いによる波圧(条件2)

条件3では、ケーソンの滑动は生じていない。この条件の水位差は4.6m(現地換算)であった。条件4では、条件2で滑动した目地幅3.0cmの隣のケーソンが滑动(傾斜)した。そのときの波圧の測定結果を表-3.9に示す。

この場合も滑动安全率は1.9と高い。これは、ケーソンが傾斜し、目地部が広がることで、目地部の流れが速くなり、目地部においてマウンド洗掘が生じ、ケーソンが傾斜する被災と考えられる。

条件5および条件6では、初期水位やポンプ出力を徐々に大きくしており、滑动済みのケーソンの隣から順に滑动(傾斜)が進行した。これは、条件4と同様であり、隣のケーソンが滑动することで、滑动後のケーソンの下のマウンドが洗掘し、ケーソンがバランスを失い、傾斜しながら滑动したと考えられる。しかし、滑落まではいかなかった。これは、水平力が滑动抵抗力よりも小さいことが原因と思われる。

表- 3.9 ケーソン(No.12,16)滑動直前の結果(条件 4)

ケーソンNo.		No. 18	No. 14	No. 11	No. 9	No. 6
ケーソンの種類		矩形	台形	台形	台形	台形
水位 (cm)	港外側	12.4		12.4	12.4	12.4
	港内側	0.1		0.1	0.1	0.1
	ケツ上	12.3		12.3	12.4	12.3
波圧強度(計測値) (gf/cm ²)	港外側前面	4.1		4.6	4.2	4.4
	スリット部底面	4.8		4.3	4.4	4.2
	スリット部直立壁	4.8		4.5	4.3	4.5
	天端面	1.7		0.6	0.3	1.0
	背面(上)	-9.3		-9.2	-8.6	-8.4
	背面(下)	-9.0		-8.5	-8.1	-8.2
波圧強度(初期補正後) (gf/cm ²)	底面	-1.4		-2.4	0.1	-0.9
	港外側前面	12.3		12.8	12.4	12.6
	スリット部底面	14.5		14.0	14.1	13.9
	スリット部直立壁	13.0		12.7	12.5	12.7
	天端面	1.7		0.6	0.3	1.0
	背面(上)	-1.1		-1.0	-0.4	-0.2
単位幅波力 (gf/cm)	背面(下)	-0.8		-0.3	0.1	0.0
	底面	6.8		5.8	8.3	7.3
	港外側前面	328.4	初期水位 +5.2cm 出力20% (条件2) で滑動したため計測対象外とした。	448.0	434.0	441.0
	スリット部底面	242.2		157.4	152.5	155.0
	スリット部直立壁	260.0		233.8	235.5	232.1
	天端面	36.7		254.0	250.0	254.0
	背面(上)	-14.5		5.9	3.0	9.9
	背面(下)	-19.0		-9.8	-3.9	-2.0
	底面	294.4		-10.5	3.5	0.0
	水平力	PH		621.9	-3.7	1.2
鉛直力	PV	-15.5		290.0	415.0	365.0
鉛直力	PV	-15.5		722.3	684.4	697.0
模型排除体積	V	68118	103.4	-22.8	32.0	
ケツ模型質量	W	144800	75470	75.470	75.470	
浮力	PB	-68118	183300	183.300	183.500	
水平合力	F	31095	-75470	-75.470	-75.470	
鉛直合力	N	75907	36115	34.220	34.850	
滑動安全率(摩擦係数 0.6)		1.46	113000	106.690	109.630	
推定摩擦係数	μ	0.41	1.88	1.87	1.89	
			0.32	0.32	0.32	

条件 7 では、水平力が大きくなったため、目地幅 0.5cm の函を除いてすべて滑動し、一部は滑落した。現地状況に近いものの、実験の水位差は現地換算で 12m となる水位差であり、数値計算の結果と比較して大きい。これは、函の重量が 1 割程度現地よりも重たかったことおよび港内水位が低かったことが原因と考えられる。

写真- 3.5 は条件 7 が終わったあとの状況であり、写真- 3.4 を真正面からみた様子である。9 番目、7 番目のケーソンは滑落していることがわかる。一方で、11 番目から 16 番目のケーソンは周囲と比較するとあまり滑動してない。これは、この条件の前からケーソンが滑動(傾斜)していたため、隙間からの流れによりマウンドが掘られ、その掘られた碎石がケーソン背後にたまり、それが堆積し、ケーソンが安定化したと考えられる。

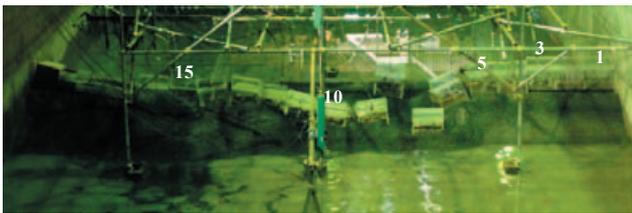


写真- 3.5 実験終了後のケーソンの状況

表- 3.10 は、そのときの波圧の結果である。No.9 のケーソンでは、滑動安全率が 1.25、滑動安全率を 1.0 とした場合、摩擦係数としては 0.48 として評価できる程度で動き出している。写真- 3.6 は、No.6~No.9 のケーソンが滑動する様子である。No.10 がまず動きだし、No.9, No.8 と動いたが、No.8 は計測器によって止められ、No.7, No.6 が滑動した。No.7 は滑動するとき一度止まったものの、最後まで流れてしまった。これの滑動のきっかけは、基礎部の洗掘により、基礎部の支持力が小さくなり、削りながら滑落したと考えられる。写真- 3.7 は、ケーソン 9 番付近を拡大したものであり、滑落したケーソン前面に碎石がたまっているのがわかる。したがって、見かけ上摩擦係数が小さくなっていると推測される。

目地幅 0.5cm の水路壁沿いの 3 函付近の実験後の状況は写真- 3.8 に示すとおりであり、港内側マウンドがケーソン下端より 10cm(現地換算 6m)以上掘れていたものの、滑動抵抗が下がらなかったと考えられる。

矩形ケーソンは 7 回の外力作用のうち、外力条件が最も厳しい条件 7 で沈下したが、6 回目まではケーソンに目立った変状は認められなかった。これは、台形ケーソン側が滑落したことにより、中央部に流れが集中するようになったためと考えられる。

表- 3.10 No.4~No.9 ケーソン滑動直前の結果(条件 7)

ケーソンNo.		No. 18	No. 14	No. 11	No. 9	No. 6
ケーソンの種類		矩形	台形	台形	台形	台形
水位 (cm)	港外側				+21.7	+21.7
	港内側				+0.5	+0.5
	ケツ上				+17.4	+20.5
波圧強度(計測値) (gf/cm ²)	港外側前面				3.8	7.0
	スリット部底面				3.2	6.1
	スリット部直立壁				6.6	7.0
	天端面				0.3	1.2
	背面(上)				-10.6	-9.1
	背面(下)				-8.5	-15.5
波圧強度(初期補正後) (gf/cm ²)	底面				8.2	-1.0
	港外側前面				18.0	21.2
	スリット部底面				18.9	21.8
	スリット部直立壁				20.8	21.2
	天端面				4.5	5.4
	背面(上)				3.6	5.1
単位幅波力 (gf/cm)	背面(下)				5.7	-1.3
	底面				22.4	13.2
	港外側前面				630.0	742.0
	スリット部底面				221.4	260.7
	スリット部直立壁				315.6	364.1
	天端面				416.0	424.0
	背面(上)				44.6	53.5
	背面(下)				38.5	53.0
	底面				1120.0	660.0
	水平力	PH				808.0
鉛直力	PV				-468.3	2.3
模型排除体積	V				75.695	75.620
ケツ模型質量	W				183.300	183.500
浮力	PB				-75.695	-75.620
水平合力	F				40.400	57.925
鉛直合力	N				84.190	107.995
滑動安全率(摩擦係数 0.6)					1.25	1.12
推定摩擦係数	μ				0.48	0.54

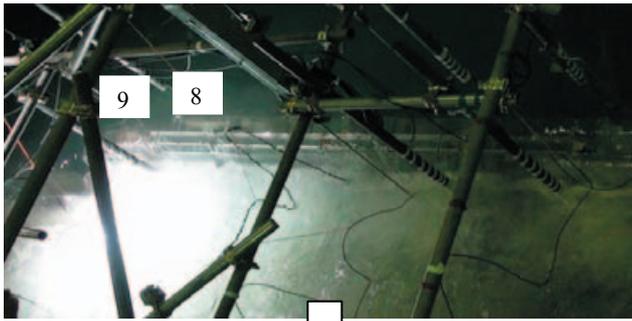


写真- 3.6 No.6~No.9 のケーソンが滑動する様子(上下では、約 5.5 秒の差がある)

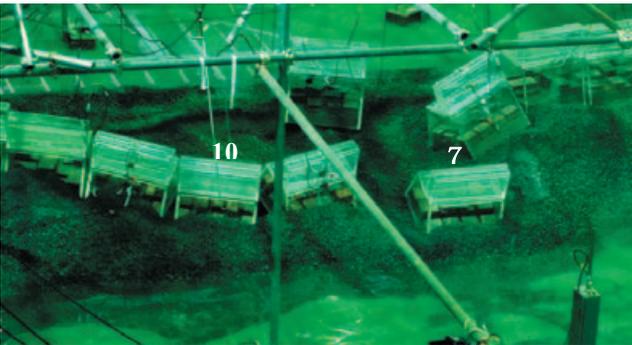


写真- 3.7 実験終了後のケーソンの状況(拡大)

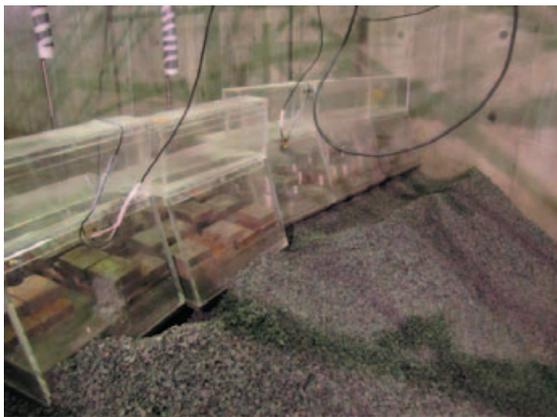


写真- 3.8 目地幅 0.5cm ケーソンの越流洗掘状況

(5) 目地流速

表- 3.11 に目地幅と目地流速の代表速度の計測値を、図- 3.11 にそれを図化したものを示す。大まかに言えば、目地流速は、港内外の水位差に比例し、港外側の目地流

速は、目地幅 3.0cm と 2.0cm はやや大きく、1.0cm と 0.5cm は小さいことがわかる。これは、ケーソンの摩擦の影響が要因として推測され、目地幅が 1.0cm 以下では、その影響が大きいことと考えられる。

また、港内外水位差が 16.7cm の条件(条件 2)では、1.0cm の目地部における港内側の流速がかなり小さくなっているが、この原因は定かではなく、測定誤差の可能性が高いと考えているが、ここでは、参考値として示すこととした。同様に、水位差 20cm の条件(条件 7)の速度も、ケーソンが変位していることから参考値として示した。また、港内側の目地幅 3.0cm の結果は、条件 2 以降はケーソンの変位にともない、測定ができなかった。

表- 3.11 水位と流速の測定結果

条件	水位差 (cm)	目地部流速 (cm/s)									
		台形ケーソン									
		0.5cm		1.0cm		2.0cm		3.0cm		1.0cm	
Δh	V_0	V_1	V_0	V_1	V_0	V_1	V_0	V_1	V_0	V_1	
1	4.6	1.6	50.9	4.9	42.4	4.9	69.5	11.0	78.4	5.8	62.7
2	16.7	3.7	97.2	9.1	71.3	9.9	153.2	18.9	167.2	7.9	欠測
3	8.2	2.2	62.5	7.8	69.0	6.7	96.0	11.2	欠測	4.7	欠測
4	12.6	3.0	69.8	10.7	96.5	9.8	140.7	15.8	欠測	6.0	欠測
5	12.9	3.9	80.4	10.7	101.2	9.5	140.4	23.3	欠測	18.9	欠測
6	10.4	4.5	77.5	9.3	101.2	10.4	124.8	28.9	欠測	25.1	欠測
7	20.0	6.8	128.1	12.7	140.4	31.5	135.3	57.5	欠測	55.7	欠測

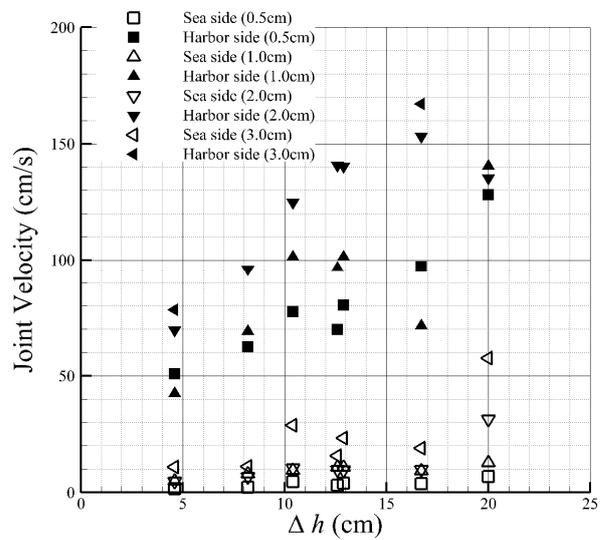


図- 3.11 目地幅による目地流速の比較

港内外水位差を使用して $(2g \Delta h)$ の 1/2 乗 (ヘッド差流速と呼ぶ) と港内流速との比をとったものを図- 3.12 に示す。港内外水位差が大きくなるほど、目地幅によらずヘッド差流速に近くなり、また、目地幅が 2cm, 3cm では、港内外水位差が小さくても、ヘッド差流速の 8 割程度である。これは、摩擦損失の影響をほぼ受けていないことを意味する。目地幅が 1.0cm より小さいケースで

は、ヘッド差流速の5割から7割程度であり、狭いと摩擦損失の影響が大きいこともわかる。

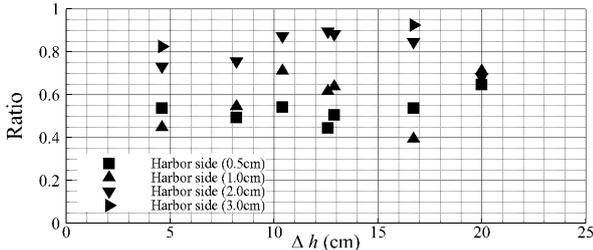


図-3.12 港内外水位差と港内流速・ヘッド差流速比

(6) 目地における捨石の安定性

目地における捨石の安定性を検討する。まず、実験での流速を用いて捨石の安定性を評価する。そのうえで、現地での目地流速の推定値から現地での安定性を検討する。

条件1において、目地幅3.0cmの港内側の目地部に於いて、目視で1cm程度洗掘されていたが、2.0cmの目地部では洗掘されていなかった(3.3(4))。そこで、目地部で計測した流速を活用して基礎マウンド捨石の安定質量を確認した。安定質量の算定には、次式のイスバッシュの式を用いた。イスバッシュ定数には、岩崎ら(1984)により示された1.08を採用して安定質量を算定した。目地幅の違いによる比較結果を表-3.12に示す。ここで、安定質量の欄において、イスバッシュの式で算定される安定質量が0.1g未満については0.0と表示した。

$$M = \frac{\pi \rho_r U^6}{48g^3 y^6 (S_r - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3}$$

ここに、

- M : 捨石の安定質量(t)
- ρ_r : 捨石等の密度(t/m³), 2.6
- U : 捨石等の上面における水の流れの速度(m/s)
- g : 重力加速度(m/s²), 9.8
- y : イスバッシュ(Isbash)の定数, 1.08
- S_r : 捨石等の水に対する比重, 2.6
- θ : 水路床の軸方向の斜面の勾配, 0.0

であり、各パラメタの値も併記した。

表-3.12 目地部の捨石の安定質量算定結果

条件	水位差(cm) Δh	捨石の安定質量(g)							
		目地幅 0.5cm		目地幅 1.0cm		目地幅 2.0cm		目地幅 3.0cm	
		V ₀	V ₁						
1	4.6	0.0	0.5	0.0	0.2	0.0	3.1	0.0	6.5
2	16.7	0.0	23.5	0.0	3.7	0.0	359.6	0.0	607.7
3	8.2	0.0	1.7	0.0	3.0	0.0	21.8	0.0	欠測
4	12.6	0.0	3.2	0.0	22.5	0.0	215.8	0.0	欠測
5	12.9	0.0	7.5	0.0	29.9	0.0	213.1	0.0	欠測
6	10.4	0.0	6.0	0.0	29.9	0.0	105.1	0.0	欠測
7	20	0.0	122.9	0.0	213.1	0.0	170.6	1.0	欠測

条件1では、港内側では、目地幅が2.0cmでは必要質量が3.1g、3.0cmでは6.5gであり、目地幅が3.0cmのみで洗掘が目視されたのは、流速が、少なくとも砕石の最大の質量より大きかったためと考えられる。

条件2では、目地幅3.0cmの周辺ケーソンが変位するほど洗掘されていたと考えられるが、算定結果では、目地幅3.0cmの必要質量は、最大質量のおよそ100倍程度であった。一方で、目地幅2.0cmの周辺ケーソンは変位するほど洗掘されておらず、このときの必要質量は、平均質量のおよそ100倍程度であった。条件2における目地幅3.0cmおよび2.0cmの目地部における安定質量の時系列を図-3.13に示す。1分程度、最大質量の100倍程度の必要質量に相当する流速が続いたあとにケーソンが変位していることがわかる。現地換算では、8分弱となる。

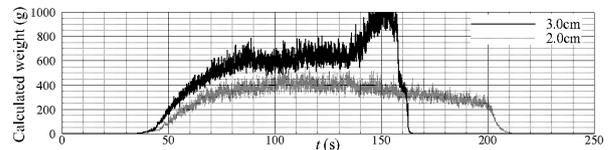


図-3.13 基礎捨石の必要質量の時系列(条件2)

(7) 現地での目地流速と捨石安定性

現地において、目地幅は20cm~80cm程度であったことが施工時の資料からわかっている。地震による傾きなども考えられなくはないが、平均としては、50cm程度ということになる。

フルード則に従うと、模型縮尺1/60では、1cm程度の目地幅となり、目地流速はヘッド差流速の6割から7割程度となる。一方で、レイノルズ数は、

$$R_e = \frac{UL}{\nu}$$

であり、粘性を変えない場合には、模型をフルード則で小さくすると、大きな差が生じる。ここで、U:代表速度、L:代表長さ、 ν :動粘性係数である。縮尺1/60であった場合、目地幅をフルード則で決めれば、レイノルズ数は、現地と模型では、およそ500倍程度異なる。

従って、現地のほうが、摩擦抵抗が少ない可能性は高いため、目地幅2.0cmや3.0cmの結果と同程度であっても不思議ではない。その場合、目地流速は、ヘッド差流速の8割から9割程度になると考えられる。

表-3.13は、水位差とヘッド差流速比率を変化させたときに計算される、目地部における捨石の安定質量を示す。また、図-3.14は、算定された質量と最大質量との比率と水位差との関係を示したものである。ヘッド差流速との比率が0.5であったとしても、水位差8.0m程度であると、必要質量が最大質量を超える。また、ケーソンが

変位するほどの洗掘がなされるためには、およそ 100 倍程度の差が必要であったが、これは、ヘッド差比率が 0.9 程度であれば、およそ 9m の水位差があれば良いことになる。洗掘の可能性については、津波の来襲時のシミュレーション結果と合わせて 3.6 節で検討する。

表- 3.13 目地部の捨石の安定質量算定結果(現地換算)

水位差(m)	捨石の安定質量 (t)					
	比率 0.5	比率 0.6	比率 0.7	比率 0.8	比率 0.9	比率 1.0
4	0.2	0.6	1.6	3.5	7.1	13.4
6	0.7	2.1	5.3	11.9	24.0	45.2
8	1.7	5.0	12.6	28.1	57.0	107.2
10	3.3	9.8	24.6	54.9	111.3	209.4
12	5.7	16.9	42.6	94.9	192.3	361.9

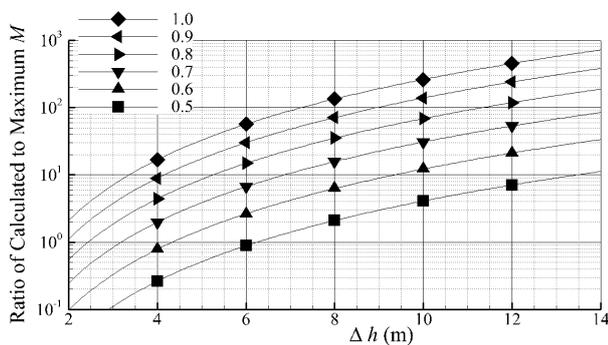


図- 3.14 算定質量/最大質量の比と水位差との関係

(8) 考察

ここでは、目地幅を様々変えて、ケーソンの滑动状況の違いを検討した。目地幅が広い場所では目地洗掘から変位した。そのときの、滑动安全率は摩擦係数を 0.6 と仮定すると 1.7 程度であった。また、ケーソンが抜けたことで隙間が広くなり、連鎖的に変位が生じた場合においては 1.9 程度の滑动安全率でも変位している。

そのときの変位距離は小さく、むしろ洗掘によりバランスを失い、洗掘されたところに向かって傾斜するというものであった。さらに、一度安定性を失って若干変位した後は、ケーソン背後に捨石が回り込むようになり、その後のケーソンの滑动安定性が増し、変位しにくくなった。つまり、洗掘から始まる変位は、比較的滑动安全率が高いため、変位距離が短くなるという結果となる。また、傾斜するほどに洗掘されるためには、実験では、最大質量のおよそ 100 倍程度の安定質量が必要される目地流速が比較的長い時間作用している必要があることがわかった。

その一方で、滑动安全率が 1.25 程度で洗掘されながら変位するような被災パターンは、洗掘量が大きくなるとともに、津波力が大きくなったときに生じると考えられ、ケーソン背後に捨石をためながら、変位量も大きくなる

ような被災形態となることがわかった。

従って、目地洗掘を伴うケーソンの被災形態としては、津波力が小さいとき(滑动安全率が高いとき)には、ケーソンが傾斜するように変位し、水平変位の距離も短い。また、ケーソン背後に洗掘された捨石がたまるため、変位後の安定性が高くなる。津波力が大きいとき(滑动安全率が低いとき)には、水平変位の距離が大きくなるが、その距離は、動きだす際の津波力が大きくなればなるほど長くなると考えられる。

3.4. 目地幅を狭くした水理模型試験

(1) 実験模型

堤体配置を図- 3.15 に示す。港外側に向かって左端の隙間ケーソンを除き、すべてが台形ケーソンである。ケーソン模型は内部に鉛塊を入れて質量を調整してある。質量は実物のケーソン、中詰め、上部工の質量をフルード則で縮小した後に、1.03 で割って若干軽くした値としてある。3%分軽くしたのは、実験水は水道水であり、現地の海水より密度が小さいことを考慮したものである。ただし、図中において「質量割増」としたケーソンは、鉛塊を多く入れて重量を割り増しし、滑动しない状況での波圧を測定できるようにした。また、図中において「重心上げ」としたケーソンは、鉛塊の下に発泡スチロールを敷いて模型の重心を高くしてある。堤体模型の諸元は表- 3.14 に示すとおりである。

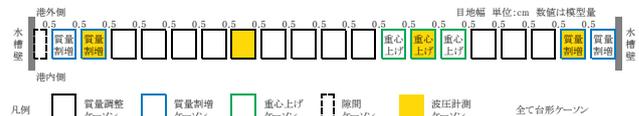


図- 3.15 実験模型の配置

表- 3.14 堤体模型の諸元

水槽の場所	ケーソン種類	No.	断面の工区	質量(kg)	目地幅(cm)
南側	台形ケーソン	1	深部 4 区台形函	割増	0.5
		2	深部 4 区台形函	割増	0.5
		3	深部 4 区台形函	165.0	0.5
		4	深部 3 区	165.2	0.5
		5	深部 3 区	165.4	0.5
		6	深部 3 区	165.8	0.5
		7	深部 3 区	165.4	0.5
		8	深部 3 区	165.4	0.5
		9	深部 3 区	165.0	0.5
		10	深部 3 区	165.8	0.5
		11	深部 3 区	167.7	0.5
		12	深部 3 区	166.3	0.5
		13	深部 3 区	164.9	0.5
		14	深部 3 区	165.7	0.5
		15	深部 3 区	166.0	0.5
		16	深部 3 区	166.2	0.5
		17	深部 3 区	164.7	0.5
		18	深部 3 区	割増	0.5
		19	深部 3 区	割増	0.5

(2) 計測方法

水位、流速、波圧(圧力)の測定と、水中ビデオおよびビデオカメラ(気中)によるビデオ撮影を行った。図中における記号の意味ならびに波圧計・流速計・ビデオの設置については、3.3(2)にならうものとする。

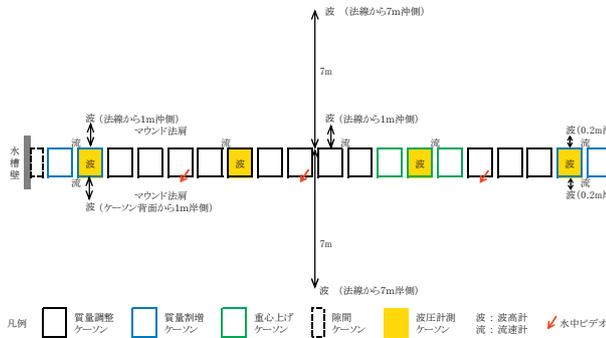


図-3.16 計測機器配置

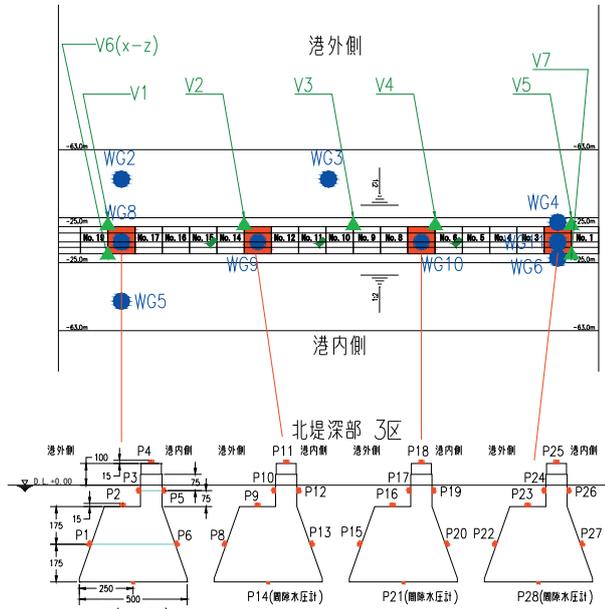


図-3.17 波圧計測位置

(3) 実験条件

初期水位と循環流ポンプの出力を変更して5回の実験を実施した。港内外水位差の計測結果は表-3.15に示す。

表-3.15 港内外水位と水位差の解析結果

条件	ポンプ出力 (%)	模型量				現地換算				解析区間 (s)		
		水位 (cm)		水位差 (cm)	水位 (m)			水位差 (m)				
		初期	港外		港内	初期	港外		港内			
		η_s	η_o	η_i	Δh	η_s	η_o	η_i	Δh	計測開始からの経過時間	解析区間長	
1	10	5.5	7.0	2.0	5.0	3.3	4.2	1.2	3.0	90	150	60
2	15	5.5	9.3	-1.9	11.2	3.3	5.6	-1.1	6.7	90	150	60
3	15	9.5	12.9	2.9	10.0	5.7	7.7	1.7	6.0	90	150	60
4	20	14.4	18.3	6.7	11.6	8.6	11.0	4.0	7.0	90	150	60
5	25	14.4	19.8	3.9	15.9	8.6	11.9	2.3	9.6	119	120	1

(4) 目地流速

目地部で計測した流速の測定結果を表-3.16及び図-3.18に示す。ここで、着色セルはケーソンが滑動する直前の数値であり、非着色セルは流速安定後の数値である。港内側の目地流速は、3.3節で行った実験の結果と同程度であることがわかる。図-3.19は、港内外水位差と港内流速・ヘッド差流速比である。0.5から0.6程度であるのは、同じであるが、条件5のケースでは若干流速が小さい。これは、ケーソンの変位が生じたためと考えら、水位差と目地部の流速に多少のタイムラグがあることがわかる。

表-3.16 目地部の流速測定結果

条件	水位差 (cm)	目地部流速 (cm/s)									
		No. 1, 2		No. 6, 7		No. 9, 10		No. 13, 14		No. 18, 19	
		Δh	V_0	V_0	V_1	V_0	V_1	V_0	V_1	V_0	V_1
1	5.0	1.5	58.0	4.3	1.7	3.2	2.7	54.9			
2	11.2	2.4	86.1	6.8	2.8	4.8	3.9	77.2			
3	10.0	2.4	81.5	6.6	2.8	4.5	3.7	73.3			
4	11.6	4.1	87.0	7.6	4.2	6.1	4.7	72.6			
5	15.9	5.9	78.8	10.0	5.6	7.4	7.0	87.9			

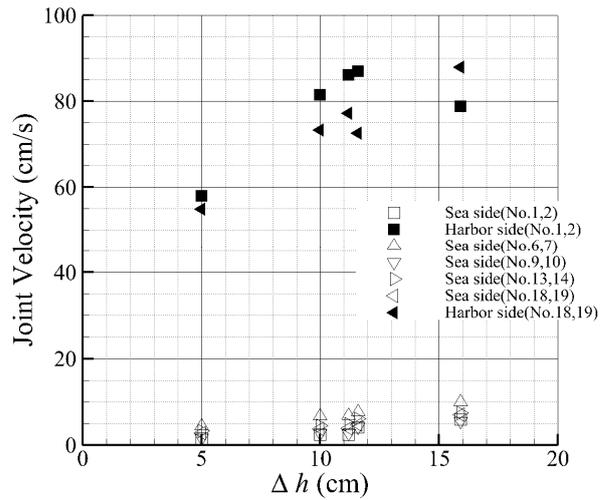


図-3.18 港内外水位差による目地部流速の変化

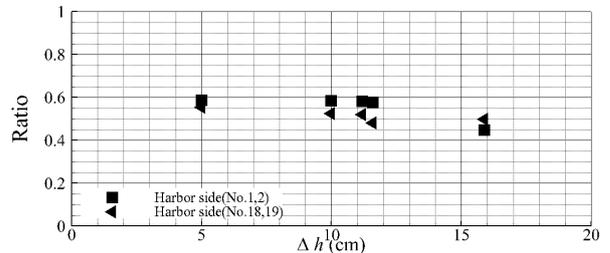


図-3.19 港内外水位差と港内流速・ヘッド差流速比

(5) ケーソンの変位と波力

実験中の堤体模型の状態の変化を表-3.17に示す。条件1から3までは変化はなく、条件4では越流洗掘を生

じているが、ケーソンの変位は生じていない。

条件5では、写真-3.9に示すように、2函がマウンド下まで滑落し、これらに隣接するケーソンが変位した。また、写真-3.9からわかる通り、滑落したケーソンに近いケーソンほど変位した水平距離が長く、若干の回転変位も加わって、弓が反ったような形状になった。これは、ケーソンが抜けた後に生じる流速とケーソン目地流速との差が大きいため、ケーソン本体にせん断力が作用し、さらに隣の函との接触することによる摩擦抵抗も影響し、回転していくと考えられる。そしてそれが隣の函に連鎖することで、弓なりの形状に変形したと推測される。

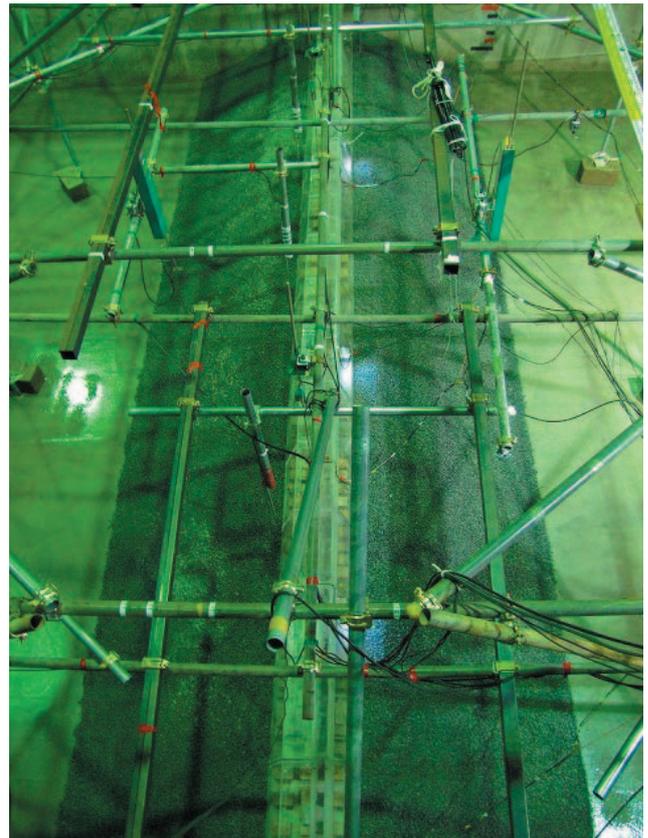
表-3.17 実験中の堤体模型の状態の変化

ケーソン No.	条件	1	2	3	4	5
		初期水位 (cm)	5.5	5.5	9.5	14.4
越流状況		なし	なし	あり	最初から水没	
1	0.5	変化なし	変化なし	変化なし	わずかに越流洗掘あり	越流洗掘
2	0.5					越流洗掘
3	0.5					越流洗掘
4	0.5					越流洗掘
5	0.5					越流洗掘
6	0.5					越流洗掘
7	0.5					越流洗掘
8	0.5					越流洗掘
9	0.5					越流洗掘
10	0.5					越流洗掘
11	0.5					越流洗掘
12	0.5					変位
13	0.5					変位
14	0.5					変位
15	0.5					変位
16	0.5					滑落
17	0.5					滑落
18	0.5					変位
19	0.5					越流洗掘

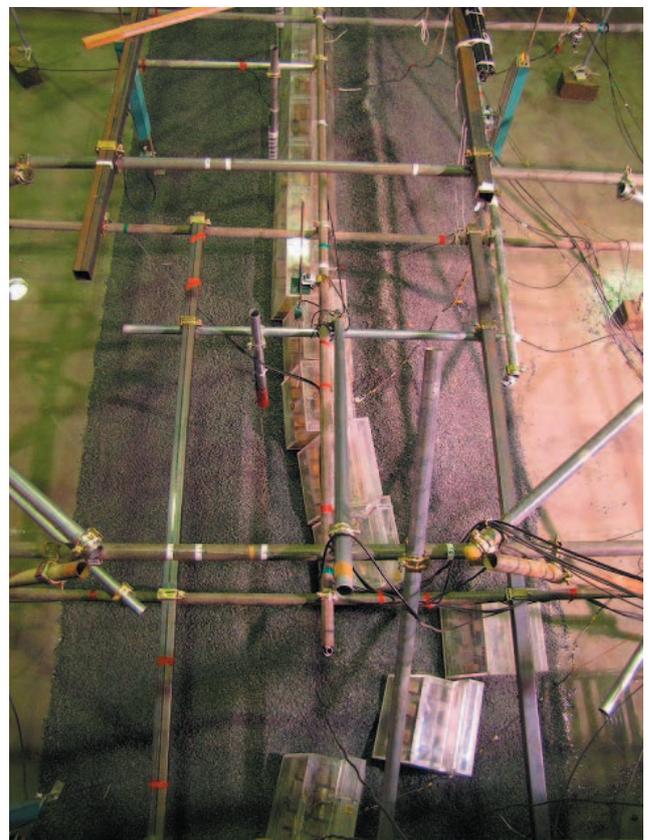
ケーソン滑動直前における圧力の計測結果と滑動安全率算定結果を表-3.18に示す。ケーソン模型 No.18 と No.2 は、質量割増ケーソンであったが、滑動安全率の算定では、質量割増をしないケーソンの質量を用い、摩擦係数は0.6とした。

これより、最初のケーソンが変位を開始した瞬間における滑動安全率を見ると、滑動安全率が1.02, 1.07になっていることがわかる。ただし、1.07は、仮のケーソンの質量を用いていることを踏まえると、ほぼ、1.0で変位していると考えられる。また、仮に滑動安全率が1.0で動いたと仮定すると、表-3.18の摩擦係数確認結果の欄をみると、摩擦係数が、0.59, 0.56となる。

3.2節における引張試験と比較しても、0.59程度の摩擦係数であれば、同程度の結果であり、目地幅が狭く目地において洗掘が生じないと考えられる場合は、水位差によるケーソンの変位は、水平に引っ張られることによって生じる現象と同じ状況であることがわかる。



(1) 実験前(模型設置直後, 注水前)



(2) 実験後(排水後)

写真-3.9 実験終了後の実験模型の状態

表- 3.18 ケーソン変位直前における結果(条件 5)

ケーソン No.		No.18	No.13	No.7	No.2	
水位(cm)	港外側	19.9	19.9	19.9	19.9	
	港内側	3.8	3.8	3.8	3.8	
ケーソン上		19.5	19.4	19.4	19.2	
波圧強度 (計測値) (gf/cm ²)	港外側前面	6.2	5.6	5.3	5.6	
	スリット部底面	5.4	5.1	5.4	5.2	
	スリット部直立壁	5.8	5.4	5.2	5.5	
	天端面	1.3	1.1	0.8	1.4	
	背面(上)	-10.6	-12.5	-10.8	-12.4	
	背面(下)	-13.5	-13.8	-12.9	-12.7	
	底面	-2.2	-1.6	1.3	-1.0	
波圧強度 (初期補 正後) (gf/cm ²)	港外側前面	20.6	20.0	19.7	20.0	
	スリット部底面	21.3	21.0	21.3	21.1	
	スリット部直立壁	20.2	19.8	19.6	19.9	
	天端面	5.7	5.5	5.2	5.8	
	背面(上)	3.8	1.9	3.6	2.0	
	背面(下)	0.9	0.6	1.5	1.7	
	底面	12.2	12.8	15.7	13.4	
単位幅波 力(gf/cm)	港外側前面	水平	721.0	700.0	689.5	700.0
		鉛直	253.4	246.0	242.3	246.0
	スリット部底面	355.7	350.7	355.7	352.4	
	スリット部直立壁	404.0	396.0	392.0	398.0	
	天端面	56.4	54.5	51.5	57.4	
	背面(上)	52.4	26.2	48.2	26.8	
	背面(下)	水平	31.5	21.0	52.5	59.5
		鉛直	11.1	7.4	18.4	20.9
	底面	610.0	640.0	785.0	670.0	
	水平力	PH	1041.1	1048.8	980.8	1011.7
鉛直力	PV	66.6	18.6	-117.1	6.7	
模型排除体積	V	76470	76470	76370	76370	
ケーソン模型質量	W	166000	164900	165400	166000	
浮力	PB	-76470	-76470	-76370	-76370	
水平合力	F	52055	52440	49040	50585	
鉛直合力	N	92860	89360	83175	89965	
滑動安全率(摩擦係数 0.6)		1.07	1.02	1.02	1.07	
推定摩擦係数	μ	0.56	0.59	0.59	0.56	

表- 3.19 は変位する直前における波圧を水位で無次元化したものである。図- 3.20 は、それを図示したものである。港外側の波圧に関しては港外側の水位変化で除し、港内側の波圧に関しては、港内側の水位変化で除した。

表- 3.19 滑動直前におけるケーソンの無次元波圧強度

ケーソン No.		No. 18	No. 13	No. 7	No. 2
水位変化量	港外側	5.5	5.5	5.5	5.5
	港内側	-10.6	-10.6	-10.6	-10.6
水位差		16.1	16.1	16.1	16.1
波圧変化量 (計測値) (gf/cm ²)	港外側前面	6.2	5.6	5.3	5.6
	スリット部底面	5.4	5.1	5.4	5.2
	スリット部直立壁	5.8	5.4	5.2	5.5
	天端面	1.3	1.1	0.8	1.4
	背面(上)	-10.6	-12.5	-10.8	-12.4
	背面(下)	-13.5	-13.8	-12.9	-12.7
	底面	-2.2	-1.6	1.3	-1.0
無次元波圧強度	港外側前面	1.13	1.02	0.96	1.02
	スリット部底面	0.98	0.93	0.98	0.95
	スリット部直立壁	1.05	0.98	0.95	1.00
	天端面	0.15	0.13	0.10	0.17
	底面	-0.40	-0.29	0.24	-0.18
	背面(上)	1.00	1.18	1.02	1.17
	背面(下)	1.27	1.30	1.22	1.20

前面の波圧は、1.0 程度から大きくなって 1.1 なので、静水圧と同じか少し大きい程度の変化である。これは越流したことにより、流線が凸となった効果が考えられる。一方で、背面については、港内水位の低下より大きな波圧が低下している。これは、越流の影響が考えられる。

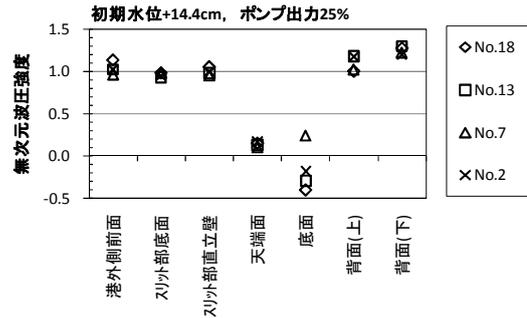


図- 3.20 滑動直前におけるケーソンの無次元波圧強度

(6) マウンドの状況

実験開始前と実験終了後に、注) 測線 3, 4, 5 は、実験後の状況から補足的に計測した地点である。

図- 3.21 に示す地点においてマウンドの測量を実施している。測量結果を図- 3.22 から図- 3.31 に示す。

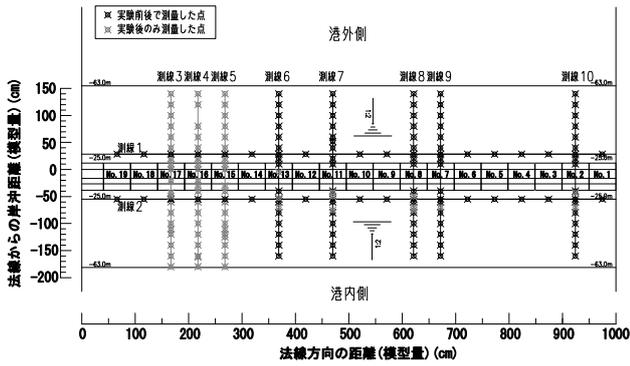
図- 3.22 は、港外側マウンド法肩を法線方向に縦断測量した結果である。実験前と実験後の測量結果がほぼ同じであり、港外側マウンド法肩はほとんど変形していない。実験後の目視観察によっても、マウンド被覆石が移動した形跡は認められなかった。

図- 3.23 は、港内側マウンド法肩を法線方向に縦断測量した結果である。実験後の測量結果は実験前より低く、概ね 10cm 程度(現地換算で 6m 程度)の低下がみられる。図中に■印で示したデータは、滑動したケーソンがマウンド法肩位置にあるので、ケーソン上を測量した結果である。

図- 3.24 から図- 3.31 は、ケーソン中央を法線直角方向に横断測量した結果である。港外側のマウンド断面は、実験前と実験後がほぼ同じである。実験後の目視観察ではマウンド被覆石の移動は認められないので、港外側マウンドの実験前後の変化は測量誤差と考えられる。

No.2 ケーソン(図- 3.31)から No.13 ケーソン(図- 3.27)の港内側マウンドは、マウンド天端が低くなって、その港内側に凸上の盛り上がりを生じている。すなわち、越流によりマウンド天端が洗掘し、実験前のマウンド法肩の岸側に堆積する越流洗掘を生じている。

ケーソンの滑動量が大きい No.15 ケーソン(図- 3.26)から No.17 ケーソン(図- 3.24)は、ケーソンが滑動しながらマウンドを崩すため、マウンド法肩付近の凸上の堆積は消滅している。港外側マウンドの法肩はほぼ元の形状で残っていて、港内側に向かって低くなる傾斜を生じている。滑動後にマウンド石材が流れている影響もあるが、マウンド天端面の傾斜がケーソン滑動時のマウンドのすべり面とおおむね一致していると考えられる。



注) 測線 3, 4, 5 は, 実験後の状況から補足的に計測した地点である。

図- 3.21 実験実施前後のマウンド測量地点

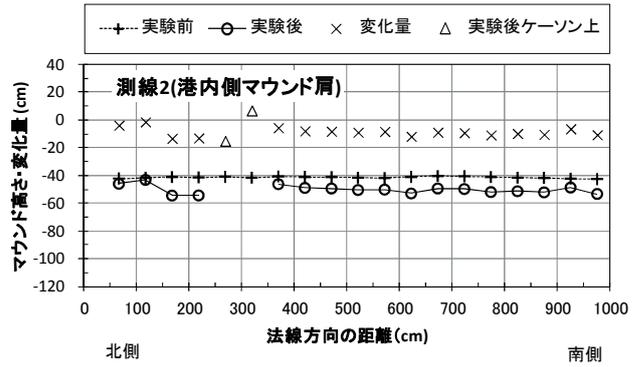


図- 3.23 港内側マウンド法肩の縦断測量結果

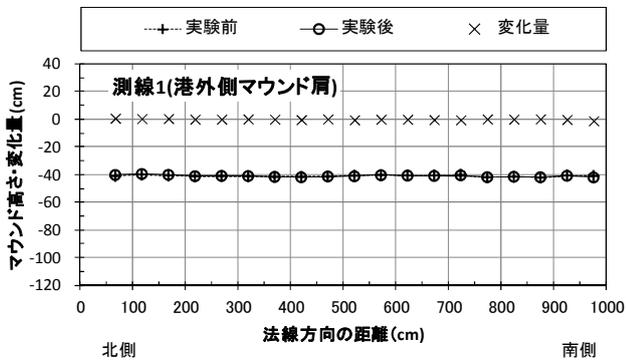


図- 3.22 港外側マウンド法肩の縦断測量結果

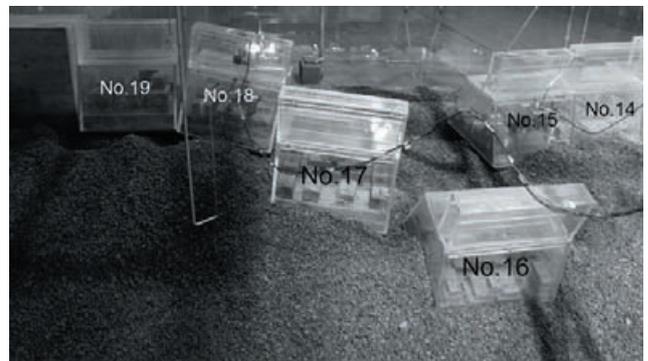
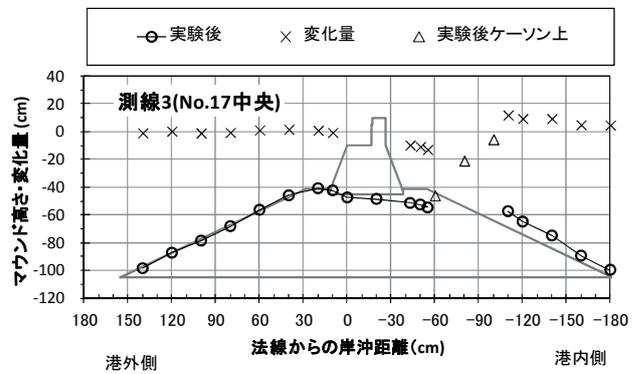


図- 3.24 No.17 ケーソン中央の横断測量結果

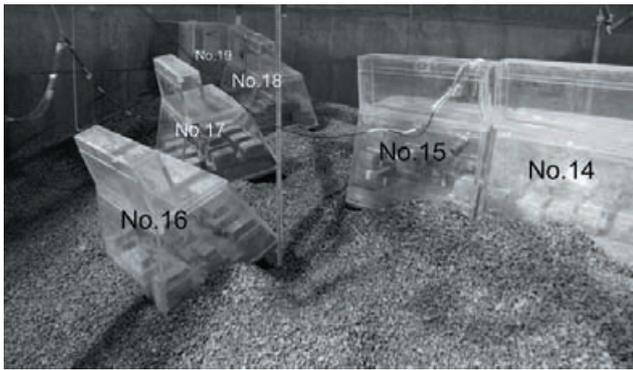
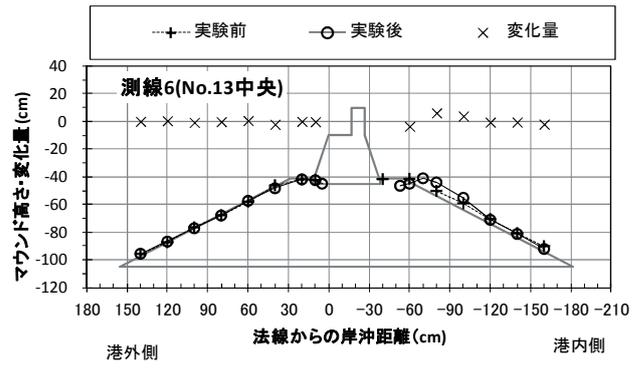
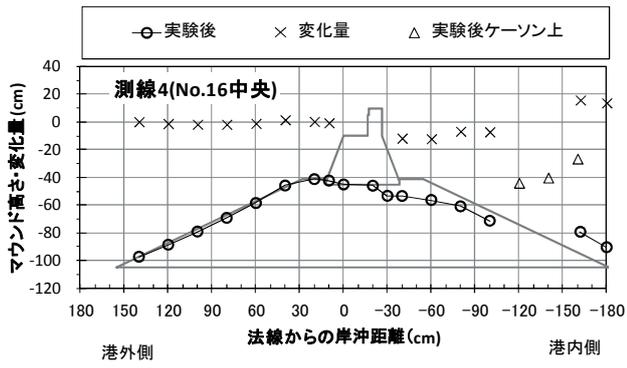


図- 3.25 No.16 ケーソン中央の横断測量結果

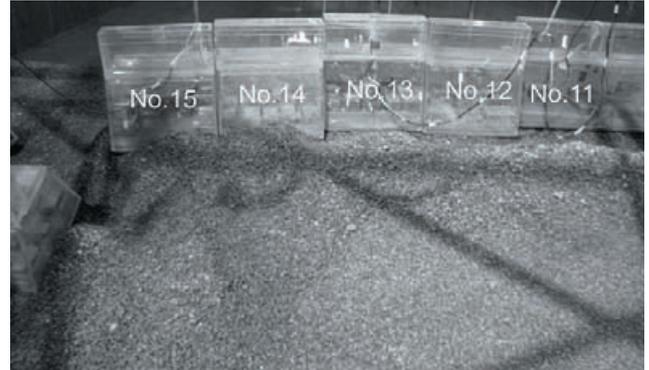


図- 3.27 No.13 ケーソン中央の横断測量結果

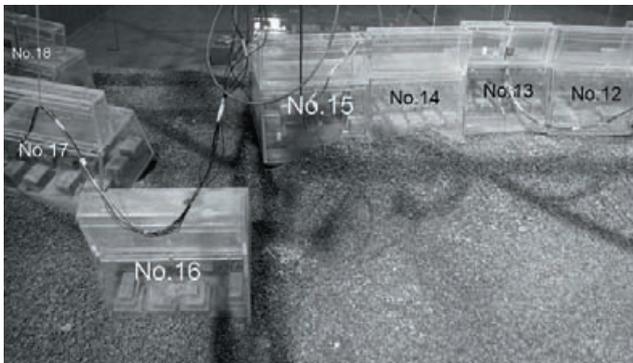
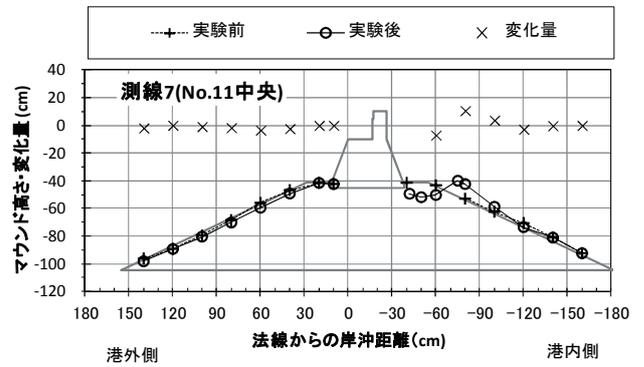
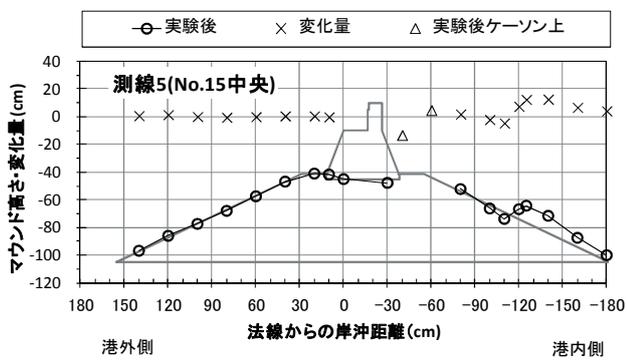


図- 3.26 No.15 ケーソン中央の横断測量結果



図- 3.28 No.11 ケーソン中央の横断測量結果

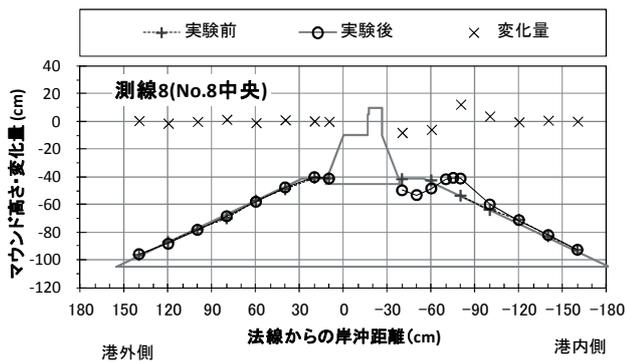


図- 3.29 No.8 ケーソン中央の横断測量結果

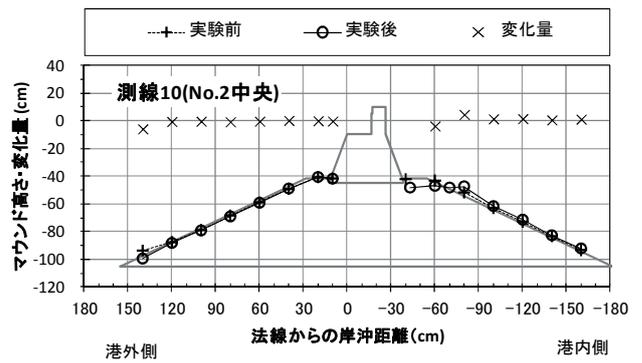


図- 3.31 No.2 ケーソン中央の横断測量結果

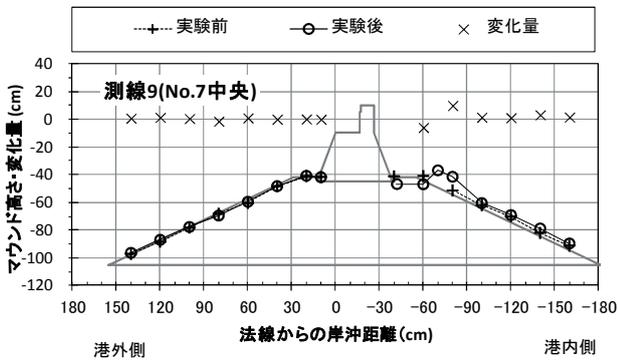
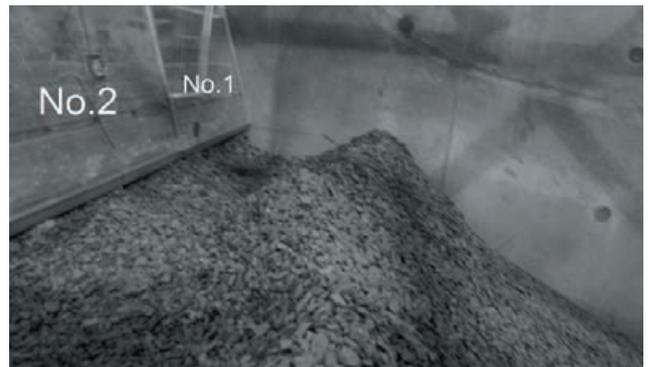
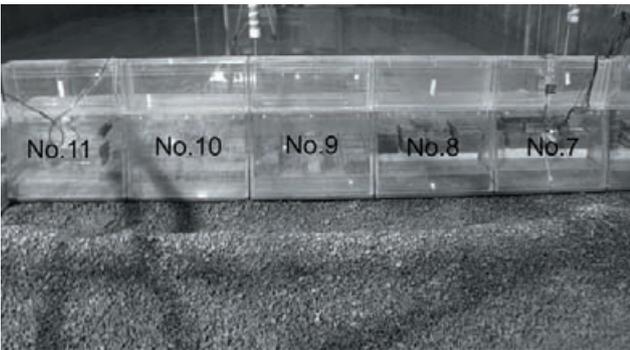
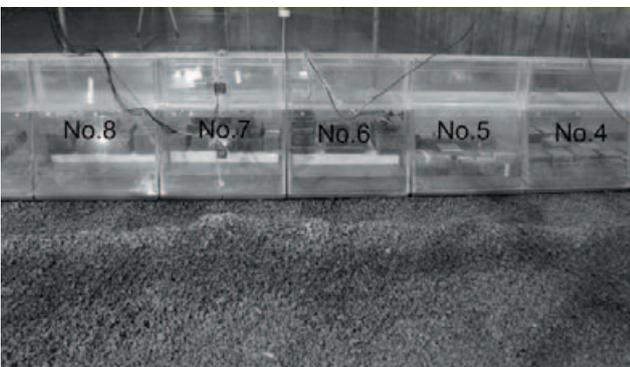


図- 3.30 No.7 ケーソン中央の横断測量結果



(7) 考察

ケーソンの滑動は、摩擦係数を 0.6 と仮定すると、滑動安全率が 1.1 程度で滑動しており、滑動したときの滑動安全率が 1.0 と仮定すると、摩擦係数が 0.54 から 0.57 の間となる。引張試験の結果(図- 3.4)から考えると、仮にマウンドが洗掘を受けていない状態であっても、摩擦係数のばらつきの範囲内である。さらに、越流による洗掘はすべての函で生じており、また、0.5cm の目地幅の流速では、碎石質量が安定質量より大きいため、目地における洗掘が生じなかった。そのような結果から導き出せる結論は、この滑動を生じた函の摩擦係数が小さかったと考えるのが合理的ではないかと考える。

また、ケーソンが滑動したあと、そこに生じる強い流れと目地における流れとの差により、連鎖的に隣の函を動かした。このため、ケーソンが弓なりの形状となるような滑動を生じた。

このときの波圧の状況は、前面の波圧は静水圧よりも同じか若干大きい。一方、背面の波圧は、静水圧よりも若干小さくなり、これは越流による影響であると考えられる。ケーソンがマウンドから滑落する際、マウンドを削るように滑ったと考えられるような滑り面が見受けられるが、洗掘からの滑動よりもケーソン背後にたまった碎石の量は少ないのがわかる。

3.5. 目地幅を広くした水理模型試験

(1) 実験模型

次に、目地幅が広いケースについて検討する。目地幅が3.0cmのケースでは、3.3節でも示されるとおり、目地洗掘が大きく生じ、滑動安全率がかなり高い状態でケーソンが傾斜、滑動している。一方で、2.0cmの目地幅のケースでは、目地洗掘が大きく生じず、かつ、目地流速は、捨石質量を動かす程度の流速であり、3.0cmの目地幅より若干小さい程度の流速である。そこで、本ケースでは目地幅をすべて2.0cmとし、目地幅が広い場合のケーソンの滑動状況を調べることにした。

堤体配置を図-3.32に示す。港外側に向かって左端の隙間ケーソンを除き、すべてが台形ケーソンである。ケーソン模型は内部に鉛塊を入れて質量調整をしてある。質量は実物のケーソン、中詰め、上部工の質量をフルード則で縮小した後に、1.03で割って若干軽くした値としてある。ただし、図中において「質量割増」としたケーソンは、鉛塊を多く入れて重量を割り増しし、滑動抵抗力を高めてある。また、図中において「重心上げ」としたケーソンは、鉛塊の下に発泡スチロールを敷いて模型の重心を高くした。堤体模型の諸元を表-3.20に示す。



図-3.32 実験模型の配置

表-3.20 堤体模型の諸元(数値は模型量)

水槽の場所	ケーソン種類	No.	断面の工区	質量(kg)	目地幅(cm)		
南側	台形ケーソン	1	深部4区台形函 割増		2.0		
		2	深部4区台形函 割増		2.0		
		3	深部4区台形函	166.0	2.0		
		4	深部3区	166.0	2.0		
		5	深部3区	165.4	2.0		
		6	深部3区	165.8	2.0		
		7	深部3区	165.4	2.0		
		8	深部3区	165.4	2.0		
		9	深部3区	165.0	2.0		
		10	深部3区	165.8	2.0		
		11	深部3区	166.1	2.0		
		12	深部3区	166.3	2.0		
		13	深部3区	166.1	2.0		
		14	深部3区	165.7	2.0		
		15	深部3区	166.0	2.0		
		16	深部3区	166.2	2.0		
		北側	台形ケーソン	17	深部3区	166.3	2.0
				18	深部3区 割増		2.0
19	深部3区 割増				2.0		

(2) 計測方法

水位、流速、波圧(圧力)の測定と、水中ビデオおよびビデオカメラ(気中)によるビデオ撮影を行った。図中における記号の意味ならびに波圧計・流速計・ビデオの設置については、3.3(2)にならうものとする。

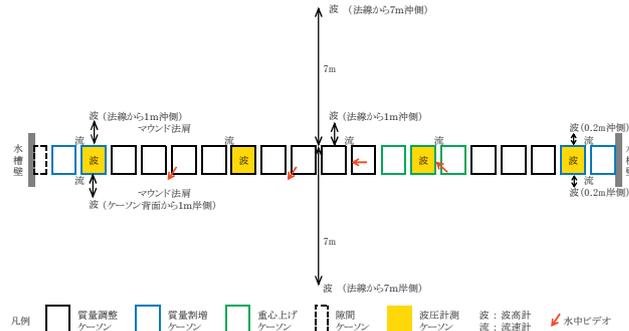


図-3.33 計測機器配置

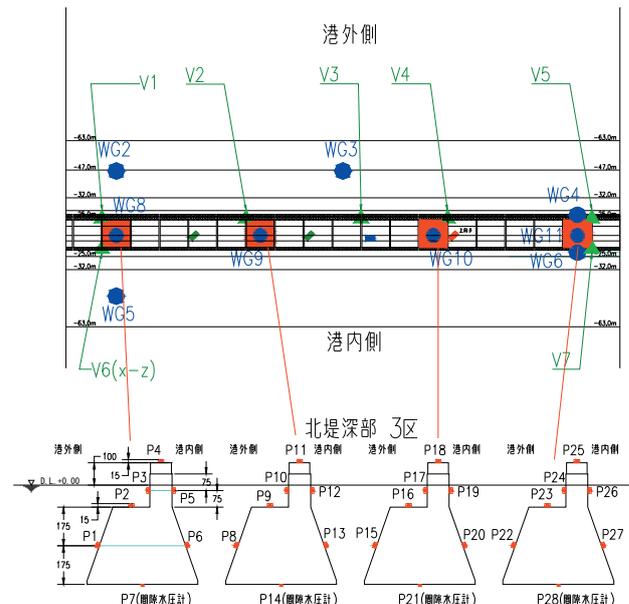


図-3.34 波圧計測位置

(3) 実験条件

流れの作用方向を押波流れ(順流)とし、循環流ポンプの運転時間を120sとした。初期水位と循環流ポンプの出力を変更して7回の実験を実施した。目地幅の狭いケースと本ケースで初期水位と循環流ポンプ出力が同じ条件の港内外水位の比較は図-3.35に示すとおりである。同じ出力では目地幅0.5cmよりも2.0cmの港内外水位差が小さく、目地流速の差によるものと考えられる。

表-3.21 港内外水位と水位差の解析結果

条件	ポンプ出力 (%)	模型量				現地換算				解析区間 (s)		
		水位 (cm)			水位差 (cm)	水位 (m)			水位差 (m)	計測開始からの経過時間	解析区間長	
		初期	港外	港内		初期	港外	港内				
1	10	5.5	6.8	2.8	4.0	3.3	4.1	1.7	2.4	90	150	60
2	20	5.5	10.7	-5.0	15.7	3.3	6.4	-3.0	9.4	90	150	60
3	15	9.5	12.2	3.9	8.3	5.7	7.3	2.3	5.0	90	150	60
4	15	14.4	16.3	10.6	5.7	8.6	9.8	6.4	3.4	90	130	40
5	15	12.0	14.3	7.2	7.1	7.2	8.6	4.3	4.3	90	150	60
6	23	12.0	16.7	2.5	14.2	7.2	10.0	1.5	8.5	90	150	60
7	28	12.0	18.2	-0.3	18.5	7.2	10.9	-0.2	11.1	95	96	1

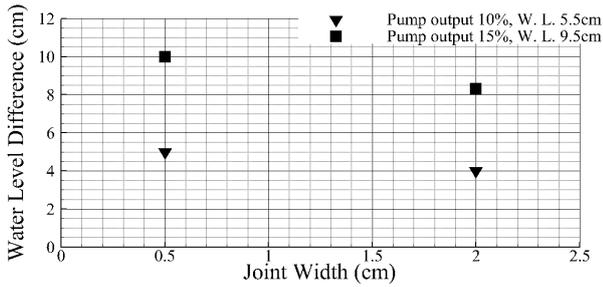


図-3.35 ケーソン目地幅による港内外水位差の比較

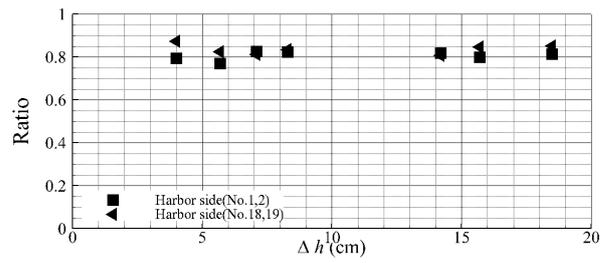


図-3.37 港内外水位差と港内流速・ヘッド差流速比

(4) 目地流速

ケーソン目地の港外側と港内側における流速の測定結果を表-3.22及び図-3.36に示す。ここで、着色セルはケーソンが滑動する直前の数値であり、非着色セルは流速安定後の数値である。また、港内外水位差と港内流速をヘッド差から計算できる流速との比を図-3.37に示す。これらを見ると、場所ごとに流速の大きな変化はなく、また、ヘッド差との比は、0.8程度であり、これは3.3節の結果ともかわりがない。

3.3節(6)の検討から、ヘッド差が10cm程度を越えてくると目地洗掘が生じるような安定質量程度になっている。従って、ケース2, 6, 7では目地洗掘が生じている可能性が高いと考えられる。

(5) ケーソンの変位と波力

本ケースの実験中の堤体模型の状態の変化を表-3.23に示す。表-3.24は実験中の堤体模型の変化の内容である。初期水位+5.5cm(現地換算で+3.3m)のポンプ出力20%で目地洗掘を生じている。初期水位+12.0cm(現地換算で7.2m)のポンプ出力23%では、ケーソン背後において、マウンド天端面の被覆石が越流による洗掘を生じている。初期水位+12.0cm(現地換算で7.2m)のポンプ出力28%では、2函がマウンド法先まで滑落し、1函は大きく滑動し、多くのケーソンが微少な滑動を生じている。

全ケースの終了時の実験模型の変状の平面配置を図-3.38に示すとおりである。目地幅が狭いケースと違い、滑動したケーソンの周辺の函がほとんど動かず弓なりになっていない。これは、目地部における流速が速いことから、ケーソンが抜けた場所における流速との差がケーソンを動かすほどの差ではなかったためと考えられる。

図-3.39に、全ケーソンの滑動状況を示す。これを見ると、ほとんどの函が微少に動いていることがわかる。

表-3.22 目地部の流速測定結果

条件	水位差 (cm)	目地部流速 (cm/s)																			
		No. 1, 2				No. 6, 7				No. 9, 10				No. 13, 14				No. 18, 19			
		V_0	V_1	V_0	V_1	V_0	V_1	V_0	V_1	V_0	V_1	V_0	V_1	V_0	V_1						
1	4	5.9	70.1	7.5	7.9	7.6	6.0	77.4													
2	15.7	12.6	140.0	13.7	15.8	15.7	12.8	148.7													
3	8.3	9.1	104.8	9.8	11.3	11.4	9.4	106.3													
4	5.7	8.6	81.2	9.7	10.8	10.8	8.9	87.2													
5	7.1	8.8	97.2	9.7	11.2	11.3	9.1	95.9													
6	14.2	15.7	136.4	18.3	19.2	19.4	15.2	134.8													
7	18.5	19.4	154.5	21.9	19.5	22.0	18.7	162.0													

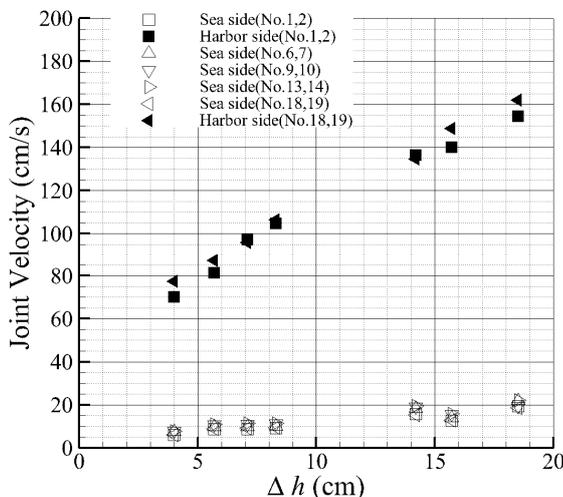


図-3.36 港内外水位差による目地部流速の変化

表-3.23 実験中の堤体模型の状態の変化

ケーソン No.	条件	1	2	3	4	5	6	7	
1	2.0	越流	なし	微少	あり	最初から水没			
2	2.0							越流洗掘	
3	2.0							変位	
4	2.0							変位	
5	2.0							越流洗掘	
6	2.0							変位	
7	2.0							越流洗掘	
8	2.0							変位	
9	2.0	目地						越流洗掘	
10	2.0	幅						変位	
11	2.0		変化なし					変位	
12	2.0			目地洗掘あり(目視で10mm程度)				変位	
13	2.0			変化なし				変位	
14	2.0			変化なし				変位	
15	2.0			変化なし				変位	
16	2.0							滑落	
17	2.0							滑落	
18	2.0							越流洗掘	
19	2.0							越流洗掘	

表- 3.24 実験中の堤体模型の変状の内容

実験順序	津波形態	流向	設定水位 (cm)	ポンプ出力 (%)	防波堤の状態
1	押し波	順流	5.5	10	非越流状態、変状なし
2			5.5	20	ケーソン目地部で洗掘が始まる
3			9.5	15	マウンド石材変状なし
4			14.4	15	大きな変状なし
5			12.0	15	大きな変状なし
6			12.0	23	ケーソン背後のマウンドが越流水により洗掘される
7			12.0	28	計測開始から96s後(ポンプ運転開始から66s後)にケーソンNo.17が滑動 計測開始から100s後(ポンプ運転開始から70s後)にケーソンNo.16が滑動 計測開始から103s後(ポンプ運転開始から73s後)にケーソンNo.15が滑動

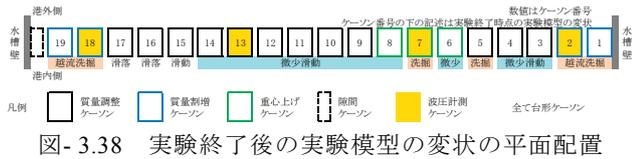


図- 3.38 実験終了後の実験模型の変状の平面配置

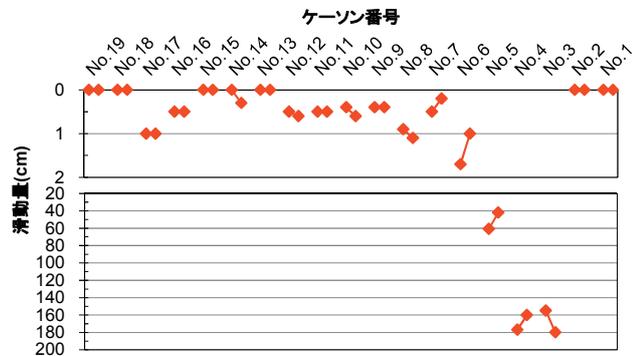
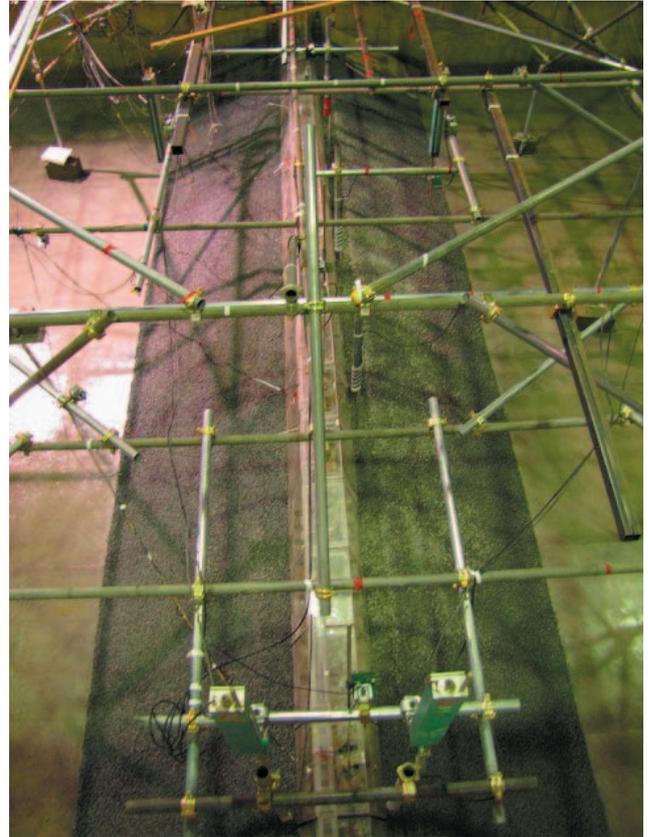


図- 3.39 ケーソンの変位量測定結果

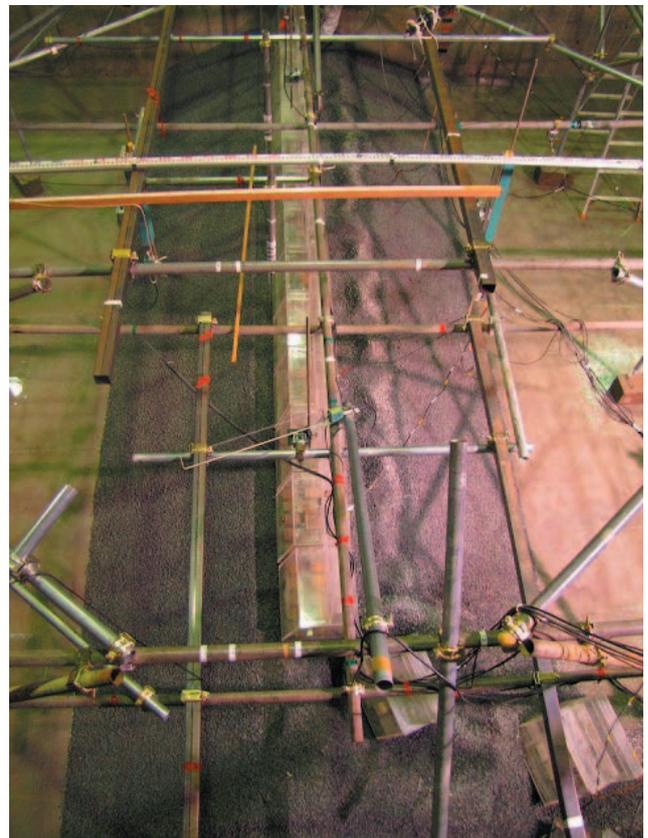
ケーソンが変位する直前における圧力の計測結果と滑動安全率算定結果を表- 3.25 に示す。最初の1函が変位するまでは、すべてのケーソンで安定であった。また、ケーソン模型 No.18 と No.2 は、質量割増ケーソンであったが、滑動安全率の算定では、質量割増をしないケーソンの質量を用いた。

これをみるとわかるように、摩擦係数を 0.6 として計算した場合の滑動安全率は、0.97 から 1.04 となっており、摩擦係数は、0.58, 0.60 であり、No.18, No.2 の結果が参考値であることを考えると、引張り試験の結果と同じと見なせる。また、目地洗掘は目視されている程度は生じていることから、ケーソンが傾斜しない程度の洗掘が生じていても、滑動抵抗力に影響しないことがわかる。これも、引張り試験の結果と一致している。

よって、ケーソンの傾斜が生じていない程度の洗掘量であれば、目地幅が狭い状況と同じく、水位差によるケーソンの変位は、水平に引っ張られることによって生じる現象と同じ状況であることがわかる。



(1) 実験前(模型設置直後、注水前)



(2) 実験後(排水後)

写真- 3.10 実験前後の実験模型の状態

表- 3.25 ケーソン変位直前における結果(条件 7)

ケーソン No.		No.18	No.13	No.7	No.2	
水位(cm)	港外側	18.3	18.3	18.3	18.3	
	港内側	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	
	ケーソソ上	17.9	17.9	17.8	17.8	
波圧強度 (計測値) (gf/cm ²)	港外側前面	7.0	6.9	6.1	6.5	
	スリット部底面	6.2	6.0	6.1	6.1	
	スリット部直立壁	6.8	6.6	6.2	6.8	
	天端面	3.4	3.7	3.2	3.6	
	背面(上)	-15.3	-14.8	-13.9	-13.8	
	背面(下)	-14.1	-13.5	-13.6	-15.8	
波圧強度 (初期補 正後) (gf/cm ²)	底面	-3.1	-2.4	-0.2	-2.6	
	港外側前面	19.0	18.9	18.1	18.5	
	スリット部底面	19.7	19.5	19.6	19.6	
	スリット部直立壁	18.8	18.6	18.2	18.8	
	天端面	5.4	5.7	5.2	5.6	
	背面(上)	-3.3	-2.8	-1.9	-1.8	
単位幅波 力(gf/cm)	背面(下)	-2.1	-1.5	-1.6	-3.8	
	底面	8.9	9.6	11.8	9.4	
	港外側前面	水平	665.0	661.5	633.5	647.5
		鉛直	233.7	232.4	222.6	227.5
	スリット部底面	329.0	325.7	327.3	327.3	
	スリット部直立壁	376.0	372.0	364.0	376.0	
	天端面	53.5	56.4	51.5	55.4	
	背面(上)	-32.0	-27.2	-18.2	-17.3	
	背面(下)	水平	-73.5	-52.5	-56.0	-133.0
		鉛直	-25.8	-18.4	-19.7	-46.7
底面	445.0	480.0	590.0	470.0		
水平力	PH	1146.5	1113.2	1071.7	1173.8	
鉛直力	PV	145.4	116.1	-8.3	93.5	
模型排除体積	V	75445	75445	75420	75420	
ケーソソ模型質量	W	166000	166100	165400	166000	
浮力	PB	-75445	-75445	-75420	-75420	
水平合力	F	57325	55660	53585	58690	
鉛直合力	N	97825	96460	89565	95255	
滑動安全率(摩擦係数 0.6)		1.02	1.04	1.00	0.97	
推定摩擦係数	μ	0.59	0.58	0.60	0.62	

表- 3.26 にケーソン滑動直前における無次元波圧強度を示す。ケーソソの背面において、港内側水位の低下による静水圧の減少分よりも 20%程度大きな圧力低下が見られることがわかる。これは、3.4 節の結果と同様の傾向が見られる。

ここで、背面の圧力の低下が、全体の静水圧に与える影響を考える。図- 3.40 は、背面波圧の無次元波圧係数の求め方を示すものである。ここで、 α は無次元波圧係数である。このように仮定すると、静水圧を仮定した波力からの低減率は、以下のように計算できる。

$$\begin{aligned} \frac{\rho g}{2} h_2^2 - \frac{\rho g}{2} \{h_2 - (\alpha - 1)\Delta h\}^2 &= \frac{\rho g}{2} h_2^2 \left[1 - \left\{ 1 - (\alpha - 1) \frac{\Delta h}{h_2} \right\}^2 \right] \\ &= \frac{\rho g}{2} h_2^2 (\alpha - 1) \frac{\Delta h}{h_2} \left\{ 2 - (\alpha - 1) \frac{\Delta h}{h_2} \right\} \end{aligned}$$

本実験においては、基準となる水深が 0.45m であり、表- 3.26 のケースにおいては、 h_2 が 0.447m、 Δh が 0.123m となるため、これから、静水圧を仮定した背面の力からの低減率を図- 3.41 に示す。これをみると、無次元波圧係数が 1.2 程度になると、背面の静水圧分布に対して、10%程度低減することがわかる。

この低減率は、越流水塊の突入速度と、流入量、およ

び背面の水位によって、決まってくると考えられる。この定量化については、今後の課題である。

表- 3.26 滑動直前におけるケーソソの無次元波圧強度

ケーソン No.		No. 18	No. 13	No. 7	No. 2
水位変化量	港外側	6.3	6.3	6.3	6.3
	港内側	-12.3	-12.3	-12.3	-12.3
水位差		18.6	18.6	18.6	18.6
波圧変化量 (計測値) (gf/cm ²)	港外側前面	7.0	6.9	6.1	6.5
	スリット部底面	6.2	6.0	6.1	6.1
	スリット部直立壁	6.8	6.6	6.2	6.8
	天端面	3.4	3.7	3.2	3.6
	背面(上)	-15.3	-14.8	-13.9	-13.8
	背面(下)	-14.1	-13.5	-13.6	-15.8
無次元波圧強度	底面	-3.1	-2.4	-0.2	-2.6
	港外側前面	1.11	1.10	0.97	1.03
	スリット部底面	0.98	0.95	0.97	0.97
	スリット部直立壁	1.08	1.05	0.98	1.08
	天端面	0.50	0.54	0.47	0.53
	底面	-0.49	-0.38	-0.03	-0.41
	背面(上)	1.24	1.20	1.13	1.12
	背面(下)	1.15	1.10	1.11	1.28

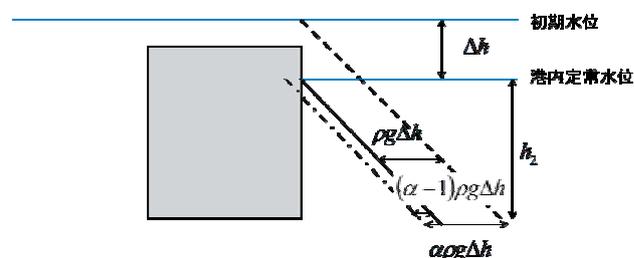


図- 3.40 背面の波圧の低下について

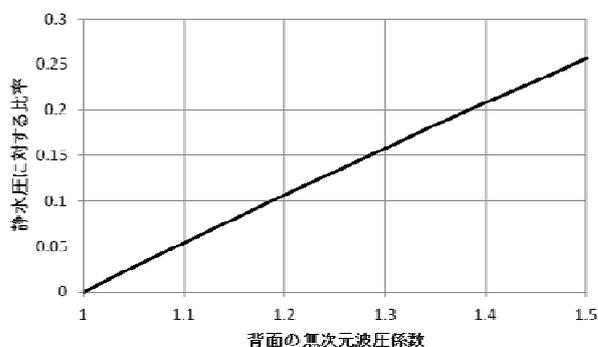


図- 3.41 背面の無次元波圧係数と静水圧分布からの低減率との関係

(6) マウンドの状況

実験開始前と実験終了後に図- 3.42 に示す地点においてマウンドの測量を実施した。測量結果を図- 3.43 から図- 3.53 に示す。

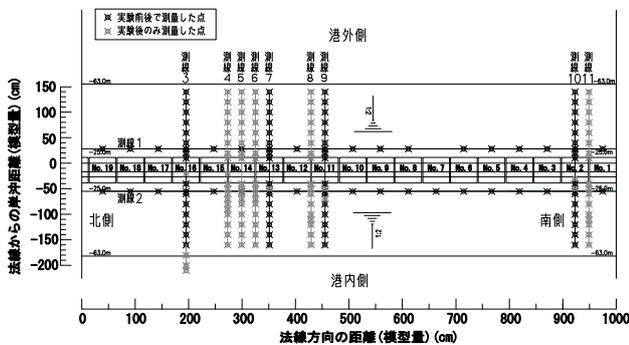
港外側マウンド法肩(図- 3.43)は、ケーソソが大きく滑動した No.15~No.17 地点を含む全測量地点において、マウンド高さの変化がほとんどない

港内側マウンド法肩(図- 3.44)は、一部の測量地点を除

き、多くの地点でマウンド高さが低くなっている。図中の写真で明らかなように、マウンドの被覆石がなくなり、ケーソン床版底面より下までマウンドの高さが下がっている。これは、越流の影響により洗掘を受けているためである。また、目地幅が狭いケース(写真- 3.9)と広いケース(写真- 3.10)とを比べると、広いケースでは、越流により洗掘された石が、目地部周辺では、背後にたまっていないことがわかる。

それは、目地部の測量結果(図- 3.48, 図- 3.50, 図- 3.53)およびケーソン中央の背後(図- 3.49, 図- 3.51, 図- 3.52)の測量結果を見ると、ある程度定量的に把握することができる。目地部の測量結果からは、マウンドの天端が下がり、初期断面より広い平らな天端が形成されていることがわかる。またケーソン中央の測量結果からは、ケーソン直背後のマウンド天端が下がり、その法肩にマウンド石材が堆積して山形を形成する越流洗掘を生じている。これらのことから、目地部に強い流れが生じていたことがわかる。

ケーソンが大きく滑動した No.16 の中央(図- 3.45)は、港外側のマウンドはほとんど変形していないが、港外側マウンド法肩から港内側に向かって低くなるように、マウンド天端が傾斜している。これは、マウンドが滑落するときに削られたものと考えられる。



注) 測線 4, 5, 6, 8, 11 は、実験後の状況から補足的に計測した地点である。

図- 3.42 実験実施前後のマウンド測量地点

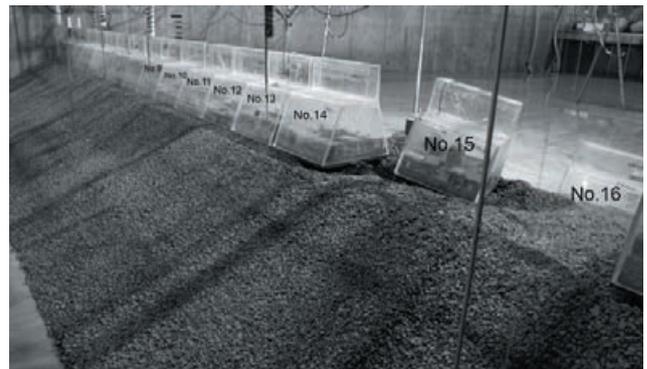
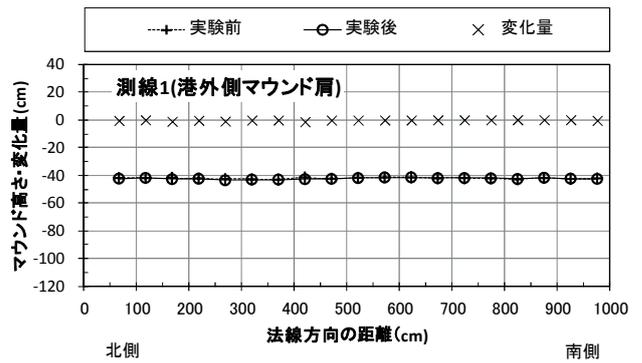


図- 3.43 港外側マウンド法肩の縦断測量結果

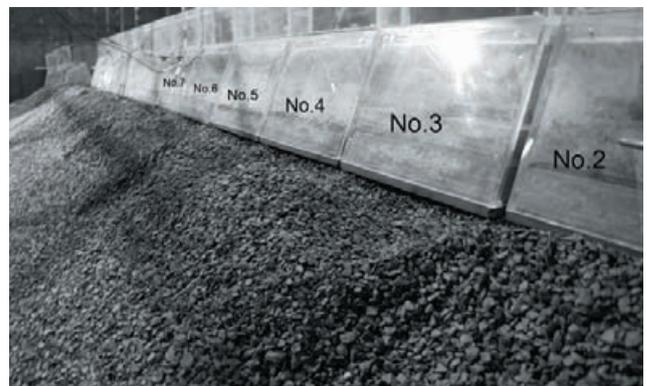
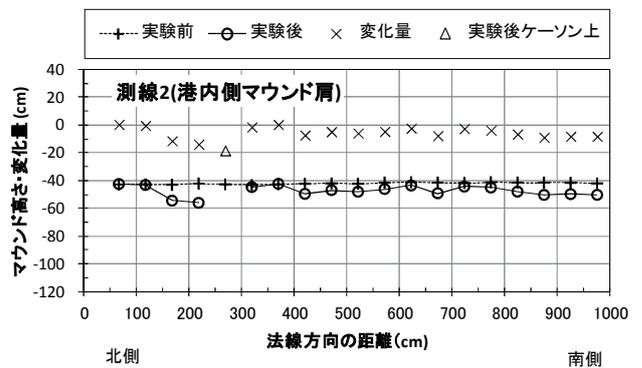


図- 3.44 港内側マウンド法肩の縦断測量結果

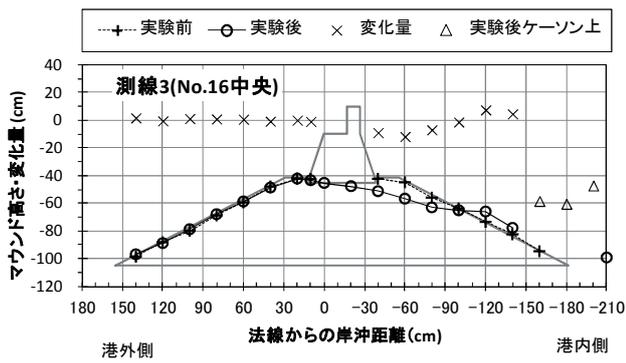


図-3.45 No.16 ケーソン中央の横断測量結果

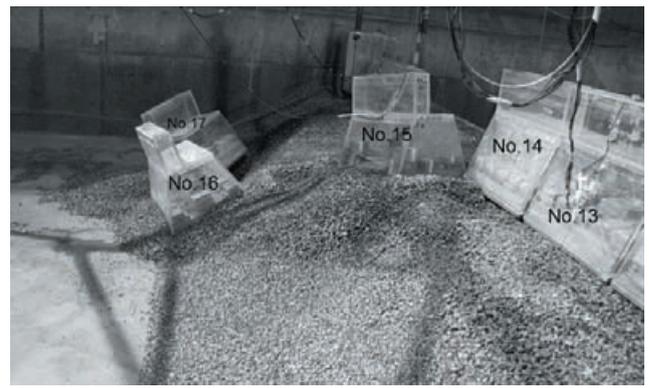
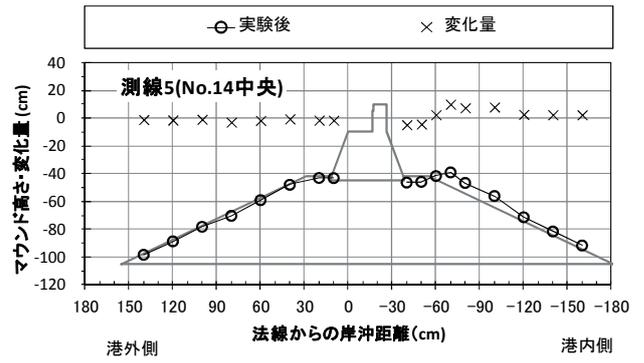


図-3.47 No.14 ケーソン中央の横断測量結果

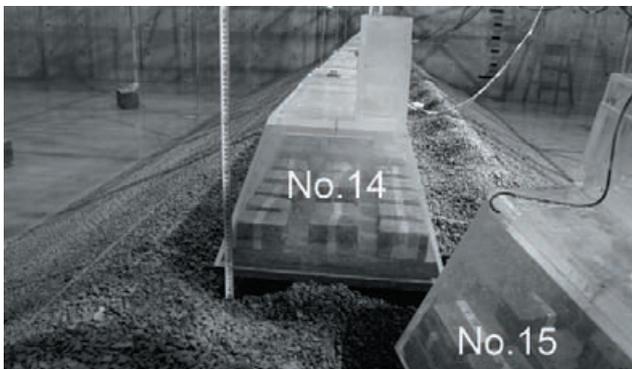
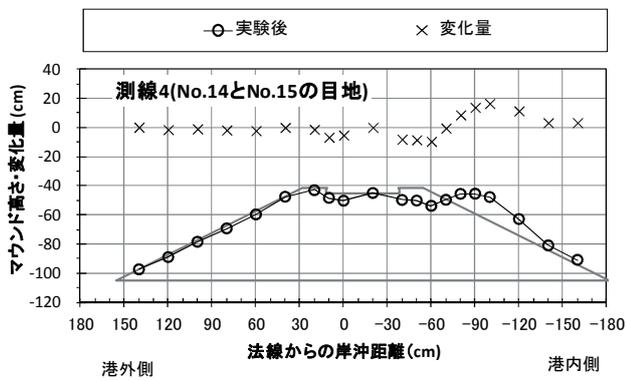


図-3.46 No.14 と No.15 の目地部の横断測量結果

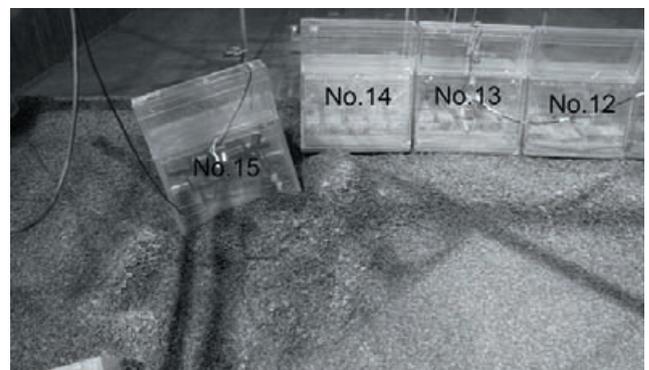
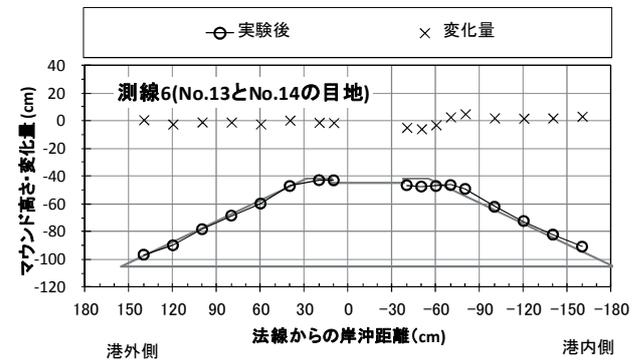


図-3.48 No.13 と No.14 の目地部の横断測量結果

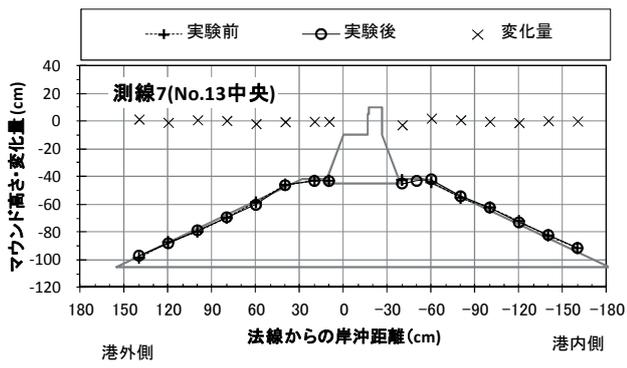


図- 3.49 No.13 ケーソン中央の横断測量結果

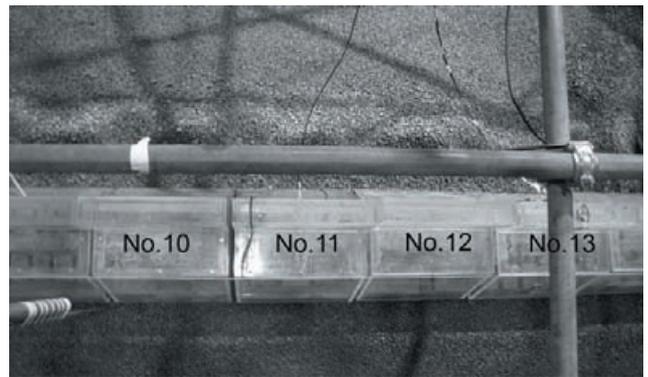
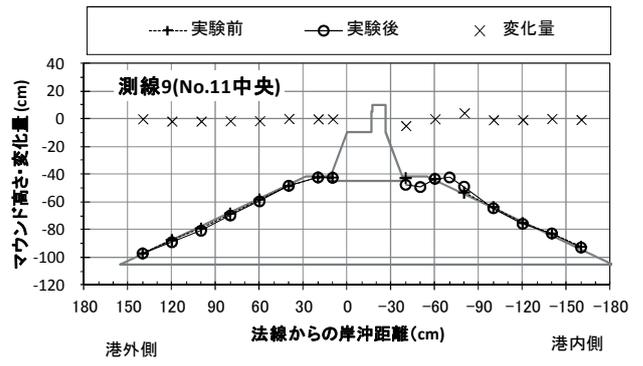


図- 3.51 No.11 ケーソン中央の横断測量結果

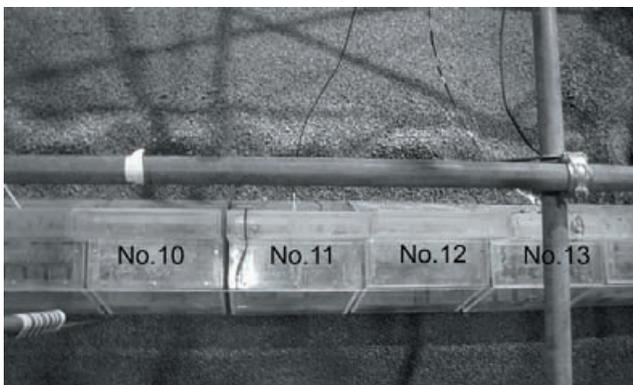
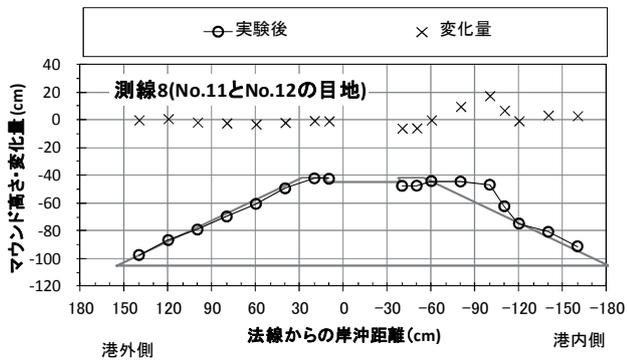


図- 3.50 No.11 と No.12 の目地部の横断測量結果

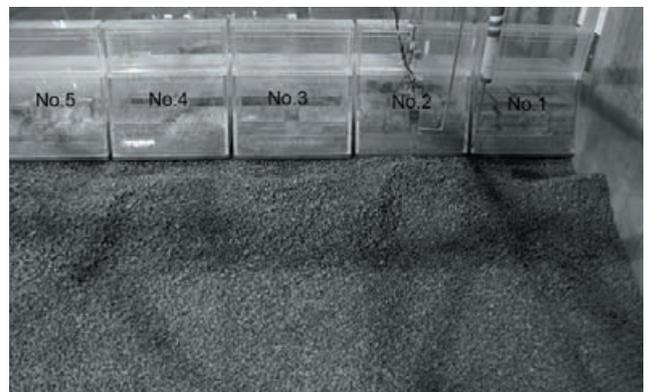
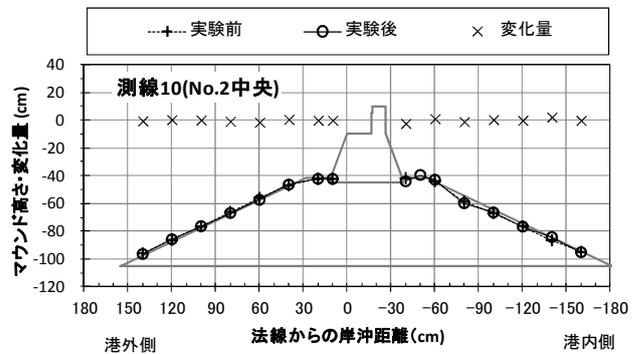


図- 3.52 No.2 ケーソン中央の横断測量結果

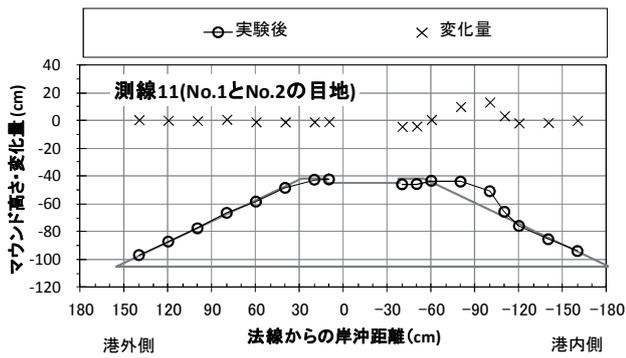


図- 3.53 No.1 と No.2 の目地部の横断測量結果

(7) 考察

目地幅が広がった場合、ヘッド差から換算される流速と同等程度の流速が生じ、今回の釜石の捨石の大きさでは、捨石が洗掘されることがわかる。

また、函が抜けても、目地流速が速いため、周辺の函が連動して動くようなことはなく、ほかの函はほぼ同じ場所に並んだような状態であった。これは、歯抜けのような状態で、ケーソンが滑落することも十分にあり得ることを示している。また、滑落した隣の函は、動いており、2 函だけ滑落するという状況に比較的似ている状況が再現されたと考えられる。

滑動安全率は、目地幅が狭い場合と同じく、ほぼ 1.0 付近で滑動しており、さらに、摩擦係数が 0.6 よりも若干小さい状態で動き出していることがわかる。これは、目地幅が狭い場合も同じであることを考えると、摩擦係数のばらつきの範囲内ではないかと考えられる。従って、目地部における洗掘、越流による洗掘が本実験程度の場合には、滑動抵抗を下げるものではないと考えられる。

また、前面においては、静水圧から若干の圧力増大と背面においては圧力低下が観察された。圧力低下に関しては、静水圧に対しておよそ 10% 程度の低下であることが実験の結果から言える。増大に関しては、静水圧に比べて数% 程度である。

3.6. 数値シミュレーションを用いた水位差の検討

(1) 計算条件

STOC-ML を用いてケーソンの前後における水位差の計算を行った。すべて鉛直方向は 1 層とした。初期水位を T.P.=0 とし、初期水位のモデルとしては、釜石の沖に設置された GPS 波浪計と一致するようにした。計算範囲を表- 3.27 ならびに図- 3.54 に示す。

水位の出力点は、図- 3.55 に示すとおりであり、各ポイントについて、防波堤近傍の点とやや遠方の点の 2 種類を出力した。

表- 3.27 計算領域

領域 No.	分割数 (X)	分割数 (Y)	格子幅 (m)	北東端 (E)	南西端 (N)	最大水深 (m)	遡上計算
a01	256	205	5,400	138.856	33.4172	9,285	なし
a02	78	177	1,800	140.8298	37.9597	1,166	なし
a03	48	75	600	141.7667	39.1398	249	なし
a04	108	141	200	141.8089	39.1827	185	なし
a05	166	110	100	141.8234	39.2222	137	なし
a06	240	150	50	141.8304	39.2293	100	なし
a07	1100	690	10	141.8386	39.232	106	あり
a08 (2 分割)	1970	1000	5	141.8479	39.2359	96	あり

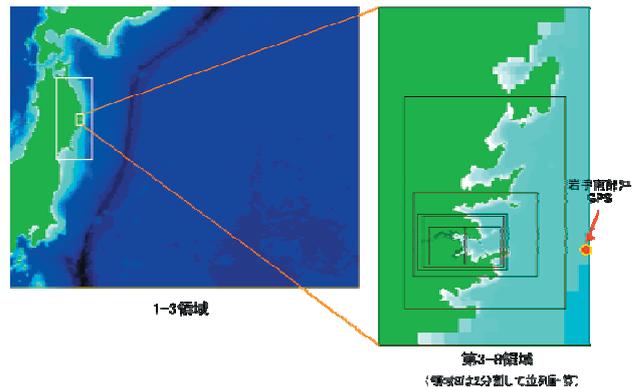


図- 3.54 計算範囲



図- 3.55 水位出力点

(2) 計算結果

北堤および南堤の最大水位が生じたときの防波堤近傍の点における水位差を表-3.28および表-3.29に示す。これをみると、北堤では浅い部分のほうが水位差は高く、開口部になるに従って小さくなっている。一方で、南堤でも同様に浅くなるに従い高くなっている。

表-3.28 最大水位差(北堤)

	港外(m)	港内(m)	最大水位差(m)
N01	12.24	4.35	7.9
N02	12.77	3.65	9.12
N03	12.41	2.93	9.48
N04	11.83	2.37	9.47
N05	12.23	2.87	9.36
N06	11.94	3.08	8.86
N07	12.26	3.69	8.57
N08	12.19	3.64	8.55
N09	11.66	2.81	8.86
N10	11.96	3.3	8.66
N11	11.27	3.62	7.65

表-3.29 最大水位差(南堤)

	港外(m)	港内(m)	最大水位差(m)
S01	8.64	3.58	5.06
S02	11.24	3.48	7.75
S03	11.12	2.99	8.12
S04	11.46	3.2	8.26
S05	11.43	3.13	8.3
S06	10.99	2.75	8.23
S07	11.4	3.08	8.32
S08	10.68	3.12	7.55

(3) 滑動安全率の検討

図-3.56は、北堤の近傍水位差を用いて、摩擦係数を0.6としたときの滑動安全率を示す。ただし、600mから700mの間にあるケーソン6函についてはアスファルトマットが敷設されていたため、摩擦係数を0.75とした。なお、滑動したケーソンをグラフ下部に示す。また、背面の静水圧を1.0倍、0.95倍、0.9倍、0.85倍したときの結果を同時に示す。

これを見ると、背面波圧が5~10%程度全体的に落ちると滑動安全率が1.1から1.0程度になることがわかる。図-3.57は、前面の波圧を静水圧に対して全体的に1.05倍したものである。これをみると、背面波圧が特に落ちなくても滑動安全率が1.0から1.1程度になっており、前面部の圧力増大は、数%以下であったと推測され、実験結果の考察とも一致する。

一方で、南堤の滑動安全率を計算すると、図-3.58のように、背面波圧の低下によってのみで滑動安全率が1.0程度に下げられるためには、背面波圧の低減率を0.85程度にする必要があることがわかる。また、図-3.59は、前面の波圧を1.05倍したものである。ここでは、背面波圧を0.95から0.9程度まで下げることにより、滑動安全率が1.0程度となることがわかる。

南堤は開口部から300m程度以上南にあるケーソンはほとんど滑動している。これは、安全率が1.0を大きく下回っていた可能性を示唆する。しかし、図を見る限り南堤においては、滑動安全率が全体にほぼ一様である。

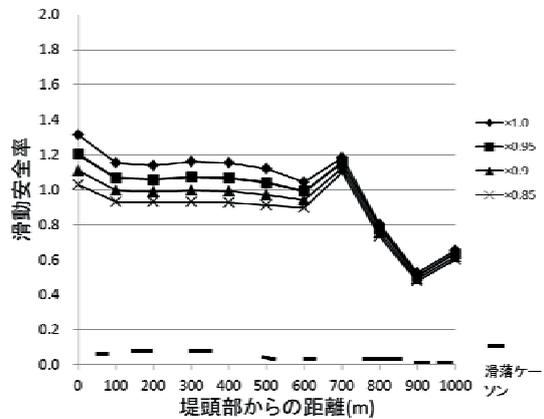


図-3.56 北堤近傍の水位差での滑動安全率の比較

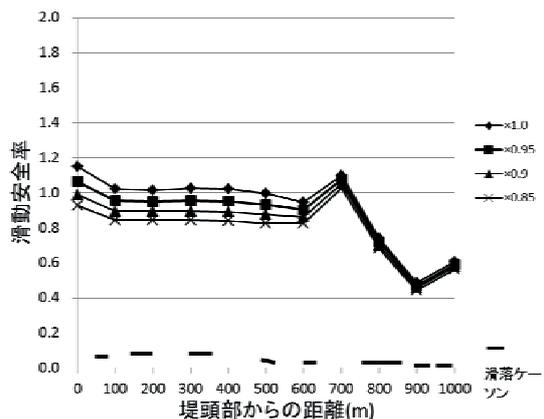


図-3.57 北堤近傍の水位差での滑動安全率の比較(前面波圧を1.05倍したケース)

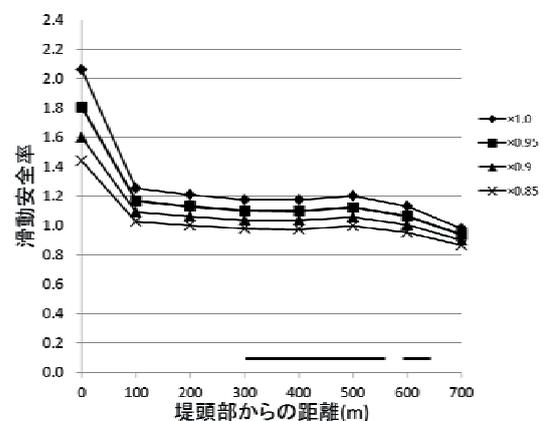


図-3.58 南堤近傍の水位差での滑動安全率の比較

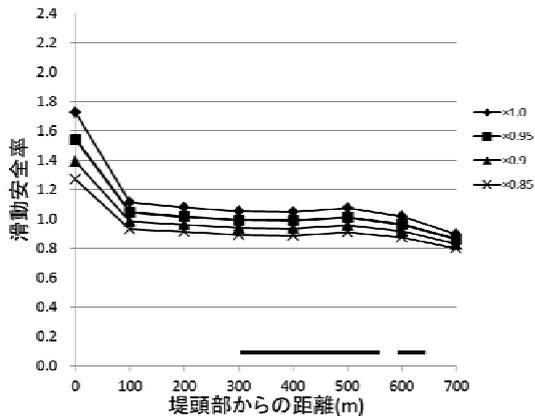


図- 3.59 南堤近傍の水位差での滑動安全率の比較(前面波圧を 1.05 倍したケース)

図- 3.60 は、南堤における最大水位差の発生の時間差を示しているものである。これを見ると、開口部から 500m 程度のところが先に破壊されることがわかる。開口部から 200m 程度のところとの時間差は 7 秒程度である。これから、南側が先に破壊されることにより、港外、港内の水位差が若干収まり、300m より北側では南堤は滑動しなかった可能性がある。

一方で、図- 3.61 は、北堤のほうの最大水位差の発生の時間差となる。開口部から 200m 付近と 500m 付近では発生時間が早くなっているため、その近辺の防波堤が流されることにより滑動が飛び飛びのような形になったひとつの要因である可能性が考えられる。

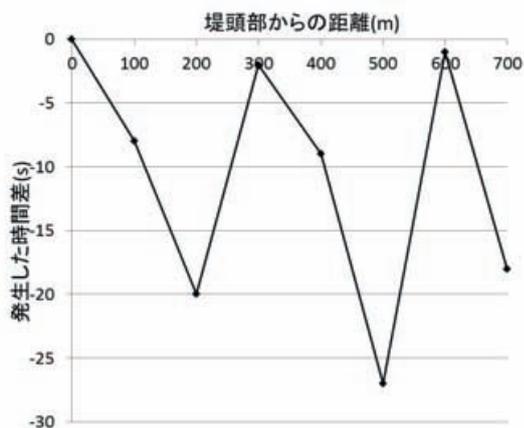


図- 3.60 南堤における最大水位差の発生の時間差(開口部のケーソンの最大水位差の発生時刻を 0.0 とする)

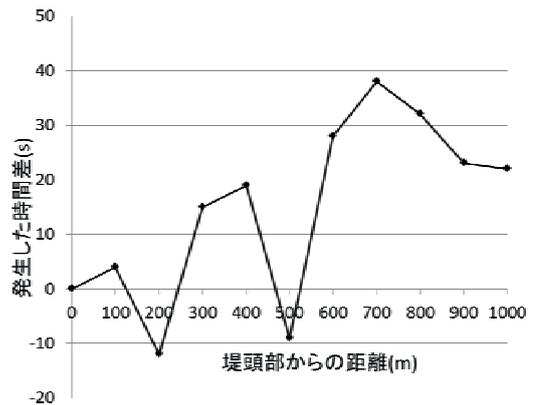


図- 3.61 北堤における最大水位差の発生の時間差(開口部のケーソンの最大水位差の発生時刻を 0.0 とする)

(4) マウンド洗掘について

マウンドの洗掘の可能性について、計算された時系列結果を用いて考察する。図- 3.62 は、北堤 No.4 における港内外水位およびその水位差の時系列結果である。これを見ると、1950 秒のところで最大水位差 9.0m 弱となっていることがわかる。

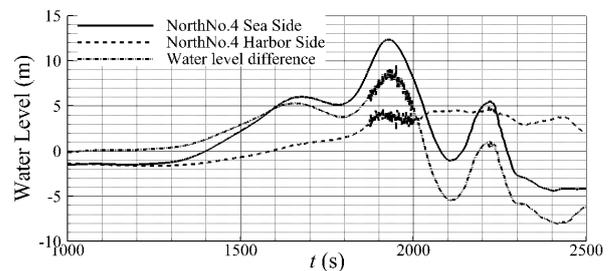


図- 3.62 北堤 No.4 における港内外水位の時系列

ここからヘッド差流速を計算し、捨石の安定質量を計算したものを図- 3.63 に示す。ヘッド差流速との比率を 0.5, 0.7, 0.9 として計算した。ヘッド差流速が比率 0.9 で計算された流速が生じているのであれば、安定質量が 40 トンを超える時間が 60s 程度あることがわかる。ただし、3.3 節の検討から、捨石部の洗掘によりケーソンが変位する程度まで洗掘されるためには、捨石最大質量の約 100 倍程度の安定質量が生じる流速が、およそ 8 分弱継続している必要があることから、少なくとも、マウンド部が洗掘されて、ケーソンが変位するという状態ではなかったと考えられる。

仮に、ケーソンが傾斜することが無かったとすれば、3.5 節で検討したとおり、目地で洗掘が生じたとしても、滑動の抵抗力には影響せず、引張り試験のように水平に変位し、滑落したものと考えることができる。

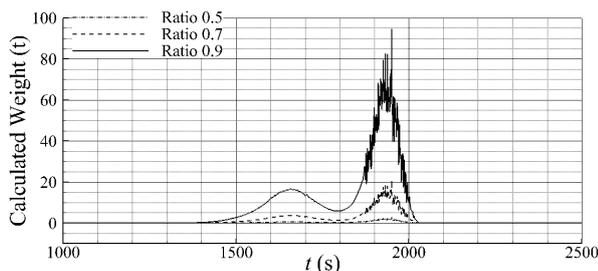


図-3.63 北堤 No.4 における捨石安定質量の時系列

(5) 考察

北堤では、背面における波圧を若干さげることで、安全率がほぼ 1.0 程度になるが、南堤では前面の波圧も背面波圧も北堤よりも若干大きく変化させなければ滑動安全率が 1.0 とならない。これは、南堤のほうが滑動しにくいのではなく、鉛直方向の力による違いではないかと推察される。表- 3.8 および表- 3.9 からわかるとおり、同じ水位差であれば、矩形ケーソンのほうが滑動安全率は低い。これは、単に堤体重量の差だけではなく、鉛直方向の力の差でもありと考えられる。

また、発生時間差により早くケーソンが抜けた場所では、周辺の水位差が小さくなる可能性があり、それにより、同じような滑動安全率であったとしても抜けたケーソンとそうでないケーソンの差がついたと考えられる。

目地における洗掘に対しては、継続時間と安定質量の観点から、ケーソンが傾斜するほどの洗掘が生じていた可能性が低いことがわかった。よって、仮に目地部の洗掘が生じていたとしても、滑動抵抗に寄与する程度ではなかったのではないかと考えられる。

したがって計算の結果から言えることは、前面波圧を静水圧の 1.05 倍、背面波圧を静水圧の 0.90 倍とし、発生時間差を考慮することで、摩擦係数を 0.6 としても、全体のケーソンの滑動状況を説明することが可能であると考えられる。

3.7. まとめ

本検討から堤幹部の被災のメカニズムは以下のように考えられる。

- ・背後の水圧は、越流時には、静水圧よりさがっている可能性がある。また、前面も静水圧より若干高くなっている可能性がある。数値計算の結果と合わせて考えると前面波圧を静水圧の 1.05 倍、背面波圧を静水圧の 0.90 倍とすると、釜石の防波堤の場合においては説明が可能であると考えられる。

- ・一旦動き始めると数秒で流される(現地時間では 20 秒から 30 秒程度)

- ・目地幅の違いによりケーソンの変位パターンが異なる。目地幅が狭い場合は、周辺のケーソンの滑動を促し、広い場合には、周辺のケーソンには大きく影響しない。このことから、現地においては、ある程度の目地流速があったものと考えられる。

- ・目地幅が広い場合は目地洗掘を生じさせることがわかる。しかし、目地幅の広さにおいて変位のしやすさを比較すると、実験条件における津波作用時間での洗掘量では、変位のしやすさに顕著な差が現れないことがわかる。

- ・目地洗掘によりマウンドが削られケーソンが滑動(傾斜)する場合は、滑動安全率が 1.0 よりも大きい場合でも動き出す。しかし、水平の変位距離が短くなる。また、滑動する一方で、洗掘によりケーソン背後に捨石がたまるため、変位後に安定性が高まる。

- ・数値計算の結果からは、ケーソンが傾斜に至るほどは洗掘されていないと考えられる。

- ・仮に滑動安全率が 1.0 付近であれば、摩擦係数のばらつきや、背面の越流による負圧の程度のばらつきが、北堤のようなケーソンの被災のばらつきの原因となった可能性が高いと推測される。

4. 対策に対する検討

4.1. 目的

堤幹部ケーソンの被災は、水平力による滑動が主たる要因であることが実験結果わかったため、ここでは、ケーソンの港内側マウンドをかさ上げする腹付け工法の滑動抵抗力に対する効果を検証する。

4.2. 実験方法

(1) 実験断面

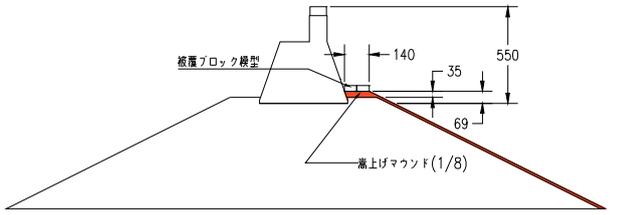
対策工なし、ケーソンの高さに対して 1/8 の高さまで捨石を積み上げた断面(腹付け 1/8)、および 1/4 までの断面(腹付け 1/4)を比較する。対策工の断面形状は図- 4.1 に示すとおりである。なお、1/8 と 1/4 の高さには、嵩上げ前のマウンド被覆材の高さ(模型で 35mm)を含む。

腹付けしたマウンドの天端は、長さが 70mm のエックスブロックの 2 個並びで被覆した。70mm のブロックは現地換算で 4.2m であり、現地換算質量は 36.7t となる。

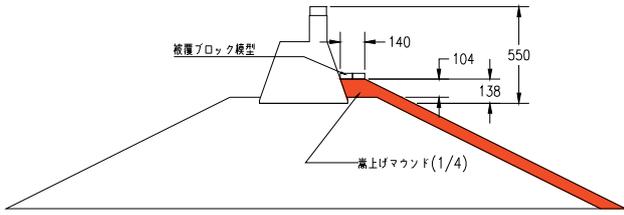
対策なしの断面は図- 4.2 に示すとおりである。対策工ありとなしのどちらも、根固めブロックを設置していない。そこで、根固めブロックの影響を確認するために、長さ 92mm のエックスブロックをケーソンの前趾と後趾に 1 列ずつ設置する断面を、対策工なしの区間につくった。この断面は図- 4.2 の下段のとおりである。

各断面の模型配置は図- 4.3 のとおりである。異なる腹

付け高さの接続部のケーソンは、連鎖的に滑動するのを防ぐために質量の割り増しを行った。また、目地部はいすべて2.0cmとした。表-4.1に重量をケーソンの配列と重量の関係を示す。

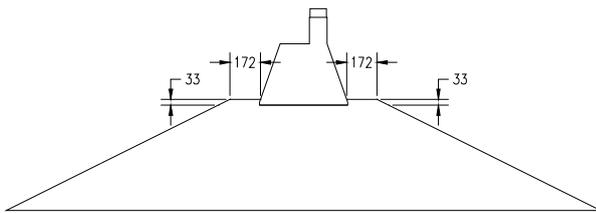


(1) 腹付け 1/8

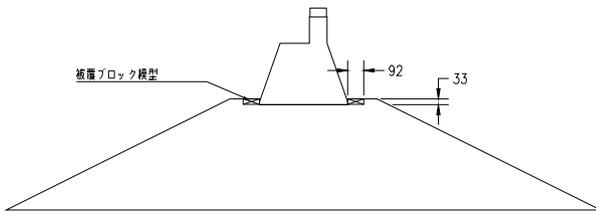


(2) 腹付け 1/4

図-4.1 対策工の断面形状



(1)被覆ブロックなしの断面



(2)根固め方塊代わりの被覆ブロックありの断面

図-4.2 対策工なしの断面形状

表-4.1 堤体模型の諸元

No.	質量(kg)	ケーソン	腹付け工	No.	質量(kg)	ケーソン	腹付け工
1	割増	台形	1/8	11	166.1	台形	1/4
2	166.0			12	166.3		
3	166.0			13	166.1		
4	166.0			14	割増		
5	165.4			15	166.0		
6	割増		接続部	16	166.2		なし
7	165.4		1/4	17	166.3		
8	165.4			18	割増		
9	166.0			19	割増		
10	165.8						

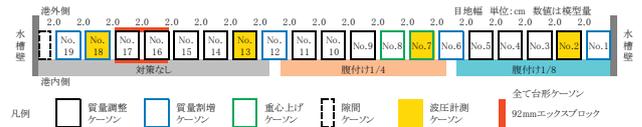


図-4.3 対策工の平面配置

(2) 計測方法

水位、流速、波圧(圧力)の測定と、水中ビデオおよびビデオカメラ(気中)によるビデオ撮影を行った。図中における記号の意味ならびに波圧計・流速計・ビデオの設置については、3.3(2)にならうものとする。

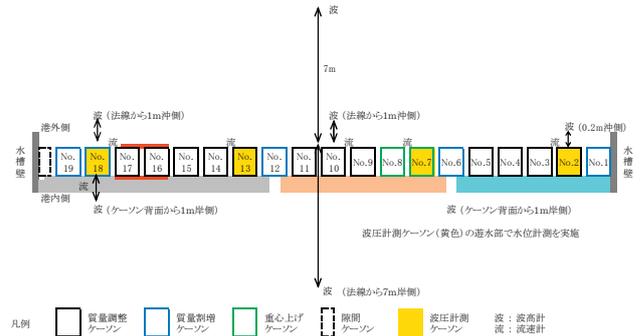


図-4.4 計測機器配置

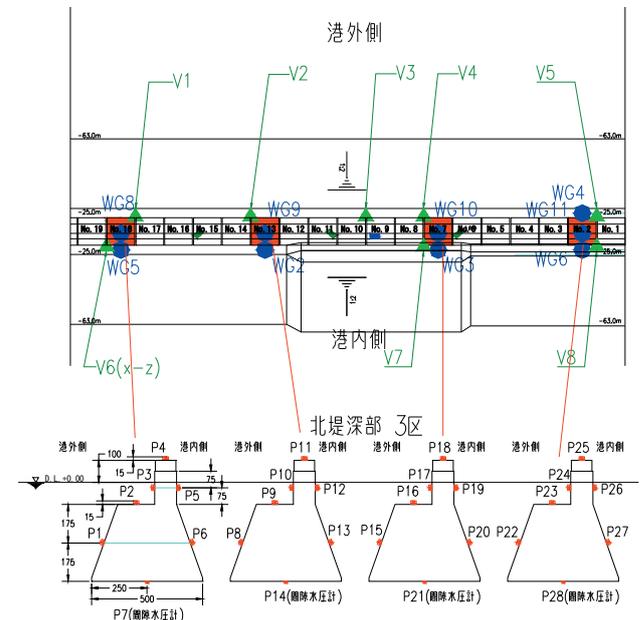


図-4.5 波圧測定位置

(3) 実験条件

堤幹部の3.5節の結果より、初期水位は+12.0cm(現地換算+7.2m, D.L.基準)とした。上部工天端高が+10.0cm(現地換算+6.0m)であるので、実験開始時点で上部工天端が水没した状態である。ポンプ出力は、滑动安全率が1.0

程度であったケースを最初とするため、最初のケースを28%とした。3回の実験を実施し、2回目が35%、3回目が60%とした。各ケースにおける実験中の港内外水位と水位差の解析結果を表-4.2に示す。

表-4.2 港内外水位と水位差の解析結果

ケース	ポンプ出力 (%)	解析対象	模型量				現地換算			
			水位 (cm)			水位差 (cm)	水位 (m)			水位差 (m)
			初期	港外	港内		初期	港外	港内	
			η_s	η_o	η_i	Δh	η_s	η_o	η_i	Δh
1	28	No.17 滑動直前	12.0	18.4	-0.1	18.5	7.2	11.0	-0.2	11.1
		ポンプ停止直前		17.0	2.5	14.5		10.2	1.5	8.7
2	35	No.16 滑動直前	12.0	14.7	6.5	8.2	7.2	8.8	3.9	4.9
		No.15 滑動直前		17.5	1.8	15.7		10.5	1.1	9.4
		水位差最大時		18.4	0.0	18.4		11.0	0.0	11.0
		ポンプ停止直前		16.3	3.4	12.9		9.8	2.0	7.8
3	60	No.5 滑動直前	12.0	18.8	-1.0	19.8	7.2	11.3	-0.6	11.9
		ポンプ停止直前		15.2	4.3	10.9		9.1	2.6	6.5

(4) ケーソンの滑動と波力

実験中の堤体模型の状態の変化を表-4.3に示す。表-4.4は実験中の堤体模型の変状の内容である。滑動の順序は対策のしていないケーソンからであることがわかる。

表-4.3 実験中の堤体模型の滑動状況

ケーソン No	対策工	ケース			ケーソン No	対策工	ケース		
		1	2	3			1	2	3
1					11	1/4			
2					12	接続部			
3					13	被覆ブロック散乱			
4					14				滑落
5					15				沈下
6					16				傾斜
7					17	対策無			滑落
8					18				傾斜
9					19				被覆散
10									変位

表-4.4 実験中の堤体模型の変状の内容

ケース	ケーソンの状態
1	ポンプ運転開始から74s後にケーソンNo.17が滑落
	ポンプ運転停止から12s後にケーソンNo.18が傾斜
	ポンプ運転停止から21s後にケーソンNo.16が傾斜
2	ポンプ運転開始から44s後にケーソンNo.16が変位し沈下
	ポンプ運転開始から79s後にケーソンNo.15が変位し沈下
3	ポンプ運転開始から36s後にケーソンNo.14が滑落
	ポンプ運転開始から45s後にケーソンNo.5が滑落
	ポンプ運転開始から47s後にケーソンNo.4, No.3が滑落
	実験後, No.18, No.19が変位していることを確認

ケース1では、腹付けの嵩上げマウンドの天端部を被覆した36.7t相当の被覆ブロックは、越流状態となった初期の段階で移動したことを、水中ビデオの映像で確認した。また、作用後に、腹付け1/4の断面における簡易計測により、ケーソン後趾部分において、ケーソン底面の5cm下までマウンドが掘れていた。

表-4.5にケーソンNo.13の波力と滑動安全率の結果を示す。ケーソンNo.13は対策無しであったが、最後まで変位しなかった筈であった。

ケース1では、ケーソンNo.17が滑落している。ケーソンNo.13とケーソンNo.17は、ケーソンの質量がほぼ変わらないことから、ケーソンNo.13の結果を用いて安全率を考えると、表-4.5からケーソンの滑動安全率を1.0とすると、滑動直前の波力から推定される摩擦係数は0.64となっており、ばらつきの範囲から考えるとケーソンは水平力により滑動したと考えられる。

表-4.5 ケース1のケーソンNo.13の結果

		No.17 ケーソン滑動限界時		
		74s後	150s後	
水位(cm)	港外側	18.5	17.0	
	港内側	-0.5	2.6	
	ケーソソ上	17.9	16.6	
水位差(cm)		19.0	14.4	
波圧強度 (計測値) (gf/cm ²)	港外側前面	7.2	5.4	
	スリット部底面	6.3	4.8	
	スリット部直立壁	7.0	5.3	
	天端面	4.1	3.1	
波圧強度 (初期補正後) (gf/cm ²)	背面(上)	-16.3	-13.3	
	背面(下)	-15.9	-10.7	
	底面	-2.7	-2.3	
	港外側前面	19.2	17.4	
波圧強度 (初期補正後) (gf/cm ²)	スリット部底面	19.8	18.3	
	スリット部直立壁	19.0	17.3	
	天端面	6.1	5.1	
	背面(上)	-4.3	-1.3	
単位幅波力 (gf/cm)	背面(下)	-3.9	1.3	
	底面	9.3	9.7	
	港外側前面	水平	672.0	609.0
		鉛直	236.1	214.0
スリット部底面	スリット部底面	330.7	305.6	
	スリット部直立壁	380.0	346.0	
	天端面	60.4	50.5	
	背面(上)	-40.9	-15.3	
背面(下)	水平	-136.5	45.5	
	鉛直	-48.0	16.0	
底面		465.0	485.0	
水平力	PH	1229.4	924.8	
	PV	114.2	101.1	
模型排除体積		V	75395	
ケーソン模型質量		W	166100	
浮力		PB	-75395	
水平合力		F	61470	
鉛直合力		N	96415	
滑動安全率(摩擦係数0.6)			0.94	
推定摩擦係数		μ	0.64	

ケース2におけるケーソンNo.13の波力と滑動安全率を表-4.6に示す。ポンプの緩起動により流量が上昇する過程でNo.16とNo.15ケーソンが変位した。そのときの滑動安全率は表-4.6から推察すると、2.2もしくは1.2と高いことがわかる。変位後、沈下したことから、ケーソンNo.17が抜けたことにより、基部のマウンドが洗掘されたため、変位したと考えられる。一方で水位差がピーク時においては、滑動安全率は0.96であったが、腹付け1/8の対策をとっていたケーソンが一つも変位していないのは、越流により腹付け工が洗掘されたものの、まだ一部残っていたことにより、重しとなっていたことが考えられる。

表- 4.6 ケース 2 のケーソン No.13 の結果

		No.16 ケーソン 滑動限界時	No.15 ケーソン 滑動限界時	水位差 ピーク時	ポンプ 停止直前	
		44s 後	79s 後	100s 後	150s 後	
水位(cm)	港外側	14.9	17.4	18.5	16.2	
	港内側	6.5	1.5	-0.5	3.9	
	ケーソン上	14.5	17.0	17.9	15.9	
水位差(cm)		19.0	8.4	15.9	19.0	
波圧強度 (計測値) (gf/cm ²)	港外側前面	3.0	5.6	7.2	4.2	
	スリット部底面	2.9	5.1	6.4	3.9	
	スリット部直立壁	3.1	5.5	6.9	4.1	
	天端面	1.6	3.0	4.1	2.2	
	背面(上)	-6.0	-14.4	-16.2	-10.4	
	背面(下)	-5.4	-11.8	-15.2	-8.6	
波圧強度 (初期補正後) (gf/cm ²)	底面	-1.6	-2.9	-2.5	-2.4	
	港外側前面	15.0	17.6	19.2	16.2	
	スリット部底面	16.4	18.6	19.9	17.4	
	スリット部直立壁	15.1	17.5	18.9	16.1	
	天端面	3.6	5.0	6.1	4.2	
	背面(上)	6.0	-2.4	-4.2	1.6	
単位幅波 力(gf/cm)	背面(下)	6.6	0.2	-3.2	3.4	
	底面	10.4	9.1	9.5	9.6	
	港外側前面	水平	525.0	616.0	672.0	567.0
		鉛直	184.5	216.5	236.1	199.2
	スリット部底面	273.9	310.6	332.3	290.6	
	スリット部直立壁	302.0	350.0	378.0	322.0	
	天端面	35.6	49.5	60.4	41.6	
	背面(上)	100.8	-27.6	-39.5	22.2	
	背面(下)	水平	231.0	7.0	-112.0	119.0
		鉛直	81.2	2.5	-39.4	41.8
底面	520.0	455.0	475.0	480.0		
水平力	PH	495.2	986.6	1201.5	747.8	
鉛直力	PV	55.2	124.1	114.4	93.2	
模型排除体積	V	77220	75895	75370	76495	
ケーソン模型質量	W	166100	166100	166100	166100	
浮力	PB	-77220	-75895	-75370	-76495	
水平合力	F	24760	49330	60075	37390	
鉛直合力	N	91640	96410	96450	94265	
滑動安全率(摩擦係数 0.6)		2.22	1.17	0.96	1.51	
推定摩擦係数	μ	0.27	0.51	0.62	0.4	

ケース 3 では、ポンプの緩起動により流量が上昇する過程でケーソン No.14, No.5 から No.3 のケーソンが滑動した。ケーソン No.5 から No.3 は、腹付け工の 1/8 の対策を施しているものである。ケーソン No.5 が滑動したときの滑動安全率を、表- 4.7 に示されるケーソン No.13 における波力と滑動安全率から推察すると、滑動安全率が 1.0 程度であることがわかる。よって、少なくとも滑動時には、腹付け工の支えとしての効果がなかったことになる。これは、ケース 1, ケース 2 を行う過程のなかで、越流により背後の腹付け工が洗掘されたためであると考えられる。一方で、腹付け工の 1/4 の対策を施したケーソンはすべて残ったことから、ケース 3 を行った時点においても、越流による洗掘が腹付け工 1/8 の対策よりも小さく、また、ポンプが定常になるまでに半分以上の函が流れてしまったことから、ケーソン No.3 が流れた後は水位差が小さくなったため、最後まで変位しなかったと考えられる。写真- 4.1 に実験前と全ケース終了後の違いを示す。

表- 4.7 ケース 3 のケーソン No.13 の結果

		No.5 ケーソン 滑動限界時	ポンプ 停止直前	
		75s 後	150s 後	
水位(cm)	港外側	19.0	15.6	
	港内側	-0.5	5.7	
	ケーソン上	17.4	14.3	
水位差(cm)		19.5	9.9	
波圧強度 (計測値) (gf/cm ²)	港外側前面	5.8	2.1	
	スリット部底面	5.4	1.4	
	スリット部直立壁	5.6	1.6	
	天端面	3.3	1.3	
	背面(上)	-16.2	-8.6	
	背面(下)	-14.8	-7.1	
波圧強度 (初期補正後) (gf/cm ²)	底面	-2.5	-3.1	
	港外側前面	17.8	14.1	
	スリット部底面	18.9	14.9	
	スリット部直立壁	17.6	13.6	
	天端面	5.3	3.3	
	背面(上)	-4.2	3.4	
単位幅波 力(gf/cm)	背面(下)	-2.8	4.9	
	底面	9.5	8.9	
	港外側前面	水平	623.0	493.5
		鉛直	218.9	173.4
	スリット部底面	315.6	248.8	
	スリット部直立壁	352.0	272.0	
	天端面	52.5	32.7	
	背面(上)	-38.6	50.7	
	背面(下)	水平	-98.0	171.5
		鉛直	-34.4	60.3
底面	475.0	445.0		
水平力	PH	1111.6	543.3	
鉛直力	PV	77.6	70.2	
模型排除体積	V	75320	76745	
ケーソン模型質量	W	166100	166100	
浮力	PB	-75320	-76745	
水平合力	F	55580	27165	
鉛直合力	N	94660	92865	
滑動安全率(摩擦係数 0.6)		1.02	2.05	
推定摩擦係数	μ	0.59	0.29	

以上のように、腹付けの被覆ブロックが初期段階でなくなっていること、腹付け 1/8 断面においてケーソン底面より深くまで掘れていることにより、ケース 2 の作用後には、腹付け工 1/8 のケーソンでは、腹付けしたマウンドの嵩上げ部は全て洗掘され、無くなっていたと考えられ、したがって、ケース 3 で滑動安全率が 1.0 程度で滑動したのではないかと推測される。

腹付け工 1/4 でも相当量洗掘されていたと考えられるが、それでも滑動しなかったのは、腹付け 1/8 よりも捨石が多いため、すべて洗掘されなかったためではないかと考えられる。よって、腹付け工は、滑動抵抗としてだけでなく、洗掘される時間を稼ぐことでケーソンの滑動する時間を遅らせるという効果もあることがわかる。



(1) 実験前(模型設置直後, 注水前)



(2) 実験後(排水後)

写真-4.1 実験前後の実験模型の状態

4.3. 越流対策

(1) 被覆ブロックの大型化

越流によって、被覆ブロックが飛ばされ、その後捨石が洗掘されたため、被覆ブロックの大型化による越流洗掘対策を検討した。ここでは被覆ブロックとして、モルタル製の幅 140mm×長さ 140mm×高さ 100mm(幅は法線直角方向, 長さは法線方向)とし、質量は 4.48kg(現地換算 968t)とした。また、台形ケーソンと大型の被覆ブロックの間に隙間を、袋詰め砕石で埋めた(図-4.6)。

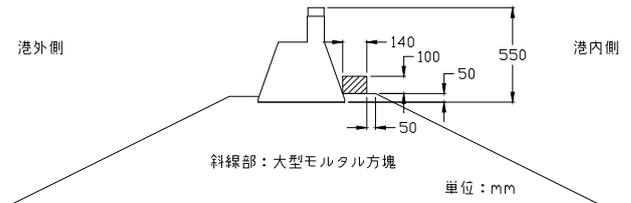


図-4.6 大型の被覆ブロックを用いた断面図

実験条件としては、4.2 節と同じ 28%のポンプ出力とした。その結果、越流が大きくなるに従い、袋詰め材ならびに大型の被覆ブロックが水平方向に滑動し、最終的には腹付け効果がなくなり、ケーソンの滑動や滑落が生じるか、大型の被覆ブロックが移動する被害を受けた。袋詰め材は、ブロックより先に持ち上がるように動いた場所もあった(写真-4.2)。

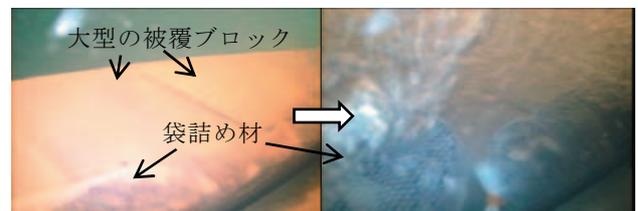
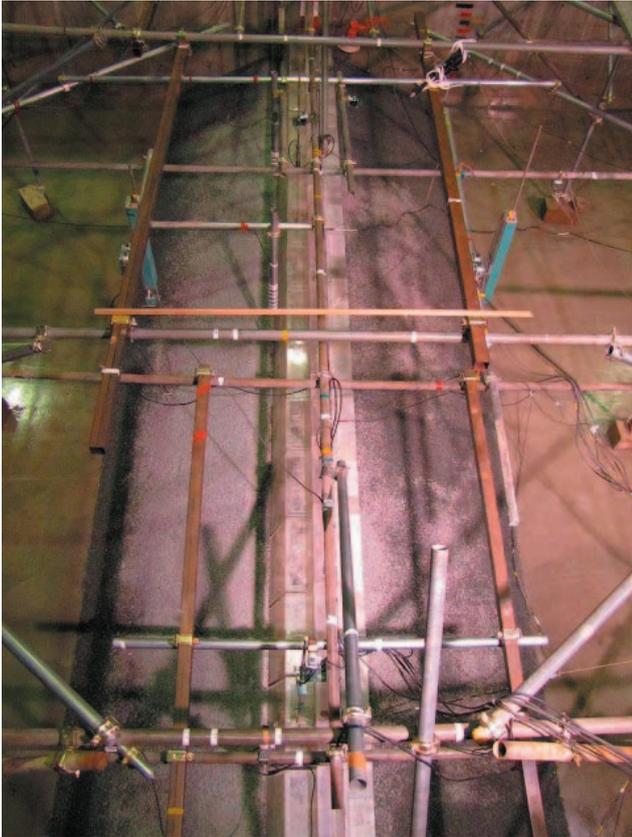


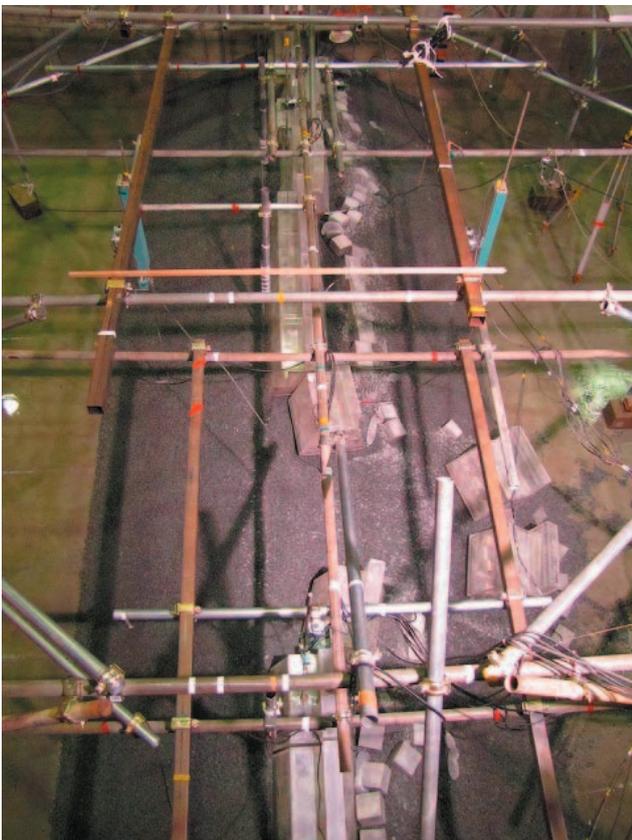
写真-4.2 詰めていた袋詰め材と一緒に動くブロック

実験前と実験後を比較したものを写真-4.3 に示す。これを見ると、ほとんどのところで大型の被覆ブロックが滑動していることがわかる。これは越流による流れの影響であると考えられ、流れと被覆ブロック重量の関係を実験的に示すことは今後の課題となる。

表-4.8 に、ケーソン No.13 が滑動したとき(125 秒後)の波圧を測定していたケーソン(No.15, No.7, No.2)における波力と滑動安全率の結果を示す。これを見るとわかるように、滑動安全率はほぼ 1.0 の状態で滑動したことが推測される。したがって、越流により早めに大型の被覆ブロックが流され、そうすることにより腹付け高さが急激になくなったことで、腹付けの効果がなくなったものと考えられる。



(1) 実験前(模型設置直後, 注水前)



(2) 実験後(排水後)

写真-4.3 実験前後の実験模型の状態

表-4.8 ケーソン No.13 が滑動したときの結果

ケーソン番号	No. 15	No. 7	No. 2		
水位(cm)	港外側(WG2)	18.5	18.7	18.5	
	港内側(WG5)	-0.9	-0.8	-0.8	
	ケーソン上	18.1	18.0	17.9	
水位差(cm)(WG2-WG5)		19.4	19.5	19.3	
	港外側前面	7.4	6.5	6.9	
	スリット部底面	6.8	6.5	6.1	
波圧強度 (計測値) (gf/cm ²)	スリット部直立壁	7.2	6.5	7.0	
	天端面	3.7	2.7	3.2	
	背面(上)	-14.9	-13.9	-14.3	
	背面(下)	-13.7	-11.9	-12.0	
	底面	-1.9	3.5	1.4	
波圧強度 (初期補 正後) (gf/cm ²)	港外側前面	19.4	18.5	18.9	
	スリット部底面	20.3	20.0	19.6	
	スリット部直立壁	19.2	18.5	19.0	
	天端面	5.7	4.7	5.2	
	背面(上)	-2.9	-1.9	-2.3	
単位幅波 力(gf/cm)	背面(下)	-1.7	0.1	0.0	
	底面	10.1	15.5	13.4	
	港外側前面	水平	679.0	647.5	661.5
		鉛直	238.6	227.5	232.4
	スリット部底面	339.0	334.0	327.3	
	スリット部直立壁	384.0	370.0	380.0	
	天端面	56.4	46.5	51.5	
	背面(上)		-26.4	-17.5	-21.2
		背面(下)	水平	-59.5	3.5
	鉛直		-20.9	1.2	0.0
底面	505.0	775.0	670.0		
水平力	PH	1148.9	1031.5	1062.7	
	PV	108.1	-165.8	-58.8	
模型排除体積	V	75295	75320	75320	
ケーソン模型質量	W	166000	165400	166000	
浮力	PB	-75295	-75320	-75320	
水平合力	F	57445	51575	53135	
鉛直合力	N	96110	81790	87740	
滑動安全率(摩擦係数 0.6)		1.00	0.95	0.99	
推定摩擦係数	μ	0.60	0.63	0.61	

(2) 上部工の工夫による越流対策

腹付け高さが一定の場合, 大型ブロックでは, 一旦動いてしまうと効果が急激に小さくなること, また, 越流が激しいと安定重量を確保することが難しいことがわかった. そこで, 次に, 上部工を工夫することにより越流の落下場所を変えることにより洗掘防止することに効果があるかどうかを検証する. ここでは, 便宜的に上部工の港内側にひさしを設置した.

腹付け部の被覆材は, 天端上に加えて, 腹付け部のマウンド斜面にも設置した(図-4.7). 使用した被覆ブロックは長さ70mmのエックスブロック(現地換算質量36.7t)と長さ77mmのペルメックス(現地換算質量32.4t)の2種類である.

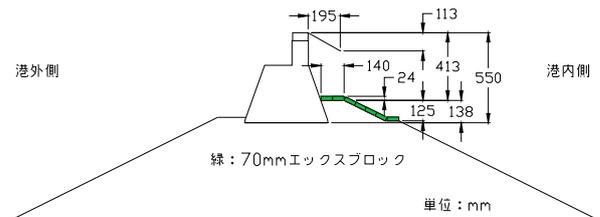


図-4.7 ひさし付き上部工の断面図

台形ケーソンの上部工背後に設置したひさしは、写真-4.4に示すように2cmのスリットを1函につき2か所ずつ設置した。各断面の平面配置は図-4.8のとおりである。図中右からNo.1からNo.15までは、ひさし付き腹付け工を1/4とした台形ケーソンとし、No.16からNo.19までは腹付け工を1/4としたひさし無し矩形ケーソンとした。また、No.1, No.2, No.14からNo.19までのケーソンは質量を重くして動かないようにしている。目地幅はすべて2.0cmとした。



写真-4.4 スリット付きひさしの実験模型



図-4.8 対策工の平面配置

実験中の港内外水位と水位差の解析結果を表-4.9に示す。ポンプ出力28%から32%は水位差が安定した後の60s間の平均値であり、ポンプ出力35%はNo.8~No.10のケーソンが滑動する直前の1s間の平均値である。

表-4.9 港内外水位と水位差の解析結果

ケーソン形状	ケース	ポンプ出力 (%)	模型量				現地換算			
			水位 (cm)			水位差 (cm)	水位 (m)			水位差 (m)
			初期	港外	港内		初期	港外	港内	
			η_s	η_0	η_i	Δh	η_s	η_0	η_i	Δh
台形	1	28	12.0	18.6	-2.7	21.3	7.2	11.2	-1.6	12.8
	2	30	12.0	19.2	-3.3	22.5	7.2	11.5	-2.0	13.5
	3	32	12.0	19.9	-3.4	23.3	7.2	11.9	-2.0	13.9
	4	35	12.0	21.0	-3.3	24.3	7.2	12.6	-2.0	14.6
矩形	1	28	12.0	18.5	-0.4	18.9	7.2	11.1	-0.2	11.3
	2	30	12.0	19.1	-2.6	21.7	7.2	11.5	-1.6	13.1
	3	32	12.0	19.7	-4.4	24.1	7.2	11.8	-2.6	14.4
	4	35	12.0	20.7	-6.0	26.7	7.2	12.4	-3.6	16.0

港内側水位が台形と矩形では若干差がある。港内外の水位差は、ポンプ出力を大きくしたときに台形ケーソンより矩形ケーソンで大きくなっている。これは、越流の差によるものではないかと考えられる。

堤体模型の状態変化の結果を表-4.10に示す。表中で、“平場移動”は腹付け部斜面下端の水平部被覆ブロックの移動、“被覆移動”は腹付け部天端や斜面の被覆ブロックの移動、“斜面移動”は腹付け部斜面の被覆ブロックの移動、“越流洗掘”は腹付け部の被覆ブロックが移動した後にマウンド石材が洗掘、“変位”はケーソンの変位はあるがマウンド天端上にケーソンが残っている状態、“滑落”はケーソンがマウンド天端上から滑り落ちた状態、着色部は堤体質量を割り増したものをそれぞれ示している。

ひさしを付けた台形ケーソンは、ケース1ではNo.12で斜面下平場の被覆ブロックが移動した以外は、被覆ブロックの移動を生じていない。これは、越流が着水する位置が法肩まで移動したことによると考えられる。

ケース2ではケーソンNo.12の背後で、ひさしの隙間からもれる水塊によって越流洗掘を生じたが、ひさし付き台形ケーソンのその他区間は、斜面部の被覆ブロックの移動のみで、天端部の被覆ブロックは移動していない。

ケース3では多くのケーソンで越流洗掘を生じているが、ケーソンが変位するには至っていない。

ケース4では、まずケーソンNo.8~No.10が滑落し、その後ケーソンNo.7, No.11が変位し、最後にNo.12が変位した。あとから変位したケーソンは、ケーソンが抜けたあとに生じた流れによって、マウンドの洗掘を受けたことにより変位したものと考えられる。

表-4.10 実験中の堤体模型の状態の変化

ケーソン形状	ひさし	ケーソン No.	ケース	1	2	3	4	
			ポンプ出力	28	30	32	35	
			越流状況	最初から水没				
台形	あり	1			斜面移動	越流洗掘	斜面移動	
		2				斜面移動		
		3				斜面移動	越流洗掘	
		4			斜面移動	越流洗掘	越流洗掘	
		5			斜面移動	越流洗掘	越流洗掘	
		6			斜面移動	越流洗掘	越流洗掘	
		7				越流洗掘	変位	
		8			斜面移動	越流洗掘	滑落	
		9				越流洗掘	滑落	
		10			斜面移動	越流洗掘	滑落	
		11				斜面移動	変位	
		12			平場移動	越流洗掘	越流洗掘	変位
		13				斜面移動	斜面移動	越流洗掘
		14				斜面移動	斜面移動	越流洗掘
		15			平場移動	斜面移動	斜面移動	越流洗掘
矩形	なし	16			被覆移動	越流洗掘	越流洗掘	
		17			被覆移動	越流洗掘	越流洗掘	
		18			被覆移動	被覆移動	越流洗掘	
		19			被覆移動	被覆移動	越流洗掘	

一方で、ひさしなしの矩形ケーソンは、ケース1で被覆ブロックの移動が始まり、ケース2では越流洗掘が始まっている。ただし、No.18とNo.19のケーソン背後は写真-4.5に示すようにポンプ出力35%の作用後にも腹付け部天端の被覆ブロックが1列残っている。これは、越流位置が台形と異なるためだと考えられる。また、質量割増によりケーソンそのものは変位していない。

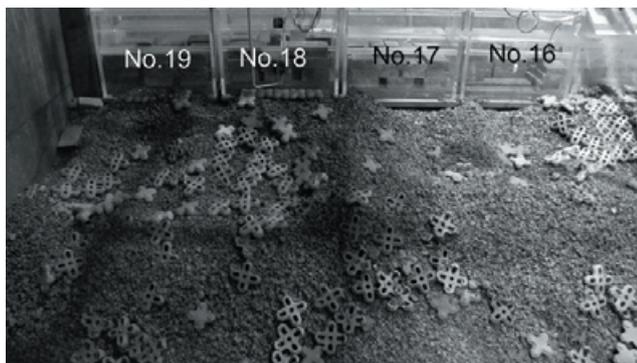


写真-4.5 矩形ケーソン背後の実験後の状況

写真-4.6に実験前と実験後の変化を示す。これを見ると滑落するケーソンがある一方で、周辺のケーソンも引きずられるように滑动していることがわかる。目地幅が小さいときの状況と似た状況となっている。これは、ひさしにより、その部分の重量により転げるように滑落したため、流れが急激に集中したことが原因のひとつとして考えられる。

表-4.11に目地流速の測定結果を示す。着色部はケーソンが滑落する直前の値である。

図-4.9には、水位差から計算される流速と港内側流速との比を示す。これを見ると台形ケーソンのほうはほぼ1.0程度であり、ヘッド差によって生じる流速となっていることがわかる。

表-4.11 目地部の流速

条件	水位差 (cm)		目地部流速 (cm/s)									
			台形				矩形					
	台形 Δh	矩形 Δh	No. 1_2 V_0 V_i	No. 6_7 V_0 V_i	No. 9_10 V_0 V_i	No. 14_15 V_0 V_i	No. 18_19 V_0 V_i					
1	21.3	18.9	16.9	204.2	16.0	計	15.3	計	15.1	計	18.8	163.2
2	22.5	21.7	17.6	212.5	17.1	計	17.2	計	16.6	計	19.7	168.2
3	23.3	24.1	18.9	222.4	18.1	なし	17.3	なし	17.0	なし	21.1	178.1
4	24.3	26.7	20.5	227.2	20.5	なし	19.1	なし	18.4	なし	21.9	197.5



図-4.9 港内側の目地流速比



(1) 実験前(模型設置直後, 注水前)



(2) 実験後(排水後)

写真-4.6 実験前後の実験模型の状態

表-4.12 に、ひさし付きケーソン(No.7)の滑動安全率と波力の算定結果を示す。これを見るとわかるように、越流洗掘が生じないため、腹付けの効果が発揮され、見かけ上摩擦係数が0.6から0.79まで向上していることがわかる。また、表-4.13に無次元波圧強度を示す。これを見ると、背面において越流が生じているにもかかわらず負圧が生じていないことがわかる。これは、ひさしにより、比較的背後が静穏になるためだと考えられ、腹付けによる重しの効果および背面波圧の軽減効果が、結果的に得られることがわかる。

表-4.12 No.7ケーソン(ひさし付き)の結果

ケース		1	2	3	4	
ポンプ出力		28	30	32	35	
水位(cm)	港外側	18.7	19.3	20.0	21.1	
	港内側	-2.7	-3.3	-3.4	-3.3	
	ケーソン上	18.0	18.5	19.2	20.1	
水位差(cm)		21.4	22.6	23.4	24.4	
波圧強度 (計測値) (gf/cm ²)	港外側前面	7.0	7.3	8.3	8.9	
	スリット部底面	6.9	7.2	8.0	8.6	
	スリット部直立壁	7.3	7.2	8.0	9.0	
	天端面	2.9	3.1	3.3	3.5	
	背面(上)	-13.4	-15.4	-16.1	-17.3	
	背面(下)	-12.6	-14.1	-15.4	-18.1	
	底面	-0.2	0.9	0.8	1.2	
波圧強度 (初期補 正後) (gf/cm ²)	港外側前面	19.0	19.3	20.3	20.9	
	スリット部底面	20.4	20.7	21.5	22.1	
	スリット部直立壁	19.3	19.2	20.0	21.0	
	天端面	4.9	5.1	5.3	5.5	
	背面(上)	-1.4	-3.4	-4.1	-5.3	
	背面(下)	-0.6	-2.1	-3.4	-6.1	
	底面	11.8	12.9	12.8	13.2	
単位幅波 力(gf/cm)	港外側前 面	水平	665.0	675.5	710.5	731.5
		鉛直	233.7	237.4	249.7	257.0
	スリット部底 面	水平	340.7	345.7	359.1	369.1
		鉛直	386.0	384.0	400.0	420.0
	天端面	水平	48.5	50.5	52.5	54.5
		鉛直	-10.2	-22.8	-27.1	-35.5
	背面(上)	水平	-21.0	-73.5	-119.0	-213.5
		鉛直	-7.4	-25.8	-41.8	-75.0
	底面	水平	590.0	645.0	640.0	660.0
		鉛直	1082.2	1155.8	1256.6	1400.5
模型排除体積	V	74845	74695	74670	74695	
ケーソン模型質量	W	166000	166000	166000	166000	
浮力	PB	-74845	-74695	-74670	-74695	
水平合力	F	54110	57790	62830	70025	
鉛直合力	N	92430	89445	90305	88585	
滑動安全率(摩擦係数0.6)		1.02	0.93	0.86	0.76	
推定摩擦係数	μ	0.59	0.65	0.70	0.79	

表-4.13 No.7ケーソンの無次元波圧強度

条件		1	2	3	4
無次元波圧強度	港外側前面	1.03	1.00	1.04	0.98
	スリット部底面	1.01	0.99	1.00	0.95
	スリット部直立壁	1.07	0.99	1.00	0.99
	天端面	0.40	0.40	0.39	0.36
	底面	-0.03	0.12	0.10	0.13
	背面(上)	1.04	1.08	1.04	0.98
	背面(下)	0.98	0.99	0.99	1.03

図-4.10は、水位差と摩擦係数を0.6と仮定した場合の波圧測定を行ったケーソンの滑動安全率の関係を示したものである。これを見るとわかるとおり、最終的にケーソンが滑落にいたったのは、ほぼ滑動安全率が0.8程度

のところである。よって、今回の実験の範囲では、ケーソンの高さに対して1/4まで腹付け工は、越流による洗掘対策を適切に施すことで、約20%程度の抵抗力が増大することがわかる。

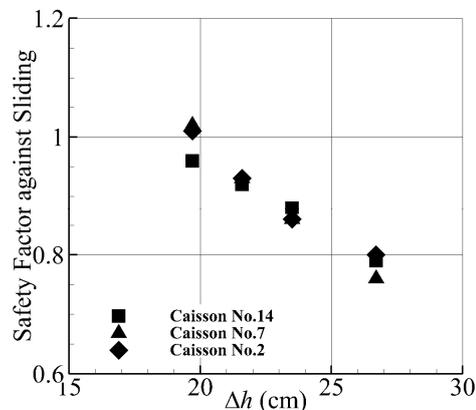


図-4.10 腹付け対策(ひさし付き)による水位差と滑動安全率の関係

4.4. 腹付け効果の定量化

菊池ら(2011)に示される以下の式で抵抗力を計算する。

$$R = \frac{W_s \cdot \tan(\theta + \phi)}{1 + \tan \delta \cdot \tan(\theta + \phi)}$$

ここで、 R は裏込めによる受動抵抗力、 W_s は滑り面より上方の裏込め重量、 θ は滑り面の水平方向とのなす角度、 ϕ は裏込め材料の摩擦角、 δ は壁面摩擦角それぞれ表す。

今回の計算では、滑り面より上方の重量は、ケーソンの底面より上にある腹付け工の重量とし、滑り面の水平方向とのなす角度として、ケーソン後肢から基礎マウンドの法尻までの直線と水平とのなす角度とした。壁面摩擦角を -15 度と仮定したとき、裏込め材料の摩擦角を 35 度とすることで、実験から得られた抵抗力とほぼ同等の値となった。

一方で、摩擦角などの与え方によって、抵抗力は変化するため、パラメタの決め方は今後の課題となると考えられる。

5. 結論

ケーソンが津波によって滑動する要因としては、津波による水平力、目地流速もしくは越流によるマウンドの洗掘による不安定性の増大、マウンドの支持力の低下、基礎地盤の洗掘などが考えられる。本研究では、釜石の湾口防波堤を対象として、それらの要因の影響度合いについて実験ならびに数値計算を用いて検討した。その結

果、堤頭部ならびに堤幹部の被災メカニズムを明らかにし、さらに堤幹部における対策案を示した。

堤頭部については、開口部の潜堤が押波時に滑動し、捨石部が露出することにより、引波時に堤頭部のマウンドが洗掘され、堤頭部が傾斜するというメカニズムで被災が生じたと考えられる。

一方で堤幹部においては、水位差による水平力に加えて、前面波圧が静水圧よりも若干大きく、背面波圧が静水圧よりも若干小さくなることで水平力が増大した現象が見られた。

目地洗掘から始まる滑動現象は、滑動安全率が高いことから、滑落には至らず、さらに、滑動後、背後にたまった石により、その後の抵抗力が増すことがわかった。数値計算の結果からは、ケーソンが変位するほどの目地洗掘はなかったと推測され、その場合は、滑動抵抗に洗掘の影響を受けることはないと考えられる。また、ケーソンの背後が少し掘られる程度の越流洗掘は、滑動抵抗に対して影響しなかった。

これらのことから、ケーソンの滑動抵抗に寄与するほどの目地洗掘ならびに越流洗掘が現地で生じていた可能性は低く、基本的には、水平方向に引っ張られる力によって、滑動安全率が 1.0 程度の状態で滑落したものと考えられる。また、数値シミュレーションの結果からは、前面波圧を静水圧の 1.05 倍、背面波圧を 0.9 倍とすることで、滑動安全率が 1.0 程度になることがわかった。

北堤においてケーソンの飛び飛びに滑落したことは、摩擦係数のばらつきや背面の負圧のばらつきがその要因の一つとして考えられるため、北堤は、滑動安全率がほとんど 1.0 付近であったことが推測される。

以上より堤幹部においては、水位差による水平力が主たる要因であると考えられ、最大水位差が発生した時間差、摩擦係数のばらつき、背面の負圧のばらつきなどが滑動状況の違いを生じさせた要因と考えられる。

越流による洗掘防止を施すと、腹付け対策は有効かつ定量的に評価できる可能性が高い。また、ひさしのように上部工を工夫し、越流の場所を変えることで背面波圧の低減や、背後の越流洗掘の低減が可能であることも確認された。

本検討では、マウンドの捨石をより小さくしたときの検討がなされておらず、捨石が小さくなったときの滑動抵抗力とマウンドの支持力の関係、洗掘量との関係は、今後の課題となる。また、越流による洗掘対策および背面の波圧と越流の関係の定式化があげられる。

(2011 年 11 月 11 日受付)

謝辞

本論文をまとめるにあたり、多くの方のご助言をいただいた。

国土交通省東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所の佐藤正勝所長はじめ職員の方々には、防波堤の被災についての情報をいただいた。

国土交通省港湾局技術企画課技術監理室の石橋洋信技術基準審査官ならびに宮田正史国際標準化推進官には、洗掘や対策についてのご助言をいただいた。

国土交通省国土技術政策総合研究所の長尾毅港湾施設研究室長には、摩擦係数についてのご助言をいただいた。同研究所の根木貴史沿岸防災研究室長には対策工のアドバイスをいただいた。

株式会社エコーの長谷川巖氏ならびに稲垣茂樹氏には、実験結果の整理をお手伝いいただいた。

港湾空港技術研究所の梅山和成統括研究官には論文の視点についてのご助言をいただいた。栗山善昭特別研究官ならびに菊池喜昭特別研究官には、論文の推敲についてのご助言をいただいた。また、企画課の寺本健太郎係員には原稿の修正に対して粘り強く対応いただいた。

耐波研究チームの鷲崎誠研究官、作中淳一郎研究官には実験作業を手伝っていただいた。

最後に、高橋重雄理事長には、被災メカニズムについて多くのご示唆をいただいた。

ここに記し感謝の意を表す。

参考文献

高橋ほか(2011): 2011 年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報, 港湾空港技術研究所資料, No.1231

谷本勝利・木村克俊・宮崎啓司(1988): 津波防波堤開口部潜堤の安定性に関する実験的研究, 港湾空港技術研究所報告, pp. 93-122, Vol.27, No.4.

菊池喜昭・新舎 博・河村健輔・江口信也(2011): 裏込めを有するケーソン式混成堤の安定性の検討, 土木学会論文集 C, Vol. 67, No.4, pp.474-487

港湾空港技術研究所資料 No.1251

2012.3

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2012) by PARI

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

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



古紙配合率70%再生紙を使用しています