

護岸における吸い出し被害の事例調査と原因の考察

(独) 土木研究所寒地土木研究所 ○菅原 吉浩
森 昌也
阿部 勝彦

護岸の吸い出し被害の原因を整理するため、北海道開発局所管の港湾・漁港における被災事例を収集し、被災原因の分類を行った。その結果、防砂シートや防砂目地板の損傷が被災の主原因であることや、護岸は係船岸に比べ、施工後 10 年以内に吸い出し被害を受けやすい傾向にあることが分かった。また、防砂シートへの波力の影響を調べるため、数値波動水路 (CADMAS-SURF) と水理模型実験により低マウンド護岸における裏込石内の水圧特性の比較を行った。

キーワード：護岸、吸い出し、被災事例、CADMAS-SURF

1. まえがき

港湾整備に伴う埠頭の拡大により、比較的波当たりの強い場所に護岸が作られる場合があり、このような護岸は防波護岸と呼ばれている。防波護岸は、船舶の利用上から静穏域内に施工される岸壁とは異なり、前面波高の制約は無く、前面波高が大きい場合には越波を抑えるために天端の高い胸壁を伴う構造となる。

防波護岸を施工する場合、水深が深い場所ではケーソンや水中コンクリート等による混成堤式護岸（以下、低マウンド型護岸）が採用され、比較的浅海域では経済性や施工性の観点から、陸上から捨石を巻き出した捨石天端の高い構造形式（以下、高マウンド型護岸）が採用されることが多い。しかし、このような防波護岸の背後の埋立土砂が吸い出されることにより、背後地盤の陥没被害が度々発生している。写真-1 は防波護岸の吸い出し被害の一例で、防砂シートが損傷し、シート上の裏埋土がシートから抜け出すことによりアスファルト舗装に直径 45cm の陥没が出来た例である。

このような護岸の吸い出しの原因については種々考えられており、高橋ら(1996)¹⁾ は水理模型実験により護岸背後の裏込石内や目地板の圧力測定を実施するとともに、対策工の 1 つとして圧抜きの有効性を確認している。このほかの対策としては、アスファルトマットによる圧力抑制、地盤改良や裏込石より粒径の小さいフィルター材の設置などによる吸い出し防止対策、等が各現場で実施されている。しかし、吸い出し被害は依然として発生しており、今後、吸い出し被害を未然に防止していく上で、これまでに発生した被災事例から被災原因を再整理する必要があると考えた。

本報告では、北海道開発局所管の港湾・漁港の吸い出

し被害について、アンケートにより被災事例調査を実施し、被災原因の分類・整理を行った。また、被災事例調査の結果、被災原因としてシートの損傷が多かったことから、防砂シートへ作用する圧力に着目し、数値波動水路 (CADMAS-SURF)²⁾ と水理模型実験により低マウンド型護岸における裏込石内の水圧特性の比較を行った。

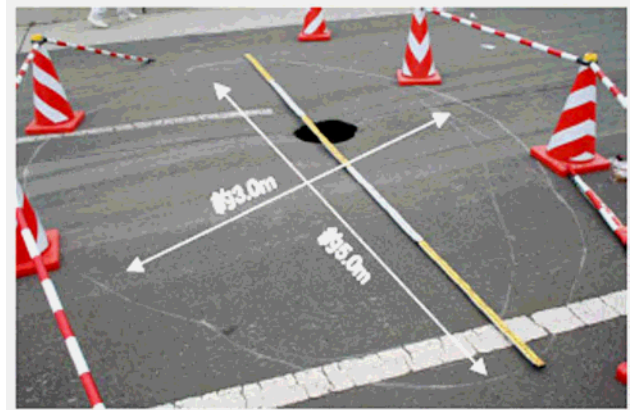


写真-1 防波護岸の吸い出し被災の一例

2. 被災事例調査

(1) 被災事例調査の概要

調査は 2008 年 7 月 9 日～7 月 31 日の期間に実施した。調査方法はアンケート方式とし、調査対象者は北海道開発局の各開発建設部の港湾関係職員（係長以上）と寒地土木研究所の港湾関係職員とした。対象とする被災事例は、エプロン、舗装、裏埋土などで陥没が発生した全ての事例（原因が不明なものも含む）とした。調査対象施

設は、全道の直轄で整備している港湾・漁港における防波護岸、護岸、岸壁など陥没被災が発生した全ての施設とした。アンケート項目は、被災施設名、被災時期、被災位置、被災の程度、その他被災の原因等とした。

調査の結果、被災事例数は 88 カ所 107 事例で、港湾数は 24 港、漁港は 15 港であった。また、アンケートの中で最も古い被災事例としては 1982 年発生した事例であり、アンケートで集まった事例は、1982～2008 年の 26 年間であった。

(2) 被災事例調査の結果

a) 原因別分類

アンケートに記述された被災の特徴を元に、被災原因を表-1 のとおり分類した。アンケートに基づいているため、全ての被災事例の被災原因を特定できるような詳細資料は必ずしも残っておらず、資料が残っているものは全被災件数 84 件中 17 件ではあった。しかし、被災が発生した場合には、被災原因を特定した上で復旧する事が不可欠であるため、アンケートの信頼性は低いという事では無いと言える。

図-1 は、被災原因を構造別に分類したものである。被災原因別に見ると、シートの損傷が 19 件と最も多く、次いで目地部からの吸い出し被害が 18 件、老朽化が 13 件であった。防砂シートの損傷については、係船岸に比べ護岸の被災事例数が多かった。これは、係船岸は防波

表-1 被災原因名との被災の特徴

被災原因名	特徴
シート	波、越波、または原因不明による防砂シートの損傷
目地	地震による目地の開き、波による目地破損、原因不明の岩着構造の目地部からの吸い出し
目地板無し	防砂目地板が無い
老朽化	鋼矢板の腐食、本体ケーソンの穴
継ぎ手不良	鋼矢板の継ぎ手の接続不良
越波	越波・冠水による舗装路床材の細粒分流出
その他	埋立土砂の不等沈下や防砂シートが無いものなど
不明	調査を実施していない、または調査をしたが原因が不明なもの

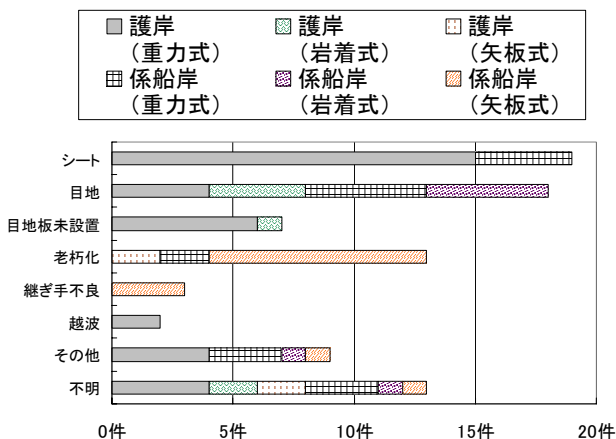


図-1 被災事例調査結果の整理 (被災原因別分類)

堤などの遮蔽域であり堤体前面波高が小さく、シートへの影響も小さいためと思われる。目地の未設置については、施工年代が古い (S40 年以前) 構造物で元々目地が設置されていないものや、コンクリートで目地処理をしていたが吸い出しを受けた事例であった。

なお、被災件数は全 84 件中、構造形式別に見ると、護岸 (重力式) が 35 件と最も多く、次いで係船岸 (重力式) 17 件、係船岸 (矢板式) 14 件となっている。

b) 経過年数別の被災件数の整理

図-2 は構造別、施工後経過年数別に被災件数を整理したものである。いずれの施設についても、施工後 30 年以上の場合の被災件数が多くなっている。

護岸については施工後 10 年以内の被災件数が多い傾向を示しており、護岸の全被災件数 42 件中 24 件 (57%) が施工後 10 年以内の被災事例であった。吸い出し被災は、大きく分けて長期的な要因 (老朽化等) と短期的な要因 (高波浪、越波、地震など) が考えられるが、護岸の場合は波当たりの強い場所に施工されることが多く、短期的要因の影響を受けやすいため、比較的短期間での被災件数が多いものと推測される。

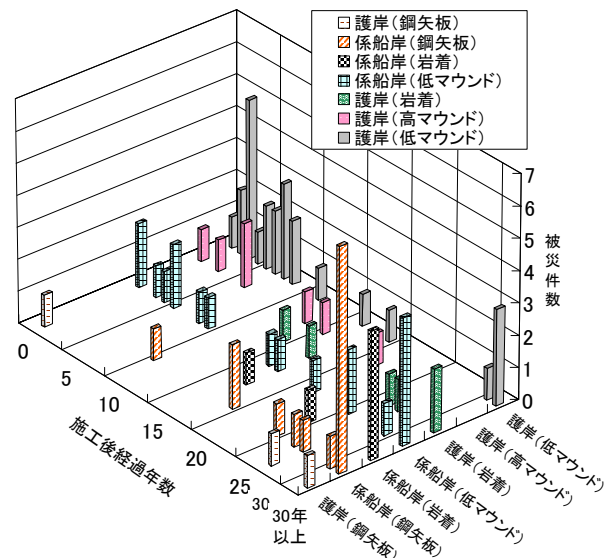


図-2 経過年数別の被災件数

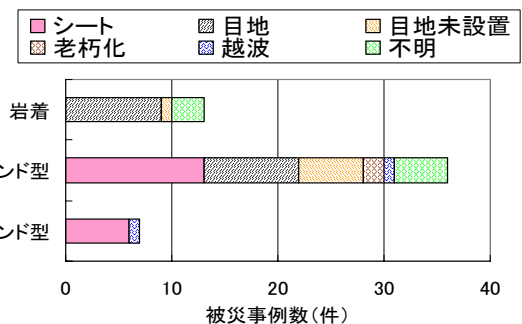


図-3 基礎捨石天端高の違いによる被災事例数

c) 捨石天端高の違いによる影響

図-3 は基礎捨石の天端高の違いにより被災事例を整理したものである。低マウンド型護岸の被災事例が最も多く (36 件)、高マウンド型の被災事例数は 7 件であった。この理由としては、護岸の施設数が低マウンド型は高マウンド型に比べ多いためであり、低マウンド型護岸の方が被災を受けやすいということでは無いと思われる。

d) 防砂シート規格変更の履歴

被災事例調査の結果、図-1 に示すとおり被災原因としては防砂シートの損傷が多いことが分かった。防砂シートの規格については、これまで何度か改訂されている。このため、表-1 に示すとおり防砂シートの規格の変更履歴についても調査を行い、シートの規格と被災事例数との整理を行った。防砂シート規格の大きな変更点は、平成 8 年度から防砂シートが織布から不織布に変更されていることである。また、平成 18 年度からは圧縮率についても仕様書で明示するようになっている。

防砂シートの規格年代と被災事例数との関係については、平成 7 年以前の規格では被災事例数は 7 件、平成 8 ~10 年の規格では 2 件、平成 11~18 年の規格では 11 件の被災事例数となっており、シートの規格と被災事例数との明確な因果関係は確認されなかった。

し、図に示すように堤体前面、裏込石内および裏埋土内

表-1 防砂シート規格の変更履歴

年度	種別	厚さ (mm)	引張強度	伸び率	質量	圧縮率	材質
S 56	織布	-	300 kg/3cm 以上	-	-	-	-
S 59		-	290 kg/3cm 以上	-	-	-	-
H8	不織布	5.0mm 以上	90 kgf/5cm 以上	60% 以上	500 g/m ² 以上	-	ポリエステル
H 11		4.2mm 以上	880 N/5cm 以上				
H 18		4.2mm 以上	880 N/5cm 以上				

表-2 実験に用いた防砂シートの特性 (カタログ値)

質量 (g/m ²)	厚さ (mm)	透水係数 (cm/s)	引張強度 (N/5cm)		伸度 (%)	
			タテ	タテ	タテ	タテ
60	0.5	1×10 ⁻¹	147	98	55	60

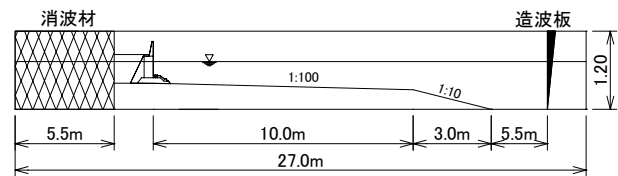


図-4 実験水路諸元

3. 裏込石内の水圧特性

(1) 水理模型実験および数値計算の目的

被災事例調査の結果、吸い出し被害の原因としては防砂シートの損傷が多いことが分かった。防砂シートの損傷原因は施工時の埋立土の落下衝撃や完成後の波による繰り返し荷重など様々考えられるが、本研究では、シートに対する水圧に着目し、裏込石内の水圧特性を水理模型実験により確認することとした。また、吸い出し被害が問題となるような他の現場において水圧特性の確認が出来るよう、汎用性の高い数値波動水路 (CADMAS-SURF) により数値計算モデルを構築する。さらに、裏込石内に圧抜き口を設置した場合の圧力低減効果について、構築した数値計算モデルにより確認を行う。

(2) 水理模型実験の概要

実験は図-4 に示す、二次元造波水路 (長さ 27.0m×幅 0.6m×高さ 1.2m) に 1/100 勾配のモルタル固定床を設置し縮尺 1/30 で行った。実験波は規則波とし、現地スケールで周期 10sec、堤体前波高は 2.0m~6.0m までの 5 種類とした。

実験断面は、図-5 の低マウンド型防波護岸を対象と

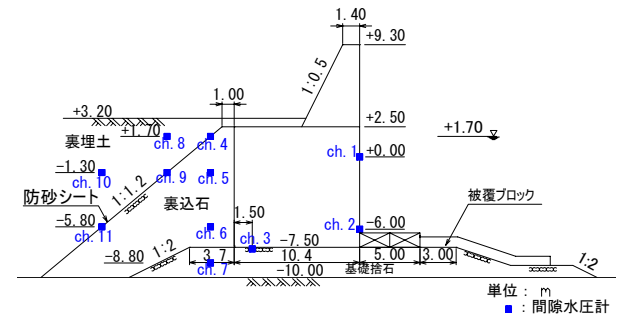


図-5 実験対象断面図 (現地スケール)

に圧力計を設置し、圧力を計測した。また、堤体設置前に堤体前面に波高計を設置し通過波を作成した。波高と圧力のサンプリング間隔は 200Hz とし、計測時間は安定した波形が 5 波以上測定できるよう 30sec 程度とした。なお、圧力の測定値としては、計測時間中の最大および最小値とし、波高については 5 波平均とした。堤体は、現地スケールで長さ 15.0m×幅 10.4m×高さ 10.0m の大きさのケーソンで、実験においては木製の堤体を使用した。基礎捨石や裏込石については砕石を使用し、裏埋土は砕砂 7 号 (D₅₀=0.158mm) を用いた。防砂シートは表-2 に示す厚さ 0.5mm の透水性を有するポリエステル製長

繊維不織布を用い、裏込石内への砂の落下を防止した。

(3) 数値計算の概要

CADMAS-SURF は、2次元断面水路における水理実験を PC 上で実施することができる数値シミュレーションプログラムである。これは VOF 法と呼ばれる自由表面の処理方法を中心として開発されており、波、流れの相互作用についての数値シミュレーションを迅速かつ容易に行うことが可能である。CADMAS-SURF の基礎式などについての詳細については文献²⁾を参照されたい。

計算断面は図-6 のとおり設定し、実験と同様な断面とし縮尺 1/30 で計算を行った。

数値計算条件は表-3 に示すとおり規則波とし、現地スケールで周期 10sec、堤体前波高は 1.0m~5.0m までの3種類とした。

計算領域は図-7 のとおりとし、水路諸元は 32.5x1.2m、計算メッシュは $\Delta x=1.25\text{cm}$, $\Delta z=1\text{cm}$ 、潮位は実験同様に現地スケールで 1.7m とした。計算パラメータを表-4 に示す。基礎捨石・裏込石については標準的なパラメータ

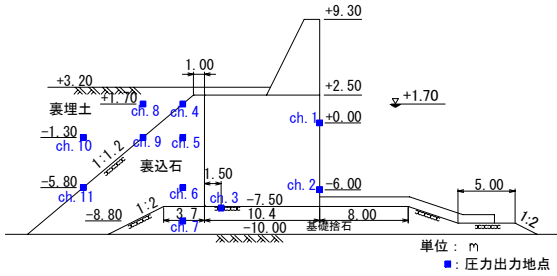


図-6 数値計算対象断面図 (現地スケール)

表-3 数値計算条件

構造形式	堤体前波高(m)	周期(sec)	水深(m)	基礎捨石天端高(m)
低マウンド型	規則波			
	1.0 (0.0033)	10	10.0	-7.5
	3.0 (0.100)			
	5.0 (0.167)			

※()内は計算スケール 1/30 での値

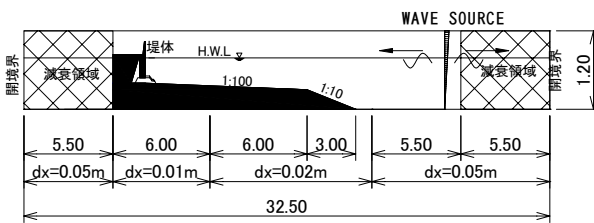


図-7 数値波動水路の概略図

表-4 数値計算パラメーター

	体積空隙率 γV	X方向面積透過率 γX	Z方向面積透過率 γZ	慣性力係数 CM	抵抗係数 CD
基礎捨石	0.48	0.48	0.48	1.20	1.00
裏込石	0.48	0.48	0.48	1.20	1.00
裏埋土	不透過	-	-	-	-

堤体	不透過	-	-	-	-
----	-----	---	---	---	---

一を用いた。また、裏埋土は不透過構造とし、以下において実験結果との比較を行った上で圧抜き口の効果の検討に適用することとした。

なお、数値計算においては造波板側に減衰領域を設定しているが、それ以外の固定床形状や造波板~堤体までの距離などの条件については実験と同一条件としている。

(4) 実験と数値計算結果の比較

a) 時系列波形の比較

図-8 は、測定波形 (時系列波形) の一例であり、現地縮尺で周期 $T=10.0\text{s}$ 、波高 $H=3.0\text{m}$ の実験波の場合である。縦軸は圧力を波高で無次元化したもので、横軸は時間で 0 秒~30 秒までの波形を示している。図中の ch 番号は、図-6 の ch 番号に対応した圧力の出力地点である。

実験と計算を比較すると、ケーソン前面 ch2 では、周期や波圧の再現性は良い。ch3,5,9 においても圧力は若干小さいものの、周期的な水圧変動が見られる。また、実験値では ch3 と ch9 に大きな違いは無いが、数値計算においても同様な結果となり、基礎捨石内から裏込石内への圧力伝播の再現性については概ね得られている。

しかし、基礎捨石や裏込石内の波形は実験とは異なり、上部が尖った波形となっている。この原因としては、裏埋土を不透過に設定しているためであり、圧力による裏埋土の変位による緩衝効果が再現できていないためと考えられる。この点を改良するためには、CADMAS-SURF を波と地盤の相互作用を考慮した数値計算モデルへ拡張することが必用である。

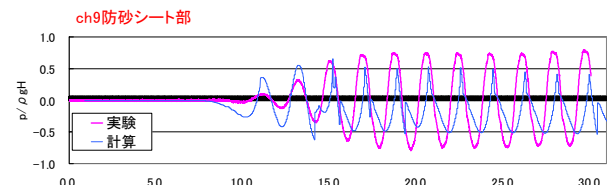
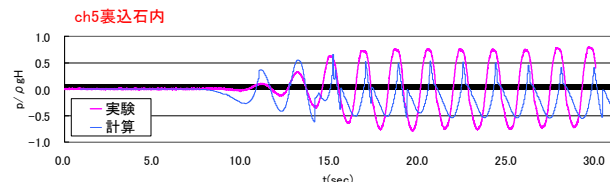
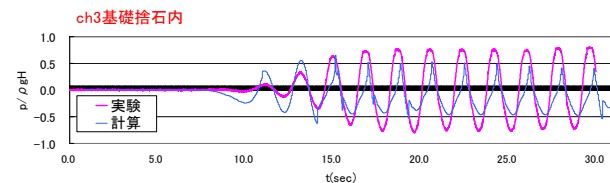
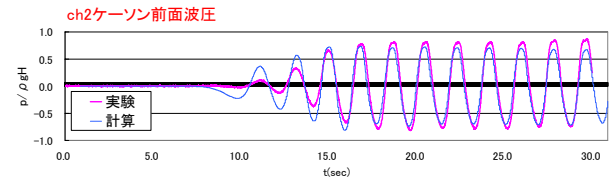


図-8 圧力測定波形の比較 (H=3.0m,T=10.0sec)

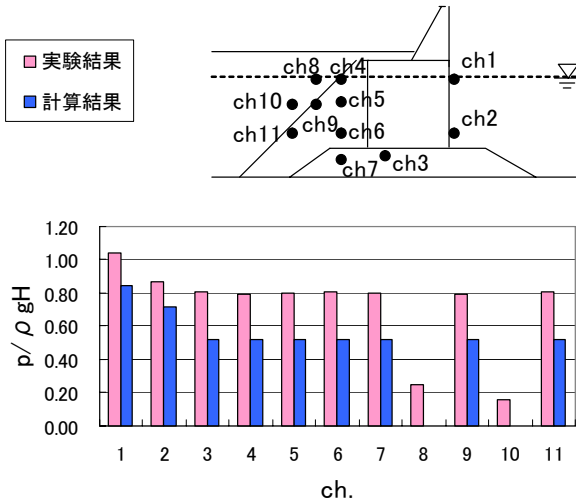


図-9 ch別の最大無次元圧力 (+側) の比較

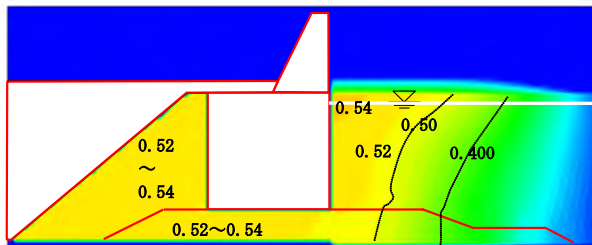


図-10 無次元圧力分布図 (H=3.0m, T=10.0sec)

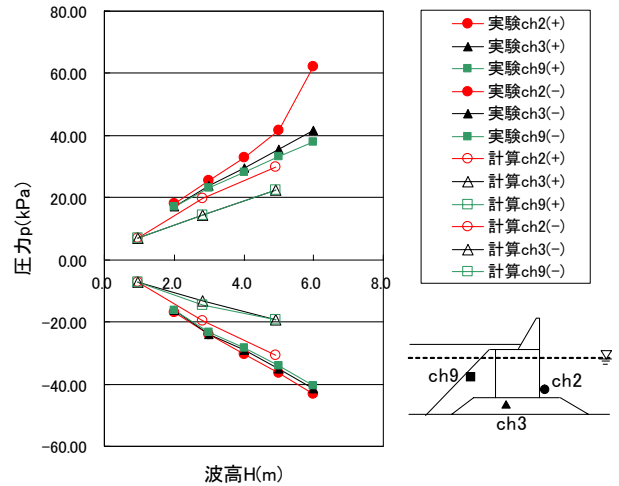


図-11 堤体前波高と圧力 (T=10.0sec)

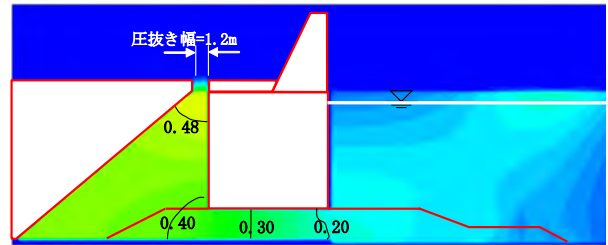


図-12 無次元圧力分布図 (圧抜き有り、H=3.0=10.0sec)

b) 圧力分布の比較

図-9 は、現地スケールで周期 $T=10.0s$ 、波高 $H=3.0m$ の場合の各 ch 別の最大無次元圧力について、実験と計算を比較したものである。縦軸は各 ch の圧力のピーク値を波高で無次元化したものである。

実験結果では、圧力はケーソン前面 $ch1$ よりも捨石マウンド部 $ch3$ の圧力が小さく $0.8w_0H$ (前面波圧の 80%程度) となり、裏込石内 $ch4,5,6,9,11$ でも $ch3$ と同程度の $0.8w_0H$ と大きな値となっている。また、埋立砂内部の $ch8$ や $ch10$ では圧力が小さく、 $ch10$ で前面波圧の 15%程度まで減少している。

一方、数値計算では、圧力は全体的に小さく、基礎捨石マウンド部 $ch3$ では $0.5w_0H$ (前面波圧の 60%程度) となっているが、裏込石の圧力は実験結果と同様に $ch3$ と同程度の値となっている。

図-10 は、数値計算による裏込石内の圧力がピーク時の無次元圧力分布を示したものである。ケーソン前面～裏込石の圧力は $0.52\sim 0.54w_0H$ で、ピーク時の圧力は一様な圧力分布となっている。

このように、堤体前面よりも基礎捨石内の最大圧力は小さくなるが、裏込石内では基礎捨石内と同様な圧力が作用することから、防砂シート部分へも比較的大きな圧力が作用すると言える。なお、この結果は、高橋らと同様な結果である。

c) 波高と圧力の関係

図-11 は各 ch における堤体前波高と正負の圧力の関係を示したもので、実験や数値計算の値を現地スケールに換算した値である。防砂シートへは、正の圧力だけでなく負の圧力も影響するので、負圧についても記載している。

実験結果を見ると波高が大きくなると、圧力は大きくなっている。また、全ての波高において堤体前面の $ch2$ に比べて、 $ch3$ と $ch9$ の圧力が小さくなっている。

一方、数値計算においては、実験と比べると圧力は全体的に小さいが、波高が大きくなると圧力が大きくなることや、 $ch2$ より $ch3$ と $ch9$ の圧力が小さい点は、実験と同様の傾向を示している。

このように、裏込石内の圧力は前面波高の増大に伴い大きくなるのが実験結果からも数値計算結果からも明らかとなり、波高が大きい場合には裏込石内に伝播する圧力は大きく、シートへの圧力も大きくなると考えられる。

(5) 数値計算による圧抜き口の効果の検討

図-12 は、圧抜き口を設置した場合の裏込捨石内の最大無次元圧力分布を示す。圧抜き口の形状は、図に示すとおり裏込石天端幅 1.2m を埋土天端まで貫通させ、パラメータについては裏込石と同様 (空隙率 $\gamma_v=0.48$ 、慣

性力係数 $CM=1.2$ 、抵抗係数 $CD=1.0$) に設定した。

図を見ると、裏込石内は $0.40\sim 0.48woH$ となり圧抜き口が無い場合と比べると 10%程度圧力が減少している。また、水面付近では他の箇所比べて大きな圧力となっているが、この理由としては圧抜き口部分での水位上昇による圧力増大のためと考えられる。

圧抜き口が無い場合の図-10 と比べるとケーソン前面部での圧力が小さくなっているが、これはケーソン前面部と裏込石内の圧力に位相差があり、裏込石内圧力が最大の瞬間の圧力分布を示しているためである。

次に、図-13 に $T=10.0\text{sec}$ における低マウンド型護岸の圧抜き口の有り無しによる堤体前波高と無次元圧力の関係を示す。波高が 1.0m の場合には、圧抜き口を設置した場合の方が圧力が大きくなっているが、波高が 3m 以上の場合には正・負の圧力ともに圧抜き口による圧力低減効果が見られる。波高が 5m の高波浪時については、正の圧力は約 27%、負の圧力は 17%低減し、圧抜き口による圧力の低減効果が確認できた。

4. 主要な結論

(1) 被災事例収集結果

①84 件の被災事例を被災原因別に分類した結果、防砂シートの損傷が一番多く、次に目地の損傷が多いことが分かった。

②施工後経過年数別に被災事例を整理した結果、護岸は係船岸に比べ、施工後 10 年以内に吸い出し被害を受けやすい傾向にあることが分かった。

(2) 数値計算及び実験結果

①実験および数値計算により裏込石内の水圧特性について確認した結果、低マウンド型護岸では波高が大きくなると、正負の圧力は大きくなることが分かった。

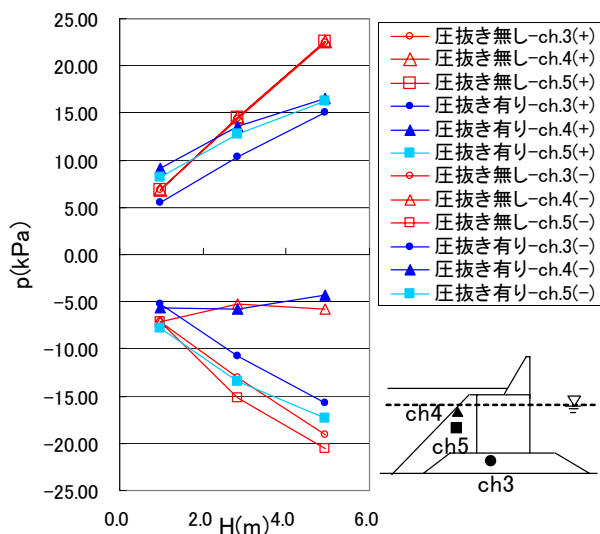


図-13 圧抜き口の有無による堤体前波高と最大圧力

②数値計算により低マウンド型護岸の圧抜き口の効果を確認した。その結果、波高が 1.0m の場合には、圧抜き口を設置した場合の方が圧力が大きくなったが、波高 3.0m 以上の場合には正・負の圧力ともに圧抜き口による圧力低減効果が見られた。

5. あとがき

今回の被災事例調査はアンケートより実施しているため、過去に発生した全ての被災事例を収集できていないことや、被災原因を特定できるような資料が少なく被災原因もアンケートにより分類しているため、100%正確な情報とは言えない。しかし、過去にこのような被災事例を整理した報告は無く、主な被災原因が再認識されたことは、大変意義のあることである。

また、低マウンド型防波護岸の裏込石内の水圧特性については高橋ら(1996)¹⁾の実験により報告がされているが、高マウンド型の研究成果については報告がされていない。このため、今後は水理模型実験や数値計算モデルにより高マウンド型護岸の水圧特性についても確認することが必用である。

さらに、今回構築した数値計算モデルについては実験値に比べ、圧力が若干小さいことや波形が異なるため、モデルの修正が必用である。

謝辞：本報文をまとめるにあたり、被災事例調査は北海道開発局の港湾関係職員に協力して頂きました。また、とりまとめに当たっては開発局の関係者から貴重な助言を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高橋重雄・鈴木高二朗・徳淵克正・岡村知光・下迫健一郎・善功企・山崎浩之、「護岸の吸い出しに関する水理模型実験」、港湾技術研究所報告、第 35 巻、第 2 号、pp. 3-63、1996。
- 2) 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会：数値波動水路の研究開発、(財)沿岸開発技術研究センター、pp. 246-255、2001。
- 3) 藤井敦・高橋重雄・小椋進・宇野健司・杉山直子・五月女洋・伊野同・鶴飼亮行・熊谷隆宏、「混成堤式管理型護岸遮水シートに作用する波圧特性および波圧算定法に関する研究」、海岸工学論文集、第 49 巻、pp. 826-830、2002。
- 4) 中村友昭・許東秀・水谷法美、「捨石護岸背後の埋立土砂の吸い出し機構」、土木学会論文集 B、Vol. 62No. 1、pp. 501-162、2006。
- 5) 横山慎司、佐藤浩彰、吉田義一、「エコグラウンド防波堤の施工について-島防波堤背後盛土護岸の均し及び防砂シート規格検証-」、北海道開発局技術研究発表会論文集、2002。