

護岸の吸い出し被災事例調査と被災要因の検討

AN EXAMINATION OF SUBSIDENCE DAMAGE CASES AND STUDY ON DAMAGE FACTOR OF SEAWALLS

菅原吉浩¹・山本泰司²・上久保勝美¹・大井啓司³・時田恵生⁴
Yoshihiro SUGAWARA, Yasuji YAMAMOTO, Katsumi KAMIKUBO,
Keiji OOI and Akio TOKITA

¹正会員 (独)土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

²正会員 博(工) (独)土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

³(独)土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

⁴国土交通省北海道開発局 港湾空港部 (〒060-8511 札幌市北区北8条西2丁目)

To clarify the subsidence conditions of ground behind seawalls, cases of damage at harbors and fishing ports under the administration of the Hokkaido Regional Development Bureau were examined, and the causes of damage were classified. The results showed that the main factor was the removal of reclaimed sand by suction forces caused by damage in geotextile sheet and joint fillers. It was also found that seawalls tended to be more vulnerable to these suction forces ten years after construction compared with mooring wharfs. Moreover, paying attention to the damage cases of geotextile sheet on seawalls which had most damage number of cases, the subsidence damage factor was examined based on cross-sectional configuration or design external force.

Key Words : Seawalls, suction, geotextile sheet, cases of damage

1. まえがき

港湾等の護岸においては、依然として背後の土砂が吸い出され地盤が陥没する被害が後を絶たない。

写真-1は、防砂シートが損傷し、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り、舗装の下には直径が3~5m、深さ1.5mの大きな空洞が発生していた。

このような吸い出しに関する既往の研究事例として、高橋ら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水圧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。また、重村ら²⁾は防砂シートがかなり損傷を受けた場合を想定して、裏埋砂の落下場所等について模型実験を通して検討しており、裏込石内の水位変動が生じる付近の裏埋砂が集中的に落下する事を確認している。許ら³⁾は、傾斜型捨石護岸を対象にした水理模型実験を実施しており、土砂の吸い出しには波長や捨石幅、アーセル数が影響することを確認している。また、吸い出しに影響する要因としては、高橋ら¹⁾により、波浪や潮位、長期的な防砂シートの物性の変化、施工時の土砂の落下衝撃など様々示されており、護岸を施工する際には、これらの要因に注意して施工を行う必要がある。

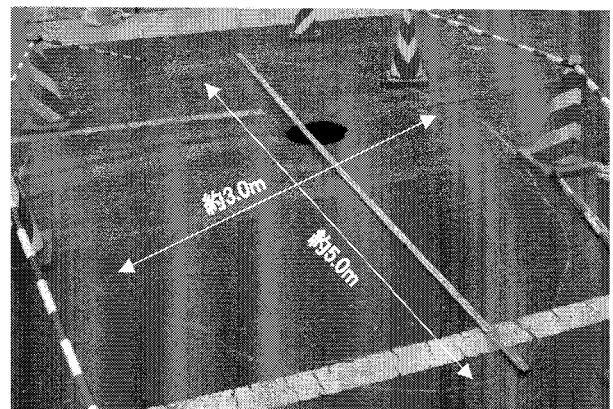


写真-1 防波護岸背後の陥没被害の例

一方で、護岸を新規に施工する際には、既往の被災事例を参考に吸い出し対策の必要性を判断する場合もあるため、これまでに発生した吸い出し被災事例から被災傾向を把握することは大変有用である。

本研究では、北海道内の港湾・漁港の岸壁や護岸等で過去に発生した吸い出し被害状況のアンケート調査を実施し、構造形式別に被災件数、被災原因、および施工完了後から被災発生迄の年数について比較検討を行う。また、被災事例調査の結果、被災件数が最も多かった防波護岸における防砂シートの損傷事例について、断面形状や設計外力に基づいて吸

い出し被災要因を検討する。

2. 被災事例調査

(1) 被災事例調査の概要

被災事例調査は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、調査対象者は国土交通省北海道開発局の港湾関係職員とし、対象人数は約250名である。対象とする被災事例は、アンケート対象者が過去に関わった吸い出し被災事例とし、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、港湾および漁港における防波護岸、用地護岸、岸壁など、陥没被災が発生した全施設とした。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、被災の原因等とした。

(2) 被災事例調査の結果

a) 被災原因別および構造形式別の分類

調査により収集された被災事例数は88カ所107事例で、港湾数は24港、漁港は15港であった。また、被災年代は1982年～2008年の26年間の事例であった。

アンケートに回答のあった被災原因や被災状況を基に、被災原因を表-1のとおり分類した。この結果、被災原因は防砂シートや目地の損傷以外にも、鋼矢板の老朽化など様々で、被災に影響する外力としては、波や地震のように原因が特定されている事例もあるが、原因不明の事例も多かった。また、施工年代が古い（昭和40年以前）施設では施工当初から目地やシートが施工されていない事例もみられた。

図-1は、被災事例数と被災原因を構造別に分類したものである。ここに、L-typeとは、ケーソンや水中コンクリート等による混成堤式護岸で捨石天端が水面下の構造の事であり、H-typeとは、陸上から捨石を施工した捨石天端の高い構造形式で捨石天端が水面上の構造の事である。また、岩着とは、基礎捨石が無く、現地盤に直接、水中コンクリートや本体ブロックが載るような直立式構造である。

被災件数は、護岸(L-type)が27件と最も多く、次いで係船岸(L-type)が17件、係船岸(矢板式)14件となっている。護岸(L-type)の被災事例が最も多くなっている理由としては施設全体数の違いによるものであり、護岸(L-type)が被災を受けやすいということでは無いと思われる。また、全84件の被災事例の内、護岸が46件、係船岸38件であり、護岸だけで無く係船岸での被災事例も多くみられた。

次に、構造別の被災原因をみると、護岸(H-type)ではシートの被災事例が多いが、護岸(L-type)ではシート以外にも目地に起因する事例が多く、岩着では目地、鋼矢板では老朽化というように構造形式別の被災パターンに違いがみられる。これは、構造形

表-1 被災原因名との被災の特徴

被災原因名	主な被災の状況
防砂シートの損傷	波、越波、または原因不明による防砂シートの損傷
目地の損傷	地震、または原因不明の目地近傍からの吸い出し
目地板未設置	施工年代が古い施設で施工当初から目地板が無い場合、または旧防波堤の護岸改良時に防砂目地板を設置しなかった場合
鋼矢板の老朽化	鋼矢板の腐食
鋼矢板の継ぎ手不良	鋼矢板の継ぎ手の接続不良
その他	埋立土砂の不等沈下や、施工年代が古い施設で、施工当初から防砂シートが無いものなど
不明	被災後に調査を実施していない、または調査を実施したが原因が不明なもの

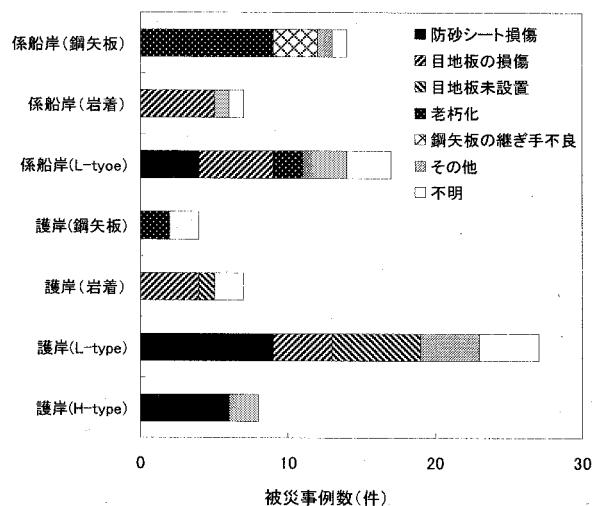


図-1 構造形式別の被災事例数と被災原因

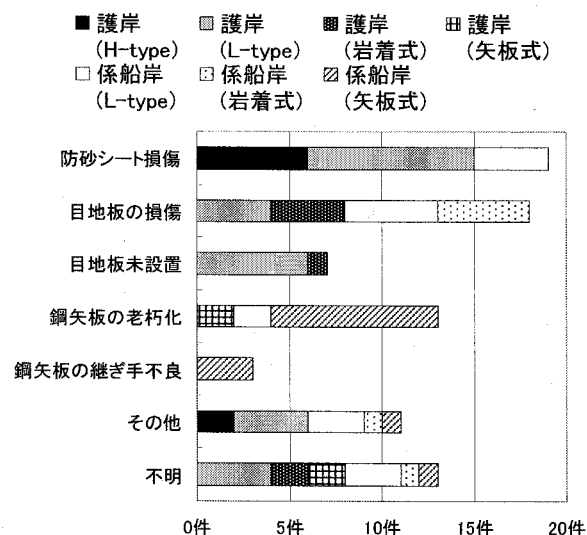


図-2 被災原因別事例数

式別の構成部材が異なるためである。

図-2に被災原因別の被災件数を示す。防砂シート損傷が19件と最も多く、次いで目地の損傷が18件、鋼矢板の老朽化が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約8

割を占めるが、この理由としては、係船岸は防波堤などの遮蔽域で堤体前面波高が小さく、波によるシートへの影響も小さいためと思われる。

b) 経過年数別の被災傾向

図-3に、構造形式別の被災発生迄の施工後経過年数と被災件数の関係を示す。係船岸（鋼矢板）では、施工後30年以上の場合の被災件数が多い。護岸についてはL-type、H-type共に施工後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。また、係船岸(L-type)でも施工後10年以内の被災件数が多くみられる。

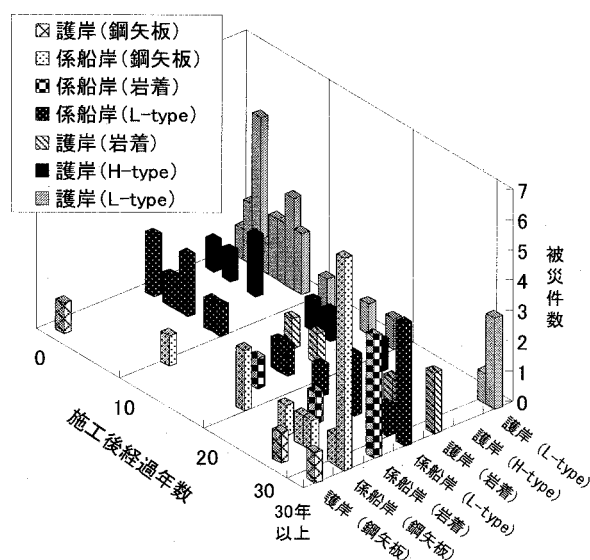


図-3 施工後経過年数別の被災件数

図-4は各構造形式別の被災発生迄の平均経過年数 Y について示したものである。なお、 Y の算出は次式による。

$$Y = y_i n_i / N \quad (1)$$

ここに、 Y : 構造形式別の被災発生迄の平均経過年数 (年), y_i : 施工後経過年数 (年), n_i : y_i に対応する構造形式別の被災件数 (件), N : 構造形式別の全被災件数 (件) を示す。

護岸では、H-typeで $Y=9.3$ 年、L-typeで $Y=10.1$ 年と、護岸でも岩着 ($Y=24.3$ 年) や鋼矢板 ($Y=19.7$ 年) と比べると被災発生までの年数が短い傾向である。係船岸においても、L-typeでは $Y=16.3$ 年であり、同じ係船岸でも岩着 ($Y=27.5$ 年) や鋼矢板 ($Y=26.6$ 年) に比べると被災発生までの年数は短い傾向である。このように、基礎捨石マウンドを有する護岸や係船岸において被災発生までの年数が短い傾向となっている。また、護岸(L-type)と係船岸(L-type)を比べると、同じ構造形式で

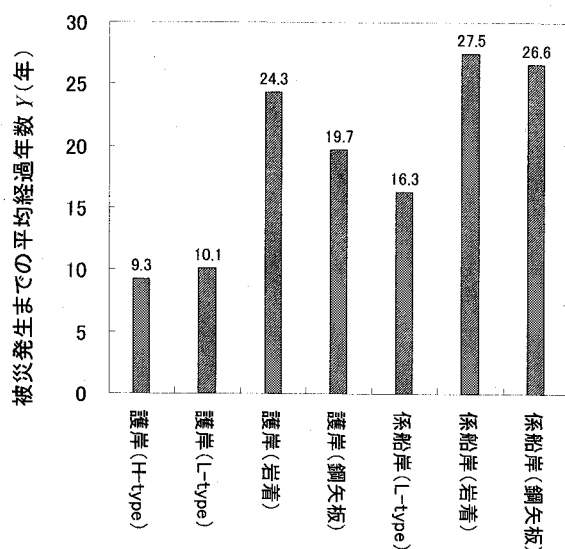


図-4 構造形式別の平均被災発生年数

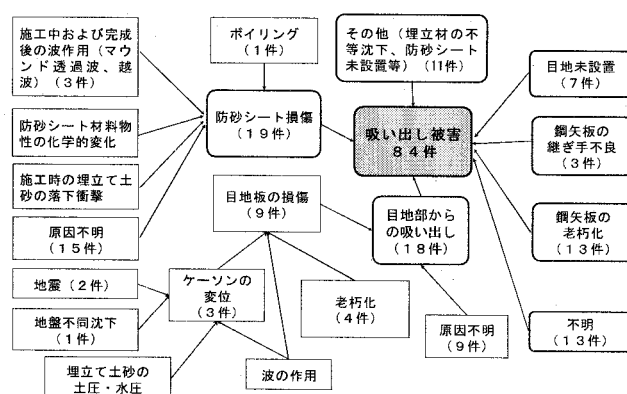


図-5 吸い出し被災要因と被災件数

あっても、護岸の方が被災発生までの年数は短い傾向となっている。

吸い出し被災の原因としては、大きく分けて長期的要因（老朽化等）と短期的要因（高波浪、越波、地震など）があると考えられるが、護岸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。また、波当たりの小さい係船岸(L-type)での被災もみられることから、長期的な要因として、例えばシートの物性の低下なども推測される。

c) 吸い出しの発生要因の相互関係

高橋ら¹⁾は、防波護岸における吸い出しの発生要因の相互関係について整理している。図-5は高橋らが示した被災要因図に、今回の被災事例調査結果による被災件数を記入したものである。吸い出しの発生箇所はシート・目地・矢板であり、吸い出しを防止するためには、この部分を適切に施工する事が重要である。また、吸い出し要因としては、完成後の

波による影響だけでなく、施工時の波や埋立て土砂の落下衝撃による影響も考えられるため、慎重に施工を行うことが大切である。一方で、シートの化学的変化やボイリング、地震による目地の開き、老朽化など、適切な施工を行っても被災が発生する事例もある。

(3) 防砂シート規格変更の履歴

被災事例調査の結果、図-1に示したとおり被災原因としては防砂シート損傷が最も多いことが分かったが、この事は従前から問題となっており、これまで防砂シートの規格を変更する事で対処してきた。

表-2は、北海道開発局における防砂シートの最低規格の変更履歴を整理したものである。規格の大きな変更点は、平成8年度以降、織布から不織布に変更されていることである。なお、防砂シートの規格年代と今回の被災事例調査による被災事例数との関係については、平成7年以前の規格での被災事例数は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件であり、不織布に変更となった平成8年以降も被災が発生していることが分かった。

一般的に防砂シートを施工する際には最低規格のシートを使用するが、不織布に変更後も吸い出し被害が多く発生していることから、全ての施工条件において最低規格を適用するのではなく、防波護岸のように波高が大きい場合には、シートの規格を上げることや、吸い出し防止対策の検討の余地がある。

表-2 防砂シート最低規格の変更履歴

年度	種別	厚さ (mm)	引張強度	伸び率	質量	圧縮率	材質
S56	織布	—	300 kg/3cm 以上	—	—	—	—
S59		—	290 kg/3cm 以上	—	—	—	—
H8	不織布	5.0 以上	90 kg/5cm 以上	60% 以上	—	—	ポリエチレン
H11		4.2 以上	880 N/5cm 以上		500 g/m ² 以上	—	
H18		—	—		—	5%以上	

3. 防砂シートの被災要因の検討

(1) 防砂シート被災要因分析の概要

全84件の被災事例の内、防波護岸における防砂シートの被災事例18件（L-typeが10件、H-typeが8件）と無被災事例17件（L-typeが9件、H-typeが8件）を対象に被災要因の検討を行う。無被災事例とは、被災箇所に隣接する被害を受けていない施設の内、断面形状や外力条件が異なる施設を指す。なお、現地で吸い出し被害が発見された時期は、高波浪直

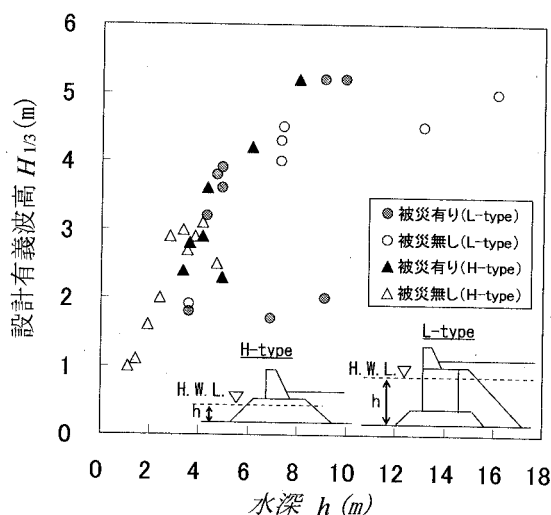


図-6 水深と波高による被災傾向

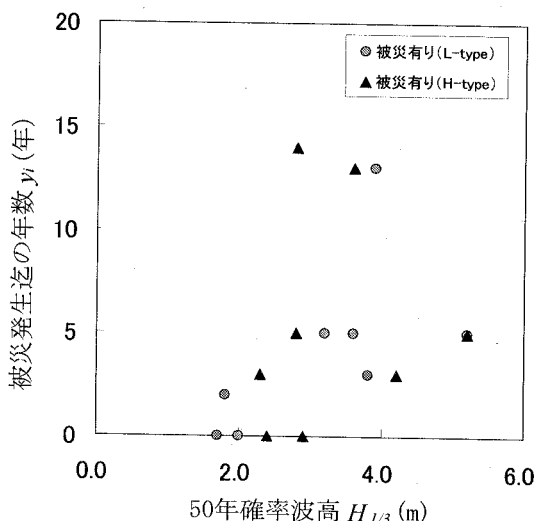


図-7 波高と被災発生までの経過年数

後では無く、相当時間が経過した後の場合も有り、被災時の波浪条件を特定することは困難である。このため、ここでは、被災要因を検討する指標としては、設計条件（50年または30年確率波 $H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$ 、構造物設置水深 h 、 h における設計波長 L 、潮位差 $\Delta W.L.=H.W.L.-L.W.L.$ 、捨石天端幅 B 等）を用いることとした。また、L-typeとH-typeでは構造形式が異なるため、被災要因については分けて検討する。

(2) 被災要因別の防砂シート被災傾向

a) 波高の影響

図-6は、吸い出し被災に与える波高の影響を検討するため、縦軸を設計有義波高 $H_{1/3}$ 、横軸を水深 h とし、被災の有無を分類したものである。H-typeでは h の増大に伴い $H_{1/3}$ が直線的に増大しており、全ての被災事例は $H_{1/3}$ が2m以上で発生している。また、L-typeではH-typeのような h と $H_{1/3}$ の直線関係はみられず、 $H_{1/3}$ が小さい場合でも被災が発生しており、

波高の影響は顕著では無い。

次に、係船岸に比べ護岸の吸い出し被害が早期に発生した要因としては、波浪が影響しているためと考え、図-7に、設計有義波高 $H_{1/3}$ と各被災事例の被災発生迄の経過年数 y_i を整理した。この結果、 $H_{1/3}$ が2m程度でも施工直後に被災を受けている場合や、 $H_{1/3}$ が4m程度でも被災発生迄の経過年数が大きい場合も有る。被災時の波高と設計有義波高 $H_{1/3}$ が異なることも想定されるが、設計有義波高が小さくても被災は早期に発生していることから、被災発生迄の年数には図-5に示したように波高以外の要因も影響していると考えられる。

b) 潮位の影響

防砂シートが破損した場合、土砂の吸い出しの進行には潮位差 $\Delta W.L.$ が影響すると考えられる。図-8に、 $\Delta W.L.$ と被災発生迄の経過年数 y_i の関係を示す。潮位差が1.0m以上では、 y_i が10年以上の事例はみられず、被災が早期に発生している。また、L-typeでは $\Delta W.L.$ が1.4mで施工直後に被災が発生している事例も有る。一方、H-typeでは、 $\Delta W.L.$ が0.3mのように潮位差が小さい場合にも施工直後の被災が発生しており、吸い出しに対する潮位の影響は顕著にみられなかった。

c) 護岸形状の影響

設計波長 L に対して捨石天端幅 B が小さいほど、堤体前面から作用する水圧や流速が防砂シート部分へ伝わりやすく、吸い出しも発生しやすくなると考えられる。図-9は、横軸を設計波長 L 、縦軸を捨石天端幅 B とし、被災の有無を分類したものである。その結果、H-typeでは L が70m~100m、 B が5m~8mの範囲、すなわち B/L が比較的小さい範囲($B/L < 0.1$)に被災有りが多くみられた。また、L-typeでは B/L に関係無く被災の有無が分布しており、L-typeでは B の影響はみられない。このことは、図-6、7において、L-typeでは $H_{1/3}$ の影響が小さいこと、すなわち堤体前面から作用する水圧や流速による影響が小さく、潮位差の影響が大きいことと整合する。

(3) 護岸の吸い出し被災傾向

以上の被災要因別の検討結果を基に、L-typeおよびH-type護岸の吸い出し被災傾向を検討する。

図-10に、横軸を波形勾配 H/L 、縦軸を水深に対する相対的な潮位差 $\Delta W.L./h$ とし、L-type護岸の被災の有無を示す。L-type護岸では潮位差の影響が大きかったため、縦軸を $\Delta W.L./h$ としたが、図に示すように、 $\Delta W.L./h$ が大きい場合($\Delta W.L./h > 0.05$)に被災が多くみられる。また、図中のカッコ内には被災発生までの経過年数も記載しているが、 $\Delta W.L./h$ が0.15~0.20($\Delta W.L. = 1.4\text{m}$)の潮位差が大きい範囲では、施工直後の被災事例が2件発生している。なお、この2件は、図-7の $H_{1/3}$ が2m程度の波高が小さい被災事例に対応している。このように、L-type護岸の吸い出し被災には、水深に対する相対的な潮位

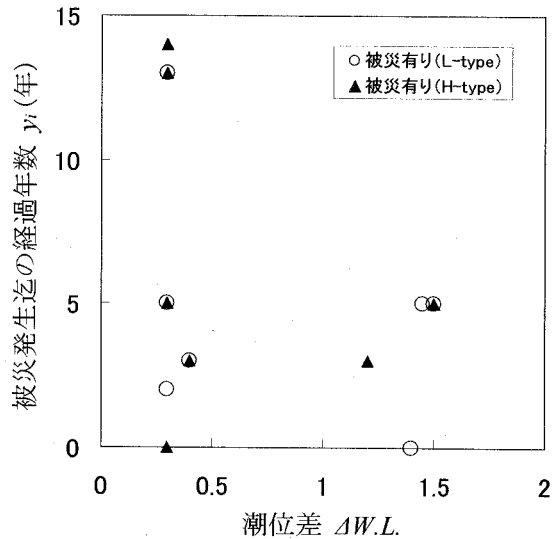


図-8 潮位差と被災発生までの経過年数の関係

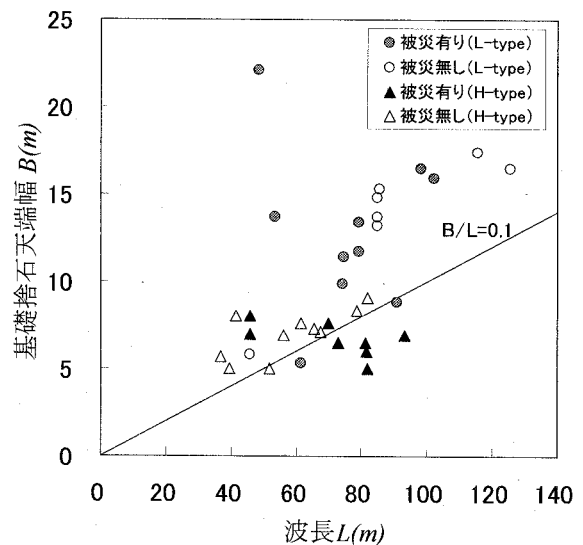


図-9 波長と基礎捨石天端幅による被災傾向

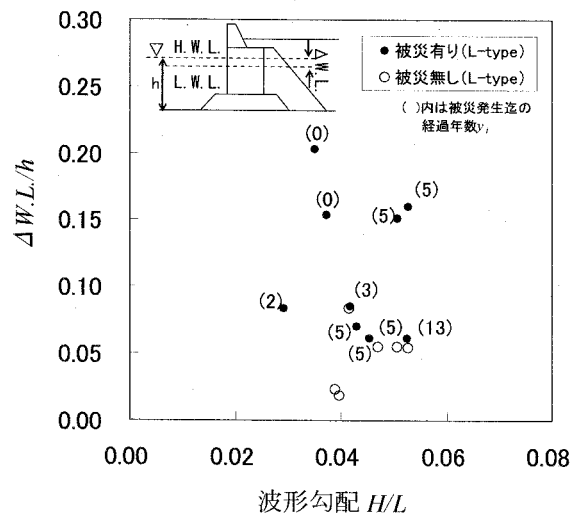


図-10 L-type護岸の防砂シート被災傾向

差 $\Delta W.L./h$ の影響が大きいと考えられる。

図-11に、横軸を設計波長 L に対する捨石幅 B の比 B/L 、縦軸を設計有義波高 $H_{1/3}$ とし、H-type護岸の被災の有無を示す。図に示すように、 B/L が0.1以下および $H_{1/3}$ が2.0m以上の範囲で被災が多い。

B/L に対する影響については、中村ら⁴⁾が傾斜型捨石護岸（H-type護岸）に防砂シートを貼らない状態で水理模型実験を実施し、 B/L が小さい範囲で吸い出しが発生しやすい事を確認している。今回の被災事例においても B/L が小さい範囲で被災が多く、同様な傾向がみられた。

4. まとめ

本研究では、港湾・漁港の岸壁や護岸等で過去に発生した吸い出し被災事例のアンケート調査を実施し、構造形式別に被災件数、被災原因、および施工完了後から被災発生迄の年数について検討を行った。また、被災事例調査の結果、被災件数の最も多かった、防波護岸における防砂シートの損傷事例について、断面形状や設計外力に基づいて吸い出し被災要因を検討した。

本研究の主要な結論を以下に示す。

- 1) 84 件の被災事例を被災原因別に分類した結果、防砂シートの損傷事例数が 19 件と最も多く、次に目地板の損傷事例数が 18 件であった。
- 2) 施工後経過年数別に被災事例を整理した結果、護岸は施工後 10 年以内に吸い出し被害が発生する割合が半数以上を占め、係船岸に比べ被災発生迄の年数は短い傾向である。
- 3) 防波護岸における防砂シートの損傷事例について、断面形状や設計外力に基づいて吸い出し被災要因を検討した結果、L-type 護岸では潮位差が大きい場合に被災発生までの年数が早く、水深に対する相対的な潮位差 $\Delta W.L./h$ が大きい条件で被災を受けやすい傾向である。
- 4) H-type 護岸では、設計波高が大きく、波長 L に対する捨石幅 B の比 B/L が小さい場合に被災を受けやすい傾向である。

5. おわりに

様々な陥没被災事例の内、防砂シートの被災要因に着目して検討を行ったが、防砂シート被災が発生しやすい条件で防波護岸を施工する場合には、より慎重な施工を行ったり、対策工の検討が必要である。ただし、被災事例調査における被災原因は、詳細資料が有るものは著者が判断したが、大部分はアン

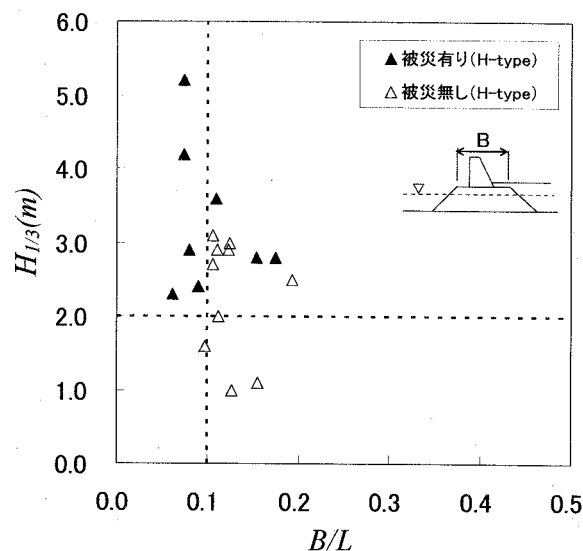


図-11 H-type護岸の防砂シート被災傾向

ケート回答者の判断であり、実際の被災原因と異なる可能性もある。また、防砂シートの被災要因は、少ない被災事例数について特定の構造形式を対象に、被災時の波浪では無く設計条件により検討を行ったものであり、全ての護岸の被災傾向を示すものではない。このため、護岸を整備する際には、本論文で示した被災傾向に加え、これまで通り外力条件、構造形状、施工条件、施設の重要度等により、吸い出し防止対策を検討することが大切である。

謝辞：本報告の被災事例調査については、国土交通省北海道開発局の港湾関係職員の皆様に多大なご協力を頂きました。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) 重村利幸, 滝口和男, 多田毅, 林建二郎, 藤間功司: 防波護岸背後からの土砂吸出しに関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 871-875, 2002.
- 3) 許東秀, 中村友昭, 岩田好一郎: 捨石護岸背後の埋立土砂吸出し機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 791-795, 2004.
- 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) 菅原吉浩, 熊谷直哉, 時田恵生: 防波護岸におけるボーリング被害に関する一考察, 土木学会第 64 回年次学術講演概要集, II-083, pp. 165-166, 2009.