

水塊落水位置調整による防波堤被覆工の被害軽減効果について

長岡技術科学大学 学生会員 池内 正俊
長岡技術科学大学 正会員 細山田 得三

1. はじめに

防波堤の転倒により津波被害が大きくなってしまった東日本大震災を経て、粘り強く耐える設計が防波堤に求められている。転倒の主たる原因の一つとして、越流水塊による港内側地盤の洗堀であった。地盤が洗堀され、支持力を失うためである。これを防ぐために防波堤設計ガイドライン¹⁾や基準書においても、腹付け盛土や被覆工を施すことが明示された。

この対策工の検証は近年でも様々な研究が進められてきている。その内、被覆ブロックの安定性に関する研究では落水位置やケーソン上部工形状で大きく影響があることが三井ら²⁾³⁾によって判明した。また、岡田ら⁴⁾によって津波越流時だけでなく、高波越波が発生した際にもその被害が懸念されることが判明し、この問題の解決は急務であると言える。

そこで本研究では、図-1のような水塊の落水位置を調整する機構を設け、落水位置の変化によって被害が軽減されるかを検証する実験を行うこととした。

2. 水路実験

(1) 実験条件

a) 基準断面

本実験で使用する水路は幅 400mm、深さ 400mm の可変勾配水路(実験時勾配無し)を使用した。今回の被災を検証する実験被覆ブロックを図-2に示す。

実スケールに直すと、0.5t 重量の被覆ブロックに相当するものである。ブロックの材料はモルタルを使用している。実験の基準断面概要図を図-3に示す。この基準断面は K 港の防波堤の 1/110 縮尺モデルとした。水位は 14cm と 12cm の 2 つとし、それぞれ

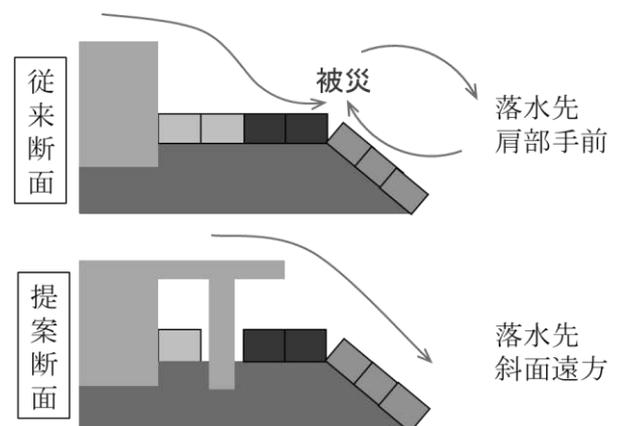


図-1 防波堤裏の従来構造と提案構造

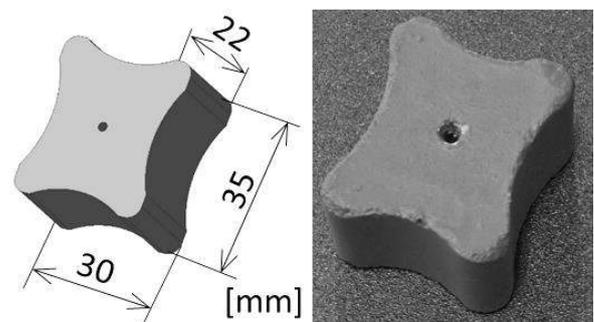


図-2 実験被覆ブロック

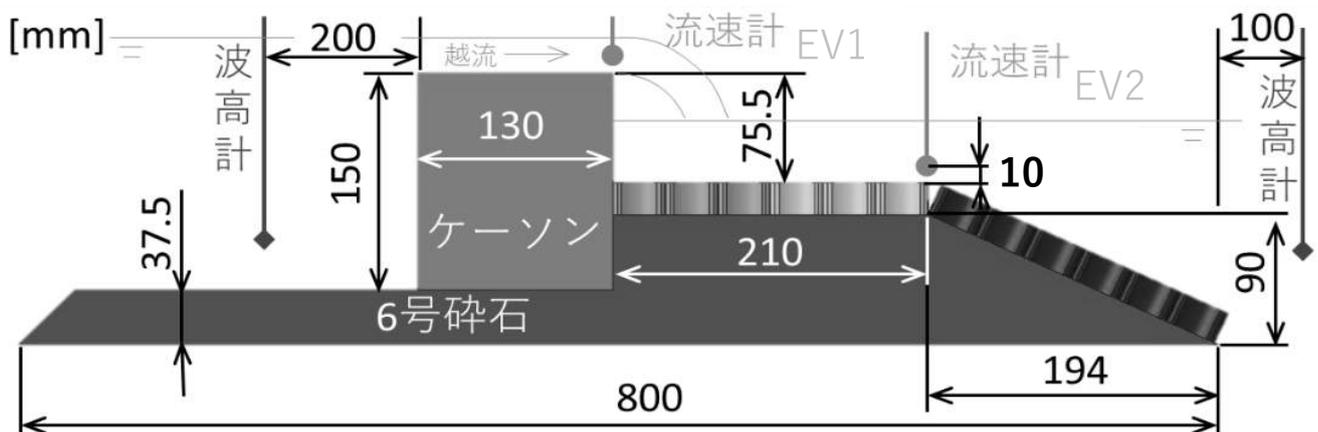


図-3 実験基準断面概略図

K 港における H.W.L.および L.W.L.に引き波を考慮した最低水位として設定した。計測機器は水位変化を取る容量式波高計(KENEK:CHT6-40 型)を図-3 に示すように防波堤前水位、防波堤後水位の 2 か所を取るようにした。また、流速を測定するために電磁流速計(KENEK:VMT2-200-08 型)をケーソン後端部と防波堤裏マウンド肩部に設置した。流速計の測定高さはそれぞれ天端から 1cm の高さとした。流れは併設のポンプによる越流実験とし、10t/h から 50t/h で連続的に実験を行った。実験の状況を記録するために水路側面からビデオカメラで撮影し、後に波高・流速データと同期させて比較検証を行った。

b) 検討断面

図-1 のように水塊落水位置を遠方にするために、図-4 のような断面構造物を追加した。後端部延長は +100mm,+150mm,+200mm の 3 種類で行った。本来であればブロックの上に延長部の支柱がある断面が望ましいが、今回は延長部の安定性を考慮した結果、両壁際に支持部を砕石に埋め込む形とした。そのため、延長を伸ばしていくたびに壁に接する端部の被覆ブロックを少なくした。また、ケーソン部と延長部の接続性を上げ、隙間からの水漏れを防ぐために防水テープにより止水を行った。

実験条件は a)と同様に行った。ケーソン後端部に設置していた流速計の位置は、後端部の延長に合わせて流れ方向に+100mm,+150mm,+200mm とし、構造物の末端になるようにそれぞれ調整を行った。

c) 実験諸条件

実験の再現性を検討するために各 4 断面、5 流量、2 水位のそれぞれ 2 回ずつ繰り返し実験も行った。

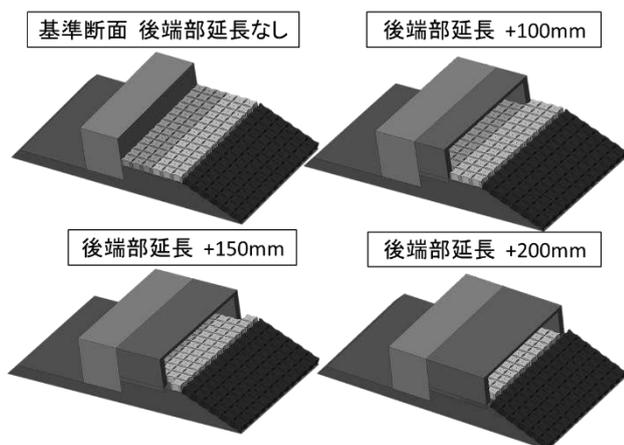


図-4 検討断面一覧

ただし、被災により断面が崩れた実験ケースはそれ以上の流量追加は無しとした。

また、今回の実験では「被覆ブロックが飛散または大きくずれる」ことや「砕石が洗堀された」事例を被災と定義することにした。

(2) 実験結果

a) 断面別被災状況

有効な総ケース 100 回中に 8 ケースの重度な被災が確認され、6 ケースの軽微な被災が確認された。

断面 1 での実験と被災状況を図-5 に示す。断面 1 のブロック上への水塊落水位置はマウンド天端の中心付近であった。

断面 2 での実験と被災結果を図-6 に示す。断面 2 では落水先が肩部付近であり、断面 1 と比べて飛散しやすい状況であった。水位は 12cm で流量が 30t/h ですべてのケースが被災した。これはすべての断面ケースで最も弱い断面形状となった。

断面 3 の実験と被災結果を図-7 に示す。断面 3 では全ての実験においてブロック上落水位置がケーソンから肩部を超えていた。一方で、水位が 12cm で流量が 40t/h を超えると次第にブロックが不安定になった。2 ケースにおいて斜面に配置しているブロックが崩壊し、肩部を中心に砕石を洗堀する甚大な被害が確認された。しかし、崩れたのは斜面付近のみであり、ケーソン付近や頂上部においてブロックの被害や砕石の洗堀は認められなかった。



図-5 断面 1 実験結果例

断面 4 での実験と被災結果を図-8 に示す。断面 4 では落水先が肩部を大きく超えており、全ての流量・水位において被災が確認されなかった。

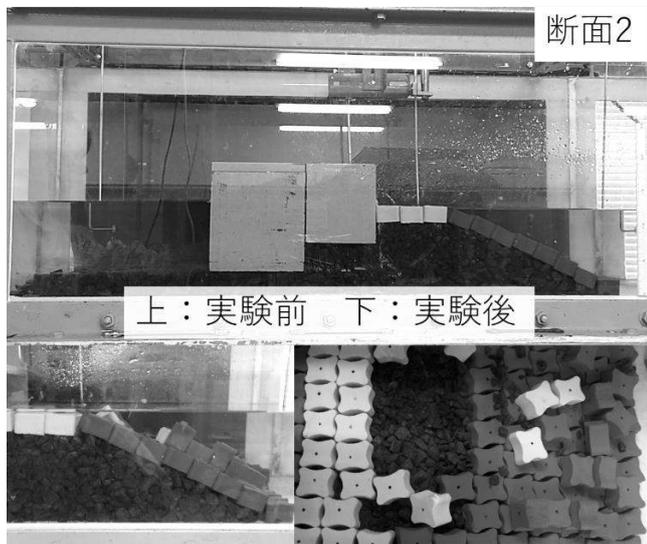


図-6 断面 2 実験結果例



図-7 断面 3 実験結果例

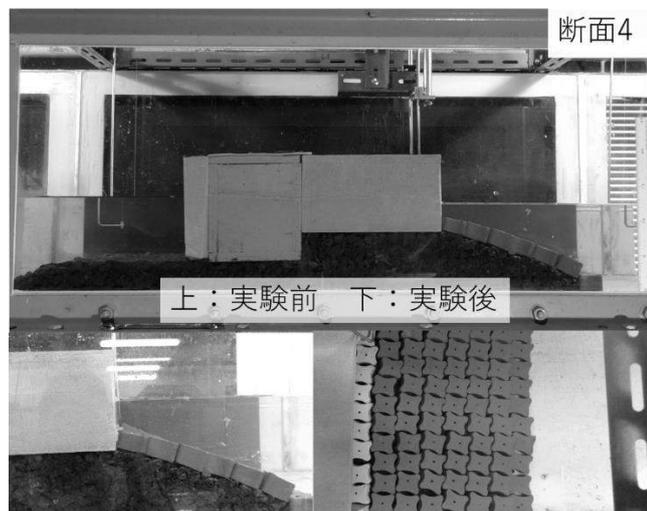


図-8 断面 4 実験結果例

b) 落水位置の変化

水塊落水先を特定するためにビデオカメラで撮影した正面映像を用いた。実験時の動画をビデオキャプチャリングソフトにて観察し、ディスプレイ測定ソフトを用いてディスプレイ上のケーソン幅を測定した。その値を設計図のケーソン幅との比を用いて、落水先の位置をケーソンの後端部から測定し求めた。次の表-1 に水塊の着水先および落水先の結果を示す。

また、水塊の落水先が移動することで、肩部に固定していた流速計の結果が変わってくる。流速に影響を及ぼす背面水位 h_2 と肩部流速 EV_{2x} の被災状況関係を図-9 として示す。

今回の実験では断面 1 を基準に、+100mm,+150mm,+200mm で後端部を延長したため、表-1 から見て取れるように着水距離、ブロック上落水距離もおおよそその結果に沿っている。肩部流速は断面 2 の水位 12 cm で最も強い流速が発生している。このケースでは図-6 で示している様子のように肩部に被害が集中したものであった。一方で、断面 1 の水位 14cm では被災は見られなかったが、肩部付近で非常に強い流速も確認された。このことから、ブロックの被災は流速だけでなく、別の要因も考えられることが言える。

表-1 断面別実験結果平均値一覧

断面	水位[cm]	着水距離 [mm]	到達距離[mm]	最大肩部流速[m/s]
1	14	29.7	119.5	1.191
	12	31.5	60.8	0.556
2	14	112.0	153.9	0.743
	12	120.5	151.1	1.216
3	14	171.7	212.5	0.027
	12	183.0	238.9	0.051
4	14	231.4	323.2	0.041
	12	245.9	278.4	0.052

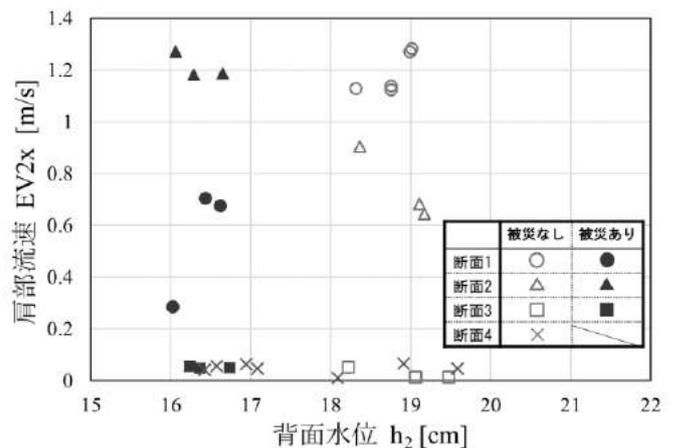


図-9 背面水位と肩部流速の被災関係

被災の別要因で影響を及ぼしているのは図-9 から水位も検討できると判明した。背面水位が高くなるにつれ、どの断面でも被災が無くなった。一方で、断面4のように断面3の被災があった事例とほぼ同じ流速と水位にもかかわらず被災しない事例もある。これは実験時の様子から水塊の落水位置が大きく関係しているのではないかと考えられた。

c) 被災の主な条件

b)で述べたように被災の条件として、流速・水位だけでなく、水塊の落水位置も大きく影響することから、各断面で水塊のブロック到達距離 x をマウンド天端幅 B_M で無次元化し評価することにした。特に肩部の流速については、水塊の落水位置により大きく影響が異なるため、ピンポイントでの評価が難しい。そこで落水位置で評価を行うことで断面別に違いを検討する。一方で、水位はケーソンの頂上からブロック上までの落差と比較できると考え、次式のようにブロックまでの落差 $H-h_B$ に対してのブロック上から h_2-h_B の水深を評価する。つまりブロック上の水深の占有している割合として「水位占有度 δ 」を求めた。

$$\delta = \frac{h_2 - h_B}{H - h_B} \quad (1)$$

次の図-10 に水塊のブロック到達距離とブロック上水位占有度の関係を示す。X軸は1.0で水塊の到達距離が肩部に等しいことを意味する。図から分かるように、被災がある結果とない結果に明確な違いが確認できた。水位がブロック上でおよそ0.8を下回ると被災が発生する。ただし、水塊のブロック到達距離がマウンド天端幅より1.3倍以上になると被災が発生しないと分かった。今回は水位を2種類で実験を

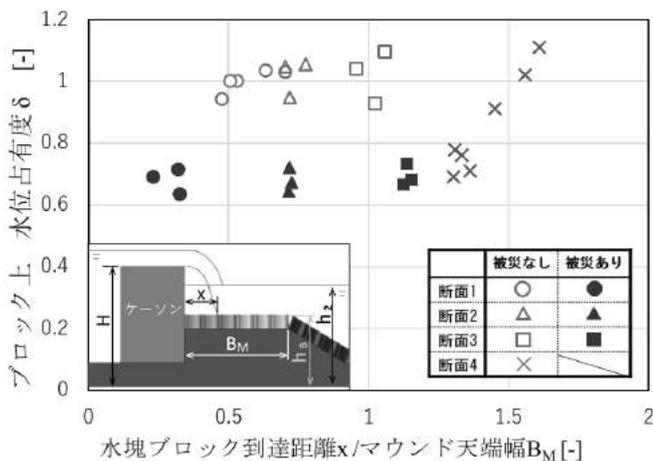


図-10 ブロック上水位占有度と到達距離被災関係

行ったため、正確な被災の有無の線引きが出来なかったが、水位占有度で十分に被災する可能性があった断面4の実験で被災がなかったケースがある。これは水塊のブロック到達距離が遠くなったため、被災がなかったと考えられる。よって、水塊の落水位置調整機構の効果が確認できたと言えるだろう。

また、断面の水位別による被災の結果で、水位占有度が下がることで、落水距離が近くなる断面1と遠くなる断面3も見て取れた。この変化は大きく2つ要因があり、後端部延長によるケーソン頂上部分が長くなったため、越流水の落水時勾配が変化したことが1つの理由であった。つまり、後端部の延長を行うことで、落水時の傾きも軽減できる可能性があり、直接的な水塊の直撃を緩和できると期待できる。

3. まとめ

本研究では、越流が発生する防波堤ケーソンに後端部延長機構を設け、水塊落水位置を調整する断面を提案した。提案別断面の水理実験の結果から、次のことが明らかになった。

後端部延長を行うことで水塊の落水位置を調整し、被害箇所の変化を確認できた。断面によっては水塊が肩部付近に落水し被災を確認できた。同時に、完全に被災を無くし、良好な結果を残す断面も見つめられた。また、水塊のブロック到達距離とブロック上の水位占有度で被災の有無を検討できると判明した。

謝辞: 本研究を実施するにあたり、長岡技術科学大学水圏防災工学研究室の山本浩技術職員、学生の皆様から実験の助力や助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局: 防波堤の耐津波設計ガイドライン, 30p. (参考資料Ⅲ pp.25-36), 2013.
- 2) 三井順, 松本朗, 半沢稔, 灘岡和夫: 防波堤港内側マウンド被覆材の津波越流に対する安定性照査方法の提案, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_956-I_960, 2013.
- 3) 三井順, 松本朗, 半沢稔: イスバッシュ式の導出過程と防波堤を越流する津波への適用性, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.71, No.2, pp.I_1063-I_1068, 2015.
- 4) 岡田克寛ら: 防波堤腹付け被覆工に及ぼす高波越流の影響について, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.73, No.2, pp.I_997-I_1002, 2017