

# 水塊落下位置による防波堤施設への影響に関する研究

水圏防災工学研究室 池内 正俊

指導教員 細山田 得三

## 1. 序論

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施されている。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<sup>1)</sup>や基準書<sup>2)</sup>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<sup>3),4)</sup>によって判明した。また、岡田ら<sup>5)</sup>によって津波越流時だけでなく、高波越波時にもその被害が懸念されることが判明し、この問題の解決は防災の観点から見て有効であると言える。

そこで本研究では、図-1に示すような越流水塊

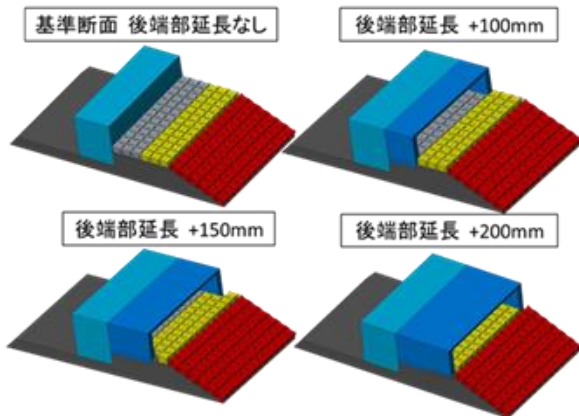


図-1 防波堤裏の従来構造と提案構造

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. 模型水理実験

### (1) 実験条件

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および実験の基準断面概要図を図-2に示す。ブロックは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。材料はモルタルを使用した。この基準断面はK港の防波堤の1/110縮尺モデルとした。実験の水位は14cm,13cm,12cmの3種類とし、それぞれ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、それらの中間水位として設定した。流速計はそれぞれ天端から1cmの高さとし、構造物後端部の位置に設置した。流れは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。なお、再現性を検討するために各4断面、5流速、3水位のそれぞれ2回ずつ繰り返し実験も行った。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、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」事例を被災と定義した。

同様に、延長構造物に孔を開け、その孔から越流水塊が分散落水する試みも行った。図-3に孔を開けた断面模型図を示す。孔を設けることにより

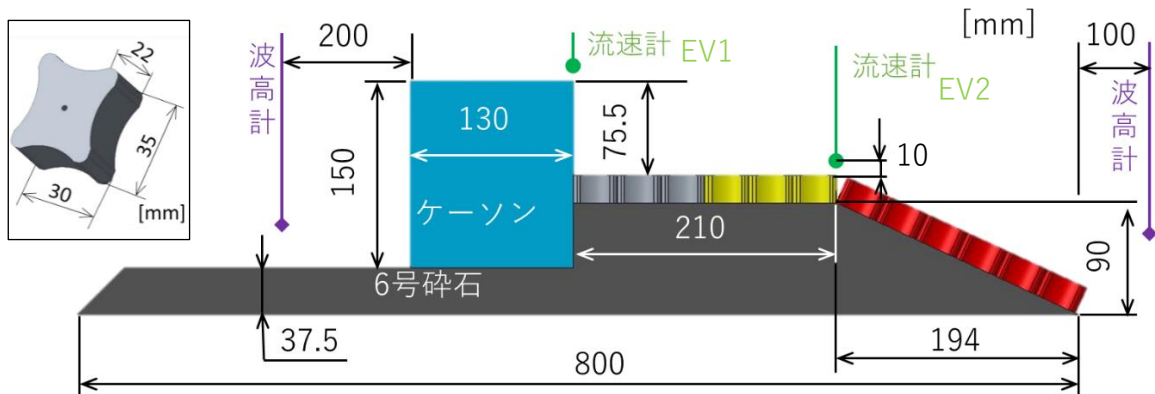


図-2 実験基準断面概略図とブロック寸法

越流水塊が分散し、被覆ブロックやマウンドへの被害を軽減できるのではないかと考えた。実験条件は、先に示したものと同様に行い、孔の有無によって被害が軽減できるかを検証実験を行った。

## (2) 実験結果

断面 1(延長なし)と断面 4(延長+200mm)の実験結果を図-4 に示す。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、図-4 から分かるように着水距離、ブロック上落水距離も同様に延長し、被災箇所が変化した。総評として、延長を行うごとに被災箇所が岸側の遠方に移動し、ブロックの飛散しているケースが減少した。また、延長を行うごとに被災流量は上昇し、次第に安全となることが明らかになった。

同様の実験である、延長構造物に孔を設けた実験結果はさらに被災するケースが減少した。特に延長+200mm では被災ケース数は0 となり、完全に被災を防ぐことに成功した。図-5 に孔から越流水塊が落水している様子を示す。このように孔からの水塊分散は発生していると言えるため、後端部延長と孔の効果は期待できることが明らかになった。なお、孔の落水効果は延長構造物の長さが長いほど、越流水はより多く減勢されていた。

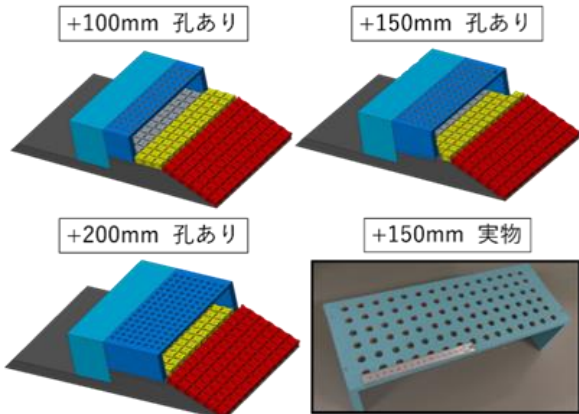


図-3 実験結果一例

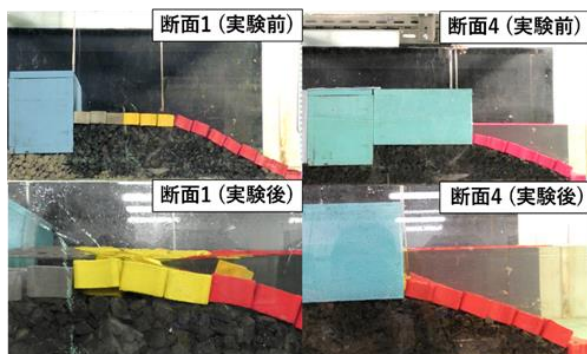


図-4 実験結果一例

## (3) 被災条件

### a) 流速による評価

被災の要因を検討するにあたり、水位と流速で評価を行った。図-6 にマウンド肩部の流速と背面水位で見た被災結果を示す。図から分かるように被災の有無によって大まかな大別は確認できるが、その閾値や条件などは判断がつかない結果となった。これは、流速計の位置を固定位置としていたため、後端部延長や水位によって水塊の落水位置が大きく変動してしまうことが原因と考えられる。そのため、流速での被災評価は非常に難しいことが明らかになった。

### b) 落水位置の検討

一方で水位と落水位置でも検討を行った。落水位置の算定方法としては、ディスプレイ計測による方法と、次に示す式(1),(2)のような水塊の放物線軌道落水による理論式から算出できる。



図-5 有孔実験孔からの落水例

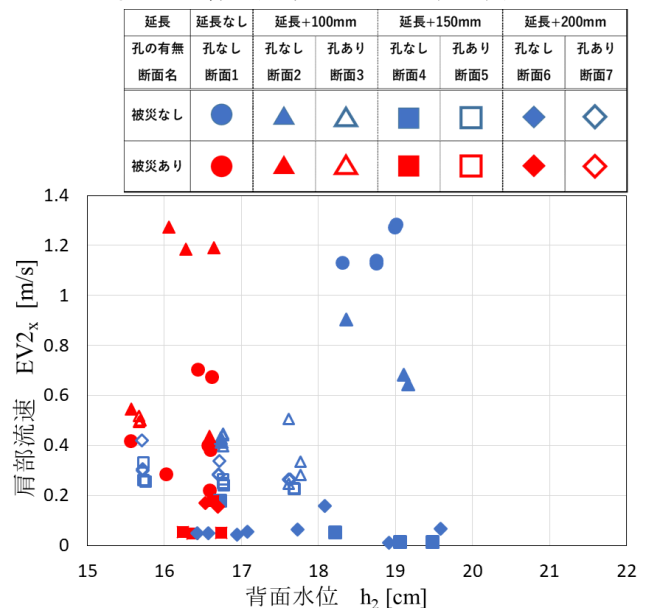


図-6 背面水位-肩部流速 被災評価図

図-7 にディスプレイ計測による実落水位置と理論式による予測落水位置の相関関係を示す。結果から、実際と予測は高い相関が得られたため、ディスプレイ計測による位置判定は有効であると考え、以降落水位置の値はこの方法を用いた。

$$t_w = (2h_2/g)^{1/2}, \quad x_w = V_{1x}t_w = V_{1x}(2h_2/g)^{1/2} \quad (1)$$

$$t_B = (2h_B/g)^{1/2}, \quad x_B = V_{1x}t_B = V_{1x}(2h_B/g)^{1/2} \quad (2)$$

ただし、断面ごとに落水位置の評価を変えなければならないことや、実際の防波堤ケーソン断面高さ・水位は一定ではないことから無次元化して表現することが必要であった。水塊の落水距離は、水塊のブロック到達距離  $x$  をマウンド天端幅  $B_M$  の値で無次元化することで評価した。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、式(3)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位の占有している割合として「水位占有率  $\delta$ 」を求めた。図-8 に水塊のブロック到達距離とブロック上水位占有率の関係を示す。

$$\delta = (h_2 - h_B)/(H - h_B) \quad (3)$$

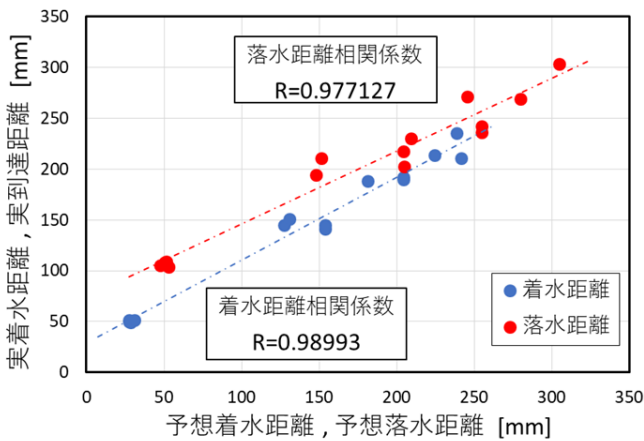


図-7 落水距離の測定方法比較

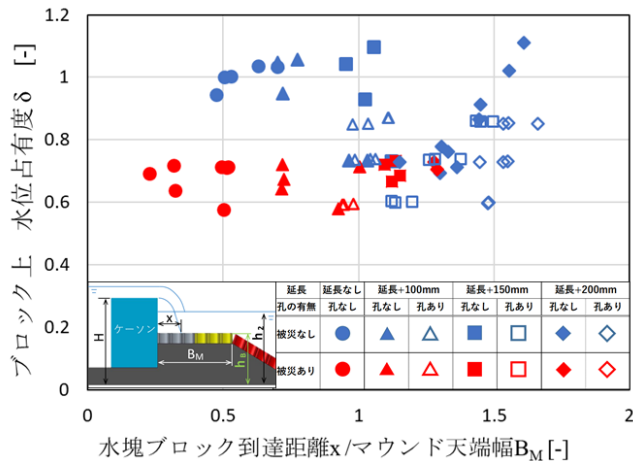


図-8 ブロック上水位・到達距離被災関係

図-8 の X 軸は 1.0 で水塊の到達距離が肩部に到達するという解釈になる。図から分かるように、被災の有無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わかる。水位占有率で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、落水位置調整機構の効果を数値的に確認できたと言える。

### 3. 高精度粒子法による再現計算

#### (1) 計算条件

実験の妥当性と実験では確認できなかった位置での流速・圧力状況、流況を確認するために、高精度粒子法 ISPH ソルバーである parisphere を使用して再現計算を行った。計算対象は水理実験時と同様の条件でモデル化した。ただし、水以外全ての構造物は透水を考慮しない壁のタイプとして設定を行った。越流水の流速は透水による分散やポンプ損失を考慮しなければならず、おおよその実験流量から断面幅・越流水深で流速を算出する方法をとった。また、有孔断面は孔の径と粒子サイズ、断面形状の兼ね合いから実験時に合わせるのが難しい。そのため、もとの通水面の面積に孔を設けた場合の面積減少を断面形状に反映して孔径と形状を決定した。

#### (2) 計算結果

図-9 に延長がない断面と延長+200mm における計算結果を示す。左図は粒子タイプで、右図は X 方向流速を示している。結果から分かるように、延長を行わない断面では落水先がマウンド肩部付近となり、強い X 方向流速が働いている。このため、肩部付近のブロックの危険性を示している。一方で、後端部延長+200mm を行った場合は落水先が遠方となり、強い X 方向流速は働かなくなった。実験の妥当性を示していると考えられる。

次に、図-10 で延長+150mm の断面を孔の有無別に粒子タイプ・圧力・Y 方向流速結果を示す。時刻は越流開始からおおよそ 3 秒後の同時刻結果である。結果から、落水先の圧力や Y 方向流速の様子が見て取れる。特に、孔の有無によって天端周辺の水量や圧力変化を確認でき、Y 方向流速によって孔からの落水状況も見ることができた。

また、本概要では割愛するが斜面付近には大渦構造の発生を確認できた。大渦構造は斜面付近で

は巻き上げ流速が発生している。これにより斜面のブロックや砕石などは浮力が働くことにより、飛散しやすいということも明らかになった。

#### 4. 総括

##### (1) 結論

本研究では、ケーソン後端部から延長構造物を設置し越流水塊の落水位置を変化させる水理模型実験と高精度粒子法による再現計算で次のことが判明した。

後端部延長を行うことで水塊の落水先が変化し、ブロック飛散被害の軽減に寄与することが明らかになった。また、水塊のブロック到達距離と水位の無次元化量によって被災を評価することができると判明した。また、延長構造物に孔を設けることで、その効果をさらに高めることができ、被害軽減を図れることが分かった。

##### (2) 提案断面について

本研究で提案した延長構造物は実用に際し、次の利点が挙げられる。

延長構造物をケーソン後端部に設けることにより防波堤港内側マウンドおよび被覆工の水塊による飛散・ズレなどの被災軽減に寄与できる。

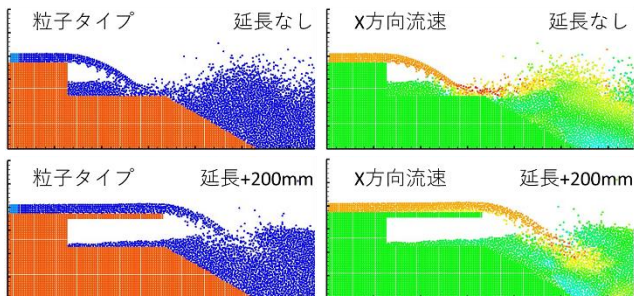


図-9 粒子法による延長効果計算結果

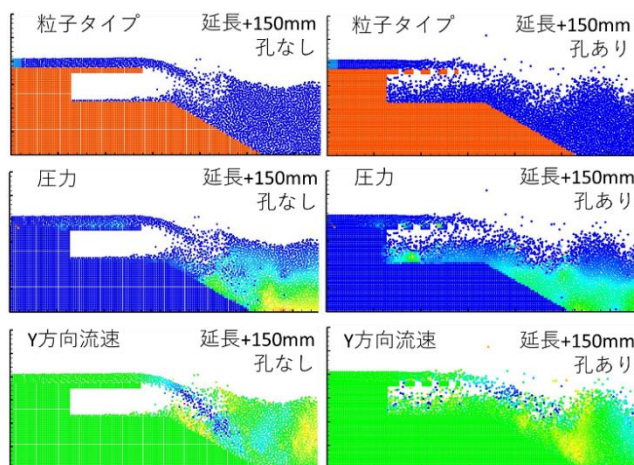


図-10 粒子法による有孔効果計算結果

また、延長構造物は越流水塊が流れるのみと考えられる。そのため、延長構造物に作用する力は基本的に越流水塊の自重のみである。つまり、延長構造物は剛性を強くする必要はなく、安価または軽量な材料を用いることが出来る。また、施工はケーソン後端部に後付けを行うだけなので、防波堤を新設する必要はない。そのため、施工の難易度は低いと考えられる。

最後に、延長構造物は本研究では2次元断面実験としたため、3次元方向で考えていない。そのため、延長構造物の支柱部分は板材とした。本来の施工性や実務性を考えると図-11に示すような支柱を設けると良いと考える。また、実際に施工する際にケーソンとの接合をどのように行うかを考えるべき検討として、今後の展望にしたい。

##### 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) 国土交通省港湾局: 港湾の施設の技術上の基準, 第14条 (防波堤の要求性能), 平成29年12月26日更新
- 3) 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.
- 4) 三井順, 松本朗, 半沢稔: イスパ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.
- 5) 岡田克寛ら: 防波堤腹付け被覆工に及ぼす高波越波の影響について, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.73, No.2, pp.I\_997-I\_1002, 2017

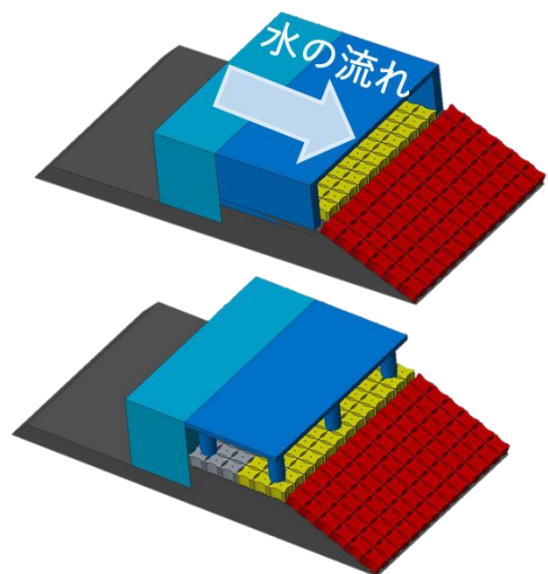


図-11 提案断面の支柱について