

# 港内側に延長した防波堤付属構造物が防波堤施設に及ぼす影響に関する研究

長岡技術科学大学 学生会員 鈴木 樹  
 長岡技術科学大学 正会員 細山田 得三

## 1. はじめに

通常の混成堤においては、ケーソンを越流した水塊の打ち込み位置をマウンド天端から遠ざけることにより、被覆ブロックの被災を軽減できることが三井<sup>1)</sup>らの研究により明らかにされている。また東北地方太平洋沖地震での津波被害を経て、ケーソンの滑動を防止するために、ケーソン直背後を腹付工で補強する構造が防波堤の耐津波設計ガイドライン<sup>3)</sup>に盛り込まれた。しかし、この腹付工は通常の混成堤と比べ設置地盤高が高い分、津波越流による打ち込みが激しくなるという危険性が示唆されている。

本論文では、腹付工で補強したケーソン式防波堤において、越流水塊の打ち込み位置の違いによる各箇所の被覆ブロックへの影響を模型実験と数値シミュレーションを行うことで明らかにし、被災状況とその際にブロックに作用する圧力値の関連性を考察した。

## 2. 水理模型実験

### (1) 実験方法・実験条件

実験の基準断面概要図を図-1に示し、断面諸量を表-1に記載する。模型はK港防波堤の1/110縮尺であり、この被覆ブロックを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。今回、水塊の落水位置を調整するための構造物を4種類用意した。図-2にそれぞれの延長を示す。ここに、 $\eta$ =防波堤後端部延長/ $B_m$ であり、マウンド天端、マウンド肩部、マウンド法面に越流水塊が流入するよう調節した。ポンプ流量は初期流量の10m<sup>3</sup>/hから連続的に増加させ、被災が発生したら実験打ち止めとする。そのため実験ケースが多い延長断面ほどより多くの流量に耐える結果となる。各ブロックには部位に応じて図-1に示すような番号が付けられている。

### (2) 被覆ブロックの被災状況整理

表-2に被覆ブロックの被災状況を示す。ここに被

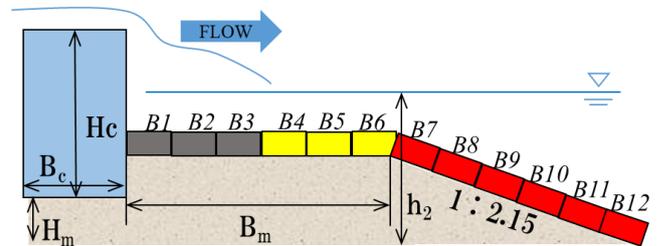


図-1 実験基準断面概略図

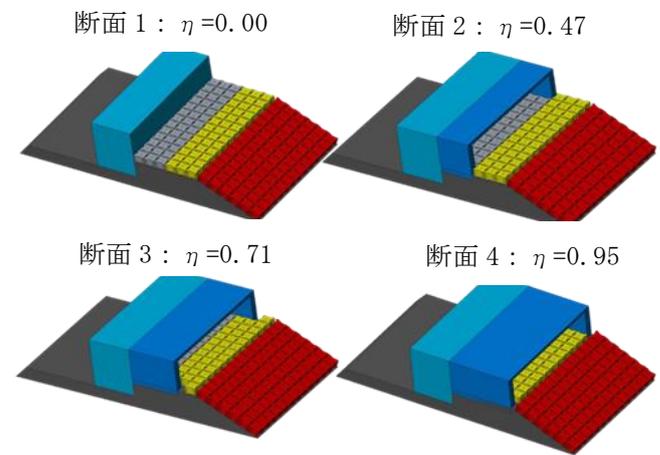


図-2  $\eta$  調節構造物

表-1 断面諸量と実験条件

項目	各諸量
ケーソン高さ $H_c$ (mm)	150
ケーソン幅 $B_c$ (mm)	130
マウンド高さ $H_m$ (mm)	37.5
マウンド天端幅 $B_m$ (mm)	210
ポンプ流量 $Q$ (m <sup>3</sup> /h)	10,20,30,40,50
港内水深 $h_2$ (m)	0.12,0.13,0.14

表-2 水理実験による被覆ブロックの被災判定表

$\eta$	総ケース数	被災度		
		甚大	中	軽微
0.00	33	6	0	12
0.47	42	2	3	9
0.71	51	3	0	5
0.95	48	3	0	2

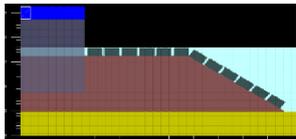


図-3 計算モデル

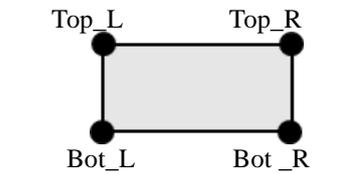


図-4 ブロック圧力測定位置

災度の大きさはそれぞれ、

甚大：複数のブロックが離散し、腹付工の洗掘発生中：被災したブロックが、ブロック1つ分の移動

軽微：ブロックの揺動・浮き上がり等

としている。また越流水の飛び出し位置が一番遠い  $\eta=0.95$  よりも  $\eta=0.71$  の方がブロック被災（軽微を除く）が少なく、4 ケース中最も被災が少ないケースであった。

### 3. 数値シミュレーション概要

#### (1) 解析条件・解析モデル

実験における被覆ブロックの圧力変化を明らかにするために、高精度粒子法を用いて再現計算を行った。計算断面は実験模型に準拠して作成した。

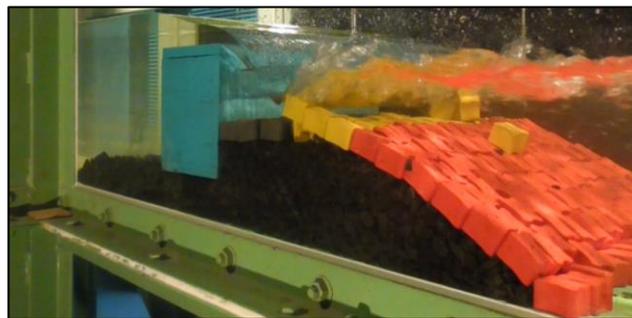
計算対象は実験においてブロックの被災が発生したケースとした。構成粒子は粒子径 0.4mm の流体粒子、ケーソン上部に流体流入粒子を配置し、実験時の越流を再現した。また各被覆ブロックの間隔は流体粒子が十分入り込める間隔を持って配置した (図-3)。

#### (2) 被覆ブロックに作用する圧力値の算定方法

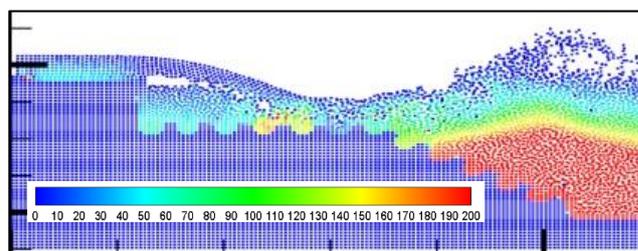
圧力測定位置は、図-4 に示すようにブロックの四隅とした。圧力値は 0.1 秒で移動平均した結果を用いる。Top\_L と Bot\_L, Top\_R と Bot\_R の最大圧力差について検討したところ、 $\eta$  の違いによる大きな差異を得ることができなかったため、本論文では Top\_L と Top\_R, Bot\_L と Bot\_R の最大圧力差のみを考察する。ここで最大圧力差について説明する。最大圧力差とは圧力値を観測した後、0.5s の移動平均を取得し、その際の同時刻における (上面での最大圧力差を算出する場合は) Top\_L と Top\_R の差の絶対値が最も大きい値とする。

### 4. 解析結果の考察

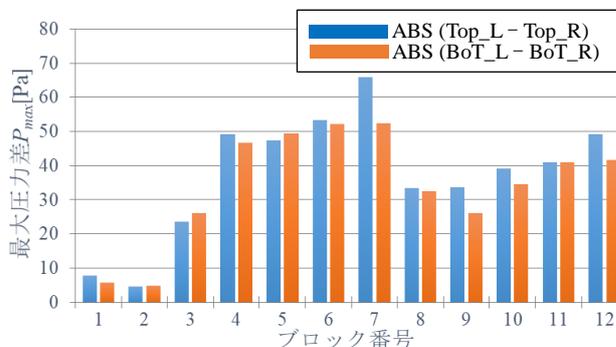
実験で被災を認定したケースにおいて、数値シミュレーション図と各ブロックの Top\_L と Top\_R, Bot\_L と Bot\_R の最大圧力差図を掲載し、 $\eta$  がそれぞれ変化した時の様子を考察する。



(a) 水路実験による実験結果



(b) 高精度粒子法によるシミュレーション



(c) 最大圧力差 (計算)

図-5  $\eta=0.0$ ,  $h_2=0.12m$ ,  $Q=30m^3/h$

#### (1) $\eta=0.0$ , $h_2=0.12m$ , $Q=30m^3/h$

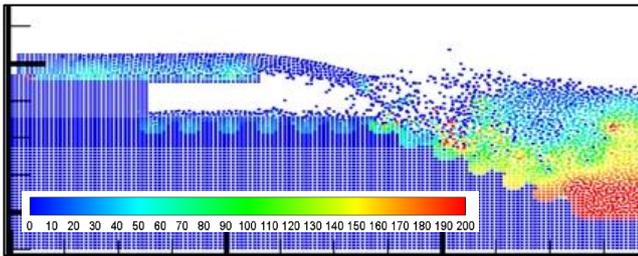
マウンド天端に越流水塊が打ち込み、被覆ブロックが転倒するという被災が発生している。被災原因としては、B4 と B5 の継ぎ目に水塊が侵入し、越流水脈の下部によりブロックが捲りあげられたことが考えられる。また、B4 が被災した直後すぐに B5, B6 の転倒、腹付工の洗掘が進行しているため、極めて危険な状態である。圧力図より B4 から上下面ともに最大圧力差が急増しており、被災と圧力値の関連が伺える。B4 よりも B7 の最大圧力差が大きくなったことに関しては、水面の変動箇所にブロックが位置しているために、静圧力の変動が大きくなったと考えられるが、越流水の打ち込みが軽度であるため被災しなかったと考えられる。 $\eta=0.0$  では 4 ケース中最も被災が多くなり、主要因は水深の浅いマウンド天端部に越流水塊が直接作用したためだと考えられる。



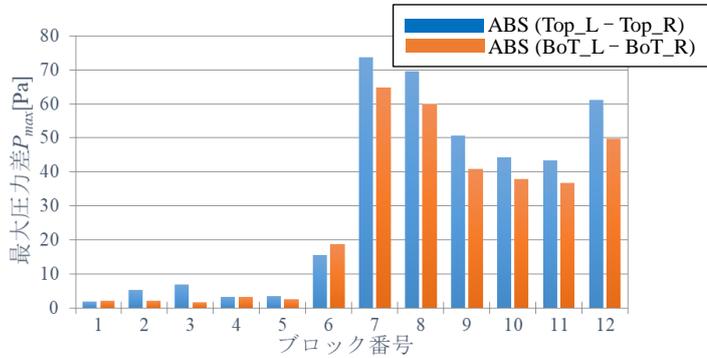
(a) 水路実験による実験結果



(a) 水路実験による実験結果

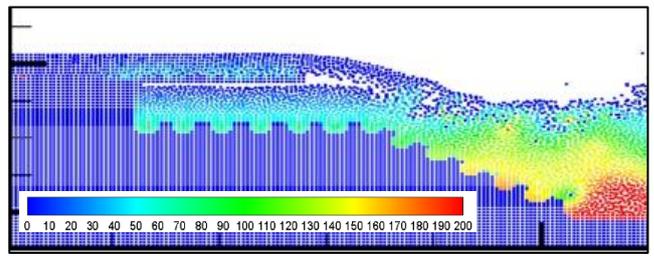


(b) 高精度粒子法によるシミュレーション

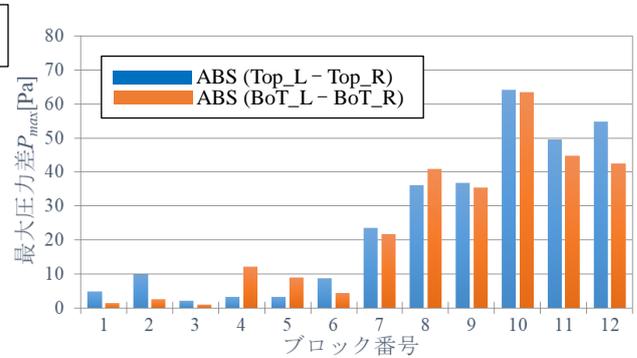


(c) 最大圧力差 (計算)

図-6  $\eta=0.47$ ,  $h_2=0.13m$ ,  $Q=30m^3/h$



(b) 高精度粒子法によるシミュレーション



(c) 最大圧力差 (計算)

図-7  $\eta=0.47$ ,  $h_2=0.13m$ ,  $Q=30m^3/h$

(2)  $\eta=0.47$ ,  $h_2=0.13m$ ,  $Q=30m^3/h$

$\eta=0.0$  と同様、B6 と B7 の継ぎ目に水塊が侵入し、ブロックが捲りあげられたことが原因だと考えられる。 $\eta=0.47$  は浮き上がりが特に激しいケースであったが、 $\eta=0.00$  のとは違いマウンド天端部へ打ち込みケースは少なかったため、天端付近のブロックは浮き上がり被災の危険性が高いことが確認できた。また、B7 の被災とほぼ同時に B8 の被災も発生しており、肩部でのブロック被災は複数のブロックが連鎖的に発生するということが分かる。最大圧力差図より、B7 から上下面ともに最大圧力差が急増しており、被災と圧力値の関連が伺えた。B7 以降のブロックでは作用する最大圧力差は徐々に小さくなるが、B12 で最大圧力差が増加した。この理由としては、マウンド背後の渦の形成により、ブロック端部に強い圧力が作用したためであると考えられる。

(3)  $\eta=0.71$ ,  $h_2=0.13m$ ,  $Q=30m^3/h$

$\eta=0.71$  ではすべてのケースで越流水塊がマウンド肩部を超えて法面に流入した。ケーソン付近や天端でのブロック被害や砕石の洗掘は見られなかったが、法面では砕石を洗掘する甚大な被害も確認された。図-7 の事例では、B10 と B11 の継ぎ目に水塊打ち込むことで B11 と B12 が「滑動」、または「転倒」する被災形態をとっているが、全ケースを通じて「滑動」での被災結果が最も多い。最大圧力差図より、B1 ~ B6 においてはブロック上面での圧力差は非常に小さいことが分かる。法面に位置する B7 から上下面ともに最大圧力差が増加しており、実験での被災と圧力値の関連が伺えた。また B10 ~ B12 に関して最大圧力差が他ブロックと比較し増大した理由としては、越流水脈の下部による流体力が法尻に沿ってブロックに作用したためであると考えられる。



(a) 水路実験による実験結果

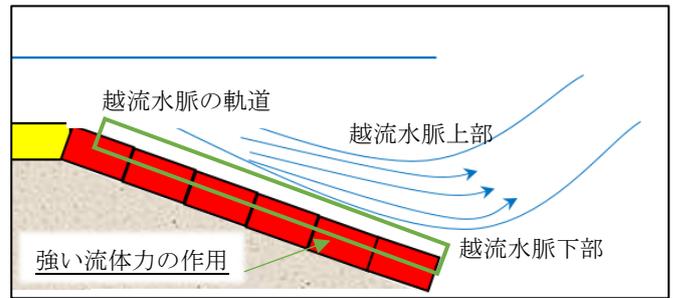
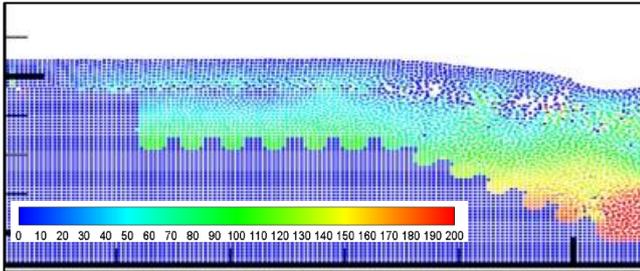


図-9 越流水脈の法面配置ブロックへの影響

られ、巻き上がった水流が Top\_R に強い流体力を加えていたためと考察される。



(b) 高精度粒子法によるシミュレーション

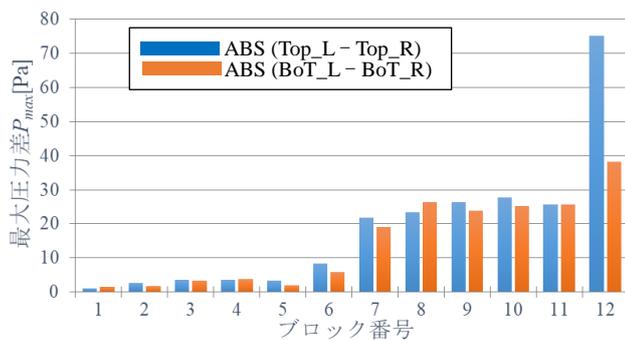
### 5. おわりに

本研究の主要な結論を以下に示す。

実験被災状況と高精度粒子法による被覆ブロックに作用する最大圧力差の関係を考察したところ、越流水塊の被覆ブロックへの打ち込みに関して影響があることが確認できた。特に、打ち込みブロックを境にして最大圧力差の大きさの違いが顕著に現れ、打ち込みブロック以降のブロックに関しては、隣り合わない状況でも最大圧力差が大きくなることが分かり、ブロック上に形成される渦や越流水脈の下部(図-9)による流体力が原因であると考察できる。

B12 などの法尻後端部に設置してある被覆ブロックに関しては、大渦による流体力の影響や直前に設置してあるブロックの支えになるため、高重量とし滑動を防ぐ策が必要となる。

また一度被災が発生すると越流水の流入方向に対して連鎖的に被災が広がり、最大圧力差が増大することが確認できた。対策としては、ブロック間に越流水が侵入しないようブロック同士の噛み合わせを良くすることや、ワイヤー等で連結させることが考えられる。今後は、被覆ブロックの圧力測定位置を増やし、圧力値を面積分することで得られる流体力に関して被災との関連性を検討する。



(c) 最大圧力差 (計算)

図-8  $\eta=0.47$ ,  $h_2=0.13m$ ,  $Q=30m^3/h$

### (4) $\eta=0.95$ , $h_2=0.13m$ , $Q=30m^3/h$

$\eta=0.95$  では  $\eta=0.71$  と同様、すべてのケースで越流水塊がマウンド肩部を超えて法面に流入した。ケースでは法尻付近に越流水塊が打ち込み、ブロックが「滑動」する被災形態をとったことが特徴である。本事例では、越流水脈の下部が B11 と B12 の上面を沿うように流入している。そのため、まずは B12 が滑動し、その後抵抗力を失った B11 が滑動するという連鎖的な被災が発生していることが確認できた。最大圧力差図より、B1~B6 において最大圧力差は非常に小さく、数値シミュレーションの結果からブロックに作用する圧力の大部分が静水圧であることが示唆される。B12 の上面の最大圧力差が同ブロックの 2 倍程度となった理由としては、越流水脈によるマウンド法尻付近での大渦の発生が原因であると考

### 参考文献

- 1) 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法の提案, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.69, No.2, I\_956-I\_960, 2013
- 2) 三井順, 松本朗, 半沢稔: イスパッシュ式の導出課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, I\_1063-I\_1068, 2015
- 3) 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