# 津波越流に対する海岸堤防及び防波堤の 強化に関する実験的研究

大井 邦昭1・林 建二郎2・河野 茂樹3

<sup>1</sup>正会員 技研興業株式会社 技術部 (〒193-0801 東京都八王子市川口町1540番地) E-mail: kuniaki.ohi@gikenko.co.jp

<sup>2</sup>正会員 防衛大学校 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1丁目10番20号) E-mail: hayashik@nda.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 技研興業株式会社 営業部 (〒160-0004 東京都杉並区阿佐谷南3丁目7番2号) E-mail: shigeki.kawano@gikenko.co.jp

平成23年東北地方太平洋沖地震では、計画外力を超過する津波によって海岸構造物が壊滅的 な被害を受けた.今後、海岸構造物を"ねばり強い"構造とするためには、構造物の陸側をコ ンクリートブロックで被覆することが有効である.そこで、海岸堤防と防波堤を対象として、 その陸側を被覆するブロックの津波越流時の挙動を水理模型実験によって検討した.海岸堤防 においては、法尻部分の強固さによってブロックの安定度や被災形態が異なった.また、ブロ ックの種類や配列方法でも安定性に差異が見られた.防波堤の実験においては、ブロックの被 災限界は静水面上の防波堤高さとマウンド天端水深によって変化した.また、越流水深によっ て越流水塊の落水位置が異なるため、被覆ブロックの被災が始まる場所も変化した.

Key Words : Coastal dike, breakwater, tsunami, tenacious structure, armor concrete block, over flow

# 1. はじめに

平成23年東北地方太平洋沖地震により発生した巨大な 津波によって、数多くの海岸構造物が壊滅的な被害を受 けた. その被災形態の一つとして、構造物天端を越流し た水流による構造物陸側・港内側の洗掘が原因となった 事例が報告されている. 例えば海岸堤防では, 陸側法尻 や法面が洗掘され、これが進行して堤体全体に洗掘が拡 大し破堤に至ったケースである".また,防波堤にお いては、天端を越流した水塊が防波堤の港内側に越流・ 落下してマウンドの構成材料を洗掘し、これが進行・拡 大することでケーソンの倒壊に至ったケースである<sup>2</sup>. いずれも構造物が大きく破壊されており、復旧には巨額 の費用を要するばかりではなく、元の機能を回復するま でに、長い期間を要する事態となった. 今後、設計外力 を超過したレベル2クラスの津波に対しても、大きな被 害を受けずに機能を容易に復旧可能な"ねばり強い"構 造とすることが提唱されている<sup>3</sup>. そのためには、海 岸堤防では陸側法面と法尻の補強が必要であり、防波堤 では港内側マウンドの補強が必要となる. この補強方法

の一つとして、コンクリートブロック被覆工が有効であ ると考えられる<sup>2)</sup>が、ここで使用するブロックの安定 性を机上で検証する方法は確立されていない.そこで、 本研究においては、被覆ブロックによる強化方法の有効 性と実現可能性について実験的に検討した.

## 2. 実験方法と実験ケース

#### (1) 実験の概要

水理模型実験は、図-1 に示す幅 0.8m×長さ 20.0m× 高さ 1.0mの開水路を用い、還流ポンプにより一方向流 れを構造物に作用させ、定常的な越流状態を生じさせる



図-1 実験水路断面模式図

ことにより津波による越流現象をモデル化した.これは、 天端からの越流水による被覆ブロックの滑動や構造物陸 側の洗掘は、津波の波としての挙動よりも流れとしての 作用が支配的であると考えたことによる. 実験はフルー ドの相似則に従うものとし、想定縮尺は海岸堤防の実験 では 1/40, 防波堤の実験では 1/47.6 とした. 水路中央付 近の水平な水路床上に構造物模型を設置し、水路の還流 ポンプの出力調整により、上記模型に作用させる津波高 さを一定のペースで徐々に大きくし、被災に至る直前の 安定限界となる津波高さを計測した. なお、津波高さは 構造物模型の天端上ではなく、模型から十分上流(沖) 側に離れた位置において計測した. ブロックの被災基準 は、断面から脱落したもの、あるいはブロック1個分以 上移動したものとした. なお、ブロックが1個でも脱落 すると、その部分から中詰め栗石の流失や隣接ブロック の被災へと連鎖的に被害が拡大することから、実際には ブロック1個の脱落が断面全体の安定限界となった.

## (2) 実験ケースと実験方法

a) 実験に使用したブロック

使用したブロックの形状を図-2に示す.ブロックAは 仙台湾南部海岸でも緩傾斜護岸として使用されていたブ ロックで、表面に突起や桁などの突出部分はない、ブロ ックBはマウンド被覆工などに使用されるタイプのブロ ックで、表面に桁状の突起が存在する.ブロックCは "標準ブロック"と称されるもの<sup>4)</sup>で比較的ブロック の厚さが大きく、四辺で隣接するブロックと接するタイ プである.いずれのブロックも、揚圧力低減を目的とし てブロックを上下に貫通する穴が設けられている.

なお、ブロックAは、今回の津波後に仙台湾南部海岸 で我々が調査した中では、最も被害の程度が小さかった ものである.**写真-1**に堤体裏法部分がほぼ完全に洗掘さ れた場所のブロックの被害状況を示す.堤体表法にまで 洗掘が及ぶほどの越流が生じていたにもかかわらず、ブ ロックが飛散することなく被覆機能を維持していた.

b) 海岸堤防の実験ケースと実験方法

海岸堤防の実験ケースを表-1に、また、実験断面の模 式図を図-3に示す.本実験では、裏法勾配を1:20、ブ ロック質量を2t/個(現地量)で一定とし、比高(堤防 の天端と裏法尻の地盤高との差)d2と法尻部の基礎処理 方法、ブロックの種類を変化させた.ブロックの配列を







写真-1 仙台湾南部海岸のブロック残存状況の一例

	表−1 実験ケース一覧表							
	ブロックタイプ	配列	法尻処理	d2(m)				
	ブロックA 表面に凸部なし	千鳥	根固	5.00				
				10.00				
			固定	5.00				
海				10.00				
一世	ブロックA 表面に凸部なし	格子	根固	5.00				
伊				10.00				
灰防			固定	5.00				
191				10.00				
	ブロックB <u>表面に凸部あり</u> ブロックC		根固	5.00				
			固定	5.00				
			根固	5.00				
	凸部なし・厚型		固定	5.00				







図-4 模型ブロックの配列方法

図-4に示す.ブロックAについては,噛み合わせ効果の 期待できる千鳥配列と噛み合わせの無い格子配列での比 較も行った.横断方向のクリアランスは,各ブロックの 標準的な値とした.堤体模型は,一般に築堤材料の透水 係数が小さく,透水性がブロックの安定性に及ぼす影響 は非常に小さいものと判断して不透過構造とした.なお, ブロック直下については栗石で透水層を設置するケース が多いことから,裏法面には現地量で粒径20 cm程度, 厚さ50cmの栗石層を設けた上にブロックを敷設した.

さらに、図-3の法尻部分は、根固方式と固定方式の2 条件とした. 根固方式は、法面部と同様の根固ブロック を横断方向に4列敷設した.これは、非常に強い外力が 作用した場合には、ブロックの滑動やブロック敷設範囲 外からの洗掘の影響を受ける可能性がある構造をモデル 化したものである.一方,固定方式は法尻から陸側(下 流側)をまったく変形しない強固な構造とした. これは, 洗掘の影響を受けない範囲まで非常に幅広く、かつ十分 な厚さのコンクリート床版で固めたような構造で、ブロ ックの大きな滑動や洗掘が生じない構造をモデル化した. しかし、地震が近海で発生した場合、地震動やそれに伴 う地盤の変形・沈下などにより、強固な基礎機能の維持 を担保することは現実的でないと考えられる. したがっ て、本ケースは、理想的な条件下における斜面部のブロ ックの安定性を検証するための参考ケースと位置づける. c) 防波堤の実験ケースと実験方法

防波堤の実験ケースを表-2に、実験断面の模式図を図 -5に示す.本実験では、マウンドの法勾配を1:20、ブ ロック質量を2t/個(現地量)で一定とし、静水面上の 防波堤高さ d2 とマウンド天端水深 d3 を変化させた.ブ ロックはマウンド被覆工で使用されることの多いブロッ クB(図-2)を格子状(図-4(3))に配列した.

本実験で使用した水路は、水路内の水をポンプで循環

		ブロックタイプ	配列	d2(m)	d3(m)
防波堤				2 00	5.00
	ブロックB 表面に凸部あり	格子	2.00	10.00	
			4.00	5.00	
				10.00	
			6.00	5.00	
				10.00	

表-2 実験ケース一覧表



させる構造である(図-1)ことから、ポンプの出力を上 げて防波堤の港外側の水位を上昇させると、港内側の水 位が低下する.そこで、実験中は防波堤から港内側に十 分に離れた位置に設置した堰の高さを細かく調整するこ とにより、港内側を所定の水位で一定に保った.

本実験においては、ケーソン模型の移動や傾きによる 実験途中のマウンドの変形や津波越流状況への影響を排 除するために、水路床上に直接ケーソン模型を設置して 固定し、港内側マウンドのみを現地量で粒径30cm程度 の砕石で構築した.実際の津波作用時には、津波の波力 等によってケーソンが滑動した事例<sup>3</sup>もあり、この際 マウンドを変形させたものと考えられる.しかし、これ らの現象を適切に再現することは困難である.また、実 際の防波堤では、ケーソン下部にも透水性の高いマウン ドが存在するが、フルードの相似則においては粘性が相 似ではないことから、透水性とその影響を再現すること は困難である.本実験ではブロック被覆工による津波越 流に対する洗掘対策の有効性の検証を主目的としている ため、ブロックの挙動を極力シンプルに再現するために、 ケーソンの移動にかかわる現象を無視して簡略化した.

防波堤の実験において,越流水の落下形態は,越流水 がケーソンに沿って流れ落ちる"付着ナップ"とケーソ ンとの間に空気を含み,ケーソンから離れた位置に落下 する"完全ナップ"の2種類に分かれる.予備実験にお いては,同じ越流水深であっても,付着ナップの方が完 全ナップよりも早い段階でブロックが被災した.これは, 最も水深の浅い位置にあるマウンド天端ブロックを落下 水塊が直撃するためと考えられる.しかし,実際の防波 堤ではケーソン間に目地があることや堤頭部の影響でケ ーソンと落下水塊との間に容易に空気が進入し,付着ナ ップのまま大きな越流水深になることは考えにくい.そ こで,本実験においては,すべてのケースで越流直後に 完全ナップとしてから越流水深を上昇させた.

# 3. 海岸堤防の実験結果と考察

(1) 法尻を根固工とした条件

a) 被災形態

法尻部を根固工とした条件の実験状況を写真-2,被災 形態の模式図を図-6に示す.各ケースで被災に至る過程 は概ね共通していた.すなわち,越流水深の増大ととも に根固工先端付近が洗掘され,さらに越流水深が増大す ると,法面上の被覆ブロックが根固ブロックを押し出す ように徐々に滑り始め,法尻または根固ブロックの内1 個がめくれるように断面から脱落する.これとほぼ同時 に,ブロック下層の栗石が吸い出されて隣接ブロックに 被害が拡大し,連鎖的にほぼ全面的な被災につながる.



写真-2 海岸堤防の実験状況例



図-6 被災形態の模式図



## b) 実験結果と考察

各ブロックタイプや配列による被災限界越流水深を比 較して図-7に示す.現地海岸で被害の程度が小さかった ブロックAで噛み合わせのある千鳥配列が最も被災限界 の越流水深が大きかった.他のブロック,配列では局所 的なブロックの滑動からブロックの抜け出しに至る様子 が見られたのに対し、ブロックAの千鳥配列では、一部 ブロックを滑動させようとする力が、噛み合わせ効果に より、斜面・根固工全体に分散されて、局所的な移動が 見られなかった. さらに, 被覆ブロック全体が滑動し始 めた段階でも強固に噛み合っており、配列の乱れはほと んど生じなかった.このため、法尻部ブロックの抜け出 しから被災への進行が最も遅かった、ブロックBも被災 限界の越流水深が比較的大きかったが、このブロックは 実験したブロックの中で最も粗度が大きく、根固工上で の流速低減が大きいことから洗掘の進行が遅かった. ま た、突起のあるブロックは近傍の流速が低減されるため、 揚力を受けにくい<sup>5</sup> ことも影響している可能性がある.



写真-3 海岸堤防の実験状況例







次に、ブロックAにおける噛み合わせの有無と比高d2 の違いによる安定性の変化を図-8に示す.比高d2が大き くなると両ケースともに被災限界の越流水深が小さくな る.また、噛み合わせ効果による差も小さくなった.比 高d2が10mのケースでは、5mのケースと比べて法尻部の 流速が大きくなったことで、根固工先端付近での洗掘が 早い段階から進行した.そのため、斜面部や法尻部のブ ロックが滑り落ちようとする力に抵抗できなくなって、 ブロックが抜け出すように断面から脱落する前に全体と して滑動してしまったことが原因と考えられる.

# (2) 法尻を固定した条件

#### a) 被災形態

法面の被覆ブロックが滑動しないように法尻部を完全 に固定する基礎とした条件の実験状況を写真-3に示す. また,被災形態の模式図を図-9に示す.この条件でも, 各ケースで被災に至る過程は概ね共通していた.すなわ ち,越流水深の増大とともに斜面部のブロックが下方向 に押し付けられる.このことにより,法面方向のブロッ クの施工伸びが圧縮され,法肩部分に若干の隙間ができ る.その後に法肩のブロックが斜面下方向に転倒するよ うに断面から脱落し,これに続いてブロック下層の栗石 が吸い出されるとともに隣接ブロックに被害が拡大し, 連鎖的にほぼ全面的な被災につながる.

#### b) 実験結果と考察

各ブロックタイプや配列による被災限界越流水深を比較して図-10に示す.法尻部を根固工とした条件と比べて被災限界越流水深が大きくなった.また,根固方式のときには比較的被災限界が小さかったブロックAの格子配列とブロックCが,固定方式では逆に被災限界が若干大きくなるという逆転現象が見られた.このケースでは,法尻がまったく動かないため非常に大きな流速にまで耐えた.このため揚圧力も非常に強大で,ブロックAについては,千鳥よりも格子配列の方が隙間が大きく,揚圧力が抜けやすかったことが安定性に影響した可能性がある.ブロックCについては,ブロックが厚いため転倒する際の支点が高いことが影響しているものと考えられる.

次に、ブロックAにおける噛み合わせの有無と比高d2 の違いによる安定性の変化を図-11に示す.比高d2が大 きくなると両ケースともに被災限界の越流水深が小さく なった.これは、比高d2が10mのケースでは、5mのケー スと比べて斜面長が長い分だけ施工伸びの圧縮量が大き く、法肩に開く隙間が大きかったことによるものと考え られる.なお、実際の施工においては、施工伸びがほと んどないように斜面を整形・調整して施工されているた め、実際の現場ではこの影響は小さいものと考えられる.

#### 4. 防波堤の実験結果と考察

#### (1) 被災形態

防波堤の実験状況を写真-4に、被災形態の模式図を図 -12に示す.被覆ブロックの被災は、落下水塊に直撃されたブロックが、斜面下方向、場合によっては斜面上方 向にめくれ上がるように断面から脱落し、この部分から マウンドの捨石が吸い出されるとともに隣接ブロックに 被害が拡大し、連鎖的にほぼ全面的な被災につながる. このとき越流水深が大きくなると、それに伴って越流水 の落下位置がケーソンから離れる.今回の実験条件では、 静水面上の防波堤高さd2が小さいケースを除き、被災時 の落下水は、天端から離れて斜面部分のブロックを直撃 した.つまり、被災ブロックの設置水深は天端に設置されたブロックよりも大きかった.ここで、岸側マウンド の天端幅が大きい場合には、落下水が天端ブロックを直 撃することもあり得る.この場合には、より小さい越流 水深でも被災する可能性があることに注意が必要である.



写真-4 防波堤の実験状況例



図-12 被災形態の模式図



図-13 防波堤高さ・マウンド天端水深とブロックの安定

#### (2) 実験結果と考察

実験結果を図-13に示す.静水面上の防波堤高さd2が 大きいほど,被災限界の越流水深は小さくなるが,マウ ンド天端水深d3が大きいケースでは,d3が小さいケース と比べてこの傾向が弱い.さらに,マウンド天端水深d3 の小さいケースの方が被災限界の越流水深が低い.これ は,越流落下する水流のエネルギーが防波堤港内側の水 中で効果的に減衰・逸散されているための考えられる.

一方,静水面上の防波堤高さd2が小さいケースでは, マウンド天端水深d3が変化しても被災時越流水深が変わ らなかった.静水面上の防波堤高さが小さい場合には, 水塊がケーソンの近くに落下するため,ケーソンに沿っ た鉛直下向きの流れが発生する.このため,沖岸両方に 渦ができるケーソンから離れた位置への落下条件と比べ てエネルギーの逸散が少なく,より深い位置にまで流体 力が作用しやすかったものと考えられる.

# 5. 結論と今後の課題

- (1) 海岸堤防に関する結論
- ①ブロックの種類や配列,法面の長さによって被災限界 の越流水深に差がある.
- ②基礎工が根固工の条件下では、ブロックの噛み合わせが法面の保護に有効であった.これは、当該ブロックの噛み合わせ配列は現地での被災規模が小さかったことと一致している.また、ブロック表面の突起も根固工先端付近の洗掘を遅らせることに効果があった.しかし、これらは本実験で使用したブロックに関して言えることであり、法尻完全固定の条件においては安定性が逆転していたことなどを考えると、一般化して断定することはできない.
- ③基礎の固定状況が被災限界の越流水深に大きな影響を 与え、被災形態もまったく異なった.しかし、基礎の 完全固定は、地震動や地盤沈下の影響を考えると現実 的ではないため、実際の設計においては、洗掘や変形 によって基礎工が弱体化することも想定した上で、被 覆工の諸元を検討する必要があると考える.
- (2) 防波堤実験に関する結論
- ①防波堤港内側のマウンド被覆ブロックの安定性は、静水面上の防波堤高さとマウンド天端水深に影響される.しかし、上記の因子は相互に影響しあっているため、独立して評価することは困難である.
- ②被災は落下水流が直撃する部分から始まるが、越流水 深が大きくなると水流が直撃する場所も堤体から離れ、 より水深の大きい位置のブロックを直撃した.一般に ブロックの設置水深が大きい方が安定性が高いため、 越流水深が大きい場合より、小さな越流水深でも水深 の浅い位置にあるブロックに水流が直撃した場合の方

が危険である可能性があることを示唆する.

#### (3) 今後の課題

本研究においては被覆ブロックの安定性を左右する因 子をピックアップし、その影響をブロックの被災という 観点から実験的に評価した.しかし、物理現象を定量的 に捉えるまでには至っていない.今後、基礎形状の検討 等を含めた実験条件の拡充に加えて、各種条件下におけ る流況とブロックに作用する力の計測などを通じて、ブ ロックの種類ごとに特性を把握し、実際の設計に反映で きる成果を導きたい.

謝辞:本研究を進めるに当たり,特に実験方法に関して 独立行政法人港湾空港技術研究所海洋研究領域の下迫健 一郎領域長,国土交通省国土技術政策総合研究所海岸研 究室の加藤史訓主任研究官から貴重なご意見をいただい た.ここに深く感謝の意を表します.

#### 参考文献

- 岡村次郎:海岸における津波対策検討委員会提言~ 平成 23 年度東北地方太平洋沖地震及び津波により被 災した海岸堤防等の復旧に関する基本的な考え方に ついて,海岸,第51巻, pp.92-101, 2012
- 下迫健一郎:港湾施設の津波被害と今後の対策について、沿岸域学会誌、Vol.24, No.22, pp.36-41, 2011.
- 3) 磯部雅彦: 2011 年東日本大震災からの復旧・復興の 方向性,海岸,第51巻, pp.1-5, 2012
- 4) 社団法人全国防災協会:災害復旧工事の設計要領, pp. 552-553, 2012.
- 福島雅紀、山本幸次、佐藤愼司、山本吉道:低天端 離岸堤の被覆ブロック被災機構に関する研究,海岸工 学論文集,第46巻,pp.896-900,1999.

# EXPERIMENTAL STUDY ON REINFORCEMENT OF COASTAL DIKES AND BREAKWATERS FOR OVER FLOW IN TSUNAMI

# Kuniaki OI, Kenjirou HAYASHI and Shigeki KAWANO

The serious damage of coastal dikes and breakwaters occurred in the tsunami caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. It is important to reinforce these coastal structures with the concrete blocks and to give the function of tenacious structures. Hydrodynamic experiments had been performed to study the damage of concrete blocks armoring on slope and mound in the side of land of these coastal structures for the over flow in tsunami. In the case of coastal dikes, the stability of concrete blocks and the damage of these coastal structures are affected by the strength of foundation in spillway. The stability of blocks are also affected by the types of blocks and there geometrical arrangement. In the case of breakwater, the critical values of the total head above the crest of breakwater, in which the damage of concrete blocks occurs, are affected by the height of breakwater above the still water level and the water depth from still water level to the foundation of breakwater. The positions where the damage of armor concrete blocks occur on the foundation change with the total head above the crest of breakwater.