

# 津波に対する消波ブロック安定性に関する 水理模型実験

安野 浩一朗<sup>1</sup>・岩塚 雄大<sup>2</sup>・西畑 剛<sup>3</sup>・古牧 大樹<sup>4</sup>・森屋 陽一<sup>5</sup>・伊野 同<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 五洋建設(株)技術研究所(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail:kouchirou.anno@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>3</sup>E-mail:takeshi.nishihata@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>4</sup>E-mail:daiki.furumaki@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>5</sup>E-mail:yoichi.moriya@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>2</sup>五洋建設(株)東京土木支店(〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

E-mail:yuudai.iwatsuka@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>6</sup>五洋建設(株)中国支店(〒730-8542 広島県広島市中区上八丁堀4-17ア-パソビエグランドタワー7F)

E-mail:hitoshi.ino@mail.penta-ocean.co.jp

2011年3月11日に発生した東日本大震災は、今まで築き上げてきた建造物の設計における考え方や手法などの妥当性を根底から改める必要性を投げかけられるものであった。これまでは、一定の想定設計値に対する安全性を確保することのみを対象に建造物を設計してきたが、外力が想定を越えた場合の建造物の変形に関する知見は殆ど蓄積されておらず、それらに関する知見の構築は今後の重要な課題と考えられる。本研究では、外洋護岸に設置された消波ブロック群に着目した水理模型実験を行い、設計津波を越えた津波外力場におけるブロック群の大規模被災の形態、そのメカニズムや想定される周辺への影響などについて基礎的な知見を得ることを目的とした。

**Key Words :** *Tsunami, stability of wave absorbing block, hydraulic model experiment*

## 1. はじめに

東日本大震災による甚大な津波被害の発生に起因して、各地で津波対策に関する研究・検討の必要性が高まっている。津波による混成堤ケーソンや海岸堤防などの安定性については、既往の研究により波圧評価が可能となっている(例えば、松富<sup>1)</sup>、水谷・今村<sup>2)</sup>、有川ら<sup>3)</sup>)。一方、消波ブロックの安定性については、これまで高波浪を対象に数パーセントの微小な挙動の発生の有無を対象に行なわれた事例は多いものの、津波によるブロック群の大移動を想定した研究は少ない。近年では、傾斜堤や潜堤を対象としたブロック群の大変形に着目した研究がなされつつあるが十分とは言えないと思われる(例えば、榊山ら<sup>4)</sup>、半沢ら<sup>5)</sup>)。特に、今回の震災で起こった第一線防波堤の大規模倒壊や、原子力発電施設の被災を前にして、想定を大きく超えた外力が作用した場合に対する知見(限界を超えた建造物の粘り強さや、想定される最大リスクなどの把握)についての言及は殆どなされておらず、これらは今後の重要な研究課題であると考えら

れる。

そこで本研究では、外洋護岸に設置された消波ブロック群に着目した水理模型実験を行い、設計津波高を越えた津波外力場におけるブロック群の大規模被災の形態、そのメカニズムや想定される周辺への影響などについて基礎的な知見を得ることを目的とした。

## 2. 水理模型実験(波高検定)

### (1) 実験概要

本研究ではフルード則による縮尺1/58.1の二次元水理模型実験を行った。実験は、長さ50m、幅0.6m、深さ1.2mの室内造波水槽を用いて実施した。実験における津波は、ゲートで仕切ったタンクを開放させるダム破壊法により発生させた。図-1および図-2に実験断面A、Bをそれぞれ示す。なお、断面Aは典型的な内湾の消波護岸、断面Bは外洋に面した護岸例として設定した。実験における津波は設計上の想定値を大きく超過した2ケースの

ックの所要質量は、簡易的に津波の進行波振幅を正弦波と仮定し、谷本ら<sup>9)</sup>の提案方法にて評価した場合には、津波7.8mのケースで約26t(現地スケール)、15.0mでは約190tとなった。

(2) 水理模型実験(津波検定)

本研究においては、津波の進行波諸元を計画に合わせることで、津波検定時にタンク水位差やゲート開放速度を変化させることで所定の計画値を再現した。津波検定においては、図-3に示すように護岸前に基礎捨石等のない、1/10の海底勾配のみを設置した条件とした。

図-4にA断面諸元における堤体位置の水位時刻歴の例を示す。A断面では、ゲート開放開始から約5s前後で水位が上昇しはじめ、6s後までの間に急激に上昇している。その後、緩やかに変化しながら、概ね計画値の津波高を維持している。また、13s程度からの水位上昇は水槽端からの反射波の影響によるものである。各ケースにおける時刻歴特性のばらつきは殆ど見られていない。静水面位置の水平流速については、150cm/sをピークに、反射波の来襲に伴って急激に低下する傾向を示している。

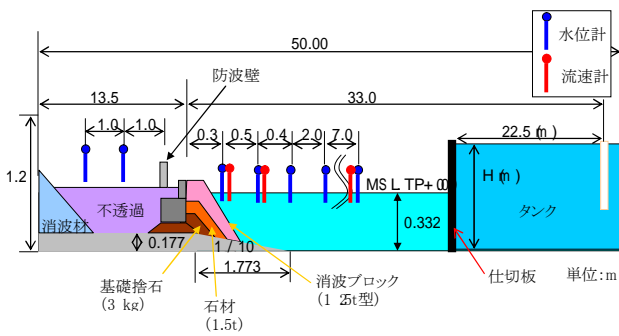


図-1 実験断面 (A断面)

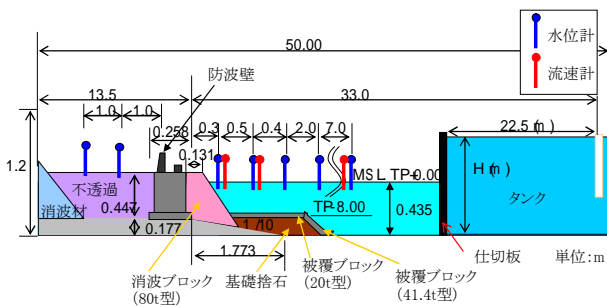


図-2 実験断面 (B断面)

表-1 実験ケース ( ) 内は実験室スケール

実験名称	断面	設置水深	津波高 (進行波片振幅)	実施回数
波高	A	TP-9.0m (0.155m)	8.1m (0.140m)	3回
	B	TP-15.0m (0.258m)	15m (0.258m)	
護岸 安定性 確認	A	TP-9.0m	8.1m	
	B	TP-15.0m	(0.140m)	
	A	TP-9.0m	15m	
	B	TP-15.0m	(0.258m)	

入射高とし、消波ブロックは現地条件に合わせて、異型の12.5型(整積)、80型(乱積)とした。実験に先立ち、SPH法による津波波形の数値検討を行い、ゲート内の水位差や開放速度の違いによる発生津波の変化などをあらかじめ再現して実験時のゲート諸元を決定した。実験においては、水位・流速計による津波波形の計測および、画像解析による消波ブロックの移動状況の判定を行なった。さらに飛散後のブロックの残存状態を詳細に把握するため、レーザー変位計(11測線)による消波ブロック不陸の計測などについて、それぞれ3回ずつ計測を実施した。それらの計測データを元に、入射津波の違いによる被災度の差や、被災形態、被災のばらつきなどについて整理した。なお、参考までに本実験における消波プロ

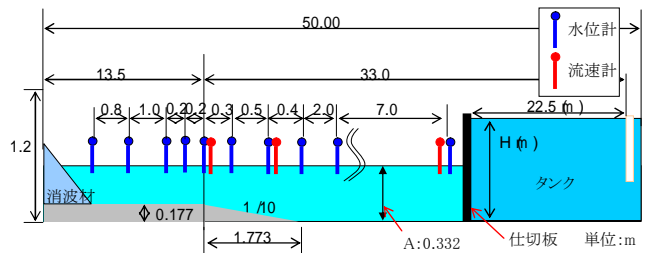


図-3 実験断面 (津波検定時の条件)

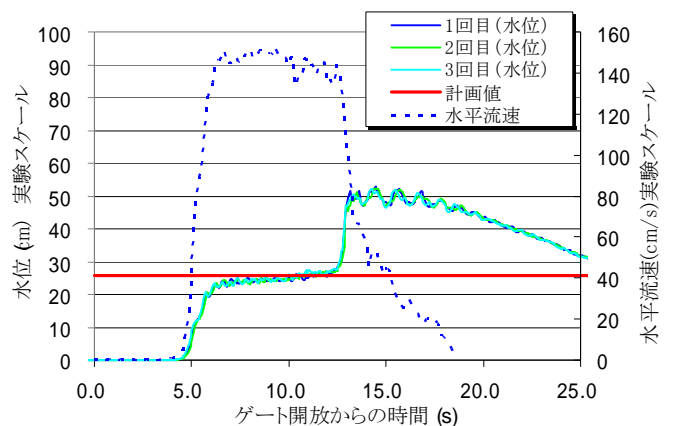


図-4 堤体位置の水位時刻歴 (No.6)  
(A断面, 津波15.0m, ゲート開放速度0.4m/s, タンク水位 H=0.9m)

図-4に示す時刻歴特性から、本実験において作用させた津波は、堤体位置では分裂せず、段波形状で進行していることがわかる。A断面の波高検定においては、ゲート開放速度の違いによる津波波形の変化は比較的小さいものであった。

(3) SPH法による水位流速の再現

B断面を対象とした津波検定においては、津波15.0mのケースにおいてのみ、ゲート開放速度の違いによって堤体位置の水位特性に差が生じていた。そのため、数値解析による実験水位の再現を平行して試みることにした。数値解析には、粒子法であるSPH法(古牧ら<sup>8)</sup>)を用いて粒子サイズ0.1mmと設定した。図-5に示すゲート開放速度が0.4m/sのケースでは、堤体位置の水位はA断面と同様に分裂型の特性を顕著には示しておらず、SPH法による計算結果も反射波が来襲する前までの範囲で概ね同等の時刻歴特性が再現できている。一方、同じタンク水位(H=1.03m)でも、図-6に示すゲート開放速度が1.0m/sのケースにおける堤体位置の水位変動は、実験および計算結果共に、一見ソリトン分裂のような時刻歴特性を持っていた。その要因としては、初期のタンク内外の水位差が大きいため、ゲート解放速度を速めて上昇させた方が水位のステップ形状に起因する短周期成分がより卓越

し、その場で分裂的な水位波形が生じたためであると考えられる。その証拠にゲート位置直近の水位計において既に堤体位置と同様の分裂的な時刻歴を示していた。消波ブロックの被災特性を把握する実験においては、A断面と同様に段波状の水位形状となるように、ゲート開放速度を0.4m/sと設定することとした。

3. 水理模型実験(消波ブロックの被災特性)

(1) A断面の被災特性

消波ブロックの移動した箇所については、過去の潜堤・傾斜堤を対象とした研究成果とはやや異なり、天端面のブロックよりも、静水面付近の方が移動が卓越する傾向を示していた。その要因としては、本実験における消波ブロックは津波水位の上昇とほぼ連動した挙動を示し、静水面付近の消波ブロックが最初に天端まで大きい速度を持って大きく移動し、天端付近のブロックは慣性力を持って駆け上がってきた静水面付近の消波ブロックとの衝突などにより大きな移動が制御されたと考えられる。その根拠の例として、乗り上げるに至った消波ブロックは実験前に天端付近に配置されたものとは限らなかった点が挙げられる。そのようなメカニズムが発生した要因としては、本実験で与えた津波条件がダム破壊法によって発生させた段波状なため、水位上昇が急(周期が

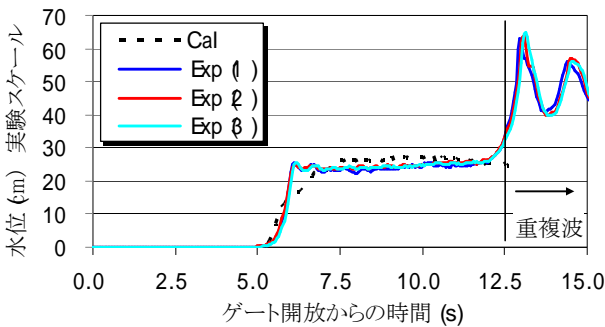


図-5 堤体位置の水位時刻歴 (No.6)  
(B断面, 津波15.0m, ゲート開放速度0.4m/s, H=1.03m)

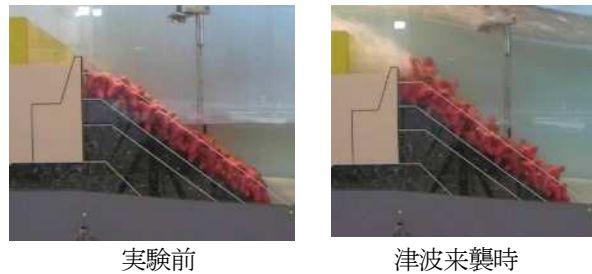


写真-1 静止画像  
(A断面, 津波15.0m, 2回目)

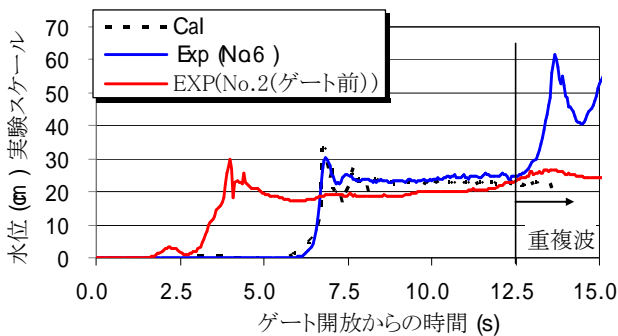


図-6 堤体位置の水位時刻歴 (No.6)  
(B断面, 津波15.0m, ゲート開放速度1.0m/s, H=1.03m)



写真-2 実験前後の比較  
(A断面, 津波15.0m, 2回目)

短い)であったことや、入射津波に対して消波ブロックの安定性が極めて低かったこと、さらには写真-1、写真-2からわかるように、本断面は護岸と消波ブロックの天端高にもともと差があるため天端付近の消波ブロックが乗り上がりやすくなっていたことなどが挙げられる。実験終了後の詳細調査では、何割かのブロックが安定性を保持するための噛み合わせを失った状態であった。そのため、今回は1波のみの作用下での検討ではあったが、榊山ら<sup>6)</sup>、富樫ら<sup>7)</sup>、の指摘にあるように、2波目以降も1波目と同等の津波が来襲した場合には、さらに被災が進展する可能性がある程度推測できる。

図-7および図-8は、実験後の消波ブロック高をレーザー式砂面計により連続的に測量した結果の例である。測量においては実験前後で水槽幅0.6mを11側線に分割してそれぞれの横断地形を計測している。また、測量においては、実験前後に加えて、消波ブロック同士の噛み合わせが消失したものを撤去した後の状態についても合わせて行なった。

図-7の津波高15.0mのケースからは、静水面より上付近の不陸が実験前後で大きく変化しており、天端付近は逆に天端高が高くなる傾向を示していることがわかる。

図-8の津波高8.1mのケースにおいては、目立った挙動を示す位置はやや天端付近に集中する傾向を示しているも

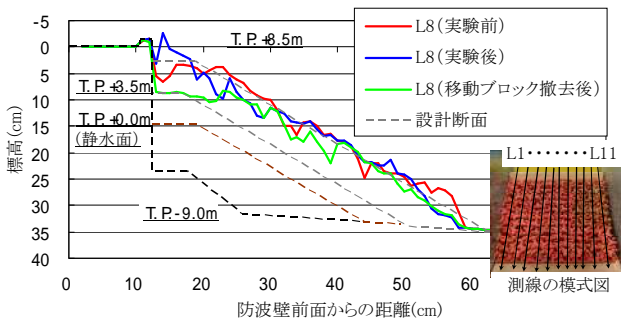


図-7 消波ブロックの横断測量の結果例 (A断面, 津波15.0m, 2回目)

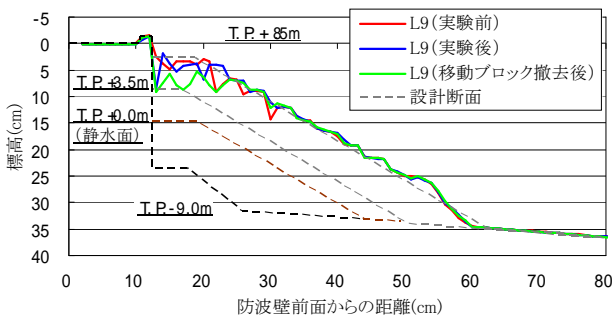


図-8 消波ブロックの横断測量の結果例 (A断面, 津波8.1m, 1回目)

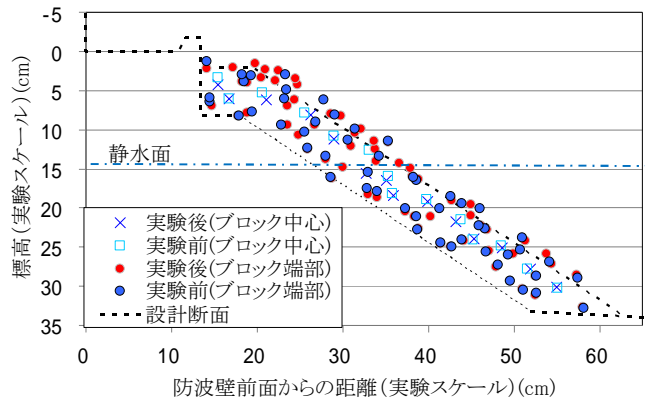


図-9 画像解析による消波ブロックの移動状況 (A断面, 津波15.0m)

の、被災のメカニズムとしては概ね津波15.0mのケースと同様であった。

次に、1層目の消波ブロックの挙動状態を概略的に把握するために、実験前後の可視化面付近の消波ブロック位置変化を画像解析により把握した。画像解析では、消波ブロックの大移動の様子から微回転などの小さい変化までを把握できるように、中心と端部位置それぞれについて画像解析を実施した。図-9に解析結果の例を示す。

図-9より、静水面より上の消波ブロック群は、実験前後で端部だけでなくの中心位置にも比較的大きな変化が生じている。一方で、静水面以深では、端部に若干の変化が見られるものの中心位置の変化は非常に少ないことがわかる。図には示していないが津波高7.8mのケースも同様の傾向であった。

以上の検討を踏まえ、A断面を対象とした消波ブロックの移動の様子は2種類の津波高共に概ね次の通りであった。

a)津波遡上開始時

津波の来襲に伴い静水面付近から天端面にかけての消波ブロック (12.5型) 全体の移動・抜け出しが発生した。また、法尻付近のブロックも微動した。画像からは、瞬間的に殆ど全ての消波ブロックが浮き上がるような挙動も確認された (図-10)。

b)最大水位時

3回の実験を平均して、10個程度 (約2パーセント) のブロックが護岸天端まで巻き上げられた。さらに、津波高

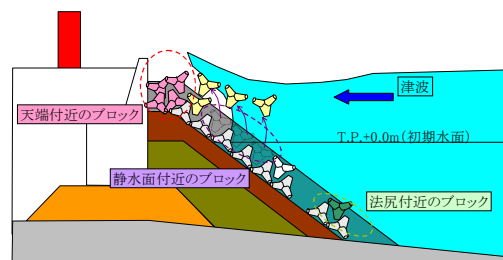


図-10 消波ブロック移動のイメージ (遡上開始時)

が大きいケースでは、ごく一部のブロックは防波壁を越えるまでに至った。

c) 押波終了時 (反射波発生時)

押波の終了および反射波の発生などの影響により沖向きへの流れが発生し、護岸天端面に乗り上げたブロックや天端付近の消波ブロックの一部は、沖側へ転げ落ちる傾向を示した。

d) 実験終了時

実験前後で天端付近のブロック高はやや高くなり、一方で斜面部の高さはやや低くなった。しかし、全体的には、護岸天端に残る、もしくは法尻まで転げ落ちる等のブロックは殆どないため、実験前後での消波断面に大きな変化は生じていない。また、本実験ではブロック内部の基礎捨石に目立った挙動は確認されなかった。なお、護岸を設置した場合の堤体付近の水位時刻歴特性としては、津波検定時と同様に段波状の津波であった (図-11)。

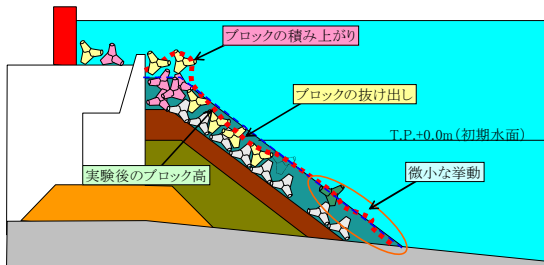


図-11 消波ブロック移動のイメージ (実験終了時)

(2) B断面の被災特性

図-12にB断面を対象とした実験結果を示す。図-12は11側線の測量結果における平均値を整理した結果である。B断面においては、天端付近のごく一部の消波ブロックが移動するに留まっていた。図-13に示す可視化面の画像解析結果からも同様の傾向が明確に伺える。消波ブロックの移動が発生するタイミングは、A断面とは異なり津波が来襲するごく短時間の範囲であり、消波ブロックが大きく移動するような被災は発生していなかった。なお、沖合いの被覆ブロックや基礎捨石については津波15.0m, 8.1mともに全く変動を示さなかった。

図-14に津波検定時 (構造物なし) と本実験 (構造物あり) の場合における水位・流速の比較例を示す。図-14より、構造物を設置した場合の水平流速は、重複波浪場になることで極端に低下する傾向を示している。参考までに榊山<sup>6)</sup>を元に本検討における80t型の消波ブロックの安定限界質量を水平流速、加速度から概算すると、概ね水平流速が50~60cm/s程度であった。そのため、被災した消波ブロックが少ない要因としては、単にブロックが大きいだけでなく、時系列的に追っていくと、重複波浪場に転じた時点で作用流体力が所要質量に対して極

端に下回るために、安定限界の観点から被災が生じる時間帯が非常に短くなったためであると考えられる。なお、津波8.1mのケースにおいては、さらにその傾向が高くなり、移動した消波ブロックはほんの数個に留まることとなっていた。

(3) 被災度の比較

図-15に被災度での整理結果を示す。消波ブロックの津波に対する被災度の評価は、ブロック長さ半分以上の挙動が見られたものとし、さらに比較的移動量が小さい

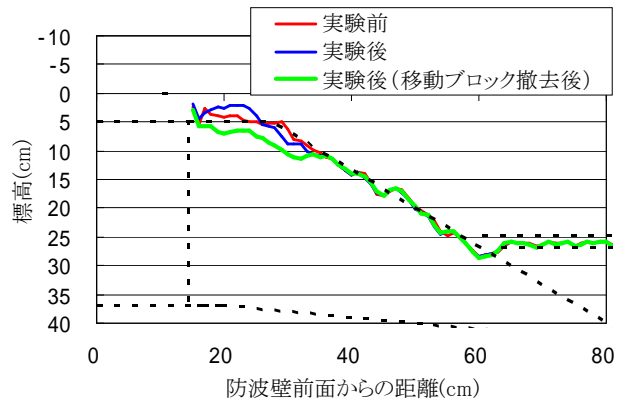


図-12 消波ブロックの横断測量の結果例 (B断面, 津波15.0m, 2回目)

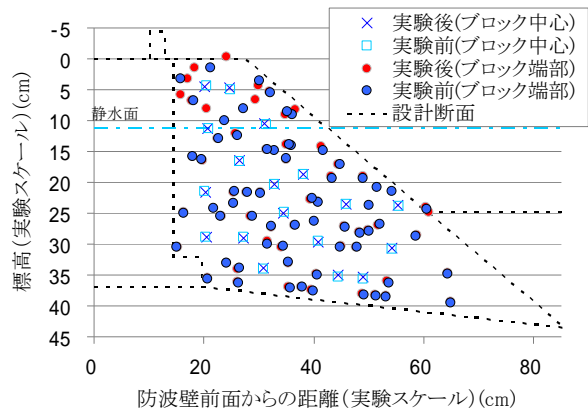


図-13 画像解析による消波ブロックの移動状況 (B断面, 津波15.0m, 2回目)

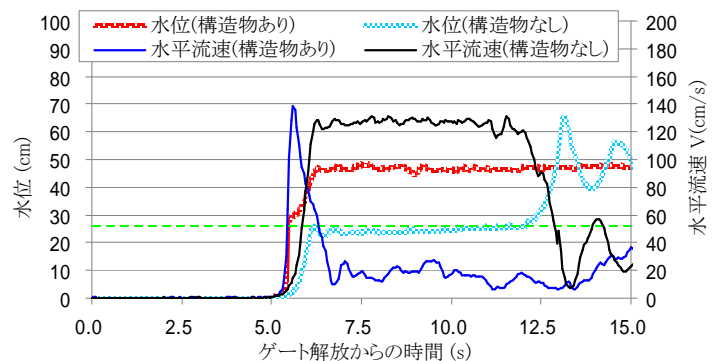


図-14 水位流速の比較例 (No.5) (B断面, 津波15.0m, 3回目)

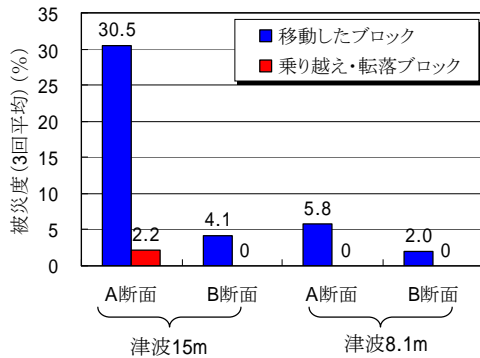


図-15 被災度の評価結果

ものであっても、実験後の噛み合わせが消失したものとを合計した結果とした。なお、同じ実験を3回行った結果の平均値を集計したものである。

図-15から、A断面の津波15.0mのケースでは、30%の被災に加え、約2%の消波ブロックが防波壁を乗り越えたり、末端まで転落する結果を示している。乗り越えた消波ブロックは、乗り越える際に防波壁に衝突する挙動ではなく、津波の越流に合わせて舞い上げられるといった様子であった。その他のケースでは、被災度はある程度の値は示すものの、引き波時の抵抗としての寄与など消波ブロックによる機能はほぼ維持され则认为られる。

#### 4. 主要な結論

- (1) ゲート開放速度を模擬した数値解析により、ダム破壊法による実験津波の水位は良好に再現できた。
- (2) 想定を上回る津波に対する消波ブロックの大移動や護岸への乗り上げは、天端面から静水面 (T.P.+0.0m) 付近にかけて集中する。
- (3) 3回の実験結果では多少のばらつきが生じているものの、断面Aで設計値を大きく超過した津波高が15m

(進行波片振幅) のケースにおいては、1~3%のブロックは防波壁を越えて内陸まで移動する現象が生じた。

(4) 消波ブロックの大規模な移動は、段波津波フロントの急激な水位上昇と連動して発生する。静水面付近の消波ブロックが最初に持ち上げられ、この消波ブロックとの衝突で天端付近のブロック移動は制御される傾向となる。

(5) 実験後の消波ブロックは一部飛散しているが、原形は留めており、引き波時の抵抗としての寄与はある程度は考慮できると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 松富英夫：砕波段波衝突時の圧力分布と全波力，海岸工学論文集，第38巻，pp626-630，1991.
- 2) 水谷将・今村文彦：構造物に作用する段波波力の実験，海岸工学論文集，第47巻，pp946-950，2000.
- 3) 有川太郎・山田文則・秋山実：3次元数値波動水槽における津波波力に関する適用性の検討，海岸工学論文集，第52巻，pp46-50，2005.
- 4) 榊山勉・松山昌史：津波に対する傾斜堤消波ブロックの安定性に関する実験的研究，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.67, No.2, pp.791-795, 2011.
- 5) 半沢稔・松本明・田中仁・山本方人：離岸堤ブロックの津波に関する実験的研究，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.67, No.2, pp.796-800, 2011.
- 6) 榊山勉・鹿島遼一：消波ブロックに作用する波力に関する実験スケール効果，海岸工学論文集，第36巻，pp653-657，1989.
- 7) 富樫宏由・平山康志・川野徹・早田佳朗：ソリトン分裂遡上津波による消波ブロック散乱のメカニズムについて，海岸工学講演会論文集，第33巻，pp466-470，1986.
- 8) 古牧大樹・安野浩一朗・西畑剛，SPH法を用いた波力低減型海域制御構造物に関する数値実験，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol.67, No.2, pp.64-69, 2011.
- 9) 谷本勝利・原中祐人・山寄一雄：不規則波に対する消波ブロックの安定性に関する実験的考察，港湾技術研究所報告，第24巻，第2号，1985.

## THE EXPERIMENTAL STUDY OF STABILITY OF WAVE ABSORBING BLOCK CAUSED BY TSUNAMI

Koichirou ANNO, Yuudai IWATSUKA, Takeshi NISHIHATA, Daiki FURUMAKI, Yoichi MORIYA, and Hitoshi INO

It originates in generating of the serious tsunami damage which is caused by the Tohoku-Pacific Ocean Earthquake. Need for the research and examination about several tsunami damages is increasing.

Although there are many researches about stability of wave absorbing blocks which are causing little action of them under wave conditions, there is few researchs about the great migration of the block groups and the usability of wave absorbing blocks after great migrations under tsunami condition.

In this study, hydraulic model experiments remaking the groups of wave dissipation blocks which are set in front of the revetments facing the outer sea have been done. This paper aims to acquire the fundamental knowledge on the forms and mechanisms of extensive sufferings of the blocks due to the over-designed tsunami forces and influence on the vicinity.