津波による越流が生じる防波堤の港内側マウンド被覆ブロックの安定性に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY FOR STABILITY OF ARMOR CONCRETE BLOCKS COVERING MOUNDS OF BREAKWATER FOR OVERFLOW IN TSUNAMI

大井邦昭¹・林建二郎²・多田 毅³・宮田喜壽⁴
Kuniaki OI, Kenjiro HAYASHI, Tuyoshi TADA, and Yoshihisa MIYATA

¹学生会員 工修 防衛大学校理工学研究科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

²正会員 Ph.D. 防衛大学校建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

³正会員 工博 防衛大学校建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

⁴正会員 工博 防衛大学校建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

The serious damage of breakwaters occurred in the tsunami caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. It is important to reinforce breakwaters 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 rubble mounds for the over flow in tsunami. In the case of breakwater, the critical values of the overflow depth 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 overflow depth above the crest of breakwater.

Key Words : *Tsunami, overflow, Breakwater rubble mounds, Armor concrete blocks, stability*

1. はじめに

(1) 背景

平成23年東北地方太平洋沖地震による巨大津波により、多くの海岸構造物に甚大な被害がもたらされた。平成26年現在、被災した構造物等の復旧工事が行われているところではあるが、震災を踏まえた新たな防災・減災対策の検討も急務となっている。

海岸構造物の一部である防波堤に着目した場合、上記の津波による被災形態として天端を越えた流れによる港内側の洗掘により本体の崩壊に繋がった事例が多く報告されている(写真-1 参照)。発生頻度が極めて低い最大クラスの津波(L2津波)はもちろん、数十年から百数十年の頻度で発生する比較的頻度の高い津波(L1津波)を設計外力とした場合でも、一部の防波堤では天端を越流することがある。今後はこのような場合でも防波堤がただちに大きな被害を受けないように粘り強い構造を付与することが提唱されている¹⁾。

写真-1 防波堤被災写真

(2) 既往の成果

粘り強い構造を付与する手段の一つとして、既存の防波堤港内側マウンドや新しく腹付された港内側マウンドをコンクリートブロックで被覆する方法が有効であると考えられる。

しかし、天端を越える流れに対するブロックの安定性に関する研究は十分には行われておらず、現在様々な研究が行われている。たとえば、加藤ら²⁾、飯干ら³⁾、著者ら⁴⁾は台形断面を想定した海岸堤防の陸側斜面に設置さ

れたブロックを対象とし、被災メカニズムの検証をおこなっている。しかし、これらは矩形断面である防波堤で想定されるような天端からの打ち込み流れや、港内側に一定の水位がある状態を対象にしていなかったため防波堤の場合と現象が異なる。

一方、三井ら⁵⁾は防波堤を対象とした研究を行っているものの、現時点では被覆ブロックの安定限界となる越流水深の調査に基づいて主として設計手法の提案に留まっている。著者ら⁶⁾は様々な形状のコンクリートブロックを用いた系統的な実験により実務で利用できる設計手法と、その設計手法の中で用いるブロック形状毎の安定係数を整理しているが、被災メカニズムの検証は十分ではない。

(3) 目的

本研究では、津波による越流が生じる防波堤の港内側マウンド被覆ブロックのうち、斜面最上段に位置するブロックに作用する流体力の直接的な計測を行い、被災時にどのような力および転倒モーメントが働いているのかを明らかにする。また、越流水の打ち込み位置や流速、周辺域の流速分布等の計測も行い、マウンド斜面最上段で転倒破壊する被覆ブロックの被災メカニズムの検証を行う。

2. 水理実験概要

(1) 実験装置

水理模型実験は図-1 に示す幅0.8m、長さ40m、高さ1.0mの還流装置付2次元造波水路を用いた。水路中央に長さ8mの嵩上げされた水路床を設け、防波堤模型を設置した。還流ポンプにより一方向流れを防波堤模型に作用させ、定常的な越流状態を生じさせることにより津波による越流現象をモデル化した。これは、天端からの越流による港内側マウンド被覆ブロックの安定性は津波の“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判断したためである。

図-2 に実験断面図を示す。実験はフルードの相似則に従うものとし、縮尺は1/30を想定した。防波堤構造諸元、港内側水位は一般的なものを想定した。港内側の水位は越流水深によらず一定に保った。なお、港内側マウンドは粘り強い構造を想定して腹付を行っている。一方、一般的な防波堤はケーソン下に基礎捨石マウンドを有しており、防波堤内外で流体の移動や圧力の伝搬が行われる。しかし、マウンドの厚さはケーソン本体の高さと比較して小さく、ブロックの安定性に及ぼす影響は小さいと考えられる。したがって、本実験では現象の簡単化のためにも基礎捨石マウンドは省略した。

使用した被覆ブロックの形状を図-3 に示す。実現場で使用される平面型のコンクリートブロックは揚圧力低

減や施工性の向上を目的として孔や突起が設けてある場合が多いが、被覆率や粗度の影響を考慮すると現象が煩雑になるため本研究ではそれらが無い単純な形状とした。

対象とした被覆ブロックの重量は実現場で2t（空中）、模型量で71.3g（空中）、39.6g（水中）である。ブロック厚さは実現場で用いられるブロックで多く見られる厚さ500mmとした。模型ブロック寸法は44mm×44mm×16.7mmである。また、模型ブロックの水中比重は $\rho_c=2.23$ である。

図-1 水路概要

図-2 実験断面図

図-3 対象ブロック 形状図

図-4 分力計配置図および座標系

(2) 流体力 F_x , F_z の計測および曲げモーメント M_y の計測

検査対象ブロックと分力計の配置図を図-4 に示す。本ブロックに作用する流体力の計測は6分力計を用いた。検査対象ブロックを分力計に取付け、ブロック単体に作用する水平方向の力 F_x 、鉛直方向に作用する F_z 、ならびに水路横断方向軸回りの曲げモーメント M_y を計測した。

測定系の水中固有振動数は37Hzであり、計測値の原点は検査対象ブロックと分力計が水没している状態とした。すなわち、計測値には浮力の影響が含まれていない。

(3) 落水位置および流速の計測

防波堤を越流した流れの被覆ブロック上への落水位置と水表面での打ち込み流速を図-5 に示す装置で計測した。落水位置の計測には簡易的なタフト法を用いた。タフトの向きが時間平均的に上・下流側の中立となる位置を落水位置とした。打ち込み流速 V および被覆ブロック周辺の流速分布をプロペラ式流速計および2成分レーザードップラー流速計を用いて計測した。

図-5 落水位置および打ち込み流速の計測

3. 結果と考察

(1) 対象とする被災パターン

実験に先立ち、被覆ブロックの被災パターンを確認した。その結果、被覆ブロックの被災は転倒による被災と滑動による被災に分類されることがわかった。なお、著者ら⁶⁾は本実験で用いている平面型に加えて立体型（消波ブロックタイプ）をも含めて水理実験を実施しており、実施した条件内では転倒と滑動の両方が同程度の頻度で生じていることを確認している。

図-6 に滑動による被災模式図を示す。滑動による被災は打ち込み流れによるせん断力と抗力が抑止力（ブロックとマウンド、ブロックと底質の摩擦力）を上回った時に起こる。せん断力と抑止力は斜面長さ（＝水深）により変化するため、現象がやや複雑である。

図-7 に転倒による被災模式図を示す。転倒による被災は滑動による被災が生じない場合、法肩にある被覆ブロックで生じ、滑動による被災と比べて現象がやや単純

である。本研究では、転倒による被災を対象とする。以下、法肩ブロックを検査対象ブロック、または法肩ブロックと称する。

図-6 滑動による被災模式図

図-7 転倒による被災模式図

(2) 転倒による被災状況および被災時越流水深

写真-2 に法肩ブロックの被災状況例を示す。転倒に至るステップは、①斜面上方に持ち上げられ、②③下流端下部を転倒支点にしてめくれが生じ、④転倒し、斜面から離脱する。

越流水深 h_l をゼロから徐々に増やしていくと、ある h_l に達したときにこのような被災が生じる。そのときの越流水深 h_l は34mmであった。この h_l を被災越流水深 h_{lc} とする。 h_l が h_{lc} のとき、流れが定常になったあと被災が生じるまで数秒から十数秒の時間がかかる。一方、 h_l が h_{lc} よりも大きくなるにつれて、被災が生じるまでの時間は減少した。

写真-2 転倒による被災状況 ($h_l = h_{lc}$)

(3) 流況特性

被覆ブロックの転倒メカニズムの検証のため、防波堤天端からの打ち込み流れの被覆ブロック上への落水位置

と流速，またはブロック周辺の流速分布を整理した。

図-8 に各越流水深 h_I における被覆ブロック上の落水位置・水表面での打ち込み流速 V を示す。図-8 より h_I が小さいときは防波堤本体に近い位置に落水し， h_I が増大すると徐々に防波堤本体から離れた位置に落水することが分かる。 $h_I = h_{IC}$ の条件における落水位置は，検査対象ブロックの下流端付近である。さらに h_I が増大すると落水位置は検査対象ブロックから下流側に遠く離れていく。また，越流水深 h_I が増大すると打ち込み流速も増大していく。

図-9 に $h_I = 21\text{mm}$ の条件における港内側領域の時間平均流速ベクトル分布を一例として示す。各ベクトルの水平および鉛直方向成分は2成分レーザー流速計で計測した流速2方向成分の時間平均値である。打ち込み位置の水表面近くでは局所的に $V = 1.7\text{m/s}$ 程度の高流速が生じている。また，ブロック表面近くでは落水位置から法尻方向に高流速が生じていることが分かる。一方，落水位置から防波堤本体方向に向かう流速は下方に向かう流速と比較して小さい。また，打ち込み位置と防波堤本体との間の領域では時計回りの渦流が生じていることが分かる。

図-8 被覆ブロックへの落水位置と打ち込み流速

図-9 被覆ブロック上での時間平均流速分布 ($h_I = 21\text{mm}$ の場合)

(4) ブロックに作用する流体力特性

分力計で計測した検査対象ブロックに作用する流体力 F_X と F_Z の h_I に対する変化を図-10，図-11に示す。計測したこれら流体力は変動成分を有しているため，図中ではそれぞれの時間平均値 (MEAN)，最大値 (MAX)，ならびに最小値 (MIN) を併せて示す。これら計測値の作用方向と符号は図-4に示している。

越流水深が $h_I < h_{IC} = 34\text{mm}$ と小さい場合には， F_X ， F_Z の最大値，平均値，最小値はともに負値を示し，検査対象ブロックの鉛直下向きおよび法尻方向に作用する力が卓越していることが分かる。

$h_I = h_{IC} = 34\text{mm}$ の場合には， $F_{X\text{MEAN}}$ および $F_{Z\text{MEAN}}$ はともに負値を示し，時間平均的には検査対象ブロックの鉛直下向きおよび法尻方向に作用する力が卓越している。しかし， $F_{Z\text{MAX}}$ は正値となり，ある時間帯にはブロックには鉛直上方に作用する力が生じていることが分かる。

越流水深が $h_I > h_{IC} = 34\text{mm}$ の場合には $F_{X\text{MEAN}}$ および $F_{Z\text{MEAN}}$ はともに正値となり，ブロックには鉛直上方および法尻方向に作用する力が卓越していることが分かる。

(5) ブロックに作用する示力線の特長

ブロックが転倒するメカニズムの検証をするために，ブロックに作用する示力線の整理は重要である。

分力計の計測値 (F_X ， F_Z ， M_Y) から検査対象ブロックに作用する流体力の大きさと示力線が分かる^{4),8)}。具体的には F_X と F_Z のから合力 F_T と方向角度 θ が算定できる (1)

図-10 F_X と h_I の関係

図-11 F_Z と h_I の関係

式，(2)式)． M_y を F_T で除算することで計測器内にあるモーメント計測点からの回転半径 l が算定できる ((3) 式) ． 図-12 に模式図を示す．

$$F_T = \sqrt{F_x^2 + F_z^2} \quad (1)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{F_x}{F_z} \quad (2)$$

$$l = \frac{M_y}{F_T} \quad (3)$$

図-13 に $h_l = 25, 34, 70\text{mm}$ の場合の F_x, F_z, M_y の平均値を用いた示力線上に合力 F_T のベクトルを示す．青色矢印線の長さが F_T の大きさを示す．いずれも検査対象ブロックの重心付近を通過している． $h_l = 25, 34\text{mm}$ の場合は斜面に向かって押さえつける方向の力が作用している． $h_l = 34\text{mm}$ は被災が生じる越流水深であるが，平均値を用いた示力線でみると斜面から引きはがす方向の力は作用していない．しかし， $F_{x\text{MAX}}, F_{z\text{MAX}}, M_{y\text{MAX}}$ を用いた示力線は図中では省略しているが，斜面から引きはがす方向となっている．一方， $h_l = 70\text{mm}$ の場合，平均値を用いた合力はブロックを斜面から引きはがす方向に作用している．

(6) 転倒が生じるメカニズム

検査対象ブロックの転倒支点は，ブロックの下流側下端となる (図-12 参照) ．流体力の示力線と分力計の計測値 (F_x, F_z, M_y) から，図-12 で示すブロック転倒支点回りの転倒モーメント M を (3) 式で算定できる⁴⁾．

$$M = M_y - (F_x \times L_z - F_z \times L_x) \quad (3)$$

ここに， $L_x (=19.7\text{mm})$ ， $L_z (=188.2\text{mm})$ はそれぞれ分力計モーメント中心から転倒支点までの水平，鉛直距離である．

図-14 に算定した $h_l=h_{lc}$ の条件における M の時系列を示す．転倒モーメントの方向と符号は図-12 に示している．また，図中には (4) 式で示される自重による抵抗モーメント $M_{SG} (=63.16\text{gf} \cdot \text{cm})$ を青線で示している．

図-15 に算定した M の h_l に対する変化を示す．図中には M の時間平均値 (MEAN) と最大値 (MAX)，最小値 (MIN)を併せて示す．

$$M_{SG} = W \times L_w \quad (4)$$

ここに， W はブロックの水中重量， L_w はブロックの重心から転倒支点までの水平距離である (図-12 参照) ．

$h_l < h_{lc} = 34\text{mm}$ の場合には，転倒モーメント M の平均値 M_{MEAN} は負値 (=反時計回り) となり，ブロックは時間

図-12 示力線，抵抗モーメント，転倒モーメント，転倒支点の模式図

図-13 流体力の示力線 ($h_l = 25, 34, 70\text{mm}$)

図-14 転倒モーメント M の時系列 ($h_l=h_{IC}$)

図-15 転倒モーメント M と h_l の関係

平均的に斜面に押さえつけられて安定していることが分かる。

$h_l=h_{IC}=34\text{mm}$ の場合には、 M_{MEAN} は負値となっているが、 M_{MAX} は正值となりかつ $M_{\text{MAX}}>M_{\text{SG}}$ となっている。したがって、ある時間帯にはブロックを斜面から引きはがす転倒モーメント（＝時計回り）とが作用していることが分かる。

$h_l>h_{IC}=34\text{mm}$ の場合には、 M_{MAX} は M_{SG} より十分大きくなり、ブロックはすぐに転倒することが分かる。

一方、平均値 M_{MEAN} でみると M は被災越流水深を越えても M_{SG} を上回ることはいない。すなわち、計測した時間平均値を基に安定限界を定めると、ブロック重量が不足する懸念がある。

4. まとめ

津波による越流が生じる場合、防波堤の天端からの打ち込み流れが作用する結果、防波堤の港内側マウンド被覆ブロックは被災する。その被災形態の一つであるマウンド斜面最上段（法肩）において生じる被覆ブロックの転倒・離脱の被災メカニズムを検証するために、分力計を用いたブロックに作用する流体力とモーメントの直接計測および、ブロック周辺の流れ計測を行った。本研究で得られた主要な結論は以下の通りである。

- 1) 越流水深 h_l の増大に伴い、防波堤天端からの打ち込み流れの被覆ブロック（検査対象ブロック）上への落水位置は、防波堤から岸方向に遠ざかる。また、打ち込み流れの港内側水面への打ち込み流速 V は大きくなる。
- 2) 越流水深 h_l の増大に伴い、打ち込み流れの落水位置および打ち込み流速 V が変化する結果、検査対象ブロックに作用する流体力およびモーメントの大きさと方向は、複雑に変化する。また、これら流体力およびモーメントは、ともに大きな時間変動成分を有している。
- 3) 分力計を用いたブロックに作用する流体力とモーメントの直接計測から、検査対象ブロックに作用する流体力の示力線を求め、検査ブロックに働く転倒モーメント M を評価した。この転倒モーメントが、検査対象ブロックの水中重量による抵抗モーメント M_{SG} を上回ると、ブロックの転倒が生じるメカニズムを定量的に明らかにした。
- 4) ブロックに作用する流体力およびモーメントは大きな時間変動成分がある結果、転倒モーメント M も大きな時間変動成分を有している。その結果、転倒モーメント M の時間平均値 M_{MEAN} が抵抗モーメント M_{SG} より小さくなる越流水深 h_l の場合においても、ブロックの転倒が生じることを明らかにした。すなわち、転倒モーメント M の時間平均値 M_{MEAN} を基にブロックの安定性を定めると、ブロック重量が不足する懸念がある。

参考文献

- 1) 平成23年度東日本大震災を踏まえた漁港施設の地震・津波対策の基本的な考え方、水産庁漁港漁場整備部，平成26年1月
- 2) 加藤史訓，諏訪義雄，鳩貝 聡，藤田光一：津波の越流に対して粘り強く効果を発揮する海岸堤防の構造検討，土木学会論文集B2（海岸工学），70(1)31-34，2014
- 3) 飯干富広，前野詩朗，吉田圭介，高田大資：津波越流時に海岸堤防法面および法尻保護工に作用する流体力特性に関する研究，土木学会論文集B3（海洋開発），70，2014
- 4) 大井邦昭，林建二郎，河野茂樹：粘り強い海岸堤防法肩におけるブロックの転倒・離脱機構，土木学会論文集B3（海洋開発），70，2014
- 5) 三井 順，松本 朗，半沢 稔，瀬岡和夫：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.I956 - I.960，2013.
- 6) 大井邦昭，林建二郎，河野茂樹：津波越流に対する海岸堤防および防波堤の強化に関する実験的研究，土木学会論文集B3（海洋開発），Vol.68，No.2，pp.I96 - I101，2012.
- 7) 大井邦昭，河野茂樹，橋本 牧：防波堤腹付マウンド被覆ブロックの津波越流に対する所要質量算定手法の提案，第13回全国漁港漁場整備技術発表会，平成26年（投稿中）
- 8) 護岸ブロック試験法検討委員会編：護岸ブロックの水力特性試験法マニュアル，財団法人土木研究センター，1999.7.

(2014. 9. 30受付)