粘り強い構造の海岸堤防に用いられる護岸ブロックの 安定性に関する基礎的研究

Fundamental Study for Stability of Armor Concrete Blocks Using to Reinforce Coastal Dikes

林 建二郎¹・大井邦昭²・河野茂樹³

Kenjiro HAYASHI, Kuniaki OI and Shigeki KAWANO

The serious damage of coastal dikes occurred in the tsunami caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. It is important to reinforce the coastal dikes with concrete blocks and to give the function of tenacious structures. In case of coastal dikes, the stability and damage of coastal dikes are affected by the strength of foundation in spillway and the fluid forces acting on concrete blocks armoring on slope just near the crest of dikes in the side of land for the over flow in tsunami. The relationship between the upstream depth and pressure distributions under the concrete blocks on the mound of slope, and the fluid forces and overturning moment acting on a concrete block adjacent to the crest of dike in the side of land. It becomes clear that the concrete block leaves from the crest of dikes in the side of land in the case of overturning moment exceeding the gravity moment of the concrete block in water.

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の洗掘が原因となった事例が多く報告されている。

例えば、海岸堤防の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においては(岡村, 2012), 海岸堤防は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ている(写真-1参照)。そこで今後、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(磯部, 2012)。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が、使用するブロックの安定性を机上で検証する方法の確立は不十分であり、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研究(例えば、国総研, 2012a, 2012b; 大井ら, 2012)、数値解析(松本ら, 2012)が行なわれている。

本報告は、海岸堤防天端に隣する護岸ブロックの力学的安定性の照査に必要な、水理学的特性値を調べることを目的として、護岸ブロック模型に作用する流体力、流体力によるモーメント、ならびにブロック設置基板上の

圧力分布の計測を試みたものである。ブロックの法面からの転倒・脱落現象を、ブロックに作用する時間変動流体力による転倒モーメント M_f と、ブロックの水中自重による抵抗モーメント M_{SG} に着目し検討した。

2. 実験装置及び方法

(1) 実験の概要

水理模型実験には、前報(大井ら, 2012)と同様に幅0.8m×長さ40m×高さ1.0mの還流装置付き2次元造波水槽を用いた。図-1に示すように還流ポンプにより一方向流れを海岸堤防模型に作用させ、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、天端からの越流水による被覆ブロックの滑動や海岸堤防陸側の洗掘は、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1/40とした。水路中央付近の水平な水路床上に海岸堤防模型を設置した。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越流水深 d_1 (津波高さ)を一定の

写真-1 海岸のブロック残存状況の一例

1 正会員	Ph.D.	防衛大学校建設環境工学科准教授
2 正会員	工修	技研興業(株)技術部
3 正会員	工博	技研興業(株)営業部

図-1 海岸堤防模型断面図

ベ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越流水深 d_1 を計測した。なお、津波高さは海岸堤防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る。

(2) 実験に使用したブロック模型と海岸堤防模型

図-1に示す本実験の海岸堤防模型断面では、裏法勾配を1:2、ブロック質量を約1.94 t/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） d_2 と法尻部の基礎処理方法を変化させた。

使用したブロック模型の形状と堤防裏法面への配列方法を図-2に示す。本ブロックは、海岸での緩傾斜護岸として通常使用されていたブロックの1/40模型で、表面に突起や桁などの突出部分はないが、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。フルードの相似率に従って製作したブロック模型の外形寸法は $38 \times 38 \times 12$ mm、空中重量は0.30N（30.5gf）、水中重量は0.16N（16.3gf）である。ブロックの配列は、噛み合わせ効果が期待できる千鳥配列とした。横断方向のクリアランスは、護岸ブロックの標準値に相当する1mmとした。

本海岸堤防模型は、一般に築堤材料の透水係数は小さく、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、ブロック真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20cm程度、厚さ50cmの栗石層に相当する平均粒子径が約5mmの砂利層を設け、その上にブロック模型を敷設した。

図-1に示す海岸堤防の裏法面の法尻部分の処理法は、根固方式と固定方式の2通りがある（大井ら, 2012）。根固方式は法尻から陸側（下流側）部に根固ブロックを敷設したものであり、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。

図-2 ブロックの形状と配列方法（千鳥配列）

一方、固定方式は法尻から陸側をまったく変形しない強固な構造としたものである。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ものである。

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。従って、固定方式は、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。

(3) 堤防天端に隣するブロックの力学的安定性実験

堤防天端に隣するブロックの力学的安定性に対する水理学的特性値を調べるために必要な、ブロック模型に作用する流体力計測の実験を、上記の固定方式による裏法面の法尻部分処理法のもとで行なった。

4分力計（容量：20N（2.04Kgf））に連結棒（ステンレス製、長さ40mm、径3mm）を用いて力計測用ブロック模型を取り付け、ブロック単体の長さ方向に作用する抗力 F_D 、その直角上向き方向に作用する揚力 F_L 、ならびにこれら流体力 F_D と F_L による流れの横断方向軸まわりの曲げモーメント M_y を計測した。力計測用ブロックと4分力計の配置図を、図-3に示す。力計測用ブロックと堤防天端との間隙は3mmと6mmである。ベニヤ板製の不透

図-3 力計測用ブロックと4分力計ならびに圧力孔の設置図

水層の上に敷設した厚さ10mmのスポンジ製の透水層と力計測用ブロック下側との間隙は1mm以下とした。力計測用ブロックとその下流に連なるブロックとの各間隙は約1mmとした。

ブロック下面に作用する水圧を計測するために、スポンジ製の透水層内に9個の圧力管を設置した。①の圧力孔は堤防天端と力計測用ブロックの間隙部にある。②～⑥の圧力孔は力計測用ブロックの下面に、⑦～⑨の圧力孔は上端から2番目、3番目、4番目のブロックの中央部下面にある。但し、③と⑤の圧力孔は、ブロックを上下に貫通する2個の穴部の真下部にそれぞれある。これら9個の圧力管をビニールホースを用いてマノメータに設置し、9箇所でのピエゾ水頭を計測した。

堤防模型天端上およびブロック上の流速分布特性の計測には、2成分レーザ流速計（ダンテック製）を使用した。

3. 結果および考察

(1) ブロックの被災形態

法尻部を根固工とした条件（根固方式）においては、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（大井ら, 2012）。

今回の実験で用いた、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（固定方式）の被災形態の模式図を、図-4に示す。この条件下では、越流水深の増大とともに斜面部のブロックが下流方向に押し付けられ、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、天端に隣する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、連鎖的に法面がほぼ全面的に被災となる。

本研究においては、この天端に隣するブロックの転

図-4 法尻部を完全に固定した場合の被災状況（固定方式）

倒・脱落現象について以下に詳述する。

(2) 堤防天端に隣するブロックの転倒・脱落

法尻部を固定した場合（固定方式）に生じる、天端に隣するブロックの転倒・脱落状況の一例を写真-2に示す。

越流水深 d_1 が低い場合は、越流流速も小さく、ブロックは静止・安定している。しかし、越流水深 d_1 の増加に伴い越流流速が増加すると、このブロックの振動が徐々に生じてくる。

越流水深 d_1 のさらなる増加に伴い、ブロックの振動は大きくなり、写真-2(a)に示すように突然に転倒開始となる。転倒が始まるとブロックの上流端が持ち上がりブロックには大きな抗力が作用する結果、ブロックは、写真-2(b)に示すようにその下流端上部を支点に瞬時に転倒し、写真-2(c)に示す離脱状態となり下流に流れ去る。

なお、このブロックの転倒・脱落現象は、本実験ケースにおいては越流水深 d_1 が14.5cm以上になると生じた。写真-2に示す結果は、越流水深が $d_1=18\text{cm}$ の場合である。

(3) 堤防天端に隣するブロック下面の圧力分布

天端に隣するブロック下方の床面に設けた9個の圧力孔を用いて計測されたピエゾ水頭の場所的変化を図-5に青色丸印で示す。図中のX軸は、堤防天端の陸側端を原点とする陸側水平方向距離である（図-3参照）。縦軸は、堤防の裏法尻部を標高の原点とするピエゾ水頭および標高である。越流水深は $d_1=18\text{cm}$ の場合である。

太い黒実線は、天端の標高およびブロックを敷設した裏法面の標高を示す。水色実線は、堤防の天端陸側端近傍の水表面の標高を示す。茶色丸印は、圧力孔の標高（＝位置水頭）を示す。天端陸側端近傍の裏法肩周辺ではピエゾ水頭が局所的に大きく低下していることが分かる。

(a) 転倒開始

(b) 転倒状態

(c) 離脱状態

写真-2 天端に隣するブロックの転倒・離脱状況（越流水深 $d_1=18\text{cm}$ の場合、各写真の右側＝海側）

ピエゾ水頭と位置水頭の差は、圧力水頭を示す。ブロック下面での水圧は、静水圧より大きく低下していることが分かる。この圧力低下は、裏法肩周辺流れの流線の曲がりによる遠心力の作用に起因している（椿，1973）。越流水深が6mを超える海岸堤防の裏法肩の近傍においては、越流水深が6mを超えると負圧が発生する実験結果が報告されている（国総研，2012b）。

(4) ブロック模型に作用する流体力と越流水深の関係

4分力計で計測された、海岸堤防の天端に隣する護岸ブロックに作用する抗力と揚力の時間平均値 F_{xmean} 、 F_{Lmean} とする。 F_{xmean} と F_{Lmean} よりブロックに作用する合力ベクトルの大きさ F_{Tmean} と方向角度 θ は、式(1)と式(2)で算出される。

$$F_{Tmean} = (F_{xmean}^2 + F_{Lmean}^2)^{0.5} \dots\dots\dots (1)$$

$$\theta = \tan^{-1} (F_{Lmean} / F_{xmean}) \dots\dots\dots (2)$$

本護岸ブロックに作用する抗力 F_D 、揚力 F_L ならびに合力 F_T の時間平均値、越流水深 d_1 に対する変化特性を図-6に示す。越流水深 d_1 が145mmを越すと本ブロックの被災（転倒・脱落）が生じた。

抗力 F_{Dmean} は、ブロックの前面と後面に作用する圧力差に大きく起因する。揚力 F_{Lmean} は、ブロックの上面と下面に作用する圧力差に大きく起因する。

抗力 F_{Dmean} は、越流水深が $d_1 = 60\text{mm}$ の場合は流れ方向に $F_D = 0.025\text{N}$ （2.6gf）の値で作用している。その後、越流水深 d_1 が大きくなると抗力 F_{Dmean} は負値となり、その作用方向は流れと反対方向になっている。これは、越流水深 d_1 の増加に伴い裏法肩周辺流れの流線の曲がりによる遠心力が大きくなる結果、力計測用ブロック前面（＝上流側）に作用する圧力がブロック後面（＝下流側）に作用する圧力より大きく低下することに起因する。

一方、揚力 F_{Lmean} は、越流水深 d_1 の増加に伴い急激に増加し、その作用方向は上向きとなっている。これも抗力の場合と同様に、裏法肩周辺流れの流線の曲がりによる遠心力が流れに作用する結果、ブロック上面での圧力がブロック下面での圧力より低下することに起因する。

(5) ブロック模型に作用する流体力とその示力線および転倒モーメント

本護岸ブロックの被災が生じる越流水深 $d_1 = 180\text{mm}$ の場合における、本ブロックに作用する合力 F_{Tmean} のベクトルとその示力線を図-7に示す。4分力計内にある曲げモーメント計測点からこの合力ベクトルまでの垂線距離 l は、式（3）で算定される。 l を回転半径と定義する。

$$l = M_{ymean} / F_{Tmean} \dots\dots\dots (3)$$

合力ベクトルの大きさ F_{Tmean} と方向角度 θ 、および回転半径 l が分ると、合力 F_{Tmean} の示力線を図-7に示すよ

うに決定できる（護岸ブロック試験法検討委員会，1997）。示力線はブロック重心の下方を通過していることが分る。

本ブロックに作用する合力 F_{Tmean} の示力線が分ると、ブロックの転倒判断が可能となる。例えば、ブロック後

図-5 裏法肩周辺のブロック下面の圧力分布（越流水深 $d_1 = 18\text{cm}$ の場合、図面左側＝海側）

図-6 護岸ブロックに作用する流体力と越流水深

図-7 護岸ブロックに作用する流体力と越流水深

流側の上端点 (= 転倒支点) まわりの合力 F_{Tmean} による転倒モーメント M_{fmean} は、式 (4) で示される。

$$M_{fmean} = F_{Tmean} * L_f \quad \dots\dots\dots (4)$$

L_f は、転倒支点から示力線までの垂線距離である。

ブロックの重心には、ブロックの空中重量から静水中のブロックに作用する浮力を差し引いた力 (= ブロック水中重量) F_{SG} が、重力方向に作用している。転倒支点まわりの F_{SG} による抵抗モーメント M_{SG} は式 (5) で示される。

$$M_{SG} = F_{SG} * L_{SG} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中の L_{SG} は、ブロックの転倒支点からブロック水中重量 F_{SG} の作用線までの垂線距離である。 $M_{SG} < M_{fmean}$ となると、本ブロックの流れ方向への転倒が生じる。

転倒モーメント M_f の時間平均値 M_{fmean} の越流水深 d_1 に対する変化を図-8に示す。図中には、本ブロックの抵抗モーメント $M_{SG} = 0.31\text{Ncm}$ (32gfc) を赤線で示す。本ブロックの転倒・脱落在生じる $d_1 = 180\text{mm}$ の場合においても、 M_{fmean} は M_{SG} を若干下回っている。抵抗モーメント M_{SG} と転倒モーメント M_f との比をブロックの転倒に対する安全率と定義する。ブロックの転倒・脱落在生じる越流水深 $d_1 = 180\text{mm}$ の場合の本ブロックの安全率は1.1であった。なお、本ブロックの転倒・脱落在生じる $d_1 > 14.5\text{cm}$ で生じている。

$d_1 = 180\text{mm}$ の場合の、抗力 F_D 、揚力 F_L 、転倒モーメント M_f の時間変化例を図-9に示す。緑色線で示す M_f の時間変動成分は大きく、多くの時間で M_f は、図-8に示す抵抗モーメント $M_{SG} = 0.31\text{Ncm}$ を超過している結果、安全率 $= 1.1 > 1.0$ である本ブロックの転倒・脱落在生じたと考えられる。

4. おわりに

海岸堤防天端に隣する護岸ブロックの力学的安定性の照査に必要な水理学的特性値を調べることを目的として、護岸ブロック模型に作用する流体力と圧力計測を試みた。本研究で得られた主要な結論は以下のとおりである。

- 1) 海岸堤防天端に隣する護岸ブロックの法面からの転倒・脱落は、流体力による転倒モーメント M_f が、ブロックの自重による抵抗モーメント M_{SG} より大きくなった場合に生じることを定量的に明らかにした。
- 2) ブロック法面からの転倒・脱落現象は、 M_f の時間平均値 M_{fmean} と M_f の時間変動成分値に大きく起因する。

図-8 転倒モーメント M_{fmean} と越流水深の関係

図-9 流体力と転倒モーメント M_f の時間記録例 (越流水深 $d_1 = 18\text{cm}$ の場合)

参考文献

- 磯部雅彦 (2012) : 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.
- 大井邦昭・林建二郎・河野茂樹 (2012) : 海岸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, 土木学会論文集B3 (海洋開発) 特集号, Vol. 68, No. 2, pp.196~1101.
- 岡村次郎 (2012) : 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.
- 国土交通省国土技術政策総合研究所 (2012) : 粘り強く効果を発揮する海岸堤防の構造検討 (第1報), 12p.
- 国土交通省国土技術政策総合研究所 (2012) : 粘り強く効果を発揮する海岸堤防の構造検討 (第2報), 21p.
- 護岸ブロック試験法検討委員会編 (1997) : 護岸ブロックの水理特性試験法マニュアル, 財団法人土木研究センター, pp.43-46.
- 椿東一郎 (1973) : 水理学I, 森北出版, pp.191-195.
- 松本 朗・真野 明・三井 順・半沢 稔 (2012) : 数値解析に基づく人工リーフ被覆ブロックの安定性の評価手法, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp.1861~1865.