粘り強い構造の海岸堤防法肩における ブロックの転倒・離脱機構

大井 邦昭¹・林 建二郎²・河野 茂樹³

¹正会員 技研興業(株) 技術営業部 (〒193-0801 東京都八王子市川口町1540)

E-mail:kuniaki.ohi@gikenko.co.jp

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

E-mail:hayashik@nda.ac.jp

³正会員 技研興業(株) 技術営業部 (〒166-0004 東京都杉並区阿佐ヶ谷南3-7-2)

E-mail:shigeki.kawano@gikenko.co.jp

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。その被災形態のひと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。海岸堤防においては陸側法尻や斜面が洗掘され、これが堤体全体に進行して破堤に至るケースがみられた。そこで今後は設計外力を超過したレベル2津波（以下、L2津波とする）に対して大きな被害を受けずに機能を容易に復旧可能な“粘り強い”構造とすることが提唱されている。

本報告は、法肩に設置されたブロックの安定性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ブロックに作用する流体力等の評価を試みたものである。また、ブロックの転倒を引き起こすメカニズムを明らかにするためブロックまわりの圧力分布の評価を行った。

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斜面が洗掘され、これが堤体全体に進行して破堤に至ったようなケースでは、堤体が大きく破壊されることにより復旧に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こととなる。そこで今後は、設計外力を超過したレベル2津波（以下、L2津波とする）に対しても大きな被害を受けずに容易に復旧可能な“粘り強い”構造とすることが提唱されている¹⁾。

海岸堤防では陸側斜面と法尻の補強が必要となるが、その補強方法のひとつとして被覆ブロックの使用が有効であると考えられる。しかし、このとき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、その有効性等やメカニズムについて研究がおこなわれている^{2), 3)}。これらによると被災は法尻の洗掘が全体の安定性に大きく影響を与えると指摘されており、実現場においてもこのようなメカニズムを考慮して法尻ブロック

背後が洗掘しないように大型の基礎ブロックを用いたり背後域の地盤改良を行う等の対策を行っている^{2), 3)}。

著者らも、このような場合についての実験的研究を行っており、法尻ブロックの安定性が大きく向上した場合、次に被災が生じるのは法肩ブロックであることを報告し⁴⁾、a)ブロックに作用する流体力とモーメントの同時計測、ならびにb)ブロック周辺の流速分布や圧力分布の計測を行っている⁵⁾。

本報告は、法肩に設置するブロックの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、ブロックに作用する流体力と転倒モーメントの発生メカニズム、及びブロック転倒・離脱現象に対するさらなる検討を行ったものである。

2. 実験装置及び方法

(1) 実験の概要

水理模型実験は図-1に示す幅0.8m×長さ40m×高さ1.0mの還流装置付き2次元造波水路を用いた。還流ポンプにより一方向流れを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

図-1 水路概要

デル化した。これは、天端からの越流水による陸側斜面及び法尻における水理現象は、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、縮尺は1/40を想定した。ポンプの出力調整により堤防模型の越流水深 d_1 （津波高さ）を変化させた。堤防高さは d_2 =約300mmで固定とした。また、実現場における構造形式を考慮して法尻ブロックは固定して動かないようにしてある（固定方式）。流体力、圧力分布、流速分布の計測時は全部、または計測対象ブロックを除く全部も固定している。（図-2参照）

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。しかし、本実験ではブロックが1個でも被災すると、その部分から中詰材の流失や隣接ブロックの被災へと連鎖的に短い時間で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) ブロック形状及び堤防諸元

図-2に示す実験断面では、勾配は海側陸側とも1:2.0とし、天端幅は100mmで固定した。また、中詰材は厚さ約20mmで安定実験時は碎石、その他の計測時はスポンジを用いた。堤体自体は木製の不透過構造である。

使用した模型ブロックの形状と配列図を図-3に示す。ブロックは実際の海岸堤防の沖側斜面で使用されているもので、質量は現地量で約1.94t、模型量で約30.5gf（空中重量）、約16.3gf（水中重量）である。配列はブロック相互のかみ合わせ効果が期待できる千鳥配列である。

(3) 力計（3分力計）、圧力分布、流速分布の測定条件

陸側法尻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、ブロックに作用する流体力の計測を行なった。

3分力計（容量 2Kgf（20N））にブロックを取り付け、ブロック単体の流れ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 F_D と F_L による流れ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3分力計の配置図を図-4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。

図-2 実験断面概要

図-3 ブロックの単体図及び配列図

図-4 力計（3分力計）設置状況

図-5 圧力計測孔 設置位置

静水中における測定系の固有振動数は21Hzである。

不透水層の上に敷設した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。

力計測用ブロックと3分力計を静水中に水没させた状態を、抗力 F_D 、揚力 F_L 、ならび曲げモーメント M_y の原点（=零値）とした。つまり、3分力計で計測された、抗力 F_D 、揚力 F_L 、ならび曲げモーメント M_y の値には、力計測用ブロックや3分力計計測部（载荷盤、連結棒、計測梁

等)に作用する浮力の影響が含まれていない。

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(図-5参照)。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箇所のピエゾ水頭を計測した。

力計測用ブロック上方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. 結果及び考察

(1) 法肩ブロックの転倒・離脱現象⁹⁾

法肩ブロックの転倒・離脱状況の一例を写真-1に示す。写真-1は越流水深が $d_1=18\text{cm}$ の場合である。

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、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、突然に転倒開始となる(写真-1のa)参照)。

転倒が始まるとブロックの上流端が持ち上がる結果、ブロックには大きな抗力が作用し、ブロックは写真-1のb)に示すようにその下流端上部を支点に瞬時に転倒し、離脱状態となり下流に流れ去る。このブロックの転倒・離脱現象は、本実験ケースにおいては越流水深 d_1 が 14cm 以上になると生じた。

(2) 法肩ブロック上方の流れとピエゾ水頭分布

法肩ブロックまわりの流速ベクトルの鉛直方向分布の流れ方向変化の一例として、越流水深 $d_1=18\text{cm}$ の結果を図-6に示す。これら流速ベクトルの水平及び鉛直方向流速成分 u 、 v より求まる流速ベクトルの大きさ $U_t=(u^2+v^2)^{1/2}$ の鉛直方向分布を図-7に示す。

ベルヌイの式に流速ベクトルの大きさ U_t と、位置水頭を代入して評価した法肩ブロックまわり流れのピエゾ水頭の鉛直方向分布を図-8に示す。 $X=0\text{mm}$ の測線における底面(=ブロック上面)の座標は $Z_B=0\text{mm}$ 、水表面の座標は $Z_S=100\text{mm}$ である。同様に $X=7\text{mm}$ の測線では $Z_B=-3.5\text{mm}$ 、 $Z_S=97\text{mm}$ 、 $X=20\text{mm}$ の測線では $Z_B=-10\text{mm}$ 、 $Z_S=91\text{mm}$ 、 $X=32\text{mm}$ の測線では $Z_B=-16\text{mm}$ 、 $Z_S=88\text{mm}$ 、 $X=90\text{mm}$ の測線では $Z_B=-45\text{mm}$ 、 $Z_S=53\text{mm}$ である。

$X=0\text{mm}$ 、 $X=7\text{mm}$ の測線上の流れにおいては、底面境界層の発達是非常に小さく、底面境界層外の流れはダム

a) 転倒開始

b) 転倒状態、このあと離脱

写真-1 陸側法肩ブロックの転倒、離脱状況
($d_1=18\text{cm}$ の場合)

越流部の流れと同様にポテンシャル流的である⁹⁾。しかし、堤体の底面勾配が水平勾配から $1/2$ 勾配に急変する結果、流れ方向は図-6に示すように水平勾配から $1/2$ 勾配に漸変している。この流れの曲がりにより生じる遠心力の影響をうけ、底面境界層の上部流れにおいては、位置 z の低下に伴い流速の大きさ U_t は増加し(図-7参照)、ピエゾ水頭は減少している(図-8参照)⁶⁾。

$X=20\text{mm}$ 、 $X=32\text{mm}$ の測線上の流れも上記と同様であるが、その境界層厚さ δ は、 $X=20\text{mm}$ の場合 $\delta \approx 6\text{mm}$ 、 $X=32\text{mm}$ の場合 $\delta \approx 10\text{mm}$ と顕著に発達している。また、 $X=20\text{mm}$ の測線上の流れにおいては、図-6に示すように底面境界層内の底面の極近傍で、流れの剥離による逆流が生じている。

$X=90\text{mm}$ の測線上の流れにおいては、底面境界層の発達は顕著となり、その境界層厚さは $\delta \approx 15\text{mm}$ となっている。ブロック床面から十分上方の流れの方向角度は、 $\theta = \tan^{-1}(1/2) = 26.6^\circ$ の法面勾配角とほぼ同じとなっている。従って、図-6に示すように、ブロック床面から十分上方の流れにおいては、流速 U_t やピエゾ水頭は水深方向に一定となっている。

(3) 法肩ブロックまわりのピエゾ水頭と圧力分布

図-6 法肩ブロックまわりの流速ベクトル分布 (上図)
(越流水深 $d_f=18\text{cm}$ の場合)

※下枠は $x=20.0\text{mm}$ 、 $z=-10.0\sim 0.0\text{mm}$ 付近の拡大

法肩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变化を、図-9 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。縦軸は、堤体の法尻部を原点とするピエゾ水頭及び標高である (図-4 参照)。越流水深は $d_f=18\text{cm}$ の場合である。

太い黒色実線は、天端の標高及びブロックを敷設した裏法面 (=ブロック上面) の標高を示す。水平勾配である天端標高は 300mm である。水色実線は、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。赤色△印はブロック上面でのピエゾ水頭の推定値を示す。このピエゾ水頭推定値の算定に必要な、ブロック上面での圧力水頭の評価にはベルヌイの式を適用した。

ピエゾ水頭と位置水頭の差は圧力水頭である。流れの圧力が静水圧分布に従うなら、ピエゾ水頭は水表面の標高と一致する。しかし、本実験では計測ブロック上流端近傍部でのブロック上・下面のピエゾ水頭は、水表面の標高より大きく低下している。従って、ブロック下面及び上面での水圧は静水圧分布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⁹⁾。越流水深が 6m を超えた海岸堤防の裏法肩の近傍においては、大きな負圧 (=位置水頭よりピエゾ水頭が下がる) が発生する実験結果が報告されている³⁾。

図-7 法肩ブロックまわりの流速分布 U_t

図-8 法肩ブロックまわり流れのピエゾ水頭分布
(越流水深 $d_f=18\text{cm}$ の場合)

図-9 法肩ブロック上面・下面のピエゾ水頭分布
(越流水深 $d_f=18\text{cm}$ の場合)

計測ブロック上面でのピエゾ水頭は、計測ブロック下方の床面でのピエゾ水頭より若干低くなっている。従って、ブロックの下面に作用する全圧力は上面に作用する全圧力より大きくなり、図-10 に示すように、流れ方向と直角な上方向に浮力の影響を取り除いた揚力が作用することが分かる。

(4) 法肩ブロックに作用する流体力と越流水深 d_f の関係

3分力計で計測した法肩ブロックに作用する浮力の影響を取り除いた抗力と揚力の時間平均値を F_{Dmean} , F_{Lmean} とする。 F_{Dmean} 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 を, (1)式と(2)式で算出した。

$$F_{Tmean} = (F_{Dmean}^2 + F_{Lmean}^2)^{0.5} \quad (1)$$

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

これら抗力 F_{Dmean} , 揚力 F_{Lmean} , ならびに合力 F_{Tmean} の越流水深 d_l に対する変化特性を図-10に示す。本実験では d_l が140mmを越すとブロックの被災が生じた。

法肩ブロックに作用する抗力 F_{Dmean} は, ブロック上流側の前面と下流側の後面に作用する圧力差に大きく起因する。揚力 F_{Lmean} は, 前記の通り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。図中には, ブロック前面とブロック後面に作用する圧力の差より, (3)式で評価した抗力の値 F_{DC} を比較のため記入している。

$$F_{DC} = p_F \times S_F - p_R \times S_R \quad \text{— 浮力の抗力方向成分} \quad (3)$$

式中の p_F , p_R は, ブロック前面と後面に作用するそれぞれの圧力である。 S_F , S_R は, ブロック前面と後面の流れ方向への投影面積である。圧力 p_F , p_R は, 図-5に示す①と⑥の圧力孔によって計測されたピエゾ水頭と位置水頭の差より推定した。両者の一致は良好である。

3分力計で計測された抗力 F_{Dmean} は, 越流水深 $d_l = 60\text{mm}$ の場合は $F_{Dmean} = 3.5\text{gf}$ となり流れ方向に作用している。しかし越流水深 d_l が大きくなると負の値となり, 流れと反対方向に作用している。これは, 越流水深 d_l 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, ブロック前面に作用する圧力 p_F がブロック後面に作用する圧力 p_R より大きく低下することに起因する(図-9参照)。

一方, 揚力 F_{Lmean} は, 越流水深 d_l 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。これは, 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の圧力より低下することに起因する(図-9参照)。

(5) 法肩ブロックに作用する流体力とその示力線及び転倒モーメント

ブロックの被災が生じる越流水深 $d_l = 180\text{mm}$ の場合における合力 F_T のベクトルとその示力線を図-11に示す。3分力計内の曲げモーメント計測点から合力ベクトルまでの垂線距離は $l = M_y / F_T$ となる。 l を回転半径とする。

合力ベクトルの大きさ($F_T = (F_D^2 + F_L^2)^{0.5}$)と方向角度 θ , 及び回転半径 l が分ると, 合力 F_T の示力線を図-11に示すように決定できる^{7), 8)}。 F_T の示力線はブロック重心の下方を通過し, 上方向に作用している。

ブロックに作用する合力 F_T の大きさと示力線が分ると, ブロックの転倒判断が可能となる。例えば, ブロック後流側の上端点をブロックの転倒支点とすると, 合力 F_T

図-10 法肩ブロックに作用する流体力と越流水深 d_l

図-11 流体力の示力線と転倒モーメント M_f の計測

図-12 転倒モーメント M_{fmean} と抵抗モーメント M_{SG}

による転倒モーメント M_f は, (4)式で示される。

$$M_f = F_T \times l_f = M_y - F_D \times L_D - F_L \times L_L \quad (4)$$

l_f は, 転倒支点から示力線までの垂線距離である。 L_D , L_L は, 転倒支点からモーメント計測点に作用する F_D , F_L までの垂線距離である。

ブロックの重心には, ブロックの水中重量 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は $M_{SG} = F_{SG} \times l_{SG}$ で示される。

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。 $M_{SG} < M_f$ となると, ブロックの流れ方向への転倒が生じる。

転倒モーメントの時間平均値 M_{fmean} の越流水深 d_l に対する変化を図-12に示す。図中には, 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。ブロックの転倒・脱落が瞬時に生じる $d_l = 180\text{mm}$ の場合, M_{fmean} は M_{SG} を若干下回っており安全率($=M_{SG} / M_{fmean}$)は1.1であ

図-13 流体力と転倒モーメント M_f の時間記録例
(越流水深 $d_f=18\text{cm}$ の場合)

図-14 流体力と転倒モーメント M_f の時間記録例
(越流水深 $d_f=14\text{cm}$ の場合)

る。長時間の流水中において突然に転倒・脱落が瞬時に生じる $d_f=140\text{mm}$ の場合においては、 $M_{f_{mean}}$ は M_{SG} を大幅に下回っており、安全率は6.2である。

$d_f=180\text{mm}$ 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-13に示す。緑色線で示す M_f の時間変動成分は大きく、多くの時間帯で M_f は上記の抵抗モーメント $M_{SG}=0.31\text{Ncm}$ を超過している。その結果、ブロックの転倒・脱落が瞬時に生じている。

$d_f=140\text{mm}$ の結果を同様に図-14に示す。 $d_f=140\text{mm}$ の場合、 M_f の時間平均値及び時間変動成分は小さく、多くの時間帯で M_f は抵抗モーメント $M_{SG}=0.31\text{Ncm}$ を下回っているが、ある一瞬において、 $M_f > M_{SG}=0.31\text{Ncm}$ となっている。その結果、越流流速が小さくなる $d_f=140\text{mm}$ の場合においても、頻度の低いある一瞬でブロックの転倒・脱落が発生すると考えられる。

STUDY FOR STABILITY OF ARMOR CONCRETE BLOCKS USING TO REINFORCE COASTAL DIKES

Kuniaki OI, Kenjiro HAYASHI 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 these coastal structures with the concrete blocks and to give the function of tenacious structures. In case of coastal dikes, the stability of concrete blocks and the damage of coastal dikes are affected by 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 velocity distributions on concrete blocs and pressure distributions 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. The forces and moment are measured by using a load cell.

4. おわりに

本研究で得られた主要な結論は以下のとおりである。

- 1) 海岸堤防における天端陸側法肩ブロックの転倒・脱落は、流体力による転倒モーメント M_f が、ブロックの水中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) 越流水深 d_f の増加に伴いブロック上流れの流線の曲がりによる遠心力が大きくなる結果、法肩ブロックには、流れの逆方向に抗力が、水表面方向に大きな揚力が作用する水理現象を定量的に明らかにした。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所：粘り強く効果を発揮する海岸堤防の構造検討（第1報），12p，2012。
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所：粘り強く効果を発揮する海岸堤防の構造検討（第2報），21p，2012。
- 4) 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.196-1101，2012。
- 5) 林建二郎，大井邦昭，河野茂樹：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，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.69，pp. 945-950，2012。
- 6) 椿東一郎：水理学I，森北出版，pp.185-193，1973。
- 7) 護岸ブロック試験法検討委員会編：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，1999.7。
- 8) 林建二郎，大井邦昭，前田 稔，斉藤 良：開水路中に水没設置された立方体及び棧柱度の流体力，水工学論文集，第55巻，pp.1141-1146，2011。