津波の流れに対する被覆ブロックの 安定性に関する検討

三井 順¹・久保田真一²・松本 朗³

¹正会員 株式会社不動テトラ 総合技術研究所 (〒300-0006 茨城県土浦市東中貫町2-7)

E-mail:jun.mitsui@fudotetra.co.jp

²正会員 株式会社不動テトラ 総合技術研究所 (〒300-0006 茨城県土浦市東中貫町2-7)

E-mail:shinichi.kubota@fudotetra.co.jp

³正会員 株式会社不動テトラ 総合技術研究所 (〒300-0006 茨城県土浦市東中貫町2-7)

E-mail:akira.matsumoto@fudotetra.co.jp

津波の流れに対する被覆材の安定性に関する基礎的な知見を得ることを目的として、台形マウンドでの実験と、堤頭部を再現した実験の2種類の水理模型実験を実施した。津波の流れによる被覆ブロックの移動形態として、マウンドの法肩部や稜線部からの離脱と、ケーソン際天端部からの離脱の2種類の形態を確認した。移動形態によって安定限界時のイスバッシュ定数が異なり、後者の移動形態に関しては抗力以外の要因により離脱が生じている可能性が示唆された。またイスバッシュ式の適用に関しては、適切な斜面勾配のとり方や流速の測定位置を検討することが今後の課題として挙げられる。その際、イスバッシュ定数を決定するための実験時とイスバッシュ式により所要質量を算定する際との定義を整合させることが必要である。

Key Words : tsunami, current, armor units, stability, Isbash formula

1. はじめに

防波堤の津波対策においては、津波の流れに対してマウンド被覆材の安定性を確保することが必要である。流れに対する被覆材の所要質量算定方法としては、以下に示すCERCによるイスバッシュの式¹⁾が通常用いられている。

$$M = \frac{\pi \rho_r U^6}{48 g^3 y^6 (S_r - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3} \quad (1)$$

ここに、 M は捨石等の質量、 ρ_r は捨石等の密度、 U は流速、 g は重力加速度、 y はイスバッシュの定数、 S_r は捨石等の水に対する比重、 θ は斜面勾配である。イスバッシュの定数は埋め込まれた石の場合は1.20、露出した石の場合は0.86とされている。

津波の流れに対する被覆材の安定性の検討事例として、岩崎ら²⁾は潜堤のマウンド被覆材にテトラポッドを用いて定常流による断面実験を行っており、イスバッシュの定数として $y = 1.08$ を得ている。また、谷本ら³⁾や作中・有川⁴⁾は釜石港湾口防波堤の開口部の潜堤を対象とした平面実験を行っており、被覆材のイスバッシュの定数を算定している。

イスバッシュの定数は本来ブロック形状に固有の値であるが、津波の流れに対する被覆材の安定性に関する検討事例は未だ少なく、ブロック形状によらず岩崎ら²⁾による値が設計に用いられているのが現状である。耐津波設計の精度向上のためには、ブロック形状ごとのイスバッシュ定数を実験により決定していくことが必要であると考えられる。その際、イスバッシュの式における斜面勾配のとり方や流速の測定位置など不明確な点が多く、実験方法や整理方法によって値が大きく変化することが想定される。また、堤頭部などの複雑な流れ場に対してのイスバッシュ式の適用性も不明である。そこで本研究では、津波の流れに対する被覆材の安定性に関する基礎的な知見を得ることを目的として、台形マウンドでの実験と、堤頭部を再現した実験の2種類の水理模型実験を実施した。前者は現象を単純化した条件、後者はより現地に近い条件という位置づけである。そして、その結果をもとに今後の設計手法の確立に向けた議論を行う。

2. 台形マウンドでの実験

(1) 実験方法

実験には、長さ50 m、幅1.0 m、高さ1.5 mの二次元水

図-1 実験装置の模式図

表-1 被覆ブロック諸元 (括弧内は現地量)

形状図	
長さ L	46.8 mm (2.34 m)
高さ H	16.8 mm (0.84 m)
質量 M	34.7 g (4.34 t)
体積 V	14.4 cm ³ (1.80 m ³)
密度 ρ	240 g/cm ³ (2.40 t/m ³)

槽を使用した。水槽には渦巻きポンプが設置されており、循環流を発生させることが可能である。

図-1に実験装置の模式図を示す。水平なモルタル床の上にマウンドを設置し、ポンプを作動させることにより定常状態の流れを発生させた。十分な流速を発生させるために、仕切り板により水路幅を1mから0.5 mに狭めた。

模型縮尺は1/50とし、実験に関わる諸量はフルードの相似則に従うものとした。実験に用いた被覆ブロック模型の諸元を表-1に示す。ブロック模型はモルタルで製作し、表乾状態の質量が表-1に示す値の±3%以内のものを使用した。マウンド模型の断面図を図-2に示す。マウンドの幅は約1 m、高さ15 cm、斜面勾配は1:2とした。

イスバッシュの定数を求めるためには、ブロックの安定限界時のブロック近傍流速を測定する必要がある。しかし、安定実験と近傍流速の測定は同時に行うことが困難であったため、安定実験と流速測定は別々に実施した。

まず安定実験方法を以下に述べる。台形マウンドでの実験においては流速を上げていく際にポンプの流量は変化させず、水路内の初期水深を 0.5～1.0 cm 刻みで段階的に下げていくことでブロック近傍流速を上げていき、ブロックの安定限界を調べた。流量は使用したポンプの発生可能な最大の流量 (約 7 m³/min) である。流速を上げていく際にはブロックの積み直しは行わず、継続して次のランクの津波を作用させた。津波の作用時間は、流れがほぼ定常となってから現地量で 15 分間 (模型量で 127 秒間) とした。

水路の側壁に接する各 1 列のブロックは観察対象外とし、ブロックが動かないように固定した。なお、上流

図-2 実験断面図 (台形マウンド実験)

図-3 津波作用状況およびブロック離脱状況 (台形マウンド実験, 1 回目)

端・下流端の法先のブロックは固定せずにモルタル床の上に設置した。安定実験は 2 回繰り返し実施した。

流速測定の際には、ブロック同士を連結した状態で安定実験と同じ津波を発生させてブロック近傍流速を測定した。測定位置は図-2 に示すように、下流側のマウンド法肩位置とした。これは安定実験においてブロックの初期被害が発生した箇所である。流速の測定高さは有川ら⁵⁾を参考にブロック天端上 1.5 cm (現地量で 75 cm) とした。電磁流速計を用いて流下方向および鉛直方向の 2 成分の流速 U_x 、 U_z を 0.05 s のインターバルで測定した。

(2) 実験結果

a) 安定実験結果

実験 1 回目は初期水深 41.0 cm から開始し、初期水深 36.5 cm の条件でブロックに被害が生じた。津波作用状況およびブロックの離脱状況を図-3 に示す。ブロックの離脱状況としては、下流側法肩部を挟む 2 つのブロックが「く」の字になるようにして離脱し、下流側へ流された。その後急激に被害が拡大し、ほぼマウンド全体にわたってブロックおよび砕石が流出した。2 回目の実験は初期水深 38.5 cm から開始した。ブロックに被害が生じたのは 1 回目の実験と同じ津波ランクであり、ブロックの離脱状況も 1 回目と同様であった。マウンド天端部の最も下流側のブロックには図-3 に示すように下流側

図-4 水位の空間分布

図-5 ブロック近傍流速の時系列 (初期水深 37.0cm)

へ滑動する方向に抗力が作用するとともに、法肩近傍の流線が上に凸の曲率を持つことにより法肩付近の圧力が低下し、離脱する方向の力がブロックに作用していた可能性がある。

b) 流速測定結果

初期水深ごとの水位の空間分布を図-4に示す。水位は解析対象とした127秒間の平均値である。水路内の初期水深を下げていくと、上流側の水位は概ね変化せず、下流側の水位が低下していくことがわかる。安定限界の条件である初期水深 37.0 cm のときの下流側法肩位置における流速の時系列を図-5に示す。解析対象とした127秒間(現地量で15分間)は概ね一定の流速であることが確認できる。初期水深と水平流速の関係を図-6に示す。流速は解析対象とした127秒間の平均値である。初期水深を下げていくことで下流側の水位が低下するため、下流側の法肩位置での流速が大きくなっている。また、別途測定した下流側法肩位置における流速の鉛直分布を図-7に示す。これは定常状態となった後に流速計を鉛直方向に動かしながら測定したものであり、30秒間の平均値である。本研究では暫定的にブロック天端上 1.5 cm (現地量で 75 cm) の流速をイスバッシュ定数の算定に用いることとしたが、図-7からわかるように測定高さによる流速の変化はブロック近傍では特に大きくなっており、イスバッシュ式で用いる流速の測定高さを明確に定めることが重要であることがわかる。

c) イスバッシュ定数の算定

安定限界時のブロック近傍流速を用いて、被覆ブロックのイスバッシュ定数を算定した結果を表-2に示す。

図-6 初期水深と水平流速の関係

図-7 下流側法肩位置における流速の鉛直分布

表-2 イスバッシュ定数の算定結果 (台形マウンド実験)

	1回目	2回目
ブロック近傍流速 U (m/s)	1.69	1.69
ブロック質量 M (kg)	0.0347	
ブロックの密度 ρ_r (kg/m ³)	2400	
ブロックの水に対する比重 S_r	2.40	
斜面勾配 θ (deg)	0	
重力加速度 g (m/s ²)	9.8	
イスバッシュ定数 y	1.86	1.86

現状ではイスバッシュ式における斜面勾配のとり方が明確ではないため暫定的ではあるが、法肩を挟む天端と法面のブロックが同時に離脱したことから、 $\theta = 0^\circ$ としてイスバッシュ定数を算定した。その結果イスバッシュ定数として $y = 1.86$ が得られた。なお $\theta = 26.6^\circ$ (勾配 1:2) として算定すると、 $\theta = 0^\circ$ とした場合と比べてイスバッシュ定数は約 1.5 倍の値となる。

3. 堤頭部を再現した実験

(1) 実験方法

実験装置や水路内の配置は台形マウンドでの実験と同じであるが、本実験に先立ちインバーター盤を設置し、インバーターの周波数でポンプの流量制御を行えるようにした。刃形堰を越流させて別途測定したインバーター周波数と流量の関係を図-8に示す。

模型縮尺は1/50とし、使用したブロック模型は台形断

面での実験と同じ質量34.7 gの被覆ブロックである。堤体の平面図および断面図を図-9に示す。本実験はケーソンを回り込む津波の流れに着目して安定性を検討するものであるため、津波が越流しないようにケーソンは十分高く設定した。ケーソンと根固方塊の模型は木製であり、津波の流れによって動かないように水路壁に固定した。マウンド上の被覆ブロックとガラス壁に生じる隙間は鉄柱等で埋めて、石が抜け出ないようにした。また、上流端・下流端の法先のブロックは固定せずにモルタル床上に設置した。初期水深を30 cm, 40 cm, 50 cmに変えた3ケースの実験を行った。

台形マウンドでの実験と同様に、安定実験と流速測定実験は別々に実施した。台形マウンドでの実験では水路内の初期水深を下げていくことでブロック近傍流速を上げていったが、本実験では初期水深は固定してポンプのインバーター周波数を2 Hzずつ上げていくことで流量を段階的に大きくし、ブロックの安定限界を調べた。流速を上げていく際にはブロックの積み直しは行わず、継続して次のランクの津波を作用させた。津波の作用時間は、流れがほぼ定常となった後から現地量で15分間とした。

流速測定実験では、安定実験においてブロックに離脱が生じた1ランク手前の条件の流れを発生させてブロックの近傍流速を測定した。ケーソンを回り込む3次元的な流れ場を把握するために、設置した全ての被覆ブロック上で流速を測定した。測定高さはブロック天端上1.5

図-8 インバーター周波数と流量の関係

図-9 堤体模型の平面図と断面図 (堤頭部実験)

cm (現地量で75 cm) とし、直軸型とL型の2種類の電磁流速計を用いて0.01 sのインターバルでx, y, zの3方向の流速 (座標系は図-9を参照) を測定した。計測時間は流れが定常状態となった後の20秒間とし、流速計の位置を動かしていくことで各測点での流速を測定した。

(2) 実験結果

a) 安定実験結果

まず初期水深 30 cm の結果を示す。インバーター周波数 20 Hz から実験を開始し、インバーター周波数 26 Hz でブロックに被害が生じた。ブロックの離脱状況を図-10に示す。ブロックの離脱の形態は台形マウンドでの実験と類似しており、下流側マウンド稜線部を挟む2つのブロックが「く」になるようにして離脱し、下流側へ流された。その後急激に被害が拡大し、ほぼマウンド全体にわたってブロックおよび碎石が流出した。

初期水深 40 cm のケースではインバーター周波数 30 Hz から実験を開始し、インバーター周波数 42 Hz でブロックに被害が生じた。最初にブロックの離脱が発生した箇所や被災の状況は、初期水深 30 cm のケースとほぼ同じであった。

図-10 津波作用状況およびブロック離脱状況 (堤頭部実験, 初期水深 30 cm)

図-11 津波作用状況およびブロック離脱状況 (堤頭部実験, 初期水深 50 cm)

初期水深 50 cm のケースはインバーター周波数 36 Hz から実験を開始し、インバーター周波数 44 Hz でマウンド天端のケーソン際のブロック 1 個が単独で離脱した。ブロックの移動状況としては、図-11 に示すようにブロックの上流側の脚が浮き上がり回転しながら離脱し、その後そこから石が数個抜け出した。次の津波ランク（インバーター周波数 46Hz）では、離脱した箇所の下流側のブロック 2 個が同じように離脱した。その後、発生可能な最大の流量まで実験を継続したが、石の抜け出しは多少見られたものの、ブロックの移動やマウンドの変形は生じなかった。このように初期水深 50 cm のケースは 30 cm, 40 cm の場合とはブロックの初期移動の発生箇所や被害の進行の様子などが異なっていた。

b) 流速測定結果

それぞれのケースでブロックに離脱が生じた 1 ランク手前の条件で測定した、各被覆ブロック上の水平方向の流速ベクトル U_x , U_y の分布と、岸沖断面（図-9 に示す B-B 断面）における断面方向の流速ベクトル U_x , U_z の分布をそれぞれ図-12, 図-13 に示す。どのケースについても、ケーソンを回り込むような流れが生じていることがわかる。また、初期水深 30 cm と 40 cm のケースについては下流側のマウンド稜線部で流速が最大となっており、ブロックの離脱が最初に発生した箇所と対応していることがわかる。離脱発生箇所の流速の絶対値 $|U| = (U_x^2 + U_y^2 + U_z^2)^{0.5}$ は、初期水深 30 cm のケースは 1.71 m/s, 40 cm のケースは 1.88 m/s であった。

一方、初期水深 50 cm のケースは他のケースと比較し

て全体的に流速が小さいことがわかる。ケーソンの存在により流れが集中したと思われるケーソンの上流側の角付近では比較的流速が大きくなっており、これはブロックの離脱箇所とも概ね対応しているが、離脱箇所の流速の絶対値は 1.09 m/s と他のケースと比較してかなり小さい流速であった。離脱箇所付近の流速分布（図-12）を見ると、流れがケーソンを回り込む際にケーソンの角から時計回りの渦が生じている様子がうかがえる。他の初期水深の条件にも同様の傾向が見られるが、水深が深いほど顕著に現れているようであり、ブロックの離脱と関連している可能性がある。

c) イスバッシュ定数の算定結果

ブロックが離脱した 1 ランク手前の条件でのブロック近傍流速を用いて、各ケースのイスバッシュ定数を算定した。初期水深 30 cm と 40 cm のケースではマウンドの稜線部（下流側の法面と手前側の法面の交線）から離脱が生じており、やはりイスバッシュ式における斜面勾配 θ のとり方が問題となる。流れの方向は水路手前側の法面とほぼ平行であり、流れの方向に対する手前側の法面の勾配はほぼゼロであることから、暫定的に $\theta = 0^\circ$ としてイスバッシュ定数を算定した。

イスバッシュ定数の算定結果を表-3 に示す。異なる移動形態であった初期水深 50 cm のケースはイスバッシュ定数が 1.20 と小さいが、ブロックが離脱した後の被害は殆ど進行しない。この移動形態のメカニズムに関しては、上で述べたようなケーソン角で発生する渦やそれに伴う局所的な圧力低下の影響等が考えられるが、メカ

図-12 被覆ブロック上の流速分布

図-13 岸沖断面の流速と水位の分布

ニズムの詳細や発生する条件などについては今後の課題である。

一方、移動形態がほぼ同じであった初期水深 30cm と 40cm の 2 ケースは、算定されたイスバッシュ定数もそれぞれ 1.88 と 2.06 となっており比較的近い値が得られていることがわかる。また、これらの値は台形マウンドでの実験から得られたイスバッシュ定数 1.85 と比べても同程度の値となった。今回の実験で得られたイスバッシュ定数の値は既往の研究における値よりもかなり大きい。今回用いた被覆ブロックは大きな開口部を有し揚力が小さいことから、流れに対して比較的離脱しづらいためであると考えられる。

4. まとめ

本研究により得られた知見と、設計手法の確立に向けた課題を以下に示す。

まず斜面勾配に関しては、イスバッシュ定数を決定する実験において、今回の結果のように法肩部から離脱した場合の斜面勾配の扱いを検討する必要がある。これについては、設計においてイスバッシュの式から所要質量を算定する際の勾配のとり方と整合させることが必要である。また、イスバッシュ式における斜面勾配に関する部分の式形が妥当であるかの検証はまだ十分でない。防波堤を越流する津波に対するブロックの安定性に関する著者ら⁹⁾の検討では、CERC によるイスバッシュ式では斜面勾配の影響が効きすぎることがわかっており、流れに対する安定性に関しても同様である可能性がある。本研究では勾配 1:2 の条件のみで実験を行ったが、今後、斜面勾配を変えた実験が必要と考えられる。

流速に関しては、イスバッシュ定数を決定する際の実験において流速の測定位置を統一するとともに、設計で用いる際の流速とも整合させる必要がある。通常の耐津波設計においては、シミュレーションにより算定される流速は断面平均流速であるため、断面平均流速からブロック近傍流速に換算することができれば、より精度の高い算定が行えると考えられる。

表-3 イスバッシュ定数の算定結果（堤頭部実験）

初期水深 h (cm)	30	40	50
ブロック近傍流速 U (m/s)	1.71	1.88	1.09
ブロック質量 M (kg)	0.0347		
ブロックの密度 ρ_r (kg/m ³)	2400		
ブロックの水に対する比重 S_r	2.40		
斜面勾配 θ (deg)	0		
重力加速度 g (m/s ²)	9.8		
イスバッシュ定数 y	1.88	2.06	1.20

堤頭部実験の水深が深い条件で見られた、ケーソン際からのブロックの離脱に関しては、そのメカニズムやこの移動形態が発生する条件などを明らかにすることも今後の課題である。

参考文献

- 1) Coastal Engineering Research Center : *Shore Protection Manual*, U.S.Army Corps of Engrs., U.S.Govt. Printing Office, Vol. II, pp.7_213-7_216, 1977.
- 2) 岩崎敏夫, 真野明, 中村武弘, 堀越伸幸: 潜堤のマウンド材およびプレバックド堤に作用する定常流体力に関する実験的研究, 海岸工学講演会論文集, Vol.31, pp.527-531, 1984.
- 3) 谷本勝利, 木村克俊, 宮崎啓司: 津波防波堤開口部潜堤の安定性に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, Vol.27, No.4, pp.93-121, 1988.
- 4) 作中淳一郎, 有川太郎: 防波堤開口部の耐津波安定性についての実験ならびに数値計算, 港湾空港技術研究所資料, No.1274, 26p, 2013.
- 5) 有川太郎, 佐藤昌治, 下迫健一郎, 富田孝史, 廉慶善, 丹羽竜也: 津波越流時における混成堤の被災メカニズムと腹付工の効果, 港湾空港技術研究所資料, No.1269, 37p, 2013.
- 6) 三井順, 松本朗, 半沢稔: イスバッシュ式の導出過程と防波堤を越流する津波への適用性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp.I_1063-I_1068, 2015.
- 7) 浜口正志, 久保田真一, 松本朗, 半沢稔, 山本方人: 大きな開口部を有する新しい被覆ブロックの開発と人工リーフへの適用, 海岸工学論文集, Vol.54, pp.961-965, 2007.

(2017.3.15 受付)

STABILITY OF ARMOR UNITS AGAINST TSUNAMI-INDUCED CURRENT

Jun MITSUI, Shin-ichi KUBOTA and Akira MATSUMOTO

Two kinds of hydraulic model experiments with trapezoidal mound and breakwater head were conducted to obtain fundamental knowledge on the stability of the armor units against the tsunami-induced current. Two failure modes of the armor units such as the damage originated from the ridgeline of the mound on the downstream side and the damage at the top of the mound near the caisson edge were observed. It was suggested that the Isbash's constant at the stability limit varies depending on the failure mode and the latter failure mode may be caused by factors other than drag force. Regarding the application of the Isbash formula, strict definition of the slope angle and measurement position of the flow velocity should be investigated in the future.