

津波の流れに対する防波堤マウンド被覆ブロックの イスバッシュ数の検討

一般社団法人漁港漁場新技術研究会

三井 順
間 井 文
岡野 本
谷 知 樹
加 藤 孝 輔
河 村 裕 之
西 村 博 一

目 次

1. はじめに	59	5. 断面二次元実験の結果	62
2. イスバッシュの式と適用における課題	59	5-1 被災形態の分類	62
2-1 イスバッシュの式とその成り立ち	59	5-2 フルード数の影響	62
2-2 適用における課題	60	5-3 イスバッシュ数の算定図の作成例	63
3. 基礎実験の実施と実験方法マニュアルの 作成	60	5-4 各種被覆ブロックのイスバッシュ数	63
3-1 基礎実験の実施	60	6. 所要質量の試算	64
3-2 実験方法マニュアルの作成	61	7. 堤頭部実験	64
4. 各種ブロックでの断面二次元実験の実施	61	7-1 実験方法	64
4-1 実験方法	61	7-2 堤頭部の影響	65
4-2 実験結果の整理方法	62	8. おわりに	65

1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震津波を契機に、津波に対する漁港施設の安定性に関して多くの検討が行われてきた。防波堤の基礎マウンドを保護する被覆ブロックについても、想定する津波に対して流出しないように、適切な質量のブロックを用いる必要がある。

防波堤を越流する津波に対しては、越流水深とブロック固有の安定数を用いた所要質量の算定法が確立されつつある¹⁾²⁾。一方、防波堤を回り込む津波の流れに対する被覆ブロックの安定性については、CERCによるイスバッシュの式³⁾が通常用いられている。しかし、このイスバッシュ式の適用にあたっては不明な点が多く、設計方法は確立されていないのが現状である。

本論文では、津波の流れに対するマウンド被覆ブロックの設計手法に関して、著者らが取り組んできた一連の検討内容を述べる。

2. イスバッシュの式と適用における課題

2-1 イスバッシュの式とその成り立ち

津波の流れに対するマウンド被覆ブロック等の所要質量は、以下に示すイスバッシュの式を用いて算定される。

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

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 は傾斜角である（図－1）。被覆ブロックの

イスバッシュ数 y の値としては、岩崎ら⁴⁾の実験による定数1.08が一般的に用いられている。

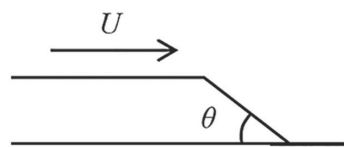


図-1 イスバッシュ式における流速と傾斜角の模式図

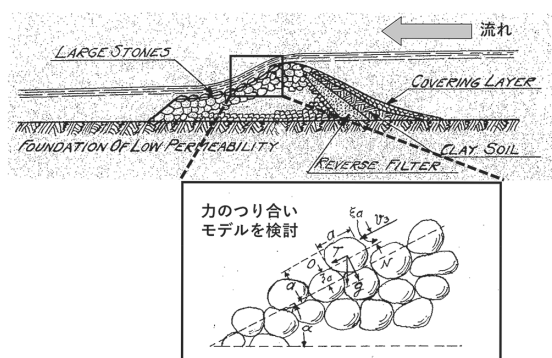


図-2 イスバッシュ式の成り立ち (Isbash⁵⁾より引用、加筆)

このイスバッシュの式は、元来、水面から石を投入して河川を締切り、ダムを建設する際の、石の質量と移動限界流速との関係について、1930年代にIsbash⁵⁾により提案された式が基となっている。

図-2に示すように、堆積した斜面上の石に対して、流れの抗力によるモーメントと抵抗モーメントとのつり合いをモデル化することで、導出されている。

2-2 適用における課題

式(1)からわかるように、イスバッシュ式により得られる所要質量は、同じ流速でも斜面の傾斜角によって変化する。傾斜角の影響を、水平の場合の所要質量に対する比として表すと、図-3のようになる。傾斜角が急になるほど所要質量は大きくなり、45°で無限大となる。例えば水平部での所要質量が1 tonの場合、法面勾配1:1.5の斜面部での所要質量は47tonとなる。

式(1)の式形として傾斜角45°で所要質量が無限大となることは、石の安息角が約40°であることと概ね整合しているものと考えられる。しかし、被覆ブロックのようなせりもちを有する形状の材料に適用する場合、傾斜角

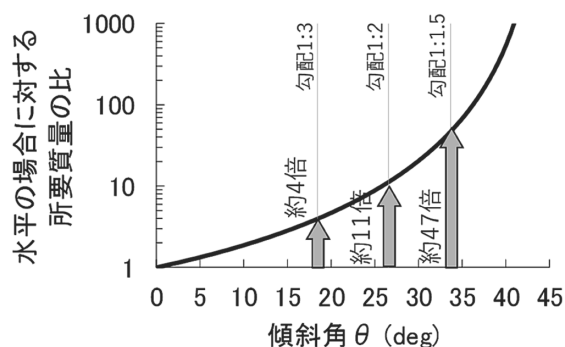


図-3 イスバッシュ式における傾斜角の影響

の影響が過大に評価されている可能性が考えられた。また、設計実務においても斜面部の所要質量が非現実的に大きな値となることがあり、課題であった。

その他にも、ブロックごとのイスバッシュ数を評価する際の流速の定義（測定位置など）があいまいであるといったこと等もあり、ブロック固有のイスバッシュ数を適切に評価するための統一的な実験手法の確立も課題であった。

3. 基礎実験の実施と実験方法 マニュアルの作成

3-1 基礎実験の実施

上記の課題の解決に向けて、まず津波の流れに対する被覆ブロックの安定性に関する基礎的な特性を把握するための水理模型実験を実施した⁶⁾ (図-4)。



図-4 基礎実験状況

実験は方塊ブロックを対象として実施し、その結果以下のような知見が得られた。

イスバッシュ式を被覆ブロックの所要質量に適用する場合は、傾斜角が大きくなることによる所要質量の増大が過剰に評価されるこ

とがわかった。したがってイスバッシュ式を用いて所要質量を適切に算定するためには、イスバッシュ数を傾斜角の関数とする必要がある。

ブロック近傍の流速を用いてイスバッシュ数を評価した方が断面平均流速を用いるよりもデータのまとまりが良いが、多少バラツキは大きくなるものの、設計との整合性を優先して断面平均流速を用いるのが良いと考えられる。

3-2 実験方法マニュアルの作成

基礎実験の結果を反映し、適切なイスバッシュ数を得るための標準的な実験方法をマニュアルとして取りまとめた⁷⁾。

本マニュアルの特徴として、従来一定値であったイスバッシュ数を傾斜角およびフルード数によって決まる値として整理したことが挙げられる。また、イスバッシュ数を評価する際の流速は、被災箇所における断面平均流速を用いることとした。

4. 各種ブロックでの断面二次元実験の実施

4-1 実験方法

上述のマニュアルに則り、各種被覆ブロックの実験を実施した。

実験装置は断面二次元水路を用い、ポンプにより水路内に定常流を発生させた(図-5)。基礎実験と同様に、台形形状のマウンドを対象とし、被覆ブロックの安定限界流速を調べた。

実験断面の模式図を図-6に、実験条件を表-1に示す。マウンドの法面勾配は1:1.5、1:2、1:3の3種類とし、マウンド天端幅は現地量で50m程度相当、マウンド厚さは現地量で5m程度または斜面上にブロックが3個分以上設置される厚さとした。ブロック質量は大小2種類とした。

本実験はブロックの初期被害に着目するものであるため、実験ケースごとの堤体の積み直し作業の効率を考慮して、マウンド模型は碎石を接着剤で固定して作成しても良いこととした。ただし、接着剤で固定する場合にも

マウンド模型は透水性を確保するように留意した。

マウンド法先の根押えブロックと水路床との摩擦係数を統一する観点から、ブロックと水路床の間にゴムシートを設置した。現地の地盤条件は様々であるが、比較的滑動が生じやすい危険側の実験条件と考えられる。

水深条件については、幅広いフルード数でイスバッシュ数を評価できるように、水路内の初期水位を3種類程度変化させて実験を行った。

安定実験と流速測定実験を同時に行うのは困難であるため、まず安定実験によりブロックの離脱箇所や安定限界時の流量を調べ、その後、流速測定実験を別途行った。

また、各ケース2回以上繰り返し実験を行い、同一条件の実験結果については平均値で整理した。

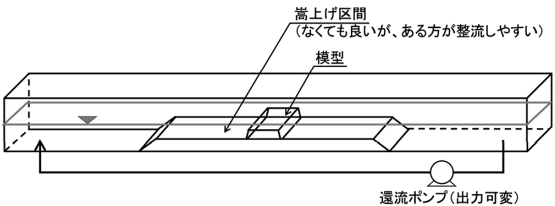


図-5 実験水路の模式図

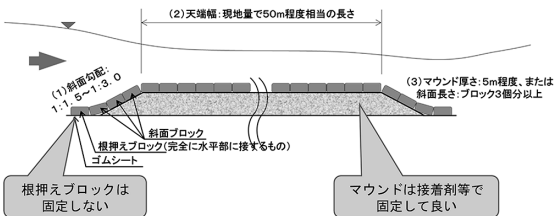


図-6 マニュアルにより定めた実験断面

表-1 実験条件

ブロック質量	2種類
マウンド法面勾配	3種類 (1:1.5、1:2、1:3)
水深条件	3種類程度 (幅広いフルード数となるように)
繰り返し	各ケース2回以上

安定実験では、図-7に示すようにポンプの流量を段階的に上げていくことでブロックの安定限界となる条件を調べた。流速測定実

験では、ブロック模型が動かないように固定した状態で、安定実験で得られた安定限界の状態を再現し、ブロック離脱箇所の流速および水位を測定した。

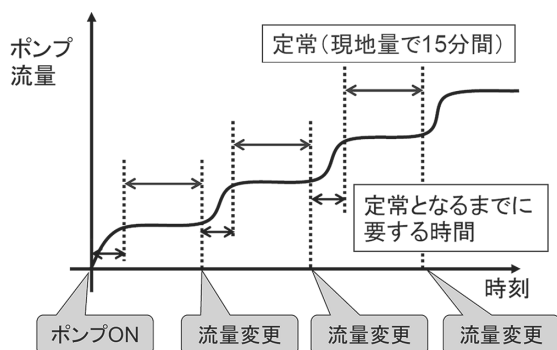


図-7 安定実験時のポンプ流量変化

4-2 実験結果の整理方法

イスバッシュ数の評価対象位置は、ブロックの初期離脱が生じた箇所とした。また、イスバッシュ数の算定に用いる流速は、評価対象ブロック位置における断面平均流速を用いた。

また、次式によりフルード数を算出した。

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh'}} \quad (2)$$

ここに、 U は対象位置における断面平均流速、 h' は対象位置におけるブロック天端上水深である。

5. 断面二次元実験の結果

5-1 被災形態の分類

各種被覆ブロックの被災形態を整理した。下流側法面での被災を対象とし、天端部（傾斜角 0° ）のデータは除外した。なお、いずれのブロックも上流側法面での被災は生じなかった。

被災形態は図-8に示すように、(a)法肩部のブロックが回転して被災する「めくれ・転倒」、(b)法面全体のブロックが滑動して被災する「滑動」、(c)法先のブロックのみ滑動して被災する「法先滑動」の3種類に分類した。

12種類のブロックごとに各被災形態の割合を調べた結果を図-9に示す。法面勾配1:1.5

の条件では「めくれ・転倒」による被災が大部分であり、勾配が緩くなるにつれて「滑動」や「法先滑動」の割合が増えていくことがわかる。また被覆ブロックの種類ごとに、生じやすい被災形態が異なっていることがわかる。これはブロックの形状によって、抗力成分と揚力成分のどちらが卓越するかといった、流体力の特性が異なること等が影響しているものと考えられる。

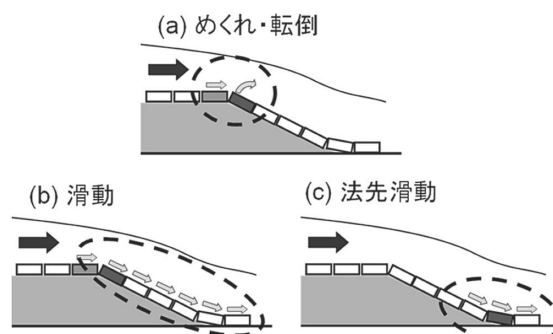


図-8 被災形態の分類

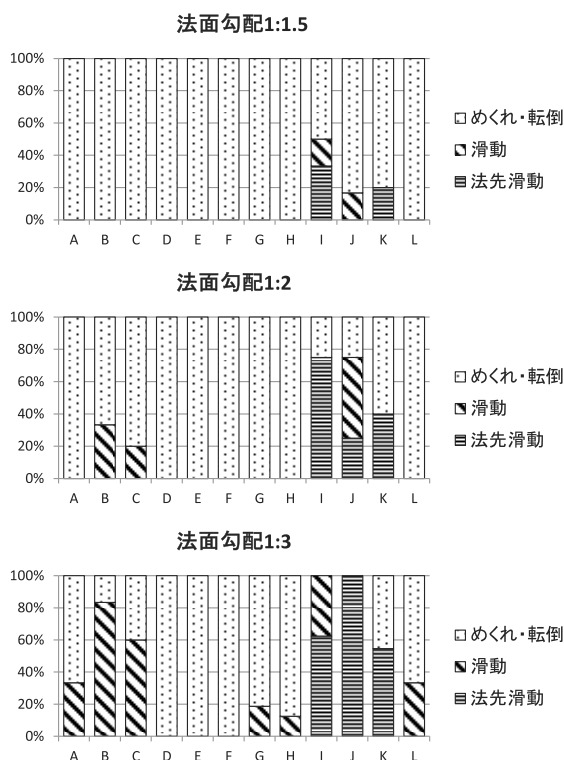


図-9 被災形態の割合(A～Lはブロック種類を表す)

5-2 フルード数の影響

図-10に示す形状の被覆ブロックの実験結果を例に取り、フルード数がイスバッシュ数に及ぼす影響を述べる。

安定限界時のフルード数とイスバッシュ数の関係の例を図-11に示す。イスバッシュ数には傾斜角の影響が含まれるため、同じ傾斜角のデータについてフルード数とイスバッシュ数の関係を見ると、いずれもフルード数が1.6付近を超えたあたりでイスバッシュ数が低下する傾向が見られる。

フルード数の増加によりイスバッシュ数が低下するメカニズムを考察する。流量の変化に伴う流れの状況例を図-12に示す。流量が小さいときは、水面形状は比較的水平に近いが、流量が大きくなりフルード数が大きくなるにつれて下流側の水深が浅くなり、水面形はマウンドに沿うように曲率を持つようになる。その結果、法肩付近のブロックには遠心力が作用し、法面のブロックには斜面下流側への抗力が大きく作用するようになり、被災しやすくなったものと考えられる。

なお、フルード数の影響に関しても、ブロック形状によって多少異なっており、形状ごとに流体力の特性が異なること等が影響していると考えられる。

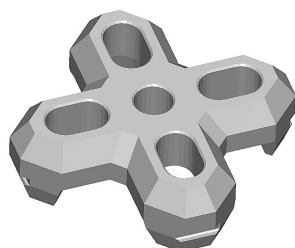


図-10 使用ブロック例

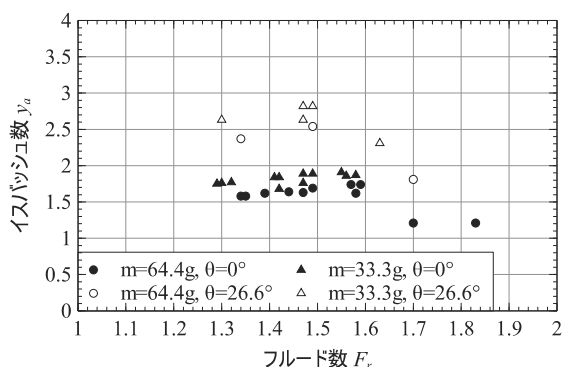
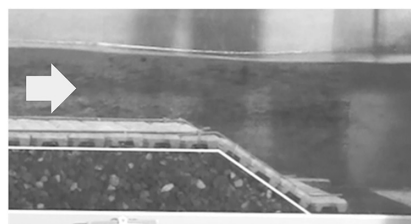


図-11 フルード数とイスバッシュ数の関係の例

5-3 イスバッシュ数の算定図の作成例

例として、イスバッシュ数の算定図の例を図-13に示す。図中の白抜きのデータが各

流量小:フルード数小



流量大:フルード数大

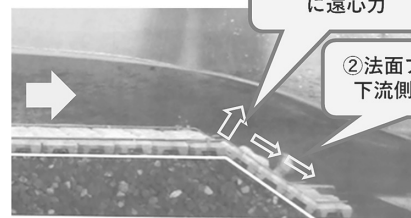


図-12 流量の増加に伴う水面形の変化

ケースの安定限界時のイスバッシュ数であり、安全側の算定となるように、実験データの下限値を上回らないようにイスバッシュ数の算定線を定めた。図の例ではフルード数1.6で場合分けをしているが、場合分けの仕方についてはブロック種類ごとに異なる。

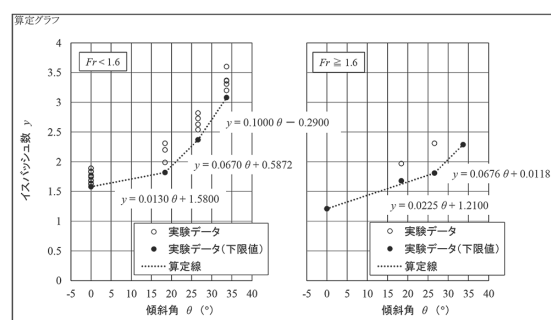
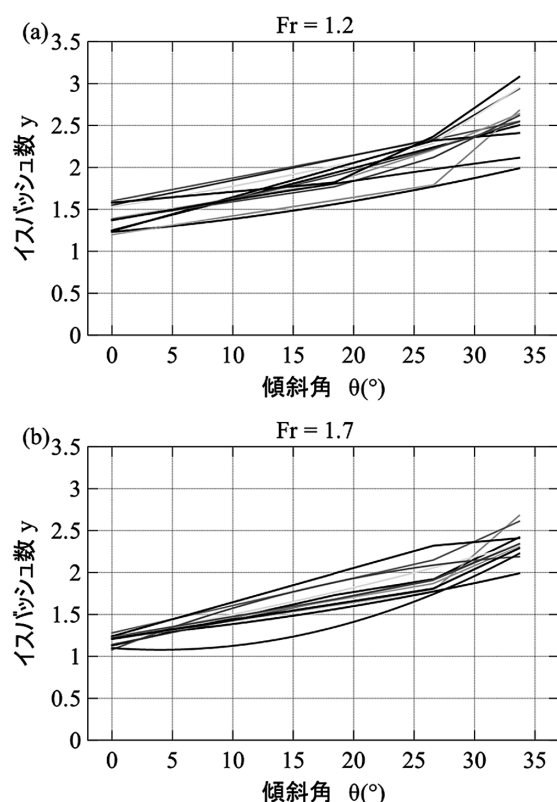


図-13 イスバッシュ数の算定図の例

5-4 各種被覆ブロックのイスバッシュ数

各種被覆ブロックのイスバッシュ数の算定図をまとめて図-14に示す。フルード数の場合分けはブロックごとに異なるため、フルード数が小さな条件として $Fr=1.2$ と、大きな条件として $Fr=1.7$ の2種類に対して図示する。全体的な傾向として、傾斜角が大きくなるほどイスバッシュ数が大きくなっていることがわかる。これは方塊ブロックでの基礎実験の結果と同じ傾向である。また、フルード数の影響については、ブロック形状によって多少傾向が異なるが、全体的にはフルード数が大きい方がイスバッシュ数は小さくなる傾向と

なった。



図ー 14 各種被覆ブロックのイスバッシュ数
(a) $Fr = 1.2$ 、(b) $Fr = 1.7$

6. 所要質量の試算

新たに実験により得られたイスバッシュ数を用いて、所要質量の試算を行った。検討条件は、流速10m/s、フルード数1.7、斜面勾配1:2の条件と仮定した。

算定結果を表ー2に示す。今回得られたイスバッシュ数を用いることにより、流速10m/s程度まで現実的なブロック質量に収まることわかる。

表ー 2 所要質量の試算例 ($U=10$ m/s, $Fr=1.7$)

(単位: ton)			
	天端部 ($\theta=0^\circ$)	斜面部 ($\theta=26.6^\circ$)	大きい方
$y=1.08$ (岩崎ら、参考文献)			
各ブロックのy			
Aブロック	38.9	19.1	38.9
Bブロック	19.4	9.7	19.4
Cブロック	24.6	12.7	24.6
Dブロック	48.2	34.2	48.2
Eブロック	53.8	11.6	53.8
Fブロック	24.4	30.8	30.8
Gブロック	25.9	22.4	25.9
Hブロック	24.6	19.7	24.6
Iブロック	23.5	6.2	23.5
Jブロック	27.2	27.3	27.3
Kブロック	28.6	29.2	29.2
Lブロック	41.0	19.2	41.0

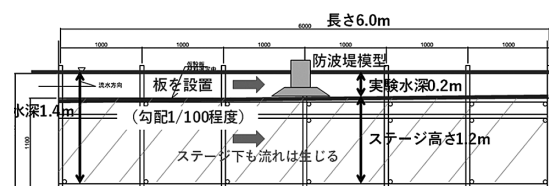
7. 堤頭部実験

7-1 実験方法

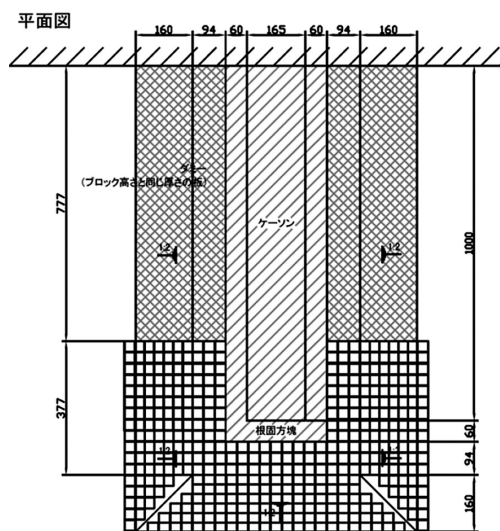
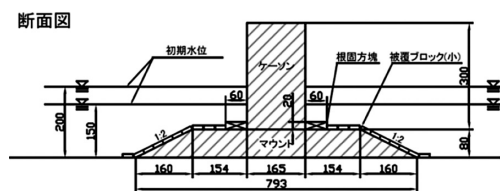
上述した内容は防波堤堤幹部を対象とした検討であるが、堤頭部では三次元性を有する複雑な流れ場となることから、水槽側壁が流れに影響を及ぼす断面二次元水路実験から得られるイスバッシュ数と異なる可能性が考えられる。そこで、(国研) 水産研究・教育機構水産技術研究所所有の回流水槽(図ー15)を用いて、防波堤堤頭部を対象とした基礎的な実験を行い、方塊ブロックの安定性における三次元性の影響を検討した。水路幅は2.8mであり、水路内に高さ1.2mのステージを設置し、その上に防波堤模型を設置した。水路両側には模型転落防止用の衝立を設置したため、実験に使用した水路幅は2.1m程度である。実験には方塊ブロックを用い、防波堤堤頭部および堤幹部のブロックの配置は図ー16のとおりである。

模型縮尺は基礎実験と同じ1/80とし、方塊ブロックもほぼ同じサイズのものを使用した。堤頭部実験では、水路幅の片側に延長1mのケーソン模型を設置し堤頭部のマウンドは堤幹部と同じ幅とした。堤幹部実験ではケーソン模型は設置せず、水路幅全体にマウンド模型を設置した。それぞれの断面で水路内の初期水深は、防波堤設置位置で15cmと20cmの2種類とした。マウンドの厚さは8.0cm、斜面勾配は1:2とした。マウンド・ケーソン・根固方塊の模型は、流れにより動かないように固定した。マウンド模型は木製であり、マウンド表面とブロックとの間の透水性が確保できるように、マウンドの表面に厚さ1cm程度の透過性のマットを設置した。

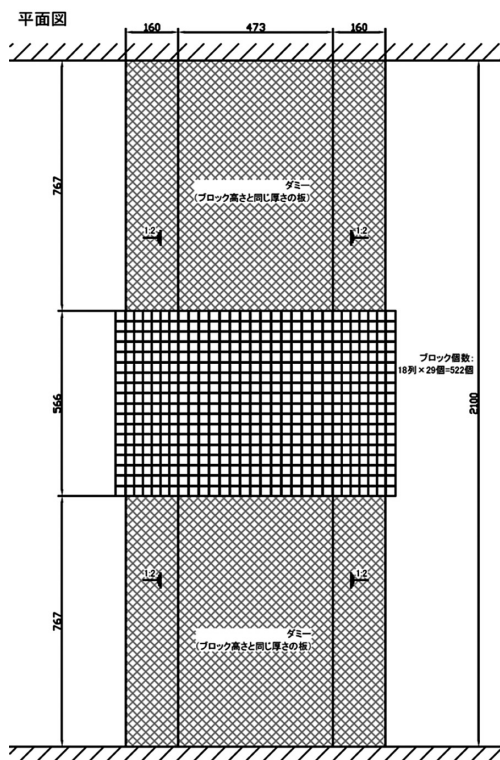
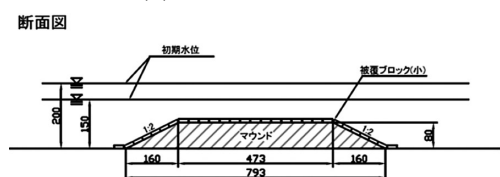
安定実験および流速測定実験は、断面二次元実験と同様の手順で行った。



図ー 15 回流水槽の断面図



(a) 堤頭部実験の場合



(b) 堤幹部実験の場合

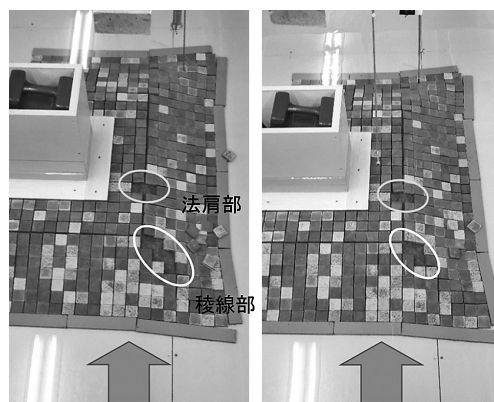
図-16 ブロックの配置図(ブロック小の場合)

7-2 堤頭部の影響

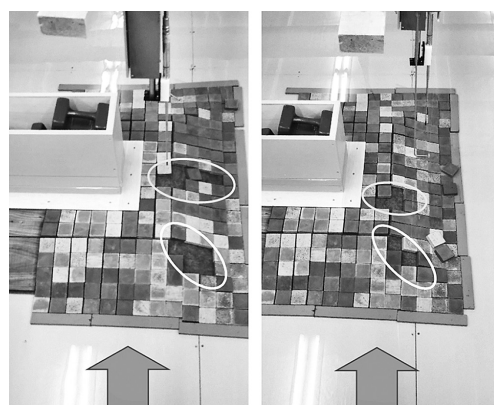
図-17は堤頭部実験の被災状況を示す。被災形態はめくれであり、ブロックの被災箇所は上流側のマウンド稜線部（以下、稜線部）と防波堤先端のマウンド法肩（以下、法肩部）の2か所に分かれることを確認した。ポンプの流量を段階的に上げると最初に稜線部のブロックが被災し、さらに流量を上げると法肩部のブロックが被災した。この一連の状況は、初期水深やブロックの大小の条件に関わらず同じ傾向であり、それぞれの箇所での流速測定実験を行った。

堤幹部実験では、全ケースで下流側の法肩が被災し、被災形態はめくれである。この結果から、断面二次元実験の場合と同じ形態であることが確認できた。

図-18は堤頭部実験と堤幹部実験の安定限界時のブロック近傍流速を比較した結果である。図-18(a)の堤頭部実験における稜線部の近傍流速は、全ての条件で堤幹部実験よりも小さい。また、図-18(b)の法肩部の流速と比べても小さく、稜線部のブロックの安定性が



(a) ブロック小(左:初期水深15cm、右:初期水深20cm)



(b) ブロック大(左:初期水深15cm、右:初期水深20cm)

図-17 堤頭部実験の被災状況

最も低い結果となった。

一方、図-18(b)の法肩部の流速は、堤幹部実験と同等であり、堤頭部の影響はそれほど大きくなさそうである。

稜線部の安定性について考察すると、稜線部は早い段階で被災したが、これは方塊ブロックの不陸の影響が考えられる。実験では木製のマウンドを使用したため、稜線上のブロックは不安定な状態となっていた。しかし、現地のマウンドは捨石で構成され稜線部はなだらかであることや、被覆ブロックでは方塊ブロックとは異なり脚がついているため不陸が生じづらいことが想定される。このため、実験による稜線部の安定性は過小評価となっている可能性がある。実験結果から、現地の施工においては、稜線部に不陸や隙間等が生じないように留意すべきであることが示唆された。

稜線部についてはマウンドの材料や配置方法の影響を受けるため、より詳細な検討が必要であると考えられる。

8. おわりに

本研究では、津波の流れに対するマウンド

被覆ブロックの所要質量算定方法の検討を行った。実験結果に基づいて得られた各種被覆ブロックのイスバッシュ数の算定図を用いることで、従来手法に比べて精度良く所要質量が算定できると考えている。各ブロックのイスバッシュ数の実験結果や算定図等については、漁港漁場新技術研究会のHP⁷⁾に掲載しているので、参照頂きたい。

なお、本論文に記載したイスバッシュ数の適用にあたっては、想定する現地の条件が実験を実施した条件の範囲内であるか、十分注意する必要がある。

また、堤頭部実験により、三次元性の影響を検討した。ブロックの被災箇所は稜線部と法肩部に分かれ、法肩部のブロックの安定性は堤幹部と概ね同程度であったが、稜線部は安定性が低く、不陸の影響が示唆された。

堤頭部実験結果については今後詳細な分析を行い、堤頭部におけるブロックの安定性について整理するなど、耐津波設計手法の確立の一助となるよう、今後も引き続き取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 三井順・松本朗・半沢稔・灘岡和夫：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. I_956-I_960, 2013.
- 2) (一社)漁港漁場新技術研究会：津波越流に対する防波堤腹付マウンド被覆ブロックの所要質量算定マニュアル, 平成26年8月, 2014.
- 3) Coastal Engineering Research Center : Shore Protection Manual, U.S.Army Corps of Engrs., Vol. II, pp.7_213-7_216, 1984.
- 4) 岩崎敏夫・真野明・中村武弘・堀越伸彰：潜堤のマウンド材およびプレパックド堤に作用する定常流流体力に関する実験的研究, 第31回海岸工学論文集, pp.527-531, 1984.
- 5) Isbash S.V. : Construction of Dams by Dumping Stones into Flowing Water, Sci. Res. Inst. Hydrotech. Leningrad, 1932.
- 6) 三井順・間辺本文・大井邦昭・岡野谷知樹・平山隆幸・松下紘資・古市尚基・大村智宏：津波の流れに対する被覆ブロックのイスバッシュ数の特性に関する水理模型実験, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol. 75, No. 2, pp. I_367-I_372, 2019.
- 7) (一社)漁港漁場新技術研究会 自然との共生部会 異形ブロック専門部会, <http://aitef.or.jp/division71.html>

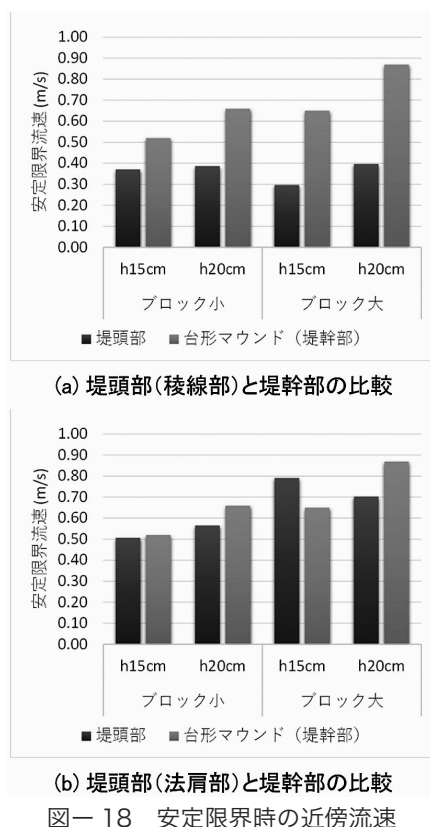


図-18 安定限界時の近傍流速