

第20回全国漁港漁場整備技術研究発表会

2022年11月9日

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
自然との共生研究部会 異形ブロック専門部会

三井 順 間辺本文 岡野谷知樹 加藤孝輔

○河村裕之 西村博一

本研究内容

1. はじめに
2. イスバッシュの式と適用における課題
3. 基礎実験の実施と実験方法マニュアルの作成(2018)
4. 各種ブロックでの断面二次元実験の実施(2019~)
5. 断面二次元実験の結果
6. 所要質量の試算
7. 堤頭部実験(2022整理中)
8. おわりに

1, はじめに

研究背景

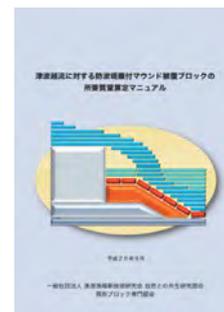
2011年の東北地方太平洋沖地震津波を契機に、津波に対する漁港施設の安定性に関する研究が進められてきた

防波堤の基礎マウンドなど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、適切な質量とする必要がある

当研究会のこれまでの取り組み

三井ら(2013)の研究によって、防波堤を越流する津波に対してブロック固有の安定数を用いた所要質量の算定法を提案

これに基づき所要質量算定マニュアルを作成し、各種被覆ブロックの安定数を示した



被覆ブロックの所要質量算定マニュアル (2014)



実験の様子

課題

防波堤を回り込む津波の流れに対しては、設計方法は確立されていない

流速に対する被覆ブロック等の所要質量はイスバッシュの式を用いて算出するが、適用にあたっては不明な点が多い

2, イスバッシュの式と適用における課題

イスバッシュの式

流速に対する被覆ブロック等の所要質量の算定式

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

安定数: イスバッシュ数

流速の6乗

M : 捨石等の質量
 ρ_r : 捨石等の密度
 U : 流速
 g : 重力加速度
 y : イスバッシュの定数
 S_r : 捨石等の水に対する比重
 θ : 傾斜角

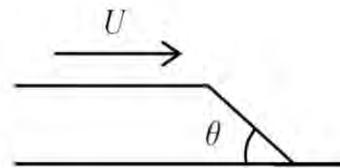


図1 流速と傾斜角の模式図

イスバッシュ数 y の値としては、岩崎ら(1984)の研究によって、 $y=1.08$ が一般的に用いられている

2, イスバッシュの式と適用における課題

イスバッシュの式の成り立ち

イスバッシュの式は、1930年代にIsbashにより提案

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式**が基となっている

堆積した斜面上の石に対して、流れの抗力のモーメントと抵抗モーメントとのつり合いをモデル化

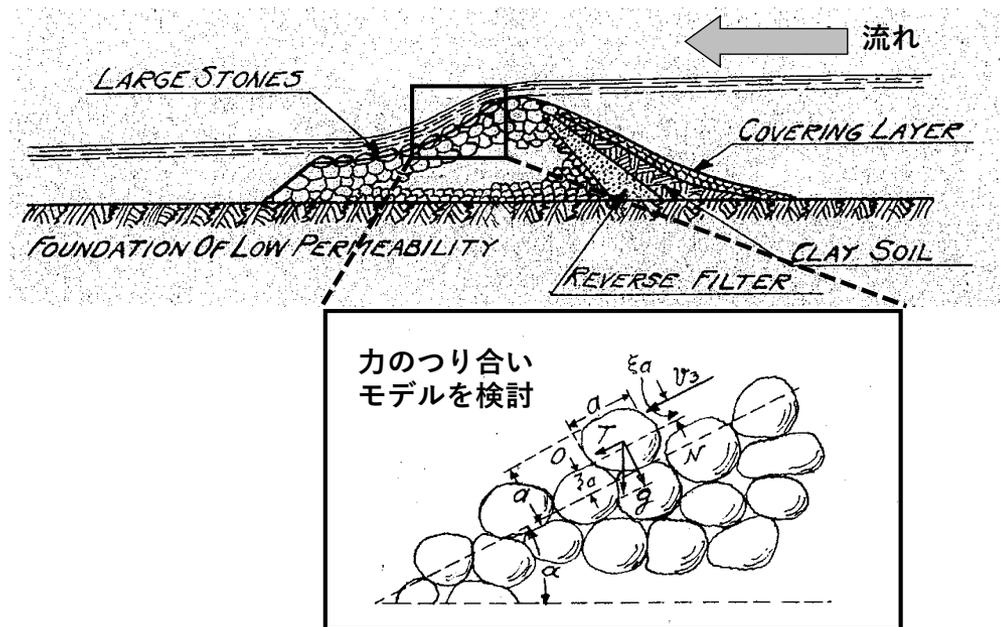
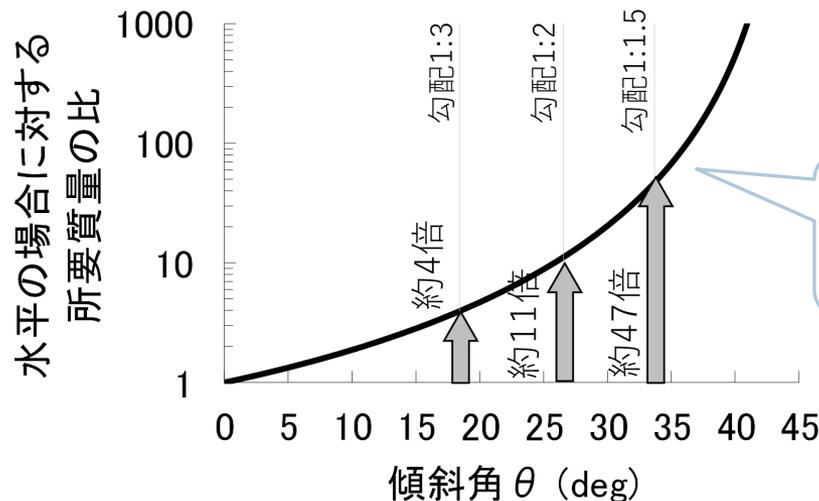
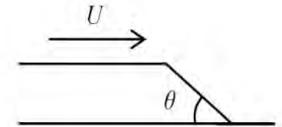


図2 イスバッシュ式の成り立ち (Isbash1932より引用、加筆)

2, イスバッシュの式と適用における課題

イスバッシュ式の傾斜角の影響



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

例えば、水平部 ($\theta=0^\circ$) を 1とした場合、法面勾配1:1.5の斜面部では 47倍の質量

図3 イスバッシュ式における傾斜角の影響

傾斜角が急になるほど所要質量は大きくなり、 45° で無限大石の安息角を考慮すると妥当であるが過大

2, イスバッシュの式と適用における課題

適用における課題

- ▶ 被覆ブロックのようなせりもちを有する形状に適用する場合、傾斜角の影響が過大に評価されている可能性がある
- ▶ 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る
- ▶ イスバッシュ数を評価する際の統一的な実験手法の確立が必要（流速の定義や測定位置があいまいなど）

3, 基礎実験の実施と実験方法マニュアルの作成

基礎実験(2018)の実施

国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産工学研究所との共同研究

前述した課題解決に向け、基礎実験を実施

台形マウンドに定常流を作用させ、方塊ブロックの安定性を検討

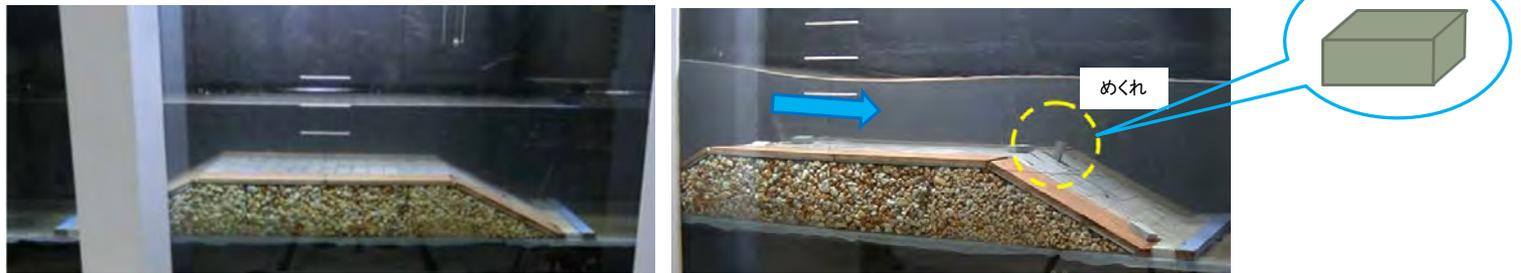


図4 基礎実験の状況

2018年実施 詳しくは、基礎実験報告書
http://aitef.or.jp/division71_3.html

得られた知見

- ・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た
⇒イスバッシュ数を傾斜角の関数とする必要がある
- ・流速は、ブロック近傍流速と断面平均流速の2種類で検討した結果、近傍流速の方が相関が良い
⇒しかし、設計との整合性を優先して断面平均流速とする

3, 基礎実験の実施と実験方法マニュアルの作成

基礎実験に基づき、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標準的な実験方法を示した水理模型実験マニュアルを作成

詳しくは、水理模型実験マニュアル http://aitef.or.jp/division71_3.html

本マニュアルの特徴

- ・イスバッシュ数 y を傾斜角 θ およびフルード数 Fr によって決まる値とする

$$y = f(\theta, Fr) \quad ※ Fr = U\sqrt{gh}$$

- ・流速は被災箇所における断面平均流速を用いる

$$U = \overline{U}$$

- ・その他、実験方法や実験条件の統一化

4, 各種ブロックでの断面二次元実験の実施

前述したマニュアルに則り、各種被覆ブロックのイสบッシュ数を検証

実験方法

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、基礎実験と同様に、台形マウンド上の被覆ブロックの安定実験をおこない、安定限界流速を測定する



台形マウンドおよび被覆ブロック設置状況

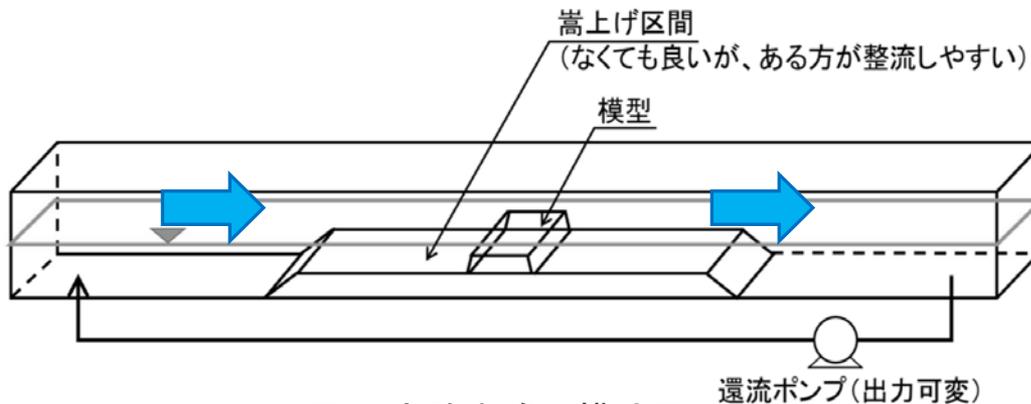


図5 実験水路の模式図

4, 各種ブロックでの断面二次元実験の実施

実験条件

表1 実験条件

ブロック質量	大小 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

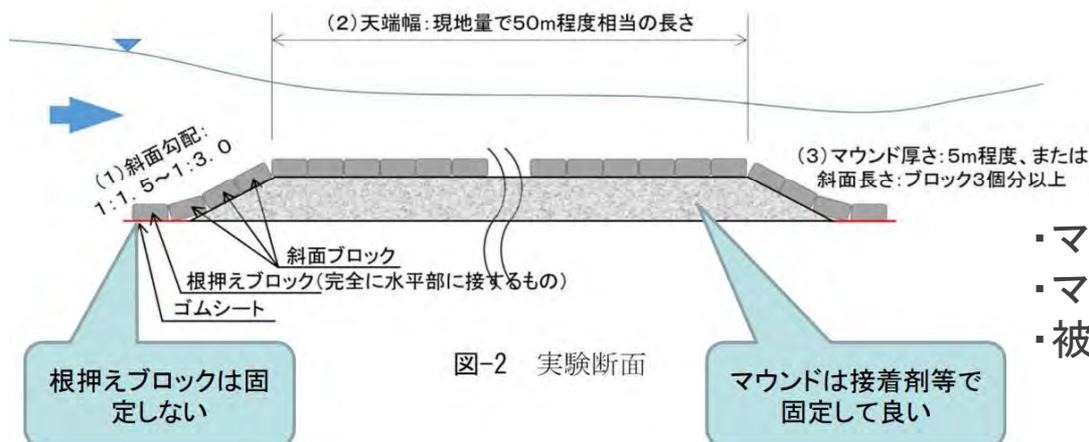


図-2 実験断面

- ・マウンド幅は現地で50m程度
- ・マウンド厚は現地で5m程度
- ・被覆ブロックは12種類

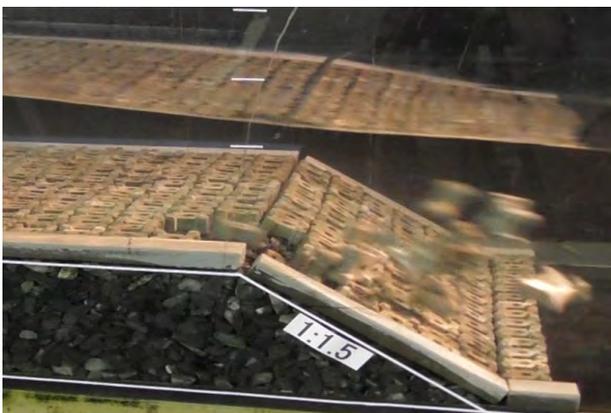
図6 マニュアルにより定めた実験断面

4, 各種ブロックでの断面二次元実験の実施

安定実験

ポンプの流量を段階的に上げ、ブロックの安定限界となる条件を調べる

(安定実験中に流速を測定することは困難であるため、流速測定は別途実施)



被覆ブロックの被災状況

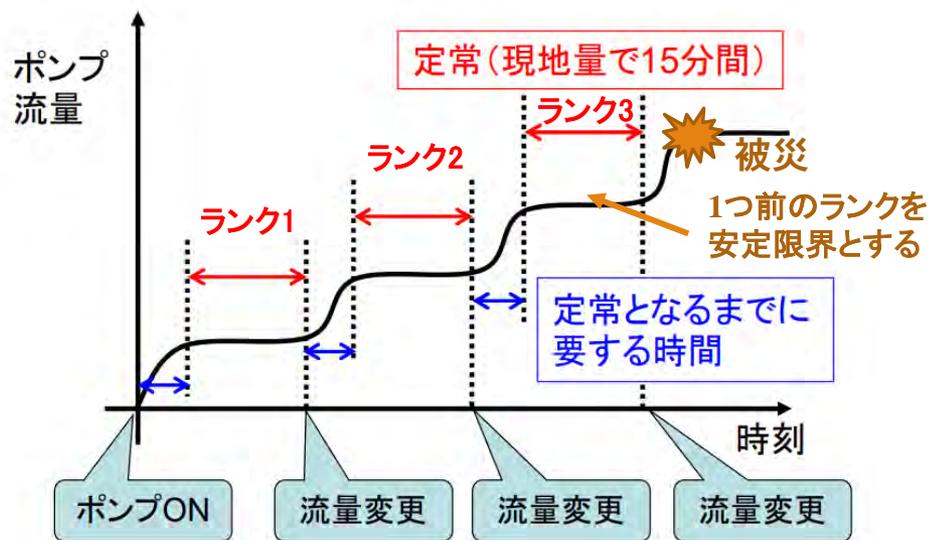


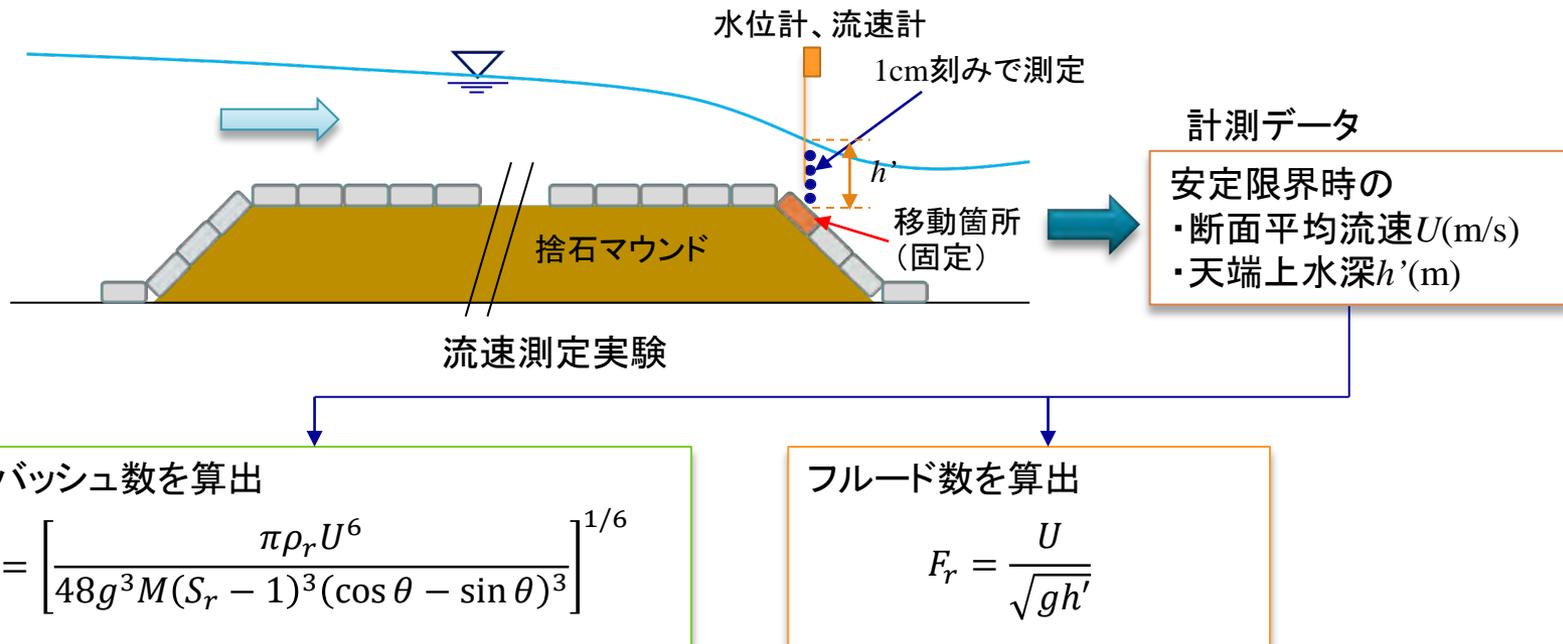
図7 安定実験時のポンプ流量変化

4, 各種ブロックでの断面二次元実験の実施

流速測定実験および整理方法

流速測定実験では安定限界の状態を再現し、ブロック離脱箇所の流速鉛直分布および水位 h' を測定

流速鉛直分布から断面平均流速 U を求め、イสบッシュ数とフルード数を求める



5, 断面二次元実験の結果

被災形態の分類

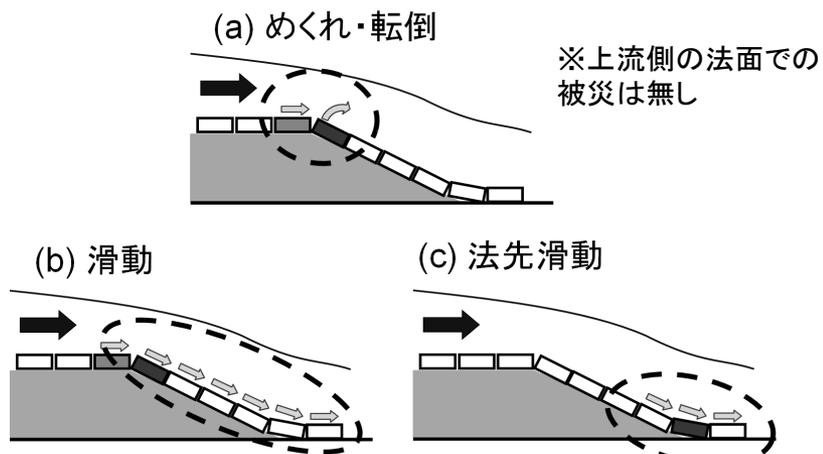
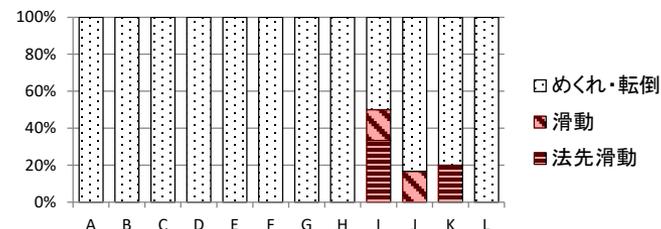


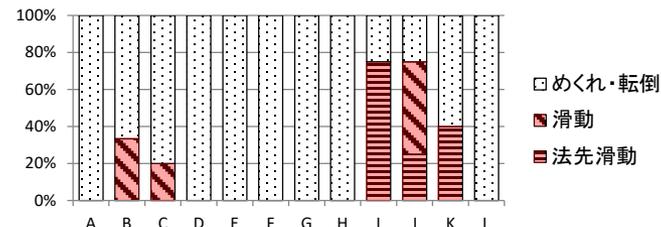
図8 被災形態の分類

- ・法面勾配1:1.5では「めくれ・転倒」が多い
 - ・勾配が緩くなるにつれて「滑動」や「法先滑動」が増加
 - ・被覆ブロックの種類ごとに異なる
- ⇒抗力成分と揚力成分の流体力の特性がブロックの形状によって異なることが影響

法面勾配 1:1.5



法面勾配 1:2



法面勾配 1:3

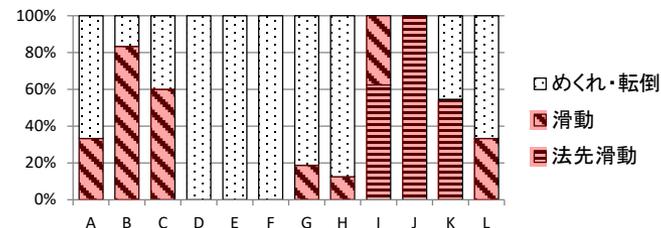


図9 被災形態の割合

A~Lの12種類の被覆ブロックを対象

5, 断面二次元実験の結果

フルード数の影響

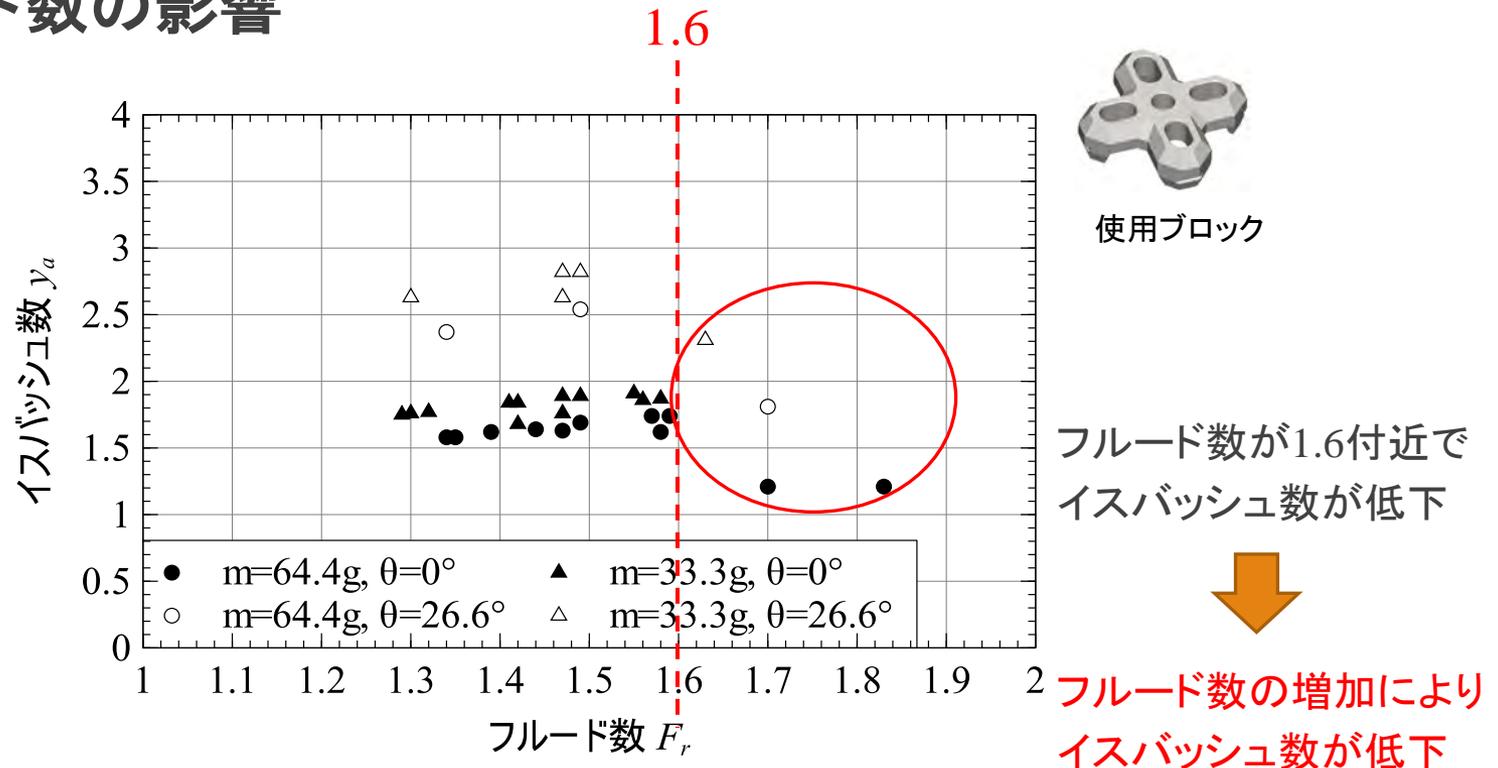


図11 フルード数とイสบッシュ数の関係の例
(法面勾配1:2の場合)

5, 断面二次元実験の結果

フルード数の増加によるイスバッシュ数の低下のメカニズム

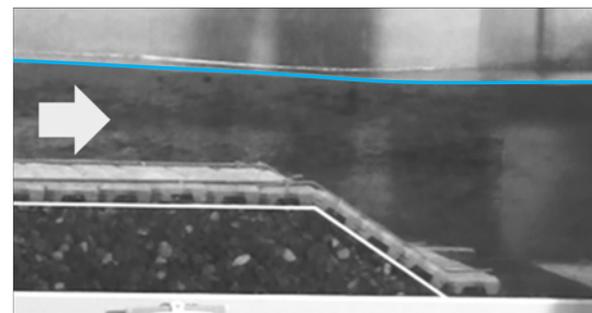
フルード数(流量)が小さい場合、水面形状は比較的水平に近い

フルード数(流量)が大きい場合、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



その結果、法肩付近では遠心力が作用し、法面では斜面下流側への抗力が大きく作用するため、被災しやすくなったと考察

流量小:フルード数小



流量大:フルード数大

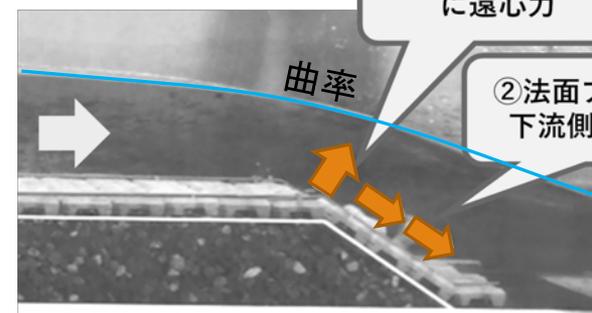
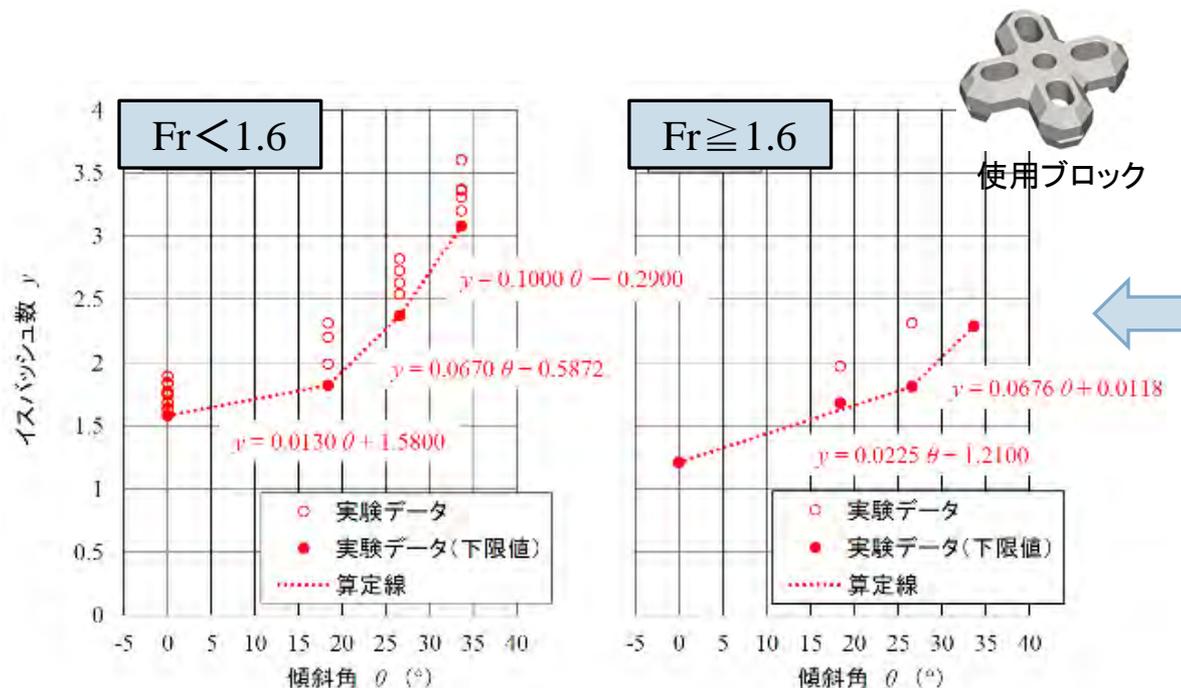


図12 流量の増加に伴う水面形の変化

5, 断面二次元実験の結果

イスバッシュ数の算定図の作成例



作成方法

- ①横軸を傾斜角 θ としてプロット
- ②算定図はフルード数 Fr で場合分け
- ※フルード数の分け方は各ブロックで異なる
- ③下限値で算定線を設定

図13 イスバッシュ数の算定図の例

5, 断面二次元実験の結果

全12種類の被覆ブロックのイスバッシュ数の例

フルード数が小さい条件 ($Fr=1.2$) と、大きい条件 ($Fr=1.7$) に設定した場合

- 全体的に傾斜角が大きくなるほどイスバッシュ数が大きくなり、基礎実験と同じ傾向 (本来であれば一定値であるはず)
- 全体的に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

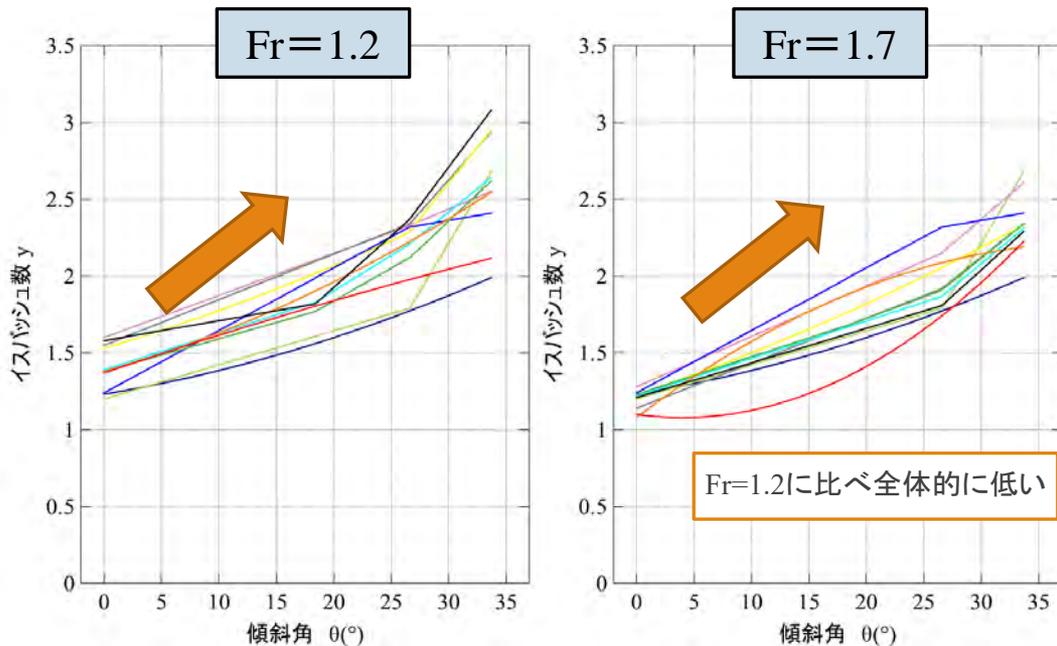


図14 各種被覆ブロックのイスバッシュ数

6, 所要質量の試算

各種被覆ブロックの所要質量の算定例

条件: 流速10 m/s、フルード数1.7、斜面勾配1:2と仮定

表2 所要質量の試算例 (ton)

		天端部 ($\theta=0^\circ$)	斜面部 ($\theta=26.6^\circ$)	大きい 方
y=1.08 (岩崎ら、参考図書)		53.8	604.4	604.4
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

被覆ブロックでは、岩崎ら(1984)の、y=1.08による所要質量600tに対し、被覆ブロックは、20~54t程度と現実的な質量に収まる

(この例では1/10~1/30程度に低減)

7, 堤頭部実験

堤頭部実験の実施の経緯について

- 断面二次元実験によって設計流速に対する被覆ブロックの所要質量が算定可能となった
- しかし、実際に津波流れが発生する場所は防波堤堤頭部であり、三次元性を有する複雑な流れ場となることから、断面二次元実験による評価と異なる可能性がある



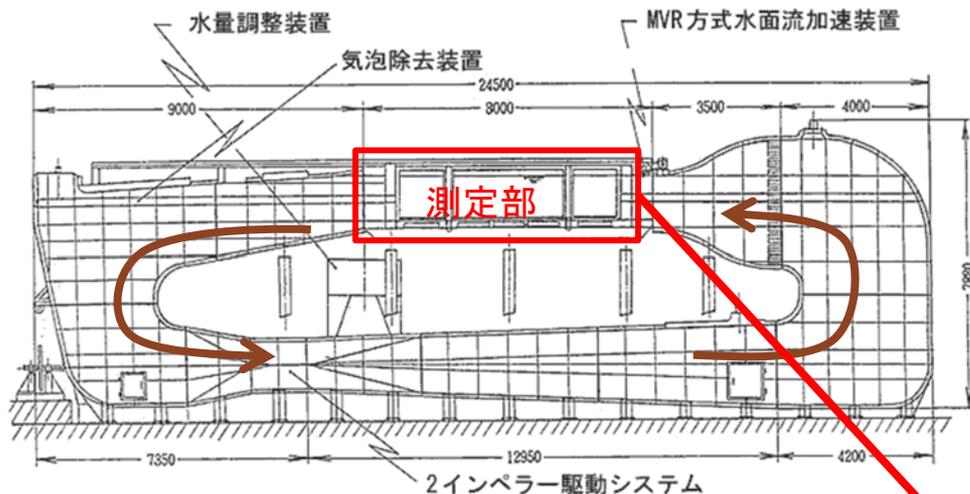
実験目的

堤頭部実験では、被覆ブロックの安定性に及ぼす 三次元的な影響を確認する

- ・幅の広い水槽で実施する
- ・基礎的な実験とし、方塊ブロックを用いる

7, 堤頭部実験

実験水槽



(国研)水産技術研究所 回流水槽

測定部 長さ6.0m × 幅2.8m × 深さ1.8m × 水深1.4m

基本の水深は1.4mであるため、ステージを設置

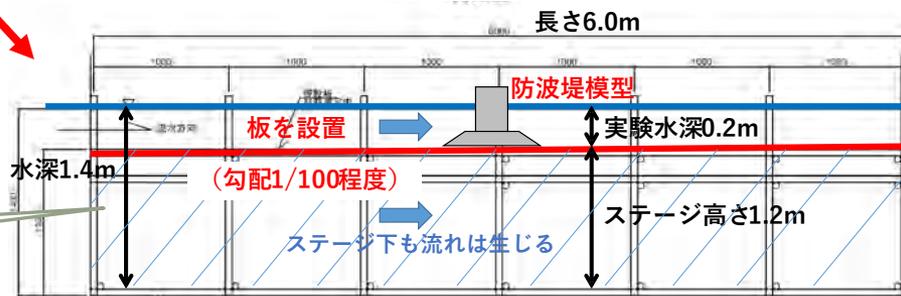
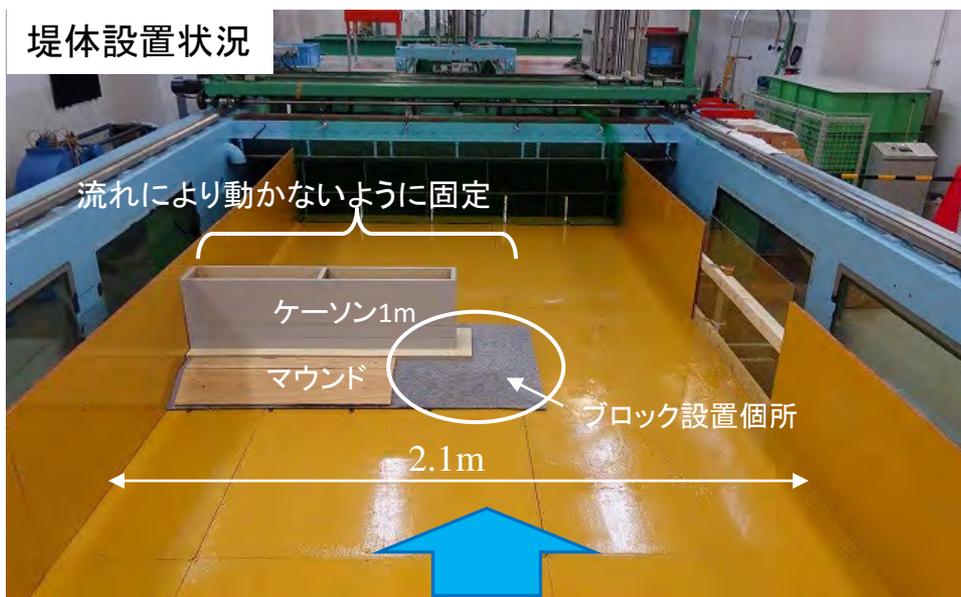


図15 回流水槽の断面図

7, 堤頭部実験

実験方法および条件

断面二次元実験と同様に、流量を徐々に大きくし、方塊ブロックの安定限界時の流速を調べる



実験条件



模型縮尺1/80

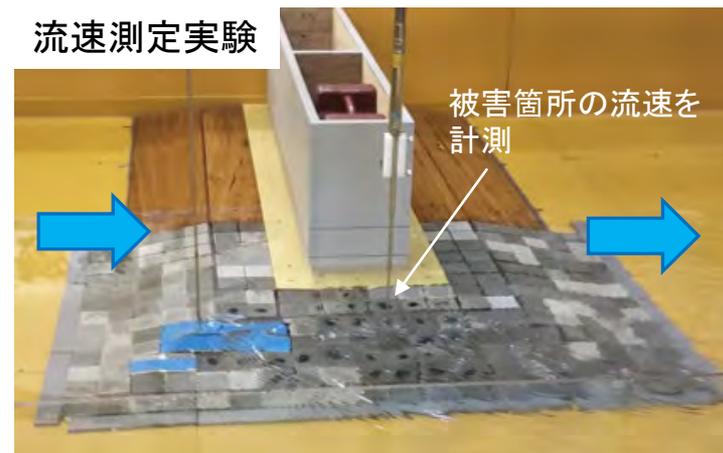
初期水深:2種類(15cm、20cm)

ブロックサイズ:2種類(約20g、約70g)

断面:2種類(堤頭部、堤幹部)

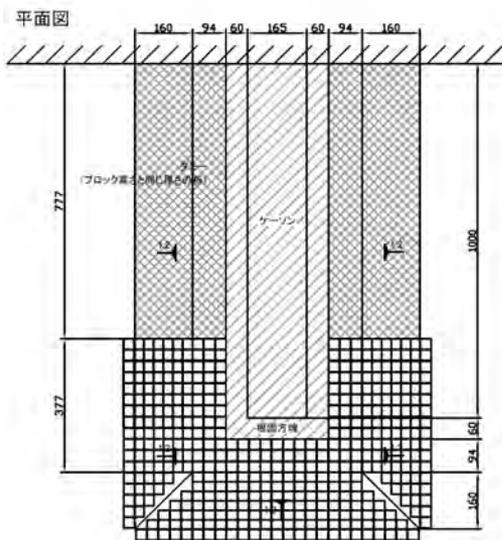
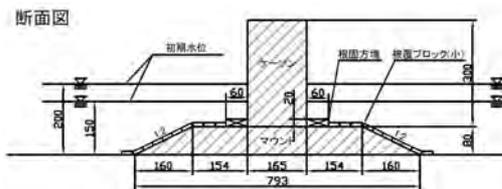
8ケース

流速測定実験



7, 堤頭部実験

実験断面



堤頭部断面

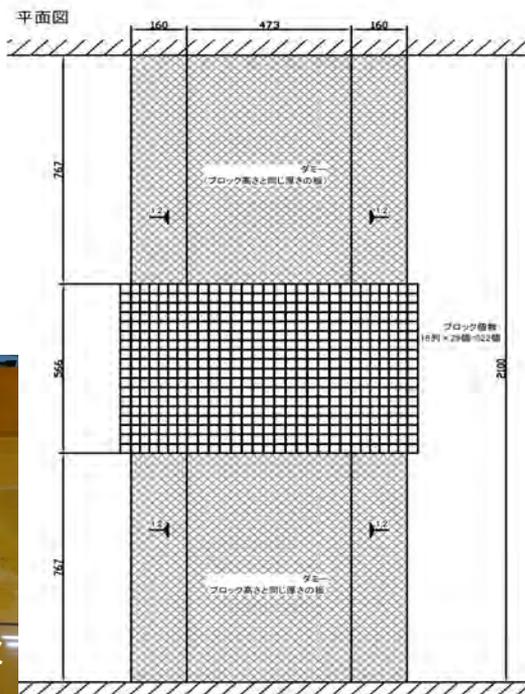
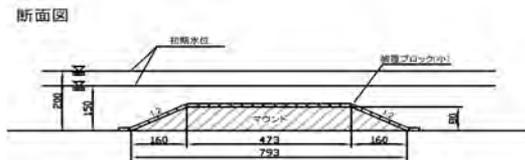


堤頭部設置状況



※実際の堤幹部ではなく、断面二次元実験を模した断面

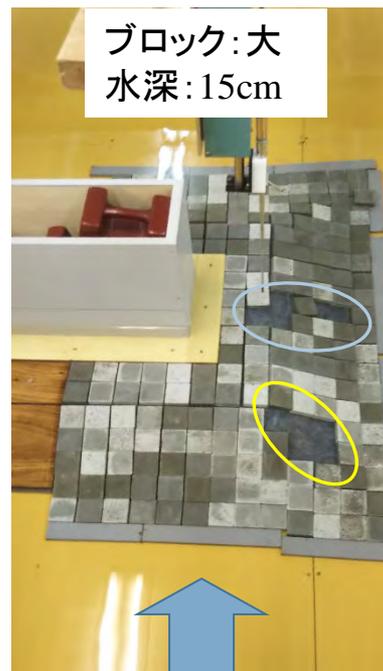
堤幹部設置状況



堤幹部断面

7, 堤頭部実験

堤頭部の被災状況



- ・被災は2か所に分かれる
- ・最初にマウンド稜線部(以下、稜線部)、次にマウンド法肩(以下、法肩部)が被災
- ・初期水深やブロックの大小の条件に関わらず同じ傾向

7, 堤頭部実験

堤幹部の被災状況(断面二次元を模した場合)

ブロック:小
水深:15cm



ブロック:小
水深:20cm



ブロック:大
水深:15cm



ブロック:大
水深:20cm

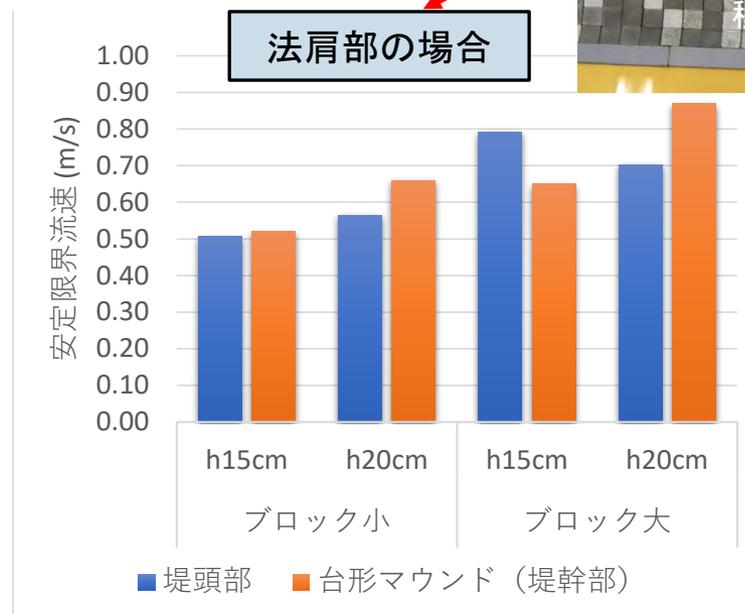
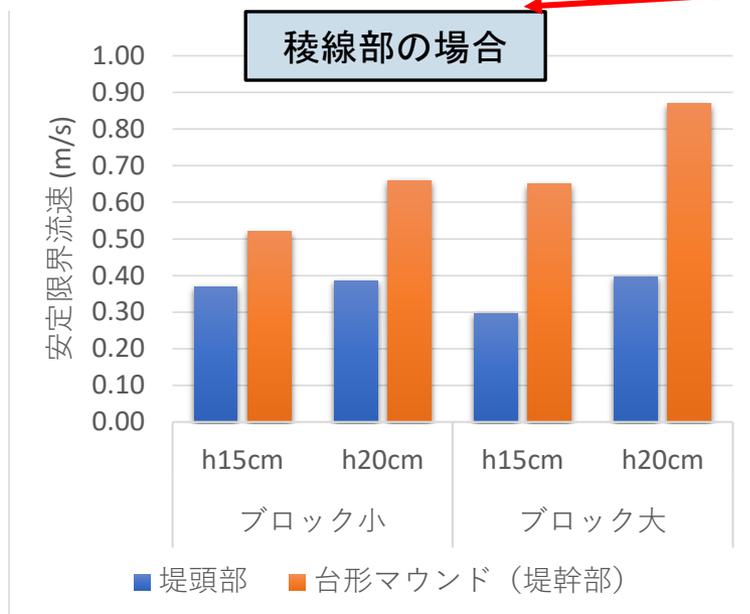


- ・下流側法肩から被災
- ・断面二次元実験と同じ状況

7, 堤頭部実験

安定限界時の近傍流速の比較 (論文のまとめ 図18)

※近傍流速はブロックに最も近い位置で測定した流速値



堤幹部より堤頭部の方が安定限界流速は低い

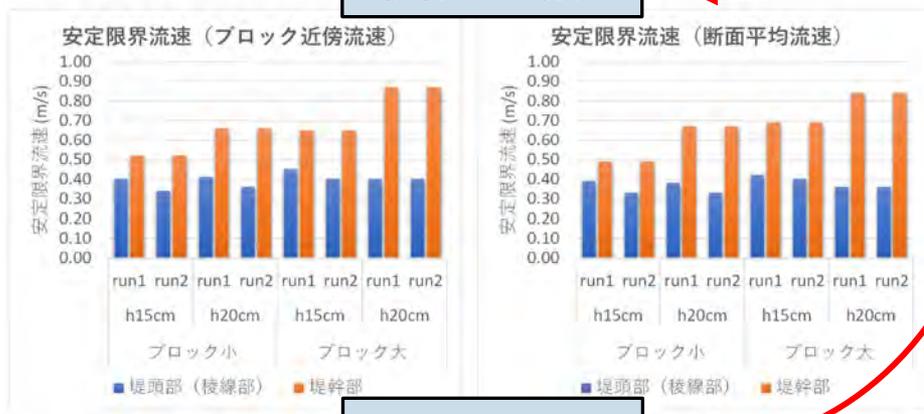
堤頭部・堤幹部で大きくは変わらない

7, 堤頭部実験

安定限界時の近傍流速と断面平均流速の比較 (最新のまとめ)



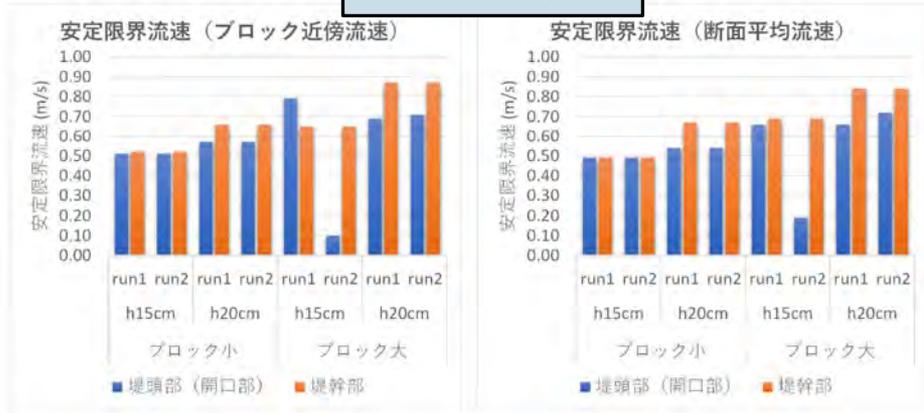
稜線部の場合



※近傍流速はブロックに最も近い位置で測定した流速値

堤幹部より堤頭部の方が安定限界流速は低い

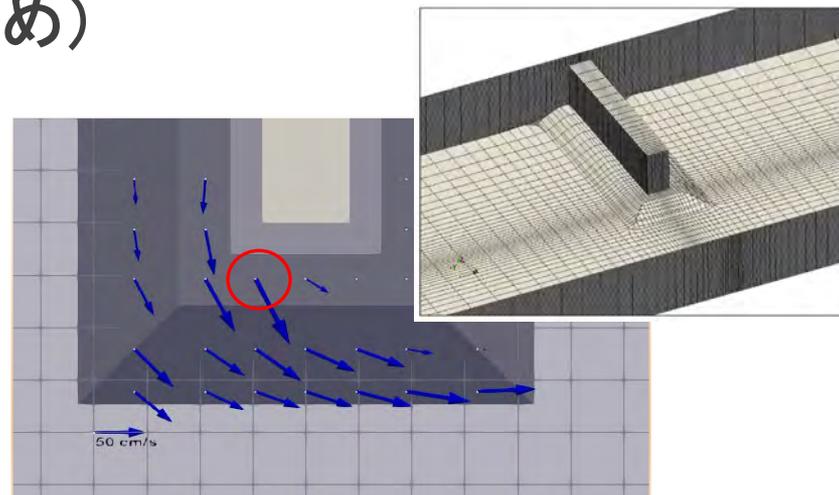
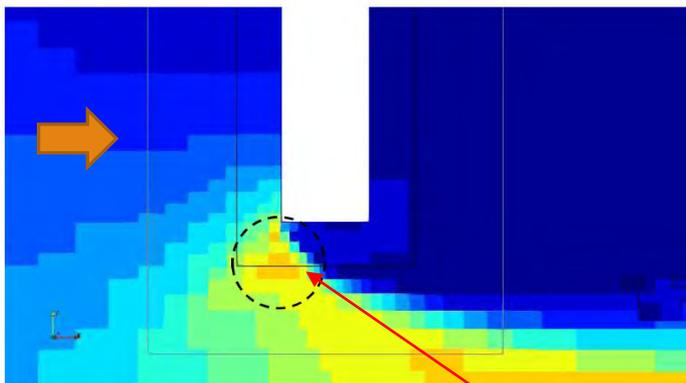
法肩部の場合



堤頭部・堤幹部で大きくは変わらない
⇒三次元的な影響は少ない

7, 堤頭部実験

数値計算による検討(最新のまとめ)



OpenFOAMのVOF法ソルバーを用いた3次元流動場の計算結果

(法肩部の流速が1.0m/sの時点での流速分布)
(マウンド天端上1cmの高さ(z=0.11m)における流速)



法肩部では、計算による流速が大きい地点と実験の被災箇所が一致



計算結果は実験状況を適切に再現

稜線部の流速が大きくない点も一致

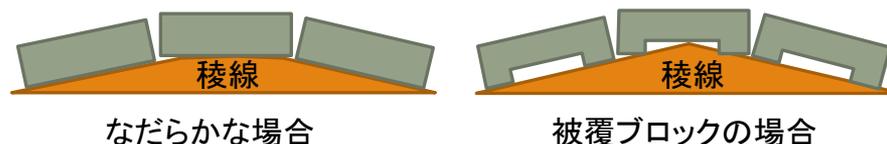
7, 堤頭部実験

稜線部の安定性についての考察

稜線部は早い段階で被災したが、稜線上のブロックは不安定な状態となっていた



実際のマウンドは、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



稜線部の安定性は不陸の影響によるものと考察する

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

7, おわりに

津波の流れに対する適切な被覆ブロックの所要質量の算定方法を検討した

- イスバッシュの式の適用における課題解決のため、基礎実験を行い、水理模型実験マニュアルを作成した
- このマニュアルに則り断面二次元実験を行い、各種被覆ブロックのイスバッシュ数の算定図を作成し、従来手法に比べて精度良く所要質量を算定することが可能となった
(漁港漁場新技術研究会のHPに掲載 http://aitef.or.jp/division71_3.html)
- 三次元的な影響を把握するため堤頭部実験を行い、ブロックの被災箇所は稜線部と法肩部に分かれることを確認した
- 法肩部のブロックの安定性は堤幹部と概ね同程度であり三次元的な影響は少ない、一方、稜線部は不陸の影響が示唆された

今後も耐津波設計手法の確立の一助となるよう、引き続き取り組んでいきたい

ご清聴ありがとうございました

一般社団法人 漁港漁場新技術研究会
自然との共生研究部会 異形ブロック専門部会