被覆ブロックのイスバッシュ数の特性に関する基礎実験

報　告　書

平成 30 年 6 月

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

目　　次

１．実験目的 1
２．実験装置 2
３．実験条件 4
　３．１　模型縮尺 4
　３．２　海底地形 4
　３．３　被覆ブロック 4
　３．４　実験断面 5
　３．５　水位・流速 8
４．模型製作方法 9
　４．１　被覆ブロック 9
　４．２　マウンド・ケーソン 9
　４．３　マウンド製作上の留意点 10
５．実験ケース 11
６．安定実験方法 12
　６．１　実験方法概要 12
　６．２　安定実験中の水位・流速の測定 12
　６．３　安定性検査域とブロックの被害基準 13
７．水位・流速測定実験方法 14
８．実験結果の整理方法 15
９．実験結果 16
　９．１　主な被災形態 17
　９．２　実験結果のバラツキについて 17
　９．３　斜面勾配の影響 17
　９．４　フルード数の影響 18
　９．５　局所的なイスバッシュ数の違いについて 19
　９．６　流速の定義について 19
　９．７　堤頭部の影響 21
１０．まとめ 24
付録　各ケースの実験結果 25

１．実験目的

津波の流れに対するブロックの設計においては、イスバッシュ式を用いて流速から所要質量が算定される。その際、ブロックのイスバッシュ数は岩崎ら[1]の実験により得られた値(y=1.08)が通常用いられている。しかし、ブロックの流れに対する安定性については知見が少なく、所要質量を過大あるいは過小評価している可能性がある。

合理的な設計のためには、水理模型実験によりブロック固有のイスバッシュ数をあらかじめ決定することが必要となるが、その際、実験方法によって得られるイスバッシュ数が大きく変わる可能性があるため、適切なイスバッシュ数を得るための標準的な実験方法の確立が望まれる。

本水理模型実験は、被覆ブロックのイスバッシュ数を評価するための標準的な実験方法を提案するにあたり、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ことを目的として実施した。具体的には、以下のような課題に対する知見を得ることを目的とした。

①斜面勾配の影響

本来イスバッシュ式は斜面勾配の影響を含んでいるため、斜面勾配が変わっても同一のイスバッシュ数で所要質量を算定できるはずであるが、そうならない場合、イスバッシュ数を斜面勾配の関数として評価する必要があると考えられる。

②流れの形態（射流・常流）の影響

マウンド上の水深が浅く、流れが射流となる条件では、マウンド法肩周辺の流線は曲率を持つようになり、法肩部のブロックには遠心力が作用し離脱しやすくなることが考えられる。また、物体の抗力係数はフルード数の影響を受ける[2]ことからも、フルード数により限界イスバッシュ数が変わる可能性がある。その場合、イスバッシュ数をフルード数の関数として評価する必要があると考えられる。

③局所的なイスバッシュ数の違い

下流側のマウンド法肩付近は上述のように遠心力の影響や、構造的に背後の支えが弱いことから、安定性が低下する（すなわち、イスバッシュ数が他の箇所より低くなる）ことが想定される。イスバッシュ数の局所的な変化がどの程度かを把握することで、例えば弱点となる箇所のみ大きな質量のブロックを用いるなど、合理的な設計に繋がると考えられる。

④流速の定義（測定位置など）

標準的な実験方法の提案の際には、流速の定義（測定位置など）を統一する必要がある。設計で用いる流速との対応を考えると、実験でイスバッシュ数を評価する際の流速も断面平均流速を用いることが考えられるが、そのような方法で所要質量が適切に算定できるかを確認する必要がある。

⑤堤頭部の影響

堤頭部は三次元性を有する複雑な流れ場となることから、断面二次元での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。

---

[1] 岩崎・真野・中村・堀越（1984）：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.

[2] 林・多田・大井（2015）：遡上流れに置かれた非水没柱状体に作用する抗力特性，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.71，No.2，pp.I_480-I_485.

２．実験装置

実験には、（国研）水産研究・教育機構　水産工学研究所　漁港水理実験棟内の津波実験水路（図-1、図-2）を使用した。

図-1　水産工学研究所漁港水理実験棟・津波実験水路

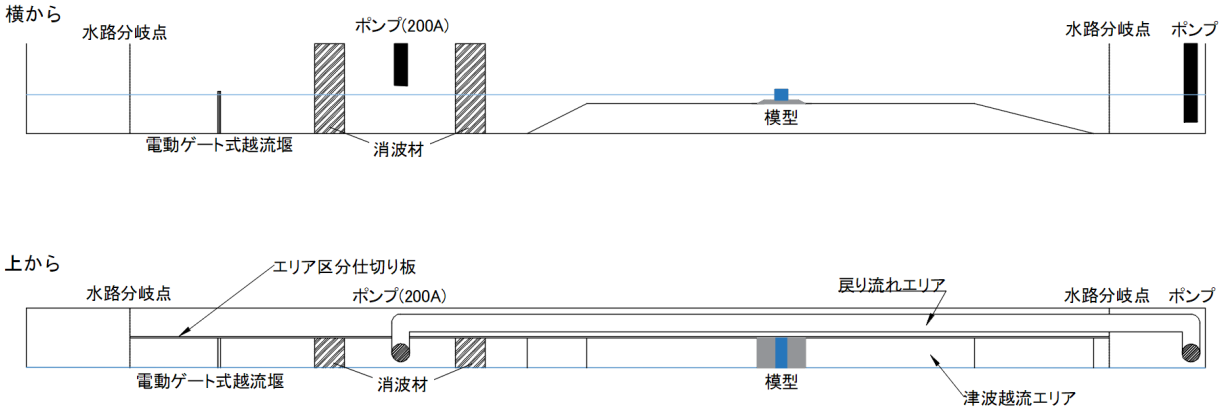


図-2　津波実験水路における模型設置方法の例

津波実験水路の主な仕様は以下の通りである。

・平成 28 年度に改修された長さ 100 m、幅 1 m、深さ 1.5 m の水路であり、その一部に、片面に強化ガラス付専用フレームをはめ込んだ全長約 20 m の実験実施・可視区間が存在する。

・水路内をエリア区分仕切り板で仕切ることにより、津波越流エリア（手前側・実験エリア）と戻り流れエリアに区分し、手前側の水中ポンプ吐出口から一定水量を供給し、対象模型に津波越流に対応する水深を保つ機構を有する。

・水中ポンプからの供給水量は配管中の電動バルブにより流量制御運転が可能。

・電動モータにより上昇・下降が操作可能な越流堰ゲートを有する。

・水中ポンプの起動・停止、電動バルブの開・閉、越流堰ゲートの上昇・下降は制御盤にて一括的に制御できるとともに、附属制御パーソナルコンピュータシステム（津波回流制御システム）にて一連の操作が可能。

・仕様機器類の詳細：

ア）エリア区分仕切り板

延長 16 m、構造　合板製（24 mm 厚）

イ）電動ゲート式越流堰

最大上下限差 50 cm、その他　整流用消波材を設置可能

ウ）流量制御用電動バルブ

配管径 200A、その他　電磁流量計

エ）水中ポンプ

揚水量 4 m^3/min、配管 200A（VP 菅）

オ）制御盤

構造　屋内型、操作　自動(パーソナルコンピュータ)・手動切替、水中ポンプ　起動・停止、流量制御バルブ　開・閉、電動越流堰ゲート　上昇・下降、表示　配管流量（デジタル表示）

カ）津波回流制御システム

構成　パーソナルコンピュータおよび制御ソフトウェア

機能　水中ポンプ・流量制御弁・電動ゲート操作・流量および越流水深のリアルタイム表示

３．実験条件

３．１　模型縮尺

模型縮尺は実験施設の性能および津波条件等を考慮し、1/80 とした。各水理量はフルードの相似則に従うものとした。

３．２　海底地形

海底地形は水平床とした。

３．３　被覆ブロック

被覆ブロックは直方体形状の方塊型ブロックを対象とした。相似形で大きさを変えた 2 種類のブロックを使用した。ブロック諸元を表-1 に示す。なおブロック密度については、現地量は 2.3t/m^3 であるが、実験では海水（1.03g/cm^3）と真水(1.0g/cm^3)の密度の違いを考慮して 2.233g/cm^3 を目標に製作した。

表-1　被覆ブロック諸元（括弧内は現地量）

	ブロック（小）	ブロック（大）
幅×長さ×高さ	3.0cm×3.0cm×1.0cm （2.4m×2.4m×0.8m）	4.5cm×4.5cm×1.5cm （3.6m×3.6m×1.2m）
体積（実測値）	9.33 cm^3 (4.78 m^3)	30.92 cm^3 (15.83 m^3)
密度（実測値）	2.184 g/cm^3 (2.184 t/m^3)	2.186 g/cm^3 (2.186 t/m^3)
質量（実測値）	20.37 g (10.43 t)	67.60 g (34.61 t)

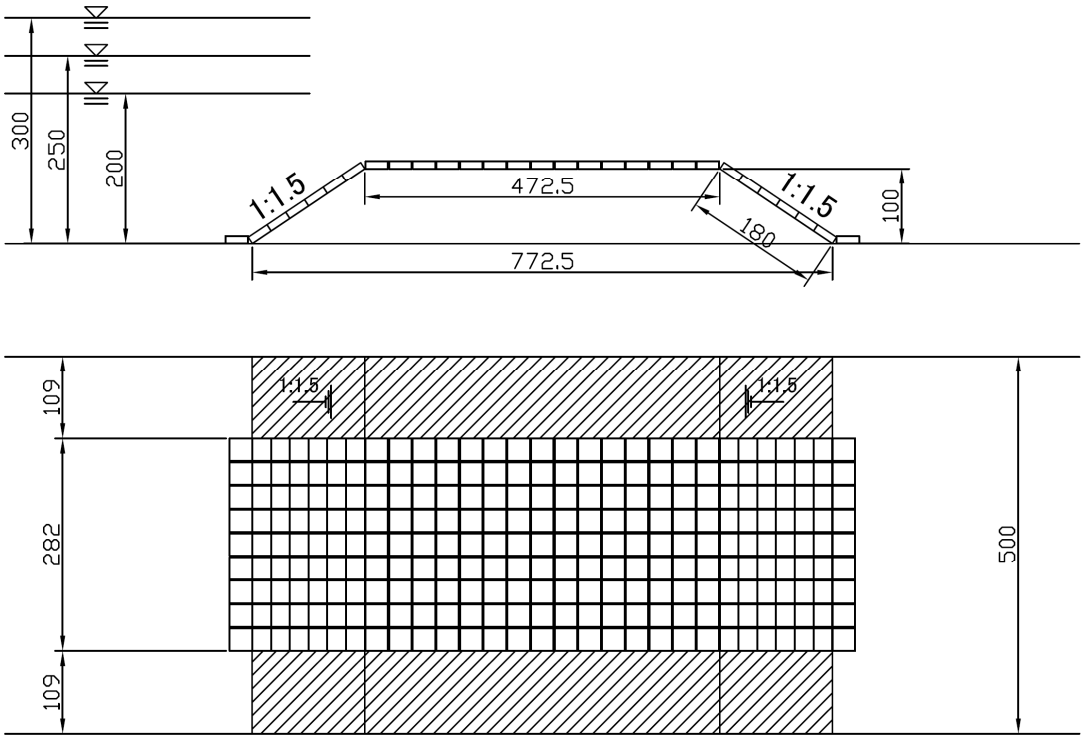
３．４　実験断面

実験対象とする構造物は、台形形状のマウンドを基本とした。マウンド形状諸元を表-2 に、断面図・平面図を図-3 に示す。また、一部のケースでは堤頭部を再現した実験を行った（図-4）。

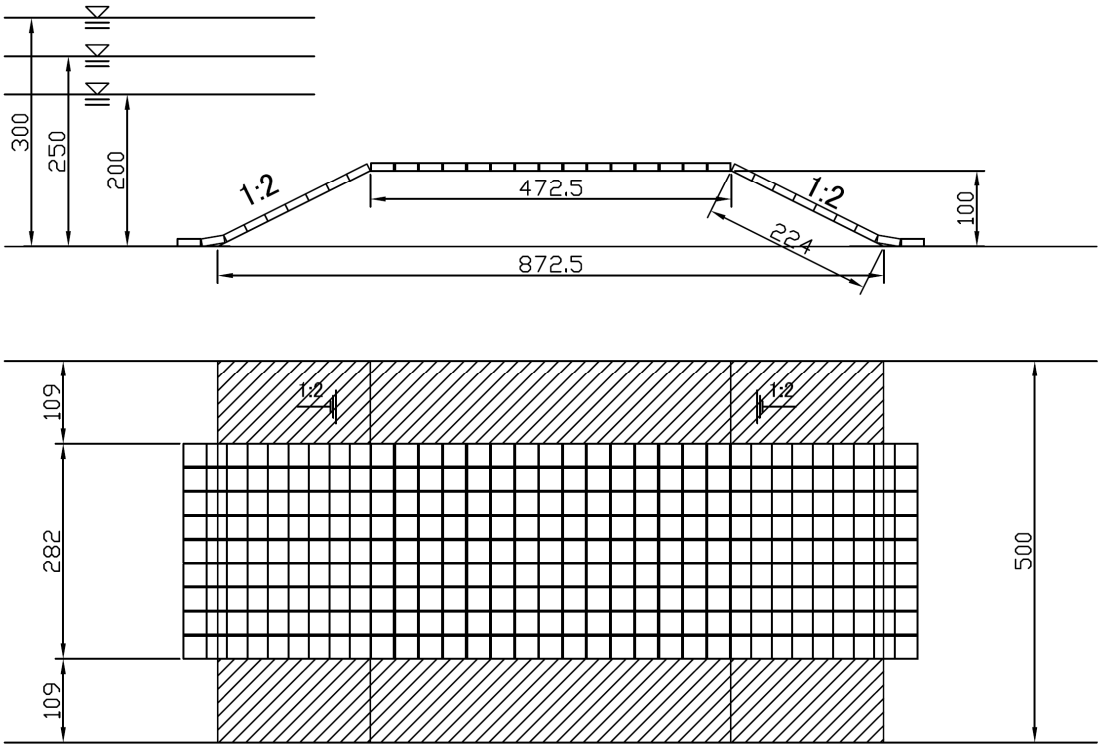
ブロック模型の個数の都合により、一部の範囲にはブロック模型の代わりにブロック高さと同じ厚さの平板を設置した（平面図中のハッチングをした範囲）。

表-2　台形マウンド諸元（括弧内は現地量）

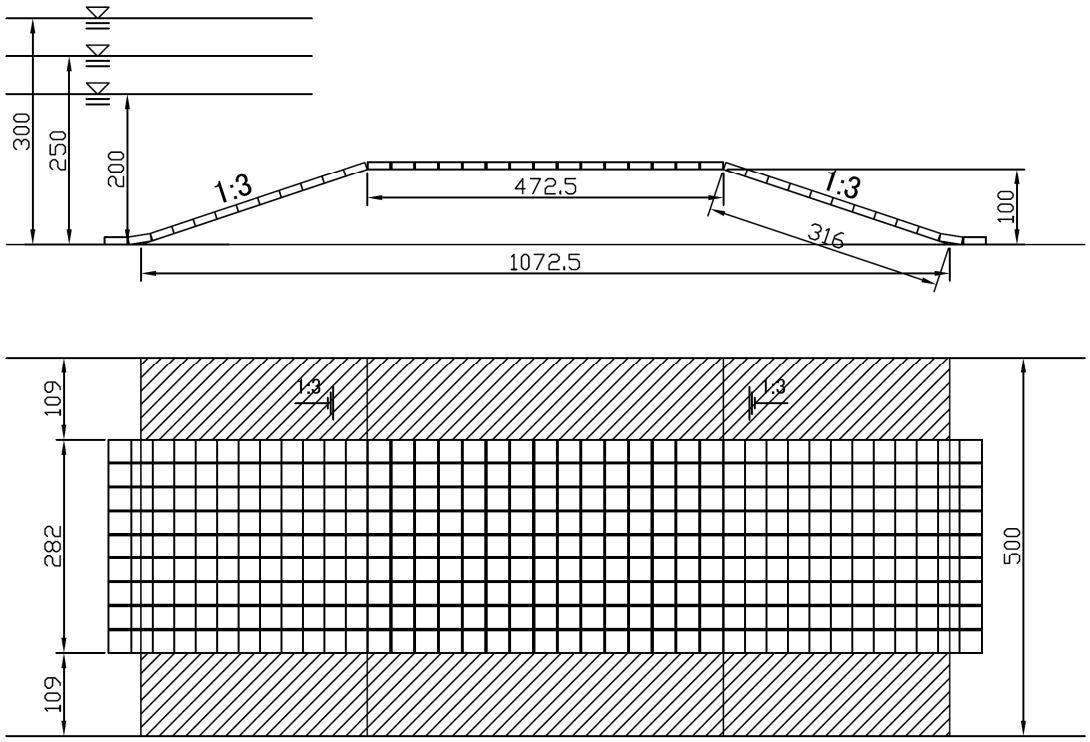
マウンド天端幅	47.25 cm (37.8 m)
マウンド厚さ	10 cm (8.0 m)
斜面勾配	1:1.5、1:2、1:3 の 3 種類



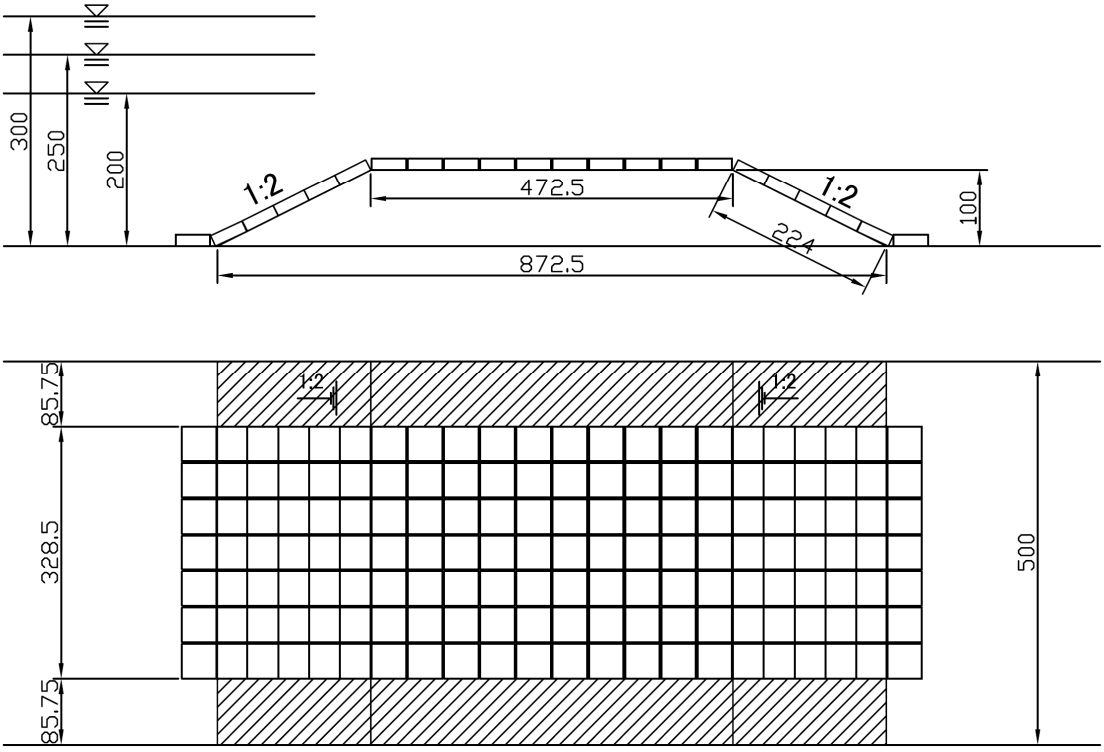
(a) ブロック（小）、斜面勾配 1:1.5



(b) ブロック（小）、斜面勾配 1:2



(c) ブロック（小）、斜面勾配 1:3



(d) ブロック（大）、斜面勾配 1:2

図-3　実験断面図・平面図（台形マウンド）

（寸法は模型量（単位：mm）で表示）

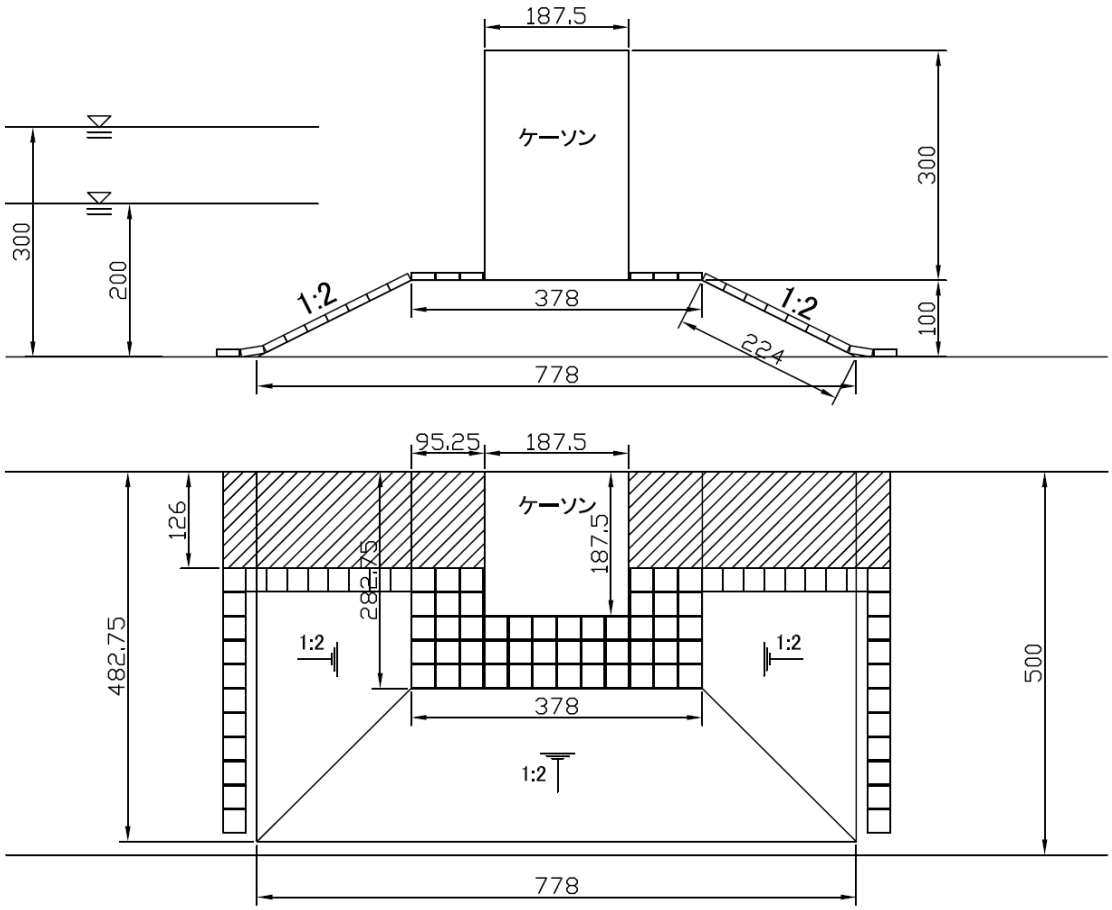


図-4　実験平面図・断面図（堤頭部再現実験）
（寸法は模型量（単位：mm）で表示）

３．５　水位・流速

水路内の初期水深は、以下に示す 3 種類とした。後述する安定実験では、ポンプの流量を段階的に上げていくことで、流速を上げていき、ブロックの安定限界を調べた。

・h = 20 cm（現地量で 16.0 m）
・h = 25 cm（現地量で 20.0 m）
・h = 30 cm（現地量で 24.0 m）

４．模型製作方法

４．１　被覆ブロック

被覆ブロック模型はモルタル製とし、事前に質量と密度の平均値を測定した（表-1 参照）。安定実験の際には、質量の平均値に対して±3%以内となるブロックを使用した。

４．２　マウンド・ケーソン

マウンドおよびケーソン模型を図-5 に示す。本実験はブロックの初期被害発生に着目するものであるため、マウンド模型は砕石を接着剤で固定して作成することで、石の抜け出しやマウンドの変形が生じない状態で実験を行った。なお、マウンド模型は透水性を有するようにした。ケーソン模型は木製とし、津波作用により動かないように錘を入れて固定した。模型の設置状況を図-6 に示す。

図-5　マウンド・ケーソン模型

図-6　模型設置状況

４．３　マウンド製作上の留意点

・ブロック間のクリアランスは、ブロック長さの 5%とした。ブロック（小）については現地量で 12cm（模型量で 1.5mm）、ブロック（大）については現地量で 18cm（模型量で 2.25mm）となる。

・法尻に設置されるブロックは海底床に完全に接するブロックが 1 つとなるように設置した。

・本実験で使用する水路床は現地とは異なり滑りやすい状況であるため、法尻のブロックから滑って被災することのないように、法尻部のブロックは固定して実験を行った。

５．実験ケース

実験ケースは大別して Case1 から Case4 の 4 種類であり、ケース総数は 15 ケースである。ケース一覧を表-3 に示す。それぞれのケースにおいて安定実験と流速分布の計測を行った。

表-3　実験ケース一覧

ケース名	マウンド	ブロック	固定	初期水深	備考	主目的
Case1−1	勾配1:2	小	固定なし	25cm	3回繰り返し	バラツキの確認
Case1−2	〃	〃	両側法肩固定	〃		局所的なイスバッシュ数の変化
Case2−1	勾配1:2	小	固定なし	20cm		水深（フルード数）の影響
Case2−2	〃	〃	〃	30cm		
Case2−4	勾配1:2	大	〃	20cm		
Case2−5	〃	〃	〃	25cm		
Case2−6	〃	〃	〃	30cm		
Case3−1	勾配1:1.5	小	〃	20cm		斜面勾配の影響
Case3−2	〃	〃	〃	25cm		
Case3−3	〃	〃	〃	30cm		
Case3−4	勾配1:3	小	〃	20cm		
Case3−5	〃	〃	〃	25cm		
Case3−6	〃	〃	〃	30cm		
Case4−1	堤頭部	小	〃	20cm		堤頭部と台形マウンドの違い
Case4−2	〃	〃	〃	30cm		

Case1-1 では実験結果のバラツキを調べるため 3 回繰り返し安定実験を行った。Case1-2 では局所的なイスバッシュ数の変化を調べるために、Case1-1 で最初に被害が生じた箇所（上流側の法肩付近および下流側の法肩付近）のブロックを固定した状態で流れを作用させ、安定実験を行った。ブロックの固定には、図-7 に示すようなアルミの棒で水路幅方向に連結したブロックを用いて、初期被害発生箇所を挟む 3 列のブロックを固定した。

図-7　ブロック 1 列を固定するための連結ブロック

６．安定実験方法

６．１　実験方法概要

安定実験ではポンプの流量を段階的に上げていくことで、被覆ブロックの安定限界の条件を調べた。初期被害が生じた後も、ある程度被害が進行するまでポンプ流量を上げていった。安定実験時のポンプ流量変化の模式図を図-8 に示す。

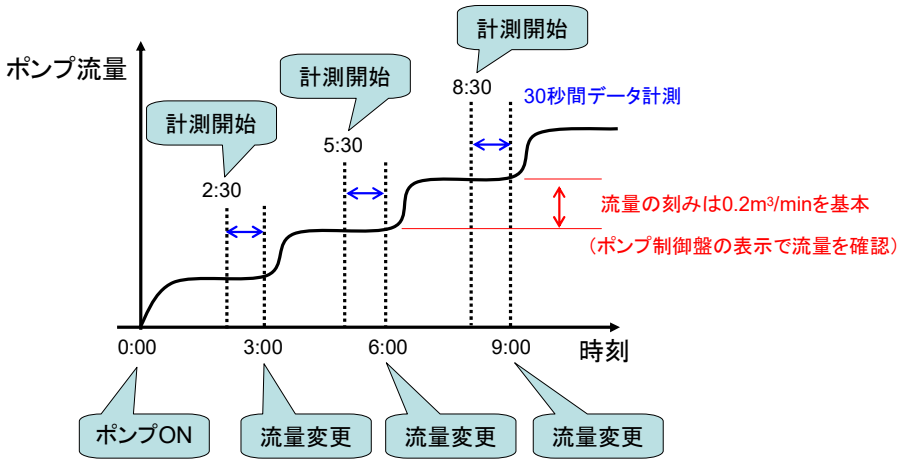


図-8　安定実験時のポンプ流量変化の模式図

ポンプの流量は 3 分ごとに段階的に上げていった。流量の刻み幅は 0.2 m^3/min 程度とし、ポンプ制御盤の表示で流量を確認した。また、ブロックの安定限界の目安がついている場合は、流量の小さい範囲は適宜省略した。

安定実験中は津波作用中のブロックの挙動を目視で観察するとともに、写真およびビデオにより状況を撮影した。

６．２　安定実験中の水位・流速の測定

安定実験時の計測器設置位置の模式図を図-9 に示す。水位の計測はマウンド中心から上流側 1m の地点と、上流側･下流側のマウンド法肩位置の計 3 箇所とし、流速の計測はマウンド中心から上流側 1m、底面から 15cm の 1 箇所とした。

水位の計測には容量式波高計、流速の計測には電磁流速計（水平 2 成分）を使用した。計測周波数は 20Hz とし、流量の各ランクで流れがほぼ定常となった状態で 30 秒間計測した。

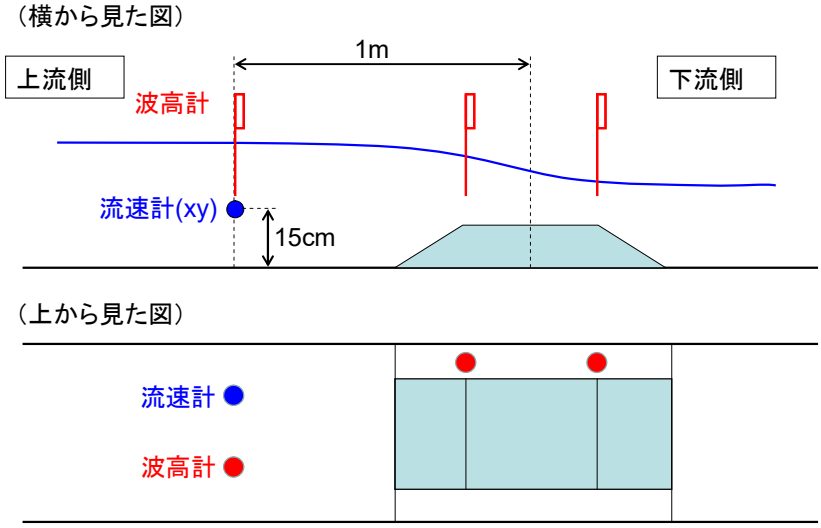


図-9　安定実験時の計測器設置位置の模式図

６．３　安定性検査域とブロックの被害基準

上述の通り、水路端付近の一部の範囲にはブロック模型の代わりに平板を設置したが、ブロックと平板とでは粗度が異なることから、平板付近のブロックの安定性はその影響を受ける可能性がある。そのため、平板に接する両側 1 列ずつのブロックは対象外とした（図-10）。

ブロックの被害基準は、ブロック 1 個分以上の移動（浮き上がり、めくれ、滑り等）を被害と定義した。被害の生じた 1 ランク手前の流量条件を移動限界として、イスバッシュ数を評価した。

図-10　安定性検査域

７．水位・流速測定実験方法

イスバッシュ数の評価にあたっては、ブロック被害箇所の流速を把握する必要があるため、安定実験とは別に水位・流速測定実験を実施した。流速については断面平均流速やブロック近傍流速を求めるために、ブロック天端面から水面までの鉛直方向の流速分布を測定した。

測定位置は、多くの実験ケースで被害が生じた、上流側法肩と下流側法肩の 2 箇所を基本とした。測定位置の模式図を図-11 に示す。図は上流側法肩の測定の場合の例であり、図中の ch4 が容量式波高計、ch5, 6 が電磁流速計（水平 2 成分）である。流速計の高さはブロック天端上 1cm から水面まで 1cm 刻みで上げていった。

その他に、マウンド中心から上流側 1m の位置（安定実験時と同じ位置）で水位・流速を測定し、安定実験時と同じ条件となっていることを確認した。

水位および流速の計測周波数は 20Hz、計測時間は 20 秒間とした。測定を行う際のポンプ流量は、それぞれの実験断面ごとに 2 種類もしくは 3 種類に変化させた。

また、測定中にブロックが動かないように、金網などでブロックを固定した状態で測定した。

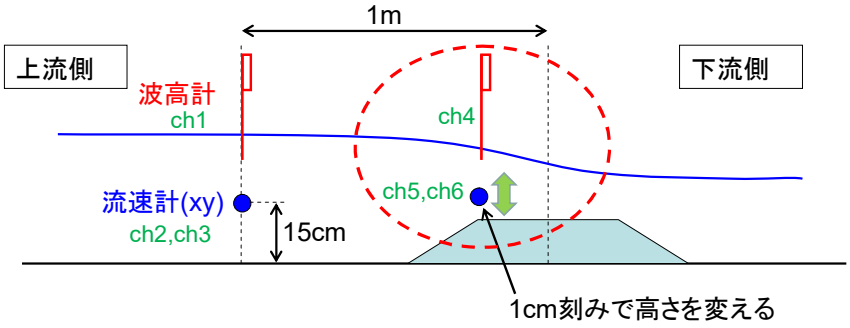


図-11　水位・流速測定実験時の計測器設置位置の模式図（上流側法肩の測定の場合の例）

８．実験結果の整理方法

台形マウンドの実験については、多くのケースで被害が生じた上流側法肩と下流側法肩の 2 箇所を対象としてイスバッシュ数を評価した（図-12）。

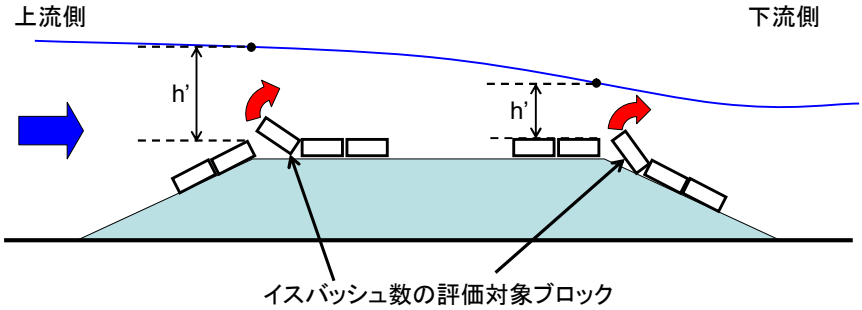


図-12　イスバッシュ数の評価対象ブロック

以下に示すイスバッシュの式により、安定限界時のイスバッシュ数 y を算定した。

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

ここに、M はブロック質量、ρ_r はブロック密度、U は流速、g は重力加速度、S_r はブロックの水に対する比重、θ は傾斜角である。

イスバッシュ数の算定に用いる流速 U は、①断面平均流速（「U_a」と表記する）、②ブロック近傍流速（「U_b」と表記する）の 2 種類で整理した。それぞれの流速は以下のように求めた。いずれも、計測時間 20 秒間の平均値を用いた。

①断面平均流速 U_a　：　流速の鉛直分布をブロック天端面から水面まで積分し、ブロック天端上水深 h'で除して算出

②ブロック近傍流速 U_b　：　ブロック天端上 1cm の流速

なお、流速 U_a および U_b の測定は実験断面ごとに 2 種類もしくは 3 種類の流量のみで行ったため、安定限界時のポンプ流量に対する流速 U_a および U_b は、ポンプ流量と U_a（あるいは U_b）との関係から求めた近似曲線から推定した。

またイスバッシュ式における傾斜角 θ は、ブロックの設置角度を用いて整理した。図-12 に示すように、上流側法肩については天端上流端のブロックを対象としたため $\theta = 0^\circ$ 、下流側法肩については法面最上段を対象としたため θ は斜面勾配の値とした。

フルード数 Fr は次式により算出した。

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh'}}$$

ここに、U は対象位置（上流側法肩あるいは下流側法肩）での断面平均流速、h'は対象位置でのブロック天端上水深である。

９．実験結果

前述の方法で算出した各ケースの移動限界時の流速、フルード数、イスバッシュ数の一覧を表-4 に示す。なお、イスバッシュ数の評価において断面平均流速 U_a を用いた場合のイスバッシュ数を y_a、近傍流速 U_b を用いた場合のイスバッシュ数を y_b とした。

表-4　実験結果一覧（台形マウンドの実験）

●上流側肩

CASE	1-1-1st	1-1-2nd	1-1-3rd	2-1	2-2	2-4	2-5	2-6	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	1-2
マウンド勾配	1:2			1:2		1:2			1:1.5			1:3			1:2
ブロック	小			小		大			小			小			小
初期水深	25cm			20cm	30cm	20cm	25cm	30cm	20cm	25cm	30cm	20cm	25cm	30cm	25cm
ブロック固定	なし			なし		なし			なし			なし			肩付近固定
安定限界流量 Q m^3/min	3.66	2.73	3.49	2.33	4.15	2.90	4.59	5.71	2.13	3.29	4.21	2.48	3.07	4.19	3.49
天端上水深 h' cm	13.6	13.1	13.2	9.9	18.0	10.6	14.7	18.0	9.3	13.3	18.1	9.6	13.0	17.7	11.8
ブロック質量 M g	20.4	20.4	20.4	20.4	20.4	67.6	67.6	67.6	20.4	20.4	20.4	20.4	20.4	20.4	20.4
ブロック密度 ρ_r g/cm^3	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18	2.19	2.19	2.19	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18
勾配 θ °	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
断面平均流速 U_a m/s	0.74	0.58	0.71	0.55	0.62	0.64	0.88	0.85	0.50	0.62	0.66	0.62	0.63	0.67	0.84
近傍流速 U_b m/s	0.83	0.63	0.80	0.62	0.64	0.73	1.04	0.90	0.54	0.67	0.66	0.67	0.66	0.66	
フルード数 Fr	0.64	0.51	0.62	0.56	0.46	0.63	0.73	0.64	0.52	0.55	0.50	0.63	0.56	0.51	0.78
イスバッシュ数 y_a	**0.95**	**0.74**	**0.91**	**0.71**	**0.79**	**0.67**	**0.92**	**0.89**	**0.64**	**0.80**	**0.85**	**0.79**	**0.81**	**0.86**	**1.08**
イスバッシュ数 y_b	**1.07**	**0.80**	**1.02**	**0.80**	**0.82**	**0.77**	**1.09**	**0.95**	**0.70**	**0.86**	**0.85**	**0.86**	**0.84**	**0.84**	
備考						被災せず	被災せず	被災せず				被災せず			天端部被災

●下流側肩

CASE	1-1-1st	1-1-2nd	1-1-3rd	2-1	2-2	2-4	2-5	2-6	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	1-2
マウンド勾配	1:2			1:2		1:2			1:1.5			1:3			1:2
ブロック	小			小		大			小			小			小
初期水深	25cm			20cm	30cm	20cm	25cm	30cm	20cm	25cm	30cm	20cm	25cm	30cm	25cm
ブロック固定	なし			なし		なし			なし			なし			肩付近固定
安定限界流量 Q m^3/min	3.66	3.48	3.65	2.12	5.68	2.13	3.61	5.52	1.90	3.90	5.41	1.71	2.90	4.19	
天端上水深 h' cm	11.6	12.2	11.6	7.4	15.5	6.9	11.3	14.9	7.7	11.6	16.0	7.6	12.3	17.0	
ブロック質量 M g	20.4	20.4	20.4	20.4	20.4	67.6	67.6	67.6	20.4	20.4	20.4	20.4	20.4	20.4	
ブロック密度 ρ_r g/cm^3	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18	2.19	2.19	2.19	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18	
勾配 θ °	26.6	26.6	26.6	26.6	26.6	26.6	26.6	26.6	33.7	33.7	33.7	18.4	18.4	18.4	
断面平均流速 U_a m/s	0.93	0.86	0.93	0.82	1.11	0.83	0.91	1.03	0.68	1.00	0.85	0.61	0.68	0.71	
近傍流速 U_b m/s	0.83	0.76	0.83	0.80	0.84	0.80	0.81	0.75	0.66	0.84	0.58	0.55	0.56	0.48	
フルード数 Fr	0.87	0.79	0.87	0.96	0.90	1.00	0.87	0.85	0.78	0.93	0.68	0.71	0.62	0.55	
イスバッシュ数 y_a	**1.79**	**1.66**	**1.79**	**1.58**	**2.13**	**1.30**	**1.44**	**1.62**	**1.65**	**2.43**	**2.08**	**0.98**	**1.10**	**1.15**	
イスバッシュ数 y_b	**1.60**	**1.46**	**1.59**	**1.53**	**1.62**	**1.26**	**1.28**	**1.18**	**1.61**	**2.04**	**1.41**	**0.89**	**0.90**	**0.77**	
備考					被災せず										

９．１　主な被災形態

ブロックの離脱状況の例を図-13 に示す。台形マウンドの実験では、全てのケースで上流側法肩あるいは下流側法肩のブロックが最初に離脱した。被災形態としては図-14 に示すように、上流側法肩については天端の上流端のブロックがめくれて離脱、下流側法肩については法面最上段のブロックがめくれて離脱する様子が多く見られた。堤頭部の実験結果については後述する。

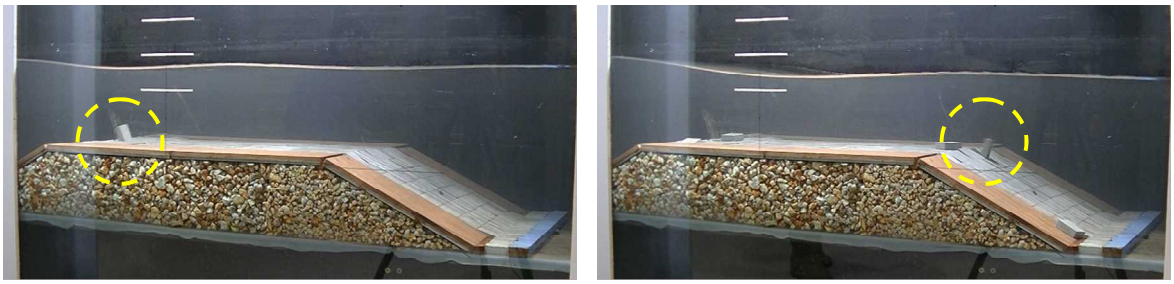


図-13　ブロックの離脱状況例（Case1-1、2 回目）

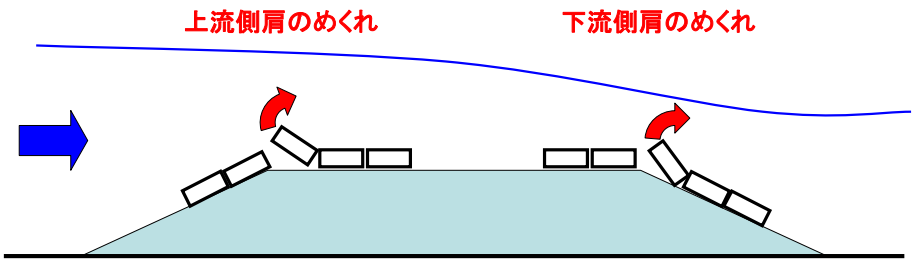


図-14　主な被災形態（台形マウンド実験）

９．２　実験結果のバラツキについて

同一の条件で 3 回繰り返し実験を行った Case 1-1 について、イスバッシュ数の平均値および標準偏差を求めたものを表-5 に示す。今回の実験においてイスバッシュ数の標準偏差は概ね 0.1 程度であった。

表-5　イスバッシュ数のバラツキ（Case 1-1）

		Case 1-1				
		1回目	2回目	3回目	平均	標準偏差
上流側法肩	イスバッシュ数 y_a（断面平均流速より）	0.95	0.74	0.91	0.87	0.11
	イスバッシュ数 y_b（近傍流速より）	1.07	0.80	1.02	0.97	0.14
下流側法肩	イスバッシュ数 y_a（断面平均流速より）	1.79	1.66	1.79	1.75	0.08
	イスバッシュ数 y_b（近傍流速より）	1.60	1.46	1.59	1.55	0.08

９．３　斜面勾配の影響

台形マウンド実験での上流側法肩および下流側法肩位置における、傾斜角θ と移動限界イスバッシュ数の関係を図-15 に示す。図-15 より、θが大きくなるほどイスバッシュ数が大きくなる傾向が明確

に表れていることがわかる。イスバッシュ式には傾斜角θが含まれており、その影響が正しく取り込まれていればイスバッシュ数は傾斜角によらず一定の値となるはずなので、イスバッシュ式は傾斜角の影響を適切に取り込んでいないといえる。

したがって、現状のイスバッシュ式を用いてブロックの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と考えられる。また、ブロックごとのイスバッシュ数を評価する実験においては、斜面勾配を変えた実験を行い、傾斜角ごとのイスバッシュ数を求める必要があると考えられる。

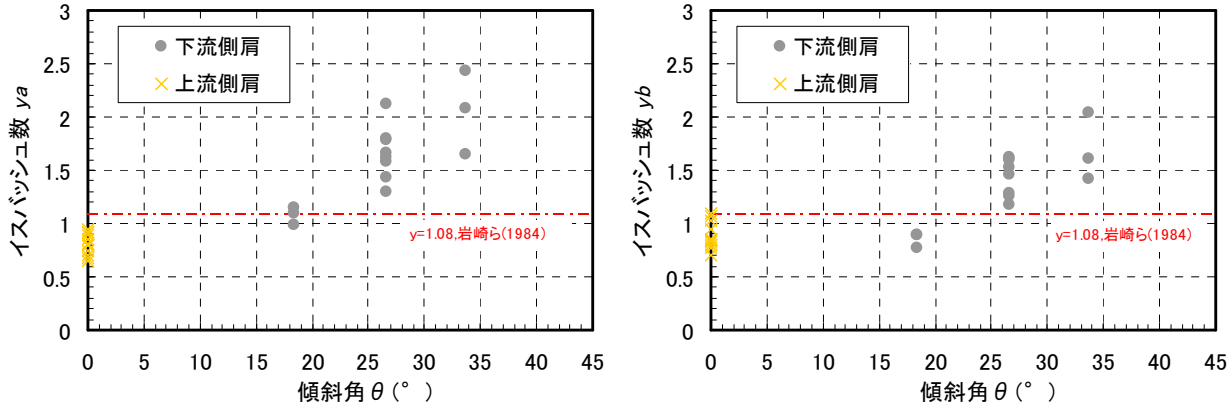


図-15　傾斜角とイスバッシュ数の関係（左：断面平均流速 U_a を使用、右：近傍流速 U_b を使用）

９．４　フルード数の影響

台形マウンド実験での上流側法肩および下流側法肩位置における、フルード数 Fr と移動限界イスバッシュ数の関係を図-16 に示す。前述のように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、フルード数の影響はそれほど明瞭ではないようである。今回の実験においては、ほぼ全てのケースで常流（$Fr<1$）の条件であるため、射流条件での検討は今後の課題である。

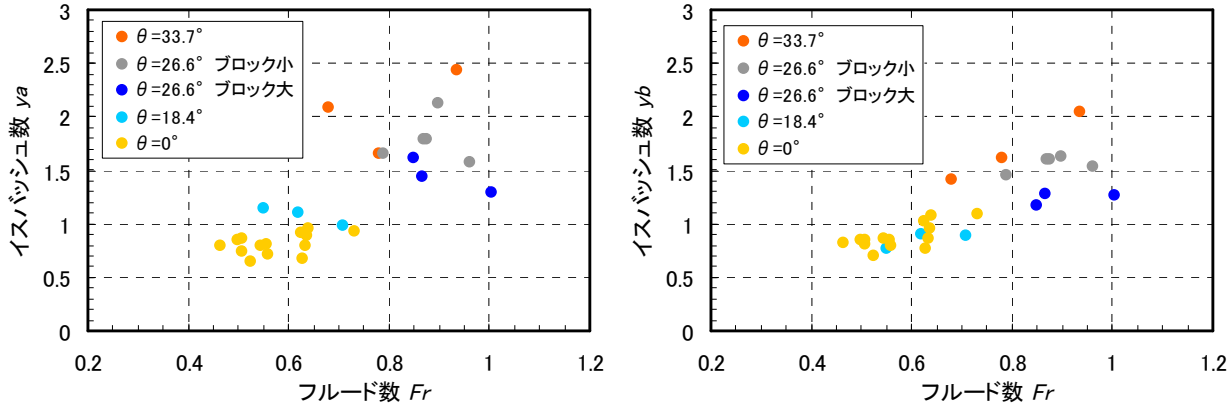


図-16　フルード数とイスバッシュ数の関係（左：断面平均流速 U_a を使用、右：近傍流速 U_b を使用）

９．５　局所的なイスバッシュ数の違いについて

Case1-2 では局所的なイスバッシュ数の違いを調べるために、図-17 に示すように上流側の法肩付近および下流側の法肩付近のブロックを固定した状態で安定実験を行った。

ブロックの被災状況は図-18 に示すように、天端のやや下流側法肩寄りのブロックがめくれて離脱した。離脱箇所の流速分布は測定しておらず水深のみ測定したため、下流側法肩位置での断面平均流速と水深を用いて離脱箇所の移動限界時の断面平均流速を推定し、イスバッシュ数を評価した。断面平均流速は $U_a = 0.84$m/s であり、イスバッシュ数は $y_a = 1.08$ となった。Case1-2 と同じ断面・水深条件である Case 1-1 における上流側法肩部のイスバッシュ数は 0.74～0.95（平均 0.87）であったことから、天端部のイスバッシュ数は上流側法肩部と比較してやや大きい程度であると考えられる。

図-17　Case1-2 の実験前状況

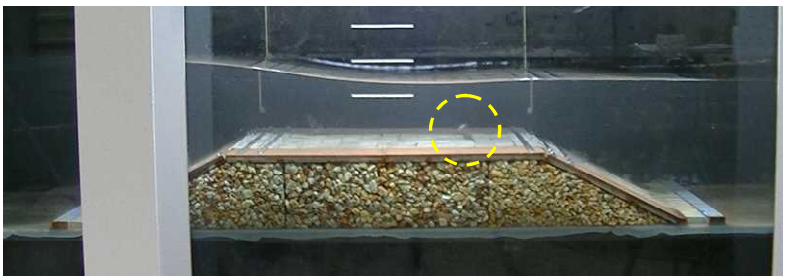


図-18　Case1-2 のブロック離脱状況

９．６　流速の定義について

冒頭に述べたように、ブロックのイスバッシュ数を評価する際、流速の定義が明確でないことが課題となっている。本実験においては、イスバッシュ数の評価に用いる流速の定義として、断面平均流速と近傍流速（ブロック天端上 1cm）の 2 種類で整理を行った。

台形マウンドの全実験ケースから得られた、断面平均流速と近傍流速との関係を図-19 に示す。上流側法肩位置では、両者の値を比較するとわずかに近傍流速の方が大きい程度であることがわかる。一方、下流側法肩位置では近傍流速の方が全体的にかなり小さく、ばらつきも大きいことがわかる。代表的な流速分布の例として図-20 に示すように、上流側法肩では鉛直方向にほぼ一様な流速分布となっているのに対して、下流側法肩では水深方向に中央付近が速く、底面近傍や水面近傍の流速が小

さくなる分布を示している。

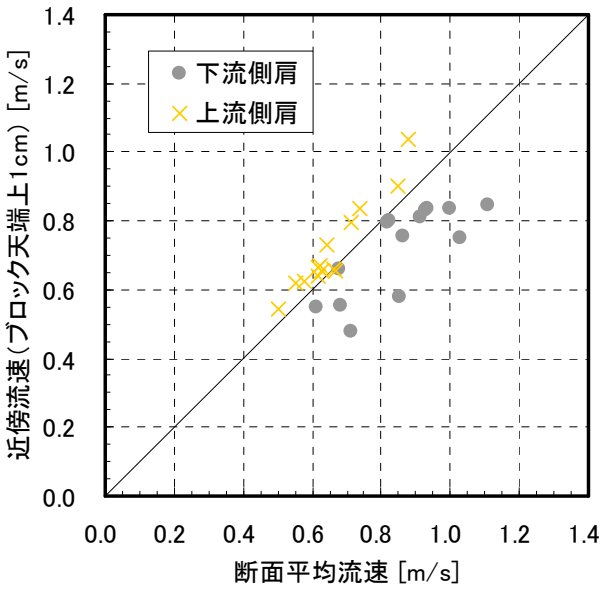


図-19　断面平均流速と近傍流速の比較

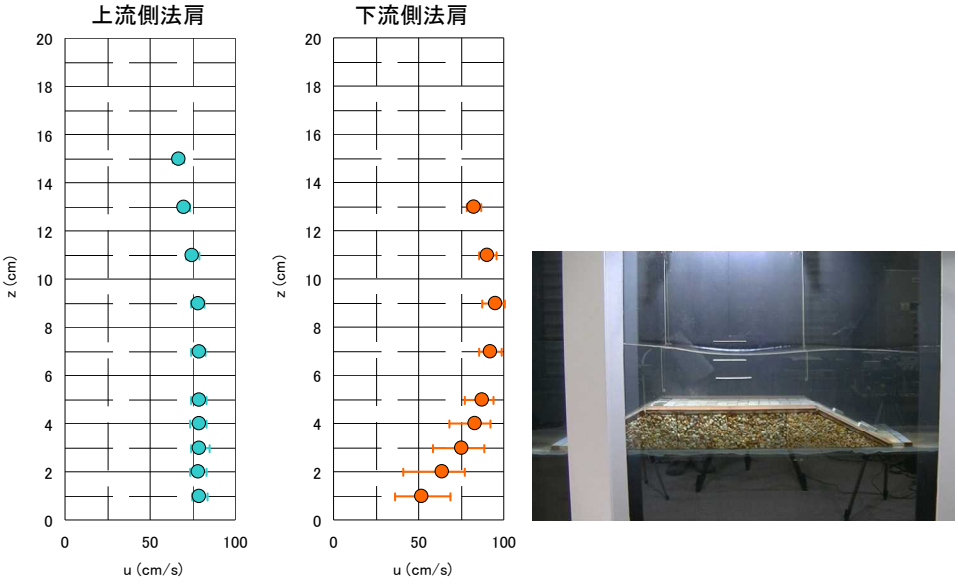


図-20　流速の鉛直分布の代表例（Case2-2、ポンプ流量 5m^3/min）

ブロックの安定性に直接関係するのは近傍流速であると考えられる。図-15 に示したイスバッシュ数の実験結果においても、近傍流速で整理した方がデータのまとまりが良いことがわかる。一方、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、設計との整合という点では断面平均流速を用いた方が良いと考えられる。

イスバッシュ数の評価実験においてどの流速の定義を用いるべきかについては、今後も議論・検討を深めていく必要があると考えられる。

９．７　堤頭部の影響

まず、被災後の状況を図-21 に示す。被災箇所の傾向としては、天端部のケーソン前面の角から斜め後方 45 度のライン（図中赤丸）と、下流側の稜線部（図中黄丸）の 2 箇所を中心に被災が生じた。被災形態としては、台形マウンドの実験と同様に、上流側から下流側にブロックがめくれて離脱する様子が見られた。

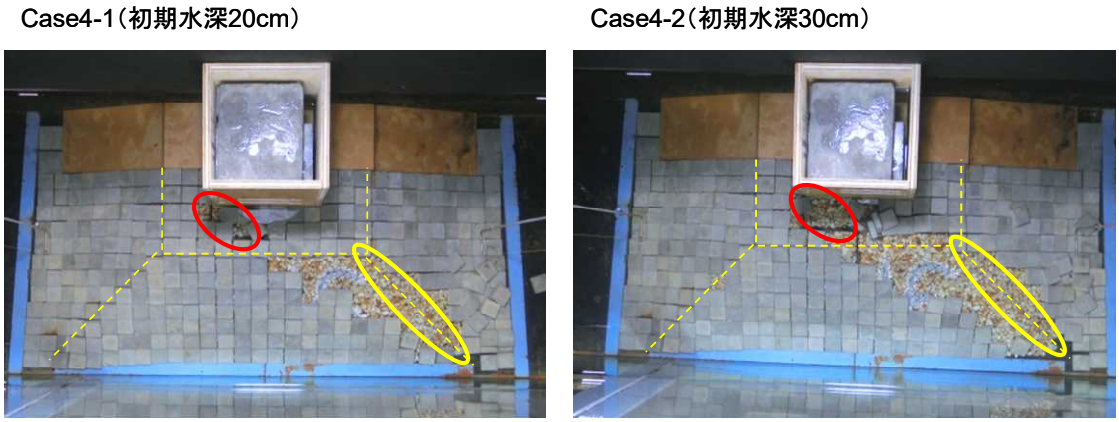


図-21　被災後の状況（堤頭部実験）

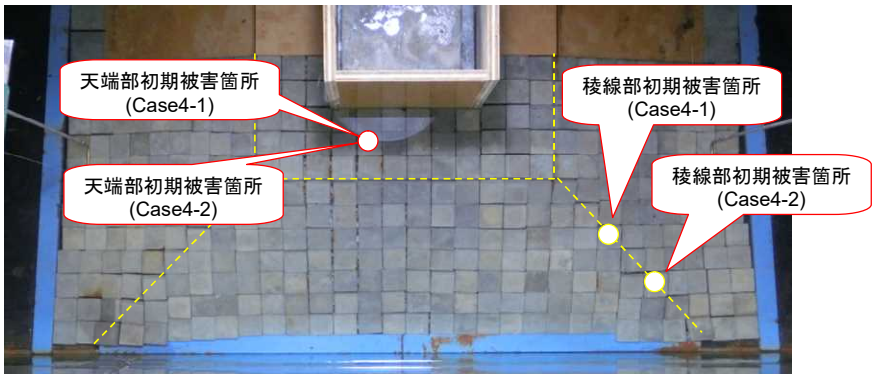


図-22　初期被害発生箇所（堤頭部実験）

図-21 に示した天端部（赤丸の範囲）と稜線部（黄丸の範囲）のそれぞれに対して、最初に離脱が生じた箇所（図-22）を対象として流速鉛直分布を測定し、イスバッシュ数を算出した。イスバッシュ式における流速 U は鉛直平均流速・近傍流速ともに水平方向（x-y）の合成流速（$U=(U_x^2+U_y^2)^{0.5}$）を用いた。また、傾斜角θ については、天端部は$\theta=0^\circ$ を用い、稜線部は流れ方向の斜面の傾斜角を用いた。水路軸に対する水平方向の流れの角度をα（図-23 参照）、斜面勾配をβとすると、流れ方向の傾斜角θは次式によって求められる。

$$\theta=\arctan\left(\tan\beta\cdot\cos\alpha\right) \qquad \cdots(2)$$

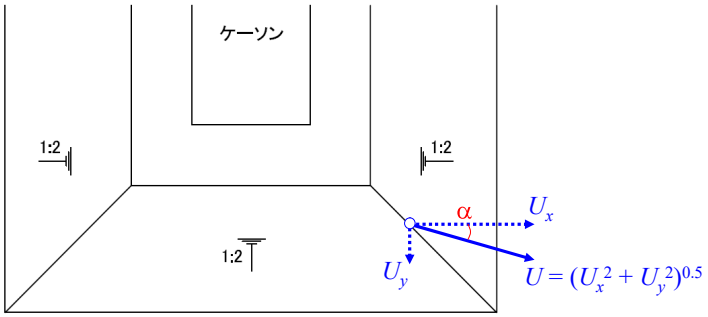


図-23　水路軸に対する水平方向の流れの角度（平面図）

イスバッシュ数を算出した結果を表-6 に示す。また傾斜角とイスバッシュ数の関係について、台形マウンドでの実験結果も含めて図-24 に示す。まず天端部におけるイスバッシュ数は、鉛直平均流速から求めると 2 ケースとも $y_a = 0.58$ であった。台形マウンドの実験での上流側法肩位置（$\theta = 0°$）のイスバッシュ数は表-4 に示したように $y_a = 0.64 \sim 0.95$（平均 0.81）であり、台形マウンドの場合と比較してイスバッシュ数は低下することがわかる。

また稜線部のイスバッシュ数は、鉛直平均流速から求めると $y_a = 0.70 \sim 1.25$ となった。流れの方向は水路軸方向が卓越していたため、傾斜角 θ の値は 26.4～26.5° となっており、斜面勾配の値（26.6°）とほぼ同じである。台形マウンドでの実験の内、斜面勾配 1:2 の実験での下流側法肩位置のイスバッシュ数は $y_a = 1.30 \sim 2.13$（平均 1.66）であり、稜線部に関しても台形マウンドの場合よりイスバッシュ数は低下する結果となった。ただし、堤頭部実験における稜線部のイスバッシュ数に関しては、マウンドを固定したことによりブロックを設置した際に不陸が生じており、イスバッシュ数が過小に評価されている可能性がある。

表-6　堤頭部実験により得られたイスバッシュ数

		天端部		稜線部	
CASE		4-1	4-2	4-1	4-2
マウンド勾配		1:2		1:2	
ブロック		小		小	
初期水深		20cm	30cm	20cm	30cm
ブロック固定		なし		なし	
安定限界流量 Q (m^3/min)		1.4	2.36	0.9	2.36
天端上水深 h' (cm)		7.9	17.9	13.5	25.2
ブロック質量 M (g)		20.4	20.4	20.4	20.4
ブロック密度 ρ_r (g/cm^3)		2.18	2.18	2.18	2.18
フルード数 Fr		0.52	0.34	0.32	0.42
鉛直平均流速を使用	U_x (m/s)	0.40	0.41	0.36	0.65
	U_y (m/s)	0.22	0.19	0.05	0.06
	$U=(U_x^2+U_y^2)^{0.5}$ (m/s)	0.45	0.45	0.36	0.65
	水路軸に対する水平方向の流れの角度 α (	0	0	7.6	5.2
	斜面勾配 β (°)	0	0	26.6	26.6
	流れ方向の傾斜角 θ (°)	0	0	26.4	26.5
	イスバッシュ数 y_a	**0.58**	**0.58**	**0.70**	**1.25**
近傍流速を使用	U_x (m/s)	0.46	0.40	0.40	0.65
	U_y (m/s)	0.22	0.22	0.02	0.03
	$U=(U_x^2+U_y^2)^{0.5}$ (m/s)	0.51	0.46	0.40	0.65
	水路軸に対する水平方向の流れの角度 α (	0	0	3.0	2.6
	斜面勾配 β (°)	0	0	26.6	26.6
	流れ方向の傾斜角 θ (°)	0	0	26.5	26.5
	イスバッシュ数 y_b	**0.65**	**0.59**	**0.77**	**1.24**

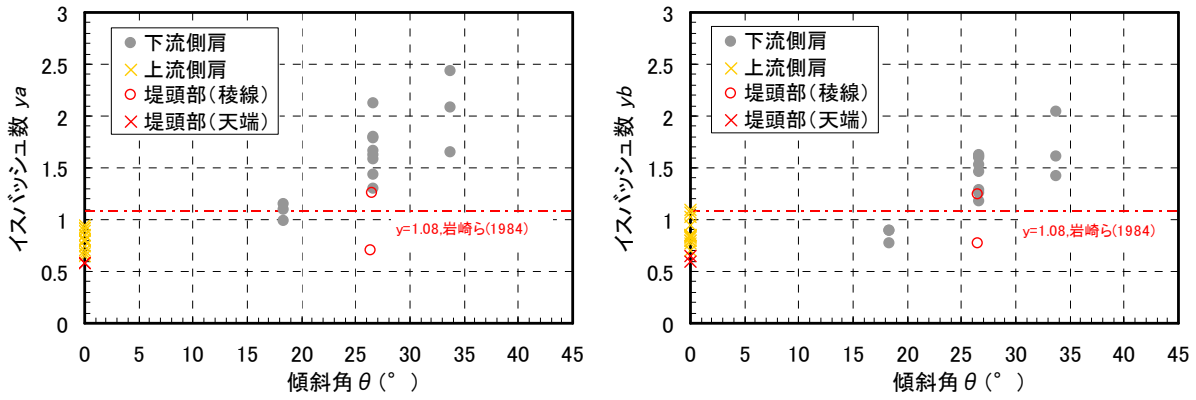


図-24　傾斜角とイスバッシュ数の関係（左：断面平均流速 U_a を使用、右：近傍流速 U_b を使用）

１０．まとめ

本実験により得られた知見と今後の課題をまとめて以下に示す。

（１） 斜面勾配の影響

実験の結果、傾斜角θ が大きくなるほどイスバッシュ数は大きくなる傾向が明確であり、イスバッシュ式の式形は、傾斜角の影響を適切に取り込んでおらず、傾斜角の影響を過大に評価している。したがって、現状のイスバッシュ式を用いてブロックの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と考えられる。

（２） 流れの形態（射流・常流）の影響

今回の実験結果からは、フルード数の影響は明確には表れなかった。ただし、本実験条件はほぼ全て常流（$Fr<1$）となる条件であり、射流条件での検討は今後の課題である。

（３） 局所的なイスバッシュ数の違い

台形マウンドの実験においては、全てのケースで上流側法肩あるいは下流側法肩のブロックが最初に離脱しており、これらの箇所が構造的に弱いことがわかった。また、天端部の上流端以外の箇所のイスバッシュ数は、上流側法肩部と比較してやや大きい程度であると考えられる。

（４） 流速の定義

本実験の結果、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実験データのまとまりが良かった。これは、ブロックの安定性に直接関係するのは近傍流速であるためと考えられる。一方、設計との整合という点では断面平均流速を用いる方が良いと考えられ、イスバッシュ数の評価実験においてどの流速を用いるべきかについては今後の課題である。

（５） 堤頭部の影響

堤頭部を再現した実験では、天端部のケーソン前面の角から斜め後方 45 度のラインと、下流側の稜線部の 2 箇所を中心に被害が生じており、これらの箇所が弱点となることがわかった。また、これらの箇所のイスバッシュ数は、台形マウンドの実験と比較して低下することがわかった。

付録　各ケースの実験結果

ケースごとのブロックの被災箇所、被災状況、移動限界時の流速、イスバッシュ数等をまとめたものを以下に示す。

図の見方は下記の通り。

①：ケース名、実験条件

②：ブロックの被災箇所を示したもの（上から見た図、左側が上流側）

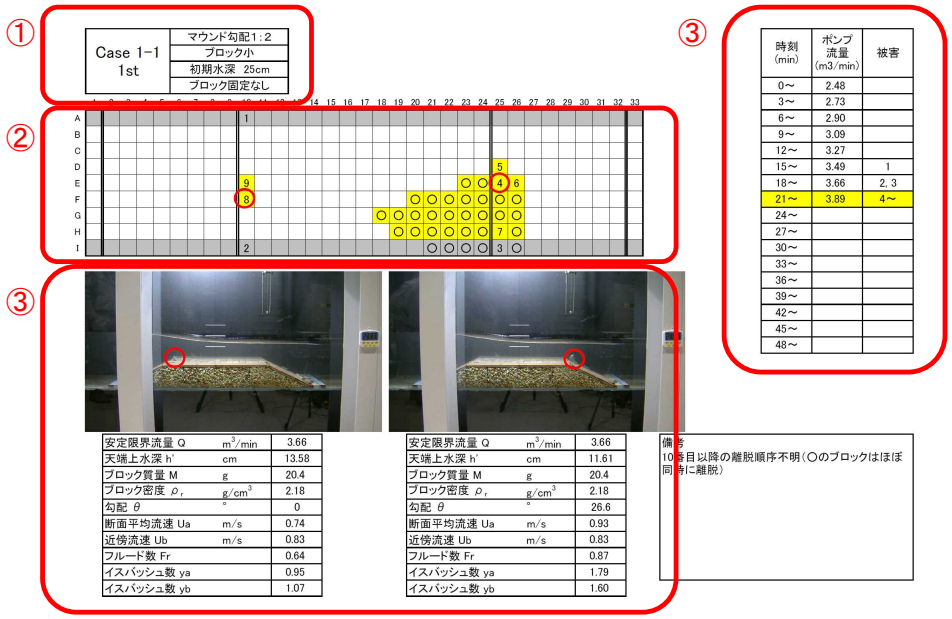
セル中の数字は被災した順番、セルの色は右側の表の流量に対応している

グレーのセルは対象外のブロック

赤丸印を付けたブロックは上流側肩・下流側肩のそれぞれで最初に被災したブロック

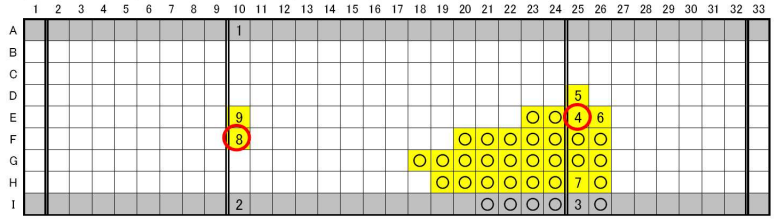
③：ポンプ作動開始からの時刻とポンプ流量、その流量で被災したブロックの番号

④：赤丸印を付けたブロックの被災状況写真と流速・フルード数・イスバッシュ数など



時刻 (min)	ポンプ流量 (m3/min)	被害
0～	2.48	
3～	2.73	
6～	2.90	
9～	3.09	
12～	3.27	
15～	3.49	1
18～	3.66	2, 3
21～	3.89	4～
24～		
27～		
30～		
33～		
36～		
39～		
42～		
45～		
48～		

Case 1-1 1st	マウンド勾配1：2
	ブロック小
	初期水深　25cm
	ブロック固定なし



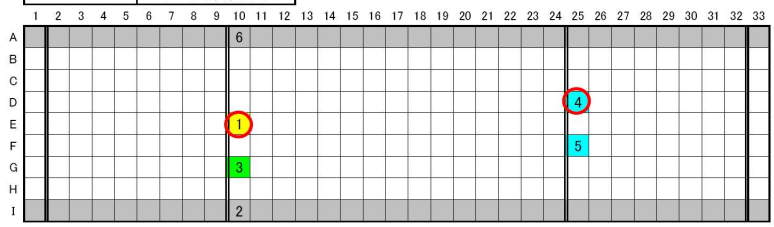
時刻 (min)	ポンプ流量 (m3/min)	被害
0～	2.48	
3～	2.73	
6～	2.90	
9～	3.09	
12～	3.27	
15～	3.49	1
18～	3.66	2, 3
21～	3.89	4～
24～		
27～		
30～		
33～		
36～		
39～		
42～		
45～		
48～		

安定限界流量 Q	m^3/min	3.66
天端上水深 h'	cm	13.58
ブロック質量 M	g	20.4
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.18
勾配 θ	°	0
断面平均流速 Ua	m/s	0.74
近傍流速 Ub	m/s	0.83
フルード数 Fr		0.64
イスバッシュ数 ya		0.95
イスバッシュ数 yb		1.07

安定限界流量 Q	m^3/min	3.66
天端上水深 h'	cm	11.61
ブロック質量 M	g	20.4
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.18
勾配 θ	°	26.6
断面平均流速 Ua	m/s	0.93
近傍流速 Ub	m/s	0.83
フルード数 Fr		0.87
イスバッシュ数 ya		1.79
イスバッシュ数 yb		1.60

備考
10番目以降の離脱順序不明（〇のブロックはほぼ同時に離脱）

Case 1-1 2nd	マウンド勾配1：2
	ブロック小
	初期水深　25cm
	ブロック固定なし



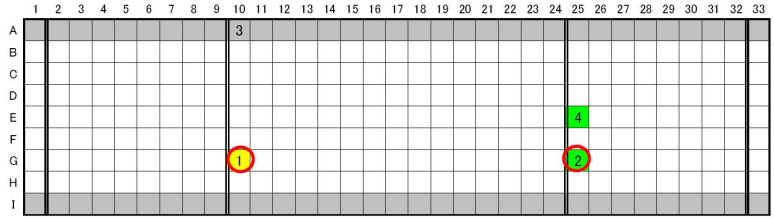
時刻 (min)	ポンプ流量 (m3/min)	被害
0～	2.51	
3～	2.73	
6～	2.89	1
9～	3.11	
12～	3.28	
15～	3.48	2, 3
18～	3.66	4, 5, 6
21～		
24～		
27～		
30～		
33～		
36～		
39～		
42～		
45～		
48～		

安定限界流量 Q	m^3/min	2.73
天端上水深 h'	cm	13.12
ブロック質量 M	g	20.4
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.18
勾配 θ	°	0
断面平均流速 Ua	m/s	0.58
近傍流速 Ub	m/s	0.63
フルード数 Fr		0.51
イスバッシュ数 ya		0.74
イスバッシュ数 yb		0.80

安定限界流量 Q	m^3/min	3.48
天端上水深 h'	cm	12.2
ブロック質量 M	g	20.4
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.18
勾配 θ	°	26.6
断面平均流速 Ua	m/s	0.86
近傍流速 Ub	m/s	0.76
フルード数 Fr		0.79
イスバッシュ数 ya		1.66
イスバッシュ数 yb		1.46

備考

Case 1-1 3rd	マウンド勾配1：2
	ブロック小
	初期水深　25cm
	ブロック固定なし



時刻 (min)	ポンプ 流量 (m3/min)	被害
0～	2.50	
3～	2.73	
6～	2.88	
9～	3.13	
12～	3.34	
15～	3.49	
18～	3.65	1
21～	3.91	2, 3, 4
24～		
27～		
30～		
33～		
36～		
39～		
42～		
45～		
48～		

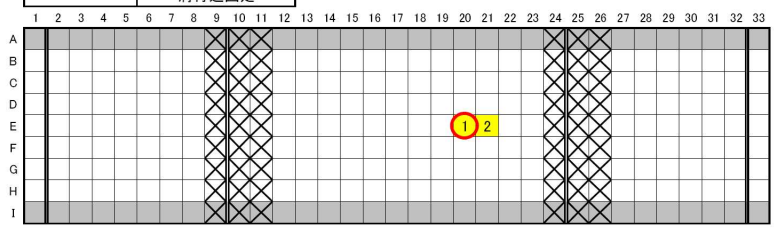
安定限界流量 Q	m^3/min	3.49
天端上水深 h'	cm	13.23
ブロック質量 M	g	20.4
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.18
勾配 θ	°	0
断面平均流速 Ua	m/s	0.71
近傍流速 Ub	m/s	0.80
フルード数 Fr		0.62
イスバッシュ数 ya		0.91
イスバッシュ数 yb		1.02

安定限界流量 Q	m^3/min	3.65
天端上水深 h'	cm	11.61
ブロック質量 M	g	20.4
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.18
勾配 θ	°	26.6
断面平均流速 Ua	m/s	0.93
近傍流速 Ub	m/s	0.83
フルード数 Fr		0.87
イスバッシュ数 ya		1.79
イスバッシュ数 yb		1.59

備考

Case 1-2	マウンド勾配1：2
	ブロック小
	初期水深　25cm
	肩付近固定

☒：固定したブロック

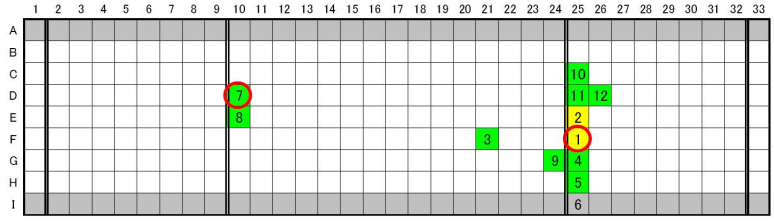


時刻 (min)	ポンプ 流量 (m3/min)	被害
0～	2.49	
3～	2.72	
6～	2.88	
9～	3.08	
12～	3.30	
15～	3.49	
18～	3.69	1, 2
21～		
24～		
27～		
30～		
33～		
36～		
39～		
42～		
45～		
48～		

安定限界流量 Q	m^3/min	3.49
天端上水深 h'	cm	11.82
ブロック質量 M	g	20.4
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.18
勾配 θ	°	0
断面平均流速 Ua	m/s	0.84
近傍流速 Ub	m/s	測定なし
フルード数 Fr		0.78
イスバッシュ数 ya		1.08
イスバッシュ数 yb		測定なし

備考

Case 2-1	マウンド勾配1：2
	ブロック小
	初期水深　20cm
	ブロック固定なし



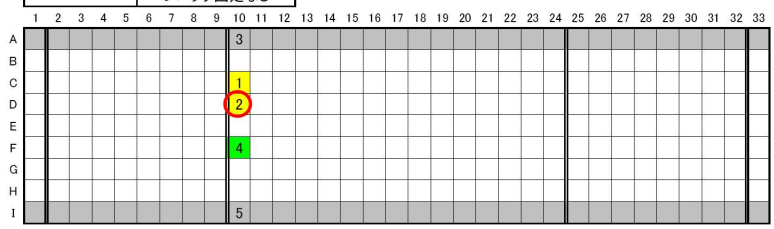
時刻 (min)	ポンプ流量 (m3/min)	被害
0～	1.52	
3～	1.78	
6～	1.93	
9～	2.12	
12～	2.33	1, 2
15～	2.58	3～
18～		
21～		
24～		
27～		
30～		
33～		
36～		
39～		
42～		
45～		
48～		

安定限界流量 Q	m^3/min	2.33
天端上水深 h'	cm	9.86
ブロック質量 M	g	20.4
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.18
勾配 θ	°	0
断面平均流速 Ua	m/s	0.55
近傍流速 Ub	m/s	0.62
フルード数 Fr		0.56
イスバッシュ数 ya		0.71
イスバッシュ数 yb		0.80

安定限界流量 Q	m^3/min	2.12
天端上水深 h'	cm	7.4
ブロック質量 M	g	20.4
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.18
勾配 θ	°	26.6
断面平均流速 Ua	m/s	0.82
近傍流速 Ub	m/s	0.80
フルード数 Fr		0.96
イスバッシュ数 ya		1.58
イスバッシュ数 yb		1.53

備考

Case 2-2	マウンド勾配1：2
	ブロック小
	初期水深　30cm
	ブロック固定なし



時刻 (min)	ポンプ流量 (m3/min)	被害
0～		
3～		
6～	2.88	
9～	3.08	
12～	3.30	
15～	3.48	
18～	3.69	
21～	3.87	
24～	4.15	
27～	4.26	1, 2
30～	4.50	
33～	4.71	3
36～	4.90	
39～	5.08	4, 5
42～	5.29	
45～	5.48	
48～	5.68	

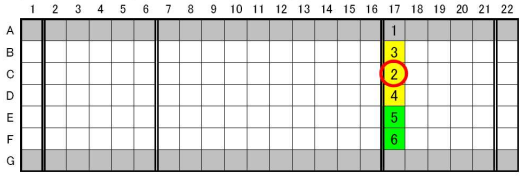
※ポンプ出力限界のため終了

安定限界流量 Q	m^3/min	4.15
天端上水深 h'	cm	18.03
ブロック質量 M	g	20.4
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.18
勾配 θ	°	0
断面平均流速 Ua	m/s	0.62
近傍流速 Ub	m/s	0.64
フルード数 Fr		0.46
イスバッシュ数 ya		0.79
イスバッシュ数 yb		0.82

安定限界流量 Q	m^3/min	5.68
天端上水深 h'	cm	15.46
ブロック質量 M	g	20.4
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.18
勾配 θ	°	26.6
断面平均流速 Ua	m/s	1.11
近傍流速 Ub	m/s	0.84
フルード数 Fr		0.90
イスバッシュ数 ya		2.13
イスバッシュ数 yb		1.62

備考
岸側肩は被災しなかったため、
最大流量時の値を記載した

Case 2-4	マウンド勾配1：2
	ブロック大
	初期水深　20cm
	ブロック固定なし



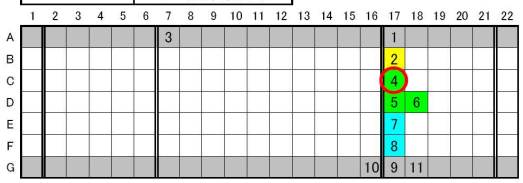
時刻 (min)	ポンプ流量 (m3/min)	被害
0～	1.50	
3～	1.74	
6～	1.89	
9～	2.13	
12～	2.33	1, 2, 3, 4
15～	2.49	
18～	2.72	5, 6
21～	2.90	
24～		
27～		
30～		
33～		
36～		
39～		
42～		
45～		
48～		

安定限界流量 Q	m^3/min	2.9
天端上水深 h'	cm	10.64
ブロック質量 M	g	67.6
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.19
勾配 θ	°	0
断面平均流速 Ua	m/s	0.64
近傍流速 Ub	m/s	0.73
フルード数 Fr		0.63
イスバッシュ数 ya		0.67
イスバッシュ数 yb		0.77

安定限界流量 Q	m^3/min	2.13
天端上水深 h'	cm	6.9
ブロック質量 M	g	67.6
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.19
勾配 θ	°	26.6
断面平均流速 Ua	m/s	0.83
近傍流速 Ub	m/s	0.80
フルード数 Fr		1.00
イスバッシュ数 ya		1.30
イスバッシュ数 yb		1.26

備考
沖側肩は被災しなかったため、
最大流量時の値を記載した

Case 2-5	マウンド勾配1：2
	ブロック大
	初期水深　25cm
	ブロック固定なし



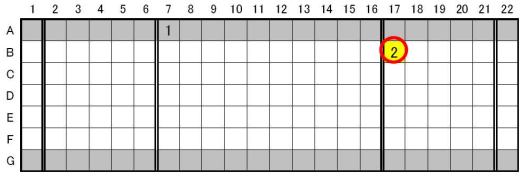
時刻 (min)	ポンプ流量 (m3/min)	被害
0～	2.02	
3～	2.20	
6～	2.43	
9～	2.59	
12～	2.86	
15～	3.00	
18～	3.18	
21～	3.41	
24～	3.61	
27～	3.79	1, 2
30～	3.99	3
33～	4.19	4, 5, 6
36～	4.40	7, 8
39～	4.59	9, 10, 11
42～		
45～		
48～		

安定限界流量 Q	m^3/min	4.59
天端上水深 h'	cm	14.7
ブロック質量 M	g	67.6
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.19
勾配 θ	°	0
断面平均流速 Ua	m/s	0.88
近傍流速 Ub	m/s	1.04
フルード数 Fr		0.73
イスバッシュ数 ya		0.92
イスバッシュ数 yb		1.09

安定限界流量 Q	m^3/min	3.61
天端上水深 h'	cm	11.32
ブロック質量 M	g	67.6
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.19
勾配 θ	°	26.6
断面平均流速 Ua	m/s	0.91
近傍流速 Ub	m/s	0.81
フルード数 Fr		0.87
イスバッシュ数 ya		1.44
イスバッシュ数 yb		1.28

備考
沖側肩は被災しなかったため、
最大流量時の値を記載した

Case 2-6	マウンド勾配1：2
	ブロック大
	初期水深　30cm
	ブロック固定なし



時刻 (min)	ポンプ流量 (m3/min)	被害
0～	3.50	
3～	3.70	
6～	3.93	
9～	4.09	
12～	4.32	
15～	4.53	
18～	4.72	1
21～	4.91	
24～	5.12	
27～	5.30	
30～	5.52	
33～	5.71	2
36～		
39～		
42～		
45～		
48～		

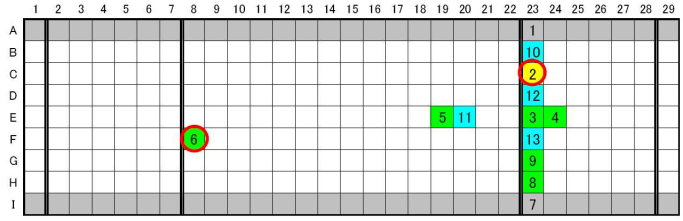
安定限界流量 Q	m^3/min	5.71
天端上水深 h'	cm	18.02
ブロック質量 M	g	67.6
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.19
勾配 θ	°	0
断面平均流速 Ua	m/s	0.85
近傍流速 Ub	m/s	0.90
フルード数 Fr		0.64
イスバッシュ数 ya		0.89
イスバッシュ数 yb		0.95

安定限界流量 Q	m^3/min	5.52
天端上水深 h'	cm	14.94
ブロック質量 M	g	67.6
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.19
勾配 θ	°	26.6
断面平均流速 Ua	m/s	1.03
近傍流速 Ub	m/s	0.75
フルード数 Fr		0.85
イスバッシュ数 ya		1.62
イスバッシュ数 yb		1.18

備考
沖側肩は被災しなかったため、
最大流量時の値を記載した

Case 3-1

マウンド勾配1：1．5
ブロック小
初期水深　20cm
ブロック固定なし



時刻 (min)	ポンプ流量 (m3/min)	被害
0～	1.48	
3～	1.72	
6～	1.90	1
9～	2.13	2
12～	2.28	3～9
15～	2.49	10～13
18～	2.73	
21～		
24～		
27～		
30～		
33～		
36～		
39～		
42～		
45～		
48～		

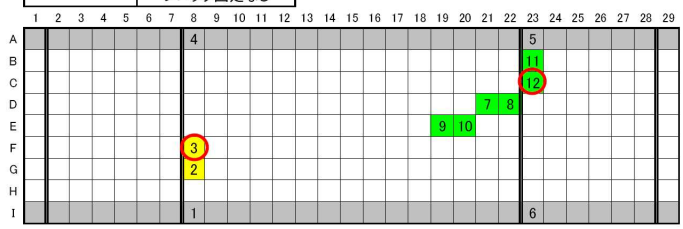
安定限界流量 Q	m^3/min	2.13
天端上水深 h'	cm	9.31
ブロック質量 M	g	20.4
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.18
勾配 θ	°	0
断面平均流速 Ua	m/s	0.50
近傍流速 Ub	m/s	0.54
フルード数 Fr		0.52
イスバッシュ数 ya		0.64
イスバッシュ数 yb		0.70

安定限界流量 Q	m^3/min	1.9
天端上水深 h'	cm	7.7
ブロック質量 M	g	20.4
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.18
勾配 θ	°	33.7
断面平均流速 Ua	m/s	0.68
近傍流速 Ub	m/s	0.66
フルード数 Fr		0.78
イスバッシュ数 ya		1.65
イスバッシュ数 yb		1.61

備考

Case 3-2

マウンド勾配1：1．5
ブロック小
初期水深　25cm
ブロック固定なし



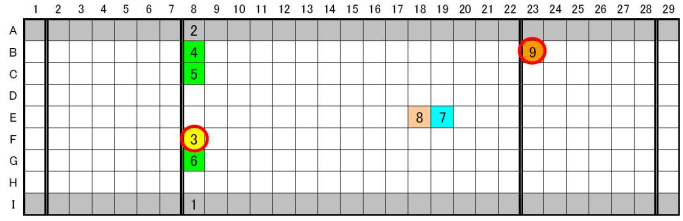
時刻 (min)	ポンプ流量 (m3/min)	被害
0～	2.50	
3～	2.73	
6～	2.91	
9～	3.08	
12～	3.29	1
15～	3.56	2, 3
18～	3.70	
21～	3.90	4, 5
24～	4.11	6～
27～		
30～		
33～		
36～		
39～		
42～		
45～		
48～		

安定限界流量 Q	m^3/min	3.29
天端上水深 h'	cm	13.28
ブロック質量 M	g	20.4
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.18
勾配 θ	°	0
断面平均流速 Ua	m/s	0.62
近傍流速 Ub	m/s	0.67
フルード数 Fr		0.55
イスバッシュ数 ya		0.80
イスバッシュ数 yb		0.86

安定限界流量 Q	m^3/min	3.9
天端上水深 h'	cm	11.62
ブロック質量 M	g	20.4
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.18
勾配 θ	°	33.7
断面平均流速 Ua	m/s	1.00
近傍流速 Ub	m/s	0.84
フルード数 Fr		0.93
イスバッシュ数 ya		2.43
イスバッシュ数 yb		2.04

備考

Case 3-3	マウンド勾配1：1．5
	ブロック小
	初期水深　30cm
	ブロック固定なし



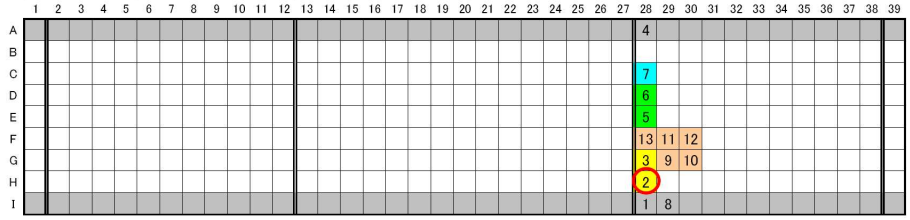
時刻 (min)	ポンプ流量 (m3/min)	被害
0～	3.01	
3～	3.19	
6～	3.42	
9～	3.58	
12～	3.79	
15～	3.98	1
18～	4.21	2
21～	4.40	3
24～	4.61	
27～	4.79	4, 5, 6
30～	5.00	7
33～	5.21	
36～	5.41	8
39～	5.60	9
42～		
45～		
48～		

安定限界流量 Q	m^3/min	4.21
天端上水深 h'	cm	18.07
ブロック質量 M	g	20.4
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.18
勾配 θ	°	0
断面平均流速 Ua	m/s	0.66
近傍流速 Ub	m/s	0.66
フルード数 Fr		0.50
イスバッシュ数 ya		0.85
イスバッシュ数 yb		0.85

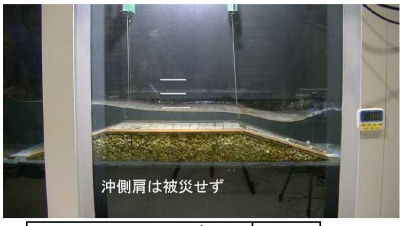
安定限界流量 Q	m^3/min	5.41
天端上水深 h'	cm	16
ブロック質量 M	g	20.4
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.18
勾配 θ	°	33.7
断面平均流速 Ua	m/s	0.85
近傍流速 Ub	m/s	0.58
フルード数 Fr		0.68
イスバッシュ数 ya		2.08
イスバッシュ数 yb		1.41

備考

Case 3-4	マウンド勾配1：3
	ブロック小
	初期水深　20cm
	ブロック固定なし



時刻 (min)	ポンプ流量 (m3/min)	被害
0～	1.50	
3～	1.71	
6～	1.88	1～4
9～	2.10	5, 6
12～	2.33	7
15～	2.48	8～13
18～	?	崩壊
21～		
24～		
27～		
30～		
33～		
36～		
39～		
42～		
45～		
48～		



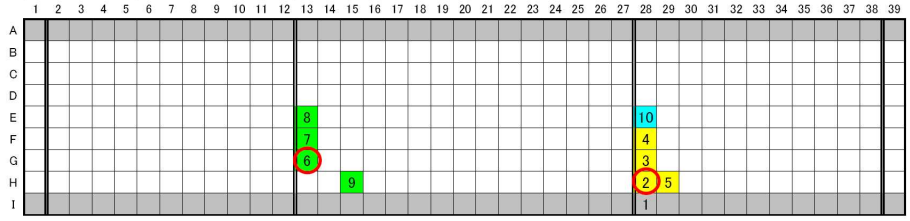
安定限界流量 Q	m^3/min	2.48
天端上水深 h'	cm	9.64
ブロック質量 M	g	20.4
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.18
勾配 θ	°	0
断面平均流速 Ua	m/s	0.62
近傍流速 Ub	m/s	0.67
フルード数 Fr		0.63
イスバッシュ数 ya		0.79
イスバッシュ数 yb		0.86

安定限界流量 Q	m^3/min	1.71
天端上水深 h'	cm	7.56
ブロック質量 M	g	20.4
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.18
勾配 θ	°	18.4
断面平均流速 Ua	m/s	0.61
近傍流速 Ub	m/s	0.55
フルード数 Fr		0.71
イスバッシュ数 ya		0.98
イスバッシュ数 yb		0.89

備考

Case 3-5

マウンド勾配1:3
ブロック小
初期水深　25cm
ブロック固定なし



時刻 (min)	ポンプ流量 (m3/min)	被害
0～	2.44	
3～	2.73	
6～	2.90	
9～	3.07	1～5
12～	3.28	6～9
15～	3.50	10
18～	3.67	
21～	?	崩壊
24～		
27～		
30～		
33～		
36～		
39～		
42～		
45～		
48～		

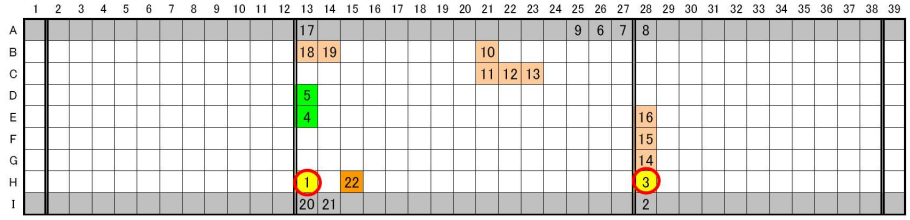
安定限界流量 Q	m^3/min	3.07
天端上水深 h'	cm	13
ブロック質量 M	g	20.4
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.18
勾配 θ	°	0
断面平均流速 Ua	m/s	0.63
近傍流速 Ub	m/s	0.66
フルード数 Fr		0.56
イスバッシュ数 ya		0.81
イスバッシュ数 yb		0.84

安定限界流量 Q	m^3/min	2.9
天端上水深 h'	cm	12.28
ブロック質量 M	g	20.4
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.18
勾配 θ	°	18.4
断面平均流速 Ua	m/s	0.68
近傍流速 Ub	m/s	0.56
フルード数 Fr		0.62
イスバッシュ数 ya		1.10
イスバッシュ数 yb		0.90

備考

Case 3-6

マウンド勾配1:3
ブロック小
初期水深　30cm
ブロック固定なし



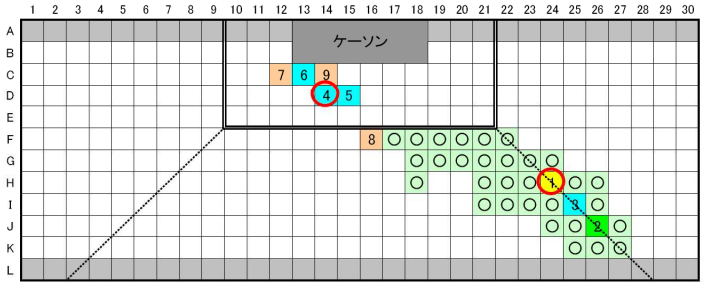
時刻 (min)	ポンプ流量 (m3/min)	被害
0～	2.97	
3～	3.17	
6～	3.37	
9～	3.60	
12～	3.80	
15～	4.00	
18～	4.19	
21～	4.41	1, 2, 3
24～	4.62	
27～	4.81	4, 5
30～	4.99	
33～	5.19	6, 7, 8
36～	5.40	9～19
39～	5.59	20～22
42～		
45～		
48～		

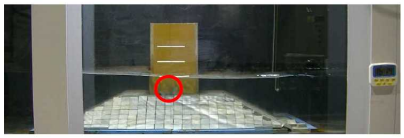
安定限界流量 Q	m^3/min	4.19
天端上水深 h'	cm	17.73
ブロック質量 M	g	20.4
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.18
勾配 θ	°	0
断面平均流速 Ua	m/s	0.67
近傍流速 Ub	m/s	0.66
フルード数 Fr		0.51
イスバッシュ数 ya		0.86
イスバッシュ数 yb		0.84

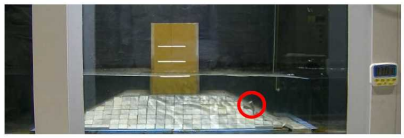
安定限界流量 Q	m^3/min	4.19
天端上水深 h'	cm	17.04
ブロック質量 M	g	20.4
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.18
勾配 θ	°	18.4
断面平均流速 Ua	m/s	0.71
近傍流速 Ub	m/s	0.48
フルード数 Fr		0.55
イスバッシュ数 ya		1.15
イスバッシュ数 yb		0.77

備考

Case 4-1	堤頭部(勾配1:2)
	ブロック小
	初期水深　20cm
	ブロック固定なし







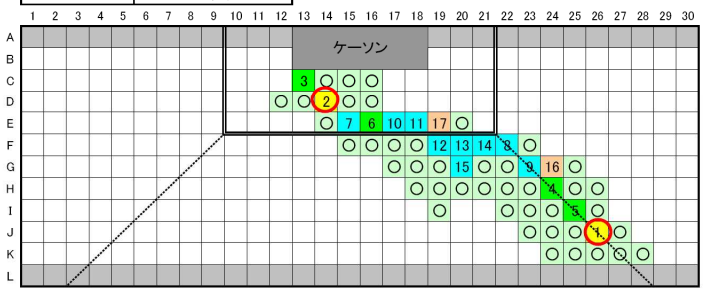
時刻 (min)	ポンプ流量 (m3/min)	被害
0～	0.55	
3～	0.90	
6～	1.00	1
9～	1.23	2
12～	1.40	
15～	1.58	3～6
18～	1.79	
21～	1.99	7, 8, 9
24～	2.18	多数
27～		
30～		
33～		
36～		
39～		
42～		
45～		
48～		

安定限界流量 Q	m^3/min	1.4
天端上水深 h'	cm	7.9
ブロック質量 M	g	20.4
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.18
勾配 θ	°	0
断面平均流速 Ua	m/s	0.45
近傍流速 Ub	m/s	0.51
フルード数 Fr		0.52
イスバッシュ数 ya		0.58
イスバッシュ数 yb		0.65

安定限界流量 Q	m^3/min	0.9
天端上水深 h'	cm	13.5
ブロック質量 M	g	20.4
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.18
断面平均流速 Ua	m/s	0.36
流れ方向の勾配 θ	°	26.36
近傍流速 Ub	m/s	0.40
流れ方向の勾配 θ	°	26.53
フルード数 Fr		0.32
イスバッシュ数 ya		0.70
イスバッシュ数 yb		0.77

備考
時刻24分以降、多数被災(○印のブロック)

Case 4-2	堤頭部(勾配1:2)
	ブロック小
	初期水深　30cm
	ブロック固定なし



時刻 (min)	ポンプ流量 (m3/min)	被害
0～	1.43	
3～	1.54	
6～	1.79	
9～	1.96	
12～	2.18	
15～	2.36	
18～	2.67	1, 2
21～	2.79	
24～	3.00	3～6
27～	3.17	
30～	3.41	7～15
33～	3.62	16, 17
36～	3.84	多数
39～		
42～		
45～		
48～		

安定限界流量 Q	m^3/min	2.36
天端上水深 h'	cm	17.9
ブロック質量 M	g	20.4
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.18
勾配 θ	°	0
断面平均流速 Ua	m/s	0.45
近傍流速 Ub	m/s	0.46
フルード数 Fr		0.34
イスバッシュ数 ya		0.58
イスバッシュ数 yb		0.59

安定限界流量 Q	m^3/min	2.36
天端上水深 h'	cm	25.2
ブロック質量 M	g	20.4
ブロック密度 ρ_r	g/cm^3	2.18
断面平均流速 Ua	m/s	0.65
流れ方向の勾配 θ	°	26.47
近傍流速 Ub	m/s	0.65
流れ方向の勾配 θ	°	26.54
フルード数 Fr		0.42
イスバッシュ数 ya		1.25
イスバッシュ数 yb		1.24

備考
時刻36分以降、多数被災(○印のブロック)