

令和3年度水産基盤整備調査委託事業報告書

I. 課題名

「津波の流れの作用に対するブロック等の安定質量検討調査」

II. 実施機関及び担当者名

国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産技術研究所

環境・応用部門 水産工学部

水産工学副部長

三上 信雄

水産工学部 水産基盤グループ長

佐伯 公康

主幹研究員

大村 智宏

水産基盤グループ主任研究員

古市 尚基

水産基盤グループ主任研究員

大井 邦昭

一般財団法人漁港漁場漁村総合研究所

第1調査研究部 主任研究員

岩瀬 浩之

第1調査研究部 主任研究員

丸山 草平

株式会社アルファ水工コンサルタンツ

東京本社 技術開発センター

シニアフェロー(特任執行役員)

中山 哲厳

北海道本社 技術部 グループリーダー

高木 隼人

北海道本社 技術部 主任

遠藤 次郎

北海道本社 技術部 主任

宍戸 雄太

国際気象海洋株式会社

取締役社長

門 安曇

銚子グループ グループリーダー

小林 学

建設コンサルグループ プロジェクトマネージャー

細野 益男

建設コンサルグループ 技師

橋野 公一

III. ねらい

平成23年東北地方太平洋沖地震・津波では防波堤等の施設が被害を受けたが、被災原因の一つとして津波による強い流れにより施設の基礎部を保護する被覆ブロックが流失したことが挙げられる。今後の施設整備にあたっては、発生頻度が比較的高い(数十年～百数十年に一度程度)「レベル1津波」に対しては機能を維持するとともに、発生頻度が低いもののレベル1津波に比べて発生規模が最大クラスである「レベル2津波」に対しては崩壊までの時間を引き延ばすことや、機能の完全な喪失を防ぐ等の構造上の工夫を施すことが求められる。その観点から、今次津波で被災のきっかけとなった被覆ブロックの流れに対する安定性の適切な評価は不可欠の課題である。現行の「漁港漁場の施設的设计参考図書 2015年版」では、津波の流れに対する被覆ブロックの安定性はイスパッシュ式で評価されている。しかし、参考図書記載の現行式(イス

バッシュ CERC 式) で安定質量を算定するとレベル 1 津波に対してもブロック 1 個当たりの所要質量が数百トンから数千トンと算出され、設計実務に支障が生じる場合があることが危惧される。このため、合理的かつ現実的な被覆ブロックの安定性照査手法の構築が求められている。

平成 30～令和 2 年度までの水産基盤整備調査委託事業「漁港漁場施設の設計手法の高度化検討調査」内の調査では、マウンド上の初期水位条件を一定値に概ね揃えた水理模型実験や、実験結果の解釈を補完するための数値計算を実施した。現時点までの主要な成果として、以下が挙げられる。

- 1) 実験結果から得られたブロック質量—安定限界流速の関係性の結果が、現行式(イスバッシュ CERC 式)による算定結果を大きく下回ること、すなわち、現行式に代わる算定式の構築・提示可能性を示した。
- 2) 水理模型実験での流体力計測や数値計算によってブロックへの作用流体力を検討した結果、イスバッシュ式が仮定する抗力に加えて揚力の作用が重要であることや、流体力が局所的に分布し、ブロックが回転しながら移動することに寄与することを示した。
- 3) 1) 2) の結果に基づき、ブロックの所要安定質量の評価式を、揚力等の流体力がブロックに局所的に作用するという力学的枠組みに基づいて導出した。水理模型実験結果との比較等に基づき、流体力の作用面積がブロック径の 2 乗に比例すると仮定した「流速の 6 乗式」と流体力の作用面積がブロック径の 1 乗に比例すると仮定した「流速の 3 乗式」とを提案した。

しかしながら、これまでの取り組みの結果、合理的かつ現実的な被覆ブロックの所用質量算定式の提案に向けて、主たるものとして、以下のような課題が残された：

課題 1) 算定式の使い分けについて 令和 2 年度には、新たに 2 つの算定式(「流速 6 乗式」・「流速 3 乗式」)を提示したが、2 式の使い分け、換言すれば、それぞれの式の適用に関するより具体的な分岐条件の方針提示等について課題が残された。この背景として、2 式の適用性・優位性を検討する上での作用流体力の特性や作用範囲等に関する科学的知見が不明確なまま残されたことや、令和 2 年度の結果として、現象論として本来参照が望ましい底面付近流速と設計実務で参照される断面付近流速との関連性について、さらなる検討の必要性が生じたことが挙げられる。次項以降で示すような課題に係る知見獲得や実務性の検討結果を踏まえて、式の適用性・適用範囲や使い分けの分岐条件を検討・提示する必要がある。

課題 2) 低水位条件への算定式の適用性について これまでの検討内容での適用可能範囲(実験での検討確認範囲)が比較的水位の高い状態(初期のマウンド上初期水位として現地スケールで 12 m)に限られていたため、水位が変化した条件、特に低水位条件下でのブロックの安定性に対する算定式の適用性を検討する必要がある。

課題 3) 異なるブロック形状への算定式の適用性について これまでの検討内容では、主に方塊型を対象としたため、異なるブロック形状に対する算定式の適用性を検討する必要がある。

- 課題 4) 実験縮尺の影響について 令和 2 年度までの調査では、概ね一定の縮尺を用いた水理模型実験による検討を行ったため、異なる縮尺の実験からも算定式に関する同様の知見・係数値等が得られるかについての実験的検討が未実施だった。特に、「流速 3 乗式」は縮尺 $1/s$ の実験から得られた係数値を現地換算する際に s の平方根で除して用いることを提案しているが、その提案の妥当性確認等のため、異なる縮尺の模型実験等による検証が必要である。
- 課題 5) 参照流速の影響について 令和 2 年度では、平成 31 年度までと異なり、現象論として本来参照が望ましい底面付近流速と設計実務で参照される断面付近流速との関係について、ブロック移動開始時の底面付近流速が断面平均流速より大きくなるケースが多くみられた。その結果、流速 6 乗式・3 乗式は両者とも CERC 式と比べて実験結果とよく合致した一方で、断面平均流速を用いると流速 6 乗式の算定曲線が、底面付近流速を用いると流速 3 乗式の曲線が実験結果と比較的よく合致した。今後の結果整理には、この断面平均流速—底面付近流速の関連性に引き続き留意して、取り組む必要がある。
- 課題 6) 3次元流れ条件下での算定式の適用性について これまでの検討が主に理想的な断面 2次元の流れ条件下を対象としたものであったため、堤頭部等での 3次元条件下での式の適用性を検討する必要がある。また、3次元流れの影響を検討する際に作用流れの時間変化の影響を検討する必要があるため、必要に応じて、非定常性の流れ条件下での式の適用性を併せて検討する必要がある。
- 課題 7) 非線形長波モデルの活用における留意点整理について 設計実務では非線形長波理論に基づく平面 2次元計算により所要安定質量算定のための津波流速値を求めると想定される。令和 2 年度では、非線形長波モデルの活用の際の留意点整理に係る検討を行ったが、低水位条件や 3次元条件下でのモデル活用に関する留意点整理について未検討だった。この非線形長波モデルの活用に関わる留意点整理について、今後の実験結果と追加比較等することを通じて検討する必要性が考えられ得る。

令和 3 年度調査では、上述の課題のうちの特に課題 1)～5) に対応するべく、提案された「流速の 6 乗式」「流速の 3 乗式」の適用条件を拡充・検証するための水理模型実験等に取り組み、その結果を踏まえ、イスバッシュ式に代わる実用的な安定質量算定式を提案することを目的とする。その目的のため、以下の項目を実施した：

ア 水理模型実験及び数値計算の実施

令和 3 年度は、平成 30 年度～令和 2 年度までの手法を参考として、初期のマウンド上水位について現地スケールで 12 m 相当より小さい条件、ならびにブロック形状について方塊型以外の条件下での算定式の適用可能性を、水理模型実験により検討する。具体的には、水位変化のケース数として 6 水位×3 ブロックサイズ×2 勾配、異なるブロック形状のケース数として 1 水位×5 ブロック×1 勾配から、合計 30 ケース以上の実験を行う。さらに、流体力計測や数値計算等（4 ケース以上）を行うことによって、水理模型実験結果の解釈補完や算定式の合理性を検討した。実験条件の詳細は、監督職員と協議の上、決定し実施した。

イ ブロック等の安定質量算定式の提案

アで得られた知見をもとに、水位変化等の影響を勘案した津波の強い流れに対するマウンド上被覆ブロック等の安定質量算定手法を、その適用条件や範囲とともに検討し、実用可能な算定式を提案した。

IV. 方法

本報告書に示す計画の各内容と仕様書内「(2) 調査の方法」との対応関係は表 4-1*の通りである。

表 4- 1 提案書内の各項目と仕様書内の事項との関係

	仕様書内の事項			
	ア) 水理模型実験 (異なる初期水位に対する算定式の適用性検討)	ア) 水理模型実験 (異なるブロック形状に対する算定式の適用性検討)	ア) 流体力計測や数値計算等 (実験結果の解釈補完、算定式の合理性検討)	イ) 安定質量算定式の提案
【水理模型実験】				
1-a) 水位変化実験	○			
1-b) ブロック形状変化実験		○		
1-c) 異なる縮尺の実験			○	
1-d) 流体力計測実験			○	
【数値計算】				
2-a) 津波流れや作用流体力の再現計算			○	
【とりまとめ・安定質量算定式の提案】				
3-a) 安定質量算定式の検討				○

*本報告書での図表番号は、「図あるいは表○-●」(○は章番号、●は連番)あるいは「図あるいは表○-△-●」(○は章番号、△は、節番号、●は連番)の形式で表記する。

(1) 水理模型実験による検討

本調査で計画した水理模型実験の実施ケース一覧を表 4-2 に示す。1-a) 水位変化実験について 33 ケース、1-b) ブロック形状変化実験について 7 ケース、1-c) 縮尺変化実験について 7 ケース程度を実施した。本年度実施する実験ケース数が平成 30 年～令和 2 年度と比べて多いことから、調査内容を無理なく効率的に実施するため、ブロック等の新規作成の必要を伴わない 1-a) 水位変化実験から実施するとともに、共同研究機関内で進行状況について共有しつつ調査を進めた。

表 4- 2 水理模型実験の実施ケース一覧

1-a) 水位変化実験 (縮尺 1/80) (33 ケース)

実験内容	被覆ブロック				堤幹部 法勾配	状態・初期水位(cm)							
	ブロック種類	寸法 (mm)	質量			比重	冠水				干出		
			模型(g)	現地(t)			30	25	20	16	13	10	7
水位変更 方塊型	小	40×40×15	58	30	2.3	1:1.5	●	○	●	●	●	●	●
						1:2.0	●	○	●	●	●	●	●
	特大	60×60×22	180	92	2.3	1:1.5	●	○	●	●	●	●	●
						1:2.0	●	○	●	●	●	●	●
	特大3	78×78×29	406	208	2.3	1:1.5	●	○	●	●	●	●	●
						1:2.0	●	○	●	●	●	●	●

マウンド高:10cm(現地8m相当)

縮尺:1/80

波圧計測実施

○:R02年度までに済 ●:今年度実施
●:方塊型に加え下流法面のみアクリル板、有孔型(孔位置中央)追加

1-b) ブロック形状変化実験 (縮尺 1/80) (7 ケース)

実験内容	被覆ブロック				堤幹部 法勾配	初期水位(cm)			
	ブロック種類	寸法 (mm)	質量			比重	冠水		
			模型(g)	現地(t)			25	16	10
有孔型	小(孔中)	42×42×15	58	30	2.3	1:1.5	○	●	●
	特大(孔中)	63×63×22	180	92	2.3	1:1.5	●	●	●
	特大3(孔中)	78×78×29	406	208	2.3	1:1.5	●	●	●
	小(孔上)	42×42×15	58	30	2.3	1:1.5	●	●	●
	特大(孔上)	63×63×22	180	92	2.3	1:1.5	●	●	●
	特大3(孔上)	78×78×29	406	208	2.3	1:1.5	●	●	●

マウンド高:10cm(現地8m相当)

()内は、孔中;中央に孔、孔上:上流側に孔

孔径(mm):小:10,大:20.5,特大:21.5,特大3:28.0

○:R02年度までに済

●:今年度実施

縮尺:1/80

1-c) 異なる縮尺の実験 (7 ケース)

実験内容	被覆ブロック					堤幹部 法勾配	状態・初期水位(現地)(m)				マウンドサイズ(mm)		マウンド高	
	ブロック種類	寸法 (mm)	質量		縮尺		冠水				上底	下底	模型 (cm)	現地 (m)
			模型(g)	現地(t)			1/	20	16	12.8				
縮尺変更	大	56×56×21	147	28.1	57	1:1.5	●	●	●	●	574	994	14.0	8
方塊型	特大3	78×78×29	406	28.0	41	1:1.5	●	●	●	●	816	1401	19.5	8

○:R02年度まで済 ●:今年度実施

波圧計測実施

※実施水位対応表

縮尺	初期水位(現地換算(m))							
	24	20	16	12.8	10.4	8	5.6	
1/80	30	25	20	16	13	10	7	
1/57	42	35	28	22.4	18.2	14	9.8	
1/41	58.5	48.75	39	31.2	25.35	19.5	13.65	

1-a) 水位変化実験

令和2年度までの調査では、初期水位を一定の25cm(縮尺1/80;現地スケールで初期水位20m、マウンド上水位としては12m)に概ね揃えて水理模型実験を行った。ただし、水位変化が被覆ブロックの安定性に及ぼす影響については過年度ま

での実験で未検討だったことから、令和3年度は、初期水位を変化させた条件、特に水位が25 cmより低い条件を中心に水理模型実験を行い、算定式の適用性を検討する方法としては、令和2年度調査までに使用された水産技術研究所神栖庁舎の津波回流装置を用いて、初期水位を変化させた条件でブロック移動実験を行った（図4-1）。初期水位はマウンドが干出する場合を含む6水位（5～30 cm 前後；現地スケール4～24 m 相当）を設定した。被覆ブロックは方塊型とし、質量は令和2年度調査までに使用した現地スケールで30～208 t（1t = 1000 kg）相当程度のブロック模型から3種類程度（例として58 g、180 g、406 g；現地スケールで30 t、92 t、208 t相当）を選択した。

検討ケースとしては、6水位、被覆ブロック3種類、マウンド法勾配2種類（法勾配1:1.5、1:2）を組み合わせ、計33ケースを実施した（表4-2）。ただし、大きな質量のブロックを用いるケースでは、小さな質量（例：58 g）のブロックを用いたケースの結果を踏まえ、調査すべき初期水深を定めることとする。各ケースについて流速を段階的に引き上げ、ブロック移動が開始するまでの水位・流速の計測を行った。

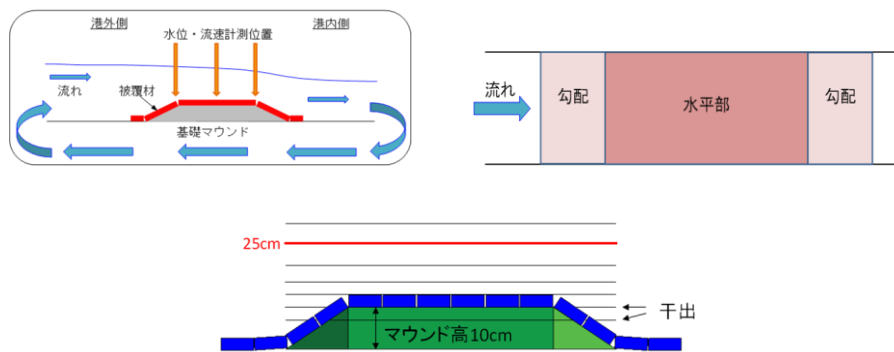


図 4-1 津波回流装置模式図（上段左）、実験模型形状平面図（上段右）、および初期水位の設定案（下段）

1-b) ブロック形状変化実験

令和2年度までの調査では、基本的な形状として主に方塊型のブロックを対象として水理模型実験を行い、算定式を検討した。しかし一般的に使用される被覆ブロックは様々な有孔型の形状であることが多く、孔の存在による揚力ー抗力バランスの違いに起因して被覆ブロックの安定性が変化する可能性についての検討が求められる。そこで令和3年度は、質量（大きさ）や孔の位置を変化させた有孔型ブロックを使用して水理模型実験を行い、方塊型以外の形状に対する算定式（「流速6乗式」「流速3乗式」）の適用性を検討した。

使用する有孔型の被覆ブロックは、質量（大きさ）については1-a)の実験結果を参考にしつつ3種類を選択し、ブロックの形状（孔の位置）についてはブロック中央及び前端部とし、計5種類の形状を新規製作し使用した（図4-2・図4-3）。検討ケースとしては、2水位、被覆ブロック6種類、マウンド法勾配1種類（1:1.5）を組み合わせた7ケース程度とした。各ケースについて流速を段階的に引き上げ、ブロック移動が開始するまでの水位・流速を計測した。

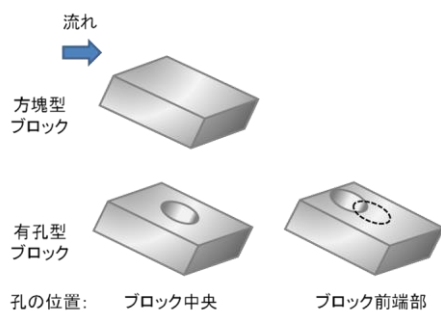


図 4-2 ブロック形状

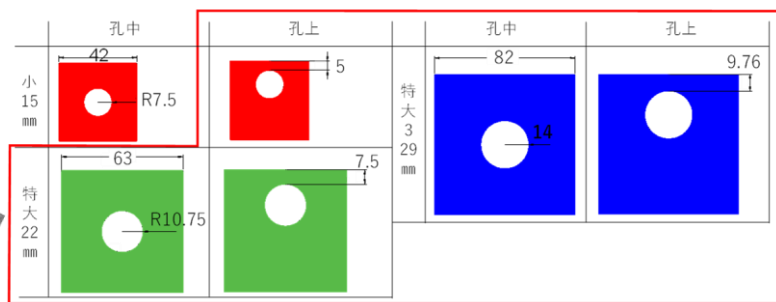


図 4-3 有孔ブロックの寸法状 ※赤枠: 新規作製

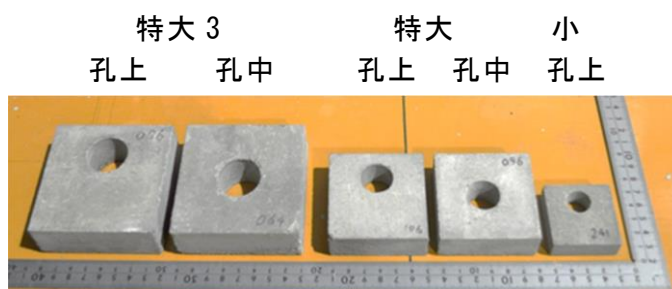


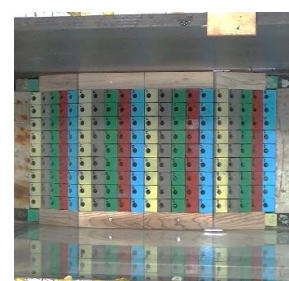
図 4-4 有孔ブロック



特大 3 孔上



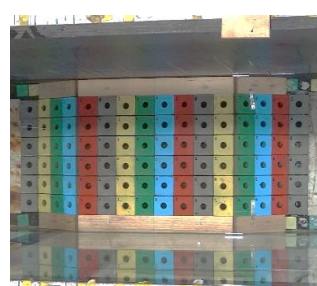
特大 孔上



小 孔上



特大 3 孔中



特大 孔中



小 孔中

図 4-5 有孔ブロック配置 (上から)

1-c) 異なる縮尺の実験

令和2年度までの調査では、縮尺 1/80 の水理模型実験による検討が主であり、異なる縮尺の実験からも算定式に関する同様の知見、係数値が得られるかについての実験的検討が未実施だった。特に、「流速3乗式」は縮尺に依存する係数を使用しており、縮尺 1/s の実験から得られた係数値を現地換算する際に s の平方根で除して用いることを提案しており、令和2年度調査までの検討委員会や関係者ヒアリング等から、「流速3乗式」における係数換算についての検討の必要性が認められた。そこで、当共同研究機関で利用可能な実験設備の条件を鑑み、縮尺 1/40～1/60 程度の水理模型実験を行った（マウンド模型図参照）。被覆ブロックは、これまで使用した小ブロック（現地スケール 30 t）の縮尺倍に相当する方塊型ブロック（例として既存模型 147 g（大：1/41），406g（特大3：1/57.6））を活用し、初期水位4種との組合せ計7ケースの実験を行った（図4-6参照マウンド模型, 図4-7ブロック配置）。

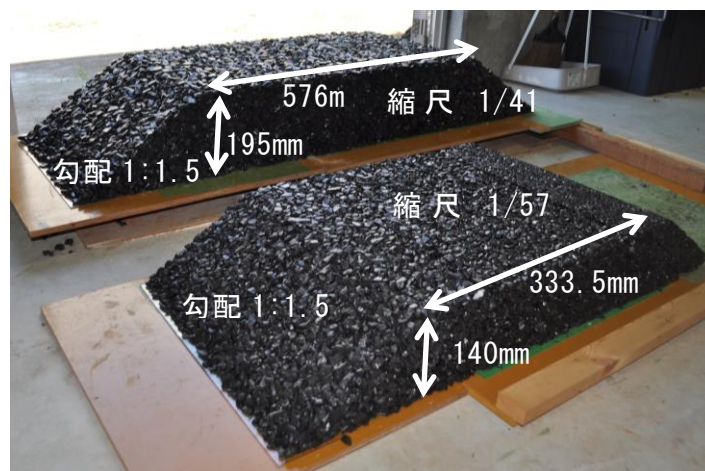


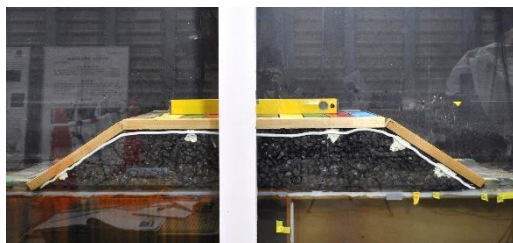
図 4- 6 縮尺実験用マウンド模型



上から



上から



横から

1/41(特大3)



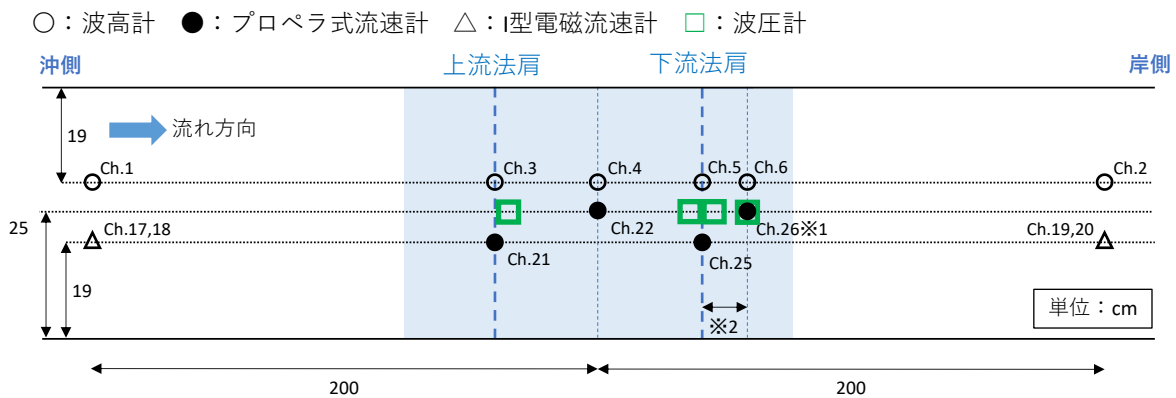
横から

1/57(特大)

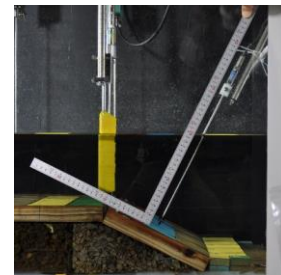
図 4- 7 縮尺変更ブロック配置

1-d) 流体力計測実験

令和2年度までの調査では、水理模型実験や数値計算により、法肩付近での圧力低下や局所的な流体力作用などの力学特性が示された。安定質量算定式の検討・提示の上で不可欠であるブロック移動を引き起こす力学的過程の検討のため、過年度に引き続き、プロペラ式流速計・波圧計等を用いた流体力検討に係る水理模型実験を行った（図4-8）。上述の1-a)水位変化実験、及び1-c)異なる縮尺の実験のケースのうち代表的なものについてブロック内に波圧計を埋め込み、圧力計測を行った（図4-9、図4-10）。特大3ブロックの波圧詳細位置を図4-11に示す。図4-12には縮尺1/41での計測機器配置位置を示す。なお被覆ブロックはすべて固定状態で流速及び圧力の計測を行った。



- ※1 プロペラ式流速計 : 上流法肩から下流法面にかけて交互に設置
下流法肩ch.26 : 法面と垂直に設置 (右写真参考)
- ※2 下流側法面計測位置 : 波圧計の位置と合わせる
勾配1 : 1.5 → 下流法肩から10.2cm
勾配1 : 2.0 → 下流法肩から14.5cm
- ※3 断面平均流速 : 初期水位30,25,20cm : 3点法 (水面から20%,60%,80%)
初期水位16,13cm : 1点法 (水面から60%)、
初期水位10,7cm : 底面付近 (ブロック天端上1cm)
各初期水位 ブロック天端上1cm
- ※4 底面付近流速



法面計測例 (勾配1 : 1.5)

図 4- 8 計測位置概要

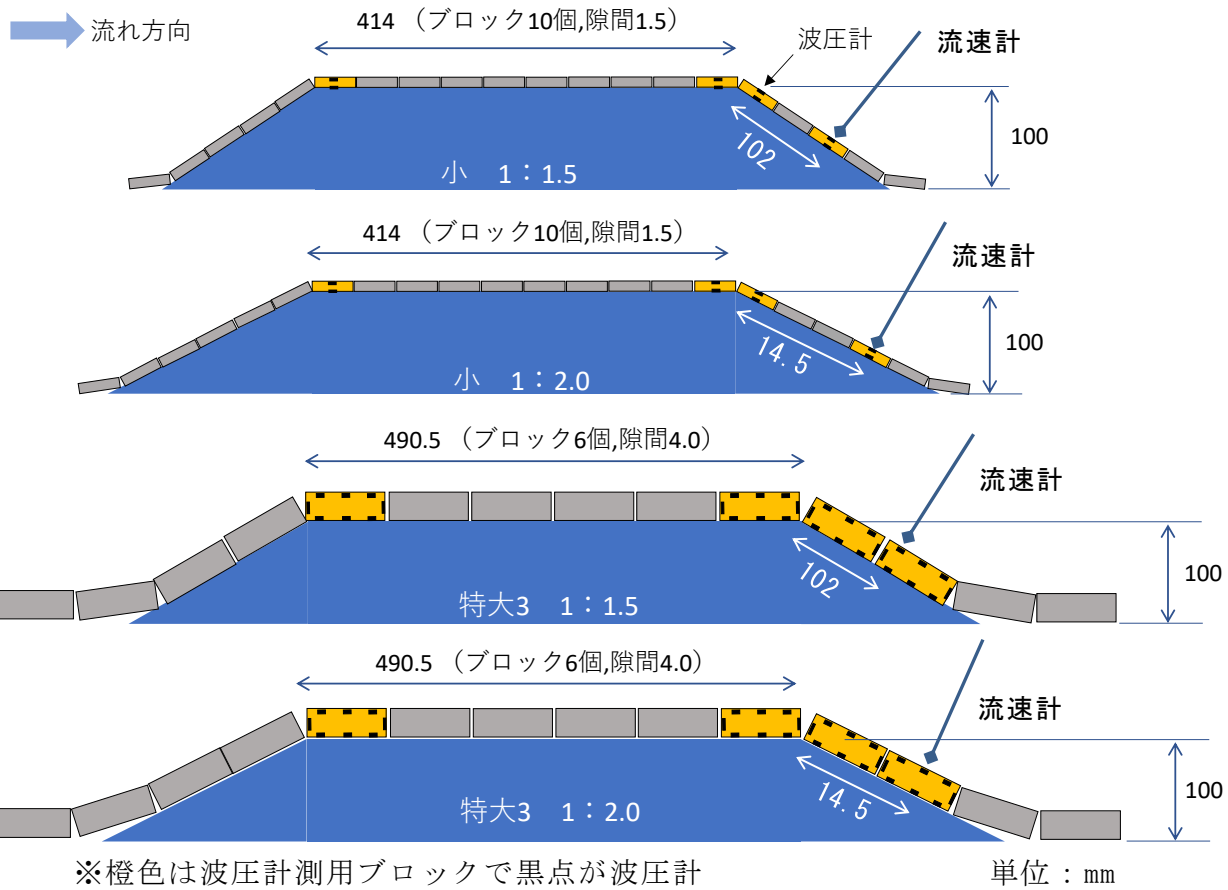


図 4- 9 波圧計測位置模式図（水位変化実験）

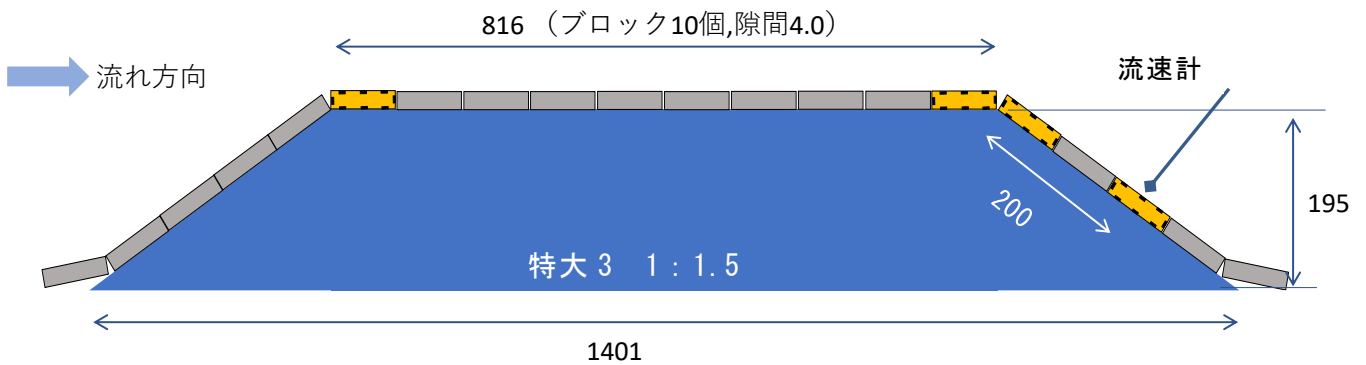
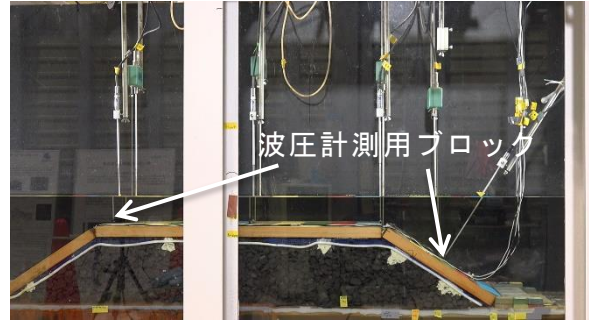


図 4- 10 波圧計測位置模式図（縮尺変化実験）



(a) 下流法肩計測



(b) 上流天端+下流法面計測



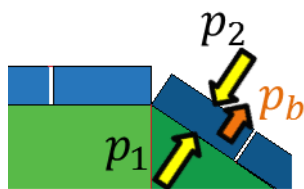
(c) 上流天端+下流法面計測 (下流側から撮影)

図 4- 12 波圧計測位置 縮尺 1/41(特大3ブロック) 縮尺変更

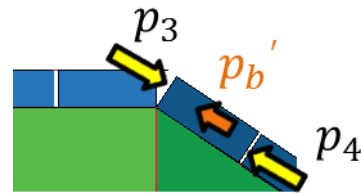
2)揚力と抗力の定義

揚力及び抗力の算出は、図 4- 13 に示すように算出した。

また静水圧については、水位計の情報と画像で記録された水面勾配より各波圧計位置の静水圧を求めた (図 4- 14) 。

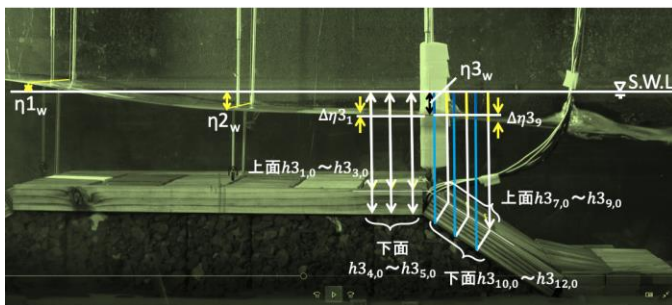


(a) 揚力の定義



(b) 抗力の定義

図 4- 13 揚力と抗力の定義



$h_{N,n,0}$:各波圧計測位置の初期水深
 $\eta_{N,w}$:波高計による N 地点の水面変化
 $\Delta\eta_{N,n}$: N 地点水面変動と波圧計測位置の水位差
 添え字 N :1~12は波圧計No.

→ 初期静水圧 変化分
 静水圧: $p_{N,n,s} = \rho gh_{N,n,0} + \rho g(\eta_{N,w} + \Delta\eta_{N,n})$
 ここで
 ρ :水の密度、 g :重力加速度、
 N :波圧計測セット位置(3は下流側法肩)

図 4- 14 静水圧の定義

(2) 数値計算による検討

津波流れや作用流体力の再現計算

既往調査では3次元流体解析ツール OpenFOAM を用いた計算を実施し、下流側法肩部で圧力が減少することにより、ブロックに作用する流体力が局所的に分布することや、高流速条件では現行の CERC 式より小さな質量でも安定になることが示される等、水理模型実験の結果解釈や算定式の合理性説明を補完する結果を得た。

令和3年度調査では、既往調査に引き続き、マウンド上の津波流れや作用流体力に関する数値計算を行い、実験結果との比較を通じて計算の妥当性を検証するとともに、過年度までの検討結果とあわせて、流速・圧力分布、作用流体力の特性（具体的には局所的な流体力作用の仮説検証や揚力/抗力の寄与バランスの変化）を調査した。加えて、過年度までの実験・数値計算結果や検討委員会から課題として指摘された現地スケールへの適用性等について検討し、実験結果の解釈補完や算定式の合理性を検討するための情報を取得・整理した。

具体的な検討ケースとして、水理模型実験の内容に対応した初期水位変更ケース（2水位×被覆ブロック2種類）、ブロック形状変化ケース（有孔型2種類）、異なる縮尺ケース、さらに水理模型実験での検討が困難な現実スケールケース、ブロック形状（厚さ）変更ケース、マウンド天端変更ケースの計11ケース実施した。調査内容を無理なく効率的に実施するため、調査開始直後から計算条件等をあらかじめ準備しておくとともに、水理模型実験の担当者と密に連絡をとり、実験結果が得られ次第、直ちに計算結果の検証・計算内容の修正を行うことができる体制で調査を進めた。

計算結果は次の観点で整理した。

(i) 流速分布構造

水平面前端部と水平面後端部の流速の鉛直分布について、計算結果と実験結果を比較することで再現性を確認した。

(ii) 圧力・作用流体力構造

下流側法面上端のブロックと水平面後端のブロックの作用圧力について、計算結果と実験結果を比較することで再現性を確認した。

(iii) 作用流体力分布の特徴

ブロックに作用する流体力を推定するため、計算から得られた圧力から、揚力及び抗力分布を算定し、その特徴を整理した。

表 4- 3 計算ケース

検討ケース	備考・内容	
1	中水位 (16cm) ・ブロック小 流量3段階 (実験流量0.6、1.0、1.4(安定限界)m ³ /min相当)	ねらい ↑ 水位の違いが作用流体力特性に及ぼす影響を検討 ↓
2	低水位 (7 cm) ・ブロック小 流量3段階 (実験流量0.2、0.4、0.6(安定限界)m ³ /min相当)	
3	中水位 (16 cm) ・ブロック特大3 流量3段階 (実験流量1.8(安定限界)、2.4、3.4m ³ /min相当)	
4	低水位 (7 cm) ・ブロック特大3 流量3段階 (実験流量1.8、2.0、2.2(安定限界)m ³ /min相当)	ブロック形状の違いが作用流体力特性に及ぼす影響を検討 ↑ ↓
5	有孔型1/特大3 孔の位置: 中央、流量3段階 (実験流量1.8、2.4(安定限界)、3.4m ³ /min相当)	
6	有孔型2/特大3 孔の位置は上流側。流量3段階 (実験流量1.8、2.4、3.4(安定限界)m ³ /min相当)	
7	異なる縮尺実験 1/57スケール 中水位 (16cm)・ブロック小の縮尺変更。流量3段階 (1/80実験流量0.6、1.0、1.4(安定限界)m ³ /min相当)	スケール(縮尺)の違いが流況・作用流体力特性に及ぼす影響を検討 ↑ ↓
8	異なる縮尺実験 1/40スケール 中水位 (16cm)・ブロック小の縮尺変更。流量3段階 (1/80実験流量0.6、1.0、1.4(安定限界)m ³ /min相当)	
9	現実スケール 中水位 (16cm)・ブロック小の縮尺変更。流量3段階 (1/80実験流量0.6、1.0、1.4(安定限界)m ³ /min相当)、乱流モデル2ケース	
10	ブロック変化ケース 初期水位25cm・小ブロック相当、流量4.0m ³ /min ブロック高さのみ3段階変更(10、20、30mm)	ブロック形状(高さ)の違いが作用流体力特性に及ぼす影響を検討 ↑ ↓
11	マウンド変化ケース 初期水位25cm・小ブロック相当、流量4.0、5.0m ³ /min 天端長さを±ブロック2個分変更させた2ケース	

表 4- 4 計算条件の詳細一覧

項目	設定条件	
使用モデル	OpenFOAM (3次元流体解析モデル)	
使用ソルバ	interFoam(VOF (volume of fluid) 体積割合に基づいた界面捕獲法による不混和流体の非圧縮性・等温 2相流用非定常解析ソルバ)	
離散化方法	有限体積法	
縮尺	1/80 (実験と同一スケール)	
境界条件	流入境界	流量を設定(流速と、流速を指定する高さを指定)
	水路の壁面境界	Slip
	構造物・底面境界	流速: 0 (no-slip) 渦動粘性係数: 0 圧力、水相率: 勾配ゼロ k、ε: 1e-8
	流出境界	自由流出境界
計算領域	水路長: 400.0cm × 水路幅: 40.0 cm	
計算格子間隔	Δx = Δy = Δz = 0.125~1.0 cm (ブロック周辺で最も細かく、空気相で最も粗い)	
計算時間、時間間隔	最大 60 秒 (30 秒程度で定常)、自動制御	
地形条件	一定水深 25.0 cm にマウンド(透水性、天端高: 底面から +10.0 cm)を設置し、マウンド上に被覆ブロックを設置	
透水モデル	Dupuit-Forchheimer 則により抵抗力をモデル化 空隙率 γ=0.46、代表径 d=0.01、材料係数 α ₀ =1500、β ₀ =3.6	
乱流モデル	低 Re 型標準 k-εモデル Launder-Sharma(1974) (参考) 平成 30 年度調査: RNG k-εモデル	

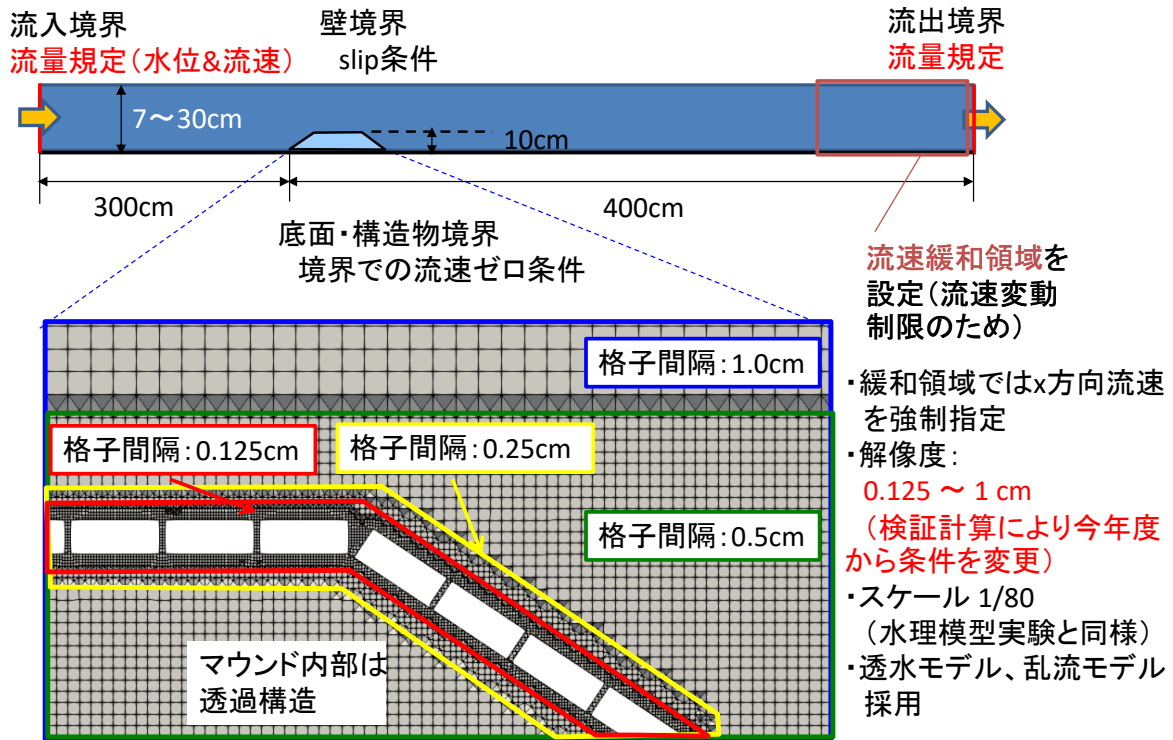


図 4- 15 計算領域の模式図

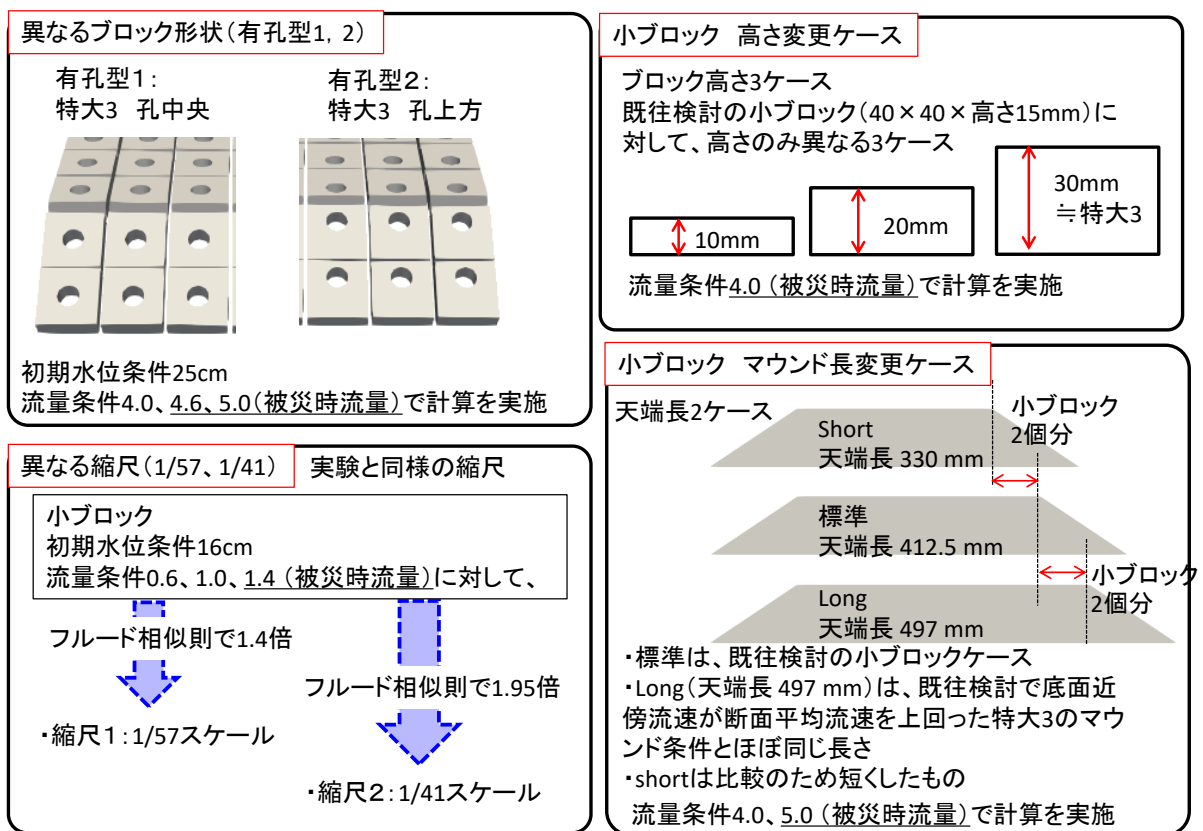


図 4- 16 各計算ケースの詳細補足図

(3) 安定質量算定式の検討・提案

3-a) 安定質量算定式の検討

【ア】における水理模型実験や数値計算の結果等に基づき、安定質量算定式について検討・提案する。算定式の検討に際しては、「Ⅲ. ねらい」で記した課題1)～5)に対応するべく、令和2年度調査までの結果に基づき、流速6乗式と流速3乗式等が初期水位・ブロック形状条件が変化した場合に適用可能か否かを検証するとともに、令和2年度までの検討委員会等で指摘された、設計実務で参照が容易な断面平均流速とブロック安定性に直接的に影響する底面近傍流速との関係性、係数と実験縮尺との関係性等について整理・検討し、必要に応じて式の修正を行った。これらの結果を踏まえ、実用的な算定式をその適用可能な条件や範囲とともに提案した。

(4) 検討会の実施

上述の研究開発計画を円滑かつ効率的に実施するために、有識者等からなる検討会を設置し、指導、助言を得ながら、事業の運営及び議論の取りまとめを行う。令和3年度における検討会は、8月と3月の2回開催した。

委員の選定・委嘱について、検討委員は、専門分野の知見を有する有識者等とし、委員の委嘱にあたっては水産庁漁港漁場整備部整備課設計班と協議のうえ、下記の4名とした。

八木 宏	防衛大学校 システム工学群建設環境工学科	教授
田島 芳満	東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻	教授
岡安 章夫	東京海洋大学学術研究院 海洋資源エネルギー学部門	教授
今井 健太郎	海洋研究開発機構海域地震火山部門地震津波予測研究開発センター	副主任研究員

V. 結果

(1) 水理模型実験

(a) 水理模型実験結果の概要

1) 初期水位変化実験

初期水位 30cm 相当では、実験実施範囲内の最大流量でもブロックが移動しなかった場合は適宜初期水位を下げ、ブロックが移動する水位で実験を実施した。大きな質量のブロックを用いるケース（特大、特大3ブロック）では、小さな質量（小ブロック）のブロックでの結果を踏まえ、初期水深を選定し実験を実施した。本調査では下流法面のみに亚克力板又は有孔型を設置し追加実験を実施した。その際の設置位置を図 5-1-1 に示す。



下流側法面のマウンド-ブロック間
（赤線部）に亚克力板を敷設



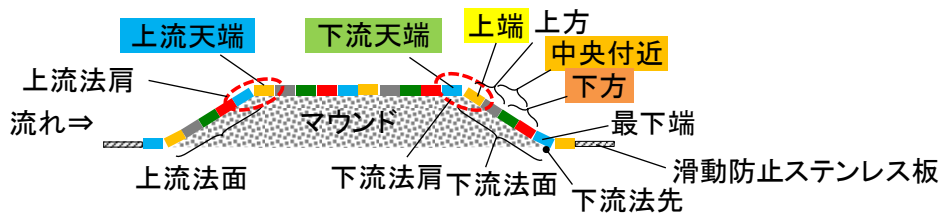
下流側法面のみ小ブロック（有孔型）

図 5-1-1 アクリル板及び小ブロック（有孔型）設置位置

1.1) ブロックの移動状況

図 5-1-2 (a)～(c)に被覆ブロックの移動実験について、ブロックの挙動例を示す。同図(a)は本文中で用いるブロック位置の呼称、同図(b)では下流側法面下方のブロックが下から押し上げられるように持ち上がり離脱する例を、同図(c)では下流法肩法面上端でブロックが上流側から回転するように離脱する例を図示した。

また、ブロックの移動開始状況について分類を行い、ケースごとに整理した結果を表 5-1-1 に示す。移動開始位置は、上流法肩、下流法肩、下流法面の三種類に分けられる。低水位（初期水位 7,10cm）では下流法面からの離脱が多くみられ、高水位の質量が小さいケースでは上流側天端から離脱し始める現象がみられた。また高水位の質量が大きいケースでは下流法肩の天端側から離脱する現象もみられた。特に、低水位での下流法面中央からの離脱は、回転して移動するこれまでのモーメントベースの力学モデルとは異なるものと考えられることから、多くのケースで、想定している力学モデルと整合しているものの、初期水位による適用範囲の設定が必要と考えられる。



(a) ブロック位置の名称等 (例: 小 勾配 1 : 1.5)



移動開始流量 $0.42 \text{ m}^3/\text{min}$

(b) 小ブロックの法面中央付近での移動例 (小 初期水位 7cm 勾配 1 : 1.5)

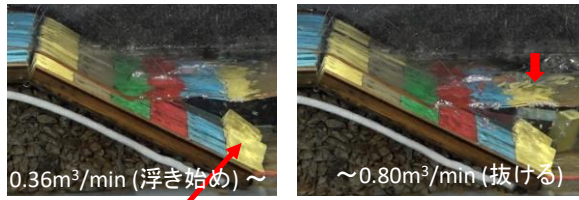


移動開始流量 $5.37 \text{ m}^3/\text{min}$

(c) 特大3の法面上端部での移動例 (特大3 初期水位 28cm 勾配 1 : 1.5)

図 5-1-2 移動ブロックの挙動例

実験ケース一覧表内に赤丸で示した箇所では、低水位時に発生した下流法面中央付近での離脱の要因と考えられたマウンドからの湧水の影響を調べるための追加実験を実施した。初期水位 10cm 小ブロックでは $0.8 \text{ m}^3/\text{min}$ で法面中央付近より下方で移動した。これに比べアクリル板敷設ケースでは移動箇所が法面中央付近から法先に移動した (図 5-1-3)。これはアクリル板によってマウンド内を通過する流れが堰き止められたことで下端部の床面との隙間から流出したもので、ブロック下面からの浸透水の影響を示す結果と考えられる。一方、この法面に有孔型ブロックを設置した場合、方塊型で見られた法面中央以下からの移動は見られず、移動開始流量が大幅に大きくなったことが確認された。これらの結果から、低水位時特有の現象について、ブロック形状の工夫や法面部分を不透過にするなどの別途対策による補強の有用性が期待される。



法先から移動開始

図 5-1- 3 アクリル板敷設時のブロックの移動状況

表 5-1- 1 水位変化実験 移動開始流量及び移動状況の一覧表（模型スケール）

法面 勾配	初期水位 (cm)	ブロック 名称	作用流量(m³/min)																						
			0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4	2.6	2.8	3	3.6	4	4.4	4.6	5	5.2	5.4	5.6
1:1.5	30	特大3																							×
1:1.5	30	特大																							×
1:1.5	30	小																○4				◇1	▼1	▼3	
1:1.5	28	特大3																					●2		
1:1.5	28	特大																						●2▼1	
1:1.5	28	小																							-
1:1.5	20	特大3														●1									
1:1.5	20	特大														●3									
1:1.5	20	小														◇2▼1●1									●1
1:1.5	16	特大3														●2									
1:1.5	16	特大														●3									
1:1.5	16	小														●2●3									
1:1.5	13	特大3														●2									
1:1.5	13	特大														●2									
1:1.5	13	小														●1●1●3									
1:1.5	10	特大3														●2									
1:1.5	10	特大														●2●3									
1:1.5	10	小														▲1▲2●2									
1:1.5	7	特大3														●2									
1:1.5	7	特大														●1●1									
1:1.5	7	小														■5									
1:2.0	30	特大3																							×
1:2.0	30	特大																							▼2●2
1:2.0	30	小																							
1:2.0	28	特大3																							
1:2.0	28	特大																							
1:2.0	28	小																							
1:2.0	20	特大3																							
1:2.0	20	特大																							
1:2.0	20	小																							
1:2.0	16	特大3																							
1:2.0	16	特大																							
1:2.0	16	小																							
1:2.0	13	特大3																							
1:2.0	13	特大																							
1:2.0	13	小																							
1:2.0	10	特大3																							
1:2.0	10	特大																							
1:2.0	10	小																							
1:2.0	7	特大3																							
1:2.0	7	特大																							
1:2.0	7	小																							

下流法面にアクリル板設置

1:2.0	16	小																							
1:2.0	10	小																							

下流法面のみ小（孔中）ブロック使用

1:2.0	16	小																							
1:2.0	10	小																							

[移動開始位置]	● : 下流法面上端	▲ : 下流法面中央付近	■ : 下流法面下方
※数字は繰り返し	▼ : 下流天端	○ : 上流天端	◇ : 上流天端・下流天端同時
回数	◆ : 下流法面最下端	× : 最後まで移動なし	- : R03年度未実施

80

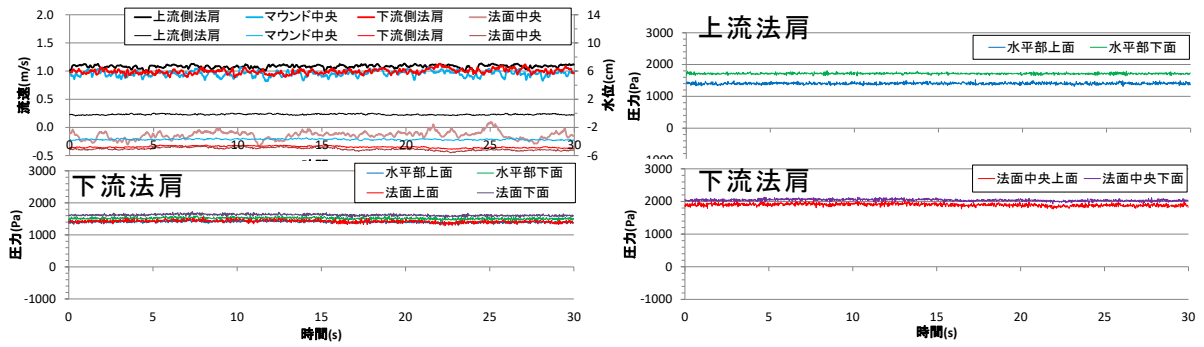
実験実施流量

1.2) 流速・流体力・水位

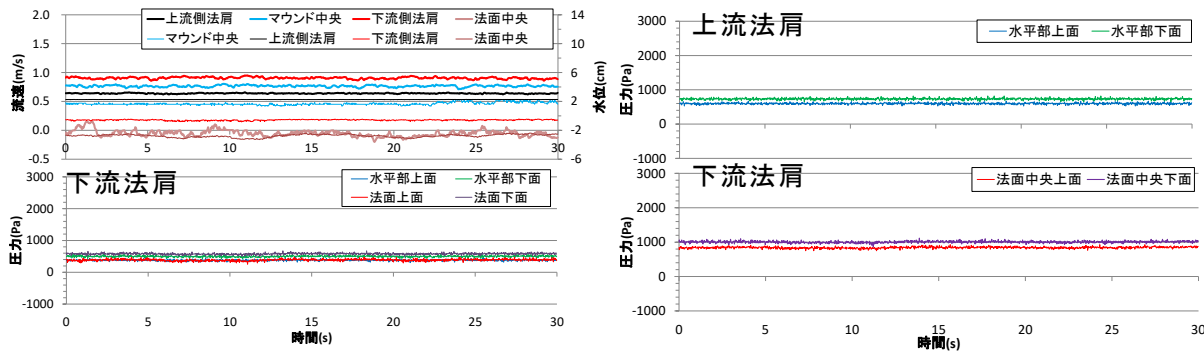
水位や流速、圧力の計測は各流量ランクにおいて 30 秒間行っており、以降では、30 秒間内の平均値や必要に応じて最大値・最小値を用いて整理を行った。経時変化図を図 5-1-4 に示す。マウンド上各位置における水位・流速の空間分布の例を図 5-1-5 に示すが、下流ほど水位が低くなり、流速は大きくなることが分かった。ブロックのサイズに関わらず、全体的な傾向として下流側で水位が低く、流速が増加する特徴は共通している。

このような底面流速・断面平均流速の比の変化と断面平均流速で定義したフルード数の対応関係を図 5-1-6 に示す。下流側ではフルード数が概ね 1.5 を超える場合に底面流速と断面平均流速の比が 1 以上になり得ることが分かった。また上流側ではフルード数が 1 未満であり、かつ底面流速・断面平均流速の比は下流側と比べて大きく概ね 0.9 以上となる特徴がみられた。また、図の緑丸・赤丸は、初期水位 16cm で全体の傾向と異なる分布がみられ、水脈幅が薄くセンサーサイズの影響から断面平均流速の測点数が一点であるなど当計測システムの限界を一因として、高水位時（灰色丸）と比べて流速比などの変化傾向が異なったことが考えられる。

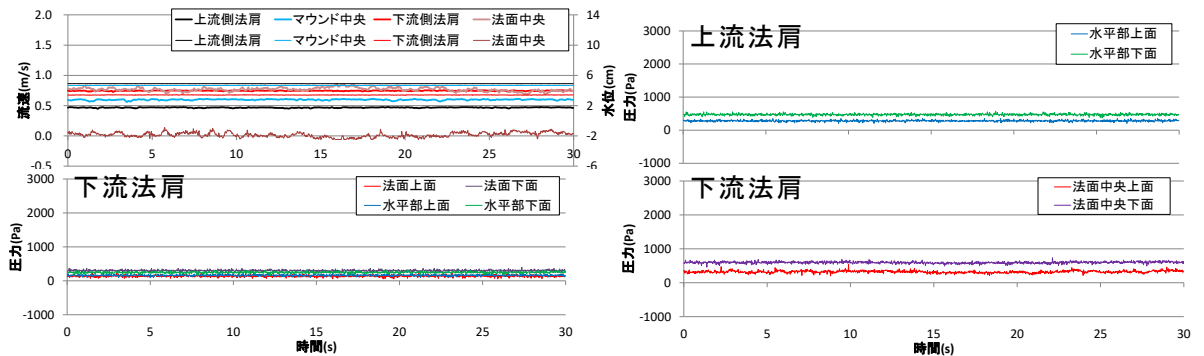
これらの結果からは、様々な水位条件に汎用的に利用可能な底面流速—断面平均流速の関係式を本実験データに基づいて提示することが困難であることが示唆される。



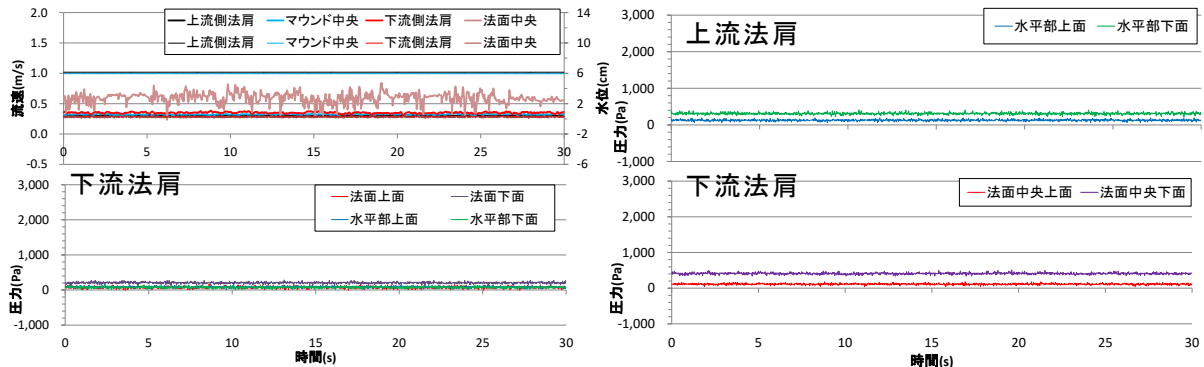
(a) 初期水位 30cm 流量 5.6m³/min (移動無)



(b) 初期水位 16cm 流量 1.4m³/min (移動)



(c) 初期水位 10cm 流量 1.0m³/min (移動)



(d) 初期水位 7cm 流量 0.4m³/min (移動)

図 5-1- 4 (1) 水位・流速・圧力の時間変動例(水位変化)

(小ブロック 勾配 1:1.5 初期水位(a) 30・(b) 16・(c) 10・(d) 7cm 縮尺 1/80)

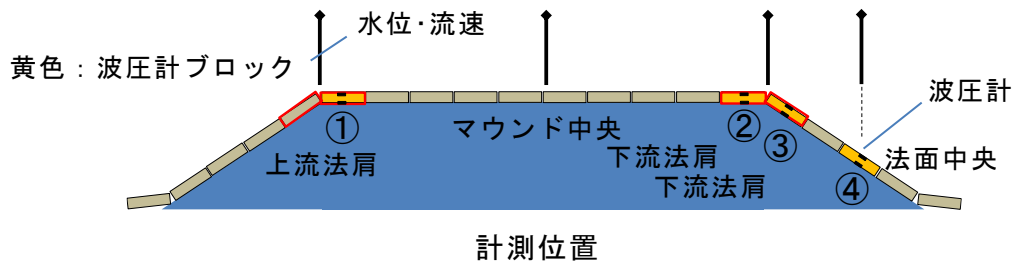


図 5-1- 4 (2) 水位・流速・圧力の時間変動例(水位変化)
 (小ブロック 勾配 1:1.5 初期水位 (a) 30・(b) 16・(c) 10・(d) 7cm 縮尺 1/80)

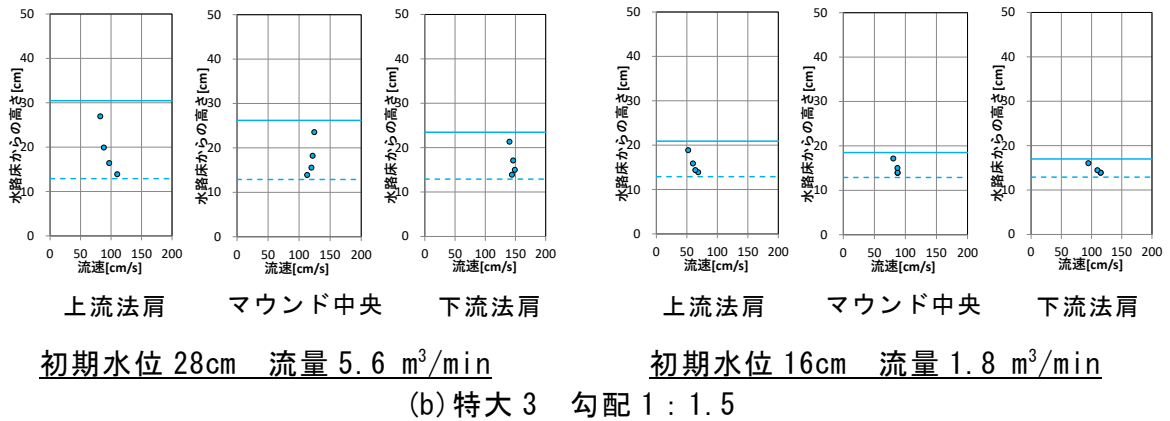
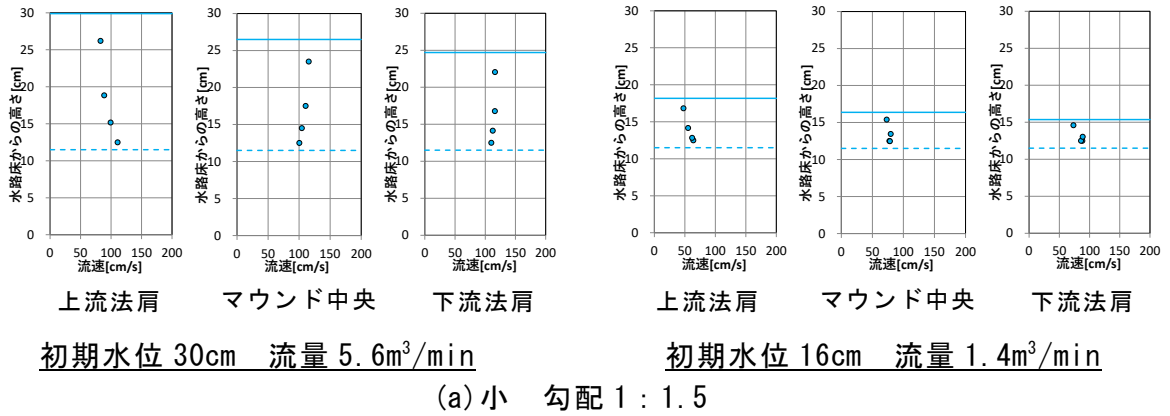


図 5-1- 5 水位と流速の空間分布例(水位変化)

$$Fr \equiv U_A / \sqrt{gh}$$

U_A : 断面平均流速

h : (下流側) 法肩水深

g : 重力加速度

凡例

▲: 小ブロック

●: 特大ブロック

■: 特大3ブロック

初期水位

紫: 30cm

青: 25cm

水: 20cm

緑: 16cm

黄: 13cm

断面平均

算出法

3点法

(20,60,80%)

1点法

(60%)

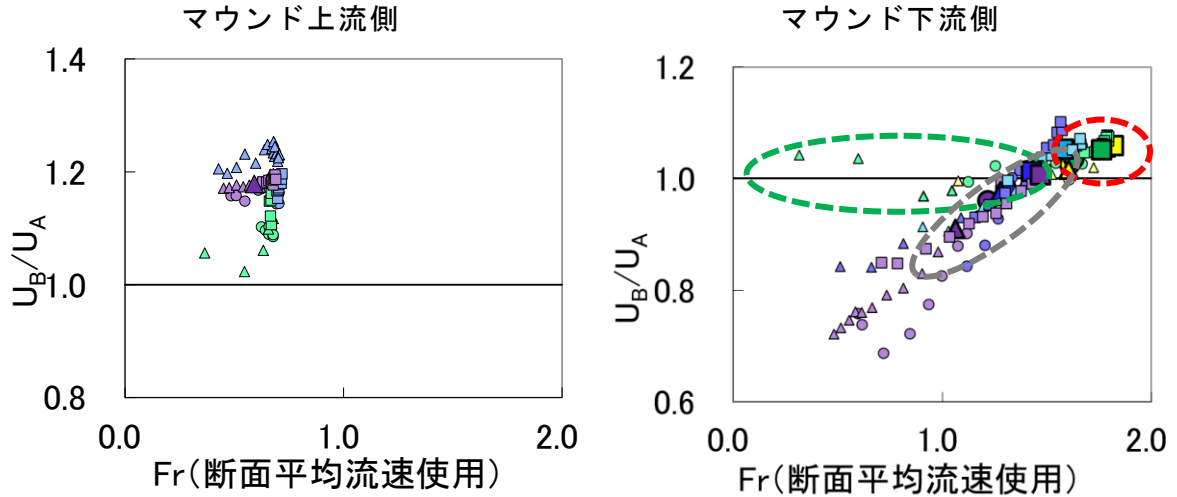
橙: 10cm

赤: 7cm

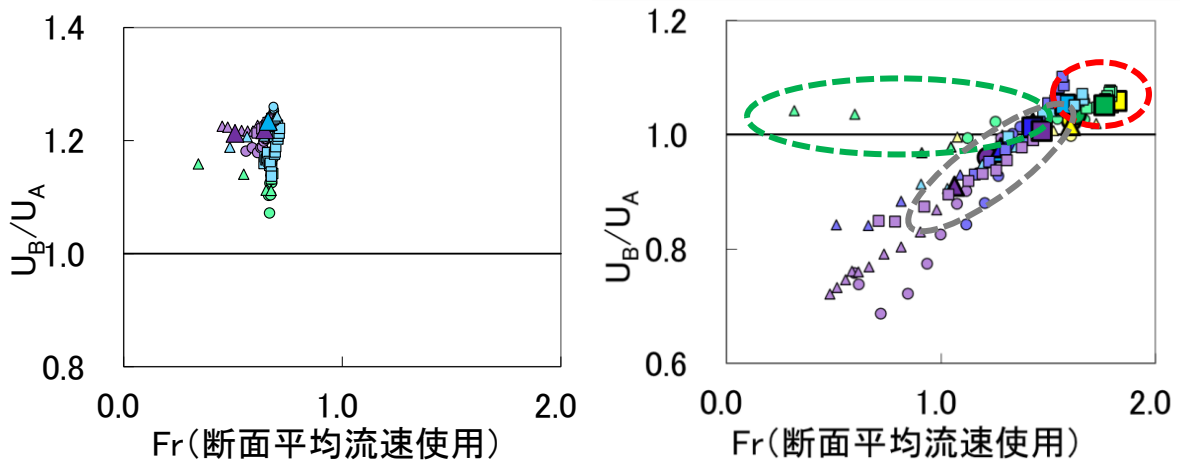
ブロック上1cm

初期水位10・7cmの

結果は表示せず(計測層数が1点のため)



(a) 勾配 1 : 1.5



(b) 勾配 1 : 2.0

図 5-1-6 フルード数と底面流速 U_B /断面平均流速 U_A 比の関係

1.3) 安定限界流速と質量の関係及び安定限界質量の実験値と算定値の比較

図 5-1-7 にマウンド後端部における安定限界の断面平均流速と質量の関係について、今年度の結果を追加したものを示す。なおブロック比重が一定のケースのみ記載しており、参考として CERC 式 ($Y=1.08$ 、黒線) と Isbash 原著の式 ($Y=1.08$ 、青破線)、加藤ら (2019) の提案式 (3 乗式 ($Y'_{\text{現地}}=0.6 \text{ m}^{-0.5}$)、赤線)、昨年度提案した新 6 乗式 ($X=1.32$ 、水色線)、新 3 乗式 ($Z'_{\text{現地}}=0.53 \text{ m}^{-0.5}$ 、ピンク線) による算定曲線を併せて示す。加藤ら (2019) の提案式・係数の手法による質量算定値はブロックサイズや初期水位に関わらず大きく下回り、危険側の評価になることが分かった。昨

年度新たに提案した新6乗式、新3乗式の手法を用いた質量算定値も、法勾配に関わらず、主に初期水位7~13cmの範囲において各ブロックの質量を下回り危険側の評価となり、安定限界流速と質量の関係式の適用範囲や係数の再精査が必要である。

また、表5-1-1に示すようにマウンド上流側からブロック離脱開始したケースがみられており、同箇所における安定限界流速と質量の関係を調べた(図5-1-8)。マウンド上流側では、CERC式、Isbash原著式、加藤ら(2019)の提案式ともに実験結果の各ブロックの質量を下回り危険側の評価となるが、新6乗(X:上流0.93)及び3乗式(Z'=上流0.37)は安全側の評価となる。下流側の新6乗式(X:下流1.32)、新3乗式(Z'=下流0.53)では双方とも初期水位が16cm程度では実験結果の各ブロックの質量を下回り危険側の評価となる傾向が見られた。

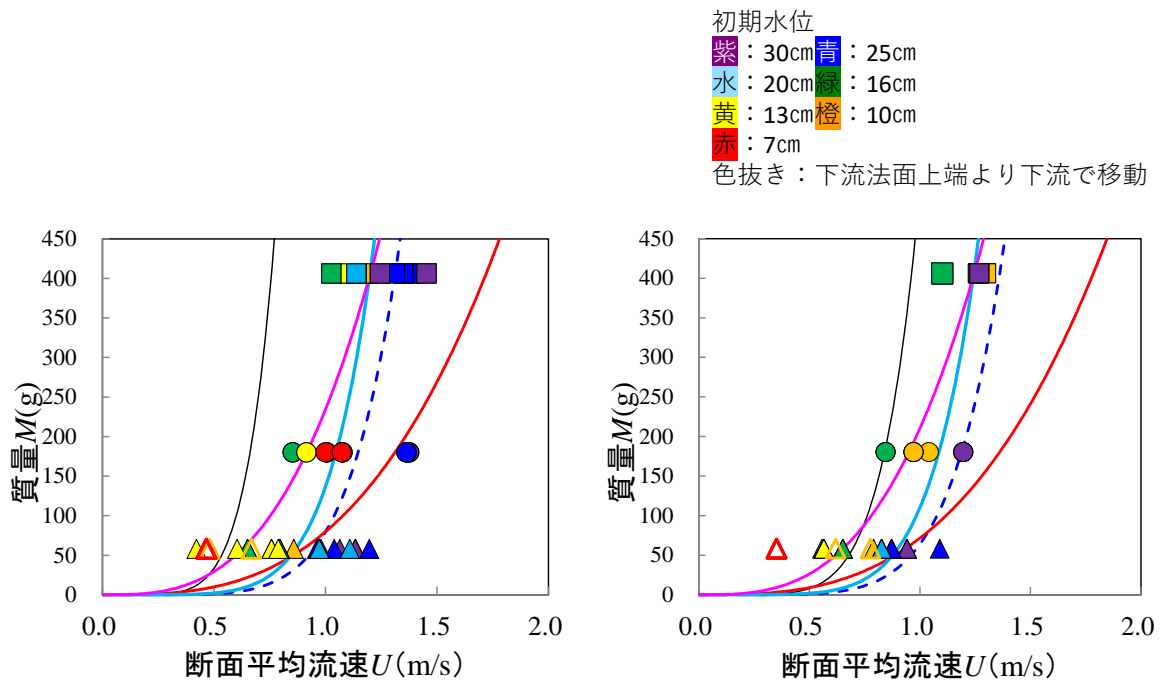


図5-1-7 マウンド後端部(下流法肩)のブロック質量と安定限界流速の関係
(左1:1.5 右1:2.0)

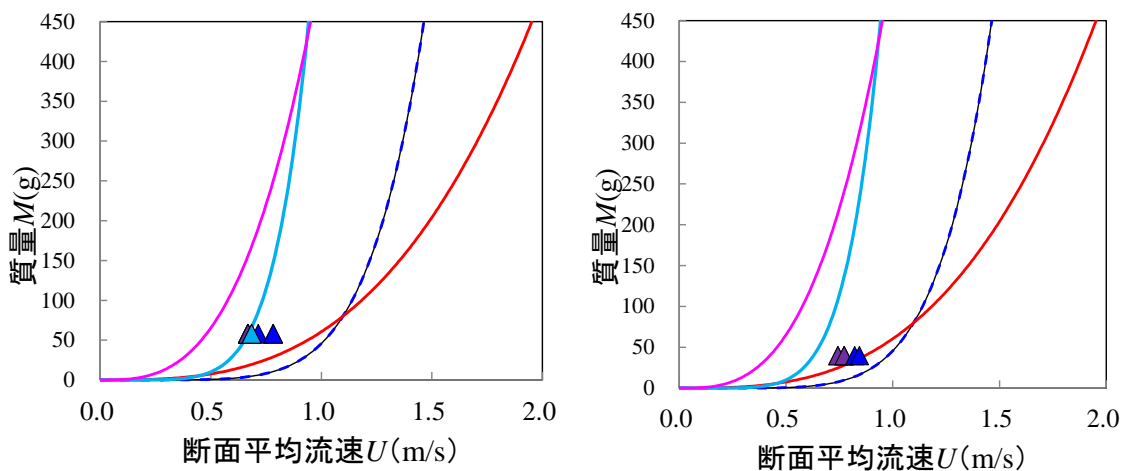


図5-1-8 マウンド前端部(上流法肩)のブロック質量と安定限界流速の関係
(左1:1.5 右1:2.0)

1.4) 背後水位 h_B 等と算定式中の係数 X, Z' の関係

図 5-1-9 に下流法肩水位 h (マウンド設置床から水面まで) と背後水位 h_B 及び下流法肩水位と背後水位の差($h-h_B$) をマウンド高 h_M で除した諸量と係数 (断面平均流速使用) の関係を見ると、係数は h/h_M とともに概ね線形増加するが、 h_B/h_M や $(h-h_B)/h_M$ 変化と比較すると初期水位 16cm の場合に下限となる傾向となり、係数と水位との顕著な関連性が確認できる。

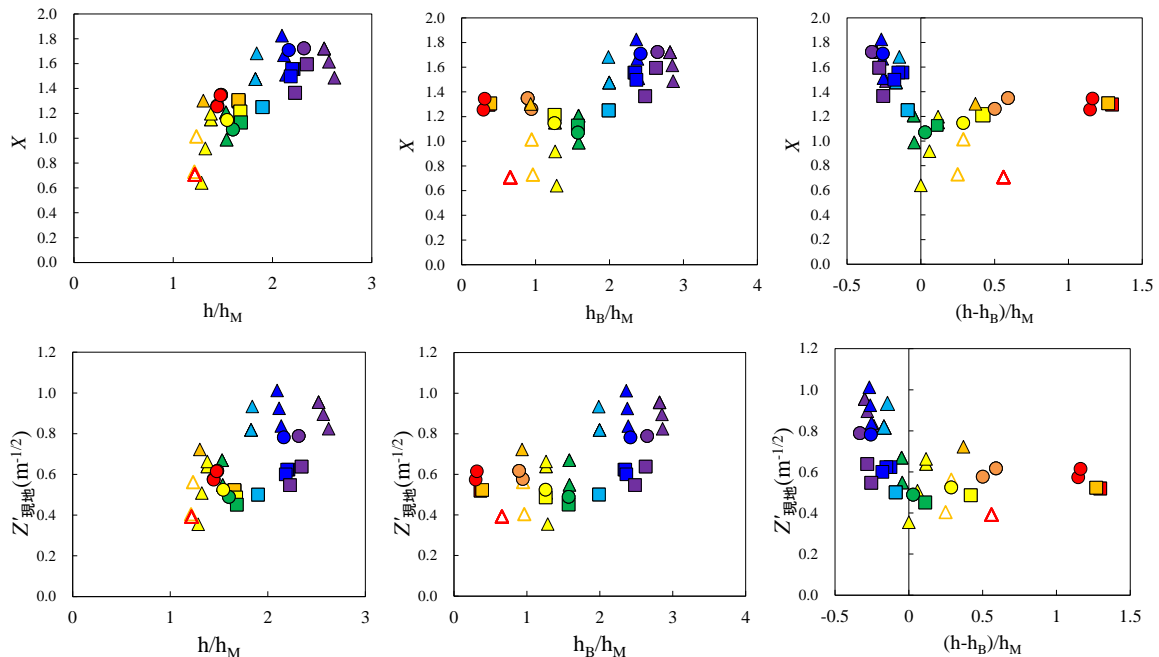


図 5-1-9 マウンド下流側 (法肩や背後) の水位と算定式中の係数の関係

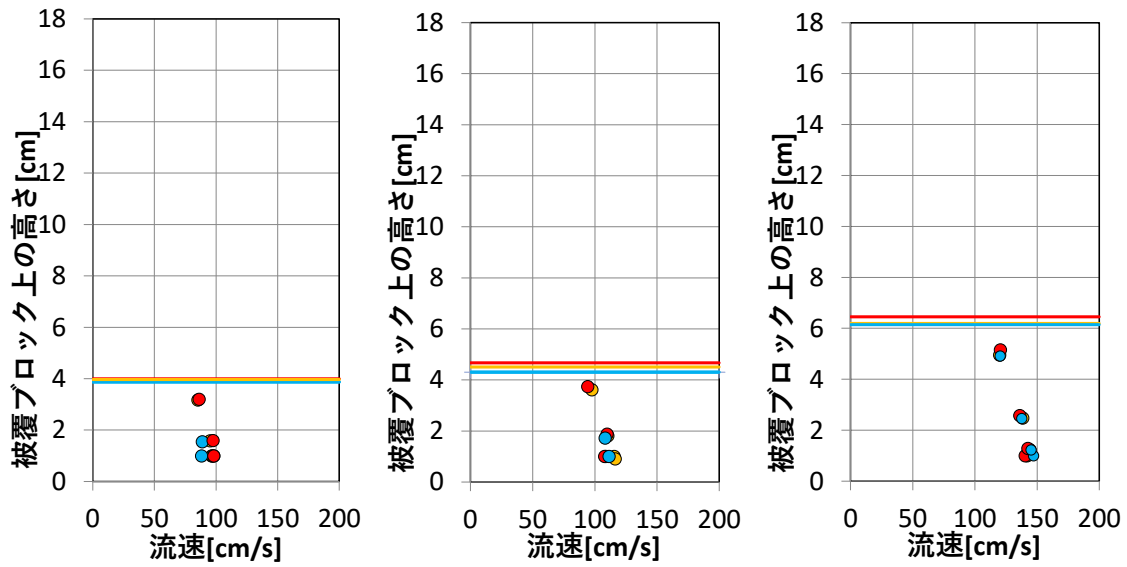
2) ブロック形状変化実験

初期水位 25cm では、実験範囲の最大流量でも特大 3 有孔型ブロックが移動しなかったため、全ての形状変化ケースで移動が確認できる初期水位 16cm を主に実施した。また、方塊型における干出時の法面での移動に対して、有孔型の安定化効果を検証するため初期水位 10cm において小ブロック有孔型 (孔位置中央) についても実施した。

2.1) ブロックの移動状況

図 5-1-10 に有孔型ブロックの挙動例を示す。同図(a)は孔位置を上流側とした場合 (孔上) の移動例であり、同図(b)は孔位置を中央とした場合 (孔中) の移動例で、移動開始流量を合わせて示した。どちらもブロック上端部が浮き上がり回転して離脱する様子が見てとれる。これは有孔型においてもモーメントベースの力学モデルの適用が可能であることを示唆する結果である。

さらに、ブロックの移動開始状況について分類を行い、ケースごとに整理した結果を表 5-1-2 に示す。移動開始位置は、下流法肩に集中している。また、低水位 (初期水位 7,10cm) において方塊で見られた下流法面からの離脱が有孔型では見られなかった。有孔型では初期水位が高くなるとより移動開始流量が増大する傾向がみられた。移動開始流量の増大は孔中に比べ孔上の方が大きかった。



小 流量 1.4 m³/min 特大 流量 1.8 m³/min 特大3 流量 3.2 m³/min

● : 方塊 ● : 孔上 ● : 孔中

図 5-1- 11 水位と流速の空間分布例 (形状変化) 勾配 1 : 1.5 初期水位 16cm

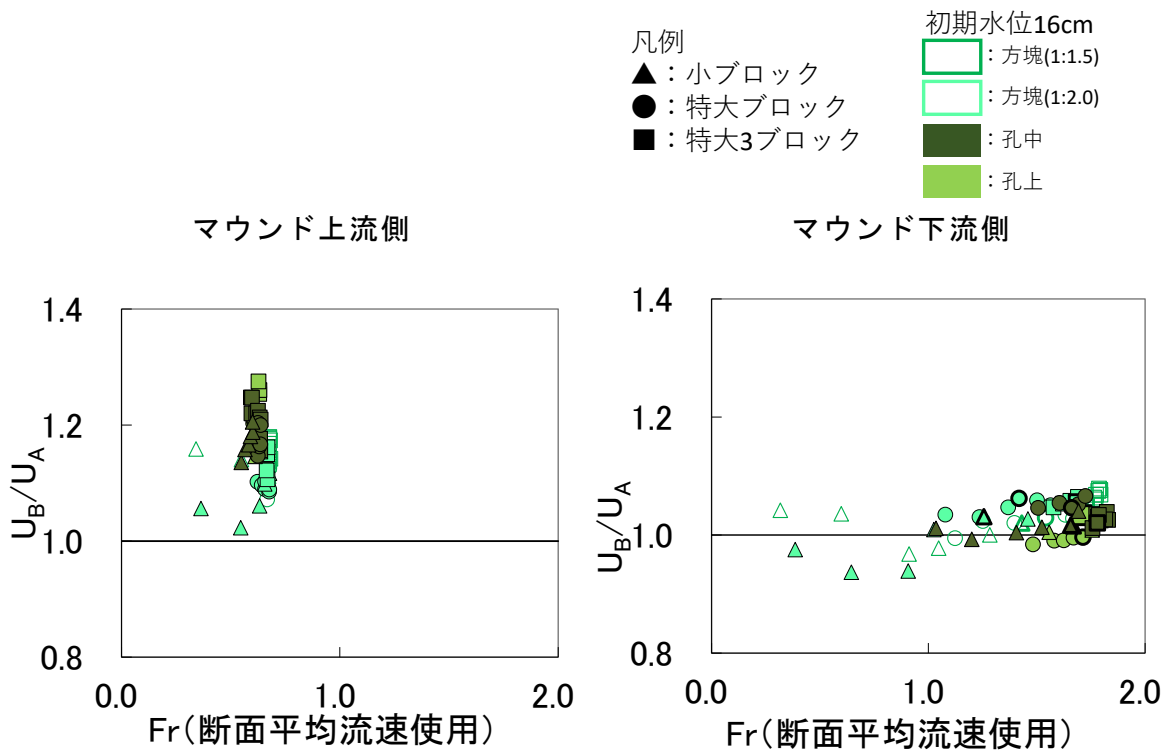


図 5-1- 12 フルード数と底面流速/断面平均流速比の関係

2. 3) 安定限界流速と質量の関係及び安定限界質量の実験値と算定値の比較

有孔型での移動は下流法肩からのみでありそこでの安定限界流速と質量の関係を図 5-1- 13 に示す。

方塊、有孔型孔中、孔上の順で安定限界流速が増大することが分かる。また、いずれの形状も安定限界流速と質量の関係は新 3 乗式よりも新 6 乗式による算定値の方が実

験値と合っているように見える。流速と質量の変化傾向（対応するべき乗則）について有孔型と方塊型で大きな差は見られず、異なる形状においても提案式の適用の可能性が示唆された。これらの傾向は、断面平均流速の参照時に顕著であるが、底面付近流速でも同様に確認された。

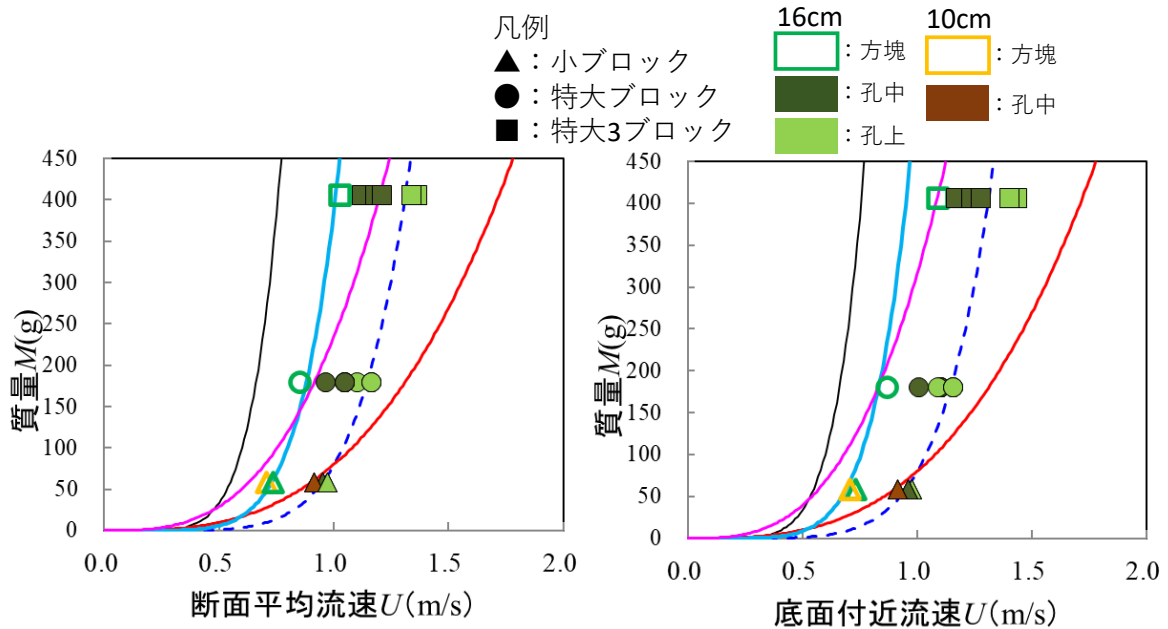


図 5-1- 13 マウンド後端部のブロック質量と安定限界流速の関係 勾配 1 : 1.5

2. 4) 背後水位 h_B と算定式中の係数 X, Z', kl の関係

図 5-1- 14 に異なる形状における水位と係数（断面平均流速使用）の関係を示す。算定式中の係数の比較においてもおおむね方塊型と同様の变化傾向がみられた。

図 5-1- 15 は係数 kl とブロック径 a の関係で、有孔の有無や孔位置で変化しないことが分かる。これは、異なるブロック形状においても、6 乗式を支持する結果であり、以降に示す縮尺変化実験で得られた相似形ばかりでなく、有孔などの形状所の違いに対しても 6 乗式が優勢であることが示唆された。

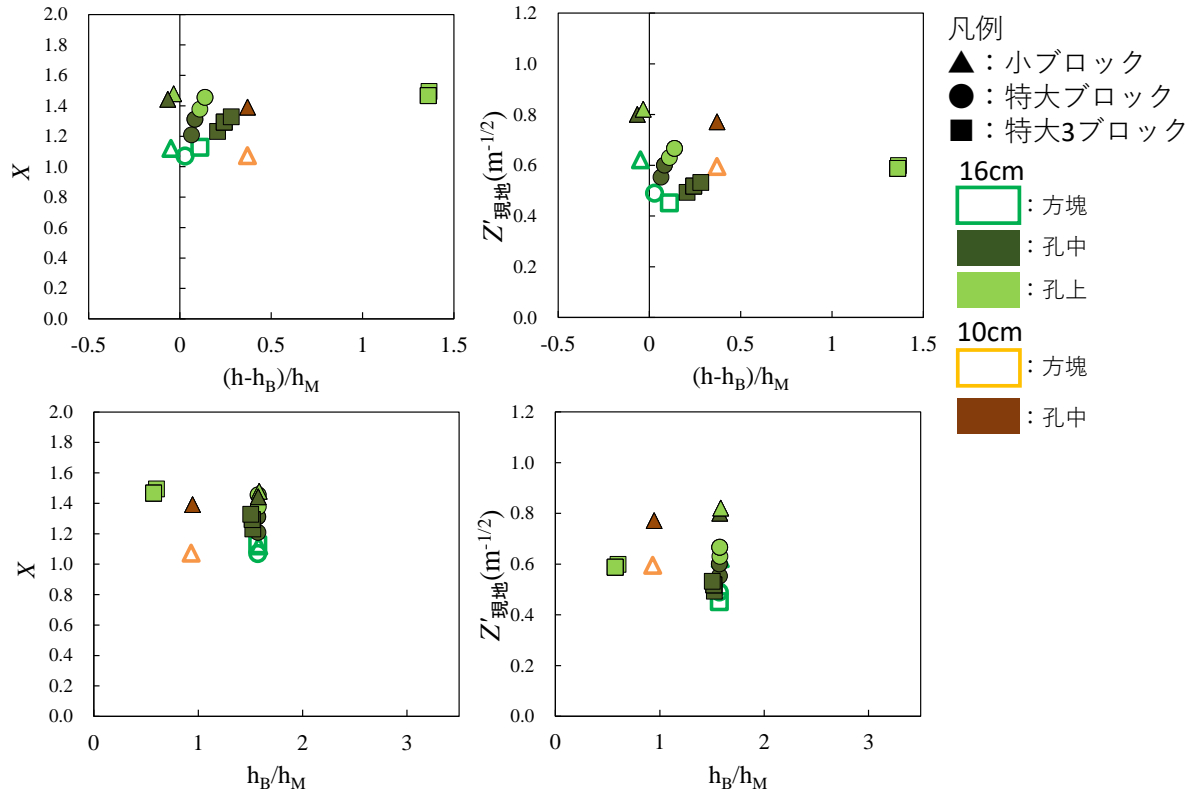


図 5-1- 14 異なる形状における背後水位等と係数 X, Z' の関係 勾配 1 : 1.5

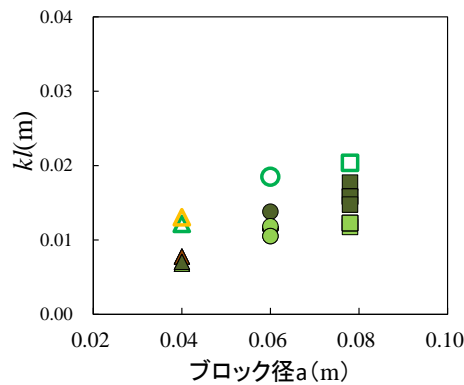


図 5-1- 15 異なる形状における係数 kl とブロック径 a の関係 勾配 1 : 1.5

3) 縮尺変化実験

3.1) ブロックの移動状況

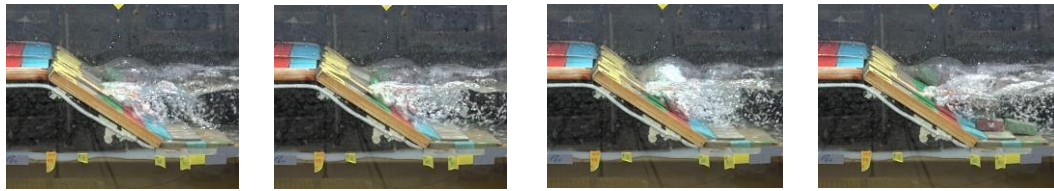
ブロックの移動開始状況について分類を行い、ケースごとに整理した結果を表 5-1-3 に移動開始流量と移動箇所の一覧表として示す。また、図 5-1-16 に縮尺変化実験における移動ブロックの挙動例を示す。同図 (a) では下流側法面下方のブロックが下から押し上げられるように持ち上がり離脱している。同図 (b) では下流側法肩で法面のブロックが上流側から回転するようにして離脱している。移動開始位置は大きくは、水位変更実験と同様に上流法肩、下流法肩、下流法面の三種類に分けられる。低水位（初期水位 10cm 相当）では縮尺に関わらず、下流法面からの離脱が多くみられ、縮尺 1/57 の高水位（初期水位 25cm 相当）のケースでは縮尺 1/80 と同様に上流側天端から離脱し

始める現象がみられた。とはいえ初期水位 16cm 相当では下流側法面上端 (●印) のみから移動開始するケースが多くみられ、総じてイスパッシュ式の導出においてモーメントベースの力学モデルが仮定されていることと整合している。

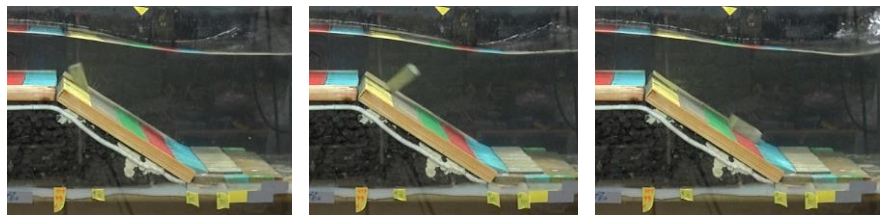
表 5-1- 3 縮尺変化実験 移動開始流量及び移動状況の一覧表

法面 勾配	初期水位		縮尺	作用流量(m ³ /min)																									
	現地(m)	実験(cm)		0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	4.0	4.2	4.8	5.0	5.2	5.4	5.6	
1:1.5	24	58.5	1/41																										
1:1.5		42	1/57																										
1:1.5		30	1/80																			○4			◇1	▼1	▼3		
1:1.5	20	48.75	1/41																										
1:1.5		35	1/57																						○2	○1	○2		
1:1.5		25	1/80																									H30実施	
1:1.5	16	39	1/41																									×	
1:1.5		28	1/57																										
1:1.5		20	1/80																										
1:1.5	12.8	31.2	1/41																										
1:1.5		22.4	1/57																										
1:1.5		16	1/80																										
1:1.5	10.8	25.35	1/41																										
1:1.5		18.2	1/57																										
1:1.5		13	1/80																										
1:1.5	8	19.5	1/41			●1	●1	●3																					
1:1.5		14	1/57																										
1:1.5		10	1/80																										
1:1.5	5.6	13.65	1/41																										
1:1.5		9.8	1/57																										
1:1.5		7	1/80																										

[移動開始位置] ● : 下流法面上端 ▲ : 下流法面中央付近 ■ : 下流法面下方
 ※数字は繰り返し回数 ▼ : 下流天端 ○ : 上流天端 ◇ : 上流天端・下流天端同時
 ◆ : 下流法面最下端 × : 最後まで移動なし - : R03年度未実施



(a) 縮尺 1/57 初期水位 10cm 相当 勾配 1 : 1.5 (移動開始流量 1.16 m³/min)



(b) 縮尺 1/57 初期水位 20cm 相当 勾配 1 : 1.5 (移動開始流量 4.01 m³/min)

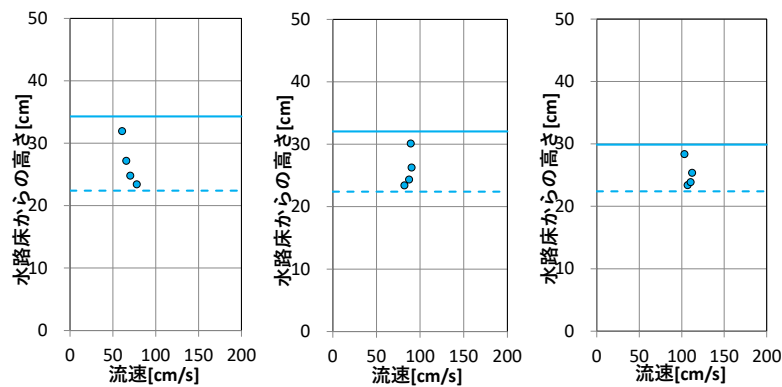
図 5-1- 16 移動ブロックの挙動例

3.2) 流速・流体力・水位

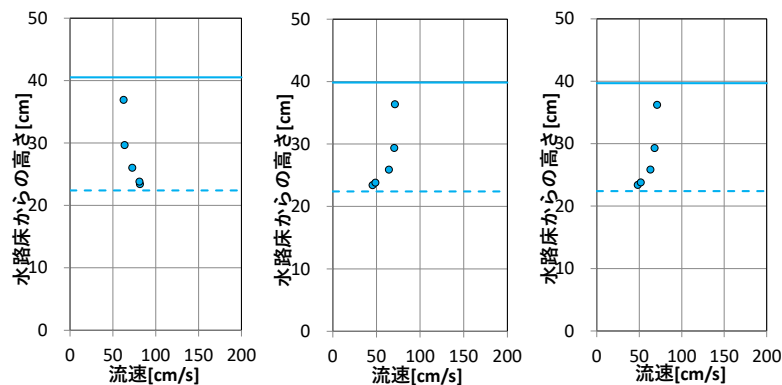
水位や流速、圧力の計測は各流量ランクにおいて 30 秒間行っており、以降では、30 秒間内の平均値や必要に応じて最大値・最小値を用いて整理を行った。マウンド上各位置における水位・流速の空間分布の例を図 5-1-17 に示すが、下流ほど水位が低くなり、流速は大きくなることが分かった。ブロックのサイズに関わらず、全体的な傾向として下流側で水位が低く、流速が増加する特徴は共通している。

このような底面流速・断面平均流速の比の変化と断面平均流速で定義したフルード数の対応関係を図 5-1-18 に示す。下流側ではフルード数が概ね 1.5 を超える場合に底面流速・断面平均流速の比が 1 以上になり得ることが分かった。また上流側ではフルード数が 1 未満であり、かつ底面流速・断面平均流速の比は下流側と比べて大きく概ね 0.9 以上となる特徴がみられた。

このように今回の縮尺の範囲では、縮尺を大きくした場合においても、水位と流速の空間分布や流速の鉛直構造などが初期水位変化実験と同じ傾向となることが分かった。



縮尺 1/41 勾配 1 : 1.5 初期水位 31.2cm (16cm 相当) 流量 3.0m³/min



縮尺 1/57 勾配 1 : 1.5 初期水位 35cm (20cm 相当) 流量 4.0 m³/min

図 5-1-17 水位と流速の空間分布例
(模型スケール, 30s 平均値)

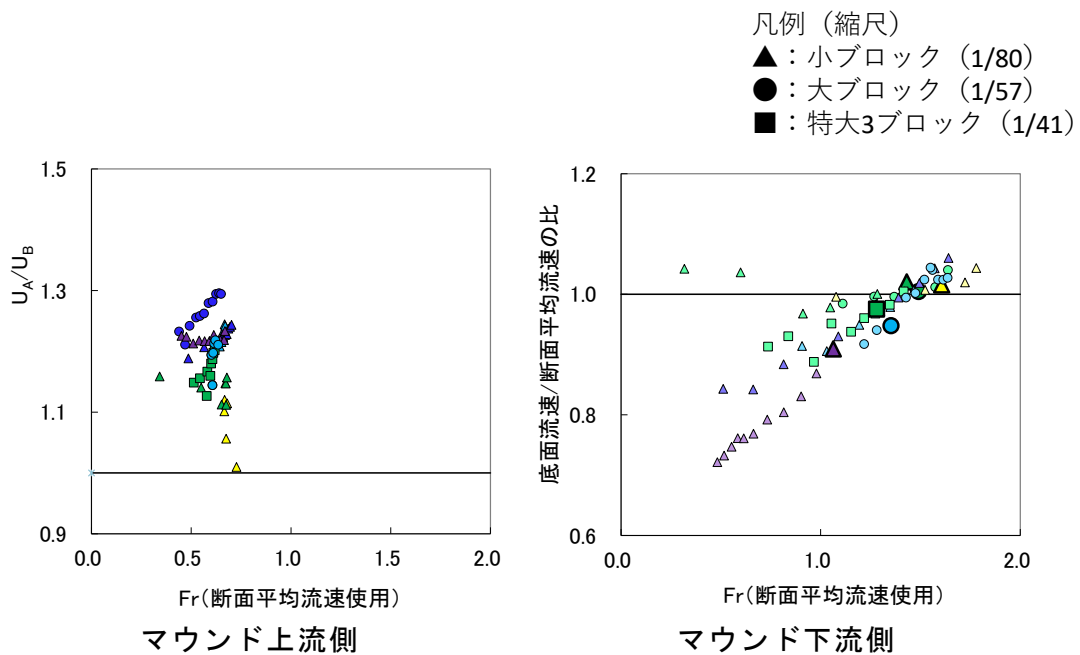


図 5-1- 18 フルード数と底面流速/断面平均流速比の関係 (勾配 1 : 1.5)

3.3) 安定限界流速と質量の関係及び安定限界質量の実験値と算定値の比較

図 5-1- 19 にマウンド後端部における安定限界の断面平均流速と質量の関係について、今年度の実験値を追加したものを示す。なおブロック比重が一定のケースのみ記載しており、参考として CERC 式 ($Y=1.08$ 、黒線) と Isbash 原著の式 ($Y=1.08$ 、青破線)、加藤ら (2019) の提案式 (3 乗式 ($Y'_{\text{現地}}=0.6 \text{ m}^{-0.5}$)、赤線)、昨年度提案した新 6 乗式 ($X=1.32$ 、水色線)、新 3 乗式 ($Z'_{\text{現地}}=0.53 \text{ m}^{-0.5}$ 、ピンク線) による算定曲線を併せて示す。CERC 式、新 3 乗式を用いた質量算定値は概ね安全側の評価となった。しかしながら Isbash 原著の式、加藤ら (2019) の式、新 6 乗式では初期水位 16cm 以下の範囲で危険側の評価となることがわかり、安定限界流速と質量の関係式の再精査が必要である。

また、表 5-1- 3 に示すようにマウンド前端部からブロック離脱開始したケースがみられたことから、同部における安定限界流速と質量の関係を調べた (図 5-1- 19 右図)。マウンド上流側の流速を参照すると、CERC 式、Isbash 原著式、加藤ら (2019) の提案式の算定値は実験結果を下回り危険側の評価となったが、新 6 乗式、新 3 乗式による質量算定値は双方ともに概ね安全側の評価になった。

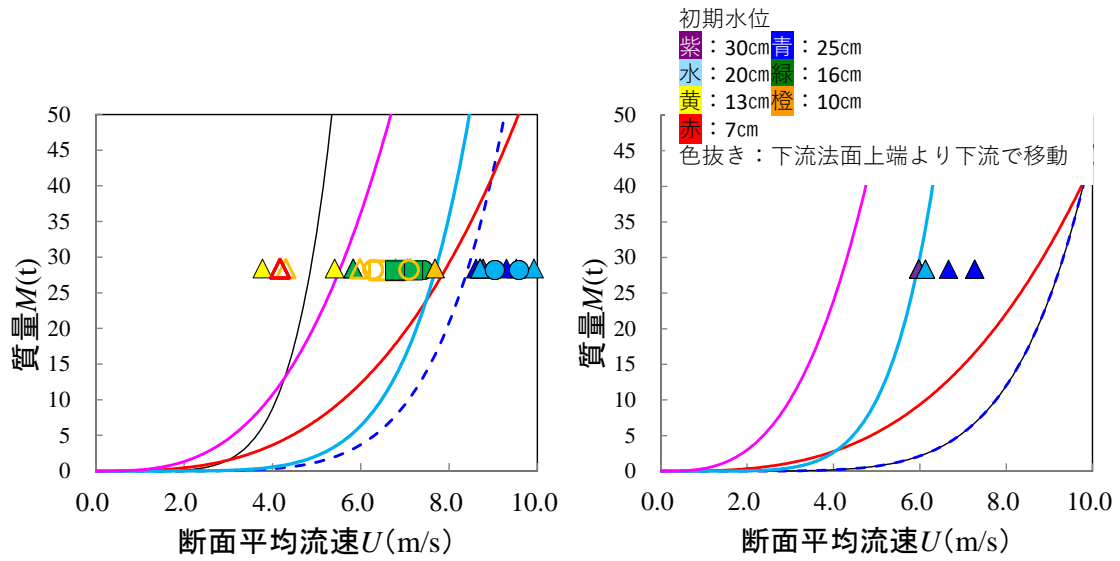


図 5-1- 19 ブロック質量と安定限界流速の関係（現地スケール）
（左：下流法肩 右：上流法肩）

3. 4) 背後水位 h_B と算定式中の係数 λ, Z' の関係

図 5-1- 20 に縮尺変化における背後水位等と係数の関係を示す。

特大 3 ブロックはポンプ流量に施設上の上限があるため高水位では移動がみられないなどの制約はあるものの、各初期水位における係数の変化はおおむね小ブロックと同傾向である。

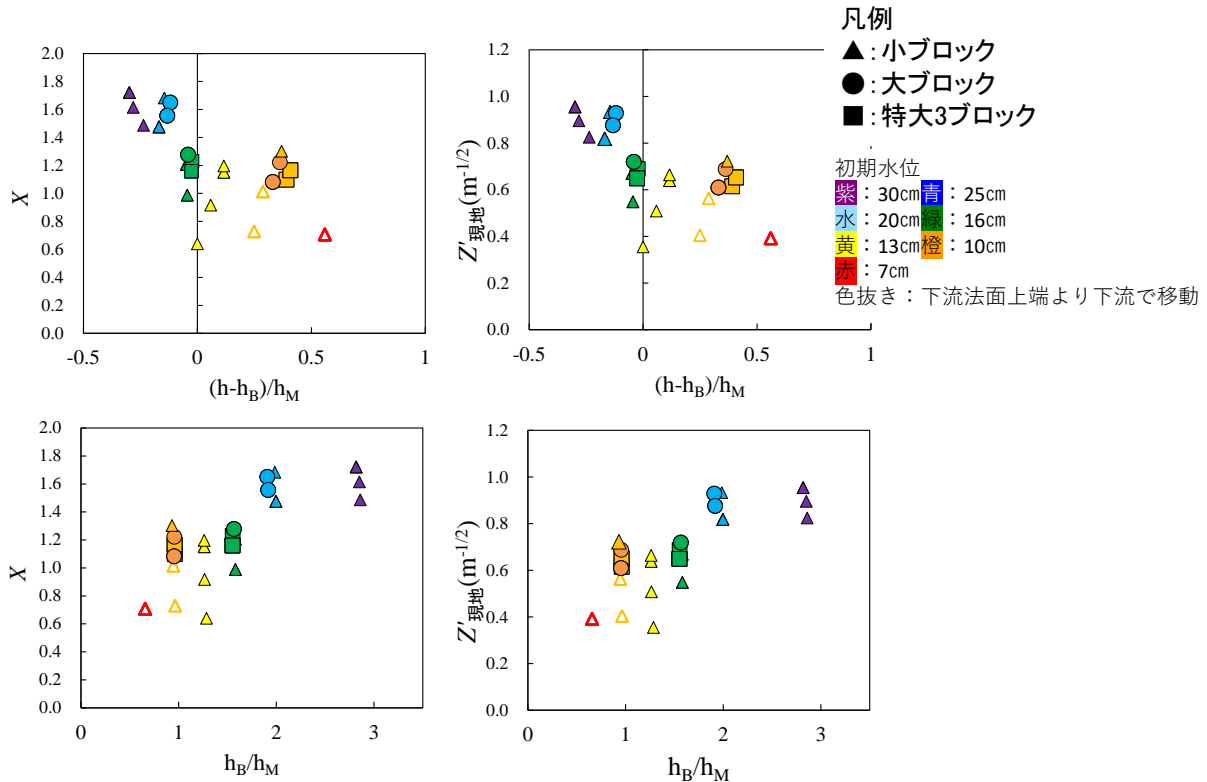


図 5-1- 20 縮尺変化における背後水位等と係数 X, Z' の関係 (模型スケール)

4) 流速・圧力計測実験

4.1) 流速

法面中央でのブロックの移動がみられており、下流法肩での水平流速と法面中央付近での法面に沿う流速の比較を図 5-1- 21 に示す。実験した初期水位が勾配 1 : 2.0 では少ないが勾配 1 : 1.5 では法面の底面付近流速の方が遅く、法面の流速が速いのは初期水位が 13cm 以下の場合である。これに比べ勾配 1 : 2.0 では初期水位 16cm でほぼ一致し、初期水位 10cm 以下で法面の方が速く、勾配 1 : 2.0 の方が流れやすい形状と考えられる。

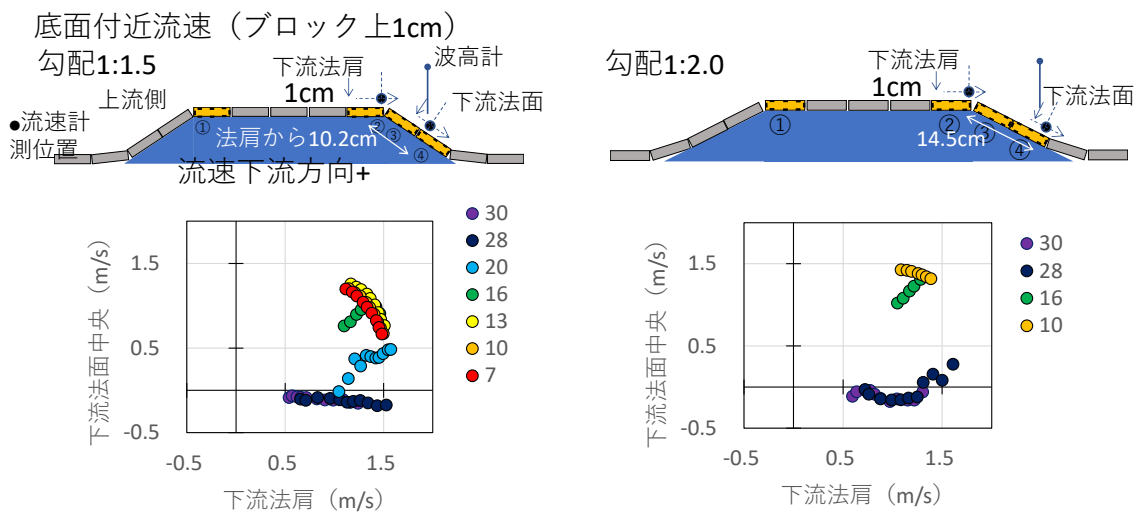


図 5-1- 21 特大 3 における下流法肩流速と法面に沿う法面中央での流速の関係

4.2) 圧力計測

水位変化または縮尺変化において移動の見られた上流法肩、下流法肩、下流法面上端及び下流法面中央付近での揚力又は抗力の計測結果を図 5-1-22～図 5-1-27 に示す。なお、上流法肩は上流法肩での底面付近流速であり、それ以外は下流法肩の底面付近流速を横軸に使用した。

小ブロックの波圧計測結果を見ると移動の見られる上流天端、下流法肩や下流法面中央で上向きの揚力が大きくなっている。一方下流天端では下向き揚力が作用している様子が分かる。上流天端では高水位時に、下流法面上端では中水位から低水位で、下流法面中央では初期水位 10cm 以下で揚力が大きい（図 5-1-22）。

特大 3 ブロックでは揚力の分布や抗力を計測した。揚力は 3 か所の平均値を求め、移動開始流量における揚力分布を示している。特大 3 での移動が下流法面上端のみであり、揚力が大きくなる位置も移動箇所と一致し、揚力の増大が被覆ブロックの移動の主な要因であるといえる。

揚力の分布形状は、上流側で揚力が大きく下流端ではほぼゼロとなる三角形分布であり、提案式で想定している回転モーメントによる移動モデルを裏付ける結果が得られた（図 5-1-23、図 5-1-24）。さらに、抗力（図 5-1-26）を見ると下流天端でもっとも大きくなっている。この要因は法肩の楔形の隙間で生じる圧力低下が大きな要因である。ただし、移動実験では下流天端では最初に移動がみられない。これは、図 5-1-23、図 5-1-24 で見られるように下向きの揚力が大きく作用していることが要因と考えられる。

さらに、縮尺変化での特大 3 ブロックでは、下流法面中央からブロックが移動しており、それを裏付けるように揚力が最も大きく作用している。分布形を法面上端と比べると法面上端は三角形分布であるのに対して、法面中央では下流端でも揚力が大きい台形分布となっている（図 5-1-25）。これは想定した力学モデルの回転モーメントでの移動とは異なる。ブロックを全体的に押し上げる力は、ブロックを押し上げるほか、滑動抵抗を低下させる要因ともなる。これは移動実験からも明らかになっているが、有孔型にして圧力を抜くことが有効な対策であることを示している。

図 5-1-27 に抗力を示す。縮尺 1/80 と同様下流天端で最も大きくなっていた。

勾配1:1.5

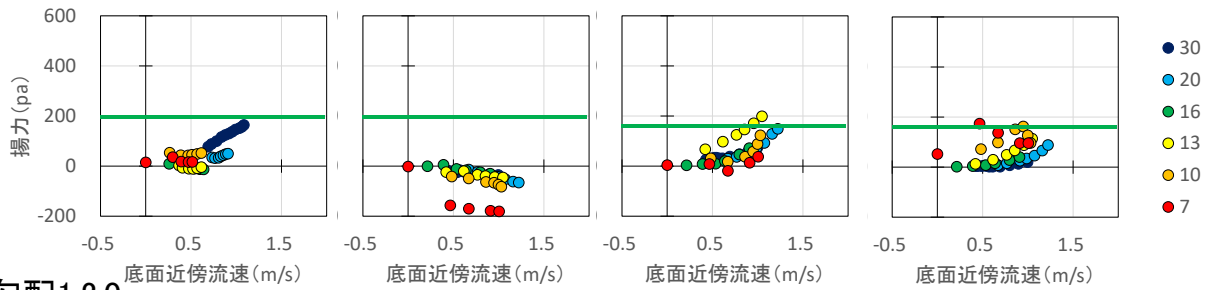


①上流天端

②下流天端

③下流法面上端

④下流法面中央



勾配1:2.0

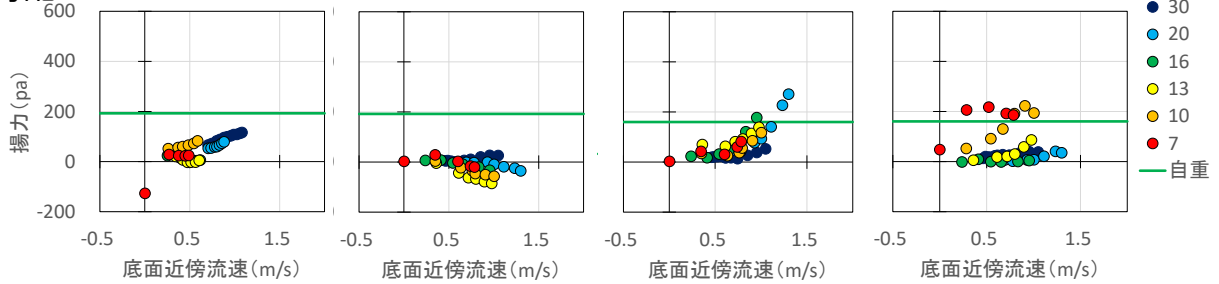


図 5-1- 22 揚力と底面付近流速の関係（水位変化：小ブロック）

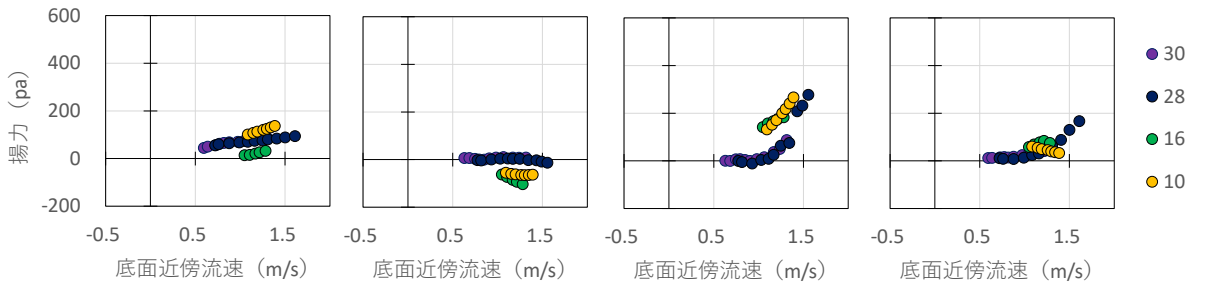


①上流天端

②下流天端

③下流法面上端

④下流法面中央



移動開始時の揚力（上図①～④に対応）

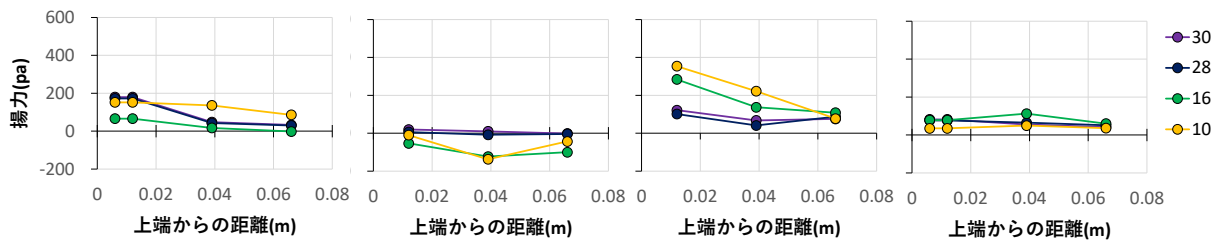
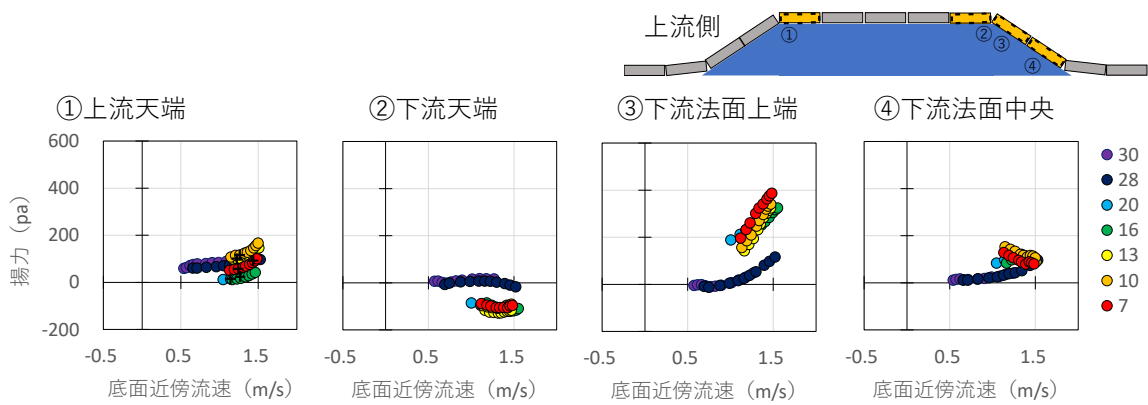


図 5-1- 23 揚力と底面付近流速の関係と移動開始時の揚力分布
（水位変化：特大3ブロック、勾配1：2.0）



移動開始時の揚力 (上図①～④に対応)

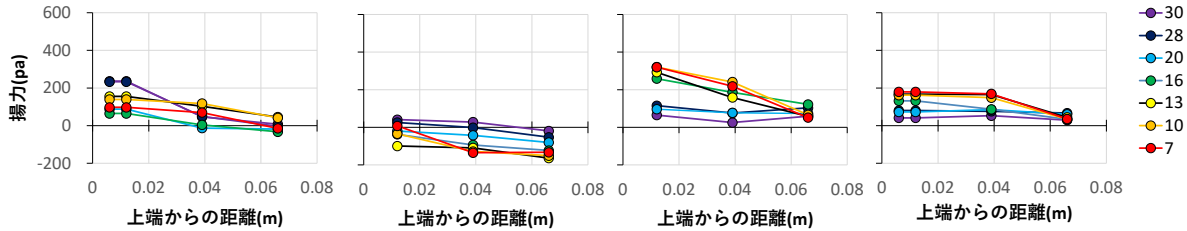


図 5-1- 24 揚力と底面付近流速の関係と移動開始時の揚力分布 (水位変化：特大 3 ブロック、勾配 1 : 1.5)

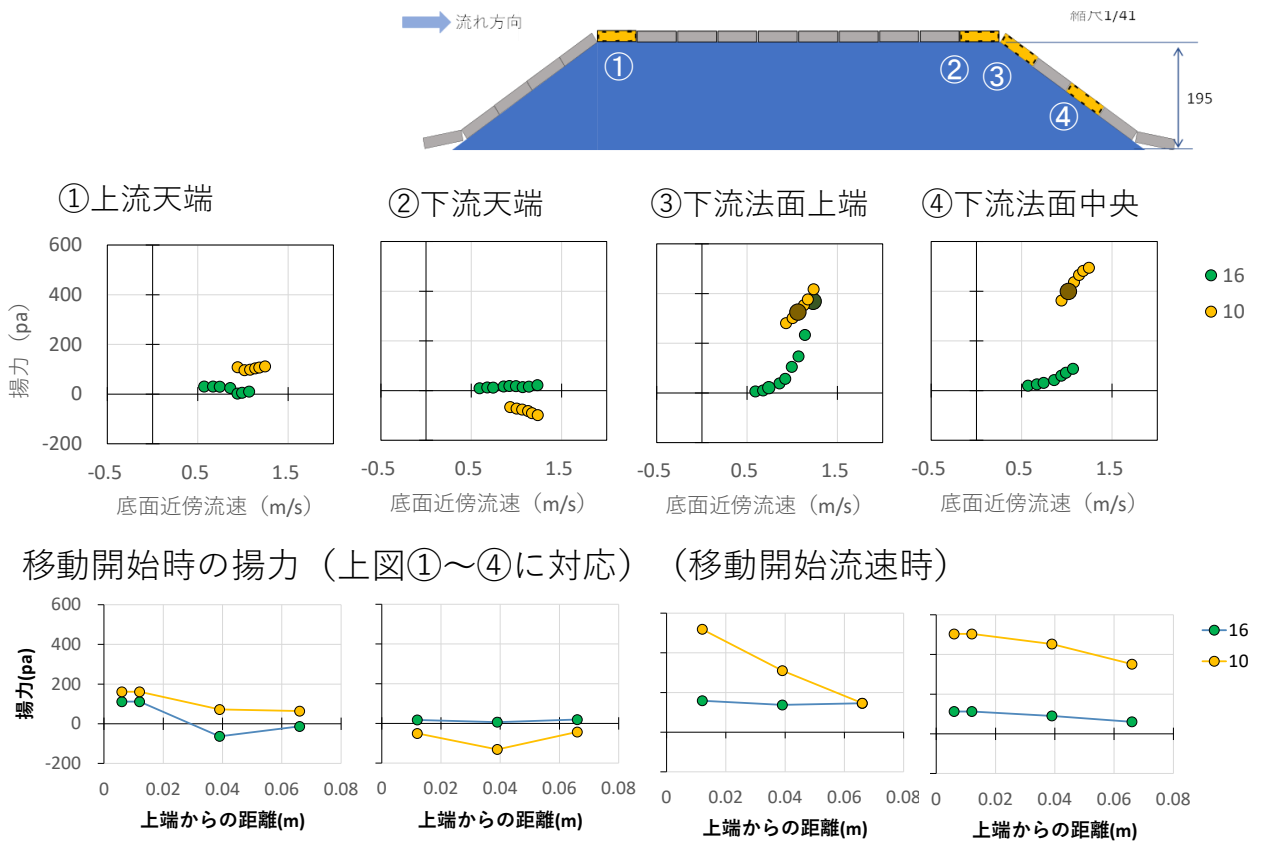
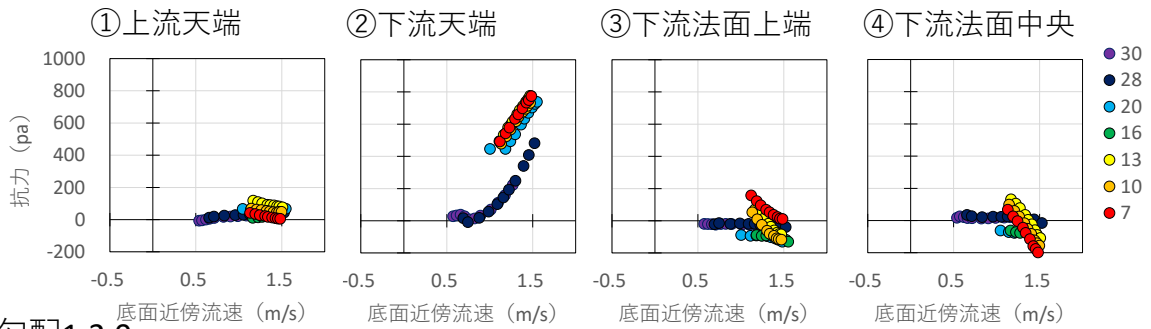


図 5-1- 25 揚力と底面付近流速の関係と移動開始時の揚力分布 (縮尺 1/41：特大 3 ブロック、勾配 1 : 1.5)

勾配1:1.5



勾配1:2.0

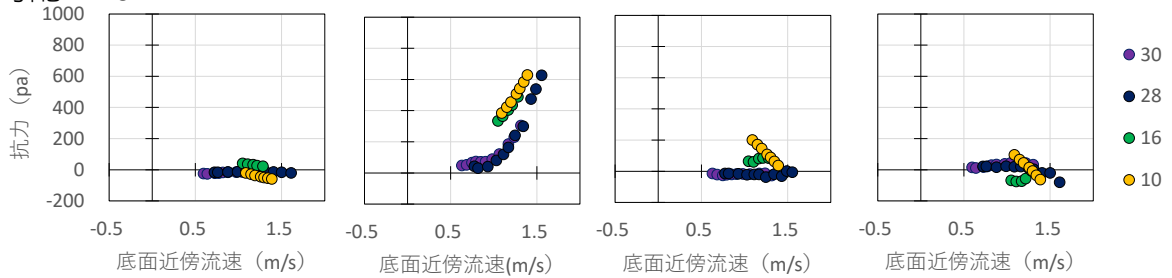


図 5-1- 26 抗力と底面付近流速の関係（水位変化：特大 3 ブロック）

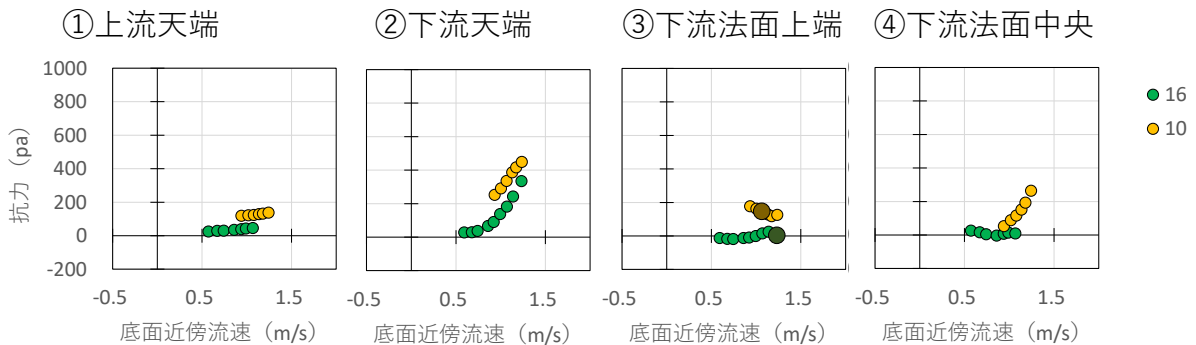


図 5-1- 27 抗力と底面付近流速の関係（縮尺 1/41：特大 3 ブロック、勾配 1：1.5）

(B)まとめと考察

1) 断面平均流速と底面付近流速の関係

図 5-1- 28 は水位変化実験での勾配 1:1.5、1:2.0 のグラフである。図中に底面付近流速 U_B と断面平均流速 U_A の比が 1 となる線を示している。グラフは再掲であるが、ここではブロックが移動する際の流速構造を見る。大印が移動開始したときの値である。高水位（初期水位 25, 30cm）で移動が見られるのは灰色破線丸の中で、概ね $U_A/U_B=1.0$ 以下で見られる。中水位以下の水色や緑色、黄色は $U_A/U_B=1.0$ 以上で移動が見られ、流速構造の変化が移動に影響を与えているものと考えられる。

断面平均流速 U_A と底面流速 U_B の比(U_B/U_A)と $Fr \equiv U_A/\sqrt{gh}$ の関係

・ 大シンボルはブロックが移動開始する際の情報

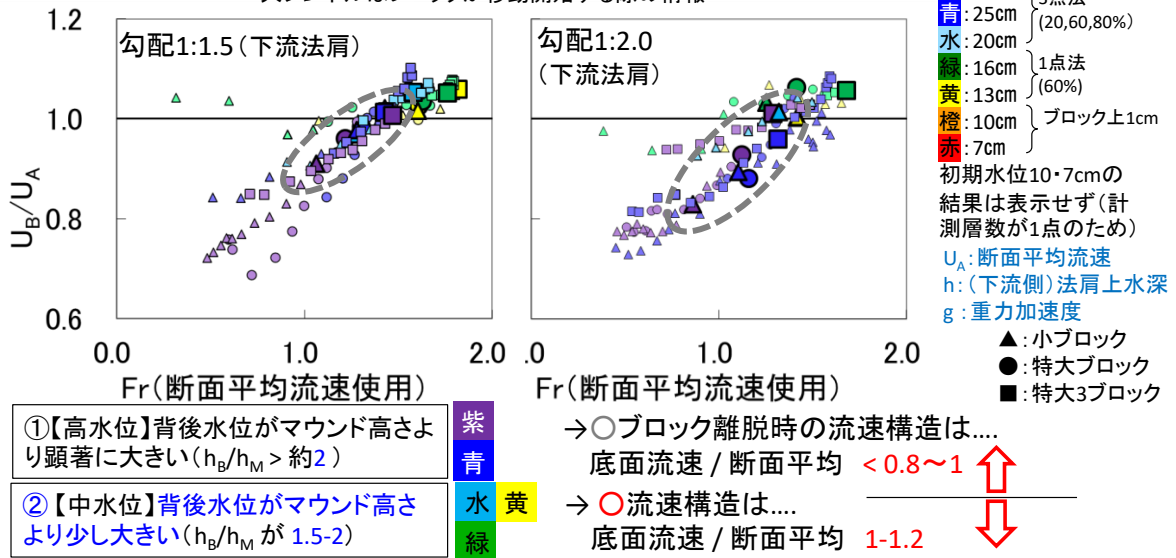


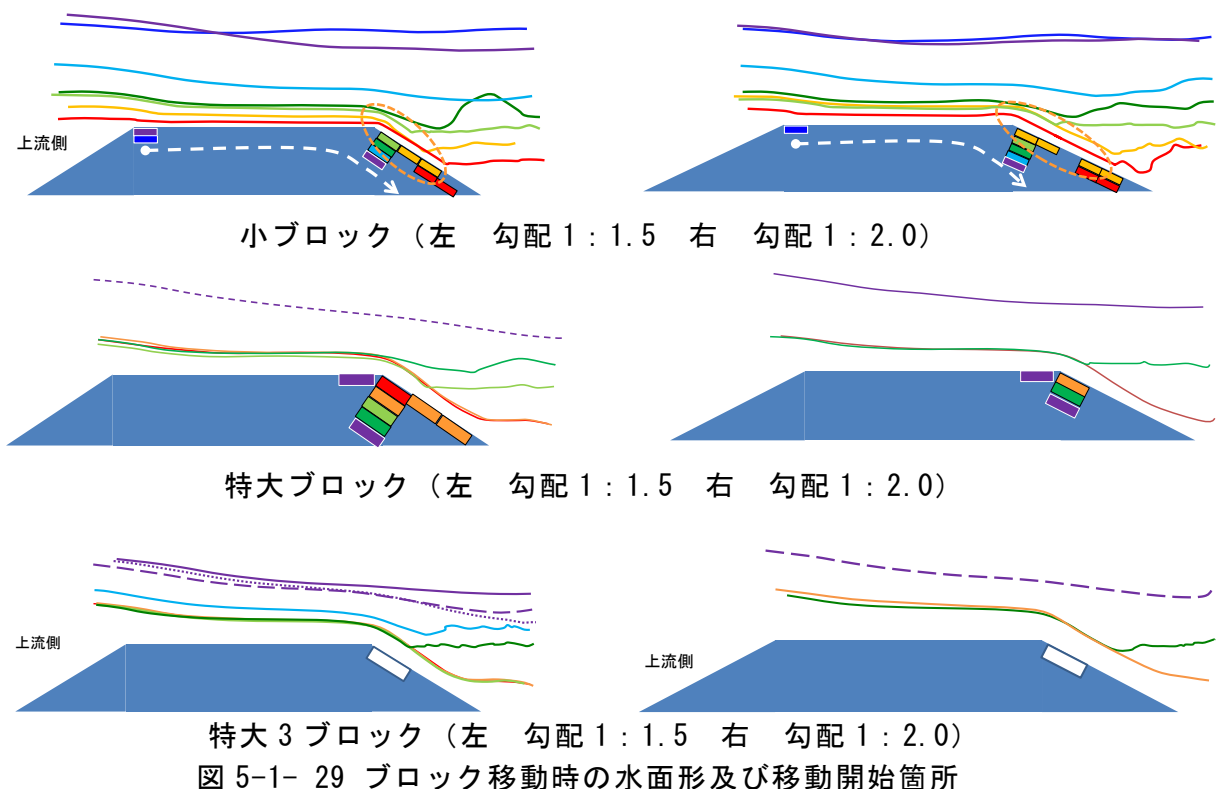
図 5-1- 28 フルード数と底面流速・断面平均流速比の関係
(下流法肩 左: 勾配 1 : 1.5 右: 勾配 1 : 2.0)

2) 水位変化の影響と適用可能な水位条件

イスパッシュ式の導出においてモーメントベースの力学モデルが仮定されている。つまりブロックが移動する際には、ブロックが回転するように移動すると考えられる。しかしながら今年度実施した小、特大ブロックの初期水位 7, 10cm では、下流側法面が下から押し上げられるように持ち上がり、ブロックが移動する様子がみられた。図 5-1- 29 にブロック移動時の水面形と移動開始箇所をまとめた。上記のようなブロックが持ち上がるように移動する時は、下流側法面の水面形が射流に近い状態になり、背後水面との境界がブロックの移動開始箇所に来ていることがわかる。このような移動開始形態は、イスパッシュ式における導出時のモーメントベースの力学モデルの仮定には当てはまらない。また、初期水位 13cm では、ブロック移動開始箇所は下流側法肩であるが、水面形は下流法面に射流に近い状態がわずかに生じていることがわかる。

図 5-1- 30 は断面平均流速と質量の関係のグラフに初期水位 16cm 以上の結果のみプロットしたものである。移動のメカニズムが異なる初期水位 13cm 以下を除くと、概ね現行の算定式で安全側の評価ができると言える。しかし、勾配 1 : 2.0 の質量が大きいブロックでは、危険側の評価となっており、適用範囲を初期水位 16cm 以上としても、安定質量算定式の新提案式の係数の再精査が必要であると言える。

また、前述の図 5-1- 9 (X,Z'の水位変化図) から初期水位の増大によって係数が大きくなる傾向がある。そのためブロックの移動の状態及び水面形、流体力計測や数値計算結果等を基に、水位を背後水位 h_B とマウンド高 h_M の関係から高水位、中水位、低水位の 3 ランクに分類した (図 5-1- 31 参照)。高水位 : h_B が h_M より顕著に大きい。中水位 : h_B が h_M より少々大きい。低水位 : h_B と h_M が同程度以下である。



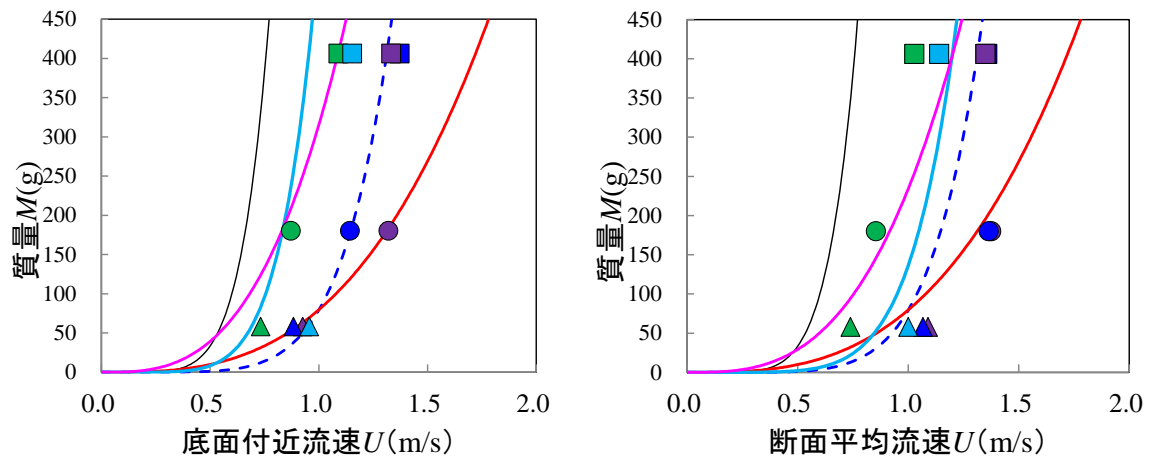
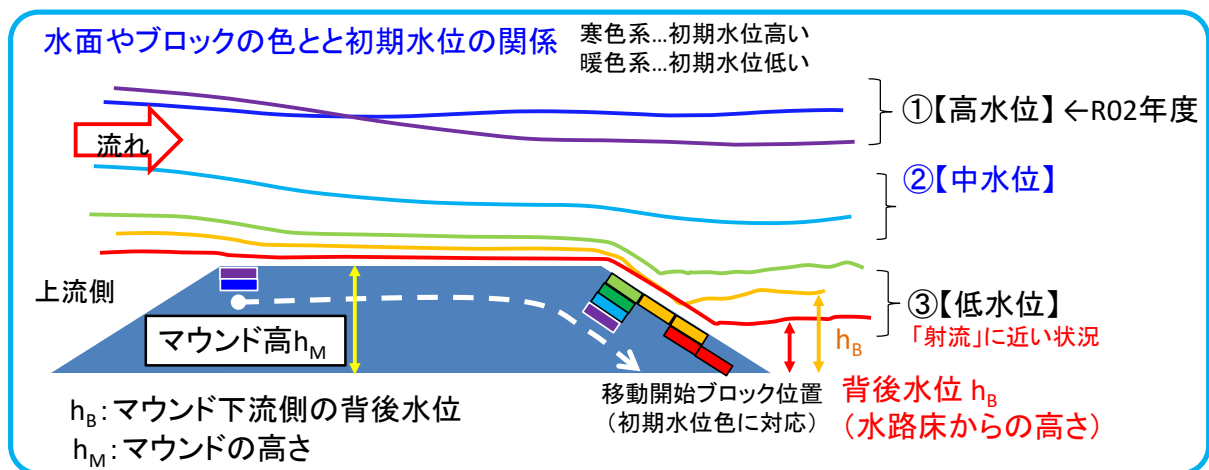


図 5-1- 30 質量と安定限界流速（初期水位 16cm 以上）



- ①:【高水位】 背後水位 (h_B) がマウンド高さ (h_M) より顕著に大きい
- ②:【中水位】 背後水位 (h_B) がマウンド高さ (h_M) より少々大きい
- ③:【低水位】 背後水位 (h_B) がマウンド高さ (h_M) と同程度以下
→移動開始箇所が法面の箇所が含まれる

図 5-1- 31 移動開始時の水面形のトレースと水位の 3 区分
（高水位，中水位，低水位）の模式図

3) ブロック形状変化の影響

有孔型は方塊型よりも安定性が向上した結果（表 5-1- 2）が得られ、写真に示すように有孔型でもブロックが回転しながら移動することが確認された（図 5-1- 32）。また、図 5-1- 15 からブロック径と流体力の作用長がともに増大しており、6 乗式を支持する結果となっており、異なるブロック形状においても提案算定式と適用できるものと考えられる。

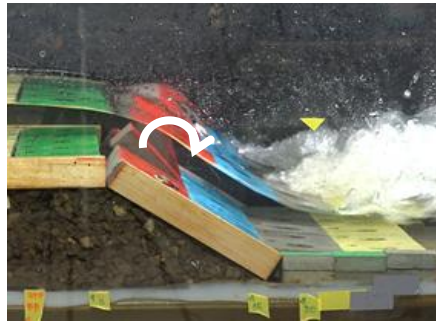


図 5-1- 32 有孔型ブロックの移動の様子（回転しながら離脱）

4) 実験縮尺の影響

図 5-1- 33 に算定式内係数 k_l とブロック径 a の関係（模型スケール）を、図 5-1- 34 に算定式内係数（ k_l ）と縮尺の関係（現地スケール）を示す。ブロック長の現地換算値は 3.2m である。図には白抜きで法面中央から移動したケースも示している。

- ・ 模型スケール（縮尺 1/80）で考えた場合：
特大 3 においては水位変化実験に比べマウンドサイズが約 2 倍となっている。後述する水位変化実験での k_l と概ね一致する（どちらも 0.02 程度）。これよりマウンド大きさの変化が k_l 値に顕著な変化を及ぼさないことが確認できる。
- ・ 現地スケールで考えた場合：
現地換算した場合、異なる縮尺での k_l 値は、同じ初期水位ではおおむね一致する。また、マウンド下流法面の中央からの離脱も異なる縮尺においても再現されており、1/80～1/41 という限られた範囲ではあるが縮尺によって、ブロックの挙動や流速の空間分布等（(a)3 参照）への影響は少ないものと考えられる。

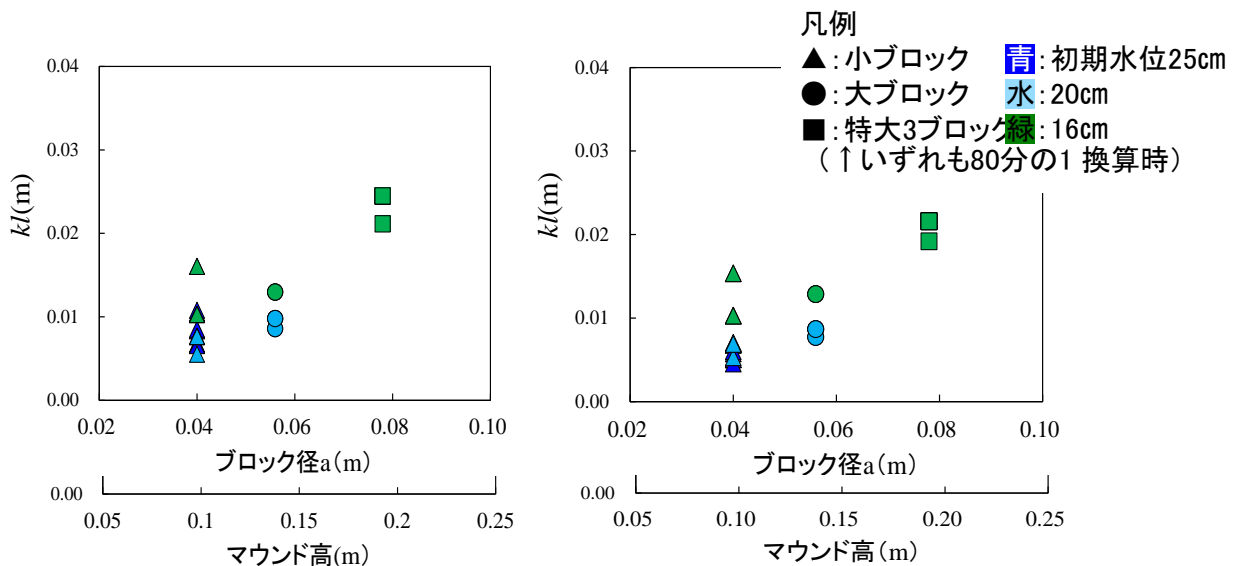


図 5-1- 33 算定式内係数 k_l とブロック長 a の関係（模型スケール、勾配 1:1.5 初期水位 16cm 以上、左：底面流速参照 右：断面平均流速参照）

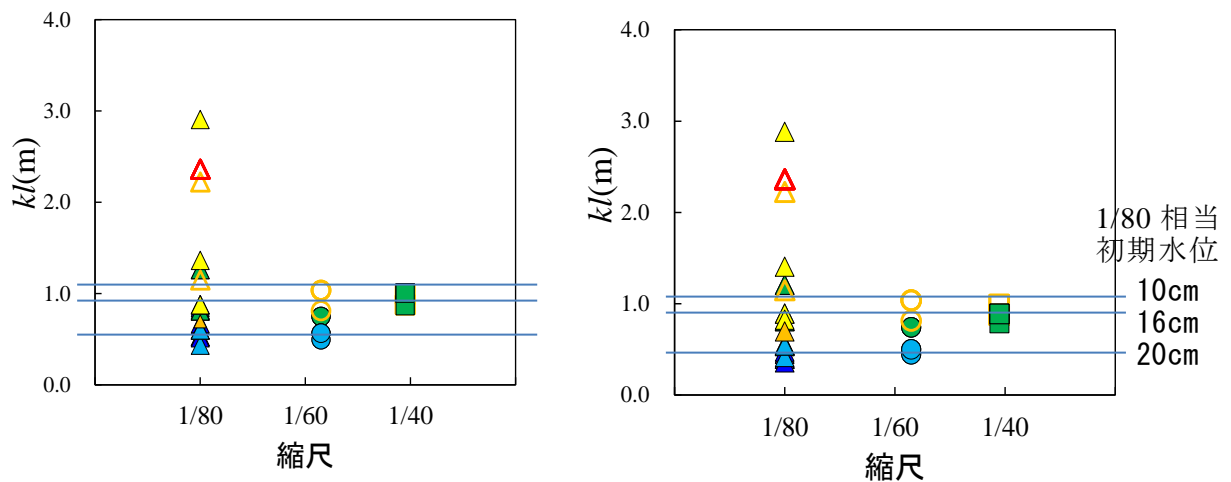


図 5-1- 34 算定式内係数 (k_l) と縮尺の関係 (現地スケール、ブロック長 3.2m、勾配 1:1.5、左：底面流速参照 右：断面平均流速参照)

5) 6 乗式と 3 乗式の使い分け

過年度は断面平均流速を参照する場合は 6 乗式、底面流速を参照する場合は 3 乗式が実験結果を比較的説明しやすいとしていた。

しかし今年度の結果はどちらの流速を参照しても k_l が a に伴って増加する傾向が比較的多くみられた (図 5-1- 35、図 5-1- 36 参照)。

よって、参照する流速によって使用する算定式を変えるのではなく、実務上参照しやすい断面平均流速を用いた 6 乗式を再精査し、適用範囲を示していくことが望ましいと考えられた。

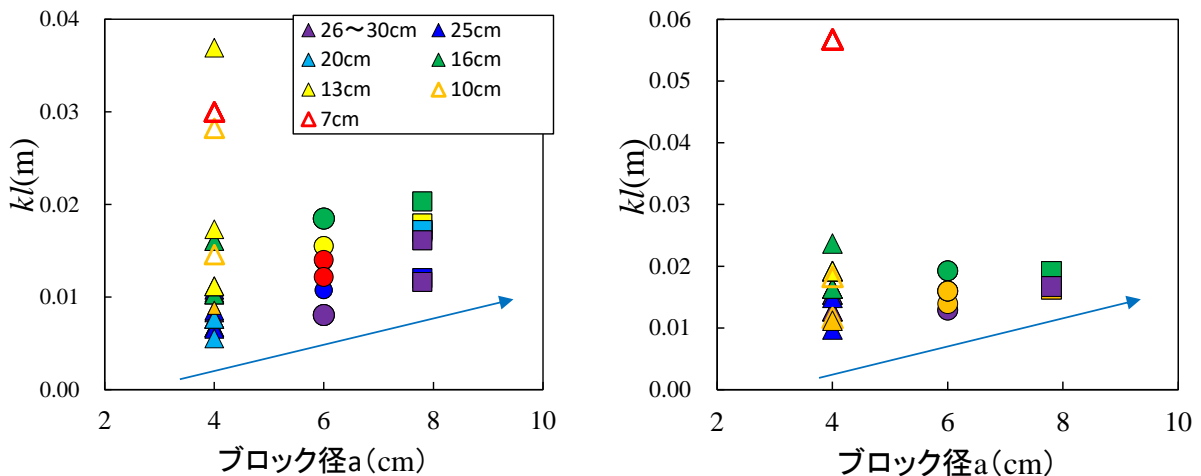


図 5-1- 35 算定式内係数 (k_l) とブロック長さ a の関係 (底面流速参照)
(左 勾配 1 : 1.5 右 勾配 1 : 2.0)

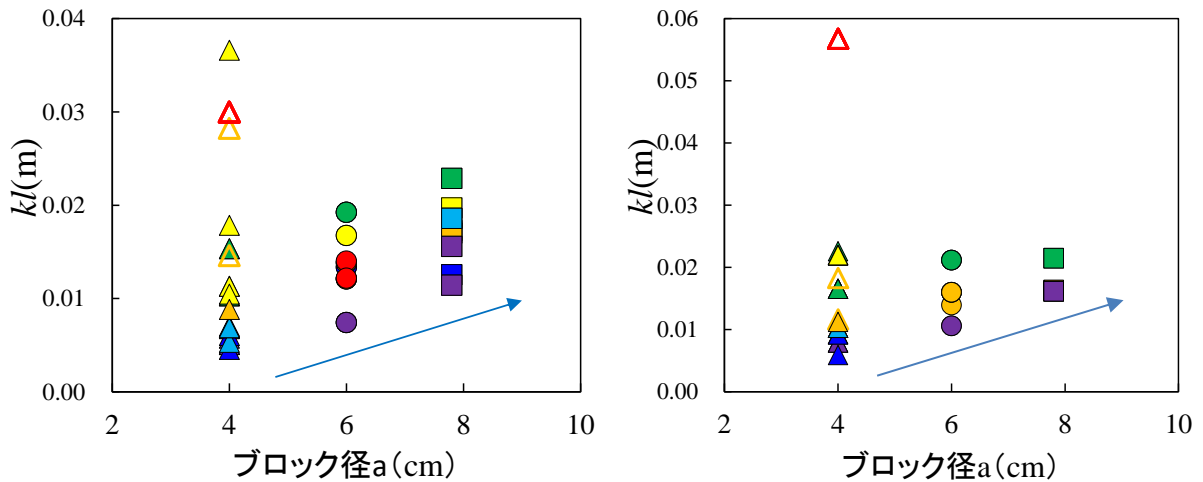


図 5-1- 36 算定式内係数 (k_l) とブロック長さ a の関係 (断面平均流速参照)
(左 勾配 1 : 1.5 右 勾配 1 : 2.0)

次に、縮尺変化実験では、前述の図 5-1- 33 から、模型スケール (縮尺を 1/80) で考えた場合、 k_l は a に比例している。

また、図 5-1- 37 に初期水位 16cm (1/80 相当) 以上についての k_l と縮尺の関係を示す。現地換算した場合の a は 3.2m。 k_l も概ね一定の値となっており、 k_l が縮尺に比例していることが分かる。したがって、 k_l が縮尺に比例しないとする 3 乗式よりも 6 乗式と整合した結果と解釈することができる。

一方、異なる縮尺実験の結果を活用し、ブロックサイズを同一に揃えたときに k_l が a よりもむしろマウンドサイズに強く依存するかどうかを検討した (図 5-1- 38)。

同様のブロック上初期水深 (■ ■ ■) 結果の比較から、流体力長さの変化に対するマウンドサイズ自体の影響は小さい (ブロックサイズ自体の影響が大きい) と推察され、3 乗式の力学仮定の一つが支持されない結果を得た。

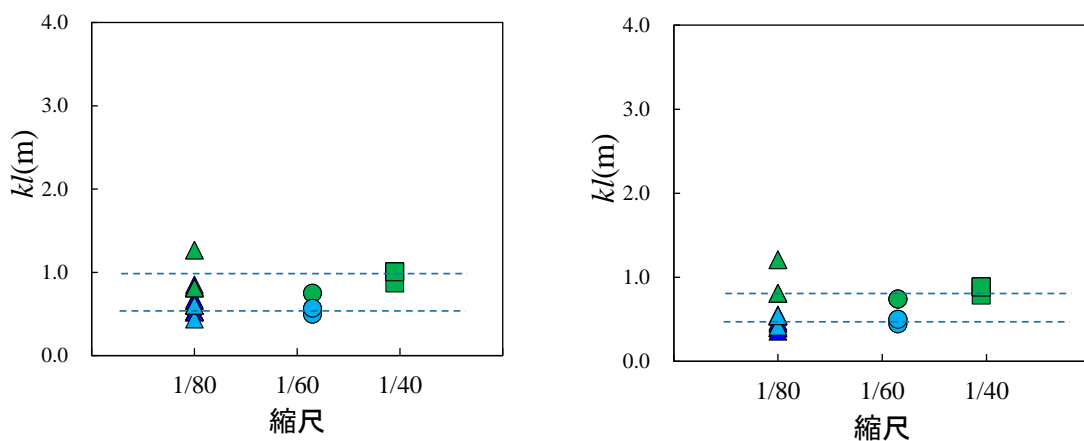
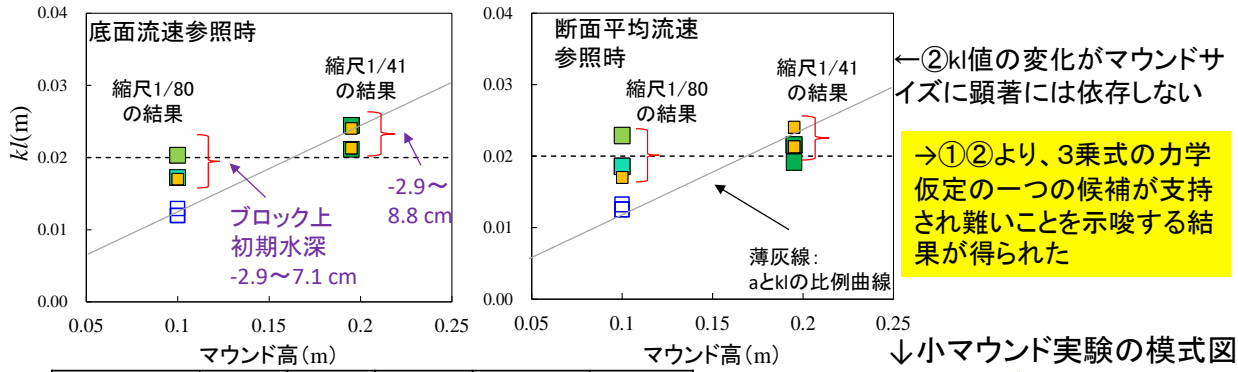


図 5-1- 37 算定式内係数 (k_l) とブロック長さ a の関係
(断面平均流速参照 現地スケール)

ブロックサイズを同一（特大3;長さ8cm, 高さ2.9cm）にそろえた場合のマウンドサイズと kl 値との関係



縮尺	ブロック長さ (m)	マウンド高さ (m)	初期水位 (m)	ブロック上初期水深 (m)	ブロック移動時のFr数
1/80 (1/41用)	0.078	0.195	0.195 10	-0.029	~1
1/80 (1/41用)	0.078	0.195	0.312 16	0.088	~1
1/80	0.078	0.100	0.100	-0.029	~1
1/80	0.078	0.100	0.160	0.031	~1
1/80	0.078	0.100	0.200	0.071	~1
1/80	0.078	0.100	0.250	0.121	~1

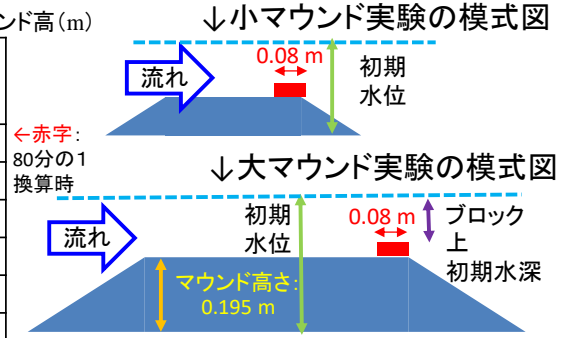


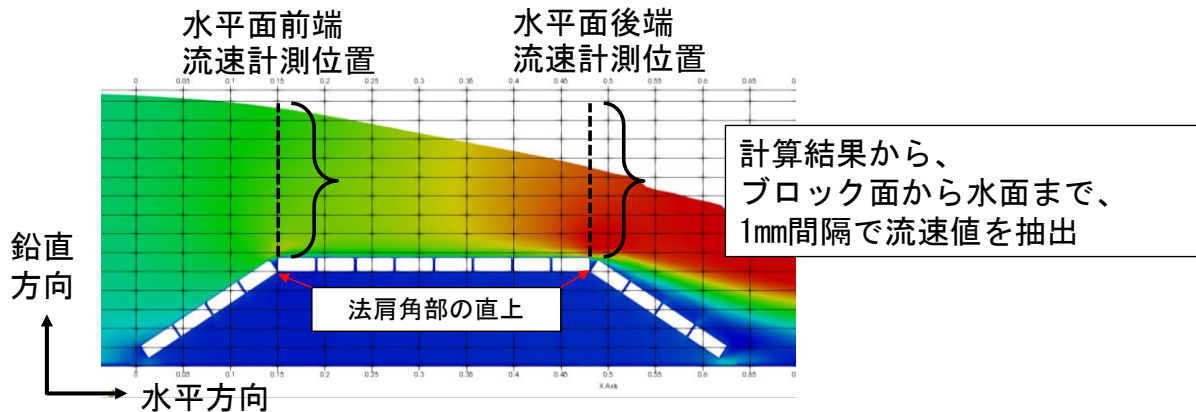
図 5-1- 38 ブロックサイズを同一（特大3;長さ8cm, 高さ2.9cm）にそろえた場合のマウンドサイズと kl 値との関係

(2) 数値計算

本調査での流速値及び作用流体力の定義は図 5-2-1 の通りとした。

数値計算の妥当性検証のため、水平方向流速及び揚力について、実験結果と数値計算結果の比較を実施し、両者は概ね同一であり、数値計算の再現が妥当であることが確認された（図 5-2-2）。

断面平均流速、底面近傍流速の定義

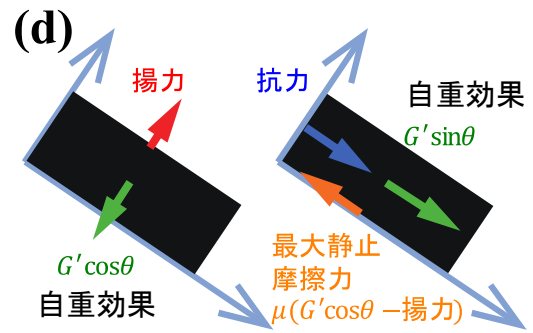
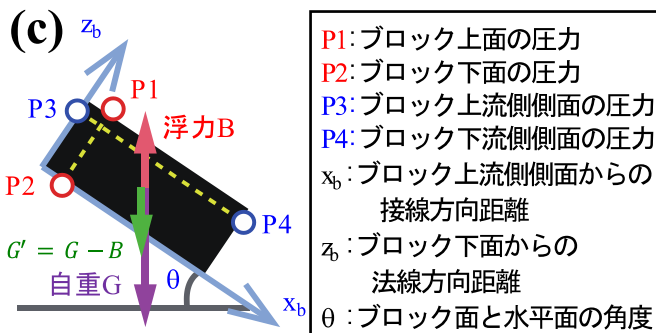


本調査での定義

底面近傍流速：ブロック上高さ1cmの位置での水平方向流速値

断面平均流速：ブロック面から水面までの1mm間隔の水平方向流速を積分し、ブロック面から水面までの高さで除した値

揚力 P_L ・抗力 P_D の定義



$$\text{揚力 } P_L = (P_2 - P_1) - B \cos\theta / A_1$$

A_1 : ブロック底面積,

$$\text{抗力 } P_D = (P_3 - P_4) + B \sin\theta / A_2$$

A_2 : ブロック上流側側面積

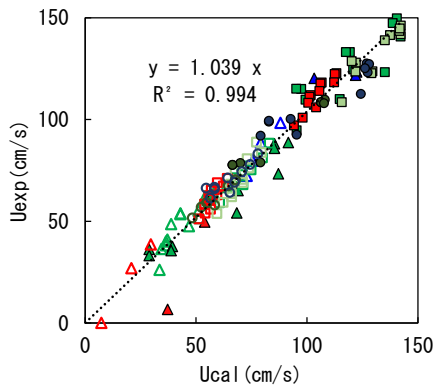
注意！)

本研究では、揚力 P_L ・抗力 P_D をそれぞれブロック面の法線 (z_b) 方向・接線方向 (x_b) に定義しており、揚力 P_L ・抗力 P_D の方向がマウンド水平面と法面で異なる

図 5-2-1 本調査での流速値及び作用流体力の定義

流速分布の再現性

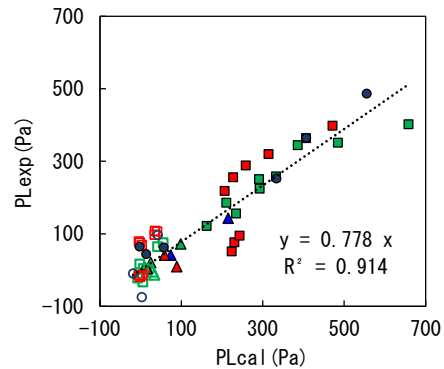
前端・後端の計測流速と計算結果を比較



流速の分布構造は、分布が概ね同一（95%の比較点が15cm/s未満の差におさまる）であることが確認された。

流体力(揚力)分布の再現性

水平面前端・下流側法面上端の計測揚力と計算結果を比較



流体力(揚力)の分布構造は、分布が概ね同一（89%の比較点が100Pa未満の差におさまる）であることが確認された。

- | | |
|--------------------|--------------------|
| ▲初期水位25cm_小 | ▲初期水位16cm_小 |
| ▲初期水位7cm_小 | ■初期水位16cm_特大3 |
| ■初期水位7cm_特大3 | □初期水位16cm_特大3_有孔型 |
| ●初期水位16cm_小_縮尺1/57 | ●初期水位16cm_小_縮尺1/40 |

白抜き：前端側
塗りつぶし：後端側

図 5-2- 2 再現性検証結果

2-a 水位変化ケース

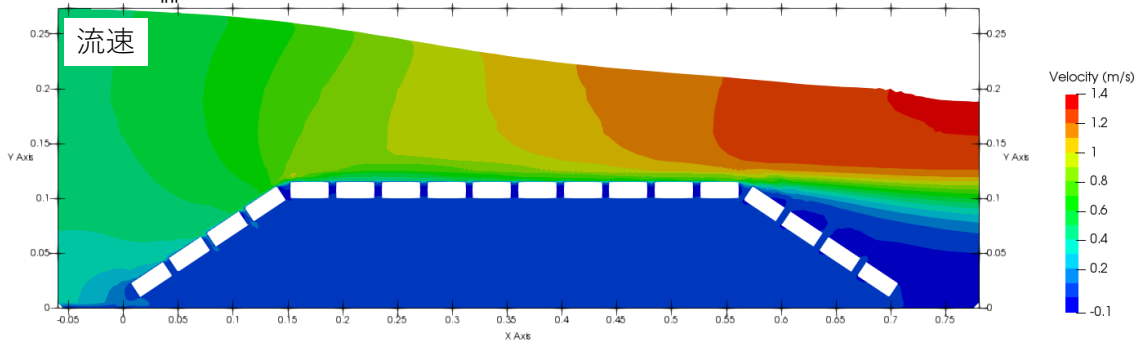
(i) 流速分布構造

水位変化ケースについて、過年度検討である初期水位 25cm のケース、比較的水位の高い初期水位 16cm のケース及び水位が極端に低い初期水位 7cm のケースの流速分布を図 5-2- 3 に示す。

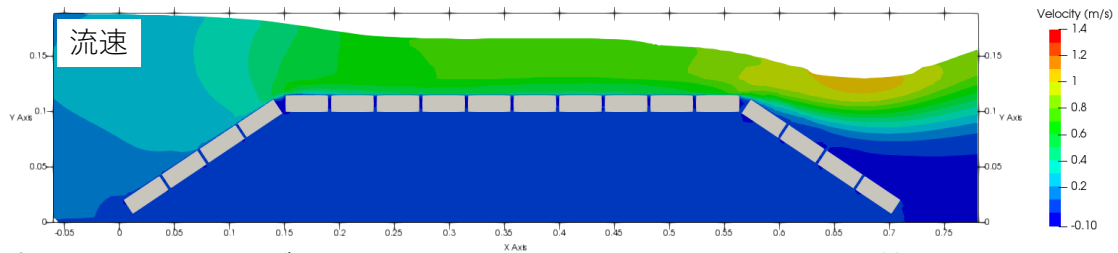
比較的水位の高い初期水位 16cm のケースは、下流側法肩付近で流速が大きくなる特徴を示し、過年度検討である初期水位 25cm と同様の流速分布構造であった。一方、水位が極端に低い初期水位 7cm は過年度検討と異なる流速分布であった。図 5-2- 4 に初期水位 7cm のケースの下流側の流速鉛直分布構造を示す。図より水深が極端に浅いケースでは、法肩上の流速より法面上の流速が大きくなる。法肩流速 / 法面上流速比が約 1.6 であったことから、低水位条件での X,Z 係数の減少の一因であることが推察される。また、過年度検討とは異なり、法面で被災開始することから被災メカニズムが異なることが示唆される。

図 5-2- 5～図 5-2- 16 に本調査で実施した水位変化ケースの流速分布を示す。

a)初期水位(η_{ini})25cm、ブロック小、勾配1:1.5、流量(Q)4.0 m³/min ※実験被災流量(法肩)



b)初期水位(η_{ini})16cm、ブロック小、勾配1:1.5、流量(Q)1.4 m³/min ※実験被災流量(法肩)



c)初期水位(η_{ini})7cm、ブロック小、勾配1:1.5、流量(Q)0.6 m³/min ※実験被災流量(法面)

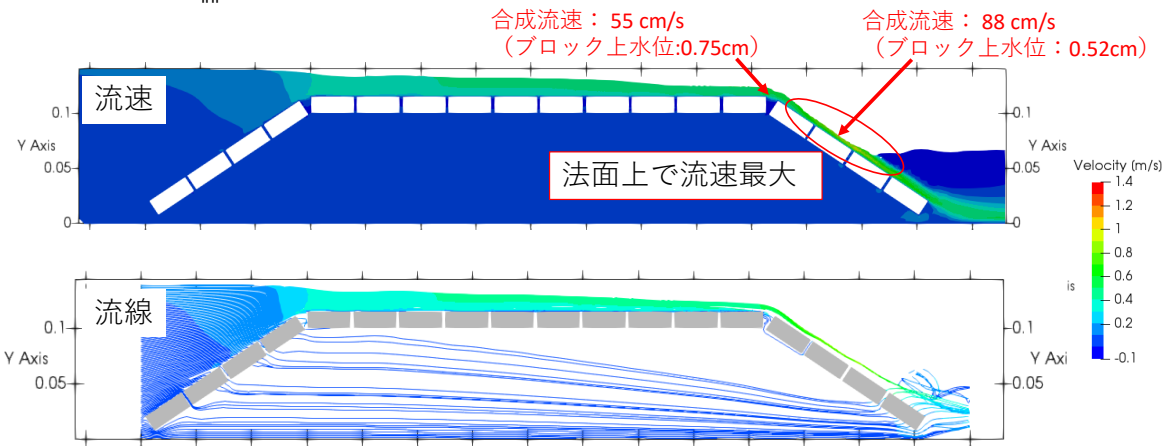


図 5-2- 3 流速分布 (水位変化ケース)

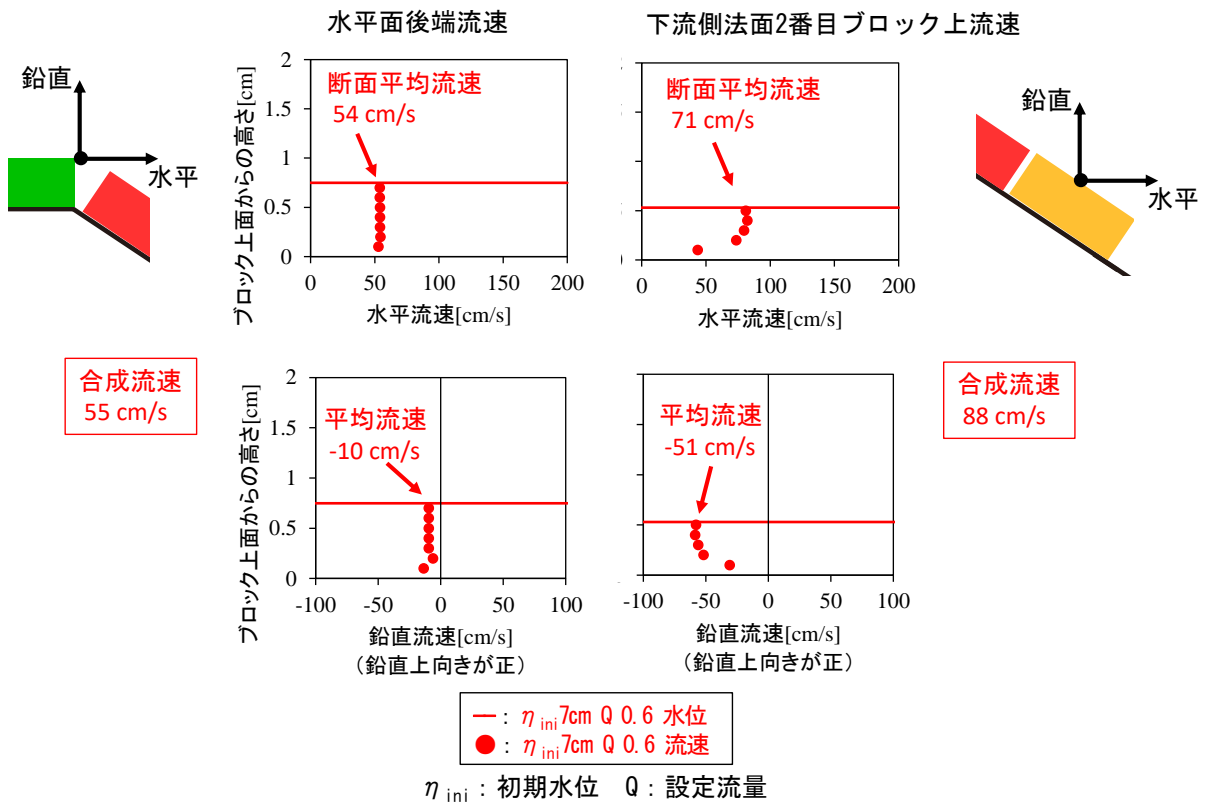


図 5-2- 4 水平面後端及び法面での流速鉛直分布
(水位変化ケース: ブロック小、初期水位 7cm)

初期水位 (η_{ini}) 16cm、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 0.6 m³/min

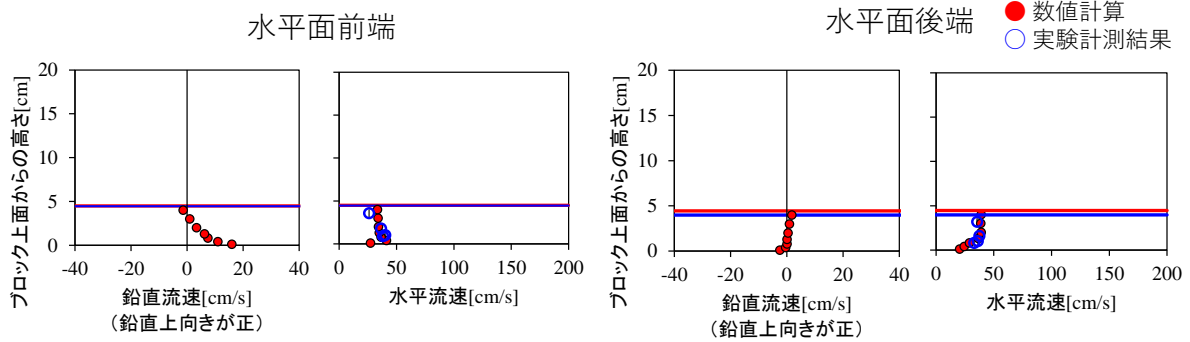


図 5-2- 5 流速鉛直分布

(水位変化ケース：初期水位 16cm、ブロック小、流量 0.6m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 16cm、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 1.0 m³/min

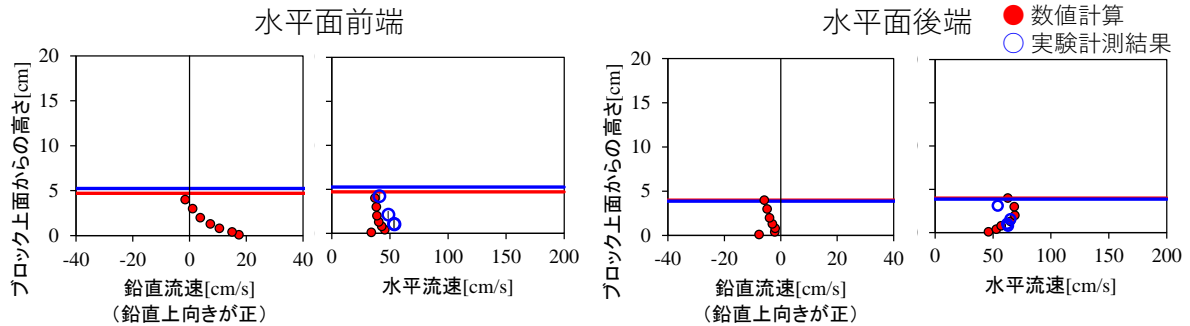


図 5-2- 6 流速鉛直分布

(水位変化ケース：初期水位 16cm、ブロック小、流量 1.0m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 16cm、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 1.4 m³/min

(被災流量)

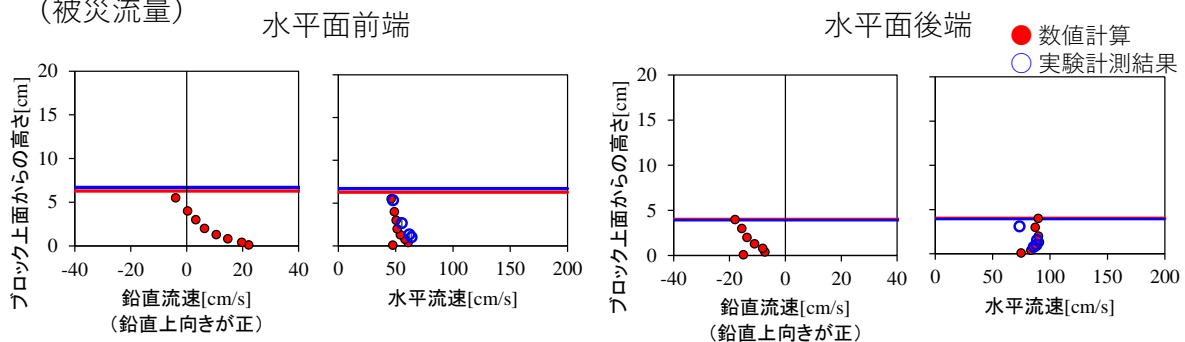


図 5-2- 7 流速鉛直分布

(水位変化ケース：初期水位 16cm、ブロック小、流量 1.4m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 7cm、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 0.2 m³/min

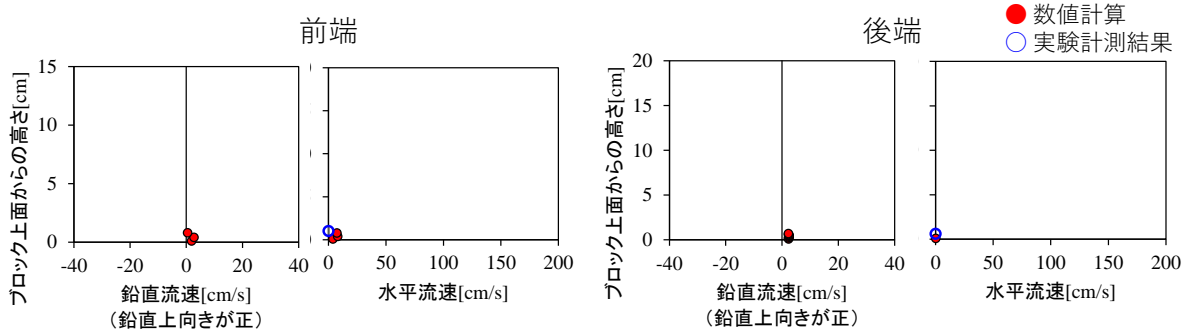


図 5-2- 8 流速鉛直分布
(水位変化ケース：初期水位 7cm、ブロック小、流量 0.2m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 7cm、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 0.4 m³/min

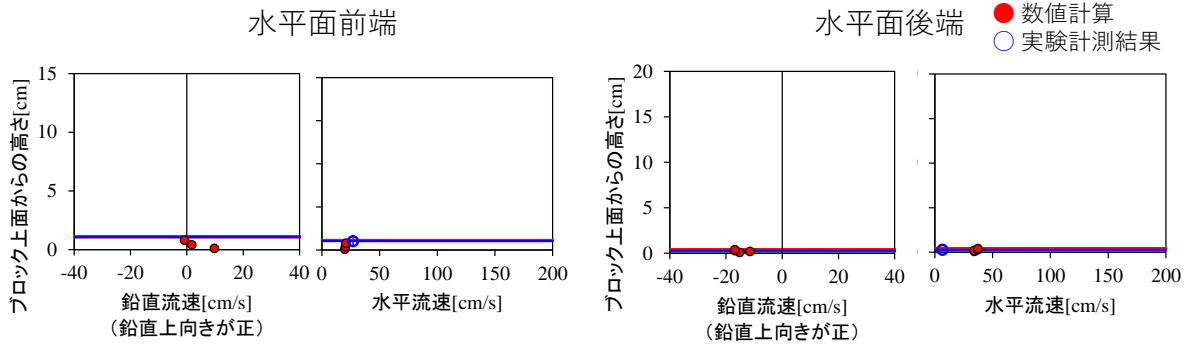


図 5-2- 9 流速鉛直分布
(水位変化ケース：初期水位 7cm、ブロック小、流量 0.4m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 7cm、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 0.6 m³/min

(被災流量)

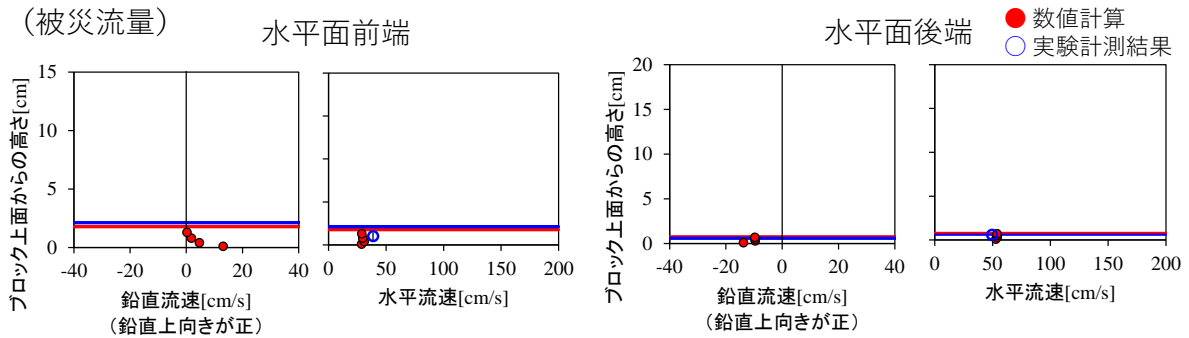


図 5-2- 10 流速鉛直分布
(水位変化ケース：初期水位 7cm、ブロック小、流量 0.6m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 16cm、ブロック特大3、勾配1:1.5、流量 (Q) 1.8 m³/min
 (被災流量)

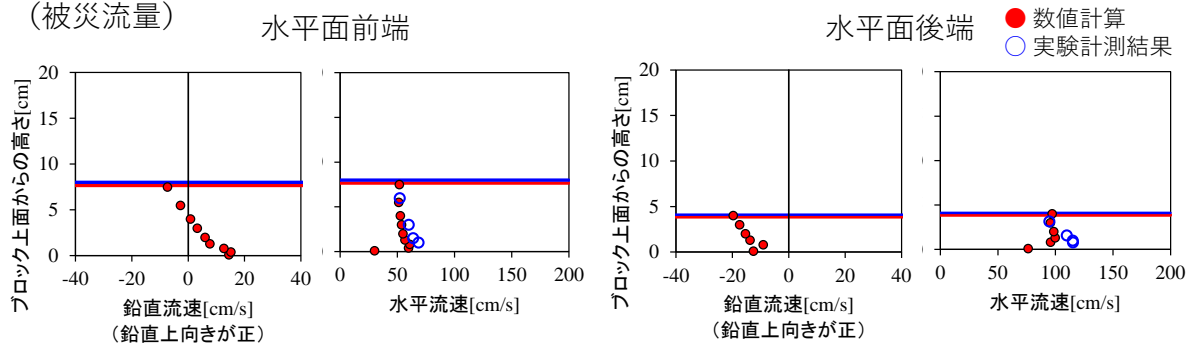


図 5-2- 11 流速鉛直分布
 (水位変化ケース：初期水位 16cm、ブロック特大 3、流量 1.8m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 16cm、ブロック特大3、勾配1:1.5、流量 (Q) 2.4 m³/min

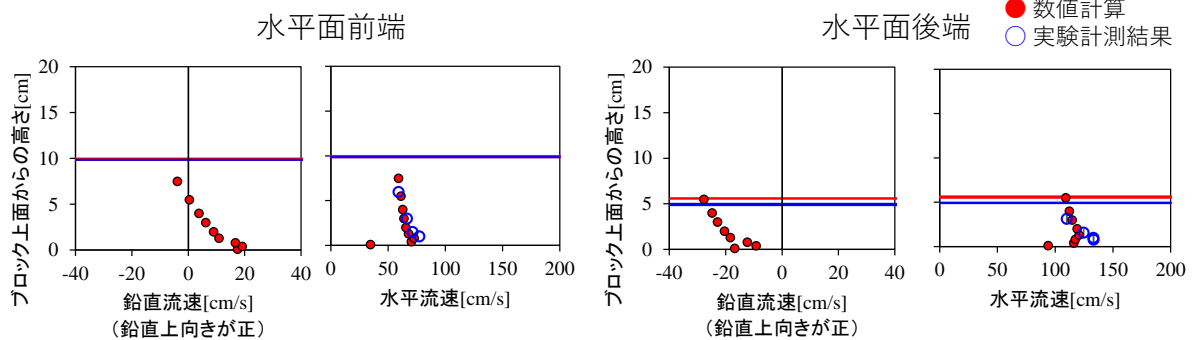


図 5-2- 12 流速鉛直分布
 (水位変化ケース：初期水位 16cm、ブロック特大 3、流量 2.4m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 16cm、ブロック特大3、勾配1:1.5、流量 (Q) 3.4 m³/min

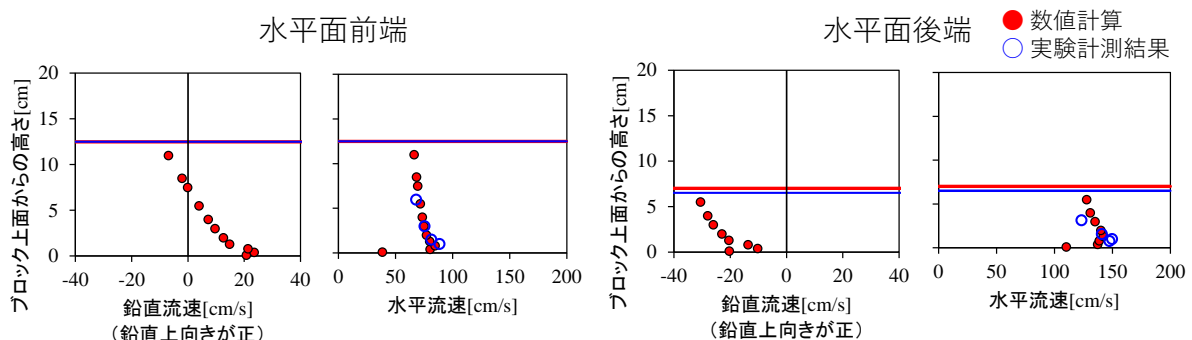


図 5-2- 13 流速鉛直分布
 (水位変化ケース：初期水位 16cm、ブロック特大 3、流量 3.4m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 7cm、ブロック特大3、勾配1:1.5、流量 (Q) 1.8 m³/min

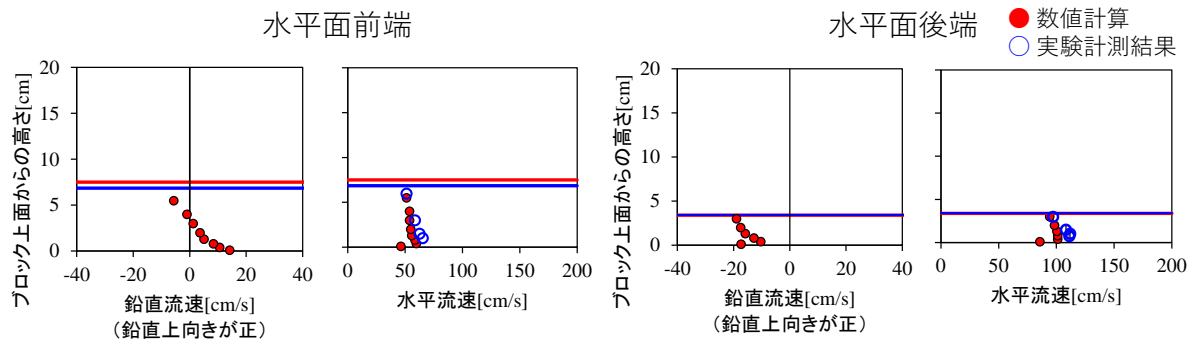


図 5-2- 14 流速鉛直分布

(水位変化ケース：初期水位 7cm、ブロック特大 3、流量 1.8m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 7cm、ブロック特大3、勾配1:1.5、流量 (Q) 2.0 m³/min

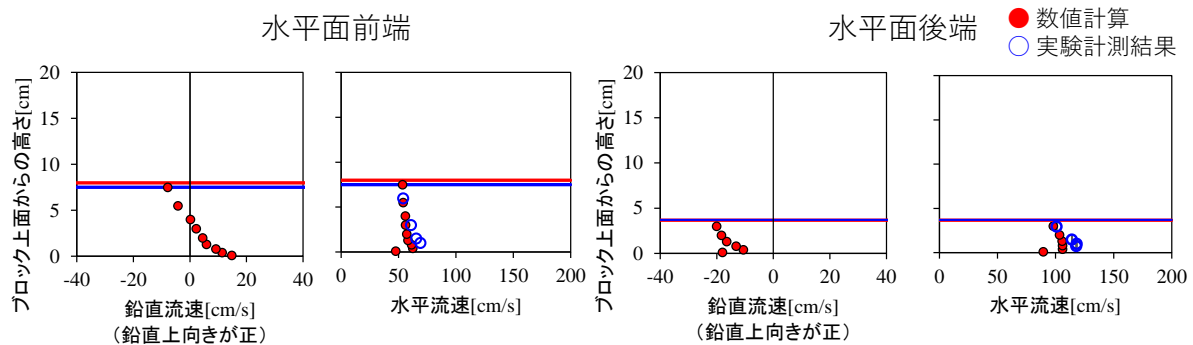


図 5-2- 15 流速鉛直分布

(水位変化ケース：初期水位 7cm、ブロック特大 3、流量 2.0m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 7cm、ブロック特大3、勾配1:1.5、流量 (Q) 2.2 m³/min

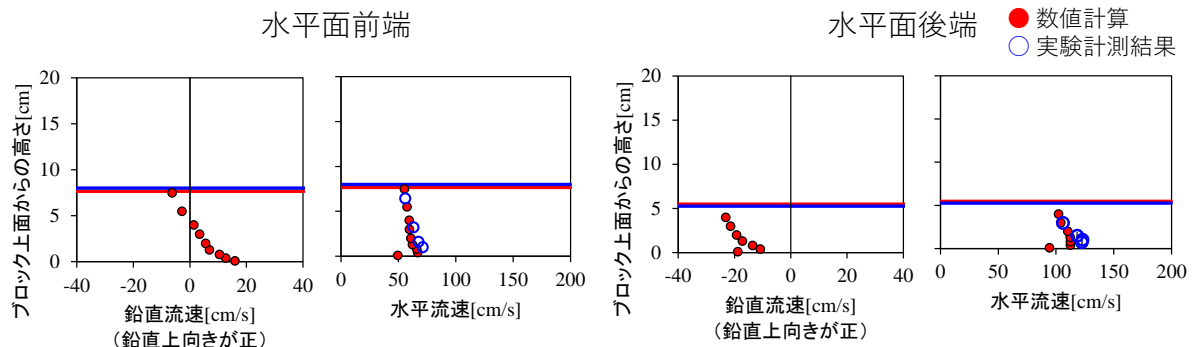


図 5-2- 16 流速鉛直分布

(水位変化ケース：初期水位 7cm、ブロック特大 3、流量 2.2m³/min)

(ii) 圧力・作用流体力構造

水位が中程度である初期水位 16cm・小ブロックケースの被災流量時の圧力分布を図 5-2- 17 に、作用流体力分布を図 5-2- 18 に示す。図 5-2- 17 より、法肩部での圧力急変など、過年度検討（初期水位 25cm）と同様の圧力分布であることが確認された。

図 5-2- 18 より、下流側法肩では、初期水位が中程度（16cm）の場合でも過年度検討（初期水位 25cm）と同様の揚力が作用しブロックが離脱することが確認できた。一方で、水平面前端では、初期水位が中程度の場合、過年度検討（初期水位 25cm）よりも揚力が小さくなっている。実験では水平面前端ブロックの離脱は水位が高い条件でのみ確認されていることから、水位の違いにより作用流体力の分布に差が生じることが示唆された。

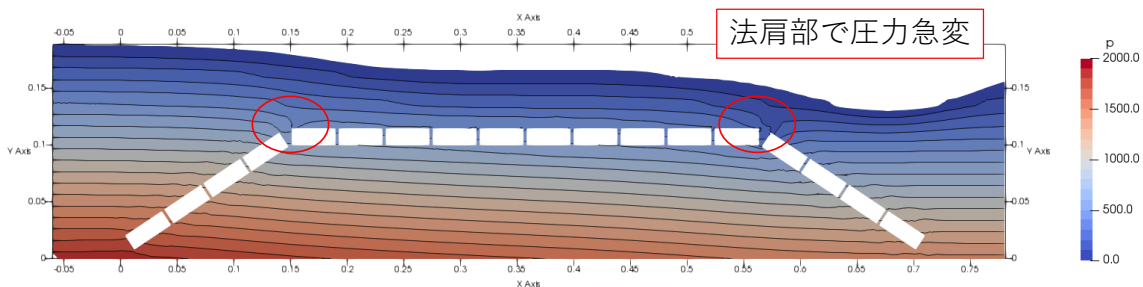


図 5-2- 17 圧力分布
（水位変化ケース：初期水位 16 cm、小ブロック、流量 1.4m³/min）

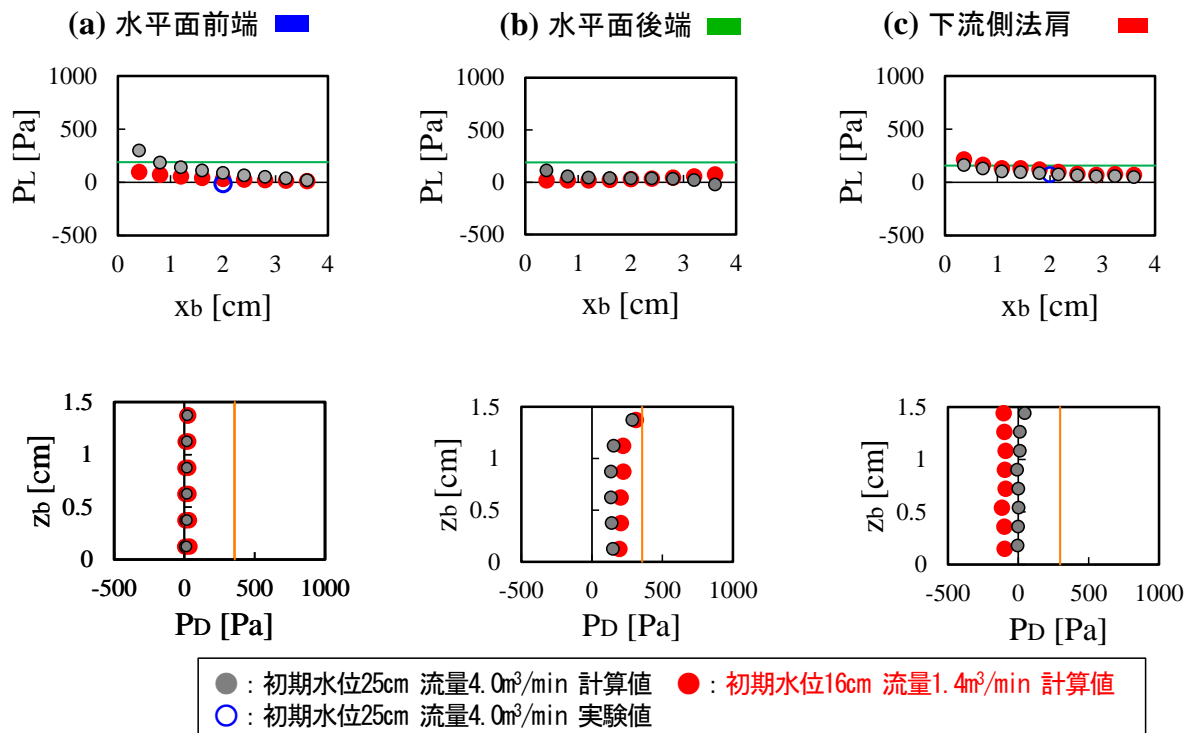


図 5-2- 18 水位変化による作用流体力分布の比較（小ブロック）

水位が極端に低い初期水位 7cm・小ブロックケースの圧力分布を図 5-2- 19 に、作用流体力分布を図 5-2- 20 に示す。両図より、低水位条件では過年度検討と異なり、マウンド内の圧力上昇により、ブロックに上向き及び右向き力が作用するような圧力分布であった。以上より、過年度検討とは被災メカニズムが異なることが示唆される。

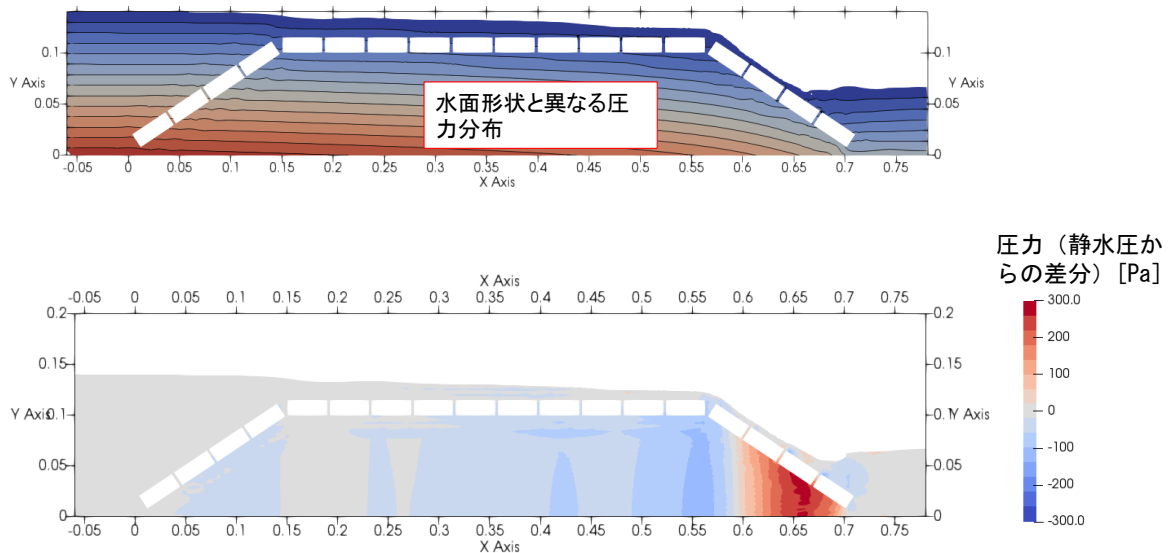


図 5-2- 19 圧力分布
(水位変化ケース：初期水位 7 cm、小ブロック、流量 0.6m³/min)

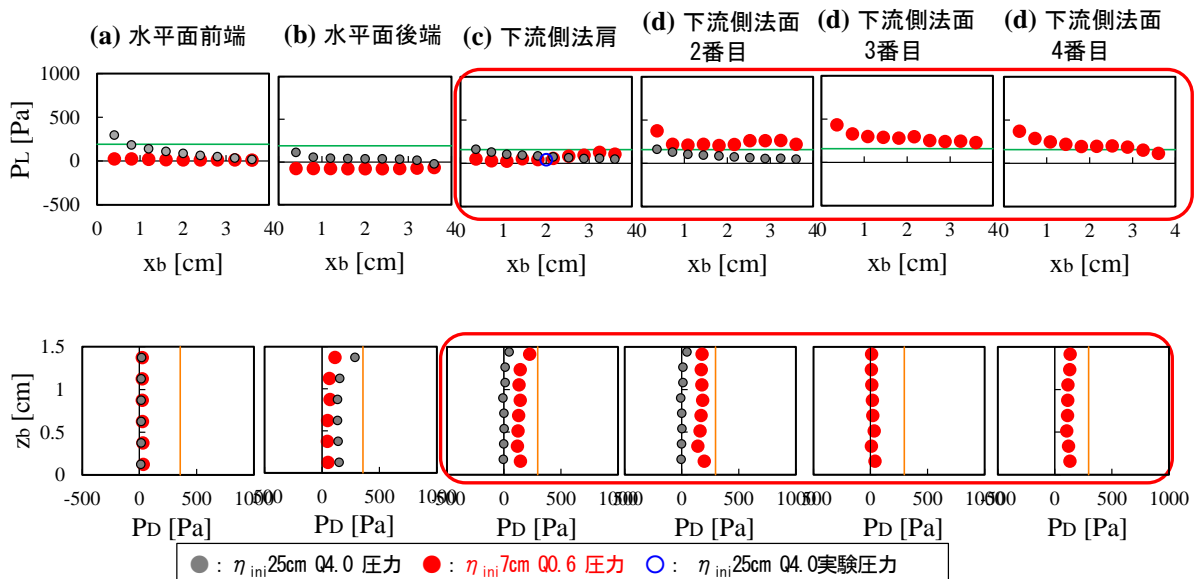


図 5-2- 20 流体力分布
(水位変化ケース：初期水位 7 cm、小ブロック、流量 0.6m³/min)

図 5-2- 21～図 5-2- 32 に本調査で実施した水位変化ケースの流体力分布を示す。

初期水位 (η_{ini}) 16cm、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 0.6 m³/min

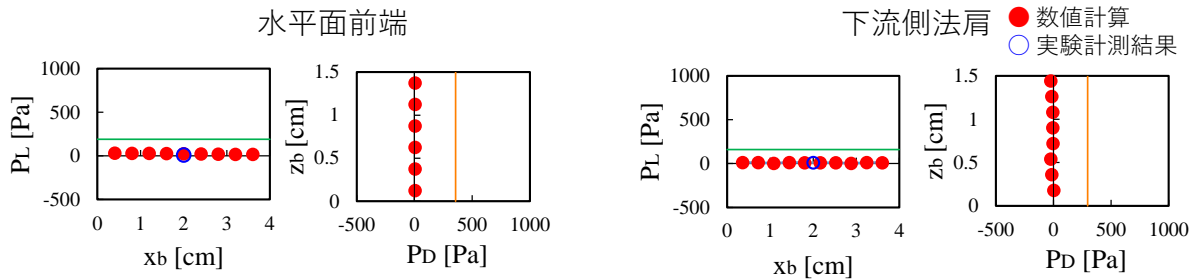


図 5-2- 21 流体力分布
(水位変化ケース：初期水位 16 cm、小ブロック、流量 0.6m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 16cm、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 1.0 m³/min

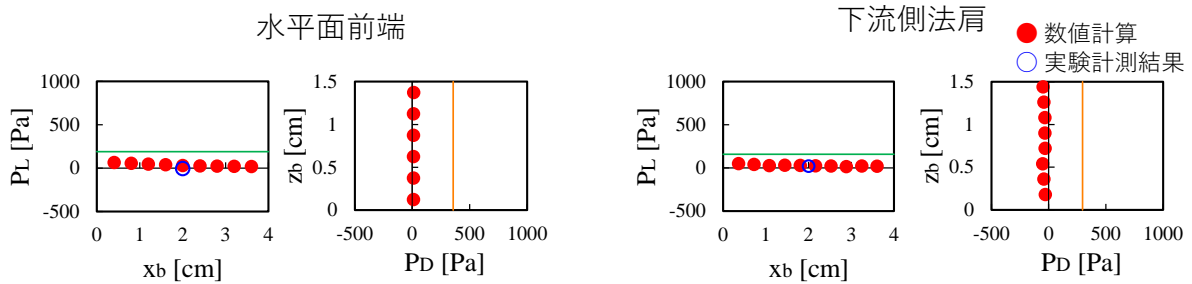


図 5-2- 22 流体力分布
(水位変化ケース：初期水位 16 cm、小ブロック、流量 1.0m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 16cm、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 1.4 m³/min
(被災流量)

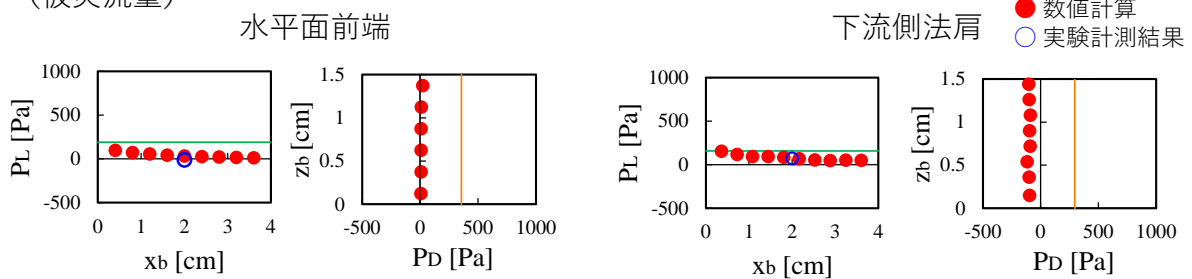


図 5-2- 23 流体力分布
(水位変化ケース：初期水位 16 cm、小ブロック、流量 1.4m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 7cm、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 0.2 m³/min

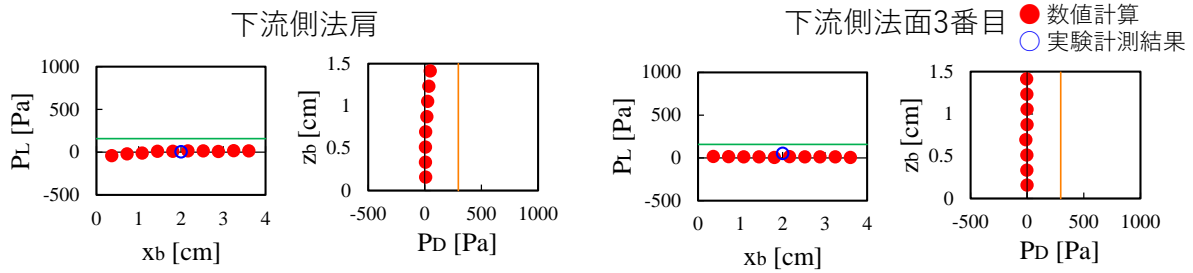


図 5-2- 24 流体力分布
(水位変化ケース：初期水位 7 cm、小ブロック、流量 0.2m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 7cm、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 0.4 m³/min

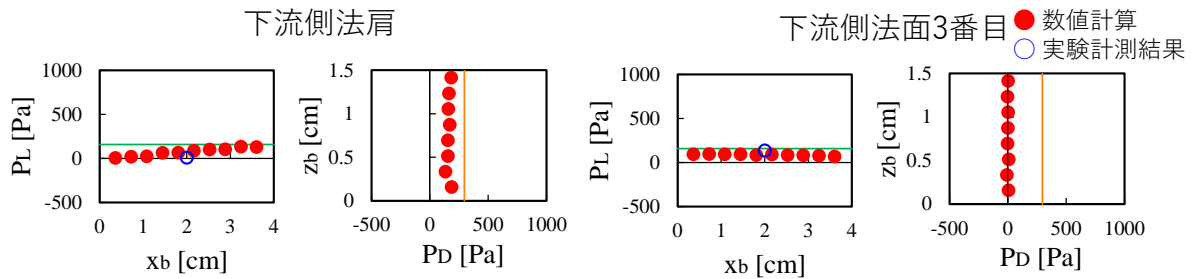


図 5-2- 25 流体力分布
(水位変化ケース：初期水位 7 cm、小ブロック、流量 0.4m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 7cm、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 0.6 m³/min

(被災流量)

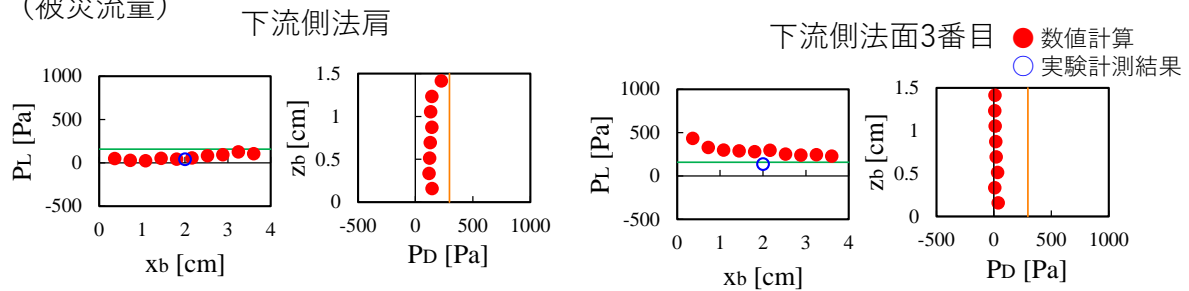


図 5-2- 26 流体力分布
(水位変化ケース：初期水位 7 cm、小ブロック、流量 0.6m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 16cm、ブロック特大3、勾配1:1.5、流量 (Q) 1.8 m³/min
(被災流量)

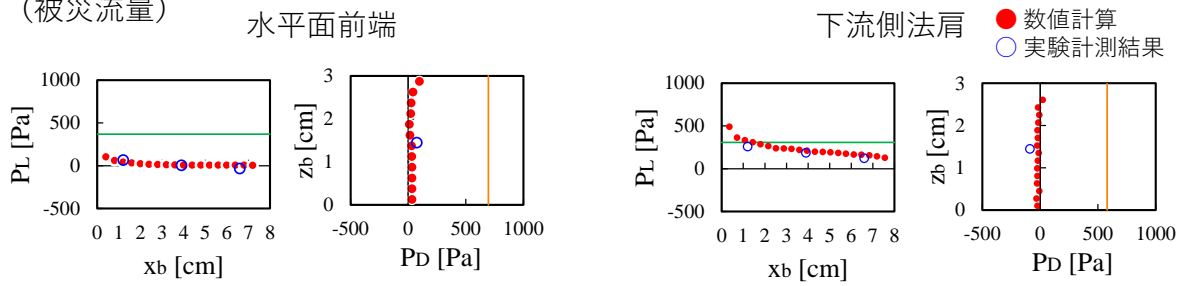


図 5-2- 27 流体力分布
(水位変化ケース：初期水位 16 cm、特大 3 ブロック、流量 1.8m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 16cm、ブロック特大3、勾配1:1.5、流量 (Q) 2.4 m³/min

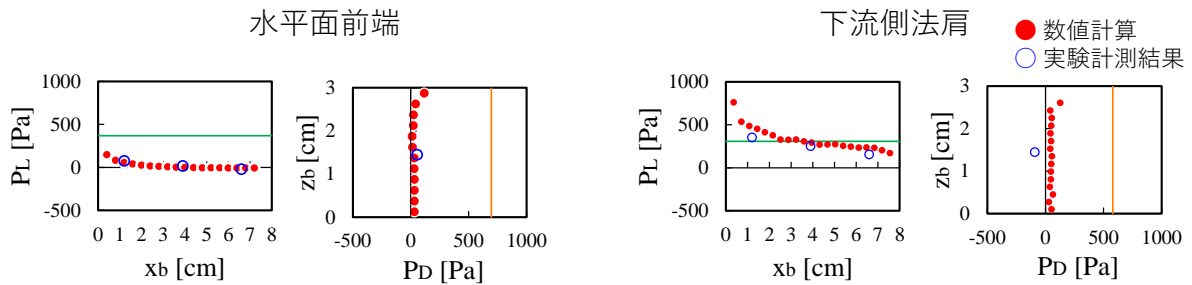


図 5-2- 28 流体力分布
(水位変化ケース：初期水位 16 cm、特大 3 ブロック、流量 2.4m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 16cm、ブロック特大3、勾配1:1.5、流量 (Q) 3.4 m³/min

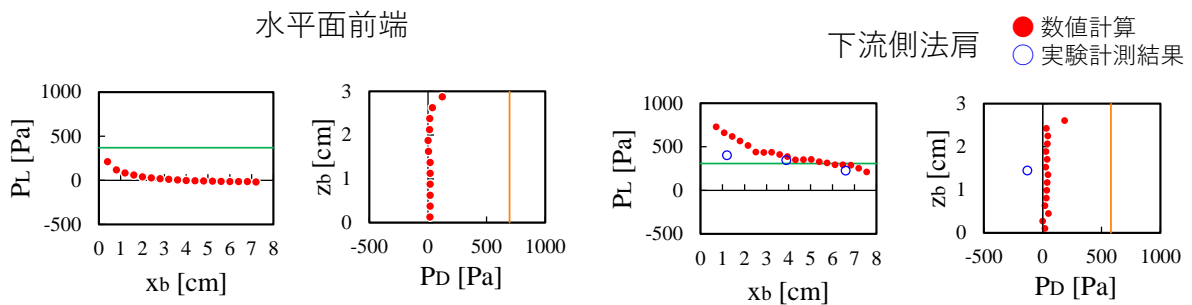


図 5-2- 29 流体力分布
(水位変化ケース：初期水位 16 cm、特大 3 ブロック、流量 3.4m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 7cm、ブロック特大3、勾配1:1.5、流量 (Q) 1.8 m³/min

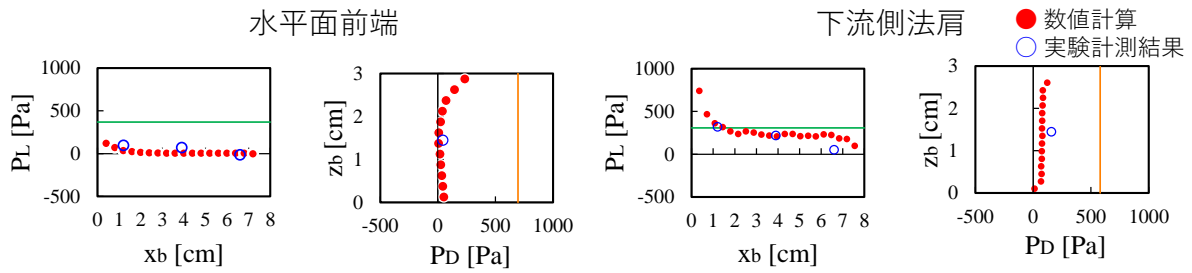


図 5-2- 30 流体力分布
(水位変化ケース：初期水位 7 cm、特大 3 ブロック、流量 1.8m³/min)

4-2) 初期水位 (η_{ini}) 7cm、ブロック特大3、勾配1:1.5、流量 (Q) 2.0 m³/min

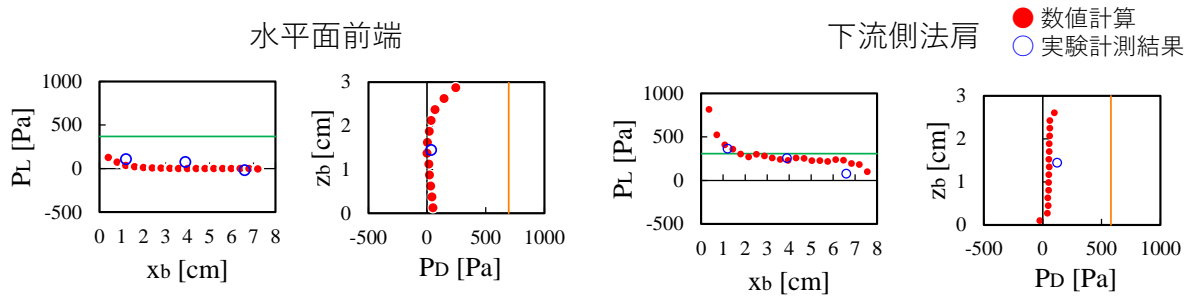


図 5-2- 31 流体力分布
(水位変化ケース：初期水位 7 cm、特大 3 ブロック、流量 2.0m³/min)

4-3) 初期水位 (η_{ini}) 7cm、ブロック特大3、勾配1:1.5、流量 (Q) 2.2 m³/min

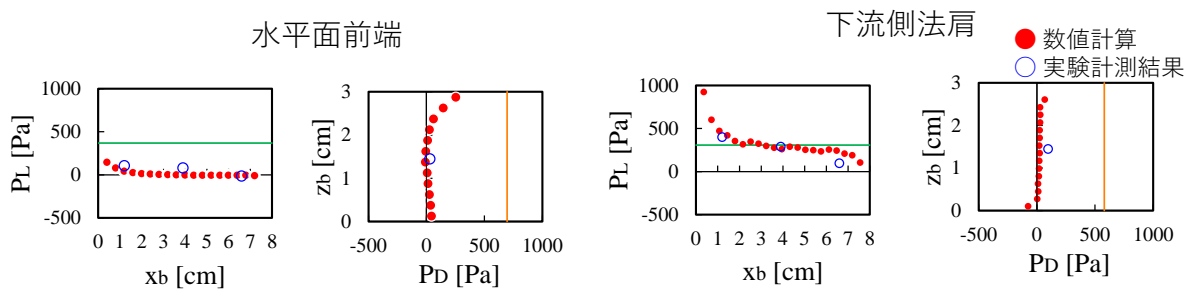


図 5-2- 32 流体力分布
(水位変化ケース：初期水位 7 cm、特大 3 ブロック、流量 2.2m³/min)

(iii) 作用流体力分布の特徴

数値計算より推察された潜在的な不安定箇所を図 5-2-33 に示す。高水位（初期水位 25cm）の場合は、上流・下流法肩部で圧力低下が生じ、揚力がブロックに作用する。中水位（初期水位 16cm）の場合は、下流側法肩付近では高水位の場合と同様に圧力低下が生じ、揚力がブロックに作用する。上流側の揚力は、高水位に比べると小さい。水位が極端に低い場合は、マウンド内部の圧力が大きくなり上向きの力がブロックに作用するため、既往検討と被災メカニズムが異なることが示唆される。

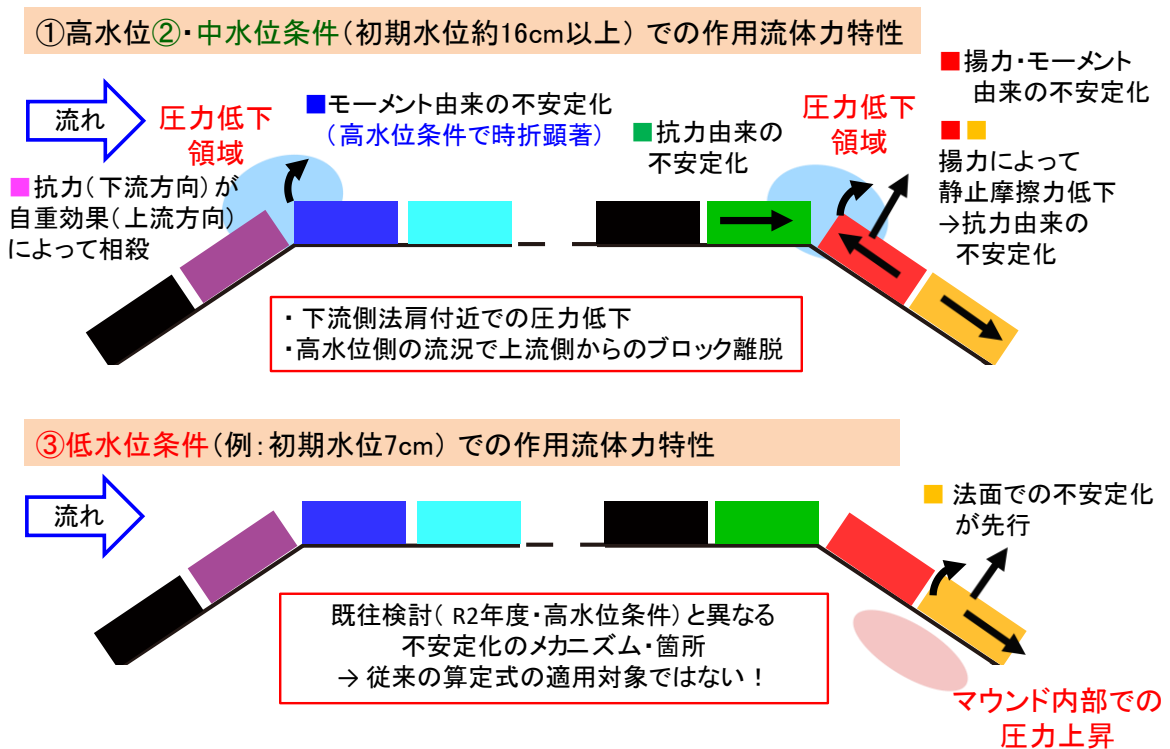


図 5-2- 33 数値計算より推察される潜在的な不安定箇所（水位変化ケース）

ここで、提案式において水位に応じて異なる係数を与えることに関する補足検討として、数値計算結果を用いて流速-作用流体力の関係性を調査した。

図 5-2- 34 に数値計算から推察された流速-ブロック作用流体力（面積分値）の関係を示す。異なる初期水位のケース（▲、▲、▲）において、水位が低い場合（▲）、同等の流速に対する作用流体力が増加する（低水位：→、高水位：→）が、比較的水位が高い場合（▲、▲）は、ほぼ同一であり、ある程度水位が高くなると水位変化が流体力に及ぼす影響が低下することが示唆される。

上記の力学的背景として、鉛直方向流速と水平方向流速の比を図 5-2- 35 に示す。図より、水位が低い場合（▲）、鉛直流速比が大きく【全流速（水平・鉛直方向双方を加味）】と【水平方向流速】との差が大きくなる。このことは、水平方向流速で整理した提案式の係数を水位によって変更することを支持する結果である。

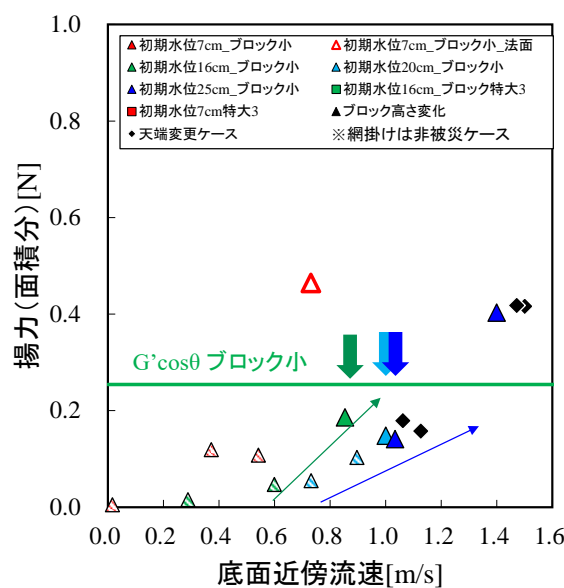


図 5-2- 34 数値計算から推察された流速-ブロック作用流体力（面積分値）の関係

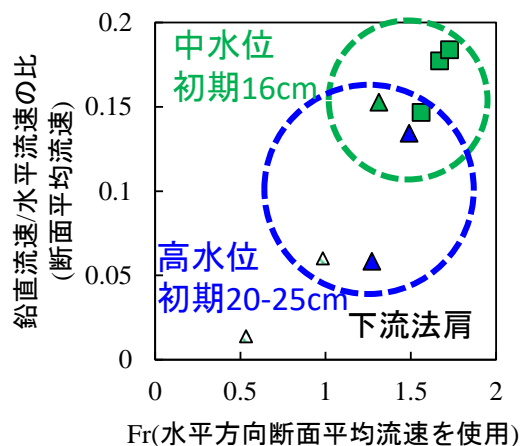


図 5-2- 35 鉛直流速と水平流速の比

2-b ブロック形状変化（有孔型）ケース

(i) 流速分布構造

ブロック形状変化（有孔型）ケースの水平面後端における流速鉛直分布を図 5-2- 36 に示す。図より、孔の位置によらず、流量（ Q ）1.8、2.4、3.4 は同一の値となる。以上より、水平面後端では孔の有無・孔の位置で流速の鉛直分布構造に変化はないことが示唆される。

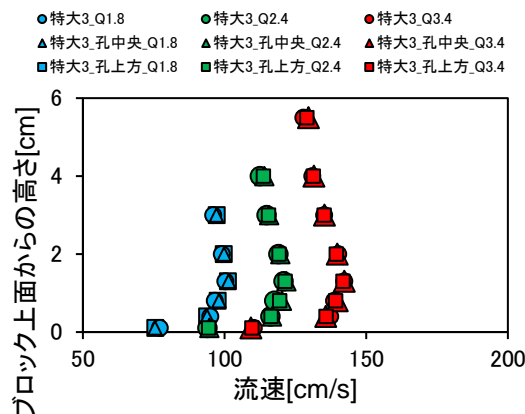


図 5-2- 36 水平面後端における流速鉛直分布

孔の有無で流速構造が変わらないことについては、都市工学で用いられる建物の配置密度の違いによる流れパターンの変化の考え方、河川分野では魚道の設計に用いられる考え方を参考にできる（図 5-2- 38）。(a)のように建物同士の間隔が広く建物密度が小さい場合、風上側構造物の後流は風下側構造物の流れに干渉せず、独立した流れ場となる (isolated roughness flow)。建物の間隔が近づき建物密度が大きくなるにつれて (b)，風上側構造物の後流渦が風下側構造物の前面に沿って強い下降流を生じさせ、流れの混合を高める (wake interference flow)。さらに接近した場合は建物間に安定した渦が生じ、建物高さ以下に侵入する流れが抑制されて建物上部を通過するような流れパターンに変化する (skimming flow)(c)¹。

図 5-2- 39～図 5-2- 44 に本調査で実施したブロック形状変化（有孔型）ケースの流速分布を示す。

¹ 吉田敏哉：空間非一様な都市構造物群上の大気乱流による運動量輸送過程に関する研究(Dissertation_全文),京都大学学位論文, 2019.

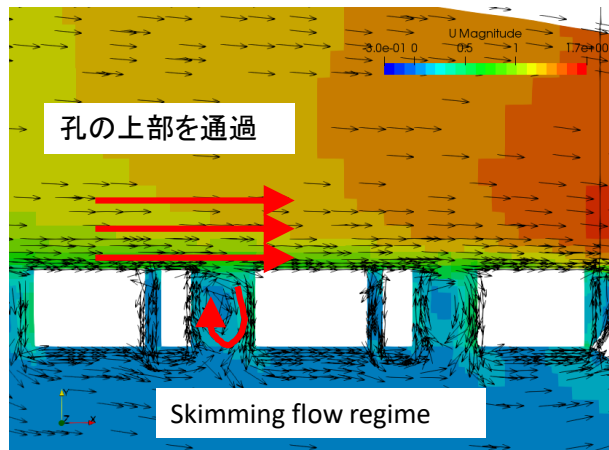


図 5-2- 37 ブロック変化ケースの水平面後端付近における流速構造の例

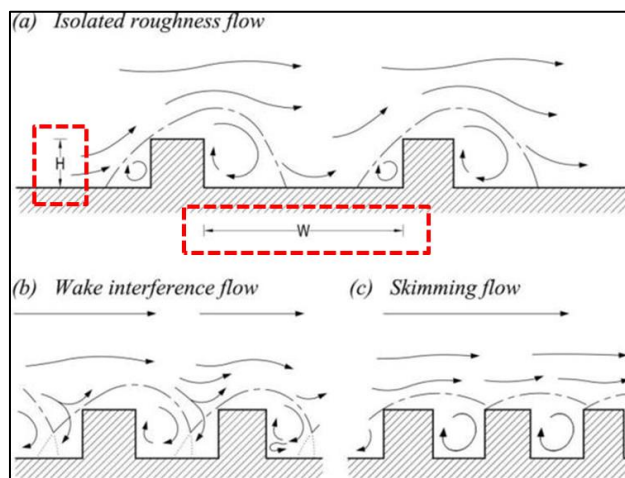


図 5-2- 38 流速構造形成の物理的背景の解釈

初期水位 (η_{ini}) 16cm、有孔型1特大3 (穴位置中央)、勾配1:1.5、流量 (Q) 1.8 m³/min

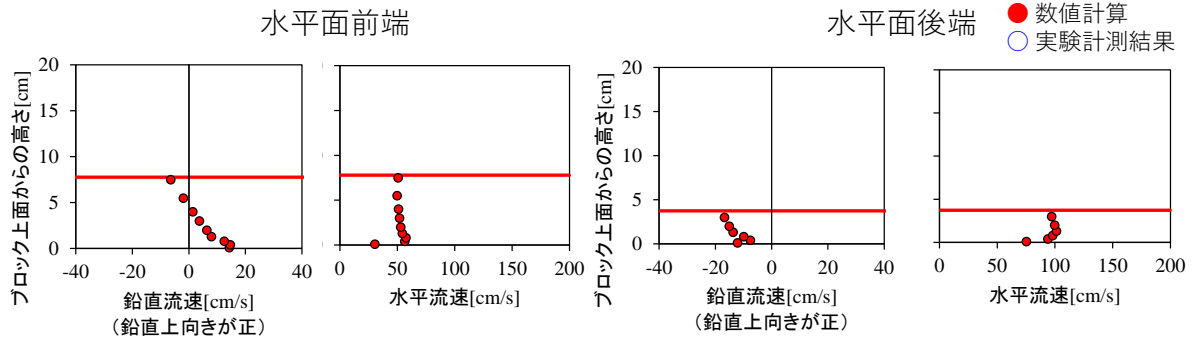


図 5-2- 39 流速分布

(ブロック形状変化ケース : 初期水位 16 cm、有孔型 1 特大 3、流量 1.8m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 16cm、有孔型1特大3 (穴位置中央)、勾配1:1.5、流量 (Q) 2.4 m³/min (被災流量)

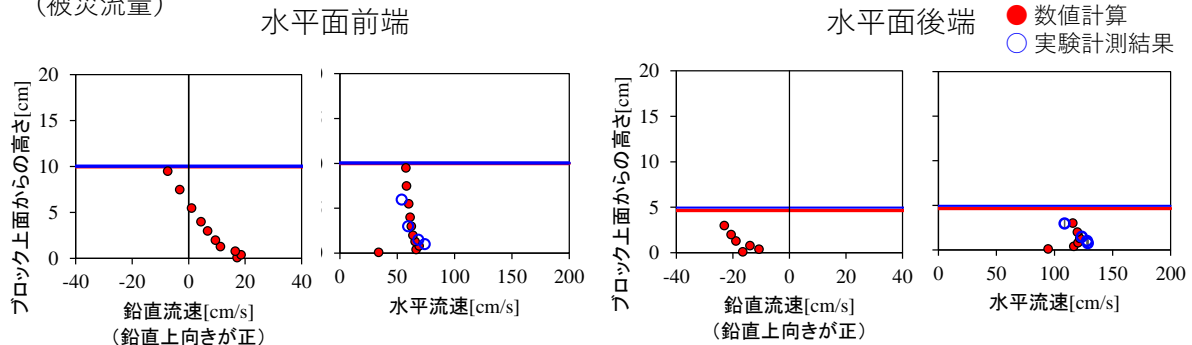


図 5-2- 40 流速分布

(ブロック形状変化ケース : 初期水位 16 cm、有孔型 1 特大 3、流量 2.4m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 16cm、有孔型1特大3 (穴位置中央)、勾配1:1.5、流量 (Q) 3.4 m³/min

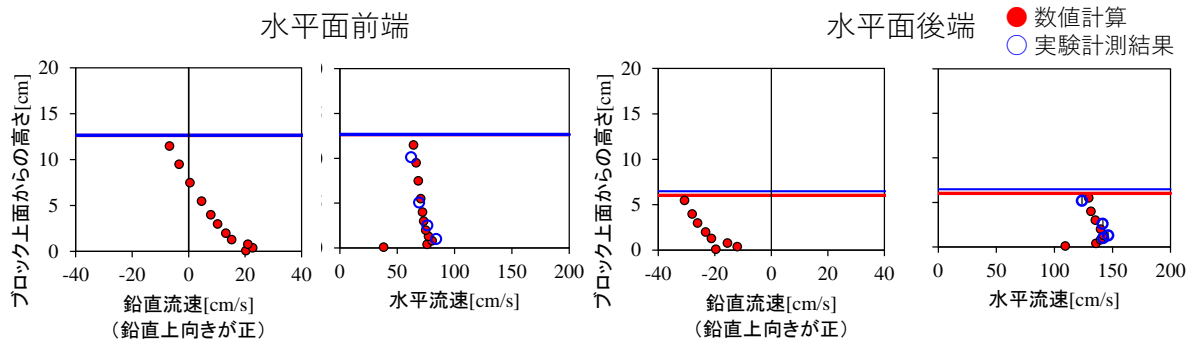


図 5-2- 41 流速分布

(ブロック形状変化ケース : 初期水位 16 cm、有孔型 1 特大 3、流量 3.4m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 16cm、有孔型2特大3 (穴位置上)、勾配1:1.5、流量 (Q) 1.8 m³/min

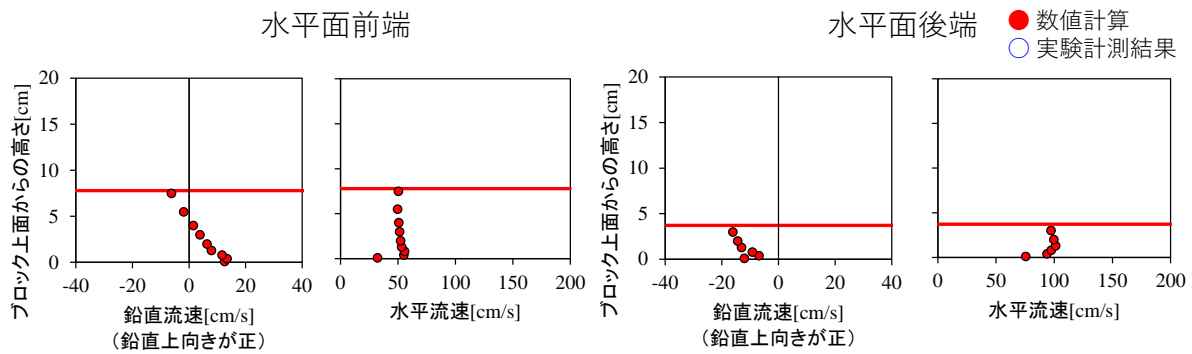


図 5-2- 42 流速分布

(ブロック形状変化ケース : 初期水位 16 cm、有孔型 2 特大 3、流量 1.8m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 16cm、有孔型2特大3 (穴位置上)、勾配1:1.5、流量 (Q) 2.4 m³/min

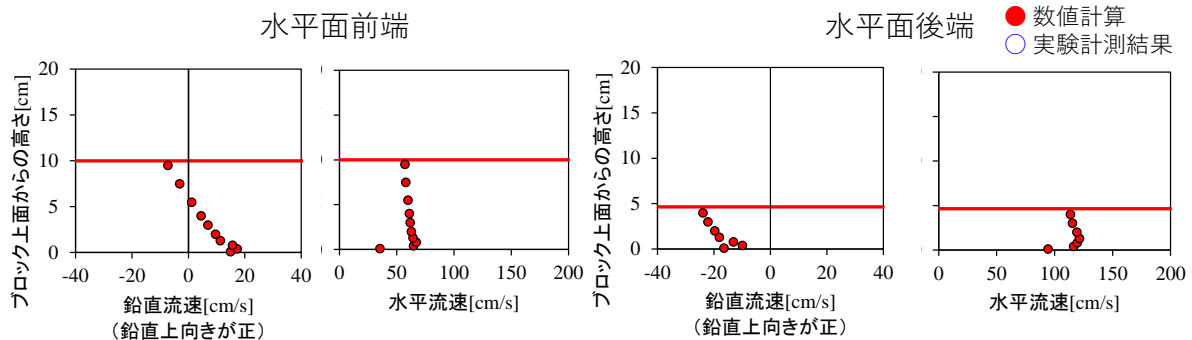


図 5-2- 43 流速分布

(ブロック形状変化ケース : 初期水位 16 cm、有孔型 2 特大 3、流量 2.4m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 16cm、有孔型2特大3 (穴位置上)、勾配1:1.5、流量 (Q) 3.4 m³/min (被災流量)

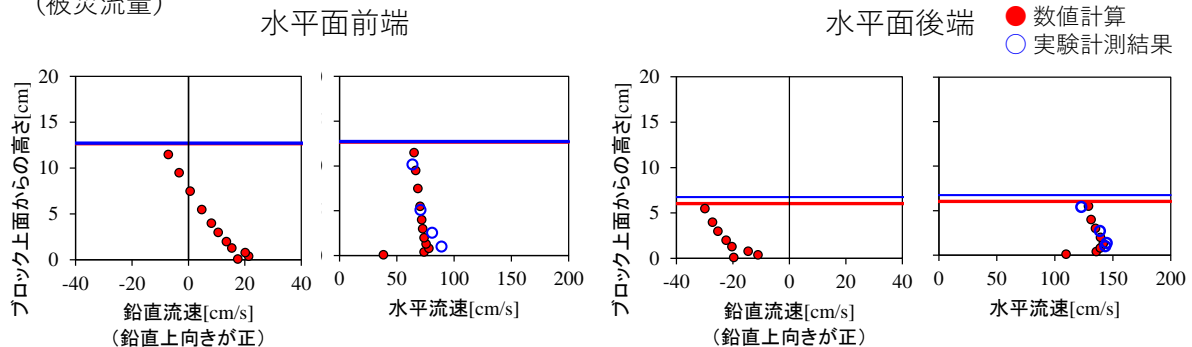


図 5-2- 44 流速分布

(ブロック形状変化ケース : 初期水位 16 cm、有孔型 2 特大 3、流量 3.4m³/min)

(ii) 圧力・作用流体力構造

ブロック形状変化（有孔型）ケースの後端法肩ブロックにおける揚力分布を図 5-2-45 に示す。有孔型（左図）の場合でも方塊ブロック（右図）と同様の揚力分布で、有孔型の場合は、孔部分に揚力が働かないような分布であることが確認された。実験において、有孔型の場合も回転しながらブロックが離脱する様子が確認されていることから、ブロック形状が変化しても局所的に揚力が作用しブロックが回転しながら離脱するという力学レジームは変わらず、異なるブロック形状にも提案式が適用可能であることを支持する結果が得られた。有孔型の揚力の面積分値は孔の分減少し、孔が上方に位置するほど、局所的に大きくなる揚力の影響を受けにくく、安定性が増加すると考えられる。

図 5-2-47～図 5-2-52 に本調査で実施したブロック形状変化（有孔型）ケースの流体力分布を示す。

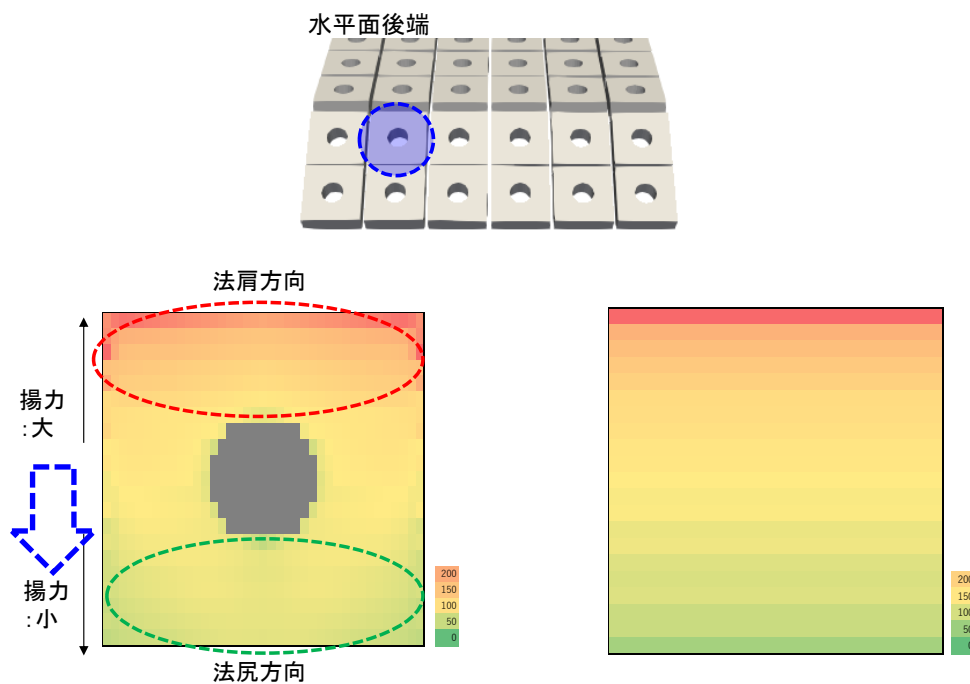


図 5-2- 45 水平面後端における法面ブロックの揚力分布
（左：有孔型、右：方塊型）

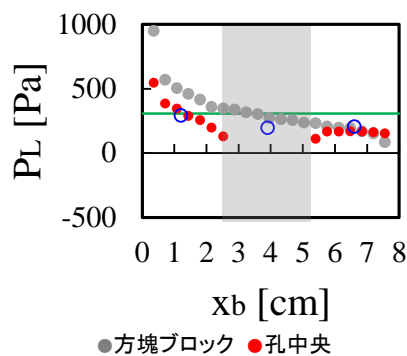


図 5-2- 46 水平面後端における法面ブロックの揚力分布

初期水位 (η_{ini}) 16cm、有孔型1特大3 (穴位置中央)、勾配1:1.5、流量 (Q) 1.8 m³/min

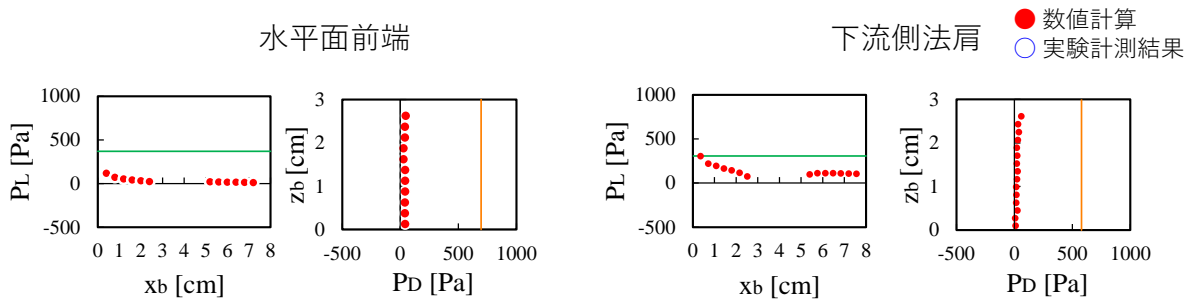


図 5-2- 47 流体力分布
(ブロック形状変化ケース : 初期水位 16 cm、有孔型 1 特大 3、流量 1.8m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 16cm、有孔型1特大3 (穴位置中央)、勾配1:1.5、流量 (Q) 2.4 m³/min (被災流量)

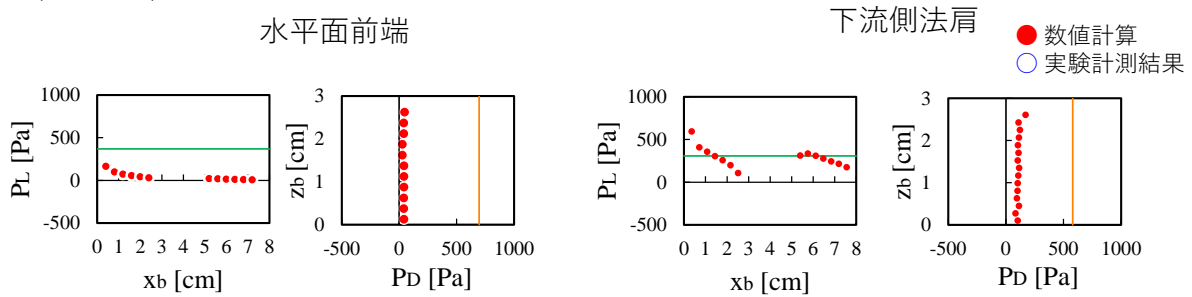


図 5-2- 48 流体力分布
(ブロック形状変化ケース : 初期水位 16 cm、有孔型 1 特大 3、流量 2.4m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 16cm、有孔型1特大3 (穴位置中央)、勾配1:1.5、流量 (Q) 3.4 m³/min

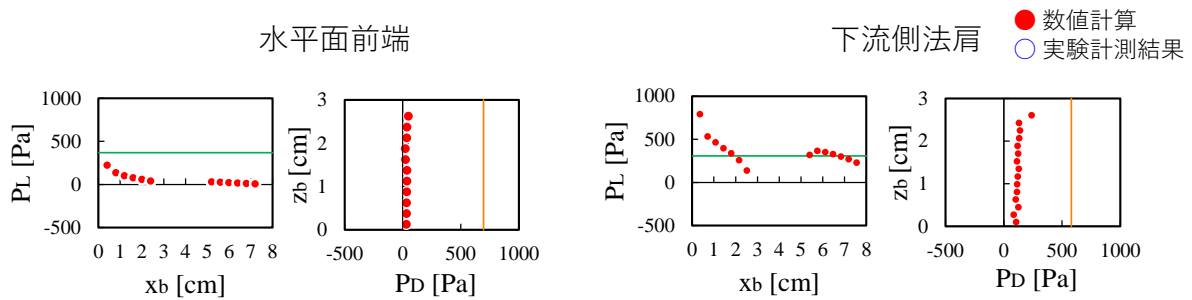


図 5-2- 49 流体力分布
(ブロック形状変化ケース : 初期水位 16 cm、有孔型 1 特大 3、流量 3.4m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 16cm、有孔型2特大3 (穴位置上)、勾配1:1.5、流量 (Q) 1.8 m³/min

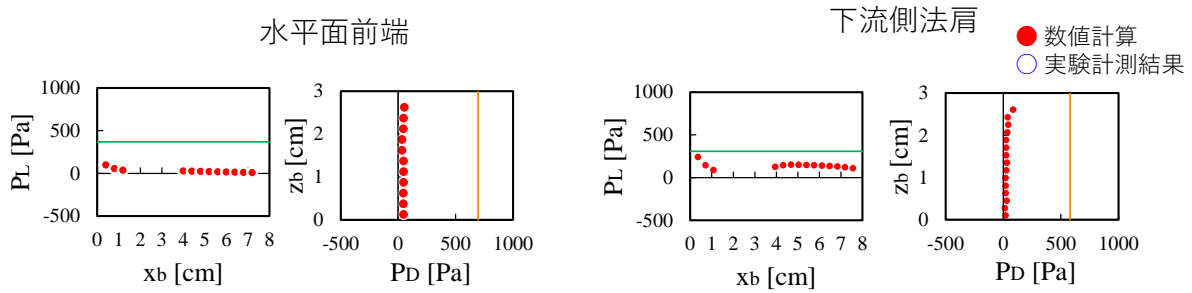


図 5-2- 50 流体力分布
(ブロック形状変化ケース : 初期水位 16 cm、有孔型 2 特大 3、流量 1.8m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 16cm、有孔型2特大3 (穴位置上)、勾配1:1.5、流量 (Q) 2.4 m³/min

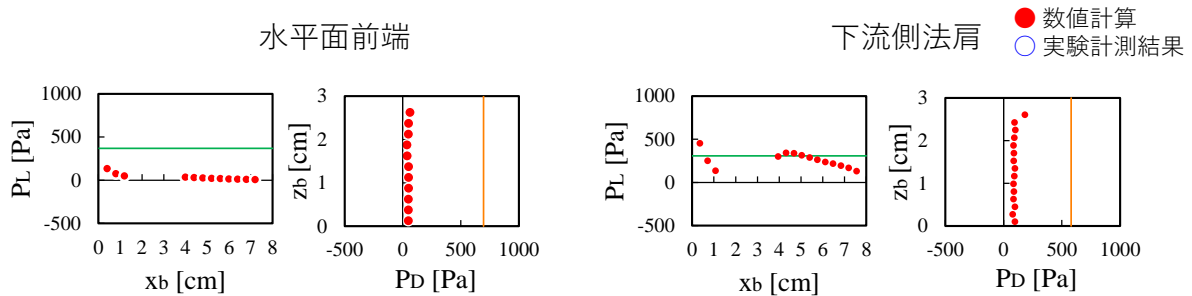


図 5-2- 51 流体力分布
(ブロック形状変化ケース : 初期水位 16 cm、有孔型 2 特大 3、流量 2.4m³/min)

初期水位 (η_{ini}) 16cm、有孔型2特大3 (穴位置上)、勾配1:1.5、流量 (Q) 3.4 m³/min (被災流量)

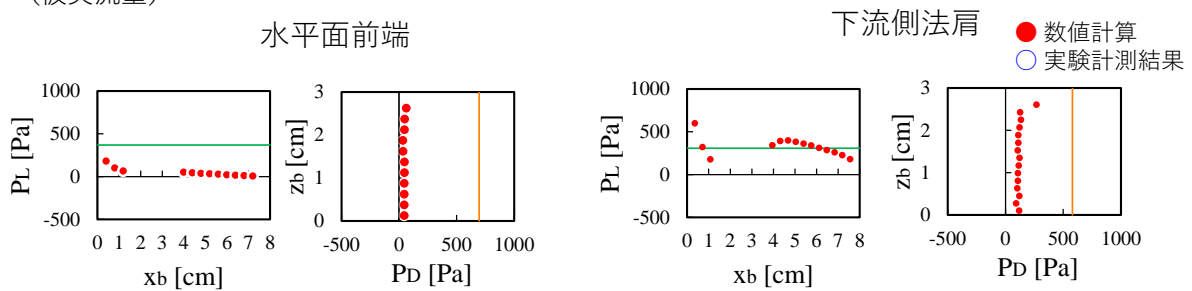


図 5-2- 52 流体力分布
(ブロック形状変化ケース : 初期水位 16 cm、有孔型 2 特大 3、流量 3.4m³/min)

(iii) 作用流体力分布の特徴

数値計算より推算される潜在的な不安定箇所を図 5-2- 53 に示す。有孔型の場合は既往検討と同様のメカニズムで被災が発生するが、孔がある分揚力が作用しないため、揚力の面積分値としては減少し、より安定となることが示唆される。

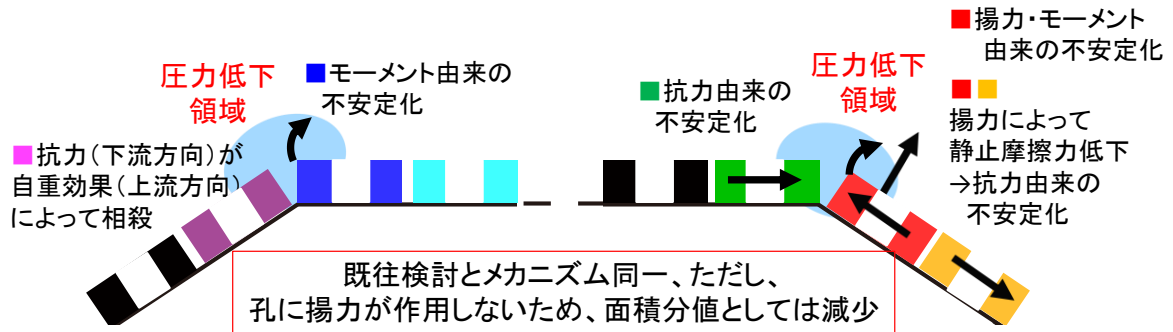


図 5-2- 53 数値計算より推察される潜在的な不安定箇所（有孔型）

2-c 異なる縮尺ケース及び 2-d 現実スケールケース

(i) 流速分布構造

異なる縮尺ケースの水平面後端における流速鉛直分布を図 5-2- 54 に示す。なお、図はフルード相似則に則り 1/80 相当の流速分布を示している。縮尺の違いをシンボルの種類で（縮尺 1/80：×、縮尺 1/57：△、縮尺 1/41：○、現実スケール：□）、流量の違いを色（●系、●系、●系）で表しているが、水平面後端での流速鉛直分布構造は、縮尺が異なっても、フルード相似を仮定して流速分布が概ね同一である（1.1 倍程度におさまる）ことが確認された。

図 5-2- 55～図 5-2- 66 に本調査で実施した異なる縮尺ケース及び現実スケールケースの流速分布を示す。なお、現実スケールケースは異なる 2 つの乱流モデル（低 Re 数型乱流モデル及び高 Re 数型乱流モデル）で計算を実施した。

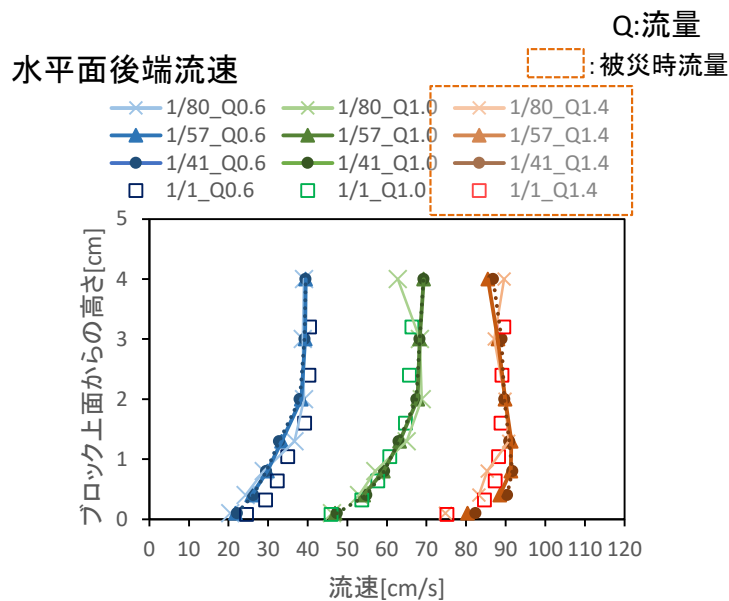


図 5-2- 54 水平面後端における流速鉛直分布

縮尺1/57 初期水位 (η_{ini}) 16cm相当、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 0.6 m³/min相当

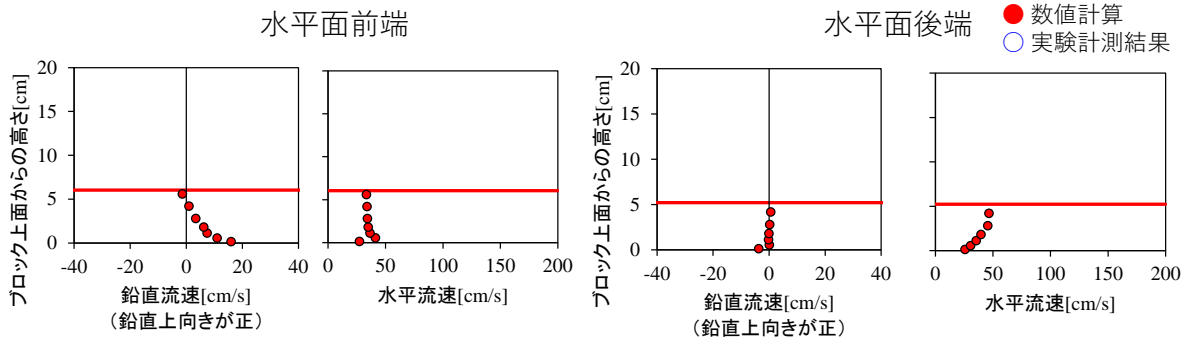


図 5-2- 55 流速分布

(縮尺変化ケース : 縮尺 1/57、初期水位 16 cm、ブロック小、流量 0.6m³/min 相当)

縮尺1/57 初期水位 (η_{ini}) 16cm相当、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 1.0 m³/min相当

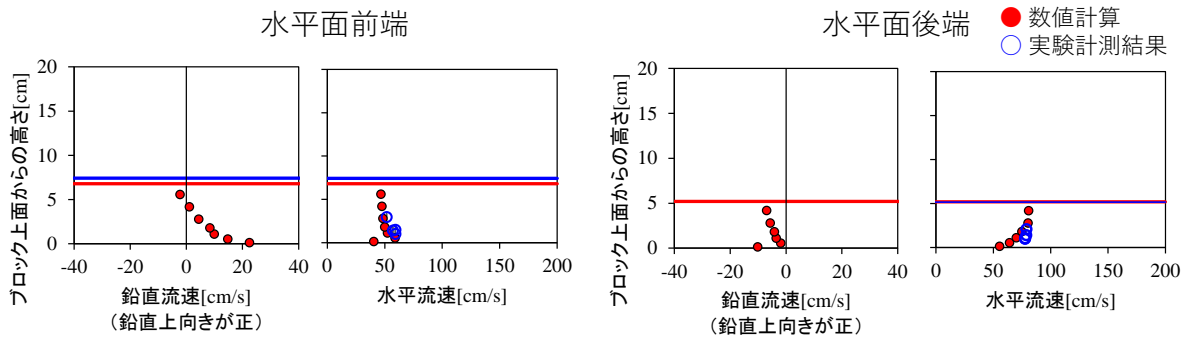


図 5-2- 56 流速分布

(縮尺変化ケース : 縮尺 1/57、初期水位 16 cm、ブロック小、流量 1.0m³/min 相当)

縮尺1/57 初期水位 (η_{ini}) 16cm相当、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 1.4 m³/min相当
(被災流量)

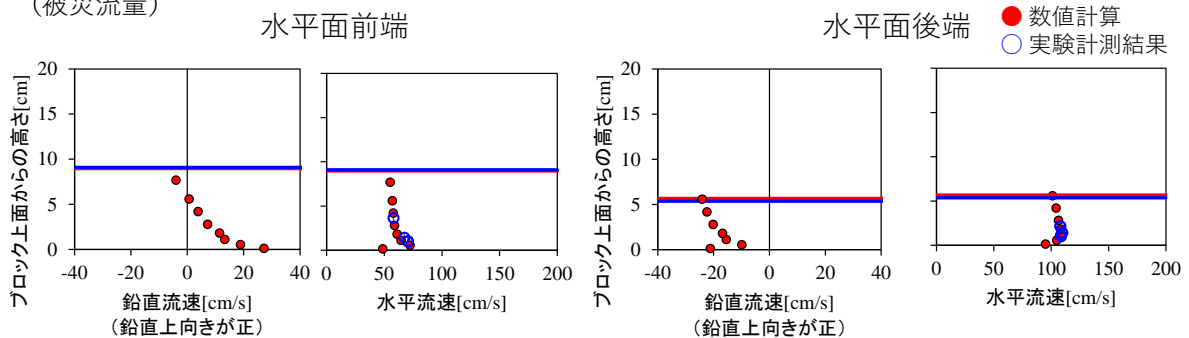


図 5-2- 57 流速分布

(縮尺変化ケース : 縮尺 1/57、初期水位 16 cm、ブロック小、流量 1.4m³/min 相当)

縮尺1/40 初期水位 (η_{ini}) 16cm相当、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 0.6 m³/min相当

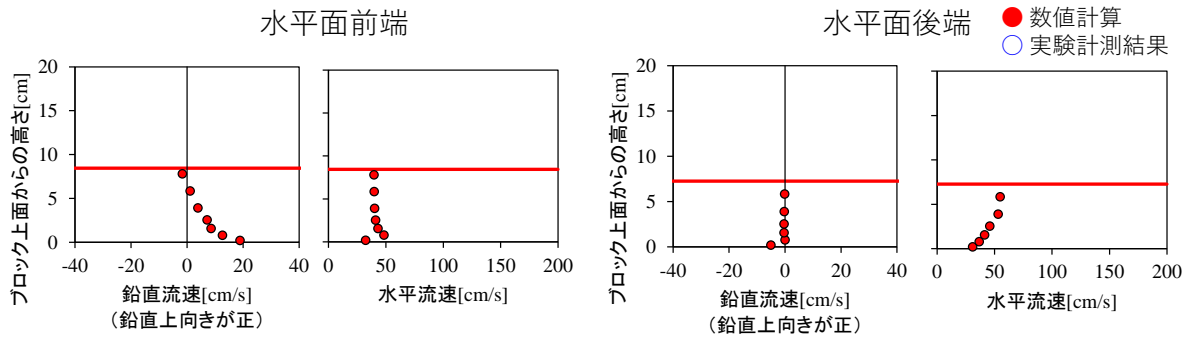


図 5-2- 58 流速分布

(縮尺変化ケース：縮尺 1/40、初期水位 16 cm、ブロック小、流量 0.6m³/min 相当)

縮尺1/40 初期水位 (η_{ini}) 16cm相当、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 1.0 m³/min相当

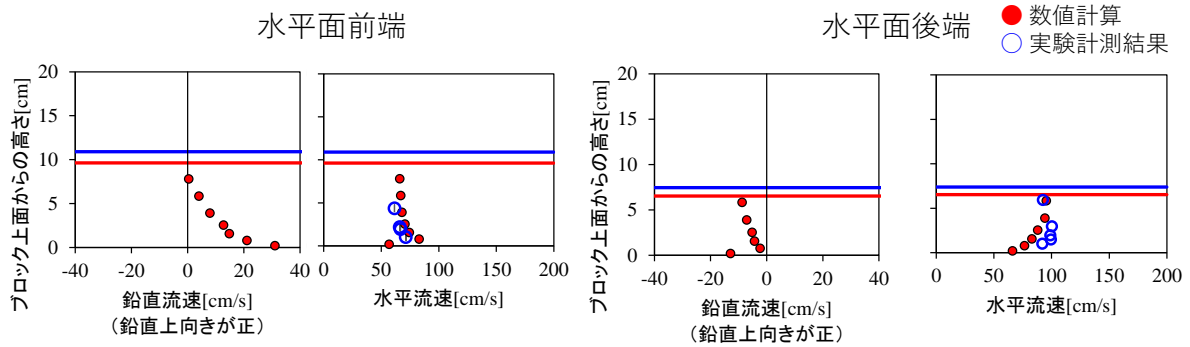


図 5-2- 59 流速分布

(縮尺変化ケース：縮尺 1/40、初期水位 16 cm、ブロック小、流量 1.0m³/min 相当)

縮尺1/40 初期水位 (η_{ini}) 16cm相当、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 1.4m³/min相当
(被災流量)

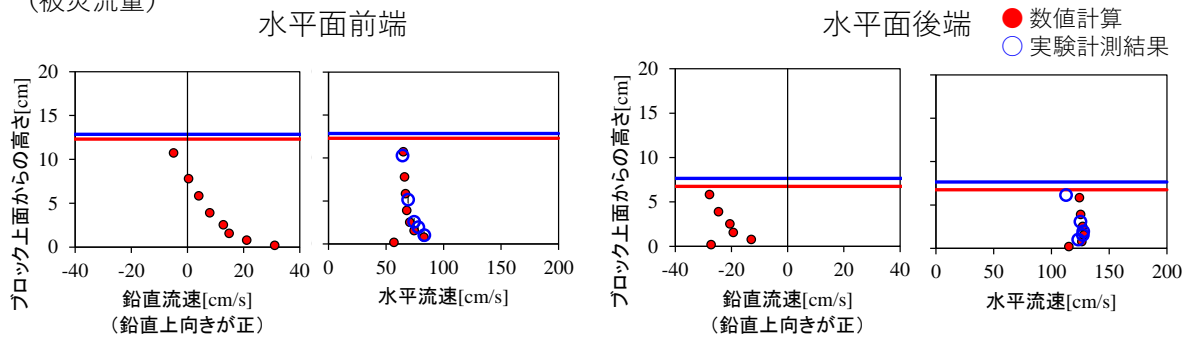


図 5-2- 60 流速分布

(縮尺変化ケース：縮尺 1/40、初期水位 16 cm、ブロック小、流量 1.4m³/min 相当)

現実スケール 初期水位 (η_{ini}) 16cm相当、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 0.6 m³/min相当 低Re数型乱流モデル

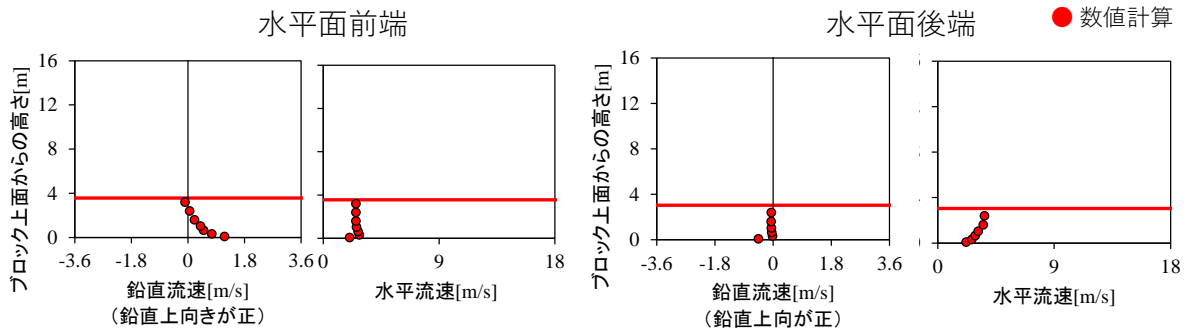


図 5-2- 61 流速分布

(現実スケールケース : 初期水位 16 cm、ブロック小、流量 0.6m³/min 相当、低 Re 数型乱流モデル)

現実スケール 初期水位 (η_{ini}) 16cm相当、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 1.0 m³/min相当 低Re数型乱流モデル

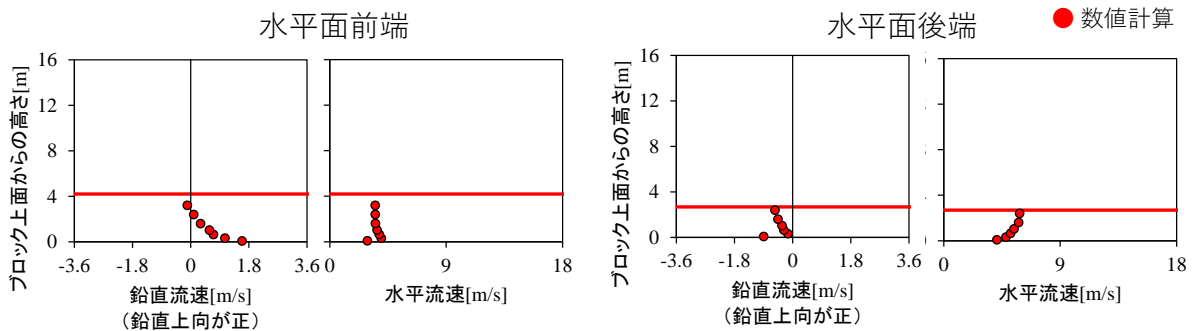


図 5-2- 62 流速分布

(現実スケールケース : 初期水位 16 cm、ブロック小、流量 1.0m³/min 相当、低 Re 数型乱流モデル)

現実スケール 初期水位 (η_{ini}) 16cm相当、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 1.4 m³/min相当 低Re数型乱流モデル

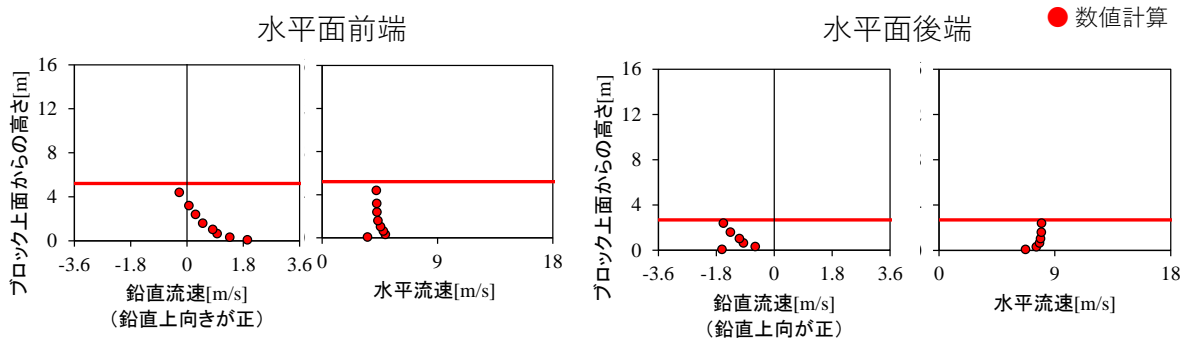


図 5-2- 63 流速分布

(現実スケールケース : 初期水位 16 cm、ブロック小、流量 1.0m³/min 相当、低 Re 数型乱流モデル)

現実スケール 初期水位 (η_{ini}) 16cm相当、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 0.6 m³/min相当 高Re数型乱流モデル

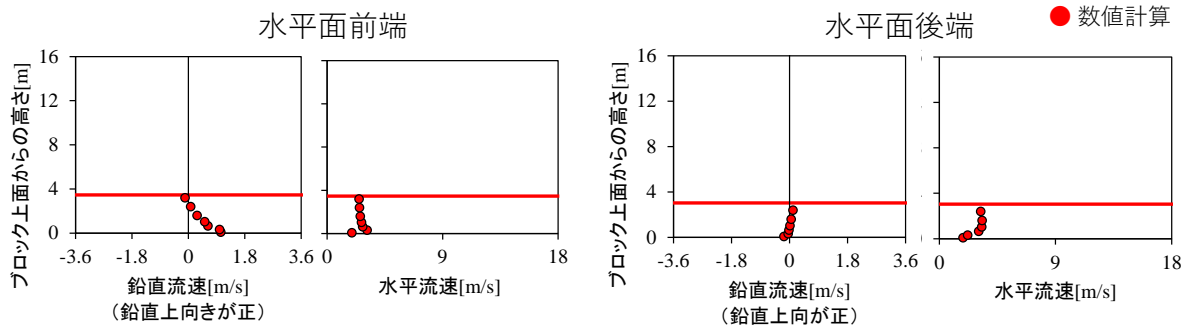


図 5-2- 64 流速分布

(現実スケールケース : 初期水位 16 cm、ブロック小、流量 0.6m³/min 相当、高 Re 数型乱流モデル)

現実スケール 初期水位 (η_{ini}) 16cm相当、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 1.0 m³/min相当 高Re数型乱流モデル

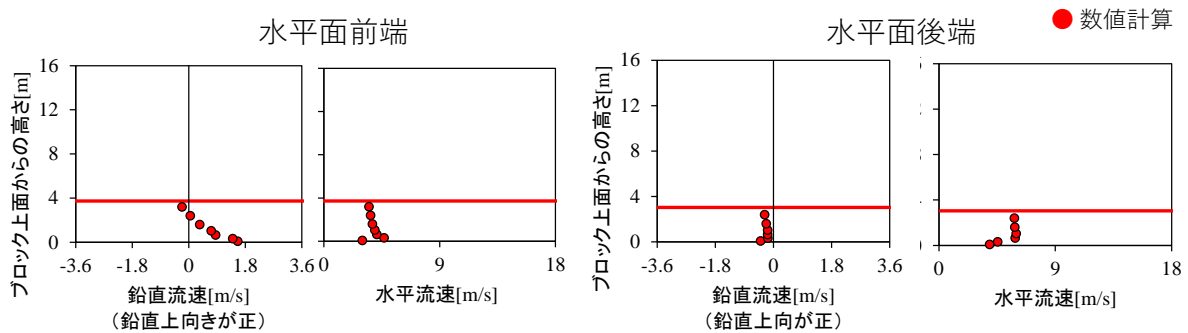


図 5-2- 65 流速分布

(現実スケールケース : 初期水位 16 cm、ブロック小、流量 1.0m³/min 相当、低 Re 数型乱流モデル)

現実スケール 初期水位 (η_{ini}) 16cm相当、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 1.4 m³/min相当 高Re数型乱流モデル

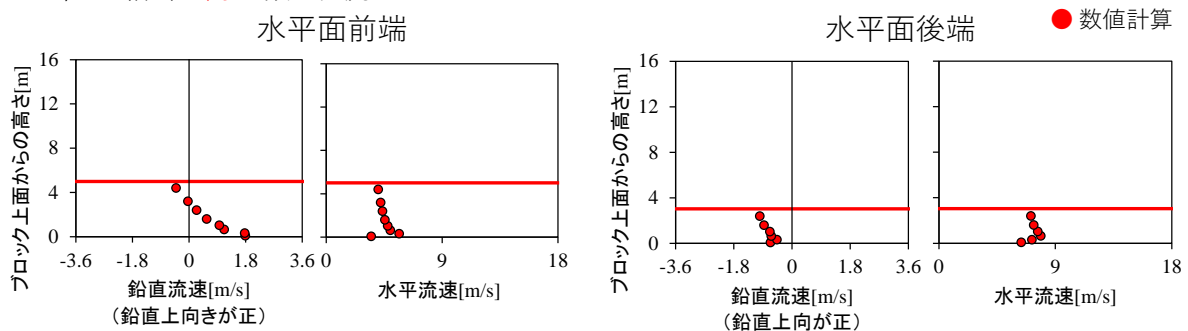


図 5-2- 66 流速分布

(現実スケールケース : 初期水位 16 cm、ブロック小、流量 1.0m³/min 相当、低 Re 数型乱流モデル)

(ii) 圧力・作用流体力構造

異なる縮尺ケース及び現実スケールケースの下流側法肩ブロックに作用する流体力分布を図 5-2- 67 に示す。なお、図はフルード相似則に則り 1/80 相当の流体力分布を示している。図より、下流側法肩ブロックに作用する流体力分布構造は、縮尺が異なっても概ね同一である（2 倍程度に収まる）ことが確認され、縮尺実験結果をフルード相似則に基づいて現地に適用することの妥当性を示唆する結果が得られた。

図 5-2- 68～図 5-2- 79 に本調査で実施した異なる縮尺ケース及び現地スケールケースの作用流体力分布を示す。なお、現実スケールケースは異なる 2 つの乱流モデル（低 Re 数型乱流モデル及び高 Re 数型乱流モデル）で計算を実施した。流速構造及び流体力構造の他縮尺との類似性から、低 Re 数型乱流モデルの方が高 Re 数型乱流モデルよりも妥当な結果が得られた。

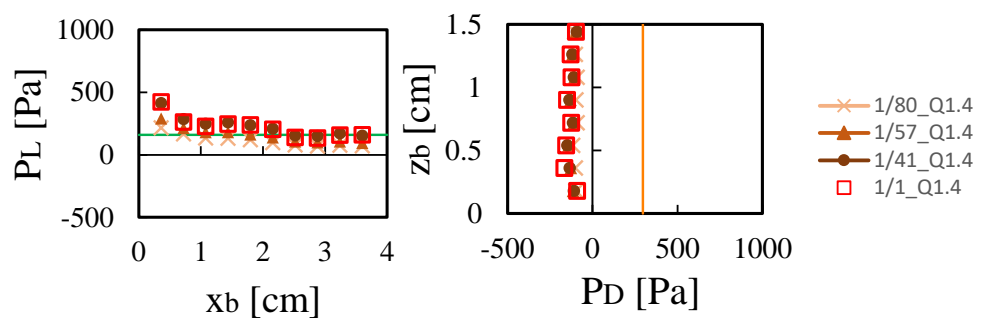


図 5-2- 67 被災時流量相当の下流側法肩ブロックの流体力分布

縮尺1/57 初期水位 (η_{ini}) 16cm相当、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 0.6 m³/min相当

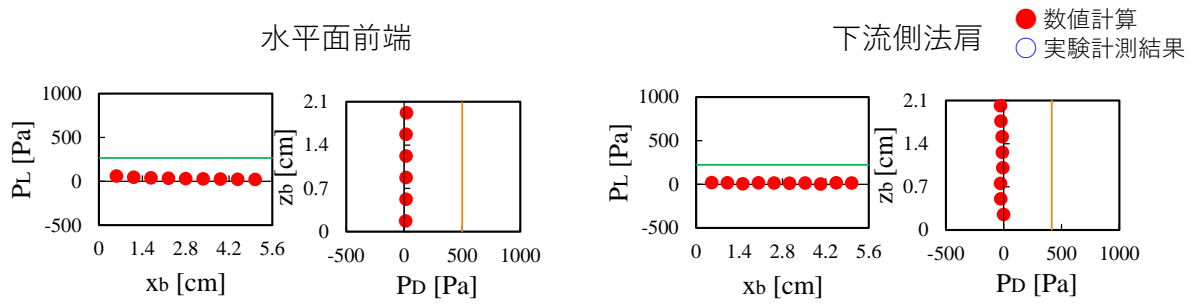


図 5-2- 68 流体力分布

(縮尺変化ケース：縮尺 1/57、初期水位 16 cm、ブロック小、流量 0.6m³/min 相当)

縮尺1/57 初期水位 (η_{ini}) 16cm相当、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 1.0 m³/min相当

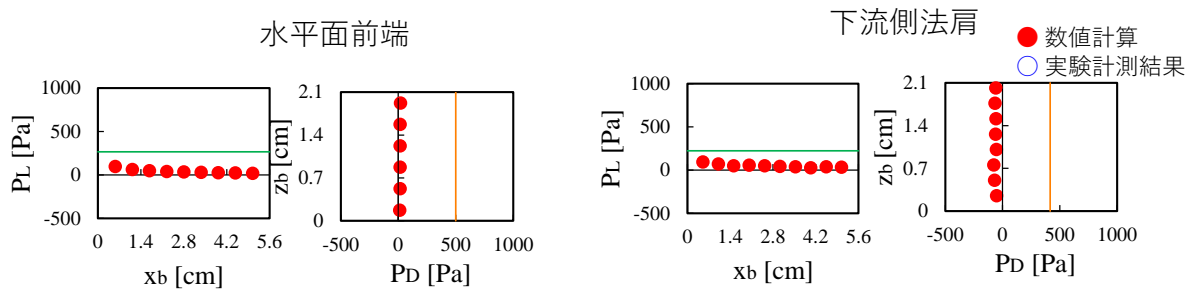


図 5-2- 69 流体力分布

(縮尺変化ケース：縮尺 1/57、初期水位 16 cm、ブロック小、流量 1.0m³/min 相当)

縮尺1/57 初期水位 (η_{ini}) 16cm相当、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 1.4 m³/min相当 (被災流量)

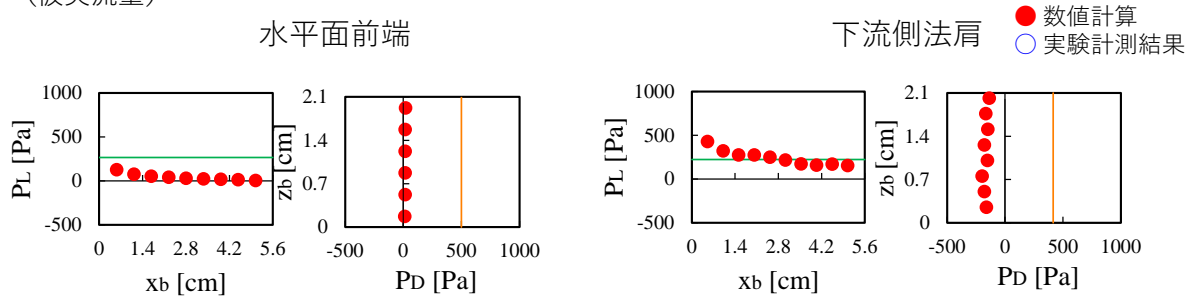


図 5-2- 70 流体力分布

(縮尺変化ケース：縮尺 1/57、初期水位 16 cm、ブロック小、流量 1.4m³/min 相当)

縮尺1/40 初期水位 (η_{ini}) 16cm相当、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 0.6 m³/min相当

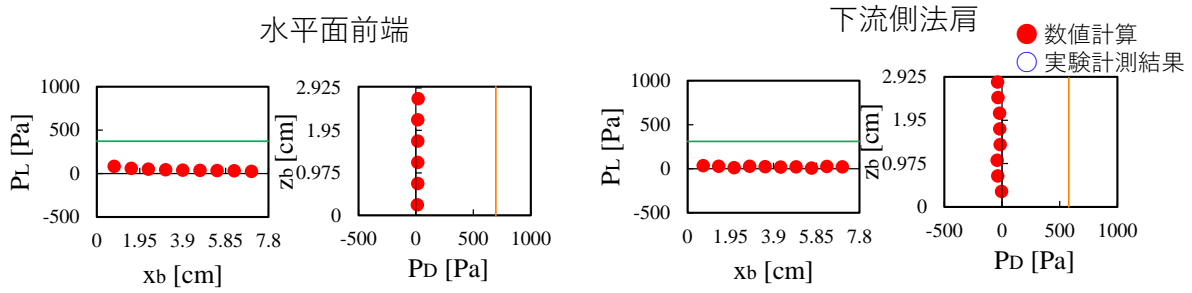


図 5-2- 71 流体力分布

(縮尺変化ケース : 縮尺 1/40、初期水位 16 cm、ブロック小、流量 0.6m³/min 相当)

縮尺1/40 初期水位 (η_{ini}) 16cm相当、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 1.0 m³/min相当

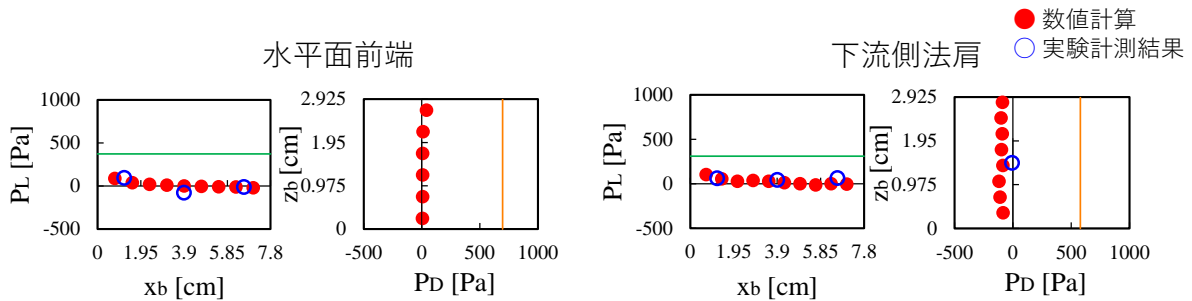


図 5-2- 72 流体力分布

(縮尺変化ケース : 縮尺 1/40、初期水位 16 cm、ブロック小、流量 1.0m³/min 相当)

縮尺1/40 初期水位 (η_{ini}) 16cm相当、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 1.4m³/min相当
(被災流量)

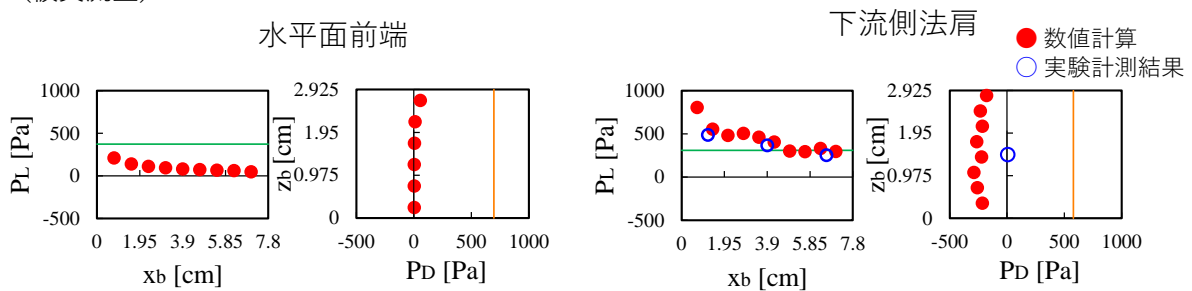


図 5-2- 73 流体力分布

(縮尺変化ケース : 縮尺 1/40、初期水位 16 cm、ブロック小、流量 1.4m³/min 相当)

現実スケール 初期水位 (η_{ini}) 16cm相当、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 0.6 m³/min 相当 低Re数型乱流モデル

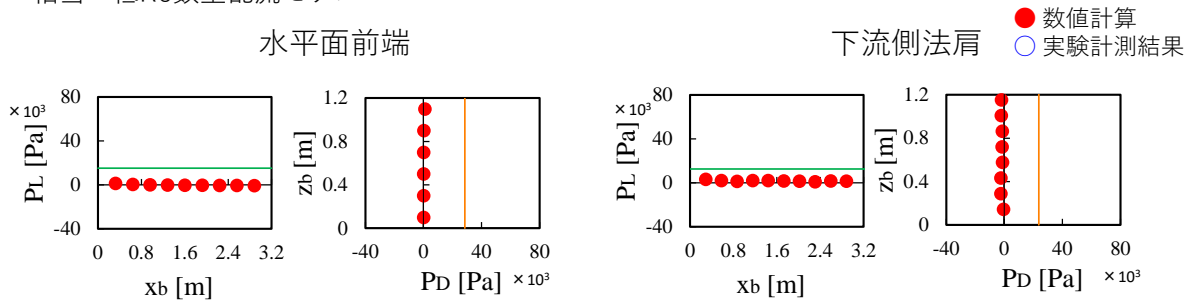


図 5-2- 74 流体力分布

(現実スケールケース：初期水位 16 cm、ブロック小、流量 0.6m³/min 相当、低 Re 数型乱流モデル)

縮尺1/57 初期水位 (η_{ini}) 16cm相当、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 1.0 m³/min相当 低Re数型乱流モデル

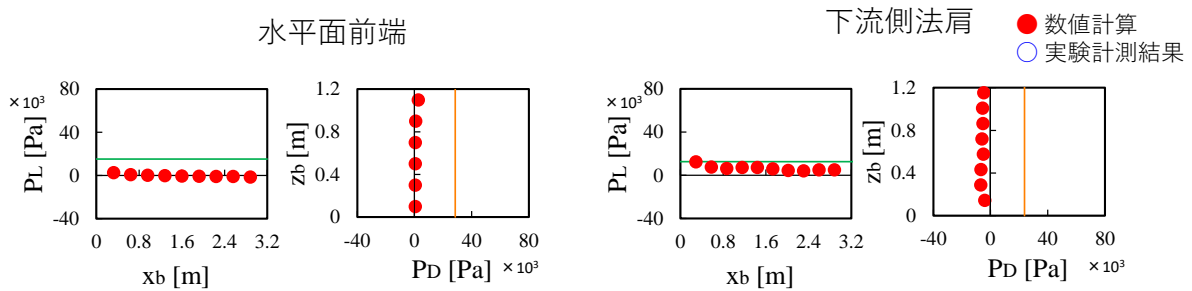


図 5-2- 75 流体力分布

(現実スケールケース：初期水位 16 cm、ブロック小、流量 1.0m³/min 相当、低 Re 数型乱流モデル)

現実スケール 初期水位 (η_{ini}) 16cm相当、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 1.4 m³/min 相当 低Re数型乱流モデル

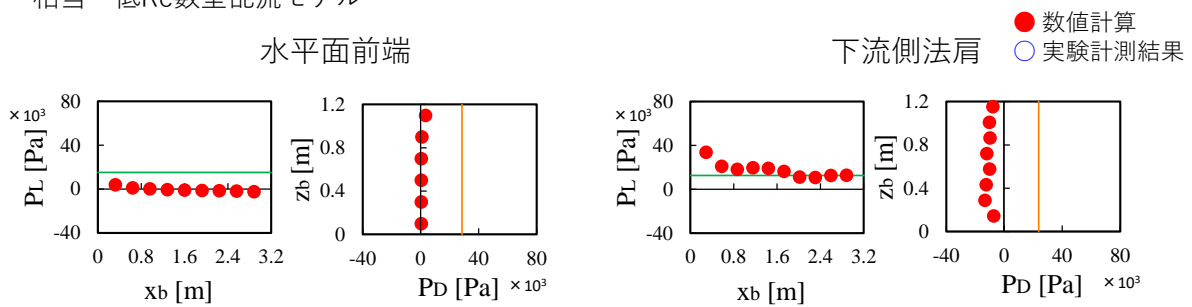


図 5-2- 76 流体力分布

(現実スケールケース：初期水位 16 cm、ブロック小、流量 1.4m³/min 相当、低 Re 数型乱流モデル)

現実スケール 初期水位 (η_{ini}) 16cm相当、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 0.6 m³/min 相当 高Re数型乱流モデル

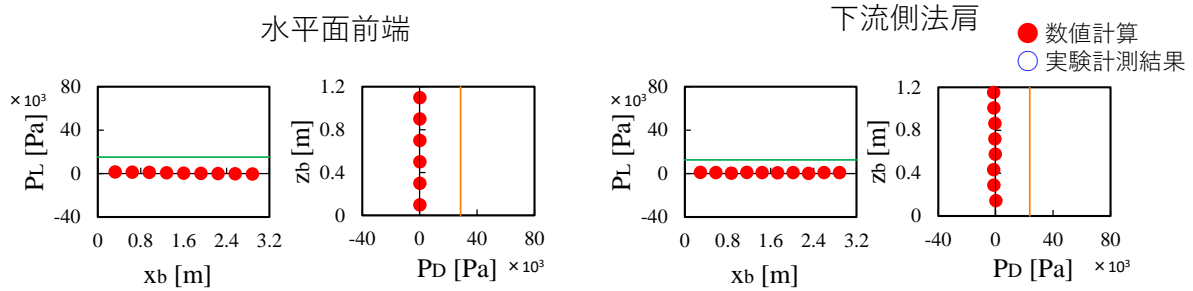


図 5-2- 77 流体力分布

(現実スケールケース：初期水位 16 cm、ブロック小、流量 0.6m³/min 相当、高 Re 数型乱流モデル)

現実スケール 初期水位 (η_{ini}) 16cm相当、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 1.0 m³/min 相当 高Re数型乱流モデル

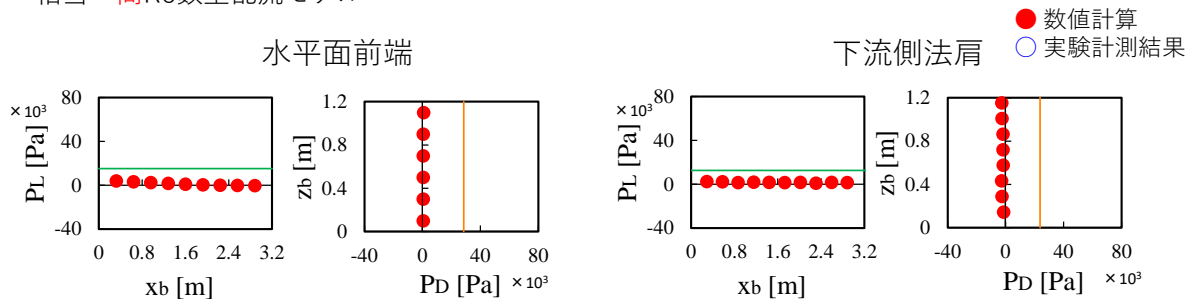


図 5-2- 78 流体力分布

(現実スケールケース：初期水位 16 cm、ブロック小、流量 1.0m³/min 相当、低 Re 数型乱流モデル)

現実スケール 初期水位 (η_{ini}) 16cm相当、ブロック小、勾配1:1.5、流量 (Q) 1.4m³/min 相当 高Re数型乱流モデル

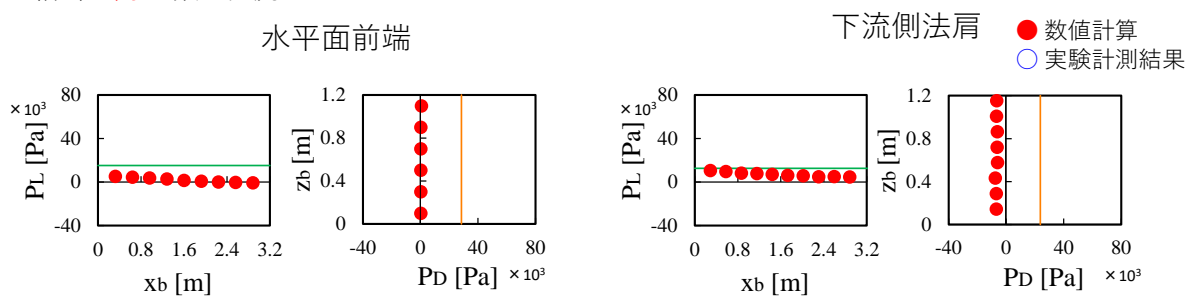


図 5-2- 79 流体力分布

(現実スケールケース：初期水位 16 cm、ブロック小、流量 1.4m³/min 相当、低 Re 数型乱流モデル)

(iii) 作用流体力分布の特徴

数値計算より推算される潜在的な不安定箇所を図 5-2-80 に示す。縮尺変化ケース及び現実スケールケース共に既往検討と同一のメカニズムであり、縮尺実験結果をフルード相似則に基づいて現地に適用することの妥当性を示唆するものである。

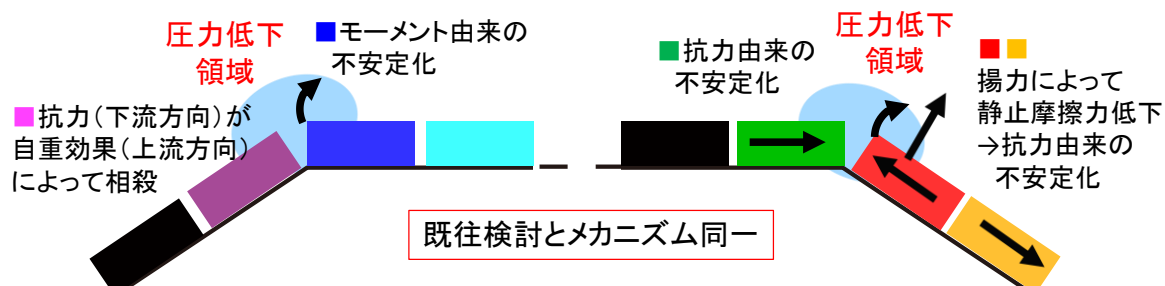


図 5-2-80 数値計算から推察される潜在的な不安定箇所（縮尺変化ケース）

2-e ブロック形状変化（ブロック高さ）ケース

(i) 圧力・作用流体力構造

ブロック形状変化（ブロック高さ）ケースの後端法肩ブロック周辺における圧力分布を図 5-2-81 に示す。図の圧力は静水圧からの差を示している。図より、圧力低下範囲（揚力の作用長さ： l ）は、ブロック高さに依存することが示唆された。

過年度検討ケースと本調査検討ケースの圧力作用範囲（揚力の作用長さ： l ）を図 5-2-82 に整理した。ここで揚力の作用長さ： l は、ブロック左端から全揚力積分値のうち上流側から積分して 50%の位置までの距離と定義している。図より、下流側法肩では、揚力の作用長さ： l がブロックサイズ（あるいはブロック高さ）に依存し、勾配や流速には依存しないこと、上流側前端ではブロックサイズや流速に依存せず、ブロック左端 1cm 程度に限定されることが確認された。

このことは、 l がブロック代表長さに比例すると仮定して導出される流速の 6 乗式の仮定を支持するものである。

図 5-2-83～図 5-2-85 にブロック形状変化（ブロック高さ）ケースの流速分布を、図 5-2-86～図 5-2-88 に作用流体力分布を示す。

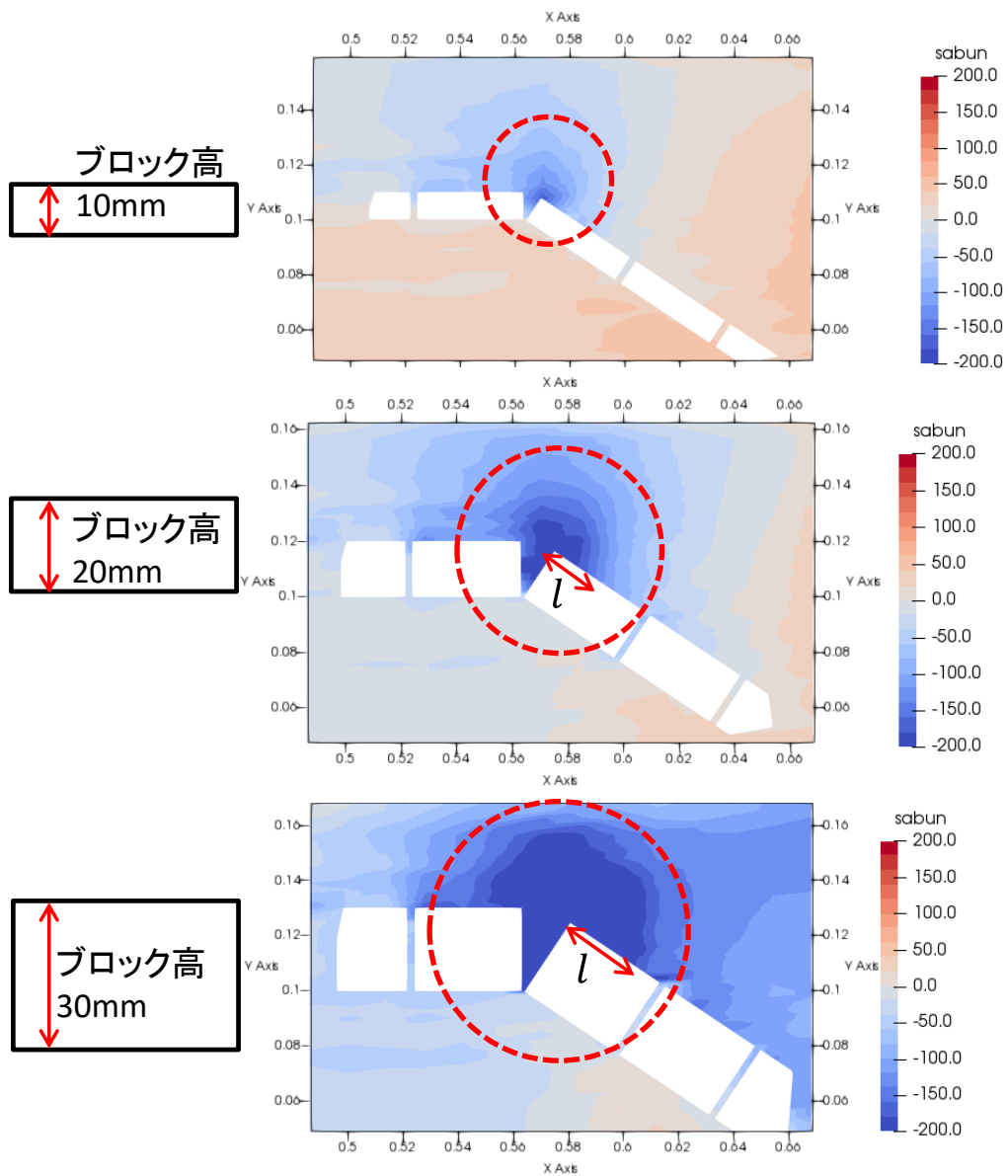


図 5-2- 81 水平面後端における圧力分布の変化

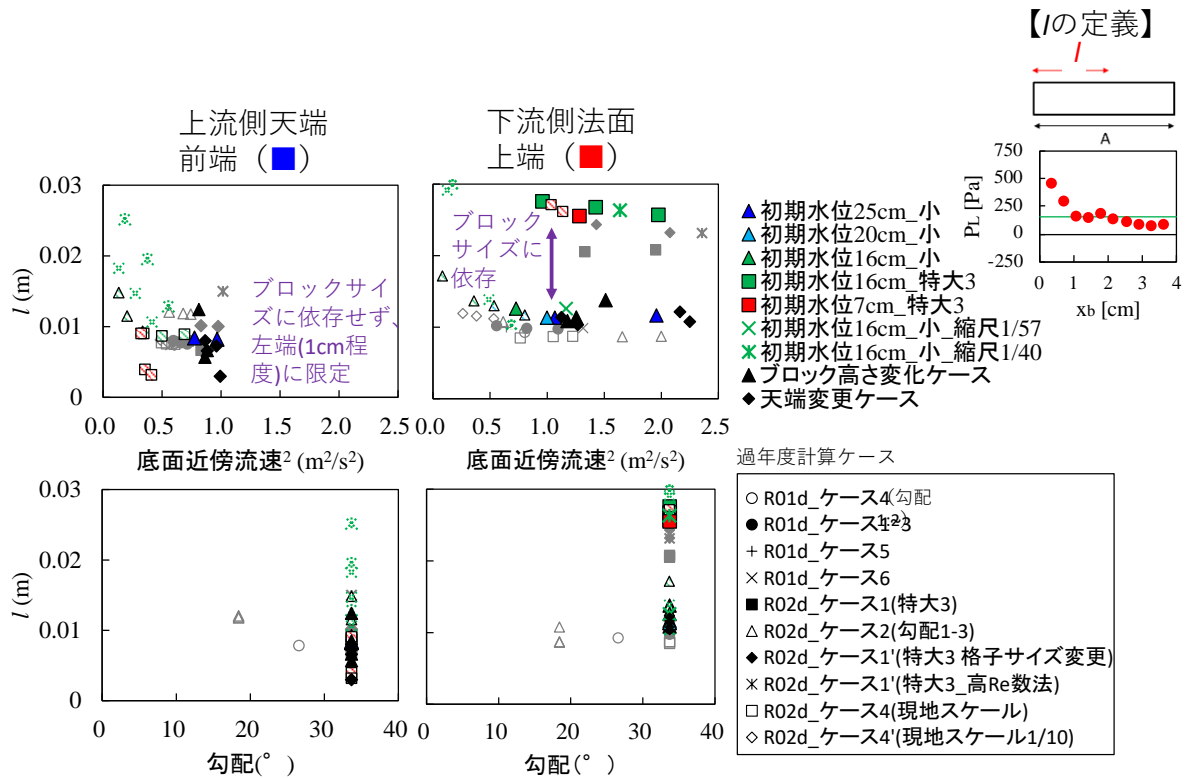


図 5-2- 82 揚力の作用長さlの変化

ブロック変化 初期水位 (η_{ini}) 25cm、ブロック小、ブロック高さ10mm、勾配1 : 1.5、流量 (Q) 4.0 m³/min

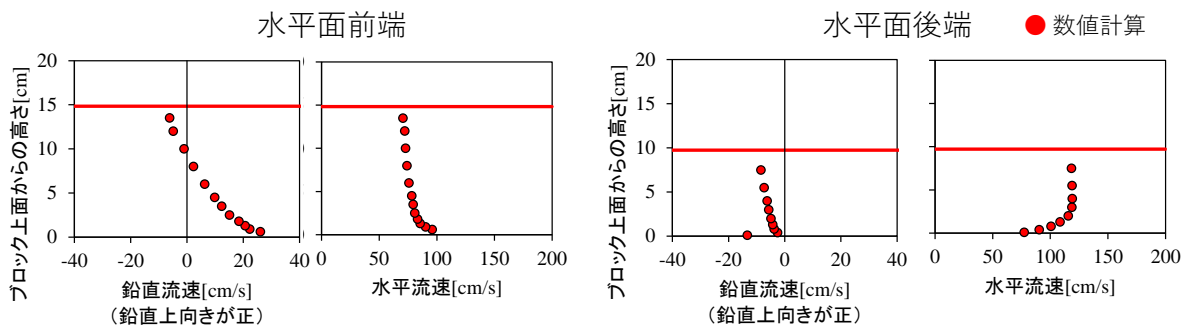


図 5-2- 83 流速分布

(ブロック形状変化 (ブロック高さ) ケース : 初期水位 25 cm、ブロック小、ブロック高さ 10mm、流量 4.0m³/min)

ブロック変化 初期水位 (η_{ini}) 25cm、ブロック小、ブロック高さ20mm、勾配1:1.5、
 流量 (Q) 4.0 m³/min

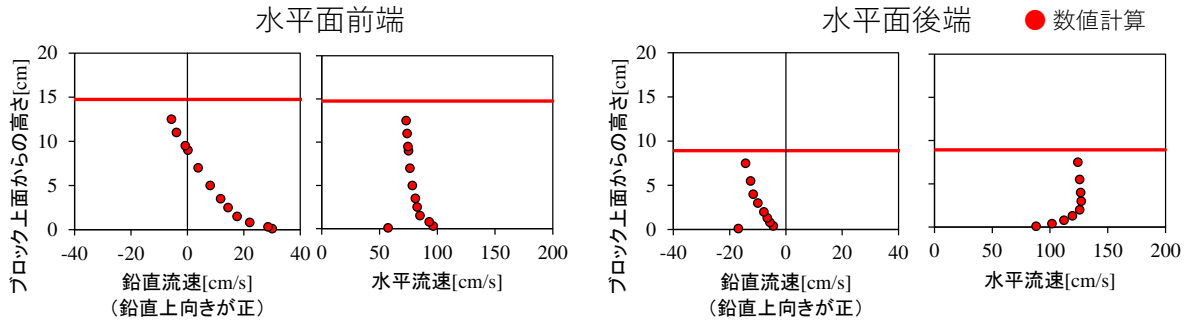


図 5-2- 84 流速分布

(ブロック形状変化 (ブロック高さ) ケース : 初期水位 25 cm、ブロック小、
 ブロック高さ 20mm、流量 4.0m³/min)

ブロック変化 初期水位 (η_{ini}) 25cm、ブロック小、ブロック高さ30mm、勾配1:1.5、
 流量 (Q) 4.0 m³/min

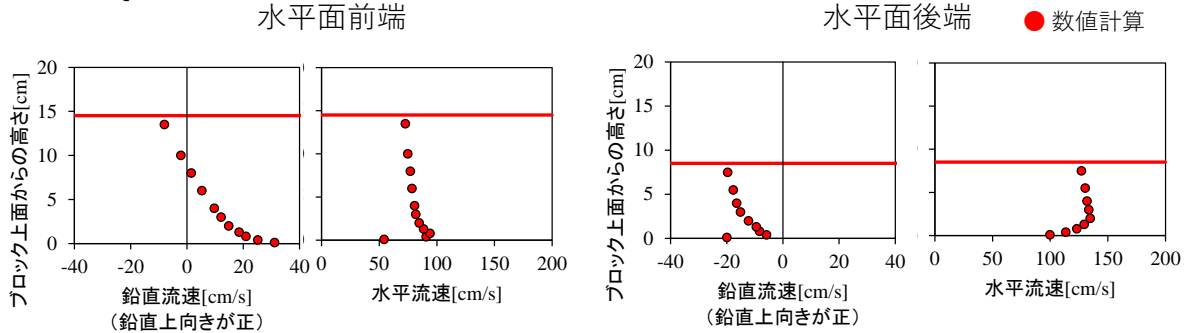


図 5-2- 85 流速分布

(ブロック形状変化 (ブロック高さ) ケース : 初期水位 25 cm、ブロック小、
 ブロック高さ 30mm、流量 4.0m³/min)

ブロック変化 初期水位 (η_{ini}) 25cm、ブロック小、ブロック高さ10mm、勾配1:1.5、流量 (Q) 4.0 m³/min

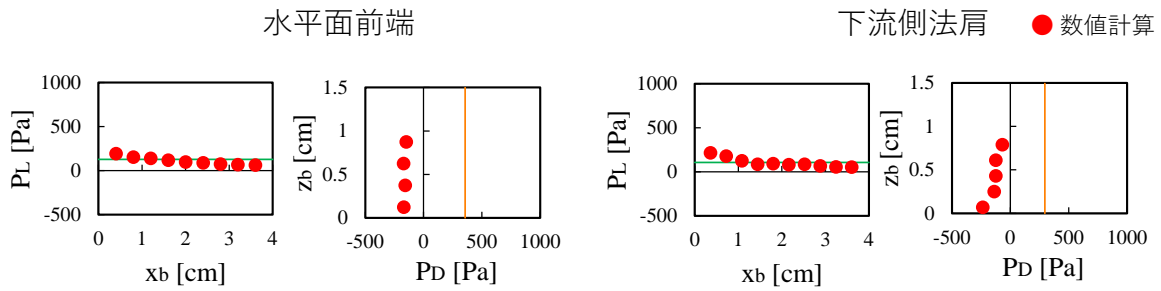


図 5-2- 86 流体力分布
(ブロック形状変化 (ブロック高さ) ケース : 初期水位 25 cm、ブロック小、
ブロック高さ 10mm、流量 4.0m³/min)

ブロック変化 初期水位 (η_{ini}) 25cm、ブロック小、ブロック高さ20mm、勾配1:1.5、流量 (Q) 4.0 m³/min

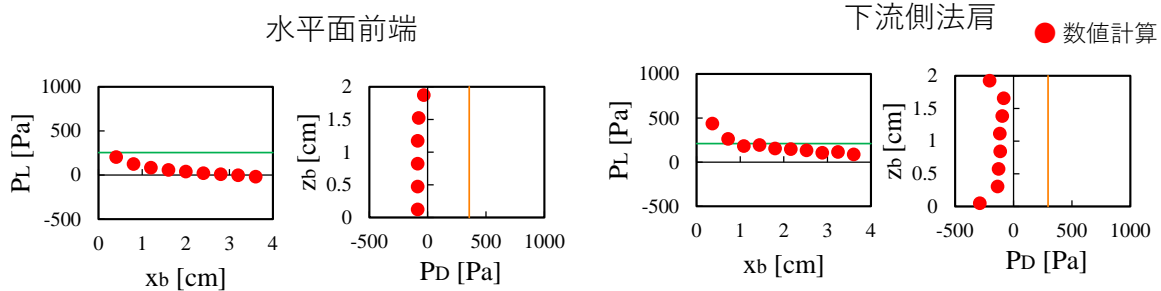


図 5-2- 87 流体力分布
(ブロック形状変化 (ブロック高さ) ケース : 初期水位 25 cm、ブロック小、
ブロック高さ 20mm、流量 4.0m³/min)

ブロック変化 初期水位 (η_{ini}) 25cm、ブロック小、ブロック高さ30mm、勾配1:1.5、流量 (Q) 4.0 m³/min

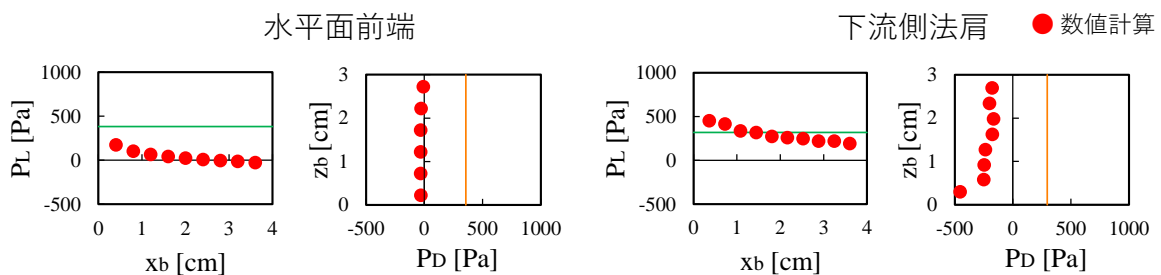


図 5-2- 88 流体力分布
(ブロック形状変化 (ブロック高さ) ケース : 初期水位 25 cm、ブロック小、
ブロック高さ 30mm、流量 4.0m³/min)

2-f マウンド変化ケース

(i) 流速分布構造

マウンド変化ケースの水平面後端における流速鉛直分布を図 5-2- 89 に、マウンド周辺の流速分布を図 5-2- 90 に示す。図 5-2- 89 より、流量 (Q) 4.0 の天端 short(●印)及び天端 long(○印)のケースは、過年度検討のブロック小(△印)と同等の流速であり、ブロック特大 3 (□印)には及ばない程度であることが確認された。流量が大きい Q5.0 天端 short(●印)及び Q5.0 天端 long (●印)のケースは同様の流速分布構造となる。以上より、天端の長短は流速構造への影響が少なく、流量やブロックサイズにより流速構造が変化することが確認された。

図 5-2- 91～図 5-2- 94 にマウンド変化ケースの流速分布を示す。

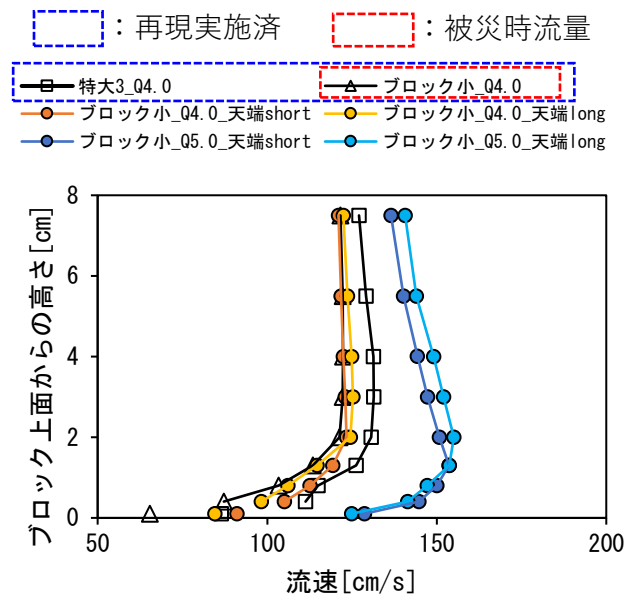


図 5-2- 89 水平面後端における流速鉛直分布 (マウンド変化ケース)

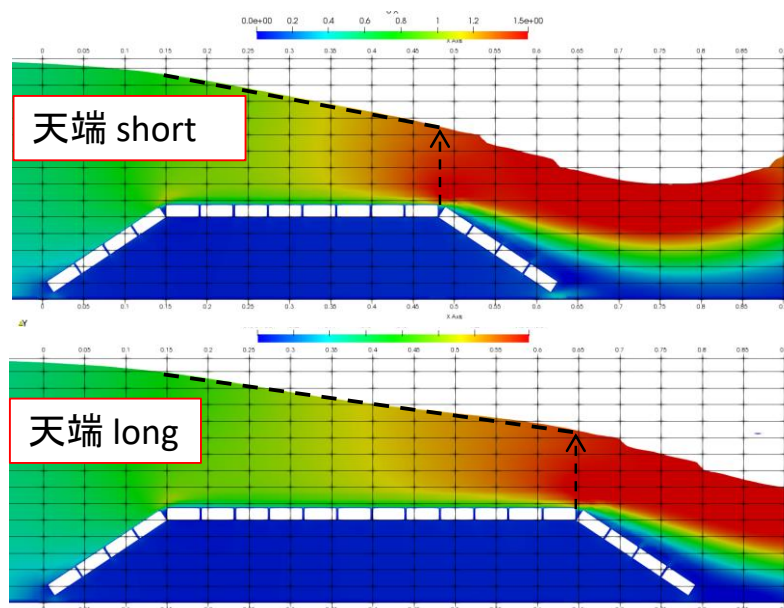


図 5-2- 90 マウンド周辺における流速分布 (マウンド変化ケース)

天端長さ変化 初期水位 (η_{ini}) 25cm、ブロック小、天端short、勾配1:1.5、
流量 (Q) 4.0 m³/min

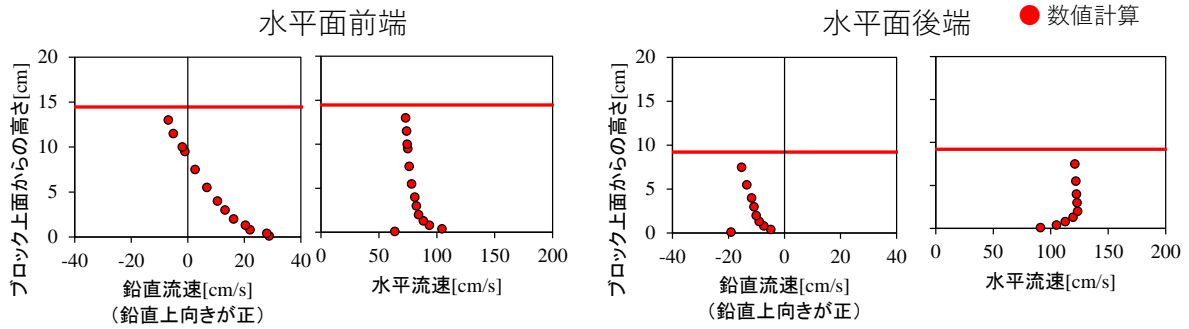


図 5-2- 91 流速分布

(マウンド変化ケース : 初期水位 25 cm、ブロック小、天端 short、流量 4.0m³/min)

天端長さ変化 初期水位 (η_{ini}) 25cm、ブロック小、天端long、勾配1:1.5、
流量 (Q) 4.0 m³/min

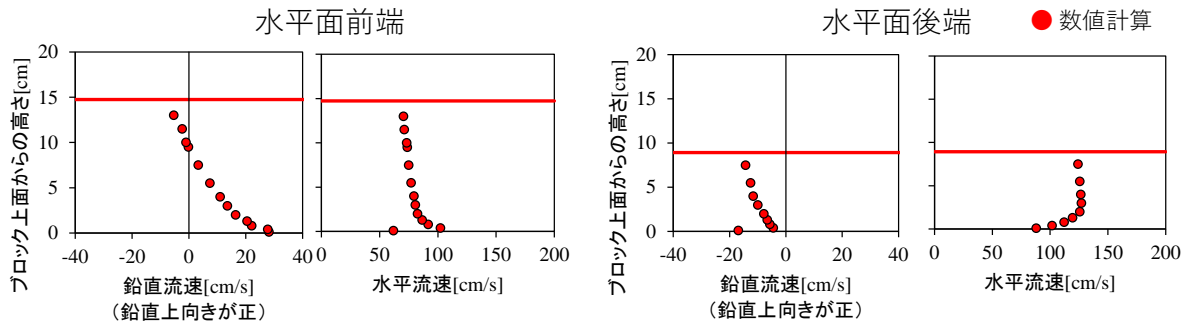


図 5-2- 92 流速分布

(マウンド変化ケース : 初期水位 25 cm、ブロック小、天端 long、流量 4.0m³/min)

天端長さ変化 初期水位 (η_{ini}) 25cm、ブロック小、天端short、勾配1:1.5、
流量 (Q) 5.0 m³/min

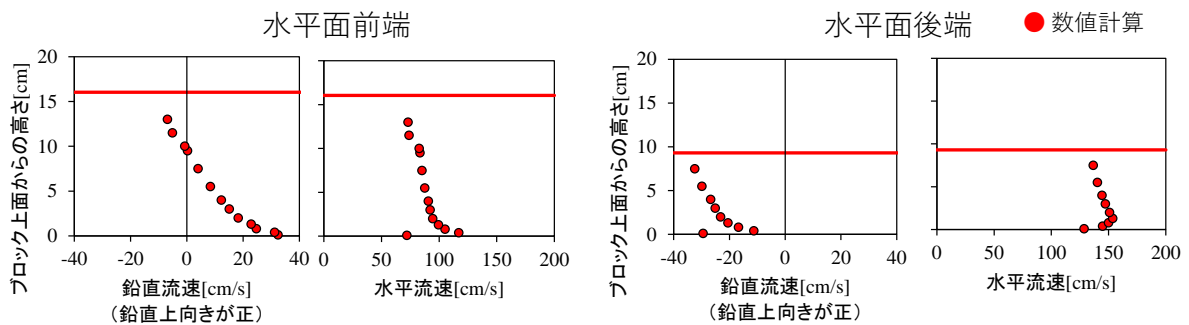


図 5-2- 93 流速分布

(マウンド変化ケース : 初期水位 25 cm、ブロック小、天端 short、流量 5.0m³/min)

天端長さ変化 初期水位 (η_{ini}) 25cm、ブロック小、天端long、勾配1:1.5、
 流量 (Q) 5.0 m³/min

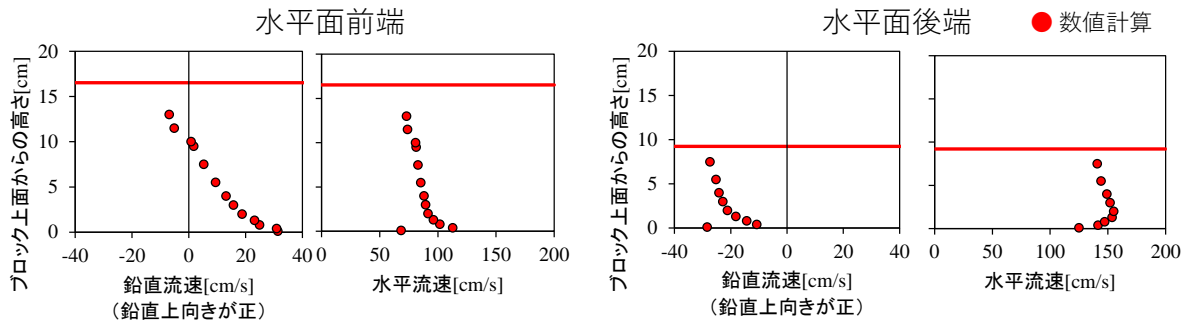


図 5-2- 94 流速分布

(マウンド変化ケース：初期水位 25 cm、ブロック小、天端 long、流量 5.0m³/min)

(ii) 圧力・作用流体力構造

マウンド変化ケースにおけるブロック小被災時流量相当時の下流側法肩における流体力分布を図 5-2- 95 に示す。図よりマウンド天端長が変わることによる流体力変化は少ない（最大 150pa 程度）ことが確認された。

図 5-2- 96～図 5-2- 99 にマウンド変化ケースの作用流体力分布を示す。

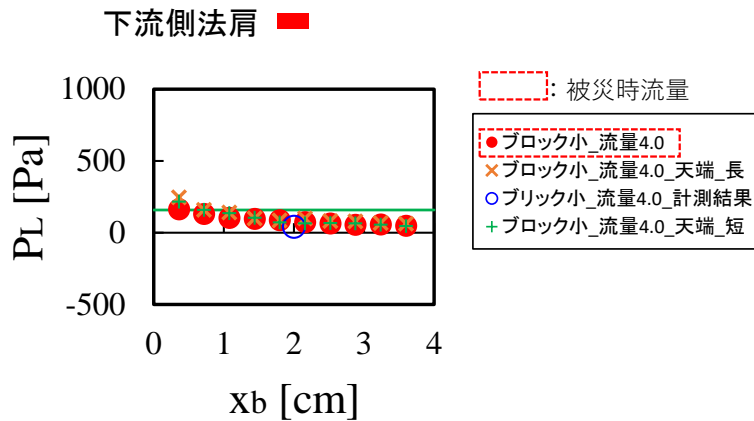


図 5-2- 95 下流側法肩における作用流体力分布の比較（マウンド変化ケース）

天端長さ変化 初期水位 (η_{ini}) 25cm、ブロック小、天端short、勾配1:1.5、
 流量 (Q) 4.0 m³/min

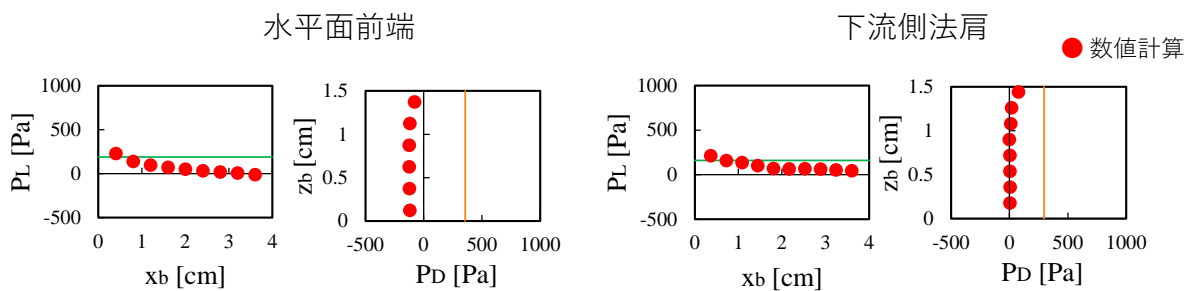


図 5-2- 96 流体力分布

(マウンド変化ケース：初期水位 25 cm、ブロック小、天端 short、流量 4.0m³/min)

天端長さ変化 初期水位 (η_{ini}) 25cm、ブロック小、天端long、勾配1:1.5、
 流量 (Q) 4.0 m³/min

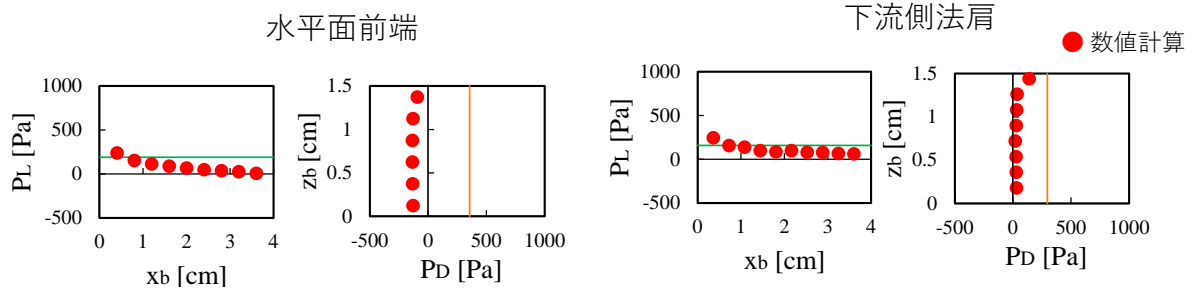


図 5-2- 97 流体力分布

(マウンド変化ケース：初期水位 25 cm、ブロック小、天端 long、流量 4.0m³/min)

天端長さ変化 初期水位 (η_{ini}) 25cm、ブロック小、天端・短、勾配1:1.5、
 流量 (Q) 5.0 m³/min

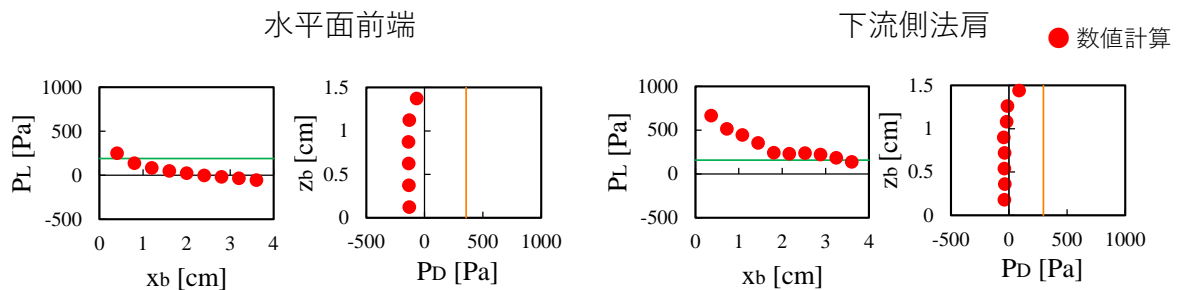


図 5-2- 98 流体力分布

(マウンド変化ケース：初期水位 25 cm、ブロック小、天端 short、流量 4.0m³/min)

天端長さ変化 初期水位 (η_{ini}) 25cm、ブロック小、天端・長、勾配1:1.5、
 流量 (Q) 5.0 m³/min

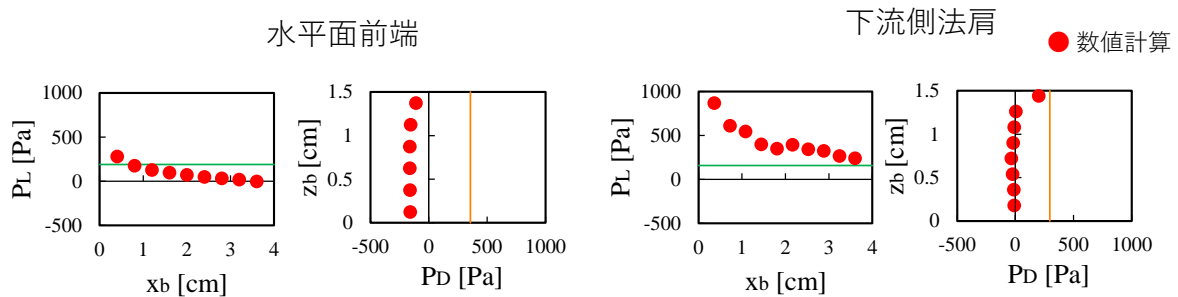


図 5-2- 99 流体力分布

(マウンド変化ケース：初期水位 25 cm、ブロック小、天端 long、流量 4.0m³/min)

2-g 底面近傍流速／断面平均流速比についての考察

既往検討では、高流速条件下での検討に特大3ブロックを用いたケースで、底面近傍流速が断面平均流速を上回る特徴がみられた。今年度の数値計算の検討では、ブロックの大きさによらず、流量が大きいケース（流量 $5.0\text{m}^3/\text{min}$ 等）で底面近傍流速が断面平均流速を上回る現象が確認された（図 5-2-100）。

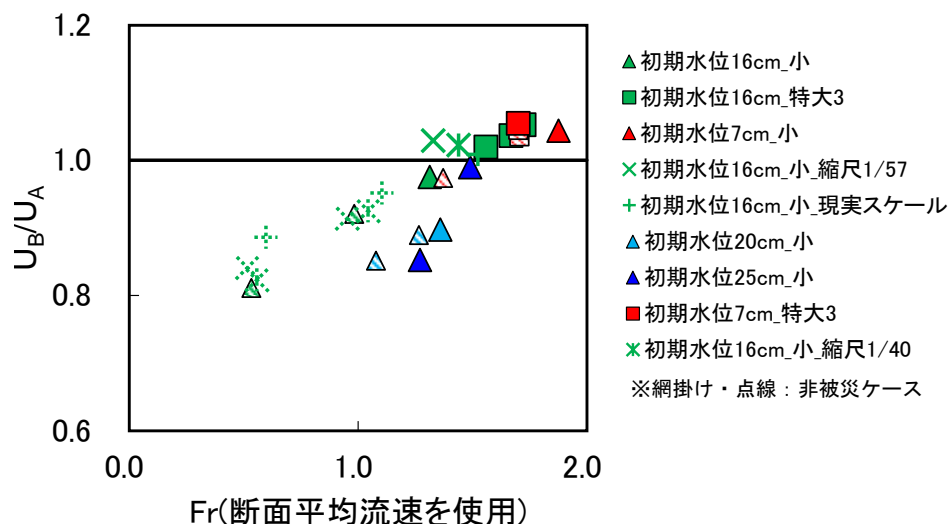


図 5-2- 100 断面流速 U_A と底面近傍流速 U_B の関係

流速の鉛直構造に着目すると、流量が小さいケースでは、流速鉛直分布は対数則分布に近いが、流量が大きくなるにつれて、ブロック上 $1\sim 2\text{cm}$ の位置が極大値をとるように変化をしていた。

例えば、図 5-2-101 に示す縮尺変化ケースの流量変化（ $Q0.6$ 、 $Q1.0$ 、 $Q1.4$ ）、底面近傍流速（ブロック上 1cm 流速、図中 \leftrightarrow 印）は、流量が 0.4 変化する毎に概ね 30cm/s ずつ増加しているのに対し、鉛直上方（図中 \leftrightarrow 印）は、 $Q0.6$ から $Q1.0$ の変化が 30cm/s 、 $Q1.0$ から $Q1.4$ の変化が 20cm/s となり、変化量が減少している。

片山ら²は、段落ち部の流れを対象に、流線曲率による遠心力を受け、ポテンシャル流と、底面近傍の対数則とみなせる層の流速を組み合わせることで、段落ち部の急変流の流速分布が形成されることを説明している。

流量が大きい場合（ $Q1.4$ ）、流線曲率による遠心力が大きくなるため、鉛直上方の流速の減少量が大きくなる。その結果、断面平均流速が過小に算定されることが推察される。

以上より、底面近傍流速（底面から 1cm 上の流速）と断面平均流速の関係は流況に応じて変化するものであり、底面近傍流速／断面平均流速比を一律に設定することが困難であることが示唆される。

² 片山道夫・福井義孝・吉川英雄：段落ち部近傍の底面せん断力、土木学会論文報告集，第 342 号，1984.

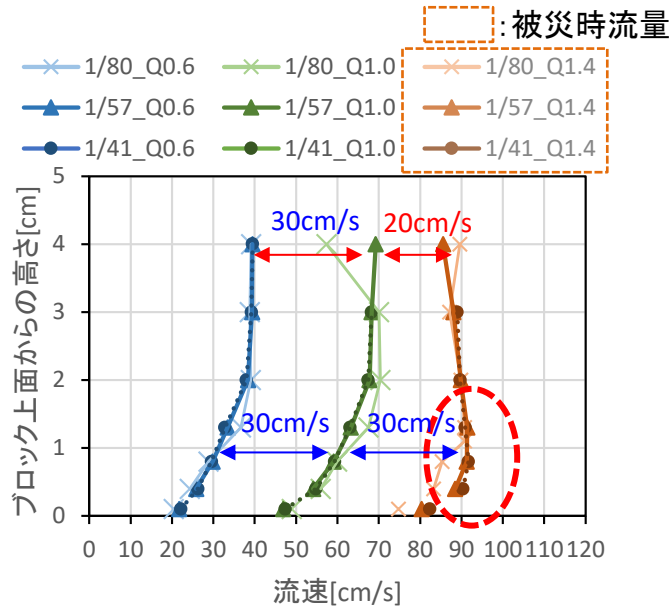


図 5-2- 101 水平面後端における流速鉛直分布（異なる縮尺ケース）

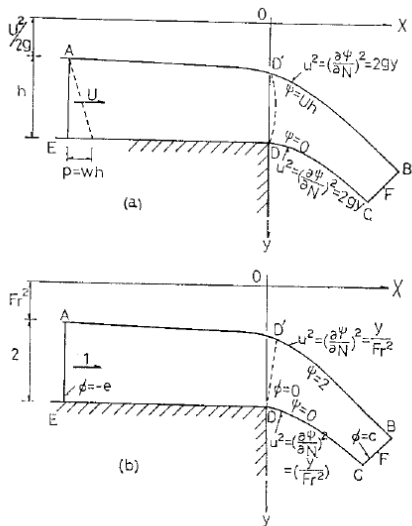


図-1 段落ち部座標系

図-6(d)において、
 ① は実際の流速分布
 ② はポテンシャル解析による流速分布
 ③ は遠心力等を受けていない、ここで想定した流れの流速分布を示している。

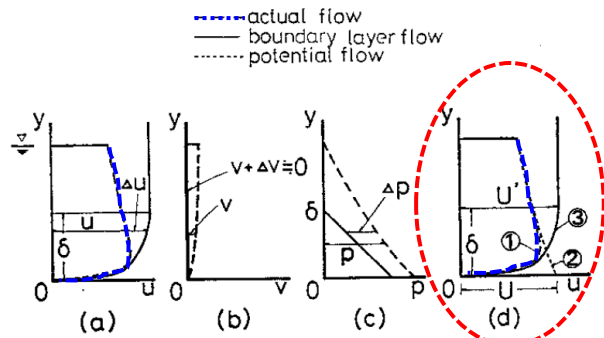


図-6 $u, \Delta u, v, \Delta v, p, \Delta p$ の定義図

図 5-2- 102 水平面後端における流速分布の物理的解釈（片山ら¹より引用）

2-h 数値計算による検討のまとめ

【流速構造 底面付近流速 / 断面平均流速 比のコントロール機構】

- ・フルード数が大きくなるにつれて、断面平均流速に対する底面近傍流速の比が大きくなる傾向がみられた。
- ・底面流速／断面平均流速の比が 1 を超える条件は、異なる水位条件、ブロック形状変化条件、縮尺変化条件などいずれの検討条件でも $Fr=1.5$ 前後であった。
- ・流速構造の考察より、流量が大きい条件下では、流線曲率による遠心力の影響を受け、底面近傍流速と比較して断面流速が小さく計測される可能性が示唆された。
- ・底面近傍流速（底面から 1cm 上の流速）と断面平均流速の関係は、以上のように流況に応じて変化するものであり、底面近傍流速／断面平均流速比を一律に設定することが困難であることが示唆された。

【流体力分布】

- ・いずれのケースにおいても、ブロックに揚力が作用し、法肩側（法面ブロックの左端側）の揚力が大きい「揚力 P_L 値の局所的分布」（→モーメント釣り合い）が確認された。
- ・ただし、極低水位の場合には、マウンド内の圧力上昇によりブロックに力が作用しており、被災メカニズムが異なることが示唆された。

【異なる初期水位条件への算定式の適用性、離脱メカニズムに関して】

- ・水位が比較的高い場合（初期水位 16cm）、推定された作用流体力分布が既往検討と同様であり、法肩部が主な被災箇所となることが示唆された。
- ・水位が極端に低い場合（初期水位 7cm）、推定された作用流体力分布が高水位の場合と大きく異なった。下流側法面部が主な被災箇所となることが示唆され、水理模型実験結果を支持する結果が得られた。
- ・（実験で計測された）法肩流速と（ブロック離脱位置周辺の）法面上流速が大きく異なり、算定式における係数 X, Z の実験値の減少の一因と考えられた。
- ・また、下流側法面下の圧力が増加し、上向きの力が法面ブロックに作用することが示唆された（既往検討結果と異なるメカニズム）。法面上でも P_L 値の局所分布が確認された。

【異なるブロック形状条件（有孔型）への適用性】

- ・水平面後端では孔の有無・孔の位置によらず流速の鉛直分布構造に変化はないことが確認された。
- ・方塊ブロックと同様の揚力分布を示し、孔部分に揚力が働かないような分布であることが確認され、孔に揚力が作用しないため、面積分値としては減少し、安定性が増すことが示唆された。
- ・揚力が法肩付近に大きく作用する傾向は同一であり、モーメントの釣り合いの枠組みで整理された提案式が適用可能であることが示唆された。

【実験縮尺の影響把握】

- ・流速の鉛直分布構造は、縮尺が異なっても、フルード相似を仮定して、流速分布が概ね同一であることが確認された。
- ・縮尺が異なっても、揚力に多少の差はあるが分布形や値のオーダーはほぼ同等であることが確認され、縮尺実験結果をフルード相似則に基づいて現地に適用することの妥当性を示唆する結果が得られた。

(3) 安定質量算定式の検討・提案

a-1) 安定質量算定式の検討・提案

過年度（令和 2 年度）には、新算定式を以下のように提案した。

■新流速 6 乗式（揚力の作用長さ相当値 l がブロック長さに比例すると仮定）

$$M = \frac{\alpha\beta\rho_B U^6}{g^3(S_B-1)^3 X^6 (\cos\theta)^3} \quad 3 \text{ 勾配} : X=1.32, \text{ 水平} : X=0.93$$

■新流速 3 乗式（揚力の作用長さ相当値 l がブロック長さに比例しないと仮定）

$$M = \frac{\alpha\beta\rho_B U^3}{g^{3/2}(S_B-1)^{3/2}(Z/\sqrt{l})^3 (\cos\theta)^{3/2}} \quad Z' = \frac{Z}{\sqrt{l}} \quad 3 \text{ 勾配} : Z'=0.53 \text{ m}^{-0.5}, \text{ 水平} : Z'=0.37 \text{ m}^{-0.5}$$

ここで、 M ：被覆ブロック質量、 U ：マウンド上流速、 θ ：マウンド勾配、 ρ_w ：水の密度、 ρ_B ：被覆ブロックの密度、 $S_B = \rho_B / \rho_w$ （ブロック比重）、 g ：重力加速度、 π ：円周率、 α ：ブロック高さとブロック長さ（または代表径）の比、 β ：ブロック幅とブロック長さ（または代表径）の比である。

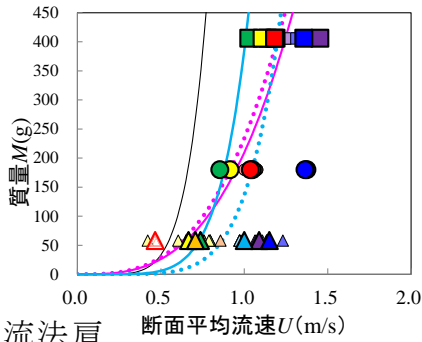
しかし、昨年度までの検討では初期水位 25cm の実験結果に基づいてモーメントベースの力学モデルを構築したものの、本年度の水位変化実験ではその力学モデルが適用されるケースと適用されないケース（低水位時）があることが分かった。そのため算定式の適用範囲を検討するとともに、適用可能なケースでも一部提案式では所要質量の算定値が過小となるケースが確認されたことから、水位変化を考慮した提案式（式中の係数の変更）の検討を行った。

初めに、図 5-3-1 に昨年度選定した新 6 乗式及び新 3 乗式の係数を用いた安定限界質量の算定値と水位変化実験で得られた実験値の比較を示す。上 2 段に断面平均流速を用いた場合（下流法肩； $X=1.32$, $Z' = 0.53\text{m}^{-0.5}$, 上流法肩； $X=0.93$, $Z' = 0.37\text{m}^{-0.5}$ ）、下 2 段に底面付近流速を用いた場合（下流法肩； $X=1.05$, $Z' = 0.48\text{m}^{-0.5}$, 上流法肩； $X=0.97$, $Z' = 0.44\text{m}^{-0.5}$ ）を示す。

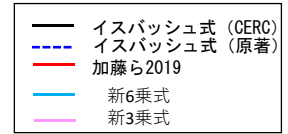
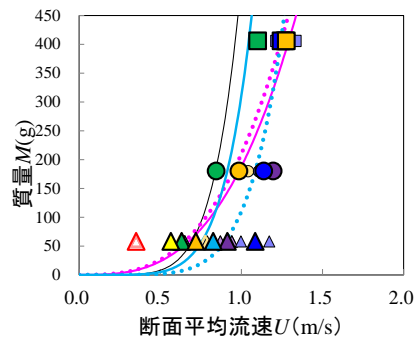
上流側では過小評価は見られないが、下流側では初期水位 20cm 以下や高流速時に実験値を過小評価するケースがみられた。特に、この傾向は断面流速を用いた場合に顕著であった。このように係数の設定によって算定式の妥当性の評価が異なることからより実験値との整合、まともの良い係数を設定したうえで提案式の妥当性の検討を行う。ここでは、(1)(2)の水理模型実験や数値計算結果に基づき、安定質量算定式について再検討した。係数の検討には、移動実験の 3～5 回の繰返し結果を平均した安定限界流速と質量を基に検討を行った。

下流法肩

急勾配 (1:1.5)



中勾配 (1:2)



凡例

- ▲: 小ブロック
- : 特大ブロック
- : 特大3ブロック

初期水位

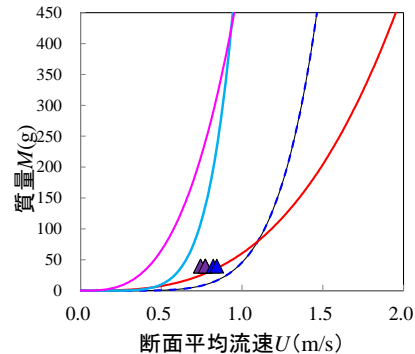
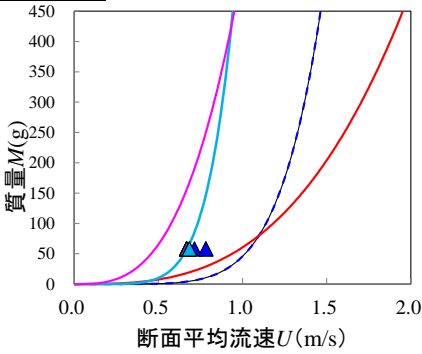
- 紫: 30cm
- 青: 25cm
- 水: 20cm
- 緑: 16cm
- 黄: 13cm
- 橙: 10cm
- 赤: 7cm

色抜き: 下流法面上
端より下流で移動

小印: 繰返実施全ケース

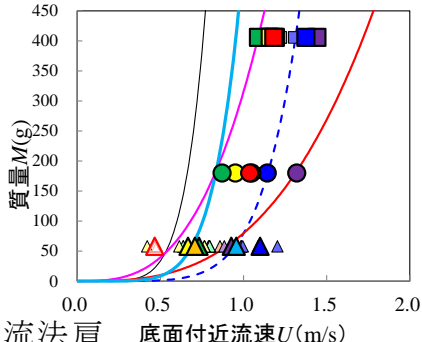
大印: 繰返ケースの平均値

上流法肩

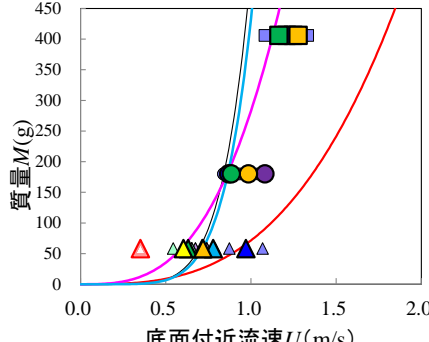


下流法肩

急勾配 (1:1.5)



中勾配 (1:2)



上流法肩

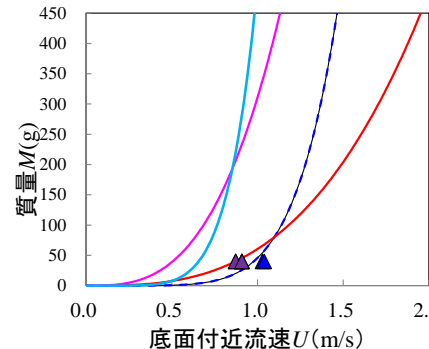
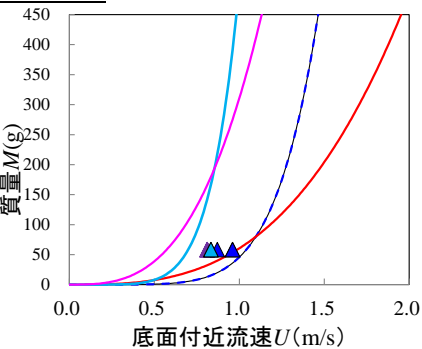


図 5-3-1 昨年度提案の係数での安定限界質量の算定値と水位変化の実験値の比較
(上 2 段: 断面平均流速、下 2 段: 底面平均流速)

次に、水位変化を考慮した提案式の検討のため実験で得られた各提案式の係数 X , Z' の水位変化について図 5-3-2 に下流側法肩、図 5-3-3 に上流側法肩の結果を示す。白抜印はブロック移動箇所が法面中央付近での移動を示している。また昨年度提示した係数を破線で示した。なお上流側については上流側法肩上水位と沖側水位の 2 種の前面側水位 h_F を用いて h_F/h_M (マウンドの前面側水位とマウンド高さとの比) を求めた。

下流法肩では、各係数は h_B/h_M (マウンドの背後側水位とマウンド高さとの比) がおおむね 1.5 程度、初期水位 16cm の場合に下限となる傾向がみられる。それ以下の h_B/h_M の範囲ではおそらくは法面中央での移動等の結果を反映して、係数の変動が大きい。初期水位 25cm 以上では係数が大きく、おおむね h_B/h_M が 2.2 以上である。一方上流法肩では係数が小さく X では 1、 Z' は 0.5 程度である。水位による差は小さいが、実験の範囲では上流側での移動例が少なかったため水位変化による傾向が反映されていない可能性があり安全側の値で設定するものとする。したがって、下流法肩における先に示した水位の区分は、高水位： $h_B/h_M > 2.2$ 、中水位： $2.2 > h_B/h_M > 1.5$ 、低水位： $1.5 > h_B/h_M$ と設定した。下流法肩の係数の設定は最も値の小さくなる中水位 (初期水位 16cm) の各ケースの平均値を用い、高水位においては昨年度の初期水位 25cm での係数を用いるものとした。

表 5-3-1～表 5-3-2 に新 6 乗式における係数 X の各ケースの平均値と係数算定に用いた値を示した。表 5-3-3～表 5-3-4 には新 3 乗式における係数 Z' の値を示した。各係数は、下流側で断面平均流速使用時は $X=1.11, Z'=0.55m^{-0.5}$ 、底面流速使用時は $X=1.12, Z'=0.55m^{-0.5}$ 。上流側では断面平均流速使用時は $X=0.97, Z'=0.37m^{-0.5}$ 、底面流速使用時は $X=1.06, Z'=0.60m^{-0.5}$ である。

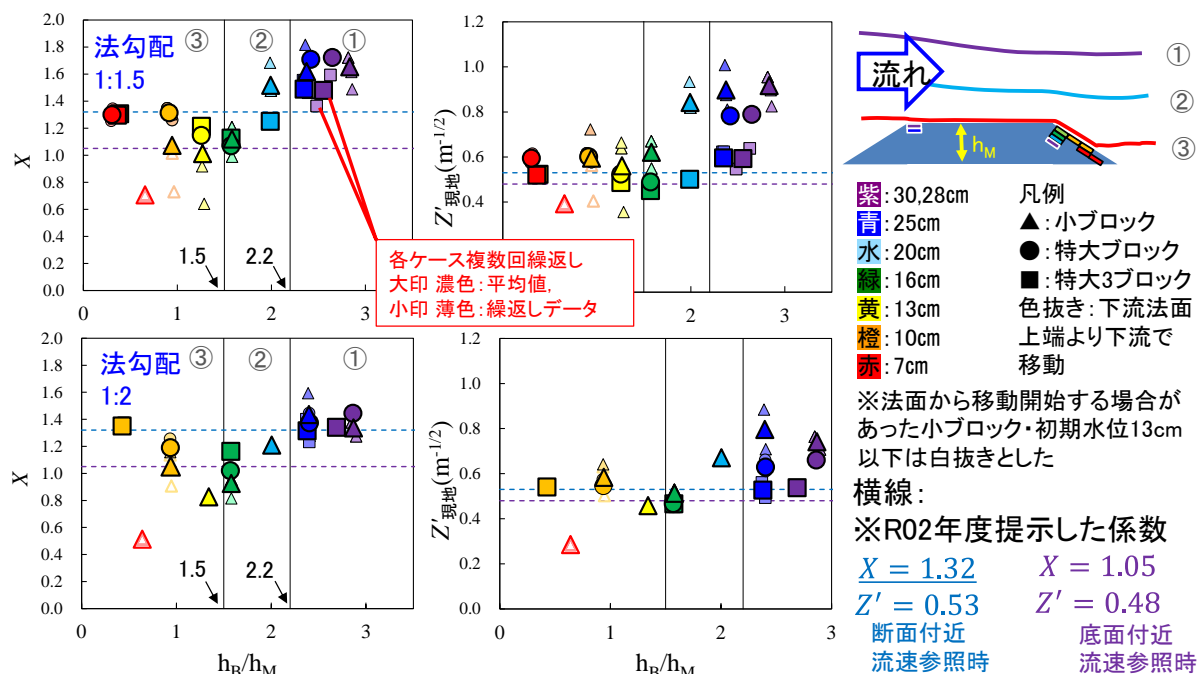


図 5-3-2 水位変化による算定式中の係数と背後水位の関係 (下流法肩)

表 5-3- 2 算定式中の係数 X の一覧（特大・特大3ブロック）

法勾配0（上流側法肩部分）：
移動しない

算定式	参照流速	γ=0.5（ブロック側面中央を回転軸と仮定）													
		↓特大						↓特大3							
	初期水位	7	10	13	16	20	25	30	7	10	13	16	20	25	28
流速6乗式 X	断面平均	×	×	×	×	—	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	底面付近	×	×	×	×	—	×	×	×	×	×	×	×	×	×

法勾配1.5 (θ=34)

算定式	参照流速	γ=0.5（ブロック側面中央を回転軸と仮定）													
			初期水位	7	10	13	16	20	25	30	7	10	13	16	20
流速6乗式 X	断面平均	1.3	1.31	1.15	1.07	—	1.71	1.72	1.3	1.31	1.21	1.13	1.25	1.49	1.48
	底面付近	1.3	1.31	1.19	1.09	—	1.43	1.65	1.3	1.31	1.27	1.19	1.26	1.5	1.46

法勾配2.0 (θ=27)

算定式	参照流速	γ=0.5（ブロック側面中央を回転軸と仮定）													
			初期水位	7	10	13	16	20	25	30	7	10	13	16	20
流速6乗式 X	断面平均	—	1.19	—	1.02	—	—	1.44	—	1.35	—	1.16	—	—	1.34
	底面付近	—	1.19	—	1.07	—	—	1.31	—	1.35	—	1.23	—	—	1.32

×：移動無し、—：実験なし

表 5-3- 3 算定式中の係数 Z' の一覧（特小・小ブロック）

■係数Z'；各ブロックサイズ・水位・勾配に対して繰り返したケース中の平均値を取得（比重2.3、方塊型のみ）
→提案式適用範囲内で最低値となる初期水位16cmでの平均値を取得：0.55(0.45-0.72)。

法勾配0（上流側法肩部分）：移動は高水位のみ 水位・縮尺変化 0.55(0.51-0.61)

算定式	参照流速	γ=0.5（ブロック側面中央を回転軸と仮定）													
		特小						↓縮尺1/60							
	初期水位 cm	25	7	10	13	16	20	25	30	10	16	20	25	10	16
流速3乗式 Z'	断面平均	0.61	×	×	×	×	0.53	0.58	0.51	×	×	×	0.52	×	×
	底面付近	0.61	×	×	×	×	0.64	0.71	0.62	×	×	×	0.41	×	×

法勾配1.5 (θ=34)

算定式	参照流速	γ=0.5（ブロック側面中央を回転軸と仮定）													
			初期水位 cm	7	10	13	16	20	25	30	10	16	20	25	10
流速3乗式 Z'	断面平均	0.39	0.59	0.56	0.62	0.84	0.97	0.92	0.63	0.72	0.9	×	0.64	0.66	
	底面付近	0.39	0.59	0.56	0.62	0.80	0.93	0.78	0.63	0.72	0.85	×	0.64	0.62	

法勾配2.0 (θ=27)

算定式	参照流速	γ=0.5（ブロック側面中央を回転軸と仮定）													
			初期水位 cm	7	10	13	16	20	25	30	10	16	20	25	10
流速3乗式 Z'	断面平均	0.29	0.58	0.46	0.51	0.67	0.88	0.74	—	—	—	—	—	—	
	底面付近	0.29	0.58	0.49	0.51	0.63	0.79	0.58	—	—	—	—	—	—	

×：移動無し、—：実験対象外

表 5-3- 4 算定式中の係数 Z' の一覧（特大・特大 3 ブロック）

法勾配0（上流側法肩部分）：

移動しない

↓特大

↓特大3

算定式	参照流速	$\gamma=0.5$ （ブロック側面中央を回転軸と仮定）													
	初期水位	7	10	13	16	20	25	30	7	10	13	16	20	25	28
流速6乗式 Z'	断面平均	×	×	×	×	—	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	底面付近	×	×	×	×	—	×	×	×	×	×	×	×	×	×

法勾配1.5（ $\theta=34$ ）

算定式	参照流速	$\gamma=0.5$ （ブロック側面中央を回転軸と仮定）													
	初期水位	7	10	13	16	20	25	30	7	10	13	16	20	25	28
流速6乗式 Z'	断面平均	0.59	0.60	0.52	0.49	—	0.78	0.79	0.52	0.52	0.49	0.45	0.50	0.60	0.64
	底面付近	0.59	0.60	0.54	0.50	—	0.65	0.76	0.52	0.52	0.51	0.48	0.51	0.60	0.63

法勾配2.0（ $\theta=27$ ）

×：移動無し、—：実験なし

算定式	参照流速	$\gamma=0.5$ （ブロック側面中央を回転軸と仮定）													
	初期水位	7	10	13	16	20	25	30	7	10	13	16	20	25	28
流速6乗式 Z'	断面平均	—	0.54	—	0.47	—	—	0.66	—	0.54	—	0.47	—	—	0.54
	底面付近	—	0.54	—	0.49	—	—	0.60	—	0.54	—	0.49	—	—	0.53

×：移動無し、—：実験対象外

これらの数値を用いて安定限界質量の算定値と実験値の比較を、下流法肩については図 5-3- 4 に示し、上流法肩については今年度の結果に加えブロックの移動がみられた同形状、同比重の過年度のブロックを図 5-3- 5 にプロットした。

断面平均流速及び底面付近流速のいずれを用いた場合においても流速 6 乗式が実験値とのまとまりが良いことが見て取れる。流速 3 乗式は高流速側で実験値を過小評価する傾向がみられた。

これまでの検討結果を踏まえ表 5-3- 5 に現行式を含めた各提案式の性能を示す。

現象的には流速の 6 乗、3 乗に起因する作用流体力が被覆ブロックの安定性に寄与しており、実験結果からは双方の流体现象が混在しているものの、これまでの検討結果から、多くの実験ケースで 6 乗式の優位性を支持する結果が得られた。また、表 5-3- 6 に 6 乗式による現行式に対する質量低減効果を示す。

提案式（6 乗式）による質量算定結果は、現行式（CERC）に比べいずれも 60%以下と大幅に減少し、特に急勾配での軽減効果が顕著であった。係数変更に加え、回転軸の仮定を球形から方塊型に修正したことが要因となっている。一方、有孔型ではさらに小さな所要質量が見積もられ、形状を工夫することでより小さな所要質量とすることが可能となると期待される。

さらに、過年度の実験結果及び現地での被災事例（加藤ら 2019）との比較を図 5-3- 6 及び図 5-3- 7 に示す。

過年度の実験値との比較では、提案する新 6 乗式はおおむね安全側の値となっており、過年度の実験ケースを包括する提案式となっていることが確認できる。

現地被災事例との比較では、新 6 乗式は安全側の値となっていることが確認できた。

初期水位 赤:7cm 橙:10cm 黄:13cm 緑:16cm 水:20cm
 青:25cm 紫:30,28cm
 ブロック種: ■:特大3 ●:特大 ▲:小 ◆:特小
 白抜き: 法面中央以下での移動,大印:平均値

— イスパッシュ式($\gamma=1.08, CERC$)
 — 流速6乗式
 — 流速3乗式

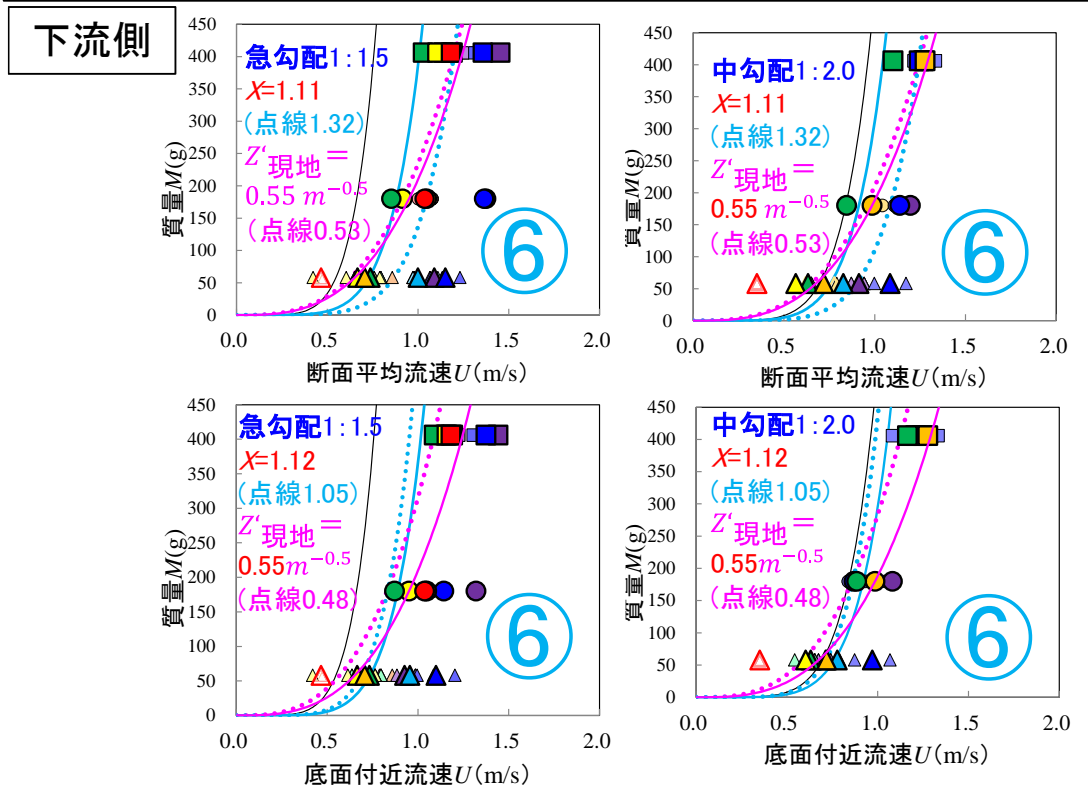


図 5-3- 4 安定限界質量の算定値と実験値の関係 (下流法肩)

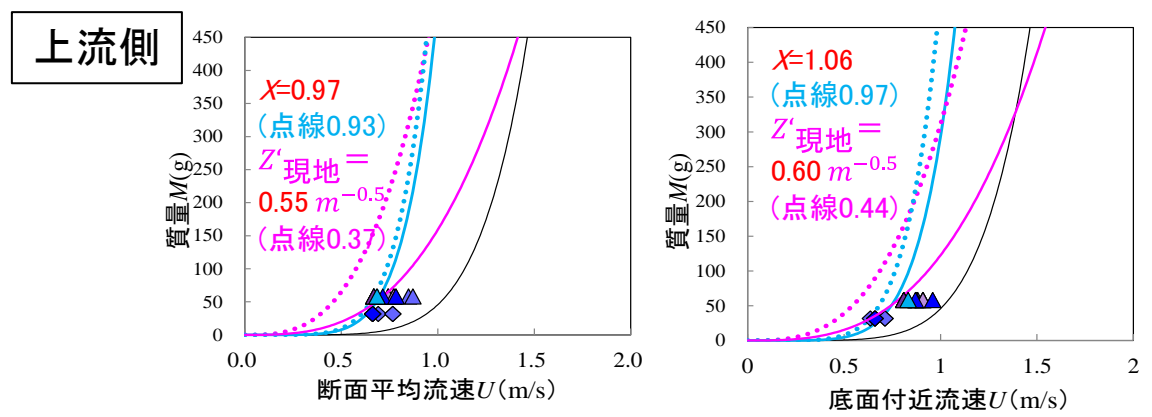


図 5-3- 5 安定限界質量の算定値と実験値の関係 (上流法肩)

表 5-3- 5 所要質量算定式の特性比較

R2年度に示された検討・留意点等に関する知見を以下のように更新する(更新箇所:黄色□部分)

式の種類	特徴・メリット (R2年度時)	注意点・課題他 (R2年度時)
イスバッシュ(CERC)式 係数 $\gamma=1.08$ 現行式	<ul style="list-style-type: none"> • 現行の設計参考図書や港湾基準に記載 	<ul style="list-style-type: none"> • ×流速値が大きい場合に実験結果を著しく過大評価
提案式① (新流速6乗式) $M = \frac{\alpha\beta\rho_B U^6}{g^3(S_B - 1)^3 X^6 (\cos\theta)^3}$ 下流側: $X = 1.32$ (高水位) $X = 1.11$ (中水位) 上流側: $X = 0.97$	<ul style="list-style-type: none"> • ◎高流速条件での実験結果に現行手法と比べてより適切に対応(過大評価の問題を軽減) • ◎離脱メカニズム(揚力の影響)を考慮して式を導出 • ○質量一限界流速の関係について、実務で参照する断面平均流速の5-6乗に比例する実験結果と対応 • ○係数が無次元 	<ul style="list-style-type: none"> • ✓実験結果での底面流速の3-4乗則の結果と合致しない ↓以下、6乗式・3乗式共通 • ✓流体力の作用長さの変動に係る検証 ↑ 断面平均・底面流速双方で、作用長さ<i>l</i>がブロック径に比例する(6乗式の仮定を支持)傾向の結果 • ✓水位条件:約20m(現地量)←漁港での活用を考えたとき比較的高水位 ↑ 低水位条件での係数変更・適用外事例あり • ✓現地スケール(異なる縮尺)での式の適用性を予想困難 ↓ 縮尺に比例して流体力長さ変化
提案式② (新流速3乗式) $M = \frac{\alpha\beta\rho_B U^3}{g^{3/2}(S_B - 1)^{3/2}(Z/\sqrt{l})^3 (\cos\theta)^{3/2}}$ $Z' = \frac{Z}{\sqrt{l}}$ 下流側: $Z'_{\text{現地}} = 0.53 \text{ m}^{0.5}$ 上流側: $Z'_{\text{現地}} = 0.37 \text{ m}^{0.5}$	<ul style="list-style-type: none"> • ◎高流速条件での実験結果に現行手法と比べてより適切に対応 • ◎離脱メカニズム(揚力の影響)を考慮して式を導出 • △質量一限界流速の関係について、現象理解に一層直接的に影響する底面流速の3-4乗に比例する実験結果と対応 ↑ 断面平均・底面流速双方で、作用長さ<i>l</i>がブロック径に比例 	<ul style="list-style-type: none"> • △実験結果での鉛直平均流速の5-6乗則の結果と合致しない マウンドサイズ由来の顕著な影響を殆ど確認できず • △係数が有次元 • △断面平均流速→底面付近流速の変換式構築が必要(流況によって底面・断面平均流速比が変化したため) ↓ 情報取得の困難さや水位条件に応じた流況変化から変換式構築が困難と判断

表 5-3- 6 新6乗式による質量軽減効果

	U 4 m/s $\theta 34^\circ$ (1:1.5)	U 4 m/s $\theta 27^\circ$ (1:2)	U 8 m/s $\theta 34^\circ$	U 8 m/s $\theta 27^\circ$	U 12 m/s $\theta 34^\circ$	U 12 m/s $\theta 27^\circ$
CERC式 係数 $\gamma=1.08$ 比重2.3	10.4t	2.5 t	664.5t	158 t	7,557 t	1,803 t
提案式 (6乗式) 係数 $X=1.11$ および 方塊型: 比重2.3 (中水位)	1.8t (17%)	1.4t (58%)	113.2t (17%)	91.1t (58%)	1,289t (17%)	1,038t (58%)
	● 16cm, 92トン, 7.2m/s		■ 16cm, 200トン, 9-11.7m/s			
提案式 (6乗式) 係数 $X=1.32$ および 方塊型: 比重2.3 (高水位)	0.66t (6%)	0.53t (21%)	42.2t (6%)	34.0t (21%)	481.1t (6%)	387.3t (21%)
			● 25cm, 92トン, 11.7m/s			
			■ 25cm, 200トン, 11.7m/s			
提案式 (6乗式) 注 係数 $X=1.38$, 有孔型 (中水位)	0.51t (5%)	0.41t (16%)	32.3t (5%)	26.0t (16%)	368.5t (5%)	296.6t (16%)

※()内は、現行方法(CERC・ $\gamma=1.08$)に対する割合

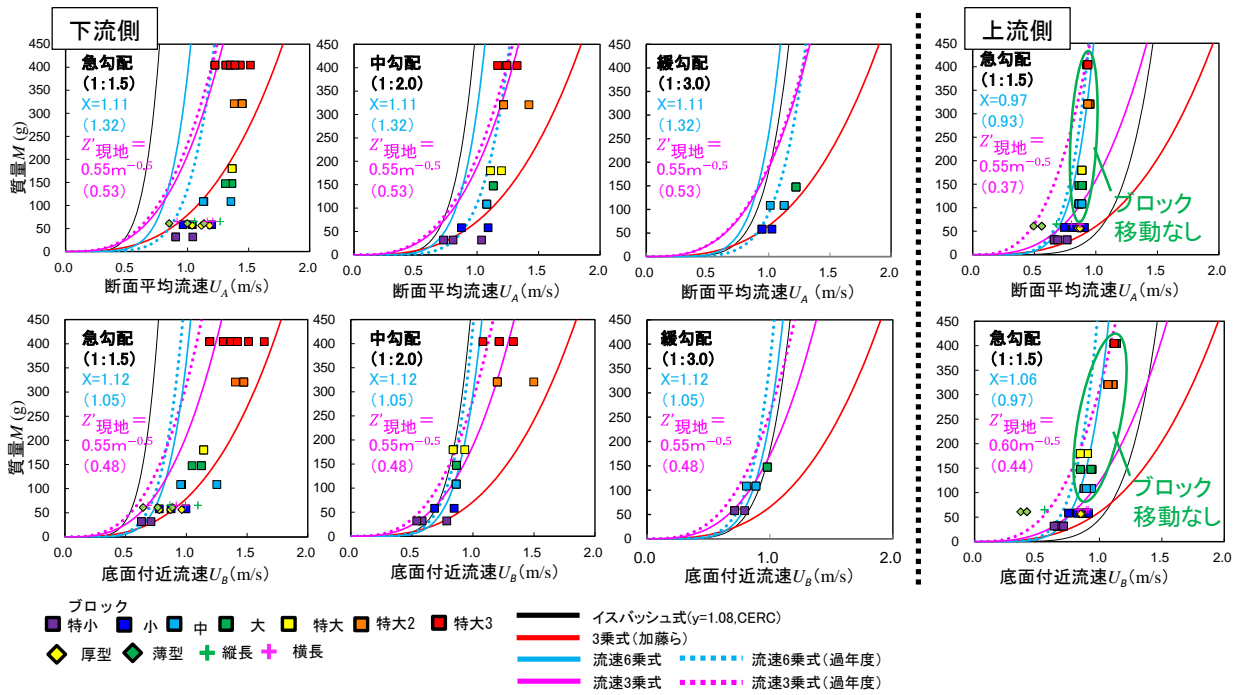


図 5-3- 6 過年度の実験値と新 6 乗式による算定値の比較

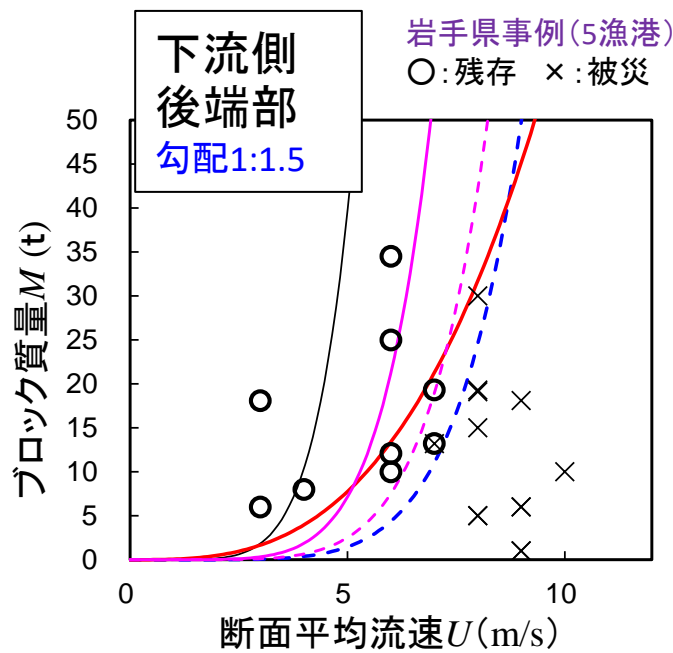
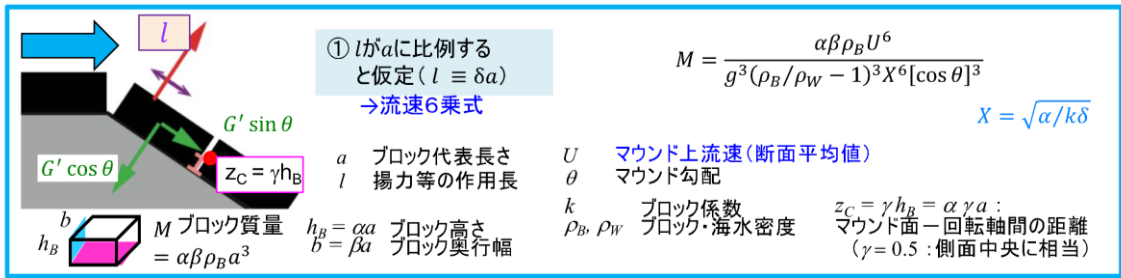


図 5-3- 7 現地被災事例と提案式の所要質量との安定性の比較

a-2) 新算定式の適用範囲(案)及び改訂の方向性(案)

以上の検討を踏まえ、以下のように式の活用方針を提案する。



方塊型を対象とした
適用係数・適用範囲

- X=1.32 ($h_B/h_M > 2.2$)
 - X=1.11 ($2.2 > h_B/h_M > 1.5$)
 - 適用不可 ($h_B/h_M < 1.5$)
- h_B : マウンド下流側の背後水位
 h_M : マウンドの高さ

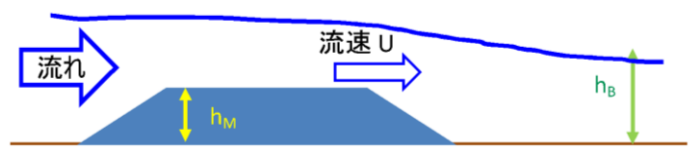


図 5-3- 8 新算定式の適用範囲 (案)

- ✓ この式の適用においては、設計対象領域での流速・流向・水位の時空間分布情報が必要(現行式は流速情報のみ使用)である。
- ✓ 適用係数・適用範囲は方塊型を対象としており、ブロックの形状の工夫によって安定性がさらに向上(Xが増加)することが期待される。
- ✓ ブロックメーカーは、水理模型実験によって、係数(X)と適用可能な水深範囲等を定めることができる。
- ✓ 係数等の決定には、断面実験等の利用が想定される。ただし、方塊型形状について、所要質量の算定値より大きな質量のブロックがマウンドの上流側から移動開始する可能性があることが確認されている。そのため、各々のブロック形状について、算定式が想定するマウンドの下流側からブロックが離脱開始することを確認して係数等を提示するものとする。

さらに、本検討結果に基づく改訂の方向性（案）を以下に示す。なお、第2回検討委員会での指摘された、実務での適用性やブロックメーカー等が別形状を対象に係数・適用範囲を提示に際しての留意点等を踏まえ改訂案を提示することが、今後の課題と位置付けられる。

● 被覆ブロック(方塊型ブロック)を対象とした所要質量算定

新6乗式 $M = \frac{\alpha\beta\rho_B U^6}{g^3(\rho_B/\rho_W - 1)^3 X^6 (\cos\theta)^3}$ X: 新6乗式の係数 ■ 流速・流向・水位情報が必要

※係数・適用条件
 $X=1.32 (h_B/h_M > 2.2)$
 $X=1.11 (2.2 > h_B/h_M > 1.5)$
適用不可 ($h_B/h_M < 1.5$)
 h_B : マウンド下流側の背後水位 h_M : マウンドの高さ

※適用範囲外条件での所要質量算定については、水理模型実験による検証を推奨

● 被覆ブロック(ブロックメーカー等が提示する別形状)を対象とした所要質量算定

水理模型実験によって、係数や適用可能範囲等を定めることができる

✓ 係数等の決定には、断面実験結果等の利用が想定される。方解型形状については、所要質量の算定値より大きな質量のブロックがマウンドの上流側から移動開始する場合があることが確認されていた。新6乗式はマウンド下流側法肩から移動開始することを仮定しているため、対象とする各々の形状のブロックが、実験において下流側から離脱開始する特徴を有することを確認して、係数等を提示するものとする。

● 被覆石等を対象とした所要質量算定

CERC式 $M = \frac{\pi\rho_B U^6}{48g^3 y^6 (\rho_B/\rho_W - 1)^3 (\cos\theta - \sin\theta)^3}$ y: イスパッシュ式の係数 ■ 流速情報が必要

※ 記載すべき係数値や対象形状の表記等、取り扱いの詳細は今後の課題

M: 安定質量(t) g: 重力加速度(m/s²) U: ブロック上流速(断面平均値) π: 円周率
 U: 水の流れの速度(m/s) ρ_B, ρ_W: ブロック・海水密度 θ: マウンド勾配

図 5-3- 9 改訂の方向性（案）

(4) 検討委員会の実施

本業務の実施にあたっては、専門分野の知見を有する学識経験者を委員とする技術検討委員会を設け、2回実施し、指導・助言を得ながら業務のとりまとめを行った。

第1回技術検討部会

日時：令和3年8月5日(木)14:00～16:30

場所：エッサム神田ホール1号館 701

(ウェブ会議システムを併用)

主な議事内容

- ・検討計画の妥当性、留意点について

第2回技術検討部会

日時：令和4年3月7日(月)15:30～17:30

場所：エッサム神田ホール1号館 701

(ウェブ会議システムを併用)

主な議事内容

- ・津波の流れの作用に対するブロック等の安定質量算定式の提案について

成果取りまとめに向けて、第2回技術検討委員会で得られた主な意見とそれらへの対応あるいは方針案は以下の通りである。

・津波の流れの作用に対するブロック等の安定質量算定式の提案について

(意見) 極低水位で小さいブロックだけ被災しているのは何故か。また、小さいブロックのみ被災する点をガイドラインか何かに盛り込めないか。

(方針案) 極低水位では法面での透水等の影響が顕著であるが、ブロック質量が大きくなると安定限界流速(流量)が増し、流体力計測や数値計算によれば透水に由来する外力が卓越しなくなって、法面中央での移動がなくなったと考えている。このようにして、極低水位では小さいブロックだけが法面から被災する結果となったと解釈している。小さいブロックでのみ被災する状態について水理条件を整理することでうまく分離できないか検討したが、現時点では困難と判断している。

(意見) マウンド背後の水位(h_B)の求め方、考え方はどういうものか。跳水後の安定した地点の水位を取ってしまっても良いのか。また、実務ではどのように取り扱うのか。

(方針案) 実験ではマウンド背後の変動の少ない安定した地点の水位を取った。大きな水位差が生じて跳水が発生する条件が限られており、多くの場合背後水位とマウンド直背後の水位差が小さい傾向にあった。また、実務では、最大流速時の流向からマウンドの背後方向を定め、どのくらい離れた地点かはまだ明確ではないが、その方向上の水位を使うことを考えている。

(意見) 中水位では式の適用は問題ないということか。

(方針案) 中水位条件への式の適用については、ブロックの被災メカニズムが高水位と同様と考えられることから、問題ないと考えている。

(意見) 確認だが、今はp41の条件(本報告書の図5-3-8、図5-3-9に記載の水深範囲)で適用範囲を決めているということか。

(方針案) ご指摘の通りである。ただし、各メーカーブロックの形状で適用可能となるマウンド背後水位—マウンド高さ比(h_B/h_M)の数値も変わってくるであろうと考えている。

(意見) h_B/h_M が1.5というのも大きいような気がする。適用できないケースが多くなると困るのではないか。1.5より閾値が限りなく低い値をブロックメーカーが出しても良いのか。

(方針案) 実験結果に基づき、安全側の考えで1.5という数値を決めた。

(意見) 背後水位が不連続、2段階となっている。

(方針案) 原理的には、 X の適用範囲を何段階にも分けても良いし、連続的にしても良いと考えている。

(意見) 現状の1.5は安全側として出しているし、この実験自体が難しいものにな

ってきているので、メーカー等で係数や適用範囲を定めるための実験を適切に実施できるか、管理というか技術的な担保があったほうが良い。

(方針案) 改訂案においては、メーカー等との意見交換も踏まえて、最終的に適用範囲を定めていくことが良いと考えられる。

(意見) 作用長さがブロック長さに依存したという結果があるが、逆算で求めているので、全体的にみると6乗式の方がより合致したということか。

(方針案) ご指摘の通りである。

(意見) 法肩の揚力と、中腹の揚力が混在するケースもあるだろう。将来的にその2つを分けて求められると良い。

(方針案) 例えば初期水位10cmの実験結果では、法肩から離脱開始するケースと法面から離脱開始するケースとが混在した。これらのメカニズムの違いの理解や適用範囲の設定方法の高度化は将来的な課題として位置づけさせていただきたい。

(意見) 実務で非線形長波モデルの計算結果を用いる際、最大流速値を使うという話であったが、どういった値を使うということをガイドライン(設計参考図書)に記載するのか。考えている方法で算定ができるか、確認する方がよい。

(方針案) 今後の調査における重要な検討事項として位置づけさせていただきたい。

(意見) 岩手県の事例において、被災したものとあまり外れてないという結果を示されていた。そういった確認も必要と考えている。

(方針案) 被災したケースと比較して、危険な評価にはなっていないということは確認済みである。

(意見) 算定式に用いる係数(X等)の実験結果からの推定について、法勾配による依存性も見える。やはり水面勾配が効いているのではないか。

(方針案) 法勾配や水面勾配は、本来重要な検討事項と考えられるが、本調査では法勾配は主に2種類のみ検討しており、非線形長波モデルによる計算での水面勾配の再現性能がどの程度であるか定かではない。このため、ご指摘の重要性を踏まえつつも、将来的な課題と位置づけさせていただきたい。

VI. まとめと今後の課題

本調査では、「Ⅲ. ねらい」で記した課題 1)～5) に対応するべく、水理模型実験と数値計算を実施し、津波等の強い流れに対する被覆ブロック等の合理的な安定質量算定式とその適用条件や範囲を検討、提案した。主な成果と今後に残された課題は以下の通りである。

(1) 主な成果

【流速 6 乗式/ 流速 3 乗式の使い分け】

- ・多様な水位条件の実験結果を追加して検討したところ、断面平均、底面付近流速のいずれを参照した場合もブロック径が大きくなるにつれて流体力長さ (kl 値) の推定値が増加し、新 6 乗式の仮定を支持する結果が総じて多い結果となった。

【異なる初期水位条件への算定式の適用性】

- ・初期水位が低下するにつれて、ブロック離脱開始位置が、上流側法肩から下流法肩、下流法面へと変化した。
- ・小ブロックかつ低背後水位 (例: $h_B/h_M < 1 \sim 1.5$; h_B は背後水位, h_M はマウンド高) 条件で、式的前提とする離脱メカニズムが大幅に変化 (法肩以外の場所から離脱開始) し、この水位条件に対する式の適用は不可であると考えられた。
- ・中背後水位 ($h_B/h_M : 1.5 \sim 2.2$) では係数を R03 年度から変更する必要性が確認された。

【実験縮尺の影響把握】

- ・縮尺を変更しても、同様の実験結果であった。
- ・マウンドサイズ自体の変更による顕著な影響が確認されず、3 乗式の仮定の一つが支持されない結果が得られた。

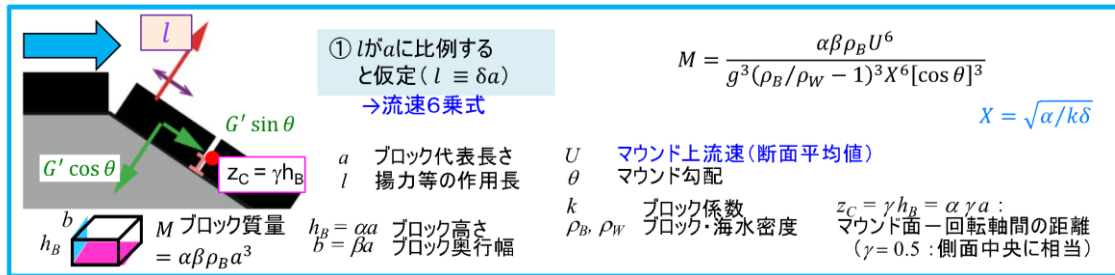
【異なるブロック形状への算定式の適用性】

- ・揚力の影響を軽減しやすく安定性が増す有孔型ブロックを用いたところ (注: ケース数限定)、有孔型ブロックの所要質量評価に対しても新 6 乗式を適用可能であることを確認した。

【断面平均流速 (U_A) - 底面近傍流速 (U_B) 間の関係性】

- ・令和 2 年度までと同様に、フルード数が大きくなるにつれて、断面平均流速に対する底面近傍流速の比が大きくなる傾向がみられた。
- ・高背後水位 ($h_B/h_M > 2.2$) と比べて中背後水位条件で U_B/U_A の値が増大傾向にあったことから、 U_B/U_A 変換式の構築を困難と判断した。

以上の検討結果より、以下のように式の活用方針を提案した。



**方塊型を対象とした
適用係数・適用範囲**

- $X=1.32$ ($h_B/h_M > 2.2$)
 - $X=1.11$ ($2.2 > h_B/h_M > 1.5$)
 - 適用不可 ($h_B/h_M < 1.5$)
- h_B : マウンド下流側の背後水位
 h_M : マウンドの高さ

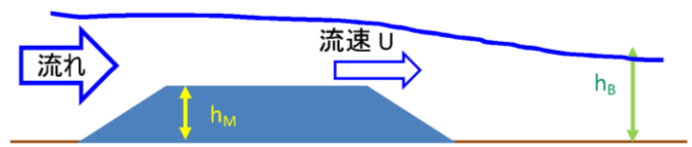


図 6- 1 新算定式の適用範囲 (案) (再掲)

- ✓ この式の適用においては、設計対象領域での流速・流向・水位の時空間分布情報が必要(現行式は流速情報のみ使用)である。
- ✓ 適用係数・適用範囲は方塊型を対象としており、ブロックの形状の工夫によって安定性がさらに向上(X が増加)することが期待される。
- ✓ ブロックメーカーは、水理模型実験によって、係数(X)と適用可能な水深範囲等を定めることができる。
- ✓ 係数等の決定には、断面実験等の利用が想定される。ただし、方塊型形状について、所要質量の算定値より大きな質量のブロックがマウンドの上流側から移動開始する可能性があることが確認されている。そのため、各々のブロック形状について、算定式が想定するマウンドの下流側からブロックが離脱開始することを確認して係数等を提示するものとする。

(2) 今後の課題

本年度内調査で対応できない残された検討項目の主なものとして、以下が挙げられる。

- ・これまでの検討は断面2次元の流れ条件下での検討が主であったため、堤頭部等での3次元条件下での式の適用性を検討する必要がある。
- ・令和2年度の非線形長波モデルの活用に係る検討では低水位条件の計算結果について、実験結果等との比較を未実施だったため、計算内容の妥当性やその活用方法を今後の低水位条件の実験結果と追加比較等することを通じて検討する必要がある。
- ・また、本調査では、初期水位変化等の実験結果を追加して検討した結果、安定質量算定式として、より多くのケースと合致したことを理由として「流速の6乗式」を提案した。しかし、現象が複雑なために明確な分離が困難だったものの、「流速の3乗式」の仮定が卓越すると示唆される実験結果も確認されていた。マウンド上ブロックに作用する津波流体力やその安定性評価方法の今後の高度化に向けて、3乗式において仮定された流体力長さがブロックの大きさに顕著には依存しない場合の力学の考察等も、将来的な課題として、併せて示す。