

越流時の透水性表面被覆工下に位置する 堤体の安定性に関する解析的検討

小林 薫¹・井上恵天²・○高橋和真^{2※}・辻 勲平³・根本嵩也⁴・松元和伸⁵

¹正会員 博（工）茨城大学大学院 理工学研究科 都市システム工学専攻

²非会員 東北大学 大学院工学研究科 土木工学専攻

³正会員 博（工）東北大学 大学院工学研究科 土木工学専攻

⁴非会員 修（工）茨城大学大学院 理工学研究科 都市システム工学専攻

⁵正会員 博（工）飛島建設株式会社 技術研究所 研究開発G

※ takahashi.kazuma.p8@dc.tohoku.ac.jp

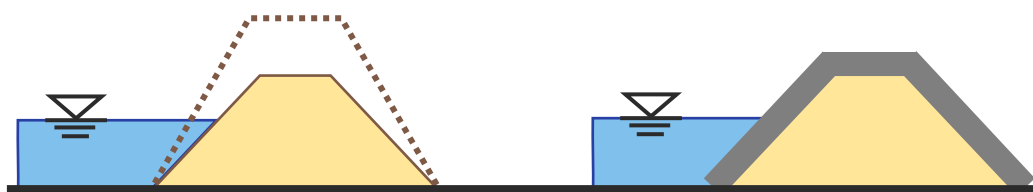
豪雨災害による堤防決壊の頻発化 e.g., 令和元年度台風19号

➤ 主要因

- ① 雨水浸透による堤防内の飽和度上昇→強度低下
- ② 越水→裏法面 & 裏法尻の侵食

➤ 対策

堤防の嵩上げ, アーマーレビー等



e.g., コンクリートブロック, 遮水シート

すべての河川でこれら対策を実施するのは**大変**



台風19号による千曲川の決壊※

求められている河川堤防

施工性, 経済性, 維持管理面, 環境面にも配慮した

「粘り強い河川堤防」

※千曲川堤防調査委員会報告書

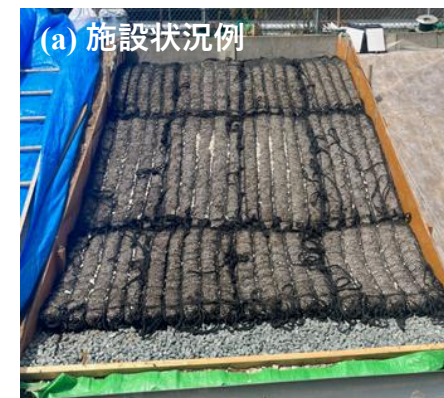
(<https://www.hrr.mlit.go.jp/river/chikumagawateibouchousa/chikuma-houkokusyo-issiki.pdf>)

提案：貝殻型透水性表面被覆工

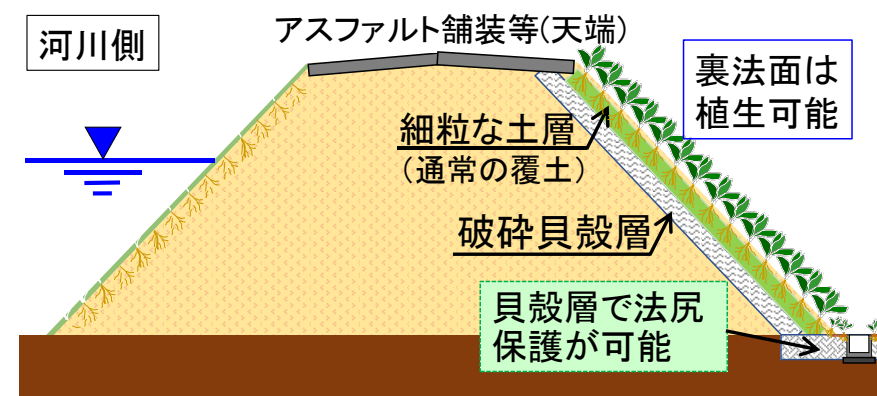
破碎貝殻をネットに詰め、堤防裏法面の浅層部に設置

特徴

- **軽量**（施工面，維持管理面）
コンクリートブロックと比較して軽量，設置・運搬コスト少
- **透水性の違いによる保水性**（透水性：通常の土層＜破碎貝殻層）
破碎貝殻上層を細粒な土で覆う→キャピラリーバリア機能
降雨浸透抑制機能＋越水時の裏法面侵食防止
- **自然由来の素材**（環境面への配慮）
大量に廃棄されるホタテの貝殻の再利用
ホタテ貝殻の野積み量の削減＋CO₂長期固定化



写真：貝殻型透水性表面被覆工の外観



図：貝殻型透水性表面被覆工による対越水CB堤防イメージ

粘り強い堤防

(国土交通省)

粘り強い河川堤防の開発目標

越流水深30cm, 越流時間3時間



表面被覆型堤防の越水に対する性能検証の技術公募

堤高2.00m を確保し, 法面上で越流流速を十分に加速

根本ら (2024 (河川技術論文集))

上記条件 + 越流流速3m/s超の越流水に対し

堤体裏法面の侵食防止・抑制効果を有することを実験的に明らかにした

ただし

貝殻型透水性表面被覆工下に位置する堤体の安定性に関する検証×

- 堤防裏法面における表面被覆工下に発生する可能性のある水みちの形成
- 高透水性の表面被覆工を用いることによる吸出し可能性

(本研究において用いる解析手法の特性上, パイピングの表現性能×)



写真:越流実験1)

本研究

粒子法SPHを用いた流体解析を通して、表面被覆工に対して
流れ場が与える影響を数値解析的に検討・評価

目的

実験による侵食防止・抑制効果の検証

実験設備を整えて行うことが困難な対照実験



数値解析に基づく検討

実規模大の実験施設や設備を用いた場合の
実験条件や実験ケースの絞り込みに活用

→計算力学的観点から評価

展望

本研究

表面被覆工に対して流れ場が与える影響を
数値解析的に検討

(解析手法の特性上、パイピングの表現×)



堤体内部の浸透や土砂移動を考慮した解析

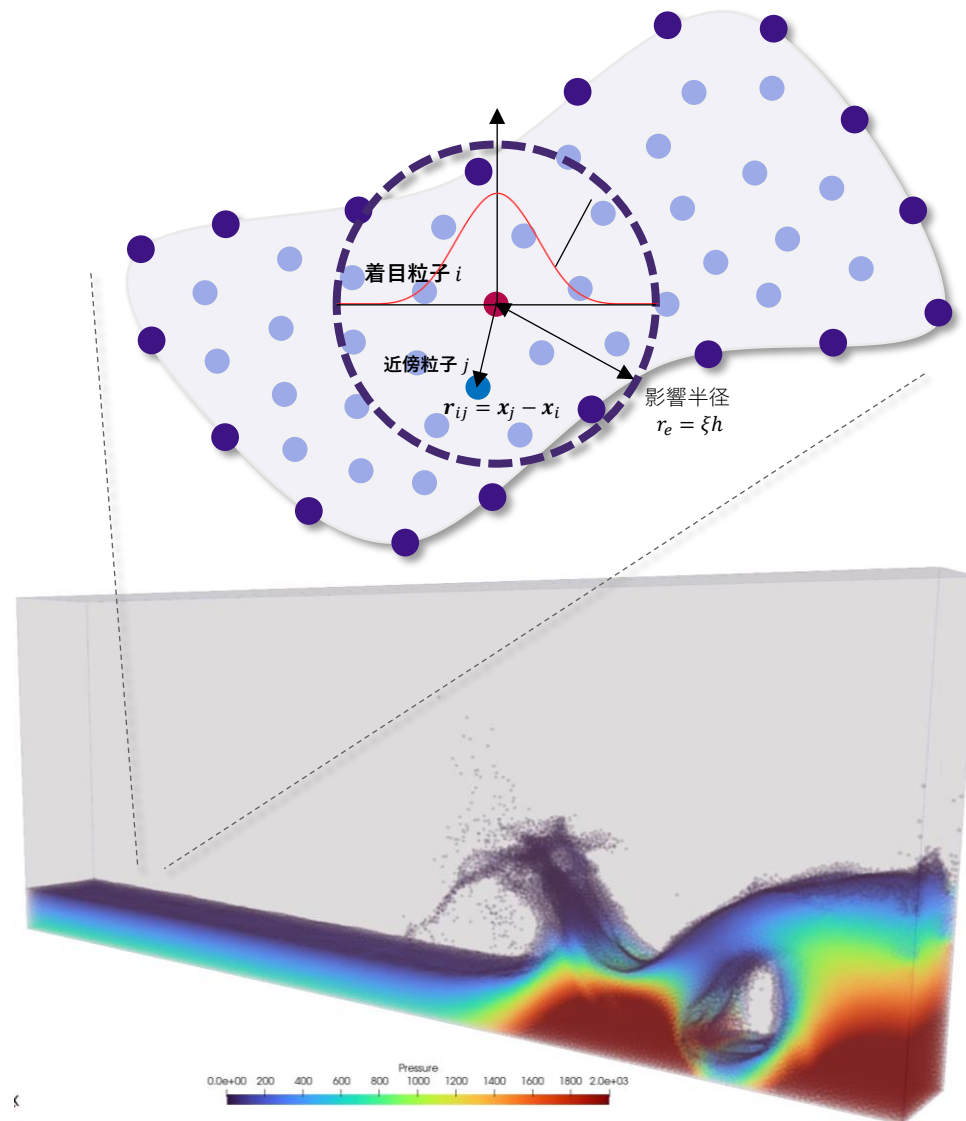


表面被覆工や堤体の移動を考慮した3次元解析

SPH : Smoothed Particle Hydrodynamics (Gingold and Monaghan, 1977 and Lucy, 1977)

- 連続体を粒子 (≠メッシュ) で離散化
- 複雑な水面形状・大変形問題に適する
- 影響域内の近傍粒子を用いて物理量を算出

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{物理量 :} & \langle \phi \rangle_i^{(0)} = \sum_{j \in \mathbb{S}^i} \frac{m^j}{\rho^j} \phi^j W^{ij} \\ \text{勾配 :} & \langle \nabla \phi \rangle_i^{(0)} = \sum_{j \in \mathbb{S}^i} \frac{m^j}{\rho^j} \phi^{ij} \nabla W^{ij} \\ \text{発散 :} & \langle \nabla \cdot \phi \rangle_i^{(0)} = \sum_{j \in \mathbb{S}^i} \frac{m^j}{\rho^j} \phi^{ij} \cdot \nabla W^{ij} \\ \text{Laplacian :} & \langle \nabla^2 \phi \rangle_i^{(0)} = 2 \sum_{j \in \mathbb{S}^i} \frac{m^j}{\rho^j} \frac{\mathbf{r}^{ij} \cdot \nabla W^{ij}}{|\mathbf{r}^{ij}|^2 + \eta_0^2} \phi^{ij} \end{array} \right.$$



越流の物理現象で考慮すべき点

① 堤体，被覆工内部を流れる浸透流

- 地表流 + 浸透流を同時に解析¹⁾

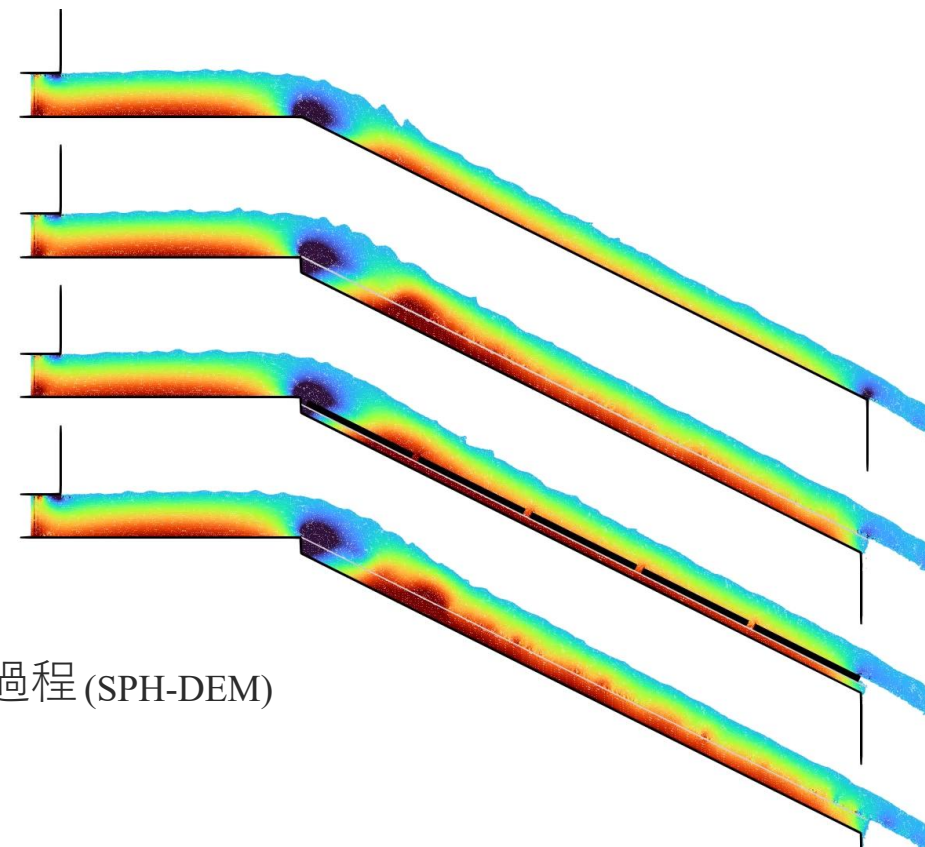
② 越水→裏法面 & 裏法尻の侵食

- 激しい自由表面変化を含む越水

+

展望

- 裏法面 & 裏法尻の侵食→運搬→堆積までの一連の過程 (SPH-DEM)



近年の粒子法

空間2次精度が理論的に保証：SPH(2)

+

計算安定化手法：PSTs（粒子再配列法）

（これまでの粒子法と比較して）

高精度かつ安定性の高い解析が可能に

¹⁾ Tsuji, K., Fujioka, S., Morikawa, D. and Asai, M.: A reliable SPH(2) formulation for Darcy–Forchheimer–Brinkman equation using a density-based particle shifting in the ALE description. *Comp. Part. Mech.*, pp. 1-29, 2024.

◆ 自由表面流れと浸透流の統一方程式：Darcy-Forchheimer-Brinkman型方程式

$$\frac{\partial \mathbf{v}_D}{\partial t} + (\mathbf{c} \cdot \nabla) \mathbf{v}_D = \frac{\varepsilon}{C_r(\varepsilon)} \left(-\frac{1}{\rho_f} \nabla p + \nu_E(\varepsilon) \nabla^2 \mathbf{v}_D + \boxed{\mathbf{f}_d(\mathbf{v}_D)} + \mathbf{g} \right)$$

- ・ 間隙率 ε
- ・ ダルシー流速 $\mathbf{v}_D$

$$\frac{D\rho_f}{Dt} + \rho_f \nabla \cdot \frac{\mathbf{v}_D}{\varepsilon} \xrightarrow{\frac{D\rho_f}{Dt}=0} \nabla \cdot \mathbf{v}_D = 0$$

透水係数 K の多孔質体を透過する際に受ける抗力

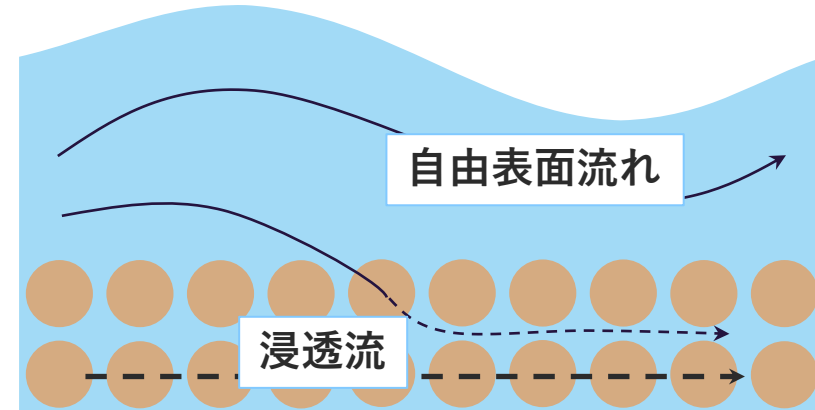
$$\mathbf{f}_d = -\frac{\|\mathbf{g}\|}{K} \mathbf{v}_D; \quad \mathbf{v}_D = \varepsilon \mathbf{v}_f$$

Navier-Stokes方程式

$$\frac{D\mathbf{v}_f}{Dt} = -\frac{1}{\rho_f} \nabla p + \nu_f \nabla^2 \mathbf{v}_f + \mathbf{g}$$

拡張Darcy則

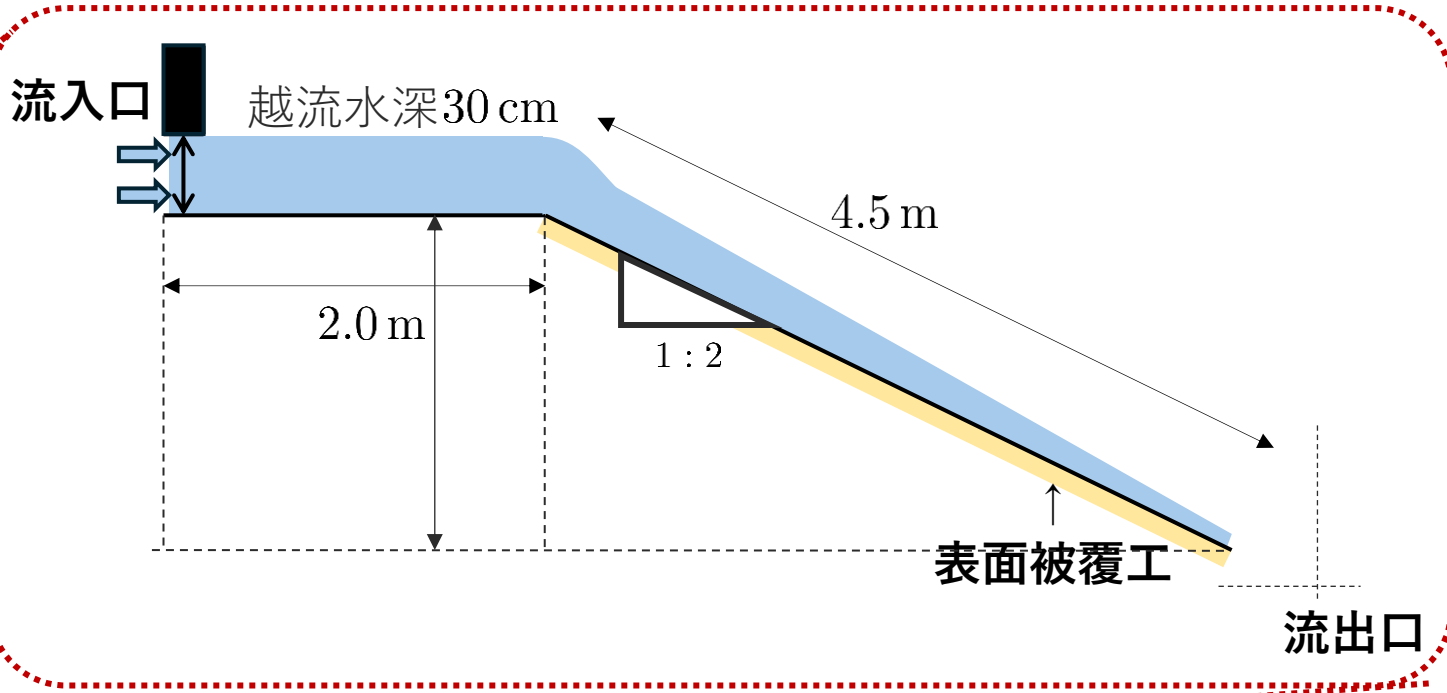
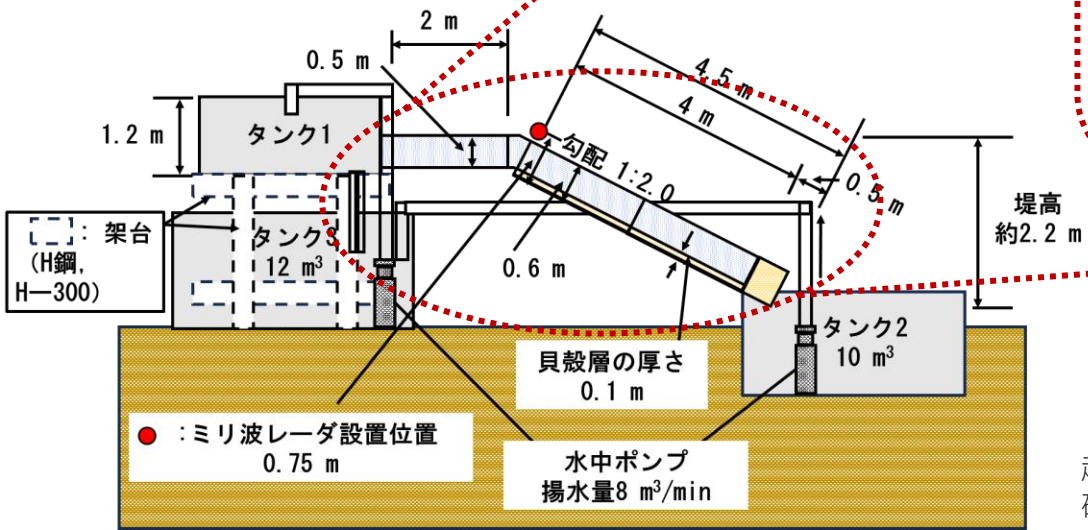
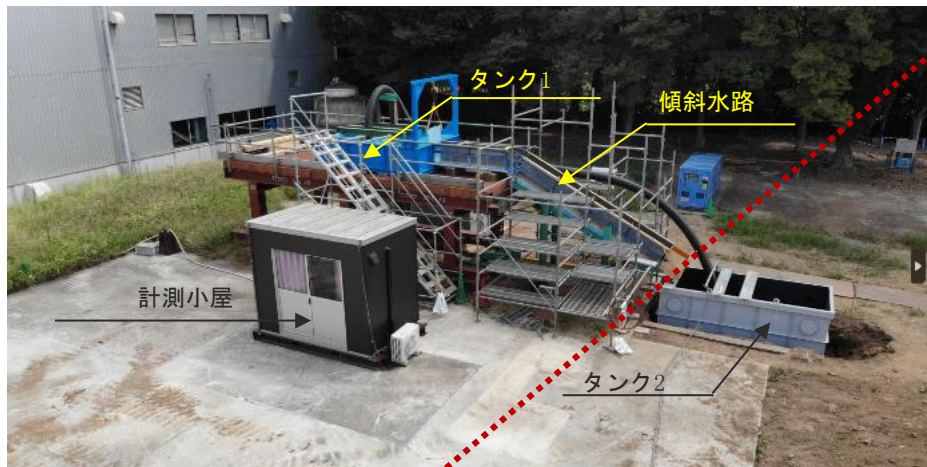
$$\frac{\mu_f}{K} \mathbf{v}_D + \frac{\rho_f C_F}{\sqrt{K}} |\mathbf{v}_D| \mathbf{v}_D = -\nabla p + \rho_f \mathbf{g}$$



自由表面流れと浸透流の遷移を**連続的に**解くことが可能



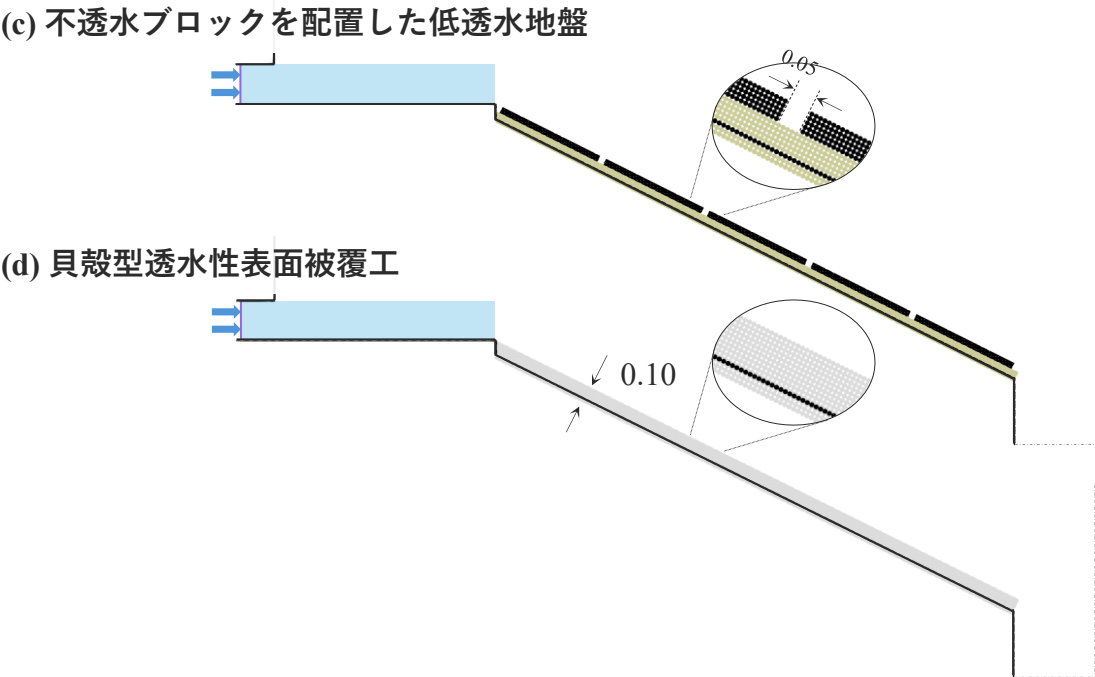
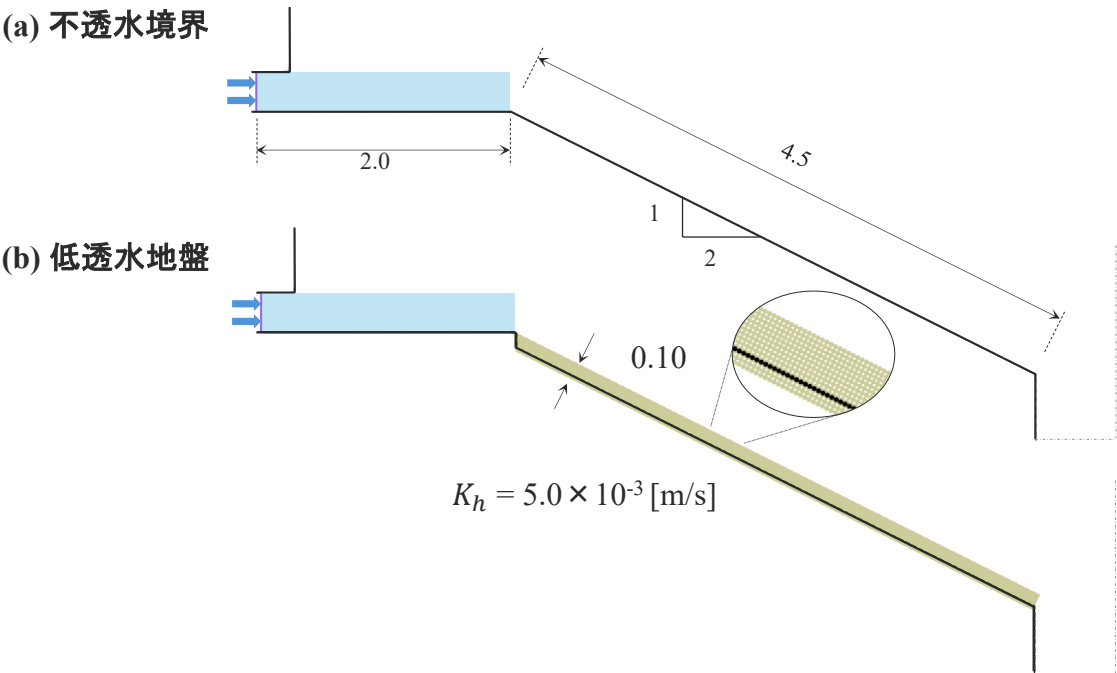
根本らによって実施された越流実験¹⁾を参考に解析モデルを作成



条件①：越流水深30cm, 越流時間3時間

条件②：堤高2.00m を確保し，法面上で越流流速を十分に加速（3m/s超）

越流実験1) 根本嵩也, 小林 薫, 松元和伸, 武田茂樹, 孫冉: 実規模堤防裏法面浅層部に敷設した
破砕貝殻層の越水時侵食抑制効果に関する実験的研究, 河川技術論文集, 第 30 巻, pp.179-184, 2024.



解析ケース

その他解析条件

- a. 不透水壁（堤体に浸透しない）
- b. 低透水性地盤（ $K = 5.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ）
- c. 不透水ブロックを配置した低透水性地盤
（法面上に隙間5.0 cmで5枚配置）
- d. 貝殻型透水性表面被覆工（ $K = 1.0 \times 10^{-1} \text{ m/s}$ ）

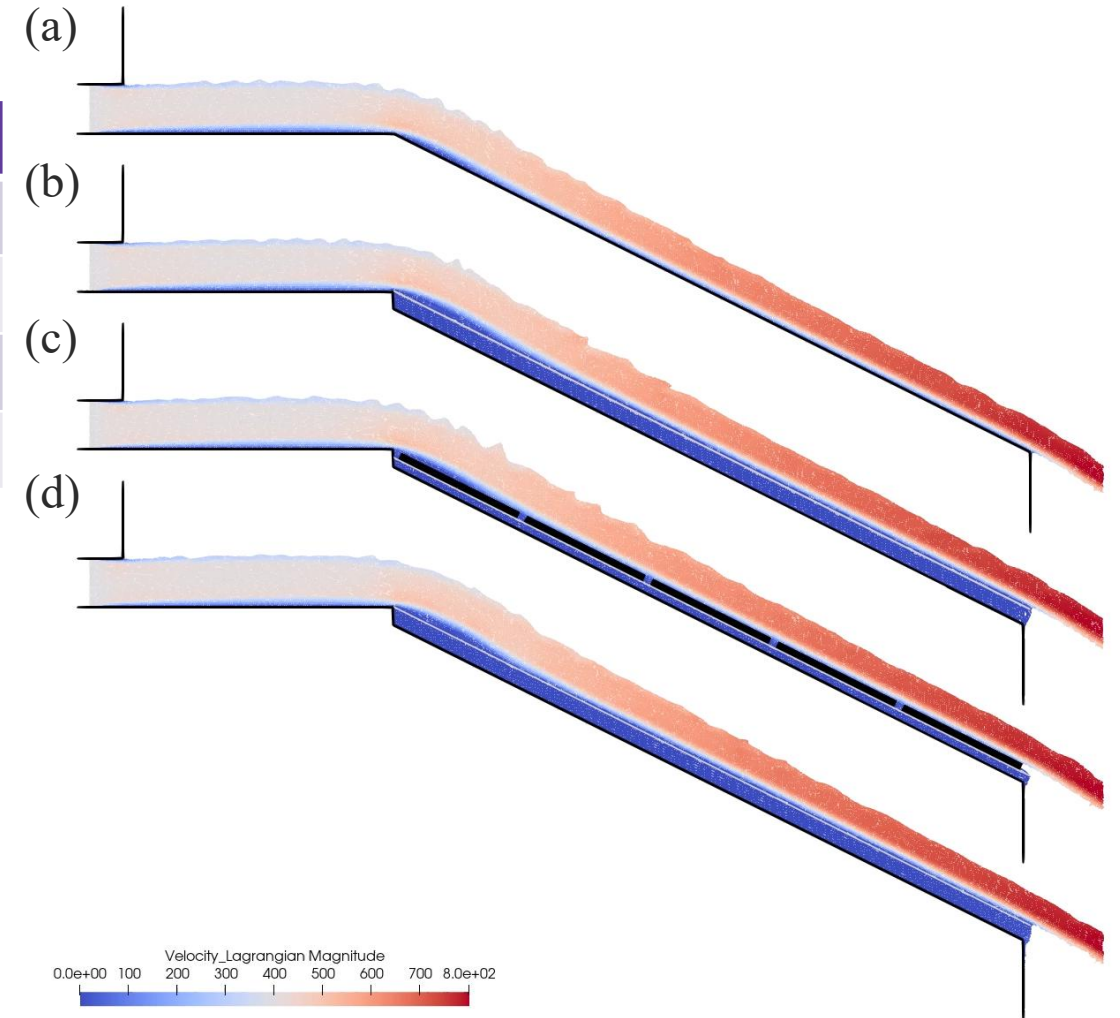
流体（SPHによる地表流・浸透流解析）			多孔質体（固定配置した固体粒子層で表現）		
密度	1.0	g/cm ³	間隙率	0.50	-
動粘性係数	0.010	cm ² /s	透水係数	(a)不透水壁境界	- m/s
初期粒子間隔	1.0	cm		(b)低透水性地盤	5.0×10^{-3} m/s
流入流速	4.0	m/s		(c)低透水性地盤 ＋不透水性ブロック	5.0×10^{-3} m/s
流入口の高さ	0.30	m		(d)貝殻型透水性 表面被覆工	1.0×10^{-1} m/s

越流実験1)との整合性

		越流実験1)	本解析結果
天端上法肩部	流速	5.0m/s超	4.0m/s超
	水深	約30cm	約30cm
法面流下後	流速	6.0~6.5m/s	6.0m/s超
	水深	—	約20cm

- 概ね実験と整合した結果
- ほぼ定常状態である

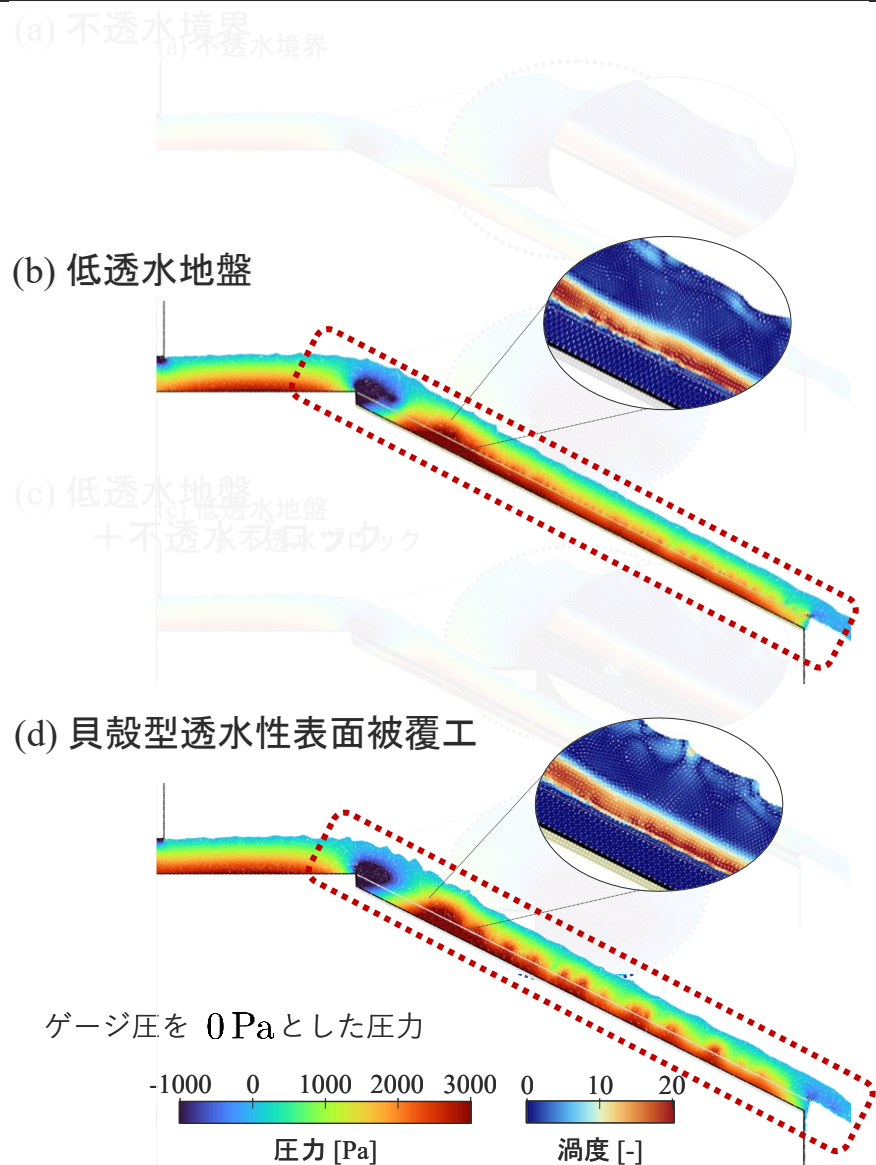
数値解析結果から表面被覆工に関する考察を行う



粒子法を用いた越流シミュレーション

得られた圧力場による表面被覆工への影響の検討

12



■ 天端端部において静水圧場より低い圧力場が形成

堤防の段差の影響

→ 細かな破碎貝殻の吸出しや、被覆工の剥離の可能性
詳細な3次元解析による検討が必要

■ 裏法面が透水性を有する(b),(d)のとき、裏法面上で圧力変動

多孔質体境界付近の渦に起因する圧力変動

→ 裏法面表面の侵食の可能性

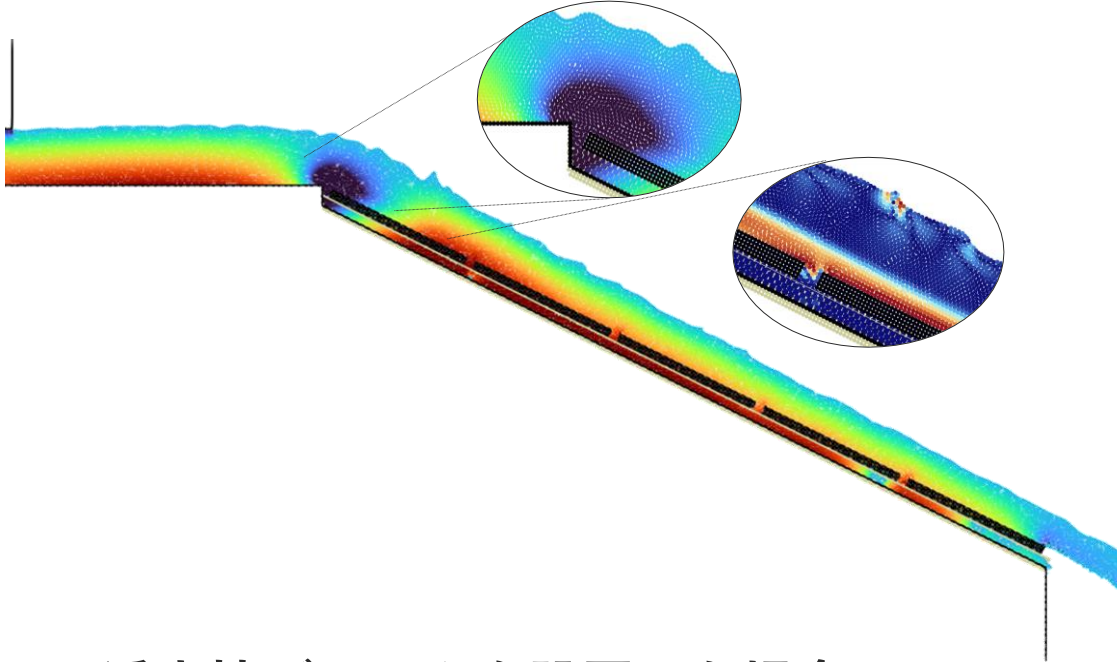
対策：シェルネットによる固定化→侵食防止・抑制効果

粒子法を用いた越流シミュレーション

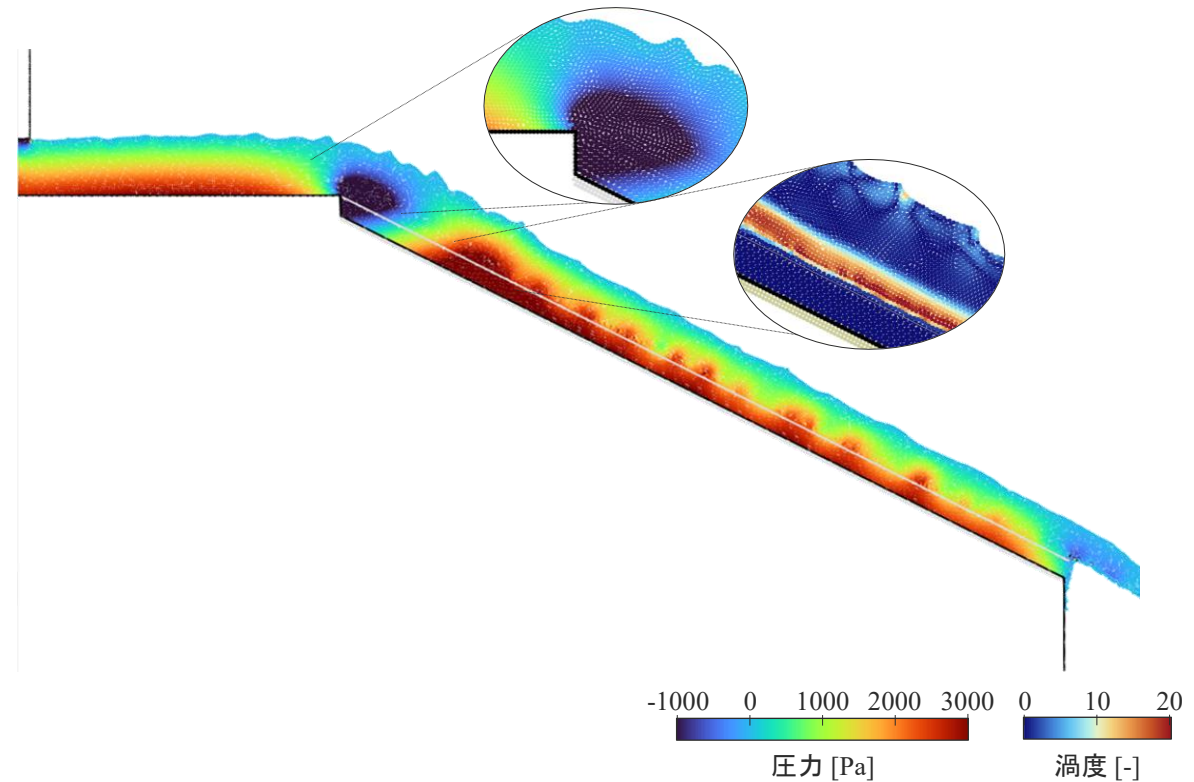
得られた圧力場による表面被覆工への影響の検討

13

(c) 低透水地盤＋不透水ブロック



(d) 貝殻型透水性表面被覆工



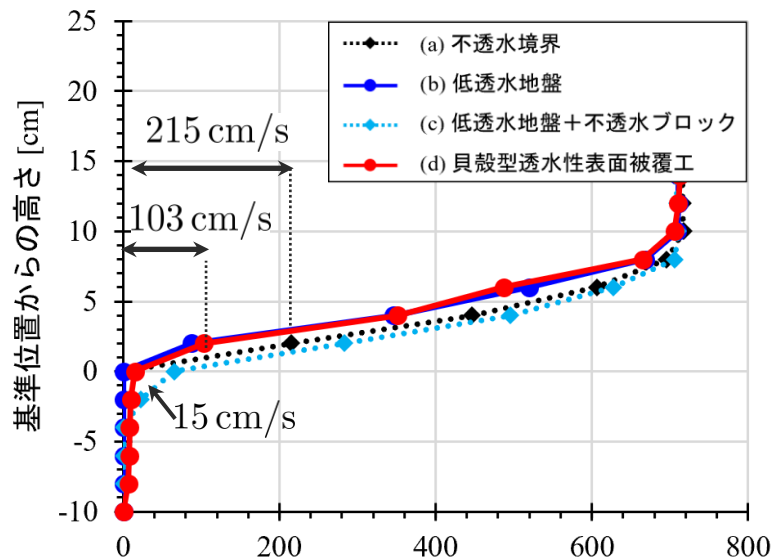
■ 不透水性ブロックを設置した場合

- 間隙部で発生する渦と圧力低下
→ 圧力勾配が大きくなることに伴う **局所的な地盤のゆるみ**
- 各不透水ブロックの上端において動圧の影響により流体力が増大
→ **ブロックの滑動や剥離**が発生する可能性

粒子法を用いた越流シミュレーション

速度プロファイルに基づく表面被覆工の効果の検討・評価

14



■ (a), (c) と(b), (d)の比較

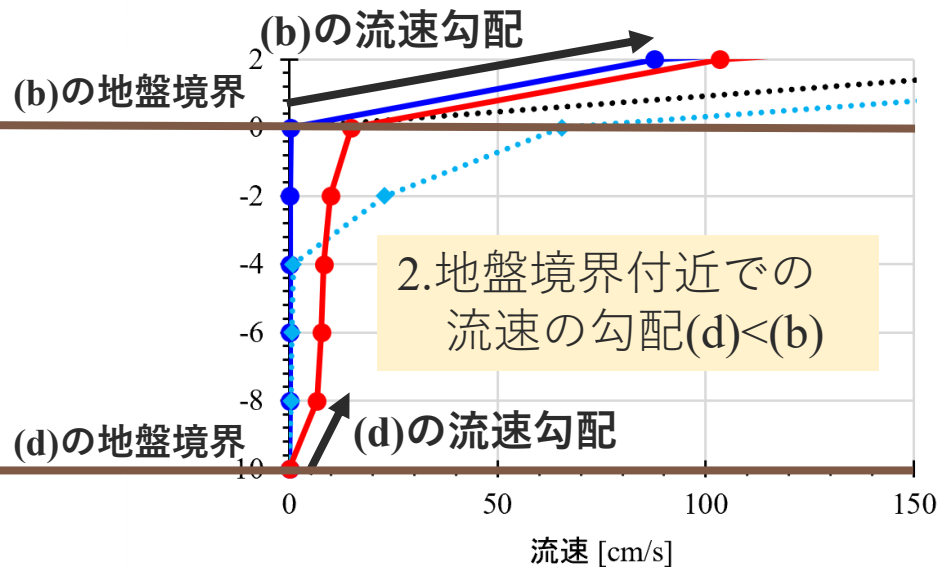
- 裏法面表面に透水性を付与することで，流速差が6割低減

$$1 - \frac{103 \text{ cm/s} - 15 \text{ cm/s}}{215 \text{ cm/s}} \approx 0.59$$

■ (b)低透水地盤と(d)貝殻型透水性表面被覆工の比較

- 透水性(b) < (d)より，(d)の被覆工内部の浸透流速は増加
- 地盤境界付近での流速の勾配は(d) < (b)
- 基準位置とその付近を流れる流速の差は同程度

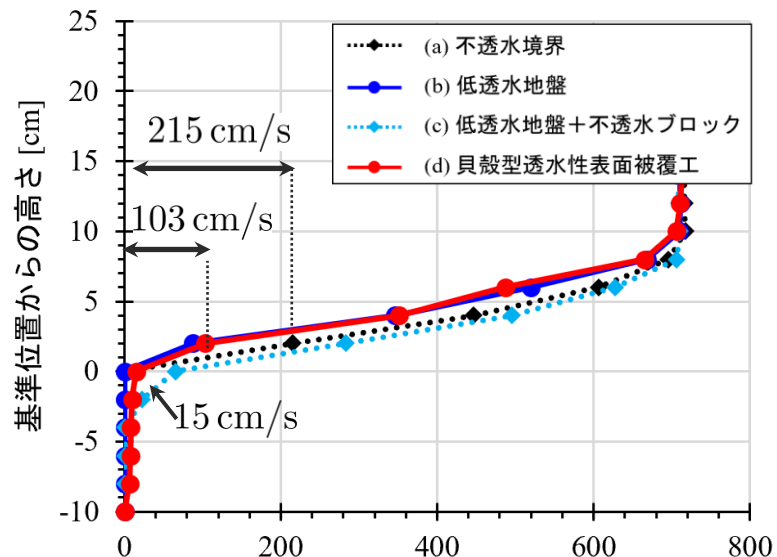
➡ 貝殻型表面被覆工→堤体に作用するせん断力は軽減



粒子法を用いた越流シミュレーション

速度プロファイルに基づく表面被覆工の効果の検討・評価

15

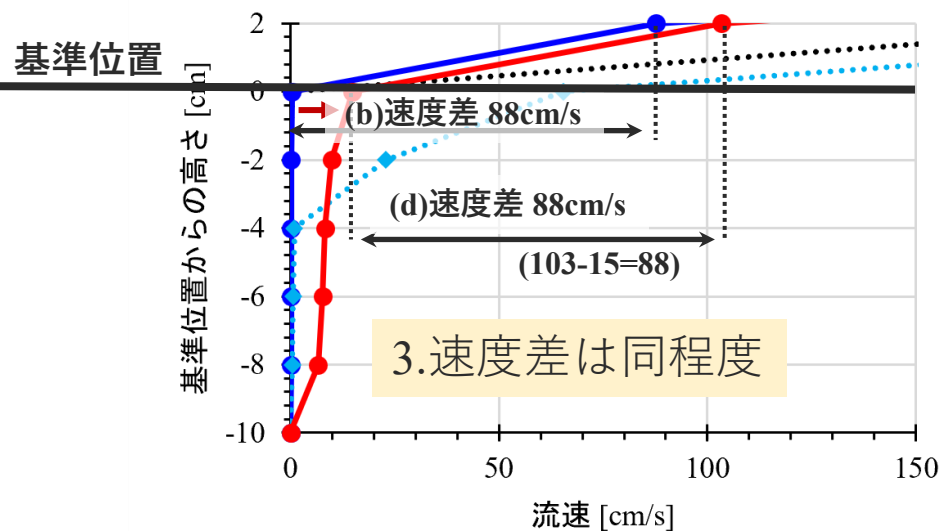


■ (b)低透水地盤と(d)貝殻型透水性表面被覆工の比較

1. 透水性(b) < (d)より, (d)の被覆工内部の浸透流速は増加
2. 地盤境界付近での流速の勾配は(d) < (b)
3. 基準位置とその付近を流れる流速の差は同程度

基準面に作用するせん断力も同程度と考えられる

→シェルネット構造により固定化



3. 速度差は同程度

法面表面に透水性を付与→地盤境界付近で速度勾配小

適切に固定された透水性被覆工の導入：シェルネット

(破碎貝殻の移動を抑制, 表面被覆工を適切に固定)

貝殻型表面被覆工：堤体の表面侵食防止・抑制に寄与

「越流時の透水性表面被覆工下に位置する堤体の安定性に関する解析的検討」

粒子法SPHによる解析 → 実規模実験の越流水の水深・流速を概ね表現

- 圧力場 : 天端端部での静水圧より低い圧力場 → 圧力の表現性能○
 - 裏法面の透水性 : 地盤境界付近での流速の勾配の低下 → せん断力が軽減
 - : 圧力変動による吸出しの可能性
 - : 基準位置での速度勾配は同程度
- シェルネットによる固定化が必要

適切に固定された透水性被覆工を導入することで堤体の表面侵食防止・抑制に寄与

→ 数値解析をもとに、**貝殻型透水性表面被覆工の有効性が確認**

今後の展望

堤体の変形を考慮した3次元解析の実施

