

第 3 回
天井川に関する技術検討会

資料1 - 弥陀次郎川の欠壊メカニズムの解明

京 都 府

目次

- 1 . 前回委員会からの検討課題
- 2 . 浸透に対する堤防の安定性検討
- 3 . 侵食に対する堤防の安定性検討
- 4 . これまでの議論のまとめ

報告内容

項目	調査内容	報告
護岸・堤防の構造	現況護岸設計図面	
	地質調査	
	レーダー探査	
	点検補修履歴	
被災状況	近隣住民への聞き取り調査	-
	流下物調査	-
水文・水理状況	降雨状況の把握（Xバンドレーダー記録）	-
	流出計算	-
	河道内水理状況（不等流計算）	-
破堤要因の検討・考察	浸透流解析	
	河床コンクリート・河床材料の安定性検討	

「 - 」...前回までに報告済み

「 」...前回委員会からの課題、追加調査・補足調査についての報告

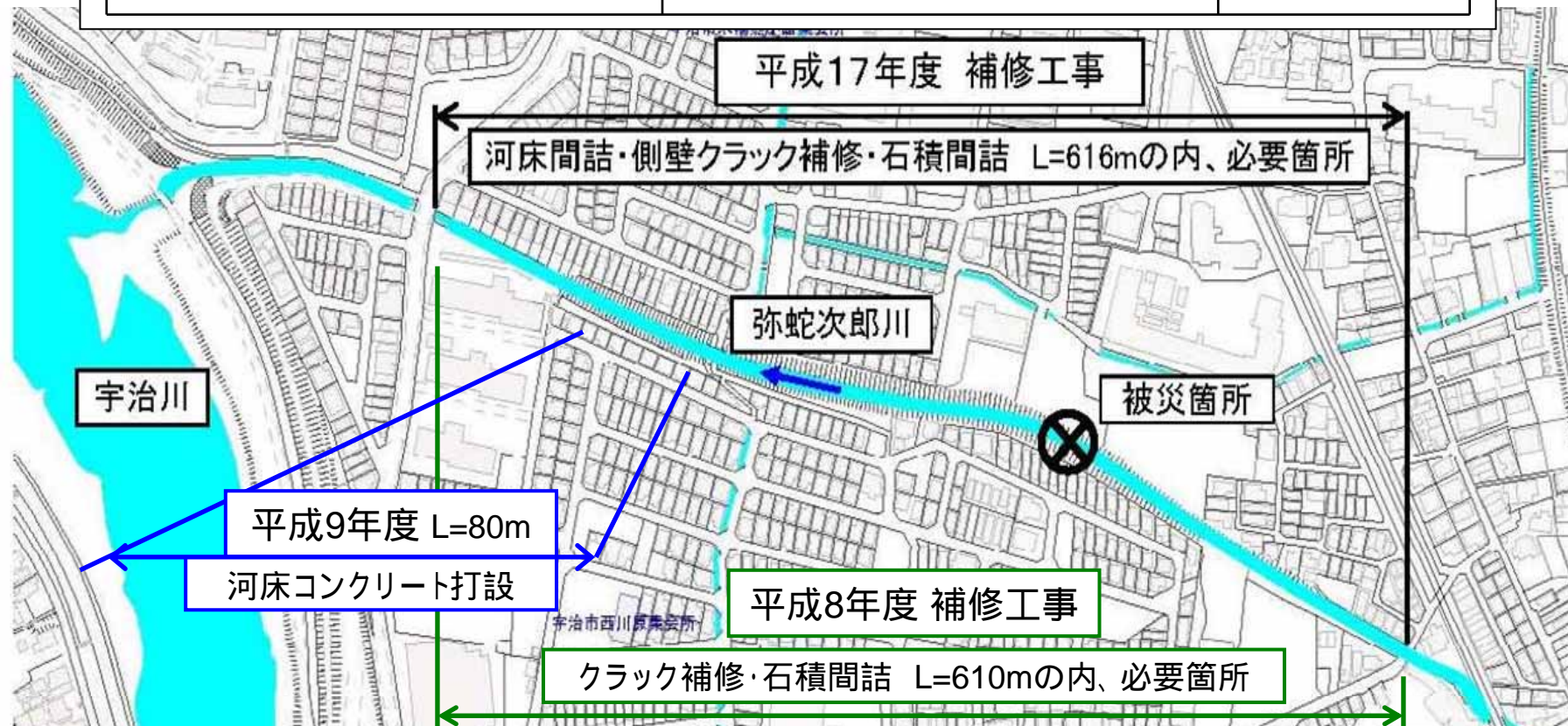
「 」...前回から今回までに新たに実施した調査・検討結果の報告

1. 前回委員会からの検討課題

過去の損傷状況(補修工事履歴)

平成8年度以降の補修工事

損傷の内容	補修の内容	補修年度
河床コンクリートの摩耗・めくれ	河床コンクリート打設・間詰め	H9、H17
石積みの目地の開き	モルタルによる目地の間詰め	H8、H17
側壁・パラペットのクラック	クラック充填	H8、H17

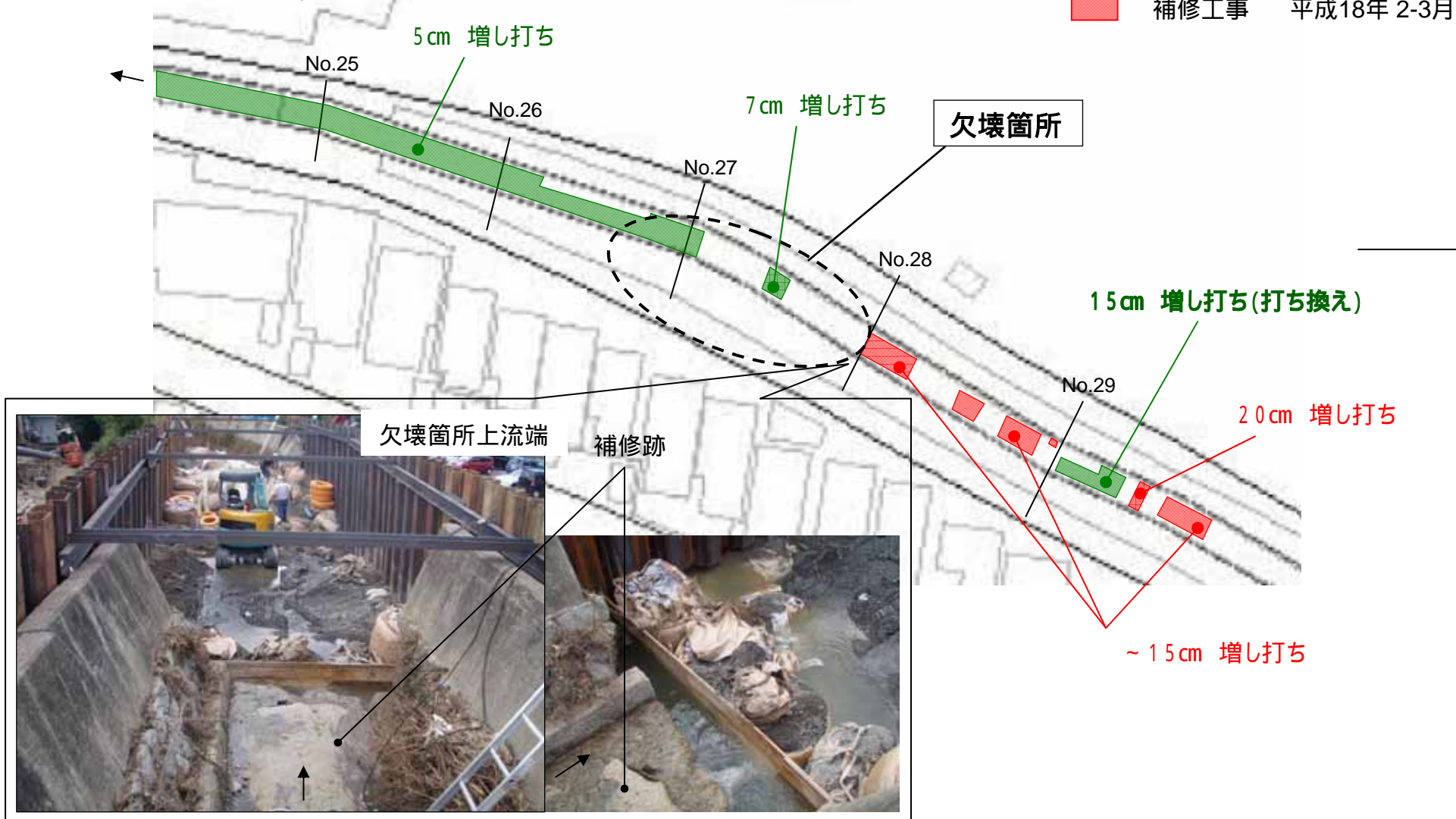


過去の補修位置(河床コンクリート)

欠壊箇所を含む区間での、河床補修工事

「打設・間詰め」とは、河床の「増し打ち」を行っている

- 補修工事 平成17年 6月
- 補修工事 平成18年 2-3月



河床コンクリートの状況(1)

コンクリートの破損・めくれ(増し打ち(打ち換え)部分) No.29付近



(補修前)



(補修後)

補修前の状況(増し打ち部分) No.27付近 摩耗され骨材が出てきている



(補修清掃前)



(清掃後)

河床コンクリートの状況(2)

No.29付近 増し打ち(打ち換え)部分



(横方向から 1)



(横方向から 2)

堤体が露出して
いるかは不明

河床現況調査 平成24年11月



河床コンクリート
の損傷箇所



コンクリート充填状態を確認

河床コンクリートの状況(2)

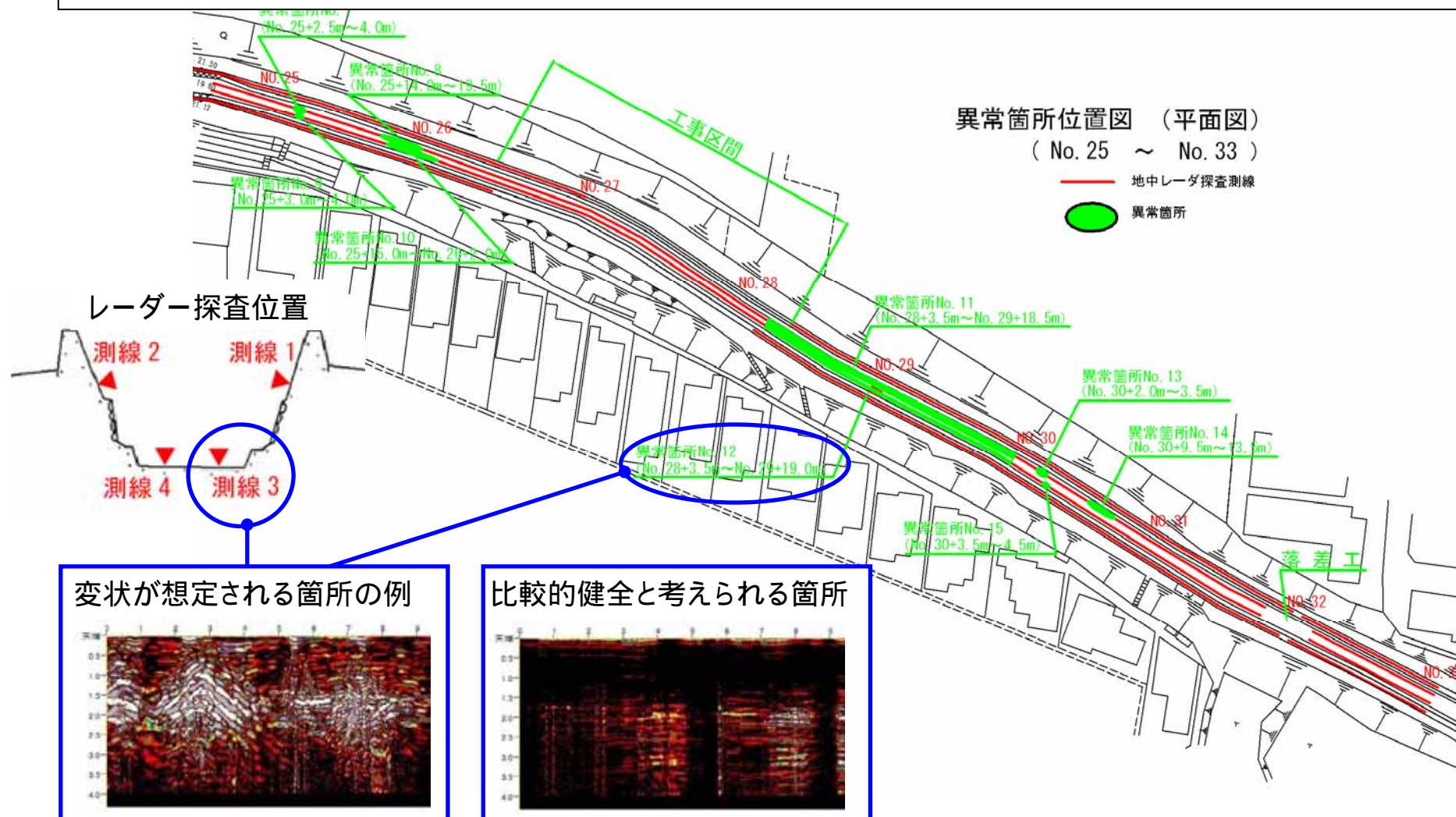
レーダー探査の結果、河床コンクリート背面に変状の想定される箇所が確認された。これらの箇所について河床張りコンクリートのコア抜きを行い、背面空洞の有無等について直接確認を行った。

異常箇所位置図 (平面図)

(No. 25 ~ No. 33)

— 地中レーダー探査測線

● 異常箇所



河床コンクリートの状況(3)

- ・ コンクリート背面には**空洞やゆるみはなく、栗石や砂利が確認**された(レーダー探査のノイズの要因と考えられる)。
- ・ 確認された**河床コンクリートの部材厚は140～480mm**であった。H17に河床の補修を行った**No.29付近では補修厚の設計値が150mm**であり、今回計測値**140～155mm**と概ね一致する。



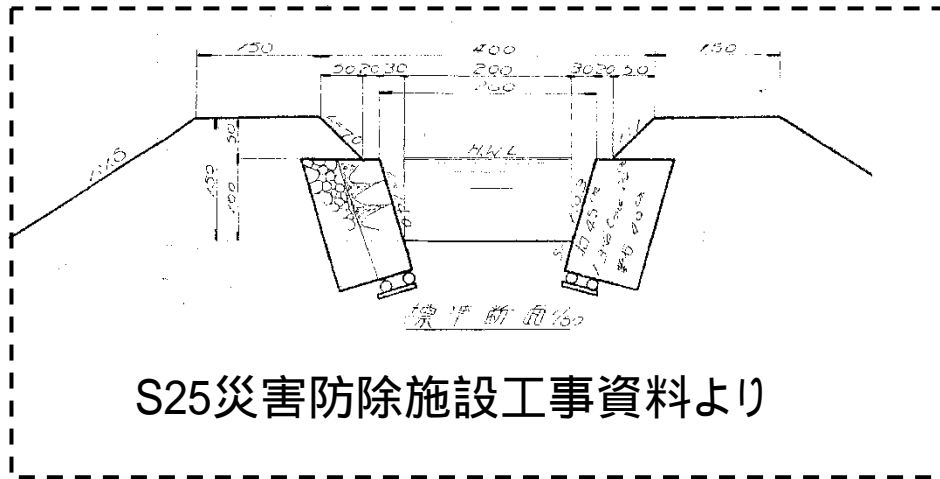
No.29付近
 ・砂利が分布
 ・空洞やゆるみは見られない



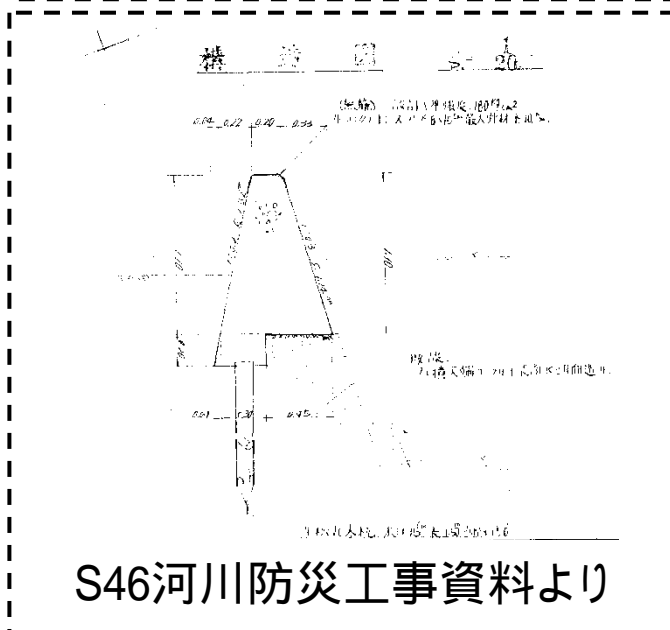
No.30付近
 ・栗石が分布
 ・空洞やゆるみは見られない

地点	コンクリート部材厚(mm)	空洞の有無	先端の状況	備考
No.19+3.00	480	無	栗石	三面張り区間のためコンクリート厚が大きい。
No.19+4.50	360	無	栗石	
No.29+1.00	155	無	砂利	H17補修区間。補修厚(設計値)は150mmであった。
No.29+5.00	140	無	砂利	
No.30-1.00	175	無	砂利	コンクリートの設計厚, 施工厚は不明。
No.30+5.00	270	無	栗石	

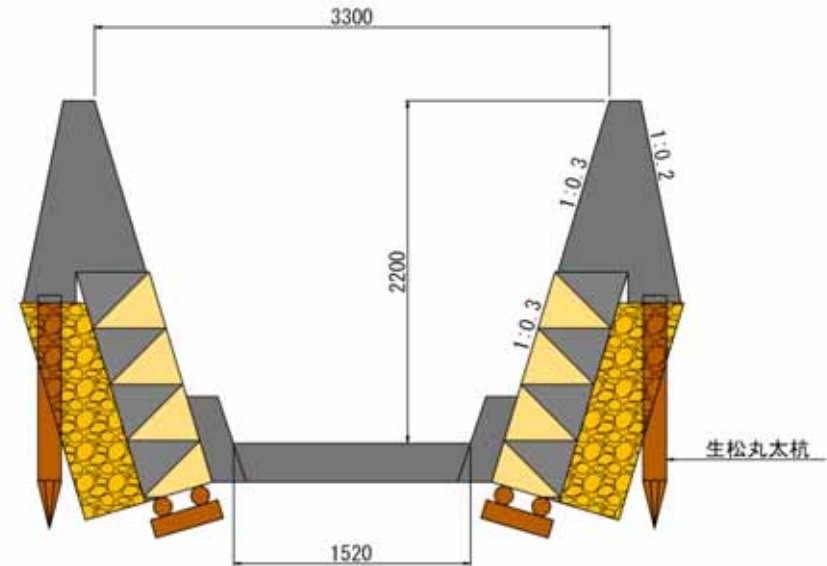
石積みの状況(1)



S25災害防除施設工事資料より



S46河川防災工事資料より



石積みの構造イメージ

過去の竣工図書等より、石積みの構造は、まず石積み (S25頃) が設けられ、その後に根継ぎと河床張りコンクリート (時期不明)、その後に嵩上げコンクリート (S46頃) と順次施工され現在の構造に至ったと考えられる。また、竣工図書では裏込めコンクリートのある「練積石垣」と表現されている。

石積みの状況(2)

No.26付近(右岸)

No.30~31付近(左岸)

破堤箇所



胴込めコンクリートが多くあり、現在の練石積みに近い構造。



石の背面は土砂が主体であり、部分的に胴込めコンクリートも見られる。



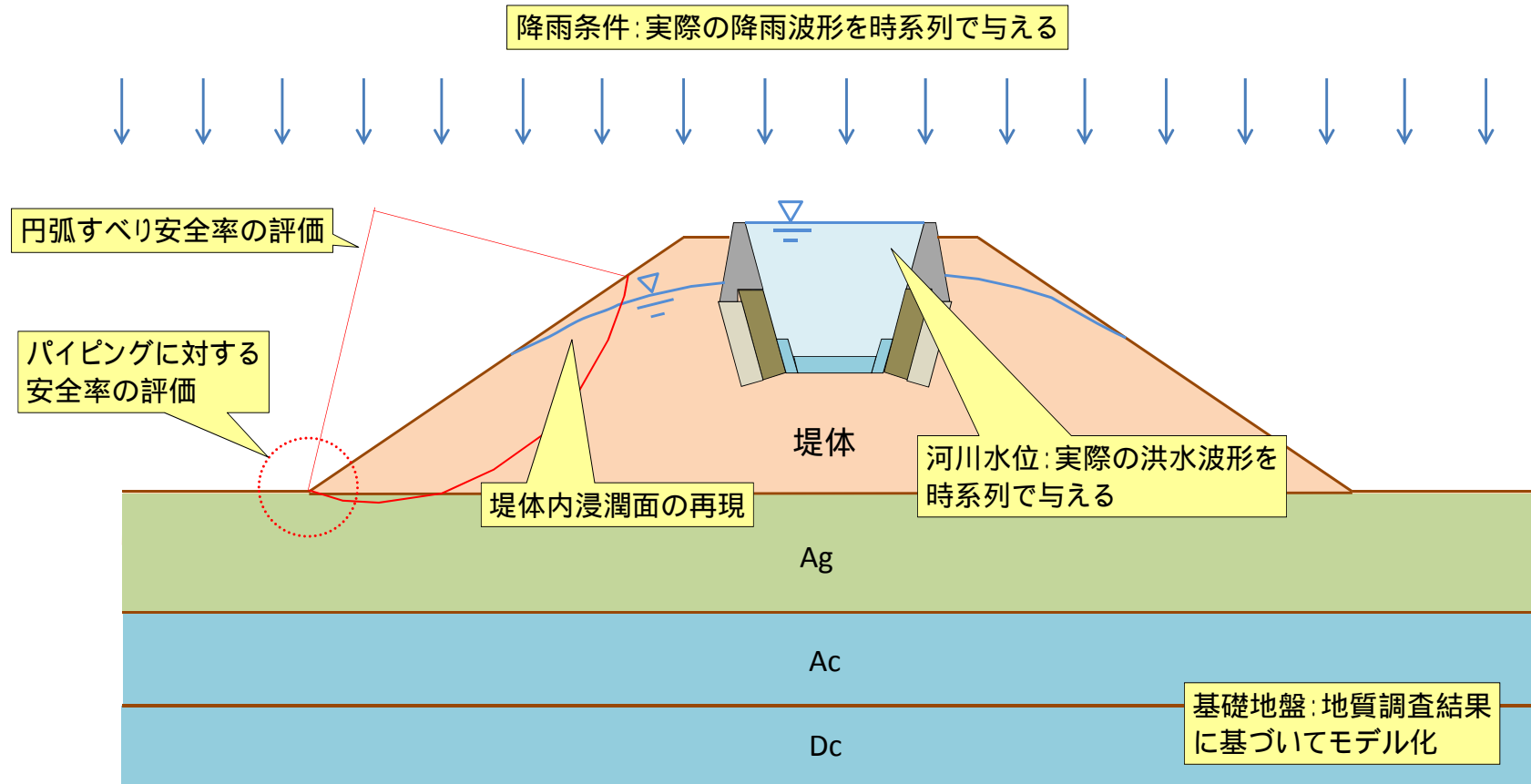
下流の流下物調査で確認された雑割石にコンクリートの付着は見られない。

- ・ 抜石によって確認した構造から、近年施工のものほど堅固に一体化された構造ではない。石積み部分からの浸透は生じると考えられる。

2. 浸透に対する堤防の安定性検討

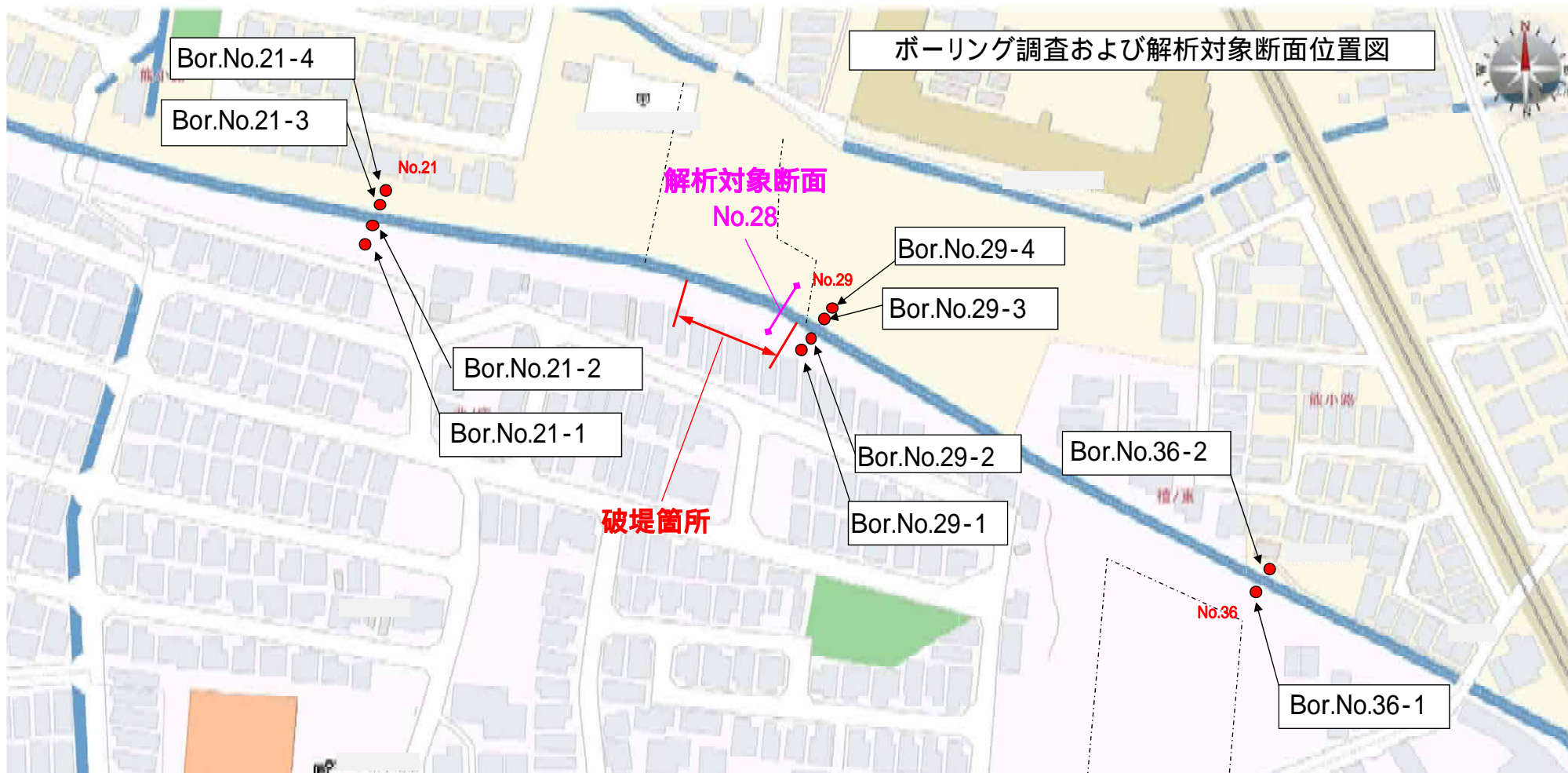
解析の概要

非定常浸透流解析によって洪水時の堤体の水理状況を再現し、浸透破壊に対する堤防の安定性を評価する。



解析対象断面

被災箇所であるNo.28(0.56k)断面を対象に解析を行う。
No.29断面で実施された地質調査の結果に基づき、地盤条件を設定する。

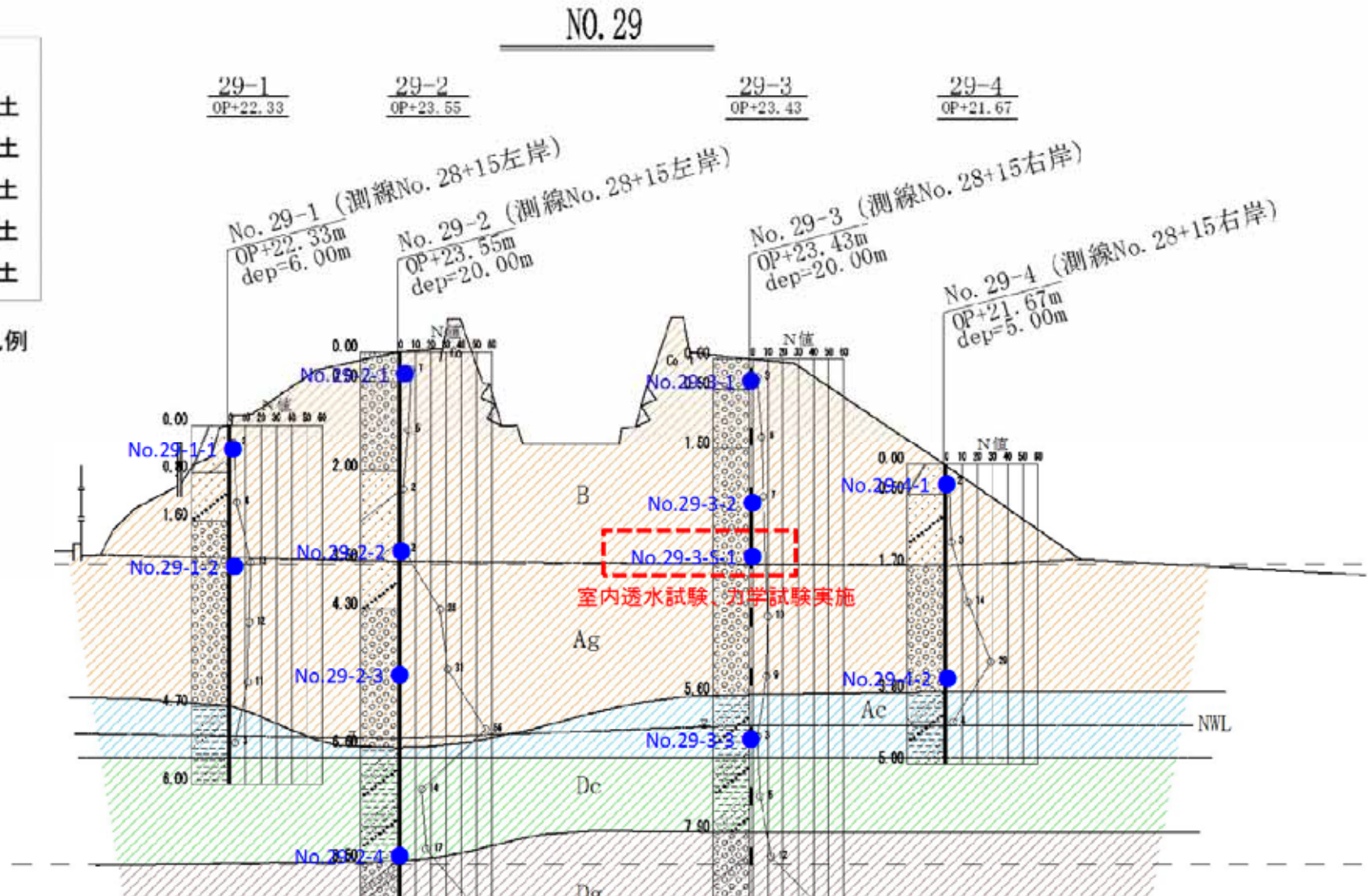
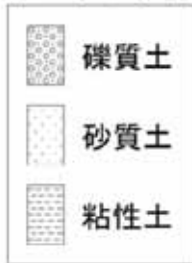


土層横断図

地層の凡例

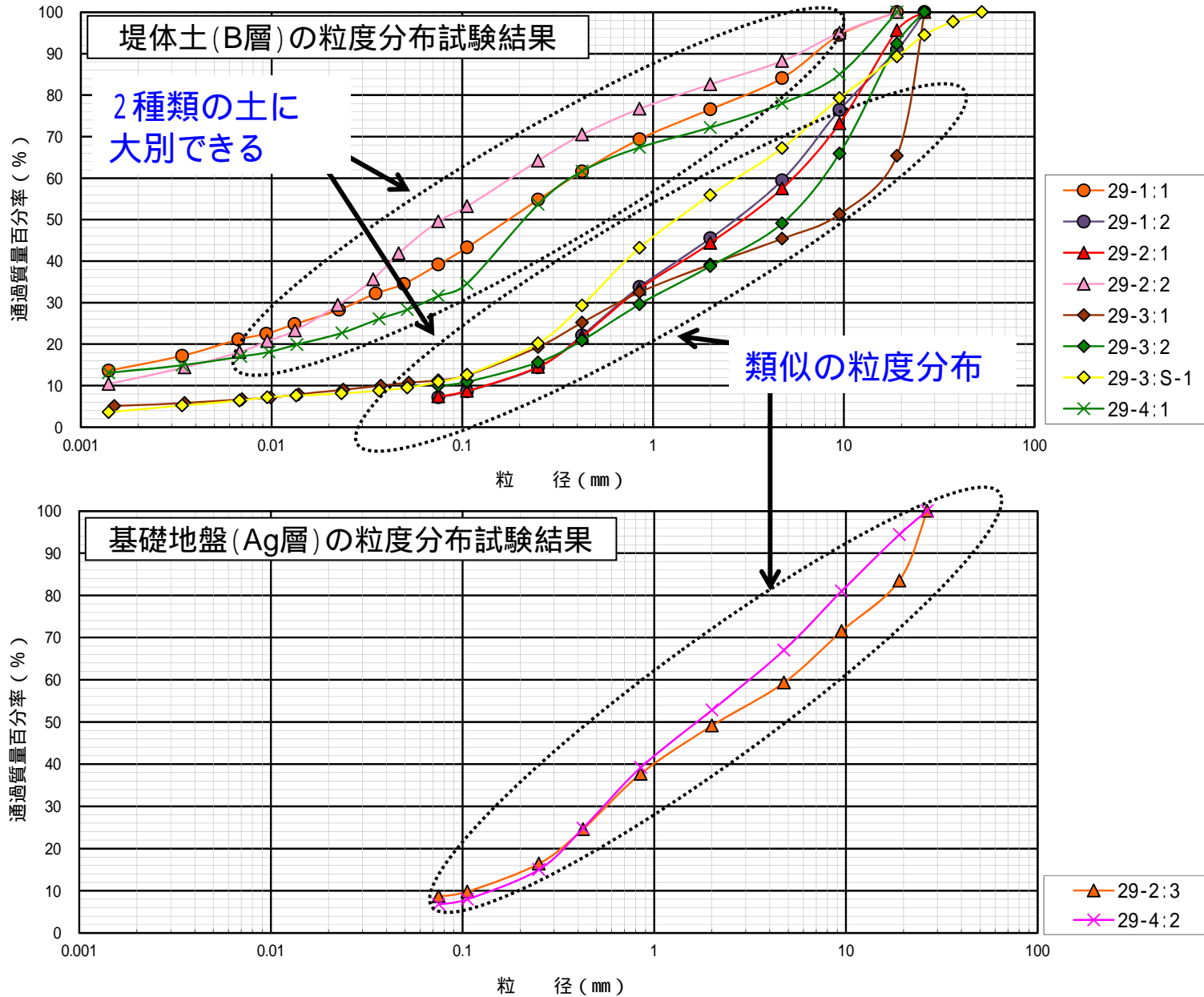


ボーリング柱状図の凡例



: 試料採取位置と試料No.

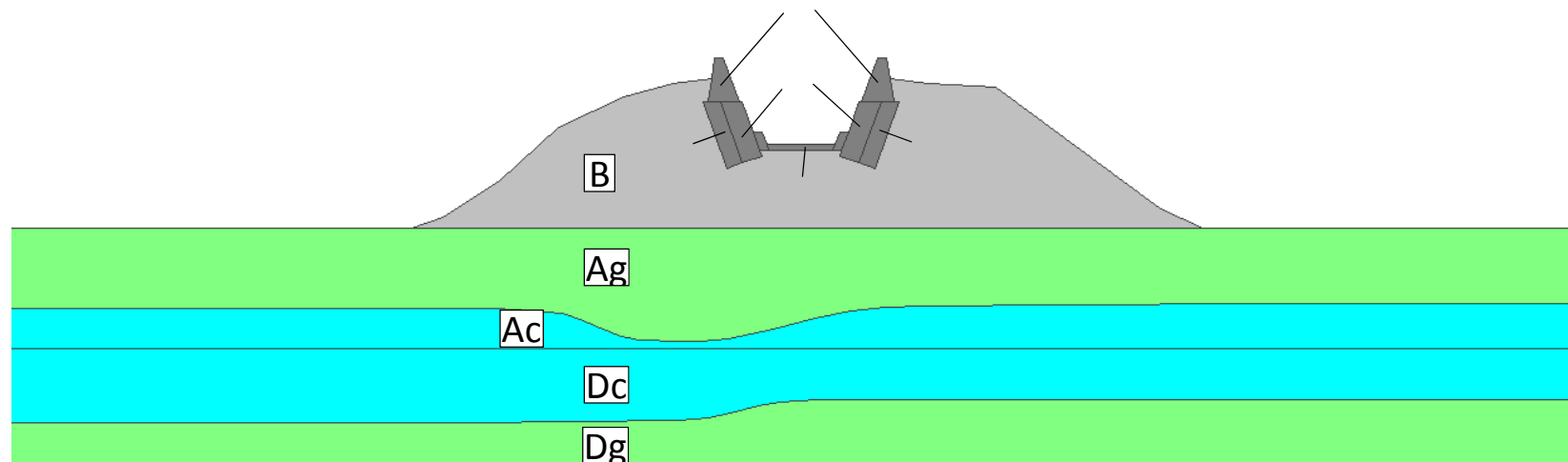
土質特性



解析に用いた地盤定数

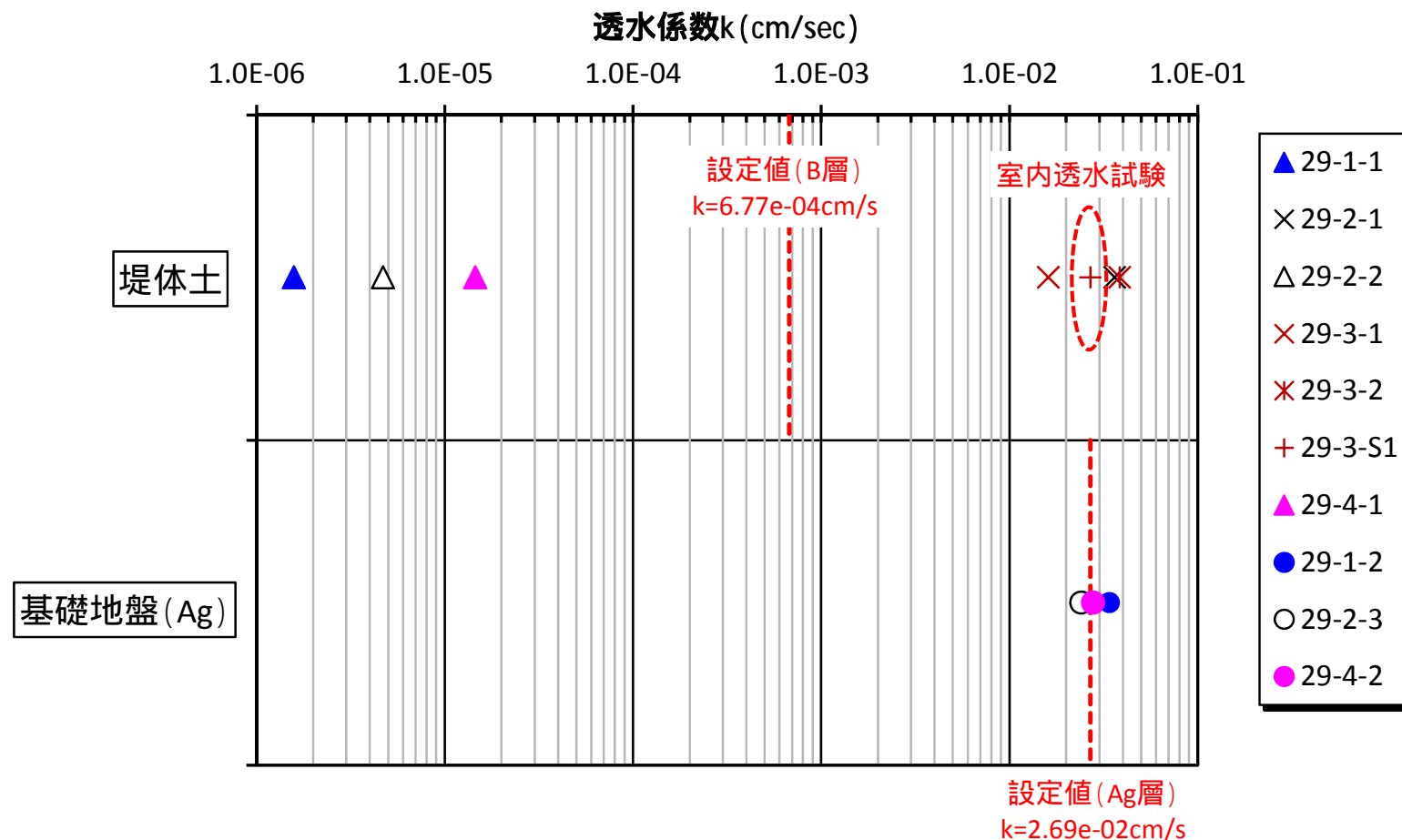
	単位体積重量		強度定数			透水係数		不飽和浸透特性
	t (kN/m ³)	設定根拠	C (kN/m ²)	(°)	設定根拠	k (cm/sec)	設定根拠	
パラペット	25	一般値	100	0		1.00E-06	不透水	礫-砂
石積み護岸	19	一般値	100	0		1.00E-02 または1.00E-06	検討ケースにより 透水係数を選定	礫-砂 または粘性土
裏込め砕石	19	一般値	0	40	一般値	1.00E-01	標準的な礫層	礫-砂
河床コンクリート	25	一般値	100	0		1.00E-02 または1.00E-06	検討ケースにより 透水係数を選定	礫-砂 または粘性土
B	18	試験結果平均値	1	39	CD試験	6.77E-04	B層試料の平均値	細粒分の多い砂
Ag	18	B層試験結果	1	39	CD試験	2.69E-02	B層試験結果	礫-砂
Ac	15	一般値	20	0	N値換算	1.00E-06	一般値	粘土
Dc	15	一般値	72	0	N値換算	1.00E-06	一般値	粘土
Dg	19	一般値	0	38	N値換算	4.20E-04	現場透水	細粒分の多い砂

パラペット、石積み護岸、河床コンクリートの強度定数は、計算上すべり面が発生しない十分大きな強度を与えた。



地盤定数の設定 飽和透水係数

試料No.29-3-S-1については、室内透水試験結果をプロット
 その他の試料については、CreagerによるD20と透水係数の関係から推定した値をプロット



堤体土 (B層) については、各試料の平均値である $k = 6.77 \times 10^{-4}(\text{cm/s})$ を採用
 Ag層については、試料No.29-3-S-1の試験結果である $k = 2.69 \times 10^{-2}(\text{cm/s})$ を採用

地盤定数の設定 強度定数

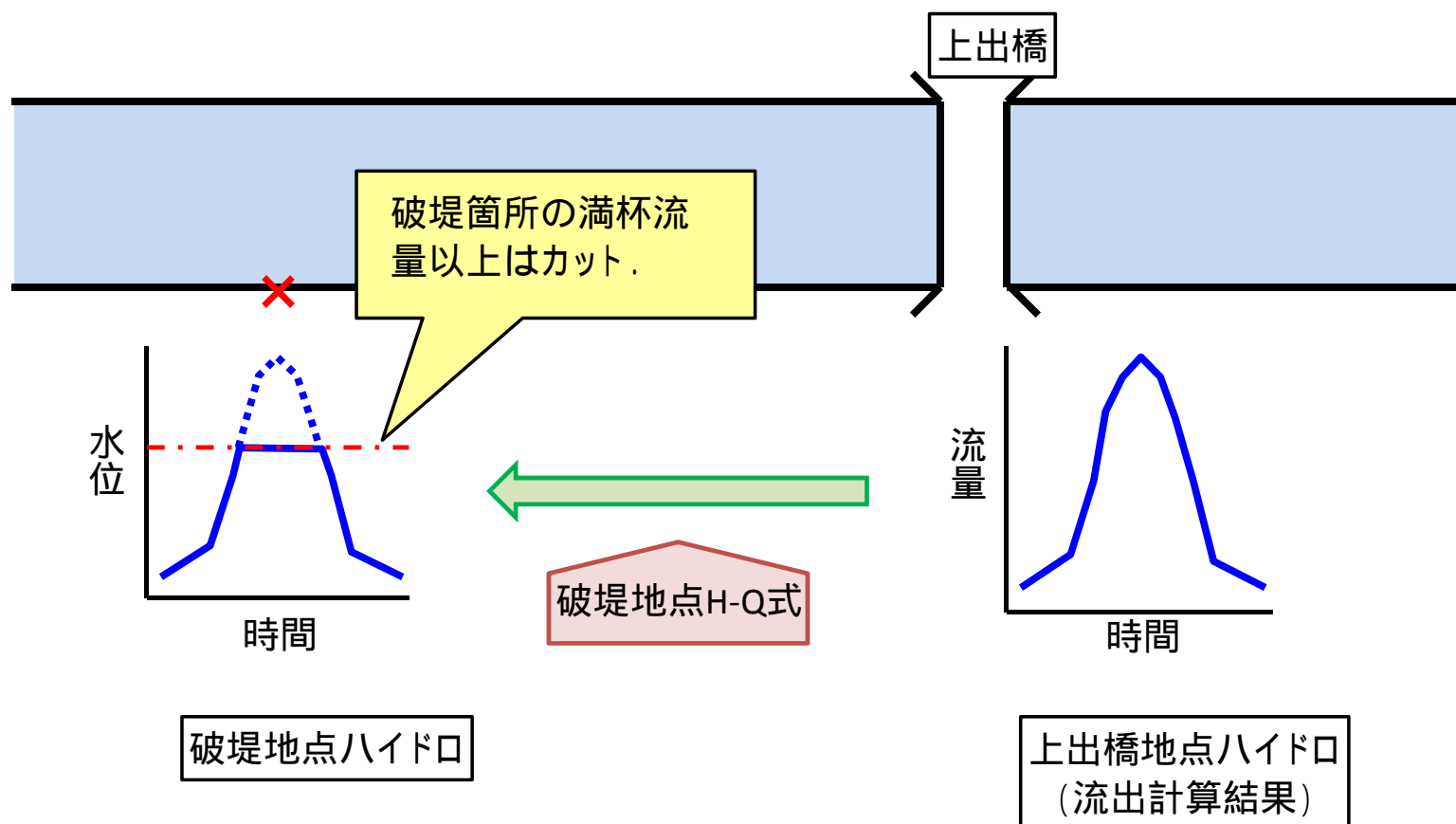
土層名	強度定数		設定根拠
	C(kN/m ²)	(°)	
堤体土 B	1	39	試料No.29-3-S-1の力学試験結果(CD)
沖積礫質土 Ag	1	39	試料No.29-3-S-1の力学試験結果(CD)
沖積粘性土 Ac	20	0	N値からの換算による
洪積粘性土 Dc	72	0	N値からの換算による
洪積礫質土 Dg	0	38	N値からの換算による

力学試料が実施されたNo.29-3-S-1の粒度分布はAg層の粒度分布と類似していることから、両者は同種の地質と判断し、Ag層の強度定数はNo.29-3-S-1の試験結果を採用した。

外水位波形の設定

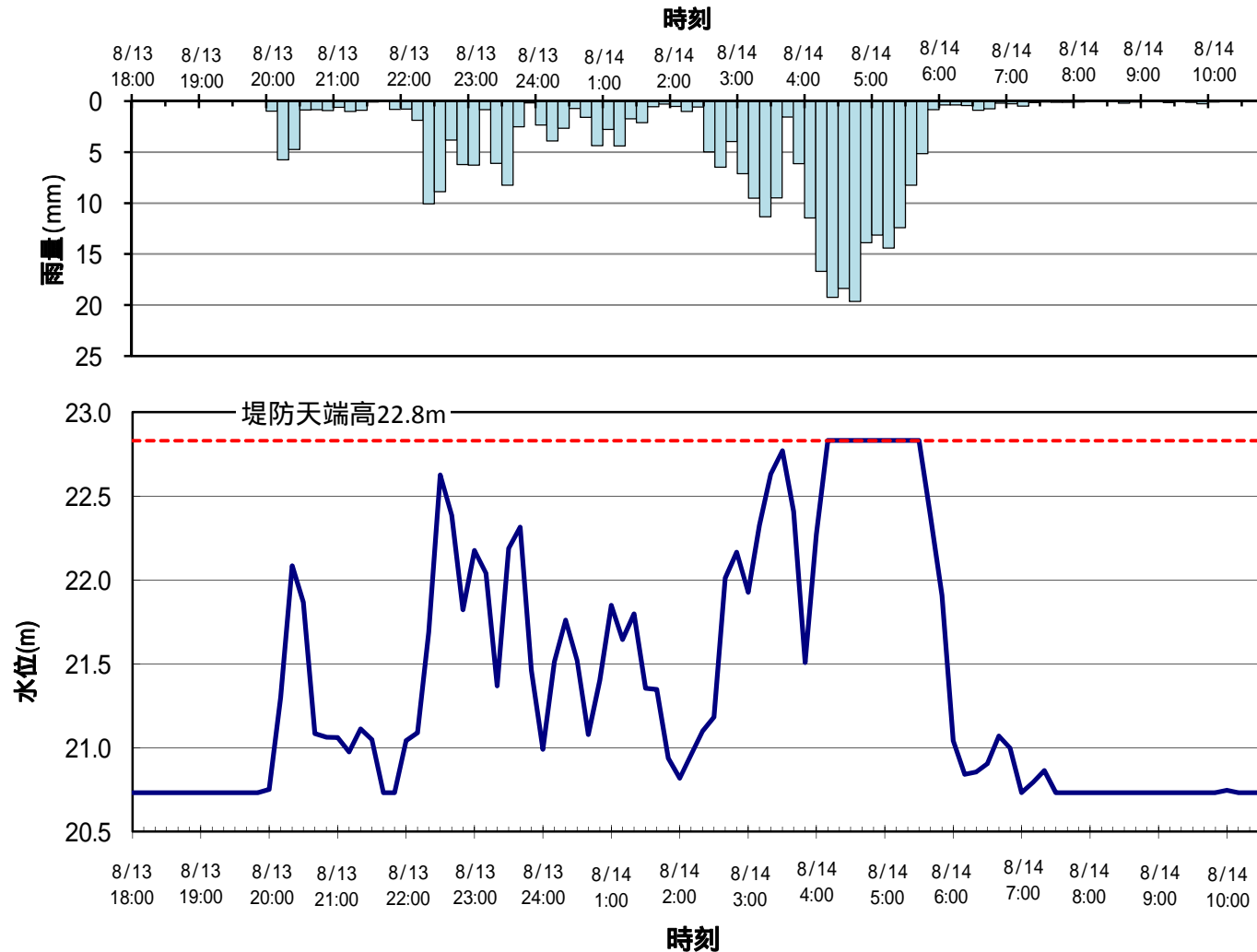
流出計算によって得られた上出橋地点の流量が、破堤地点まで流下するものと想定する。

破堤箇所(解析断面)において満杯流量を上回る部分はカットし、これを外水位波形として与える。



降雨波形および外水位波形

降雨波形については、XバンドMPレーダー観測記録に基づいて作成した降雨波形を用いる。



堤体安定性の評価法(1)

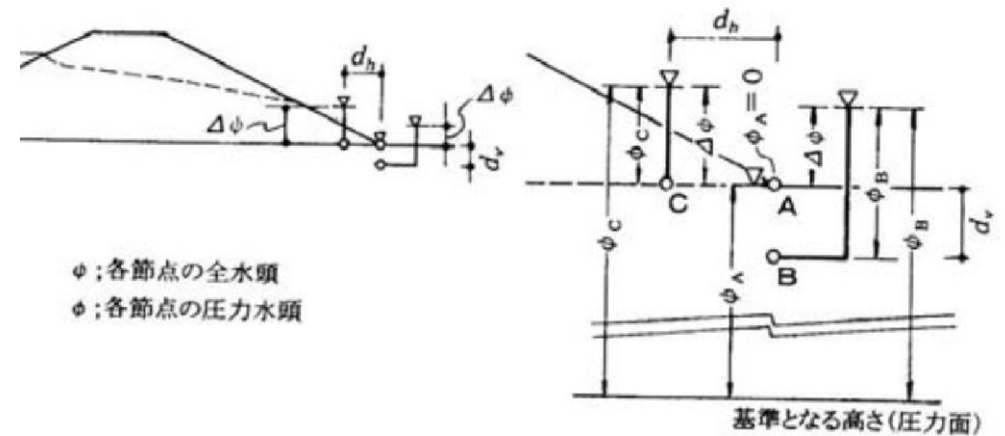
パイピング破壊に対する照査

鉛直方向・水平方向の局所動水勾配によってパイピング破壊の照査を行う。

$$i_v = \frac{\Delta \phi}{d_v} = \frac{\Delta \phi - d_v \cdot \rho_w}{d_v} \quad (\text{鉛直方向})$$

$$i_h = \frac{\Delta \phi}{d_h} = \frac{\Delta \phi}{d_h} \quad (\text{水平方向})$$

ここに、
 i_v ; 鉛直方向の局所動水勾配
 i_h ; 水平方向の局所動水勾配
 $\Delta \phi$; 節点間の全水頭差(m)
 $\Delta \phi$; 節点間の圧力水頭差(m)
 d_v ; 節点間の鉛直距離(m)
 d_h ; 節点間の水平距離(m)
 ρ_w ; 水の密度 ($\rho_w = 1.0 \text{ t/m}^3$)



パイピング破壊に対する安定性の評価基準は、 i_h, i_v の両者ともに1未満であるときに安定と判断した。

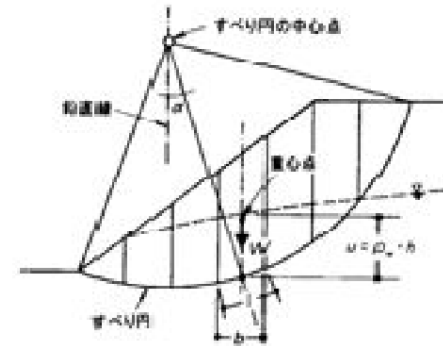
堤体安定性の評価法(2)

すべり破壊に対する照査

全応力法に基づいて、すべり破壊に対する最小安全率を算出する。

$$F_s = \frac{\Sigma\{c l + (W - ub) \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi\}}{W \cdot \sin \alpha}$$

ここに、 F_s : 安全率
 u : すべり面の間隙水圧 (kPa)
 W : 分割片の重量 (kN/m)
 c : すべり面に沿う土の粘着力 (kPa)
 l : 円弧の長さ (m)
 ϕ : すべり面に沿う土の内部摩擦角 (°)
 b : 分割片の幅 (m)



すべり破壊に対する安定性の評価基準は、安全率 F_s が1以上のときに安定と判断した。

検討ケース

護岸等構造物の取り扱い

- A. 石積み護岸・河床コンクリートともに遮水性を考慮する。
- B. 河床コンクリートのみ遮水性を考慮する。
- C. 石積み護岸・河床コンクリートの遮水性を考慮しない。

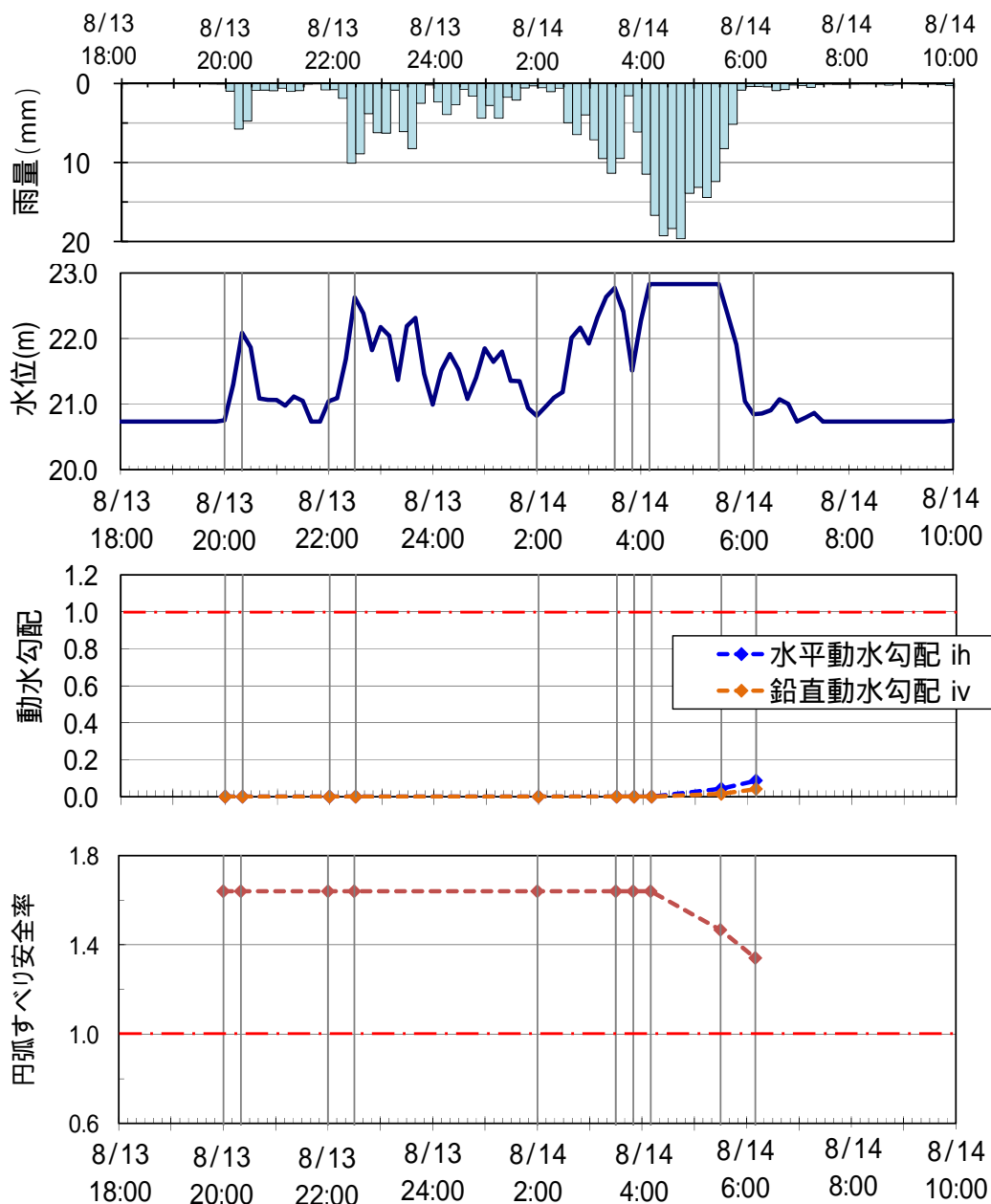
初期水位

地質調査で確認された地下水位 (Ac層付近) を初期水位とする。
堤内地盤高付近 (G.L.-0.5m) を初期水位とする。

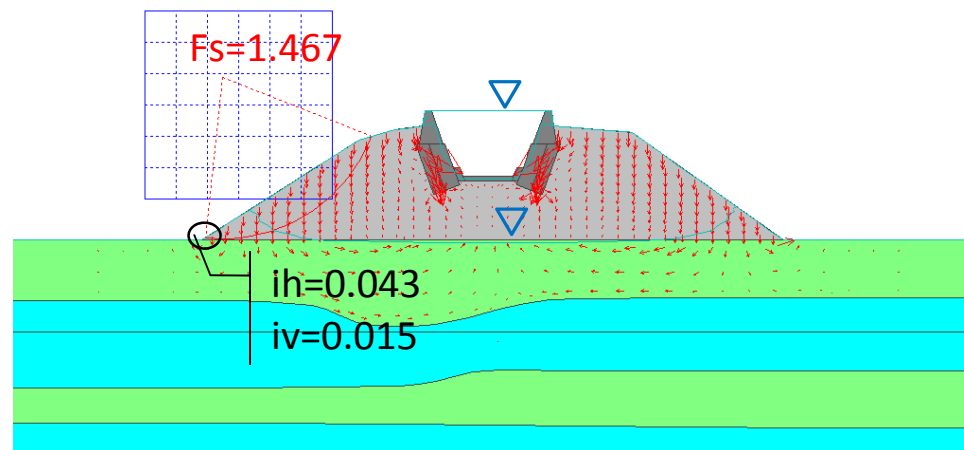
		構造物の透水性					
		A		B		C	
		護岸	河床	護岸	河床	護岸	河床
		×	×		×		
初期 地下水位	Ac層付近	CaseA-		CaseB-		CaseC-	
	G.L.-0.5m	CaseA-		CaseB-		CaseC-	

× ... 遮水層, ... 透水層

解析結果 ケースA- / 初期地下水位:Ac層, 護岸・河床:不透水



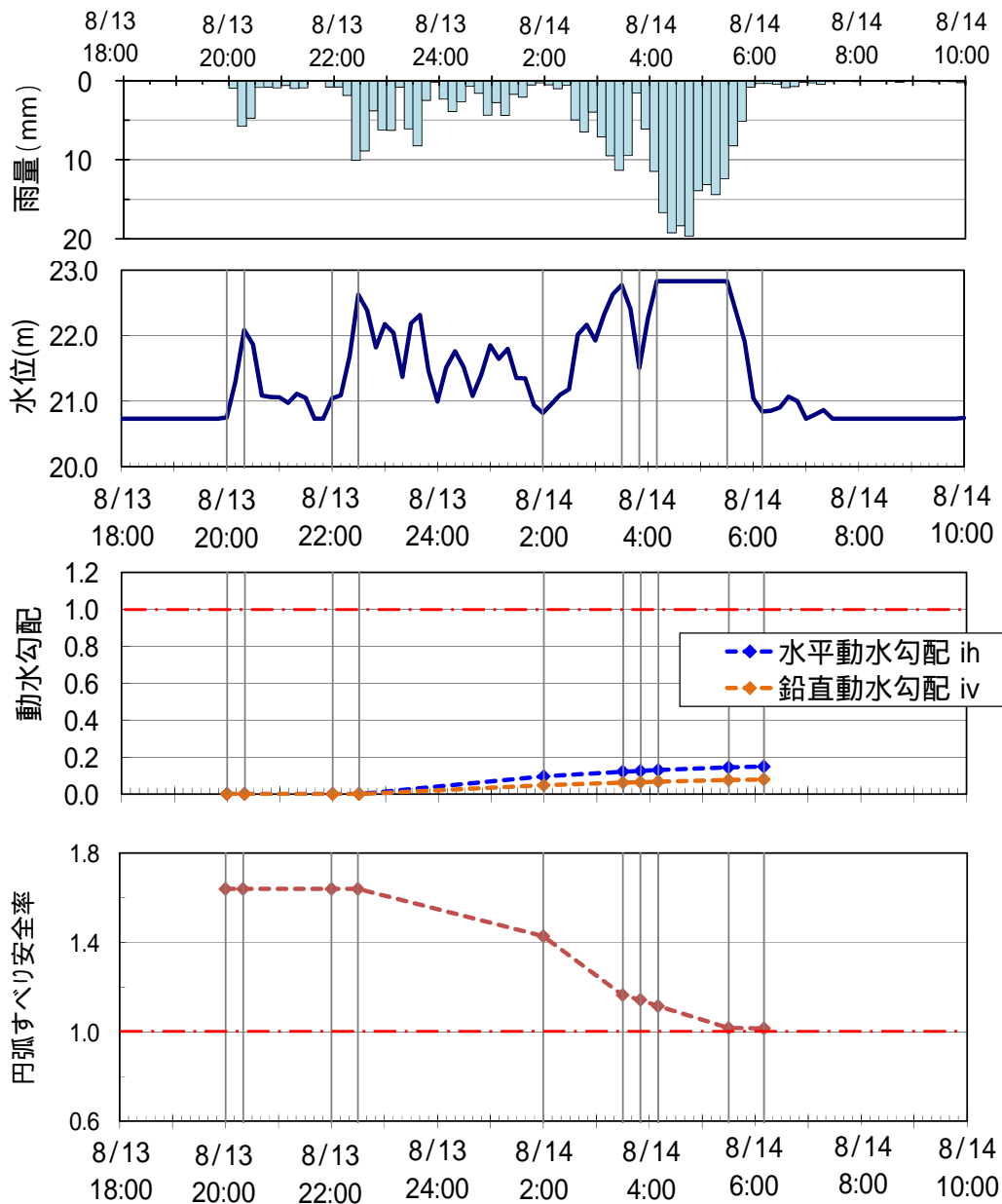
浸潤面と円弧すべり計算結果(8/14 5:30)



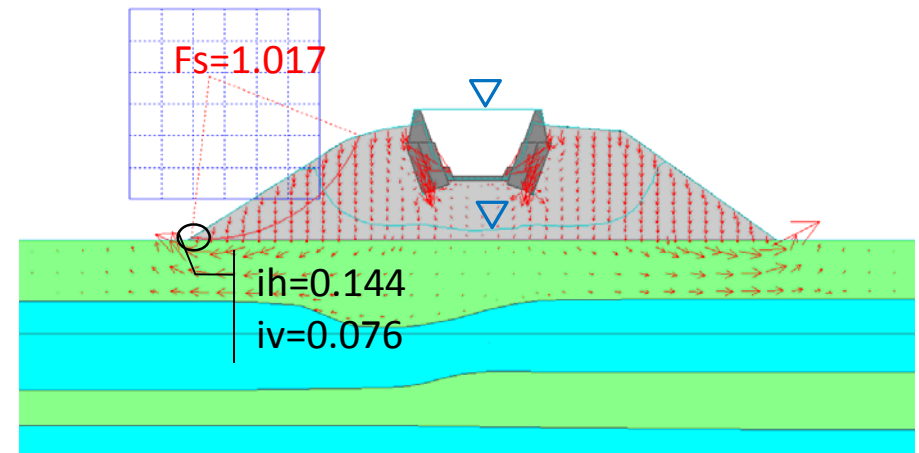
評価

- ・局所動水勾配、円弧すべり安全率ともに、評価基準値を満たしている。
- ・本ケースの条件では、パイピング破壊、円弧すべり破壊ともに発生しない。

解析結果 ケースA- / 初期地下水位: 堤内地盤高-0.5m, 護岸・河床: 不透水



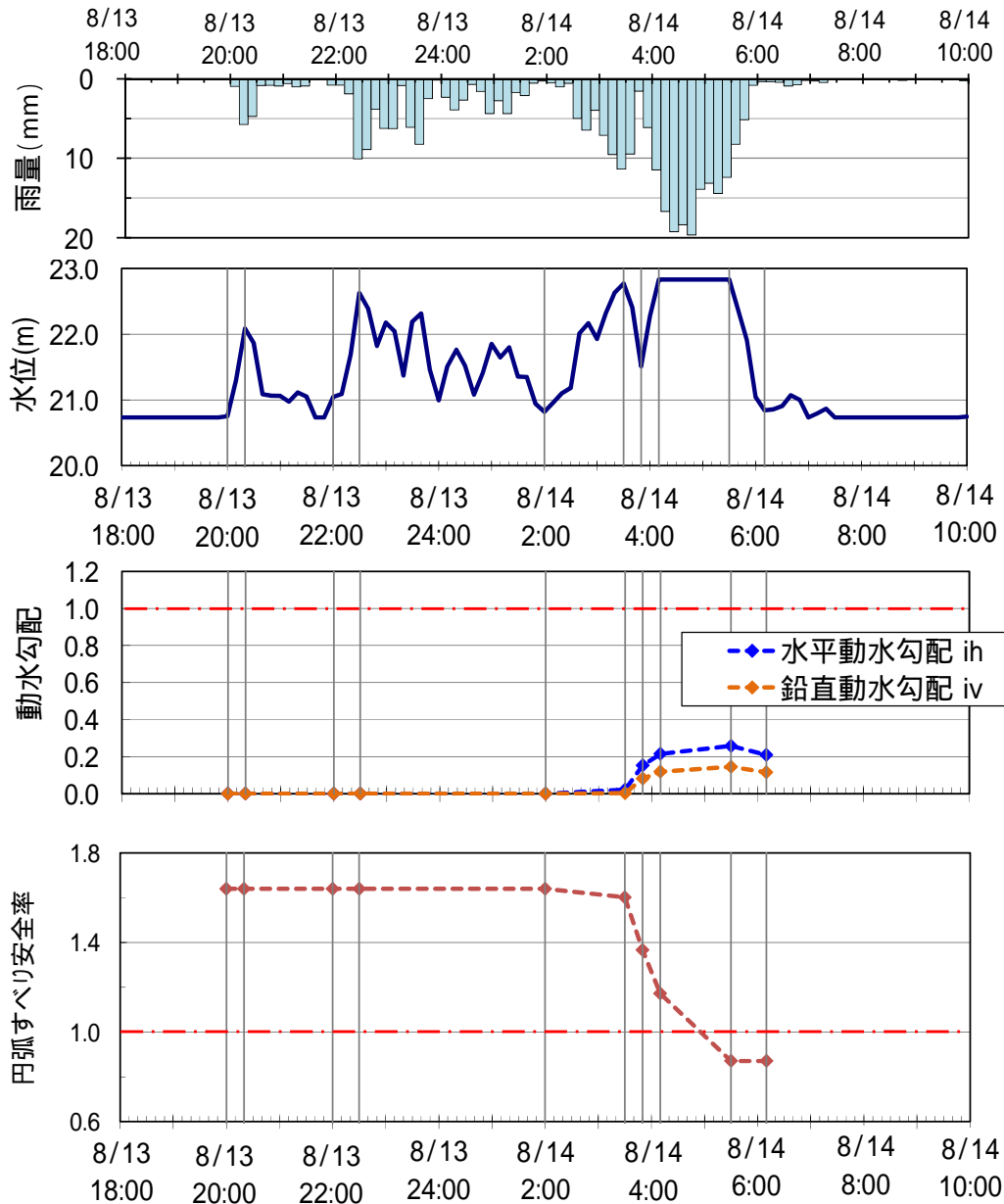
浸潤面と円弧すべり計算結果(8/14 5:30)



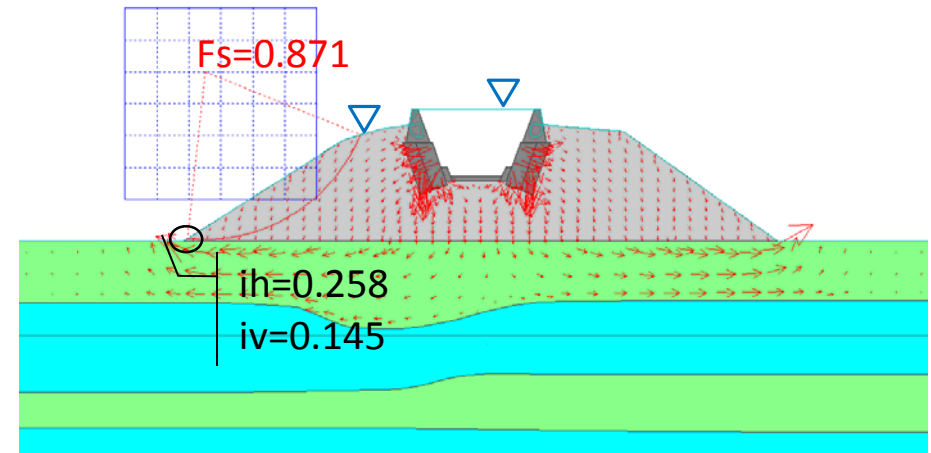
評価

- ・局所動水勾配、円弧すべり安全率ともに、評価基準値を満たしている。
- ・本ケースの条件では、パイピング破壊、円弧すべり破壊ともに発生しない。

解析結果 ケースB- / 初期地下水位:Ac層, 護岸:透水, 河床:不透水



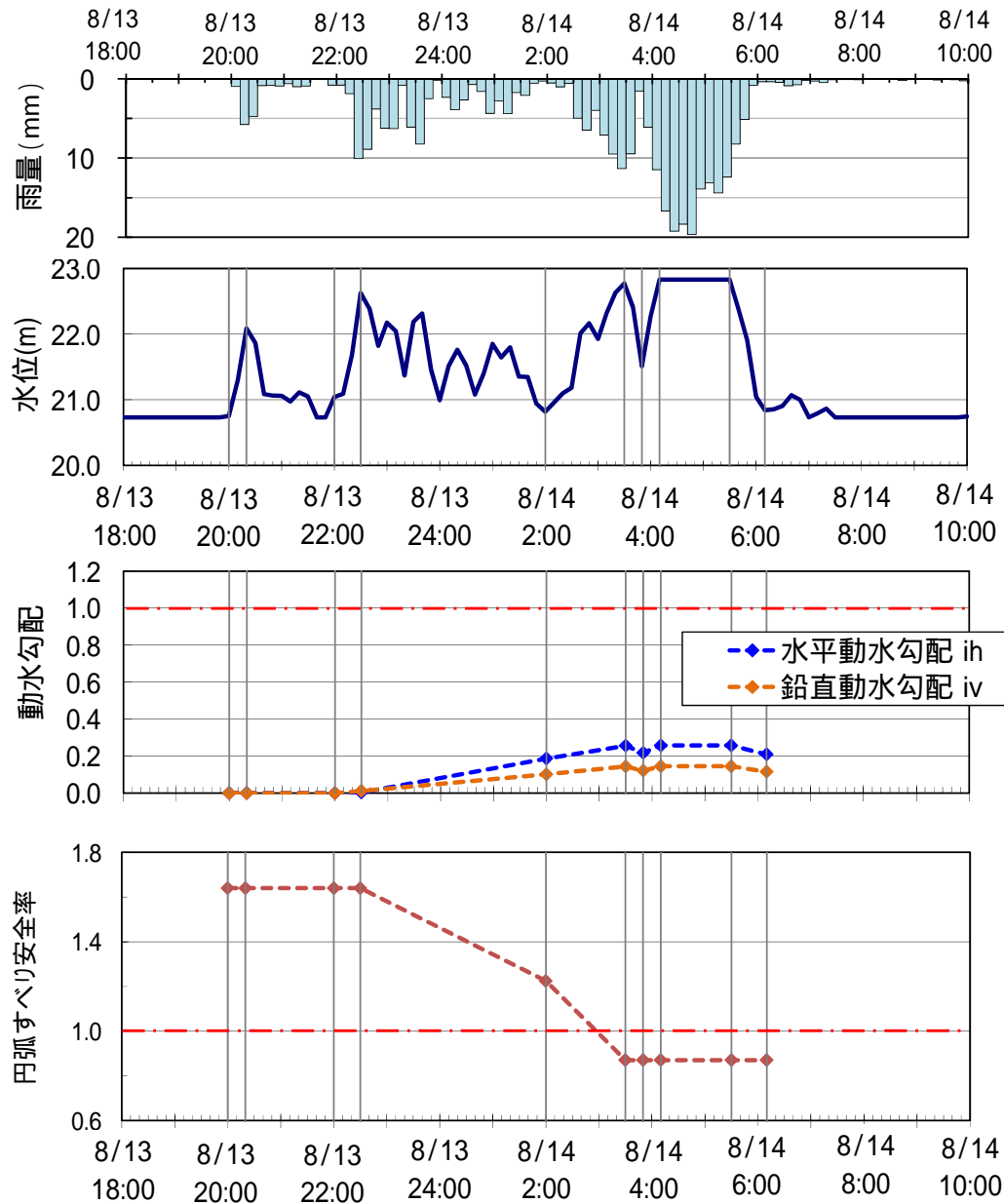
浸潤面と円弧すべり計算結果(8/14 5:30)



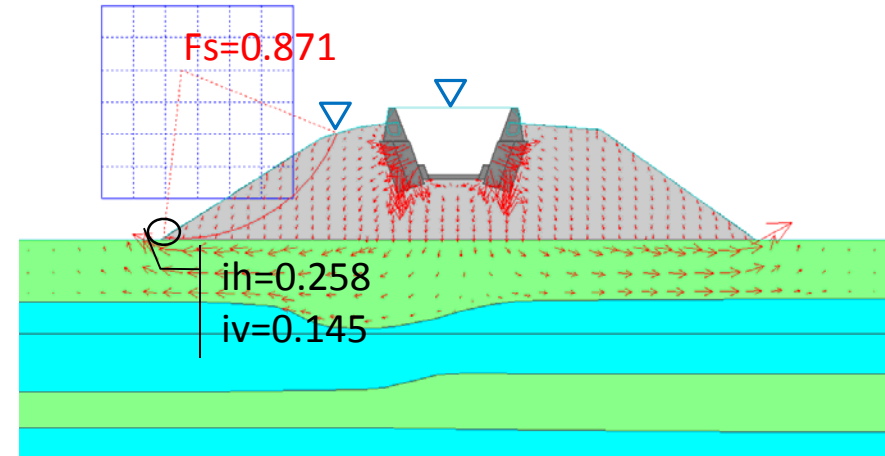
評価

- ・局所動水勾配については評価基準値を満たしており、パイピング破壊は発生しない。
- ・8/14 5:30の時点で円弧すべり安全率が1を下回るが、これは実際の破堤時間(4:00頃)よりも遅い時間である。

解析結果 ケースB- / 初期地下水位: 堤内地盤-0.5m, 護岸: 透水, 河床: 不透水



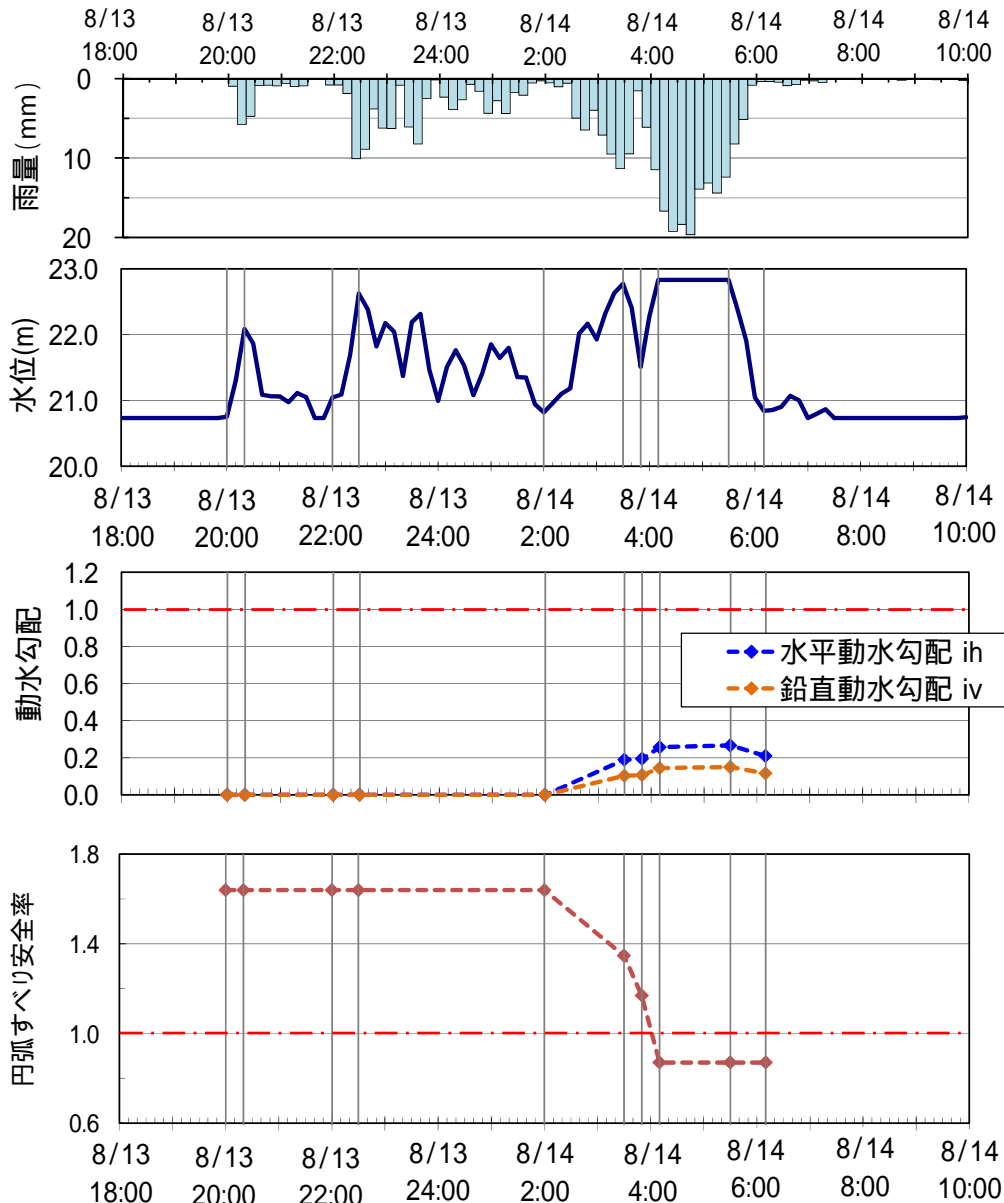
浸潤面と円弧すべり計算結果 (8/14 5:30)



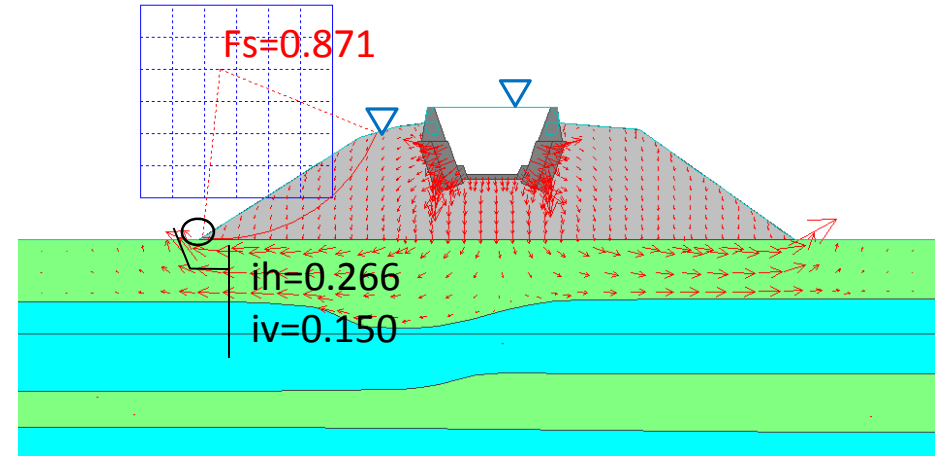
評価

- ・局所動水勾配については評価基準値を満たしており、パイピング破壊は発生しない。
- ・8/14 3:30の時点で円弧すべり安全率が1を下回っており、すべり破壊が生じる可能性がある。

解析結果 ケースC- / 初期地下水位:Ac層, 護岸:透水, 河床:透水



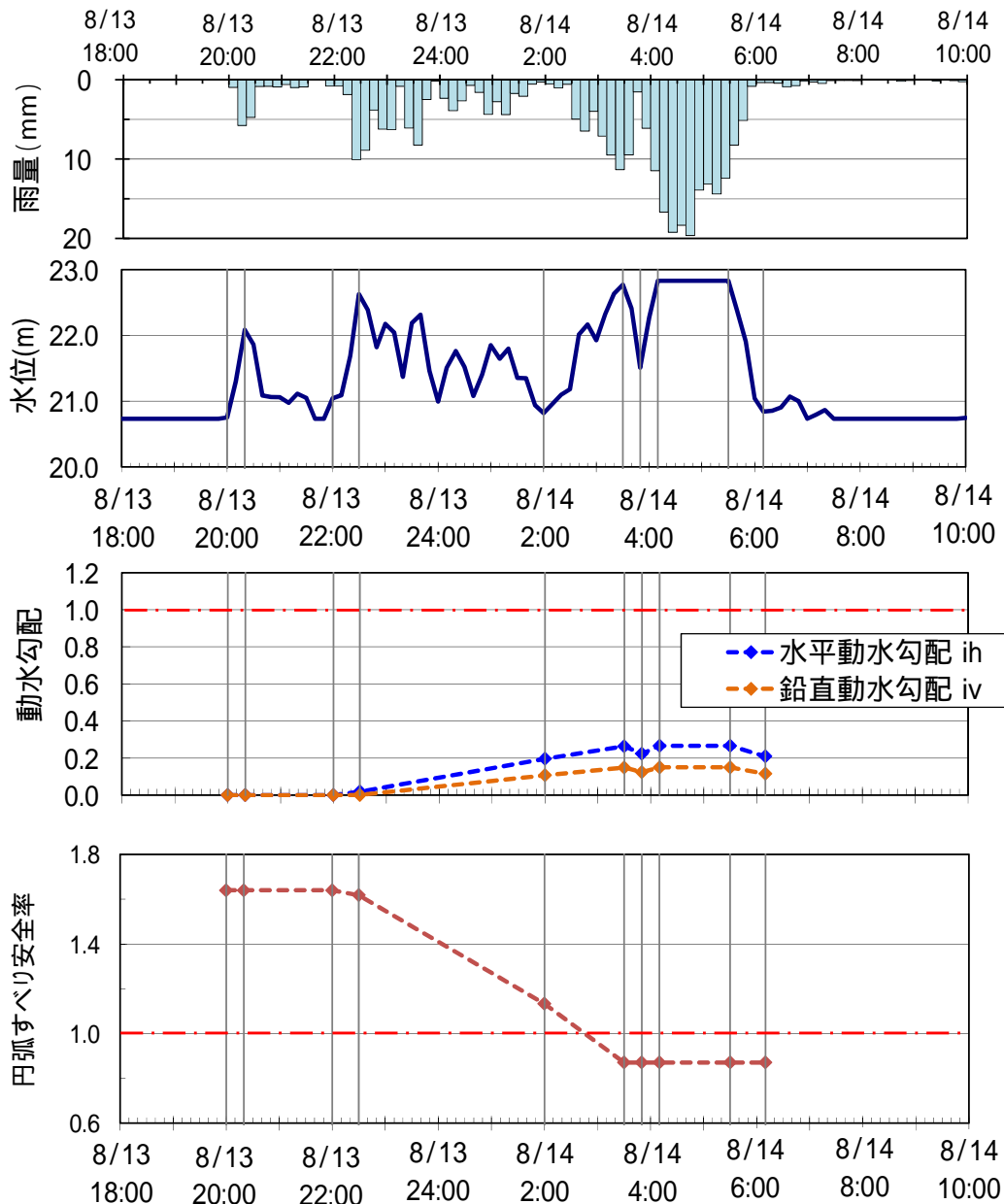
浸潤面と円弧すべり計算結果(8/14 5:30)



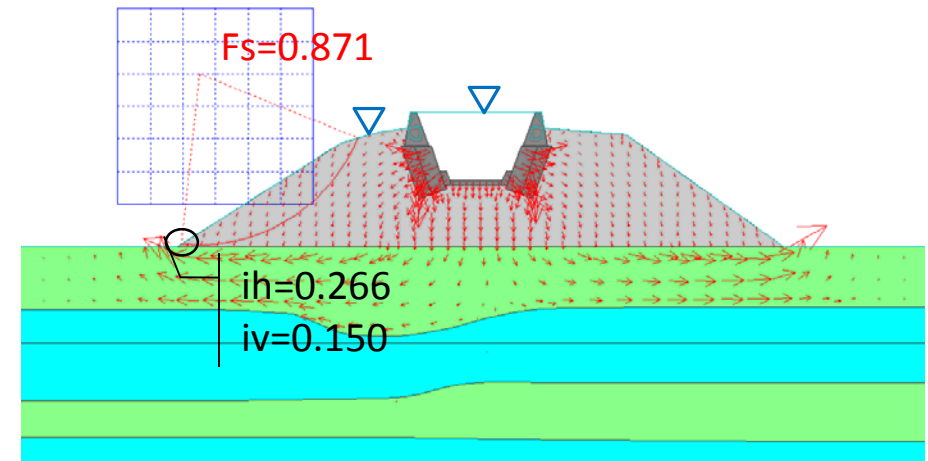
評価

- ・局所動水勾配については評価基準値を満たしており、パイピング破壊は発生しない。
- ・8/14 4:10の時点で円弧すべり安全率が1を下回っており、すべり破壊が生じる可能性がある。

解析結果 ケースC- / 初期地下水位: 堤内地盤-0.5m, 護岸: 透水, 河床: 透水



浸潤面と円弧すべり計算結果 (8/14 5:30)



評価

- ・局所動水勾配については評価基準値を満たしており、パイピング破壊は発生しない。
- ・8/14 3:30の時点で円弧すべり安全率が1を下回っており、すべり破壊が生じる可能性がある。

浸透に対する堤防の安定性評価

パイピング破壊

浸透流解析によれば、いずれのケースでも局所動水勾配は評価基準値を下回っている。



パイピング破壊は発生しない

すべり破壊

護岸と河床コンクリートを遮水層としたケース以外では、円弧すべり安全率が1を下回る。



降雨浸透のみではすべり破壊は発生しない

河川水の浸透により、すべり破壊が発生する可能性がある

3 . 侵食に対する堤防の安定性検討

想定される流量・流速

目撃証言より、
「越水はしていなかったが、ほぼ満杯まで
水位が上がっていた」



CASE-1 (樹木を考慮しない場合)

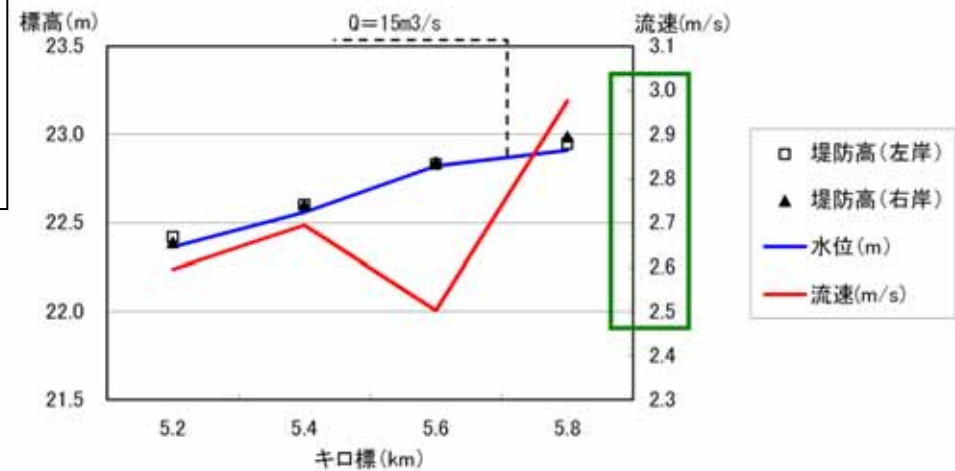
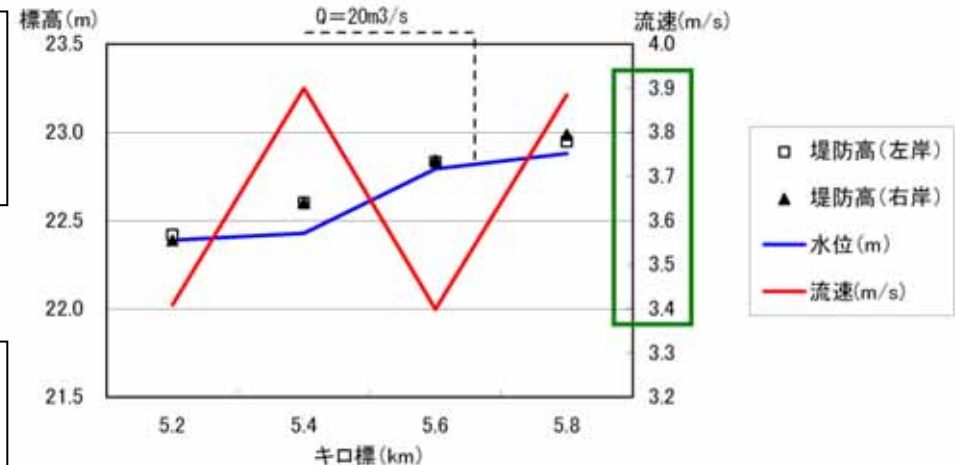
- ・堤防満杯流量 Q 20 m^3/s
- ・その時の流速 V 3.4 ~ 3.9 m/s

CASE-2 (樹木を考慮する場合)

- ・堤防満杯流量 Q 15 m^3/s
- ・その時の流速 V 2.5 ~ 3.0 m/s



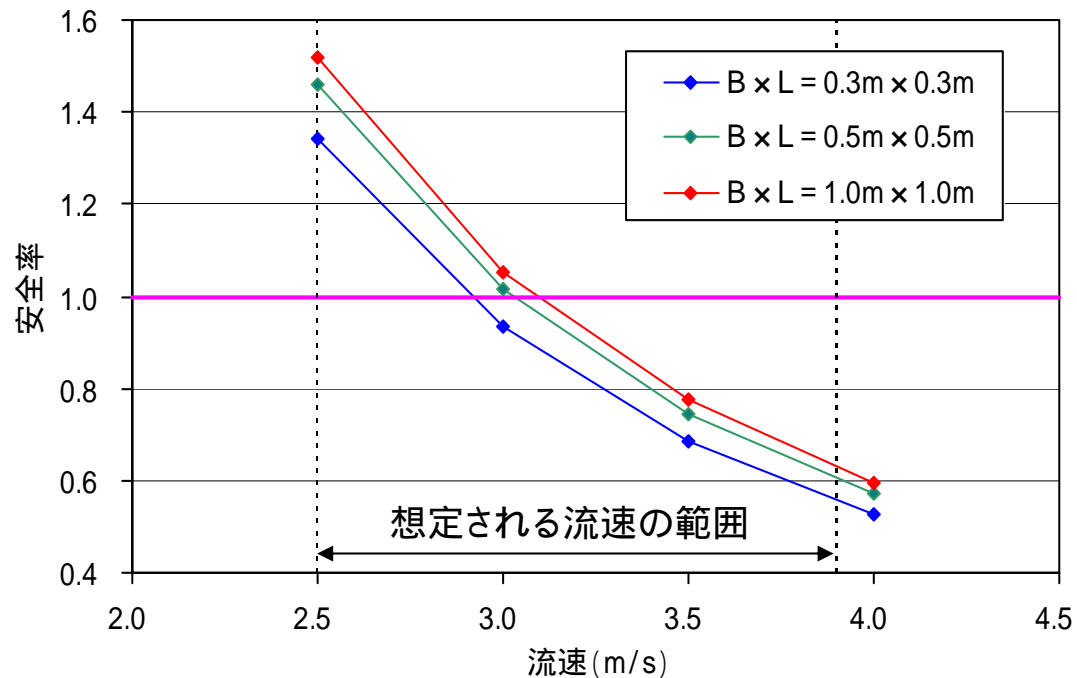
想定される流速
 V 2.5 ~ 3.9 m/s



(CASE-2 樹木を考慮しない場合)

河床コンクリートの移動の可能性

調査により、弥陀次郎川河口部において、河床張りの材料と推測されるコンクリート片が多く確認された。
これらのコンクリート片は、大きいもので1000mm × 1000mm程度で、厚さは概ね15mm程度であった。
『護岸の力学設計法』に示される「めくれモデル」により、これらのコンクリート片が移動するかを評価した。



(流速とめくれ安全率の関係)

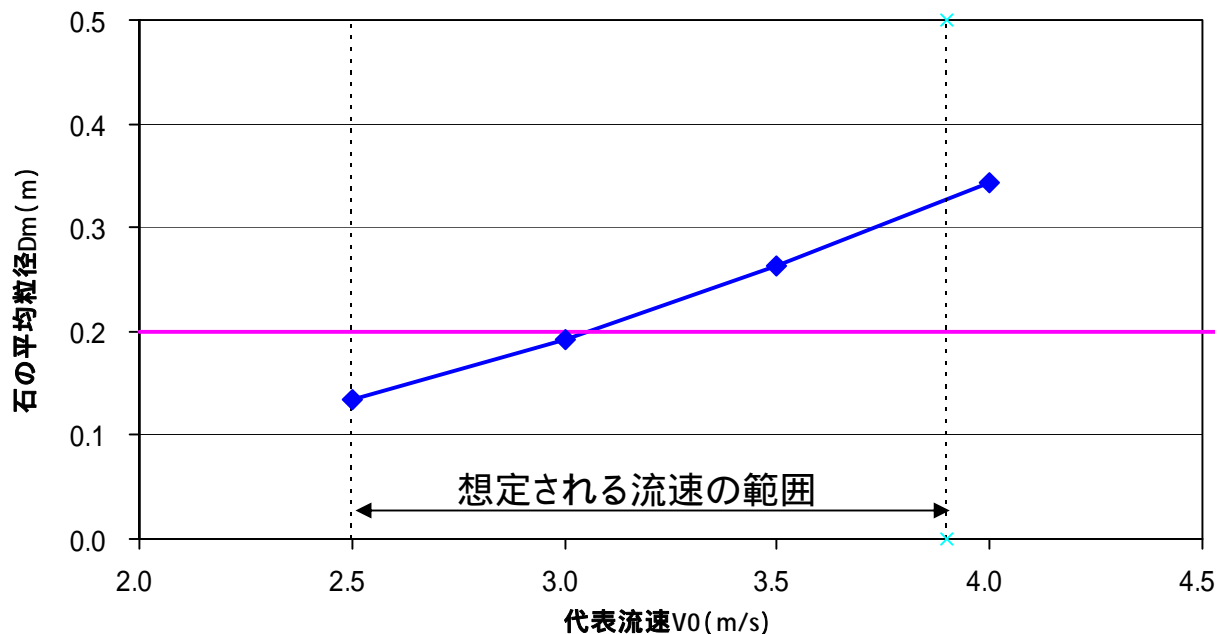
想定される流速が $V = 2.5 \sim 3.9$ m/sであるのに対し、流速が3m程度を上回るとめくれ安全率が1.0を下回る(めくれが生じる)結果となる。



河床コンクリートが下流まで流されたことは十分に考えられる

河床コンクリート背面の礫の移動の可能性

過去の河床コンクリートの補修履歴写真より、河床コンクリート背面には 200mm程度以下の礫が多数見られる。
『護岸の力学設計法』に示される「掃流 - 一体性が弱いモデル」により、これらの礫が移動するかを評価した。



(代表流速と移動限界粒径の関係)

想定される流速が V 2.5 ~ 3.9 m/sであるのに対し、流速が3m程度を上回ると、0.2m程度の石が移動する結果となる。



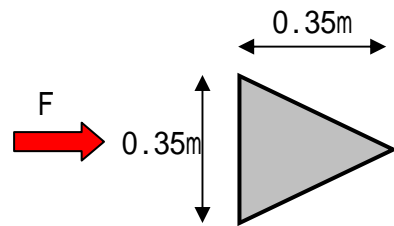
河床コンクリート背面の礫は移動する可能性が高く、その下の土砂も含めて洗掘が生じていたことは十分に考えられる

雑割の移動の可能性

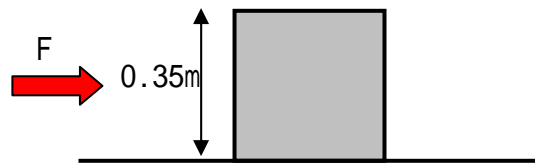
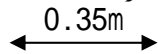
調査により、弥陀次郎川河口部において、石積み護岸の材料と推測される雑割石がいくつか確認された。
雑割石の形状を下図のように想定し、流水による作用力Fと摩擦による抵抗力Rを比較してこれらが移動するか評価した。



【三角柱】

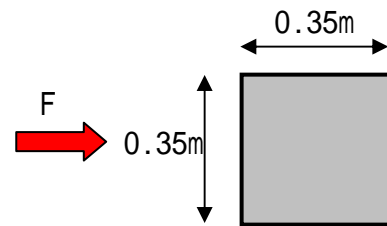


(平面図)

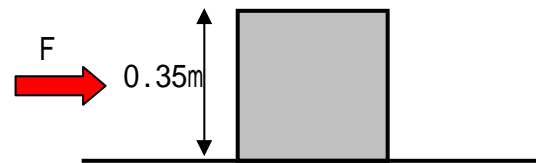
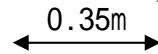


(側面図)

【立方体】



(平面図)



(側面図)

流水による作用力

$$F = 150 \sim 640 \text{ N}$$

摩擦による抵抗力

$$R = 170 \sim 350 \text{ N}$$



破堤箇所の雑割石が下流まで流されたことは十分に考えられる

まとめ

流下物調査

弥陀次郎河口部付近（宇治川合流部付近）に，破堤箇所のものと思われる以下の材料が確認された。

- ・ コンクリート片（大きいもので1000mm×1000mm程度，多数）
- ・ 護岸の雑割石（控え35cm程度，4個）

力学的な検証

想定される流速は $V = 2.5 \sim 3.9 \text{ m/s}$ であり，これらの外力に対して上記の材料やコンクリート背面の礫（200mm程度以下）が流されることは十分に考えられることが検証された。

- ・ コンクリート片
- ・ 雑割石
- ・ コンクリート背面の礫

が流されることは十分に考えられる。



結論

河床や護岸背面の土砂が侵食を受けた可能性は十分に考えられる