

第 4 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

京 都 府

目次

1. 前回検討会からの追加検討
2. 浸透流解析
3. 河床コンクリート安定性検討
4. 欠壊メカニズムの考察
5. いただいた御意見

1. 前回検討会からの追加検討

検討課題①～浸透に対する安定性検討に係る課題

課題①

浸透流解析のパラメータスタディ

堤体・護岸について、想定し得るパラメータをいくつか設定し、どういった条件でどんな破壊が考えられるか、さらに検討を行うこと。

課題②

護岸構造の詳細調査

護岸構造についてさらに詳しく調査を行い、解析モデルに反映させること。



対応

追加現地調査の実施と解析モデルへの反映

堤体および護岸構造のより詳細なパラメータを得るための追加現地調査を行い、解析モデルに反映させた。

検討課題②～侵食に対する安定性検討に係る課題

課題

河床コンクリートの安定性検討

河床コンクリートに生じた段差の高さと“めくれ”の限界流速の関係について調査・検討すること。



対応

「めくれモデル」による河床安定性の追加検討

前回の検討会で提示した河床の「めくれモデル（『護岸の力学設計法』による）」を用いて、河床の安定性に対する追加検討を行った。

追加現地調査の内容

調査①

堤体のサウンディング試験

これまでの地質調査で詳細を明確にできなかった堤体の土層構成を把握するため、既往調査を補完する目的で、堤体のサウンディング試験を実施した。

- ・スウェーデン式サウンディング試験（SWS試験）
- ・簡易動的コーン貫入試験

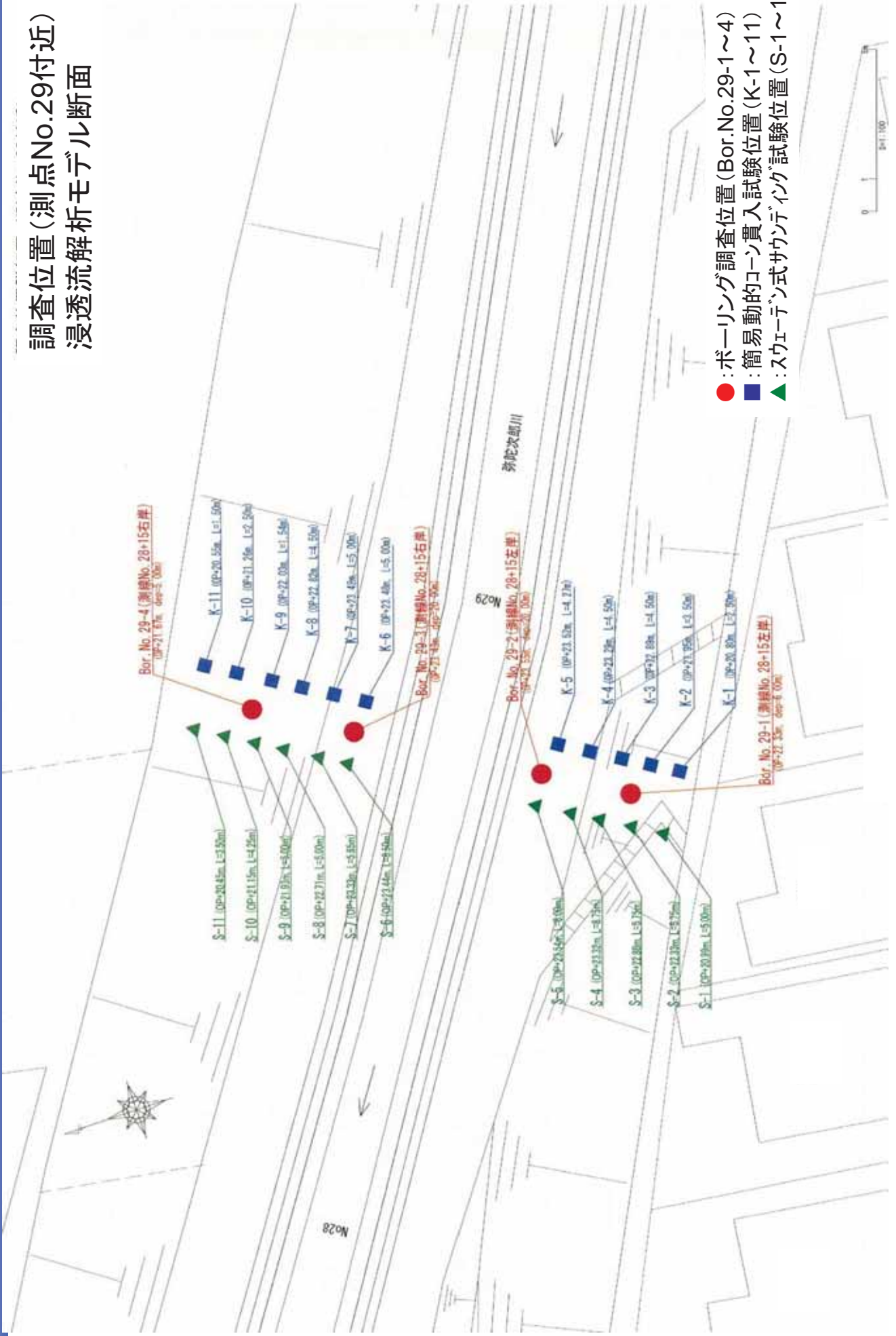
調査②

護岸の抜石調査（追加）

浸透流解析におけるパラメータのひとつである護岸の透水係数を評価するために、追加で抜石調査を実施し、護岸構造の詳細を調査した。

サウンディング試験 実施箇所図

調査位置 (測点No.29付近)
浸透流解析モデル断面



- : ボーリング調査位置 (Bor.No.29-1~4)
- : 簡易動的コン貫入試験位置 (K-1~11)
- ▲ : スウェーデン式サウンディング試験位置 (S-1~11)

サウンディングに基づく土質想定断面図と地下水位

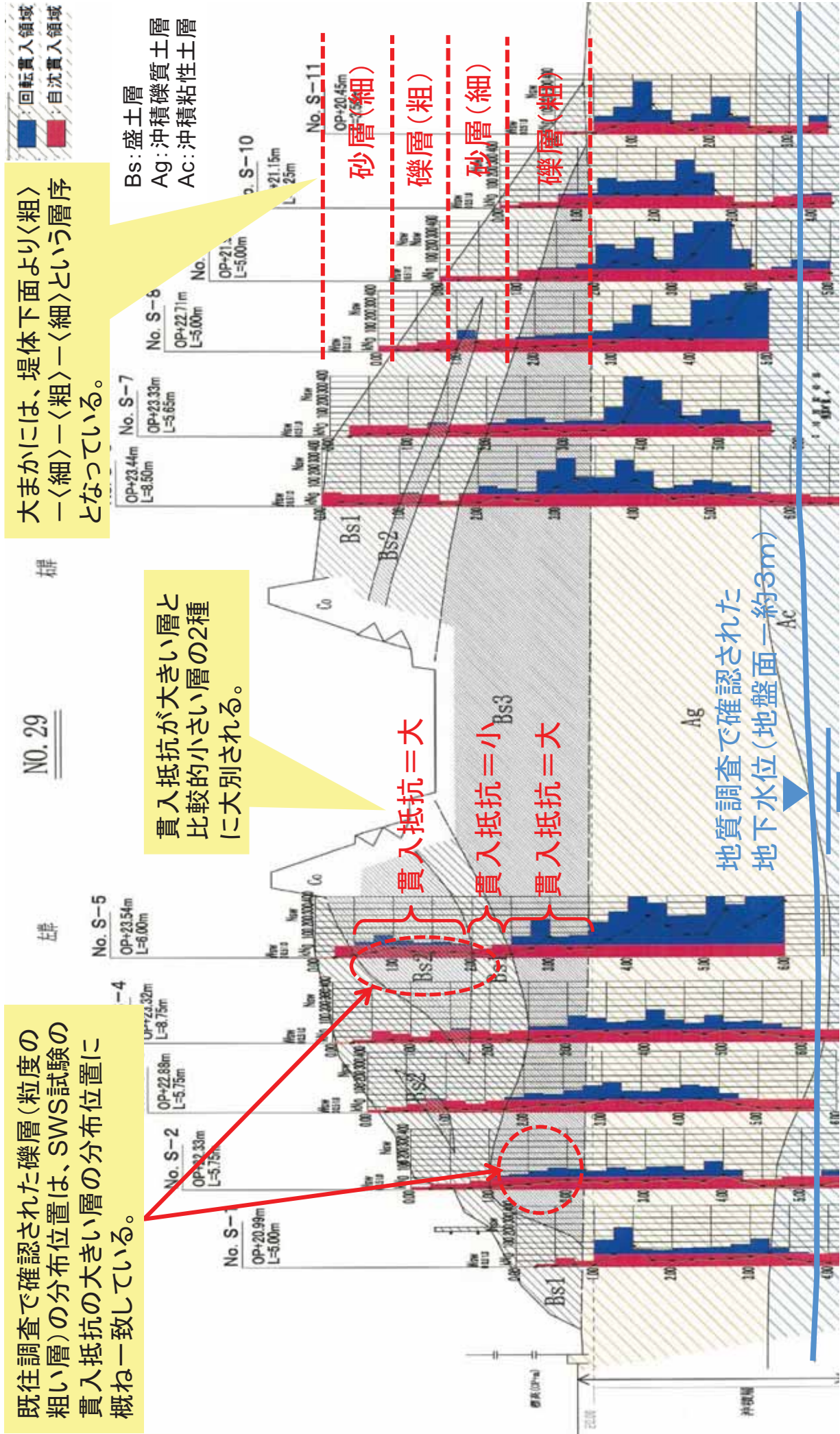
既往調査で確認された礫層（粒度の粗い層）の分布位置は、SWS試験の貫入抵抗の大きい層の分布位置に概ね一致している。

大まかには、堤体下面より〈粗〉-〈細〉-〈粗〉という層序となっている。

貫入抵抗が大きい層と比較的小さい層の2種に大別される。

貫入抵抗=大
貫入抵抗=小
貫入抵抗=大

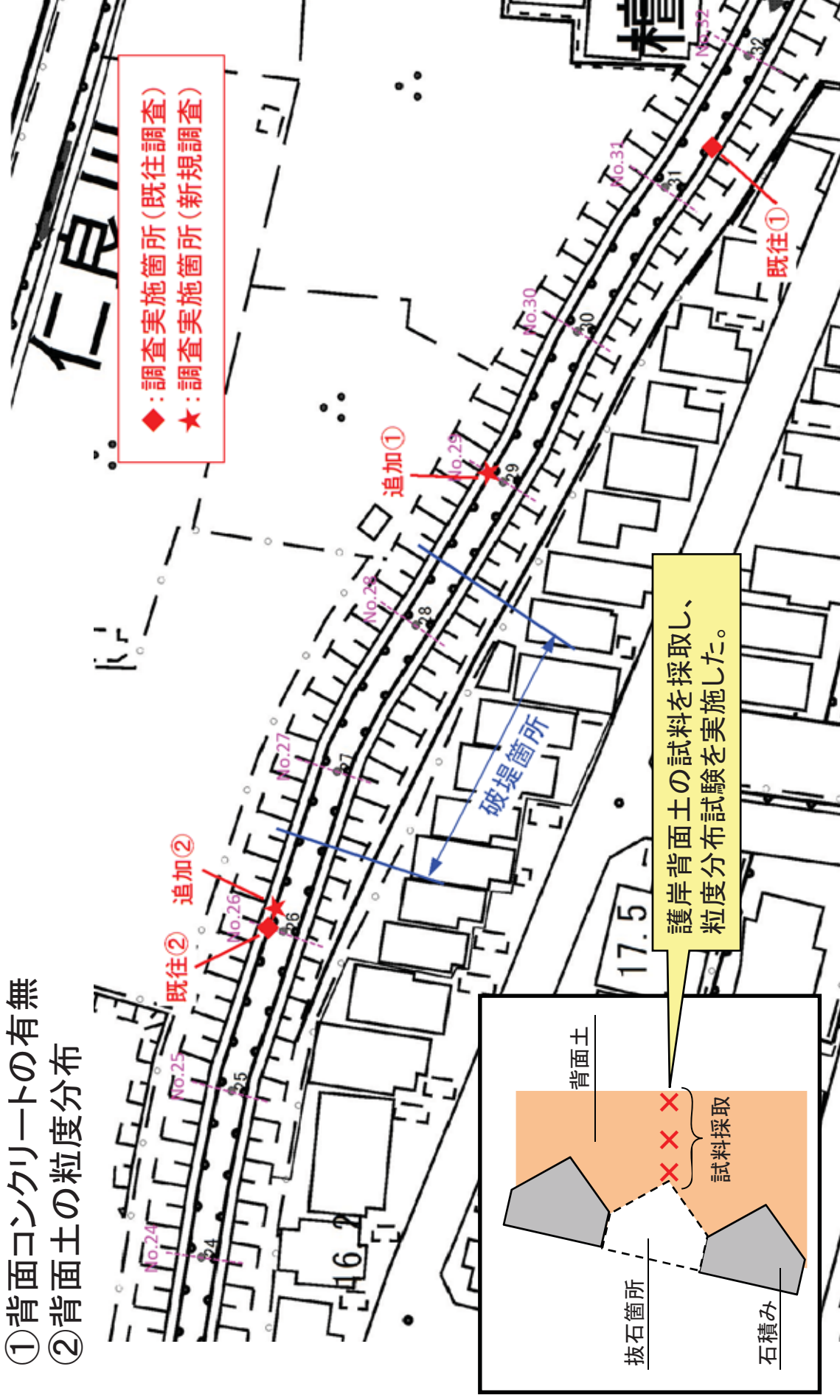
地質調査で確認された地下水位（地盤面—約3m）



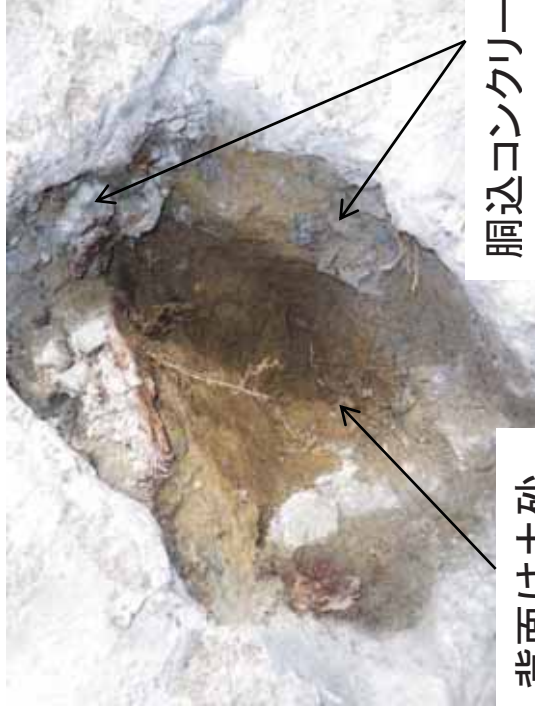
護岸の抜き石調査(追加)

抜き石調査を破堤箇所の上流各1箇所を追加実施し、以下の点を確認した。

- ①背面コンクリートの有無
- ②背面土の粒度分布



抜き石調査結果



洞辺コンクリートを確認
劣化が進み空隙があるため、遮水性なしと判断

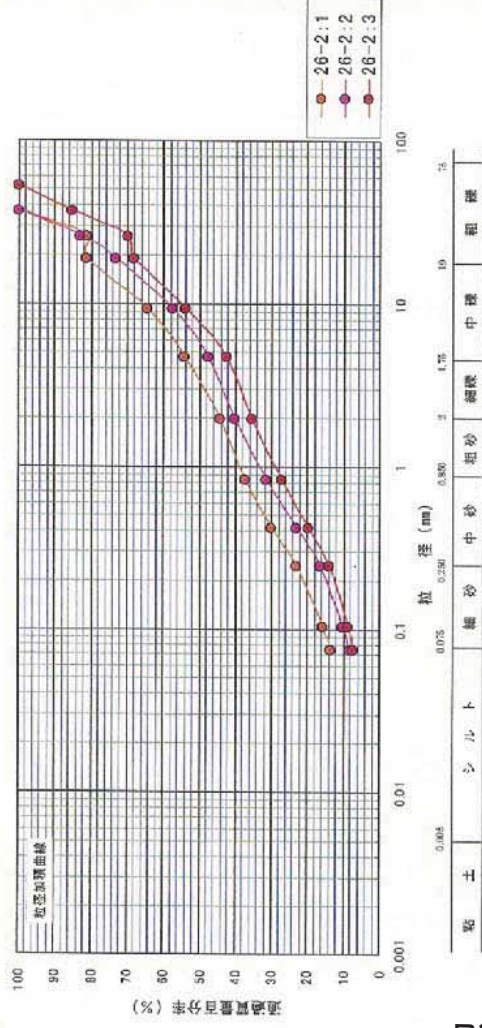
背面は土砂



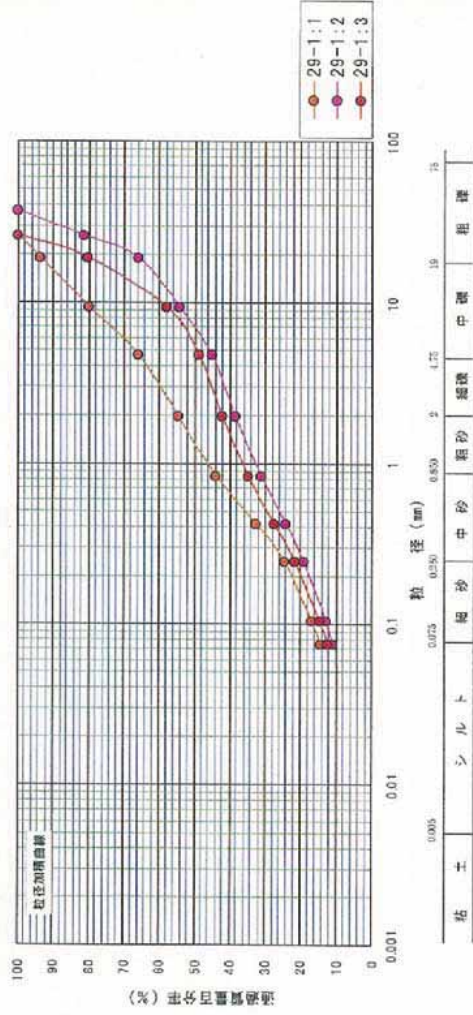
背面土砂を採取



石積背面 No.26-2 (破堤箇所より下流側 礫質土層)



石積背面 No.29-1 (破堤箇所より上流側 礫質土層)



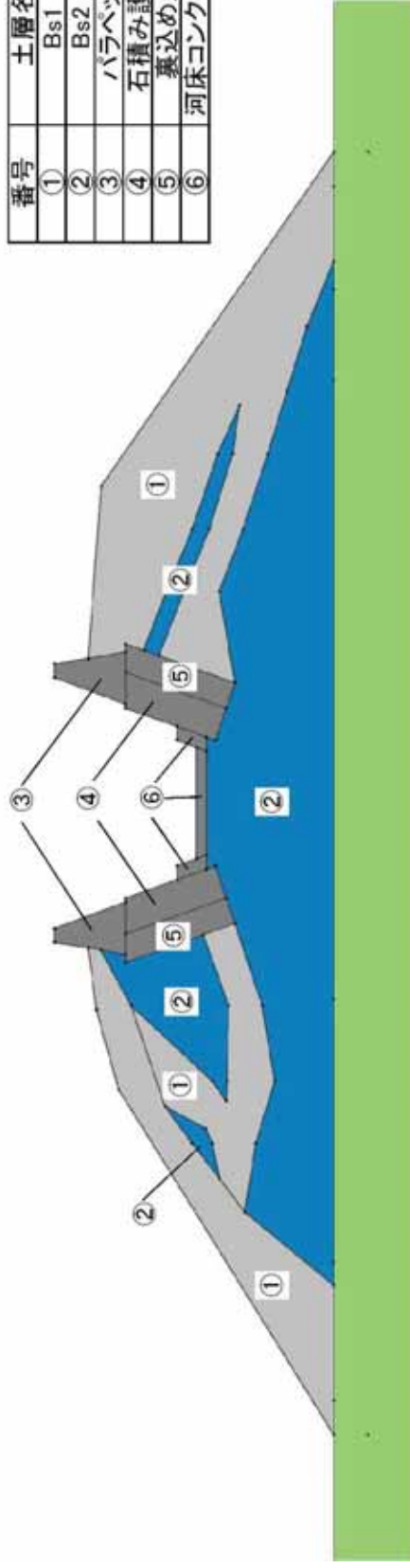
2. 浸透流解析

堤体の土層構成

土層構成タイプⅠ

SWS試験の結果を忠実に反映させたケース

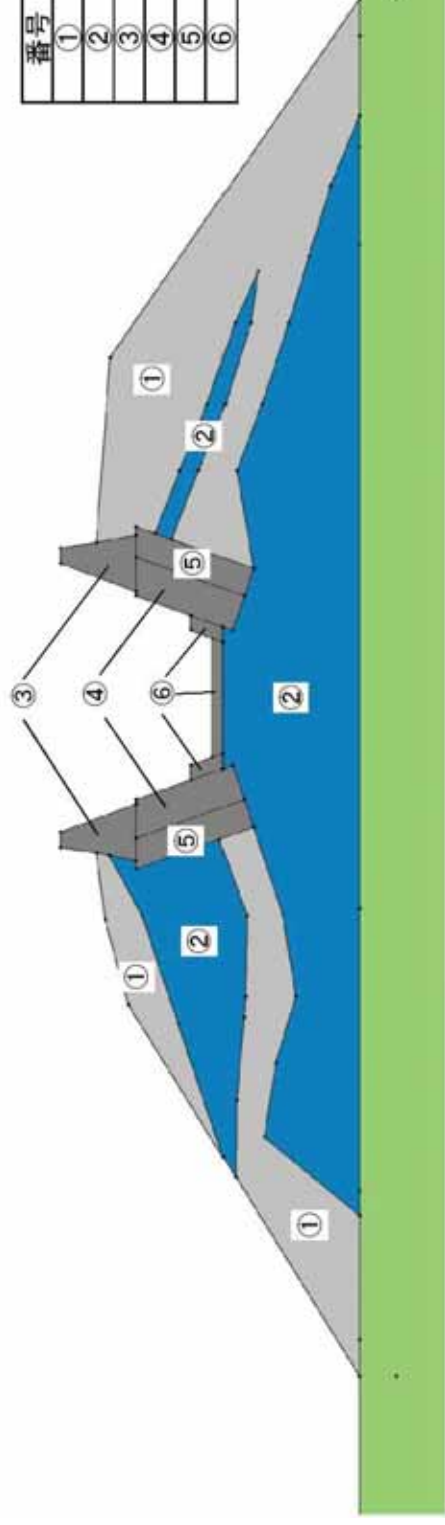
番号	土層名
①	Bs1
②	Bs2
③	パラベット
④	石積み護岸
⑤	裏込め土
⑥	河床コンクリート



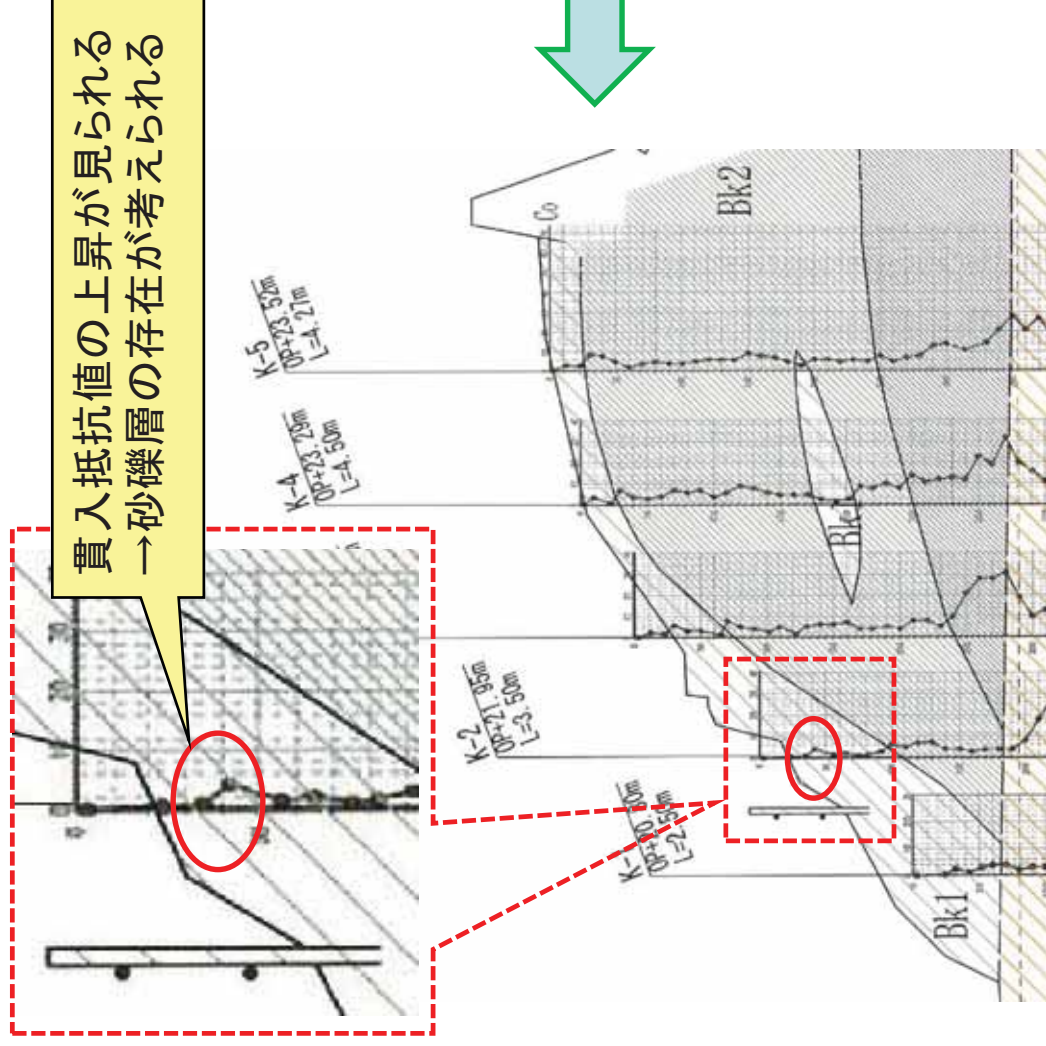
土層構成タイプⅡ

左岸側のBs2層を堤防法面まで貫通させたケース

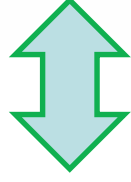
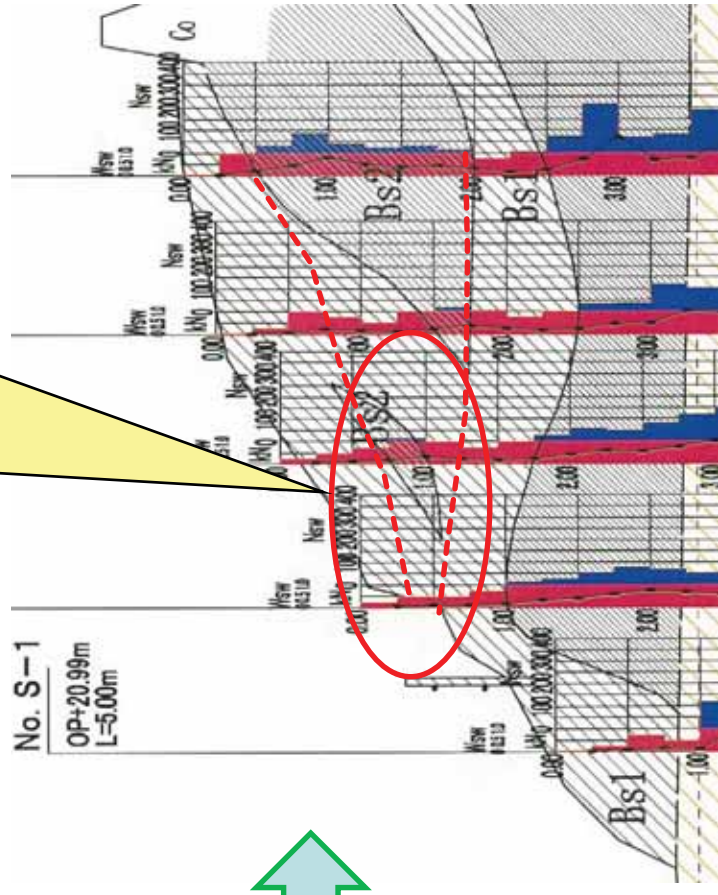
番号	土層名
①	Bs1
②	Bs2
③	パラベット
④	石積み護岸
⑤	裏込め土
⑥	河床コンクリート



土層構成Case II の設定根拠



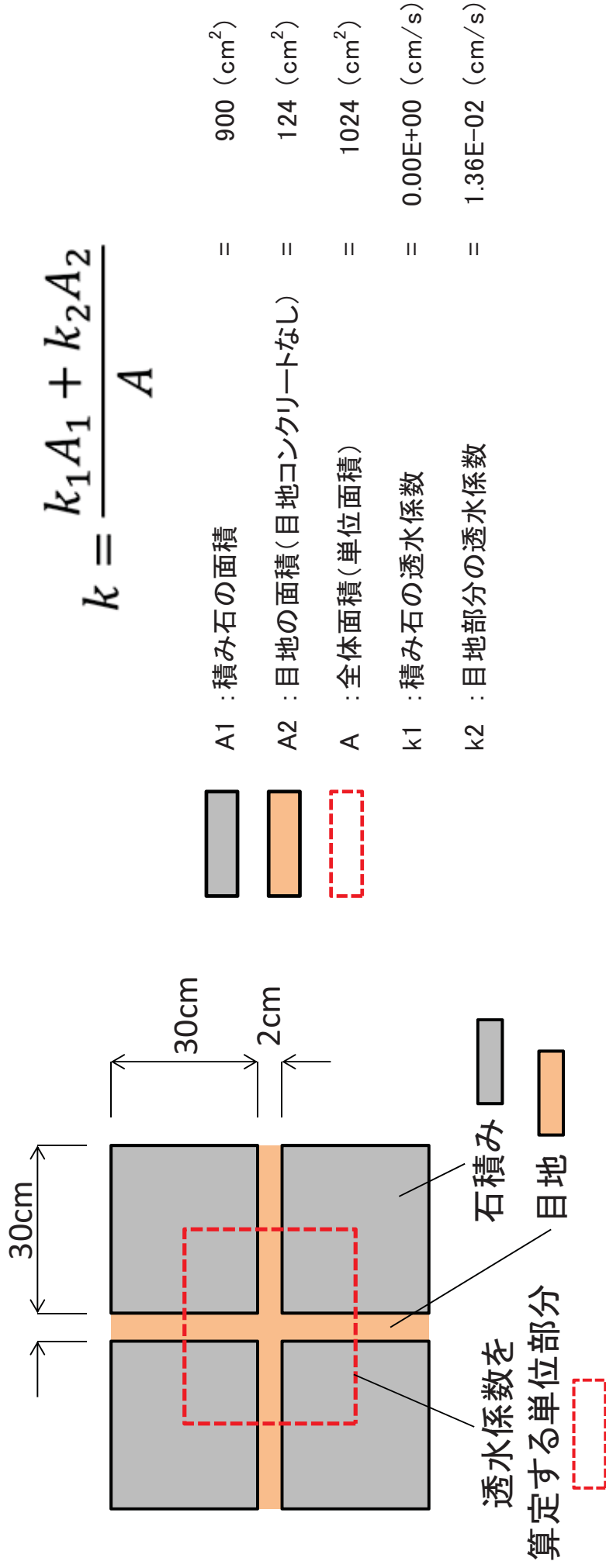
砂礫層 (Bs2層) は
法面まで連続？



簡易動的コーン貫入試験結果

SWS試験結果

護岸の透水係数～護岸背面土の粒度分布結果より



背面土の粒度分布試験結果(D20)※)と護岸の石積み部分と目地部分の面積比から、透水係数を設定



$$k = 1.65 \times 10^{-3} \text{ (cm/sec) と推定}$$

※)背面土(目地部分)の透水係数は、一般に広く用いられるCreagerによるD20と透水係数の関係から推定

堤体の地盤定数

土層名	強度定数		飽和透水係数	
	C(kN/m ²)	ϕ (deg)	k(cm/s)	根拠
①Bs1	1	39	4.76E-06	堤体細粒土層のD20(Creager)
②Bs2	1	39	2.69E-02	室内透水試験
③パラペット	100	0	1.00E-06	不透水
④石積み護岸	100	0	1.65E-03	抜石調査結果に基づき設定
⑤裏込め土	0	40	1.36E-02	護岸背面土の粒度分布(D20)
⑥河床コンクリート	100	0	1.00E-02 または1.00E-06	河床コンクリートの場合と無しの場合の2通りを想定

※)Bs1層、Bs2層ともに、土質分類は砂～礫質土であることから、CD試験の結果を適用

解析ケース

堤体の土層構成、河床コンクリートの有無、初期水位条件の組合せにより、以下の8通りの解析ケースを設定した。

ケース番号	計算条件		
	堤体土層	河床コンクリート	初期水位
I-A-①	タイプ I	あり	Ac層
I-A-②	タイプ I	あり	G.L.-0.5m
I-B-①	タイプ I	なし	Ac層
I-B-②	タイプ I	なし	G.L.-0.5m
II-A-①	タイプ II	あり	Ac層
II-A-②	タイプ II	あり	G.L.-0.5m
II-B-①	タイプ II	なし	Ac層
II-B-②	タイプ II	なし	G.L.-0.5m

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

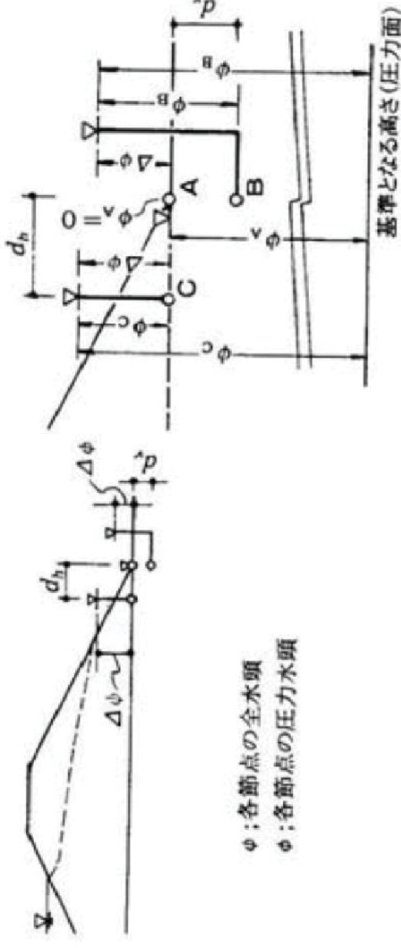
$\Delta\phi$ ；節点間の全水頭差(m)

$\Delta\phi$ ；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 の両者とも以下で判断。

- $1.0 \leq i_h, i_v$ 可能性大きい
- $0.8 \leq i_h, i_v < 1.0$ 可能性あり
- $0.5 < i_h, i_v < 0.8$ 可能性低い
- $i_h, i_v \leq 0.5$ 可能性なし

「河川堤防設計指針」で規定されている、パイピング破壊に対する安
全性の照査基準 $i < 0.5$ は、一般的な砂質土及び礫質土の度限界
動水勾配が $i_c = 0.8 \sim 1.0$ とされるうえで採用されている、設計に際し
ての基準値である。

堤体採取土の土質試験結果から

$$i_c = (\rho_s - 1) / (1 + e)$$

$$= (2.653 - 1) / (1 + 0.585) = 1.04$$

ρ_s : 土粒子の密度、 e : 間隙比

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。

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

ここに、

F_s : 安全率

u : すべり面の間隙水圧 (kPa)

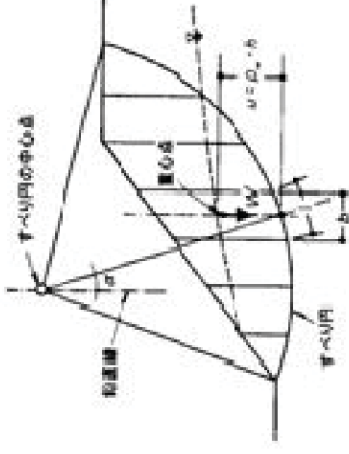
W : 分割片の重量 (kN/m)

c : すべり面に沿う土の粘着力 (kPa)

I : 円弧の長さ (m)

ϕ : すべり面に沿う土の内部摩擦角 ($^{\circ}$)

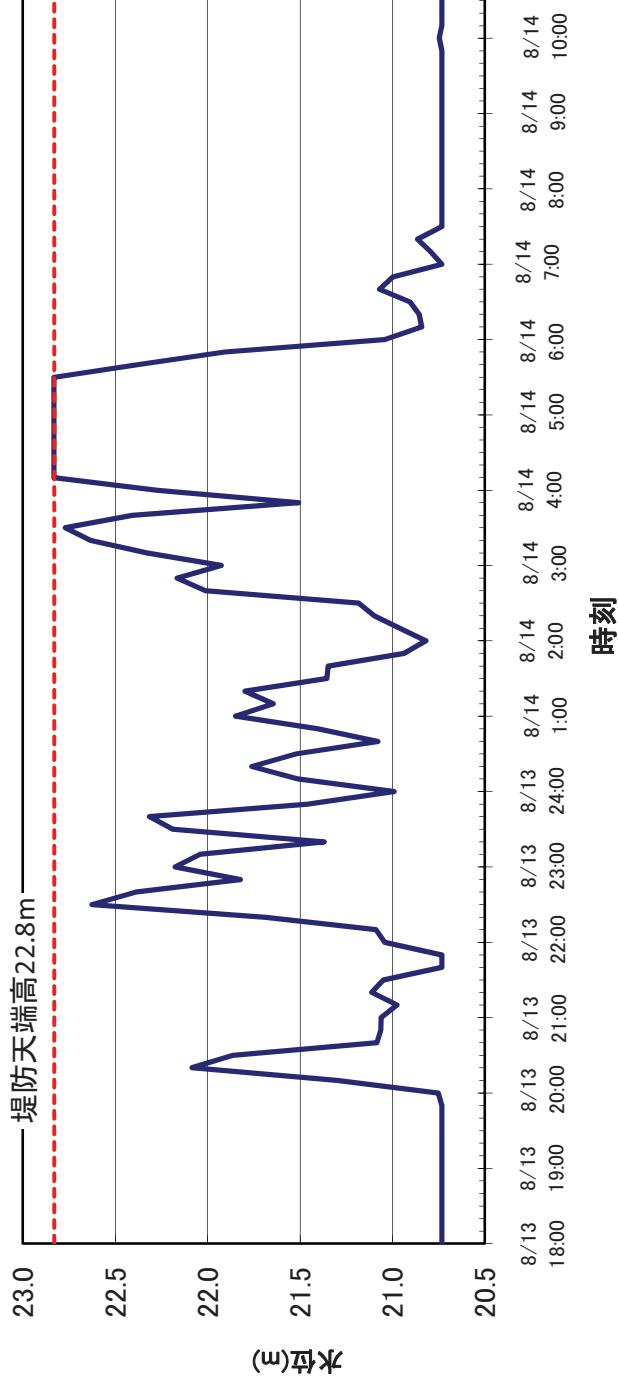
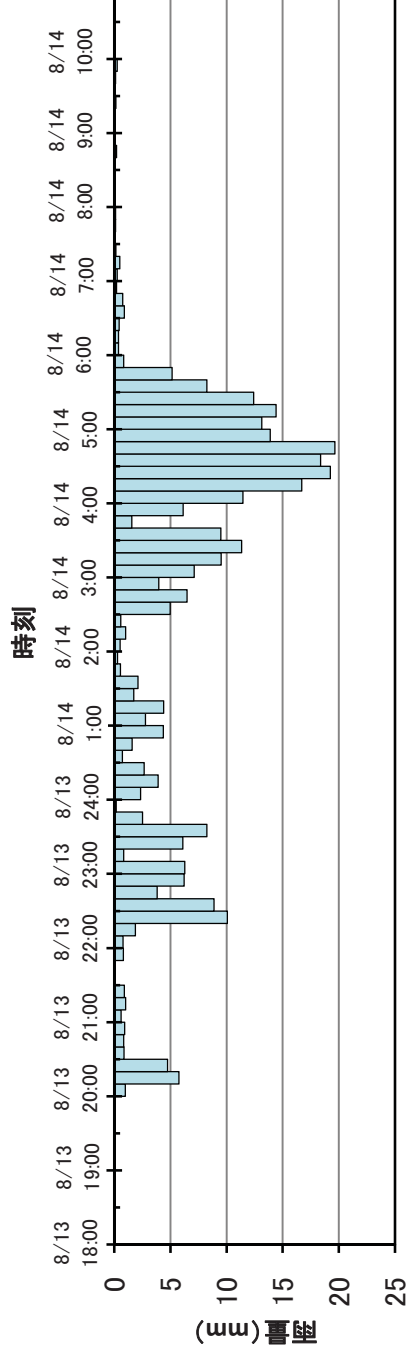
b : 分割片の幅 (m)



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

降雨波形および外水位波形

これまでの解析と同様、XバンドMPLレーダー観測記録を基にした降雨波形と流出解析によって得られたハイドログラフに基づく外水位波形を用いる。



解析結果一覧表

ケース番号	計算条件			計算結果		
	堤体土層	河床Co	初期水位	ih	iv	Fs
I-A-①	タイプI	あり	Ac層	0.021	0.013	1.623
I-A-②	タイプI	あり	G.L.-0.5m	0.148	0.087	1.621
I-B-①	タイプI	なし	Ac層	0.864	0.507	1.493
I-B-②	タイプI	なし	G.L.-0.5m	0.864	0.507	1.478
II-A-①	タイプII	あり	Ac層	0.032	0.019	1.640
II-A-②	タイプII	あり	G.L.-0.5m	0.152	0.090	1.631
II-B-①	タイプII	なし	Ac層	0.911	0.535	1.402
II-B-②	タイプII	なし	G.L.-0.5m	0.911	0.535	1.386

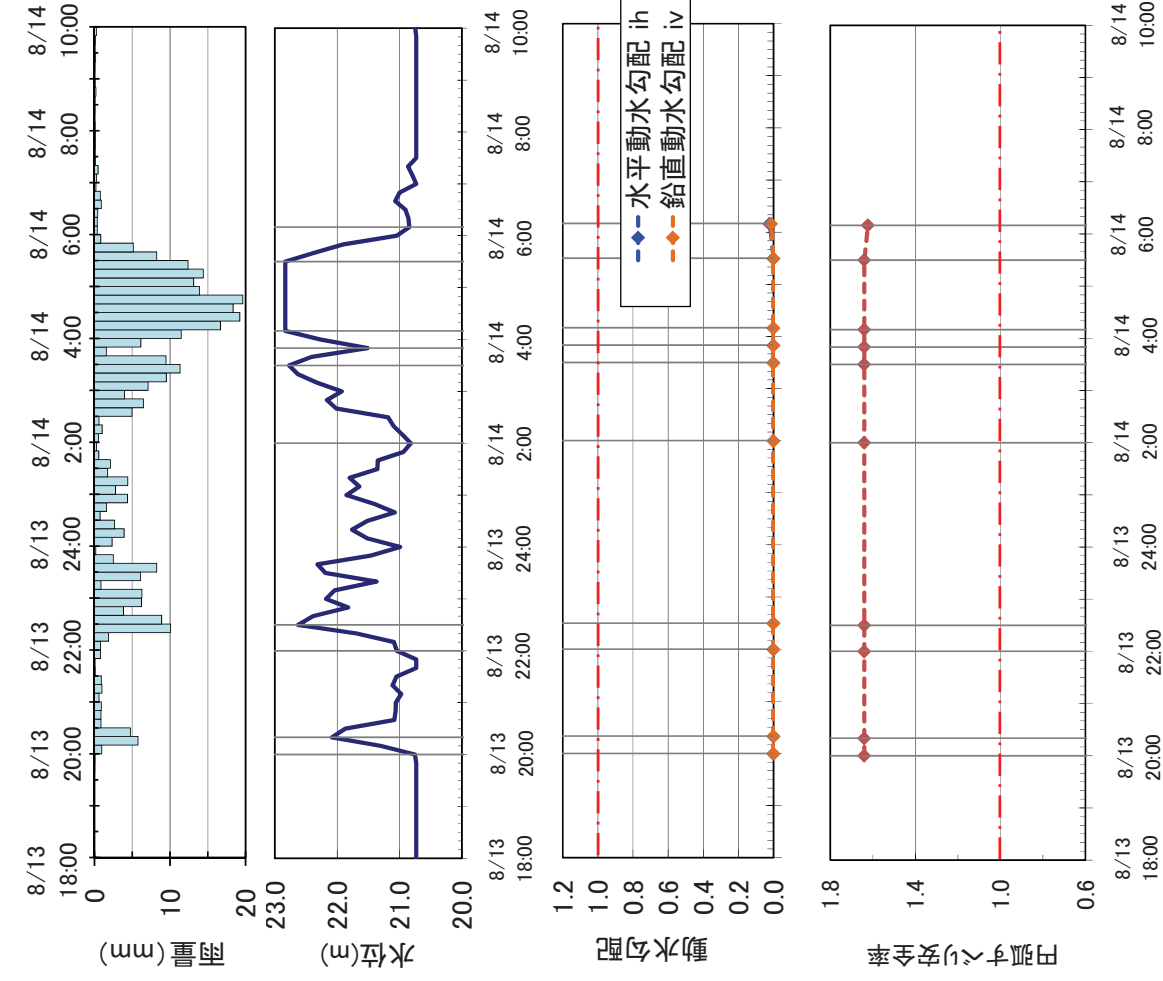
※計算結果は、各ケースで堤体が最も危険な状態になった時点の数値を記載した。

局所動水勾配 iv 、 $ih < 1.0$

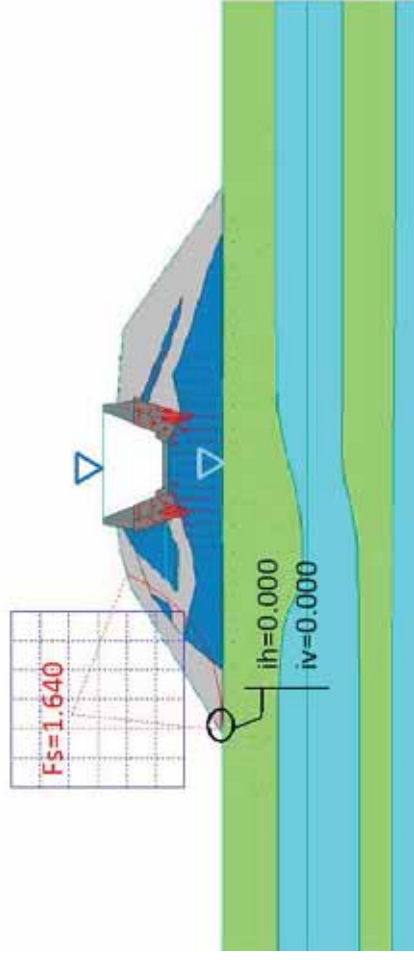
河床コンクリートが有る条件のときは、
指針での照査基準の0.5以下

円弧すべりは全ての場合で
 $Fs \geq 1.0$

解析結果〈ケース I-A-①〉／堤体土層：タイプ I，河床コンクリート：あり，初期地下水位：Ac層〉



■ 浸潤面と円弧すべり計算結果 (8/14 5:30)

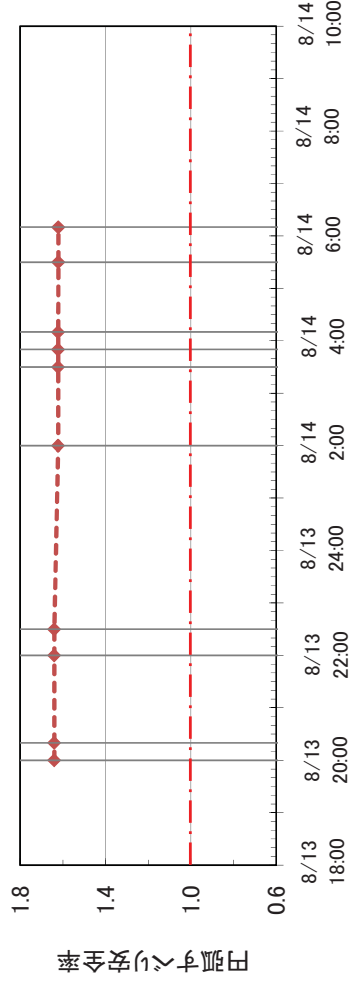
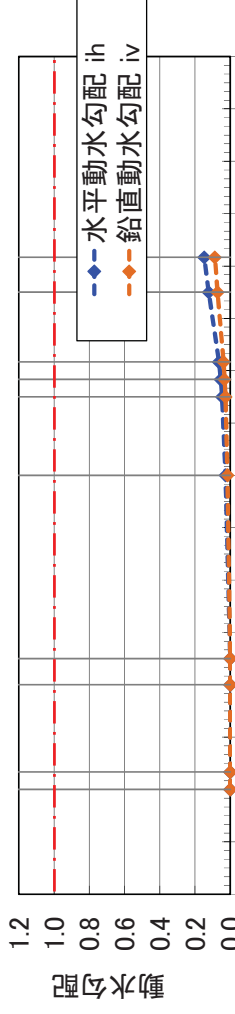
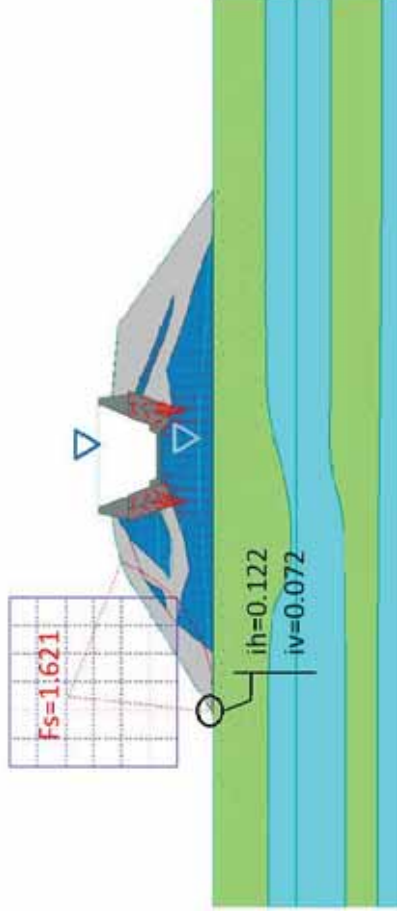
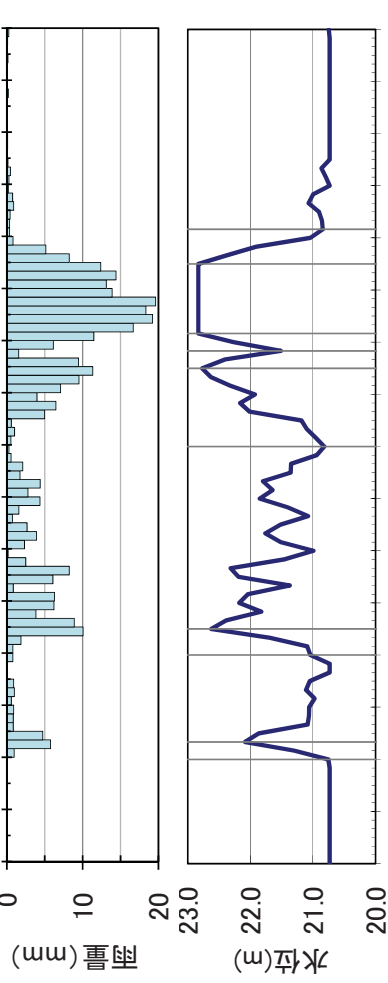


■ 評価

- ・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 I-A-②／堤体土層:タイプ I, 河床コンクリート:あり, 初期地下水位:G.L.-0.5m〉

■ 浸潤面と円弧すべり計算結果 (8/14 5:30)

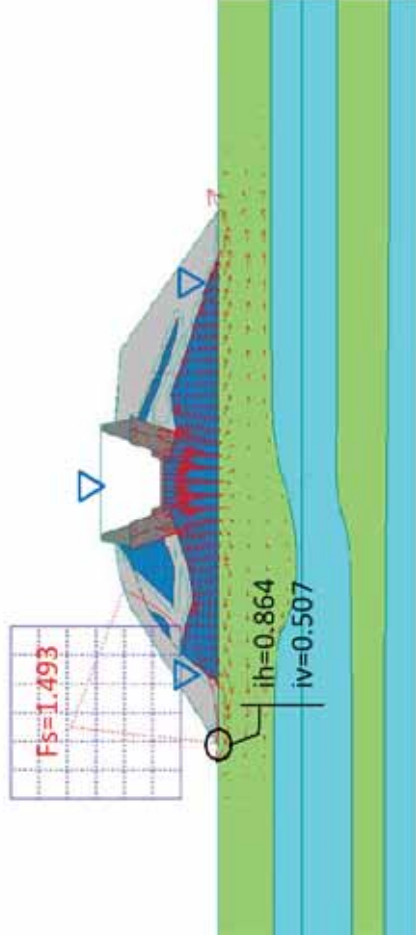
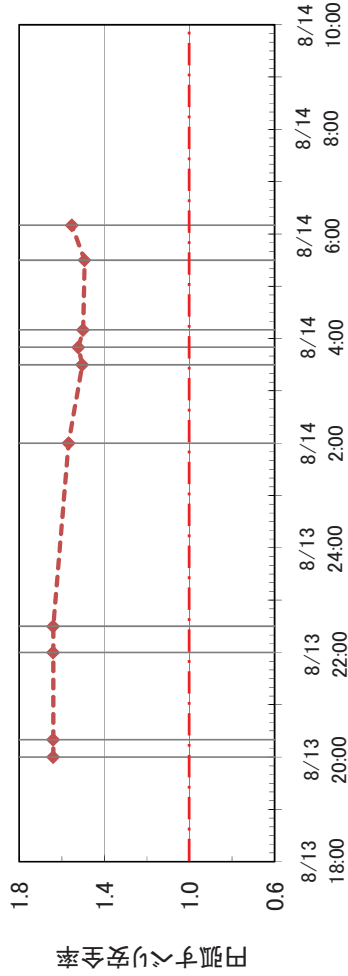
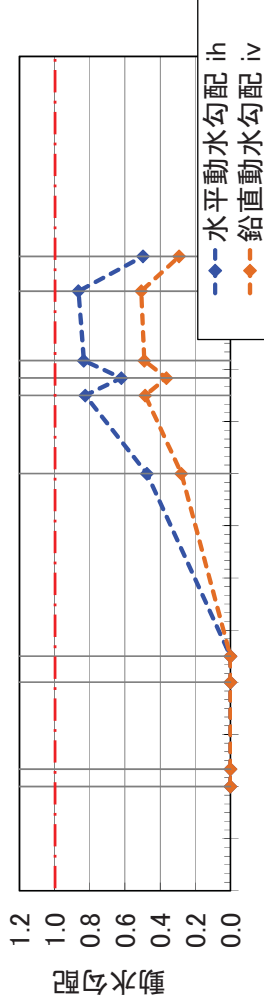
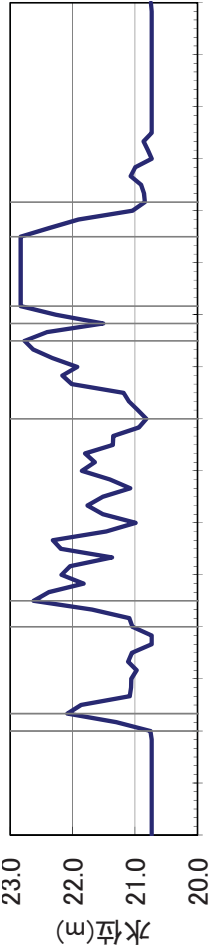
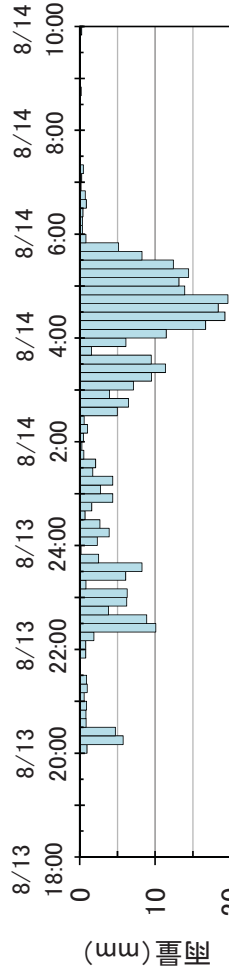


■ 評価

- ・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 I-B-①〉／堤体土層：タイプ I，河床コンクリート：なし，初期地下水位：Ac層〉

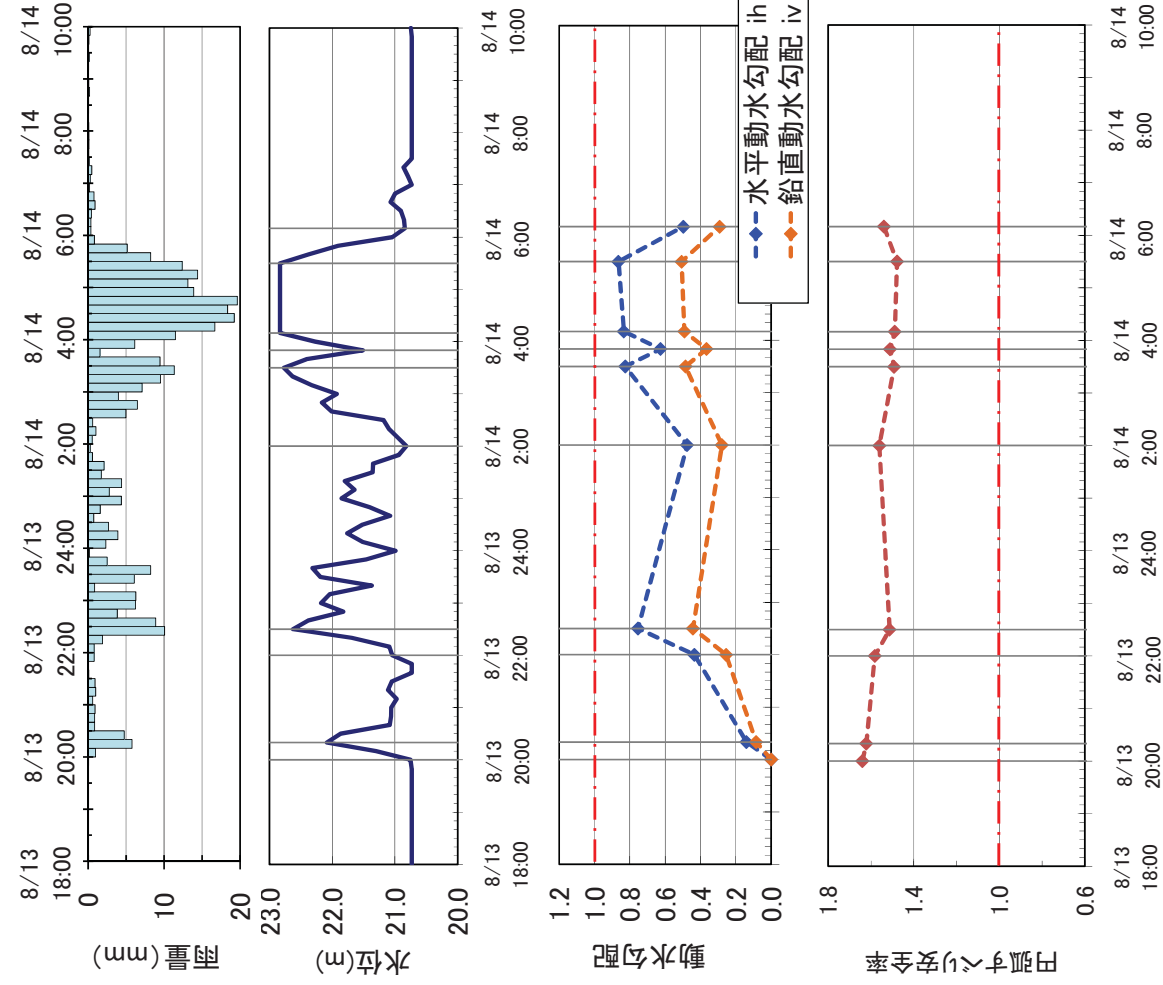
■ 浸潤面と円弧すべり計算結果 (8/14 5:30)



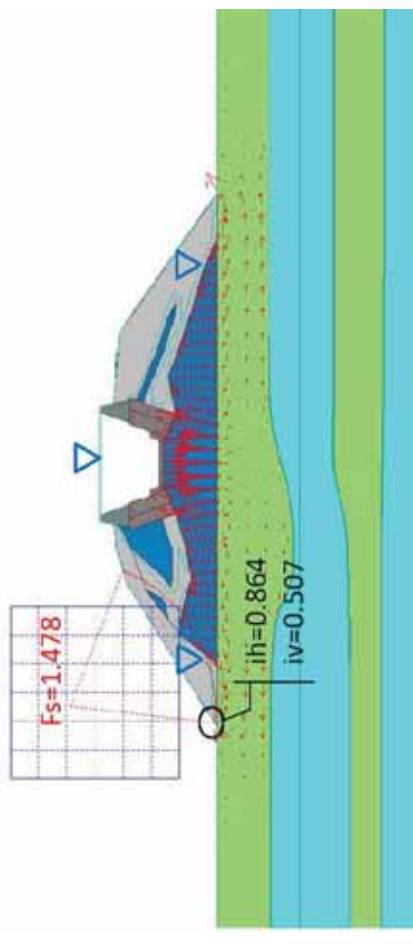
■ 評価

- ・円弧すべり安全率は評価基準値を満たしており、円弧すべり破壊は発生しないと考えられる。
- ・局所動水勾配は1.0付近まで上昇していることから、本ケースではパイピング発生の可能性がある。

解析結果〈ケース I-B-② / 堤体土層:タイプ I, 河床コンクリート:なし, 初期地下水位:G.L.-0.5m〉



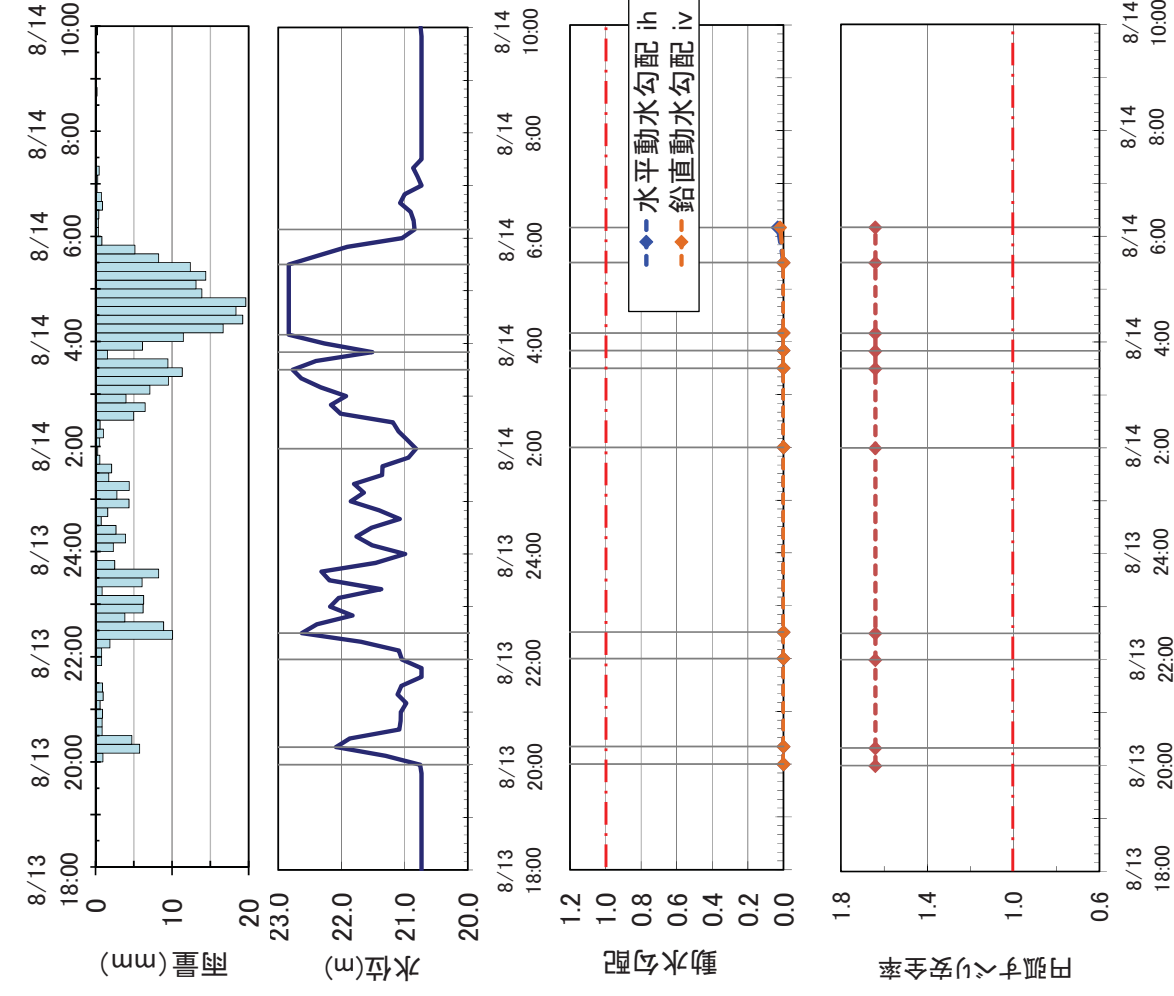
■ 浸潤面と円弧すべり計算結果 (8/14 5:30)



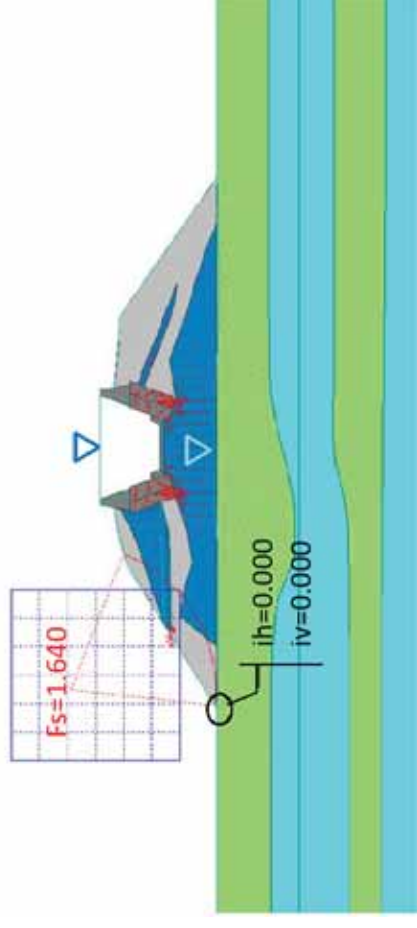
■ 評価

- ・円弧すべり安全率は評価基準値を満たしており、円弧すべり破壊は発生しないと考えられる。
- ・局所動水勾配は1.0付近まで上昇していることから、本ケースではパイピング発生の可能性がある。

解析結果〈ケースⅡ-A-①〉／堤体土層：タイプⅡ，河床コンクリートあり，初期地下水位：Ac層〉



■ 浸潤面と円弧すべり計算結果 (8/14 5:30)

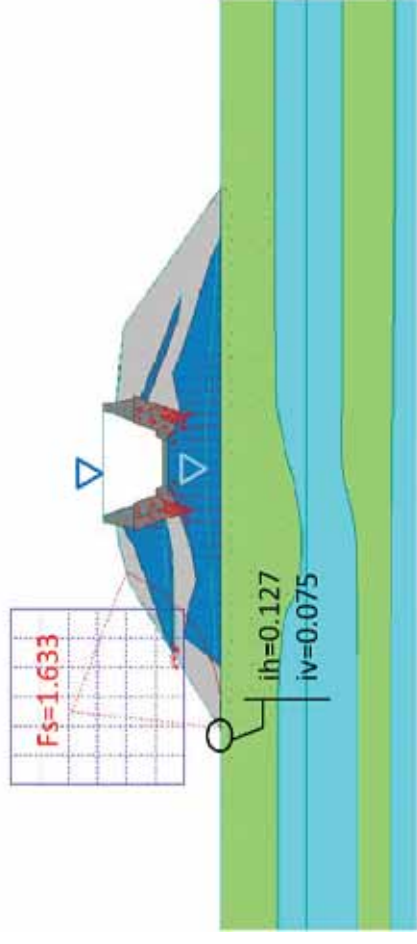
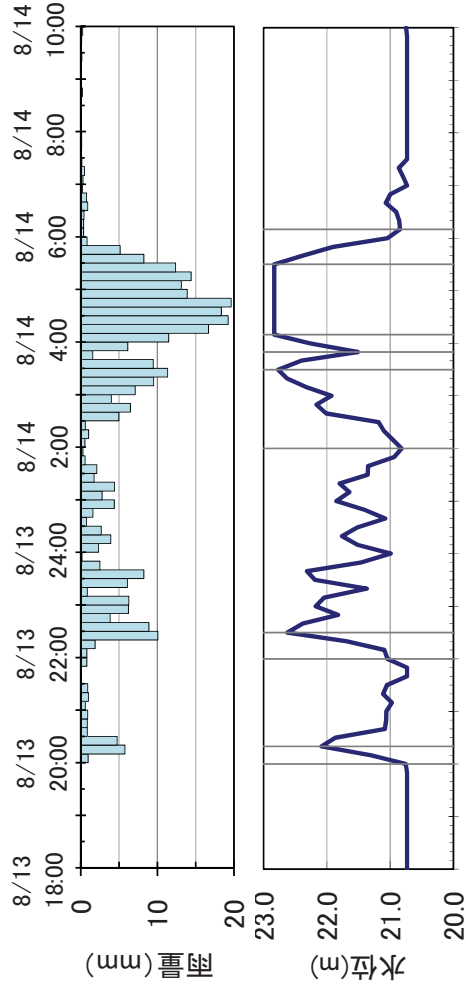


■ 評価

- ・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。

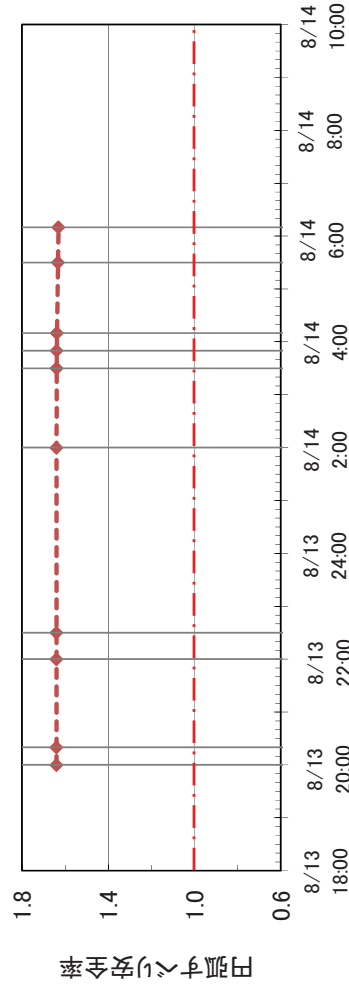
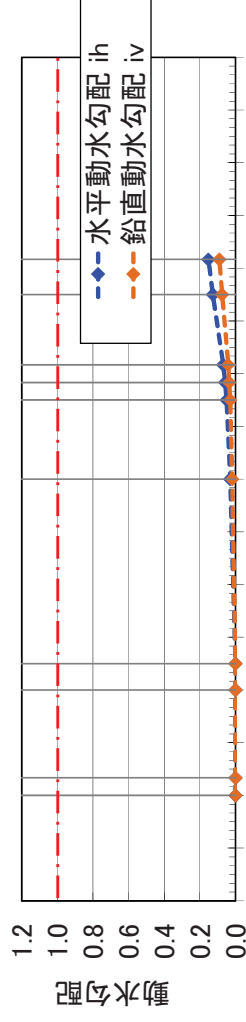
解析結果〈ケースⅡ-A-②〉／堤体土層：タイプⅡ，河床コンクリート：あり，初期地下水位：G.L.-0.5m〉

■ 浸潤面と円弧すべり計算結果 (8/14 5:30)

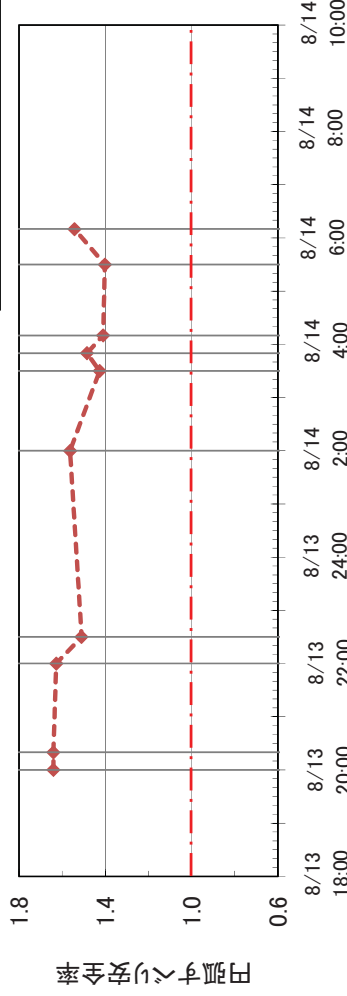
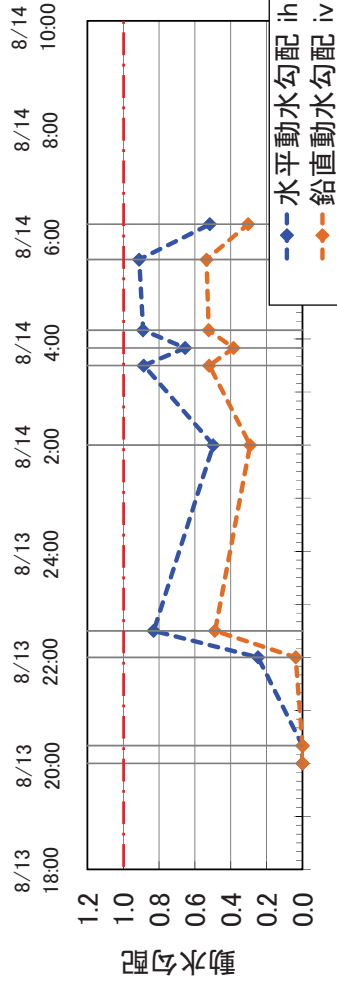
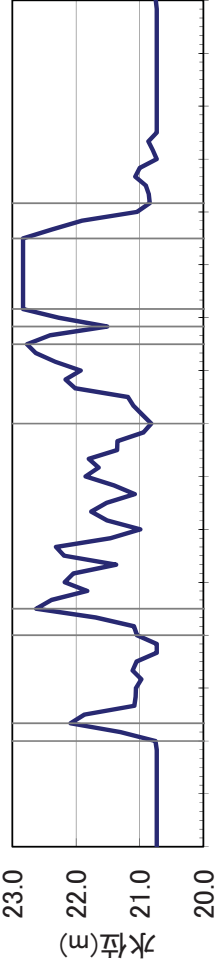
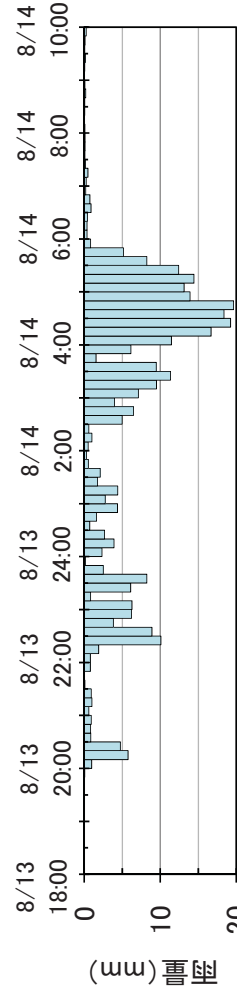


■ 評価

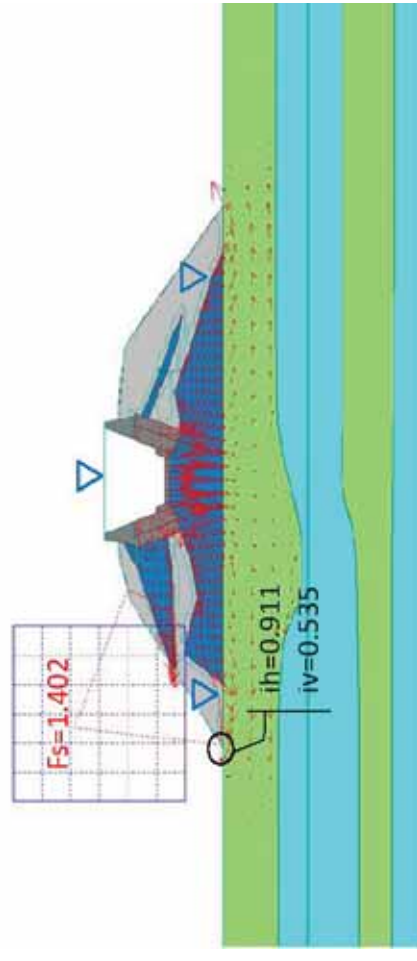
- ・局所動水勾配、円弧すべり安全率ともに、評価基準値を満たしている。
- ・本ケースの条件では、パイピング破壊、円弧すべり破壊ともに発生しない。



解析結果〈ケースⅡ-B-①〉／堤体土層：タイプⅡ，河床コンクリート：なし，初期地下水位：AC層〉



■ 浸潤面と円弧すべり計算結果 (8/14 5:30)

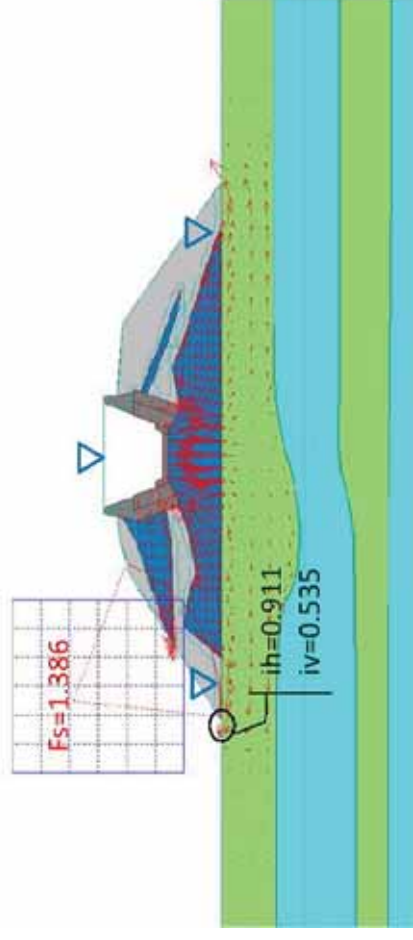


■ 評価

- ・円弧すべり安全率は評価基準値を満たしており、円弧すべり破壊は発生しないと考えられる。
- ・局所動水勾配は1.0付近まで上昇していることから、本ケースではパイピング発生の可能性がある。

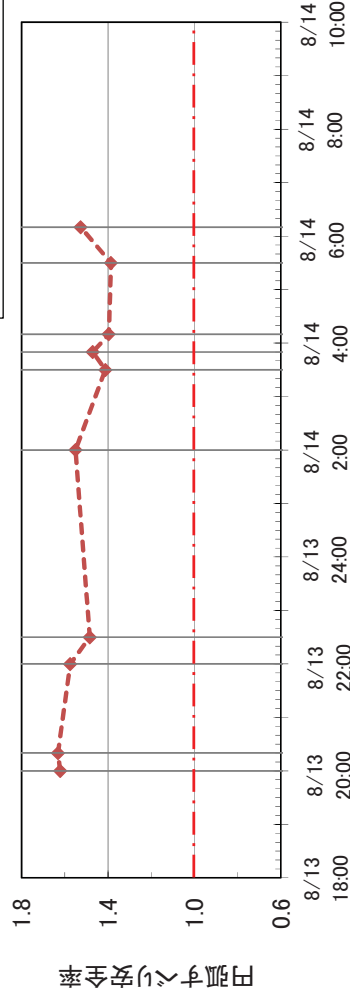
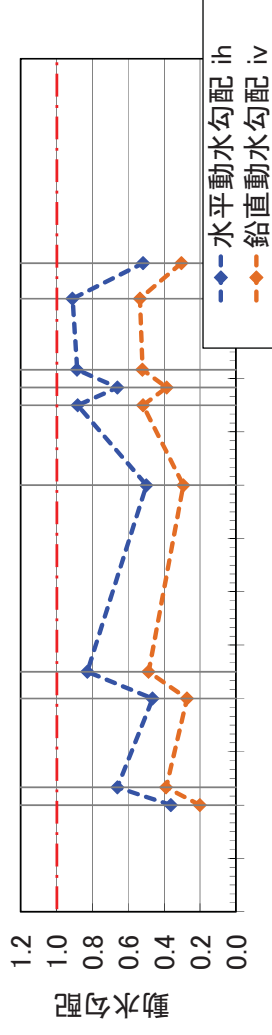
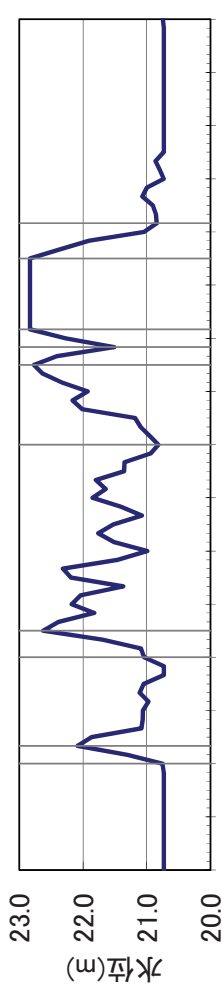
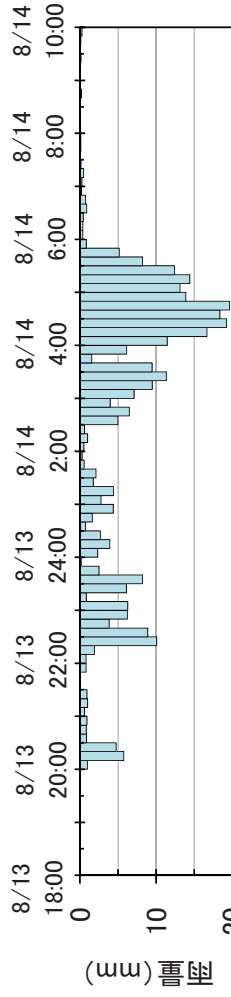
解析結果〈ケースⅡ-B-②／堤体土層：タイプⅡ，河床コンクリート：なし，初期地下水位：G.L.-0.5m〉

■ 浸潤面と円弧すべり計算結果 (8/14 5:30)



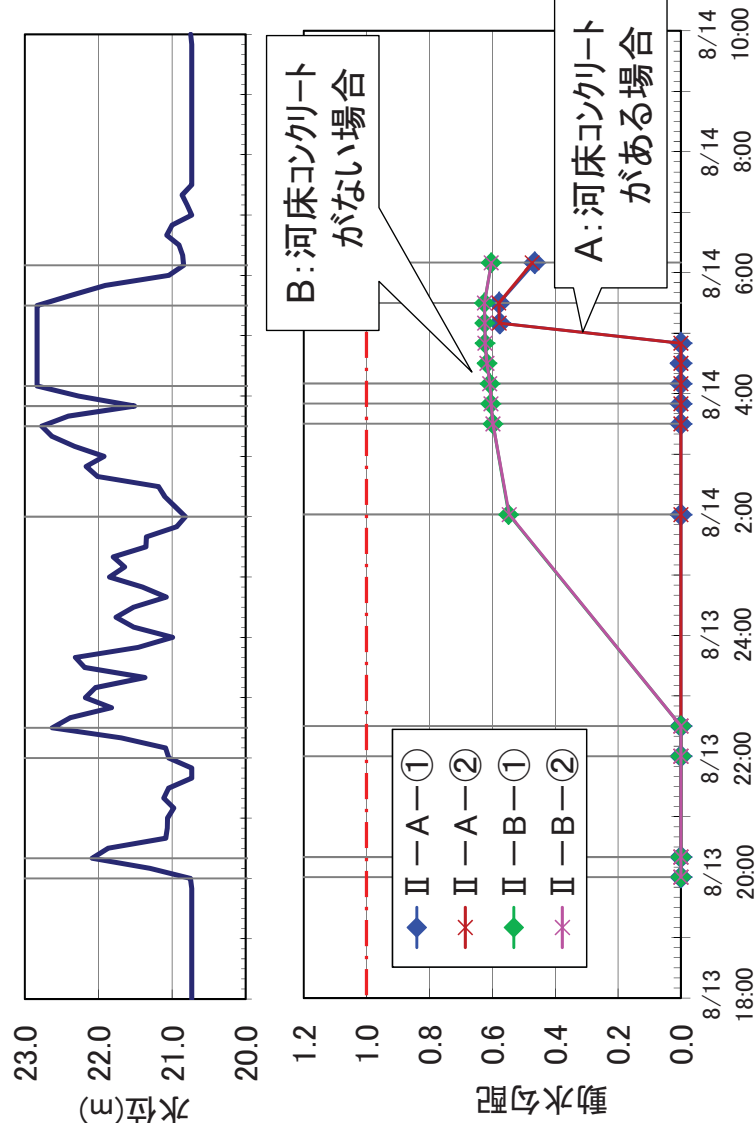
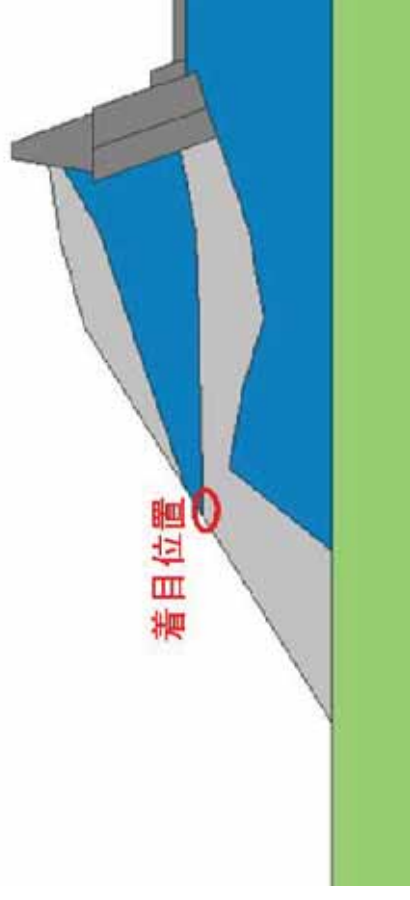
■ 評価

- ・円弧すべり安全率は評価基準値を満たしており、円弧すべり破壊は発生しないと考えられる。
- ・局所動水勾配は1.0付近まで上昇していることから、本ケースではパイピング発生の可能性がある。



解析結果く法面中腹の砂礫層に発生する局所動水勾配

- タイプⅡの堤体土層構成では、法面中腹に透水性の高い砂礫層が露出しており、この箇所におけるパイピングの発生が想定される(右図参照)。
- このため、同箇所における水平動水勾配の経時変化を確認した。



- 法面中腹の水平動水勾配は、最大で0.6程度まで上昇する。河床コンクリートが有る条件でも、最大水位の時に動水勾配値が0.6程度まで上昇する。

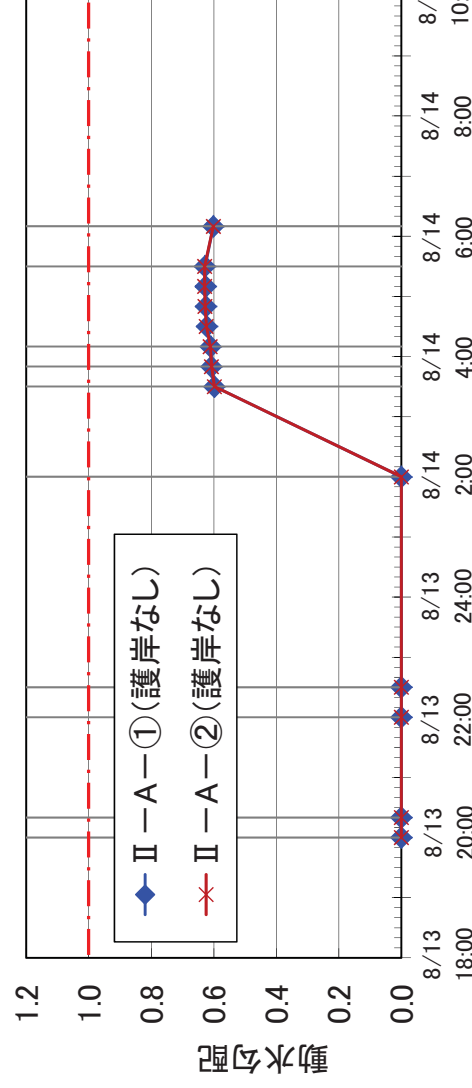
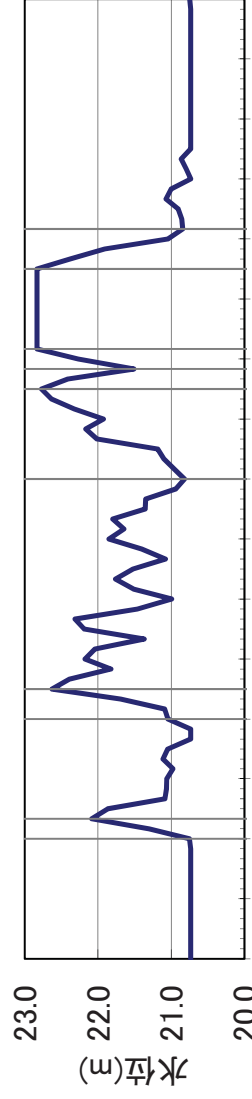
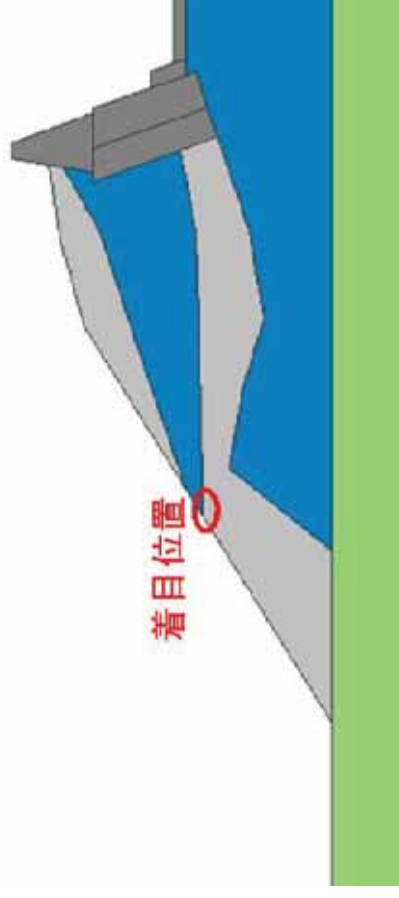
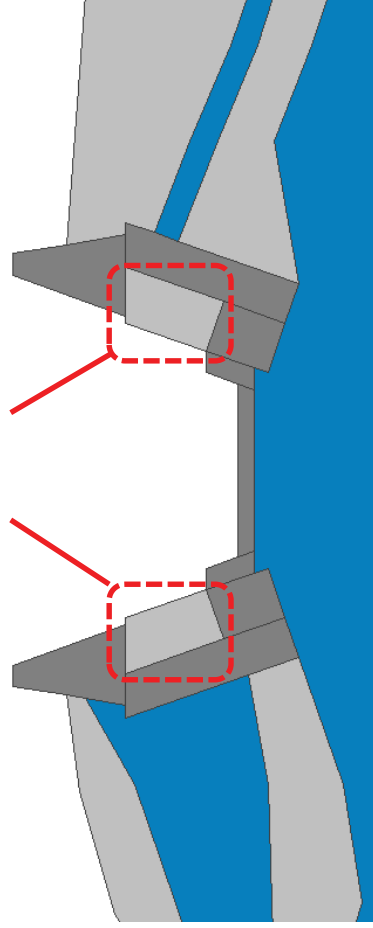


- 護岸の一部が無いという条件での解析を追加する。

解析結果く法面中腹の砂礫層に発生する局所動水勾配(2)》

■ 石積み護岸の一部が損傷した状態を想定し、解析を行った。

護岸損傷＝裏込め土相当の透水係数
($1.36E-02\text{cm/s}$)を与える。



■ 法面中腹の水平動水勾配は、14日の水位上昇時の早い段階で、0.6程度まで上昇する。

数値上ではパイピング発生の可能性は低いと判断される。

浸透流解析のまとめ

- 堤体の土層構成、河床コンクリートの有無、初期地下水位といった条件に関わらず、円弧すべりは発生しない。
- 法尻部での局所動水勾配は限界動水勾配未満である。ただし、河床コンクリートが失われた条件では0.9付近まで上昇し、パイピングが発生していた可能性がある。
- 法面中腹部の局所動水勾配も限界動水勾配未満である。河床コンクリートが失われた条件及び石積護岸の一部が失われた条件では0.6程度までの上昇で、パイピングが発生していた可能性は低い。

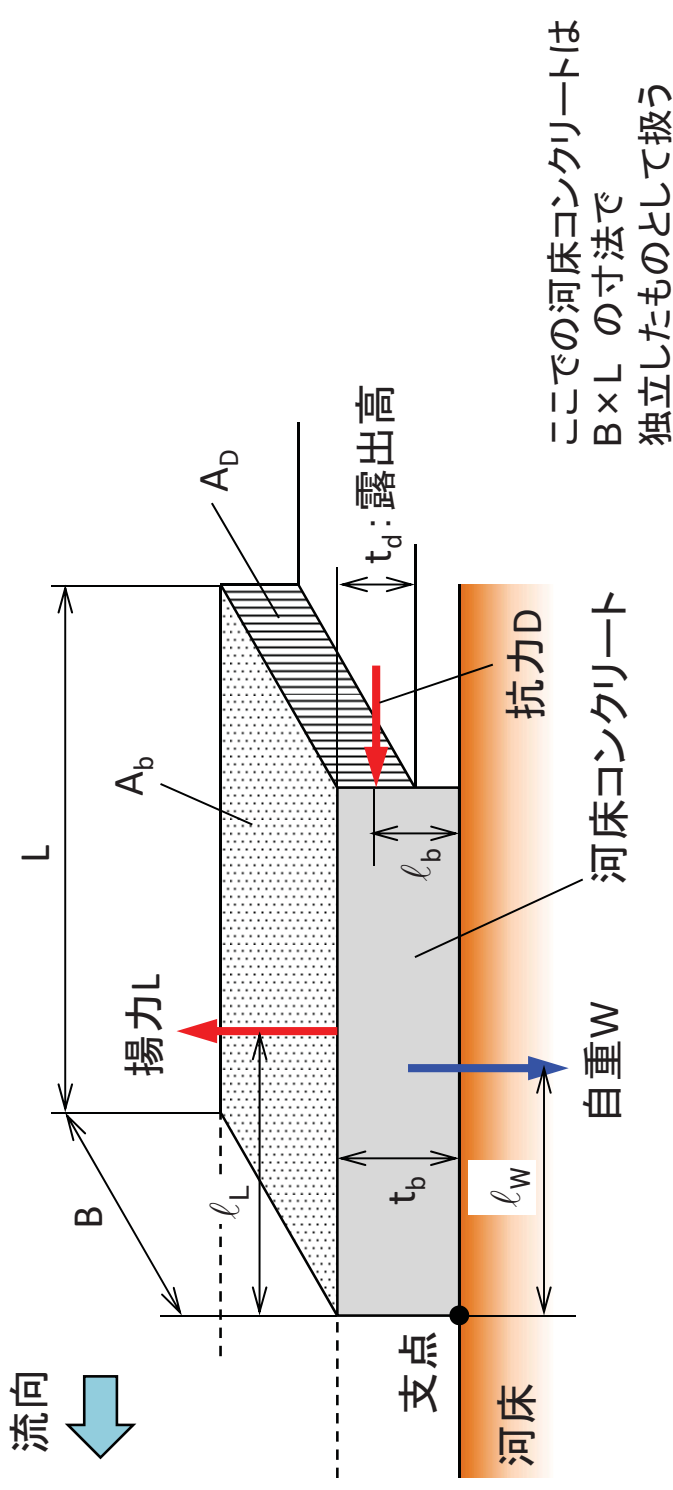
浸透によるパイピング破壊は発生しない。

河床コンクリートや護岸の破損が生じ、河床から浸透する状態が生じた場合、出水時にパイピングが生じる可能性はある。

3. 河床コンクリートの安定性検討

安定性照査の考え方

- 河床コンクリートの局所的な破損により、前面に段差が生じた場合（河床コンクリート前面が局部的に露出した場合）の安定性検討を行う。
- 安定性の照査手法は、前回の検討会で示した河床の「めくれモデル」に依った。



$$\text{めくれに対する安全率} = F = \frac{\text{自重によるモーメント}}{\text{揚力・抵抗力によるモーメント}} = \frac{W \cdot l_w}{L \cdot l_L + D \cdot l_b}$$

安定性照査結果

被災時の想定流速 $V \doteq 2.5\text{m/s} \sim 3.9\text{m/s}$

■ 計算条件

・河床コンクリートの寸法:

① $B \times L = 30\text{cm} \times 30\text{cm}$

② $B \times L = 50\text{cm} \times 50\text{cm}$

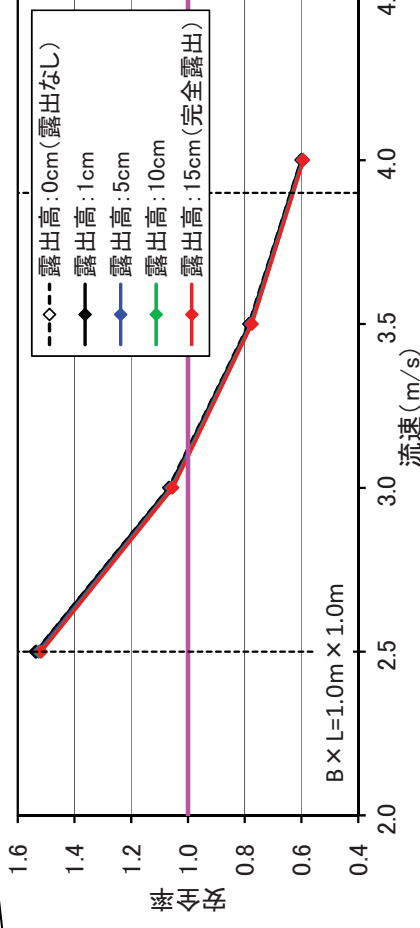
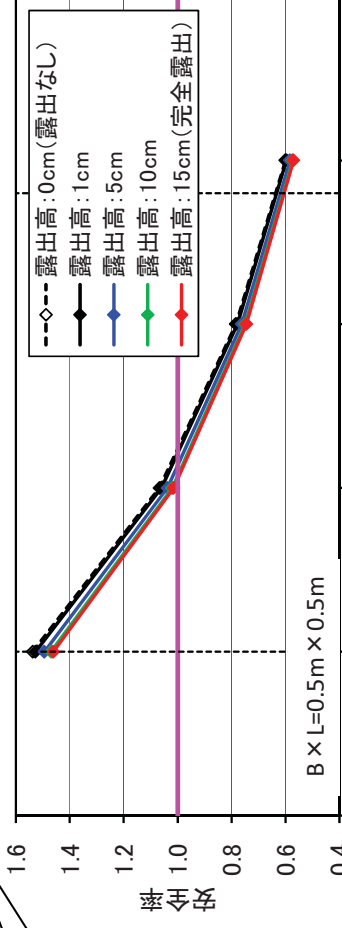
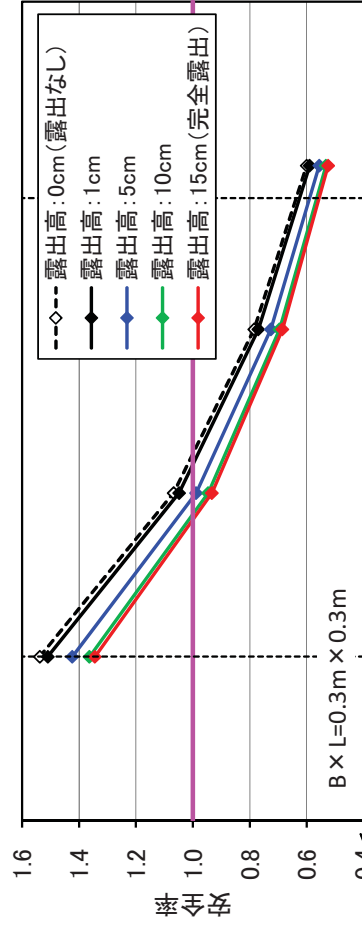
③ $B \times L = 100\text{cm} \times 100\text{cm}$

※厚さはいずれも15cmを想定した

・露出高: 1cm, 5cm, 10cm, 15cm (完全露出)

河床コンクリートの寸法が小さい場合、流速による差が見られる。

河床コンクリートの寸法が大きくなると、流速による差が見られなくなる。



河床コンクリートの安定性検討～まとめ

■ 想定される流速が $V \doteq 2.5 \sim 3.9 \text{m/s}$ であるのに対し、流速が3m程度を越え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。

被災時に河床コンクリートがめくれ、下流まで流されたことは十分に考えられる。

■ 河床コンクリート前面に生じた段差(露出高)を変化させた場合、寸法が小さい場合は流速による安全率の差が見られ、大きい場合は流速による差が見られなくなる。

■ 大きい場合の結果では、河床コンクリート前面に働く抗力よりも、河床コンクリート全体に働く揚力の方が河床コンクリートの安定上支配的であることがわかる。

河床コンクリートのめくれに対する安全性確保は、河床コンクリートの摩耗や衝撃への対策及び維持管理が有効と考えられる。

4. 欠壊メカニズムの考察

各破壊形態の可能性について

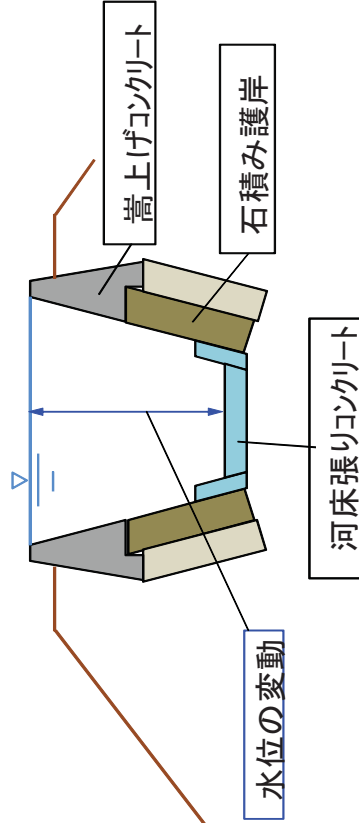
河床の損壊から始まった、侵食による破壊の破堤の可能性が高い

原因	越流による法面侵食破壊	浸透によるパイピング破壊	侵食による破襲
メカニズム図			
分析	<p>①流域雨量の再現と流出解析により、8月14日の降雨により、現況流下能力を超える洪水が発生しているが、天井川区間上流部の市道橋がネックとなり、今回の欠壊地点の堤防高を超える洪水は流下でききないことから、侵食が発生する程の越水は発生しない。</p> <p>よって、破壊に至るような継続的な溢水は無かったと、考えられる。</p> <p>②近隣住民の目撃でも越水は確認されていない。</p>	<p>①浸透解析結果から、河床コンクリートがある条件では、法裾部でパイピング現象が生じていた可能性はない。河床コンクリートがない条件では、動水勾配が0.9付近まで上昇していった可能性がある。</p> <p>②礫質土層の法面中腹露出部での動水勾配は0.6付近までの上昇で、パイピング現象が生じていた可能性は低い。</p> <p>※河床や護岸の損壊がパイピング発生の前提条件となる。浸透による破襲のみで欠壊に至ったとは考え難い。</p> <p>③河床コンクリートがない条件においても、すべり破壊が発生する可能性はなく、近隣住民の目撃でも、堤防裏法面の崩壊は目撃されていない。</p>	<p>①弥陀次郎川は、護岸が石積護岸とコンクリートの特殊堤、護床がコンクリート張となっており、今回の洪水の流速3 m/s程度で侵食が発生する構造では無い。</p> <p>②転石や流木等の流下物の衝突や摩擦等が単独又は複合して作用することにより河床や護岸の一部に破損等が生じた場合には、掃流力や揚力により、順次破損が拡大し、河床洗堀や土砂の吸い出しが生じた結果、護岸損壊、堤体浸食が生じる可能性がある。</p> <p>③何らかの要因により損傷を受けた河床コンクリートは、「めくれ」によって流下する可能性があり、河床コンクリートの損壊によって露出した河床材料は、流水によって洗堀される。</p> <p>④洗堀や吸出しが進行していくなかで、パイピング現象の発生を誘発した可能性がある。</p>
可能性	可能性無し	パイピングによる破襲：可能性あり 円弧すべりによる破襲：可能性なし	可能性 大

欠壊過程のイメージ図(3)

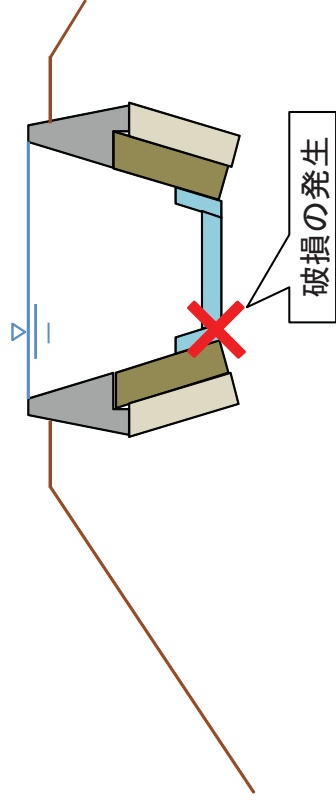
(2) 侵食による破壊 シナリオ その1

① 水位上昇



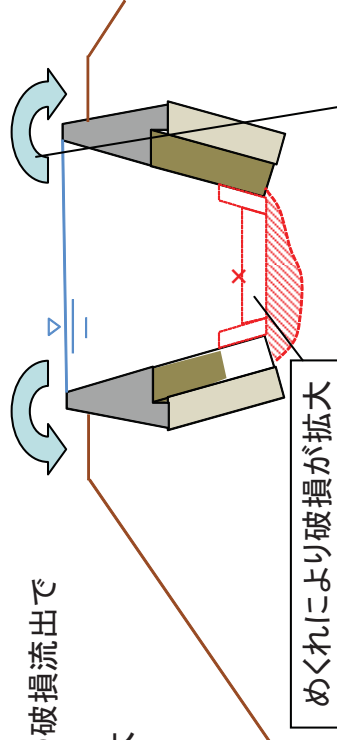
② 流下物等による河床破損等の発生

・流速と流木等の流下物により河床コンクリートの一部 (摩擦等により弱部となった箇所) 又は護岸が破損



③ 石積み、河床コンクリートの破損が拡大

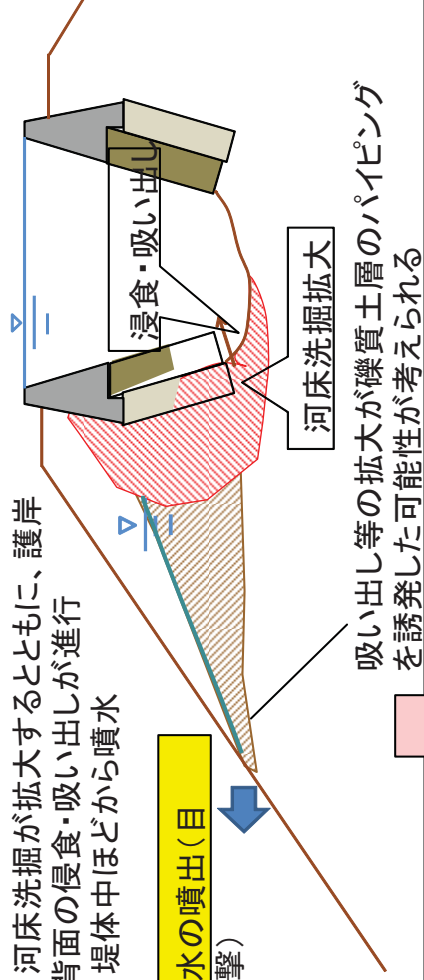
・河床コンクリートの破損流出で河床洗掘が発生
・石積み破損の拡大



④ 河床洗掘の拡大、護岸背面吸い出しの拡大

・河床洗掘が拡大するとともに、護岸背面の侵食・吸い出しが進行
・堤体中ほどから噴水

水の噴出(目撃)

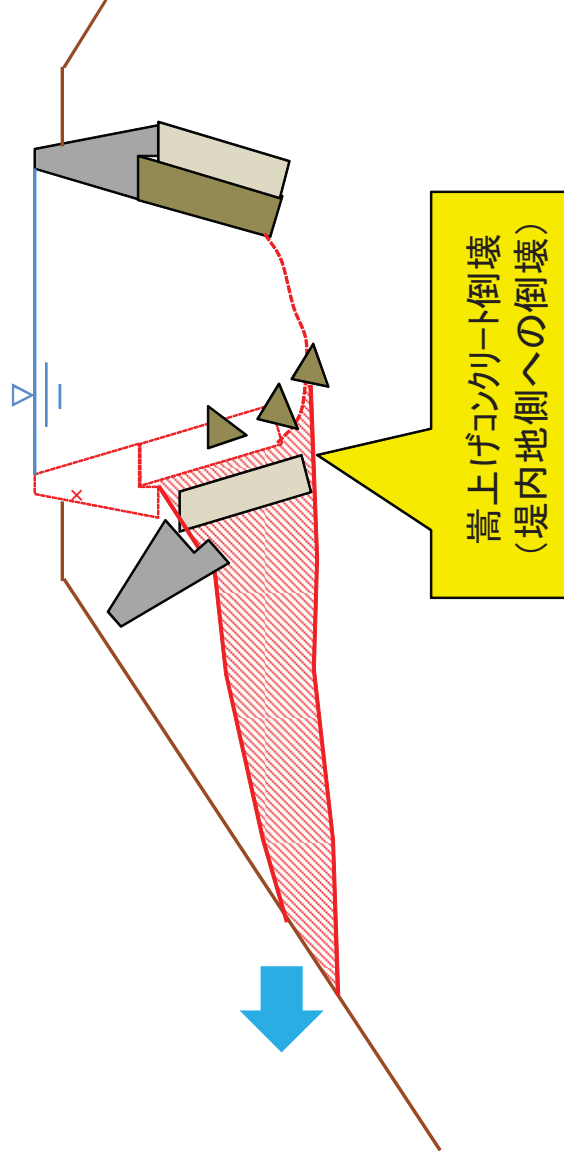


欠壊過程のイメージ図(4)

(2) 侵食による破壊 シナリオ その2

⑤ 護岸崩落、欠壊

- ・堤体が真下、又は宅地側に崩壊



今回の解析を踏まえて

河床コンクリートの破損は、侵食・浸透破壊に影響が大きい。洪水流に耐えることができる(摩擦も考慮した上での)厚さを有していること、流下物等の外力に対して十分な強度を有していること、かつ、それを維持してゆくことが重要である。

護岸についても、侵食・浸透に影響があり、空積み護岸の練積み化等の構造強化や老朽化対策など、維持管理を図ることが重要である。

堤体断面が小さい天井川は、浸透によるパイピングが発生する可能性が高く、また、侵食にも弱いことから、越水を生じさせないことに加え、一定の大きさの断面を確保することが重要である。

過去の状態を確認できるようにするために、日常の管理と記録が重要である。

5. いただいた御意見

弥陀次郎川の以前の状況についての情報提供など

- ・周辺が宅地化される前は、両岸とも竹藪が広がっていた。欠壊箇所北側の駐車場も、10数年前には広い竹藪だった。
- ・堤防には、小動物(モグラ、タヌキ、イタチ、ヘビなど)が生息していた。
- ・数年前に土手の樹木を伐採したが、根は残っていた。
- ・阪神大震災後に、堤防コンクリートのずれ、石積みの隙間、河床の凹凸があった。その後、補修されていた。
- ・地震時の不等沈下で護岸が損傷したために、平成8年度の補修をすることになったのではないか。

破堤メカニズムについての御意見

- ・石積みに多くの隙間がある。これが原因となって石積みが崩れ、破堤したのではないか。
- ・堤体背面の円弧すべりは無かったのではないか。土質データや現場写真等から堤体は不均質と判断され、均質と想定しての計算は成り立たない。
- ・石積み護岸が最初に壊れたのではないか。宇治川との合流部に多数の間知石を確認した。

今後に向けての御意見

- ・上流部の流域保全が最重要である。
今回の災害では流木や土砂の流出が多く、橋梁等で疎通障害が生じたことが氾濫の原因となった。
斜面崩壊、斜面浸食が流木や土砂の流出源となっている。
- ・天井川より上流区間
越水しないように、さらに堤防コンクリートなどの嵩上げをすべきでは。
- ・越水しても被害ができるだけ小さくなるような対策をとるべき。
洪水が堤防を越流することがあったとしても、破堤しない構造にする。
越流水が堤内地を流下する際に被害が最小になるように工夫する。
- ・弥陀次郎川の改修とともに内水対策が必要である。
弥陀次郎川からの越流水は仁良川流域に流れ込むので、周辺地域全体の治水安全性を考えるのならば、仁良川改修、木幡池の浚渫、山科川への排水ポンプ場の容量アップ、といった対策も併せて講じるべき。