

第3回 球磨川堤防調査委員会

九州地方整備局
令和2年11月4日

1. 第2回球磨川堤防調査委員会での指摘事項と対応

第2回球磨川堤防調査委員会での指摘事項を踏まえ、多面的な視点から追加調査や解析・検討を実施した。



2. 決壊箇所状況

決壊箇所における現地状況について、被災状況の記録や痕跡調査を追加。



3. 出水時の再現解析

決壊箇所における出水時の再現解析を実施し、氾濫状況、内外水位状況等の推定を行った。



4. 堤防決壊原因の推定

決壊原因として想定される越水、浸透、河岸侵食、構造物および補修履歴等について、調査・解析を行った。



5. 決壊のメカニズムと要因

決壊要因の可能性を整理し、決壊メカニズムの推定を行った。



6. 本復旧方法の検討

今回の決壊原因とメカニズムの推定結果を踏まえ、決壊箇所における復旧方法について検討を行った。

■第2回球磨川堤防調査委員会 令和2年8月7日(金)

項目	ご意見	対応方針
再現解析について	○再現解析の条件を提示すること。(非定常の再現、内外水位差の時間変化を求める方法など) ○本解析では、本川側の水位の下がり方が大事になる。 ○記録の残っている箇所で解析結果の検証を行う必要がある。 ○痕跡水位は、現地調査を行い、更に充実させる必要がある。 ○住民が撮影した動画は検証材料となるので、収集して報告書に記載した方がよい。	→再現解析の条件や解析結果を今回提示する。 →痕跡や証言を収集する。
要因推定について	○浸透による影響についても今後、地質調査結果をもとに浸透流解析を行い確認すること。 ○構造物や工事の影響は、越水と浸透の両方に複合的に関わってくる可能性がある。 ○堤体材料の置き換え工事について、置き換えた土の性質や施工状況などの情報収集が必要。	→浸透流解析結果を提示。 →構造物や工事の影響について整理する。 →置き換え工事の記録を収集する。
その他	○今後の復旧に活かすため、被災状況を図面として記録に残すことが大事。 ○決壊箇所だけでなく、他の場所でも堤防の裏法面の削れ方や土砂のたまり方、アスファルトの剥がれ方などは参考になる。	→被災状況を図面として残す。 →他の場所の被災状況を整理する。

I. 球磨川右岸56.4k付近

(八久保排水樋管付近)

1) 決壊箇所状況

【球磨川右岸56.4k付近】(1)決壊箇所概要

○球磨川右岸56.4k付近において、延長約30mにわたり堤防が決壊。

○決壊箇所の応急対策については、7月4日23時から緊急復旧工事に着手し、7月6日24時に緊急復旧が完了。

■平面図



堤防決壊状況



7月4日15時撮影

堤防決壊状況



7月4日16時撮影



7月4日16時30分撮影

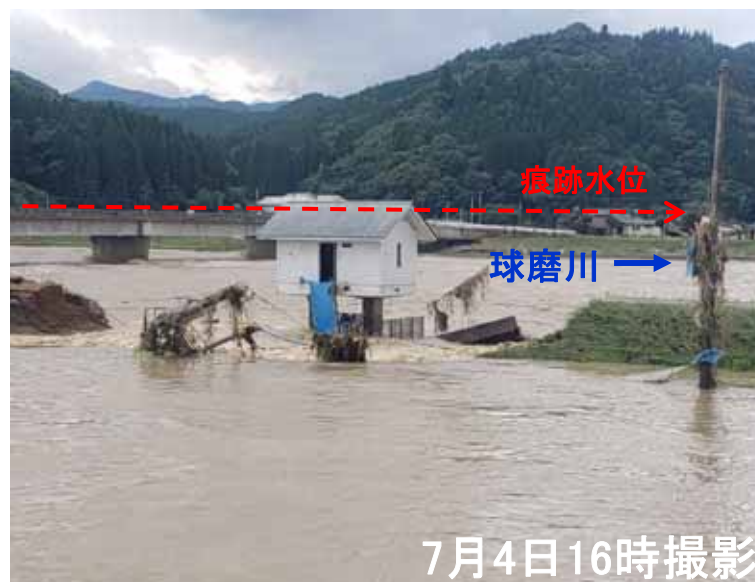
【球磨川右岸56.4k付近】(2)現地状況①

- 堤防天端のアスファルトや堤体材料と思われる土砂が河川側に飛散していることが確認される。
- ポンプ配管や発電機が見られる。



【球磨川右岸56.4k付近】(2)現地状況②

○周辺の洪水痕跡から少なくとも堤防天端から2m以上の水位であったことが確認できる。



【球磨川右岸56.4k付近】(2)現地状況③

- 詳細な土質区分は不明であるが、堤防断面の上流側断面と下流側断面で土の色調が異なる。
- 下流側の方が礫を多く含む。

上流側断面



下流側断面



【球磨川右岸56.4k付近】(2)現地状況④

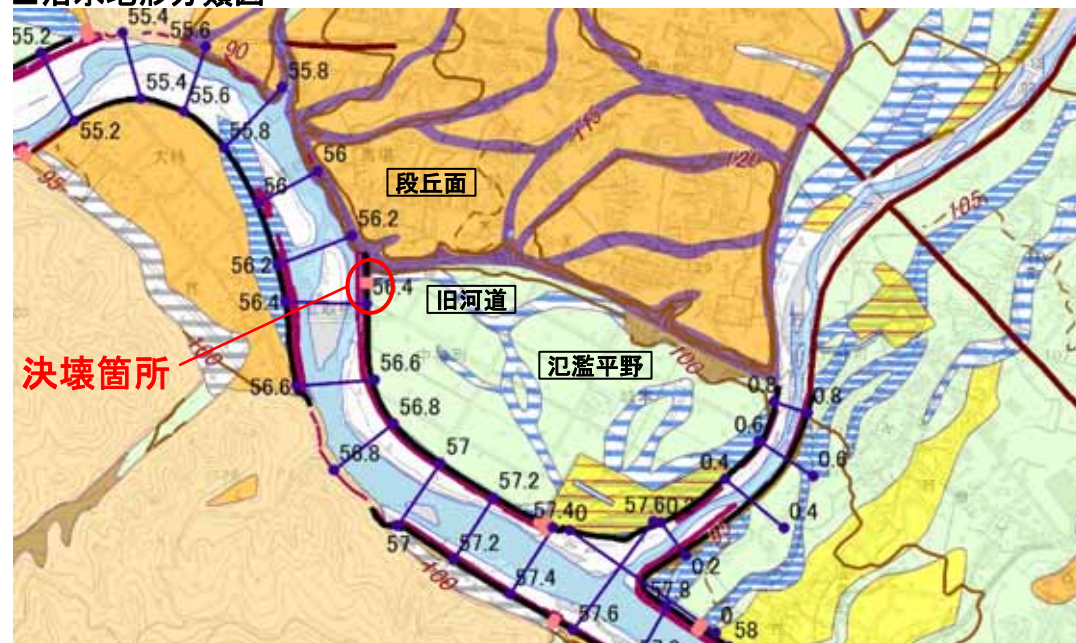
- 宅地側の植生は上向きや決壊箇所に向けて倒伏し、河川側の植生は下向きに倒伏していることが確認できる。
- 決壊箇所周辺では、宅地側の法面にも堤防に侵食が確認できる。



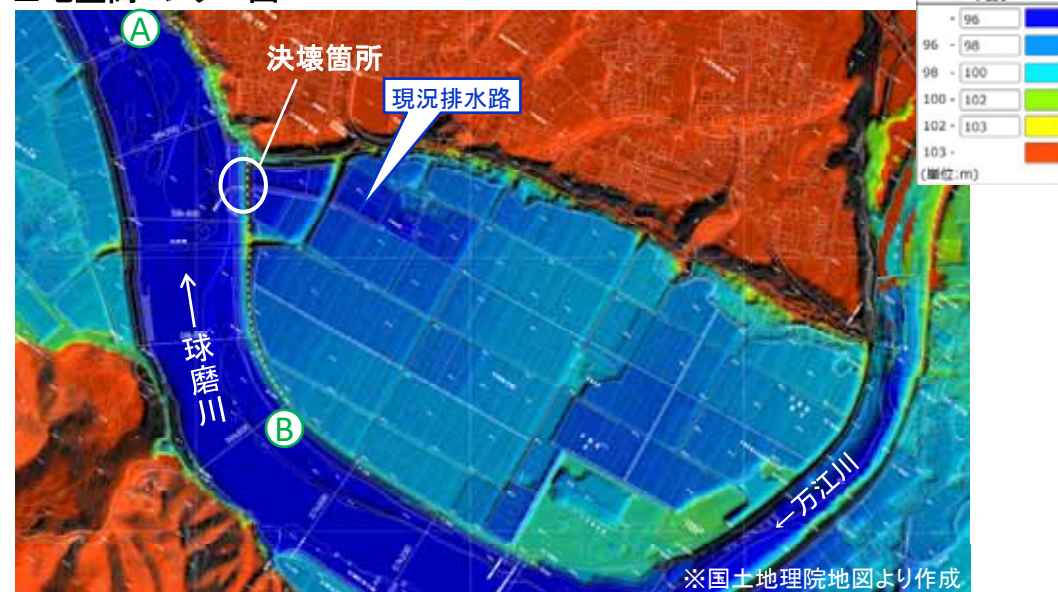
【球磨川右岸56.4km付近】 (3) 決壊箇所周辺の地形、堤防高

- 治水地形分類図では、決壊箇所付近は、段丘面と氾濫平野の境界付近で、氾濫平野には旧河道が見られる。
- 宅地側の地盤高は、下流へ向かい徐々に低くなり、宅地側の水は、決壊箇所付近へ集まる地形となっている。
- ミオ筋は右岸側によっている。近年は河床高は堆積傾向にある。

■治水地形分類図

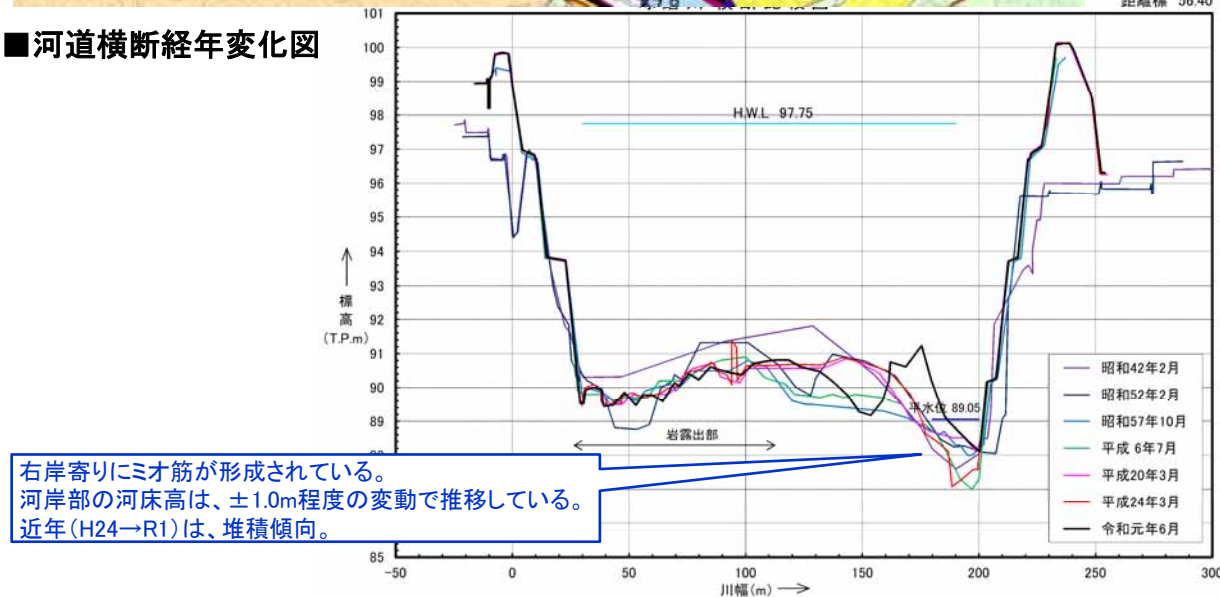


■地盤高コンター図



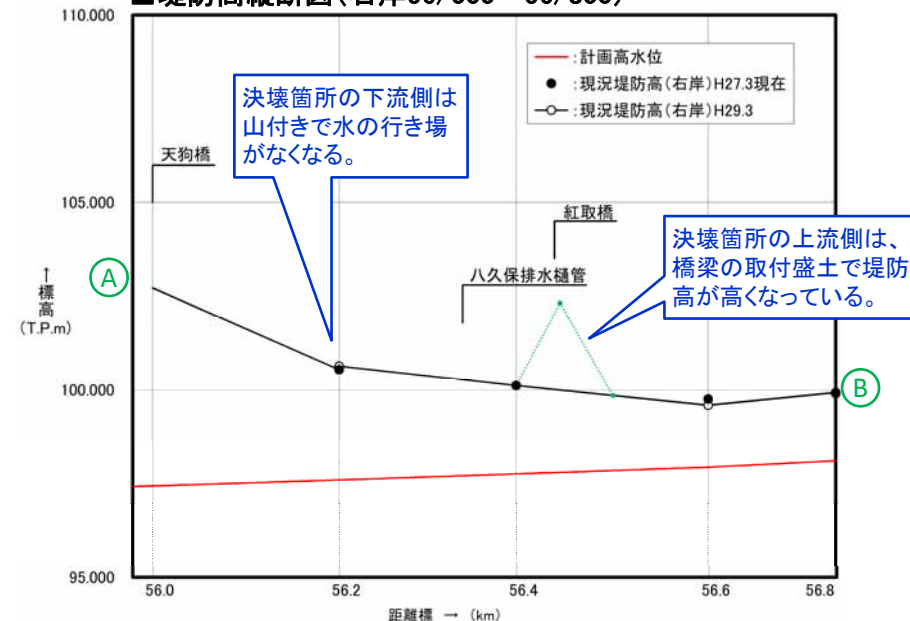
※国土地理院地図より作成

■河道横断経年変化図



右岸寄りにミオ筋が形成されている。
河岸部の河床高は、±1.0m程度の変動で推移している。
近年(H24→R1)は、堆積傾向。

■堤防高縦断図(右岸56/000~56/800)



決壊箇所の下流側は山付きで水の行き場がなくなる。

決壊箇所の上流側は、橋梁の取付盛土で堤防高が高くなっている。

【球磨川右岸56.4k付近】(4)堤防断面

- 決壊箇所における応急復旧時の堤防断面図を以下に示す。
- 堤防が決壊した高さは、約6mとなっている。

【被災前】

川表(河川側)

56K400-69.2

GH: 99.73
FH: 99.73

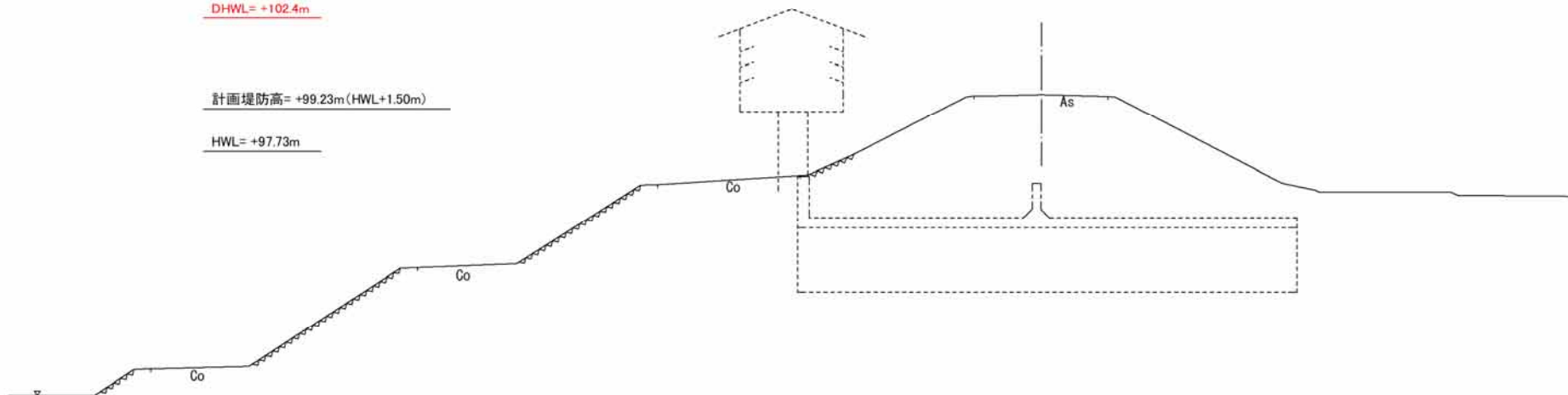
川裏(宅地側)

DHWL= +102.4m

計画堤防高= +99.23m (HWL+1.50m)

HWL= +97.73m

DL=95.00



DL=95.00

【被災後】 応急復旧断面

川表(河川側)

56K400-69.2

GH: 99.73
FH: 99.73

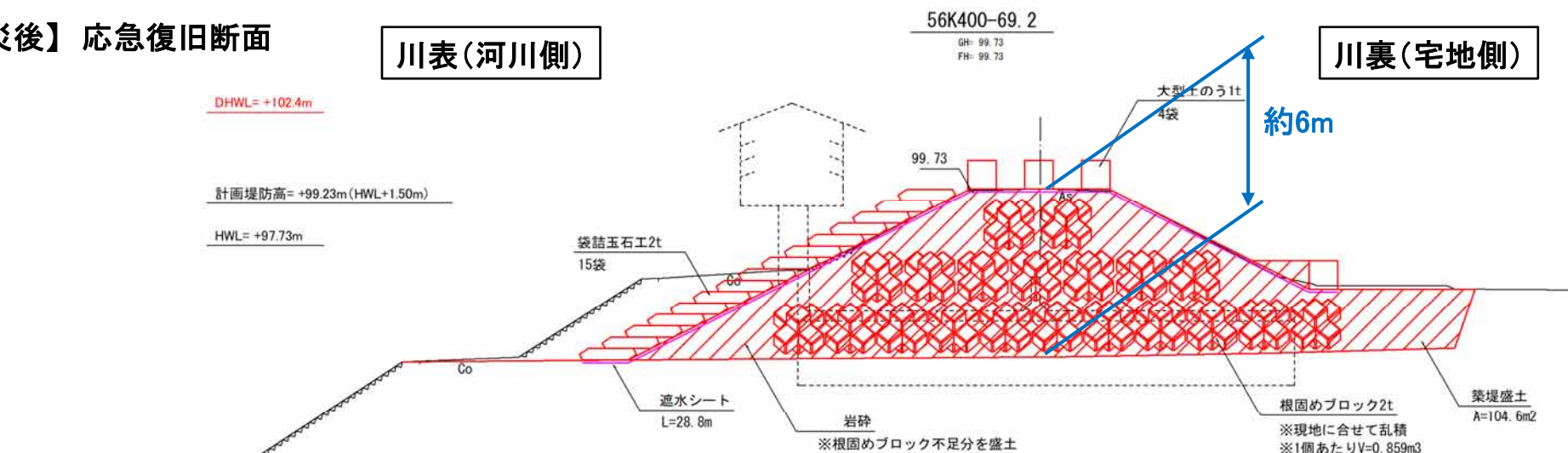
川裏(宅地側)

DHWL= +102.4m

計画堤防高= +99.23m (HWL+1.50m)

HWL= +97.73m

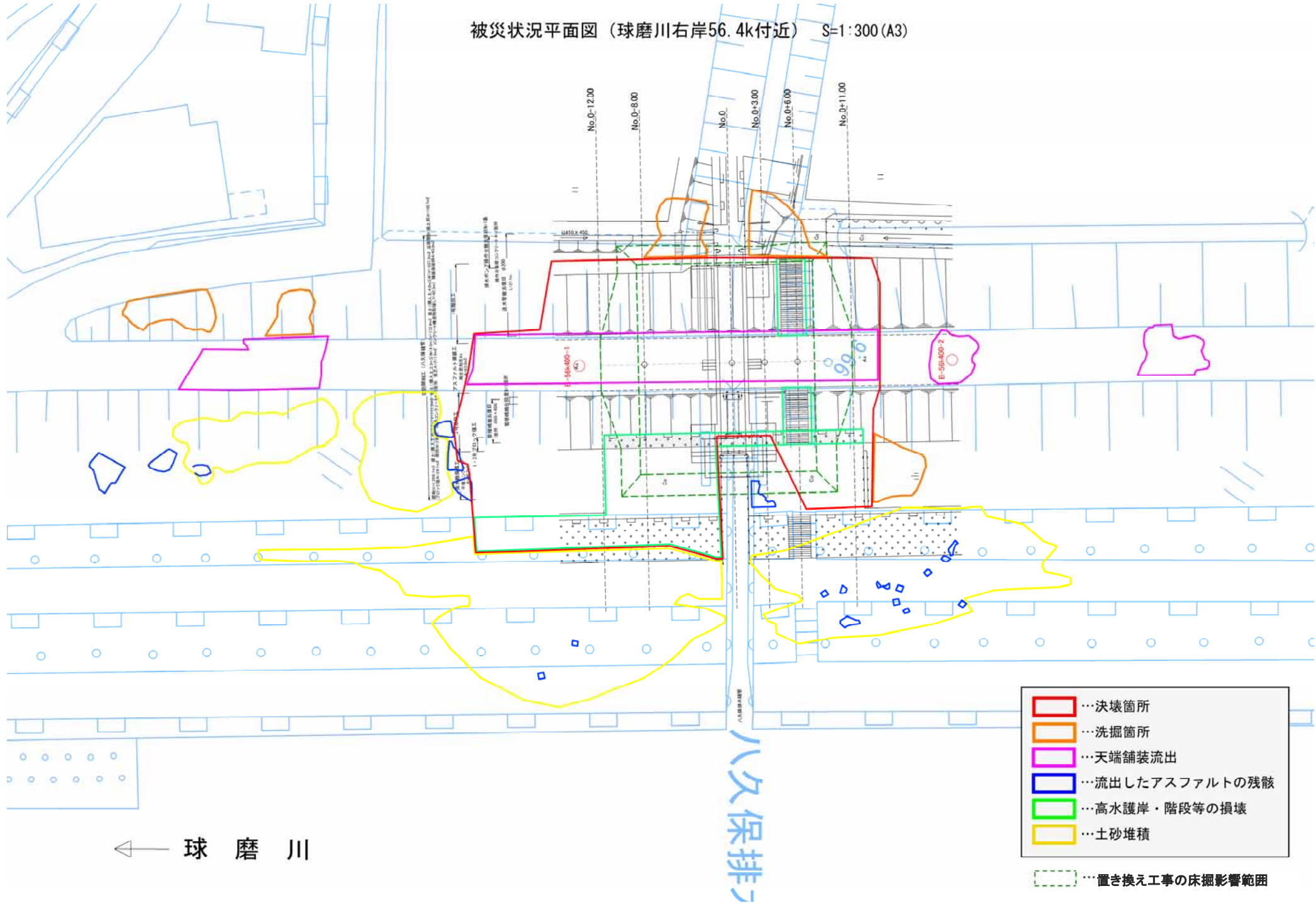
DL=95.00



DL=95.00

【球磨川右岸56.4k付近】 (5)被災状況の記録

被災状況平面図（球磨川右岸56.4k付近） S=1:300 (A3)



【球磨川右岸56.4k付近】(6)痕跡調査結果

○ 洪水痕跡の状況では、堤防を越水した水が下流方向に流下し、下流側の堤防箇所付近に流れが集中している。

【聞き取りによる証言】

7月4日（土）時間不明 ○万江川より越水が始まり、八久保樋管方向へ流下
7:00前頃 ○球磨川の水位が堤防ぎりぎりまで水位上昇。そのとき田んぼは水に浸かっていた。
7:30頃 ○八久保樋管付近で堤防越水。
（下流側の低くなっている箇所（ア）から越水、その後全体から越水が始まった。）
8:30～9:30頃 ○水位上昇は早く1～2時間で家屋敷高より2m程度高くなった。
9:30頃 ○辺り一帯は湖のようであった。
14:30頃 ○水が引くのも早く、市内に行けるようになる。

○越水した際には、堤防は問題なかった。
○決壊の状況は、避難していたため、確認していない。



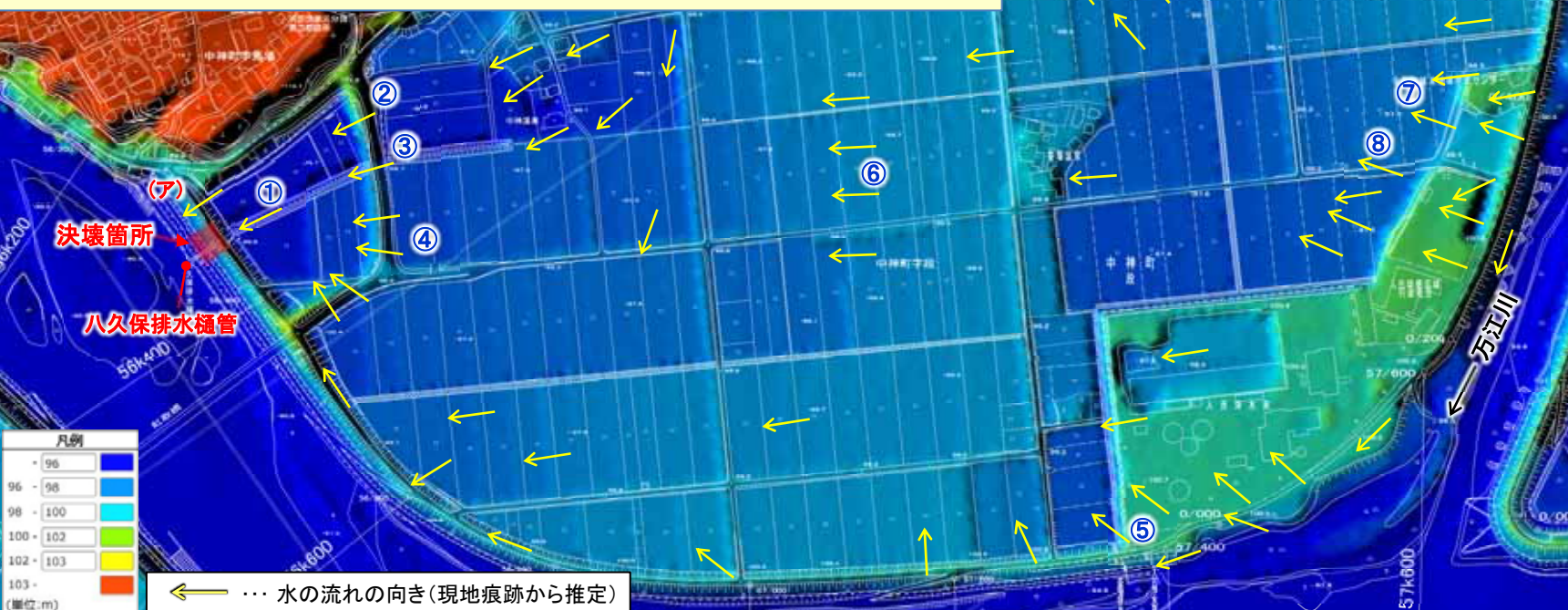
⑥: 決壊箇所方向へ倒伏



⑦: 決壊箇所方向へ舗装流出



⑧: 法面洗掘、電柱倒壊



①: 草が倒伏



②: ガードパイプに塵芥が堆積



③: ガードパイプに塵芥が堆積



④: ガードパイプに塵芥が堆積



⑤: 電柱・フェンスに塵芥が堆積



【球磨川右岸56.4k付近】(7)痕跡水位

○痕跡結果からピーク時には宅地側と河川側の水位は、ほぼ同じ高さとなり、堤防天端から約3mの水深が発生。



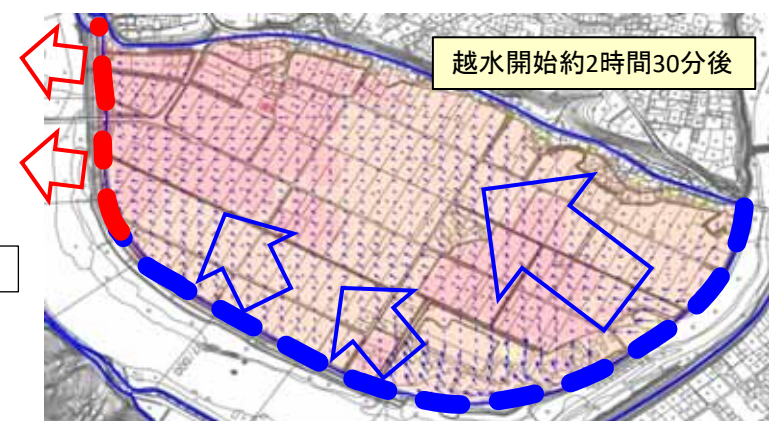
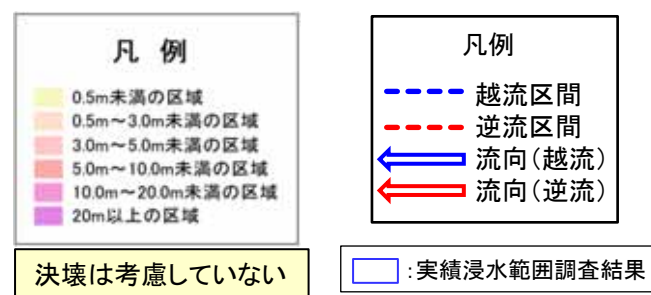
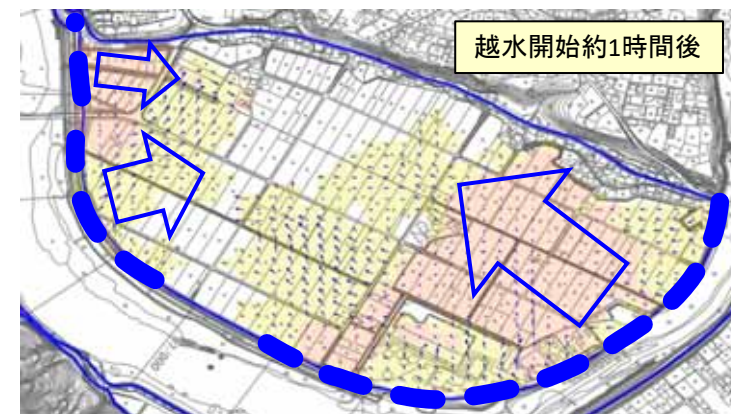
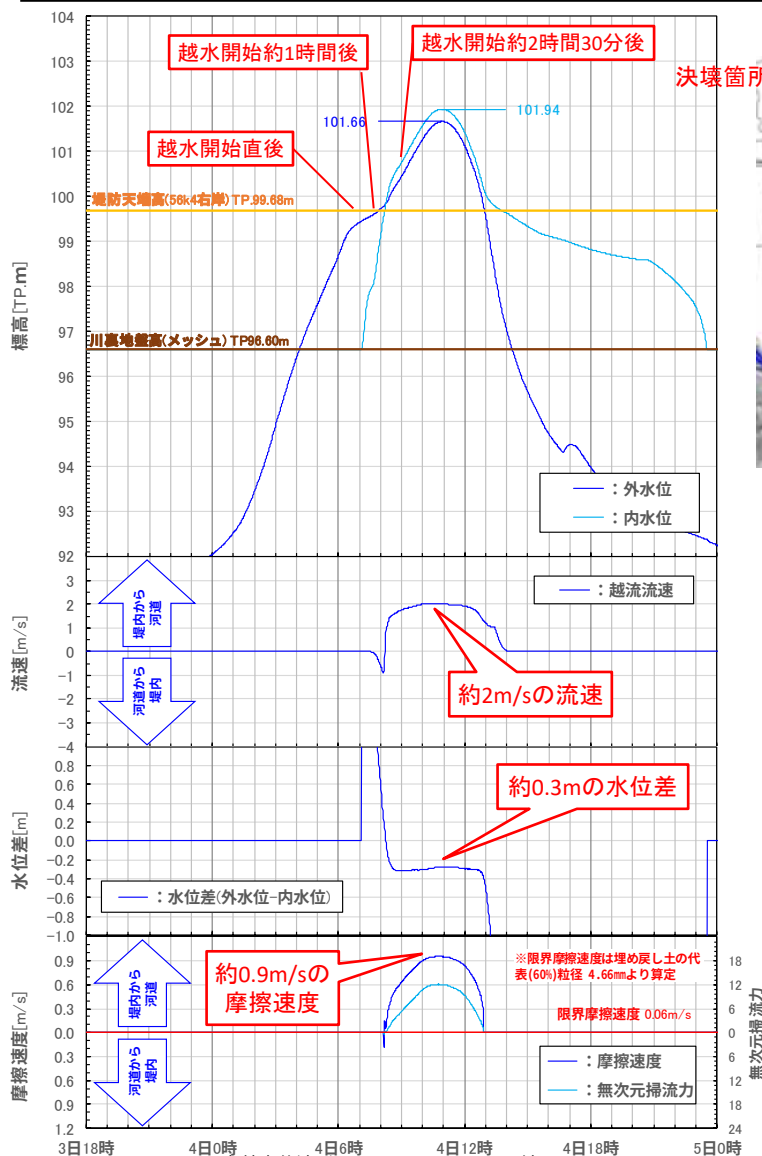
2) 出水時の再現解析

○氾濫解析モデルは「浸水想定区域図作成時に作成したモデル」を用いて、下表に示す計算条件により洪水再現計算を実施する。

項目		令和2年7月4日洪水 再現計算氾濫解析モデル
マニュアル		浸水想定区域図作成マニュアル(第4版) 平成27年7月
対象外力	規模	令和2年7月4日洪水 実績
	市房ダム	実績放流量
	川辺川	柳瀬地点実績流量
	残流域	貯留関数法による推算流量
河道モデル	計算手法	一次元不定流計算
	河道条件	現況河道(平成28年度～令和元年度測量河道ベース)
	粗度係数	令和2年7月4日洪水 検証粗度係数
氾濫原モデル	計算手法	平面二次元不定流計算
	メッシュ分割	約25mメッシュ(基準地域メッシュを縦横40等分)
	地盤高	現時点最新のLPデータ(5mDEM)を用いたメッシュ内の平均値を設定 ※LPデータは平成22年測量
	粗度係数	小谷らの土地利用分類別の粗度係数及び標準的な道路の粗度係数にて設定
	空隙率・透過率	メッシュ内の建物占有率(国土地理院DMデータを使用)を用いて設定
	連続盛土	平均地盤高より0.5m以上を目安に、道路、県道、支川堤防等をモデル化
	排水施設	既設の水門・樋門及び樋管をモデル化(排水施設ごとの排水エリアを詳細にモデル化)
	越水条件	直轄区間で河道水位が堤防天端高等を上回った箇所での越水・溢水を考慮して河道流量の低減を表現 直轄区間外(県区間)の河川(山田川・万江川等)も越水・溢水による河道流量の低減をモデル化

【氾濫解析 八久保排水樋管付近】

- 支川の万江川から越水が始まり、越水開始約1時間後には決壊地点からも越水が生じることで内水位が上昇し、越水開始約2時間30分後には逆流に転じたと考えられる。この逆流状態は約6時間以上継続していたと考えられる。
- 外水位と内水位の差は約0.3m程度であり、逆流時堤防天端では約2m/s程度の流速が発生していたと考えられる。また、堤防天端における摩擦速度はピーク時には約0.9m/s程度発生していたと想定される。



越流流速 = 氾濫計算による横越流量 / 天端水深

摩擦速度 $u_* = (g \times \text{天端水深} \times \text{水面勾配})^{0.5}$

水面勾配 = 内外水位差 / 堤防天端幅

無次元掃流力 $\tau_{*R} = \frac{u_*^2}{s \times g \times d}$

限界掃流力 $u_{*c} = \sqrt{80.9d} \quad (d \geq 0.303\text{cm})$

注) 越流流速は氾濫計算において横越流公式による越流量を水深で除して算定
摩擦速度は上式により算定。
無次元掃流力は、購入土の代表(60%)粒径を用いて算定。
限界摩擦速度も同様に購入土の代表(60%)粒径を用いて岩垣の式より算定。

3) 堤防決壊原因の推定

(1)越水 ①堤体の侵食

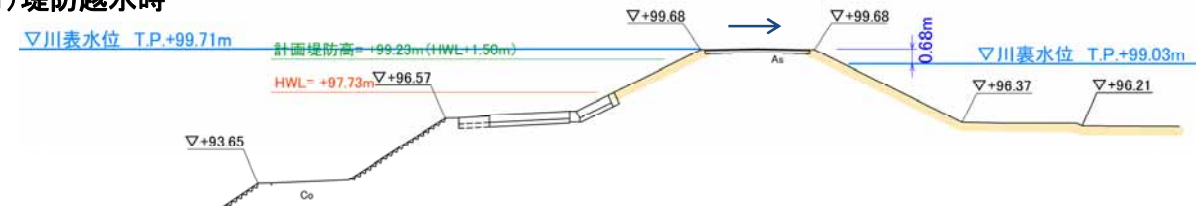
- 決壊地点での水位変動は、まず河川水位が上昇し、堤防からの越流が始まった。
- その後、内水位が上昇し、外水位と同じ水位となった後に、内水位の方が高くなり、宅地側から河川側への流れが発生。

■堤防越水の流れ ※本図の水位は、再現解析の内外水位波形による。

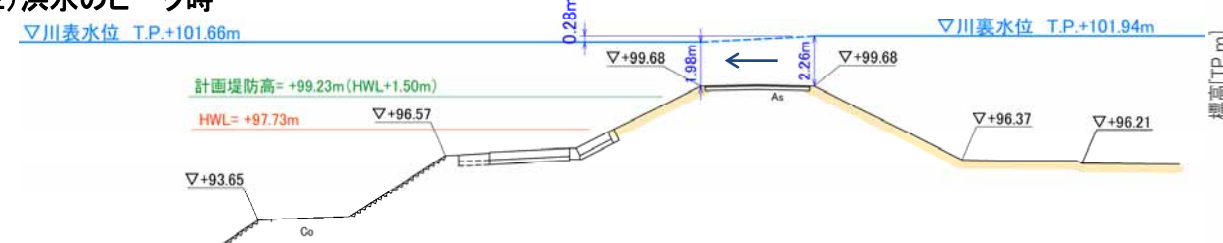
川表(河川側)

川裏(宅地側)

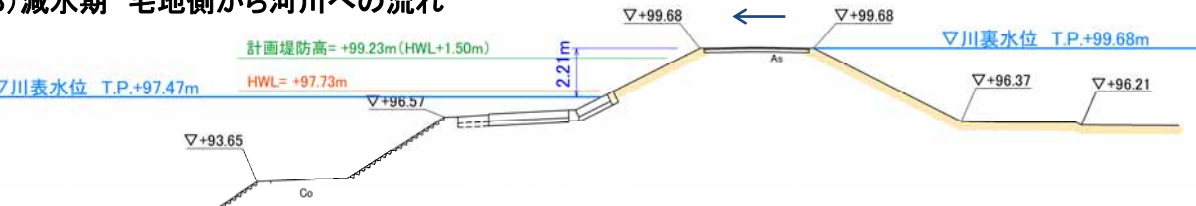
(1)堤防越水時



(2)洪水のピーク時



(3)減水期 宅地側から河川への流れ



■水理解析結果による内外水位波形

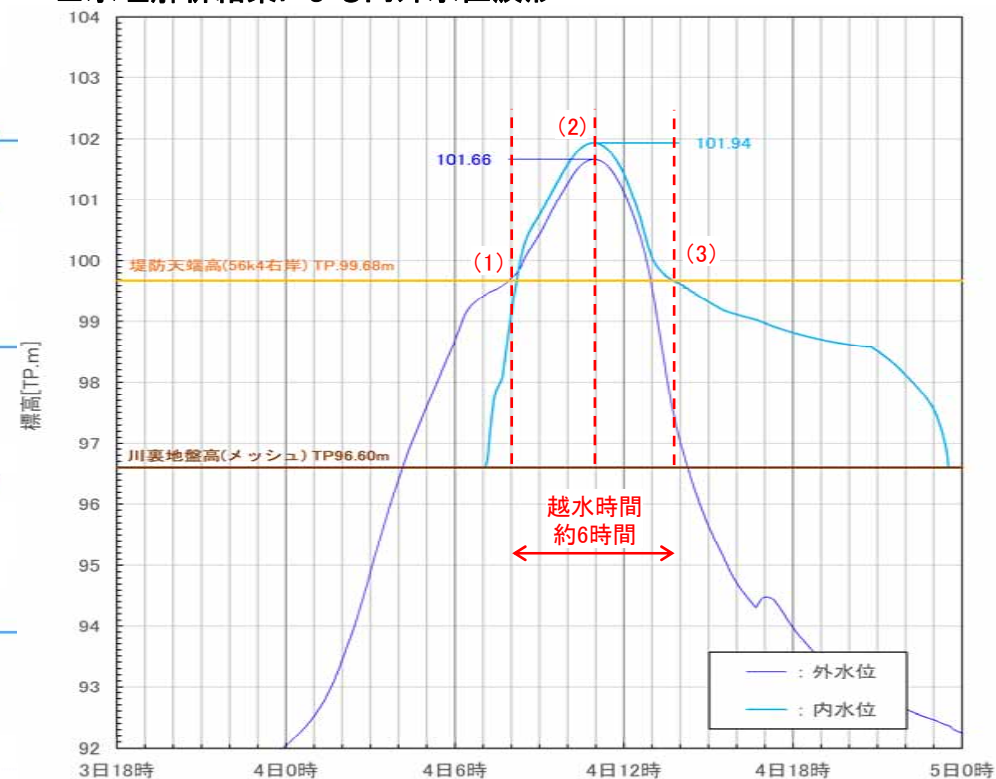


図 想定内外水位波形 再現シミュレーション結果図
(R02.07.04洪水(56.3k右岸付近)(越水のみ、決壊なし))

■現地に残された堤体侵食の痕跡 ※それぞれ撮影した場所は異なる。

宅地側の堤防法尻の洗掘跡



天端舗装が部分的に流出した箇所
アスファルトの残骸は河川側に残されている。



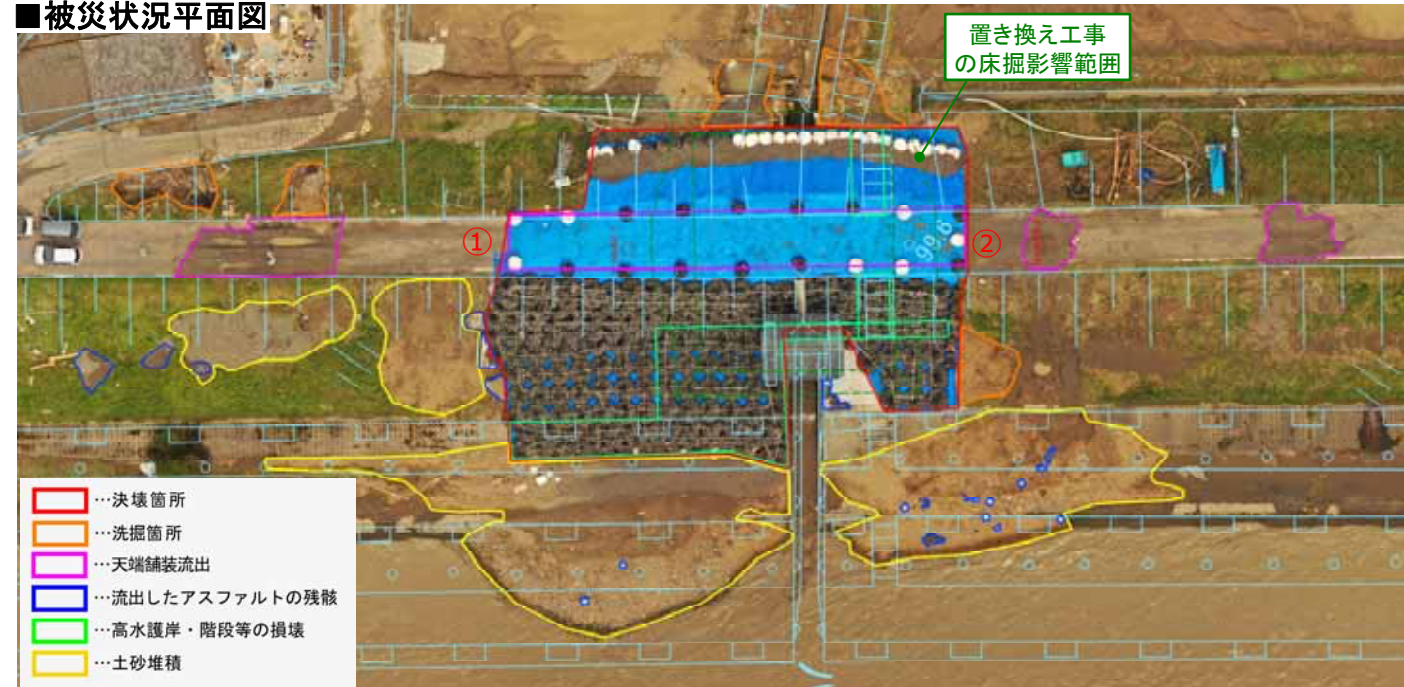
堤体土や天端舗装、護岸は、すべて河川側へ流失



(1)越水 (2)舗装の流失

- 堤体材料の置き換え工事に伴い、堤防天端舗装の撤去復旧が行われている。
- 今回舗装が流出した範囲は、置き換え工事で新しく舗装した範囲とほぼ合致している。

■被災状況平面図



■被災後の損壊状況



■アスファルト舗装施工直後の状況

①下流側端部



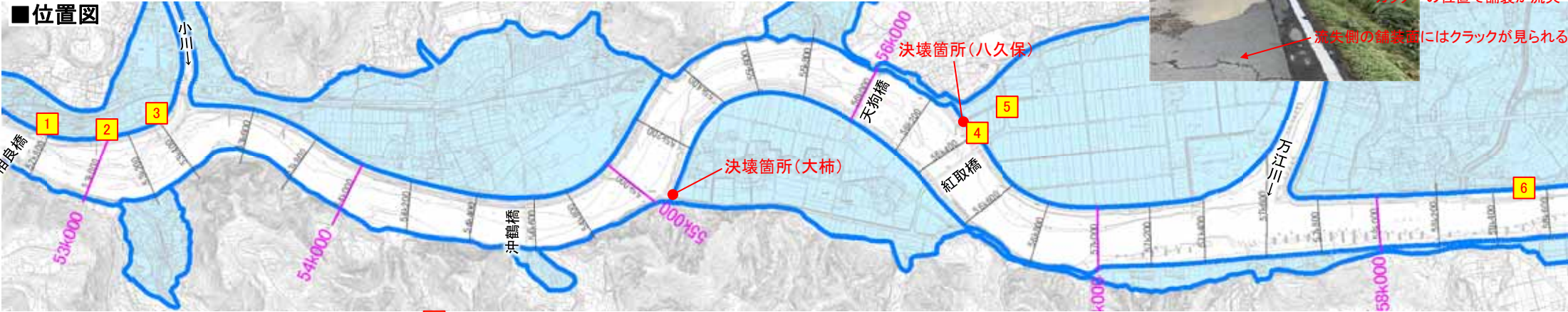
②上流側端部



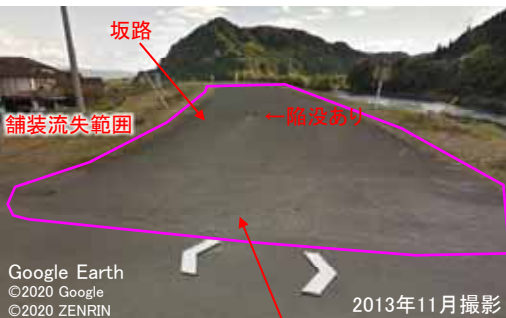
(1)越水 ②舗装の流失(他の箇所での被災状況)

- 今回の出水でアスファルト舗装が被災を受けた箇所を調査。
- 打ち継ぎ目があった箇所やクラックが多い箇所での被災が目立つ。
- 舗装がめくれた箇所での洗掘も確認できる。

■位置図



1 右岸52.8k付近(相良橋) 被災前



1 被災直後の状況



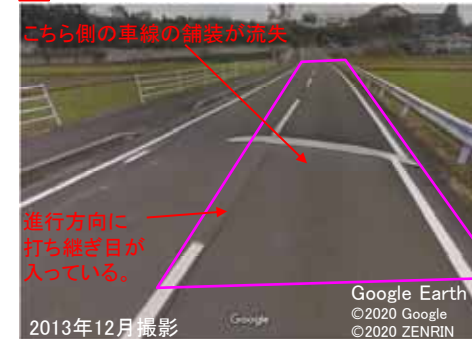
2 右岸53.0k付近(渡第二排水樋管) 被災直後の状況



3 右岸53.4k付近(渡第三排水樋管) 被災直後の状況



5 紅取橋右岸側の堤内地道路 被災前



5 被災後



6 右岸58.6k付近 被災後

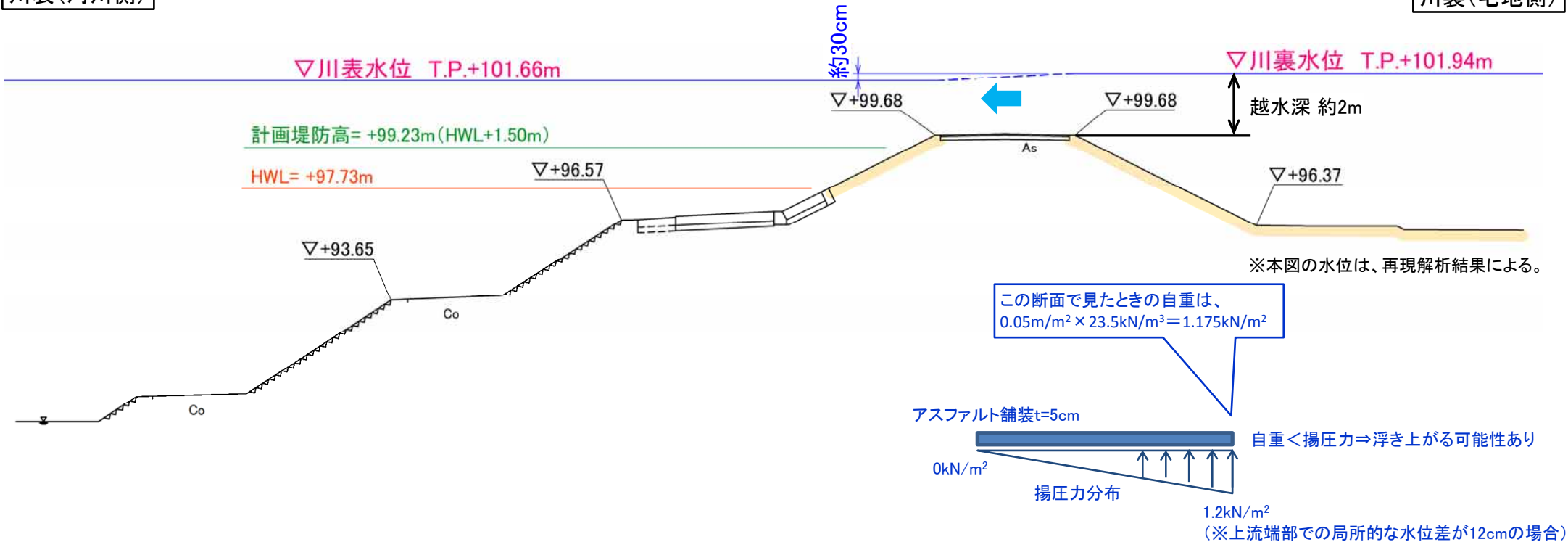


(1)越水 ③舗装の浮き上がり

- 宅地側からの逆越流時の水深は、氾濫解析結果から、堤防天端から約2mあり、河川側との水位差は約30cmある。
- 宅地側と河川側の水位差により天端アスファルト(厚さ5cm)の自重を上回る揚圧力が作用し、浮上がりが生じた可能性がある。特に、打ち継ぎ目があるアスファルト舗装は弱点となった可能性がある。
- 流況解析では、天端付近で宅地側から河川側へ約2m/sの流速が発生しており、アスファルトが剥離・流出した後、堤防天端付近から堤体土が洗掘された可能性がある。

川表(河川側)

川裏(宅地側)



■水面の状況

- ①宅地側が堤防天端高以上に湛水
- ②天端を流れる状態となり水位が低下
- ③川表法肩付近で限界水深となり越水
- ④越水後水面が落込み、一時的に高流速が発生

■天端アスファルトへの作用力

- ・天端アスファルトの厚さは5cmであり、その自重は端部断面で見ると約1.2kN/m²となる。
- ・それに対し、天端アスファルトを浮き上がらせようとする揚圧力は、上下流の水位差により決まり、約12cm以上の水位差が生じると、アスファルト舗装が浮き上がる可能性がある。

(1)越水 ④堤防表面の侵食(トルク抵抗値測定)

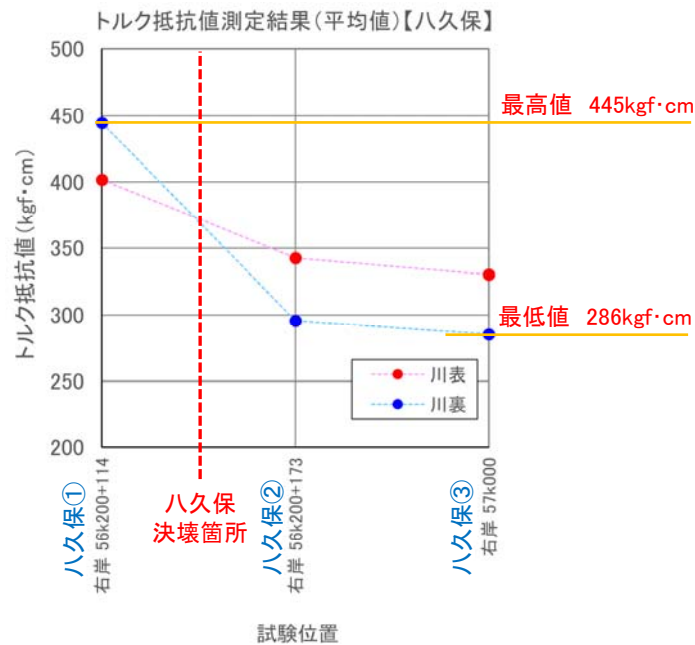
- 今回現地で堤防法面のトルク抵抗値を測定した結果、286kgf・cm～445kgf・cmであった。
- 過去に九州地方整備局管内の堤防にて調査した結果と比較しても良好な状態であることを確認。

測定箇所位置図



※各箇所の川表と川裏でそれぞれ測定

測定結果



(測定状況写真)

ハ久保①ー川裏



※メイン植生(チガヤ、オオブタクサ)

ハ久保②ー川裏

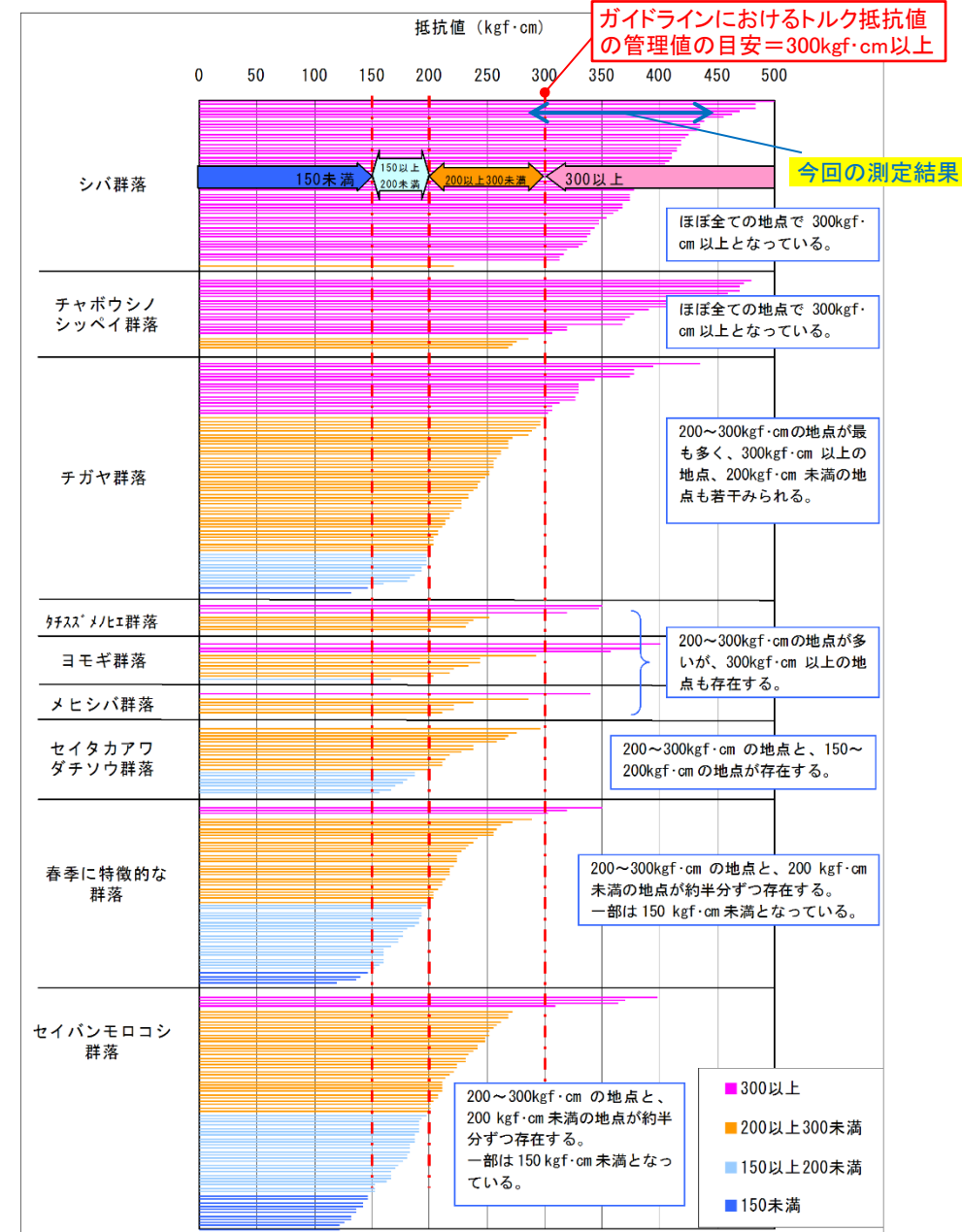


※メイン植生(チガヤ、オオブタクサ)

ハ久保③ー川裏



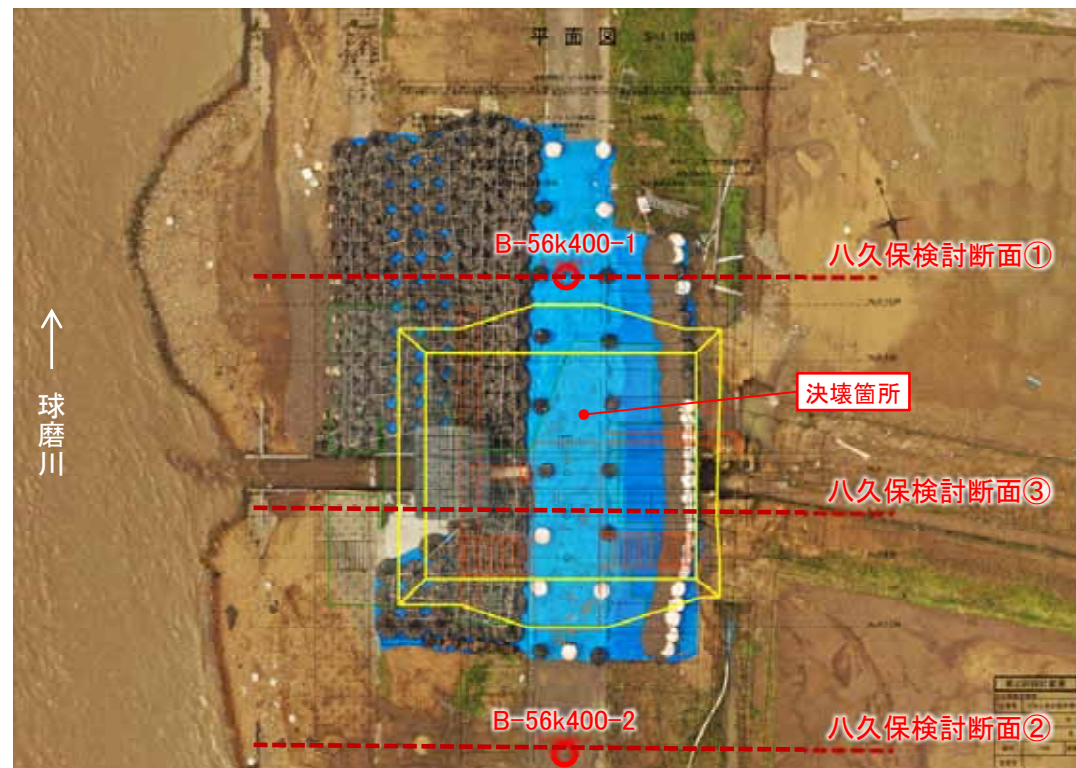
※メイン植生(オオブタクサ)



(2)浸透 ①浸透流解析の検討方針

- 目的：浸透破壊が今回の堤防決壊の一因となり得たのかを確認するため、浸透流解析を行う。
- 地盤条件：地質調査結果(地層構成、土質定数等)を用いる。置き換え工事の実施箇所は、材料が流出しているため、同材料で実施している大柿の地質調査結果を用いる。
- 水位条件：今次出水による再現波形(波形その1)及び「河川堤防の構造検討の手引き(改定版)」に準拠した波形(波形その2)を用いる。

解析断面位置(56.4k右岸) 八久保排水樋管付近

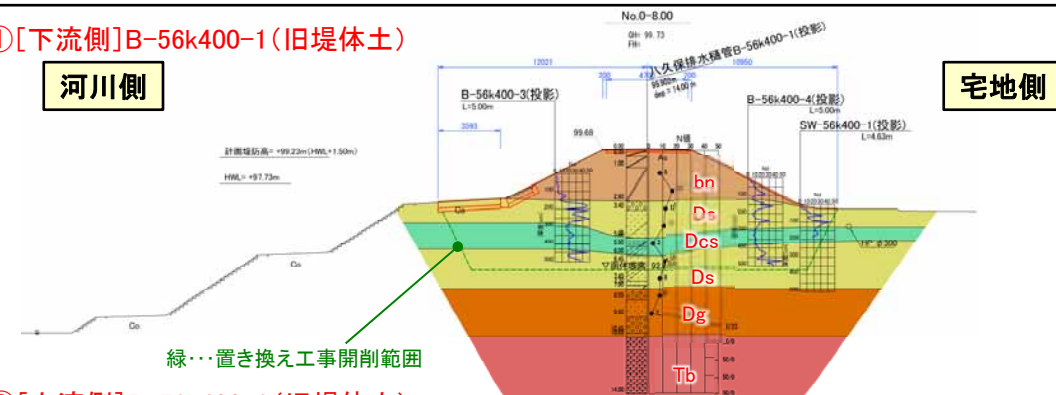


[土質区分]

記号	地層名	記号	地層名
bn	堤体盛土(旧堤体土)	Dcs	洪積砂質粘性土層
Nbn	新規堤体盛土(置き換え土)	Dg	洪積砂礫層
Ds	洪積砂質土層	Tb	凝灰角礫岩

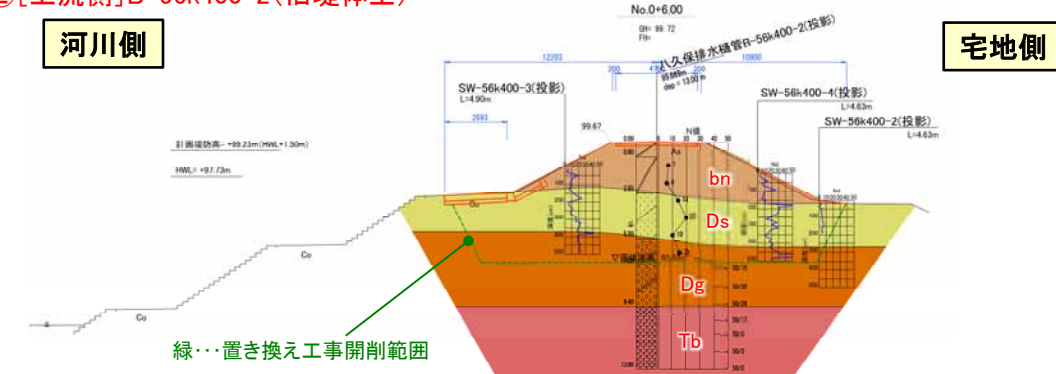
①[下流側]B-56k400-1(旧堤体土)

河川側



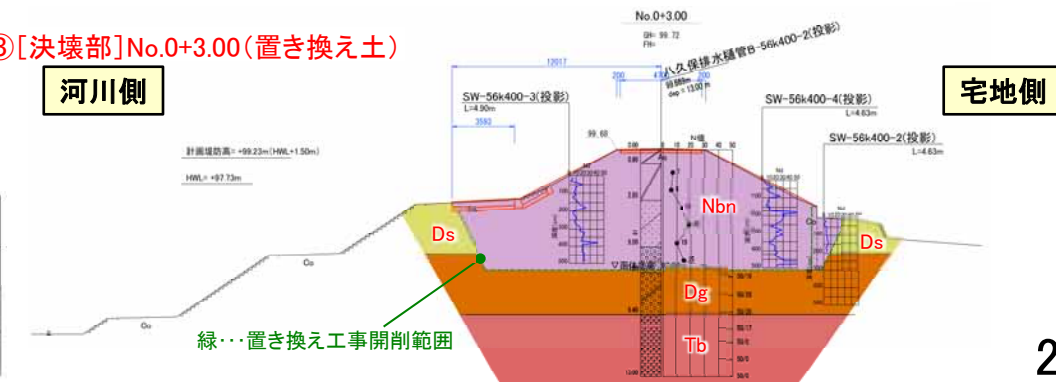
②[上流側]B-56k400-2(旧堤体土)

河川側



③[決壊部]No.0+3.00(置き換え土)

河川側



(2)浸透 ②条件設定

土質条件

No.	対象	地層区分		分類		設定定数						コメント		
		地層名	記号	名称	記号	粘着力 C [kN/m ²]	内部摩擦角 φ [°]	湿潤単位体積 重量 γ t [kN/m ³]	飽和単位体積 重量 γ sat [kN/m ³]	飽和透水係数 k [m/s]	比貯留係数 Ss [1/m]		不飽和特性	
①	八久保下流 B-56k400-1	旧堤体土	旧堤体土	bn	細粒分質砂質礫	GFS	1	41.9	21.5	21.6	8.51E-06	1.00E-04	礫質土・砂質土	
			洪積砂質土層	Ds	細粒分質礫質砂	SFG	0	33.3	20.6	20.7	2.91E-08	1.00E-04	細粒分の多い砂質土	
			洪積砂質粘性土層	Dcs	-	-	18.8	0	15	16	1.00E-07	1.00E-03	粘性土	土質試験なし
			洪積砂質土層	Ds	-	-	0	31.6	16	17	2.91E-08	1.00E-04	礫質土・砂質土	土質試験なし、kは上位Dsと同じ値
			洪積砂礫層	Dg	細粒分混じり砂質礫 細粒分質砂	GS-F SF	0	31.2	18	19	2.10E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土	
②	八久保上流 B-56k400-2	旧堤体土	旧堤体土	bn	細粒分質砂質礫	GFS	4.9	33.35	19.8	20.0	4.13E-08	1.00E-04	礫質土・砂質土	
			洪積砂質土層	Ds	細粒分質礫質砂	SFG	0	34.3	20.4	20.5	2.86E-08	1.00E-04	細粒分の多い砂質土	
			洪積砂礫層	Dg	細粒分混じり砂質礫	GS-F	0	38.8	20	21	7.77E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土	
③	八久保決壊部 No.0+3.00	置き換え土	Nbn	細粒分砂混じり礫 細粒分混じり砂質礫	G-FS GS-F	1	39.3	21.3	21.7	4.50E-05	1.00E-04	礫質土・砂質土	値は 大柿B-55k000-1 の盛土	
アスファルト			As	-	-	置き換え土又は旧堤体土と同様					1.00E-07	1.00E-03	粘性土	透水性は粘性土として設定
コンクリート			Co	-	-						1.00E-07	1.00E-03	粘性土	透水性は粘性土として設定

：基準等による推定値

降雨条件

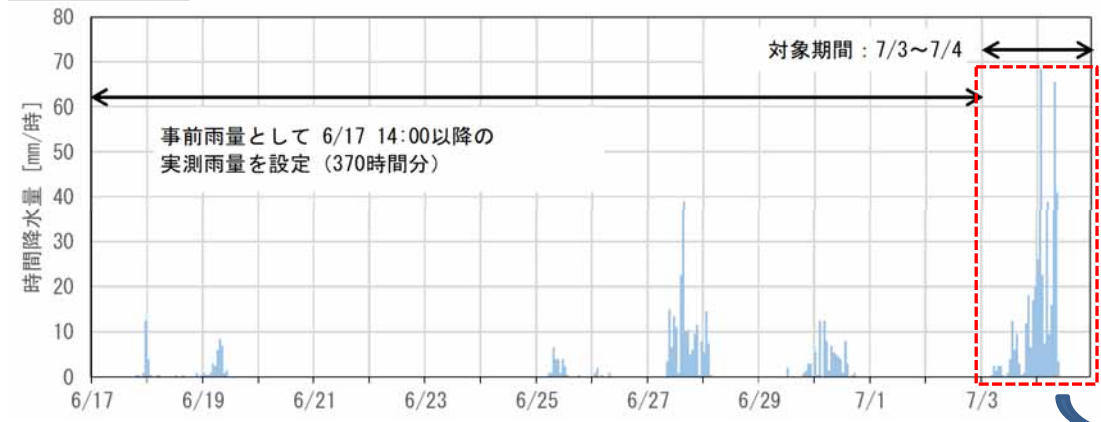


図 時間降水量(気象庁人吉、2020/6/17~7/4)

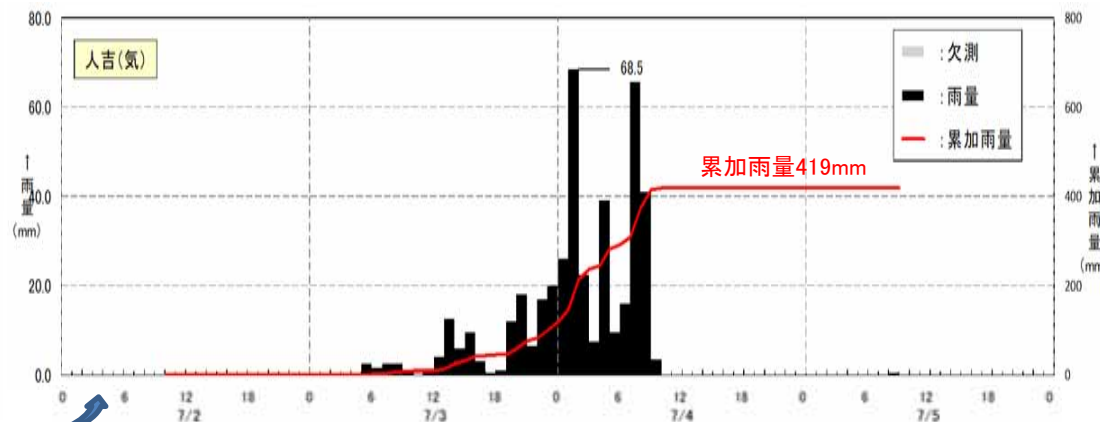
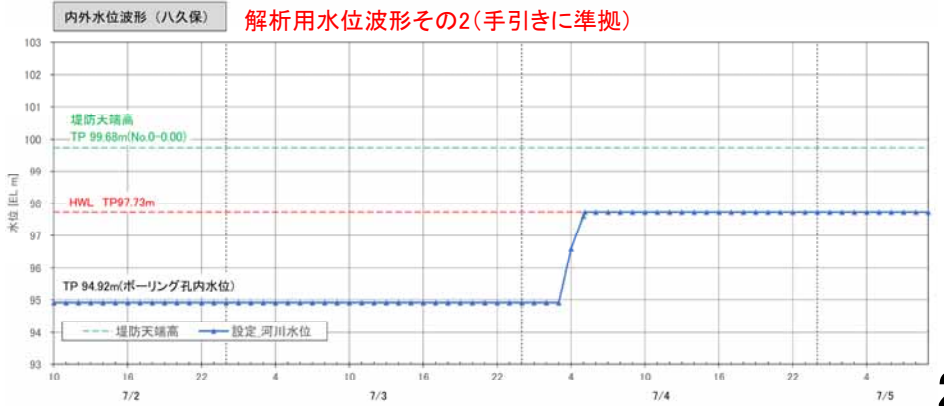
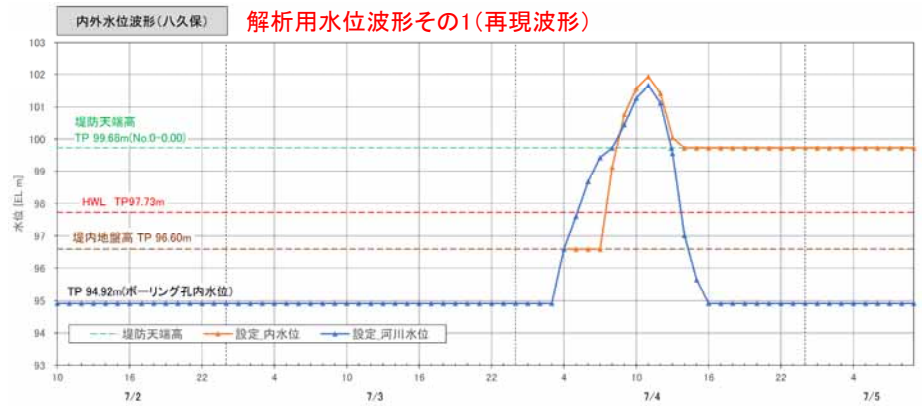


図 令和2年7月4日洪水ハイトグラフ(気象庁人吉雨量観測所)

内外水位波形



(2)浸透 ③浸透流解析結果一覧(56.4k右岸・八久保)

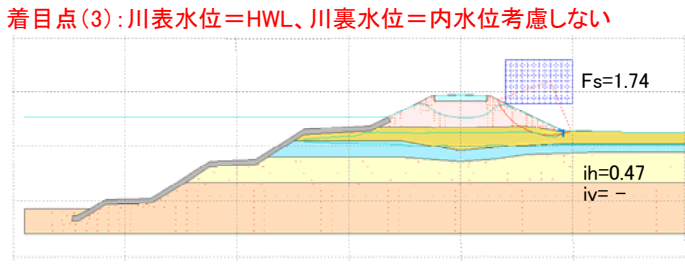
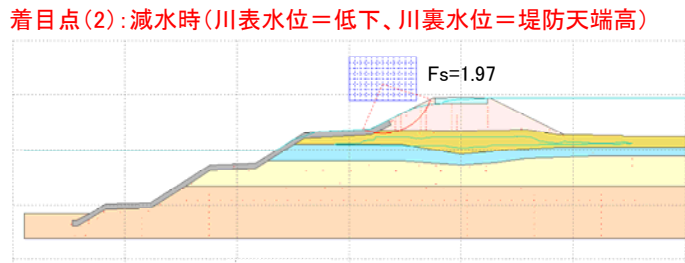
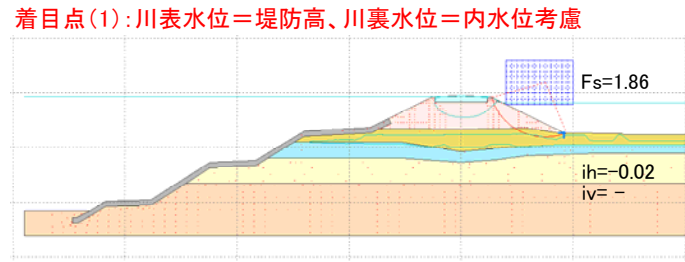
○浸透流解析を実施した結果、今次出水による再現波形(波形その1)及び「河川堤防の構造検討の手引き(改定版)」に準拠した波形(波形その2)のどちらも安全性照査基準(パイピング破壊、すべり破壊)を満足することを確認。

No.	対象	位置	モデル名	波形その1			波形その2			備考	
				着目点(1)		着目点(2)	着目点(3)				
				最小安全率 【川裏】 (Fs>1.00)	局所動水勾配 (i<0.5)		最小安全率 【川表】 (Fs>1.00)	最小安全率 【川裏】 (Fs>1.00)	局所動水勾配 (i<0.5)		
					水平 ih	鉛直 iv			水平 ih		鉛直 iv
①	八久保 排水 樋管	56k400 右岸	[下流部] B-56k400-1	1.86	-0.02	値なし	1.97	1.74	0.47	値なし	旧堤体土
②			[上流部] B-56k400-2	2.66	値なし		2.59	2.24	値なし		旧堤体土
③			[決壊部] No. 0+3.00	2.01	-0.11	-0.13	1.42	1.64	0.30	0.17	置き換え土

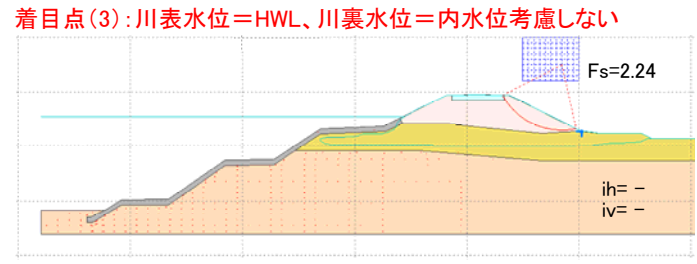
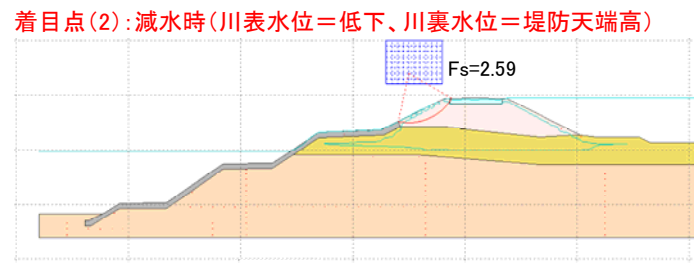
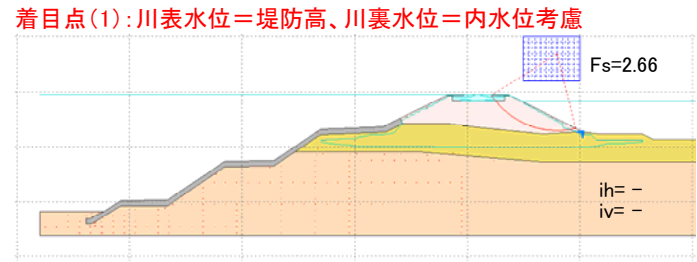
着目点(1)：河川水位が堤防天端高に達した時(波形その1：内水位を考慮する場合)
着目点(2)：減水時(波形その1)
着目点(3)：河川水位が計画高水位に達した時(波形その2：内水位を考慮しない場合)

※局所動水勾配について、
(1)不飽和状態の場合は値なし。
(2)正の値は浸出、負の値は浸透を示す。

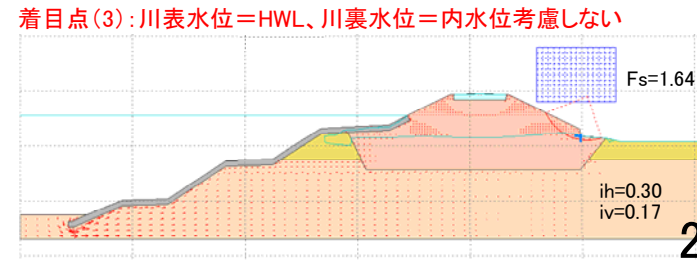
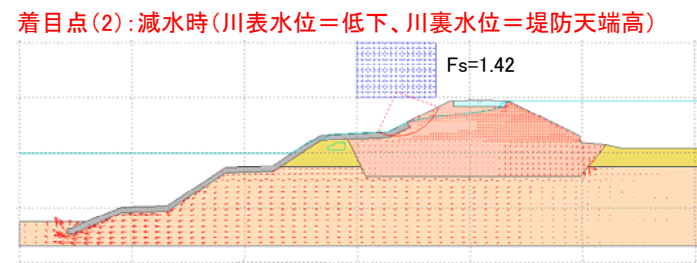
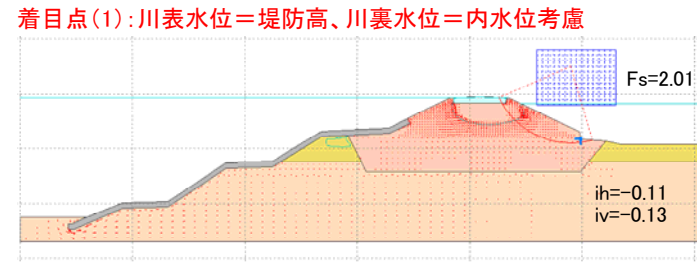
八久保検討断面① [下流側]B-56k400-1(旧堤体土)



八久保検討断面② [上流側]B-56k400-2(旧堤体土)



八久保検討断面③ [決壊部]No.0+3.00(置き換え土)



(2)浸透 ④水没した堤防の土質性状(既往研究成果)

○既往の研究成果では、飽和が進むと粘着力が低下することや湿潤状態となることで堤体侵食の進行が速いことが報告されている。

■排水・吸水過程におけるせん断強度の時系列変化

出典)不飽和火山灰質土の排水・吸水過程における水分特性とせん断強度の簡易同時計測システムの開発とその適用 九州大学地盤工学研究室

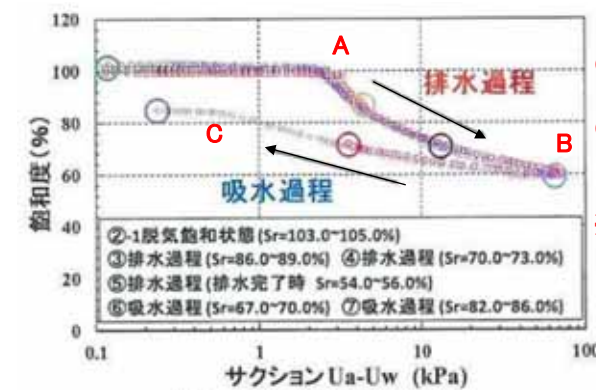


図-3 阿蘇黒ぼくのSWCC

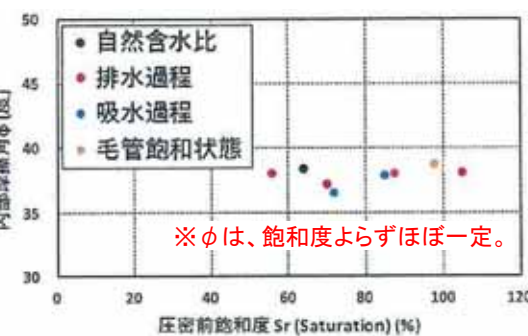


図-11 内部摩擦角・圧密前飽和度の関係

表-4 一面せん断試験結果のまとめ

	自然含水比			脱気飽和	毛管飽和
	①-1	①-2	①-3	②-1	②-2
圧密前飽和度 Sr %	64.0	64.0	64.0	103~105	96~98
粘着力 C kN/m ²	9.05	7.51	6.29	4.26	6.19
内部摩擦角 φ 度	36.88	37.67	38.32	38.11	38.67
	排水過程(不飽和)			吸水過程(不飽和)	
	③	④	⑤	⑥	⑦
圧密前飽和度 Sr %	86~89	70~73	54~56	67~70	82~85
粘着力 C kN/m ²	7.01	7.31	14.18	6.34	2.41
内部摩擦角 φ 度	37.98	37.19	37.97	36.39	37.76

○排水過程で排水が進む(A→B)とサクシオンが増加する。
○逆に、吸水過程では、飽和が進む(B→C)とサクシオンが低下する。

※サクシオン $s = U_a - U_w$
 U_a : 間隙空気圧
 U_w : 間隙水圧

※飽和が進むと、粘着力が小さくなる傾向。

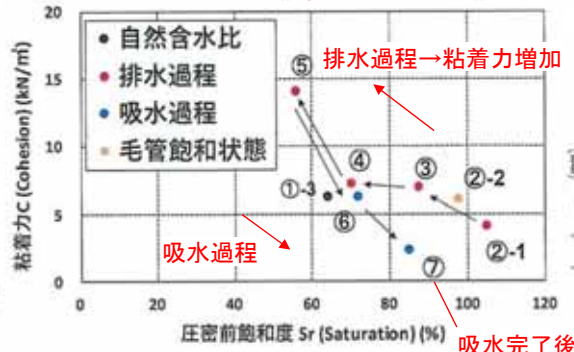


図-12 粘着力・圧密前飽和度の関係

(まとめ)

- [1] 同じ飽和では、排水過程(上図②→⑤)より吸水過程の方が粘着力が小さくなる傾向がある。
- [2] 排水前の飽和状態に比べて(②と⑦の比較)、吸水完了後は、飽和度が低いにも関わらず粘着力が小さい。

■堤体内湿潤状態の違いによる越流侵食への影響

出典)日本自然災害学会誌論文 堤体飽和度に着目した堤防の越流侵食のメカニズムに関する研究

越流侵食実験の結果

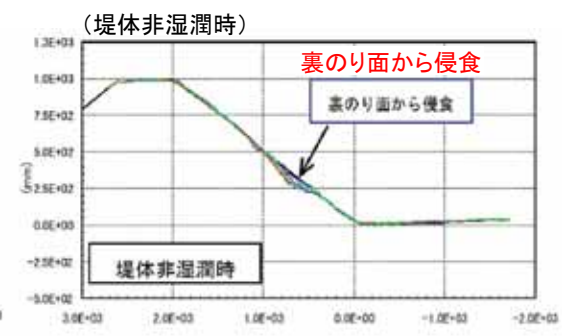
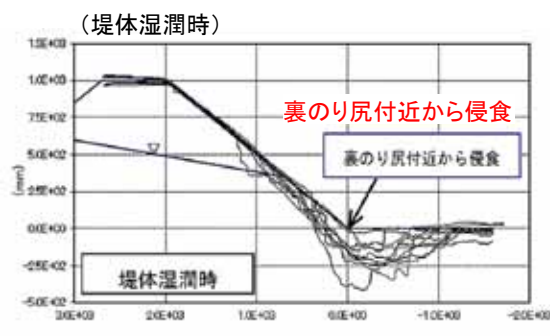


図7 通水2分後の侵食形状の比較(実験結果重ね合わせ)

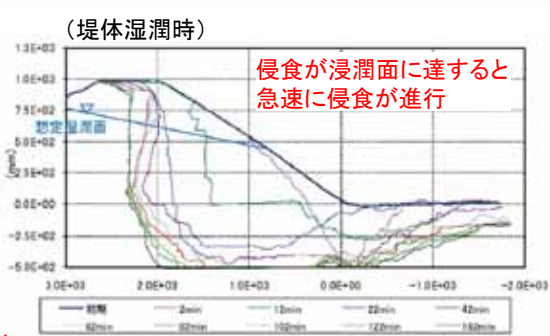


図5 越流侵食形状(堤体湿潤時)

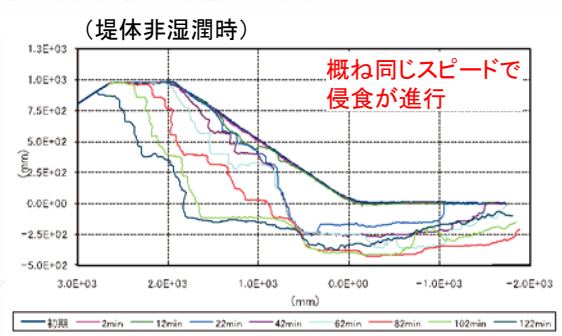


図6 越流侵食形状(堤体非湿潤時)

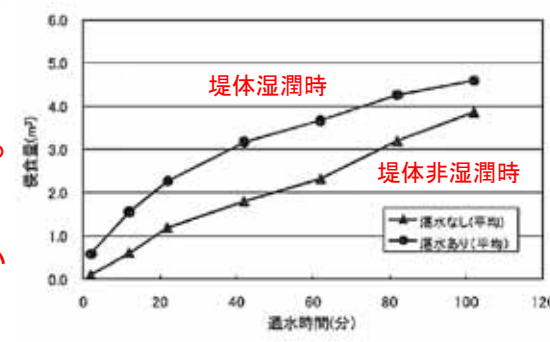


図8 通水時間と侵食量の関係

○堤体湿潤時の方が、侵食量が多い。
○堤体湿潤時の方が、侵食の進行が速い。

「湿潤(飽和)状態の堤体は、非湿潤(不飽和)状態よりも侵食しやすく、侵食量が多くなる。」

(3)河岸侵食

- 決壊箇所は、河床からHWLまでの高さで、護岸や張りコンクリートが設置されていた。
- 決壊箇所の低水護岸が一部損壊しているが、宅地側からの流れにより押し出されたものと推定される。また、決壊箇所付近の堤防法面に河川の流れによる侵食跡は確認されない。

■決壊後の状況

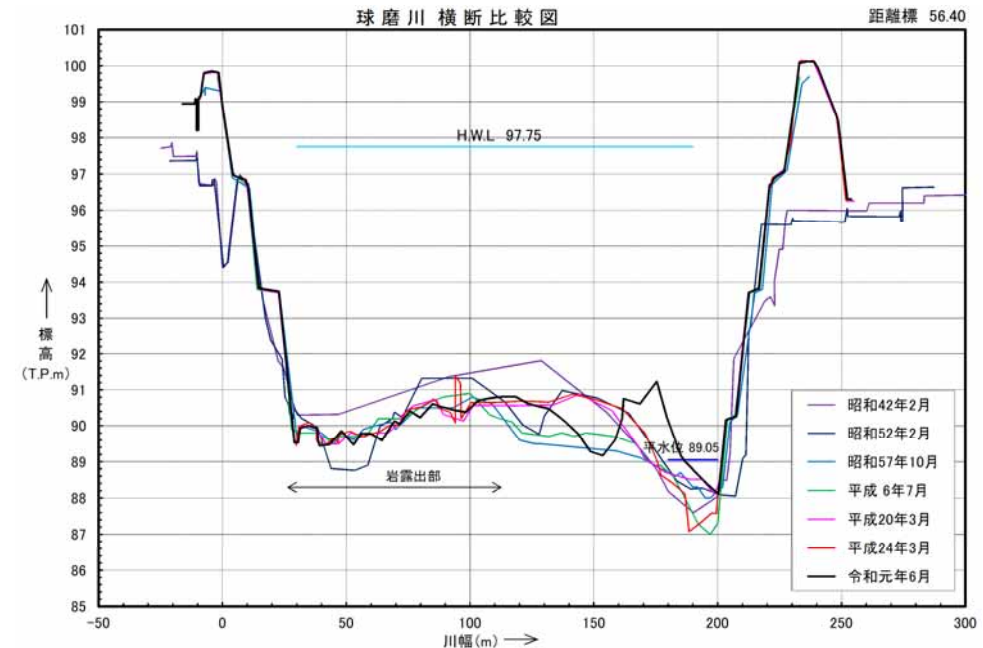


■天端舗装および護岸の損壊箇所



■河道横断経年変化図

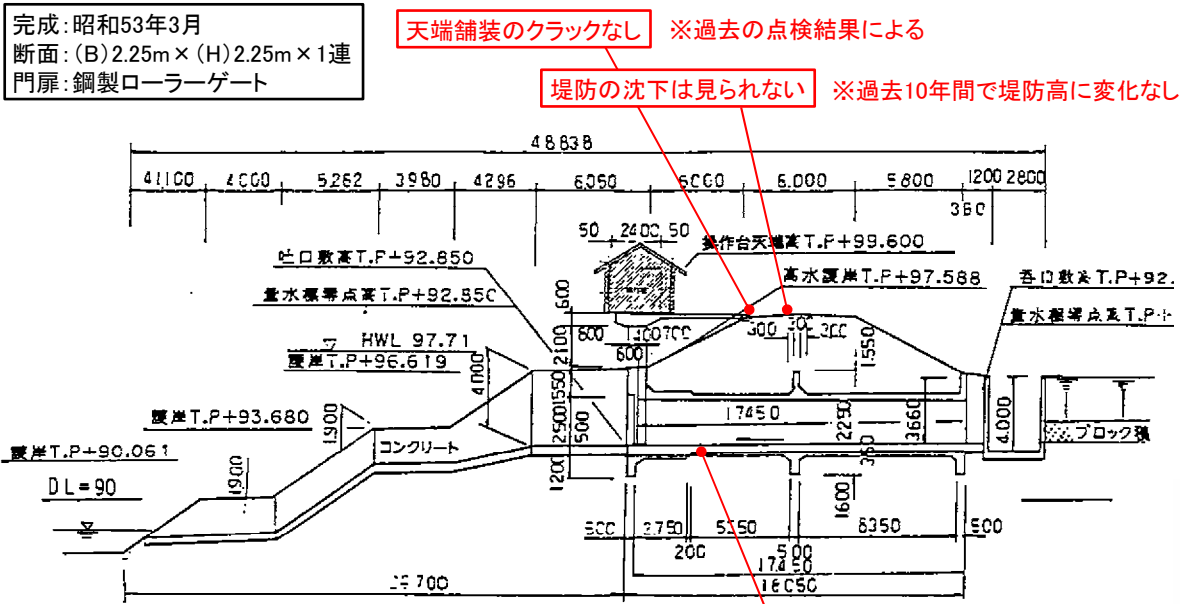
※ミオ筋は右岸側に寄っているものの、堤防に影響のあるような洗掘が進行した形跡は見られない。



(4)構造物および補修履歴等

- 堤防点検の結果から堤体の沈下や函渠の大きなクラック等は、確認されていない。
- 被災時に想定される条件においても浸透路長を満足しており、函体周辺から漏水が生じた形跡は確認されない。
- 平成30年度に堤体材料の置き換え工事を実施。

■八久保排水樋管の縦断面図(構造物台帳より)



■過去の点検結果(堤防点検H29)(構造物点検R1)

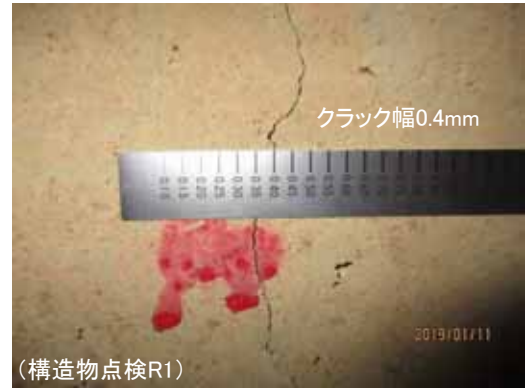
決壊箇所周辺では、過去の堤防点検において変状は認められていない。
八久保排水樋管は、若干変状(クラック、漏水)が見られるものの、その程度は非常に軽微である。

函渠内のクラック



(構造物点検R1)

函渠内のクラック拡大写真

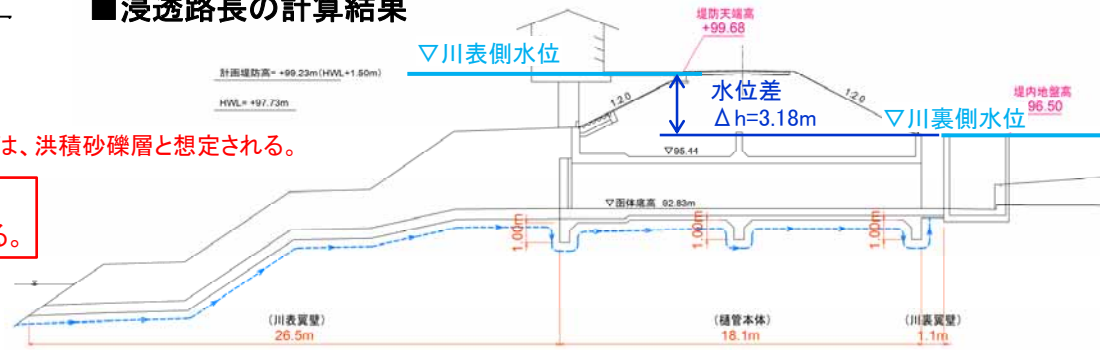


(構造物点検R1)

■樋管・堤防の影響評価 ※樋管および堤防が、決壊要因となった可能性は低いものと考えられる。

決壊要因	評価
①基礎地盤の沈下に伴う空洞化(水みち、漏水)	過去の点検結果では空洞化は確認されていない
②不等沈下による堤防のクラックやゆるみ	対策工事済み(H30)
③函渠クラックや継手開きからの吸出し、漏水	過去の点検結果で有害な異常は確認されていない
④浸透路長の不足による吸出し、漏水(水みち)	今回想定される条件において浸透路長は不足しない

■浸透路長の計算結果



○Laneの式…樋門の設計で一般的に使用されている簡易的な手法を用いる。

$$C \leq \frac{L/3 + \Sigma \ell}{\Delta h}$$
$$C = 6.0 \leq 6.7 \quad \dots \text{OK}$$
$$\frac{45.7}{3} + \frac{6.0}{3.18} = 6.7$$

- C : 加重クリープ比 6.0(中砂)
…地質調査結果による
- L : 樋管本体および翼壁の延長
26.5m + 18.1m + 1.1m = 45.7m
- $\Sigma \ell$: 鉛直方向浸透路長(遮水矢板による延長)
1.0m × 6 = 6.0m
- Δh : 水位差 3.18m

(4) 堤体材料の置き換え工事 ①工事概要

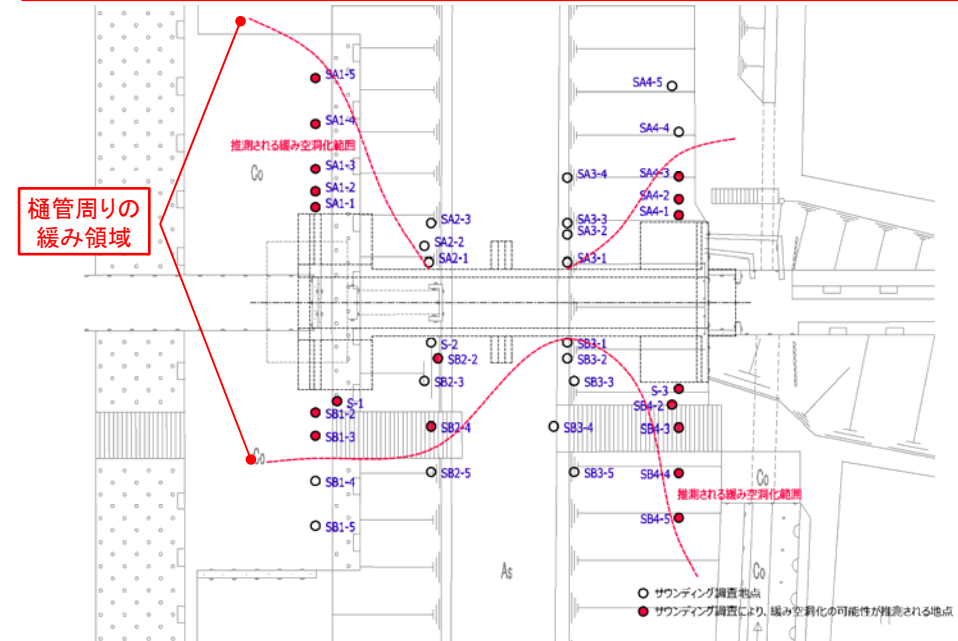
- 決壊箇所では、平成30年度に堤体材料の置き換え工事を実施。
- 当該工事では、既設樋管周辺を開削し、堤体材料の置き換えと合わせて、舗装や護岸、階段工等の整備を行っている。

■堤体材料の置き換え工事の開削範囲と決壊範囲の重ね合わせ



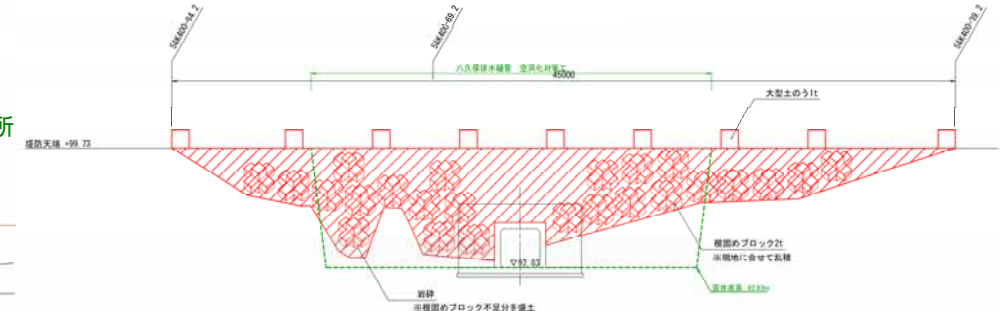
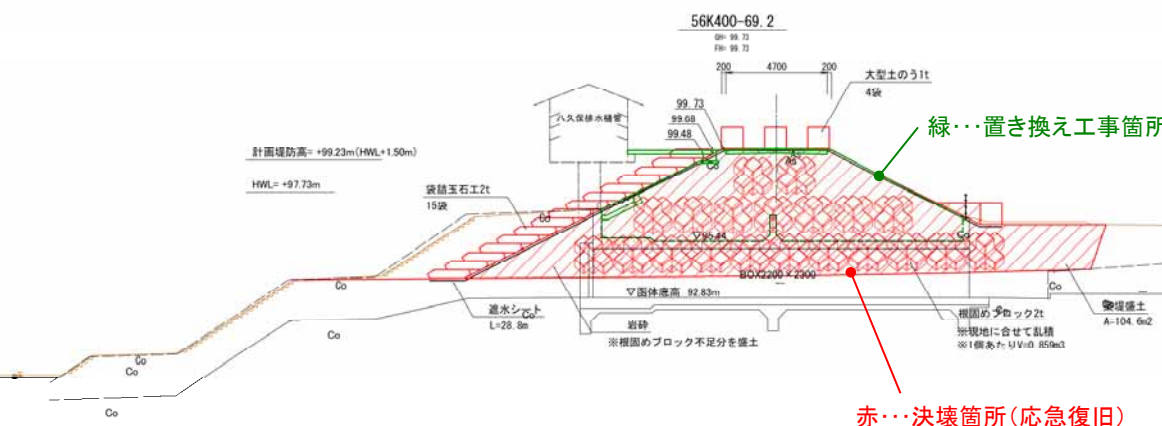
■過去の調査結果 (H26年度報告書による)

○スウェーデン式サウンディング調査により、樋管周りの堤体に緩み領域が確認されたため、対策工を実施。



周辺堤防緩み空洞化調査結果図-八久保排水樋管(球磨川 右岸56/350) S=1/200

堤防正面図



(4) 堤体材料の置き換え工事 ②堤体材料の評価

○置き換え工事では、堤体材料(埋戻し土)として「購入土(山ずり)」が使用されている。
○今回の地質調査で得られた結果から、置き換え土および旧堤体土ともに、築堤材料に適した土であると言える。

■望ましい堤体材料の評価 参照)河川土工マニュアル 平成21年4月 (財)国土技術研究センター P63をもとに表に整理

堤体材料として望ましい土の条件 (河川土工マニュアル参照)	置き換え土【55.0k左岸】		旧堤体土【55.0k左岸】		旧堤体土【56.4k右岸】		旧堤体土【56.4k右岸】	
	決壊箇所下流側	判定	決壊箇所上流側	判定	決壊箇所下流側	判定	決壊箇所上流側	判定
① 粒度分布の良い土	・適正範囲に分布	○	・適正範囲に分布	○	・おおむね適正範囲に分布	△	・適正範囲に分布	○
② 最大寸法が10～15cm以下	・最大粒径5cm程度	○	・最大粒径3cm程度	○	・最大粒径7.5cm以下	○	・最大粒径3cm程度	○
③ 細粒分(0.075mm以下の粒子)が土質材料の15%以上	・細粒分含有率13.0～15.6%	△	・細粒分含有率20.6%	○	・細粒分含有率16.4%	○	・細粒分含有率33.1%	○
④ シルト分のあまり多くない土 (細粒分のうち、シルトの割合)	・細粒分のうちシルトの割合58%	○	・細粒分のうちシルトの割合61%	○	・沈降分析が実施されていないため、不明	—	・細粒分のうちシルトの割合46%	○
⑤ 細粒分(0.075mm以下の粒子)があまり多くない土(50%以下)	・細粒分含有率13.0～15.6%	○	・細粒分含有率20.6%	○	・細粒分含有率16.4%	○	・細粒分含有率33.1%	○
⑥ 土質分類名で[GF]、[SF]、[M]、[C]に相当する土	・[GF-S]、[G-FS]、[GS-F]	○	・[SFG]	○	・[GFS]	○	・[GFS]	○
総合評価 :		○	総合評価 :		○	総合評価 :		○

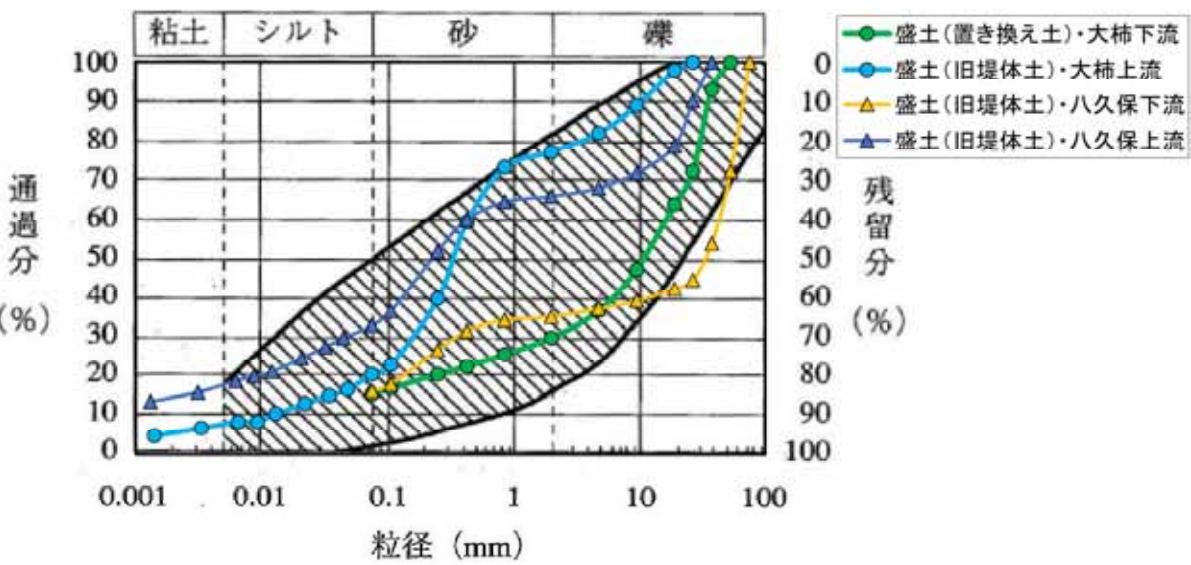
■置き換え工事で使用された置き換え土(採取現場写真)



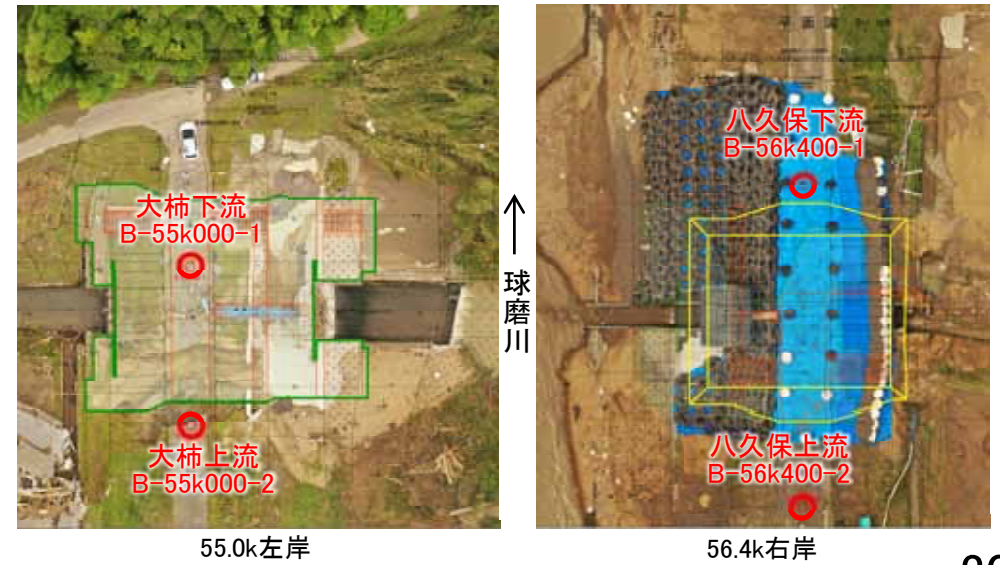
(採取現場写真)

出典)H30人吉出張所管内河川維持管理工事
土質材料試験報告書 平成30年12月

■堤体材料の粒度分布の適用範囲



■ボーリング位置図



(4) 堤体材料の置き換え工事 ③施工状況

- 工事記録より、施工当時の締固め度は、規定値を十分に満足している。
- 施工当時の施工状況写真より、掘削法面は、段切りを行っており、適切な施工がなされている。

■締固め度の検証(施工管理値の評価)

(品質規定方式における締固め度の規定値)

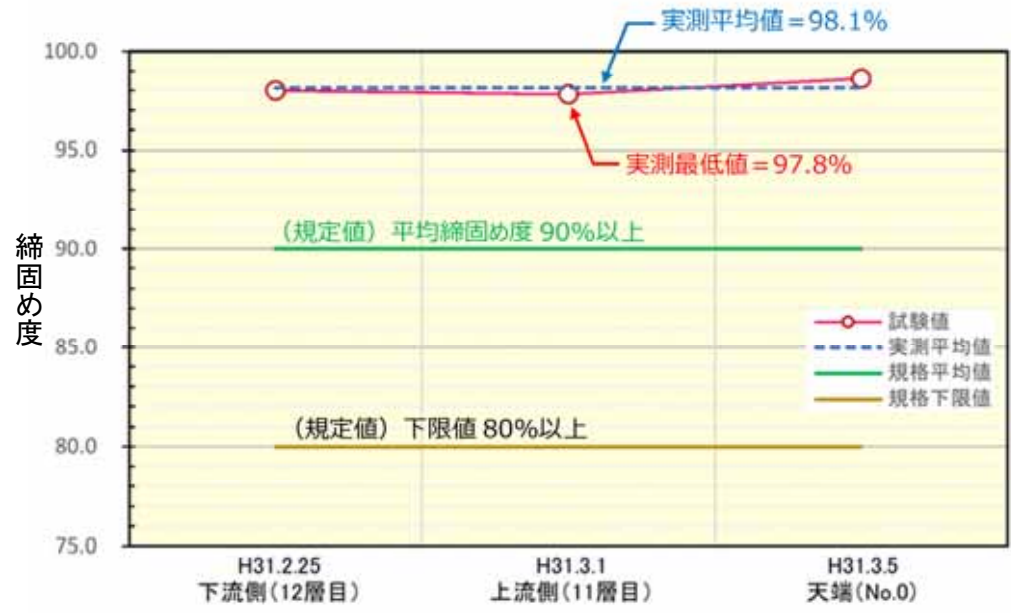
- 平均締固め度：Dc=90%以上
- 締固め度品質下限値：Dc=80%

参照)河川土工マニュアル 平成21年4月
(財)国土技術研究センター P80, 81

使用材料名	山ずり
最大乾燥密度	1.772 g/cm ³
最適含水比	17.4 %

※施工当時の現場試験値

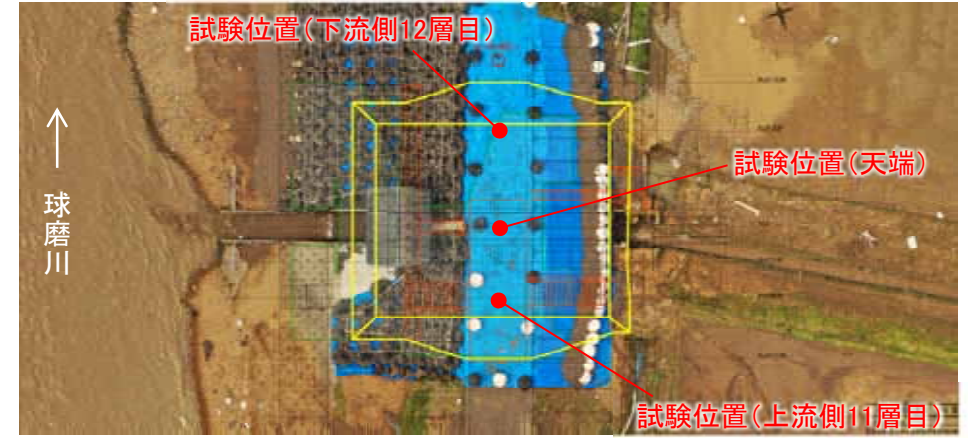
試験日	H31.2.25	H31.3.1	H31.3.5	平均値
測定箇所	八久保樋管 下流側(12層目)	八久保樋管 上流側(11層目)	八久保樋管 天端(No.0)	
含水比	14.3	14.1	13.8	14.1 %
乾燥密度	1.737	1.734	1.748	1.740 g/cm ³
締固め度	98.0	97.8	98.6	98.1 %



■施工状況写真



■現場密度試験位置(締固め度)



- (1)「置き換え土」と「旧堤体土」の土は、同じものではないが、土質的にはどちらも細粒分を含む砂礫に分類される。
- (2)「置き換え土」は、「旧堤体土」に比べ、礫分が多く、砂分・細粒分がやや少ない。
- (3)強度特性および透水係数には、大きな違いは見られない。(置き換え土の方がやや透水係数大きい。)

■堤体土の土質試験結果横並び

(凡例) … 置き換え土、 … 旧堤体土

調査箇所		55.0k左岸（大柿排水樋管）				56.4k右岸（八久保排水樋管）		
盛土種別		置き換え土			旧堤体土	旧堤体土		
調査位置		決壊箇所下流側			決壊箇所上流側	決壊箇所下流側	決壊箇所上流側	裏法尻洗掘箇所
試料番号		Tr55k000-1-1	S1-1（追加実施）	S1-2（追加実施）	C55k000-2-1	Tr56k400-1-1	Tr56k400-2-1	八久保No.1（追加実施）
試料状態		乱れの少ない	乱れの少ない	乱れの少ない	乱れの少ない	乱れの少ない	乱れの少ない	乱した
試料採取深度（GL-m）		-2.40	-1.30	-2.30	-1.50	-1.925	-1.925	—
試料写真								
物理特性	① 湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	2.249	2.143	2.205	2.140	2.190	2.078	—
	② 間隙比 e	0.336	0.477	0.433	0.473	0.442	0.581	—
	③	液性限界 WL (%)	35.9	33.6	32.1	NP	27.1	26.2
		塑性限界 WP (%)	23.4	23.6	21.1	19.2	14.8	19.2
		塑性指数 IP	12.5	10.0	11.0	NP	12.3	7.0
	④	れき分 grav (%)	70.1	72.8	67.8	22.9	64.7	34.0
		砂分 sand (%)	14.3	14.2	18.0	56.5	18.9	32.9
		シルト分 silt (%)	15.6	7.7	8.1	12.5	16.4	15.2
		粘土分 clay (%)		5.3	6.1	8.1	17.9	8.6
	⑤ 細粒分含有率 F_c (%)	15.6	13.0	14.2	20.6	16.4	33.1	24.0
力学特性	⑥	平均粒径 D_{50} (mm)	10.6000	10.1209	6.9268	0.3298	33.75	0.2261
		20%粒径 D_{20} (mm)	0.2153	0.5461	0.2996	0.0710	0.1393	0.008466
		⑦ 土質分類名	砂混じり細粒分質礫 {GF-S}	細粒分砂混じり礫 {GF-S}	細粒分混じり砂質礫 {GS-F}	細粒分質礫質砂 {SFG}	細粒分質砂質礫 {GFS}	細粒分質礫質砂 {SFG}
	⑧	試験条件	CD	CD	CD	CUB	CD	CUB
		粘着力 C (kN/m ²)	90.0	8.3	11.5	15.6	2.1	4.9
		内部摩擦角 ϕ (°)	28.6	39.7	38.8	33.9	41.9	33.4
			特異値のため除外					
	⑨	試験条件	変水位	変水位	変水位	変水位	変水位	—
		透水係数 k (m/sec)	5.34E-06	1.94E-05	7.05E-05	4.35E-06	8.51E-06	4.13E-08

(2)

(1)

(3)

- 今回地質調査を行った結果を踏まえ、決壊直後の堤防断面の写真に地層区分を記入したものを以下に示す。
- 56.4k右岸(八久保)では、工事の置き換え土は流失しているため、確認できない。
- 堤体土は、上流側断面の方が細粒分が多く、透水係数が小さい。

下流側

- ・堤体土の細粒分含有率 : $F_c = 16.4 \%$
- ・ " 透水係数 : $k = 8.51 \times 10^{-6} \text{ m/sec}$



上流側

- ・堤体土の細粒分含有率 : $F_c = 33.1 \%$
- ・ " 透水係数 : $k = 4.13 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$



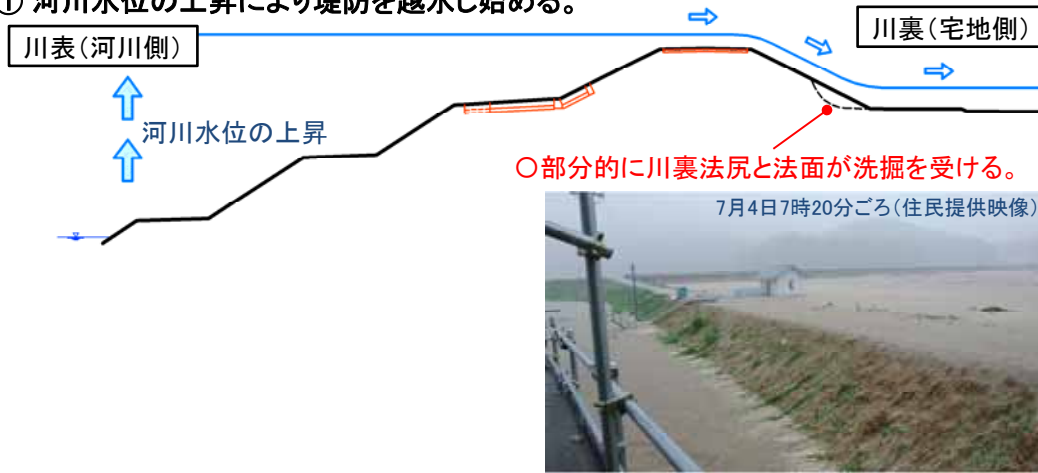
4) 決壊のメカニズムと要因

要因の種類	決壊要因の可能性
I .越水	○河川水位が上昇し堤防を越水。 ○堤防を大きく越える水位に達し、長時間（6時間程度以上）堤防全体が水没。 ○決壊箇所周辺では、宅地側から河川側に向かって長時間（6時間程度以上）の越水。 ○内外水位差によりアスファルト舗装の自重を上回る揚圧力が作用していたことを確認。 ○堤防天端のアスファルトは河川側へ流出していることを確認。 ○川裏法尻（八久保樋管周辺）及び堤防法肩（大柿樋管周辺）に洗掘箇所を確認。 ○決壊箇所の耐侵食性は良好な状態であることを確認。
II .浸透	○地質調査の結果を用いて浸透流解析を実施した結果、安全性の照査基準（パイピング破壊、すべり破壊）を満足することを確認。 ○既往研究成果から土の飽和が進むと粘着力が低下することや湿潤状態となることで堤体侵食の進行が速いことを確認。
III .河岸侵食	○決壊箇所の川表小段の平張コンクリートや小段よりも下の低水護岸の損傷は確認されていない。 ○決壊箇所付近の堤防法面に河川の流れるによる侵食跡は確認されない。
IV .構造物・工事	○過去の点検結果において、函体のクラックからの漏水や堤体・護岸の変状等は確認されていない。 ○被災時に想定される条件においても浸透路長を満足しており、函体周囲から漏水が生じた形跡は確認されない。 ○堤体材料の置き換え工事では、適切な材料及び施工が実施されていることを確認。 ○置き換え土と旧堤体材料は細粒分を含む砂礫に分類され、強度特性及び透水係数に大きな違いはないことを確認。（置き換え土の方がやや透水係数が大きい） ○堤防天端舗装に舗装復旧時の打ち継ぎ目を確認。

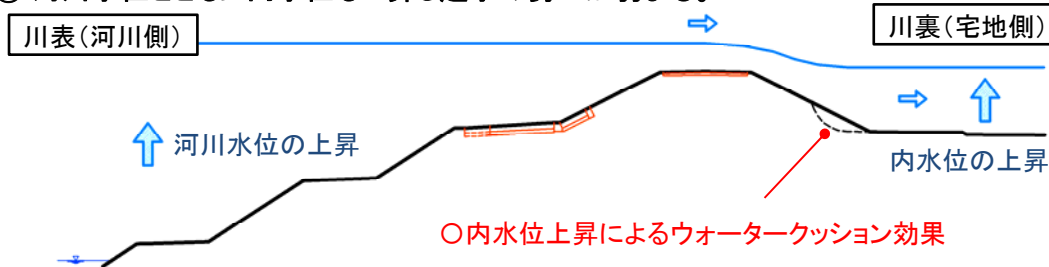
【球磨川右岸56.4k付近】 (2) 決壊メカニズムのイメージ

○当該箇所想定される決壊の過程は、以下のように考えられる。

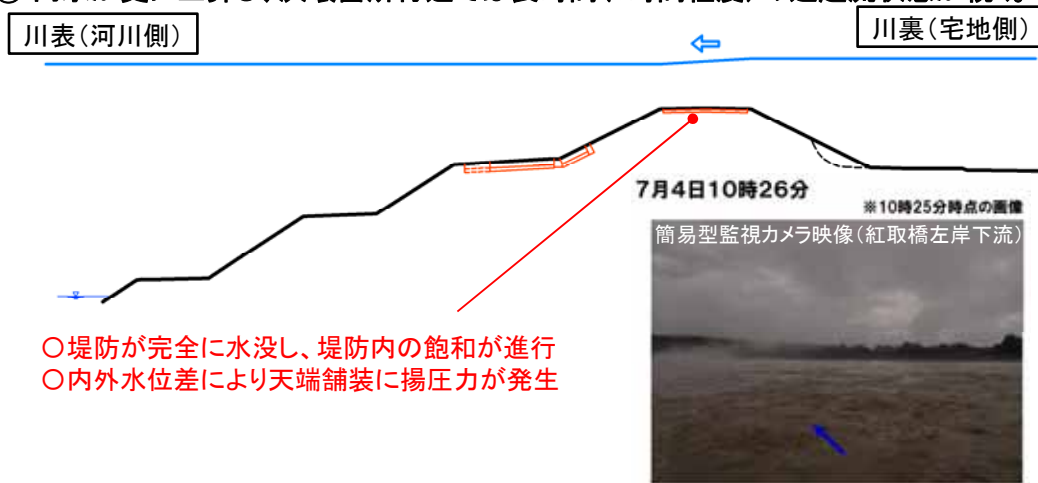
① 河川水位の上昇により堤防を越水し始める。



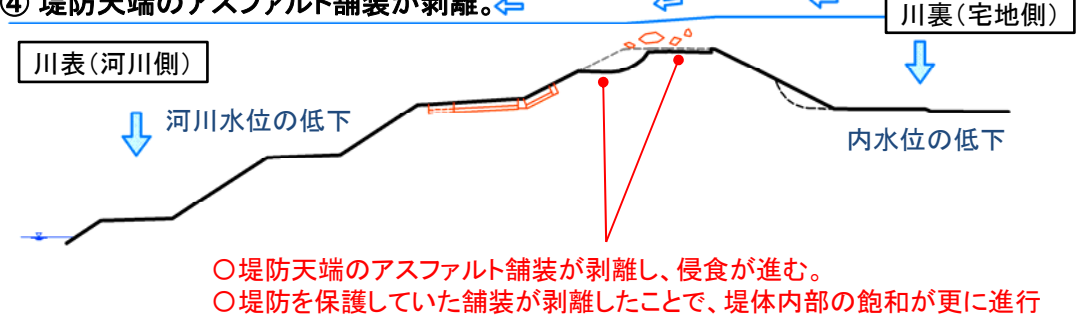
② 河川水位とともに内水位も上昇し越水の勢いが弱まる。



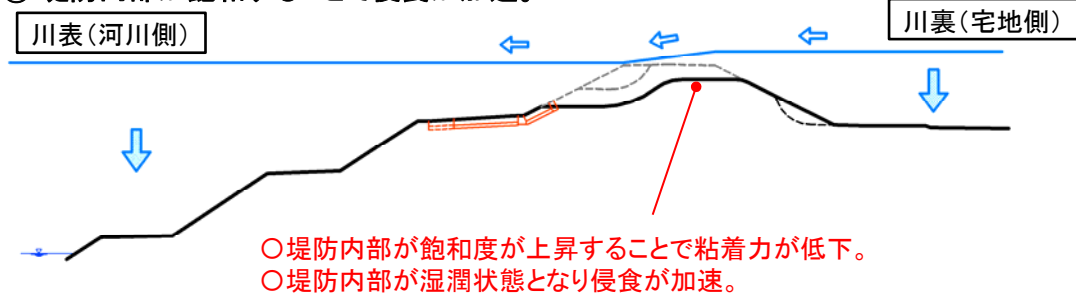
③ 内水が更に上昇し、決壊箇所付近では長時間(6時間程度)の逆越流状態が続く。



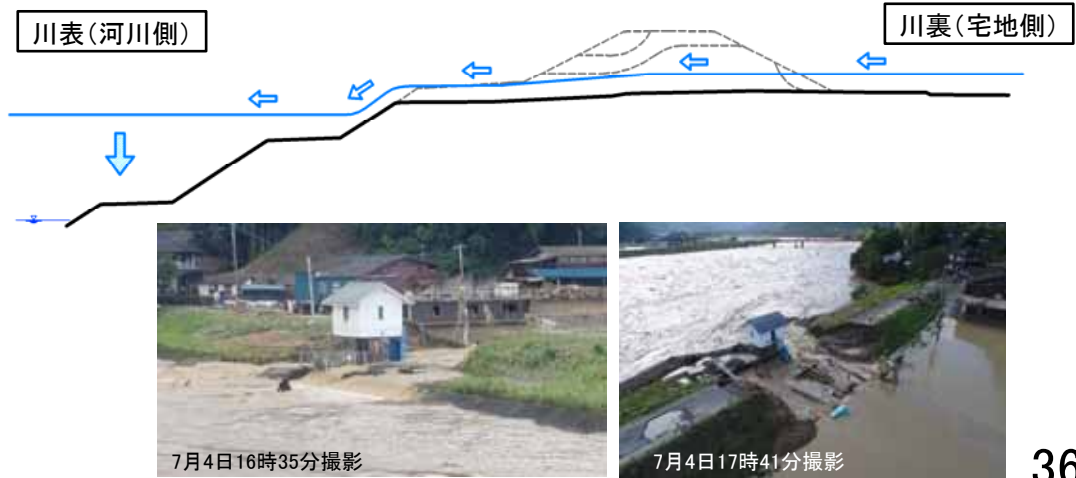
④ 堤防天端のアスファルト舗装が剥離。



⑤ 堤防内部が飽和することで侵食が加速。



⑥ 堤防が決壊。



5) 本復旧方法(案)

【球磨川右岸56.4k付近】復旧工法の方針(案)

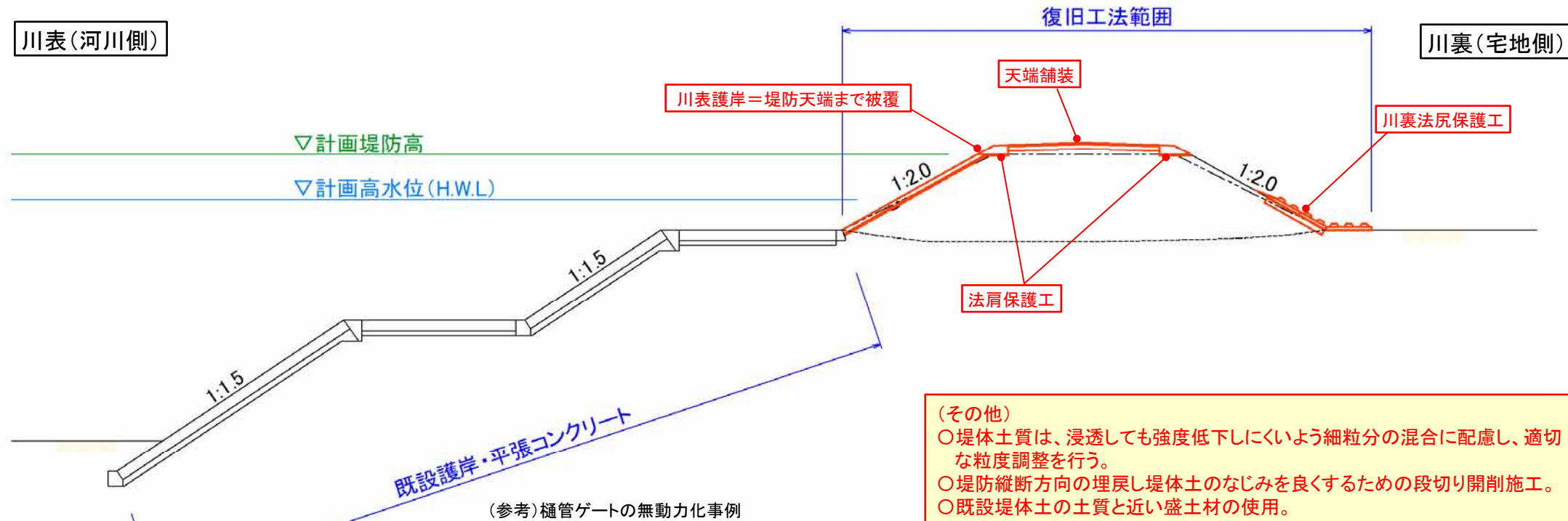
- 今回の被災要因を踏まえ、川裏法尻保護工(川裏法尻部の洗掘対策)、天端舗装、天端までの川表護岸工、法肩の侵食防止として法肩保護工を設置する。
- また、洪水の減水期に遅延なく排水が実施可能となるよう排水樋管のゲート構造を無動力化とする。

■復旧工法横断範囲のイメージ(案)

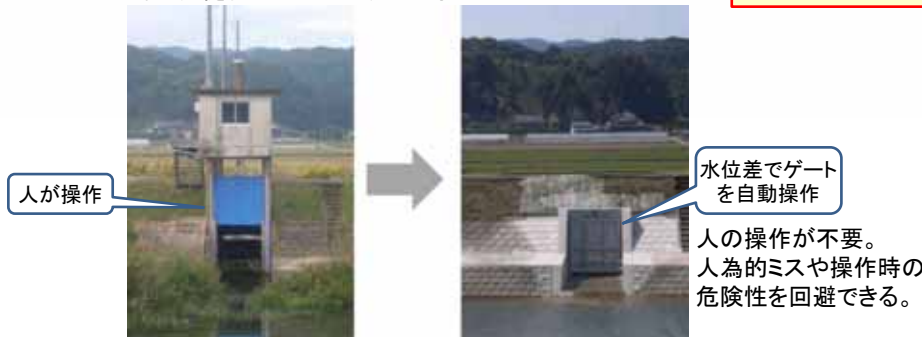
— : 復旧工法実施範囲

川表(河川側)

川裏(宅地側)



(参考)樋管ゲートの無動力化事例



出典)樋門ゲートの無動力化と操作等の共同管理に関するガイドライン H30.5 九州地方整備局

II. 球磨川左岸55.0k付近

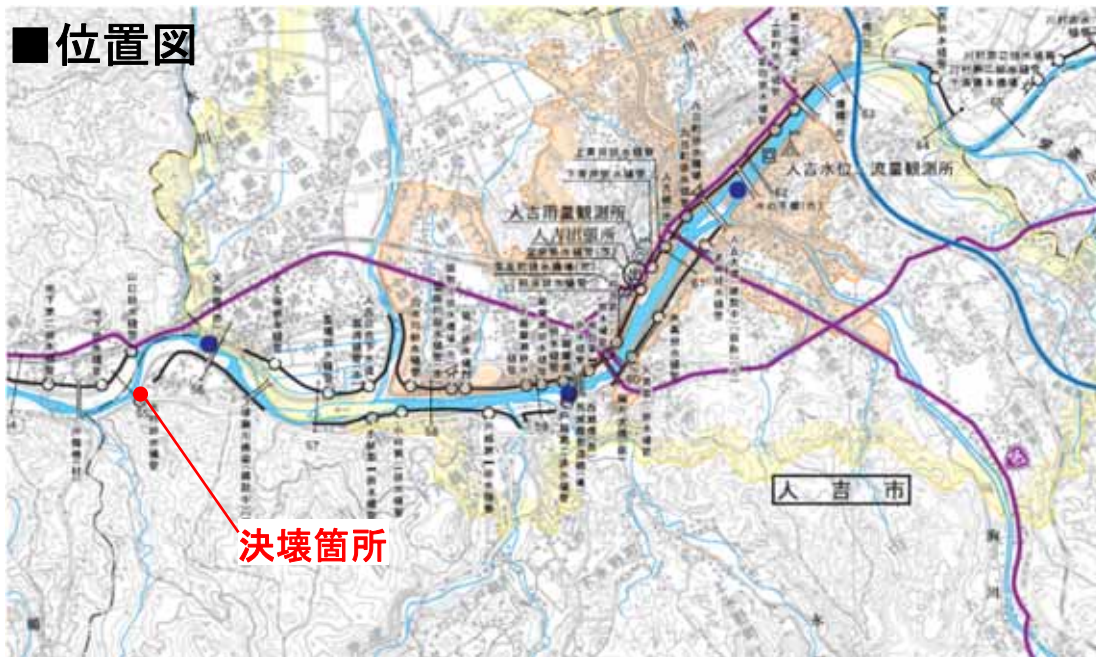
(大柿排水樋管付近)

1) 決壊箇所状況

【球磨川左岸55.0k付近】(1)決壊箇所の詳細

- 球磨川左岸55.0k付近において、延長約10mにわたり堤防が決壊。
- 決壊箇所の応急対策については、7月8日18時に緊急復旧工事に着手し、7月9日9時30分に緊急復旧が完了。

■位置図



■平面図



【球磨川左岸55.0k付近】(2)現地状況①

○大柿排水樋管の上流側で堤防決壊が発生しており、堤防天端のアスファルトや堤体材料と思われる土砂が河川側の高水敷に飛散していることが確認される。



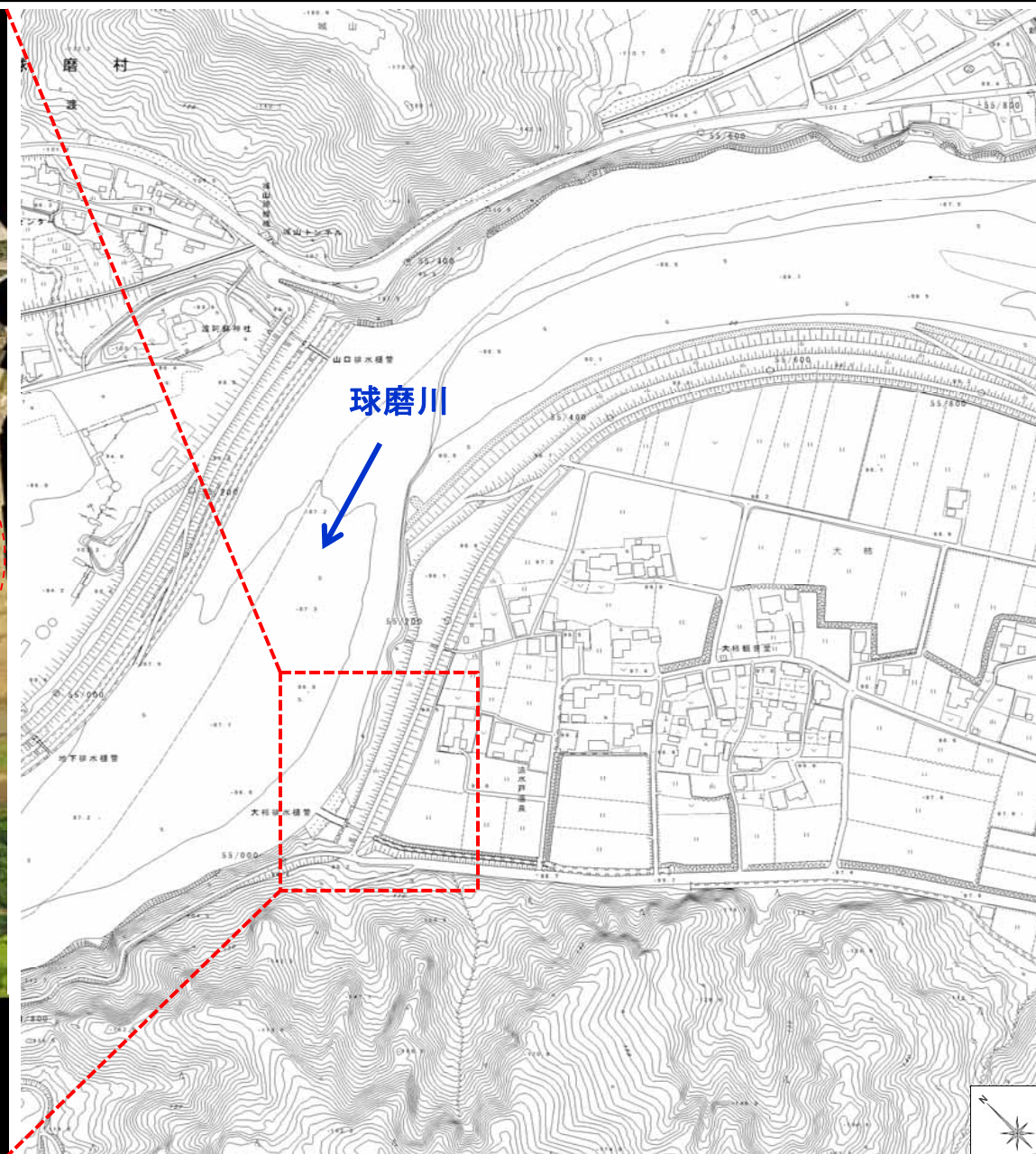
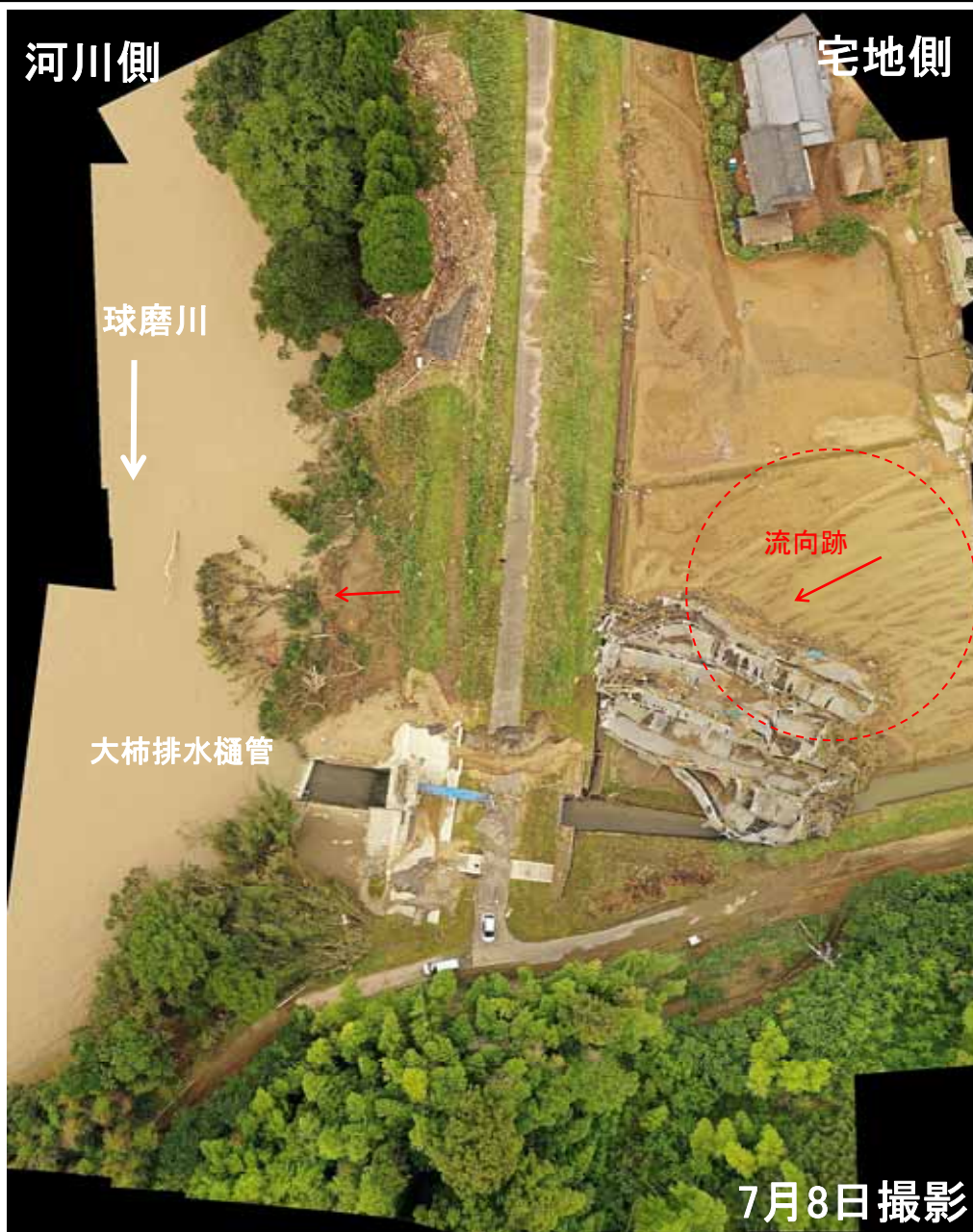
【球磨川左岸55.0k付近】(2)現地状況②

○電柱部の洪水痕跡から少なくとも堤防天端より4m程度は水位が高い状態となっていたことが確認できる。



【球磨川左岸55.0k付近】(2)現地状況③

- 宅地側から河川側へ帯状に流向跡が残っている。また、河川内の樹木が河川側へ倒伏している。
- 宅地側に落堀が見られない。



○詳細な土質区分は不明であるが、決壊箇所の堤防断面の下流面と上流面で土質が異なる。

下流面



上流面



【球磨川左岸55.0k付近】(2)現地状況⑤

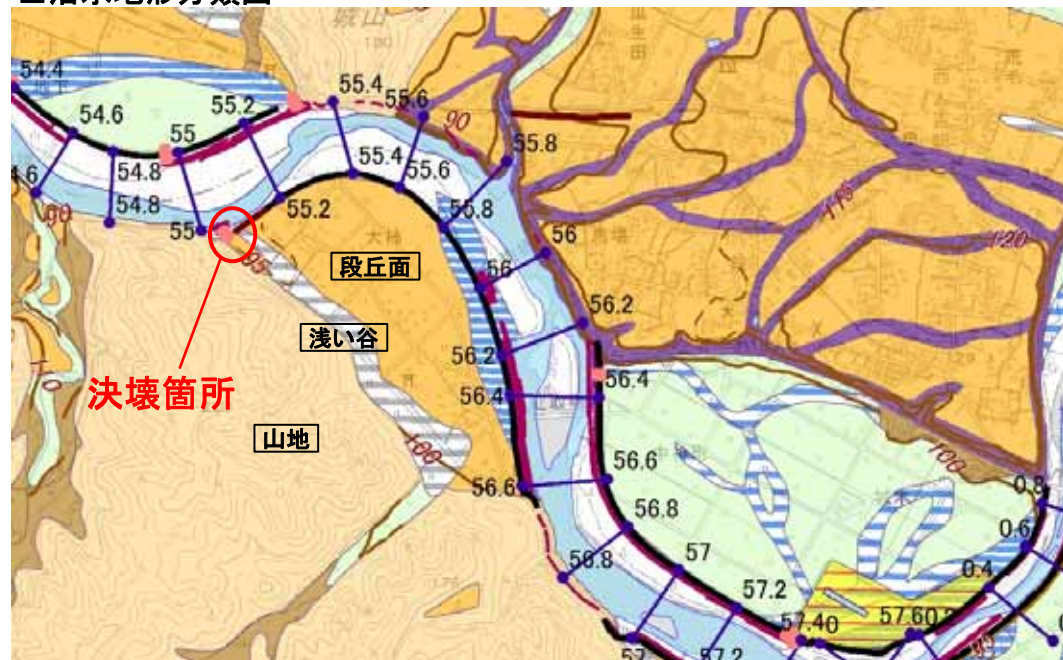
○宅地側の植生は上向きや決壊箇所に向けて倒伏し、河川側の植生は下向きに倒伏していることが確認できる。



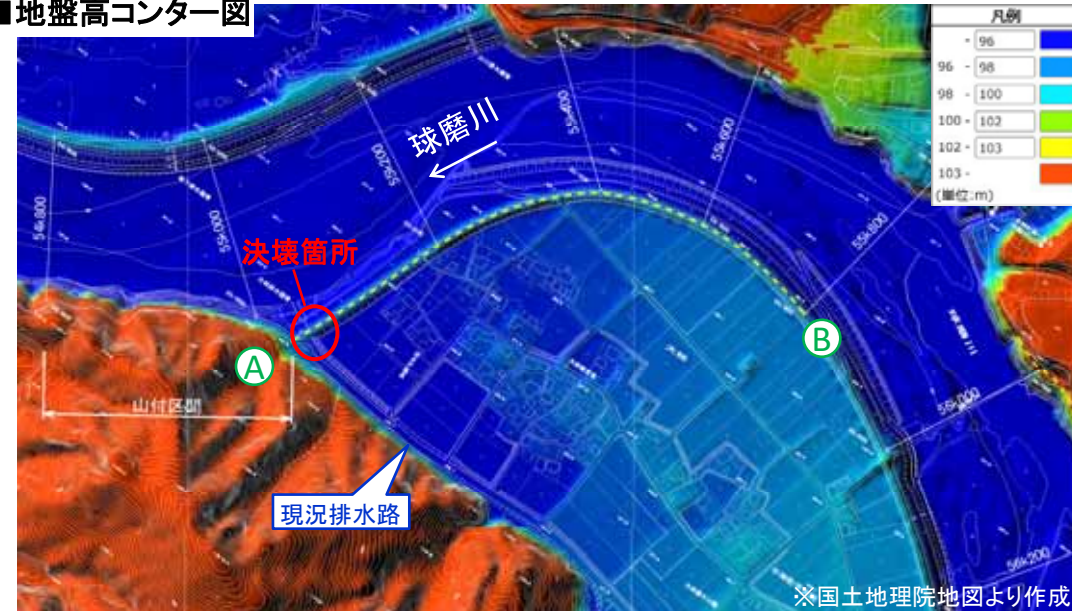
【球磨川左岸55.0km付近】 (3) 決壊箇所周辺の地形、堤防高

- 治水地形分類図では、決壊箇所付近は、山地の山裾にできた浅い谷の出口付近に位置する。
- 宅地側の地盤高は、下流へ向かい徐々に低くなり、宅地側の水は、決壊箇所付近へ集まる地形となっている。
- 河床は、岩盤であるため河床洗掘は進行していない。

■治水地形分類図

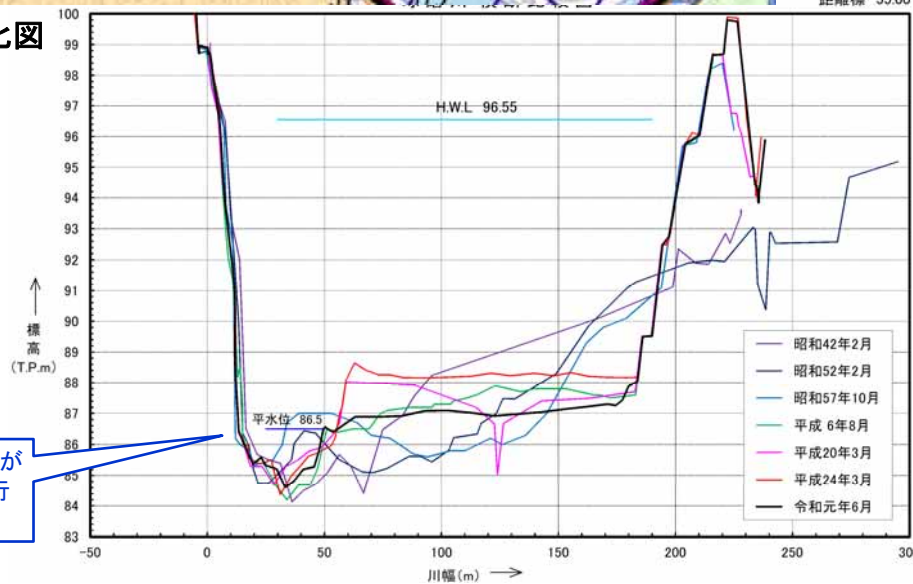


■地盤高コンター図



※国土地理院地図より作成

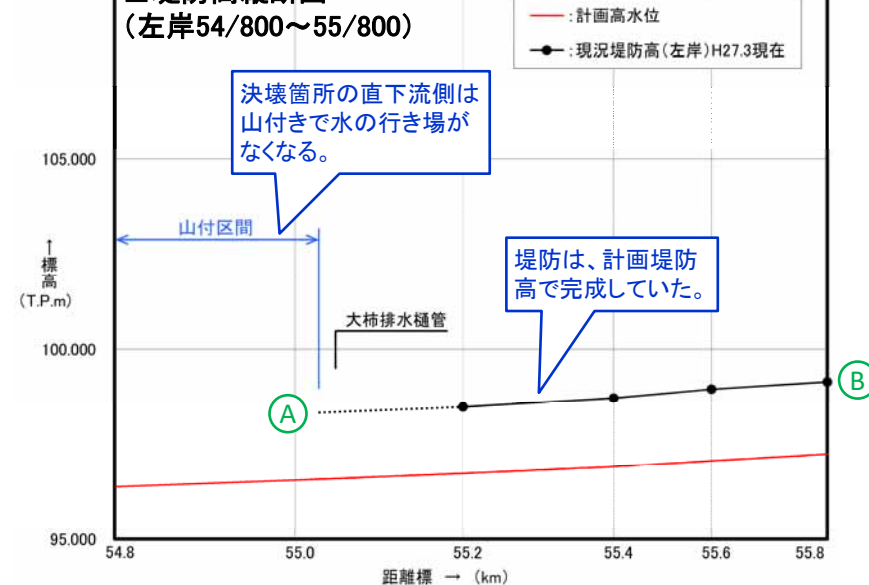
■河道横断経年変化図



左岸側の河床付近は、岩が見られ、近年、洗掘が進行した形跡は見られない。

■堤防高縦断図

(左岸54/800~55/800)



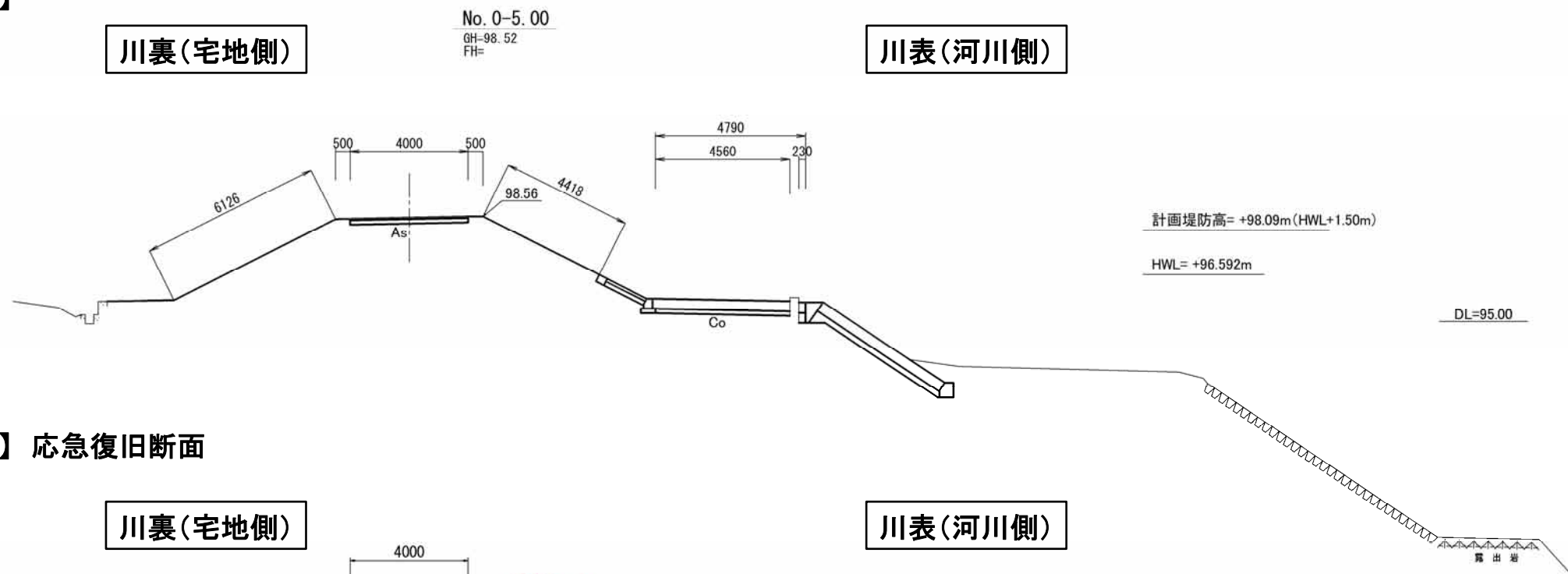
決壊箇所の直下流側は山付きで水の行き場がなくなる。

堤防は、計画堤防高で完成していた。

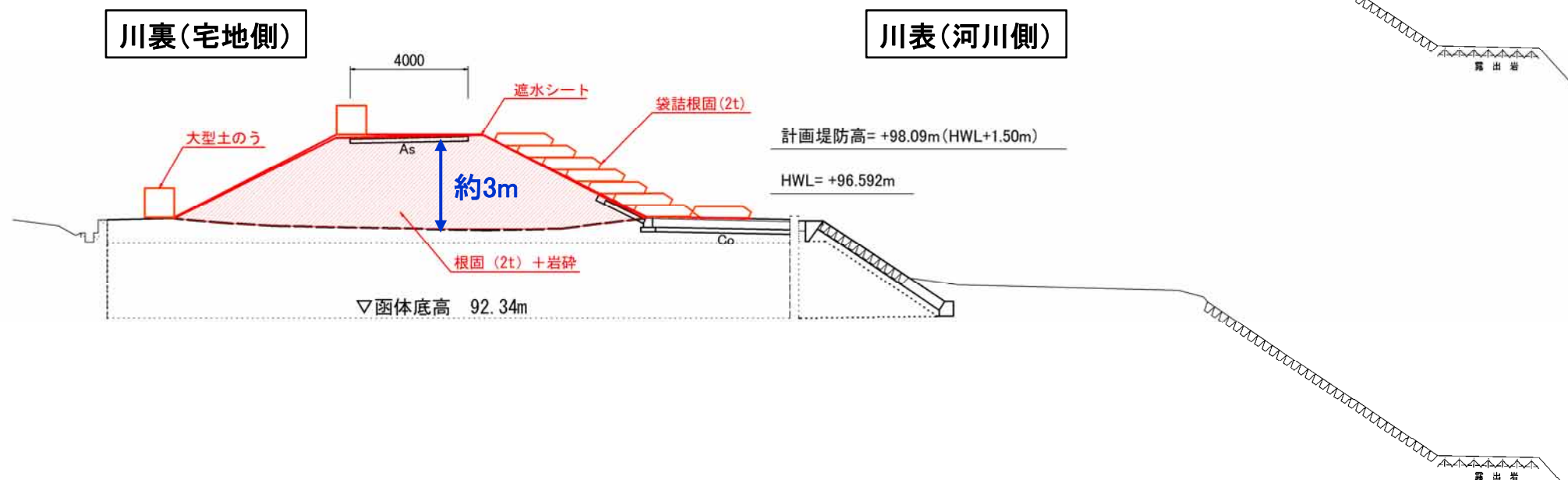
【球磨川左岸55.0k付近】(4)堤防断面

○決壊箇所付近の堤防断面図を以下に示す。決壊した高さは、約3mと想定される。

【被災前】

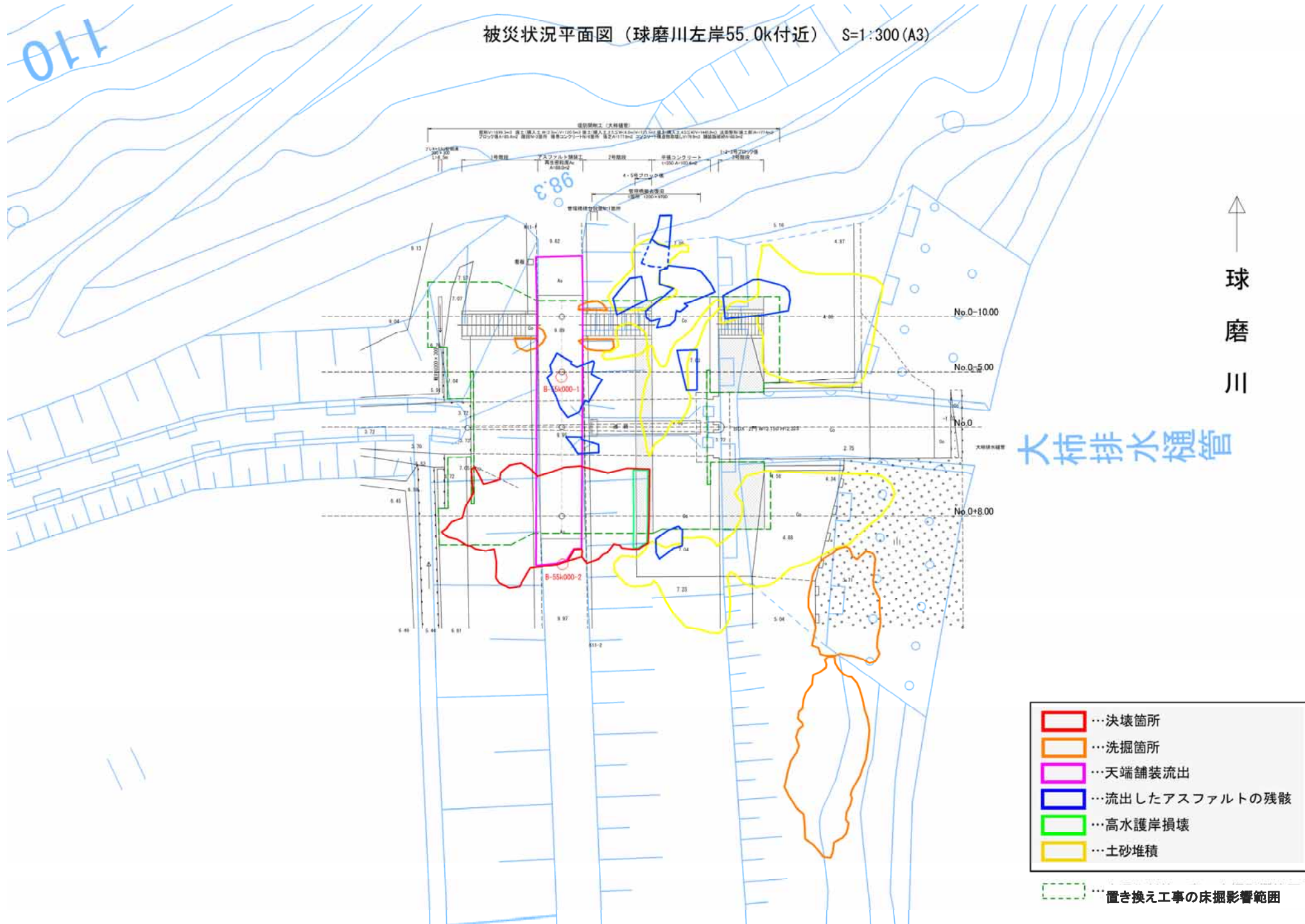


【被災後】 応急復旧断面



【球磨川左岸55.0k付近】(5)被災状況の記録

被災状況平面図（球磨川左岸55.0k付近） S=1:300 (A3)



【球磨川左岸55.0k付近】(6)痕跡調査結果

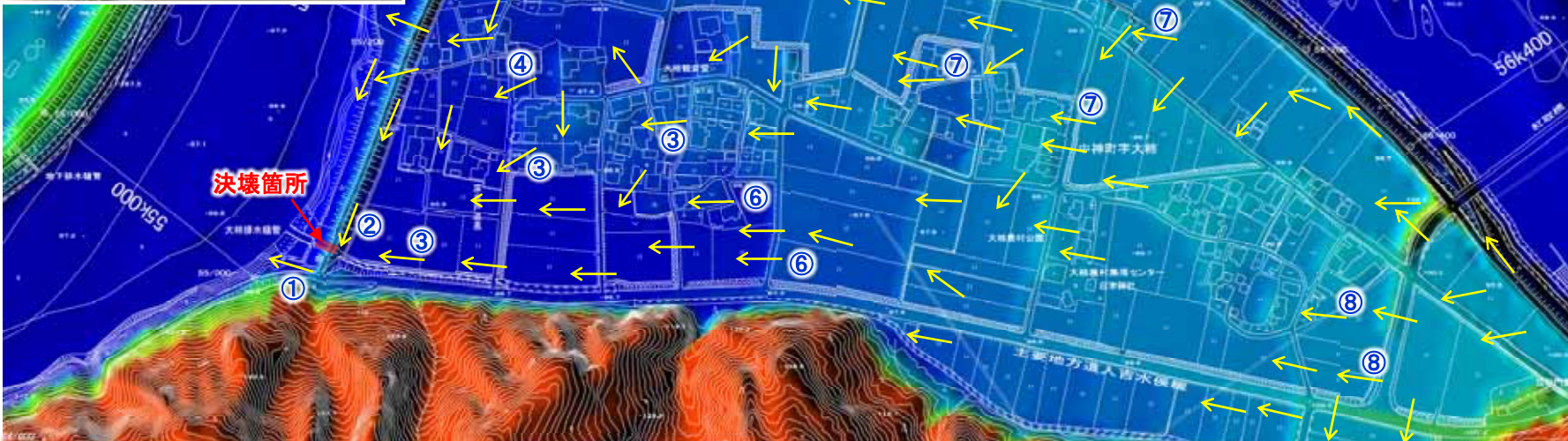
○ 洪水痕跡の状況では、堤防を越水した水が下流方向に流下し、下流側の堤防箇所付近に流れが集中している。

【聞き取りによる証言】

7月4日(土) 5時か6時頃 ○初めは球磨川から越水してきた。
9時30分頃 ○自宅屋根の上に避難(水位は屋根より30cm下ぐらい)
15時過ぎ ○近隣の住民と一緒にボートで救助される

○堤防が決壊した時点は不明。水が引いた後、気付いたら決壊していた。

①: 竹が倒伏



②: 草が倒伏



③: 塵芥・土砂が堆積



⑦: 塵芥・土砂が堆積



⑧: ガードレールが流失



④: 草が倒伏、塵芥が堆積



⑤: 塵芥が堆積



⑥: 塵芥が堆積



九州地方整備局
Kyushu Regional Development Bureau

Figure 1: Investigation of the 2018 Kumagata River flood damage.

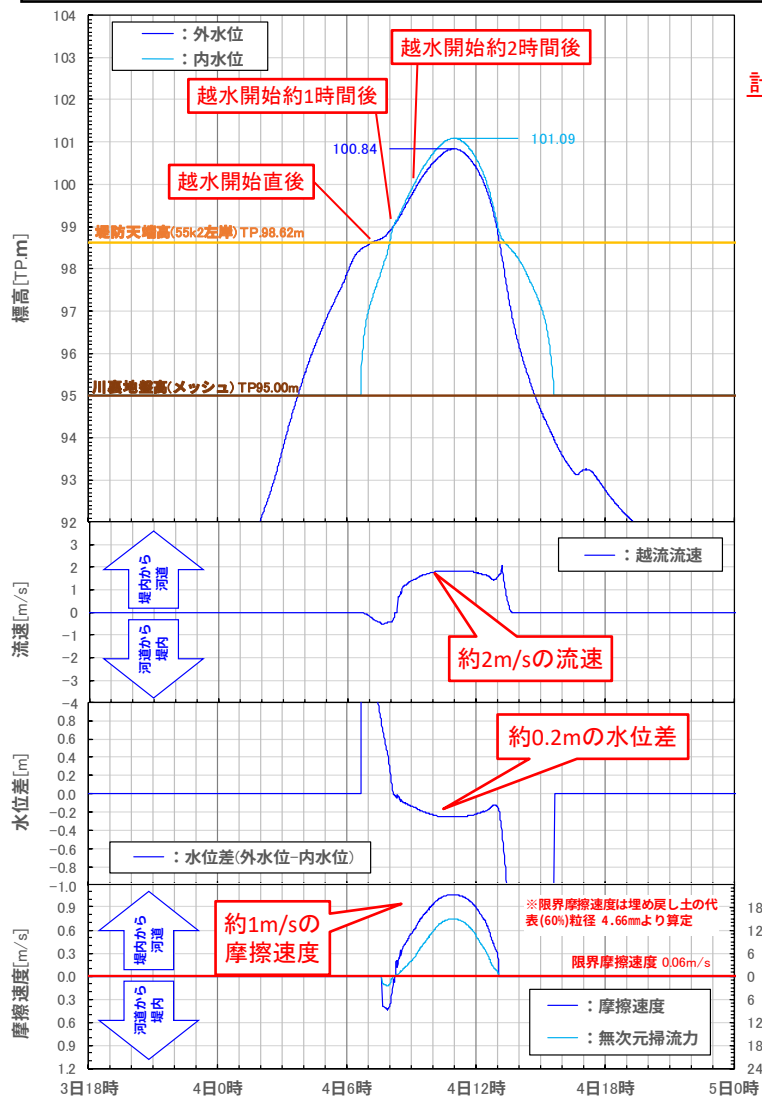
The figure consists of several parts:

- Central Map:** A topographic map of the Kumagata River area showing 23 flood marks (川裏痕跡) and 2 surface marks (川表痕跡). The marks are labeled with their elevations (TP+). A dashed line A-A' is drawn across the map. A red arrow points to a location labeled "決壊箇所 L=10m".
- Photographs (A-F):** Six photographs showing specific damage sites with elevation measurements:
 - A:** A photograph of a riverbank with a measurement of 7.15m from the ground to the water level (TP+103.49m).
 - B:** A photograph of a riverbank with a measurement of 6.15m from the ground to the water level (TP+102.33m).
 - C:** A photograph of a building with a measurement of 2.85m from the ground to the water level (TP+102.38m).
 - D:** A photograph of a riverbank with a measurement of 3.57m from the ground to the water level (TP+103.10m).
 - E:** A photograph of a building with a measurement of 3.52m from the ground to the water level (TP+102.12m).
 - F:** A photograph of a riverbank with a measurement of 3.88m from the ground to the water level (TP+102.39m).
- Graph (A'):** A graph showing the relationship between flood mark water level (痕跡水位) and ground elevation (地盤高). The x-axis represents distance (0 to 450m) and the y-axis represents elevation (94 to 104m). The graph shows a blue line for the flood mark water level and a red line for the ground elevation. The difference between the two is approximately 5m.

2) 出水時の再現解析

【氾濫解析結果 大柿排水樋管付近】

- 決壊地点付近から越水が始まり、越水開始約1時間後には越水範囲が上流へ拡大、上流からの越水により堤内地水位が上昇することで決壊地点水位は河道水位と同程度まで上昇、約2時間後には逆流に転じたと考えられる。この逆流状態は約5時間以上継続していたと考えられる。
- 外水位と内水位の差は約0.2m程度であり、逆流時堤防天端では約2m/s程度の流速が発生していたと考えられる。また、堤防天端における摩擦速度はピーク時には約1m/s程度発生していたと想定される。



越流流速 = 氾濫計算による横越流量 / 天端水深

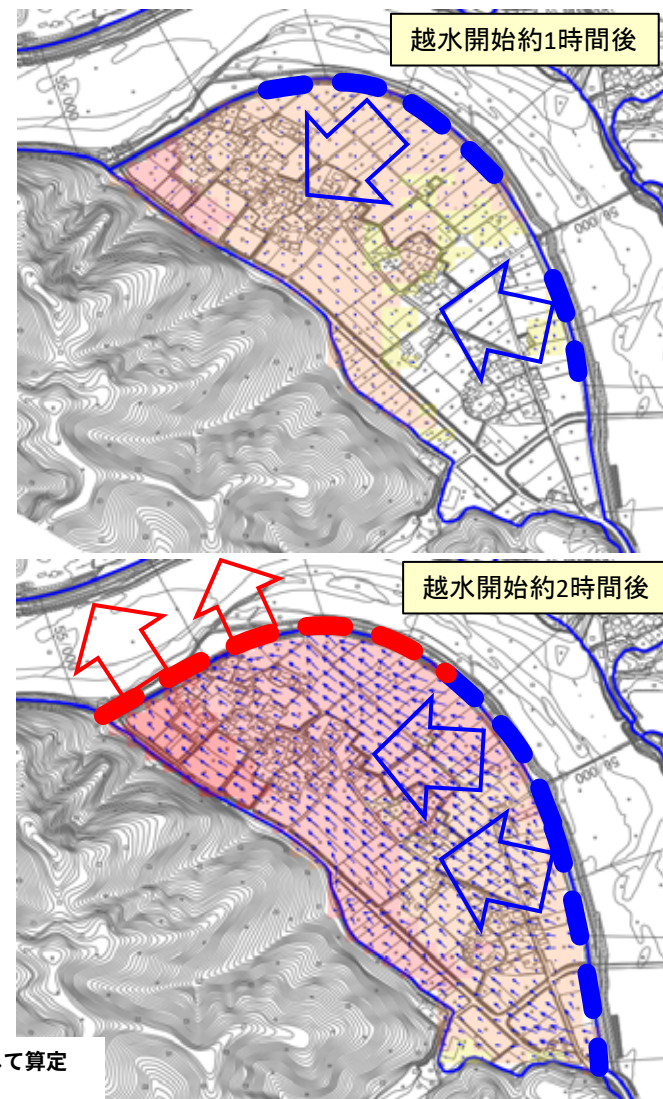
$$u_* = (g \times \text{天端水深} \times \text{水面勾配})^{0.5}$$

水面勾配 = 内外水位差 / 堤防天端幅

$$\tau_{*R} = \frac{u_*^2}{s \times g \times d}$$

$$u_{*c} = \sqrt{80.9d} \quad (d \geq 0.303\text{cm})$$

注) 越流流速は氾濫計算において横越流公式による越流量を水深で除して算定
摩擦速度は上式により算定。
無次元掃流力は、購入土の代表(60%)粒径を用いて算定。
限界摩擦速度も同様に購入土の代表(60%)粒径を用いて岩垣の式より算定。



浸水深・流速ベクトル図
※図中の浸水深は氾濫解析結果

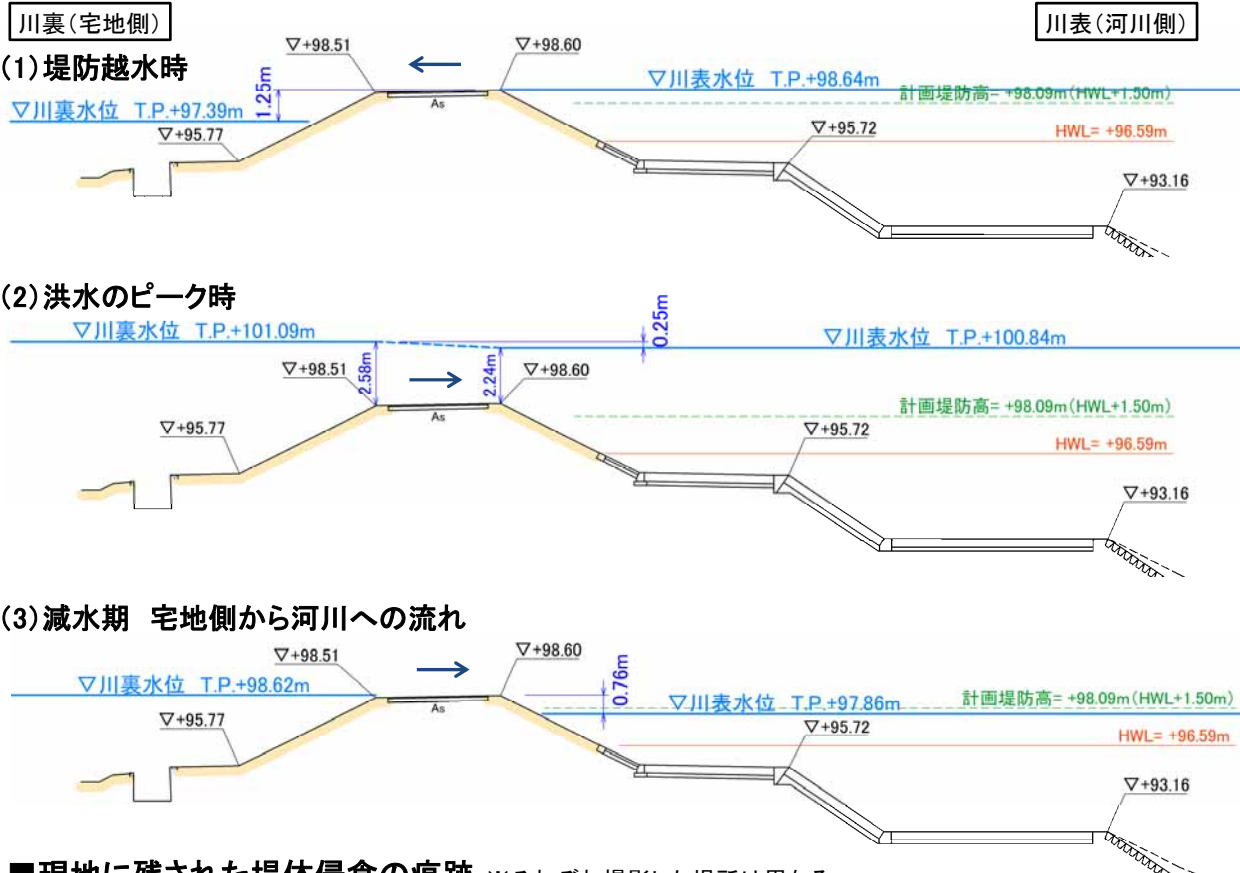
3) 堤防決壊原因の推定

(1)越水 ①堤体の侵食

- 決壊地点での水位変動は、まず河川水位が上昇し、堤防からの越流が始まった。
- その後、内水位が上昇し、外水位と同じ水位となった後に、内水位の方が高くなり、宅地側から河川側への流れが発生。

■堤防越水の流れ

※本図の水位は、再現解析の内外水位波形による。



■再現解析による内外水位波形

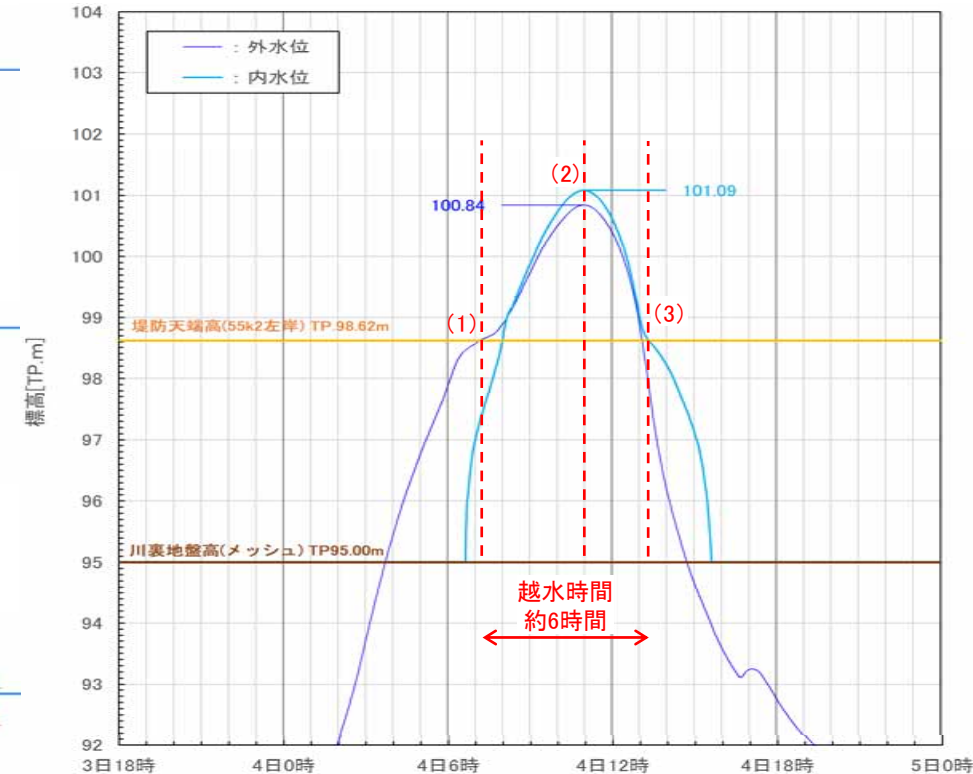


図 想定内外水位波形 再現シミュレーション結果図
(R02.07.04洪水(55.1k左岸付近)(越水のみ、決壊なし))

■現地に残された堤体侵食の痕跡

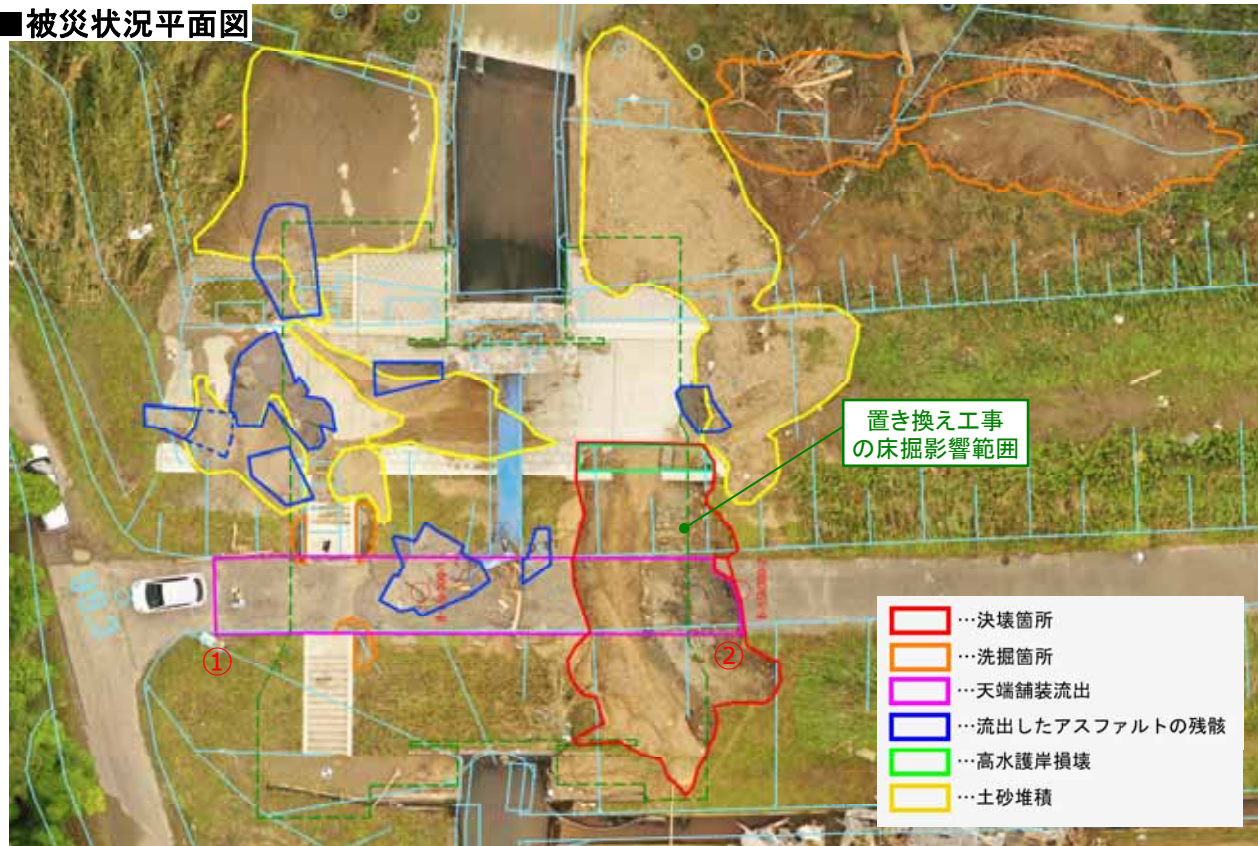
※それぞれ撮影した場所は異なる



(1)越水 ②舗装の流失

- 堤体材料の置き換え工事に伴い、堤防天端舗装の撤去復旧が行われている。
- 今回舗装が流出した範囲は、置き換え工事で新しく舗装した範囲とほぼ合致している。

■被災状況平面図



■被災後の損壊状況



■アスファルト舗装施工直後の状況

①下流側端部

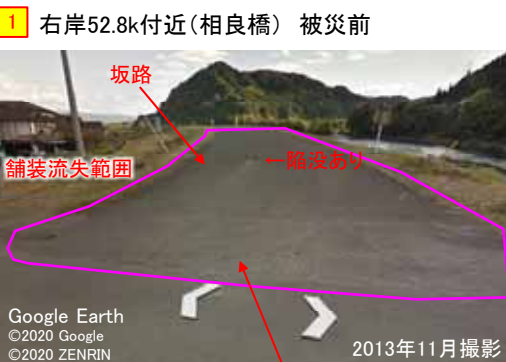


②上流側端部

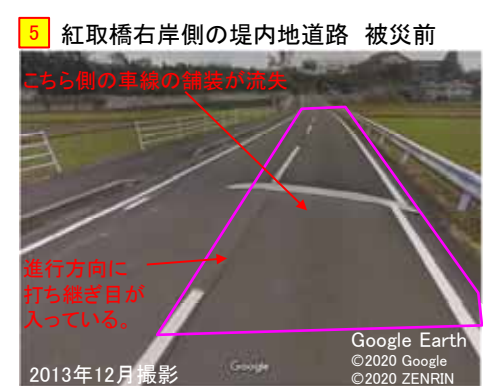


(1)越水 ②舗装の流失(他の箇所での被災状況)

- 今回の出水でアスファルト舗装が被災を受けた箇所を調査。
- 打ち継ぎ目があった箇所やクラックが多い箇所での被災が目立つ。
- 舗装がめくれた箇所での洗掘も確認できる。



1 被災直後の状況

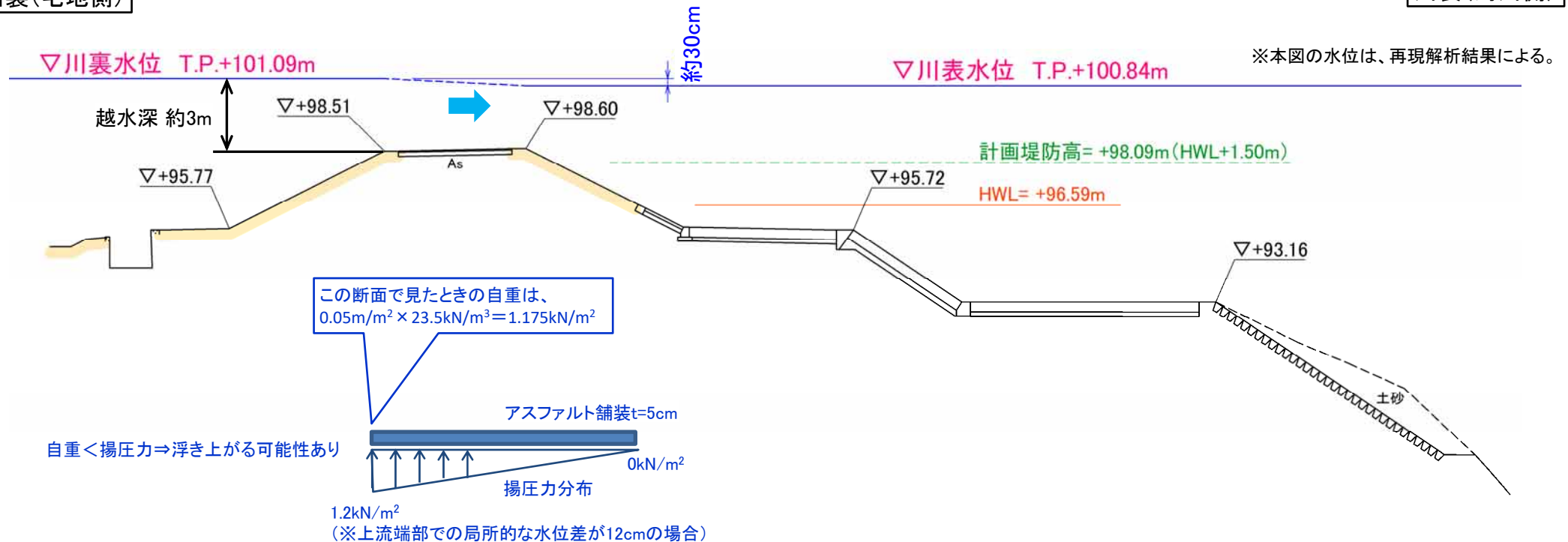


(1)越水 ③舗装の浮き上がり

- 宅地側からの逆越流時の水深は、氾濫解析結果から、堤防天端から約3mあり、河川側との水位差は約30cmある。
- 宅地側と河川側の水位差により天端アスファルト(厚さ5cm)の自重を上回る揚圧力が作用し、浮き上がりが生じた可能性がある。特に、打ち継ぎ目があるアスファルト舗装は弱点となった可能性がある。
- 流況解析では、天端付近で宅地側から河川側へ約2m/sの流速が発生しており、アスファルトが剥離・流出した後、堤防天端付近から堤体土が洗掘された可能性がある。

川裏(宅地側)

川表(河川側)



■水面の状況

- ①宅地側が堤防天端高以上に湛水
- ②天端を流れる状態となり水位が低下
- ③川表法肩付近で限界水深となり越水
- ④越水後水面が落込み、一時的に高流速が発生

■天端アスファルトへの作用力

- ・天端アスファルトの厚さは5cmであり、その自重は端部断面で見ると約 1.2kN/m^2 となる。
- ・それに対し、天端アスファルトを浮き上がらせようとする揚圧力は、上下流の水位差により決まり、約12cm以上の水位差が生じると、アスファルト舗装が浮き上がる可能性がある。

(1)越水 ④堤防表面の侵食(トルク抵抗値測定)

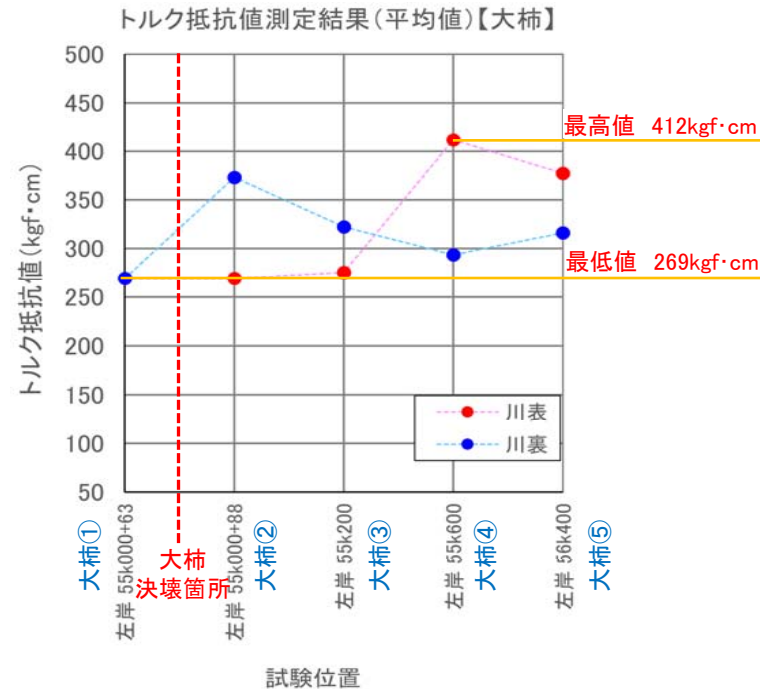
- 今回現地で堤防法面のトルク抵抗値を測定した結果、269kgf・cm～412kgf・cmであった。
- 過去に九州地方整備局管内の堤防にて調査した結果と比較しても良好な状態であることを確認。

測定箇所位置図



※各箇所の川表と川裏でそれぞれ測定

測定結果



(測定状況写真)

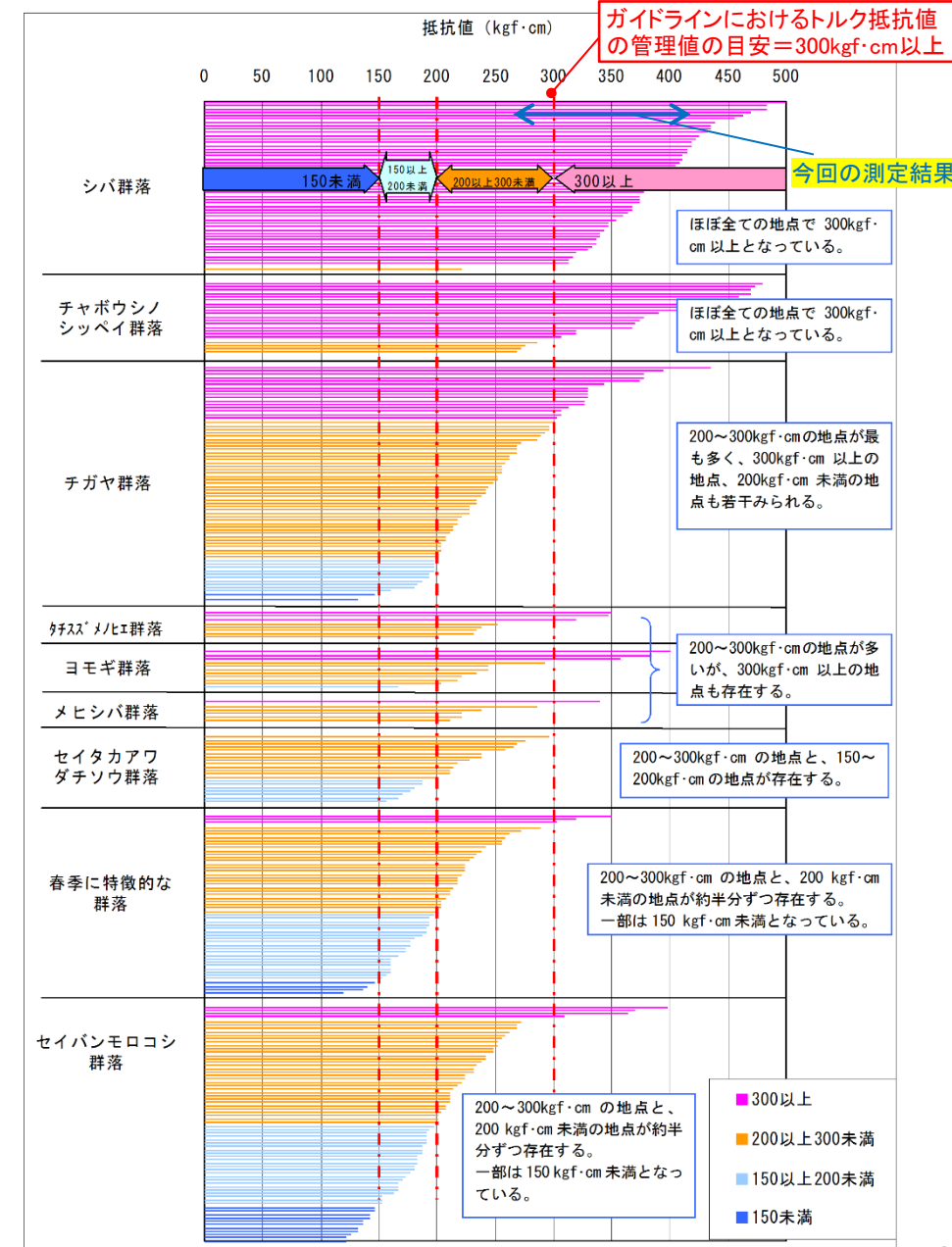
大柿①ー川裏



大柿②ー川裏



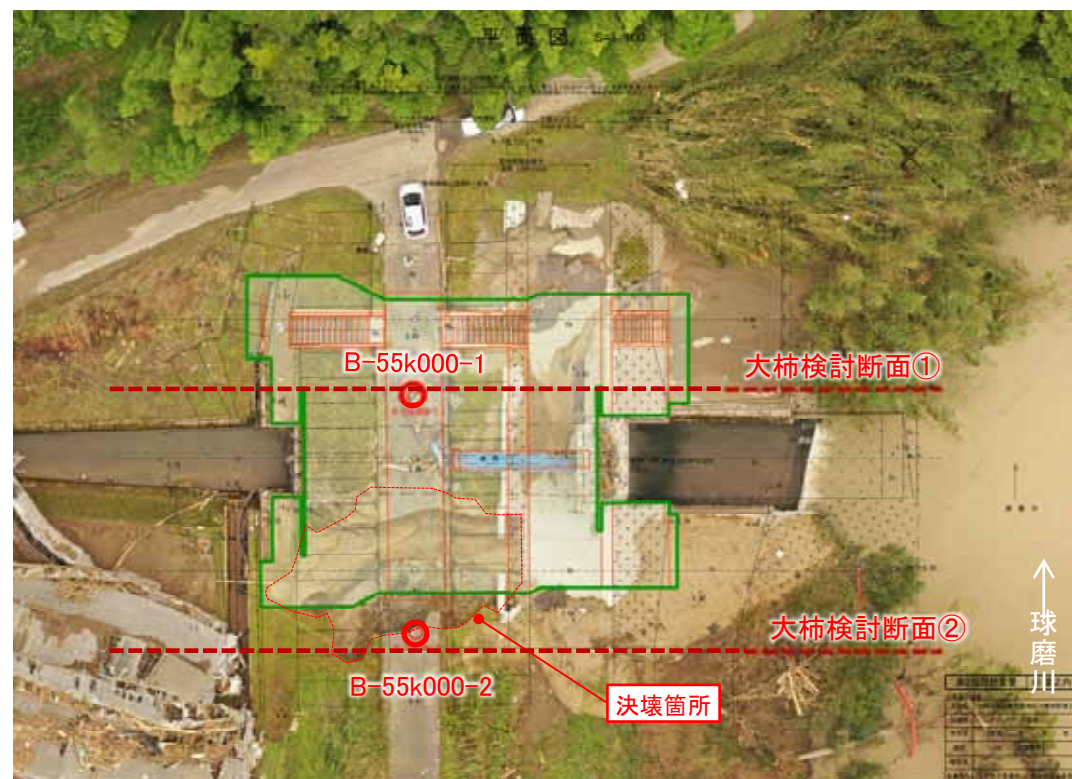
大柿③ー川裏



(2)浸透 ①浸透流解析の検討方針

- 目的：浸透破壊が今回の堤防決壊の一因となり得たのかを確認するため、浸透流解析を行う。
- 地盤条件：地質調査結果(地層構成、土質定数等)を用いる。
- 水位条件：今次出水による再現波形(波形その1)及び「河川堤防の構造検討の手引き(改定版)」に準拠した波形(波形その2)を用いる。

解析断面位置(55.0k左岸) 大柿排水樋管付近

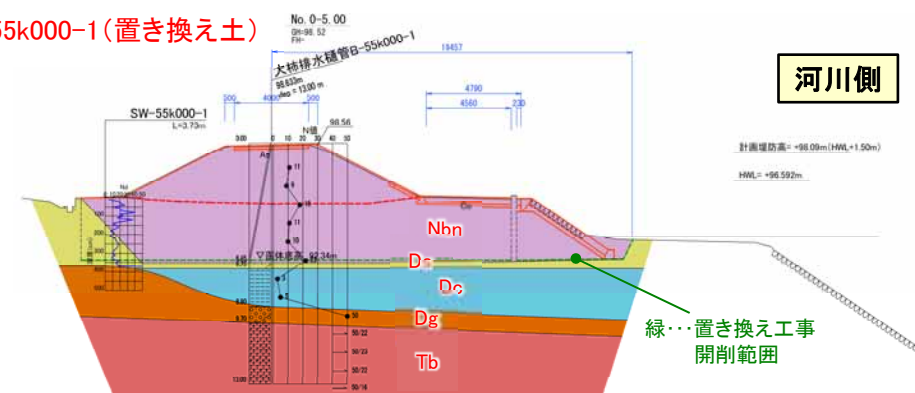


[土質区分]

記号	地層名	記号	地層名
bn	堤体盛土(旧堤体土)	Dc	洪積粘性土層
Nbn	新規堤体盛土(置き換え土)	Dg	洪積砂礫層
Ds	洪積砂質土層	Tb	凝灰角礫岩

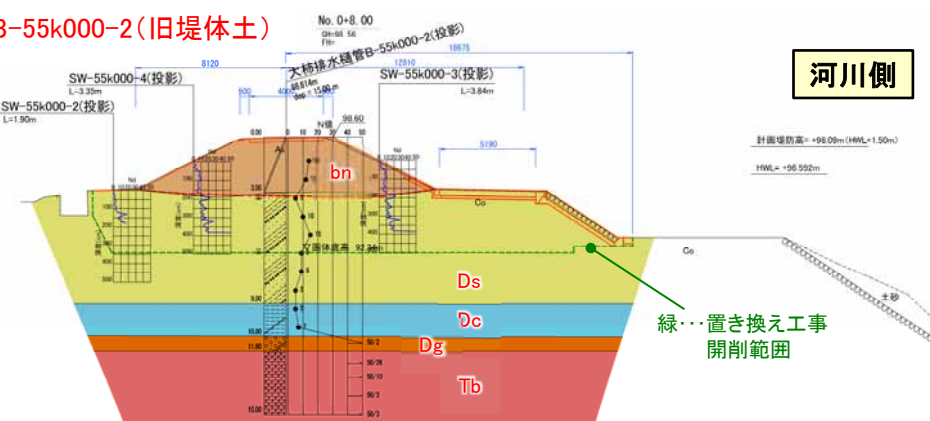
①[下流側]B-55k000-1(置き換え土)

宅地側



②[上流側]B-55k000-2(旧堤体土)

宅地側

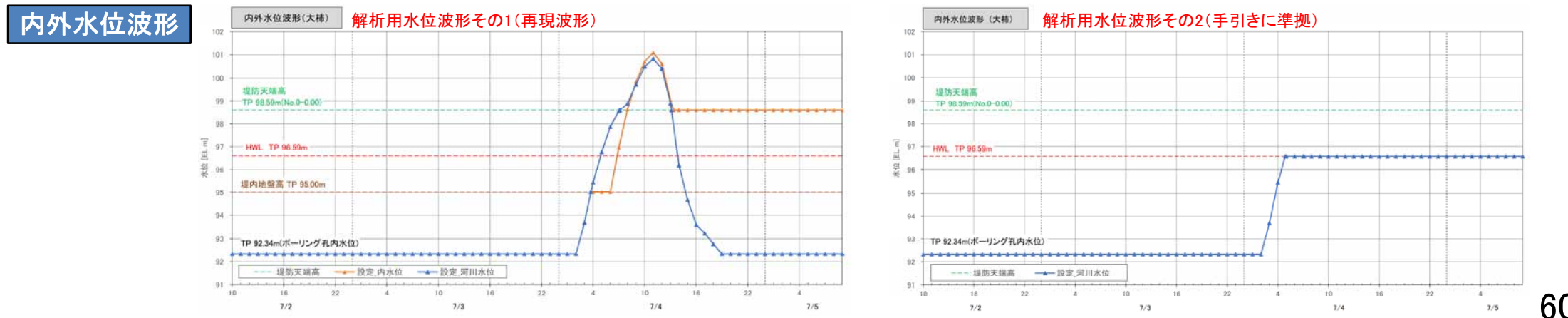
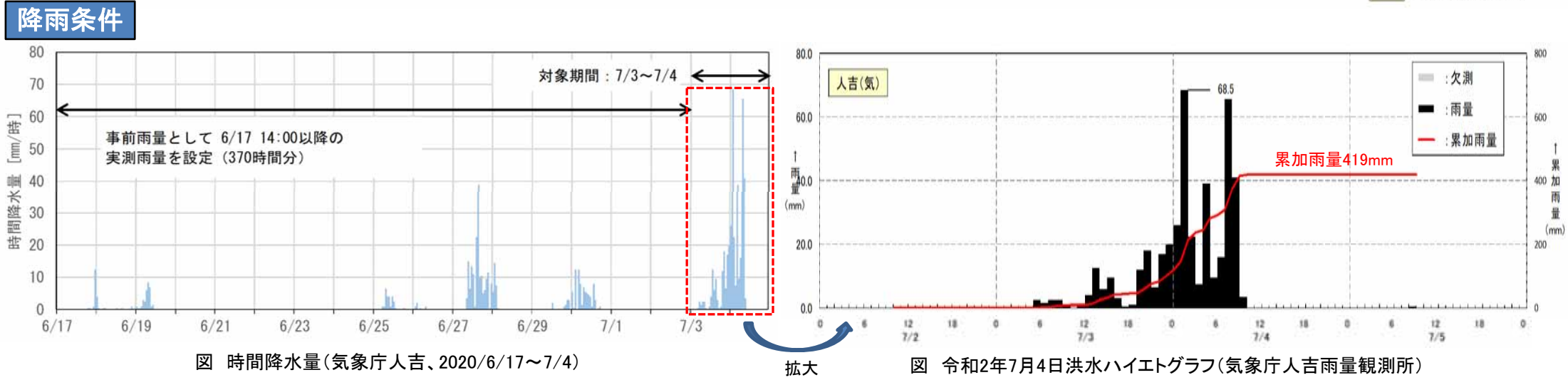


(2)浸透 ②条件設定

土質条件		No.	対象	地層区分		分類		設定定数						コメント
				地層名	記号	名称	記号	粘着力 C [kN/m ²]	内部摩擦角 φ [°]	湿潤単位体積 重量 γ _t [kN/m ³]	飽和単位体積 重量 γ _{sat} [kN/m ³]	飽和透水係数 k [m/s]	比貯留係数 S _s [1/m]	
①	大楠下流 B-55k000-1	[置き換え土]	置き換え土	Nbn	細粒分砂混じり礫 細粒分混じり砂質礫	G-FS GS-F	1	39.3	21.3	21.7	4.50E-05	1.00E-04	礫質土・砂質土	
			洪積砂質土層	Ds	細粒分質礫質砂	SFG	0	30.1	17	18	1.22E-07	1.00E-04	細粒分の多い砂質土	
			洪積粘性土層	Dc	砂礫混じりシルト	ML-SG	25.0	0	14	15	1.00E-07	1.00E-03	粘性土	
			洪積砂礫層	Dg	細粒分混じり砂質礫	GS-F	0	38.5	20	21	4.63E-05	1.00E-04	礫質土・砂質土	
②	大楠上流 B-55k000-2	[旧堤体土]	旧堤体土	bn	細粒分質礫質砂	SFG	15.6	33.89	21.0	21.3	4.35E-06	1.00E-04	細粒分の多い砂質土	
			洪積砂質土層	Ds	細粒分質砂質礫	GFS	0	30.7	21.4	21.5	6.43E-07	1.00E-04	細粒分の多い砂質土	
			洪積粘性土層	Dc	-	-	37.5	0	16	17	1.00E-07	1.00E-03	粘性土	土質試験なし
			洪積砂礫層	Dg	細粒分砂混じり礫	G-FS	0	50.9	20	21	8.89E-02	1.00E-04	礫質土・砂質土	
アスファルト			As	-	-	置き換え土又は旧堤体土と同様					1.00E-07	1.00E-03	粘性土	透水性は粘性土として設定
コンクリート			Co	-	-						1.00E-07	1.00E-03	粘性土	透水性は粘性土として設定

: 基準等による推定値

：基準等による推定値



(2)浸透 ③浸透流解析結果一覧(55.0k左岸・大柿)

○浸透流解析を実施した結果、今次出水による再現波形(波形その1)及び「河川堤防の構造検討の手引き(改定版)」に準拠した波形(波形その2)のどちらも安全性照査基準(パイピング破壊、すべり破壊)を満足することを確認。

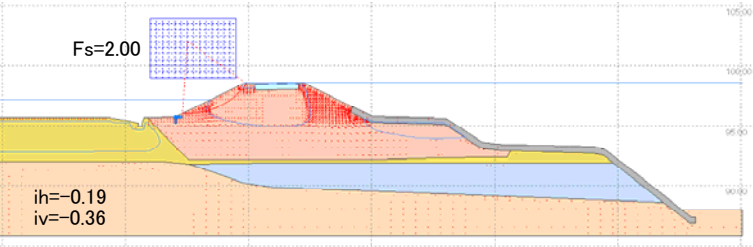
No.	対象	位置	モデル名	波形その1			波形その2			備考	
				着目点(1)		着目点(2)	着目点(3)				
				最小安全率 【川裏】 (Fs>1.00)	局所動水勾配 (i<0.5)		最小安全率 【川表】 (Fs>1.00)	最小安全率 【川裏】 (Fs>1.00)	局所動水勾配 (i<0.5)		
					水平 ih	鉛直 iv			水平 ih		鉛直 iv
①	大柿排水樋管	55k000 左岸	[下流部] B-55k000-1	2.00	-0.19	-0.36	1.32	1.99	値なし		置き換え土
②			[上流部] B-55k000-2	3.85	0.00	0.00	3.57	3.68	0.50	0.11	旧堤体土

着目点(1) : 河川水位が堤防天端高に達した時 (波形その1 : 内水位を考慮する場合)
着目点(2) : 減水時 (波形その1)
着目点(3) : 河川水位が計画高水位に達した時 (波形その2 : 内水位を考慮しない場合)

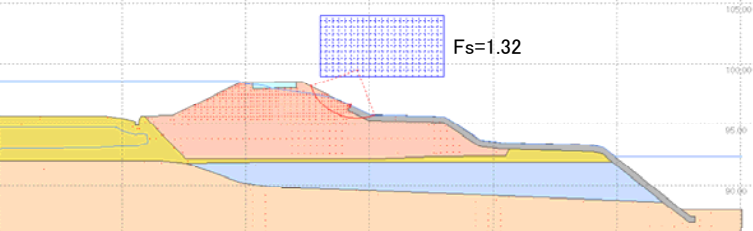
※ 局所動水勾配について、
(1) 不飽和状態の場合は値なし。
(2) 正の値は浸出、負の値は浸透を示す。

大柿検討断面① [下流側]B-55k000-1(置き換え土)

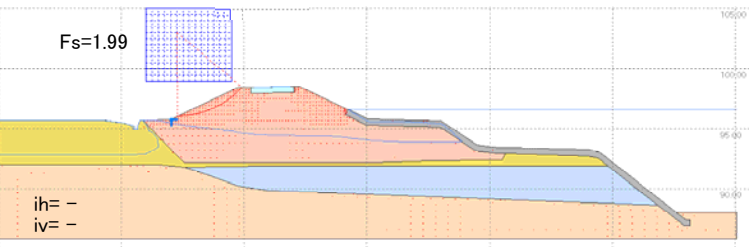
着目点(1) : 川表水位=堤防高、川裏水位=内水位考慮



着目点(2) : 減水時(川表水位=低下、川裏水位=堤防天端高)

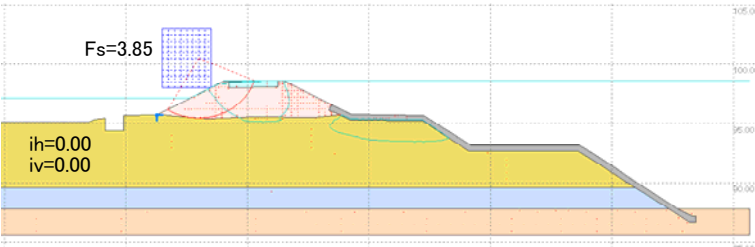


着目点(3) : 川表水位=HWL、川裏水位=内水位考慮しない

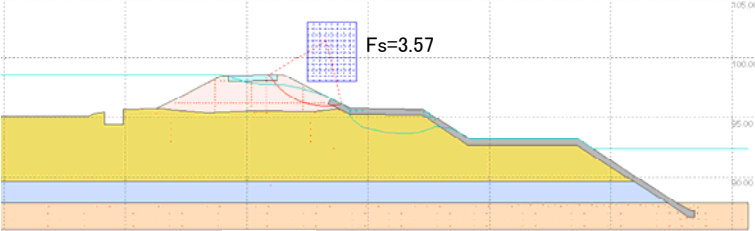


大柿検討断面② [上流側]B-55k000-2(旧堤体土)

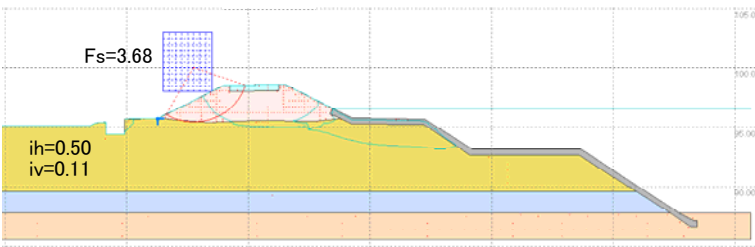
着目点(1) : 川表水位=堤防高、川裏水位=内水位考慮



着目点(2) : 減水時(川表水位=低下、川裏水位=堤防天端高)



着目点(3) : 川表水位=HWL、川裏水位=内水位考慮しない



(2)浸透 ④水没した堤防の土質性状(既往研究成果)

○既往の研究成果では、飽和が進むと粘着力が低下することや湿潤状態となることで堤体侵食の進行が速いことが報告されている。

■排水・吸水過程におけるせん断強度の時系列変化

出典)不飽和火山灰質土の排水・吸水過程における水分特性とせん断強度の簡易同時計測システムの開発とその適用 九州大学地盤工学研究室

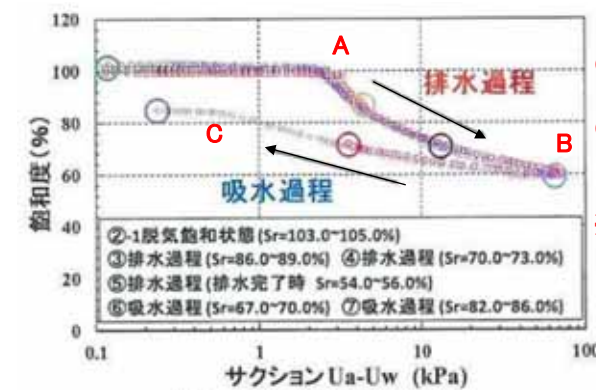


図-3 阿蘇黒ぼくのSWCC

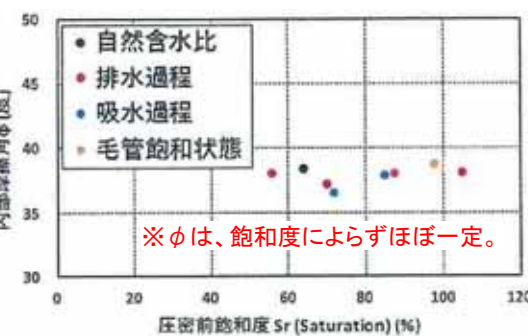


図-11 内部摩擦角・圧密前飽和度の関係

表-4 一面せん断試験結果のまとめ

	自然含水比			脱気飽和	毛管飽和
	①-1	①-2	①-3	②-1	②-2
圧密前飽和度 Sr %	64.0	64.0	64.0	103~105	96~98
粘着力 C kN/m ²	9.05	7.51	6.29	4.26	6.19
内部摩擦角 φ 度	36.88	37.67	38.32	38.11	38.67
	排水過程(不飽和)			吸水過程(不飽和)	
	③	④	⑤	⑥	⑦
圧密前飽和度 Sr %	86~89	70~73	54~56	67~70	82~85
粘着力 C kN/m ²	7.01	7.31	14.18	6.34	2.41
内部摩擦角 φ 度	37.98	37.19	37.97	36.39	37.76

○排水過程で排水が進む(A→B)とサクシオンが増加する。
○逆に、吸水過程では、飽和が進む(B→C)とサクシオンが低下する。

※サクシオン $s = U_a - U_w$
 U_a : 間隙空気圧
 U_w : 間隙水圧

※飽和が進むと、粘着力が小さくなる傾向。

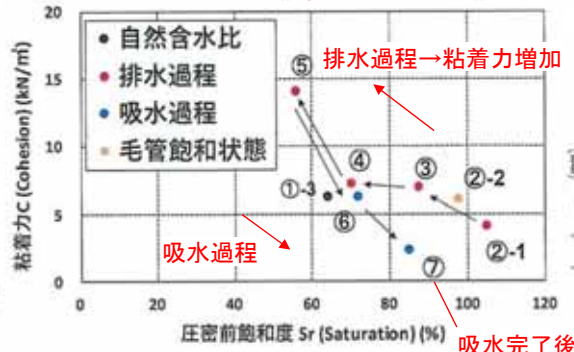


図-12 粘着力・圧密前飽和度の関係

(まとめ)

- [1] 同じ飽和では、排水過程(上図②→⑤)より吸水過程の方が粘着力が小さくなる傾向がある。
- [2] 排水前の飽和状態に比べて(②と⑦の比較)、吸水完了後は、飽和度が低いにも関わらず粘着力が小さい。

■堤体内湿潤状態の違いによる越流侵食への影響

出典)日本自然災害学会誌論文 堤体飽和度に着目した堤防の越流侵食のメカニズムに関する研究

越流侵食実験の結果

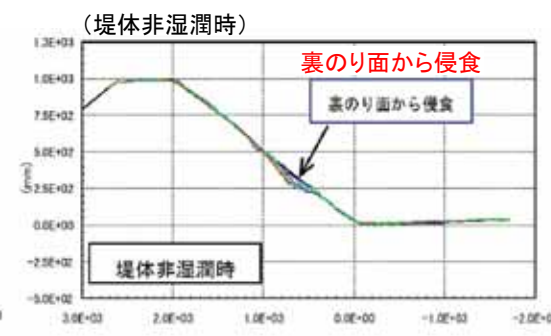
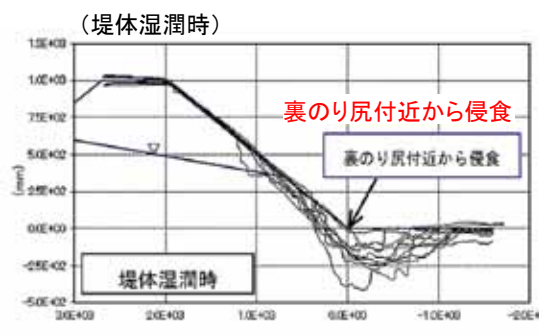


図7 通水2分後の侵食形状の比較(実験結果重ね合わせ)

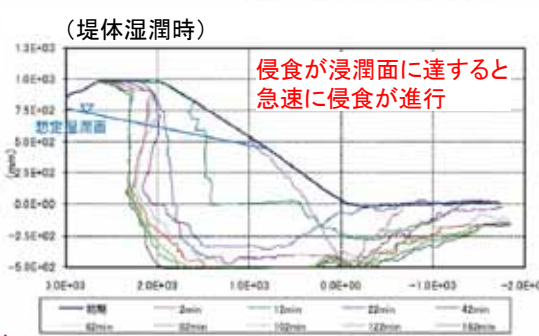


図5 越流侵食形状(堤体湿潤時)

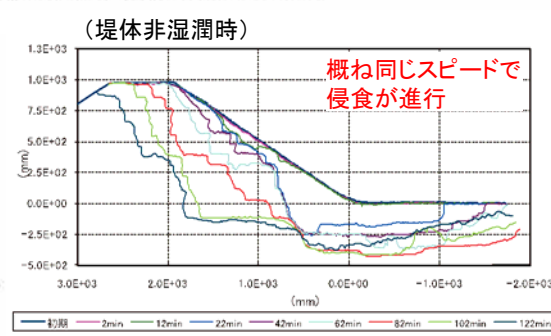


図6 越流侵食形状(堤体非湿潤時)

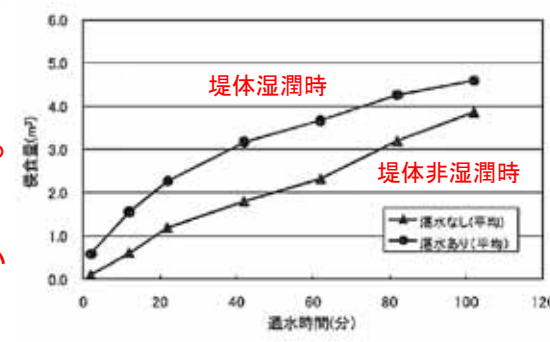


図8 通水時間と侵食量の関係

○堤体湿潤時の方が、侵食量が多い。
○堤体湿潤時の方が、侵食の進行が速い。



「湿潤(飽和)状態の堤体は、非湿潤(不飽和)状態よりも侵食しやすく、侵食量が多くなる。」

(3)河岸侵食

- 決壊箇所は、河床からHWLまで、護岸や張りコンクリートが設置されていた。
- 決壊箇所の川表小段の平張りコンクリートや小段より下の低水護岸は損傷を受けていない。また、決壊箇所付近の堤防法面に河川の流れによる侵食跡は確認されない。

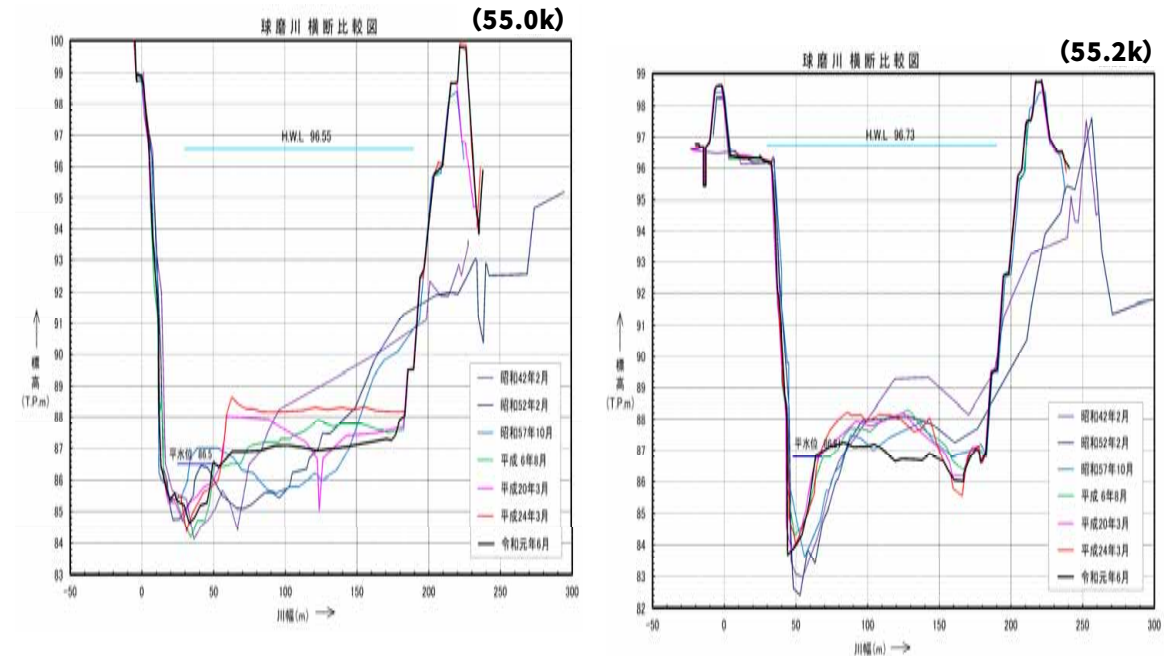
■決壊後の状況



■天端舗装および護岸の損壊箇所

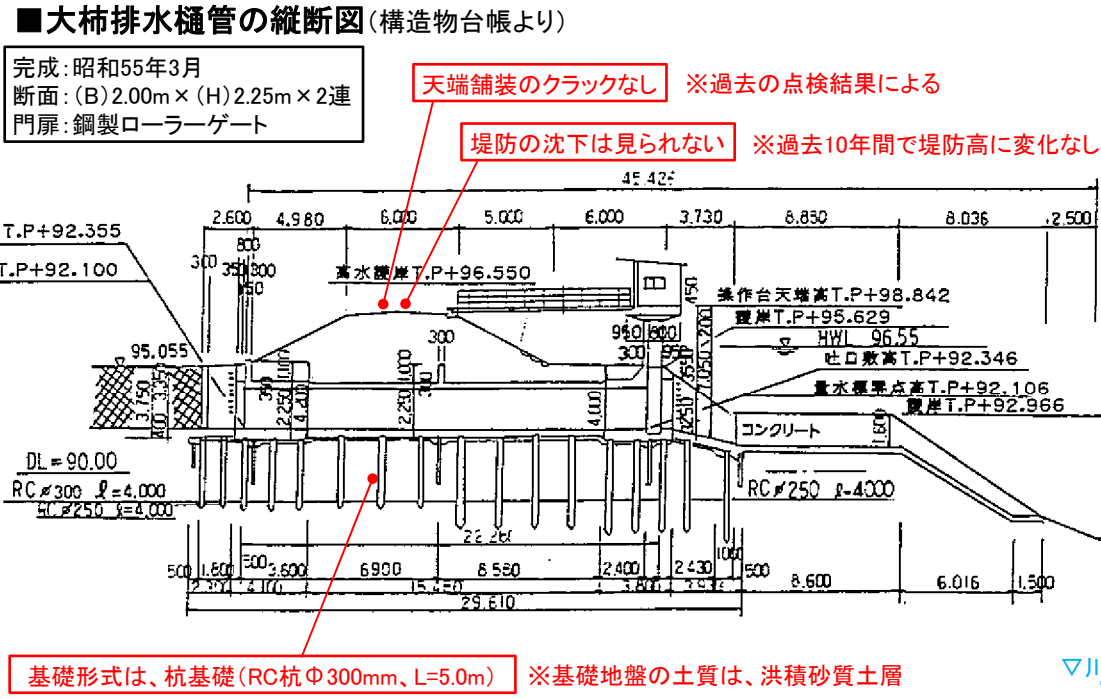


■河道横断経年変化図 ※ミオ筋は左岸側に寄っているものの、河岸付近が岩盤となっているため、過去に洗掘が進行した形跡は見られない。



(4)構造物および補修履歴等

- 堤防点検の結果から堤体の沈下や函渠の大きなクラック等は、確認されていない。
- 被災時に想定される条件においても浸透路長を満足しており、函体周辺から漏水が生じた形跡は確認されない。
- 平成30年度に堤体材料の置き換え工事を実施。



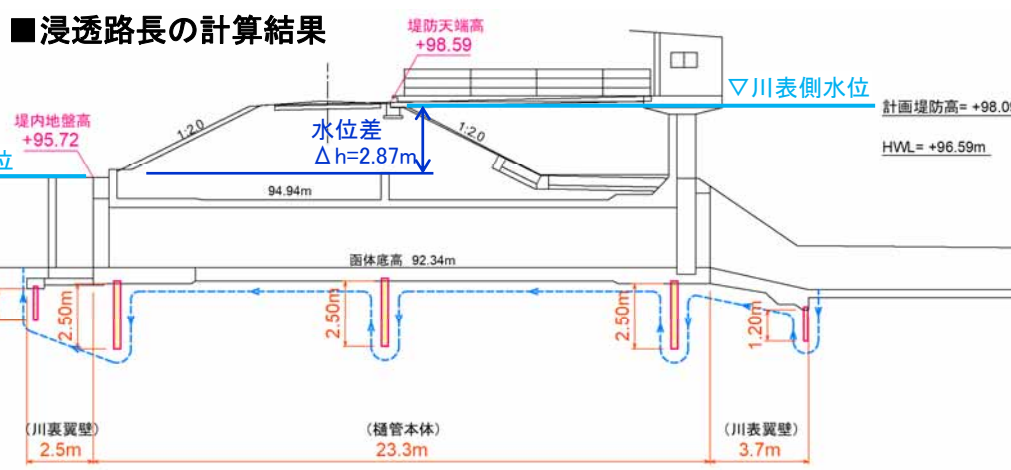
■過去の点検結果(堤防点検H29)(構造物点検R1)

決壊箇所周辺では、過去の堤防点検において変状は認められていない。
大柿排水樋管は、若干変状(クラック、漏水)が見られるものの、その程度は非常に軽微である。



■樋管・堤防の影響評価 ※樋管および堤防が、決壊要因となった可能性は低いものと考えられる。

決壊要因	評価
①基礎地盤の沈下に伴う空洞化(水みち、漏水)	過去の点検結果で空洞化は確認されていない
②不等沈下による堤防のクラックやゆるみ	対策工事済み(H30)
③函渠クラックや継手開きからの吸出し、漏水	過去の点検結果で有害な異常は確認されていない
④浸透路長の不足による吸出し、漏水(水みち)	今回想定される条件において浸透路長は不足しない



○Laneの式…樋門の設計で一般的に使用されている簡易的な手法を用いる。

$$C \leq \frac{L/3 + \sum \ell}{\Delta h}$$

$C = 8.5 \leq 9.0 \dots \text{OK}$

$\frac{29.5}{3} + \frac{16.1}{2.87} = 9.0$

C : 加重クリープ比 8.5(極めて細かい砂またはシルト) …地質調査結果による

L : 樋管本体および翼壁の延長 2.5m+23.3m+3.7m=29.5m

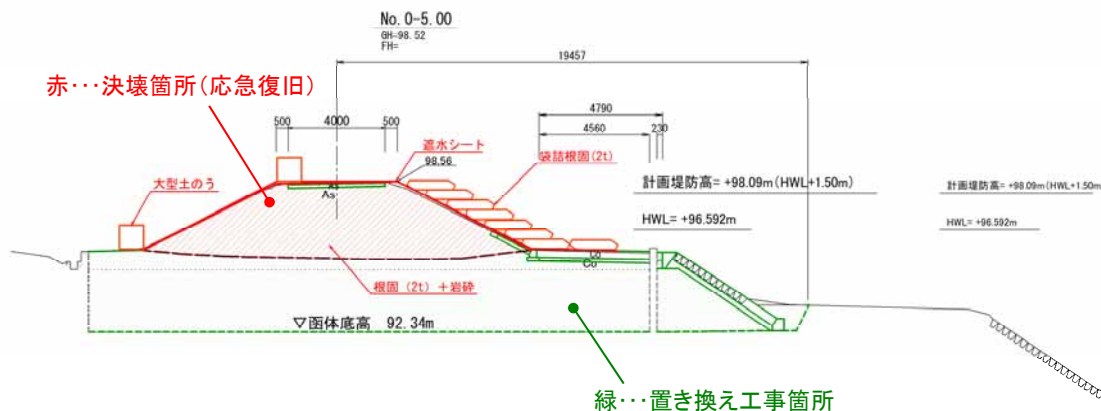
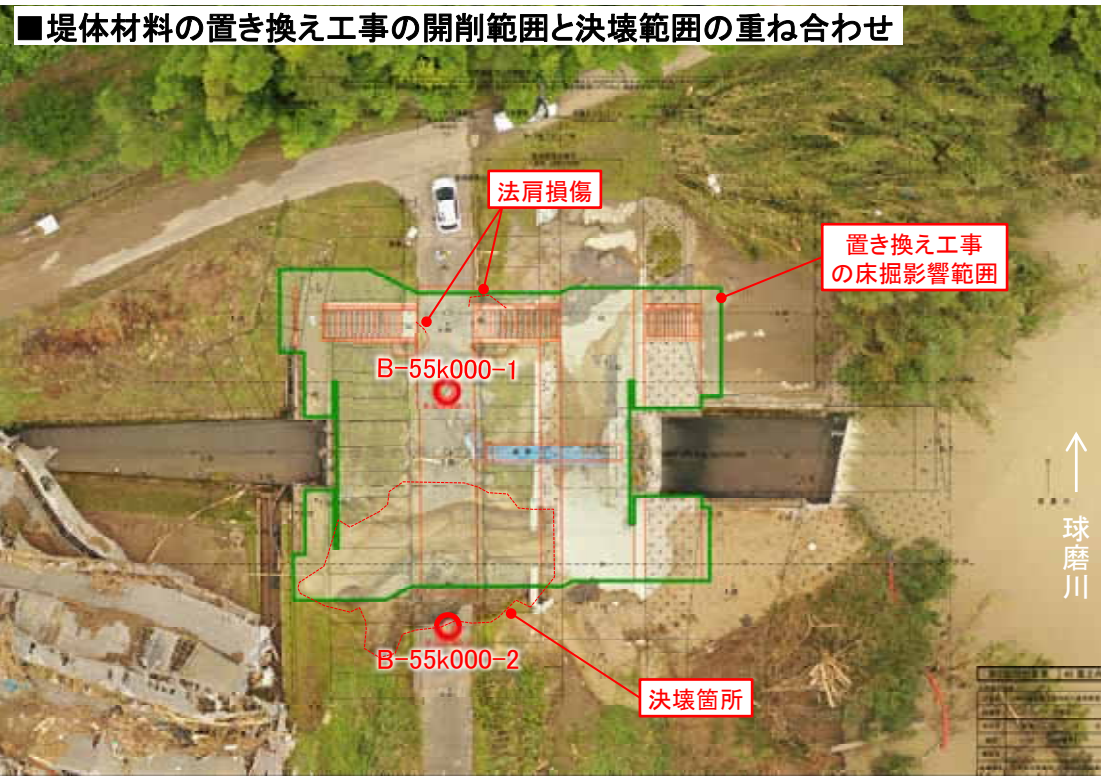
$\sum \ell$: 鉛直方向浸透路長(遮水矢板による延長) 2.5m×5+1.2m×3=16.1m

Δh : 水位差 2.87m

(4) 堤体材料の置き換え工事 ① 工事概要

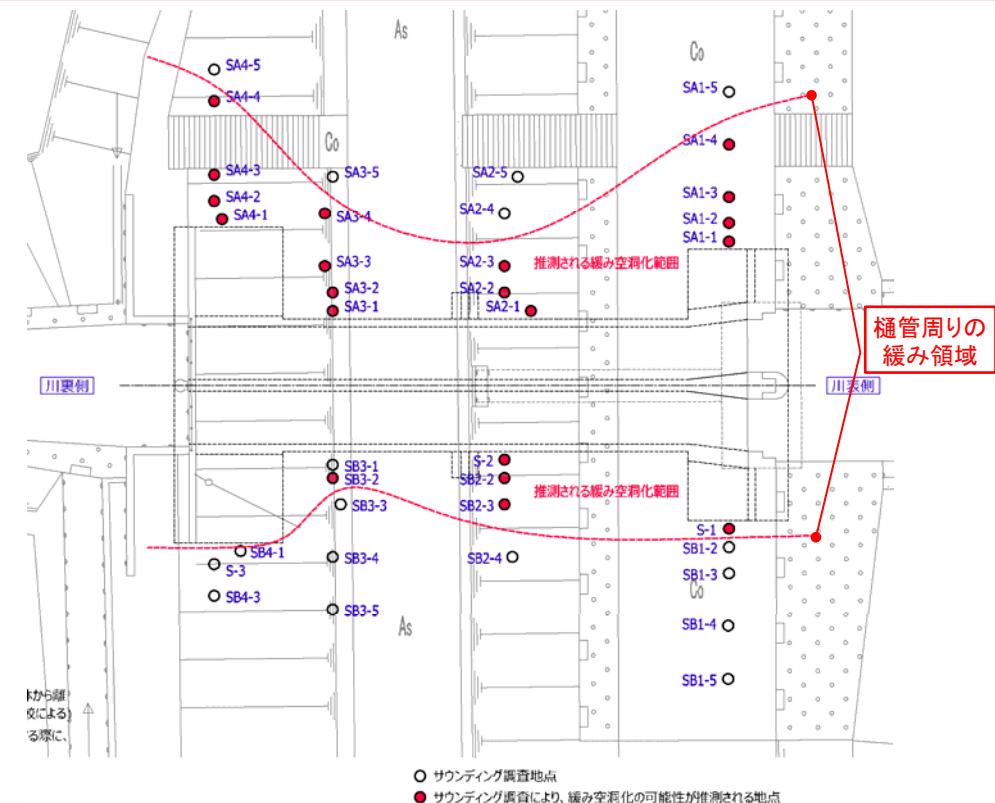
- 決壊箇所では、平成30年度に堤体材料の置き換え工事を実施。
- 当該工事では、既設樋管周辺を開削し、堤体材料の置き換えと合わせて、舗装や護岸、階段工等の整備を行っている。

■ 堤体材料の置き換え工事の開削範囲と決壊範囲の重ね合わせ



■ 過去の調査結果 (H26年度報告書による)

- スウェーデン式サウンディング調査により、樋管周りの堤体に緩み領域が確認されたため、対策工を実施。



(4) 堤体材料の置き換え工事 ②堤体材料の評価

○置き換え工事では、堤体材料(埋戻し土)として「購入土(山ずり)」が使用されている。
○今回の地質調査で得られた結果から、置き換え土および旧堤体土ともに、築堤材料に適した土であると言える。

■望ましい堤体材料の評価

参照)河川土工マニュアル 平成21年4月 (財)国土技術研究センター P63をもとに表に整理

堤体材料として望ましい土の条件 (河川土工マニュアル参照)	置き換え土【55.0k左岸】		旧堤体土【55.0k左岸】		旧堤体土【56.4k右岸】		旧堤体土【56.4k右岸】	
	決壊箇所下流側	判定	決壊箇所上流側	判定	決壊箇所下流側	判定	決壊箇所上流側	判定
① 粒度分布の良い土	・適正範囲に分布	○	・適正範囲に分布	○	・おおむね適正範囲に分布	△	・適正範囲に分布	○
② 最大寸法が10～15cm以下	・最大粒径5cm程度	○	・最大粒径3cm程度	○	・最大粒径7.5cm以下	○	・最大粒径3cm程度	○
③ 細粒分(0.075mm以下の粒子)が土質材料の15%以上	・細粒分含有率13.0～15.6%	△	・細粒分含有率20.6%	○	・細粒分含有率16.4%	○	・細粒分含有率33.1%	○
④ シルト分のあまり多くない土 (細粒分のうち、シルトの割合)	・細粒分のうちシルトの割合58%	○	・細粒分のうちシルトの割合61%	○	・沈降分析が実施されていないため、不明	—	・細粒分のうちシルトの割合46%	○
⑤ 細粒分(0.075mm以下の粒子)があまり多くない土(50%以下)	・細粒分含有率13.0～15.6%	○	・細粒分含有率20.6%	○	・細粒分含有率16.4%	○	・細粒分含有率33.1%	○
⑥ 土質分類名で[GF]、[SF]、[M]、[C]に相当する土	・[GF-S]、[G-FS]、[GS-F]	○	・[SFG]	○	・[GFS]	○	・[GFS]	○
総合評価 :		○	総合評価 :		○	総合評価 :		○

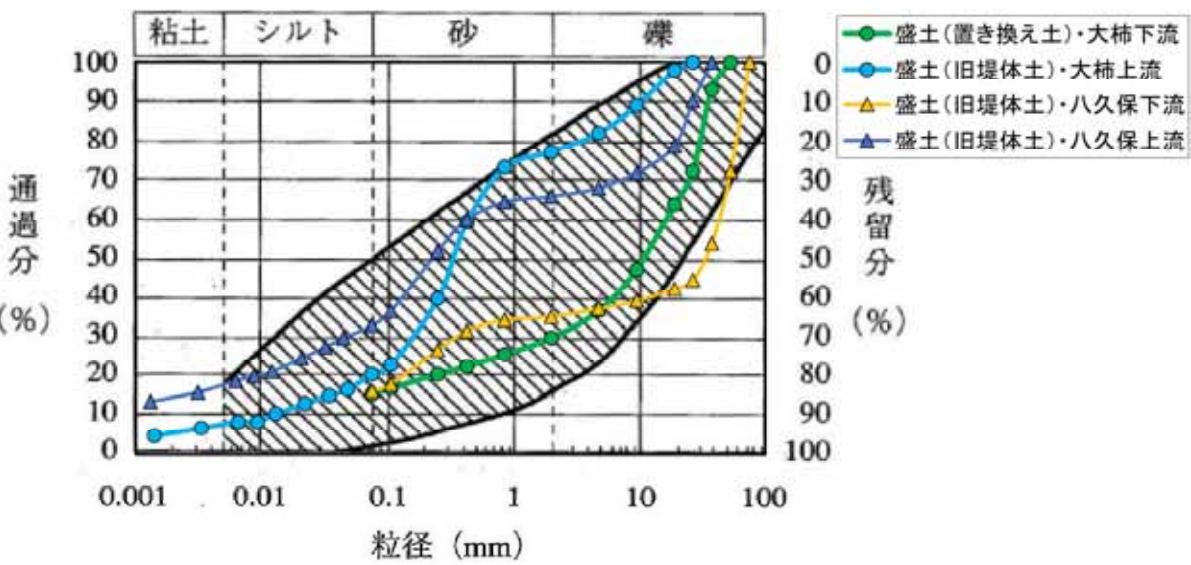
■置き換え工事で使用された置き換え土(採取現場写真)



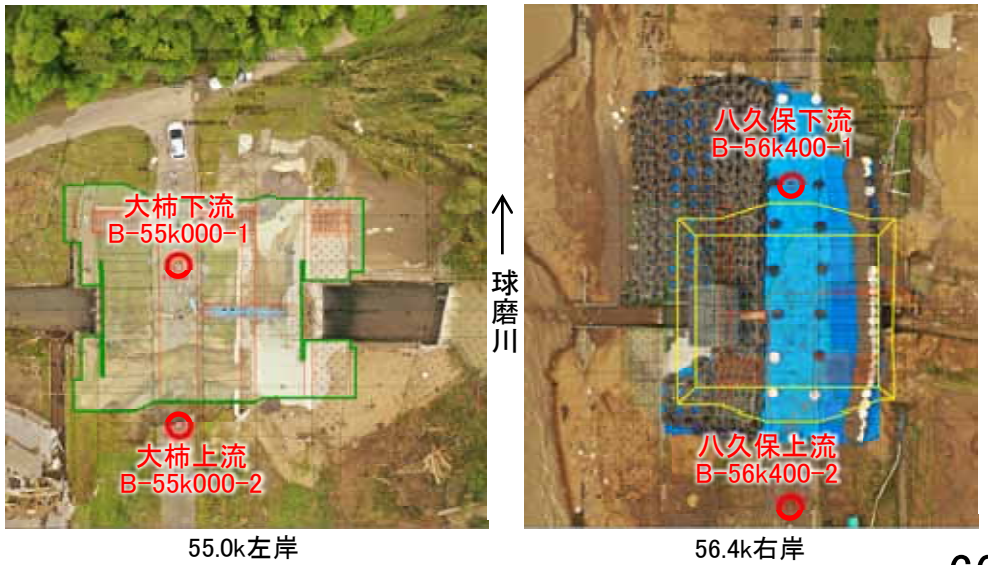
(採取現場写真)

出典)H30人吉出張所管内河川維持管理工事
土質材料試験報告書 平成30年12月

■堤体材料の粒度分布の適用範囲



■ボーリング位置図



(参考) 堤体土質の比較

- (1)「置き換え土」と「旧堤体土」の土は、同じものではないが、土質的にはどちらも細粒分を含む砂礫に分類される。
(2)「置き換え土」は、「旧堤体土」に比べ、礫分が多く、砂分・細粒分がやや少ない。
(3)強度特性および透水係数には、大きな違いは見られない。(置き換え土の方がやや透水係数大きい。)

■堤体土の土質試験結果横並び

(凡例) … 置き換え土、 … 旧堤体土

調査箇所		55.0k左岸（大柿排水樋管）				56.4k右岸（八久保排水樋管）		
盛土種別		置き換え土			旧堤体土	旧堤体土		
調査位置		決壊箇所下流側			決壊箇所上流側	決壊箇所下流側	決壊箇所上流側	裏法尻洗掘箇所
試料番号		Tr55k000-1-1	S1-1（追加実施）	S1-2（追加実施）	C55k000-2-1	Tr56k400-1-1	Tr56k400-2-1	八久保No.1（追加実施）
試料状態		乱れの少ない	乱れの少ない	乱れの少ない	乱れの少ない	乱れの少ない	乱れの少ない	乱した
試料採取深度（GL-m）		-2.40	-1.30	-2.30	-1.50	-1.925	-1.925	—
試料写真								
物理特性	① 湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	2.249	2.143	2.205	2.140	2.190	2.078	—
	② 間隙比 e	0.336	0.477	0.433	0.473	0.442	0.581	—
	③	液性限界 WL (%)	35.9	33.6	32.1	NP	27.1	26.2
		塑性限界 WP (%)	23.4	23.6	21.1	19.2	14.8	19.2
		塑性指数 IP	12.5	10.0	11.0	NP	12.3	7.0
	④	れき分 grav (%)	70.1	72.8	67.8	22.9	64.7	34.0
		砂分 sand (%)	14.3	14.2	18.0	56.5	18.9	32.9
		シルト分 silt (%)	15.6	7.7	8.1	12.5	16.4	15.2
		粘土分 clay (%)		5.3	6.1	8.1	17.9	8.6
	⑤ 細粒分含有率 F_c (%)	15.6	13.0	14.2	20.6	16.4	33.1	24.0
力学特性	⑥	平均粒径 D_{50} (mm)	10.6000	10.1209	6.9268	0.3298	33.75	0.2261
		20%粒径 D_{20} (mm)	0.2153	0.5461	0.2996	0.0710	0.1393	0.008466
		⑦ 土質分類名	砂混じり細粒分質礫 {GF-S}	細粒分砂混じり礫 {GF-S}	細粒分混じり砂質礫 {GS-F}	細粒分質礫質砂 {SFG}	細粒分質砂質礫 {GFS}	細粒分質礫質砂 {SFG}
	⑧	試験条件	CD	CD	CD	CUB	CD	CUB
		粘着力 C (kN/m ²)	90.0	8.3	11.5	15.6	2.1	4.9
		内部摩擦角 ϕ (°)	28.6	39.7	38.8	33.9	41.9	33.4
			特異値のため除外					
	⑨	試験条件	変水位	変水位	変水位	変水位	変水位	変水位
		透水係数 k (m/sec)	5.34E-06	1.94E-05	7.05E-05	4.35E-06	8.51E-06	4.13E-08

(2)

(1)

(3)

- 今回地質調査を行った結果を踏まえ、決壊直後の堤防断面の写真に地層区分を記入したものを以下に示す。
- 55.0k左岸(大柿)では、下流側断面に工事の置き換え土が残っており、上流側断面には旧堤体土が見られる。
- 堤体土は、上流側断面の方が細粒分が若干多く、透水係数が若干小さい。

下流側

・堤体土の細粒分含有率 : $F_c = 14.3\%$ ・堤体土の透水係数 : $k = 4.50 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$



上流側

・堤体土の細粒分含有率 : $F_c = 20.6\%$ ・堤体土の透水係数 : $k = 4.35 \times 10^{-6} \text{ m/sec}$



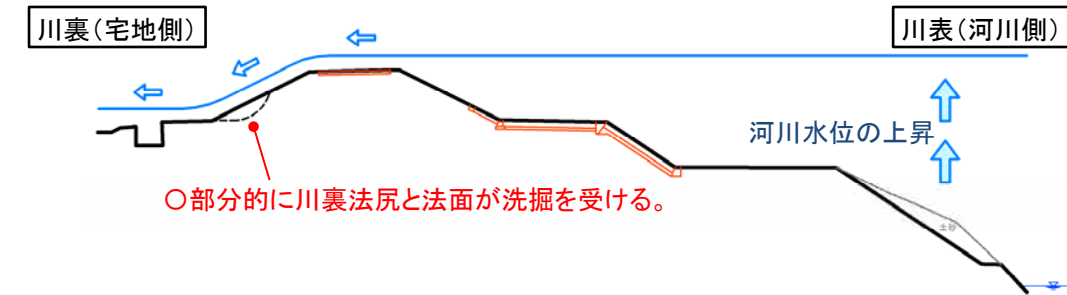
4) 決壊のメカニズムと要因

要因の種類	決壊要因の可能性
I.越水	○河川水位が上昇し堤防を越水。 ○堤防を大きく越える水位に達し、長時間（6時間程度以上）堤防全体が水没。 ○決壊箇所周辺では、宅地側から河川側に向かって長時間（6時間程度以上）の越水。 ○内外水位差によりアスファルト舗装の自重を上回る揚圧力が作用していたことを確認。 ○堤防天端のアスファルトは河川側へ流出していることを確認。 ○川裏法尻（八久保樋管周辺）及び堤防法肩（大柿樋管周辺）に洗掘箇所を確認。 ○決壊箇所の耐侵食性は良好な状態であることを確認。
II.浸透	○地質調査の結果を用いて浸透流解析を実施した結果、安全性の照査基準（パイピング破壊、すべり破壊）を満足することを確認。 ○既往研究成果から土の飽和が進むと粘着力が低下することや湿潤状態となることで堤体侵食の進行が速いことを確認。
III.河岸侵食	○決壊箇所の川表小段の平張コンクリートや小段よりも下の低水護岸の損傷は確認されていない。 ○決壊箇所付近の堤防法面に河川の流れるによる侵食跡は確認されない。
IV.構造物・工事	○過去の点検結果において、函体のクラックからの漏水や堤体・護岸の変状等は確認されていない。 ○被災時に想定される条件においても浸透路長を満足しており、函体周囲から漏水が生じた形跡は確認されない。 ○堤体材料の置き換え工事では、適切な材料及び施工が実施されていることを確認。 ○置き換え土と旧堤体材料は細粒分を含む砂礫に分類され、強度特性及び透水係数に大きな違いはないことを確認。（置き換え土の方がやや透水係数が大きい） ○堤防天端舗装に舗装復旧時の打ち継ぎ目を確認。

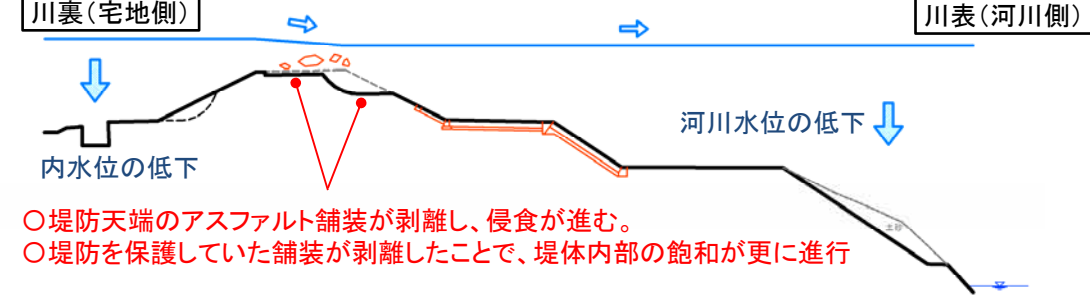
【球磨川左岸55.0k付近】 (2) 決壊メカニズムのイメージ

○当該箇所想定される決壊の過程は、以下のように考えられる。

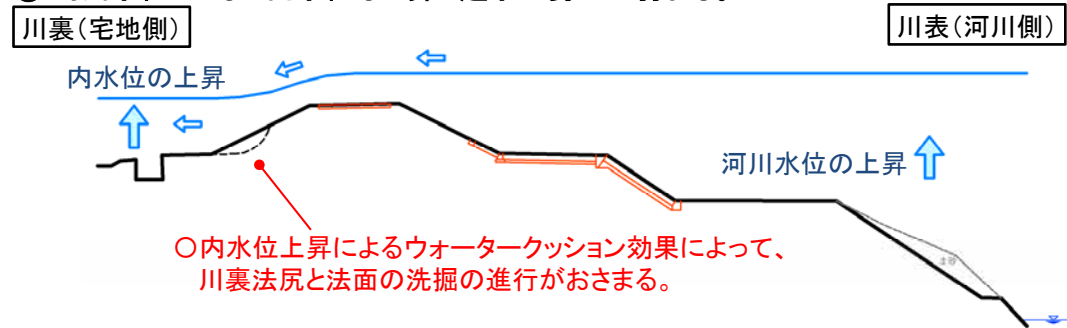
① 河川水位の上昇により堤防を越水し始める。



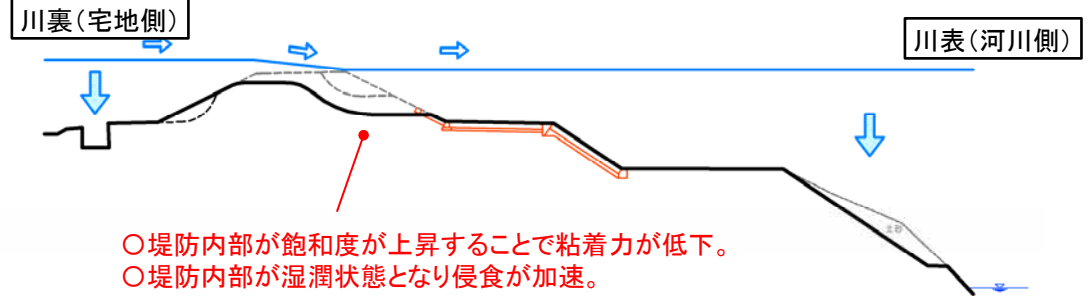
④ 堤防天端のアスファルト舗装が剥離。



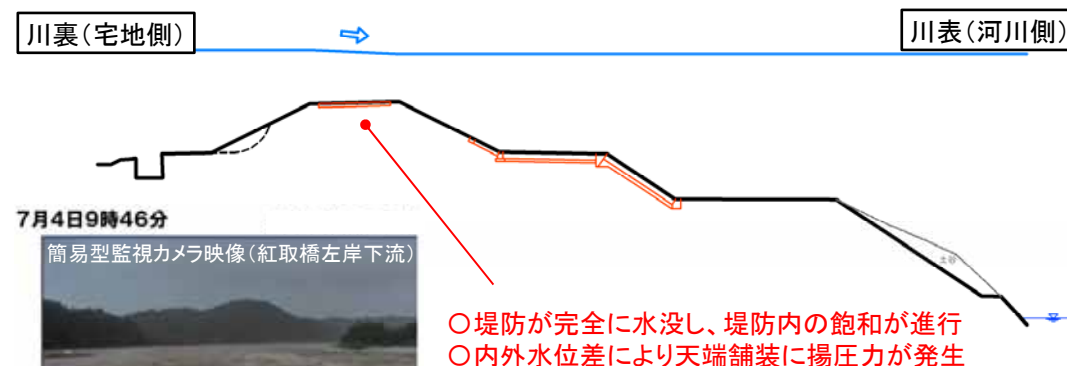
② 河川水位とともに内水位も上昇し越水の勢いが弱まる。



⑤ 堤防内部が飽和することで侵食が加速。



③ 内水が更に上昇し、決壊箇所付近では長時間(5時間程度)の逆越流状態が続く。



⑥ 堤内地側からの逆越流によって、堤防が決壊。

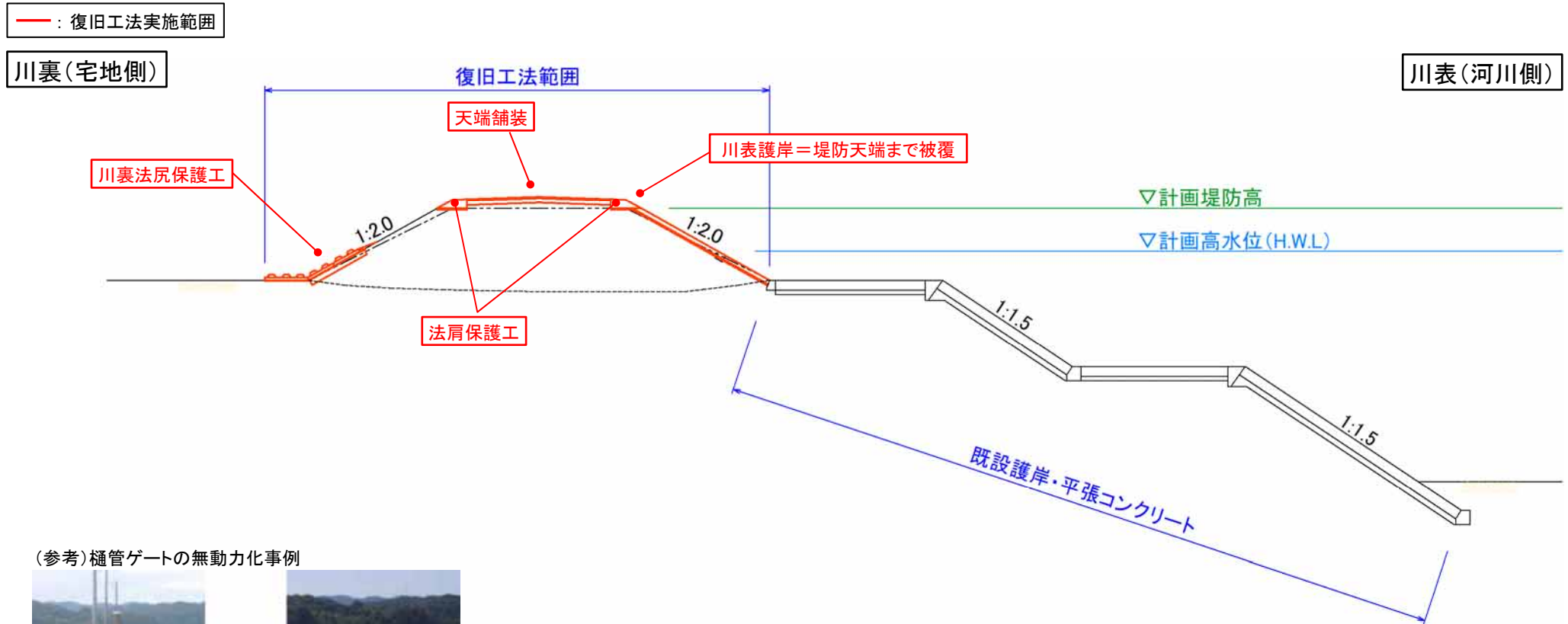


5) 本復旧方法(案)

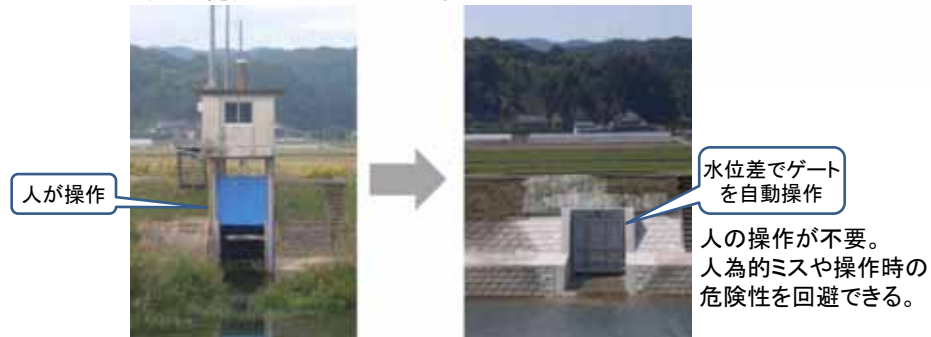
【球磨川左岸55.0k付近】復旧工法の方針(案)

- 今回の被災要因を踏まえ、川裏法尻保護工(川裏法尻部の洗掘対策)、天端舗装、天端までの川表護岸工、法肩保護工を設置する。
- また、洪水の減水期に遅延なく排水が実施可能となるよう排水樋管のゲート構造を無動力化とする。

■復旧工法横断範囲のイメージ(案)



(参考)樋管ゲートの無動力化事例



出典)樋門ゲートの無動力化と操作等の共同管理に関するガイドライン H30.5 九州地方整備局

(その他)

- 堤体土質は、浸透しても強度低下しにくいよう細粒分の混合に配慮し、適切な粒度調整を行う。
- 堤防縦断方向の埋戻し堤体土のなじみを良くするための段切り開削施工。
- 既設堤体土の土質と近い盛土材の使用。