

四万十川における堤防開削調査と試掘調査の報告

中村河川国道事務所 工務第一課 河川工務係員 新居 鈴菜
中村河川国道事務所 工務第一課長 渡辺 教仁
中村河川国道事務所 工務第一課 河川工務係長 鎌田 摩耶

令和3年度樋門新設および改築工事に伴い実施した堤防開削調査及び四万十川における堤防点検で多く見られた排水不良箇所代表箇所として実施した試掘調査について、既往の河川堤防の安全性照査時（質的評価）の諸設定（堤防モデル、透水係数、せん断強度特性など）との比較を行い、また、ボーリング調査を主体とした照査時の想定モデルと地盤定数の設定に関する考察を行うとともに当該一連区間の再評価を実施した。あわせて、堤防点検の予防保全段階に評価区分される排水不良に関する対応方針などを設定するための基礎資料として報告する。

キーワード：堤防開削調査、試掘調査、堤防点検、質的評価、締固め特性

1. はじめに

四万十川では、降雨・洪水を外力とした河川堤防の浸透に対する安全性検討を「河川堤防設計指針」（国土交通省河川局治水課 平成14年7月）を踏まえ、「河川堤防の構造検討の手引き」（財団法人 国土技術研究センター）に準拠して照査や強化工法の設計を行っている。その際、基礎地盤を含む河川堤防のモデル化にあたっては、工事台帳など、これまでの改修記録資料をもとに築堤履歴を整理し、基本的には堤防天端、堤内外の3本のボーリング調査を行いモデル化している。このモデル化された各地盤で透水特性（飽和透水係数）、せん断強度特性（粘着力、内部摩擦角）、湿潤密度を設定し、浸透流解析および円弧すべり計算による一連の浸透に対する安全性の照査を行っている。この照査で所要の安全性が満足されない区間では、強化工法の設計が行われ施工されている。これら一連の照査・強化工法の設計にあたっては、点となる複数の地盤調査で実施せざるを得ない。

近年、非破壊調査（物理探査）により面として地盤情報を得る手段もあるが、強化設計の実用に至っていないのが現状である。そこで、樋門改築・新設など堤防開削を伴う際、「河川堤防開削時の調査マニュアル」（国土交通省河川局治水課 平成23年3月）に基づき、開削断面の観察、各種地盤・土質試験を行い、照査時のモデル設定の検証を行うことは、治水安全性の管理において重要である。あわせて、今後の周辺堤防における河川構造物計画においても有用な資料となる。

本報告では、四万十川右岸入田地区（12k200付近）、中筋川左岸楠島地区（8k600付近）において実施した調査・検討結果を報告する。あわせて、管内の堤防点検において小段、法尻部に多く見られる「排水不良」箇所について、

堤体内状況・メカニズムの把握を目的として実施した試掘調査についても報告する。なお、この試掘調査は前述の目的の成果を得られるものとはならなかったが、今後の堤防の治水安全性の評価に関する、開削調査をはじめとした調査の必要性を示すものである。

これら堤防開削調査と試掘調査箇所を図-1に示す。



図-1 堤防開削調査箇所、試掘調査箇所

2. 入田地区堤防開削調査と質的評価モデル

当該堤防は、四万十市の入田・具同地区の集落を守る重要な治水施設であり、過去の大洪水や昭和21年の昭和南海地震などの大災害を受け災害復旧などの対策工事も繰り返された堤防として、古くより拡張・嵩上げ整備がされている。基礎地盤は厚く堆積された沖積砂礫層が主体となっている。この層は、高透水性基礎地盤であり、近年破堤を伴う被災が生じている。当該地区においては漏水が頻発し止水矢板やドレーン工が施工されている。

(1) 質的評価時地層断面モデルとの比較

図-2に上流側堤防開削断面を示す。本調査では、築堤盛土は5回（図中①～⑤）実施されていることが確

認できた。各築堤盛土層において粒度試験，現場密度試験，締固め試験，室内透水試験，三軸試験を実施し地盤特性を把握した。なお，①層と③層は観察により同様の性状と判断し①における試験のみを行った。図-3に平成19年度に実施した質的評価モデルを示す。質的評価時は堤防開削における①，②，④層をB1層として砂質礫としてモデル化し，③，⑤層をB2層としてB1層と同等としている。表-1に粒度試験結果を示す。この表中に質的評価時も併記するが詳細な粒度分布は不明なため土質分類を示す。①層は所々200mmの円石があるが円礫が主体となっており基礎地盤の砂礫層と同等である。②層は昭和8,12年増築で細砂が主体の粘性土質砂となっている。④層は昭和55年の増築で角礫が主体となっており山土である。堤内側③層は昭和22年に増築され①層と基礎地盤と同様な円礫が主体となっており河床掘削土が用いられたと考えられる。⑤層は平成元年の増築で細粒分が主体となる砂質粘土となっている。表-2に締固め特性と質的評価時に設定した湿潤密度 ρ_t を示す。当該築堤盛土は90%以上の締固め度を有した良好な締固めを示す。

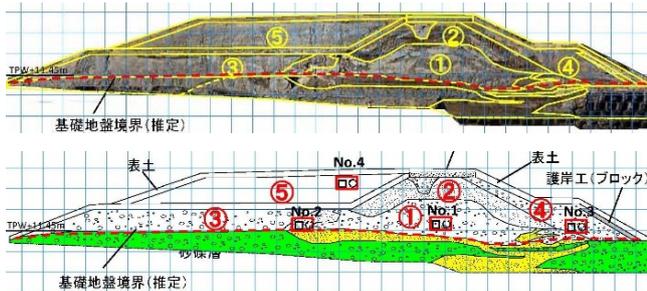


図-2 入田地区堤防開削断面

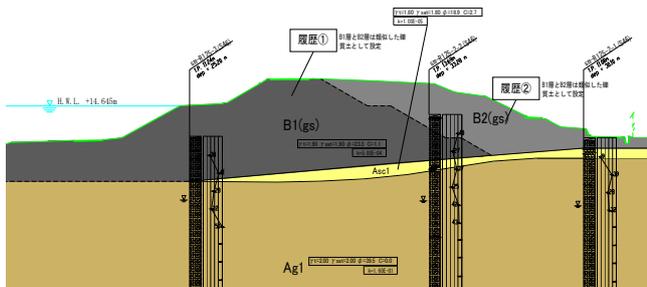


図-3 入田地区質的評価モデル断面

表-1 入田地区粒度試験結果

開削調査	質的評価	粒度試験			
		細粒分(%)	砂分(%)	礫分(%)	分類
12k/200	12k/600				
① / No.1		7.4	23.7	68.9	粘性土まじり砂質礫
② / No.2		33.8	63.4	2.8	粘性土質砂
④ / No.3		12.0	14.0	74.0	粘性土砂まじり礫
	B1(gs)				砂質礫
③ / No.1		① / No.1を適用			
⑤ / No.4		72.5	26.5	1.0	砂質粘土
	B2(gs)	B1(gs)を適用			
	※Asc1				粘性土質砂
	Ag				礫

表-2 入田地区締固め特性

開削調査	質的評価	現場密度試験			締固め試験		締固め度
		ρ_t (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	W (%)	ρ_{dmax} (g/cm ³)	W _{opt} (%)	
12k/200	12k/600						
① / No.1		2.030	1.939	4.7	2.030	3.9	95.50
② / No.2		1.944	1.605	21.1	1.619	20.3	99.10
④ / No.3		1.999	1.861	7.4	1.873	6.4	99.40
	B1(gs)	1.900	一般値を適用				
③ / No.1		① / No.1を適用					
⑤ / No.4		1.898	1.596	19.0	1.697	16.9	94.00
	B2(gs)	B1(gs)を適用					

(2) 質的評価時透水特性との比較

表-3に透水試験と Creager による20%粒径から間接的に求めた透水係数を示す。Creager と室内試験は2~3オーダーの違いとなっており，Creager は表中に示した分類の土質で多数の試験から示されたものであることから礫が含まれる当該地盤で大きく異なっていると推察される。今後，透水係数の設定にあたっては留意する必要があることを示唆する結果となった。この透水係数は質的評価時の浸透流解析において主体となる地盤特性である。当該地点では，堤内のり尻部における鉛直方向のパイピング破壊が安全性を満足しない結果となりドレーン工による対策工が施されている。開削調査により得られた透水係数と質的評価での設定値では④層と⑤層が異なるものの堤体内浸透に主体となる層は同オーダーとなっていることから質的評価結果は妥当と考えられる。

表-3 入田地区透水試験結果

開削調査	質的評価	室内透水試験		透水係数(D ₂₀)		粒度試験	
		m/sec	m/sec	分類	D ₂₀ (mm)	分類	
12k/200	12k/600						
① / No.1		2.47×10 ⁻⁶	1.80×10 ⁻⁴	微粒砂	0.2793	粘性土まじり砂質礫	
② / No.2		6.99×10 ⁻⁹	1.14×10 ⁻⁶	粗粒シルト	0.0330	粘性土質砂	
④ / No.3		2.19×10 ⁻⁵	2.66×10 ⁻³	粗粒砂	0.8716	粘性土砂まじり礫	
	B1(gs)	5.00×10 ⁻⁶				砂質礫	
③ / No.1		① / No.1を適用					
⑤ / No.4		5.71×10 ⁻⁸	1.00×10 ⁻⁸	粗粒粘土	0.0028	砂質粘土	
	B2(gs)	B1(gs)を適用					
	※Asc1	1.00×10 ⁻⁷ (手引きのシルトを適用)				粘性土質砂	
	Ag	1.60×10 ⁻³ (試験値の平均)				礫	

(3) 質的評価時せん断強度特性との比較

表-4に円弧すべり計算に用いるせん断強度特性を求める三軸試験結果を示す。本調査では試験条件をC_{Ubar}としており全応力と有効応力でのせん断強度を示している。質的評価では川表側最小すべり安全率は1.77，川裏側最小すべり安全率は1.90となっており所要の安全率を大きく上回る結果となっていた。本調査で得られたせん断強度特性と質的評価時のせん断強度特性値を比較すると，②層が質的評価時より大きな強度となっており，他の層は同等の強度となっていることから，質的評価は妥当と考えられる。本調査箇所は，質的評価時と開削調査結果とで地盤構成は大きく異なるものの，透水係数，せん断強度特性が同程度であっ

たことから質的評価は妥当となったが、そうならないことも考えられることから、今後も開削調査の機会があれば積極的に調査を行い、既往検討の再精査、再評価を行い河川堤防の浸透に対する安全性の確認を行うことは重要である。

表-4 入田地区三軸試験結果

開削調査	質的評価	三軸圧縮試験				
		条件	C (kN/m ²)	Φ (°)	C' (kN/m ²)	Φ' (°)
12k/200	12k/600					
① / No.1		CUbar	36	12.7	26	21.1
② / No.2		CUbar	105	13.5	9	34.5
④ / No.3		CUbar	19	14.7	2	31.2
	B1(gs)	CU	11	23.3	←試験値の平均	
③ / No.1			① / No.1を適用			
⑤ / No.4		CUbar	3	14.6	5	29.1
	B2(gs)		B1(gs)を適用			
	※Asc1	CU	27	18.9	←試験値の平均	
	Ag		0	39.5	←N値よりDunhamで設定	

3. 楠島地区堤防開削調査と質的評価モデル

当該堤防も中筋川下流部左岸の楠島・具同地区を守る重要な治水施設である。築堤履歴は、昭和28年より小堤の嵩上げ整備がされ、昭和30年頃に概成している。渡川改修40年史の昭和28年度に「付近の河川敷より掘削し、直接築堤箇所に捨土を行い築立した（一部略）」と記載されており、河道の掘削土を築堤に利用したものである。中筋川の基礎地盤は、粘性土が厚く堆積していることが特徴であることから、堤体盛土として粘性土を用いる場合、トラフィカビリティの確保が困難となり、締固めが容易ではないと考えられる。なお、現行の「河川土工マニュアル」（平成21年4月財団法人国土技術センター）では、堤体材料として望ましい土として、細粒分が15%以上50%以下と示されている。

(1) 質的評価時地層断面モデルとの比較

図-4に下流側堤防開削断面を示す。図-5に平成15年に実施した質的評価モデルを示す。開削調査では①層から③層地盤構成が示され、質的評価ではBc1、Bc2としており、ボーリング調査による想定築堤履歴との相違が顕著となった。

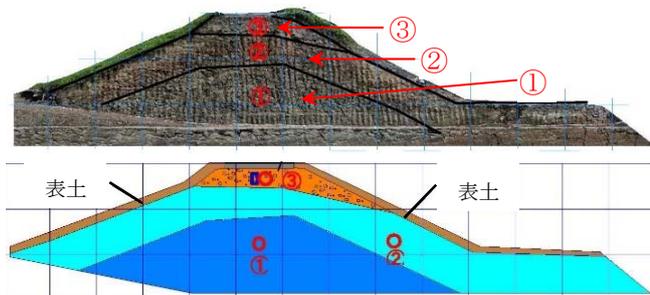


図-4 楠島地区堤防開削断面図

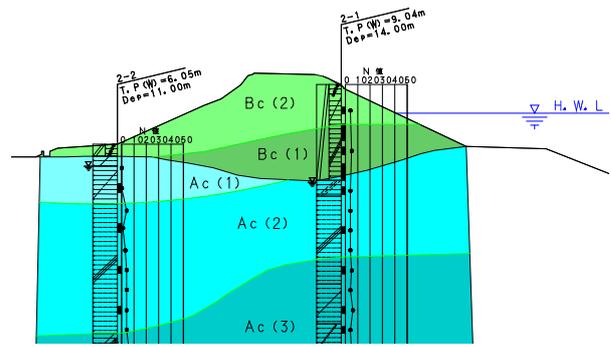


図-5 楠島地区質的評価モデル断面

当該地区も入田地区と同様の試験を実施した。各試験結果の整理にあたっては、①層をBc1層、②層をBc2層として整理し考察した。表-5 粒度試験結果を示す。①層、Bc1層、②層、Bc2層とも砂混じり粘土に分類され河道の掘削土を用いたことが明確となった。③層は亜角礫～円礫が主体となっており近年において、堤防天端補修などにより、山土あるいは流用土を用いたと判断できる。

表-5 楠島地区粒度試験結果

開削調査	質的評価	粒度試験			
		細粒分(%)	砂分(%)	礫分(%)	分類
8k/600	8k/200				
① / No.1		88.4	10.5	1.1	砂まじり粘土
	Bc1	83.3	16.7	0.0	砂まじり質粘土
② / No.2		91.0	8.9	0.1	砂まじり粘土
	Bc2	80.1	19.9	0.0	砂まじり質粘土
③ / No.3		15.4	18.9	65.7	粘性土質砂質礫
	Ac1	89.8	10.2	0.0	砂まじり粘土
	Ac2	96.6	3.4	0.0	粘性土
	Ac3	94.2	5.8	0.0	砂まじり粘土

表-6に締固め特性と質的評価における設定した湿潤密度を示す。①層、②層は粘性土主体であることから締固め状態が課題となるが、現状において締固め度は90%以上となっており、湿潤密度からも十分な締固めが行われていると判断できる。開削調査から①層と②層の層境に大きな不陸が生じていないことから、①層の築堤もある程度締固められていたと考えられ、この材料での築堤は困難であるにもかかわらず、良質な施工と圧密沈下により形成されたものと想定される。

表-6 楠島地区締固め特性

開削調査	質的評価	現場密度試験			締固め試験		締固め度
		ρ _t (g/cm ³)	ρ _d (g/cm ³)	w (%)	ρ _{dmax} (g/cm ³)	w _{opt} (%)	
8k/600	8k/200						
① / No.1		1.891	1.481	21.5	1.538	14.8	96.3
	Bc1	2.000 ←試験値を平均			26.4		
② / No.2		1.936	1.513	24.5	1.475	19.5	102.6
	Bc2	2.000 ←Bc1を適用					
③ / No.3		1.929	1.819	6.9	1.876	6.4	97.0

(2) 質的評価時透水特性との比較

表-7に透水特性を整理した結果を示す。粘性土は室内試験とCreagerからの設定値とほぼ同程度の値となっていることから、このような地盤においてはCreager

による設定は有効であると判断できる。質的評価にあたっては、基礎地盤堤体盛土ともに非常に低い透水特性となっていることから、高水による堤体内浸透は及ばないと考えられ、浸透によるパイピング破壊に対する危険性は無いと判断できる。一方、本調査では基礎地盤の圧密沈下は対象としていないが、基礎地盤は締固めが行われていないと考えられることから、未圧密の沖積粘性土とも想定され、築堤などの盛土荷重により何らかの変状が発生することが懸念される。

表-7 楠島地区透水試験結果

開削調査	質的評価	室内透水試験		透水係数(D ₂₀)			粒度試験	
		m/sec	m/sec	分類	D ₂₀ (mm)	分類		
① / No.1	8k/600	4.41 × 10 ⁻⁸	8.58 × 10 ⁻⁹	粗粒粘土	0.0036	砂まじり粘土		
	8k/200		17.94 × 10 ⁻⁸	粗粒粘土	0.0034	砂まじり質粘土		
② / No.2		5.14 × 10 ⁻⁸	3.00 × 10 ⁻⁸	粗粒粘土	0.0050	砂まじり粘土		
			1.42 × 10 ⁻⁸	粗粒粘土	0.0026	砂まじり質粘土		
③ / No.3		1.18 × 10 ⁻⁵	1.03 × 10 ⁻⁴	粗粒砂	0.2212	粘性土質砂質礫		
	Ac1		1.00 × 10 ⁻⁸ (一般値適用)	0.0012	砂まじり粘土			
	Ac2		1.00 × 10 ⁻⁸ (一般値適用)	0.0014	粘性土			
	Ac3		1.00 × 10 ⁻⁸ (一般値適用)	0.0050	砂まじり粘土			

(3) 質的評価時せん断強度特性との比較

表-8 に三軸試験結果を示す。本調査はCUbar 条件で実施しており、締固めによる過圧密状態が示される結果となり、十分なせん断強度を有している。質的評価時は UU 条件で試験を行っており、この条件では試料採取深度での強度しか得られないことから、深度方向の強度増加を考慮する場合は複数の UU 条件による試験もしくはCUbar 条件で実施することが望まれる。

表-8 楠島地区三軸試験結果

開削調査	質的評価	三軸圧縮試験					
		条件	C(kN/m ²)	φ(°)	C'(kN/m ²)	φ'(°)	
① / No.1	8k/600	CUbar	37.1	2.1	38.0	2.6	
	8k/200		15.0	0.0			
② / No.2		CUbar	34.0	13.6	37.6	14.0	
			UU	30.0	0.0		
③ / No.3		CD	—	—	7.7	38.5	
	Ac1		35.0	—	—	—	
	Ac2		57.0	—	—	—	
	Ac3		62.0	—	—	—	

4. 堤防点検による排水不良箇所における試掘調査

四万十川における堤防点検では、排水不良による堤防小段や法尻部の湿潤・泥濘化した箇所が多く見られる。そこで、中筋川・磯ノ川箇所堤内法尻部(写真-1, R2年調査)、四万十川・山路背割箇所本川側小段部(写真-2, R3年調査)でメカニズムの推定を目的として試掘調査を実施した。これら試掘調査は冬期のほとんど降雨がない時期に実施したが、試掘中から湧水が見られ翌日にはほぼ満水状態まで水が溜まるものとなった。

磯ノ川箇所は楠島地区と同様に基礎地盤は粘性土で旧堤は河道の掘削土と考えられ粘性土ではあるが、複

数回の増築では礫質土が用いられている。あわせて、約 3m の小段が設けられている。これらの要因で降雨により堤体内に透水層と難透水層が互層になり宙水層が形成され、「絞り水」現象で常時堤体水がわき出ているものと考えられる。この想定メカニズムを検証する目的で約 1m の壺掘りによる試掘調査を実施したが、今回の試掘範囲では明確な根拠を得ることはできなかった。

山路背割箇所は明確な築堤履歴、盛土構成の資料がなくボーリング調査により粘性土質砂礫層の 2 層構成と考えられており、透水性は有するとみられるが、降雨により盛土内に貯留するとは想定できないことから試掘調査を実施した。しかし、本箇所も試掘調査によりその規模から根拠となる資料を得ることができなかった。

これら排水不良は、堤体土が湿潤で飽和度が高い状態であることから、漏水やすべり、地震時液状化など堤体の弱点にもつながることも危惧され、今後のメカニズム解明を目的とした詳細調査を踏まえ対策方針検討が望まれる。



写真-1 中筋川・磯ノ川箇所堤内法尻部試掘調査



写真-2 四万十川・山路背割箇所本川側小段部試掘調査

5. おわりに

本調査より、質的評価は妥当ではあるが、築堤モデル・地盤特性の設定を精査するためにも、開削調査を実施することが重要であると再確認できた。また、試掘調査結果より、堤防点検における排水不良箇所において、メカニズム解明を実施して盛土構成を明確にし、対策方針を検討する必要があると考えられる。さらに、これらの情報を継続的に管理・伝承することは肝要と考える。

謝辞: 多くのご助言を頂いた方々に深謝の意を表す。

参考文献

- 1) 渡川改修四十年史(発行: 1970年3月20日, 編集: 建設省四国地方建設局中村工事事務所)