

釧路川堤防の緩傾斜化による 堤防強化に向けた調査検討について —散水試験による降雨浸透挙動と堤体強度の把握—

釧路開発建設部 治水課 ○橋本 武幸
大串 正紀
濱中 昭文

近年、釧路川では大雨による堤防法面の被災が発生しているが、法面の被災メカニズムを検討し、釧路川の現況堤防の安定性確保のためには、3割以上の緩傾斜化が必要との結論を得た。

本報告では、釧路川の現況堤防法面の緩傾斜化の検討を行うため、現地に造成した実物大の試験堤防に人工的な降雨を与えた際の堤防内の降雨浸透挙動や法面強度変化の把握に関する散水試験結果について報告する。

キーワード：堤防強化、散水試験

1. はじめに

釧路川では、近年大雨による堤防法面の被災が発生している。平成28年8月の度重なる台風の上陸により大雨を記録した際には、釧路川左岸KP45.8～46.0の川表で大規模な堤防法面すべりが発生した。一般に堤防の主な被災形態には浸透による裏法すべりやパイピング、洪水流による表法の侵食、地震動及び液状化による被災など様々であるが、釧路川では降雨による堤防天端の法肩からの崩壊や法面中腹からの崩壊が発生している。平成28年の被災直後には現地調査を実施し、原型復旧工事を完了させている。また平成30年5月には有識者からなる「釧路川堤防技術検討委員会」（以下、「委員会」とする）を設置して、釧路川の堤防強化対策の検討を行ったところ、堤防の安定性確保のための対策工として緩傾斜化が提言された。このような経緯から、釧路川では堤防の緩傾斜化を検討するため、実物大の試験堤防を造成し、人工的に降雨を作用させる散水試験を行っている。

本報告では、令和3年度に実施した試験堤防に対して、計画降雨量を人工的に作用させ、堤体内の降雨浸透挙動や法面強度変化を調査した散水試験の結果と、散水試験結果を踏まえた再現解析について報告するものである。

2. これまでの経緯

(1) 釧路川の被災状況

釧路川中流域の堤防では、近年の大雨により平成25年から平成28年までの4年間で、15箇所が法面すべりが確認されている。中でも平成28年8月の3つの台風が北海道に上陸し、釧路管内の標茶雨量観測所で8月としては観

測史上最大となる月降水量561mmを記録した際には、釧路川左岸KP45.8～46.0の川表で大規模な堤防法面すべりが発生した。具体的には、釧路川左岸KP45.8付近において幅約65mにわたる法中央部からの法面すべりと、KP46.0付近において幅約65mの天端付近からの法面すべりの、合わせて約130mの区間で被災が発生した(写真-1)。気候変動による気象の激甚化が懸念される中で、釧路川の現況堤防の安定性の確保が必要となっている。

(2) 釧路川堤防技術検討委員会

釧路開発建設部では、平成28年の被災を受けて、平成30年5月に釧路川の堤防強化対策を講ずるため、河川工学、地盤工学等の専門的知見を有する学識経験者からなる「釧路川堤防技術検討委員会」を設置した。委員会では、現地調査を行うとともに、旧河道に着目した河道変遷の確認や簡易的な土質調査による堤防基盤状況の把握、釧路川の堤体土質や基礎地盤土質の特徴の検討を行った。また釧路川の特性を踏まえた上で、実物大の試験堤防に



写真-1 釧路川で発生した堤防法面の被災

よる現地実験を行い、雨水や外水に対しての安全性の高い堤防形状についての検討を行った。平成30年5月から平成31年3月までに5回の委員会を開催し、議論を重ねた結果、被災原因は堤体表層の土質が火山灰質でシルトを多く含む粘性土の部分に、雨水が浸透して飽和度が上昇し、表層の強度が低下したことが理由¹⁾であると考えられた。さらに散水試験結果を反映した浸透流及び安定解析結果から、釧路川の現況堤防の安定性の確保には、法面勾配の3割以上の緩傾斜化が必要との提言を受けた。

3. 散水試験

(1) 試験概要

a) 試験堤防の概要

試験堤防は、令和2年度に釧路川左岸KP44.6の高水敷に法面勾配3割の実物大で造成された(写真-2)。

試験堤防の横断面図を以下に示す(図-1)。試験堤防は、平成28年8月の被災箇所と同様に2割勾配の堤体(砂質土)を一度造成した後、拡幅土(粘性土)で3割勾配に拡幅した。実堤防に近い土質にするため、堤体内の砂質土は近傍の土取り場から採取し、法面表層の粘性土は釧路川の特徴を反映させるため釧路川の高水敷から採取した。堤防天端はアスファルト舗装しており、これにより天端が不透水性となり、天端からの雨水の浸透が排除されることによって、被災時の状況を再現した。また基礎地盤表面には止水シートを敷設しており、堤体と止水シートの間には粘性土を敷設している。止水シートと粘性土は、被災箇所の地盤である水が浸透しにくい粘性土(不透水性)を再現するために敷設した。

b) 観測機器の設置

堤防の縦断方向に対し中央の横断面を主要観測測線A-A'断面とし、上下流の等間隔に補助観測測線C-C'断面を設定した(図-2)。A断面には水位計と土壌水分計を設置し、堤体内水位と体積含水率の計測を試験前から試験後まで常時行った。水位計の設置箇所は、川表と川裏法面のそれぞれ法肩、法面中央、法尻とし、土壌水分計は水位計の近くに法面から深度0.2m、0.4m、0.6m、0.8mの4箇所(法尻は2箇所)設置した(図-1)。C断面では補助観測として、それぞれ自記水位計と手ばかり水位計による堤体内水位の観測を行った。またA断面、C断面ともに、降雨浸透の影響による法面強度の変化を測定するため、水位計の近傍で定時(散水試験前、事前降雨後、試験開始7h後、14h後、21.3h後)にポータブルコーン貫入試験を



写真-2 左：造成時の様子 右：試験堤防の空撮

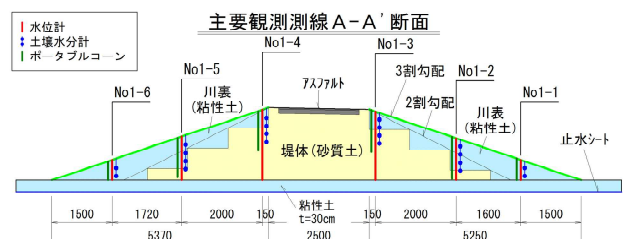


図-1 試験堤防横断面図(観測測線A-A')

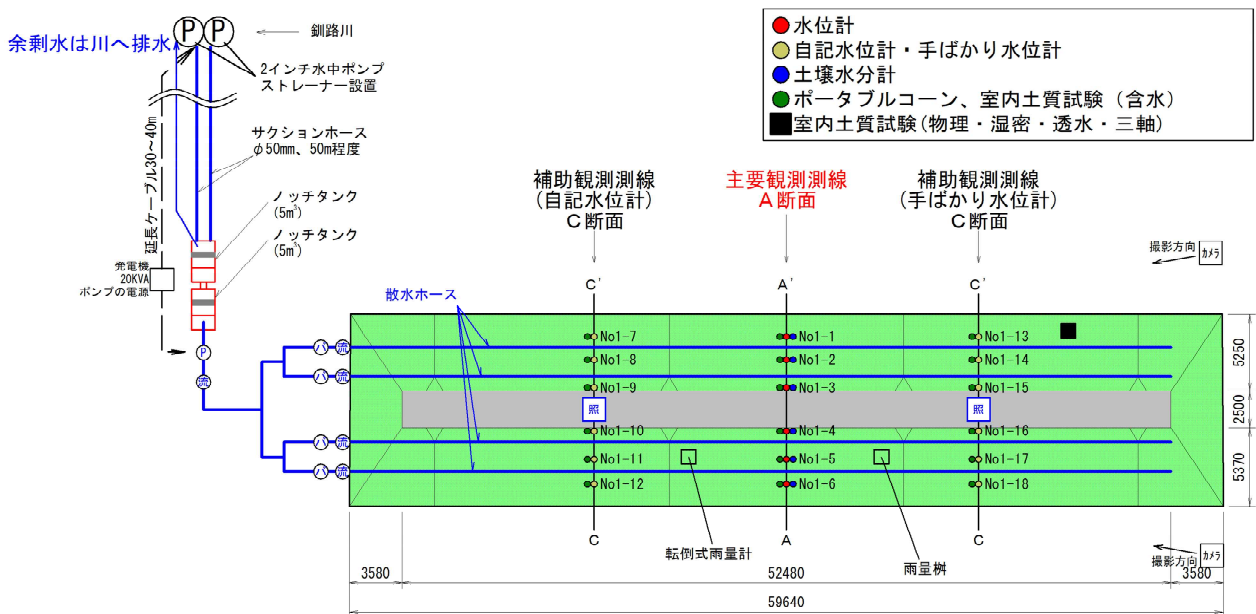


図-2 散水試験計画平面図

実施し、コーン強度を測定した。

c)散水方法とスケジュール

散水は、釧路川から水中ポンプを使いくみ上げた水をノッチタンクに貯留し、そこから給水ポンプを用いて川表、川裏それぞれに2本設置した農業用散水ホースに給水し、散水を行った(図-2、写真-3)。安定した給水を行うため、給水ポンプは圧力を一定に保てるポンプを使用した。試験で作用させた降雨については、堤防の散水面積から降雨量を満たすために必要な送水量を求めており、試験中は各散水ホースに設置したリアルタイム流量计及びバルブにより送水量を調節した。なお試験堤防には、転倒式雨量計、雨量柵を設置し、散水試験時の実測の降雨量についても確認した。

散水試験スケジュールを以下に示す(図-3)。

散水開始：2021年7月27日(火) 7:00

- ① 事前降雨：5mm/h×2h
- ② 計画降雨：10mm/h×21.3h

②計画降雨は、「河川堤防構造検討の手引き(改訂版)」²⁾に則り、降雨強度=10mm/h、降雨時間=釧路川の計画降雨量213mm÷降雨強度10mm/h=21.3hと設定した。

(2) 試験結果

a)浸潤面

堤体内の水位観測結果より得られた浸潤面を経過時間毎に示した(図-4)。主要観測測線A断面の浸潤面を青線で、補助観測測線C断面の浸潤面を水色、黄色線で示す。経過時間は、図-3 散水試験スケジュールに記載した①



写真-3 散水の様子

～⑦の各段階で整理しており、具体的には、①散水試験開始時、②事前降雨終了時、③計画降雨10mm/h×3h、④計画降雨10mm/h×7h、⑤計画降雨10mm/h×14h、⑥計画降雨終了時、⑦散水試験翌日(試験終了後約26時間)の結果を整理した。

①散水試験開始時には、堤体内にほとんど水が無く浸潤面が低いことが確認できる。②～③事前降雨終了時か

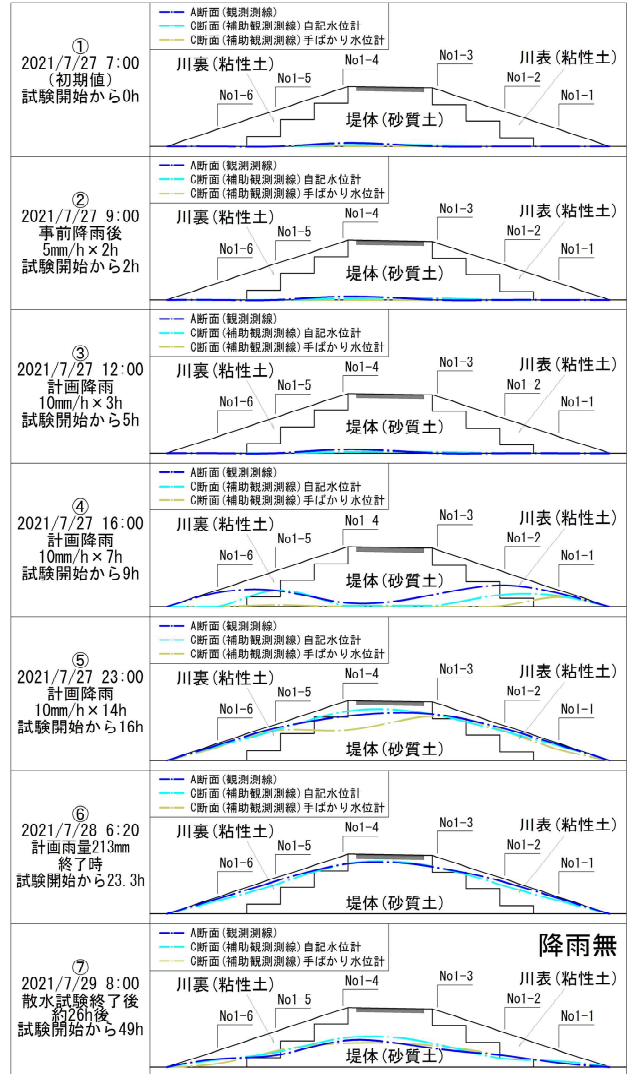


図-4 浸潤面変化図

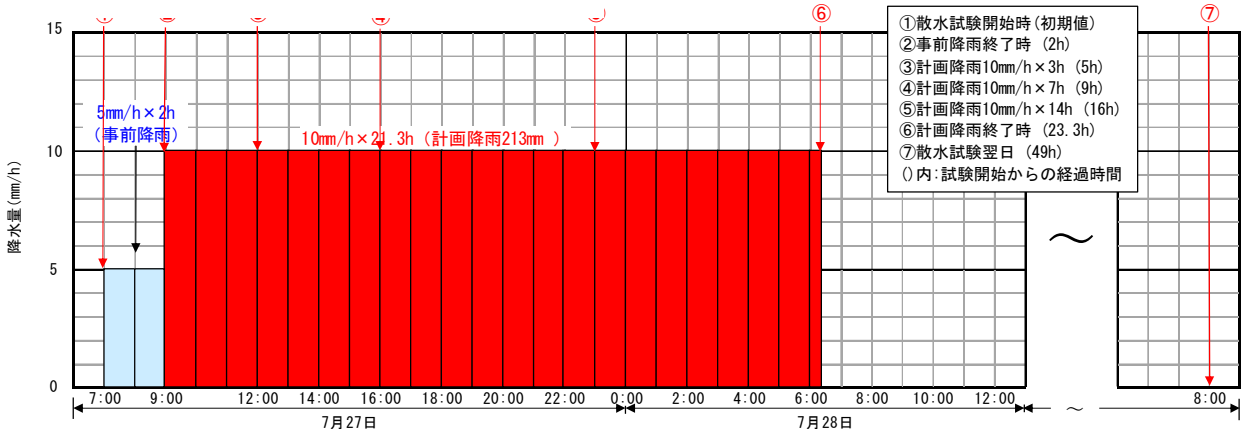


図-3 散水試験スケジュール

ら10mm/h×3hにかけての降雨では浸潤面に大きな変化はない。④10mm/h×7hの降雨で川表、川裏ともに法尻から浸潤面が上昇しているのが確認できた。一方で中央部では、依然として浸潤面は低い状態が続いている。⑤10mm/h×14hの降雨で、中央部でも浸潤面が堤体内の高い位置まで上昇していることが確認できる。⑥計画降雨量終了時では、大きな変化が見られず、高い位置の状態が継続していることが確認できた。⑦散水試験翌日には、法尻から浸潤面が低くなり、中央部の浸潤面が法尻に比べ、高くなっているのが確認できた。

b)体積含水率とコーン強度

土壌水分計により測定した体積含水率の結果と、ポータブルコーン貫入試験によるコーン強度の試験結果を以下に示す(図-5, 6)。体積含水率とコーン強度についても浸潤面と同様の経過時間の結果で整理している。

図-5 は、体積含水率の①散水試験開始時の初期値を0% (赤色) 、最大上昇時を100% (青色) として変化率をコンター図で整理したもので、赤→青にかけて体積含水率が上昇していることを示す。また、図中には水位観測による堤体内浸潤面(水色線)を併せて示す。

体積含水率の結果についてまとめると、①散水試験開始時は変化率の初期値のため堤体内は0% (赤色) である。②事前降雨による変化は確認できない。③10mm/h×3hの降雨では、川表、川裏ともに法面表層において体積含水率のわずかな上昇が確認できる。④10mm/h×7hの降雨では、川表、川裏ともに法尻から法尻に向かって変化率が高くなっており、特に法尻では、法面から基礎地盤に至るまで変化率が最大値を示している。法尻から体積含水率の最大上昇を迎える結果は、浸潤面上昇と同じ結果を示している。⑤10mm/h×14hの降雨では、川裏の法尻付近から基礎地盤にかけてを除き、ほとんどの箇所に変化率が最大値となった。⑥計画降雨終了時には、すべての箇所に変化率が最大値となり、堤体内の浸潤面が高い位置で定常の状態になったことを示している。⑦散水試験翌日には、堤体内の中心部から変化率が下がり、法尻から法尻にかけて水が排出されているのが確認できた。

図-6 は、地点ごとのポータブルコーン貫入試験によるコーン強度の試験結果である。貫入試験は、深度10cmごとに貫入抵抗値を計測し、原則として貫入不可となる深度まで連続して実施した。川表の法尻、中央、法尻、川裏の法尻、中央、法尻の順に、No1-1、No1-2、No1-3、No1-4、No1-5、No1-6とし、またグラフ中の赤線は、堤体内の粘性土と砂質土の境界線を示す。

コーン強度の結果についてまとめると、法尻の観測地点、No1-1、No1-6における②事前降雨終了時(橙色)と④10mm/h×7hの降雨(紫色)を比較すると、貫入抵抗値が減少し、貫入深度が増加しているのが確認できる。前述した浸潤面と体積含水率の結果から、④10mm/h×7hの降雨では法尻に水を多く含んでいると確認できているため、

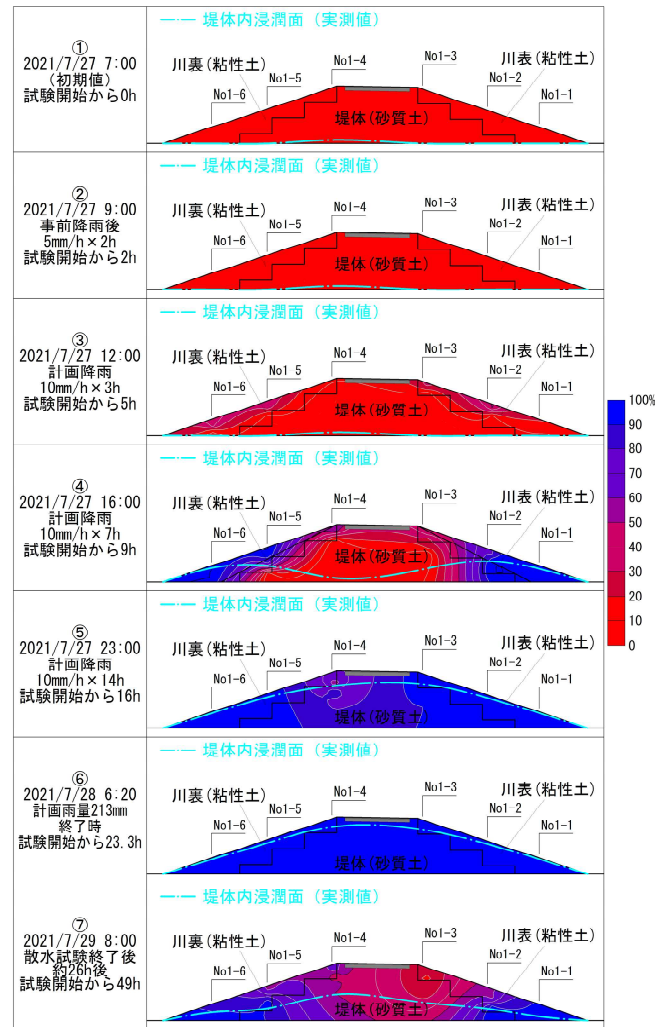


図-5 体積含水率コンター図

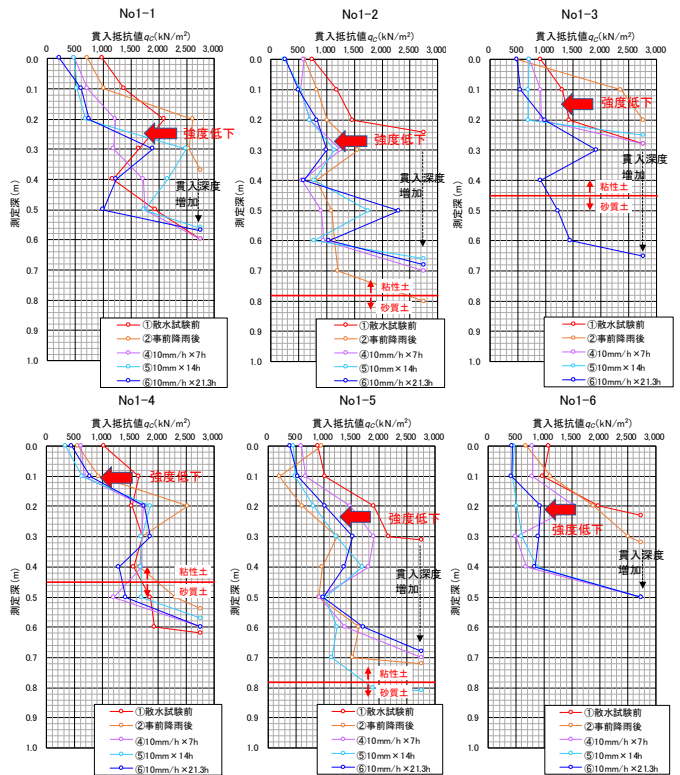


図-6 コーン強度の試験結果

表-1 貫入抵抗値の平均と貫入深度

	貫入抵抗値の平均 (kN/m ²)			貫入深度 (m)		
	① (散水試験前)	⑥ (10mm/h×21.3h)	増減	① (散水試験前)	⑥ (10mm/h×21.3h)	増減
No1-1	1712	1209	-503	0.60	0.57	-0.03
No1-2	1542	1164	-378	0.24	0.68	0.44
No1-3	1602	1286	-316	0.28	0.65	0.37
No1-4	1755	1471	-283	0.62	0.6	-0.02
No1-5	1750	1288	-461	0.31	0.68	0.37
No1-6	1708	1053	-654	0.23	0.5	0.27

※①-⑥にかけて、増加を赤、減少を青で示す



写真-4 試験後の堤防法面が高飽和状態の様子

これは水を含んだことで堤防の強度が低下したものと考えられる。また全ての観測地点で、①散水試験開始時と⑥計画降雨終了時について、貫入抵抗値の平均と貫入深度を比較した(表-1)。貫入抵抗値の平均の増減を確認すると、283~654kN/m²の範囲で全ての地点で減少しているのが確認できる。貫入深度の増減はNo1-2、3、5、6で0.27~0.44m増加し、No1-1、4で0.02~0.03m減少しているが、減少の幅が0.02~0.03と小さいことから、全体的には貫入深度は増加傾向であるといえる。以上のことから、散水試験前と散水試験後で、貫入抵抗値が減少し、貫入深度が増加していることから、降雨の浸透の影響により堤防の法面強度が低下しているのが確認できた。

c)試験堤防の変状

UAVを使用した空中写真測量による三次元測量を実施したが、試験前と試験後で試験堤防の変状は確認されなかった。しかしながら、試験後に試験堤防法面を観察すると高飽和状態であることが確認できた(写真-4)。

4. 散水試験結果を踏まえた再現解析

散水試験時の土質試験結果と散水試験の観測結果をもとに試験堤防における再現解析を行い、拡幅土(粘性土)の地盤定数の設定を行った(表-2)。

(1) 散水試験結果から求めた地盤定数

a)単位体積重量 γ_t

単位体積重量 γ_t については、散水試験後に行った試験堤防の湿潤密度試験結果より求めた。

表-2 拡幅土(粘性土)の地盤定数

土質	単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	粘着力 C (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)	透水係数 k (m/sec)
新規盛土	16.15	1.20	16.35	1.27×10^{-5}

<設定方法>

- ・単位体積重量 γ_t : 試験堤防の湿潤密度試験値(散水後)
- ・粘着力C: H30の散水試験の観測結果も踏まえ、堤防被災を再現する逆解析から試算
- ・内部摩擦角 ϕ : 試験堤防の三軸圧縮試験値(散水後)
- ・透水係数k: 試験堤防の散水試験水位を再現可能な透水係数

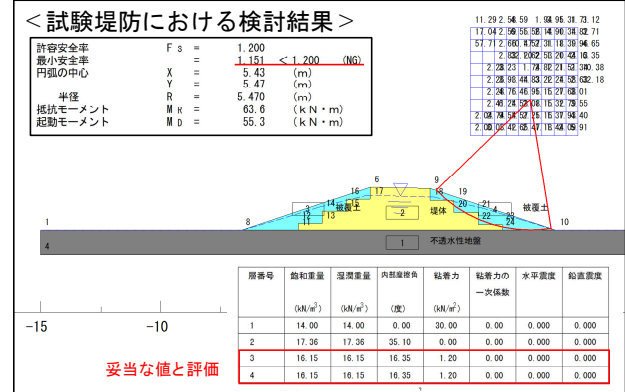


図-7 安定計算結果図

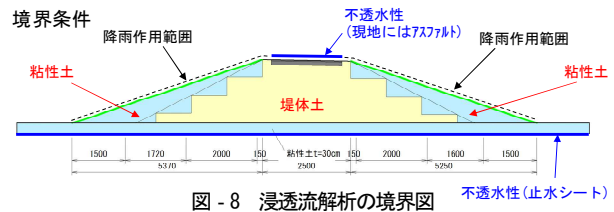


図-8 浸透流解析の境界図

b)粘着力C

粘着力Cについては、低土被り圧の場合、三軸圧縮試験結果で得られる粘着力Cが過大に評価される可能性があるため、低土被り圧での粘着力Cについて検討した委員会のC=1.2kN/m²の値を用いるものとした。C=1.2kN/m²と設定し、円弧すべり解析により安定性を検討した結果(図-7)、安全率Fs=1.151となった。散水試験後の法面は高飽和状態で、すべり破壊は発生しないが安全率は低下していると考えられるため、C=1.2kN/m²は妥当な値と考える。

c)内部摩擦角 ϕ

内部摩擦角 ϕ については、散水試験後に行った試験堤防の三軸圧縮試験結果より求めた。

(2) 散水試験結果の再現解析と透水係数kについて

散水試験時と同様の降雨を作用させた浸透流解析による再現解析を実施し、実測水位と解析水位との比較からその再現性の評価を行った。散水試験の再現解析では、現地試験と同様に天端アスファルトと基礎地盤の止水シートを不透水境界に設定し、堤防法面から降雨が浸透するように条件づけた(図-8)。再現解析については、事前の調査で得られた複数の透水係数から、透水係数を任意に変更(1/1000~1000倍程度)していき、堤体中央の水位の上昇するタイミングや、水位の最大値、水位の低

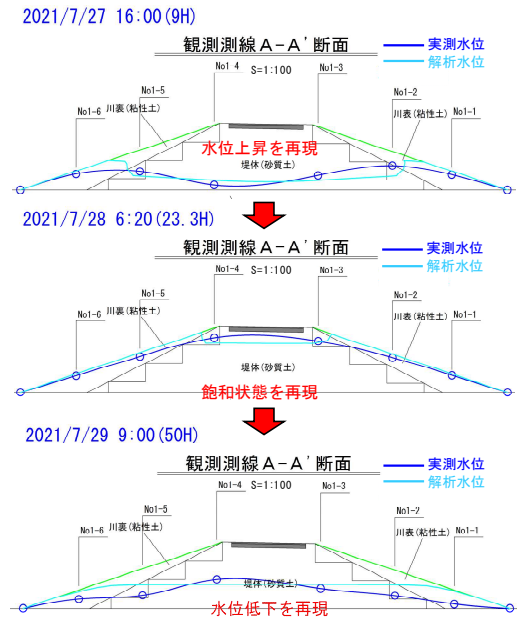
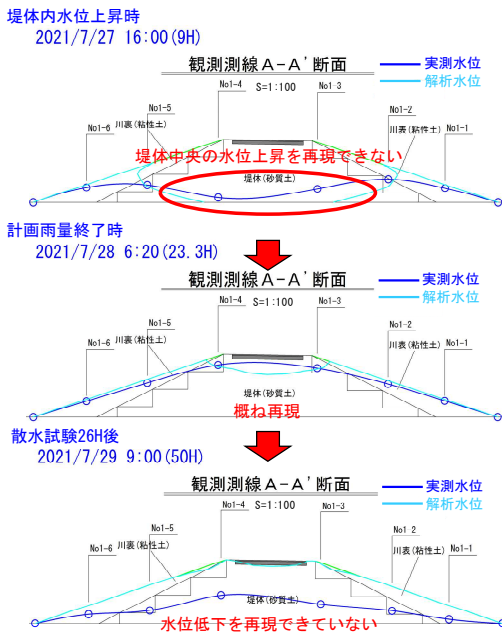


図 - 9 散水試験の再現解析結果

下状況等が再現可能となるようにフィッティング解析を行った。

再現解析結果を図-9に示す。図-9 左図の中央、計画降雨終了時の堤体内の水位は、実測水位(青線)と解析水位(水色線)が概ね一致し再現できているが、上段の堤体内水位上昇時では、堤体中央の水位上昇を再現できず、また下段の散水試験後でも解析水位が下がらず、再現できていないのが確認できる。その後、透水係数を様々な値に変更し、再現計算を行ったところ、最も再現性が高いと評価した結果が図-9 右図の試験堤防の造成時に調査して得られた透水係数、堤体(砂質土)= $7.22 \times 10^{-5}(\text{m/s})$ 、拡幅土(粘性土)= $1.27 \times 10^{-5}(\text{m/s})$ に設定した際の再現解析結果である。上段の試験開始から9h後を見ると、実測水位と解析水位がともに法尻から水位が上昇し始めているのが確認できる。計画降雨終了時には、実測、解析ともに堤体内水位が高い状態となり、下段の試験終了後約26h後の水位の低下についても再現できていることが確認できる。よって実測水位と解析水位の挙動がおおむね一致し、散水試験の再現が可能であることから、試験堤防の造成時に調査して得られた透水係数が妥当な値と考え、拡幅土(粘性土)の透水係数 $k=1.27 \times 10^{-5}(\text{m/s})$ と設定した。

5. まとめ

散水試験の結果と、解析による散水試験の再現解析結果について、以下にまとめる。

- 散水試験により、堤体内の降雨浸透挙動を確認することができた。
- 降雨の浸透により堤体内の含水率が上昇することで、法面強度が低下することが確認できた。
- 法面勾配3割の試験堤防に対し、計画降雨213mm作用させても、法すべり等の堤防の変状は見られなかったが、堤防法面が高飽和状態となるのが確認された。
- 散水試験後の土質試験等の検討により、単位体積重量 γ_t 、粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ を求めることができた。
- 浸透流解析による散水試験の再現解析では、実測水位の挙動を再現することを可能にし、透水係数 k を求めることができた。

謝辞： 釧路川の堤防強化に関する検討では、九州工業大学 川尻峻三准教授に散水試験から再現解析まで、コロナ禍や距離的な制約が多い中にも関わらず、多大なるご助言を頂いた。加えて関わったすべての方に深く感謝し、ここに御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 釧路川堤防技術検討委員会：釧路川堤防技術検討委員会報告書（平成31年3月）
- 2) 財団法人 国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き（改訂版）（平成24年2月）