

釧路川流域標茶における平成 28 年北海道豪雨の降雨 及び河川水位履歴を再現した実物大堤防実験

Full-scale test levee experiment reproducing the rainfall and river water level history of the 2016
Hokkaido heavy rain in Shibecha district, Kushiro River basin

(第 60 回地盤工学会北海道支部技術報告会 北海道支部賞受賞論文の再構成)

共通事業本部 地質部 不動 充
共通事業本部 地質部 鈴木 智之

釧路川では、平成 28 年 8 月に 3 つの台風上陸に伴い、各観測所で最多雨量を観測する等の記録的な降雨が発生し、釧路川左岸 45.8~46.0k の川表で堤防法面すべり等の河川被害が発生した。本稿は、被災時における堤防法面への降雨の浸透挙動や堤体内水位を把握し、被災原因を考察する目的で実物大堤防実験を実施したものである。

1 はじめに

釧路川では、平成 28 年 8 月に 3 つの台風上陸に伴い、各観測所で最多雨量を観測する等の記録的な降雨が発生した。この記録的な降雨により、釧路川左岸 45.8~46.0k の川表で堤防法面すべり等の河川被害が発生した(図-1)。被災直後、開削調査や室内土質試験等の調査が実施され、堤体土質が火山灰質であることや基礎地盤に粘性土(不透水性)が堆積することが確認された。その後、被災要因の検証や復旧工法が検討され、同年に復旧されている。¹⁾被災時の釧路川の河川水位は、最高でも川表側の法尻程度の高さであったにも関わらず法面すべりが発生しており、河川水の堤体への浸透に起因した被災とは考えにくい状況であった。また、被災直前には 10mm/h を超える降雨が続いていたことから、降雨の浸透によって堤防法面が湿潤状態となり被災した可能性が考えられた。そこで、堤防法面への降雨の浸透挙動、堤体内水位(浸潤面)を把握する目的で、釧路川の現地で実物大試験堤防による散水及び湛水試験を実施した。



図-1(a) 堤防法面すべり(平成 28 年 8 月)



図-1(b) 堤防法面すべり(平成 28 年 8 月)

2 実験概要

実験は、釧路川左岸 44.2k 付近の高水敷に実物大の試験堤防(h=1.75m)を施工して実施した。試験堤防は、釧路川堤防及び被災時の実現象を再現できるようにモデル化した。実験で与える降雨は、平成 28 年度の被災時の降雨を再現し、降雨が法面へ与える影響を把握した後、外水位として計画高水位(HWL)、超過洪水(試験堤防満杯)を作用させた。試験堤防は枠堤状(図-2)とし、湛水試験時には枠堤内側に湛水して外水位として作用させた。以下、本稿では枠堤内側を川表、枠堤外側を川裏と示す。

また、試験堤防には、堤体内水位を計測する目的で水位計、堤体への降雨の浸透挙動を把握する目的で土壌水分計を設置し、実験中に降雨の浸透挙動や浸潤面を観測した。試験の各段階では法面に対してポータブルコーン貫入試験を実施し、法面強度と降雨の浸透挙動の関係性について整理した。

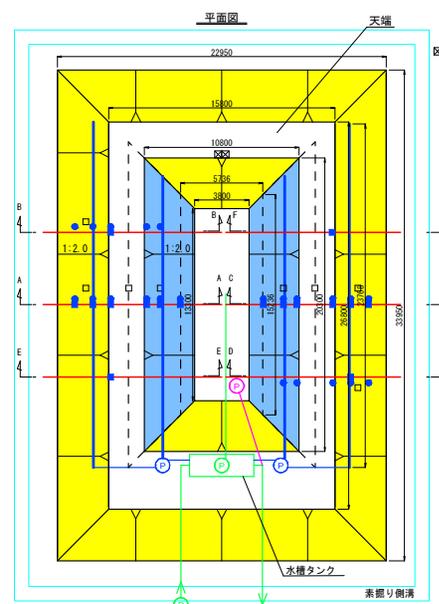


図-2(a) 実物大試験堤防平面図

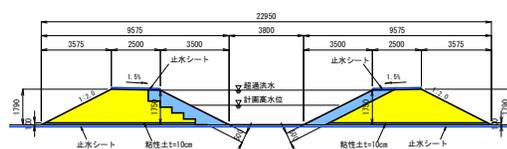


図-2(b) 実物大試験堤防標準断面図

3 実験方法

実験の方法及び試験堤防のモデル化の詳細を以下に示す。

3.1 試験堤防の土質の選定

試験堤防の土質は、釧路川の被災箇所を再現することを目的として、堤体は砂質土で構成し、川表法面には粘性土を被覆した(図-3)。盛土材料の土質は、釧路川堤防の被災箇所で使用されていた盛土材料と類似した粒度分布のものを使用するものとし、堤体には火山灰質礫まじり粘性土質砂(図-4)、川表法面には砂質火山灰質粘性土(図-5)を用いた。盛土材料は、堤体については周辺の土取場、川表粘性土については、釧路川堤防左岸 44.0k 高水敷よりそれぞれ採取した(表-1)。

表-1 盛土材料の物性値

盛土材料	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	含水比 Wn (%)	飽和度 Sr (%)	透水係数 K (m/s)
砂質土 (堤体)	1.781	17.3	63.6	1.08×10^{-4}
粘性土 (川表)	1.553	30.8	67.9	4.77×10^{-7}

3.2 試験堤防の形状, 境界条件, 観測計器の配置 (前出図-3)

試験堤防の法面勾配は平成 28 年度に被災した箇所と同様に 2 割勾配とした。

境界条件は、今回の実験が法面への降雨の浸透や法面からの外水位の浸透の把握等を目的としており、かつ、被災時の基礎地盤が粘性土(不透水性)であったことから、基礎地盤表面には粘性土と止水シートを敷設した。また、被災箇所の堤防天端には、アスファルト舗装が施工されていることを考慮して、試験堤防天端に止水シートを敷設した。これにより、堤体内水位の基礎地盤への浸透、堤防天端からの雨水の浸透などの影響を排除することができ、不透水性を確保した。観測計器は、水位計と土壌水分計を設置し、実験中の堤体内水位と体積含水率を把握した。水位計の設置位置は、川表と川裏法面のそれぞれの法肩、法面中央、法尻とし、各水位計の近傍に土壌水分計(深度 0.20m, 0.40m, 0.60m, 0.80m)を設置した。水位計や土壌水分計の観測は、試験前～試験終了の翌日まで実施した。

3.3 降雨, 外水位条件

降雨は散水孔の空いた農業用散水ホースを川表、川裏法面にそれぞれ設置し、平面的な散水を行った。散水は、試験堤防天端に設置された水槽タンクからポンプで農業用散水ホースへ

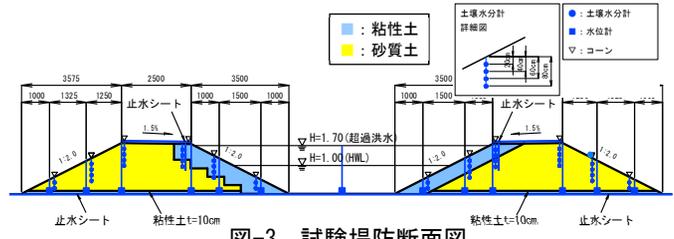


図-3 試験堤防断面図

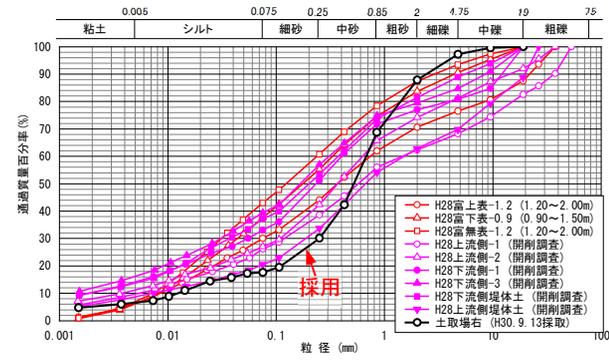


図-4 粒径加積曲線 (堤体)

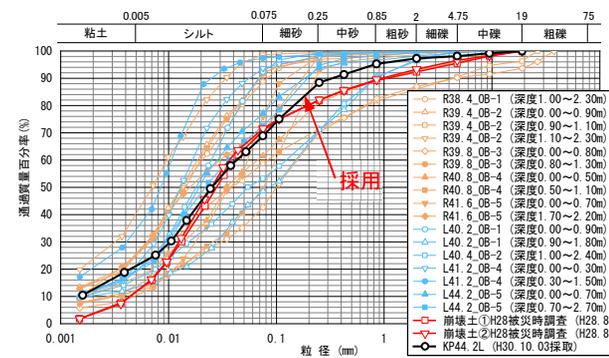


図-5 粒径加積曲線 (川表粘性土)

給水して、設置した流量計により送水量を調整することで被災時の降雨量を再現した(図-6)。降雨は、被災当時(図-7)を再現するために事前降雨(2mm/h×5時間)、本降雨(10mm/h×5時間、5mm/h×5時間)を与える計画とした。

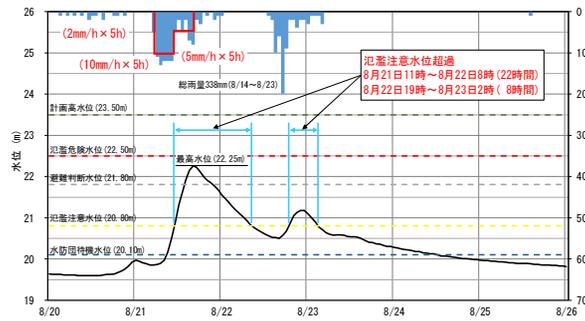


図-7 被災時の降雨と河川水位¹⁾

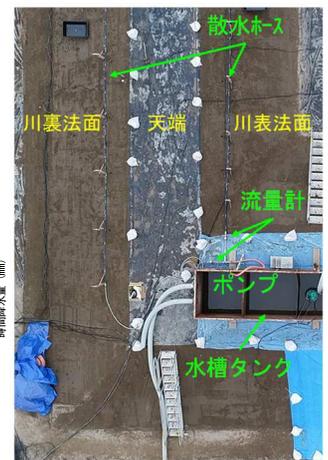


図-6 試験堤防平面図

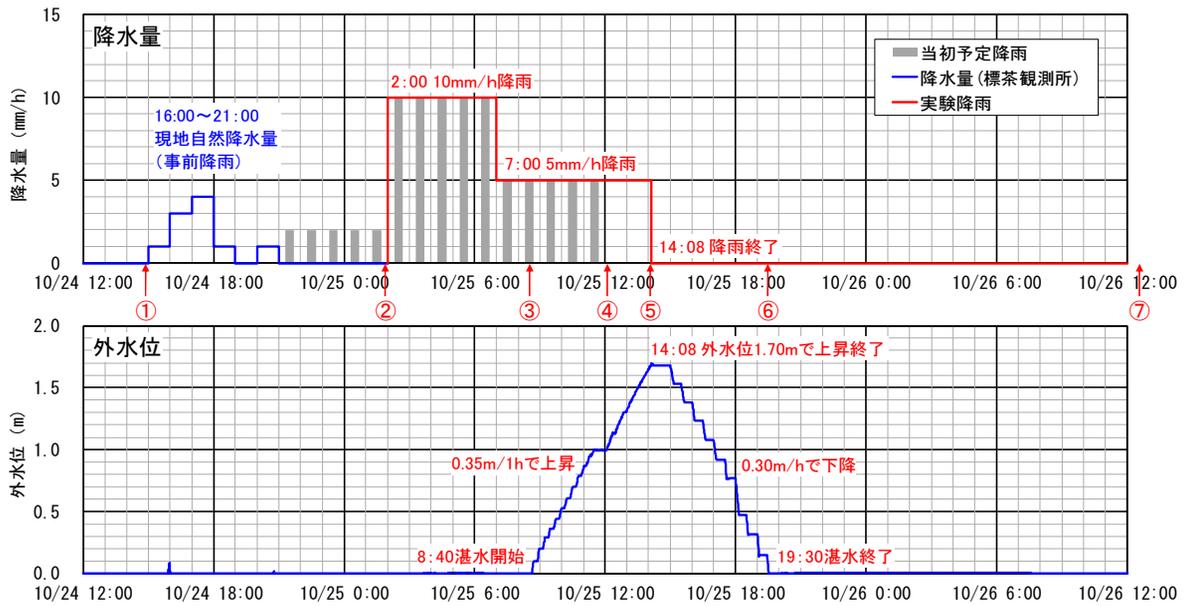


図-8 現地実験スケジュール

外水位については、計画高水位 (HWL) と超過洪水 (試験堤防満杯) を作用させるものと計画した。外水位の湛水方法は、試験堤防天端に設置された水槽タンクに鉤路川から貯水し、ポンプを用いて枠堤内に注水した。外水の排水は、枠堤内に設置した排水ポンプを使用して行った。枠堤内の中央には標尺を設置し、常時外水位を把握できるようにした。

4 現地実験の結果

前述の方法で実施した実物大堤防実験結果を以下に示す。

4.1 実験スケジュール (図-8)

実験は、事前降雨を与えてから本降雨を与え、その後外水位を作用させるスケジュールであったが、実際の現地では予定していた事前降雨に相当する自然の雨が降ったため、これを事前降雨の代替とし、その後は計画通りのスケジュールで実験を実施した。

水位計や土壌水分計については、実験開始前から観測を開始しており、実験終了翌日まで観測を続けた。

ポータブルコーン貫入試験は、各法面の観測計器埋設箇所付近で各試験段階で実施した (図-8 中①~③)。

4.2 堤体内浸潤面 (図-9)

堤体内浸潤面は図-8 中①~⑦の各試験段階で整理した。観測開始時には、試験堤防施工前後に降雨が確認されていないにもかかわらず、堤体内に浸潤面が確認された (図-9①)。盛土底面には止水シートが敷設されており、基礎地盤からの水分供給も無いことから、盛土材の含水により浸潤面が確認されたと考えられた。

観測で得られた浸潤面は、10mm/h 降雨によって川裏側法尻付近で上昇が確認されており (図-9③)、その後は湛水試験で外水位が上昇することで堤体内の浸潤面が上昇 (図-9④~⑥)、外水位が低下後も浸潤面が形成されていることが確認された (図-9⑦)。

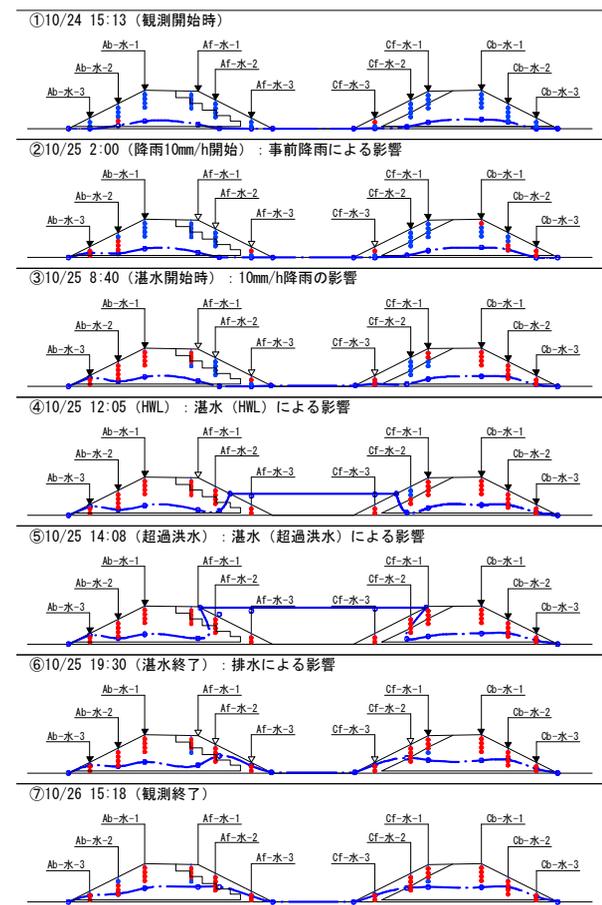


図-9 堤体内浸潤面の経時変化

4.3 土壌水分計(図-10)

土壌水分計より得られた体積含水率の変化率コンター図を整理した。変化率は、体積含水率の初期値を0%、最大上昇時を100%として、各試験段階時の(体積含水率の値)/(最大値)で計算した。体積含水率コンター図は初期値から体積含水率が上昇するにしたがって赤→青に変化し、濃い青は水分をより多く含むことを示す。図-10には水位観測結果による浸潤面(図中水色)を併せて示す。実験の各段階における浸潤面と体積含水率の変化について、以下に概要を示す。

- ①観測開始時には、試験堤防施工前後で降雨が観測されていないにもかかわらず、堤体内水位が確認された。体積含水率は初期値である。
- ②事前降雨による影響では、川裏法面では少しずつ上昇する傾向が見られた。この時点では堤体内水位の大きな変化は認められない。
- ③10mm/h 降雨の影響では、体積含水率に大きな変化は現れないが、川裏法尻付近の堤体内水位が上昇したことが確認された。
- ④湛水(HWL)による影響では、川表法面でも体積含水率の上昇が確認され、浸潤面がやや上昇したことが確認された。
- ⑤-1 湛水(超過洪水)による影響では、川表の粘性土裏の体積含水率は大きく上昇はしていない。浸潤面の上昇が確認された。
- ⑤-2 湛水(超過洪水 1 時間程度経過後)による影響では堤体に水分が浸透して、全体に体積含水率が上昇していることが確認された。
- ⑥排水による影響では、湛水の排水後も堤体内に浸潤面が確認されており、川表法面では体積含水率が高い状態であることが確認された。
- ⑦観測終了時では、排水から 19 時間程度経過した後も体積含水率が高く、排水後も水位が上昇したことが確認された。

4.4 降雨の影響によるコーン強度と体積含水率の関係

降雨の影響による体積含水率とコーン強度の関係について整理した。ここでは、A断面川表法面(図-11Af-1~Af-3)と川裏法面(次頁図-12Ab-1~Ab-3)の結果を示す。体積含水率の経時変化は深度0.20mの各調査位置の観測値を用いた。

川表法面の粘性土の体積含水率は、前述したように降雨の影響で徐々に増加する傾向が見られ、コーン貫入抵抗値は実験前400kN/m²程度であったのに対し、①観測開始~②事前降雨後の浸透初期の段階で111~266kN/m²程度、急激に低下することが確認された。③10mm/h降雨後にも多少の強度

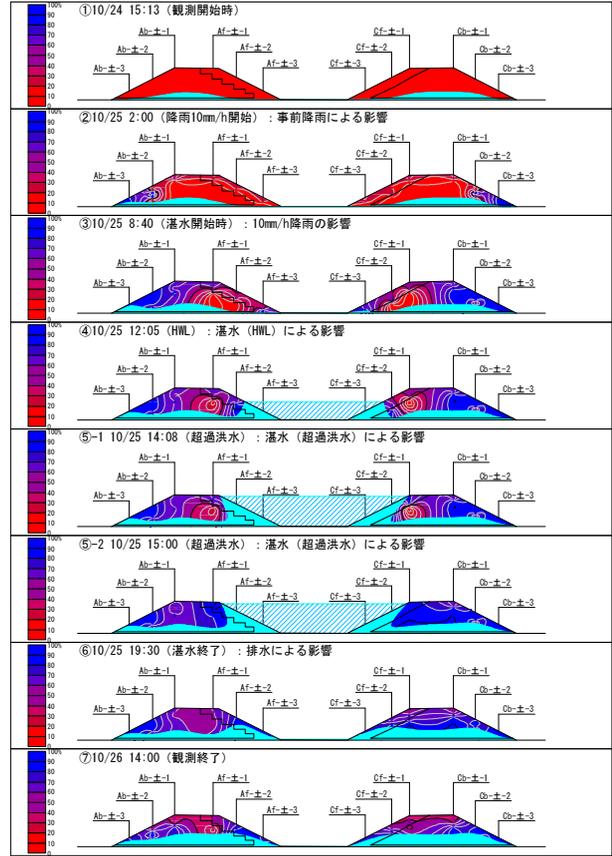


図-10 体積含水率変化率コンター図の経時変化

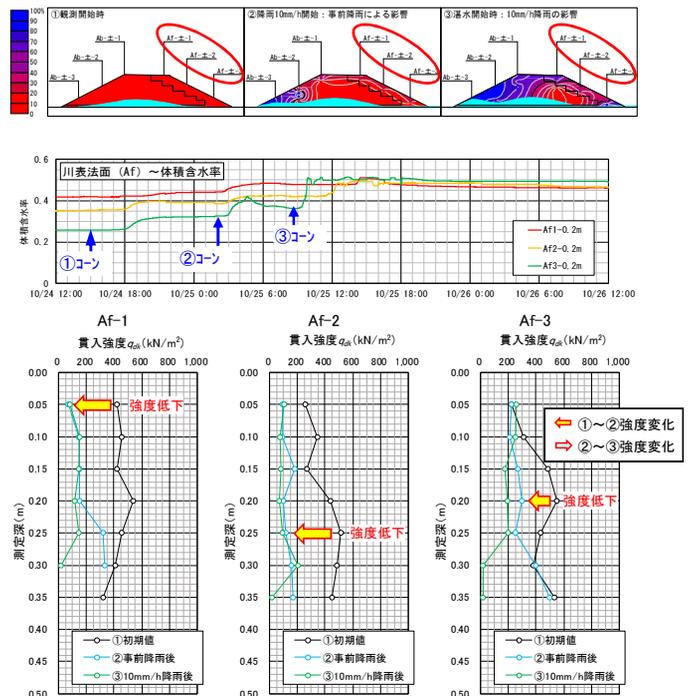


図-11 体積含水率とコーン貫入抵抗値の関係(川表法面)

低下が確認されたが、事前降雨による強度低下よりも下がり幅は小さかった。このことから、川表の粘性土は、自然状態から水分を少し含んだ段階で強度が著しく低下することが確認された。

一方の砂質土で構成されている川裏法面(図-12)は、事前降雨の段階で法尻(Ab-3)の体積含水率が大きく上昇し、降雨によってコーン貫入抵抗値が76.2~655.5kN/m²程度低下することが確認された。その後、法面強度が回復している傾向も見られた。

4.5 法面変状の観察

実験中には、作用させた降雨及び湛水によって変状が確認された。降雨による変状については、川表法尻(図-13)、川裏法尻の泥濁化(図-14)が確認され、湛水後には川表法面で縦断方向のクラック(次頁図-17)が確認された。

(1) 降雨中の法尻の変状

10mm/h 降雨によって川表法尻(粘性土)、川裏法尻(砂質土)で一部泥濁化による変状が確認された(図-13~14)。観測結果(図-15)より、10mm/h 降雨による影響では、川表法尻には浸潤面が確認されておらず、川裏法尻に浸潤面が確認されている。体積含水率については、川表法尻、川裏法尻の両方で上昇していることが確認された。今回の実験のように基礎地盤が不透水層である場合、法尻が先行的に飽和状態となり、堤防の弱点になる可能性があることを示す結果となった。

(2) 湛水後の川表法面の変状

湛水後には、川表法面で縦断方向のクラックが確認(次頁図-17)されており、観測結果(図-16)より外水位が低下した状態でも堤体内に浸潤面が形成され、川表法面で体積含水率が高い状態であることが確認された。このことから、外水位が無い状態でも堤体内に浸潤面が形成されれば法面変状が発生する可能性があることを示す結果となった。

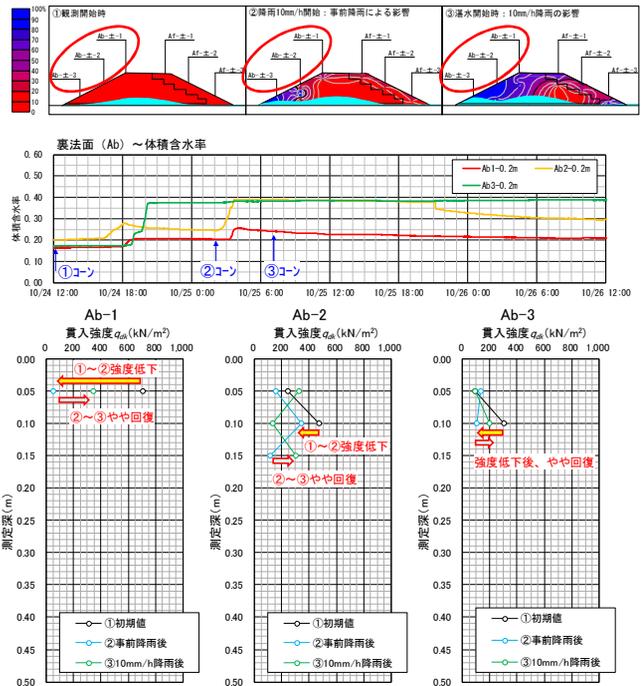


図-12 体積含水率とコーン貫入抵抗値の関係(川裏法面)



図-13(a) 川表法尻変状状況



図-14(a) 川裏法尻変状状況 (1)



図-13(b) 川表法尻変状状況



図-14(b) 川裏法尻変状状況 (2)

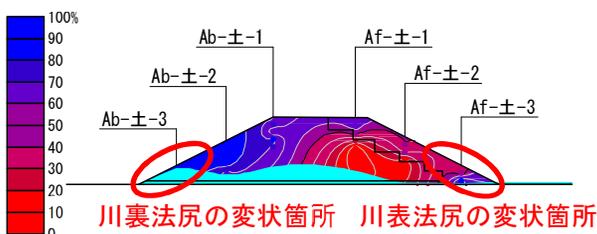


図-15 川裏法尻変状時の体積含水率コンター図

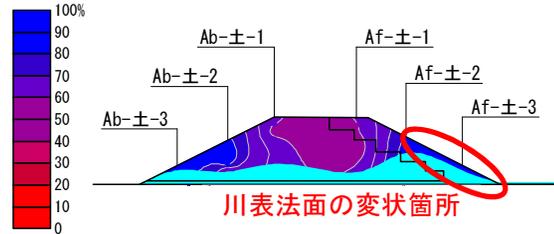


図-16 川表法面変状時の体積含水率コンター図

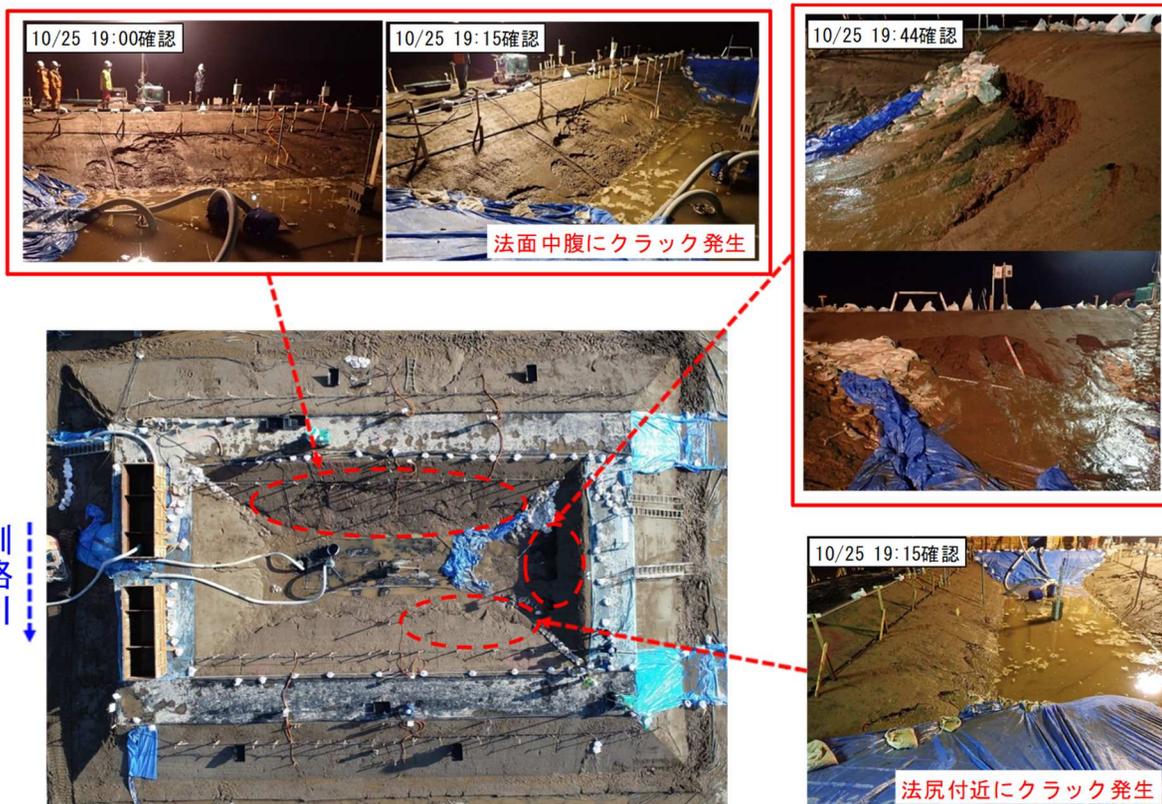


図-17 川表法面変状状況

5 まとめ

今回の実験は、川表法面の粘性土は降雨のみで体積含水率が上昇、コーン貫入抵抗値が著しく低下し、法尻の変状が確認された。堤体内の浸潤面は、湛水終了後も水位が上昇し続け、川表法面の変状要因になっていると考えられる。一方の表面が砂質土となる川裏法面は、体積含水率の上昇によるコーン貫入抵抗値の低減効果があることも確認された。

平成 28 年 8 月の被災は、河川水位が最高でも川表側の法尻程度の高さであったのにも関わらず、法面すべりが発生した。

今回の実験結果から、平成 28 年 8 月の被災は、法肩や法面の火山灰質の粘性土の部分に雨水が直接浸透して飽和度が上昇し、表層の強度低下を起こしたことが被災要因であると考えられる。また、火山灰質の砂質土の部分についても雨水の浸透による強度低下が発生することとなり、特に基礎地盤が不透水性の場合、法尻の被災の危険性がより高くなると考えられた(図-18)。

今回の実験を含めた平成 28 年の堤防被災の再現・検討結果を踏まえ、近年法面すべりが発生している標茶市街下流区間について堤防強化対策(緩傾斜化)が事業計画として位置づけられることとなった。

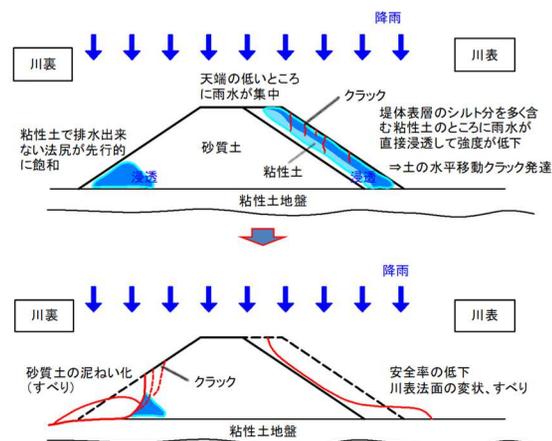


図-18 釧路川堤防の法面被災要因概要図

最後に今回の実物大堤防模型実験の実施にあたり、多くのご助言を頂いた関係者の方々、試験堤防を施工するにあたりご協力いただいた施工会社の方々にこの場を借りてお礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) 釧路川堤防調査検討会:平成 28 年 8 月の大雨により発生した釧路川の堤防法面被災に係る報告書(案), 平成 28 年 10 月
- 2) 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