

2016年北海道豪雨で被災した堤体の性能評価のための
水理・力学的動態観測および地盤調査

北見工業大学工学部 地球環境工学科 川 尻 峻 三
北海道大学大学院 工学研究院 西 村 聡
鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 松 丸 貴 樹

2016年北海道豪雨で被災した堤体の性能評価のための 水理・力学的動態観測および地盤調査

Investigation of hydro-mechanical conditions in river dykes
in the aftermath of the 2016 flooding in Hokkaido

川尻 峻三¹・西村 聡²・松丸 貴樹³

Shunzo KAWAJIRI, Satoshi NISHIMURA and Takaki MATSUMARU

¹ 北見工業大学 地球環境工学科 助教

² 北海道大学大学院 工学研究院 准教授

³ 鉄道総合技術研究所構造物技術研究部 主任研究員

要 旨

2016年北海道豪雨災害では常呂川において既往最大の出水となり、堤体の越水侵食や堤内地盤での噴砂が発生した。本研究では、被災当時の堤体内の水理状態の把握と性能を総合的に評価するため、越水侵食および噴砂の発生箇所近傍の堤体断面において、各種計測機器を埋設して長期的な動態観測を行った。また、定期的に表面波探査を実施し、堤体内の力学挙動の間接的な把握を試みた。さらに、動態観測や各種地盤調査の結果を利用して、観測断面での非定常不飽和浸透流解析モデルおよび三相系多孔質体理論に基づく浸透-変形連成解析モデルを作成し、出水当時の降雨データおよび河川水位を入力データとすることで、被災当時の堤体内の水理状態の把握を試みた。動態観測の結果から、今回の観測期間内での水分量や水位の上昇は降雨履歴と良く整合した。また、凍結融解および融雪時にも堤体内の水分量は大きく上昇した。表面波探査によって取得した堤体内の V_s 分布は、堤体内の水分量を反映した結果となっており、表面波探査によって堤体内の剛性変化が把握可能であった。越流が発生した堤体に対する数値解析結果から、越流が発生した際には堤体の飽和化が阻害されることで、裏のり面の浸潤化が遅延したことが当該断面の決壊への抵抗に寄与した可能性が示唆された。また、噴砂発生箇所での解析結果から、河川水位の上昇時には地上に噴出した噴砂と同様の土質で構成した堤体支持地盤の砂質土層には浸透流が発生し、間隙水圧および空気圧が上昇し、裏のり尻近傍では土の平均骨格応力を減少する傾向にあった。

《キーワード：河川堤防；越流；噴砂；降水浸透；間隙水圧；間隙空気圧；動態観測》

1. はじめに

2016年北海道豪雨災害において常呂川では既往最大の出水となり、これによって破堤・越水侵食や堤内地盤では空気湧出・噴砂が発生した¹⁾。越水による侵食が発生した箇所では、2016年8月20日深夜から21日未明にかけて越流が起こった。これに先立ち、8月20日には越流箇所近傍の雨量観測所では70mm程度の日降雨量が観測されており、外水位の上昇と合わせて、堤防内には相当量の水が浸入し、堤体は湿潤状態にあったと考えられる。しかし、裏のり面の部分的な浸食崩壊は見られたものの、堤防全体は健全性を保ち破堤を免れた。また、空気湧出や噴砂の発生箇所についても、降雨浸透に伴い堤体内の水分量は増加した状態にあったと予想されるが、堤体天端や裏のり面などには目立った変状は発生しておらず、噴砂は発生したものの堤体の健全性を保っていた。このメカニズムを解明するためには、越水や噴砂発生当時の堤防内の水理状態を正しく理解する必要がある。特に、事前降雨と外水位上昇により裏のり面の浸潤化や堤体支持地盤の不安定化がどこまで進んでいたかという点が、全面的な破堤に至らなかった原因を追及するに当たり論点となり得る。しかし、出水当時の堤体内の様子を直接知る方法はないため、降雨履歴や外水位変化の記録に基づいた解析により再現・推察を行うしか手段はない。一方で、この解析の妥当性を担保するためには、現在および今後の水理状態を観測し、解析手法がそれを正しく再現することを確認する必要がある。

以上のような背景から本研究では、2016年北海道豪雨の際に常呂川で越流および噴砂による被災が発生した堤体近傍に各種計測機器を埋設し、堤体内の水分量、地中温度、堤体内水位について2016年10月から動態観測を行った。さらに堤体内の性状変化を把握するための地盤調査として表面波探査を定期的実施した。また、2017年度からは越流被害が発生した堤体において、より詳細に水理状態を把握するために間隙水圧観測を開始した。これらの動態観測結果を基に観測期間中の水理状態および2016年8月の出水時の堤体およびその周辺地盤の水理状態を把握するために不飽和浸透流解析を行った。なお、噴砂の発生箇所については、地盤内の間隙空気挙動についても考慮可能な三相系多孔質体理論を用いた土/水/空気連成解析を行うことで噴砂発生時の力学挙動の変化について考察を行った。一方、間隙水圧計測については、北見という特に厳しい寒冷地での間隙水圧計測の経験がなかったことや、不飽和特性試験装置の作製と試験実施に時間を要したこと、さらに堤体でのボーリング調査数が少なかったことなどの理由から、越流および噴砂発生箇所での再現検証はまだ実施途中であるため、ここまでの成果から得られた暫定的な知見について本文で報告する。なお、本研究での動態観測は、筆頭著者である研究代表者が災害直後の共同研究や他の助成金を受けて2016年に設置したものを随時、維持・更新することで実施した。

2. 観測および解析対象とした堤体の2016年北海道豪雨における被災状況

(1) KP18.6付近における越水侵食¹⁾

図1は越水侵食の発生箇所周辺の航空写真(図1左)および治水地形分類図(図1右)を示したものである。なお、図中には後述する動態観測箇所についても併記している。被災箇所は河道湾曲部の外岸に位置している。治水地形分類図からは、被災箇所周辺では旧河道の痕跡は確認できない。図2は2016年北海道豪雨での被災状況を示している。当該箇所では2016年8月20日深夜から21日未明にかけて越流が起こった。これによって太茶苗観測所の建屋およびCCTVカメラの基礎を設置する際に堤体本体に腹付したと考えられる堤体の裏のり面において、浸食崩壊が発生していた。のり面浸食の崩壊幅は最大で約3m、崩壊深は1m程度であった。浸食崩壊は、のり面に設置されているコンクリート製の階段付近やCCTVカメラの基礎コンクリート付近など、構造物と堤体の境界周辺に集中していた。なお、観測断面とした箇所では構造物などは設置されていない植生のり面であり、顕著な流水跡が確認できたものの、のり面浸食は発生していなかった。また、記録的な降雨による相当量の浸透水によって堤体内は湿潤状

態にあったと予想されるが、のり面には目立った変状などは無く、浸透崩壊が発生している状況は確認できなかった。

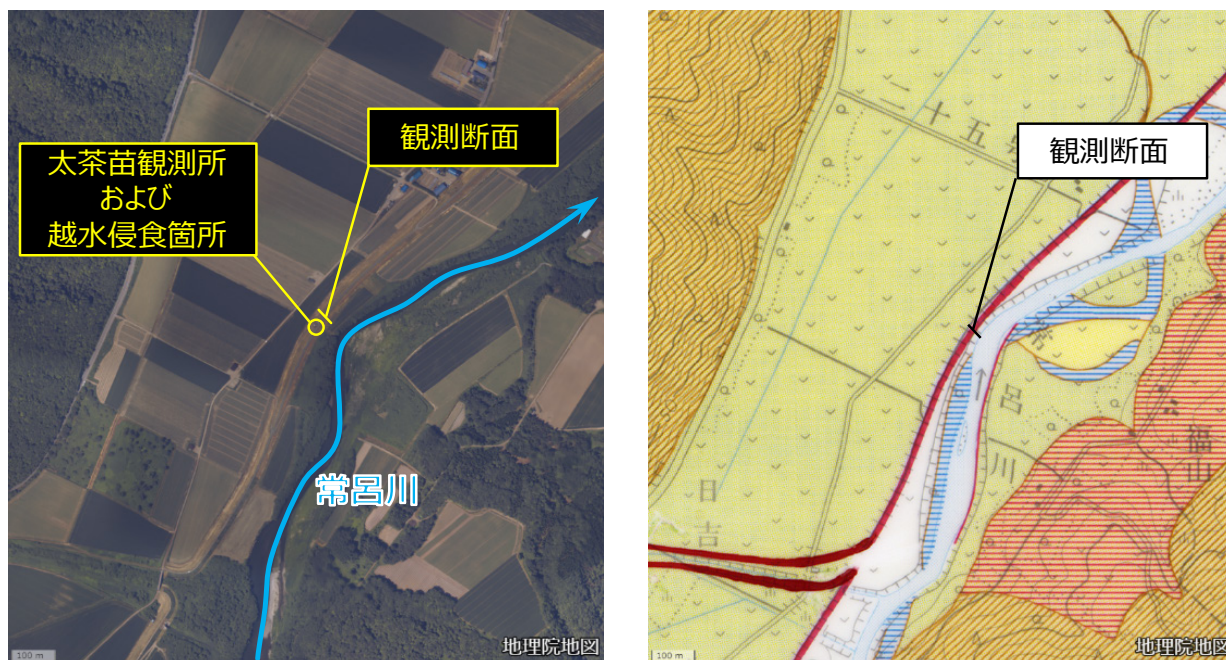


図1 越水侵食箇所 (KP18.6付近の位置図) (左：航空写真，右：治水地形分類図，地理院地図に加筆)



図2 越水侵食箇所 (左：上流側から撮影した全景，右：裏のり尻から撮影した侵食箇所)

(2) KP24.6付近における噴砂¹⁾

図3は噴砂発生箇所周辺の航空写真(図3左)および治水地形分類図(図3右)を示している。先述したように、図中には後述する動態観測を行った箇所についても併記している。噴砂発生箇所は常呂川本川と支川であるポン隈川の合流地点に位置している。堤内地はさけ・ますふ化場となっている。また、噴砂発生箇所は、ポン隈川の旧河道の延長線上に位置していることがわかる。図4は発生した噴砂の状況を示している。この地点での噴砂は、今回の災害で最大規模であり、噴砂の大きさは幅約1.6m、高さ約0.5mであった。なお、大規模な噴砂が発生しているものの、堤体天端やのり面には堤体の安定性が直ちに低下するような目立った変状は確認できなかった。

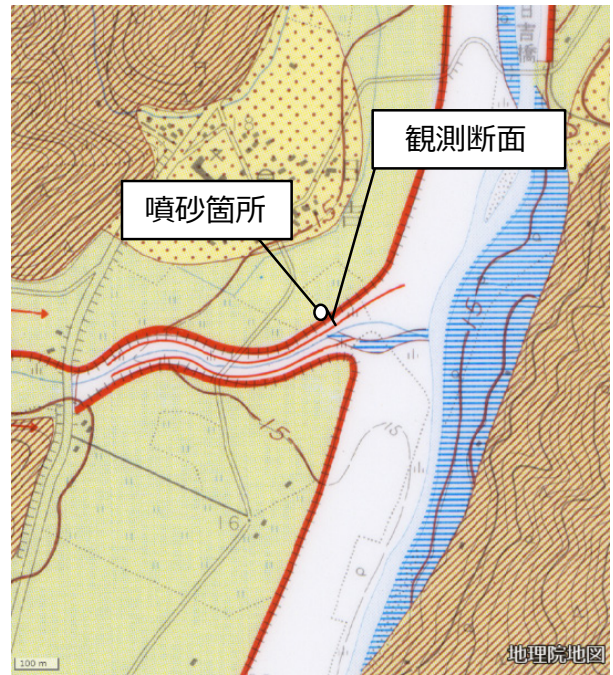


図3 噴砂発生箇所 (KP24.6付近の位置図) (左：航空写真，右：治水地形分類図地理院地図に加筆)

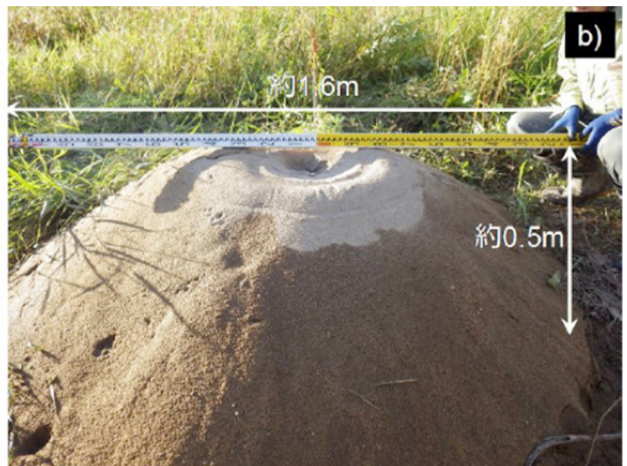


図4 噴砂発生状況 (左：堤体から撮影，右：噴砂の形状と大きさ)

3. 越水が発生した堤体(KP18.6)に対する動態観測および解析結果

(1) 堤体内の水位, 土壌水分, 地中温度の長期的な計測結果

図5および図6は当該計測箇所全景図および堤体断面と計測機器の埋設位置を示している。計測箇所は国土交通省北海道開発局が設置し、管理している太茶苗観測所から、20m程度下流の地点である。2016年北海道豪雨後の2016年10月中旬に土壌水分計, 地中温度計, 水位計を設置し, 計測を開始した。土壌水分計および水位計は堤内・堤外のり面中腹に設置しており, 地中温度計は堤内・堤外のり面付近とのり尻付近に設置している。また, 土壌水分計は深度0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8mに, 地中温度計は深度0.0, 0.2, 0.6, 1.0mに設置した。土壌水分計および地中温度計の計測間隔は60分間隔とし, 水位計は60分間隔を基本とした。また, 後述する表面波探査は, 堤内のり尻から3m堤内側を始点として, 堤内側から堤外側へと測線を設けた。



図5 動態観測箇所の状況 (KP18.6付近)

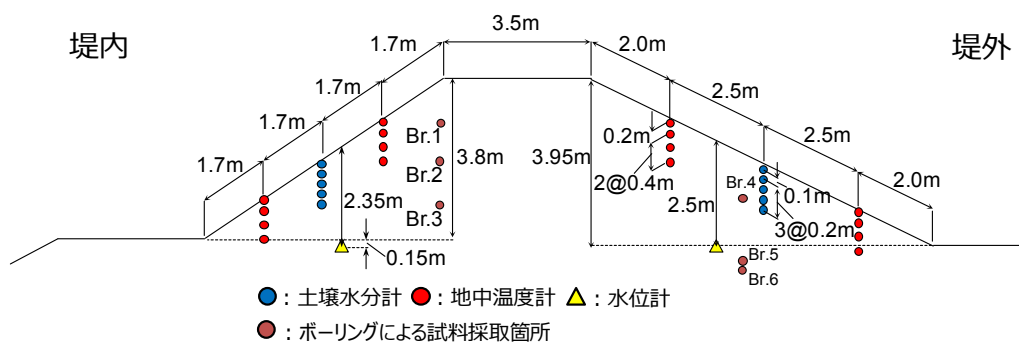


図6 堤体の断面形状と計測機器の設置箇所および地盤調査の実施箇所

図7は2016年10月中旬から2018年3月中旬までの計測地点近傍での雨量観測所(上川沿観測所, KP10.9)での観測雨量および河川水位(太茶苗観測所, KP18.6)と各種計測データの経時変化を示している。まず, 堤体水位の変化を見ると, 必ずしも河川水位の変化とは連動しておらず, 比較的降雨量との整合性が良い傾向にある。2017年4月初旬での堤体水位の上昇については, 融雪水の浸透に伴う水位上昇であると予想される。また, 水位上昇量の最大値は堤内側の0.3m程度とわずかであることから, 当該箇所での堤体水位の上昇は降雨浸透による影響が支配的であると推察される。なお, 堤内側でのみ水位が上昇する傾向にある現象については, 堤体支持地盤の地盤特性を反映していると考えられるため, 今後は追加ボーリングなどのより詳細な地盤調査を行い, その結果からより正確な観測結果の解釈を試みる予定である。

次に、代表的な計測結果としてのり肩付近における地中温度の変化を見ると、堤内側では厳冬期である2月にはG.L.-0.2mの観測地点で 0°C を下回っており、地表面から0.2mをやや超える範囲で堤体表層が凍結した状態にある。2017-2018年シーズンでは、例年と比較して小雪であったため、積雪による断熱効果が低いことによって2016-2017年シーズンよりも凍結深さがやや進行している。凍結深さ(0°C 線)は、2016-2017年シーズンでは外気温が上昇する3月中旬から徐々に地表面の浅い位置へ移動し、4月初旬には凍結領域が消失している。一方で、堤外では凍結線の進行は確認できない。

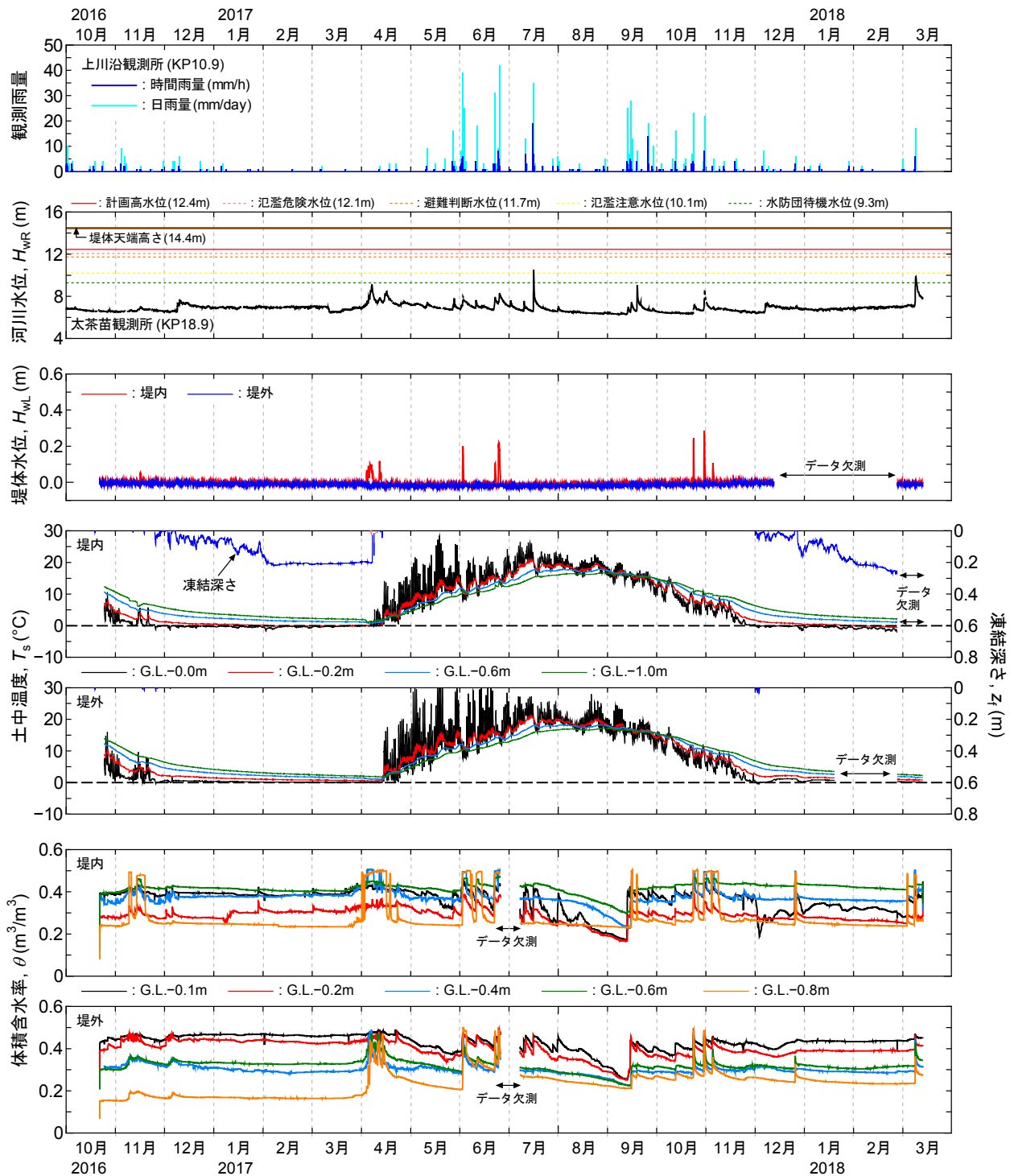


図7 観測雨量，河川水位，各種計測データの経時変化(KP18.6付近)



図8 2017年1月30日12:00における堤体のり面の状況

ここで、図8は観測断面付近に設置したインターバルカメラで撮影した2017年1月30日12:00における堤内および堤外の堤体のり面の状況を示している。堤内側と比較すると、堤外側では積雪深が明らかに大きいことがわかる。この傾向は、初冬期から融雪期の間で一貫して同様の傾向であった。日射や風向きの影響により積雪深が異なると考えられるが、この詳細なメカニズムは不明ではあるものの、堤体の同一断面における表および裏のり面内では積雪深が異なり、これにより熱収支挙動が異なると考えられる。

土壌水分量を表す体積含水率の変動は、堤体の表層からG.L.-0.8mに土壌水分計を埋設しているため、降雨履歴との整合性が良い。一方、3月下旬から4月上旬の間にも体積含水率が増加する傾向にある。凍結領域が発生している裏のり面については、凍結領域の融解に加えて、凍結領域消失後の融雪水の地表面への浸透によって体積含水率が増加したと考えることができる。なお、凍結領域が発生していない表のり面については、融雪水の地表面への浸透によって体積含水率が上昇したと考えられるため、積雪層内を融雪水が浸透する遅延効果の影響によって、裏のり面よりも体積含水率が増加する時期が遅くなっている。このように、積雪寒冷環境条件では降雨期のみならず、融雪期においても堤体のり面の不安定化要因の一つである土中水分量の増加が発生することに加えて、凍結領域の有無によって土中水分量が増加する時期には違いが生じるため、融雪期の河川巡視は適切な期間を設定して行う必要があると言える。

(2) 表面波探査による V_s 分布の季節変化

筆者らがこれまでに実施している千歳川遊水地周囲堤²⁾と同様に、季節に伴う気象条件の変化による堤体内部の力学挙動の変動を把握するため、表面波探査³⁾から取得可能なS波速度(V_s)の評価を行った。ここで、 V_s は堤体の安定性評価に用いる直接的なパラメータではないが、せん断強度やせん断剛性と強い相関があるため、間接的に堤体内部の力学的な状態を把握可能であると考えられる。

図9a)およびb)は、それぞれ当該箇所で行った表面波探査から得られた、凍結融解前後での V_s の2次元分布(以降、 V_s 分布とする)を示している。凍結前である2016年11月15日の V_s 分布は、堤体表層から3.0m付近までは $V_s = 110 \sim 120 \text{m/s}$ 程度、堤体内部では $V_s = 120 \sim 140 \text{m/s}$ 程度の範囲で分布している。これは、当該箇所は過去に堤体の拡幅を実施しているため、 V_s の2次元分布は築堤履歴の影響を反映している可能性がある。また、のり尻付近では堤内外ともに、 $V_s = 100 \text{m/s}$ 程度の低速度領域が分布している。これは、表面波探査を実施した2016年11月15日より以前に観測された降雨による影響であると考えられる。または堤体材料の保水性が良いために、堤体内の水分は排水されにくい状況であるということも推察される。次に、融雪期である2017年4月5日の V_s 分布は、堤内のり尻付近で $V_s = 100 \text{m/s}$ 程度の低速度領域が広範囲に分布していることがわかる。さらに、堤体内にも $V_s = 100 \text{m/s}$ 程度の低速度領域が分布しており、のり中腹部で体積含水率が上昇した結果と整合している。また、低速度領域は天端下2m程度の

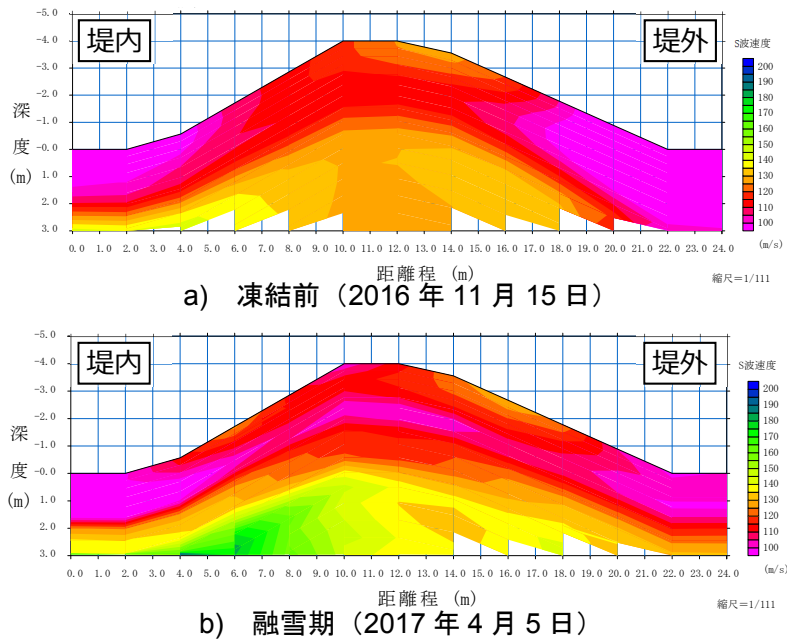


図9 凍結融解前後による堤体内の V_s 分布



図10 2017年4月5日の現地の状況

位置にも分布しており、体積含水率の上昇領域はのり面表層のみならず、堤体内部にまで広がっていることが伺える。ここで、図10は2017年4月5日の表面波探査実施時の現地の状況を示している。のり尻部では融雪水が滞水しており極めて湿潤な状態であった。以上のことを考慮すると、のり尻付近の低速度領域は地盤内の飽和度や水位上昇に応じて変化していると予想され、表面波探査は現地の状況を概ね表現できているといえる。

図11は降雨後に実施した表面波探査から得られた V_s 分布を示している。2017年6月26日および7月17日の結果においても、のり尻付近では V_s の低速領域が存在している。先述した結果とともに考察すると、堤体のり尻付近では透水性の低い支持地盤が分布しており、降雨や融雪水の浸透によって水分量が上昇した後は湿潤状態になることが推察される。しかしながら、太茶苗観測所の河川水位が、氾濫注意水位まで到達した2017年7月17日での V_s は、融雪期にみられたような V_s の著しい低下は確認できなかった。その理由として、降雨強度が大きい（時間雨量 $r = 19\text{mm/h}$ ）ことに加えて、降雨時間が短いことから堤体内へ雨水が浸透しなかったためと考えられる。さらに、2017年11月23日での V_s は降雨が観測されたにも関わらず、堤体のり肩および天端では $V_s = 140 \sim 150\text{m/s}$ 程度の高速度領域が分布している。これは、降雨前の2017年8月～9月に渡り、天端に舗装が施されており、そのために天端およびのり肩部では舗装による再転圧によって V_s が上昇していると考えられる。しかし、舗装が施されていないのり面での降雨による V_s の顕著な低下はなく、体積含水率と V_s の増減の関係性が必ずしも一致していない。今後はボー

リング位置を増やして堤体内の複数箇所から試料を採取することで堤体内の土質構成を明らかにしたうえで、この結果を反映した数値解析を行うことで、 V_s 分布の変化に関する力学的な解釈について検討を進める予定である。

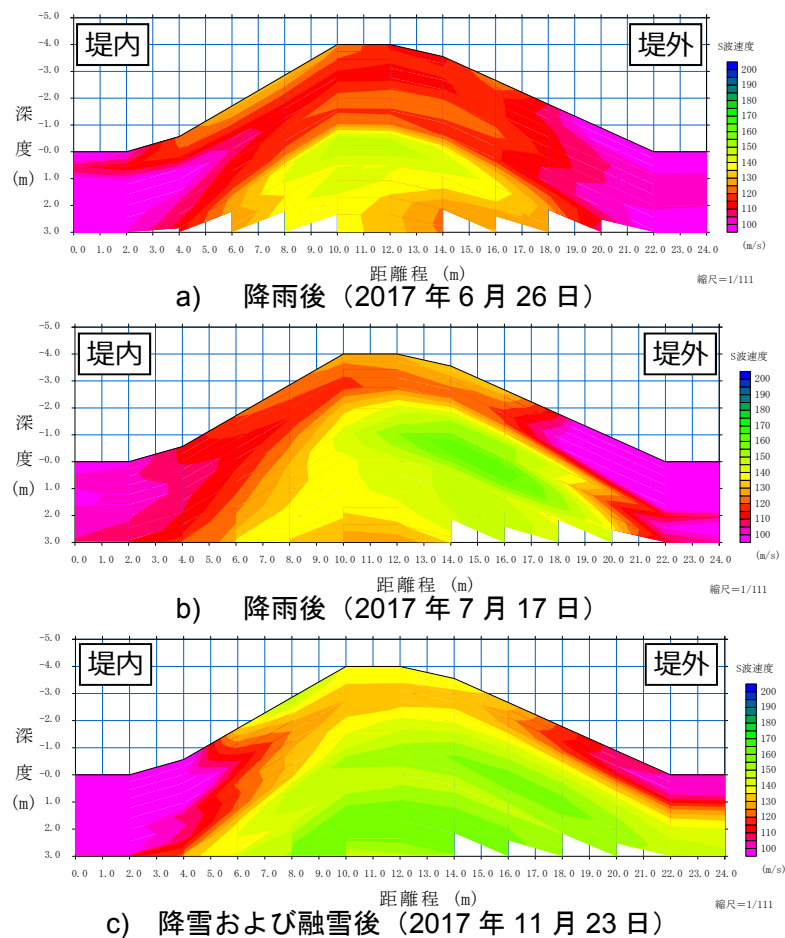


図11 降雨および融雪による堤体内の V_s の比較

(3) 堤体内の間隙水圧の計測結果と堤体土の水理特性

先述した種々の観測に加えて、当該箇所では堤体内の水理状態をより詳細に把握するため、裏法において2017年10月下旬に間隙水圧測定システムを設置し、観測を開始した。間隙水圧計測のために図12に示すテンシオメーターを12式作製し、図13に示す手順で地盤を削孔し埋設した。テンシオメーターはセラミックカップを通して水の張力をセンサー受感部に伝えることにより、大気圧を基準として正圧のみならず、地下水位上での負圧を計測できるものである。自動計測が可能な電気式は、現在市場で入手可能なもので1式10万円前後の価格が標準的であるが、本研究では市販のアナログ式テンシオメーターのカップ部を廉価な圧力計と結合することにより、1式1万円程度で製作した。データロガーも廉価に自主開発・製作することで本助成の範囲で裏のり面の包括的な間隙水圧モニタリングを計画した。

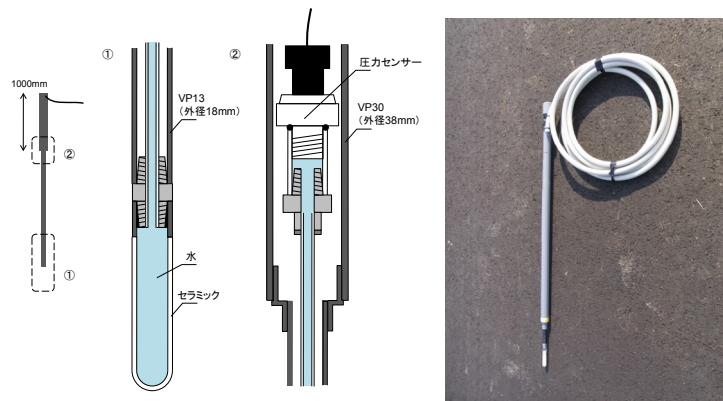


図12 製作・設置したテンシオメーターの構造と外観

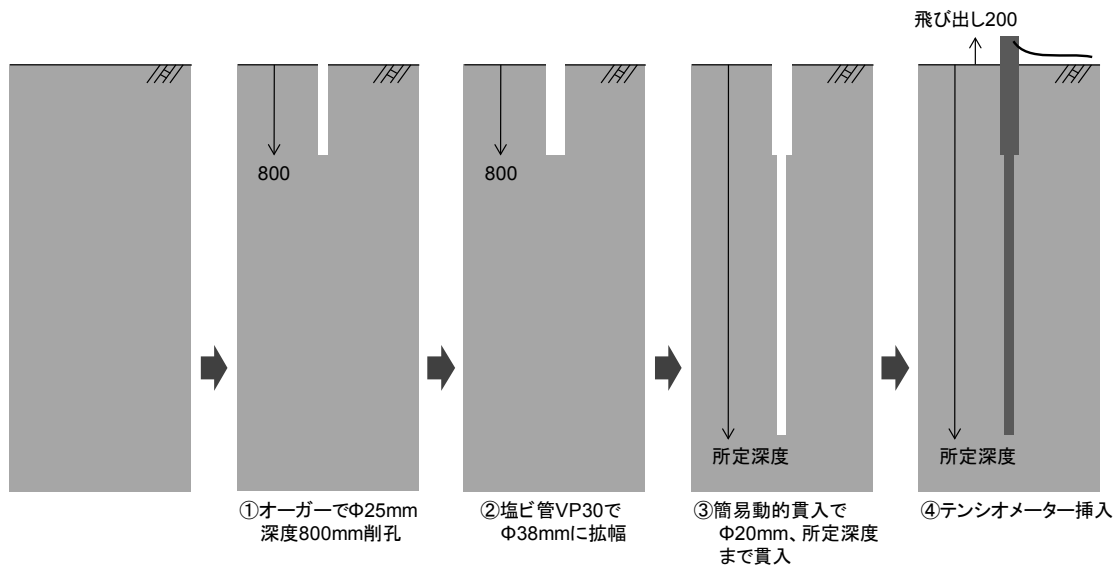


図13 テンシオメーター設置手順（ポーラスカップ深度1~3mの場合）

西村ら⁴⁾の別サイトでの経験より，圧力センサーを地表付近（深度10cm程度）に設置すると，観測値が気温の日変化の影響を強く受けることがわかった．そこで本サイトでは圧力センサーを深度80cmに設置した（測点深度が0.5mのもののみ深度30cmに設置）．この深度は寒冷地である常呂における地盤凍結深も考慮して決定した．ただし，作業員の手の届く深度ではないため，テンシオメーターのレザボアが乾燥した場合には容易に再飽和できないという短所もある．テンシオメーターの配置を図14に，設置後の様子を図15に示す．データとして12式のテンシオメーターの計測電圧のほか，補正用の大気圧計測値とロガー温度を1時間に一度記録した．

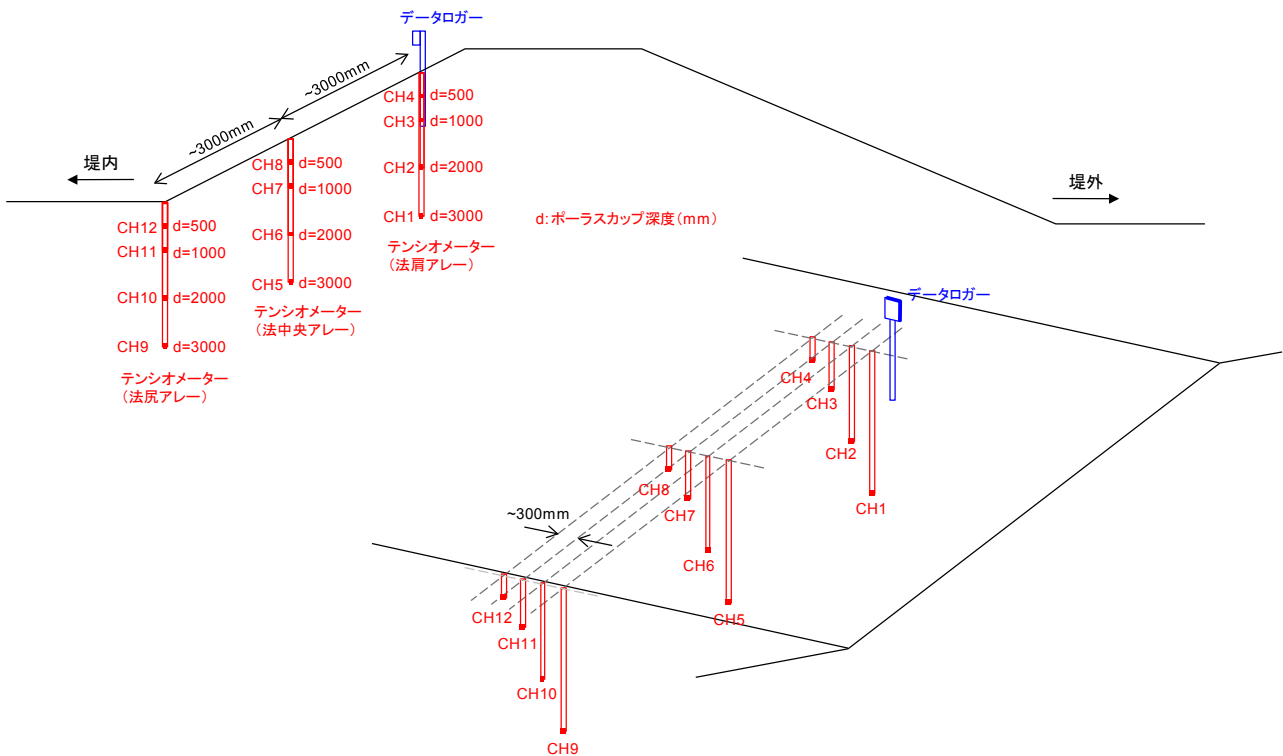


図14 KP18.6裏法におけるテンシオメーターの配置

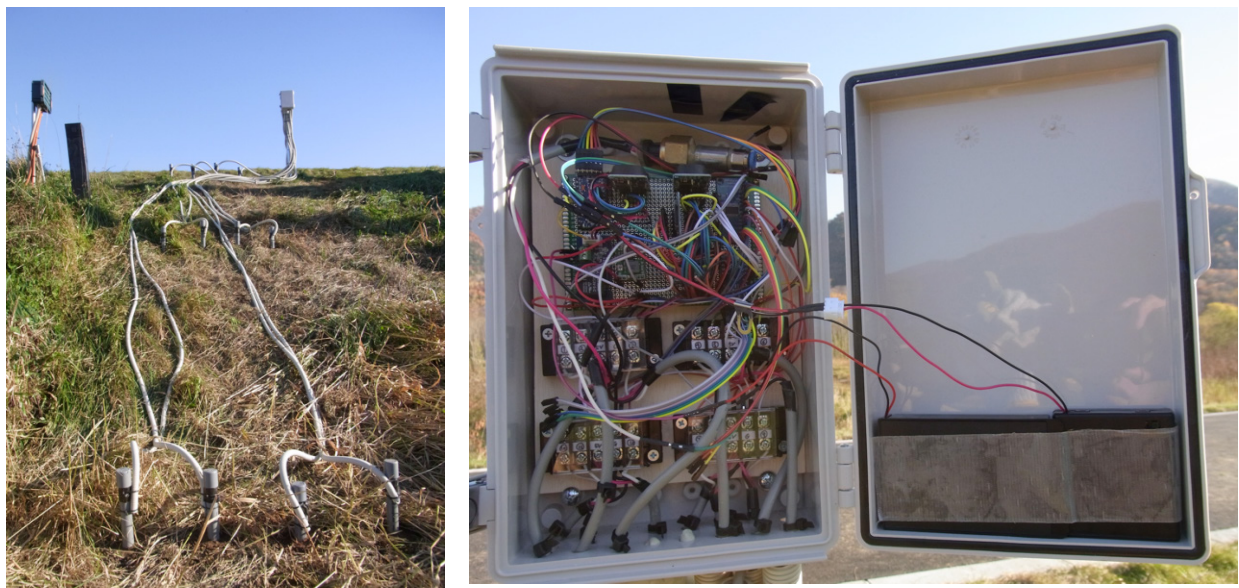


図15 テンシオメーター設置の様子 (左：計測箇所全景，右：ロガーボックス内部)

堤体内部の水利状態は、堤体土と降雨・積雪などの気象条件のみならず原地盤（基礎層）の土質条件に大きく依存することがこれまでの研究からわかっている³⁾。しかし本研究では詳細な地盤調査をまずKP24.6から開始しており、現時点ではKP18.6における土層構造などはまだ情報が得られておらず、堤体土の室内試験における水利特性調査から開始している。堤体土試料は天端から深度1.10～3.05mの範囲でパーカッションボーリングにより採取しており、砂質土が主体であることを確認した。現時点で深度1.2mの試料の定水位透水試験と吸引法による水分特性曲線同定を実施済みである。後者は1データ点の取得に1日以上要することもあり、吸水過程はまだ実施中である。これらより、飽和透水係数 $k_{sat}=3.7 \times 10^{-6} \text{m/sec}$ と、図16に示す水分特性曲線が得られた。

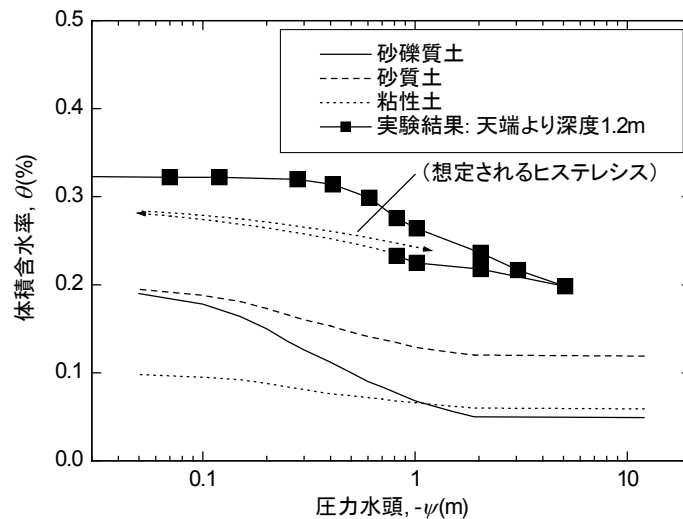


図16 天端より深度1.2mの砂質堤体土の水分特性曲線および文献6)に示された3種の土質に対する照査用曲線

観測した堤体内間隙水圧の時刻歴を図17に示す。12月初頭以降は明らかに計測値が不安定になっており、これは日平均外気温が 0°C を下回る時期と一致している。多くの深度で同様の不安定現象が見られることから地盤凍結が原因とは考えづらく、データロガーあるいは印加電源が正常に稼働していなかった可能性が高い。本研究は冬期挙動に重点を置いていないため、寒冷環境への対策を十分に講じてはおらず、春期以降の動作については改めて十分な較正を行い動作を保證する予定である。10月下旬から12月初頭までは安定したデータが記録されており、この期間の降雨は少なかったものの、間隙水圧の降雨への応答が見られる。水圧は概ね安定しており、明確な減少や増加傾向は見られない。法尻からの計測を除き、有意義な正圧はほとんど見られず、堤体内では表面付近の一時的と思われる湿潤領域を除き、この期間において正圧領域は存在しないようである。

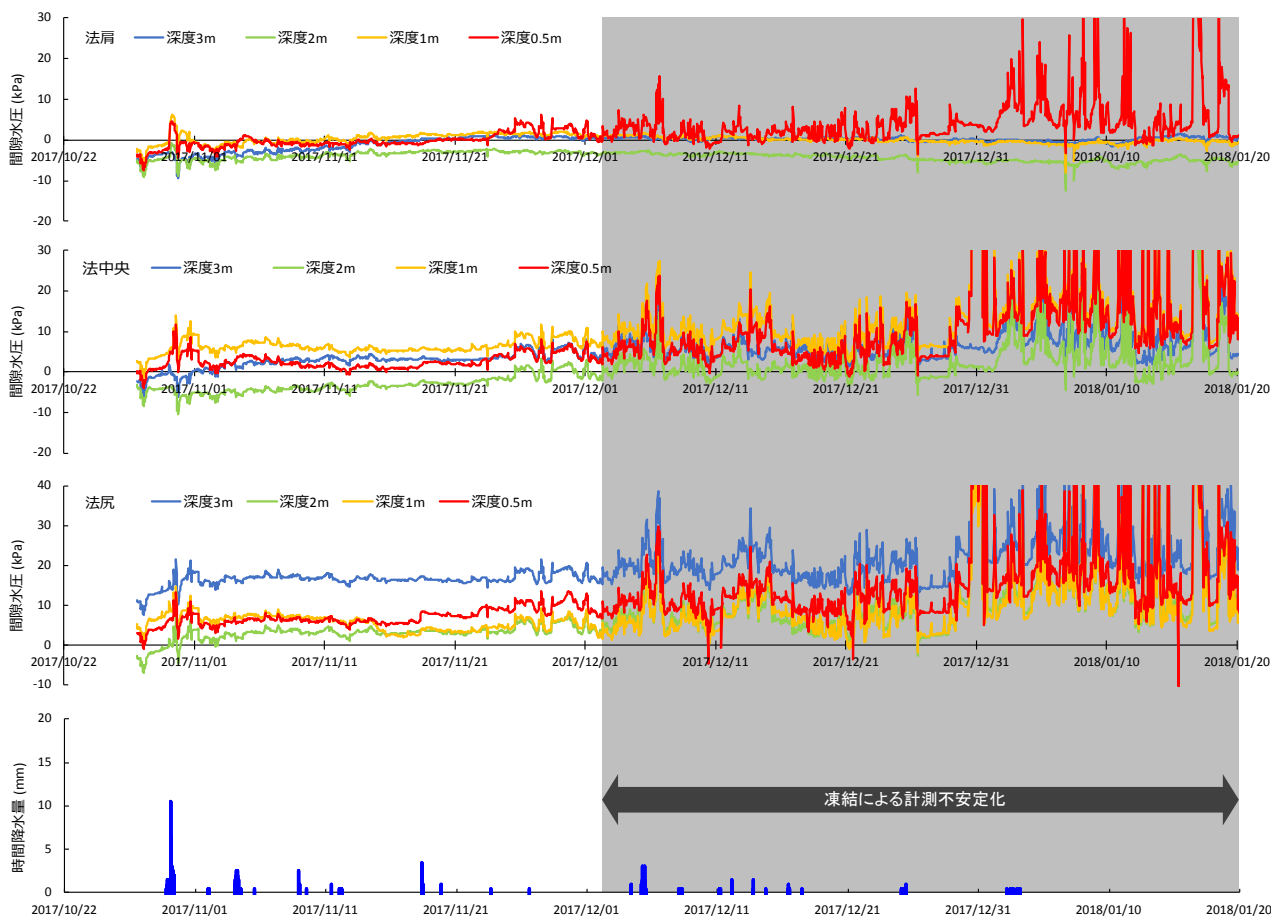


図17 KP18.6堤防裏のり面にて観測された間隙水圧の時刻歴

(4) 非定常不飽和浸透流解析による堤体内間隙水圧の再現計算

上記堤防断面での水理状態変動を再現するために、断面を二次元モデル化し、Richards式に基づく非定常不飽和浸透流解析を実施した。解析手法の詳細については平成28年度当助成報告²⁾に記したのでそちらを参照されたい。今回は冬期の水理挙動に着目しないため、積雪・融雪のモデル化は省略し、降水量を全て即時に堤防表面にフラックスとして入力した。また、当該堤防は砂質土から構成されているため蒸発散の影響は小さいと考え⁷⁾、これについてもモデル化を省略した。よって入力条件は地表からの降雨浸透と河川水位変動による河岸（出水時には堤防表面を含む）での静水圧変化のみである。

解析は有限要素法に基づいており、有限要素モデル断面を図18に示す。現時点では原地盤の情報がないため、堤防（Bk層）と同じ土質を想定した。下端・左側方境界は非排水とし、河川水位は国土交通省水理水質データベースより太茶苗観測所で計測されたものを使用した。当断面では前述の通り2016年8月21日にかけて越流が起こっており、河川水は裏法および堤内地表面を浸したが、今回の解析では堤外側法肩で水位が止まったものとして解析を実施した（その理由については後述する）。土質物性として、飽和透水係数 $k_{sat} = 1.0 \times 10^{-6} \text{m/sec}$ （室内試験の値からオーダーのみ抽出して丸めた値）、比貯留係数 $S_s = 0.0001 / \text{m}$ （文献6）を入力した。不飽和浸透特性として、水分特性曲線および相対透水性曲線には、文献3)のうち「砂質土」に相当するものを適用した。図16に示すように、乾湿のヒステレシスを考慮する場合、「砂質土」に相当する曲線は実験データに近い勾配を示している。なお、図16中ではいずれの3つの曲線ともに実験データから大きく乖離しているように見えるが、不飽和浸透流解析では飽和状態 ($\psi=0$) からの増分を用いて計算するため、図16中の上下のオフセットは結果に寄与せず、全体的な曲線勾配と形状を一致させることが重要である。

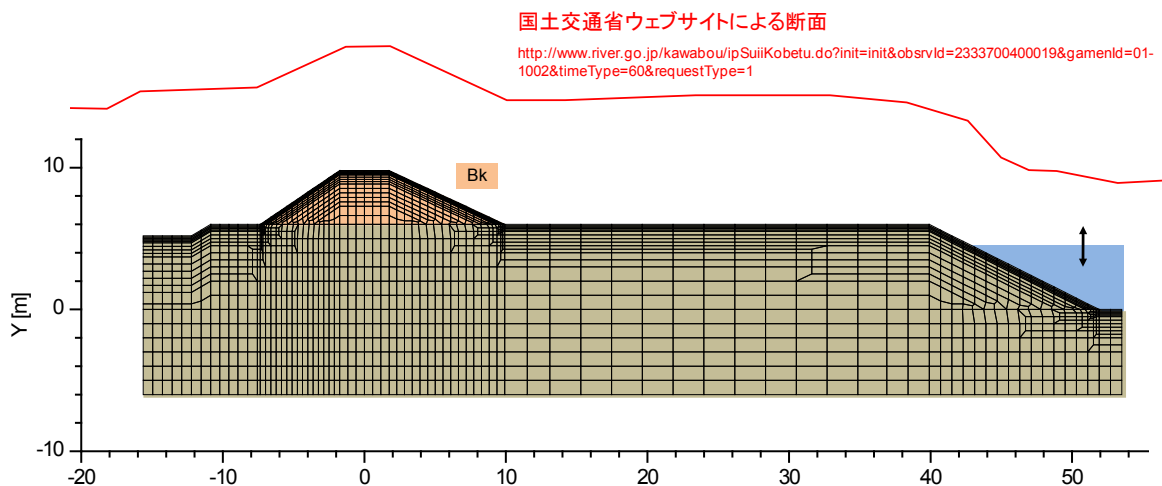


図18 KP18.6堤防断面の有限要素モデル

解析結果から、堤防中心線上底面での水頭（図18上で水位に相当するよう基準を取っている）を抽出したものを図19に示す。同図には河川水位および時間雨量も併記してある。解析は2016年1月1日を基準として開始したが、最初の6カ月ほどは「ならし解析」⁸⁾と呼ばれる、任意に設定した初期条件の影響を消すための期間であり、その間の出力は無視する。実際に、最初の6カ月ほどで計算された堤体内水位が上げ止まり、それ以降は河川水位と同様に長期的には横這いに推移しているのが確認できる。2016年8月の出水期間の前後を拡大したものが同図下段であり、河川水位が堤防天端高さに至るとともに、堤体内水位も大きく上昇している。河川水位が降下した後も、2～3カ月にわたり堤体内には水位が残留している。堤防地表から浸透する降雨の影響により、堤体内水位は常に河川水位よりも高くなっている。

解析対象期間のうちいくつかの時間を抽出し、圧力水頭のコンター図を示したものが図20である。特に2016年8月20～22日の出水期間においては6時間毎に抽出し、左段に示してある。ここで着目すべき点は、越流が開始する8月21日0:00において、飽和（圧力水頭が正）領域は表法面に限定されており、堤体中央部まで至っていないことである。この直後に越流が起これ、天端・裏法面の表面が浸潤することが想定されるが、この場合は堤体内の空気の大部分は閉封されることになり、堤体の飽和が阻害される。実際に常呂川堤防の複数箇所ではこの出水に際して浸潤した堤内地から空気湧出が確認されており、間隙空気が閉封・圧縮されたことを示している。このように、裏法の浸潤化が遅延したことが当該断面の決壊への抵抗に寄与した可能性がある。今回適用した解析手法は間隙空気相の流れを考慮しない単相浸透流解析であるため、仮に越流を入力してもこのような空気閉封は再現されない（空気はブラックホールに消えるような扱いとなり、全境界から浸潤化が進行するという非現実的な解が想定される）。これゆえに今回の解析ではあえて越流は入力しなかったが、次年度は気液二相連成解析コードを開発し、同問題に適用する予定である。

平常時（非洪水時）の例として、2017年11月23日0:00に計測された間隙水圧分布を図21に示す。この計測結果から地下水水位と読み取れる部分を結び、数値解析結果から得られた水位（圧力水頭ゼロのコンター）と比較すると、数値解析は水位を堤体中央部で3m近く低く出力している。この原因として可能性が高いのは、基礎地盤に沖積粘土層が含まれており、河川への排水が実際には格段に遅いことである。これは今後の地盤調査によって明らかにしていく予定であるが、2016年8月出水のような極めて短期の現象に関する上記の知見にこのことが与える影響は限定的であると考えられる。

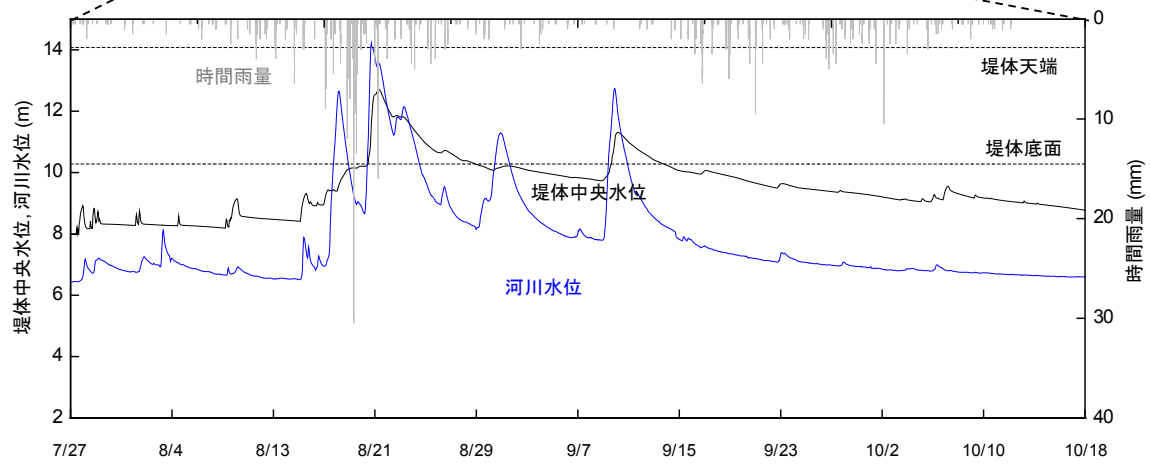
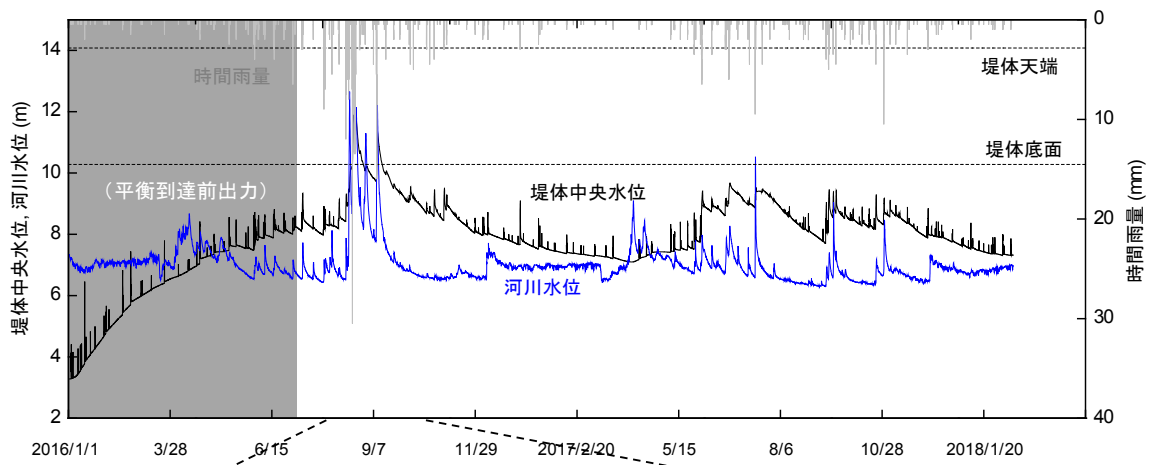


図19 数値解析による堤体内水位（断面中央部）および入力した河川水位と時間雨量

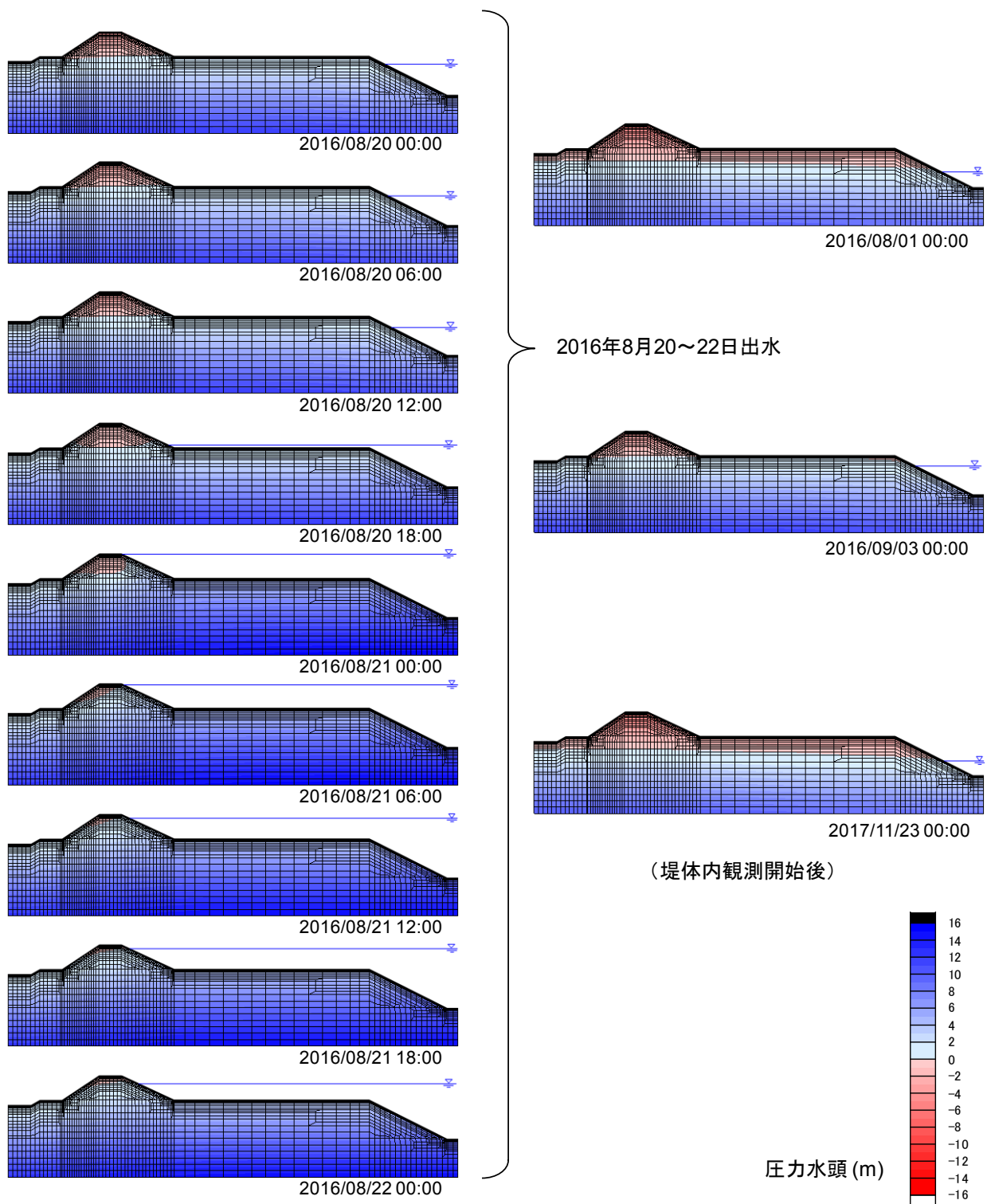


図20 2016年8月20~22日およびその他の時刻における圧力水頭分布 (解析結果)

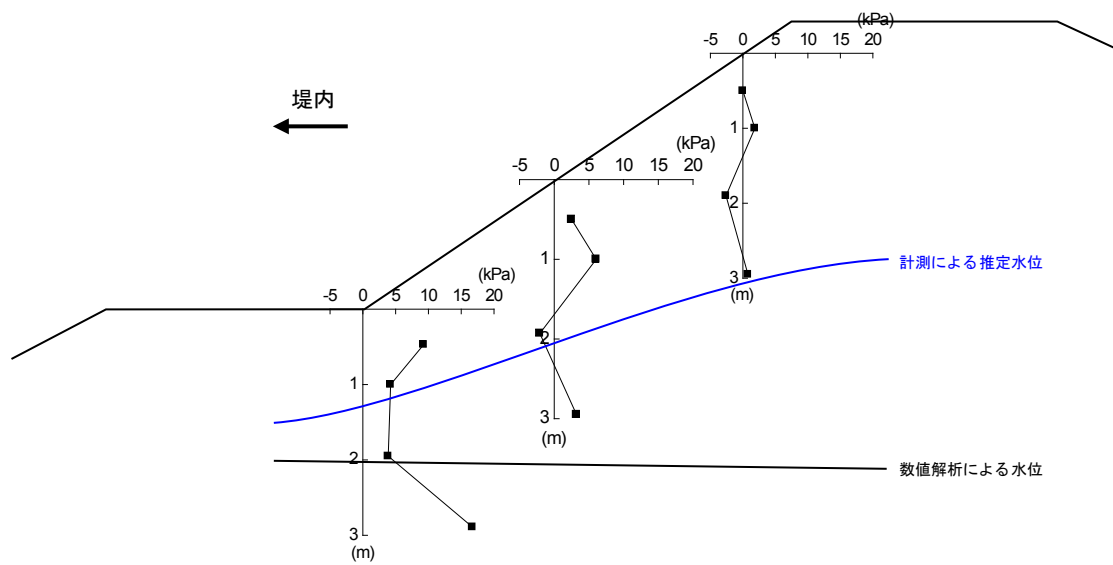


図21 2017年11月23日0:00における堤体内間隙水圧分布（計測値）と堤体部水位

4. 噴砂が発生した堤体(KP24.6)に対する動態観測および観測結果

(1) 堤体内の水位、土壤水分、地中温度の長期的な計測結果

図22および図23は当該計測箇所全景図および堤体断面と計測機器の埋設位置を示している。観測箇所は常呂川本川と支川であるポン隈川の合流地点付近のKP24.6付近である。計測機器の設置内容は、基本的には先述したKP18.6付近と同様である。なお、噴砂の発生に伴う対策工が施工された関係で、2017年8月初旬から11月下旬の期間では表のり面の計測機器の一部（土壤水分計）を一時的に撤去し、工事終了後に再度設置している。なお、表面波探査の測線についても、KP18.6付近と同様に始点を裏の尻付近として、表のり尻周辺を終点とした。



図22 動態観測箇所の状況(KP24.6付近)

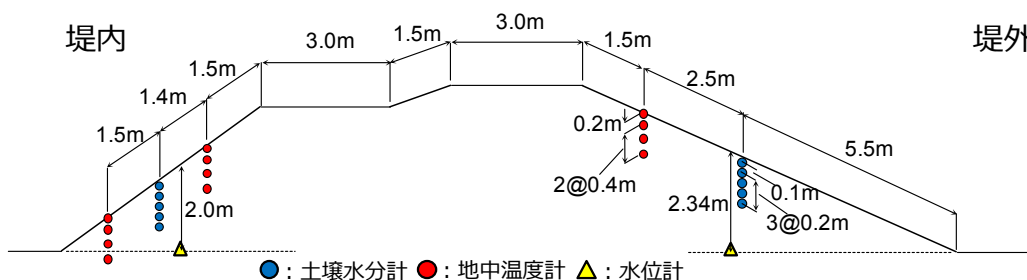


図23 堤体の断面形状と計測機器の設置箇所

図24は2016年10月中旬から2018年3月中旬までの計測地点近傍での雨量観測所(上川沿観測所, KP10.9)での観測雨量および河川水位(太茶苗観測所, KP18.6)と各種計測データの経時変化を示している。先述したKP18.6付近の各種計測結果については、河川水位の観測地点が観測断面から20m程度上流側に位置しているため、両者の相関性の議論はできるものの、KP24.6付近については近傍に河川水位の観測所が無いので、参考としてKP18.6付近の結果と同様に太茶苗観測所の河川水位を記載している。なお、観測降雨についても、観測断面に最も近い上川沿観測所の観測雨量を記載している。

堤内水位については、KP18.6付近の観測結果と比較するとノイズが大きいものの、今回の観測期間内には堤内および堤外ともに有意な上昇傾向は示していない。

次に堤体のり肩部の凍結深さを見ると、堤内側については冬期間に地表面から堤体内部へ凍結線が進行するものの、2016-2017年シーズンの凍結深さは0.1m程度となっており、これは先述したKP18.6付近での観測結果の半分程度である。一方、2017-2018年シーズンは0.2m程度まで凍結線の進行が確認できるが、この結果についてもKP18.6付近の結果よりも小さい。この理由として、観測箇所のそれぞれで外気温が異なっていることや、堤体材料が異なっていることによる熱伝導率の違いなどが考えられる。なお、表のり面では、KP18.6付近と同様に凍結線の進行は確認できない。現地の状況写真は省略するもの

の、**図8**に示した**KP18.6**付近と同様に表のり面では裏のり面よりも積雪量が多い状況であった。

土壌水分量である体積含水率の変化については、**KP18.6**付近と同様に降雨時や融雪期に上昇する傾向にある。一方で、一度上昇した後の体積含水率の低下挙動を見ると、**図7**に示した**KP18.6**付近の結果では上昇した体積含水率が低下するまで一定の時間を要する、または低下過程にある体積含水率がその後の降雨を受けて再度上昇し、また一定の時間をかけて低下するため、降雨期には体積含水率の高い状態で推移していた。一方で、**KP24.6**付近の結果は、一度上昇した体積含水率が速やかに低下する傾向にあり、体積含水率の低下中に降雨があった場合に一旦は体積含水率が上昇するものの降りやみ後には迅速に低下している。これは堤体材料の違いを反映したものであり、降雨期や融雪期の河川巡視における堤体変状の着眼の一つとして、堤体材料の違いを勘案することが重要であることを示唆している。

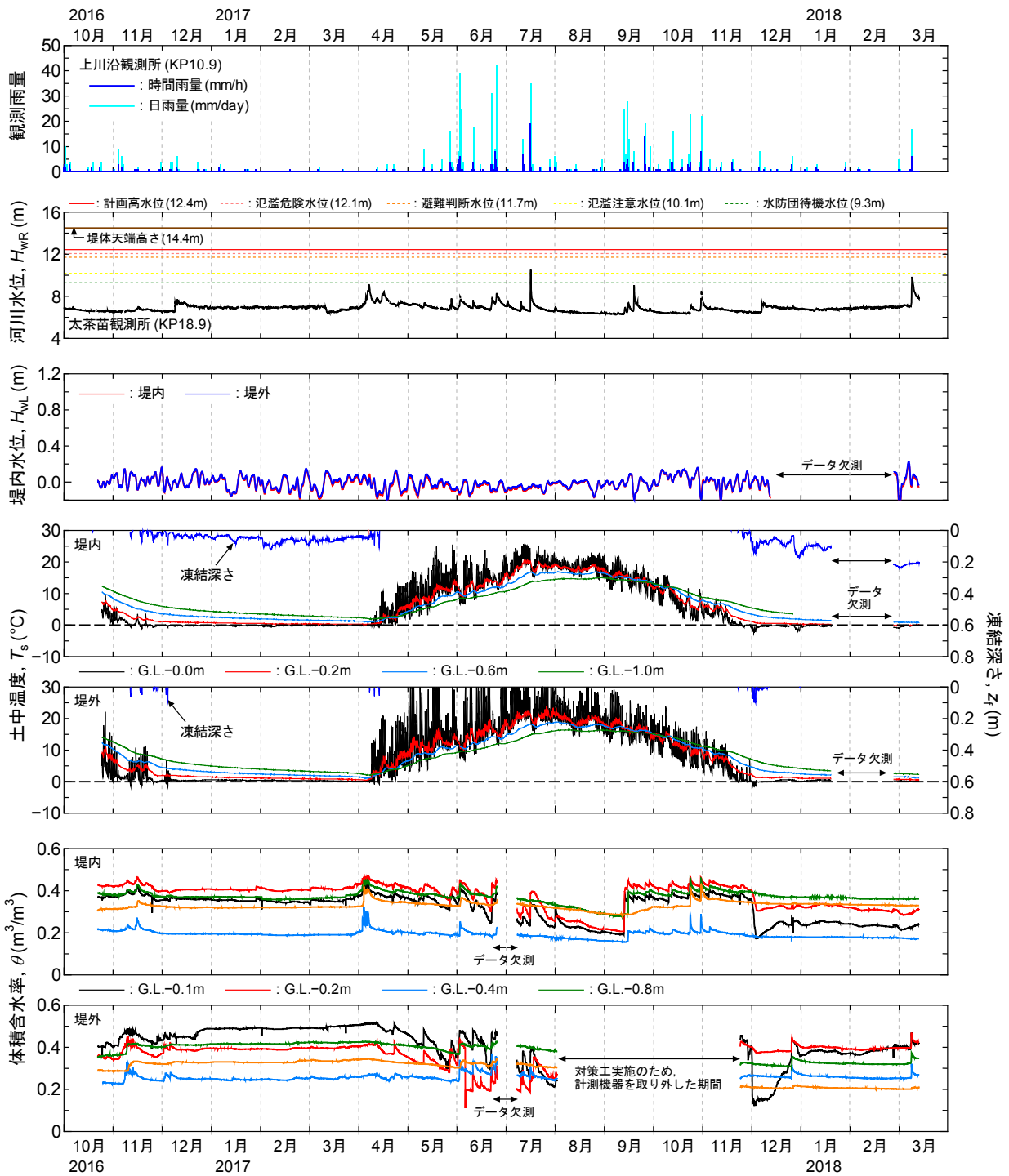


図24 観測雨量，河川水位，各種計測データの経時変化 (KP24.6付近)

(2) 表面波探査によるVs分布の季節変化

図25a)およびb)は、それぞれ当該箇所で行った表面波探査から得られた2016年11月の積雪前と、2017年6月の降雨後におけるVs分布を示している。積雪前である2016年11月15日のVs分布をみると、堤体表層から3.0m付近まではVs = 100~120m/s程度、堤体内部ではVs = 120~200m/s程度の範囲でVsが分布しており、堤体内部のVsの分布形状から当該計測箇所においても、築堤履歴があったことが示唆される。堤内のり尻付近では、Vs = 100m/s以下の低速度領域が分布している。さらに、2016年11月15日における堤外のり肩では、Vsがわずかではあるが增加していることがわかる。これは、2016年10月21日から11月15日の期間内では大きな降雨は観測されず、のり面での蒸発散によって水分量が低下したためにVsが増加したと考えられる。

次に、降雨後である2017年6月26日のVs分布では、2016年11月と比較すると裏のり面においてVsが増加している。これは図24に示した体積含水率の違いを反映したものと考えることができ、2016年11月と2017年6月の体積含水率を比較すると、2017年6月は降雨による影響はあるものの体積含水率の上昇が2016年11月よりも低いいため、Vsも大きな値を呈したと推察される。以上のように、当該箇所においても水分量上昇に伴う堤体内部の性状変化をVs分布によって把握可能であると言える。

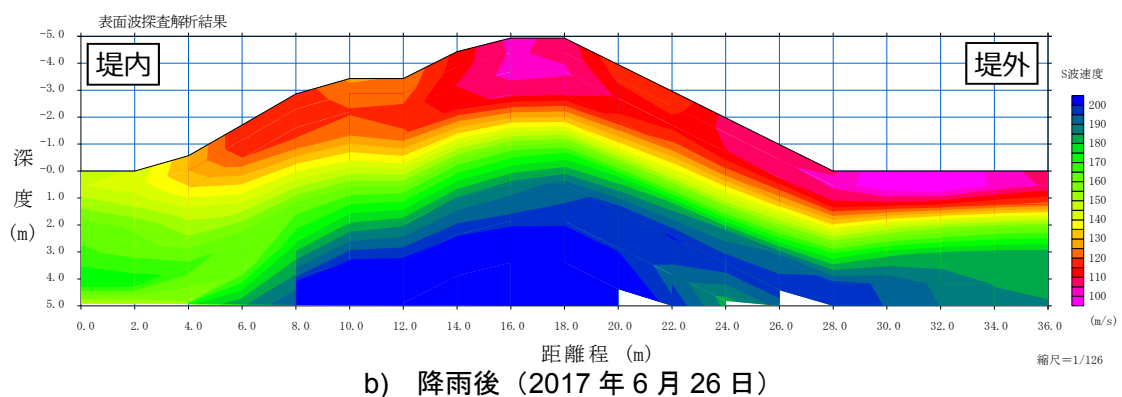
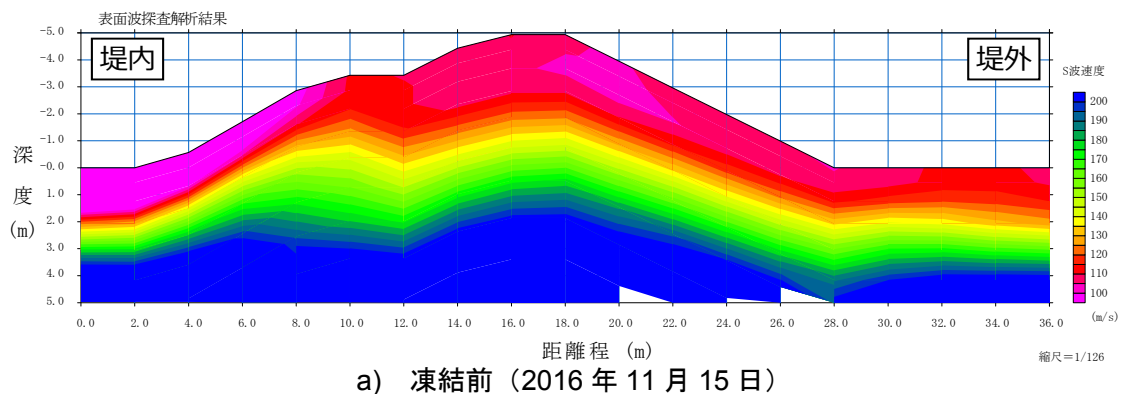


図25 凍結前および降雨後における堤体内のVsの比較

(3) 三相系多孔質体理論を用いた浸透－変形連成解析手法による力学挙動の再現計算

a) 数値解析手法

数値解析には、土骨格、間隙水、間隙空気からなる三相系多孔質体理論に基づく浸透－変形連成解析手法を用いた。本手法では、降雨や河川水位の上昇に伴う土骨格の応力状態の変化を求解することができ、間隙水圧や空気圧の変化と土の変形挙動を同時に解くことができる。

土骨格の構成式には不飽和土の浸透挙動を記述できる弾塑性構成式を用いた。具体的には、せん断による降伏を考慮した相当応力比一定型の降伏関数、非線形移動硬化則⁹⁾、非関連流動則、Cam-Clay型の塑性ポテンシャル関数を用いた。この構成式を基に、ダイレイタンシー係数がサクシジョンの大きさに応じて変化できるように改良を行い¹⁰⁾、また大きなひずみを表現できるように塑性相当ひずみに応じて塑性剛性の低減も行っている¹¹⁾。

基礎式は多孔質体理論に基づき、土骨格の変位 u^s 、間隙水圧 p^w および間隙空気圧 p^a を未知数とする混合体のつりあい式と間隙水・間隙空気の連続式から成る¹²⁾。空間離散化には有限要素法を、時間積分には差分法を適用した。

b) 解析条件

解析に用いた有限要素モデルを図26に示す。土質構成は過去の実施されたボーリング調査を参考に設定した¹²⁾。境界条件として土骨格の変位は、モデル下端は全節点固定とし、左右の両端は水平方向を固定、鉛直ローラーとした。間隙水は、堤体と地盤地表面を降雨の流入境界とした。なお、堤体を含めたモデルの右側半分については時間帯によっては河川水で覆われることとなるが、この際には圧力水頭を水位の高さに応じて与えた。間隙空気は、堤体および地盤の地表面が大気圧(=0kPa)となる条件とした。

地盤のモデルパラメータは、まず土骨格の構成モデルについては、As1層およびAs2層には上述した弾塑性構成式を適用した。実際に地盤材料を使った三軸圧縮試験等は実施されていないため、ここでは既往の数値解析で用いられている内部摩擦角が30度程度の土のパラメータを用いることとした。残りのB層、Ac1層、Asg層については弾性体でモデル化した。特に表層のB層やAc1層では河川水や降雨によって極端に有効応力が減少し、解析上体積膨張が生じる可能性がある。本解析ではこのような体積膨張が生じないように、弾性係数に極力大きな値を与えた。本来であればこれらの層についても応力状態の変化に伴う土の変形挙動を記述できる必要があるが、本解析では噴砂と同様の土質特性を持つAs1層およびAs2層の弾塑性挙動に着目するため、残りの層については弾性体によるモデル化を行っている。

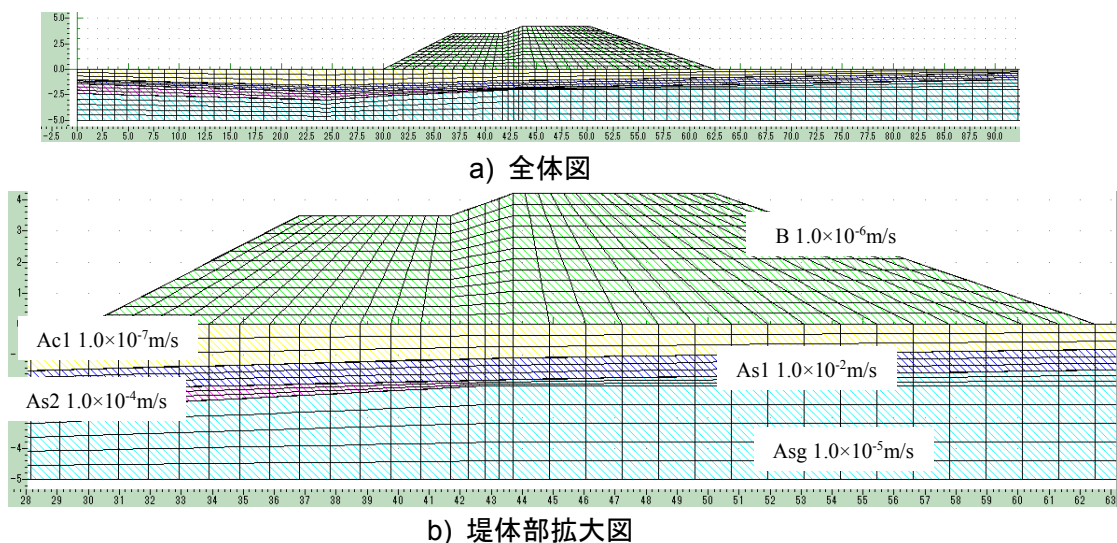


図26 構築した解析モデル

次に水理特性に関するパラメータとして、飽和透水係数は地盤調査結果で得られた土質区分等を勘案して、**図26**中に示すように各層の値を設定した。水分特性曲線については、上記の土質区分に応じて河川堤防の手引き⁶⁾に示される水分特性曲線を用いることとした。なお、水分特性曲線にはロジスティック関数モデルを適用した。比透水係数は、河川堤防の手引き⁶⁾の飽和度と比透水係数の関係を記述できるようにべき乗則のモデルパラメータを調整した。

解析の手順としては、初期応力解析を行った後に、AMeDAS常呂でのここ10年間程度での年平均降水量700mm/hの降雨履歴を3年間与えて地盤および堤体内の飽和度やサクシオンに変化が生じない定常状態となることを確認するためにならし解析を行った。この際、モデルの右端の河川水位はGL-2.0mの位置に設定しており、モデルの左端については詳細な情報が得られていなかったことからGL-2.0mまで水位が到達すると流出境界となる境界条件の設定を行った。その後、2016年8月の台風に伴う降雨および河川水位の増加を与える解析を行った。**図27**に与えた降雨および河川水位の履歴を示す。なお、河川水位のデータについては、解析断面近傍には水位観測所が無いため、先述した太茶苗観測所の水位データを解析断面箇所における出水時の痕跡水位と高水敷地盤高を使い補正したデータを用いた。台風に伴う降雨および河川水位の増加を与える期間は、8月16日から23日までの8日間とした。モデルの地表面の位置はこの河川水位の履歴を与えるまでは水位より低い位置にあり、2016年8月の台風によって水位以下に浸かることとなる。この水位上昇を解析では地表面位置での間隙水圧の増分として付与することとした。ただし、これだけは河川水が増加することでの土に作用する重量増加（全応力の増加）は再現することができない。そこで、文献13)を参考に、地表面の節点においては水位が鉛直方向の座標を上回ったときに、その高さ分の水の重量を節点荷重として付与することで、水位上昇に伴う全応力の増加を模擬することとした。**図27b)**には一例としてGL-0.0mの位置で与える節点荷重（水頭相当）も示している。鉛直座標を上回る水頭のみをその節点での鉛直荷重として付与することとしている。

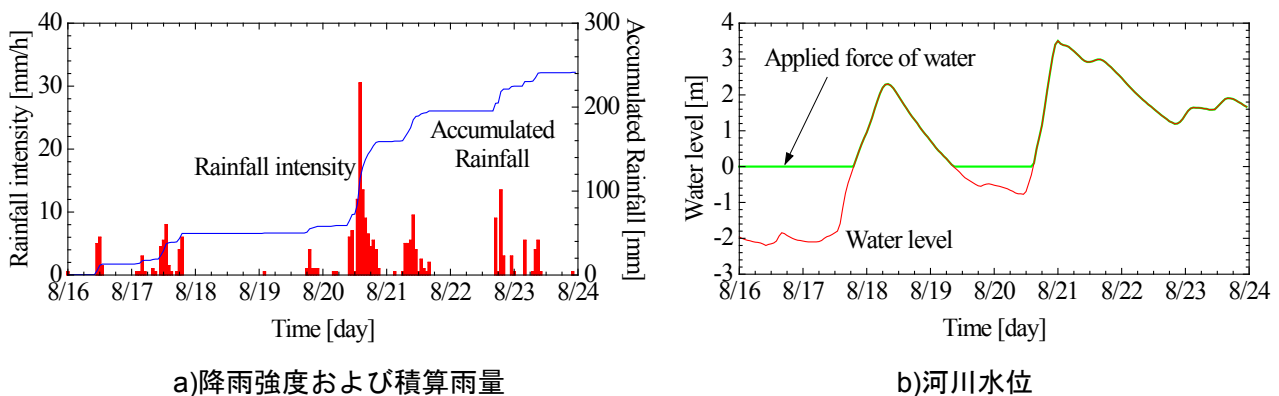


図27 台風来襲時の降雨および河川水位の経時変化

数値解析は以下の3ケースを実施した。Case1はこれまで述べた条件下で実施する解析である。次に、Case2ではモデルの左端の位置までAs1層およびAs2層が到達せず、途中で止まっている状況を想定した解析を行った。**図28**にCase2での解析モデルの変更を行った概要を示す。また、Case3ではAc1層の透水係数を 10^{-7} m/sから 10^{-5} m/sに変更した解析を行い、支持地盤表面の透水性がよい場合の降雨浸透挙動を確認することとする。

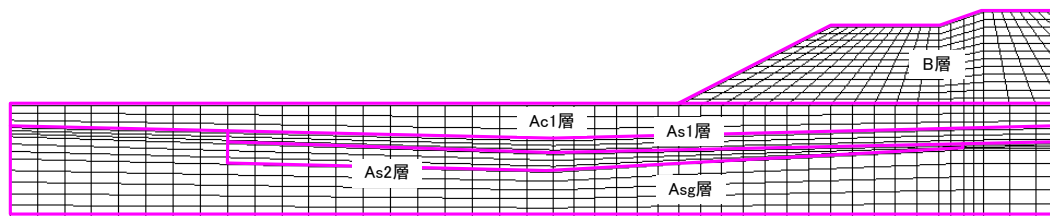


図28 Case2における解析モデルの変更

c) 解析結果および考察

8月22日0時におけるCase1およびCase3の解析での堤体周辺における飽和度分布を図29に示す。この時刻においては8月16日以降の2度の水位上昇を経験しており、20～22日の多雨を経験した直後の飽和度分布を示している。GL+2.5m付近まで河川水位が上昇しており、堤外側では飽和度の上昇が見られるが、堤体の大半の領域は40～60%の飽和度となっている。これは、堤体B層の透水係数が 10^{-6} m/sと極めて低く、堤外側のり面付近での飽和度の上昇に限られたものと考えられる。本解析では、支持地盤表層のAc1層の透水係数も 10^{-7} m/sと極めて小さいため、Case1の解析では堤内側の地表面付近では飽和度が100%には到達していない。一方、Case3の解析ではAc1層の透水係数がCase1と比べて2オーダー大きい 10^{-5} m/sとしているため、河川水位の上昇によってAc1層で堤外から堤内側への浸透が生じることで、堤内側や堤体の下部で飽和度が上昇している。なお、As1層およびAs2層が解析モデル左端まで通じていないCase2の解析は、Case1と同様な飽和度分布を示していた。

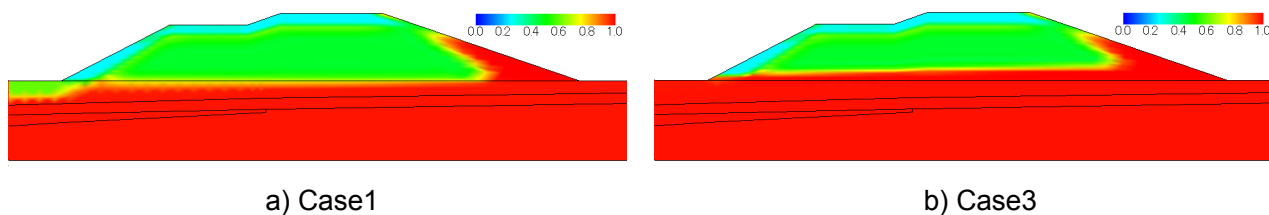


図29 堤体周辺の飽和度分布（8月22日0時）

次に、Case1およびCase3の解析で得られた平均骨格応力減少比（Mean skeleton stress reduction ratio: MSSRR）の変化を図30に示す。ここでは、弾塑性モデルを適用しているAs1層およびAs2層のコンターを示しており、平均骨格応力減少比は次式により算定される。

$$\text{MSSRR} = 1 - p'/p_0' \quad \text{式(1)}$$

ここに、 p' は平均骨格応力、 p_0' は初期の平均骨格応力である。平均骨格応力減少比が大きくなると、初期状態に対して現在の骨格応力が低下した状態となり、この値が1となると完全に骨格応力が消失し液状化状態に至ることを示している。

Case1の解析では、モデルの右端および堤体下部からモデル左端にかけてのAs1層およびAs2層において平均骨格応力減少比の減少が見られる。図29に示す飽和度分布からはAs1層は飽和度が100%となっているが、支持地盤表層のAc1層は透水係数が 10^{-7} m/sと極めて小さいため、この層からの降雨や河川水の浸透は難しい一方で、As1層の透水係数は 10^{-2} m/sと極めて大きいことから、河川水位が上昇するこの層を通じた浸透流がモデルの右側から左側に向かって発生することで平均骨格応力の減少が生じたものと考えられる。平均骨格応力減少比の上昇量は最大で0.6程度であり、完全に平均骨格応力がゼロとなるような箇所はない。

一方、Case3の解析では、As1層およびAs2層において平均骨格応力減少比がCase1と比較するとより大きな値となっている。特に、解析モデルの堤体中央付近から左側にかけての領域でAc1層との境界付

近くに位置するAs1層で平均骨格応力減少比が1に近い状態となっており、骨格応力が消失し、液状化に近い状態となっているものと考えられる。

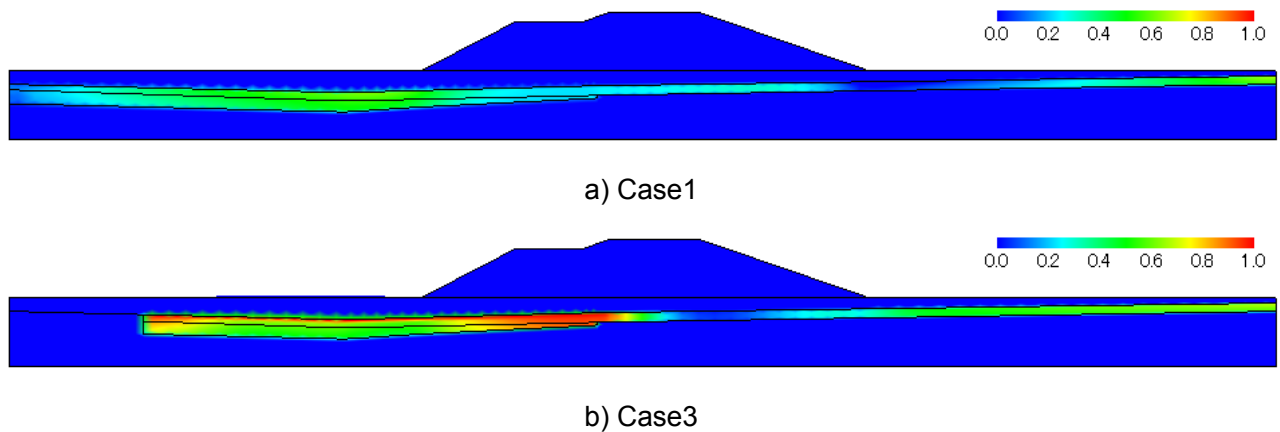


図30 平均骨格応力減少比のコンター(8月22日0時)

また、解析終了時点におけるせん断ひずみのコンターを図31に示す。Case1の解析ではほとんどひずみが生じていないが、Case3の解析では平均骨格応力減少比がほとんどゼロとなったモデルの左半分のAs1層の領域で大きなせん断ひずみが生じている。現地においては堤内側の地盤で噴砂が多数確認されているが、As1層およびAs2層における骨格応力の減少に伴うひずみの発生がこの現象を説明しているといえる。

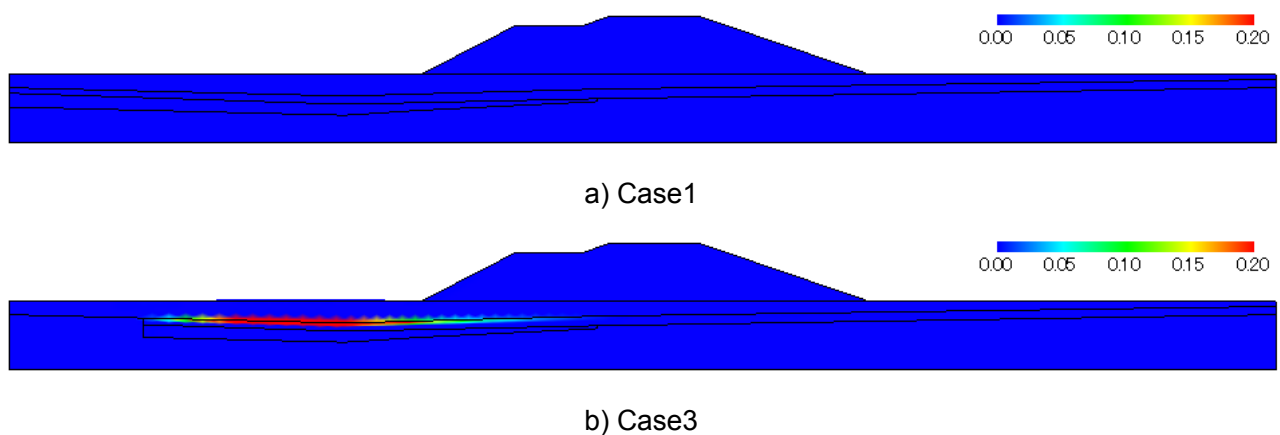
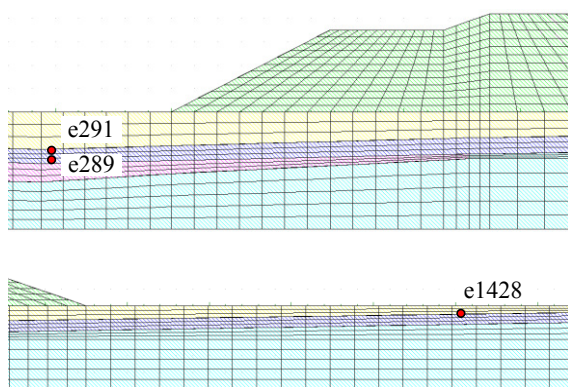


図31 せん断ひずみのコンター(8月24日0時)

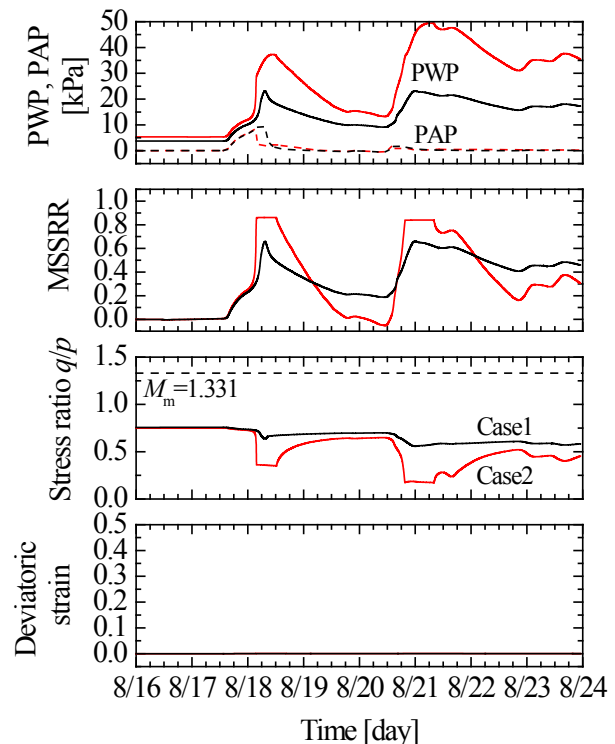
以降では、河川水位や飽和度の上昇に伴う地盤の応力変化や変形の発生状況に着目する。堤内および堤外のAs1層の各要素での諸量の時刻歴を図32に示す。出力を行った要素は図中(a)のモデルに示す。また出力を行った諸量は、各要素での間隙水圧 (Pore Water Pressure; PWP)・間隙空気圧 (Pore Air Pressure; PAP), 平均骨格応力減少比, 応力比 (平均骨格応力と偏差応力の比), およびせん断ひずみである。降雨量や河川水位の上昇に伴って間隙水圧・空気圧が上昇すると共に平均骨格応力減少比も増加し、有効応力が減少する。これらの挙動は、堤外側の要素e1428ではCase1と2での違いはほとんどないが、堤内側の要素e289およびe291ではCase2の方が間隙水圧・空気圧および平均骨格応力減少比の上昇量が大きく、Case2のe291では平均骨格応力減少比が完全に1となり、骨格応力が消失し液状化状態に至っている。

次に、応力比およびせん断ひずみの挙動に着目すると、Case2のe291においてのみ、上述の間隙水圧や空気圧の上昇が生じる期間に、応力比が破壊応力比 ($M_m=1.331$ のライン) に近づくと共に、せん断ひずみが大きく増加している。他のケースではこのような挙動は見られず、せん断ひずみが増加するようなことはない。堤内側での要素e289およびe291における応力経路図(平均骨格応力～せん断応力関係)を図33に示す。要素e289やCase1のe291においては降雨や河川水の浸透によって、平均骨格応力の減少と共にせん断応力も減少する挙動を示すが、限界状態線に到達することはなく増減を繰り返すのみである。一方、Case2のe291では一気に平均骨格応力・せん断応力が減少し、応力状態が原点に到達している。以上の解析から、As1層およびAs2層での骨格応力の減少に伴う液状化状態や破壊状態への漸近により、Case2の解析ではひずみが堤内側地盤で増加する挙動となったものと考えられる。

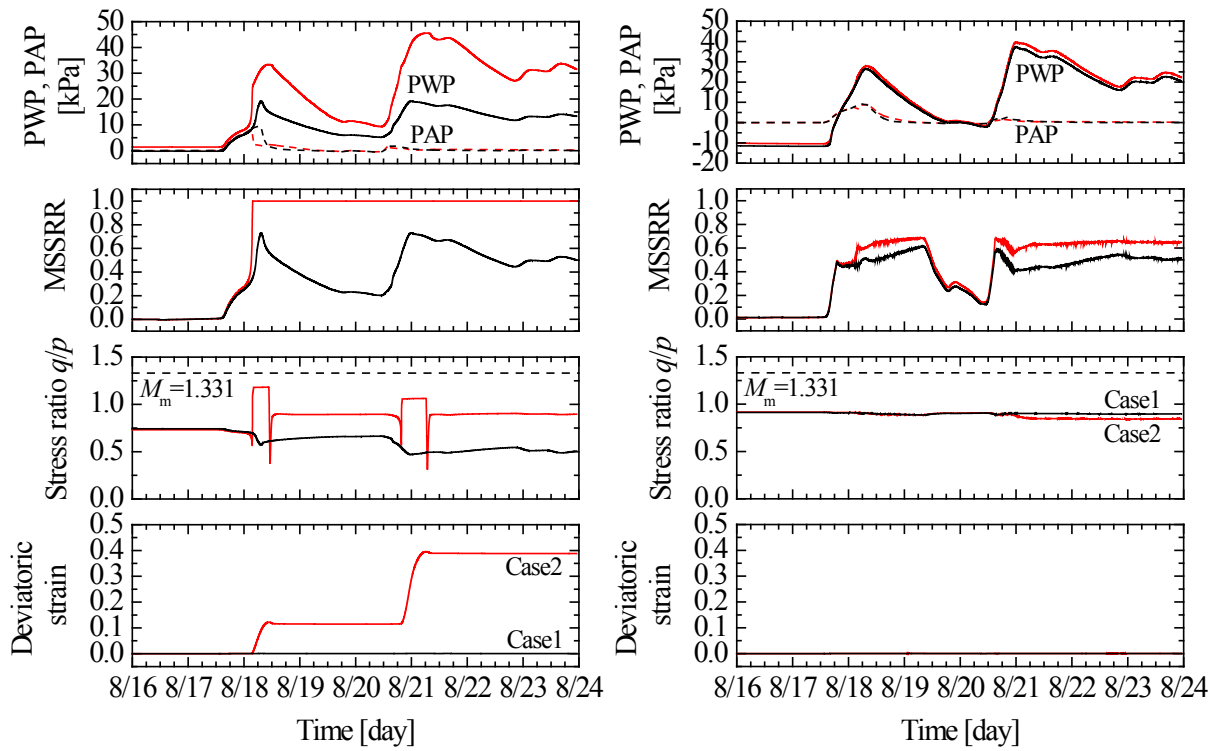
なお、図32d)に示す堤外側の要素e1428ではいずれのケースの解析においても、8月18日午後から8月19日の午後にかけての期間と、8月21日から23日にかけての期間において、間隙水圧や間隙空気圧が上昇する一方で、平均骨格応力減少比が増加している。この挙動は堤内側の要素では見られない現象である。図27b)に示した河川水位の経時変化においては、これらの期間においては水位が低下する期間となっており、堤外側の地表面の節点に作用する河川水の自重が低下していく。このことにより、間隙水圧や空気圧は低下する一方で、平均骨格応力も減少する挙動を示したものと考えられる。この挙動は、海底地盤に津波外力が作用したときの引き波時にも見られる挙動と整合しており、土の変形特性が非常に弱い場合には液状化に至る可能性があることも数値解析によって示されている⁹⁾。仮に河川水位の低下速度がより大きいようなことがあれば、堤外側の骨格応力の減少はより著しいものとなり、堤外側においても液状化に近いような応力低下が生じ得ることを示唆している。



a) 出力要素位置



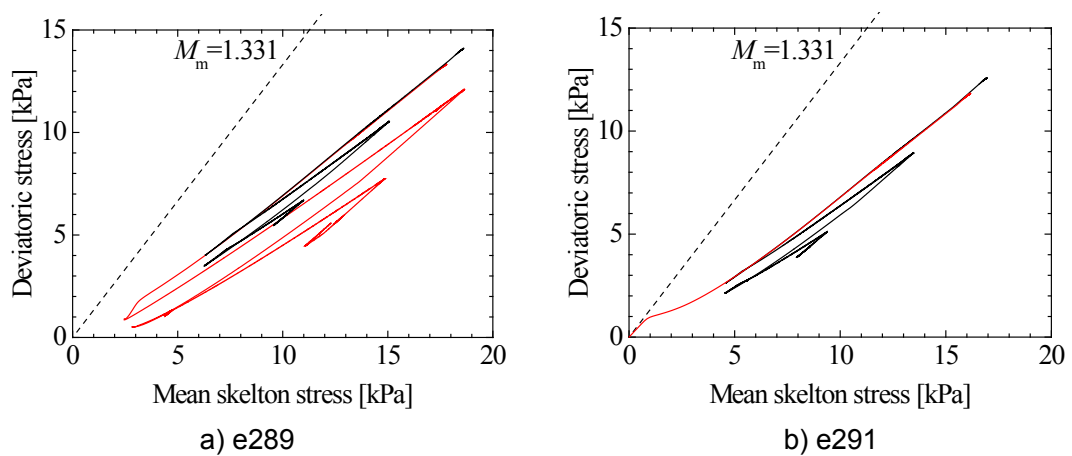
b) 要素 e289



c) 要素 e291

d) 要素 e1428

図32 要素での諸量の経時変化 (図中の黒線はCase1, 赤線はCase2)



a) e289

b) e291

図33 応力経路図 (平均骨格応力～せん断応力) (図中の黒線はCase1, 赤線はCase2)

5. まとめ

本研究では、2016年北海道豪雨災害による越流および噴砂が発生した常呂川の堤体について、被災当時の堤体内の水理状態の把握と性能を評価するため、動態観測、地盤調査、数値解析を行った。本研究から得られた知見を以下にまとめる。

1. 動態観測の結果から、2016年の出水で越流が発生した堤体では積雪はあるものの地表面から凍結線が進行し、観測期間内では裏のり面において最大で地表面から0.2m程度の領域が凍結した状態にあったが、表のり面では凍結は発生しておらず、積雪深や日射の違いによる影響と考えられる。また、堤体内の水位は、観測期間内では河川水位よりも降雨履歴を反映して上昇する傾向にあったものの、観測期間内での最大値としては堤内側で0.3m程度の上昇量であった。堤体のり面表層の水分量は、堤体内水位と同様に降雨履歴および凍結領域の融解と融雪水の浸透時に上昇する傾向にあった。噴砂が発生した堤体では、降雨時の堤体内の水理挙動や熱収支挙動は、概ね越流箇所と同様ではあったものの、堤体のり面表層の水分量の低下は越流箇所と比較すると速やかに行われ、堤体土質によっては繰り返しの降雨時や出水後水位低下時の堤体の健全性に違いが生じると言える。
2. 定期的な表面波探査によって取得した堤体内のVs分布の季節変動は、概ね動態観測における堤体内の水分量を反映した結果となっており、降雨期や融雪期などの堤体内の水分量が増加している状態での堤体内の剛性変化を表面波探査によって把握可能である。
3. 越流が発生した堤体に対する数値解析結果から、越流の開始直前における堤体内の飽和領域はのり法面に限定されており、堤体中央部は不飽和状態にあったことがわかった。このような状態で越流が発生した際には天端・裏法面の表面が浸潤化したと想定されるが、この場合は堤体内の不飽和領域の空気の大部分は閉封されるため、堤体の飽和が阻害される。すなわち、裏法の浸潤化が遅延したことが当該断面の決壊への抵抗に寄与した可能性がある。このようなことから、堤体の越流による侵食・破堤メカニズムをより詳細に解釈するためには、地盤内の間隙水圧と間隙空気圧の気液二相連成解析コードを開発し、同問題に適用する必要があることがわかった。
4. 噴砂が発生した堤体に対する数値解析結果では、越流が発生した堤体と同様に、外水位上昇時の堤体内の飽和領域は表のり面に限定されていた。一方で、地上に噴出した噴砂と同様の土質での構成を想定した堤体支持地盤の砂質土層には浸透流が発生し、間隙水圧および空気圧が上昇して裏のり尻近傍では土の平均骨格応力を減少した。また、この間隙水圧および空気圧の上昇量や平均骨格応力の減少量は、堤内地盤内における砂質土層の横断方向の位置に依存しており、砂質土層が堤内地盤内で行き止まりのように存在している解析ケースでは、間隙水圧・空気圧の上昇量および平均骨格応力の減少量が大きく、骨格応力が消失し液状化状態に至る結果となった。このように土骨格、間隙水、間隙空気からなる三相系多孔質体理論に基づく浸透-変形連成解析手法を用いることで、外水位上昇時における堤体および周辺地盤の応力状態の変化を把握できる可能性がある。

参考文献

- 1) (公社)土木学会2016年8月北海道豪雨災害調査団：2016年8月北海道豪雨災害調査団報告書，2017。
- 2) 西村聡・川尻峻三：千歳川堤防・遊水地堤を例とした堤体性能保証のための水理・力学的動態調査，北海道河川財団研究所紀要，Vol. XXVIII, pp.1-30, 2017。
- 3) Park, C.B., Miller, R.D. and Xia, J. : Multichannel analysis of surface waves, *Geophysics*, Vol. 64, No. 3, pp.800-808,1999。
- 4) 西村聡・山添誠隆・西家翔・花田智秋：砂質土堤防の降雨に対する水理応答：計測事例と解析，第5回河川堤防技術シンポジウム，pp.51-54, 2017。
- 5) 西村聡：盛土中の浸潤面挙動に関するパラメトリックスタディからの知見，地盤工学会北海道支部

技術報告集, No.53, pp.43-52, 2017.

- 6) 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），2012.
- 7) Rivas, M. F. and Nisihimrua, S.: Analysis of the hydraulic behavior of Abukuma River dyke considering infiltration and evapotranspiration, 第51回地盤工学研究発表会, 岡山, pp.1037-1038, 2016.
- 8) 土木学会堤防研究小委員会WG2：堤体内浸潤線の予測手法案 Ver.2, 2017.
- 9) Armstrong, P.J. and Frederick. C.O.: A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect, Technical report C.E.G.B.Report RD/B/N731, Berkeley Nuclear Laboratories, 1966.
- 10) 古田竜一：粘土及び砂からなる多層地盤の動的挙動のモデル化とその応用, 岐阜大学博士論文, 2003.
- 11) 松丸貴樹, 渦岡良介：不飽和土の繰返し弾塑性構成式を用いた三相系多孔質体理論に基づく盛土の地震応答解析, 土木学会論文集C（地圏工学）, Vol. 70, No. 4, pp.395-411, 2014.
- 12) Uzuoka, R. and Borja, R.I.: Dynamics of unsaturated poro-elastic solids at finite strain, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol.36, pp.1535-1573, 2012.
- 13) 奥村与志弘, 加藤亮輔, 岡二三生：津波による地盤の液状化に関する1次元解析, 土木学会論文集A1（構造・地震工学）, Vol. 68, No. 4, pp.I_1171-I_1178, 2012.