

記録的豪雨時の堤体性能評価のための間隙空気圧測定による  
水理・力学的動態観測および地盤調査

北見工業大学 地球環境工学科  
北海道大学大学院 工学研究院

川 尻 峻 三  
西 村 聡

# 記録的豪雨時の堤体性能評価のための間隙空気圧測定による 水理・力学的動態観測および地盤調査

Pore air pressure measurements for levee performance evaluation during record heavy rainfall by hydro-mechanical observation and geotechnical investigation

川尻 峻三<sup>1</sup>・西村 聡<sup>2</sup>

Shunzo KAWAJIRI and Satoshi NISHIMURA

<sup>1</sup> 北見工業大学 准教授

<sup>2</sup> 北海道大学大学院工学研究院 准教授

## 要 旨

堤防は延長が長い土構造物であり、堤防の局所的な弱点箇所を出水後に迅速かつ簡便に抽出する方法が必要である。近年では物理探査を用いた堤防の現状把握手法について提案されており、堤防の内部状況を把握できることが報告されているものの、出水中や出水直後での堤体状況について検討した事例は少ない。また、出水により変状や崩壊が発生した堤防の被災メカニズムの解明には、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。しかし、通常実施される浸透流解析によってより現実的な解析結果を得るためには、間隙空気の移動を考慮し、強雨時には浸透へのインピーダンスが増大するメカニズムを解析に組み込むことが必要である。以上のような背景から本研究では、間隙空気の挙動を考慮可能なより現実的な堤防の飽和・不飽和浸透流解析手法について、2つの計測事例に照らして考察した。また、出水中や出水後の迅速な堤防の内部情報取得手法として、2つの物理探査手法に着目し、試験堤防でその有用性を検証した。その結果、間隙空気圧を考慮した浸透流解析の結果は、降雨強度や堤体材料の土質に依ることが確認できた。また、物理探査による出水中の堤防内部状況の把握については、リアルタイム性には課題が残るものの、物理探査結果と堤体の水理状態の変化は概ね整合し、物理探査の有用性を確認した。

《キーワード：河川堤防；水理挙動；噴降水浸透；間隙水圧；間隙空気圧；動態観測；物理探査》

## 1. 序論

出水によって被災を受けた堤防では変状・崩壊の発生メカニズムの検討を行い、変状・崩壊が発生していない堤防では出水による損傷箇所を迅速に把握して性能回復を図る必要がある。しかし、堤防は延長が長い土構造物であり、堤防の局所的な弱点箇所を出水後、迅速かつ簡便に抽出する方法が必要である。近年では物理探査を用いた堤防の現状把握手法について提案されており、既存手法であるボーリング調査よりも迅速かつ広範囲に非破壊で堤防の内部状況を把握できることが報告されているものの、出水中や出水直後での堤体状況について検討した事例は少ない。一方で、出水中や出水直後の堤防の内部状況の把握手法として、これまでに提案されている物理探査の有用性が確認できた場合には、洪水後における堤防の状態把握および応急対策箇所の迅速な抽出手段の一つとしての利用価値が高まる。

また、出水により変状や崩壊が発生した堤防の被災メカニズムの解明には、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。「河川堤防の構造検討の手引き」<sup>1)</sup>には、堤内への雨水・外水の浸透過程を解析する手法として不飽和浸透流解析の定式化およびその実施に必要な不飽和水理関数の例が示されている。この手法の精度や妥当性は、土木学会地盤工学委員会堤防研究小委員会WG2により、一斉解析や実堤防挙動の観測・再現を通して2012年より継続的に検証されている。文献<sup>1)</sup>に示された方法は間隙空気の移動を考慮せず、また不飽和水理関数として飽和時の比透水係数をかなり高く設定したものを示しているため、強雨時の浸透を過大評価する傾向があり、結果として堤体天端近くまで飽和が起ころうような事象がしばしば出力される。しかし原位置での観測結果はこのような極端な堤体内水位上昇を示すことは稀である。一方で通常時の堤体内水位は上記手法で多くの場合比較的良く再現されることを考慮すると、強雨時のみ浸透へのインピーダンスが増大するメカニズムを合理的な形で解析に組み込むことが必要である。

以上のような背景から本研究では2つの検討項目を設けて、1) 間隙空気の挙動を考慮可能なより現実的な堤防の飽和・不飽和浸透流解析手法について、有限の粘性と圧縮性を有する間隙空気の挙動を考え、間隙水移動とともに連成系として解くことを提案し、本研究ではその妥当性を既設堤防と越水実験における試験堤防での現地観測の再現解析によって検証した。次に2) 出水中や出水後の迅速な堤防の内部情報取得手法として、本研究では地盤剛性を間接的に表すパラメタであるS波速度の2次元分布を測定可能な表面波探査と、地盤内の水分量を間接的に表すパラメタである比抵抗の2次元分布を測定可能な電気探査の有用性について検討した。越水実験における試験堤防では表面波探査と電気探査を、散水・湛水実験における試験堤防では表面波探査を実施し、それぞれの探査から得られた結果と堤体内の水理状態を比較・検証した。

## 2. 気液二相浸透流解析の理論と実装

### (1) 気液二相浸透流理論

「河川堤防の構造検討の手引き」<sup>1)</sup>においては、外水浸透に対する安定性照査にはRichards式に基づく浸透流解析を行うこととなっている。基本的なRichards式は間隙水のマスバランスのみに基づくものであり、式(1)のように間隙水圧（文献<sup>1)</sup>においては水頭の形で定式化されている）のみを未知数とする支配方程式である。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{k_{wr}}{\eta_w} k_{x0} \left( \frac{\partial u_w}{\partial x} + \rho_w g_x \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{k_{wr}}{\eta_w} k_{y0} \left( \frac{\partial u_w}{\partial y} + \rho_w g_y \right) \right] - c \frac{\partial u_w}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

ここに、 $x, y$ : 座標軸,  $k_{x0}, k_{y0}$ :  $x, y$ 方向の土の固有透過係数,  $k_{wr}$ : 比透水係数,  $\eta_w$ : 水の粘性係数 (=0.001

Pa・sec),  $\rho_w$ : 水の密度,  $g_x, g_y$ :  $x, y$ 方向の重力加速度である. 未知数は水圧 $u_w$ である.  $c$ は比水分容量であり,  $\partial\theta_w/\partial u_w$ で定義される. また,  $\theta_w$ は体積含水比である. この式は, 間隙空気の存在が間隙水の移動に影響を及ぼさないことを想定しており, 低飽和度領域への緩速な浸透の場合などのように, 間隙空気の逃げ道が十分に確保される状況の表現に適している. 一方で, 領域境界での飽和が非常に速い場合や, 境界が被覆されている場合のように間隙空気の自由な移動が妨げられる際には, この式の適用は間隙水圧予測の大きな誤差につながる.

上記の問題は間隙水・間隙空気の移動およびこれらの相互作用を常にとらえる連成式の適用により回避できる. 気液二層浸透流の連成式は古くより提案されており<sup>2)</sup>, 以下のように表せる.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{k_{wr}}{\eta_w} k_{x0} \left( \frac{\partial u_w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{k_{wr}}{\eta_w} k_{y0} \left( \frac{\partial u_w}{\partial y} + \rho_w g \right) \right] - c \frac{\partial (u_w - u_a)}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{I}{\beta_a} \frac{k_{ar}}{\eta_a} k_{x0} \frac{\partial u_a}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{I}{\beta_a} \frac{k_{ar}}{\eta_a} k_{y0} \frac{\partial u_a}{\partial y} \right] + \frac{c}{\beta_a} \frac{\partial u_w}{\partial t} - \left[ \frac{\Phi(I - S_w)}{p_{atm}} + \frac{c}{\beta_a} \right] \frac{\partial u_a}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

$$c = \frac{\partial \theta_w}{\partial (u_w - u_a)} \beta_a = \frac{p_{atm}}{u_a + p_{atm}} \quad (4)$$

ここに,  $k_{ar}$ : 比透気係数,  $\eta_a$ : 空気の粘性係数 (=0.1 Pa・sec),  $\Phi$ : 間隙率,  $S_w$ : 飽和度である. 未知数は水圧 $u_w$ に加えてゲージ圧での空気圧 $u_a$ である. また,  $p_{atm}$ は大気圧である. 本研究では有限要素法を用いてこれらの単相浸透流・気液二相浸透流解析を行った. 両式に未知数 $u_w$ と $u_a$ があるため, これらを同時に求めていくことで互いの相互作用を勘案した解を得ることができる.

## (2) 有限要素法によるコード実装

本研究では, 前節の式(2)(3)を有限要素法により空間離散化し, 有限差分法で時間離散化することで解析コードを構築した. 上2式は離散化により以下のような連立方程式となる.

$$\begin{Bmatrix} \{q_w\} \\ \{q_a\} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} [K_w] & 0 \\ 0 & [K_a] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_w\} \\ \{u_a\} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \{b\} \\ 0 \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} [C_w] & -[C_w] \\ -[C_a^w] & [C_a^a] \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{Bmatrix} \{u_w\} \\ \{u_a\} \end{Bmatrix} = 0 \quad (5)$$

となる. ここで $\{\}$ はベクトルを表し, 有限要素の節点上での値を各要素とする. 上式中,  $q_w$ および $q_a$ はそれぞれ間隙水・間隙空気のフラックスを表す. また, 係数行列 $[\ ]$ はそれぞれ式(2)(3)中の係数に由来して離散化により現れるものである. 実際にはベクトルを $u_{w1}, u_{a1}, u_{w2}, u_{a2}, \dots$ というように, 間隙水・間隙空気に関わる要素を互いに並べることで係数行列のバンド幅を抑えている. 時間については, Crank-Nicolson法を用いて積分を行った. 式(5)を以下のように簡略化して表すと,

$$\{q\} - [K]\{u\} - \{b\} - [C] \frac{\partial}{\partial t} \{u\} = 0 \quad (6)$$

時間差分の考慮により

$$\begin{aligned} [M]\{u\}_{t+\Delta t} &= [\{q\}_{t+\theta\Delta t} - \{b\}_{t+\theta\Delta t}]\Delta t - [\Delta t(I - \theta)[K]_{t+\theta\Delta t} - [C]_{t+\theta\Delta t}]\{u\}_t \\ ([M] &= [\theta[K]_{t+\theta\Delta t}\Delta t + [C]_{t+\theta\Delta t}]) \end{aligned} \quad (7)$$

として  $\{u\}_i$  から  $\{u\}_{i+1}$  を求めることができる。Crank–Nicolson法では通常  $\theta=0.5$  を適用するが、本研究では著者の経験より  $\theta=0.7$  とした。

この他、有限要素法を適用するにあたり、要素は4節点四角要素を用い、ガウス積分次数は可変とした。後者については、飽和要素（節点でのサクシオン値が全て0以下のもの）では1次、不飽和要素（一つでもサクシオン値が負の節点があるもの）では2次となるように自動的に判定されるものである。これにより、非線形性の低い飽和要素に対してはマトリクス構築の時間を節約することができる。連成解析は一般に非対称行列による線型方程式を解く必要があるが、本研究ではソルバーライブラリーとして CLAPACK を用いた。

式(2)(3)中の係数  $k_{wr}$ ,  $k_{ar}$ ,  $c$  はサクシオン  $u_a - u_w$  の関数であり、具体的な表現式が必要となる。本研究では van Genuchten 式および van Genuchten – Mualem 式<sup>3)</sup>によりこれらを以下のようにモデル化した。

$$c = (\Phi - \theta_r) a m n \{ \alpha (u_a - u_w) \}^{n-1} \times [1 + \alpha \{ (u_a - u_w) \}^n]^{-m-1} \quad (8)$$

(ただし  $u_a - u_w < 0$  では  $c = S_e$  (定数) とする)

$$k_{wr} = \sqrt{S_e} \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^2 \right] \quad (9)$$

$$k_{ar} = (1 - S_e)^\gamma \left( 1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^{2m} \quad (10)$$

ここに、 $\theta_r$  : 残留体積含水率,  $a, n$  : フィッティングパラメタ,  $m = 1 - 1/n$ ,  $S_e$  : 有効飽和度 ( $= (\theta_w - \theta_r) / (\Phi - \theta_r)$ ) である。単相解析では、式(5)中の  $u_a$  は0となる。また、定数  $\gamma$  は0.5に設定した。

### (3) 一次元カラム数値シミュレーションによる気液二相浸透流解析の検証

地表からの降雨あるいは外水の浸透に対する空気相挙動の影響を検証するため、一次元の地盤モデル（カラム）を想定し、浸透のシミュレーションを行った。これはコードの妥当性検証に加えて、計算安定性の向上のために設ける便宜的手法の影響を評価する目的もある。式(10)では、有効飽和度  $S_e$  が1のとき相対透気係数  $k_{ar}$  が0となり、間隙空気圧の求解が不安定となる。これを回避するために今回は  $k_{ar}$  に最小値  $k_{ar,min}$  を設け、式(10)がこれより小さい値を与える場合には  $k_{ar} = k_{ar,min}$  とした。この最小値は便宜的なものなので、恣意的な値の入力が結果に影響を与えない範囲で設定する必要がある。これについてパラメトリックスタディを行い、適切な  $k_{ar,min}$  の値の範囲を同定した。

図1に一次元カラムの設定と有限要素メッシュを示す。側面と底面境界は非排水・非排気とし、地表のみを降雨浸透境界とした。降雨浸透境界では、通常時は流量を規定するが、水圧  $u_w > 0$  が起こる場合には自動的に水圧  $u_w = 0$  とする規定に切り替わるものであり、地表面からの強制的な流入を防ぐものである。空気相については、飽和 ( $u_a - u_w < 0$ ) した場合のみ流量ゼロ、不飽和の場合は  $u_a = 0$  とするのが厳密な処理であるが、実際には不飽和時に  $k_{ar,min}$  が十分に小さくなることによって流量が非常に小さくなることから、単に  $u_a = 0$  を規定した。この一次元カラムに地表より 1mm/hour の降雨を与えた際の応答をシミュレーションした。なお、用いたパラメタ値は表1に示す。

上面:  
液相フラックス: 0.00001m/sec (=36mm/hr)  
空気圧 = 大気圧

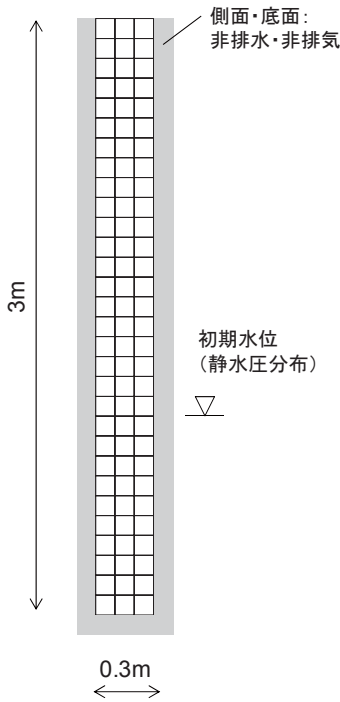


表1 一次元カラム解析に用いたパラメタ値

パラメタ	値
$k_{x0} = k_{y0}$	$1.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2$
$\alpha$	0.1019 1/kPa
$m$	0.3
$n$	1.43
$\theta_r$	0.1
$\phi$	0.5
$S_s$	$1.02 \times 10^{-5}$ 1/kPa
$\eta_w$	$1.0 \times 10^{-6}$ kPa·sec
$\eta_a$	$1.0 \times 10^{-4}$ kPa·sec
$\rho_w$	1000 $\text{kg/m}^3$

図1 解析検証用一次元カラム

図2に間隙水単相のみに基づく(式(1))間隙水圧の増加再現結果および気液二相連成解析(式(2)(3))による結果を示す。地表付近である高さ3mや2.5mの地点に着目すると、解析初期では両解析間であまり相違がない。しかし時間が経過すると、単相解析の場合、約14,000secでカラム全体が飽和に至る(地表を水位基準とする静水圧に至る)のに対し、二相連成解析では飽和に約28,000sec程度の時間がかかっている。この過程を間隙水圧・間隙空気圧のプロファイルとして示したものが図3である。連成解析の場合、初期地下水位(1m)と地表の間に空気が封入されているのが明らかであり、間隙水の浸透のためにはこの空気が地表から排出される必要がある。しかし飽和度が上がった地表付近においては式(10)に従って透気係数が大きく減少しており、排気が格段に遅れることになる。この過程における間隙空気圧を図3(c)に示すが、解析を通じて間隙空気圧はせいぜい2~3kPaしか増加していないことがわかる。わずかな空気圧の上昇が比較的大きな浸透へのインピーダンスにつながるという。

上記の二相連成解析では $k_{ar,min}=0$ と設定しても不安定化を呈さずに解析が進行したが、より複雑な境界値問題を解く際には、前記のように $k_{ar,min}$ に有限値を入力すると計算安定性が増すことがある。図4は上記と同様の問題を $k_{ar,min}=0, 0.001, 0.01, 0.1$ として入力した場合の、高さ0.5mおよび2m地点での間隙水圧時刻歴を示したものである。同図中には単相解析による結果も併記した。 $k_{ar,min}$ を0とした場合と0.001とした場合では結果にほとんど差異がないことがわかる。これにより、次章以降の解析では常に $k_{ar,min}=0.001$ として解析を行った。また、 $k_{ar,min}$ を大きくしていくと次第に結果が単相解析結果に漸近していくことも図4からわかる。これは、飽和領域での透気係数の減少が小さければ(つまり、空気の封入が起こらない)、二相連成解析と単相解析は同等の解を与えるということであり、解析結果の妥当性を示すものである。



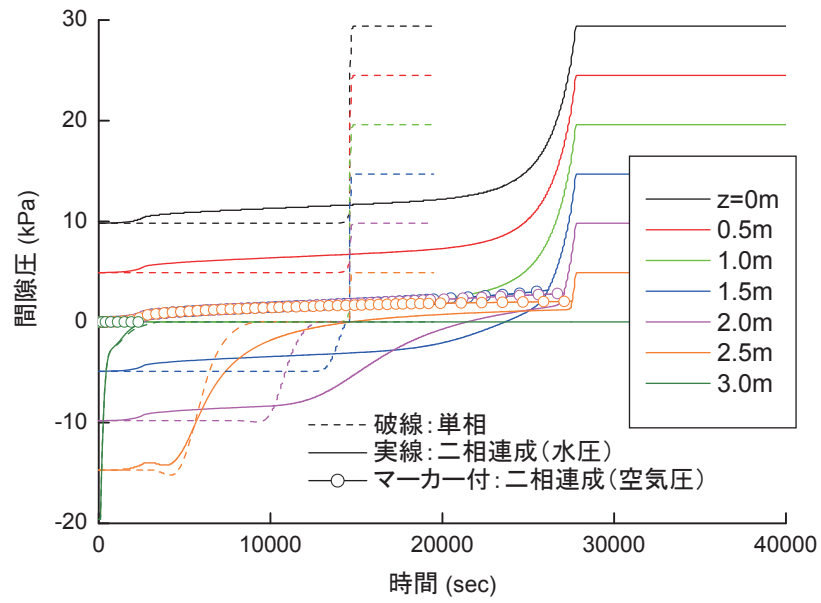
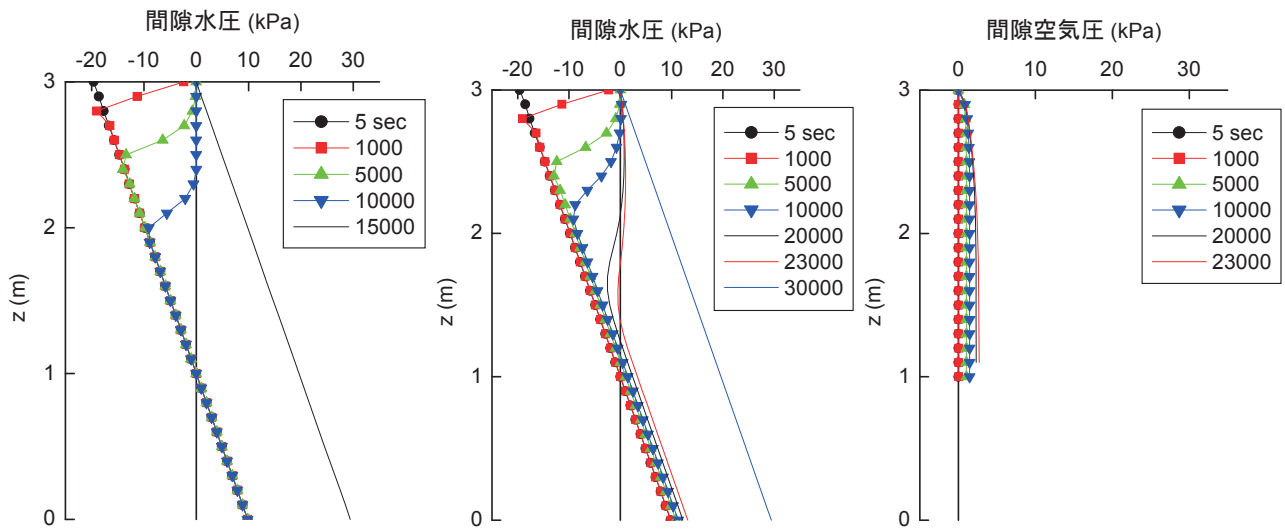


図2 単相解析と二相連成解析による間隙圧変化の比較 (時刻歴)



(a) 単相解析 (間隙水圧) (b) 二相連成解析 (間隙水圧) (c) 二相連成解析 (間隙空気圧)

図3 単相解析と二相連成解析による間隙圧変化の比較 (間隙圧プロファイル)

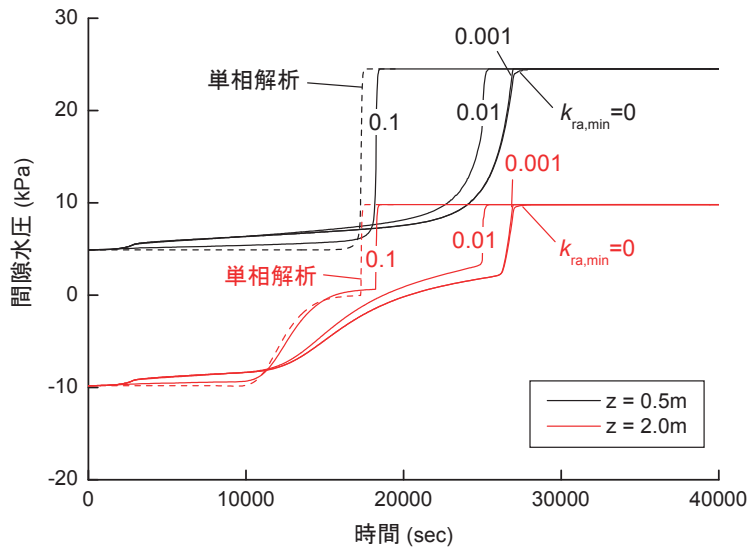


図4 比透気係数の最小値 $k_{ar,min}$ 設定の影響

#### (4) 気液二相浸透流解析による実堤防の間隙水圧挙動の解釈

本研究は常呂川堤防や釧路川堤防など北海道内の堤防の水理モニタリングと解釈を想定して当初の研究計画を立てた。実際に常呂川堤防では、前年度に設営した観測システムを増強したが、道内は強雨の頻度が低く、単年度内に堤体の安定性に影響を及ぼすような強雨事象が起こる可能性は低い。そこで、著者が国内他地域に設けている同様の観測地点も同様の増強を行い、観測を継続した。そのうちここでは秋田県八郎潟町洲先における馬場目川堤防の事例について報告する。

観測サイトの位置を図5に、断面幾何を図6に示す。図6に示す地質断面は、堤内側法肩から実施したボーリング調査により推定したものである。本サイトは二級河川馬場目川が八郎潟調整池に注ぐ地点であり、同様の断面構成が上流側に約2km連続していると推定される。観測断面は天端から約1mの位置に薄い礫層が存在しているものの、堤体・基礎地盤ともに概ね均質な砂質土で構成されていると考えられる。また、本サイトは堤内側に水路が設けられており、堤内外両側で水理的境界条件が明確であるという特徴がある。堤内側水路の水位は河川水位よりも常時約1m低く、堤外側から堤内側へ常時浸透流が存在していると考えられる。堤防の比高は2.8m、法勾配は1:2であり、法面は堤内外ともに植生で覆われている。



図5 馬場目川堤防観測サイト位置

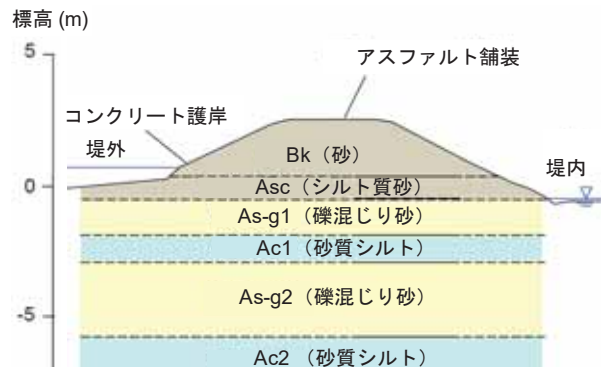


図6 馬場目川堤防観測位置標準断面



原位置における水理状態モニタリング手法として、自作の電気式テンシオメーターを用いて堤体内間隙水圧の長期断続的観測を行った。図7は今回製作したテンシオメーターの模式図である。テンシオメーターはすべて堤内側の法肩・法中央の複数の深度に設置した(図8)。また、一部の深度では計測結果の信頼性を高めるため、同深度に2つのテンシオメーターを設置した。観測は2018年8月18日から開始し、現在も継続中である。圧力計(SMC PSE573-01;計測レンジ100~100kPa)は地中に設置したが、地中の温度変化の影響を受けるため、同深度に温度計を設置することで計測値の補正を行った。また、河川・水路水位の計測もロガー内蔵の水位計(HOBO CO-U20L-04)を用いて行った。

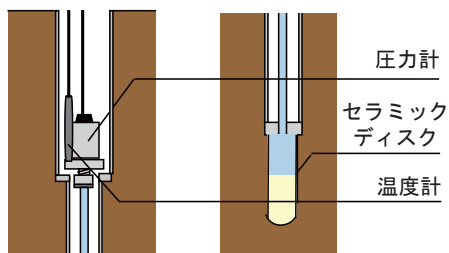


図7 電気式テンシオメーターの設置形態

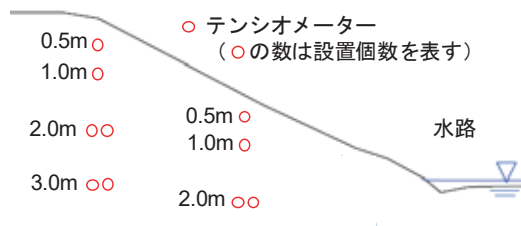


図8 電気式テンシオメーターの設置位置

法肩より実施したボーリングで不攪乱試料を採取し、土の保水性試験(JGS-0151)を吸引法により行い、その結果をもとに表2に示す水分特性曲線に関する各パラメータを同定した。図9にBk層(砂層)とAsc層(シルト質砂)を対象とした保水性試験結果、及びvan Genuchtenモデルのフィッティングカーブを示す。As-g1層以深の土層は今回の解析対象期間において常に外水位以下の飽和状態にあったため、不飽和浸透特性値を考慮する必要はない。また、飽和領域における空気圧計算の安定性を確保するため、前記の通り比透気係数 $k_{ar}$ の下限值 $k_{ar,min}$ を0.001に設定した。

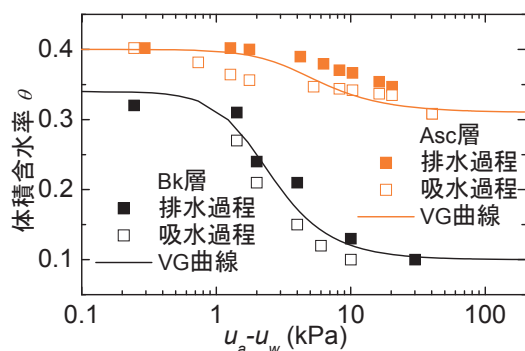


図9 Bk層・Asc層の水分特性曲線

表2 Bk層・Asc層のvan Genuchtenパラメータ値

土層	$\alpha(1/kPa)$	$n$	$m$	$\Phi$	$\theta_r$
Bk	0.54	2.45	0.59	0.34	0.10
Asc	0.27	2.20	0.55	0.40	0.31

図10に解析に用いた有限要素モデル、入力したパラメータ及び設定した境界条件を示す。Bk層とAsc層の飽和透水係数は不攪乱試料を用いた定水位透水試験の結果をもとに決定した。As-g1層においては、現場透水試験を回復法により実施し、その結果をもとに飽和透水係数を決定した。Ac層はクレーガー法により推定した飽和透水係数を適応した。図10中では飽和透水係数 $k_{sat}$ をm/secの単位で表記しているが、固有透過係数( $m^2$ )は図中の値の約 $10^7$ 倍に相当するものである。また、全層において透水係数の異方性は考慮せず解析を行った。比水分容量は文献<sup>1)</sup>を参考に決定した。

液相に対する境界条件として、モデルにおいて外水位より上部の表面は降雨浸透境界とし、観測サイト近傍のAMeDAS五城目観測所にて観測された降雨量を与えた。この境界上のノードにおける水圧 $u_w$ は常に0kPa以下になるように浸透量に上限を設け、飽和地盤に水が浸透する現象は起こらないようにした。外水位以下の表面は水圧規定境界とし、堤内外に設置した水位計により記録された水位に相当する静水圧を与えた。有限要素モデル下部は、外水位と内水位を直線で結んだ水位を推定し、それに相当する静水圧を与えた。気相に対しては、降雨浸透境界上のノードに空気圧 $u_a=0\text{kPa}$ （大気圧）を規定し、外・内水位以下の表面は非透気境界と規定した。また、境界条件は記録した外・内水位変動を反映した。計算ステップは900秒で一定として解析を行った。

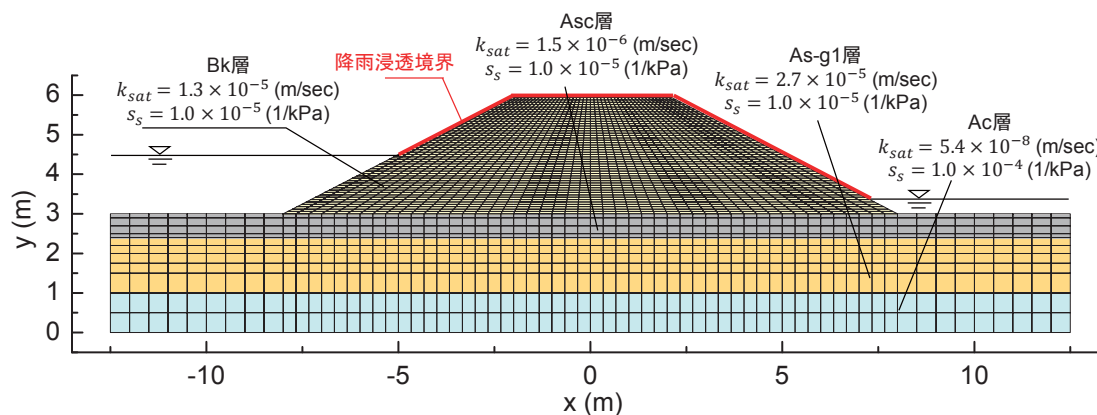


図10 調査サイトの有限要素モデル、各層入力パラメータ及び設定境界条件

法肩深度3m及び深度0.5mの計測結果と単相解析及び二相流解析結果を図11(a)に示す。単相解析・二相流解析ともに再現性は非常に高いといえる。これは、室内試験により得られる現場の物理特性を反映した、透水係数や水分特性曲線といった入力パラメータを用いることで、堤体内間隙水圧挙動は再現可能であることを示している。2つの解析結果は同じ間隙水圧挙動を出力しており、封入空気の影響がほぼ無かったことが分かる。これは入力した降雨量が封入空気の影響を生じさせるほど大きくなかったことや、堤体の透水性が高かったことが原因であると考えられる。今回の調査サイトのような高透水性の堤体の場合、連続降雨量100mm未満の降雨イベントでは封入空気が浸透を妨げる現象は発生せず、二相流解析を行う必要はないと言える。そこで、観測降雨量の2倍を入力値とする仮想条件下で単相解析・二相流解析をそれぞれ行った。図11(b)に示すその結果を、観測降雨量をそのまま入力した図11(a)の結果と比較すると、2倍の降雨量を入力したケースでは単相解析と二相流解析の出力結果に明らかな相違が見られる。前述の9/10の降雨イベント時における出力に着目すると、単相解析では約20kPaの間隙水圧上昇を示している一方、二相流解析の結果は約6kPaの上昇にとどまっており、倍の降雨量を入力したにも関わらず間隙水圧上昇量は図8のケースとほぼ同等となった。また、本サイトでは2017年7月に連続降雨量約100mmの降雨が発生している。この期間を対象とした単相・二相流解析も実施したが、2つの解析結果に相違は見られなかった。また、同じ連続降雨量でも、時間降雨量に表されるようなごく短時間の降雨パターンの相違も結果に影響すると考えられ、これについては今後検討していく。以上より、連続降雨量150mm以上の降雨イベントを想定した場合、調査サイトのような高透水性の堤防においても、空気が封入され浸透が妨げられる現象が発生することが分かる。

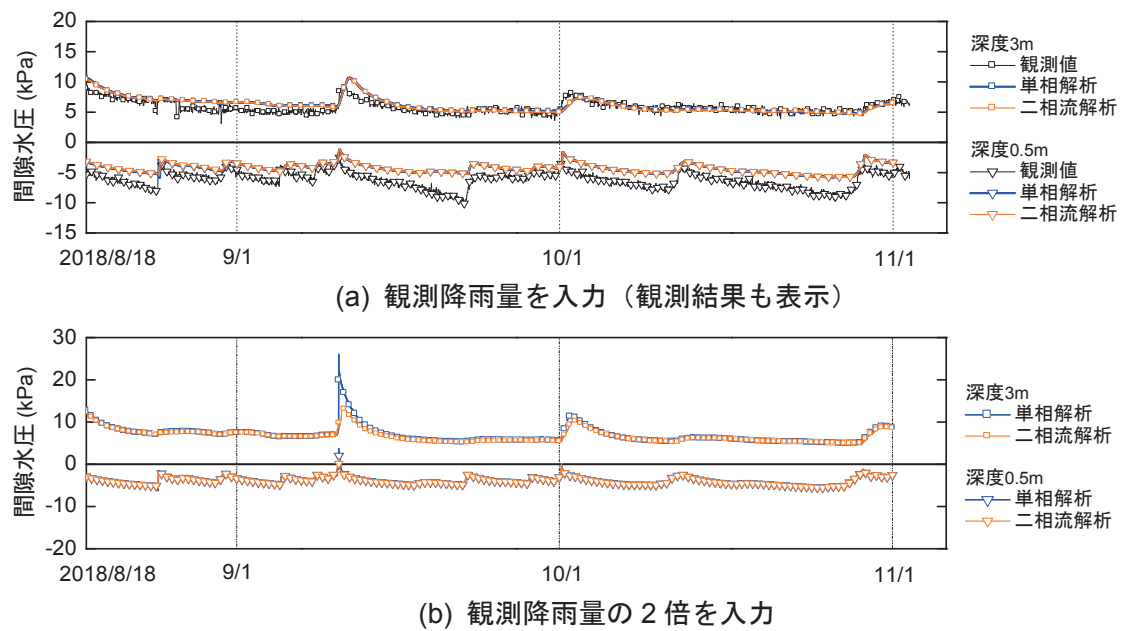


図11 法肩深度3m・0.5mの单相・二相流解析結果

この9/10の降雨イベント前後を拡大した、天端中央の深度2mにおける单相・二相流解析結果（間隙水圧・空気圧挙動）を図12に示す。单相解析では、降雨入力に対して迅速に間隙水圧が約20kPaの上昇を示す一方で、二相流解析では初めに間隙空気圧が約2kPa上昇し、その後間隙水圧が約6kPa上昇した。これは、豪雨により堤体内に空気が封入される現象を再現している。また、間隙空気圧は降雨入力直後に上昇を示すが、すぐに発散し定常状態に戻ることが分かる。図13に2018/9/10 12:00時点のモデル中央（ $x=0\text{m}$ ）における单相・二相流解析による間隙水圧・空気圧の鉛直方向分布を示す。なお、 $u_w < u_a$ の領域における空気圧のみ表示している。单相解析結果では水圧が天端から鉛直方向にほぼ静水圧分布しており、堤体は全領域が完全に飽和していることが分かる。一方、二相流解析による間隙水圧・空気圧の分布は大きく異なっている。4m< $y$ <5mの範囲において地盤は不飽和状態であり、同範囲に約2kPaの間隙空気圧が封入されていることが確認できる。これは、強雨により堤体表面のみが部分的に飽和し、堤体内に空気が封入され水の浸透を妨げる現象を再現している。図14に観測降雨量の2倍を入力した单相・二相流解析による、2018/9/10 12:00時点の水圧 $u_w$ をコンター図で示す。单相解析ではこの時点において、モデルの全域において $u_w > 0\text{kPa}$ であり、堤体が完全に飽和していることが分かる。しかし二相流解析では、堤体内浸潤線は外水位とほぼ同じ高さであり、堤体内への水の浸透が限定的であったことが分かる。図15に降雨量2倍を入力した解析における、降雨イベント直後の飽和度及び間隙空気圧をコンター図で示す。なおコンター図においては、飽和領域における空気圧は0kPaとして表示している。降雨イベント直後の2018/9/10 12:00時点において、堤体内の飽和度が低い領域で、より高い空気圧が封入されていることが確認できる。また、対象とする領域を天端全体に拡大しても、封入される空気圧は最大でも2kPa程度である。以上より、150mm以上の雨が5～6時間以内に連続的に降る短時間豪雨による浸透過程に着目すると、堤体内に空気が封入され浸透を妨げる大きな要因となると言える。また、地盤が飽和に至る前後の計算安定性に課題が残るため、解析アルゴリズムや計算ステップの設定を今後改善する必要がある。

今回解析対象とした期間では、連続降雨量が150mmを超えるような降雨イベントは観測されなかったが、原位置での間隙水圧観測は来年以降も長期的に継続して行う予定であり、今後そのような降雨イ

ベントが発生した際には、豪雨時の間隙水圧上昇を観測することができる。実際の観測値と単相・二相流解析結果からより詳細な浸透挙動を考察することが期待される。

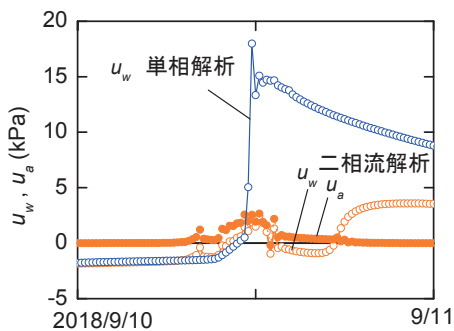


図12 モデル中央・深度2mの各解析結果  
(観測値の2倍の降雨を入力)

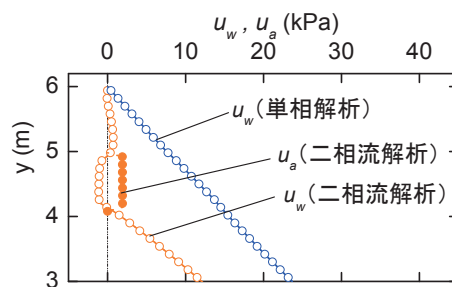


図13 モデル中央における $u_w$ ,  $u_a$ の深度分布 (9/10 12:00時点)

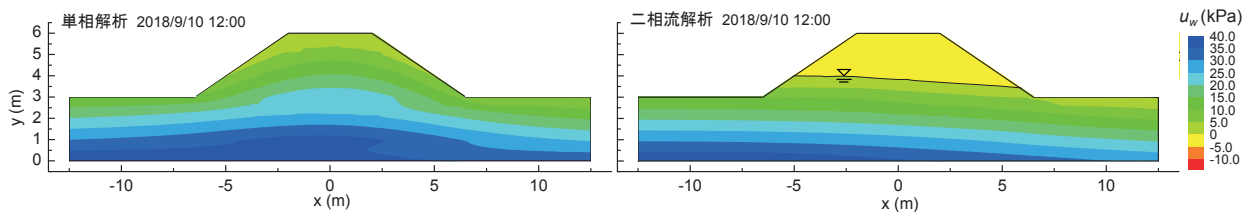


図14 2018/9/10 12:00時点の単相・二相流解析による堤体内間隙水圧分布

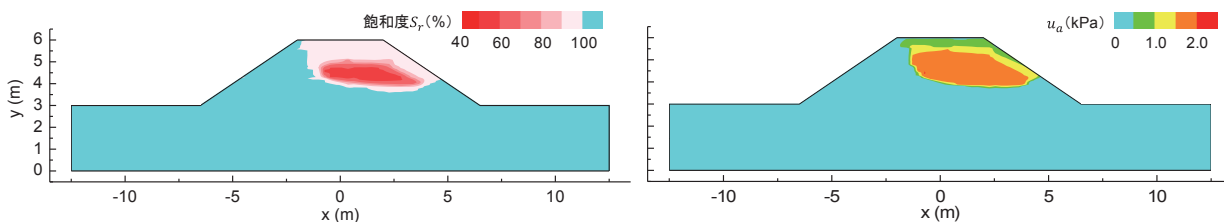


図15 2018/9/10降雨イベント前後の二相流解析による飽和度・間隙空気圧分布

### 3. 千代田実験水路における破堤実験中の堤体内水理挙動

#### (1) 物理探査による浸潤過程の可視化

近年、各種物理探査を用いた堤防の現状把握手法について提案されており、既存手法であるボーリング調査よりも迅速かつ広範囲に非破壊で堤防の内部状況を把握できることが報告されているものの、出水中や出水直後での堤体状況について検討した事例は少ない。そこで本項では堤体内への浸透状況を把握するための物理探査手法の適用性を検証するために、国土交通省北海道開発局と寒地土木研究所が十勝川千代田実験水路で実施した実物大破堤実験における河川水位の上昇過程において、表面波探査および電気探査を実施した結果について報告する。

図16は国土交通省北海道開発局が十勝川千代田実験水路で実施した破堤実験に用いた実物大堤防（以下、実験堤防とする）の概要を示している。実験堤防は縦断方向の長さが約100mであり、縦断方向中央には破堤のきっかけとなる深さ約0.5m・幅約1mの切り欠きが存在している。本稿で報告する物理探査は、この実験堤防の上流部で実施した。図17は実験堤防の代表的な3地点で採取した地盤材料の粒度分布を示している。堤防表層は粘性土もしくはシルト質土で、堤防内部は礫質土によって構成されている。このような実験堤防の図16a)に示すような箇所において、表面波探査および電気探査のそれぞれの測線を配置して、外水位上昇中の一定時間間隔でそれぞれの探査を実施した。なお、表面波探査については縦断方向に、電気探査について縦断および横断方向に測線を配置した。

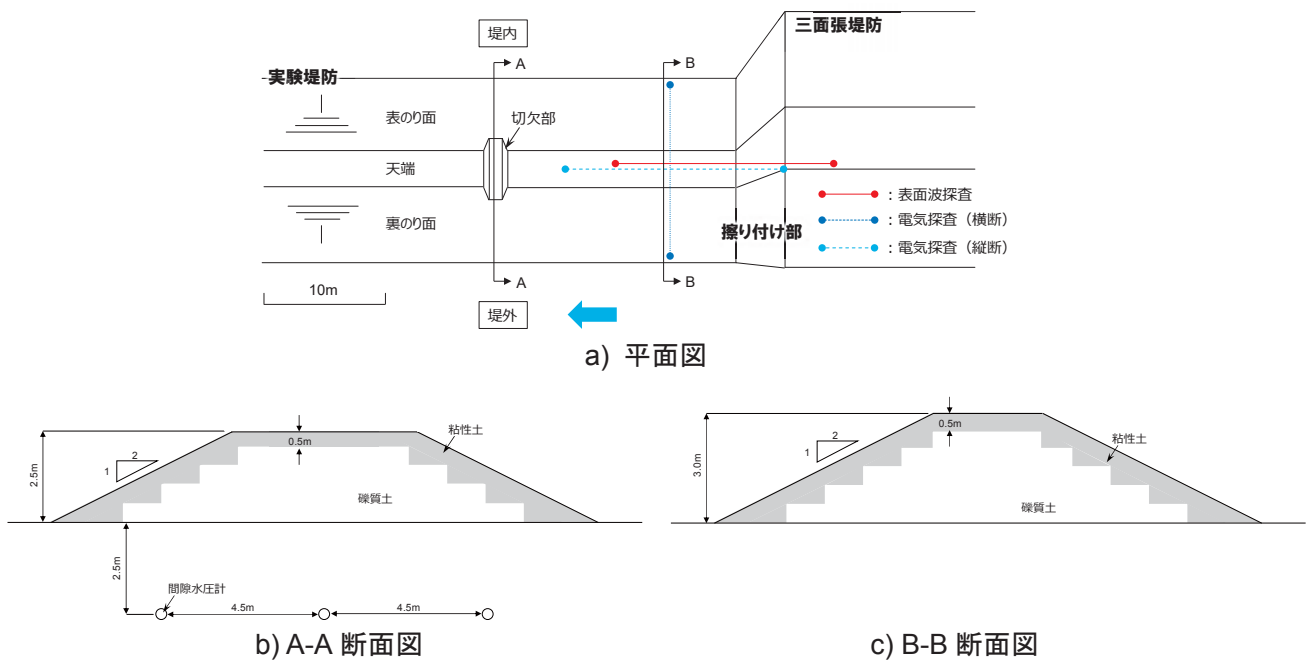


図16 実験堤防の概要

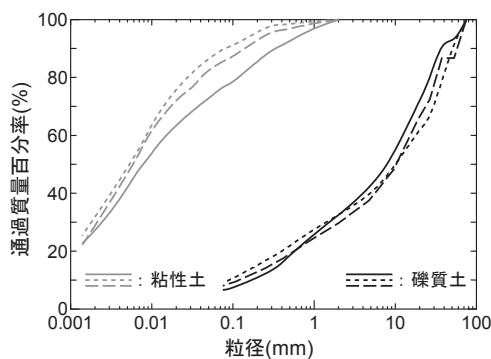


図17 実験堤防に用いられた堤体材料の粒度分布



図18は表面波探査および電気探査の実施状況を示している。表面波探査は弾性波探査の一つであり、地盤の地表面付近を伝播する表面波を複数個設置した地震計で測定し、表面波の分散性を利用して解析することで、2次元的なS波速度分布を求める手法である。S波速度は地盤のせん断剛性率を間接的に表すパラメタであり、河川水が堤防内に浸透することによる飽和度上昇や間隙水圧上昇によって土のせん断剛性が低下した際にはS波速度が低下するため、堤防内の浸透状況を把握できると予想される。

電気探査<sup>1)</sup>については、地盤内に電気を流し、その際の電気応答を測定・解析することによって、地盤内の比抵抗分布を求める手法である。この探査から取得できる地盤の比抵抗は、土の粒度特性や飽和度と関連しており、比抵抗分布から堤防の土質構成や浸潤状況を把握できる。



図18 実験堤防および物理探査測線の状況

図19は外水位上昇中に実施した表面波探査から取得した堤防内のS波速度分布、外水位、堤体内水位を示している。なお、堤体内水位については、図16a)のA-A断面での計測結果を示している。また、表面波探査は実施時の安全性を考慮し、外水位が上昇して越水する前までの3回のみの実施とした。全体的な傾向として既設の三面張堤防や支持地盤よりも、今回の越水破堤実験のために新設した実験堤防のS波速度が低いことから、表面波探査から取得したS波速度分布は概ね妥当であると判断した。距離程 $X=0\sim 2\text{m}$ 、標高 $Y=14\sim 14\text{m}$ の堤防下部の範囲では、経過時間とともにS波速度がわずかに低下する傾向にある。堤体内水位は外水位上昇とともに上昇しているため、堤体下部でのS波速度の低下は堤体内水位の形成と上昇によるものと予想される。また、実験終了後の16:10~16:24に実施した結果を見ると、図中に示した実験中の最大堤体内水位よりも下部の領域でS波速度が低下している。さらに実験後には破堤口の拡大に伴い、表のり面の大部分が流出していた。このことから実験終了後のS波速度の低下は、水位上昇による堤体土の剛性低下や表のり面流出による応力開放の影響を受けていると考えられるが、いずれにしてもS波速度分布は実験堤防の状況を表現できると言える。

図20は先述した表面波探査と同様に外水位上昇中に実施した電気探査から取得した横断面での比抵抗変化率を示している。比抵抗変化率については、越水実験前日に取得した比抵抗分布を基準としている。のり面表層と堤防内部において比抵抗変化率が異なっており、比抵抗分布によって堤防を構成している土質の違いを表現できていると言える。堤体内水位の上昇に伴い、10:30には距離程8~12m程度の範囲で比抵抗の変化率が大きくなり、低比抵抗化が認められる。しかし、支持地盤から鉛直上向きに低下比抵抗化(変化率がマイナス)しているように見え、これについては解析上の誤差の可能性はある。しかし、裏のり面において堤体内水位が認められる11:00の段階においても低比抵抗な状態にあり、比抵抗分布と堤体内水位の分布は調和的な結果と言える。



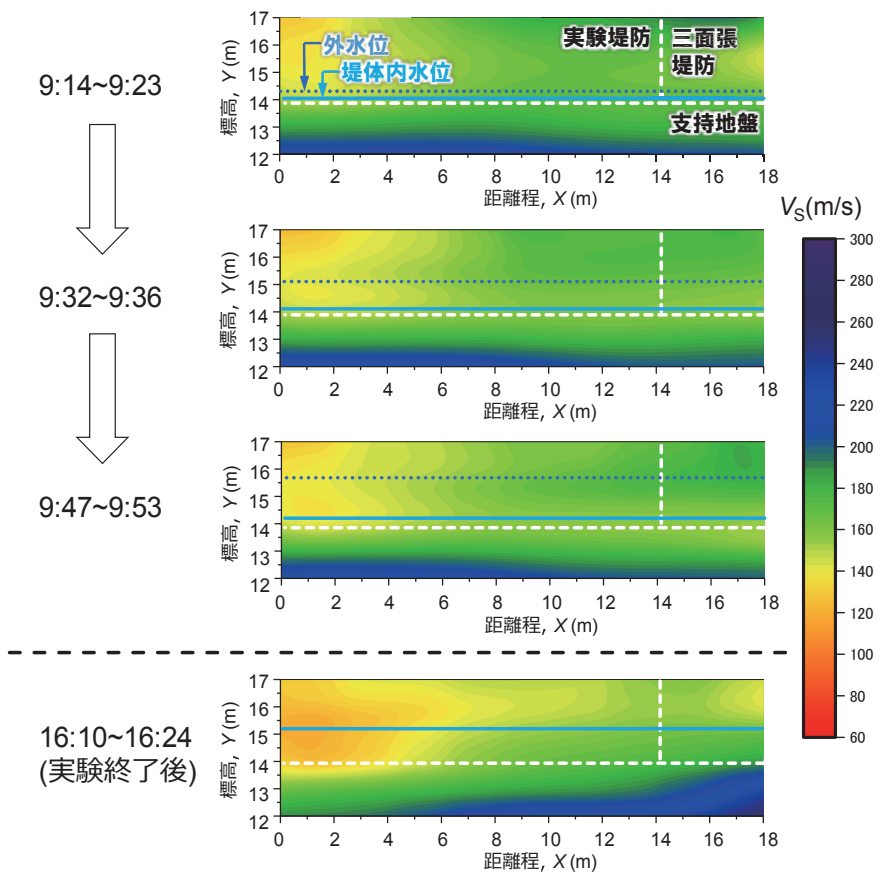


図19 外水位上昇中のS波速度分布

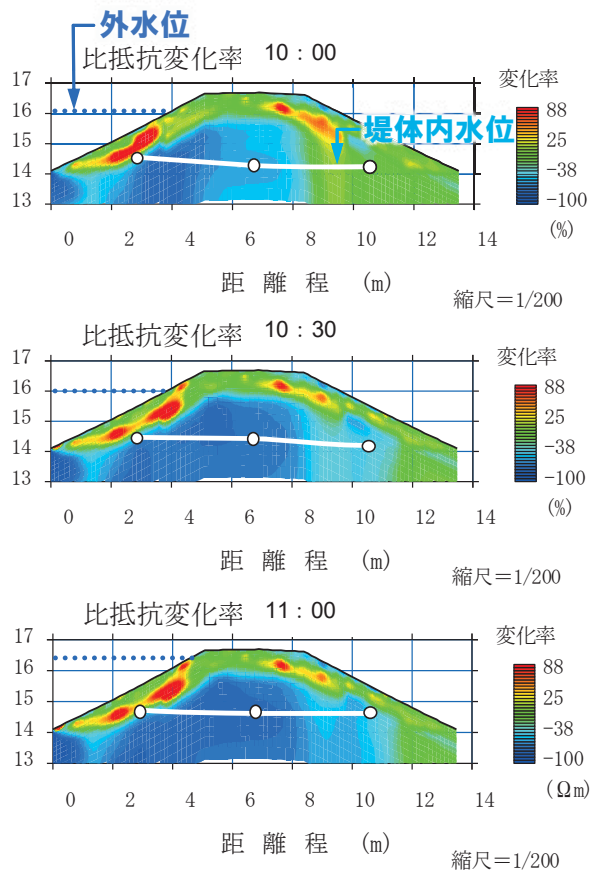


図20 外水位上昇中の比抵抗変化率

## (2) 間隙空気圧を考慮した数値解析による堤体内水理挙動の推定

今回用いられた実物大堤防の断面幾何および間隙圧測定箇所を図21に示す。対象とした堤防は、堤体・基礎地盤ともに高透水性の砂礫質土で構成されていた一方で、堤体表層が層厚約0.5mの粘性土で構成されており、表面からの空気の排出経路が限られた構造であった。そのため、外水の浸透がもたらす浸潤面上昇に伴い、堤体内に空気が封入されることが予想された。しかし、表層である粘性土層には、多くにひび割れが存在していたため、マスとしての実際の透気性は不明である。なお、当日は早朝より連続した降雨があり、表面は泥濘化していたため、ひび割れは少なくとも部分的には閉塞していたとも考えられる。

本研究では、図22に示す間隙圧測定装置を製作し空気圧・間隙水圧を観測した。観測断面は、切り欠きから上流側に約15mの位置に設定した。観測装置の設置は、予め掘削しておいたボーリング孔を用いて設置深度まで内径2.25mmの毛管チューブと土壌水分計（Decagon EC-5）を埋設し、隙間をセメントミルクで充填する手順で行った。セメントミルクによりチューブが閉塞することを防ぐため、先端部分のみ豊浦砂を充填した。この装置により、チューブ先端の地盤が不飽和のときは間隙空気圧を観測し、浸潤面上昇後地盤が飽和したあとは間隙水圧を観測することが可能である。また、地盤の飽和度は土壌水分計により大まかに推定することが可能である。間隙圧測定装置設置後・越水実験開始前の様子を図23に、実験中の様子を図24に示す。

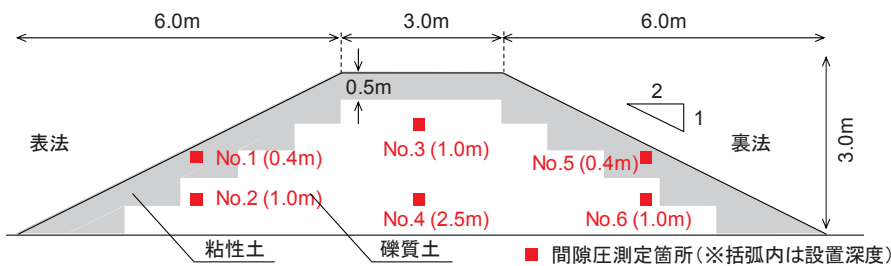


図21 千代田水路堤防の断面幾何・間隙圧測定箇所

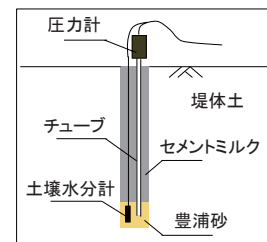


図22 間隙圧測定装置の模式



図23 間隙圧計測装置設置後（実験前）の様子



図24 越水実験中の様子

本研究では不飽和浸透特性値を表す水理モデルとして、van Genuchtenモデル<sup>3)</sup>を用いた。現時点では土の保水性試験を実施していないため、水分特性曲線のフィッティングは、Aryaらが提案した粒度分布

から水分特性曲線を推定する手法<sup>4)</sup>を用いてvan Genuchtenモデルのパラメタを決定し行った。用いた有限要素モデル，入力した飽和透水係数 $k_{sat}$ ，設定境界条件を図25に示す。図中の領域Aは，堤体表面のひび割れの影響を再現するために仮想的に設けた高透水性の要素である。実験当日は降雨が観測されていたため，観測した実験水路水位変動に加えて，アメダス帯広観測所において観測された降雨も地表から入力した。

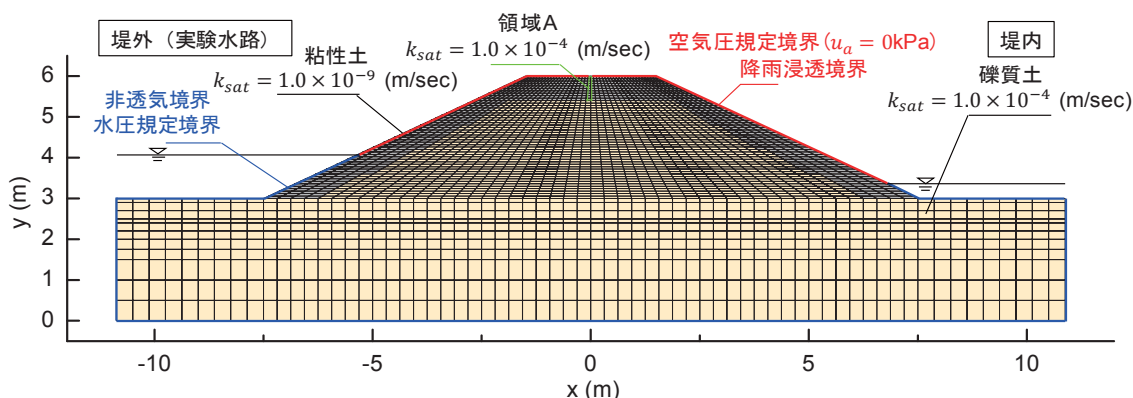


図25 千代田実験水路堤防の有限要素モデル・設定飽和透水係数及び境界条件

実験水路水位の時間変化を図26に，土壤水分計・間隙圧計の計測値を図27に示す。毛管チューブ内の空気の圧縮量は小さいとして，チューブ内への間隙水侵入による水頭補正は行っていない。また，土壤水分計は較正を行っておらず，単に浸潤状態の相対変化のみに着目した。土壤水分・間隙圧ともに水位上昇に遅れて反応を示した。図27中12:00付近に見られるスパイク上の計測値変化は電気ノイズと考えられ，考察には加味していない。測点No.4の土壤水分計が終始反応していないが，砂の充填がうまくいかず，セメントミルクが土壤水分計受感部に付着してしまった可能性がある。測点No.3は，後に示すように浸潤面が至らなかったために土壤水分計が反応しなかったものと解釈できる。他の4つの土壤水分計が反応を始めた時間を図27中に矢印・点線で示したが，これらは全て間隙圧が増加を始める前の時間であることがわかる。前述の通り，間隙圧計はチューブ先端の土要素が水で飽和（あるいはその直前）した時点から間隙水圧を計測し始めると考えるのが妥当である。よって，土壤水分計が応答を示してから遅れて間隙圧計が応答するまでの時間は，土の飽和度が上昇しながらも気相が連続している状態であると解釈できる。この時間中，間隙圧はほとんど変化していないか，きわめて微小な増分しか示しておらず，空気封入による気圧増加がほとんどなかったことを示している。

間隙圧の時間変化について，実測値と二相流解析結果を比較したものを図28に示す。なお，仮想のクラック（領域A）を設けないケースの解析も行ったが，実測値と比較し約6倍の間隙空気圧が封入される結果となったため，実際の堤防模型にも空気の排出経路が存在していたと考えられる。No.2・No.4のセンサーの圧力挙動に着目すると，ある時点より5kPa以上の大幅な圧力増加を観測しているが，前述の通り，これらの圧力計の読みの増分は間隙水圧上昇を反映していると考えられる。解析においても同様の間隙水圧上昇が見られる。一方No.3のセンサーでは，観測された圧力増分は最大でも2kPa程度であった。土壤水分計も飽和度上昇を観測しなかったため，No.3のセンサーによって観測された圧力増分は，間隙空気圧上昇を反映していると考えられる。二相流解析では，正確な間隙空気圧挙動を捉えることはできなかったが，その増分は概ね同等であった。二相流解析による12:30時点の間隙空気圧コンター図を図29に示す。堤体の不飽和領域において，封入される空気圧は最大でも約2kPaである。以上から，

今回対象とした堤防のような、人工的に堤体表面を粘性土で構成した極端な例においても、封入空気圧の増加は比較的小さいといえる。

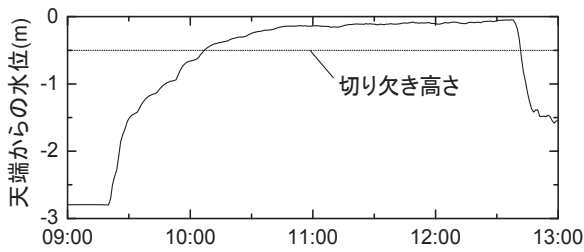


図26 実験水路水位の時間変化

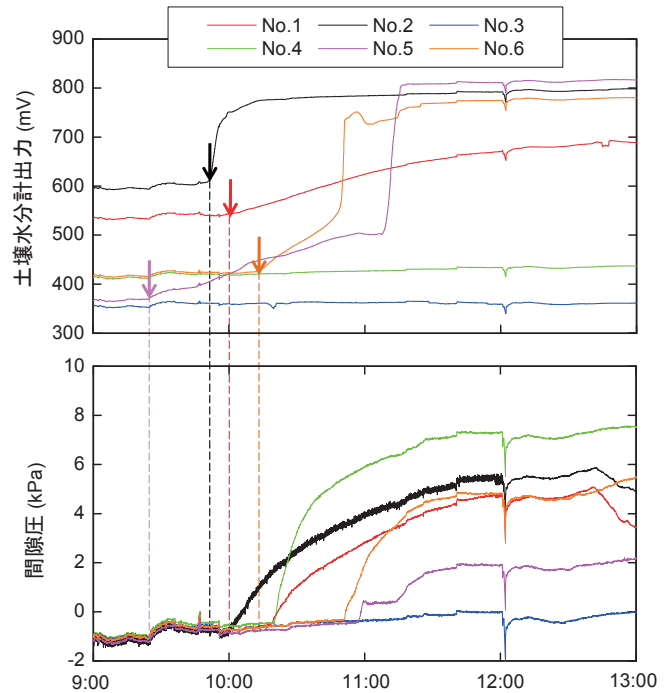


図27 土壌水分計および間隙圧計の計測値

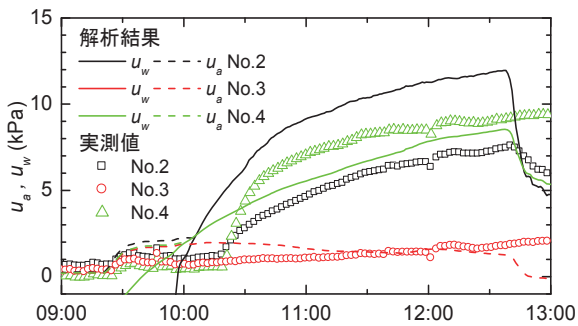


図28 間隙圧の解析結果と計測値の比較

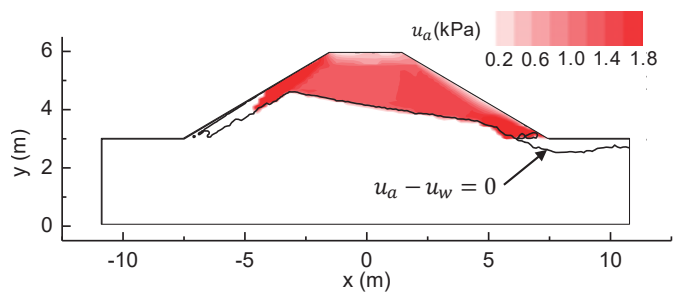


図29 間隙空気圧（解析値）の分布



## 4. 釧路川堤防を再現した実物大試験堤防に対する散水・湛水実験

### (1) 実験の目的

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30）。被災直後、開削調査や室内土質試験等の調査等を実施し、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。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かか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を超える降雨が連続して降り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試験を実施した。また、散水試験後には、試験堤防に外水位を作用させる湛水試験を実施した。この散水および湛水実験中には、堤体天端に表面波探査の測線を設置し、一定時間間隔で表面波探査を実施することでS波速度分布と堤体水分挙動および堤体内水位との関連性について検討した。



図30 堤防法面すべり(平成28年8月)

### (2) 実験の概要

実物大試験は、平成28年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に、外水位として計画高水位（H.W.L.）や超過洪水を与えた。試験堤防は枠堤状（図31、図32a）とし、湛水試験時には枠堤内側に湛水する事で外水位として作用させた。以下、本稿では、枠堤内側のことを川表、枠堤外側のことを川裏と示す。



図31 実物大試験堤防の実験状況

試験堤防の土質は被災箇所を再現するものとして、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32b)。盛土材料の土質は、釧路川堤防材料と類似した粒度分布のものを使用し、堤体は砂混じり粘性土質砂(透水係数 $k=1.08 \times 10^{-4} \text{m/s}$ )、川表法面は砂質火山灰質粘性土(透水係数 $k=4.77 \times 10^{-7} \text{m/s}$ )とした。法勾配は、平成28年被災箇所の堤防と同じ2割勾配とした。

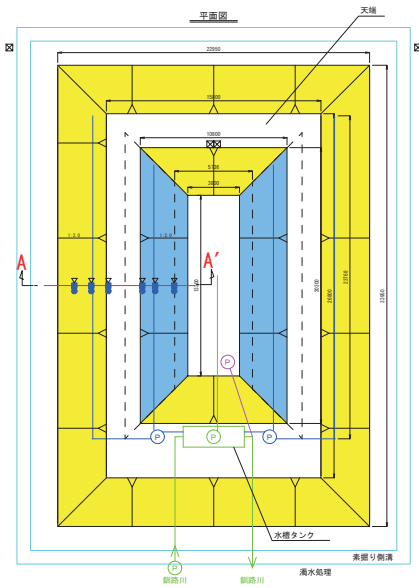


図32a) 試験堤防の平面図

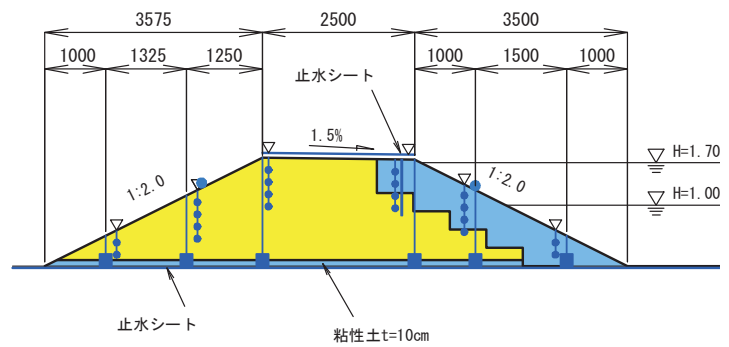


図32b) 試験堤防の断面図 (A-A断面)

降雨は、送水孔の空いた農業用散水ホースを川表裏法面に設置し、水槽タンクからポンプで給水し、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。降雨は、事前降雨、本降雨を与えるものと計画したが、試験当日に予定していた事前降雨量に相当する自然降雨が発生したため、これを事前降雨とした(図33上)。

試験堤防には図32a, b)中のA-A断面の川表裏法面の法肩、法面中央、法尻に堤体内水位を把握する目的で水位計を設置し、各水位計の近傍に降雨の法面への浸透を把握する目的で土壌水分計(深度0.20m, 0.40m, 0.60m, 0.80m)を設置した(図32b)。観測は試験前～試験終了翌日まで実施した。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図33に示す各試験段階(①～③)で実施した。表面波探査は、A-A断面側の堤体天端長手方向および堤体天端中央部を測線とし、受信点間隔1mで24個の地震計を配置することで測線長さは24mとした。

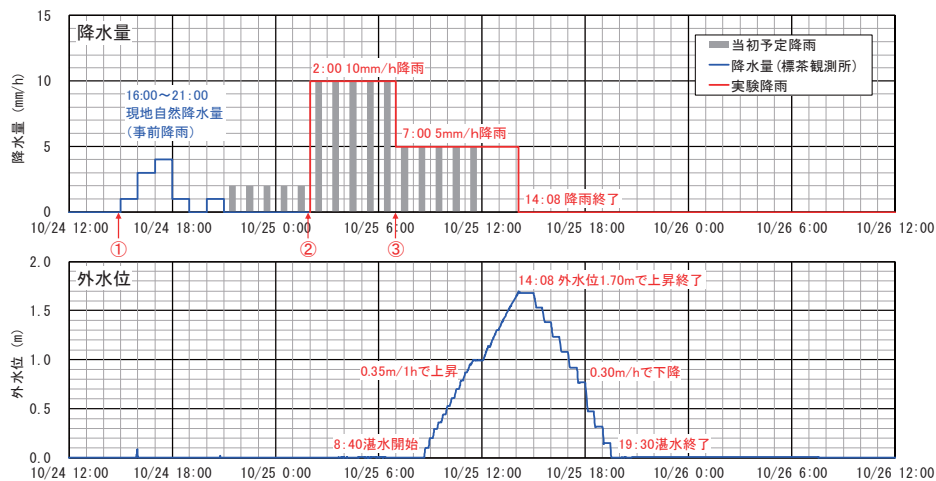


図33 降雨量と外水位の経時変化



### (3) 実験結果および考察

土壌水分計の観測結果から得られた体積含水率から、体積含水率測定値をコンター図として整理した(図34)。体積含水率コンター図は図33に示す①～③の各試験段階で整理し、水位観測結果から得られた堤体内水位(図34中の水色)を併せて示す。体積含水率コンター図は、値が高くなるほど濃い青色を示し、水分をより多く含むことを示す。

この結果を見ると観測開始時には、試験堤防施工前後で降雨が観測されていないにも関わらず、堤体内水位が確認された。事前降雨による影響では、川裏法尻付近で体積含水率が上昇し、川表法面では均一に少しずつ上昇する傾向がみられた。この時点では、表面波探査の測線直下となる堤体天端下での堤体内水位の大きな変化は認められない。次に10mm/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上昇したことが確認された。散水試験後に実施した湛水試験では、図33下に示す外水位を与えた。しかし、表面波探査の測線直下となる堤体天端下での堤体内水位の急激な上昇等の変化は湛水中にも認められなかった。

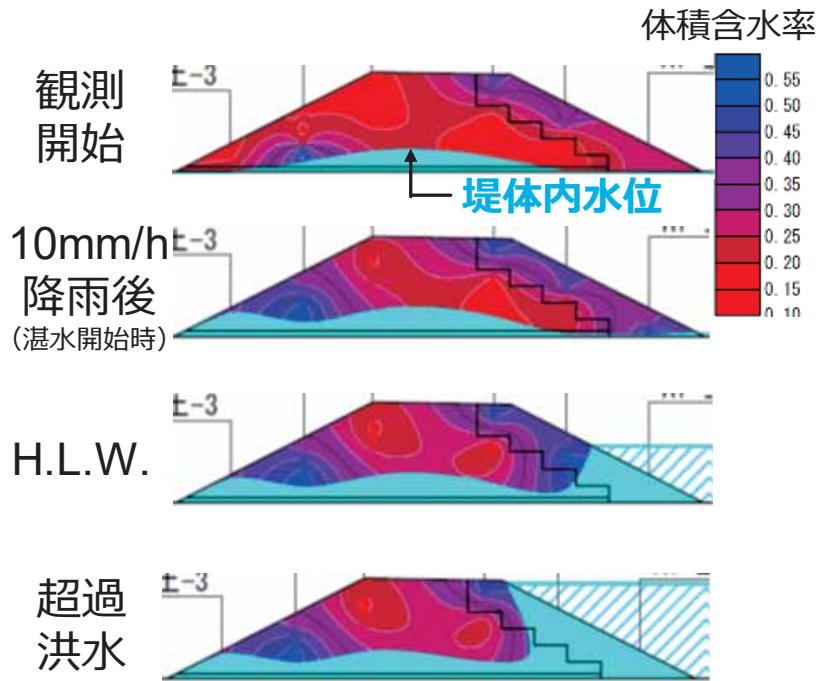
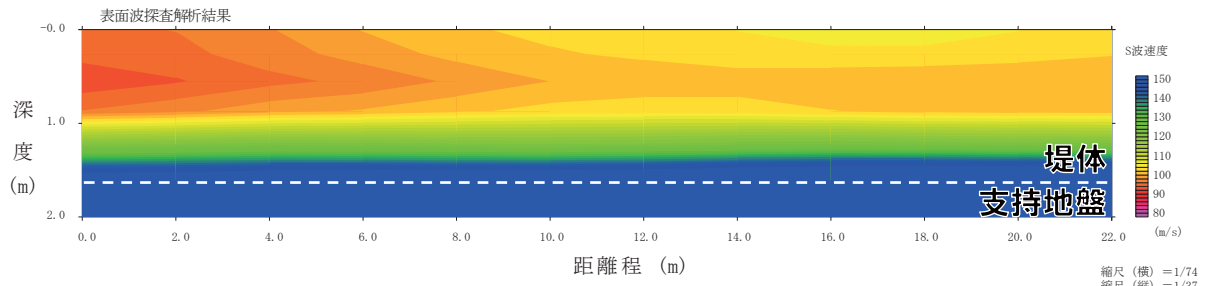
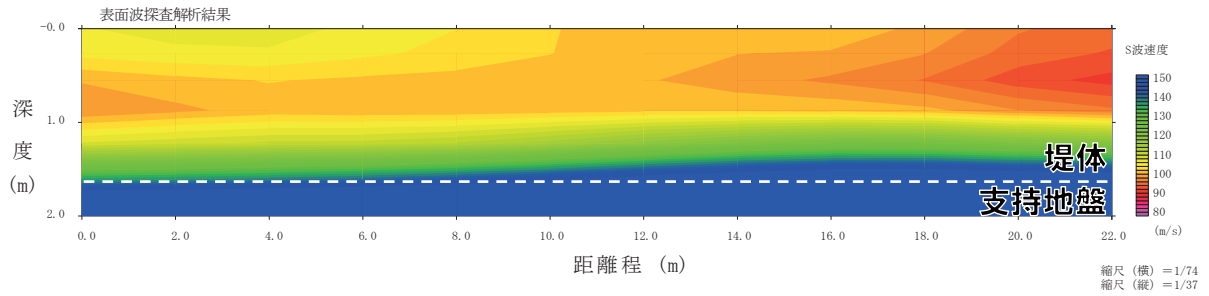


図34 A-A断面における体積含水率および堤体内水位の変化

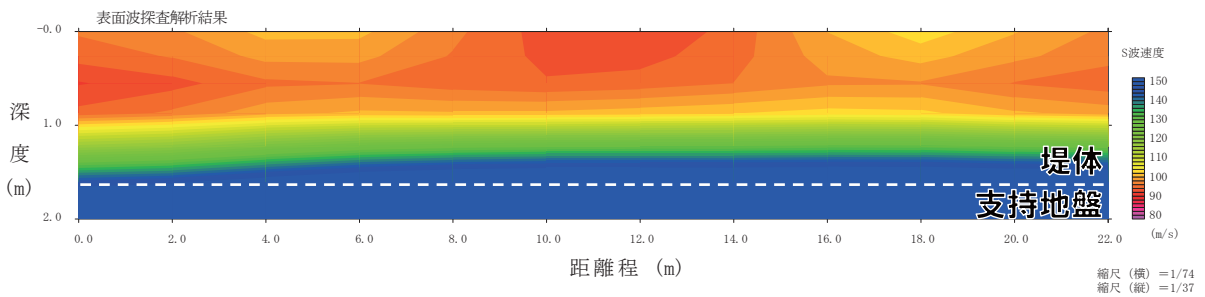
図35は表面波探査から得られたS波速度分布を示しており、深度0mが試験堤防天端である。試験堤防高さは1.7m程度あり、概ね1.7m以深では $V_s = 150\text{m/s}$ 以上の地盤が連続しており、それより上部の試験堤防の領域では相対的にS波速度が小さいことから、試験堤防と支持地盤の違いをS波速度分布で捉えていると言える。一方、試験中の堤体のS波速度は、深度0～1mの領域で変化しているように見えるが、S波速度の変化量は10m/s以下であり、物理現象と対応する有意な変化は無いと考えられ、この結果は先述した堤防天端直下での堤体内水位や水分量の変化が小さいことと整合している。



a) 観測開始



b) 10mm/h 降雨終了後



c) 超過洪水

図35 散水および湛水実験中のS波速度の変化

## 5. 常呂川堤防での水理挙動観測の継続と拡充

前年の助成研究では常呂川堤防の水理挙動観測を開始したが、 $-20^{\circ}\text{C}$ に至る低温環境などによる計測上の困難を経験し、間隙水圧等の主要なデータの欠損が大きいことを2018年度紀要<sup>3)</sup>では報告した。また、変換器（テンシオメーター）・データロガーともに著者らの自作によるものであり、まだ試作段階であったことも動作が不安定であった原因の一つである。本年度は、状況の改善を目指し、2018年8月に当該サイト（常呂川KP18.6）にて、テンシオメーター挿入孔のみ再利用し、観測システムの再構築を行った。具体的には以下の改善を行った。

### ①テンシオメーターの圧力センサーの交換

前年度は5V印加タイプで計測範囲 $-100\sim 700\text{kPa}$ （ゲージ圧）の廉価なセンサーを用いていたが、12チャンネル全てにおいて9V印加タイプで計測範囲 $-100\sim +100\text{kPa}$ の高精度センサーに交換した。また、データロガーに起因する電圧ドリフトを補正するため、大気圧に開放した追加チャンネルを設置した。

### ②テンシオメーター温度補正のための温度計の併設

新たに設置した圧力センサーは、前年度までのものに比べて出力への温度影響は低く、くわえて地中 $30\sim 80\text{cm}$ の位置に設置されているため、日中温度変化の影響をほとんど受けない。しかし、地温の通年変化による影響は避けられないため、圧力センサーにIC型のデジタル温度計を併設し、あらかじめ求めた較正係数により結果を補正できるようにした。

### ③太陽光パネルによる計測の永続化

当該サイトは冬期のアクセスが悪く、定期的なバッテリー交換が困難であるため、太陽光パネルを設置してバッテリーが自動充電されるように電源システムを再構築した（図36）。その結果、冬季の限られた日照条件下においても数日に一度、バッテリーが完全充電され、計測が永続化された。

観測期間中に、今年度の研究テーマである間隙空気挙動が影響するような強雨が観測されなかったため、本報では結果の揭示は割愛する。当該サイトは2016年8月北海道豪雨時に、堤内地での噴砂が見られたり、越水したにも関わらず予想を超える浸食耐性を呈するなど、外水や表層水に対する内部応答の詳細な理解が望まれる箇所である。当該箇所では、今後も観測システムを維持し、豪雨時の応答を捕捉することを目指す予定である。



(a) 太陽光パネル設置後のデータロガー全容



(b) データロガー内部の更新の様子

図36 太陽光パネル設置後の計測サイトの様子

## 6. まとめ

本研究では、堤体内の水利状態の把握と性能を評価するため、既設堤防、越水実験での試験堤防、散水・湛水実験での試験堤防に対して動態観測、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) 間隙空気圧の測定と不飽和浸透流解析による再現計算

秋田県馬場目川堤防の事例では、観測期間中に記録された日降雨量は最大で87mm程度であり、観測期間がまだ短いこともあり極端な強雨は観測さなかった。この規模の強度の降雨では、従来型の単相解析と気液二相連成解析では全く結果に相違が生じず、どちらも堤内間隙水圧の変動観測値を比較的良好に再現できた。しかし、仮想的に降雨量を二倍にすると両解析間で明確な差異が生じ、二相連成解析では空気封入効果により間隙水圧の上昇量が抑えられた。

千代田実験水路での実物大堤防越水試験では、土壌水分計と間隙圧計測装置を1横断面中に6点設置し、土壌水分の変動および間隙空気圧、飽和してからは間隙水圧を計測した。外水位上昇による浸潤線進行に伴い、計測箇所は随時飽和化し、間隙水圧上昇が記録されたが、間隙空気圧に相当すると考えられる計測値はほとんど変動を起さなかった。当該堤防は人為的に粘土により表層約50cmが被覆されたものであったにも関わらず、ひび割れや浸食箇所からの空気排出により空気の封入が限定的であったことが示唆される。当該堤防のように大部分が砂礫質土からなり非常に透過係数が高い場合、わずかな排出ルートが存在により間隙空気は迅速に排気されることがわかる。このような場合は、気液二相連成解析を用いる必要性は低く、従来型の単相（液相）のみを考慮した不飽和浸透流解析により堤内浸潤過程を解析することができると考えられる。

### (2) 物理探査による堤体内浸透挙動の把握

越水実験を行った試験堤防では、越水破堤実験のために新設した試験堤防のS波速度は支持地盤や既設堤防よりも低いことから、表面波探査から取得したS波速度分布は概ね妥当であること確認した。また、実験中のS波速度は、堤体内水位上昇による堤体土の剛性低下や表のり面流出による応力開放に連動するように低下する挙動を呈し、S波速度分布は試験堤防の状況を表現できていた。また、比抵抗については、のり面表層と堤防内部において比抵抗変化率が異なっており、比抵抗分布によって堤防を構成している土質の違いを表現できることに加えて、堤外地から堤内地への浸潤領域の動き、及び、浸潤領域の上昇過程を捉えることができた。

散水・湛水実験を行った試験堤防では、降雨を再現した散水中に法面表層での体積含水率は上昇するものの、堤体内水位の明瞭な上昇は確認できず、堤体法面表層以外では堤体の水利挙動に大きな変化はなかった。また、湛水中においても表法面の水分量は増加するものの、堤体内水位の急激な上昇は確認できなかった。このような試験堤防に対して実施した表面波探査から得られたS波速度分布は、試験堤防と支持地盤の境界が明瞭であったため、得られたS波速度分布の妥当性を確認した。散水・湛水実験中にS波速度分布は最大でも10m/s以下に留まり大きな変化はなかった。このS波速度の増減は物理現象を反映した値ではないと考えると、S波速度は大きく変化しておらず得られたS波速度分布は水利挙動を捉えていると判断できる。以上の結果から、リアルタイムで堤体内部状況の変化を評価するためには、測定時間や測定間隔の短縮化が必要であるが、降雨や出水後前後での浸透領域を把握する場合は、今回のような測定を実施することで、十分評価可能である。

## 謝辞

本研究の実施にあたり、北海道開発局河川計画課、同 帯広開発建設部治水課、同 釧路開発建設部治水課、寒地土木研究所から多大な協力を得た。末筆ながら記して深甚なる謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) （社）地盤工学会：不飽和地盤の挙動と評価，2004.
- 3) van Genuchten, M.Th.：A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, pp.892-898, 1980.
- 4) Arya, L. M. and Paris J. F.：A Physicoempirical Model to Predict the Soil Moisture Characteristic from Particle-Size Distribution and Bulk Density Data, *Soil Science of America Journal*, Vol. 45, No.6, pp. 1023-1030, 1981.
- 5) 川尻峻三・西村聡・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, 北海道河川財団研究所紀要, Vol. XXIX, pp.1-32, 2018.