

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

Investigation of hydraulic and mechanical behaviour of river dykes:
Towards performance assurance of Chitose river dykes

西村 聡¹・川尻峻三²

Satoshi NISHIMURA and Shunzo KAWAJIRI

¹北海道大学大学院工学研究院 准教授

²北見工業大学工学部地球環境工学科 助教

要 旨

地震時や洪水時の堤防の安定性評価へ向けて、堤体中の水理状態を把握し、その力学的特性への影響を評価するための統合的な調査・解析を、千歳川遊水地堤をモデルケースとして実施した。2 サイト 4 測点において継続的な原位置長期水理モニタリングを実施するとともに、定期的に各種貫入試験や表面波探査を行った。また、自主開発した非定常不飽和浸透流解析により堤防表層境界および内部の水移動・水収支のプロセスの解明を目指した。上記 2 サイトは築造から十分に時間が経ち水理的に平衡状態にある箇所（舞鶴遊水地）と築造プロセスにある箇所（東の里遊水地）を代表しており、堤防盛土の構築から供用までの推移を理解するために選択した。降雨浸透・蒸発散・積雪・融雪といった地表過程を簡易にモデル化した浸透流解析により、地表付近の水圧変化の観測値を比較的良好に再現できた。表面波探査からは、舞鶴遊水地では 5 月と 9 月で S 波速度に大きな相違は見られなかったが、これは春期と秋期で盛土内水圧が同等であったことと整合しており、冬期・夏期のように水圧が異なる時期では S 波速度、すなわち剛性の変化を捉えられる可能性がある。東の里遊水地では盛土の嵩上げ時に間隙水圧が大きく上昇する現象が見られた。これは盛土材の飽和度が高く短期的圧縮への間隙水圧応答性が高いことに起因しており、このメカニズムを導入した築堤有限要素解析で観測挙動を再現することができた。同サイトでは法尻にグラベルドレーンを設置した比較対照断面を試験施工しているが、ドレーンの効果は盛土中央までは短期的には及ばず、嵩上げ終了時ではドレーン直上の法面領域においてのみ明確な効果が現れることが解析により予測された。表面波探査・簡易動的コーン貫入試験の結果はこの解析結果を定性的に裏付けるものであった。

《キーワード：河川堤防；水圧；強度変化；原位置調査；降水浸透》

1. はじめに

地震時や洪水時の堤防の安定性を評価するためには、その表面および内部の常時土質・水理状態を正しく把握する必要がある。例えば2003年十勝沖地震や2011年東北地方太平洋沖地震の際には、浸潤した堤体が地震動により液状化し、大規模な沈下・流動を起こした。また、洪水時の堤体浸透破壊に対する照査には一般全応力法が用いられるが、多くの場合、堤内間隙水圧の値は安定解析結果に対し、土の強度定数の設定値と同等あるいはそれ以上の影響を及ぼす。このように堤防、あるいは盛土一般において間隙水圧挙動はその安定性を支配する最も主要な要因であるにも関わらず、それを長期（季節ごとの降水・蒸発散や基礎層との水移動収支など）・短期（豪雨や比較的短期間での融雪など）において予測する体系立った手法は構築されていない。また、それに向けて重点を置くべき調査事項や開発・発展が望まれるツールも十分に整理されていないのが現状である。その理由の一つは、これまでの多くの研究が室内実験・原位置観測・数値解析のどれかに終始することが多く、これらの間でのフィードバックを通して実現象を総合的に理解する試みが不足していたからと考えられる。一方で、筆頭著者がメンバーをつとめる土木学会堤防研究小委員会WG2では、浸透流解析を中心に置いてそのような手法を構築しようという試みが進められており、本州の堤防を事例にとり、現地調査とともにその検証が進められている。しかし、北海道のような積雪寒冷地は積雪・融雪に見られるように独自の長短期水収支パターンが存在し、特段に考慮すべき事項も多いと推測される。

本研究は、千歳川遊水地群の周囲堤を対象とし、①土壌水分・間隙水圧・地温アレーによる通年観測、②現地での定期的な力学試験（静的および動的簡易コーン貫入・表面波速度測定による剛性評価）、③新規開発手法による浸透流解析を実施し、互いの解釈を助ける形で堤体の水理的・力学的動態変化の総合的な理解を目指した。これにより、堤体の状態がどのように通年・経年変動していくかを理解するとともに、数値解析や表面波探査といった、堤防の状態を極めて効率的に、かつ二次元的・三次元的に把握できる手法の妥当性を検証した。また、東の里遊水地の建設事業に関連して、本助成期間中に築堤中の堤防の状態を調査する機会も得られたため、基礎地盤や気候の作用との平衡状態に至る前の堤防の状態についての知見も得ることができた。よって、築堤後に平衡（隔年安定）状態に至った堤防とその前の状態にある堤防の両者について本報告は議論する。

本研究は千歳川遊水地周囲堤を対象としているため、本報告書は細粒土を多分に含む低～中透水性の堤体に関する議論が中心となる。砂礫を主体とする高透水性堤防については重力浸透が卓越するため、減少は比較的単純であり、そのような堤防に関する知見は著者による既刊行物の中で議論されている¹⁾。なお、本研究で実施した原位置モニタリングは筆頭著者が他の助成金（科研費および地盤工学会助成）を受けて2014-2015年に設営していたものを維持・更新することで実施した。

2. 堤防・盛土の水理状態に関する既往の知見・研究および設計・照査への反映

盛土という構造物が水を貯留する現象は、その力学的安定性への影響とともに一般に認識されており、道路盛土ではドレーンを設けるなどして積極的に排水を促進する工法がしばしば用いられる。しかし一方で、2003年十勝沖地震や2011年東北地方太平洋沖地震の際に見られたように、浸潤状態にあった堤防が大々的な液状化を起こし、本来の性能を発揮し得ない規模の変状を呈した（例えば東北地方阿武隈川堤防の一区間では10mを超える側方流動変位を記録した）ことは地盤工学関係者に驚きをもって受け取られた。実際に砂質盛土が浸潤することにより耐震性が大きく減少することは遠心模型実験などからも確認されている³⁾。このように盛土が浸潤することに対して一般に受け入れられた事後解釈は、軟弱地盤上に建設された砂質盛土が圧密沈下を引き起こし、盛土が地下水位面下に落ち込むとともに、軟弱地盤層の間隙水圧が上方浸透し、上に凸な形の浸潤面を形成していたというものである。しかし、次第に収束に向かうはずである圧密による上方浸透が恒久的に浸潤面を押し上げる必然性はなく、これは図

1 に示す、より包括的な水収支過程の一部ととらえるのが合理的である。このように問題を捉えると、単に土領域内の水移動だけを考慮するのでは、盛土内水理状態を長短期に渡り記述する手法には至らないことがわかる。

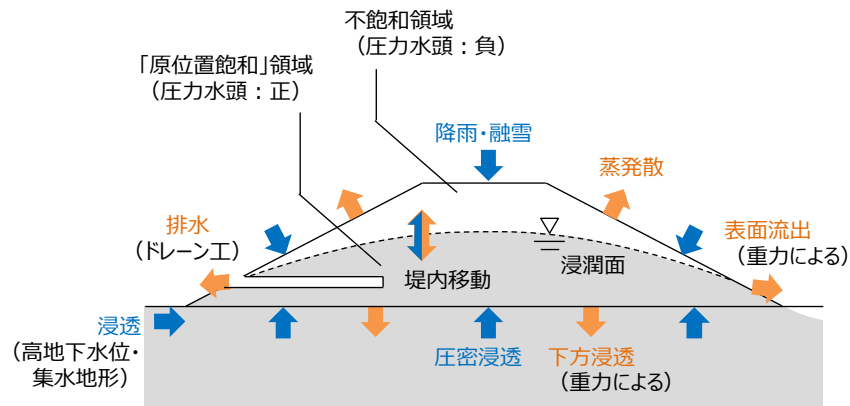


図1 堤防・盛土内の浸潤面と水収支過程

盛土という構造物スケールでの地表水収支については、実務レベル・研究レベルにおいて様々な解釈やモデル化がなされてきた。実務においては、出水時の堤防安定性照査の一環として「河川堤防の構造検討の手引き」⁴⁾に示された手法がある。すなわち、非定常不飽和浸透流解析を適用し、堤防表面に所定の降雨浸透を与える（「多雨時期の月降水量の平年値程度を」「1mm/hr程度」で）というものである。ただし、この手法の前提は上記の事前降雨量を「全て堤体に浸透するよう」を与えるというものであり、その意味では浸潤面上昇量ありきの方法である。研究レベルでは、より洗練された方法による盛土や切土内水理状態の予測が試みられている。Smethurstら⁵⁾は蒸発散のモデル化に重点を置き、根系のマイクロモデルに基づきマクロな蒸発散量を計算し、粘土切土内の水理状態の長期に渡る再現を行った。盛土においては、例えばAnら⁶⁾は地表からの温度拡散と間隙水・間隙気体移動の連成解析を行い、Wilsonら⁷⁾のマイクロな蒸発モデルに従い、シルト質盛土内の土壌水分量の再現を行った。一方で、著者^{1), 8)}は蒸発散についてはHamon式⁹⁾に基づき大幅に簡素化し、比較的簡易な解析的手法により砂質土・細粒土盛土ともに観測された間隙水圧を長期に渡りよく再現できることを示した。しかしながら、上記の研究では積雪・融雪を伴う冬期の地表面過程の扱いの議論がない、あるいは希薄であった。

地表面過程とは別に、基礎層との間隙水交換も盛土内水理状態に影響を与える一因である。特に軟弱地盤帯において築堤時は水圧が急激に上昇し、築堤作業に支障をきたす事例も報告されており、千歳川遊水地建設事業のうち晩翠遊水地や東の里遊水地など下流側の軟弱地盤帯における築堤はそれに該当する（図2・図3）。築堤は通常、現地あるいはその近傍で発生した土質材料を用いることが多く、基礎地盤のみならず盛土材までもが高含水で軟弱な土質となり、これが盛土内水圧を抑留する原因の一つと考えられる。築堤時水圧に関して、ダムについては解析的な研究が見られ¹⁰⁾、道路盛土に関しては道路土工盛土工指針¹¹⁾中にHilfの式¹²⁾として簡易な推定式が与えられている。また一方で、築堤時応力の分布についてはCloughら¹³⁾の弾性理論に基づく解析や、田中ら¹⁴⁾・居上ら¹⁵⁾の土・水連成不飽和弾塑性解析によるものなどがある。著者¹⁾は弾性解析から求めた築堤時の全応力増分を浸透流解析のステップ間に入力し、時々刻々の各節点での飽和度や間隙水圧といった状態量に応じてSkemptonのB値を算出・乗算し、間隙水圧増分を加えるコードを開発し、築堤時水圧挙動を再現した。しかし文献1)では地表面での水収支は考慮せず、あくまで試算としての意味合いが強かった。

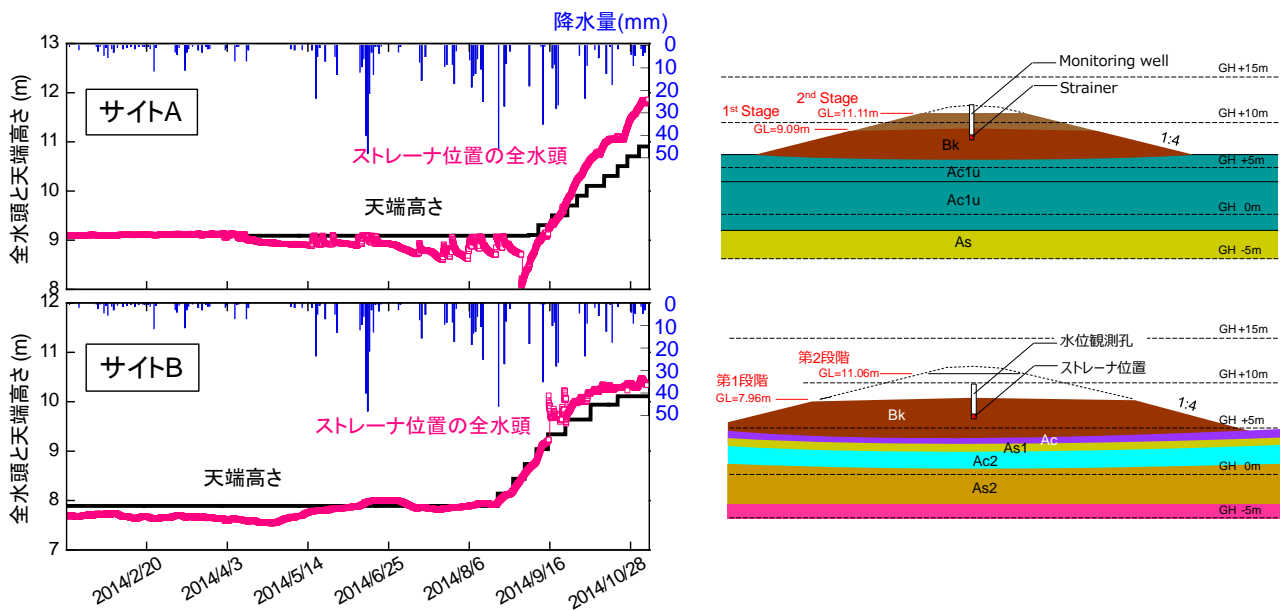


図2 築堤とともに上昇する堤内水位の例（千歳川遊水地周囲堤の2つのサイトの例）



図3 築堤後1年経過しても天端より高い水頭を保つ堤内間隙（図2中サイトA）

上記の解析的研究はすべて有限要素法による逐次解析を用いており、盛土の水収支問題を一般的に扱うためには、拡張ダルシー則（不飽和状態に対し透水係数を変数とする非線形ダルシー則）に基づく浸透流解析が有用なツールである。しかし、前節で記した土木学会堤防研究小委員会 WG2 での一斉解析によれば、比較的単純な断面の堤防の浸潤・乾燥の解析結果も解析者・コードに依存し、整合しないのが現状である。これらの背景を踏まえるに、今後、盛土内水理状態予測モデルとそれを実装したツールを開発していくにあたり、①パラメタの設定に過度に敏感ではなく、②広域に渡り適用可能な、最小限のパラメタと境界条件（降雨浸透など）設定に基づき、③安定して解を与えるといった特徴を重視する必要がある、また④多くの異なるシナリオ・断面に対し原位置実測との整合の検証を行う必要があるといえる。

3. 対象とする堤防および調査・解析手法

(1) 対象サイト：千歳川遊水地周囲堤

本研究では千歳川遊水地周囲堤の複数サイトを対象として堤内水理・力学状態の調査を実施した。サイトの一つは舞鶴遊水地に（2測点：SP250 および SP2600）著者が本助成期間前から設営していた観測

点を本助成により更新する形で維持した。さらに東の里遊水地に 2 測点 (SP2210 および SP2275) を設け、計 4 点において堤内水理等の原位置モニタリングを行った。

舞鶴遊水地における観測断面を図 4・5 に示す。ここでは SP2600 断面を示しているが、SP250 についても最終形はほぼ同様である。舞鶴遊水地周囲堤は全区間において掘削による現地発生粘土と砂質土の混合材 (バルクの体積比にしておよそ 1:1) により比較的均一に築造されている。SP250 地点で 2 段階 (2010 年 : 1.5m, 2012 年 : 4.4m, 2014 年 : 0.1m 余盛り), SP2600 地点で 3 段階 (2010 年 : 1.6m, 2011 年 : 3.0m, 2012 年 : 1.5m) に分けて築堤されており、高さ約 6m で法勾配はいずれの箇所においても両側 1:4 である。両地点間で築堤履歴に多少の相違はあるものの、ほぼ同一断面で、かつ類似した堤体材料から成っているが、基盤地層構造に相違があり、SP2600 付近では局所的に泥炭層が見られる。これら 2 地点は基礎地盤の影響を考察するために選定した。しかし SP250 の粘土層は薄く、SP2600 の泥炭層は含水比 200% 以下の低含水泥炭であるため、舞鶴遊水地では堤体の特筆すべき沈下は見られず、盛土変位は収束している。

東の里遊水地における観測位置と観測断面を図 6 にそれぞれ示す。SP2275 では、築堤時間隙水圧消散促進のために法尻にふとん籠を併用したグラベルドレーンを設置した断面となっており、ドレーンを設置しない SP2210 と比較・対照する研究を 2015 年より国立開発法人土木研究所寒地土木研究所 (寒地地盤チーム) が実施しており、今回はこれらの地点を利用した。築堤はいずれの断面も 3 段階を予定しており、2015 年に約 2.1m, 2016 年に約 3.0m の嵩上げが行われた。なお、同サイトでも舞鶴遊水地と同様に現地発生粘土と砂質土の混合材で築堤が行われたが、2015 年は混合体積比が 1:1, 2016 年は 1:1.5 であった。同サイトの地盤工学的記述は文献¹⁶⁾に詳しい。

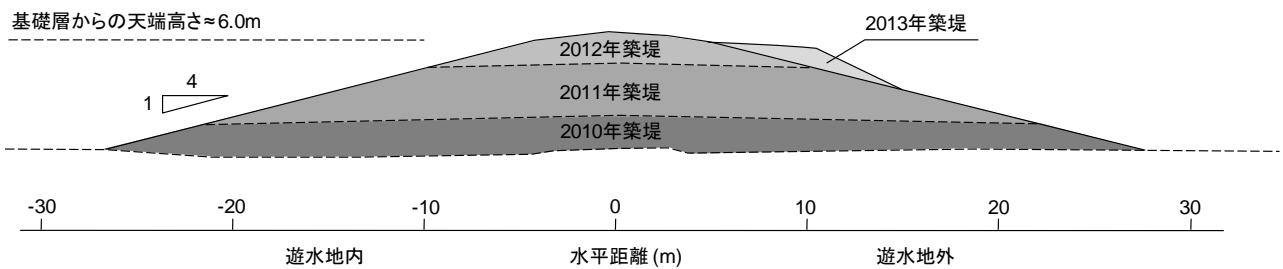


図 4 舞鶴遊水地周囲堤の標準断面 (SP2600 の例 : SP250 も同様)

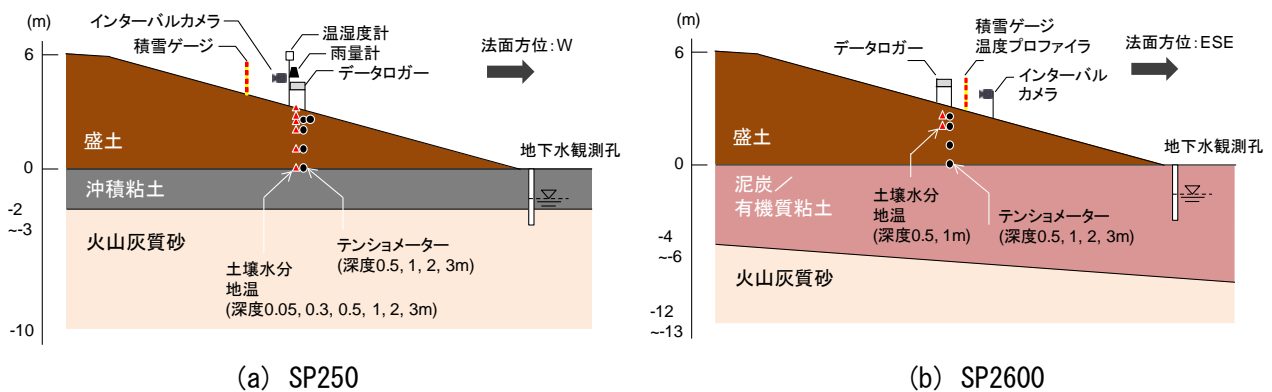
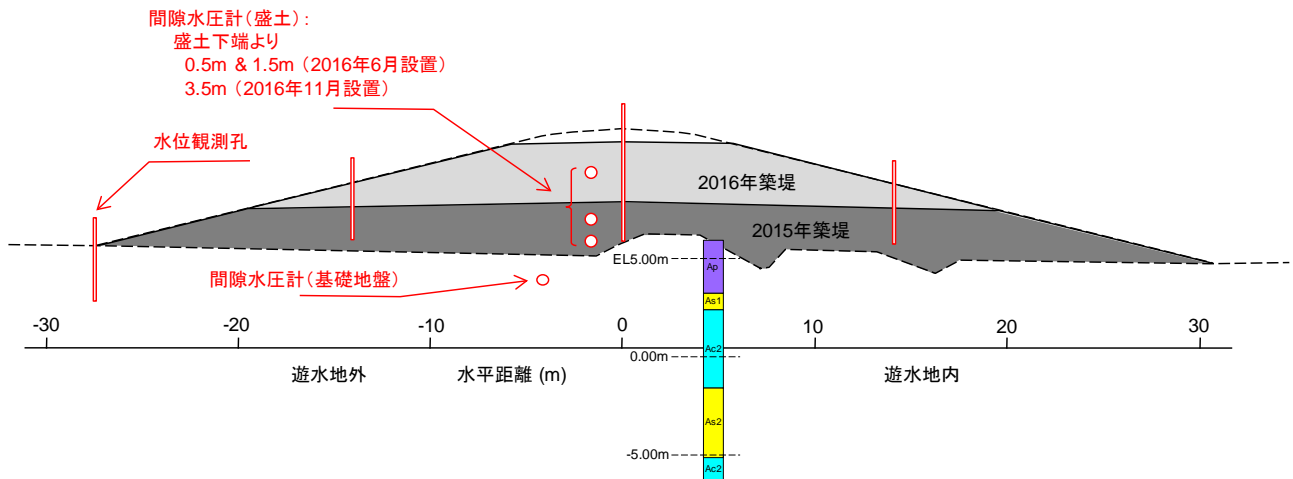
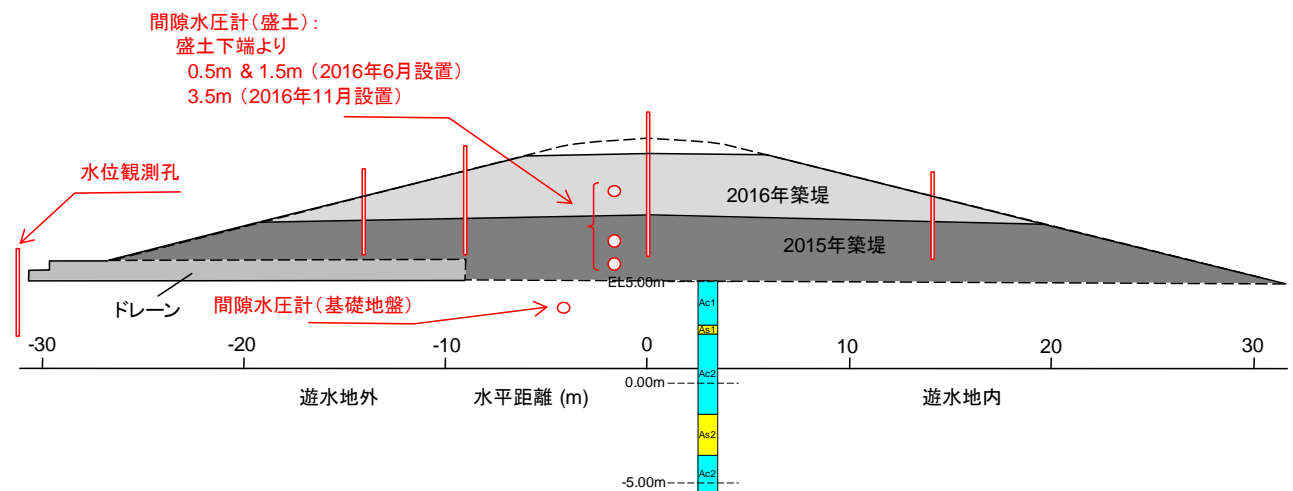


図 5 基礎地盤の推定地層断面と観測機器の設置状況



(a) SP2210 (ドレーンなし)



(b) SP2275 (ドレーンあり)

図6 東の里遊水地の観測地点断面

(2) 原位置モニタリング

舞鶴遊水地 SP250 では 2014 年 8 月より、SP2600 では 2015 年 10 月より原位置モニタリングを開始した。それぞれの断面でのセンサー配置および測定項目を図 5 に示す。法面中腹より鉛直に掘削した設置孔よりセンサーを埋設した。SP250 での計測より、盛土は 1m 以深では通年飽和していることがわかったため、SP2600 では土壌水分計を減らし、代わりに高さ 10cm ごとに熱電対を配置したプロファイラを設置することにより地表温度・積雪温度の詳細な計測を行った。断面の様子はインターバルカメラで 1 時間ごとに記録するとともに、およそ月に一度の頻度で現地を踏査し、地表植生などの様子を記録した。夏期に撮影した現地の様子を図 7 に示す。

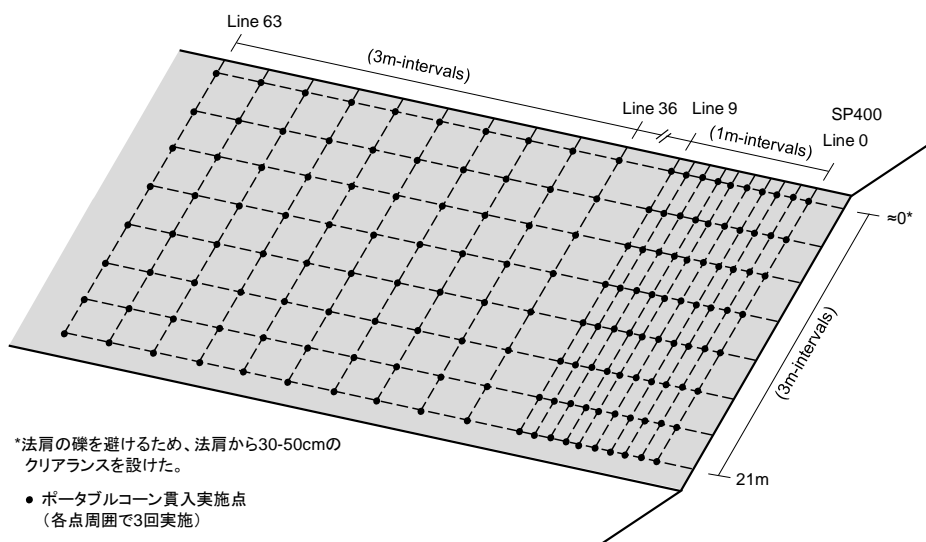
東の里遊水地では図 6 に示すように、2016 年よりそれぞれの断面で 3 点ずつテンシオメーターを設置し、間隙水圧を計測した。これらのテンシオメーターの近傍にはそれぞれ寒地土木研究所チームにより ADR あるいは TDR 土壌水分計が設置されたが、ADR 式のものには動作不良により信頼性のあるデータが得られていない。また、寒地土木研究所チームにより、図に示すように水位観測孔が設けられ、先端部のストレーナを介して水頭を自動計測している。これらのうち本報告では限られたデータのみを示す。



図7 舞鶴遊水地でのモニタリング状況

(3) 原位置力学試験（コーンペネトロメータおよび簡易動的貫入）

舞鶴遊水地・東の里遊水地ともに、2016年に複数回にわたりポータブルコーン貫入試験（地盤工学会基準 JGS 1431-2012, ただし 324mm²の小断面コーンを使用）および簡易動的コーン貫入試験（地盤工学会基準 JGS 1433-2012）を実施した。特に舞鶴遊水地においては、地表の力学特性、特に強度の通年変動を把握するためにおよそ月に一度の頻度で法面横断方向に7地点×2測線ずつコーンペネトロメータ貫入を実施した（図8）。簡易動的コーン貫入は年に3回（春期・夏期・冬期）実施し（ただし東の里遊水地では2回のみ）、盛土強度の相対的な変化を推定することのみを目的としたが、ポータブルコーン貫入試験は非排水せん断強度への定量的な変換を最終的な目的とし、そのために盛土材を用いた一面せん断試験および室内締固め試料による模型地盤を用いたポータブルコーン貫入の室内キャリブレーションを行った（図9）。キャリブレーションに用いたコンテナは、内径 200mm・250mm・300mm を用いた結果の検証の後、最終的に内径 200mm のものを使用した。



実施日	測線
2016/02/02	Line 0, Line 36
2016/03/10	Line 1, Line 39
2016/04/27	Line 2, Line 42
2016/05/14	Line 3, Line 45
2016/06/22	Line 4, Line 48
2016/08/02	Line 5, Line 51
2016/09/05	Line 6, Line 54
2016/10/19	Line 7, Line 57
2016/11/26	Line 8, Line 60
2017/02/15	Line 9, Line 63

図8 ポータブルコーン貫入実施地点（SP400 から SP250 に向かって順に実施）と実施日



図9 室内におけるキャリブレーションのためポータブルコーン貫入

(4) 表面波探査

地盤や土構造物の内部構造を得るための従来手法としてボーリング調査による地盤調査が挙げられるが、ボーリング調査のようなピンポイント情報によって広範囲に亘って複雑に変化する地盤の内部構造を把握するためには、多大な費用や労力を要する。このようなことから近年では、地盤剛性に関するパラメタである S 波速度 V_s の 2 次元分布を非破壊で簡便に取得することができる表面波探査を用いて迅速に河川堤防の健全性を評価する手法が提案され、その有用性が報告されている^{17), 18)}。

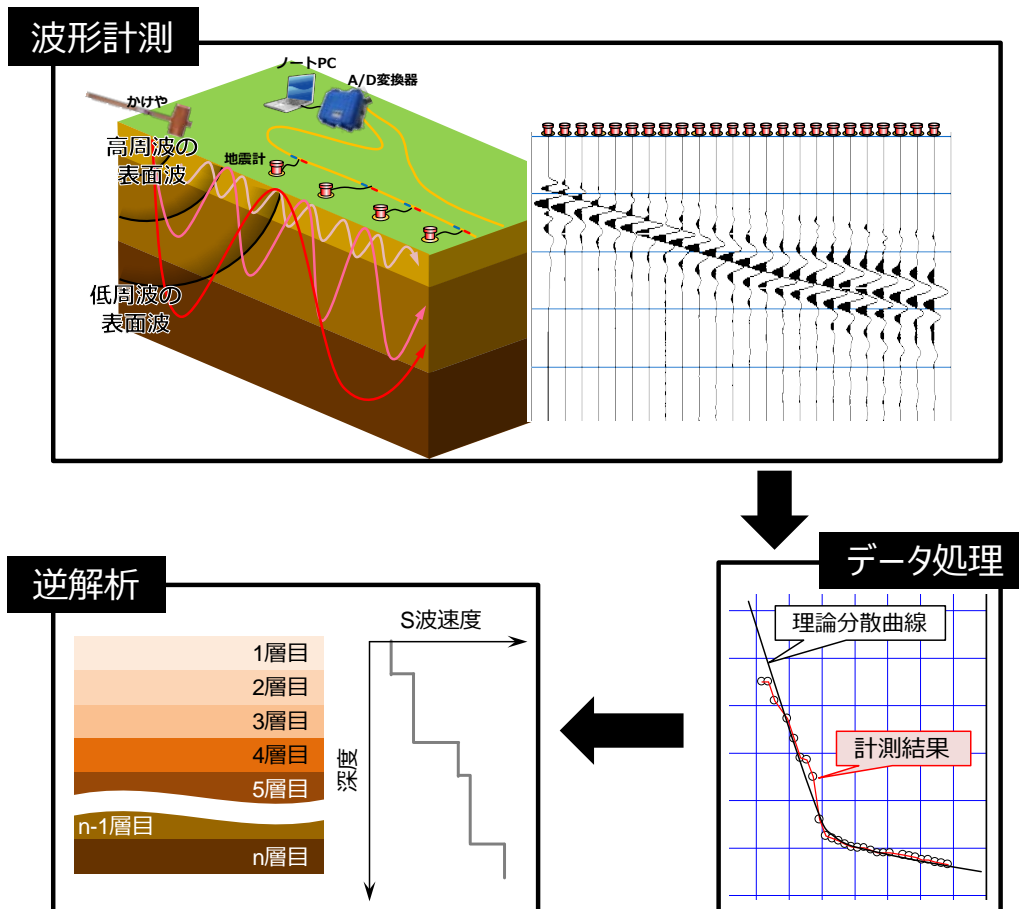


図10 表面波探査の計測概念図

図 10 は表面波探査の原理を概略的に示したものである。表面波探査は地盤の地表付近を伝わる表面波（レイリー波）を測定・解析することにより地盤の S 波速度を求めることができる調査方法¹⁹⁾である。ハンマーやかけや等で人工的に地表面を起振すると表面波が発生する。この表面波の時間領域の波形記録をフーリエ解析することで周波数と位相速度の関係を算出し、すべての地震計での結果を重ね合わせることで位相速度と周波数の関係である分散曲線が取得できる。一般的に表面波は、その周波数によって伝播する深度が異なり、高周波数の波は浅い地盤を、低周波数の波は深い地盤を反映している。経験的に波長の 3 分の 1 が深さに相当するという関係を利用して解析の初期モデルを作成し、波形記録から算出した分散曲線を最も良く再現する S 波速度構造を逆解析によって推定する。この解析を各地震計での分散曲線に応じて行い、各地震計で得られた S 波速度構造を測線方向に補間することで S 波速度 (V_s) 分布が取得できる。地盤剛性を表すせん断剛性は、 V_s の二乗に比例するため、 V_s の増減は地盤剛性の大小を表している。また、筆者らの過去の研究²⁰⁾では、降雨浸透によって盛土内部の水分量（飽和度）が上昇した箇所では、 V_s が低下することを確認しており、盛土の密度変化が小さいと考えられる場合には、 V_s 分布の比較によって堤体内部の水分状態を相対的に判断できると考えられる。

(5) 非定常不飽和浸透流解析

本研究で適用した非定常不飽和浸透流解析に関する以下の記述は、近年に発表した内容^{1), 8), 20)}をまとめたものである。支配方程式は Richards 式であり、以下のように表わされる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y} + k_y(\psi) \right) = (C(\psi) + \beta S_s) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (1)$$

式中の k_x , k_y はそれぞれ x (水平) 方向・ y (鉛直) 方向の透水係数であり、 C は比水分容量、 S_s は比貯留係数である。変数 β は飽和時に 1、不飽和時に 0 を仮定することが多く、本研究もそのように扱う。この式は間隙圧力水頭 ψ を未知変数としているが、Richards 式には含水量を未知変数とする表現もあり、そのような定式化はマスバランスのより正確な計算に適していると言われている²¹⁾。しかし、含水量を未知変数とした場合、飽和状態を扱うことが困難であるなどのデメリットもあるため、本研究では式(1)の形式を採用した。一般に透水係数 k_x , k_y および比水分容量 C は飽和度 S_r に大きく依存するため、不飽和領域 ($S_r < 100\%$) では S_r あるいは ψ の関数として表わす。本研究では透水性の異方性は考慮せず、常に $k=k_x=k_y$ として解析を行った。透水係数 k は一般的に以下の式で表わす。

$$k = k_{sat} \cdot k_r(\psi) \quad (2)$$

ここで k_{sat} は飽和透水係数であり、 k_r は ψ の値に応じて 0~1 の値をとる相対透水性である。比水分容量 C は水分特性曲線（体積含水比 θ と圧力水頭 ψ の関係）の微分値 $\partial\theta/\partial\psi$ に相当し、水分特性曲線により一義的に決まる。これは不飽和状態において、マトリックサクションの減少による含水量の増分を表わしている。一方、比貯留係数 S_s は主に飽和時の水圧増加による含水量の増加を表す。これは、全応力一定時に間隙水圧が増加すると有効応力が減少し、土が膨潤することを表わすものであり、 S_s は体積圧縮係数 m_v と密接に関係している。式(1)は飽和状態に対しては圧密方程式と等価になり、次元問題に関しては次の関係が成り立つ。

$$S_s = m_v \gamma_w \quad (3)$$

ここで γ_w は水の単位体積重量である。つまり、比貯留係数 S_s を適切に設定することで、式(1)は圧密による水頭変化・マスバランスを記述することもできる。本研究はこの貯留項を利用することで、式(1)により地表からの浸透と基礎地盤圧密による水分上方浸透の両者を記述するアプローチを採用した。

本研究では有限要素法を用いて離散化・計算を行った。土領域内の浸透のみならず、外部からの影響を間隙水圧変化に反映させるため、以下のようなモデル化やインターフェイス整備を行った。

a) 降雨浸透

地表からの降雨の浸透は「降雨浸透境界」という境界条件を定義して入力した。これは一般的に用いられているもので、地表面の水圧が負値であるときは規定の流入フラックスを与える一方、水圧がゼロを超えるような場合はゼロで頭打ちとなる水圧（水頭）規定境界に自動で切り替えるものである。これにより、表面が飽和するのに過不足ない流入フラックスが自動計算されることとなり、例えば降水量を入力値として用意した場合、その差は表面流となる（ただし **ponding**、いわゆる水溜り状態となりこれが遅れて浸透する現象は考慮していない）。

b) 蒸発散

蒸発散量の計算方法については、一般的に標準として用いられているものはなく、種々のアプローチが試みられている。Wilsonら⁷⁾の方法のように間隙液相と間隙気相の質量交換およびその移動を考慮する厳密な連成式があるものの、マイクロ～メソスケールでの物質パラメタが必要とされるなど、本研究で考える空間スケールや地盤物性情報量とそぐわない点がある。一方で、広域を対象とした地理学的なモデルには Penman²²⁾の式・Thornthwaite²³⁾の式・Hamon²⁴⁾の式などがある。これらのうち Hamon の式は、気温のみが実質上の入力パラメタであり、可能蒸発散量（自由水面からの蒸発量）を簡易推定するものである。日射・風速・湿度などを考慮しないため、時々刻々の短期的な蒸発散量の高精度推定には向かないと考えられるが、年間蒸発散量など長期的な平衡を考えるうえでは Thornthwaite の式などのより厳密な式との良い整合が報告されている。本研究では簡易なモデル化を意図し、Hamon の式を適用した。同式は、


$$PE = 0.1397D^2P_t \quad (4)$$

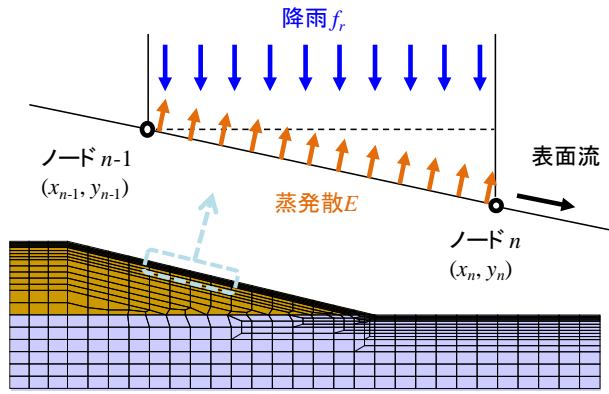
$$P_t = 1344 \exp[17.27T_d / (237.3 + T_d)] / (T_d + 273.15) \quad (5)$$

と表わされる。ここで、 PE は可能蒸発散量 (mm/day)、 D は一日当たりの最大日照時間（日出～日没）を 12 時間で除したもの、 T_d は日平均気温 (°C)、 P_t は T_d における飽和蒸気圧密度 (g/m³) である。実際の蒸発散量 E は以下のように係数を α_e として有効飽和度 S_e に比例するとし、以下のように計算した。

$$E / PE = \alpha_e S_e \quad (6)$$

$$S_e = \frac{\theta_w - \theta_r}{\phi - \theta_r} \quad (7)$$

ここで、 θ_w は体積含水率、 θ_r は残留体積含水率、 ϕ は間隙率であり、これらは水分特性曲線に関連したパラメタである。降雨浸透と蒸発散を同時に数値モデルの地表に規定するため、に示すように正味のフラックスを逐次計算するようにコードを整備した。なお、 α_e の値はことわりがない限り 1 とする。



地表で規定するフラックス:

■ 非降雨時

$$f = -E\sqrt{(x_n - x_{n-1})^2 + (y_n - y_{n-1})^2}$$

■ 降雨時

$$f = f_r|x_n - x_{n-1}| - PE\sqrt{(x_n - x_{n-1})^2 + (y_n - y_{n-1})^2}$$

降雨時は地表で常に \$S_e = 100\%\$ と仮定し
\$E = PE\$ とする

図 11 降雨浸透と蒸発散を考慮した境界フラックスの計算

c) 盛土嵩上げ荷重による過剰間隙水圧発生

浸透流解析では盛土築造に伴う新規盛土層以下の過剰間隙水圧の発生を自動的には再現できないため、間隙水頭増分をステップごとに別途計算し入力することで再現する。盛土一層ごとに対する全領域での全応力増分を Boussinesq の弾性解を用いて別途計算し、この全応力増分を間隙水圧増加に換算して各節点に与えた (図 12)。解析対象となる盛土は勾配が 1 : 4 と応力伝播角よりも十分に緩いため、盛土表層を接地面とする水平境界半無限弾性体を想定し計算した。盛土は完全に側方拘束された状態ではないが、盛土勾配が緩いため \$K_0\$ 状態に準じた状態を仮定し、鉛直全応力増分の付加と同時にそれと等価な水平全応力増分が発生するものとした。この仮定のもとでは盛土築造と同時に等方的な全応力増分 \$\Delta\sigma\$ が発生すると考えられるため、過剰間隙水圧の発生分 \$\Delta u_w\$ は Skempton の \$B\$ 係数を利用し次のように表される。

$$\Delta u_w = B\Delta\sigma \quad (8)$$

また、\$B\$ 係数の計算には土骨格と空気・水の三相を考慮し、水の圧縮性は無視することで次の式を用いて計算した²⁵⁾。

$$B = \left(1 + K_b n \frac{1 - S_r}{p_a} \right)^{-1} \quad (9)$$

ここで、\$K_b\$ は土骨格の体積弾性係数、\$S_r\$ は飽和度、\$p_a\$ は空気圧である。土骨格の弾性係数 \$K_b\$ は次式により計算した。

$$K_b = \frac{\Delta p'}{\Delta \varepsilon_{vol}} = \frac{\Delta \sigma' (1 + 2K_0)}{3\Delta \varepsilon_{vol}} = \frac{1 + 2K_0}{3m_v} \approx \frac{0.7}{m_v} \quad (10)$$

ここで、\$p'\$ は平均有効主応力、\$\varepsilon_{vol}\$ は体積ひずみである。この \$B\$ 係数の計算値は実際に行われた非排水・非排水等方圧縮試験の結果²⁶⁾と比較的良く一致しており、上式の適用は妥当であった。原位置では実際に不飽和状態からの湿潤では大気圧下で飽和状態に至ることは難しいため、原位置大気圧飽和度限界 \$S_{rf}\$ を導入し、大気圧下で短期的に浸潤が起こる際に達しうる現実的な最大飽和度を定義する。サクシオンが正からゼロになった時点で飽和度を \$S_{rf}\$ とし、これを上限として浸潤は許さず、水圧が正の領域では完全非排気とし、間隙空気圧・間隙率を Boyle の法則に従う気泡圧縮で考慮したうえで式(9)により \$B\$ 係数を計算し適用した。節点にサクシオンが発生している (水圧が負である) 領域に対しては、以下の仮

定を設けた。 荷重による気相圧増分が瞬時に領域外に発散し（透気係数を無限大と想定）、間隙水圧増分も発生しないと想定し、水圧が負の領域では常に B 値がゼロになるとした。 本研究では盛土の単位体積重量を 18.6kN/m^3 とし、新規の盛土層にはサクシオン- 9.8kN/m^2 （おおよそ最適含水比で観測される状態）を与えた。 実際の盛土は最適含水比よりも湿潤側で施工されているため、これよりもサクシオンはやや小さいと思われる。 計算ステップとしては、新たな盛土要素を追加後、過剰間隙水圧増分を各節点に、サクシオンを新規盛土要素に与える。 その後境界条件設定を一度全て解除し、降雨蒸発散を与える表面要素を新規の盛土表層に、砂層下部の固定圧を再設定するという形を取った。

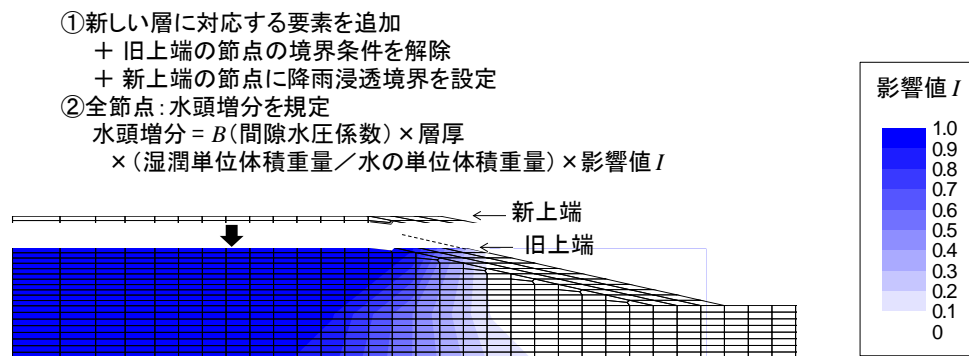


図 12 Boussinesq の弾性解による影響値分布と築堤過程への適用

d) 地表凍結・積雪・融雪

冬期の地表過程については不明な点が多い。 地表と積雪の熱的相互作用が起こることが想定され、熱・水連成解析などでその記述はある程度可能であるが、植生の影響などパラメタ化しづらいものもあり、厳密な扱いは難しい。 また、北海道中央部の気候では、積雪下の地表が凍結するかは積雪前の気温の履歴の微妙な相違に依存するところが大きい。 すなわち、積雪前に氷点下の気温が続いた後に積雪が起こると凍結状態が維持され、逆に積雪前に凍結が起こらない場合は、その後の積雪を介しての熱伝導により地表が凍結することは難しく、このどちらも年によって起こり得ることが舞鶴遊水地での観測よりわかっている。 本研究では冬期全体を通しての水収支を合理的に考慮することに主眼を置き、以下のような理想化を行った。 積雪量が記録され始めた時点から最大積雪量が観測された時点までは地表面は非排水境界とした。 これは必ずしも地表凍結を前提としているのではなく、途中にある程度融雪が起こる期間があったとしても、積雪上端からの融雪が下端に至る前に再凍結するシナリオを想定している。 実際に、冬期の後半には積雪下部にて非常に密な氷板が観察される。 非排水境界の規定は、地熱による積雪下端から融解を無視することに相当する。 また、最大積雪量が観測された時点から積雪量がゼロになるまでを融雪期間とし、地表面の凍結期間に記録された降水量（ヒーター式雨量計により記録された AMeDAS データを使用）の累積を融雪期間の時間で割ることで融雪による浸透フラックスとし、降水として一時間ごとに節点に入力した。 最大積雪量が観測された時点から融雪の開始とする熱力学な根拠はないが、後述（4 節）の舞鶴遊水地での過年度の観測結果より、地中間隙水圧の上昇開始時期とよく一致しているという観測事実に基づいて上記のように設定した。 この方法により境界条件を時期によって分類した例を、2015-2016 年の東の里遊水地について図 13 に示す。

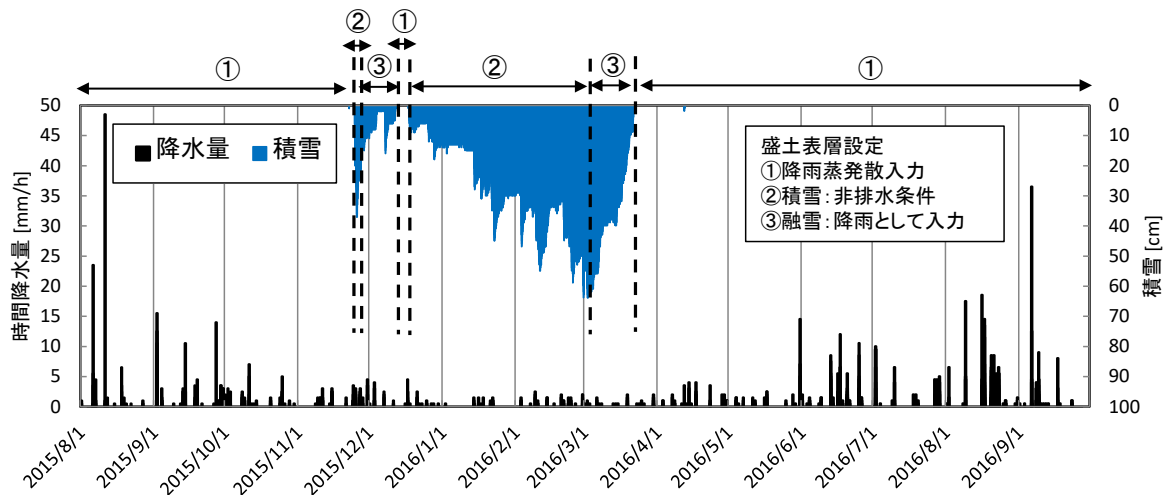


図 13 地表境界条件の設定（東の里遊水地の例）

4. 平衡状態にある堤防の水理・力学特性（舞鶴遊水地）

(1) 原位置モニタリング結果の概要

舞鶴遊水地でこれまで観測されている各種データの主要なものを図 14 に示す。SP250 では雨量・積雪深を計測しているが、雨量に関しては高分解能型（0.2mm 転倒ます）を用いたため、強降雨時には降雨の一部を補足できていないことが疑われた。また、オリフィスの詰まりなども起こったため、AMeDAS 千歳のデータにより補間した合成データとしている。積雪についても、現地積雪ゲージに基づく積雪深は AMeDAS 千歳のデータと極めて整合性が良かったため、後者を示している。積雪ゲージはインターバルカメラで観察しているため、吹雪によるレンズへの着氷時や夜間のデータが欠損となるためである。地中データとして、ここでは力学的挙動により直接的な影響のある間隙水圧のみ議論し、土壌水分については割愛する。2015 年春期に深度 0.5m において間隙水圧が一時的に -83N/m^2 まで減少したが、その後の挙動を同深度に設置した予備のテンシオメーターの計測値と比較したところほぼ完全な整合性が見られ、キャビテーションは起こらなかったと判断できる。

SP250 での深部間隙水圧挙動は安定した年サイクルを示しており、2m 以深では夏に最大値、冬に最小値を呈している。その振幅は 10kN/m^2 程度であり、力学的安定性に影響するほど大きくはない。また、盛土表面でサクションがはたらくのは表層 1m 未満であり、その期間も非常に限られている。SP250 と SP2600 は直線距離にして 2km ほど離れており、図 5 に示すように基礎地盤構成も大きく異なるが、間隙水圧挙動は総じて類似している。これは一つの断面で周囲堤を代表することを正当化する材料の一つとなる。本遊水地の周囲堤は深度 2m から 3m にかけて間隙水圧が減少しているのが特徴であり、下位透水性層（火山灰質砂層）からの下方排水が定常的に生じていることが疑われる。

図 14 では積雪深が増加する時期と減少する時期を分けて色付けしているが、この境界で間隙水圧挙動が大きく変化していることがわかる。すなわち、浅部（0.5m・1m）では間隙水圧はほぼ地表浸潤時の静水圧まで増加（それぞれ 4.9kN/m^2 ・ 9.8kN/m^2 ）し、深部では水圧が減少から増加に転じている。これは明らかにこの時点から融雪浸透が生じていることを示している。融雪浸透過程には地盤－積雪－大気の複雑な相互作用があり、そのモデル化は容易ではないが、地盤への浸透に関する限り、最大積雪深の時点をもその開始とすることで、ある程度現実的な堤内水収支の計算が可能になると考えられる。

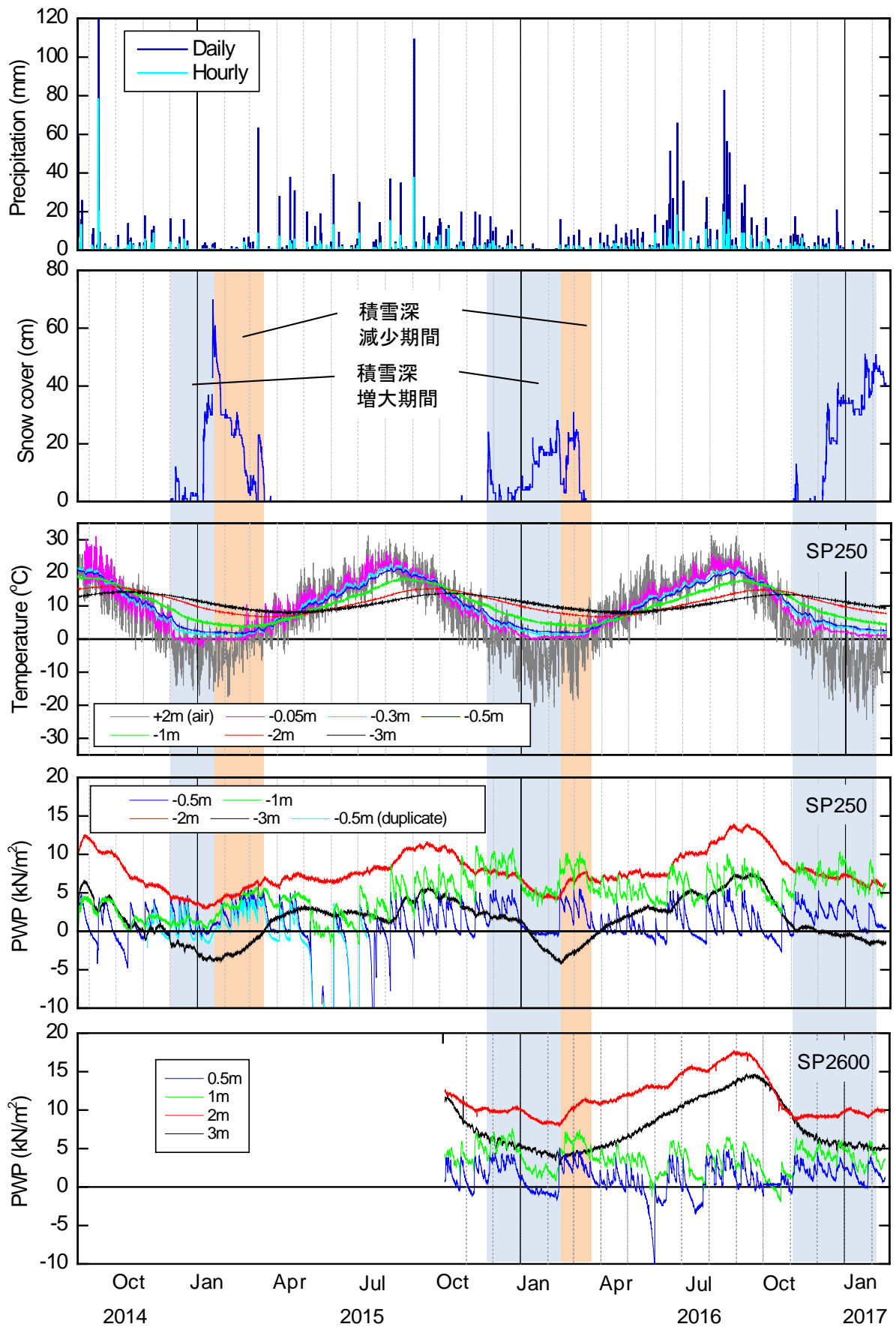


図 14 舞鶴遊水地周囲堤での各種観測結果

(SP250: 2014年8月19～, SP2600: 2015年10月5日～, いずれも観測継続中)

(2) 非定常不飽和浸透流解析による再現

上記観測結果の再現を数値解析により試みた。盛土は対称性を仮定し（図4に示す通信ケーブル埋設のための法肩の余盛りは小規模であるため無視した）図15のように半断面を設定した。ここで盛土層は表面0.5mのみ、大きな透水係数で表わされる緩い層を想定した。これは試行計算の結果、均一な物性設定では深度0.5-1mでの降水への比較的敏感な応答と、深度2-3mでの減衰の大きい応答を同時に再現できなかつたためである。表1に示す上層(Bk-u)の飽和透水係数 k_{sat} の設定値は原位置計測結果(10^{-7} m/secのオーダー)に近い。ここでの盛土材は細粒を多分に含み圧縮性が高いことから、自重圧密による深度方向の連続的な透水係数の減少が想定される。一方で、地表0.5-0.7mにかけては盛土材の色が酸化を示す暗褐色を呈しており、それ以深と不連続的な物性の変化も想定される。これらに基づき、ここでは図15・表1のように理想化した。この設定に関しては今後再検討の余地がある。なお、その他の物性は一般値として妥当と思われるものを設定した。

水分特性曲線と相対透水性関数には「河川堤防の構造検討の手引き」⁴⁾に粘性土を対象として示されている表形式のものを用いた（図16）。著者は以前^{1),8)}に van Genuchten モデル²⁷⁾なども併用し、上記と比較検討したが、舞鶴遊水地周囲堤に関する限り類似した結果が得られたため、ここでは他モデルによる解析は省略した。

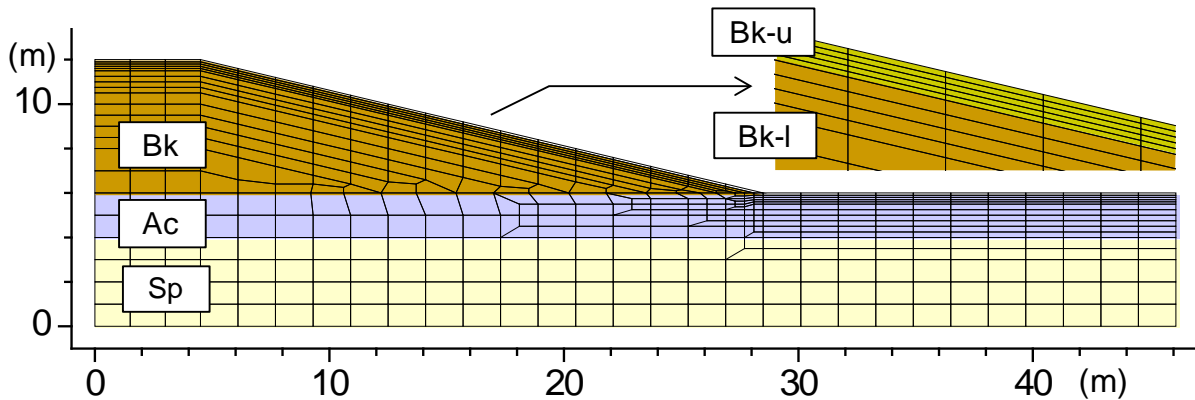


図15 舞鶴遊水地周囲堤の半断面の有限要素モデル

表1 舞鶴遊水地断面の浸透流解析パラメタの設定

	k_{sat} (m/sec)	m_v (m^2/kN)
Bk-u	5×10^{-7}	0.05
Bk-l	1×10^{-8}	0.05
Ac	5×10^{-9}	0.05
Sp	1×10^{-6}	0.001

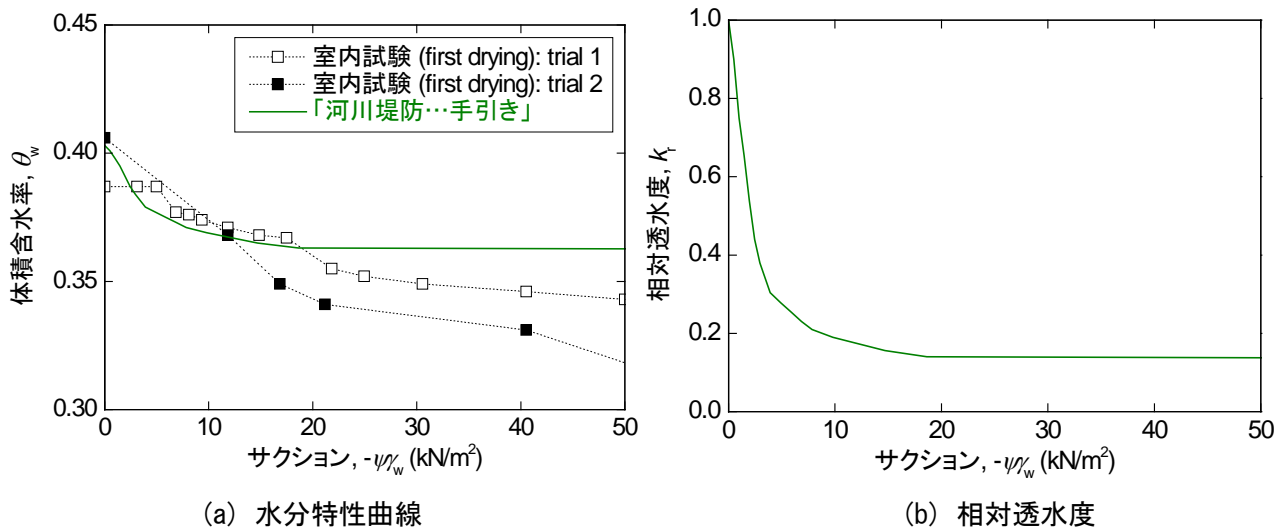


図 16 浸透流解析における水理モデル（「河川堤防の構造検討の手引き」⁴⁾の「粘性土」より）
 (*解析では飽和時からの体積含水率変化分のみ考慮するため、
 ここではオフセットを与えて室内試験結果と比較している)

数値解析により算出された間隙水圧と計測値の比較を深度ごとに図 17 に示す。なお、解析では 3 節での記述の通りに積雪・融雪による水収支への影響を考慮したシナリオ（図中「No consideration of snow cover」）とともに、これらを考慮せず、記録された降水量をそのまま入力（つまり、降雪が瞬時に融けて地表面に接触すると仮定）したシナリオ（図中「Consideration of snow cover」）の 2 ケースを実行した。また、ここでは図の煩雑化を防ぐため、計測結果は SP250 からのもののみ限定する。深度 0.5m での結果に着目すると、冬期の積雪・融雪を地表境界条件に反映させることにより、これを無視した場合よりも、理想化された形ながら（実測にみられる短期の上下変動は再現されないが）冬期の水圧変動をより正確に再現できている。しかし、融雪期以降は上記 2 シナリオ間での結果の相違は速やかに消失した。2015 年に見られた数回のサクシオン増大は再現できていないが、これは計算安定性を担保するため、相対透水性関数（図 16(b)）の残留値が比較的大きく設定されているからである。これは比較的短期間のみ継続する状態であり、深部への影響は見られないため、特段の再現追求は行わなかった。

深度 1m では、解析結果は計測結果よりも短期応答が小さくなり、Bk-u 層から BK-l 層に向けて、透水係数の値を今回設定したよりも緩やかに減少させる設定が必要であったことがわかる。しかし、通年の傾向や 2015 年融雪期の変動傾向など多くの点が再現できている。深度 2m 以下では日単位の応答はほとんど観測されなくなっており、解析結果も同様であった。観測結果は年サイクルの長期変動を呈しているが、これは今回の数値解析では再現不能と思われる。その理由は、浅部に対する明確な位相遅れが見られないことであり、地表からの浸透が時間遅れで反映されるメカニズムによるものではないことが明らかだからである。おそらくこの深部の挙動には基礎地盤中の下位透水層を介してのより広域的な水位変動が影響を及ぼしていると考えられる。著者は過去に、高透水性（砂礫）盛土が低透水性基盤（セメント改良粘土）上にあるケースについて同様の解析を行っており、そのケースでは基盤層がバリアとなりこのような長期変動は見られなかった。千歳川遊水地群の周囲堤のように低透水性盛土の下位に透水層が存在し、広域の水位変動とつながっているケースの解析には注意が必要である。

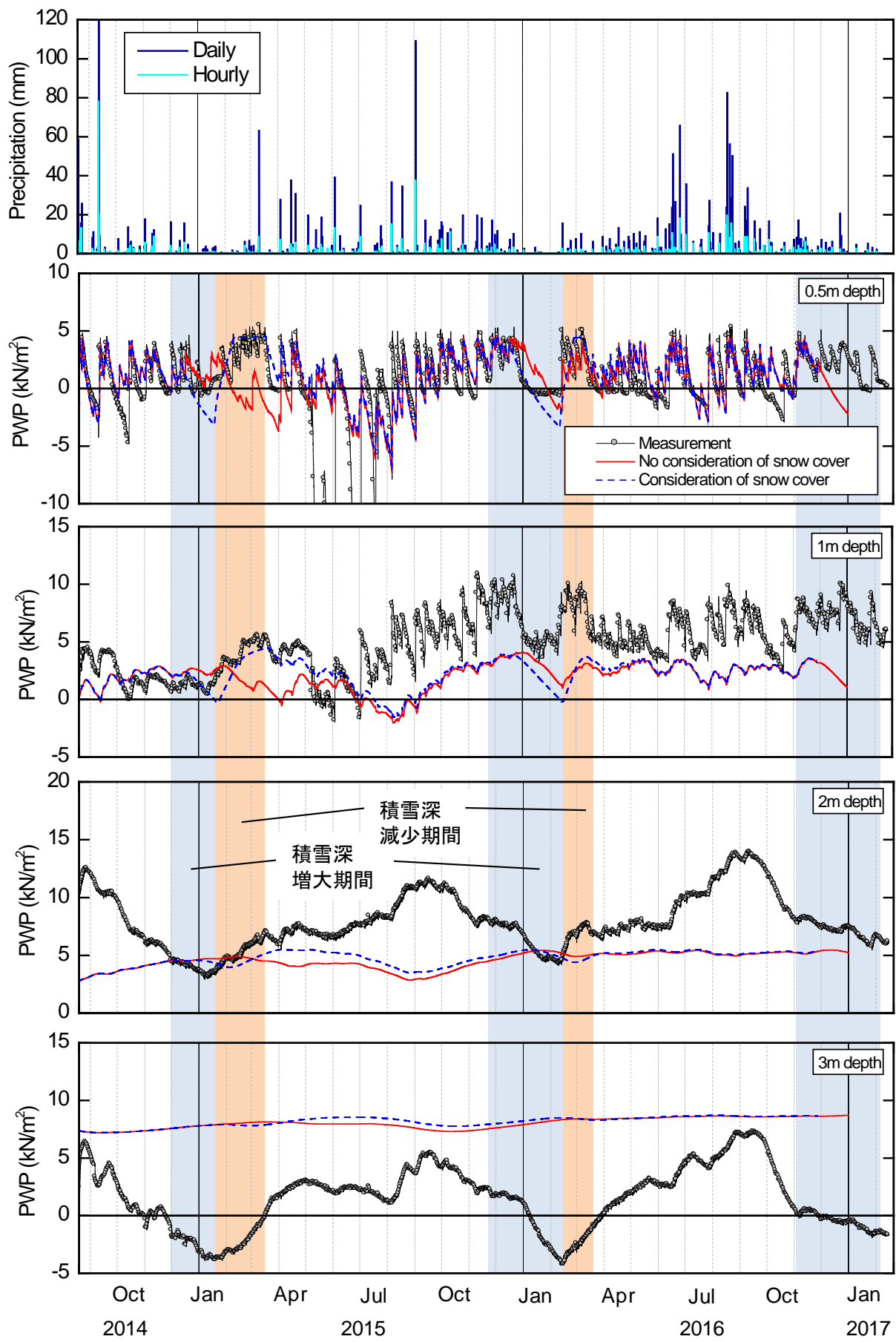


図 17 舞鶴遊水地周囲堤の間隙水圧：深度ごとの測定値と解析値の比較 (SP250)

(3) 堤体の力学的健全性に及ぼす水理状態の影響評価

先に見たように、舞鶴遊水地周囲堤の間隙水圧は地表 1m 以浅では降水など地表過程に敏感に応答するのに対し、それ以深では年サイクルを辿る。これらの状態変化が堤体の力学的挙動にどのような影響を与えるかを貫入抵抗・せん断波 (S 波) 速度に基づき評価する。S 波速度は安定解析に用いるパラメタではないが、非排水せん断強度と強い相関を持つため、強度定数の代理として考慮する。なお、本盛土はごく地表を除いて飽和しているため、単位体積重量の変化はほとんどない。よって、S 波速度の変動はせん断剛性の変動と解釈することができる。

図 18 に舞鶴遊水地 SP250 で表面波探査により推定した S 波速度の分布を示す。図中にはテンシオメーターアレーの位置と、表面波探査実施日 (12:00 時点) の間隙水圧記録を示す。図 14 に示すように間隙水圧が最も低くなる 2017 年 1 月にも表面波探査を実施予定であったが、訪問日は雪が特に深く、かつ荒天であったため実施を断念した。結果として水理状態にあまり相違のない春期と秋期の比較のみが得られることとなり、図 18 に見られるように 2 つの時間断面において有意義な相違が見られなかった。しかし、表面波探査の再現性の良さを示す例もとらえることができ、当該断面においては今後も調査を継続する予定である。

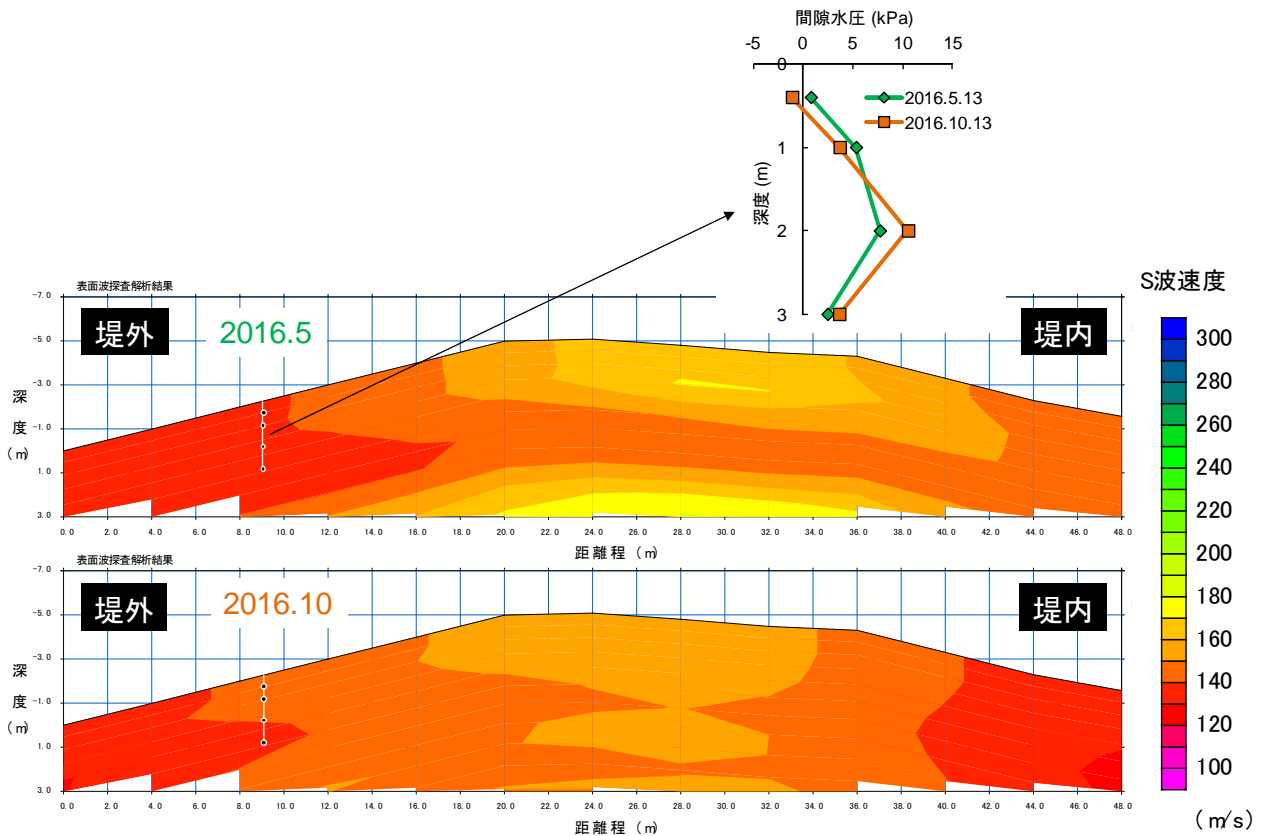


図 18 表面波探査による舞鶴遊水地周囲堤 (SP250) の S 波速度分布 : 2016 年 5 月および 11 月

表面波探査に加えて、簡易動的コーン貫入試験を行い、季節による貫入抵抗の変化を調べた結果を図 19 に示す。黄色掛けした部分が盛土層に相当する。また、図の下部には数値解析により予測された間隙水圧プロファイルを示した。ここで 2016 年 5 月と 9 月の結果を比較すると、地表から 0.5-1m までは法尻・法肩で 9 月のほうがやや貫入抵抗が大きく、これは 9 月のほうが地表面で間隙水圧が低いという解析結果と対応しているように見えるが、一方で中腹表面では貫入抵抗に変化が見られない。実際に間隙水圧の実測値にも変化がなく、間隙水圧の実測値と解析値が完全には整合していない (深部での水圧が

一致しないことは前述の通りである)。よって法尻・法肩でも地表近くの間隙水圧は5月・9月で解析値が示しているよりも実際の相違は小さかった可能性がある。法肩から深度1-4mでは5月から9月にかけてわずかながら水圧増加が計算され、同位置での貫入抵抗減少と整合する。しかし解析で出力された水圧増分は貫入抵抗を定量的に説明するには小さく、あくまで定性的な整合性を確認するにとどまる。2017年2月については、本報作成の時点で解析に必要な入力データが揃わず、今後検討する。

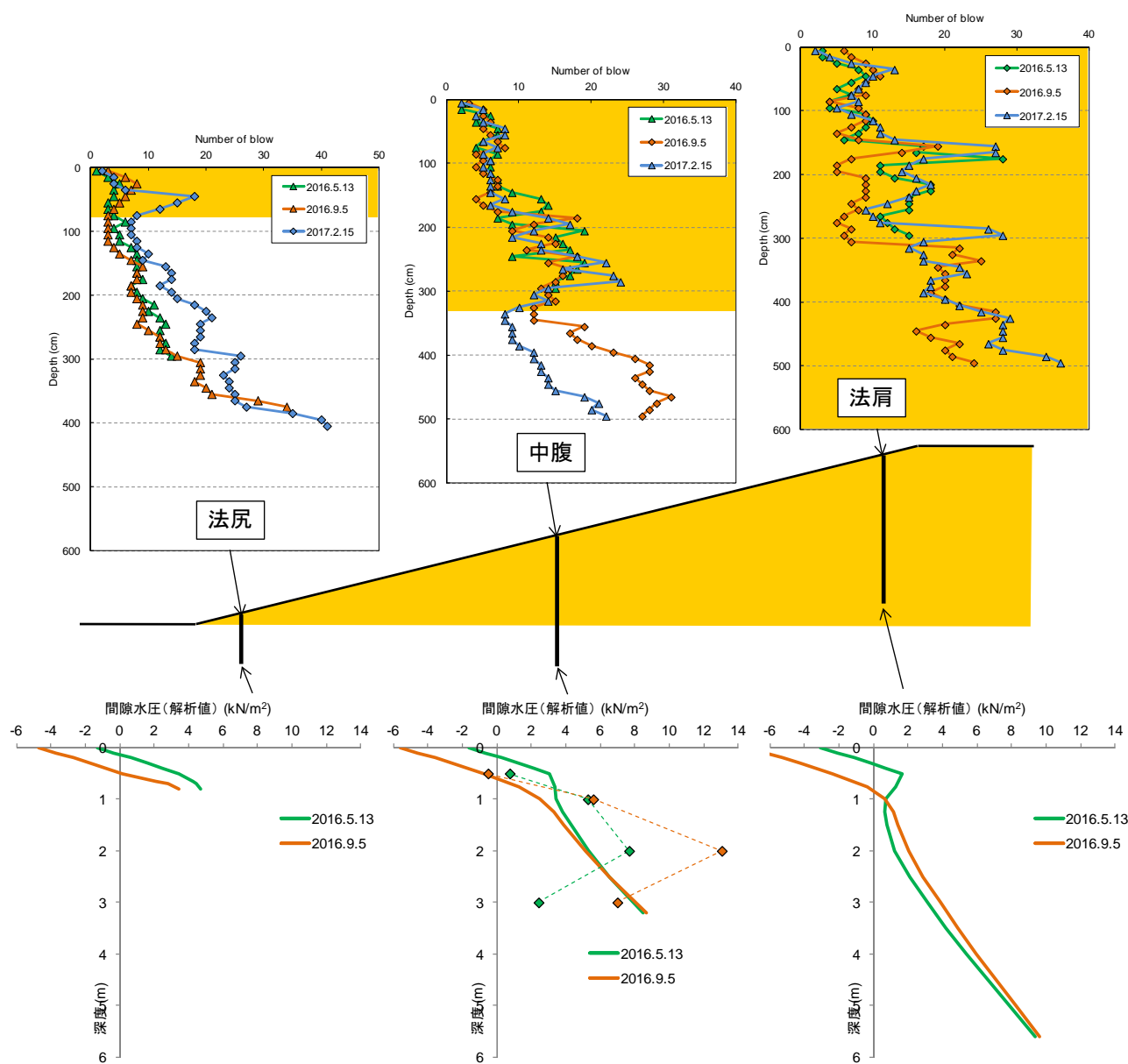


図 19 簡易動的コーン貫入による舞鶴遊水地周囲堤 (SP250) の強度分布と季節変化

ポータブルコーン貫入試験は、プループリング容量から抵抗 2.8MN/m^2 の深度までのみ実施可能であり、図 20 の例に示すようにほとんどの位置・季節で 0.5m 程度までしか貫入できなかった。図中では貫入抵抗 2.8MN/m^2 の深度をつなぎ、それ以上を色掛けしている。この地表領域はわずかながら法尻に向かって深くなる傾向が見られた。図 21 は図 8 に示すように 2016 年 2 月から 2017 年 2 月までの 1 年間、ほぼ毎月実施したポータブルコーン貫入試験結果の範囲を表したものである。中腹 (“Mid”: 法肩より 6, 9, 12m) と法尻 (“Toe”: 法肩より 15, 18m) では相違が見られないが、法肩 (“Top”: 法肩より 0, 3m) では地表の貫入抵抗がやや大きいことがわかる。これは図 19 下部の間隙水圧分布に示されるように、法

肩では重力による下方排水により地表でもわずかに間隙水圧が低くなることが原因であると考えられる。

図 21 中には、最適含水比 (w_{opt}) の 1.05, 1.15, 1.30 倍の含水比で室内にて締固めた試料を用いて図 9 に示す室内キャリブレーションを行った結果も示している。これらの含水比は実際の施工で適用された範囲に相当する。深度 0.5m までほぼ一定（わずかな抵抗増加は自重による拘束効果に加え、次第に剛な境界の影響を受けはじめるためと考えられる）の貫入抵抗を示しており、これは原位置での結果と全く異なる傾向である。一方、同図には 2015-2016 年にかけて築造された東の里遊水地 (SP2210-SP2275) での測定結果も示してあり、こちらは舞鶴遊水地での結果とは対照的に、室内キャリブレーションに見られた傾向（すなわち、貫入抵抗が深度にほとんど依存しない）を示した。両サイトでは築造からの経過時間に加え、植生の有無（本報作成時点で、東の里遊水地周囲堤 SP2210-SP2275 は植生がない）などの環境の相違がある。盛土表層がいかに時間をかけて舞鶴遊水地に見られるような強度分布を発現するのか、そのメカニズムの解明は、出水時の堤防侵食耐性の評価の観点から非常に興味深いものであり、今後のさらなる調査を予定している。

室内で締固めた試料に対する一面せん断試験から求めた CU 強度定数 ($c_{cu} \cdot \phi_{cu}$) と鉛直有効応力（土被り圧から深度 0.5m のテンシオメーターの計測値を指し引いたもの）から計算した非排水せん断強度 c_u を、深度 0.4-0.5m のポータブルコーン貫入抵抗に対してプロットしたものが図 22 である。室内キャリブレーションと原位置では相関が一致しないのが明らかであり、原位置での貫入抵抗は、その時々有効応力を有する室内締固め供試体強度から想定される貫入抵抗よりおよそ 50-100% 大きい。今後は原位置で不攪乱サンプリングを行い、原位置供試体の室内試験結果との相関を見ることで、相関の一義性が存在するかを検証する。

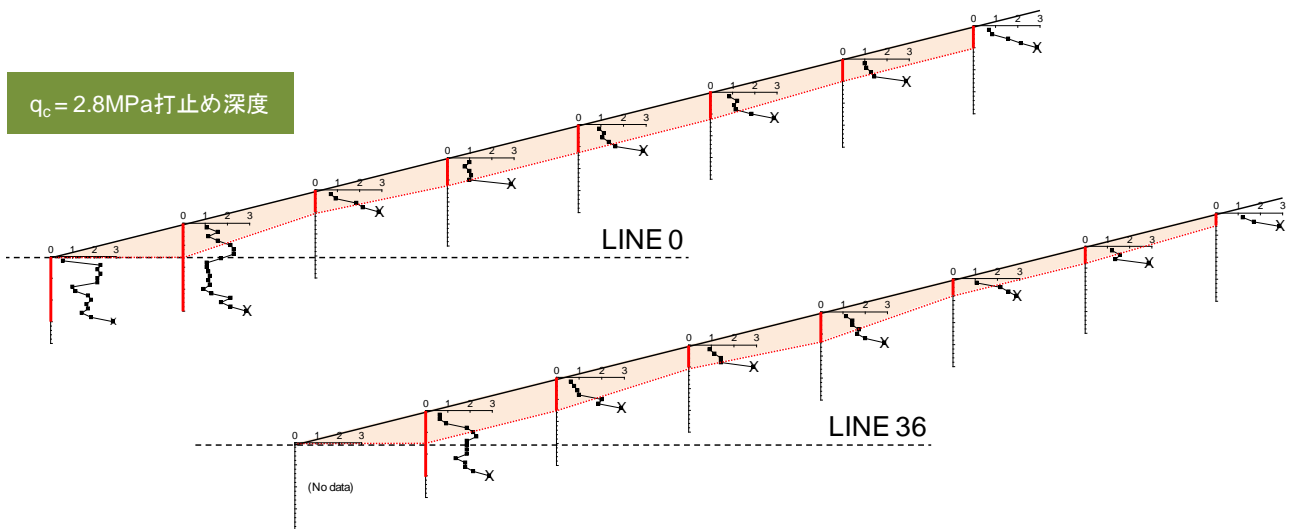


図 20 ポータブルコーン貫入による舞鶴遊水地周囲堤表面 (SP250) の強度分布の例

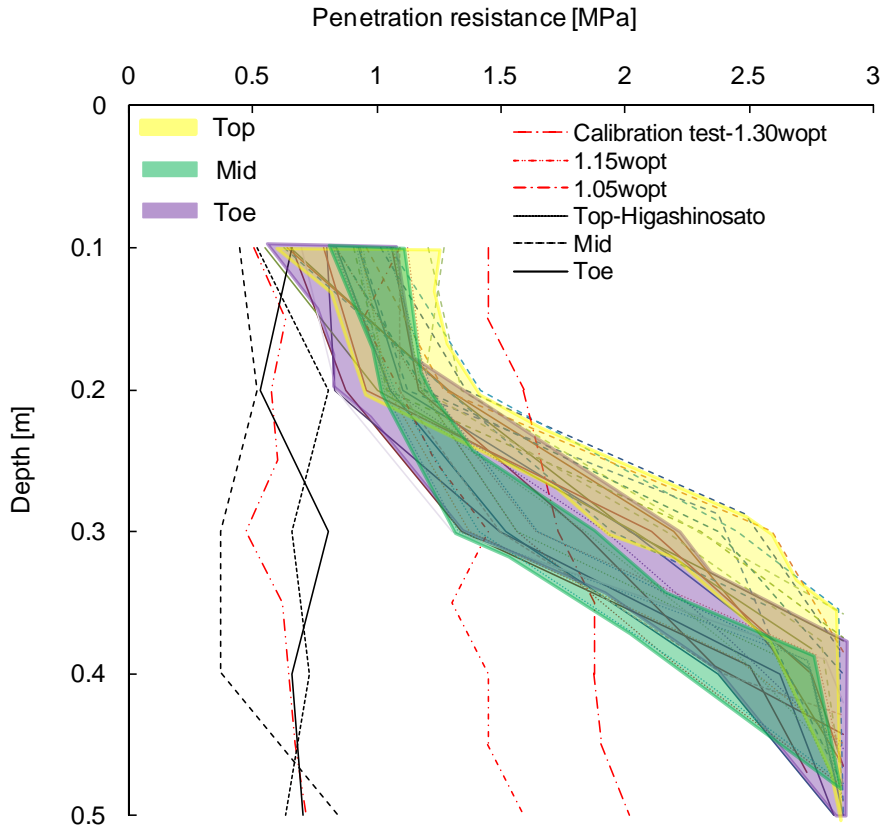


図 21 舞鶴遊水地周囲堤表面（SP250）におけるポータブルコーン貫入抵抗プロファイルと各種参照プロファイルの比較

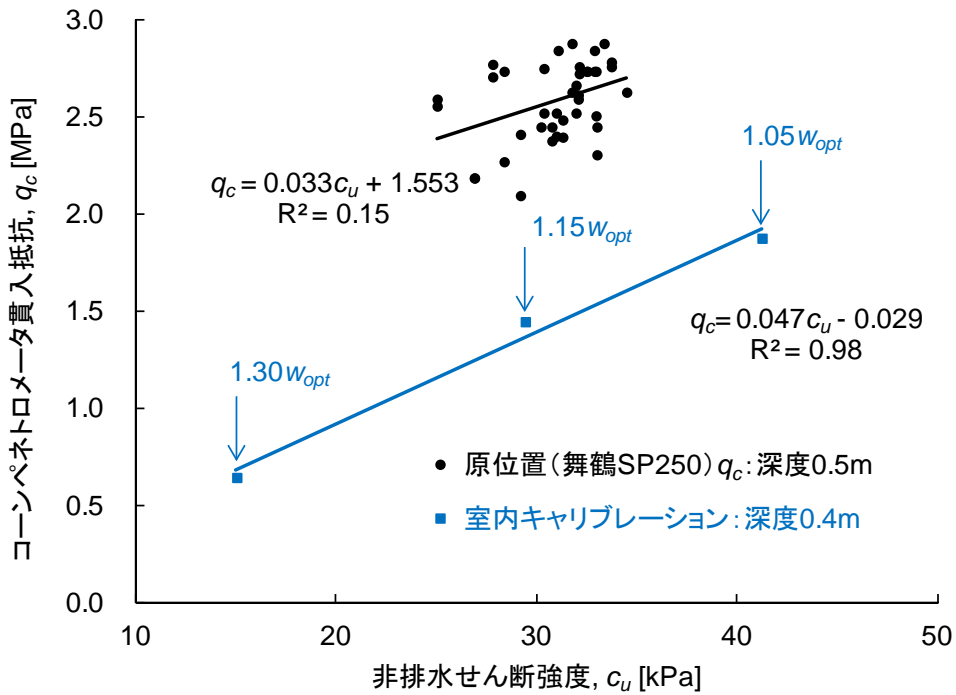


図 22 ポータブルコーン貫入抵抗値と室内試験（一面せん断試験）による非排水せん断強度との相関

5. 築堤直後の堤防の水力・力学特性（東の里遊水地）

東の里遊水地での調査は、2016年度の築堤時の水利状態変化の解明に重点を置いて調査を実施した。非常常不飽和浸透流解析に用いた有限要素モデルを図23に、入力パラメータを表2に示す。この図の中に示した「盛土要素」は解析開始時点では存在せず、地表境界は「泥炭層」上端に設定したが、実際の築堤と同じ履歴で盛土要素を加え、同時に地表境界もその上端に更新していくことで築堤をモデル化した。その際の荷重増加による間隙水圧増加の表現については3.(5)c節に記した通りである。なお、ドレーン無し断面（SP2210）の解析は対称性を考慮して半断面に対して実施した。

解析結果・観測結果の例として、盛土下端から高さ0.5mに埋設した間隙水圧計の計測値と、解析による再現結果を図24に示す。ここでは解析に3つの異なるシナリオを導入した。「地表非排水」シナリオは、築堤時の間隙水圧増分のみを考慮し、地表面を通しての水収支は一切考慮しない（築堤時およびその間の作業休止時に盛土および周囲の地盤表面を不透水シートで覆うことに相当）もので、「降水・蒸発散」シナリオは図11に示す双方向のフラックスをいずれも考慮するものである。また、「降水のみ」シナリオでは蒸発散は考慮していない。なお、降水を考慮した上記の2ケースについては、積雪・融雪は先述のスキームを適用して解析に反映している。本サイトでの積雪記録は図13に示してある。図24より、降水を考慮することの影響は非常に大きく、降水は築堤休止区間の水圧を高いレベルに維持する効果があることが理解できる。図25は「降水・蒸発散」シナリオにおいてドレーンの有無の影響を比較したものである。解析ではドレーンの存在により嵩上げ間の水圧減少速度が増加し、築堤終了後にはドレーン無しのケースよりもわずかながら水圧増加量が抑えられている。しかしその増加量の相違は小さく、飽和透水係数 k_{sat} が 10^{-7} m/sec程度と比較的透水性が低い盛土では、間隙水圧計が設置された盛土中央部まで排水効果が短期的には及ばないことがわかる。観測値では、ドレーンの効果が一見逆転して現れており、ドレーンのある断面において間隙水圧がより高くなっている。ドレーンが逆の効果（間隙水圧の増加）を起こす力学的メカニズムは考えられないため、これはSP2210とSP2275で盛土や基礎地盤の性質が異なったことが原因と考えられる。いずれにせよ、盛土中央部での比較では、ドレーンの有無の影響の議論は難しいことがわかる。

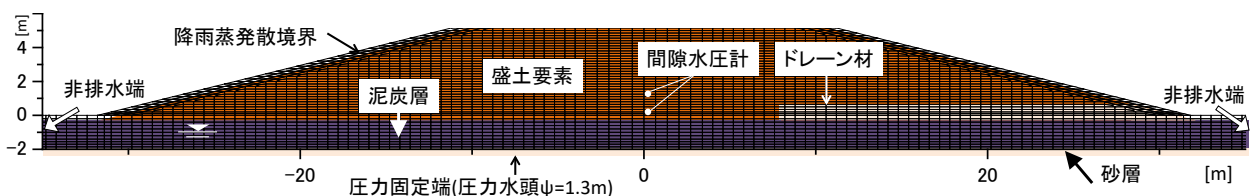


図23 東の里遊水地周囲堤の有限要素モデル
(SP2210に関しては図中のドレーン要素は通常の盛土要素とした)

表2 東の里遊水地断面の築堤・浸透流解析パラメータの設定

土層	飽和透水係数 k_{sat} (m/sec)	体積圧縮係数 m_v (m^2/kN)	間隙率	原位置大気圧飽和限界
盛土	1.0×10^{-7}	0.0005	0.4	0.9
ドレーン材	1.0×10^{-5}	0.00001	0.4	0.9
泥炭層（地下水位以上）	1.0×10^{-8}	0.003	0.4	0.9
泥炭層（地下水位以下）	1.0×10^{-8}	0.003	0.4	1

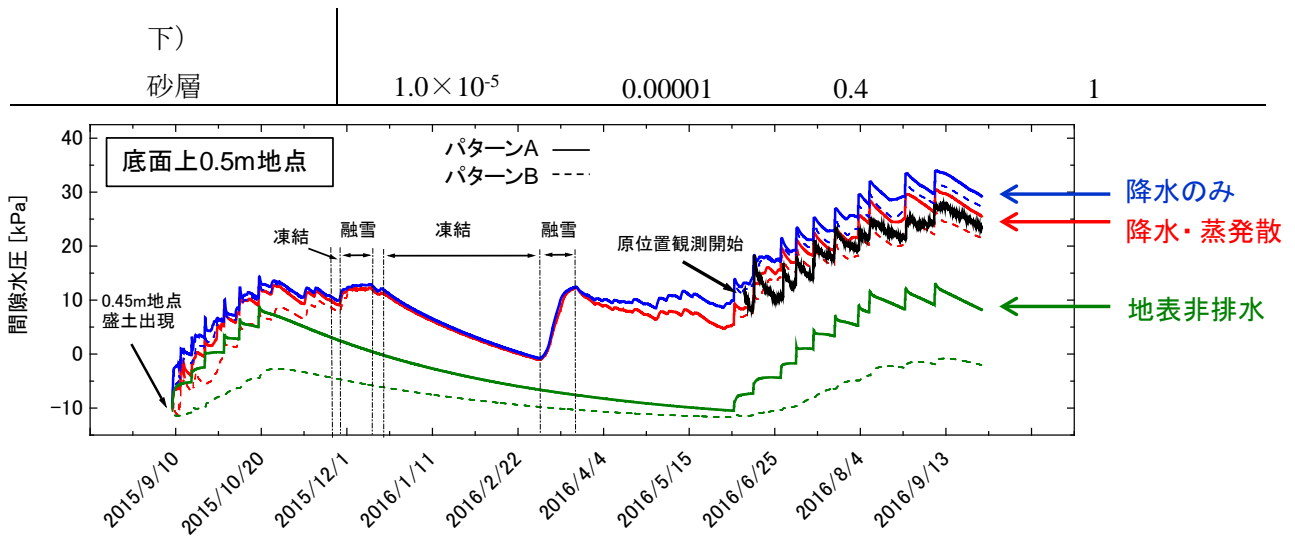


図 24 東の里遊水地周囲堤の嵩上げに伴う間隙水圧挙動：実測値（黒線）と解析値

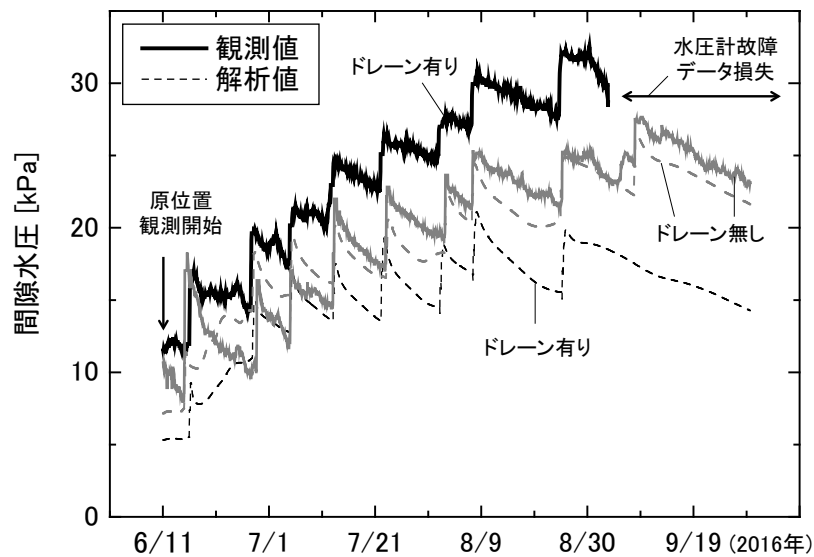


図 25 東の里遊水地周囲堤の嵩上げに伴う間隙水圧挙動：
ドレーン無し（SP2210）断面とドレーン有り（SP2275）の比較

数値解析により得られた、築堤過程における主要な時間断面での間隙水圧分布を図 26 に示す。この図からも、中心線においてはドレーンの有無の影響は明確に表れないことがわかる。一方でドレーン上部の盛土に対しては明確な排水効果が期待できることが解析からは示されている。これを踏まえて図 27 に示した表面波探査結果を議論する。2016 年 10 月の結果をドレーン無しの断面（SP2210）とドレーン有りの断面（SP2275）で比べると、ドレーンの影響が小さいと考えられる堤外側（遊水地内側）で前者のほうが S 波速度が小さく、前述の通りこちらの断面では盛土材が築堤直後から、より湿潤であったことが疑われる。一方でドレーン設置側（堤内側）法面の S 波速度に着目すると、SP2275 では堤外側法面でのそれよりも明らかに大きく、築堤終了の時点（図 26 では 9 月、図 27 では 10 月）で既にドレーンの上側から間隙水圧が消散されていることが推測できる。2017 年 1 月の時点では両断面での堤内側法面の S 波速度の相違が小さいが、これはドレーンのない断面での排水がドレーンのある断面のそれに追いついたことの表れと考えられる。

同サイトにおいて実施した簡易動的コーン貫入の結果を図 28 に示す。この図からも、中心線付近ではドレーンのある断面のほうが貫入抵抗、すなわち強度が全体的に低いことがわかる。しかしドレーン直上の法面では、強度が低い深度でもドレーンのない断面と同等であり、2017 年 1 月には大きく増加している。2017 年 1 月 17 日を除き、簡易動的コーン貫入と表面波探査の実施日が異なったので定量的な相関の検討は難しいが、ドレーン直上箇所の強度が相対的に高くなる傾向は、図 27 の S 波速度分布と整合している。

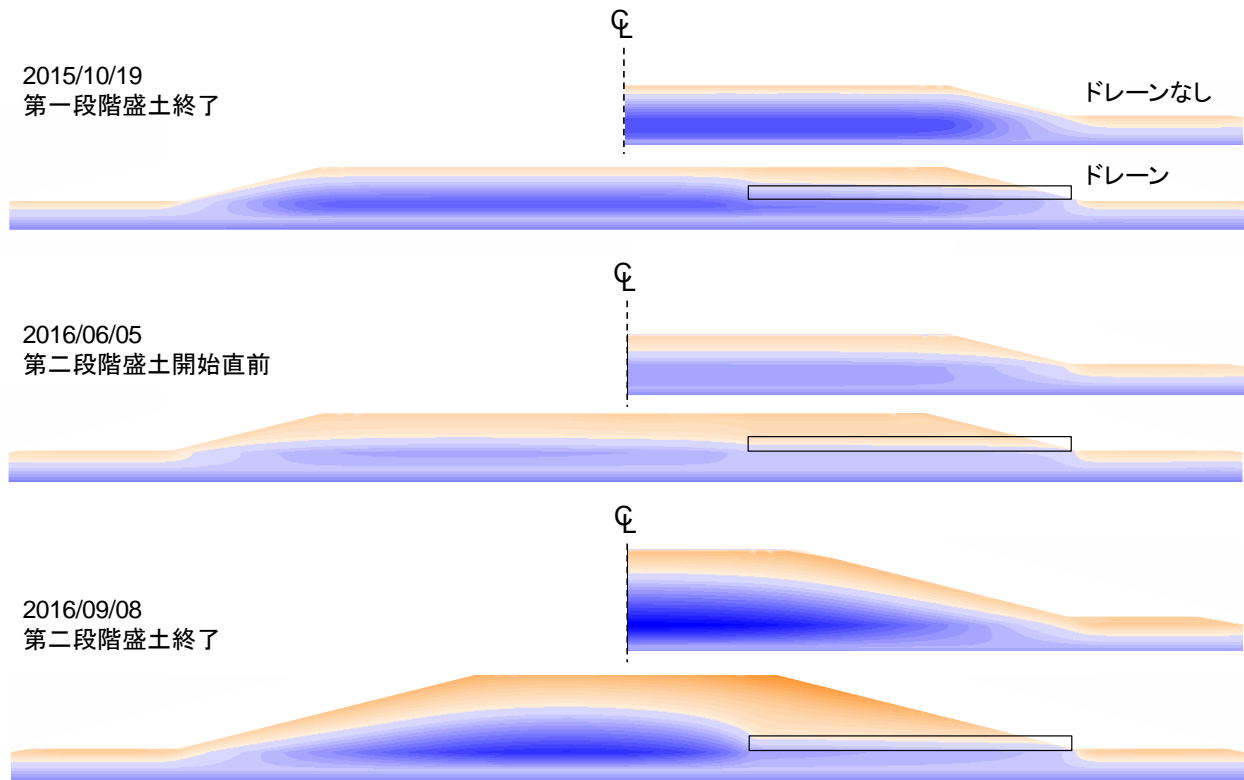
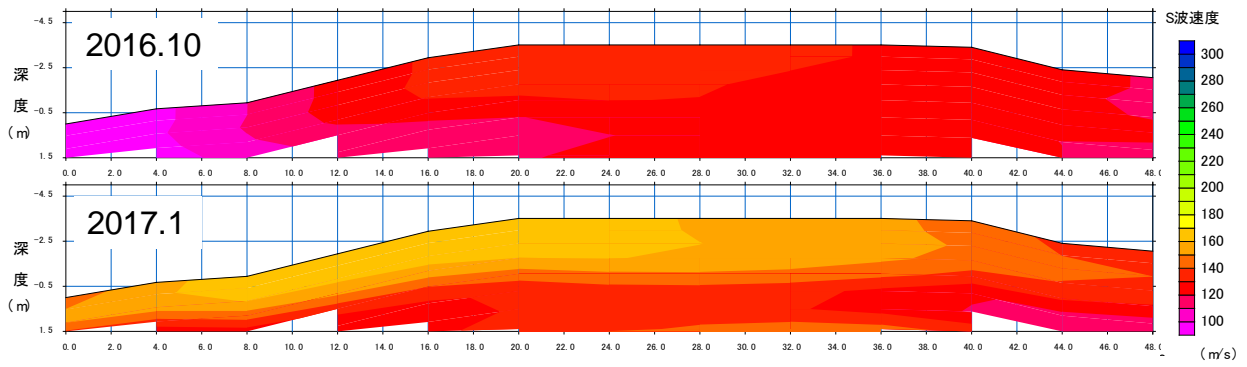
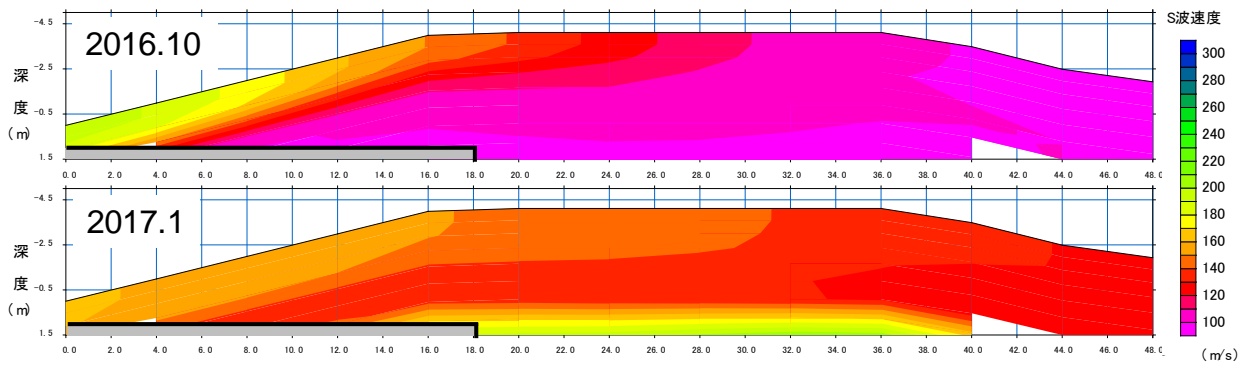


図 26 主要時間断面における東の里遊水地周囲堤の嵩上げに伴う間隙水圧分布：
ドレーン無し（SP2210：対称性により半断面のみ表示）断面とドレーン有り（SP2275）断面の比較



(a) ドレーン無し断面 (SP2210)



(b) ドレーン有り断面 (SP2275) : 左下隅灰色部がドレーン

図 27 表面波探査による東の里遊水地周囲堤の S 波速度分布 : 2016 年 10 月および 2017 年 1 月

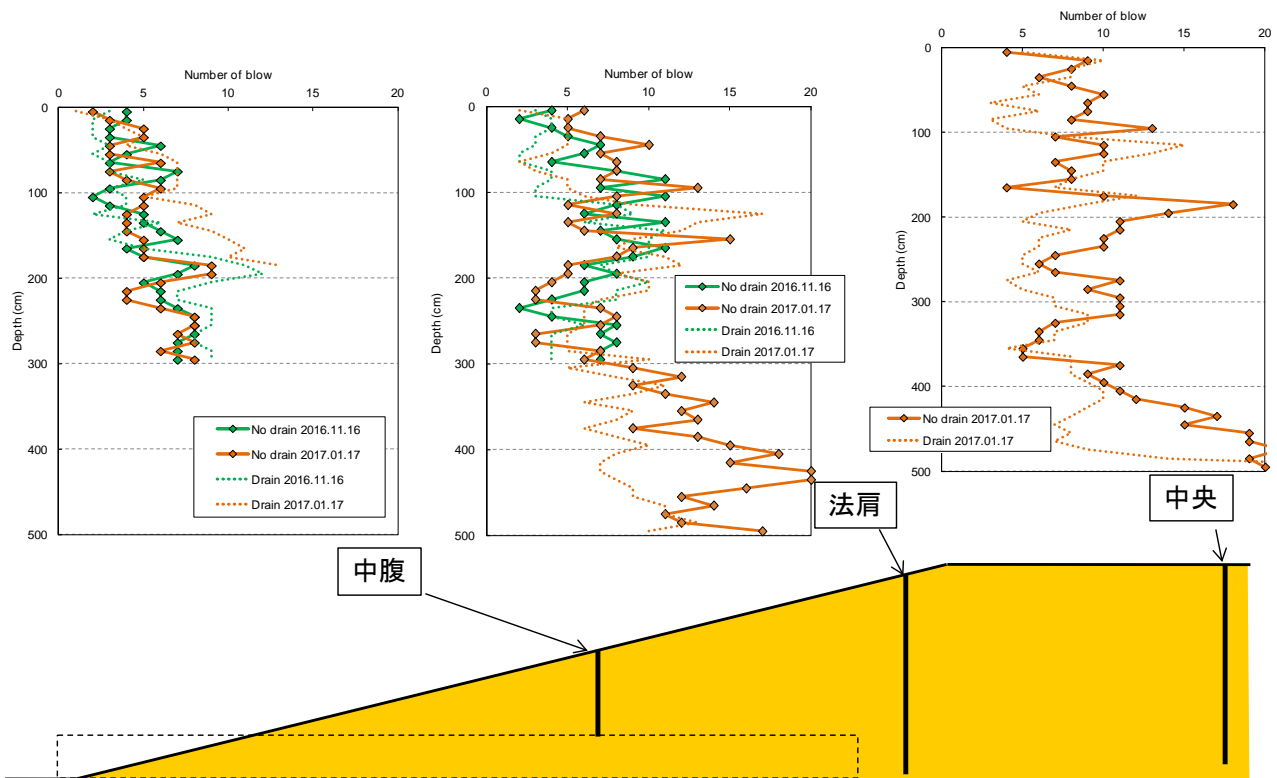


図 28 簡易動的コーン貫入による東の里遊水地周囲堤の強度分布と築堤後変化

6. まとめ

本研究では地震時や洪水時の堤防の安定性評価へ向けて、堤体中の水理状態を把握し、その力学的特性への影響を評価するための統合的な調査・解析を行った。千歳川遊水地群のうち舞鶴遊水地と東の里遊水地の周囲堤において継続的な原位置長期水理モニタリングを実施し、定期的に訪問し各種貫入試験や表面波探査を実施した。また、これらの結果の解釈のために補助的な室内試験を実施するとともに、自主開発した非定常不飽和浸透流解析により堤防表層境界および内部での水移動・水収支のプロセスの解明を目指した。上記2サイトは、築造から十分に時間が経ち水理的に平衡状態にあるもの（舞鶴）と築造プロセスにあるもの（東の里）を代表しており、堤防盛土の構築から供用までの内部推移を理解するのに適した選択であった。本研究から得られる主要な結論は以下の通りである。

①降雨浸透・蒸発散・積雪・融雪といった地表過程を非常に簡素な形でモデル化した浸透流解析により、地表付近の水圧変化の観測値を比較的良好に再現できた。深部の水圧は領域外の広域的な過程（広域地下水水位変動など）に影響されている可能性があり、盛土とその近傍のモデル化のみでは再現はできなかった。地表と深部の中間部は、飽和透水係数の適切な設定（盛土の自重圧密による透水係数減少の考慮など）を行うことでより良い再現が可能と思われる。

②表面波探査は舞鶴遊水地・東の里遊水地ともに2016年は2回しか実施できなかった。舞鶴遊水地では5月と9月でS波速度に大きな相違は見られなかったが、これは春期と秋期で盛土内水圧が同等であったことと整合しており、冬期・夏期のように水圧が異なる時期ではS波速度、すなわち剛性の変化が測定できる可能性がある。

③東の里遊水地では盛土の嵩上げ時に間隙水圧が大きく上昇する現象が見られた。これは盛土材の飽和度が高く瞬間的な圧縮（非排水圧縮）時の間隙水圧応答性が高いことに起因しており、このメカニズムを導入した築堤有限要素解析（不飽和浸透流解析の簡易的拡張）で観測挙動を再現することができた。同サイトでは法尻にグラベルドレーンを設置した比較対照断面を試験施工しており、その影響についても調査した。盛土の透水性が 10^{-7}m/s のオーダーと比較的小さいため、ドレーンの効果は盛土中央にまでは短期的には及ばず、嵩上げ終了時ではドレーン直上の法面領域においてのみ明確な効果が現れることが解析により予測された。表面波探査・簡易動的コーン貫入試験の結果はこの解析結果を定性的に裏付けるものであった。

本研究は荒天に見舞われ冬期の調査が予定通りに実施できなかったことなどもあり、表面波探査・貫入試験のデータが限られたものとなったため、計測・解析水圧との定量的な関連付けが困難であった。今後は同サイトでデータの蓄積を図るとともに、常呂川など異なる気候下・水系へと調査の対象を拡張していきたい。

参考文献

- 1) 西村聡：降雨浸透と盛土・基礎地盤圧縮に起因する堤体内水位変動の予測，第55回地盤工学会北海道支部技術報告会，室蘭，pp.235-256，2015.
- 2) Rivas, M. F. and Nishimura, 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.
- 3) 山木正彦・林 憲裕・林 宏親・橋本 聖：泥炭地盤上盛土の地震時液状化とその対策に関する検討，第56回地盤工学会北海道支部技術報告会，札幌，pp.203-212，2016.
- 4) 河川堤防の構造検討の手引き（改訂版），国土技術研究センター，2012.
- 5) Smethurst, J. A., Clarke, D. and Powrie, W.: Factors controlling the seasonal variation in soil water content and pore water pressures within a lightly vegetated clay slope, *Géotechnique*, Vol.62, No.5, pp.429-446, 2012.
- 6) An, N., Hemmati, S. and Cui, Y.: Numerical analysis of soil volumetric water content and temperature variations

- in an embankment due to soil-atmosphere interaction, *Computers and Geotechnics*, Vol.83, pp.40-51, 2017.
- 7) Wilson, G. W. Fredlund, D. G. and Barbour, S. L.: Coupled soil-atmosphere modelling of soil evaporation, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, pp.151-161, 1994.
 - 8) 西村 聡・所 哲也・Maria Fernanda Rivas : Predicting pore water pressure variations in embankments due to evapotranspiration and precipitation, 第 56 回地盤工学会北海道支部技術報告会, 札幌, pp.339-348, 2016.
 - 9) Hamon, W. R.: Estimating potential evapotranspiration, *Journal of Hydraulics Division, Proceedings of the Americal Society of Civil Engineers*, Vol.87, No.HY 3, pp.2817-2822, 1961.
 - 10) 向後雄二・高橋 章・鈴木朋和 : 不飽和土弾塑性モデルを用いた実ダムの築堤・湛水挙動解析, 土木学会論文集 C, Vol.66, No.1, pp.183-195, 2010.
 - 11) 日本道路協会 : 道路土工 盛土工指針, pp.108-115, 2010.
 - 12) Hilf, J. W.: Estimating Construction Pore Pressure in Rolled Earth Dams, *Proceedings of the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.3, pp.234-240, 1948.
 - 13) Clough, R. W. and Woodward, R. J.: Analysis of embankment stresses and deformations, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Devision, ASCE*, Vol 93, No.SM4, pp.529-549, 1967.
 - 14) 田中麻穂・河井克之・金澤伸一・橘 伸也・大野進太郎・飯塚敦・竹山智英 : 築堤シミュレーションにおける設定条件が盛土内応力分布に及ぼす影響, 応用力学論文集, Vol.13, pp.423-430, 2010.
 - 15) 居上靖弘・下河太一・渦岡良介・上野勝利・鈴木 壽 : 基礎地盤の変形を考慮した堤防内部の応力・水分状態に関する三相連成解析, 第 49 回地盤工学研究発表会, 北九州, pp.935-936, 2014.
 - 16) 林 宏親・林 憲裕・山木正彦・西村 聡・田村真次 : 掘削発生土を盛土材料に用いた河川堤防の安定性改善に向けた試験施工, 第 57 回地盤工学会北海道支部技術報告会, 北見, pp.103-112, 2017.
 - 17) 稲崎富士 : 河川堤防安定性評価への統合物理探査情報の活用, 河川技術論文集, Vol.14, pp.85-89, 2008.
 - 18) 杉井俊夫・前田健一・斎藤秀樹・小林 剛・尾畑 功 : EPS 盛土を使った堤体横断面の表面波探査, 河川技術論文集, Vol.18, pp.315-320, 2012.
 - 19) Park, C.B., miller, R.D., Xia, J.: Multichannel analysis of surface waves, *Geophysics*, Vol.64, No. 3, pp. 800-808, 1999.
 - 20) 田中悠暉・川尻峻三・橋本 聖・川口貴之・中村 大・佐藤厚子・山田 充・山下 聡 : 締固め条件を変えた試験盛土の S 波速度分布に関する研究, 第 51 回地盤工学研究発表会, 岡山, pp.1153-1154, 2016.
 - 21) Nguyen, M.N., Bui, T.Q., Yu, T. and Hirose, S.: Isogeometric analysis for unsaturated flow problems, *Computers and Geotechnics*, Vol.62, pp.257-267, 2014.
 - 22) Penman, H. L.: Natural evaporation from open water, bare soil and grass, *Proceedings of Royal Society of London, Series A*, Vol.193, pp.120-148, 1948.
 - 23) Thornthwaite, C. W.: An approach toward a rational classification of climate, *Geographical Review*, Vol.38, pp.55-94, 1948.
 - 24) 中野渡博道・西村 聡・林 宏親・山木正彦・田村真次 : 地表面の水収支を考慮した築堤時間隙水圧挙動の解析, 第 57 回地盤工学会北海道支部技術報告会, 北見, pp.113-120, 2017.
 - 25) Yang, J.: Pore pressure coefficient for soil and rock and its relation to compressional wave velocity, *Géotechnique*, Vol.55, No.3, pp.251-256, 2005.
 - 26) 中野渡博道・西村 聡 : 混合土盛土材の非排水圧縮特性と築堤時水圧挙動への影響の検討, 第 51 回地盤工学研究発表会, 岡山, pp.1027-1028, 2016.
 - 27) 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.892-89, 1980.