

①技術研究開発テーマ名	統合システムによる河川堤防の重点強化地点の同定と対策法に関する研究
②研究代表者	
氏名	所属・役職
杉井 俊夫	中部大学工学部・教授
③共同研究者	
氏名	所属・役職
前田健一	名古屋工業大学 工学部・教授
小高猛司	名城大学 理工学部・教授
神谷浩二	岐阜大学 工学部・准教授
斎藤秀樹	応用地質（株）技術本部技術研究所・副所長
小林 剛	応用地質（株）機器事業本部技術部 グループリーダー
尾畑 功	国土交通省中部地方整備局庄内川河川事務所調査・品質確保課長
黒田英伸	国土交通省中部地方整備局庄内川河川事務所調査・品質確保課・専門官
④背景・課題	
<p>河川堤防はこれまで経験的構造物、歴史的構造物と呼ばれ、自然条件だけでなく人為的、歴史的な条件を含み、外見からだけでは分からない、延長も非常に長いといった難物であった。これに対して我々人間は、水害から身を守るための必然性からその難物に対して知恵を絞り、被害を小さく抑えることを考えてきた。堤防整備は、これまで量的整備を中心とした堤防がない区間での築堤や幅や堤防の高さが不足する区間の拡幅やかさ上げを優先的に実施してきた。平成8年(1993年)より、浸透に対する安全性の調査が実施され、堤防の質的評価が行われるようになったが、堤防の整備率は2005年度時点で断面形状条件(56%)と低いことに加えて、質的条件においても直轄堤防の15%が「安定性が低い」と判断されており(21年度末には40%(約4000km)が何らかの浸透に対してNGであると評価されている)、堤防の重点強化地点の抽出やその対策法について重要な課題となっている。近年では、科学技術の発達、情報の開示といった社会の変化で様々な分野で技術開発が進み、統計的因果関係、室内実験、現場実験、数値解析、非破壊調査の分野で個々に発展してきている。こうした中、本研究は、物理探査、数値解析、被災履歴の統合システムによる重点強化地点の抽出シナリオと適切な対策・評価技術の提案を目的とし、有効な堤防整備の施策に寄与することを目指すものである。</p>	
⑤技術研究開発の目的	
<p>本研究では、研究者と堤防管理者とのパイプを繋ぐことで、これまでの研究者らの研究成果を実務技術に活かすことと、堤防現場でのデータ・情報を研究に活かすこと念頭に、統計的因果関係、室内実験、現場実験、数値解析、非破壊調査、そうした個々の技術をどのように結びつけていくか、地域課題研究に相応しい産官学が取り組むことで、図1.1に示す重点化地点の抽出のシナリオを構築していくことを念頭に図1.2のように研究を遂行してきた。また、以下の3点を明らかにすることを狙ってきた。</p>	
<p>1) 広範な粒度分布を有する堤体および基礎地盤材料の力学・浸透特性の評価</p>	

- 2) メカニズムの究明とシミュレータ開発（空気閉塞によるエアブロー現象，進行性破壊，付帯構造物による破壊，対策の効果）
- 3) 物理探査，数値解析，被災履歴の統合システムによる重点強化地点の抽出シナリオの構築，を具体的な目標としている

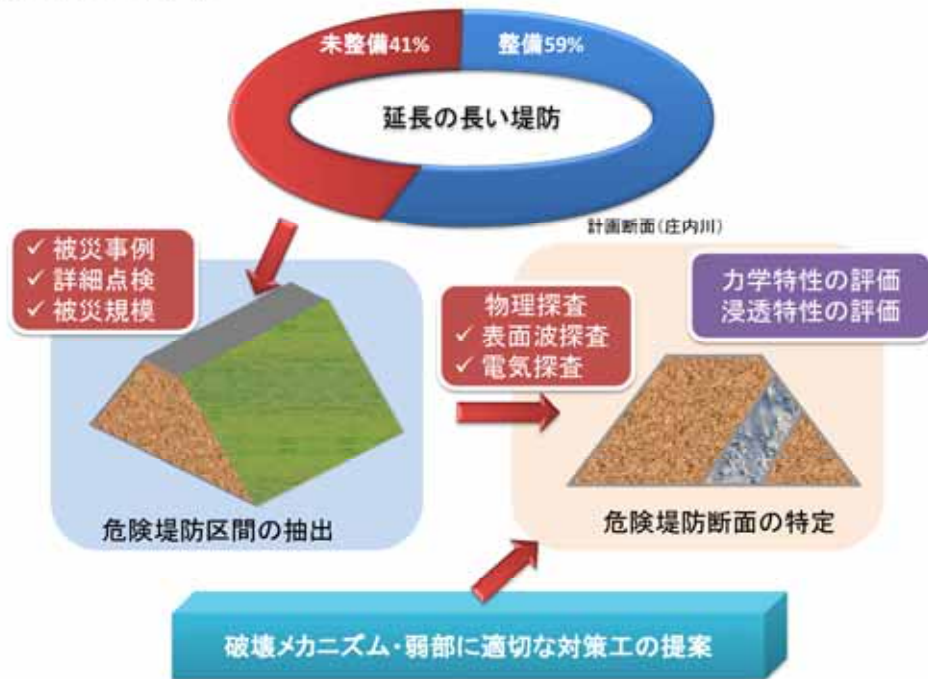


図-1 難物な対象からの抽出シナリオ



図-2 統合システムによる評価と対策技術の提案

⑥技術研究開発の内容・成果

1. 河川堤防データベースから被災履歴や破壊規模を考慮した弱部の抽出

延長の長い堤防の中では，弱部堤防区間の優先順位として表すことが有効である。また，国土交通省はこれまで概略点検，詳細点検等を実施してきているが，すべりに対する安全性やパイピングに対する安全性など破壊メカニズムに対する安定性を評価してきた。しかし，詳細点検において強度定数の取り

扱い、ドレーンなどを有する場合の安定解析に用いる石積みによる浸潤前線の低下、擁壁などの効果などが考慮されていない点もいくつか見つかった。また、すべり計算における場合には、粘着力の小さい影響で非常に薄いすべりによる破壊モードが小さな場合での安全率が使われている場合があり、実際の堤体の安定性の低下には直接寄与するものではないことなどがあり、破壊モードを考慮する必要がある。こうした背景から、(i)詳細点検、(ii)庄内川堤防の被災実態を考慮して設定した危険度判定、(iii)被災確率による判定、を組み合わせることで危険個所の優先順位をつけようとするものである。

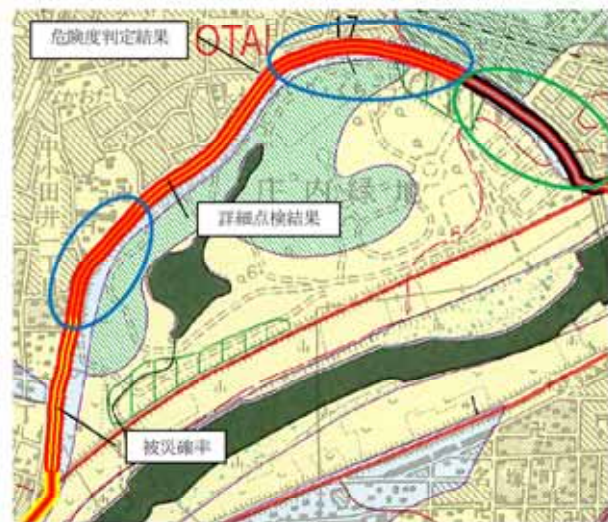
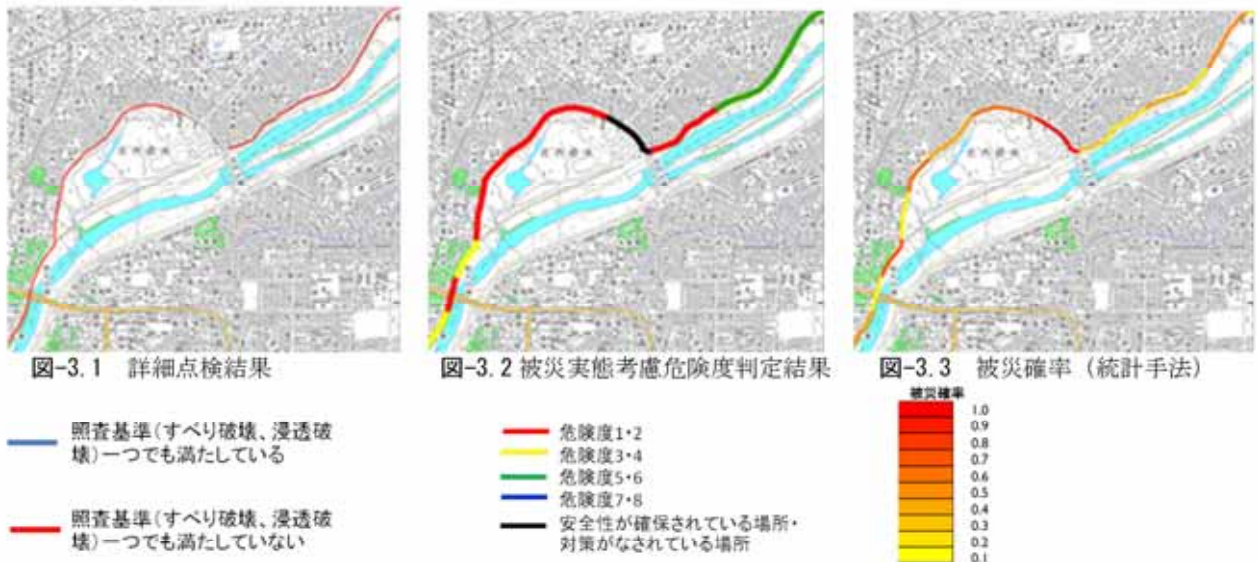


図-4 庄内川右岸（15km から 18km 付近）の3つの評価の重ね合わせ

庄内川右岸の15kmから18km付近の結果河川堤防の危険区間のそれぞれの評価を行うため、GIS上にデータベースをリンクさせて計算を行い、抽出したのが図3.1～3.3である。また、図-4は一番外側のラインが危険度判定結果である。その内側に被災確率、中央に詳細点検結果を示している。図-4において危険性が高く優先的に整備を進めていく必要のある区間は3つの評価すべてにおいて危険と評価されている青い丸の区間と考えられる。さらに、優先度が高いとされた区間の中で、破堤した時の経済的損失

なども考慮して優先度を定める必要がある。

2. 堤体の物性の評価法とモニタリング技術の開発

2.1 力学特性

(1) 大型ならびに小型三軸試験による河川堤防砂礫の力学特性の評価

河川堤防は礫分から細粒分までの広範な粒度の土で構成されており、大きな礫を含有した原粒度の土の強度定数を求めるには大型三軸試験を行うのが望ましいが、実務では粒度調整した試料を用いた小型三軸試験により強度定数を求める。そこで河川堤防砂礫を用いて大型三軸試験と小型三軸試験を実施し、供試体寸法、供試体密度、せん断時の排水条件が試験結果に及ぼす影響を検討し、適正な強度定数を求める手法について考察した。大型、小型三軸ともに締固め度 90 および 85%の供試体を準備し、と CD の 2 種の排水条件で試験を実施した。図-5 に試験試料の粒度分布を示す。詳細点検が実施された小鴨川の河川堤防で採取した試料である。大型三軸試験では、原粒度のままの乾燥試料を、三軸セル上に組み立てた 3 割モールド内で 5 層ずつ密度管理をしながら、軽く締固めて供試体を作製した。小型三軸試験では、図-5 に示す粒径 9.5mm を超える礫を除外した粒度調整試料を用いた。供試体は含水比 14%に湿潤させて 2 割モールド内で 5 層に突き固めて円柱供試体を作製した後に三軸セルに設置した。大型三軸試験、小型三軸試験ともに、所定の有効拘束圧 (50, 100, 200kPa) で等方圧密し、載荷速度 0.1%/min でせん断を行った。試験条件は あるいは CD とした。表-1 に各実験における供試体の諸元を示す。

図-6.1 および図 6.2 は、締固め度 90%の応力～ひずみ関係および有効応力経路をそれぞれ示す。図

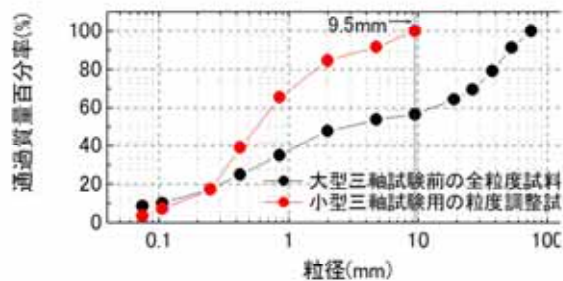


図-5 実験試料の粒度分布

表-1 各実験における供試体の諸元

	大型三軸		小型三軸	
直径(cm)	30		5	
高さ(cm)	60		10	
乾燥密度(g/cm ³)	1.80	1.70	1.80	1.70
締固め度(%)	(90)	(85)	(90)	(85)

図-6.2の有効応力経路に着目すると、 \overline{CU} 試験では、大型、小型ともに、せん断初期に塑性圧縮を示し、その後正のダイレイタンスの発現により塑性膨張に転じて軸差応力が増加するが、小型の方がより軸差応力は増大するとともに、破壊応力比も大きくなる。一方、CD試験では、破壊応力比に大きな差は見られない。図-7.1 および図-7.2 は、締固め度 85%の応力～ひずみ関係および有効応力経路をそれぞれ示す。図-7.2の有効応力経路に着目すると、 \overline{CU} 試験の場合、大型では、せん断初期から大きく塑性圧縮したままであるのに対して、小型では、せん断後半に塑性膨張に転じていることが分かる。また、大型の破壊応力比は小型よりもかなり小さな値を示し、大型三軸試験では比較的緩詰め砂の挙動を示す。一方、CD試験では破壊応力比に大きな差は生じない。

表-2 はすべての実験ケースにおいて、破壊時のモールの応力円と破壊規準から得られた内部摩擦角と粘着力をまとめたものである。なお、 \overline{CU} 試験を全応力で整理して c_{cu} と ϕ_{cu} を算出している。また、 \overline{CU} 試験ならびにCD試験で得られる粘着力 c' および c_d はいずれもゼロである。締固め度 90%では、大型、

小型ともに見かけの粘着力 c_{cu} が現れるのに対し、締固め度 85%では粘着力は現れない。また、締固め度 90%の場合において、粘着力 c_{cu} は大型よりも小型の方が大きく現れる。一方、内部摩擦角 ϕ_{cu} に着目すると、締固め度 90% では、大型と小型ではほとんど差はないのに対し、締固め度 85%では、大型の ϕ_{cu} の値は小型よりも小さい。次に、有効応力で整理し、大型と小型の ϕ' を比較すると、締固め度 90%では、 ϕ' にそれほど差はないが、締固め度 85%では、大型の ϕ' は小型よりもかなり小さい。また、締固め度の違いで比較すると、小型は締固め度によって ϕ' の差がないのに対し、大型では ϕ' が大きく異なる。

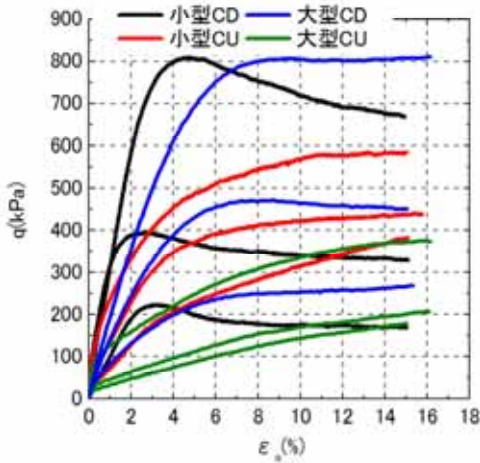
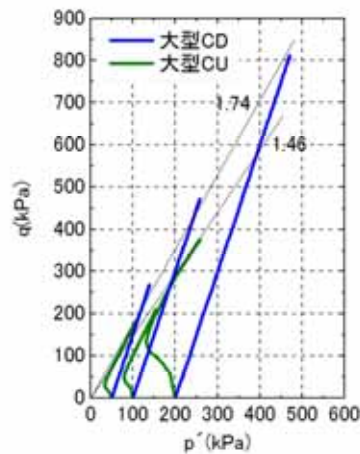
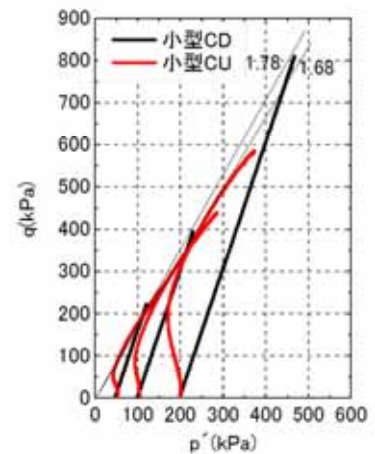


図-6.1 応力～ひずみ関係 (締固め度 90%)



(a) 大型三軸試験



(b) 小型三軸試験

図-6.2 有効応力経路 (締固め度 90%)

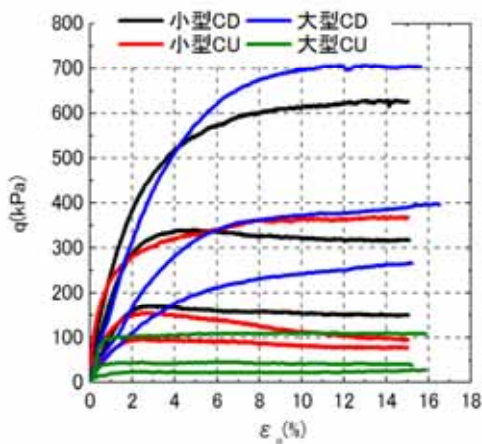
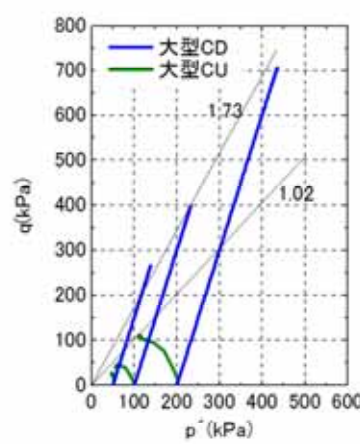
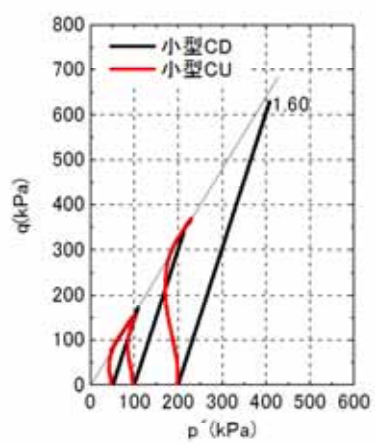


図-7.1 応力～ひずみ関係 (締固め度 85%)



(c) 大型三軸試験



(d) 小型三軸試験

図-7.2 有効応力経路 (締固め度 85%)

表-2 内部摩擦角と粘着力

締固め度	試験	ϕ_{cu}	c_{cu} (kPa)	ϕ'	ϕ_d
90%	大型	22.5°	39.1	35.3°	42.1°
	小型	24.5°	115.0	41.1°	41.7°
85%	大型	12.1°	0	24.7°	40.9°
	小型	30.6°	0	40.6°	39.0°

CD試験によるに着目すると、いずれの実験ケースにおいてもほとんど差は見られない。そのため、とを比較すると、大型では両者の差が大きく、特に締固め度が小さいケースではその差は顕著に現れる。

以上のように、同じ乾燥密度で供試体を作製しても、小型三軸試験で得られる力学挙動は、大型三軸試験よりも密詰め傾向となる。これは、通常業務の室内試験の結果では、原位置の力学特性を過大評価することを示唆している。

(2) 供試体作製時の含水比の違いによる試験結果の違い

供試体作製時の含水比の違いが、試験結果に及ぼす影響について検討する。試験は小鴨川の通常粒調試料を用いた小型三軸試験である。供試体の締固め度は80, 85および90とし、供試体作製時の含水比は、自然乾燥状態から、締固め試験を行った際の最適含水比を超えるものまで、0%, 3%, 5%, 10%, 14%の5種類とする。いずれの初期含水比の供試体も、三軸試験装置に設置後、二重負圧法によって完全飽和化 (B 値 0.95 以上) した。

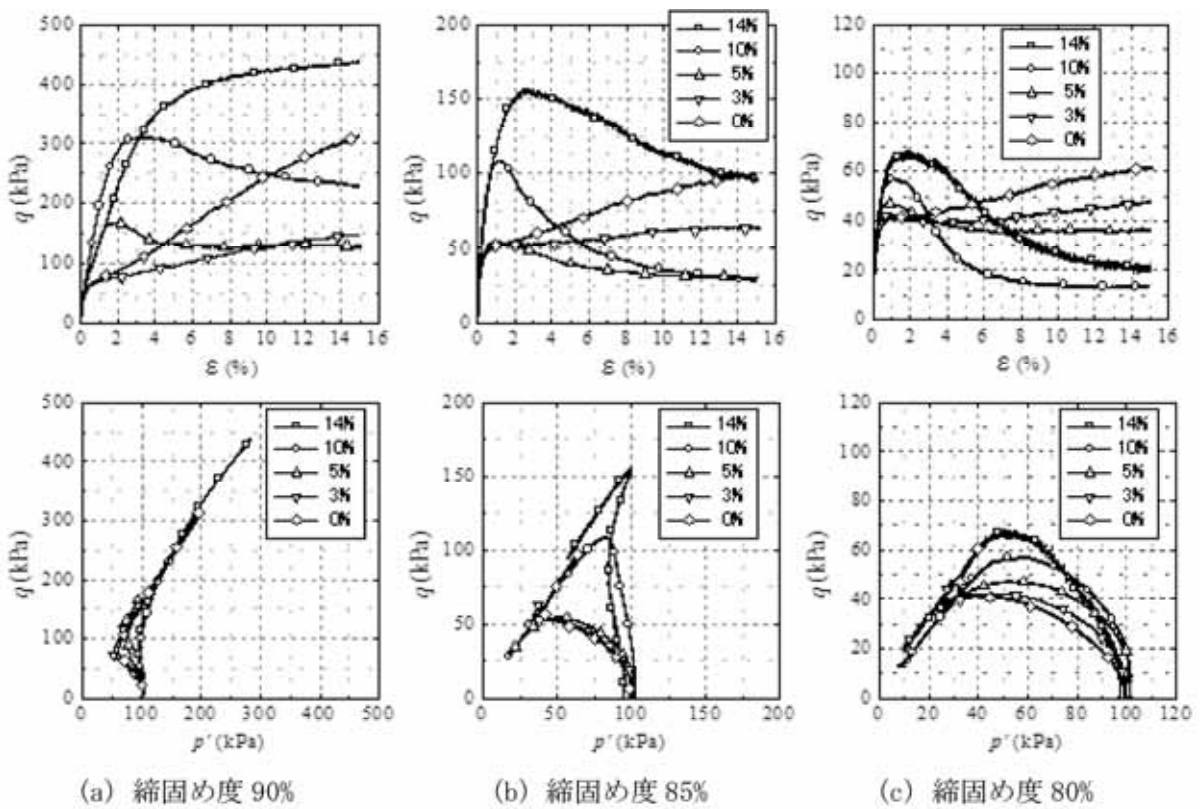


図-8 供試体作製時の含水比の違いによる三軸試験結果の違い (小鴨川・小型三軸)

(上：軸差応力～軸ひずみ関係，下：有効応力経路)

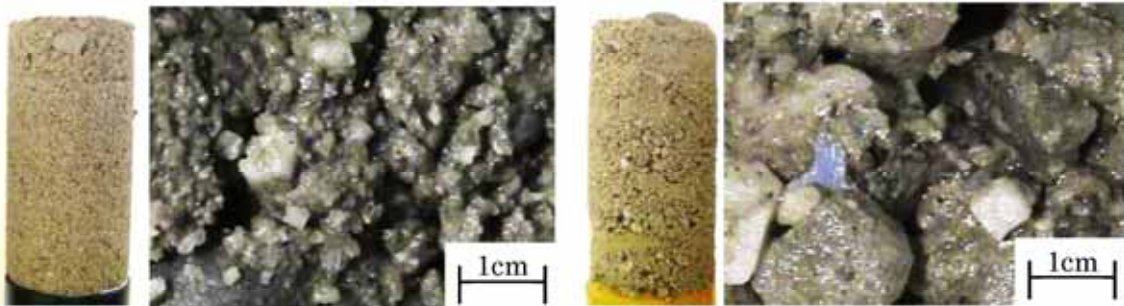


写真-1 供試体表面の観察結果 (左：含水比 10%，右：含水比 0%)

上段の応力～ひずみ関係を見ると、締固め度 80%の場合、供試体作製時の含水比 (以下、単に含水比と記す) が 14%と 10%では、軸差応力が最大値に達した後、ひずみ軟化挙動が見られる。含水比 5%で

は、軸差応力の最大値は 14%、10%に比べて小さくなっているが、ひずみ軟化の度合いが小さいため、最終的な軸差応力は大きくなっている。含水比 3%、0%では、ひずみ軟化がごくわずかに見られた後に硬化に転じて、軸差応力が増加する。応力～ひずみ曲線の初期立ち上がりは、供試体作製時の含水比によらずほぼ同一であるが、せん断後半になるにつれて差が顕著になる。この差は、締固め度が高くなるにつれて一層顕著になる。図-8 下段の有効応力経路を見ると、締固め度 80%の場合、含水比 14%、10%では、特にゆる詰め傾向を示していることが分かる。含水比 5%ではひずみ軟化の程度が小さくなり、さらに含水比 3%、0%となると正のダイレイタンスー挙動が見られる。また、最大軸差応力に至るまでの経路を見ると、含水比が高いほどせん断初期の有効応力経路の増加度合いが大きく、弾性挙動が大きいことがわかる。締固め度 85%の場合には、さらに上述の傾向が顕著になり、含水比 14%、10%では弾性挙動後に急激な脆性破壊によるひずみ軟化を呈し、含水比 5%以下では、せん断初期から塑性圧縮が顕著に見られ、含水比 3%と 0%では変相後の正のダイレイタンスーが発現している。締固め度 90%の場合には、いずれの含水比でも密詰め傾向のせん断挙動を示しているが、やはり含水比の高い 14%と 10%では、せん断初期に弾性挙動を示している。以上のように、供試体作製時の含水比によってせん断挙動が大きく異なることが明らかとなった。この理由として、各供試体が有する骨格構造が関係していると考えられる。供試体を三軸試験機に設置し、飽和させた後に試験機から取り出し、観察を行った。写真-1 に含水比 10%と含水比 0%の供試体の全体写真と拡大した写真を示す。供試体の全体写真から、含水比 10%の供試体は均質的な表面となっていることがわかる。しかし、含水比 0%の供試体では、礫が多い所と細粒分が多い所に分かれており、目視でも不均一性が確認できる。拡大写真に着目すると、含水比 10%では礫のまわりに細粒分がついているが、含水比 0%では礫の周りには細粒分が少なく、礫の形がはっきりと見て取れる。含水比 10%の供試体は、あらかじめ含水比調整を行ったため、モールドに試料を投入する以前から、サクシヨンの作用によって粗粒分の周りに均一に細粒分が分布するため、比較的卓越した骨格構造が形成されるものと考えられる。一方、含水比 0%の供試体では、乾燥試料を自然落下させ、突き固めた際に細粒分と粗粒分との分級が進み、骨格構造が形成されづらいと考えられる。

2.2 浸透特性（原位置での浸透特性の評価）

地盤の透水係数は飽和度によって変化し、原位置では境界条件の違いにより地下水面以下の飽和域にある飽和透水係数と不飽和透水係数、地下水面以上の不飽和領域にある飽和透水係数と不飽和透水係数の4つに分けられる（図-9）。堤防、斜面や地下水位が深い現場では通常不飽和状態にあるが、豪雨により飽和状態に変わり透水特性が大きく変

化するために、原位置における飽和・不飽和土の透水係数はもちろん、水分特性曲線を求める試験法の開発が重要となる。しかし、原位置での不飽和透水試験が高価で特殊な装置となることや、いかに地盤を飽和化させるかが課題となり、実務で有効な手法が開発されていない現状にある。そこで、本研究は通常不飽和状態にある地盤でも透水特性（飽和・不飽和透水係数、水分特性曲線）を評価する試験法の開発を目的としている。本論文は、これまで著者らが提案してきた浸潤時の動態水分分布モデルを利用することにより、

浸潤流量と間隙水圧を計測することで飽和透水係数および不飽和透水係数、水分特性曲線を算出するこ

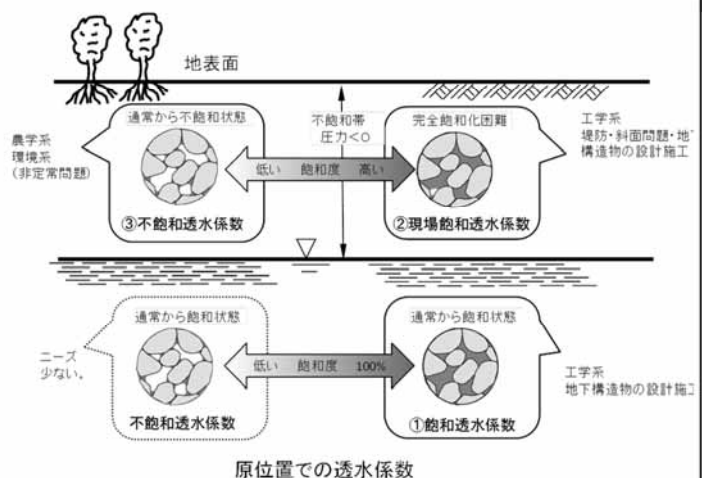


図-9 原位置での透水係数

とが可能となる新しい手法を提案するものである。

i) 浸潤実験装置と計測量

現場での実験装置を模擬するため、室内に土槽を使って図 3.2.5 の給水とセンサー部をもつ試験装置 (図-10) を作成し、浸透実験を行った。圧力水頭を一定に保ったまま水を一定量貯め、計測開始と同時に浸透させることのできるようにマリオットタンクおよび透水管の浸透面には栓を取り付けている。水位変化を計測した結果より地盤へ浸透する浸透流量及び、深さ 5cm に設置したテンシオメータより非定常計測される間隙水圧を時間ごとに読み取る。すなわち、現場で得られる情報は、浸透流量 Q (cm^3)、間隙水圧 h_p (cm)、経過時間 t (sec) の 3 種類である。

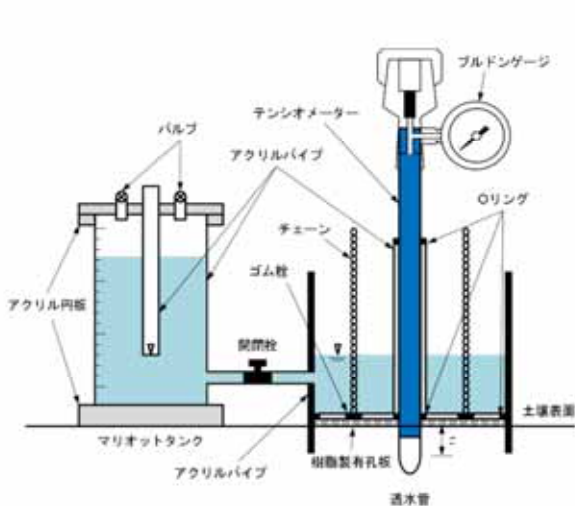


図-10 実験装置における給水・センサー部

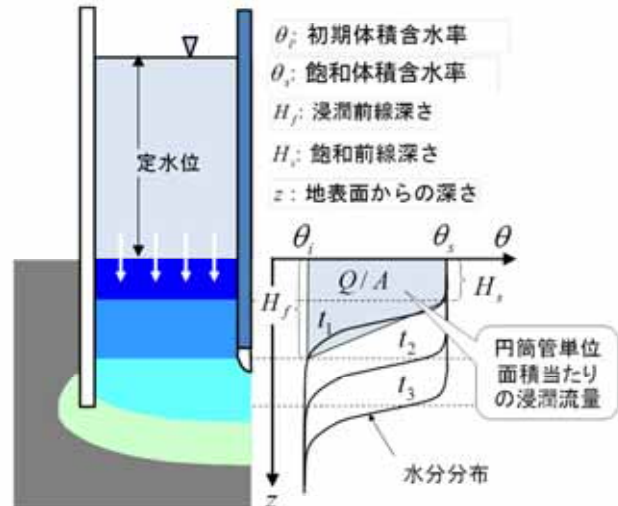


図-11 浸潤試験の概略図

ii) 定常状態と飽和透水係数の算出

浸透実験は、乾いた状態の豊浦砂に 10 秒間隔で圧力水頭と浸透深さを計測した。試験を行った結果を図-12 に示す。圧力水頭が変化していく段階では浸透量も曲線を描きながら徐々に増すが、圧力水頭が一定になると浸透量も直線的に増えていくことがわかる。また、圧力水頭が一定になることから、その部分の土が飽和していると判断でき、貯水位による地表面の水頭と土中で計測される間隙水圧から動水勾配を、また一定となった流速をダルシーの法則を使って飽和の透水係数 $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ が得られた。

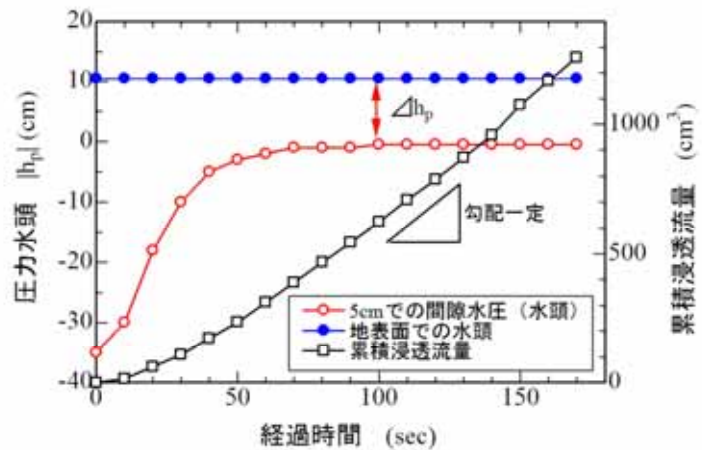


図-12 浸潤実験における観測量

iii) 水分分布の推定結果から不飽和透水特性の推定

動態水分分布モデル (図-13) を取り入れ、浸潤流量から水分分布を補完し、水分特性曲線を推定することを試みた。また、得られている飽和透水係数と合わせて不飽和透水係数を推定することを試みた。水分特性曲線には、排水過程と吸水過程ではヒステリシスがあるため、今回の吸水過程の実験では一致しないことは明白であるが、加圧法による吸水過程の実験結果からも圧力水頭が小さい結果となった。これについては、本試験では地表面に一瞬にして水面を作るために、地表面からの空気の置換ができず、

間隙空気圧が上昇し正圧側にシフトしたものと推定される。なお、間隙空気圧を考慮しない飽和不飽和浸透流解析コードによる数値実験で同様にチェックした結果ではこのような誤差はないことから間隙空気の影響が考えられた。得られた結果を図-15 に示す。他の試験法とも十分一致していることが得られた。水分特性曲線がずれていてもその勾配であるの van Genuchten—Mulalem モデルパラメータの n が正しく評価されているため、透水係数を推定できたと考える。推定される水分特性曲線の圧力水頭が間隙空気の影響を受け、正圧にシフトしており、深さを考慮するため散水による鉛直一次元流れの生成など、さらなる改良が期待できる。

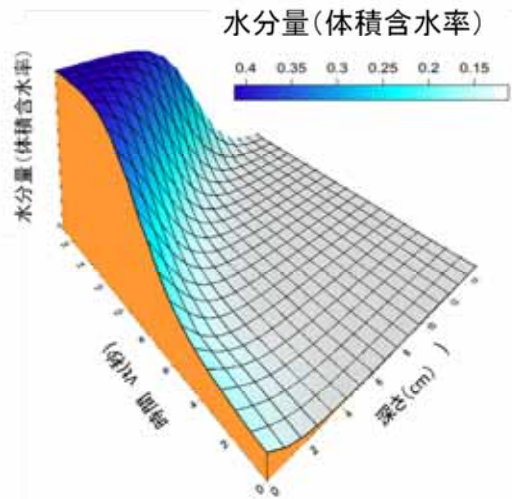


図-13 動態水分分布モデル③

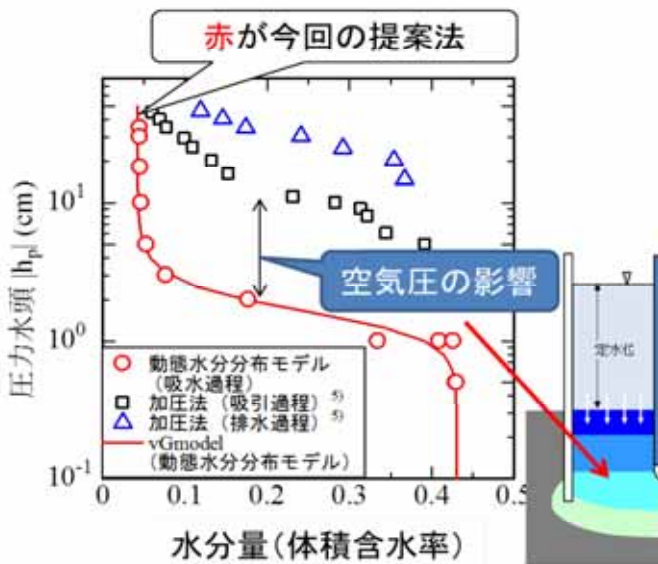


図-14 水分特性曲線の推定結果

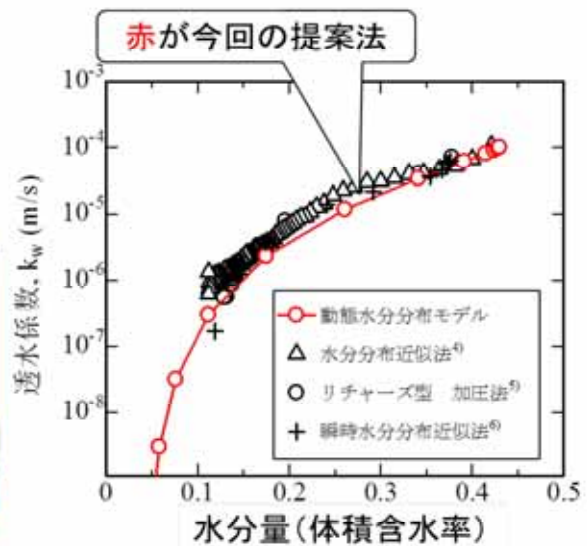


図-15 不飽和透水係数の推定結果

(3) 河川堤防の水分量変動の予測

豪雨時には河川堤防は、河川からの浸透水だけでなく、天端やのり面からの雨水浸透を伴い、平常に比べて高い水分量を含むこととなる。堤防の重要箇所や整備前の堤防など、豪雨・出水時の堤体内の水分量が遠隔から推定できれば、避難情報や警戒情報の一部ともなりうる。近年、降雨データは気象庁のレーダー・ナウキャストなど、5分ごとの60分先の降水強度分布予測が可能になってきており、外力変化により60分後の堤体内の水分量予測が可能となる。この技術は、河川堤防だけでなく、斜面災害にも有効と考えられる。23年度には、矢田川・庄内川の背割り堤防に水分計を埋設し、9月19日-20日の台風第15号の通過時のデータを観測する機会を得ることができた。そこで、降水と堤体内の水分量の関係を推定するモデルを考案した。調査は矢田川と庄内川の瀬割堤で行っており、図-16のように堤体に穴を開け水分量を測るセンサーを50cm、100cm、200cmの深さに埋め込む。法面、法尻、高水敷にも同様に埋め込み水分量を測定しているが、本研究では降雨の影響に着目し地下水や河川水位の影響を除くため法肩下の調査結果のみを使用する。水分センサーには、安価な誘電率式水分センサーを使

用した。10分ごとの体積含水率の推移データは上限値と下限値から0~1で表した、不飽和浸透特性の表現によく用いられる有効飽和度を用いている。実効雨量を変数とし水分量を目的変数とするとき、水分量では最小値から最大値までしか変化しないため、ロジスティック関数式を用いて有効飽和度の推定値を表すこととした。パラメータの推定にはエクセルのソルバーを利用し、観測値と推定値の残差の二乗和が最小になる最適値を導き出していく。今回は有効飽和度の変動のみを推定するため、計算の範囲は有効飽和度の上昇が始まった点から変動が横這いになる収束点までとした。図-17に構築されたモデルで推定した予測結果と別途観測された水分量（有効飽和度）を示しており、観測値をほぼ推定していることができています。

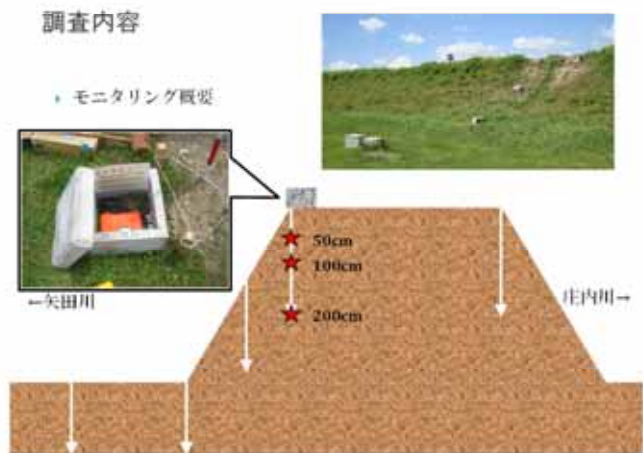


図-16 センサー及びロガー設置断面図

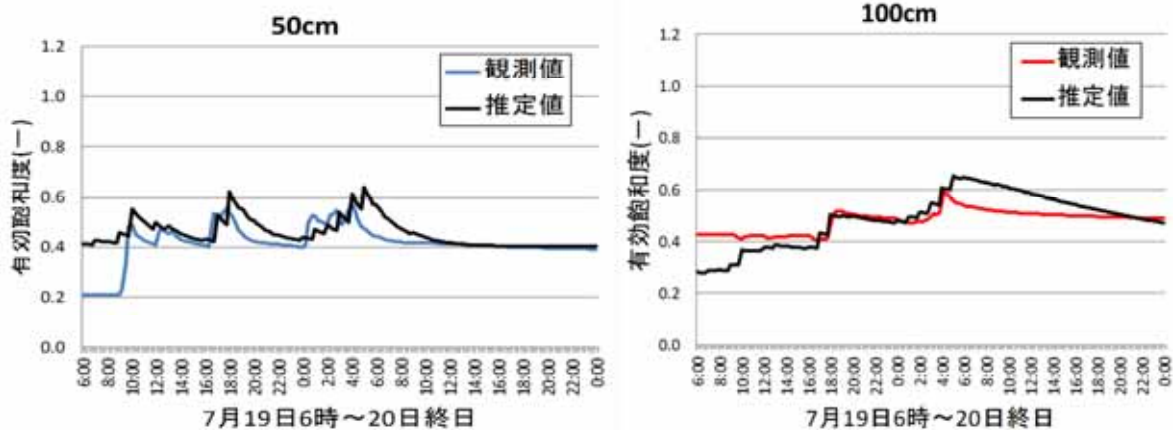


図-17 有効飽和度の推定値と観測値

3. EPS 盛土を使った堤体横断面の表面波探査

非破壊調査の一つ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波速度を求める物理探査法であり、堤防でも利用されてきている。しかし、表面波探査はその計測原理から、平坦な場所にしか適用できず、堤体の横断面を測るには、縦断方向に密に実施し繋ぎ合わせることをしなければならなかった。堤防横断面構造を把握するために、EPS を用いて

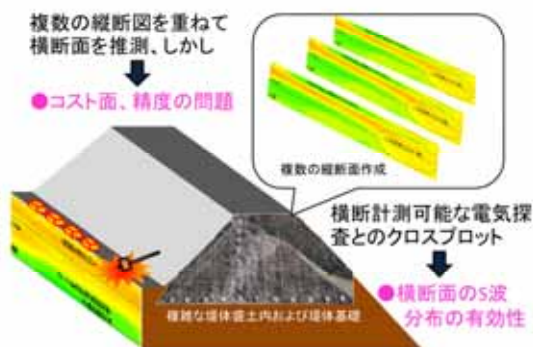


図-18 縦断面から横断面へ

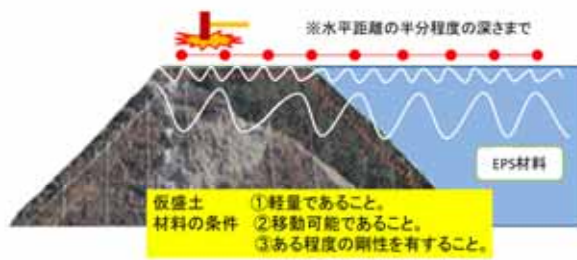


図-19 EPS を用いた横断面表面波探査

移動可能な仮設盛土を設置することで堤防横断面を平坦化し、表面波探査の適用を実堤防で試みた。

小段側の表面波探査における起振位置を図-20.1に、と観測波形を図-20.2, 20.3に示す。EPS側からの起振した場合②ではEPSを伝わる波が速く伝わっていることがこれよりわかる。また図-20.2の①の波形に比べ、②の方がEPS内の波形の乱れが大きい。これは、EPS板を緊結金具のみで結束しているために、EPS板間で干渉していることが原因と考える。また、図-21の横断面表面波探査の結果から

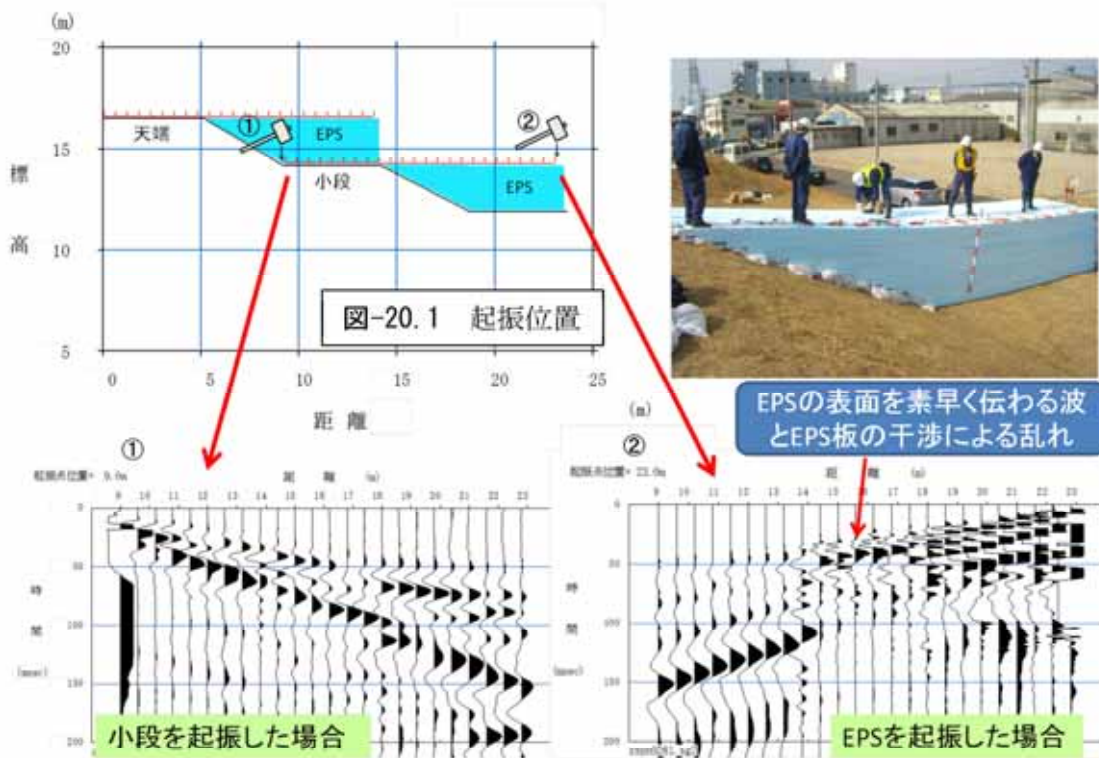
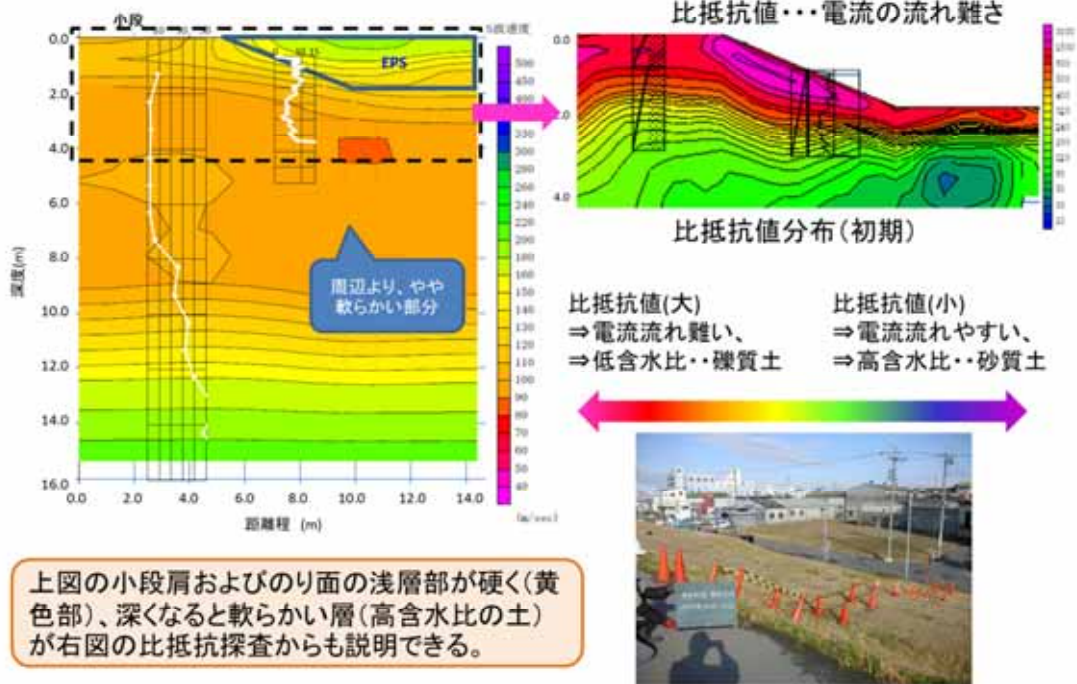


図-20.2 観測波形

図-20.3 観測波形



上図の小段肩およびのり面の浅層部が硬く(黄色部)、深くなると軟らかい層(高含水比の土)が右図の比抵抗探査からも説明できる。

図-21 横断面表面波探査結果と比抵抗値分布

僅かであるが、EPS から 1.5~2m 下で周辺よりも軟らかい（赤い部分）が存在していることが得られている。その部分について着目して比抵抗分布との比較を行った。EPS 下 1.5~2m の軟らかい部分が、比抵抗分布図（図-21）では、比抵抗が小さく（電流が流れやすい）（青色の部分）得られている。周辺よりやや保水性が高い砂質土系の土で構成されていることが推察できる。物理探査の他に、SH 型

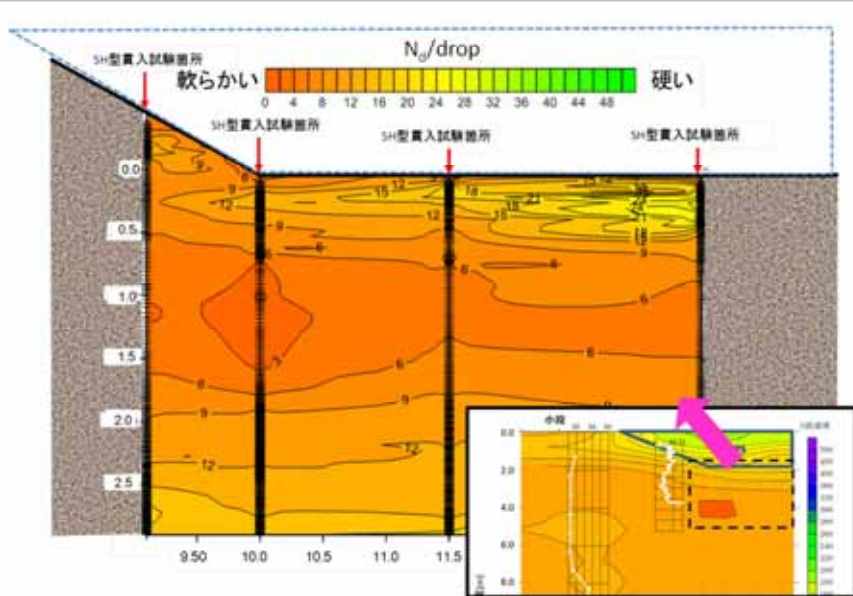


図-22 SH 型貫入試験結果（コンター図）

貫入試験により地盤の硬軟を調べた。のり尻部 10.0m 点を位置に 4m 弱の試験を 4 本実施した。結果をコンター図（図-22）で表す。EPS 盛土を用いた表面波探査の結果では、1.3~2.5m 深さにおいて、のり尻から堤内側に S 波速度が小さい軟らかい部分があったが、深い部分ではやや位置的なズレはあるが確かに軟らかい部分（0.7~1.7m の $N_d=2\sim3$ ）が存在していることが SH 貫入試験結果からも得ることができた。今回の横断面の表面探査では、15m の水平距離であったため、深部での分解能が低下しズレが現れた点を考慮し、今後は、EPS 板でなく、EPS のブロック状で板間の干渉を低減することで精度を上げることができるものを考えられる。

4. 間隙空気圧の堤体破壊への影響と対策

(1) 実験装置の概要

河川堤防の決壊には間隙空気が関連していることが考えられる。ところが、降雨浸透時において間隙空気の影響は考慮されず、浸透特性や安全性の評価がされており、河川堤防の設計においても降雨の影響を十分に考慮されていないのが現状である。任意の降雨強度を再現可能な降雨発生装置を備えた模型堤防実験を行い、降雨浸透や河川水位の上昇に伴う間隙空気の挙動を把握することを試みた（図-23）。また、降雨浸透および河川水位が上昇によりエアブロー現象の観察や空気圧の測定を行った。この結果を踏まえ、不透気遮水シートを用い、一般的な越流対策としてのアスファルトフェイシングを模擬した実験を実施し、つぎに透気遮水シートの設置効果を検討した。

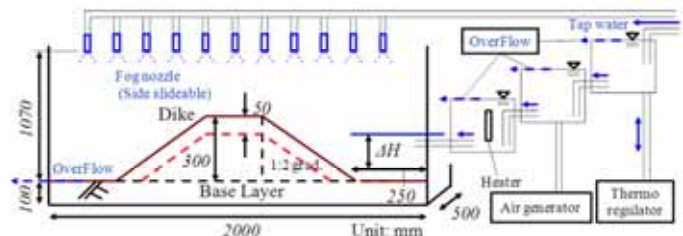


図-23 実験装置概要

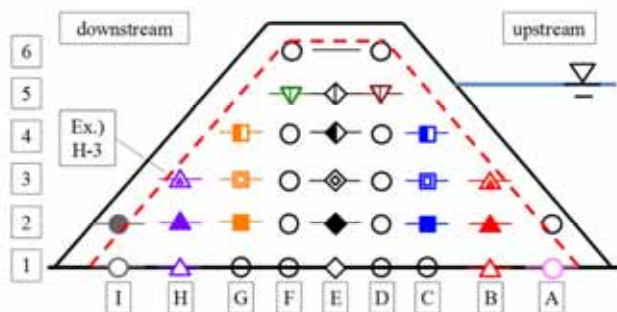


図-24 計測器設置位置とグラフのプロット

(1) 浸潤挙動に及ぼすシート設置の影響

降雨と河川水位の上昇の外力を同時に考慮し、都市型集中豪雨のような自然環境に近い外力条件を設定し、試験を行った（時間雨量 120mm/h）。この条件下で実施した浸潤過程を図-25 に示す。これらの試験では堤外側からの総給水量が等しい。また、本実験では堤体内に設置した水分計から計測した体積含水率の変化（ $\theta - \theta_0$ ）（ θ 、 θ_0 はそれぞれ現在と初期の体積含水率）および空気圧の計測を試みた。

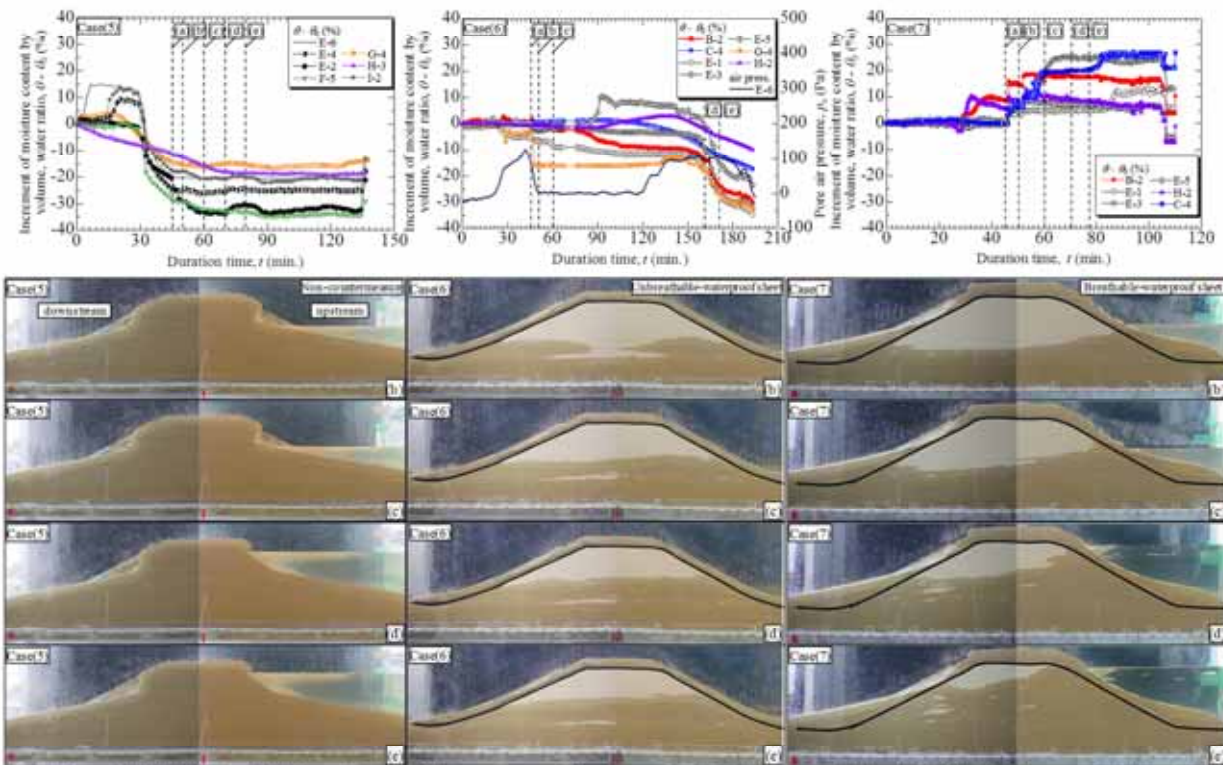


図-25 浸潤過程の比較：左から順に、case(5)（シート無し）、case(6)（不透気遮水シート施工時）、case(7)（透気遮水シート施工時）を示している。なお、グラフ上に記されている時刻歴と堤防断面の時刻は一致している。(a)堤外側の水位を上昇させ始めた時、(b)河川水位が150mmに到達した時、(c)河川水位150mmを保持して10分経過した時、(d)河川水位が250mmに達した時、(e)河川水位250mmを保持して10分経過した時である。

無対策の堤防では、降雨浸透や河川水位の上昇により空気圧の上昇やブロー現象が確認されるとともに、天端にクラックが生じ、堤体内に圧縮空気が封入されることによって、堤体に損傷を与えることが模型実験でも確認することができた。不透気遮水シートによる浸透防止対策工ではシート直下の空気圧が上昇した。越流時にはこの間隙空気が堤防へ突発的な損傷を与えることが予想される。また、透気遮水シート施工時には、浸潤線の経時変化から堤体内から外部へ早期の気泡放出が確認され、降雨浸透防止効果と間隙空気圧の軽減効果が生じることが分かった。

5. 原位置での透気遮水シート敷設時の散水試験

透気遮水シートの敷設効果を検討するために、無対策、透気遮水シート敷設時において同じ外力条件、初期条件で散水試験を実施した。外力は50mm/hrの降雨強度を6時間継続し、総降雨量300mmを与え、降雨開始5時間経過後に河川が増水し水位が上昇した場合を模擬して、直径100mm、長さ1000mmの塩ビ管を法肩に設置し、定水位透水試験を実施した。本来、河川水が上昇すると水圧が法面に面的に作用するが、本試験で用いた河川堤防は、天端を道路としての機能も持つため、実験によりこれらの機能を失うことが無いように、外力を調整した。



図-26 透気遮水シート敷設状況



図-27 透気遮水シート敷設状況

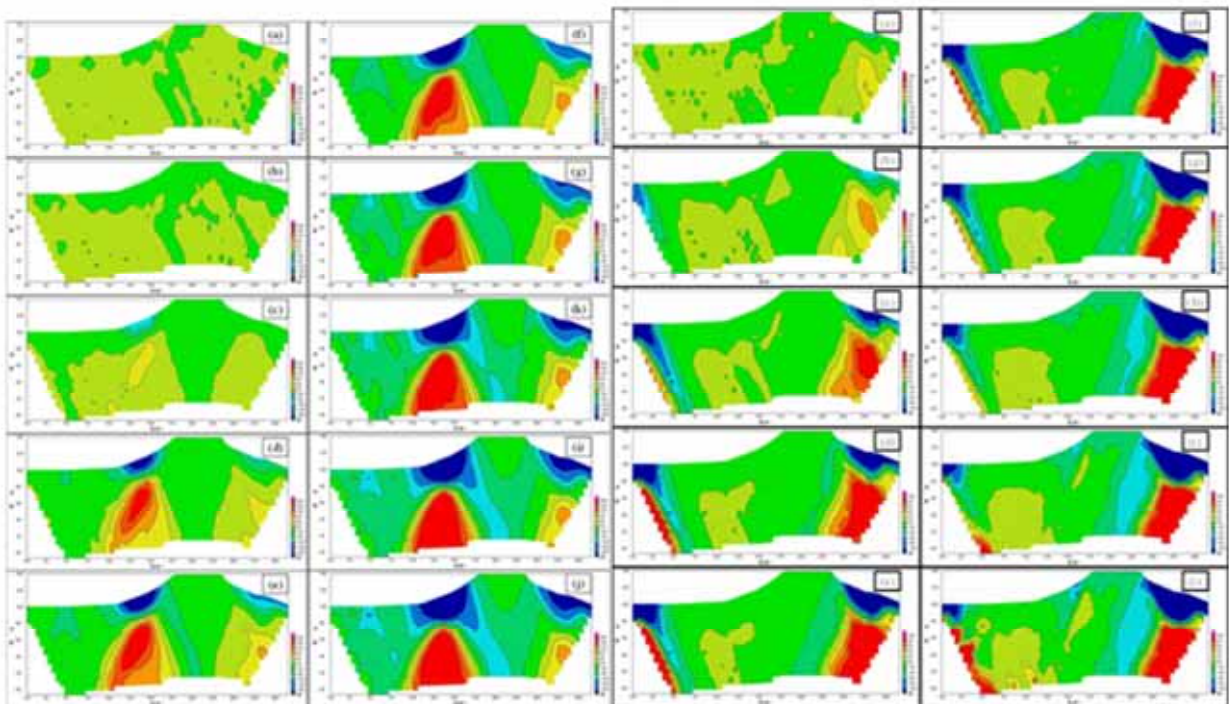


図-28 シート無し

図-29 透気遮水シート

比抵抗モニタリングによるシート無しの堤体内浸透現象（図-28）を観察すると、事前降雨により湿潤していた法先から下層へ向かい降雨が浸透を始めるが、その先に比抵抗値の高い領域が生じ、浸透流は高比抵抗領域を避けるようにして進行している様子が分かる。高比抵抗領域に設置している水分計の応答を確認すると、体積含水率は一定値を示し、外力による影響を受けていない。すなわち、粘土等の透水係数の低い材料で構成された領域もしくは、この領域に間隙空気が閉じ込められていることが考えられる。ここで、比抵抗変化率断面の経時変化の意味を考えると、計測の度に高比抵抗領域が現われ続けるためには、変化し続ける必要があり、その様子が可視化されている。よって、この高比抵抗領域には、間隙空気存在が示唆される。試験日の前には10日間程度、雨は降っておらず、堤体は乾燥状態である。透気遮水シートの場合、堤体内の浸透の様子（図-29）を観察すると、シートの設置効果により降雨浸透が抑制され、堤体表面が湿潤化していないことが分かる。また、比抵抗モニタリングによると、降雨はシートを設置していない庄内川側の法面および矢田川小段から浸透し、透気遮水シートを回り込むようにして進んでいることで透気遮水シート下部は間隙空気が閉じ込められず、浸透していることが分かった。

【研究開発成果としての事業化、製品化等の普及状況（予定も含む）】

[比抵抗モニタリング]計測システムの小型化を図り、普及型システムの製品開発を行う予定である。

[透気遮水シート]堤防の補強方法の一例として、透気遮水シートを用いた実堤防現地実験を実施し、その効果を確認した。さらに敷設の方法など検討を行う。

[原位置透水試験]原位置の不飽和状態にある飽和透水試験法について地盤工学会の地盤調査規格・基準の一つとして可能か地盤工学会 WG メンバーとして基準化を検討している。

[堤防横断面の表面波探査]EPS を利用した表面波探査技術は、さらにデータの蓄積を行い、実用化を考えていく。

⑦今後の課題・展望

3年という研究期間中に、東日本大震災だけでなく、名古屋では大きな水害が発生した。そこでは、間隙空気の挙動と推定される気泡の発生が確認されたり、水位が上がった時の堤体内の水分量を観測できたり、貴重なデータを得ることができた。研究者、技術者としてこれらのデータを有効に活用しなければならないと同時に、今回の研究成果を踏まえて、以下に今後の展望、課題を挙げる。

- 1) 中部では、秋雨前線と迷走台風が刺激しあい豪雨をもたらす、水害が発生するパターンが典型的であるが、降雨量の多い地域によって堤防の損傷箇所が異なってくる。また、東海豪雨のような豪雨を経験し、激特事業の効果がみられるところがあるが、線状構造物の特性について考える必要があると考えられる。
- 2) 本研究期間中に、堤体からの気泡発生が確認された。また、嵩上げ改修が完了していない堤防が、越水、洗掘され、あわや破堤に至る寸前といった箇所が、近くで発生した。こうしたことから、集中豪雨が頻発する今日では、堤体のり面からの浸透する雨水の影響や、嵩上げ改修が未完成な堤防の堤体内の間隙空気の挙動と安定性の面から、透気遮水シートのような保護シートの応急対策も念頭においていく必要があり、さらにはシートの設置法などが検討されていく必要がある。
- 3) 統計的な因果関係からまずは危険箇所の絞込みを行った作業の過程で、治水地形分類図と DEM (Digital Elevation Model) を重ね合わせるだけでも、周辺地形・因果関係が分かり易く、さらに旧地名が大きな情報をとることを感じた。さらなる治水地形分類図の改訂や詳細な DEM データの利用が求められるであろう。
- 4) 物性評価については力学特性・強度として、実務に対して提供できる非常に有効な情報を得たが、現場に以下に浸透させていくか、河川管理上、重要になってくると考えられる。また、浸透特性については、不飽和状態にある地盤の飽和透水係数を測れる技術の確立が遅れており、設計指針にも反映されていない。解析上の精度に影響してくることから新たな進展が望まれる。
- 5) 「河川堤防安全性評価のための統合物理探査適用の手引き (案)」が作成されており、堤防調査で用いられるようになっているが、経費の面から比抵抗探査を行わないなどでクロスプロットが取れない場合が多く、データを活かすために物性確認を行い、精度を上げていくことが必要であろう。

なお、本研究の遂行に当たり、堤防内に観測センサーを設置することができ、長期の観測を続けているところであり、今後も①矢田川堤防に設置した比抵抗モニタリング、水位計、土壌水分計を用いて、降雨時や出水時のデータを継続して取得する予定である。②比抵抗モニタリングの河川堤防への適用事例を増やすために、現場を選定している状況であり、地盤内に浸透した水分量との相関関係など、定量的な評価検討を行う予定である。