

技術研究開発テーマ名	渡良瀬川堤防を対象とした堤体内水の常時監視システムによる持続可能な浸透性破壊に対する健全性診断手法の構築	
研究代表者		
氏名	所属・役職	
松本 健作	群馬大学大学院工学研究科・助教	
共同研究者		
氏名	所属・役職	
竹内 篤雄	自然地下水調査研究所・所長	
清水 義彦	群馬大学大学院工学研究科・教授	
岡田 崇		
背景・課題		
<p>河川堤防の安全性診断手法の確立のための様々な取り組みが盛んに為されている。その基本的な指針となる河川堤防設計指針¹⁾には、堤防をその形状によって規定する、いわゆる形状規定方式に加え、堤体および基礎地盤の不均質性を考慮した質的な検討が必要である旨が明記されている。河川堤防の多くは、その端緒を流水の堆積作用により形成された自然堤防として、その後、嵩上げや腹付が施され大規模化した経歴を有し、その施工時代毎に異なる材料、異なる施工方法が用いられている歴史的半自然構造物である。このため、必然的に高い不均質性を示す。図 1 に、ボーリングによる土質調査を実施した結果得られた渡良瀬川堤防の土質想定図を例示する。種々の土質特性を有する領域が混在している状況が見て取れる。この高い局所性故に、堤防およびその基盤に関する内部構造の詳細な把握には密なサンプリングが必須となるが、河川堤防の有するいまひとつの特性である線形長大社会基盤施設であることが、取り組みを更に困難なものとしている。河川堤防は、河道内を流下する流水を堤内地に溢れさせることなく速やかに流下せしめることを目的とした構造物であるため、全線区間において均しく維持管理されて始めて機能する。たとえそのほとんどの区間で高い治水機能が維持されていても、僅か一か所の弱点箇所からの決壊・氾濫によってその周辺全域が被災することとなる。この「高い不均質性」と「線形長大な全線区間における均等な安全性の要求」という二律背反する特性を有することが、河川堤防の質的な維持管理を困難なものとしている本質である。更に、河川施設の維持管理費が縮減の一途であることも大きな背景的課題である。我が国の社会基盤の多くは、高度経済成長期に集中して施工されてきた背景を持つ。よって、施工後 50 年以上を経過し、経年劣化によって点検・補修を必要とする施設が多くあり、これらは今後更に増加する。河川施設も同様であり、このような投資余力の低迷期において、前述のような課題を有する河川堤防の質的維持管理を実施するには極めて効率的な維持管理手法の確立が将来に喫緊の課題であるといえる。</p> <p>河川堤防の破堤要因は越流性、浸透性および洗掘性の 3 種に大別できる。そのなかで、堤体内部の土質特性に起因する主たる破堤要因は浸透性破堤である。越流性や洗掘性の破堤と異なり、その進行状態が外観から観察できず、事前予知が特に難しいのも、この浸透性破堤の特徴といえる。破堤実績としては越流性破堤が最も多いが、越流性破堤は比較的堤高が低い中小河川堤防において発生している。一方で、整備が比較的進んでいる利根川などの大河川の堤防においては、堤高が高く、越流性破堤が発生し難い反面、高水位状態に晒される時間が長くなり、浸透性破堤の懸念が増している。実際、破堤には至っていないものの、堤体および基盤からの漏水被害は随所で発生しており、大河川であるが故の、破堤時の災害ポテンシャルを考えると、その対策は急務であるといえる。</p> <p>2004 年における破堤氾濫の頻発をひとつの契機として、国土交通省では全国一斉河川堤防詳細点検を実施した。1km 毎に設定された断面において数本のボーリング調査による土質調査を実施し、土質想定</p>		

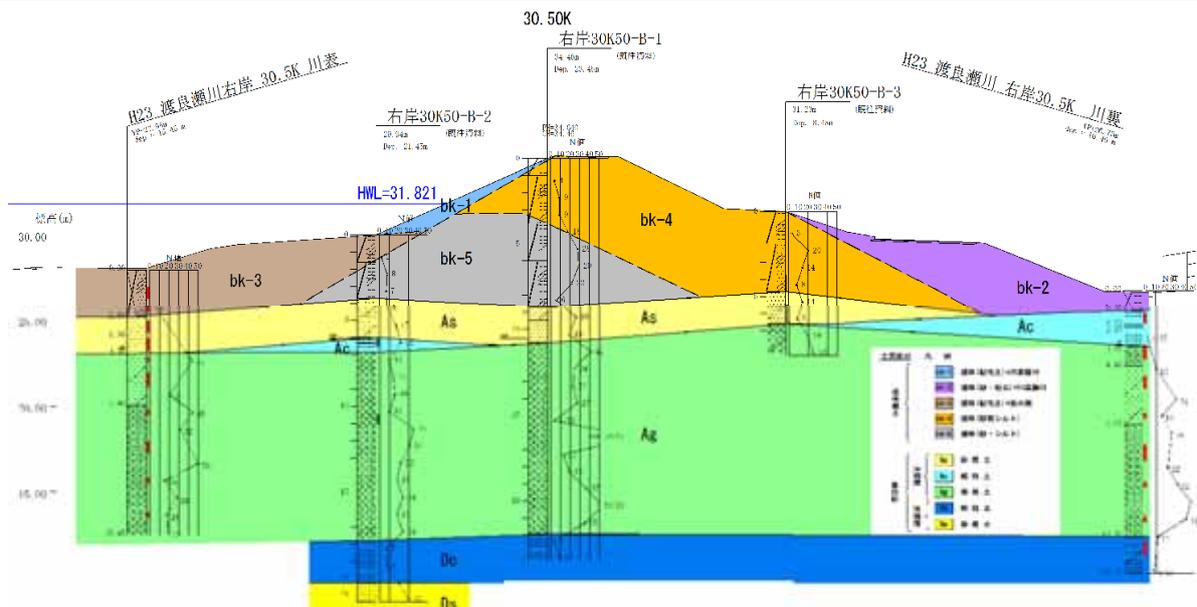


図 .1 河川堤防の土質想定図例(渡良瀬川 30.5km 地点, 右岸)

とその想定土質毎に算定した土質強度定数と透水係数を元に、すべり破壊とパイピングに対する安全度評価を実施した。1km 毎の調査結果であり、前述のように、数 m 離れると全く異なる調査結果となることも常である高い不均質性を考えると、局所的な浸透現象に対して十分なデータ密度であるとはいえないが、全国の主要河川堤防を対象として一斉点検が為されたことは極めて大きな成果である。浸透性破壊の要因となる堤体および基盤の漏水現象は、極めて局所的な現象であり、河川堤防全線区間を対象としてそのような微視的な視点で検討することは投資過多且つ現実的に不可能である。全国一斉河川堤防詳細点検は、河川というシステムを総観的にみただけの線形長大システムとしての河川堤防の質的評価という視座からみると、そのデータ密度は十分なものであり、今後の河川堤防の種々の質的評価を検討するうえで基本情報とすべきものである。

このことは一方で、詳細点検ではカバーしきれない、より微視的な検討を可能とする取り組みが別途必要であることを浮き彫りにしている。漏水が顕在化している区間において河表に遮水矢板を施しても漏水被害が再発してしまう例や、降雨や出水が近在しない状態において堤体から浸透水が染み出てくる現象例などが河川堤防の維持管理の現場から報告されており、堤体および基盤における浸透現象については時空間的に複雑な挙動を示し、その実態が未解明な点が多く残されている。

堤防の浸透性破壊に対する現在のスタンダードな検討の方向は、詳細点検で実施されたように、ボーリング等の直接採取データ、あるいは更に、各種物理探査によって得られる面的情報を、ボーリングデータを用いてチューニングした探査結果を元に堤体および基礎地盤を土質区分し、その区分された想定土質毎に透水係数を与えて各種浸透流解析を試みる、というスタンスである。堤防というシステムを総観的に捉えて大まかな安全性診断を実施する場合にはこれで良いが、前述のように局所的な漏水の箇所検知やその対策といったきめ細かい問題解決の手法としては有効ではない場合が多い。

河川堤防周辺域における浸透現象に関する研究は多種あるが、モデル化が困難な不均質性をそのまま検討対象として実態を把握しようとする試みは、その取扱いの困難さから、他のアプローチに比して十分な成果が挙がっていない。

不均質な土質場において実際の地下水がどのような存在形態となっているかは現在においても未解明な点を多く残しているが、その複雑性は種々のデータから窺い知ることができる。図 .2 は、ボーリング調査の際に得られる、ボーリング掘削深度と孔内水位の関係を示したもので、一般に試錐日報と呼ばれるものの一例である。横軸が掘削開始からの経過日数、縦軸が地表面からの深度(以下、GL-と記す)で図左上を原点である。掘削深度、作業前水位および作業後水位を示している。作業 2 日目以降は孔内に水位が確認できる。2 日目から 4 日目までの間は、ボーリング孔を掘り下げても孔内水位は GL-2m 程で安定しているが、初日に GL-4m まで掘削した際には孔内水位は確認されていないことから、この周囲の地下水位が掘削前の自然状態において周囲に一樣に GL-2m として存在していた訳ではないことは自明である。更に 5 日目に、掘削深度が GL-19m 付近まで達したところで、孔内水位が一気に GL-19m、つま

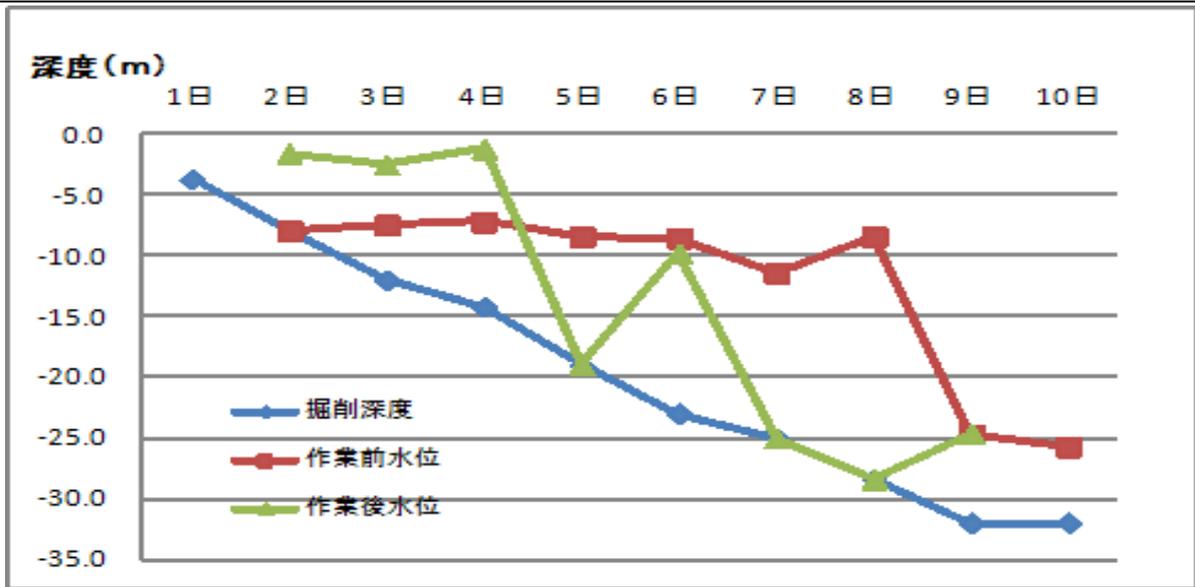


図 .2 試錐日報(ボーリング掘削深度と孔内水位の関係)例

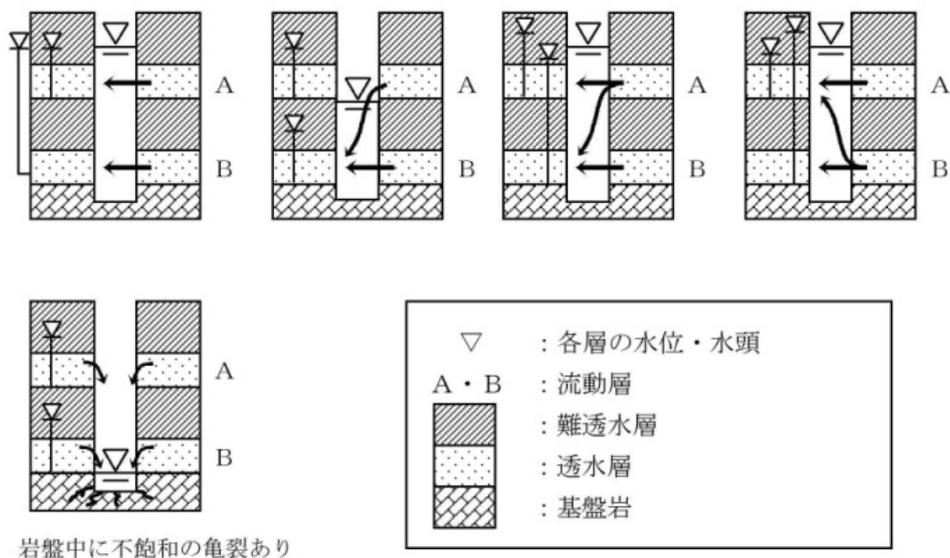


図 .3 孔内水位の水理地質学的解釈概念図

り孔内水無しという状況を呈している。これは、GL-19m 付近の難透水層をボーリング孔が貫通したことにより、その下部に存在した透水層に孔内水が逸水したものと考えられる。8 日目までは掘削深度に依らず作業前水位は地下 8~10m 程度となっており、これが平衡水位と考えられるが、9 日以降は、更に下層の難透水層を貫通したためと考えられる孔内平衡水位の急落が確認できる。このようなボーリング孔深度と水位の関係は一般的に認められる現象で、特殊な事例では無い。これらの結果は、自然状態における地下水が、下層から層状に空間的に均一に存在しているという概念では説明し難く、地下に存在する複数の流動層が異なった水位・水頭を有している状態を示唆していると考えられる。すなわち、孔内において確認される水位を水平に延長した水位が、その周辺土層内に地下水位として存在しているという解釈は、一般的には誤りであり、孔内水位は一般的にはいくつかの流動層を貫通した場合の水理学的平衡水位であると考えられる。図 .3 にその概念図を示す。図 .3 の上の 4 図は、異なる深度に A および B の流動層が存在するとした際、両者の水頭差によって様々に変化する孔内水位について示したもので、下図は基岩に亀裂が存在している状況を想定している。一般的な場においても、このような複雑な地下水状態が想定されるが、河川堤防周辺域においては河川水の伏流水と下層の地下水が混在してい

表 1 本研究で用いた物理探査

物理探査法	探査指標	探査目的	既往研究 ^{4)~7)} での実施の有無
チェーンアレー探査	S波速度	土質構造	×
1m深地温探査	1m深における地温	流動地下水	×
多点温度検層	ボーリング孔内の温度復元率	流動層の存在深度	×

るため、更に複雑な挙動をとると考えられる。特に、堤外地側の水頭は出水の水位上昇に伴って増大するため、平時においては堤内から堤外方向への浸透流動であるところが、出水時にはその同一流動層を逆流し、堤外から堤内へと、所謂漏水現象という形態をとって具現化することなども想定される。このような概念は、自然地下水状態に立脚した取り組みのなかで従前より認識されているものであるが、現地計測データが少なく、未検証な状況にある。

このような局所性の高い不均質場における浸透流の挙動に起因する堤防の浸透性破壊に対する安全性の診断を実施するには、より分解能の高い密なデータ取得を、長大区間を対象に実施することが必要となる。ボーリングデータを高密度に得ることは費用面の制約から現実的に不可能であるため、物理探査に頼らざるを得ないが、現在一般的に実施されている物理探査で、局所的な漏水を検出対象として、長大な全線堤防に適用可能な手法は存在しない。

物理探査には多くの技術が存在し、それらは実際に業務において用いられている。しかし、手法が多様であることに加え、それらの適用範囲や解釈法が複雑で実施する技術者の経験・技術に依存する要素もあることなどから、十分に活用しきれていない現状にある。これらの背景を踏まえ、河川堤防の内部構造を把握するための物理探査の適用性評価に関する取り組みがいくつか為されている^{4)~7)}。例えば高橋⁴⁾ら、畠中ら⁵⁾および鈴木ら⁶⁾は、国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所および京都大学河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究委員会と連携し、10種類の物理探査手法の河川堤防の内部構造把握手法としての適用性について評価検討している。3次元電気探査、屈折トモグラフィおよび連続波レーダなどが、試験用に作成された実験堤体を対象として実施およびその適用性評価が為されており、3次元電気探査結果が、模型堤体の不連続部や透水性変化部を良好に捉えていると報告している。しかし、「高密度」や「3次元」などの各種電気探査⁸⁾は、優れた探査手法である一方で、適用性やその結果の解釈においては注意を要する。電気探査で指標としている比抵抗は土質特性によって変化し、また同一土質であってもその含水状態によっても変化する。探査場の含水状態が均一である場合には土質の不連続部を検出でき、逆に土質が均一である場合には、含水状態に関する分布を得ることができる。試験用堤体のように、事前情報が判明している場合には解釈が容易であるが、一般的に現場で用いる場合には、この両者は共に不明な状態であり、結果として、電気探査によって不連続分布形状が得られたとしても、それが土質変化に起因するものであるのか、あるいは含水状態に起因するものであるのかの区別がつかないことになる。

電気探査と並び、頻繁に用いられる物理探査が表面波探査である。これも多種存在するが、基本的には表面波を計測することで、地中のS波速度構造を求め、土質を推定する手法である。S波は原理的には水分依存しないため、こちらは含水状態に依存せず、土質を推定することができる。土質をきめ細かく区分できれば、想定土質毎に透水係数を設定することでより局所性の高い浸透場の解析を実施できることになる。また、表面波探査と電気探査が併用されれば、表面波探査の結果確認できる土質起因情報を用いて含水状態に起因する影響を分離することも原理的には可能である。しかし実用に際しては、精度や種々の適用条件の制約などに課題を残している状況であり、より高精度な探査手法の開発が引き続き検討されている。

技術研究開発の目的

これら多くの物理探査が存在し、また現在においても多くの研究が推進されているなか、河川堤防を対象とした物理探査手法としての最大の課題は、費用的な制約から長大区間に実施する手法としては向かないという点である。上記に限らず多く存在する物理探査は注目区間が特定された後、その区間について高精度に探査する方向で技術開発が進められているものがほとんどであるが、浸透性破壊は終局的な状態となるまでは一般的には表面的な異常は検出されない。このため、浸透性破壊の安全性診断を

施するにあたっては、外見からは異常が検知できない長大区間を探查対象とし、そこから危険性の高い区間についてのおよその特定をすることがまず必要となる。しかし、この所謂「あたり」をつけるための研究や技術開発はほとんど為されていないのが現状である。このおよその「あたり」をつける概要診断を、本研究では以下、「1次診断」と称することとする。この1次診断が効果的に実施されれば、それによって特定された区間を、比較的高費用で高精度に探查する手法はいくつか存在する。これらの比較的高費用・高精度な詳細診断を本研究では、先の1次診断に対し「2次診断」と称することとする。2次診断手法を有効に機能させるためにも、比較的簡便・安価且つできる限り高精度な1次診断手法を確立することが重要な課題としてあり、今現在、維持管理の現場において必要とされている技術であると考えられる。

以上の背景を踏まえ、本研究では、河川堤防の浸透性破壊に対する安全性診断のための1診断手法の構築を試みる。1次診断手法としては、竹内¹⁰⁾によって開発された流動地下水探查法の1種である「1m深地温探查」を用い、その精度検証のため、2次診断として、チェーンアレー探查および多点温度検層を実施し、ボーリング調査による検証を実施した。以下にその詳細を示す。なお、前述した河川堤防に対するの物理探查手法の有効性が検証された既往の取り組み^{4)~7)}において、本研究で検討対象とした1m深地温探查、微動アレー探查および多点温度検層は、いずれも含まれておらず、それら既往の研究を補完する情報も提供するものとも位置づけられる。本研究で用いた探查手法の概要を表 .1 に示した。各物理探查に関する概要を

.1 1m 深地温探查

まず、1m 深地温探查について概要を述べる。1m 深地温探查は、土と水の熱容量の差異に着目して、地下水の存在域を検知する物理探查である。一般に、地下 70cm 以深では、日射量による地温の日変化が 0.1 度以下となる地温不易層となることが知られている。この 0.1 度以下の日変動量の蓄積によって地温は年変動するが、熱容量が高い土中の水分は地温の変動に追従せず、年間を通じてほぼ一定の水温となる。これによって、地温にとって地下水温は、夏季においては冷熱源、冬季においては温熱源として作用することになる。図 .1 に、1m 深地温探查の実測例を示す。横軸は測線長であり、縦軸は計測された地温であり、左縦軸が夏季、右縦軸が冬季における計測結果をそれぞれ示している。夏季および冬季共に同一区間において計測したもので、当該区間では目視で漏水が顕著に確認できる状態である。図中央付近において、夏季には低温ピークとして、冬季には高温ピークとしてそれぞれ地温異常帯が検出されており、現場の状況から、漏水存在域と地温異常帯の位置が良好に一致していることを確認した。



図 .1 1m 深地温探查実測例(夏季と冬季で明瞭に逆位相となっていることが確認できる)

上記のように、1m 深地温探査は、比較的簡便・安価且つ高精度に漏水帯を検出することができ、地表からみた面的な漏水の存在域を特定することができるため、本研究の目的である 1 次診断手法として適用できる可能性があるため、これを実施することとした。1m 深地温探査によって得られる情報は、あくまで地表面投影した流動地下水の存在域であり、深度方向については特定できない。

2 チェーンアレー探査

チェーンアレー探査は、微動アレー探査法の 1 種であるため、始めに微動アレー探査について概説する。微動アレー探査は、複数の地震計で地表の微弱な振動を観測することで地下構造を推定する技術である。計測作業は簡便であり、騒音・振動および産廃などを発生しない。また集落や都会の中でも実施できるなどの長を有している。従来、地震基盤など大深度の調査に利用されてきたが、近年、土木建築分野などへの適用例が増え、その有効性が確認されている。計測される表面波は周波数によって伝播速度が異なる分散特性を有している。伝播波形の分散現象の概要を図 2 に示す。左図は、横軸に距離、縦軸に時間を示してあり、空間的より遠方にある受信 3 においては、より近在する受信 1 における計測信号より分散が顕著となっている様子を表している。この分散性は地下構造の変化と良好な相関を有しているため、この特性を利用して表面波の分散特性から地下構造を推定する。分散特性の抽出は、空間自己相関法で行う。SPAC 法は、中心点と円周上等間隔の各点間の全周平均値（空間自己相関係数）を求め、分散特性を抽出する手法である。最少観測は 3 点で、即ち正三角形の中心と各頂点に地震計を配置して微動を観測する。図 3 に微動観測のための測点配置の概念図を示す。表面波の分散特性は地下構造を反映するため、分散曲線を相対的に比較すれば、地下構造の変遷の推定可能となる。分散曲線の位相速度は、波長の $1/2$ ($\sim 1/6$) の地下深度とされるので分散曲線から擬似的な位相速度構造を作ることが出来る。

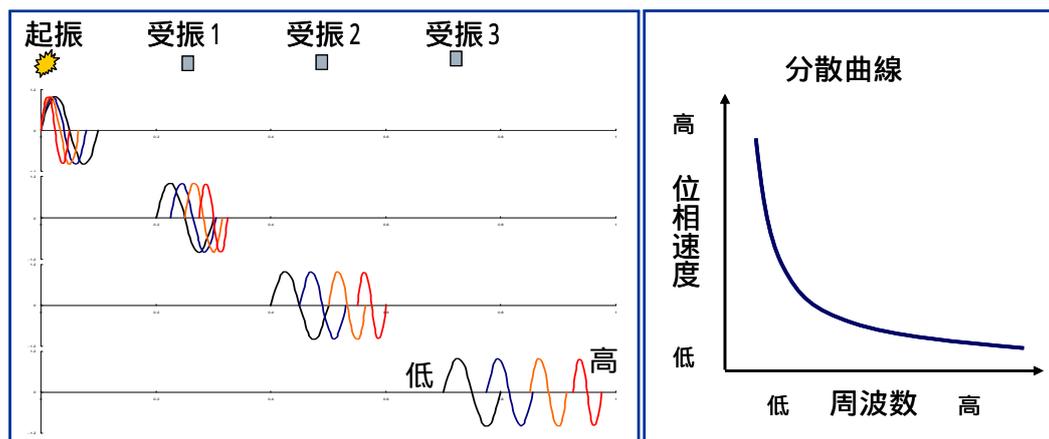


図 2 伝播波形の分散現象の概要(波動の周波数によって伝播速度が変化する現象。低周波数ほど早く伝播する。伝播距離が長くなるに従い、分散が顕著となる。左図：伝播波形の時空間的な分散の様子、右図：周波数と位相速度の関係)

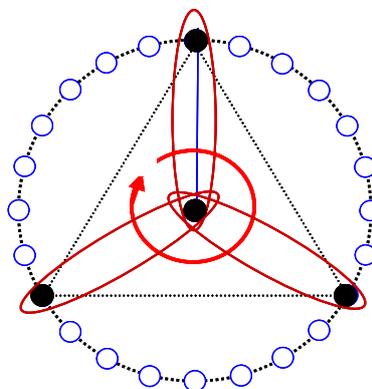


図 3 微動受信における測点配置の概念図
(中心点と円周上等間隔の各点を示してある。最少測点は3点で、円形正三角形分布となる。)



写真 .1 桐生川におけるチェーンアレー探査の測線配置

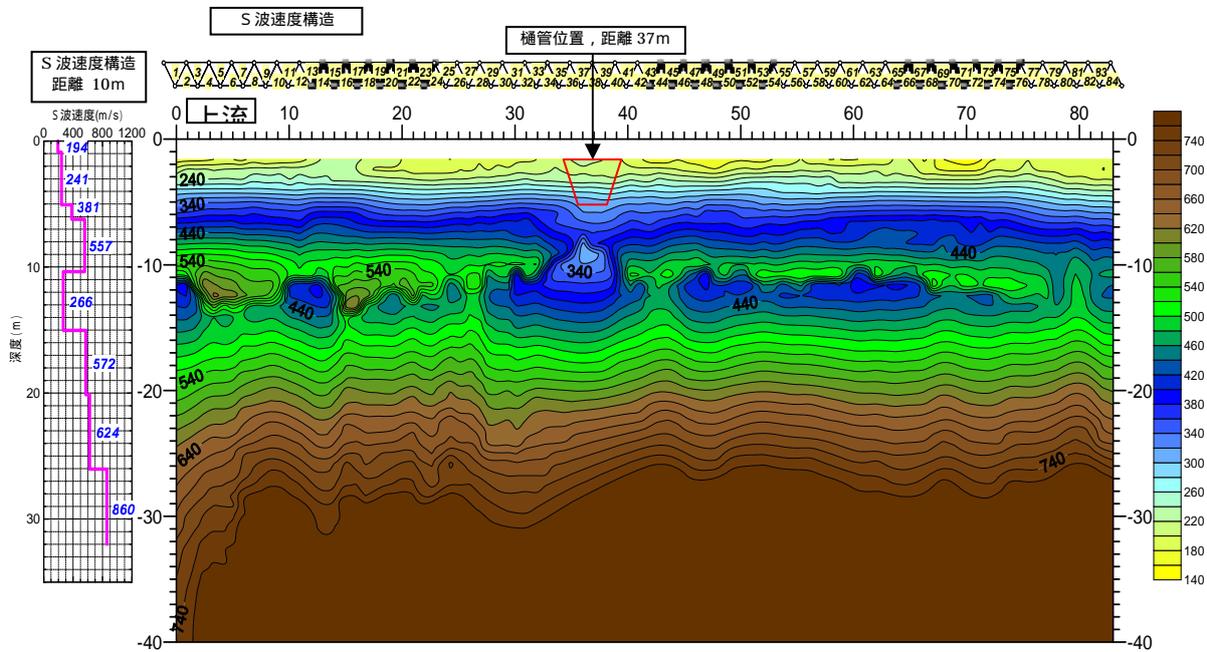


図 .4 チェーンアレー探査結果

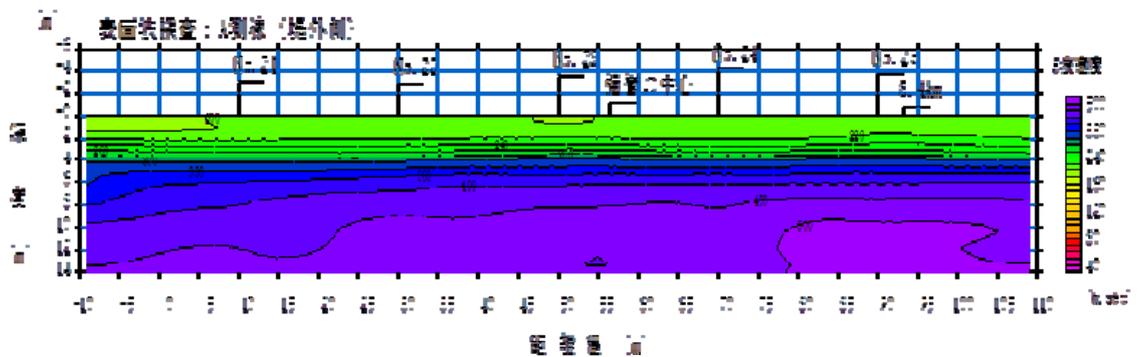


図 .5 表面波探査結果

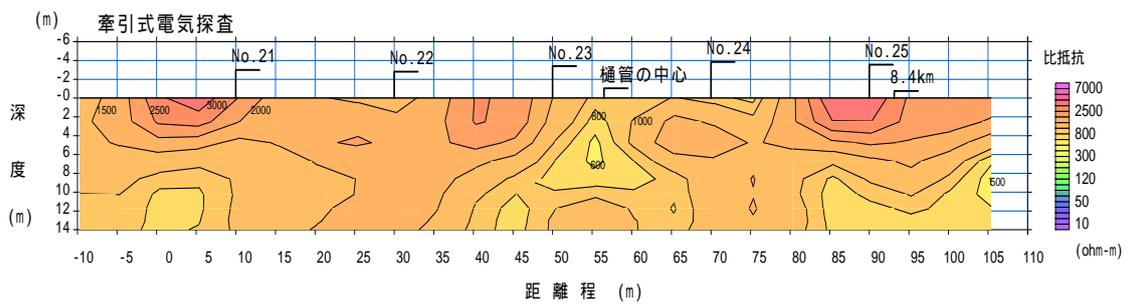


図 .6 牽引式電気探査結果

チェーンアレー探査は、地震計を連続的に三角形配置することにより、連続的に分散曲線を得る方法で、連続した分散曲線から2次元の位相速度断面を求めるものである。チェーンアレー探査は、微動アレー探査の新しい利用法であり、探査精度および探査の実施速度が従来法より向上している。渡良瀬川支川桐生川におけるチェーンアレー探査の実施結果を例示する。写真 .1に、チェーンアレー探査を実施した桐生川8.45km右岸、広見橋上流の約80m区間の測線配置を示す。

表面波探査および電機探査との比較できるため、実施例として示す。図 .4がチェーンアレー探査の結果得られた地下のS波速度分布である。横軸が堤防縦断方向にとった測線長、縦軸が深度である。図の色調は図の右に付した凡例に対応しており、茶色が高速、黄色が低速域をそれぞれ表している。図の横軸の中央に位置する約37m付近に樋管が存在している。土質構造の境界が明瞭に確認できるが、特に樋管存在位置の下部にも、局所的に低S波速度域が存在していることが見て取れる。図 .5および図 .6に、一般的な表面波探査および牽引式電気探査の結果を示す。ほぼ同一測線での実施例であり、各図の中央が樋管存在域である。電気探査の結果には、樋管の存在域に対応するような比抵抗値の局所的な分布がみてとれるが、表面波探査の結果においては不明瞭である。本区間における計測においては、チェーンアレー探査は表面波探査、牽引式電気探査に比して、高い分解能を有しており、樋管周囲の土質構造などをはじめ、各種詳細な検討に使用できる可能性があることが確認できた。表面波の観測によってS波速度構造から地下の土質構造を推定する手法はいくつかあるが、上記のような結果からも、本研究では、1次診断後に実施すべき2次診断手法としてチェーンアレー探査を用いることとした。

.3 多点温度検層

同一想定土質内においても不均質性を考慮して局所的な流動地下水に関する考察を実施する場合、更に土質想定を細分化して検討する方向も有効である。しかし、土質的物性値をどれだけ細分化しても、厳密には流動地下水に関する直接的な情報とはなり得ない。透水係数が高いということは、その周囲に浸透流場がある場合に、優先的にその領域を浸透流が流動することを意味するのであって、例えば難透水層によって周囲を閉鎖されているような状況下に透水性の高い土層が存在しても、そこに顕著な流動地下水が存在する訳ではない。このような地下水の存在形態を竹内¹⁰⁾は自然地下水と呼び、その3次元的存在域を把握するために多点温度検層を開発した。地下流動層を想定した探査手法はいくつか存在するが、本研究で用いる多点温度検層は「地盤工学会基準 JGS1317」として認定されている「トレーサーによる地下水流動層検層方法」の温度トレーサー法として認識されているものである。多点温度検層は、ボーリング孔内に温水を注入し、孔内を一定温度に昇温させた後、平常温度に復元する際の復元率を追跡する。流動地下水が存在する深度においては、浸透流の冷却効果によって温度復元率が上昇することから、孔内の温度復元率の鉛直分布を求めることで、流動地下水の深度を推定するものである。温度復元率の分布形状と、流動層厚および浸透流速との間には明瞭な相関があること、および現地観測で得られる典型的な温度復元率の鉛直分布形状が、深度方向に複数の流動層が存在する場合において確認できることを室内実験によって確認されている¹¹⁾。多点温度検層の実施状況を図 .7 に示す。また、多点温度検層に用いたプローブの構造と計測手順について、図 .8 に示す。このプローブをボーリング孔に挿入し、深度毎の水温を時系列的に計測することになるが、一般的な土質調査において掘削される40～50mm程度の試錐孔内径の制約に合うよう、プローブの外径は25mmとしている。孔内においてできるだけ高密度に計測を実施することが望ましいが、このプローブ径の制約から、水温を検出するサーミ

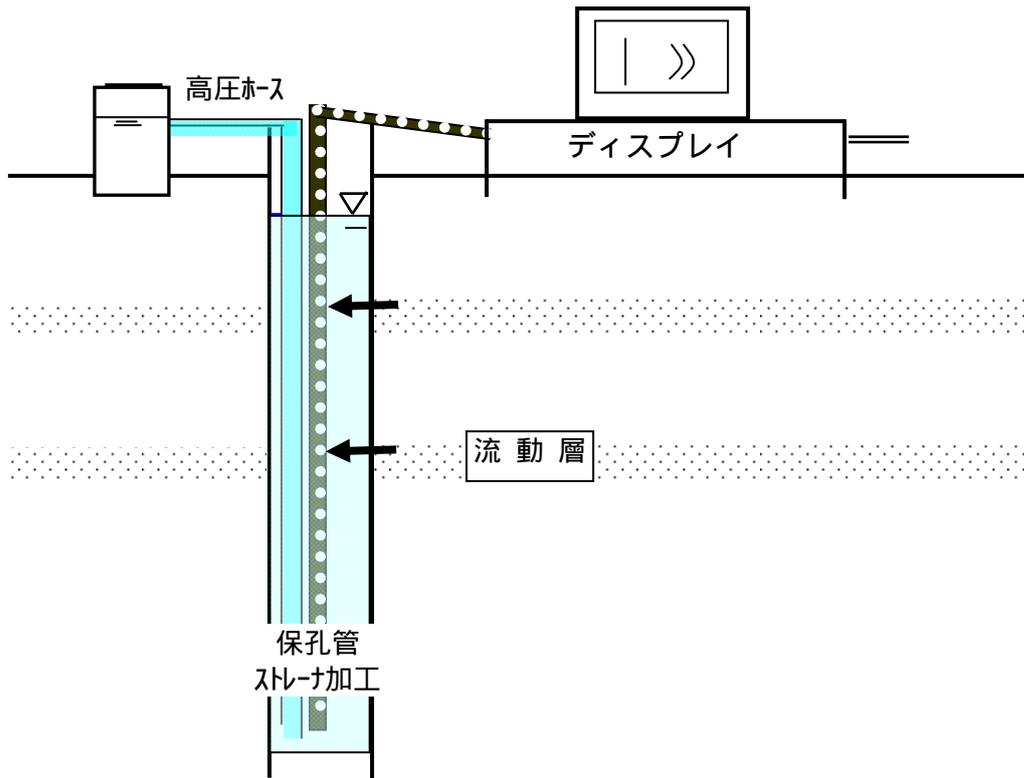


図 .7 多点温度検層実施状況の模式図

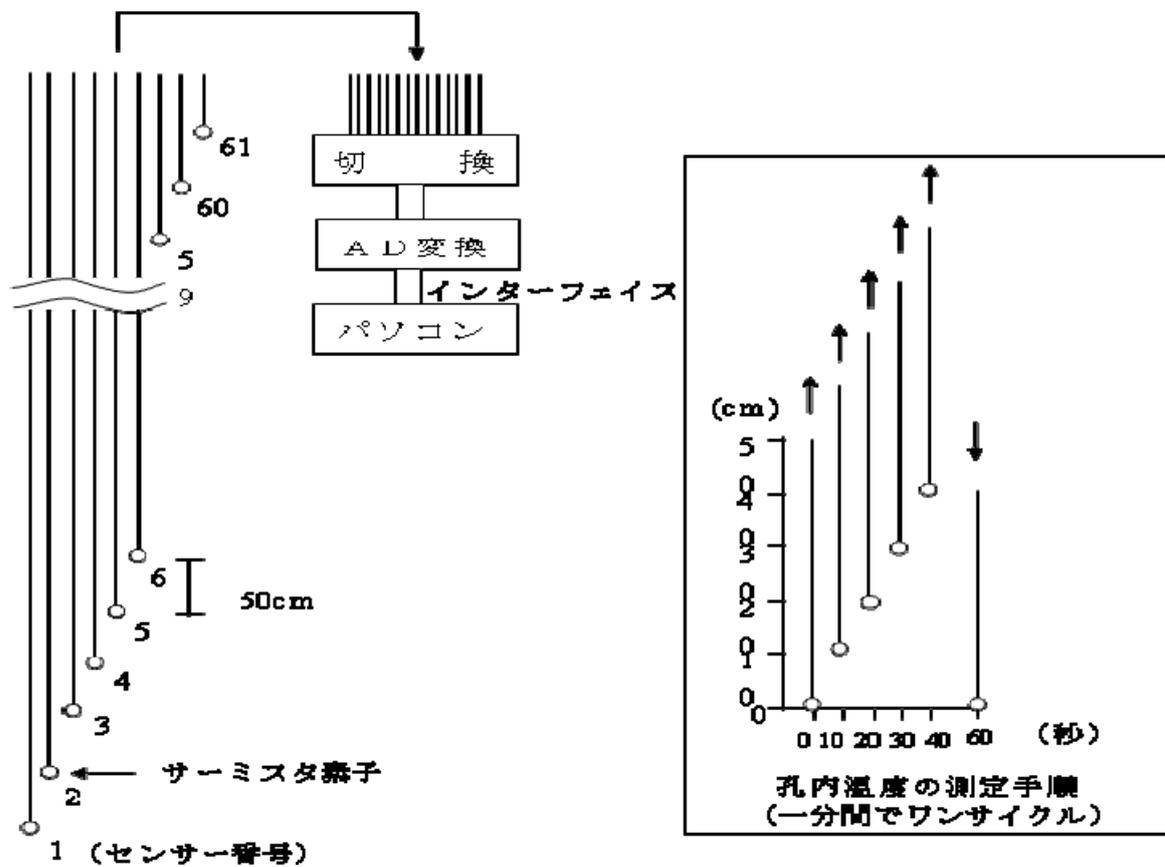


図 .8 多点温度検層用プローブの構造(左図)と計測手順(右図)

スタは 50cm 間隔で設置してある。実際の計測に際しては、孔底部までプローブが挿入された状態を基本状態として、そこから 0cm, 10cm, 20cm, 30cm, 40cm と 10cm ずつプローブを上昇させ、計 5 回の計測で 1 セットとすることで、10cm 間隔の計測を実施している。プローブの全長は 30m であり、計 61 個のサーミスタが設置されている。多点温度検層では、一定温度まで昇温させた後、温度復元の深度方向分布を求め、浸透流動による冷却効果とすることで流動層の存在を検知するが、指標としては式 .1 に示す温度復元率を用いる。

$$\frac{(\text{0分時の温度}) - (\text{任意の経過時間における温度})}{(\text{0分時の温度} - \text{自然状態の温度})} \times 100(\%) \quad (.1)$$

孔内の水温を深度方向に一定昇温させた直後の状態を「0 分後の温度」として計測し、そこから任意の経過時間において水温を計測することで、時系列的な温度復元率の深度方向分布が得られることとなる。1m 深地温探査と同じく竹内によって開発された探査手法であるが、1m 深地温探査以上の豊富な情報を得ることができる探査手法である一方で、実施にあたってはボーリング孔が必要であること、より費用が高額であることから、2 次診断手法の 1 つと位置づけた。以上のような手法を用い、1 次および 2 次診断の結果をまとめそれらの有効性について検証する。



図 .1 国土地理院発行 1/2.5 万地形図

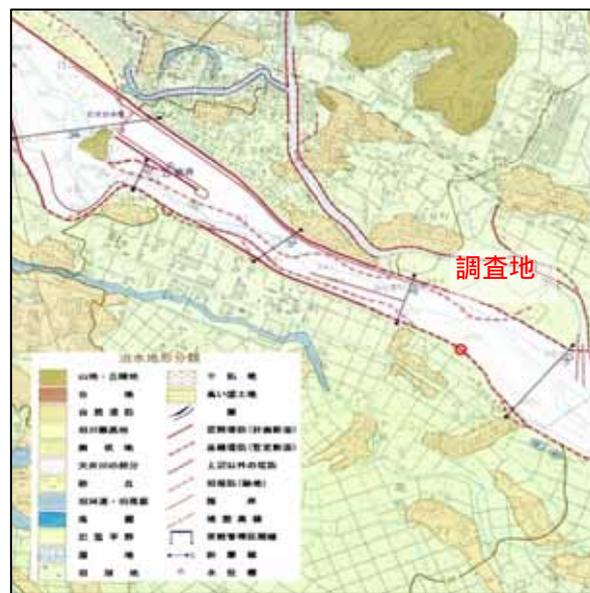
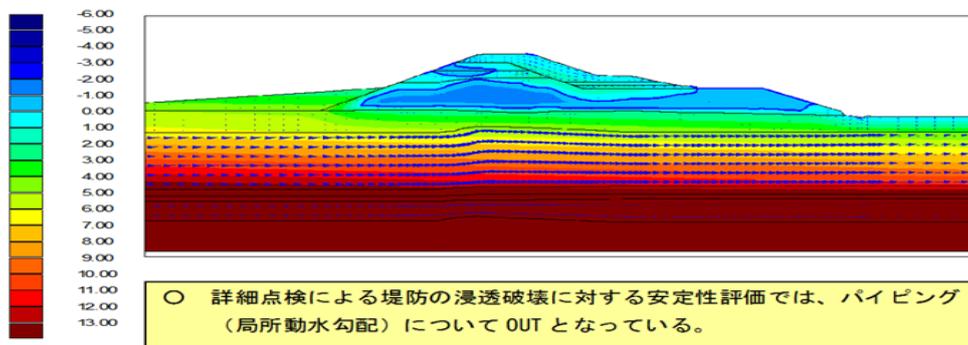


図 .2 治水地形分類図



照査項目	照査結果	判定	
局所動水勾配 (<0.5)	I v	0.716	×
	I h	1.151	×
G/W (>1.0)	—	—	

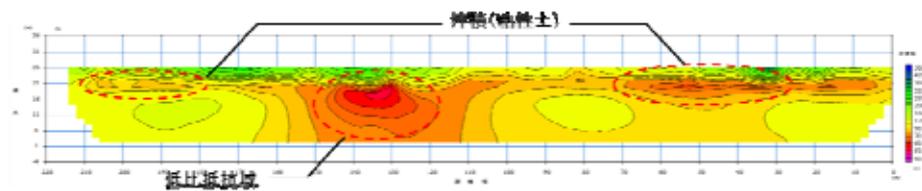
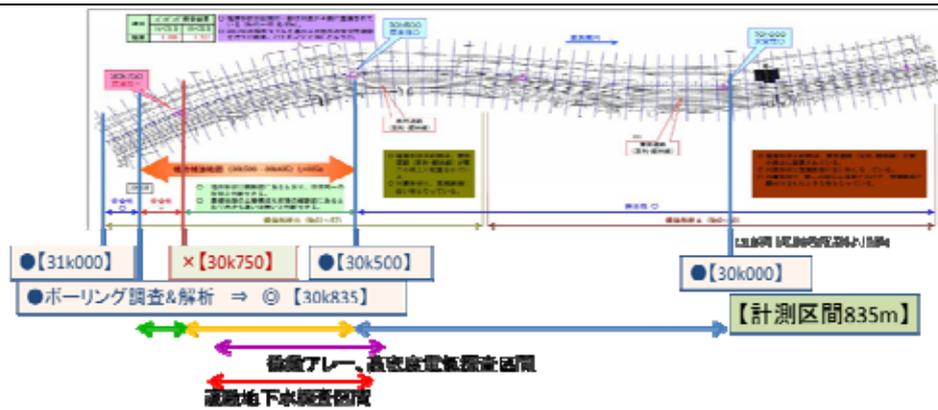
図 .3 福富サイトにおける堤防詳細点検結果(渡良瀬川河川事務所資料より抜粋)

技術研究開発の内容・成果

現地観測の概要を示す。現地観測は渡良瀬川 30.5km 付近右岸の福富町地先堤防(以下、福富サイトと呼ぶ)を対象とした。栃木県の南西から南部を東流する渡良瀬川右岸中流域の低地に位置し、堤内地には氾濫平野が広がり、治水地形分類図から自然堤防や旧河道、旧湿地の名残がみられ、かつては蛇行や氾濫を繰り返してきたことが確認できる。図 .1 に現在の地図上での、図 .2 に治水地形分類図での当該調査地の位置を示す。調査地付近の表層地質は、泥質な軟弱層および砂質・礫質で構成される沖積層からなり、沖積層下位は砂礫層を主体に砂層、泥層を挟む半固結堆積物が厚く堆積している。河川堤防詳細点検の結果、パイピングに対する安全性に懸念があると診断された区間である。図 .3 に、渡良瀬川河川事務所資料より抜粋した当該区間における詳細点検結果を示す。

図 .4 に測線配置図および物理探査結果を示す。上から、現地観測対象区間である福富サイトの地形概況と各物理探査の測線配置図、比較の為に付加的に実施した高密度電気探査、チェーンアレー探査および 1m 深地温探査の各結果である。高密度電気探査およびチェーンアレー探査の結果は横軸位置を合わせて示してあり、高密度電気探査では縦軸 26m の深度が地表面、チェーンアレー探査では縦軸 0m の深度が地表面としてある。高密度電気探査結果図においては赤いほど比抵抗値が小さく、チェーンアレー探査結果図においては赤いほど S 波速度が小さい。1m 深地温探査結果では、縦軸は計測された地温で、左縦軸が夏季の、右縦軸が冬季の計測結果を示している。

前述のように、当該区間は先行して実施された詳細点検においてパイピングに対する安全性に懸念があると診断されている。そこで、国土交通省関東地方整備局渡良瀬川河川事務所では、30.500km、30.750km および 30.835km のそれぞれの位置においてボーリング調査と安全性診断を実施したところ、30.500km および 30.835km の位置では安全、30.750km の位置では安全性に懸念有り、との診断となった。そこで、この安全性の確認ができていない 30.500km~30.835km の 335m の区間に注目して物理探査を実施することとした。高密度電気探査の結果を見ると、GL-5m ほどの領域に、水平に低比抵抗領域が分布している。また、横軸で 140~150 の区間で比抵抗が減少する領域が存在している。前述したように、電気探査では、その比抵抗分布の成因が土質特性に起因するのか、含水状態に起因するのかの判断がつかないため、他の探査結果と比較する。チェーンアレー探査の結果を見ると、横軸で 180 付近に S 波速度が局所的に高くなっている領域が見られる。他にも、局所的な高 S 波速度領域が点在しているが、高密度電気探査の結果と一致しているようにはみえない。チェーンアレー探査の結果と 1m 深地温探査の結果は横軸がずれているため、チェーンアレー探査の結果内に点在する高 S 波速度領域に対応する区間を、矢印で示し、1m 深地温探査の結果図に青色で示した。チェーンアレー探査の結果内の横軸 180 付近に存在する比較的大きな高 S 波速度領域に対応する 1m 深地温探査の探査結果をみると、夏季および冬季共に高温帯となっている。通常の流動地下水存在域の挙動は夏季に低温・冬季に高温となるため、通常の流動地下水挙動ではないことがうかがえる。当該区間には県管理の污水管が存在しておりチェーンアレー探査の明瞭な分布と 1m 深地温探査結果が夏季および冬季の両方で高温帯となっていることも、この污水管の影響を捉えている可能性があり、チェーンアレー探査と 1m 深地温探査の間では一定の整合性が認められた。図 .5 に、1m 深地温探査の結果、流動地下水反応が顕著であった領域を抽出した結果を示した。右上図に、探査結果を示したが、横軸で 39.477 付近に、夏季に低温且つ冬季に高温となる典型的な流動地下水反応が見られる。横軸で 30.5 付近には、ほぼ変動が無く、局所的に冬季に低温帯となっている領域がある。河川水が伏流状態で浸透している場合、冬季に低温帯となるためこのような傾向を示すことがあるが、少なくとも流動地下水反応ではない。よって、この 2 地点をボーリング調査地点として選出し、ボーリングによる土質調査と、そのボーリング孔を用いた多点温度検層を実施して、深度方向に流動地下水存在域を特定し、1m 深地温探査の結果との整合性について検証する。図 .6 に、1m 深地温探査の結果とボーリング孔の位置関係を示す。流動地下水反応が顕著であった測点をボーリング、他方をボーリングとした。ボーリングの結果得られた土質区分想定図とチェーンアレー探査結果の比較を図 .7 に示す。両者が良好に一致しており、チェーンアレー探査とボーリング結果との整合性が高いことが確認できる。ボーリング および の孔を用いて実施した多点温度検層の装置概要を図 .8 に、またその結果を図 .9 に示す。図 .9 は温度復元率の鉛直分布であり、縦軸は地表面からの深度(m)である。横軸は、図上部に付してあり、左が昇温完了後の段階で、この時点が温度復元率 0% である。以後、孔内水温の経時変化を計測し、最大で 30 分後までの温度復元率の鉛直分布を示してある。ボーリング においては GL-2.4m、ボーリング においては GL-3.1m が温水注入前における孔内水位である。両図を比較すると、ボーリング における温度復元率の方が、ボーリング のそれよりも総観的に高い復元率を示していることが見て取れる。ボーリング の孔内水位以深区間で、最終的な温度



微動アレー探査 (ジオックスコンサルタント)

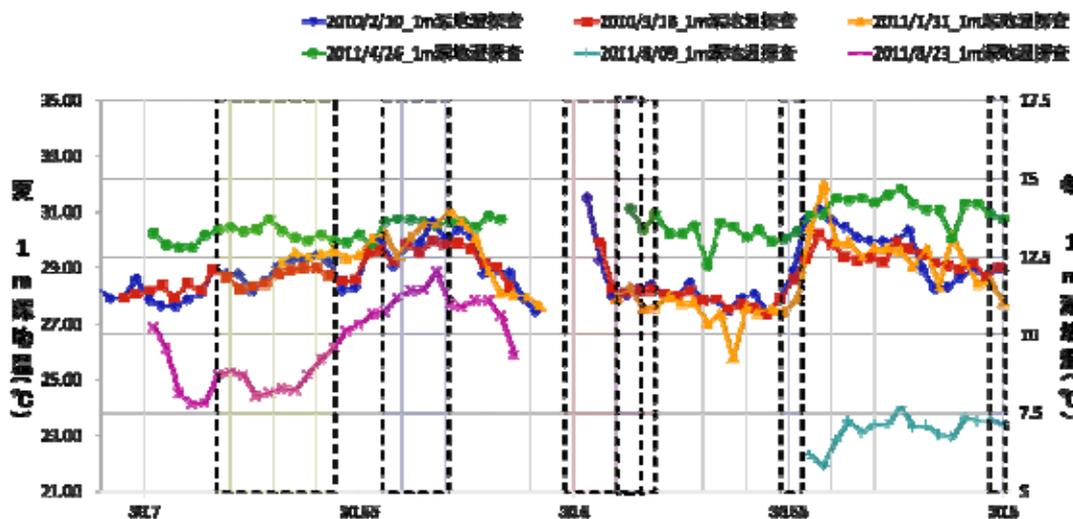
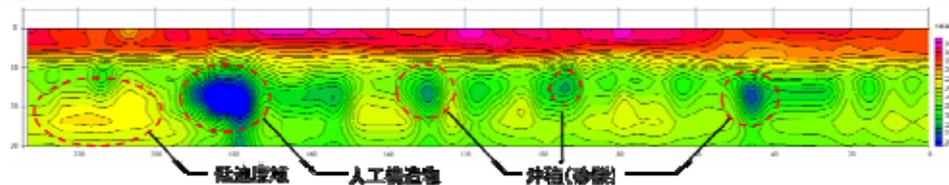


図 4 測線配置および物理探査結果
(上から、地形概況および測線配置、高密度電気探査、微動アレー探査、1m 深地温探査の各結果)

復元率の鉛直分布において突出(左に凸)区間を抽 GL-9.1m~10.2m, GL-11.6m および GL-14.1m の4層となっている。ボーリングの結果を見ると、ボーリングと比較すると温度復元が平坦で、深度方向に特徴が見え難い。同じく温水注入前の孔内水位で深区間を対象として、温度復元率の突出区間を抽出すると、GL-6.1m に定量的には小さいが明瞭な形状が見てとれるほか、GL-9.1m および GL-11.7m~14.1m の区間に不明瞭ながら抽出することができる。ただし、最下部の GL-11.7~14.1m 区間については、不明瞭であるため、ここでは流動層と判断しない。考察の目安として温度復元率 60%線を両図に記したが、

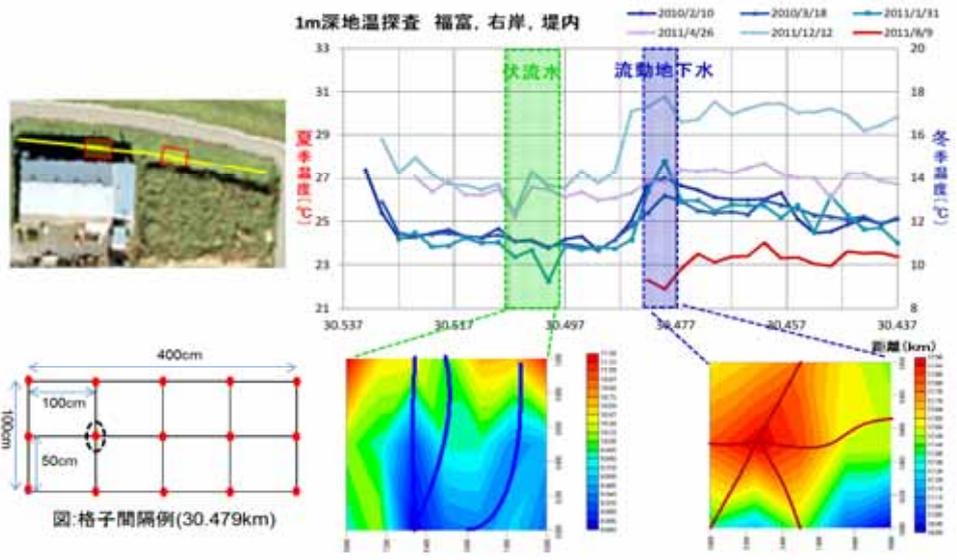


図 .5 1m 深地温探査による流動地下水反応の検出
 (左上：測線と注目区間の配置図，右上：1m 深地温探査結果
 左下：1m 深地温探査の格子状計測の測点配置，右下：格子状計測結果の地温等高線図)

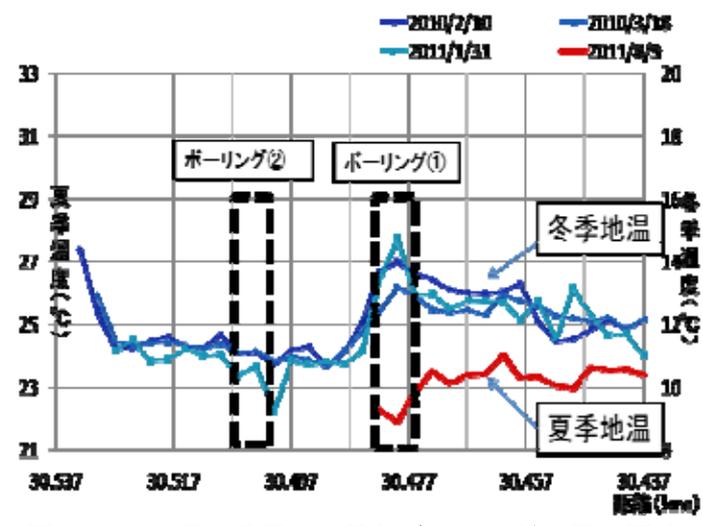


図 .6 1m 深地温探査結果とボーリング位置の関係

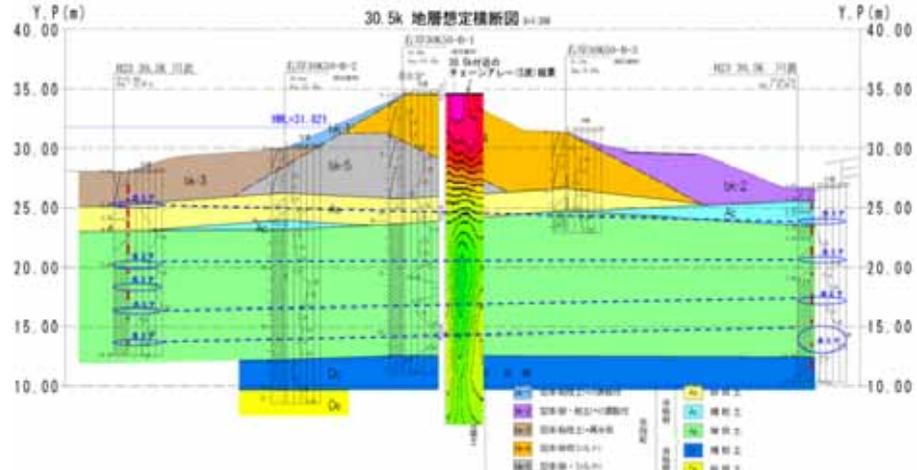


図 .7 ボーリング調査による土質想定図とチェーンアレー探査結果の比較

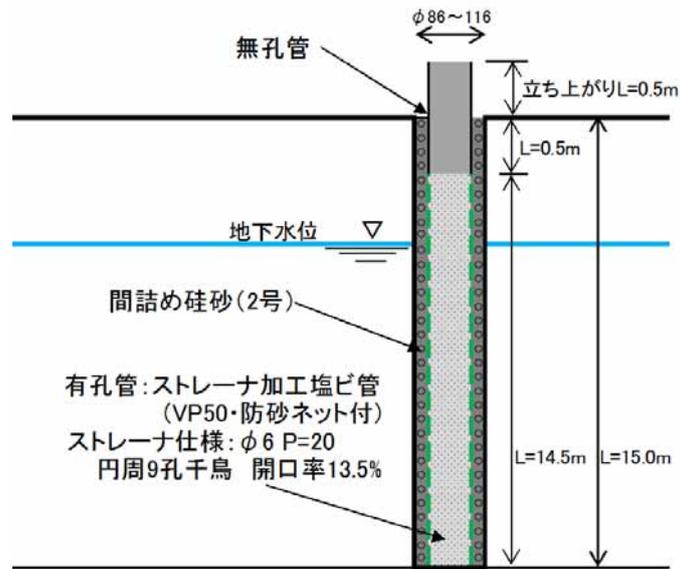


図 .8 多点温度検層用ボーリング孔の仕上げ完成図
(開口率 13.5%のストレーナ加工塩ビ管を防虫ネットで巻き挿入する。
塩ビ管とボーリング孔の間隙は砂で充填する。)

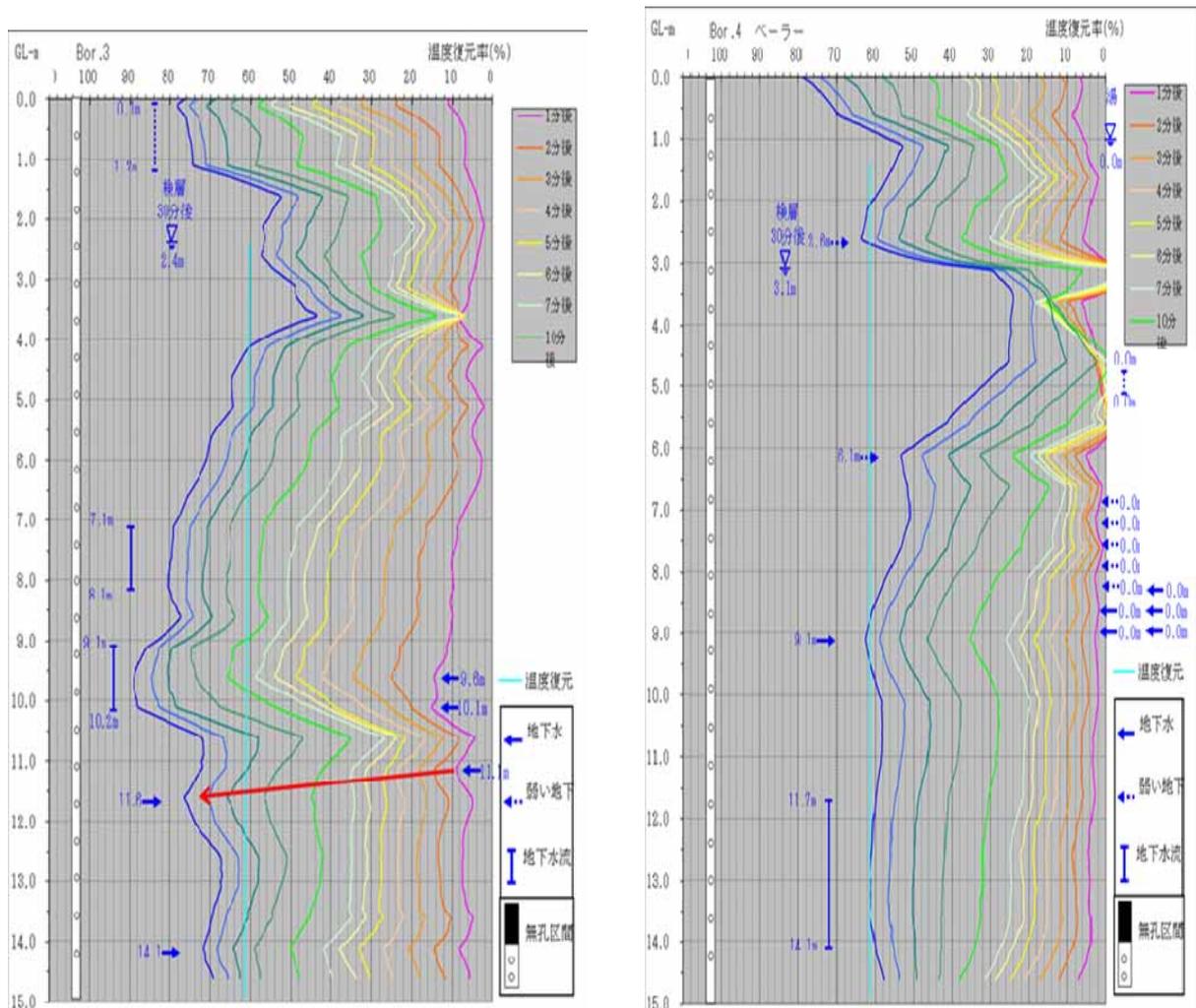


図 .9 多点温度検層結果(左: ボーリング , 右: ボーリング)

両図を比較するとボーリング において流動地下水反応が強いことは明瞭であり、これは図 .6 に示した 1m 深地温探査の結果とも符合する。よって、簡便・安価であることで、1 次診断手法として実施できる可能性を期して実施した 1m 深地温探査の結果は、チェーンアレー探査および多点温度検層、ひいてはボーリング調査と先行して実施された堤防詳細点検のそれぞれの結果とも良好に符合する結果となり、1 次診断手法として良好な精度を有した有用な手法であることを確認することができた。

今後の課題・展望

本研究では、河川堤防の浸透性破壊に対する安全性の 1 次診断手法として 1m 深地温探査を選定し、その有効性について検討を行った。結果、流動地下水反応が顕著であった測点で多点温度検層の結果が、同じく温度復元率が高く流動層反応が顕著であった。チェーンアレー探査やボーリング調査の結果とも矛盾なく、1m 深地温探査の結果は、1 次診断手法として有効であることを示すことができた。

今後の課題としては、1m 深地温探査および多点温度検層結果の評価について経験的な取り扱いが為されている要素について数値シミュレーションによる定量的な吟味を実施する必要があると考えられる。

全国の河川堤防が地震・出水というインパクトを受け劣化していることが懸念されているなか、概観からはうかがい知れない内部の損傷を、長大な区間のなかから検出していく技術は河川堤防の維持管理の現場において切望されている。本研究の成果は、その一助となすための基礎的であり、今後の展望として更なるデータの蓄積や精度向上を含めた取り組みを実施していくことが望ましいと考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局ホームページ
- 2) 長瀬迪夫：浸透破壊に関する考え方と破壊発生の条件 諸文献における記述と用例，応用地質年報，Vol. 9，pp. 43-124，1987.
- 3) 中島秀雄・長瀬迪夫・飯島豊：X 線を用いた土の浸透破壊とその考察，応用地質年報，Vol. 9，pp. 21-41，1987.
- 4) 高橋亨，田中壮一，山本剛，糸川政孝，船曳誠二：河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究(その1)，物理探査学会第117回学術講演会論文集，pp. 119-122，2007.
- 5) 畠中与一，今里武彦，山口伸治，山本剛，糸川政孝，船曳誠二：河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発(その2)，物理探査学会第117回学術講演会論文集，pp. 123-125，2007.
- 6) 鈴木敬一，山本剛，糸川政孝，船曳誠二：河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究(その3)，物理探査学会第118回学術講演会論文集，pp. 178-181，2008.
- 7) 渡辺文雄：河川堤防への統合物理探査手法の適用性検討(その1)，物理探査学会第116回学術講演会論文集，pp. 277-280，2007.
- 8) 島裕雅，梶間和彦，神谷英樹編：比抵抗映像法-建設・防災・環境のための新しい電気探査法，古今書院，1995.
- 9) 原澤剛史，松本健作，竹内篤雄，内堀寿美男，矢澤正人，林久夫：流動地下水探査法による渡良瀬川堤防の基盤漏水探査に関する研究，応用地質学会平成 23 年度研究発表会講演論文集，pp. 207-208，2011.
- 10) 竹内篤雄：流動地下水探査法，古今書院，1996.
- 11) 竹内篤雄・松本健作・原澤剛史：温度復元率を用いた流動地下水特性の検証と堤防基盤漏水調査への適用，水工学論文集，第 56 巻，pp. 571-576，2012.