

II-1 都市域表層地盤の探査技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 13～平 15

担当部署：技術推進本部

研究担当者：稲崎 富士

【要旨】

都市域の表層地盤の内部構造とその物性を、高分解能かつ高効率で把握することが可能な新しい地盤探査技術について、その確立と普及を図ることを目的とした研究を実施した。中核とした技術は、土木研究所が独自に開発していた S 波ランドストリーマー探査技術である。都市域は土地の高度利用が進み、地表のほとんどは舗装されており、また交通振動に代表される計測時に障害となるような雑音レベルが高いという特徴がある。このような悪条件下でも詳細な地盤構造の把握が可能となるよう、中核技術に対する改良および新たな関連技術の開発を行なった。

キーワード：ランドストリーマー、舗装、都市域、地下空洞、弾性波探査

1. はじめに

地表および地下空間が高度利用されている都市域においては、深度 30m 程度までの表層地盤をより詳細かつ的確に把握することが可能な地盤調査手法の適用が求められる。従来多用されてきたボーリング調査は、「点」の情報しか得られないため空間的な不均質性を把握することができない。特に空洞などの数 m オーダーの局所的異常構造、あるいは埋没谷や断層変形帯などの数 10m～100m オーダーの地盤構造変化は、群列ボーリングによっても検出が困難である場合が多い。

本研究は、土木研究所で独自に開発した技術である S 波ランドストリーマー探査技術およびその関連技術について、詳細地盤構造の検出能力を実験的に検証し、都市域での実調査への適用をはかることを目的とした。また同探査技術の特徴である舗装面での計測を可能にした非固定センサアレイ方式を活用して、堤防や埋立地のように表面舗装されている構造物の内部構造調査、さらに舗装自体やコンクリート覆工の詳細内部構造解析手法についても検討を加えた。なお平成 14 年度からは（独）産業技術総合研究所および民間調査会社 5 社と共同研究を実施し、本研究の加速的推進をはかった。

2. 研究方法および結果

2. 1 舗装の影響に関する実験的検討

2. 1. 1 ランドストリーマーの特徴

本研究において技術的確立と普及を目標とした、表層地盤探査技術に使用するランドストリーマー探査ツールは、図-1 に示すように非伸縮性のベルト上に一定間隔で 24 ないし 48 個の地震計ユニットを固定した一体型マルチチャンネルセンサアレイである。各地震計ユニットの内部には、図-2 に示すように 2 個の振動センサが内蔵されている。この地震計ユニットは、金属製のベースプレートを通じて舗装面と接触しているが、地面には固定されていないので車両等で容易に牽引することが可能である。一般的に弾性波探査では、高品質の信号を取得するためスパイク型の地震計を使用し、スパイクを地面に突き刺して地面に堅固に固定する方式が採用されてきた。しかしこの方式では地震計の設置および回収に多大

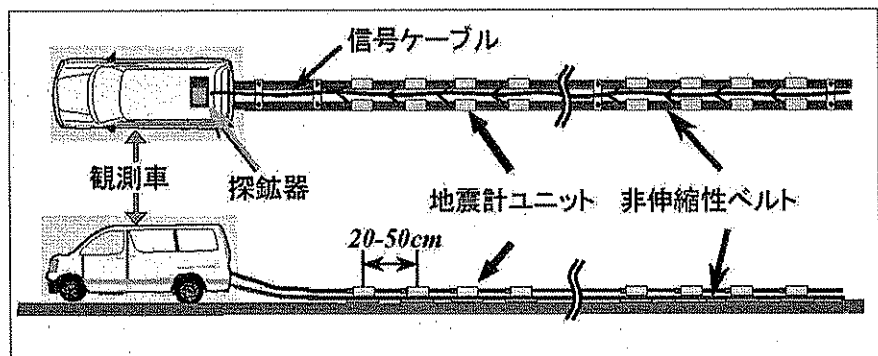


図-1 ランドストリーマーツールの概要(文献1)を改変)

な時間と労力を必要とする。また舗装面ではそのままでは設置できない。これに対してランドストリーマーツールでは、上述のように地震計ユニットは舗装面には固定されていない。このような非固定方式の地震計設置により、取得信号のS/Nの低下が懸念された。そこで小規模な簡易舗装路を作成し、ツールの特性評価およびデータ品質に対する舗装構造の影響について実験的検討を行なった。

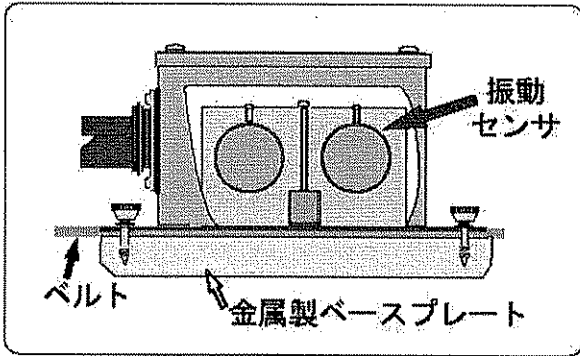


図-2 地震計ユニットの概要(文献1)を改変

2. 1. 2 モデル舗装路の作成と比較データ取得

作成した簡易舗装路の断面構造を図-3に示す。舗装路の延長は62mで、起点から17.5mの地点に直径30cmのVP管を埋設した。埋設深度は約2mである。VP管内には発泡スチロールを充てんし、周辺からの土砂の浸入を防ぐとともに、地盤との速度コントラストを増大させた。また表層部の地盤構造を把握するために、起点距離15, 30, 45m地点で静的コーン貫入試験を実施した。さらに30m地点では、サイスミックコーンを用いた速度検層も行なっている。

起点距離30m地点での静的コーン貫入試験およびサイスミックコーン検層プロフィールを図-4に示す。深さ2m付近までは盛土で、その下位6m付近まではロームおよび粘土層が分布する。5.5m付近に薄い砂層を挟むが、連続性はよくない。6m以深

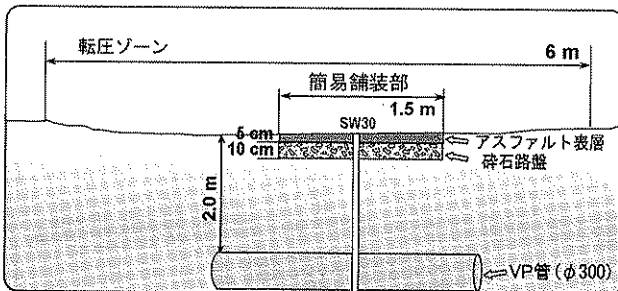


図-3 簡易舗装路の断面構造

約10m付近までは砂層が出現する。表層のS波速度は約95m/s、5.5m以深の砂層では約205m/sと見積もられた。

図-5は、表面状態、探査ツールによって波形記録がどのように異なるかを比較したものである。舗装路脇の地面で取得した波形記録では、明らかに従来のスパイク型地震計の記録のほうが高品質である。ランドストリーマーツールの記録には、波形の乱れが認められ、センサの設置状態が不良であることを示している。一方舗装上でのランドストリーマーによる波形記録は、全体的に波群が整列しており、非固定型のセンサ設置でも、高品質の波形記録を取得できることが検証された。特徴的であるのは、地面上で取得した波形記録と、舗装上で取得したその様相が明らかに異なっていることである。地面上での取得波形には、大振幅の直接波および屈折波が卓越しているのに対し、ランドストリーマーを用いて舗装上で取得した波形には、それらは明瞭ではなく、逆に地盤構造把握に有用な情報である反射波群が多く認められる。

他地域での実験結果でも同様の結果が得られ、厚

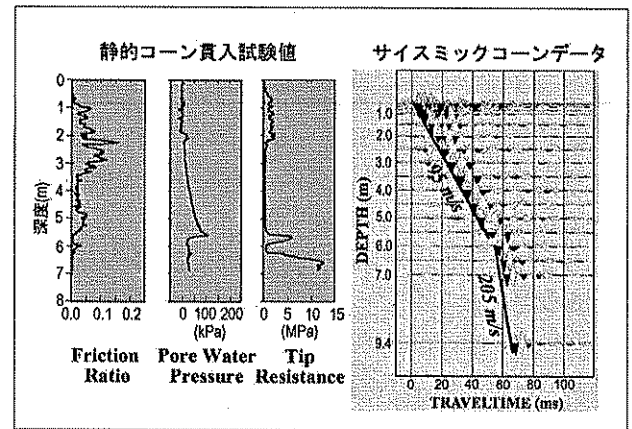


図-4 静的コーンおよびサイスミックコーンプロフィール(30m地点;文献2)を改変

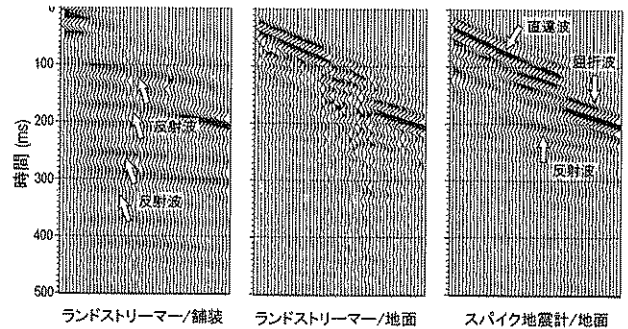


図-5 簡易舗装路での取得波形比較 (文献2)に加筆

さ数 cm 程度のアスファルト表層だけでも、記録波形の品質が大幅に改善され、地盤構造探査に有利に働くことが明らかになった。これは理論的には最表層部の高速度層の効果で説明することができる。表面に薄い高速度層が存在すると、表面波が卓越せず、また直接波の振幅も小さくなるからである。

ところで波線理論によれば、高速度層が存在するとその下面で逆屈折が生じ、反射波の走時が上側にシフトするとともに、傾斜する構造が再構成できなく

なることが想定される^{3), 4)}。これは、舗装域では反射波を利用した地盤構造探査が不可能であるか、あるいは不正確な情報をもたらすことを意味する。実際にこのような現象が発生しているのかをモデル舗装路を用いて検証した。

モデル舗装路の中央部（起点距離 30m）地点で地盤内にサイスミックコーンを挿入し、路面上で振源位置を移動させながら片走時データを取得するウォークアウェイ測定を実施した（図-6）。通常の波線理論によると、振源波形は高速度のアスファルト表層内を伝播し、4m 付近で逆屈折する（図左側、破線）。一方右側の実線は、アスファルト表層による屈折現象を無視した場合の波線である。両者の理論走時を計算し、実際の観測走時と比較してみた（図-7）。観測走時は、表層内での屈折が生じない場合の理論走時とほぼ一致しており、このような波長に比べてきわめて薄い高速度層の場合は、波線理論の適用には限界があること、すなわち舗装域においても反射波を利用した地盤構造調査が可能であることが検証された。

図-8 は、20cm 間隔の S 波ランドストリーマー探査ツールを用いて取得したデータを処理して作成した、モデル舗装路の反射深度断面である。同図には 3 地点で実施した静的コーン貫入試験結果（貫入抵抗値）および VSP 検層断面を合わせて示してある。図中、横方向につながる線状模様（イベント）が速度層境界を表しているが、それらは貫入試験結果、検層結果と調和的であり、地層境界とよく対応していることがわかる。たとえば断面中央部で顕著な深さ 2m 付近のイベントは、盛土層と原地盤との境界に対応している。4m 付近のそれは、ローム層と下

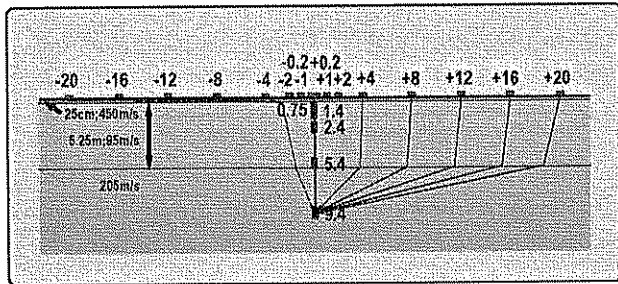


図-6 簡易舗装路でのウォークアウェイ測定および理論波線（文献2）に加筆

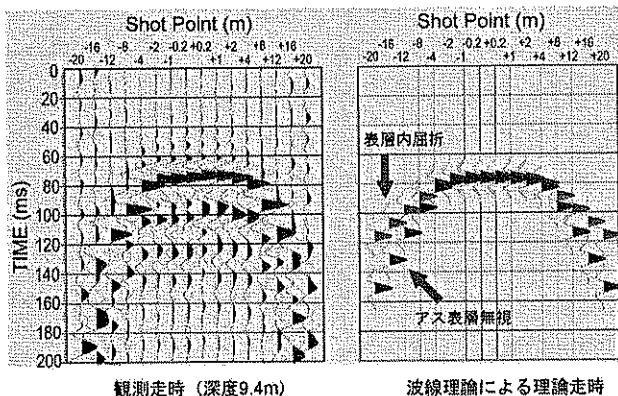


図-7 観測走時と理論走時との比較（文献2）に加筆

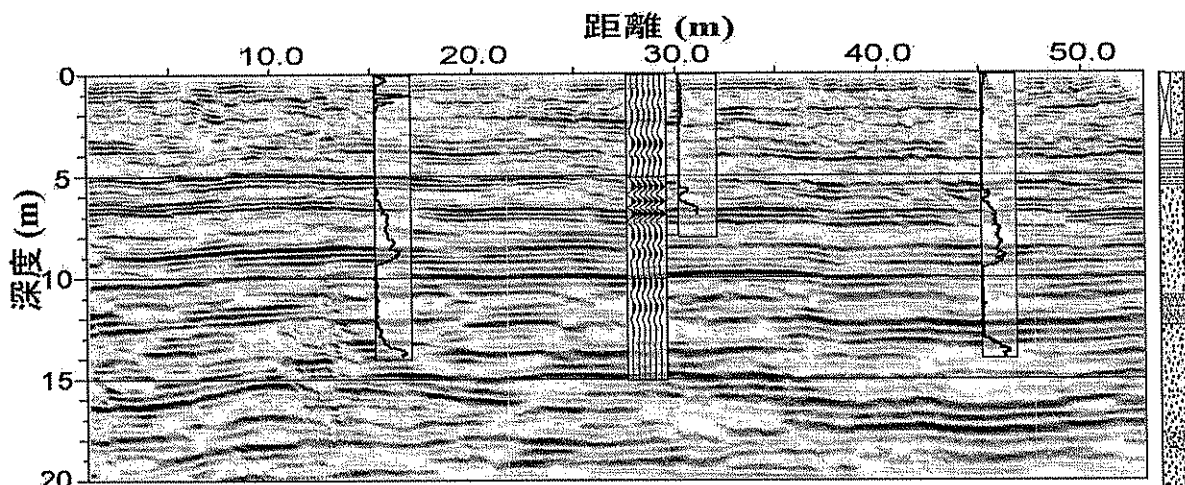


図-8 小間隔ランドストリーマーツールによるモデル舗装路下の反射深度断面（文献2）に加筆

位の粘性土層境界に、また5mおよび6.5m付近のイベントは各々砂挟み層と下部砂層の上面に対比される。さらに10mおよび12. m付近には高有機質土の上下境界が認められる。

同図で特徴的であるのは、測線長が50m程度に関わらず、区間内での変動が大きいことである。これは、地盤構造が一様ではないことを意味する。従来のボーリング調査では、稠密群列調査でも間隔は30m程度であり、その間の局所的な地盤構造の変動を把握することはできなかった。また一般的な弾性波探査でも、水平方向の空間分解能は2.5mないし5m程度であり、それより小さな変動を検出することができなかった。それに対しS波ランドストリーマー探査では、測定間隔を小さくすることで空間分解能を10cm程度まで高めることができる。これにより、旧来の方法では見出されなかった局所的な地盤構造変化がイメージングされているものと解釈することが可能である。

なお図-8に関わる現場計測は、4人で2時間程度であった。また解析処理はPC上で専用の処理ソフトウェアを使用した。再処理も含め、要した日数は2日程度であった。

2.2 堤防内部構造探査への展開

河川堤防の管理区間延長は1万kmを超えており、その改修、維持管理を効率的に進めることが重要な課題となっている。旧河道部や樋管・樋門等の人工工作物横断部は、特に損傷や変状を受けやすい箇所であることが経験的に知られている。しかし河川改修の歴史は古く、全ての横断工作物が把握されている

わけではない。また旧河道についても、従来の空中写真判読や地形解析では検出することができないような埋没谷地形が沖積平野部には多く存在することが知られている。旧河道部に多段状に埋没谷が形成されている場合もある。数100m間隔のボーリング調査では、このような地域的、局所的な地盤構造変化を把握することが困難であり、連続的なプロファイリングが可能な探査手法の開発が期待されてきた。そこで、いくつかの探査手法を実際の堤防上で適用し、このような条件に合致するかどうかについて検討を加えた。

堤防内部探査は共同研究の一環として参加機関・各調査会社との共同計測実験として実施した。実施箇所は淀川水系桂川左岸約1.8kmの淀樋門付近、および利根川水系小貝川左岸約34.3kmに位置する豊里樋門付近の2箇所である。両箇所とも堤防上面は簡易舗装されている。

現地において適用した探査手法を表-1に示す。適用した手法は基本的に高い作業効率が期待できるランドストリーマー型あるいは牽引型のツールを使用するもので、舗装上でも実施することができる。

図-9は、小間隔ランドストリーマーツールを使用して得られた淀樋門付近の堤防の高分解能S波反射

表-1 堤防内部構造調査適用探査手法

探査手法	作業性	分解能	可探深度
キャパシタ電極牽引型電気探査	20	5m	10m
ランドストリーマー型表面波探査	1	2m	20m
ランドストリーマー型S波反射法探査	0.5	40cm	40m
固着型加速度反射法探査	0.2	20cm	20m

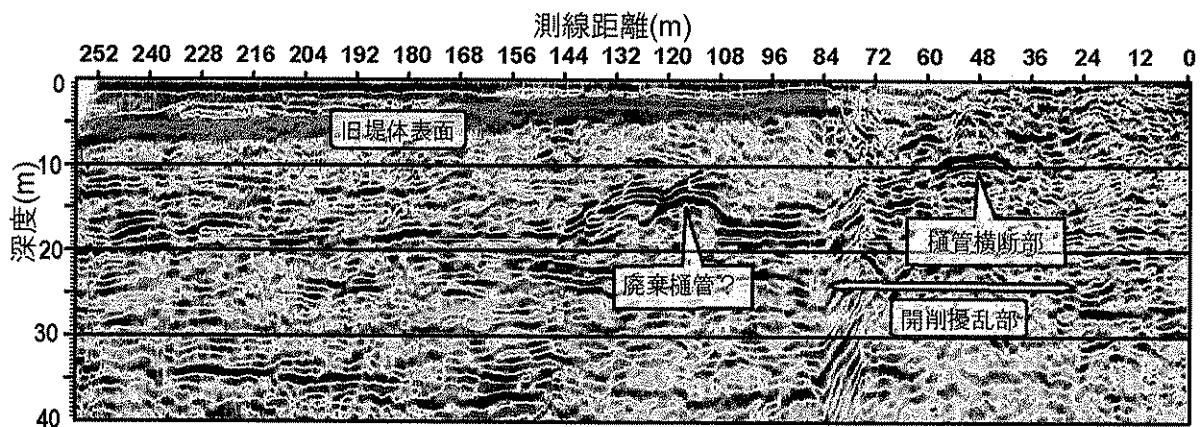


図-9 小間隔ランドストリーマーツールによる河川堤防の反射深度断面 (文献5)に加筆

($V/H=2$)

法探査断面である。測線距離 50m 付近には、同樋管上面からの反射が明瞭にイメージングされている。出現深度は約 9.2m であり、測線を設定した堤防上面からの樋管上面深度に合致している。特徴的であるのは、樋管通過部の両側 30m 付近で反射波が著しく乱れていることである。これは開削による擾乱であると解釈することができる。また断面左側（下流側）には、深さ 2~5m に旧堤防表面に比定される、下流側に緩く傾斜した反射面が認められる。

ところで測線距離 120m には既設樋管横断部と同様なイベントが認められる。このような上に凸型のイベントは、地下レーダー探査でもよく出現する。空洞あるいは地下埋設物に起因する特徴的な回折波パターンである。しかし当該地点には堤防を横断する構造物は知られていない。出現深度はやや深い、古い樋管の可能性もある。小貝川豊里樋門付近での探査結果でも同様な回折波パターンが、既設樋管以外の地点から見出されている⁶⁾。

これらの適用結果から、ランドストリーマー型 S 波反射法探査によって河川堤防の詳細な内部構造を把握することが可能であること、特に埋設物等の局所異常構造（アノマリ）の検出に有効であることが示された。なお深さ 10m 前後の異常体の検出は、地下レーダー探査などの既往の探査手法では困難とされていたものである。

探査手法の展開にあたっては、作業性、分解能、探査深度、対費用効果等についても検討を加える必要がある。今回試験適用した 5 種類の探査手法についての概略的な実績を表-1 に示した。現地作業性に最も優れているのはキャパシタ電極牽引型の電気探査であり、1 日あたり約 20km をカバーすることができる。一方ランドストリーマー型 S 波反射法探査のそれは約 0.5km である。しかし作業性は分解能とトレードオフの関係にある。局所的な異常を検出するには、分解能は 1m 以下を必要とする。実際の調査に際しては、調査段階・目的に応じてこれらの探査手法を組み合わせることで適用することが効果的であろう。

2.3 地下空洞探査への展開

地下浅所に人工的に掘削された空洞が、長年の間に劣化し、あるいは自然的加速要因によって拡大して地表部にまで達し、地表陥没事故を引き起こすことがある。戦時中に各地で掘られた地下壕や、1900 年代初頭から 1960 年頃までに稼行して

いた亜炭鉱の採掘空洞などがその典型である。そしてこの両者に共通しているのが、掘削関係資料がほとんど残されていないため空洞の分布位置が不明であるということである。

地下空洞の調査法としては、ボーリングは効果的ではない。路面下空洞探査に多用されている地下レーダー探査手法も、空洞の分布深度が探査限界深度下にある場合がほとんどであるため有効とはいえない。重力探査や微動探査などの物理探査手法も、分解能の点で問題があった。一方本研究で検討してきた小間隔ランドストリーマー型反射法探査手法は、高分解能で探査深度も 20m 程度以上あるため、空洞探査への適用が期待された。そこで、当該探査手法を実際に空洞が分布すると推定されている地域で適用し、最適なツール仕様及び探査条件を明らかにすることを目的とした現地計測実験を実施した。

本空洞探査は共同研究の一環として参加機関・各調査会社との共同計測実験として実施した。実施箇所は亜炭採掘跡空洞が広く分布していることが事前調査で確認されていた名古屋市守山区中志段味地区、および防空壕が多数残存し、その劣化が問題となっていた鹿児島県鹿屋市の 2 箇所である。両箇所とも地下空洞が推定されていた地区の舗装道路上に数本の測線を設定して探査を実施した。

現地において採用した探査ツールおよび補足的に適用した探査手法を表-2 に示す。ランドストリーマー型 S 波反射法探査については受振点・発振点間隔の異なる 2 パターンの探査条件を検討した。加速度センサアレイ型ツールについては、固着方式およびランドストリーマー型の 2 方式を実施し、作業効率・データ品質等を比較検討した。また名古屋市中志段味地区での計測では、比較データ取得を目的としてランドストリーマー型表面波探査、連続波型レーダー探査を試験的に適用している。

表-2 空洞探査適用探査手法および探査条件

探査ツール/手法	CH 数	受振間隔	発振間隔
S 波ランドストリーマー-30	48	30cm	60cm
S 波ランドストリーマー-20	48	20cm	40cm
加速度ランドストリーマー	48	20cm	20/40cm
固着型加速度アレイ	48	20cm	20cm
表面波ランドストリーマー	24	2m	4m
連続波型レーダー	1	25cm	25cm

図-10は、2種類の小間隔ランドストリーマーを使用して得られた名古屋市中志段味地区A測線の反射法探査断面である。同図上が加速度型ランドストリーマーツールによるもの、下は30cm間隔のS波ランドストリーマーツールの断面である。下図には標高40m付近に、起伏しながら断面右側に向かって緩く傾斜する反射面が認められる。周辺でのボーリングデータから、この反射面は採掘対象亜炭層に対比することができる。特徴的なのは、この反射面が一部で上に凸の形状を示していることである。特に明瞭な部分に矢印でマーキングしたが、上図でもほぼ対応する位置にアノマリを見出すことができる。上図では亜炭層層準に対比される反射イベントは不明瞭であるが、逆に回折波アノマリは鮮明である。このアノマリは、その出現位置が亜炭層層準とほぼ一致することから、亜炭層採掘空洞等の局所的異常体と解釈することができる。しかし一部では亜炭層層準より上位の、より地表に近い部分にアノマリを見出すことができる。これらは亜炭層採掘空洞そのものではなく、それから浅所に向かって進展してきている内部崩落空洞を示す可能性が高い。

鹿児島県鹿屋市での地下壕探査においても、小間隔ランドストリーマーを使用した探査によって、既知及び未確認の地下壕に対応するアノマリを検出することができた。これらの適用結果は、ランドストリーマーを用いる反射法探査が、地下空洞などの局所的異常の検出にも有効であることを示している。

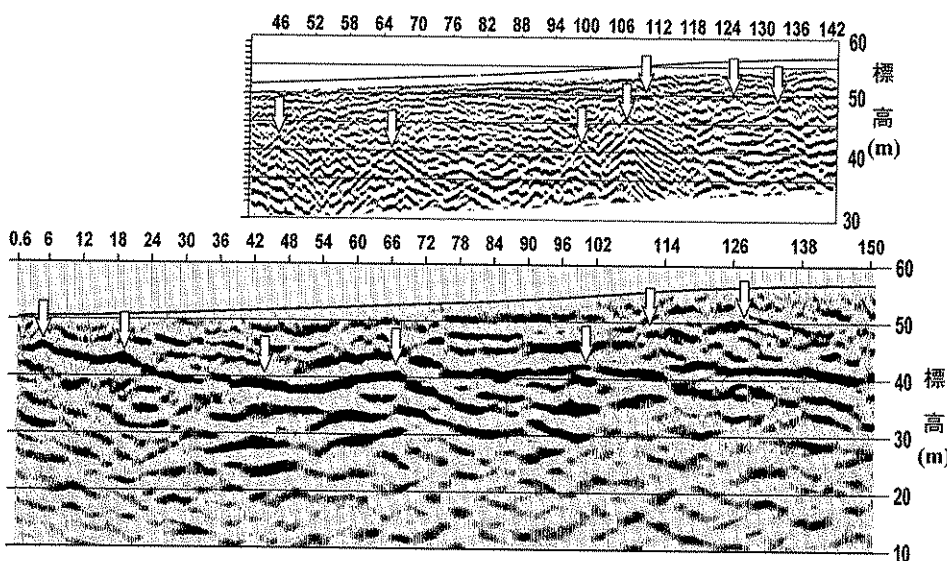


図-10 小間隔ランドストリーマーツールによる空洞探査適用事例 (文献7)を改変
(中志段味A測線, 上:加速度ランドストリーマー;下:S波ランドストリーマー)

4. まとめ

都市域のように表面が舗装で覆われ、かつ雑音の大きな地域においても、表層部の地盤構造を詳細に把握することができる探査技術を開発した。ランドストリーマーという土木研究所で独自に開発したツールを使用するこの技術は、堤防の内部構造調査や、亜炭採掘空洞や地下壕などの空洞検出にも適用できることが検証された。

参考文献

- 1) 稲崎 富士(1998):「断層調査法の開発」,大都市域における地震防災技術の開発 土木部会 研究報告書,平成8年度版,68-77,建設省土木研究所.
- 2) 稲崎 富士(2001):「極浅層反射法探査における表面構造の影響の実験的検討」,物理探査学会第105回学術講演会講演論文集,24-27.
- 3) 稲崎 富士(1999):「高分解能S波反射法探査とサイスミックCPTによる埋没活断層の表層構造調査」,物理探査学会第100回学術講演会講演論文集,360-363.
- 4) 加野直巳(2000):「高速度表層の反射法探査に与える制限」,物理探査学会第103回学術講演会講演論文集,1-4.
- 5) 林 宏一,田澤 教,松林 弘智,稲崎 富士(2002):「河川堤防調査におけるS波ランドストリーマー反射法地震探査および表面波探査の適用例」,物理探査学会第107回学術講演会講演論文集,75-78.
- 6) 稲崎 富士(2002):「堤体内部構造調査へのS波ランドストリーマー探査技術の利用」,物理探査学会第106回学術講演会講演論文集,55-58.
- 7) 稲崎 富士,田澤 教,河村 茂樹,加野 直巳,鈴木 敬一,林 宏一,伊東 俊一郎,小熊 健一(2003):「統合物理探査による亜炭層空洞調査」,物理探査学会第109回学術講演会講演論文集,76-79.