

トンネル坑内および地表からの 弾性波反射法を用いた切羽前方探査

Geological prediction ahead of tunnel face using the Shallow Seismic Reflection survey for Tunnel (SSRT) from the tunnel and the ground surface

加藤卓朗¹⁾・村山秀幸²⁾・清水信之³⁾・岡村浩孝⁴⁾・望月斎也⁵⁾

Takuro KATO, Hideyuki MURAYAMA, Nobuyuki SHIMIZU, Hiroataka OKAMURA and Tokiya MOCHIZUKI

Recently, Tunnel Seismic Prediction (TSP) and in-tunnel Horizontal Seismic Profiling (HSP) have been applied to the geological prediction ahead of the tunnel face at several tunnel construction sites. However, since these methods require the use of explosives, and it is not easy to apply the shallow overburden condition. We developed the Shallow Seismic Reflection survey for Tunnel (SSRT) to look ahead of the tunnel face using hydraulic impactor, and verified the validity of this method through field experiments.

This paper describes the following. We apply the SSRT to the shallow overburden tunnel at Hiroshima City using the several measurement conditions from the tunnel and the ground surface. And, we approach to estimate the geological condition ahead of the tunnel face using the several seismic analyses.

Key Word: Tunnel, Prediction ahead of tunnel face, Seismic reflection method, Hydraulic impactor, Shallow Overburden, Active Fault

1. はじめに

トンネル工事においては、事前調査として地表からのボーリング調査や弾性波屈折法が実施され、これらの調査結果はトンネル設計における地山分類の重要な評価基準となっている。しかしながら、トンネル施工段階においては事前調査の結果から予測された地山状況と大きく異なる地質状況に遭遇することが少なくない。これらは地質条件の複雑さや探査手法の原理的限界などに起因していると考えられる。そこで、トンネル工事を安全かつ経済的に進めるために、トンネル施工時の切羽前方探査としてTSP、HSPが開発され、多くの現場で適用されている^{1),2)}。これらの探査法は通常発破を起振源とするため、自由断面掘削機やTBMなど発破使用許可申請を実施していないトンネル現場においては別途申請が必要となる。よって、発破を用いない弾性波反射法による探査の方が適用トンネルに制限が少なく汎用性が高いと考えられる。このような背景から、筆者らは非爆薬振源が利用可能なトンネル浅層反射法探査（以下SSRT (Shallow Seismic Reflection survey for Tunnel) と称す）³⁾を開発し、現場での適用を実施している。

本手法は、弾性波反射法による切羽前方の地質予測手法であり、大きな特長としては、①起振源として非爆薬振源を利用可能である、②多起振点・多受振点で測定を実施する、③複数の解析方法を用いて総合的に

1) 正会員 修士(工学) 株式会社フジタ 技術センター土木研究部

2) 正会員 博士(工学) 株式会社フジタ 技術センター土木研究部

3) 理学博士 株式会社地球科学総合研究所

4) 広島高速道路公社

5) 株式会社フジタ 広島支店 フジタ・奥村・伏光建設共同企業体

評価するなどが挙げられる。また、本手法は通常のトンネル坑内での測定に加え、地表からの測定も可能であるため、トンネル坑内からの鉛直構造解析、地表からの水平構造解析、トンネル坑内ー地表間の弾性波トモグラフィ解析などを同時に実施し、地山を総合的に評価することにより、確度の高い探査が可能となると考えられる。

本稿では、低土被りで活断層の存在が予測される区間でトンネル坑内および地表からSSRTを実施し、①SSRTの低土被り区間での適用性、②地表からの浅層反射法探査の有効性、③トンネル坑内ー地表における弾性波トモグラフィの測定・解析による総合的な地山評価について述べる。

2. 適用トンネルと探査目的

切羽前方探査は広島市内に位置する広島高速4号線トンネル第2工区で実施された。トンネル地質は花崗岩類であり、風化深度が非常に深くマサ化が地山深部まで及んでおり、事前調査として実施された弾性波屈折法探査によると、断層破碎帯と推定される低速度帯($V_p=1.9\sim 3.4\text{km/s}$)が数ヶ所把握されていた。特に今回の探査対象である己斐上地区では己斐断層が発達していることが明らかにされており⁹⁾、ボーリング調査、物理探査、水文調査などから断層活動に伴う地山の脆弱化が課題となっていた。よって断層の発達に伴う破碎・脆弱部の性状と分布を事前に把握するため、切羽前方探査の実施が望まれたが、己斐断層付近は土被りが約40mと浅く、TSPでは低土被りの場合、探査深度が小さくなることから⁹⁾、精度よい探査が難しい状況であった。以上より、SSRTをトンネル坑内および地表から様々な手法によって実施し、精度よく切羽前方予測を実施することとした。

3. 探査実施方法

今回の探査では、①トンネル坑内測定による鉛直構造探査、②地表測定による水平構造探査、③トンネル坑内ー地表測定による弾性波トモグラフィを同時に実施し、総合的な地山評価を試みた。図-1にSSRTの実施手法の概念図を示し、以下にそれぞれの探査方法について述べる。

3.1 トンネル坑内測定による鉛直構造探査

今回の探査では、起振源として油圧インパクトと発破の2種類を使用した。油圧インパクトは、図-2に示すように重錘落下起振源であり、都市部における活断層探査などに利用されている⁹⁾。測線配置を図-3に示す。油圧インパクトの起振点は受振測線に平行に約1m離れた位置とし、6.0m間隔で21点配置した。なお、油圧インパクト起振はノイズの低減と探査深度を深くする目的で、同一箇所につき数回打撃するスタッキングを行った。発破孔は右側坑壁に1.5m間隔で24孔配置した。発破には含水爆薬を用い、1孔あたりの装薬量を100gとした。受振器は、トンネル軸方向に100Hz上下動1成分受振器を1.5m間隔で40点、切羽側トンネル横断方向に10Hzの3成分受振器を10点設置した。データ取得はトンネル坑内に配置した観測車内の探鉱機G・DAPS-4を使用し、サンプル間隔1.0ms、記録長1secとした。解析は、CMP重合法により探査測線直下の大局的な構造を把握し、VSPを応用した処理により切羽前方と後方の鉛直構造を把握した。

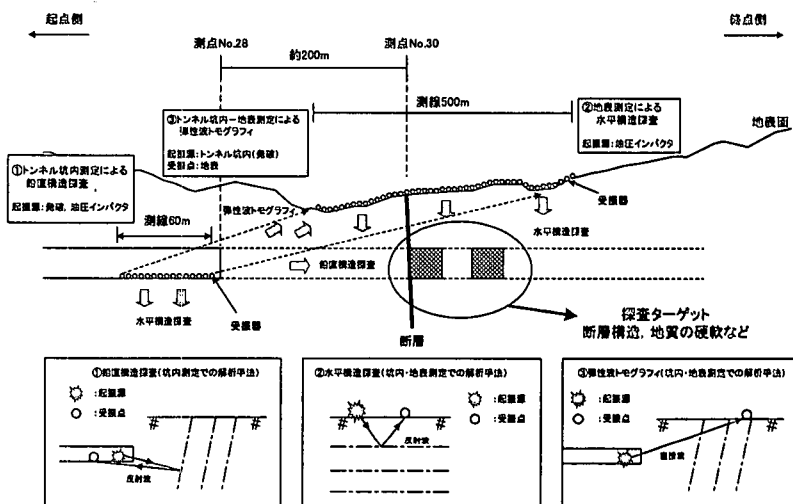


図-1 SSRTの実施手法概念図



図-2 油圧インパクトによる起振状況

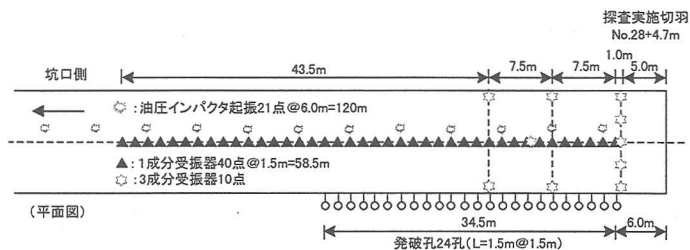


図-3 測線配置図

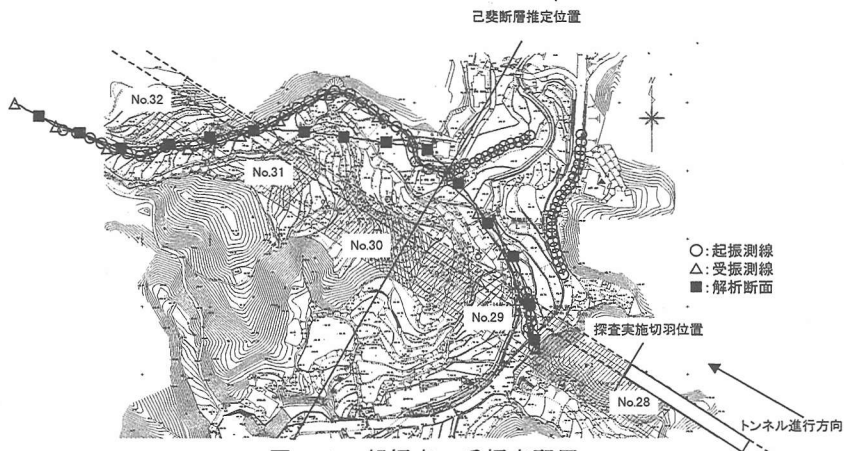


図-4 起振点・受振点配置

3.2 地表測定による水平構造探索

起振点・受振点配置を図-4に示す。起振点・受振点はトンネル直上であることが最適であるが、地表での土地利用状況を考慮して、農道や一般道および休耕地を利用することとした。受振点は、100Hz上下動1成分受振器を使用し、已斐断層の推定位置を挟むように5m間隔で100点設置した。起振源は油圧インパクトを用い、起振点は受振点近傍に10m間隔で配置した。ただし、一部油圧インパクトが進入できない受振測線部分に関しては、なるべく近傍の起振可能な箇所にて5m間隔で起振した。記録装置はトンネル坑内で使用したものと同様である。解析はCMP重合法により実施した。

3.3 トンネル坑内ー地表測定による

弾性波トモグラフィ

起振源はトンネル坑内における発破とし、起振点は切羽近傍に6m間隔で10孔配置した。受振器は地表測定の100点を利用し、有線で記録装置に接続した。受振器のトンネル路線上での投影位置は切羽前方約100～500mとなる。弾性波探査では起振信号を正確に記録することが重要であるが、今回のようにトンネル坑内と地表では距離がかなり離れており、通常的手法ではデータの取得が困難である。このため今回は図-5に示すように発破制御装置を用い、着火信号を発破地点に無線および有

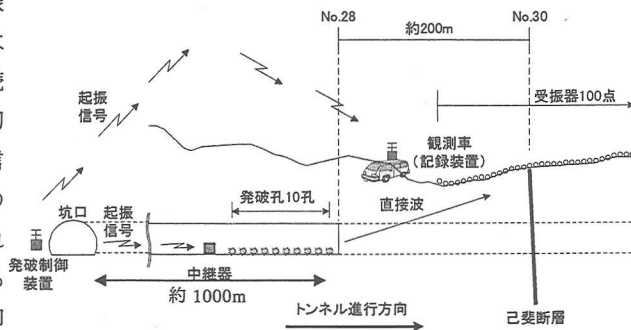


図-5 弾性波トモグラフィ測定模式図

線により送信すると同時に、起振信号を記録装置へ無線により送信する手法を採用した。発破制御装置は、記録装置と無線により良好に送受信でき、また可能な限り発破地点に近い位置まで無線により送受信できる地点となる坑口部に配置した。

4. 探査結果と掘削実績との比較

4.1 トンネル坑内測定による鉛直構造解析結果

本手法では反射面の分布状況により評価を実施し、「反射面が多い区間」を著しい地山変化、すなわち破碎帯と考え施工上課題となる区間と想定し、「反射面が少ない区間」は岩質が一様で安定した区間と想定した。図-6、図-7にそれぞれの起振源における探査結果を示す。なお、いずれも測定された平均的弾性波速度は $V_p=4.0\text{km/s}$ であり、この値を用いて切羽前方距離に換算した。探査限界は油圧インパクト起振が切羽前方約200m、発破起振が約400mである。この探査限界とはノイズの影響で明瞭な反射面が確認できなくなる位置に相当する。

油圧インパクト起振による探査結果は、No.28+5～No.28+95mとNo.29+55～No.30+5mを反射面が多い区間と評価した。このうち、No.28+40～95mに反射強度の強い反射面が4本検出された。また、事前調査結果を考慮して、反射面が多い区間と少ない区間の境界であるNo.30+5mを己斐断層本体に相当すると予測した。

発破起振による探査結果はNo.28+5～35m、No.29+5～No.30+15mを反射面が多い区間と評価した。このうちNo.29+80mとNo.30+5mに反射強度の強い反射面が検出され、No.30+5m付近の強反射面が己斐断層本体に相当すると予測した。

以上のように起振源の違いにより、探査限界、反射面分布に違いがみられた。探査限界は衝撃エネルギーの大きい発破のほうがより深く探査可能であるといえる。一方、今回の結果では起振源の違いにより反射面分布状況に違いがみられるが、これまでの測定実績から油圧インパクト起振は切羽近傍側の情報を精度よく測定でき、発破起振は探査深度の深い領域まで測定できると考えている³⁾。このような起振源による違いは起振源と地山の周波数特性に起因すると考えられ、今後はそれぞれの起振源ごとの適切なデータ処理手法などを検討していく必要があると考えられる。

4.2 地表測定による水平構造解析結果

解析結果を図-8に示す。横軸は測点、縦軸は反射波が往復するのに要する時間である。平均的地山弾性波速度を $V_p=4.0\text{km/s}$ とすると0.1(sec)で深度200mに相当する。本地域の概略の水平構造として、深度100m前後に顕著な反射面が2本みられる。この2つの反射面に注目すると、図中の①～⑤に示すように不連続な

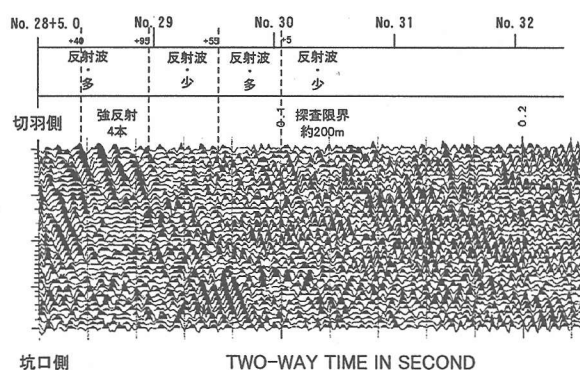


図-6 トンネル坑内探査結果（油圧インパクト起振）

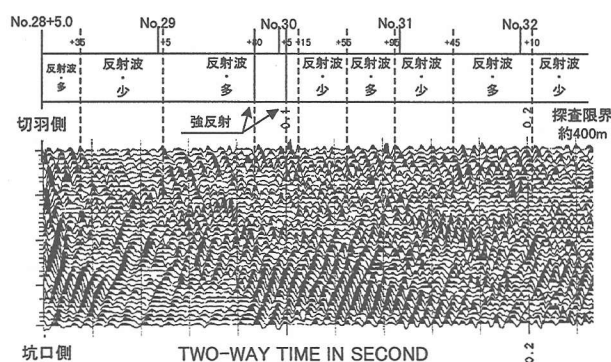


図-7 トンネル坑内探査結果（発破起振）

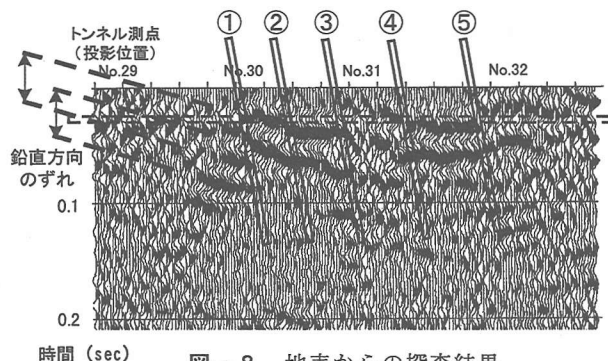


図-8 地表からの探査結果

面がみられる。この鉛直方向のずれは、断層構造を表していると考えられ、そのうち最大の規模のものが①であり、これは事前調査で推定されている己斐断層の位置にほぼ一致する。その他にも②～⑤において①ほど大きくないものの不連続面がみられ、これらは己斐断層から派生する副断層を捉えていると考えられる。

また、図-9に異なる2箇所での起振位置における取得波形を示す。(a)は己斐断層の西側で起振した記録であるが、東側に伝播する初動が不明瞭になっている。一方、(b)は己斐断層の東側にて起振した記録であるが、P波初動は最も西側まで到達していることが分かる。このことから、断層の西側からはエネルギーが透過し難い地質構造になっていることが推定され、断層を挟んで両側のインピーダンスが西側に比べて東側で高くなっていると考えられる。

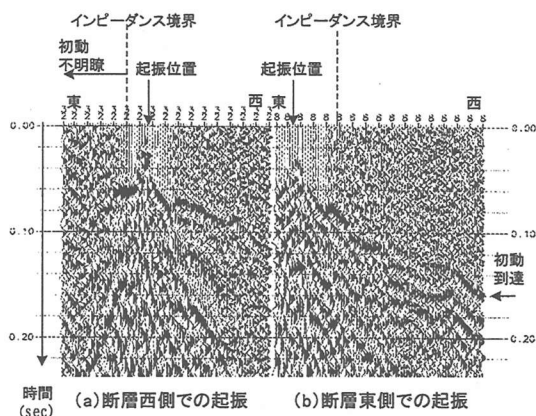


図-9 起振位置による取得波形の相違

4.3 トンネル坑内-地表測定による弾性波トモグラフィ解析結果

トンネル坑内10点の発破起振について地表に設置した100個の受振点の初動を読み取り、トモグラフィ解析により地山の弾性波速度を計算した。トモグラフィ解析にあたっては、地盤内を小さなセル(縦2.5m×横5m)に分割し、セル内の速度は一定と仮定し、波動の伝播に要する時間は波線理論に基づいて計算し、走時の計算誤差が充分小さくなるまで繰返し計算した。解析結果を図-10に示す。なお、ここで示した受振点の位置とは屈曲した測線をトンネル軸に平行な面上に投影した位置である。

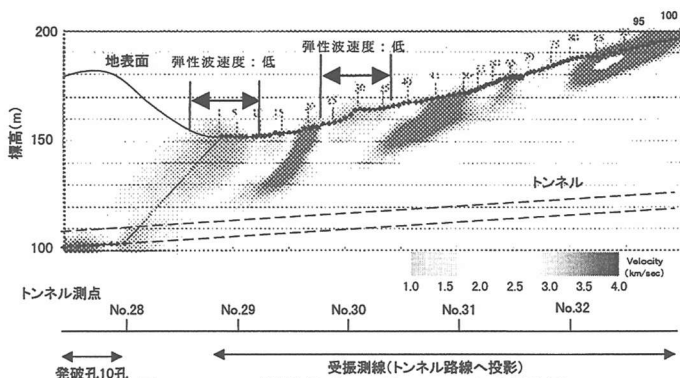


図-10 弾性波トモグラフィ解析結果

図中の矢印の区間が弾性波速度の低い箇所であると推定することができ、トンネル天端上部の弾性波速度構造を把握することができた。今回の結果から測定配置や既知の弾性波速度の利用などを適切に行なうことにより、本手法は弾性波速度分布を推定するのに有効な手法になりうることが示された。

4.4 総合評価

図-11に事前調査結果、探査結果、切羽観察結果及び水抜き対策工として実施した水平ボーリング結果などを総合的に示す。前方探査結果としては切羽前方約150m以浅を油圧インパクト起振、それ以深を発破起振の探査結果を採用した。図に示した4つの「反射面が多い区間」についてみると、切羽からNo.28+95においては、No.28+40～75mに抽出された強反射面が掘削実績における鉛直系弱層(粘土層)の位置におおむね一致する。次にNo.29+55～No.30+15mは己斐断層が存在すると想定されている区間である。活断層調査や斜めボーリングなどの結果から己斐断層のトンネル路線上の出現位置はNo.29+97付近と推定されていたが、実際の切羽では、No.29+87m付近で連続性の高い幅10cm程度の粘土脈が出現し、己斐断層であると推定され、断層通過後約30mで次第に岩盤強度が増加した。このことからNo.29+55～No.30+15mは己斐断層付近の著しく脆弱化した区間を捉えたと考えられる。また、No.30+55～95mは水平ボーリングにおける軟質部、切羽評価点におけるNo.30+60m付近の不良部などに相当すると考えられ、No.31+50m以降は掘削実績における2ヶ所の鉛直系弱層(粘土層)を捉えたと考えられる。以上のように出現位置は数m～十数m異なっていたものの、反射面分布状況と掘削実績はおおむね一致しており、本手法は低土被り区間においても充分適用可

能であるといえる。

地表における探査からは、No.29+30～40m付近に高インピーダンスと低インピーダンスの境界が推定され、これは掘削実績より評価した風化変質程度のNo.29+40m付近の風化・強風化区間の境界を捉えたものだと考えられる。また、探査結果における反射面の不連続面①～⑤は掘削実績にお

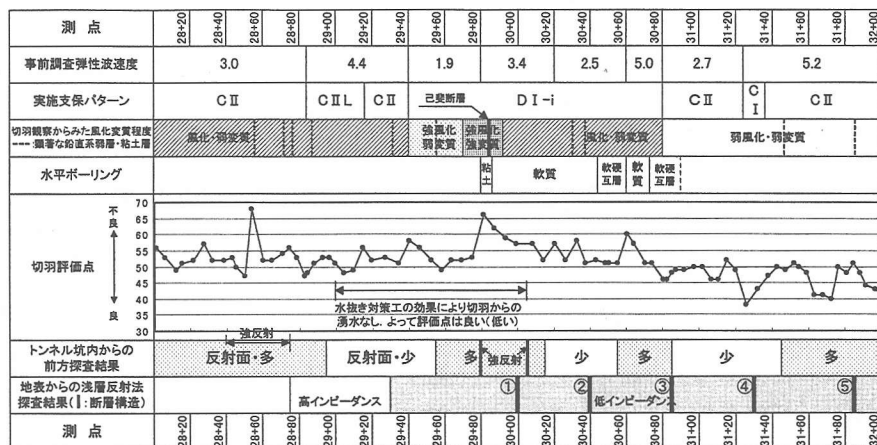


図-1.1 探査結果と掘削実績との比較

ける己斐断層本体、風化変質の程度および鉛直系の弱層（粘土層）などを捉えたと考えられる。ただし①の不連続面を己斐断層本体と考えると、実際にトンネルに出現した位置と約15m異なっている。不連続面の位置の想定は地表からの水平構造探査の深度100m前後における反射面の構造的なずれから想定しており、トンネル路線のような浅部では、断層の方向性が深部とは多少異なっていたと考えられる。

以上のように、トンネル坑内と地表と2つの方向から切羽前方を総合的に評価することにより、より詳細に地山性状を評価できたと考えられる。

5. おわりに

本稿では、トンネル浅層反射法探査（SSRT）をトンネル坑内と地表から実施することで総合的に切羽前方を評価する手法を提案し、トンネル切羽前方が低土被りで活断層が発達する現場にて検証した。その結果、坑内からの探査結果は掘削実績とおおむね一致し、本手法は低土被り区間でも適用可能であることが示された。また、地表からの探査結果からも断層に伴う地質構造を捕らえることができ、弾性波トモグラフィにおいても弾性波速度構造を推定できたことから、これらの手法を組み合わせることによって切羽前方を予測することが有効であると示唆された。

今後は各手法において、測定方法の改良、解析・評価方法の検討を実施し探査精度の向上を図るとともに、地山条件を考慮した各手法の最適組合せに関して検討を進める予定である。

【参考文献】

- 1) ジェオフロンテ研究会新技術相互活用分科会前方探査WG：トンネル切羽前方探査技術技術資料，pp.18-46，1997。
- 2) 稲崎富士，倉橋稔幸，飯酒孟久夫，河村茂樹，林久夫：TBM施工トンネルにおけるHSPの連続的適用，トンネル切羽前方探査に関するシンポジウム・講演会，土木学会関西支部，pp.69-74，2000。
- 3) 加藤卓朗，柳内俊雄，村山益一，清水信之：油圧インパクトを起振源とする切羽前方弾性波反射法探査の開発と適用，第31回岩盤力学に関するシンポジウム，土木学会，pp.22-28，2001。
- 4) 活断層研究会編：新編日本の活断層・分布と資料 -，東大出版会，1991。
- 5) 越野洋一，山本浩之，笠博義，宇津木慎司，工藤繁樹：土被りが小さい区間においてのTSP法による切羽前方探査の適用性，第31回地盤工学研究発表会，pp.2251-2252，1996。
- 6) 例えば，佐々・芦田・菅野：建設・防災技術者のための物理探査，森北出版株式会社，pp.66-68，1993。