

坑内弾性波反射法における測定・解析手法の再検討

Re-examination on measurement/analysis procedures for “elastic wave reflection shooting”

港 高学¹⁾・上野 光²⁾・太田幸信³⁾・佐野信夫⁴⁾

Takanori MINATO, Hikaru UENO, Yukinobu OHTA, Nobuo SANO

TSP (Tunnel seismic prediction) method with elastic wave remains some problems in such case that analyzed results become much different from the actual geological features depending on soil status and/or measuring situation. Although fundamental researches on precision improvement have been done so far, practical procedures for the improvement are not fixed yet.

The purpose of this report is to examine a technique to improve the precision based on measurement data through TSP method.

Around the tunnel that the measurement was done for, there are border faces with three different strikes, which cross the tunnel with acute angles. The measurements were under two kinds of conditions, and examined/evaluated the precision of measurement by comparing with the actual geological features of the tunnel.

Key Words: TSP, seismic prediction, tunnel, elastic wave, survey geometry

1. はじめに

トンネル施工において、切羽前方の突発的な地質変化を事前に予測し、施工に反映することは必要不可欠であり、特にTBM施工では非常に重要な事項である。切羽前方の地質状況を予測する手法として水平ボーリングなど様々な手法が挙げられるが、近年、切羽前方探査の技術として弾性波反射法を原理とする探査法が提案され実施されている。その中でもTSP (Tunnel Seismic Prediction)法は、測定によって施工を妨げることが少なく、解析も比較的容易に実施できることから適応性が高い手法である。そのため多くのトンネルで本手法による探査が実施され、また研究も進められている。しかしながら現状では、地質状況や測定状況により解析結果と地質実績が大きく食い違う場合もありいくつかの問題点が残されている。これまでに予測精度の向上に関する基礎的な研究が行われているが、予測精度向上手法の確立は遅れているのが現状である。

本報告では、単一の地質から構成されるトンネルを用いて行った結果について報告する。本トンネルでは、3系統の異なる走向の地質変化面が分布し、それらの部はトンネル軸と鋭角に交差する。測定は両側壁に発振孔・受振孔を設置する通常の測線配置による測定に加え同位置で天端および底盤にも受振孔・発振孔を設置して実施し、トンネルの地質実績との対比検討により測定精度について評価検討を実施した。その結果、従来正確なTSP探査が困難であった地質条件下での測定精度の向上が確認された。また得られた結果から、より簡易な手法でトンネル施工に対して適応性の高い測定手法を立案実施し、その有効性を確認した。

- 1) 正会員 (株)エーティック 地質部
- 2) 正会員 飛鳥建設(株) 土木本部 土木設計部 設計第2課
- 3) 正会員 飛鳥建設(株) 飛騨トンネル避難坑工事作業所
- 4) 日本道路公団 名古屋建設局 清見工事事務所 飛騨工事区

2. 測定・解析

対象としたトンネルは、主に中生代白亜紀後期の花崗岩より構成され、新第三紀の塩基性貫入岩類が貫入し、熱水変質作用を伴っている。また近接してENE-WSW走向の跡津川断層とN-S走向の御母衣断層の異なる2系統の垂直性の断層が分布し、これらと同様な走向・傾斜の弱層や亀裂が発達する。

TSPの解析システムでは、対象となる地質変化面の走向がトンネル軸と交差する角度に対する制限と人為的な走向の推定が必要であるという事項があり、そのため対象とする地質変化面の走向が鋭角に交差する場合や地質が複雑で走向の推定が困難な場合、通常のTSP測定の測線配置による測定では解析が困難であり解析精度も低い場合がある。

測定は、TSPシステムを2台使用し、トンネル左右側壁・上下壁へ受振器を設置して同時受振を実施した。測定では図-1に示すように左右側壁部にそれぞれ受振孔各1孔・発振孔各20孔を設定する通常の左右測線配置に加えて、天端・底盤にそれぞれ受振孔各1孔・底盤に発振孔20孔を設置した。なお底盤の受振孔は45°切羽側に傾斜して設置した。天端側の発振は、トンネルへの影響も考慮して、今回の測定では行っていない。

測定は、1測線の発振孔(20孔)の同一発破起振で発生させた弾性波(反射波)を左右・上下の4受振器で同時受振し、3測線分のデータを記録した。起振には瞬発雷管とスラリー爆薬を使用した。

測定時の発振・受振の組み合わせを表-1に示す。左右の受振データは、L-L、L-R、R-L、R-Rの4種であり、これらを用いて地質変化面の傾斜・位置の検出を行った。一方、上下の受振データは、同じく直線上配置のD-U、D-Dの2種で、これらから地質変化面の走向・位置の検出を行った。本測定ではそれらに加えてL-U、L-D、R-U、R-D、D-L、D-Rのような発振孔と受振孔がねじれ位置の配置での測定、解析も実施した。これは異なる発振測線での発振を同一受振点で受振したデータ(例えばL-LとD-L)の相関性検証のために実施した。

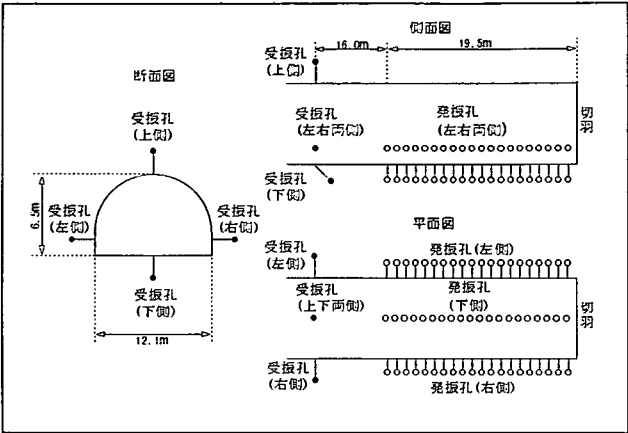


図-1 測線設定

表-1 発振・受振パターン

発振 受振	左側L	右側R	下側D	センサ 指向	結果
左側L	L-L	R-L	D-L	X, Z (トンネル軸, 垂直方向)	傾斜 位置
右側R	L-R	R-R	D-R		
上側U	L-U	R-U	D-U	X, Y (トンネル軸, 水平方向)	走向 位置
下側D	L-D	R-D	D-D		

直線上配置 ねじれ配置

3. 解析結果

表-1に示す発振・受振パターンの測定データの内、左右の受振器での受振データ(L-L、L-R、R-L、R-R、D-L、D-R)および上側の受振器での測定データ(L-U、R-U、D-U)は、受振孔の設置状況が良く良好なデータが得られた。下側の受振器での受振データ(L-D、R-D、D-D)は不良で、受振孔の角度が影響したものと考えられる。図-2に直線上配置及びねじれ配置の解析データと反射面検出結果を示す。

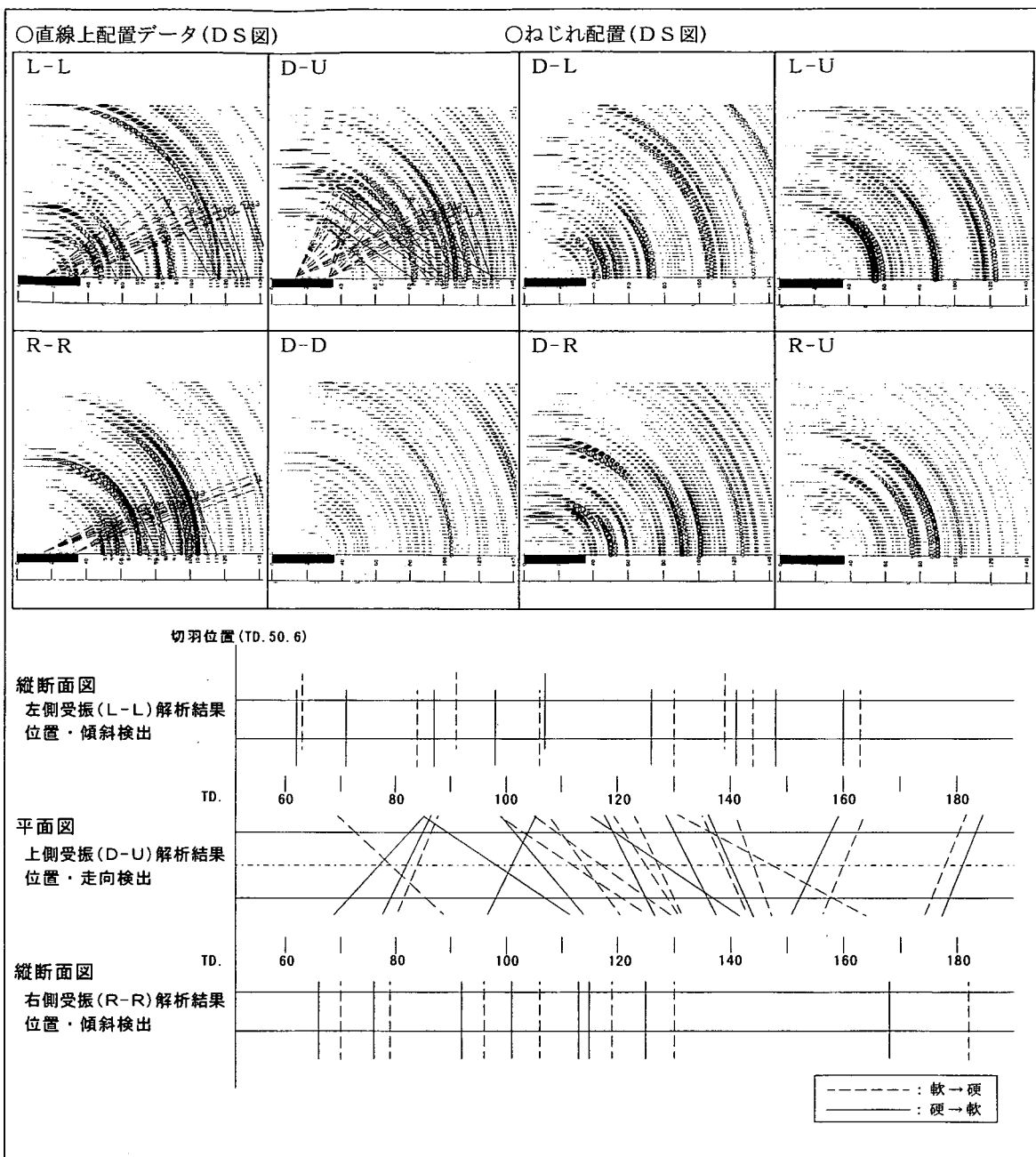


図-2 解析データおよび反射面検出結果

(1) 左右・上下測線データの解析

左右・上下測線の直線上配置のデータは、地質変化面(反射面)検出のための主解析データとした。データの内 L-L, R-Rを左右測線延長上の反射面の出現位置と傾斜角度検出を目的として解析を実施した。L-R, R-Lは、L-L, R-Rのデータに比べやや信頼性が低いため補助データとした。一方、D-D、D-Uは上下測線延長上の地質変化面の出現位置と走向角検出を目的とした解析であるが、D-Dのデータはデータ不良のためD-Uのデータのための解析を実施した。これらの結果から、左右測線と上下測線の各解析で得られた反射面の位置はほぼ一致しており、傾斜・走向ともに推定することが可能であった。

(2) ねじれ配置と直線上配置の解析データ対比

本測定での、左右・上下のねじれ配置のデータの解析は、直線上配置による解析の代用データとしての可否を検討するために実施した。表-2に直線上配置、ねじれ配置の対比表を示す。今回は上側(天端)での発振は実施しなかったためD-Uのデータを用いた。直線上配置における測定において、例えばL-L、L-Rのように同発振系の場合でも、弾性波は球面状に伝播するため反対側のトンネル壁での発振によるデータの解析も可能である。従って、原理的に発振孔と受振孔が直線上に配列されていなくてもデータの解析は可能である。

表-2 対比表

直線上配置	ねじれ配置	検出項目	対比結果
L-L (R-L)	D-L	傾斜・位置	◎
R-R (L-R)	D-R		○
D-D	L-D, R-D	走向・位置	△
D-U	L-U, R-U		◎

◎：全体にほぼ一致 ○：部分的に不一致 △：対比不可能

ねじれ配置と直線上配置で測定された弾性波速度はほぼ同様な値を示し、発振点から受振点までの弾性波の伝達経路はほぼ同一と見なされる。検出された反射面の位置についても、直線上に配置された測線の解析結果との誤差は少なく、相関性が高いことが判明した。また、左右発振上側受振のL-U、R-Uによる走向の推定が可能であった。

ねじれ配置と直線上配置で測定された弾性波速度はほぼ同様な値を示し、発振点から受振点までの弾性波の伝達経路はほぼ同一と見なされる。検出された反射面の位置についても、直線上に配置された測線の解析結果との誤差は少なく、相関性が高いことが判明した。また、左右発振上側受振のL-U、R-Uによる走向の推定が可能であった。

(3) 地質実績との対比検討

解析結果と地質実績を図-3に示す。対比の結果、検出した反射面と実績の地質変化面は必ずしも一致しているとは言えない。予測誤差が大きくなった理由として、測線上の地質状態に比べ切羽前方の状態が良好であり、推定した弾性波速度と実際の弾性波速度の差が大きくなったことと、本測定区間にはトンネルと平行な走向の地質変化面も分布しており、その変化面を検出していることが考えられる。また、TSP探索では、反射面の反射強度を測定区間内の相対的な強弱により表現しているため、今回の測定区間の様な硬軟の変化の少ない地山である場合には、地質変化に比べコントラストが強い結果となったものと考えられる。

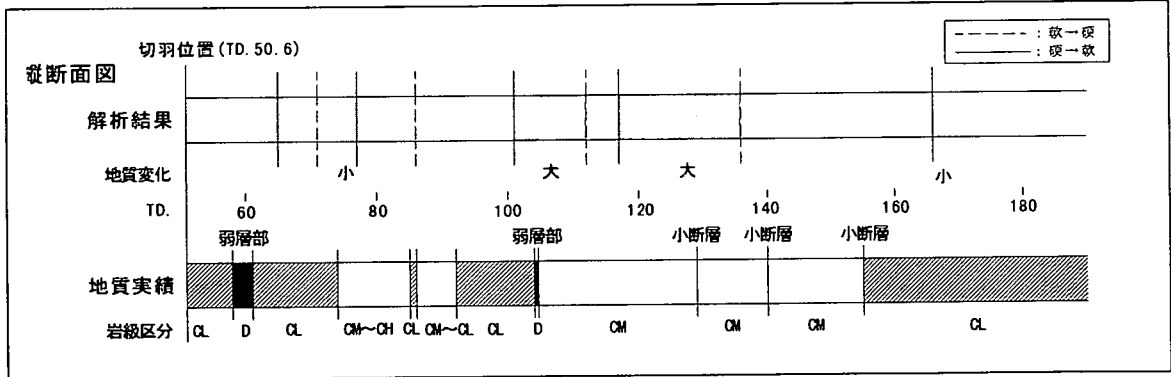


図-3 解析結果と地質実績との対比

(4) 左右・上下測線測定の有効性

解析結果から上下の直線上配置の測定データは、左右の直線上配置のデータとの相関性が高いことが判明した。上下配置測定では反射面の走向、トンネルへの出現位置の検出が可能であり、複雑な地質構造の場合に通常のTSP測定・解析では困難な走向の決定が容易になる。通常の測定で検出される走向はトンネルに対して右から左か左から右のどちらか一方であるのに対し、本測定法では左右どちらの走向でも検出が可能である。また左右配置測定による反射面の傾斜・位置の検出結果との組み合わせ評価で切羽前方の地質状況の疑似3次元的な把握が可能となる。特に断層等の走向・傾斜の急激な変化や反射面の走向・傾斜の予測が困難な場合や地山の地質構造が複雑で変化が著しい地山に対して本測定手法による測定が有効と考えられる。反面、測線のデータが多くなるため解析が複雑になり、経済的、時間的な施工への影響が大きくなることが懸念される。また現段階では対象とする断層等の地質変化面の傾斜が高角度なものとの制約がある。

4. トンネル施工への適応性検討

(1) 測線配置の検討

上述と同様の精度の反射面検出が可能で、経済的、時間的な影響をより少なくし施工への適応性を高める一つの手段として、測線配置の簡略化が考えられる。

本測定法でのねじれ配置の測定結果は、直線上配置の解析データと若干の誤差があるが、相関性が良好であり、データの代用が可能であることから、代用可能な個所の発振孔・受振孔の省略が可能と考えられる。

測定結果から考案したTSPシステム1台での測定における簡略化配置の組み合わせを表-3に示す。本報告では同トンネルの異なる地点において考案した測線配置のうち、図-4に示す配置により測定を実施した。特に小断面トンネルでは、ねじれ配置と直線上配置の発振・受振点間の距離の誤差が小さく、弾性波速度の値はほぼ同値と考えられるため、ねじれ配置での測定条件は良好となる。また、発振が同一のためデータの対比とデータ処理の簡素化が可能である。この測定法での受振孔(発振孔)の位置は、推定される走向により左右どちらかに決定

する必要があり、地山の地質構造が複雑な場合には、左右両側への設置の検討が必要である。

(2) 検証

測定を実施した地点は、前回の地質状況とほぼ同じ条件であり、異なる系統の断層が分布することから、図-4に示す左右の簡略化配置の両方を組み合わせた測定を実施した。

解析は、トンネル左右壁測線の延長上での反射面の傾斜・位置の検出をそれぞれL-L，R-Rにより実施し、走向はL-U，R-Uにより検出した。図-5に解析結果、図-6に走向・傾斜・位置を総合的に評価した解析結果と地質実績を示す。

解析結果と地質実績を対比すると、地質実績では地質変化面の走向は左から右のものが卓越して確認されており解析結果からも同様な傾向が見られる。検出された反射面位置の誤差は5m程度であった。一方測定区間中間地点TD.160～200付近のCL級の区間は、右から左の反射面として検出されており、これは弱層区間に分布する亀裂を検出したものと考えられる。また、検出された反射面の中には硬軟の変化が逆転して検出されたものがある。このように現段階で原因が不明な点もあり、今後データの蓄積による原因解明が必要である。

表-3 簡略化配置の組み合わせ

検出可能走向	受振	発振
左→右	左(左壁)・上(天端)	左 or 上
	左(左壁)・下(底盤)	左 or 下
右→左	右(右壁)・上(天端)	右 or 上
	右(右壁)・下(底盤)	右 or 下

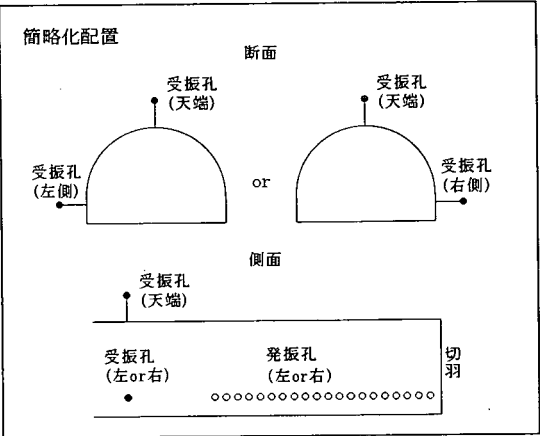


図-4 測線配置の簡略化

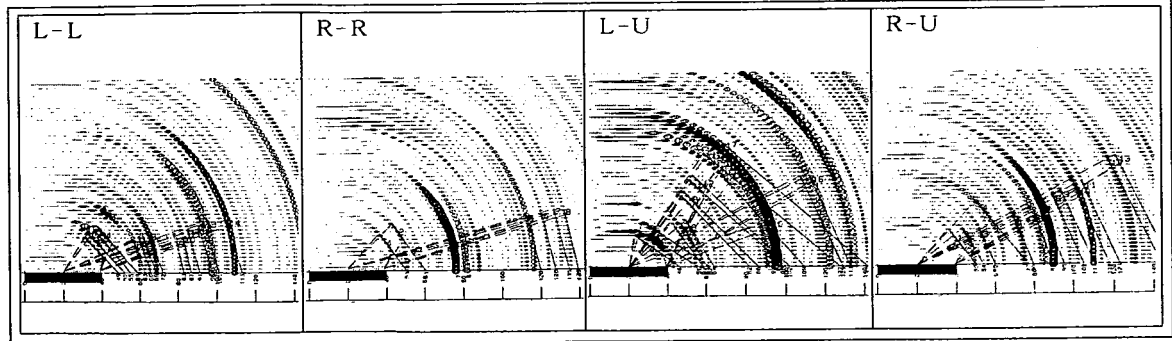
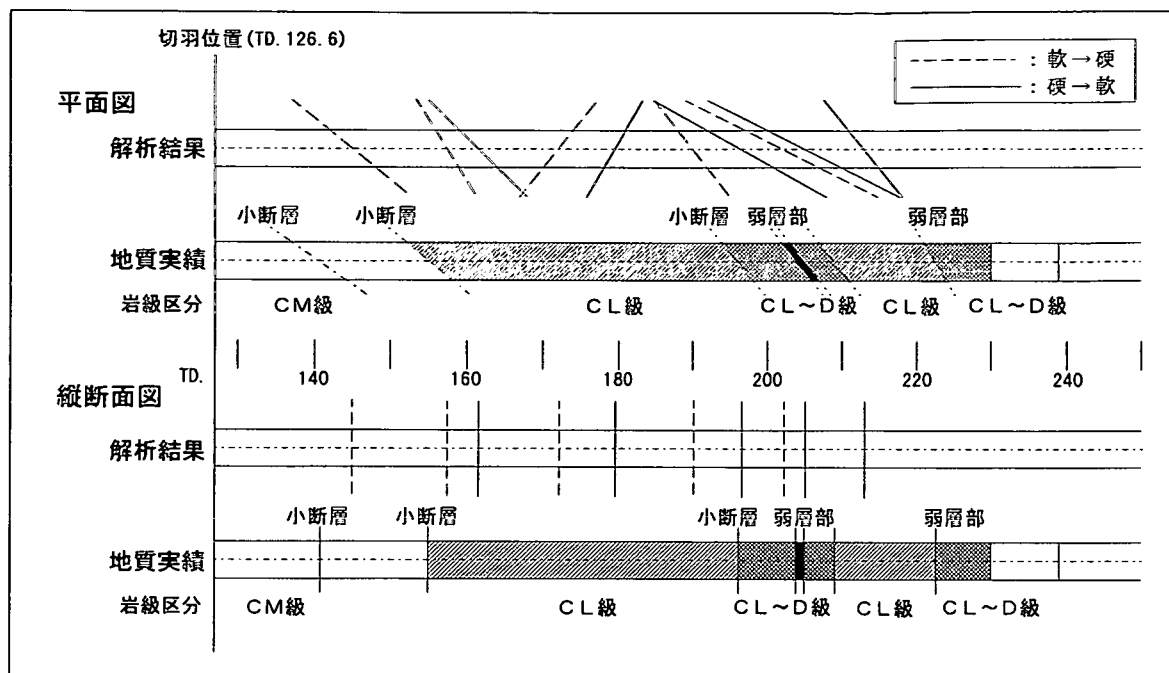


図-5 解析データ(DS図)



図－6 簡略化配置による解析結果と地質実績

5. おわりに

今回の結果から、鉛直方向に追加設置設置した受振器による測定が可能であることが判明した。鉛直方向の受振器設置により通常の測定では困難であった

- ・トンネルと鋭角に交差する地質変化面の検出精度の向上
- ・地質変化面走向のある程度の推定
- ・地質情報の疑似3次元化

がある程度可能となった。このことから断層等の地質変化面がトンネル軸と鋭角に交差する場合やそれらの走向が想定困難な測定条件では通常(左右)の測線配置に加え、上下方向の測線の追加により地質変化面の検出精度の向上が期待できることが判明した。しかしトンネル施工において、左右・上下に測線を配置することは、測線の設定が多いことや、TSPシステムを2台使用するということによるコストアップは避けられない。測線の設定時にある程度の走向の予測が必要であるが、本報告により提案した簡略化配置による測定は、左右・上下の測定結果とほぼ同等の精度が期待でき、測線の設定も比較的単純なため、現場への適応性を高められることができる。一方、実績と検出された反射面の傾向(硬→軟・軟→硬)の予測精度向上のため、連続測定によるデータの蓄積および地質実績との対比検討を実施し、評価方法の検討及び測定・解析の改善が必要である。本手法による切羽前方の予測精度の向上により、非破壊探査法として弾性波による切羽前方探査はトンネル施工においてより有効性の高い手法となる可能性がある。

参考文献

- 1) 上野他：弾性波反射法による地山予測法の有効性検証，土木学会第53回年次学術講演会(Ⅲ-B122)
- 2) 港他：TSP探査における測線配置の検討，土木学会第53回年次学術講演会(Ⅲ-B91)