

トンネル施工中の切羽起振点を用いた高精度屈折法 地震探査による切羽前方予測

PREDICTION AHEAD OF THE TUNNEL FACE BY HIGH RESOLUTION SEISMIC REFRACTION METHOD WITH SOURCES PLACED IN THE TUNNEL

林 宏一*・斎藤 秀樹**
Koichi HAYASHI, Hideki SAITO

The new data acquisition and analysis method has been introduced into the seismic refraction method in order to estimate the velocity ahead of the tunnel faces. The approach is the expansion of the high resolution seismic refraction method by using sources at the tunnel faces. At first, the surface seismic refraction method using sources and receivers only on the surface is performed in the investigation phase. Next, the data acquisition and analysis using in-tunnel sources are repeated in the construction phase. The data acquired in the investigation and construction phases is analyzed simultaneously. The numerical experiments of seismic refraction method including in-tunnel sources have been performed in order to show the efficiency of the method. The data without in-tunnel sources cannot delineate the velocity model clearly. As the number of in-tunnel sources increased, the resolution of reconstructed model increased. Specially, the velocity just ahead of the tunnel faces can be estimated precisely. The method was applied to a tunnel site, and the analysis results agreed with the excavation records.

Key Words: tunnel face, seismic refraction method, numerical and field examples

1. はじめに

トンネル施工中に切羽前方の岩盤状況の予測を、合理的かつ簡便・迅速に行える手法の確立が望まれている。この目的に適用される手法の一つとして、施工中のトンネル中に起振点と受振点を設けて測定を行う切羽前方地震探査（反射法、TSP、HSPなどと呼ばれる場合もある）がある¹⁾²⁾。この手法は、主として実験的ではあるが、近年多くのトンネル施工現場で、適用が試みられてきた。しかし、適用事例が増えるにつれて、探査結果が施工結果と一致しないケースも報告されるようになり、予測上の問題点も指摘されるようになってきた³⁾。一方、古くから施工前に行われてきた調査として、屈折法地震探査（弾性波探査）がある。屈折法地震探査は事前調査では標準的に実施されてきたが、施工技術が進歩し精度の高い事前調査が求められるようになるにつれて、屈折法地震探査に要求される精度も高くなっている。

切羽前方地震探査も屈折法地震探査も、人工的に起こした地震波（弾性波）を用いた探査手法であり、トンネル施工基面近傍の弾性波速度構造（もしくは速度構造に起因する反射面）を求めることにより、施工時の切羽状況を推定する手法である。筆者らは、これらの手法の探査結果が施工結果と合わない原因は、①正しい弾性波速度構造（もしくは反射面）が得られていない、②求められた弾性波速度（もしくは反射面）と岩盤状況の関係が不明、の大きく二つに分けられると考える。①は探査もしくは解析手法の問題である。例えば通常の屈折法地震探査は二次元構造を仮定して解析を行うが、実際の構造が三次元であれば、正しい結果が得られない場合もある。しかし、測定および解析手法を発展させることにより、この問題を改善することは可能であろう。②はより根本的な問題である。同じ4.5km/sの速度値が得られたとしても、花崗岩の場合と古い年代の堆積岩の場合では切羽状況は大きく異なることが多い。切羽状況を正しく予測するには、切羽前方地震探査や屈折法地震探査の結果に加えて、地質や水文など他の情報を含めて総合的に分析する必要があることは言うまでもない。

本稿では上記2つの課題のうち①を改善することについて、筆者らの取り組みを紹介する。切羽前方地震探査の問題点の一つは、切羽前方の弾性波速度を正しく推定することが困難なことである。筆者らは切羽前方からの反射波を詳細に解析することにより、切羽前方の弾性波速度を精度良く推定することを試みたが⁵⁾⁶⁾、現実的には難しい場合も多いとの結論に達した⁷⁾。この問題を解決するには、知りたい範囲を挟む（取り囲む）ように起振点や受振点を配置する、つまり切羽前方の地表や地中にも起振点もしくは受振点を設けて測定を行う必要がある。一方、屈折法地震探査の問題点の一つは、起振点・受振点を地表にのみ設けて測定・解析を行うことである。これにより、同手法により得られた弾性波速度構造は、深部ほど精度や分解能が相対的に低下することは避けられない。この間

*応用地質（株）つくば技術開発センター

**正会員 応用地質（株）つくば技術開発センター

題を解決するには、解析領域を囲むように、もしくは解析領域の内部に、起振点あるいは受振点を配置する必要がある⁸⁾。そこで筆者らは、切羽前方地震探査と屈折法地震探査の解析上の限界を同時に改善する手段として、施工中のトンネル坑内に起振点を設置し、地表の受振点で測定を行い解析することにより、未施工区間の弾性波速度分布をより精度良く推定することを試みている。

2. 測定・解析方法

調査の流れとしては、まずトンネル施工前に地表に設置した起振点・受振点を用いて高精度屈折法地震探査⁸⁾の測定・解析を行う。次に施工開始後、ある程度切羽が進む毎に切羽で起振を行い、これを地表に設置した受振器で測定する。図-1に測定の概念図を示す。測定には、トンネル坑内の起振と地表の受振器の時刻を合わせるために、GPS時計などを用いる。

施工前に取得したデータに坑内起振点のデータを加えて、高精度屈折法地震探査の解析を行う。これは、繰り返し連立一次方程式を解く逐次解法により、地表起振・地表受振のデータと切羽起振・地表受振のデータの両者において、理論走時と観測走時の残差が最も小さくなるようなモデルを求めるものである。理論走時の計算にはホイヘンスの原理に基づく方法（最短経路法）⁹⁾、連立一次方程式の解法としてはSIRT（同時反復再構成法）などを用いる。

3. 数値実験例

この方法の有効性を検討するために数値実験を行った。図-2に実験に用いた速度構造モデルおよび起振点位置を示す。このモデルに対して理論的な走時を計算し、これを観測走時と考える。この観測走時を満足する速度構造モデルを、連立一次方程式を解くことにより求める。

この方程式を解くためには、理論走時だけでなくその波線経路も必要である。通常の屈折法地震探査では、速度構造モデルと波線経路の両方がわからないために前述のように逐次解法が用いられるが、本検討では問題を簡単にするために正しい波線経路を与えた。したがって、一度だけ連立方程式を解けば速度構造モデルを求めることができる。連立一次方程式の解法としてはコレスキー分解を用いた。

図-3～5に計算例を示す。図-3は起振点を地表にのみ設置した場合の解析結果である。地表付近ではほぼ正しい速度構造が求まっているが、深部ほどモデルの速度分布の再現性は悪く、とくに低速度帯は最下層上面付近で確認されているだけで、施工基面までの連続性は不明瞭である。

図-4は、両坑口近くの坑内に2点ずつ起振点を設置した（両坑口からそれぞれ約20m掘進したときの切羽を想定）場合の解析結果である。図-3と比べると、距離程25～30mの区間の低速度帯や距離程170mの速度境界の付近では、正しい速度構造が得られていることがわかる。これらの低速度帯や速度境界は切羽前方に位置すると考えることができるから、切羽に起振点を設置することにより、その前方の速度を精度良く推定することができるといえる。

図-5は、両坑口からそれぞれ8点、計16の坑内起振点を用いて解析した結果である。未施工区間に存在する測線中央部の低速度帯も含めて、測線全域でほぼ正しい速度構造が得られていることがわかる。

このように、トンネルの施工が進む度に切羽で起振を行うことにより、切羽前方の弾性波速度の決定精度を改善していける可能性があることがわかった。本手法を切羽前方地震探査（反射法）と併用すれば、得られた反射面の位置を精度良く推定できるだけでなく、切羽から反射面までの区間の地山状況も推定することができる。また、反射面より先の地山状況もある程度推定することが可能と考えられる。

4. 現場適用例

以上の手法を施工中のトンネルに適用した。トンネルは長さ2km弱の道路トンネルであり、粘板岩、砂岩、チャートなどが出現する古生層の地山である。施工前の調査で行われた屈折法地震探査では、本適用実験実施箇所での施工基面付近の弾性波速度は4.0～4.2km/sであった。本トンネルは測線の中央付近では土被りが400m近くもあることから、より精度良く切羽前方の地山状況を予測するために、切羽の起振を地表で観測し施工前のデータと併せて高精度屈折法地震探査の解析を行った。また同時に、施工前の屈折法地震探査や地質踏査の結果から推定された断層・破碎帯の有無を確かめるために、切羽前方地震探査（反射法）も行った。図-6に施工前に行った弾性波探査の解析結果と測線位置などを示す。

(1) 切羽前方地震探査（反射法）

図-7に切羽前方地震探査の測定波形（生記録）を示す（起振点位置は図-6の●）。見掛け速度約3.6km/sの初

動は直達P波であり、見掛け速度速度約1.2km/sの顕著な後続波はトンネル坑壁を伝わる表面波などと思われる。距離20~50mの60~80msに見られる、初動や表面波とは逆の見掛け速度を持つ波群は、切羽前方からの反射波と思われる。この反射波の見掛け速度は、直達P波の速度に比べて明らかに速く、反射面がトンネル軸と斜交していることを示唆している。筆者らの経験では、切羽前方地震探査において生記録の段階でこのような明瞭な反射波が見えることは少なく、この現場では切羽前方（もしくは側方）に顕著な反射面が存在する可能性があると考えられた。図-8にバンドパスフィルターおよび速度フィルター（F-K フィルター）処理後の波形を示す。初動と逆向きの見掛け速度を持つ波群が抽出され反射波が見やすくなったことがわかる。

(2) 切羽の起振点を用いた高精度屈折法地震探査

図-6に示した起振点(◎)および受振点配置で測定を行い、施工前に測定したデータと併せて高精度屈折法の解析を行った。得られた速度断面を図-9に示す。全体の速度構造は大きく変化しないが、切羽前方がやや低速度となったことがわかる。図-10にトンネル施工基面の高さの弾性波速度を示す。切羽の起振点を使用した測定・解析により切羽前方が低速度であること、および切羽前方約100m区間の弾性波速度はおおよそ4.15km/sであることがわかった。

(3) 施工結果

以上のように、切羽前方地震探査（反射法）の結果、切羽前方に顕著な反射面が解析され、また切羽の起振点を用いた高精度屈折法地震探査の結果、切羽前方で速度が低下すると解析されたことから、今後地山状況が悪化するとの予測を行った。高精度屈折法地震探査で得られた切羽前方の弾性波速度（4.15km/s）を用いて、ディフラクション・スタッキングにより反射面をイメージした結果を図-11に示す。施工の結果、切羽前方90m過ぎから肌落ちが多くなるなど地山状況は悪化し、切羽前方104.7mで切羽の崩壊が発生した（図-9, 11）。

5. まとめと今後の課題

本稿に示した現場適用例において最も重要なことは、高精度屈折法地震探査を用いて切羽前方の速度を求めることにより、地山状況が悪化する可能性が高いことを指摘できた点である。起振点および受振点を坑内にのみ設置する通常の切羽前方地震探査（HSP, TSPなど）では、反射面の存在をとらえることができて、それに対応する地山状況を予測することは難しい。例えば反射面が、速度が大きくなる（地山状況が良くなる）境界なのか、小さくなる（地山状況が悪くなる）境界なのかを、反射波だけから推定することは現時点では極めて難しい。

施工前に地表から高精度屈折法地震探査を行い、さらに施工中に切羽に起振点を設置し地表で受振することにより、切羽前方の速度をある程度推定することができる。この方法を切羽前方地震探査と併用すれば、より実際の施工に資する情報を提供できると考える。

本稿で紹介した例では切羽の起振点は1点だけであるが、理想的にはなるべく多くの起振点を坑内に設けた方がよい。したがって、切羽の前進に伴って定期的に切羽起振の観測を行うことが望ましい。これを実現するためには、施工サイクルに影響しない測定方法（例えば掘削用発破の利用）や地表の受振器やケーブルを施工中は地表に常設しておくことなど検討する必要がある。また、切羽前方のボーリング孔などを利用し受振器も地中に設けることができれば、より精度の高い結果が得られると思われる。これらの課題を解決することができ、さらに探査結果の定量的な評価が可能となれば、屈折法地震探査を調査だけでなく施工管理にも適用することが可能だと考える。

参考文献

- 1) Sattel, G., Frey, P. and Amberg, R.: Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods - Pilot project in Centovalli Tunnel, Locarno, Switzerland, First Break 10, pp.19-25, 1992.
- 2) 稲崎 富士, トンネル HSP 共同研究会: 切羽前方地山の亀裂評価と施工管理の新技术 (トンネル HSP), 土と基礎, 45, pp.13-16, 1997.
- 3) 芦田 謙, 丸地 明宏, 松岡 俊文, 渡辺 俊樹: トンネルボーリングマシンの振動を利用したトンネル切羽前方予測, 物理探査学会第100回学術講演会論文集, pp.16-19, 1999.
- 4) 明石 健, 稲葉 力, 木村 哲: 切羽前方弾性波探査の不適合事例についての検討, トンネル切羽前方探査に関するシンポジウム・講演会講演論文集, pp.107-113, 2000.
- 5) 林 宏一, 高橋 亨: トンネル切羽前方地震探査における切羽前方速度の推定, 物理探査学会第 100 回学術講演会論文集, pp.20-24, 1999a.
- 6) 林 宏一, 高橋 亨: トンネル切羽前方地震探査における切羽前方速度の推定 (その2), 物理探査学会第 101 回学術講演会論文集, pp.87-91, 1999b.
- 7) 林 宏一, 斎藤 秀樹: 高精度屈折法地震探査を併用した切羽前方地震探査, トンネル切羽前方探査に関するシンポジウム・講演会講演論文集, pp.49-55, 2000.
- 8) 林 宏一, 斎藤 秀樹: 高精度屈折法地震探査の開発と適用例, 物理探査, 51, pp.471-492, 1998.
- 9) 石井吉徳, 六川修一, 鈴木知行: 種々の地下モデルとART法について, 物理探査学会第80回学術講演会論文集, pp.23-26, 9.

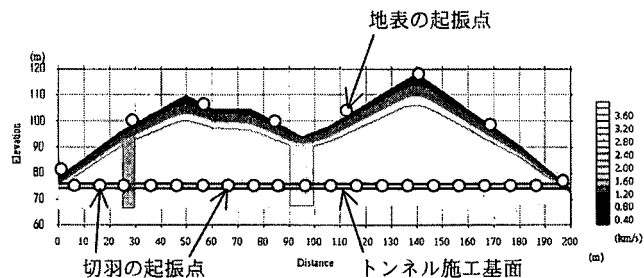
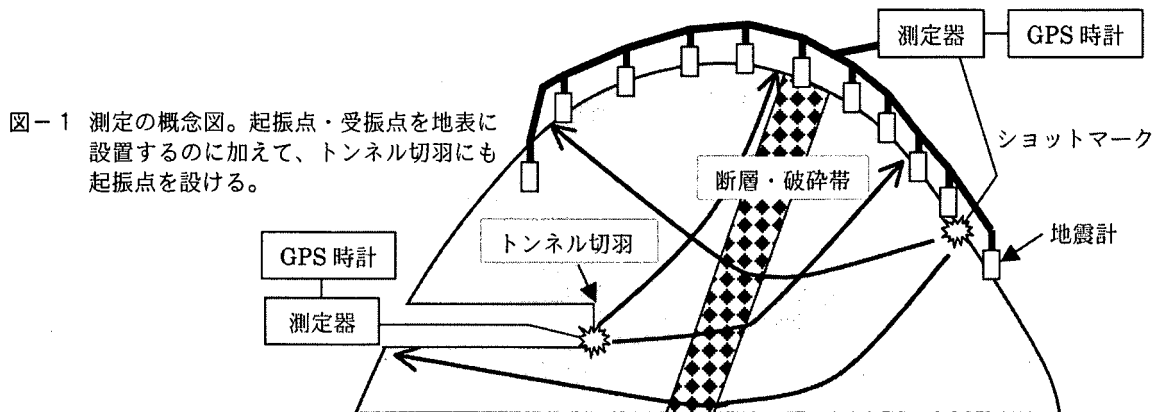


図-2 数値実験に用いた速度構造モデルおよび起振点位置

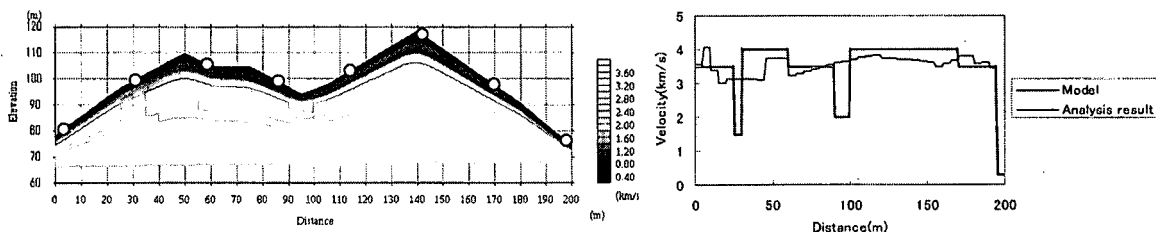


図-3 坑内の起振点は使用しない解析結果。速度断面図(左)と施工基面における弾性波速度(右)。右の図において太線はモデル(正しい値)、細線は解析結果を示す。

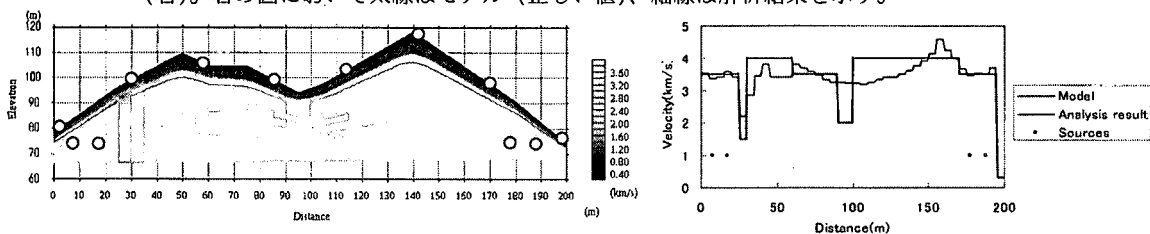


図-4 4点の坑内起振点(両側から2点ずつ)を使用した解析結果。速度断面図(左)と施工基面における弾性波速度(右)。右の図において太線はモデル(正しい値)、細線は解析結果、○は坑内の起振点位置を示す。

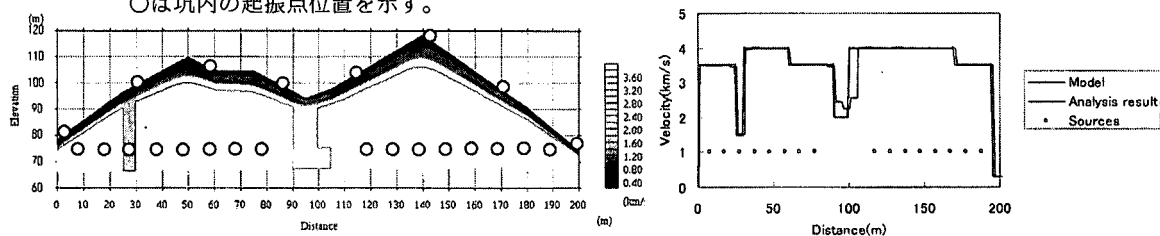


図-5 16点の起振点(両側から8点ずつ)を使用した解析結果。速度断面図(左)と施工基面における弾性波速度(右)。右の図において太線はモデル(正しい値)、細線は解析結果、○は坑内の起振点位置を示す。

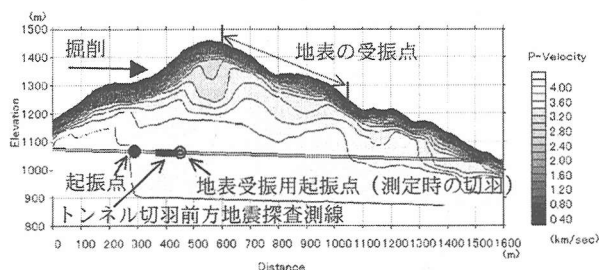


図-6 施工前に行った弾性波探査の解析結果。黒太線：トンネル切羽前方地震探査の測線、●：起振点。⊙：地表受振用の坑内起振点（測定時の切羽）。地表では距離 600～1050m の区間に受振点を設置した。

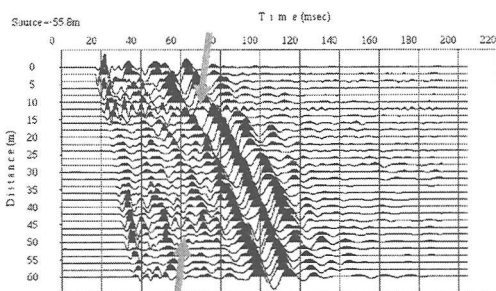


図-7 切羽前方地震探査（反射法）の生記録。起振点は、坑口側の測線端から 55.8m（図-6 中の●）。矢印で示した位置に反射波が見られる。

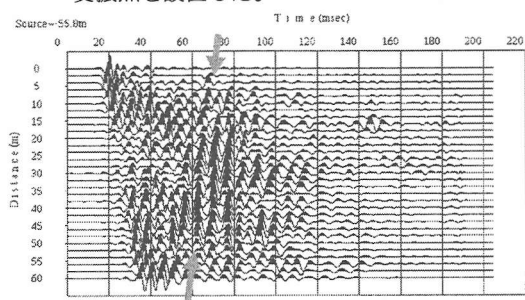


図-8 バンドパスフィルターおよび速度フィルター処理後の波形。矢印で示した位置に反射波が見られる。

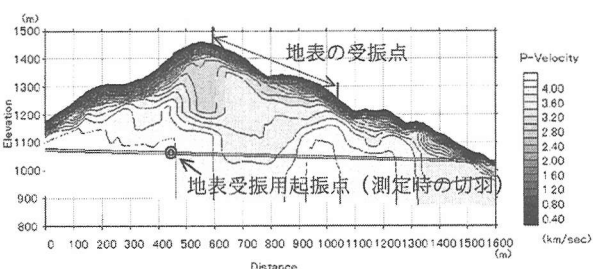


図-9 切羽の起振（⊙）を地表の受振点で記録し、そのデータを用いて解析した結果。施工前の解析結果（図-6）に比べて、切羽前方が低速度になっている。

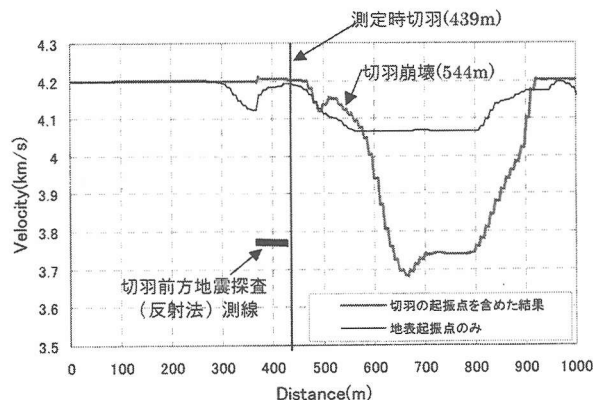


図-10 トンネル施工基面における弾性波速度。太線は切羽の起振点の記録を含めて解析した結果、細線は地表起振点のみの解析結果。

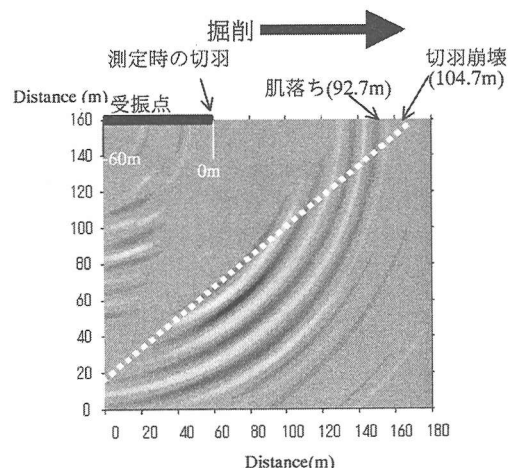


図-11 切羽前方の弾性波速度は 4.15km/s として切羽前方地震探査（反射法）のデータにディフラクション・スタックを施した結果。白点線は弾性波速度が 4.15km/s の時に最もスタック値が大きくなる反射面位置。測線側方の顕著な反射面の延長上で切羽崩壊が発生した。