

# 地震波干渉法によるトンネル地山の可視化

伊東 俊一郎<sup>1</sup>・相澤 隆生<sup>1</sup>・松岡俊文<sup>2</sup>

<sup>1</sup>サンコーコンサルタント(株) 地盤調査防災部 物理探査課 (〒136-8522 東京都江東区亀戸1-8-9)

<sup>2</sup>京都大学 工学研究科 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

トンネルや橋梁設計のための施工前に地質調査が実施されるが、近年は防災や維持管理の観点から供用中の構造物周辺の地盤を対象に、堆積物の厚さや、断層や褶曲などの地質構造を把握することが重要となってきた。地質構造調査では地中を非破壊で可視化する方法として、反射法地震探査が広く利用されている。通常の反射法地震探査では、ダイナマイトや大型の震動源を用いて人工地震を発生させる必要があり、安全上の制約から供用中のトンネルを対象とする場合では適用が困難である。本報告の地震波干渉法では、トンネル内を通行する車両振動を利用して反射法地震探査を行うことが可能となった。ここでは地震波干渉法を用いて、供用中のトンネルを対象として反射断面による地下の可視化を試みた事例について報告する。

**Key Words :** seismic reflection exploration, seismic interferometry, geological survey, mountain tunnel

## 1. はじめに

近年は地震などの自然災害を契機に、防災や維持管理の観点から供用中の構造物周辺の地盤を対象に、堆積物の厚さや、断層や褶曲などの地質構造を把握することが重要となってきた。地質構造調査においては地下を非破壊で可視化する方法としては、反射法地震探査が広く利用されている。反射法地震探査は、地層境界や断層等で発生する反射波を抽出することで地下を可視化できるため、供用中のトンネル地山へ反射法地震探査が適用できれば、トンネル周辺の詳細な地質構造をイメージングできると考えられる。

一方で反射法地震探査では人工地震を発生させる必要があり、通常はダイナマイトや大型の震動源を用いるため、供用中の構造物周辺で大型の震動源を用いて反射法地震探査を適用するには制限が多かった。例えば、震災で被害を受けたトンネルではいち早く復旧されるため、復旧後の地表で大型の震動源を駆動して付近の地質調査を再度行う事は、構造物及び使用者の安全を考えると現実的には困難である。

ここで述べる地震波干渉法では、地中の雑振動を観測して各受振点を仮想震源とした波形記録を合成する手法である。地震波干渉法の理論は Claerbout (1968) <sup>1)</sup> によって次元モデルにおける反射波記録が自己相関から導かれることが示された。その後 Wapenaar (2006) <sup>2)</sup> によって三次元モデルにおいて相互相関から、反射波記録が

合成できることが示され、物理探査業界でも活発な研究が行われてきた。筆者ら (2008) <sup>3) 4)</sup> も反射法地震探査を中心に様々な調査対象への地震波干渉法の適用性について検討してきた。

ここでは従来は反射法地震探査による調査が困難であった供用中の山岳トンネルや都市部のトンネルを対象として、地震波干渉法を利用した反射断面による地下イメージングの事例について報告する。

## 2. 既往手法によるトンネル地質調査の課題

従来の反射法地震探査では、人工的に弾性波を発生させて、地中の地層境界などから反射してきた反射波を地表に並べた数十から数百個の地震計を並べた受振点群で観測している。人工震源は、図-1のようダイナマイトもしくはパイブロサイス、インパクトといった大型の震動源を使用し、全ての受振点位置で起振するのを基本とするため、屈折法と比較して発震点数が数倍～数十倍となっている。よって供用中の山岳トンネルを防災や維持管理目的で地質調査を行う場合、実際は影響がなくても安全面からトンネル付近でダイナマイトなどを使用して起震することは非常に困難である。

さらに震災等で被害を受けたトンネルについては、地山の地質構造をより詳細に把握することが重要となるが、現実的にはそのようなトンネル付近での起震作業は不可

能であり、反射法地震探査を適用できないケースがほとんどである。もし安全面から起震作業が許容されるケースでも、山岳地域で多量の発震点数を設定し、実際に起震作業を行うためには、多大な測定費用や測定時間が必要となってくる。このように山岳トンネルを対象として反射地震探査を実施するにあたって、震源の使用が調査適用上の大きな課題となっている。

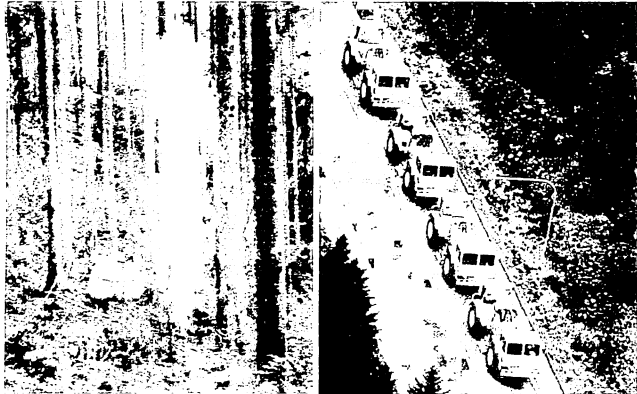


図-1 反射法地震探査の人工震源の例  
(左：ダイナマイト、右：パイプロサイス)

3. 地震波干渉法を適用した改善策

反射法地震探査において従来は不可欠であった人工震源による起震を行う代わりに、本研究では雑振動の観測記録から地震波干渉法を適用して反射法地震探査の解析を行った。これにより前述した人工震源による問題がなくなり、反射法地震探査の適用範囲が大幅に拡大すると考えられる。

地震波干渉法は、図-2に示すように、二点間で同時に観測された波形記録の相互相関処理により、一方を震源とし、他方を受振点とする擬似的な合成地震記録を得ることが可能である。

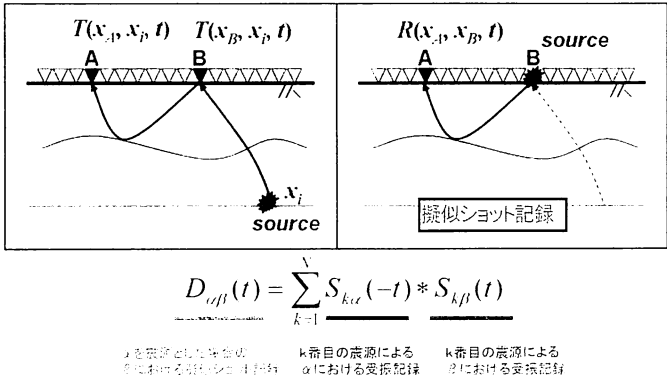


図-2 地震波干渉法概念図

これにより従来の測定ではノイズとされていたトンネ

ル内を通行する車両などから発生する交通振動などを信号として利用し、地表に設置した全ての受振点を震源としたことに対応する波形記録（擬似ショット記録）を合成することが可能である。これらの地震波干渉法の特徴は、供用中の山岳トンネル地域のような人工震源による起振が難しい調査地で反射法を実現するのに有効である。

4. 供用トンネルへの地震波干渉法適用事例

地震波干渉法では、理論上または数値シミュレーションから、地下にランダムな波動場が存在することで、偽像が低減されてシグナルが強調されることが知られている。振動源は地中の様々な場所で発生するほど精度が向上すると考えられる。供用中のトンネル内を車両が通行すると、移動しながら連続的に振動を発生させ、様々な方向へ伝搬した波が観測される。これは地震波干渉法の適用に有利な条件である。そこで供用中のトンネルを対象として実験サイトを選定した。

現地のデータ取得では、トンネルルート上の地表に地震計を展開し、トンネル内を通行する車両から発生する雑振動を利用し、地中の様々な方向から伝播してくる波動を測定している。データ処理では、取得した波形記録に地震波干渉法を適用し、擬似ショット記録を合成する。次に擬似ショット記録に対して反射法処理を行い、反射断面図によるトンネル周辺の地下の可視化を試みている。各実験サイトでの適用結果について以下に述べる。

(1) 山岳道路トンネル

震災で被害を受けた山岳トンネルは、早急な復旧工事が必要とされるため、変状状況とともに地山の地質状況を把握することが重要である。しかし被害を受けたトンネルにおいて、人工震源を使用する地質調査は安全上の理由から適用が難しいと考えられる。ここではそのような山岳道路トンネルを対象として、トンネル地山の可視化を試みている。

現地測定では人工震源の代わりに地盤の振動を長時間連続測定を行った。測定期間は一般車両は全面通行止でありトンネル内を通行する車両が極端に少なかったため、今回は交通振動を想定した震源車両をトンネル内で往復運転させた。この交通振動記録に地震波干渉法を適用する。比較のために、調査測線上でダイナマイトにより発震した記録(A)と、交通振動記録に地震波干渉法を適用して合成した擬似ショット記録(B)を図-3に示した。

(A)ではP波初動が明瞭に捉えられており、同様なイベントが(B)でも確認できることから、擬似ショット記録が良好に合成されていることが確認された。擬似ショ

ット記録に反射法処理を適用し、得られた反射断面図を図-4に示した。反射断面図では縦軸に時間、横軸に距離を示しており、反射波の位置や形状から地層境界などを読み取ることができる。図中点線(a)で示した反射波は東傾斜を示しており、これは事前の地質調査から推定された砂岩泥岩互層の地層傾斜とほぼ一致している。また東傾斜より浅部側で(b)(c)の反射波も認められている。

このように震災で被害を受けたトンネルのように人工震源の使用が難しい場合でも、交通振動を利用してトンネル地山を可視化することができることが示された。

対象トンネルの周辺地質は図-5に示すように新第三紀の泥岩層が分布する地域であり、トンネル延長は約8.6kmである。今回はトンネルルートに沿う道路が存在する約700m区間に試験的に測線を設定した。トンネル内を新幹線が通過する際に発生する振動は、測線上に設置した地震計の波形記録上で明瞭に確認できた。この波動を利用して擬似ショット記録を合成し、反射法処理を行った。得られた反射断面を図-6に示す。反射断面図では測線上の距離程300m付近から北傾斜を示す反射波(図中実線)が認められた。これは調査測線つまりトンネルルートが北側に向かって泥岩層の背斜軸から徐々に離れていくことから、想定される地層構造とも整合する結果となっている。しかし全体的に反射波の周波数成分が低かったことから詳細な地質解釈は難しい。

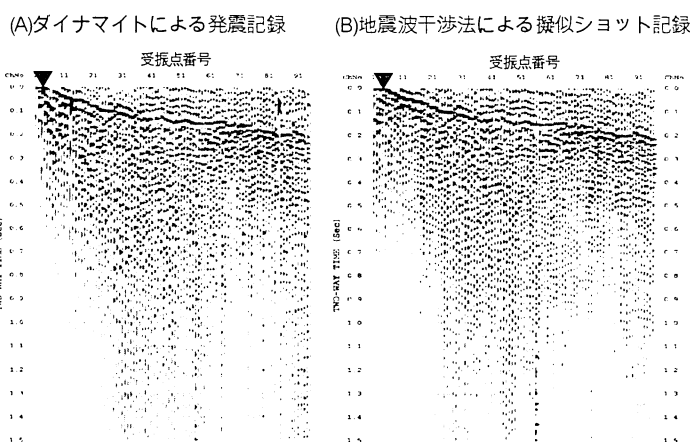


図-3 反射法地震探査の波形記録比較

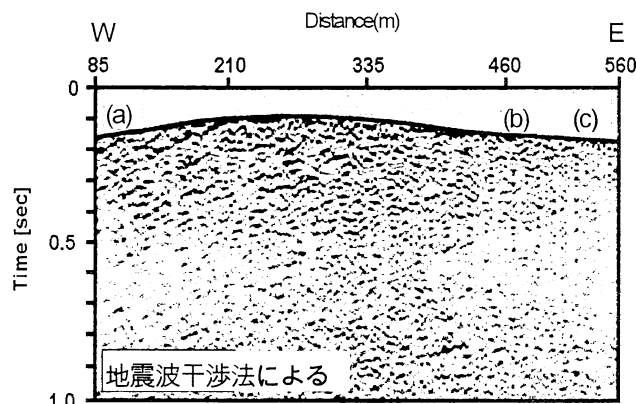


図-4 道路トンネル地山の反射断面図

## (2) 山岳鉄道トンネル

新幹線の鉄道トンネルは、運行速度や周辺環境を配慮し、屈曲半径を大きくして山岳地域に長い区間で設定されることが多い。このような長大山岳トンネルでは、通常の反射法地震探査を実施する場合、人工震源によりトンネルルート上で全点発震するのが時間的・経済的制約から非常に困難である。ここではそのような山岳鉄道トンネルを対象として、トンネル地山の可視化を試みた。

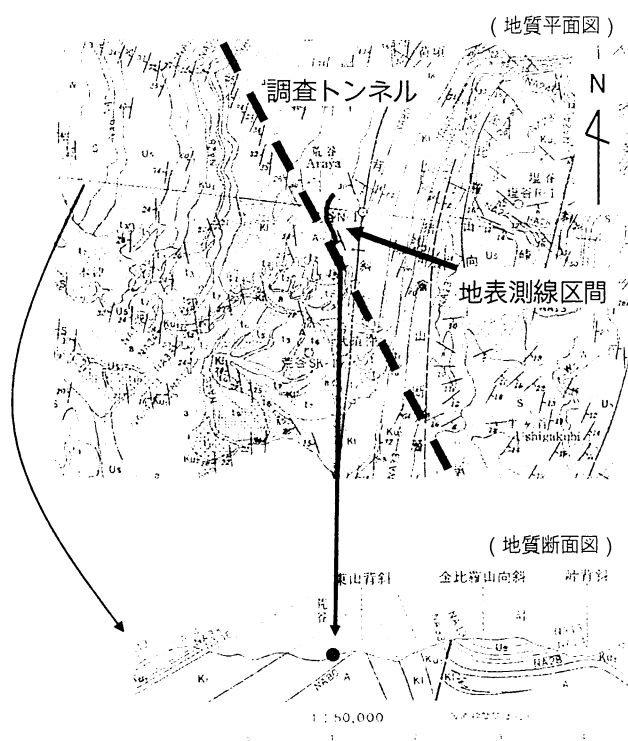


図-5 山岳鉄道トンネル周辺地質図

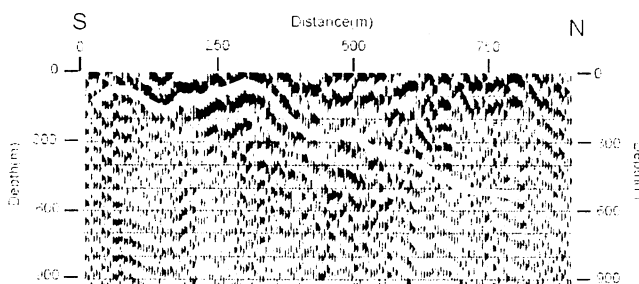


図-6 鉄道トンネル地山の反射断面図

### (3) 都市部地下鉄トンネル

都市部では、商業施設や集合住宅が密集し、道路交通量も多いことから、広範囲あるいは深部の地盤を調査するには様々な課題が存在する。人工震源を使用する手法では交通規制や用地問題に加えて、周辺の地下鉄などの交通機関や工場からの人工振動がノイズとなり、測定上の大きな問題となる。ここでは地下鉄の通行振動を利用した都市部地盤の可視化を試みている。

地下鉄トンネルのほぼ直上の道路を利用し、図-7に示すように測線長150m程度を設定し、地下鉄の車両通行による振動を約8時間測定した。また都市部のような軟弱地盤では、弾性波速度も遅く地下水位も浅いことから、P波よりもS波による探査が有利である。そこで水平動成分を測定してS波の擬似ショット記録を合成し、反射法処理から得られた反射断面図を図-8に示した。反射断面では深度30m付近にほぼ水平方向に反射波が認められる。これは比較のために人力ハンマーで起振した記録でも確認された反射波の位置と一致していることから、地下の地質境界に対応する構造を示していると考えられる。

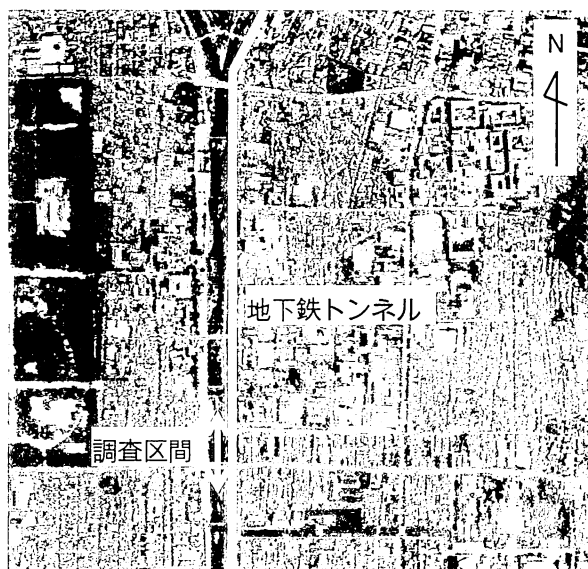


図-7 地下鉄トンネル周辺の衛星写真

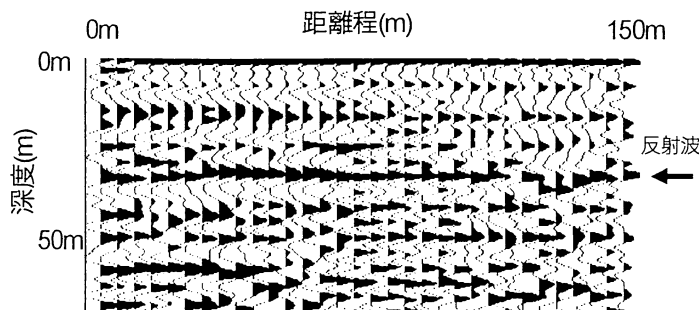


図-8 地下鉄トンネル地盤の反射断面図

## 5. まとめ

本報告では、供用中のトンネルを対象に地震波干渉法を利用して、通行車両などの振動から反射断面による地下の可視化を行った。この手法はダイナマイトや大型震源重機を必要としないため、これまで安全性や経済的理由から反射法の適用が困難であったトンネルを対象とした調査も可能となる。またデータ取得時に周辺ノイズが問題となる都市部での適用も考えられる。適用事例として供用中の3つのトンネルについて、反射断面による地下の可視化を行い、地層境界などに対応する地質構造を推定した。今後も様々なトンネルに対して本手法を適用し、課題の抽出と実用化に向けて研究を行いたい。

## 参考文献

- 1) Claerbout, J. F. : Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response, *Geophysics*, 33, 1968.
- 2) Wapenaar K. and Fokkema, J. : Green's function representations for seismic interferometry, *Geophysics*, 71, 2006.
- 3) 白石和也, 尾西恭亮, 伊東俊一郎, 山中義彰, 相澤隆生, 松岡俊文: 地震波干渉法による地下構造イメージング技術の実用化に向けた実験的研究, *物理探査*, 第61巻2号, 2008.
- 4) 相澤隆生, 山中義彰, 伊東俊一郎, 木村俊則, 尾西恭亮, 松岡俊文: フィールドでの観測実データを用いた地震波干渉法の敵機用条件に関する研究, *物理探査*, 第61巻2号, 2008.

## VISUALIZATION OF THE TUNNEL MOUNTAIN BY SEISMIC INTERFEROMETRY

Shunichiro ITO, Takao AIZAWA, Toshifumi MASTUOKA

Seismic reflection method is widely used as a geological survey for visualizing underground by un-destroying methods. It is necessary to use seismic sources such as a dynamite or the vibroseis in the usual seismic reflection method. Seismic Interferometry reconstructs the pseudo shot records from seismic data observed the vehicle or train vibration which passes through the inside of a tunnel. We report the case study which tried visualization of the mountain tunnels and underground at urban area by reflective sections using Seismic Interferometry.