

トンネル坑内からの反射法地震探査による地層境界の推定

ESTIMATION OF GEOLOGICAL STRUCTURES USING SEISMIC REFLECTION PROFILING FROM TUNNEL

高橋 晃¹・竹内 友章²・松原 由和³・松岡 俊文⁴

Akira TAKAHASHI・Tomoaki TAKEUCHI・Yoshikazu MATSUBARA・Toshifumi MATSUOKA

We propose a new approach using the seismic reflection profiling for estimating geological structures around shield tunnels. In the study including field tests, we found that an elastic wave (S wave) generated inside a shield tunnel transmits to the ground around the tunnel through its concrete segments and reflects at geological layer boundaries. In the proposed approach, the reflected waves are detected by geophones set inside the tunnel and geological structures above and below the tunnel are estimated through the data processing of the seismic reflection profiling. This approach was experimentally applied for an existing shield tunnel and the estimated seismic zones are consistent with the geological data observed by the boring survey. And the applicability to the horseshoe-shaped tunnel and rectangular shaped tunnel of this technique was confirmed by simulation analysis.

*Key Words :shield tunnel, seismic reflection profiling ,elastic wave, geological survey
maintenance of tunnel*

1. はじめに

シールドトンネルを長期間に亘り維持管理していくためには，覆工の状態を継続的に観察して行くとともに，トンネル周辺の地層構成や地質性状を十分に把握しておく必要がある¹⁾．シールドトンネルは，地質調査結果に基づき地山荷重を見込んで覆工設計を行っている．しかし，線状構造物であるシールドトンネル全線の周辺地質は，任意の間隔で実施されたボーリング調査に基づき，ボーリング地点間を地形調査，踏査，古地図などの情報から補完して推定しているため，トンネルに沿った連続的なデータに基づいて評価されているとはいえない．

一方，シールドトンネルの耐震設計については，基盤の深さなどの地盤条件が急変する場合に，検討の必要性が言われている²⁾．また，基盤層やトンネル下方地盤の不整形性は，トンネルが受ける地震動に大きな影響を及ぼすことが既往の実験ならびに研究成果から把握されている³⁾．このため，既存トンネルの耐震設計を再評価する場合には，地盤の不整形性をより定量的なデータに基づき評価することが必要と思われる．

そこで筆者らは，トンネル維持管理や耐震設計に必要となるトンネル全線，とくにボーリング地点間の地層構成をより定量的に評価する手法の開発に取り組んだ．検討した手法は，トンネル坑内からのS波を用いた浅層反射法地震探査である．浅層反射法地震探査は，資源探査用に開発された反射法地震探査を震源や測定パラメータの工夫により高分解能化し，浅層部の探査に適用できるようにしたものである⁴⁾．手法として浅層反射法地震探査を選定したのは，探査結果からトンネル上下の地層境界面を線的にとらえること

キーワード：シールドトンネル，浅層反射法地震探査，弾性波，地質調査，トンネル維持管理

¹ 正会員 東京電力株式会社 東京支店

² フェロー会員 東京電力株式会社 電力流通本部

³ 応用地質株式会社 東京本社

⁴ 正会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻

ができ、トンネル坑内を利用することで、河川横断や海底トンネルなどの立地条件的に地表からの調査が難しい場合でも探査が可能なること、地表面からの探査で問題となる交通騒音などに起因したノイズを低減できると考えたからである。なお、同探査法の探査深度は数10～数100m程度とされ⁵⁾、シールドトンネルのほとんどがトンネル上下50mの範囲内に地表面と耐震上の基盤層が存在していると考えられ、その範囲を探査できれば十分であった。

シールドトンネル坑内からの浅層反射法地震探査手法の開発にあたっては、以下の課題があげられた。

- 1) 地中の任意の場所（トンネル坑内）で弾性波を発震した場合の周辺地盤への弾性波の伝播経路の解明。
- 2) トンネル坑内で得られた反射波の分析による、トンネル周辺の地層構成の推定手法の確立。

本論文では、このような課題に対して、内径3.5m程度のシールドトンネルを事例としたシミュレーション解析と現地試験を行い、同探査手法により、特性の異なる地層の境界を把握できることが確認した。また、同手法の大断面シールドトンネルや馬蹄形トンネルへの適用の可能性についてシミュレーション解析により確認した。

2. シールドトンネルをモデル化した浅層反射法地震探査のシミュレーション解析

シールドトンネル坑内からの浅層反射法地震探査においては、トンネル形状が観測波形に与える影響が大きいことが予想された。この影響を評価するために、トンネル内で発震した場合の二次元シミュレーション解析（トンネル断面方向、トンネル縦断方向）を実施した。また、その解析結果に基づきトンネル内での探査における計測計器の配置についても検討した。

(1) トンネル断面方向のシミュレーション解析

断面方向のシミュレーション解析は、トンネル坑内で発震した弾性波がセグメントを透過して地盤内をどのように伝播するかを確認するために実施した。なお、解析は、地盤内の伝播をより詳細に把握するため、弾性波動方程式に基づく差分法⁶⁾により行った。

a) 解析モデルの設定

解析モデルは、外径3.5m、セグメント厚さ0.25mのシールドトンネルを地盤内にモデル化し、トンネル上方10mと下方15mの位置に地層境界を設けた。

なお、シールドトンネルの裏込め注入層は、一般的に層厚が薄いことから探査結果に影響を及ぼさないと判断し、モデル化はしていない。

解析は、入力波形としてリッカー波⁷⁾を用い、高分解能な探査を行うことを前提とした卓越周波数が500Hzの波と、コンクリートの透過性が良い低周波の50Hzの2つの周波数で実施した。このシミュレーション解析では、P波とS波の伝播状態を比較するため、トンネル下部に鉛直方向の振動を与え、P波成分が卓越する鉛直成分とS波成分が卓越する水平成分の解析を行った。なお、差分法のメッシュは、2.5cmに設定した。

解析結果は、トンネルの上下の地盤内に設定した観測点において、セグメントを透過した弾性波の地盤内の伝播経路を評価した。解析モデルと地盤物性値などを図-2に示す。

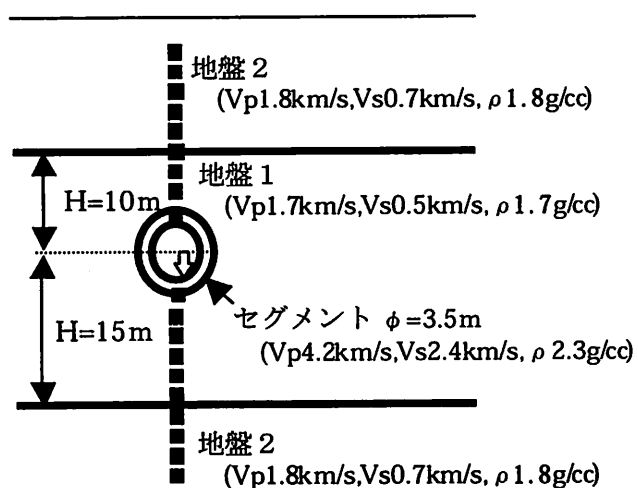


図-1 シミュレーション解析モデル（断面方向）

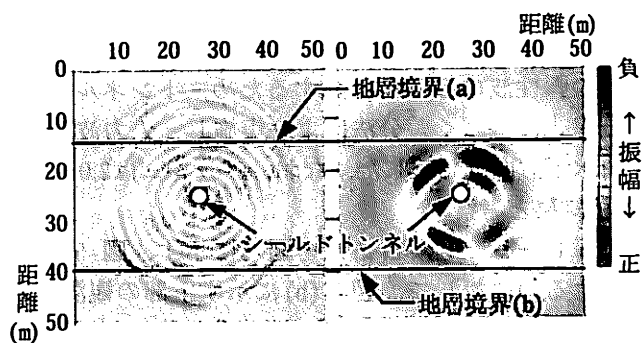
b) 解析結果と考察

観測点の波形記録を図-2に示す。シミュレーション解析では、トンネル下部を鉛直下方に発震したので、図-2におけるP波は、下に凸な波、S波は、トンネル上部における観測点の波形記録では下に凸の波、トンネル下部では上に凸の波として記録されている。

2つの周波数のシミュレーション解析結果を比較すると、500Hzの場合には、1回の発震であるにもかかわらず、セグメントが反響するかのように繰り返して同様の波列が地盤内に伝播している。一方、50Hzの場合には、明瞭な孤立した波としてとらえられている。なお、図-2(b)-2に示すS波の伝播を反映する水平成分の波形記録では、地層境界からの反射波を確認することができる。

シミュレーション解析結果における発震から37.5ms後のスナップショット記録を図-3に示す。ここで、スナップショット記録は、シミュレーション解析結果の任意の時間における波動の振幅を、その大きさに応じて色分けして示したものである。スナップショット記録から、発震周波数が500Hzの場合には、トンネル下部で弾性波を発震した場合でもトンネルそのものが点震源であるかのように、トンネルを中心に同心円状に弾性波が地盤内を伝播している。一方、発震周波数が50Hzの場合には、発震位置（トンネル下部）を中心に弾性波が広がり、波形が単純で波の特性が理解しやすい結果となっている。

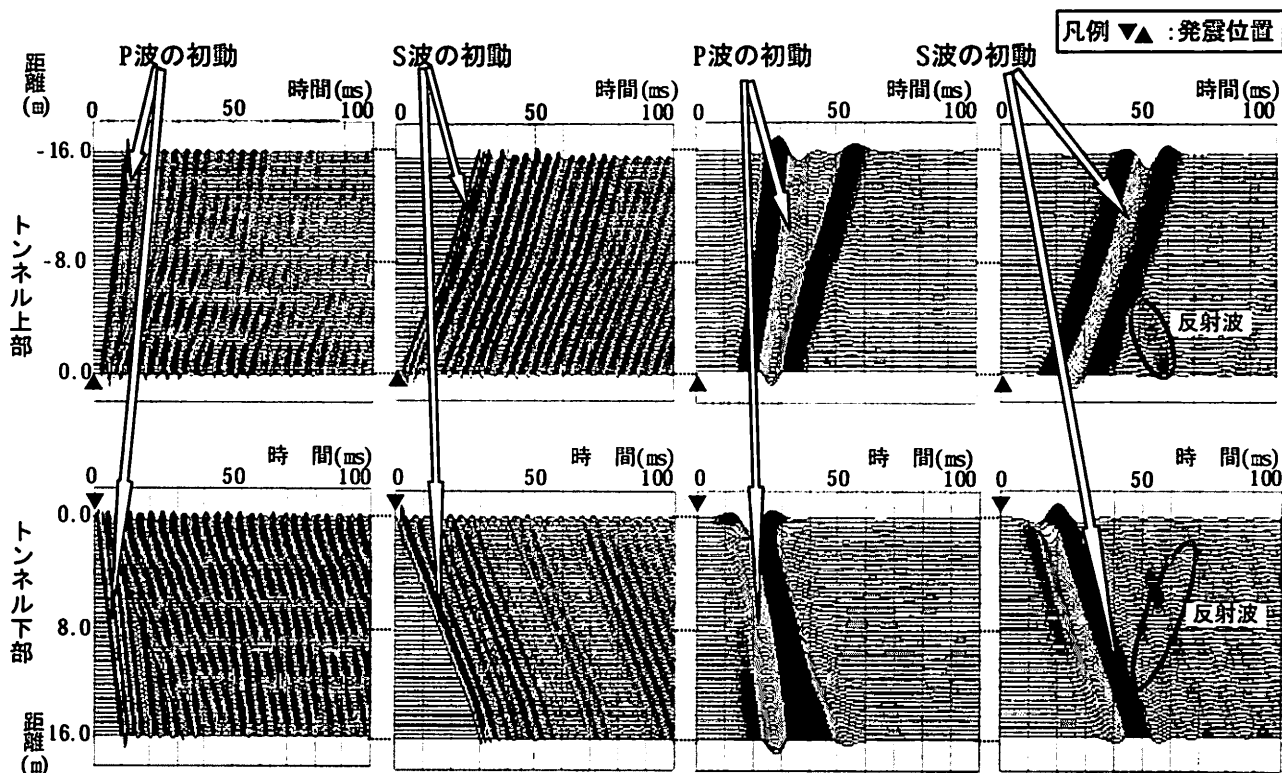
今回のシミュレーション解析により、トンネル内の一点（下部）で発震しても、トンネル上方にも弾性波が伝播されることが確認できた。これは、弾性波がトンネルによる空間に影響されずに地盤内を広範囲に伝播していることを示している。また、発震周波数が高



(a) 発震周波数：500Hz (b) 発震周波数：50Hz

図-3 スナップショット記録

(発震から37.5ms後の水平成分)



(a)-1 鉛直成分

(a)-2 水平成分

(b)-1 鉛直成分

(b)-2 水平成分

(a) 発震周波数：500Hz

(b) 発震周波数：50Hz

図-2 シミュレーション解析結果（観測点の波形記録）

周波の場合には複雑な波が発生することとなり、トンネル坑内からの探査では、周波数の選択が重要となることも確認できた⁸⁾。

(2) トンネル縦断方向のシミュレーション解析

トンネル断面方向のシミュレーション解析において、トンネル坑内の任意の点で発震することにより、トンネル上下に弾性波が伝播することが確認できた。これは、トンネル坑内で反射波を観測した場合に、トンネル上方から到来する反射波か下方から到来する反射波かを区分する必要があることを示している。このため、上下から到来する反射波を区分することに必要となる受振器の配列を検討するため、縦断方向のシミュレーション解析を実施した。

a) 解析モデルの設定

縦断方向の解析は、断面方向の解析に用いたモデルを縦断方向に展開して実施した。なお、断面方向の解析結果からトンネルによる空間は、地盤内の弾性波の伝播に影響を及ぼさないと判断できたことから、トンネル空間を周辺地盤と同様な地盤物性に置き換えた。震源はトンネル内を水平方向に2mずつ移動させ、40ショットの探査記録を作成し、観測点は、トンネル内空の上部と下部に1m間隔で設置した。また、深度方向への弾性波の伝播を確認するため、トンネル上下方向にも観測点を0.5m間隔で設置した。解析は音響波動方程式に基づく差分法により実施し、入力波形は卓越周波数50Hzのリッカー波としてトンネル下部を軸直角水平方向に発震した。なお、メッシュは2.0mとした。縦断方向の解析モデルを図-4に示す。

b) 解析結果と考察

シミュレーション解析結果を図-5に示す。図-5(a)に示すトンネル上部の観測点の記録では、反射面が2面存在するのに対して、図-5(b)に示す下部の観測点の記録では反射面が1面しか存在しないことが確認で

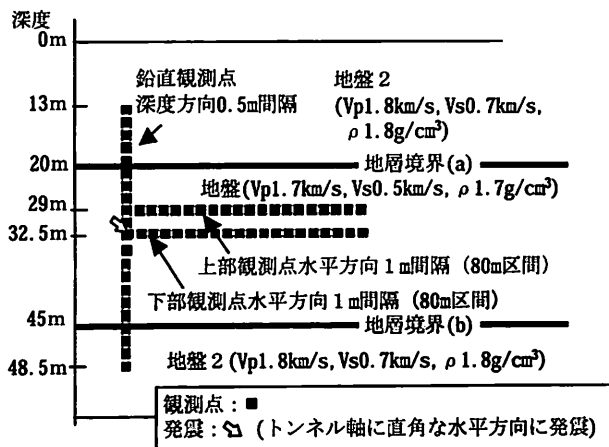


図-4 シミュレーション解析モデル（縦断方向）

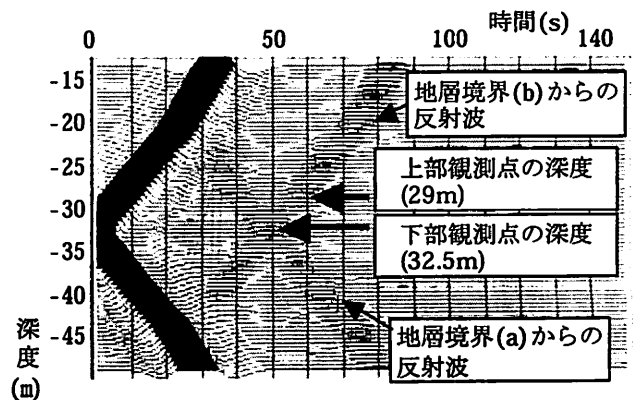
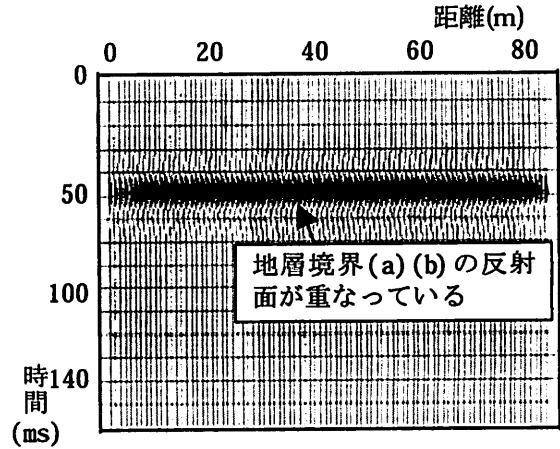
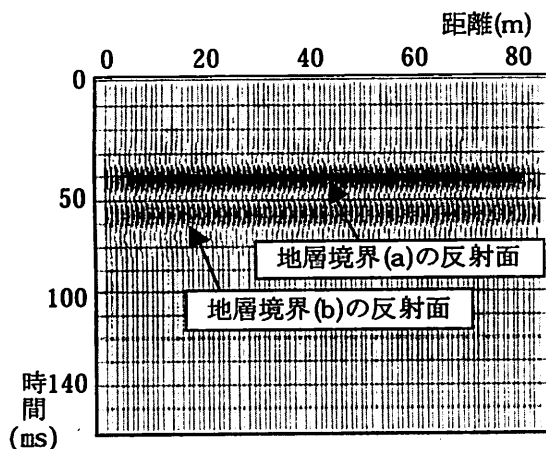


図-6 深度方向の観測点の記録



(a) 上部観測点の時間断面

(b) 下部観測点の時間断面

図-5 シミュレーション解析結果（時間断面）

これらの結果を受け、既設のシールドトンネル坑内からの試験探査を行った。

3. 既設シールドトンネルを使用した浅層反射法地震探査

トンネル坑内からの浅層反射法地震探査の実用性を確認するために、周辺の地質構成が既知のトンネルにおいて、試験探査を実施し地質データとの整合性を確認した。

(1) 試験条件

探査を実施したシールドトンネルは、図-7に示すように内径3.4m、RCセグメント厚さ275mmであり、底部に幅600mm、厚さ100mm程度のインバートコンクリートが設置されている。探査箇所の平面線形は直線であるものの、図-8に示すように3.54%の縦断勾配を有しており、トンネルの土被りはGL-12.0~13.8mである。なお、トンネルの建設位置は、多摩川右岸のデルタ地帯にあたり、かつては海岸線から沖に広がっていた潮汐平野であり、最終氷期以降の海進とともに沖積層が厚く堆積した地盤である。探査は、図-7に示すように、インバートコンクリートの上にS波ポータブルパイプレータ⁹⁾を設置し、トンネルの頂部とインバートコンクリート脇にそれぞれ2.0mピッチに受振器を設置して実施した。

ここで、本試験では、震源の波動をS波としたのは、多くのシールドトンネルが建設されている地下水位以下の未固結地盤の層相変化に対応した速度を示すこと、さらにS波速度はN値との相関も良く、地盤の物性値として工学的な解釈の点でも有利となるからである⁹⁾。

探査条件を表-1に示す。なお、発震方向は、トンネル軸方向に直角な水平方向とし、スイープ波周波数はトンネル坑内で実施したスイープ波周波数のテストから20-140Hzとした。

(2) 測定結果と上下から到来する反射波の分離について

図-8に示すように、探査した区間のシールドトンネルは、3.54%の勾配を有しており、地層境界がほぼ水平であれば、観測される反射面との勾配差により、その反射面がトンネル上方のものか、下方のもの

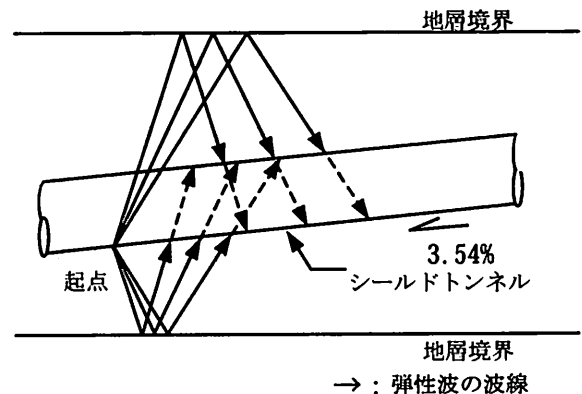
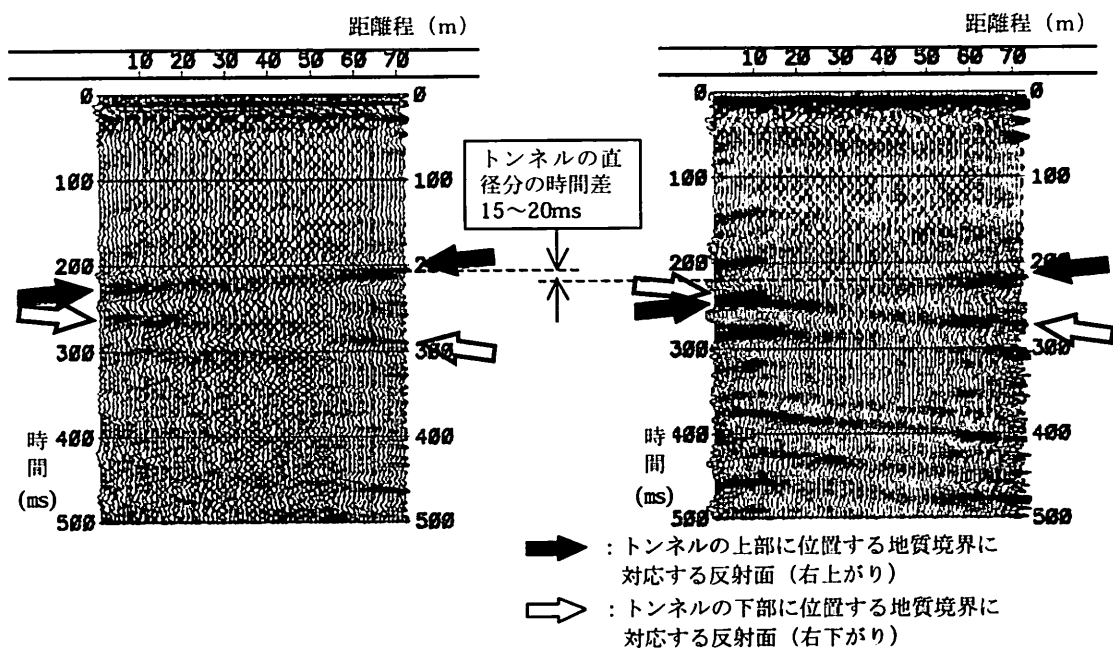


図-9 トンネルの勾配と反射波のイメージ図



(a) 上部受振器列による時間断面

(b) 下部受振器列による時間断面

図-10 観測結果（時間断面）

のかを判断することができる。つまり、図-9に示すように、探査起点の位置から離れると、トンネルと上方の地層境界の距離は短くなり、トンネル上方の反射面は、右上がりとなる。逆にトンネル下方の地層境界は、右下がりの反射面として記録されることとなる。なお、探査を実施した箇所の地層境界は、既存のボーリングデータや地質の成層過程を考慮すると、ほぼ水平であることが推定されている。

図-10は、それぞれ上部の受振器列と下部の受振器列により得られた時間断面である。図-10(a)において約230msから始まる黒矢印で示した反射面は、起点から右上がりとなっており、トンネル上方からの反射波であると推測される。また、右上がりの反射面は、図-10(b)に示したトンネル下部に設置した受振器においても記録されていることがわかる(約250msから始まる黒矢印で示した右上がりの反射面)。同様に、トンネル下方の地層境界を示す右下がり反射面(白抜き矢印)も、上下の受振器列の時間断面で記録されていることがわかる。なお、トンネル上方の反射面は、上部の受振器列で得られた時間断面の方が下部の受振器列で得られた時間断面より明瞭であり、下方の反射面は、下部の受振器列で得られた時間断面の方が上部の時間断面より明瞭である。おそらく、地中内に存在するトンネルの空間が、反射波の記録に影響を及ぼし、トンネル上方からの反射波は、トンネル上部の受振器列が、下方からの反射波は、トンネル下部の受振器列がより明瞭にとらえることができると考えられる。

ここで、トンネルをモデル化した浅層反射法地震探査の断面方向のシミュレーション解析結果では、トンネル坑内で発震した弾性波は、トンネルによる空間に影響されずに地盤内を広範囲に伝播すると結論付けたが、反射波の観測記録から、トンネルによる空間は、少なからず地盤内を伝播する弾性波に影響を及ぼし、波の振幅が小さくなる反射波では、波の減衰が顕著になると考えられた。

さらに、上部の受振器列において約230msから始まるトンネル上方の反射面は、下部の受振器列の方が約15-20ms程度遅れて記録されている。既存のPS検層の結果によると、トンネル周辺の地盤のS波速度は180m/sであり、トンネルの内径3.4mを考慮すると、受振器列の深度差となって時間差を生じたものと判断できる。つまり、トンネル上方の地層境界からの反射波は、トンネル上部に設置した受振器で記録された後、トンネル内径分の時間差をもって、トンネル下部の受振器で記録されたこととなる¹⁰⁾。これは、シミュレーション解析結果でも同様の結果を示している。このことは、上下の受振器列で得られた時間断面において、反射面に見られる時間差を考慮して探査結果を分析することにより、その反射波がトンネルの上方あるいは、下方から到来したものかを判断する材料となることを示している。

(3) 既往の地質柱状図との比較

上部受振器列と下部受振器列の時間断面に対して、それぞれ既往のPS検層の速度値を用いて深度変換し、シールドトンネルの勾配を考慮して、トンネルを中心に上部の受振器列の時間断面はトンネル上方に、下

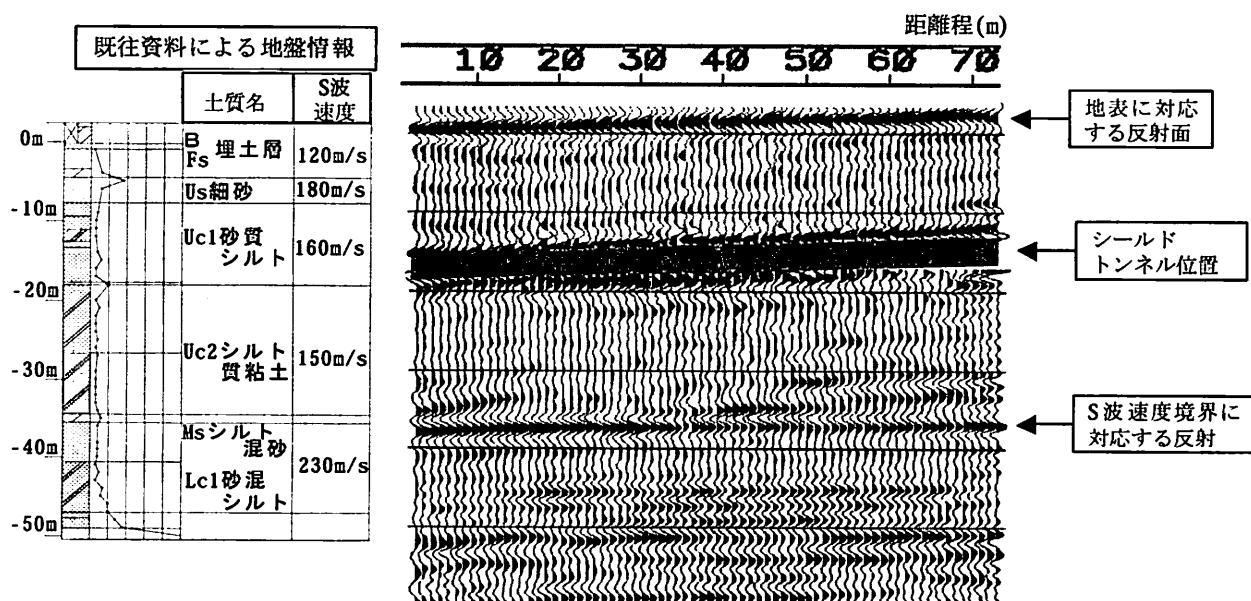


図-11 シールドトンネル上方、下方の深度断面

部の受振器列の時間断面は、トンネル下方にそれぞれ配置し、深度断面を作成した。既往のボーリング調査結果とあわせて図-11に示す。なお、反射波は、音響インピーダンスの高い層から低い層への地層境界と低い層から高い層への地層境界からのものでは、極性の正負が逆となる。このため、図-11は、インピーダンスが高くなる境界からの反射イベントが正になるように表示している。

既往の地質資料でわかるように、トンネル上位には、S波速度の相違が顕著な地層境界が存在しておらず、唯一、地表からの反射波が明瞭にとらえられている。一方、トンネルの下方には、深度方向に多少の誤差は含まれているもののS波速度が相違する深度36mに位置するシルト質粘土と砂混じりシルトの境界が明瞭な反射面としてとらえられている。

これらの結果から、シールドトンネル坑内からの浅層反射法地震探査により、トンネル上下の特性の異なる地層の境界面を線的にとらえることの有効性を確認できたと考えられる⁹⁾。

4. トンネル形状・サイズを考慮したシミュレーション解析

現地試験結果により、内径3.4m、RCセグメント厚さ275mmのシールドトンネル坑内からの浅層反射法地震探査により、既往の地質調査結果と整合性のある、特性の異なる地層の境界面を線的にとらえることの有効性を確認できた。また、トンネル内に設置した受振器は、トンネル上方および下方の地層境界からの反射波をどちらも観測していることなどから、現地試験結果は、十分にシールドトンネルをモデル化した浅層反射法地震探査のシミュレーション解析の有効性を確認できたものと考えられた。

ここで、トンネル坑内からの浅層反射法地震探査手法について、シールドトンネルの径の違いやトンネル形状の異なるトンネルへの適用性についてシミュレーション解析により確認した。

なお、解析は、シールドトンネルの他に馬蹄型トンネル、ボックストンネルを対象とした。

(1) 解析モデルの設定

解析に用いたトンネルは、円形トンネル（外径3.0m、6.0m、10.0m）、馬蹄形トンネル（H=6.0m×B=6.0m）、ボックストンネル（H=6.0m×B=6.0m）とした。なお、外径10mのトンネルは厚さ350mmの中床版を設けた。モデルでは、これらトンネルの土被りを25mとし、地表面から15mと65mの位置に地層境界を設けた。解析は、2.(1)の解析と同様に入力波形としてリッカー波を用い、卓越周波数30Hz、60Hz、120Hzでトンネル下部を

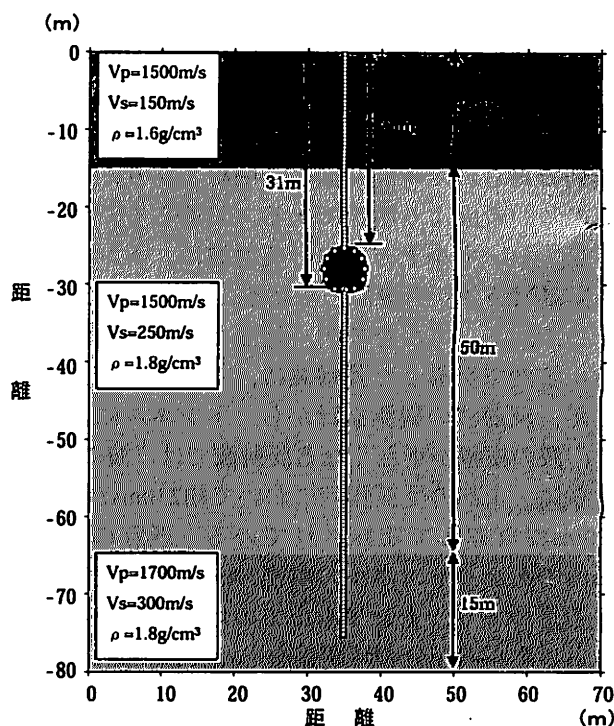


図-12 トンネルの勾配と反射波のイメージ図

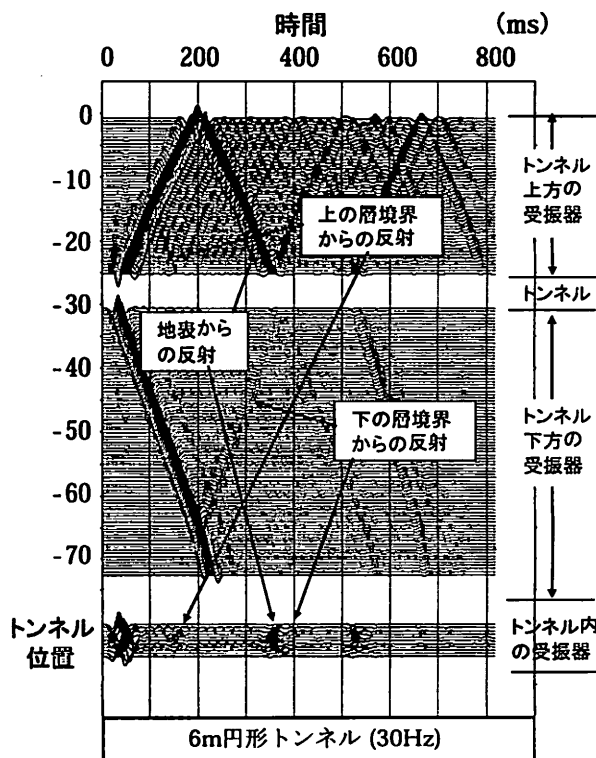


図-13 解析結果（円形トンネル）

トンネル軸に直角な水平方向に起振した。

馬蹄型トンネルの解析モデルを地盤条件とともに図-12に示す。

(2) 解析結果と考察

a) トンネルの径による影響

図-13に外径6.0m、入力波形30Hzの解析結果を示す。反射波がトンネルを透過してトンネル上方からの反射波は下方に、トンネル下方からの反射波は上方に連続性のある波が伝播しているのが確認できる。ここで、トンネル内の受振器の波形を詳細に分析すると、同じ地層境界からの反射波の到来時間は、トンネル上部の受振器と下部に設けた受振器の差が20ms弱となっている。仮にトンネルを透過する波が周辺地盤の速度にしたがって伝播しているとする、その時間差は24ms ($=6\text{m}/250\text{ms}$) となる。時間の差は微少であり2章での解析や3章での現地試験では、影響を把握するには至らなかったが、今回の解析でトンネルを透過する波は、コンクリートセグメントの影響を受けて地盤の速度よりもやや速い速度で伝播していることがわかった。

今回の解析では、トンネルの外径を10mのものも実施した。その結果、地表面や地層境界からの反射波を観測できる結果となっている。シールドトンネルで外径10mは、現存するトンネルの最大クラスであり、東京湾横断道路の外径と同程度である。ことから、浅層反射法地震探査に適した地盤に構築されているシールドトンネルについては、トンネル径に関係なく全てのシールドトンネルに適用できるという解析結果となった。

トンネル径による差異で顕著であったのは、トンネルの径が大きくなるほどトンネルを透過することによる波形のエネルギーの減衰が大きくなることであった。これは、トンネルの径が大きくなると、トンネル上方からの反射波は、トンネル上部に設置した受振器で明瞭に観測されるが、トンネル下部に設置した受振器での観測が不明瞭となることであり、径の大きいトンネルでの計測では、トンネル上下方向からの反射波の分離が、容易になる可能性を示している。

b) トンネル形状による影響

高さ6.0m、コンクリート厚さ0.4mの馬蹄型トンネル、高さ6.0m、幅6.0m、壁厚0.4mのボックストンネル

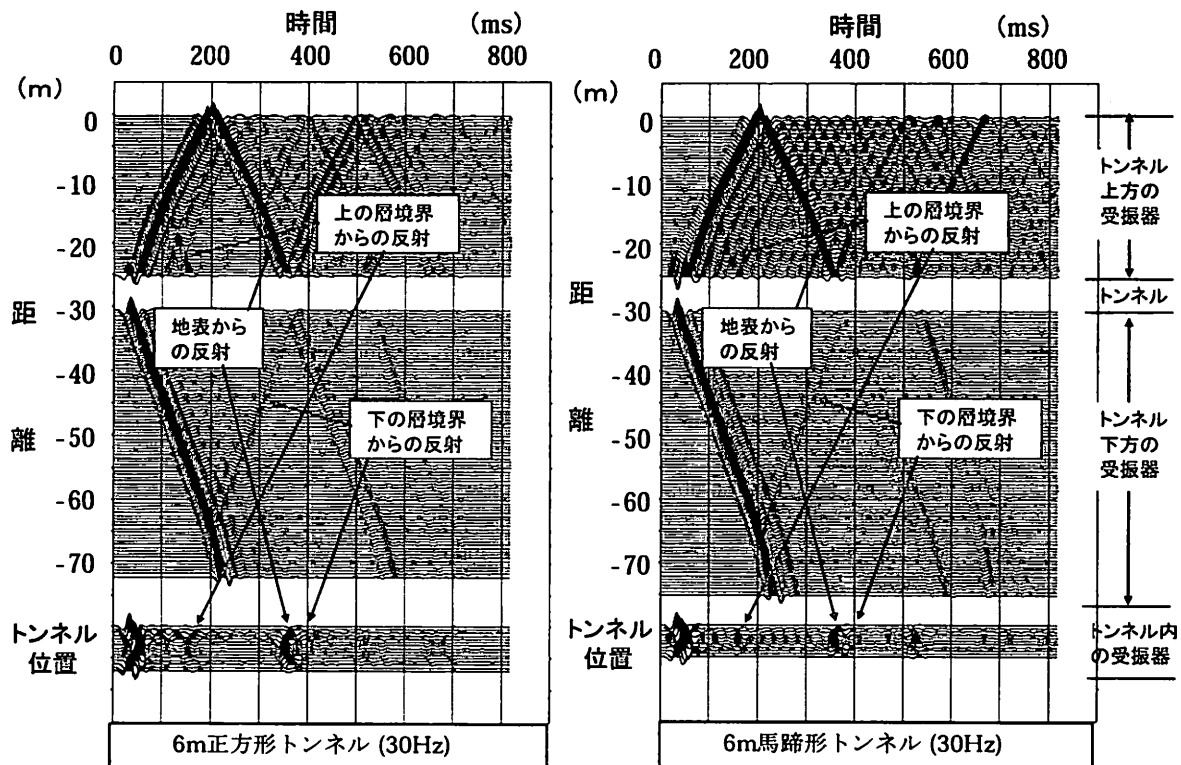


図-14 解析結果 (ボックストンネル, 馬蹄型トンネル)

の解析結果を図-14に示す。シールドトンネルと同様に、トンネル内の一点（下部）で発震しても、トンネルの上方にも弾性波が伝播されることが確認できた。また、反射波をトンネル内の上下に設置した受振器で観測できるという解析結果を得ることができた。

このことから、馬蹄型トンネルやボックストンネルの場合においても、トンネル坑内からの反射法地震探査によりトンネル上下の地層境界を確認できることが解析の上では可能と判断できた。

5. 結論

本論文では、トンネル坑内で弾性波を発震し、トンネル坑内で地層境界からの反射波を受振することで、トンネル上下の地層境界を判別する手法について、内径3.4mの既設シールドトンネル坑内で現地試験を行い、既存のボーリングデータと整合性のある結果を得られることを確認した。また、径の異なる円形トンネル、馬蹄型トンネル、ボックストンネルへの同手法の適用性についてシミュレーション解析により確認した。

ここで、浅層反射法地震探査では、探査結果を時間断面から深度断面に変換するときに用いる地盤の弾性波速度は、一般的に誤差を含んでおり、コンクリートを透過しない浅層反射法地震探査においても、探査データを評価する場合には、既存の地質データを十分に吟味して評価するように言われている。一方、シールドトンネルは事前に離散的ではあるが地質調査を実施している場合が多い。このため、トンネルからの浅層反射法地震探査の結果の分析にあたっては、既存の地質資料を十分に吟味して行うことが可能となる。探査記録を十分に吟味し誤差の小さくなった探査結果は、トンネル上下の地層境界面を連続的にとらえることができるため、耐震設計における基盤層の傾きの状況などを定量的に把握でき、トンネルの維持管理に有効なデータになる。

今後は、傾斜した多層地盤に構築されてたシールドトンネルや今回シミュレーション解析を実施した馬蹄型トンネルやボックストンネルについて、現地試験により今回の手法の適用性を確認していく所存である。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル・ライブラリー第14号 トンネルの維持管理， pp. 27-37, 2005.
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書 シールド工法・同解説， pp. 49-53, 2006.
- 3) 土木学会関西支部：シールドトンネルの合理的耐震設計法ガイドライン（案）（平成13年度講習会テキスト）， pp. 112-114, 2001.
- 4) Brouwer, J., Helbig, K. : Shallow High-Resolution Reflection Seismics, Handbook of Geophysical Exploration Seismic Exploration, Vol. 19, pp. 123-184, Elsevier, 1998.
- 5) 物理探査学会：物理探査適用の手引き（とくに土木分野への利用）， pp. 83-106, 2000.
- 6) 林 宏一, Burns, R. D. : 地形を考慮した差分法による粘弾性波動場モデリング，物理探査学会第105回学術講演会論文集， pp. 37-41, 1999.
- 7) Ricker, N. : Wavelet contraction, wavelet expansion, and the control of seismic resolution, Geophysics, 18, pp. 769-702, 1953.
- 8) 竹内友章, 高橋 晃, 松原由和, 山本正人, 新家由隆, 松岡俊文：シールドトンネル坑内からの反射法地震探査（その1），物理探査学会第115回学術講演会論文集， pp. 153-156, 2006.
- 9) 信岡 大, 甲斐田康弘, Nijhof, V., Brouwer, J., Ghose, R. : S波ポータブルバイブレータ震源の開発とその適用実験，物理探査学会第99回学術講演会論文集， pp. 56-60, 1998.
- 10) 高橋 晃, 竹内友章, 松原由和, 山本正人, 新家由隆, 松岡俊文：シールドトンネル坑内からの反射法地震探査（その2），物理探査学会第115回学術講演会論文集， pp. 157-160, 2006.

(2008. 7. 7受付)