

穿孔探査法と坑内弾性波反射法を組み合わせた 切羽前方探査法

THE FORE SURVEY SYSTEM OF TUNNEL FACE USING IN-TUNNEL SEISMIC SURVEY AND ROCK DRILLING SURVEY

山下雅之¹⁾・石山宏二¹⁾・稲葉 力¹⁾・塚田純一²⁾・森田 誠²⁾

Masayuki YAMASHITA, Koji ISHIYAMA, Tsutomu INABA, Junichi TSUKADA, Makoto MORITA

In tunnel, unexpected appearance of heterogeneous rocks such the faults at the face can produce serious problems for safety, planning and costs of excavation. Because of this, estimates of the geological conditions ahead of the face as soon as possible are most important subject, and several methods of fore survey have been proposed. However, these methods as, used individually, were not satisfactory to both of accuracy and extent of exploring.

In this study, the fore survey system combined of in-tunnel seismic survey and rock drilling survey was proposed. Between these methods described above, the former can survey further from the face than latter, and the prediction by latter is more accurate than that by former. Therefore, this system can obtain merits of accuracy and extent of exploring. And, as the result of application this system to the tunnel under construction, the geological prediction approximately coincided with geology for the exploratory section ahead of the face.

Key Words: fore survey of tunnel face, in-tunnel seismic survey, rock drilling survey

1. まえがき

トンネル施工における切羽前方地質のより正確な把握は、施工性および安全性を向上させる重要な要因の一つであり、これまでに数多くの切羽前方探査法が開発・提案されてきた。例えば、直接的に地質情報が得られる探査法としては水平コアボーリングによる探査等が挙げられ、また、短時間で比較的長い区間の前方探査が可能な探査法としては坑内弾性波反射法等が挙げられる。しかし、前者には切羽前方100m程度の探査に数日を要するために施工サイクルに与える影響が大きいという短所があり、後者には測線区間および探査区間の地山性状に探査精度が大きく左右されるという短所がある。このように、既存の探査法を単独で使用しても、探査精度、探査距離および測定・解析時間等のすべての条件を同時に満足させるのは現状では非常に困難である。

そこで今回、単独ではなく異なる特性（長所・短所）を持つ2種類の探査法（坑内弾性波探査法、穿孔探査法）を効果的に組み合わせることによりお互いの長所を生かすとともに、短所を補い合わせて総合的に切羽前方の地質性状を解析・予測する手法を提案し、先に述べた単独探査にみられる問題点の解決を図った。また、施工現場においてこの手法を用いた実験探査を行い、その適用性についての検討も行った。

1) 正会員 西松建設（株）技術研究所

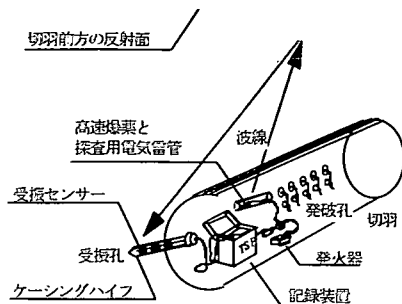
2) ドリルマシン（株）技術部

2. 組み合わせに使用した各探査法の概要

(1) 坑内弾性波反射法（TSP 法）

a. 探査システムの概要

今回使用した探査システムはアンベルグ社が開発したTSP 202システムである。探査は図－1に示すように、坑内側壁に多数の発振点および1ないしは2つの受振点をほぼ一直線に設けた測線配置で行われる。そして各発振点から順次放出された波動エネルギーが、切羽前方の地質境界においてその一部が反射し、その反射波が受振点に設置された受振器において検知・記録される。また、同時に発振点からの直接波も記録し、得られた平均弾性波速度より反射面から受振点までの距離を推定する。



図－1 TSP 探査概念図

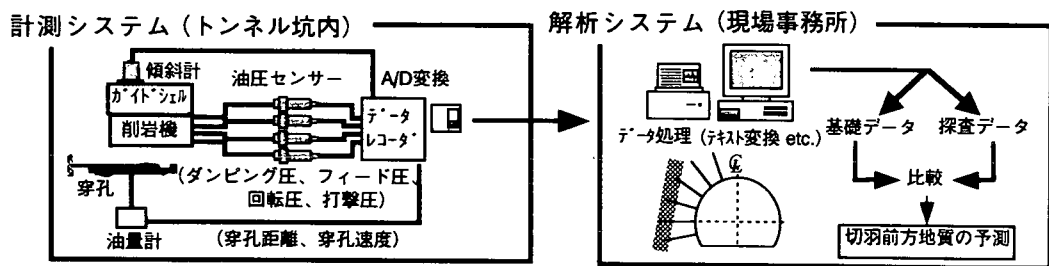
b. 探査法の特徴

この探査法の長所は、坑内での計測作業が準備作業も含めて半日程度であり、さらに約3時間程度の解析作業で切羽前方約100m区間における反射面の予測が可能となる点である。これにより、施工サイクルへの影響をあまり与えずに100mという比較的長区間の探査が行えるとともに、探査結果を迅速に施工に反映させることが可能となる。短所としては、測線区間および探査区間の地山性状や探査対象の地質境界面の性状・形態によって探査精度が大きく左右されるという点が挙げられる。

(2) 穿孔探査法

a. 探査システムの概要

穿孔探査法¹⁾とは油圧式削岩機の穿孔油圧データを利用して穿孔区間の地質予測を行うものであり、穿孔時の岩盤からの打撃反力を吸収する働きをもつダンピング圧の挙動を地質予測に利用することを最大の特徴としている。探査システムは図－2に示すように、穿孔データを計測・収集する『計測システム』および収集されたデータの処理・解析を行う『解析システム』からなる。



図－2 穿孔探査システム

図－2の解析システムにおける地質予測は探索データを基礎データと比較することによって行われるが、この基礎データとは探査に先立ち収集された岩盤性状との対応が明らかな穿孔データを指す。図－3には、探査トンネルにおいて収集した基礎データのうち、とくにフィード圧（削岩機を岩盤に押し付ける圧）とダンピング圧との関係を示している。このように同一のフィード圧で穿孔した場合、硬質な岩盤ほどより高いダンピング圧を示しており、その特性を利用して岩盤性状の予測が行われる。また、本システムにおいて同時に算出される穿孔速度もダンピング圧データの補足データとして予測に使用する。

穿孔探査の適用方法には、施工時の穿孔データを基に切羽前方数m区間の比較的短区間の探査を連続的に行う方法と、昼夜勤の交代時等の施工休止時を利用して切羽前方数10m区間の比較的長区間の探査を行う方法の2種類がある。TSP探査との組み合わせには、より早期に切羽前方の地質性状を把握するために後者の方法を用いた。図-4に長区間探査の概念図を示す。なお、ダンピング圧と岩盤物性の関係および長区間探査の方法等についての詳細は参考文献¹⁾²⁾を参照されたい。

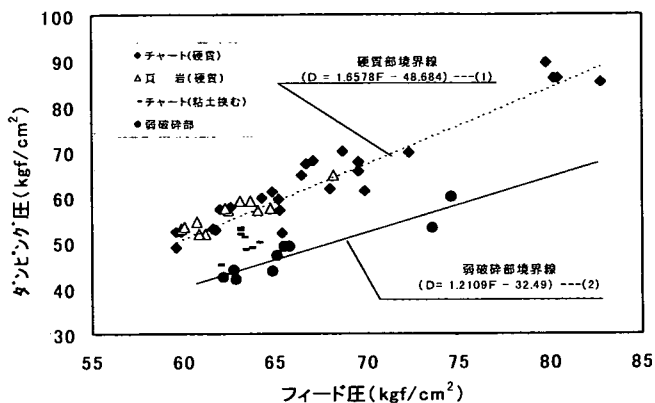


図-3 ダンピング圧/フィード圧と岩盤性状の関係

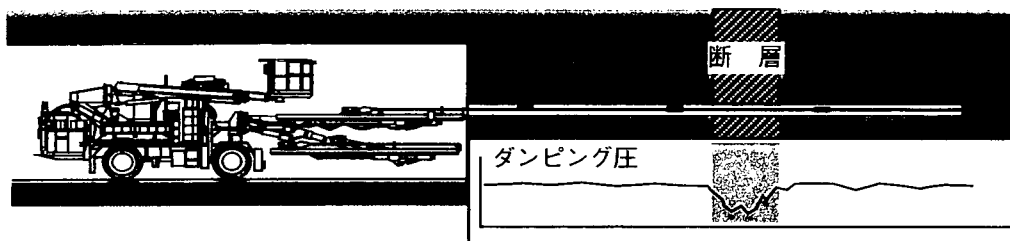


図-4 長区間探査概念図

b. 探査法の特徴

この探査法の長所は、探査区間の地山情報を穿孔という直接的な手法を用いて地質探査を行うことから、より高い探査精度が期待できる点である。さらに、断層などの性状のみならずそれに伴う湧水の有無もしくはその程度を把握することも可能である。計測時間についてはこれまでの探査実績¹⁾より、約30m区間の探査において準備・後片付けを含めても約1.5時間程度で行うことが可能であり、地質予測作業に要する時間も0.5時間程度である。したがって、弾性波探査法と同様に施工サイクルへの影響をあまり与えず、かつ、計測結果を迅速に施工に反映させることができる。短所としては、探査区間が数10m程度とTSP探査の約100mに比べてやや短く、面ではなく点のデータしか得られない事等が挙げられる。

3. 2種類の探査を組み合わせた切羽前方探査法

(1) 組み合わせ方法とその利点

組み合わせに用いた2種類の探査法の特徴を比較してみると、探査範囲についてはTSP法が有利であり(TSP法: 約100m、穿孔探査法: 数10m)、探査精度については穿孔探査法が有利であると言える。そして今回、両者の長所を生かしてより効果的な切羽前方探査を行うために、図-5に示すような方法を採用した。すなわち、まずTSP法を用いた長区間の探査により断層破碎帯等の有無またはそのおおよその出現位置を把握し(Step 1)、その予想出現区間近くまで掘削が進んだ時点において穿孔探査を集中的に適用して地質境界面のより正確な位置を把握する(Step 2, 3)。

以上のような組み合わせ方法により、TSP探査を単独で適用する場合に問題となる探査条件による探査誤差を穿孔探査により修正することが可能である。また、穿孔探査を単独で適用する場合には30m毎の連続探査(約100mの探査で4回程度)が必要となるのに対し、その適用回数を必要最小限に抑えることができる。

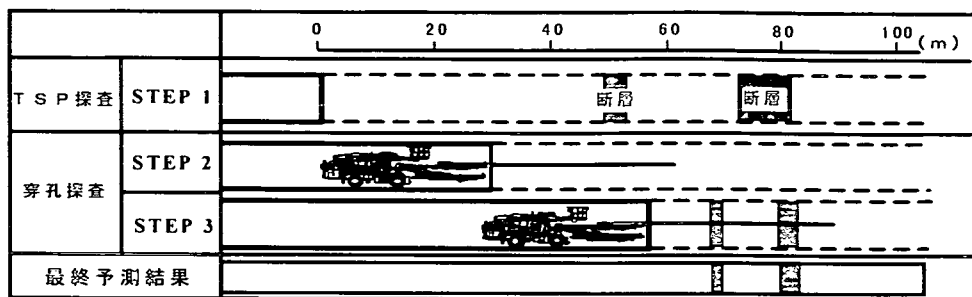


図-5 組み合わせによる探査例

(2) 適用事例

上述の探査法の適用性を確認するために、実際のトンネル施工現場において実験探査を行った。以下にその概要および結果を述べる。

a. 適用トンネルの概要

探査を行った施工トンネルは、NATM工法で施工中の道路トンネル（掘削断面約73m²）であり、トンネルおよびその周辺には中生代ジュラ紀のチャート、砂岩および頁岩層が広く分布している。

b. 探査方法

適用トンネルでは事前調査によりT. D. 495-520m区間に断層破碎帯の出現が想定されており、その地質脆弱部の有無または出現位置のより正確な把握を目的に探査をおこなった。組み合わせ方法としては、まずT. D. 450m - 550m区間においてTSP探査をおこない、それによって推定された地質脆弱区間において穿孔探査を集中的に適用する方法を用いた。

c. 探査結果

図-6に示すように、TSP探査によりT. D. 521-543m区間に反射面の密集部が認められた。TSP探査によって抽出された反射面から地質評価をする方法としては、反射面の種類によって評価する方法が一般に良く知られている。すなわち、硬質岩盤から軟質岩盤へ変化する境界面と軟質岩盤から硬質岩盤へ変化する境界面で挟まれた区間を断層などの地質脆弱部とする評価方法である。しかし、最近の研究では反射面の種類に関わらずそれら反射面の密集の度合いで地質評価をした方が実際の地質性状と良く一致するという報告³⁾があり、この方法では反射面が密集している区間を地質脆弱部として評価する。今回はその方法に従い、T. D. 521-543m区間の反射面密集部を断層などの地質脆弱部として識別した。その結果、図-7に示すように、TSP探査による断層の出現位置予測と事前調査による予測との間に約25mの差が生じた。

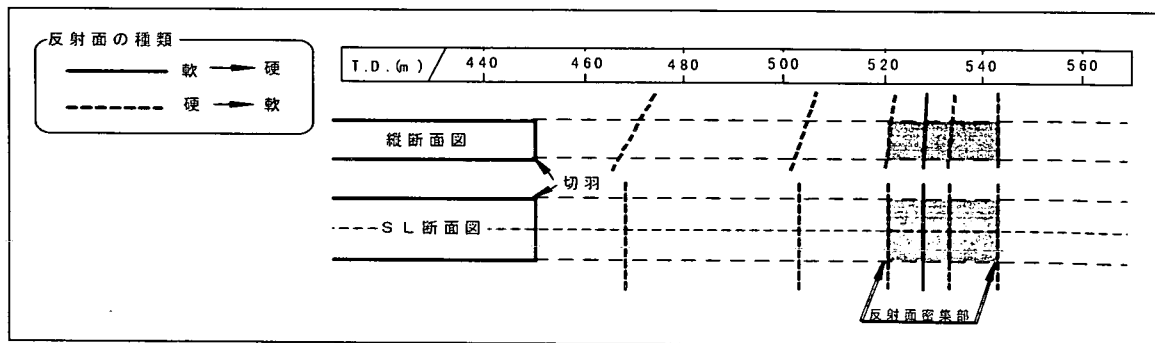


図-6 TSP 探査結果

そこで、穿孔探査をT.D. 484mとT.D. 511mの2地点において適用し、事前調査およびTSP探査によって異なる位置に想定された断層破砕帯の最終的な位置予測を行った。なお、1回の穿孔探査による地質推定区間は、既に探査実績のある切羽前方約30mまでの区間とした。

穿孔探査による探査結果を図-8に示す。この図において弱破砕部の境界線としたものは、図-3の式(2)から推定される弱破砕部を穿孔した際得られ

るダンピング圧を示す。すなわち、穿孔時のダンピング圧の値がこの境界線以下に低下した場合、その区間を弱破砕部として識別することができる。また、長区間の穿孔による孔曲がりやを極力抑えるために、切羽より約3m区間の初期穿孔はフィード圧を通常の探査に使用する値(約60kgf/cm²以上)よりも低い値で穿孔した。今回の探査では、この初期穿孔区間を除く切羽前方約3～30m区間の地質予測をおこなう事とし、図-8において第2回探査の初期穿孔区間であるT.D. 511-514m区間のデータは第1回探査のデータと重なるため除外した。探査結果を見てみると、全探査区間においてダンピング圧の値が弱破砕部の境界線よりも約20kgf/cm²程度高い位置で安定しており、探査区間全般にわたって地山性状は比較的硬質で安定していると判断できる。ただし、T.D. 519m付近ではダンピング圧が弱破砕部ほどではないものの、若干低下しているのが認められる。したがって、その付近では地山性状がやや悪化する可能性も考えられたが、ダンピング圧の低下区間が1m程度と短いことからそれ程大きな地山性状の悪化はないと判断した。

以上の結果より、TSP探査を適用したT.D. 450m-550m区間の地山性状はおおむね硬質で安定しており、事前調査やTSP探査によって想定されたような断層破砕帯は探査区間に出現しないと判断した。

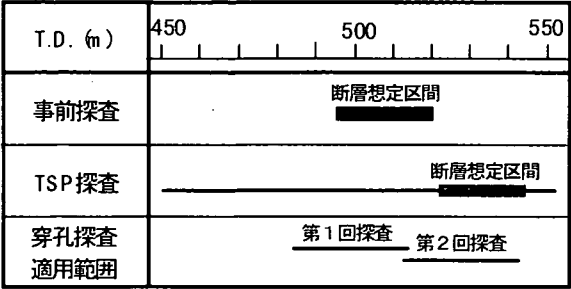


図-7 穿孔探査適用範囲

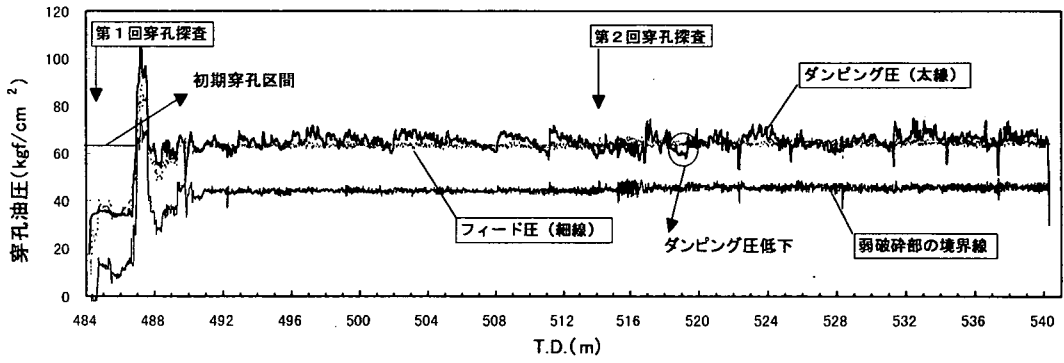


図-8 穿孔探査結果

d. 探査結果と実際の地質との対比

図-9には探査区間のうち、とくに事前調査およびTSP探査によって断層破砕帯の出現が予想された区間における各探査の予測結果と実際の地質性状を比較したものを示す。この図からも分かるように、掘削によって明らかになった探査区間の地質性状は部分的に剥離性に富む頁岩層が認められるものの、比較的安定した硬質砂岩・頁岩混在層(頁岩部は砂岩に比べてやや脆弱)が卓越している。これを探査結果と比較してみると、穿孔探査で高いダンピング圧を示す区間には比較的安定した岩盤が出現し、ダンピング圧に若干の低下が認められた区間付近にはやや脆弱な剥離性に富む頁岩層が出現しており、穿孔探査による予測結果と実際の地山性状との間に非常に良い対応関係がみられた。また、穿孔探査を適用した以外の区間では硬質で比較的安定した岩盤が認められ、TSP探査による予測結果に一致している。以上のように、組み合わせによる探査でおこなった地質予測は実際の地山性状におおむね一致しているという結果が得られた。

ここで、事前調査およびTSP探査で想定された断層が探査区間に出現しなかった理由については以下のような原因が考えられる。まず事前調査で想定された断層については、想定よりも約80m手前のT.D. 405-420m付近に白色粘土層を含む断層破砕帯が出現しており、この断層が想定されていた破砕帯に対応していた可能性がある。次にTSP探査で識別された反射面密集部については、前述のT.D. 405-420m付近の断層破砕帯が出現した後に探査を行っており、反射面がこの破砕帯を捉えていた可能性は考えられない。したがって、TSP探査で識別された反射面密集部は事前調査で想定されていた断層と異なる地山性状を捉えていたと考えられる。図-9に示したようにTSP探査は切羽前方ではなく斜め前方の地質境界面を捉え、その境界面を切羽前方のトンネル掘削予定区間まで投影させることによって地質予測を行う。したがって、地質境界を捉えた位置からトンネル掘削区間までの間に境界面から構成される地質脆弱部が収束してしまった場合には、それが探査により推定されていても掘削区間には出現しない。適用トンネルではこれまでの掘削で連続性が乏しく不規則な形態（レンズ状など）を呈する弱層が数多く切羽で確認されており、今回の探査で識別された反射面密集部もこのような地質性状を捉えていた可能性がある。

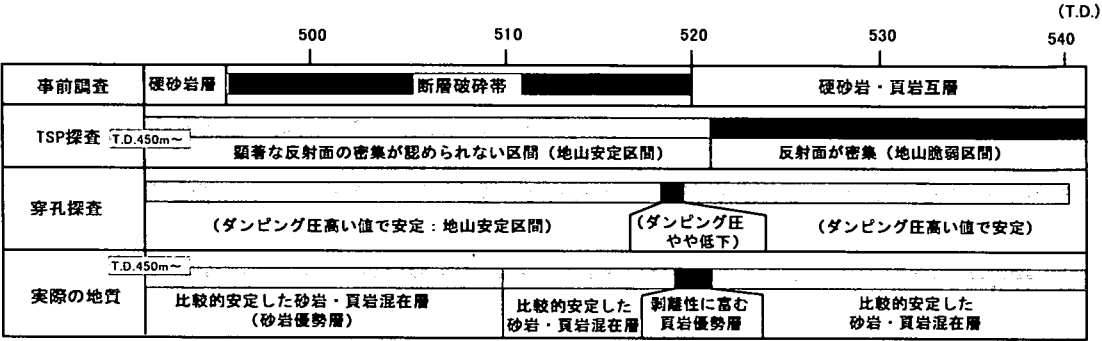


図-9 探査結果と実際の地質との対比

4. まとめと今後の課題

今回の検討によって得られた結果は以下のようにまとめられる。

1. 効率良くより精度の高い切羽前方地質の想定を行うために、TSP探査および穿孔探査という特性の異なる探査法を組み合わせた探査法を提案した。
2. 組み合わせによる探査法の現場適用実験を行った結果、TSP探査による地質予測を穿孔探査によって修正することにより、最終的に実際の地質性状をより正確に把握することができた。

今後の課題としては、組み合わせによる探査実績が本論で紹介した一回のみであるので、更に実験データを収集して本探査法の適用性についての検討を加える必要がある。また、TSP探査および穿孔探査の個々についての探査精度を更に向上させるための検討も同時に進める必要がある。

参考文献

- 1) 山下, 石山, 稲葉, 塚田, 森田: 穿孔探査法の長区間地質探査への適用, 土木学会第52回年次学術講演概要集第3部(A), pp644-645, 1997.
- 2) 山下, 石山, 稲葉, 早坂, 塚田: 油圧式削岩機のダンピング圧を利用した切羽前方探査法, トンネル工学研究論文・報告集(第6巻), pp107-112, 1996.
- 3) 明石, 山下, 石山, 稲葉: TSP法による切羽前方地質推定についての基礎的検討, 土木学会第51回年次学術講演概要集第3部(A), pp734-735, 1996.