

Prediction System of Geological Conditions ahead of the Tunnel Face

Masaru TOIDA , Michihiro INOU , Takuji YAMAMOTO , Yasuyuki MIYAJIMA

For the secure and rationalized excavation of tunnels, the prediction of geological conditions ahead of the face is of extreme importance. The authors have developed the prediction system which are constituted of "TSP (Tunnel Seismic Prediction) measurement", "Drilling logging" and "Velocity logging". This paper describes the verification of this system which was done by comparing the measurement results obtained by the above three methods with the geological and mechanical properties of rock mass. Using this system, the existence of weak zone ahead of the tunnel face can be accurately detected during tunnel excavations.

1. はじめに

トンネルの施工に際して切羽前方の地質や構造を精度よく予測することは、経済的な施工や安全性の確保を達成する上で重要である。特に、断層や破碎帯などの地質不良部が出現した場合には、施工方法や支保パターンの変更など工事の進捗に与える影響が大きく、これら地質不良部の存在やその岩盤物性に関する情報を事前に入手することが望ましい。しかしながら、従来は必要に応じて切羽からの先進コアボーリングを実施することが多いため比較的高額の費用が必要とされ、ボーリング作業中は掘削を中断しなければならないなどの問題点もあるため、新たな調査技術の開発が望まれている。

筆者らは、施工への影響ができるだけ少なく、しかも支保設計に直接的に利用可能な切羽前方の地質や構造についての情報を得るためには、比較的短時間で測定・評価が行えることや地質不良部の岩盤物性をより定量的に把握することが必要と

考え、複数の簡便な調査手段を組み合わせた切羽前方予測システムを開発した。今回、本手法を実際のトンネルへ適用することによって本システムの性能試験を試みた結果、実用的な調査・評価システムであることが確認できたので、これらの試験結果について以下に報告する。

表-1 切羽前方予測システムを構成する技術

	調査手法	掘削への影響を考慮した探査距離 短 中 長	長所	短所
切羽前方予測システム	削孔検層	↔	リアルタイムに情報を得ることができる	測定値に及ぼす地質や使用機器の影響が大きい(定量的情報として使いにくい)
	速度検層	↔	測定結果を掘削方法や支保パターンに反映できる	測定の前段剛として削孔が必要である
	TSP測定	↔	短時間の作業・解析でアウトプットが得られる	測定精度が不明確である
従来方法	* コア・ボーリング	↔	岩盤構造を直接的に確認できる	作業に時間がかかり、作業中は、切羽が止まることが多い

* コア・ボーリングは実質的な探査距離は最も長くなるが、掘削作業への影響が最も大きいと考えられるため、点線表示とした。

2. システムの概要

本項では、切羽前方予測システムを構成する要素技術の概要と特徴などについて述べる。本システムは、「TSP (Tunnel Seismic Prediction)」¹⁾、「削孔検層」²⁾、及び「速度検層」³⁾の3つの技術から構成され、各々の概要は表―1のとおりである。表中には、各技術ごとの探査距離や長短所を一般的な切羽前方予測手法である「コア・ボーリング」と比較して示した。これより、本システムを構成する3つの技術は、いずれもコアボーリングのように切羽を長期間にわたって止めることがなく、簡便かつ迅速に調査結果が得られることが特徴であり、これを最大限に活用するために各技術の短所を相互に補う形でのシステム構成を考えた(図―1参照)。すなわち、システムの適用ステップを2つに分け、以下の手順で実施することとした。

- ①まず、探査精度は他の手法に比べてやや劣るが比較的長距離の探査が可能なTSP測定で、トンネルの切羽前方に地質不良部のような不連続面が存在するかどうかを予測する。
- ②次に、TSP測定結果から不連続面の存在が予測された場合には、これらの不連続面にトンネル切羽が近づいた時点で削孔検層を実施し、地質や湧水に関する情報を直接入手する。また、削孔検層によって生じたパーカッション・ボーリング孔を利用して速度検層を行い、地山の力学的情報である弾性波速度値を入手してトンネルの施工(掘削、支保)に反映させる。

このように本システムの適用により切羽前方に対する調査頻度・数量の適正化、前方予測作業によるトンネル掘削休止期間の低減、及び施工(掘削・支保)に有効な情報入手が期待できる。以下に、各技術の概要について説明する。

2・1 TSP測定

TSP測定は、今回、筆者らがスイスのアルベルグ・メジャリング・テクニク社から導入した弾性波探査手法である(図―2参照)。トンネル壁面に複数(通常24点)の発破孔と受信孔(1~2点)を設置し、発破による振動を受信器で観測する。その受信波形を専用ソフトで解析して、切羽前方の不連続面(岩盤の物性が変化する境界面など)からの反射波(P波)を取り出し、不連続面の位置・傾きを表示する。本技術の最大の長所は、現場の工事に影響を与えることなく比較的短時間で測定・解析が行える点にある。

ただし、TSPでは測定・解析を極めて簡略化しているため、その精度に不明確な部分があると判断し、結果

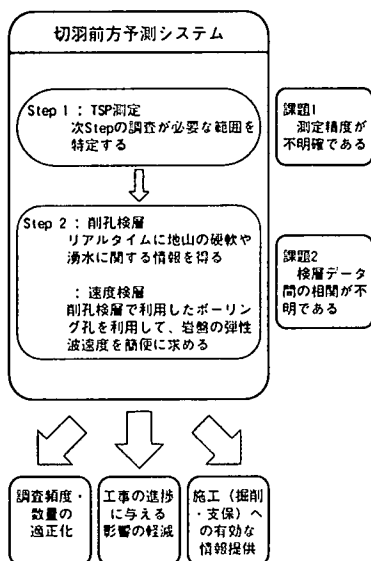


図-1 切羽前方予測システムの概念

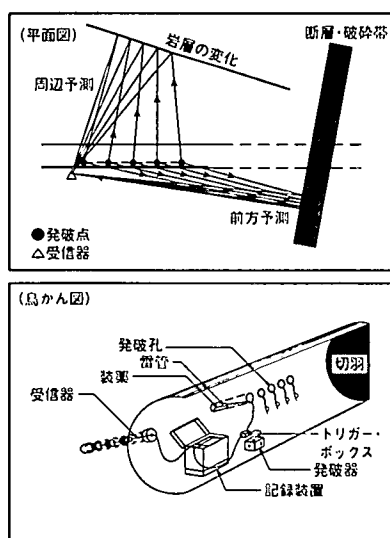


図-2 TSP測定の概念

の評価には以下の点について必ず留意することとした。

- ①結果を評価するために必要な切羽前方地山の弾性波速度に推定値を用いているため、不連続面の存在予測位置は、あるバラツキの範囲を有していると考える。
- ②本システムでは不連続面の走向を地質情報等に基づいてマニュアル入力する形式になっているので、不連続面の評価は存在の有無だけにとどめ、走向に関する評価はしない。
- ③測定した反射波振幅のフェーズ（アップ、ダウン）で地山の硬軟を判定するプログラムを内蔵しているが、測定した反射波が初動部分であるという確認ができないため、この硬軟に関する判断は行わない。

2.2 削孔検層

削孔検層システムは、山岳トンネルの掘削や支保に際して用いられることの多い油圧式ドリルの削孔データ（削孔速度・打撃エネルギーなど）を測定・解析し、削孔深度の地山状況を評価する手法である。具体的評価には図-3に示す破壊エネルギー係数を用いる。ここで破壊エネルギー係数は単位体積の岩盤を破壊するのに必要なエネルギーを表しており、掘削位置の岩盤が硬い場合には大きくなり、軟らかい場合には小さくなる。

削孔検層は削孔中のデータを現場において記録する「計測システム部」と、これらのデータを現場事務所で解析・評価する「データ処理システム部」から構成される。計測システム部ではフィード圧、打撃圧、トルクを測定するための圧力計と削孔深度を測定するための流量計を用いており、これらのセンサーで測定されたデータをメモリーカードに連続的に記録する。解析はメモリーカードを切羽から現場事務所に持ち帰り、パソコンを用いて行うことができる。

2.3 速度検層

速度検層は、前項で紹介した「削孔検層」の実施によって生じたパーカッション・ボーリング孔を有効利用して、地山の弾性波速度（P波）を簡便に測定する技術である（図-4参照）。

まず、パーカッション・ボーリング孔に受振器（1m間隔で3連式）を挿入する。受振器は塩ビパイプの先端についており、これに1本2mの塩ビパイプを順次つなぎながら測定孔の先端まで挿入していく。受振ケーブル及びトリガーケーブル（ハンマー打撃または発破の瞬間の信号を送るケーブル）と計測器を接続して準備は完了する。次に、測定孔から50cm～1m程度離れた位置の切羽岩盤で発破またはハンマー打撃により起振し、波形を記録する。良好な波形が得られたら、受振器を2m引き出し（受振器1個は重ねる）、起振して波形を記録するという操作を孔口まで繰り返し、測定を終了する。測定された波形データは同時にコンピュータに記録され、解析はデータの収録されたコンピュータに備え付けの専用ソフトを用いて行う。まずディスプレイ上に記録した波形を表示し、初動到達時間を自動または手動で読み取る。次に、初動到達時間を横軸に、ボーリング孔の深度（切羽からの距離）を縦軸にとった走時曲線を作成し、

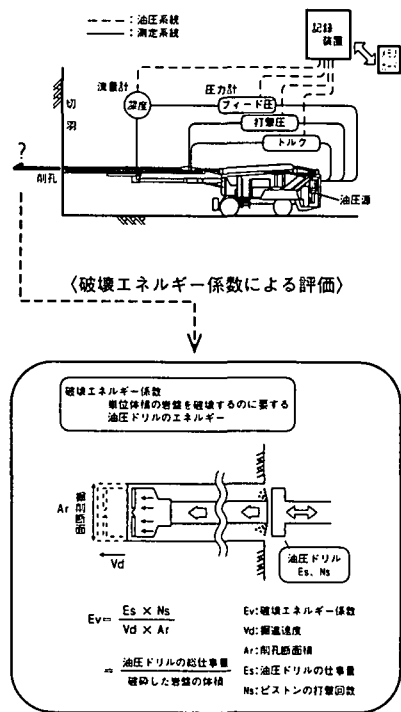


図-3 削孔検層の概念

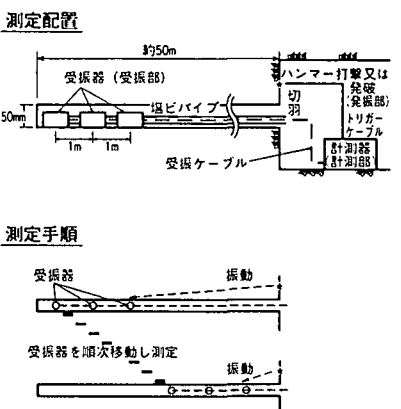


図-4 速度検層の概念

傾きが一定となる区間ごとに速度値（区間速度）を計算して走時曲線上に表示する。最終結果は、切羽からの距離ごとの弾性波（P波）速度分布として利用されることが多い。

3. システムの性能確認試験

2項で述べたように、本システムは3つの要素技術を組み合わせることによって各技術の短所を補いつつ、各々の長所を最大限に活用することを目指している。しかし、前出の図―1中に示したように、実用に先立ってクリアすべき2つの課題があり、まず、これらについての性能確認試験を原位置で実施したのでその結果を以下に示す。

3・1 試験サイトの概要

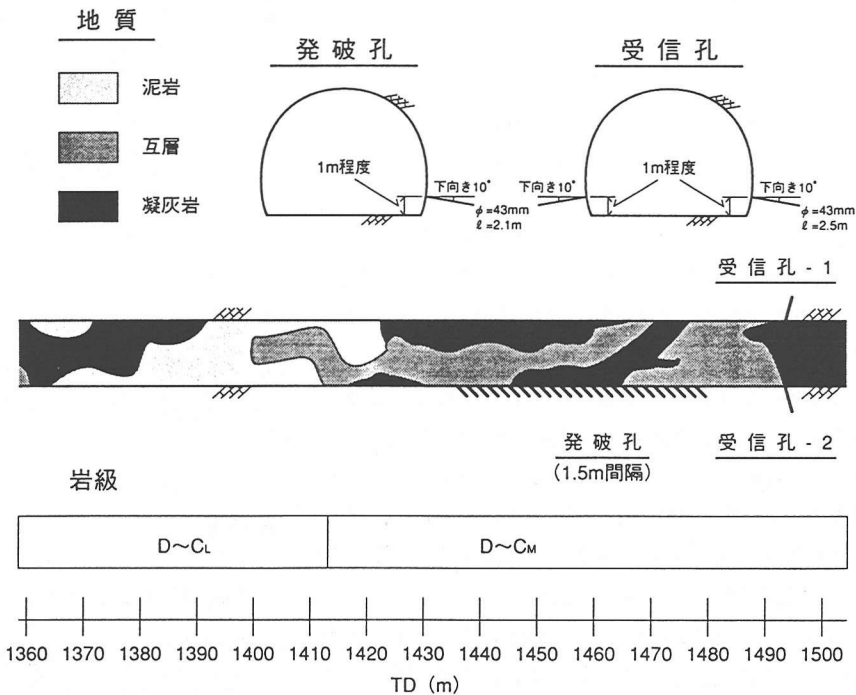
今回の試験を実施した地点は、新第三紀の凝灰岩、泥岩及びその互層から構成される岩盤中に掘削中のトンネルであり、試験位置での土被りは概ね150～200mである。後出の試験位置平面図（たとえば図―5）にも示されるように、凝灰岩と泥岩が交互に出現し、泥岩部では一部で膨張性を示す箇所がある。このような箇所については掘削後の計測値に基づいて支保増強が行われている。また、岩石試験結果による一軸強度（平均値）は凝灰岩が約30MPa、泥岩が約14MPaと、強度特性が岩種によってかなり異なっている。

3・2 TSPの性能確認

本試験は、TSPの測定・解析精度の把握を目的として実施した。

(1) 試験方法

図―5はTSPの性能確認試験における発・受信配置を示したものであり、TSP測定によってトンネルの既掘削区間であるTD1,410～1,420m付近やTD1,380～1,390m付近の凝灰岩・泥岩の境界が検出可能かどうかを測定目的とした。発破孔は1.5mピッチで24点とし、受信孔は発破孔群から15m離れたトンネルの両側壁に設置した。



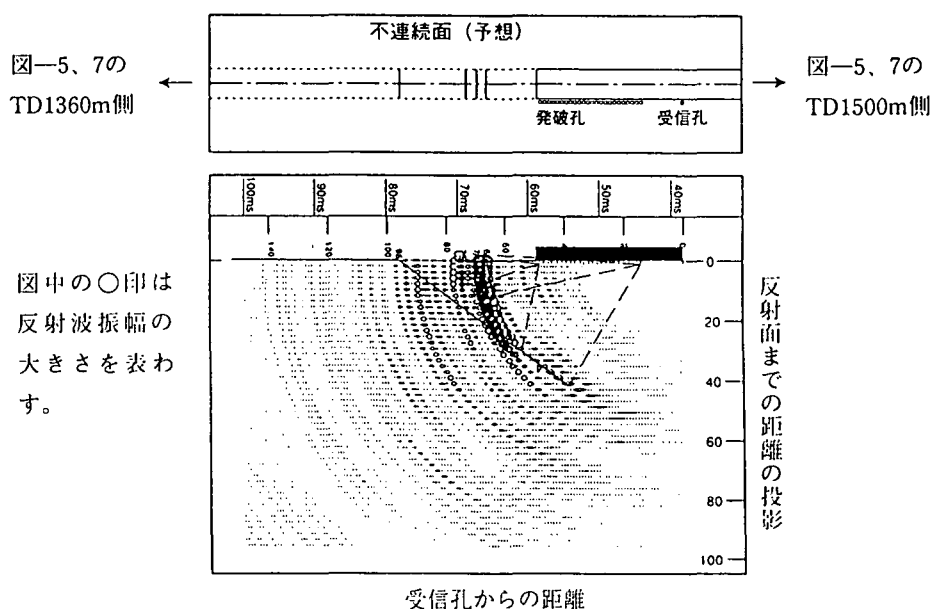
図―5 TSP測定の発受信配置（性能確認試験）

(2) TSP測定による探査精度

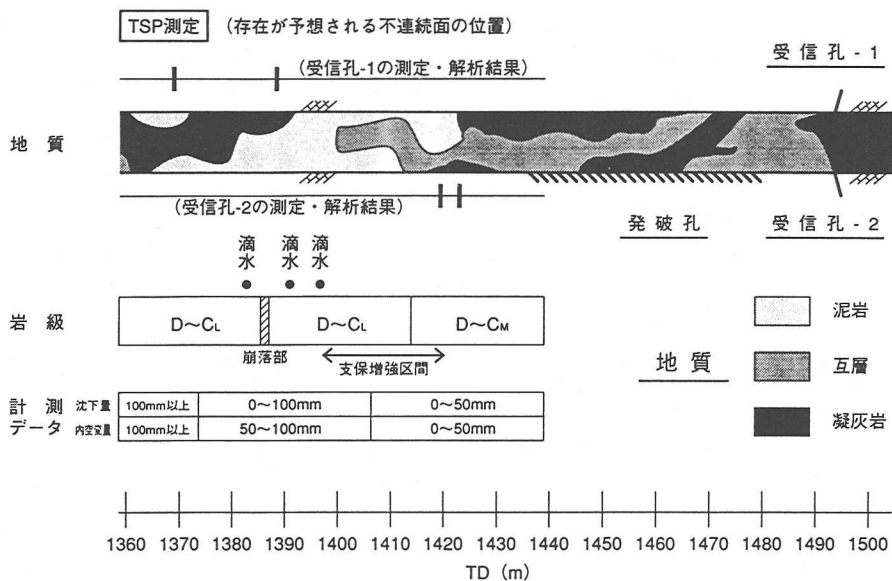
TSP測定では、各発破孔ごとに起振した波動を受信孔で観測した際に時間的ずれの発生が確認できた。このような時間的ずれは、他の弾性波探査、たとえば速度検層などでも時々見受けられる現象であり、通常は起振に用いる発火器の電圧変化や、振源から等距離に設置した固定点での波動を観測して解析上の補正を施している。TSP測定では、このような補正がハード・ソフト両面で施せないために反射波の到達時刻にも時間的ずれが生じていると思われ、今後の改良課題と考える。さらに、本解析では図—5中に示した複数の発破孔から受信孔1、2へ直接伝播する波動の伝播時間から得られた平均的な岩盤のP波速度(約1,900m/sec)を不連続面検出の解析に用いているが、この値がTD1,360~1,420mの岩盤を代表しているとは限らない。しかしながら、今回は図—8中のA、B、C、D、G、H、Iの各ボーリング孔の速度検層から得られた平均的なP波速度が1,900m/secと、TSP測定から得られた値と同じであった。この切羽前方岩盤と発受信点付近岩盤の弾性波速度値の違いについては後出の4. 切羽前方予測試験で具体的にコメントする。

図—6は測定波形を解析して得られた不連続面の存在予測位置であり、前述のように地山の硬軟や不連続面の走向は考慮せず、位置のみを推定することとした。また、図—7は、このようにして得られたTSP測定の解析結果を切羽観察結果(地質、岩盤等級)及びトンネル掘削後の計測データ(沈下量、内空変位量)と併せて示したものである。前述のように、TSP測定から得られた直接波の平均P波速度と速度検層から得られた平均的なP波速度がほぼ一致したため、図—7中の不連続面の予測位置にはバラツキがなかったが、一般的にはある程度のバラツキを持って評価される必要がある。これらより、TSP測定で検出された不連続面は、当初目的としていたTD1,380~1,390m及び1,410~1,420m付近の力学的に弱い岩盤への地質が変化する箇所以外に、TD1,370m付近にも存在していることがわかる。TD1,370m付近については、この前後で支保パターンは同じであるが、計測データで変形量の大きくなる箇所に対応していることから地山の強度変形特性が小さくなる箇所が不連続面として表れたものと判断される。

以上より、TSP測定は精度的にバラツキがあるが、約50~100m前方の不連続面に関する概略の情報、特に地質不良部や目視では不明確だが岩盤の力学的特性が劣るような箇所の存在位置を予測できるとの見通しが得られた。



図—6 TSP測定・解析結果例(上:解析結果平面図、下:解析データ)



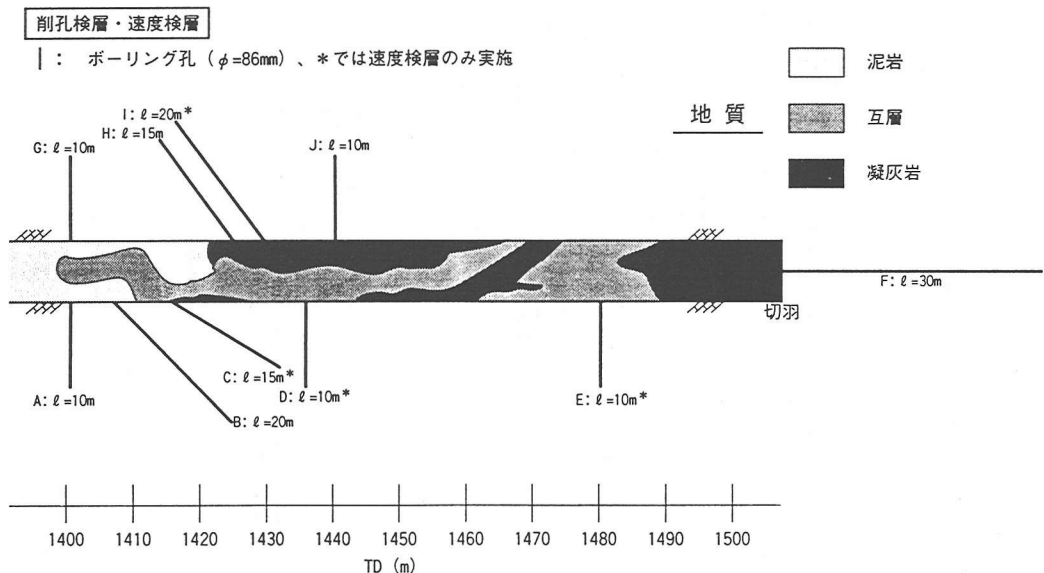
図一7 TSP測定の性能確認試験結果

3.3 地質と削孔検層・速度検層結果の関連

ここでは、前出の図一1中で示した本システムのもう一つの課題である削孔検層と速度検層との関連についてのデータ取得を目的として性能試験を実施した。

(1) 試験方法

本試験では、図一8に示すように3.2 TSP測定と同様、トンネルの既掘削区間で長さ10~30mのボーリング孔10孔で削孔検層と速度検層を実施し、各検層結果と地質との関係について検討した。なお、切羽からの長さ30mボーリング孔Fでの測定データは後述する4. 切羽前方予測試験としても用いている。



図一8 削孔検層・速度検層の実施位置

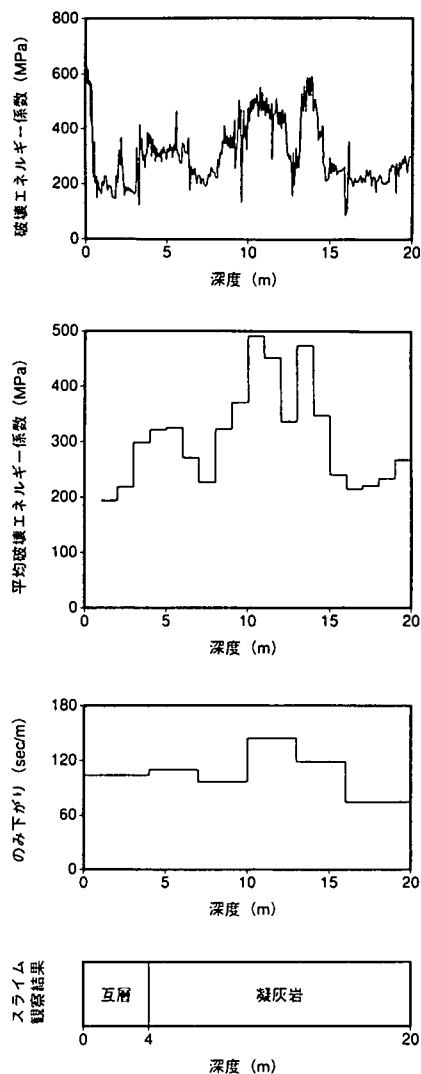
(2) 地質・削孔エネルギー・弾性波速度の関係

図—9は削孔検層結果の一例であり、図—3に示した深度ごとの破壊エネルギー係数と、これを1mごとに平均した平均破壊エネルギー係数を算出した。また、参考として削孔時の各ロッド（長さ3～4m）ごとの、のみ下がり（秒/m）やスライム観察結果を併記した。なお、平均破壊エネルギーの算出に際しては深度0～1m区間のデータにはトンネル壁面の吹付けコンクリートの影響があると考え、検討対象から除外した。

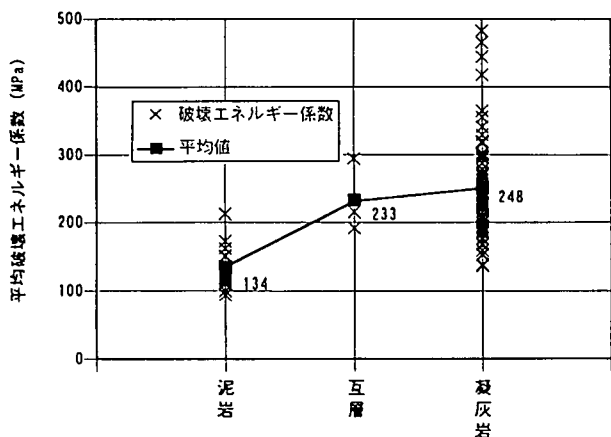
図—10は、図—9に例示したようなすべての削孔検層結果から地質と平均破壊エネルギー係数との関係を示したものであり、凝灰岩では平均破壊エネルギー係数が大きく、泥岩では平均破壊エネルギー係数が小さくなるのがわかる。なお、図中の■印は各地質ごとの平均値である。具体的には、凝灰岩では118～490MPa（平均約250MPa）、泥岩では102～196MPa（平均約130MPa）と、岩種によって比較的大きな差があるので、削孔検層結果から概略の地質判定が可能と思われる。また、岩種による平均破壊エネルギー係数の違いと一軸圧縮強度等の強度特性の関連についても今後の検討課題と考える。

図—11は、削孔検層後のボーリング孔で実施した速度検層結果の一例である。図中には1mごとの区間速度（以下、1m区間速度と称す）と、走時曲線上で傾きが一定となる区間ごとの速度（以下、区間速度と称す）を併記しており、参考に削孔検層時のスライム観察結果も示した。ただし、深度0～1mについては吹付コンクリートの影響があると考え、削孔検層同様、検討から除外した。なお、今回の試験ではP波の波長が波長＝速度／周波数として1,000～4,000m/sec/100～300Hz≒約10mとなることから、1m区間速度は分解能の面で問題があると考え、以下の検討では区間速度を用いた。

図—12は、図—11に示したような速度検層結果から地質とP波の区間速度の関係を整理したものであり、図中の■印は各地質ごとの平均値を示している。図中には別途実施した岩石試料のP波速度測定結果も併せて示した。これより、原位置で得られたP波速度はコアのP波速度の50%～70%であり、切羽観察による地質や岩盤等級がD～C_u級が多いことを勘案すると速度検層結果は妥当な値と考えられた。ただし、互層と泥岩がほぼ同程度の値であったり、削孔検層ほど凝灰岩と泥岩の差が明瞭でないことがわかる。これは、削孔検層の方が速度検層よりも地質の変化に対する分解能が高く、岩盤に発生するひずみレベルも大きいことから、地質の差異を精度良くとらえているためと



図—9 削孔検層結果例 (B孔)



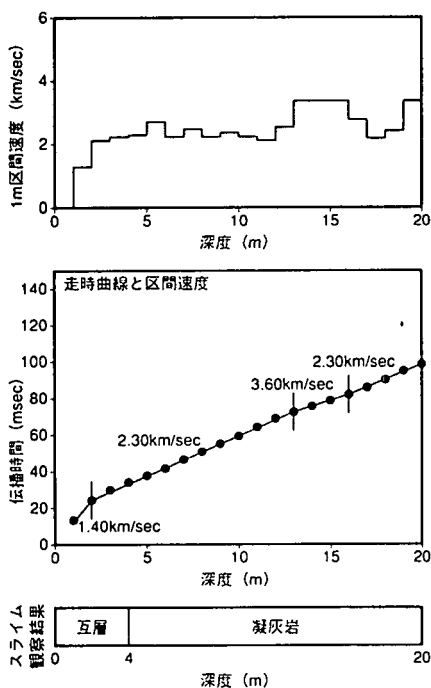
図—10 地質と平均破壊エネルギー係数の関係

判断される。

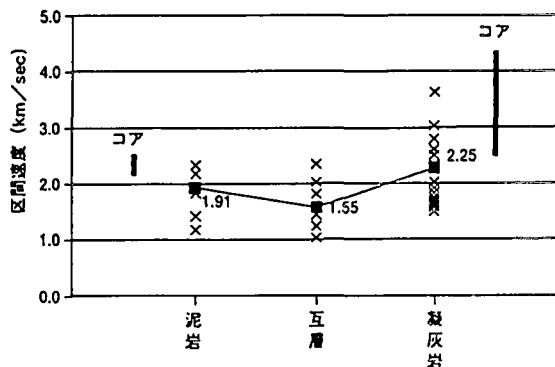
図一13は、削孔検層から得られた平均破壊エネルギー係数と速度検層から得られた区間速度との関係を示したものであり、比較的バラツキが大きく回帰分析から求めた相関係数も0.37となっており、強い相関は認められない。これに対して図一14は、図一13中のデータを用いて区間速度（図一11参照）が一定な範囲（4～20m）ごとに削孔検層から求めた平均破壊エネルギー係数（1mごとの値）の平均値を算出してクロスプロットしたものである。これより、データの数は少ないが相関関係は図一13より良好であり、回帰分析から求めた相関係数も0.71と大きい。したがって、同じサイトで同一機械を用いた場合、数m以上のひとまとまりの範囲に対しては削孔検層結果による平均破壊エネルギー係数から弾性波速度を推定することが可能と考えられ、掘削や支保の参考データとして活用することが可能と判断される。

以上の性能確認試験結果から、本システムを構成するTSP測定、削孔検層及び速度検層の性能に関して下記の知見を得ることができた。

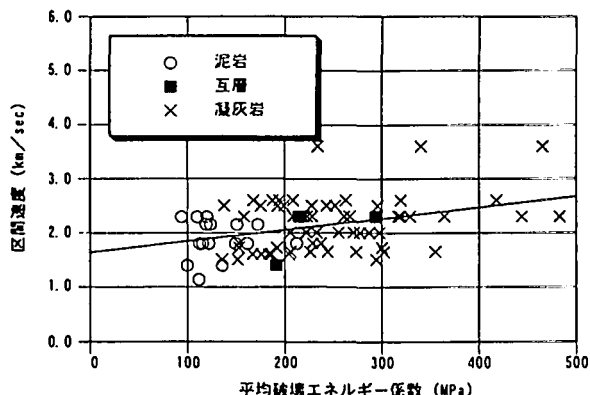
- ①TSP測定は探査精度は粗いものの、地質境界や地山の力学特性が低下するような部分を弾性波の反射面として掘削前の段階からとらえることができそうである。
- ②削孔検層から得られる1mごとの平均破壊エネルギー係数は、地質との対応が良好であることから、掘削直前の段階で地質構造推定を直接的に行えるものとする。



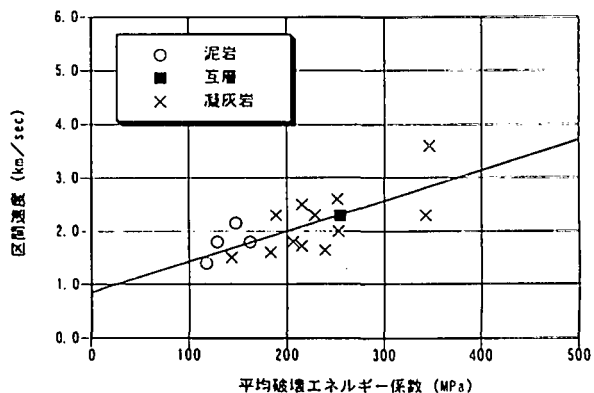
図一11 速度検層結果例（B孔）



図一12 地質と区間速度の関係



図一13 平均破壊エネルギー係数と区間速度の関係



図一14 平均破壊エネルギー係数と区間速度の関係
（区間速度が一定となる範囲ごと）

③削孔検層結果の平均破壊エネルギー係数と速度検層結果の区間速度との間には、数m以上の区間での平均値について正の相関が認められることから、両方の検層データを取得することによって掘削方法や支保パターンの変更利用できる情報が入手できると考える。

4. 切羽前方予測試験

前項で本システムを構成する各要素技術の性能確認ができたと考え、原位置で具体的な前方予測試験を実施し、本システムの適用性について検討した。

4・1 試験方法

図—15は本試験の概要を示したものであり、切羽がTD1,507m付近の時点で切羽前方に対してTSP測定と切羽

からの削孔検層・速度検層（ $\ell=30\text{m}$ ）を実施した。このボーリング孔は前出の図—9中のボーリング孔Fである。なお、別途切羽からは長さ75mのコアボーリングが事前に実施されている。

4・2 試験結果

図—16はTSP測定・削孔検層・速度検層結果を示したものであり、コアボーリング結果によるRQDや、実際にトンネル掘削時に得られた地質や岩盤等級に関する情報を併せて示した。なお、TSP測定から得られた直接波の平均速度が1,900m/secであるのに対し、切羽からのボーリング孔で実施した速度検層結果による平均的P波速度は2,100m/secであった。したがって、存在を予測した不連続面の位置は、実際には遠くなる可能性があり、発受信点間の距離を勘案すると具体的には+10m程度と判断される。したがって、図—16中には、この範囲を併せて示すこととした。

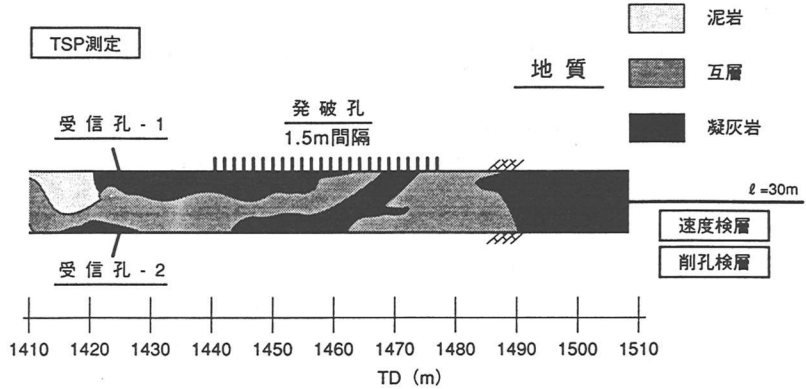
図—16より、TSP測定から検出した不連続面が深度60m付近の地質境界や深度20m、40m付近の地質変化部に対応していると判断される。また、深度5mや12m付近の不連続面については岩級やRQDの変化に対応しているようであり、削孔検層や速度検層での測定値の変曲点にも対応している。また、削孔検層では深度20m付近の地質の変化、特に弱層の出現をよくとらえており、速度検層でも同様の結果が表われている。したがって、これらの前方予測試験結果から以下の知見が得られたと判断した。

- ①TSP測定では、切羽前方約50～100mまでの間の地質境界や顕著な地質不良部の出現位置を、バラツキを持ったある範囲内で予測することが可能と考える。
- ②削孔検層や速度検層の探査範囲は、現状では地質によるが約30～50m程度であり、地質の変化部、特に施工上問題となるような地質不良部の出現位置を的確にとらえることができる。

5. おわりに

本論文では、筆者らの開発したトンネルの切羽前方予測システムの性能確認試験結果と切羽からの前方予測試験結果について報告し、具体的に以下の事項を確認した。

- 1) 切羽前方の約50～100mを対象としてTSP測定を実施し、バラツキはあるが地質不良部の有無を掘削前の段階で予測できそうである。



図—15 切羽前方予測試験方法

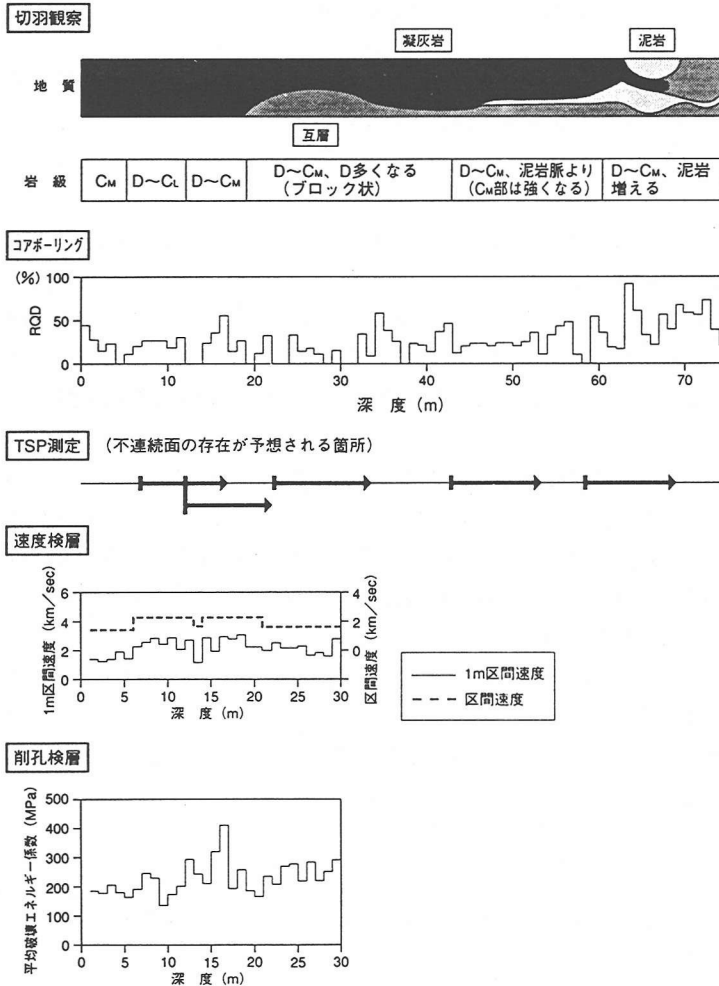
- 2) TSP測定結果から地質不良部の存在が想定される場合には、不連続面に切羽が近づいた（約30～50m）時点で削孔検層を実施すれば、削孔データから地質不良部の位置や性状を直接的に把握できる。
- 3) また、削孔検層を行ったボーリング孔で速度検層を実施すれば、数m以上の範囲に対しては両検層データの平均値の相関は良好である。したがって、削孔検層結果から速度検層データとの相関関係を利用して施工方法や支保パターンの設定に参考となるデータを得ることができる。

図—17は、今回の原位置試験結果に基づいて設定した具体的な切羽前方予測システムのフローである。各トンネルごとに地質や施工条件の違いによって切羽前方の予測対象が多少異なる可能性はあるが、施工時に最も問題となるような断層・破碎帯などの地質不良部の出現予測は共通の問題点と考えられる。この観点からは、本システムの適用性が充分確認できたものと考えられ、今後は地質や施工条件の異なるサイトでのデータ蓄積と、これに基づく本システムの高精度化を図る予定である。

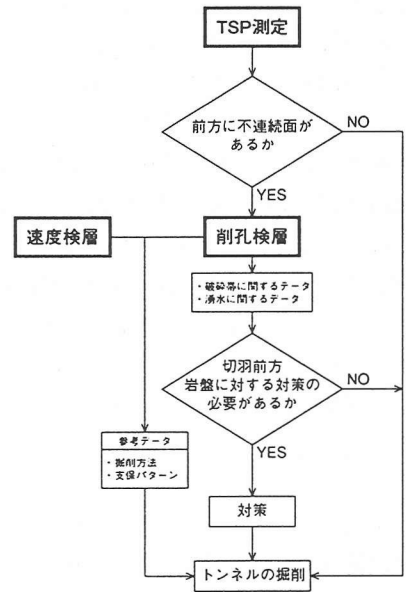
参考文献

- 1) TSP202：富士物産（株）カタログ
- 2) 稲葉武史・山本拓治・志水俊仁・宮嶋保幸：削孔検層システムによるトンネル切羽前方地質予測、第32回地盤工学研究発表会平成9年度発表講演集、pp.2103～2104、1997.7.

- 3) 稲生道裕・戸井田克・山本拓治・宮嶋保幸：速度検層を用いたトンネル切羽前方探査、土木学会第52回年次学術講演会概要集、共通セッション、pp.68～69、1997.9.



図—16 切羽前方予測試験結果



図—17 切羽前方予測の具体的なフロー