

切羽前方探査技術の現場への適用

APPLICATION OF PREDICTION AHEAD OF THE FACE IN TUNNEL SITE

折橋 恒春*・徳永 豊*・飯尾 正史*・増尾 重義**

Tsuneharu ORIHASHI, Yutaka TOKUNAGA, Masashi IIO and Shigeyoshi MASUO

During the excavation phase, abrupt changes of geological condition often bring about accidents which cause delay in tunnelling progress. Therefore, the tunnel engineer requires the information of geological condition ahead of the face. Ordinarily this information is obtained from surface investigations and face observations. But these cannot get correctly informations ahead of the face. So it is required and investigated the prediction methods ahead of the face.

In this paper, we take two prediction methods[TSP(Tunnel Seismic Prediction),non-core horizontal boring test] and make a field experiment. In this experiment, we examine the relation between rock classification and two prediction methods, and the applicability for tunnel site.

Keywords : Prediction ahead of the tunnel face, TSP, Non-core boring test, Rock classification

1. まえがき

トンネル工事では、地山条件により突発的な切羽の崩壊や湧水等が発生することがある。これらの場合、切羽付近が危険な状態になり、施工が中断してしまうため、安全性・経済性の両方の面で問題が生じる。これらを防止するために従来は、事前調査、施工中の切羽観察や変位等の計測により地山を評価し、施工管理、安全管理を行ってきた。しかし、切羽前方の地質状況を事前に把握することは非常に困難であるため突発的な地山条件の変化に対して対応が遅れることが少なくない。このようなことから切羽前方の地質状況を事前に把握する必要性が生じ、それに伴い前方探査技術が開発されてきた。また、探査精度が良くても探査を実施する度に何日もあるいは何度も切羽を止めなければならないとなると、経済性が悪くなる。そのため探査時間が短く施工サイクルに影響を与えない、探査距離が数10m～100m程度の方前探査技術が注目されている。

本報では、これらの要求に対応する切羽前方探査技術としてTSP法(Tunnel Seismic Prediction)とノンコア水平ボーリングについて現場実験を行い、その結果について実際の掘削データ(地山評価点、火薬使用量、切羽速度(m/day))と比較し、探査精度の検証、考察を行ったので報告する。

2. 実験概要

現場実験は、島根県邑智郡石見町広域農道日とトンネルで行った。実験期間は、切羽の止まる休日を利用した。図一1に地質縦断面図を示す。探査区間はNo. 24+92.1(坑口から1,712m)の切羽より前方、TSPで約120m、ノンコア水平ボーリングで約88mの区間である。岩質は石英安山岩質凝灰岩で、支保パターンCⅡ-L、およびCⅡパターンである。切羽(No. 24+92.1)の弾性波速度は、4.8km/secであった。

* 正会員 五洋建設(株) 技術部門 技術研究所

** 正会員 五洋建設(株) 中国支店

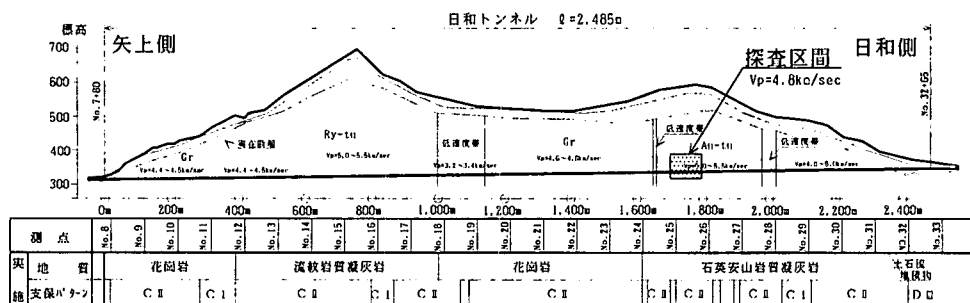


圖-1 地質縱斷圖

3. 前方探查

3·1 TSP法

(a) 概 要

”TSPシステム”はAmberg Measuring Technique社（スイス）のG. Sattel博士によって開発された切羽前方探査システムである。このシステムの特徴としては、

- 1) 測定，解析時間が短く（数時間程度）施工をあまり妨げることがない。
- 2) 探査距離が切羽前方100m～150m程度と長い。
- 3) パソコンを使用して解析を行うため，現場事務所での解析が可能である。
- 4) 解析に特別な知識を必要としない。

等がある。

探査原理を図一 2 に示す。トンネル坑壁に設置した
 発振孔 (20~30点) より弾性波を発生させ、直接波
 と反射対象物 (断層や地層の変化) からの反射波を
 受振し、反射面の状況や切羽からの距離を推定する
 ものである。基本原理としては V S P (Vertical Se-
 ismic Profiling), H S P (Horizontal Seismic Pro-
 filing) 等の弾性波探査と同様である。

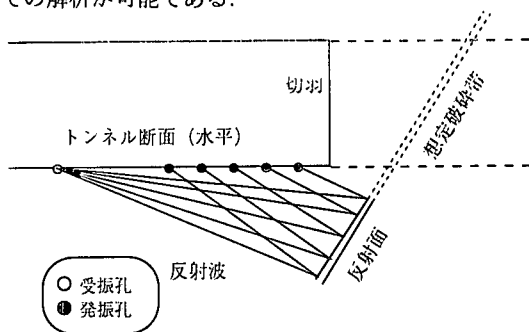


圖-2 探查原理

解析は、受振器によって得られた地震波データを直接波の除去、バンドパスフィルター、デコンボリューション等の波界処理により反射波を強調し、反射面の位置を推定する。ディフラクション・スタック法やイメージポイント法による図化処理を通して反射面の視覚化が行われ、探索結果として出力される。

(b) 測定・解析

図-3 にシステムの概要図、図-4 に孔配置図を示す。表-1 に測定・解析手順およびサイクルタイムを示す。測定は現場の休日に行ったが、準備の一部（孔位置表示、穿孔、ケーシング設置）は前日の掘削作業に組み込まれた。測定は作業を始めてから4～5時間程度で完了した。データの解析に要した時間は2時間程度であった。また、資機材の運搬は容易であった。以上のように、施工性が良く、現場の休

表-1 測定・解析手順およびサイクルタイム

手 順	項 目	時 間 (分)
準 備	マ-キング (孔 位 置 表 示)	30
	穿 孔	130
	ケ-シング 設 置	30
	測 定 機 器 設 置	30
	機 能 試 験	20
測 定	測 定 (8分 × 24)	190
	撤 去	30
解 析	解 析	120
	合 計	580

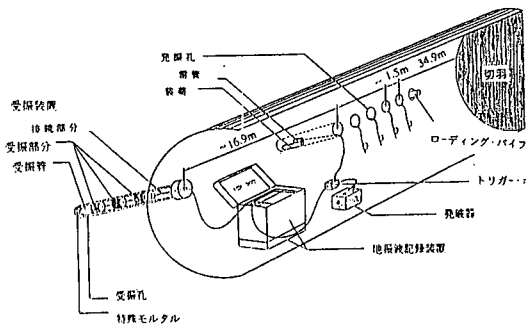


図-3 システム概要図

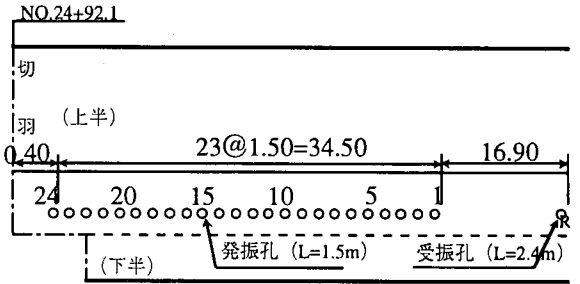


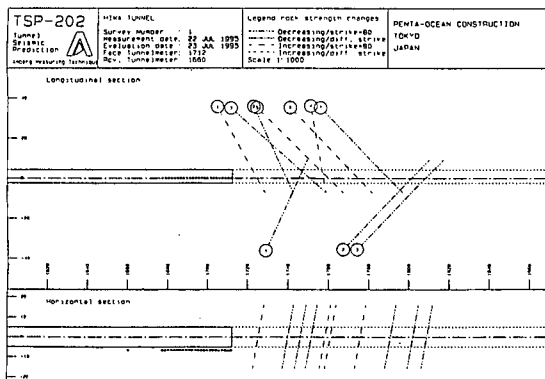
図-4 孔配置図

日を利用すれば切羽を止めずに前方探査を行うことが可能である。

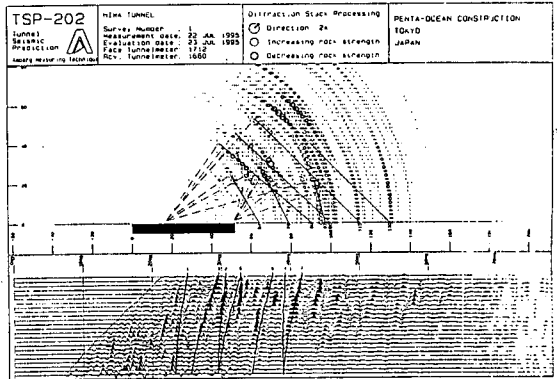
(c) 探査結果

受振データより直接波を除去し、バンドパスフィルター、減衰補正、デコンボリューション等の波界処理を行い、反射波を強調し、反射対象物を推定する。図-5 (a), (b)はディフラクション・スタック法、イメージポイント法をもとに反射対象物を図化処理した結果である。図-5 (a)は、上部に反射エネルギーの度合いを円の大ききさで表示し、下部に受振した波形データを表示してある。反射エネルギーの大きいものを結んだ直線とトンネル軸と交差した点に推定される地質の変化面が現れる。図-5 (b)は、図-5 (a)より推定される地質の変化面の現れる位置と状況を示している。上部は縦断面図、下部は平面図を示す。横軸は坑口からの距離、縦軸は縦断面図では受振孔からの高さ、平面図ではトンネルセンターからの距離を示している。地質の変化は、地質が硬質→軟質と変化する場合では鎖線、軟質→硬質と変化する場合破線と線種を変えて表示されている。また、トンネル軸と交わる角度は縦断方向の傾斜角と平面方向の走向角の二つのパラメータがあり、二つを同時に求めるのはプログラム上での計算量が増大するので本システムでは、走向角を設定(80度)したうえで傾斜角を計算している。

地質の変化を判断するのは図-5 (b)で行う。この図より判断できることは、切羽前方の地質の変化面の位置と地質の変化状況である。このため前方地山の物理的な変化(岩種、一軸圧縮強度、弾性波速度等)の判断はできない。ただし、探査地点を基準として各反射面の反射エネルギーの相対的な変化量は数値として得ることが可能であるため変化の度合いの大小は判断することができる。ただし、プログラム上で反射エネルギーの最大変化量を10,000としているため、現在のところ連続的にTSPで前方探査を行っても前区間との相関は得られない。



(a)



(b)

図-5 解析結果

表－２ 使用機器一覧

名 称	仕 様
ドリルユニット	最大給進力6000kgf
パワーユニット	75kw・440v
ポンプユニット	変量式2連複動ピストンポンプ 195～45ℓ/min
インナービット	クロスビット(60mm)
アウタービット	リングビット(101mm)
インナーロッド	P54UJ×1.5m 18.4kg/本
アウターロッド	P89U×1.5m 31.4kg/本
給排水設備	水中ポンプ, 分電盤, ケーブル 他

表－３ 測定手順およびサイクルタイム

手 順	項 目	時間(分)
準備	事前準備(整地, 他)	150
	資機材搬入	80
	設 置(ケーブル, 配管接続)	320
測定	削 孔(ビット交換60分)	930
	撤 去	120
	搬 出	140
	合 計	1,740

3・2 ノンコア水平ボーリング

(a) 概 要

本試験では、ノンコアで施工し、下に示す掘進データより切羽前方地質を予測するものである。

(b) 測 定

表－２に使用機器一覧、表－３に測定手順およびサイクルタイムを示す。作業時間が29時間かかり切羽を2～3日止めての作業となる。また、ボーリング機の重量が3,000kgあり運搬、設置に時間と人数が必要である。

(c) 結 果

切羽前方35m付近で掘進速度が上がらなくなったのでビットを交換した。掘削は100mを予定していたが88m付近で掘削が進まなくなり打ち切った。スライムの採取については、亀裂の介在鉱物が削孔水と共に流出し、スライム自体の変化も判断しにくいため地質の判定までには至らなかった。

掘進データとしてトルク、打撃エネルギー、回転数等の数値を用いる。切羽前方地質の判断(予測)は、これらのデータをもとに掘削エネルギー等を算出するなどして、解析担当者が行う。

4. 考 察

前方探査の結果を実際のトンネル掘削データと比較して考察する。岩盤分類(RSR, RMR, Q値, 道路公団評価点)、使用火薬量(kg/m³)、切羽速度(m/day)を掘削データとして前方探査結果と比較する。表－４に各掘削データとの相関係数を示し、表－５に切羽観察項目のうち岩石強度、亀裂、湧水に関する項目との相関係数を示す。

4・1 TSP法

1) 相 関

TSP相対変位値とRSR, RMRのいずれも相関係数が0.8を越えており、相関が強いと考えられる。切羽観察項目との相関は、割れ目の間隔(−0.506)と割れ目の方向性(縦断方向)(−0.427)に中程度の相関が見られる。TSPは、地山の亀裂、強度、湧水について影響があるものと考えられるが、本探査区間の切羽観察では、岩石の一軸圧縮強度は一定($q_u=500\sim1,000\text{kgf/cm}^2$)と評価され、また、湧水についても多くはなかったため亀裂に関する項目(割れ目の間隔、方向性(縦断))に相関が生じたものと考えられる。縦断方向の割れ目の方向性に対して横断方向の相関が低いのは、本システムが反射面の横断方向の角度(走向角)を仮定していることが原因であると考えられる。そのため、設定角度と実角度の差が、変化面までの実際の距離と探査結果との間に誤差を生じさせていると考えられる。(図－8)

2) TSP使用上の留意点

解析プログラムの特性上、反射エネルギーの相対変位値を算出する場合、探査範囲内の最大変化量を10,000としてその値で他の変化量を正規化するため、実際の地質の変化の規模に対して常に一定の変化量が出力されない。したがってRSR, RMR等の岩盤分類とTSPの変化量を対応させて地山を定量的に評価することは現段階では困難である。

また、解析に使用する弾性波速度から生じる問題がある。解析上では、探査地点の弾性波速度を探査範囲全

表-4 掘削後のデータとの相関係数

	RSR	RMR	log (Q)	道路公団評価点	切羽速度 (m/day)	火薬量 (kg/m ³)
TSP相対変位値	0.816	0.832	0.648	0.441	-0.335	0.232
単位掘削エネルギー	0.704	0.770	0.476	0.553	-0.207	0.027

表-5 切羽観察項目との相関係数

	RQD	岩石強度 (kgf/cm ²)	割れ目の 間隔	割れ目の方向性 (縦断方向)	割れ目の方向性 (横断方向)	湧水
TSP相対変位値	-0.224	0.832	-0.506	-0.427	0.002	-0.375
単位掘削エネルギー	-0.583	0.770	-0.660	-0.450	0.097	-0.486

域に適用している。しかし、実際は地質が変化すると弾性波速度も変化するので実際の弾性波速度とは誤差が生じる。この差が地質の変化面までの距離を推定するときの誤差の原因となる。この現象は探査距離の長い範囲や弾性波速度が極端に変化する場合に顕著となると考えられる。この点を留意して探査結果を判断する必要がある。

以上より、TSPは地山の変化を定性的に評価することは可能であっても、定量的に評価することは現段階では困難であることが分かった。

4・2 ノンコア水平ボーリング

ノンコア水平ボーリングより得られるデータは、掘進速度、トルク、回転数、スライム等がある。これらのデータをもとに単位体積を掘削するのに要する単位掘削エネルギー(E_v)を求め圧縮強度(q_u)を推定する。E_vおよびq_uは以下の式によって算出される。

$$E_v (\text{kgf} \cdot \text{cm}/\text{cm}^3) = E_r / V$$

V: 掘削した体積 (cm³)

$$E_r (\text{kgf} \cdot \text{cm}) = (\text{回転エネルギー}) - (\text{回転損失エネルギー}) + (\text{給進エネルギー}) + (\text{打撃エネルギー})$$

$$= T \times N \times 2\pi \times 10^2 - BL \times \mu \times D / 4 \times N \times 2\pi + BL \times S + P \times b \times 10^2$$

N: 回転数 (rpm)

T: トルク (kgf・m)

BL: ビットロード (kgf)

μ: ビット面の摩擦係数 (μ=0.3)

D: ビット径 (cm)

S: 単位時間の掘進長 (cm)

P: 打撃エネルギー (kgf・m) b: 打撃回数 (bpm)

$$q_u (\text{kgf}/\text{cm}^2) = K \cdot E_v$$

K: 定数 = 0.0468 (実測値より回帰)

各掘削データとノンコア水平ボーリングとの比較は単位掘削エネルギー(E_v)により行う。

1) 相関

表-4より相関が強いと考えられるのは、岩盤分類のRSR (0.704) とRMR (0.770) であった。本探査

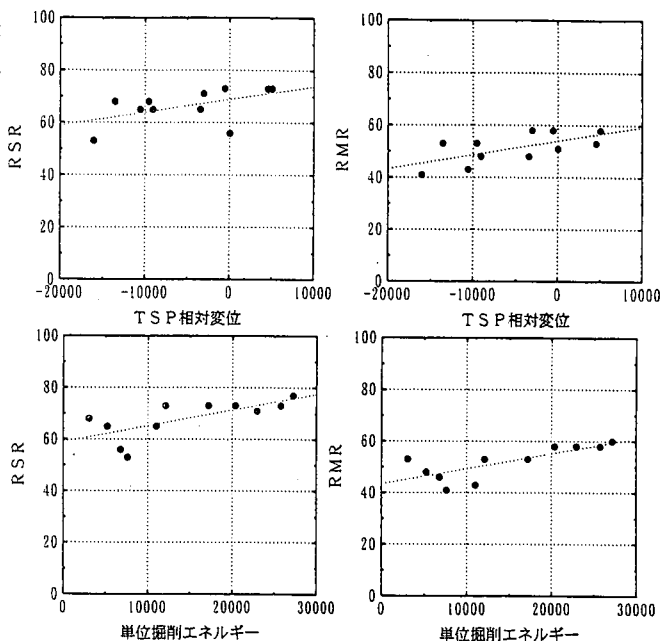


図-7 相関図

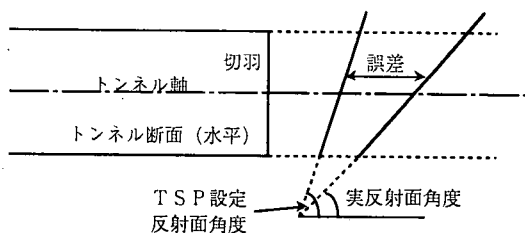
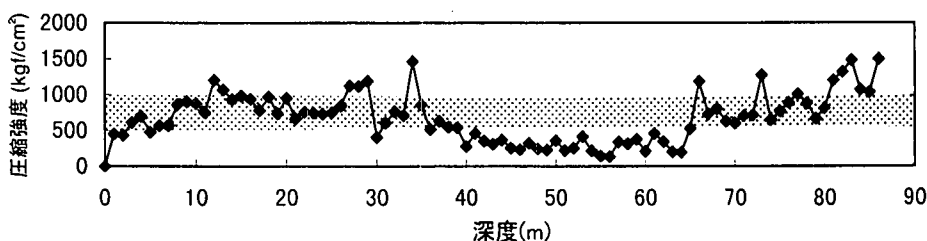


図-8 走向角による誤差



図－9 掘削エネルギーより推定した一軸圧縮強度

区間では切羽観察項目のうちの岩の一軸圧縮強度は一定 ($q_u=500\sim1,000\text{kgf/cm}^2$) と評価されているが、掘削エネルギーより推定した一軸圧縮強度は図－9によると深度40m～60m付近で小さく ($q_u=150\sim400\text{kgf/cm}^2$) なっている。この付近は切羽観察記録では他の区間よりも亀裂が発達しているため、掘削エネルギーが小さくなり、その結果推定された一軸圧縮強度が小さくなったものと考えられる。表－5の相関係数を見ても割れ目に関する項目 (RQD, 割れ目間隔) と中程度の相関が見られる。従って、ノンコア水平ボーリングによる一軸圧縮強度は、地山の一軸圧縮強度を推定するものと考えられる。

2) 留意点

ボーリングは切羽全体ではなく一点の探査である。また、ビットの磨耗の程度やロッドの長さによる掘削エネルギーの損失も考えられるので、今後検討していく必要がある。

5. まとめ

1) TSP法

- ・本法は探査時間が短く施工サイクルに組み込むことが十分可能である。
- ・現段階では、定性的な切羽前方地質の推定が可能である。
- ・本実験において現場からは、“おおむね信頼できる結果が得られた”との報告があった。切羽前方に危険とされる箇所の有無だけでも推定できれば、十分対応できるだけの探査距離があるので、工事に対する安全性は向上されるものと考えられる。
- ・経済的な面では、断面の超大化や高速施工が進む傾向の今後のトンネル工事において考えてみると本法は十分活用できる範囲にあるのではないかと考えられる。

2) ノンコア水平ボーリング

- ・本方法では探査時間に2～3日要した。
- ・探査結果から掘削エネルギー、一軸圧縮強度の定量的な地質の推定ができ、結果を岩盤分類等に反映させることができる可能性がある。
- ・ボーリングが切羽の局所的な探査であることを考慮する必要がある。

3) 全体

本実験では、探査区間の支保パターンがCⅡおよびCⅡ-Lだけと比較的変化の少ない区間であったので、顕著な差異が得られなかった。

本報では日和トンネルのデータだけであるため、今後、他の地質においても探査を行い、データを蓄積し、検討を続けていかなければならないと考える。

6. 参考文献

- 1) 手塚 仁ほか:弾性波を用いた切羽前方探査の一考察, 土木学会第50回年次学術講演会, pp. 210-211, 1995
- 2) G.Sattel et al: Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods-pilot project in Centovalli Tunnel, Locarno, Switzerland, Break, Vol. 10, No. 1, pp 19-25, 1992