

山岳トンネル工事への前方探査技術の適用

折橋 恒春 徳永 豊
飯尾 正史 *増尾 重義

要旨

トンネル工事において、切羽に出現する不連続面や帶水層等の地質の想定は、通常トンネル施工前に実施される地表からの弾性波探査やボーリング調査等の事前調査によって行われる。しかし、事前調査によって想定された地質が、実際に施工中の切羽に出現する地質と異なることは希ではない。事前調査に基づいて施工を行った結果、地山の急変や突発的な湧水等への対応が遅れ、工事の安全性や経済性が損なわれるケースが少なからず発生している。切羽前方地山の地質を事前にある程度正確に把握することができれば、地山の急変に対しても予め対応できるので、より安全で経済的な工事を行うことが可能になる。このようなことより、切羽前方の地質状況を探る前方探査技術の研究、開発が行われてきた。

本報では、TSP法とノンコア水平ボーリングの二つの切羽前方探査技術について現場実験を行い、その施工性、探査方法について考察を行った。その結果、本報のデータだけでは探査精度に関しては十分に論じることはできないが、TSPには施工性が良く、切羽前方の地質を定性的に評価する特徴があり、ノンコア水平ボーリングには切羽前方の地質を定量的に評価する特徴があることが確認された。

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、いくら探査精度が良くてもそのためには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ことをもとに、探査距離が数10m～100m程度の前方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

おおち ひわ
現場実験は、島根県邑智郡石見町で施工中の日和トンネルで行った。実験期間は、切羽の止まる休日を利用して

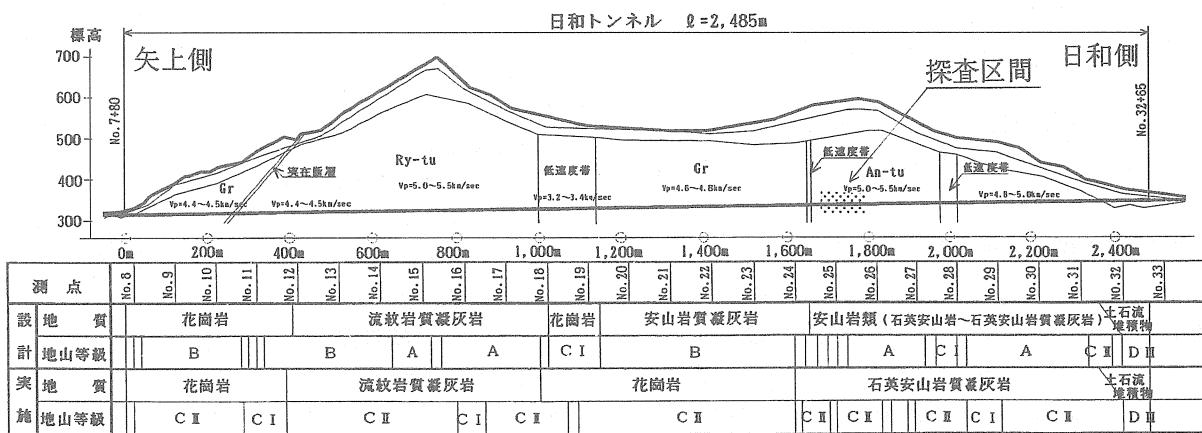


図-1 地質縦断図

*中国支店 日和トンネル工事事務所

行った。

図一1に地質縦断図を示す。日和トンネル施工区間は、矢上地区と日和地区を隔てる山地部2.5kmの区間である。帯状に連なる京太郎山（標高826.9m）と智河原山（標高685.0m）両山系の中間付近にあり、比較的急峻な山地で、矢上側坑口標高300m、日和側坑口標高370mで両坑口で約70mの高低差がある。地層は、古第三紀の地層にあたり、矢上側から花崗岩、流紋岩質凝灰岩、花崗岩、石英安山岩質凝灰岩と日和側に向かって変化していく。断層、低速度帯が存在するが、弾性波速度は両坑口部と終点側の土石流堆積層を除いて4.0km/sec以上であり、風化も見られず比較的良質である。日和側坑口部は、土破りが浅く土石流堆積層で未固結な転石・玉石からなる。

切羽前方探査試験区間は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ある。支保パターンは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。

実験概要を以下に示す。

実験概要

実験月日 平成7年7月21日（金）

～平成7年7月23日（日）

実験箇所 島根県邑智郡石見町日和トンネル

切羽測点 No.24+92.1（坑口から1,712m）

支保パターン CⅡ-L, CⅡ

実験項目

- ・TSP法
- ・ノンコア水平ボーリング

3. 前方探査

3. 1 TSP法

3. 1. 1 概要

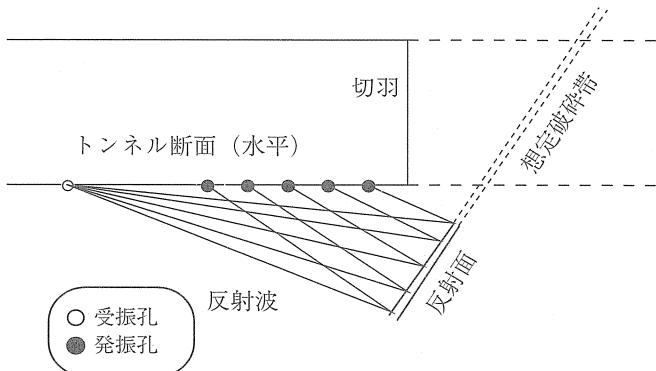
”TSPシステム”はAmberg Measuring Technique社（スイス）のG.Sattel博士によって開発された切羽前方探査システムである。

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（切羽より1.5m～2.0mピッチで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



図一2 探査原理

離を推定するものである。基本原理としてはVSP (Vertical Seismic Profiling)、HSP (Horizontal Seismic Profiling) 等の弾性波探査と同様である。

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。その後、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、探査結果として出力される。

3. 1. 2 測定・解析

図一3にシステムの概要図を示す。測定・解析の手順は次のように行った。

(1) 準備

- ・受振孔（孔の深さL=2.4m）1孔および発振孔（L=1.5m）24孔を孔壁に下向き10°～20°で穿孔する。図一4に受振孔、発振孔の配置図を示す。
- ・無収縮早強モルタルを受振孔に詰め、受振システム用ケーシングを受振孔に挿入する。
- ・受振システムをケーシングに挿入する。
- ・受振装置付近をハンマーで打撃し、地震波記録装置の機能試験を行う。

(2) 測定

- ・1本の発振孔に瞬発電気雷管付き2号榎ダイナマイト50gを装薬し、発破、地震波の記録を行う。
- ・同様の方法で、切羽側から順々に発破を行い、地震波を記録する。

(3) 解析

- ・記録装置のデータをコンピュータへ転送する。
- ・基本プログラム、波形演算ソフト、イメージポイント法、ディフラクション・スタック法により解析を行い、結果をプリンタにて印刷する。
- ・解析結果を切羽進行と対比し、確認する。

3. 1. 3 探査結果

1) サイクルタイム

表一に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（マーキング、穿孔、ケーシング設

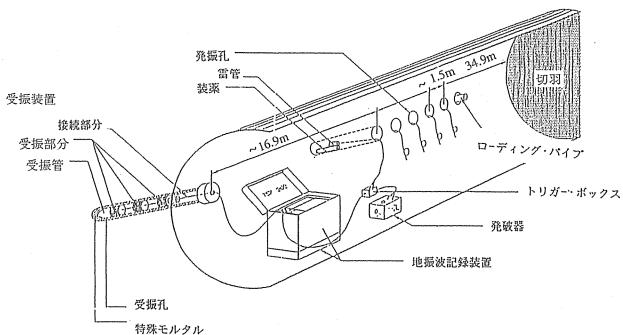


図-3 システム概要図

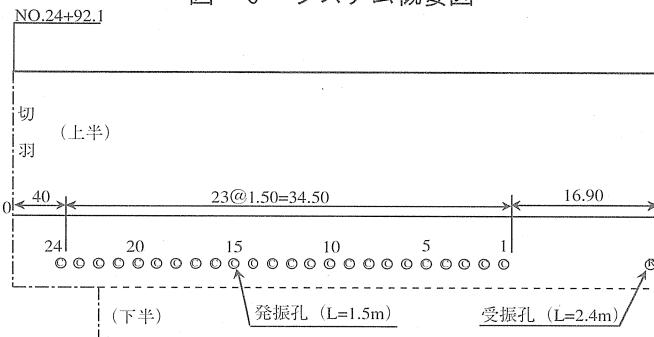


図-4 受振孔、発振孔配置図

表-1 サイクルタイム

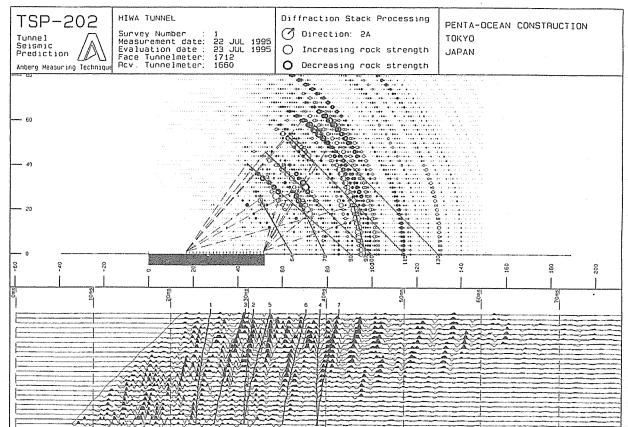
手順	項目	時間 (分)
準備	マーキング (孔位置表示)	30
	穿孔 (発振孔×24、受振孔×1)	130
	ケーシング設置 (モルタル養生16時間)	30
	測定機器設置	30
	機能試験	20
測定	測定 (8分×24)	190
	後片付け	30
解析	解析	120
	合計	580

置)の3時間程度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時間であった。また、資機材の運搬は容易であり、2000ccクラスのワゴン車1台で行うことが可能であった。以上のように、施工性が良く、現場の休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。

2) 解析結果

解析上での弾性波速度は、受振装置から得られた直接波より算出され、以後の解析全般においてその値が用いられる。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・スタッツ法、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

(a)



(b)

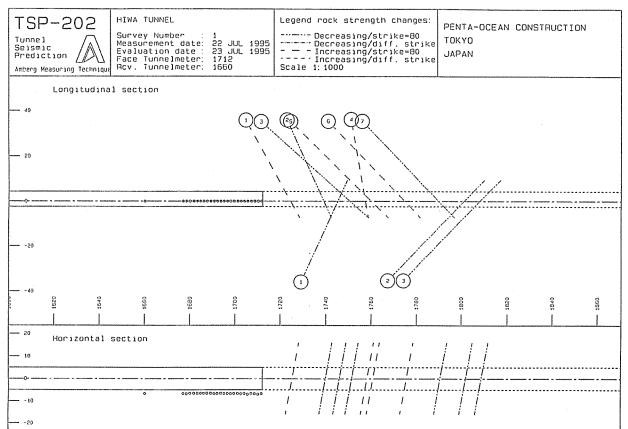


図-5 解析結果

の大きさで表示し、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は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)し傾斜角を計算し結果に表示している。

地質の変化を判断できるのは図-5 (b) だけである。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だけである。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程度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ことに留意しなければならない。

3.2 ノンコア水平ボーリング

3.2.1 概要

本試験で使用したボーリング機は、鉱研工業製のアロードリルで、2重管ロッドを使用し、油圧式パーカッション装置により従来の給圧回転による掘削機能に打撃機能が加わるため、高速削孔ができる。この機械の最大の特徴は、コアの採取がロッドを抜き取らなくても行うことができる点にあるが、コアを採取すると掘進速度が1/4に減少するので、本試験では、コアの採取を行わなくともノンコアで施工した。ノンコアでの掘進速度は、 $qu=300 \sim 500 \text{kgf/cm}^2$ で $V=16.2 \text{m/h}$ 、硬岩($qu=1,000 \sim 1,500 \text{kgf/cm}^2$)で $V=12.0 \text{m/h}$ 程度である。また、掘進データがリアルタイムで表示され、ICカードに記録できる。

3.2.2 測定

表-2に使用機器一覧、図-6に機械配置図を示す。測定の手順は次のように行った。

(1) 準備

- ・ボーリング機一式を、切羽中央に設置する。
- ・給水タンクを設置し、給水、排水ラインを確保する。

(2) 削孔

- ・スライムを検査、採取する。
- ・削孔データを計測する。

(3) データ処理

- ・ICカードのデータをコンピュータ処理し、切羽前方の地質を推定する。
- ・切羽進行に伴い切羽データと解析結果を比較し、確認する。

3.2.3 結果

1) サイクルタイム

表-3に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、ボーリングマシーンの重量が3,000kgあり運搬、設置に時間と人数が必要である。

2) ボーリング結果

切羽前方35m付近で掘進速度が上がらなくなつ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。

ICカードからは、トルク、打撃エネルギー、回転数等の数値が得られるだけである。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(算出法は4章に記述)するなどして、解析担当者が行わ

表-2 使用機器一覧(アロードリル:鉱研工業)

名 称	仕 様
ドリルユニット	RPD-100S-K2-kM 最大給進力 6000kgf
パワーユニット	PUE-100 75kw・440v
ポンプユニット	MG-15HFV
インナービット	クロスピット(60mm)
アウタービット	リンクビット(101mm)
インナーロッド	P54UI×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

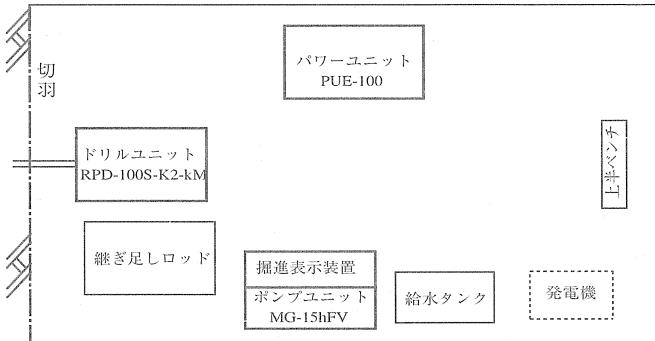


図-6 機械配置図

表-3 サイクルタイム

手順	項 目	時間(分)
準備	事前準備(整地、分電盤組み込み他)	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分を含む)	930
	撤去	120
	搬出	140
	合計	1,740

なければならない。

4. 考察

前方探査の結果を実際の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/cm³)、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

RSR(相関係数0.816)とRMR(相関係数0.832)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、湧水について探査できるものと考えられるが、本探査区間の切羽観察では、

表一4 掘削後のデータとの相関係数

	R S R	R M R	$\log(Q)$	道路公団評価点	切羽進行(m/日)	火薬量(kg/cm 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

表一5 切羽観察項目との相関係数

	R Q D	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	—	- 0.506	- 0.427	0.002	- 0.375
単位掘削エネルギー	- 0.583	—	- 0.660	- 0.450	0.097	- 0.486

岩の一軸圧縮強度は一定 ($q_u = 500 - 1,000 \text{ kgf/cm}^2$) 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。（図一8）

2) T S P 使用上の留意点

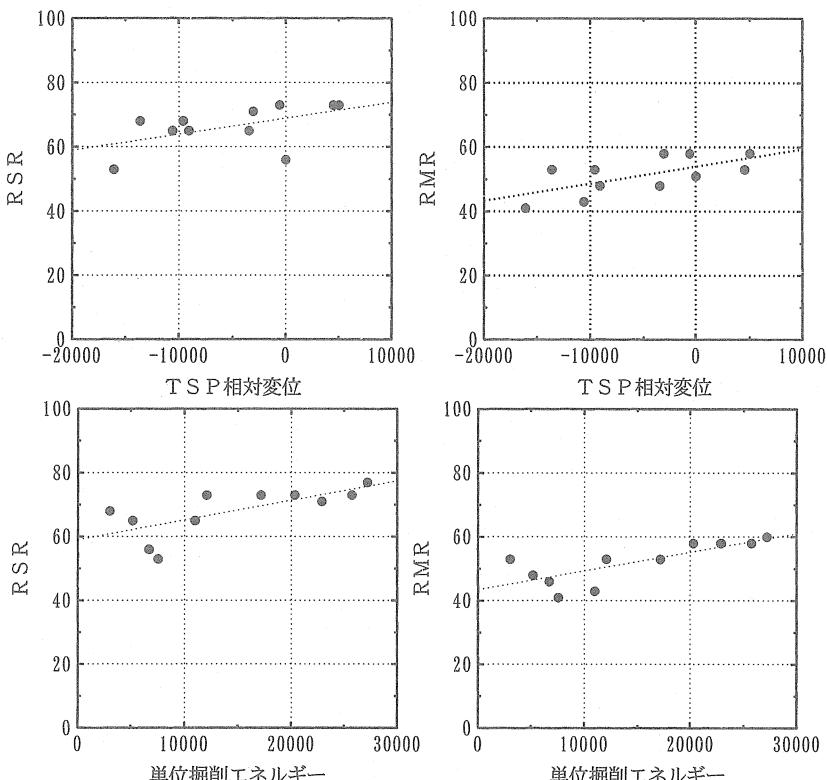
解析プログラムの特性上、反射エネルギーの相対変位値を算出する場合、探査範囲内の最大変化量を 10,000 としてその値で他の変化量を正規化するため、実際の地質の変化の規模に対して常に一定の変化量が出力されない。R S R、R M R 等のデータと T S P の変化量を対応させて地山を定量的に評価することは現段階では困難である。

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域に適用しているが、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。

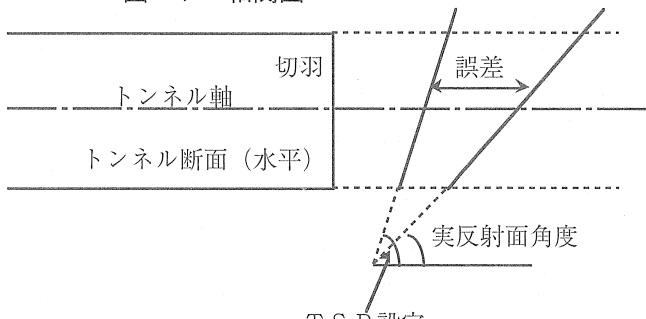
以上より、T S P は地山の変化を定性的に評価することは可能であっても、定量的に評価することは現段階では困難であることが分かった。

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



図一7 相関図



図一8 走向角による誤差

ルギー (E_v) を求め圧縮強度 (q_u) を推定することができる。 E_v および q_u は以下の式によって算出される。

$$E_v (\text{kgf} \cdot \text{cm}/\text{cm}^3) = E_r / V \quad V: \text{掘削した体積} (\text{cm}^3)$$

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

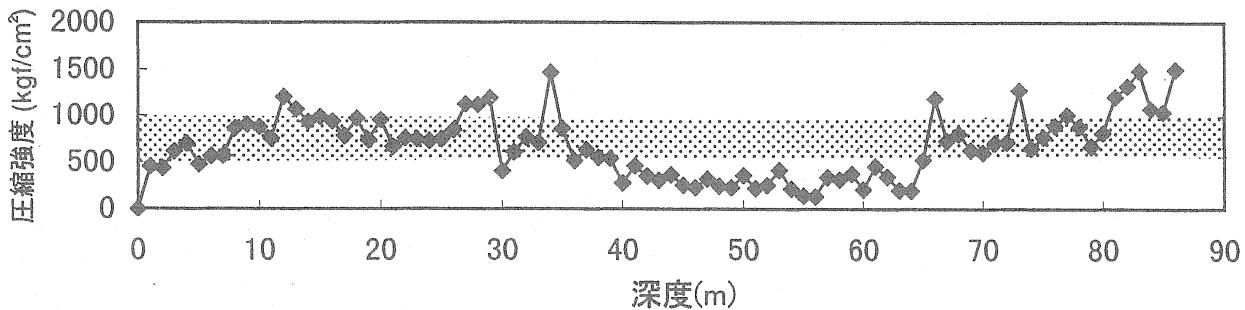


図-9 掘削エネルギーより推定した一軸圧縮強度

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

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 ($\mu = 0.3$)

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)

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

$$K: \text{定数} = 0.0468 \quad (\text{実測値より回帰})$$

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R S R (0.704) とR M R (0.770) であった。本探査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 ($q_u=500-1,000 \text{ kgf/cm}^2$) 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40 m~60 m付近で小さく ($q_u=150-400 \text{ kgf/cm}^2$) 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 (R Q D、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。ただし、ボーリングは切羽の一点で行われているため割れ目の方向性とは相関はないと考えられる。

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) T S P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、本実験では若干のコストアップとなった。しかし、断面の超大化や高速施工化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ある一点で行われてい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C IIおよびC II-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。

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, First Break, Vol.10, No.1, pp.19-25, 1992