

(103) 含水未固結地山での切羽面におけるトンネル前方探査実験について

本州四国連絡橋公団 板垣 正義
前田建設工業㈱ ○小熊 登
井上 博之
神藤 健一

The forward geologic exploration at tunnel face with high water content and loose formation.

Masayoshi Itagaki, Honshu-Shikoku Bridge Authority
Noboru Oguma, Hiroyuki Inoue, Ken-ichi Kanto, Maeda co., ltd

Abstract

In order to judge the stability of tunnel face, under the condition of high water content and loose formation, Rayleigh wave method and Resistivity method are applied at MAIKO TUNNEL tunnel face. these exploration results are compare with face observation results, then the following knowledge are obtained,

- ① If Rayleigh wave velocity of rock mass is over 400m/sec, then it suppose the face stability is good on condition.
- ② If Resistivity of rock mass is over 100Ωm, then it suppose the face stability is good on condition.
- ③ It is necessary to combine Rayleigh wave and Resistivity for better judgement of stability of tunnel face under condition of high water content and loose formation. So, the face stability index with the value of Rayleigh wave and Resistivity is proposed.

1. はじめに

山岳トンネル施工において切羽前方の地質状態が把握できることは、事前に施工方法の検討や資材準備が可能となるため、工事の安全性・経済性を向上させることができ、有意義なことであると考えられる。

我々は、この切羽前方の地質状態を把握することを切羽面からの探査で行うことを考え、施工サイクルに組み込むことが可能で、探査結果が短時間で出力できる利点をもった表面波法および比抵抗法を選択し、実験を繰り返してきた。これまでに切羽前方に断層や明瞭な地層境界等が分布する地山条件下では、表面波法および比抵抗法によってそれらの分布や性状が概略把握できることを示した¹⁾。

ここでは、含水未固結地山である大阪層群砂礫層地山（以下、大阪層と呼ぶ）を掘削中の舞子トンネル中北工事において、表面波法、比抵抗法が含水未固結地山での前方探査に有効であることを検討するために実施した探査実験について報告する。

今回報告する実験の主な目的は以下の通りである。

- ①探査結果と、併せて行う切羽観察結果を比較して、探査手法で大阪層の切羽安定性を評価する事が可能であることを明らかにする。
- ②表面波法により大阪層中で地下水の分布を規制している粘土層を、また比抵抗法により帯水状態にある砂層を捉えることが可能であることを明らかにする。

2. 実験概要

舞子トンネル中北工事周辺の地質は、主に第四紀洪積世の大阪層群砂礫層である。φ1～3cm大のチャート亜円レキを主体とする比較的良く締まった(N値>50)地質であるが、砂礫層中に帯水砂層や粘土層が狭在しており、地下水の賦存状態によっては掘削により切羽崩壊や集中湧水が懸念されていた。

実験方法としては、探査手法の有効性や精度を確認するために、探査結果とトンネル掘削後に実施した切羽観察から判断した地山状況とを比較することとした。

切羽観察は掘削にともない出現する切羽の地質、探査位置の地山の固結度、湧水状況、切羽全体の安定性について実施し、表-1に示す基準に従い定性的に地山状態を評価する方式をとった。

トンネル切羽面での表面波法、比抵抗法の具体的な測定方法、測定装置等はここでは省略するが、図-1に舞子トンネル中北工事の切羽における表面波、比抵抗法の概略測定位置を示す。

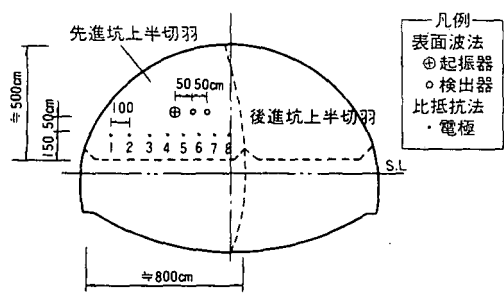


図-1 概略測定位置図

観察項目	観察基準
地 質	Gr(花崗岩), Og(大阪層砂礫), Os(大阪層砂層)
固 結 度	◎良好……ハンマー強打により若干へこむ ○やや良好……ハンマー中打により若干へこむ (マトリクス) △やや不良……ハンマー軽打により若干へこむもしくは貫入する
湧水状況	◎少ない……10ℓ/min以下 ○やや多い……10～30ℓ/min △多い……30ℓ/min以上
切羽安定	◎安定……掘削後数時間切羽が自立する ○やや安定……掘削後短時間切羽が自立するが部分的に少量の崩落・剥落がある場合がある △やや不安定……部分的に少量の崩落・剥落がある

表-1 切羽観察項目と基準

3. 実験結果および考察

3.1 表面波法

各切羽位置での表面波探査結果と、掘削後に行った肉眼観察による地山状況および両者を比較した結果をまとめたものを表-2に示す。また、表中に示した①～⑦地点のうち、③以降の地点が大阪層での結果であるので、これについて表面波探査結果を解析して得られる深度-表面波速度図(以後D-Vr図と呼ぶ)を図-2に示す。

表面波法では探査深度別に表面波速度が得られるが²⁾表-2には、代表的なものとして切羽より2m付近、4m付近および最大探査深度地点における表面波速度を示した。表面波探査結果の欄の地山状況の推定とは、表面波速度や得られるD-Vr図の特徴より推定したものである。当トンネル地点での良く締まった大阪層砂礫層のPS検層結果は、S波速度=0.4～0.6km/secであり、また以前に行った同じ大阪層での表面波法の実験では、表面波速度=400m/sec以上である地山は良く締まっているという結果を得ている。これらに基づいて地山状況を推定している。地山状況(肉眼観察による)は、表-1に示した基準により評価したもので、探査を行った範囲における地山の平均的評価を示したものである。

以下に、探査結果と地山状態の整合性について簡単に記述する。

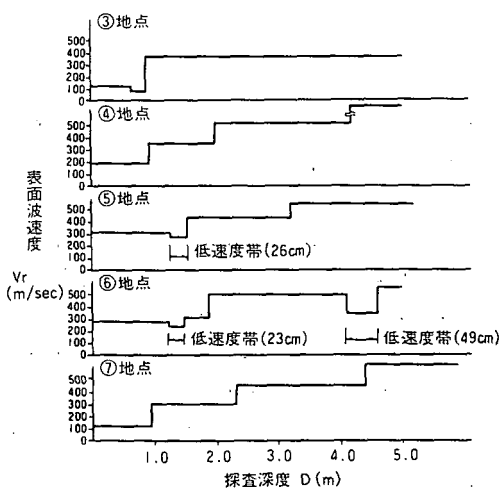


図-2 表面波探査結果(深度-表面波速度)

a) 表面波速度が 400m/sec以下の地点(表-2 中③、⑦)では、地山の締まりは悪いと判定したが、切羽観察でも固結度はやや不良であった。逆に、表面波速度が概ね400m/sec以上であれば締まりは良いと判断したが、切羽観察でも固結度が良好と判定されていた。

今回の大阪層の観察でも固結度と切羽安定性の評価は一致しており、表面波速度は切羽安定性の一つの指標となる可能性が確認できた。

b) 図-2 に示した通り、⑤、⑥地点において切羽前方に若干の低速度帯が分布したため砂層または軟質層の存在を予測したが、切羽観察では地山状態に変化が認められなかった。これは、この程度の変化は肉眼的には変化が認められないものであるか、あるいは、低速度帯の区間長が一回のトンネル掘削長より狭かったため、掘削後の切羽観察では認められなかった等のことが考えられる。

なお、今回の実験区間内には粘土層が出現しなかったため、表面波法で粘土層を捉えられるかは確認できなかった。舞子トンネル中北工事における粘土層のS波速度はP-S検層結果では0.35~0.44km/secであり砂礫層よりやや低い。したがって、粘土層が出現したときに捉えられるか不明であるが、今後も実験を続ける予定なので確認したいと考えている。

表-2 表面波探査結果と地山状況および両者の対比

No	Sta	表面波探査結果 V_s (m/sec)				断面観察における地山状況(肉眼観察による)				表面波速と地山状況の対比				備 考
		2m付近	4m付近	最大探査深度 (m) V_s (m/sec)	0-Vf 間の 特徴と地山状況 の推定	地 質	傾 度	切羽状況	切羽安定性	1.5m付近 の地山状況	2m 4m の深さの地山	2m 4m の深さの地山	総合評価	
①	25° + 10.0	360	390	9.8m 840	5.0m付近までは (450m/sec) Gr/Dz境界を想定 1.5m付近までは 砂層、軟質層の存在 を推定	Gr/Dz	CR主体/O	○	○	△	○	○	○	砂礫層主体 軟質層(花崗岩-砂礫) 確認
②	25° + 94.3	500	-	3.8m 590	1.5m付近までは 砂層、軟質層の存在 を推定	Gr	○	○	○	○	-	○	○	砂礫層
③	25° + 43.3	380	380	9.0m 380	断面方向断面 変化なし、断面 が広い地山状況 を推定	Gr (Gr+Vf)	△	○	△	○	○	○	○	
④	24° + 56.2	510	510	7.5m 810	断面方向断面と断面 傾度が高い Gr/Dz境界を推定	Gr	○	○	○	○	○	○	○	
⑤	24° + 38.0	430	540	3.2m 540	1.5m付近までは 砂層、軟質層の存在 を推定	Gr	○	○	○	○	○	△	△	①砂礫層で推定、②砂礫層の存在を推定したが断面では確認できなかったが砂礫層を推定した。しかし全体的な地山状況は推定されていると推定している。
⑥	23° + 56.8	500	500	9.8m 810	1.5m付近までは 砂層、軟質層の存在 を推定	Gr	○	○	○	○	○	△	△	
⑦	22° + 24.2	300	440	9.8m 810	断面方向断面と断面 傾度が高い	Gr (Gr+Vf)	△	○	△	○	△	△	△	

*4 表面波速度と0-Vf間の特徴より推定
 *5 断面を行った断面における地山の平均的評価

凡 例

*1 ①-花崗岩 ②-頁岩 ③-少ない ④-空室 ⑤-よく一致している
 *2 ①-砂層 ②-砂層 ③-砂層 ④-砂層 ⑤-ほぼ一致している
 *3 ①-砂層 ②-砂層 ③-砂層 ④-砂層 ⑤-ほぼ一致している
 *4 ①-砂層 ②-砂層 ③-砂層 ④-砂層 ⑤-ほぼ一致している
 *5 ①-砂層 ②-砂層 ③-砂層 ④-砂層 ⑤-ほぼ一致している

3.2 比抵抗法

表-3 に比抵抗探査結果と、掘削後の肉眼観察および両者を比較した結果を示す。

今回は、比抵抗値に影響する地下水の性質に変化は無いものとして、トンネルセンター部の見かけ比抵抗値、および、トンネルセンター1.0m深度の地点を基準とした比較率¹⁾によって、探査結果と地山状況の整合性について検討を行った。

今回の場合、有効な探査深度が7mしかなかった。そこで、表-3 では代表的地点として比較を簡便とするために、深度1mと5m地点での見かけ比抵抗値を示している。肉眼観察による地山状況の判定は、3.1 項と同様に表-1 に示した基準で行っており、探査範囲における地山の平均的評価を示しているものである。

比抵抗法では、見かけ比抵抗値とともに、次の比較率の考え方によって切羽前方の地山状況を推定している。この地点の砂礫層での電気検層結果は50~150Ωmを得ており100Ωm以上ならば締まっており、それ以下であれば緩んでいると推定している。比較率は均質地山の2次元ポテンシャル解析結果をもとに作成しておりトンネルセンター1.0m深度の地点を基準にした、100%より小さければ電気を通し易い(一般には地質が悪い) ことになり、100%より大きければその逆と見なすことができるとしている¹⁾。

$$\text{比較率(\%)} = \frac{\text{得られた見かけ比抵抗値 } \rho_a}{\text{補正係数により算出した比抵抗値 } \rho_b} \times 100$$

また、図-3には、表-3に示した測定点でのトンネルセンター部の比較率の変化傾向を示す。
 表-3に示すように、②、④地点では切羽前方地山が不良になると推定したが、肉眼観察では切羽の安定性はやや安定レベルであり両者は一致していない。それ以外の地点では両者はほとんど一致している。

図-3に示した比抵抗比較率の変化をみると、③、⑤地点以外は比較率は指数関数的に低下しており、今までの判定方法に基づくと、1 m地点に比べて前方地山が悪くなっていることになる。比抵抗値は、地山の含水状態に強く影響されることは良く知られていることであるが³⁾、現状の比較率を算出時に使用する補正係数には、この深度方向の含水状態の分布まで考慮していない。そのため比較率での判定と地山状況が一致しなかったと思われる。図-4は地質観察結果より求めた切羽付近の地下水状態の模式図とこれから想定される比抵抗比較率の分布である。これと図-3に示した分布は①地点を除いてかなり一致しており、地下水状態を考慮すれば地山状態をあらわすことができると考えられる。切羽前方の地下水状態を定量的に評価し、それを補正処理方法、比較率に反映することが探查結果を評価するための今後の課題であると考えられる。

表-3 比抵抗探查結果と地山状況および両者の対比

No.	STA	比 抵 抗 探 査 結 果 トンネルセンター見かけ比抵抗値: ρ (Q-m)				探查範囲における地山状況 (肉眼観察による)				探查結果と地山状況との対比			備 考
		1 m地点	5 m地点	比較率% (5 m)	データの傾向と 地山状況の推定	*1	*2	*3	*4	*5	*6	*7	
①	25' + 41.4	62	18.5	45.2	現切羽はゆるんでおりさらに不良となる	0g (0sあり)	△	○	△	○	○	○	
②	25' + 64.2	100	22.5	36.4	現切羽は締まっているが深部は不良となる	0g	○	◎	○	○	△	△	
③	24' + 54.2	142.5	73.5	78.1	現切羽は締まっており連続する	0g	○	◎	○	○	○	○	
④	24 + 40.0	181.5	65 (4m)	23.2	現切羽が締まっているが深部は不良となる	0g	○	◎	○	○	△	△	後進路で実施
⑤	22' + 32.1	42	24	110.1	現切羽はゆるんでおり連続する	0g (0sあり)	△	○	△	○	○	○	

*A 見かけ比抵抗値と比較率により推定
 *B 探查を行った範囲における地山の平均的評価

凡 例

*1 花崗岩
 *2 良好
 *3 少ない
 *4 安定
 *5 6.7
 *6 ほぼ一致している
 *7 評価基準

0g: 砂層
 0s: 砂層
 △: やや不良
 △: 多い
 △: やや不安定
 △: 一致していない

◎: 良好
 ○: やや良好
 ○: やや安定
 ○: やや不安定
 ○: ほぼ一致している
 ○: 一致していない

ρ 値の評価基準
 ρ ≥ 100 Q mならば固結度良好
 ρ < 100 Q mならば固結度やや不良

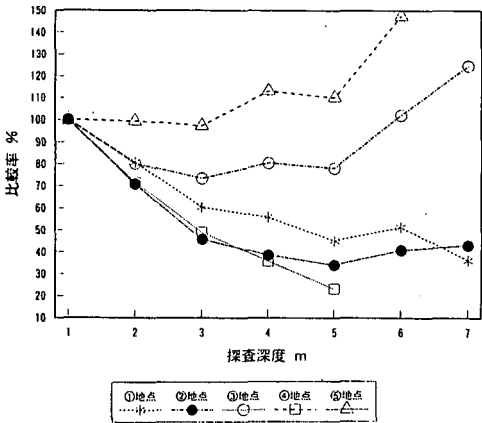


図-3 トンネルセンター部における比較率の変化

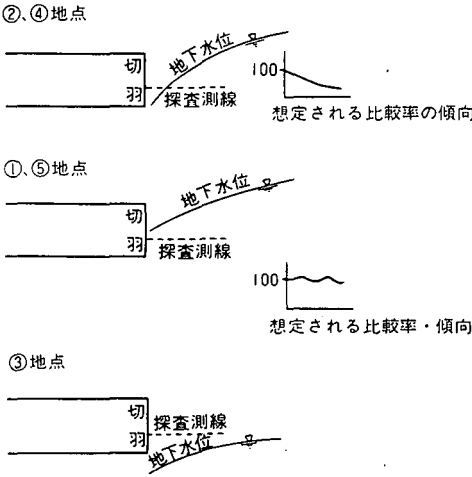


図-4 切羽前方の地下水状態と想定される比較率の傾向

3.3 切羽安定性評価について

これまでの探査実験により、大阪層を掘削する舞子トンネル中北工事において精度の良い切羽評価を行うためには、主に固結度との相関がある表面波法、含水比との相関がある比抵抗法を組み合わせる必要があると考えられた。

表－4に、これまでの現場での実験結果をもとにした、舞子トンネルでの切羽安定性評価の試案を示す。表面波法、比抵抗法による探査結果と予想される地質状態を4パターンに分類してまとめた。勿論、適宜修正する必要があると考えられるが、今後探査結果利用の際のベースとなるものと思われる。

表－4 大阪層で表面波法、比抵抗法を用いた切羽安定性評価案

パターン	表面波速度 V_r^* (m/sec)	比抵抗値 ρ^{**} (Ω m)	評 価	想定される地質
A	高 ($V_r > 400$)	高 ($\rho > 100$)	固結度良く 水はない	比較的良好な地質
B	高 ($V_r > 400$)	低 ($\rho < 100$)	固結度良いが 水はある	長時間切羽放置すると崩 落、流出する地質
C	低 ($V_r < 400$)	高 ($\rho > 100$)	固結度不良で 水はない	切羽、天端からの崩壊が ある地質
D	低 ($V_r < 400$)	低 ($\rho < 100$)	固結度不良で 水がある	切羽、天端からの土砂流 出等が考えられる地質

* 4～5 m前方の表面波速度

** トンネルセンター1 m深度の比抵抗値

4. おわりに

今回、含水未固結層である大阪層を掘削中である舞子トンネル中北工事において、表面波法、比抵抗法による探査実験を行った結果、以下の知見を得た。

- ①大阪層において表面波速度が400m/sec以上ならば、締まりは良いと判定したが、切羽観察でも良好であると判定された。これより表面波速度は、切羽安定性評価の指標となる可能性が確認できた。
- ②大阪層において見かけ比抵抗値が100 Ω m以下ではゆるんでおり、100 Ω m以上ではかなり締まっていると判定したが、切羽観察結果と比較すると概ね一致していた。これらより比抵抗値を用いて切羽の安定性評価が可能であると考えられた。
- ③大阪層で精度の良い切羽安定の評価を行うには、固結度と含水程度の両者によって切羽を評価すべきであると考えられ、表面波速度と比抵抗値を組み合わせた切羽安定性評価の試案を提案した。

以上、舞子トンネル中北工事における実験結果について報告した。技術的な課題はいくつか残されるが、今後も継続して実験を行っていく予定である。

謝辞

現地実験に際しては、前田・清水・三井・大日本・大本共同企業体の方々に多大なる御尽力を頂きました、ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 神藤健一、井上博之、小熊登：トンネル前方地質性状予測のための切羽での物理探査実験について、物理探査学会第88回学術講演会講演集、pp.129～133、1993
- 2) ビイック（株）：表面波探査法、技術資料
- 3) 物理探査学会編：図解物理探査、pp.53～62、1989