

1 地山全体の岩盤の性質

地山全体の岩盤の性質を物理的な方法で定量的に表わすための方法として、最近物理探査法が利用されるようになった。わが国で物理探査が建設工事に利用されるようになったのは10数年以前からであつて未だ日が浅いにもかかわらず非常な成果を挙げるようになってゐる。

物理探査には電気探査、地震探査（弾性波探査）、磁気探査、重力探査、原子力探査などがあるがこのうち建設工事の地質調査に利用されているのは主として電気探査と地震探査である。

2 電気探査

探査方法としては、電気探査法のうち比抵抗探査方法を用い地表面からの探査とボーリング孔を利用する探査との2種類が主に使用される。

2.1 地表面からの探査：地形が複雑であつたり地下構造が複雑であると一般的にいつて電気探査の解析には非常に困難な条件であるが、最近アナログ電気探査解析装置を用いて結果の解析が行なわれるようになった。地表面からの探査では水平探査法と垂直探査法が用いられる。水平探査では調査の目的に応じて、例えばある測線について10m、20m、40m、60m、80m等の電極間隔を用いる。垂直探査は水平探査の結果を概略現地で考慮して主として地下の水平構造を探索するために用いられる。調査の実例として、ある地点（地質は主として輝緑凝灰岩）の断面が図-1の場合、上記の10m～80mの5種類の電極間隔を用いた水平探査比抵抗曲線は図-2で示される。この測線の地形は極めて複雑であり、したがつて比抵抗曲線はその影響を著しく受けている。この地形の影響を取除くために電気探査解析装置を用いて解析する。

図-1に示す地形断面図に従つて解析装置に地形を表示したが、装置における抵抗網の1メッシュは水平距離10mに相当する。この地形断面を表示した装置について10m、20m、40m、60mおよび80mの5種類の電極間隔によつて測定した結果を図-3に地形解析曲線として示す。ここでは地下構造は均質媒質として表示されているので $\bar{\rho} = 1$ からのずれが地形の影響を示すものである。現地の比抵抗曲線（図-2）と比較すれば曲線の傾向は両者よく一致し、現地の比抵抗曲線は著しく地形の影響を受けていることが明らかである。

つぎに現地の比抵抗曲線と解析装置によつて得た地形解析曲線との比を求めたものが図-4に示す地形比曲線である。この曲線では地形の影響が除かれたために比較的単調な比抵抗曲線となり結果の解釈が容易と

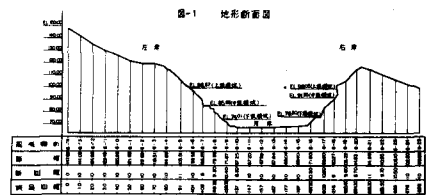


図-2 水平探査比抵抗曲線

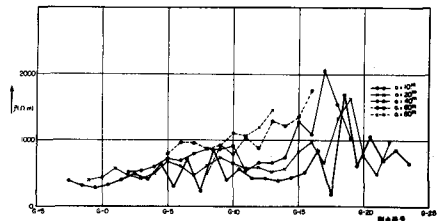
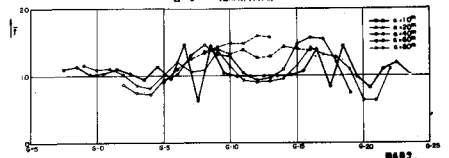


図-3 地形解析曲線



なつた。すなわち G-18 から G-20 の部分以外は比較的単純な水平構造と考えることができ、G-18 から G-20 に相当する右岸の地表近くでは高比抵抗帯があると考えられる。内部構造については、推定される地下構造をさらに解析装置に表現して検討を進める必要がある。

従来、複雑な地形に対して困難視されていた電気探査の適用の問題も解析装置を用いて地形の解析を行うことによつて解決でき、複雑な地形に対する電気探査の適用性が新たに考えられるようになった。

2.2 横坑を利用する探査 : 探査的な考え方からすれば、横坑はボーリング孔と同様に考えてよい。すなわち地表面からの探査によつて推定された地下構造図を確認および修正する手段として用いられる。電極間隔は 1 m, 2 m 程度が用いられる。

2.3 ボーリング孔を利用する探査(電気検層):

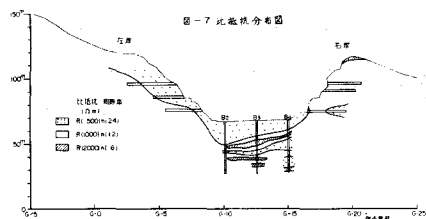
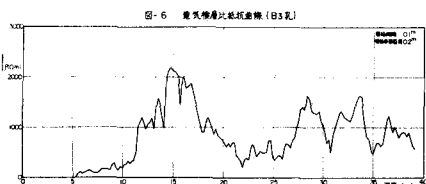
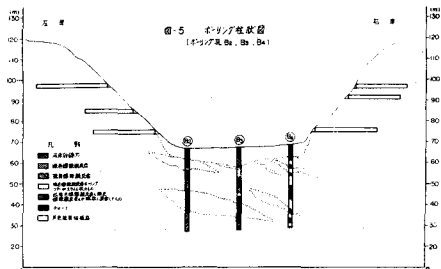
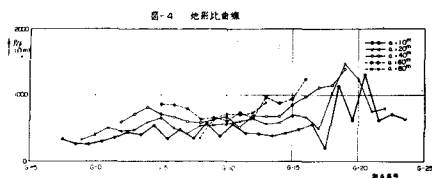
図-5 はこの地点のボーリングの柱状図を示す。ボーリングによる調査はコアの採取状況を柱状図に示し、コアの写真を採取順序に並べて示すのが普通であるが、コアの採取不能な部分はボーリングでは調査できない。これを補う一つの方法として電気検層が利用される。B₃孔の電気検層の結果を図-6 に示す。

この図は実測結果のうち電極間隔が 0.1 m である場合の結果のみが示されている。

2.4 測線断面の比抵抗分布 : 以上の地表からの探査、横坑を利用する探査、ボーリング孔を利用する探査を総合して、この測線断面の比抵抗分布を図示すれば図-7 となる。比抵抗としては 3 種類に大別することができる。すなわち比抵抗 R (x Ω-m 程度) は R (500), R (1000) および R (2000) である。 R (500) の範囲は表上および河床砂礫層, R (1000) の範囲は輝緑凝灰岩が粘板岩である。

これを要するに、この地点は間隙の多い地質構造であるが水の流動は測定されなかつた。また比抵抗の値は種々の条件によつて左右されるが、2000 Ω-m 程度以下の値を示す岩盤はあまり堅硬な良質のものとは言えない。

2.5 電気探査のその他の利用法 : 電気探査の岩盤の性質を調査するその他の利用法としては、まず比抵抗の変化によるクラックの発生を探査することが考えられる。また岩盤内部に含まれる水分あるいは水が有するポテンシャルエネルギーが発破によつて振動され、その際電位の変化によつて弾性波より速度の早い電磁波が発生する。この電磁波を解明することによつて岩盤の性質が表わされると考えられる。



3. 地震探査（弾性波探査）

探査方法として屈折法探査が多く用いられる。これには主にP波（縦波）が利用されるが、場合によつてはS波（横波）が地中の性質を良く表わすこともある。ただS波のみを発生させることはきわめて難しいという難点がある。またボーリング孔を利用して孔内に起震点をとることにより、深部の測定資料が得られ解析の資料とすることができる。

3.1 P波およびS波の速度とポアソン比、弾性率との関係

一般につぎの関係がある。 $V_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$ (7.1), $V_s = \sqrt{\mu/\rho}$ (7.2), $\sigma = \lambda/2(\lambda + \mu)$ (7.3),

$E = \mu(3\lambda + 2\mu)/(\lambda + \mu)$ (7.4), $K = \lambda + 2/3\mu$ (7.5) ここに V_p : P波の速度, V_s : S波の速度, λ : Laméの常数, μ : 剛性率, ρ : 密度, σ : ポアソン比, E : ヤング率, K : 体積弾性率である。

一般に弾性波探査においてはP波速度のみで地山内部の伝播速度を表わしている。しかし、表示されたP波速度は測定区域の硬岩、破碎帯、軟岩等を含めた区間の平均速度か、あるいは廻り道をして弾性波が硬岩部のみを通り最短時間で伝播した速度を示し、地山内部の性質を適確に示すとは限らないことが多い。この欠点を補うために、できれば同一測定区域のS波速度を対比して判断すれば施工上一層明確に性質を知ることができる。

3.2 トンネルにおける探査

(1) 新生駒トンネルに関する探査 : 新生駒トンネルは岩質は花崗岩でこの建設のための調査として旧トンネルからの調査横坑を利用して地震探査が行われた。その結果を表-1に示す。一般にS波速度がP波速度の1/2以上あれば岩盤は正常な状態で堅硬なものと考えてよい。またポアソン比が0.33以下であれば一般に堅硬な岩でトンネル掘削では支保工は必要ないか、後普請で肌落ちを防止する程

表-1 近鉄生駒トンネルにおける弾性波の速度とポアソン比

場所	岩石の賦存	P波速度 km/s	S波速度 km/s	ポアソン比 σ
横坑6	花崗岩	5.2	2.8	0.30
横坑5	軟岩	4.7	2.4	0.32
横坑4	破碎帯	3.0~3.5	不明 増加傾向あり とも考慮し	

度である。表の硬軟岩区域は40m²の上部半断面掘削でほとんど無普請で進行した。ただし龜裂や薄い断層が発達し一部支保工を建て込んで押えながら進んだところもある。破碎帯区域は横坑5付近から破碎が著しくなり、粘土をまじえた湧水を伴う大断層が横坑4の付近まで約200m続いていた。支保工は200Hを1m間隔に入れトレンチシートを併用した。

(2) 新深沢トンネルに関する探査 : 昭和40年4月より着工し、坑口より160mまでの区間における地震探査の結果は次のとおりである。P波速度3.0km/s, S波速度1.2km/s (P波速度×1/2.5), ポアソン比0.40。岩質は粘板岩でこの付近の堅岩のP波速度4.0km/sである。掘削にあたっては28m²の全断面に対して125Hの支保工を12~10m間隔に使用した。

以上はいずれもトンネル坑内の地震探査の結果を述べたが、トンネルの建設のための地震探査にあたっては予定線に沿った地表よりの調査とともに調査横坑あるいはボーリング孔を利用し、起震点と受震点を施工基面付近に置く調査が望ましい。ボーリング孔での地震探査のためには孔中に固定して使える3成分地震計の開発が切望される。

3.3 地表面、横坑、ボーリング孔を利用する探査 : 図-1に示す前述の電気探査と同じ断面において、地表面における屈折法探査(P波)、横坑およびボーリング孔を利用したP波速度の直接測定を行なった結果を図-8に示す。堅硬な岩質のところでは横坑内での発破からS波の位相を読み取る

ことができるが、この地域ではこれに対応するS波の位相が検出されなかつた。これは岩石の中でのS波の減衰が大きかつたためと考えられる。

ボーリング孔の中に3 m 間隔に11ヶの水中マイクロフォンを殊数つなぎにし、孔内を伝わる水中の音速Cを測定した。このCから岩石の剛性率 μ が求められる。孔内の水を伝わる音波の速度は波長が孔の直径より十分長いと周囲の固体媒質の剛性によつて変化する。Cと岩石の剛性率 μ との関係は次式で与えられる。

$$C/V_w = \{ \mu / (K_w + \mu) \}^{1/2} \quad (7.6) \quad \text{ここに } V_w: \text{水の本来の音速, } K_w$$

$$: \text{水の体積弾性率である。水の密度を } \rho_w \text{ とすると } V_w = \sqrt{K_w / \rho_w} \quad (7.7), (7.2) \text{ 式から } V_s = \sqrt{\mu / \rho}$$

またボーリング孔沿いのP波速度の検層を行つたが図-9にそれらの結果を示す。図-9ではCの値より算出したS波速度はこれに対応するP波速度に比し1/32~1/28と甚しく低下している。この場合の弾性常数を表-2に示す。ポアソン比は0.40~0.44程度である。ただしボーリングの際孔壁を損傷するのでここに算出されたポアソン比は実際の値より若干大きく表示される可能性がある。

以上の点を総合して考えるとこの地域はP波速度は見掛け上よい値であるが、局所的に龜裂の多い部分が岩盤内に存在する可能性が十分あり、また岩石の剛性が小さく、こわれ易いことも考えられる。

4. 岩盤の性質と掘削工法

地山全体の岩盤の物理的性質を定量的に示すために電気探査の比抵抗法による探査の例と地震探査のP波、S波速度による探査の例を述べた。これらの探査法は併用して利用することが岩盤の性質を表わすのに最も効果が大である。比抵抗値は岩の強度と中に含む水分の量を示すものと考えられ、またP波およびS波速度は減衰の仕方や、相対的な値から岩盤の硬軟、龜裂破碎の程度を示す。ポアソン比の値を利用することも掘削には極めて有効である。例えばトンネル掘削ではポアソン比が0.33以下であれば一般には無普請で掘削できる程度の岩盤であると考えられる。P波速度のみで岩盤の性質を表わすのは困難であつて、上記の探査法が総合的に活用されて一層明確な岩盤の性質を把握し、この資料に基いて最も経済的で安全、迅速な掘削工法が決定されることが望ましい。

最後に上述の実験の測定と解析を担当された京都大学教授吉住博士、吉川博士に深く感謝する次第である。

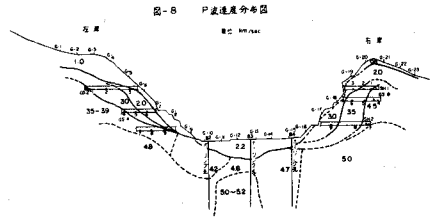


図-9 弾性波検層図 ボーリング見出し速度

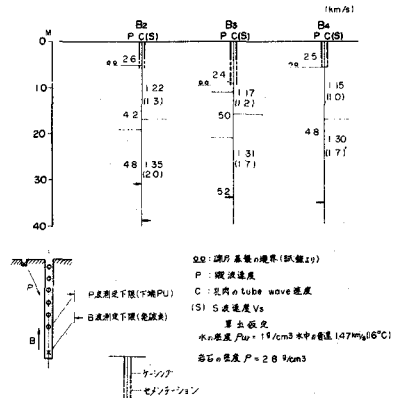


表-2 岩石の速度および弾性常数

ボーリング No	地盤深度 [m]	P波速度 [km/s]	S波速度 [km/s]	縦波速度 [km/s]	横波速度 [km/s]	縦波速度 [km/s]	横波速度 [km/s]	縦波速度 [km/s]	横波速度 [km/s]
Bz	1	2.800	4.8	2.0	42.9	11.4	0.40	31.8	50.5
Bz	1	2.800	5.0	1.7	54.9	8.25	0.43	23.8	60.4
Bz	2	2.800	5.2	1.7	60.7	8.25	0.44	23.8	66.2
Bz	1	2.800	4.8	1.7	49.3	8.25	0.43	23.9	54.8

Nature of Rocks in situ and Surveying Methods for Rock Excavation

Chugoro SATO, Kajima Construction Co., Ltd.
Sadao UMEDA, " " "

Among various methods applied for determining the physical properties of rock as a mass in situ in relation to the rock excavation works, the combined application of electrical and seismic methods are considered most practicable as far as physical measures are concerned.

The two physical analyzing methods, electrical and seismic, have been used for geological survey for the past several decades, but their applications to the civil engineering profession are rather recent techniques and we can foresee more active utilization of these techniques for coming years.

With the electrical method, nature of rocks and existence of cracks can be surveyed through electric logging within the bored hole or by measuring electrical resistivity of rocks. Electromagnetic waves obtained from the changes of electric potentials of rock mass produced by means of blasting vibrations could also serve for this purpose. A resistance network analyzer for electrical prospecting method can be used to analyze the data thus obtained.

As to the seismic method, the conventional way of depending only on the propagation velocity of Primary wave (longitudinal wave) is now considered insufficient to reveal the nature of rock, and the recent study of rigid logging methods is known to use propagation velocities of both Primary wave and Secondary wave (transverse wave) and test boring holes. The sonic waves propagating through water or behaviour of P and S waves serve for the logging. By analyzing the propagation velocities of the two different waves through rocks, Poisson's ratio, rigidity, Young's modulus and bulk modulus of rock can be obtained.