

物理探査結果と地盤特性の相関

Correlation between the Results of Geophysical Prospecting and Geotechnical Properties

鍛治義和 (かじ よしかず)

中央開発(株)技術本部

三木 茂 (みき しげる)

基礎地盤コンサルタント(株)技術本部

羽竜忠男 (はりゅう ただお)

北光ジオリサーチ(株)

増本 清 (ますもと きよし)

島根大学総合理工学部 講師

1. はじめに

物理探査にはいろいろな方法があるが、探査によって得られる物性値は弾性波速度とその減衰（弾性波探査）、比抵抗・誘電率・充電率（電磁探査）、体積密度（重力探査）、帯磁率（磁気探査）、熱伝導率（地温探査）、 γ 線強度（放射能探査）等である。これらのうち、地盤工学分野で最も利用されているのは弾性波速度であり、供試体および原位置試験の結果を使って、地盤の諸特性や工学的特性との関係が詳しく研究されてきた。一方、近年、電気探査が見直されてきており、比抵抗と地盤特性との関連についても研究が進められている。

物理探査の地盤工学での利用法に着目すると、探査結果を定量的に評価し地盤の工学的特性を判定すること、探査で得られた物理量の分布パターンから地盤の状態を定性的に判定することに大きく2分される。現在のところ前者の利用方法がなされているのは弾性波探査ぐらいであり、多くの探査は後者で示される利用法にとどまっている。電気（電磁）探査における比抵抗については、前者と後者の中間段階であるといえる。しかし、探査結果を有効に地盤工学へ利用するためには、定性的であっても探査で得られる物理量と地盤の状態との因果関係について把握しておく必要がある。このことが物理探査結果を定量的に利用するための基礎となることは言うまでもない。「物理探査技術の地盤工学への利用に関する研究委員会」では、検討項目の一つとして「物理探査計測値の理論的位置づけ、物理探査計測値と地盤・岩盤物性値との相関性の再整理」を行ってきた。本文は、地盤工学分野で比較的多く利用されている弾性波探査と電気探査について、探査結果と地盤種別や地盤状態の関係を既存資料から整理し、探査結果から地盤の工学的特性を判定するための基本的な考え方、留意点を示すことを目的としてまとめたものである。

2. 地盤条件と弾性波速度、比抵抗の関係

2.1 物理探査と地盤条件の考え方

地盤は物質の骨格をなす固体とその間隙を満たす液体および気体より構成されている。固体を構成する骨格の特性と状態、固体・液体・気体の割合と物理的特性、その置かれた状態により地盤の弾性波速度や比抵抗が決定される。また、これらの地盤の状態を表すパラメーターとして、岩種（土質）、間隙率、飽和度、固結度、圧力（拘束圧）、温度（地温）などが一般的に使われている。図-1および図-2は、弾性波速度と比抵抗について、地盤の生成過程と履歴における上記のパラメーターとの関係を模式的に示したものである。例えば、統成作用により固結度が増すと弾性波速度は高くなる。間隙に含まれる水の量が低下すると比抵抗は高くなる。地盤の特性は、種々の地質作用、そして現在における人為作用によって付与されるものである。物理探査結果は、地盤種別によって基本的性質が与えられ、地盤種別ごとにある範囲の値をもつと考える。しかし、同種の地盤であっても地域によって生成過程や組成が異なり、その値に地域差が生じうる。さらに人為作用の結果、同種の地盤であってもさまざまな探査結果を示すようになる。一方、地盤の工学的性質も地質作用、人為作用の結果であるが、その表れ方が物理探査で求まる物理量と1対1の関係を示さないことが多い。このことが物理探査結果から直

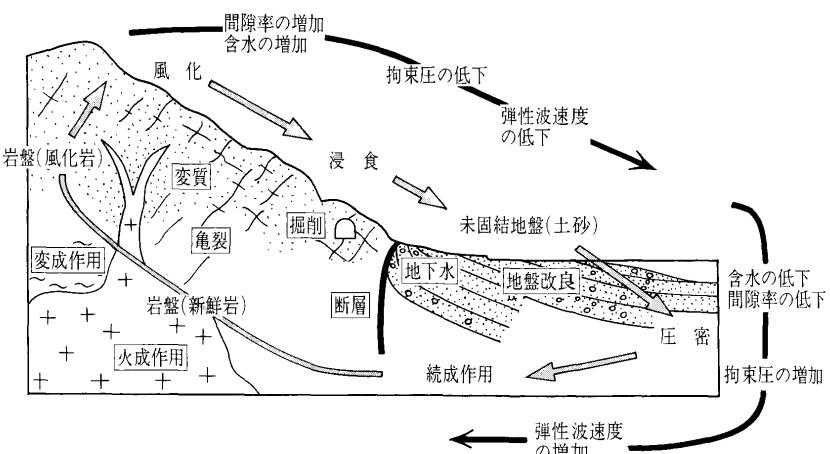


図-1 地盤の弾性波速度の変化と概念図

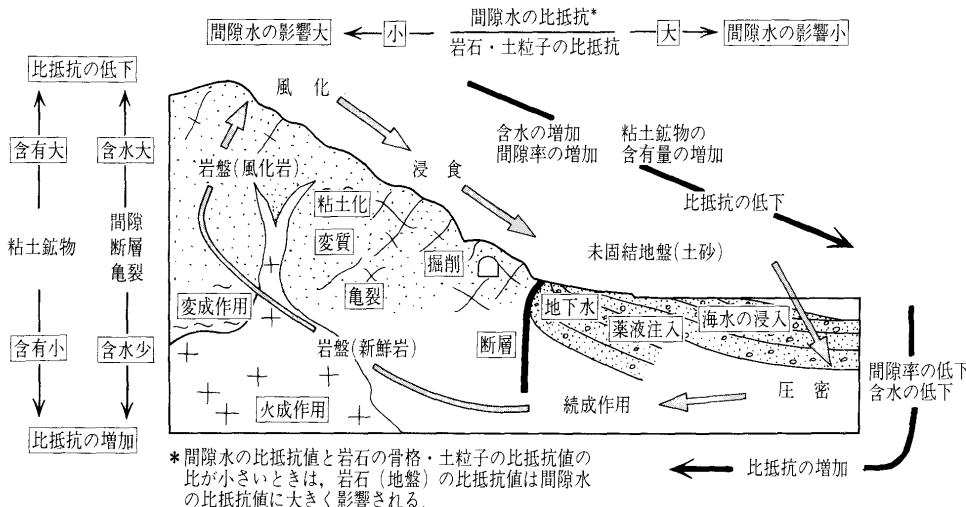


図-2 地盤の比抵抗値の変化の概念図

接、地盤の工学的特性を判定することを難しくしている。したがって、地盤種別による物理探査結果の分布範囲を把握しておき、間隙率、飽和度、拘束圧などのパラメータ（影響因子）で表せる地盤の状態と探査結果の関係を整理しておくことが重要となる。

2.2 弹性波速度に影響を及ぼす条件

弹性波探査および室内での測定結果から、岩石・未固結土の状態を表すいくつかの要因が弹性波速度の変化をもたらすことが明らかにされている。表-1は弹性波速度に変化をもたらす代表的な要因とその影響について定性的に示したものである。地盤のP波、S波の速度変化をもたらす要因を大きく分けると、

- ① 土質・岩種と締まり・固結度（地質年代）
 - ② 地盤の間隙とその状態
 - ③ 岩盤に含まれている亀裂とその状態
 - ④ 地盤に作用している外力
 - ⑤ 土砂・岩石を構成している鉱物、粒子の配列
- に分類できる。
- ①の要因は基本となるもので、岩種や地質年代により

速度が大まかに決定される。堆積岩より構成される岩盤では、地質年代が古いもの、良く固結している岩石より成る岩盤ほどP波速度が高い。一方、深成岩あるいは火山岩では、鉱物組成の違いを反映し、塩基性岩で弹性波速度が高く、酸性岩で弹性波速度が低くなる傾向がある。未固結地盤および軟岩地盤では、P波速度は土質および地質年代による速度の差が顕著に表れないが、S波速度ではその差異が表れる。②の要因は同一の岩石であっても、間隙の状態によりP波速度、S波速度が変化することであり、間隙率と飽和度が主要な因子となる。間隙の多い岩石では、飽和度が低下すれば、P波速度が低下する傾向が認められる。③の要因は②の要因に共通した点があるが、亀裂の長さ、幅、方向、亀裂に介在している物質によってもP波速度、S波速度に変化をもたらすことがあることを示している。亀裂を多く介在する岩盤ほどP波速度、S波速度は低下する。④の原因の代表的なものとしては、拘束圧（土被り）があげられる。固結度が低い岩石、未固結土では拘束圧の増加により、S波速度の増加が顕著である。⑤の要因は結晶片岩

表-1 P波速度・S波速度に及ぼす因子の影響度の概念図

		P波速度の変化					S波速度の変化				
		間隙	飽和度	拘束圧	亀裂	粒子配列	間隙	飽和度	拘束圧	亀裂	粒子配列
未固結土	粘性土	△	○	○	-	-	○	-	○	-	-
	砂質土	△	○	○	-	-	○	-	○	-	-
新第三紀層	泥岩	△	○	○	○	-	△	△	○	○	-
	砂岩	○	○	○	○	-	△	△	○	○	-
中古生層	泥岩・頁岩	△	△	△	○	○	△	△	△	○	○
	砂岩	△	△	△	○	-	△	△	△	○	-
	石灰岩	-	-	-	○	-	-	-	-	○	-
变成岩	結晶片岩	△	△	○	○	○	-	-	○	○	○
	ホルンフェルス	-	-	-	○	-	-	-	○	-	-
火山岩	多孔質	○	○	○	○	-	-	-	○	○	-
	稠密	-	-	-	○	-	-	-	○	○	-
花崗岩	新鮮岩	-	-	-	○	-	-	-	-	○	-
	風化岩	△	△	△	○	-	△	-	△	○	-
	強風化岩	○	○	○	○	-	○	-	○	○	-

記号 ○：影響大 ○：影響中 △：影響小 -：該当しない、影響ほとんどない

などにみられる一定方向の鉱物粒子配列のため、弾性波が伝播する方向により速度が変化する要因である。

弾性波速度は、固結度の低い岩石ほど低い値を示す傾向がある。また、固結度の低い岩石、未固結土では間隙率が高くなる傾向がある。このことを反映して、未固結土、固結度の低い岩石では②の要因による速度変化が顕著に表れる。同様に、未固結土、固結度の低い岩石では、④による速度変化が顕著に表れる。固結が進んだ岩石、新鮮な火成岩などでは間隙率が低く、③の要因による速度変化が主要な要因となる。亀裂が少なく新鮮な固結度の高い岩石では、②③④の要因による速度変化はほとんど見られない。しかし、風化が進行すると、②③④の要因による速度変化が表れ始め、風化の進行に伴い、固結度の低い岩石、未固結土の性質が反映されてくる。

2.3 比抵抗に影響を及ぼす条件

電気探査で求められる比抵抗は、地盤・岩盤の電気的特性を反映したものである。したがって、岩盤を構成している岩石骨格部そのものの電気的特性に加え、破碎帯などの空隙を満たしている流体（地下水、空気）や粘土鉱物等の電気的特性の影響を強く受ける。このような比抵抗の特性を利用して、断層破碎帯の調査などに多く利用されている。一方、比抵抗から工学的諸量を導き出したいとする要望も増加してきている。表-2は比抵抗に及ぼす影響因子を概念的に示したものである。岩盤および地盤の比抵抗に対する影響因子としては、主として次のようなものが考えられる。

- ① 岩盤・地盤を構成する岩石や鉱物
- ② 岩盤の変質、風化状況（粘土鉱物など）
- ③ 岩盤の亀裂帶、破碎帶（空隙率、粘土鉱物、地下水）
- ④ 地下水
- ⑤ 温度

①の要因は岩石の組織、鉱物組成、間隙率、生成年代が異なるために、新鮮な岩盤においても岩種により比抵抗が異なることを示すものである。このため岩種という条件は、比抵抗と工学的諸量との関係を把握する際の必須条件となる。各種機関で、電気検層の結果や電気探査の結果から、岩種別にみた比抵抗が整理されている。比抵抗は、各岩種とも2オーダー程度のばらつきがみられるが、大局的には岩種による違いは認められ、電気探査結果を解釈する上で重要な指標となる。②③④の要因はお互いに関連している。地盤の比抵抗は、骨格部の比抵抗と間隙水の比抵抗、間隙の大小によりさまざまな値をとりうる。例えば骨格部の比抵抗が高く、間隙比の大きい地盤（火山岩屑、段丘砂礫層、扇状地堆積物など）では、飽和度が低下すれば比抵抗は高くなる。また、地下水の比抵抗の増加に伴い、地盤の比抵抗も増加する傾向にある。逆に、間隙比が小さく岩石の骨格部の比抵抗が低い地盤では、間隙水の変化による比抵抗の変化は小さくなる。岩盤の風化帯や破碎帯では新鮮な岩盤に比べ間隙比が大きくなり地下水で飽和されていることが多く、一般に周辺岩盤よりも小さな比抵抗を示す。しかし、岩石の比抵抗と地下水の比抵抗がほぼ同等な場合（泥岩、

表-2 比抵抗に影響を及ぼす因子の影響度の概念

地盤・岩盤		風化・変質	亀裂 ¹⁾	間隙率 ¹⁾	飽和度
未固結地盤	粘性土	—	—	△	△
	砂礫	—	—	◎	◎
堆積岩	泥岩、頁岩	△	△	△	△ ²⁾
	砂岩	○	○	○	△ ²⁾
火成岩		◎	○	○	△ ²⁾

記号)「—」：該当はない、「◎」：影響大、「○」：影響中、「△」：影響小

注1) 亀裂や間隙に地下水が飽和されている場合は比抵抗が低下する傾向にあり、空気だけの場合では比抵抗が増大する傾向にある。

注2) 饱和度が20%程度以下では比抵抗が著しく増加するが、50%以上では飽和度の比抵抗に対する影響は少ないと考えられる。

頁岩、凝灰岩など）には一概にこのことは言えない。⑤は比抵抗が温度により変化することを示すものである。一般に、温度の上昇に伴い比抵抗は減少する。また、間隙水が凍結すれば比抵抗は急激に上昇する。

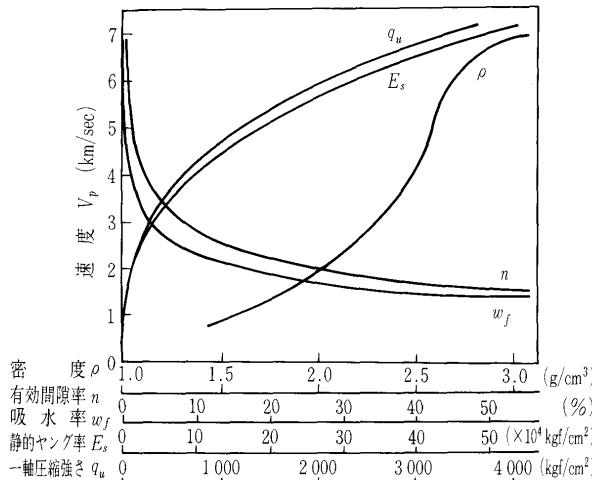
原位置で求められる比抵抗は、岩種、風化・変質、亀裂、粘土鉱物などの導電性鉱物の有無、間隙率、地下水の水質と飽和度、地温など多くの因子に影響を受ける。したがって、比抵抗と工学的諸量との関係を把握する際、これらの条件を明確にして判断しなければならない。

3. 工学的諸量と弾性波速度、比抵抗の関係

3.1 工学的諸量と弾性波速度、比抵抗との相関性

弾性波探査（PS検層）結果の利用法の一つとして、地盤の強度や変形性を推定することが挙げられる。また、簡単な調査法により、地盤の弾性波速度を推定することも行われている。前者の例としては、弾性波速度から一軸圧縮強度を推定することが、後者の例としては、標準貫入試験のN値からS波速度を推定することが挙げられる。図-3は、その1例であり、岩石のP波速度とほかの物理量との関係を総合的に表している。P波速度が高い岩石では、一軸圧縮強度、ヤング率が高くなる。未固結土ではS波速度と一軸圧縮強度、変形係数（ヤング率）の相関が良いことが確かめられているが、P波速度は一軸圧縮強度、変形係数（ヤング率）とあまり良い相関を示さない。

弾性波速度は、強度などの工学的諸量と比較的の相関が得られやすいが、比抵抗は物質の電気的性質となるので、力学的な工学的諸量と直接結びにくい。多くの場合、地盤の間隙状態を通しての相関となっている。比抵抗との相関性が検討されている主要な工学的諸量としては、一軸圧縮強度、変形係数、密度、透水係数があげられる。比抵抗とこれらの工学的諸量の関係については、古くは、電気検層による比抵抗と密度、有効間隙率、変形係数の関係が研究されている²⁾。また、近年、供試体を用いた比抵抗と一軸圧縮強度、変形係数等の関係を求める研究が始まっている³⁾。一般的には、比抵抗が高い岩石は一軸圧縮強度、変形係数が高いと考えられている。また、礫層では比抵抗が高いほど透水係数が高くなることが知られている。

図—3 岩石供試体のP波速度とほかの物理量の関係¹⁾

表—3は、弾性波と比抵抗の工学的諸量への利用性についてまとめたものである。

3.2 工学的諸量の関係の利用法

岩盤では原位置のP波速度のデータが多く蓄積されているのに対して、S波速度はあまりデータが蓄積されていない。したがって、岩盤において工学的に利用されるのはP波速度が中心となっている。利用法は、P波速度から直接、岩盤の強度や変形性を求めるのではなく、岩盤の善しあしを分類する指標としての意味合いが強い。未固結地盤では、PS検層により原位置のP波速度、S波速度が測定されるが、工学的にはS波の利用が中心となっている。利用目的は、地震時の地盤の振動特性を計算するための地盤定数や液状化の判定などが中心となっている。

弾性波速度とほかの物理量との関係は相関性の良いもの、ばらつきが多く関係が不明りょうなものもある。これらのはらつきは、地盤そのもののばらつきに加えて、地盤が置かれている条件による差異が加味されたものと判断される。したがって、各種原位置、室内試験を行い、弾性波速度とほかの物理量との相関図を作成し、調査対象地域の特性を反映した曲線を得て、工学的諸量の決定や補間に利用されている。

一方、前節までにみてきたような比抵抗に対する影響因子から判断すると、岩種や飽和度等の条件をそろえておけば、比抵抗と工学的諸量の間に相関性を見い出し、利用することが期待できる。例えば、薬液注入工法の施工管理に比抵抗が利用されている。ここでは、薬液注入前の地盤の比抵抗と薬液注入後の地盤の比抵抗を比較して薬液注入範囲の管理を行う。基本となる地盤条件は同一であることから、薬液注入の効果を抽出できる。あらかじめ室内試験で比抵抗と充填率の関係を求めておけば、比抵抗により定量的な現場管理（充填率の管理）を行えることになる。これはモニタリングとしての物理探査の利用法である。

4. 最後に

弾性波探査結果の妥当性について、今日でもなお議論

表—3 物理探査結果の利用方法

物理探査結果	未固結／半固結地盤	岩盤
弾性波速度	<ul style="list-style-type: none"> 地盤の変形特性 微小ひずみ（弾性領域）における地盤の変形係数の設定。 $V_s \rightarrow G_0$ 等 モニタリング <ul style="list-style-type: none"> —掘削に伴う緩み域の判定等 —薬液注入効果判定等 	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤分類 強度、変形定数の推定 モニタリング <ul style="list-style-type: none"> —地下水調査 —透水係数の推定 —特に砂礫地盤においてモニタリング —薬液注入効果判定 —地下水変動 —地質汚染等
比抵抗	<ul style="list-style-type: none"> 地下水調査 透水係数の推定 モニタリング <ul style="list-style-type: none"> —特に砂礫地盤においてモニタリング —地下水変動 —地質汚染等 	<ul style="list-style-type: none"> 破碎帶、変質帶の検出 モニタリング <ul style="list-style-type: none"> —地下水変動 —地質汚染等 物理特性、強度、変形定数の推定 他の探査結果との組合わせ 今後データ収集が必要

- 注) • 表中のアンダーラインは、今後物理探査結果の利用が増加すると考えられる項目。
 • 表中の工学定数の推定については、岩種や地下水条件等の境界条件を整えた上で、物理探査で求めた定数と工学定数との関連性を評価する必要がある。
 • モニタリングでは物探値の絶対値ではなく物探値の変化（相対値）に着目するために、境界条件を同一にして評価すれば良いと考えられる。

されている。探査手法としての問題点もあるが、探査結果を考察する際、ここで示した影響因子について十分吟味されていないことに起因することもしばしばある。一方、掘削に伴う緩み域のモニタリングとしての利用性に注目されつつある。どの影響因子でもって地盤状態の変化を検出するのかに、ここで示したことが役に立つ。

電気探査は古くから地下水にかかる探査として用いられてきたが、地盤工学に積極的に利用されるようになったのはここ近年のことである。したがって、比抵抗と工学的定数の関係については、データの収集が緒に就いたばかりである。今後データが蓄積されていくに従い、岩種などの条件が明らかになり、相関性がはっきりとしてくるものと考えられる。

それぞれの探査手法の特性を活かし、複数の探査結果を組合せて利用すれば、物理探査結果をさらに効果的に工学的定数に焼き直すことができると思われる。物理探査の有効利用の端緒として本文をみていただければ、我々の目的は達成できたと考えている。

文 献

- 1) 大久保 彪ほか：岩石の物理的性質と弾性波速度、土と基礎、Vol. 19, No. 7, pp. 31~37, 1971.
- 2) 石川浩次ほか：孔内測定を利用した花崗岩類の工学的性質の判定について、第4回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、p. 19, 1973.
- 3) 関根一郎ほか：岩石の比抵抗値とその力学的性質との関係、土木学会論文集、No. 541/III-35, pp. 75~86, 1996.
(原稿受理 1997.5.15)