

## 岩盤工学の変遷と岩盤調査の体系化

おのてら  
小野寺

とおる  
透\*

### はじめに

岩盤調査の、事業目的別の具体的事項および方法論などが、この小特集において述べられることになっているが、ここでは、岩盤調査の全体的な体系に関連し、岩盤工学の変遷を振り返ってみることにする。

本論にはいる前に、岩盤調査は岩盤施工のための調査であることを、初めに再認識しておくことが大切である。それは、一つには、岩盤は現場なり学校なりの機関で広く関心が持たれながら、関心の重点が違うために、岩盤工学という比較的若い分野で、用語の使い方が統一されていないことによる混乱を避けるためと、もう一つには、岩盤工学と土質工学とが、共通の場において、地盤を構成する材料、または地盤そのものと取り組んでいるということを確認しておくことが必要であると思うからである。

土質工学の分野においては、用語、試験方法、調査方法などが整理され、多くのものが基準化されている。また、それと共に、社会全体の教育事情の変遷、学問・技術の発達に伴って、用語・基準自体に対する検討も行なわれている。

岩石・岩盤の方面では、世界的に見て、用語、試験方法、調査方法のいずれも、統一ないし規格化が始まった段階であるといつてよい。土質工学会においては、岩の力学委員会で、岩石・岩盤関係の用語、試験方法、データシートなどの整理を検討しているが、この中で用語については、委員会資料として本年3月までに解説集が発行され、試験・調査については岩の工学的性質と設計・施工への応用が、学会から近く発行される。これらを参考にされたい。

### 基本的な用語

岩石・岩盤に関心を持つ分野は、純粋理学では地質学、地球物理学、実業では鉱山その他資源に関する事業、土木関係の多くの諸事業、そしてこれらを結びつける採鉱技術、建設技術ないしそれらの基本となる各方面の工学等々、きわめて多岐にわたっている。

岩石、岩盤、あるいは石、岩などの用語も、それぞれの分野の歴史にからんで、いろいろに使われてきたが、つぎのように整理される。

岩石：ある地質学的な意味を持つ産出状態の所から採取してきた岩片、試験片など。

石：地質学的な意味を問わない岩片。岩石の一般用語であり、石材方面では産地の地理的意味を持って使われるが、地質学的な意味は持たない。

岩体：地質学的な意味を持った産出位置にある岩石の母体。産出状態によってさまざまな呼び名がある。

岩：岩体またはその一部分を呼ぶ一般用語。

岩盤：岩体のうちで、工事に関係のある部分、すなわち工事による応力の影響を受ける範囲。したがって、岩盤の大きさは、工事または構造物の規模によって変わる。一般に物を載せるときにささえになるものを盤と呼ぶことから、ダムなどの岩盤、道路の路盤などの呼び方が古くから使われてきたが、トンネルのようにその中に作られる場合には盤と呼ぶことに賛成でない意見もあったが、最近ではトンネル方面でも、岩石地山を岩盤と呼ぶようになってきた。鉱山方面では、岩体の一部を古くから岩石と呼んできたが、近年岩盤という語が次第に広まっている。

学術用語や技術用語も本来は一般用語からきているものであり、山についている石を岩と呼び、山から離れてしまった岩石を石と呼び、岩から離れた片ではあるが、岩とのかわりは持っているものを岩石と呼んでいる。古来の文字の使い方は誠に妙を得ている。

ともあれ、ここで大切なことは、岩盤という用語は、工事と関係した用語であることであり、岩盤を考えるということは、工事の中心となる施工に関して岩盤を問題にしているということである。したがって、岩盤のために岩あるいは岩石を扱うことは岩盤を考える上での基本の問題である。

### 理学と事業との間に立つ力学、工学の立場

この問題は、ここでの主題ではないが、岩盤調査と不可分の関係にある岩盤力学・岩盤工学が、技術の基礎づけ、さらには事業の裏づけとして持つ立場を理解する上で、一般的にこの問題を考えておきたい。

近年、岩盤力学という言葉が流行のように広く使われているが、岩盤工学という言葉はあまり耳にしないのはなぜであろうか。20何年か前に土質力学という言葉が流行病のように広まっていたが、最近ではむしろ土質工学という言葉

\* 理博 埼玉大学教授 理工学部建設基礎工学科

## 論 説

表一 学術と実生活との関連(単純化)

純粋科学* = 学芸	工学と学芸との結びつき, 学芸の実生活への接近		技術への学問的裏づけ	実生活の行為への基礎づけ	実 生 活
自然科学 = 理学	応用理学	基礎工学	工 学 (広 義)	技 術 (広 義)	工 業, 事 業
エネルギー科学 (古典物理学)	力 学		工 学	各 種 技 術	各 種 工 業
対象物 { 水 土 岩**	水 理 学	土 質 力 学	水 工 学	水 工 技 術	
	岩 盤 力 学**		土 質 工 学	土 工 技 術	
エネルギー科学的地学 (地盤の理学)	地 盤 力 学		岩 盤 工 学**	岩 盤 工 技 術	
			地 盤 工 学	岩盤に関する技術	地盤工に密接する事業

注 \* 科学には自然科学のほか人文科学, 社会科学がある。

\*\* 岩石または岩盤

の方が広まっているように思う。これは、この間に経験的な土工から、力学に基礎を置いた土の施工への体系が整えられ、土質工学ができ上がってきたことによるものであることを考えれば、岩盤工学の置かれている現況がわかるであろう。

理学では、おのれの関心に従って古くから岩石と取り組んできたが、建設事業の直接関心の対象となる岩盤に、力学的に取り組む点では関心が薄かった。すなわち、表一1の応用理学ないし基礎工学としての岩盤に関する学問分野が、比較的充実して埋められてきたのは、近年になってからである。これは、たとえばダム、トンネル、電力などの建設事業のほか、資源開発事業などが大規模になるに従って、経験的な岩盤工ではカバーし切れない問題に対処するために、表一1の右側からの要請に従って、左側へ次第に連帯が強まってきたことに大きく影響されている。

もともと理学は、芸術などと同様に、そのこと自身に対する関心から出発するものであるが、地球、特に地球表層部の地盤上に生きる人間社会の中にあるという点で、地球の表層部および実生活とは無縁ではありえず、必然的にこれらとかかわりを持つ。

建設構造物が、その上またはその中に作られる地殻(地盤)の工学の基本となっている理学には、方法論的にはエネルギー科学(古典物理学)があり、対象物としては地殻(地盤)の理学がある。力学は前者に連なる応用理学ないし基礎工学の立場にある。そして、土質・岩盤力学は、地盤を対象物とする応用理学ないし基礎工学の立場にあって、土質・岩盤工学、さらにはそれらの技術を通して建設事業への結びつけの帯となる。また、ここでいう力学は、もちろん固体の力学だけではない。

### 岩石と岩盤

岩石の力学的性質は、そのままでは岩盤にはあてはめることはできないことは衆知のことである。たとえば、岩石試験によって得られた強さの値は、岩盤の強さとしては使えない。それは、岩盤はそれを構成している岩石が、断層、節理などの割れ目で分断されていることによっているから

であると説明され、これらの割れ目を含まない本質的材料が岩石であるともいわれる。

しかし、岩石の中にも大小の割れ目やきずが存在していて、強さに対する寸法効果が認められることも衆知である。この点を考慮すれば、大きさをそろえた試験片について測った圧縮強さの平均値に対する標準偏差の比は、試験片の中に含まれる割れ目の密度を表現するはずである。また、割れ目の密度は寸法効果として表われるから、相似形で寸法を異にする2系列の試験片による圧縮試験によって得られる強さの比も、割れ目密度を表現する。これらのことから、試験片の中に含まれる程度の割れ目(たとえば片理のような)だけを含む岩盤の工学的区分(強度表現)を、室内試験の値だけから行なおうとする試みもなされている<sup>1)</sup>。

また、土質に比べて岩石は透水係数が小さく、透水試験を行ない難いため、必要を感じながら、岩石の透水試験はあまり行なわれなかった。1959年、マルパッセダム取付け部岩盤の破壊以来、岩石・岩盤の透水性が重要視され、岩石の中空厚肉円柱試験片の内壁と外壁との圧力差による加圧透水試験によって、岩石の透水試験が行なわれ、岩石の透水性と力学的性質との相関を求める工夫も行なわれている<sup>1)</sup>。

普通の弾性波探査とは別に、岩石試験・岩盤測定に弾性波を使うことは、わが国では1960年頃から実用化されているが<sup>2),3)</sup>、諸外国では3年程おくれて広まった。この方法は、測定値をそのまま使用することよりも、むしろ岩石・岩盤の物性の表現に使用されるべきで、ボーリング孔内における弾性波検層、測定方法の工夫、そして静的測定との検証によってさらに利用度は高まるものと考えられる。

### 弾性力学からの脱皮

歴史的に見ると、人間がエネルギー科学的に物を見るときに、簡単に法則的に認識できるものから順に体系化されてきたことがわかる。すなわち、ロバート・フックが応力はヒズミに比例することが、純粋固体については実験的法則として成り立つことを発見したのが1678年であるが、これは、ある材料(物質)の温度、圧力、時間の外的条件に

よって異なる複雑な変形挙動の中で、固体として扱われている多くの物質は、常温、常圧、普通の実験時間内で、この法則に従うような比較的簡単な変形挙動を示すという内容を表わした経験則であって、物の本質を規定する一般則ではない。

他方において、エネルギー科学的には、純粋固体とは対照的な性質で、比較的単純な変形挙動を示すものが、粘性流動であり、この変形（流動）に関する法則がニュートン流動式として表わされたのがフックの法則発見の9年後、1687年である。

実在する多くの物質の変形は、普通の外的条件の下でフック変形とニュートン流動の中間のさまざまな様式をとり、簡単な数式や法則では表現できないので、この一般的な変形挙動についての力学的扱いは、ずっとおくれ、フック変形とニュートン流動とが、一つずつ直列に結びついたモデルによって説明されるマックスウェル型流動が、1868年に考え出されるまでもに190年ばかりを経過した。ついで、フックとニュートンの2要素並列モデルによってケルビン型固体変形が1877年に考えられ、この間に実際の物質の複雑な変形様式と強度的性質とは、フックとニュートンだけのモデルの組み合わせだけでは表現し切れないことを取り入れたサンブナンの考え(1870年)、後にビンガムによるその展開(1919年)などを経、ブルゲルの4要素モデルによる変形流動の表現(1935年)までには、ケルビン以来60年、フック以来では250年以上を経過している。

フック変形もニュートン流動も、物質の変形挙動の両極端の現象であって、その物質の本質を規定するものではなく、物質の本質が温度、圧力、時間の外的条件下において呈する変形挙動の一つである。この挙動を、一貫して連続的に扱おうとするのがレオロジーであって、英国レオロジー協会によって1942年、フック変形からニュートン流動までを一覧的に整理されるまでに経過したフック以来の年月は、この間に、一方においては弾性論で代表される純粋固体の力学の台頭と展開、他方においては水理学を中心とする流体の力学の展開の時代と、これらの稜線の谷間を埋めてきた粘弾性ないしは塑性力学進展の年月であった。

岩石も岩盤も、われわれが日常関係する程度の条件、ことに圧力、時間の条件下において、塑性変形の現象が目立つ物質である。いいかえれば、強度的・変形的性質を問題とする上で、岩石・岩盤自体内の境界条件のほか、外的境界条件を適切に設定することが重要である。

近年、計算機の発達に伴って計算手法も急速に進歩した。有限要素法による解析<sup>4)</sup>は、内的境界条件の細分化による計算精度向上を可能にするものである。岩石・岩盤について粘弾性解析すなわち塑性力学的解析が<sup>5)</sup>行なわれるようになってきたことは、岩石・岩盤の強度および変形的性質が外的境界条件に敏感であることに注目されるようになったことにほかならない。これらに伴って、その解が正し

く得られるためには、これらの内的・外的境界条件を的確に与える岩盤調査・測定が行なわれることが前提とされる。

フック、ニュートン時代から近代レオロジー展開までの200余年間の力学の発展の様相が、岩石・岩盤の分野では、グリッグス以来のこの30年あまりの間に見られる。1963年にアメリカ地質学会の岩石力学委員会(同年にアメリカ学術会議の岩石力学委員会になった)の主催で開かれた、地殻内部における応力状態に関する国際会議において、W. ジャッドが、ヘビが半分脱皮した図をかかげ、岩石は自然の法則にしか従わない。岩石の力学的性質の解明には、弾性論という古い殻を脱皮しなければ成長することはできない、と警告したのは1963年のことである<sup>6)</sup>。以来10年間の岩石・岩盤の塑性力学は進展してきている。この工学的、さらには技術的進展は、事業段階に対応する境界条件を適切に与える岩盤調査にまつ所が大きい。

### 土質と岩盤の工学——地盤工学への進展

「堅さ」の標準を何に置くかは別にしても、岩石には堅いものから柔らかいものまであって、たとえばJIS A 5003では、圧縮強さによって、硬石、準硬石、軟石に分類されている。しかし、柔らかい方の下限は、どのような分類立場からも、決定的なものではなく、軟石の下限は土質と連続であり、区分は全く人為的に決めるより致し方がない。水中に入れた場合に、粒子にまで分解するものを土と呼び、そうでないものを岩石とすることもかなり広く行なわれているが、これとても明確に区分できない場合がある。

同様に、岩盤にも硬岩、軟岩などの呼び方が使われているが、この場合は岩石の場合よりもさらに、区分を明確にし難い。それは、岩盤の強度的性質は、工事または構造物の大きさとの関連においてのみ考えられるものであるから、岩盤だけの強さや堅さというものは意味を持たなくなるからである。さらに、粘弾性的性質を強調すれば、岩盤の強度的性質は施工方法によって異なるから、事業目的のほか施工方法が決まらなければ、岩盤の強さ区分はできないことになる。

岩盤は、各種の不連続面を含むことに他の材料に比べて大きな特徴がある。この点、岩盤力学は *clastic mechanics* (碎片体の力学) であり、問題を単純化して表わすと図-1のようになる。すなわち、碎片の一つの上に(中心ま

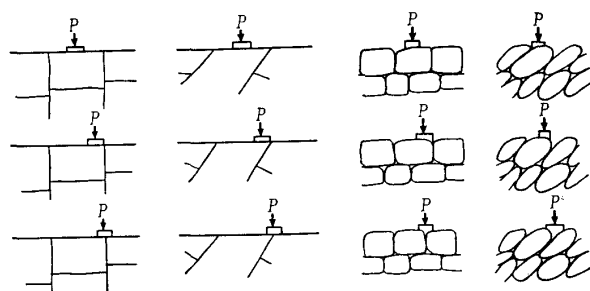


図-1 碎片体と粒状体

## 論 説

または偏心) 荷重が載る場合, 2個以上の碎片をまたいで荷重が載る場合の, 等方性および異方性の問題になる。

このことは, 土質についてもいえることであって, 砂やレキのような粒状体の力学の問題の一つは, 巨大なレキの一つの上(中心または偏心), またはレキを2個以上またいで荷重が載る場合であり, この場合の問題は, 構造物の大きさ(たとえば細いフーチング)と粒子の大きさおよび異方性との相対的な問題になる。この点においても, 土質は岩盤と, 土質力学(粒状体の力学)は岩盤力学(碎片体の力学)と連続であり, この考えをおし広めていくと, 土質力学も岩盤力学も地盤の力学を目指しているものであり, その工学として geotechnology (地盤の工学)があることがわかる。

地盤——地質学的な表現では地殻——の上または中に物を建造する地盤工を遂行する技術として geotechnics (地盤工の技術)があり, そこでは土質も岩盤も区別する必要はなく, 連続または混合体である。歴史的に地盤工の技術上の問題は, 主として軟弱な地盤に生じたことから, 初期の地盤工学では土質に主な関心が払われたが, 工事の規模が大になるとともに, 地盤工学の中で岩盤工学への関心が必然的に高まってきたというのが, ここ20年程の変遷である。このことは, グロスツップが行なった1968年度ランキン記念講演にもうかがえる<sup>7)</sup>。

## 基本的調査体系の中での岩盤調査

岩盤調査も岩盤分類も, 一方では岩石・岩体の成因に基づく本質に立脚すると同時に, 他方では岩盤施工の規模との関連において行なわれることが大切であり, そのいずれかを軽視すると, 大きなあやまちをおかすことになりかねない。この点で, 岩盤調査のために, 事業の調査, 計画, 設計, 施工, 維持管理のそれぞれの段階における調査体系を系統的に確立するとともに, それぞれの段階での調査予算措置を講ずることが必要である。

このような調査体系の中で, 岩盤調査を考えれば, 施工に当たって問題となる岩盤の問題は局部の問題であっても, 工事全体のための岩盤調査としては, 広く全体の地盤調査の中で捕えなければならないことがわかる<sup>8)</sup>。

このような調査体系は, 事業別によって異なるのは当然であるが, 一般的には, 調査・計画段階での調査は当該地

点を含む広い地域(たとえば流域全体)全体の地形・地質を知り, その中で目的地点の岩盤の特性を知ることが目的として行なわれ, この場合には既存の各種地図, 空中写真などの資料が活用される度合いが大きい。ついで, 設計・施工段階では, 前段階の成果に基づいて, 問題とする地点での測定を中心とする調査が行なわれる。普通に岩盤調査と呼ばれているのは, この段階の調査を指すものであり, 種々の目的で種々の方法によって測定されているが, 地形・地質学的な残留応力などは, むしろ, 前段階の調査で把握しておくべきものといえよう。また, 岩盤測定に当たっては, 前に述べたように, 境界条件を適切にすることが大切である。設計段階に十分に測定を行なっても, 施工時の条件では行なえないのが普通であるから, 最近の大規模な岩盤工では, 工事管理の意味をもって, 岩盤測定が続けられるようになっている<sup>9)</sup>。

大ダムの基礎岩盤の挙動が, 竣工後も測定されて, 実規模の測定値として集積しつつあり, 技術・学術の進歩に大きな貢献をしていることは広く知られているとおりであり, 地震に対する問題をも含めて, 地盤測定は構造物の維持・管理段階にも行なわれることが望まれる。

## 参 考 文 献

- 1) Habib, P. & Bernaix, J.: La fissuration des roches, Proc. 1st Congr. ISRM, Vol. 1, pp. 185~190, 1960
- 2) 工藤慎一: ダムの基礎岩盤の調査 (Geophysical な方法による岩盤の特性の調査に関して), 土木技術資料 Vol. 2, No. 3, pp. 12~17, 1960
- 3) Onodera, T.: Dynamic Investigation of Foundation Rocks *in-situ*, Proc. 5th Symp. Rock Mech. 1962, pp. 517~533, Pergamon Press. 1963
- 4) たとえば, 日本学術会議力学研究連絡委員会: 有限要素法の地盤工学への応用と問題点, 1972
- 5) たとえば, 林正夫ほか: 地下の開削にともなう周辺岩盤の緩みの進展に関する解析, 電力技術研究所報告, 土木 No. 67095, 1967
- 6) Judd, W.R.: Rock stress, Rock mechanics, and Research, Proc. Intn'l Conf. State of Stress in the Earth's Crust 1963, pp. 5~53, Elsevier Pub. 1964
- 7) Glossop, R.: The Rise of geotechnology and its influence on engineering practice, Géotechnique Vol. 18, No. 2, pp. 107~150, 1968
- 8) たとえば, 建設省河川砂防技術基準の調査篇, 地質, 河川協会
- 9) たとえば, 御牧陽一: トンネル工事における岩盤調査と設計・施工への適用——高瀬川水力開発工事地下発電所の場合, 土木学会第27回年次学術講演会第Ⅲ部門研究討論会資料, 1972 (土木学会誌 Vol. 58 増刊号に掲載予定 1973)

(原稿受理 1973.1.9)

\*

\*

\*