

6. 岩の性質と力学

おおにしゆうぞう
大西有三

京都大学大学院工学研究科

1. 岩盤力学の生い立ち

岩の性質と力学を取扱う「岩盤力学」は、岩石の物性の研究にその基を置き、1950年代から1960年代にかけて学問的な基礎が築かれたものであり、現在に至るまでその体系化が図られてきた。

岩石の力学的な研究は、地質学や鉱山学の分野で古くから行われてきたが、1950年代に入り、近代化と共に世界中で大規模なダムや地下発電所、大型の橋梁が建設されるようになり、その学問的基盤を岩石でなく岩盤を取扱うことの出来る「岩盤力学」に求めたため、工学的な「岩盤力学」の発展が促されたものと思われる。特に、1959年のフランスのマルパッセダムの破壊、1963年のイタリアのバイオントダムの淡水地域の岩盤崩壊はいずれも大惨事を引き起こしたため、基礎岩盤の安定性の重要性を技術者に再認識させることとなった。当時の技術的関心は、ダムの設計・施工の面ばかりに向けられていたが、ダムが岩盤の欠陥から崩壊したと判明すると、技術者の間に、基礎岩盤の安定がダム本体と同じあるいはそれ以上に重要であるとの認識が生まれ、岩盤の性質をより正確にとらえようとする動きが強まった。それについて、岩盤の力学的性質とその設計・施工への適用についても強い関心が寄せられるようになった。

我が国においても、産業の成長期を迎えると共に、巨大な岩盤構造物（ダム、橋梁基礎、地下空洞・トンネルなど）が計画・設計されるようになり、岩盤工学的な見地からの検討を行おうとする動きが胎動してきた。特に、エポックメーカーキングな構造物は、黒部第四ダムである。従来のダム建設では、ダムは岩盤の極めて良好なところに建設され、技術者は基礎岩盤はダム本体より強固であると考えており、ダムの安定性に及ぼす基礎岩盤の重要性をそれほど認識していなかった。ところが、黒部第四ダムの建設では世界的な注目を浴びることになり、過去のダムの崩壊事故の教訓を生かし、世界中の岩盤工学の専門家が助言を行った。その結果、ダムの建設に際しては、大規模な原位置岩盤試験など多くの先駆的な試験、実験が行われ、我が国を始め世界の岩盤工学の礎を築くことになったのである。これを契機に、我が国では「岩盤力学研究会」が発足し、土木学会、地盤工学会など各学会でも岩や岩盤を研究するグループが設立されるようになった¹⁾。

この間、欧米諸国においても、岩盤工学に関する研究組織が作られていき、1962年岩盤を対象とするいろいろ

ろな学問分野の研究者や技術者が寄り集まって学際的な国際学会「国際岩の力学会議 (International Society of Rock Mechanics, 略称 ISRM)」が組織され、1966年にポルトガルリスボンで第1回の国際会議が開催された。この会議が、岩盤力学の新しい幕開けを告げるようになったのである。その後、1995年9月に第8回の国際会議が東京で開催され、我が国が世界に貢献していることを示した。その時、櫻井春輔教授が ISRM 総裁に選出され、今年(1999年)の第9回パリ会議まで世界をリードされてきた。

岩の力学的性質に関する研究分野は、地球物理学、地質学、鉱山学、土木工学など極めて広範囲にわたるが、地質学や鉱山学では、岩石の構成関係式、寸法効果、レオロジ-的な性質、破壊機構、力学的な挙動といった材料学的研究が主流を占めていた。一方、土木工学や鉱山学では、岩盤をマスとしてとらえた岩盤の力学的性質、初期応力の状態、各所構造物での岩盤挙動などについて工学面での研究が行われてきた。また、岩盤力学という力学面では、初期には連続体力学に基づく弾性論や塑性論の適用、主として軟岩を対象に土質力学に用いられている手法の援用、不連続面単体での強度・変形特性などについて積極的な研究が実施されてきた。

その後の岩盤力学の発展は、数値解析の進歩に負うところが大きい。有限要素法はその代表であるが、さまざまな数値解析手法が提案されたことから、従来よりも複雑で不均質性の強い岩盤を実用的な範囲で取扱えるようになった。加えて、試験・調査・解析・計測のそれぞれの面で見張るような進展があり、それらが有機的に結合されるようになったことから、岩盤工学が学問としてまた実用的な合理的で安全な構造物の設計・施工の基礎として認知されるようになったわけである。

2. 岩盤力学の過去から現在

2.1 岩盤の工学的性質とその取扱い方

岩盤を直接観察すると自明ではあるが、岩盤は重要な構造特性を持っており、不連続面ももっている。それゆえ、岩盤は本質的には不連続体であることを認識しておかなければならない(砂が不連続・粒状体であることと対比)。したがって、岩盤を取扱う場合、岩盤を構成するものとして、三つの姿をとらえる必要がある。それらは、(1)岩石あるいはインタクトな岩、(2)不連続面、(3)岩盤全体である。これら異なる特性の重要度は工学的適用の仕方によって相対的に変わってくるが、岩質(岩種)に加えて地質学的な問題が大きくなる。

地質学的な事項の中で、岩石や不連続面の特性が把握された後に、岩盤全体として考慮しなければならない重要なことは、岩盤中の応力状態などの力学境界条件、水理学的な条件、建設のプロセスである。

岩盤をどのように取扱うかについて、図1-2²⁾に示すような例を用いて考えてみよう。岩盤は図のように様々な姿を示す。岩盤の風化や弱화가進むと、土質材料のようになる。不連続面が多い状態では、岩盤構造物は不安



図一 不連続面を含む岩盤のさまざまな状態²⁾

定になりやすく、取扱いも難しい。岩盤内にそれほど不連続面がない状態は、構造体としては安定しているが、断層などの位置によっては不安定にもなる。一方、大きな圧力がかかっている場合には不連続面がほとんど見あたらなくても、岩石そのものの強度を超えた破壊が起こることもあり、注意が必要である。これらの現象は軟岩、硬岩という区分けによらない。

軟岩は、一軸圧縮強さが20 MPa程度以下の岩石と言われ、硬岩はその値以上の強度を持つものとされている。図一に示す岩盤状況は、軟岩では不連続面の影響がそれほど顕著に現れず、硬岩では不連続面の方が強度的に弱いためその影響が著しく強調されてくることを表現したものであり、基本的な取扱いは変わらず、モデル化のプロセスも同じである。

以上のような岩盤特性を考慮した上で、岩盤の取扱い方の変遷をたどる。岩盤の力学特性の把握のためにまず行われたことは、岩石の力学特性を調査・検討することであり、主に応力～ひずみ関係を明らかにする作業であった。これは、後に岩石の構成式の構築という一大テーマになる。硬岩で問題になったのは、急激なひずみ軟化挙動である。非常に硬い岩石を通常の試験装置で試験すると、ピーク強度を過ぎた直後の時点で爆発的に破壊が起こり完全な応力～ひずみ関係を取得することが、長い間できなかった。この問題は、後に剛性試験機が開発されて解決した。

軟岩においては、構成式の構築に関して時間依存性の把握が課題であった。軟岩の中に存在する地質的な欠陥を無視して、連続体的な取扱いに限定すると、軟岩を土質力学の範疇と同じに取扱うことが効果的に見えてきた。カムクレイモデルの導入は必然的な結果である。その後様々な構成モデルが開発され、現在でも同じように研究が続いている。軟岩の特徴は、著しいひずみ軟化が起こらないため、比較的取扱いが易しくなることである。しかし、一方、風化など化学的な影響を受けているため、劣化が早く構造体として不安定になりやすく、岩盤構造物には大部分不適である。

岩石自体の性質を調べる研究の後、不連続面を単体で調査する気運が起こった。一般的な岩盤では、岩盤挙動が不連続面の存在に影響されることが判明してきたためである。多くの実験が実施されてきた結果、岩種により違いはあるものの不連続面の挙動は大まかには把握されてきた。ただし、挙動を精度よく表現できる不連続面の構成式が完成しているとは言い難いのが現状である。

岩盤全体を取扱うのは、解析的な見地からは容易ではない。経験的に岩盤をいくつかに分類し、それらを工学的特性に結びつけて岩盤構造物の設計を行う方法は、今でも実用的には主流である。岩石や不連続面の挙動を組み合わせて、岩盤挙動を解析的に表現する試みはいろいろ行われているが、実用に適するものはほとんどない。理由は、不連続面の分布や形状が複雑すぎて把握できないためである。しかし、最近では数値解析法の進展に加えて計測や探査の方法が改善され、不連続面の力学的、幾何学的特性が判明しつつある状態になっている。

2.2 調査・試験技術

調査・試験技術は、長い間固定化しそれほどの進歩が見られなかったが、最近のコンピューター技術が様相を変えた。調査や実験結果の可視化、探査技術における解析手法の高速化と深度化、新しい物質を使った探査方法、実験の自動化、ネットワークによるデータの共有化など枚挙にいとまがない。具体的な内容については、専門書を参考にさせていただきたいが、調査・試験技術の最近の進歩は驚くばかりである。しかし、残念ながら岩盤工学の分野では、まだそれらの技術が十分に浸透してきているとは言い難い。今後期待する次第である。

2.3 岩盤解析技術

弾性学の適用が岩盤の解析の基礎である。さらに塑性論が導入されて、応力・変位だけでなく極限支持力や釣合い力が求められるようになった。しかし、理論解析は単純な岩盤条件のものしか適用できず、大幅なモデルの簡略化が行われなければならなかった。この状況を一変させたのが、有限要素法の登場である。有限要素法は1960年代に登場し、瞬く間に岩盤に適用されるようになった。1968年に不連続面挙動をある程度表現できるジョイント要素が考案されてから適用範囲が広がり、実用的な利用にも拍車がかかった。こうして、有限要素法が確固たる地位を築いたことはよく知られている。

最近になって、有限要素法以外のいくつかの数値解析

地盤工学50年の歩みと展望

法が登場してきた。有限要素法が連続体解析の範疇にいるのに対し、それらは不連続面の影響をもっと積極的に解析に取り入れようとするものである。その背景には、前述のように岩盤挙動が不連続面に少なからず支配されていることが明らかになってきたこと、不連続面の幾何学的、力学的情報が集積できるようになってきたこと、コンピューターの解析能力が向上してきたことなどが挙げられる。また、構造物が大型化し（例えば第2東名・名神高速道路トンネル）、従来より行われてきた設計法を見直し、より合理的で経済的な方法を探る動きが活発化してきたことも要因の一つである。

岩盤挙動を議論する場合、微視的立場と巨視的立場の2とおりが考えられる。微視的立場からは材料の性質を調べる研究が行われている。通常の応力解析は一般的に後者の巨視的立場により行われている。しかし、この巨視的立場に立ったとしても土や岩盤を連続体と見なすにはあまりにも不均一・不均質であるため本質的には不連続体として取扱うべきであろう。

しかしながら、モデル化の難しさ、無数の不連続面の取扱いの是非、計算容量の制約などから実用的に岩盤を常に不連続性体として取り扱うことには限界がある。

どちらのアプローチを採用するかは、不連続面に関する情報と質、構造物の規模と重要性に依存する。すなわち、対象を極めて巨視的に見ると、不連続面についての工学的判断により、岩盤は次のようにモデル化される。

①岩盤内に地質構造・物性上の特定できる顕著な不連続面が存在する場合

……個々の不連続面のモデル化

②岩盤内に特定できないほどの多数の不連続面が存在する場合

……等価連続体としてのモデル化

③岩盤内に小規模な不連続面が一様・均一に存在するあるいはほとんど無い場合

……物性値の評価による連続体としてのモデル化

本質的に不連続面を多数含んでいる岩盤に対し、上記のようなモデル化を行い、その力学的挙動を数値解析により求める場合、岩盤内の不連続性の評価により解析手法は、次のように大きく二つに区分される。

a) 連続体の解析

軟岩や深部の硬岩では不連続面の影響がなく岩盤強度が岩石強度にはほぼ等しいので、そのまま連続体解析が可能である。また、不連続面が多くても等価連続体により連続体としてのモデル化が可能である場合には、連続体解析が採用されるが、その場合岩盤内の応力、ひずみ、変形状態を総合的に把握するという目的が優先する。

等価連続体としてモデル化する場合には不連続性の卓越量を把握するため、それらの幾何学的（頻度、方向、大きさ）および性状に関する情報の収集・処理が必要となる。代表例としてクラックテンソルがある。

通常、等価連続体の解析に必要な物性は、弾性係数・変形係数、ポアソン比、強度定数などであるが、その評価には多大の注意を要する。

b) 不連続体の解析

不連続面の発達した被りの浅い応力レベルが比較的小さい重力場での岩盤の斜面などでは、岩塊がブロック状であり、その応力場も小さい。この状態では、岩塊ブロック自体の弾性変形よりも、ブロック全体の運動による変形の方が大きい。そこで、不連続性岩盤を分割し、剛なブロックの集合体と仮定すると、斜面やトンネルの掘削によって生じる岩塊の運動および岩盤の逐次破壊のメカニズム、斜面の崩壊などの過程を大変形の運動として解析が可能であり、その結果としてブロックの移動の範囲も決定できる。また、このように個々の不連続面を直接に表現できる解析モデルは、断層やシーム、あるいは連続した不連続面の連なりのように岩盤内での存在が明らかでしかも比較的大きな場合に、威力を発揮する。

すなわち、不連続体解析手法は、連続体解析手法で解析し難い個々の岩盤ブロックの挙動を破壊後まで解析できる有用な手法であり、個別要素法、不連続変形法などがある。しかし、そのモデル化に際しては不連続面の情報を詳細に把握する必要があり、かつ、高度な技術を要する。また、その適用に際して現段階では実績が少なく、実験および実測との比較による信頼性の向上を図る必要があるなどの課題を抱えている。

通常、個々の不連続面をモデル化する場合には、不連続面に関する物性値（垂直およびせん断ばね定数、粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ ）を調査・試験によって設定し、不連続面の空間的配置もそれぞれ特定する必要がある。

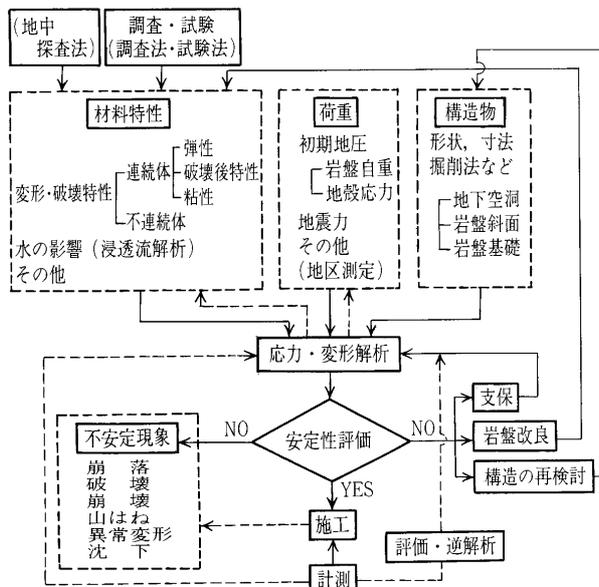
2.4 岩盤の工学的利用と設計方法

岩の性質と力学の工学的利用の対象は各種の岩盤構造物の建設と利用、維持・管理である。岩盤構造物は、その構造形態から分類すると、地下空洞、岩盤斜面、岩盤基礎の三つに大別される。地下空洞には、トンネル、地下発電所、鉱山坑道、などが代表的で、最近話題の地下空間利用のための地下施設もこれに含まれる。創られた地下空間はその周辺岩盤で維持されなければならない、その力学的安定性の評価が岩盤力学の中心的な課題である。

岩盤斜面には日常的に遭遇する道路・鉄道斜面、大規模な構造物建設に伴う掘削で出来る斜面、自然の斜面などがある。最近では、いくつかの大規模斜面崩壊が社会的に強い関心を集めたように、自然災害と直結した斜面の安定問題に注目が集まっている。この問題に関しては岩盤力学の役割は大きく、斜面崩壊予知、斜面の安定化の課題に対して重要な研究が行われている。

岩盤基礎には、橋梁やダム、発電所など公共構造物の礎になって役立っているものが多い。大型構造物として、本州四国連絡橋公団の明石大橋は世紀を代表する構造物であり、その基礎岩盤の評価技術は岩盤工学的に世界に誇りうるものである。

ここで、従来から行われて、徐々に改良がなされてきた岩盤構造物の設計の全体像を見てみよう。図-2は岩盤構造物を設計する際の要因と設計の流れを概念的に示したものである³⁾。岩盤構造物の変形挙動解析を行ってその安定性評価を実行することが基本となるが、そのた



図一 岩盤構造物設計の流れと要因
(文献3)を一部改変)

めには岩盤の材料特性(物性), 荷重に相当する初期地圧状態およびそのほかの外力, 構造物の幾何学的条件が必要となる。まず, 岩盤の性質を知るために材料物性の決定, 次に岩盤のモデル化が行われ解析に入る。一方, 地質条件により材料物性が分布することになるが, その状態の詳細を事前に知ることは難しい。

岩盤構造物を設計して, 安定性が保たれないとした場合には, 場所を変える以外には人工的な補強で対処することになる。鋼製支保やロックボルト, 吹付けコンクリートが普通であるが, 場合によってはグラウトなど岩盤改良が行われる。このようなときでも支保を含めた岩盤構造物の変形挙動解析が必要となる。

岩盤構造物が安定と評価された場合には, 掘削施工が行われるが, 岩盤の変形や支保に作用する荷重を計測するのが普通である。この計測結果より, 実際の岩盤の安定性を確認し, 解析によって得られている値と比較検討, 各種入力データを再評価する。このとき, いわゆる逆解析が行われる。また, 計測によって構造物の挙動が異常であると判断されれば, 材料特性や外力の再評価や支保などの設計変更が直ちに行われ, 施工に反映される。こうした一連の流れを情報化施工と名付けているが, このような設計法が日常的に行われるのも岩盤構造物に特有のものであるといえる。

岩盤構造物を解析的な面から設計するのではなく, 岩盤の工学的分類をベースにした設計法も実際には多く用いられている。この方法は, 過去の実績から多くの経験に基づいて岩盤の状態を整理・分類し, 岩盤に応じた支保形式をあらかじめランク分けして決定しておくものである。岩盤のように自然のものは, 不確実性や複雑性を伴うのが当たり前であるので, こうした分類は構造物の安定性に影響を及ぼす因子となっており, 解析的にも示唆に富むものである。今後はこれらの方法の融合が図られることになるであろう。

さらに, 設計においてもっと岩盤挙動の本質に迫るような立場から岩盤をとらえ, 極限状態あるいは破壊に至るまでのメカニズムを理解した上で設計を行わないと, 最近のような構造物の超大型化には対処できないという意見も強くなっている⁴⁾。

3. 岩盤力学の将来像と今後の展望

21世紀の社会における岩盤構造物にどのような要請がされ, 構造物がどのような方向に進むのか, そのキーワードを地盤工学会「岩盤構造物の設計法に関する研究委員会」は次の項目で指摘している⁵⁾。

- (1) 防災
- (2) 資源エネルギーの確保
- (3) 空間資源の創出
- (4) 物流・情報ネットワーク

この中で地下空間の担う役割はきわめて重要であり, ゆえにこのような地下空間利用に関係して岩盤工学に期待する声は大きい。岩盤力学の原理は土質力学や構造力学と同じように, 何らかの手を加えた理想的な材料・場に関する理論に基づくものであり, その目的は工学的な問題の中の岩盤挙動の把握であって, まだ満足できるものとは言い難い。岩盤工学はもともとながしかの乱れた状態にある(地質的に複雑な)実際の岩盤に, さらに建設工事によって乱れを加えられる問題を扱うものである。したがって, 長年の経験に基づいた結果から大抵はうまくいくが, 特殊な条件下では失敗することもあり得る。重要なことは, 岩盤工学はどのような条件でどのような施工技術がうまく適用できるかを判断するための基礎をなすものであり⁶⁾, 直接的な答を出してはくれないという点である。個々の岩盤は異なった特性を示し, 建設工事も特色がある。岩盤工事を安全に経済的に行うには, 確かな経験に基づいた技術と判断が要求されるが, 岩盤がどのように挙動するかよく観察分類し, なぜそのように挙動するかを理解できてこそ要求が満たされる。岩盤力学の価値は解析や設計に対して必要な知識の骨組みを与えることにある。岩盤挙動を把握するためには, はじめに言及した様々な分野の協力なしには達成し得ないことであり, 今後の幅広いさらなる研究が必要である。

参考文献

- 1) 川本脩万・吉中龍之進・日比野敏: 岩盤力学, 土木学会編 新体系土木工学, 技報堂, 1985.
- 2) Hoek, E and Brown, T (小野寺透ほか訳): 岩盤地下空洞の設計と施工, 土木工学社, 1982.
- 3) 日本材料学会編: 岩の力学, 基礎から応用まで, 丸善, 1993.
- 4) 山縣 守・堀井秀之・壺内辰也: 岩盤構造物の設計法の展望, 土と基礎, Vol.46, No. 9, 1998.
- 5) 山縣 守: 安全で持続可能な社会における岩盤構造物をめざして, 土と基礎, Vol. 46, No. 9, 1998.
- 6) Hudson, J. A. (川本脩万ほか訳): 岩盤工学の基礎, オーム社, 1991.

(原稿受理 1999.9.16)