

岩盤の調査および設計

おか もと しゅん ぞう
岡 本 舜 三*

岩盤力学とは

岩盤力学は応用力学の一分野であって、構造力学的部分と材料力学的部分をととも持っている。その応用のおもな分野は構造物基礎工、トンネル、高圧トンネル、地下空洞など岩盤構造物自身の安定または変形の解析、そうした構造物を作る段階で起きる諸問題の解析や、岩盤の改良などであろう。こうしたことは以前はすべて経験のみに頼っていたが、関連する科学の進歩が岩盤に対しても解析手法の適用を可能にし、そのことが従来は考えられなかったような構造物の出現を促している。科学の進歩は一般にこの段階に至ると急に加速される。岩盤力学は今ようやくその域に達した。今後しばらくはその発展に目を見張るものがあるであろう。

岩盤を力学的特性から大別すると、つぎの4種類に分けることができる。とされている*。

(1)岩石がかなりの硬さをもっていて、不連続面は存在するが著しくはなく、ゆるみがほとんどないため岩石とほとんど大差ない力学的特性を示す岩盤。こういう岩盤の解析には弾性学を適用することができる。

(2)岩石がかなりの硬さをもち、不連続面が存在し、ゆるみがあるために岩石の力学的性質とかなり異なった力学的特性を示す岩盤。こういう岩盤の力学的性質は不連続面に沿う破壊やスベリによって支配される。したがって水の浸透の量や速さなども著しい影響を及ぼす。

(3)岩石の固結度はかなり低く、不連続面はほとんど存在しないか、存在してもゆるみも少なく岩石とほとんど大差ない力学的特性を示す岩盤。こういう岩盤は一般に非弾性であり、ヒステリシス、クリープ、吸湿膨張、風化など多面的な性質をもっている。したがって最近に至るまでその数理解析はほとんど不可能であった。

(4)岩石の固結度はかなり低く、不連続面が存在し、ゆるみも存在するために、不連続面の影響もかなり強く現われている岩盤。力学的には最も複雑で取扱いがむずかしい。

こうした対象を調査する計画をたてる場合には、まず大きな地質構造、岩質とその変化をとらえられるような方法を取り、広範囲で概略的な把握をしたうえで次第に問題点に向かって網をしばっていく。すなわち、目的をはっきり

させたいと、地表から岩盤を推定する間接的な方法（たとえば、地表踏査、弾性波探査など）を実施し、問題点をやや明らかにしたうえで、岩盤内部を直接調査する方法（たとえば調査横坑ボーリングなど）を実施する。

岩盤試験は直接的な調査がある程度進んだ時点で実施する。岩盤はよく知られているように異方性と不均一性があるので、直接的な調査や試験方法をできるだけ客観的に適用し、判断するために統計処理的な考え方をを用い、ばらつきの小さい情報を得るような配慮が必要である。調査横坑やボーリングの配置におけるグリッドシステムの採用、岩盤区分に基づいた原位置試験などはその一例である。

現在一般的に用いられている岩盤の調査の概要をまとめるとつぎのようである。

(I) 岩盤の所在する場所の地質学的調査

(1) 地形、断層などの調査

空中写真、地表地質踏査

(2) 物性に関する調査

物理探査（弾性波探査、電気探査、放射能探査）

(3) 潜在応力に関する調査

応力解放によるヒズミ測定

(4) 地震動特性の調査

地震動観測、常時微動測定

(II) 岩盤の材料力学的調査

(1) き裂、断層など性状に関する調査

調査横坑の掘削、ボーリングによる資料採取、ボーリング坑内調査（掘削試験、テレビによる孔壁観察、孔内変形試験）

(2) 物理的性質に関する調査

速度、音波、反射、電気、放射能、地下水、温度各検層

(3) 変形および強度に関する調査

変形係数試験（ジャッキ法、水室法）、強度試験（ロックセン断試験、ブロックセン断試験、断層セン断試験、引抜きセン断試験、岩盤三軸圧縮試験）岩盤変位試験（精密測量、プラムライン法、鋼棒による距離測定法）

(4) 岩石の性質に関する調査

* 工博 埼玉大学学長

* この小節とつぎの小節は土木学会発行「土木技術者のための岩盤力学昭和50年度改訂版」より引用した。

総 説

物理試験, 化学試験, 物理化学試験, 機械的試験

(Ⅲ)岩盤の透水性に関する調査

(1)透水に関する調査

ルジオン試験, 湧水圧試験, 模型試験

(2)グラウト性に関する調査

試験グラウト

(Ⅳ)岩盤の構造力学的調査

(1)数理解析による応力, 変形の調査

弾性論, 極限設計法, 有限要素法

(2)実験解析による応力, 変形の調査

2次元光弾性法, 3次元光弾性法, 寒天, ゼラチンなどによる3次元模型試験, 石こうなどによる2次元, 3次元模型試験

(3)応力, 変形の現地調査

工事中およびしゅん功後の応力, および変形の実測
地下空洞, 構造物基礎, 高水圧トンネルなどの設計は前述のような材料力学的調査と構造力学的調査の両者を対比して安全性を確かめながら行なわれてゆくことは橋などの場合と考え方に違いはない。ただ岩盤構造物の場合はつぎの3点に特に留意する必要がある。第1は岩盤を対象とする場合, 調査方法自身がまだ橋の場合ほど精密でないことのほか, さらに本質的なこととして, 岩盤はきわめて不均一な組成を持っているために, 数個の試験でその代表的性質を知ることが一般にむずかしいことである。したがって試験個所の選定, 試験結果の判定には慎重でなければならず, 同時に経験が高く評価されることになる。

第2に岩盤のこのような特性を考えると, 施工中やしゅん功後に随時実測を行なって, 設計値と実測値の比較が必要であり, そういふことができるような計測の準備をあらかじめしておかねばならないことである。両者は必ずしも一致するとは限らない。岩盤力学の現段階ではむしろかなりの不一致を示すことが多いであろうが, なぜそういう結果になったか, 原因の追求が今後進んだ構造物を造る場合の基盤となるのである。以前はこうした努力をするだけの条件が整っていなかったが, 最近は関連科学の進歩でそれが可能になってきた。したがって大規模な工事現場ではすべてのところで研究的態度で工事が進められている。これは岩盤力学の進歩のために歓迎すべきことである。

第3に岩盤は水や空気によって劣化しやすいことである。したがって安定条件は時間の経過とともに変わることが他種の構造物の場合よりも著しいと考えなければならず, 設計時には風化に対応する考慮を払い, また, しゅん功後の維持管理には入念の配慮が必要である。この維持管理において, 接近する危険状態の予知を可能にするものは高精度の岩盤力学的計測である。近時, 高感度地震計を設置して貯水により生ずる岩盤の小破壊を検知する装置を備えた貯水池が増加してきたが, これは岩盤構造物の将来の一般の姿を示すもののように思われる。

しゅん功後の状態に対してのみならず, 構造物の施工中の問題に対しても慎重な配慮を払うのが建設現場の最近の傾向であり, それは安全管理の面で, また工事費節減の面で非常に重要なことである。特に対象が土や岩盤の場合その必要性が高く, 支保工の寸法決定, ロックボルトの数, 切取り面のコウ配, 発破の薬量, かけ方などに岩盤力学を用いた設計が行なわれている。施工中の問題は, 処理がすめば, すぐまたつぎの問題に立ち向かわねばならないという事情のために, その経験は多くの場合個人のものとしてのみ蓄積され活字となって広く世に知らされることは少ない。まして体系化もされにくい。しかし, 実際は短期間に答を出さねばならない問題で, 最も参考書が要望される問題である。「土と基礎」の今回の企画は, 会員の強い要望により取り上げられたものとされているが, 多数の読者の要望の焦点は, でき上がったものに対するよりも, 施工中の問題に対する考え方にあつたのではなからうか。その点, 現在の岩盤力学は組織的に答えるところが少なく, 今後の努力が必要のように思われる。

戦前の岩盤力学

学問の発展の歴史をたどることは興味あることであるが, 岩盤力学の場合, 生誕して間もない現在ではまだ時期尚早であろう。それに筆者は組織的にも調べていないので身の回りに起こったことだけをおおよそ年代順に思い起こしてみようと思う。筆者が岩盤力学に関係ある話を耳にしたのは, 昭和のはじめ, 上越線の清水トンネルの掘削の際に起こった山はね現象に対する恩師山口昇先生の解析である。先生は山の自重による円形孔のまわりの応力を2次元弾性論を使って解析され, さらに寒天模型実験を行なって, 計算結果を確かめられた。この方法は全く独創的なもので, 当時として画期的なものであつたばかりでなく, 今日でもこの種の問題の解明に踏襲され, 基本的には変わっていない。山口先生は日本の土質力学の創設者としてだれ知らぬ者のない方であるが, 岩盤力学においてもまた創設者といつてよいであろう。

そのころの世相は日一日と険悪化し, ついに太平洋戦争に突入した。その後半, 筆者は地下工場建設の戦時研究班に入れられた。地下工場の問題点は湿気の対策と構造上の安全であつて, 筆者は後者の幹事として働いた。1トン爆弾の投下に耐えること, 火薬欠乏のため手掘りが可能なこと, コンクリート欠乏のため巻立はできないこと, 出来上がった戦闘機の格納ができる大きさをもつこと, こんなむずかしい条件をもつ坑道を岩山の中に計画するには岩盤に対する力学的解析に頼るしかない。前述の山口先生の方法を頼りに乏しい資材の中で研究を続け, とにかく設計指針を作つたが, 残念なことにあまり使われないうちに終戦を迎えた。指針は全部焼却せよとのことで一冊を残して皆焼いてしまったが, これはお粗末ながら岩盤力学の珍しい一

文献といえるであろう。

戦後、国の復興の基として土木工事は早くから再開された。国鉄信濃川発電所の大水路トンネルもその一つであるが、ここで大崩壊が起きて多数の犠牲者を出す事件があった。そのとき、筆者は戦中・戦後にかけてまとめたトンネルの応力と崩壊の関係に関する考え方を適用してこの事件の力学的機構の解明を試みたところ、偶然だったのかもしれないが、数値的にまですましく説明できた。それで事故調査委員会に資料として提出した。もちろんそれほど重視されたとは思えなかったが、自分にとってはこういう種類の問題にも解析的手法が使えるという深い自信を与える経験であった。

ダムへの応用

それから間もなく、奥利根に日本最初の地下発電所ができることになった。形状は円形が一番合理的だと主張される有力意見もあったが、無用の空間は経済上許されないもので、天井はアーチ、側壁は垂直壁という今と変わらない形をとることになった。問題は、垂直壁の厚さであるが、試算ではこれをクーロン土圧理論による擁壁設計と同じ方法でやろうとしたので、実現不可能なような壁厚が算出された。どう考えたらよかろうかとの相談であったが、筆者はここでも、また土圧論ではなく岩盤力学特有の考え方が必要なことを感じた。大胆ではあったけれども、空洞は素掘りのままもつような所に掘るべきで、信頼できる計算のできない現在では、覆工がなければもたないような所には空洞を作るべきでない。素掘りのままもつかどうかは弾性論で計算してみたいかとお答えした。幸いに地山は堅硬な石英粗面岩であったので、表面保護程度の覆工で安全に空洞を作ることができた。

このとき筆者の関係ではもう一つの問題があった。それは地下の震度をいかにとるべきかということであった。丹那トンネルの中というような深い所の変位地震計による観測資料はあったが、数10メートルの深さでしかも加速度という記録は例がなく、地表より幾分小さいだろうという程度以外にはわからなかった。それで発電所完成後ただちに地表面と空洞内に加速度計を設置した。そのころはスターターもなかったので光電管などを使って苦労してスターターを考案して無人観測を始めたが、幸いに設置後間もなく千葉県北部の地震をとらえて得てきれいな記録がとれた。地下の最大加速度は地表の40%であったが、この結果はその後の地下発電所の計画でもしばしば使われている。

こうした観測によって岩盤の地震加速度はチュウ積地のそれとは非常に違うことがわかり、その記録を集めることの必要性が認められた。その後鬼怒川発電所の立て坑を利用して本格的な地震観測が行なわれ、すでにかんりの記録が集められている。はじめのころは岩盤の地震記録の役立つのはダムの設計だけだと思っていたが、各地に原子力発電所

が計画されるようになって、岩盤上の加速記録、特にその高周波成分の記録に対して原子炉設計者の非常な要望があることを知った。この方面の研究を充実する必要がある。

1956年には、わが国のダム建設の中で歴史的意味をもつ佐久間ダムが完成した。当局の厚意で不要になった工事用トンネルの中に精密傾斜計を設置して貯水重量による地盤の傾斜を計ることになった。測定は地震研究所が行なった。その結果は簡単には機構を解明できないほど複雑な現象であることがわかったが、これは岩盤力学的変形測定の最初ではないかと思う。それから間もなく奥利根で行なわれた実験用アーチダムの測定では、筆者は興味ある事実を経験した。筆者の担当はアーチダム下流側趾における河床の局部的微傾斜の測定であった。貯水をすればダムのカンチレバー作用によって河床は下流側に傾くという考えと、貯水重量によって上流側に傾くという考えがあつて、試験の結果が期待された。結果は上流側に傾いた。貯水の重量の影響のほうが大きかったのである。このころはただの興味だけからやったことであつたが、最近では大貯水池の築造が地殻表層に異変を与え、地震を誘発するおそれがあるということが問題となり、貯水池付近の岩盤変位の測定が大貯水池について行なわれる例が外国では多くなっている。

わが国の岩盤力学の歴史の中で黒部ダムの建設はきわめて重要な出来事である。この基礎岩盤は花コウ岩であつて、きびしい気候条件に風化がかなり進んでおり、大アーチダムを作るには種々の問題が存在していた。これの解決は在来のような大まかな検討では不可能で、岩盤についての綿密な応力解析、材料試験、透水試験、岩盤改良工事などが必要であり、このためには岩盤に対しても上部堤体に行なわれていると同様な詳細な解析や試験が必要であつた。もちろん前例もないし、よるべき常道もない。関係者は手探りながらできるだけ努力をして問題解明につとめたが、その中心となって指導的役割を果たしたのはオーストリアの土木地質学者レオポルド・ミュラー (Leopold Müller) 博士であつた。ここでは日本ではもちろん、世界でもまだ行なわれたことのない各種の大規模な現地岩盤試験が必要な数だけ行なわれ、その結果が直接にダムの設計に生かされた。今日一般に行なわれているブロックセン断試験、ロックセン断試験、断層セン断試験、岩盤三軸圧縮試験、断層三軸圧縮試験、ジャッキ試験、水室法変形試験などの原位置試験はいずれもこのとき始められたもので、その方法は今も変わっていない。規模はむしろ当時のほうが大きかった。こうした現地試験に基づいてアバットメントの応力が解析され、その境界条件のもとに堤体が設計されたのであつて、岩盤の性質を経験から適当に仮定したものではなかった。

この一連の作業は岩盤の調査と設計という立場からみると今までにないことであるが、これが先駆となって、その後のダム建設では同じような手法がとられるようになった。

総 説

ダムが困難な条件下に造られただけに、貯水はきわめて慎重に行なわれ、最後の数10メートルのたん水は岩盤やダムの変位の綿密な測定結果をみながら進められた。岩盤の綿密な変位測定はこれまで行なわれたことのないことであったので、プラムラインを用いたり、水平ボーリングをした穴に長尺の鋼棒を入れるなどいろいろの新しい試みがなされた。雨が降ると山が谷のほうに張り出してることがわかって驚いたのもこのころであった。

黒部ダムの建設にあたっては、岩盤力学の手法が駆使されたといっても、それはむしろ問題にぶつかってから苦しまぎれにとられた打開策のようなところがないでもなかった。それはパイオニアとして当然の苦悩であるが、そのあとに続く川俣や奈川渡のダムでは、はじめから順序よく岩盤力学が用いられ、それは「調査と設計」というにふさわしい内容であった。どちらもかなり幅広い断層があり、良好なダムサイトとはいえなかった。したがってダムおよびその基礎の安定については綿密な数値的および模型実験的解析と現地岩盤試験が行なわれ、それに基づいてグラウトやプレストレッシングによる岩盤の補強が大規模に採用された。また、しゅん功後にはこうした補強工事がどういう働きをしているかも計測されている。この段階になると力学的解析はその精度においてはなお差があるとはいえ、橋りょうなみということができ、山口先生が力学的手法を岩盤に導入されてから約30年を経てここまで来たのであった。

そして今日、また一つの新しい時代を迎えようとしている。目下建設中の高瀬川発電所の地下空洞においては、近年急速に進歩してきた有限要素法を使って、空洞周辺部の応力の解析が行なわれた。しかも、従来のこの種の計算は開削後の状態についてのみ問題にされたが、ここでは掘削の各段階における応力と変位が算出された。その場合、計算は弾性域を超え、岩の非弾性的性質が考慮されているのも、画期的な進歩であるし、また地盤の持つ潜在応力が測定され、その応力を考慮して適切な方向に空洞の方向がむけられたことも、岩盤力学の重要な成果として注目される。従来はこうした科学的調査が行なわれても、参考にされるだけで、そのために初期の計画に大きな変更が加えられるようなことはまれであったが、ここでこのような措置がとられたことは、岩盤力学に対する厚い信頼の結果といわねばならない。

こうした綿密な計画と細心な施工により、空洞はなんの障害にもあうことなく、無事に掘削を終わっている。そうはいっても、実測変形量は計算値とよい一致を示していたかどうか。それが明らかになるまでは力学者側は手放しでは喜べない。実際には変位は計算値より大きかったときいているが、それならばその原因は究明されなければならない。それによって岩盤力学はまた一段と進むことになるであろう。

トンネルへの応用

岩盤力学の応用はここにあげたような構造設計の面のみあるのではなく、施工への応用がきわめて重要な一面であり、そのことはトンネル掘削の場合特に顕著である。トンネルの場合、掘削の進行とともにいろいろな土や岩に遭遇する。しかもそれがあらかじめ明確にはわかっていない。湧水があればさらに施工はむずかしくなる。したがって当然技術者の経験と熟練が重視される。このことのために、これまでは数理解析的配慮があまりなされなかったが、しかし老練な技術者の経験に数理的配慮が加わるならばさらにより成果をあげるであろうと思われるし、またそれは現在では弱体でも研究を続けてゆけば、十分実用に耐える工学にまで伸びることもあろうと期待される。その意味でいま掘削中の青函トンネルにおいて、潜在応力、トンネル掘削による応力、支保工の変形ならびに応力、湧水圧、水抜き覆工圧力に及ぼす効果、破砕帯の強度など破砕帯を主題にした各種の岩盤力学的計算や現位置試験が行なわれているのは意義深いことだと思う。このことがトンネルに起こった破砕帯からの数次の大出水の対策に直接役立ったとはいえないが、こうした解析実際との比較などを通じての岩盤への理解の深まりは、トンネル掘削、特に非常事態に遭遇した場合の突破対策にかくれた貢献をしていると思う。トンネルはこれから膨張性の火山灰質軟岩よりなる海峡中心部に近づく。それはまた破砕帯とは違った問題として、岩盤力学の応用が試みられなければならない、それに備えて現場では研究が進められている。数年の後、世界最長の海底トンネルの開通とともに、トンネル力学においてもまた輝かしい進歩が期待されるのである。

おわりに

以上には自分の身の回りを中心にして岩盤力学の発展を振り返ってみたが、この他に筆者の知らない多くの貢献がなされているであろう。このような国内で実施された多くの経験をふまえて土木学会は著書「土木技術者のための岩盤力学」を出版したが、この書の出版はわが国の岩盤力学の歴史の中ではやはり書き落とせない一業績であると思う。この書の初版が出たのは1966年で、1975年に再版された。その特長は日本で行なわれた応用例をきわめて多く詳述している点にあり、両版を比べてみると、この間の岩盤力学の進歩と応用をまざまざと見ることができる。このほかにも邦人の手になる岩盤力学関係の著書もその数を増し、毎年行なわれているシンポジウムへの出席者も非常に多くなっている。先にも述べたように岩盤力学はいまようやく急成長を迎える段階にきた。そのときわが国がこのような厚い層をもっているということは、この新しい科学の前途のために喜ばしく心強いことである。

(原稿受理 1975. 10. 14)

土と基礎, 24-1 (215)