土木界における岩盤力学の動向*

畑 野 正**

A Recent Trend of Rock Mechanics in the Field of Civil Engineering

by

Tadashi HATANO

(Central Research Institute of Electric Power Industry, Tokyo)

In the field of civil engineering in Japan particular attention has hitherto been paid to rock mechanics mainly in relation to the problems on dam foundation.

In 1960, the first study group on rock mechanics was organized, and its 1st symposium was held in 1962 at which the engineers concerned, including tunnel and soil engineers attended. The 2nd symposium was held in 1963 under the auspices of the above mentioned study group and was reorganized into a "Committee for Rock Mechanics of the Japan Society of Civil Engineering," with about 50 members concerned. This committee is currently divided into five divisions where valuable and zealous discussions and presentation of study achievements are made once a month.

This paper explains briefly the methods actually used and the recent representative studies concerning rock mechanics in the field of civil engineering in Japan, which covers extremely diversified problems such as on combination of applied geology with rock mechanics, on various observations in situ and their interpretation, on analytical and model studies, on foundation treatment of real structures, on water movement in fissured rocks, and so on. (Received Jan. 11, 1965)

1 前 言

ダムやトンネル等の土木構造物に関する岩盤力学の問題は、これらの構造物を取り扱う場合に必然的に生じてくる重要な課題であるが、土木の分野におけるその発展の経過を顧みると、つい近年までのゆるやかな発展段階と最近の非常に強い関心を集めている段階の二者に区分できるように思われる。第1の段階では、弾性論などを主要な手段として、いわば観念的な机上の理論が多かったのであるが、多くの土木構造物の研究がそうであるように、戦後の計測技術の発展に伴い、実物に関する測定を実施して、現実に近い状況を把握し、これから従来の単なる観念論を根本から見直して、新しい理論を組み立てるという態度が、岩盤力学についても、要求されたことが第2の発展段階を促進した一つの要因であろう。またダムについていえば、急速な国内の開発に伴って、やや困難な岩盤地帯においてもダム建設を行なわねばならない状況から、堤体よりもむしろ岩盤を通じて構造物の安定性を確保することが重要な課題となったことも、その要因の一つであろう。さらにまたフランスにおけるマルパッセダムの崩壊、イタリアのバイヨントダム地点の地すべりによる惨事等も岩盤力学を重要視しなければならないという

警鐘となった。最近の土木界における研究として、組織的には、1960年まずダム技術者の間でダム基礎の岩盤力学についての情報交換の研究グループが結成された。これがしだいに拡大され、1962年にはトンネル技術者、土質工学者を含めて、岩盤研究会の名の下にシンポジウムが開かれた。この研究会は1963年土木学会の中の岩盤力学委員会として約50名のメンバーで再編成され、第2回のシンポジウムが開かれた。

岩盤力学委員会は今のところ五つの分科会に分かれ、特長ある課題ごとに月々討議や研究紹介が行なわれている。岩盤力学には力学と地質学との結合の問題、岩盤の現地テストによる実状把握の問題、解析的または模型実験的研究の問題、実際構造物の基礎処理法の問題、あるいは浸透流の問題等、多方面にわたる問題の採り上げ方が考えられる。以下主要な課題別に現在土木工学の分野で行なわれている岩盤力学の手法ならびに特長ある最近の研究等について紹介しよう。

2 地質学との関連

応用地質学と力学との融合、これは岩盤力学上の一つの重要な課題である。土木の分野でのこの問題はなおきわめて不十分な状態にあり、特に力を注がねばならない面である。岩盤力学に関係ある重要な地質的特質としては、まず、岩盤の均一性を左右する分離面の存在があげられる。岩盤の中に発達する節理や破砕帯

* 原稿受理 昭和40年1月11日

** 電力中央研究所 東京都多摩郡狛江町

などの分離面は、その力学的な性質に重大な変化を与える原因となっているので、その地質的特徴、分布状態を解明することが必要である。このほか岩石そのものの性質として風化程度、強度などが重要なものである。これらの地質的特質は岩盤力学として応用できるような形に表現することが必要である。現在岩盤内の分離面を表現するため、通常シュミット網またはウルフ網という特殊な球面投影のグラフを用いて、統計的方法によってその集中方位を求めることが行なわれている。これは、元来、岩石学において変成岩類の研究に用いていた方法を応用したものである。この統計値を求めるためには、現地において地表や試掘横坑内で、たくさんの分離面を適当にサンプリングして測定することが必要である。Fig. 1 は、シュミット網を用いて作成した、あるダムサイトにおける分離面の密度分布図で、黒く塗った部分によって卓越した方位が示されている。アーチダムの基礎の調査などでは、この図にスラストの方向を記入すると、これと分離面の方向との関係を検討することもできる。

Fig. 1. Density diagram of Schmidt net.

また岩石斜面の安定度の検討にも使用できる。次に岩盤の強度を試験する場合の地質学上の問題点として、次のような点が考えられる。

- (1) 分離面の性質：節理、破砕帯の方向および分布、間隙内の充てん物質、面の平面性など
- (2) 岩石そのものの性質：風化程度、圧縮強度、弾性係数など
- (1) については試験体内に発達している分離面の走向、傾斜を測定することはもちろんであるが、多くの場合、これらの面はある限られた範囲にのみ分布しているので、それらの状況を図で示すのがよい。Fig. 2 はある噴出岩よりなる試験体の節理をその展開図に示

Fig. 2. Distribution of joints in the specimen.

したもので、側面では長さの短い節理も上面では長くのびていることが明らに認められる。最近では、このような図から地質的特質の一つとして、面の平均間隔や試験体内に含まれる節理の総面積を計算によって求めることも行なわれている。これらによって岩塊としての強度を、岩石そのものの強度と節理との組み合わせにより推定しようと努力されているのである。充てん物質は粘土、シルト、ある場合には、熱水作業によって二次的に生成された物質のこともあり、これらの状態を土質力学または地質学での分類に従って記載している。面の平面性や平滑度などもまた岩盤の力学的性質になんらかの影響を与えるものと考えられるが、これらについては、現状では数値的に表現することがむずかしいので、記載的な用語によって説明している。たとえば、平面性については平面とか曲面とか、また平滑度についてはなめらかとかあらさとかの用語を用いている。

(2) の岩石そのものの性質のうち、圧縮強度、弾性係数などの物理的性質は、現地の試験体付近から採取したテストピースによる測定値をもって表わしている。

風化程度については、これを表現する方法が確立されていないが、肉眼観察またはハンマーの打診などによって、風化していないものから完全に風化したものまでを6等級に分類して記載することが行なわれている。以上のように、複雑な地質現象を力学に結びつけるための試みは徐々にではあるが行なわれている。しかしなおみちは遠い状態である。この問題の発展は応用地質学に習熟した力学者、力学を十分に駆使できる応用地質学者の養成など、力学と地質学との結合の上に立脚しなければならない重要な問題である。

3 現地テスト

現地岩盤そのものの変形とか、強度などの特性を調べるために、現地テストが盛んに行なわれている。これらの特性は、基礎岩盤の変形を加味した構造物の設計を行なうとか、基礎岩盤の安定を検討するとかの目的で調査されるものである。変形試験として最も一般的に用いられるのはジャッキ法である。Fig. 3 は剛性の大きな載荷板を介して岩盤に一樣変位を与える方法で、直径数10cmの載荷板に50~200t程度の圧力を

Fig. 3. Jack test (Constant deformation).

油圧ジャッキで加え、不動点からダイヤルゲージ等を使用して載荷板の沈下を測定し、荷重—変位曲線を求めている。Fig. 4 は油封入のダイヤフラムを介して一定応力を与える方法である。80~120cmの直径のダイヤフラムに200~800t程度の荷重を与えてダイヤルゲージ等でダイヤフラム中心部の変位を測定し荷重—

Fig. 4. Jack test (Constant pressure).

変位曲線を求めている。これらの曲線のこう配より弾性係数を弾性計算から推定したり、永久変形を知ったりする。この曲線の性質はきわめて複雑で実際設計に使用すべき弾性係数、変形係数の決定はその目的に応じて相当複雑なものがある。静的な変形試験にはこのほかに水室法がある。Fig. 5 のように円筒形水室を作り、内部水圧を加えて半径方向の伸びをカーソ

Fig. 5. Chamber test.

ン継目計で測定している。前と同様荷重—変位曲線を求めて岩盤の変形特性を求めるが、載荷面積が大きく、岩盤の局所的な部分の影響の少ない結果が得られるのが特長であるが、実験規模がジャッキ法に比べて相当大きくなる。以上は局所的なテストであって、地山全般の性質を調べるには相当の数が必要である。そこで弾性波試験によって伝播速度を測定し、これから地表はもちろん、山の相当の深さまでの全般的な性質を把握することが行なわれている。Fig. 6~8 に示すように横坑内の屈折波法によるもの、横坑内の平均速度法によるもの、小間隔の穴ごとの直接波法によるもの等、いろいろな測定法が使用されている。特に直接波法は狭い範囲の精密な測定に適しており、掘削による岩盤のゆるみの範囲とか、グラウト前後の速度変化からグラウト効果の推定にも使用されている。測定された速度から弾性論に従って一応弾性係数を計算することができるが、この値はジャッキ法および水室法によって求めた値と同一岩盤に対し、おおよそ10:2:1程度

Fig. 6. Refracted wave method.

Fig. 7. Mean velocity method.

Fig. 8. Direct wave method.

の関係にあるといわれている。弾性係数として設計に実際に使用するには、その目的に応じて充分の注意の下に適当な換算が必要になってくる。

地山としての強度を知るためには、現地岩盤強度試験が行なわれている。岩盤そのもの、岩盤の分離面、断層粘土、またはコンクリートと岩盤の接着面等について、クーロンのせん断摩擦強度の式 $\tau = c + \sigma \tan \phi$ を求めるのが一般で、Fig. 9 はその試験方式の一例を示すものである。岩質や岩盤のめの間隔等から試験ブ

Fig. 9. Shearing test.

ロックの大きさは1mから数mまで、ジャッキ荷重として数100tから数1000tまでの荷重が使用される。このほか、3軸圧縮試験や引き抜き試験を行なった例もある。この強度試験は実験規模としてきわめて大きいものであるから、あまり多数は行なわれていないが、試験ブロック内の応力の分布ならびにその伝播の状況、ブロック全体としての破壊に至る前の局部的破壊の進行等、岩盤破壊論の基本となる問題がしだいに観察解明されつつある状況である。

4 基礎処理の実例

各種の困難な岩盤基礎の実際の条件を改良して設計施工した例を、ダムの場合について紹介しよう。

4.1 川俣ダム（コンクリートアーチ高さ120m）の基礎処理

川俣ダム地点は堅硬な石英粗面岩質溶結凝灰岩からなる急峻なU字形の谷を作っているが、Fig. 10 に示すように断層、シーム等が非常に発達しており、左岸ではアーチダムの基礎としてかなり問題を含んでいる。

Fig. 10. Kawamata dam (Faults).

このような地質状態にもかかわらず、他にダム地点がないこと、コンクリート用骨材の採取条件等により、大規模な地質改良工事を行なってもアーチダムが経済的であると判断されたため、岩盤の力学的性質、種々の改良案について研究が行なわれ、次の改良工事が行なわれて現在一部湛水中である。

4.1.1 Transmitting wall アーチバットメント近傍に作用するせん断応力を減ずるためにアーチ

Fig. 11. Kawamata dam (Foundation treatment).

スラストを奥に追い込み、結果として岩盤のすべり破壊面を山側に追い込むことを目的とする杭状構造の Transmitting wall が計算および模型実験により研究され、この構造物を入れた範囲が一体化されることを確かめ着工された。

4・1・2 Prestressed tie-rods 上記 Transmitting wall の掘削施工時に岩盤をゆるめることを補ない、さらに岩盤の一体化を図るため、左岸プレストレス量24000tの Prestressed tie-rods を埋設した。(Fig. 11)。

4・2 鳴子ダム（コンクリートアーチ高さ95m）の基礎処理

鳴子ダム地点は花コウ閃緑岩および石英粗面岩からなり、その境界は破碎帯である。この地点ではアーチダムの基礎として次の処理が行なわれた。

4・2・1 河床プラグ 左岸側河床にある厚さ約1mの上下流に通る傾斜50°~60°の圧砕部に対し、止水のため上下流端にそれぞれ深さ12m、幅10mのしゃ水壁を作って漏水を防ぎ、これらの中間に深さ6~8m、幅6~10mのくさび状のプラグを施工した。

4・2・2 ニまた基礎工 右岸上部の高さ25m区間および左岸上部の高さ21.5mの区間では、風化の進んだ圧砕された岩盤に、厚さ20~30cmの粘土層がはいっている。しかし、アーチアバットメントから20~35mはいった位置では良好な岩盤となるので、アーチスラストをこの部分に伝達させ、あわせてしゃ水壁を兼ねる2列のコンクリート壁（ニまた基礎）を施工した。(Fig. 12)。

Fig. 12. Naruko dam (Foundation treatment).

4・2・3 右岸のコンクリート置換 右岸のニまた基礎の下部の粘土層、および厚さ約2mの貫入石英粗面岩が風化し、粘土化している部分を高さ15m、長さ15mにわたり掘削除去し、コンクリートで置き換えて基礎岩盤の変形、滑動を防止した。

4・3 奥只見ダム（コンクリート重力高さ157m）における不良岩処理

奥只見の基礎岩盤は主として堅硬な斑レイ岩よりなるが、ダム天端標高付近の左右両端は天端標高から下50mの範囲は不良岩盤であり、特に右岸にはシルトス

トーンおよび蛇紋岩が広範囲に存在した。これらは乾燥時はかなりの強度を有しているが、いったん水を含めば軟弱化するものであって、特別な処理を行なう必要があった。このため調査坑の掘削、ボーリング調査、透水試験、グラウト試験、ベアリングテスト等を充分に行なって、不良岩盤部の地質調査を行なった結果、下記の方針により基礎処理を行なった。

(1) 不良岩部は、2m×2mの坑道切り取りを繰り返して、Fig. 13に示すようにげたばき式にコンクリートで置き換えられ（置き換えコンクリート量15700m³）、コンタクトグラウトを行なってしゃ水効果をもたせるとともに、ダムからの力を下の堅硬な岩盤に伝える。

(2) ダム上流面ステップ、下流面ステップ等からカ

Fig. 13. Okutadami dam (Foundation treatment).

ーテングラウトを行ない、特に上流側は置き換えコンクリート内に設けた通路からもさらにカーテングラウトを行なって、置き換えコンクリート壁の中間に存在する不良岩部を包みしゃ水幕を形成し、地山浸透水によってこれらの岩が軟弱化するのを防止する。

(3) 置き換えコンクリートおよびその中間の不良岩部内に設けた通路から健岩に達するまで削孔し、コンソリデーショングラウトを行ない中間の不良岩部を締め固め、止水効果の向上および支持力の増大を図る。

(4) ダム前面（取水口前面）切り取り斜面の不良岩部に厚さ2mの張コンクリートを設けるとともに、充分コンソリデーショングラウトを行なって軟弱化を防止する。

4・4 御母衣ダム（傾斜土質しゃ水壁ロックフィル高さ131m）における断層処理

ダムサイト付近の基盤は主として石英斑岩よりなっており、おおむね堅硬であるが、右岸の本流沿いに傾

斜 60~70° の断層 (福島断層) が存在する。断層は帯状の数条の粘土層を含む破砕帯となっており、その幅は10~30m程度であり、この部分には特別に止水処理を行なう必要があった。御母衣ダムのカーテングラウト工は Fig. 14 に示すように、土質しゃ水壁の基礎部に設けられた2条のコンクリートカットオフから行なわれたが、特に断層部においては前記の理由により止水効果を上げるため次の方法が採られた。すなわち、

Fig. 14. Miboro dam (Foundation treatment).

上流側地表カットオフからまず深さ18mのグラウト工を行ない、続いて断層部に設けられた深さ約50mの立坑に連絡する3段の横坑から、破砕帯とその周辺のぜい弱部にグラウト工を行なう。横坑の間隔は15mとし、横坑からのグラウト工は上段より順次行ない、削孔の方向は鉛直、その長さは18mとし、結果として断層部を横切る幅約60m、深さ約60mのしゃ水幕を形成する。なお止水効果を上げるため鉛直方向のボーリンググラウトのほかに、適宜横坑内から傘型のボーリンググラウトも行なう。下流側のカーテングラウト幕は地表のカットオフからのグラウト工のみによって形成する。以上の各種の基礎処理の後湛水が行なわれているが、すべて異常はなく所期の目的が達成されている。もちろん各種の計測設備が埋設されており、日常の状況が詳しく観察されている。

5 最近の理論的、実験的研究の二、三の例

岩盤の力学を基本的に追求するにあたって、岩石そ

のものの非弾性的性質の問題、節理の存在による応力伝播や強度への影響の問題、力学的性質の方向性の問題等、各種の複雑な事象が問題を非常に困難にしている。これらの困難を解決するための種々の努力が行なわれているが、最近の代表的な研究二、三を次にあげてみる。

5・1 不連続な節理性基盤の応力伝播と強度評価についての考察

まず岩盤に節理系が発達しているときの表面载荷による応力の伝わり方や、不連続な節理系を含んだマスの強度を支配する二、三の要因について実験と解析的な考察を試みた林正夫^{1) 2)}の研究がある。現実の複雑をきわめる岩盤の力学的な挙動を論ずる第一歩として、ここでは簡易化された基本的なケースの積み上げを取り扱っている。すなわち、一つの力学模型を考え、ひび割れ面間の平均距離 C の表面载荷幅 T に対する比 C/T を、ひび割れ規模と構造物規模の関連を付けるためのパラメーターとして導入し、さらに、ひび割れ面のせん断固有抵抗 τ_r の载荷圧 q に対する比 τ_r/q や、ひび割れ面の摩擦係数 $\tan \phi_r$ などの無次元パラメーターを考えに入れ、ひび割れ面の応力を局所的なすべりの各過程で弾性論によって近似的に求めて、ひび割れ面の局所的なすべり条件を逐次的に検定しながら、局所的なすべり領域を求める数値解法を試みている。その結果として、

(1) 载荷面近くのある深さ D までは局所的なすべりをひび割れ面上で生じながら鉛直応力は複合パスカル分布に従って下方に伝わっていき連続体としての弾性計算に比べると载荷面の直下に応力分布がかたよる傾向がある (Fig. 15, 16)。

(2) 深さ D より深い所ではもはやひび割れ面での局所的なすべり条件に触れないで、従来の連続体の力学が適用できる。ただし、その領域に対しては、 D を仮想的な表面として、 D 面で複合パスカル的に分布してきた応力をこの面の荷重とする。 D 面は転移面と仮称し、その値は上述の諸パラメーターの関数として

Fig. 15. Model of fissured foundation.

Fig. 16. Propagation of stress in the fissured foundation.

示される。

(3) このような傾向はモザイク状基盤を模擬して行なった光弾性実験で確かめることができた。必ずしもよい合致は得られていないが、特性の理解に役だっている。将来さらに考慮すべきは主節理の方向であり、今後の研究に待たなければならない。

(4) 不連続な節理面を含むぜい性実質部分の抵抗と、節理部分の摩擦抵抗の和の形で初等力学的には巨視的な強度を推定することになろうが、これらの合成効果は節理面の断続度や、隣接している同種の節理面の平行度数、その近接の程度などのいろいろの要因によって影響を受けることを、室内実験で明らかにすることができた。これらの要因は上述の単純な合成抵抗値を割り引きしなければならない傾向に影響を与える。

(5) 室内実験はぜい性材料としてセッコウ、ケイソウ土、水の混合物を用い、不連続な節理面としてはマイクロワックスを塗布した紙を挿入して模擬し、約300個の比較実験で上述の傾向を確かめ、さらに皮膜式光弾性実験で、各節理ごとに主せん断ひずみのピークが現われ、それらが互いに干渉する場合には上述の強度の低下が起こることを明らかにした。

(6) 上述の不連続度数および平行数のパラメーターに対して極値分布理論を導入してみたところ、単独節

理面の場合からの強度低下率についてかなり実験と合致した値を得ている。今後の研究の一つの方向を示しているものと思われる。(Fig. 17)。

Fig. 17. Comparison of strength decrease between theory and experiment.

5・2 岩盤の粘弾性の性質とその数学的表現の一例

川淵桂により、岩盤の粘弾性モデルとして Fig. 18 が提案されている。これは岩盤表面の掘削過程における岩盤内部の横坑の回りの応力弛緩のひずみ変化より実測したもので、輝緑灰岩質の岩盤である。通常のジャッキによる変形試験に比べ、実ダムの載荷規模による変形を知りうる利点がある。ただしいまのところ除荷の過程だけであり、載荷の過程は目下実測中である。掘削経過と測定位置は Fig. 19 に示すとおりである。

Fig. 20 の AB, AC, BC の3区間ともによく適合する

Fig. 18. Proposed nonlinear model.

モデルとして、非線型スプリングと Kelvin body を直列に結んだ非線型モデルを提案しているわけである。なおこのモデルの $\sigma=0$ での弾性係数は弾性波速度から求めた弾性係数とほぼ一致し、Kelvin model の E はジャッキによる弾性係数値にほぼ等しい (Fig. 21)。ダムによる載荷のように載荷速度が遅いと、その弾性係数 E_0 は $1/E_0 = 1/E_1 + 1/E$ となり、 $\sigma=20 \text{ kg/cm}^2$ とすれば $E_0=20000 \text{ kg/cm}^2$ となり、この値はジャッキによる値の半分ほどとなる。

Fig. 19. Condition of excavation.

Fig. 20. Measure room and analysed section.

Fig. 21. Measured strain and calculated strain.

Stresses in ($\theta = 0^\circ$)

Stresses in ($\theta = 90^\circ$)

Stresses in ($\theta = 45^\circ$)

Fig. 22. Stress distribution in the orthogonal anisotropic foundation.

5・3 直交異方性基盤の応力状態の弾性解

川本⁴⁾は直交異方性の半無限基盤の表面にスラスト、曲げ、およびせん断力の部分荷重が作用する場合の応力解を求めている。その方法は応力関数の特性方程式としての4階の変係数偏微分方程式（直交異方性版の基礎式）を上記の境界条件に対し解いたものである。数値計算例によると、いずれの荷重状態においても大きいほうの弾性係数の方向の応力が異方性の影響を受けやすく、等分布荷重の場合によると $\theta=0^\circ$ （鉛直方向の主弾性係数が大）では荷重直下の鉛直応力 σ_y は $e=1$ の等方等質の場合よりも増大し、かつこの σ_y の増加する範囲は深くなるほど広がる。一方、水平応力 σ_x は異方性が大きいほど（ $e \rightarrow$ 小）減少する。 $\theta=90^\circ$ （水平方向の主弾性係数が大）では σ_y は減少し σ_x は増大する。 $\theta=45^\circ$ の場合の等最大直応力線図によると、大きいほうの主弾性係数の方向に伸びて分布することと係数比が大きいほど伸びが大きいことがわかる。（Fig. 22）。

5・4 基盤の安定性に関する模型実験方法の研究

岩盤に各種分離面が存在して、その強度が支配されることに着目した実験研究の一例として、高野⁵⁾穂のものがあ。基盤の強度を総合的に示す支持力あるいはすべり抵抗を直接求めようとする場合、規模が大きいかつ複雑な場合には、たとえ大規模な現場実験によっても困難で、実用上求めうる基盤の強度、すなわち卓越した走行傾斜を持つ節理の発達した岩盤の圧縮強度、せん断強度、ならびに内部摩擦角、あるいはディスロケーション沿いのせん断強度ならびに基盤構造の幾何学的形状とが、基盤の総合的な強度を支配する要素であることをわれわれは知っているの、これらを測定対象として安全率を求めうるスケールを得ようとする立場をとっている。そして適確に把握しがたい実物をいくつか仮想的に分類し、標準基盤構造相似律を次元解析的に定めて、模型上に必要な機械的性質を上記各相似要素に付与し、模型実験的に耐荷力を各標準基盤構造ごとに求めて、それらの間に内挿される安全度を考究しようとした。模型材料としてはプラスター、ケイソウ土、砂、水ガラス、ケイフ化ソーダ、重ソーダなどを採用し、各分離面に付与すべき強度条件に特に注意が払われた。またこの実験は二次元的な安全性のみならず、三次元的なダムと基盤の複合構造としての安定性の考究に努めたもので、黒部第四ダムの基盤の設計に資したものである。

6 その他の問題

以上の説明の内容はほとんどダムの基盤の力学に関連する問題に限定されている。しかし、ダム自体でも岩盤浸透流というきわめて困難で重要な問題が残されており、また構造物を対象としたときには、トンネル

に関する岩盤力学というきわめて取り扱いの困難な問題がある。以下この問題に簡単に触れてみよう。岩盤内の浸透流には、流量、水圧、流線の形状、および流速の各要素があるが、砂層のような多孔性物質内の浸透流と異なり一般には不規則かつ複雑な分布をした割れめ、断層などの状態に影響されるため、岩盤全体を通じて画一的な法則（たとえばDarcy法則のような）を単純に適用することには問題がある。しかし地質調査の結果から判断して、岩盤が巨視的に見て等方均質として取り扱えると考えられる場合、砂岩や頁岩またはそれらの互層のような異方性をもつ場合、また断層破碎帯そのもののような場合には既知の理論を適用して解析や実験を行なうこともある程度可能と考えられる。関西電力では二次元的割れめが縦横等間隔にある場合を導線で表現し、また一方かんでんゲルで均質媒質を作って岩盤基礎の浸透流圧力分布を比較したが、両者がよく一致した結果を得たと発表している。またさらに割れめのある岩盤内の浸透流の模型試験法として各種の太さのパイプ系で置き換えて実験する方法、解析的方法として割れめを通る部分と多孔質な岩塊内を通る部分との2要素の組み合わせで基本方程式をたてる方法なども外国の研究者により提案されたこともあり、しだいに一般の岩盤状態の場合にも適用可能な方法が展開されていくことが希望される。黒四ダムにおいて大長昭雄によって研究された各種の岩盤透水問題は、この地点に限られた前提にたつとはいへ岩盤浸透流の問題に多くの前進をもたらした。

一方、トンネルに関する岩盤力学は、工事施工法の躍進的な発達に比べて、やや停滞の域にあると残念ながらいわざるをえない面である。これはトンネル工事に伴う自然条件のあまりに複雑なことに起因しているものかもしれない。トンネルに関連して地形地層との関係、断層の処理、工法の選択、巻厚の決定等、問題の解決は主として地質学にゆだねられる一方、経験にまつところが大きかった。しかし長大トンネルまたは海峡トンネル等の従来にならぬ規模のものが計画施工される今日では、定性的な、あるいは経験のみによる判定では満足できない面が出てくることが考えられ、力学的研究の必要性が要求されている。トンネルの力学に関しては一般の岩盤力学に共通して岩の弾塑性の性質、破壊機構等が基本となるほか、変質岩石の膨張力が特に問題となる場合がある。またトンネル工事に関連しての理論研究としては、土圧論、弾性論、塑性論による地圧の研究が古典的な研究から今日に至るまで相当あることはよく知られていることである。Forchheimer⁶⁾に始まりHeim, Schmidt⁷⁾らの理論、⁸⁾わが国での山口、岡本教授らの理論、最近では村山教授⁸⁾の免圧圏の弾塑性的解釈などがあげられる。トンネル

工事に伴い湧水の問題も重要な点で、最近では高橋彦⁹⁾治の研究があげられる。直接工事に関連した問題で鋼アーチ支保工の使用について、坂本貞雄¹⁰⁾はその実物破壊テストならびに実際の破壊実績に基づいて地山荷重と支保工の耐力の関係を研究発表しているが、このような現場測定と力学との結合が重要な今後のいき方であろう。

7 結 言

全般的にいて、取り扱い困難な岩盤力学の出発点は、まず現物についての測定観察であり、これを基礎にしての理論の組み立てでなければならない。この意味で現場における測定法の開発を現状よりさらに大きく発展させることが、岩盤力学を大きく発達させる第一条件であるといえる。また今後の着実な発展のためには、限られた狭い視野の上にたつのではなく、この問題に関係のある各界相互間の連係と啓発が必要である。なお本紹介を草するにあたり、土木学会岩盤力学委員会の各分科会から資料を提出してもらったことに對し厚く謝意を表する次第である。

(昭和39年11月12日 岩の力学国内シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 林正夫, 電力中央研究所技術報告 (土木・63007) (1963).
- 2) 林正夫, 第2回岩盤力学シンポジウム前刷, 6 (1963).
- 3) 川淵桂, 土木学会第18回年次学術講演会前刷, p. 179 (1963).
- 4) 川本勝万, 発電水力, No. 68, 1 (1964).
- 5) 高野稔, 土木学会論文集, No. 78, 43 (1962).
- 6) 山口昇, 鉄道業研資料, 16, No. 11, 1 (1928).
- 7) 岡本舜三, 土木学会論文集, 昭和22・23年増刊号, 60 (1949).
- 8) 村山朔郎, “土と基礎の設計法”, p. 209 (1961) 土質工学会
- 9) 高橋彦治, “湧水と地圧”, p. 1 (1963) 山海堂
- 10) 坂本貞雄, 第一トンネル工学シンポジウム, トンネル工学シリーズ1, p. 2 (1962)