

研究展望

REVIEW

研究展望

岩盤力学の回顧と展望

REVIEWS AND PROSPECTS FOR ROCK MECHANICS

川本 眺万

Toshikazu KAWAMOTO

正会員 工博 愛知工業大学教授
(〒466 名古屋市昭和区高峰町 23)

Keywords : rock mechanics, geotechnical engineering,
numerical methods

1. はじめに

1991年9月のアーヘンにおける第7回岩の力学国際会議でE. Hoek教授の行ったMüller Lectureの題目は“岩盤工学における設計が受け入れられるのはいつか?”と言うものであった。このテーマの内容は、岩盤工学における設計が受け入れられるためには、広範囲な基準の中から用いられるべき基準をどのように調べ、決定するかということであったが、ただ一つの普遍的に受け入れられるような基準は無いということを説明していた。これはHoek教授の長年にわたるコンサルトの経験から出されたもので、それぞれのプロジェクトはそれぞれ自身のユニークな条件を持ち、岩盤工学の技術者の責任は、プロジェクトに科せられる総ての拘束条件に適合するような、安全かつ経済的な解を求めることであることを教えている。

岩盤工学の基礎としての岩盤力学は、この30数年の間に急速に進展してきた学問分野であり、徐々にその体系化が行われてきてはいるものの、技術者にとってはまだまだ経験に頼らねばならない場合や、工学的判断を要する場合も多い。岩盤力学は、土木工学だけでなく鉱山学、地質学、地球物理学なども深く関係した学際的な学問である。岩の力学(Rock Mechanics)の研究は、早くから主として岩石の力学的性質、破壊条件、爆破や掘削に対する諸特性など、材料的な立場で行われてきた。しかし、1950年代に入ってダム、トンネル、長大橋基礎、岩盤斜面等の大型土木構造物の建設が増え、さらにその後の地下発電所、原子力発電所基礎、高レベル放射性廃棄物処理施設などの大型プロジェクト、その他の地下利用や資源・エネルギーの開発などの社会的需要に対応できるように、今まで以上に安全性と合理性が岩盤構造物の設計・施工に要求されるようになってきている。その

ため岩盤力学としては種々の規模の地質学的不連続面を含んだ岩盤としての力学特性がより強く認識されるようになり、岩盤としての変形挙動や破壊特性に関する調査・試験・解析・実験・計測などの研究・開発が進められてきた。さらに最近では廃棄物処理や岩盤構造物の建設に伴う環境問題として、とくに地盤内の地下水の挙動、熱の影響や各種物質の移動拡散現象に対する研究の必要性が増加している。この場合にも不連続性岩盤を対象としたこれらの特性と、さらに力学との連成挙動の調査・解析が必要になる。

岩盤の力学特性や水理特性が、それを構成する岩石の特性よりも節理、層理、断層破砕帯などの地質構造的な要因に多く支配されるために、その評価は極めて難しいが、徐々に経験のない工学的な判断が岩盤力学的な考え方に置き換わりつつある。岩盤工学は従来よりダム工学、トンネル工学、鉱山学において論じられ、また土質力学を援用するかたちで設計計算が進められてきた。しかし、岩盤力学としてまとまった最初の本として、Talobreの“Mecanique des Roches”(1957)¹⁾が、続いてMüllerの“Felsbau”(1963)²⁾が出版されるに及んで、それらの中で示された地質学および地質工学に関する知識と、ダムやトンネルの豊富な設計や工事経験に基づいて書かれたものが、その後の岩盤の調査・試験や研究にたいして一つの刺激となり、これを契機に岩盤力学の体系が整い始めたと見ることができよう。

後述するように、我が国においても1955年前後における高ダムの建設や半地下ないし地下発電所空洞の掘削に伴いロックメカニクス(当初は岩石力学、岩盤力学、岩の力学などに訳されており、それらの名称が各学会の委員会名に用いられているが、統一的には岩の力学と呼ばれている)もようやく活発になりつつあった。その中で日本材料学会では岩石力学に興味をもった有志が集ま

り、Müllerの著書に匹敵するような新著を著そうとして、工学の分野は勿論のこと地球物理学、構造地質学に関連した純粋科学としての岩石力学の立場にも触れた“岩石力学とその応用”³⁾を1966年に出版している。その頃になると世界的にも土木工学の分野だけでなく、鉱山学、地質学、地質工学、土質力学、地球物理学などの各分野の研究者や技術者が境界領域での学際的な研究の必要を感じ、1966年に国際岩石力学会議(ISRM)が組織され、リスボンにおいて第1回国際会議⁴⁾が開催された。

あれから26年が経過し、岩盤力学は理論面でも実際面でも多くの分野で着実に発展してきた。しかし、総てのものが解決されている訳でなく、第1回ISRMで出されていた問題は現在でも研究の対象になっているものがかなりある。この間の岩盤力学とその応用面での変化進展を、筆者の経験を通して眺めていきたい。

2. 我が国における岩盤力学の幕明け

戦後の日本のダム建設の手本はTVA(テネシー川流域開発公社)であった。そこでの成果は多くの分冊として出版され、設計法や施工の細目について日本の土木技術者も大いに利用した。大学においてもダムコンクリートの材料的な研究、自重、地震力や硬化熱などによるダム応力の解析、設計計算法の検討などが活発になってきている。しかしながら、当時はダムサイトとしては、コンクリート重力ダムを安全に建設するのに十分な岩盤が選ばれていたから、必ずしも岩盤力学的な検討を必要としなかったように思われる。しかし、我が国における複雑な地質構造に加えて地震の影響を考えると、いろいろ新しく克服しなければならない問題がでてくる。特に、1950年のアメリカ海外技術顧問団(OCI)の勧告によって上椎葉ダム(高さ110mのアーチダム)が建設されるに及んで、アーチダムの耐震性に関する諸問題の解明が必要になり、ダム地点岩盤の岩盤特性と地震特性が調査された。

上椎葉ダムの建設と前後して、実験用のアーチダムとして檜隈ダム(高さ13m、須田貝ダム仮締切)が建設され、ダムの応力やたわみ、ダム内の埋設計器(カールソノメータ)による実測値が試算荷重法による計算結果と比較された⁵⁾。これ以後、ダムの現場計測が急速に進展していくのである。さらにダム上の起振機による振動実験や貯水池内でのダイナマイトの爆発による動水圧の実験が行われ、アーチダムの耐震性に関する研究が進められたが、岩盤を対象にした特別な調査、研究や、岩盤力学を意識した報告は行われなかったように思う。

我が国最高の高さ186mを誇る黒部川第四ダムの工事においては、当初の200mに近い設計高さに対して基礎岩盤が悪く、その変形性および強度に関して問題が

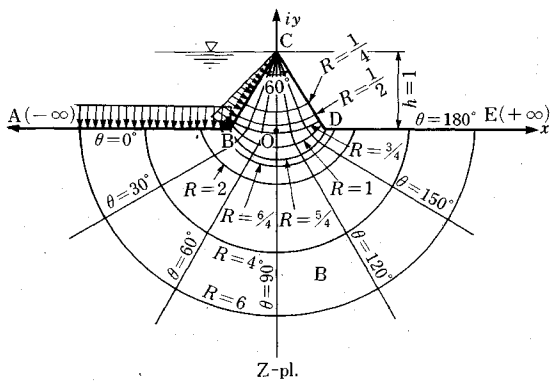
指摘された。またその建設途上に、フランスのマルバツセダム(高さ61m、コンクリートアーチダム)がアバットメントの岩盤のすべりによって崩壊(1959年12月、洪水波で地中海に至る11kmの河水路に沿って被害、死者421人)したこともあって、黒部第四ダムの設計変更を余儀なくされ、岩盤の強度・変形特性について世界に例を見ないような大規模な原位置岩盤試験が行われた。一方、種々の試験法の開発や石膏模型実験や光弾性実験などの助けをかりて不良岩盤の処理工法が検討されてきた⁶⁾。このときの岩盤試験法や模型実験法はその後の世界における岩盤力学の教科書にも紹介され、特に、この原位置岩盤試験によってそれまでのダムの建設であまり配慮されていなかった実際の岩盤の力学特性を知ることができ、黒四ダムにおける試験が我が国の岩盤力学の幕開けとなり、その進歩に大きな足跡を残すこととなった。

1950年代に入ってトンネルの建設も増え、それまでに培われたトンネル技術上の貴重な体験に加えて、佐久間ダム(高さ155.5m、重力式ダム、1956年完成)とそれに伴う国鉄飯田線付替工事における鋼製支保の採用や重機械の使用による新しい施工技術の導入により、トンネルの施工法は飛躍的に進歩した⁷⁾。大断面の掘削、長大トンネルの施工期間の短縮が可能になるにつれて、かなり厳しい地質条件、岩盤条件、地下水条件を克服して関門国道トンネル、北陸トンネル、新丹那トンネル、大町トンネルなど、多くの重要な幹線トンネルの建設を見ている。このようなトンネルの建設においても、掘削方式や支保方式の進歩、使用材料や補助工法の改良に応じて岩盤力学上の問題が提起され、その解決にむけて研究が進められてきた。この場合、現場における計測技術の発展および計測機器の開発を見逃すことはできない。当時のトンネル掘削に対する解析手法や設計法に岩盤力学的な考え方が用いられるようになり、それらの考え方が後に地下発電所、地下石油備蓄用空洞などの大空洞に対する解析、設計、施工技術の発展へと続いた。

3. 数値解析以前の岩盤力学の研究

(1) 解析解

一般に連続体力学における解析には、理論解析、実験解析、数値解析の分野が考えられる。また、工学問題の解を得るためには厳密な解あるいは閉じた解、数値解析による解および経験的な解あるいは実験に基づく解が用いられていると考えることができる。電子計算機の発達に伴う数値解析法の開発される以前には、ダム基礎やトンネル周辺地山の応力・変形状態の解析は、岩盤を弾性連続体と仮定して行われることが多かった。さらに岩盤を弾塑性体や粘弾性体、また直交異方性体と仮定される場合もあるが、それも比較的単純な境界形状をもつ問題に限られていた。岩盤斜面の安定性の解析に対しては土



図一 ダム内部応力の理論解析例⁹⁾

質力学で取り扱われているような極限約合い条件を用いて行われていた。

図一に示すような重力ダムの堤体内部および基礎岩盤内の二次元応力状態を求める場合を考える⁹⁾。解析の初期には、基礎岩盤の影響を考慮することなく基本三角形の半無限片持ばりに水圧や堆砂圧、自重等を作用させて応力計算を行っていた。しかし、堤体と基礎との接触線付近の応力分布や堤体の応力、変形に及ぼす岩盤の影響を調べるために、かなり厄介な理論解析が行われている。すなわち、 z 平面 ($z = x + iy$) 上の堤体と基礎を Schwarz-Christoffel の変換によって w 平面 [$w = R(\cos \theta + i \sin \theta)$] の上半領域に写像し、さらにそれを媒介平面として、 ζ 平面 [$\zeta = r(\cos \theta + i \sin \theta)$] 上の単位円内に写像した後、この単位円領域内で成立するポテンシャル関数が求められる。その後、その関数を用いて z 平面内での応力成分が求められる。このような複雑な計算を行っても、堤体と岩盤の弾性係数は同じであり、堤体の形状によってまた新たに解析しなければならない。これに対して、当時光弾性実験法が用いられたが、それによれば堤体の形状や、堤体と基礎の弾性係数を容易に変えることができ、堤体内に設けられる監査廊の影響も求めることもできた。また後述する遠心力光弾性実験装置を用いて自重の作用による応力解析も行われた。

堤体内の監査廊や地表面の影響を受けるトンネルの周辺応力の解析には、いわゆる有孔無限板理論が適用された。これは孔のない状態で解析を行って、孔の位置での主応力状態を求め、その後、孔を有する無限板にその主応力を作用させて解を求めるものである。このような考え方はその後有限要素法による解析にもしばしば用いられている。

等方等質の弾性体と仮定した基礎岩盤が、その表面に種々の荷重を受けるときの応力計算は、半無限岩盤の表面に鉛直方向の集中荷重が作用した場合の Boussinesq の解と、水平方向に集中荷重が作用した場合の Cerruti の解を、荷重状態に合うように積分することによって行

われる⁹⁾。規則的な半無限弾性層状体が、その表面において荷重を受ける場合の応力伝播状態やトンネル掘削に伴う応力・変形状態についても幾つかの研究 (例えば、Sonntag¹⁰⁾, Maury¹¹⁾) がある。層間でのせん断抵抗が大きく、すべりを生じない場合には、層状岩盤を全体的に見て、それと等価な性質を有する等質直交異方性体に置き換えることにより応力解析が行われる¹²⁾。

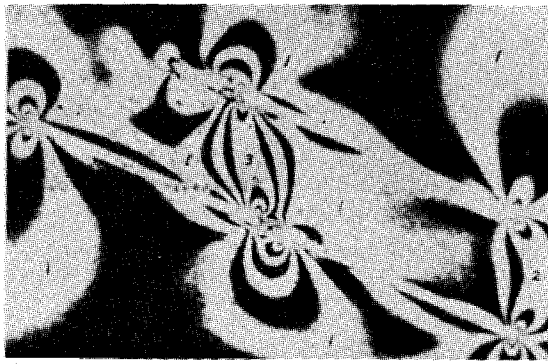
数値解析が用いられる以前のトンネル応力の解析は、よく弾性岩盤内の円形トンネルを対象に行われていた。トンネル位置での地山の初期応力が与えられると、Kirsch の解を用いて周辺地山の応力が計算された。地表面の影響を考慮した浅いトンネルや双設トンネルに対しては双極座標が、楕円形トンネルには楕円座標が用いられ、馬蹄形や長方形の断面を持つトンネルに対しては複素変数関数を用いて応力解析¹³⁾が行われたが、手回しの計算機では素掘トンネル壁面の応力集中を求めるのがやっとであった。円形トンネルの応力、変形状態に及ぼす岩盤の異方性や成層状態の影響は、さきの基礎岩盤の場合と同様な手法で解析された。この外、厚肉円管に対する解を用いて、内圧を受けるトンネルの応力状態や、静水圧的な初期応力状態でのトンネルの周りの塑性変形領域が求められている¹⁴⁾。

(2) 模型実験による解

複雑な地形状態や地質構造の岩盤を対象にするときには、理論解析が適用できない場合が多い。そのような場合に模型実験による解析がよく行われた。上記の黒部第四ダムの場合も、イタリアの ISMES において大型模型実験が行われ、高さ約 2 m (実物の 1/90) の石膏模型で静的実験が、また高さ 1 m の模型で動的实验が行われ、ダムの破壊機構について検討している⁶⁾。さらに国内で小型模型実験が行われ、模型総数は 40 個を越えている。さらに、ダム基礎岩盤の基礎的研究や、ダム建設途上に生じた 2, 3 の岩盤処理方法の検討について、光弾性実験が行われている。

模型実験によって理論解析で導入しえなかった材料的ないし幾何学的条件がある程度考慮されるものの、現実の条件に十分に適合した実験を行うことは相似律の上からも難しいことが多かった。特に、自重の影響を考慮しなければならない場合には、例えば 3 次元石膏ダム模型では多数の点からワイヤーで重錘を吊り下げるなど、色々な工夫がなされた。破壊実験材料としての石膏・珪藻土の混合材料や、岩盤の分離面のせん断特性を表現する諸材料についても研究が進められた。そして岩盤斜面の 2 次元破壊実験や岩盤構造とコンクリートダム構造の連成を考えた 3 次元破壊実験などが行われた。

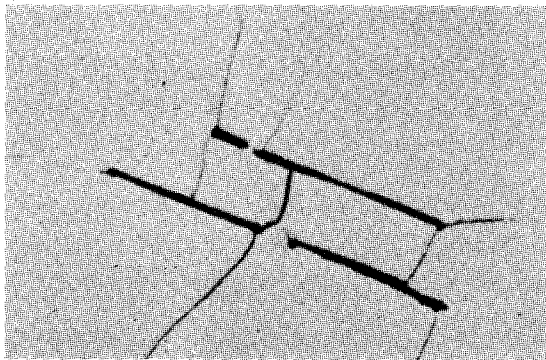
光弾性実験¹⁵⁾においては、光弾性材料や、応力凍結法、光弾性皮膜法、遠心力載荷法等の実験法の開発研究が進められ、ダム基礎岩盤を対象にして、断層の変形が岩盤



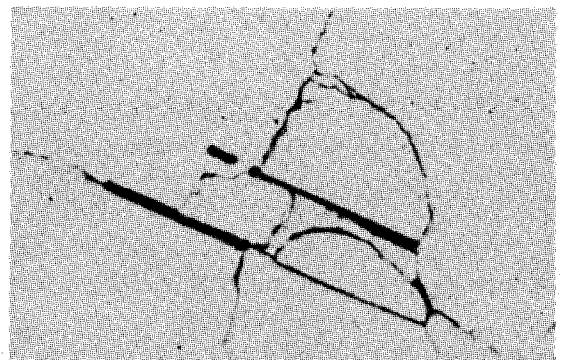
(a) 鉛直方向等分布荷重



(b) 鉛直方向遠心力荷重



(c) 鉛直方向等分布荷重

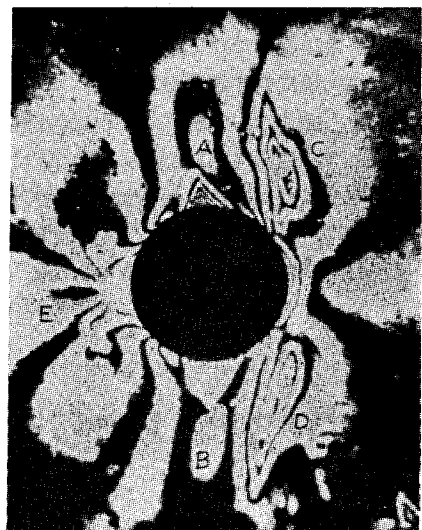


(d) 鉛直方向遠心力荷重

図—2 鉱山空洞の破壊進展に対する光弾性実験と石膏模型実験の比較¹⁶⁾

内部応力に与える影響やコンクリートで置き換えられた断層部の応力集中等について実験的研究が行われた。成層状基礎岩盤や節理性岩盤の応力の伝播が検討され、また凍結法を用いて断層の変形性を考慮したアーチダム基礎岩盤の3次元実験も行われた。トンネルや坑道を対象にしたものも多く、トンネル断面形状や覆工形状と応力状態との関係を求めたもの、軟弱地盤におけるトンネルにかかる土圧を推定するための実験などがある。3次元実験法として一般に用いられた応力凍結法によって、交差坑道における応力集中、立坑と水平坑道との接続部の応力状態など、理論的に取り扱うことの困難な場合の3次元応力解析が有効に行われた。

重量構造物の自重あるいは地震力による応力を測定するには通常の光弾性実験では不可能である。それは重力場におけるびずみが極めて小さいからである。したがって、大きな加速度の場を作って測定可能な範囲までモデルの応力を高める必要があり、そのために遠心力装置が用いられる。最近では土質力学の分野で高速遠心力装置が盛んに設置され、重力場での模型実験や地震時の土質特性の実験が行われているが、原理的には同じものである。この方法を用いて地下構造物やトンネルを対象にして行った実験や地形状態と地圧の関係を調べた実



図—3 鉛直方向等分布荷重をうける円孔周辺の破壊領域の進展 (光弾性皮膜法)¹⁶⁾

験などがあるが、ここでは Hoek が行った実験結果を示しておく¹⁶⁾。Hoek は岩盤中の空洞周辺の破壊状態を調べる目的で、石膏模型による破壊試験を光弾性実験と平行して行っている。図—2 (a) と図—2 (c) は上下縁

において均一に分布した荷重により破壊した後の写真であり、図-2 (b) と図-2 (d) は鉛直方向に遠心力荷重を作用させたときのものである。これらより両方の場合の応力状態および破壊状態がかなり異なることが分かる。

光弾性皮膜法を用いて異方性体に対する応力解析が行われた。また岩石やコンクリート供試体に適用して、クラックやすべり線の発生や進行状況、さらには亀裂の連続性が強度に及ぼす影響、亀裂における応力集中の相互干渉など、破壊に至るまでの現象が観察されている。最後に、石英岩の模型を用いて円形坑道周辺の破壊状態を、皮膜を通してオッシロカメラで撮影した興味ある結果を図-3に示しておく¹⁶⁾。

4. 岩盤力学の展開

(1) 国際会議に見る研究の流れ

さきに我が国における岩盤力学の幕開けについて述べたが、世界的にはそれ以前からかなり国際的な討議が行われてきている。現在の ISRM の前身である Salzburg サークルが、Müller 博士の指導のもとで当時の岩盤力学に対する関心の増大に応じて、1951 年以来多くの会合を組織してきた。また 1955 年以来地圧制御および岩石力学に関する 4 つの国際会議も開かれ、欧米における鉱山界のこの方面の関心も高まってきていた。このように岩盤力学の初期の発展は、やはり鉱山学や応用地質学における研究者や技術者によるものであるが、その後地球物理学、土質力学、ダムおよび基礎工学などの土木工学の研究者や技術者が加わり、あらゆる方面から岩盤力学に関する研究活動が各国で活発に行われるようになってきた。このような世界的状況のもとで 1966 年に第 1 回岩の力学国際会議 (ISRM) が開催されたが、組織委員長の Rocha 博士と ISRM 会長の Müller 博士は共に、岩盤力学の発展のためには工学分野と地質学分野の研究者、技術者のより有効な協力が必要であることを協調していた。このことは、両分野ではそれぞれかなりの発展を見ている今日において、特に強く感じられることである。

第 1 回国際会議⁴⁾における課題は、“岩盤調査”、“岩石・岩盤の物理的・力学的特性の記述法”、“岩石・岩盤の物性、岩盤中の残存応力”、“岩石破壊”、“岩石斜面”、“地下坑道と深いボーリング”、“基礎岩盤”の 8 つであったが、地質調査や鉱山の分野での課題が主流を占めていたように思われる。しかしながら、このときの一般報告では、世界の研究に対する現況調査を実施した興味深い結果が示されており、現在我々が取り組んでいる問題、あるいは未解決な問題に対する研究の必要性がすでに指摘されている。その中で取り上げている主な研究は次のとおりである。

- ① ジョイントや断層などの不連続性を含む岩盤の力学挙動の解明とその数値解析
- ② 岩盤分類
- ③ 岩石の材料異方性を含んだ変形・破壊挙動の解明 (塑性および粘性変形)
- ④ 水との相互作用、すなわち岩石および岩盤の透水性、堆積岩に対しては圧密特性、吸水膨潤およびスレーキング
- ⑤ 岩石および岩盤の進行性破壊
- ⑥ 風化作用
- ⑦ 原位置および室内試験法、とくに岩盤内の初期応力の測定
- ⑧ 岩盤構造物の安定性
- ⑨ 発破および動的問題

上記の研究課題を見て明らかなように、殆どのものが現在の問題でもある。その後、ISRM の国際会議や ISRM が支援する国際シンポジウムにおいて、それぞれの時代の要請に応じた岩盤力学上の問題、例えば、長大斜面、長大トンネル、石油備蓄や揚水発電所のための地下大空洞、原子力発電所、高レベル廃棄物地下処分場などの建設に伴う岩盤工学的ないし地質工学的な諸問題、さらには地盤環境問題についての研究、討論が重ねられ、色々な分野でかなりの発展を遂げてきている。

第 1 回国際会議を契機に我が国においても土木学会、鉱業会 (現資源・素材学会)、土質工学会、および材料学会などの岩の力学に関する委員会でも活発な研究活動が繰り広げられ、さらに国内協力体制を強化するために研究連絡会が作られ、それが今日の岩の力学連合会 (ISRM 日本支部) に発展し、活発に国際協力にも力を入れてきている。その後、ISRM においても幾つかの課題についての技術委員会が設けられて活動しているが、特に、室内および原位置岩盤試験法に関する委員会がいち早く活動を始め、多くの Suggested Methods を提案している¹⁷⁾。原位置試験に属するもののうち興味あるものを幾つか示すと次のようである。

- ① 岩の原位置での変形性の決定方法
- ② 原位置一軸圧縮試験を用いる変形性と強度の決定方法
- ③ 岩盤の水理特性の決定方法
- ④ ポアホールによる地球物理学的調査と原位置地盤振動特性の測定方法
- ⑤ ポアホール壁に 9 個ないし 12 個のひずみゲージをもつセルによる絶対地山応力の決定方法
- ⑥ 変位計を用いた原位置岩盤応力の決定方法
- ⑦ コンバージェンスの測定による岩盤変位の観察方法
- ⑧ せん断強度の決定方法
- ⑨ 岩盤内の不連続性の量的記述方法

その後、国際会議は4年毎に世界の各地で開催され、次々と新しい話題が提供され、討議されてきた。それらの中から幾つかの課題を示しておこう。研究課題はそれぞれの開催年代や会議を主催する国における開発分野によって左右されるが、岩盤力学の研究の進展が伺われて興味深い。

第2回会議(1970, Beograd)では、“岩盤の性質の改良”、“自然斜面と掘削斜面の安定性”が、第3回会議(1974, Denver)では、“テクノフィジックス”、“岩石破碎”が新しく論じられた。第4回会議(1979, Montreux)では、“岩盤のレオロジカルな挙動”、“設計・施工に用いられる試験やモニタリング”、“地下構造物の設計に関する近代的な施工方法”(これにはNATM工法が含まれている)などが、第5回会議(1983, Melbourne)では、“サイトの探査と評価”、“深部地下掘削”、“岩盤動力学”が課題とされ、さらに“岩盤力学におけるスペシャル・トピックス”なるセッションを設けて当時の先端的な研究および技術について話題の提供が行われた。第6回会議(1987, Montréal)では、“岩盤内の水の流れと廃棄物の隔離”や、“過剰な応力を受けた地下空洞”について新しく論じられた。これらの会議への我が国からの提出論文や参加者は回を追うごとに増え、第7回会議(1991, Aachen)には、次回(1995)の会議を東京で開催することが決定していたこともあって、数十名の参加をみている。この会議では、不連続性岩盤の力学的特性や水理学的特性の調査、試験および評価に関して種々の分野から報告がなされた。新しい課題としては、“亀裂性岩盤における廃棄物貯蔵と汚染物質の移行”、“廃棄物および生の材料の地下貯蔵、核廃棄物の最終貯蔵庫”、“岩盤の透水性のモデル化”、“岩盤力学における計算手法”、“TBMによる掘削”、“市民防衛シェルターを含む地下空洞”などがあり、廃棄物の処理処分やそれに関連する岩盤内の水の挙動、地下空洞の開発利用の計画や建設、種々の地質構造や岩盤特性を考慮して開発された計算手法など、最近の研究成果が多く発表された。この間、我が国においても青函、中山、恵那山などの多くのトンネルや、幾つかの揚水発電所や石油備蓄用の地下大空洞の建設における経験を通じて岩盤力学ないし岩盤工学上の多くの学術的、技術的な研究開発を進めてきた。

(2) 岩石・岩盤の力学特性

初期の国際会議ではもっぱら岩石および岩盤の力学特性が話題にされ、インタクトな岩に対する室内試験、岩盤に対する原位置試験や室内模型実験、不連続面に対するせん断試験等の結果とその評価、さらにモデル化(構成則の作成)などが多く発表されてきた。それらの詳細はそれぞれのプロシーディングスに譲ることにして、ここでは幾つかの研究成果について述べておく。

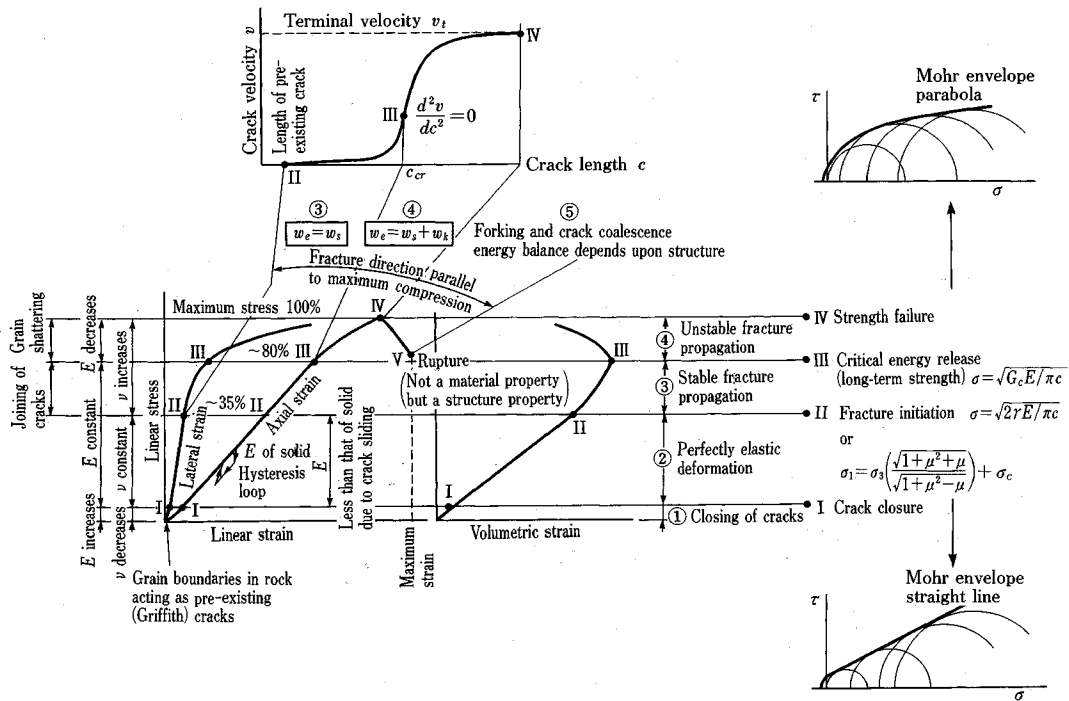
岩盤の力学挙動は母岩の特性と地質構造すなわち不連

続面の状態の両方に強く影響される。母岩は連続体として近似されるが、不連続面はその力学的および幾何学的状態によって取り扱い方が大きく異なる。しかし、軟岩の場合には不連続面の影響は硬岩ほど顕著でないことが多くの実験で示されている。軟岩の定義ははっきりしていないが、一般に堆積岩で固結度が低いもの、風化途中の岩、変成を受けた岩等で、岩石供試体の一軸圧縮強度が 100 kgf/cm^2 以下で、水の影響を受けやすい岩がイメージされる。堆積性軟岩は我が国にも広く分布しており、建設工事に際して遭遇する機会も多く、しかも工学的に多くの問題を含んでいる。

今までの国際会議における課題を討議し、我が国で開催するのに適した主題として、Weak Rock が選ばれ、1981年に東京で「Weak Rockに関する岩盤力学」国際シンポジウム¹⁸⁾が開催された。副題として、Soft, Fractured or Weathered Rock が付いており、さらにスウェリング、スレーキング、崩壊、クリープ、圧密、非線形変形、破壊、硬岩盤内の断層などのような岩盤力学的状态で Weak Rock を特性付けられるものとしている。

そして Weak Rock に関連した工学的性質、原位置試験、理論と解析、設計と施工、動力学と地質構造などのセッションが設けられ、活発な討議が行われた¹⁹⁾。岩石の非線形弾性や塑性、粘性などの構成関係が現実に重要な問題として研究され始めたのは、有限要素法が開発され、ほとんどの連続体力学の問題が解けるようになったからである。岩石の構成則の問題と数値解析は互いに強い影響を与え合いながら発展してきており、その後、いずれの会議においても地盤材料の構成則は常に重要な1セッションとして議論されてきている。岩石の強度や破壊条件、さらには塑性や粘弾性・粘塑性などの変形特性および破壊特性を合わせた構成則としてのモデル理論が多く提出されてきている。ここでは岩石の脆性破壊のメカニズムを総括的に説明している Bieniawski の図(図—4)を示しておく²⁰⁾。Bieniawski はマイクロクラックの伝播理論-破壊力学から出発して、ピーク強度後のひずみ軟化の領域を進行性破壊と考える理論を構築している。この中で軟化域から破断に至る過程は岩の物性ではなく、構造特性であることが明確に指摘されている。

岩盤の特性は岩石と不連続面の特性に依存する。そしてその評価は岩石試験や地質調査の結果に加えて、従来の経験に基づく種々の要因を加味して行われるが、岩盤分類もその一つである(図—5参照)²¹⁾。岩盤の評価が行われても、それが直接に設計計算や安定解析に用いられるのではなく、解析に用いるために構造物の大きさや荷重条件によって、岩盤としての力学的評価を変え、岩盤モデル(構成則を含めて)を変化させる必要がでてくる。これは図—6に示すように考慮すべき岩盤の領域に



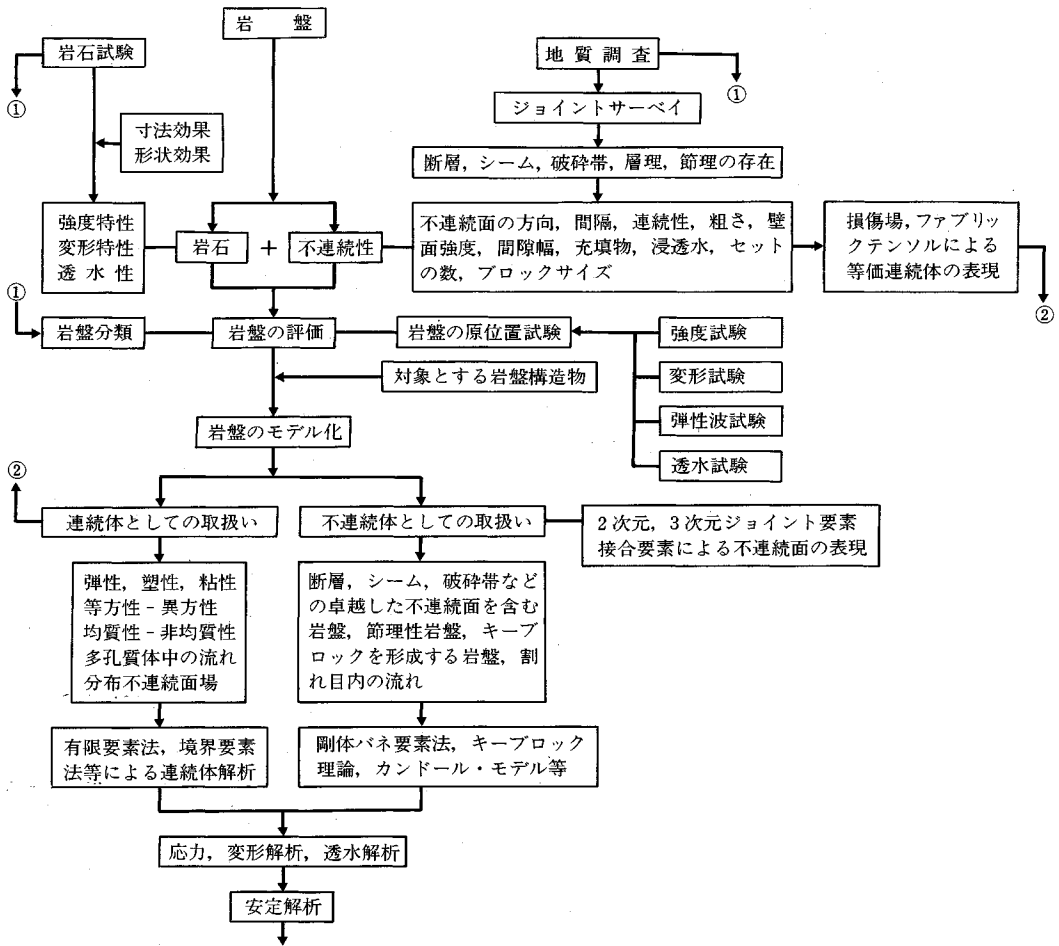
図—4 多軸圧縮下での岩石の脆性破壊メカニズム²⁰⁾

応じて不連続性の影響が異なることを意味している²²⁾。図—5に見られるようにモデル化としては大きくは2つの流れが考えられる。その1つは岩盤内の不連続性を評価(経験的・実験的ないしは理論的)して、それと等価な疑似連続体を考える場合であり、他の1つは不連続性に着目して不連続体として岩盤の安定性を考える場合である。これらのモデルに対する数値解析の方法が後述するように開発されているが、それに対応できるような地質構造解析や不連続面の力学特性の把握もまた重要である。なお、岩盤分類に対してはしばしばファジ理論が適用され²³⁾、不連続性岩盤を疑似連続体として取り扱う場合には損傷力学理論²⁴⁾、クラックテンソル理論²⁵⁾およびHomogenization法(均質化手法)²⁶⁾などが適用されるようになってきている。

岩盤の力学特性や水理学特性が不連続面の存在で大きく影響されることから、岩の力学国際会議(ISRM)では、“Rock Joint”に関する技術委員会を組織して研究討論を世界的に行い、1990年にはノルウェーのローエンで岩盤のジョイントに関する国際シンポジウム²⁷⁾を開催している。そこでは地質構造としての不連続面の調査・解析・表現に始まり、個々の岩盤不連続面の挙動を対象にして、不連続面の幾何形状の測定方法や、力学特性や水理特性の実験的・解析的な研究成果が発表された。同時にスケールエフェクトに関するワークショップ²⁸⁾も開かれて興味ある討議がなされている。

さらに1992年には同技術委員会がサポートして亀裂性・節理性岩盤(Fractured and Jointed Rock Masses)に関する国際シンポジウム²⁹⁾がアメリカのLake Tahoeにおいて、前回のRock Jointのシンポジウムの続きとして開催された。この会議では不連続面を含む岩盤の挙動を対象としており、ジョイント系の幾何学的特性の評価法や力学および水理学的特性の実験的および解析的な研究成果が多く集まることを予想して開かれたものである。本会議の主要なテーマは、クラックの定量化、力学挙動のモデル化、物理特性、浸透、地下空洞と斜面などであるが、ロック・ジョイントや不連続性岩盤の挙動は、露天掘りや地下鉱山、ダム基礎、水力および輸送のためのトンネル、石油貯蔵、核廃棄物貯蔵などを含む工学分野に多くの影響を及ぼすことが報告されている。また研究者だけでなく、土木技術者や地質技術者のレベルにおいても非常に活発に研究開発が進められてきていることより、地質と工学の両分野から種々の地質学的不連続面とそれを含む岩盤に対する学際的な研究の必要性を強く印象づけている。

室内試験や原位置試験から得られた変形特性を用いて予測された変形が、理論解析や数値解析によって得られた岩盤や構造物の変形と、実際のどの程度一致するかを明らかにすることは、技術者にとって一番の関心事である。動態観測の必要性³⁰⁾は、室内実験のレベルで得られた材料の構成則を現場に適用することの難しさ、岩盤の力学



図一五 岩盤の評価と解析²¹⁾

的・水理学的な諸性質を前もって十分な精度で知り得ない場合の多いことを物語っている。現場計測や動態観測に基づく逆解析法の導入が行われるようになったが、この方法では地盤が比較的単純にモデル化される傾向にあり、岩盤および構造物の示す挙動を忠実に把握しえない場合がある。このように理論と実際の間にはまだまだ多くの問題が横たわっており、従来の岩盤力学や岩盤工学の分野における経験に頼らねばならない部分も多い。しかし、その経験的な部分も動態観測を通じて定量化かつ数量化されつつあり、その意味で、パラメトリック・スタディやケース・スタディがますます必要である。

5. 岩盤力学における数値解析法の進展

筆者が岩盤工学への有限要素法の適用に関する研究報告を初めて聞いたのは第1回のISRM国際会議のときで、O.C. ZienkiewiczとY.K. Cheung, W.D. Liam Finn および H.W. Anderson の3編のみであった⁴⁾。それまでもジャーナルなどに発表されていたが、地盤の

ような連続体をトラスに置き換えてどうして計算するのかと言う程度に見逃していたように思う。有限要素法は主として欧米の航空機構造力学者によって開発されたものであるが、Zienkiewicz教授によっていち早く土質力学や岩盤力学の分野に取り入れられた。計算機の発達や計算技術の進歩が、調査・計測技術の向上と相俟って、材料的にも幾何学的にも複雑な地盤の力学問題を、かなり実際的に取り扱うことを可能にしている。有限要素法の体系化を試み、多くの実際的な解析結果とともに広範囲の問題に対する解析法をまとめたO.C. ZienkiewiczとY.K. Cheungの著者³¹⁾は多くの地盤工学の問題を含んだもので、その後の土質力学や岩盤力学の研究に大いに利用されてきた。各国で地盤力学における有限要素解析の研究や応用が活発になってきて、地盤材料の非均質性や非線形性、水や構造組織、さらには時間に対する依存性などを考慮した解析が可能になるにつれて、岩盤力学の分野でも数値解析と調査・試験・現場計測の技術が相互に影響を及ぼしながら発展してきた。それら

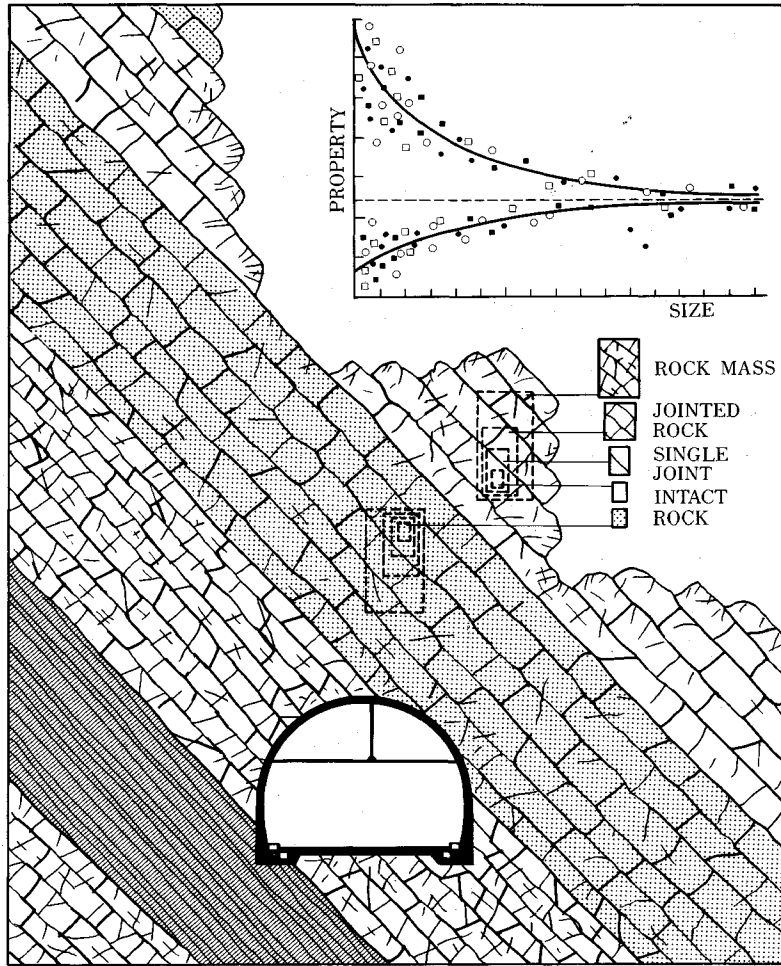


図-6 岩盤力学におけるスケールエフェクトの例²²⁾

の成果は幾つかの著書^{32), 33)}としてまとめられ、また年々国の内外の会合で発表されてきた。

このような状態のもとで、1972年にアメリカのVicksburgでC. S. Desai博士を中心として“地盤工学における有限要素法の応用”というシンポジウムが開かれた(提出論文36編)³⁴⁾。これは土質力学と岩盤力学における有限要素法について、理論や応用に対する過去の研究をレビューし、最近の研究、将来の展望について議論することを目的としたものである。この会議では、“レビューおよび理論”、“ダム、掘削および斜面”、“基礎および舗装”、“浸透、圧密およびクリープ”“地震解析および動力学”、“土-構造物相互作用”の6つのセッションが設けられているが、主として土質力学における有限要素法の理論と適用の現状や計算機の能力の有効な利用などが論じられている。岩盤力学に関しては、異方性の亀裂性岩盤における応力-ひずみと浸透解析、粘板岩に対する逐次破壊モデル、岩盤における掘削、亀裂性岩盤と構造物の相互作用に対する連続体モデルの適用性など

の論文が提出されており、現在の研究にも通じる課題が論議されている。なお、それぞれの論文の最後にはプログラムの内容を示す調査表が付けられており、プログラムの相互利用に関する試みがなされている。

1976年にはアメリカのBlacksburgで第2回地盤力学に関する数値解析国際会議(16か国、98編)が開催された³⁵⁾。第1回会議ではgeotechnical engineeringを対象にして、その有限要素解析のみを討議しているのに対して、第2回会議ではgeomechanicsを対象にし、討議の範囲も土質力学、岩盤力学、鉱山学にとどまらず、地殻を構成する材料と、それよりなるあらゆる構造物の力学まで広げられた。さらに、解析手法としても、有限要素法だけでなく差分法、積分方程式法、特性方程式による方法などのような種々の計算手法が見直され、評価された。この会議での主要なトピックスは“理論的基礎と定式化”、“材料の挙動”、“応用(工学的および地質学的)”、“理論から応用へ”である。

この会議では数値解析の実際への応用面が強調された

が、解析手法の開発もさることながら、地盤材料の構成則や幾何学的条件の選択、すなわち、解析対象物の理想化 (Idealization) と数値計算上の諸特性 (Numerical properties) が特に重要であり、材料の挙動についての現場試験だけでなく、地盤構造物の建設中ならびに完成後の挙動の測定の必要性に強い関心が示された。この会議中に、地盤力学の数値解析に関する国際委員会の設立ならびにジャーナルの発行について討議された。そして周期的な国際会議の組織と、International Journal on Numerical and Analytical Methods in Geomechanics をスタートさせることとなった。

上記のように、1970年代に入って地盤力学(土質力学、岩盤力学)の分野での数値解析が進むとともに、解析プログラムについての討議がISRMや国際地盤力学数値解析委員会、さらにはISSMFEで行われるようになってくる。ISRMではWittkeを議長としてGeomechanics Computer Programに関するコミッションが作られ、岩盤力学における既存のコンピュータ・プログラムのリストを作成するためのアンケートを行った。この内容はタイトル/コード名、FE/FD/その他、エレメント・タイプ、線形/非線形、構成則、言語、ドキュメンテーション、適用性などである。このアンケートに対する回答(1980年9月)は109件(この内欧米が73%、日本が19%)で、その時点でFE-Codesが60%、その内非線形解析が86%、3次元解析が29%という結果がでている。また、ISSMFEの会長に福岡教授がなられたときに、世界的に数値解析プログラムを整理し、交換利用することについて検討が行われ、我が国でも土質工学会でこの件について委員会を設けて検討した。しかし、プログラムの言語や計算機機種統一、ノウハウの問題、商業ベースとの関係等、難しい問題にぶつかり、いずれも立ち消えになってしまった。その一方で、コンピュータソフトの開発を行う会社や、数値解析を仕事にした建設コンサルタントが続々と出現し、岩盤力学の分野での活動も活発になってくる。

その後、3年ごとに開かれていたこの会議での研究の進展について簡単に触れておく。第3回会議(Aachen, 1978)³⁶⁾では、Desaiが地盤力学の問題の中で、これまで解決済みの問題、未解決の問題、近い将来解決可能な問題は何かを再整理し、実際の地盤挙動の計測との比較を通じて、より優れた解析手法を開発することを強調した。このDesaiの考えは、本来(1992年)10月にアメリカのNormanで開かれたU.S.-Canada Workshop on Recent Accomplishments and Future Trend in Geomechanics in The 21st Centuryに通じている。また、Liam Finnはこれから解明すべき問題として、地盤材料の構成則の確立、地盤内の水と空気の浸透問題を挙げ、非定常浸透問題と二相流体の浸透問題の解析手法

の開発の必要性を指摘している。

第4回会議(Edmonton, 1982)では数値解析技術とプログラミング、海底地質工学、凍土問題が新しく加えられた。1985年に名古屋において筆者が議長として第5回会議が開かれた。このときには岩盤水理学、現場計測結果の解釈、マイクロ・コンピュータの利用などのセッションが新しく加えられた。

第6回会議(Innsbruck, 1988)にはジョイントや不連続面のモデル化、無限領域のモデル化、逆解析、CAD/メッシュ分割/ソフトウェアのセッションが加えられた。そして、理論と実際との間のギャップを埋めることが強調され、また地盤材料としての不連続体に対する新しい数値解析モデルの導入、地盤力学における確率論的手法の適用、無限領域のモデル化としてのBEMなどが活発に討議された。次いで第7回会議が1991年にオーストリアのCairnsで開かれ、ジョイントおよび局所化理論、個別要素法(DEM)、動力学と繰返し荷重、地球物理学的应用、環境/資源/地下水に関する地盤工学などについても討議が行われた。この時点から国際委員会を解散し、発展的に新しい国際学会(International Association For Computer Methods and Advances in Geomechanics, IACMAG)が創設された。

上記のように岩盤力学における数値解析法は年を追うごとに発展してきているが、基本的には図—5に示すように岩盤を連続体あるいは不連続体として取り扱うことになる。数値解析の適用は調査・試験・設計・安定解析・計測・施工管理(フィードバックシステム)の各段階で行われ、また研究面と実際面にわたっているが、一次的には連続体として取り扱われる場合がほとんどである。その場合、等方・等質かつ線形弾性が基本的な仮定であるが、異方性、非均質性、非線形性、塑性、粘性等をも比較的容易に取扱えるようになってきている。

岩盤の安定性を解析する場合には、岩盤の破壊挙動を把握することが重要である。従来より、岩盤の局所破壊の発生や塑性領域の広がりを調べるのに有限要素法が有効に用いられてきたが、進行性破壊のメカニズムや破壊後の挙動を解析することは得意でなかった。不連続面の影響を考慮するために種々のジョイント要素が開発されたが、いずれも連続体解析の範囲を出なかった。しかし最近では不連続性岩盤に対するモデルおよび解析手法が種々開発され、岩盤の逐次破壊の現象や岩盤内の不連続面の挙動を考慮した応力・変形解析や安定解析が行えるようになってきている。ここでは表—1にそれらの解析手法の比較を示すにとどめる³⁷⁾。

最後に逆解析手法の適用について触れておく^{38), 39)}。岩盤の複雑な挙動をより正確に把握するためには、原位置の状態にできるだけ忠実な解析モデルを設定することが重要であるが、十分な調査・試験を行って得られた岩盤

表一 不連続モデルの解析手法比較³⁷⁾

手法	FEM (有限要素法)	DDA (不連続変形 要素法)	DEM (個別要素法)	RBSM (剛体-バネ モデル)
提案者	1870 (Reyleigh) 1909 (Ritz)	1984 (G.H. Shi, R.E. Goodman)	1971 (P.A. Cundall)	1976 (川井忠彦)
目的	連続体解析 (構造解析) (流体解析)	不連続岩盤 ブロックの 弾性的挙動	ブロックの 剛体運動	連続体の極 限解析 (破 壊モード)
運動方 程式	Hamilton の原理	FEM と同 様	ニュートン の運動の第 二法則	FEM と同 様
要素の 特性	弾性体	弾性体	剛体	剛体
要素間 特性	ジョイント 要素など	バネ	バネ-ダグ シュポット	バネ
主変数	(節点変位) (圧力, 速度)	要素の剛体 変位, 剛体 回転, ひず み	要素の剛体 変位, 剛体 回転	要素の剛体 変位, 剛体 回転
剛性マト リックス 導理の (エネルギー 原理)	ポテンシャル エネルギー 最小化原理 最理, 仮想仕 事の理論	ポテンシャル エネルギー 最小化原理	相反定理	有限要素法 と差分法の 中間
従属変 数	要素のひず み, 要素の 応力	要素の変 形, 要素の 応力	要素間バネ の力	要素間バネ の力

特性値を用いて解析を行っても、計測された岩盤構造物の挙動と解析結果が一致しない場合が多い。そのために情報化施工 (Observational Procedure) が行われてきているが、この方法を適用するに際して数値解析手法が用いられている。その場合の解析は一般に逆解析と呼ばれるものである。地盤材料を対象にした逆解析問題としては、斜面の掘削問題非均質地盤に対する同定法、地下空洞の掘削問題 (地山の初期応力と弾性係数の比、空洞周辺の塑性領域の広がり)、トンネルの設計・施工等、多くの分野で適用されている。また最近では、非均質な地盤の材料定数と軟弱層の位置の同定解析、非線形弾性体の材料定数の同定、異方性岩盤や非均質岩盤の材料に対する境界要素法による定式化、不連続性岩盤の損傷テンソルの同定など、複雑な地盤の特性を同定するような解析方法の研究も進められている。さらに、均質あるいは非均質地盤の浸透流問題や三次元逆解析問題も取扱われるようになってきている。

6. おわりに

今まで、岩盤力学や地盤工学問題の解析の発展過程について総花的に説明してきた。岩盤力学はその適用範囲を広め、多くの分野での困難な岩盤構造物の建設を可能にしてきた。筆者としては岩盤力学の基礎的な問題に取り組むとともに、岩盤斜面の安定と支保、原子力発電所基礎の安定性、地下発電所空洞などを対象に、試験・計

表二 ジオトピア研究における研究内容⁴⁰⁾

	研究テーマ	研究内容
①地盤構造調査研究	a. 地山応力調査研究	・逆解析手法に基づく地山の力学特性の研究 ・岩盤の力学特性調査の研究
	b. 水理水文調査研究	・深地層における水理機構の調査法の研究 ・地下水の水みち調査技術の研究
	c. 割れ目調査研究	・岩盤割れ目の調査技術の研究 ・水撃伝播測定による岩盤割れ目の脈絡探査
	d. 地震動調査研究	・地下深部の地震動特性に関する研究 ・地震時の地震変位測定の実験
	e. 探査技術高度化	・ジオトモグラフィ手法の適用性の研究
②岩盤特性調査研究	a. 透水性調査研究	・ベントナイトの密封特性研究 ・大寸法岩盤塊試料による載荷岩盤透水試験
	b. 透気性調査研究	・岩盤透気実験
	c. 熱拡散性調査研究	・岩盤の加熱試験および注水試験 ・岩盤熱拡散係数の現場迅速・簡便決定試験
	d. 地下水挙動調査研究	・破砕帯内の地下水挙動実験 ・岩盤地山の地下水による放射性核種の移行実験
	e. 力学特性調査研究	・岩盤のゆるみ測定 ・高地圧及び高水圧のもとでの岩盤空洞の崩壊条件研究 ・破砕帯のような非均質媒体のせん断強度特性研究 ・高地圧のもとでの亀裂性岩盤の挙動測定
③建設技術研究開発	a. 掘削技術開発研究	・特に軟岩 (堆積岩) における大深度空間の掘削の可能性に関する研究 ・ロックメルターの開発
	b. 支保技術開発研究	・種々の崩壊機構に対する支保設計の概念研究 ・施工中の地山条件に最適な補強法および支保の計測 ・高地圧, 高水圧, 高温下での長期にわたる支保システムの安定性の研究 ・任意形状空洞の安定性に関する研究
	c. 覆工技術開発研究	・岩盤変形および地下水流出のコントロール技術の開発 ・地下空洞の仕上げ技術の研究
④環境・安全性研究	a. 空間特性調査研究	・地下居住の環境生理学的研究
	b. 医学的, 精神医学的研究	・地下居住の精神・心理学的研究
	c. 換気空調技術研究	・地下空洞内気流分布測定実験
	d. 防災技術研究	・緊急避難時の行動科学的研究 ・煙, 熱の挙動実験

測・解析等に関係し、多くの経験を得た。また、岩盤力学の教育や現場における岩盤工学の実際について、さらに土木工学と地質学との関係について大いに興味を持ってきた。これらについて述べる紙面がないのが残念であるが、最後に、ジオトピア構想⁴⁰⁾について触れておきたい。大深度地下空洞の開発が叫ばれてからは、特に深部の地下空間に独立した施設 (ジオトピア研究センター) を考えるジオトピア構想について論議してきたが、これはその後、地上空間の利用計画と有機的に機能させる地下空間の開発利用を含めて考えることになった。ジオトピア研究センターにおける研究として表二のようなものが考えられている。従来の岩盤力学や岩盤工学の分

野での研究や技術で十分に対処できるものもあるが、地下深部での研究開発を必要とするものも多い。

不連続性岩盤あるいは多孔質性岩盤においては、その応力・変形状態と地下水の間の相互作用が問題になり、さらに応力・浸透・熱および物質移動・拡散現象の問題、いわゆるカップリング問題に対する解析手法の一層の開発が必要になる。長大斜面や岩盤空洞の耐震性についても、岩盤の動的特性の試験、計測技術、解析手法の総ての面で、さらに研究開発が要望される。

上記のように、今までの岩盤力学上の豊富な知識を適用しうる問題は、質・量ともに徐々に変化してきている。国内における研究集会だけでなく、国際集会への参加や活発な討議を通じて岩盤力学・工学における世界の趨勢を把握するとともに、国際交流の場で活躍できる若い元気な研究者、技術者の活躍を期待したい。

参 考 文 献

- 1) Talobre, J. : La Méchanique des Roches, Dunod, Paris, 1957.
- 2) Müller, L. : Der Felsbau, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1963.
- 3) 日本材料学会編：岩石力学とその応用，丸善，1966.
- 4) Proc. of 1st International Congress, ISRM, Lisbon, 1966.
- 5) 土木学会：日本の土木技術，100年の発展のあゆみ，p. 444, 1964.
- 6) 関西電力（株）：黒部ダム測定報告書（1960-1983），1983.
- 7) 前出5），pp. 369-406.
- 8) 丹羽養次：堰堤内部応力の算定について，土木学会誌，37-7，1952.
- 9) 例えば，前出3），pp. 123-131.
- 10) Sonntag, G. : Einfluss der Anisotropie auf die Beanspruchung des Gerirges in der Umgebung von Stollen, Der Bauingenieur, 33-8, ss. 287-294, 1958.
- 11) Maury, V. : mécanique des milieux stratifiés, Dunod, 1970.
- 12) 川本眺万：岩盤力学，朝倉土木工学講座23，朝倉書店，pp.142-145, 1975.
- 13) Sawin, G.N. : Spannungserhöhung am Rande von Löchern, VEB Verlag Technik, 1956.
- 14) 前出12），pp.188-196.
- 15) 川本眺万：岩石力学における光弾性実験，材料，14-141, pp. 464-472, 1965.
- 16) Hoek, E. : Experimental Mechanics, Proc. of 1st Congr., New York 1961, Pegamon Press, p.177, 1963.
- 17) ISRM : Suggested Test Methods, #1-#17, 1974-1988, あるいは Book of Suggested Methods, 1981.
- 18) Akai, K., et al, ed. : Weak Rock-Soft, Fractured or Weathered Rock, Tokyo, 1981.
- 19) 川本眺万・市川康明：軟岩の力学挙動と数値解析，材料，31-347, pp. 770-779, 1982.
- 20) Bieniawski, Z.T. : Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Part I, 4, 395, Part II, 4, 407, Part III, 4, 425, 1967
- 21) 川本眺万：岩盤物性の特徴と考え方，第7回岩盤システム工学セミナー，pp.1-25, 1990.
- 22) Cunha, A.P. : Scale effects in rock mechanics, Proc. of 1st Int. Workshop on Scale Effects in Rock Masses, Loen, pp.3-27, 1990.
- 23) 清水則一：地下空洞における現場計測変位の逆解析ならびに岩盤評価に関する研究，学位論文（神戸大学），1992.
- 24) 京谷孝史・市川康明・川本眺万：岩盤の力学特性評価における損傷テンソルの適用について，土木学会論文集，358/III-3, pp. 27-35, 1985.
- 25) Oda, M. : Fabric Tensor for Discontinuous Geological Materials, Soils and Foundations, 22-4, pp.96-108, 1982.
- 26) 石川 明：Homogenization 法による多孔質琉球石灰岩の力学特性評価について，名古屋大学卒業論文，1992.
- 27) Proc. of International Symposium on Rock Joints, Loen, 1990.
- 28) Proc. of 1st Int. Workshop on Scale Effect in Rock Masses, Loen, 1990.
- 29) Proc. of Int. Symp. on Fractured and Jointed Rock Masses, Lake Tahoe, 1992.
- 30) 川本眺万：岩盤工学を巡る諸問題，資源・素材学会誌，106-14, pp. 835-841, 1990.
- 31) Zienkiewicz, O.C. and Cheung, Y.K. : The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics, McGraw-Hill, 1967 .
- 32) 川本眺万・林 正夫：地盤工学における有限要素解析—土質力学と岩盤力学へのアプローチ，培風館，1973.
- 33) Gudehus, G 編，川本・桜井・足立訳：地盤力学における有限要素解析，共立出版，1977.
- 34) Proc. of the Symp. on Application of the Finite Element Method in Geotechnical Engineering, Vicksburg, 1972.
- 35) 川本眺万：岩盤力学における数値解析の現状，土木学会誌，2月号，pp. 38-43, 1977.
- 36) 足立紀尚：第3回地盤工学における数値解析に関する国際会議に出席して，土と基礎，27-9, pp. 51-55, 1979.
- 37) 大西有三：岩盤解析における不連続変形法（DDA）の導入と課題，第9回岩盤システム工学セミナー，pp. 157-178, 1992.
- 38) 例えば，土質工学会：地盤工学における数値解析の実務，第10章 数値解析と情報化施工管理，1987.
- 39) 大上俊之：一般化逆解析手法と岩盤力学への適用，学位論文（名古屋大学），1991.
- 40) 動力炉・核燃料開発事業団：ジオトピア構想検討（II），委託研究報告書，（株）テクノパ，p. 25, 1988.

(1992. 10. 26 受付)