軟岩の力学挙動と数値解析*

川 本 眺 万** 市 川 康 明***

Mechanics of Soft Rocks and Numerical Analyses

by

Toshikazu KAWAMOTO and Yasuaki ICHIKAWA

(Faculty of Engineering, Nagoya University, Nagoya)

1 は じ め に

岩の力学は、土木工学、鉱山学、地質工学、石油学等を総合する学問分野として徐々に発展を遂げてきているものの、その形成からまだ30数年程しか経ていない。この間、国際岩の力学会議 (ISRM) の創設を見、1966年の第1回の会議以後定期的に国際会議が開かれ、また毎年世界の各地で岩の力学に関するシンポジウムが開催され、種々の問題に検討が加えられて岩の力学および岩盤工学は飛躍的に発展してきた。この陰には、岩盤の調査・試験法、数値解析手法、計測機器ならびに計測法、施工機械等の各分野の進展があり、これらの研究開発や応用の相乗効果が考えられる。

ISRM の International Congress では毎回、各テーマごとに general reporter による現況の総括と展望を行っているが、第1回の Lisbon Congress (1966年) では、世界の研究に対する現況調査を実施して、興味深い結果を示している。この中で取り上げられている主な研究は次のとおりである。

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

これらは今日においても勝れて重要、かつ未解決な問題である。

金属や土と異って岩の力学的取扱いが困難なのは、岩盤が人間の生活空間と対応するサイズの不連続性を有しているからに他ならない。すなわち、岩盤の力学挙動は母岩の物性およびジョイント状態の両方に強く影響される。母岩は連続体として近似しうる挙動を示すのでその力学的取扱いは可能であろうが、ジョイント・断層はサイズ、数量および充てん物質等によって取扱い方が大きく異なる。ただし、軟岩の場合はその影響は硬岩ほど顕著でないと推測される (軟岩の定義は正確ではない。その成因一堆积岩で固結の程度の低いもの (泥岩、頁岩、凝灰岩等)、風化途中の岩、変成を受けた岩等々—によっても種々の軟岩が考えられるし、たとえ泥岩に対してさえ、どのようなものを軟岩と呼ぶかははっきりしていない。ただし、この泥岩に対する軟岩の諸問題は²³⁾Morgenstern、仲野等によって明らかにされつつある。これらを総合して、我々は軟岩とは、岩石供試体の一軸圧縮強度が 10 MPa 以下で、水の影響を受けやすい岩と、便宜的に定義しておきたい)。堆积性軟岩はわが国および世界的にもひろく分布しており、土木工事に際して遭遇する機会も多く、しかも工学的にも多くの問題を含んでいる。

本報告では ISRM 1981 Tokyo Symposium on Weak Rock の第3部門—Specialized Theory and Analysis on the Weak Rock (軟岩に関する理論と解析) について総括するわけであるが、今まで研究され、さらに設計計算に用いられてきた岩石および岩盤、とりわけ軟岩をめぐる諸問題のうち、力学特性と数値解析についてレビューし、その中で第3部門に寄せられた論文について概説したいと思う。岩の力学的性質については、第1部門の工学的性質のところにおいても、力学挙動の数理モデル的な評価がなされているが、ここでは工学的性質を理論的ないし解析的に取扱うときに考慮されている力学挙動について述べている。なお、

* 原稿受理 昭和57年1月26日

** 正 会 員 名古屋大学工学部 名古屋市中種区不老町

*** 名古屋大学工学部 名古屋市中種区不老町

第3部門に提出された論文は次の40編である。

- [1] Van der Kogel, H., The Initiation and Detection of Discontinuities in a Continuum
- [2] Okabe, T., K. Kishi, and H. Ohtsuki, Evaluation of Shearing Strength and Deformability of Soft Rock Containing Weak Layers
- [3] Yoshinaka, R., and T. Yamabe, A Strength Criterion of Rocks and Rock Masses
- [4] Liu, B., and R. Yan, Mechanical Models of Fractured Rock
- [5] Nascimento, U., Frictional Mechanism of Ploughing
- [6] Isobe, T., and Tominaga, A New Equation about Creep Deformation on Weak Rock
- [7] Mintchev, I. T., Integral-Operator Method for Determining Rheological Deformations of Weak Rocks
- [8] Ichikawa, Y., and T. Kawamoto, A Coupled Problem of Freezing and Seepage Phenomena in Saturated Porous Media
- [9] Sancio, R. T., The Use of Back-Calculations to Obtain the Shear and Tensile Strength of Weathered Rocks
- [10] Ito, H., and Y. Kitahara, Some Consideration on the Mechanical Behaviour of Anisotropic Rock Masses during the Excavation of Slope
- [11] Chowdhury, R. N., and D. A. Grivas, Probabilistic Consideration of Progressive Action in Weak Rock Masses
- [12] Evans, R. S. Valliappan, H. L. Raja Sekar, and D. McGackin, Stability Analysis of a Rock Slope against Toppling Failure
- [13] Yoshinaka, R., and H. Nishimaki, Bearing Capacity and Failure Mechanism of Soft Rock under Rigid Footing
- [14] Poorooshasb, H. B., B. B. Taylor, E. L. Matyas, and B. Lelievre, Settlement Analysis of Foundations on a Complex Geological Profile
- [15] Hamajima, R., T. Kawai, and H. Izeki, Stress Distribution in Fissured Foundations
- [16] Madhav, M. R., and K. S. Rama Krishna, Monte Carlo Simulation of Settlement of Foundations on a Rock Mass
- [17] Ter-Martirosyan, Z. G., and G. Ya. Karapetov, Prediction of the Stressed-Strained State of Expansive Rock Massifs upon Wetting
- [18] Nishida, T., T. Esaki, K. Aoki, and N. Kameda, On the Surface Subsidence in Natural Gas Fields
- [19] Nishida, T., T. Esaki, N. Kameda, and K. Aoki, Cave-In due to Mining at Shallow Depths
- [20] Kawahara, M., Y. Kanoh, N. Kaneko, and K. Yada, Strain-Softening Finite Element Analysis of Rock Applied to Tunnel Excavation
- [21] Nguyen Minh, D., P. Berest, J. Bergues, and P. Habib, Strain Softening Behaviour of Rocks in Engineering Practice
- [22] Kawai, T., N. Takeuchi, and T. Kumeta, New Discrete Models and Their Application to Rock Mechanics
- [23] Kuznetsov, S. V., and M. E. Slonim, A Mathematical Model for Cracked Weak Rock with Nonlinear Deformative and Collector Properties
- [24] Asai, T., M. Nishimura, and T. Saito, A Numerical Modeling Technique for Analyzing the Behavior of Discontinuous Rock Masses
- [25] Popovic, B. R., Stability of Cross-Section Tunnel Structures of Multiple Joint System
- [26] Sakurai, S., Interpretation of Displacement Measurements in Tunnels
- [27] Tazawa, Y., Y. Nakahara, and N. Okabayashi, Effects of Rock Bolts and Thin Linings as Tunnel Supports in Soft Rock
- [28] Tanimoto, C., S. Hata, and K. Kariya, Interaction between Rockbolts and Weak Rock in Tunneling
- [29] Selvadurai, A. P. S., The Behaviour of Anchor Plates Embedded in Creep Susceptible Geological Media
- [30] Oda, E., and M. Horita, On the Deformations in the Plastic Region about an Unlined Circular Tunnel in Soft Ground
- [31] Zhu, W., and S. Bai, Stress Analysis in the Weak Surrounding Rock and Lining Treated as Multiconcentric Rheological Media
- [32] Mandžić, E. H., Rock Salt Mass Creep around the Circular Opening
- [33] Kamemura, K., and H. Kimura, A Numerical Analysis of Tunneling in Soft Rocks
- [34] Ito, T., and M. Hisatake, Effects of Existing Tunnel on the Stress Distribution of New Tunnel Lining
- [35] Konda, T., A. Inokuma, and K. Kanto,

Three Dimensional Model Tests on Soft Ground Tunnels

[36] Kobayashi, S., Y. Mochida, T. Tamura, and N. Nishimura, Stresses and Deformations around Tunnel Face in Soft Rock

[37] Olsen, J.M., The Effect of Lateral Stress Changes around a Borehole in Shale during Plugging on Plug Adequacy

[38] Yamada, T., and H. Sasaguri, A Study of the Ground Behavior around the Longwall

Table I. Properties to be estimated in each engineering problem (after Pacher⁵⁾)

Behaviour of ground		Initial deformation	Purely elastic deformation	Creep	Failure	After-failure deformation	Purpose of investigation of behaviour
Structure							Purpose of calculation
							Application
Stage		<div><div>Elastic</div><div>Visco-plastic</div></div>
Rock as foundation	Large civil engineering structures embankments, dam	—————	—————	—————	—————	—————	Settling, deformation in bedrock, abutments, etc.
Slopes	Natural artificial	—————	—————	—————	—————	—————	Magnitude and rate, possible deformation, failure risk
Rock excavation	Mines, quarries large excavations	—————	—————	—————	—————	—————	Magnitude and rate of possible deformation, failure risk
Underground cavities	Pressure headings	—————	—————	—————	—————	—————	Contribution of rock to bearing capacity
	Tunnels, adits large cavities caverns	—————	—————	—————	—————	—————	Behaviour during excavation and supporting, convergence, formation of protective zones
	Mines	—————	—————	—————	—————	—————	As above, contribution to bearing capacity by failed pillars
	Underground storage	—————	—————	—————	—————	—————	Behaviour at extremely high and low temperatures or under radiation
Tectonic processes		—————	—————	—————	—————	—————	Tectonic stresses, back-calculation of tectonic forces, process of folding, etc.

Fig. 1. Construction procedure of constitutive laws in rock mechanics (after Pacher⁵⁾).

- Faces in Under-Ground Mining of Colliery
- [39] Yamatomi, J., T. Shimotani, and U. Yamaguchi, A Study on the Under-Ground Openings of Kuroko Mines
- [40] Moelle, K. H. R., Geological, and Rockmechanics Aspects of Coal Mining in Weak Rock Environments

2 変形・強度特性

Pacher は1970年の第2回 International Congress of Rock Mechanics (Beograd) のテーマ2—Deformability of Rock Masses—の general report で岩盤工学のどんな分野でどのような力学特性が問題となり、考慮に入れられなければならないかを示している (Table I). 言うまでもないことであるが、非線形弾性や塑性、粘性等の構成関係が現実重要な問題として研究され始めたのは、有限要素法 (finite element method; FEM) が開発されて、連続体の離散化という仮説の枠内であれば、ほとんどの力学問題が解けるようになったからである。この普及に努力したのが University of Wales, Swansea の Professor O. C. Zienkiewicz であり、彼のテキストの第2版は殊に地盤工学への FEM の適用に関して大きなインパクトを与えた。また、1972年以来3、4年ごとに開かれている International Conference on Numerical Methods in Geomechanics は地盤工学諸問題の数値解析に先鋭的な役割を果たしている。この会議の中でも、地盤材料の

構成法則は重要な1セクションとして議論されている。

このように、構成法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、数値解析の手法が精密化するにつれて、構成法則もまたより厳密に、より正しく、材料の挙動を表現するようなモデルを構築しなければならなくなっている。いかにしてこの構想と現実への対応を進めていくかを、また、Pacher の構図によって Fig.1 に示す。

構成法則としては本来、変形・破壊の両特性を含んでいなければならない。しかしながら土質工学の流れを汲んで、ことに岩盤構造物の安定性を論ずる場合に強度特性のみを考える場合が多い。このような立場から Mohr の仮説、すなわち破壊は垂直応力 σ とせん断応力がある面を切ったときにおこるという仮説

$$|\tau| = f(\sigma) \quad (1)$$

が提案されたわけであり、Coulomb は実験的にこの

Fig. 2. Failure of granular materials.

Fig. 3. Mechanism of brittle fracture of rock in multiaxial compression (after Bieniawski¹⁹⁷⁹).

面が (σ, τ) —空間では直線になるとした (Mohr-Coulomb の破壊仮説, 詳細は Jaeger and Cook⁷⁾等を参照) のであるが, 吉中ら^は[3]その他の中でこの関数が (規準化された形で) べき関数になると提案している。一般に, 岩を含めて粒状体は, 低拘束圧下 (粒子がつまっていない) と高拘束圧下 (つまっている) で二相の破壊形態をもつと考えられる (Fig. 2)。高拘束圧下では粒子がコンパクションされて金属のような密物質に近い破壊挙動を示すようになるが, これを低拘束圧から高拘束圧まで広い範囲にわたって一つの破壊条件で表そうとすると, べき関数的な形となるわけである。

岩の破壊仮説には, この他にマイクロクラックの伝ば理論, すなわち破壊力学 (fracture mechanics) から出発した修正 Griffith 理論 (Jaeger⁸⁾または Jaeger and Cook⁹⁾参照), 最大ひずみエネルギー説の修正 von Mises 理論 (Drucker-Prager 説), 最大せん断応力説の Tresca 理論等があるが, 桜井は [26] の中で新たに, ひずみによる破壊評価を提案している。

破壊条件についてはその他に層状岩盤のように異方性¹⁰⁾を有する岩の破壊 (Jaeger; Jaeger and Cook, Paterson, Mogi, Egger¹¹⁾; 実験は Donath¹²⁾によって行われた), 水による影響 (これについては後節の塑性論, 水との相互作用で触れたい), 岩盤の不連続性が強度および変形特性に与える影響 (長い間議論の対象であり, 現在でも未解決な問題の一つである。例えば Bernaix, Jaeger, 飯田, 小林, Goodman, Lane¹³⁾などを参照。本会議でも [2] および [3] がこの話題を提供している)。進行性破壊の問題等がある。進行性破壊については, ピーク後のひずみ軟化の領域を進行性破壊域と考える理論 (Fig. 3) があり, これはマイクロクラックの伝ば理論-破壊力学から出発している。この中で Bieniawski は軟化域から破断に至る過程は岩の物性ではなく, 構造特性であると明確に指摘している。この考え方は岩の破壊が狭いせん断ゾーンで起り (仲野¹⁴⁾), このせん断ゾーンの伝ばによって破壊もしくは軟化現象が現れるとする, いわゆるせん断帯不連続理論¹⁵⁾や分岐理論¹⁶⁾に発展される。本会議の報告 [23] は岩盤中に分布するマイクロクラックの開閉, 閉口に伴う異方性の発生と破壊領域の進展を取扱っているが, これも進行性破壊を解析しうる一手法であると思われる。

これまで強度・破壊特性に限定してその理論を追ってみたが, 以下, 変形・破壊特性を併せた構成法則としてのモデル理論を, 各物性ごとに概観したい。

2・1 塑性

提案されたモデルは多岐に渉るが, 岩のような多孔質材料に対して, 一般的に言って, 岩の実質部分の応

力-ひずみ関係が間げき水の圧力と連成しているか否かによって, 二種のモデルが考えられる。すなわち, 岩の固結の程度が高い場合や, 水の飽和度が低い場合は岩実質部に働く応力のみを与えればよい (一軸圧縮強度 q_u が数 MPa 以上であればこのようなモデルで充分でないかと考えられる)。このような塑性モデルでは古典的な塑性論を容易に援用できる。増分塑性論で基本的な仮説は, 降伏関数, 硬化則および流れ則から成る (例えば Mróz²⁷⁾, Fung²⁸⁾, Owen and Hinton²⁹⁾, Naylor, Pande, Simpson and Taft³⁰⁾, 山田³¹⁾)。解の安定性に関する Drucker の仮定は降伏関数 f と塑性ポテンシャル g が一致するという関連流れ則を要求するが, 多くの実験結果は, 関連流れ則がダイレイタンスを過大に評価していることを示している。したがって f と g が異なる非関連流れ則が用いられる場合が多い (岩に関しては例えば Maier and Hueckel³²⁾参照) が, この非関連流れ則を用いた場合の解の安定性と唯一性の条件が Mróz, Prévost and Höeg³³⁾ および前述の Maier and Hueckel³⁴⁾に与えられている。

塑性論でもう一つ問題となるのは Biniawski の言う不安定破壊過程である。もちろんこれは, 前述のように物性ではなく構造特性と考えるべきであり, その実証的研究が本会議の第1部門の報告 Akai, Ohnishi and Yashima³⁵⁾, あるいは Kawamoto, Ichikawa and Obara³⁶⁾によりなされている。すなわち, Akai, Ohnishi and Yashima³⁵⁾に見られるように横変位はピークを過ぎるとそれぞれの位置で大幅に異なり, この供試体の平均的な体積ひずみを考えることはほとんど無意味となろう。それにもかかわらず, 供試体の平均体積塑性ひずみを利用したひずみ軟化型塑性論が用いられるのは, 一つはその数学的および数値解析的取扱いの容易さのためであり, また残留強度が不連続面を含む岩盤 (岩ではなく) の強度の下限値を与えられと考えられるからである (足立, 小川³⁷⁾)。岩に関するひずみ軟化型塑性論については Dragon and Mróz³⁸⁾, Maier and Hueckel³²⁾, 山富, 下谷, 山口らが参照される。なお, 室内三軸試験等で得られたひずみ軟化型構成則は, あくまで

Fig. 4. Typical loading curves for volumetric and shearing components (after Dragon³⁸⁾).

Fig. 5. Cap model under high compression.

Fig. 6. Uniaxial cyclic loading for Kobe-Tuff (after Kawamoto and Tokashiki⁴³⁾).

その大きさの、その試験条件における供試体の構成則であり、岩盤構造物の解析等にこれを用いて正しい結果が得られるかどうかは判らない。また、これらの理論は、ピーク後の体積が増大することを仮定している (Fig. 4) が、例えば自然乾燥状態の軟岩では、ある拘束圧を境にしてより高い拘束圧下では常に体積減少を示すこと、すなわち負のダイレイタンスーが起ることが実験的に報告されている³⁶⁾。この場合にはある種の cap model 等が必要となろう (Fig. 5)。繰返し載荷を考えた場合は、降伏曲面が応力空間内を大きさを変えながら移動していくために、非等方便化を考慮に入れなければならない⁴²⁾。また、繰返し載荷時には、ピークを過ぎると破碎された粒子のゆるみのために弾性係数が明らかに低下する (Fig. 6)。残留ひずみが 0 の場合はぜい性-弾性、繰返し時の弾性係数が初期載荷時のそ

れと等しい場合は弾性-塑性と呼ばれるのであるが、Fig. 6 のような材料に対してはこれらの複合したぜい性-弾性-塑性モデルを考える必要があろう (Fig. 7)^{32,38,44)}。なお、このぜい性-弾性モデルの安定性は Ilyushin の仮説として知られている⁴⁴⁾。

以上みてきたように、ダイレイタンスーやひずみ軟化等を精密に塑性モデルに組込むのは、かなり困難であり、これから研究を待つことも多いのであるが、物理的な意味より、実験データの結果をそのまま使えるモデルの開発も試みられている。大西らによる軟岩に対するエンドクロニック理論の適用は、その意味で注目されよう。また、Gudehus 一派の、亜弾性の理論を發展させたひずみ速度理論も軟岩への適用が期待される⁴⁷⁾。

水の影響を無視できないような軟岩に対しては、土と同様に圧密排水ならびに排水試験を行って構成則を定める必要がある。赤井、足立、西⁴⁾および足立、小川³⁷⁾によると、大谷石のような堆積軟岩は水で飽和していれば Terzaghi の有効応力を用いてその力学挙動を記述でき、残留強度の状態では有効応力も体積も変化せずにせん断変形のみが継続する、土質材料に対するいわゆる 限界状態になる。このような岩に対しては、Roscoe らの Cam クレイモデル (Roscoe and Burland⁴⁸⁾, Schofield and Wroth⁴⁹⁾) の考え方を発展・適用できると考えられ、赤井、足立、西、Zienkiewicz⁹⁾, Hamphenson and Lewis⁵⁰⁾, 仲野²⁾, 田中等⁵¹⁾が試みている。本会議の報告 [20] は一般的なひずみ軟化型弾塑性モデルを提案し、それを適用して一軸圧縮試験のシミュレーションを行っている。

2.2 粘弾性・粘塑性

岩質材料の時間依存特性は、岩盤構造物の長期挙動を推定するうえでも、強震時の応答特性を知るうえでも重要であるが、その実験および数学的取扱いの煩雑さのために未解決な問題が多い。岩および岩盤の時間依存性変形の実証的研究は未だその端緒についたばかりであると言える。なお、岩盤の時間依存性挙動に対

Fig. 7. Mathematical models for rocks (after Dragon and Mróz³⁹⁾).

Fig. 8. Stress-strain relationships for sandstone for various constant strain rates (after Bieniawski⁵⁸⁾)

する概説が 4th ISRM Congress の general report⁵²⁾として Langer によりなされているので参照された。

塑性にしろ、粘弾性、粘塑性にしろ、本来、ある状況下における材料の（みかけ上の）応答を表すための作業仮説に過ぎないのであるが、通常、粘性挙動はばねとダッシュポットのモデルを組合せたレオロジーモデルを導入して表現されるため、一層モデルとしての色彩が濃くなり、現象論的な取扱い方に傾き勝ちである。更に、粘弾性においてさえ物性値決定の煩雑さを避けるために、予め3要素モデルや、5要素モデルに限定する場合が多かったが、これは最近緩和スペクトルの近似解を求めることによって容易に一般化モデル⁵³⁾⁵⁴⁾を求め得ることが赤木によって示されたので、今後は一般化 Maxwell モデルを用いた数値解析が広く用いられるだろう。また、近似遅延スペクトルから一般化 Voigt モデル（一般化 Kelvin モデルとも呼ばれる）を構築することも可能であり、この場合の数値解析は Voigt モデルから Maxwell モデルへの変換公式を用いて Maxwell モデルで解くか、または Zienkiewicz, Watson and King⁵⁷⁾の方法を用いればよい。

定ひずみ速度試験において、岩の変形・破壊挙動はひずみ速度に著しく依存することが Bieniawski⁵⁸⁾により求められている (Fig. 8)。また、一軸クリープ下における破壊のメカニズムが Scholz⁵⁹⁾によって追求されている。Cogan⁶⁰⁾は Opohonga 石灰岩と Ophir 頁岩に対する三軸クリープ試験を行って、体積増加は常に二次クリープを伴うこと、圧縮過程は時として初期クリープを伴うこと等、岩石の時間依存特性で体積変化が重要な役割を果たすことを明らかにしている。ただし、Bieniawski の試験は、自然乾燥条件下における砂岩の一軸試験であり、Cagan の試験は圧密排水試験の結果である。Kaiser and Morgestern⁶¹⁾は定ひずみ速度試験の結果から時間依存の強度特性を定める方法を

提案している。

粘塑性の理論で触れなければならないのは Perzyna の一連の労作であろう。Perzyna は Malvern の考え方と実験結果を発展させて、多軸応力下における弾/粘塑性、すなわち静的降伏曲面を越えた応力に対してのみ粘性挙動が現れる物体の構成法則の理論を完成させた。ちなみに、降伏前にも粘性をもつ物体は弾-粘塑性と定義され、この一般理論は Naghdi and Murch⁶⁵⁾によって提案されているが、その具体的な適用は未だ行われていない。赤井、足立、西は、堆積軟岩（大谷石）に対して、圧密排水・非排水クリープ試験を行って、体積膨張を伴う挙動、すなわち先行履歴応力以下の抱束圧状態における大谷石の時間依存特性を求め、これに Perzyna の理論を適用して、粘弾-粘完全塑性体としての構成法則を得ている。Zienkiewicz and Corneau⁶⁷⁾⁶⁸⁾および Zienkiewicz and Humphenson⁶⁹⁾の粘塑性体の数値解析はすべて Perzyna の理論を基にした弾/粘塑性体の解析であるが、これは $\Delta \epsilon^{VP} = \dot{\epsilon}^{VP} \Delta t$ の近似を行い、 $\dot{\epsilon}^{VP}$ には flow rule を導入して時間方向の数値積分を進めていく方法といえる。ここで、 ϵ^{VP} は粘塑性ひずみ、 Δt は時間増分である。なお、Olszak and Perzyna⁶⁴⁾が発表された IUAM Symposium, Grenoble (1964) で、村山・柴田の rate process theory が同時に発表されているのは興味深い。

岩質材料の粘塑性挙動を、降伏条件を組込んだレオロジーモデルで表す場合もある。この非線形レオロジーモデルの降伏条件に弾性ひずみエネルギーを用いて進行性破壊の解析を行った例もある。⁷⁰⁾⁷¹⁾

本会議の第3部門でも岩質材料の時間依存性を扱った論文は多数見うけられる。〔6〕はクリープ試験の応答関係を第2種 Volterra 型積分方程式で表してその核関数を求める方法、〔7〕は不均質・異方性を有する粘弾性体としての岩の構成則と記憶積分形で表して、その応答関数を求める方法を提案している。〔21〕は時間依存型のひずみ軟化特性を非線形レオロジーモデルを用いて説明しようとしたものであり、〔31〕は円形トンネルのライニングに働く荷重の時間変化を非線形レオロジーモデルで解析している。〔32〕は岩盤中の円形トンネルの挙動を一般化 Voigt 型非線形レオロジーモデルを用いて解析した。〔25〕はフラットジャッキで測定した覆工セグメントの径方向応力の変化をレオロジーモデルで説明しようとする試みを行っており、〔29〕はクリープしやすい岩盤中のアンカープレート挙動を粘弾性無限地盤中の剛体円板と仮定してその挙動を解析している。

3 水との相互作用

岩と水の相互作用で問題となるのは、前述のように、透水性、圧密、吸水、膨張、スレーキング等である。

均質なジョイント系を有する岩盤中の水と岩骨格との相互作用は、Serafim⁷³⁾によって総括されている。岩が充分大きな弾性係数を有していれば、浸透流場と応力場は分離することができるが、軟岩の場合は連成系で考えなければならない場合もあり、その場合は、⁷⁴⁾Biot の多次元圧密解析や応力・変形場と連成した浸透流解析⁷⁵⁾を行えばよい。近年は、ダイレイタンスーを含んだ非線形の応力場と流れ場を連成させることも盛んである。⁷⁶⁾⁷⁷⁾ 本会議の第3部門では、この連成問題を扱った論文はないが、[18]はガス層から揚水した場合の地表面の地下を浸透場と地表沈下が非連成した系で扱っている。また、[8]では応力、浸透、温度場が連成し、かつ、内部に各場の跳躍が存在するという凍結問題に対する定式化が試みられている。なお、浸透流の数値解析には境界要素法が使われ初めており、これは浸透解析には有効な手法と思われる。1972年にStuttgartで開催された ISRM Symposium on Percolation Through Fissured Rock において、ドイツ土質工学会の会長 H. W. Koenig は核および工業廃棄物の岩盤内貯蔵に伴う拡散問題（浸透流れと連成している）の重要性を指摘しているが、本会議でも [37] はこの話題に触れている。

き裂の発達した岩盤内の浸透流れは、き裂内の流れと多孔母岩内の流れと連成して考える必要がある。この連成場の支配方程式は Barenblatt, Zheltov and Kochina⁷⁹⁾によって与えられている。き裂性岩盤内の浸透流の数値解析は、これとは別に、き裂として線要素を導入した有限要素解析が川本、門田によって与えられている。⁸⁰⁾

含水率と応力場の連成場で (Biot と同じ仮説の下で) 膨張性岩の膨潤問題を解いているのが [17] である。水の場合 (moisture field) は簡単な問題に対しては解析的に解かれている (conformal mapping method)。また、[33] は膨張性地山中に NATM によって掘削されたトンネルの粘塑性数値解析を実施して、実測値と比較検討を行っている。

4 岩盤構造物とその数値解析

岩盤構造物の数値解析は、有限要素法が開発された当初より、数多く試みられてきたが、近年は増々より現実合った複雑な構成法則、連成問題、あるいは非線形動的問題等を扱うことが多くなった。現在、わが国の岩盤工学における話題の一つは何と言っても NATM であり、この問題に対してロックボルト・ライニングを組込んだ非線形解析（塑性、粘弾性、あるいは粘塑性）が行われることが多い ([27], [28], [33],

[36]) が、現実の岩盤に対するロックボルトの付着の評価はかなり難しい。この点が NATM における現時点における一番の問題であろう。[27] ではロックボルトと吹付けコンクリートの効果を明らかにするために、大型の模型実験を行い、FEM 解析と比較しているが、ひずみ軟化特性の考慮が必要であることを説明している。[28] では、支保効果を等価な内圧に置き換える試みがなされ、現場計測との比較が行われている。[33] は膨張性地山中の NATM の解析と計測を報告している。[36] は数値解析手法として積分方程式を用いて、三次元的な切り端の弾塑性解析を行っている。有限要素法は非線形性を容易に評価できるのに対し、境界要素法（積分方程式法）は無境界の評価に適し、また、要素数も少なくて済むという長所を有する。したがって、この両者の結合を計る試みがなされているのは当然であろう。なお、桜井⁸¹⁾ [26] は内空変位の測定結果を現場で直ちに評価するためには、ひずみによって破壊の評価を行うのが適切であると提案している。このように、NATM のもう一つの問題は、現場計測データの迅速・適切な評価と、そのフィードバックにあり、そのためには、より現場に適した解析法を開発することも肝要であろう。

地下掘削に関しては、その他、炭鉱跡の地表面沈下を論じた [19]、トンネル覆工セグメントにジョイント要素を用いて解析した [25]、特性方程式によって円形トンネル周辺の塑性解析を行う [30]、非線形レオロジーモデルによってトンネル周辺の緩みを論じた [31]、岩塩中のトンネルのクリープ挙動の測定と解析を行った [32]、近接トンネルの掘削を論じた [34]、三次元的な模型実験によってトンネル周辺の締め付け (squeezing) のメカニズムの解明を試みた [35]、ひずみ軟化型塑性モデルを用いて黒鉱山⁸²⁾の空洞まわりの破壊挙動を論じた [39] などがある。

非連続体の破壊挙動の解析を行うために川井によって開発された剛体ばねモデル (rigid body-spring model: RBSM) の岩盤力学への適用も種々試みられている ([15], [22], [38], [24])。ただし、[24] はオリジナルの RBSM と一部異なる。

[10] は掘削斜面の挙動の予測を FEM で行い、実測値と対比したものである。[9] は破壊斜面の逆算解析から岩盤の c , ϕ , σ_c を求めている。[12] は Goodman のジョイント要素とクリープの power law を用いて岩盤斜面のトップリングの解析を行ったものである。マルコフ鎖を用いて岩盤などの進行性破壊の安定性を確率的に論じた [11] は特異な論文である。

5 おわりに

1981年 ISRM Tokyo Symposium on Weak Rock の第3部門 —Specialized Theory and Analysis on

the Weak Rock—を総括するに当り、過去の ISRM の会議の Proceedings 等を再びひといてみると、岩盤力学成立以来変らぬ、この学問を取り囲む問題の複雑さと、解決の困難さに心を引き締められる。最近の岩盤力学の隆盛は、目をみはるものがあるが、今後この未踏の分野に挑む一人として努力を続けたいものと思う。

全般的な総括は、とても個人の力でなし得るものではなく、独断と偏見に満ちたレビューとなったが、寛容を願いたい。なお、動的問題は取扱った論文が岩盤内の弾性波速度に関する一編であったことと、紙面の都合により割愛した。

参 考 文 献

- 1) Enquiry on the Research Activities in the Field of Rock Mechanics, Proc. 1st Int. Congress of I.S.R.M., **III**, 627-671 (1966).
- 2) 仲野良紀, 土と基礎, **28**, 7, 1 (1980).
- 3) 仲野良紀, 土と基礎, **28**, 7, 37 (1980).
- 4) 赤井浩一, 足立紀尚, 西 好一, 土木学会論文報告集, **271**, 83 (1978).
- 5) Pacher, F., Proc. 2nd Int. Congress of I.S.R.M., **4**, 214 (1970).
- 6) Zienkiewicz, O. C., "The Finite Element Method in Engineering Science," 2nd and revised ed. (1971), McGraw-Hill, London (邦訳「基礎工学におけるマトリックス有限要素法」, 吉識, 山田監訳, (1975)培風館)
- 7) Jaeger, J. C., and N.G.W. Cook, "Foundamentals of Rock Mechanics," 3rd ed. (1979) Chapman and Hall, London.
- 8) Jaeger, J. C., "Elasticity, Fracture and Flow," 2nd ed. (1962), Methuen, London (邦訳「弾性・破壊・流動論」, 飯田訳, (1968) 共立全書)
- 9) Drucker, D. C., W. Prager, and H. J. Greenberg, Quat. Appl. Math., **11**, 4, 381 (1952).
- 10) Paterson, M. S., "Experimental Rock Deformation—The Brittle Field," (1978) Springer-Verlag, Berlin
- 11) Mogi, K., Proc. 4th Int. Congress of I.S.R.M., **3**, 123 (1979).
- 12) Egger, P., Proc. Euromech. Coll., No. 115, (1979) Grenoble
- 13) Donath, F. A., Bul. Geol. Soc. Am., **72**, 985(1961).
- 14) Bernaix, J., Proc. 3rd Int. Congress of I.S.R.M., Denver, **1-A**, 9 (1974).
- 15) Jaeger, C., "Rock Mechanics and Engineering," 2nd ed. (1979) Cambridge Univ. Press, Cambridge
- 16) 飯田隆一, 小林茂敏, 第3回岩の力学国内シンポジウム, 125 (1970).
- 17) Goodman, R. E., "Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks," (1976), West Pub., St. Paul (邦訳「不連続性岩盤の地質工学」, 赤井, 川本, 大西訳, (1978) 森北出版)
- 18) Lane, K., Proc. 1st Int. Congress of I. S. R. M., Lisbon, **3**, 223 (1966).
- 19) Bieniawski, Z. T., Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Part I, **4**, 395 (1967); Part II, **4**, 407 (1967); Part III, **4**, 425 (1967).
- 20) Cleary, M. P., J. Appl. Mech., Trans. ASME, **728** (1970).
- 21) Cleary, M. P., Int. J. Num. Meth. Eng., **10**, 679 (1976).
- 22) Cleary, M. P., J. Pressure Vessel Tech., Trans, ASME, **100**, 2(1978).
- 23) Hutchinson, J. W., and V. Tvergaard, Int. J. Solids Structures, **17**, 451 (1981).
- 24) Pietruszczak, St., and Z. Mróz, Int. J. Num. Meth. Eng., **17**, 327 (1981).
- 25) Vardoulakis, I., M. Goldscheider, and G. Gudehus, Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech., **2**, 99 (1978).
- 26) Kolymbas, D., Ingenieur-Archiv, **50**, 131 (1981).
- 27) Mróz, Z., "Mathematical Models of Inelastic Material Behaviour," (1973) Univ. of Waterloo Press, Waterloo, Canada
- 28) Fung, Y. C., "Foundations of Solid Mechanics," (1965) Printice-Hall, Englewood Cliffs (邦訳「固体の力学/理論」, 大橋, 村上, 神谷訳 (1970) 培風館).
- 29) Owen, D. R. J., and E. Hinton, "Finite Elements in Plasticity—Theory and Practice," (1980), Pineridge Press, Swansea, U. K.
- 30) Naylor, D. J., G. N. Pande, B. Simpson, and R. Table, "Finite Elements in Geotechnical Engineering," (1981) Pineridge Press, Swansea, U. K.
- 31) 山田嘉昭, "塑性・粘弾性," (1980) 培風館
- 32) Maier, G., and T. Hueckel, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., **16**, 77 (1979).
- 33) Mróz, Z., J. de Mécanique, **2**, 1, 21 (1963).
- 34) Prévost, J. H., and K., Höeg, Géotechnique, **25**, 2, 279 (1975).
- 35) Akai, K., Y. Ohnishi, A. Yashima, Preprints 1 of Proc. Int. Symp. on Weak Rock, 76 (1981) Tokyo
- 36) Kawamoto, T., Y. Ichikawa, and Y. Obara, Proc. Int. Conf. on Constitutive Laws for Engineering Materials: Theory and Application, Tucson, Arizona, 1983 (to be appeared)
- 37) 足立紀尚, 小川豊和, 土木学会論文報告集, **295**, 51 (1980).
- 38) Dragon, A., and Z. Mróz, Int. J. Engng. Sci., **17**, 121 (1979).
- 39) Dragon, A., and Z. Mróz, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., **16**, 253 (1979).
- 40) 山富二郎, 下谷高瀧, 山口梅太郎, 日本鉱業会誌, **95**, 1100, 721 (1979).
- 41) Dragon, A., Archives of Mechanics, **28**, 1, 13 (1976).

- 42) Mróz, Z., V. A. Norris, and O. C. Zienkiewicz, *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech.*, **2**, 203 (1978).
- 43) 川本眺万, 渡嘉敷直彦, 石塚与志雄, *材料*, **30**, 517 (1981).
- 44) Bažant, Z. P., *Int. J. Solids Structures*, **16**, 873 (1980).
- 45) 大西有三, 八嶋 厚, 吉田 順, 第16回土質工学研究発表会, 1313 (1981).
- 46) Truesdell, C., and W. Noll, "The Nonlinear Field Theory of Mechanics", Sect. 99, in *Handbuch der Physik*, III/3, 401 (1965).
- 47) Gudehus, G., and D. Kolymbas, *Proc. 3rd Int. Conf. Num. Meth. Geomech.*, Archen, 319 (1979).
- 48) Roscoe, K. H., and J. B. Burland, in "Engineering Plasticity" (1968) ed. by Heyman and Leckie, Cambridge at the University Press, 535
- 49) Schofield, A., and P. Wroth, "Critical State Soil Mechanics," (1968) McGraw-Hill, London
- 50) Zienkiewicz, O. C., C. Humpherson, and R. W. Lewis, Chap. 4 in "Finite Elements in Geomechanics" (1977) ed. by Gudehus, John Wiley & Sons, London, 151 (邦訳「地盤力学の有限要素解析」, 1 (1981); 2 (1982), 川本, 桜井, 足立訳, 森北出版)
- 51) 田中忠次, 農業土木試験所報告, **18**, 101 (1979).
- 52) Langer, M., *Proc. 4th Int. Congress of I. S. R. M.*, **3**, 29 (1979).
- 53) 赤木知之, 土と基礎, **25**, 3, 47 (1977).
- 54) 赤木知之, *材料*, **30**, 898 (1981).
- 55) 赤木知之, 大野大明, 色部 誠, 土木学会論文報告集, **214**, 1 (1973).
- 56) 山本三三三, "材料科学のための物体の変形学," (1972). 誠文堂新光社
- 57) Zienkiewicz, O. C., M. Watson, and I. P. King, *Int. J. Mech. Sci.*, **10**, 807 (1968).
- 58) Bieniawski, Z. T., *Rock Mechanics*, **2**, 3, 123 (1970).
- 59) Scholz, C. H., *J. Geophys. Research*, **73**, 10, 3295 (1968).
- 60) Cogan, J., *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geotech. Abstr.*, **13**, 1 (1976).
- 61) Kaiser, P. K., and N. R. Morgenstern, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **18**, 153 (1981).
- 62) Perzyna, P., *Quat. Appl. Math.*, **20**, 321 (1966).
- 63) Perzyna, P., in "Advances in Applied Mechanics" Vol. **9** (1966), ed. by Chernyi *et al.*, 243
- 64) Olszak, W., and P. Perzyna, in "Rheology and Soil Mechanics," IUTAM Symp. Grenoble (1964), Published from Springer-Verlag, 47 (1966) Berlin
- 65) Naghdi, P. M., and S. A. Murch, *J. Appl. Mech., Trans. ASME*, **30**, 321 (1963).
- 66) 赤井浩一, 足立紀尚, 西 好一, 土木学会論文報告集, **282**, 75 (1979).
- 67) Zienkiewicz, O. C., and I. C. Coremeau, *Int. J. Num. Meth. Eng.*, **8**, 821 (1973).
- 68) Zienkiewicz, O. C., and I. C. Coremeau, in "Computing Methods in Applied Sciences and Engineering, Part 1" *Int. Symp. Versailles* (1973), ed. by Glowinski and Lions, Published from Springer-Verlag (1974) as *Lec. Notes in Comp. Sci.* **10**, 259
- 69) Zienkiewicz, O. C., and C. Humpherson, Chap. 3 in "Numerical Methods in Geotechnical Engineering" ed. by Desai and Christian (1977), McGraw-Hill, New York, 116
- 70) Serata, S., S. Sakurai, and T. Adachi, in *Proc. 11th Symp. Rock Mech.*, Univ. Calif., Berkeley, **1**, 431 (1969).
- 71) Adachi, T., S. Serata, and S. Sakurai, in *Proc. 11th Symp. Rock Mech.*, Univ. Calif., Berkeley, **2**, 293 (1969).
- 72) Ichikawa, Y., H. Kuroda, T. Akagi, and T. Kawamoto, *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech.* (to be appeared)
- 73) Serafim, J. L., Chap. 3 in "Rock Mechanics in Engineering Practice" (1968), ed. by Stagg and Zienkiewicz, John Wiley & Sons, London
- 74) Biot, M. A., *J. Appl. Phys.*, **12**, 155 (1941).
- 75) 大西有三, 村上 毅, 土木学会論文報告集, **298**, 87 (1980).
- 76) Prévost, J. H., *EM1, Proc. ASCE*, 169 (1981).
- 77) Zienkiewicz, O. C., V. A. Norris, L. A. Winnicki, D. J. Naylor, and R. W. Lewis, Chap. 12 in "Numerical Methods in Offshore Engineering" ed. by Zienkiewicz, Lewis and Stagg (1978), John Wiley & Sons, Chichester
- 78) Banerjee, P. K., R. Butterfield, and G. R. Tomlin, *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech.*, **5**, 15 (1981).
- 79) Barenblatt, G. I., Iu. P. Zheltov, and I. N. Kochina, *PMM*, **24**, 5, 852 (1960).
- 80) 川本眺万, 門田俊一, 発電水力, **147**, 7 (1977).
- 81) Brady, B. H. G., and A. Wassiyng, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **18**, 475 (1981).