

1 ま え が き

鉾山分野で「岩盤」に関連した研究は実に多く、坑内支保や盤圧をテーマとしたものは三十有余年の昔から研究が行われてきた。1938年にはR. Fenner が盤圧の問題を弾性理論的、また塑性論の立場から考察を行つた。⁽¹⁾ 我国に於ては1940年に杉原武徳先生が坑内空洞の周囲の地圧を、弾性理論を駆使して解説しておられる。⁽²⁾ しかし各国多数の学者によつて盤圧の問題にかぎらず、岩盤に関する多方面の研究が行われるようになってしたのは終戦後のことである。

1951年には西欧諸国の間ではじめて岩盤をテーマとした国際会議が開催された。⁽³⁾ これは主として炭坑の盤圧とその制御法が主題であつたので、その論文も切羽周囲の盤圧と移動を論じたもの、盤圧と移動の測定、支保法、山はね、落盤などに関するものであつた。この会議はその後4年互に開催され、盤圧の計測や支保の分野では著るしい進歩をとげた。ソ聯を中心とした東欧諸国の間でも同様なテーマの国際会議が開催されている。⁽⁶⁾

米国に於てはBureau of Mines の研究所の活動に最も刮目すべきものが多いが、大学関係にも注目すべきものがある。最近では米国の地質、土木、地球物理、鉾山方面に活躍する研究者による共催の岩石力学会議が毎年のように開催されており、その内容も多岐にわたつて著るしい進歩が見られる。

2 岩 盤 研 究 の 分 類

鉾山界ではその仕事の性質上、岩盤を対象とした研究が非常に多いわけであるが、そのなかから主なテーマを拾うとつぎのように分類することができる。

A. 基礎研究（理論）

- (1) 均質等方体内の弾・塑性研究
- (2) 岩石の破壊（一軸、三軸下など）
- (3) 岩石の静特性、動特性（弾性常数）
- (4) レオロジー、力学的構造模形
- (5) 異方性岩盤の地圧、その他の性質

B. 基礎研究（実験）

- (1) 光弾性実験（二次元、三次元凍結法、異方性）
- (2) パロダイナミクスによる実験（光弾性、ルーフボルト、地表沈下）
- (3) 模形地層による坑道周囲の破壊

C. 応用研究

- (1) ルーフボルト法とボルト施工装置

- (2) 弾性波による弾性常数の測定, 岩盤堅固さの判定
- (3) 盤圧計による支保圧 (盤圧) の測定
- (4) 穿孔, 切削, 破碎 (jet-Piercing, 砲弾穿孔, 電気穿孔)
- (5) 発破, ANFOの発達, 核爆発 (地下防護, クレータの研究, 運河開さく)

D. 岩盤計測

- (1) ボアホール内の光学的調査 (Borehole Camera)
- (2) 岩盤変形度の測定
- (3) ヒズミ計の利用, 光弾性皮膜法
- (4) 亀裂音の測定と崩落予知法, 浮石探知
- (5) 超音波法による岩盤亀裂, 層厚の測定
- (6) 地圧測定 (ボアホール径変化, 表面ヒズミ変化, 超音波速度測定)

3 岩盤力学と計測の現況

岩盤を異方性体と考えこれを弾性論の立場から論ずるようになったのは比較的最近のことである。⁽⁷⁾ 実際, いわゆる '岩盤' は色々な物理的性質を異にする岩石が互に成層し, 褶曲し, あるいはまた断層を生じて集塊状をなしているものであつて, 比較的小範囲の岩盤を考えても, 岩目や節理の発達した岩石の集塊体と考えるべきで, そのように不均質, 非等方体であるところに岩盤としての特性が存在すると云える。岩質を異にする地層が成層状態をなす岩盤, あるいは一定方向に岩目や節理の発達した岩盤では, 弾性的性質が方向によつて変化する弾性係数を有すると考えられるので, これを等質異方性体と見做し理論的にあるいは光弾性実験により研究が進められている。しかしこの研究に関しては直交異方性板の応力の問題として機械学, 土力学方面が一步先んじておりこゝであらためて紹介するまでもない。異方性岩盤を考慮した光弾性実験では F. Schuermann⁽⁸⁾ が 1960 年に国際会議で発表している。また断層の存在による上下盤の応力分布の擾乱は光弾性実験により比較的容易に解明され得る一例である。⁽⁹⁾ 炭坑切羽の光弾性による模型実験や三次元凍結法による実験も行われるに至つた。光弾性材料としてはエポキシ樹脂やゼラチンが使用される。

岩石の脆性破壊に関しては Griffith の理論が注目されている。Griffith は固体の理論的破壊強さと現実に観測される破壊強さとの間には大きな相違のあることを指摘し, この相違は固体内に存在する微小欠陥に起因するとした。

彼はこの小欠陥の形をだ円状と仮定し, 欠陥にもとづく応力を計算し, ヒズミエネルギーを計算した。Murrell はこの問題をとりあげ論じており,⁽¹¹⁾ W. F. Brace もこの観点から岩石の破壊を研究した。⁽¹²⁾ それらの研究はいづれも Griffith の理論を基本的には認めているものである。

岩石の静特性と動特性を同一岩石について比較検討すると静特性より求めた弾性常数は音波による動特性より求めた値より小さいことが一般に指摘されている。⁽¹³⁾

R. B. Sutherland⁽¹⁴⁾ はこの両者の相違をヤング率 (E), 剛性率 (G) およびポアソン比 (μ) についてさらに精しく検討した。彼の実験によれば E_d は E_s より 4~25% 大きく, 縦波から求めた E_d と横波から求

めた E_s は殆んど同一である。また μ_s は μ_d よりかなり大きくなる。これは μ を E と G を含む計算式から求めるため、両者に2%の誤差があれば μ は20%の誤差となることを指摘している。 G_d は E_s や μ_s より計算で求める G_s より大きくなるがその差は12~29%であつた。また $E_s < E_d$ の理由を岩石試料中のキャビティ、クラックその他の弱線に起因すると説明している。また静的に E を求める時は試料にかなり強い応力を加えることになること、低応力下の状態の岩石の常数を求めるときは音波法の方が優れており時間的にも早く結果が求まり、試験も容易であり、しかも経済的であると結論している。

岩石の物理性をレオロジーの立場から論じ岩石の力学的構造模型をつくり上げようとする試みが盛んとなりつつある。^{(15)~(17)} これは地質学上重要なばかりでなく、坑内岩盤の流動を考究する場合にも重要である。この研究は土木関係でもコンクリート材料に関し集められているが、岩石試料としてばかりでなく岩盤特性を取り入れた考察を強く要望し度い。

模型試験体に遠心力を加えることにより試験体に物体力を有せしめ、試験体の変形や応力を測定しようとする研究がある。これを Barodynamics と称するが米国コロンビア大学鉱山科の P. B. Buckley 教授の開発した実験装置がある。⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾ これは模型試料の寸法比を実物と比例的に定めると重力下の実物と同一の応力状態を再現できることになるので研究上便利である。光弾性実験もこれで行うことができる。Bureau of Mines では大型の試験装置によりルーフボルトの効果、地表沈下、空洞周囲の崩落などの諸現象を研究している。⁽²⁰⁾

石膏その他の材料を使用して模型地層を作りあげ、これを二次元的にまたは三次元的に加圧し、模型地層中に開けられた坑道の周囲の破壊の発生状態などを調査して坑道形状、坑道支保などを研究する方法がある。ドイツ石炭協会研究所の装置は三次元的に加圧できる相等大きなものであるが、側圧をいろいろ変えて実験すると亀裂発生の模様も変り、光弾性実験と対比して研究すると効果的である。ソ聯では二次元的であるがこれとは異つたさらに大型の実験を行つている。⁽²¹⁾

つぎに主として技術上のテーマについて簡単に述べる。

ルーフボルト技術は鉱山炭坑のみならず建設方面でもすでに利用されており、上盤や側壁、さらに盤膨れに対しても効果的であることが実証されているが、Bureau of Mines では締付装置と締付力の測定装置を開発した。⁽²²⁾

岩盤の力学的性質を識る方法としてはジャッキ法や水圧法のような静的方法よりも弾性波法のような動的方法による方が色々な理由から合理的でありまた経済的であると云われているが、⁽²³⁾⁽²⁴⁾ 小野寺氏は土木鉱山などの比較的小地域の調査に適した計測器を開発した。これは弾性波到達時間を $1/10000 \text{ sec}$ の精度まで計測できるものである。⁽²⁵⁾

岩石試料のバルス伝播速度を測り、それより計算で求めたヤング率を E_d 、現場の弾性波速度から求めたヤング率を E_a とすれば $\text{Crack coefficient} = (E_d - E_a) / E_d$ なる係数が考えられ、これは岩盤の岩目、節理、断層その他の亀裂などの存在程度を表わす一つの目安とされているが、小野寺氏は $E_a / E_d =$ 岩盤の堅固さ (soundness) とし、これにより、岩盤を5つのグループに類別している。⁽²⁶⁾ 岩盤の X, Y, Z 軸方向の各々の E_a を求めれば Crack coeff. あるいは Soundness から岩目の方向も判明するであろう。

岩盤内部に存在する亀裂、岩目などの多寡、地層の厚さなどを測定する音波測定器がある。これは20 KC 以下の音波を使用するもので米国では transmitter と receiver を使用し31 in の石炭層を、またさらにその上部に存在する24 in の厚さの頁岩層を測定した。さらに小型化にするためトランジスター化することと、周波数と beam formation の問題を解決し性能の向上をはかると云う。²⁹ 同様な原理であるが reflectoscope なるボアホール挿入式測定器がある。^{30,31} これはチタン酸バリウムクリスタル製の transducer 1 個を使用し、これで transmitter と receiver をかねさせる。ボアホールの軸に直角方向に音波を発射す。transmitter を回転しつつ、ボアホール軸上に移動することによりボアホールの周囲全面5 ft の半径以内の亀裂などの多寡を識ることができると云う。

鉾山では地圧測定の研究が盛んにづけられている。これは地圧の日時の経過に伴う変化を測定しつづける場合と、絶対地圧 (Absolute Pressure) を測定しようとする場合とある。地圧測定と云つてもヒズミ変化の測定に帰着するものが多く、従つて抵抗線ヒズミ計、半導体ゲージ、Maibak 振弦式³²、差動変圧器式³³、磁わい式³⁴、さらに光弾性皮膜法などが発達してきた。絶体地圧の測定は relaxation method によるわけであるが、鉾山では坑道周辺そのものは発破による亀裂が発達していることが多いから、浅いボアホールを穿孔し、その底面にヒズミ計を接着するか、あるいは孔径一ぱいに計測器をくさび止めして、先のボアホールの外周にさらにスリット状に穿孔し relaxation を行わしめて、ヒズミ変化や孔径変化を測定し、その岩石試料から E や μ を求めて計算により主応力の方向や大きさを算出する。

(以上)

Recent Development of Rock Mechanics in Mining Field.

by Univ. of Tokyo, Mining Eng. Ko SUZUKI

In this paper, as the fundamental research, stresses and strains in anisotropically elastic ground, brittle fracture of rocks, comparison of static and dynamic properties of rock, rheological study of rocks, photoelastic experiments by anisotropical material and of 3-dimensional problem, barodynamics tests, and model tests of underground cavities are explained. And also, as the technical development, roof-bolt anchorage testing instrument and measuring devices for anchorage force, travel-time measuring instrument of elastic wave for civil and mining engineering, crack coefficient and ground soundness, use of sonic techniques in exploring cracks, fracture and seam depth in ground and measuring techniques on earth's pressure are described.