

京都大学工学部 正員 赤井浩一
 京都大学工学部 正員 山本和夫
 熊谷組 正員 有岡正樹

1. まえがき

節理・片理・層理などの地質学的不連続面を含む異方性片岩の破壊特性を調べるために、打継ぎ面を有するモルタル供試体により予備的実験を行ってきた。本研究ではそれらの結果に基づいて片理面が比較的規則正しい愛媛県産の緑泥片岩と石墨片岩を用いて一軸および三軸圧縮試験を行ない、片理面の破壊に及ぼす影響について検討した。

2. 実験試料および実験方法

実験に用いた試料は緑泥片岩についてはA～Eの5個の岩塊から、石墨片岩についてはF～Lの7個の岩塊から作成された。これらの岩塊にはいずれも規則正しい明確な片理面とともに若干の石英脈も含まれているが、外観から判断して緑泥片岩についてはB岩塊を除いて他はほぼ同一、また石墨片岩については全てがほぼ同一なものと考えることができる。

(1)一軸圧縮試験 超音波伝播速度測定による弾性率の試験に供用するために、緑泥片岩についてはA・B岩塊から径3.2cm、石墨片岩についてはF岩塊から径2.9cmの円柱供試体を作成して実験を行なった。片理面の傾き α (荷重方向からの傾き)は $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ の7種類とした。使用した試験機は島津製リレー式万能試験機である。

(2)三軸圧縮試験 本試験は全て1辺約4.4cmの立方体供試体を作成して、3主応力を独立にコントロールできる大型三軸試験機を使用した。打継ぎ面を有するモルタルの予備実験により打継ぎ面の傾きが約 30° の場合にその影響が最も大きいことがわかっているので、ここでは緑泥片岩C～E岩塊から $30^\circ \sim 60^\circ$ 供試体および片理面の影響の少ない $0^\circ \sim 90^\circ$ 供試体の2種類を作成して平均主応力一定試験($\sigma_{oct} = 1500 \text{ kg/cm}^2$)を行った。また石墨片岩G～L岩塊から $\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ および 90° の6種類の供試体を作成して、拘束圧の等しい三軸圧縮試験を行なった。なお端面摩擦の影響を少なくするために、シリコングリースを塗布した0.2mm厚のラバーシートを用いた。

3. 実験結果と考察

図1に一軸圧縮試験における片理面の方向と強度の関係を示す。片理面の方向が強度に及ぼす影響は全体的に従来の予備実験と同一の傾向を示し、 $\alpha = 30^\circ$ で強度低下が最も著しい。3種の岩石を比較すると片理面の影響がほとんどないと考えられる $\alpha = 90^\circ$ の場合に対する $\alpha = 30^\circ$ 付近の最大の強度低下率は緑泥片岩Aにおいては88%にも及び、緑泥片岩Bで81%、石墨片岩で77%となっている。しかし、低下率の大きい α の範囲は逆で、石墨片岩Fにおいては α の $0^\circ \sim 75^\circ$ の広範囲で50%以上の低下率を示している。写真1は緑泥片岩Aにおける破壊様相を示す。

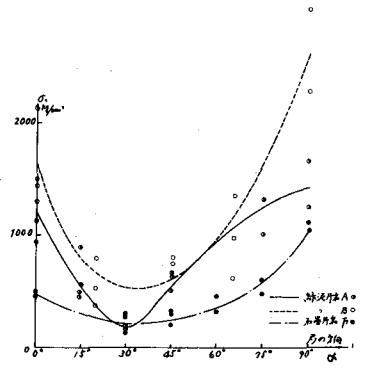


図1 一軸圧縮試験における α と強度の関係

破壊の様相については大きく3つに分けて片理面でのへき開破壊（I型）、片理面に沿うすべり破壊（II型）および片理面を横切るすべり破壊（III型）の型が認められる。この破壊様相と強度の間には密接な関係があつて、緑泥片岩A・Bについては若干の強度低下がある $\alpha = 0^\circ$ においてI型、強度低下の著しい 30° においてII型および強度低下が少ない 75° 以上においてIII型となつていて、その中間の α においてはこれらの混合型となつていて、この種の結晶片岩は構成する鉱物の並行配列により線構造がかなり明確に現われていて、片理面の傾きが同じ 0° でも強度低下率は線構造に平行な 0° において20%、線構造に垂直な 0° において42%とかなり



写真-1 緑泥片岩における破壊様相

異なつていて、また石墨片岩Fについては線構造が明確でなく、薄片葉状の扁平粒子の重合体に近く全体的な破壊の様相は緑泥片岩の場合と同様であるが、 $\alpha = 0^\circ$ において圧屈に似た様相と示したり、 $\alpha = 30^\circ$ において2~3の片理面に渡つて沿うすべり、 $\alpha = 60^\circ, 75^\circ$ においてより多くの片理面に渡つて沿うすべりが見受けられる。

図2に石墨片岩を用いて行なつた拘束圧の等しい三軸圧縮試験結果を示す。0~200 kg/cm²（地中約800 m深さに相当）の拘束圧の範囲では拘束圧の増加に伴う強度の増加は30度供試体の低い拘束圧の域を除いてほぼ直線的である。その勾配は0度供試体を除いて余り差異はなく、この拘束圧の範囲では $\alpha = 30^\circ \sim 45^\circ$ における片理面による強度の低下率は依然として存在している。モルタルによる予備実験結果およびDonathによる

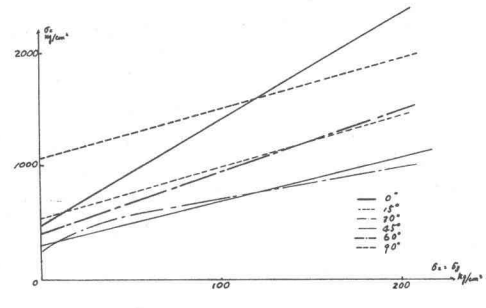


図-2 石墨片岩における三軸圧縮試験

粘板岩の実験結果においては、90度供試体の一軸圧縮強度の70~80%の拘束圧の段階に至つて90、0および75度供試体において強度増加の勾配はゆるくなり、この片理面の影響は少なくなつていて、破壊の様相については、低い拘束圧の段階では一軸試験の場合と同様であるが、100 kg/cm²以上の高い拘束圧になると0~30度供試体において、ある幅をもちたせん断域を形成するものが現われる。このせん断域の形成はモルタルの予備実験には見られないもので薄片葉状の片岩に特有なものと考えられます片理面に沿う分離が生じて圧屈および荷重の偏心を誘発し、その後密接する分離した片理面が結合したものと推測される。しかし、せん断域が高い拘束圧で現われているということは、破壊後の荷重状態にも1つの成因があると考えられる。

図3に片理面の方向と破壊角の関係を示す。図中せん断域の方向は別に取扱いX印で示している。0~30度供試体においては破壊角は片理面の方向とほぼ一致し、45以上の供試体では破壊角は片理面の方向よりも小さい。45および60度供試体では片理面の影響を受けたものとそうでないものがあつて値はかなり散らばりがある

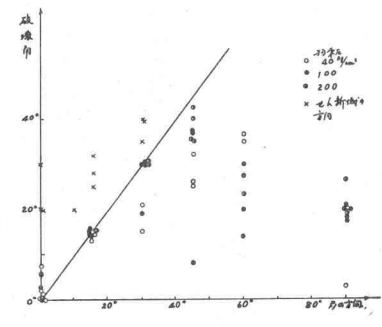


図-3 石墨片岩におけるalphaと破壊角の関係

が、90°供試体では20°前後でほぼ一定している。これらの結果は Donath の粘板岩による実験結果とかなりよく似た傾向を示している。またせん断域の角度は片理面の方向が0°~30°において20°~40°となっている。

図4に0, 40, 100および200 kg/cm²の各拘束圧における片理面の方向と強度の関係を示す。曲線は先述したように約30°を最小にした下に凸の放物線型を示し、拘束圧の増加とともに0°および60°以上における強度低下は少なくなつて、30°における曲線の曲率は小さくなつてきているのが注目される。この傾向は Donath の粘板岩の試験とほとんど類似しているが、モルタル予備実験においては顕著ではない。この曲線の型は片理面の強度および密度などの特性に左右されるものと考えられる。ここでモルタルの予備実験で比較的良好一致を示した Mohr-Coulomb の規準を発展させた Jaeger の理論と比較するため、図中 Jaeger の理論による値を併示している。この Jaeger の理論に適用した片理面に影響しない部分のせん断特性としては90°供試体における実験結果より Mohr の円を描き、その包絡線から次式を与えている。

$$\tau = 275 + \sigma \tan 39^\circ \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (1)$$

また片理面のせん断特性としては30°および45°供試体において片理面上ですべりを起こしたもののから、片理面上の $\tau \sim \sigma$ 関係を求めて次式を与えている。

$$\tau = 125 + \sigma \tan 26^\circ \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (2)$$

一軸圧縮試験の場合を除いて15°~45°の範囲で比較的に一致している。45°以上においては理論値が大きい値を示しているが、これは石墨片岩においては片理面密度が大きく、隣接する片理面の相互作用によるものと考えられる。

つぎにこの種の異方性片岩が主応力空間内でのような破壊曲面を有するかについて、モルタルの予備実験結果に基づいて、片理面の影響が最も小さい0°~90°供試体と最も大きい30°~60°供試体の2種類について $\sigma_{oc} = 1500 \text{ kg/cm}^2$ 一定試験を行なった。実験は主応力パラメーター λ を -1, 0, 1 と変化させて全域にわたって行なった。

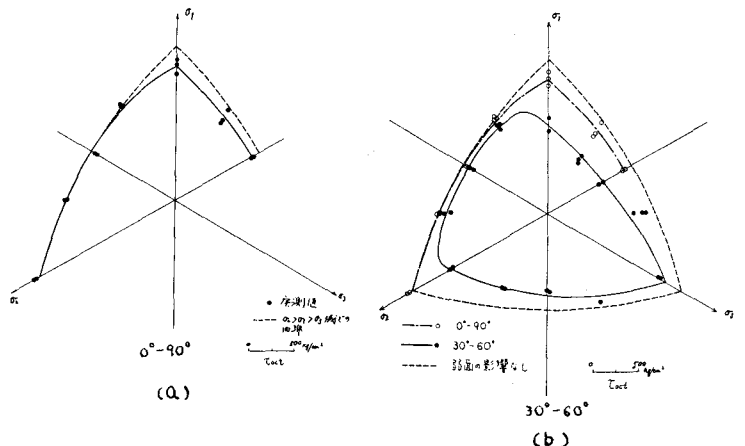


図5 緑泥片岩における π 平面上 ($\sigma_{oc} = 1500 \text{ kg/cm}^2$) の破壊曲線

図5(a)および(b)にそれぞれ0°~

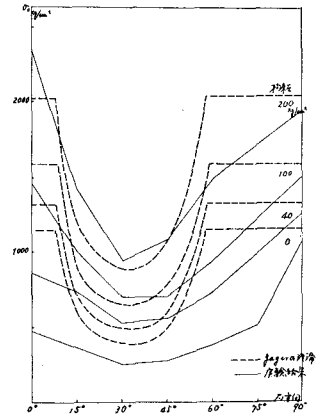


図4 石墨片岩における三軸圧縮試験結果と Jaeger の理論の比較

90°供試体および30°-60°供試体のものを示した。図中の破線は片理面の影響がほとんどなく最大強度を示す0°-90°供試体の $\sigma_2 > \sigma_1 > \sigma_3$ 域のものを、比較のために全域に拡張したもので、等方的なものの破壊曲面を与えるものである。写真2(a)および(b)はそれぞれの破壊様相の一例を示したものである。

0°-90°供試体においては $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 域および $\sigma_2 > \sigma_1 > \sigma_3$ 域において片理面の影響は見られず、破壊は片理面に交叉して生じている。これに対して $\sigma_1 > \sigma_3 > \sigma_2$ 域では破壊は片理面に沿ったものが多く、強度も片理面の影響を受けて若干低くなっている。30°-60°供試体においては σ_2 が最小主応力の域で片理面の影響による強度低下は著しく、0°-90°供試体に比べて σ_{oct} の値で40%にも達している。この域での破壊はほとんどすべて片理面に沿うすべりによるもので、石墨片岩に見られたようなせん断域の形成は見られなかった。また σ_1 が最小主応力の域でもかなりの影響が見られるが、この域では破壊面は σ_2 - σ_3 面に平行に生じ易いので、片理面の密度が大きい時に隣接する片理面の相互作用により各片理面に生じた短かいクラックが連続することが考えられる。 σ_3 が最小主応力の域では破壊面は片理面に直交して生じ易いので、片理面の影響はほとんど見られなかった。

したがって、この種の片岩の破壊曲面は π 面上の切口が図5(b)に示すようなひずんだ幾何丸味を帯びた三角形に近い偏平な三角錐のようなものを推定できる。

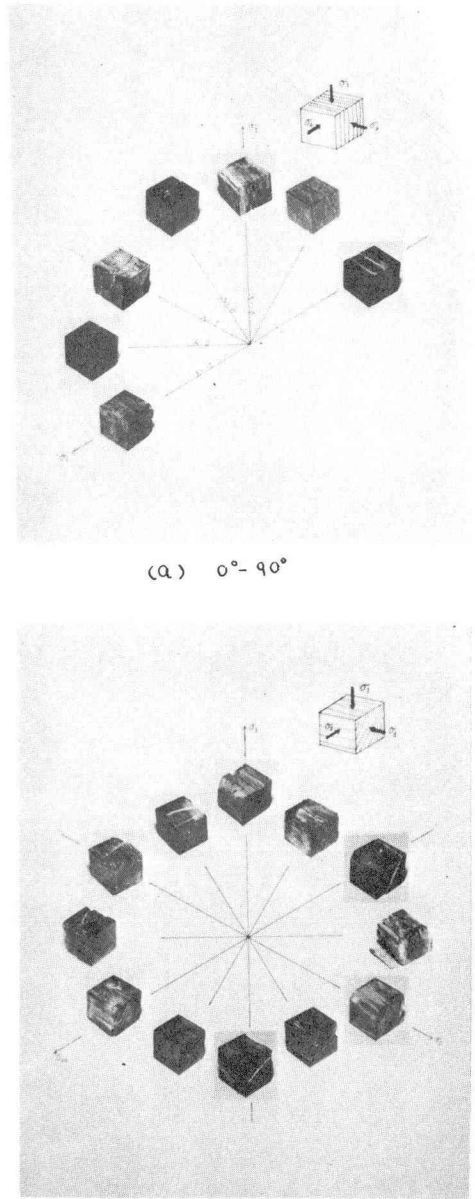
4. あとがき

本実験で得られた結果をまとめるとつぎのようである。

- 1) 片理面が破壊強度に及ぼす影響は片理面と最大主応力のなす角の広範囲にわたって見られ、とくに30°付近において著しい強度低下を示した。
- 2) この種の片岩においては線構造の方向が強度に及ぼす影響が見られた。
- 3) 薄片葉状の石墨片岩において高拘束圧のもとでせん断域の形成が見られた。
- 4) 主応力空間内での破壊曲面は σ_2 および σ_1 の最小主応力域で片理面の影響をもつひずんだ三角錐に近いものとなる。

実験には京都大学大学院生香川和夫君の助力を得たので謝意を表す。

1) 有岡・香川：異方性岩石の弾性挙動に關する一考察，昭和44年度(期)西支部年次學術講演会(1969.5)



(a) 0°-90°

(b) 30°-60°

写真-2 緑泥片岩における破壊様相