

(20) 掘積岩の中間主応力効果と残留強度特性について

北海道大学工学部

地質調査所

北海道大学工学部

高橋 学

小出 仁

木下 重教

1. はじめに

地下岩盤内部は三つの主応力が異なる三次元応力下にあることが種々の地圧測定^{1)~3)}により観測されている。したがって、岩盤の力学的挙動を把握するためには、三つの主応力を独立に加えられる装置を用いた室内試験が必須である。茂木⁴⁾は封圧下で二軸圧縮試験を行なうという方法で、より一般的な応力場を再現することに成功した。本研究は茂木式の三軸圧縮試験装置を用いることにより、50 MPa以下の低封圧領域における掘積岩の強度特性、特に中間主応力効果、について調査したものである。試験は必ずしも予測の他に弾性波伝播速度の予測も行なった。

2. 試験方法

図1は載荷前の供試体を最小主応力方向から見た場合の模式図である。最大主応力(σ_1)と中間主応力(σ_2)は二組の剛体ピストンにより、最小主応力(σ_3)は油圧により負与される。最大と中間主応力方向のみずみはクロス型箔ゲージで、最小主応力方向の変位は変位変換器で測定した。中間主応力方向の端面拘束を減じるために、側方エンドピースと供試体との間にはテフロンシートとシリコングリースを挿入した。

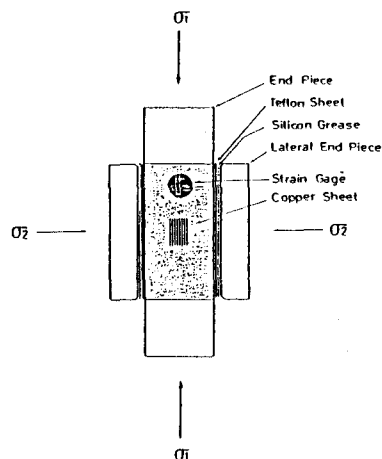


図1 最小主応力方向から見た供試体の組み立て

図2は載荷経路を示したものである。同図(a)は従来の二軸圧縮試験における経路である。(b)、(c)は中間主応力方向作用した場合の載荷経路である。(b)では中間主応力を先に負与した後、最大主応力方向の負与に入ることに対し、(c)は中間主応力値まで最大・中間の主応力方向の負与を同時に行い、その後最大主応力の負与のみを継続する。本実験では(b)を主に用い、(c)は補助的に用いた。なお、変位量の測定は図3の太線圧印で示される領域で行なった。

図3は弾性波の測定の様子を中間主応力軸方向から見た場合の模式図である。圧電素子型のトランスデューサは供試体の最小主応力面上の中央部に一組設置した他に下部のエンドピースの中にも組み込んでいる。

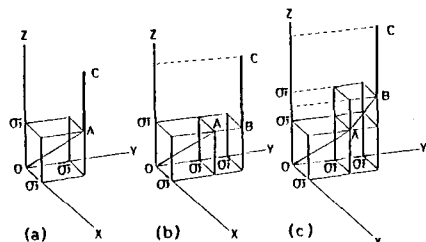


図2 載荷経路

3. 強度特性

3.1 強度におよぼす中間主応力の影響

図4(a)~(d)は白炭砂岩、細粒大理石、9張炭鉱産頁岩、幌内炭鉱産砂岩の破壊時における最大主応力と中間主応力との関係を示したものである。いずれの岩種においても強度に違い、次の傾向が認められる。1) 少ないとき、中間主応力が小さい(すなわち、 σ_2 に近い)時には中間主応力の増加に伴って強度は増加する。2) 中

向主応力が大きくなり、最大主応力に近づくにつれ、破断度は逆に減少する傾向を示すものが多い。3) 破断度度には、中主応力効果は最小主応力の増加と共に増加する。4) 3)の傾向は、白炭砂岩ほど顕著に認められるので、中主応力効果は脆性的な岩石よりは延性的な岩石の方が大きいと言える。この事から、さらに、封圧の増加に伴ない岩石は脆性状態から延性状態へと遷移するので、同一の岩種でも最小主応力が異なる場合は中主応力効果が変化する可能性があるものと推定される。

図-3 弾性波の測定模式図と得られた波形の一部

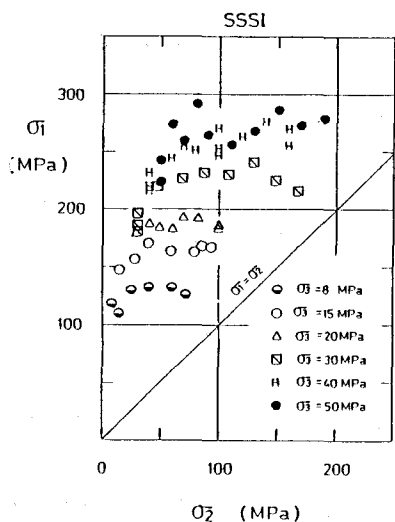
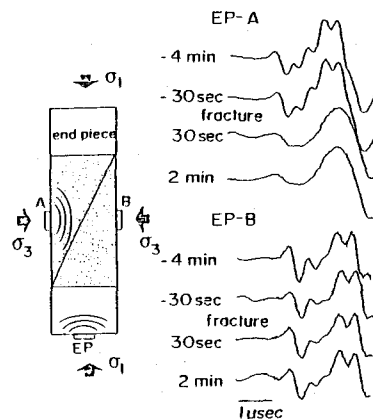
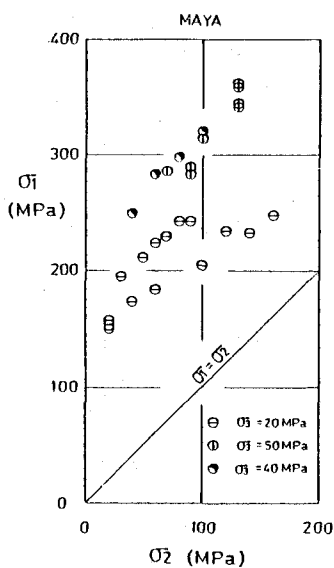
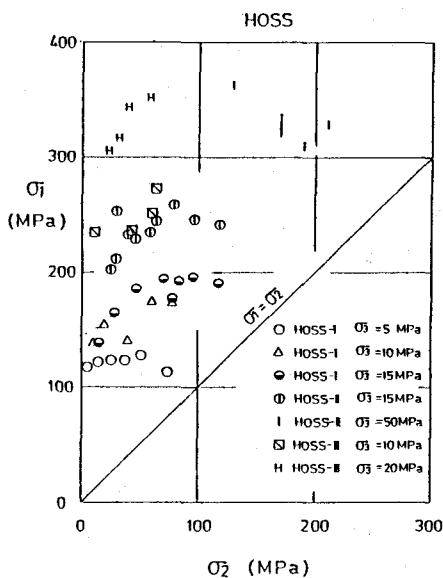


図-4 破壊時の最大主応力と中主応力との関係



(b)

(c)

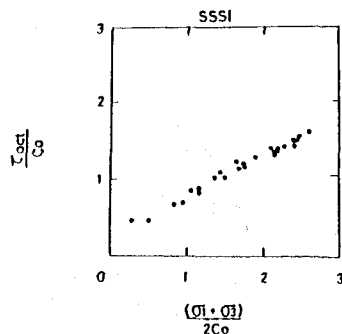
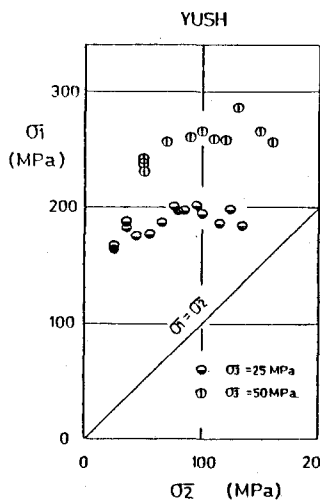


図-5 破壊時の $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ と $\frac{\sigma_3}{\sigma_2}$ の関係

3.2 破壊条件式

現在までに提案されている破壊条件式は中間主応力を考慮していませんが、考慮していても実験的説明が十分なものが多かった。Mogiは延性金属に於ては、まずVon Misesの式を一般化した次式が、組立合材応力下における岩石の破壊強度と適合することを見出した。

$$\sigma_{oct} = f(\sigma_1 + \sigma_3) \quad (1)$$

ここで、 f は単調増加関数である。本試験結果を整理したところ、図5に示すように、(1)式は直線で近似できることがわかった。すなわち、(1)式は次のように表現できる。

$$\sigma_{oct}/C_0 = a + b\{(\sigma_1 + \sigma_3)/2C_0\} \quad (2)$$

ここに C_0 は単軸圧縮強度である。なお、(2)式は係数 $b=0$ とするとVon Mises式に一致する。 b は圧力依存性を示すパラメータである。また、(2)式中の係数 a, b は従来の封圧試験データからも求まるので、一般的に主応力場を試験を実施しなくても、任意の最小主応力のもとで中間主応力効果を予想することができると考えられる。

4 残留強度特性

残留強度は前述した破壊実験において、最大強度直後の差応力-ひずみ曲線から得られる。図6は残留強度と中間主応力との関係について整理したものである。いずれの岩種および最小主応力においても、中間主応力は残留強度に影響を及ぼさないことが認められる。これは巨視的な破断面が最終的には常に中間主応力と平行に生じることと関連していると考えられる。

残留強度状態に至る間に応力降下が生じ、これが伏試験内で形成されたクラックに対してどのような影響を及ぼすかを明らかにするために弾性波の測定を実施した。この測定のためには、単一の破断面が予測できる方向に形成される必要がある。そこで、伏試験として細粒大理石(山口県産)を選び、応力状態は最小主応力を20MPa、中間主応力を80MPaとした。図7は破断面形成前後50%間の差応力と三主応力の变化を示したものである。

図6 中間主応力と残留強度との関係
最大と中間の主応力が、破断面形成後回復しているのに反し、最小主応力は逆に増加している。この応力の増加分は、ほとんどが破断面上の相対的なすべり変位で説明できる。また、破断方向の速度に関しては図8に示すように、破断面形成前に50%の減少が認められる。図9は破断面形成前後の破断方向の速度変化を示したものであるが、破断面形成後、約6%の回復が認められる。この方向のひずみが破断面形成後、

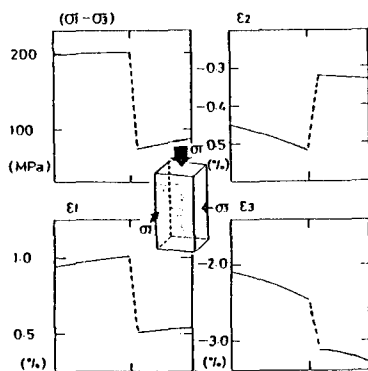
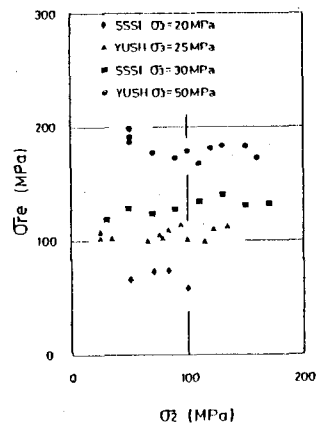


図7 破断面形成前後の差応力と三主応力の变化

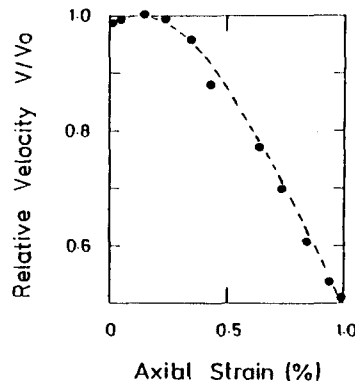


図8 軸ひずみと速度変化との関係(破断方向)

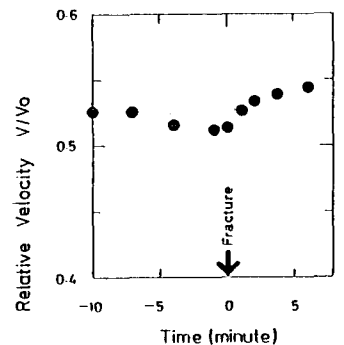


図9 破断面形成前後の速度変化(破断方向)

約0.6%増加していること、および破断面による破砕帯の形成という相反する効果を考慮するならば、この量はかなりの量があると言えよ。破断面形成前の圧方向の変位の増加は主に、中向主応力軸と平行なタイプのクラックの増加に帰因すると考えられる⁶⁾。速度回復はこの方向のクラックが部分的に肉壁したこととを意味すると解釈でき、したがって、組合せ応力下における岩石の残留変位状態では、破断面を含む破砕帯以外のクラックの大半が肉壁し、載荷前の状態に戻っていることが予想される。

5. 考察

組合せ応力下において、中向主応力は岩石の変形・破壊特性にかなりの影響をおよぼす。これは顕微鏡には岩石内部のクラックのうちで、変形や破壊に肉入するものつ分布や数の変化に影響をおよぼすためである。すなわち、中向主応力の増加はこれと直交する角度にあるクラックを肉壁させ、その結果、破壊に肉入するクラック数を減少させる作用を有する。したがって、中向主応力軸と若干の角度を有するクラックが卓越することになる。これは中向主応力の増加により、中向主応力方向の弾性波速度が著しく減少し、中向主応力と最小主応力方向の弾性波速度の異方性が顕著となることを良く説明できる。破壊強度低下後、このように卓越していたクラックは最大強度复次時の応力降下と共に再び肉壁し、破断面上に分布するき裂の運動の抑制が卓越するようになる。つまり、この状態が残留変位であり、この状態ではやはり、中向主応力の影響を受けやすいことが確認された。

(謝辞)

本研究に際して、北海道大学工学部資源開発工学科 石島洋二助教授、同じく中村孝助多助教授を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 平松・岡・伊藤・田中(1974): 岩盤内の地山応力と地学的に推定される地殻応力との関連について、材料, 23巻 248号, pp. 380~386.
- 2) 小出 仁 (1976): 地下の応力を測る, 地質ニュース, 第257号, pp. 14~22.
- 3) 亀岡美友 (1978): ホール底面上の応力解放による岩盤応力測定に関する研究, 京都大学学位論文
- 4) Moji, K (1971a): Fracture and flow of rocks under high triaxial compression, J. Geophys. Res., vol 76, No. 5, pp. 1255~1269.
- 5) Moji, K (1971b): Effect of the triaxial stress system on the failure of dolomite and limestone, Tectonophysics, vol 11, No. 11, pp. 111~127.
- 6) 高橋・木下・西澤・小出・今泉: 真三軸圧縮下でのウエスリー花崗岩の弾性波速度異方性について, (地震), 投稿中)
- 7) 小出・高橋・星野(1983): 地下空洞周辺の貯水目における真三軸応力の影響について, 日本応用地質学会シンポジウム, p. 47~50.

- (20) The effect of intermediate principal stress on the sedimentary rocks and their properties of residual strength

Manabu Takahashi^{*}

Hitoshi Koide^{**}

Shigenori Kinoshita^{*}

^{*} Hokkaido University

^{**} Geological Survey of Japan

Abstract

The present experimental objective is to evaluate the effects of intermediate principal stress, which affects on the feature of ultimate strength and/or residual strength of the sedimentary rocks. The general stress states in rock samples were realized strictly by using a Mogi-type true triaxial compressional apparatus, in which the three principal stresses are independently controllable. Elastic wave velocities as well as strains were measured during loading. Following results are obtained:

- 1) The ultimate strength is increasing as the intermediate principal stress increases. This tendency called intermediate principal stress effect is sharply appeared at the low intermediate principal stress and becomes dominant with the increase of minimum principal stress.
- 2) Ductility is another parameter which affects the intermediate principal stress effect. It is more remarkable in the ductile state than the brittle one.
- 3) The following generalized Von Mises criterion proposed by Mogi(1971) correlates well the present results.

$$\tau_{oct}/C_0 = a + b \{ (\sigma_1 + \sigma_3) / 2 C_0 \}$$

where, τ_{oct} : octahedral shear stress

C_0 : uniaxial compressive strength

a, b: constants

- 4) The intermediate principal stress affects little on the residual strength.
- 5) Most of the induced cracks, which are flat and oriented parallel to the intermediate principal stress axis, close after the fault formation.