

京都大学工学部 正員 赤井 浩一
建設省九州地方建設局 正員 ○ 森 寛昭
京都大学防災研究所 正員 小栗竹 重機

1. はじめに

常温、常圧で脆性を示す岩石は異種物質の結合体ないしは混合体であり、破壊機構はこれら岩石特有のいろいろな要素に影響され複雑なものとなる。この複雑な破壊機構を究明するには、強度座席のみならず破壊までの変形、破壊の形態などの多方面にわたって巨視的な並びに微視的立場から研究せねばならない。本研究は岩質材料として和泉砂岩およびモルタル試料を用い、多軸応力下におけるこれら材料の極限圧縮強度と破壊の形態について三軸圧縮試験より巨視的立場から、さらに顕微鏡を用いて微視的立場から研究し、岩石の破壊機構を解明しようとするものである。

2. 実験概要

2-1. 供試体：本実験には巨視的等方等質とみなすことのできる和泉砂岩とモルタル供試体を使用した。和泉砂岩供試体は市販の角柱石材を5.5cmの立方体に切断し表面仕上げならびに面と面、直交性、平行度と精密にす

弾性係数	$3.2 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$
ポアソン比	0.28
単位体積重量	2.548 g/cm^3
含水比	1.12
間隙比	0.03

表-1

るため、カーボランダム(N₀.80)で研摩して成形したものであり、その物理的性質は表-1のとおりである。和泉砂岩の異方性は二、三の実験を行なった結果ほとんど認められな

水セメント比 $\text{w/c} = 0.60$	セメント比 $\text{c/g} = 0.50$
養生：水中(20±1°)	材令：4週(28日)
練混ぜ：電動式モルタルミキサー	

表-2

ったが、実験では一定の供試体軸と最大主応力方向とが常に一致するように供試体を設置した。モルタル供試体も一辺5.5cmの立方体とし、品質、養生は表-2に示すとおりである。

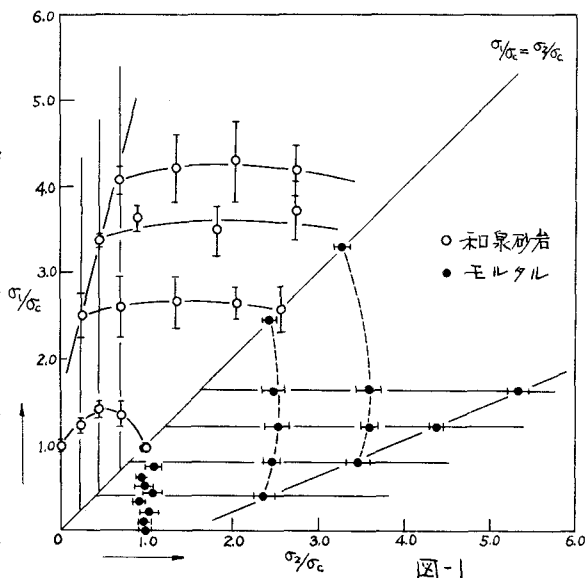
2-2. 三軸圧縮試験機および試験方法：実験に使用された三軸圧縮試験機は、立方体供試体の三軸方向にそれぞれ独立に加圧または減圧できる試験機である。したがって、この試験機によると中間主応力といろいろ変えた三軸圧縮試験が可能である。

A) 強度試験：実験はすべて定荷重速度(和泉砂岩 8 t/min , モルタル 3 t/min)で行なわれた。強度試験に立方体供試体を用いるため、端面・拘束、寸法効果、部分載荷(供試体寸法1辺5.5cm、圧盤5.0cm)の強度への影響などが入ることは避けられないが、これは端面・摩擦力を極力小さくすることで軽減できる。供試体と圧盤の間にシリコングリースを塗布した減摩剤を用いると、用いない場合の1/50~1/10の摩擦力が低下が期待できる(和泉砂岩 $f=0.002$, モルタル $f=0.006$)。載荷は、和泉砂岩において①等方圧としたまま最小主応力のまで載荷する。② σ_2 を一定にしたまま他の2主応力を中間主応力の値まで載荷する。③ σ_2 , σ_3 を一定に保ち最大主応力を増加させる。モルタルでの載荷順序は②2軸と③に保ったまま1軸と σ_3 まで上昇させる点で和泉砂岩の場合と違っている。応力状態V-24-8とは最小軸圧8t、中間軸圧24tとし最大軸圧を増して供試体を破壊させる試験を表わしている。

B) 破壊の形態試験：圧縮試験において破壊した供試体を注意深く取出して、供試体表面に表われた破断面の最大主応力面との角度の測定、初せん断破壊によって破断面内に生じる白い粉末の割合を調べるため、破断面の明るさの測定、初立体顕微鏡を用いた破断面の微視的観察を行なった。

3. 実験結果および考察

A) 強度試験について：和泉砂岩供試体の一軸圧縮強度 σ_c は 1190 kg/cm^2 ，変動係数3.9%でモルタル供試体では σ_c (二軸圧縮試験) = 312 kg/cm^2 σ_c (三軸圧縮試験) = 245 kg/cm^2 ，変動係数7.1%であった。二軸，三軸圧縮試験結果を無次元化するためすべて σ_c で除した値を用いている。図-1は和泉砂岩(左上部)，モルタル(左下部)の実験結果を $\sigma_1/\sigma_c \sim \sigma_2/\sigma_c$ で表わしたものである。○印は実験結果の平均値を，—印は標準偏差を表わしている。和泉砂岩の変動係数がモルタルのもの約2倍であることは，供試体製作上の欠陥が大きく影響していると思われる。供試体・単位体積重量と σ_1 のばらつき



関係を調べたところ，両者には相関関係が見られなかった。図-1において三軸圧縮試験結果の平均値に臨応力曲線を描くと両試料ともに中間主応力の強度に及ぼす影響が見られるが，二軸圧縮試験では両試料の傾向が全然違っている。すべての結果を見ると compression test と extension test 結果が一致していることは興味深い。

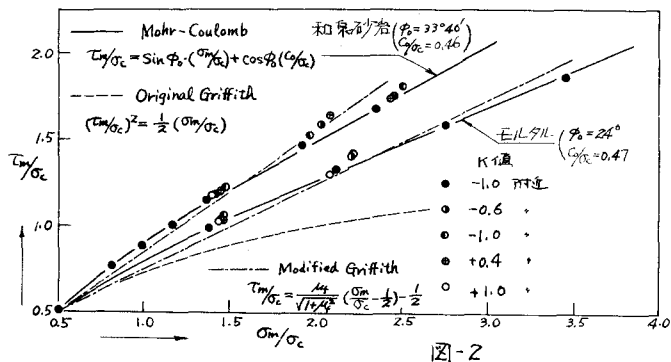


図-2は $\sigma_m/\sigma_c \sim \tau_m/\sigma_c$ の関係を表わした図である。中間主応力 σ_2 を主応力パラメータKを用いて

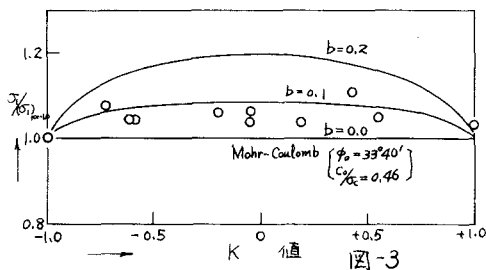
$$\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2 + K \cdot (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \quad (1)$$

と表示すると，側圧が高い $K = -1.0$ ($\sigma_2 = \sigma_3$; comp. test)の実験結果はMohr-Coulomb条件式に一致し，この強度定数は和泉砂岩で $\phi_0 = 33^\circ 40'$ ， $G/G_c = 0.46$ ，モルタルで $\phi_0 = 24^\circ$ ， $G/G_c = 0.47$ となった。中間主応力の影響がある

場合 $\sigma_m/\sigma_c \sim \tau_m/\sigma_c$ 表示すると，実験結果は45°の勾配で変動する。図-2に注目すると，両供試体ともその変動量は $K = -1.0$ から0までは45°の勾配で上昇し， $K = 0$ から+1.0までは逆にもとに帰る傾向のあることが判明した。これはBishopが中間主応力の影響を考慮に入れて提案した extended Mohr-Coulomb の条件式

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2C_0 \cot \phi_0} = \frac{\sin \phi_0}{1 - \frac{b}{2} \sqrt{1 - K^2}} = \sin \phi_K \quad (2) \quad \text{ただし } \begin{cases} \phi_0: K = -1.0 \text{ の場合のせん断抵抗角} \\ b: \text{中間主応力の影響度と表わすパラメータ} \end{cases}$$

に一致することがわかる。ただし側圧が低くなる実験結果はこの破壊条件式からはずれ， τ_m/σ_c は



σ_{yk}/σ_c の商次式に合う。図-3は式(1)のK値に対する $\sigma_y/\sigma_1)_{K=1.0}$ と和泉砂岩についてプロットしたものである。図中に $b = 0.1, 0.2$ とした extended Mohr-Coulomb の条件式を記入すると和泉砂岩については $b = 0.07$ が、モルタルについては $b = 0.07$ が得られた。これを強度定数 ϕ_K の変化量に換算すると高々 1.5° であり、この程度の強度変化は実験に使用した供試体製作上の欠点または供試体に含まれている欠陥などによるばらつきの範囲内に納まってしまふので工学的には無視しうる値であるが、破壊の形態を取扱う場合には重要な要素となるであろう。図-4は正八面体平衡上の破壊曲線を示し、

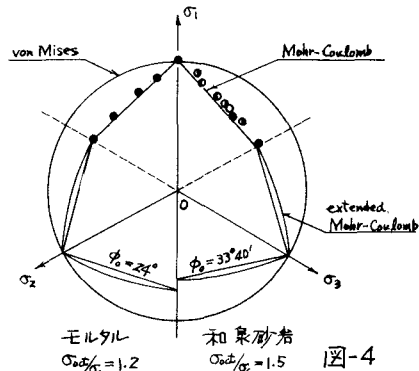


図-4

右半分は和泉砂岩、左半分はモルタルについての結果を示し、両供試体ともに破壊時の強度に及ぼす中間主応力の影響がわずかに認められる。

B) 破壊の形態試験

1) 破断面の角度について：一軸圧縮試験においては両試料とも破壊者とともに多数の細長い柱状片となって飛散した。二軸圧縮試験においても同様に多数の薄い板状片となって

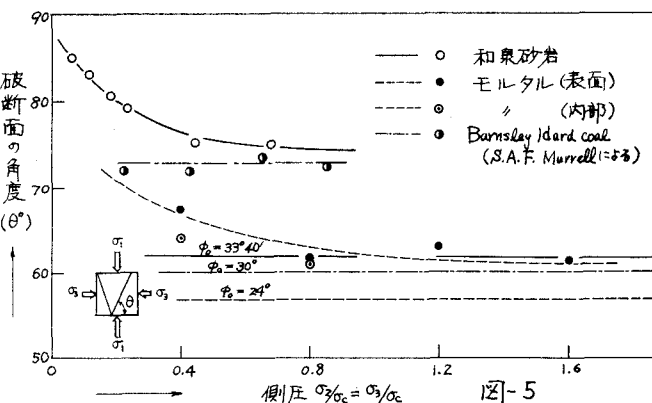


図-5

破壊した。三軸圧縮試験において、3個の破断面が認められた。図-6はこれらの角度と側圧に対して描いたものである。比較のため Murrell が測定した Burnsley 1st coal の破断面の角度も記入した。図から破断面の角度は側圧の増加とともに指数関数的に減少するが、ある一定値に達するとほとんど減少しないことが認められる。この現象は一軸、二軸圧縮試験で和泉砂岩、

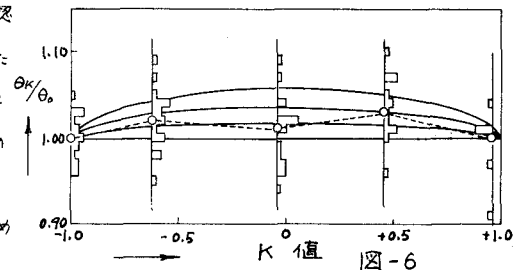


図-6

モルタル両試料内に axial cleavage fracture が生じ、それに対して側圧の高い三軸圧縮試験ではせん断破壊が生じていることを示している。しかしせん断破壊と考えられる応力範囲内の破断面の角度は Mohr-Coulomb の理論値とはかなりはずれている。これはずれは材料の性質、測定誤差などに支配されると考えられる。つまり和泉砂岩がモルタルより大きくはずれていることは、破壊規準の含んでいる材料の仮定(連続性、延性など)に前者が後者よりはずれていることを意味している。さらにモルタル内部の破断面の角度を測定したところ表面の角度より小さい値が得られた。つまり内部ほど端角の影響をうけないので角度は低くなり理論値に近づく。図-6は破断面の角度が中間主応力の影響をうけずかどうかを調べるために K 値に対して θ_K/θ_0 をプロットしたものであり、参考のため extended Mohr-Coulomb の条件式 ($b = 0.1, 0.2$) を記入してある。各測定値はばらついてはいるがそれらの平均値は $b = 0.1$ と

した式(2)の規準とかなりよく一致している。

ii) 破断面の明るさについて：一般に劈開破壊とせん断破壊は、破壊が生じた結晶面の相違と破断面の外観とで区別される。岩石などの脆性材料では、よごれのないきれいな面をもつ劈開破壊と白い粉末のある汚れた面をもつせん断破壊とに識別される。

和泉砂岩供試体の破断面を観察したところ、白い粉末の発生がせん断破壊によっていることを認め、この

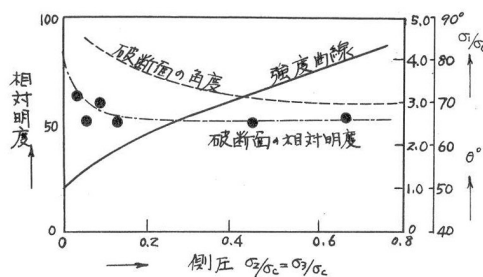


図-7

粉末の割合を量的に調べるために破断面の平均明度を測定した結果、図-7を得た。巨視的立場から得られた極限強度、破断面の角度も図中に記入しこれらすべての面から破壊機構を総合的に考察する。

- ① 側圧 $\sigma_3/\sigma_1 > 0.2 \sim 0.4$ の三軸圧縮試験ではせん断破壊が生じ、強度は extended Mohr-Coulomb の規準に一致する。
- ② 一軸および二軸圧縮試験では劈開破壊が生じ、先の規準はこの領域、試験結果とは一致しない。
- ③ 側圧が①と②の間の遷移領域では、せん断破壊と劈開破壊が同一供試体内で同時に生じている。

iii) 破断面の微視的観察について：立体顕微鏡を用いて和泉砂岩の破壊機構を観察したところ、破壊の外観上の形態として劈開型破壊とせん断型破壊が認められた。劈開型破壊による破断面(写真-1)はその面内で凹凸がはげしく、結晶粒子が粒内で劈開破壊された跡がうかがわれる。せん断型破壊による場合は、破断面周辺部、弱い粒子が粉碎されて白い粉末になっている(写真-2)。このせん断型破壊は金属などの転位論によるよりも、むしろ土質力学的な立場からせん断破壊と考える方が妥当である。

4. おわりに

和泉砂岩とモルタルの破壊機構について巨視的および微視的立場から調べた結果を以下にまとめる。

- (1) 側圧がその材料の一軸圧縮強度の2割ないし4割以上もある三軸圧縮試験では、両供試体ともにせん断破壊し、その破壊条件は中間主応力の影響を若干含んだ extended Mohr-Coulomb の規準によく一致した。この場合破壊後の形態を観察するとせん断型破壊が生じていることが認められた。
- (2) 一軸圧縮試験および二軸圧縮試験においては、すべて劈開破壊が生じた。
- (3) (1)と(2)の間の遷移領域ではせん断破壊と劈開破壊が同時に生じ、そのときの破壊条件式は陳型ではなく高次の式として表わされる。しかしこの条件式は破壊の形態も含んだ力学的意味を失ない、単に破壊応力の関係式を表わすにとどまるものと考えられる。

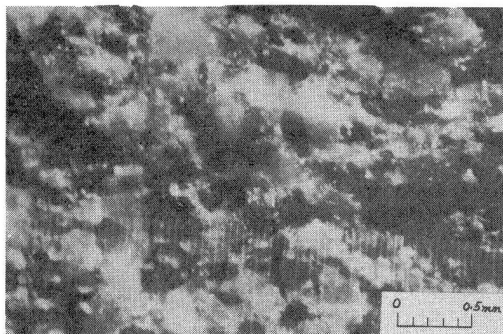


写真-1 一軸圧縮試験における破断面(劈開型破壊)

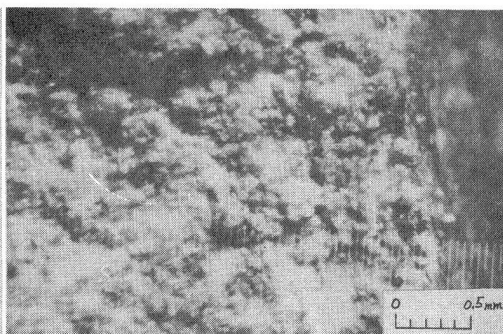


写真-2 高圧三軸圧縮試験における破断面(せん断型破壊)