

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

岩石には節理・片理・層理などの地質学的不連続面が存在しており、岩石の弾性および他の力学的性質にかなりの異方性を与えていることはよく知られている。この不連続面が岩石の強度や変形に及ぼす影響を及ぼすかを実在岩石を用いて調べるためには多大の時間と労力を必要とするので、筆者らはまず予備的段階として昨年来打継ぎ面（以下弱面と呼ぶ）を有する異方性モルタル供試体を用いて系統的に三軸圧縮試験を行ない、その破壊特性の概要の把握に努めて来た。今回は同様の供試体により、さらに二軸および三軸圧縮試験を補足実施することにより、主応力空間内での破壊曲面を決定するとともに弱面数の影響についても検討を加えた。

2. 理論的考察

1) Mohr-Coulomb の理論を發展させたもの

Jaeger は破壊が全てせん断で起こるとして、岩石自体と弱面それぞれについて Mohr-Coulomb 式を適用している。

岩石については最大主応力方向から角 β の傾きをなす面で破壊が生ずるとして次式を与えている。

$$\tau_m = \sigma_m \sin \phi_0 + C_0 \cos \phi_0 \quad (1)$$

ただし $\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$, $\tau_m = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$, $\beta = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} \phi_0$.

C_0 : 岩石材料自体のせん断強度 , ϕ_0 : 岩石材料自体の内部摩擦角

弱面については弱面が最大主応力方向と角 α の傾きをなすとき次式を得る。

$$\tau_m \sin(\alpha + \phi_j) = \sigma_m \sin \phi_j + C_j \cos \phi_j \quad (2)$$

ただし C_j : 弱面のせん断強度 , ϕ_j : 弱面の内部摩擦角

したがって破壊は(1),(2)式で求められる τ_m の小さい方で生ずる。

さらに Jaeger は材料のせん断強度自身も弱面の影響を受けるとして、弱面方向で最小で弱面のせん断強度に等しく、これと直角な方向において最大となるよう次式で与え同様の考察をしている。

$$C_0 = C_1 - C_2 \cos 2\omega = C_1 - C_2 \cos 2(\beta - \alpha) \quad (3)$$

ただし C_1, C_2 : 定数 , ω : 弱面からの角度

2) Griffith の理論を發展させたもの

Hoek および Walske と Brace はそれぞれ粒子境界にランダムに存在する短かいクラックと弱面に沿って卓越的に存在する長いクラックを考えている。一軸引張試験あるいは一軸圧縮試験より各々のクラックに関する定数を決定して、それらのクラック先端に生ずる引張応力と限界引張応力の大小より破壊を規定している。

Walske と Brace によればランダムに存在する短かいクラックの成長に必要な応力は次式で与えられる。

$$C_s = (\sigma_1 - \sigma_3)_s = C_{os} + \frac{2\mu_s p}{\sqrt{1+\mu_s^2} - \mu_s} \quad (4)$$

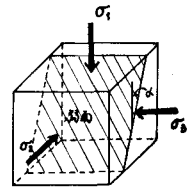
ただし C_{os} : 材料の一軸圧縮強度, μ_s : 短クワックに対する摩擦係数, p : 拘束圧
また最大主応力方向より角 α の傾きをなす弱面に沿って存在する長クワックの成長に必要な応力は次式で与えられる。

$$C_L = (\sigma_1 - \sigma_3)_L = \frac{C_{oL}(\sqrt{1+\mu_L^2} - \mu_L) + 2\mu_L p}{2 \sin \alpha \cos \alpha (1 - \mu_L \tan \alpha)} \quad (5)$$

ただし C_{oL} : 長クワックに支配される一軸圧縮強度, μ_L : 長クワックに対する摩擦係数
したがって破壊は(5),(6)式の C_s, C_L の小さい方で生ずる。

3. 実験方法

図1に実験に用いた弱面を有するモルタル供試体を示す。角 α は最大主応力方向からの角とし、弱面は1つの主応力に平行である。供試体寸法は5.4cm立方で、弱面の方向 α は $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ および 90° の7種類とした。使用した機械は三主応力を独立にコントロールできる大型三軸試験機で、圧盤と供試体との間の端面摩擦の影響を少なくするため、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。



試験は弱面の数が1の場合について一軸圧縮試験, 二軸圧縮試験, 三軸圧縮試験, 三軸伸張試験および平均主応力一定試験の5種類, また弱面の数の影響を調べるため、弱面数が3の場合について一軸および三軸圧縮試験を行なった。

4. 実験結果と考察

4.1 弱面数1の場合

一軸および三軸圧縮試験結果についてはすでに若干報告しているので、それについては4.2において弱面数3の場合と比較しながら述べる。

(1) 二軸圧縮試験

図2(a),(b),(c)にそれぞれ $\sigma_3=0, \sigma_2=0, \sigma_1=0$ の面における二軸圧縮試験結果を示す。この場合 $15^\circ-75^\circ$ 供試体は σ_1 方向から 15° の傾きをなす弱面を有する供試体を

表わしている。まず図2(a)の $\sigma_3=0$ の面では $30^\circ-60^\circ$ 供試体および 45° 供試体においてはほぼ全域にわたって弱面の影響による強度低下が見られるが、他の供試体においては σ_2 の小さい域において弱面の影響が見られるだけで等方なものに類似している。弱面の分離について

図1 弱面を有するモルタル供試体

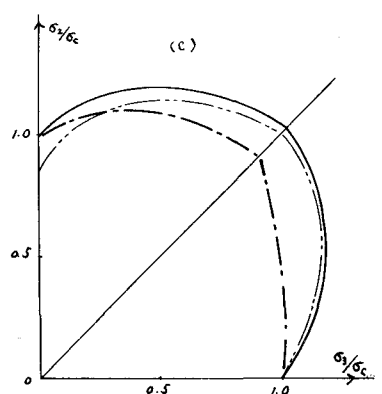
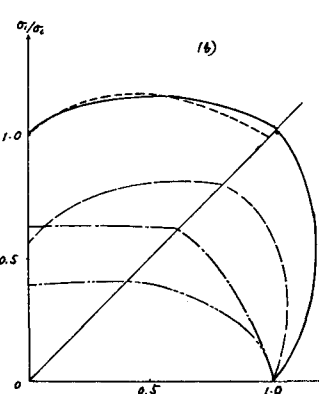
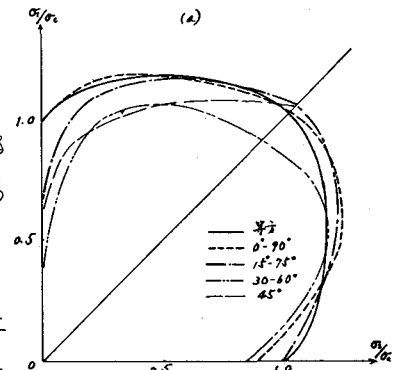


図-2 二軸圧縮試験

も σ_2 の小さい域において見られるが、他の域では見られない。図2(b)の $\sigma_2 = 0$ の面では $0^\circ - 90^\circ$ 供試体を除いて弱面の影響がかなり見られ、ほとんどの供試体の全域において弱面の分離が見られる。強度の低下は $30^\circ - 60^\circ$ 、 $15^\circ - 75^\circ$ 、 45° 供試体の順で大きく、 $30^\circ - 60^\circ$ 、 $15^\circ - 75^\circ$ 供試体においては $\sigma_1 > \sigma_3$ の域で中間主応力 σ_2 の影響が認められず、一軸圧縮強度と等しく等方なものにくらべてそれぞれ60%、40%以上の強度低下を示している。図2(c)の $\sigma_1 = 0$ の面では $15^\circ - 75^\circ$ 供試体に若干の影響が見られる程度である。弱面の分離はここでも σ_2 の小さい域で生じているだけである。 $0^\circ - 90^\circ$ 供試体においては全域にわたってほぼ等方なものと同じであるが、弱面の分離は見られる。

2) 三軸伸張試験

図3(a), (b)は $30^\circ - 60^\circ$ 供試体における $\sigma_2 = \sigma_3$ 、 $\sigma_1 = \sigma_3$ のRendulic plane 上での三軸圧縮試験および三軸伸張試験の結果である。この図によると二軸圧縮試験から予想されるように $\sigma_1 = \sigma_3$ の域において弱面の影響による強度低下が見られる。またこの種のモルタルにおいては三軸圧縮試験よりも三軸伸張試験の方が強度(軸差応力)は大きく、最小主応力の小さい域で二次放物線、大きい域で一次直線関係を示す。 $15^\circ - 75^\circ$ 供試体、 45° 供試体においても $30^\circ - 60^\circ$ 供試体と同一の傾向を示しているが、 $15^\circ - 75^\circ$ 供試体の $\sigma_1 = \sigma_3 > \sigma_2$ の域においては強度の低下はほとんど見られなかった。なお $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ の域では実験を行っていないが、二軸試験より $30^\circ - 60^\circ$ 供試体に若干の影響が予想されるのみで、他は等方なものと同じであると思われる。

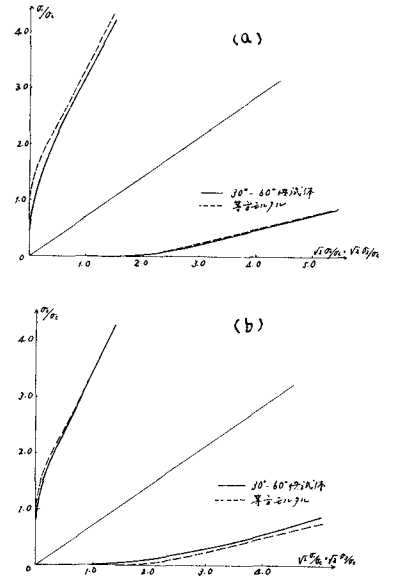


図3 Rendulic plane 表示

3) 平均主応力一定試験

この試験は中間主応力の影響がある場合に2)の三軸伸張試験とともに主応力空間における破壊曲面を決定するのに重要なものである。また弱面をもつ異方性材料では π 平面(直截面)の全域にわたって調べる必要があり、本実験では $\sigma_{oct} = 200 \text{ kg/cm}^2$ ($\sigma_{oct}/\sigma_c = 0.8$) および 300 kg/cm^2 (1.2) について行なった。

図4に $30^\circ - 60^\circ$ 供試体における試験結果を示す。この図より破壊曲面の π 平面上の形は $\sigma_1 > \sigma_3 > \sigma_2$ の域において弱面の影響が見られ、それ以外の域ではほとんど等方なものと同じで、外側にふくらんだ三角形状をしている。また弱面の影響による強度低下の割合は $30^\circ - 60^\circ$ 供試体で等方なものにくらべて10%程度に15%程度である。 σ_{oct} が 200 kg/cm^2 から 300 kg/cm^2 に増加しても π 平面上の形は余り変らない。

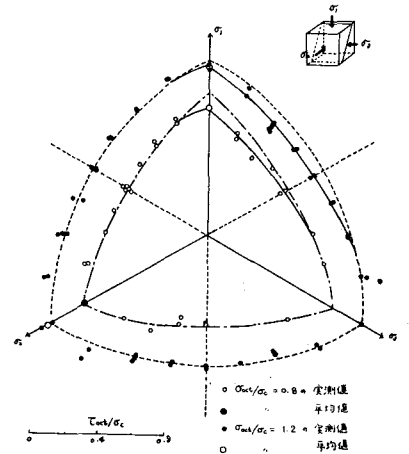


図4 $30^\circ - 60^\circ$ 供試体における π 平面上の破壊曲線

4.2 弱面数3の場合

図5は弱面数が1および3の場合の一軸および三軸圧縮結果を示している。

弱面数が1の場合も3の場合も全体の傾向はほぼ一致して、15°から45°供試体において弱面の影響による強度の低下は著しく、弱面もほとんど分離している。弱面数が3の場合は1の場合にくらべて15°から45°供試体において強度の低下率は著しく、60°以上で両者はほとんど一致している。例えば30°供試体について言えば、弱面数が1の場合は一軸で約60%、低拘束圧で20~30%、 $\sigma_2/\sigma_c = \sigma_3/\sigma_c$ が0.4以上の高拘束圧のもとでは強度低下率はさらに減少して高々8%となっているに反して弱面数が3の場合は一軸で約80%、低拘束圧で30~60%、 $\sigma_2/\sigma_c = \sigma_3/\sigma_c = 0.4$ 以上の高拘束圧のもとでもなお15%もの強度低下率を示している。しかしこの弱面数の増加に伴う強度低下率の増加は弱面向の相互作用による影響より、むしろこのような単純化した弱面数1の立方体供試体にその欠乏な因があると考えられる。弱面数1の15°および30°供試体では弱面の先端が最大主応力面に出ているため、弱面において分離破壊しても荷重は再分配されてなお維持される。この立方体供試体特有の問題点を考慮するため、30°および45°立方体供試体についても三軸圧縮試験を行なったところ、弱面数3の場合と比較的によく一致した。したがって弱面数3の場合が一般性があるものと考えられる。

図6は得られた実験結果とJaegerの理論およびGriffithの理論と比較表示したものである。

ここにおいてJaegerの理論に用いた弱面および材料自体のせん断特性はせん断試験およびMohrの包絡線より次式とした。

$$\begin{aligned} C_0 &= 0.45\sigma_c, & \phi_0 &= 28.5^\circ \\ C_j &= 0.08\sigma_c, & \phi_j &= 34.5^\circ \end{aligned} \quad (6)$$

Griffith理論における引張強度は30°供試体の一軸圧縮強度より求めた。

この図よりJaegerの理論は一軸試験を除いた45°以下の供試体において比較的よく実験結果と一致している。一軸試験において実験値が低い値を示すのは、へき面破壊の要素が加味されるからと考えられ、また45°~60°の間の不一致は45°立方体供試体における弱面の位置に由来していると考えられる。Griffith理論は実験値よりもはるかに小さい値を示し、拘束圧の増加に伴う最小強度の増加が少くない。これはGriffith理論がクラックの成長荷重を規定していることとクラック閉塞後の摩擦効果等を考慮していないことに基づくものと考えられる。修正Griffith理論を発展させたWalshとBraceの理論は比較的实验値とよく一致を示している。

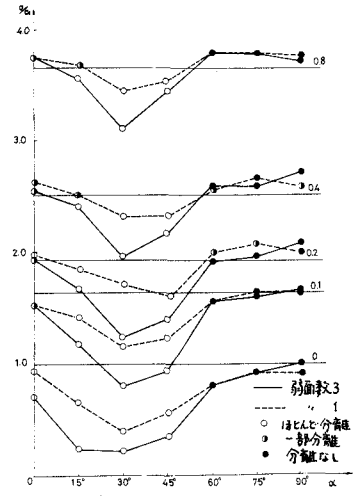


図5 三軸圧縮試験の弱面数の影響

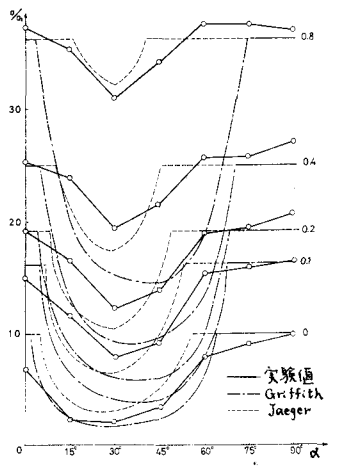


図6 弱面数3における三軸圧縮試験結果とGriffithおよびJaegerの理論の比較

1) 赤井・山本・北田：異方性岩質材料に対する三軸圧縮試験，昭和43年度関西支部年次学術講演会（1968.5）