

大阪府立工業高等専門学校 ○正員 山本 和夫
兵庫県土木部 正員 米田 光明

1. まえがき 筆者らは従来よりジョイントの発達した岩盤(ブロック・ジョイント・モデル)の力学的挙動について、理論的および実験的に考察して来た。それによると、岩盤の力学的挙動におよぼすジョイントの影響の度合は、ジョイントの方向および強度によって著しく異なることが明らかとなった。本文はこのモデルを用いて岩盤斜面の変形と破壊におよぼすジョイントの影響について実験的に考察したものである。

2. 実験概要 従来取り扱ってきたモデルでは、ジョイントはペーストを用いて充填されていたが、今回の実験では主としてジョイントは充填されず、写真-1に示されるようにブロックを単にモザイク状に積み重ねた斜面モデルを用い、上表面より構造物としての上載荷重を受けっている場合を対象としている。ジョイントの間隔 d は5 cm, 上載荷重幅 T は30 cm (6 d), 斜面の傾斜および高さはそれぞれ $\alpha=45^\circ$, $H=50$ cm (10 d)とした。またジョイントは層状ジョイントとそれに直交して千鳥状にあるクロス・ジョイントからなるが、ジョイントの傾きとしては層状ジョイントと水平面との傾き β (順目⊕, 逆目⊖)を $0^\circ, \pm 30^\circ, \pm 45^\circ, \pm 60^\circ, 90^\circ$ の8種類を選んだ。岩石材料として用いた石こう(5×5×10 cm)は水と焼石こうを重量比 $\omega_p=1$ で配合され、一軸圧縮強度 σ_c , 単位体積重量 γ , 含水比 w はそれぞれ24.6 kg/cm², 1.2 g/cm³, 36%である。

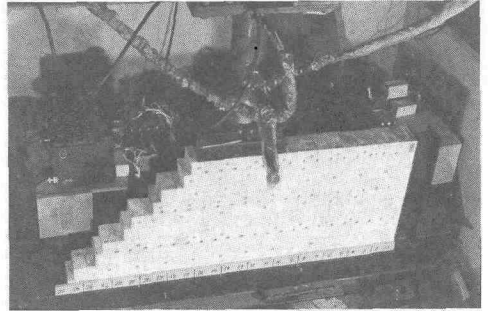


写真-1 実験装置 およびモデル

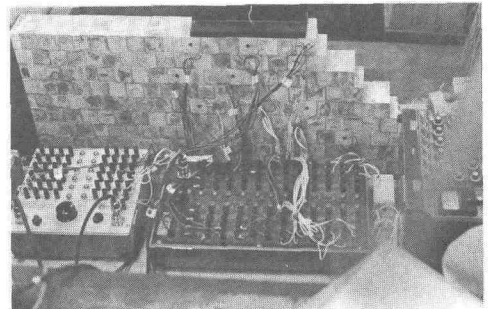


写真-2 応力測定

また応力-ひずみ曲線は非線形を示すが、応力計算では $E_p=30000$ kg/cm²を用いた。石こうブロック間の接触まさつ係数は、まさつ試験より $\tan \phi_f=0.6\sim 0.7$ ($\phi_f=31^\circ\sim 35^\circ$)を得た。実験装置は写真-1に示されるように、支持盤としてのH型鋼梁上にモデルを作成し、載荷はモデル上面より厚さ10 mmのゴム板2枚、幅丁のH型鋼、ロードセルを介して油圧ジャッキにより行なった。変位は荷重段階毎に写真撮影し、予めブロック表面に印した測点をフィルム上でコンパレータで読み取り、その変化より測定した。変位測定精度は約0.1 mmである。ブロックに生じる応力(ひずみ)は写真-2に示すように、ブロック裏面にロゼットゲージを貼付して測定した。

3. 実験結果および考察 (1)応力状態 従来の実験よりブロック・ジョイント・モデルにおける応力分布は等方等質の弾性体におけるものより、一般に載荷中心線近くに応力集中の現象を示すことが明らかになっているが、比較検討のため弾性体と考えた有限要素法による応力分布を図-1に示す。この斜面の傾き($\alpha=45^\circ$)においては、斜面の影響は余り見られない。本実験によると、 $\beta=0^\circ$ では応力分布

はほぼ複合パスカル的分布を示すが、最大主^カ応力^カの方向は谷側および山側とも鉛直方向よりそれぞれ 10° 前後傾いている。順目の場合の $\beta = 30^\circ$ ($\beta \leq \phi_f < \alpha$)では、図-2に示すように载荷中心線近くにおいてかなりの応力集中(最大 $2q$)を生じ、特に谷側の応力は極めて小さく無応力に近い。最大主応力の方向は浅い域ではほぼ鉛直に近く、 $z = T$ の深さにおいては山側の主応力が傾いている。さらに荷重の増加につれて浅い域における無応力域は谷側より载荷中心線近くまで広がる。ジョイントに粘着力 $c = 3.0 \text{ kg/cm}^2$ の充填材料(てんぷん糊)を用いた場合には、これ程の応力集中は示さず、谷側にも応力の伝達が見られるが、この場合荷重の増加に伴うブロックの破壊およびジョイントの粘着力の消失により、谷側のブロックがすべり出し、応力は急減する。 $\beta = 45^\circ$ ($\phi_f < \beta = \alpha$)では図-3に示すように、 $z = \frac{2}{3}T$ までの浅い域では载荷中心線近くに応力が集中している。特に $z = \frac{2}{3}T$ の深さでは最大主応力が $3q$ にも達し、谷側のブロックでは無応力に近い。しかし $z = T$ の深さになると、载荷中心線近くの応力が減って、アーチング現象が見られる。荷重の増加につれて、谷側のアーチングの支柱が山側に移動するのが見られる。 $\beta = 60^\circ$ ($\phi_f < \alpha < \beta$)では図-4に示すように、载荷幅内の層状ジョイント間では、最大主応力方向はほぼ層状ジョイント方向に平行であるが、山側ブロックでは最大主応力方向は逆にクロス・ジョイント方向に近い。 $z = \frac{2}{3}T$ の深さでは目立った応力集中は見られないが、 $z = T$ の深さになるとアーチング現象が現われ、3つのアーチ支柱が見られる。荷重の増加につれて荷重は等分担化される。 $\beta = 90^\circ$ では荷重方向と層状ジョイント方向が一致するので、载荷幅直下のブロックのみに応力は伝達され、主応力方向も鉛直であり、あたかも载荷幅大の鉛直柱の様を呈し、荷重の増大につれて座屈現象が著しくなる。逆目の $\beta = -60^\circ$ では図-5に示すように、 $\beta = 60^\circ$ の場合と同様にアーチング現象が見られるが、谷側の斜面にごく近いブロックにおける応力はかなり小さい。荷重の増加につれて山側への応力の偏向が見られ、 $z = \frac{2}{3}T$ 、 $z = T$ の深さではアーチの崩壊

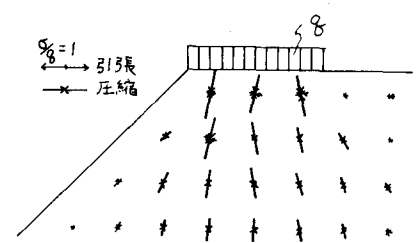


図-1 FEMによる応力計算(弾性解)

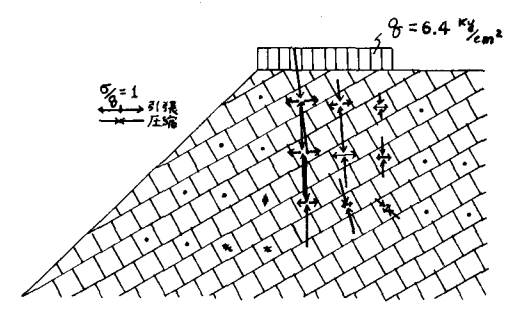


図-2 $\beta = 30^\circ$ における主応力

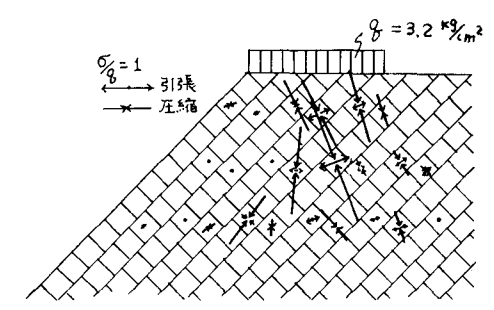


図-3 $\beta = 45^\circ$ における主応力

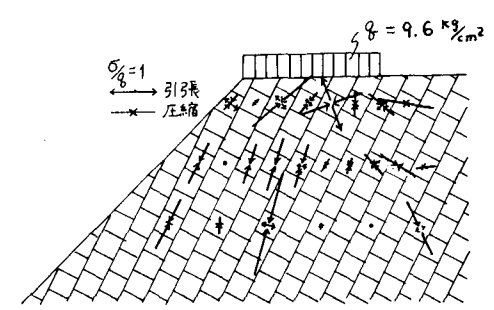


図-4 $\beta = 60^\circ$ における主応力

が見られ、荷重は等分担化される。 $\beta = -45^\circ$ では、 $\beta = 45^\circ$ の場合と同様に载荷中心線近くに応力は集中しているが、谷側のブロックにも応力の伝達が見られる。荷重の増加につれて応力集中の度合が少なくなり、等分担化される。 $\beta = -30^\circ$ では $\beta = 30^\circ$ の場合と同様に、载荷中心線近くに著しい応力集中の現象を示し、最大主応力方向も鉛直に近い。しかし順目の場合の図-2に見られるような極端な無応力域は見られない。

(2)変形状態 ブロック・ジョイントモデルにおける変位は、ジョイントに沿うすべり、ブロックの回転、座屈、ブロックおよびジョイント間の変形より成る。 $\beta = 0^\circ$ では変位は鉛直方向で破壊近くでも3mm以下と小さく、ジョイントの圧着を含めた材料の圧縮ひずみと考えられる。 $\beta = 30^\circ$ では図-6に示すように、 $\beta \leq \phi_f$ で層状ジョイントの傾きがまさり係数 ϕ_f に近く、かっ端が斜面に出ているので、ジョイントに沿うすべりが見られ、変位も7mm前後を示す。ジョイントの一端が斜面に出る部分と出ない部分を図-6の一点鎖線で示すように分けると、前者では層状ジョイントに沿う変位が見られ、後者では山側ほど変位は小さく、その方向も鉛直方向に近くなる。ジョイントに充填材料を用いた場合は、かえってより深い層状ジョイントに沿うすべりが見られ、変位も全般に大きい。 $\beta = 45^\circ$ では図-7に示されるように、一点鎖線で示す境界線として大変位領域(谷側)と小変位領域(山側)に分けられる。大変位領域の変位は層状ジョイントに沿い、底面におけるすべりも加わって20mmにも達しているが、小変位領域の変位は鉛直方向に2mm以下である。 $\beta = 60^\circ$ では図-8に示すように、変位量は3mm前後と小さく、変位過程は一点鎖線で分けられた3つの領域によって異なる。谷側の領域では層状ジョイントに沿う変位、山側の領域ではクロス・ジョイントに沿う変位、中間の载荷板下では蛇行変位を示している。 $\beta = 90^\circ$ では変位量は3mm前後と小さく、初期荷重段階で载荷板下のブロックにおいてのみ鉛直方向変位が見られ、その後は横方向へのはらみ出し変位が見られる。 $\beta = -60^\circ$ では図-9に示すように、クロス・ジョイントに沿うように大変位を生じ、底面における谷側へのすべりを起している。 $\beta = -45^\circ$ では変位量は3mm

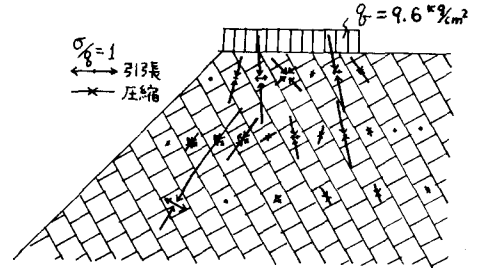


図-5 $\beta = -60^\circ$ における主応力

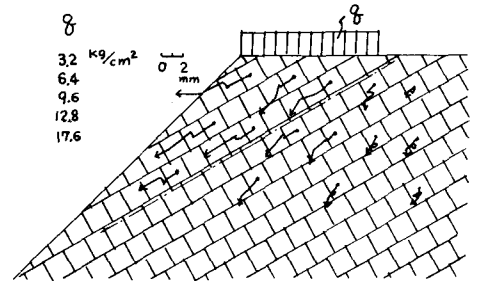


図-6 $\beta = 30^\circ$ における変位

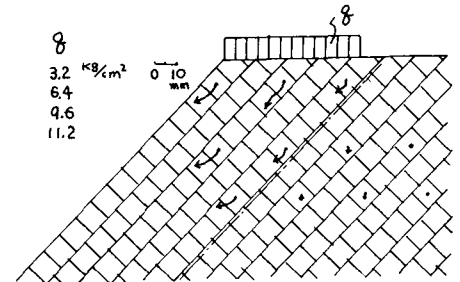


図-7 $\beta = 45^\circ$ における主応力

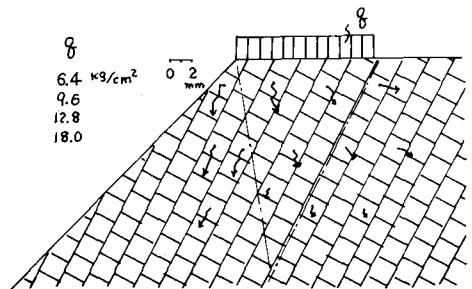


図-8 $\beta = 60^\circ$ における主応力

前後と小さく、変位方向は斜面にごく近い部分を除いて、ジョイント方向に関係なく鉛直方向を示している。 $\beta = -30^\circ$ では変位量は2mm前後と小さく、フロス・ジョイントに沿うようにわずかな浮上りを示すものがある。

(3)破壊状態 ブロック・ジョイントモデルの破壊モードとしては(A)ジョイントに沿うすべり破壊、(B)ジョイントと部分的に岩石ブロックを横切るすべり破壊、(C)載荷板下の岩石の圧潰、(D)上記の混合した破壊に分けられる。 $\beta = 0^\circ$ では載荷板直下のブロックが粉々に圧潰して破壊に至る(モードC, 破壊荷重 $q_{of} = 28.8 \text{ kg/cm}^2 = 1.17 \sigma_c$)。 $\beta = 30^\circ$ では写真-3に示すように谷側のブロックの層状ジョイントに沿うすべりとそれに伴う山側のブロックへの応力集中により破壊に至る(モードA', $q_f = 17.6 \text{ kg/cm}^2 = 0.72 \sigma_c$)。充填材料を用いた場合、ブロックの破壊と層状ジョイントの相互作用により曲線状のすべり線を形成し、かえってすべり易くなって破壊に至る(モードB, $q_f = 18.9 \text{ kg/cm}^2 = 0.77 \sigma_c$)。 $\beta = 45^\circ$ では写真-4に示すように層状ジョイントの開口が目立ち、底面でのすべりによって破壊に至る(モードA, $q_f = 12.2 \text{ kg/cm}^2 = 0.50 \sigma_c$)。充填材料を用いた場合は、載荷と同時に一つのジョイントにおいてすべりを生じ、足をすくわれたように底面すべりを起して破壊に至る(モードA, $q_f \div 0 \text{ kg/cm}^2$)。 $\beta = 60^\circ$, $\beta = -45^\circ$, $\beta = -30^\circ$ ではブロックの圧潰による破壊を生じる(モードC, q_f はそれぞれ $22.4 \text{ kg/cm}^2 = 0.91 \sigma_c$, $22.4 \text{ kg/cm}^2 = 0.91 \sigma_c$, $24.0 \text{ kg/cm}^2 = 0.98 \sigma_c$)。 $\beta = -60^\circ$ では写真-5で示すように、クロス・ジョイントに沿うすべりとそれに伴う層状ジョイントの開口および底面のすべりによって破壊に至る(モードA, $q_f = 15.4 \text{ kg/cm}^2 = 0.63 \sigma_c$)。これらの結果より充填材料を用いない、斜面角 $\alpha (=45^\circ)$ の斜面における破壊荷重 q_f とジョイント傾き β および破壊モードの関係は図-10のようになるものと考えられる。

4. あとがき 本文では実験で得られた結果の記述を主にしたが、得られたモデル内の応力、変形、破壊状態の現象によって、この種のモデルの力学的機構が明るみになった。結果の詳しい解釈は当日発表した。

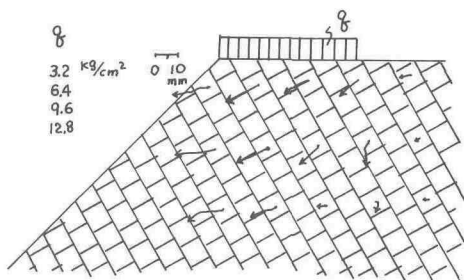


図-9 $\beta = -60^\circ$ における主応力

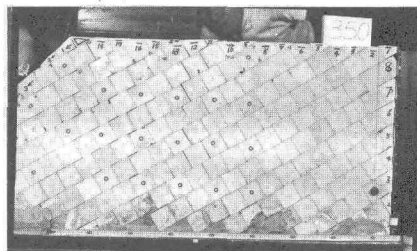


写真-3 $\beta = 30^\circ$

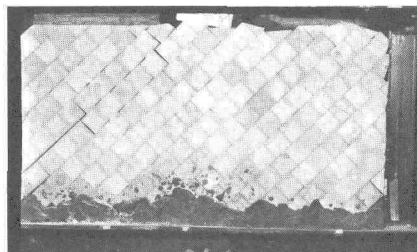


写真-4 $\beta = 45^\circ$

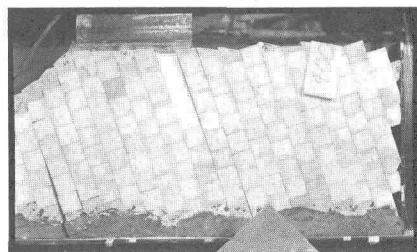


写真-5 $\beta = -60^\circ$

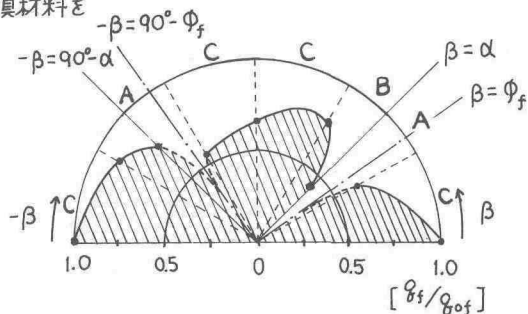


図-10 破壊荷重と破壊モード ($\beta = -90^\circ \sim 90^\circ$)