

農林省林業試験場防災部 正員 〇陶山正憲
 東京大学生産技術研究所 北川英夫
 韓国仁荷大学校工科大学 金相哲

1. 破壊力学による岩石の強度評価について

岩盤・岩石は一般に、その荷重条件と拘束状態によっては、強度的に弱いぜい性材料の特性を示す。これは必ずしも岩石等の材料自体の強度の低さのみに起因するのではなく、岩盤・岩石中にき裂または力学的なき裂と等価と見なされる断層、節理、層理、片理や低剛性の含有鉱物、不完全な結晶粒界、空隙などのような先在性欠陥を含むことが、その主たる理由の一つと考えられる。き裂材強度の評価には破壊力学が極めて有効なアプローチであると言われているが、これを岩盤・岩石に適用するには、その方法、限界、精度を検討するための基礎的研究が必要である。破壊力学は欠陥の存在またはその発生が危惧される材料、構造物を強度上安全に使用するための工学的な方法論であり、その基本的方法論は既に確立していると思われるが、ここでは要するに岩石強度の判定基準として従来の公称応力に加えて、力学的境界条件をより多く含む破壊力学的パラメータ（例えば応力拡大係数、 K ）を使用することにより単純な形状の供試体の強度を複雑な実物構造物に適用する可能性を追求しようというのである。筆者らは既にセメント硬化体については破壊力学の適用の有効性を一応認めた⁽¹⁾⁽²⁾ので、本報では岩石の破壊靱性試験の結果について破壊力学的検討を行う。

2. 岩石の破壊靱性試験の方法

岩石のようなぜい性不均質材料に対する破壊靱性試験法はまだ確立されていないので、前報コンクリートの場合と同様にASTM試験法⁽³⁾に準拠した曲げによる破壊靱性試験⁽¹⁾と著者らの開発した圧縮による破壊靱性試験⁽²⁾を岩石について行い、両試験法の適用の可否と修正案について検討した。

供試材には試験片の成形が容易な、山口県美祿郡秋吉台地方に産する秋芳大理石を選定し、その中でも比較的等方均質な中粒大理石（粒径0.01～0.10mm）を採用した。その力学的特性は、圧縮強度 $\sigma_c = 1100 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$ 、引張強度 $\sigma_t = 89 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$ 、ヤング率 $E = 7.5 \times 10^5 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$ 、ポアソン比 $\nu = 0.33$ である。

試験片の形状は図1に示す曲げ試験用の片側切欠き梁と、図2に示す圧縮試験用の中央スリット入り円板の2種類である。片側切欠き梁試験片の寸法は $W = 40 \text{ (mm)}$ 、 $B/W = 0.5$ を目標にし、 $a/W \geq 0.45$ の標準試験片と $a/W < 0.45$ の標準外試験片を準備した。一方、中央スリット入り円板試験片の寸法は直径 $2R = 100 \text{ (mm)}$ 、板厚 $t = 20 \text{ (mm)}$ 、スリット全長 $2a = 20 \text{ (mm)}$ 、 30 (mm) 、スリット幅 $2c = 1.0 \text{ (mm)}$ を目標にした。

試験片の作製と人工き裂の加工については、まず大理石の角材（約40cm角）から円柱コア（ $\phi 100 \text{ mm}$ ）と板状スライス（板厚50mm位）を切り出した。次に円柱コアからは円板を、板状スライスからは梁を、それぞれ所定の板厚、寸法に切断・研削した。なお、両試験片の端面平行度と直角度の精度を上げるために研磨仕上げを行った。また、梁の片側切欠きおよび円板の中央スリットは、いずれも超音波加工

装置で
精度よ
く加工
した。

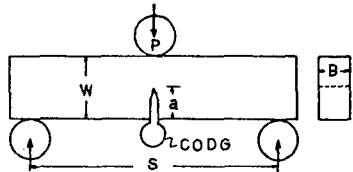


図1. 片側切欠き梁の形状と曲げ試験法
 （CODGはき裂開口変位計）

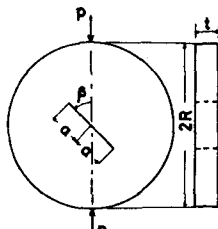


図2. 中央スリット入り円板の形状と
 圧縮試験法

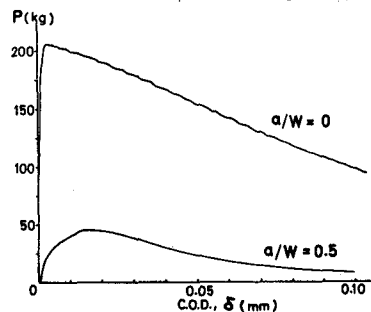


図3. 荷重-き裂開口変位量($P-\delta$)曲線

曲げによる破壊靱性試験の方法は、図1のような片側切欠き梁の3点曲げ試験で、スパン長 $S = 4W$ 、両支点および中央荷重のころ半径は 20mm である。曲げ試験では、破壊の進行に伴うき裂開口変位量 (COD) の変化を測定したが、これは破壊靱性試験特有の量である。変位計の出力と荷重計の出力は動ひきみ測定器で増幅して X-Y レコーダに自記させたが、結果の一例として、典型的な荷重-き裂開口変位量 ($P \sim \delta$) 曲線を図3に示す。なお、試験機はインストロン型オートグラフ (使用容量 500kg) で、荷重突の変位速度は一定 (0.1mm/min) に保った。

圧縮による破壊靱性試験の方法は、図2のように中央スリット入り円板の中心に集中圧縮荷重する試験である。荷重線と円板スリットの傾斜角 β は、 $2a = 20\text{mm}$ については $\beta = 0, 30, 45, 60^\circ$ に変えたが、 $2a = 30\text{mm}$ については $\beta = 0^\circ$ のみにした。試験機はアムスラ型万能試験機 (使用容量 2ton) で、荷重速度はほぼ一定 (1500kg/min) にした。

3. 岩石の破壊靱性試験の結果と K の計算

金属材料の破壊靱性試験では通常、破壊開始荷重 P_Q を図3のような $P \sim \delta$ 曲線から求めることになっている。しかしながら、 K の算出に用いるべき P 値の選定方法が金属と岩石では本質的に異なることも考えられるので、ここでは便宜上、コンクリートの場合⁽¹⁾と同様に P_M を採用し、これに対する最大応力拡大係数 K_{IM} を次式で計算した。

$$K_I = 6YM\sqrt{a}/BW^2 ; Y = 1.93 - 3.07(a/W) + 14.53(a/W)^2 - 25.11(a/W)^3 + 25.80(a/W)^4$$

曲げによる大理石の破壊靱性試験の結果を、 P 基準強度と K 基準強度で整理すると図4のようになる。

一方、中央スリット入り円板がスリット線に沿って集中圧縮荷重を受ける場合 ($\beta = 0^\circ$) には、次のような K の近似解を導いたので、この式を用いて破壊荷重 P_F に対する破壊時の応力拡大係数 K_{IF} を計算した。

$$K_I = F P \sqrt{a/\pi} / R t ; F = 1.0 + 1.5(a/R)^2$$

圧縮による大理石の試験結果を、 $\beta = 0^\circ$ について、 P 基準強度と K 基準強度で整理すると図5のようになる。また破壊後の各円板試験片について測定した、スリット傾斜角 β とスリット先端からの割れ角度 θ_0 の関係を図6に示す。図6の実線は、き裂先端における最大周方向応力 $(\sigma_{\theta \max})$ による理論曲線である。

なお、大理石の破壊靱性値は、標準曲げ試験片による結果 $K_{IM} = 115\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3/2}$ と、円板の圧縮による結果 $K_{IF} = 95\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3/2}$ ($a/R = 0.3$)、 $88\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3/2}$ ($a/R = 0.2$) と若干異なり、 $K_{IM} > K_{IF}$ となった。

4. 曲げおよび圧縮による岩石の破壊靱性の K 依存性に対する検討

欠陥の寸法を変えると、曲げ (図4) および圧縮 (図5) による大理石の荷重基準強度 P_M, P_F は共に著しく変わるが、 K 基準強度 K_{IM}, K_{IF} は欠陥の寸法比にかかわらず、いずれも大きな変動はみられない。従って、平滑材 (無き裂材) 強度から欠陥材 (き裂材) 強度を求めるのは極めて困難となる。つまり平滑材強度と欠陥材強度は互に換算できないので、現実の材料については平滑材と欠陥材の両強度を別個に求め、それを併用して使用する必要があると考える。次に図6で $\beta = 0^\circ$ の K_{θ} 値を基準にすると、 $\theta_0 \geq 90^\circ$ でスリット先端以外から割れ始める。従って、破壊力学の使用範囲は $\theta_0 < 90^\circ$ となる。

[引用文献] (1) 北川・陶山: 30回土会講, 1975

(2) 北川・金・陶山: 19回材研連講, 1975 (3) ASTM, E399-70T, 1970

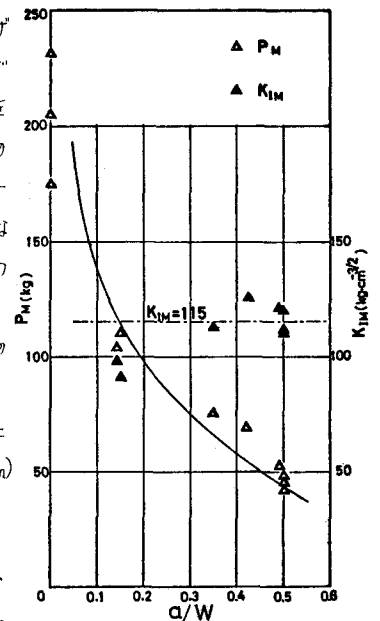


図4. 曲げ梁の切欠き寸法に対する P_M と K_{IM} の比較 (曲線は $K_{IM} = 115\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3/2}$ (定) の P_M 推定曲線)

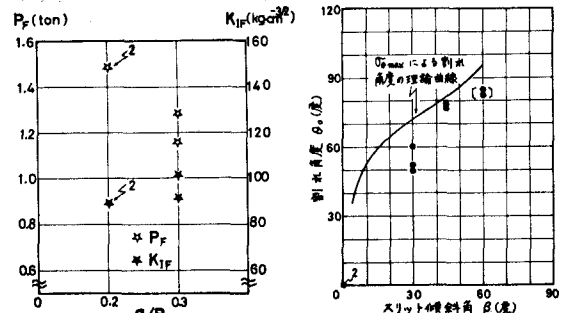


図5. 円板のスリット長に対する P_F と K_{IF} の比較. 図6. 円板のスリット傾斜角と割れ角度 (2R=100mm, t=20mm, $\beta = 0^\circ$) (○はスリット先端以外から割れた例)