

スリットをもつ脆性材料の強度に及ぼす先在欠陥の影響について

日本大学工学部 正員 ○田野久貴

同 上 学生員 横山又二

同 上 学生員 下浅俊一

1. 緒言

多くの不連続面をもつ岩盤を実験室内でモデル化する一つの方法として、モルタルや石膏等の岩質材料にスリット状の欠陥を与え、その力学的挙動を検討することが行なわれており、いくつかの報告がなされている。岩質材料の一軸圧縮強度はスリットを含むことにより低下するが、その長さ及び角度等によっても変化することが知られている。これらの現象を把握するためには、スリット周辺に発生する亀裂の解析とともに、多数の欠陥を含む母材そのもののモデル化も重要な問題である。すなわち、スリットと内在する微小欠陥との相互作用によって全体破壊に至ると考えられるからである。本文はこのような観点から、スリットをもつ岩質材料の圧縮強度に先在欠陥のパラツキがどのような影響を及ぼすかについて若干の考察を加え、実験と比較したものである。

2. 岩質材料(母材)のモデル化

先在欠陥を評価する方法として確率論の立場から、一連の実験・考察を続けてきたが、特に次の二つの点について検討を加えた。すなわち、従来の最弱リンク理論の概念に試験片の「細長比」と「破壊様式」を考慮したことである。図-1は試験片とその確率モデルの対応を模式的に示したものであり、これはいわゆる分離破壊の場合であるが、すべり破壊を示す材料の場合は、図-1のリンク数を $r(s) \rightarrow r(h)$ 、クサリの本数を $g(s) \rightarrow g(h)$ と入れ換えればよい。これにより、従来試験片体積と欠陥数のみで論じられて来た寸法効果が、細長比や破壊様式によっては体積が増加すると強度も増加する場合のあることが示された。断面積 S 、高さ h の試験片の強度を X とすると、図-1のモデルの破壊確率 $H(X)$ は次式で与えられる。

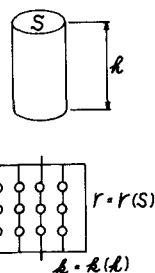


図-1 母材の確率モデル

$$H(X) = \{1 - e^{-\alpha X^m}\}^k \quad (1)$$

$$r = r(s), \quad g = g(h)$$

ここに α m はワイブル分布における材料定数であり、後者は均一性係数と呼ばれパラツキを示す指標である。

3. スリットをもつ岩質材料の強度のモデル化

この問題に、先の最弱リンクモデルを用いた研究があるが、これはスリット総長さを一定としその数を増加させる場合であり、また筆者もその数と絶対長さの増加する場合について同様な考察を加えている。しかし、これらはその結果が強度比として与えられ、母材の強度が考慮されていない。そこで本文ではこの点を次のように考える。

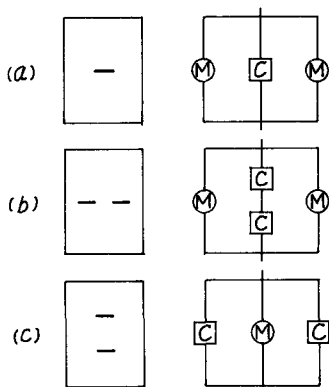


図-2 スリットを持つ場合の確率モデル

石膏のような材料では分離破壊が主である。すなわち、まずスリット周辺からの亀裂の発生及び伝播と先在する欠陥からの亀裂発生・伝播とにより軸方向にいくつか分離し全体破壊を生じる。これらのことはスリットの破壊確率と母材のそれとを考えた場合、スリットをもつ材料の破壊確率はこれらの積で与えられることを意味している。さらに、母材のモデルが図-1で表わされることを考慮すると、単一スリットの場合は図-2(a)のように表わされる。ここに、(M)及び(C)は母材及びスリット要素を模式的に表わしている。次にスリットを複数個もつ場合にはどのようなモデルで表現し得るかを考えてみる。石膏の場合には、図-1に示すように、試験片の高さ h と断面積 S はモデルにおけるクサリの並列数 g 及びその構成リンク数 r と対応することが明らかになってい

る。物理的・構造的には高さと断面積は直列的及び並列的要素であるが、確率モデルではそれぞれが互いに逆になっている。したがって 図-2(b)のようにスリットが並列するものはモデルでは直列に 同一図(c)のような場合にはモデルでは並列になることを意味している。破壊確率は(b)の方が(c)に比べて大であるから、圧縮強度は前者の方が小さくなるが、これは実験によってもすでに明らかとなっている。

4. 実験による検討

4-1 母材とスリットの破壊確率

ここで、図-2に示すようなモデルにおける、母材及びスリットの破壊確率 $G_M(x)$ 及び $G_C(x)$ の求め方について述べよう。 $G_M(x)$ はスリットをもたない標準試験片の分布より得られる。図-3はスリット周辺より発生・伸長する亀裂を作用応力とその伸び長さで示したものである。亀裂はある応力 σ_1 (破壊開始応力) に達すると、スリット上に亀裂が発生し、この亀裂はその後 σ_2 (亀裂伝播応力) になるまでほぼ一定の割合で擬安定成長を続け、 σ_2 で急速に加圧面近くまで伝播する。したがって この時の応力 σ_2 がスリットの「破壊」と考えられる。

図-4は、この σ_1 及び σ_2 と全体破壊時応力 σ^* (強度) の分布例を示したものである。

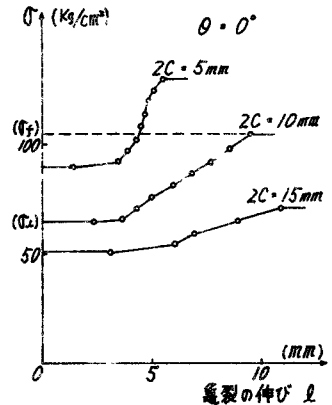


図-3 スリット長さゝ亀裂の伸び

4-2 スリットをもつ材料の強度に反ばす母材のパラツキについて

図-2に従ってその強度を求めるためには、さらに検討を加えておかねばならないことも多いが、母材及びスリットの破壊確率 $G_M(x)$, $G_C(x)$ ともにワイブル分布をなすとして、単一スリットの場合の簡単な検討を行なってみる。

図-2(c)のモデルの破壊確率 $H(x)$ は次のようになる。

$$H(x) = (1 - e^{-r\alpha_0 x^{m_0}})^{1/2} \cdot (1 - e^{-\alpha_c x^{m_c}}) \quad (2)$$

ここに、 α_0 , m_0 及び α_c , m_c はそれぞれ母材及びスリットに関する定数である。ここで母材の破壊確率を $H(x)_M$ とし(2)式との比をとると

$$\frac{H(x)_1}{H(x)_M} = \frac{(1 - e^{-\alpha_c x^{m_c}})}{(1 - e^{-r\alpha_0 x^{m_0}})} > 1 \quad (3)$$

均一性係数 m は不均質な材料ほど小さいから、一般に $m_0 \geq m_c$ と考えられる。一方定数 α は強度の大きい材料ほど小さいから、 $r\alpha_0 \ll \alpha_c$ と考えられる。したがって(3)式は1より大きく、スリットを含むことにより破壊確率が増加し強度は低下することになる。一方、同一寸法の試験片に同一寸法のスリットを与えた、パラツキの異なる材料の強度低下は次のように考えられる。パラツキの大きな(m の小さい)場合の分布関数 $G(x)$ は、平均値 ($G(x) = 0.5$) 付近においても強度に対する勾配が小さいから、逆に小さな破壊確率の変化に対して大きく強度が変動する。したがって、パラツキの大きい材料ほどスリットを与えることによる強度低下は大きいことになる。表-1は3種類の岩質材料について調べたものであるが、この傾向がよく表われているといえよう。なお、スリットの長さや角度と σ の分布との関係等についても実験によって検討を行なっている。

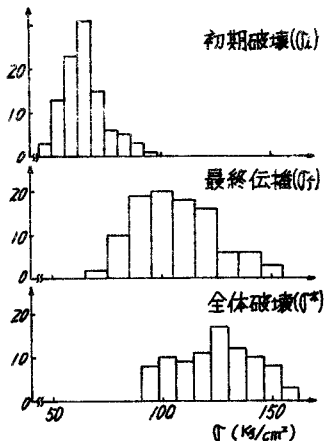


図-4 単一スリット(θ=0°, 2C=10mm)の強度の分布

	花崗岩	モルタル	石膏
母材の強度 X_0 (kg/cm²)	2414.0	319.0	163.5
変動係数 (%)	21.0	18.0	10.0
単一スリットの強度 X_1	1809.0	255.4	145.8
X_1/X_0	0.75	0.80	0.89

表-1 単一スリットをもつ場合の強度低下