

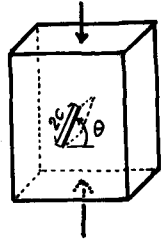
単一スリットをもつ岩石の一軸圧縮強度について

東北大学工学部 正員 佐武正雄

日本大学工学部 正員○田野久貴

1. 緒言

本文は、超音波によって単一スリットを与えた岩石の一軸圧縮試験の結果を報告するものである。スリットを与えた石コウやモルタル試験片による実験結果については、すでに多くの報告があり、筆者らも二三の報告^{3),4)}を行なっている。今回は超音波によって硬質ケツ岩にスリットを与えることを試み、これらを用いて得られた一軸圧縮試験の結果を、石コウにおける結果と比較を行ない若干の考察を加えるものである。



2. 単一スリットをもつ材料のヤング率及び強度に関する考察

2.1 スリットをもつ材料のヤング率

いま、ヤング率 E をもつ材料に二次元的な単一スリット(図-1)が存在する場合を考える。このスリットをもつ材料の一軸圧縮試験において、見掛け上現われる有効ヤング率を E_e とし、スリットと直交する面の面積を A とすると、その単位長さ当りのひずみエネルギー U_e は次式で与えられると仮定する。

$$U_e = \frac{A\sigma^2}{2E_e} \quad (1) \quad \text{図-1}$$

一方、傾き θ 、長さ $2C$ のスリットを含むことにより、増加するひずみエネルギー(以下、スリットのひずみエネルギーという) U_s は次式で与えられる。

$$U_s = \frac{\pi C^3 \sigma^2 \cos^3 \theta}{E} \quad (2)$$

ここで、スリットの存在しない場合の弾性体のひずみエネルギー $A\sigma^2/2E$ を考慮すると、(1)、(2)式より次式を得る。

$$\frac{A\sigma^2}{2E_e} = \frac{A\sigma^2}{2E} + \frac{\pi C^3 \sigma^2 \cos^3 \theta}{E} \quad (3)$$

従って、単一スリットをもつ場合の弾性体のヤング率 E_e は次式で与えられる。

$$E_e = \frac{E}{1 + 2\pi C^3 \cos^3 \theta / A} \quad (4)$$

(4) 式は、弾性体の面積 A がスリット長さ $2C$ に比べてある程度大きい場合に成立すると考えられるが、 $\theta = 90^\circ$ の場合は $E_e = \frac{1}{2} E$ となる。

2.2 スリットをもつ材料の圧縮強度

スリット周辺に新たなクラックが生じて破壊に至るためには、一般に応力条件及びエネルギー条件が同時に満たされなければならない。この点については、すでに述べたように、非常に高い応力集中が生じるようなスリット角度をもつ場合には、容易に応力条件は満たされるが、その時作用する外応力は小さいのでスリット周辺に集中するひずみエネルギーは小さく、エネルギー条件は満足されない。一方スリット角度が低角度で応力集中が小さい場合にはこれと逆な現象となるが、応力条件が満たされればすみやかに破壊(クラック)は進行すると考えられる。我々の扱う岩石の引張強度は、金属等のそれに比較して小さいと考えられるので、ここではエネルギー条件が必要十分条件であると仮定して考察を行なう。

さて、クラック伝ぱに関するGriffithのエネルギー条件の概念に従えば、スリット(クラック)のひずみエネルギーを U_s 、材料の表面エネルギーを γ とすると、このスリット周辺に新たなクラックが発生するための条件は次式で示される。

$$\frac{\partial U_s}{\partial C} - 4\gamma = 0 \quad (5)$$

従って、 $\partial U / \partial C$ が材料によってきまる一定値に達した時に破壊が生じる。すなわち、 U_0 として (2) 式を用いると、それぞれ異なるスリット長さ ($2C_1$ 、 $2C_2$) 及び角度 (θ_1 、 θ_2) をもつ二つの材料において次式が成立する。

$$\frac{2\pi C_1 \sigma_{i1}^2 \cos^2 \theta_1}{E} = \frac{2\pi C_2 \sigma_{i2}^2 \cos^2 \theta_2}{E} = 4\gamma \quad (6)$$

ここに、 σ_{i1} 、 σ_{i2} はそれぞれの材料に作用する破壊開始時の外応力である。従って (6) 式より (7) 式を得る。

$$\frac{\sigma_{i1}}{\sigma_{i2}} = \frac{\sqrt{C_2 \cos \theta_2}}{\sqrt{C_1 \cos \theta_1}} \quad (7)$$

(7) 式より、破壊開始応力 (σ_i) はスリット長さの平方根と角度の余弦との積に関係することがわかる。すでに石コウを用いた実験において、破壊時の最終応力 (σ_{f3}) がスリットの投影長さ、すなわち $2C \cos \theta$ と関係することを報告したが、(7) 式はこれと類似した形となっている。しかし、若干異なっており、実験値とも一致しない。

3. 実験方法

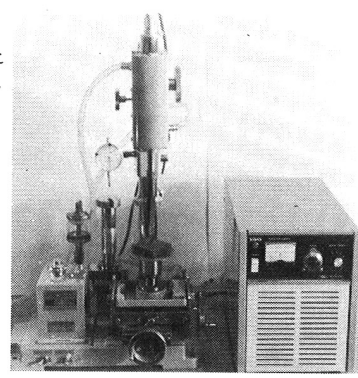
(1) 岩石試験片の場合：用いた岩石試験片

(各種類平均8個)の諸元を表一に示す。試料は、宮城県女川町より採取した黒色硬質ケツ岩であり、比較的均質な岩質である。試験片にスリットを与える方法については、超音波機械加工機 (写真一)を用いた。その原理は、超音波発振装置によって発生させた振動を駆動子に伝え、この駆動子に振動の振幅を増幅させるホーン (図二)を取付け、その先端についた刃 (厚さ0.2~0.3mm)の振動と微粒のカーボランダムとによって、試験片にスリットを作るものである。スリット ($2C = 5mm$ 、 $\theta = 60^\circ$)を与えた試験片の例を写真二に示す。

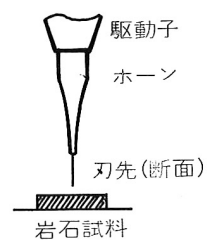
(2) 石コウ試験片の場合：石コウを用いた角柱試験片 ($6 \times 6 \times 12cm$)に、単一スリットを与えて行なった実験については、すでに二三の報告を行なっているので、ここではこれらを引用する。なお、スリットをもたない標準試験片の一軸圧縮強度及びヤング率は、約 $165kg/cm^2$ 及び $4.1 \times 10^4 kg/cm^2$ であり、スリット長さ・角度については岩石 (表一)の場合と同様である。

岩石名	ケツ岩 (Shale)
試験片寸法	5.5×5×1.7cm
スリット長	2C = 5, 10, 15mm
幅	約0.4mm
角度	$\theta = 0, 30, 60$ 度
標準試験片 (スリットのないもの)	
圧縮強度	1950kg/cm ²
ヤング率	$3.4 \times 10^4 kg/cm^2$

表一 岩石試験片の諸元



写真一 超音波機械加工機

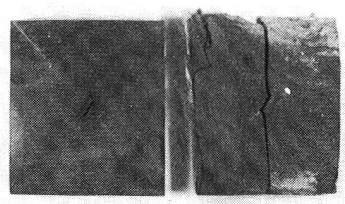


図二

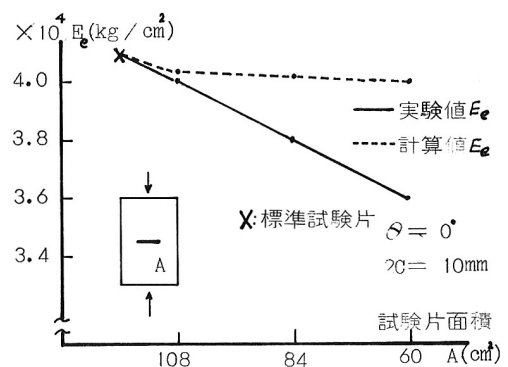
4. 実験結果及び考察

4.1 石コウ試験片による一軸圧縮試験

図一三にスリット ($2C = 10mm$ 、 $\theta = 0^\circ$) を一定とし、試験片の面積 A を変化させて測定したヤング率 E_e を



試験前 試験後
写真二 スリットをもつ岩石試験片



図一三 ヤング率 E_e と試験片面積 (石コウ)

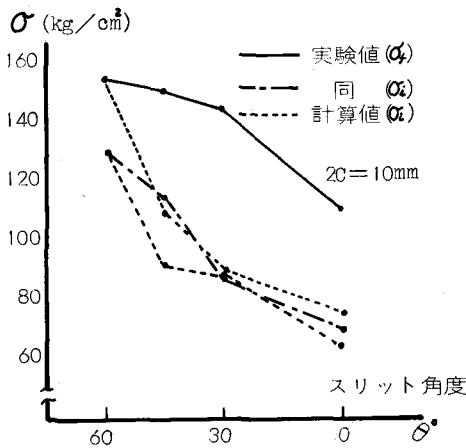


図-4 スリット角度と強度 (石コウ)

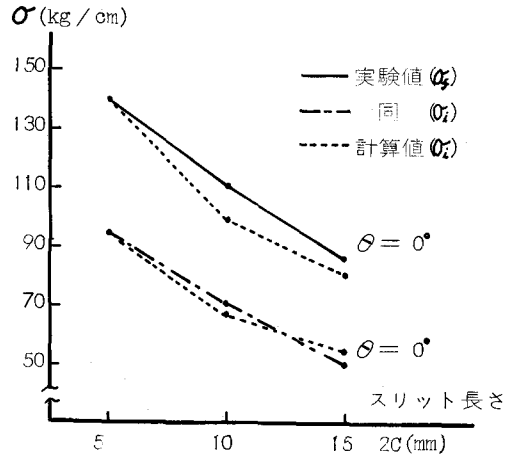


図-5 スリット長さとは強度 (石コウ)

示す。面積が小さくなるにつれて E_e は低下している。(4)式によって求めた計算値(破線)と比較すると、実験値の方の低下が大きい、これは(4)式においてスリットの厚さを考慮していないことが主な理由と考えられる。

次に、スリット長さ($2C=10\text{mm}$)を一定とし、その角度を変化させた場合及び角度($\theta=0^\circ$)を一定としその長さを変化させた場合の例を図-4及び図-5に示す。図-4において、最終応力(σ_f)と破壊開始応力(σ_i)に対する計算値(7式)をそれぞれ破線で示してあるが、 σ_i と計算値とはほぼ一致している。また、図-5に示す長さとの関係においても両者は良く合致しているように思われる。

一方、これらの図において、 σ_f と計算値とを比較するとスリット角度(図-4)との関係においては大きく相異している。従って、 σ_f についてはこれらのことを考慮した新たな考察が必要である。

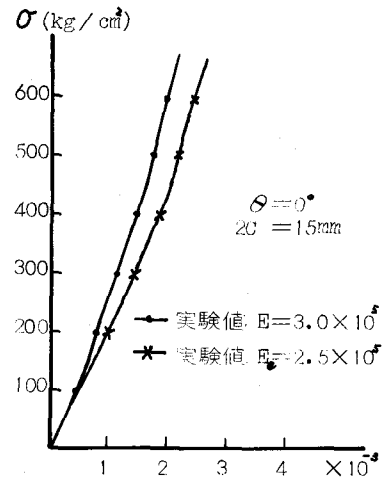


図-6 ケツ岩における E と E_e との比較

4.2 岩石試験片による一軸圧縮試験

単一スリットがヤング率に与える影響を調べるため、次のような実験を行なった。まず、標準試験片のヤング率(E)をあらかじめ測定しておき、その後、所定のスリットを与えて再びそのヤング率(E_e)を測定する。図-6に、 $2C=15\text{mm}$ 、 $\theta=0^\circ$ の場合について示す。これによると若干の相異が現われているが、小さなスリットではバラツキも多く、その差はあまり明りようではない。

一方、圧縮強度については次のような結果が得られた。写真-2は、スリット($2C=5\text{mm}$ 、 $\theta=60^\circ$)を与えた試験片の試験前及び試験後の写真である。破壊(クラック)の発生時の状況は石コウの場合

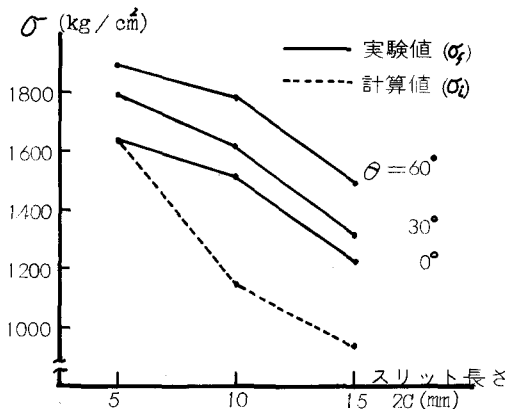


図-7 スリット長さとは強度 (ケツ岩)

と同様であつた。すなわち、 $\theta=0^\circ$ ではスリットの中央附近より分岐クラックが発生し、また、 $\theta=30^\circ\sim 60^\circ$ では写真-2に示すようにスリットのほぼ先端より、スリット長軸と直角方向にクラックが発生している。これらの分岐クラックが大きく成長した後も、試験片は σ_c の1.5~2倍の耐荷力を示しており、石コウを用いた水平スリットにおける実験結果と同様な傾向を示す。

図-7及び図-8は、それぞれ強度(σ_f 、 σ_c)とスリット長さ及び角度との関係を示したものである。これらの図から明らかなように、角度が減少するに伴い、またその長さが増加するに伴って σ_f 、 σ_c が低下しており、この傾向は石コウの場合と類似している。さらに、図-8において σ_c と(7)式による計算値を比較すると、石コウの場合と同様に、ほぼ一致しているように思われる。2C=15 mm以外は破壊開始が不明確であるため、計算値との比較が困難であった。

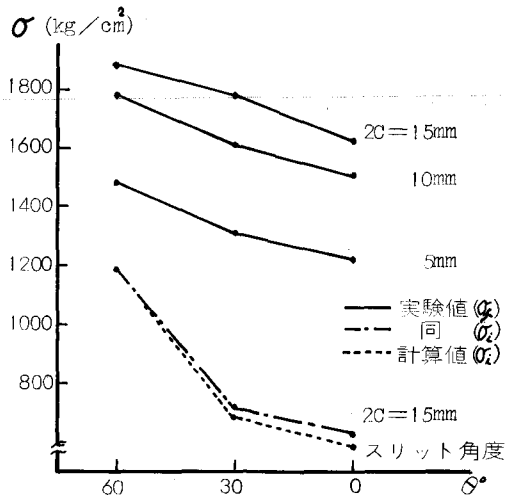


図-8スリット角度と強度(ケツ岩)

5. 結語

単一スリットを与えたケツ岩の一軸圧縮試験の結果、すでに報告した石コウによる場合と同様な結果が得られた。すなわち、スリット長さの増加に伴い、また、角度の減少に伴って強度は低下する。破壊開始応力(σ_c)に関しては(7)式による計算値と実験値はほぼ一致している。エネルギー条件によって(7)式を求めたことを考えると、スリットをもつ材料の破壊開始には、一軸圧縮下においてもスリット周辺に集中するひずみエネルギーが影響しているものと考えられる。しかし、最終強度(σ_f)についての検討が必要であり、また、スリットの存在しない標準試験片の強度との関係や、ヤング率 E_c ((4)式)に関するさらにくわしい実験も必要である。なお、実際の岩石にスリットを与えることが可能となったので、種類の異なった岩石との比較や応力条件を変えた実験を行ないたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 佐武正雄、田野久貴、森田秀夫：スリットをもつゼイ性供試体の弾性波速度の性質について，土木学会第27回年次学術講演会講演概要集第3部，p. 237~240，1972。
- 2) Griffith, A.A. : The phenomena of rupture and flow in solids, Phil. Trans. Roy. Soc. London, p. 163~198, 1920.
- 3) 佐武正雄、田野久貴：き裂の強度に及ぼす影響について，土木学会第5回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要，p. 37~41，1969。
- 4) 佐武正雄、田野久貴：単一スリットをもつゼイ性材料の最終強度に関する一考察，土木学会第7回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要，p. 46~50，1972。

On the Uniaxial Compressive Strength of Rocks
with artificial Single Slit

Masao Satake, Tohoku University
Hisataka Tano, Nihon University

Abstract

This paper reports the experimental results on the uniaxial compressive strength of rock materials(hard shale) with single slit. Usually, model materials made by plaster or cement mortar were used in such experiments because it had been difficult to give slits into the natural-rock samples. However, the ultra-sonic machining tool(Photo.-1) is applied to give slits into rocks in this experiments. This method is very available.

The specimens used in this experiments are listed in Table-1 and an example of these specimen is shown in Photo.-2.

As can be seen in Fig.-7,8 the strength of specimens decreases as the slit angle(θ) decreases and slit length($2c$) increases.

Above results are similar to the experimental results which we obtained previously by plaster under uniaxial compression test(Fig.-4,5). As the so-called Griffith's energy condition may be applied under the uniaxial compression, we shall obtain the equation(7) concerned with the stress (σ_i) of the fracture initiation around a slit. The values calculated from this equation(7) are shown by broken line in Fig.-4,5 and 8, and are compared with experimental values σ_i (broken line with a dot). It is seen that experimental results agree with calculated values closely.