

圧縮強度試験に関する破壊力学的研究

東京大学生産技術研究所 ○ 金 相 哲
農林省林業試験場防災部 正員 陶 山 正 寛
東京大学生産技術研究所 北 川 英 夫

1. 岩盤の圧縮強度と有限寸法の岩石試験片の圧縮強度との関係について

自由境界に垂直圧縮荷重を受ける均質半無限体では、内部に引張応力は生じにくく、これが引張に弱いぜい性材料たる岩石からなる岩盤が高荷重の物体を支持できる理由の一つであろう。しかし (a) 内部に材質的不連続部や欠陥などが存在する (b) 自由境界に垂直でない圧縮荷重を受ける (c) 自由境界が直線でない等の場合には引張応力を生じることがある。これに (d) せん断応力による破壊もありうる。これらの組合せによれば、圧縮荷重下で岩盤が異常な弱さを示すことも考えられる。これらの高引張応力または高せん断応力はき裂発生のきっかけとなり、既存の欠陥に K_I , K_{II} を発生させる。これに欠陥群の相互干渉、変動荷重などによるき裂の進展の促進や、別報⁽¹⁾ のごとき各種のき裂条件による K の増大と変化を伴って、一見きわめて複雑な岩盤の破壊過程を導き、時として岩盤強度の著しい低下を招くものと考えられる。ただし、ここで K_I , K_{II} はⅠモード、Ⅱモードの応力拡大係数である。

岩盤・岩石を、内部に多数の欠陥群を有するぜい性連続体と考えられるならば、その強度や破壊過程は力学的に等価なき裂体として破壊力学によって処理できる可能性があるものと思われる。その場合は、 K は力学的境界条件のすべてを含むので、上記の岩盤の強弱を輸じた同一論法で有限寸法試験片と実際の岩盤との関係を考えることができる。

すなわち、両者の強度の差は、広義の力学的境界条件によるものと考え、試験片により、破壊の発生・伝播・成長が生じやうい条件での材料特性を求め、それが実際の岩盤中でいかなる場合に該当するかを検討しようとするものである。

同じ論法に立てば、欠陥を含む材料からなる小試験片による圧縮強度はその材料の圧縮強度自身を示しておらず、また、無欠陥の小形平滑試験片の圧縮強度だけでは欠陥を含む実在岩盤の強度を推定できないのではないかとと思われるが、これはさらに検討を要する問題でもある。

2. 圧縮強度に対する破壊力学の適用の可否

破壊力学は通常は引張材に対して使われるが、力学の持たせ性が存在すれば圧縮材にも適用できる可能性があるものと思われる。また岩石も含めて一般に圧縮材はぜい性を有するので欠陥・不連続部などの特長点があれば線型破壊力学の適用が可能である場合が多いと考えられる。しかし岩盤は rheology 的特性があり、不均質または不連続な材料または構造物でもあるので採用したき裂モデルか、または破壊力学自体が使えるかどうかは実験的保証が必要である。ぜい性の高いエポキシ板を使用しての類似実験結果⁽²⁾、セメントモルタルによる破壊靱性実験結果⁽³⁾ はぜい性材料の圧縮破壊に対して線型破壊力学による整理が条件付きで可能であることを示した。このことより岩盤への破壊力学のアプローチもあまり不自然ではないものと考えられる。一般に試験片の寸法効果も含めて、境界条件の差の影響の考慮は、き裂がある場合は破壊力学により効率よく導入することができ、ここに破壊力学の効用があるものと思われる。

3. セメントモルタル材料による検討

ぜい性材料としての岩盤への類似物体として、類似点が多いセメントモルタルによる陶山等の実験結果⁽³⁾ を検討してみよう。この実験では早強ポルトランドセメント、豊浦標準砂、水を重量配合比で 1:2:0.6 に混合したセメントモルタルで中央にノッチを入れた曲げ試験片を作り三点曲げ試験をした結果を報告している。この試験

において試験片の大きさを一定にしてノッチの長さだけをいろいろ変えた場合に破壊荷重はノッチの長さ a の増加に対して減少するが、これを K_I で整理すると比較的変動が少なく実用上材料定数としての強度値として使用できることを示した。また、ノッチの長さ a を特に短くすると、材料定数として考えた破壊時の K_I が若干低下することも報告されておりその理由は追求中である。ノッチの長さを試験片の高さの $1/2$ に保った相似試験片について、試験片寸法をかえた場合の破壊荷重とその時の K_I 値も報告されているがこの時も破壊荷重の著しい変化にかかわらず K_I の値は大きな変動を示さなかった。以上のことより線型破壊力学は金属に比べある程度不均質であると考えられるセメントモルタルにも適用できる可能性を示しておるものと推察でき、不均質材、欠陥材、不連続体の強度を破壊力学学的アプローチによって仮想的等価き裂に置きかえる等の方法を用いて検討できる可能性があるものと考えられる。

4. プラスチック材料による検討

上に述べたごとく線型破壊力学はある程度の均質性をもつ材料に対しては有効に使用できる可能性があり、また、より不均質な岩盤等へのアプローチにも今後の研究によっては可能ではないかと思われるので、比較的低く、試験片作製が容易なプラスチック材を使用して類似圧縮破壊実験を行い岩石の圧縮破壊試験について予備的に破壊力学学的検討を試みる。

4.1. 集中圧縮荷重によるき裂入り円板の特性

き裂入り材がある応力場におかれるときき裂先端には応力の特性性が現われ、特に線型破壊力学的には $1/\sqrt{r}$ の特性性、すなわち、き裂端から距離 r としたとき、き裂端近傍では $1/\sqrt{r}$ に比例した応力分布が生ずる。

今、集中圧縮荷重を受ける図1のごとき円板を考えると、き裂がない場合の応力分布は、円の中心を原点とする図2示すような極座標系で次のごとく誘導される⁽²⁾。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -\frac{2P}{\pi t} \left[(R - \rho \cos \alpha) \left\{ \frac{R \sin \alpha}{R^2 + \rho^2 - 2R\rho \cos \alpha} \right\}^2 + (R + \rho \cos \alpha) \left\{ \frac{R \sin \alpha}{R^2 + \rho^2 + 2R\rho \cos \alpha} \right\}^2 \right] + \frac{P}{\pi R t} \\ \tau_{r\alpha} &= \frac{2P}{\pi t} R \sin \alpha \left\{ \frac{(R - \rho \cos \alpha)(R \cos \alpha - \rho)}{(R^2 + \rho^2 - 2R\rho \cos \alpha)^2} + \frac{(R + \rho \cos \alpha)(R \cos \alpha + \rho)}{(R^2 + \rho^2 + 2R\rho \cos \alpha)^2} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

この式を使って求めた応力分布を円板に図示すると図2のごとくなり、図2わかる通り、 σ_r に関して引張場もあらわれる。荷重点付近は応力の乱れがあり実際にはこれとは若干異なった分布を示すが、本実験の結果には大きな影響を与えない。円形境界により引張応力が生じ $\alpha = 90^\circ$ の平均応力 $(P/2R)$ の $2/3$ にも達することにまず注目したい。

無限板の荷重軸に対して β の傾きをもつ長さ $2a$ のき裂端での応力拡大係数 K_I, K_{II} は、き裂が存在しないときの応力場においてき裂線にそった応力 $\sigma_\alpha, \tau_{r\alpha}(\alpha = \beta)$ を積分することにより次のごとく求められる⁽⁴⁾。

$$\left. \begin{aligned} K_I &= \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_{-a}^a \sigma_\alpha(\alpha = \beta, \rho) \left(\frac{a + \rho}{a - \rho} \right)^{1/2} d\rho \\ K_{II} &= \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_{-a}^a \tau_{r\alpha}(\alpha = \beta, \rho) \left(\frac{a + \rho}{a - \rho} \right)^{1/2} d\rho \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

半径 R に比べて充分小さい($a/R = 0.2$)のき裂が円板中心に β の傾きをもつて存在するときのき裂端での応力拡大係数は近似的に(2)式を使って求められるので、これを無次元化して示せば図3のごとくなる。すなわち、 K_I は傾角 β が約 30° 以下で $K_I > 0, \beta = 0$ で最大値をとる。 K_{II} は 40° と 45° の間で最大値をとる。 $K_I \leq 0$ の領域でも K_{II} によりき裂近傍には高引張応力が生じることに注目したい。なお、上記の諸係数は正方形板についてもほぼ同様である。

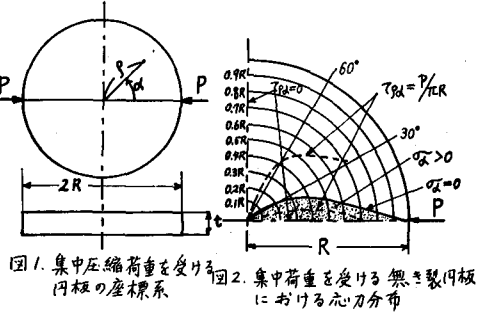


図1. 集中圧縮荷重を受ける円板の座標系 図2. 集中荷重を受ける無き裂円板における応力分布

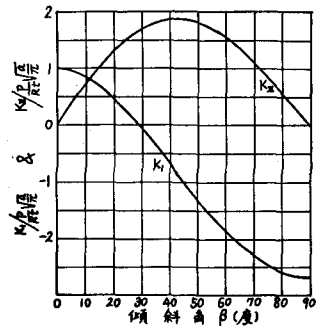


図3. $a/R = 0.2$ の中央き裂をもつ円板の K_I, K_{II} の近似値

4.2. スリット入り円板の集中圧縮荷重による圧縮試験および付帯試験

a) 試験片および試験方法

厚さ $t = 10 \text{ mm}$, 直径 $2R = 70 \text{ mm}$ の円板の中心に円板直径に比べて充分短かい ($2a = 14 \text{ mm}$, $a/R = 0.2$) 先端を充分鋭くしたスリットを入れ, 荷重線とスリットの傾斜角 β を $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ にかえて中心を通る集中圧縮荷重をかけた。ほかには ASTM 基準⁽⁵⁾で曲げ K_I 試験も行なった。

b) スリット端での割れの方角 (θ_0) (図4)

各 β に対する割れの方角 θ_0 の実験値を理論曲線と共に示す。ここで $\beta = 75^\circ, 90^\circ$ の場合はき裂がスリット端より発生したもののほか, スリット加工の便のためスリット中心にあけた円孔から発生したものもあった。

一般に先在あるき裂端より発生した新しい割れの方角はき裂端での最大周方向応力⁽⁶⁾, Sih のひびきエネルギー密度説⁽⁷⁾等によって求められるものと思われるが, 応力拡大係数比 K_I/K_{II} を割れ方角 θ_0 の関数として表わすと, 最大周方向応力説によれば (3) 式のように, ひびきエネルギー密度説によれば (4) 式のようになる。

$$\frac{K_I}{K_{II}} = \frac{3 \cos \theta_0 - 1}{\sin \theta_0} \quad (3)$$

$$\frac{K_I}{K_{II}} = \frac{2 \{ \cos 2\theta_0 - (1-2\nu) \cos \theta_0 \} - \sqrt{3 + (\cos 2\theta_0)^2 + 4(1-2\nu) \{ (1-2\nu) - 2 \cos \theta_0 \}}}{2 \sin \theta_0 \{ \cos \theta_0 - (1-2\nu) \}} \quad (4)$$

(ν : ポアソン比)

式(2)より各傾斜角 β に対する K_I/K_{II} の値を求めプロットすれば図5のごとき曲線となるがこの K_I/K_{II} の値に対して割れ角度の実験値をプロットすれば図6のごとくなる。図6で実線は(3)式, 点線は $\nu = 0.3$ に対する(4)式を示すが, き裂発生がスリット先端より発生した $\beta = 60^\circ$ までは比較的(3)式の曲線によくのるようである。

c) 各傾斜角 β に対する破壊荷重 (P_F)

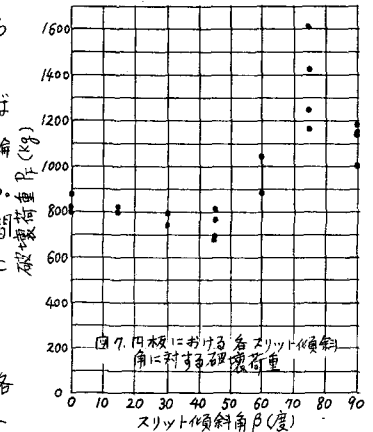
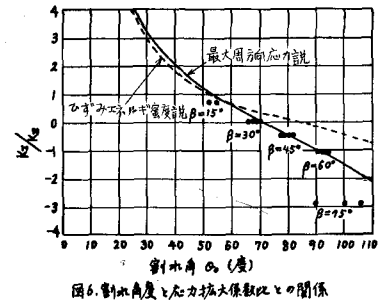
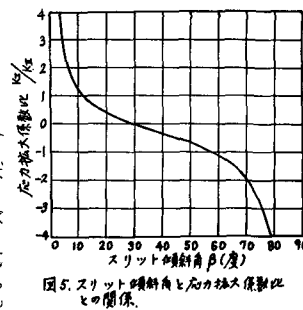
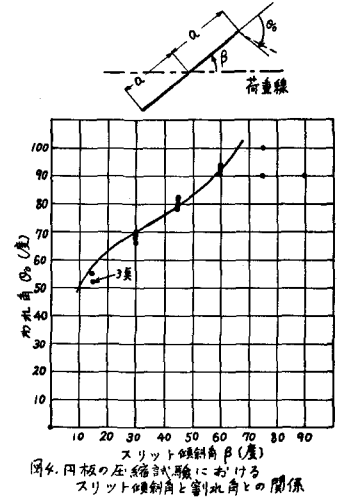
各 β に対する破壊荷重 P_F をプロットにすれば図7のごとくなる。各 β に対する P_F の値はある程度のばらつきがみられ, これは荷重負荷条件や, スリット端の形状などの変動によるものと思われる。特に $\beta = 75^\circ, 90^\circ$ の場合はスリット端以外からの破壊発生も見られ, これに起因するばらつきも含まれると思われる。

今各 β での破壊荷重を使って式(1),(2)により K_I, K_{II} を求めプロットすれば図8のごとくなり図中の実線で示した曲線は最大周方向応力説における理論曲線である。傾向の一致と絶対値の過大は圧縮き裂の不穩定によると思われる。

図8の整理では, 通常考えない (K_{II} を用いたがこれはスリットが実際は隙間がありスリット端にはやはり特異性が現われるものと考えたためである。これれも圧縮の破壊力学における特殊問題の一つと言えよう。

d) スリット隙間の影響

スリットの傾斜角 $\beta = 0^\circ$ のときに対して3種類, その他の β に対しては各2種類にスリット形状をかえて実験を行った。 $\beta = 0^\circ$ 以外の場合はスリット



先端部の鋭さを同じにすれば割れ角度にはスリット形状の変化の影響が現われれば、 $\beta=0$ の場合のみは図9に示すごとくスリットの形状により破壊荷重が変わる傾向を示した。スリットの形状 A, B, C 型を図9に併記する。この図で見るとおりスリット先端部分の隙間が狭い場合には破壊荷重が若干増加する傾向が見られ、これもき裂面接触による不静定に起因すると思われる。

次に、試験片やスリットの寸法を注意を変えて破壊条件のK依存性について検討する。 $2R=100\text{ mm}$ ($2a=20\text{ mm}$), $2R=70\text{ mm}$ ($2a=14, 21\text{ mm}$), $2R=50\text{ mm}$ ($2a=10\text{ mm}$)の実験による $\beta=0^\circ$ での破壊荷重 P_f を図10に示す。一見、形状・寸法効果より P_f は著しく変動するように見える。これに対し、破壊時の K_I を K'_{IF} と置きプロットすれば図11のごとくなり、4種の試験片の K'_{IF} がほぼ同じ値をとりK依存性のよさを示している。三点曲げ試験より求めた破壊時の K_{II} を K_{IF} と置き同じ図に示した所、円板の値よりやや高めに得られ、不静定のありうる圧縮き裂との差を示しているように思われる。なお、円板における K'_{IF} はTweed⁽⁸⁾等による値、三点曲げの式はSrawley⁽⁹⁾の式を使用した。

5. まとめ

岩盤として地盤中にある岩石と、有限寸法の試験片との圧縮強度の差、または両者の関係を、両者の力学的境界条件の相違の観点から論じた。これにき裂材として岩盤・岩石を見ることにより破壊力学的検討を加えた。予備的検討の結果を次に要約する。

a) 有限寸法の圧縮試験体には十分に高い引張応力が発生する。引張に弱いぜい性材料の試験体の圧縮強度がまずこれに支配される可能性がある。

b) 次に、実際の岩石が欠陥を含むぜい性材料と考え、たとえ $K_{II} \leq 0$ の破壊力学的圧縮場においても、有限寸法の圧縮試験体内の欠陥近傍には、 K_{II} によってき裂に高い引張応力が生じて、これが試験体の圧縮強度を著しく低下させることを理論と、脆いプラスチックによる類似実験により確認した。

c) き裂入りぜい性試験体の破壊条件は、試験体やき裂の寸法・形状・方向にかかわらずよくK値で整理され、変動の著しい破壊荷重より階段に安定であることを示した。

d) ただし、圧縮下のき裂はき裂面の部分的接触による不静定という特殊問題が生じることが見出された。これは破壊荷重が高めに得られる傾向に現われ、われの伝ば方向には影響しない。この問題の解明が今後に残された問題である。

e) 円板等の圧縮による破壊靱性試験ではき裂が 30° 程度傾いた時がもっとも弱く、垂直き裂は安定な強度値を与えない場合もある。

文献 (1)北川, 陶山, 結城; 第9回岩盤力学に関するシンポジウム(1975) (2)北川, Kim; 概論, No.740-11 (1974) 235 (3)北川, 陶山; 土木学会関東支部大会講演集(1975) (4) F.Erdogan, P.C.Paris, G.C.Sih; Trans. ASME, Vol.29 (1962) 306 (5) ASTM Standard part 31 E399-70T (1970) 911 (6) F.Erdogan, G.C.Sih; Trans. ASME Series D Vol.85 (1963) 519 (7) G.C.Sih; Lehigh Univ. IFSM-72-23 (1972) (8) J.Tweed, S.C.Das, D.P.Rooke; Int. J. Engng. Sci. Vol.10 (1972) (9) W.F.Brown, J.E.Srawley; ASTM STP 410

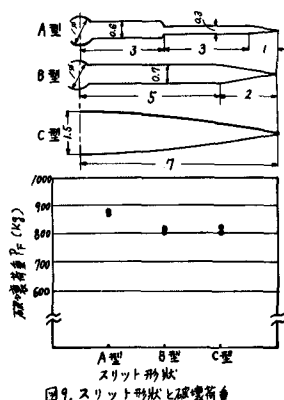


図9. スリット形状と破壊荷重

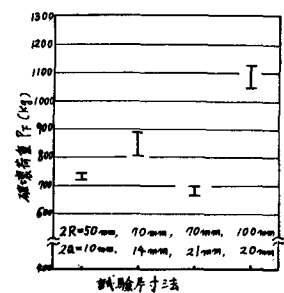


図10. スリット形状と試験片寸法を変化させたときの破壊荷重 ($\beta=0^\circ$)

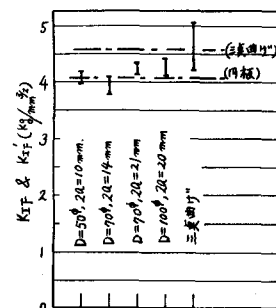


図11. 円板と三点曲げ試験片による破壊時の K_{II} (K'_{IF} , K_{IF})

Fracture Mechanics Study on the Compression Test

Sang-Chul Kim*

Masanori Suyama**

Hideo Kitagawa***

For brittle materials, such as rocks, which are usually subjected to compressive load, tensile fields are possibly induced, because of the discontinuities, the flaws in materials, and the other various reasons. And in this case, compression strength of such brittle bodies will be surprisingly lowered. If it is possible to assume the rocks as the brittle continuum body containing a number of flaws, their strength and fracture process will be possible to be treated as those of an equivalent cracked body by fracture mechanics approaches. In that case, the stress intensity factor "K", which characterizes the stress singularity, satisfies all the mechanical boundary conditions and so it will furnish the relation between the test pieces and actual rocks.

Fracture mechanics will be possible to apply to the compression bodies, if there exist some singularities in them. And also the compression bodies, such as rocks, are generally brittle, so the linear fracture mechanics will be well applied.

By means of theoretical analysis and analogical experiments on cracked plastic plates, the authors discussed the relation of compression tests of specimens and the compressive strength of actual rocky ground, from the view-points of the difference of boundary conditions.

* Inha University, Inchon, Korea; Professor.

** Government Forest Experiment Station, Ministry of Agriculture and Forestry, Meguro, Tokyo, Japan.

*** Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Roppongi 7-Chome, Minatoku, Tokyo, Japan; Professor.