

(13) 静的内圧破壊における切り欠きの効果

徳山高専	正会員○橋本堅一
徳山高専	正会員 工藤洋三
㈱奥村組技術研究所	正会員 萩森健治
山口大学工学部	正会員 中川浩二

1. はじめに

発破が規制されている市街地近郊での岩盤掘削において、静的破砕剤や液圧によってあらかじめ穿孔された孔に内圧を載荷して岩盤を破砕する方法が試みられるようになった。これらの手法は破砕を確実にこなせるかどうかの能力の問題のみならず、経済性、安全性、さらには工期を考慮した場合の広い意味での経済性の問題を有しており、今後さらに有効な方法の開発が期待されている。

一方、ウォータージェットが発達により発破孔に切り欠きを設け発破による周辺岩盤の損傷、余堀りをよりいっそう少なくするスムーズプラスティングが以前から検討されている。いまここでこの工夫を静的内圧による破壊に利用することを考えれば、切り欠き先端の応力集中により切り欠きを設けない場合とくらべて低い圧力で破壊できることが期待される。そこで本研究では最も簡単なモデルとして、孔軸方向に添った対称切り欠きをもち、載荷孔を供試体中央に有する角柱モデルの静的内圧破壊を考え、切り欠き効果、特にその深さが破壊強度に与える影響について検討した。検討に際してはセメントモルタル供試体を用いた水圧による破壊実験および破壊力学に基づいた数値解析を行なっている。

2. 破壊力学に基づく数値解析

切り欠きを有する材料の内圧破壊を考える場合、切り欠き先端から亀裂が発生すると考えることが一般的である。そのためここでは線形破壊力学を適用した切り欠き先端の応力拡大係数解析を行なった。中心軸に添った切り欠きを有する載荷孔を持つ円柱に内圧を作用させたときの切り欠き先端の応力拡大係数については解析解が求められている。図-1、図-2はBowieら手法¹⁾によって解析的に求められた切り欠き長に対する応力拡大係数を示したものである。ここで図-1は切り欠き面に圧力の作用する場合を示しており、図-2は切り欠きには作用せず、孔壁部分にのみ圧力が作用する場合を与えるものである。本研究では図-3のように岩盤等に一系列に載荷孔を穿孔し、それらの孔に切り欠きをつけた上で同時に載荷して孔間をクラックで連結することを考えている。そのため図中破線部分をモデルとして考え、またこれに対応する実験供試体を直方体のブロックとしている。そのためここでは種々の幾何学的形状に対応できるようにす

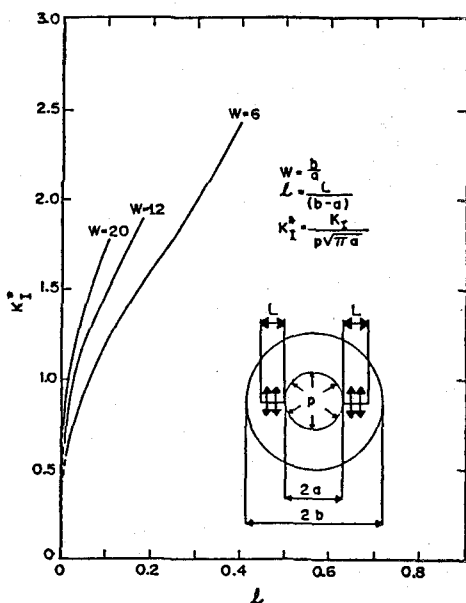


図-1 内圧を受ける中空円筒の応力拡大係数—クラック面圧力載荷—
(R.J.Clifton et al. 1976)

るため有限要素法を用い、平面ひずみ問題として考えた。また応力拡大係数 (K_1) の算定法としては要素分割に影響されにくい、亀裂進展にともなうモデル中のひずみエネルギーの変化により求める方法を用いた。図-4にモデルに用いる諸量を示す。解析を行なったモデルは辺長 S と孔径 D の比 (S/D) が 4, 8 および 12 のものの3種類である。代表的なモデルとして

$S/D = 12$ のモデルの要素分割を図-5に示す。ここでモデルにおいては切り欠き長さ a と孔半径 r ($=D/2$) の比 (a/r) が 1 以内で K_1 に一つの極値をもつことがあるため载荷孔周辺でとくに細かい要素分割を行なっている。解析領域は $1/4$ 部分である。図-6はモデルの解析結果を切り欠き長さに対する K_1 に対して示している。縦軸は計算された K_1 を $\sigma \sqrt{a\pi}$ ($a = 1$, σ ; 内圧) で除して無次元化したものである。前の図-2と比較すると、有限要素モデルにおける数値解析結果は解析解とよく似た結果を与えている。 K_1 が大きい程破壊圧が小さくなることを考えれば $S/D = 4$ の場合のように载荷孔が自由面に近いモデルでは切り欠きが長くなる程破壊圧が小さくなるということが理解でき

る。これに対して载荷孔と自由面の距離が少し大きくなると状況が異なる。すなわち $S/D = 8$ では $a/r = 0.5 \sim 3$ の範囲では K_1 に大きな変化はみられない。このことはこれらの範囲内では切り欠き長さを変えても破壊を生じさせるための内圧は変わらないことを意味している。換言すれば $a = 0.5r$ の切り欠きを持つ供試体の破壊圧以下で

供試体を破壊させるには a を $3r$ 以上にとる必要があることになる。 $S/D = 12$ の場合 a/r およそ 0.5 で上に凸のピークを、また a/r がおよそ 3 で下に凸のピークを持っている。ここでこの a/r の増加に対する K_1 の減少域は内圧の増加にしたがって亀裂が進展する亀裂安定成長領域と考えられる。ここでは図中AからBまでの切り欠き長に対しては内圧がA点およびB点に対応する圧力を越えないかぎり破壊は生じないと考えることができる。

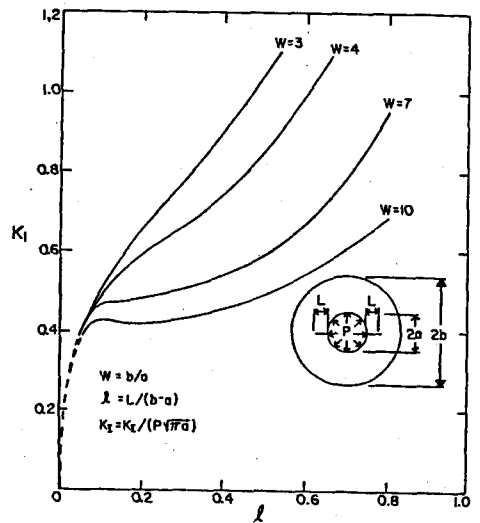


図-2 内圧を受ける中空円筒の応力拡大係数-クラック面圧力無载荷-(R.J.Clifton et al. 1976)

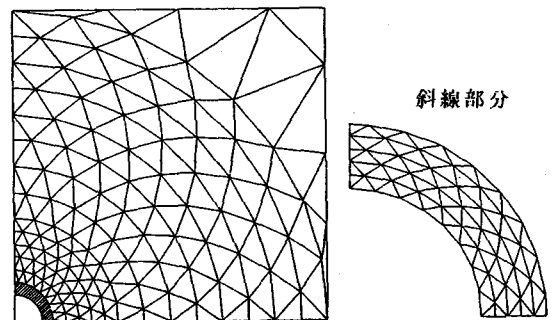
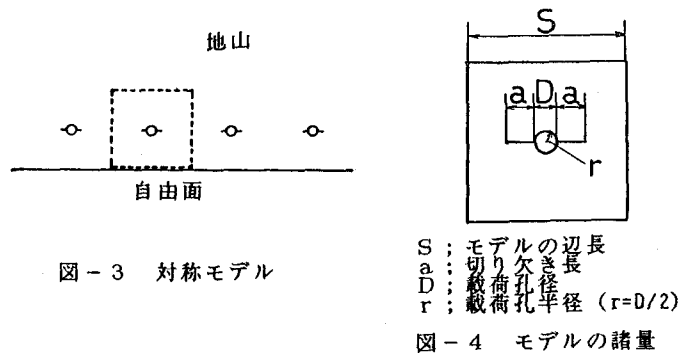


図-5 モデルの要素分割 ($S/D=12$)

3. セメントモルタル供試体による内圧破壊実験 前述のように切り欠きをつけた載荷孔に内圧を作用させて岩盤を破碎することを考慮したモデル実験を単純化したセメントモルタル供試体を用いて行ない、先の数値解析にもとづく考え方が実際に成り立つかどうかを実験的に検討した。セメントには早強セメントを用い、モルタルの配合はセメント：砂の重量比が1：2、水セメント比が0.43とした。打設後約二週間の湿潤養生を行ない実験に供した。実験時の材料定数は表-1に示すとおりである。載荷孔は直径が26mmとし、あらかじめ型枠に設置した塩化ビニル製パイプをモルタルが半硬化の状態のとき抜き取るにより設けた。供試体寸法は、高さは25cmとし、辺長はS/D が数値解析と同じ値になるよう S/D = 4, 8, 12から決定した。切り欠きは厚さ 1mm のアクリル板をサンドペーパーにより先端を鋭く整えモルタル中に埋め込むことにより設置した。切り欠き長さは辺長と孔直径との比, S/D が4のものについては切り欠き長の孔半径に対する比, a/r = 0,1,2 になるよう3種類、S/D が8のものについてはa/r = 0,1,3,5 となるよう4種類、またS/D が12のものについてはa/r = 0,1,3,5,7,9 になるよう6種類を用いている。供試体数は各々2個とするため計26個である。内圧の載荷は水压によるもので、密封したゴムチューブに手動ポンプにより水を送り込む形式をとっており図-7に示すように供試体高さの中央約70%に等分布載荷されるようになっている。載荷速度は2〜3 MPa/min とした。

図-8〜図-10にセメントモルタル供試体により得られた実験結果を○印で示す。また解析値と比較するため載荷幅に対応して実験結果を17/25倍し修正した値を●印で示している。図中、実線はセメントモルタルの破壊靱性値 K_{Ic} を $0.588\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ($60\text{kgfcm}^{\frac{3}{2}}$) として数値解析により求めた破壊圧である。図-8はS/D が4に対するものである。ここでa/r が大きくなるほど破壊圧が低くなるという傾向は解析結果とよく対応している。S/D が8の実験結果である図-9ではa/r の増加にともなう破壊圧低下の傾向は解析結果の傾向に対応するものではあるが数値解析でみられたa/r が2〜4程度の範囲における破壊圧一定の領域が顕著には表われていない。図-8 (S/D=12) においてはa/r が9の場合に実験値が著しく小さくなっているが全体として解析結果とよく一致している。

る。またa/r = 1〜5の範囲では破壊圧一定の領域が明確に認められる。ここで切り欠きのない供試体と切り欠きのあるものの破壊圧を比較する。全ケースについて a/rが1のものと比較して切り欠きのないほうが若干

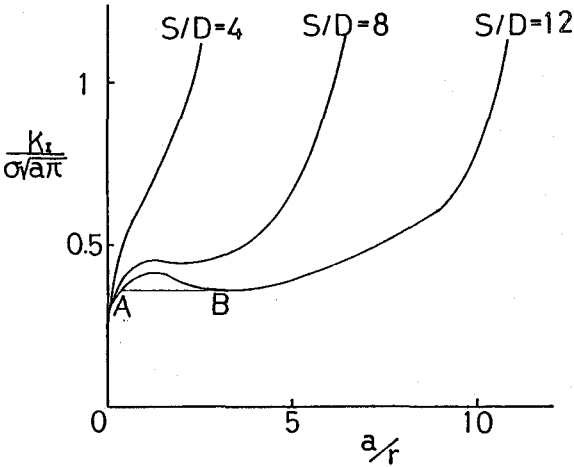


図-6 内圧を受ける角柱モデルの応力拡大係数

表-1 モルタルの材料定数

圧縮強度(MPa)	48.1
引張強度(MPa)	4.04
弾性係数(GPa)	20.3
ポアソン比	0.21

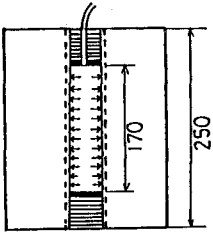


図-7 載荷状態 (mm)

大きい破壊圧となっているが大きな差がない。切り欠きのない供試体では写真-1にみられるように切り欠きを有するもののように供試体を完全に半分にする破壊ではなく割れやすい方向に破壊するものであり、もし供試体を真二つに破壊するとしたら若干大きい破壊圧となることが予想される。

4. おわりに

以上のように载荷孔に対称切り欠きを有する均質材料の内圧破壊について、主に切り欠き長さが破壊に与える影響について検討してきた。

その結果破断長が長くなる破壊においては切り欠きの長さを変化させても破壊圧が変わらない領域が存在することが示された。これは切り欠きを有効に用いて破壊設計を行なうための基礎的資料となろう。

実験による破壊圧と解析による破壊圧の差の解釈のためにここでは単純に载荷長と供試体長の比から実験値を17/25倍しているがこの点については検討の余地があろう。

参考文献

- 1) Bowie, O.L. and Freese, D.E., Elastic Analysis for radial crack in a circular ring, Eng. Fracture Mech., 4, 315-320, 1972.
- 2) Clifton, R.J., Simonson, E.R., Jones, A.H. and Green, S. J., Determination of the critical stress-intensity factor K_{Ic} in a circular ring, Experimental Mechanics, 16, 233-238, 1976,

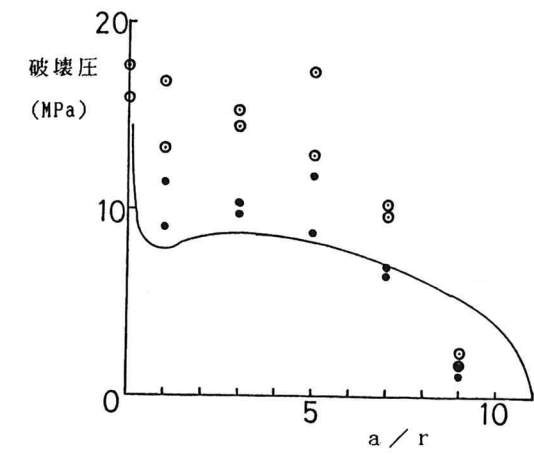


図-10 S/D=12の実験結果

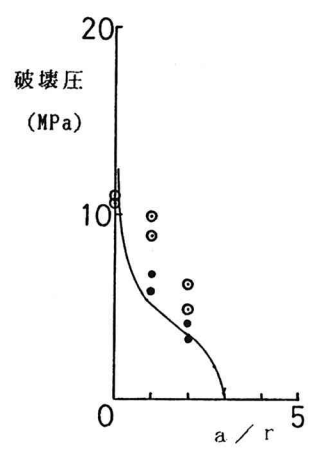


図-8 S/D=4の実験結果

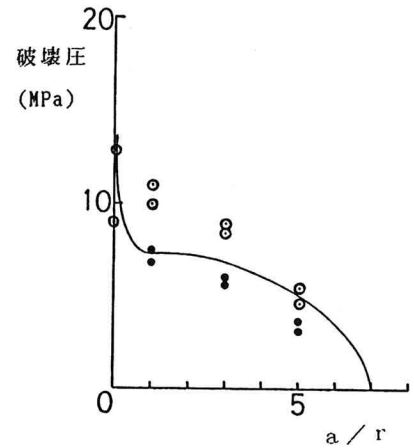


図-9 S/D=8の実験結果

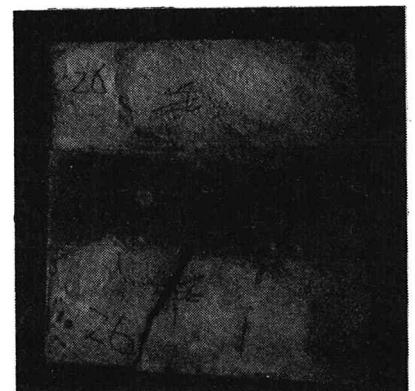


写真-1 供試体の破断形状

(13) The Notch Effect on Fracture of Rock-like Materials Subject to Internal Pressure

Ken-ichi HASHIMOTO, Yozo KUDO
Tokuyama Technical College
Kenji HAGIMORI
Technical Research Institute
OKUMURA CORPORATIN
Koji NAKAGAWA
Yamaguchi University

ABSTRACT

The notch effect on fracture of rock-like materials subject to internal pressure is investigated by means of finite element analysis and fracture experiment with cement-mortar specimens. Three kinds of models with one loading hole are treated in this paper. In the analysis, the relation between stress intensity factor(K_I) and notch length is obtained through the Energy Method. In the experiment, the relation between the measured maximum internal pressure at specimen failure and notch length is investigated. Then, the internal pressure at failure is calculated by numerical analysis results in consideration of fracture toughness(K_{Ic}) and is compared with experimental results.

As a result, the following become clear. The failure pressure of the model with a short length between free surface and loading hole become low with increase of notch length. In the model with a long length between free surface and loading hole, there is the range that failure pressure is not variable with change of notch length.