

清水建設(株) 正会員 ○石塚与志雄  
清水建設(株) 嶋田 純  
公害資源研究所 小林 秀男  
東洋工業(株) 石内紀久雄

1. はじめに 地下空洞掘削の際、発破による周辺岩盤の損傷、余掘を少なくするスムーズブラスティングが盛んに行なわれるようになってきた。スムーズブラスティングの一種として、掘削予定面に沿った発破孔にノッチ(切欠き)を設け、ノッチ方向にき裂が発生し易い事を利用して、岩盤の損傷をより少なくし、掘削断面を平滑に仕上げる工法(Pre-Notched Blasting 工法と呼ぶ)がある。ノッチを設ける方法としては、削岩機に特殊ビット(トレンチビット)を設置してノッチを穿孔する方法、圧力水(水ジェット)を利用する方法がある。ノッチの形状は種々考えられるので、効果的な形状の評価が必要となる。ここでは、形状の異なるノッチを有する円孔に静的破碎剤を充填して、破壊を生じさせる実験と、き裂先端の応力拡大係数解析を行ない、ノッチの形状効果と拘束圧下におけるノッチ効果について検討した。

2. 実験概要 実験に用いた試験体は、一辺 30 cm の渡良瀬花崗岩(引張強度 53.4 kgf/cm<sup>2</sup>, 弾性係数  $2.13 \times 10^5$  kgf/cm<sup>2</sup>, ポアソン比 0.10)の立方体で、中心にノッチを設けた円孔(直径 45 mm)を有するものである。ノッチは、トレンチビット(TB), 水ジェット(WJ)で設けた。ノッチ先端の形状は、TB について先端が丸い形状(先端丸)と鋭角な形状(先端鋭), WJ の 3 種類とし、各々についてノッチ長を変えて 6 種のノッチを選定した。比較のため、ノッチなし円孔についても実験を行なった。表-1 の中列に各ノッチの形状、寸法を示す。なお、WJ のノッチ幅は、圧力水方向の制御により、より細くすることが可能である。

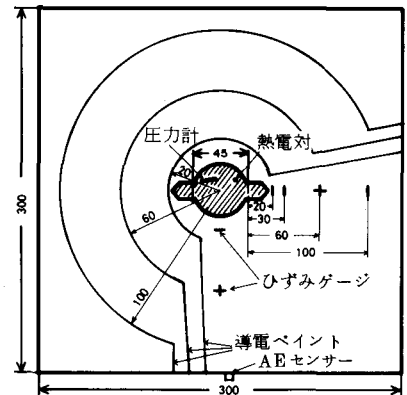


図-1 実験測定位置

実際の発破では、衝撃圧が発破孔壁に作用するが、今回は発破の代用として静的破碎剤を円孔に充填し、膨張圧により破壊を生じさせた。実験中は、円孔内部の内圧、温度、岩石のひずみの経時変化、および、破壊き裂の発生、進展を調べるために、導電ペイントの貼付、AE 測定を行なった。図-1 に岩石上面の各測定項目の位置を示す。

実際の岩盤では地圧が存在し、拘束圧下でのノッチ効果を調べる必要がある。そのため、各種ノッチ形状効果の比較実験体側面を無拘束とし、TB 先端鋭の深ノッチについて、全周拘束と片側拘束下における実験を行ない、拘束の影響を調べた。なお、拘束圧は 15 kgf/cm<sup>2</sup>とした。

3. 解析方法 今回の実験における岩石の破壊は、き裂の発生、進展という形態をとるため、解析では、ノッチ先端の先在き裂からき裂が発生すると考え、線形破壊力学を適用したき裂先端応力拡大係数解析を実施することにした。解析は、き裂先端付近に 8 節点 4 辺形アイソパラメトリック要素の一边を特異点(き裂先端)として退化させ、中間節点を 4 分の 1 特異点側に移動させて得ら

表-1 各ノッチ形状と実験・解析結果

| 破壊状況 |   | ノッチ形状          | 破壊内圧と K <sub>I</sub>       |                             |
|------|---|----------------|----------------------------|-----------------------------|
| A    | B |                | 0                          | 100 200 kgf/cm <sup>2</sup> |
|      |   | ノッチなし<br>45 mm | ○                          | ○                           |
|      |   | WJ 深<br>93     | △                          | ○                           |
|      |   | WJ 浅<br>69     | △                          | ○                           |
|      |   | TB 鋭・深<br>72   | △                          | ○                           |
|      |   | TB 鋭・浅<br>66   | △                          | ○                           |
|      |   | TB 丸・深<br>87   | △                          | ○                           |
|      |   | TB 丸・浅<br>88   | △                          | ○                           |
|      |   |                | ○ 破壊内圧                     |                             |
|      |   |                | △ K <sub>I</sub> : ノッチ部内圧無 |                             |
|      |   |                | □ K <sub>I</sub> : ノッチ部内圧有 |                             |

れる特異要素<sup>1)</sup>を用いたFEMにより行なった。なお、応力拡大係数( $K_I$ )の算定法としてはJ積分法を用いた。

$K_I$ の解析を行なう場合、ノッチ先端の先在き裂の長さの評価が必要となる。現状では、定量的な先在き裂長の評価が確立されていないため、今回は、ノッチなし円孔の破壊実験結果から逆計算による先在き裂長の推定を試みた。方法は、破壊時の内圧を円孔壁に作用させて得られる $K_I$ を、各き裂長に対して求め、 $K_I$ が破壊じん性値 $K_{Ic}$ に一致する時、破壊が発生すると考え、先在き裂長を算定するという方法である。ここでは、内圧を実験結果の平均値 $215 \text{ kgf/cm}^2$ 、花崗岩の $K_{Ic}$ を $6.0 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ とし、き裂長を $0.05 \sim 1.0 \text{ mm}$ まで変化させた。図-2に解析結果を示す。これによれば、先在き裂長は $0.05 \sim 0.1 \text{ mm}$ 程度と推定される。解析では、 $0.1 \text{ mm}$ を用いた。

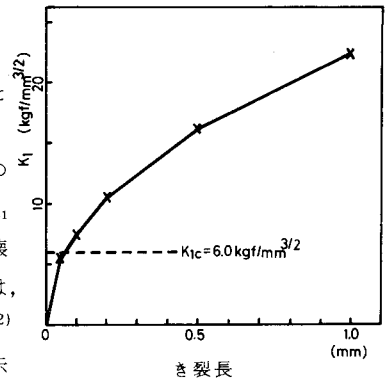


図-2  $K_I$ とき裂長の関係

表-2 拘束圧下における破壊内圧と $K_I$

| 拘束状態                           |             |             |             | 実験無         |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 破壊内圧<br>kgf/cm <sup>2</sup>    | 107         | 148         | 167         | —           |
| $K_I$<br>kgf/mm <sup>3/2</sup> | 21.4 - 51.2 | 13.1 - 42.9 | 11.6 - 41.4 | 22.9 - 52.7 |

PNB工法により実際に掘削する際、発破時に発生する衝撃圧は、ノッチなしの場合には発破孔壁に様に作用すると考えられるが、ノッチありの場合には、ノッチの影響のため発破孔壁に作用する内圧分布は様にならないと考えられる。また、実験では、ノッチ部分の内圧は円孔部の内圧よりも小さい値を示した。このため、解析では、円孔部のみ内圧が作用する場合と円孔部、ノッチ部分に一樣な内圧が作用する場合の2通りを考えた。なお、内圧は全て $100 \text{ kgf/cm}^2$ とした。

**4. 実験結果および解析結果** 表-1に、側面無拘束の場合の各ノッチ形状に対する破壊状況と破壊時の内圧、およびFEMによる $K_I$ を示す。実験は2回しか実施しなかったが、ノッチが深い場合、先端鋭の場合には、ノッチ方向のみに破壊面が形成され、他の形状よりき裂発生方向の制御力が高いことを示した。破壊内圧は、形状の種類による著しい差は認められないが、ノッチなし円孔の場合と比較するとかなり小さい値を示した。一方、解析結果は、ノッチが深く、先端鋭の場合が他の形状と比較して大きな $K_I$ となり、実験の破壊面形成状況に対応している。ノッチを有する場合の $K_I$ は、ノッチなしの場合に比較してかなり大きな値となり、解析においてもノッチの効果が確認された。また、ノッチ部分に内圧が作用する方が、内圧が作用しない場合よりも大きな $K_I$ となることから、発破時に発生する衝撃圧がノッチ部分にも有効に作用するようなノッチ形状が効果的であると考えられる。

つぎに、TB先端鋭で深ノッチの場合の拘束圧下での実験および解析結果を表-2に示す。実験は、表に示すように2通り(全周拘束とノッチ方向に平行な側面を拘束)しか実施しなかったが、破壊内圧は無拘束状態と比較して大きくなり、き裂発生方向の制御力も低下する。解析においても、同様に $K_I$ は小さくなる。これに対して、ノッチ方向に直角な側面を拘束する場合、 $K_I$ は無拘束状態と同じ程度の値を示す。このことは、実際に空洞掘削する場合、ノッチ方向が自由面に平行であれば、無拘束状態と同程度のノッチ効果があることを示している。

**5. 結論** 以上より、ノッチ形状としては、ノッチが深く、先端鋭で、ノッチ部分にも有効に内圧が作用するような形状が効果的であり、拘束圧下では、ノッチ方向が自由面に平行であれば、無拘束圧と同程度のノッチ効果があることが明らかとなった。実際の発破は衝撃荷重であり、複数の発破孔が設けられる。そのため、今後、静的荷重と衝撃荷重との相違、発破孔間の相互干渉等の検討が必要と思われる。

**謝 辞** 実験遂行に際し、日油技研工業(株) 塚本靖夫氏の協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

**参考文献** (1) Barsoum R.S. : Int. J. Num. Method in Engng., Vol.11, (1977), pp.85-99

(2) 大塚尚寛, 小林良二 : 日本鉱業会誌, 98〔1127〕, (1982), pp.1-6