

## (20) 液圧による岩質材料の破碎について

徳山高専 正会員 ○橋本堅一  
 徳山高専 正会員 工藤洋三  
 山口大学工学部 正会員 中川浩二  
 (株)奥村組 正会員 萩森健治

### 1. はじめに

硬岩の掘削を伴う工事が市街地近辺や既設構造物に近接して行なわれる場合が増加しているように思われる。この場合に従来の爆薬を用いる工法は種々の理由より制限され、機械掘削や静的破碎剤などを用いたいいわゆる無発破岩盤掘削工法がとられることが多いようである。これらの中で穿孔された孔中に静的破碎剤や液圧を作用させ岩盤を破碎する方法は今後多く用いられる方法と思われる。またその破壊の機構等は力学的にも興味のあるところである。そこで本研究では液圧による岩盤掘削に関する基礎的資料を得ることを目的とし、モルタル供試体による破壊実験とそれに対する有限要素法を用いたシミュレーション解析を行った。実験は中空円筒供試体と孔列を有するブロック供試体について行い、液圧破壊の条件およびメカニズムについて検討した。

### 2. 内圧を受ける材料の破壊

佐藤らは鋳鉄、黒鉛および大理石を円筒状に加工して内圧破壊実験を行った結果を報告している。佐藤らによると円筒の破壊には次式で表される平均応力説とその適用限界で起こる2種類、すなわち

$$\frac{\sigma_{ic}}{\sigma_t} = (D/d) - 1 \quad \text{----- (a)}$$

$$\frac{\sigma_{ic}}{\sigma_t} = \frac{3(D/d)^2 - 1}{2(D/d)^2 + 1} \quad \text{----- (b)}$$

$\sigma_{ic}$ ; 破壊膨張圧  $\sigma_t$ ; 引張強度  
 $D$ ; 円筒の外径  $d$ ; 円筒の内径

の関係のものがあつた。実際の材料の破壊に対してはこれらの直線および曲線の間に存在すること、また材料の延性が完全脆性材料から増すにしたがつて円筒の応力分布はなだらかになるので条件式は(b)から(a)に移行すると述べている。また石島らは水圧破碎と静的破碎剤による破碎について合理的な岩盤掘削に関する基礎資料を得ることを目的として数値シミュレーションを行っている。石島らの考え方はクラックの発生を引張強度に、クラックの伸展を破壊靱性値に依存させている。内圧破壊をクラックの問題として扱い破壊力学へのアプローチを試みたことは興味のもてることである。

### 3. モルタル供試体による破壊実験

液圧による内圧破壊に関する基礎資料を得るためにまず1孔を有する円筒モデルについてつぎに岩盤掘削を考慮した破碎設計の立場から孔列を有するブロック破壊実験を行った。ここで破壊膨張圧については圧力発現部が供試体高さに比べて短いため若干の補正をおこなっている。用いた液圧破碎器はボアホールにゴムチューブを介して高水圧を作用させ材料を破壊させるものであり、5本の液圧管とこれらに水を供給するポンプおよびバルブユニットからなっている。

#### 3. 1 中空円筒供試体の実験

供試体高さは25cmとし外径(D)と内径(d)は表-1に示す。材料にはセメントモルタルを用い配合はC:S=1:2(手練り)、C:S=1:1(手練り)およびC:S=1:2(レディミクストモルタル)とした。打設後約4週間の湿潤養生ののち実験に供している。供試体数はそれぞれの実験条件について各2個とし合計は54個である。載荷速度は2-3 MPa/minとした。

| 供試体種類 | 外形(cm) | 内径(mm) |
|-------|--------|--------|
| A     | 10     | 22     |
| B     | 10     | 26     |
| C     | 10     | 32     |
| D     | 20     | 22     |
| E     | 20     | 26     |
| F     | 20     | 32     |
| G     | 30     | 22     |
| H     | 30     | 26     |
| I     | 30     | 32     |

表-1 円筒供試体緒量

写真-1に供試体の代表的な破壊形状を示す。破壊は若下の例外を除いてこの写真に示すようにほぼ半分にボンという音とともに割れた。図-1は外径10cm、内径22mmの供試体の外側面に互いに120度となる位置、3箇所に貼り付けた電気抵抗線ひずみゲージにより測定した加圧に伴うひずみの増加を示す。この図において内圧が8MPaあたりから3本のひずみゲージのひずみにはその増加傾向に差が顕著となりはじめる。このことは8MPaあたりから特定の方向へのクラックの発達が生じ、供試体中のひずみの分布が軸対称ではなくなったことを意味している。すなわちこの程度の外内径比( $D/d$ )の供試体においても破壊は瞬時には起こらずある程度クラックが伸びて起こるものと判断される。図-2は破壊圧力と圧裂引張強度の比( $\sigma_p/\sigma_t$ )と外内径比( $D/d$ )の関係を各々6個の供試体について示している。図には佐藤らによって示された二つの破壊条件をも参考のために示している。実験結果は両条件の中間程度の値をとるようでありなめらかな曲線状を示している。

### 3.2 孔列を有するブロックの破壊

供試体高さは円筒供試体と同様25cmとした。用いた供試体の寸法および孔径、孔数をまとめて表-2に示す。供試体数は各々2個、計30個とし、材料にはセメント対砂が1:2のレディミクストセメントモルタルを用いた。写真-2に破壊状態の一例を示す。実験に際していくつかの供試体で各孔間の中間位置にひずみゲージをはりつけ荷重にともなうひずみの変化を計測している。その一例を図-3に示す。一般に図-3中(a)で示されるように最大ひずみを与える孔間は破断の結果、直線に近い破断を与えることが示された。これについては次のように考えられる。すなわち荷重により各孔から孔間にクラックは発達するがこのクラックは必ずしも孔中心を結ぶ直線上にあるとはいえない。これらの中で比較的直線に沿うクラックをもつ孔間が最大のひずみを与えることにより、まず最初に破断することになる。一つの孔間が破断すると破壊現象は直ちに隣接する孔間へも及ぶ。隣接孔間の破断に際してはすでに孔から発達しているクラックは必ずしも孔間を結ぶ直線上にはないためその破断面は直線状とはならない可能性が高い。このことから破断面の形態により最初に破断した孔間を推定することが可能である。また孔間が大きくなるほどこの破断面の直線性はなくなる傾向にあった。破壊圧力と圧裂

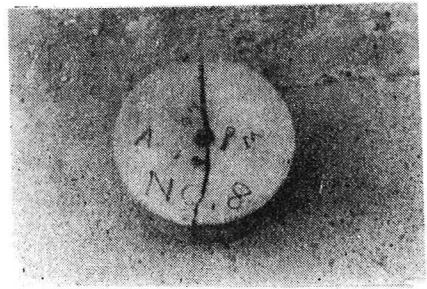


写真-1 円筒供試体の破壊状態

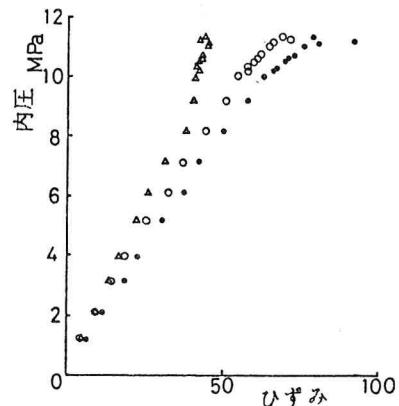


図-1 円筒供試体の円周ひずみ

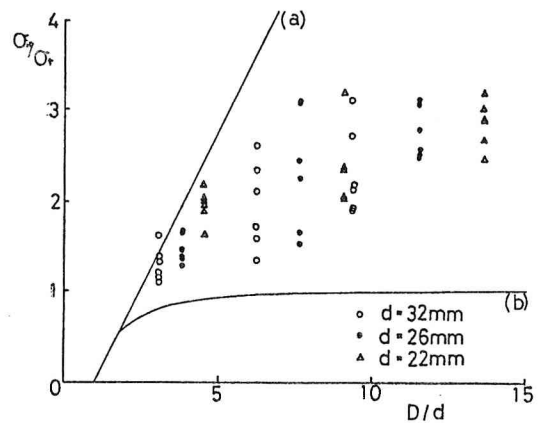


図-2  $D/d$ と $\sigma_p/\sigma_t$ の関係

強度の比( $\sigma_c/\sigma_t$ )と孔間隔と孔径の比( $S/d$ )の関係をしめしたのが図-4である。ここでも $D/d$ と $S/d$ を読みかえると円筒供試体の場合と同様に $S/d$ が大きくなるにつれて $\sigma_c/\sigma_t$ がなめらかに増加する傾向がみられ両曲線はよく似た形を示している。

#### 4. 数値シミュレーション

##### 4. 1 数値解析

液圧を受けるモルタル供試体の破壊の機構と条件を力学的に検討するため孔列を有する供試体の破壊について数値シミュレーションを行った。数値シミュレーションには有限要素法を用いた。解析に用いた有限要素分割は正三角形を基礎としており孔は正六角形で近似している。 $S/d=4$ と $S/d=6$ のモデルを図-6および図-7に示す。斜線を施した部分が載荷孔である。解析手順は次のとおりである。すなわち載荷孔に内圧を与えて周囲の要素の最大主応力を求める。最大主応力が材料の引張強度を越す場合にはクラックが入るものとし要素の弾性係数を直交異方性に置きかえる。対象となるすべての要素の最大主応力が材料強度以下になるまで繰り返す。すなわちあらかじめ定めたステップ幅の内圧の増加につれて供試体が破断するまで繰り返す。

##### 4. 2 材料の応力-歪関係

破壊条件には多くの考え方があるがここでは簡単のため破壊は最大主応力に支配されるものとする。シミュレーションに用いた材料の応力-ひずみ関係を図-5に示す。この応力-ひずみ関係はEvansらのコンクリートについての実験にもとづくものでありここではこれに準ずることとした。折れ線とひずみ軸とで囲まれる面積は破壊靱性と関連づけられるものである。

##### 4. 3 数値解析結果

数値解析により得られたクラックの伸展状態を図-6( $S/d=4$ )、7( $S/d=6$ )に示す。これによると載荷孔周辺の要素については両者とも3MPaでクラックが入っているが最終的な破断は $S/d=4$ では5MPaのときに $S/d=6$ のときには6MPaのときに起こっている。また得られた破断時の応力を各 $S/d$ について図-3に示している。ここで $\sigma_c/\sigma_t-S/d$ 曲線は若干低くな

| 供試体種類 | 寸法(mm)   | 孔径(mm) | 孔数 |
|-------|----------|--------|----|
| A     | 59×35×25 | 22     | 3  |
| B     | 59×35×25 | 22     | 4  |
| C     | 59×35×25 | 22     | 5  |
| D     | 59×35×25 | 26     | 3  |
| E     | 59×35×25 | 26     | 4  |
| F     | 59×35×25 | 26     | 5  |
| G     | 59×35×25 | 32     | 3  |
| H     | 59×35×25 | 32     | 4  |
| I     | 59×35×25 | 32     | 5  |
| J     | 29×35×25 | 22     | 4  |
| K     | 34×35×25 | 26     | 4  |
| L     | 42×35×25 | 32     | 4  |
| M     | 19×35×25 | 22     | 4  |
| N     | 23×35×25 | 26     | 4  |
| O     | 28×35×25 | 32     | 4  |

表-2 ブロック供試体の諸量

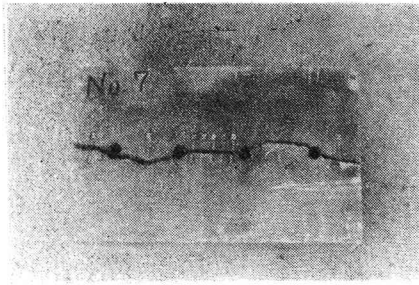


写真-2 ブロック供試体の破断状態

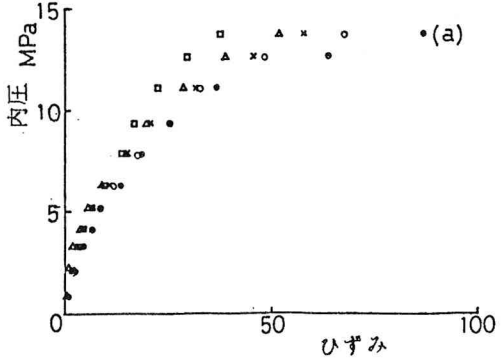


図-3 孔間のひずみの発現

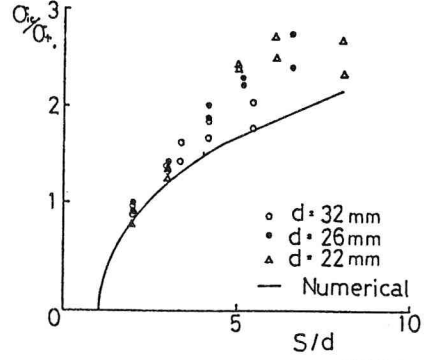


図-4  $S/d$ と $\sigma_c/\sigma_t$ の関係

っているがその形状はよく似ておりシミュレーション結果は実験結果をおおむね説明できるものと思われる。

## 5. おわりに

以上のように液圧によるセメントモルタルの破壊について一孔を有する円筒供試体および孔列を有するブロック状供試体についてその破壊条件および破壊のメカニズムを検討してきた。その結果それらの破壊は引張強度だけでなく破壊靱性を考慮したシミュレーション解析により説明できることが示された。しかし孔列破壊においては $S/d$ 限られた範囲でしか行われていないのでこれらを今後の課題としたい。

## <参考文献>

- 1) 佐藤、茂村、永井 「ぜい性材料からなる円筒の内圧破壊に及ぼす延性の影響」 日本機械学会論文集(A編)、第45巻、第391号、1979年、3月
- 2) 石島、木下 「岩石の静的破碎—水圧破碎と静的破碎剤による破碎—」 第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、1984年、12月
- 3) Evans, R. H., and Marathe, M. S., "Microcracking and Stress-Strain Curves for Concrete in Tension," *Materiaux et Constructions*, Vol. 1, Jan. - Feb., 1968, PP. 61-68.

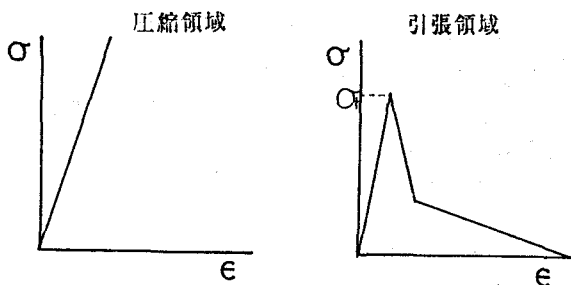


図-5 解析に用いた応力-歪関係の

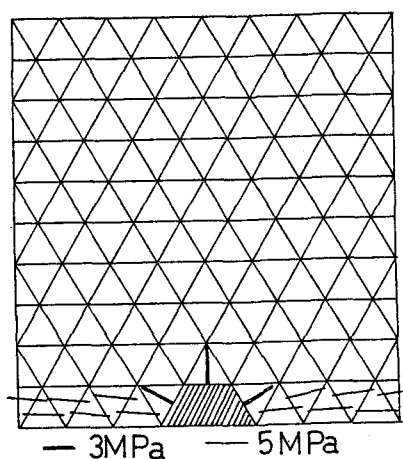


図-6  $S/d=4$  の数値解析結果

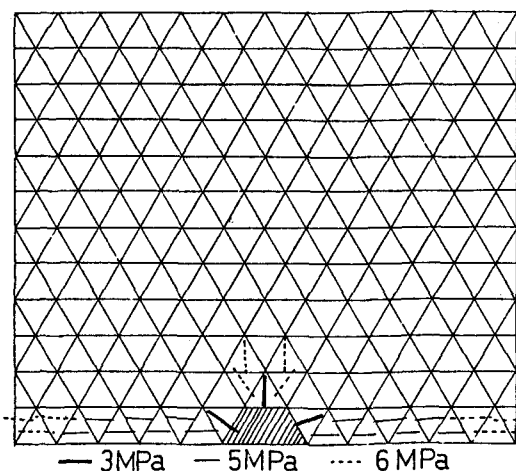


図-7  $S/d=6$  の数値解析結果

## (20) Fracturing of Rock-like Materials by Liquid Pressure

Ken-ichi HASHIMOTO, Yozo KUDO  
Tokuyama Technical College  
Koji NAKAGAWA  
Yamaguchi University  
Kenji HAGIMORI  
Okumuragumi Co., Ltd.

### ABSTRACT

Recently, there has been a marked tendency to excavate hard rocks close to urban areas or established structures. Thus, the former excavation method of using explosives is limited because of various reasons. Therefore, non-explosive methods are widely used and are in great demand. The excavation of rocks using the pressure of a demolition agent or a liquid are important mainly because they are easy to handle. Thus, the behavior and mechanism of fractures are important for us.

In this study, a fracture experiment, using cement mortar specimens, was performed with the objective of getting basic data of using liquid pressure and the experimental results were analyzed with the finite element method.

In this experiment, cylindrical specimens with one borehole and rectangular specimens with the holes parallelepiped were used and the fracturing conditions and mechanisms were discussed.

The numerical results showed a good simulation of the fractures in the cement mortar specimens.