

# 特殊発熱剤添加による膨張性破砕剤の破砕効果 について(第3報)

—破砕効果について—

\*坂野良一, \*石井康夫, \*\*塚本靖夫, \*\*片岡雅義

著者らは、第1報<sup>1)</sup>(加熱効果について)、第2報<sup>2)</sup>(加熱方式及び反応促進効果について)で含水後の膨張性破砕剤を特殊テルミット剤である発熱剤により加熱することで、膨張性破砕剤の反応を促進し、ごく短時間のうちに破砕に必要な膨張圧に達すること、さらには、その場合の膨張性破砕剤と特殊発熱剤の装填方法、加熱方法について報告した。

膨張性破砕剤と特殊発熱剤とを用いるこの破砕方法を、岩石、岩盤、コンクリートなどのぜい性体の破砕に数多く適用した結果、相当効率よく用いることができることを確認した。

本稿は、この破砕方法をぜい性体の破砕に適用する場合に必要な破砕設計法について、光弾性法試験、コンクリート供試体におけるひずみ測定を行ない、主として膨張圧 $P_i$ により装填孔周辺に発生する応力及びその分布について検討すると共に、破砕設計法について述べた。

## 1. 緒 論

第2報では、特殊発熱剤(以下発熱剤とする)と膨張性破砕剤(以下破砕剤とする)と合わせ用いることにより、破砕剤含水後、破砕剤中にリーフ孔を設け、10~30分で発熱剤で加熱することにより破砕剤の水和、膨張反応を促進し、加熱後数分間で膨張圧 $P_i=400\text{kgf/cm}^2$ 程度に上昇させ、岩石、岩盤、コンクリートなどのぜい性体を相当効率よく破砕しうることを報告した。

本稿では、この破砕方法をぜい性体破砕に適用する際の破砕計画に必要な合理的なせん孔配置、破砕剤量、発熱剤量について、2次元、3次元の光弾性試験、コンクリート供試体によるひずみ計測、解析から、破砕設計上必要となる項目について検討を行ない、せん孔間隔設定のための式、破砕剤、発熱剤の必要量の標準値について研究したものである。

これら一連の研究の結果、この破砕方法が、実際の破砕において有効に実施されうる破砕方法であることが確認された。

## 2. 光弾性試験による応力解析

破砕剤の膨張圧により装填孔周辺に発生する応力を

昭和61年12月17日受理

\*大成建設株式会社 土木本部土木部  
〒163 東京都新宿区西新宿 1—25—1  
TEL (03) 348-1111

\*\*日油技研工業株式会社 川越工場 技術部  
〒350 埼玉県川越市鯨井 1995—4  
TEL (0492) 31-2103

解析するため、 $P_i$ なる圧力が内壁に作用する円孔を有する板の2次元応力問題としてとらえた2次元の試験を行ない、次いで3次元の光弾性試験を行なった。

特に3次元供試体試験は、装填孔の深さ方向に平行する断面での応力分布を確認するためのものである。

なお、装填孔にノッチを設けた装填孔周辺の応力についても確認した。

### 2.1 光弾性試験 (i) (2次元試験)

2.1.1 2次元光弾性供試体及び円孔への加圧法  
供試体、光学的に均一で、無応力状態の熱硬化性のエポキシ樹脂板を用いた。

形状は、Fig. 1のごとく、1辺300mmで板厚 $t=6\text{mm}$ の平板である。

装填孔径は、通常この破砕で用いる装填孔直径 $2r_i=38\text{mm}$ の1/3、 $\phi 12.7\text{mm}$ とした。

円孔(装填孔)の配置は、Fig. 1に示す様にCase 1(1孔)、Case 2(2孔)、Case 3(3孔)とした。2孔、3孔の場合の孔間隔( $D$ )は、2孔の場合 $D=21.0r_i$ (133.4mm)、3孔の場合 $D=11.0r_i$ (75mm)とした。

円孔内への加圧は、アルミニウムの円板を用い「冷しばめ法」により、光弾性フリッジが10本以上出るように行なった。

### 2.1.2 応力分布

等色線のフリッジ次数 $N$ と主応力 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、とには次の関係がある<sup>3)</sup>。

$$N=at(\sigma_1-\sigma_2) \quad (1)$$

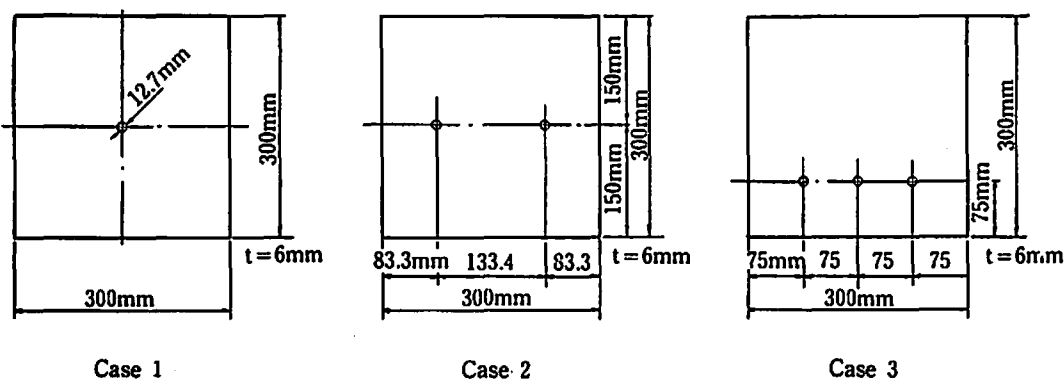


Fig. 1 Two-dimensional test pieces.

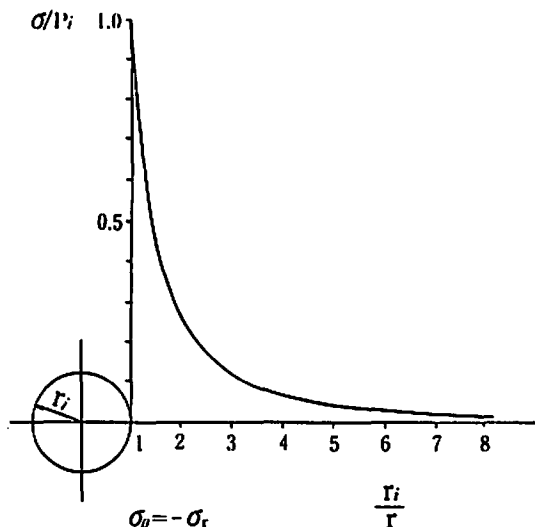


Fig. 2 Attenuation of stress around a single borehole.

ただし  $\alpha$ : 光弾性感度 (mm/kgf),  $t$ : 供試体厚 (mm)。本試験では、 $\alpha = 0.96 \text{ mm/kgf}$ ,  $t = 6 \text{ mm}$  であることから、次のごとくとなる。

$$N = 5.76((\sigma_1 - \sigma_2)) \quad (2)$$

無限大の板の円孔に内圧が作用したときの板の応力状態は、内圧を  $P_i$ 、円孔の半径を  $r_i$ 、孔の中心から  $r$  の位置の円周方向応力を  $\sigma_\theta$ 、半径方向応力を  $\sigma_r$  とすると、次式のごとく表される。

$$\sigma_\theta = \sigma_1 = \left(\frac{r_i}{r}\right)^2 P_i \quad (3)$$

$$\sigma_r = \sigma_2 = -\left(\frac{r_i}{r}\right)^2 P_i \quad (4)$$

なお、 $\sigma_\theta = -\sigma_r = \sigma$  である。

フリンジ次数  $N$  が、 $N = 5.76 \times 2 \times \sigma$  であることから、 $N$  と  $\sigma_\theta$ 、 $\sigma_r$  との関係を求めると次式のごとくとなる。

$$\sigma_\theta = (1/11.52)N \quad (5)$$

$$\sigma_r = -(1/11.52)N \quad (6)$$

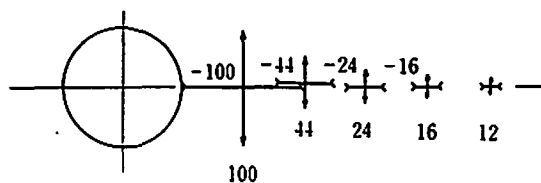


Fig. 3 Stress produced around a round borehole to which an inner pressure of  $400 \text{ kgf/cm}^2$  is applied (unit:  $\text{kgf/cm}^2$ )

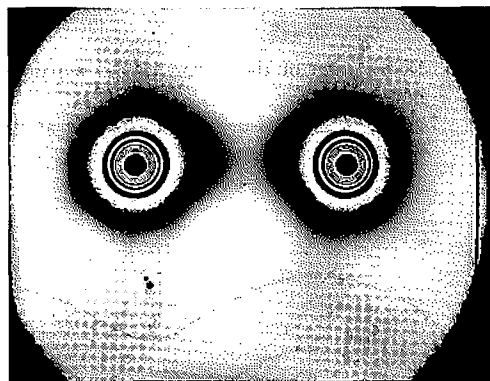


Fig. 4 Photoelasticity fringe pattern around a pair of boreholes.

#### ① 装填孔1孔の場合

応力は、Fig. 2のごとくとなり、孔壁位置で最大となる。しかしながらその位置より離れるにしたがい急激に応力は減衰し、半径の3倍の位置  $r = 3r_i$  では、内圧  $P_i$  により孔壁に発生する応力の  $1/10$ 、 $r = 10r_i$  では  $1/100$  となることわかる。

Fig. 3は、破砕剤の膨張による内圧  $P_i = 400 \text{ kgf/cm}^2$  を円孔に作用させたときの発生応力を示したものである。

#### ② 装填孔2孔の場合

2孔間の距離を  $D = 21.9 r_i (133.4 \text{ mm})$  とした場合、

光弾性フリンジは、Fig. 4のごとくとなると共に、応力分布は、Fig. 5のごとくなり、装填孔2孔の場合の膨張圧により孔間に発生する応力の相互干渉は比較的小さいことがわかる。

③ 装填孔3孔の場合

3孔相互の孔間距離 $D=11.8r_i$ (75mm)とした場合の光弾性フリンジをFig. 6に、応力分布をFig. 7に示

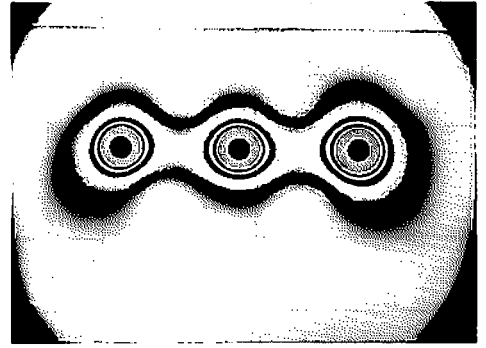


Fig. 6 Photoelasticity fringe pattern around three boreholes.

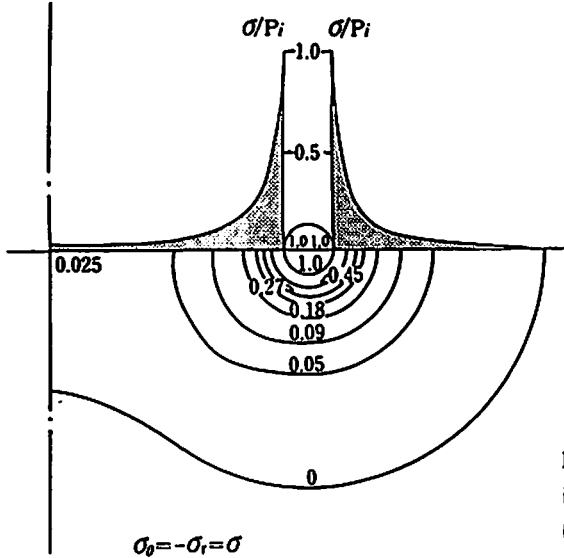


Fig. 5 Distribution of the stress around a pair of boreholes.  
( $P_i$  is inner pressure:and the stress at the borehole wall is assumed to be 1.0)

す。孔間の応力は、内圧を $P_i=400\text{kgf/cm}^2$ とすれば、 $\sigma_0=32.0\text{kgf/cm}^2$ となる。

2. 2 光弾性試験(II)(3次元試験)

2. 2. 1 3次元光弾性供試体及び円筒孔への加圧法

3次元光弾性試験の供試体は、2次元試験で用いたものと同様エポキシ樹脂を用いた。供試体の形状は、Fig. 8のごとき形状とした。装填孔については、孔直径 $2r=\phi 38\text{mm}$ の1/3、 $\phi 12.7\text{mm}$ とし、孔長については、93mmで行なった。

装填孔の配置は、2孔とし、孔間隔は、2次元試験3孔の場合の孔間隔 $D=11.8r_i$ (75mm)とした。

円筒装填孔への加圧は、Fig. 9に示すごとくとした。CaseAは、発熱剤により破砕剤への加熱が開始され、

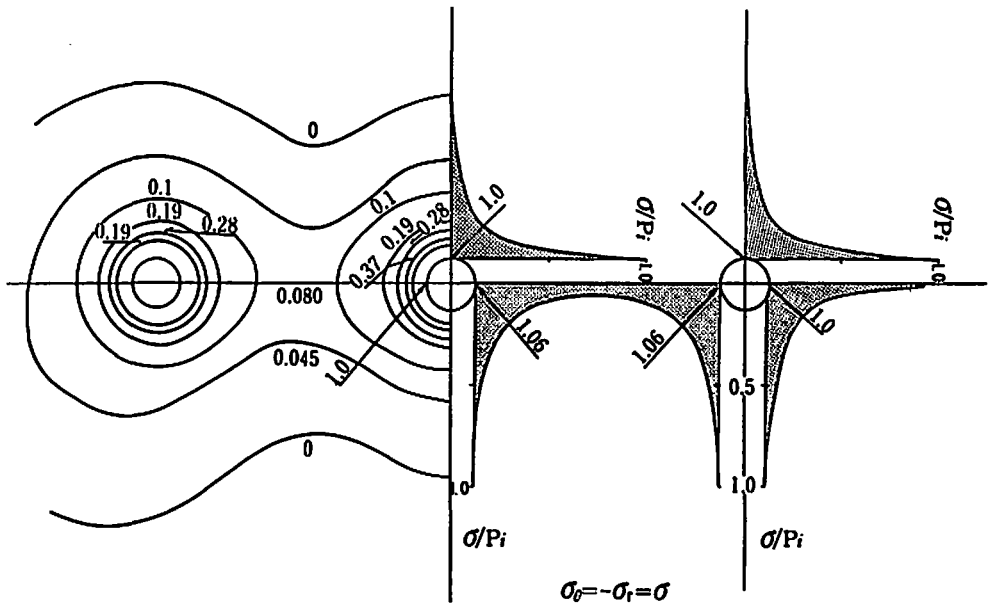


Fig. 7 Distribution of the stress around three boreholes.  
 $P_i$  is inner pressure:and the stress at the borehole wall is assumed to be 1.0)

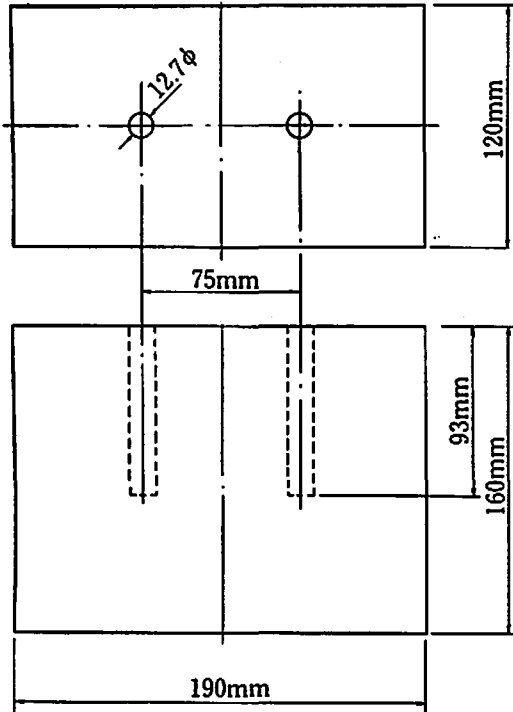
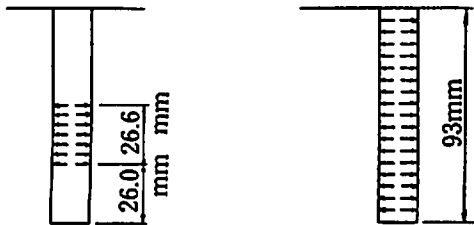


Fig. 8 Test piece for three dimensional photoelasticity test.



Case A

Case B

Fig. 9 Manners for the application of expansive stress.

破砕剤の反応が発熱剤近傍で始まった段階を想定し、Case Bは、破砕剤の反応が装填孔全長に及び、装填孔全体が加圧された状態を想定したものである。加圧法は、エポキシ樹脂で製作したシリンダーに、空気圧をCase Aで2.08kgf/cm<sup>2</sup>、Case Bで3.13kgf/cm<sup>2</sup>作用させ行なった。

### 2. 2. 2 応力の凍結と光弾性供試体

3次元供試体を応力凍結炉に入れ、炉の温度を130℃まで上げ、供試体の弾性係数を低下させた状態で空気圧による内圧を装填孔に加え、応力を供試体に導入したのち、ゆっくりと冷却し、応力を凍結させた。その後、必要な断面を板厚  $t=8\text{mm}$  で切り出し、

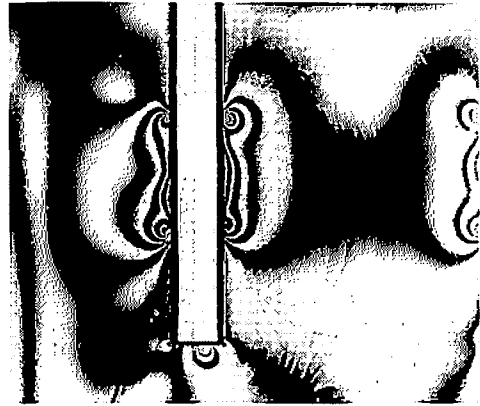


Fig. 10 Photoelasticity fringe pattern for the Case A.

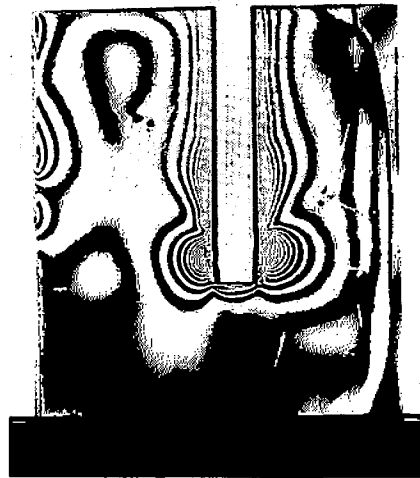


Fig. 11 Photoelasticity fringe pattern for the Case B.

供試体とした。

### 2. 2. 3 主応力線図

装填孔の深さ方向と直交する断面での主応力線図は、2次元の場合と同様な結果を得た。

一方、装填孔の深さ方向に平行する断面での光弾性フリンジは、Case Aの場合、Fig. 10、Case Bの場合Fig. 11のごとく得られた。

### 2. 2. 4 応力分布

装填孔の深さ方向に直交する断面での等色線フリンジ次数  $N$  と主応力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  の関係は、2次元の場合と同様であるが、装填孔深さ方向に平行する断面における、縦方向の応力  $\sigma_L$  は、次式で求めた。

$$\sigma_L = N/\sigma_0 + \sigma_r \quad (7)$$

Case Aの応力分布はFig. 12、Case Bの分布は、Fig. 13のごとくとなった。Fig. 13における孔下端付近の応力集中は、実験方法による影響であり、シリン

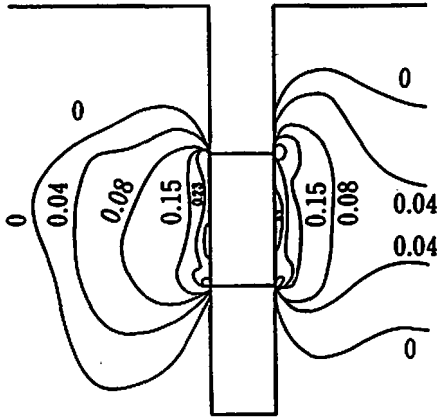


Fig. 12 Stress distribution for the Case A.  
(The stress at the borehole wall is assumed to be 1.0)

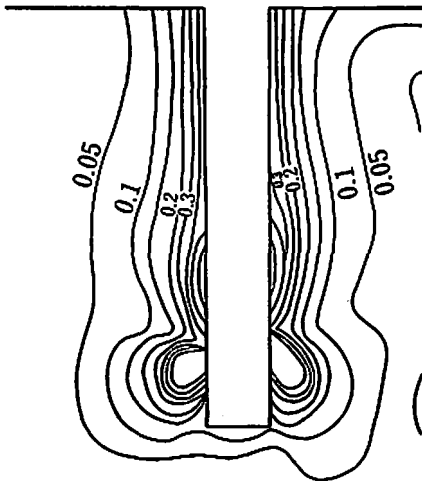


Fig. 13 Stress distribution for the Case B.  
(The stress at the borehole wall is assumed to be 1.0)

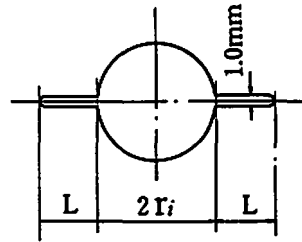
ダー下端が完全に孔下端まで挿入できなかったことによるものである。したがって実際の破砕では、孔下端部において発生する応力<sup>5)</sup>である。

なお、装填孔に直交する断面における $\sigma_a$ 、 $\sigma_r$ は、2次元試験の結果と一致した。

### 2.3 ノッチ効果の試験

破砕剤により、目的とする方向へ亀裂を誘導し、整形破砕をするために、破砕剤装填孔の周壁部分に、ジェットカッティング法、機械的な切削法等により、亀裂を誘導したい方向側にノッチ(切り欠き)を設けた状態で破砕を行えば、相当精度の高い破砕効果が期待できる。

この効果を確認するために、2次元の光弾性供試体



$$2r_i = 12.7\text{mm}$$

$$1 : L = \frac{1}{2} r_i$$

$$2 : L = r_i$$

Fig. 14 Cross-sectional shape of the notched borehole.

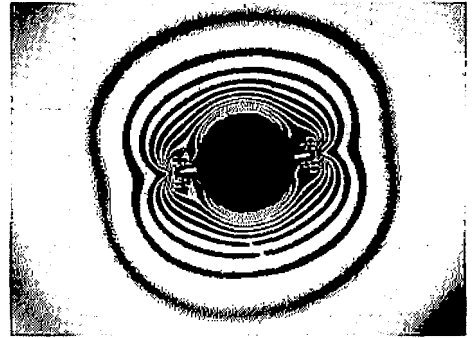


Fig. 15 Photoelasticity fringe pattern around a borehole with notches. (Notch length  $L_1 = 1/2 r_i$ ).

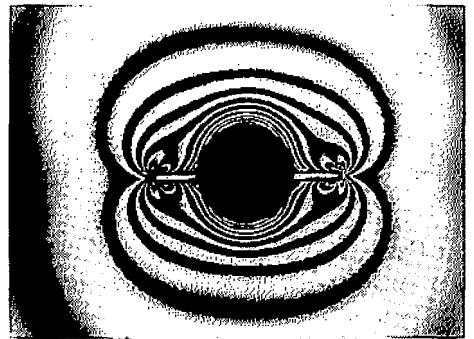


Fig. 16 Photoelasticity fringe pattern around a borehole with notches. (Notch length  $L_2 = r_i$ ).

による試験を実施した。

#### 2.3.1 光弾性供試体及び円孔への加圧法

供試体は、前述の試験と同様にエポキシ樹脂を用い、大きさは $\phi 12.7\text{mm}$ の円孔内側より作用させる内圧の影響が供試体外周まで及ばない大きさ、 $300\text{mm} \times 150\text{mm} \times 6\text{mm}$ とした。円孔径は、実際の孔径 $2r_i = \phi 38\text{mm}$ の1/3スケールの $\phi 12.7\text{mm}$ とし、ノッチ長は、Fig. 14のごとく、 $L_1 = 1/2 r_i$ 、 $L_2 = r_i$ とした。なお、ノッチ幅は1mmとした。

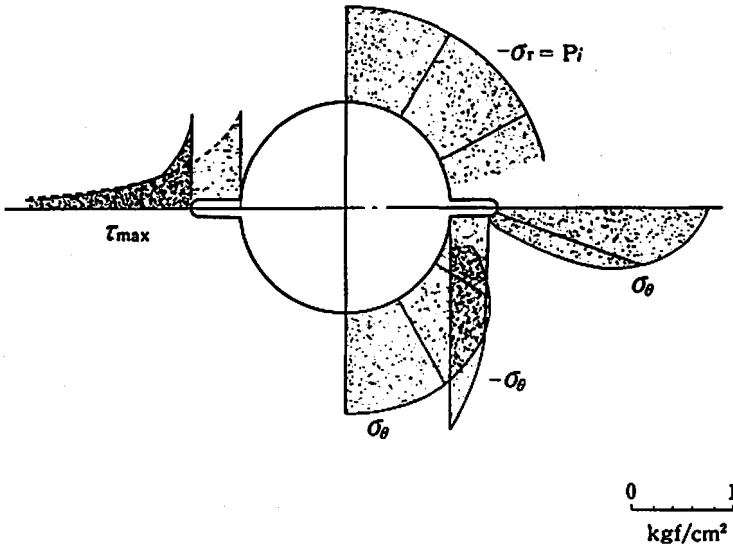


Fig. 17 Stress Parameters for  $L_1=1/2 r_1$   
(The inner pressure  $P_i=1\text{kgf/cm}^2$ ;  $r$  denotes the shear stress)

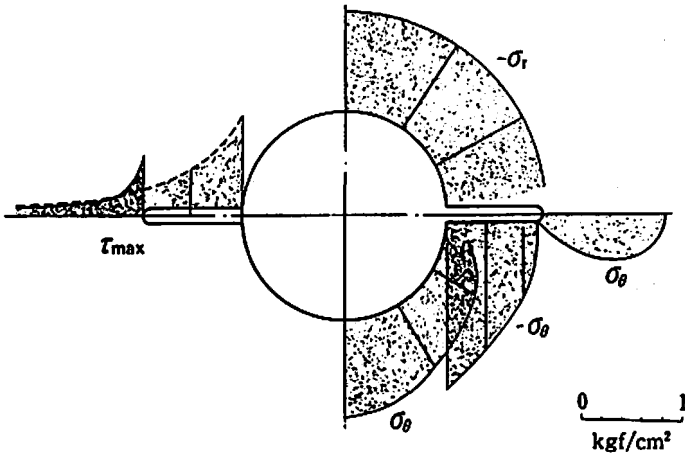


Fig. 18 Stress Parameters for  $L_2=r_1$   
(The inner pressure  $P_i=1\text{kgf/cm}^2$ ;  $r$  denotes the shear stress)

一方、円孔内への加圧は、光弾性試験(I)と同様にアルミ製円板を用い、「冷しばめ法」により行なった。

### 2.3.2 応力分布

ノッチ長  $L_1=1/2 r_1$  の場合の光弾性フリンジを Fig. 15 に、 $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$  の分布を Fig. 17 に示す。 $L_2=r_1$  の場合の光弾性フリンジを Fig. 16 に、 $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$  の分布を Fig. 18 に示す。

ノッチ先端の応力は、 $L_1=1/2 r_1$  の場合、孔壁に作用する応力の 1.9 倍、 $L_2=r_1$  で 1.2 倍の値となった。しかしながら、ノッチからの距離が離れると、急激に応力値が低下する結果となった。

なお、Fig. 17, 18 の  $\tau_{max}$  は、せん断応力を示し、主応力差との関連からのフリンジ次数との関係により求

めた。

$$\tau_{max} = N/11.52 \quad (8)$$

破砕剤による破砕は、孔間側孔壁より始まると考えられるので、より高い応力を孔壁のノッチ部分に集中させるこの方法をとることにより、破砕方向の決定には、効果があり整形破砕に有効な手法であることが確認された。

## 3. コンクリート供試体による発生応力の確認

### 3.1 供試体

供試体に用いた材料は、1:2モルタルで、圧縮強度の  $\sigma_{28}=460\text{kgf/cm}^2$ 、寸法、 $900\text{mm} \times 900\text{mm} \times 900\text{mm}$  のものを使用した。

### 3.2 破砕パターン

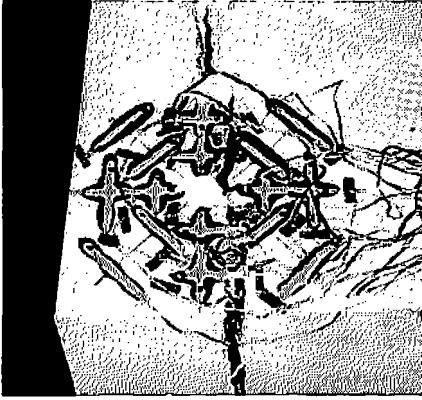


Fig. 19 Apparatus for strain measurements.

装填孔径  $2r_1 = \phi 38\text{mm}$ ，せん孔長  $700\text{mm}$  で Fig. 1 の配置とし，平面配置寸法は，Fig. 1 の3倍(実寸)とした。

Case 1: 供試体中央に1孔

Case 2: 装填孔間隔  $21.0 r_1 (400\text{mm})$

Case 3: 装填孔間隔  $11.8 r_1 (225\text{mm})$

1孔当り装填量は，破砕剤  $1.3\text{kg/孔}$ ，カートリッジ入発熱剤(点火装置付)  $20\text{g/孔}$

### 3.3 応力計測方法

孔中心より， $3.9 r_1 (75\text{mm})$ ， $5.3 r_1 (100\text{mm})$ ， $7.1 r_1 (135\text{mm})$  の位置にポリエステルひずみゲージ，孔中心より3種類の異なる位置の円周上の8等分点に，円周方向 ( $\sigma_\theta$ )，半径方向 ( $\sigma_r$ ) の両方向を配置し，ゲージ長は，内側の位置より  $60\text{mm}$ ， $90\text{mm}$ ， $120\text{mm}$  のものを使用した。

Case 1 においては，孔中心より  $100\text{mm}$ ， $135\text{mm}$  の位置で行ない，Case 2，3 においては，孔中心より  $75\text{mm}$ ， $100\text{mm}$  場合で行なった。

### 3.4 計測結果

Case 1 の場合，亀裂発生直前において，孔中心より  $100\text{mm}$  位置で，ひずみ量は  $\epsilon = 65 \sim 70\mu$ ， $135\text{mm}$  位置で  $\epsilon = 35 \sim 40\mu$  を示した。

Case 2，3 においては，孔中心より  $75\text{mm}$  の位置で  $\epsilon = 110 \sim 130\mu$ ， $100\text{mm}$  位置で  $\epsilon = 65 \sim 70\mu$  を示した。

亀裂の発生状況は，Case 1 においては，外周自由面に平行する，優劣な直交2亀裂を生じ，Case 2，3 においては，自由面に平行する方向，孔相互を貫く形で亀裂が発生した。Fig. 19 に Case 3 の破砕状況を示す。

なお，それぞれの場合の応力は，コンクリートの弾性係数を  $E = 210,000\text{kgf/cm}^2$  とすれば，Case 1 で孔中心より  $100\text{mm}$  位置で， $\sigma_\theta = 13.6 \sim 14.7\text{kgf/cm}^2$ ， $135\text{mm}$  位置で， $\sigma_\theta = 7.3 \sim 8.4\text{kgf/cm}^2$  となり，Case 2，3 の  $75\text{mm}$  位置で  $\sigma_\theta = 23.1 \sim 27.3\text{kgf/cm}^2$ ， $100\text{mm}$  位置で， $\sigma_\theta = 12.6 \sim 14.7\text{kgf/cm}^2$  となり，それぞれの

位置における応力値を孔壁での応力として算出すると，すべての Case で約  $400\text{kgf/cm}^2$  となる。またそれぞれの位置における応力値は，光弾性結果とよく一致した。

## 4. 破砕設計法

破砕剤による破砕は，装填孔孔壁に作用する破砕剤による内圧  $P_i$  により円周方向に発生する応力  $\sigma_\theta$  が破砕体の引張強度  $\sigma_T$  到達すれば，孔壁に亀裂が発生する。一部の破砕体においては，破砕体内部の微小亀裂の存在のため，応力緩和を生じ，引張強度  $\sigma_T$  より高い値で破砕が始まる<sup>9)</sup> ようであるが，本稿では，孔壁に作用する円周方向の応力成分 ( $\sigma_\theta$ ) が破砕対象の材料の引張強度 ( $\sigma_T$ ) に達したとき，亀裂が発生するとして検討した。

### 4.1 破砕性状

破砕剤による破砕は，亀裂が孔壁に発生すると，比較的短い時間で，孔間を亀裂が伝播し貫通する。

破砕に必要な引張応力は，装填孔間の平均引張応力  $\sigma_{\theta a}$  が，材料の引張強度  $\sigma_T$  に到達した時に破砕すると考える。

### 4.2 破砕剤の膨脹圧

破砕剤が発生する膨脹圧力と膨脹圧発生時間との関係については，すでに第1報<sup>1)</sup>，第2報<sup>2)</sup> に述べたごとくであるが，使用する破砕剤の最高膨脹圧を  $P_m$  ( $\text{kgf/cm}^2$ )，発熱剤点火後の経過時間を  $T$  ( $\text{min.}$ ) とすると，装填孔の孔内で発生する膨脹圧  $P_i$  は，実験の結果，次式で示される結果となった。

$$P_i = P_m(1 - e^{-KT}) \quad (9)$$

K値は，破砕剤に含水させる水の温度，水—破砕剤比等使用条件により決まるが，標準的な使用条件，水温  $18 \sim 20^\circ\text{C}$ ，水—破砕剤比  $28 \sim 30\%$  で  $K = 0.7 \sim 1.1$  となる，Fig. 20 は， $K = 1.1$  と  $K = 0.7$  における  $P_i$  と  $T$  の関係を示したものである。

### 4.3 孔間距離の算定 ( $D_m$ )

中空円筒の内側と外側の面に一様な圧力が作用する場合の，半径方向圧力  $\sigma_r$ ，円周方向の応力  $\sigma_\theta$  は，内圧  $P_i$ ，外圧を  $P_o$ ，円筒の半径を  $r_i$ ，外径を  $r_o$  とすれば，応力成分に関する次式を得る<sup>4)</sup>。

$$\sigma_r = \frac{r_i^2 r_o^2 (P_o - P_i)}{r_o^2 - r_i^2} \frac{1}{r^2} + \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad (10)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{r_i^2 r_o^2 (P_o - P_i)}{r_o^2 - r_i^2} \frac{1}{r^2} + \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad (11)$$

内圧のみをうける場合は，Fig. 21 のごとく， $P_o = 0$  となるので上式は，次のごとくとなる。

$$\sigma_r = \frac{r_i^2 P_i}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_o^2}{r^2}\right) \quad (12)$$

$$\sigma_\theta = \frac{r_i^2 P_i}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_o^2}{r^2}\right) \quad (13)$$

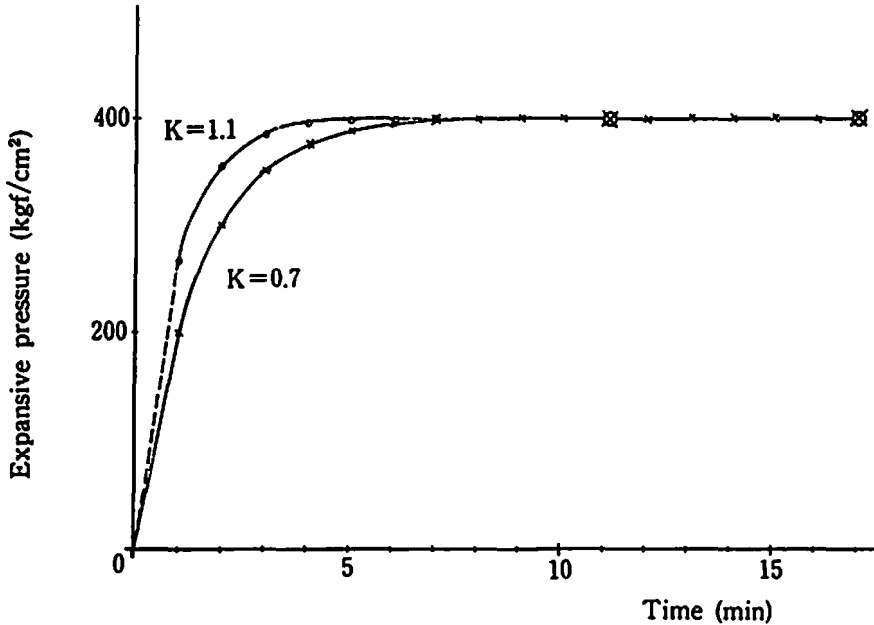


Fig. 20 Relation between expansive pressure & time.

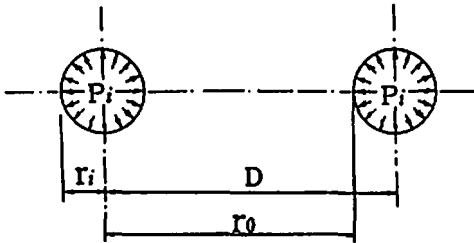


Fig. 21 Paired round holes stressed solely by the inner pressure.

破碎には、 $\sigma_{\theta}$ 引張応力が対象となり、装填孔間の平均引張応力 $\sigma_{\theta 0}$ が破碎条件となる。

両孔間の距離を $D$ とすれば、装填孔(半径= $r_i$ )間の孔間距離は、 $D-2r_i$ となる。したがって $r_0=D-r_i$ となるので、

$$\sigma_{\theta} = \frac{r_i^2 P_i}{(D-2r_i)^2 - r_i^2} \left\{ 1 + \frac{(D-r_i)^2}{r^2} \right\} \quad (14)$$

両孔間の平均引張応力 $\sigma_{\theta 0}$ は、両孔から応力が作用するとすれば、次式で示される。

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta 0} &= \frac{2 \int_{r_i}^{(D-r_i)} \sigma_{\theta} dr}{(D-2r_i)} \\ &= \frac{2}{(D-2r_i)} \int_{r_i}^{(D-r_i)} \frac{r_i^2 P_i}{(D-r_i)^2 - r^2} \left\{ 1 + \frac{(D-r_i)^2}{r^2} \right\} dr \\ &= \frac{2P_i r_i}{D-2r_i} \quad (15) \end{aligned}$$

破碎は $\sigma_{\theta 0} \geq \sigma_T$ で始まることになるので、限界のせん孔間隔 $D_{cri}$ は次のごとくとなる。

$$D_{cri} = \frac{2r_i(P_i + \sigma_T)}{\sigma_T} \quad (16)$$

ただし  $D_{cri}$ : 限界せん孔間隔(cm)

$r_i$ : 装填孔半径(cm)

$P_i$ : 破碎剤膨脹圧(kgf/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_T$ : 破碎対象の引張強度(kgf/cm<sup>2</sup>)

#### 4.4 装填量

各種ぜい性体に当破碎方法を数多く適用した結果、破碎対象を1m<sup>3</sup>破碎するために必要となる破碎剤、発熱剤の装填量は、Table 1のごとく得られた。

#### 5. 考察および結論

岩石、岩盤、コンクリートのようなぜい性体を、発熱剤である特殊テルミット剤により、含水状態にある破碎剤を強制加熱することにより相当短時間で破碎できることが確認できた。

第1報では、破碎剤の反応を促進するために、発熱剤、破碎剤装填後2~4時間待って後、つまり破碎剤に、発熱剤燃焼時の発生圧力に抵抗する孔壁との付着力を生じた時点で点火し破碎する方式を考案し、第2報では、この発熱剤により発生する圧力を発熱剤、破碎剤装填後破碎剤中にリップ孔を設けることにより、装填後10~30分点火し、破碎剤の反応を促進し破碎する方式を提案した。

本稿では、主として第2報で述べた方法を、フィー



Table 1 Specific charge of chemical agent & heating composition

Fracturing materials	no. of free faces	Tensile strength of materials	Specific charge of chemical expansive demolition agent (kg/m <sup>3</sup> )	Specific charge of Special heating composition (g/m <sup>3</sup> )
Boulder	More than 2 free faces	Soft rock ( $\sigma_T < 30\text{kgf/cm}^2$ )	4 ~ 5	100 ~ 140
		Medium hard rock ( $30 < \sigma_T < 100\text{kgf/cm}^2$ )	5 ~ 8	120 ~ 180
		Hard rock ( $\sigma_T > 100\text{kgf/cm}^2$ )	7 ~ 13	140 ~ 240
Rock	2 free faces	Soft rock ( $\sigma_T < 30\text{kgf/cm}^2$ )	5 ~ 10	100 ~ 160
		Medium hard rock ( $30 < \sigma_T < 100\text{kgf/cm}^2$ )	8 ~ 15	140 ~ 220
		Hard rock ( $\sigma_T > 100\text{kgf/cm}^2$ )	10 ~ 20	200 ~ 300
Concrete	2 free faces	Plain concrete ( $\sigma_T < 45\text{kgf/cm}^2$ )	4 ~ 7	100 ~ 140
		Reinforced concrete	15 ~ 35	300 ~ 500

\*  $\sigma_T$ : Tensile strength of materials (kgf/cm<sup>2</sup>)

ルドにおいて実務的に各種ぜい性体の破碎に用いる際に必要となる破碎設計をするための算定式(主として限界せん孔間隔  $D_{cm}$ )を求めるために、光弾性法による試験、コンクリートブロックによる発生応力確認試験を行ない、被破碎体中に生ずる応力を確認した。

実際の破碎においては、破碎効率を高めるために、破碎に対する抵抗をできるかぎり小さくする必要があり、自由面の設定等が重要な項目となる。一方破碎対象の引張強度の他、特に破碎対象が岩石の場合には、岩石のぜい性度、クラック等の状態が、さらにコンクリートの場合では、特に鉄筋コンクリート構造物の破碎において、鉄筋の配筋状況、量についても考慮しなければならぬ。

なお、破碎剤中に設置する発熱剤の位置については、今回までの一連の実験結果より、破碎作業の安全を確保するため、全孔長に対し孔底より40%位置(孔径

$\phi 38\text{mm}$ で発熱剤上部の破碎剤充填長は500mm以上必要)が望ましいことも確認された。

#### 文 献

- 1) 坂野良一・石井康夫・斎藤孝夫・辻 進三:特殊発熱剤添加による膨張性破碎剤の破碎効果について(第1報), 工業火薬協会誌, vol. 45, No5, 1984.
- 2) 坂野良一・石井康夫・斎藤孝夫・辻 進三:特殊発熱剤添加による膨張性破碎剤の破碎効果について(第2報), 工業火薬協会誌, vol. 47, No. 1, 1986.
- 3) 益田義治:入門光弾性実験, 日刊工業新聞社, 1970.
- 4) S. P. Timoshenko·J. N. Goodier:Theory of Elasticity McGRAW-HILL, 1970.
- 5) 西田正孝:応力集中, 森北出版, 昭和42年.
- 6) E. Z. Lajitai:Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol 9, 1972

On the Fracturing Effect of Chemical Expansive Demolition  
Agent with Application of Special Heating Composition (III)

Effects on Fracturing

by Ryoichi BANNO\*, Yasuo ISHI\*, Yasuo TSUKAMOTO\*\*  
Masayoshi KATAOKA\*\*

In the Part I (Effect of Heating) and Part II (Heating Method and Effect to Accelerate Reaction), the authors reported on the effect of heating the chemical expansive demolition agent after immersing by means of a special thermit composition as the heating agent to accelerate its hydration reaction and to reach the required expansive pressure for fracturing within a very short period of time, and on the methods for charging the demolition agent and the heating agent, and for heating.

This demolition method based on the combined use of the demolition agent and the special heating agent was examined by application to various brittle materials including rocks, bedrock and concrete structures, to demonstrate its fairly high efficiency in practical applications.

With the purpose to develop a method for demolition design applicable to brittle materials, distribution of the stress caused mainly by the expansive pressure  $P_i$  around the borehole was studied by photoelastic measurements and strain measurements of concrete test pieces. The results, and recommendable method for the demolition design, are described in the present paper.

(\*Civil Engineering Dept. of Taisei Corp. 1—25—1 Nishi-Shinjuku,  
Shinjuku-ku, Tokyo

\*\*Technical Dept. of Nichiyu Giken Kogyo Co., LTD. 1995—4 Kujirai  
Kawagoe—city, Saitama)

---