

生石灰を主成分とする静的破碎剤」(第6報)

— 静的破碎剤の破碎性能II —

福井久明*, 塚田和彦**

速効性静的破碎剤を円孔に充填し、注水による水和反応で発生する膨脹圧の深さ方向分布とその時間推移を測定した。その結果、充填された円孔内のすべての位置から均一に圧力は上昇しておらず、孔底から約20%上部附近の特定位置から圧力上昇は開始し、漸次孔全体に亘って拡がっていることが判明した。

上記の実証試験としてアクリル製透明パイプに充填した場合の破碎状況、および透明アクリルブロック中で拘束状態下にある破碎剤の応力挙動について観察した。

その結果、前者ではパイプ下端から1/4附近より膨脹は開始し、時間と共に膨脹はパイプ上下方向に推移しパイプ外径は拡大され、約15分後にはパイプ破断が発生した。一方、体積膨脹の最終形体が塑性変形として把えることができるアクリルブロック試験では充填孔の中間領域が最も大きく拡張され、上端および下端領域では孔の拡大は観測されてなかった。この二つの実証実験は、円孔内圧力分布試験結果と概ね一致する結果が得られたものと考えられる。

次に、この円孔内において等しい膨脹特性を示す破碎剤を用い断面特性の影響、特に先端き裂効果をみるため穿孔断面が円孔と楕円形状における破碎特性を石灰石岩盤にて評価した。その結果、楕円形状での破碎はき裂発生が長軸方向のみに進行し、かつ最大き裂伝播距離は円孔に対し、約1.7倍となり長軸方向での応力集中効果が観測された。

1. 緒言

爆薬をもちいた一自由面爆破における動的応力分布については種々な報告があり¹⁾²⁾、装薬孔内には大きさが一定の動的ガス圧が作用すると仮定して装薬孔径と最小抵抗線が一定値以下の場合に応力分布の解析がなされている。

静的破碎剤の場合、まず遅効性破碎剤ではその反応時間は10数時間と長く³⁾⁴⁾、膨脹反応は充填された円孔内のどの部分においてもほぼ同時に進行し、壁面に作用する深さ方向の膨脹圧は均一に作用しているものと考えられる。このようにStaticな応力が集荷されて脆性材料が破壊

に至る条件は、(a)微小欠陥等のき裂先端局部へ材料(岩石等)強度を上回る高い応力が作用すること、(b)発生するき裂の伝播によって解放されるエネルギーが材料固有の臨界値(G_c :破壊靱性値)を超えることの二つを満足する必要があるとするエネルギーのつり合いを考えるGriffith理論⁵⁾⁶⁾、がその解析に用いられている。

一方、注水後30分前後で破碎が完了する速効性破碎剤⁷⁾は、水和反応により急速な温度上昇をおこない最高発熱温度は200℃前後を示すものの、穿孔内に充填された破碎剤の深さ方向温度分布は均一とは考えにくく、その温度分布測定とさらに水和反応から引続きもたらされる膨脹反応による深さ方向の圧力分布を知ることは岩盤破碎において重要な要因であり、ここにその研究結果を報告する。

次に穿孔内における破碎剤の内圧が一定であるとき、破碎断面形状、特に先端き裂効果を持つ場合の破碎性能を知るため、石灰石岩盤で円孔と楕円形状の穿孔をおこない、その破碎性能

2002年2月2日受付

2002年10月15日受理

* (株) ロックス・ジャパン

〒103-0007 東京都中央区日本橋浜町1-5-2

浜町エビスビル 3F

TEL 03-3863-0748, FAX 03-3863-0749

** 京都大学・大学院工学研究科

〒606-8501 京都市左京区吉田本町

TEL 075-753-5423, FAX 075-753-5428

対比について報告する。

2. 実験

2.1 供試試料

粒子表面が部分的に不活性化された、高温焼成(1,100~1,300℃)生石灰(CaO)とアルミナセメントおよび水和調整剤として酸化ホウ素をTable 1に示す配合比で混練し、この粉末をブリケットマシンで乾式圧搾し平均粒径4.8mmの顆粒状静的破砕剤を供試試料とした。

Table1 Composition of non-explosive

Composition	CaO	Aluminum Cement	B ₂ O ₃
Wgt %	78	20	2

2.2 実験方法とその測定条件

アルミパイプ外壁面に30枚のひずみゲージを貼付し、その周方向ひずみ分布を連続的に計測し、その測定値から弾性理論⁸⁾にもとづいて内圧分布(円孔内圧にかかる深さ方向の圧力分布)を推定した。但し、圧力分布は周方向には均一であることを仮定した。

同時にアルメルクロメルによる熱電対を4本挿入し水和反応による発熱温度を測定した。

Fig.1およびTable 2にてその測定方法と条件を示す。上記の測定系を用いて、Fig.2に示す測定

容器へ破砕剤を充填し、Table 3による実験条件にて以下の実験をおこなった。

実験装置の操作条件は下記の通りである。

(イ)膨脹圧の計測は注水後、12秒より開始した。

(ロ)膨脹圧の計測終了は、Fig.2に示す底板ゴム抜けまたは計測リード線の破断までとした。

2.3 実験結果

Fig.3は、すべてのゲージについて観測された膨脹開始からゲージ剥離が発生する迄のひずみ変化の測定値より、弾性円筒殻理論をもとに推定した円筒内圧(パイプ内壁面に作用する膨脹圧の半径方向)の分布である。さらにFig.4は、膨脹反応の全期間にわたる各位置での温度変化の推移を示したものである。

膨脹は全長30cmに充填されたパイプ中の破砕剤全体から均一に上昇はしておらず、その下部領域20~25cm附近から膨脹反応が開始し急激にかつ局所的に圧力上昇がおこなわれ、時間と共にパイプ上部領域へゆるやかな圧力上昇が観測されている。また、水和発熱の挙動もFig.4で示すとおりパイプ下部領域の20cm附近で最高発熱温度が観測されており、膨脹圧測定と同様にこの領域で最も激しい水和発熱が測定されている。この下部領域が最高発熱帯を示す理由として、(イ)最大膨脹圧を示すほぼ近似的なこの領

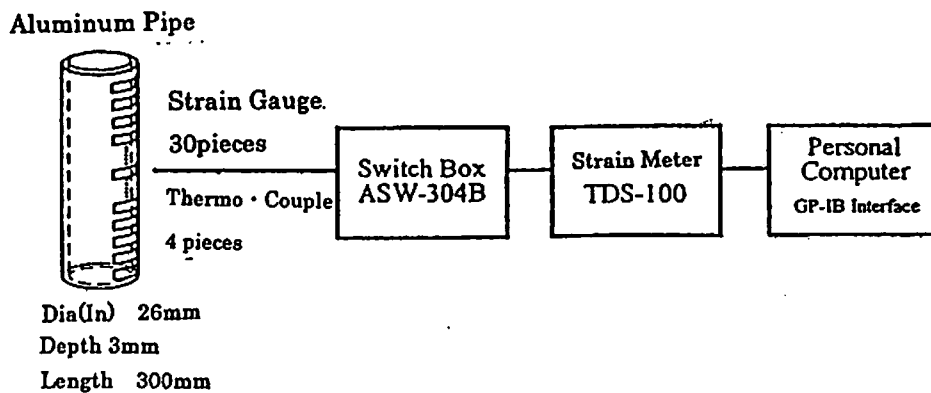


Fig. 1 Outline of pressure measurement

Table2 Measurement method of strain and temperature

	Sensor	Measure points	Sensor position
Strain	Strain gauge	30 points on length's Direction	Each 10 mm from top of the pipe. At 5,15~285,295. Totally 30 pieces measured by 3 wire method of each Gauge
Temperature	Thermo-couple (Aromel-cromel)	4 points	Their position is 105,155,205,255mm from top of the pipe.

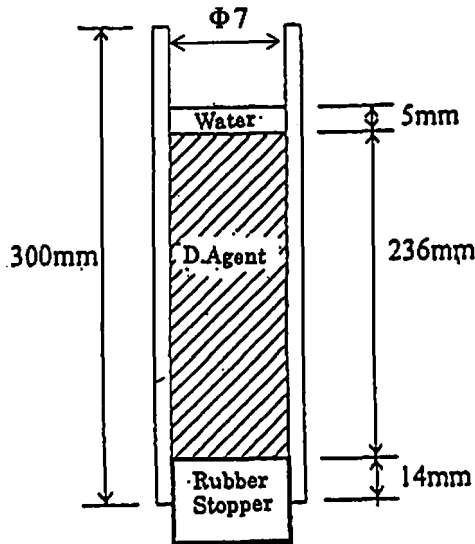


Fig. 2 Size of experimental apparatus

Table 3 Experimental conditions

Demolition agent	Weight	184.4g
	Volume	125.3cc
	Apparent gravity	1.47
Poured water		72.3g
Water temperature		15°C

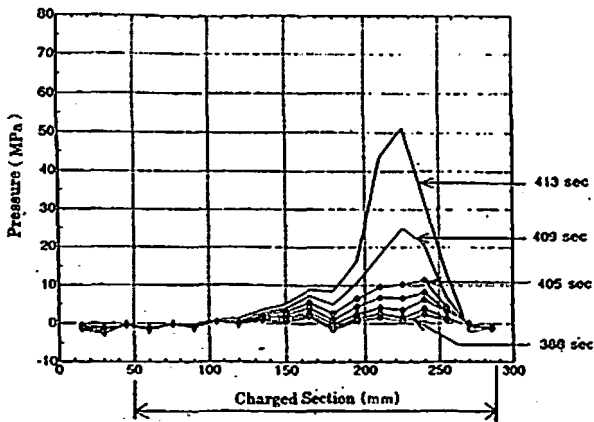


Fig. 3 Inner pressure occurred by expansion in aluminum pipe

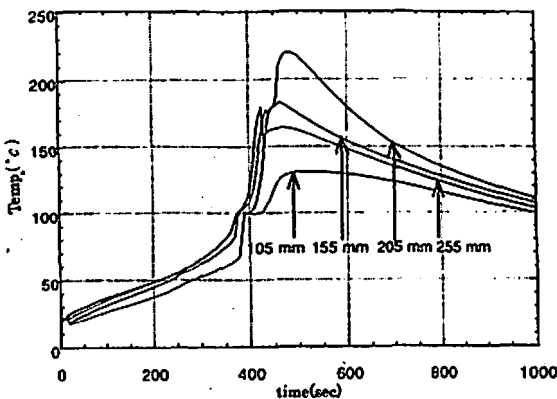


Fig. 4 Hydration temperature observed at each point on the pipe surface

域で、最も激しく結晶転移がおこなわれ、それに伴う発熱作用の影響か、もしくは(ロ)添加された水は水和発熱を伴いながら流下するため、下層部ほどより高温状態の水で水和がおこなわれる要因なのか、今後の検討を必要とする。

実際の岩盤破碎においても、破碎の初期過程は充填された破碎剤のごく一部分から発生する応力が、き裂発生に寄与しさらに上部領域へ転移する膨脹反応によってき裂拡大がおこなわれていると推定される。

2.3.1 膨脹特性の実証試験

速効性破碎剤は、充填孔中でその下部領域から膨脹は開始し、漸次上部へ移行している。

この現象を確認するため次に示す2つの方法にて実証試験をおこなった。

①透明パイプ充填による破碎状況の観察

内径40mm(厚さ3.0mm)、長さ2.0mの透明アクリル製パイプを用い実破碎のモデル実験をおこなった。

結果はPhoto.2で示すとおり、注水後6分15秒でパイプ下部から約50cmの箇所強い破裂音と共にパイプは破損した。

これは、膨脹圧測定から得られた下端部より約25%前後の位置が最大膨脹圧を示していることとかなりよく一致している。

さらに破損時高圧の水蒸気が放出されていることからパイプ破損は破碎剤の膨脹応力によるものと同時に、高圧蒸気による熱応力も関与していることが充分考えられる。

②透明ブロック体による破碎状況の観測

アクリル樹脂の透明ブロック(20cm×8cm×20cm高さ)をモノマー・キャスト法で成形し、Photo.3とFig.5に示す容積を持つ2孔をブロック中へ設け、各々の孔中へ破碎剤74g、水32ccを注入した。水和膨脹が終了する30分後のアクリル樹脂変形度はFig.6に示すとおりである。

ブロック成形体中での膨脹は、き裂伝播さらにブロック本体の破損がないため、その変形度は破碎剤が拘束状態にある場合での最終膨脹特性を現わしている。その結果はFig.6に示すとおり、円周方向に30~35%、長さ方向で中央部分の約70%が膨脹拡大されている。

この膨脹を受けた体積はもとの体積に対し約18~25%の増大を示している。

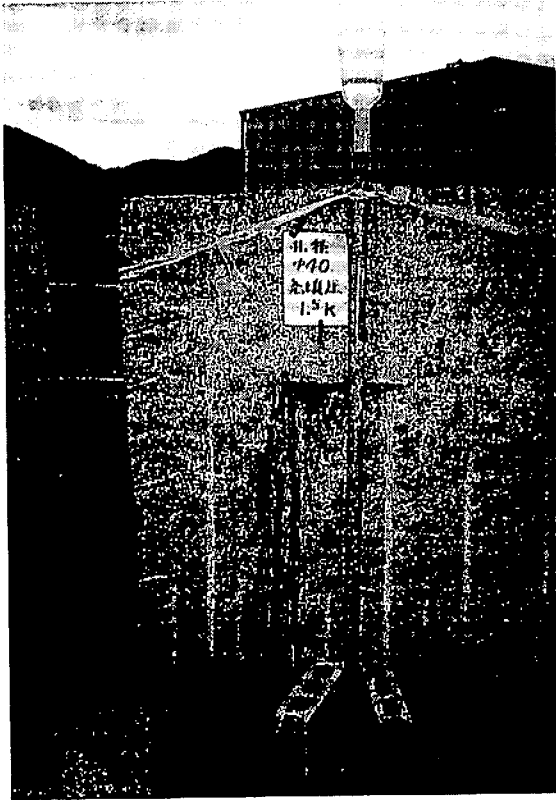


Photo. 1 Before expansion

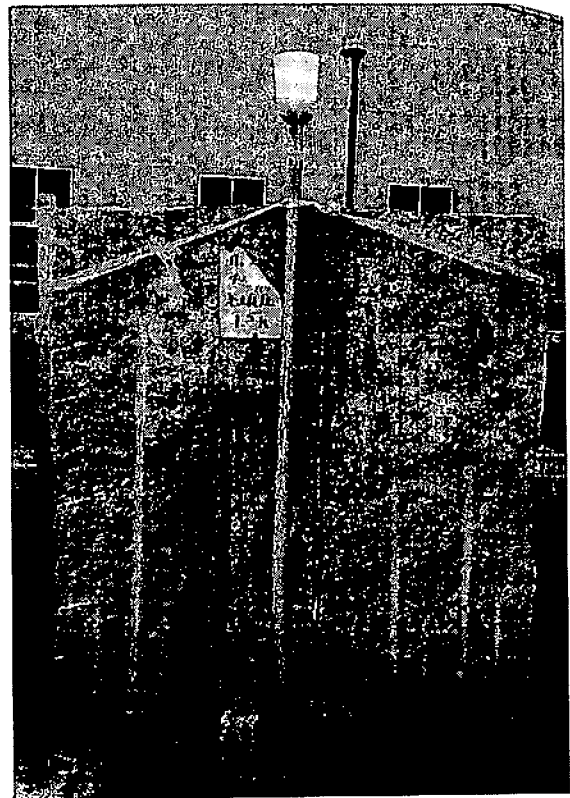


Photo. 2 During expansion (After 7 min.)

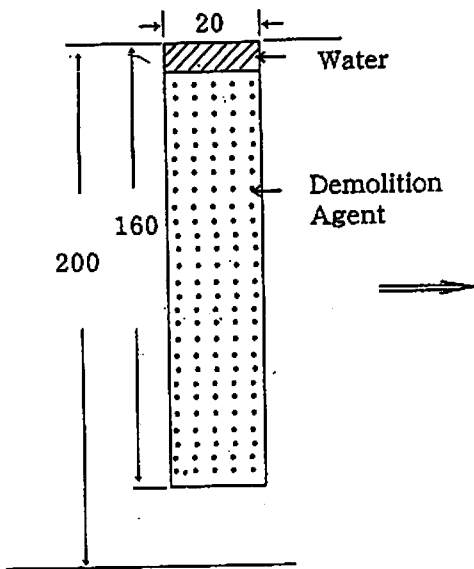


Fig. 5 Before reaction

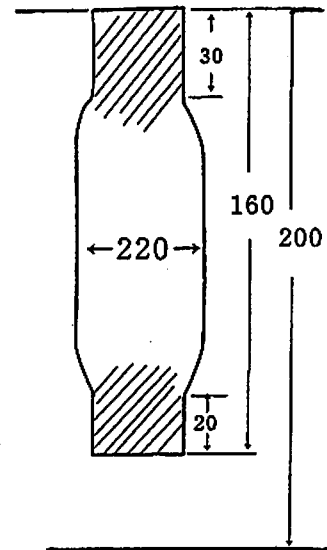


Fig. 6 After reaction

3. 断面形状の影響

脆性材料の破砕において、き裂先端への応力集中効果は数多指摘⁹⁾¹⁰⁾されている。

このことは、一定の内圧を示す破砕剤を用いた場合でも充填される断面形状が異なればその破砕性能は異なってくることが予測される。

その効果を見るため、先端が鈍化して曲率が大きくなった場合の楕円形状と、曲率=1である円形状の穿孔をおこない、石灰石岩盤で破砕

性能の対比をおこなった。

3.1 破壊応力の簡易推定式

無限遠方から引張応力が働いた場合の応力集中による破壊理論¹¹⁾は体系化されているものの、穿孔中に内圧が負荷された場合のき裂先端応力と破壊の関係は必ずしも明確とは云い難い。¹²⁾

そこで円形と楕円模型を各々単純化し、下記の簡易応力推定式を算出した。¹²⁾

肉厚円筒に開孔した円形孔の応力分布は、極

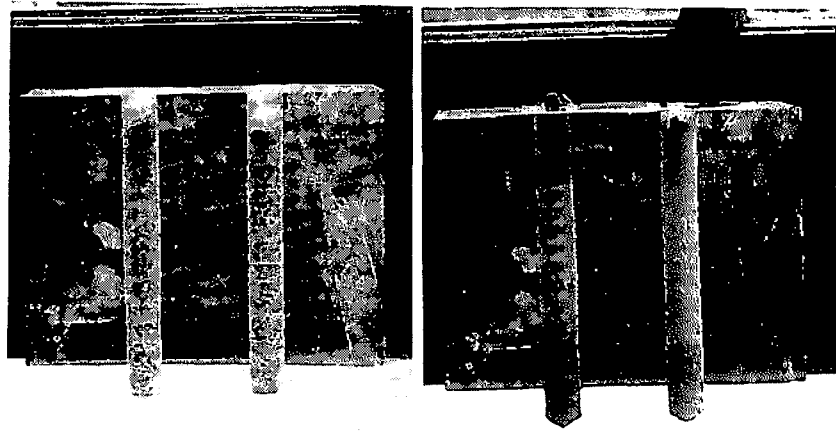


Photo. 3 Before expansion

Photo. 4 After expansion

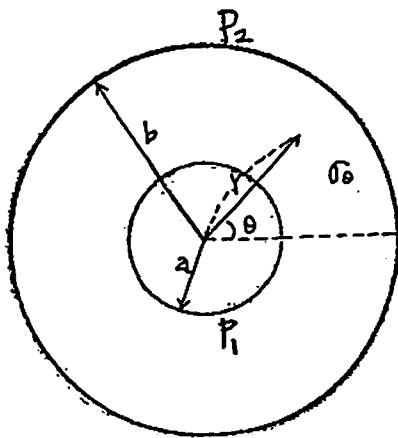


Fig. 7 Dynamic equilibrium of thick cylinder

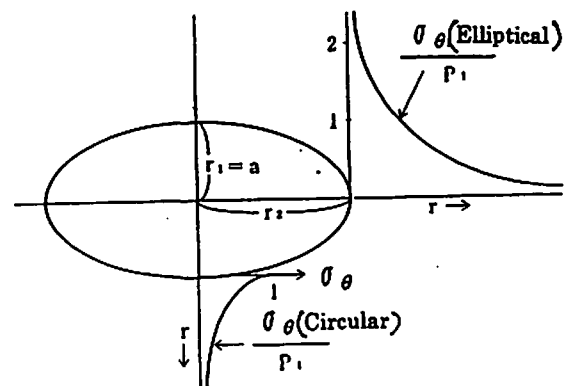


Fig. 8 Dynamic equilibrium on elliptical hole

座標Q方向のr点における応力 σ_Q は次式で表わされる。

$$\sigma_Q = \frac{a^2}{b^2 - a^2} \left\{ \left(1 + \frac{b^2}{\gamma^2}\right) P_1 - \left(\frac{b^2}{a^2} + \frac{b^2}{\gamma^2}\right) P_2 \right\} \quad (1)$$

a: Inner Radius

b: Outer Radius

P_1 : Inner Pressure

P_2 : Outer Pressure

外圧すなわち空気圧 P_2 は、内圧にも加わっているから $P_2 = 0$ として計算

$$\sigma_Q = \frac{a^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{\gamma^2}\right) P_1 \quad (2)$$

最大応力は、 $r = a$ で発生するため

$$(\sigma_Q)_{\max} = \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} P_1 \quad (3)$$

岩盤破碎のように、 $b \gg a$ (肉厚が無限に厚い時) の場合

$$(\sigma_Q)_{\max} \approx P_1 \quad (4)$$

即ち、円孔 ($r = a$) で材料の許容応力 σ_a とすると $P_1 \gg \sigma_a$ で破壊が進むこととなる。

一方、楕円開孔の場合、長軸方向については応力釣合を求める Unit Volume 計算のための座標 r に対して補正因子 V_2^2 / r_1^2 を掛けておかねばならず、(5) 式となる。

$$(\sigma_Q)_{\max} \approx \frac{V_2^2}{\gamma_1^2} P_1 \quad (5)$$

($r_2 > a$)

3.1.1 破碎性能結果

内径40 mm ϕ 鋼管充填によるダイヤフラム式圧力計計測による膨脹圧が750 kgf/cm²を示す破碎剤組成を用い穿孔長2.0m、抵抗線0.6mの石灰岩法面破碎をおこない円形穿孔と楕円穿孔による破碎性能対比をおこなった。その結果をTable 4に示す。

石灰岩による穿孔形状を変えた実破碎の結果は、円形でのき裂伝播距離が60cmに対し、楕円形状では1.0m迄伝播距離は伸び、1.6倍の値を示

Table 4 Comparison of excavation result between circular and elliptical hole

		Elliptical hole		Circular hole
		Long radius	Short radius	
Drilling diameter (mm)		65	32	46
Expansion force (kgf/cm ²)	Calculated	3.034	182	—
	Observed	—		750
	0.4 (m)	○		○
	0.6	○		○
Spacing	0.8	○		△
	1.0	○		×
	1.2	△		×

(○ : Crack line is connected between holes, △ : Imperfect, × : Fault)



Photo 5 Elliptical hole



Photo 6 Excavation result elliptical hole

している。

この事はき裂先端への応力集中効果を利用することにより、破碎効果を著しく向上させることが可能であることを確認された。

4. まとめ

アクリルパイプ試験では、パイプ下部領域で激しい破裂音と共に破片の飛散を伴いながら破碎は進行し、あたかも動的な圧力が負荷されたような現象を呈することが多い。この動的なエネルギーは粒子間に閉じ込められた高圧水蒸気が衝撃的に放出され直接的にパイプを破損するとともに、爆発音に近い破裂音が発生することから生成物のコロイダル細粒化粒子に起因する水蒸気爆発¹³⁾¹⁴⁾を伴った現象も包含されていると考えられる。

次に、穿孔断面に曲率を持つ楕円形状での破碎試験では、石灰石岩盤の実破碎において Spacing の向上が観測され先端応力の集中効果が確認された。

今後、穿孔先端の曲率をさらに鋭角とした場合における破碎性能との関係を検討する必要がある。

5. 謝辞

本研究のご指導をいただきました京都大学大学院工学研究科花崎紘一教授、さらに研究のご協力をいただきました河合石灰工業(株)、開発部水野次長に深くお礼申し上げます。

文献

- 1) 伊藤一郎, 佐々宏一, 日本鉱業会誌 79, 261 (1963).
- 2) 花崎紘一, 伊藤一郎, 水曜会誌 Vol.17, No.2 (1970).
- 3) 河野俊夫, 石井四郎, 石灰石 189, 26 (1981).
- 4) 佐藤雅男, 山田荘太, 川崎久己, セメント・コンクリート論文集 43, 616 (1989).
- 5) 山口梅太郎, 西松裕一著 「岩石力学入門」 P82, P86 (1983), 東京大学出版会.
- 6) 三木幸蔵著 「岩石と岩盤の知識」 P99 (2000) 鹿島出版会.
- 7) 福井久明, 火薬学会誌, 62, 225 (2001).
- 8) 渋谷寿一, 本間寛臣, 齊藤憲司著「現代材料力学」P151, P154 (2001) 朝倉書房.
- 9) 堀内良, 金子純一, 大塚正久著「材料工学入

- 門]P157(2001)内田老鶴圃.
- 10) 北条英光著「材料の工学と先端技術」P28, P38 (1997) 裳華房.
- 11) 岡田明著「セラミックの破壊学」P59, P63 (1998) 内田老鶴圃.
- 12) 中村一, 小泉堯著「固体の力学」P53(1994) 養賢堂出版.
- 13) 甲藤好郎著「伝熱概論」P311, P321(2002) 養賢堂出版.
- 14) 高島武雄, 飯田嘉宏著「蒸気爆発の科学」P51, P82(1998) 裳華房.

Static demolition agent by calcium oxide

Hisaaki Fukui*, and Kazuhiko Tsukada**

This report mainly consists of the measurement result on the pressure distribution from what portions occur by the expansion of the static demolition agent in the aluminum pipe.

As the result, the expansion pressure doesn't occur equally from all portion charged in aluminum pipe but comes out from the particular portion. This section is approximately at 20% areas from bottom of the pipe. In order to examine the above result, two kinds of experiments are taken.

The first, using the opaque plastic tube of which free deformations are capable at any surface, it is observed that any portion of the pipe starts to enlarge toward circular direction.

The second is the test using the opaque acrylic block in order to observe the expansion behavior under the confinement condition.

Both of them are showed the same tendency as the pressure distribution measurement that the expansion starts to occur at 20% around from bottom of the pipe.

Finally, the test of the breacrage properties on lime stone rocks is examined compared with circular holes and elliptical holes.

Consequently, it is found that the spacing of elliptical holes is prolonged 1.6 times than circular holes.

(*ROX · JAPAN Co. Ltd., Ebisu Bld. 3F Hamacho 1-5-1, Nihonbashi, Chuo-Ku, Tokyo.
103-0077 JAPAN

**Faculty of Engineering, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501, JAPAN)
