

生石灰を主成分とする静的破碎剤(第5報)

—静的破碎剤の破碎性能評価—

福井久明*

生石灰(CaO)から水を付加することによって生じる消石灰(Ca(OH)₂)の体積膨脹をその主応力とする静的破碎剤の膨脹圧発生挙動は、(イ)充填後12時間以上経過して所定の膨脹圧に到達し岩盤へ亀裂発生させる遅効性タイプと、(ロ)充填後30~60分で所定の膨脹圧に到達し岩盤破碎を行う速効性タイプの二種類に大別される。

前者は膨脹圧の上昇と共に岩盤が持つ潜在的亀裂が顕在化し目視可能な亀裂線が発生するのに対し、後者は亀裂発生と共にその線に沿って若干の岩盤移動があり亀裂巾が大きくなる特長を持ち、いわゆる破碎現象が観察される。

具体的に亀裂が発生する条件として、(イ)遅効性破碎剤は最大膨脹圧が300kg/cm²以上であり、(ロ)速効性破碎剤は最大膨脹圧は600kg/cm²以上が必要であり、かつ膨脹圧力発生速度が300kg/minを越える場合に、破碎効果が現われることが判明した。

1. 結 言

破碎剤充填後、12時間以上の時間経過後に岩盤等へ亀裂を発生させる遅効性破碎剤と、充填後30~60分の間で亀裂が発生し破碎が完了する速効性破碎剤とでは、その破碎機構は異なると考えられる。

遅効性破碎剤の破碎機構は、水和後に生成されるコロイダルCa(OH)₂が時間と共に結晶成長しそれによって生じる応力によって岩盤亀裂が発生されると言われている^{1),2)}。

一方、速効性破碎剤の破碎機構は、急激な水和反応で生じるCa(OH)₂の体積増大効果から発生する弾性応力と、同じく水和反応によって生じた高温高圧の水蒸気効果³⁾により亀裂の成長と若干の岩盤移動を併う破碎現象が観察されるものと考えられる。

本研究は両者の膨脹圧発生挙動と亀裂発生の関係、および破碎剤の充填密度、温度因子等について測定し、さらにその実破碎性能試験を行った結果を報告する。

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℃)CaOを主成分とし、Table 1に示す水和速度を制御する水和調整剤(Reterder)を各々配合したものをを用いた。

具体的には、製品化された市販静的破碎剤を以下の実験に供した。

- (1)遅効性破碎剤 S-マイト(住友大阪セメント社製)⁴⁾
 - (2)速効性破碎剤 ロックトーン(河合石灰工業社製)⁵⁾
- Table 2にその性状を示す。

2.2 膨脹圧測定法

破碎剤が岩盤に接触している状況を想定し、圧力センサー(フラッシュダイヤフラム式圧力計)を鋼管内壁表面の位置に4点設置し膨脹圧を測定した。長所は直接的に圧力が測定できるものの、欠点は粒状破碎剤が圧力センサー面と不連続に接触しているため、圧力値

2001年4月26日受付
 2001年8月13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
 E-mail mfukui@tky2.3web.ne.jp

Table 1 Reterder of hydration

Demolition agent	Retarder
Delay type	Na ₂ SiF ₆ (1.5 wt%)
Rapid type	B ₂ O ₃ (1.0 wt%)

Table 2 Physical properties of demolition agent

	Delay type	Rapid type
Shape	Powder	Particle
Average particle size	44 μ (15~88)	4.8 mm (2.4~7.6)
Density	2.6	2.7

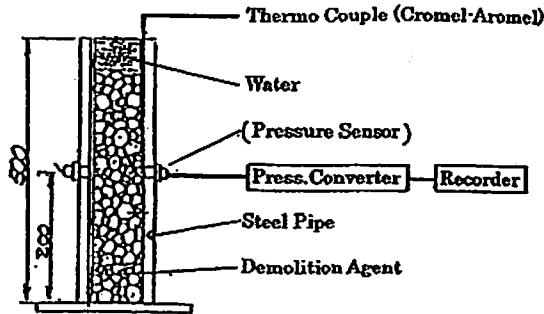


Fig. 1 Measurement method of expansion pressure and hydration temperature

の変動巾が大きいことである。

また、膨脹現象と同時に発生する水和発熱量を測定するため熱電対 (CA) を鋼管中央部迄挿入し、発熱温度上昇を測定した。

Fig. 1 に、膨脹圧測定法の実験概要を示す。

3. 実験方法

遅効性、速効性破砕剤の試料を各々 800g とり、水比 26% (水比 = 注水重量/破砕剤重量) にて、Fig. 1 に示す方法により膨脹圧および水和反応による温度上昇を測定した。

次に破砕性能評価として、60cm (角) × 60cm (高さ) サイズ、引張強度 25kg/cm² (圧縮強度 300kg/cm²、ヤング率 3.0 × 10⁵kg/cm²) のコンクリートブロックを用い破砕状況を観察した。

破砕条件として、穿孔径 40mm、穿孔長 55cm、破砕剤充填量 1.3kg (充填密度 2.0) にて行った。

3. 1 遅効性破砕剤の膨脹特性とその破砕性能

破砕剤組成として、Table 2 に示す遅効性破砕剤 (S-マイト) を用い、温度変化による膨脹圧特性等の測定をおこなった。

測定温度の設定は、被破砕体であるコンクリートブロック、破砕剤さらに注入する水温すべてを 0℃、20℃ に各々調整し膨脹圧測定および実破砕テストをおこなった。

コンクリートブロックに亀裂が発生する時間帯は、測定温度 20℃ の場合 10 時間 30 分前後から除々亀裂発生 - 成長が観察され、20 時間後には Fig. 4 の通り亀裂は上下に走りブロックは分断された。

一方測定温度 0℃ では 24 時間においても亀裂は発生せず、その時間帯での膨脹圧は 270~280kg/cm² の範囲であった。このブロックはその後約 40 時間で

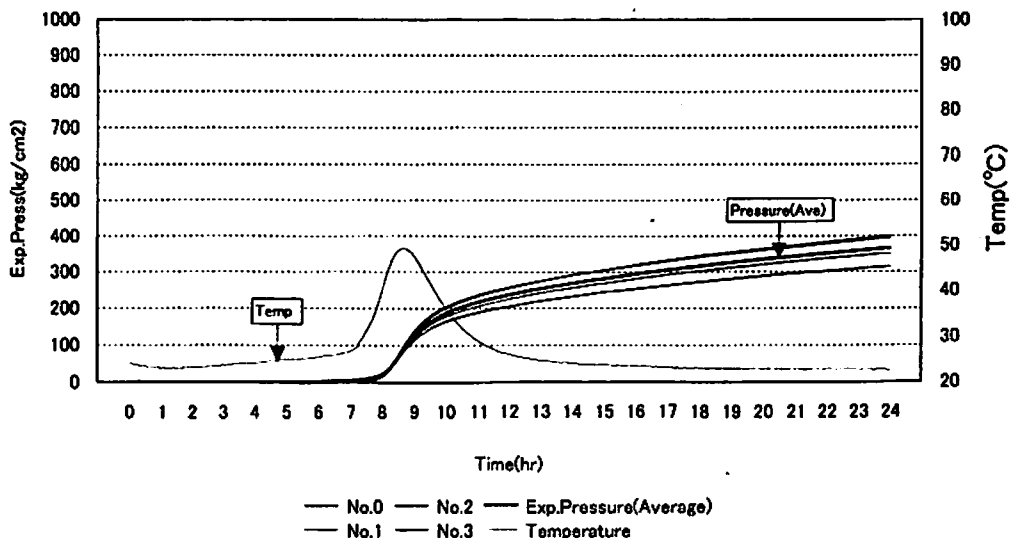


Fig. 2 Expansion pressure and temperature resulted by delay type demolition agent at 20°C

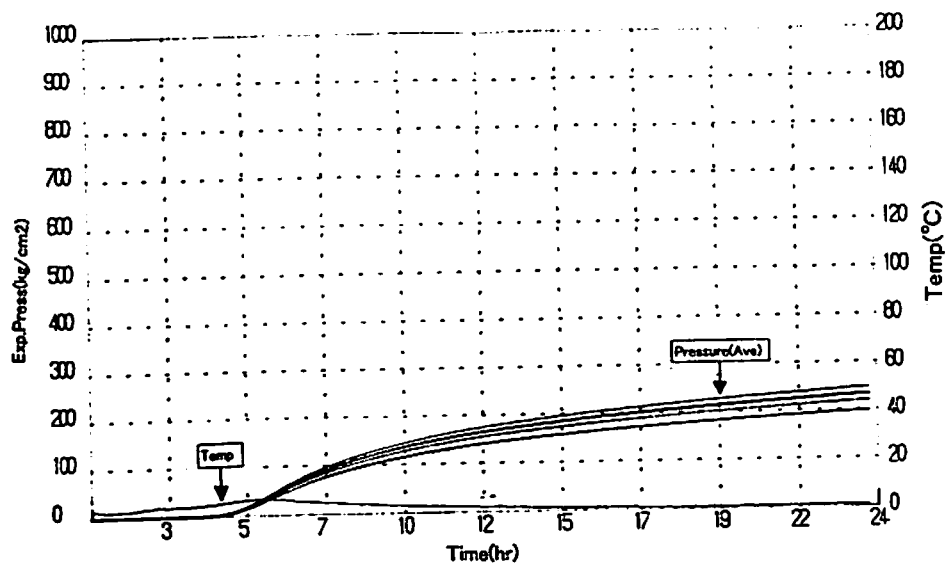


Fig. 3 Expansion pressure and temperature resulted by delay type agent at 0°C



Fig. 4 Broken concrete block tested at 20°C

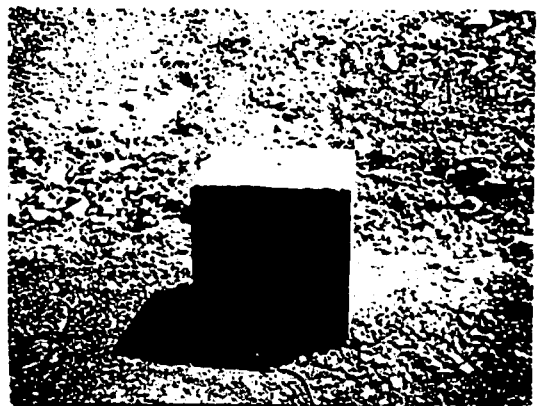


Fig. 5 Failed concrete block tested at 0°C

亀裂が発生し、その時点での圧力値は 310 kg/cm^2 であった。

その後の破砕試験の結果と併せてコンクリートブロックに亀裂が発生する圧力は、 300 kg/cm^2 を越える必要があると判明した。

次に、この遅延性破砕剤による亀裂の状態は、目視可能な破砕線は発生するもののブロック本体の移動は認められない。

3. 1. 2 結晶粒の変化

上記の応力発生は、水和後に生成された Ca(OH)_2 の結晶成長がその主たる要因と考えられる。

そこで結晶粒径変化の状態を SEM 写真にて観察した結果を Fig. 6 に示す。

20°C 放置における SEM 写真より初期 $1.5 \sim 2.0 \mu$ の C_2O 結晶粒径は、水和後 Ca(OH)_2 へ変化し 24 時間後その結晶粒は $30 \sim 40 \mu$ 迄成長し約 20 倍となっている。

経時的には 4 時間迄はさほど大きな結晶成長は認められないが、8 時間以降では急速な結晶成長が観察される。これは Fig. 2 による膨脹圧発現ともよく合致しており応力発生の主たる要因は、 Ca(OH)_2 へ変化した結晶粒の成長に基づくものであるといえる。

同様に 0°C 放置での結晶粒の成長は、24 時間後に平均 18μ (最大 20μ) でありこれは 20°C における 10 時間前後の結晶粒径に相当し、その膨脹圧力値にもよく一致している。

3. 2 速効型破砕剤の膨脹特性とその破砕性能

3. 2. 1 膨脹圧特性

Fig. 1 に示す膨脹圧測定鋼管に、破砕剤充填密度を $1.4 \sim 2.0$ の範囲で変化させ、温度 20°C における膨脹圧と発熱温度の測定をおこなった。

3. 2. 2 コンクリートブロック破砕試験

雰囲気温度 20°C において、充填密度を Exp NO 2

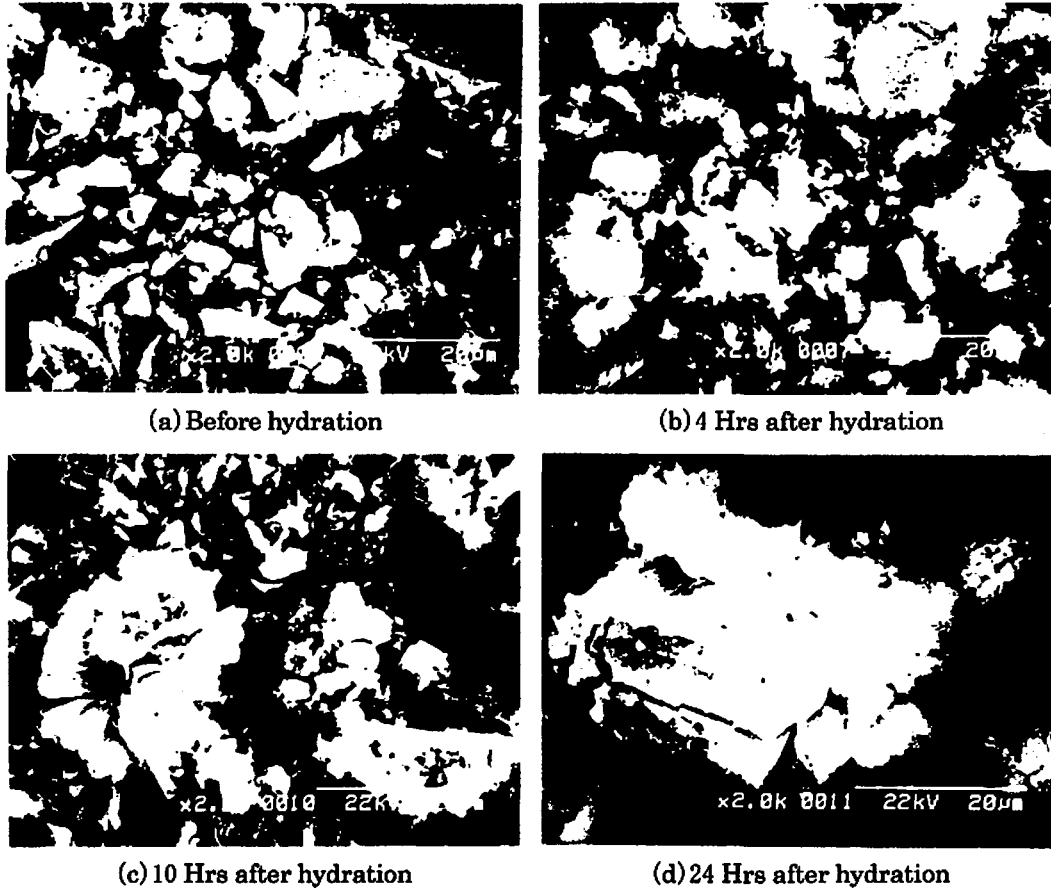


Fig. 6 SEM observation of growing gvains after hydration of delay type demolition agent at 20°C

Table 3 Results of expansion pressure and hydration temperature by various loading density

Exp. No	Loading density	Expansion pressure (kg/cm ²)	Expansion velocity (kg/min)	Maximum hydration temp. (°C)	Result of breackage
1	1.4	560	280	196	Fault
2	1.5	610	220	154	Impertect
3	1.6	620	310	145	Breackage
4	1.8	800	320	200	Breackage
5	2.0	1,100	320	140	Breackage

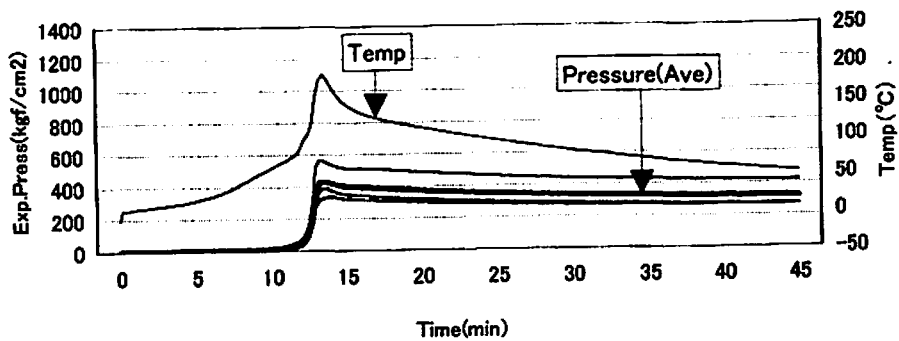


Fig. 7 Expansion pressure and hydration temperature at loading density of 1.4

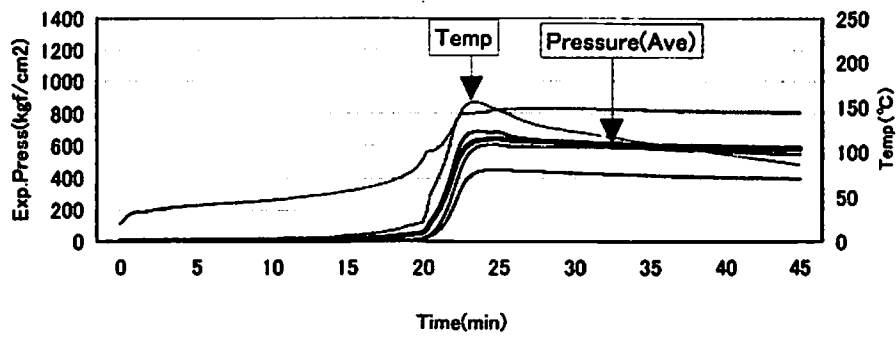


Fig. 8 Expansion pressure and hydration temperature at loading density of 1.5

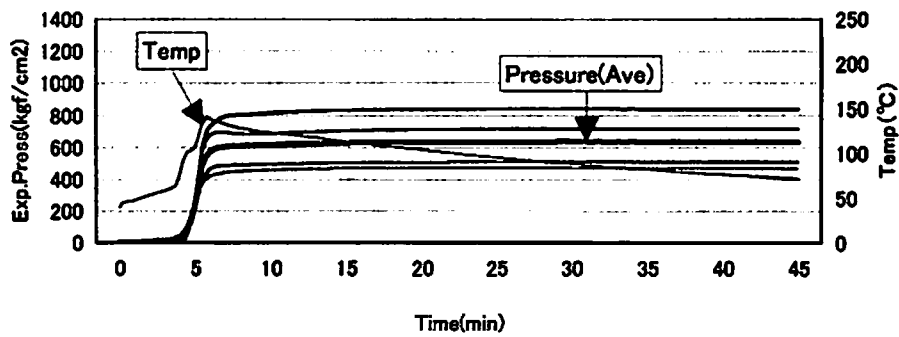


Fig. 9 Expansion pressure and hydration temperature at loading density of 1.6

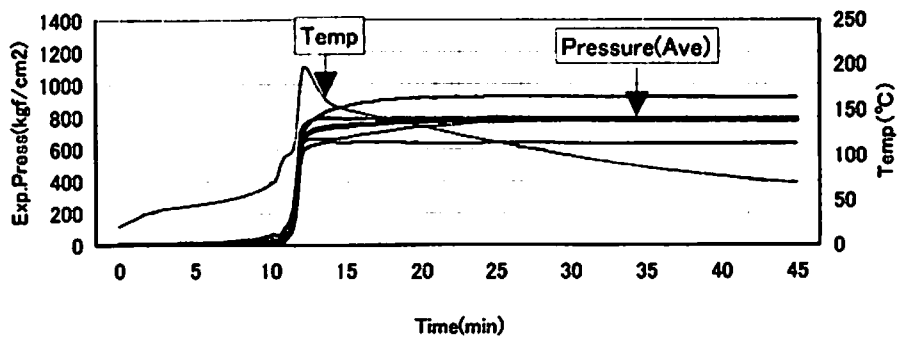


Fig. 10 Expansion pressure and hydration temperature at loading density of 1.8

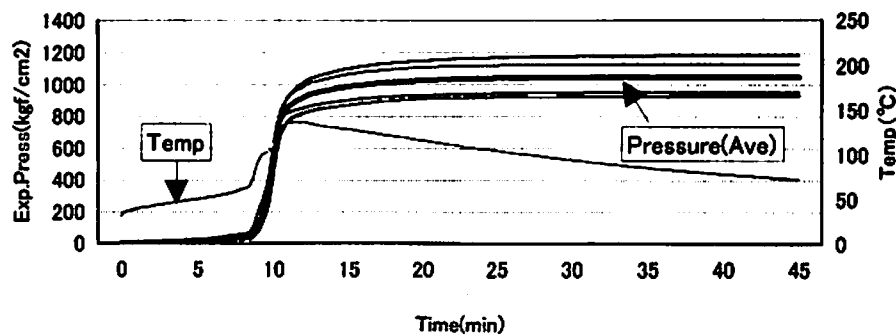


Fig. 11 Expansion pressure and hydration temperature at loading density of 2.0

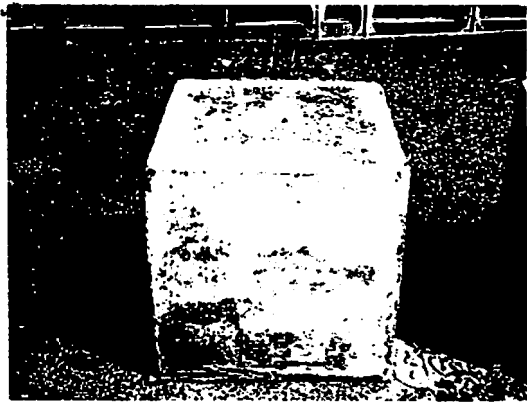


Fig. 12 Concrete block before expansion test

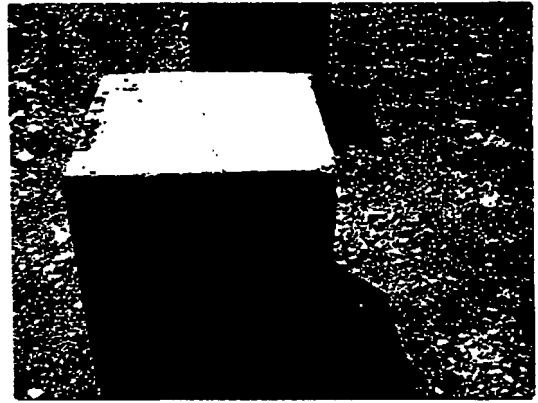


Fig. 13 Result of expansion by Exp. 2

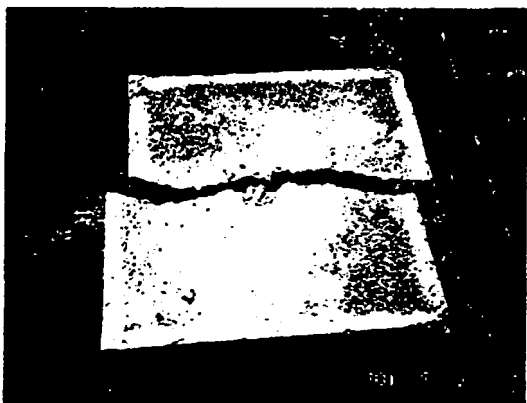


Fig. 14 Result of expansion test by Exp. 3

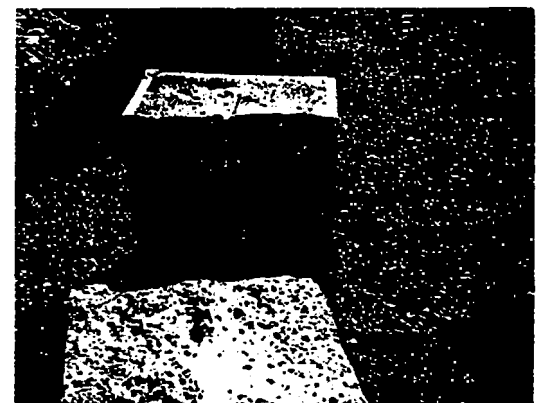


Fig. 15 Result of expansion test by Exp. 4

～4で示すように1.4～2.0の範囲で変え、コンクリートブロックの破碎実証試験をおこなった。

その結果を Fig.12～Fig.15に示す。

圧縮強度 300kg/cm^2 を持つコンクリートブロックの破碎実証結果より、完全破碎をおこなうためには膨脹圧が 600kg/cm^2 以上でかつその膨脹圧発生速度は 300kg/min 以上必要であることが明らかとなった。

Fig.13は部分的な破碎で終了している。この要因として最大膨脹圧は 600kg/cm^2 を越えているものの、その発生速度が 220kg/min と緩慢なため完全破碎に至ることが不能であったと考えられる。

一方、完全破碎に迄到達した Fig.14～15の最高膨脹圧はいずれも 600kg/cm^2 を越えかつその発生速度は 300kg/min 以上である。即ち破碎時間が30～60分以内で完結させるような短時間破碎では最高膨脹圧の絶対値と共に、その発生速度も重要な要因であることが判明した。

この膨脹圧発生速度は、被破碎体に負荷しつづける応力があるレベル以上必要であることを示唆するものである。

3. 2. 3 孔口に塞栓を用いた場合の膨脹圧

コンクリートブロックの破碎は、Fig.14～15で観察されるように完全に分離されしかも瞬間的にブロック片は分割・移動される。

この現象は生石灰の固体膨脹速度よりも遙かに高速である。従ってこの現象は、水和反応によって発生する高温高圧の水蒸気エネルギーが孔内に蓄積され、コンクリートブロックが持つ亀裂に浸入し、初期の亀裂拡大とブロック片の分割・移動にこのエネルギーが寄与しているものと推定される。

そこで、孔内に発生する水蒸気を封入した場合と開放の場合を対比し、膨脹圧測定をおこなった。

水蒸気の封入方法は、Fig.17に示すように米国で発破用に市販されているゴム製塞栓(Stemming Plug)を膨脹圧測定鋼管の上部に挿入し、水蒸気を見掛上密閉した状態で圧力測定をおこなった。その結果4定点測定のうち、その一部は 1000kg/cm^2 を越える値を示し、その平均値は 920kg/cm^2 であった。一方通常の開放状態では、平均 800kg/cm^2 であり約15%以上圧力上昇している。

この圧力差の要因は、半密閉下で 150°C を越える高

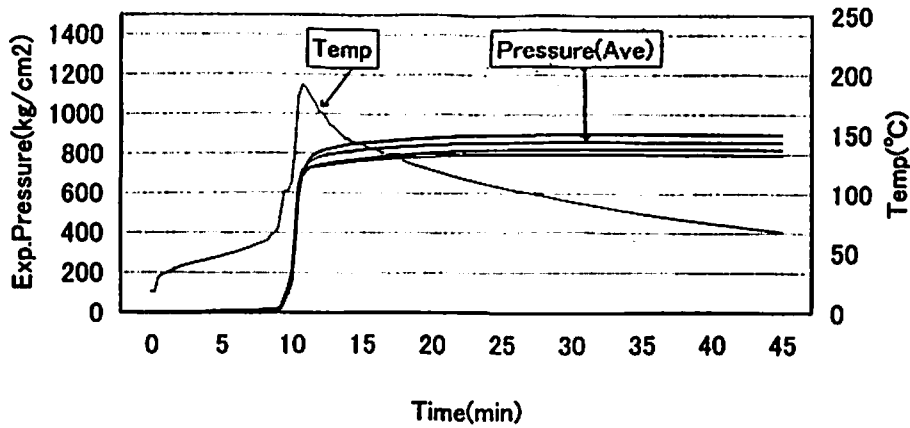


Fig. 16 Expansion result without stemming plug

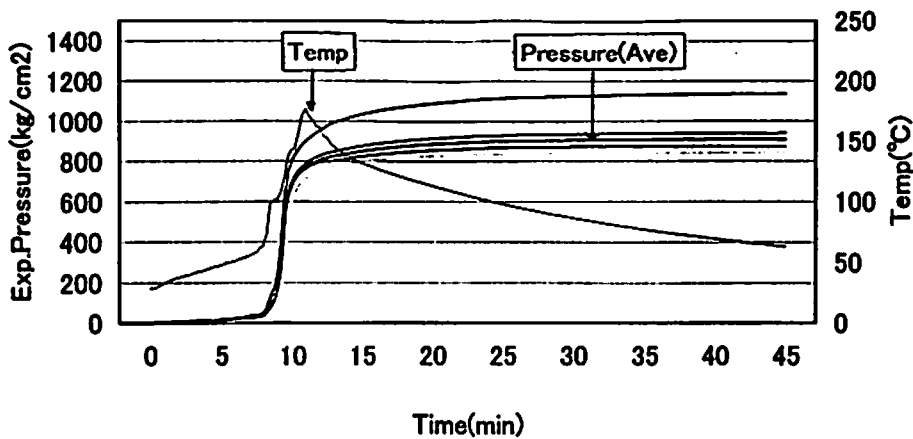


Fig. 17 Expansion result with stemming plug



Fig. 18 Stemming plug made from rubber

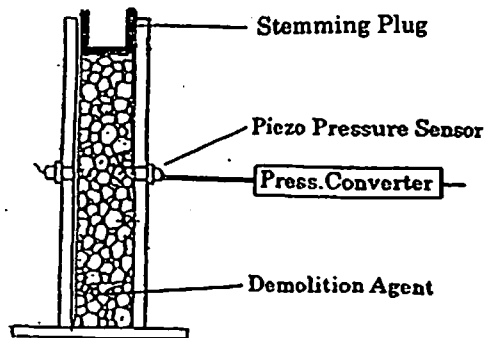


Fig. 19 Expansion test with a rubber stemming plug on the top of hole

温高圧の水蒸気圧によるものと考える。

4. まとめ

膨脹圧特性および実破碎テストの観察より、遅効性破碎剤と速効性破碎剤ではその挙動は大きく異っている。

前者の場合、単なる目視可能な亀裂線が発生し破碎が完了するのに対し、後者の速効性破碎剤では亀裂発生と同時に分割されたコンクリートブロックの移動が

ある。これは Fig.14~15 で観察された通りであり、発生した水蒸気が亀裂への進入とその成長・拡大をおこないコンクリート片を加速し移動させたものと考えられる。

Fig.16~17 で計測されたとおり、充填孔中で発生した水蒸気は 200°C 近くまで急激に温度上昇しており、その飽和蒸気圧は 10 kg/cm² 前後の圧力値をもったガス体である。従ってこの孔中で発生した高圧ガスがパルス的作用を行いコンクリート片の移動が観察される

ものと推定される。

この高温高圧下の水蒸気が存在が両者の破砕性能に大きな差異を生じているものと考えられる。

謝 辞

本研究にご協力いただきました河合石灰工業(株)技術部水野次長様に深く御礼申し上げます。

文 献

1) 森茂二郎, 下田正雄, 岡田能彦: 石膏と石灰,

No. 130, P101~108(1974)

2) S. Chatterji, J. W. Jeffery: *Magazine of Concrete Research*, Vol. 15, No. 44, P83~86(1963)

3) S. Chatterji, J. W. Jeffery: *Magazine of Concrete Research*, Vol. 18, No. 55, P65~68(1966)

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, No. 43, P616~621(1989)

5) 山崎之典, 五味忠夫, 中島雄二: セ技年報 41, P515~518(1987)

Static demolition by calcium oxide — Evaluation of demolition properties —

Hisaaki FUKUI*

The demolition of concrete or rocks was carried out with the two kind of static demolition agents consisting of CaO as the main ingredient.

The first type of the agent, the delay type cracked concrete or rocks after 12 hours, and it was guessed that the expansion pressure was needed to be over 300 kg/cm². Split lines were observed in the cracks.

The second type, the rapid type cracked concrete of rocks after 30 to 60 minutes, and the expansion pressure was needed to be over 600 kg/cm² and the occurrence velocity had to be over 300 kg/min. For the rapid type, it was recognized that water vapor with the vapor pressure of 10 kg/cm² and the temperature of 150°C played an important role.

It is suggested for the cracking mechanism by the rapid type that the pulsating motion of high pressure water vapor produced in a hole acts on concrete or rocks to migrate them.

(*Rox·Japan Co. Ltd., Ebisu Bld. 3.F. Hamacho 1-5-2, Nihonbashi, Chuo-ku, Tokyo 103-0007, JAPAN)