

静的破碎剤の膨張圧発生機構に関する一考察

副田孝一*・原田哲夫**

静的破碎剤の膨張圧発生機構は、諸説あるものの未だ明確にされていない。膨張圧の発生機構を解明することは、静的破碎剤の性能向上に役立つばかりでなく、FRP 緊張材の定着法やケミカルジャッキ等への展開にとって重要である。本研究では、静的破碎剤の種類、養生温度、水-破碎剤比を変化させた時の、膨張圧と水と量および空隙構造の関係を検討し、その結果に基づき、静的破碎剤の膨張圧発生機構について考察を行った。

Key Words : expansive demolition agent, expansive pressure, degree of hydration, pore structure

1. はじめに

静的破碎剤の主成分は生石灰であり、静的破碎剤は生石灰の膨張圧を利用して脆性物質を破碎するものであることは周知の事実である。生石灰の水和膨張現象は古くから知られているが、その膨張圧発生機構については、諸説あるもののまだ結論が出るに至っていない。Chatterjy¹⁾、渡辺²⁾、河野³⁾は、膨張圧の発現は生石灰の水和により生成した消石灰の生成量よりも、主として生成した消石灰の結晶成長によるところが大きいとしている。一方、山崎^{4),5)}は、生石灰の膨張圧発生は生石灰の消化反応による消石灰の生成量に関連しており、結晶成長は見られないことを報告している。

既に筆者⁶⁾は、静的破碎剤の膨張圧に関連して、その大きさや発現時間に及ぼす水-破碎剤比 (W/B)、周囲の環境温度、被破碎体の拘束度等の影響について検討して、なかでも周囲の環境温度の影響が大きいことを報告している。但し、周囲の環境温度が変化しても、静的破碎剤の水和率すなわち $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成率が同じであれば、膨張圧は同じであるという知見が得られている。しかしながら、この場合用いられた静的破碎剤は一種類(夏季用)で、しかも $W/B=25\%$ の場合の結果であって、静的破碎剤の種類、 W/B の影響については十分な検討がなされているとは言い難い。

以上より本報では、静的破碎剤の膨張圧に及ぼす種々の要因を考慮し、より一般的に膨張圧の評価が行えるよう、静的破碎剤の種類が異なる場合、環境(養生)温度および W/B が変化した場合について、静的破碎剤の水和量および空隙構造と膨張圧との関係について検討した。さらに、これらの結果に基づき、静的破碎剤の膨張

Table 1 Chemical composition and main minerals of expansive demolition agent A, B

								(wt%)
	lgloss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Total
A	1.2	8.5	2.3	1.0	82.5	0.7	3.5	99.7
B	1.5	4.3	1.3	0.5	90.1	0.8	1.0	99.5

	Main minerals (wt%)				Superplasticizer (wt%)	Fineness (cm ² /g)
	free CaO	alite	belite	anhydrite		
A	55.0	28.5	3.0	6.0	1.0	3000
B	76.8	0	12.3	1.7	1.0	2200

圧発生機構についての考察を行った。

なお、膨張圧の発生機構を解明することは、静的破碎剤を用いた破碎設計の高精度化や今後の静的破碎剤の性能向上に役立つばかりでなく、FRP 緊張材の定着法⁷⁾やケミカルジャッキ⁸⁾等への用途展開にとっても重要となってくる。

2. 使用材料

(1) 静的破碎剤 A : 春秋用 (O 社製)

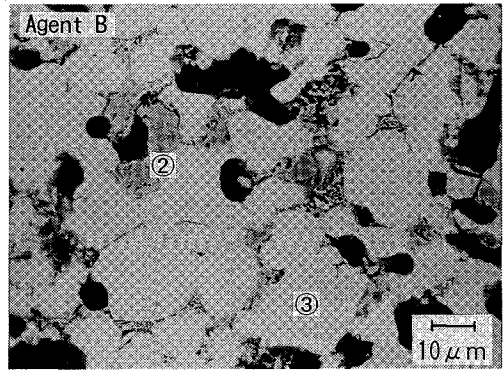
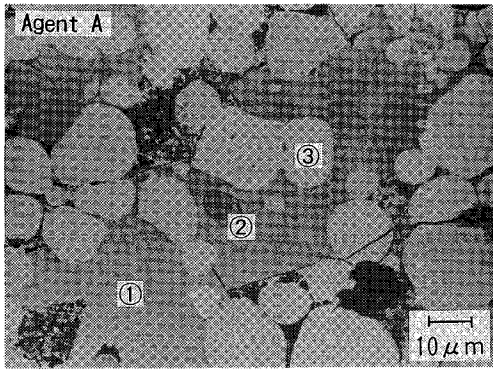
(2) 静的破碎剤 B : 冬季用 (O 社製)

Fig.1 に 2 種類の静的破碎剤クリンカの反射電子像、**Table 1** に化学成分、鉱物組成、粉末度を示す。

静的破碎剤は周囲の温度の影響を著しく受け、温度が低くなると膨張圧発現時間が遅延する。したがって市販の静的破碎剤は、破碎時間をほぼ一定にするよう異なった種類のものを用いている。静的破碎剤 A は常温での使用を目的としているが、静的破碎剤 B は低温環境下でも静的破碎剤 A と同程度の時間で膨張圧を発現させるため **Fig.1** および **Table 1** に示すように、free CaO を 20% 程度増し、CaO に対して遅延効果のあるエーライトを減じて設計されている^{9),10)}。

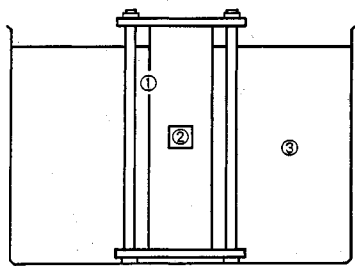
* 正会員 小野田セメント(株) 建設材料研究所
(〒285 佐倉市大作 2-4-2)

** 正会員 工博 長崎大学助教授 工学部構造工学科



① : alite ② : belite ③ : CaO

Fig.1 Back scattered electron image of clinker for agent A and agent B



① : Steel pipe ② : Strain gauge ③ : Water

Fig.2 Measuring method of expansive pressure

3. 実験方法

(1) 膨張圧試験

内径φ32.8 mm×155 mm (厚み4.95 mm)の配管用炭素鋼管に歪みゲージを貼り、防水処理を施した後、静的破砕剤と水をホバートミキサ(丸東製作所製)にて低速で1分間練り混ぜ鋼管中に充填した。次に、Fig.2に示すように上下を鋼板にて拘束し、水中に浸漬して、静的破砕剤の膨張による歪み量を歪み測定器((株)東京測器研究所製TDS-302)にて計測し、式(1)により膨張圧を算出した。静的破砕剤の膨張圧の測定において、建設省技術評価規定に基づく、技術評価委員会での試験法では、通常長さ1mの鋼管を使用し、中央部のひずみを計測する方法としているが、この方法では試料採取が困難となるため、今回は筆者らが品質管理に用いている上下を鋼板で拘束する方法を採用した。上下を拘束する理由は、鋼管長が短いため上下の開口部付近ではわずかではあるが膨張圧のロスが見られるのをこれを防止して1mの鋼管の中央部と同等の状況を作るためである。なお、建設省技術評価委員会での試験法と本試験法では、ほとんど差がないことを事前に確認しており、軸方向の拘束の影響はほとんどないと考えている。

Table 2に実験水準を示す。養生温度は5°C、20°Cとし、W/Bは30%とした。なお温度制御に関しては、

Table 2 Materials and test conditions

No	Kind of agent	Curing temp. (°C)	Water/agent ratio (%)
1	A	20	30
2	A	5	30
3	A	20	27
4	A	20	25
5	B	20	30
6	B	5	30

すべて恒温室内で実験しており、水温はそれぞれ20±1°C、5±1°Cの範囲内に収まっていた。また、W/Bの影響を検討するために、静的破砕剤Aについて、W/B=25、27、30%にて試験を実施した。

$$p = \frac{E_s(k^2 - 1)}{2(1 - \nu_s^2)} (\epsilon_\theta + \nu_s \epsilon_z) \dots \dots \dots (1)$$

p : 膨張圧 (kgf/cm²)

ν_s : 鋼管のポアソン比 (0.3)

E_s : 鋼管の弾性係数 (2.1×10⁶ kgf/cm²)

k : 鋼管の内径に対する外径の比 (外径/内径)

ε_θ : 円周方向のひずみ

ε_z : 軸方向のひずみ

(2) Ca(OH)₂生成量の測定

膨張圧試験と同様な試験体を使用し、各材令で鋼管内部の静的破砕剤硬化体を取り出し、水和を止めるためアセトンで洗浄後、D乾燥を行った。材令は、4時間、8時間、24時間、48時間とした。

次に、微分熱重量測定(DTG、(株)リガク社製)を使用し、460°C付近のCa(OH)₂の脱水による重量減少および660°C付近のCaCO₃(試料処理の過程でわずかに生成する)の脱炭酸による重量減少をCa(OH)₂量に換算してCa(OH)₂生成量とした。これは、D乾燥後の静的破砕剤水和物に対するCa(OH)₂の重量百分率を表している。なおCa(OH)₂生成量には生石灰の水和によるCa(OH)₂および他の鉱物の水和により生成した

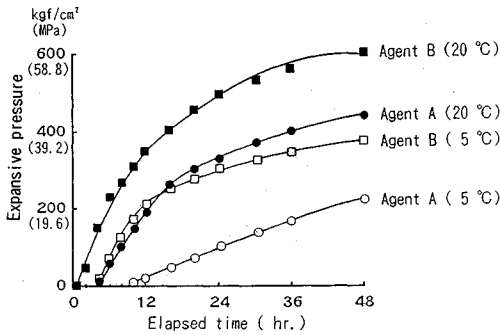


Fig. 3 Expansive pressure of the agents

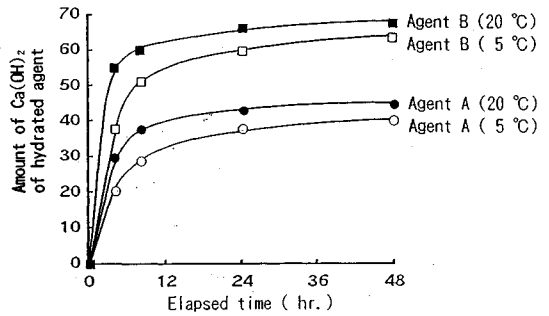


Fig. 5 Amount of Ca(OH)₂ of the hydrated agents

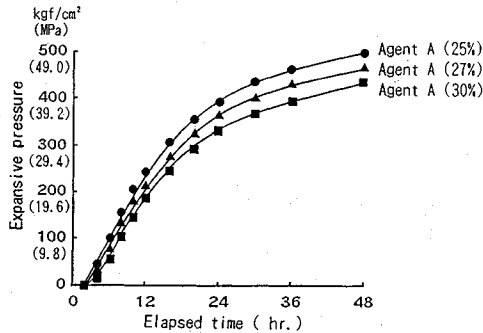


Fig. 4 Expansive pressure of the agent A varying water/agent ratio

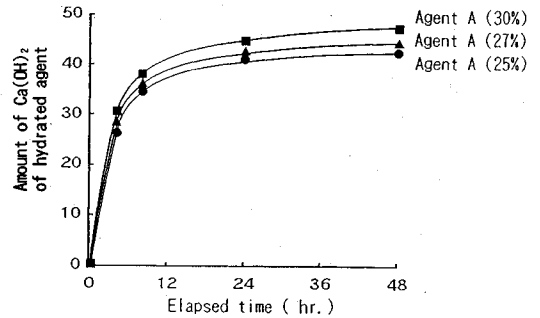


Fig. 6 Amount of Ca(OH)₂ of the hydrated agent A varying the water/agent ratio

Ca(OH)₂の両者を含んでいる。

(3) 硬化体の空隙構造

a) 空隙率および空隙分布

Ca(OH)₂生成量測定と同様の試料調整を行い、水銀圧入式ポロシメーター（島津製作所社製）により空隙率および空隙分布を測定した。なお、ポロシメーターの測定上限は60.3 μmで、下限は0.003 μmである。

b) 破断面の組織

Ca(OH)₂生成量測定と同様の試料調整を行い、走査型電子顕微鏡（日本電子社製）を使用し、常法による静的破砕剤水和物破断面のSEM観察を行った。なお、比較のため未水和粉末のSEM観察も同時に行った。

4. 試験結果

(1) 膨張圧試験

静的破砕剤A, Bの20°Cおよび5°Cの膨張圧経時変化をFig. 3に示す。また、静的破砕剤Aについて、W/Bが変化した場合の膨張圧経時変化をFig. 4に示す。

静的破砕剤Bの方が、静的破砕剤Aに比べ膨張圧の発現が速くなっており、その絶対値も大きい。また、両方の静的破砕剤とも養生温度が高いほど膨張圧の発現は速くなっている。水比の影響については、水比が低くなるほど膨張圧は大きくなっている。

(2) Ca(OH)₂生成量

静的破砕剤A, Bの20°Cおよび5°CのCa(OH)₂生成量経時変化をFig. 5に示す。また、静的破砕剤AについてW/Bが変化した場合のCa(OH)₂生成量経時変化をFig. 6に示す。

静的破砕剤Bの方が、静的破砕剤Aに比べCa(OH)₂生成速度が速くなっており、また両方の静的破砕剤とも養生温度が高いほどCa(OH)₂生成速度が速くなっている。水比の影響については、水比が低くなるほどCa(OH)₂生成量が小さな値を示している。

(3) 硬化体の空隙構造

a) 空隙率および空隙分布

静的破砕剤AおよびBの、空隙率経時変化をFig. 7およびFig. 8に示す。

すべての実験水準において、時間の経過とともに空隙率は減少していることが明らかとなった。また、静的破砕剤Bの方が、静的破砕剤Aに比べて空隙率が小さくなっており、両方の静的破砕剤とも養生温度が高いほど空隙率は小さくなっている。水比の影響については、水比が低くなるほど空隙率は小さくなっている。

b) 破断面の組織

2種類の静的破砕剤の未水和粉末および8時間、24時間後の水和物破断面のSEM写真をFig. 9に示す。

静的破砕剤A, Bとも材令が進むにつれて水和組織が緻密になっているのが見られる。

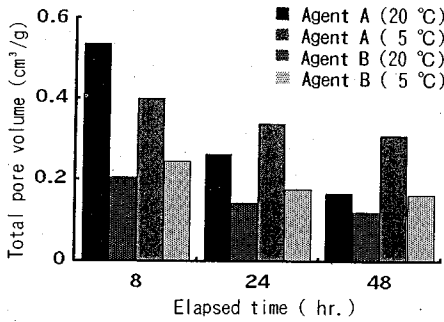


Fig.7 Total pore volume of the hydrated agents

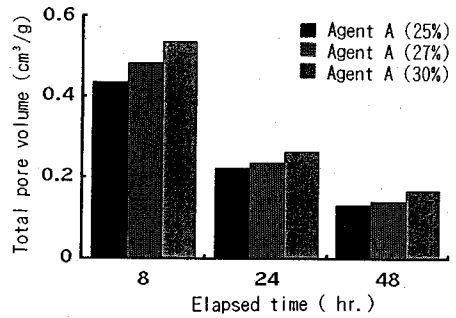


Fig.8 Total pore volume of the hydrated agents varying the water/agent ratio

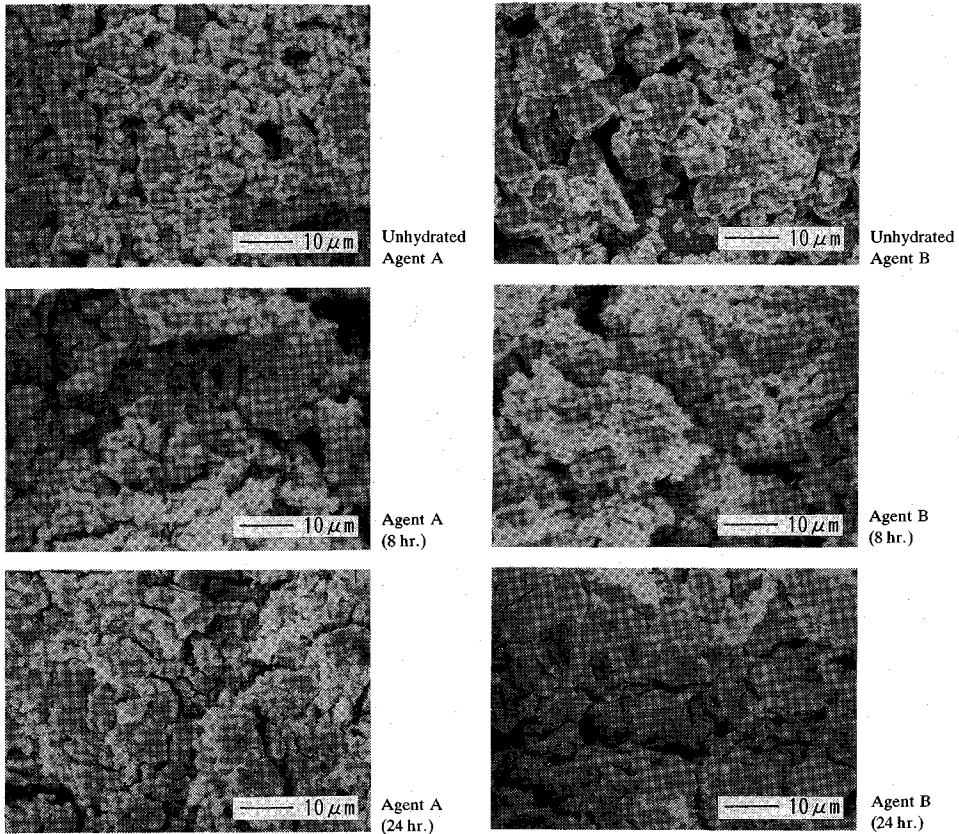


Fig.9 SEM image of hydrated agents

5. 考 察

(1) 静的破碎剤の膨張圧におよぼす静的破碎剤の種類の影響

静的破碎剤 A は静的破碎剤 B と比較して、膨張圧発現速度が遅くなっている。筆者らは、エーライトは生石灰の水和を著しく遅延させる効果があるが、ビーライトには遅延効果が小さいことを既に報告した¹⁰⁾。Table 1 に示すように静的破碎剤 A は静的破碎剤 B と比べ、エーライト量が多いため、エーライトの遅延効果により

膨張圧の発現速度は遅くなっているものと考えられる。また、静的破碎剤 A は、free CaO 量が少ないため膨張圧の絶対値も小さくなっていると推測される。

(2) 静的破碎剤の膨張圧と Ca(OH)₂ 生成量の関係

Fig.10 に静的破碎剤の種類を変えた場合の膨張圧と Ca(OH)₂ 生成量との関係を示す。同一の静的破碎剤では、養生温度によらず膨張圧は Ca(OH)₂ 生成量に関連しており、山崎ら^{4),5)}の静的破碎剤の膨張圧は生石灰の消化反応に依存するとする結果と一致している。養生温度が高くなると膨張圧が大きくなるのは、高温になる

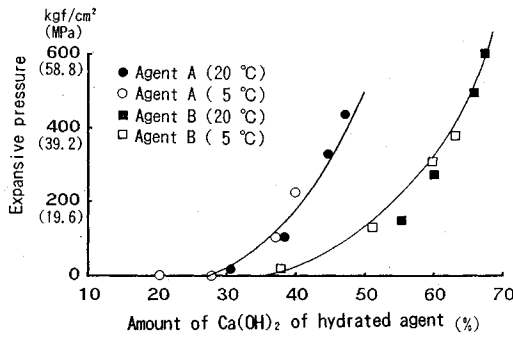


Fig.10 Relationship between expansive pressure and the amount of Ca(OH)₂

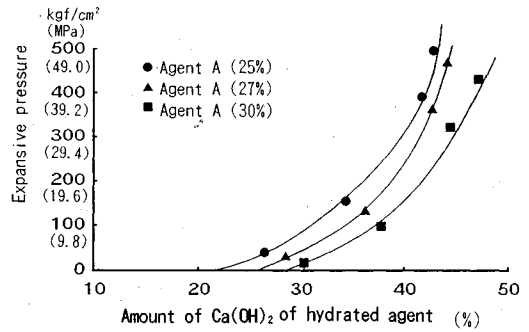


Fig.12 Relationship between expansive pressure and the amount of Ca(OH)₂ varying water/agent ratio

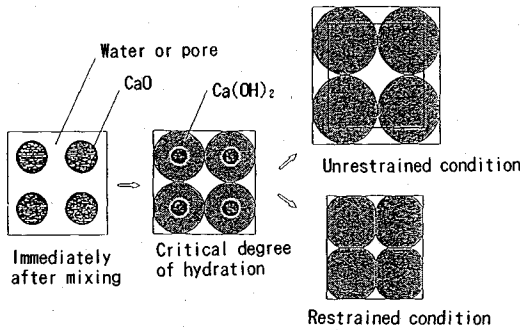


Fig.11 Shalom's sphere model for the expansive mechanics of expansive additive

ほど生石灰の水和反応が進み、Ca(OH)₂生成速度が速くなるためと考えられる。以上の結果は、既に報告した結果⁶⁾とも符号し、同一の静的破砕剤においては、温度変化の影響は、Ca(OH)₂の生成量で统一的に評価できることが明らかとなった。

しかし、静的破砕剤の種類が異なると、膨張圧とCa(OH)₂の関係は異なる。静的破砕剤Aは、静的破砕剤Bの膨張圧-Ca(OH)₂生成量曲線と比較して、低Ca(OH)₂生成量側にずれている。つまり、静的破砕剤Aは少量のCa(OH)₂で膨張圧を発現していることになる。

Ish-ShalomとBentur¹¹⁾⁻¹³⁾は、CSA系膨張材の膨張発生機構について、Fig.11に示す球状モデルを提唱している。それによると、生石灰の水和により生石灰の周囲にCa(OH)₂層を形成し、水和が進むにつれてCa(OH)₂層が広がり他の層と接触する。この点を臨界水和量(critical degree of hydration: α_{cr})と呼んでおり、この時点まで膨張圧は発生しない。さらに水和が進むと、Ca(OH)₂層が互いに押し合うことにより膨張力を持つとしている。本破砕剤についても同様の現象が見られ、ある水和量つまりあるCa(OH)₂生成量になってはじめて膨張圧が発生しており、 α_{cr} が存在する。また、静的破砕剤Aの方が静的破砕剤Bよりも α_{cr} が小さくなっ

Table 3 Critical degree of hydration (α_{cr})

Kind of agent	Water/agent ratio (%)	α_{cr} (%)
A	30	27
A	27	25
A	25	21
B	30	33

ており、静的破砕剤Aは少量のCa(OH)₂生成量で膨張圧を発現することがわかった。

以上より、静的破砕剤の種類が異なった場合の膨張圧を、生石灰の消化反応のみで考えることが難しい結果が得られた。

また、Ish-Shalomらは温度が高くなるほど、 α_{cr} が小さくなるため高膨張圧が発現するとしているが、本実験では α_{cr} は養生温度で変化しないことが確認された。

Fig.12に静的破砕剤AのW/Bを変化した場合の膨張圧とCa(OH)₂生成量の関係を示す。W/Bが小さくなるにつれて、膨張圧-Ca(OH)₂生成量曲線が低Ca(OH)₂生成量側へずれた形になっており、 α_{cr} が小さくなっている。この理由は、W/Bが小さくなるにしたがい、単位体積当たりの静的破砕剤量が多くなるので、生石灰の個々の粒子間距離が小さくなって、少量の水和により粒子間の接触が起こるため、 α_{cr} が小さくなるためと考えられる。したがって、W/Bが小さくなるほど、Ca(OH)₂生成量が小さな値を示しているにもかかわらず、膨張圧が高いのはこのためであると判断できる。

Fig.10およびFig.12のデータから、最小自乗法により膨張圧とCa(OH)₂生成量との関係の回帰式を求めると式(2)~(5)により表される。また α_{cr} の一覧表をTable 3に示す。

上記結果より、静的破砕剤の膨張圧は、Ca(OH)₂生成量ばかりでなく、練り混ぜ時における静的破砕剤の固体濃度にも依存することが明らかとなった。

$$\text{Agent A, } W/B \text{ 30\% } p = 8264 \left(\frac{h - \alpha_{cr}}{100} \right)^{1.87} \dots (2)$$

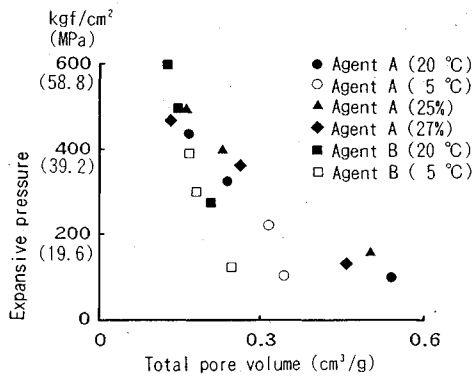


Fig. 13 Relationship between expansive pressure and total pore volume

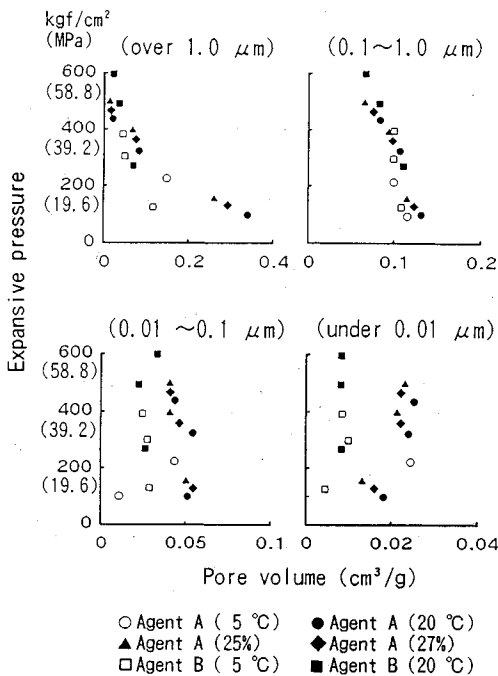


Fig. 14 Relationship between expansive pressure and each size of pore volume

$$\text{Agent A, } W/B \text{ 27\% } \quad p = 5525 \left(\frac{h - \alpha_{cr}}{100} \right)^{1.59} \dots (3)$$

$$\text{Agent A, } W/B \text{ 25\% } \quad p = 6024 \left(\frac{h - \alpha_{cr}}{100} \right)^{1.72} \dots (4)$$

$$\text{Agent B, } W/B \text{ 30\% } \quad p = 3212 \left(\frac{h - \alpha_{cr}}{100} \right)^{1.42} \dots (5)$$

p : 膨張圧 (kgf/cm²) · 式 (2)~式 (5) は

$h \geq \alpha_{cr}$ の範囲で成り立つ式

h : Ca(OH)₂ 生成量 (%)

α_{cr} : 臨界水和量 (%)

(3) 静的破砕剤の膨張圧と硬化体の空隙構造の関係

Fig. 7 および Fig. 8 より材令が進むにつれて空隙量は小さくなっており、膨張圧が大きくなるに伴い空隙率は

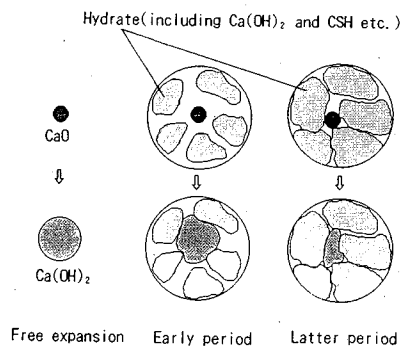


Fig. 15 General idea for the expansive mechanism of expansive demolition agent

小さくなるのがわかった。Fig. 9 の硬化体の SEM 写真より材令が進むにつれて、硬化体組織が緻密化しているのがわかる。つまり、膨張圧が大きくなるにつれて硬化体組織が緻密化しているのが確認できた。

Fig. 13 に静的破砕剤の膨張圧と硬化体の総空隙量の関係を、Fig. 14 に膨張圧と硬化体の空隙分布との関係を示す。

同図より 0.1 μm 未満の空隙量には膨張圧とそれほど相関は見られないが、0.1 μm 以上の空隙量と膨張圧には強い相関が見られることが判明した。またこの関係は、養生温度、静的破砕剤の種類、W/B によらず一定の関係があることがわかった。したがって、硬化体の 0.1 μm 以上の空隙量を測定することにより、静的破砕剤の膨張圧をある程度推定できると考えられる。

(4) 静的破砕剤の膨張圧発生機構について

上述の結果から静的破砕剤の膨張圧発生機構は Shalom らの提唱している Fig. 11 に示す球状モデルとほぼ同様のもので説明できる。まず、生石灰の水和により生石灰の周囲に Ca(OH)₂ 層を形成する。水和が進むにつれて Ca(OH)₂ 層が広がり他の層と接触する。この点が α_{cr} であり、さらに水和が進むと Ca(OH)₂ 層が互いに押し合うことにより膨張力を持ち始めるが、外部の拘束条件によりその形態は異なる。無拘束条件では膨張力は拘束されず、これに伴い内部の空隙量は増加し、膨張圧は発生しない。しかし、外部が拘束されると Ca(OH)₂ は変形を受け、拘束の小さい内部へ Ca(OH)₂ の結晶が発達し内部の空隙を埋めることにより、空隙量は減少する。この時拘束体に対する反力としての膨張圧が発生することになると考えられる。したがって、外部の拘束度が大きいほど膨張圧は高くなることが予想されるが、これは小林ら¹⁴⁾の報告と一致している。ただし、拘束度がある程度以上になると、膨張圧は拘束度の影響を受けない⁹⁾。

また、空隙構造の観点から考えると、Fig. 15 に示すように拘束体に囲まれた硬化体内部で一個の生石灰が水和するとした時、水合初期では硬化体の組織は空隙量が多

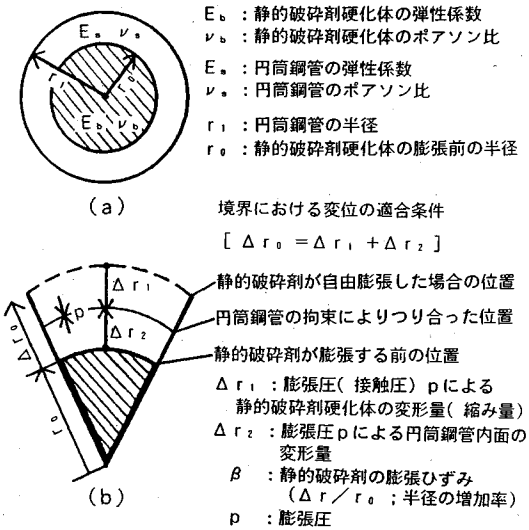


Fig.16 The composite model of hydrated agent and restraining cylinder

く粗になっているため、水和して $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を生成しても、それほど拘束は受けず膨張率は小さくなる。一方、水和が進むと、エーライト等のセメント水和物および水和した $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の硬化体内部への結晶成長により、硬化体組織の空隙量が小さく緻密になる。この段階で水和生成した $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は、周囲の硬化体組織から強い拘束力を受け、その反力としての高膨張圧が発生することが予想される。Fig.10, Fig.12 に示したように、膨張圧— $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成量曲線が水和が進むにつれて、少量の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成で膨張圧が急激に立ち上がっている理由は、このためであると考えられる。

今、静的破砕剤硬化体を、空隙を有する弾性体と仮定し、Fig.16 (a) に示すようにこの弾性体が、円筒鋼管中に埋め込まれており、膨張率 β で膨張しようとした場合、境界面に働く接触圧すなわち膨張圧は、Fig.16 (b) に示す境界における変位の適合条件より、式(6)で表される。但し、静的破砕剤硬化体の弾性係数は時間とともに増加するが、ここではある任意の材令における定数として処理した。膨張圧発生機構を定性的に説明するには、円筒鋼管を剛体と考えても差し支えなく、便宜上 $E_s = \infty$ とすると、式(6)は式(7)のように変形される。 β は1に対して十分小さいので、膨張率は弾性係数と膨張率の積 $E_s \cdot \beta$ に比例すると考えてよい。

$$p = \frac{E_s \cdot \beta}{(1 - \nu_s)(1 + \beta) \cdot n + \frac{k^2 + 1}{k^2 - 1} + \nu_s} \dots \dots \dots (6)$$

$$n = E_s / E_r$$

$$k = r_1 / r_0$$

$$p = \frac{E_s \cdot \beta}{(1 - \nu_s)(1 + \beta)} \dots \dots \dots (7)$$

一般に同一材料においては、硬化体の空隙量が小さくなるにつれて、弾性係数は大きくなることが知られている¹⁵⁾。水和初期では空隙量が大きく弾性係数が極めて小さいため、かなりの $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が生成しても膨張圧はほとんど発生せず、ある程度の弾性係数を持つてはじめて膨張圧が発生することになる。水和後期では硬化体の空隙が小さくなるにともない、弾性係数が飛躍的に大きくなるため(原田の実験結果⁶⁾によると E_s は 5×10^4 kgf/cm² 程度)、少量の反応で高膨張圧が得られることになる。また、静的破砕剤 A の α_{cr} が小さくなる理由は、静的破砕剤 A は、静的破砕剤 B に比べ、エーライト等セメント鉱物をより多く含んでおり、エーライト等の水和生成物により硬化体の空隙を埋めることができるため、少量の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成量で弾性係数を高めることができるからだと考えられる。

従来、静的破砕剤の膨張圧が増加するにつれて空隙量が大きくなることや^{14), 15)}、CSA系膨張材についてエトリンガイト層に $0.25 \mu\text{m}$ 程度の空隙が増加することが報告されているが¹³⁾、本実験では空隙の増加は見られず、逆に膨張圧の増加とともに、空隙量は減少する結果が得られた。

このように結果が異なる理由については、試験方法や膨張成分の相違が考えられるが、その検証については、今後の研究課題としたい。

以上の結果より、高膨張圧の静的破砕剤を得るには、 α_{cr} をできるだけ小さくすること、および $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成量を増加させることすなわち静的破砕剤の水和率を上げることが重要であると考えられる。また空隙構造の観点から同一の膨張率であれば硬化体の空隙量をできるだけ小さく緻密にし、硬化体の弾性係数をできるだけ大きくすることが重要である。

6. 結 論

静的破砕剤の膨張圧を統一的に評価するために、膨張圧に及ぼす種々の要因を考慮し、膨張圧と水和量および空隙構造との関係を検討した。さらに、その結果に基づき、膨張圧発生機構についての考察を行った。本研究の範囲内から以下のことが言える。

(1) 静的破砕剤の膨張圧は、同一種類の破砕剤、同一 W/B の条件下では、養生温度が変化しても $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成量即ち生石灰の消化反応に依存する。したがって、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成量から膨張圧の推定ができる。養生温度が高いほど高膨張圧が発現するのは、温度が高くなるほど $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成量が多くなるためである。

(2) 静的破砕剤の種類が異なる場合は、膨張圧は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成量のみで考えることが難しい。同一膨張

圧を得るために、静的破砕剤 A は静的破砕剤 B より少量の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成量で十分であることが判明した。

(3) 静的破砕剤の W/B が変化した場合、 W/B の低い方が少量の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成量で膨張圧を発現させることが可能であることが判明した。この理由として、 W/B が低くなることにより、生石灰の粒子間距離が小さくなるため Shalom らの提唱している α_{cr} が小さくなるためと考えられる。

(4) 静的破砕剤の膨張圧が増加するに従い、硬化体の空隙量は小さくなる。また空隙分布から特に $0.1 \mu\text{m}$ 以上の空隙が減少していることが確認された。また、静的破砕剤の膨張圧と空隙量との関係は、養生温度、破砕剤の種類、 W/B によらず一定の関係があり、空隙量を測定することにより、膨張圧をある程度まで推定できることが確認された。

(5) 静的破砕剤の膨張圧発生機構は Shalom らの球状モデルで説明でき、高膨張圧を得るためには α_{cr} をできるだけ小さくすること、静的破砕剤の水和率を上げることが重要である。また、静的破砕剤硬化体を空隙を有する弾性体と考えると、膨張圧は弾性係数と膨張率の積に比例する。したがって、膨張圧を高めるには、膨張率を大きくするとともに、静的破砕剤硬化体の弾性係数を大きくすることが重要である。

謝辞：本研究を行うに当たって、貴重な御助言および御協力を頂いた九州工業大学渡辺 明教授、出光 隆助教授に厚く御礼申し上げます。

参考文献

1) S. Chatterji and J.W. Jeffery : The volume change of hardened cement paste due to the presence of "dead-burnt" CaO , Magazine of Concrete Research, vol.18, No.55, pp.65~68, 1966.

2) 渡辺 明：解体の時代と静的破砕剤の利用，セメント・コンクリート，No.442, pp.20~32, Dec., 1983.
 3) 河野俊夫：非爆性破砕剤，石膏と石灰，No.176, pp.41~48, 1982.
 4) 山崎之典・榎原善朗：静的破砕剤の水和と膨張特性，セメント技術年報，Vol.40, pp.578~581, 1986.
 5) 山崎之典：静的破砕剤，石膏と石灰，No.208, pp.51~59, 1987.
 6) 原田哲夫：静的破砕剤を用いたコンクリート構造物の解体に関する基礎的研究，東京大学学位論文，1988.
 7) 原田哲夫・出光 隆・渡辺 明・高山俊一：静的破砕剤を用いた FRP 緊張材の定着法，プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.251~256, 1990年10月。
 8) 原田哲夫・松田 浩：静的破砕剤を用いたケミカルジャッキによる PC 部材の接合法，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14, No.1, pp.177~182, 1992年。
 9) 副田孝一・檜田俊晴・林 浩志・上林真幸：静的破砕剤の膨張圧におよぼす生石灰の焼成度および遅延剤の影響，石膏と石灰，No.235, pp.490~497, 1991。
 10) 副田孝一・檜田俊晴・林 浩志・上林真幸：静的破砕剤の膨張圧におよぼす各種添加剤の影響，石膏と石灰，No.237, pp.79~84, 1992。
 11) M. Ish-Shalom and A. Bentur : Properties of type K expansive cement of pure components I . Cement and Concrete Research, Vol.4, pp.519~532, 1974.
 12) A. Bentur and M. Ish-Shalom : Properties of type K expansive cement of pure components II , Cement and Concrete Research and Vol.4, pp.709~721, 1974.
 13) M. Ish-Shalom and A. Bentur : Properties of type K expansive cement of pure components III , Cement and Concrete Research., Vol.5 pp.139~152, 1975.
 14) 小林一輔・伊藤利治：膨張セメントの膨張圧に影響をおよぼす諸要因，土木学会論文報告集，第226号，pp.67~72, 1974年6月。
 15) 後藤誠史：セメント硬化体と空隙（その2），セメント・コンクリート，No.464, pp.28~33, Oct, 1983.

(1992.7.28 受付)

THE MECHANICS OF EXPANSIVE PRESSURE GENERATION USING EXPANSIVE DEMOLITION AGENT

Koichi SOEDA and Tetsuo HARADA

The mechanics of expansive pressure generation in expansive demolition agents has not been clearly proven to date, although there are a number of theories to explain this phenomenon. It is important to clarify this for not only for the purpose of improving expansive demolition agents, but also in order to develop anchoring method of FRP tendons and chemical jacks. This report examines the relationship among expansive pressure, degree of hydration and pore structure in two kinds of expansive demolition agents at different curing temperatures and water-agent ratios, in order to research the mechanics of expansive pressure.

The results are as follows : The expansive pressure is not determined by the degree of hydration alone. The pore volume decreases as the expansive pressure increases, and this relationship is independent of the types of agents, curing temperature and water-agent ratio. The generation of expansive pressure is generally explained by using Shalom's sphere model.