

論文

[1114] 静的破碎剤の膨張エネルギーの評価方法

正会員○羽根田寛 (群馬大学大学院)

正会員 辻 幸和 (群馬大学建設工学科)

花田光雄 (吉澤石灰工業)

1. まえがき

市街地および火薬の使用が制限されている場所でのコンクリート構造物の解体工事や岩盤の掘削等では、静的破碎剤¹⁾は、火薬に比較して安全でありかつ無騒音、無振動であるなどの点が高く評価され、幅広く使用されてきた。この静的破碎剤の膨張エネルギーの評価については、建設省の技術評価に用いられた試験方法²⁾があるものの、膨張圧の発現機構に関しては諸説^{3)~5)}があり、未だ確立していない。また、速効性の静的破碎剤が開発されているが、この開発には膨張圧の発現機構を正確に把握することが強く要請されている。

本研究では、拘束方法として二重鋼管を用いた静的破碎剤の各方向に生ずる膨張エネルギーの評価方法を提案し、膨張エネルギーの発現性状を実験的に検討するものである。

2. 実験概要

静的破碎剤は、粉末状で水と練り混ぜ、スラリーとして用い、鋼管に充填した。静的破碎剤は、供試体が最大でφ100mmと大孔径のため、噴出現象を抑制するように成分調整を行った。表-1にその化学分析値を示す。また、ブレン値は2680cm²/gであった。

鋼管はJIS G 3454 圧力配管用炭素鋼鋼管STPG 38 SCH 80を用い、図-1に示すような二重鋼管の供試体を作製した。供試体名およびその仕様の一覧を表-2に示す。外鋼管は同一とし、内側に配置する鋼管の寸法と厚さを変化させた。そして、拘束鋼材比 p は、内外鋼管の断面積の和と静的破碎剤の断面積の比として求めた。

膨張ひずみの測定には、鋼管表面に貼付した4軸のワイヤーストレンゲージを用い、円周方向と軸方向の膨張ひずみを求めた。また、内外鋼管の中央付近には熱電対を入れて静的破碎剤の温度を測定した。膨張ひずみの測定は、20℃±2℃の恒温室内の恒温水槽で行った。なお、内鋼管内の水はポンプにより循環させた。

3. 膨張エネルギーの算定

静的破碎剤を図-1のような鋼管に充填することにより、

表-1 静的破碎剤の化学分析値 (wt%)

ig. los	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	total
1.88	3.83	2.94	1.02	84.36	2.27	2.72	99.02

表-2 供試体の仕様 (mm)

供試体	r _{oo}	r _{oi}	r _{io}	r _{ii}	p (%)
A	57.05	48.45	—	—	38.65
B	57.05	48.45	16.93	12.73	50.06
C	57.05	48.45	24.25	20.43	69.66
D	57.05	48.45	38.10	31.55	152.2

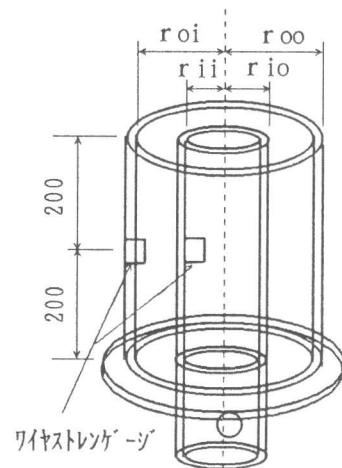


図-1 供試体略図

静的破砕剤に作用する膨張圧(応力度)は、鋼管表面に貼付したワイヤストレンゲージから求めた円周方向の膨張ひずみ ε_{cro} (外鋼管)、 ε_{cri} (内鋼管)と軸方向の膨張ひずみ ε_{clo} (外鋼管)、 ε_{cli} (内鋼管)より、それぞれ次のようにして求められる。

3. 1 薄肉円筒理論による膨張圧および膨張エネルギーの算定⁶⁾

薄肉円筒理論より、静的破砕剤に作用する半径方向の膨張圧 σ_{cr} および二重鋼管の半径方向に生ずる膨張エネルギー U_{cr} は、式(1)および式(2)より求められる。

$$\sigma_{cr} = \frac{E_s}{(r_{oi} - r_{io})(1 - \nu^2)} \{ (\varepsilon_{cro} + \nu \varepsilon_{clo}) t_o + (\varepsilon_{cri} + \nu \varepsilon_{cli}) t_i \} \quad (1)$$

$$U_{cr} = \frac{\pi E_s}{A_c(1 - \nu^2)} \{ (\varepsilon_{cro} + \nu \varepsilon_{clo}) r_{oi}^2 \varepsilon_{cro} + (\varepsilon_{cri} + \nu \varepsilon_{cli}) r_{io}^2 \varepsilon_{cri} \} \quad (2)$$

ここで、 E_s : 鋼管のヤング係数、 ν : 鋼管のポアソン比、 A_c : $\pi(r_{oi}^2 - r_{io}^2)$: 静的破砕剤の断面積、 t_o 、 t_i : 鋼管の厚さ。

鋼管内部における軸方向の膨張ひずみが断面各位置で一定であり、鋼管と静的破砕剤との間にすべりがないと仮定すれば、鋼管と静的破砕剤の釣合条件から、静的破砕剤に作用する軸方向の膨張圧 σ_{cl} および鋼管の軸方向に生ずる膨張エネルギー U_{cl} は、式(3)および式(4)より求められる。

$$\sigma_{cl} = \frac{E_s}{A_c(1 - \nu^2)} \{ (\varepsilon_{clo} + \nu \varepsilon_{cro}) A_{so} + (\varepsilon_{cli} + \nu \varepsilon_{cri}) A_{si} \} \quad (3)$$

$$U_{cl} = \frac{E_s}{2A_c(1 - \nu^2)} \{ (\varepsilon_{clo} + \nu \varepsilon_{cro}) A_{so} \varepsilon_{clo} + (\varepsilon_{cli} + \nu \varepsilon_{cri}) A_{si} \varepsilon_{cli} \} \quad (4)$$

ここに、 $A_{so} = \pi(r_{oo}^2 - r_{oi}^2)$: 外鋼管の断面積、 $A_{si} = \pi(r_{io}^2 - r_{ii}^2)$: 内鋼管の断面積
 $p = (A_{so} + A_{si}) / A_c$: 拘束鋼材比

3. 2 厚肉円筒理論による膨張圧の算定⁷⁾

厚肉円筒理論により、静的破砕剤に作用する半径方向の膨張圧 σ_{cro} (外鋼管) および σ_{cri} (内鋼管) は、式(5)および式(6)より求められる。

$$\sigma_{cro} = \frac{E_s (r_{oo}^2 - r_{oi}^2)}{2(1 - \nu^2) r_{oi}^2} (\varepsilon_{cro} + \nu \varepsilon_{clo}) \quad (5)$$

$$\sigma_{cri} = \frac{E_s (r_{ii}^2 - r_{io}^2)}{2(1 - \nu^2) r_{io}^2} (\varepsilon_{cri} + \nu \varepsilon_{cli}) \quad (6)$$

また、3. 1 と同じように仮定すれば、静的破砕剤に作用する軸方向の膨張圧 σ_{clo} (外鋼管) および σ_{cli} (内鋼管) は、式(7)および式(8)より求められる。

$$\sigma_{clo} = \frac{E_s (r_{oo}^2 - r_{oi}^2)}{(1 - \nu^2) (r_{oi}^2 - r_{io}^2)} (\varepsilon_{clo} + \nu \varepsilon_{cro}) \quad (7)$$

$$\sigma_{cli} = \frac{E_s (r_{io}^2 - r_{ii}^2)}{(1 - \nu^2) (r_{oi}^2 - r_{io}^2)} (\varepsilon_{cli} + \nu \varepsilon_{cri}) \quad (8)$$

4. 静的破碎剤の温度

図-2には静的破碎剤の温度の経時変化を供試体毎に示す。静的破碎剤の内部温度の上昇は、内鋼管のないものが最も高く、内鋼管の孔径が大きくなるにしたがい、内部温度の上昇は小さくなるのが認められる。

静的破碎剤はCaOと水が反応し、そのとき多量の反応熱を生ずる。このような実験では、静的破碎剤の内部温度の上昇は、静的破碎剤の反応熱が鋼管を通して水中へ熱移動することと、静的破碎剤内部へ蓄熱することとのバランスの結果と考えられる。また、この反応は、温度に強く影響される。つまり、静的破碎剤の温度が高いほど、反応は進行して結晶成長が促進され、膨張力も増加する。しかしながら温度が高すぎると、反応は制御できなくなり、噴出現象を起こす。

一般に静的破碎剤の設定温度が10℃異なれば、異なるタイプの静的破碎剤を使用するのが適当である。ここでは、内部温度の上昇は供試体Aを除いて2℃前後に抑えられている。したがって、内鋼管を配置した供試体B、C、Dについては、内部温度の影響は少ないものと考えた。

5. 膨張性状

円周方向および軸方向の膨張ひずみの経時変化を図-3に示す。膨張ひずみは、充填後約10時間から増加している。

静的破碎剤の膨張力による円周方向のひずみについて、内鋼管には圧縮ひずみを、外鋼管には引張りひずみを与えることが確かめられた。内鋼管と外鋼管の絶対ひずみ量を比較すると、内鋼管のひずみ量が大きくなる傾向にある。そしてその比 $|\epsilon_{cri}/\epsilon_{cro}|$ は、内鋼管が大きくなると大きくなる傾向にある(表-4参照)。また、ひずみの量も外鋼管の場合は降伏ひずみに相当する 1300×10^{-6} 以上生じている。したがって、本研究では、鋼管の弾性領域の範囲に限りて比較を行った。

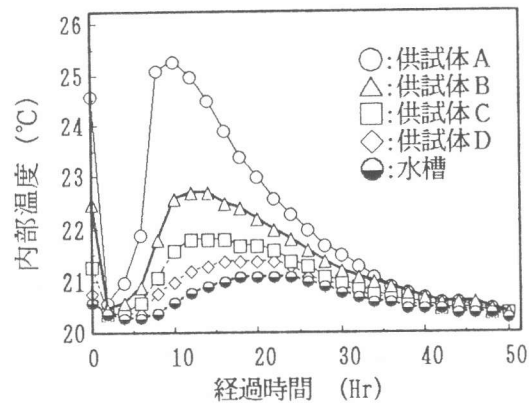


図-2 静的破碎剤の温度変化

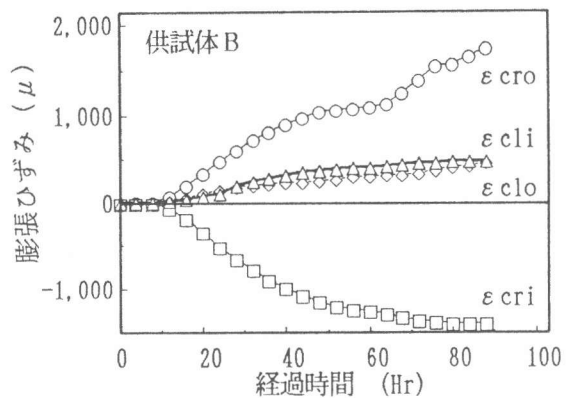


図-3 各方向の膨張ひずみ

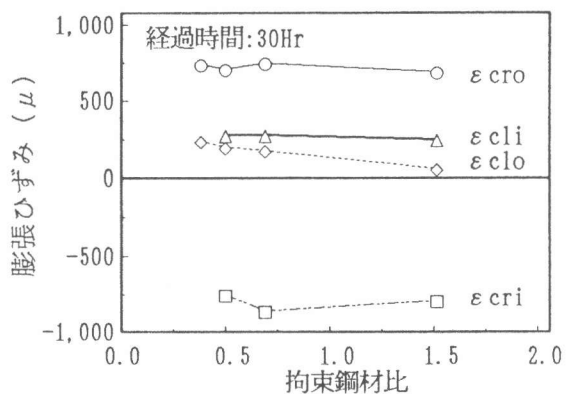


図-4 拘束鋼材比に対する各方向の膨張ひずみ

表-4 円周方向と軸方向の膨張ひずみの絶対値の比率(at 30Hr)

	A	B	C	D
$ \epsilon_{clo}/\epsilon_{cro} $	0.33	0.29	0.19	0.06
$ \epsilon_{cli}/\epsilon_{cri} $	—	0.38	0.30	0.30
$ \epsilon_{cri}/\epsilon_{cro} $	—	1.04	1.14	1.17
$ \epsilon_{cli}/\epsilon_{clo} $	—	1.37	1.76	5.58

軸方向には、内外鋼管とも引張りひずみが生ずることが確かめられた。内鋼管と外鋼管を比較すると、内鋼管の引張りひずみが大きい値を示している（表-4参照）。

円周方向および軸方向の膨張ひずみと拘束鋼材比との関係を示したのが図-4である。円周方向のひずみは、内外鋼管とも拘束鋼材比に関係なくほぼ等しい値を示している。軸方向のひずみについては、内鋼管ではほぼ等しい値を示しているが、外鋼管では、拘束鋼材比が大きくなるにしたがい小さくなる傾向が認められる。

軸方向と円周方向の膨張ひずみの絶対値の比率を比較すると、表-4に示すように内鋼管においては拘束鋼材比に関係なく、約1/3の値を示した。このことは、円周方向の縮みにより、軸方向のポアソン効果による引張りひずみが生じただけで、静的破砕剤による軸方向への引張り作用がほとんど生じなかったことを意味する。外鋼管においては内鋼管がないもの（供試体A）が最も大きく、内鋼管の径が大きくなるすなわち、拘束鋼材比が大きくなるにしたがい小さくなっている。しかしながら、引張りひずみが生じている。すなわち、円周方向に引張り応力が生ずるとポアソン効果により軸方向には圧縮ひずみが生ずるが、引張りひずみが生じたことは、そのひずみに相当する分は、静的破砕剤により軸方向に引張られたことを示している。

6. 膨張圧

上記測定結果と薄肉円筒理論に基づく算定式(1)および(3)より求めた半径方向の膨張圧 σ_{cr} および軸方向の膨張圧 σ_{cl} の経時変化を図-5に示す。 σ_{cr} および σ_{cl} とも、経過時間とともに増加することが確かめられた。また、 σ_{cl} の方がより大きい値を示した。

σ_{cr} および σ_{cl} と拘束鋼材比との関係を図-6に示す。拘束鋼材比が大きくなるにしたがい、軸方向の膨張圧 σ_{cl} は増加するが、半径方向の膨張圧 σ_{cr} はほぼ等しい値を示している。

同様に、厚肉円筒理論に基づいた算定式(5)、(6)および(7)、(8)より求めた外鋼管および内鋼管に作用する半径方向の膨張圧 σ_{cro} 、 σ_{cri} および軸方向の膨張圧 σ_{clo} 、 σ_{cli} の経時変化を図-7に示す。各方向の膨張圧は、時間の経過とともに増加することが確認された。各膨張圧の大きさを比較すると、 $\sigma_{cl} \geq \sigma_{clo} > \sigma_{cro} \geq \sigma_{cri}$ 、 σ_{cli} のようになる。すなわち半径方向の膨

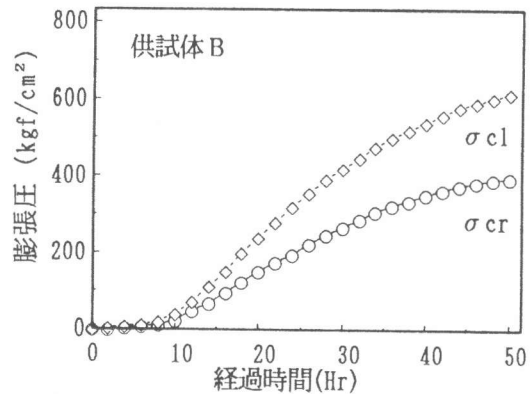


図-5 薄肉円筒理論による軸方向および半径方向の膨張圧変化

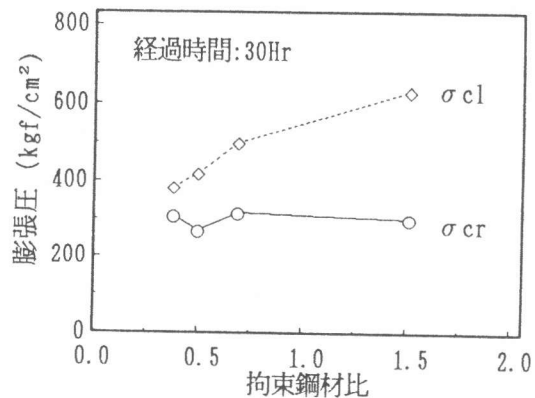


図-6 拘束鋼材比に対する薄肉円筒理論による軸方向および半径方向の膨張圧

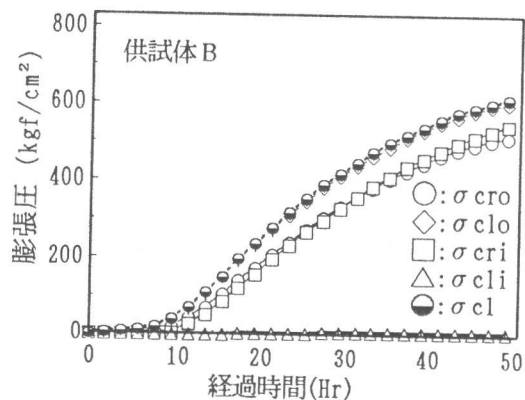


図-7 厚肉円筒理論による各方向の膨張圧変化

張圧 σ_{cro} と σ_{cri} はほぼ等しい値を示しているが、 σ_{cro} の方が σ_{cri} より大きくなる(表-5 参照)。また軸方向に作用する膨張圧 σ_{cl} と外鋼管に作用する σ_{clo} は ほぼ等しい値を示している。これは軸方向の内鋼管に作用する膨張圧 σ_{cli} が極端に低い値を示しているためである。

外鋼管および内鋼管の各方向に作用する膨張圧と拘束鋼材比との関係を図-8 に示す。半径方向の膨張圧は、内外鋼管ともほぼ等しい値を示しており、拘束鋼材比が大きいくほど小さな値になる傾向がある。軸方向の外鋼管に対する膨張圧は、拘束鋼材比が大きくなるにしたがい増加する傾向にある。内鋼管の軸方向に対する膨張圧も、低い値ではあるが拘束鋼材比が大きくなるにしたがい大きくなる傾向にある。

7. 膨張エネルギー

薄肉円筒理論に基づいて式(2)および式(4)より得られた単位体積当たりの静的破砕剤が鋼管に対してなした各方向の膨張エネルギーの変化を図-9 に示す。半径方向の膨張エネルギー U_{cr} および軸方向の膨張エネルギー U_{cl} は、いずれも時間の経過とともに増加していることが確認された。しかし、軸方向の膨張エネルギーは、半径方向に比して極端に小さな値となっている。

半径方向および軸方向の膨張エネルギーと拘束鋼材比との関係を図-10 に示す。拘束鋼材比の増加にともない、半径方向の膨張エネルギーはほぼ直線的に増加しているが、軸方向の膨張エネルギーは同程度か少し小さくなる傾向がある。

内鋼管がある場合とない場合の半径方向の単位体積当たりの膨張エネルギーを比較すると、拘束鋼材比が大きくなるにともなってほぼ直線的に増加し、供試体Dにおいては約4倍にも達している。しかし、半径方向の膨張圧 σ_{cr} は、図-6 に示したように拘束鋼材比に関係なくほぼ等しい。そこで内鋼管がないと仮定した場合の半径方向の膨張エネルギーを計算し、その結果を図-11 に示す。この半径方向の膨張エネ

表-5 各供試体の経過時間毎の $\sigma_{cro}/\sigma_{cri}$ (圧肉円筒理論による)

	B	C	D
20Hr	1.094	1.234	1.228
30Hr	1.010	1.184	1.172
40Hr	0.974	1.107	1.136

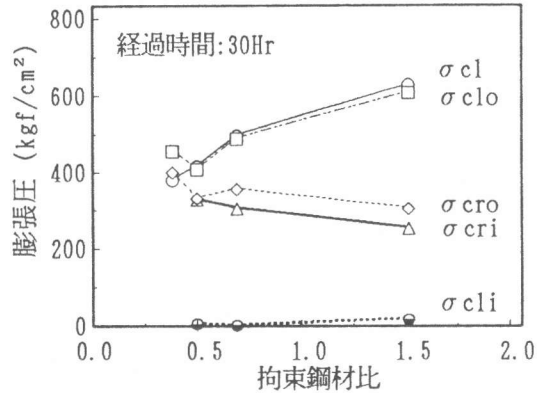


図-8 拘束鋼材比に対する厚肉円筒理論による各方向の膨張圧

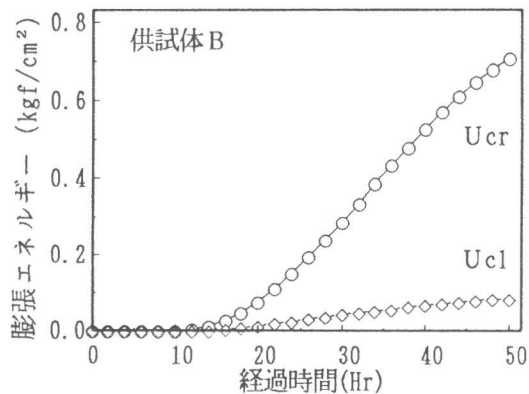


図-9 薄肉円筒理論による軸方向および半径方向の膨張エネルギー変化

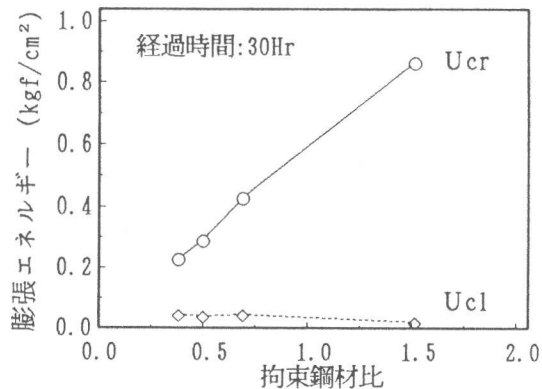


図-10 拘束鋼材比に対する薄肉円筒理論による各方向の膨張エネルギー

ルギーは拘束鋼材比に関係なくほぼ等しい値が示された。このことは内鋼管がないときを基準とした場合、単位体積当たりの膨張エネルギーの増加分は、静的破碎剤が内鋼管に作用する膨張エネルギー、さらに内鋼管によって置換された静的破碎剤の減量分に相当するものと考えられる。つまり、このような拘束条件下では、拘束鋼材比が極端に大きくなければ、拘束鋼材比に関係なく外鋼管にはほぼ同程度の膨張エネルギーが作用するものと考えられる。今後、この点について研究を進めて行きたい。

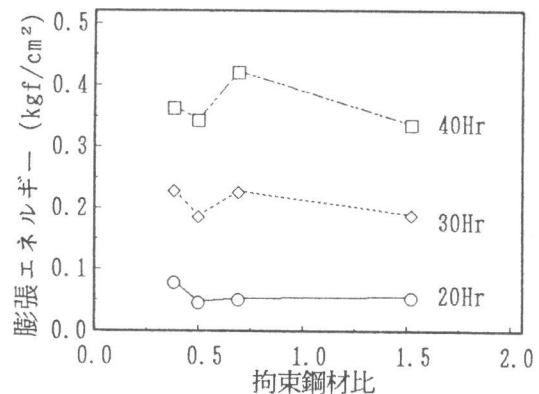


図-11 内鋼管がない場合を想定した半径方向の膨張エネルギー (計算値)

8. まとめ

本研究では、静的破碎剤を二重鋼管を用いた拘束状態においた場合に、膨張ひずみ、膨張圧および膨張エネルギーの生ずる特徴を述べた。本研究の範囲内で次のことがいえる。

- (1) 円周方向には、外鋼管には引張りひずみが、また内鋼管には圧縮ひずみが生じ、その絶対値はほぼ等しい値が得られた。
- (2) 外鋼管と内鋼管の拘束により生ずる膨張圧は、半径方向についてはほぼ等しい値となる。
- (3) 外鋼管の拘束による軸方向の膨張圧は、内鋼管によるものよりもはるかに大きい値となる。
- (4) 半径方向の膨張エネルギーは、拘束鋼材比が大きくなるにしたがって大きくなる。
- (5) 半径方向の外鋼管に作用する総膨張エネルギーは、拘束鋼材比が極端に大きくなればほぼ等しい。

参考文献

- 1) 河野俊夫：被爆性破碎剤、Gypsum & Lime, No. 176, pp. 41~48, 1982
- 2) 昭和56年建設省告示第1236号建設省技術評価「膨張圧を利用した破碎工法の開発」
- 3) 渡辺明・後藤司・松田浩：静的破碎剤によるコンクリート構造物の解体に関する実験的研究、セメント技術年報、36巻、pp. 183~186, 1982
- 4) 出光隆・岡田雅文・新徳雅男：静的破碎剤の膨張圧測定に関する研究、昭和57年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集、pp. 482~483, 1983
- 5) 原田哲夫・出光隆・渡辺明：静的破碎剤の膨張圧測定に関する研究、土木学会第38会年次学術講演会講演概要集、第5部、pp. 449~450, 1986
- 6) 辻幸和・落合光雄・武知勉：内外鋼管の拘束を受ける膨張コンクリートの膨張性状、セメントコンクリート論文集、No. 43, pp. 782~787, 1989
- 7) 辻幸和、吉田誠、奥泉貴朗：異なる配置の鋼管による拘束を受ける膨張コンクリートの膨張エネルギー、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 13, No. 1, pp. 303~308, 1991