

論文

[1093] 異なる拘束下に生じる静的破碎剤の膨張エネルギーの評価

羽根田寛\*1・辻 幸和\*2・花田光雄\*3

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や岩盤の掘削等の工事において、静的破碎剤は、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 [1]。しかし、この静的破碎剤の膨張圧の発現機構に関しては諸説があり [2]、未だ確立していない。

本研究では、異なる拘束下として、鋼管の厚さおよび配置方法を大幅に変化した拘束状態における静的破碎剤の膨張エネルギーの評価方法を提案し、各方向に生じる静的破碎剤の膨張エネルギーと拘束状態との関係を実験的に検討したものである。

2. 実験概要

静的破碎剤は、市販の大口徑用で、春秋用のものを使用した。この静的破碎剤は粉末状で、水と練り混ぜてスラリーとして用い、鋼管内に充填した。

表-1 に、静的破碎剤の化学成分および粉末度を示す。

図-1 に示すような輪切り鋼管供試体(A, B, C) および底板を鋼管に溶接した一体鋼管供試体(E, F, G)を作製した。供試体名称およびその仕様の一覧を表-2 に示す。鋼管は JIS G 3454 圧力配管用炭素鋼管を使用した。拘束鋼材比を大幅に変化させるために、厚さを切削加工した。また、輪切り鋼管供試体では、軸方向には一對の鋼板と4本のPC鋼棒により拘束した。拘束鋼材比  $p$  は、鋼管の断面積と静的破碎剤の断面積の比として求めた。 $p$  は0.6から8.3まで大幅に変化させた。

図-1 に示したように、鋼管表面に貼付したゲージ長が2mmの2軸のワイヤストレンゲージにより、円周方向と軸方向の膨張ひずみを求めた。また、PC鋼棒の中央付近にゲージ長が6mmのワイヤストレンゲージを貼付して、軸方向のひずみを測定した。同時にまた、鋼管の中央付近には熱電対を設置し、静的破碎剤の温度もあわせて測定した。膨張ひずみの測定は、 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ の恒温室内の恒温水槽に供試体を浸漬させて行った。

- \*1 群馬大学大学院 工学研究科生産工学専攻 (正会員)
- \*2 群馬大学教授 工学部建設工学科、工博 (正会員)
- \*3 吉澤石灰工業(株)技術顧問 工博

表-1 静的破碎剤の化学成分および粉末度

化 学 成 分 (wt%)							粉末度
ig. loss	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Total (cm <sup>2</sup> /g)
1.85	5.48	3.21	1.66	81.48	2.08	3.32	99.02, 2,680

表-2 供試体名称と寸法 (mm)

供試体名称	鋼管寸法			rod $\phi$	p**
	ro	ri	t		
A	17.0	12.5	4.5	15.9	0.84
B	24.7	12.4	12.3	15.9	2.96
C	38.1	12.5	25.6	15.9	8.31
E*	24.3	19.3	5.0	—	0.59
F*	34.9	20.3	14.6	—	1.96
G*	60.1	19.6	40.5	—	8.35

\*: 一体鋼管供試体 \*\* : 拘束鋼材比

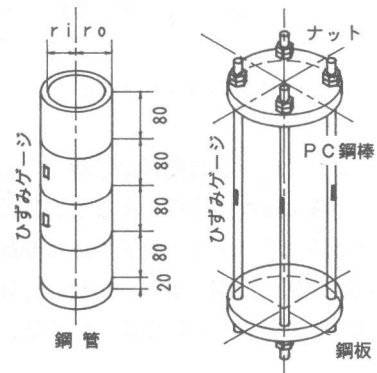


図-1 供試体略図 (輪切り鋼管)

### 3. 膨張エネルギーの算定

静的破砕剤を図-1のような鋼管に充填することにより、静的破砕剤に作用する膨張圧(応力度)および鋼管に及ぼす膨張エネルギーは、鋼管表面に貼付したひずみゲージから求めた円周方向の膨張ひずみ  $\varepsilon_{sro}$  と軸方向の膨張ひずみ  $\varepsilon_{slo}$  により、それぞれ次のようにして求められる。

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  $\sigma_{cro}$  および鋼管の半径方向に及ぼす膨張エネルギー  $U_{cro}$  は、式(1)および式(2)より求められる [4, 5]。

$$\sigma_{cro} = \frac{r_o^2 - r_i^2}{2r_i^2} \cdot \frac{E_s}{1-\nu^2} (\varepsilon_{sro} + \nu \varepsilon_{slo}) \quad (1)$$

$$U_{cro} = \frac{\pi}{AcE_s} \cdot \frac{r_o^2 r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \left\{ (1-\nu) \frac{r_i^2}{r_o^2} + (1+\nu) \right\} \sigma_{cro}^2 \quad (2)$$

ここで、 $E_s$  : 鋼管のヤング係数、 $\nu$  : 鋼管のポアソン比、 $A_s$  : 鋼管の断面積

$A_c$  : 静的破砕剤の断面積

鋼管および内部における静的破砕剤の軸方向ひずみが等しく、鋼管と静的破砕剤との間にすべりがないと仮定すれば、静的破砕剤に作用する軸方向の膨張圧  $\sigma_{clo}$  および鋼管の軸方向に及ぼす膨張エネルギー  $U_{clo}$  は、式(3)および式(4)より求められる [4, 5]。

$$\sigma_{clo} = \frac{-A_s}{A_c} \cdot \frac{E_s}{1-\nu^2} (\varepsilon_{slo} + \nu \varepsilon_{sro}) \quad (3)$$

$$U_{clo} = \frac{A_s}{2A_c} \cdot \frac{E_s}{1-\nu^2} (\varepsilon_{slo} + \nu \varepsilon_{sro}) \varepsilon_{slo} \quad (4)$$

また、軸方向の拘束が P C 鋼棒のみにより拘束されていると仮定すれば、P C 鋼棒に貼付したひずみゲージから求めたひずみ  $\varepsilon_b$  を用い、P C 鋼棒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  $\sigma_{clb}$  および静的破砕剤が P C 鋼棒に与える膨張エネルギー  $U_{clb}$  は、式(5)および式(6)より求められる [5]。

$$\sigma_{clb} = \frac{N r b^2}{r_i^2} E_b \varepsilon_b \quad (5)$$

$$U_{clb} = \sigma_{clb} \times \varepsilon_b \times \frac{1}{2} = \frac{N r b^2}{2 r_i^2} E_b \varepsilon_b^2 \quad (6)$$

ここで、 $N$  : P C 鋼棒の本数、 $E_b$  : P C 鋼棒のヤング係数、 $r b$  : P C 鋼棒の半径

同様に薄肉円筒理論により、静的破砕剤に作用する半径方向の膨張圧  $\sigma_{cro}'$  は、式(7)により求められる。また、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  $\sigma_{clo}'$  は、式(8)より求められる [5]。

$$\sigma_{cro}' = \frac{(r_o - r_i)}{r_i} \cdot \frac{E_s}{1-\nu^2} (\varepsilon_{sro} + \nu \varepsilon_{slo}) \quad (7)$$

$$\sigma_{clo}' = \frac{-2(r_o - r_i)}{r_i} \cdot \frac{E_s}{1-\nu^2} (\varepsilon_{slo} + \nu \varepsilon_{sro}) \quad (8)$$

#### 4. 膨張性状

一体鋼管および輪切り鋼管供試体の円周方向と軸方向の膨張ひずみおよびP C鋼棒の膨張ひずみの経時変化を、図-2および図-3に示す。

一体鋼管供試体においては、静的破碎剤の膨張力により鋼管の円周方向および軸方向には、引張ひずみが生じている。一方、輪切り鋼管供試体においては、鋼管の円周方向には引張ひずみが生じ、軸方向には圧縮ひずみが生じている。また、静的破碎剤を充填した後に、P C鋼棒には当初 200 kgf/cm<sup>2</sup> の応力を導入したためか、反応初期にはP C鋼棒には圧縮ひずみが生じたが、その後引張ひずみが生じ、時間の経過とともに引張ひずみは増加している。

一体鋼管供試体では軸方向の膨張圧を鋼管との付着により拘束しているために、軸方向にも引張ひずみが生じているのに対して、輪切り鋼管供試体では軸方向の膨張圧を主として鋼板とP C鋼棒により拘束しており、鋼管長が短く鋼管との付着が少ないために、鋼管の軸方向には、ポアソン効果による圧縮ひずみが測定されたものと考えられる。それにともない、P C鋼棒には引張ひずみが生じ、時間の経過とともに引張ひずみが増加しているのである。

拘束鋼材比に対する一体鋼管および輪切り鋼管供試体における各方向の膨張ひずみの変化を、図-4に示す。一体鋼管供試体の円周方向および軸方向の膨張ひずみは、拘束鋼材比の増加にともない減少している。一方、輪切り鋼管供試体における円周方向の膨張ひずみは、拘束鋼材比の増加にともない減少している。これは一体鋼管と同様であるが、鋼管の軸方向の膨張ひずみは、ポアソン効果により、すべて圧縮ひずみを示している。そこで軸方向と円周方向のひずみの比率を、静的破碎剤と鋼管との付着の程度を表す指標と仮定し、その絶対値の比率を比較すると、表-3に示す値となり、輪切り鋼管の方が小さくなっている。また、P C鋼棒に生じた膨張ひずみ  $\epsilon_b$  は、拘束鋼材比の増加にともない、ほぼ直線的に減少する傾向を示している。

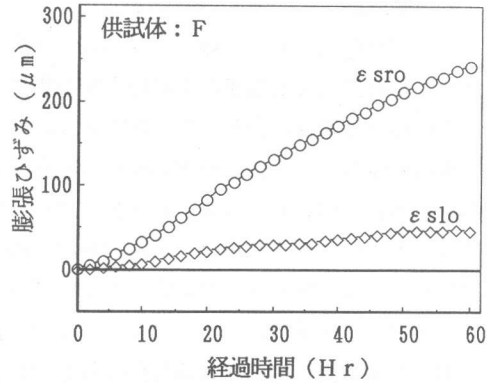


図-2 各方向の膨張ひずみの経時変化 (一体鋼管)

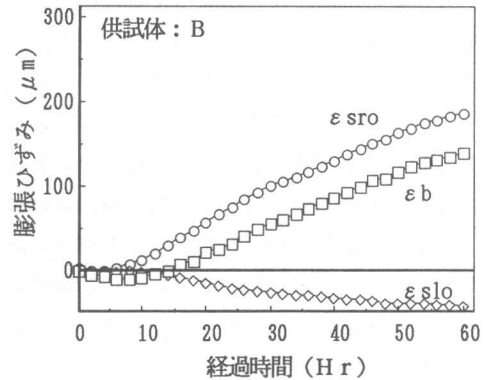


図-3 各方向の膨張ひずみの経時変化 (輪切り鋼管)

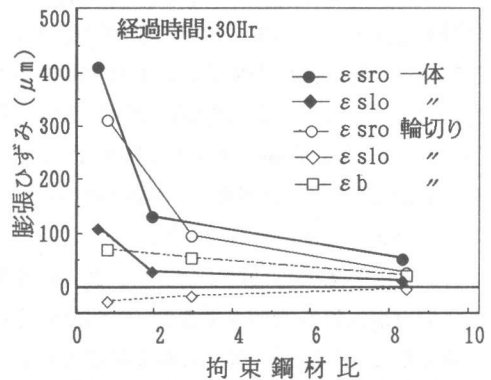


図-4 拘束鋼材比に対する各方向の膨張ひずみ

表-3 軸方向と円周方向の膨張ひずみの絶対値の比率 (at:30Hr)

	輪切り鋼管			一体鋼管		
	A	B	C	E	F	G
$\frac{\epsilon_{clo}}{\epsilon_{cro}}$	0.080	0.156	0.094	0.250	0.227	0.266

## 5. 膨張圧

厚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および軸方向の膨張圧、ならびにP C鋼棒に表れたひずみにより式(5)から求めた軸方向の膨張圧のそれぞれの経時変化を、図-5および図-6に示す。本実験で用いた静的破碎剤は大口徑用のために、通常の静的破碎剤を用いた場合より膨張圧の発現が遅くなっている。

一体鋼管供試体では、鋼管により生じた半径方向および軸方向の膨張圧はほぼ同じ値を示し、時間の経過とともに増加する傾向を示している。輪切り鋼管供試体では、鋼管による半径方向の膨張圧は、時間の経過とともに増加しているが、軸方向の膨張圧は半径方向の膨張圧に比較して極端に小さな値を示している。一方、P C鋼棒により生じた軸方向の膨張圧は、約10時間後から発現し、半径方向の膨張圧と同じように、時間の経過とともに増加する傾向を示している。これは、静的破碎剤と鋼管との付着が少ないために、鋼管による軸方向の膨張圧は低い値を示し、その分P C鋼棒に作用したためと考えられる。

一体鋼管供試体における厚肉円筒理論および薄肉円筒理論による各方向の膨張圧と拘束鋼材比との関係を図-7に示す。厚肉円筒理論による半径方向および軸方向の膨張圧は、それぞれ拘束鋼材比の増加とともにほぼ直線的に増加している。小林ら[4]は、膨張セメントの膨張圧に関して円管の拘束度( $t/r$ )と膨張圧との関係において、拘束度がある限度以下( $t/r < 0.2$ )では、その大きさに比例して膨張圧は増加するが、ある限度を超えて拘束鋼材比を増加させると、膨張圧の増加率が低くなり比例関係は成立しなくなるとしている。静的破碎剤については、その断面積が一定であれば、本実験のように拘束鋼材比を大幅に変化させた場合(0.5~8.3)にも、膨張圧と拘束鋼材比にはほぼ比例関係が認められる。一方、薄肉円筒理論における半径方向および軸方向の膨張圧は、拘束鋼材比に関係なくほぼ同程度の値を示すことが認められる。

輪切り鋼管における各方向の膨張圧と拘束鋼材比の関係を図-8に示す。鋼管による半径方向の膨張圧は、拘束鋼材比に関係なくほぼ等しい値を示している。鋼管による静的破碎剤の軸方向の膨張圧も、拘束鋼材比に関係なくほぼ等しい値を示している。一方、P C鋼棒による軸方向の

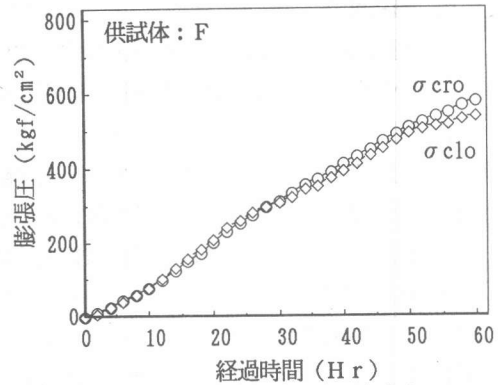


図-5 厚肉円筒理論による各方向の膨張圧の経時変化(一体鋼管)

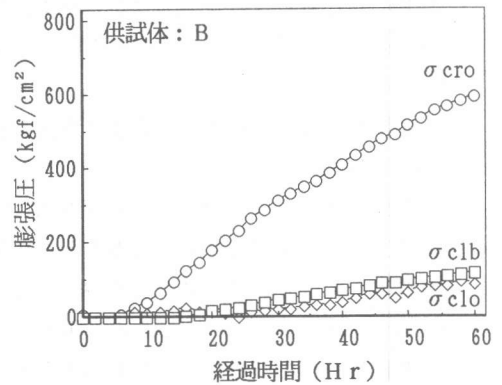


図-6 厚肉円筒理論による各方向の膨張圧の経時変化(輪切り鋼管)

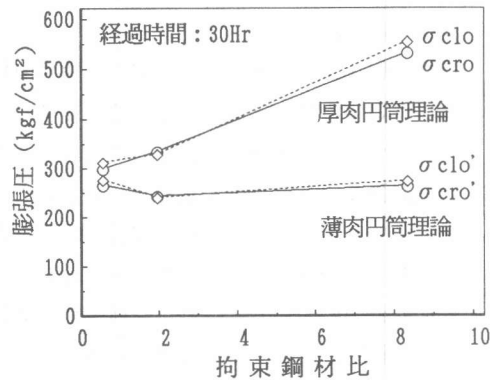


図-7 拘束鋼材比に対する各方向の膨張圧(一体鋼管)

膨張圧は、拘束鋼材比の増加にともないほぼ直線的に減少する傾向を示している。静的破砕剤の軸方向の膨張圧を、鋼管による軸方向の膨張圧とP C鋼棒に作用する軸方向の膨張圧との和と仮定すると、その値は拘束鋼材比の増加に対して減少する傾向を示している。また、一体鋼管供試体と輪切り鋼管供試体を比較すると、輪切り鋼管供試体における膨張圧は、各方向とも小さい値を示している。

### 6. 膨張エネルギー

厚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およびP C鋼棒に対してなした単位体積当りの静的破砕剤の軸方向の膨張エネルギーのそれぞれの経時変化を、図-9および図-10に示す。

一体鋼管供試体において、鋼管の半径方向および軸方向に対してなした静的破砕剤単位体積当りの膨張エネルギーは、時間の経過とともに増加する傾向を示すが、軸方向の膨張エネルギーは半径方向の膨張エネルギーに比較して小さい値となっている。

一方、輪切り鋼管供試体においても、鋼管の半径方向および軸方向のP C鋼棒に対してなした静的破砕剤単位体積当りの膨張エネルギーは、時間の経過とともに増加しているが、鋼管の軸方向に対してなした静的破砕剤単位体積当りの膨張エネルギーは、極端に小さい値となっている。これは静的破砕剤と鋼管との付着不足のために、鋼管の軸方向に対しては膨張エネルギーがほとんど作用しなかったことを意味する。つまり、静的破砕剤単位体積当りの軸方向に対してなした膨張エネルギーは、P C鋼棒に主として作用したものと考えられる。

半径方向の膨張エネルギーと拘束鋼材比との関係を図-11に示す。一体鋼管供試体における半径方向の膨張エネルギーは、拘束鋼材比が0.59から1.96に増加すると減少するが、8.4に増加すると膨張エネルギーは増加に転じている。この現象は、本実験で用いた拘束鋼材比の範囲(0.5~8)において膨張エネルギーに最小値があるとも考えられる。しかし、鋼管の内径がほとんど同じで、鋼管に充填した静的破砕剤の量もほとんど

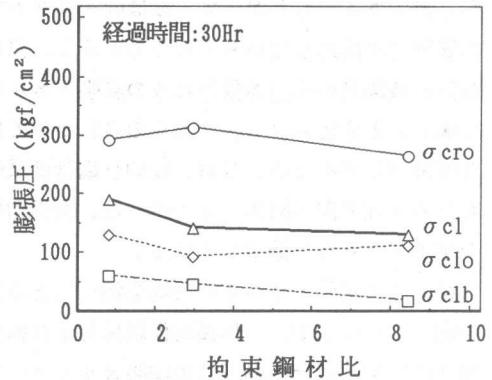


図-8 拘束鋼材比に対する各方向の膨張圧 (輪切り鋼管)

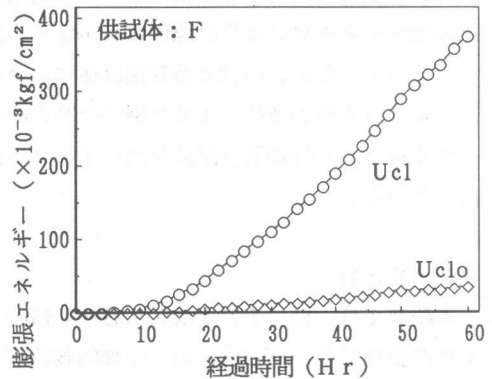


図-9 厚肉円筒理論による各方向の膨張エネルギーの経時変化 (一体鋼管)

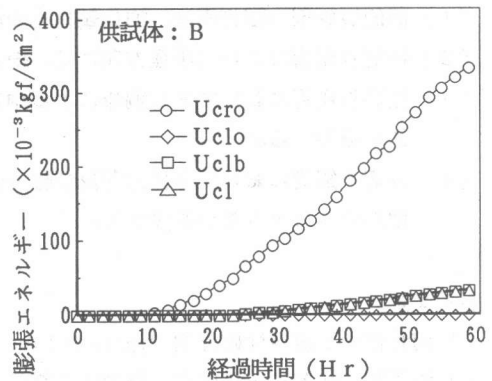


図-10 厚肉円筒理論による各方向の膨張エネルギーの経時変化 (輪切り鋼管)

同じ量である。したがって、ほぼ同一条件下で静的破砕剤が反応しているものと考え、発現する静的破砕剤の単位体積当たりの膨張エネルギーは等しいと考えられる。これらの点については、今後検討してみたい。なお、輪切り鋼管供試体における半径方向の膨張エネルギーは、拘束鋼材比の増加にともない減少している。

軸方向の膨張エネルギーと拘束鋼材比との関係を図-12に示す。一体鋼管供試体および輪切り鋼管供試体における軸方向の膨張エネルギーは、拘束鋼材比の増加にともない減少している。そして、P C鋼棒に作用する膨張エネルギーも拘束鋼材比の増加にともないほぼ直線的に減少する傾向を示している。なお、輪切り鋼管供試体における各方向に対する静的破砕剤単位体積当たりの膨張エネルギーは、一体鋼管供試体に比べて小さい値となっている。

## 7. まとめ

本研究では、異なる拘束状態における静的破砕剤の膨張ひずみ、膨張圧、および静的破砕剤の単位体積当たりの膨張エネルギーの性状を述べた。本研究の範囲内で次のことがいえる。

- (1) 静的破砕剤の膨張圧は、拘束鋼材比の増加にともない直線的に増加する。
- (2) 輪切り鋼管において半径方向には、拘束鋼材比に関係なく同程度の膨張圧が生じる。
- (3) 輪切り鋼管においてP C鋼棒による軸方向の膨張圧は、拘束鋼材比の増加にともない直線的に減少する。
- (4) 輪切り鋼管において半径方向及び軸方向の静的破砕剤の膨張エネルギーは、拘束鋼材比が増加するにともない減少する。

## 参考文献

- 1) 河野俊夫：被爆性破砕剤, Gypsum & Lime, No. 176, pp. 41~48, 1982
- 2) 渡辺明・後藤司・松田浩：静的破砕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
- 3) 辻幸和, 神戸隆幸, 吉田誠：輪切り鋼管が膨張コンクリートの膨張特性に及ぼす影響、土木学会第47回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp. 662~663, 1992
- 4) 小林一輔, 伊藤利治：膨張セメントの膨張圧に影響を及ぼす諸要因、土木学会論文集第286号, pp. 67~71, 1974
- 5) 吉田誠：膨張コンクリートの膨張エネルギーとその持続効果に関する研究、群馬大学大学院修士論文, 1992.3

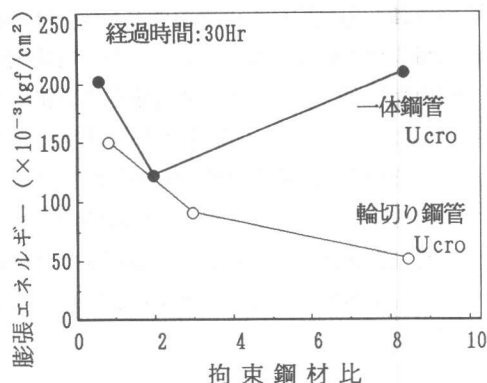


図-11 拘束鋼材比に対する半径方向の膨張エネルギー

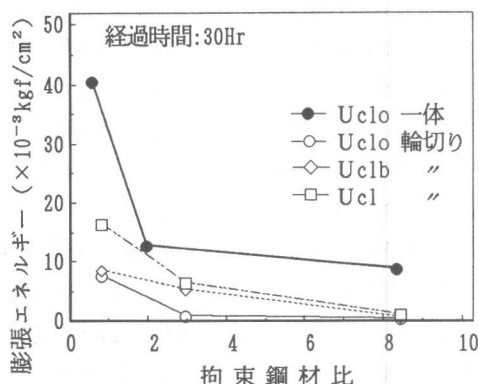


図-12 拘束鋼材比に対する軸方向の膨張エネルギー