論文

[1093] 異なる拘束下に生じる静的破砕剤の膨張エネルギーの評価

羽根田寬*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、静的破砕剤は、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、この静的破砕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 ける静的破砕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砕剤の膨張エネル 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

静的破砕剤は、市販の大口径 用で、春秋用のものを使用した。 この静的破砕剤は粉末状で、水

と練り混ぜてスラリーとして用い、鋼管内に充塡した。 表-1に、静的破砕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 圧力配管用炭素鋼鋼管を使用したが、 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、軸方向には一対の鋼板と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 積と静的破砕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、静的破砕剤の温度もあわせて測定した。 膨張ひずみの測定は、20℃±2℃の恒温室内の恒温水槽 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㈱技術顧問 工博

表-1 静的破砕剤の化学成分および粉末度

				••••				
		化学	成	分((wt%)			粉末度
ig. loss	Si02	Fe ₂ 0 ₃	Al_20_3	Ca0	Mg0	SO 3	Total	(cm ²/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	鎁	管寸法	rod	p**			
	名称	ro	ri	t	φ			
	Α	17.0	12.5	4.5	15.9	0.84		
,	В	24. 7	12.4	12.3	15.9	2.96		
	С	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



3. 膨張エネルギーの算定

静的破砕剤を図-1のような鋼管に充塡することにより、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ε sroと軸方向の膨張ひずみε 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σ 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]。

$$\sigma \operatorname{cro} = \frac{\operatorname{ro}^2 - \operatorname{ri}^2}{2\operatorname{ri}^2} \cdot \frac{\operatorname{Es}}{1 - \nu^2} \quad (\varepsilon \operatorname{sro} + \nu \varepsilon \operatorname{slo}) \tag{1}$$

$$U cro = \frac{\pi}{A c E s} \cdot \frac{r o^2 r i^2}{r o^2 - r i^2} \{ (1 - \nu) \frac{r i^2}{r o^2} + (1 + \nu) \} \sigma cro^2$$
(2)

ここで、Es:鋼管のヤング係数、v:鋼管のポアソン比、As:鋼管の断面積

Ac: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σcloおよび鋼管の軸方向に及ぼ す膨張エネルギUcloは、式(3)および式(4)より求められる [4,5]。

$$\sigma \operatorname{clo} = \frac{-\operatorname{As}}{\operatorname{Ac}} \cdot \frac{\operatorname{Es}}{1-\nu^2} \quad (\varepsilon \operatorname{slo} + \nu \varepsilon \operatorname{sro}) \tag{3}$$

$$Uclo = \frac{As}{2Ac} \cdot \frac{Es}{1-\nu^2} \quad (\varepsilon slo + \nu \varepsilon sro) \quad \varepsilon slo$$
(4)

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

$$\sigma \operatorname{clb} = \frac{\operatorname{N} \mathbf{r} \mathbf{b}^{2}}{\operatorname{r} \mathbf{i}^{2}} \operatorname{Eb} \varepsilon \operatorname{b}$$
(5)

$$Uclb = \sigma clb \times \varepsilon b \times \frac{1}{2} = \frac{N r b^2}{2 r i^2} Eb \varepsilon b^2$$
(6)

ここで、N:PC鋼棒の本数、Eb:PC鋼棒のヤング係数、rb:PC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σ 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σ clo'は、式(8)より求められる [5]。

$$\sigma \operatorname{cro}' = \frac{(\operatorname{ro} - \operatorname{ri})}{\operatorname{ri}} \cdot \frac{\operatorname{Es}}{1 - \nu^2} \quad (\varepsilon \operatorname{sro} + \nu \varepsilon \operatorname{slo}) \tag{7}$$

$$\sigma \operatorname{clo'} = \frac{-2(\operatorname{ro} - \operatorname{ri})}{\operatorname{ri}} \cdot \frac{\operatorname{Es}}{1 - \nu^2} \quad (\varepsilon \operatorname{slo} + \nu \varepsilon \operatorname{sro}) \tag{8}$$

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PC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、静的破砕剤の膨張 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 的破砕剤を充塡した後に、PC鋼棒には当初 200 kgf/cm² の応力を導入したためか、反応初期には PC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PC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、PC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 砕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、PC鋼棒に生じた膨張ひずみ ɛb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。



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			
	Α	В	С	Ε	F	G	
$\left \frac{\varepsilon \operatorname{clo}}{\varepsilon \operatorname{cro}} \right $	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PC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 破砕剤は大口径用のために、通常の静的破砕剤を 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、PC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 砕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PC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 比の増加にともない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。 静的破砕剤については、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。鋼管による静的破砕剤の軸方向 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、PC鋼棒による軸方向の

- 564 -

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PC鋼棒 に対してなした単位体積当た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。

ー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た 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PC鋼棒に対してなした静 的破砕剤単位体積当た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たりの膨張 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 砕剤単位体積当たりの軸方向に対してなした膨張 エネルギーは、PC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、鋼管に充塡した静的破砕剤の量もほとんど 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ると、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、PC鋼棒に作用する膨張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PC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