

# AE 測定による速効性と遅効性静的破砕剤の 破壊メカニズムの比較検討

## Comparison between fracturing mechanism of quick-acting expansive cement and that of slow-acting one by acoustic emission monitoring and stress analyses

岸口正也\*・末宗克浩\*\*・石田 毅\*\*\*・福井久明\*\*\*\*

Masaya KISHIGUCHI, Katsuhiko SUEMUNE, Tsuyoshi ISHIDA and Hisaaki FUKUI

Calcium oxide (CaO)-based expansive cement has been believed to make fracture in rocks and concretes by its expansive pressure, since a volume of CaO becomes twice larger with the chemical reaction shown in the equation,  $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$ . However, the authors have found and pointed out that thermal stresses due to heat accompanied with the chemical reaction affect fracturing mechanism, at the least, of quick-acting expansive cement. In this paper, they compare the fracturing mechanism of quick-acting expansive cement to that of slow-acting one, because the slow-acting one does not radiate large energy in the chemical reaction.

**Key Words:** expansive cement, thermal stress, fracturing, acoustic emission, rock

### 1. はじめに

従来、コンクリート構造物の解体や転石の小割除去を行う際には火薬類、重機類が用いられてきたが、これらによる工事では騒音・振動・粉塵等を伴うため、静的破砕剤を用いた破砕工法が用いられる事例が増えている。静的破砕剤の主成分である生石灰(CaO)は水との水和反応に伴い、発熱を伴いながら最終生成物である  $\text{Ca(OH)}_2$  に変化し、体積が増大する。静的破砕剤には、破壊に 15 分程度の時間を要し、発熱温度が最大 150℃ 前後まで上昇する速効性静的破砕剤と、破壊に 10～20 時間の時間を要し、発熱温度が 40℃ 程度である遅効性静的破砕剤がある。従来は静的破砕剤の化学反応に伴う体積膨張を利用して脆性材料を破壊することができると考えられてきた。体積膨張による破壊であれば、破壊は破砕孔付近から発生する。しかし、我々が過去に行った速効性静的破砕剤による破砕実験<sup>1), 2)</sup>では、どちらかという供試体側面から亀裂が発生する傾向が見られた。そこで本研究では、速効性静的破砕剤と発熱が少ない遅効性静的破砕剤を用いたモルタル供試体の破砕実験を行い、静的破砕剤の発熱による影響を検討した。

### 2. 速効性静的破砕剤実験

#### 2.1. 実験方法

##### (1) 供試体と破砕方法

実験に用いた供試体は、一辺 300mm のモルタル立方体であり、図-1 のように座標系を定めた。供試体には直径 50mm、深さ 250mm の孔を設けこれを破砕孔とした。破砕孔には図-2 に示すように、まず圧力計と

\* 学生会員 山口大学大学院 理工学研究科

\*\* 正会員 (株)中央開発(元山口大学大学院 理工学研究科)

\*\*\* 正会員 山口大学 工学部 社会建設工学科

\*\*\*\* 正会員 (株)ロックス・ジャパン 代表取締役

熱電対を挿入し、隙間に速効性静的破碎剤ロックトーン 1020（河合石灰工業㈱）を充填した後、水を注入した。

## (2)測定方法

温度測定には T 熱電対を用いた。破碎孔内温度は図-2 に示す 3 点において測定した。供試体内部の温度は図-1 に示すように供試体側面の中央とその上下 100mm の位置から直径 10mm の細孔を中心に向着て 3 本穿孔し、各孔に熱電対を 9 点ずつセメントペーストを埋設し測定した。供試体内の測定位置を図-3 に示す。測定は 1 秒間隔で行った。

膨張圧は外径 12.5mm、長さ 150mm の鉄製円筒の内側にひずみゲージを貼った圧力計 KPJ-60MPS（㈱東京測器研究所）で測定した。実験では破碎孔内温度が 100℃を超えることから、温度が圧力計に与える影響を考慮しなければならない。そこで、電気炉を用いて温度のみを変化させる条件で校正試験を行い、温度による影響を補正した。測定は 0.1 秒間隔で行った。

AE 測定は図-1 に示すように供試体表面の各面に 2 個ずつ、合計 12 個の AE センサーを貼付し測定した。AE 発生頻度は、波形を 70dB 増幅した後、しきい値を 250mV に設定し、リングダウン計数法でチャンネル毎に計数して 0.1 秒ごとに記録した。また震源決定のための波形収録はサンプリングタイムを 0.2  $\mu$ s、記録長 2kword、Dead Time 4.4ms で行った。

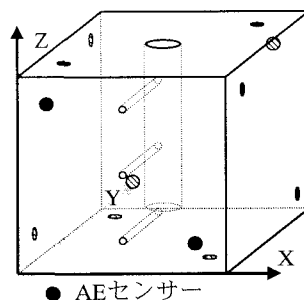


図-1 供試体とAEセンサー位置

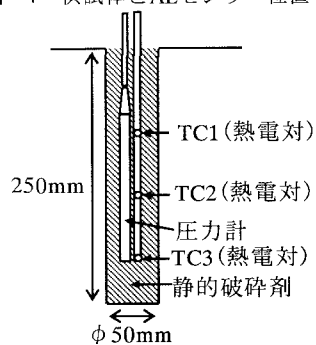


図-2 破碎孔内図

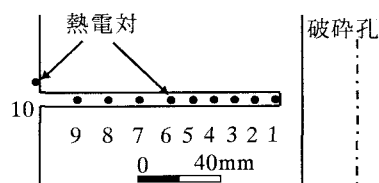


図-3 供試体内の温度測定点

## 2.2. 実験結果

### (1)膨張圧・温度・AE 発生頻度の経時変化

図-4 は横軸に経過時間を、縦軸に膨張圧と温度、AE 発生頻度を示す。膨張圧をみると経過時間 645.9 秒の 8.6MPa から一瞬に上昇し 646.2 秒に最大値 27.3MPa を示し、その後急激に低下した。一方温度は熱電対 TC2 が経過時間 646 秒で 136.5℃を記録し、リングダウン計数法でカウントした AE 発生数は経過時間 645.8 秒からの 0.1 秒間に最大 14856 個を記録した。図-5 に実験後供試体表面で観察した亀裂のスケッチを供試体表面の展開図上に示す。

### (2)AE 震源の空間分布

AE 震源は収録した合計 4800 個の AE イベント波形の P 波初動到達時間から求めた。推定誤差数 mm 以内の精度で決定された AE 震源 436 個を 4 つの時間帯に分類し、空間分布図としたものを図-6(a)~(d)に示す。ここで時間区分は図-4 の上部に示したようにⅠ期：実験開始～経過時間 566.6 秒，Ⅱ期：経過時間 566.6～630.0 秒，Ⅲ期：経過時間 630.0～636.0 秒，Ⅳ期：

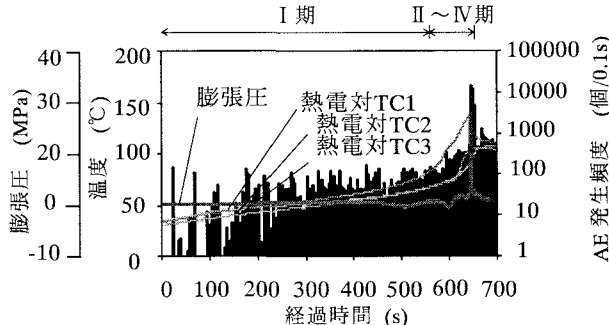


図-4 膨張圧・温度・AE発生頻度の経時変化

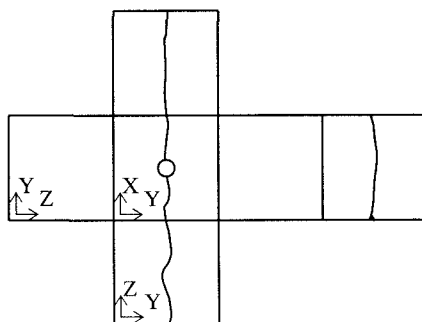


図-5 供試体展開図

経過時間 636.0～646.2 秒（供試体破壊時刻）とした。図-6 (a) の I 期の XY 平面図に着目してみると、AE 震源は破碎孔周辺、特に X 座標 100～150mm の範囲に多く分布している。XY 平面図では破碎孔の位置を明瞭に示すため、破碎孔内に決定された震源を示していないが、破碎孔内には多くの震源が決定されている。これらの震源は静的破碎剤の反応に伴い、静的破碎剤自身から発生した AE と思われる。このことから、破碎孔周辺の AE の多くは静的破碎剤自身から発生した AE が、誤差により破碎孔周辺に決定されたと考えられる。またこの大半の AE 震源は巨視的亀裂の発生位置とは一致しないことから、本実験での破壊には影響が少ないものであると考えられる。II 期においては Y 座標 200

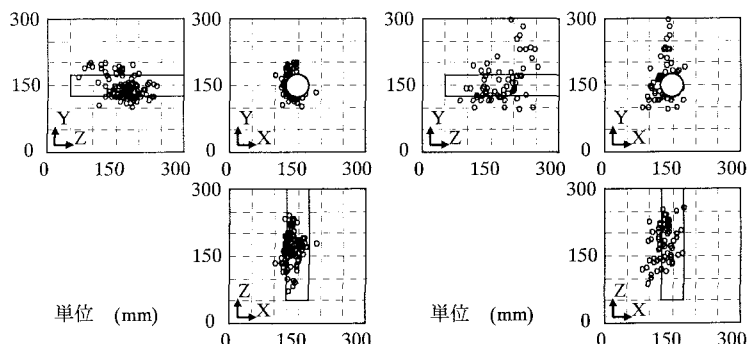


図-6(a) 経過時間別AE震源の空間分布 (I期: 実験開始～経過時間566.6秒) 図-6(c) 経過時間別AE震源の空間分布 (III期: 経過時間630.0～636.0秒)

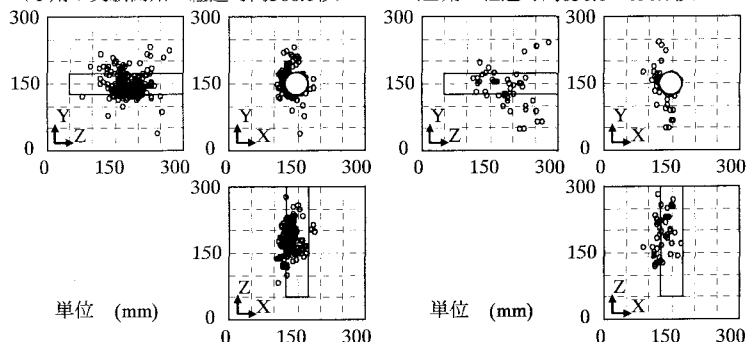


図-6(b) 経過時間別AE震源の空間分布 (II期: 経過時間566.6～630.0秒) 図-6(d) 経過時間別AE震源の空間分布 (IV期: 経過時間636.0～646.2秒)

～220mm に分布が集中する。III 期では、破碎孔壁と供試体端面の中間位置における分布が、Y 座標 150～300mm に広がる。最後にIV期では Y 座標 50～150mm 付近に AE 震源が分布するようになる。このことから、供試体の微小破壊が破碎孔と供試体端面の中間から発生し、まず Y 座標 300mm の端面方向に進展した後に、Y 座標 0mm の端面に向けて進展していったと推測される。

### (3) 応力解析

#### i) 破碎剤の発熱による熱応力

熱応力とは供試体内に温度分布が作用したとき、それに応じた自由な熱膨張が拘束されるために生じる応力である。本実験では、供試体内の温度は図-3 に示す位置で測定した。この温度分布をもとに、本研究ではモルタル供試体を内径  $a=25\text{mm}$ 、外径  $b=150\text{mm}$  とする半径  $r$  の円筒と仮定し、次式<sup>3)</sup>により接線方向応力の熱応力を求めた。

$$s_{\theta} = \frac{aE}{r^2} \left[ \frac{r^2 + a^2}{b^2 - a^2} \int_a^b T r dr + \int_a^r T r dr - T r^2 \right] \quad (6)$$

この計算において線膨張係数  $a$  には  $a=14 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  を、ヤング率  $E$  には別途行ったコア試験から得た  $E=23\text{GPa}$  を用いた。図-7 に供試体破壊時の温度分布および熱応力分布を、図-8 に経過時間別の熱応力分布図を示す。図中には破碎孔壁近傍の拡大図を示している。ここで経過時間は AE 震源分布での経過時間

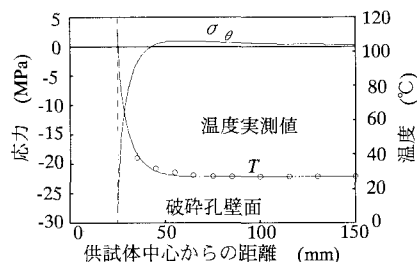


図-7 温度分布と熱応力分布例

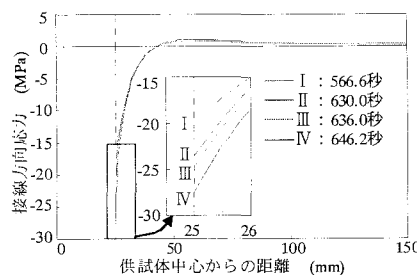


図-8 経過時間別熱応力分布

区分Ⅰ～Ⅳ期の終了時間，Ⅰ：566.6秒，Ⅱ：630.0秒，Ⅲ：636.0秒，Ⅳ：646.2秒とした．図-8をみると破碎孔壁位置では時間の経過とともに圧縮応力が大きくなっていることがわかる．

## ii) 破碎剤の膨張圧による応力

熱応力解析と同様にモルタル供試体を内径  $a=25\text{mm}$ ，外径  $b=150\text{mm}$  とする半径  $r$  の円筒と仮定し，次式に示す肉肉円筒理論式<sup>3)</sup>を用いて解析を行った．

$$s_{\theta} = -\frac{a^2 b^2 (p_0 - p_i)}{b^2 - a^2} \frac{1}{r^2} + \frac{p_i a^2 - p_0 b^2}{b^2 - a^2} \quad (7)$$

式(7)は接線方向応力を表し， $p_i$ は内圧， $p_0$ は外圧であり，本実験では拘束圧は作用していないため  $p_0=0$  である．図-9に経過時間別の応力分布図を示す．この図をみると，経過時間646.2秒での応力が他の経過時間の応力に比べ大きくなっている．これは，図-4に示した膨張圧の経時変化をみても分かるように，本実験では膨張圧が実験開始からほとんど変化せず，破壊直前のみ急激な上昇をしたからである．

## iii) 熱応力と膨張圧による応力の重ね合わせ

各経過時間での熱応力と膨張圧による応力の重ね合わせた応力分布図を図-10に，破壊直前の膨張圧の変化に対応させた，経過時間645.8～646.2秒の応力分布を図-11に示す．両図には供試体の圧裂引張強度  $3.0\text{MPa}$  も示す．図-10の経過時間566.6秒の応力分布をみると，供試体中心から55mm付近で最大応力約  $1.4\text{MPa}$  となっている．この最大応力は供試体の圧裂引張強度の50%程度であり，この時期の応力では亀裂を形成するには至らなかったと推測される．その後，最大応力と最大応力の発生位置は経過時間636.0秒となってもほとんど変化しない．経過時間646.2秒となると，供試体中心から32mm付近で最大応力  $12.5\text{MPa}$  となり，この値は圧裂引張強度を上回る．図-11をみると経過時間645.8秒の応力分布では供試体中心から40～55mmの範囲で，供試体の圧裂引張強度を上回っている．その後，時間が経過すると応力最大位置は破碎孔へと近づき，圧裂引張強度を上回る範囲も広がる．

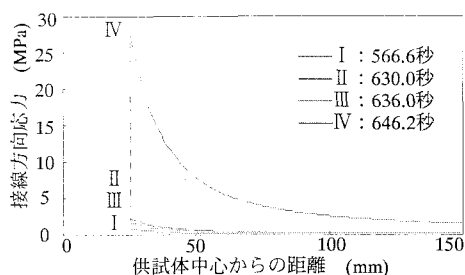


図-9 経過時間別膨張圧による応力分布

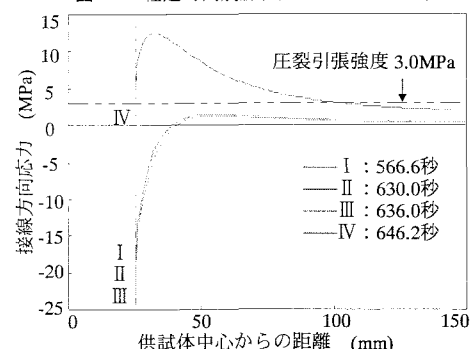


図-10 経過時間別応力の重ね合わせ

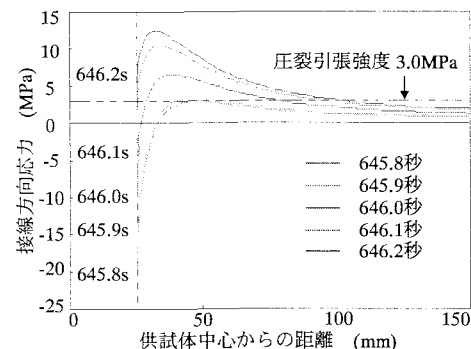


図-11 破壊直前の応力の重ね合わせ

## 2.3. 考察

速効性静的破碎剤実験において，AE震源決定の結果，膨張圧が上昇する以前から破碎孔から離れた位置でのAE震源が確認された．また応力解析の結果においても，破碎孔付近では熱応力の圧縮応力が膨張圧による引張応力を打ち消し，破碎孔から離れた位置で最大応力を示した．このことから，速効性静的破碎剤による破碎では，破壊が破碎孔からではなく，破碎孔と供試体側面の中間から発生し，これは速効性静的破碎剤の発熱による熱応力が大きく影響したためと考えられる．

## 3. 遅効性静的破碎剤実験

### 3.1 実験方法

#### (1) 供試体と破碎方法

実験に用いた供試体は，速効性静的破碎剤実験同様一辺  $300\text{mm}$  のモルタル立方体であり，供試体には直

径 50mm、深さ 250mm の破碎孔を設けた。今回用いた遅効性静的破碎剤 S マイト A 型（㈱住友大阪セメント）は水と混練し、スラリー状にして充填した。薬剤がスラリー状のため、このままでは圧力計と圧力計に固定した熱電対が薬剤中に沈んでしまい、遅効性静的破碎剤実験と同じ位置に設置することができない。そこで、圧力計とほぼ同径で長さ 50mm の花崗岩を圧力計底部に接着し、圧力計および熱電対を破碎孔内に設置した後に水と混練した静的破碎剤を充填した。

## (2) 測定方法

測定方法は遅効性静的破碎剤実験とほぼ同様であるが、遅効性静的破碎剤実験では破碎までに 10 時間以上かかるため、測定器の記憶容量を考慮し、温度の測定間隔を 60 秒、膨張圧の測定間隔を 1 秒とした。AE の波形の収録については Dead Time を 22ms と遅効性静的破碎剤の場合より長く設定した。また、今回の実験での温度測定は、測定器を変更したため、チャンネル数が 10 点のみであった。そこで温度測定点は破碎孔内の 3 点および、供試体の一側面の中央に穿孔した細孔内で図-3 に示す 1～4、6、8、10 の 7 点とした。

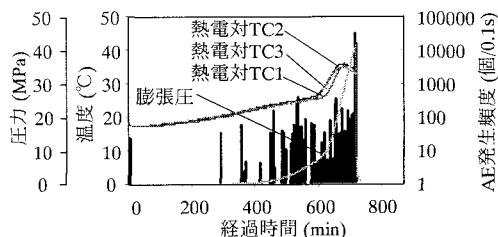


図-12 膨張圧・温度・AE発生頻度の経時変化

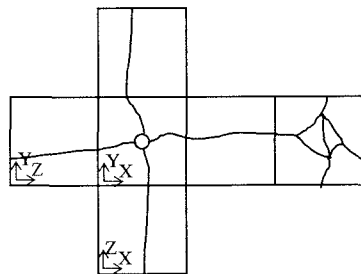


図-13 供試体展開図

## 3.2. 実験結果

### (1) 温度・膨張圧・AE 発生頻度の経時変化

図-12 に温度・膨張圧・AE 発生頻度の経時変化を示す。膨張圧をみると、経過時間 400 分あたりから緩やかに上昇し、715 分 30 秒付近で最大値 40.5MPa に達した後急激に低下する。AE 発生頻度も経過時間 715 分 30 秒に 401135 個の最大値を記録した。温度はこれより早い経過時間 679 分で最大値 35.9℃となる。図-13 に実験後供試体表面で観察した亀裂のスケッチを供試体表面の展開図上に示す。

### (2) AE 震源の空間分布

本実験において震源決定された AE 震源 102 個の空間分布図を図-14 に示す。これをみると、AE 震源が、図-13 で示した巨視的亀裂の位置に沿って発生しているのがわかる。本実験においては、実験中の目視による観察では X 方向から先に巨視的亀裂が発生したことがわかった。よって、X 方向の AE 震源の経時変化を知るため、横軸に破壊直前の経過時間、縦軸に X 座標をとった AE 震源の時空分布を図-15 に示す。この図をみると、破壊直前には AE 震源が破碎孔から供試体側面方向へ進展していくことがわかる。

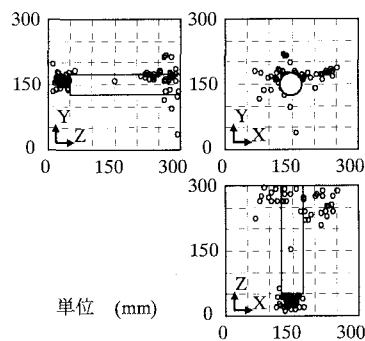


図-14 AE震源の空間分布

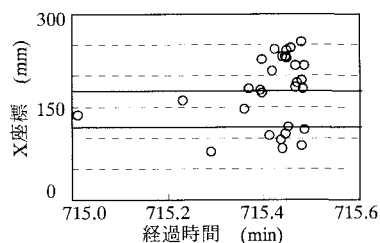


図-15 AE震源の時空分布

### (3) 応力解析

遅効性静的破碎剤実験と同様に、熱応力および膨張圧による応力を理論式によりそれぞれ求めた。

#### i) 破碎剤の発熱による熱応力

本実験での経過時間別熱応力分布を図-16(a)に示す。なおこの図の縦軸の接線方向応力のスケールを、後に示す膨張圧

による応力分布図と一致させたものを図-16(b)に示す。経過時間は 600 分、640 分、680 分、715 分とした。

これを見ると、破碎孔付近での圧縮応力は経過時間 680 分の  $-3.2\text{MPa}$  が最大となっている。

## ii) 破碎剤の膨張圧による応力

図-17 に経過時間別の膨張圧による応力分布を示す。経過時間は 600 分, 640 分, 680 分, 715.48 分 (供試体破壊時刻) とした。応力の最大値はいずれの経過時間においても破碎孔孔壁に位置する。

## iii) 熱応力と膨張圧による応力の重ね合わせ

各経過時間での熱応力と膨張圧による応力の重ね合わせた応力分布図を図-18 に示す。この図を見ると熱応力による影響は小さく、膨張圧による応力分布とほぼ同じ分布となっていることがわかる。

## 3.3 考察

遅効性静的破碎剤実験において、AE 震源は破壊直前に破碎孔孔壁から供試体側面に向けて進展していく傾向がみられた。また応力解析結果においても、発熱による熱応力の影響は、膨張圧による応力にほとんど影響をおよぼすことなく、最大応力は常に破碎孔孔壁に位置した。このことから、遅効性静的破碎剤による破碎では破壊が破碎孔孔壁から発生し、供試体側面に向けて広がっていくものと考えられる。

## 4. 結論

速効性、遅効性静的破碎剤による破碎を比較すると、反応速度が早く、発熱温度も高い速効性静的破碎剤では破碎孔孔壁付近で大きな圧縮応力が発生し、膨張圧の引張応力を打ち消すことになる。一方、反応速度が遅く、発熱温度も低い遅効性静的破碎剤では熱応力による影響は少ない。速効性静的破碎剤で効率的な破碎を行うには、発熱による影響を検討する必要があると思われる。

## 参考文献

1) 末宗克浩・田口雅輝・石田毅・木下直人・福井久明：岩盤加熱試験と比較した静的破碎剤の熱応力による破碎効果，第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム公園論文集，pp.385-390，2004 年 1 月

2) Ishida, T., Taguchi, M., Suemune, K., Fukui, H. and Mizuta, Y. : Fracturing mechanism by expansive cement agent deduced from acoustic emission monitoring, Proc. of 2002 ISRM Regional Symposium (3rd Korea-Japan Joint Symposium) on Rock Engineering Problems and Approaches in Underground Construction, pp.841-846, Seoul, Korea, July 2002.

3) Timoshenko, S. P., and Goodier, J. N : Theory of elasticity (Third Edition), McGRAW-HILL KOGAKUSHA, 1970.

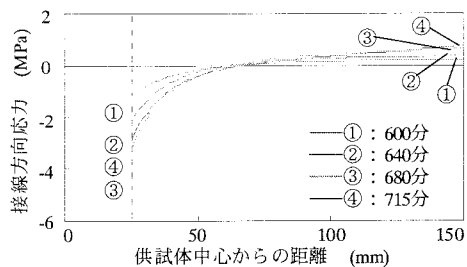


図-16(a) 経過時間別熱応力分布

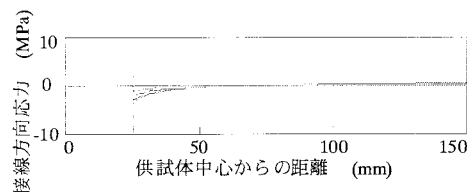


図-16(b) 図-16(a)図の縦軸スケールを  
図-17, 図-18と一致させた場合

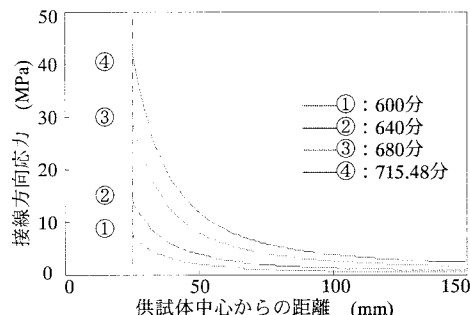


図-17 経過時間別膨張圧による応力分布

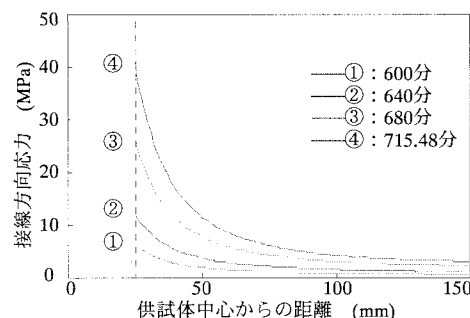


図-18 経過時間別応力の重ね合わせ