

論文

[1168] RC床版に接着したメタクリル樹脂コンクリートの硬化収縮に関する研究

堤下隆司\*1・栗田章光\*2・徳岡文明\*3・小西偉夫\*4

1. まえがき

損傷を受けた道路橋RC床版の新しい補強工法の1つとして、床版防水をも兼ね得るメタクリル樹脂コンクリート（以下、樹脂コンという）による増厚補強工法について著者らは開発研究を行っている。実物大のはり試験体を用いた各種の基礎試験においては、十分実用レベルに達しており、その補強効果についてはすでに発表した[1]。この補強工法に用いられるメタクリル樹脂は、熱可塑性樹脂で熱硬化性の不飽和ポリエステル樹脂と同様、硬化に伴い大きな収縮ひずみを生ずる。本工法では、樹脂コン中にメッシュ筋を配置することにより増厚部の剛性を高める構造を採用しているため、当然ながらメッシュ筋の補強によりその収縮ひずみが拘束され、樹脂コンには引張応力が発生する。本研究では、このような硬化収縮ひずみに伴う種々の影響を明らかにするため、理論解析とともに実物大の供試体を用いた実験を行って考察を加えた。その主たる目的は、拘束を受ける樹脂コンの硬化収縮に伴う残留応力を評価することにある。

2. 実験概要

拘束を受ける樹脂コンの硬化収縮現象を解析するためには、樹脂コンの自由硬化収縮ひずみ、弾性係数、クリープ係数などの材令に伴う性質等を明らかにしなければならない。また、樹脂コンは骨材の配合や添加材料および温度などによって、その硬化速度や性質を異にする。それらすべてについて、徹底的追求を行うためには、膨大な実験、時間そして経費を必要とすることになる。そこで本実験では、先に実施したはり実験の結果を基に得られた一配合のものに的を絞ることとした。その配合を表-1に示す。また供試体の作製条件は表-2に示すとうりである。図-1には、供試体の形状寸法を示した。硬化収縮ひずみの測定は、埋込型ひずみゲージで、またメッシュ筋およびコンクリートの表面には、ストレインゲージにより各ひずみ量の測定を行った。

表-1 メタクリル樹脂コンクリートの配合

| 材料名   | 規格      | 配合率(wt%) | 備考      |
|-------|---------|----------|---------|
| 天然骨材  | 15~5mm  | 25.0     | 川砂利     |
| 〃     | 5mm以下   | 17.0     | 川砂利     |
| 〃     | 4号      | 12.0     | 珪砂      |
| 〃     | 7号      | 8.0      | 珪砂      |
| 人工骨材  | 0.2mm以下 | 12.0     | 硬質粒状スラグ |
| 微粉骨材  | #300    | 6.0      | 炭酸カルシウム |
| バインダー | メタクリル樹脂 | 10.0     | 常温重合型   |

表-2 供試体の作製条件

|      | 拘束の有無           | 供試体寸法                  |
|------|-----------------|------------------------|
| Aタイプ | 無し(自由硬化収縮)      | 樹脂コン(600×600×40)       |
| Bタイプ | 有り(メッシュ筋の拘束)    | 600×600×40, φ4メッシュ×50角 |
| Cタイプ | 有り(メッシュ筋+床版の拘束) | 600×600×40, 床版厚200     |

\*1 修成建設専門学校教授 土木工学科、工修（正会員）  
 \*2 大阪工業大学助教授 工学部土木工学科、工博（正会員）  
 \*3 トーメンコンストラクション(株)土木建材部部长  
 \*4 三菱レイヨン(株)コーティング材料技術センター主任研究員

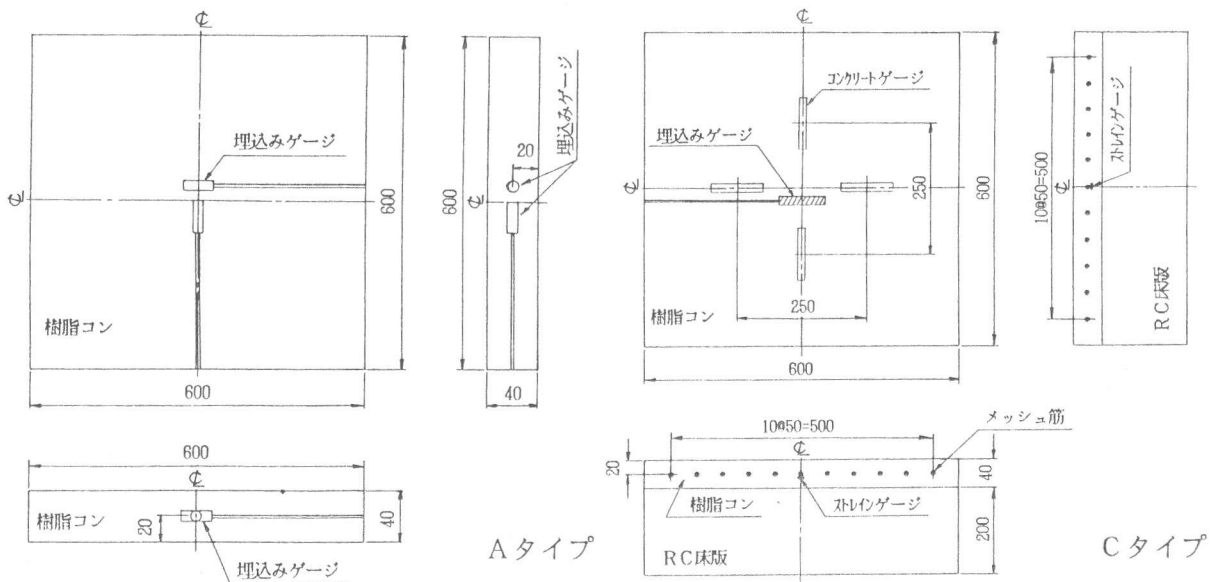


図-1 供試体形状寸法

### 3. 硬化収縮の解析方法

#### 3.1 メタクリル樹脂コンクリートの硬化収縮現象とその定式化

一般にレジンコンクリートの硬化収縮現象を見た場合、コンクリートの乾燥収縮ひずみの進行の様に経過時間に伴ってゆっくりしたひずみ増加はせず、硬化剤の量により硬化速度が異なるが、打設後の早期の段階において著しくひずみ変化が生じる。樹脂コンの硬化収縮現象を定式化するにあたり、本研究では硬化収縮ひずみの進行を指数関数を用いて近似することにした。そこで、任意の時刻  $t$  における硬化収縮ひずみは、次のように表される。

$$\epsilon_{s,t} = \epsilon_{s\infty} \cdot (1 - e^{-kt}) \quad (1)$$

ここに、 $\epsilon_{s,t}$  : 時刻  $t$  の硬化収縮ひずみ

$\epsilon_{s\infty}$  : 硬化収縮ひずみの最終値

$k$  : 硬化収縮ひずみの進行過程を表す無次元係数

また、樹脂コンの硬化収縮に伴うクリープ係数  $\phi_s(t)$  は、コンクリートと同様に収縮の進行と同じ経路をたどるとする仮定を用いると次式で表すことができる。

$$\phi_s(t) = \phi_s(\infty) \cdot (1 - e^{-kt}) \quad (2)$$

ここに、 $\phi_s(t)$  : 時刻  $t$  における硬化収縮に伴うクリープ係数

$\phi_s(\infty)$  : 時刻  $t = \infty$  における硬化収縮に伴うクリープ係数

式(1)と式(2)とから、硬化収縮ひずみ  $\epsilon_{s,t}$  は、クリープ係数の関数として表される。

$$\epsilon_{s,t} = \epsilon_{s\infty} \cdot \frac{\phi_s(t)}{\phi_s(\infty)} \quad (3)$$

さらに、時刻  $t_1$  から  $t$  に至るまでの間の硬化収縮ひずみ ( $\epsilon_{s,t-t_1}$ ) は、次式で表すことができる。

$$\varepsilon_{s, t-t_1} = \varepsilon_{s\infty} \cdot \frac{\phi_s(t) - \phi_s(t_1)}{\phi_s(\infty)} \quad (4)$$

### 3. 2 硬化収縮の解析におけるメタクリル樹脂コンクリートの応力-ひずみ関係式

図-2に示すように時刻 $t_1$ から $t$ までの硬化収縮による時刻 $t$ での樹脂コンの応力 $\sigma_{t-t_1}$ (圧縮応力を正)は、初期応力を $\sigma_{t_1}$ とすれば

$$\sigma_{t-t_1} = \sigma_{t_1} + \Delta\sigma_{t-t_1} \quad (5)$$

で表され、時刻 $t_1$ から $t$ に至るまでのひずみの変化量 $\Delta\varepsilon_{s, t-t_1}$ は次式で表される。

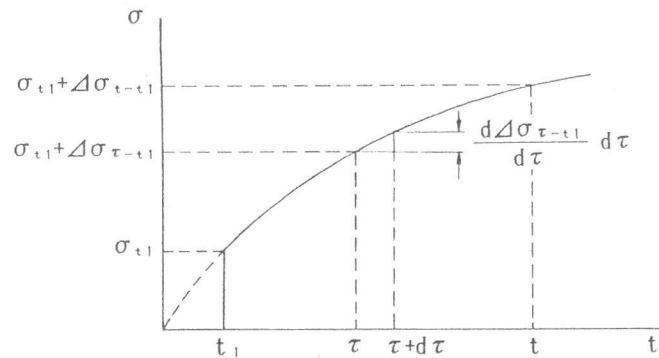


図-2 硬化収縮による応力の変化

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_{s, t-t_1} = & \frac{\Delta\sigma_{t_1}}{E_a} \{ \phi_s(t) - \phi_s(t_1) \} + \frac{\Delta\sigma_{t-t_1}}{E_a} + \frac{1}{E_a} \cdot \int_{t_1}^t \frac{d\Delta\sigma_{\tau-t_1}}{d\tau} \\ & \cdot \{ \phi_s(t) - \phi_s(\tau) \} d\tau + \varepsilon_{s\infty} \cdot \frac{\phi_s(t) - \phi_s(t_1)}{\phi_s(\infty)} \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、 $E_a$  : 樹脂コンの弾性係数

硬化収縮において、初期着目材令は $t_1 = 0$ であるから式(6)は、

$$\Delta\varepsilon_{s, t} = \frac{\Delta\sigma_t}{E_a} + \frac{1}{E_a} \cdot \int_0^t \Delta\sigma_\tau \frac{d\phi_s(\tau)}{d\tau} d\tau + \varepsilon_{s\infty} \cdot \frac{\phi_s(t)}{\phi_s(\infty)} \quad (7)$$

硬化収縮による応力の変動量を、収縮に伴うクリープ係数の進行と相似とみなし、

$$\Delta\sigma_\tau = \Delta\sigma_t \cdot \frac{\phi_s(\tau)}{\phi_s(t)} \quad (8)$$

と仮定する。したがって式(2)と式(8)とを式(7)に代入して整理すれば、硬化収縮解析に用いる樹脂コンの応力-ひずみ関係式は、次のようになる。

$$\Delta\varepsilon_{s, t} = \frac{\Delta\sigma_t}{E_a} \{ 1 + \frac{1}{2} \phi_s(t) \} + \varepsilon_{s\infty} \cdot \frac{\phi_s(t)}{\phi_s(\infty)} \quad (9)$$

### 3. 3 内部拘束を受けるメタクリル樹脂コンクリートの硬化収縮の解析

本工法では樹脂コンの内部にメッシュ筋を配置する構造であるため樹脂コンの硬化収縮量は、メッシュ筋の拘束により減少する。そこで、樹脂コンの硬化収縮に伴うメッシュ筋の影響は、図

3に示す解析モデルを用いて解析することができる。ただし、本解析においては、次のような仮定を用いることにする。

- ①平面保持則が成立するものとする。
- ②各材料の弾性係数は、一定とする。(経時的に変化しないものとする。)
- ③樹脂コンとメッシュ筋は、完全合成の挙動をするものとする。

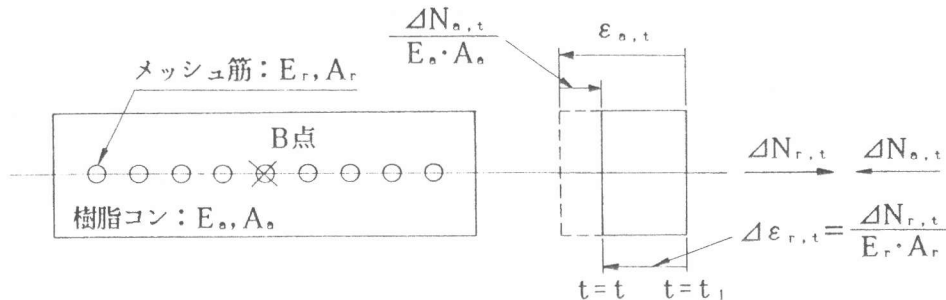


図-3 拘束を受けるメタクリル樹脂コンクリートの硬化収縮解析モデル

いま、任意の時刻  $t$  における樹脂コンの自由硬化収縮量を  $\epsilon_{a,t}$  とし、樹脂コン部分、およびメッシュ筋に作用する軸方向力をそれぞれ  $\Delta N_{a,t}$  および  $\Delta N_{r,t}$  とする。すると、ひずみの適合条件式、および力のつり合い式から、次式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{s\infty} \cdot \frac{\phi_s(t)}{\phi_s(\infty)} - \frac{\Delta N_{a,t}}{E_a \cdot A_a} \{1 + \frac{1}{2} \phi_s(t)\} &= \frac{\Delta N_{r,t}}{E_r \cdot A_r} = \Delta \epsilon_{r,t} \\ \Delta N_{a,t} &= \Delta N_{r,t} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

そこで、式(10)から、任意の時刻  $t$  におけるメッシュ筋のひずみ、すなわち内部拘束を受けたメタクリル樹脂コンクリートの硬化収縮量を求めると、次式のように与えられる。

$$\Delta \epsilon_{r,t} = \frac{\epsilon_{a,t}}{1 + n' \cdot p} \quad (11)$$

ここに、 $n' = E_r / E_a'$  : メッシュ筋と樹脂コンとの弾性係数比  
 $p = A_r / A_a$  : 鉄筋比

またクリープ作用を考慮した樹脂コンの弾性係数  $E_a'$  は、次式のように表すことができる。

$$E_a' = \frac{E_a}{1 + \frac{1}{2} \phi_s(t)} \quad (12)$$

### 3. 4 RC床版に接着したメタクリル樹脂コンクリートの硬化収縮の解析

この解析は、3. 3で述べた内部拘束を受けるメタクリル樹脂コンクリートをさらにRC床版に接着した状態である。したがって3. 2の仮定①~③に加えて

- ④樹脂コンとRC床版は、完全合成の挙動をするものとする。

の仮定を追加すると、樹脂コンの硬化収縮に伴う各分担断面力の変化量は、図-4を参照し、力のつり合い条件式、および変位の適合条件式より、式(13)で求めることができる。

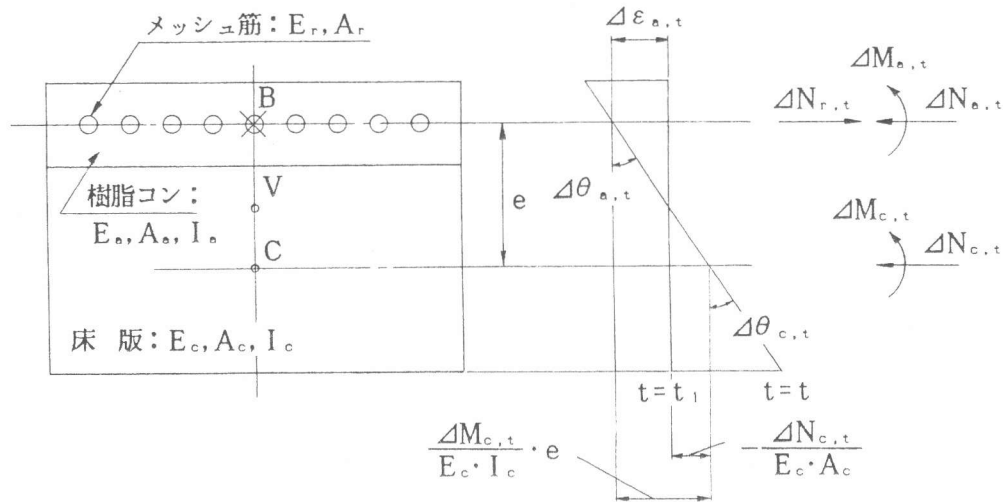


図-4 硬化収縮に伴う各部材のひずみ分布(増厚補強の場合)

$$\begin{aligned}
 \Delta N_{a,t} &= \frac{\{(1+\eta_D+D_M)(D_N-D_C+D_1 \cdot e)-D_M \cdot e \cdot D_1\}}{(1+\eta_D+D_M)\{(1+\eta_D)(D_C-D_1 \cdot e)-D_N(1+\eta_D-D_C+D_1 \cdot e)\}+D_M \cdot e \cdot D_1(1+\eta_D+D_N)} \cdot P_s \cdot \gamma(t) \\
 \Delta N_{r,t} &= \frac{\{(1+\eta_D+D_M)(D_1 \cdot e-D_C)-D_M \cdot e \cdot D_1\}}{(1+\eta_D+D_M)\{(1+\eta_D)(D_C-D_1 \cdot e)-D_N(1+\eta_D-D_C+D_1 \cdot e)\}+D_M \cdot e \cdot D_1(1+\eta_D+D_N)} \cdot P_s \cdot \gamma(t) \\
 \Delta M_{a,t} &= \frac{-D_M \cdot e \cdot D_N}{(1+\eta_D+D_M)\{(1+\eta_D)(D_C-D_1 \cdot e)-D_N(1+\eta_D-D_C+D_1 \cdot e)\}+D_M \cdot e \cdot D_1(1+\eta_D+D_N)} \cdot P_s \cdot \gamma(t) \\
 \Delta N_{c,t} &= \Delta N_{r,t} - \Delta N_{r,t} \\
 \Delta M_{c,t} &= \Delta N_{c,t} \cdot e - \Delta M_{a,t}
 \end{aligned} \quad (13)$$

ここに、剛度比と係数  $\eta_D$  は、

$$\begin{aligned}
 D_1 &= \frac{E_a \cdot A_a}{E_c \cdot I_c} \cdot e, \quad D_C = \frac{E_a \cdot A_a}{E_c \cdot A_c}, \quad D_M = \frac{E_a \cdot I_a}{E_c \cdot I_c}, \quad D_N = \frac{E_a \cdot A_a}{E_r \cdot A_r} \\
 P_s &= \epsilon_{s\infty} \cdot E_a \cdot A_a, \quad \gamma(t) = \frac{\phi_s(t)}{\phi_s(\infty)}, \quad \eta_D = \frac{\phi_s(t)}{2}
 \end{aligned} \quad (14)$$

### 3.5 解析値と実験値の比較検討

以上に示した解析法を用いて、表-2 および図-1 に示した供試体を対象に、硬化収縮に伴うメッシュ筋のひずみ変化に着目して、数値解析を行った。解析の際に用いた諸条件を表-3 に示す。数値解析は、樹脂コンの弾性係数  $E_a$  は一定と仮定(表-3 に示す実験値)し、最終硬化収縮量  $\epsilon_{a,\infty}$  は、図-5 に示す実験値

表-3 解析条件

| 項   | 目                            | 数値                    |
|---|------------------------------|-----------------------|
| メタクリル樹脂コンクリートの弾性係数                              | $E_a$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | $2.3 \times 10^4$     |
| 最終硬化収縮量   | $\epsilon_{a,\infty}$        | $2750 \times 10^{-6}$ |
| メッシュ筋の弾性係数                                      | $E_s$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | $1.9 \times 10^5$     |
| { $\phi 4 \cdot 50$ mm角、 $\phi 6 \cdot 50$ mm角} | $A_s$ (cm <sup>2</sup> )     | 1.382, 3.11           |
| コンクリートの弾性係数                                     | $E_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | $2.22 \times 10^5$    |
| 断面二次モーメント                                       | $I_c$ (cm <sup>4</sup> )     | 45600                 |

を用いて行った。図-6 にBタイプ、図-7 にCタイプのそれぞれメッシュ筋のひずみ変化の理論値と実測値とをプロットした。これらの図から以下のことがいえる。

(1) 図-6 から、今回用いた解析法より樹脂コンの硬化収縮に伴うクリープ係数  $\phi_s(\infty)$  は、

31~34程度であることが推定できた。

(2) (1)より、Cタイプでは $\phi_s(\infty) = 31$ で計算した理論値を用いて実測値を評価した。しかし、増厚した場合は $\phi_s(\infty)$ が多少変化してもひずみの計算値はほとんど同じ結果となる。

(3) またRC床版と樹脂コンとの剛度比が著しく小さいため、メッシュ筋径の影響は、計算値にほとんど影響しない。

(4) 図-7に示す $\phi 4$ と $\phi 6$ の実測値の差異は、 $10\mu$ 程度のため測定誤差範囲であると判断できるので、両者はほぼ同様なひずみ変化である。故に図中に示す理論値は、実際の経時挙動をよくとらえていると云える。

#### 4. まとめ

本研究により得られた成果をまとめると次のようなことがいえる。

(1) 拘束をうける樹脂コンの硬化収縮に対する収縮解を示した。

(2) Cタイプの場合、メタクリル樹脂コンクリートは、硬化収縮の際にメッシュ筋やコンクリート部の拘束により引張応力が生じて収縮量は極端に小さくなる。本解析法により硬化収縮における残留応力を計算すると、約 $4\text{kgf/cm}^2$ 程度の引張応力が生じる結果となった。

(3) 本解析より樹脂コンの硬化収縮に伴うクリープ係数 $\phi_s(\infty)$ は、約30程度になることが明らかとなった。

#### [謝辞]

本研究の遂行に関して、大阪工業大学・小林和夫教授から種々の貴重な助言をいただきました。また、実験に際しては、大阪工業大学の橋梁研究室の卒業研究生の多大の協力を得ました。ここに記して、深く感謝の意を表します。

[参考文献] 1)堤下・栗田・徳岡・小西：アクリル樹脂コンクリートによる道路橋RC床版の増厚補強工法、コンクリート構造物の補修工法に関するシンポジウム、pp. 61-68、1992. 10

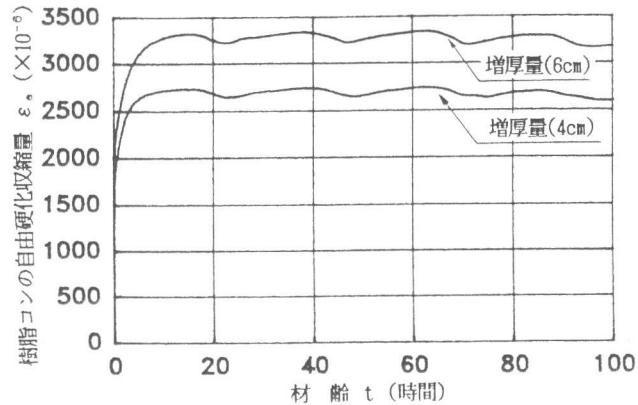


図-5 硬化収縮と材齢の関係(Aタイプ)

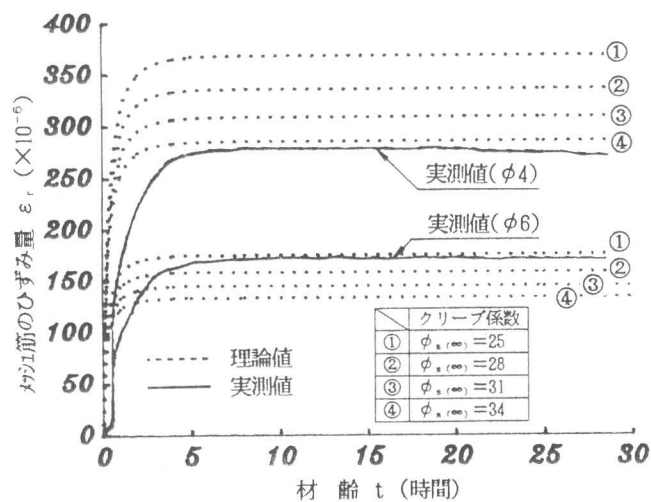


図-6 硬化収縮によるひずみ変化(Bタイプ)

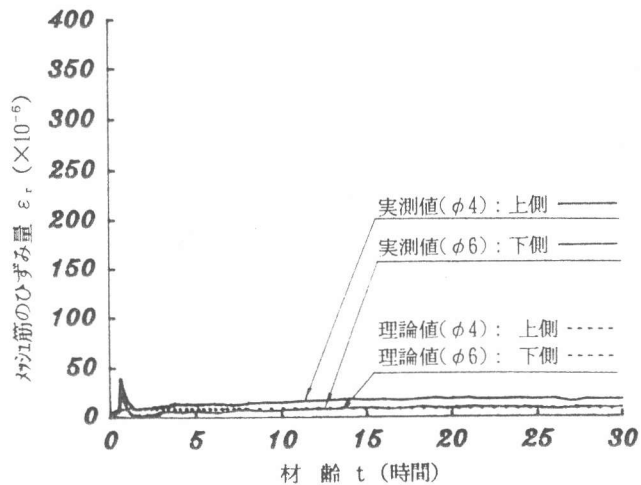


図-7 硬化収縮によるひずみ変化(Cタイプ)