

# 無拘束モルタル試験体の乾燥収縮応力に関する検討

松藤泰典\*・吉岡俊二\*・白浜敏行\*

## A Study on Drying Shrinkage Stress in Unrestrained Mortar Specimen

by

Yasunori MATSUFUJI, Shunji YOSHIOKA and  
Toshiyuki SHIRAHAMA

(Department of Structural Engineering)

There are many factors on strength changes resulting from moisture changes in mortar or concrete, for instance, transitory progress of hydration and hardening at drying, etc.

The main factor may be drying shrinkage-stress in drop of bending and tensile strength.

As the arbitrary distribution of shrinkage-strain is not permitted in the continuum, the shrinkage-stress of unrestrained specimen must satisfy the condition of continuity in the distribution of shrinkage-strain, or, if it agrees with the pattern satisfied the condition of continuity, shrinkage-stress does not arise. The strain  $\varepsilon_S$  by stress is

$$\varepsilon_S = e_x + S$$

where  $e_x$  is real shrinkage-strain in the direction of length of specimen, and S is free, unrestrained unit linear shrinkage-strain.

Therefore, if  $e_x$  and S are known, the strain  $\varepsilon_S$  or it's stress is given. Although it is desired that both  $e_x$  and S are got experimentally, S can be little get by experiment. About the theoretical method on free shrinkage-strain, there is the way of diffusivity equation, and drying shrinkage process coressonds to the equation of heat conduction.

G. Pickett is one of reseachers lead this solution and analysed shrinkage-stress.

Authors added the experimental study on his analysis and considered the possibility of it's apprication.

### 1. ま え が き

モルタル、コンクリート等の強度試験は、規定の水中養生後実施されるが、試験時の乾湿状態の差異が強度に影響を与えることは周知の事実である。殊に、曲げ、引張強度試験においてその影響は顕著であり、多数の実験的研究がなされている。著者等もこれに関する実験を行ない、一部既に報告しているが<sup>1)</sup>、その際、水中養生28日後の乾燥材令による曲げ強度の変化は試験体形状寸法によって異なるが、乾燥材令3日で20%

～60%の強度低下の極値を示した後回復傾向に移行し小試験体(4×4×16cm程度)では同7日で湿潤強度の水準まで回復を示す等の結果を得た。この期間は視点を変えれば強度の不安定期間でもあり、試験時強度の信頼性に関係することは当然であるが、更に、コンクリート2次製品等でその耐力をコンクリート自身の曲げ強度に期待するような場合には特に重要であると考えられる。

モルタル、コンクリート等の湿潤状態から乾燥状態への移行による強度変化については、化学的变化の一

時的急進をはじめとして乾燥硬化等種々の要因が存在するが、曲げ、引張強度の低下に関しては乾燥収縮応力の存在を支配的要因とみなすことができる。

強度試験に使用されるような無拘束試験体に生ずる収縮応力は、一定の湿度分布における試験体の自由収縮ひずみを  $S$  とすれば、連続固体では任意の変形分布を許容しないので、収縮ひずみ分布が連続の条件を満足するような形で生ずる。換言すれば、自由収縮ひずみ  $S$  の分布が連続の条件を満足するような分布形を示せば収縮応力は生じない訳である。

試験体長さ方向に生ずる実際のひずみを  $e_x$  とすれば、応力によって生ずるひずみ  $\epsilon_s$  は、 $e_x$  と収縮ひずみ  $S$  との代数和である。即ち、式(1)のように表わすことができる。

$$\epsilon_s = e_x + S \quad (1)$$

但し、

$e_x$ : 長さ方向に生ずるひずみ

$\epsilon_s$ : 応力によって生ずる長さ方向のひずみ

$S$ : 乾燥過程における長さ方向の自由収縮ひずみ

従って、 $e_x$  および  $S$  が求められれば、応力によって生ずるひずみ  $\epsilon_s$  が与えられ、収縮応力を得ることができる。 $e_x$ ,  $S$  とともに実験的に求めることが望ましい。然し、 $e_x$  は実験的に求めることも可能であるが、 $S$  を実験的に求めることは殆んど不可能である。

自由収縮ひずみ  $S$  を理論的に求める方法としては熱拡散過程を乾燥収縮過程に対応させ、拡散方程式により求める方法がある。G. Pickett はこの解を求め、更に収縮応力の解析も行なった1人である。著者等は彼の理論解析に実験的検討を加え、その適用の可能性について考察することとした。

## 2. コンクリートの収縮応力についての Pickett の理論の概要

G. Pickett は、コンクリートを対象として乾燥収縮による変形の理論式およびそれに伴う収縮応力の分布式を導いた<sup>2)3)</sup>。彼は、乾燥状態のコンクリートにおける収縮の現象を支配する法則は、冷却中の理想的な物体の熱応力の現象を支配する法則に類似しているという仮定の下に熱拡散方程式を適用し、自由収縮ひずみ  $S$  の解析を行ない、更に、コンクリートを等方・均質な固体として捉え、応力-ひずみ関係にはフックの法則を適用して収縮応力の分布を求めている。

コンクリート中の水分の移動を熱拡散に対応させることの妥当性については種々議論されており、また、常温で大きなクリープ変形を示すコンクリートが、フックの法則に従わない可能性も指摘されるが、実験的に求めることがほとんど不可能な自由収縮ひずみを推

定できる点は評価すべきであろう。本研究では、収縮応力の時間的変化を拡散方程式で取り扱えるか否かの検討に重点を置き、収縮応力の算定にも Pickett の理論を準用した。以下、収縮応力、収縮ひずみの算定について Pickett の理論の概要を示す。

### 2.1 収縮応力について

応力の解は前述の如く、均質・等方でフックの法則に従う固体に限定される。

試験体は Fig-1 に示すような4面乾燥試験体(乾燥面  $y = \pm b$ ,  $z = \pm c$ , シール面  $x = \pm a$ )で、試験体中央に座標軸  $(x, y, z)$  をとる。

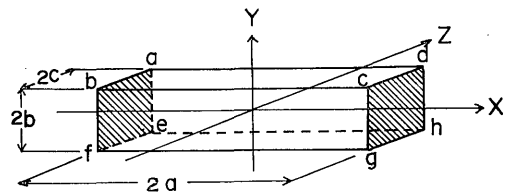


Fig. 1 Shape and size of the specimen, shading indicates sealed surfaces.

$a \gg b, c$  であるような細長いはり、または、ポアソン比  $\nu=0$  と仮定すれば、 $\sigma_y, \sigma_z$  を無視することができ、式(1)は式(1')で表わされる。但し、 $E$  はヤング係数(=一定)である。

$$e_x = \frac{\sigma_x}{E} - S \quad (1')$$

応力は式(2)の形で表わすことができる。

$$\sigma_x = E(e_x + S) \quad (2)$$

もし、 $x$  方向の拘束が完全であれば、 $e_x=0$  であり、そのときの拘束応力  $\sigma_x$  は式(3)となる。

$$\sigma_x' = E \cdot S \quad (3)$$

外部拘束が作用しない場合、応力の釣合方程式(4)、(5)が成立する。

$$\int_{-b}^b \int_{-c}^c \sigma_x dy dz = 0 \quad (4)$$

$$\int_{-b}^b \int_{-c}^c \sigma_x yz dy dz = 0 \quad (5)$$

Pickett は変形の条件として、 $e_x$  にサン・ブナンの定理を適用し、 $x$  軸に対して独立であるとしている。これらの条件を満足する、外部拘束のない場合の、 $\sigma_x'$  からの応力の減少は  $\sigma_x'$  の平均値 ( $\sigma_x''$ ) に対応し、減少応力は  $-\sigma_x''$  で与えられる。

$$\sigma_x'' = \frac{1}{4bc} \int_{-b}^b \int_{-c}^c \sigma_x' dy dz = \frac{E}{4bc} \int_{-b}^b \int_{-c}^c S dy dz \quad (6)$$

従って、無拘束試験体の収縮応力  $\sigma_x$  は、

$$\sigma_x = \sigma_x' - \sigma_x'' = E(S - S_{av}) \quad (7)$$

但し、

$$S_{av} = \frac{1}{4bc} \int_{-b}^b \int_{-c}^c S \, dy \, dz \quad (8)$$

以上により、自由収縮ひずみ  $S$  および、 $S$  の平均値を与えれば収縮応力  $\sigma_x$  が得られる。

## 2.2 自由収縮ひずみ(S)について

4面乾燥状態の試験体 (Fig-1) に対する拡散方程式は次のようになる。

$$k \left( \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial S}{\partial t} \quad (9)$$

$y=0, z=0$  における境界条件はそれぞれ、

$$-\frac{\partial S}{\partial y} = -\frac{\partial S}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

$t=0$  における初期条件は、

$$S = 0 \quad (11)$$

露出面  $y = \pm b, z = \pm c$  における境界条件としては、熱伝導における Newton の冷却則に相似させれば、

$$\frac{\partial S}{\partial y} = \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{f}{k} (S_\infty - S) \quad (12)$$

ここで、

$S$  : 無拘束試験体の自由収縮ひずみ (前出)

$S_\infty$  : 終局収縮ひずみ,  $t \rightarrow \infty$  における  $S$  の値

$t$  : 乾燥材令 (days)

$k$  : 収縮拡散係数 (cm<sup>2</sup>/day)

$f$  : 表面係数 (cm/day)

式(9)~(12)を満足するフーリエ級数による解は、整理すれば次のようになる。

$$\frac{S}{S_\infty} = 1 - \left[ \sum_1^\infty e^{-T_b \beta_n^2} F_n \frac{\cos \beta_n \frac{y}{b}}{\cos \beta_n} \right] \left[ \sum_1^\infty e^{-T_c \beta_m^2} F_m \frac{\cos \beta_m \frac{z}{c}}{\cos \beta_m} \right] \quad (13)$$

但し、

$\beta_n$  :  $\beta \tan \beta = B_b$  の  $n$  番目の根

$B_b$  :  $f \cdot b / k$

$T_b$  :  $k \cdot t / b^2$

$\beta_m$  :  $\beta \tan \beta = B_c$  の  $m$  番目の根

$B_c$  :  $f \cdot c / k$

$T_c$  :  $k \cdot t / c^2$

$F_n$  :  $\frac{2 \cdot B_b}{B_b^2 + B_b + \beta_n^2}$

$F_m$  :  $\frac{2 \cdot B_c}{B_c^2 + B_c + \beta_m^2}$

式(8), (13)より

$$\frac{S_{av}}{S_\infty} = 1 - \sum_1^\infty e^{-T_b \beta_n^2} H_n \sum_1^\infty e^{-T_c \beta_m^2} H_m \quad (14)$$

但し、

$$H_n = \frac{2B_b^2}{\beta_n^2(B_b^2 + B_b + \beta_n^2)}$$

$$H_m = \frac{2B_c^2}{\beta_m^2(B_c^2 + B_c + \beta_m^2)}$$

## 3. 収縮拡散係数(k)および表面係数(f)の決定法

前節で時間  $t$ , 座標  $y, z$  の関数である収縮ひずみ  $S$  の解が与えられたが、式(13)を用いて  $S$  を求める場合、収縮拡散係数  $k$ , 表面係数  $f$  および終局収縮ひずみ  $S_\infty$  の3係数が必要である。これらの係数の決定には、2面乾燥および6面乾燥試験体の収縮ひずみから求める方法があるが<sup>4)5)</sup>、ここで考えたのは1面乾燥試験体の反り (Warping) を利用する方法である。

この方法によれば、比較的短期間の測定によって、一義的に  $k, f$  を決定することができ、同時に  $S_\infty$  の推定も可能である。この方法の詳細については既に別報で報告しているので重複を避けるが<sup>6)</sup>、Fig-1において、シール面を  $y=0$  および  $z = \pm c$  の3面だけ追加した1面乾燥状態を仮定する。このとき、試験体は乾燥面を内側にして彎曲する。彎曲量の最大値  $v$  は試験体中央で生じ、前節の仮定を全て認めれば、 $v$  と乾燥材令  $t$  との関係式は、係数  $T_b$  が小さい場合 ( $T_b \leq 0.05$  程度)、式(15)で与えられる。

$$\frac{b \cdot v}{6a^2 S_\infty} = \left[ \frac{1}{2B_b} + \frac{1}{B_b^2} \right] \left[ e^{B_b^2 T_b} \phi(B_b \sqrt{T_b}) - 1 + \frac{2B_b \sqrt{T_b}}{\sqrt{\pi}} \right] - T \quad (15)$$

ここで、

$$\phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-x^2} dx, \text{ Gauss の誤差関数}$$

さて、式(15)の指数関数、Gauss の誤差関数を級数展開して整理し、更に、 $B=B_b, T=T_b$  とすれば次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{b \cdot v}{6a^2 S_\infty} = & \left[ \frac{1}{2B} + \frac{1}{B^2} \right] \left[ B^2 T - \frac{4B^3}{3\sqrt{\pi}} T^{\frac{3}{2}} \right. \\ & + \frac{B^4}{2} T^2 - \frac{8B^5}{15\sqrt{\pi}} T^{\frac{5}{2}} + \frac{B^6}{6} T^3 \\ & - \frac{16B^7}{105\sqrt{\pi}} T^{\frac{7}{2}} + \frac{B^8}{24} T^4 - \frac{32B^9}{945\sqrt{\pi}} \\ & \left. T^{\frac{9}{2}} \dots \right] - T \quad (15') \end{aligned}$$

ここで、反り量  $v$  は、ある経過時間の時に必ず極大値を有し、且つ、極大値の前後では単調増加および単調減少を示す現象であることに注目すれば、反り量の極大値  $v_{max}$  に対して、式(15')は、 $\partial v_{max}/\partial T=0$  を満足する必要があり、式(16)が成立する。

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_{max}}{\partial T} &= \left[ \frac{1}{2B} + \frac{1}{B^2} \right] \left[ B^2 - \frac{2B^3}{\sqrt{\pi}} T^{\frac{1}{2}} + B^4 T \right. \\ &\quad - \frac{4B^5}{3\sqrt{\pi}} T^{\frac{3}{2}} + \frac{B^6}{2} T^2 - \frac{8B^7}{15\sqrt{\pi}} T^{\frac{5}{2}} \\ &\quad \left. + \frac{B^8}{6} T^3 - \frac{16B^9}{105\sqrt{\pi}} T^{\frac{7}{2}} \dots \right] - 1 \\ &= \frac{B}{2} - \frac{B(2+B)}{\sqrt{\pi}} T^{\frac{1}{2}} + \frac{B^2(2+B)}{2} T \\ &\quad - \frac{2B^3(2+B)}{3\sqrt{\pi}} T^{\frac{3}{2}} = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

式(16)に  $B=f \cdot b/k$ ,  $T=k \cdot t/b^2$  を代入して整理すれば、表面係数  $f$  に関する3次式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{2}{3\sqrt{\pi}} b k^2 - \frac{5}{2} t^{\frac{3}{2}} f^3 \left\{ \frac{4}{3\sqrt{\pi}} \left( \frac{t}{k} \right)^{\frac{3}{2}} - \frac{1}{2} \left( \frac{bt}{k^2} \right) \right\} \\ f^2 + \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{b^2 t}{k^3} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{t}{k} \right\} f + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \\ \left( \frac{t}{k} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{b}{2k} = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

終局収縮ひずみ  $S_{\infty}$  は、拡散の定義からは試験体の形状寸法や乾燥面の数によっては影響されない訳であるが、既往の研究結果ではかなりの差を生ずると報告されており、その場合の要因として、体積と表面積との比の影響が指摘されている。そこで、同一調合の、体積と表面積との比の値の近い1組の試験体を作成すれば、両者の終局収縮ひずみは近似的に相等しいと仮定することができる。1組の試験体の反り量極大値時の諸元を、 $b_{1,2}$ ,  $a_{1,2}$ ,  $t_{1,2}$ ,  $v_{1,2max}$  とし、式(15')の右辺を、 $F(b, t)$  とすれば次式が成立する。

$$\frac{a_1^2 \cdot b_1 \cdot v_{1max}}{a_2^2 \cdot b_2 \cdot v_{2max}} = \frac{F(b_1, t_1)}{F(b_2, t_2)} \quad (18)$$

体積と表面積との比の近い1組の1面乾燥試験体を作成し、反り量極大値時の諸元を得ることができれば、式(17), (18)は  $k, f$  に関する2元連立方程式となり、これを数値計算することによって  $k, f$  を一義的に決定することができ、こうして得られた  $k, f$  を式(15')に代入すれば終局収縮ひずみ  $S_{\infty}$  を得ることができる。

## 4. 実験概要

### 4.1 材料および調合

試験体はモルタルとし、普通ポルトランドセメント、

粒径5mm以下の海砂を使用した。海砂の比重、吸水率はJISA 1109に従って求め、表-1に調合比と共に示す。〔調合・打込み〕強度差を水セメント比(W/C)で与え、フロー値190~200mmを規定して調合した。〔養生〕打込み後24時間で脱型し、材令4週まで水中養生(水温  $21 \pm 1^\circ\text{C}$ )後、強度試験時まで乾燥収縮測定用試験体と共に恒温恒湿室(室温  $21 \pm 0.5^\circ\text{C}$ , RH  $70 \pm 5\%$ )に置いた。

Table 1 Mix proportion of mortar

sand gravity	water absorption	mix proportion by weight			flow (mm)
		cement	sand	water	
2.64	0.73 (%)	1	0.6	0.35	198
		1	2.5	0.55	195
		1	3.1	0.65	207

### 4.2 係数 $k, f$ 決定に関する実験

前述の方法による収縮拡散係数  $k$ , 表面係数  $f$  決定用の反り測定1面乾燥試験体は、厚さ ( $b$ ) = 1~4cm で1cm間隔、巾=10cm、長さ=40cmの板状試験体とし、全面乾燥試験体の厚さ ( $B$ ) =  $2b = 2 \sim 8$ cm に対応させた。各要因毎に3体宛作成し、平均値を実験値とした。試験体は4週間の水中養生実施後最大表面積を有する面の一方に、中心線上中央と両端から各10cmの位置にアクリル製アタッチメントを貼布した。この面の相対する面を乾燥面とし、他の5面をシンナーで若干希釈した油性ペイント(シンナー:ペイント = 1:5)で塗装し、更に塩化ビニールシートでシールした。以後、恒温恒湿室内にてダイヤルゲージ(最小目盛0.01mm)で反り量測定を実施し、最大反り量とその材令を求めた。

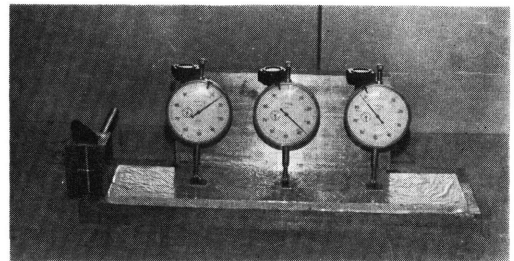


Fig. 2 Specimen used measurement of warping

### 4.3 乾燥収縮応力に関する実験

乾燥材令の変化による収縮応力については、収縮応力の影響が顕著に現われ、且つ、実験の容易な曲げ強度試験を実施し、曲げ強度低下量 ( $\Delta F_b$ ) を収縮応力に対応させることとした。曲げ応力度は弾性仮定に基づく梁理論による値であり、曲げ引張縁の仮想引張応力

度であるが、乾燥収縮応力作用時の破断条件も同様に、破断直前まで平面保持の仮定が保たれ、且つ、弾性状態を示すと仮定すれば、水和反応が十分進行し、湿潤曲げ強度の経時変化が殆んど無視できる場合、乾燥曲げ強度との差、即ち、曲げ強度低下量は乾燥収縮応力に対応する。試験体は、 $B \times B \times 4B$  の角柱試験体で、 $B=5 \sim 9\text{cm}$  間を 1cm 刻みの 5 種類とし、加圧面と支持面に塩化ビニール板 (厚さ 2mm) を使用した木製型枠で作成した。曲げスパンは  $3B$  とし集中曲げ荷重により、試験機は 30ton 万能試験機を使用し、水中養生 28 日後、乾燥材令 0, 1, 2, 3, 5, 7, 14, 21, 28 日で各要因毎に 3 体宛行ない、その平均値を実験値とした。なお、圧縮および引張強度は、直径 10cm 高さ 20cm 円柱試験体を使用して求めた。

5. 実験結果と考察

5.1 収縮拡散係数 (k) と表面係数 (f) に関する考察

1 面乾燥試験体の乾燥材令進行に伴う反り量  $\omega$  は、(1)板状試験体厚が小さい程反り量  $\omega$  は大きくなり、極大値材令は早くなる。(2)比例的ではないが水セメント比が小さい程反り量は大きくなる。(3)反り量  $\omega$  は極大値を示した後、徐々に回復する、等の性状を示した。

試験体厚  $b=1\text{cm}$  を基準として、式(17)、(18)より、表面係数  $f$ 、収縮拡散係数  $k$  を求めた。

式(17)において  $k$  を仮定し、 $f$  に関する 3 次方程式とし、根を求め、式(18)を判別式として使用し、漸近法によった。更に、決定された  $k, f$  を式(15')に代入して終局収縮ひずみ  $S_{\infty}$  を求めた。数値計算結果を表-2に示す。

[収縮拡散係数 (k)] Newton の冷却則に対応さ

せた場合、収縮拡散係数は熱伝導率に、表面係数は熱伝達率に対応する。即ち、前者は材料定数、後者は状態係数の性格を有する。算定結果、 $k = 0.06 \sim 0.12 \text{ cm}^2/\text{day}$  の範囲となり、1cm 厚試験体を基準とした場合、同一調合の試験体においては殆んど等しく、また、水セメント比が大になるに従い  $k$  も大になる結果を得た。これは、セメントペースト濃度が低下すれば水分移動が生じ易くなることを示しており、また、同一水セメント比間で一定値を示すことは係数  $k$  の材料定数としての性格の現われとみることができる。係数  $k$  の定量的関係を他の研究と比較すれば、中西氏による 2 面乾燥、6 面乾燥の場合とほぼ等しく、Pickett の値に対しては約 1/2 となっている。

[表面係数 (f)] 表面係数は算定結果、 $f=0.044 \sim 0.062\text{cm}/\text{day}$  となった。収縮拡散係数と同様に同一調合内では等しいが、水セメント比間では一定の傾向を示さない。表面係数が状態係数の性格を有するという事は、試験体表面とこれに接する外界との境界条件によって影響されることを意味し、算定結果ではこれに関して、試験体表面の状態は水セメント比によってはそれ程影響を受けない、即ち、モルタルを構成する複合材料である細骨材と、濃度の異なるセメントペーストによって形成されている試験体の表面状態の差異は本実験の範囲では表面係数に差異を与える程には影響していないと考えられる。

[終局収縮ひずみ ( $S_{\infty}$ )] 前項の  $k, f$  を式(15')に代入して得られる終局収縮ひずみ  $S_{\infty}$  は、理論的には試験体形状寸法には影響されないが、算定結果は試験体厚が大になる程小さく、反り量測定段階で既に形状寸法の影響が含まれていると考えられる。算定値

Table 2 Calculated values of surface factor f, diffusivity coefficient of shrinkage k, and final shrinkage strain  $S_{\infty}$  from warping values.

water-cement ratio W/C	thickness of specimen b (mm)	maximum warping value Vmax(mm)	drying age t (days)	surface factor f (cm/day)	diffusivity coefficient k (cm <sup>2</sup> /day)	final shrinkage strain S <sub>∞</sub> (x10 <sup>-4</sup> )
0.35	10	1.30	3.0			
	20	0.95	6.0	0.0615	0.060	26.7
	30	0.58	8.0	0.0615	0.060	24.8
	40	0.32	8.0	0.0615	0.060	20.7
0.55	10	0.67	1.5			
	20	0.54	3.0	0.0503	0.120	29.4
	30	0.34	4.0	0.0460	0.121	26.7
	40	0.22	4.0	0.0372	0.123	27.0
0.65	10	0.98	1.5			
	20	0.49	2.0	0.0503	0.120	30.1
	30	0.25	2.0	0.0503	0.120	28.8
	40	0.12	1.5	0.0503	0.120	28.8

は、 $S_{\infty}=(20\sim30)\times 10^{-4}$  の範囲で得られ、セメントペーストの終局収縮ひずみに近い値となった。この値は骨材の収縮拘束効果を考慮すればセメントモルタルの終局収縮ひずみを示す結果となり、ほぼ妥当であるといえる。収縮応力の数値計算にはこれらの平均値を使用した。

## 5.2 収縮応力に関する考察

〔収縮応力 ( $\sigma_x$ ) の数値計算〕 上記各係数の水セメント比毎の平均値を式(13)、(14)に代入して試験体表面 ( $y/b=z/c=1.0$ ) の収縮応力  $\sigma_x$  を求め、4面乾燥試験体、 $B=5\sim 9\text{cm}$  について示せば Fig-3 のようになる。但し、 $W/C=35\%$ 、 $B=5\text{cm}$  の極大値を基準として、その比率を  $R$  とした。式中の係数  $\beta_n$ 、 $\beta_m$  は項数を120項とすれば材令  $t=0$  の値が  $R=1.5\sim 2.8\%$  となり、殆んど0と見做して差支えないと判断した。

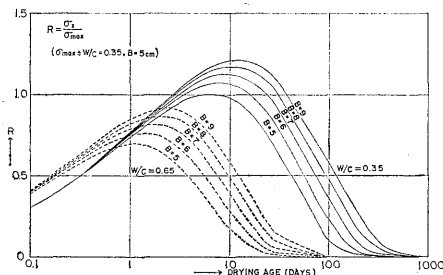


Fig. 3 Theoretical curves calculated by the equation (7), (13) and (14).

数値計算結果、次のような傾向を指摘することができる。(1)乾燥材令1日以内における収縮応力の増加が急激である。(2)極大値を示した後の回復が比較的遅い。(3)水セメント比が大きい程極大値を示す乾燥材令も早くなり、且つ、その後の回復も早い。(4) $B=5\text{cm}$  試験体を基準として $B=9\text{cm}$  試験体までを比較すれば、極大値は試験体断面の大きい方が大きく、20~30%増となり、水セメント比の大きい方がその増加率は高い。(6)極大値を示す乾燥材令、その後の回復共に試験体断面が大きい程遅くなる。

〔曲げ強度の低下量 ( $\Delta F_b$ )〕 モルタル試験体の4週湿潤強度は表-3に示す通りである。水中養生4週以後、恒温恒湿室で乾燥材令を経過した試験体の曲げ強度は、乾燥材令の進行に伴って急激に低下し、2~14日で強度低下の極大値材令を示し、以後、徐々に回復傾向に移行するが、実験値のばらつきが大きく不安定な過程であることを示している。また以下のような傾向を指摘することができる。(1)乾燥材令の進行に従って、水セメント比、試験体形状寸法の如何に拘らず、曲げ強度は低下し、極小値を示した後、強度回復に移行する。同一水セメント比では、試験体形状寸法が小さい程、強度低下の極値を示す乾燥材令は早くなり、以後の強度回復も早くなる。(2)試験体形状寸法別の性状としては、乾燥材令28日の時点で見た場合、 $W/C=35\%$  以外は、 $B=6\text{cm}$  試験体までは湿潤強度水準までほぼ回復するが、 $B=7\text{cm}$  試験体以上では回復していない。但し、追試の結果では乾燥材令68~83日で湿潤強度水準に回復していることを確認することができ、強度回復には試験体形状寸法の効果が大きい。

以上により、水セメント比、試験体形状寸法の各要因は乾燥過程における曲げ強度低下と回復に密接に関連していることがわかるが、ここで注意しなければならないことは、曲げ強度の極小値を示し回復傾向に移行した試験体は湿潤強度まで回復した後も強度増加を持続し、遂には28日湿潤強度を越えてしまうことである。この原因としては、1つは、水和反応の進行による試験体自身の強度増加、更に、圧縮強度にみられるような試験体の乾燥硬化の影響等が考えられ、強度回復の過程ではこれらの効果を無視することはできないようである。

次に、水セメント比の差異に拘らず乾燥材令50~60日目位から試験体表面にひび割れが観察されるが、 $W/C \leq 55\%$  では網目状の不規則なヘアクラックであるのに対して、 $W/C=35\%$  試験体では、試験体長・短辺両方向に各々平行な格子状のひび割れとなる。同試験体で乾燥材令83日でも強度回復が殆んど見られない理由として、乾燥収縮ひび割れの強度に及ぼす影響に

Table 3 Compressive, tensile and bending strength of mortar specimens in 28 days of water curing.

W/C	Compressive strength Fc(kg/cm <sup>2</sup> )	Tensile strength Ft(kg/cm <sup>2</sup> )	Bending strength Fb(kg/cm <sup>2</sup> )					
			mean	B=5 cm	B=6 cm	B=7 cm	B=8 cm	B=9 cm
0.35	478	38.8	99.3	101.4	103.1	93.8	100.6	97.7
0.55	289	25.2	68.3	72.8	67.8	66.2	66.2	68.4
0.65	213	19.5	58.3	65.0	60.6	55.0	55.6	55.1

についても考慮する必要がある。

〔実験値 ( $\Delta F_b$ ) と解析値 ( $\sigma_x$ ) との比較〕 各乾燥材令における曲げ強度の低下量 ( $\Delta F_b$ ) と収縮応力の解析値 ( $\sigma_x$ ) との関係は Fig-4 のようになる。

図より明らかなように、 $W/C=35\%$  の場合は、 $\sigma_x$  との間にほぼ比例関係が認められるが、 $\sigma_x$  の高応力では  $\Delta F_b$  は若干低下の傾向を示す。この傾向は  $W/C=55,65\%$  では、 $\sigma_x$  が高応力になるに従い  $\Delta F_b$  の増加が鈍化し、更に顕著となり比例関係が認められない。これについては後述するが、ほぼ比例関係が成立している  $W/C=35\%$  について、 $\sigma_x$  と  $\Delta F_b$  との比を求めれば、平均値で  $\sigma_x/\Delta F_b=4.836$  となり、解析値と実験値の極大値材令  $t=5$  日における曲げ強度低下量を  $\Delta F$  とすれば、 $\Delta F=59.5\text{kg/cm}^2$  となる。実験値  $\Delta F_b$  と  $\Delta F$  との比を  $R_E(=\Delta F_b/\Delta F)$  とし、解析値の比  $R$  と共に図示すれば、Fig-5 のようになる。Fig-5 は、曲げ強度低下量の乾燥材令による変化が解析結果とほぼ一致していることを示し、殊に極大値を示す乾燥材令は殆んど一致している。図示はしていないが極大値材令は水セメント比が大になるに従って実験値の方が遅くなる傾向があり、解析結果からずれ

てくる。

以上の結果により、乾燥曲げ強度の低下と回復の過程が、基本的には拡散過程に従うといえるが、同時に、解析値と実験値との絶対値による比較検討の困難性、実験結果の全体に対して解析結果はその定性的傾向を十分には説明し得ない等の問題点が残る。

その理由として、解析的には、収縮変形  $e_x$  の分布に平面保持の仮定を適用していることが挙げられる。 $e_x$  の分布は著者等が行なった別の実験によれば、Fig-6 に示すように平面を保持することはなく、試験体表面近傍で曲率を大にする曲線分布となりこの仮定が実情に合わないことを示している。次いで、ヤング係数一定の仮定が指摘される。モルタル、コンクリート等のヤング係数は試験体の乾燥状態に影響され、一般に乾燥状態の方がヤング係数は大きい。本実験のように乾燥状態に分布のある試験体を対象にする場合は当然その影響を考慮すべきである。 $W/C=35\%$  の場合に解析値と実験値が良い相関々係を示すのは高濃度のセメントペーストのために水分移動が抑制され、試験体内部の湿度分布が一定に保持され、これらの仮定に近い状態を示した結果であると推察される。

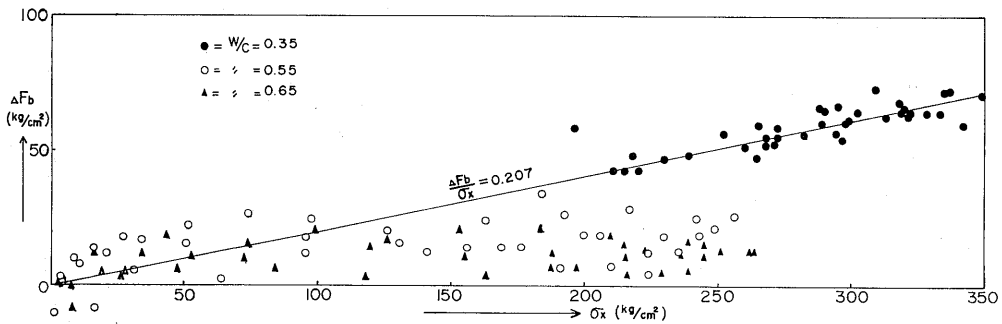


Fig. 4 Relation between test results and calculated values.

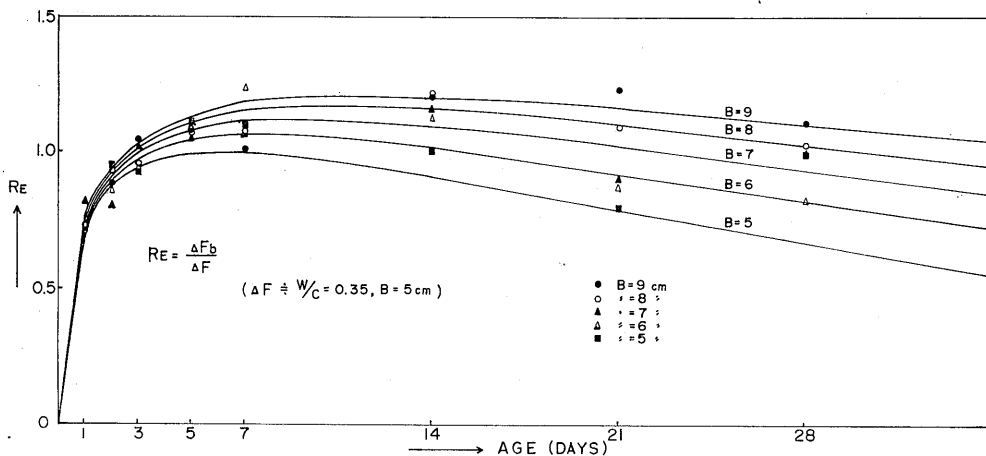
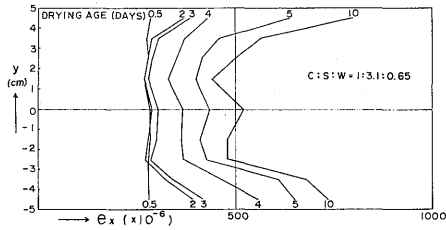


Fig. 5 Test results and theoretical curves.

Fig. 6 Distribution of  $e_x$ .

更に、材質的にはセメントペーストの水和反応の進行の影響が存在する。打込後から乾燥状態に置かれた試験体には強度低下が見られないし、水中養生1週後乾燥状態に置かれる試験体ではその形状寸法によって強度低下を示したり、そうでなかったり極めて不安定な挙動を示す。著者等は水中養生4週を経た試験体が一応、一様な強度低下を示すことを確認して本実験を実施したものであるが詳細にはこれらの影響も考慮すべきであろう。

## 6. 結 論

本研究は、セメントモルタル曲げ強度の乾燥材令の進行に伴う強度の低下と回復現象が乾燥収縮応力によるものと仮定して、この現象に対する拡散方程式による解の適用の可能性について検討を行なったものである。

拡散方程式の解の数値計算には、収縮拡散係数  $k$ 、表面係数  $f$ 、終局収縮ひずみ  $S_\infty$  の3係数が必要であるが、著者等は1面乾燥試験体の反り現象を利用して一義的にこれらの係数を決定した。収縮応力は Pickett の理論を準用して試験体表面について求め、曲げ強度の低下量との比較検討を行なったが、試験体形状寸法の影響、強度低下量の極大値を示す乾燥材令等について定性的傾向はほぼ一致するが、定量的比較は困難であることがわかった。Pickett は、収縮ひずみを拡

散方程式によって求め、これより収縮応力を算定する場合、平面保持、およびヤング係数一定の仮定を適用しているが、実験結果、収縮応力算定の仮定が適当でないといえる。この点に関しては検討結果に従って更に研究を続ける予定である。

本研究は、昭和48年、49年度卒業研究として実施したもので、担当された卒業生諸君、並びに、日頃御指導いただく九州大学・佐治教授に深く感謝の意を表わすものである。

なお、数値計算は長崎大学 FACOM 270-30 を用いて行なったことを付記する。

## 参 考 文 献

- 1) 松藤泰典, 吉岡俊二, 石田信一: 乾燥収縮過程におけるモルタル・コンクリートなどの曲げ強度に関する研究 (第 I, II 報), 建築学会中国九州支部研究報告, 第3号 P.25~32(1975)
- 2) G. Pickett: Shrinkage Stress in Concrete (Part I), Journal of A. C. I, vol. 17, No. 3, p. 165~204 (1946)
- 3) G. Pickett: Shrinkage Stress in Concrete (Part II), Journal of A. C. I, vol. 17, No. 4, p. 361~398 (1946)
- 4) 中西正俊: コンクリートおよびモルタルの乾燥収縮過程を拡散方程式で表示したときの諸係数について, 建築学会論文報告集, 第190号 P.11~17(1971)
- 5) 岡田清, 川村満紀: ソイルセメントの乾燥収縮応力に関する二・三の考察, 土木学会論文集, 第142号, P.37~45(1967)
- 6) 松藤泰典, 吉岡俊二, 石田信一: セメントモルタルの収縮予測に関する一考察, セメント技術年報, 第29巻, (投稿受理) (1975)