

## セメント系材料の曲げ強度に及ぼす不均一な乾燥収縮応力の影響

INFLUENCE OF NON-UNIFORM SHRINKAGE STRESS ON FLEXURAL STRENGTH  
OF CEMENTITIOUS MATERIAL

宮沢伸吾\*・田澤栄一\*\*

By Shingo MIYAZAWA and Ei-ichi TAZAWA

In order to generate non-uniform self stress that is different in area of working zone, partial surface provided by controlling coating area of mortar beams was exposed to drying condition at first. Distribution of self stress thus generated was experimentally determined by measuring variation in strain when a part of a specimen was cut or notched. Next, beams were loaded flexurally and failure condition was examined. It was proved that the maximum tensile stress obtained by superposing stress due to external load upon the self stress did not serve as a failure criterion.

*Keywords: self stress, measurement, flexural failure, superposition, drying shrinkage*

## 1. まえがき

材料に荷重が作用する以前に生じる応力は自己応力とよばれ、コンクリートについては、乾燥収縮や温度変化に起因するもの、ケミカルプレストレス等が挙げられる。たとえば、コンクリートに乾燥収縮が生じると、乾燥の進行の早い乾燥面付近の自由な収縮が内部に拘束されるために、乾燥面には引張の自己応力が生じ、内部では圧縮の自己応力が生じる。

これらの自己応力は、コンクリートの強度やひびわれの発生に大きな影響を及ぼすことは明らかであり、特に乾燥収縮応力に関しては、従来より実験的および解析的な研究が数多くなされてきた<sup>たとえば(1)~(6)</sup>。しかし、この種の自己応力はひずみの測定値とは対応しないこと、また部材断面内で不均一に分布していることから実測が困難であった。また、自己応力の実測値に基づいた研究としては、近年開発された応力計による乾燥収縮応力の実測例<sup>7)</sup>があるが、一般的な方法にはなっていない。既往の研究では、定量的評価は解析的手法により検討される場合が多く、実測値による検証がなされていないためその

信頼性は必ずしも十分とはいえなかった。したがって、この種の自己応力の測定方法を確立することがきわめて重要である。

従来、自己応力を生じたコンクリートの破壊条件は、外力による応力と自己応力の単純な重ね合わせから求まる最大応力が強度に達したときに破壊が生ずるとして求められてきた。他方、Hillerborgら<sup>8)</sup>は乾燥面における収縮応力の大きさが同じでも曲げ強度の低下は断面寸法とともに大きくなることを仮想ひびわれモデルにより説明している。また、桑原<sup>9)</sup>は温度ひびわれ発生直前の供試体の割裂引張強度の低下率は約30%にすぎないことを示している。これらの実験結果は、自己応力が断面内に不均一に分布する場合の破壊条件を求める際、従来の最大応力説による検討のみでは不十分であることを示唆している<sup>10)</sup>。

以上のような観点から、本研究では、モルタルやコンクリートに生じる不均一な乾燥収縮応力の測定方法を確立し、さらにその実測結果をもとに、静的曲げ強度に及ぼす乾燥収縮応力の影響について明らかにすることを目的とする。

モルタルおよびコンクリート供試体に生じる乾燥収縮応力の大きさと断面内分布形状を変化させるために、乾燥幅を変化させ、供試体表面の一部分のみから乾燥を起

\* 正会員 広島大学助手 工学部第四類  
(〒724 東広島市鏡山1-4-1)

\*\* 正会員 工博 広島大学教授 工学部第四類(同上)

こさせた。これは、乾燥幅に対応して乾燥収縮応力の作用する面積が変化するばかりでなく、断面内の含水率分布の変化に対応して乾燥収縮応力の大きさと深さ方向の分布が変化すると考えたことによる。乾燥収縮応力の実測には、金属材料等の加工や溶接の際に発生する残留応力の測定に用いられている機械的測定方法<sup>11),12)</sup>を適用することを試みた。すなわち、乾燥を受けた供試体の切断あるいは切込みにより応力を部分的に解放させ、そのときに生じる弾性ひずみの測定値から断面内に不均一に分布する乾燥収縮応力を求めた。さらに、所定期間の乾燥を終了した後に曲げ強度を測定し、乾燥収縮応力が曲げ強度に及ぼす影響について実測値をもとに検討した。

2. 実験概要

(1) 使用材料および配合

表一は、モルタルおよびコンクリートの作成に使用した材料の特性を示したものである。細骨材粒子の最大粒径は5mmとした。モルタルおよびコンクリートの配合はそれぞれ表二および表三に示すとおりとした。W/C=50 および 70% の場合はリグニン系標準型 AE 減水剤を使用した。モルタルで W/C=30% の場合はナフタリン系高性能減水剤を添加し、シリカフェウムをセメント重量の内割りで10% 混入した。表一は水中養生7日終了直後のモルタルの圧縮強度(φ7.5×15cm 供試体)、圧縮載荷時の静弾性係数(1/3セカントモデュ

表一 使用材料

セメント	早強ポルトランドセメント(比重3.14)
細骨材	風化花崗岩系山砂(F.M.:3.00, 比重:2.59, 吸水率:1.14%)
粗骨材	石灰岩質砕石(最大寸法10mm, 比重:2.71, 吸水率:0.32%)
混和剤	リグニン系標準型AE減水剤(wr) ナフタリン系高性能減水剤(sp)
混和材	シリカフェウム(比表面積2×10 <sup>5</sup> cm <sup>2</sup> /g)のみ使用

表二 モルタルの配合

W/C (%)	S/C	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		W	C	S	Si	ad. (cc)
30	1.00	288	883	981	98	9800(sp)
50	2.50	282	563	1408	0	1408(wr)
70	3.12	317	452	1408	0	704(wr)

W:水, C:セメント, S:砂, Si:シリカフェウム  
sp:ナフタリン系高性能減水剤, wr:リグニン系AE減水剤

表三 コンクリートの配合

Gmax (mm)	slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					ad ml/m <sup>3</sup>
					W	C	S	G	ml/m <sup>3</sup>	
10	3±1	4±1	50	46	180	360	780	958	1260	

表四 モルタルの力学的特性

W/C (%)	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )
30	673	45.9	2.63 × 10 <sup>5</sup>
50	428	38.4	2.40 × 10 <sup>5</sup>
70	250	22.5	1.75 × 10 <sup>5</sup>

ラス, φ7.5×15cm 供試体)、割裂引張強度(φ10×15cm 供試体)を示したものである。

(2) 練りませ方法

コンクリートおよび、W/C=50% と 70% のモルタルの練りませは、強制練りミキサ(公称容量50l, 56rpm), W/C=30% のモルタルの場合はホバート型モルタルミキサ(公称容量10l, 自転280rpm, 公転80.0rpm)を用い、全材料投入後2分間行った。

(3) 養生および乾燥条件

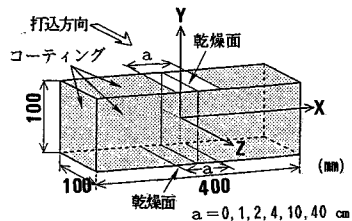
モルタルおよびコンクリートは打設後2日で脱型し、材令7日まで20°Cで水中養生した。乾燥させる場合はその後20°C, 50% R.H. の恒温恒湿室内に静置した。断面内分布の異なる乾燥収縮応力を発生させるために、図一に示すように相対する二面に乾燥部分を設け、乾燥幅 a を 0, 1, 2, 4, 10, 40 cm と変化させた。供試体の乾燥面以外は、モルタルの場合はアルミ箔粘着テープ(厚さ0.05mm)により、コンクリートの場合は布製テープ、エポキシ樹脂系接着剤、ポリ塩化ビニリデンシートをこの順に重ねてコーティングした。

(4) 曲げ強度試験

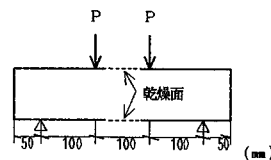
図一は、モルタルの曲げ強度試験用供試体を示したものである。水中養生終了後、所定の乾燥期間を経た後、図二に示すように、乾燥面を上・下縁として、JIS A 1106 により曲げ強度試験を行った。

(5) 均一性係数の測定

曲げ強度に及ぼす等曲げモーメント区間長さの影響を検討するためにモルタルの均一性係数(m)を測定した。ここでは同一バッチから製造した30個の4×4×16cm 供試体を用い、7日間の水中養生終了直後に行った二等分点荷重による曲げ強度試験値から求めた。詳細は5.に述べる。



図一 曲げ強度試験用供試体



図二 曲げ強度試験方法

(6) 乾燥収縮応力の測定

所定の乾燥期間を経た後、 $a=40\text{ cm}$  のモルタル (図-3) およびコンクリート (図-4) について切断法により乾燥収縮応力の断面内分布を測定した。また、 $a=2\sim 10\text{ cm}$  のモルタル供試体については、切込み法により、乾燥面付近の乾燥収縮応力を測定した。これらの方法は、自己応力の一部を解放させることにより生じる弾性変形の測定から自己応力を求める方法で、乾燥期間中の収縮ひずみやクリープとは無関係に乾燥収縮応力分布を測定することができる。切断法の詳細は 3. で、切込み法の詳細は 4. で述べる。

モルタル供試体は曲げ強度試験では  $10\times 10\times 40\text{ cm}$ 、切断法による応力測定では  $4\times 10\times 40\text{ cm}$ 、切込み法では  $2\times 10\times 40\text{ cm}$  であり供試体幅が異なる。乾燥収縮応力に及ぼす供試体幅  $b$  の影響について、拡散方程式を用いた FEM 三次元弾性解析により検討した。なお、解析で用いる諸条件は、応力の解析値が 3., 4. で述べる実測値とおおむね一致するように設定した。

図-5 は、供試体長手方向の乾燥収縮応力 ( $\sigma_x$ ) に及ぼ

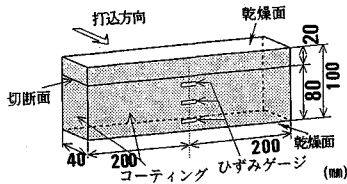


図-3 切断法による乾燥収縮応力測定方法 (モルタル)

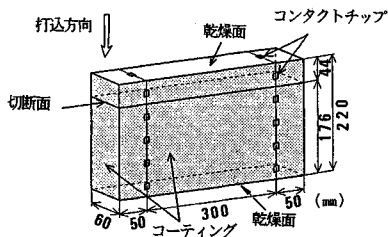


図-4 切断法による乾燥収縮応力測定方法 (コンクリート)

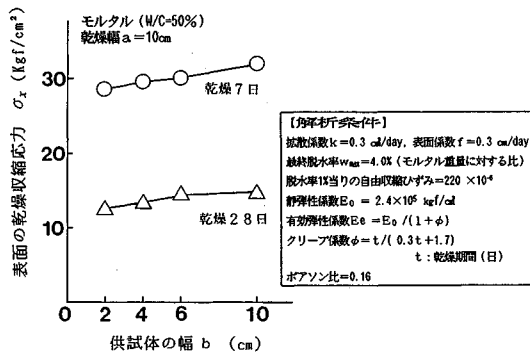


図-5 供試体幅と乾燥収縮応力の関係 (FEM 解析値)

す供試体幅の影響を示したものである。乾燥収縮応力は  $2\sim 10\text{ cm}$  の範囲では供試体幅に大きな影響を受けないことが示されている。

3. 供試体の切断による乾燥収縮応力の測定

部材内に生じている自己応力は断面内でつり合っているため、供試体の一部を切断すれば新たなつり合い条件を満足すべく弾性変形を生じる。この変形量の測定から自己応力を求める方法すなわち切断法を、コンクリートやモルタルの乾燥収縮応力測定に適用することを試みた。

本測定法は、乾燥収縮応力が表面からの深さのみの関数である場合、すなわち乾燥幅  $a=40\text{ cm}$  の供試体にも適用される。

(1) モルタル

図-3 に示すように、2面乾燥を受ける ( $a=40\text{ cm}$ )  $4\times 10\times 40\text{ cm}$  のモルタル供試体を乾燥面に平行な面で 2 つに切断し、そのときに生じる長手方向 ( $X$  方向) ひずみの測定値から  $\sigma_x$  の  $Y$  方向分布を以下のように求めた。なお、切断は三角形断面の鋼製エッジを介して圧縮力を作用させ割裂させることにより行い、ひずみの測定は電気抵抗線ひずみゲージ (10 mm) により行った。

図-6 に示すように、切断に伴い A 部に生じるひずみ ( $\epsilon_x$ ) は B 部に生じていた自己応力が切断前の相対位置で A 部に外力として作用した場合の弾性変形に相当すると考えられる。この偏心力を軸力の成分と曲げの成分に分離して考えると、次式が成立する。

$$E_c \times \epsilon_x = \frac{P}{A} + \frac{M}{I} \left( y + \frac{d}{2} \right) \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{ただし、} P = \int_{h/2-d}^{h/2} b \cdot \sigma_x dy$$

$$M = \int_{h/2-d}^{h/2} b \cdot \sigma_x (y + d/2) dy$$

A: A 部断面積, I: A 部断面二次モーメント,  
b: 供試体幅, d: 乾燥面から切断面までの距離,  
h: 供試体高さ, y: 断面中央からの距離,  
 $E_c$ : 静弾性係数

ここで、2面乾燥を受けたモルタルに生じる乾燥収縮応力を 2 次曲線で近似できるとすると、乾燥条件の対称性および断面内の垂直応力およびモーメントのつり合い

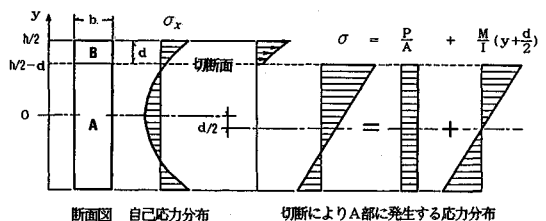
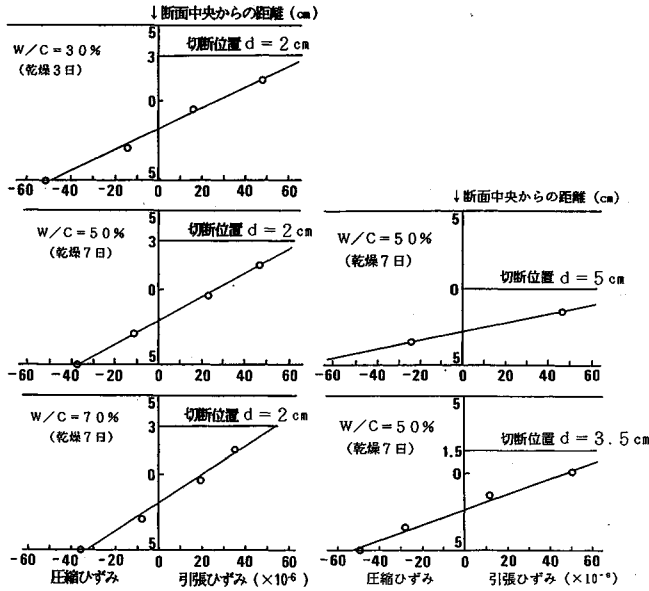


図-6 乾燥収縮応力の算定方法



図一七 切断により生じるひずみ分布 (モルタル)

表一五 切断法による乾燥面自己応力 ( $\sigma_{max}$ ) の実測値 (モルタル)

W/C (%)	乾燥期間	供試体 No.	切断位置 d (cm)	$\sigma_{max}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	平均
30	3日	1	2.0	32.5	30.3
		2		28.0	
50	7日	1	2.0	29.7	29.0*
		2		28.3	
		3	3.5	24.4	
		4	5.0	28.0	
70	7日	1	2.0	20.8	18.3
		2		15.7	

\* 平均値は d = 2cm のみで算出

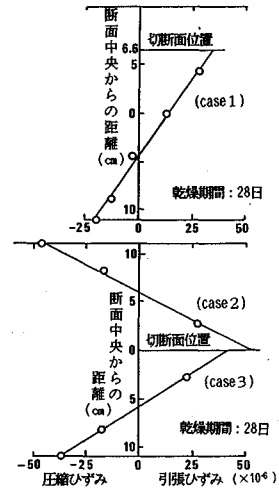
から、乾燥収縮応力は引張応力を正として次式で表わすことができる。ただし、表面付近での乾燥収縮応力はモルタルの引張強度を越えない範囲で成り立つものである。

$$\sigma_x = 6 \sigma_{max} \left\{ \left( \frac{y}{h} \right)^2 - \frac{1}{12} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $\sigma_{max}$  : 乾燥面における乾燥収縮応力

図一七は、測定結果を示したものである。図中の直線は測定値を直線回帰したものであり、切断に伴う弾性変形に対しては、平面保持が成立していることがわかる。この回帰直線から求まる  $\epsilon_x$  を式 (1) に代入し式 (2) を用いることにより  $\sigma_{max}$  を決定することができる。表一五は、本方法による測定結果を示したものである。同表より、切断位置により測定結果に大きな相違がないことから、乾燥収縮応力の二次曲線近似が本実験条件 (湿度、乾燥期間、供試体寸法) の範囲では妥当であると考えられる。

同一乾燥条件では、W/C が小さいほど乾燥収縮応力が大きくなるのがわかる。ただし W/C = 30% の場



図一八 切断により生じるひずみ分布 (コンクリート)

合は、乾燥面に微細な網目状ひびわれが認められたことから、乾燥収縮応力は若干緩和されていると考えられる。

なお、モルタルの静弾性係数 ( $E_c$ ) は応力の正負 (圧縮、引張) や応力レベル、またモルタルの含水率の影響を受けると考えられる。しかし、これらの影響を正確に考慮することはきわめて困難である。また、測定法としての簡便性も考えて、ここでは式 (1) 中の  $E_c$  としては、湿潤供試体で求めた圧縮静弾性係数 (表一四) を用い、かつ断面内で一定値であると仮定した。

(2) コンクリート

二面乾燥を受けるコンクリートの乾燥収縮応力分布を切断法により測定した。図一四に示すように、 $6 \times 22 \times$

表一六 切断法による乾燥面自己応力 ( $\sigma_{max}$ ) の実測値 (コンクリート)

W/C (%)	乾燥期間	Case No.	$\sigma_{max}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	
			$\sigma_{max}$	平均
50	28日	1	16.7	17.4
		2	19.6	
		3	15.8	

40 cm 供試体とし、切断により生じるひずみはコンタクトゲージ (測定区間 30 cm) で測定したが、測定原理は (1) で示したモルタルの場合と同様である。

図一八は、28日間乾燥を受けたコンクリートについての測定結果を示したものである。ここに、case 1 は乾燥面から 4.4 cm の面で切断した場合、case 2 および case 3 は二等分した場合の測定結果を示している。なお、今回はコンクリートの静弾性係数として純引張試験から求めた値 ( $E_c = 3.0 \times 10^5$  kgf/cm<sup>2</sup>) を用いた。表一六は、測定結果を示したものである。モルタルについての測定値 (表一五) も合わせて考えると、本測定法により、乾燥表面の自己応力は ± (2~3) kgf/cm<sup>2</sup> の精度で測定することが可能であるといえる。

以上のことから、二面乾燥を受けるモルタルおよびコンクリート供試体に生じる自己応力は、切断法により測定できることが明らかとなった。

4. 供試体の切込みによる乾燥収縮応力の測定

乾燥幅  $a = 40$  cm 以外の場合は、乾燥収縮応力が供試体長手方向に著しく変化するので、供試体を切断する方法では測定することができない。そこで、部分乾燥 ( $a$

$= 2 \sim 10$  cm) を受けるモルタル供試体の露出面付近の乾燥収縮応力を以下の方法で測定した。なお、図一九は、アルミ箔粘着テープでコーティングした場合のモルタル供試体の重量減少率を示したものであるが、良好なコーティング性能を示しているといえる。

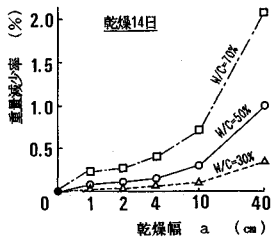
図一十に示すように、供試体に表面から切込みを入れていき、供試体長手方向の応力 ( $\sigma_x$ ) を部分的に解放する。この解放された部分の  $x$  方向の表面ひずみを電気抵抗線ひずみゲージ (ゲージ長 5 mm) で測定した。ダイヤモンドカッタを用いて切断したため発熱したが、20°C の室内で自然冷却させ熱の影響がなくなってからひずみ測定を行った。このための冷却時間は、ひずみおよび供試体温度の測定結果から 10~15 分とした。図一十一は測定結果の一例を示したものである。供試体を表面から切り込んでいくと、乾燥面における引張の自己応力が解放されるため収縮ひずみが生じる。ひずみは切込み深さとともに増加するが、切込み深さが 1~2 cm になると増加は停止する。この傾向は図一十二に示した FEM 解析結果ともほぼ一致した。そこで、このひずみの増加過程に着目して以下のようにして表面付近の乾燥収縮応力を求めた。

まず、切込み深さ ( $y$ ) と表面ひずみ ( $\epsilon(y)$ ) の関係を  $y \leq 2$  cm の範囲について次式で帰した。

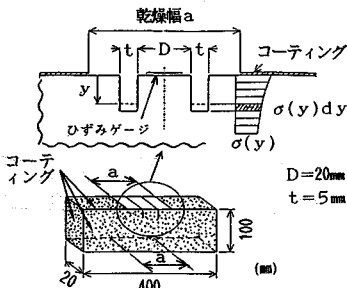
$$\epsilon(y) = y \cdot \exp(p - qy) \dots \dots \dots (3)$$

$p, q$ : 定数

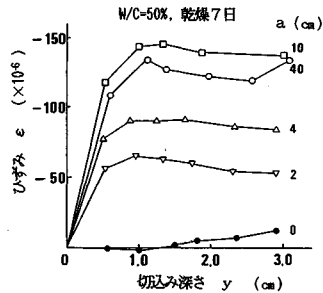
式 (3) は、測定値を比較的良く近似できる関数として選んだものであり、物理的な意味はないが、図一十三に示すように、測定値と帰帰曲線は比較的良く一致して



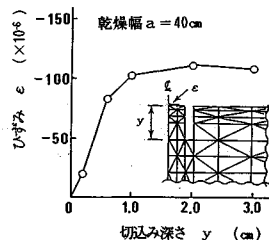
図一九 乾燥幅と重量減少率の関係



図一十 切込み法による乾燥収縮応力測定方法 (モルタル)



図一十一 切込みにより生じるひずみ (実測値)



図一十二 切込みにより生じるひずみ (FEM 解析値)

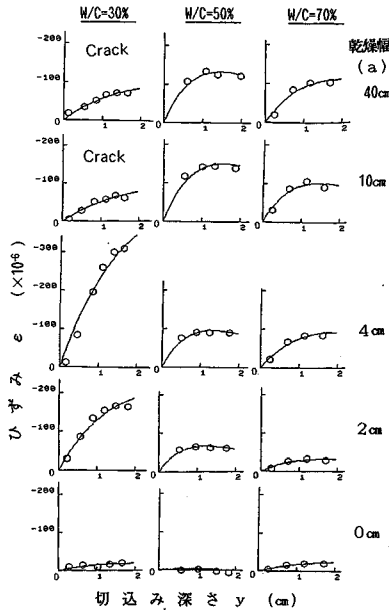


図-13 切込みにより生じるひずみと帰帰曲線の比較 (乾燥7日)

いる。

いま、図-10に示すように、深さ  $y$  まで切込みが進んでいるとし、さらに  $dy$  の切込みを行った場合、等価的には  $-\sigma(y)dy$  の力が切込み幅  $D$  の応力解放部分の底部に加わることになる。そのために生じる表面のひずみを  $d\varepsilon(y)$  とすると、 $E$  を弾性係数として次式が成立すると考える。

$$d\varepsilon(y) = K_y \cdot (1/E) \cdot \sigma(y) dy \quad (4)$$

ここで、 $K_y$  は  $D$ ,  $t$ ,  $y$  ( $D$ ,  $t$ ,  $y$  は図-10参照,  $D = 20$  mm,  $t = 5$  mm) およびゲージの種類と配置に依存する実験定数である。また  $K_y$  はモルタルの配合とは無関係なので、応力分布が明らかな供試体について同様の切込みを行い  $\sigma_0 - \varepsilon_0$  関係を測定することにより求めることができる。すなわち

$$d\varepsilon_0(y) = K_y \cdot (1/E_0) \cdot \sigma_0(y) dy \quad (5)$$

ここで、 $\sigma_0(y)$  としては、 $W/C = 50\%$ ,  $a = 40$  cm, 乾燥7日の供試体についての切断法による実測値  $\sigma_0(y) = 6 \times 29.0 \{(y/h)^2 - 1/12\}$  を用いた。

式(4), (5)より

$$\sigma(y) = \frac{E d\varepsilon/dy}{E_0 d\varepsilon_0/dy} \sigma_0(y) \quad (6)$$

切込み法による測定値  $\varepsilon(y)$  および  $\varepsilon_0(y)$  を式(3)で表わせば、式(6)により  $a = 2 \sim 10$  cm の供試体の表面付近の乾燥収縮応力を求めることができる。結果の一例を図-14に示す。また、乾燥面における乾燥収縮応力 ( $\sigma_{max}$ ) を図-15に示す。乾燥幅  $a = 2 \sim 10$  cm の範囲で

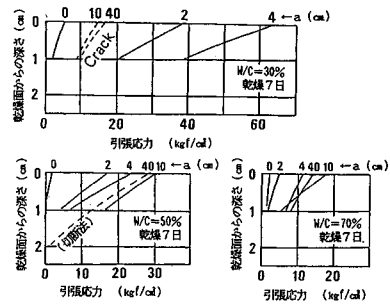


図-14 切込み法により求めた乾燥収縮応力

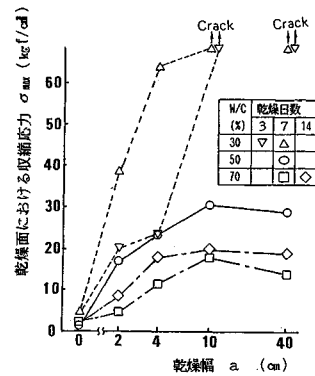


図-15 切込み法により求めた乾燥面の自己応力 ( $\sigma_{max}$ )

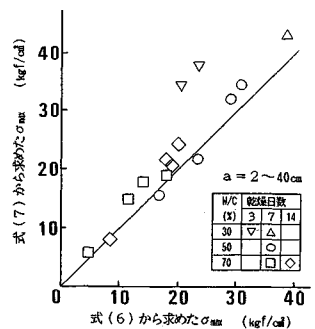


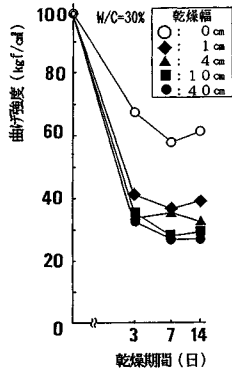
図-16 式(6)から求めた  $\sigma_{max}$  と式(7)から求めた  $\sigma_{max}$  の関係

は、乾燥幅  $a$  が小さくなるほど  $\sigma_{max}$  は小さく、また  $a = 10$  cm と  $40$  cm では、ほぼ同一の値となった。また、同一の乾燥条件では、 $W/C$  が小さいほど  $\sigma_{max}$  は大きくなった。

なお、 $W/C = 70\%$ ,  $a = 40$  cm の場合、切込み法による  $\sigma_{max}$  の測定値は切断法による測定値 (表-5) の  $76\%$  であった。

切込みによる表面ひずみは、本実験結果では切込み深さ  $1 \sim 2$  cm 程度で最大値 ( $\varepsilon_{max}$ ) をとるが、このとき表面の乾燥収縮応力は完全に解放されていると考え、次式により  $\sigma_{max}$  を求めることもできる。

$$\sigma_{max} = E \times \varepsilon_{max} \quad (7)$$



図一七 曲げ強度の経時変化 (W/C=30%)

図一六は、式(6)から求めた $\sigma_{max}$ と、式(7)から求めた $\sigma_{max}$ との比較を示したものであるが、両者はおおむね一致している。

なお、W/C=30%の場合、 $a=10\text{ cm}$ および $a=40\text{ cm}$ の供試体は乾燥3日で乾燥表面に深さ数mmの横方向ひびわれが観察され、このため切込み法により求めた乾燥収縮応力が小さくなった。このように、乾燥収縮応力が引張強度を超え塑性ひずみを生じたり、ひびわれが生じた場合には本測定法は適用できない。

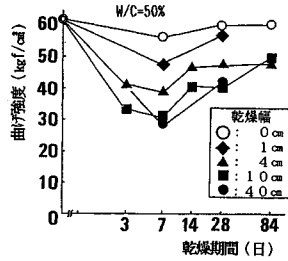
以上のことから、モルタル供試体の局所的な乾燥収縮応力は、切断法および切込み法を併用することにより測定できることが明らかとなった。

### 5. 乾燥収縮がモルタルの曲げ強度に及ぼす影響

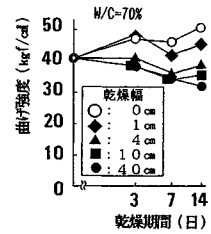
モルタルやコンクリートの曲げ強度が乾燥収縮の影響を大きく受けることは周知の事実である。ここでは、前章で示した乾燥収縮応力の実測値をもとに、乾燥収縮応力がモルタルの曲げ強度に及ぼす影響について検討した。

図一七～一十九は、乾燥幅 $a$ の異なるモルタル供試体の曲げ強度の経時変化を示したものである。W/C=70%で乾燥幅 $a=1\text{ cm}$ の場合を除いて、曲げ強度は乾燥の進行とともに低下し、乾燥7日で極小値をとり、その後はしだいに回復している。このように乾燥途中において曲げ強度が低下するのは、乾燥面が載荷の際に引張縁となるため、引張の乾燥収縮応力( $\sigma_x$ )が外力による曲げ引張応力に加算されるためである。なお、乾燥面では $\sigma_x$ と同時に供試体幅方向の乾燥収縮応力( $\sigma_z$ )も存在するが、コンクリートの二軸引張応力下の強度は一軸引張強度とほとんど変わらないことが報告されているので<sup>13), 14)</sup>、 $\sigma_z$ が曲げ強度に及ぼす影響は無視した。

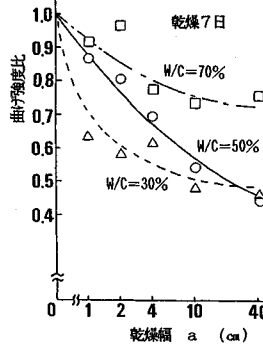
図一七より、W/C=30%の場合、水中養生終了後全面コーティング( $a=0\text{ cm}$ )して3～14日放置すると、重量減少が全く認められないにもかかわらず、曲げ強度



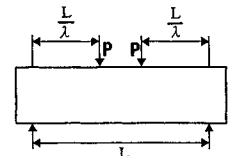
図一八 曲げ強度の経時変化 (W/C=50%)



図一十九 曲げ強度の経時変化 (W/C=70%)



図一二十 乾燥幅と曲げ強度比の関係



図一二十一 式(8)中の $\lambda$ の定義

が大幅に低下した。水中養生終了直後の供試体破断面(10×10 cm)は、表面から約7 mmまでの表層部が内部より黒くなっていることが明瞭に観察された。これは、水セメント比が小さくシリカフェウムを混入しており組織がきわめて緻密なため、セメントの水和により内部空隙<sup>15)</sup>が形成される速度に比べて、その空隙に養生水が外部から浸透する速度が非常に遅いことによると考えられる(Self desiccation)。そのため、供試体の表層部における湿潤膨張ひずみが内部に拘束され、表面に圧縮の自己応力が生じると考えられる。前述した強度減少は、この圧縮の自己応力がコーティング後の水分拡散に伴い減少するためと考えられる。なお、類似の現象として、乾燥させたコンクリート供試体を浸水させると曲げ強度が一時的に増加した例が報告されている<sup>16)</sup>。

図一十九より、W/C=70%の場合、 $a=0\text{ cm}$ の供試体で若干強度増進を示している。

そこで、各乾燥期間について、 $a=0\text{ cm}$ の場合の曲げ強度に対する各乾燥幅の場合の曲げ強度の比を「曲げ強度比」と定義し、以下「曲げ強度比」を用いて、乾燥収縮応力の影響について検討した。

図一二十は、「曲げ強度比」と乾燥幅 $a$ の関係を示したものである。いずれの配合においても、乾燥幅 $a$ が大きくなるほど曲げ強度の低下率が大きくなっている。

一般に脆性材料の曲げ強度の試験値は、等モーメント

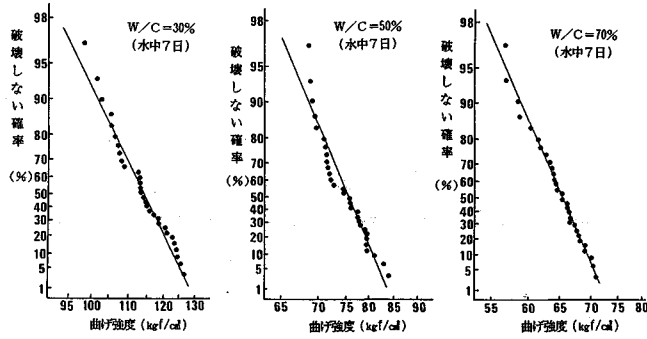


図-22 曲げ強度の確率分布

表-7 載荷方法が異なる場合の曲げ強度試験値の比

W/C (%)	m	等曲げモーメント区間長さ (cm)			
		1	2	4	10
30	16.38	1.000	0.982	0.957	0.916
50	18.86	1.000	0.983	0.960	0.934
70	18.09	1.000	0.982	0.959	0.922

区間の長さに影響を受ける。強度の分布を確率論的に扱ったワイブル理論により検討すると、図-21に示す載荷試験から得られる曲げ強度は次式により与えられる<sup>17)</sup>。

$$f_0 = f_0 \Gamma(1 + 1/m) \cdot g(m, \lambda) / V^{1/m} \dots \dots \dots (8)$$

ただし、

$$g(m, \lambda) = [2 \lambda(m+1)^2 / 2 + (m+1)(\lambda-2)]^{1/m}$$

m: 均一性係数,  $f_0$ : 強度の基準値,  $\lambda$ : 載荷方法を示す係数 (図-21 参照), V: 供試体の体積

図-22は、7日間の水中養生終了直後の4×4×16 cm 供試体 30個の曲げ試験データをワイブル確率紙上にプロットしたものである。同図における回帰直線の傾きとして均一性係数(m)が表-7のように求められる<sup>18)</sup>。

本実験では、等曲げモーメント区間は10 cmで一定であるのに対し、乾燥収縮応力が最大値を示す区間は乾燥幅 a とともに変化する。したがって、図-20の結果は乾燥収縮応力のみならず等曲げモーメント区間長さの影響も受けていると考えられる。そこで、a=1 cmの場合を基準にして等曲げモーメント区間長さの影響を式(8)により推定すると表-7のようになる。等曲げモーメント区間長さが1 cmから10 cmに増加することによる曲げ強度の減少率は高々8%であり、したがって、等曲げモーメント区間長さの影響に比較して乾燥収縮応力の影響が卓越していることが確認される。

図-23は、モルタルの引張強度( $f_t$ )に対する乾燥収縮応力( $\sigma_{max}$ )の比( $\sigma_{max}/f_t$ )と「曲げ強度比」の関係を示したものである。同図において、 $f_t$ は水中養生7日終了

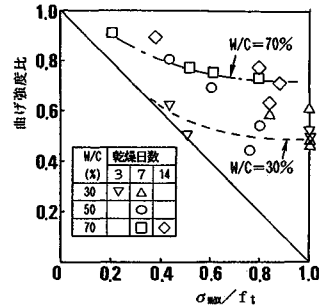


図-23 ( $\sigma_{max}/f_t$ )と曲げ強度比の関係

直後の割裂引張強度,  $\sigma_{max}$ は乾燥面における供試体長手(x)方向の乾燥収縮応力で切断法および切込み法による実測値である。また、乾燥期間中にひびわれが観察されたものについては $\sigma_{max} = f_t$ とした。なお、乾燥表面付近ではセメントの水和は乾燥により阻害されることが考えられ<sup>19)</sup>、また本実験では早強セメントを使用しているので、乾燥を開始した材令7日以降の水和の進行による曲げ強度の増加は少ないとして無視した。

いずれの配合についても $\sigma_{max}$ が大きいかほど曲げ強度の低下率が大きい。 $\sigma_{max}/f_t$ が同一でも、曲げ強度の低下率はモルタルの配合により大幅に異なり、組織が緻密なほど大きい。また、乾燥収縮応力が表面で引張強度に達しても( $\sigma_{max}/f_t = 1$ )、W/C=30%で約50%、W/C=70%では約75%の曲げ強度が残存している。このことは、自己応力と外力による曲げ応力を単純に重ね合わせて求めた応力の最大値が引張強度に達したときに破壊が生ずるとする従来の破壊規準は適用できないことを示している。したがって、自己応力の断面内分布形状をも考慮した新たな破壊条件を求めることが必要である。

## 6. 結 論

本研究の範囲内で得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) モルタルやコンクリートの内部に不均一に分布



する乾燥収縮応力は、応力を部分的に解放させたときに生じる弾性ひずみの測定値から求めることができる。すなわち、二面乾燥を受ける場合の乾燥収縮応力分布は切断法により、また二面乾燥または部分乾燥を受ける場合の表面付近の乾燥収縮応力は切込み法により実測することができる。

(2) 切断法および切込み法による測定結果から、部分乾燥を受けるモルタル供試体の乾燥面における引張の乾燥収縮応力は、乾燥幅が大きいほど大きく、また同一乾燥条件では、 $W/C$  が小さく組織が緻密なほど大きい。

(3) 乾燥面における引張の乾燥収縮応力 ( $\sigma_{max}$ ) が大きいほどモルタルの曲げ強度の低下率は大きくなるが、 $\sigma_{max}$  が引張強度に達しても 50 % 以上の強度が残存している。この強度の残存率は、 $W/C$  が小さく組織が緻密なほど小さい。

(4) 不均一な乾燥収縮応力を有するモルタルが曲げモーメントを受ける場合、乾燥収縮応力と外力による曲げ応力を重ね合わせて求めた引張応力の最大値が引張強度に達したときに破壊するとする従来の破壊条件は適用できない。したがって、乾燥収縮応力の作用範囲や分布形状をも考慮した新たな破壊条件を確立することが必要である。

謝 辞：本研究を行うにあたり、当時広島大学に在学中であった山本哲也氏、柏木 勉氏、斎藤幸治氏および重川幸司氏（現在大学院生）のご協力を得た。また、本研究の一部は日本スパンクリート協会研究助成金によるものであることを記し、感謝の意を表する。

#### 参 考 文 献

- 1) Gerald Pickett : Shrinkage stress in concrete, Journal of ACI, Vol. 17, No. 3, pp. 165~195, 1946.
- 2) 長瀧重義：コンクリート、特に舗装用コンクリートの乾燥収縮応力に関する基礎研究，東京大学工学部土木工学科論文集録，第1輯，1964.
- 3) 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，1967.
- 4) 中西正俊：コンクリートおよびモルタルの乾燥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，pp. 11~17, 1971.
- 5) 阪田憲次・蔵本 修：乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散と乾燥収縮に関する研究，土木学会論文報告集，第316号，pp. 145~152, 1981.
- 6) 永松静也・佐藤嘉昭・竹田吉紹：乾燥に伴うコンクリートの各種強度変化について，セメント技術年報，36, pp. 271~274, 1982.
- 7) 田澤栄一・飯田一彦：新型応力計について，コンクリート工学年次論文報告集，第2巻，pp. 117~120, 1980.
- 8) Hillerborg, A., Modéer, M. and Petersson, P.E. : Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by means of Fracture Mechanics and Finite Elements, Cement and Concrete Research, Vol. 6, pp. 773~781, 1976.
- 9) 桑原隆司：マスコンクリートの温度ひびわれ発生の危険性評価に関する研究，清水建設研究報告，No. 16, 1986.
- 10) 田澤栄一・宮沢伸吾・山本哲也・斎藤幸治：乾燥を受ける無筋コンクリートの自己応力について，コンクリート工学年次論文報告集，第10巻，pp. 255~260, 1988.
- 11) Von Helmut Wolf *et al.* : Das Ring-Kern-Zur Messung von Eigenspannungen und seine Anwendung bei Turbinen und Generatorwellen, Archiv für das Eisenhüttenwesen, 42, pp. 195~200, 1971.
- 12) 米谷 茂：残留応力の発生と対策，養賢堂，1975.
- 13) 岩崎訓明・西林新蔵・青柳征夫：新体系土木工学 29, フレッシュコンクリート・硬化コンクリート，技報堂出版，1981.
- 14) 岡島達雄：複合応力（内圧・圧縮，内圧・引張）を受けるコンクリートの破壊条件，日本建築学会論文報告集，第199号，pp. 7~13, 1972.
- 15) 田澤栄一・宮沢伸吾・笠井哲郎：セメントの硬化収縮と内部空隙について，セメント技術年報，40, pp. 75~78, 1986.
- 16) 小梁川雅・遠藤成夫・福田 正：含水変化を受けたコンクリートの曲げ強度，セメント技術年報，37, pp. 298~301, 1983.
- 17) Jayatilaka, S. : Fracture of Engineering Brittle Materials, Applied Science Publishers LTD, 1979.
- 18) Davidge, R. W. (鈴木弘茂・井関孝善 訳)：セラミックスの強度と破壊，共立出版，1982.
- 19) 地濃茂雄・平野 隆・仕入豊和：養生条件とコンクリート表層部の細孔構造，セメント技術年報，38, pp. 266~269, 1984.

(1990. 5. 11・受付)