

論文

[1060] 乾燥を受けるモルタルの引張強度について

正会員 田澤栄一 (広島大学)

正会員○宮沢伸吾 ( " )

重川幸司 (大成建設㈱)

三宅啓文 (広島大学)

1. まえがき

自己応力を受ける材料の破壊条件に関する研究は種々行なわれているが [1]-[4]、一般的な手法として確立されるには至っていない。コンクリートに生じる乾燥収縮応力や温度応力は引張破壊に大きな影響を及ぼすが、最大応力説により検討されるのが一般的であり必ずしも十分とはいえない。本研究では、乾燥を受けたモルタルの純引張強度および曲げ強度を測定するとともに、自己応力の実測および表面部のひびわれの観察を行ない、乾燥を受けるモルタルの引張破壊条件について検討する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

モルタルの作製に使用した材料を表1に示す。配合は表2に示す通りで、組織の緻密度を大幅に変化させるためにW/C=30~70%とし、W/C=30%の場合にはシリカフュームを添加した。

2.2 養生方法

モルタル供試体は打設後2日で脱型し、以後材令7日まで20℃で水中養生し、以後20℃、50% R.H.の恒温恒湿室内に静置した。所定の乾燥面以外はアルミ泊粘着テープ(厚さ0.05mm)によりシールした。

2.3 純引張強度試験

水中養生終了後全面シールした供試体および相対する2面から乾燥を受けた供試体について、図1に示す供試体を用いて純引張強度試験を行なった。載荷速度は、0.17kgf/cm<sup>2</sup>/secとした。

2.4 曲げ強度試験

図2に示すように相対する2面に部分的な乾燥面を設け、自己応力の大きさおよび断面内分布形状を変化させるために乾燥幅(a)を0, 2, 4, 10, 40cmと変化させた。曲げ強度試験は、

乾燥面が上・下縁になるように三等分点載荷により行なった。また、載荷時にアコースティックエミッション(AE)の計測を行なった(増幅率100dB, しきい値1V)。さらにスパン中央にお

表-1 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.H.:3.00, 比重:2.59, 吸水率:1.14%)		
混和剤	リグニンスルホン酸塩系AE減水剤(wr)		
	ナフタリン系高性能減水剤(sp)	W/C=30%の場合のみ使用	
混和材	シリカフューム(比表面積2×10 <sup>5</sup> cm <sup>2</sup> /g)		

表-2 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)

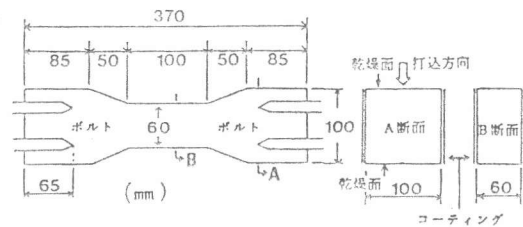


図-1 純引張強度用供試体

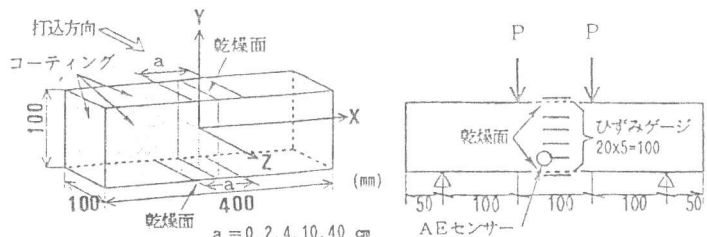


図-2 曲げ強度試験方法

ける中立軸を求めるために、30mmゲージにて断面内ひずみ分布を測定した。

### 2.5 自己応力の測定[5]

乾燥面に平行な面で切断(切断法, 図3)、あるいは乾燥表面からの切込み(切込み法, 図4)により自己応力を部分的に解放させ、そのときに生じる弾性変形の測定により、供試体長手方向の自己応力の断面内分布を測定した。また図5に示すように、 $W/C=30\%$ の場合について湿潤供試体表面に生じる自己応力の測定を切断法により行った。

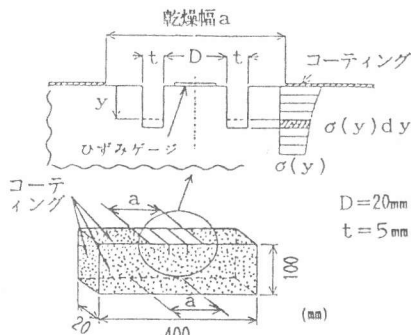


図-4 切込み法による応力測定

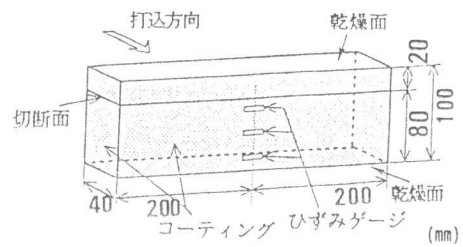


図-3 切断法による応力測定

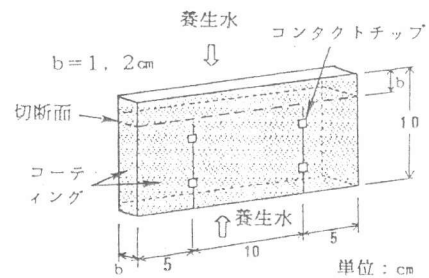


図-5 湿潤供試体の応力測定

## 3. 結果および考察

### 3.1 自己応力の測定値

2面乾燥を受ける供試体 ( $a=40\text{cm}$ ) を乾燥面に平行に切断すると図6に示すような変形が生じる。供試体長手方向の自己応力の断面内分布を(1)式に示す2次曲線で近似し、切断により生じるひずみから  $\sigma_{\text{max}}$  を求めた。

$$\sigma_{\text{self}} = 6 \cdot \sigma_{\text{max}} \left\{ (y/h)^2 - (1/12) \right\} \dots (1)$$

ここに、 $\sigma_{\text{max}}$ : 乾燥面における自己応力,

$h$ : 供試体高さ,  $y$ : 断面中央からの距離

部分乾燥を受けるモルタル ( $a=2\sim 10\text{cm}$ ) の自己応力の測定には切断法が適用できないので、切込み法により測定した。表3は切断法あるいは切込み法により求めた  $\sigma_{\text{max}}$  の実測値を示したものである。同表で\*を付したものは乾燥期間中に乾燥面にひびわれを生じ、そのため自己応力は相当量解放されていると考えられる。

### 3.2 自己乾燥の影響

図7は、7日間の水中養生後直ちに密封した供試体の曲げ強度の経時変化を示したものである。乾燥を受けない場合でも、 $W/C=30\%$ では曲げ強度が低下している。 $W/C=30\%$ の場合、図5に示す供試体を水中養生終了直後に切断すると図8に示すひずみを生じ、断面内の自己応力分布を矩形で近似すると湿潤面で  $14.5\text{kgf/cm}^2$  の圧縮応力が生じていることになる。これは、組織が緻密で間隙水の浸透

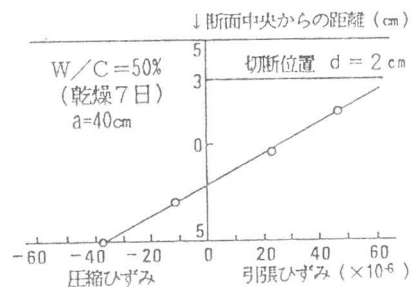


図-6 切断により生じるひずみ

表-3 自己応力の実測値 ( $\sigma_{\text{max}}$ )

W/C (%)	乾燥期間	乾燥幅 a (cm)				
		2	4	10	40	
30	3日	16.4	18.9	61.5	34.4*	30.3*
	7日	33.4	51.8	14.4*	15.9*	—
50	7日	15.6	21.1	28.4	—	29.0
	28日	—	—	—	—	30.4
70	7日	5.4	11.6	24.2	15.9	18.3
	14日	10.1	19.8	21.9	20.6	—
測定方法		切込み法			切断法	

\*: 乾燥収縮ひびわれ発生

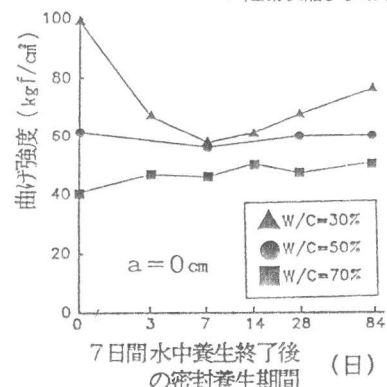


図-7 全面シール後の曲げ強度

速度が遅く、水中養生中に供試体の表層部のみが湿潤膨張を生じ内部の拘束を受けるためと考えられる。しかし、密封後には内部への水分浸透が継続するので表層部の圧縮応力は減少し、さらに、内部の自己乾燥を補い得ない状態にまで達するので曲げ強度の低下が大きくなると考えられる[6]。図9は、密封期間中のひずみの経時変化を示したものであるが、W/C=30%の場合には他の場合に比べ大きな収縮ひずみを生じており、自己乾燥の影響が大きいことを示している。

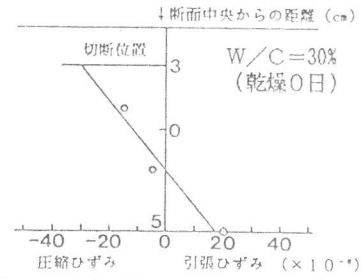


図-8 切断により生じるひずみ

### 3.3 断面内の応力分布による検討

図10および図11は、水セメント比と純引張強度および曲げ強度の関係をそれぞれ示したものである。純引張強度・曲げ強度はいずれも乾燥7日付近で極小値になり、水セメント比が低くなるに従い乾燥による低下率が大きくなっている。上記自己乾燥の影響も加算されるのであろう。

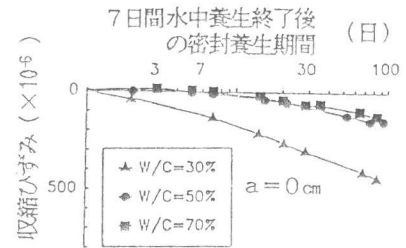


図-9 全面シール後の収縮ひずみ

乾燥による強度低下は、乾燥面における引張の自己応力に外力による応力が加算されるためと従来考えられている。そこで、自己応力の実測値を基に、断面内の応力分布を考慮して、乾燥を受けたモルタルの曲げ強度および純引張強度を以下のように算定することを試みた。

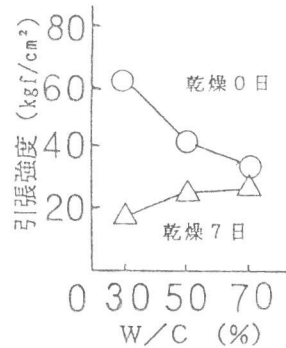


図-10 純引張強度の実測値

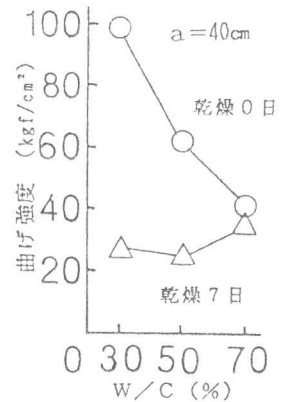


図-11 曲げ強度の実測値

破壊曲げモーメントの算定にあたり、次の仮定を設けた。

- ①引張応力下の応力-ひずみ関係は図12に示すものとする。
- ②圧縮応力下の応力-ひずみ関係に対してはフックの法則が成立する。
- ③自己応力は弾性限界以下とし、断面内分布は式(1)とし $\sigma_{max}$ の実測値を用いる。
- ④荷重による曲げ変形に対しては平面保持が成り立つ。

以上の仮定から、

$$\epsilon_{self} = \sigma_{self} / E \quad \dots\dots (2)$$

$$\epsilon_{load} = \frac{(1/2-k)h-y}{(1-k)h} \epsilon_b \quad \dots\dots (3)$$

$$\epsilon = \epsilon_{self} + \epsilon_{load} \quad \dots\dots (4)$$

$$\sigma = \begin{cases} E_c \epsilon & (\epsilon < 0) \\ E_t \epsilon & (0 \leq \epsilon < f_t / E_t) \\ 2 f_t - E_t \epsilon & (f_t / E_t \leq \epsilon < 2 f_t / E_t) \\ 0 & (2 f_t / E_t \leq \epsilon) \end{cases} \quad \dots (5)$$

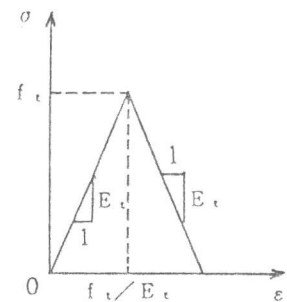


図-12 引張応力下の $\sigma - \epsilon$ 曲線

$$P = \int_{-h/2}^{h/2} b \sigma dy = 0 \quad \dots\dots (6)$$

$$M = \int_{-h/2}^{h/2} b \sigma y dy \quad \dots\dots (7)$$

ただし、 $\epsilon_{self}$  : 自己応力による弾性ひずみ

$\epsilon_{load}$  : 外力による弾性ひずみ

$\epsilon_b$  : 外力による下縁ひずみ

$k$  : 外力に対する中立軸比

$E_c$  : 圧縮静弾性係数

$E_t$  : 引張静弾性係数

$f_t$  : 純引張強度,  $b$  : 供試体幅

$\epsilon_b$  を仮定すると式(2)～(6)より $k$ が定まり、式(7)より曲げモーメント( $M$ )を求めることができる(図13参照)。図14は、以上のように求めた $\epsilon_b$ と $k$ および $M$ の関係を示したものである。同図における曲げモーメントの最大値として破壊モーメント $M_u$ が求まり、破壊時の中立軸比 $k_u$ も定まる。なお、 $f_t$ 、 $E_c$ および $E_t$ には水中養生終了直後における実測値(表4)を用いた。

図15はこのようにして求めた中立軸比 $k_u$ の計算値を、表5は同じく実測値を示したものであるが、いずれも乾燥を受けると $k_u$ は小さくなり、計算結果の妥当性を示していると考えられる。

図16は、乾燥面における自己応力と破壊曲げモーメントの実測値および計算値を示したものである。 $W/C=50\%$ 、 $70\%$ では破壊曲げモーメント $M_u$ の実測値はほぼ計算値と一致している。しかし $W/C=30\%$ では、実測値が計算値に比較してかなり小さくなっている。

前述した曲げ強度の場合と同じ仮定を用い、同様の方法で純引張強度の算定を行った結果を図18に示す(計算過程は図17を参照)。曲げ強度の場合と同様に $W/C=50\%$ および $70\%$ については、算定値が実測値と

概ね一致しているが、 $W/C=30\%$ の場合に実測値が大幅に小さくなっている。

以上のように、 $W/C=30\%$ の場合に曲げ強度や引

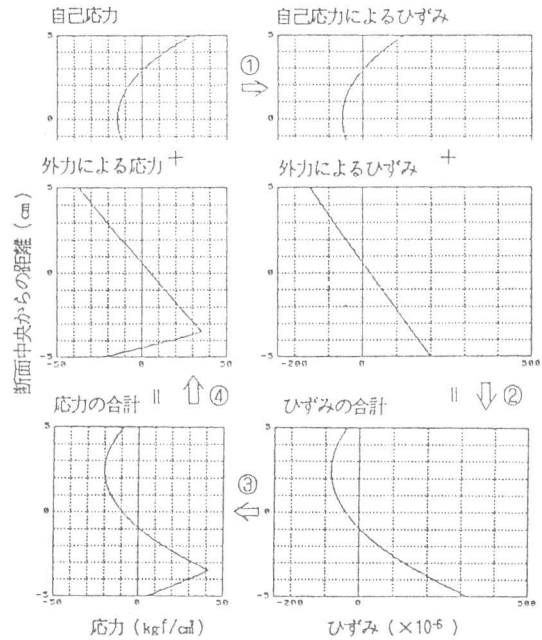


図-13 曲げ载荷時ひずみ・応力分布の計算経路(番号順)

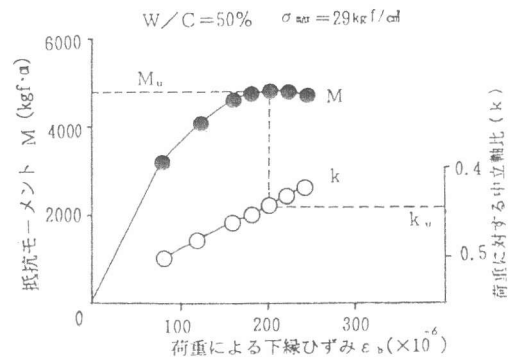


図-14  $\epsilon_b$  に対する  $k$  および  $M$  の計算値

表-4 モルタルの力学的特性(材令7日)

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 ×10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup>	
		純引張	割裂	圧縮	引張
30	673	61.9	45.9	2.63	2.54
50	428	41.8	38.4	2.40	2.44
70	250	33.3	22.5	1.75	1.74

表-5 破壊時の中立軸比( $k_u$ )の実測値

W/C (%)	乾燥期間 (日)	乾燥幅 (a)	
		0 cm	40 cm
30	3	0.51	0.44
	14	0.53	0.42
50	7	0.53	0.51
70	3	0.51	0.42
	7	0.51	0.48

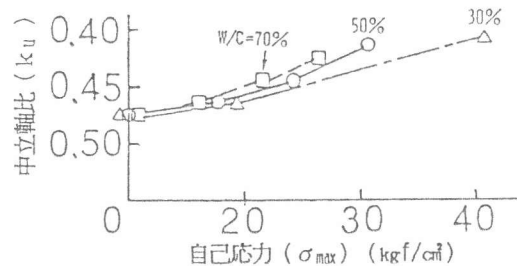


図-15 破壊時の中立軸比( $k_u$ )の計算値

張強度の実測値が算定値を大幅に下回ったのは、後述するように表面部のひびわれの影響が大きいと考えられる。その他の場合はひびわれの影響は無視できると考えられ、自己応力を考慮した断面内応力分布の検討により、曲げ強度および引張強度の評価が可能と考えられる。

なお、図12に示した応力-ひずみ曲線の形状は、 $W/C = 50, 70\%$ の場合に引張強度の算定値が実測値とほぼ一致するように、試算の結果決定されたものである。また、応力-ひずみ曲線の形状は破壊曲げモーメントの算定値には大きな影響を及ぼさなかった。

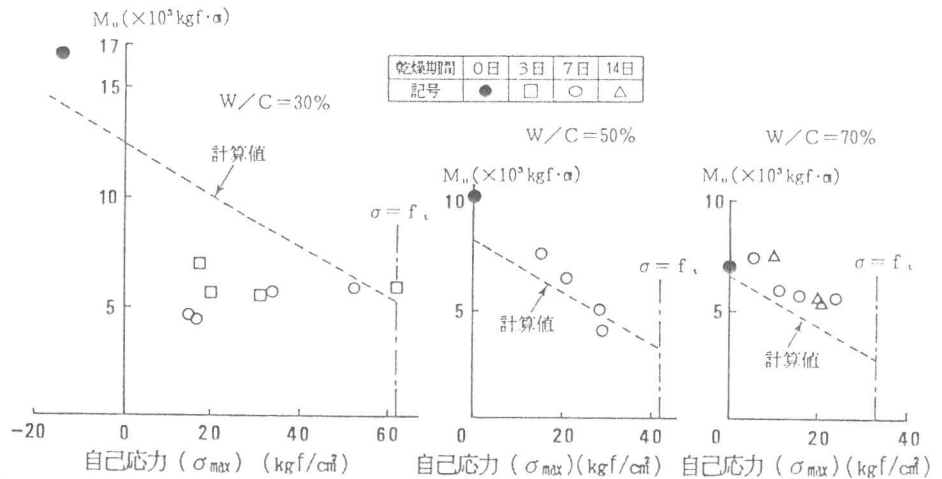


図-16 破壊曲げモーメント ( $M_u$ ) の実測値と計算値の比較

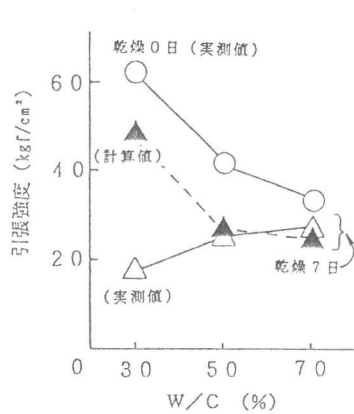


図-18 引張強度の実測値と計算値の比較

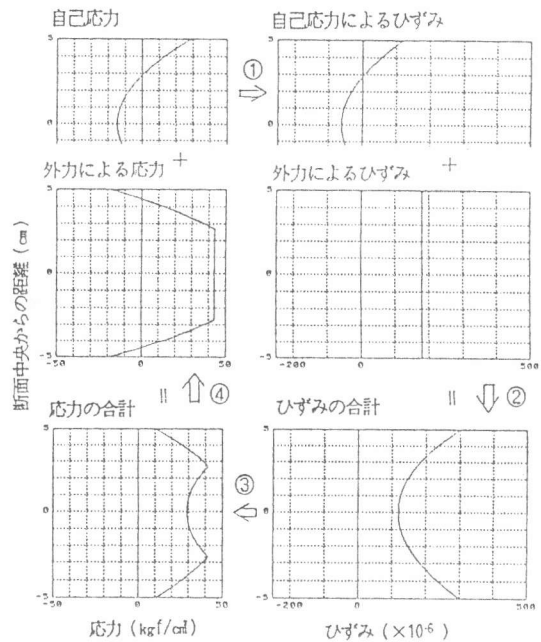


図-17 引張載荷時ひずみ・応力分布の計算経路(番号順)

### 3.4 表面部のひびわれに関する検討

図19は、2面乾燥を受けたモルタルの引張載荷時の応力-ひずみ曲線を示したものである。ひずみの測定は供試体中央の4側面に貼った電気抵抗線ひずみゲージ(30mm)で行なったが、供試体はいずれもひずみ測定区間の外側で破断した。 $W/C = 50\%$ および $70\%$ の場合には供試体の破断までほぼ均一なひずみを生じている。しかし $W/C = 30\%$ の場合では、ある応力以上になると乾燥面においてひずみの増加が停止している。

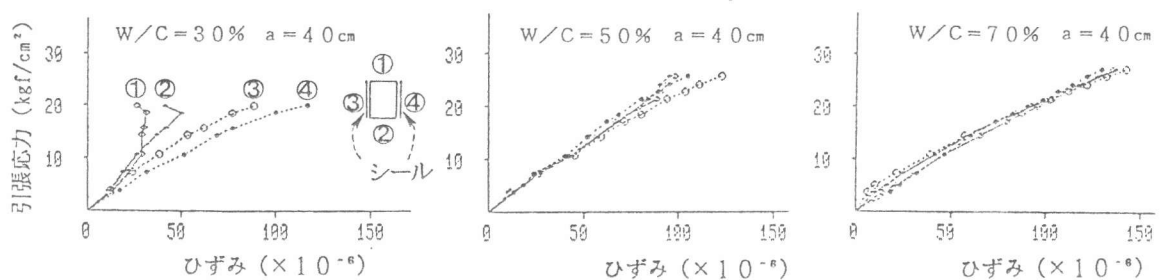


図-19 引張応力下の応力-ひずみ関係

曲げ載荷時アコースティック・エミッション (AE) を測定したが、 $W/C = 50\%$  および  $70\%$  では AE 発生状況に乾燥の有無により大きな差が認められなかった。これに対し、図20に示すように  $W/C = 30\%$  の場合では、乾燥を受けない場合は破断直前まで AE カウント数が少ないのに対して、2面乾燥を受けた場合は乾燥が進むに従い低応力レベルから AE カウント数が増加している。

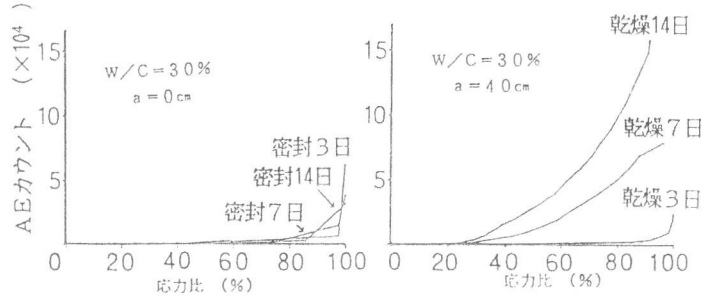


図-20 曲げ載荷時の AE 発生状況

以上のことから、 $W/C = 30\%$  の場合、乾燥面で低応力レベルから局所的な破壊が進行し破断にいたると考えられる。 $W/C = 30\%$ 、 $a = 40\text{cm}$  の場合、乾燥3日で乾燥面に供試体横方向に卓越するひびわれが生じた。乾燥面に蛍光粉末を懸濁させたアセトン吹き付けた後、供試体を切断しひびわれ深さを測定した結果、平均  $1.1\text{mm}$  ( $1.0 \sim 1.4\text{mm}$ ) であった。上述した破局ひびわれ (catastrophic crack) はこの表面ひびわれを起点にして進展したものと考えられ、従って、自己応力およびひびわれ深さを考慮した破壊力学的検討が有効であると考えられる。

#### 4. 結論

応力解放法による自己応力の実測値を基に、純引張強度および曲げ強度に及ぼす乾燥収縮の影響について検討した結果以下の結論が得られた。

- (1) 断面内分布の不均一な自己応力を受けるモルタルの純引張強度および曲げ強度は、表面部のひびわれの影響を受けない範囲では、断面内の応力分布を考慮することにより算定できる。
- (2) 表面部にひびわれを生じたモルタルでは、断面内応力分布の検討から求めた引張および曲げ強度の算定値は実測値よりかなり小さくなる。
- (3) 水セメント比の低いモルタルの純引張強度および曲げ強度は、水中養生終了後に乾燥を防いでも低下したが、これはセメントの硬化収縮に起因する自己乾燥の影響と考えられる。

なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金により行なわれたものであり、記して感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) D. P. H. Hasselman : Unified Theory of Thermal Shock Fracture Initiation and Crack Propagation in Brittle Ceramics, Journal of The American Ceramic Society, Vol. 52, No. 11, pp. 600-6041, 1969
- 2) A. Hillerborg, et al ; Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements, Cement and Concrete Research, Vol. 6, pp. 773-782, 1976
- 3) 田澤栄一：複合時元応力と材料強度，コンクリート工学年次講演会論文集，第一回，pp. 1-4 1979
- 4) 鈴木賢治：セラミックスの曲げ強度に及ぼす切削残留応力の影響，材料，第38巻，第429号，pp. 8-14, 1989
- 5) 宮沢伸吾，田澤栄一：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，土木学会論文集，第426号，V-14，pp. 121-129, 1991
- 6) 田澤栄一他：水和反応による硬化セメントペーストのマクロな体積減少，第45回セメント技術大会講演集，1991 (投稿中)