

論文

[1024] 部分乾燥を受けるモルタルの収縮応力分布の実測について

正会員 田澤栄一（広島大学工学部）

正会員 ○宮沢伸吾（広島大学工学部）

重川幸司（広島大学大学院）

1. まえがき

乾燥収縮応力や熱応力などの自己応力は、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る。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。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言えなかった。

本研究ではモルタルの乾燥収縮応力分布の実測を、供試体の切断または切込みにより応力を部分的に解放させ、このときに生じる弾性ひずみを測定することにより行ない、その有用性を示したものである。また、乾燥に伴うモルタルの曲げ強度の低下について、乾燥収縮応力の実測値に基づいて若干の検討を行なった。

表-1 モルタルの配合

W/C (%)	S/C	単位量 (kg/m ³)				
		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)

2. 実験概要

2-1. 使用材料および配合

セメントには早強ポルトランドセメント、細骨材には風化花崗岩系山砂（最大寸法5mm）を使用した。モルタル組織の緻密度を広範囲に変化させるために、W/C=30, 50, 70%の3種類とし、W/C=30%の場合にはシリカフュームを混入した（表-1）。表-2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（φ7.5×15cm供試体、1/3セカントモデュラス）、割裂引張強度（φ10×15cm供試体）を示したものである。

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

表-2 モルタルの力学的特性

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

2-2. 養生および乾燥条件

モルタル打設後2日で脱型し、材令7日まで20℃で水中養生した。乾燥させる場合はその後20℃、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、相対する二面に乾燥部分を設け、乾燥幅aを0, 1, 2, 4, 10, 40cmと変化させた。なお、乾燥面は型枠の鉛直面に接する面とした。供試体の乾燥面以外は、アルミ箔テープによりコーティングした。

2-3. 曲げ強度試験

図-1に示すように、乾燥幅aの異なる10×10×40cm供試体により曲げ強度試験を行なった。水中養生終了後、所

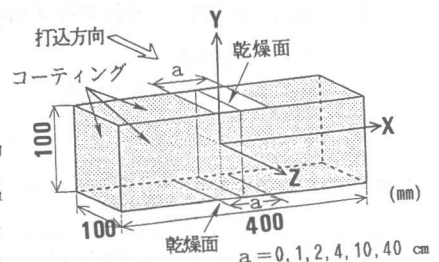


図-1 曲げ強度試験用供試体

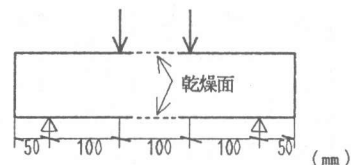


図-2 曲げ強度試験方法

定の乾燥期間を経た後、図-2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なった。

3. 結果および考察

3-1. 供試体の切断による乾燥収縮応力測定^{1) 2)}

乾燥幅 $a = 40\text{cm}$ の供試体の乾燥収縮応力分布を本方法により測定する。供試体は長手方向のみの乾燥収縮応力を持ち、応力は表面からの深さのみの関数であると仮定する。

図-3に示すように、 $4 \times 10 \times 40\text{cm}$ 供試体を乾燥面に平行な面で切断(割裂)すると、乾燥収縮応力が一部解放され弾性変形を生じる。図-4は、そのときに生じる供試体の長手方向ひずみの分布(10mmゲージで測定)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釣合いから、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超えない範囲で成りたつものである。

$$\sigma = 6 \sigma_{\max} \left\{ \left(\frac{Y}{h} \right)^2 - \frac{1}{12} \right\} \quad (1)$$

ここに、 $\sigma_{\max}$: 表面における乾燥収縮応力

h : 供試体高さ

Y : 断面中央からの距離

表-3 乾燥面における収縮応力の切断法による実測値

W/C (%)	乾燥期間	供試体 No.	$\sigma_{\max}$ (kgf/cm ²)	
				平均
30	3日	1	32.5	30.3
		2	28.0	
50	7日	1	29.7	29.0
		2	28.3	
70	7日	1	20.8	18.3
		2	15.7	

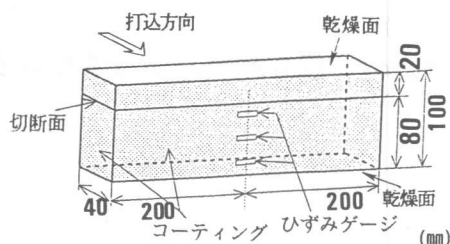


図-3 切断法による自己応力測定法

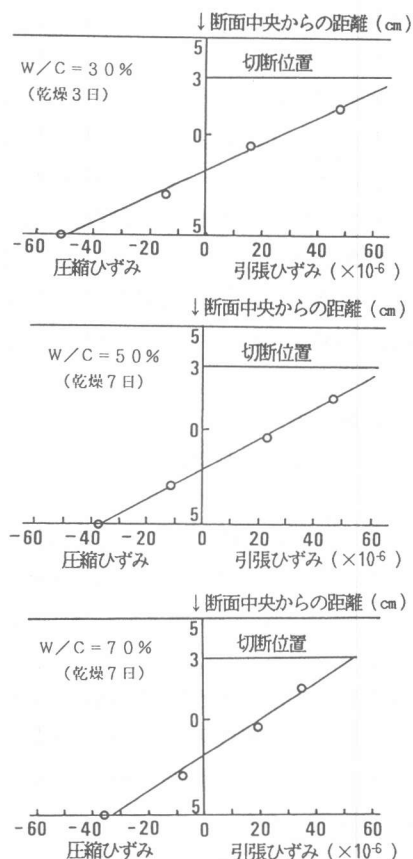


図-4 切断により生じるひずみ分布

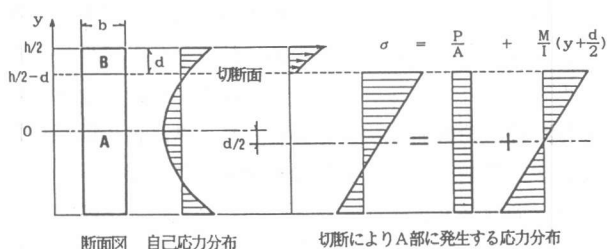


図-5 自己応力の算定方法の概念図

図-4に示す切断に伴う変形量の測定値から、図-5に示す考え方で $\sigma_{\max}$ を決定することができる(詳細は文献2)による)。表-3は、本方法により測定された $\sigma_{\max}$ を示したものである。表より、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ものと考えられる。

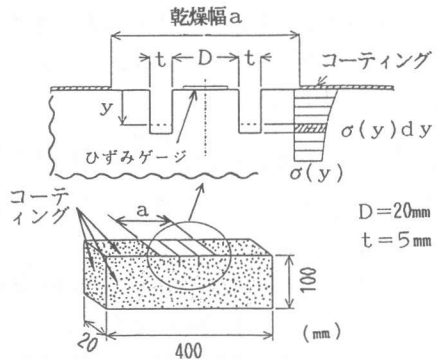


図-6 切込み法による自己応力測定法

3-2. 供試体の切込みによる乾燥収縮応力測定³⁾

乾燥幅 $a=2\sim 10\text{cm}$ の供試体については、乾燥収縮応力が供試体長手方向に著しく変化するので、前章で示した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、2面乾燥($a=40\text{cm}$)あるいは部分乾燥($a=2\sim 10\text{cm}$)を受けるモルタルの露出面付近の乾燥収縮応力を以下に示す切込み法により測定した。

図-6に示すように、供試体に表面から切込みを入れていき、応力の解放された部分をつくる。そのときの解放された部分の表面ひずみを電気抵抗線ひずみゲージ(ゲージ長5mm)で測定した。ダイヤモンドカッタを用いて切込むため熱が発生するが、自然冷却により熱の影響がなくなってからひずみ測定を行なった。この冷却時間は温度およびひずみの測定値から10~15分とした。図-7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込んでいくと収縮ひずみが生じ、その値は切込み深さとともに増加するが、深さが1~2cm以上になると増加は停止する。この傾向は図-8に示すFEM二次元弾性解析の結果ともほぼ一致した(水分の移動は拡散方程式に従うとし、乾燥面は熱伝導における対流熱伝達境界と類似であるとした²⁾)。そこで、この

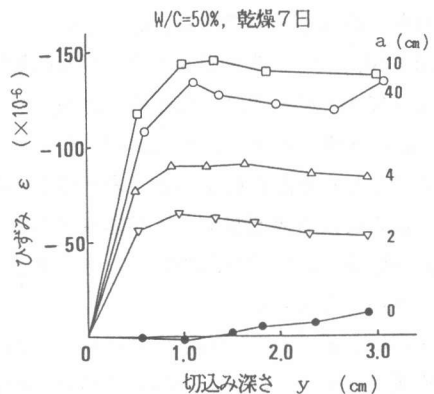


図-7 切込みにより生じるひずみ

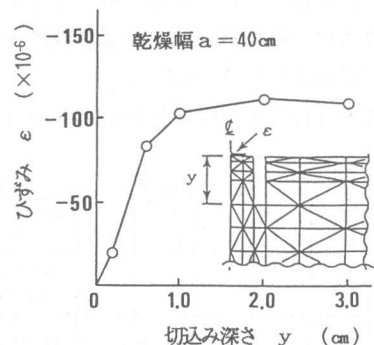


図-8 切込みにより生じるひずみ (FEM解析)

ひずみの増加過程に着目して以下のように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 $y \leq 2\text{cm}$ の範囲について次式で回帰した。

$$\epsilon(y) = y \cdot \exp(p - qy) \quad (2)$$

ここに、 p, q : 定数

図-6に示すように、いま深さ y まで切込みが進んでいるとし、さらに dy の切込みを行なった場合、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ひずみを $d\epsilon(y)$ とすると E を弾性係数として次式が成立すると考える。

$$d\varepsilon(y) = K_y \cdot (1/E) \cdot \sigma(y) dy \quad (3)$$

$$d\varepsilon_0(y) = K_y \cdot (1/E_0) \cdot \sigma_0(y) dy \quad (4)$$

式(3)(4)より

$$\sigma(y) = \frac{E d\varepsilon/dy}{E_0 d\varepsilon_0/dy} \sigma_0(y) \quad (5)$$

ここに、 K_y : D , t , y およびゲージの種類、配置に依存する定数で、モルタルの配合とは無関係(ただし、 D , t , y は図-6 参照)

添字 0 : 応力分布が既知の供試体を示し、ここでは $W/C=50\%$, $a=40\text{cm}$, 乾燥 7 日のものとした。

$\sigma_0(y)$ として切断法により求めた応力分布を用い、切込み法による測定値 $\varepsilon(y)$ および $\varepsilon_0(y)$ を式(2)で表わせば、式(5)により $a=2\sim 10\text{cm}$ 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。結果を図-9 に示す。また、乾燥面における乾燥収縮応力 ($\sigma_{\max}$) を図-10 に示す。乾燥幅 $a=2\sim 10\text{cm}$ の範囲では、乾燥幅 a が小さくなるほど $\sigma_{\max}$ は小さく、また $a=10\text{cm}$ と 40cm 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、 $W/C=70\%$, $a=40\text{cm}$ の場合、切込み法による $\sigma_{\max}$ の測定値は前章で示した切断法による値(表-3)の 76% であった。

切込みによる表面ひずみは切込み深さ $1\sim 2\text{cm}$ 程度で最大値 ($\varepsilon_{\max}$) をとるが、このとき表面の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。

$$\sigma_{\max} = E \times \varepsilon_{\max} \quad (6)$$

図-11 は、式(5) から求めた $\sigma_{\max}$ と、式(6) から求めた $\sigma_{\max}$ (図-10) との比較をすべての乾燥幅 ($a=2\sim 40\text{cm}$) の場合について示したものであるが、両者は概ね一致している。

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。

モルタルの静弾性係数は応力の正負(圧縮・引張)や応力レベル、さらにモルタルの含水率に

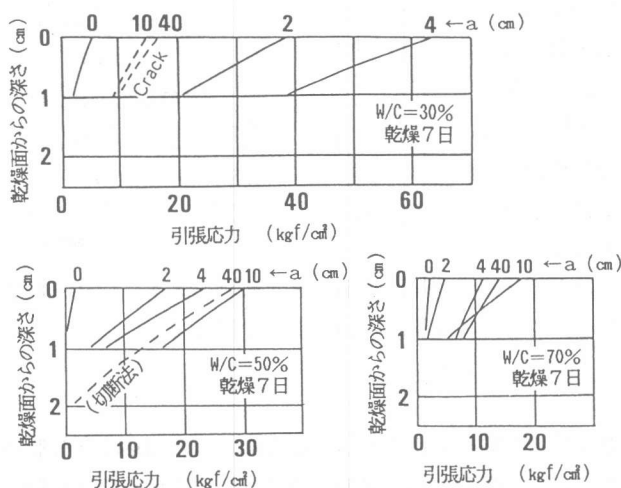


図-9 切込み法により求めた乾燥収縮応力

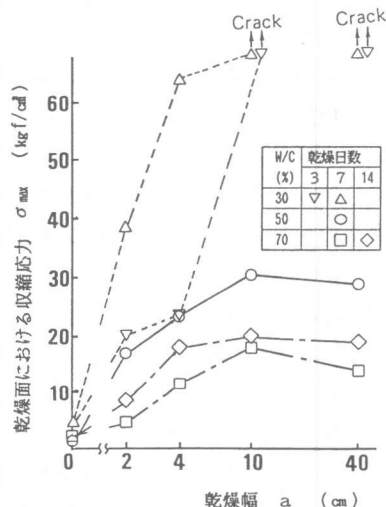


図-10 切込み法により求めた表面の乾燥収縮応力 ($\sigma_{\max}$)

影響を受けるが、本測定法の適用性を確認することを目的としたため、簡便性を考慮して静弾性係数は一定値とした。なお、乾燥期間中の水和の進行の影響は、早強セメントを用いており比較的小さいため無視した。

3-3. 乾燥収縮がモルタルの曲げ強度に及ぼす影響

乾燥収縮応力の影響を顕著に受けるものの代表的な例として、曲げ強度が挙げられる。ここでは、切断法および切込み法により求められた実測値に基づいて、乾燥収縮応力と曲げ強度の低下率との関係について一考察を加えた。

図-12は、モルタル供試体の曲げ強度と乾燥幅 a の関係を示したものである。いずれの配合でも、乾燥幅 a が大きくなる程曲げ強度の低下率が大きくなっている。

ぜい性材料の曲げ強度の試験値は、等モーメント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-13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⁴⁾。

$$f_b = f_0 \cdot \Gamma(1 + 1/m) \cdot g(m, \lambda) / V^{1/m} \quad (7)$$

ただし、

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

ここに、 m : 均一性係数、 f_0 : 強度の基準値、

λ : 載荷方法を示す係数(図-13参照)、

V : 供試体の体積

図-14は、7日間的水中養生終了直後の $4 \times 4 \times 16$ 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-4 のように求められる⁵⁾。

本実験では、等曲げモーメント区間は 10 cm で一定であるが、乾燥収縮応力が最大の引張応力を示す区間はほぼ乾燥幅 a とともに変化する。従って、図-12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、乾燥幅 a が 1 cm の場合を規準にして等曲げモーメント区間長さの影響を式(7)により推定すると表-4 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、従って、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。

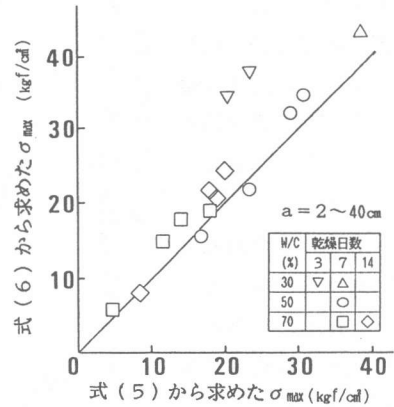


図-11 式(5)から求めた $\sigma_{\max}$ と式(6)から求めた $\sigma_{\max}$ の比較

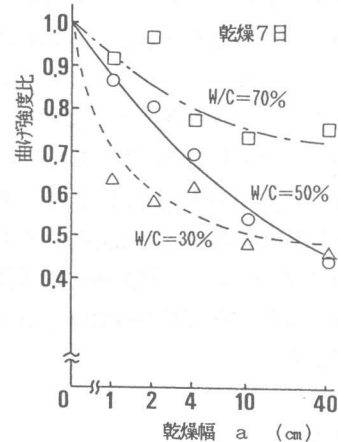


図-12 乾燥幅と曲げ強度の関係

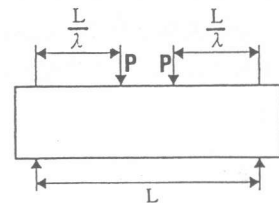


図-13 式(7)中の λ の定義

表-4 等曲げモーメント区間長さ f_b / f_0 の関係

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

図-15は、モルタルの水中養生終了直後の引張強度 (f_t) に対する乾燥面における乾燥収縮応力 (σ_{max}) の比 (σ_{max}/f_t) と曲げ強度比 (乾燥幅 = 0 cm の場合の曲げ強度に対する割合) の関係を示したものである。ここに、 σ_{max} は切断法および切込み法による測定値とし、乾燥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。いずれの配合についても σ_{max} が大きい程曲げ強度の低下率が大きいが、 σ_{max}/f_t が同一でも曲げ強度の低下率はモルタルの W/C により異なる。また、 $\sigma_{max}/f_t = 1$ の場合でも、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、温度応力についての実験結果⁶⁾と同様に、自己応力と外力による応力の単純な重ね合せから求まる最大応力が引張強度に達したときに破壊するとする従来の破壊規準は成り立たないことを示している。

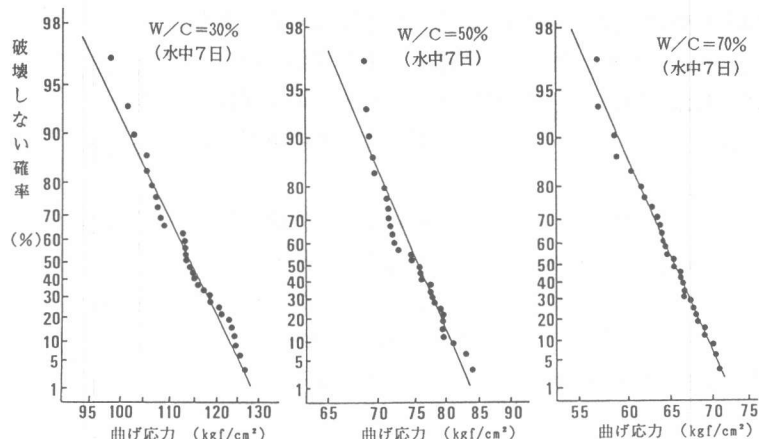


図-14 曲げ強度の確率分布

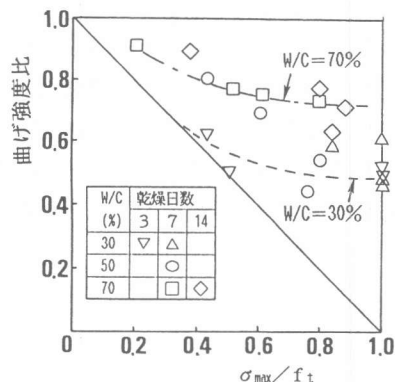


図-15 (σ_{max}/f_t) と曲げ強度比の関係

4. 結論

従来、セメント系材料内部に不均一に分布する自己応力は実測が困難とされてきたが、部分的に応力を解放させ生じる弾性ひずみを測定することにより実測できることが明らかとなった。すなわち、2面乾燥を受けるモルタル供試体の乾燥収縮応力分布は切断法により、また部分乾燥を受けるモルタル供試体の表面付近の乾燥収縮応力は切断法と切込み法の併用により実測することができる。

参考文献

- 1) 米谷茂：残留応力の発生と対策，養賢堂，1975
- 2) 田澤栄一他：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，10-2，1988
- 3) Von Helmut Wolf et al: Das Ring-Kern-Verfahren zur Messung von Eigenspannungen und seine Anwendung bei Turbinen und Generatorwellen, Archiv für das Eisenhüttenwesen, 42, 1971
- 4) S. Jayatilaka : Fracture of Engineering Brittle Materials, Applied Science Publishers LTD, 1979
- 5) R. W. Davidge (鈴木弘茂他訳)：セラミックスの強度と破壊，共立出版，1982
- 6) 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方法に関する研究，清水建設研究報告別冊，第16号，1986