

論文

[1044] モルタルの曲げ破壊に及ぼす自己応力の影響

正会員 ○宮沢伸吾 (広島大学工学部)

正会員 田澤栄一 (広島大学工学部)

柏木 勉 (榊大林組)

重川幸司 (広島大学大学院)

1. まえがき

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せから求まる最大応力が強度であるとして求められてきたが、乾燥収縮応力や温度応力と外力の重ね合せの実験結果^{1) 2)}などから、この方法は再検討する必要があることが明らかとなった。

本研究では局部的に乾燥を受けるモルタル供試体について、乾燥部分の面積を変化させることによって断面内の自己応力分布形状を変化させ、外力系から生じる曲げ応力との重ね合わせ効果を検討し、自己応力の作用範囲と曲げ強度の関係を証査した。すなわち、相対する二面から部分乾燥を受けるモルタル供試体を作成し、曲げ強度試験、除去法による自己応力の実測、FEMによる二次元応力解析などを行ない、それらの相互関係より乾燥収縮応力場が曲げ破壊条件に及ぼす影響について検討した。

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、また標準型A E減水剤を使用した。モルタルの配合は $W/C = 0.50$, $S/C = 2.5$ とした。材令7日における割裂引張強度は 27.2 kgf/cm^2 、また静弾性係数は $2.4 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ である。

2-2. 供試体

図-1は、曲げ強度試験用供試体を示したものである。相対する二面に乾燥部分を設け、乾燥幅 a を 1, 2, 4, 10, 40 cm 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。

2-3. 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°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。供試体の乾燥面以外は、布製テープ、エポキシ樹脂系接着剤、サラン樹脂シートの順でコーティングした。

2-4. 曲げ強度試験

所定の乾燥期間を経た後、図-2に示すように、乾燥面上・下縁として、JIS A 1106により曲げ強度試験を行なった。

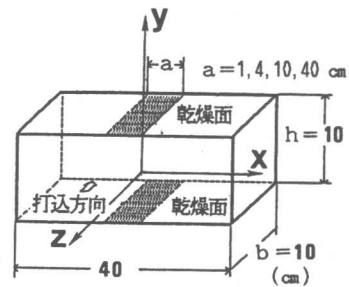


図-1 曲げ強度試験用供試体

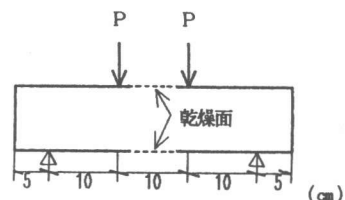


図-2 曲げ強度試験方法

2-5. 除去法による自己応力測定

自己応力は断面内で釣合っているため、供試体の一部を切断すれば新たな釣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分布を求める方法、すなわち除去法により二面乾燥を受けるモルタル（乾燥幅 $a = 40 \text{ cm}$ ）の自己応力の測定を行なった^{1) 3)}。図-3

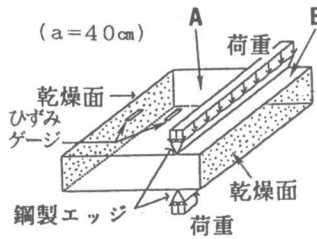


図-3 供試体の切断方法

に示すように供試体を乾燥面と平行な面でA部とB部に切断し、A部の軸方向（x方向）のひずみ分布の切断に伴う変化量を、両側面の三ヶ所および乾燥面に貼付した電気抵抗線ひずみゲージ（ゲージ長：10mm）により測定した。なお切断を容易にするために供試体の幅を4cmとした他は曲げ強度試験用供試体と同一寸法とした。

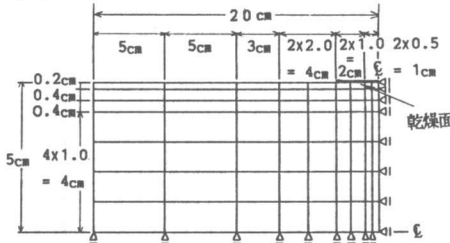


図-4 FEM解析モデル

3. FEMによる脱水率分布および応力解析

局部的に乾燥を受けるモルタルの自己応力分布を把握するために、以下のように有限要素法（FEM）による解析を行なった。

乾燥に伴うモルタル中の水分の移動が拡散方程式に従うと仮定し、また本実験の乾燥条件を考慮して水分の移動はxy平面内で生じるとし、FEMによる二次元非線形非定常解析を行なった。さらにFEMによる自己応力の二次元弾性解析を行ない、除去法による実測値と比較した。図-4は本解析モデルを示したものである。

位置（x, y）、時刻tにおける脱水率をw（モルタル質量に対する比）、拡散係数をkとし次式が成立するとした。

$$k \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial w}{\partial t}$$

ここで、座標のとり方は図-1参照。

供試体の乾燥面における境界条件は、熱伝導における対流熱伝達境界と類似であると考え、次式で与えられる。

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{f}{k} (w_{\max} - w)$$

ここで、f：表面係数 w_{\max} ：最終脱水率

kは含水率に依存するものとし図-5に示す通りとし、またf

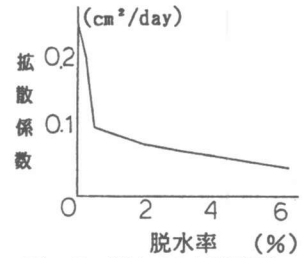


図-5 脱水率と拡散係数の関係

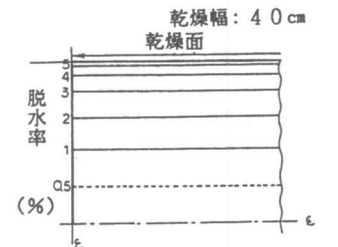
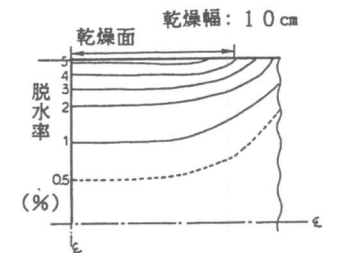
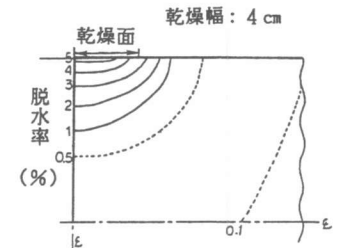
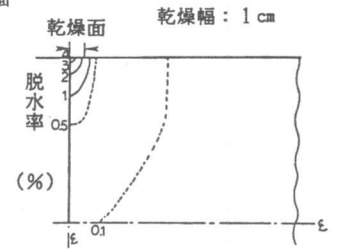


図-6 XY平面内の脱水率分布（FEM, 乾燥期間：28日）

および w_{max} は、 $f = 0.2 \text{ cm/day}$ 、 $w_{max} = 6.2\%$ とした。図-6は本解析から求められた $x-y$ 平面内の脱水率分布を示したものである。

脱水率分布の解析に引続いて、応力分布を有限要素法による二次元弾性解析により求めた。モルタルのクリープ(%)は有効弾性係数により考慮し、非拘束自由収縮ひずみは脱水率に比例すると仮定し、乾燥幅 $a = 40 \text{ cm}$ の場合について自己応力の解析値と除去法による実測値がほぼ一致するように定めた。

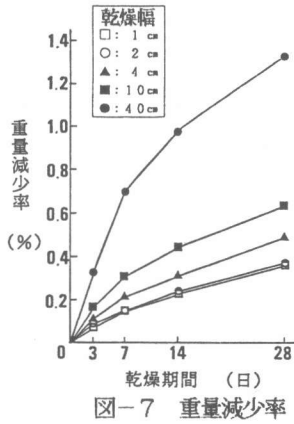


図-7 重量減少率

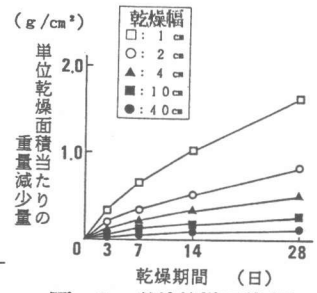


図-8 単位乾燥面積当たりの重量減少率

4. 結果および考察

図-7は部分乾燥を受けるモルタルの重量減少率、図-8は単位乾燥面積あたりの重量減少率の測定値を示したものである。乾燥幅 a が小さい程単位乾燥面積あたりの逸散水量が大きくなっている。これは、毛細管流動による三次元的な流れにより乾燥面付近に水分補給が生じたためと考えられる。

図-9は、乾燥面における平均収縮ひずみの実測値と FEM 解析値の比較を示したものである。図中の実測値は、測定区間 10 cm としたコンタクトチップによる測定値を用い、図-10に示した解析による分布形状を参考にして算出したものである。両者は概ね一致しており、本解析結果の妥当性を示している。これらの結果より、同一乾燥期間で比較すると、乾燥幅が小さい程、乾燥面での収縮ひずみは大きくなる傾向が認められた。

乾燥幅 $a = 40 \text{ cm}$ の場合について、乾燥収縮によりモルタルに生じる自己応力の測定を除去法により行なった。図-11は供試体の切断により生じるひずみ分布の測定値を、図-12はこの結果をもとに算出した自己応力分布を FEM 解析値と共に示したものである。ここでは、乾

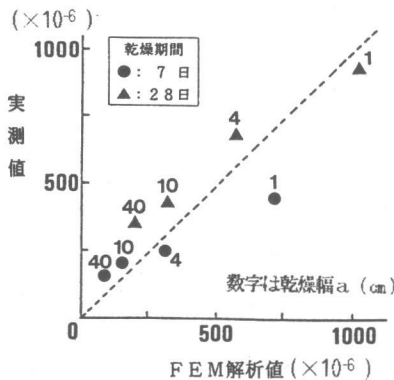


図-9 乾燥面の平均乾燥収縮ひずみ

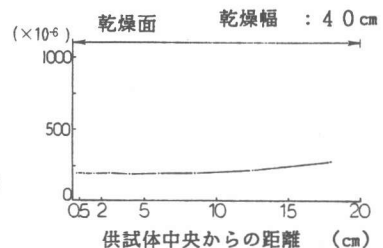
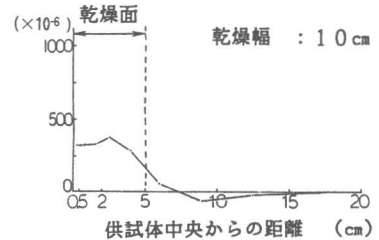
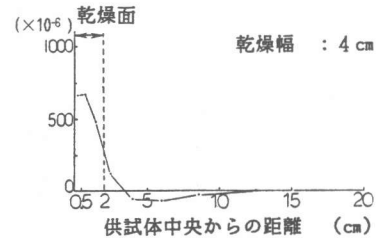
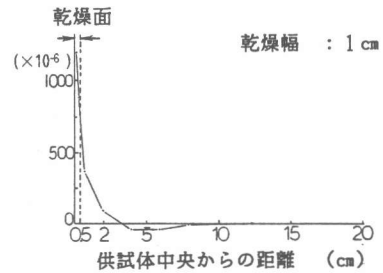


図-10 乾燥面の乾燥収縮ひずみ分布 (FEM)

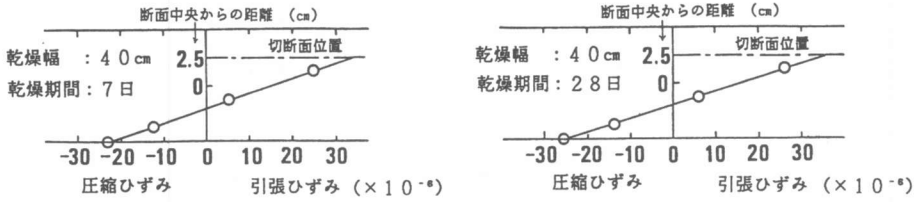


図-11 供試体切断により生じるひずみ

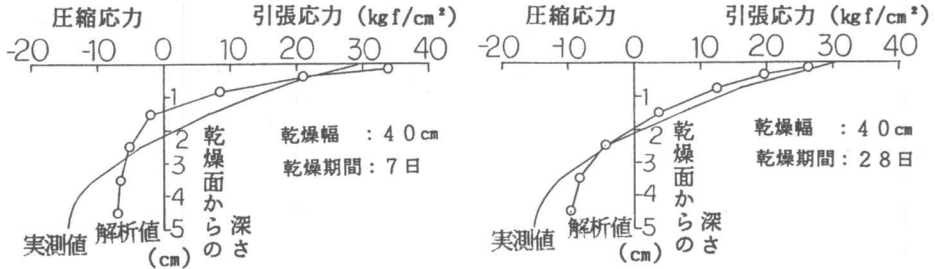


図-12 自己応力の断面内分布 (実測値と解析値の比較)

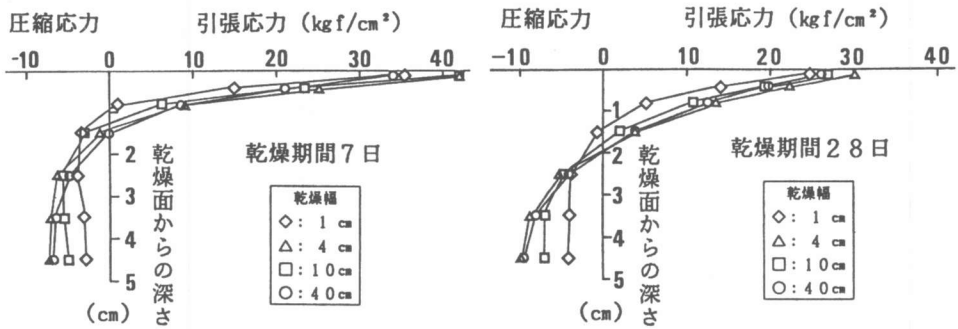


図-13 自己応力の断面内分布 (FEM)

乾燥条件の対称性を考慮して応力分布は二次曲線で近似した。乾燥期間28日においては、実測値と解析値はほぼ一致している。乾燥期間7日の場合に両者がかなり異なっているが、これは、乾燥初期においては自己応力分布を二次曲線で近似したことによる誤差が大きくなったためと考えられる。

図-13は、部分乾燥を受けるモルタルの乾燥面中央における断面内の自己応力分布の解析値を示したものである。乾燥面における引張の自己応力の最大値は、図-14にも示すように乾燥幅(a)には大きな影響は受けないようである。しかし、自己応力の分布形状はaにより変化し、aが小さい程乾燥面から内部に向かって引張応力の減少する程度が大きく、すなわち引張応力の作用する領域が小さくなる傾向が認められる。

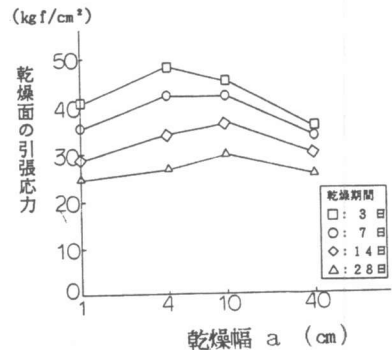


図-14 乾燥面における自己応力 (FEM)

図-15は、乾燥面付近の供試体長手方向の自己応力分布のFEM解析値を示したものである。いずれの場合も自己応力は乾燥面において局所的に大きく、コーティング面では急激に減少している。

図-16, 17は部分乾燥を受けるモルタルの曲げ強度の測定結果を示したものである。図-16は曲げ強度の経時変化を示したものであるが、乾燥開始から7日までは曲げ強度は乾燥の進行とともに低下し、その後はしだいに回復している。また全面コーティングを施した供試体 ($a = 0 \text{ cm}$) は強度増進を示していないことから乾燥期間中のセメントの水和進行に伴う強度増進の影響は無視できるといえる。

図-17から、曲げ強度は乾燥幅 (a) によって変化し、 a が大きい程曲げ強度の低下率は大きくなることが明らかとなった。曲げ試験時の破断面の位置についても、 $a = 1 \text{ cm}$ の場合は乾燥面の範囲内で破断することはほとんどなく、一方、 $a = 4, 10 \text{ cm}$ では、ほとんどが乾燥面の範囲内で破断した。

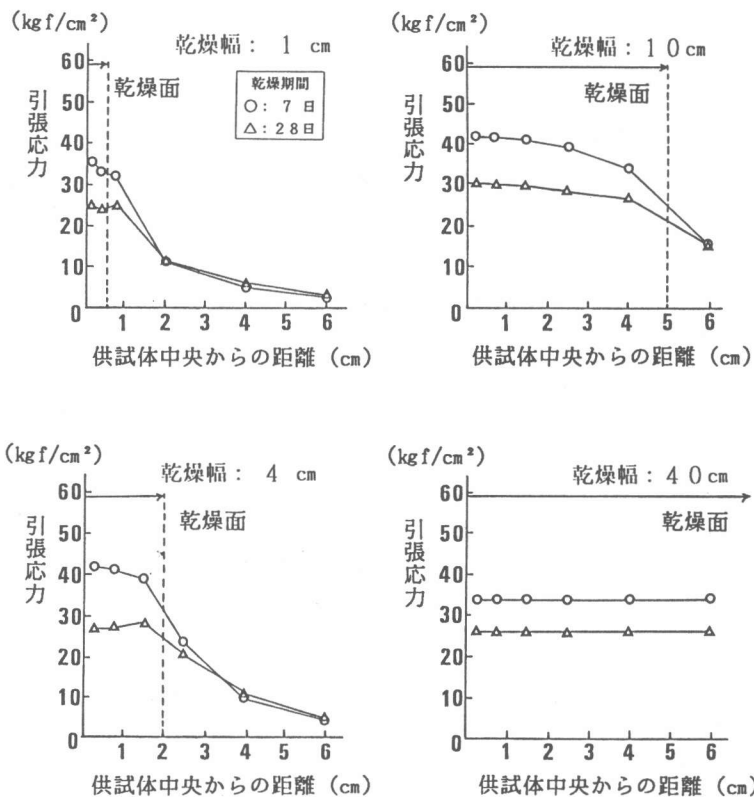


図-15 乾燥面付近の自己応力分布 (FEM)

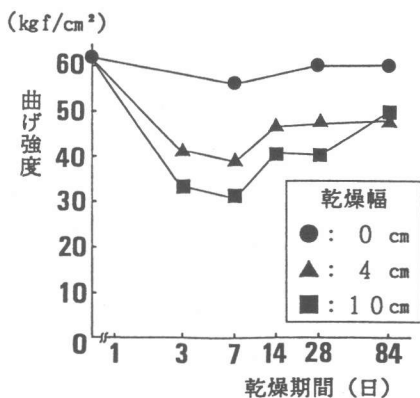


図-16 曲げ強度の経時変化

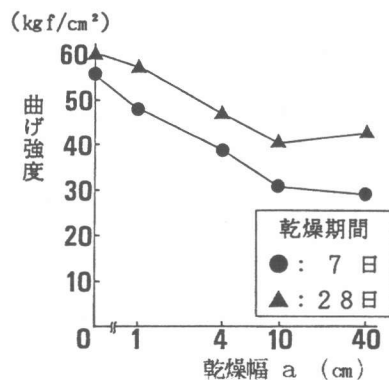


図-17 乾燥幅と曲げ強度の関係

図-18は、FEM解析より求めた乾燥面における引張の自己応力と曲げ強度試験値の低下率との関係を示したものである。乾燥面に生じている引張の自己応力の大きさが同じでも、曲げ強度の低下率は乾燥幅すなわち自己応力の分布形状により大幅に異なっている。

図-19は、自己応力の分布形状を考慮するためのひとつの方法として、自己応力が引張域にある領域の大きさに着目し、

$$\int_{h/2-d}^{h/2} b \cdot \sigma_{self} dy$$

と曲げ強度の低下率の関係を示したものである。なお自己応力にはFEM解析値を用いている。同図より、両者の関係は乾燥幅すなわち自己応力の分布形状に大きな影響を受けず、比較的よい相関を示している。

以上のことから、乾燥による自己応力を受ける場合、曲げ破壊条件は自己応力と外力による応力の単純な重ね合せによる最大応力では決定されず、自己応力の分布形状をも考慮して決定される必要があると考えられる。

6. 結論

部分乾燥を受けるモルタルにおいて、乾燥幅が変化しても乾燥面に生じる引張の自己応力はほぼ同一の大きさとなるが、曲げ強度の低下率は乾燥幅が大きい程大きくなった。従って、乾燥収縮応力場において、外力の重ね合せによる最大応力のみから破壊条件を求めるのは不適當であり、自己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の確立が必要になることが明らかとなった。

なお、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り行なわれたことを記し、感謝の意を表する。

【参考文献】

- 1) 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講演会論文集，1988
- 2) 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
- 3) 米谷茂：残留応力の発生と対策，養賢堂，1975

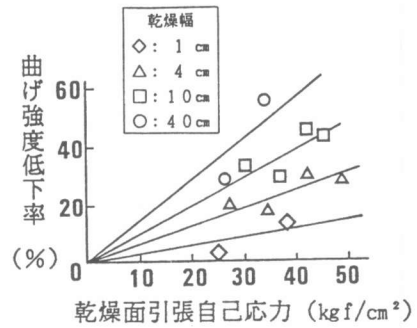


図-18 乾燥面自己応力と曲げ強度低下率の関係

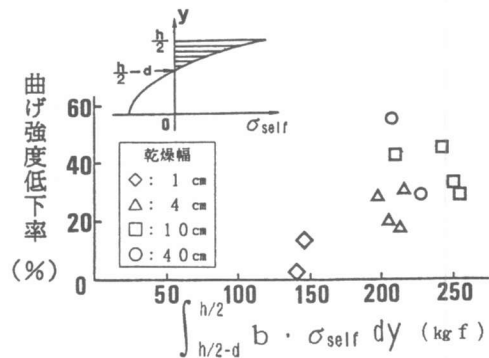


図-19 $\int_{h/2-d}^{h/2} b \cdot \sigma_{self} dy$ と曲げ強度低下率の関係