

論文 デジタル画像相関法を用いたモルタルの収縮による応力発生の評価

大野 又稔*¹・渡辺 健*²・野間 康隆*³

要旨：乾燥収縮試験および荷重試験の際のモルタル試験体の表面ひずみを、デジタル画像相関法により非破壊・非接触で算出し、試験体表面のひずみ分布を算出した。中心に鋼材リングを配置したモルタル試験体のひずみより、厚肉円筒理論を用いて有効弾性係数法の低減係数 ϕ を求め、デジタル画像相関法による試験体表面のひずみ分布に適用することで、試験体表面の残留応力分布を求めた。また算出された残留応力分布を用いることで、乾燥収縮試験での拘束体界面の残存応力の影響により生じる、荷重試験でのひび割れ発生荷重の差を考慮できることを確認した。

キーワード：デジタル画像相関法, 厚肉円筒理論, ひずみ分布, 応力分布, 乾燥収縮, ひび割れ発生

1. はじめに

コンクリート構造物では、水分が逸散することなどによりセメントペーストおよび骨材の収縮に起因した体積変化が生じ、拘束や外力の影響によりひび割れや変形が発生する。また、コンクリート中に応力が発生することは、強度に対する応力の余裕度が低下することから、RC部材の耐荷力の低下にもつながる可能性がある¹⁾。

複合材料であるコンクリート部材の収縮では、例えばセメントペーストと骨材や鋼材とのひずみ差により、材料の界面に集中して応力が発生するといった、応力やひずみが不均一に発生する。このRC部材に残存する応力の分布を把握することが重要となる。

本研究は、セメント系材料に発生する応力を、ひずみを計測することで推定することを目的とした。具体的には剛性が明らかな鋼製リングを用いてモルタルに発生する応力やひずみを推定した。拘束条件が異なる試験体において発生するひずみの差分に着目することで得られるモルタルの有効弾性係数から応力状態を推定した。そして、この応力状態が荷重中のひび割れ発生に与える影響について検討したものである。モルタルに発生する微小

なひずみを、局所情報を含めて把握するために、ひずみゲージのほかに、対象の表面に発生する変形を測定可能なデジタル画像相関法を使用している。

2. 実験概要

2.1 試験体概要および養生

図-1 に、本研究で用意した試験体を示す。100×100×10mmの平板である試験体の中心には、外径が30mmである発泡スチロール、1mm厚あるいは3mm厚の鋼製リングが配置されている。使用したモルタルの製作では、普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm³)、標準砂(表乾密度:2.64g/cm³, 吸水率:0.42%)、ポリカルボン酸エーテル系高性能AE減水剤を使用した。水セメント比は0.40, 水:セメント:細骨材の重量比は2:5:10

表-1 モルタル配合

項目	W/C (%)	単位量(kg/m ³)		
		水	セメント	細骨材
		W	C	S
モルタル	40	271	678	1356

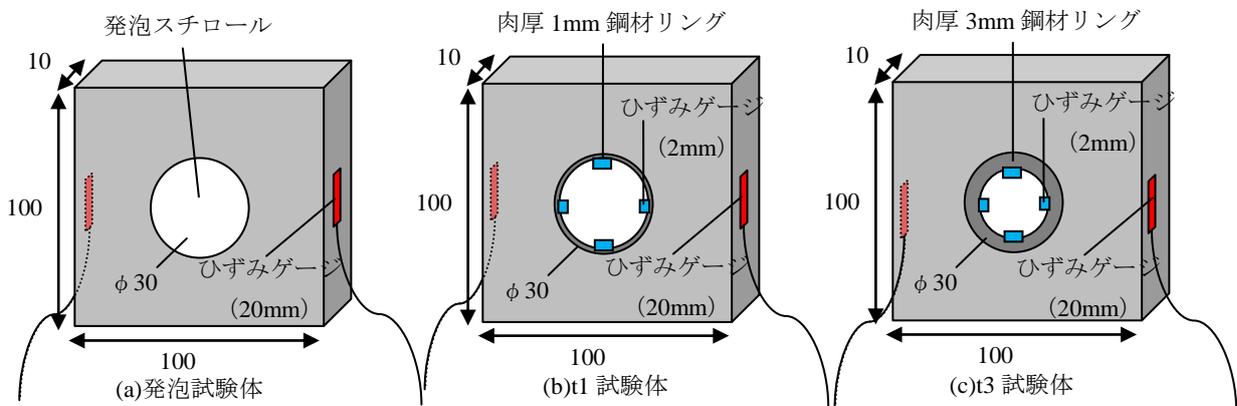


図-1 試験体寸法

*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 修士(工学) (正会員)

*2 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 博士(学術) (正会員)

*3 安藤ハザマ技術研究所 土木研究部 構造・耐震チーム 博士(学術) (正会員)

である。試験体は気温 20℃、相対湿度 60%で管理された恒温恒湿室で打設した後に封緘状態で静置し、材齢 1 日で脱型、材齢 28 日まで静置した。

図-2、図-3 に、材齢にともない増加する圧縮強度、割裂引張強度、静弾性係数を示す。これは、試験体と同一バッチのモルタルを用いて製作し、養生した円柱試験体(φ50×100mm)を用いて計測したものである。

2.2 荷重試験

図-4 に、圧縮荷重試験の概要を示す。材齢 28 日後の試験体を台座に設置し、荷重板との間にはテフロンシートを挿入することで摩擦を低減した。

2.3 計測項目

図-1 に示す通り、ゲージを試験体の側面(測定長 20mm)、鋼材リングの内側(測定長:2mm)に貼付し、養生および荷重において、ひずみを測定した。なお、荷重では、荷重および上下の荷重板間の変位も測定した。

また、養生および荷重中、試験体の表面に発生するひずみを、デジタル画像相関法²⁾を用いて測定した。図-5 に示す通り測定面に模様をつけ、これを追跡することで面内の変位を計測するものである。本研究では、探索点の領域を 100×100 画素、探索点の間隔を 50 画素、ひずみの出力を 2mm 間隔とした。さらに、計測分解能を高めるために、試験では、デジタル一眼レフカメラ(5760×3840 画素、5616×3744 画素)を用い、レンズのゆがみの補正、フリッカの影響の低減を考慮するために LED 照明を用いるなど、既往の成果に倣い工夫している³⁾。

乾燥収縮試験のひずみは、乾燥開始直後をインシヤルとした。しかし、t1 試験体の乾燥開始直後では、試験体表面の水分逸散による輝度値分布が大きく変化したため、

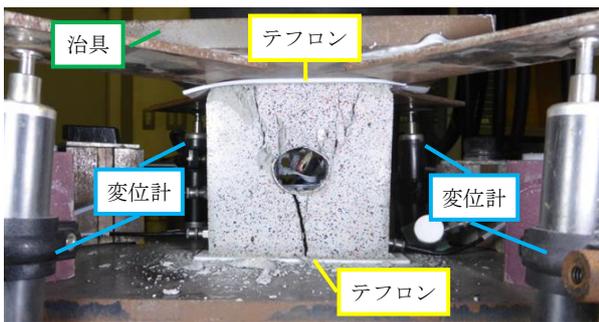


図-4 圧縮荷重試験

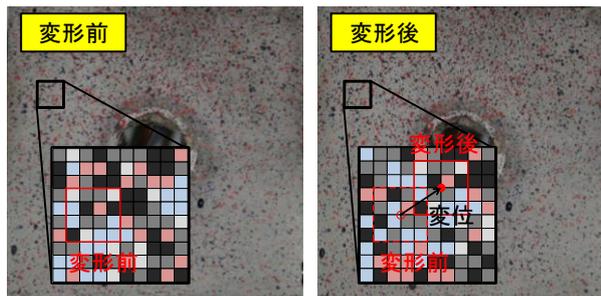


図-5 デジタル画像相関法

画像相関法による変形後の探索点位置が定まらず、適切に計測できなかったため、乾燥開始 6 時間後を計測開始点とした。一方、荷重試験では、荷重開始前を初期値とし、ひずみを算出した。

3. 乾燥収縮試験結果

3.1 ひずみゲージによる検討

(1) ひずみ測定結果

図-6、図-7 にゲージを用いて測定した、試験体側面

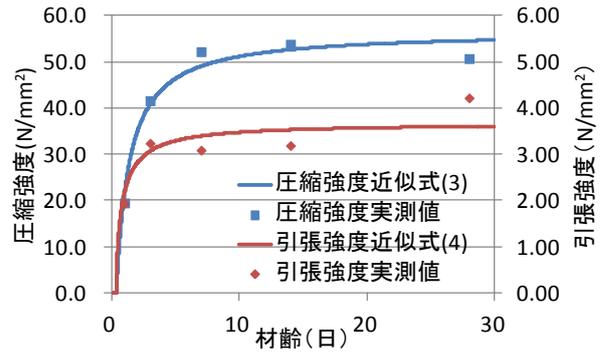


図-2 圧縮強度・引張強度

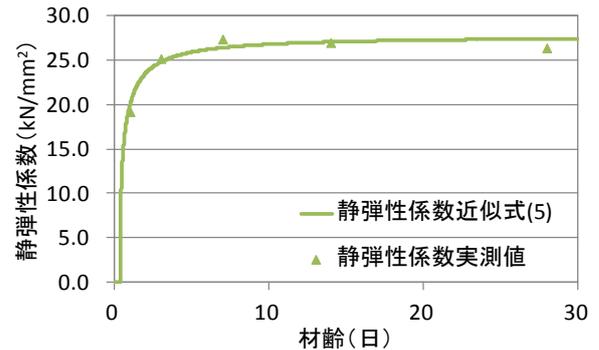


図-3 静弾性係数

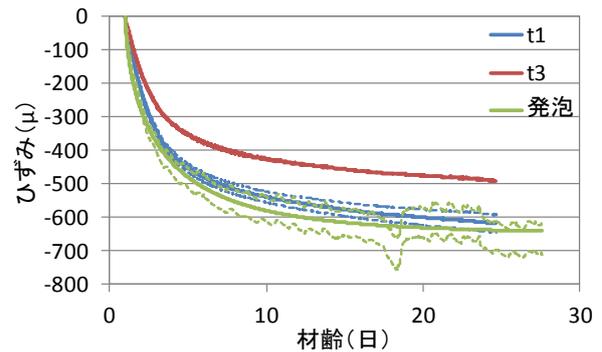


図-6 試験体側面のひずみ

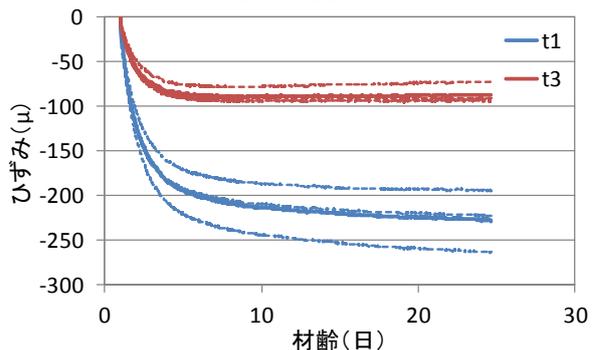


図-7 リング内面のひずみ

およびリング内面のひずみの経時変化を示す。乾燥開始である材齢 1 日をイニシャルとし、ゲージごとの測定値を点線で表し、試験体ごとの平均を実線で表す。なお発泡試験体は、材齢 17～18 日に試験機の不具合により湿度が一旦低下したため、材齢 17 日までの平均値から求めた対数近似式を実線で示した。

拘束力の生じない、発泡試験体のモルタルの自由収縮ひずみは、材齢 24 日で 638 μ となった。t1, t3 試験体は、モルタルの乾燥収縮によりリングが圧縮され、反対にモルタルはリングにより外側に圧縮力が作用している。材齢 24 日の t1 試験体側面のモルタルは 616 μ で、22 μ 拘束されたことが分かり、t3 試験体側面のモルタルは 488 μ で、150 μ 拘束されたことが分かる。

(2) モルタルの応力およびひずみ

厚肉円筒理論⁴⁾を参考に、リング界面のモルタルの円周方向ひずみおよび応力を計算することとした。図-8の通り a: リング内径, b: リング外径, c: 試験体半径, p_o : リングに生じる外部応力, p_i : モルタル内面に生じる内部応力とし, E_s : リングの弾性係数とする。

リング界面のモルタルの円周方向ひずみ $\varepsilon_{m\theta(b)}$ および応力 $\sigma_{m\theta(b)}$ は式(1)(2)として計算される。

$$\sigma_{m\theta(b)} = -\frac{(b^2 + c^2)(b^2 - a^2)}{2b^2(c^2 - b^2)} E_s \varepsilon_{s\theta(a)} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{m\theta(b)} = \frac{a^2 + b^2}{2b^2} \varepsilon_{s\theta(a)} \quad (2)$$

図-9, 図-10 に, $a=14\text{mm}$ (t1 試験体), 12mm (t3 試験体), $b=15\text{mm}$, $c=50\text{mm}$, $E_s=200\text{kN/mm}^2$ として計算した結果を示す。

図-11 に, 強度試験結果(図-2, 図-3)より求めた式(3)~(5)を用いて算出した, リング界面のモルタルの円周方向の応力強度比を示す。式(3)~(5)は JCI マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008 を参考に定め, $f'_c(t)$: 圧縮強度, $f'_t(t)$: 引張強度, $E_m(t)$: モルタルの弾性係数, である。

$$f'_c(t) = \frac{t - 0.37}{0.92 + 0.90 \times (t - 0.37)} \times 50.7 \quad (3)$$

$$f'_t(t) = 0.24 \times f'_c(t)^{0.69} \quad (4)$$

$$E_m(t) = 6351 \times f'_c(t)^{0.37} \quad (5)$$

t1 試験体のリング界面のモルタルは、材齢 3 日には引張強度の 82% の応力が生じた。材齢 3 日以降も応力・ひずみは増加し、材齢 24 日には別途、割裂試験より得た引張強度(式(4))と同程度の 3.5N/mm² まで応力が増加し、ひずみが 212 μ に増加した。t3 試験体のリング界面のモルタルには、材齢 3 日には引張強度を超える応力が生じた。材齢 3 日以降はひずみ一定のまま応力がやや減少し

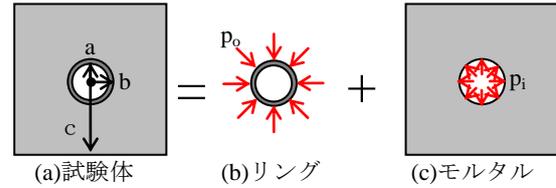


図-8 厚肉円筒理論モデル

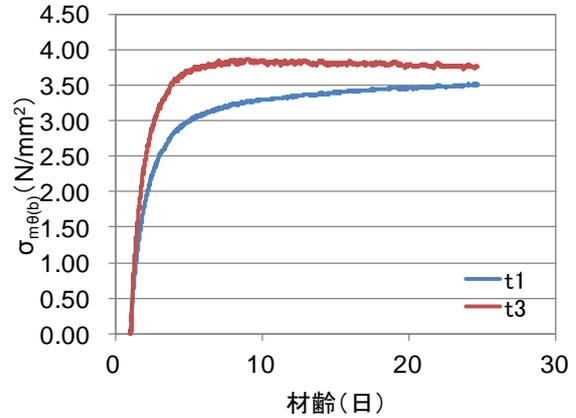


図-9 リング界面のモルタルの円周方向応力

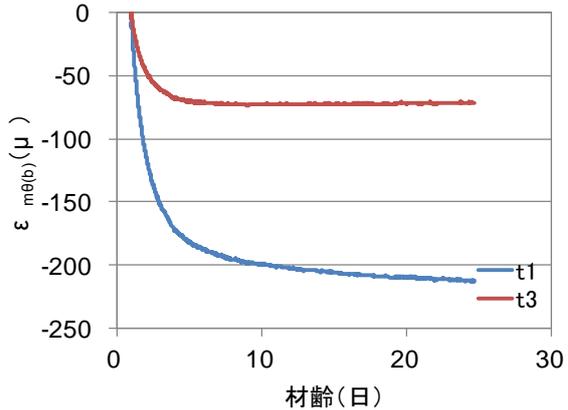


図-10 リング界面のモルタルの円周方向ひずみ

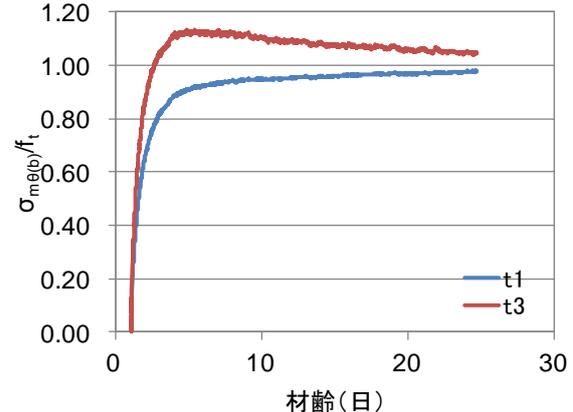


図-11 リング界面のモルタルの応力強度比

たことから、この期間では微細なひび割れ発生およびクリープの増大が考えられる。

(3) モルタルのクリープ特性

t1, t3 試験体のリング界面のモルタルの円周方向ひずみ $\varepsilon_{m\theta(b)}$ から、自由収縮ひずみである発泡試験体側面のひ

ずみを引いた有効ひずみ $\varepsilon_{eff\theta(b)}$ を計算した結果を図-12に示し、応力-有効ひずみの関係を図-13に示す。ここで、有効弾性係数法を用いてモルタルのクリープ特性を表すこととし、式(6)、式(7)より低減係数 φ を算出した。求めた結果を図-14に示す。なお $E_{eff\theta(b)}$: 有効弾性係数を表し、 E_m は式(5)の近似式の値を用いた。

$$\sigma_{m\theta(b)} = E_{eff\theta(b)} \varepsilon_{eff\theta(b)} \quad (6)$$

$$E_{eff\theta(b)} = \varphi E_m \quad (7)$$

図-13をみると、応力-有効ひずみ関係が非線形形状を示している。すなわち、クリープによるひずみが弾性ひずみに比例して発生していないことを示している。よって t3 試験体では、材齢 4 日程度からモルタルに微細なひび割れが生じていることが推察される。また t3 の低減係数が t1 の低減係数より低くなっているのも、t3 の微細なひび割れにより、クリープひずみ以上のひずみが生じたためと考えられる。

3.2 画像相関法による検討

(1) ひずみ計算結果

図-15に、画像相関法により取得した、試験体表面の最大・最小主ひずみの方向および絶対値のベクトルを示す。赤線は引張りひずみ、青線は圧縮ひずみを示す。

発泡試験体は、材齢の増加に伴い様々な方向に最小主ひずみが増加しており、拘束の影響がないまま、収縮が進んだことが確認される。t1, t3 試験体は、リング界面で円周方向の最大主ひずみが卓越して発生しており、リングの拘束により、リング界面のモルタルに引張応力が生じたためと考えられる。

拘束体界面から試験体側面までの円周方向ひずみ $\varepsilon_{m\theta}$ の分布を、図-16の位置から算出した結果を図-17~図-19に示す。なお、カメラの移動による誤差を考慮して、画像相関による試験体側面のひずみは、試験体側面に貼付したゲージの計測値を参考にしながら補正し、左右のデータを平均した値を採用している。

発泡試験体の円周方向ひずみは、材齢 2 日から材齢 7 日で収縮が大きい。材齢 2, 7, 13, 20 日において拘束体界面と試験体側面のひずみの差が少ないことから、一様に自由収縮していることが分かる。t1 試験体の円周方向ひずみは、材齢 2 日から材齢 7 日で収縮が大きい。材齢 2, 7, 13, 20 日において、拘束体界面および試験体側面のひずみは、発泡試験体より一様に 300μ 程度小さく、収縮が拘束されていることが分かる。t3 試験体の円周方向ひずみは、材齢 2 日から材齢 7 日で収縮が大きい。材齢 7, 13, 20 日において、拘束体界面のひずみは t1 試験体より 100μ 程度大きく、試験体側面のひずみは発泡試験体のひずみと同程度であり、拘束体界面は試験体側面

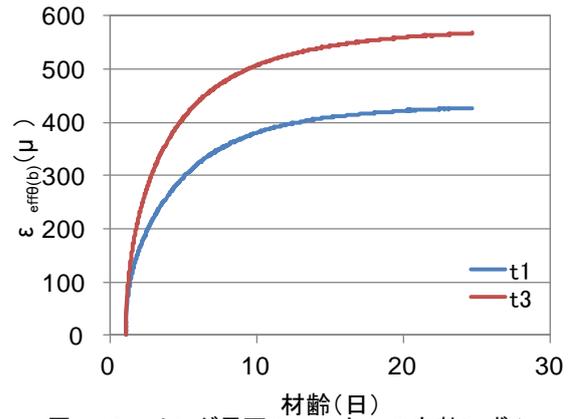


図-12 リング界面のモルタルの有効ひずみ

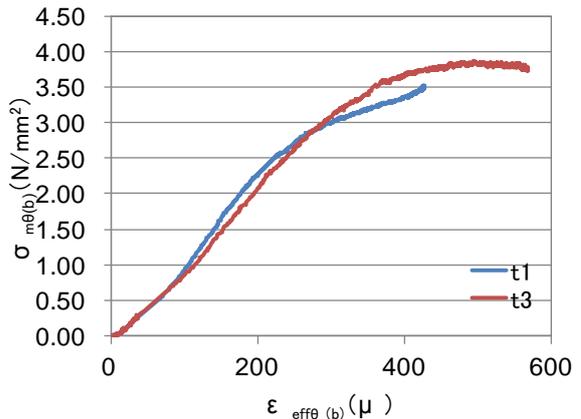


図-13 応力-有効ひずみ関係

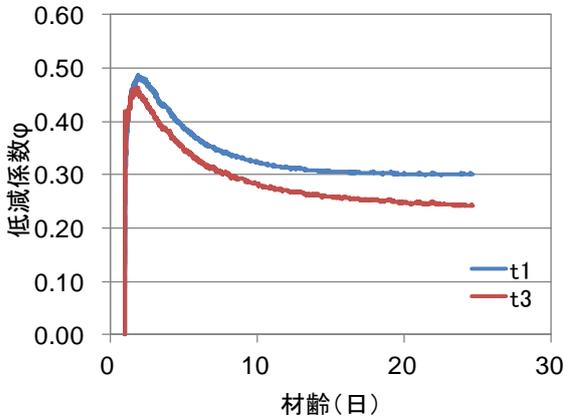
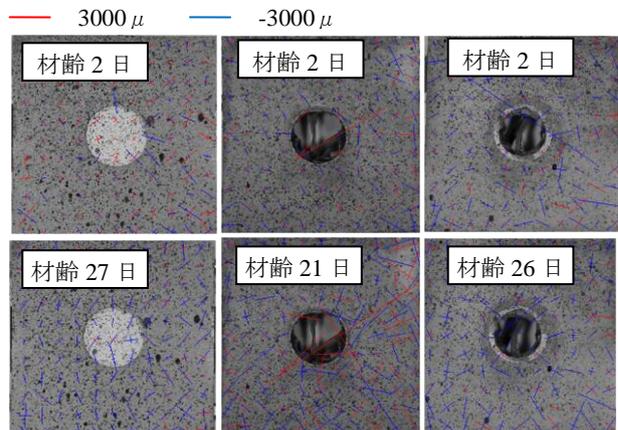


図-14 低減係数



(i)発泡試験体 (ii)t1 試験体 (iii)t3 試験体

図-15 主ひずみベクトル分布 (乾燥収縮試験)

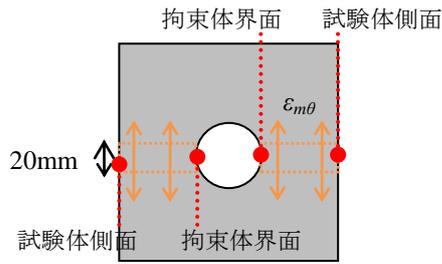


図-16 円周方法ひずみ算出位置

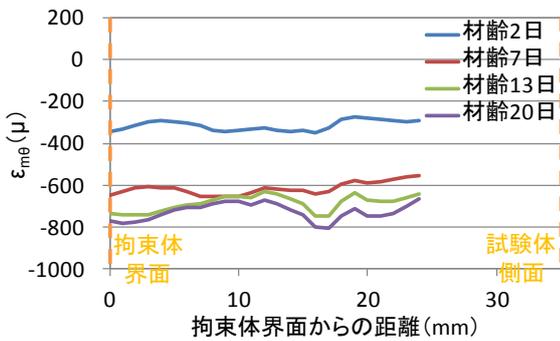


図-17 円周方向ひずみ（発泡）

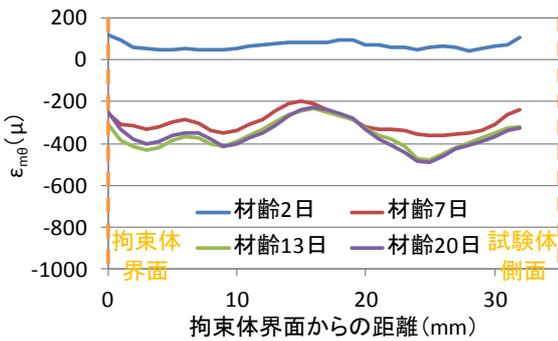


図-18 円周方向ひずみ (t1)

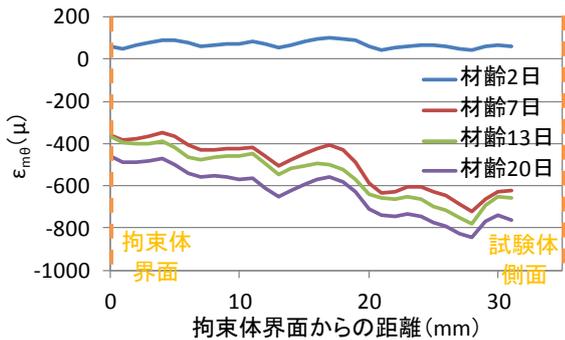


図-19 円周方向ひずみ (t3)

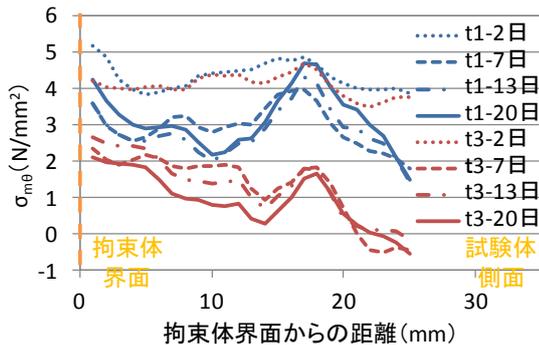


図-20 残留応力分布

よりも 200μ 程度小さい。拘束体界面では t1 試験体よりも拘束力が小さく、試験体側面ではほとんど拘束されていないと考えられる。原因として、リング界面に生じた微細なひび割れにより、リング界面に生じる応力が減少し、試験体側面ではほとんど応力が生じていなかったと推察された。

(2) 残存応力分布計算

t1, t3 試験体の円周方向ひずみ $\varepsilon_{m\theta}$ 、発泡試験体の円周方向ひずみ $\varepsilon_{m\theta}$ (=自由収縮ひずみ ε_{sh})、3.1(3)で求めた低減係数 φ 、式(5)の静弾性係数 E_m より、式(8)を用いて t1, t3 試験体の残留応力 σ の分布を計算した結果を図-20に示す。

$$\sigma_{m\theta} = \varphi E_m (\varepsilon_{m\theta} - \varepsilon_{sh}) \quad (8)$$

t1 試験体の拘束体界面から 10mm までの区間では、材齢 2 日で平均 4.3N/mm^2 の引張応力が生じ、材齢 20 日で平均 3.0N/mm^2 の引張応力が生じている。t3 試験体は材齢 2 日で平均 4.1N/mm^2 の引張応力が生じ、材齢 20 日で平均 1.5N/mm^2 の引張応力が生じている。ここで本検討では、微細なひび割れも含んだ 20mm 幅の平均ひずみから応力を算出したため、材齢 20 日の t3 試験体に 1.5N/mm^2 の残留応力が生じていると計算されたが、実際の t3 試験体のリング界面では、微細なひび割れにより応力が解放され、残留応力は生じていないと考えられる。

4. 載荷試験

図-21 に載荷試験の荷重-変位関係を、図-22 に画像相関法による最大主ひずみ分布の載荷に伴う変化を示す。変位は 4 個の変位計の平均を用いた。最大主ひずみは載荷直前を基準とした。t3 試験体の最大主ひずみ分布の右下部分は、載荷により試験体が移動したことによる影響であると考えられる。

ここで 2 次元 FEM 解析ソフトを用いて、発泡試験体、残留応力を考慮した t1 試験体、残留応力を考慮しない t1 試験体、t3 試験体の拘束体界面の最大主応力 σ_m が、引張強度 f_t' と残留応力 σ と式(9)を満たす、ひび割れ発生荷重を計算した。

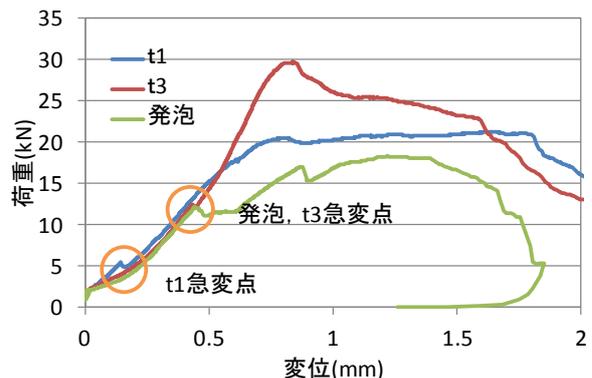


図-21 荷重変位関係

$$\sigma_m = f'_i - \sigma \quad (9)$$

モルタルの強度特性は式(3)～式(5)を用いた。また3.2(2)の結果より、発泡試験体で 0N/mm^2 、t1 試験体で 3.0N/mm^2 、t3 試験体では微細なひび割れにより 0N/mm^2 の残留応力であったとして計算した。

解析によるひび割れ発生荷重と、変位計、試験体側面のひずみゲージ、目視、画像相関法で測定されたひび割れ発生荷重との比較を図-23 に示す。変位、ひずみゲージによる測定では、図-21 に示す測定値の急変点をひび割れ発生と判断した。画像相関による測定では、図-22 上段に示すように、最大主ひずみが、拘束体界面から線状の領域に集中して急激に増加した時点を目視ひび割れ発生と判定した。この急激に増加した最大主ひずみは 1000μ 程度であり、ひび割れ発生荷重の判定は、表示方法には依存しないことを確認している。

測定方法による違いをみると、画像相関で判断されるひび割れ発生荷重は、目視・ひずみ・変位により判断される値よりも小さく、ひび割れ発生を早く感知することができていることがわかる。よって本実験でのひび割れ発生荷重は画像相関による測定値とすることとした。

発泡試験体は残留応力 0N/mm^2 として計算した解析値と測定値が一致しており、荷重試験前の拘束体界面には残留応力が生じていなかったと考えられる。t1 試験体は残留応力 σ を考慮しない場合、解析値と実測値に 4.0kN の差があるが、本検討に求められた残留応力 3.0N/mm^2 を考慮することで、解析値と実測値がほぼ一致した。よって荷重試験前のリング界面には 3.0N/mm^2 程度の残留応力が生じていたものと考えられる。t3 試験体は残留応力 0N/mm^2 として計算した解析値と測定値が一致しており、荷重試験前の拘束体界面には残留応力が生じていなかったと考えられる。リング界面で微細なひび割れにより応力が解放されたためと推察された。

5. まとめ

- (1) リング内面のひずみ変化を計測することで、厚肉円筒理論によりリング界面の円周方向の応力、ひずみが算出でき、モルタルのクリープ特性である有効弾性係数法における低減係数 ϕ が得られた。
- (2) デジタル画像相関法により測定したひずみ分布変化と、リング内面のひずみ変化から求めた低減係数 ϕ から、試験体に生じる応力の変化を算出することができた。
- (3) リングの肉厚が異なることで、乾燥収縮により生じるリング界面のモルタルに生じる残留応力が異なるが、これが荷重試験におけるひび割れ発生荷重に影響することを定量的に把握した。

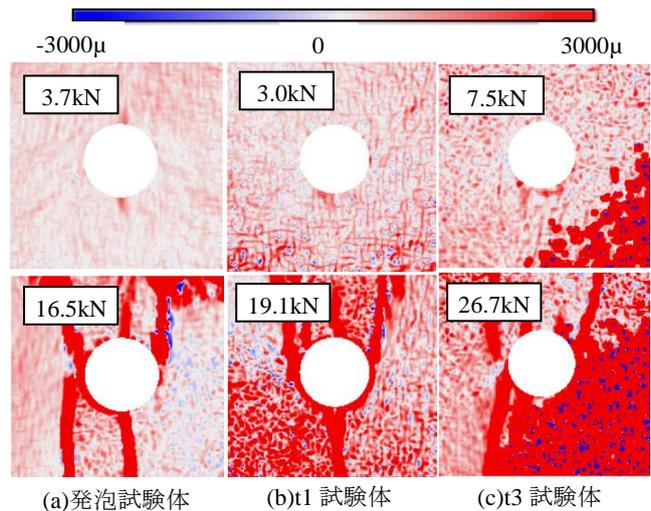


図-22 最大主ひずみ分布 (荷重試験)

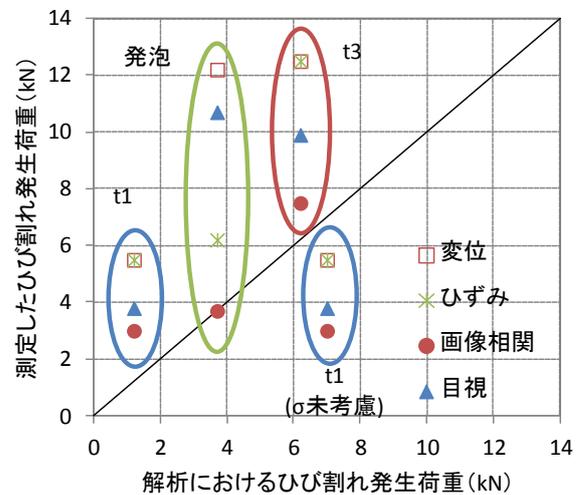


図-23 ひび割れ発生荷重

本研究は、科学研究費補助金によって実施したものです。

参考文献

- 1) 河金 甲, 佐藤良一, 嶋 文雄: 高強度 RC はりの斜めひび割れ発生強度に及ぼす収縮の影響評価, 土木学会論文集 E, Vol. 65, No. 2, pp. 178-197, 2009.
- 2) 野間康隆, 渡辺 健, 二羽淳一郎: 画像解析による高強度コンクリートの圧縮破壊性状の可視化並びに評価, 土木学会論文集 E, Vol. 66, No. 1, pp. 68-79, 2010.3.
- 3) 渡辺 健, 東 広憲, 三木朋広, 二羽淳一郎: コンクリート構造実験を対象としたリアルタイム画像解析システムの開発, 土木学会論文集 E, Vol. 66, No. 1, pp.94-106, 2010.3.
- 4) S.P.ティモシェンコ, J.N.グーディア: 弾性論, コロナ社, 1973.2.