

第 V 部門

モルタル供試体内部の乾燥率と体積変化の計測への X 線 CT 画像の適用性

近畿大学理工学部 学生員 ○山本 康輔
 近畿大学理工学部 非会員 高木 雅斗
 近畿大学理工学部 正会員 麓 隆行

1. はじめに

乾燥によるコンクリートの体積変化は、JIS A 1129 により、所定の寸法の供試体に関する見かけの長さ変化から推定されてきた。しかしペースト、骨材が複雑に配置され、単体の特性とともに相互に影響するため、供試体の見かけの長さ変化だけでは、使用材料の影響は十分に明らかにできない。内部の乾燥や状態変化を可視化する手法が必要となる。その手法として X 線 Computed tomography(CT)法に着目した。既往の研究で、恒温室内に静置した円柱供試体内部の含水状態や変形を計測できる可能性が示された。本研究では、乾燥する供試体内部の乾燥率と体積変化の計測を、X 線 CT 画像の輝度や画像計測から算出可能かを実験的に検討した。

2. 実験方法

水道水(W)、普通ポルトランドセメント(C)、硬質砂岩砕砂(S1)、石灰砕砂(S2)、AE 減水剤、高性能 AE 減水剤、ジルコニア球 (Zr : 粒径 0.1mm、モルタル体積の 0.75%を混入) を使用し、表-1 の配合のモルタルを作製した。なお、目標強度 30, 45 および 60N/mm²となるように W/C を 3 種類とした。小型ミキサで練り混ぜたモルタルを直径 75mm、高さ 150mm の型枠に打設した。ただし、型枠底部には、長さ変化計測用の直径 6mm、長さ 35mm のボルトを取り付けた厚さ 2mm のステンレス円板を設置した。モルタルは 3 層に分けて打設し、最後に型枠上面に同様のボルトを取り付けたステンレス円板を設置した。供試体を 20°Cの恒温室内で 1 日静置後、脱型し、上下面の鋼板を取り外した。20°Cの水中で材齢 7 日まで養生後、打設面のボルトを利用して、既往の研究⁵⁾を参考に機械的誤差を減らすための固定点 (直径 5mm のセラミック球 12 個) を埋め込んだ塩ビ管を取り付けた。塩ビ管には、供試体からの水分逸散への影響を小さくするため、高さ中央から下部方向に直径 1cm の穴を 32 個設けた。

図-1 に供試体全体図と本研究で使用した各座標軸の方向を示す。直後に供試体を、温度 20±1 度、湿度 60±5%の恒温恒湿室で保存した。計測は、乾燥材齢 175 日までの所定の日数に行った。まず、すべての試験体に乾燥開始時からの質量変化を、そして上下のボルト端部を用いて供試体の長さ変化を JIS A 1129-3 に準じて計測し、乾燥開始からの乾燥収縮ひずみを算出した。次に、すべての供試体に対して表-2 の撮影条件で X 線 CT 画像を取得した。異なる乾燥材齢の画像を比較し、約 2mm 角の立方体範囲の輝度変化と 3 次元画像相関法(Digital Volume Correlation, 以下 DVC) を用いて約 1mm ごとの変位分布を算出した。本研究では、Tadisco らが作成した TomoWarp2 を用いた²⁾。高さ中心から ±25mm の断面の Z 方向の平均変位の差を 2 面間距離 50mm で除して長さ変化率を算出した。また隣り合う変位値の差から体積ひずみを次式で算出した。

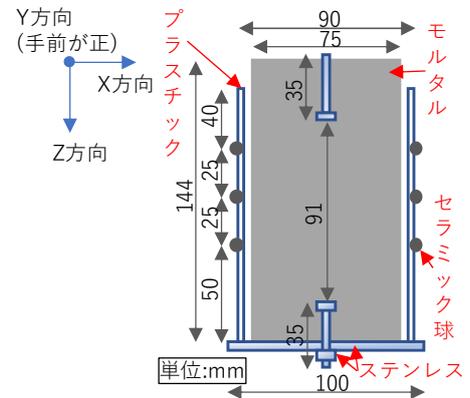


図-1 供試体と乾燥イメージ(黒線：乾燥方向)

表-1 配合表

W/C (%)	単位量(kg/m ³)					
	W	C	S1	S2	AE 剤	Zr
49	306	623	791	531	2.18 *1	46

*1 AE 減水剤 *2 高性能 AE 減水剤

表-2 撮影条件

管電圧 (kV)	管電流 (μA)	積算レート (f/s)	プロジェクション数	銅板 (mm)	分解能 (mm)	撮影時間(s)
200	100	3	2000	2	0.062	666

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$$

ここで、 ε_v は体積ひずみ、 ε_x 、 ε_y 、 ε_z は各軸方向のひずみである。また、別途用意した同配合の供試体を60°Cの送風乾燥機で一定質量になるまで乾燥し、その前後のX線CT画像と質量変化を取得した。乾燥後の質量と輝度の変化量を、飽和から絶乾までの最大質量減少率と最大輝度変化量と仮定し、各乾燥材齢の質量減少率や輝度減少量との比率から乾燥率を算出した。

3. 実験結果と考察

図-2 に実計測から算出した乾燥収縮ひずみと画像計測結果を用いて2面間の変位差から算出した乾燥収縮ひずみとの関係を示す。途中、湿度調整の不備とみられる変化が見られるものの、乾燥材齢が進むとともに実計測結果は増加した。これに対し、画像計測結果は、ほぼ同じ挙動を示した。すなわち、画像計測による内部変形計測は、精度良く行われたと考えられる。

図-3 に質量変化から算出した乾燥率の変化と輝度変化から算出した乾燥率を示す。なお輝度から算出した乾燥率は、直径75mm、高さ約50mmの範囲の平均値である。質量変化による乾燥率は、乾燥開始から大きく増加し、乾燥材齢28日以降で急に緩やかな変化となった。一方、輝度変化による乾燥率は、質量変化の場合に比べて緩やかに増加し、乾燥材齢90日頃に質量変化の場合より大きくなった後、までその後乾燥率の増加が小さくなった。これは、塩ビ管の装着により供試体の上下端部からの乾燥速度や収束程度が異なったことが要因だと考えられる。

図-4 に供試体中心から±25mm範囲で約1mmごとの各断面の輝度変化から求めた乾燥率と画像計測から算出した体積ひずみの平均値を図示した。およそ乾燥材齢増加にともない乾燥率が増加し、それにほぼ比例して体積ひずみが低下、すなわち収縮した。体積ひずみの値は、乾燥収縮ひずみの3~4倍程度であった。各乾燥材齢でのばらつき要因は、高さ方向の乾燥率の違いに加えて、撮影時の輝度誤差や変形による細骨材の配置等による誤差が影響していると考えられる。以上から、X線CT画像を用いた乾燥率と体積ひずみとの関係を求めることが妥当性であると考えられる。

4. まとめ

- (1) 画像計測により算出した乾燥収縮ひずみは、JIS法による計測とほぼ同じ値となった。
 - (2) 輝度から算出した乾燥率は、質量から算出した乾燥率とやや傾向が異なったが、これは供試体の乾燥方法の影響と考えられる。
 - (3) 供試体の複数断面で計測された乾燥率と体積ひずみは良好な関係があった。
- 以上から、X線CT画像を用いた乾燥率と体積ひずみとの関係を求めることが妥当性であると考えられた。

参考文献

- 1) 麓隆行：新しい機構のX線CTの開発とポリマーコンクリートの圧縮試験への適用，土木学会論文集 E2, Vol. 69, No. 2, pp. 182-191, 2013
- 2) Tudisco, E. et al. : TomoWarp2: A local digital volume correlation code, SoftwareX, Vol.6, pp. 267-270, 2017

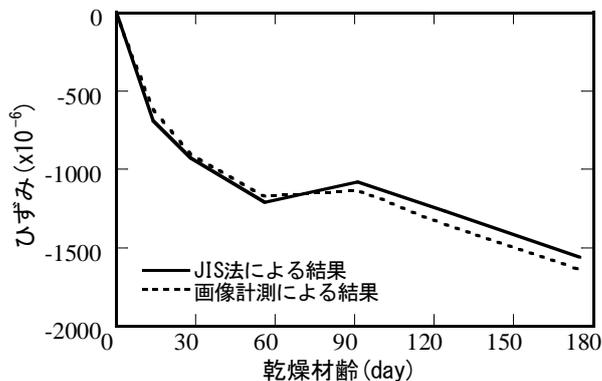


図-2 JIS法と画像計測による乾燥収縮ひずみの比較

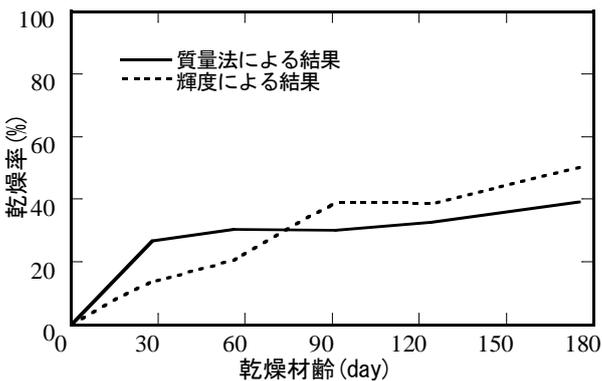


図-3 質量と輝度から算出した乾燥率の比較

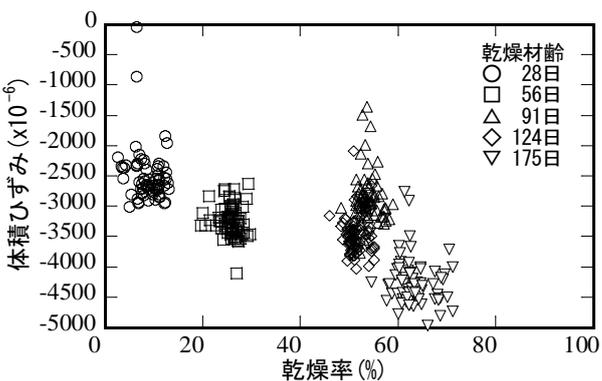


図-4 供試体内の複数断面の乾燥率と体積ひずみの関係