

コルゲートチューブの長さ変化試験に基づく 若材齢セメントペーストの内部組織に関する研究

Shrinkage of early age cement paste based on the experiment of corrugated mold

苫小牧工業高等専門学校環境都市工学科 ○学生員 大巻雅篤 (Masahiro Oomaki)
苫小牧工業高等専門学校環境都市工学科 正 員 渡辺暁央 (Akio Watanabe)
苫小牧工業高等専門学校環境都市工学科 正 員 廣川一巳 (Kazumi Hirokawa)

1. はじめに

コンクリート硬化体は、水和反応や乾燥等による体積収縮が発生し、ひび割れの原因の1つとなっている。低水セメント比のコンクリートでは、自己収縮と呼ばれる巨視的な収縮が発生するため問題となっており、様々な手法で自己収縮を評価している。ASTM C 1698-09 のコルゲートチューブを用いた長さ変化試験も自己収縮を容易に評価できる。この試験は、セメントペーストあるいはモルタルにおいて、凝結の終了時間を初期値として、ダイヤルゲージにて収縮量を評価するものである。一方で、この試験装置を一部改良して、ダイヤルゲージの代わりに、レーザー変位計による自動記録を行うようにすると、打設直後から硬化に至るまでの連続的な収縮量の評価が可能となる¹⁾。この試験により得られた結果は、打設直後から大きな収縮が認められ、この現象の原因が不明である。

本研究ではレーザー変位計によるコルゲートチューブの長さ変化試験により得られる打設直後の収縮現象を解明することを目的とした。特に収縮と凝結時間の関係に着目し、凝結時の SEM-BEI の評価から考察を行うこととした。

2. 実験概要

(1) セメントペーストの作製

使用するセメントは普通ポルトランドセメントで水セメント比 50%と 20%のセメントペーストを作製した。なお、水セメント比が 20%のときポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を使用した。

(2) 長さ変化試験

打設後のセメントペーストの膨張量を評価する方法として ASTM C 1698-09 に準じたコルゲートチューブを用いた長さ試験を採用した。試験方法はコルゲートチューブを振動台の上に鉛直に設置し、振動を加えながら、上部から注ぎ込んだ。その後テフロン製の栓をして、長さ変化測定用の供試体とした。これを写真-1 のように設置し、打設直後からの長さ変化をレーザー変位計で連続的に自動計測した。

(3) SEM-BEI による内部組織観察

長さ変化試験の変曲点に着目し、変曲点の材齢においての厚さ 5mm、幅 10mm の正方形供試体を切り出し、プロパノール浸漬をして水和反応を停止させた。その後、エポキシ樹脂を含浸させ鏡面研磨したものを、反射電子像観測試料とした。反射電子検出器を備えた走査型電子顕微鏡を使用して内部組織観察を行った。



写真-1 長さ変化測定装置

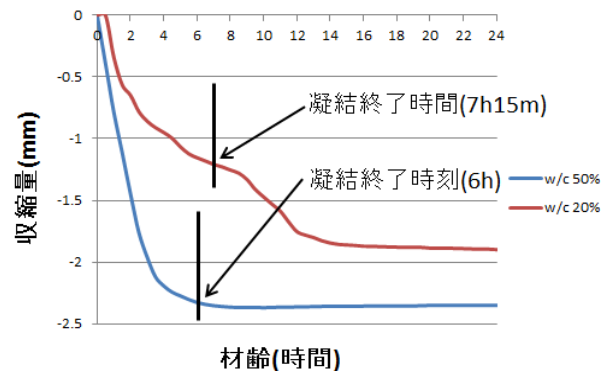


図-1 長さ変化試験結果

3. 実験結果および考察

(1) 長さ変化試験

水セメント比 50%、20%のセメントペースト供試体の長さ変化試験結果および凝結時間を図-1 に示す。水セメント比 50%20%ともに、打設直後から著しい収縮を示した。その後、水セメント比 50%は約 6 時間で、水セメント比 20%は約 12 時間後で収縮が小さくなっている。水セメント比が 50%の場合は初期の収縮が終了する時間がほぼ凝結の終了時刻に相当しており、その後の長さ変化が認められない。一方、水セメント比が 20%では、凝結の終了時刻は 7 時間であり、凝結後も自己収縮による大きな収縮が発生するようである。また、材齢に時間を経過した後も、ゆるやかに自己収縮が継続している。その後、数時間後に収縮変化量が小さくなった。水セメント比 50%のセメントペーストは凝結終了時間以降長さ変化が認められない。このことから、凝結によりセメントペーストは骨格構造が完成してマクロ的な体積変化が終了したと考えられる。水セメント比 20%のセメントペーストは、凝結終了時刻を経過しても継続して収縮が起きている。これは、セメントペーストの含水率が低いので自己乾燥状態となり自己収縮が発生したのが原因と考えられる。

(2) 凝結後の内部構造観察

水セメント比 50%材齢 6 時間と水セメント比 20%材齢 9 時間のセメントペーストの反射電子像の例を図-2 に示す。なお、水セメント比 20%の凝結終了時間は 7 時間 15 分であるが、この時間で試料を切り出して、SEM-BEI 試料を作製すると現有する切断装置では、切断時に水和セメント粒子がはがれてしまい、適切な評価ができなかった。そのため材齢 9 時間にて解析を行い考察することとした。白色の粒子の相が未水和セメントの相、明るい灰色の相が水酸化カルシウムの相、黒色の相が粗大毛細管空隙である。水セメント比 50%6h および水セメント比 20%9h の反射電子像を図-3 に示すように、未水和セメントを抽出する二値化を行い、面積計測を行った。その結果水セメント比 50%6h の未水和セメントの体積率は 33.7%で水セメント比 20%9h の未水和セメントの体積率は 45.1%であった。そして、式(1)により水和度(α_{BEI})を求めた。

$$\alpha_{BEI} = 1 - \frac{VC_{BEI}}{VC_0} \quad (1)$$

ここに、

VC_{BEI} : 画像解析により求めた未水和セメントの体積率

VC_0 : 配合時のセメントの体積率

その結果、水セメント比 50%6h のセメントペーストは水和度 13.1%、水セメント比 20%9h のセメントペーストは水和度 26.5%であった。

(3) Powers モデルによる収縮量の推定

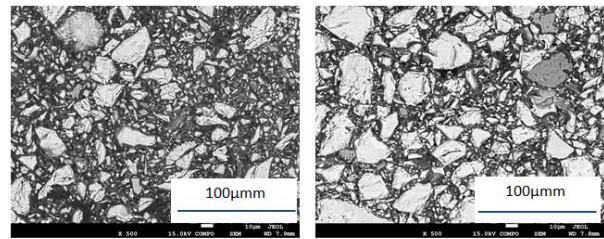
(1) 式で求めた水和度をもとに、Powers の水和反応モデルにより化学収縮量を求めた。図-4 に Powers モデルの例を示す。Powers モデルでは理論上の化学収縮量が式 (2) で計算することができる²⁾。

$$\begin{aligned} V_{CS} &= \rho_c 6.410^{-5} (1 - \rho) \alpha \\ &= 0.20 (1 - \rho) \alpha \quad (\text{chemical shrinkage}) \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、

- V_{CS} : 体積減少量
- ρ_c : セメントの密度
- ρ : 初期密度
- α : 水和度

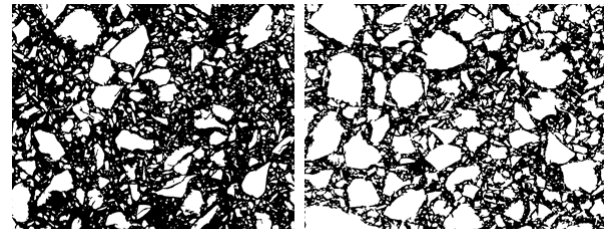
Powers モデルによる収縮量は水セメント比 50%6h では全体の約 1%にあたり、水セメント比 20%9h では全体の約 1.5%にあたる。長さ変化試験において使用したコルゲートチューブの長さは 425mm であり、1%に相当する長さは約 4mm で、1.5%に相当する長さは約 6mm である。しかし、長さ変化試験では水セメント比 50%6h では約 2.3mm の収縮、水セメント比 20%9h では約 1.3mm の収縮が見られた。水セメント比 50%6h では Powers モデルによる化学収縮量の半分であり、水セメント比 20%9h では化学収縮量の 1/3 であった。打設



水セメント比50%6h

水セメント比20%9h

図-2 反射電子像の例



水セメント比50%6h

水セメント比20%9h

図-3 二値化、二値処理の例

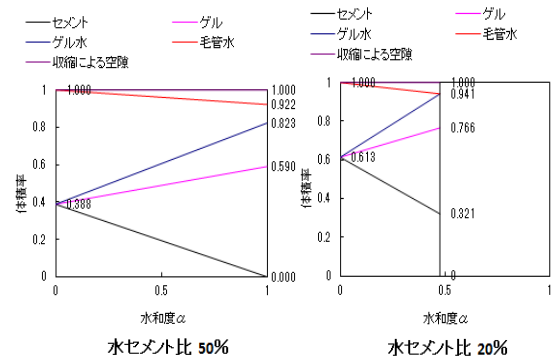


図-4 Powers モデルの例

から凝結までは、セメント硬化体の骨格構造が形成される前であるため、Powers モデルに示される化学収縮が直接的に長さ変化試験に反映される可能性があると考えた。しかし、測定値と計測値には有意な関係が認めなかった。打設直後のフレッシュ時の収縮については、さらなる検討が必要である。

4. 結論

- (1) 打設直後は大きな収縮が発生し、数時間後に変化量が小さくなった。
- (2) 水セメント比 50%では変化量が小さくなる時刻と凝結終了時刻が一致したが、水セメント比 20%では凝結終了時刻を過ぎても一定の収縮が見られた。

参考文献

- (1) 石井允都、廣川一巳、渡辺暁央：焼成ホッキ貝殻粉末混入モルタルの膨張特性の相違について、コンクリート工学年次論文集、Vol.35、No.1、2013
- (2) Jenson, O.M. and Hansen, P.F. : Water-entrained cement-based materials I. Principles and theoretical background, Cement and Concrete Research Vol.31, pp.647-654,2001