

論文 若材齢で脱型した無筋コンクリート断面に生じる微細ひび割れとセメントの水和反応に関する基礎的研究

酒井田 智哉*1・丸山 一平*2・市之瀬 敏勝*3・七里 賢司*4

要旨：本研究では若材齢で脱型し、乾燥を受ける部材断面を模擬したコンクリートに発生する微細ひび割れの発生状況と、若材齢での養生打ち切りに伴うセメントの水和反応への影響を検討した。まず、微細ひび割れについては養生期間が長い試験体で多く見られた。次にセメント中の水酸化カルシウム生成量は養生期間が長いほど多く、乾燥面に近づくほど少なくなっていく傾向が見られた。結果として、コンクリート内側の水分を保持した場合に、表層にある程度の微細ひび割れが伴うことは不可避と考えられた。

キーワード：若材齢、微細ひび割れ、画像相関法、水和、TG-DTA

1. はじめに

コンクリートが強度や耐久性を発揮する上で養生は欠かせない。しかし、近年の人手不足を背景とした、コンクリート工事の工期短縮、型枠の転用による建築資材の削減を目的に型枠を早期に脱型する事例が散見されるようになった。早期に脱型されたコンクリートは水和反応の初期段階で乾燥を受け水分が逸散し、水和に必要な水分が不足し、強度などの物性に影響すると指摘されている。加えて、乾燥収縮による過大なたわみや乾燥収縮ひび割れによる美観の劣化などに対する抑制・制御の重要性を踏まえた場合からみても、早期脱型により乾燥開始材齢が若材齢に近づくことはひび割れを管理する上で好ましいことではない。このため、経済性、施工性、耐久性、および構造的観点からの合理的な脱型材齢についての指標があることが望ましい。

養生期間における水分供給量や水分逸散量がコンクリートの品質に及ぼす影響に関する研究は多く^{例え 2)}、その結果は日本建築学会における標準仕様書 (JASS 5) にも反映されている³⁾。しかし、JASS 5 に示されている型枠存置期間は様々な条件における圧縮強度の発現が基準となっており、そのほかの物性が養生期間によって変化することについての記述が少ない。特に養生期間とかぶりコンクリート内の微細ひび割れ、それが性能に及ぼす影響に関する研究は少ない。かぶり部にあるコンクリートの品質のうち、時として議論の俎上に上がる微細ひび割れの実態と水和反応の両面から脱型材齢との関係を明らかにすることは、コンクリートの表層品質を確保するための合理的な脱型材齢の提案に資する基礎的研究と位置付けられよう。

本研究では、早期脱型したコンクリート断面の微細ひ

び割れ性状およびセメントペースト部分の水和反応の把握を目的に、部材断面を模擬したコンクリートを 1 方向のみ乾燥させ、二次元的なひずみ分布の取得をデジタル画像相関法により試みた。

表-1 使用材料

材料	記号	物理性質など
セメント	C	普通ポルドランドセメント/密度： 3.16g/cm ³
細骨材	S	山梨県大月産砕砂/表乾密度： 2.63g/cm ³ , 吸水率：2.85%
粗骨材	G	春日井産砕石/表乾密度：2.65g/cm ³ , 吸水率：0.25%

表-2 調合とフレッシュ試験結果

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					スランプ (cm)	空気量 (%)
	C	W	S	G	AE		
56	315	178	836	936	3.1	12	5

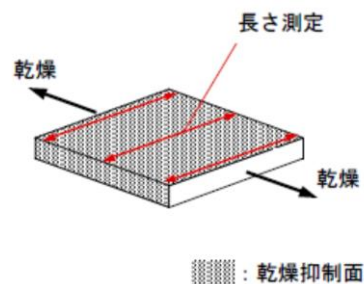


図-1 試験体の状況

*1 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻 (学生会員)
 *2 名古屋大学大学院 環境学研究科准教授 博士(工学) (正会員)
 *3 名古屋工業大学 建築・デザイン工学科教授 工博 (正会員)
 *4 NIPPO(株) 建築事業部管理専門課長

さらに、乾燥を受けたコンクリート試験体の水和および中性化の程度を確認するため、化学分析によって水酸化カルシウムおよび炭酸カルシウムの生成量を算出した。

2. 実験の概要

2.1 使用材料および調合

使用材料は表-1に、コンクリートの調合およびフレッシュ性状試験結果を表-2に示す。

2.2 試験体の作製

試験の水準は乾燥開始材齢とし、3日と7日(以下3D, 7Dとする)とした。試験体の形状を図-1に示す。100×100×400mmの型枠に打込み後、封緘養生した。それぞれ材齢2日と6日で脱型し、ダイヤモンドカッターで10mm厚に切断した。そして試験体の切断面と、打設面を含む側面一方向に遮水塗料を塗り、2面のみから乾燥が進むように加工した。加工後は乾燥面を封緘し、遮水塗料を硬化させるために24時間室温で放置した後乾燥を開始した。乾燥条件は恒温恒湿室内で20℃, RH60%とし、試験体は各乾燥開始材齢で3体ずつ用意した。

2.3 乾燥収縮試験

乾燥時の試験体全体の挙動を把握するため、長さ変化を、マイクロメータヘッド MHN3-25MB(Mitutoyo 社製, 最小読み取り 0.001mm, 精度±0.003mm)を用いた器具により測定した。乾燥開始直前に質量と長さを測定し、その後、乾燥条件下で乾燥させ、乾燥による収縮ひずみの経時変化を測定するため、数日ごとに測定を行った。測定点は各試験体で3点とし、それらから算出されるひずみの平均をとり、さらにそれぞれ3体の試験体の平均を乾燥収縮ひずみとした。質量変化率も同様に3体の平均とした。

2.4 デジタル画像相関法

乾燥による試験体乾燥面に生じたひずみ分布の経時変化をデジタル画像相関法⁴⁾によって測定した。デジタル画像相関法には、CCDカメラAtik 383L+(ATIK社製, 3326×2504ピクセル), カメラレンズAi AF Nikkor 35mm f/2D(Nikon社製)を使用した。前処理として、試験体表面には画像相関の探査精度向上のためと、乾燥による試

験体表面の輝度変化の影響を少なくするため、白色の遮水塗料を塗装後、黒色のアクリル顔料スプレーを吹き付け、まだら模様を作製した。その後、乾燥開始直前に撮影し、取得した画像を基長として数日おきに撮影した画像中のひずみ分布を求めた。

2.5 化学分析

化学分析の試験体には乾燥収縮試験およびデジタル画像相関法と同様の調合、寸法、養生、乾燥条件で65日間乾燥させた試験体を図-2のように乾燥面から3cmでダイヤモンドカッターを用いて切断し、乾燥側と湿潤側で分け、それぞれディスクミルで微粉碎した後、105℃環境下で自由水を蒸発させた試料を作成した。その試料を使用し、熱重量-示差熱重量分析(TG-DTA)を行い、水酸化カルシウムおよび炭酸カルシウムの定量を行った。測定は、昇温速度10℃/min, N₂フロー環境下で行い、水酸化カルシウム生成量はTG-DTAによる415~515℃付近の減量分を、炭酸カルシウム生成量は600~700℃付近の減量分をそれぞれの脱水、脱炭酸ガス量と仮定し、DTG曲線から各試料の脱水、脱炭酸ガス範囲を設定し算出した。

本研究では化学分析にコンクリート試料を用いるため、セメントペースト中の水酸化カルシウムおよび炭酸カルシウム量を定量的に評価するためには骨材の影響を排除する必要がある。そのためにセメント協会「コンクリート専門委員会報告F-18:硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験結果」⁹⁾に記載されている塩酸(1+100)を用いて配合推定する方法を参考に骨材分の補正を行い、TG-DTA測定後の試料中の未反応セメント量

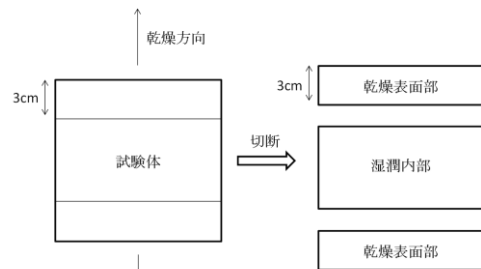


図-2 分析用試験体

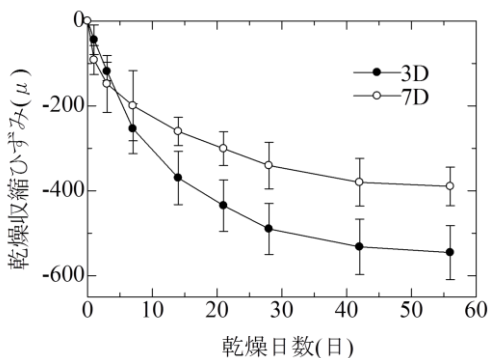


図-3 脱型材齢の違いによる乾燥収縮ひずみの違い

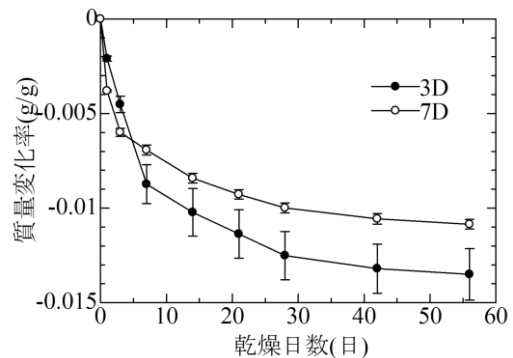


図-4 脱型材齢の違いによる質量変化率の違い

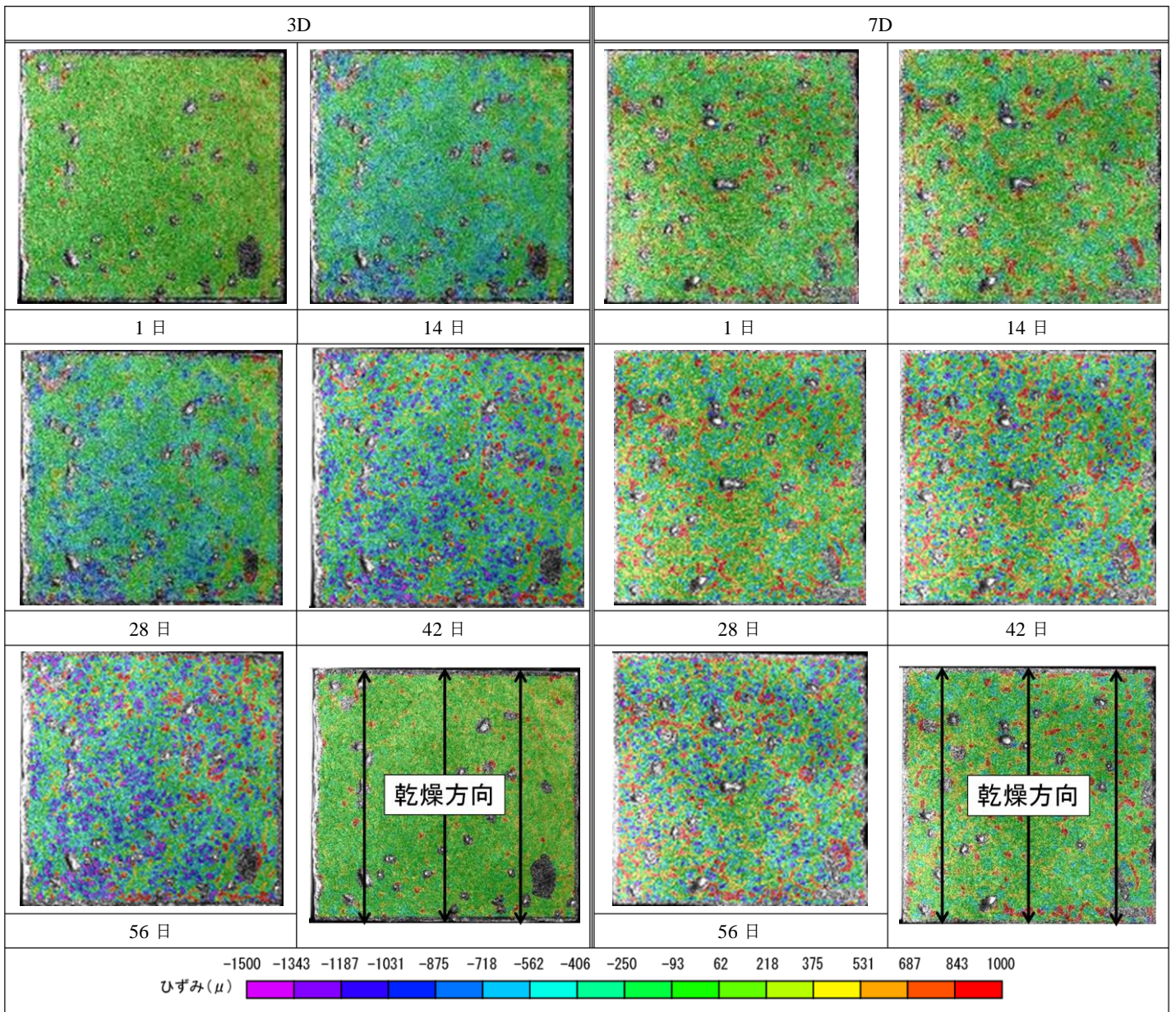


図-5 脱型材齢の違いが試験体断面における最大主ひずみ分布と経時変化に及ぼす影響

(試験体寸法：10×10cm, 上辺及び下辺が乾燥面)

あたりの各生成量を算出した。試料内の骨材中の粗骨材と細骨材の割合は調合通りであると仮定した。未反応セメント量の定量には以下の式(1)を用いた。

$$X = Y - Z \left(\alpha \times \frac{S}{S+G} + \beta \times \frac{G}{S+G} \right) \quad \dots (1)$$

ここで、 X ：試料中の未反応セメント量(g), Y ：コンクリート試料を1000℃に加熱後の質量(g), Z ：試料中の骨材量(g), α ：細骨材を1000℃に加熱後の質量残分(%), β ：粗骨材を1000℃に加熱後の質量残分(%), S ：調合における細骨材の単位量(kg/m³), G ：調合における粗骨材の単位量(kg/m³)

また、骨材についてもコンクリート試料と同様の測定条件でTG-DTAを行い、骨材からの減量の影響の有無を確認した。

3. 実験結果

3.1 乾燥収縮ひずみと質量変化の経時変化

図-3 に乾燥収縮ひずみ, 図-4 に質量変化率の経時変化を示す。図中のエラーバーは標準偏差を表している。乾燥3日までは7Dのほうが脱水量, 乾燥収縮ひずみともに大きい, 乾燥7日からは3Dが上回っている。これは早期脱型したコンクリートには自由水が多く残っている, 3Dでは乾燥7日以降も水分が逸散したことがわかる。乾燥7日以降の変化率は乾燥収縮ひずみ, 質量変化率ともに3Dのほうが大きい。従来, 養生期間が乾燥収縮ひずみに与える影響は小さいと考えられているが⁷⁾, 本実験では試験体寸法が小さく薄いため, 養生期間の影響が顕在化したと考えられる。

3.2 デジタル画像相関法の結果

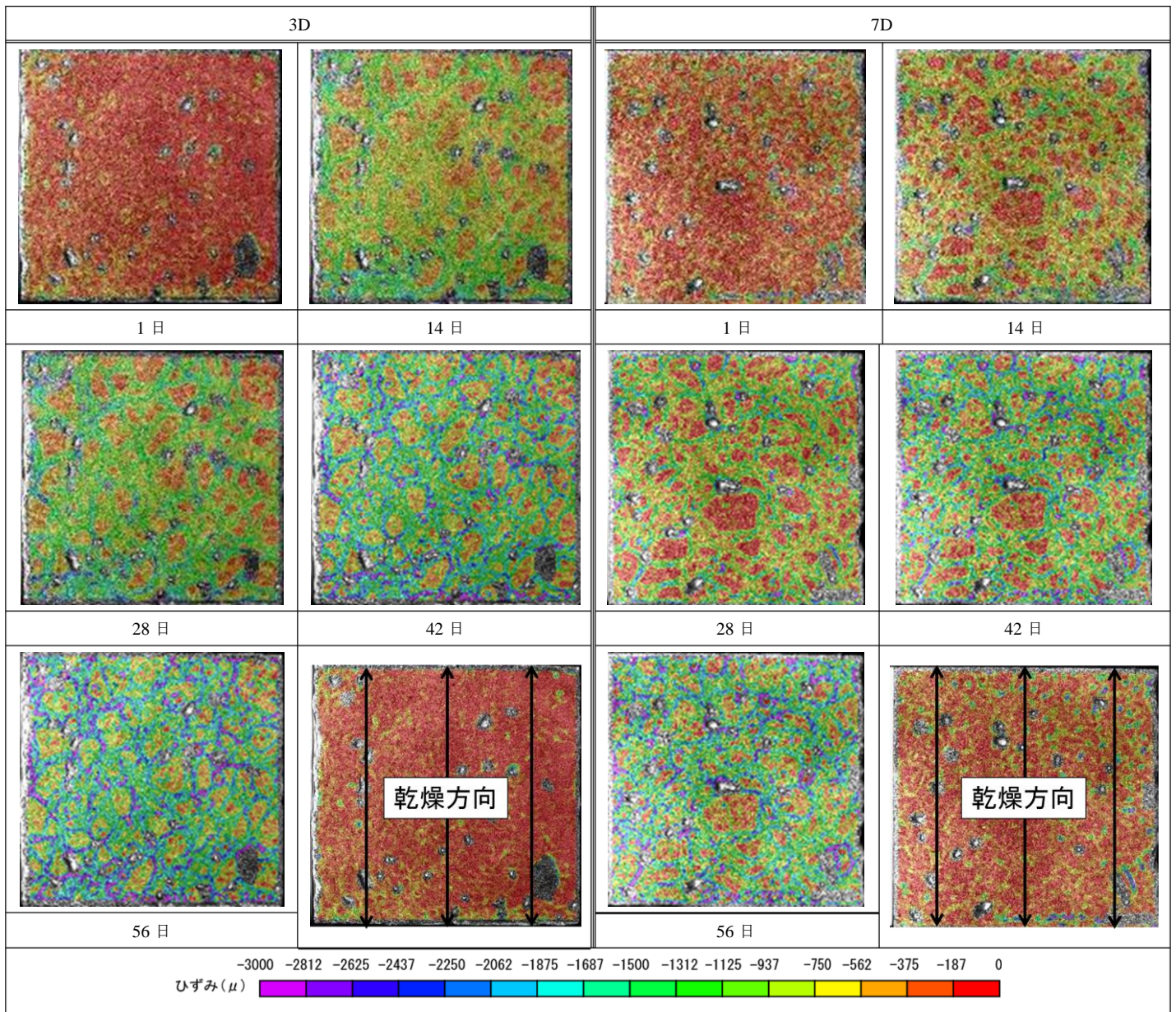


図-6 脱型材齢の違いが試験体断面における最小主ひずみ分布と経時変化に及ぼす影響
(試験体寸法：10×10cm, 上辺及び下辺が乾燥面)

図-5 に 3D と 7D の画像相関法による最大主ひずみの経時変化を、図-6 に最小主ひずみの経時変化を示す。図-5 から、3D では乾燥面に近いほうから収縮が進行しているが、7D では同じ傾向が明確には見て取れない。

微細ひび割れは、モルタル部分の収縮量に対して骨材の収縮量が小さいので、その差によってモルタルが拘束されひび割れが発生する。デジタル画像相関法は 400μ 以上の膨張ひずみの場所と微細ひび割れが良好な対応を示す⁵⁾。本実験で 400μ 以上の膨張ひずみの場所を表すのは図-5 の黄色および赤色部分であり、3D と比べて 7D のほうがひび割れは多いと推察される。図-6 では乾燥 28 日までのモルタル部分の収縮が 3D においては内部まで進展し、7D においては 3D ほど進展していない。乾燥 42 日以降は 3D、7D 双方で内部のモルタルまで収縮してい

る。また、骨材部分は収縮が小さいことがわかる。

図-7 は図-6 に示す二次元ひずみ分布からひずみの数値を抽出し、縦軸を最小主ひずみ、横軸を上側乾燥面からの距離としてプロットしたグラフから、骨材部分を除いたものである。グラフに用いる最小主ひずみの数値は上下の乾燥面を縦方向に結んだ 7 本の線の平均としている。図-7 は図-6 で示すひずみ分布の内、収縮が大きい部分のみを表示しているため、モルタル部分における上下方向のひずみ分布を表しており、乾燥初期では乾燥面近くで収縮が大きく、内部では収縮が小さいことがわかる。なお、コンクリートの乾燥収縮試験の結果よりも図-7 の収縮が大きいのはモルタル部の最小主ひずみ分布であるからである。

また、3D は乾燥日数が進むにつれて全体が収縮していっ

ているのに対し、7Dでは乾燥28日まで中心部での収縮の進行が小さい。

この理由として、3Dは水和の途中で乾燥を受け水和が停滞し、粗大な空隙が残存するため、容易に内部まで乾燥しやすい状態が形成されたからであると推察される。一方、7Dでは乾燥初期での収縮は表層部分にとどまっておき、ひずみの観点からみても、乾燥面から4cmより内側は、水分逸散による収縮が進行していないため、水分が残存することで水和が継続し緻密な状態が保持されている。

3.3 化学分析の結果

TG-DTAの分析結果の例として3Dの湿潤内部と乾燥表面部の試料の分析結果を図-8に示す。

また、各骨材の分析結果を図-9に示す。横軸は温度、縦軸は測定前の試料の質料からの質量変化を1000℃に到達した際の質量で除した値である。破線は各温度での温度変化を明確にするため、質量変化を時間で微分した値(DTG)である。

図-8の結果は骨材を含む試料の結果であるため、セメントペースト部分の質量変化を評価するためには骨材の影響を考慮しなければならない。図-9において、粗骨材は各温度で継続的に質量が減少し続けているが、その変化量は図-8に示す3Dの試料の質量変化の10分の1程度であるため、コンクリート試料が示す減量のピークへの影響は小さい。また、細骨材については400℃までにはほとんど質量変化が終了しており、415～515℃付近で脱水する水酸化カルシウムと600～700℃付近で分解する炭酸カルシウムへの影響は微小であると考えられる。以上のことから、各試料の415～515℃付近と600～700℃付近の質量変化に骨材が与える影響はごくわずかであり、本実験では無視することとした。

図-10に塩酸によるコンクリート粉砕サンプルの不溶残分を用いた骨材量の推定結果から、試料中のセメントペースト量を定量し、水酸化カルシウム量と炭酸カルシウム量を1000℃に加熱後のコンクリート試料中のセメント量で除した値を示す。

乾燥開始材齢が3日と比べて7日では水酸化カルシウム量が多く、養生期間が長くなることでセメントの水和が進行している。また、乾燥表面部と湿潤内部を比べると湿潤内部で水酸化カルシウムが多く、若材齢で乾燥を受けることで水分が逸散し、乾燥面近くのセメントペーストは水和が妨げられることがわかる。

炭酸カルシウム量については湿潤内部と比べて乾燥表面部でいずれの脱型材齢でも約4倍生成しており、本実験での乾燥日数において中性化は進行していることがわかる。乾燥開始材齢で比べると、乾燥側で3日より7日で炭酸カルシウム量が多く、中性化が進行している。7

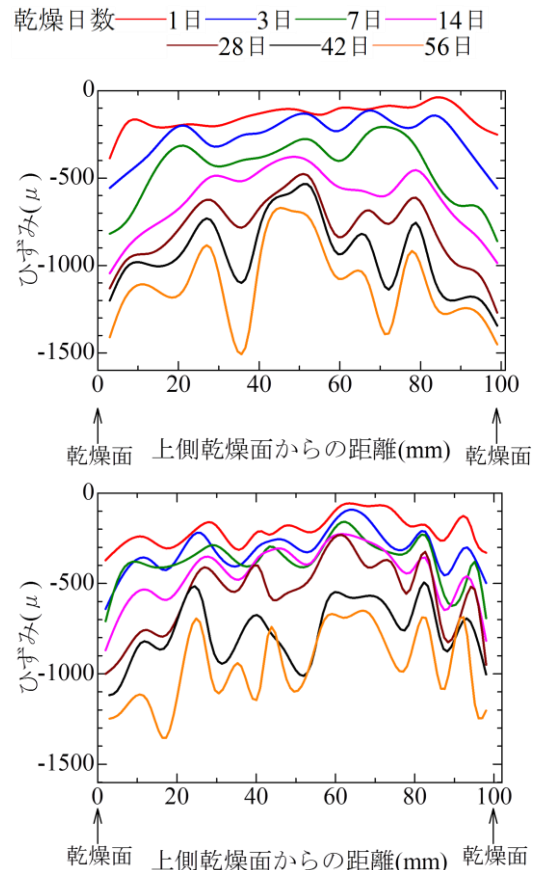


図-7 コンクリート断面における最小主ひずみの分布 (上：3D, 下：7D)

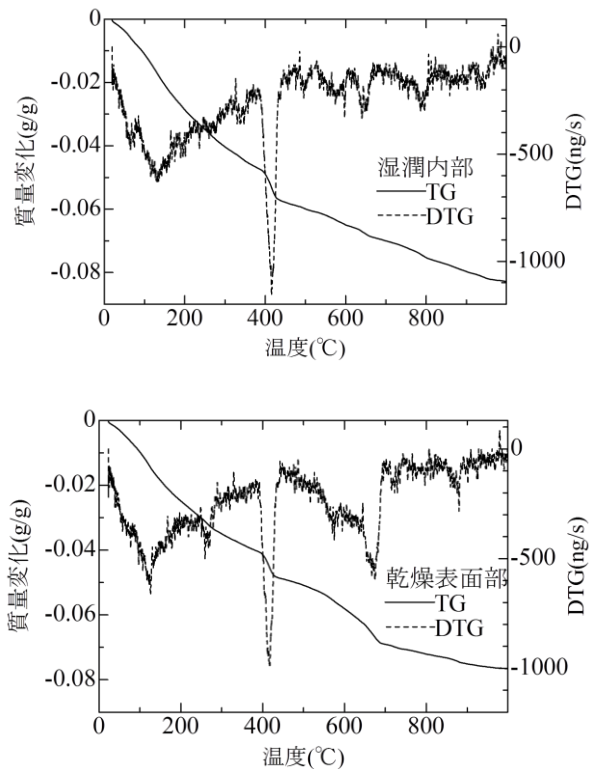


図-8 乾燥開始材齢3日のTG-DTA分析結果

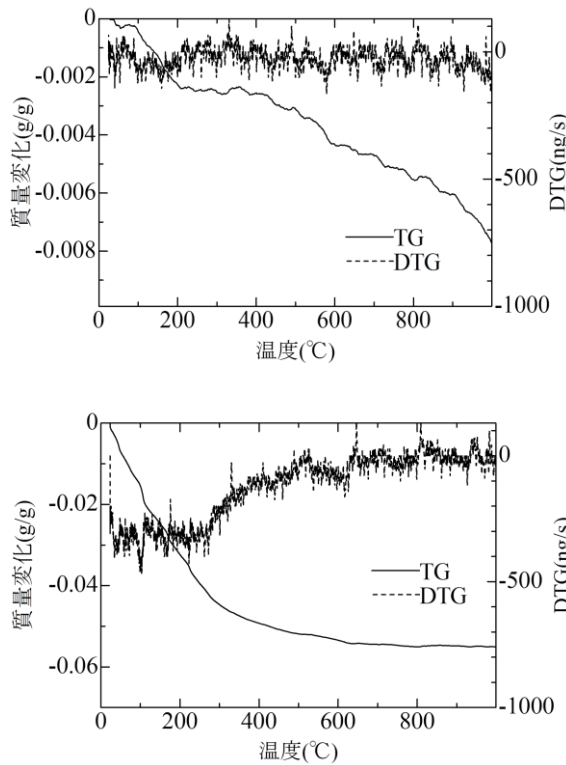


図-9 骨材の TG-DTA 分析結果

日のほうがセメントの水和は進行して、コンクリートは緻密化しているはずであるが、このような結果になったのは、試験体表面の微細ひび割れによって空気中の二酸化炭素が内部に侵入しやすくなったためだと推察される。

化学分析によって、乾燥開始材齢が遅れると湿潤側のセメントの水和は乾燥側と比べて進行することが確認できたことから、水和が十分進む部分と表面の乾燥を受ける部分で収縮量に差が生まれ、表面を拘束することで微細ひび割れが生じ、水和が進むとその影響は大きくなると考えられる。

4. まとめ

(1) 養生期間が長いほうがコンクリート表面における膨張ひずみが広範囲に分布した。これは組織の緻密化にともない、水分移動が緩慢になり、結果として乾燥面内側のコンクリート断面内の収縮ひずみ勾配が急になるためと考えられる。乾燥面内側の水分を保持しようとした場合には、ある程度の微細ひび割れの発生は不可避免なものと考えられた。

(2) 材齢3日から乾燥させた場合、10 cmの試験体については、試験体内部で早期から収縮が進行する傾向を示した。

(3) 本研究では、乾燥開始材齢に関わらず、セメントの水和は養生期間が長いほど進み、乾燥面に近くなるほど水酸化カルシウム生成量が多くなった。中性化につい

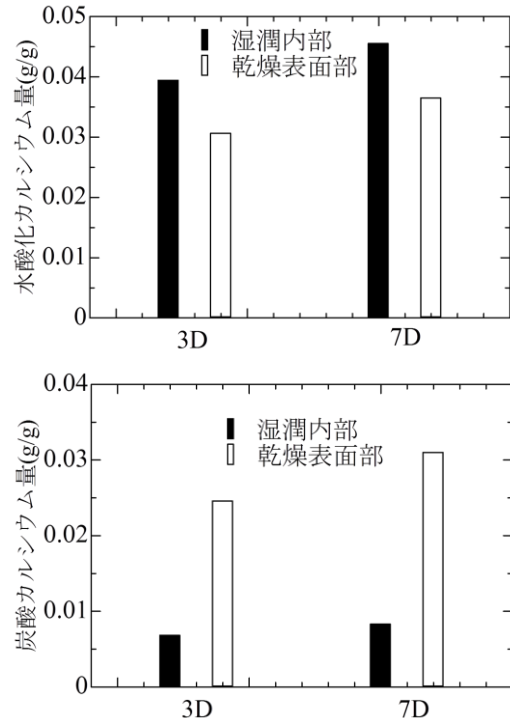


図-10 未反応セメント量あたりの水酸化カルシウムと炭酸カルシウムの生成量と乾燥開始材齢の関係

ては本研究の乾燥条件で乾燥 65 日では乾燥面近くで炭酸カルシウムが生成された。

参考文献

- 1) 伊代田岳史, 魚本健人: 初期材齢における乾燥履歴が水和反応と強度発現に与える影響, セメント・コンクリート論文集 55 巻 pp.116-121, 2001
- 2) 笠井芳夫: 極く早期脱型するコンクリートの強度に関する研究 (その 1, 2), 日本建築学会論文報告集, No.179, No.180, 1971.1, 2
- 3) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, 2009
- 4) T.C.Chu, W.F.Ranson, M.A.Sutton, W.H.Peters: Application of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics, *Experimental Mechanics*, Vol.25, No.3, pp.232-244, 1985
- 5) 篠野宏, 堀口直也, 丸山一平: 乾燥によりコンクリート断面に生じるひずみ分布と微細ひび割れ性状の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.454-459, 2012.7
- 6) セメント協会コンクリート専門委員会報告 F-18「硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験結果」および F-23「同(その 2)」
- 7) 吉岡昌洋: 各種ポルトランドセメントを用いるコンクリート品質にせき板存置期間が及ぼす影響の評価と仕様への適用に関する研究, 宇都宮大学博士論文, 2009.9