

論文 低炭素型モルタルの二次養生における養生剤の水分逸散抑制効果の評価

上谷 幸太郎*1・鈴木 南都*1・西脇 智哉*2・岡田 和寿*3

要旨 : CO₂ 排出量を削減した低炭素型コンクリートの実用化に向けて、プレキャスト製品を想定して加熱養生を施した混和材の大量使用による低炭素型モルタルに対して、養生剤を塗布した場合の水分逸散の抑制効果や圧縮強度、中性化の検証を行った。その結果、低炭素型モルタルであっても養生剤による水分逸散抑制効果が得られること、また、潜在水硬性による水和反応やポズラン反応などの停滞を防いで内部構造を緻密化することで、中性化の抑制効果が得られることを確認できた。

キーワード : 養生剤, 水分逸散, 低炭素, プレキャスト, 二次養生, アブサンデン現象

1. はじめに

2015 年に COP21 にて採択されたパリ協定にて、日本は 2050 年にカーボンニュートラルを達成することを宣言した。日本のセメント生産に伴う総 CO₂ 排出量は 3330 万 t (2023 年) となっている¹⁾。カーボンニュートラル達成のためには、セメント生産に伴う CO₂ 排出量を、より削減する必要がある。コンクリートに用いられるセメントは生産する際の CO₂ 原単位が大きく、セメントの使用量を削減した低炭素型コンクリートの使用が CO₂ 排出削減につながる。低炭素型コンクリートの一つには、セメントに代わり産業副産物を混和材に用いたコンクリートが挙げられる。産業副産物を使用することで、大幅な CO₂ 排出量削減と産業副産物の有効利用が可能になる²⁾。

しかし、この低炭素型コンクリートでは、強度発現性の低下や中性化速度の増加など様々な課題が報告されている³⁾。この原因として、セメントの使用量が少ないことによるコンクリート中のアルカリ性の低下や、水和反応の進行が抑制されるなどが挙げられる。

また、低炭素型コンクリート特有の課題にアブサンデン現象が挙げられる。アブサンデン現象は、コンクリート材齢初期に表層部の自由水が逸散し、水和進行が大きく影響を受け、表層部脆弱化することとされており^{4),5)}、この現象はコンクリートの表層部に限定される。魚本ら⁶⁾は結合材中のセメントの割合が 10%未満でアブサンデン現象が発生するとしており、低炭素型コンクリートの性能向上において、水分逸散の抑制は必須である。

低炭素型コンクリートは、品質の安定化などを目的にプレキャストコンクリート製品 (以下 PCa 製品) として製作されることが多い。PCa 製品は、打込み後に型枠ごと蒸気養生が施され、脱型後は出荷されるまで工場で保

管される。この脱型後の期間を以下、二次養生期間と称する。2023 年制定のコンクリート標準示方書 (施工編)⁷⁾では、二次養生期間における養生の必要性が記されている。この期間中に、水中養生やシート養生を行い、強度発現に必要な水分を十分に維持することができれば、PCa 製品の性能向上が期待される。一方で、PCa 製品を格納できる巨大な水槽の設備やシート敷設の施工性を考えると、現実的ではないことが予想される。これらのことから、二次養生では PCa 製品が空気中に曝されることが多く、コンクリート内の水分の逸散によって、水和反応が停滞してしまうと考えられる⁸⁾。

筆者らは、これらの問題の解決に向けて、コンクリート養生剤に注目した。養生剤の多くはコンクリートに対して散布または塗布するタイプで、PCa 製品に対しても簡易に使用できることから、二次養生期間における施工性の改善が期待できる。実際に、エコセメントを用いたコンクリートなどに、養生剤を用いた場合の水分逸散抑制効果などが報告されている⁹⁾。一方で、低炭素型コンクリートに養生剤を用いた場合の検討例は少なく、同様の効果が得られることは確認されていない。

これらの背景から、本研究では、低炭素型モルタルに養生剤を用いた際の水分逸散抑制効果を検証する。圧縮強度や中性化深さの測定、また、アブサンデン現象の程度を確認し、これらの結果と水分逸散の関係を検証する。また、また、結合材にセメントのみを使用した普通モルタルについても確認し、低炭素型モルタルに養生剤を用いることの優位性について論じる。

*1 東北大学 大学院工学研究科 都市・建築学専攻 (学生会員)

*2 東北大学 工学院工学研究科 都市・建築学専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 竹本油脂 (株) 第三事業部 研究開発部 部長 博士 (工学) (正会員)

2. 実験概要

2.1 試験体のパラメータ

実験の比較要素を表-1 に示す。実験はモルタルを用いて行った。結合材中のセメントの割合として 100%のもの、5%のものを準備した。二次養生の方法は、屋内または屋外での気中養生において、養生剤の有無により 4 通り、また、屋内での封緘養生と水槽での水中養生を含め、計 6 通りについて検討を行った。また、C5 および C100 の試験体作製時期と、二次養生時の屋内および屋外環境における平均気温、平均相対湿度を表-2 に示す。二次養生において、屋内環境は温度約 21℃の恒温室とし、屋外環境は、実際の PCa 製品の二次養生環境に近づけるために、雨がかり環境とした。水中養生は水温 20℃の水中に沈めた。試験体は全て実験の直前まで養生条件を変えないものとした。

2.2 使用材料と調合

セメントには普通ポルトランドセメント (C, 密度 3.16 g/cm³, 比表面積 3140 cm²/g) を、混和材には高炉スラグ微粉末 (GGBS, 密度 2.91 g/cm³, 比表面積 4140 cm²/g, 活性度指数 112 (材齢 91 日)), 改質フライアッシュ (CfFA, 密度 2.22 g/cm³, 比表面積 3680 cm²/g, 強熱減量 0.4, 活性度指数 99 (材齢 91 日)), シリカフューム (SF, 密度 2.20 g/cm³, 比表面積 200000 cm²/g) を用いた。細骨材には、砕砂 (福島県相馬郡産, 表乾密度 2.65 g/cm³, 粗粒率 2.90) と陸砂 (宮城県亶理郡産, 表乾密度 2.62 g/cm³, 粗粒率 2.02) を 1:1 で混ぜ合わせたもの (S, 表乾密度 2.64 g/cm³, 粗粒率 2.46) を使用した。混和剤には、高性能減水剤 (SP, ポリカルボン酸系, 密度 1.05 g/cm³) を使用した。養生剤には、ノニオン系界面活性剤を主成分とするものを用い、詳細な効果については後述する。

表-1 実験の比較要素

項目	種類	省略形
結合材中のセメントの割合	・ 100 % ・ 5 %	C100 C5
二次養生方法	・ 養生剤無し-屋内 ・ 養生剤有り-屋内 ・ 養生剤無し-屋外 ・ 養生剤有り-屋外 ・ 養生剤無し-封緘養生 ・ 養生剤無し-水中養生	無-内 有-内 無-外 有-外 封緘 水中

表-2 試験体の作製時期と養生環境

	作製時期	平均屋内環境		平均屋外環境	
		温度	湿度	温度	湿度
C5	2024/10/23	21 °C	51 %	14 °C	70 %
C100	2024/11/27	一定	41 %	5.3 °C	69 %

モルタルの調合表を表-3 に示す。結合材に混和材を用いず、セメントのみで作製したものを C100, 結合材の内 95 % を混和材で置き換えたものを C5 とした。C5 は鈴木ら¹⁰⁾の調合表 (C4) を参考に作製した。C100 の水結合材比は 53%とした。C5 における、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、シリカフュームの結合材全体に対する質量割合はそれぞれ 60%, 30%, 5%とし、水結合材比は 25%とした。

2.3 養生剤の効果

若材齢時のモルタルは、密実な硬化組織が形成されておらず、表面から水分が逸散しやすい状況にある¹¹⁾。そのため、本研究では、ノニオン系界面活性剤を主成分とする養生剤を使用した。ノニオン系とは、イオン性基をもたないという意味であり、電解質の影響を受けにくい特徴を持つ¹²⁾。水および養生剤の主成分の物性値を、表-4 に示す。養生剤の物性値には、化学構造が類似しているポリマーの物性値を用いた。表-4 より、この界面活性剤は水溶性で、密度も水に近いので、水に均一に溶解する。また、高沸点や低蒸気圧、高粘度という特徴があるほか、分子の両末端にヒドロキシ (-OH) 基を持つため、水分子と水素結合を形成する。すなわち、水素結合の一部に、低蒸気圧、高粘度の成分が混在することで、水分逸散が抑制されていると考えられる。

2.4 練混ぜ、打込み、養生方法

モルタルの練混ぜには、螺旋アーム式二軸強制練りミキサ (容量 60L) を使用した。一回の練混ぜ量は 20 L とした。C100 では、結合材と細骨材を入れ 60 秒間、さらに水を入れ 90 秒間練り混ぜた。C5 では、結合材と細骨材を入れ 60 秒間、水と混和剤を入れ 3 分間練り混ぜた。それぞれの練混ぜ時間は鈴木ら¹⁰⁾の検討を参考にした。

練り混ぜ後、直径 50 mm, 高さ 100 mm の金属製円柱型枠と、40×80×40 mm の金属製角柱型枠に打ち込み、後述する加熱養生を施して試験体を作製した。円柱試験体は、質量変化試験、圧縮試験、中性化試験に使用し、角柱試験体は削り試験に使用した。試験体の本数は、各材齢につき、質量変化試験で 4 本、圧縮試験で 3 本、中

表-3 試験体の調合表

	単位質量 (kg/m ³)						
	B (結合材)				S	W	SP
	C	GGBS	CfFA	SF			
C100	570	0	0	0	1367	302	0
C5	40	484	242	40	1291	202	4.0

表-4 水と養生剤の主成分の物性値比較

	水	養生剤の主成分
密度	0.99820 g/cm ³ (20 °C)	1.01 g/cm ³ (20 °C)
粘度	0.890 mPa·S (25 °C)	70 mPa·S (25 °C)

性化試験で1本、削り試験で1本を用いた。

加熱養生においては、打ち込み直後の型枠を、水を入れた金属の容器に置き、蓋をして養生テープで封をした後、オープンに入れて加熱養生を行うことで一般的なPCa製品工場などにおける蒸気養生の条件に近づけた。加熱養生の条件を図-1に示す。一般的な蒸気養生では、シートで覆った空間の中で、蒸気を吹きかけるものが多く、本研究の加熱養生でも試験体に蒸気が曝される環境としている。前養生として、打ち込み直後から20℃で3時間静置してから加熱養生を開始した。加熱養生では22.5℃/hで2時間昇温させ、65℃で3時間経過後、4.5℃/hで10時間かけて20℃まで降温させた。その後6時間静置し、打ち込みから計24時間後に脱型した。なお、封緘養生の試験体は、脱型せずにラップを被せ、養生テープで封をしてから、屋内環境にて二次養生を開始した。これらの制御温度や養生環境は、一般的なPCa製品工場 で用いられる蒸気養生の条件と類似したものである⁸⁾。

型後、角柱試験体についてはモルタルカッターを用いて長辺方向に二分した。また、養生剤有りの試験体には、養生剤塗布を開始した。養生剤は脱型直後の硬化モルタル全表面に、市販のローラーを用いて塗布した。一度塗布した後、養生剤が浸透し、試験体表面に水分のつやが見られなくなってから、二度目の塗布を行った。二度の塗布で計150g/m²を塗布した。

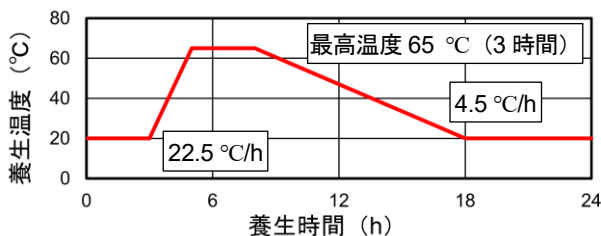


図-1 加熱養生の条件

2.5 試験項目

(1) 質量変化試験

加熱養生後(材齢1日)の質量を基準として、試験体表面からの水分逸散に伴う質量減少量を測定した。養生剤を塗布したものは、養生剤塗布後の質量を基準とした。試験体の材齢に関しては、C5、C100ともに材齢56日まで測定した。式(1)を用いて、質量変化率(%)を各材齢、各養生条件で4本ずつ求め、その平均値を算出した。求めた質量変化率で試験体の水分逸散量を評価した。

$$\text{質量変化率}(\%) = 100 - \frac{m_1 - m_2}{m_1} * 100 \quad (1)$$

ここで m_1 : 基準の質量, m_2 : 試験日の質量

(2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験はJIS A 1108に準拠し、載荷速度を0.6MPa/sとした。封緘養生を行っていた試験体について

は、試験直前に、脱型したものを使用した。試験体の材齢に関しては、C5は材齢14, 28, 56日で、C100は材齢14, 28日とした。各材齢、各養生条件で3本ずつ圧縮強度試験を行い、その平均値を算出した。

(3) 中性化試験

中性化試験は、JIS A 1152に準拠した。封緘養生をした試験体については、試験直前に脱型し、水中養生をした試験体については、試験直前に水中から取り出し、試験体を割裂した後、試験を行った。測定箇所は5mm間隔ごとに測定し、測定単位は0.5mmとした。試験体の材齢に関しては、C5は材齢14, 28, 56日で、C100は材齢14, 28日のそれぞれで測定した中性化深さから、 \sqrt{t} 則を用いて中性化速度係数を算出し、各材齢の中性化速度係数の平均値を用いて中性化深さの予測曲線を描いた。

(4) 削り試験

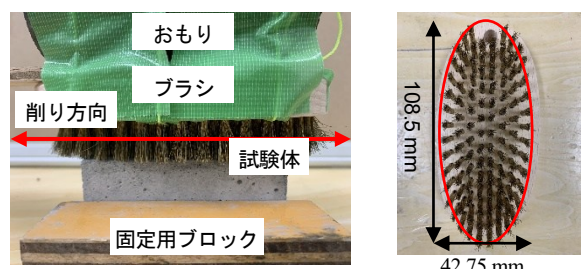
削り試験は、Chenら¹³⁾の厚さ減少率試験を参考に、試験体を万力で固定し、重しを載せた真鍮製ブラシを用いて試験体を削った。ブラシは、直径0.14mm、毛丈16mmの真鍮線が12500本備わっているものを用いた。ブラシが試験体の全面を覆う際に、削り面に与える応力(=荷重÷試験体削り面積/ブラシ面積×真鍮線断面積和)について、Chenら¹³⁾は約0.292kgf/cm²で試験を行っている。本研究ではこの値に近づけるため、かつ、ブラシの上に載せ、試験を行う容易さを考慮し、重しとブラシを合わせた重さは605gとした。このとき、削り面に与える応力は約0.347kgf/cm²であり、成人男性が立つ際に地面に与える圧力(0.133kgf/cm²)の、約2.5倍に相当する。

ブラシを動かす速度は2秒で1往復とし、100回往復した後の質量を測定した。ここで、1往復とは、ブラシの右端を試験体の左端まで、ブラシの左端を試験体の右端まで動かすこととした。

試験体の40×80mmの面のうち、打ち込み面を除いた3面で試験を行った。試験の前後で、試験体の質量を測定し、式(2)を用いて質量減少率(%)を3面それぞれで求め、平均値からアブサンデン現象の程度を評価した。

$$\text{質量減少率}(\%) = \frac{m_3 - m_4}{m_3} * 100 \quad (2)$$

ここで m_3 : 試験前の質量, m_4 : 試験後の質量



(a) 削り試験の様子 (b) 試験に用いるブラシ
写真-1 削り試験の状況

3. 実験結果と考察

3.1 質量変化試験

C5 と C100 のそれぞれにおける 6 種類の養生条件のモルタルについて、質量変化率の推移を図-2、図-3 に示す。C5、C100 のどちらにおいても、養生剤を塗布することで、気中養生時の質量変化率を小さくする結果となったため、養生剤による水分逸散を防ぐ効果が確認できた。また、屋外環境と比較して、屋内環境で質量減少が大きくなる結果となった。これは、屋内環境は屋外環境と比較して、湿度が低く、温度が高いためだといえる。一方で、養生剤を塗布した試験体は封緘養生よりも質量変化率が小さかった。本研究の封緘養生において、水分が逸散するのは、試験体上面からラップを透過する分のみである。一方、養生剤を塗布した場合、養生剤の効果により水分の逸散は抑制されるものの、逸散自体は発生するため、試験体全面から水分が逸散する。このため、養生剤の塗布よりも、封緘養生による水分逸散の抑制効果が上回ったといえる。C5 について、封緘養生と水中養生以外の養生条件の試験体では、C5 は C100 と比較して、材齢初期の質量変化率の傾きが、小さい結果となった。C5 では、結合材に混和材を多く使用しており、これらの混和材はセメントよりも比表面積が大きいため、内部構造が緻密になると考えられる¹⁴⁾。また、混和材のポズラン反応も同様に、緻密化に寄与できるものと考えられる。このことは、著者らの予備検討による MIP 計測の結果からも確認できる。これらのことから、C5 は C100 と比較して、材齢初期の水分の逸散速度が緩やかになったと考えられる。

同じ養生条件で比較すると、C5 は C100 よりも質量変化率が小さい。この原因として、C5 は C100 と比較して内部構造が緻密になっており、その結果、C5 の水分逸散量が低減された可能性がある。さらに、本研究で用いた養生剤は、自身の OH 基で水分子と水素結合を形成することで水分逸散を抑制する。そのため、モルタル内の自由水が多いほど、養生剤による水分逸散の抑制効果が大きいと期待できる。これらのことから、単位水量が多い C100 で、より自由水が多く存在し、より養生剤による水分逸散の抑制効果が確認されたと考えられる。

3.2 圧縮強度試験

C5 と C100 のそれぞれにおける 6 種類の養生条件のモルタルについて、圧縮強度試験の結果を図-4、図-5 に示す。また、C5 と C100 のそれぞれについて、質量減少率と圧縮強度の関係を図-6、図-7 に示す。

図-4 から、C5 について、材齢 56 日の結果を除けば、養生剤を塗布することで、最低で 2.9%、圧縮強度が増加する結果となった。C5 では、結合材に混和材を多く使用しているため、強度発現には、潜在水硬性やポズラン反

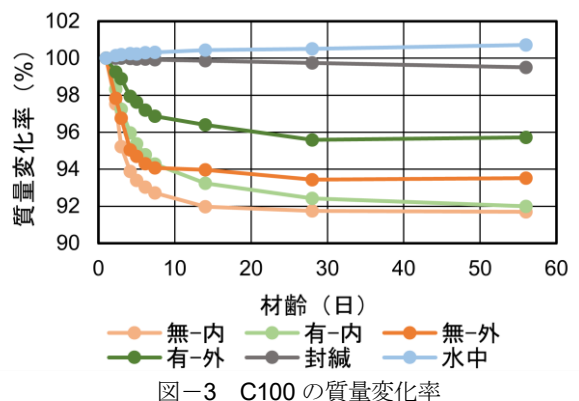
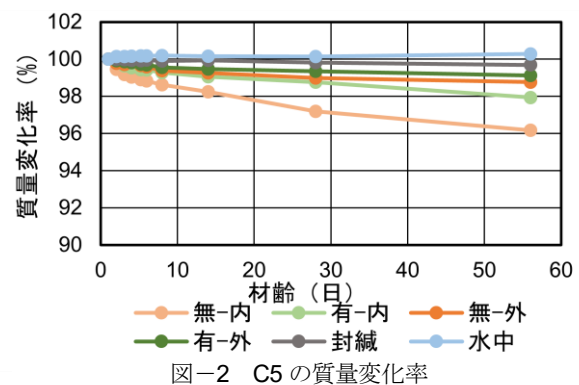
応が大きく関係している。養生剤の水分逸散抑制が、潜在水硬性やポズラン反応の進行に寄与した可能性が考えられる。しかし、水分逸散がない水中養生でも、圧縮強度は他の養生条件と近い値を示している。図-6 から、C5 では養生条件による水分逸散量の差が小さいために、圧縮強度の差も小さいと考えられる。C5 の材齢 56 日においては、有-外が無-外を下回った。これについて、予備検討として材齢 91 日で試験を行ったところ、有-外が無-外を上回った。そのため、長期材齢における養生剤の強度増進効果に関しては、今後の検討対象である。

図-5 から、C100 については、養生剤を塗布することで、最低で 15.9%、圧縮強度が増加する結果となり、C5 よりも強度の増加が著しかったといえる。図-7 から、C100 では、質量減少と共に圧縮強度も減少している傾向が見られる。このことから、単位水量が C100 の方が多いため、養生剤の水分逸散抑制効果が大きく作用したことや、水分逸散抑制が、潜在水硬性やポズラン反応よりも、セメントの水和反応の進行に対する寄与が大きいためだと考えられる。

3.3 中性化試験

C5 における 6 種類の養生条件のモルタルについて、中性化深さ試験の結果を図-8 に示す。なお C100 に関しては、材齢 28 日時点での中性化深さが、全ての養生条件において 0 mm であった。

図-8 より、C5 は養生剤を塗布したことで、中性化速度が 45%以上低減される結果となった。養生剤の水分逸



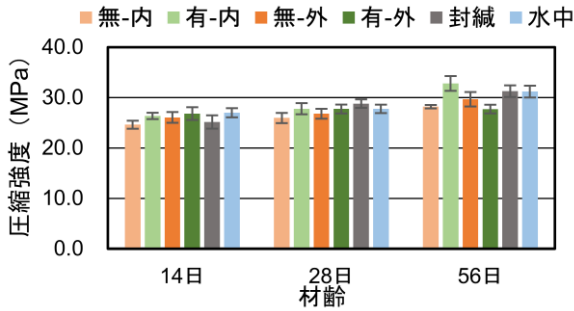


図-4 C5の圧縮強度

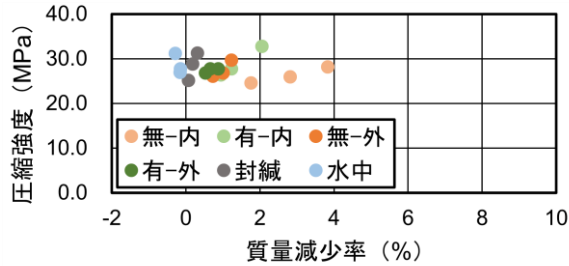


図-6 C5の質量減少率と圧縮強度の関係

散の抑制が、水和反応の停滞を防ぐ。水和反応により、毛細管空隙量は増加するものの、相対的に大きな空隙量が減少する。その結果、内部構造は緻密になる。また、養生剤による、水和反応の停滞の抑制により、ポズラン反応がより進みやすくなると期待できる。ポズラン反応に伴い生成するポズラン反応相の膨張力により、空隙が充填され、内部構造が緻密になる。以上の内部構造の緻密化により、CO₂の侵入量を減少させ、中性化の進行を抑制させたと考えられる。また、養生剤により、モルタル内に水分が残ったことで、CO₂の侵入が妨げられた可能性も考えられる。このことから、養生剤による水分逸散量の抑制量が、中性化速度に与える影響が極めて大きいと言える。また、屋内養生で屋外養生より中性化速度が大きいのは、屋内は屋外よりも温度が高く、湿度が低いことに起因していると考えられる。

C5の材齢14, 28, 56日の質量減少率と中性化深さの関係を図-9に示す。封緘養生と水中養生をしたものについては、質量減少率、中性化深さのいずれもゼロと見なせるために省略している。全ての養生条件にて、回帰式の傾きは正の値となり、決定係数も1に近い値となった。したがって、養生条件の違いに関わらず、水分逸散量と中性化深さには正の相関が見られる。これは榊原ら¹²⁾の主張と同じような傾向を示した。

3.4 削り試験

C5とC100のそれぞれにおける6種類の養生条件のモルタルについて、削り試験の結果を図-10、図-11に示す。各二次養生方法において、C5は左から材齢14日、28日、56日の結果であり、C100は左から材齢14日、28日の結果である。

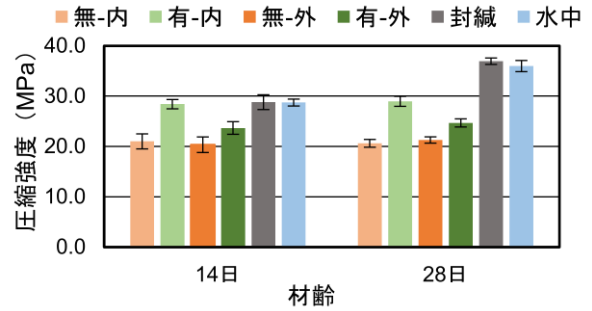


図-5 C100の圧縮強度

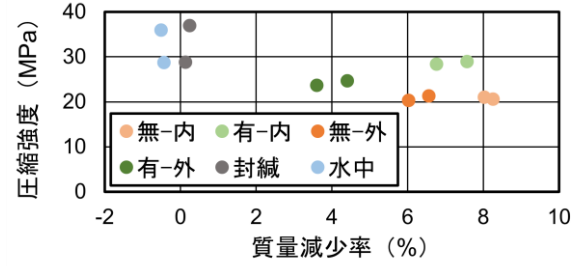


図-7 C100の質量減少率と圧縮強度の関係

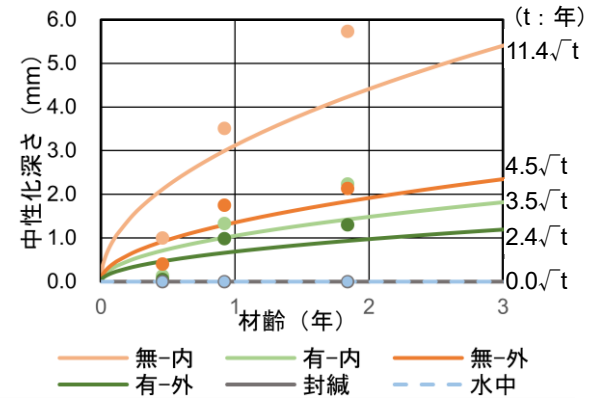


図-8 C5の中性化試験の結果

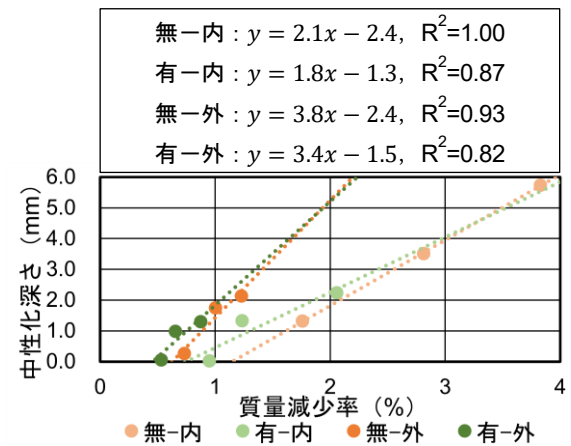


図-9 C5の質量変化と中性化深さの関係

図-10より、同じ材齢、同じ養生環境(内外)で比較すると、C5で養生剤を塗布した試験体は、養生剤無しの試験体よりも質量減少率が小さい結果となった。これは、3.3の中性化の節でも述べたように、養生剤の水分逸散抑制により、水和反応やポズラン反応により内部構造が緻密化し、CO₂の侵入を抑制した結果、アブサンデン現象を抑制したためだと考えられる。

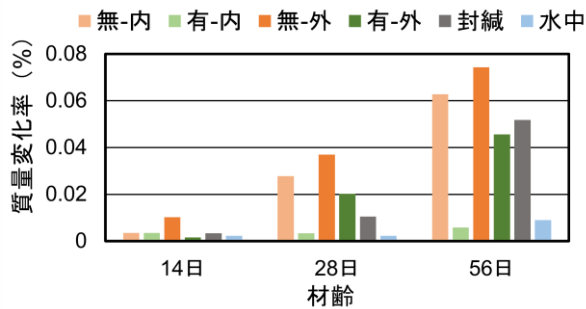


図-10 C5の削り試験結果

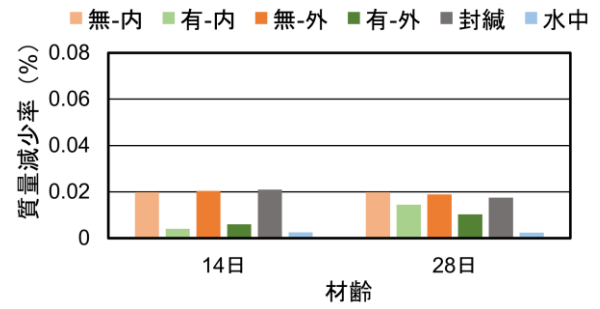


図-11 C100の削り試験結果

図-10より、C5では、材齢が長くなるほど質量減少率が大きくなる結果となった。これから、材齢の長期化に伴ってCO₂の侵入量が増加し、アブサンデン現象が進行したことを確認できる。一方で、図-11より、C100では、材齢が増加しても質量減少率は大きくない。C100ではアブサンデン現象が生じないため、これは妥当な結果と言える。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 低炭素型モルタルと普通モルタルのいずれの場合も、養生剤を塗布したことによる水分逸散抑制効果が確認できた。
- 2) C100では、水分逸散量を抑えるほど圧縮強度が増大する関係が確認できた。C5では、養生条件による水分逸散量の差が小さいために、圧縮強度にも大きな差が確認されなかった。
- 3) C5では、水分逸散量と中性化速度には強い正の相関が見られた。養生剤の塗布により、中性化速度を大きく低減することを確認した。
- 4) C5では、材齢が大きくなるとともにアブサンデン現象が進行することを確認した。また、養生剤の使用は、アブサンデン現象の抑制に有効であることを確認できた。

謝辞

本研究の実施にあたり、竹本技研株式会社の山本陽一氏に養生剤を提供していただき、また、多くの助言をいただいた。ここに記し深謝する。

参考文献

- 1) セメント産業の循環型社会実現への貢献とカーボンニュートラル (CN) に向けた取組み: https://www.jcassoc.or.jp/cement/4pdf/241024_01.pdf (閲覧日: 2025年3月18日)
- 2) 小林利充: 脱炭素社会に向けた低炭素型コンクリートに関する取組み, コンクリート工学, Vol. 59, No. 9, pp. 770-775, 2021

- 3) 小林利充: 環境に配慮した低炭素型のコンクリート, コンクリート工学, Vol. 54, No. 5, pp. 578-581, 2016
- 4) Zermin W. (徳永吉郎訳): 建築技術者のためのセメントコンクリート化学, 技報堂, pp. 77, 1969
- 5) 小林一輔, 魚本健人: スラグ石こう系セメントを用いたコンクリートの耐久性, 生産研究, Vol. 32, No. 3, pp. 88-94, 1980.3
- 6) 魚本健人, 小林一輔, 星野富夫: 高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を用いたコンクリートの劣化, コンクリート年次論文集, Vol. 2, pp. 69-72, 1980
- 7) 土木学会: コンクリート標準示方書 [施工編], 2023
- 8) 寺川麻美, 宇治公隆, 上野敦, 大野健太郎: プレキャストコンクリート製品の細孔構造に及ぼす養生条件の影響, コンクリート年次論文集, Vol. 34, No. 2, pp. 469-474, 2012
- 9) 小山善行, 早川光敬, 陣内浩, 山田直毅: エコセメントを用いたモルタルにおけるコンクリート用養生剤の効果に関する研究, コンクリート年次論文集, Vol. 30, No. 2, pp. 193-198, 2008
- 10) 鈴木南都, 小林紀行, 小林知大, 西脇智哉: CO₂排出量削減を実現するセメントコンクリートの開発と評価, コンクリート年次論文集, Vol. 45, No. 1, pp. 1054-1059, 2023
- 11) 榊原泰造, 近松竜一, 十河茂幸: コンクリートの乾燥防止用各養生剤の適用効果, コンクリート年次論文集, Vol. 27, No. 1, pp. 817-822, 2006
- 12) 近藤行成: 界面活性剤の定義と種類, 色材協会誌, Vol. 89, No. 2, pp. 59-63, 2016
- 13) Chen J., 平本真也, 檀康弘, 辻大二郎: 高炉スラグ微粉末の置換率がアブサンデン現象の発生に及ぼす影響に関する実験的検討, コンクリート年次論文集, Vol. 46, No. 1, pp. 1315-1320, 2024
- 14) 李長江, 依田彰彦, 横室隆: 高炉スラグを用いたモルタルの細孔構造と乾燥収縮, コンクリート年次論文集, Vol. 20, No. 2, pp. 187-192, 1998