

論文 ガラス繊維補強モルタルの炭酸化速度に関する検討

取達 剛*1・横関 康祐*2・永井 勇輔*3・藤木 昭宏*4

要旨: 筆者らは、モルタルを炭酸化させることによってガラス繊維のアルカリ劣化を抑制した、ガラス繊維補強モルタルの埋設型枠への適用を検討している。ガラス繊維補強モルタルからなる埋設型枠は、製造サイクルの向上によるコストダウンを目的として、即時脱型方式を採用している。本検討では、埋設型枠のさらなる生産性向上を目的に、合理的な炭酸化養生条件について検討した。その結果、炭酸化養生中の CO₂ 濃度を高めること、および炭酸化養生前に乾燥させることが炭酸化速度増大に効果があることを確認した。また、炭酸化養生中の過度な湿度低下はモルタルの曲げ強度や耐久性を低下させる可能性があることを確認した。

キーワード: ガラス繊維, 即時脱型, 炭酸化, CO₂, 湿度, 曲げ強度, 空隙率

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性や施工時の生産性向上を目的として、構造物の表面にプレキャストコンクリートを埋設型枠として用いる事例が報告されている¹⁾。埋設型枠は、設置時の取り回しやすさや型枠支保部材低減のために軽量なものが望ましく、3~4cm 程度の薄肉部材で使用されることが多い。そのため、曲げ靱性の付与、ならびに運搬時やコンクリート施工時の作用荷重による変形に伴うひび割れ抵抗性確保の観点から、繊維補強材が多く用いられている。筆者らは、繊維補強材としてガラス繊維に着目した。ガラス繊維は安価で引張強度が高いことから、補強材としての性能は優れているが、繊維自体が高アルカリ環境下で劣化してしまうため、用途が限られていた。著者らはこれまでに、モルタルの炭酸化によってガラス繊維のアルカリ劣化を抑制した、ガラス繊維補強モルタル (以下、GRM) の、埋設型枠への適用検討を行っている²⁾。過去の検討では、型枠への流し込みが可能な GRM を対象としていたが、一日あたりの製造量に限界があることから、GRM の大量製造によるコストダウンを目的として、即時脱型方式に着目した。検討の結果、ガラス繊維を混入しても密実な締固めが可能で、ガラス繊維による適切な曲げ補強効果が得られる GRM の配合を室内試験にて選定した³⁾。また、この配合は、実際の製造・養生設備を用いても室内試験と同等の強度が得られ、普通コンクリートと同等以上の塩化物イオン浸透抵抗性を有することを確認した⁴⁾。

即時脱型方式を採用することで 1 日に 100 枚以上の埋設型枠の製造が可能となった。しかしながら、筆者らが検討してきた GRM はガラス繊維のアルカリ劣化抑制のために炭酸化養生を行うため、炭酸化養生日数の低減が GRM の生産性を大きく左右することとなる。

そこで本検討では、CO₂ 濃度、湿度および繊維添加率が即時脱型方式の GRM の炭酸化速度およびモルタルとしての硬化物性に及ぼす影響を評価した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

GRM の使用材料を表-1 に示す。使用したガラス繊維



写真-1 ガラス繊維 (E ガラス)

表-1 使用材料

材料	記号	摘要
水	W	水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント: 密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3310cm ² /g
混和材	BFS	高炉スラグ微粉末: 密度 2.90g/cm ³ , 比表面積 4330cm ² /g
	γC ₂ S	γ C ₂ S, 密度 2.85g/cm ³ , 比表面積 2500cm ² /g
	F	フライアッシュ: 密度 2.19g/cm ³ , 比表面積 3770cm ² /g, 強熱減量 3.2%
細骨材	S	砕砂, 密度 2.63g/cm ³
混和剤	AD1	高性能減水剤 (標準形 I 種) ポリカルボン酸系化合物
	AD2	粉体系増粘剤
ガラス繊維	GF	E ガラス, 密度 2.60g/cm ³ , 繊維長 12mm

*1 鹿島建設(株) 技術研究所 土木材料グループ 主任研究員 修士(工学) (正会員)

*2 東洋大学 理工学部 都市環境デザイン学科 教授 博士(工学) (正会員)

*3 鹿島建設(株) 技術研究所 土木構造グループ 研究員 修士(工学) (正会員)

*4 ランデス(株) 品質推進本部 本部長 博士(工学) (正会員)

表-2 GRMの配合

W/P (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)								GF 外割混合 (kg/m ³)	単位容積質量 (kg/m ³)
		W	C	BFS	γC ₂ S	F	S	AD1	AD2		
30.0	7	260	253	446	45	187	894	15.4	13	26 (1.0Vol%)	2,084

※P=C+BFS+γC₂S+F

は写真-1 に示す繊維長 12mm, フィラメント径 18 μm の短繊維である。炭酸化によって GRM の pH が低下することから, 本検討では耐アルカリ性を持たない安価な E ガラスを用いた。

GRM の配合を表-2 に示す。一般的な即時脱型タイプのモルタルは, 脱型直後のモルタルが自立するように, W/C=30%程度, 単位水量 120~130kg/m³ 程度の超硬練りの材料が用いられている⁵⁾。本検討で用いた GRM は, 一般的な即時脱型モルタルと同様に W/P=30%としつつ, ガラス繊維混入による締固め性能の低下抑制と, 練混ぜ時のガラス繊維の破断抑制を目的として, ペースト量を増加させ, 単位水量を 260kg/m³ に設定した。また, 単位水量の多いモルタルを自立させるために, 粉体系増粘剤を用いた。運搬時やコンクリート施工時の作用荷重による変形に伴うひび割れ抵抗性確保を目的として, ガラス繊維外割添加で 1.0Vol%を基本として添加した。結合材には普通ポルトランドセメント, 高炉スラグ微粉末, フライアッシュに加えて, CO₂ と反応して硬化する性質を有する γC₂S⁶⁾ を用いた。なお, 表-2 に示した配合のモルタルで, 曲げ強度 6N/mm² 程度が得られることを確認している⁴⁾。

2.2 供試体の作製方法

繊維以外の材料を公称容量 55L の強制二軸ミキサに 40L 投入して 120 秒練り混ぜ, その後, 所定の量のガラス繊維を投入し, 30 秒練り混ぜた。なお, 練混ぜ完了時の GRM のモルタルフロー (15 打) は繊維投入前で 105mm であった。練混ぜ完了後, ただちに 100×100×400mm の鋼製型枠に厚さ 40mm 分になるように GRM を投入し, 100×400cm の支圧面積を有する治具を取り付けたランマにて人力で 5 秒間加圧した。加圧後, ただちに鋼製型枠の側面を脱型した。

2.3 試験ケースと養生方法

上述した方法によって作製した 40×100×400mm の角柱供試体を, 温度 20℃, 湿度 60%の環境に 4 時間静置した。以降, これを『前養生無し』と称する。その後, 表-3 に示した試験ケースの環境で炭酸化養生を行った。炭酸化養生における温度は 50℃で一定とし, CO₂ 濃度は 15%, 50%, 75%の 3 水準, 相対湿度は 40%と 30%の 2 水準とした。また, 『前養生有り』の Case4 と Case6 は, 炭酸化養生開始前に供試体を乾燥させることを目的とし

表-3 試験ケースと養生条件

Case	前養生	CO ₂ 濃度 (%)	湿度 (%)
1	無し	15	40
2	無し	50	40
3*	無し	75	40
4*	有り	75	40
5	無し	75	30
6	有り	75	30

※繊維添加率 1.5Vol%も実施

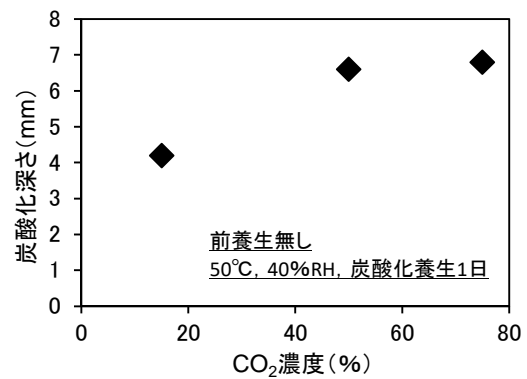


図-1 CO₂ 濃度と炭酸化深さの関係

て, 供試体作製後に, 温度 20℃, 湿度 60%の環境で 1 日静置してから炭酸化養生を開始した。炭酸化養生期間は, Case1 と Case2 は 28 日間とした。Case3~Case6 は炭酸化養生期間を 7 日間とし, その後は材齢 28 日まで温度 20℃, 湿度 60%の環境で養生した。なお, Case3~Case6 はいずれも 7 日間の炭酸化養生で全面炭酸化した。

さらに, 繊維添加率が炭酸化速度や硬化後の曲げ補強効果に及ぼす影響を評価するために, Case3, Case4 については繊維添加率 1.5Vol%についても検討した。

2.4 試験方法

炭酸化養生中に定期的に供試体を養生槽から取り出して割裂し, JIS A 1152 に準拠して 1%フェノールフタレイン溶液を噴霧し, ガラス繊維の劣化が抑制可能な領域の指標として, 炭酸化深さを測定した。また, 材齢 7 日時点で全面炭酸化した Case3~Case6 について, その後の気中養生を経て, 材齢 14 日にてスパン長 300mm として 3 等分点曲げ載荷試験によって曲げ強度を測定した。載荷試験の際には試験体中央載荷点のたわみを測定した。

さらに、Case3～Case6について、炭酸化養生7日後および材齢28日にて水銀圧入式ポロシメータにて3nm～300 μ mの細孔径分布を測定した。測定用試料は供試体全域を対象とし、アセトン浸漬したあと24時間の真空凍結乾燥を実施して測定に供した。測定は2回行い、その平均値を取りまとめた。

3. 実験結果

3.1 炭酸化深さ

(1) CO₂濃度の影響

CO₂濃度と、1日炭酸化養生後の炭酸化深さの関係を図-1に示す。CO₂濃度を高めるほど、炭酸化深さは大きくなる傾向が得られた。また、その傾向はCO₂濃度の増加とともに緩慢となった。既往の研究によると、CO₂がコンクリート中を濃度拡散で浸透する場合、炭酸化速度はCO₂濃度の平方根に従うとされており⁷⁾、本検討においてもこれに類似した結果が得られた。

次に、CO₂濃度15%とCO₂濃度75%の環境における、炭酸化養生日数と炭酸化深さの関係を図-2に示す。CO₂濃度を15%として炭酸化養生を行うと、炭酸化深さは時間の平方根に従って増加し、一般的な中性化と同等の傾向が得られた。一方、CO₂濃度を75%として養生すると、養生日数に伴って炭酸化深さが線形に増加し、炭酸化養生7日の時点で厚さ40mmの全面が炭酸化した。

CO₂と反応して硬化する γ -C₂Sを用い、緻密なセメント系材料の構築を目指した著者らの先行研究⁸⁾では、CO₂濃度を高めると、 γ -C₂Sやセメント硬化体の炭酸化による組織の緻密化が進行するため、濃度拡散にて想定されるよりも炭酸化が進行しないという結果が得られていた。すなわち、本検討における試験結果はこれと異なる傾向となった。本検討で対象としたGRMは設計空気量が7%であり、製品としての空隙が一般的なセメント系材料に比べて多いために、CO₂の高濃度化が炭酸化の進行に大きく寄与したものと考えられるが、詳細なメカニズムについては解明できておらず、今後の課題である。

(2) 前養生の有無が炭酸化速度に及ぼす影響

前養生ありと前養生無しにおける、炭酸化養生日数と炭酸化深さの関係を図-3に示す。前養生として1日の乾燥期間を設けることで、炭酸化深さは3mm程度大きくなり、養生1日で厚さ40mmのパネルを片側10mm以上炭酸化させることが可能となった。既往の研究⁹⁾では、初期に乾燥を受けたコンクリートは中性化が進行しやすいとされており、本検討にて実施した配合・環境条件においても、炭酸化養生前に乾燥させることは炭酸化速度の増大に有効と考えられる。

(3) 相対湿度が炭酸化速度に及ぼす影響

相対湿度40%と30%における、炭酸化養生日数と炭

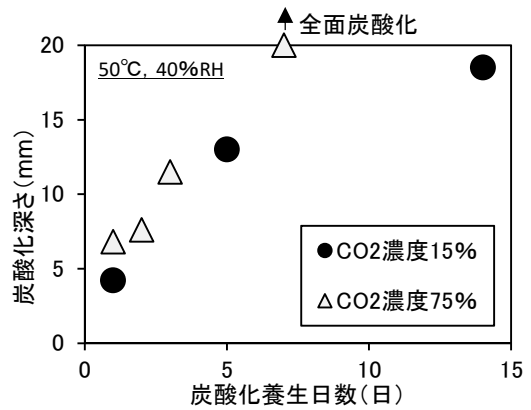


図-2 養生日数と炭酸化深さの関係

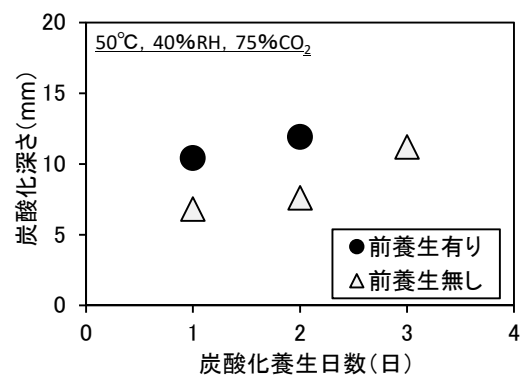


図-3 前養生の有無が炭酸化深さに及ぼす影響

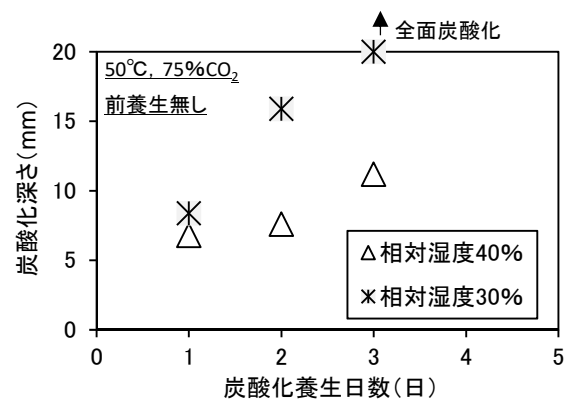


図-4 湿度が炭酸化深さに及ぼす影響

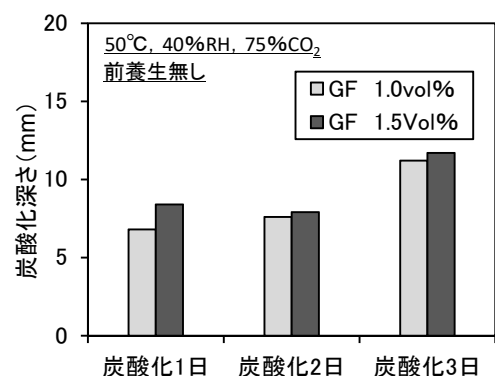


図-5 繊維添加率が炭酸化深さに及ぼす影響

酸化深さの関係を図-4 に示す。養生 1 日においては湿度 30%のほうが、40%に比べてわずかに炭酸化深さが大きい、養生 2 日においてその差が大きく開き、湿度 30% においては養生 3 日で厚さ 40mm が全面炭酸化した。本検討の目的である、炭酸化速度の増大という観点では湿度 30%の方が望ましいが、養生 1~2 日での炭酸化の進行の仕方を踏まえると、湿度 30%の GRM については乾燥に伴う微細なひび割れの発生や組織の脆弱化等によって炭酸化が促進された可能性があり、後述する硬化物性を含めて総合的な評価が必要である。

(4) 繊維添加率が炭酸化速度に及ぼす影響

GF 添加率 1.0Vol%と 1.5Vol%における、養生 1 日、2 日、3 日の炭酸化深さを図-5 に示す。繊維添加率が高いほど炭酸化がやや進みやすいが、その差はごくわずかであり、GF が炭酸化速度に及ぼす影響は小さい。

3.2 曲げ強度

炭酸化深さの検討によって、養生中の CO₂ 濃度を高めることが GRM の炭酸化速度向上に極めて効果的であることが確認されたことから、以降の硬化物性については、CO₂ 濃度 75%の環境で養生した Case3~Case6 について、前養生の有無や養生中の湿度が硬化物性に及ぼす影響について評価した。

(1) 前養生が曲げ強度特性に及ぼす影響

前養生無し (Case3) と前養生有り (Case4) における、材齢 14 日の曲げ強度を図-6 に、応力~たわみ関係を図-7 に示す。同図には、GF 添加率 1.0Vol%と 1.5Vol%の結果を併せて示した。GF 添加率 1.0Vol%においては、前養生を行うことで曲げ強度がやや低下した。炭酸化養生を行う前に乾燥させることで、GRM 表面において組織がやや粗になった可能性がある。また、表面と内部での収縮量の差によって生じる応力が曲げ強度低下をもたらすと言われており¹⁰⁾、これらが GRM の曲げ強度に影響した可能性がある。一方、応力~たわみ関係については、前養生の有無によって差は見られず、ガラス繊維による GRM の曲げ補強効果が得られていると考えられる。

(2) 相対湿度が曲げ強度特性に及ぼす影響

相対湿度 40% (Case3, Case4) と 30% (Case5, Case6) における、材齢 14 日の曲げ強度を図-8 に、応力~たわみ関係を図-9 に示す。同図には、前養生の有無についても併せて示した。湿度 40%に比べて、湿度 30%で炭酸化養生することで曲げ強度が低下すること、また、前養生が無い場合にその傾向が大きい結果となった。前養生を行わない場合、打込みの当日から炭酸化養生を開始した。その結果、湿度 30%では硬化途中からやや乾燥を受けた状態となり、これが曲げ強度低下の原因となったと考えられる。以上のことから、養生中の湿度を 30%に設定するような、GRM を過度に乾燥させる環境にて養生

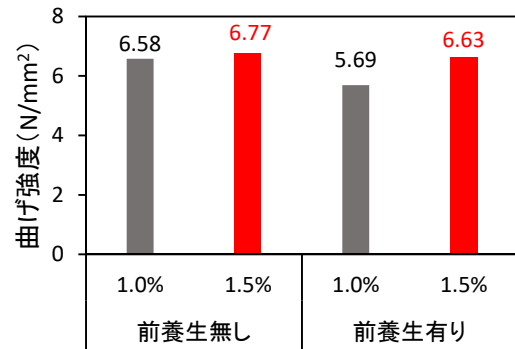


図-6 前養生の有無が曲げ強度に及ぼす影響

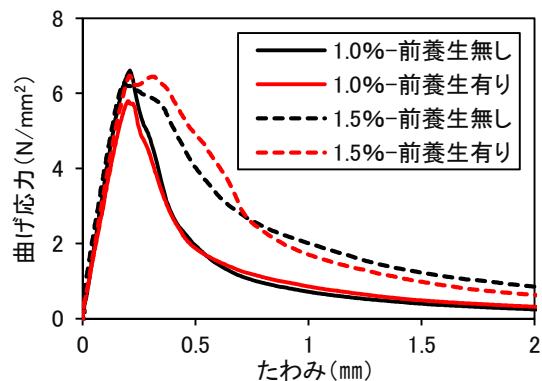


図-7 応力~たわみ関係

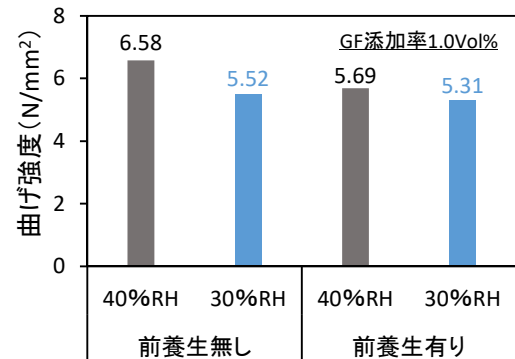


図-8 湿度が曲げ強度に及ぼす影響

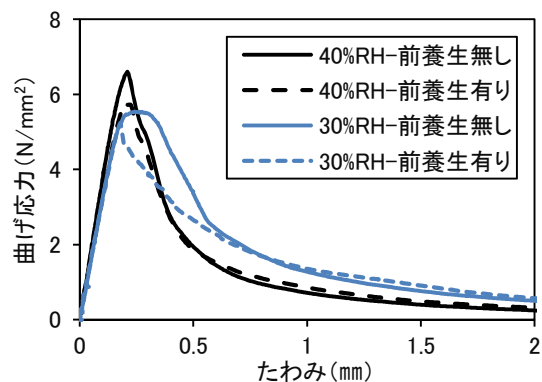


図-9 応力~たわみ関係

を行うと、炭酸化は進みやすくなる一方で、曲げ強度がやや低下する可能性があることが明らかとなった。なお、**図-9**に示すように、曲げ靱性については、湿度30%で養生した場合にも湿度40%と同等以上の補強効果がGRMに付与されることを確認した。

前述のとおり、筆者らは、このGRMを埋設型枠として用いることを検討している。埋設型枠として適用する場合には、ひび割れ発生強度が支保工の設計に影響を与えることから、実際にGRMを製造する設備の締固め能力や養生環境に即した、適切なひび割れ発生強度(=曲げ強度)の管理値の設定が今後の課題と考える。

3.3 空隙径分布

(1) 炭酸化養生による空隙径分布の変化

前養生無し (Case3) における炭酸化養生7日後、および材齢28日の空隙径分布を**図-10**に示す。前述のとおり、この養生環境においては炭酸化養生7日の時点で厚さ40mmの全域が炭酸化していた。同図によると、7日と28日における空隙径分布はほぼ同等であった。このことから、本検討に用いたGRMは全面炭酸化した時点で反応が収束していると考えられる。

(2) 前養生が空隙径分布に及ぼす影響

前養生無し (Case3)、および前養生有り (Case4) における、材齢28日の細孔径分布を**図-11**に示す。なお、同図には、既往の研究¹¹⁾にて得られたW/C=55.0%の普通ポルトランドセメントを用いた普通コンクリートNの材齢98日における細孔径分布を併せて示した。本検討で用いたGRMのW/Pは30%であり、普通コンクリートNに比べて0.1 μ m以下の細孔量が多く、0.1~1.0 μ mの比較的粗大な空隙が少ないという特徴を有する。前養生の有無で比較すると、前養生を行うことで、0.1~10 μ mの比較的大きな空隙が増加する結果となった。空隙の粗大化は塩化物イオン等の外部からの劣化因子の浸透を助長する恐れがある。

(3) 湿度が空隙径分布に及ぼす影響

湿度40% (Case3) および30% (Case5) における、材齢28日の細孔径分布を**図-12**に示す。なお、同図には、**図-11**と同様に、W/C=55.0%の普通コンクリートNの材齢98日における細孔径分布を併せて示した。炭酸化養生における湿度を30%にした場合、湿度40%に比べて0.1~10 μ mの空隙が増加する結果となった。これは、前養生有りの空隙径分布と同様の傾向である。前述のとおり、前養生を行わない場合、打込みの当日から炭酸化養生を開始することとなるため、湿度30%ではGRMが硬化途中からやや乾燥を受けた状態となったと考えられる。これによって空隙が粗大化し、炭酸化速度が大きく向上したのと考えられる。

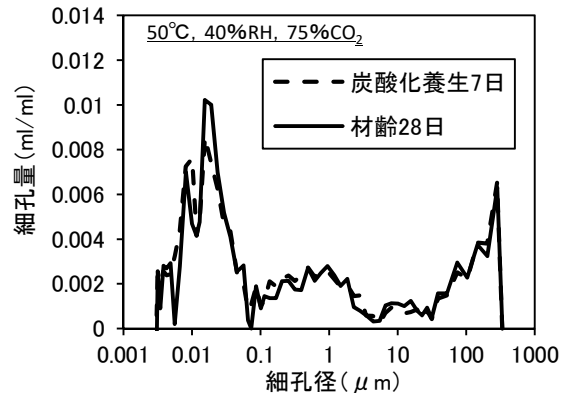


図-10 材齢が空隙径分布に及ぼす影響

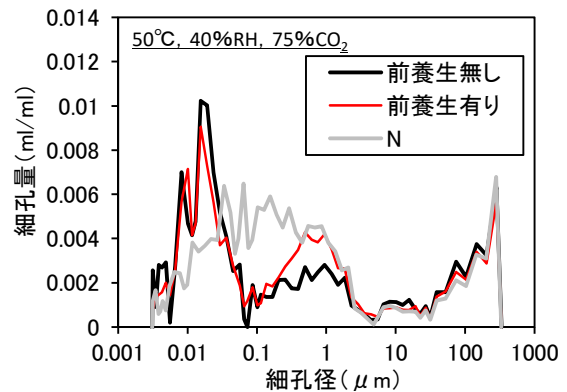


図-11 前養生の有無が細孔径分布に及ぼす影響

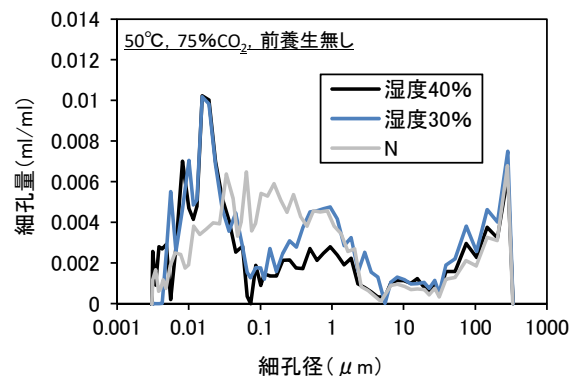


図-12 養生中の湿度が細孔径分布に及ぼす影響

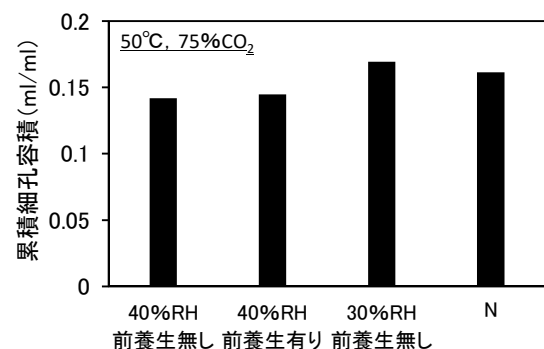


図-13 累積細孔容積

上述した細孔径分布に関する試験結果を、累積細孔容積にて整理したものを図-13に示す。湿度40%の環境で炭酸化養生を行う場合、前養生の有無によらず、累積細孔容積は図-12に示した普通コンクリートN¹¹⁾よりも小さい結果となった。筆者らの過去の研究⁴⁾において、GRMの塩分浸透抵抗性はW/C=45%の普通コンクリート相当と試算されており、図-13はその研究結果を裏付けるものと考えられる。一方、湿度30%で炭酸化養生をした場合、累積細孔容積が普通コンクリートよりも大きい結果となった。炭酸化速度を向上させるためには養生中のCO₂濃度の増加および前養生における乾燥が効果的であるが、過度な乾燥はGRMの力学特性や耐久性を低下させる恐れのあることが明らかになった。

4. まとめ

本検討では、炭酸化させたガラス繊維補強モルタルの生産性を向上させるために、合理的な炭酸化養生条件について検討を行うとともに、その品質について評価した。その結果、養生中のCO₂濃度を高めること、および炭酸化養生前に乾燥させることがGRMの炭酸化速度増大に寄与することを明らかにした。また、炭酸化養生中の過度な湿度低下はモルタルの曲げ強度を低下させ、空隙の粗大化を助長する可能性があることを確認した。今後は、実際の製造設備を用いてGRMの製造性を確認するとともに、養生設備における環境のばらつきがGRMとしての各種硬化物性に及ぼす影響を評価する予定である。

参考文献

- 1) 本田ほか：有機繊維を用いた埋設型枠の性能と適用事例，第70回土木学会年次学術講演会，pp.347-348，2015
- 2) 関ほか：炭酸化技術によるガラス繊維補強埋設型枠の耐久性向上，コンクリート工学，Vol.54，No.6，pp.

607-612，2016.6

- 3) 取違ほか：炭酸化させたガラス繊維補強モルタルの施工性および曲げ強度に関する検討，第72回土木学会年次学術講演会，pp.1071-1072，2017
- 4) 取違ほか：炭酸化させたガラス繊維補強モルタルの曲げ強度および塩分浸透抵抗性に関する検討，第73回土木学会年次学術講演会，pp.867-868，2018
- 5) 木村彩永佳，関健吾，取違剛，横関康祐：炭酸化養生を行った環境負荷低減型コンクリートの環境影響評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.2254-2259，2014
- 6) 渡邊賢三，横関康祐，坂田昇，坂井悦郎： γ -2CaO・SiO₂および各種ポゾランを添加した硬化体の炭酸化反応による空隙充てん機構，土木学会論文集E2，Vol.68，No.1，pp.83-92，2012
- 7) 魚本健人，高田良章：コンクリートの中性化速度に及ぼす要因，土木学会論文集，No.451，V-17，pp.119-128，1992
- 8) 渡邊賢三，横関康祐，取違剛，坂井悦郎： γ -2CaO・SiO₂を添加したセメント系材料の各種炭酸化養生条件における物理・化学特性，土木学会論文集E2，Vol.68，No.3，pp.157-165，2012
- 9) 横塚清規，半井健一郎，李春鶴：供試体の寸法および乾燥期間がセメント硬化体の中性化進行に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.725-729，2011
- 10) 岡田清，六車熙：コンクリート工学ハンドブック，p.403，1981
- 11) 温品達也，渡邊賢三，坂井吾郎，石田哲也：種々の結合材を用いたコンクリートに対する長期特殊養生シート養生の効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.747-752，2016