

論文 コンクリートの現場炭酸化養生技術に関する研究

小林 聖*1・取違 剛*1・渡邊 賢三*2・横関 康祐*3

要旨: コンクリートを強制的に炭酸化させることでセメント硬化体を緻密化させ、物質遮断性を向上させる手法を検討し、このコンクリートをプレキャスト部材として実際の栈橋補修工事に適用した。しかし、本手法は炭酸化養生という特殊作業が必要となるため、工場製作のプレキャストでの適用に限られていた。今回、場所打ち用の炭酸化コンクリート配合を選定し、現場の炭酸化養生を試みた。その結果、適切な養生槽を用いることで養生環境を制御することができ、現場で炭酸化養生が可能となった。場所打ちした炭酸化コンクリートの炭酸化部分の細孔径分布はプレキャスト部材と同等であり、耐久性を確保できることが示唆された。
キーワード: 炭酸化コンクリート、場所打ち、炭酸化養生

1. はじめに

高度経済成長期に建設された社会基盤が更新の時期を迎え、補修・補強工事が増加している。また、近年の大震災や洪水による甚大な被害を鑑み、レジリエントな社会基盤の構築が強く求められている。さらに、建設業界における作業員の減少が顕在化しており、社会基盤の維持管理の簡略化・省略化を目指したメンテナンスフリーな構造物が求められている。このためには、補修・補強や新設構造物において、耐久性の高い材料を使用することが必要となる。

これまでに、筆者らはセメント系材料を強制的に炭酸化させて、組織の緻密化、化学的安定性の向上を図り、セメント硬化体の耐久性を大幅に向上させた炭酸化コンクリートについて研究を行っている¹⁾²⁾。一般的に炭酸化反応はコンクリート構造物の鉄筋腐食の要因となるため、コンクリート構造物にとっては有害なものと考えられているが、無筋もしくは腐食しない補強材を用いることでこの問題を解決している。筆者らは、二酸化炭素と反応するダイカルシウムシリケート相（以下、 γ - C_2S とする）を混和材として用い、若材齢から強制的に炭酸化させることで、セメント硬化体を緻密化し、物質移動を抑制して耐久性を向上させることができる技術を開発した。炭酸化に伴う膨張・収縮概念図を図-1に示す。一般的に、セメント中の酸化カルシウムは、水和反応により水酸化カルシウムを生成し、その水酸化カルシウムが炭酸化した場合には炭酸カルシウム（カルサイト）が生成されて体積収縮を引き起こす。一方、 γ - C_2S を強制的に炭酸化させた場合、水酸化カルシウムをほとんど生成せずに直接炭酸カルシウムが生成される。この際に生成される炭酸カルシウム（パテライト）はカルサイトよりも密度が小さいため体積が膨張する³⁾。 γ - C_2S の膨張によりセメン

ト硬化体の空隙が充填されて緻密になることで高い耐久性が得られる。

この炭酸化コンクリートを用いてプレキャスト部材を製作し、2つの現場に試験的に適用している⁴⁾⁵⁾。いずれも塩害で鉄筋腐食が発生している栈橋の床版補修工事であり、遮塩性を向上させるために床版の上面および底面に炭酸化コンクリートのプレキャスト床版を設置した。

炭酸化コンクリートのプレキャスト床版を用いた栈橋の床版補修は、従来よりも工程短縮が可能であり、高い耐久性が得られる。ただし、プレキャスト部材は工場生産であるため、工場から現場までの輸送費や、高額な型枠費など、コストが高くなるため汎用性に劣ることが問題である。また、プレキャスト部材を製造するための型枠が高価であるために柔軟に形状を変更することができないこともデメリットとして挙げられる。さらに、本コンクリートは、炭酸化養生という特殊な養生が必要となるため、プレキャスト部材としての利用にとどまっていた。

そこで、上記の課題を解決するためには、場所打ちを可能とすることが必要であると考え、現場で炭酸化コン

セメント中のCaOの炭酸化プロセス

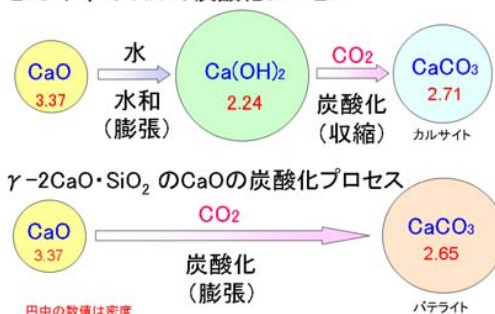


図-1 炭酸化に伴う膨張・収縮概念図

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

*2 鹿島建設（株） 技術研究所 土木材料グループ 上席研究員 工博（正会員）

*3 鹿島建設（株） 土木管理本部 プロジェクト推進部 担当部長 工博（正会員）

表-1 使用材料

| 材料 | 記号 | 摘要 |
|------|-----|--|
| 水 | W | 上水道水 |
| 特殊粉体 | P | 炭酸化コンクリート用特殊粉体, 密度: 3.22g/cm ³ |
| 混和材 | γ | ダイカルシウムシリケート γ 相, 密度: 2.85g/cm ³ |
| 膨張材 | EX | エトリンガイド・石灰複合系, 密度: 3.16 g/cm ³ |
| 細骨材 | S1 | 砕砂, 密度: 2.65g/cm ³ , 粗粒率: 2.78 |
| | S2 | 山砂, 密度: 2.71g/cm ³ , 粗粒率: 2.57 |
| 粗骨材 | G10 | 砕石, 最大粗骨材寸法: 10mm, 密度: 2.65g/cm ³ |
| 混和剤 | SP | ポリカルボン酸エーテル系化合物 |

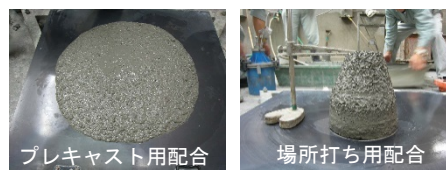


写真-1 フレッシュ性状

表-2 配合

| 配合 | スランブフロー スランブ (cm) | 空気量 (%) | W/B (%) | s/a (%) | 単体量(kg/m ³) | | | | | | | SP ((B+γ)×%) |
|---------|-------------------------|------------|------------|------------|-------------------------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----------------|
| | | | | | W | B | | γ | S1 | S2 | G10 | |
| | | | | | | P | EX | | | | | |
| プレキャスト用 | 65 | 2.5 | 30 | 45 | 160 | 534 | 0 | 160 | 563 | 99 | 808 | 1.10% |
| 場所打ち用 | 8 | 4.5 | 45 | 45 | 160 | 341 | 15 | 107 | 645 | 114 | 924 | 1.10% |

クリートを打ち込み, 現場で炭酸化養生する「現場炭酸化養生システム」について検討を行った。

2. 場所打ち用の配合選定

プレキャスト用の炭酸化コンクリートは非常に粘性が高く, そのまま場所打ちを指向した場合, 現場での施工性は極めて劣る。また, 同コンクリートは埋設型枠としての適用を主としており, 薄肉部材で耐久性を確保するために, 圧縮強度が 100N/mm² 以上の配合としている。しかし, 場所打ちの場合は部材を薄くする必要が無いため, プレキャスト用配合ほどの耐久性は不要と考えた。そこで, 従来配合の水結合材比を 30%から 45%に大きくし, 粉体量を 694kg/m³から 463kg/m³に低減することで粘性を下げた施工性を確保することとした。

2.1 試験概要

使用材料を表-1に, 配合を表-2に示す。場所打ちした場合, 硬化過程の収縮と外部拘束によりひび割れが発生することが懸念されたため, 収縮量を低減するために膨張材を使用することとした。打込み後の翌日に脱型し, 1日間水中養生を行った。その後, 温度 60°C, 湿度 50%RH, CO₂濃度 20%の環境で炭酸化養生を 27日間行った。試験項目および方法を表-3に示す。細孔径分布を測定し, 水結合材比を上げることがセメント硬化体の細孔構造に及ぼす影響を確認した。

2.2 試験結果

(1) フレッシュ性状

フレッシュ性状を写真-1に示す。プレキャスト用配合のスランブフローは 64.5cm, 場所打ち用配合のスランブは 8cmであり, 目標のスランブフローおよびスランブを確保することができた。

(2) 圧縮強度

炭酸化養生終了後(材齢 28日)に圧縮強度を測定した。結果を図-2に示す。プレキャスト用配合は 100N/mm²程度であった。一方で, 場所打ち用配合の圧縮強度は

表-3 試験項目および方法

| 項目 | 試験方法 |
|-------|---|
| 圧縮強度 | JIS A 1108 に準じて測定 (テストピース寸法: φ100×200mm) |
| 炭酸化深さ | JIS A 1152 に準じて測定 (テストピース寸法: φ100×200mm) |
| 乾燥収縮 | JIS A 1129-1 に準じて測定 |
| 細孔径分布 | 水銀圧入法により測定 (測定範囲: 3nm~360μm) |

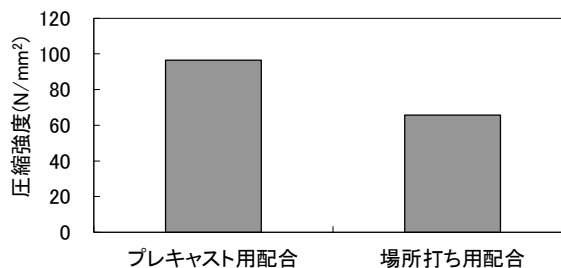


図-2 圧縮強度

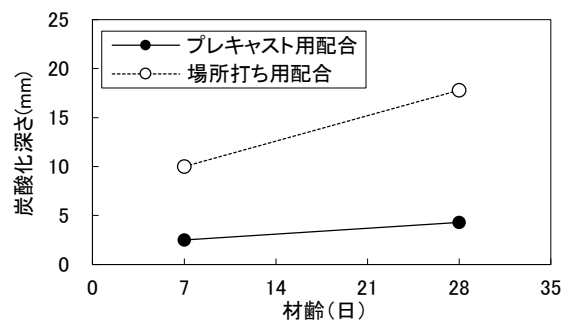


図-3 炭酸化深さ

65N/mm²程度となった。

(3) 炭酸化深さ

炭酸化深さを図-3に示す。プレキャスト用配合は材齢 28日 で 4mm 程度の炭酸化深さとなった。一方, 場所打ち用配合は, 水結合材比が大きくなったことで炭酸化深さは大きくなり, 材齢 28日 で 18mm 程度とプレキャスト用配合の 4.5 倍の炭酸化深さとなった。

(4) 乾燥収縮

炭酸化養生中の乾燥収縮を図-4に示す。プレキャスト用配合は750 μ 程度の収縮量を示した。一方で、場所打ち用配合は、粉体量の低減と膨張材の使用により500 μ 程度に抑制することができた。

(5) 細孔径分布

未炭酸化部分と炭酸化部分の細孔径分布を測定した。なお、エントラップトエアなどの粗大な空隙の影響を除去するため、10 μ m以下の細孔径分布について整理した。細孔径と累積細孔容積の関係を図-5に示す。

未炭酸化部分を比較すると、プレキャスト用配合よりも場所打ち用配合は全体的に細孔容積が大きくなることが確認された。また、累積細孔容積は、プレキャスト用配合は0.13ml/gであるのに対し、場所打ち用配合は0.15ml/gと、プレキャスト用配合よりも場所打ち用配合の方が大きくなっており、水結合材比を大きくすることで未炭酸化部分のセメント硬化体の細孔構造は疎になっていると考えられる。

炭酸化部分を比較すると、細孔径が0.1 μ m付近で場所打ち用配合の方がプレキャスト用配合よりも細孔容積が大きくなっていることが確認された。しかし、累積細孔容積は、プレキャスト用配合、場所打ち用配合ともに0.09ml/gであり、同等の値となった。つまり、累積細孔容積の観点からは、水結合材比が30%から45%に増加しても、炭酸化に伴う細孔充填効果が十分に得られると考えられるが、水セメント比を大きくすることで細孔径分布が変化していることが確認されたため、細孔径分布の変化が物質透過性などに及ぼす影響を確認する必要がある。

3. 模擬現場炭酸化養生

配合選定により得られた場所打ち用配合の施工性を確認するとともに、現場で炭酸化養生する際の槽内環境の均一性と現場炭酸化養生による炭酸化深さを確認するために模擬現場炭酸化養生を実施した。

3.1 実験概要

模擬現場炭酸化養生実験の概要を図-6に示す。断面修復等を想定し、表面を目粗しした普通コンクリートの上に炭酸化コンクリートを打ち継いだ。配合はプレキャスト用配合と場所打ち用配合の2種類とし、1配合当たり、25 \times 200cmの面積に5cmの厚さで打ち込んだ。打込み後、現場炭酸化養生を開始した。現場炭酸化養生装置は、養生環境調整装置と養生槽から構成されている。養生槽の概要および養生環境測定箇所を図-7に示す。養生槽は100 \times 200cm、高さ30cmとし、全体の養生環境が均一になるように、養生槽にはフィッシュボーン型のダクトを設置した。打設から3日間封緘養生し、その後炭酸化養生を25日間実施した。なお、炭酸化養生における温度は

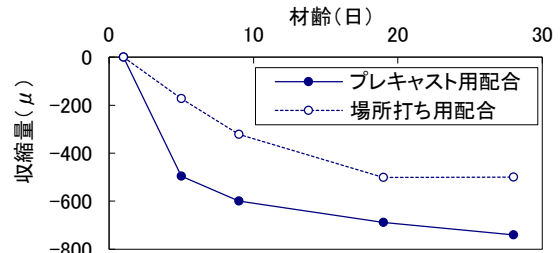


図-4 乾燥収縮

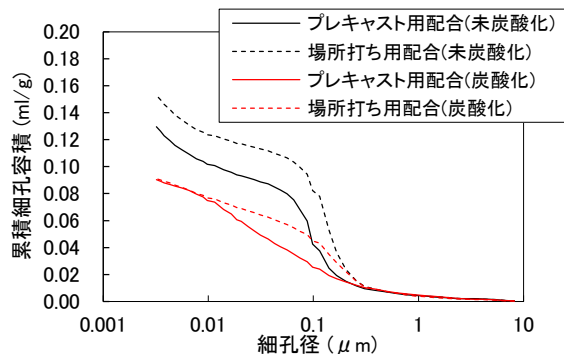


図-5 細孔径と累積細孔容積の関係

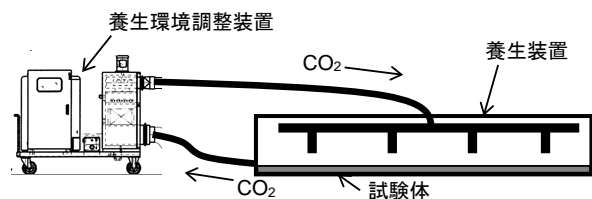


図-6 模擬現場炭酸化養生実験の概要

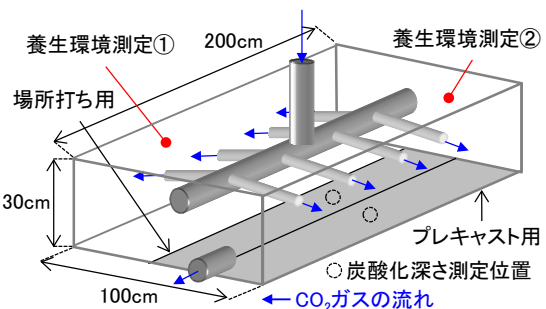


図-7 養生槽の概要

40 $^{\circ}$ C、湿度は50%RH、CO₂濃度は20%となるように装置を設定し、槽内の2ヶ所で計測を行った。炭酸化養生後に各種硬化性状を確認した。なお、現場養生する際に、槽内に ϕ 100 \times 200mmのテストピースを装置から最も遠い端部を奥とし、中、手前の3ヶ所に配置し、炭酸化深さのばらつきを併せて確認した。また、比較用として、室内の中性化槽でも炭酸化養生を行った。さらに、炭酸化養生終了後に試験体の中心で炭酸化深さを測定した。

3.2 実験結果

(1) 施工状況

プレキャスト用配合は流動性が高く、自己充填性を有しているため、コンクリートの打込みは端部から連続的

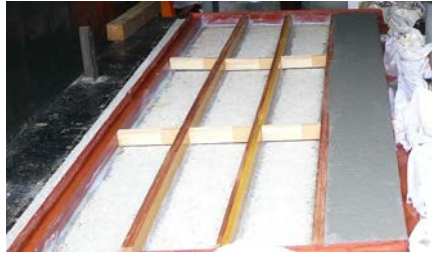


写真-2 炭酸化コンクリートの打込み状況



写真-3 炭酸化養生状況

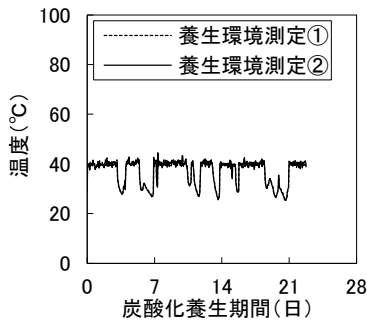


図-8 温度の測定結果

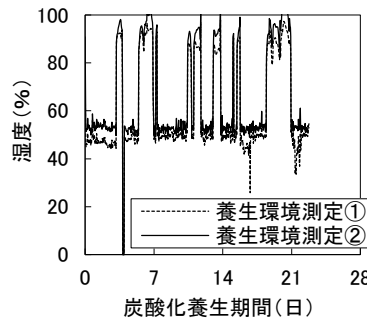


図-9 湿度の測定結果

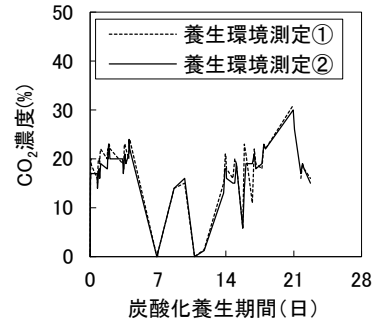


図-10 CO₂濃度の測定結果

に行った。しかし粘性が高いため、こて仕上げは困難であった。場所打ち用配合はスランプ8cm程度であるため、突き棒と木づちによる締め固めをしながら打ち込んだ。プレキャスト用配合よりも粘性が低減されたため、こて仕上げは容易であった。炭酸化コンクリートの打込み状況を写真-2に、炭酸化養生状況を写真-3に示す。

温度の測定結果を図-8に、湿度の測定結果を図-9に、CO₂濃度の測定結果を図-10に示す。温度、湿度およびCO₂濃度は養生環境測定①および②での差はほとんどなく、均一性という観点では、フィッシュボーン型のダクトの有用性が確認できた。しかし、CO₂ガスの不足により装置が停止した際は、温度低下によって飽和水蒸気圧が低下し、湿度が100%近くまで上昇したが稼働中は所定の温度および湿度で管理できた。また、CO₂濃度はばらつきが大きい結果となったが、その理由としては、今回使用した養生環境調整装置は約90m³の養生槽の環境を制御できるのに対し、養生槽が0.6m³と小さいため、温度、湿度およびCO₂濃度の制御が困難であったと考えられる。

(2) 炭酸化深さ

炭酸化深さの測定結果を図-11に示す。プレキャスト用配合のテストピースにおける炭酸化深さは、材齢7日で4mm程度であり、材齢28日でも同等の値であった。また、養生槽内の設置位置によるばらつきは無く、全体的に均質に炭酸化していることが確認された。室内の中性化槽における炭酸化深さは4.3mmであり、現場炭酸化養生とはほぼ同等であった。しかし、試験体における炭酸化深さは1mm程度であり、ほとんど炭酸化していないことが確認された。一方、場所打ち配合のテストピースに

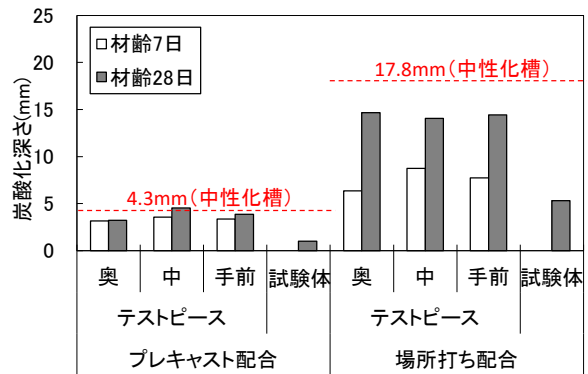


図-11 炭酸化深さの測定結果

おける炭酸化深さは、材齢7日で8mm程度であり、材齢28日では14mm程度まで増加した。室内の中性化槽における炭酸化深さは17.8mmであり、現場炭酸化養生は室内より若干小さい結果となった。炭酸化深さが大きくなると養生環境の影響が顕著になると考えられる。試験体における炭酸化深さは5mm程度であり、テストピースの半分以下の値となった。前述したとおり、今回の養生槽の大きさでは養生環境の調整が困難であり、特に湿度が高い領域で推移していた。一般的に湿度が高いと炭酸化が抑制され⁹⁾、試験体は解放面が上面のみであるため、試験体内部の湿度の低下しづらかったため、炭酸化深さが小さくなったものと考えられる。しかし、そのような状況下においても炭酸化していることを考慮すると、現場炭酸化養生に対して場所打ち用配合の適用は可能であると考える。

(3) ひび割れ発生状況

炭酸化養生終了後にひび割れ発生状況を目視により確認したが、いずれの試験体もひび割れは確認されなかつ

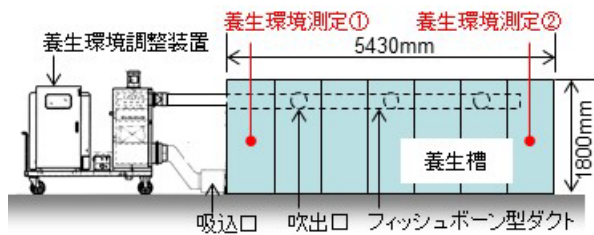


図-12 現場炭酸化養生装置の概要



写真-4 養生状況 (外観) 写真-5 養生状況 (内部)

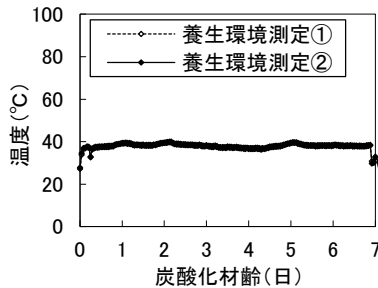


図-13 温度の測定結果

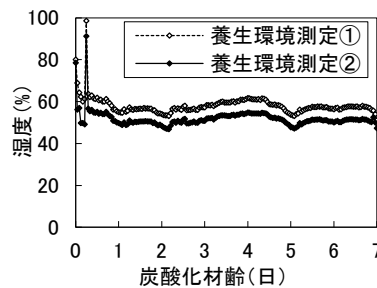


図-14 湿度の測定結果

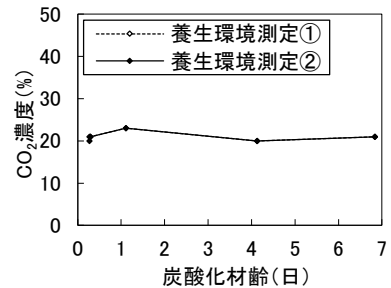


図-15 CO₂濃度の測定結果

た。今後は適用事例を増やしつつ、場所打ち配合のひび割れ抑制効果を確認する。

4. 現場炭酸化養生

模擬現場炭酸化養生実験の結果を受け、養生槽を養生環境調整装置に適した大きさにし、更に大面積を炭酸化養生する現場炭酸化養生を実施した。

4.1 実験概要

現場炭酸化養生装置の概要を図-12 に示す。模擬現場炭酸化養生実験と同様に養生環境調整装置を使用し、養生槽はビニールハウスを改造して、天井にフィッシュボーン型のダクトを設置した。配合はプレキャスト用配合と場所打ち用配合とした。いずれの配合も現場で練り混ぜ、養生槽内に打ち込んだ。炭酸化コンクリートの打込み面積は各配合で9.2m²、打込み量は0.46m³(厚さ0.05m)とした。養生槽の容量は27m³であり、養生環境調整装置の制御可能容量の30%とした。打設から3日間はビニールで封緘養生し、その後7日間の炭酸化養生を行った。なお、炭酸化養生における温度は40℃、湿度は50%RH、CO₂濃度は20%となるように装置を設定した。養生状況を写真-4および写真-5に示す。養生槽内に比較用としてテストピースを設置した。また、炭酸化養生終了後に試験体の中心で炭酸化深さを測定した。

4.2 実験結果

(1) 養生環境

温度の測定結果を図-13 に示す。温度はほぼ40℃で一定であった。入口側と吸気口側での温度差も無く、均質な温度環境に制御可能であった。湿度の測定結果を図-14 に示す。極初期のみ1時間ほど湿度が上昇したが、その後はほぼ設定どおりの湿度で推移した。ただし、吸気口

側の湿度は60%程度で推移しており、養生槽内で湿度にムラが生じていた可能性がある。CO₂濃度の測定結果を図-15 に示す。初期にCO₂ガス漏れが発生した以降は安定しており、最後まで20%を保持していた。以上より、養生槽の容量を養生環境調整装置の制御可能容量の30%であれば、養生環境を制御することが可能であることが確認された。

(2) 炭酸化深さ

炭酸化深さの結果を図-16 に示す。プレキャスト用配合のテストピースにおける炭酸化深さは、材齢7日目で1.7mm程度であった。試験体のコアにおける炭酸化深さは1mm程度とほとんど炭酸化していないため、プレキャスト用配合による現場炭酸化養生は困難であることが確認された。一方、場所打ち配合のテストピースにおける炭酸化深さは、材齢7日目で9mm程度であった。試験体のコアにおける炭酸化深さは6mm程度であり、テストピースの2/3程度の値となったが、現場炭酸化養生により確実に炭酸化しており、場所打ち用配合による現場炭酸化養生が可能であった。今回の炭酸化養生環境は安定していたにも拘らず、炭酸化養生した試験体の炭酸化深さがテストピースよりも小さくなっている理由として、筆者らは試験体の体積面積比が大きくなると炭酸化深さが小さくなることを確認しており、試験体の寸法を考慮した炭酸化深さの予測式を提案している⁷⁾。同予測式から算出した炭酸化深さと実測炭酸化深さの関係を図-17 に示す。炭酸化養生開始時の積算温度は実測値より73(℃・日)とし、試験体の体積面積比を50、テストピースの体積面積比を10とした。若干実測炭酸化深さの方が小さい傾向であるが、ほぼ線形の関係にあることが確認された。現場炭酸化養生の場合でも養生環境を整えば、この予測

式から炭酸化深さを推定できることが示唆された。

(3) 細孔径分布

試験体から採取したコアで炭酸化部分における $10\mu\text{m}$ 以下の細孔径分布を評価した。細孔径と累積細孔容積の関係を図-18 に示す。炭酸化部分を比較すると、図-5 と同様に、細孔径が $0.1\mu\text{m}$ 付近における細孔容積は場所打ち用配合の方がプレキャスト用配合よりも大きくなっていることが確認された。しかし、累積細孔容積は、プレキャスト用配合が 0.09ml/g であるのに対し、場所打ち用配合も 0.09ml/g であり、両配合とも同等の値となった。今回は炭酸化養生期間を 7 日間に短縮したが、炭酸化期間 28 日間と同等の結果であり、模擬実験の炭酸化養生期間 7 日の時点で既に炭酸化部分の細孔充填効果は得られるものと考えられる。

前述のとおり、場所打ち用配合は、プレキャスト用配合と比較して累積細孔量は同じであるが $0.1\mu\text{m}$ 付近の細孔量が増える。一方で、炭酸化深さは大きくなるため、緻密な層も増大する。今後は、細孔径分布の違いに加え、炭酸化深さも考慮した包括的な耐久性評価が必要である。

5. おわりに

今回の検討により得られた結果は以下のとおりである。

- (1) プレキャスト用の炭酸化コンクリートを場所打ちにも適用できるように配合を修正した。
- (2) 養生槽に適した大きさの養生環境調整装置を選定することで、現場でも養生環境を制御することが可能であった。
- (3) 場所打ち用配合の未炭酸化部分の細孔径分布はプレキャスト用配合より疎になるが、炭酸化部分は細孔径分布が異なるものの、累積細孔量は同じとなる。
- (4) 場所打ち用配合とすることで現場炭酸化養生により炭酸化させることが可能であり、プレキャスト用配合と同様に表層に緻密な層を確保できることが示唆された。

今後は、場所打ち用配合の耐久性を評価し、現場炭酸化養生システムの確立を目指す予定である。

参考文献

- 1) 渡邊賢三, 横関康祐, 坂井悦郎, 大門正機: $\gamma\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ を用いたセメント系材料の炭酸化養生による高耐久化, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.735-740, 2004
- 2) 小林聖, 芦澤良一, 渡邊賢三, 横関康祐: 炭酸化コンクリートの海洋環境下における耐久性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.778-783, 2012
- 3) 盛岡実, 樋口隆行: $\gamma\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ の中性化抑制効果

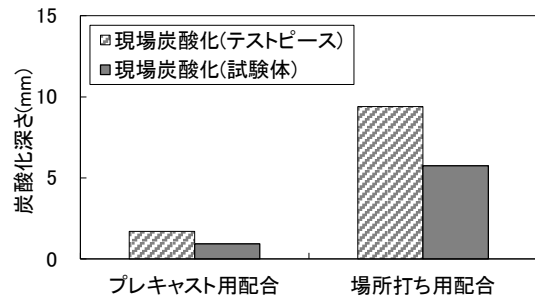


図-16 炭酸化深さの結果

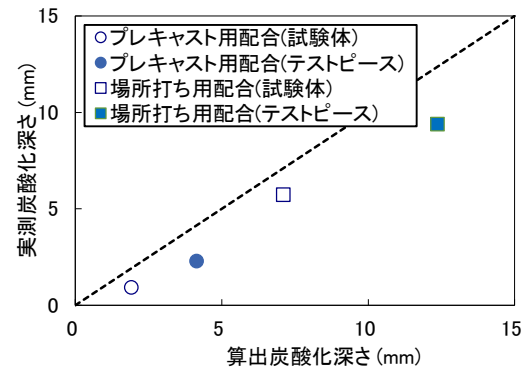


図-17 炭酸化深さの算出値と実測値の関係

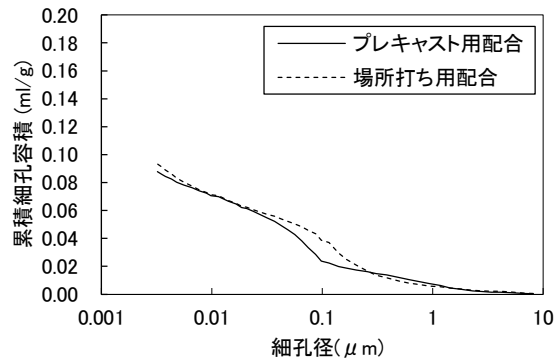


図-18 細孔径分布の測定結果 (炭酸化部分)

とその機構, セメント・コンクリート論文集, No.57, pp.23-29, 2003

- 4) 取違剛, 渡邊賢三, 横関康祐, 坂田昇: 炭酸化コンクリートを用いた長寿命栈橋補修工法, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第7巻, pp.71-76, 2007.11
- 5) 渡邊賢三, 取違剛, 横関康祐, 坂田昇: 超高耐久カーボン繊維補強コンクリートを用いた新しい栈橋補修工法, 鹿島技術研究所年報, Vol.54, pp.85-90, 2006.9
- 6) 白川敏夫, 島添洋治, 麻生実: コンクリートの中性化と湿度の関係に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.18, No.1, pp.723-728, 1996
- 7) 小林聖, 渡邊賢三, 取違剛, 横関康祐: 供試体寸法および初期養生条件がコンクリートの炭酸化深さに与える影響, 土木学会第 65 回年次学術講演会, V-694, pp.1387-1388, 2010.9