

# 論文 5年間屋外暴露した速硬コンクリートの耐久性に関する一考察

岡田 明也\*1・長塩 靖祐\*2

**要旨:**本研究では、設計強度の異なる普通コンクリートに速硬性混和材を添加して作製した速硬コンクリートについて、北海道北斗市にて5年間屋外暴露試験を実施し、その耐久性について検討した。その結果、本研究で作製した速硬コンクリートは、屋外暴露5年において、凍害による劣化は認められず健全な状態を維持していた。また、それらの速硬コンクリートは、空気量を5%程度とした普通コンクリートに比べて、累積細孔量が少なく緻密な組織構造を形成しており、優れた圧縮強度、表層品質及び耐久性を有していること、並びにコンクリート内部の水和生成物が健全な状態であることを確認した。

**キーワード:**速硬コンクリート, 速硬性混和材, 屋外暴露試験, 耐久性

## 1. はじめに

1960年代の高度成長期に整備された道路橋インフラは、2018年時点で施工後50年経過しているものが約19万橋、2023年には約30万橋にも上ると言われおり<sup>1)</sup>、経年劣化が顕著化しつつある。特に、北海道や東北地方の道路橋は、経年劣化に加えて、凍結防止剤の散布や凍害の影響を受けて劣化が進行し、今後、維持・修繕に関する工事が増加していくものと考えられている。

一般に、劣化したコンクリート舗装や道路橋床版の補修工事を行う場合、交通状況や車線規制などの観点から、普通コンクリートよりも強度発現の早い、速硬性を有するコンクリートが用いられることがほとんどである。

このような速硬性を有するコンクリートの一つとして、速硬性混和材を使用した「速硬コンクリート」及びその製造システムが開発されている<sup>2)</sup>。この速硬コンクリートは、可使時間を最大120分まで確保できることや、大量製造・大断面施工が可能という特徴がある。また、その製造システムは、現場に到着した生コンクリート(車)に、開発した速硬性混和材と硬化調整剤を溶解させた水溶液を投入して、生コンクリート車(以下、生コン車)で高速攪拌することで速硬コンクリートを製造する方法であることから、特別な専用(製造)装置が必要なく製造が可能である。更に、そのシステムで製造された速硬コンクリートは、6~12時間で圧縮強度24MPa以上を発現し、速硬性混和材を添加する前のコンクリートに比べ

て、圧縮強度や乾燥収縮、塩化物イオン浸透抑制効果、凍結融解抵抗性などの耐久性が優れていることも報告されている<sup>3)</sup>。

しかしながら、その上記報告<sup>3)</sup>は、室内で行う促進試験の結果を用いて評価している。一般に、コンクリートの耐久性を評価する場合、自然環境下に屋外暴露して評価することが、最も信頼性の高いデータを得られるが、速硬コンクリートに関する報告は未だ数少ない。

以上のことに鑑み、本研究では、設計強度の異なるコンクリートに速硬性混和材を添加して作製した速硬コンクリートについて、北海道北斗市にて5年間屋外暴露試験を実施し、その耐久性について検討している。

## 2. 使用材料

表-1には、使用材料の一覧を示す。速硬性混和材は、特殊カルシウムアルミネートと特殊硫酸塩を主成分とするものを使用した。また、硬化時間調整のために、オキシカルボン酸系の硬化調整剤を使用した。

## 3. 試験方法

### 3.1 コンクリートの配合及び供試体の作製

表-2には、コンクリートの配合を示す。JIS A 1138(試験室におけるコンクリートの作り方)に従って、二軸ミキサ(容量60L)を用いて、呼び強度を27, 33及び40, 空気量4.5±1.5%, スランプ15±2.5cmとした速硬性混和材添加

表-1 使用材料の一覧

| 材料名    | 記号  | 種類                       | 備考                          |
|--------|-----|--------------------------|-----------------------------|
| セメント   | C   | 普通ポルトランドセメント             | 密度: 3.16g/cm <sup>3</sup>   |
| 練混ぜ水   | W   | 上水道水                     | -                           |
| 細骨材    | S   | 静岡県掛川市産山砂                | 表乾密度: 2.61g/cm <sup>3</sup> |
| 粗骨材    | G   | 茨城県桜川市富谷産碎石              | 表乾密度: 2.64g/cm <sup>3</sup> |
| 減水剤    | Ad  | AE減水剤                    | リグニンスルホン酸化合物                |
| 速硬性混和材 | F   | 主成分: 特殊カルシウムアルミネートと特殊硫酸塩 | 密度: 2.93g/cm <sup>3</sup>   |
| セッター   | Re. | 硬化調整剤                    | オキシカルボン酸系                   |

\*1 太平洋マテリアル 開発研究所 土木・混和材料グループ 修士(工学)(正会員)

\*2 太平洋マテリアル 開発研究所 土木・混和材料グループ 副主席研究員 博士(工学)(正会員)

表-2 コンクリートの配合

| 水準   | W/C (%) | W/B* (%) | 呼び強度 | 普通コンクリート配合 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |      |      | 外割 (kg/m <sup>3</sup> ) |      |    |
|------|---------|----------|------|-------------------------------------|-----|-----|------|------|-------------------------|------|----|
|      |         |          |      | W                                   | C   | S   | G    | Ad   | F                       | Re.  | +W |
| PL   | 55.0    | -        | 30   | 172                                 | 313 | 803 | 968  | 0.78 | -                       | -    | -  |
| 50FC | 56.0    | 41.5     | 27   | 168                                 | 300 | 762 | 1042 | 0.38 | 129                     | 3.00 | 10 |
| 60FC | 50.0    | 37.1     | 33   | 168                                 | 336 | 749 | 1024 | 0.42 | 144                     | 3.36 | 10 |
| 70FC | 44.0    | 32.6     | 40   | 168                                 | 382 | 733 | 1002 | 0.48 | 164                     | 3.82 | 10 |

\* : B=C+F

前の普通コンクリートをそれぞれ一括で90s練り混ぜた。その際に併せて、呼び強度30、空気量 $5.0 \pm 1.0$ 、スランプ $15 \pm 2.5$ とした配合の比較用コンクリート(PL)も練り混ぜた。なお、PLの空気量は耐凍害性が有利側となるように、5.0%を中心値として設定した。次に、空気量 $2.0 \pm 1.5\%$ 、スランプ $20 \pm 2.5\text{cm}$ とした速硬コンクリートを作製するために、練り混ぜた普通コンクリートに、 $20^\circ\text{C}$ 環境下において可使用時間が60min確保できるような添加量の硬化調整剤を溶解させた単位水量 $10\text{kg/m}^3$ 分の水溶液を外割添加して15s練り混ぜた。その後、質量比でセメント:速硬性混和材=7:3となるような量の速硬性混和材を外割添加して90s練り混ぜ、供試速硬コンクリートを作製した。なお、本研究で検討している速硬コンクリートは、室内で製造したものであるが、前述した生コン車で製造したものと品質に差が無いことを確認している<sup>3)</sup>。

作製した各供試コンクリートを動弾性係数及び質量減少率測定用に寸法 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ に、圧縮試験用に $\phi 100 \times 200\text{mm}$ に成形し、1d 気中 [ $20^\circ\text{C}$ , 60% (RH)] +27d 水中 ( $20^\circ\text{C}$ ) 養生を行い供試体を作製した。その際に、供試コンクリートのスランプ及び空気量測定すると共に所定の材齢で初期強度についても測定した。

また、本研究で検討している速硬コンクリートは、強度によって耐凍害性を確保する設計にしている。このことを検討するため、速硬コンクリートの目標圧縮強度は、上述した普通コンクリートの呼び強度によって異なり、材齢6~12hで24MPa以上、材齢28dにおいて、50FCでは50MPa、60FCでは60MPa、70FCでは70MPa程度発現することを目標とした。

### 3.2 促進凍結融解試験

JIS A 1148 の A 法 (水中凍結融解方法) に従って、養生後の供試体について凍結融解試験を行い、JIS A 1127 (共鳴振動数によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法) に従って、300 サイクルまで30 サイクル毎に、相対動弾性係数を測定した。

### 3.3 屋外暴露試験

養生後の供試体を北海道北斗市にある3階建てのRC構造物(海岸線から約1km)の屋上に2013年~2018年までの5年間、写真-1に示すように、寸法 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 供試体は長さ方向に水平に、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 供試体は、垂直に設置して屋外暴露した。なお、暴露5年間の凍結融解サイクルは、供試体中心温度が $0^\circ\text{C}$ 以上から $0^\circ\text{C}$ 未満になった回数を1サイクルすると、屋外暴露5



写真-1 暴露場の景観及び暴露状況

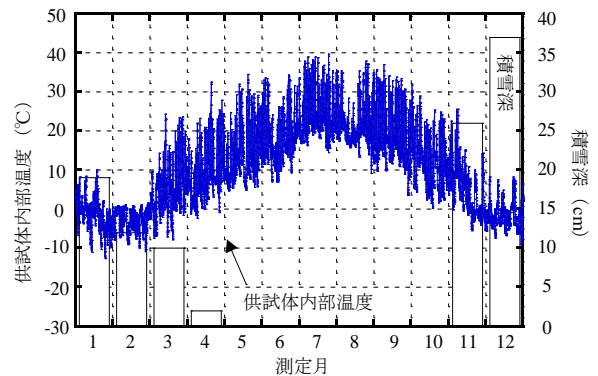


図-1 供試体内部温度及び積雪深(2017年)

年間で514サイクルであった。図-1には2017年の供試体内部温度及び北斗市の積雪深を示す。

### 3.4 圧縮強度試験

JIS A1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法) に従って、屋外暴露1, 3及び5年後において圧縮強度試験を行った。

### 3.5 相対動弾性係数及び質量減少率の測定

JIS A 1127 及び JIS A 1148 (コンクリートの凍結融解試験方法) に従って、屋外暴露前、屋外暴露0.5, 1, 2, 3, 4及び5年後の相対動弾性係数及び質量減少率を測定した。

### 3.6 透水試験

JIS A 6909 (建築用仕上塗材) の透水試験 B 法に準じて、屋外暴露 5 年後の供試体の含水率を測定した後、透水量を 7d 間測定した。

### 3.7 表層透気係数の測定

トンネル施工管理要領に準じて、屋外暴露 5 年後の供試体の含水率が 5.5% 以下であることを確認した後、Torrent 法で表層透気係数を測定した。

### 3.8 中性化及び塩化物イオン浸透深さの測定

JIS A 1171 (ポリマーセメントモルタルの試験方法) に準じて、屋外暴露 5 年後における供試体の中性化及び塩化物イオン浸透深さを測定した。

### 3.9 細孔径分布の測定

屋外暴露 5 年後の PL 及び 70FC 供試体を 2mm 程度に粉砕し、アセトンで水和停止した後、真空乾燥機中に 3d 静置して、D-dry 乾燥を行い、水銀圧入式ポロシメーターを用いて測定した。なお、測定範囲は、3nm~3000nm とした。

### 3.10 粉末 X 線回折

粉末 X 線回折装置 (XRD) を用いて 70FC 供試体中の水和物の定性分析を行った。なお、試料は寸法 100×100×400mm 供試体の 100×100mm 断面の中心部から、粗骨材を除いた、モルタル部分のみを採取して粉砕し、測定に使用した。

### 3.11 電子線マイクロアナライザーによる面分析

JSCE-G574 (EPMA 法によるコンクリート中の元素の面分析方法) に従って、屋外暴露 5 年後の 70FC 供試中の元素  $Al_2O_3$ 、 $CaO$ 、 $SiO_2$  及び  $SO_3$  について面分析を行い、 $CaO/SiO_2$  モル比及び  $CaO/Al_2O_3$  モル比を算出した。なお、測定部分は、寸法 100×100×400mm 供試体の 100×100mm 断面の中心部 40×40mm 部分とした。

## 4. 試験結果及び考察

### 4.1 フレッシュ性状及び初期強度

表-3 には、コンクリートのフレッシュ性状及び普通コンクリートの圧縮強度を示す。普通コンクリート並びに速硬コンクリートである 50FC、60FC 及び 70FC のスランブ及び空気量は、いずれの水準においても目標値の範囲内であった。また、50FC、60FC 及び 70FC のスランブは、速硬性混和材添加前の普通コンクリートに比べて、4~5cm 増加し、空気量は 2~5% 程度低下した。これは、添加した速硬性混和材には、施工性向上の観点から減水剤と、製造時の巻込みエア抑制の観点から消泡剤が内添されている影響である。なお、当然のことながら、普通コンクリートの圧縮強度は、単位セメント量が多く水セメント比の低いものほど高い傾向を示した。

図-2 には、材齢 28d までの圧縮強度を示す。速硬コン

クリートである 50FC 供試体は 8h で、60FC 及び 70FC 供試体では 6h で目標値である 24MPa を満足した。なお、これらの初期強度発現は、速硬性混和材を添加したことにより、エトリンガイト等に代表されるカルシウムアルミネート系水和物の早期生成によって得られているものと考えられている<sup>2),3)</sup>。また、材齢 28d において、50FC 供試体では 55.4MPa、60FC 供試体では 63.7MPa、70FC 供試体では 74.8MPa であり、概ね目標値通りの強度が発現されていた。

### 4.2 圧縮強度

図-3 には、屋外暴露後の圧縮強度を示す。PL 供試体の圧縮強度は、暴露開始から 1 年で暴露開始前の 1.3 倍程度増加するものの、その後はほぼ一定の傾向を示した。一方、50FC、60FC 及び 70FC 供試体の圧縮強度は暴露期間の経過に伴って増加する傾向にあり、屋外暴露 5 年に

表-3 コンクリートのフレッシュ性状及び普通コンクリートの圧縮強度

| 種類   | 普通コンクリート  |         |                |
|------|-----------|---------|----------------|
|      | スランブ (cm) | 空気量 (%) | 28d 圧縮強度 (MPa) |
| PL   | 15.0      | 5.5     | 38.9           |
| 50FC | 16.5      | 5.9     | 34.8           |
| 60FC | 15.5      | 4.8     | 41.4           |
| 70FC | 13.0      | 3.5     | 48.0           |

| 種類   | 速硬コンクリート  |         |
|------|-----------|---------|
|      | スランブ (cm) | 空気量 (%) |
| 50FC | 20.5      | 1.1     |
| 60FC | 20.0      | 1.1     |
| 70FC | 17.5      | 1.5     |

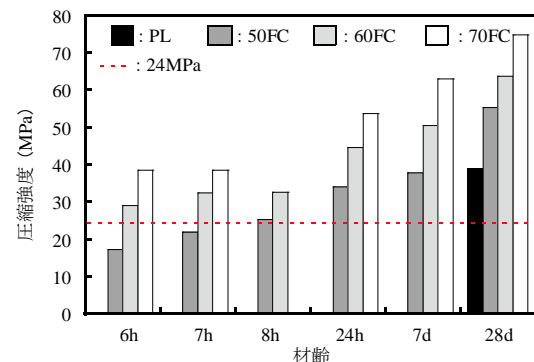


図-2 圧縮強度 (屋外暴露前)

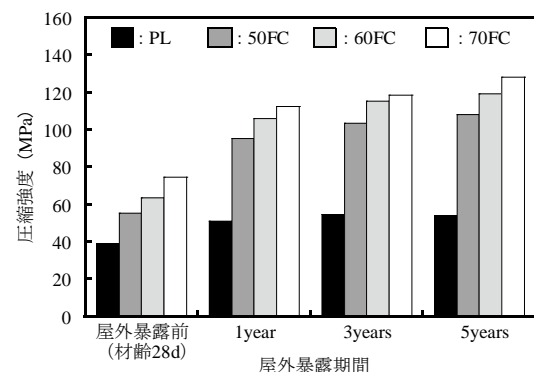


図-3 圧縮強度 (屋外暴露後)

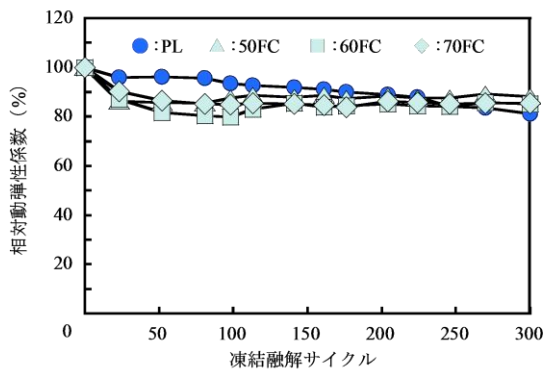


図-4 相対動弾性係数(促進試験)

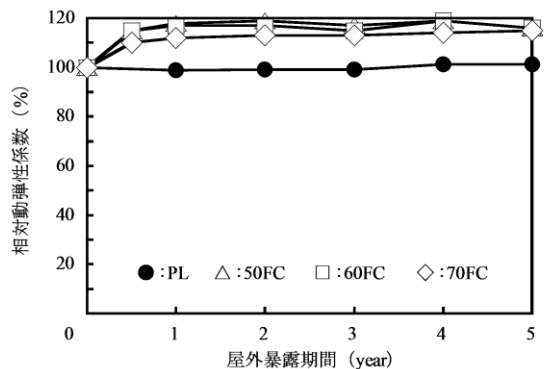


図-5 相対動弾性係数(屋外暴露試験)

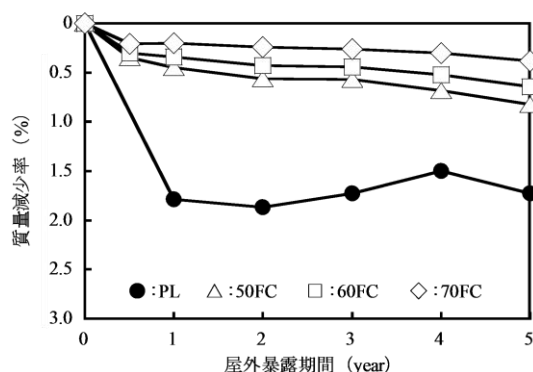


図-6 質量減少率



写真-2 屋外暴露5年における供試体の外観

において、暴露開始から1.7~2.0倍程度増加しており、強度劣化は認められなかった。

### 4.3 相対動弾性係数

図-4には、促進試験を実施した供試体の相対動弾性係数と凍結融解サイクルの関係を示す。凍結融解300サイクル時の相対動弾性係数はPL供試体で81%、速硬コンクリートである50FC、60FC及び70FC供試体は85~88%であり、いずれの供試体も60%を上回っていることから、十分な凍結融解抵抗性を有しているものと推察される。なお、本研究で作製した速硬コンクリートは、空気量が1%程度と凍結融解抵抗性の観点からは極めて不利な条件ではあるが、単位ペースト量が多い配合であり、試験開始時の圧縮強度が50MPa以上で高強度コンクリートに分類されること、また、後述する累積細孔量が少なく、ち密な組織構造を形成していることに起因して、相対動弾性係数の低下が抑制されたものと考えられる。

次に、図-5には相対動弾性係数と屋外暴露期間の関係を示す。促進試験の傾向とは異なり、PL供試体の相対動弾性係数は、暴露開始から同程度で推移し、暴露期間5年において100%程度であった。一方、50FC、60FC及び70FC供試体の相対動弾性係数は、暴露開始から増加する傾向にあり、屋外暴露5年において115%程度であった。これは、図-3に示した通り、各供試体の圧縮強度は暴露開始から増加しており、この圧縮強度の増加が相対動弾

性係数の増加に影響しているものと考えられる。

なお、上述したように、促進試験と屋外暴露試験での相対動弾性係数の傾向は大きく異なり、既往の研究<sup>4)</sup>等で報告されているように、本研究においても、促進試験は屋外暴露試験に比べて過酷な条件であることが確認された。

### 4.4 質量減少率及び外観観察

図-6には、質量減少率と屋外暴露期間の関係を示す。PL供試体の質量は、屋外暴露1年まで急激に減少し、その後はほぼ一定で、屋外暴露5年で質量減少率は1.7%であった。一方、50FC、60FC及び70FC供試体の質量は、暴露開始から緩やかに減少し続けるが、屋外暴露5年においても質量減少率は0.9%以下であり、圧縮強度の高いものほど小さい傾向を示した。また、写真-2には屋外暴露5年後の供試体(側面)の外観を示す。PL供試体の表面は、若干ではあるがスケールリングが認められた。それに比べて、50FC、60FC及び70FC供試体表面では、スケールリングは認められなかった。

### 4.5 表層品質

試験開始前の供試体表面の含水率は3.9~5.2%の範囲にあった。

図-7には、透水試験の結果を示す。50FC、60FC及び70FC供試体の透水量はPL供試体に比べて小さい傾向を示した。また、その値は透水期間7dにおいて、50FC



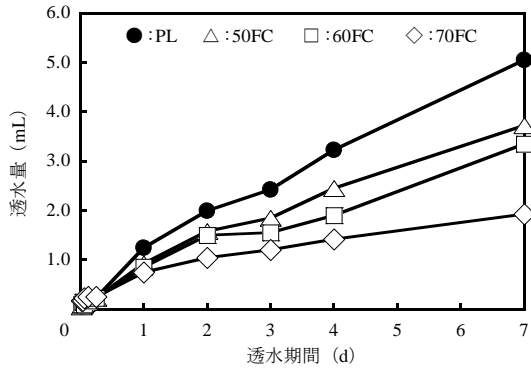


図-7 透水量

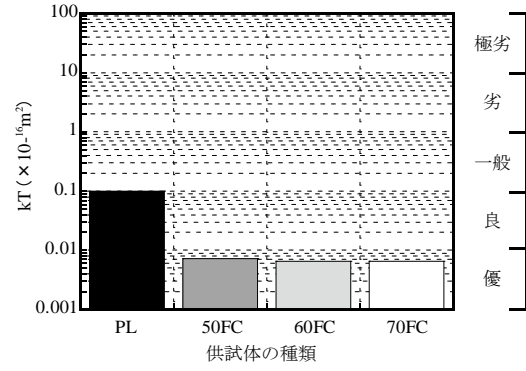


図-8 表層透気係数

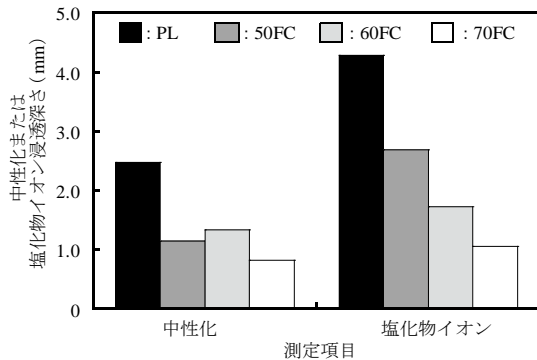


図-9 中性化または塩化物イオン浸透深さ

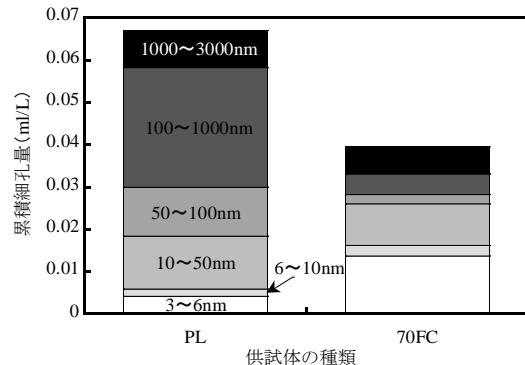


図-10 細孔径分布

で 3.7mL, 60FC で 3.4mL, 70FC で 1.9mL であり, 圧縮強度の高いものほど小さい傾向を示した。次に, 図-8 には表層透気係数を示す。PL 供試体の表層透気係数は 0.100KT であり, 評価グレードは「一般」であった。一方, 50FC, 60FC 及び 70FC 供試体の表層透気係数は, 0.007~0.008KT の範囲にあり, いずれの供試体においても評価グレードは「優」であった。これは, 本研究で作製した速硬コンクリートの屋外暴露 5 年における表層品質は, 圧縮強度に依存しているものと考えられる。

#### 4.6 中性化及び塩化物イオン浸透深さ

図-9 には, 屋外暴露 5 年後における供試体の中性化及び塩化物イオン浸透深さを示す。50FC, 60FC 及び 70FC 供試体の中性化及び塩化物イオン浸透深さは, 表層品質の試験結果同様に, 圧縮強度が高いものほど小さく, PL 供試体に比べて小さい傾向を示した。特に 70FC 供試体については, 中性化深さが 0.8mm, 塩化物イオン浸透深さが 1.1mm であり, PL 供試体の 1/3~1/4 程度であった。既往の研究<sup>5)</sup>によると, 中性化及び塩化物イオン浸透に関しては, 表層透気係数と高い相関性があることが確認されており, 本研究においても同様の傾向が確認された。

#### 4.7 細孔径分布

図-10 には, PL 及び 70FC 供試体の細孔径分布を示す。ここで, 細孔径分布の範囲については, 羽原の研究<sup>7)</sup>を参考に 6 範囲に分類した。PL 供試体の累積細孔量は, 0.067mg/L であったが, それに比べて, 70FC 供試体は,

0.040mg/L と 2/3 以下であった。細孔範囲別に見ると, 3~6nm の細孔量は PL 供試体に比べて 3 倍程度大きい値を示した。一方, 圧縮強度の低下や凍結融解劣化の進行, 中性化・塩化物イオンの浸透に影響を及ぼすとされている 50nm 以上の細孔量<sup>6)・9)</sup>は著しく少ない傾向を示した。これらのことは, 本研究で作製した速硬コンクリートは, 速硬性混和材を外割で添加しているため, 水結合材比が低く, 単位ペースト量が多い配合であることに起因して, PL 供試体に比べて, ち密な組織構造を形成していることを示唆するものである。

以上のことを踏まえれば, 本研究で作製した速硬コンクリートは, 高強度であることに加えて, 累積細孔量が少なく, ち密な組織構造を形成していることから, 凍結融解抵抗性等の耐久性や表層品質に優れているものと考えられる。

#### 4.8 水和生成物の状態確認

図-11 には, 70FC 供試体の粉末 X 線回折結果を, 回折強度 5~20° の範囲で示す。骨材由来のシリカの回折ピークの他にエトリングタイトの回折ピークが認められた。

表-4 には, 70FC 供試体における CaO/SiO<sub>2</sub> モル比及び CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> モル比の濃度分布を示す。70FC 供試体の CaO/SiO<sub>2</sub> 及び CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> モル比の濃度分布は, 均一に分布されていることが確認された。これは, 速硬コンクリート内部の水和生成物が屋外暴露 5 年においても変状しておらず, 健全な状態で維持している可能性を示唆するものである。

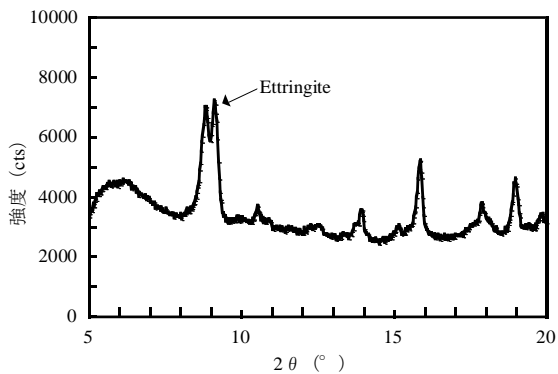
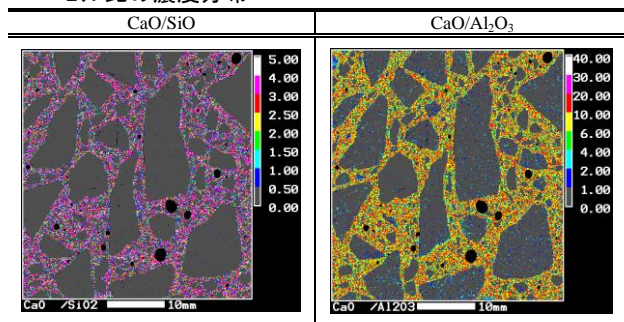


図-11 粉末 X 線回折

表-4 70FC 供試体における CaO/SiO<sub>2</sub> モル比及び CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> モル比の濃度分布



本試験結果から、屋外暴露 5 年においては、速硬コンクリートに凍害による劣化は認められなかった。なお、現時点において、速硬性混和材添加前の普通コンクリートにおける強度の違いが、速硬コンクリートの耐久性に影響するのには明確にするに至っていない。そのため今後も屋外暴露試験を継続していく予定である。

## 5. 結論

本研究を結論づければ以下の通りである。

- 1) 速硬コンクリートの圧縮強度は暴露期間の経過に伴って増加する傾向にあり、屋外暴露 5 年において、暴露開始から 1.7~2.0 倍程度増加しており、強度劣化は認められなかった。
- 2) 速硬コンクリートの相対動弾性係数は、屋外暴露 5 年及び凍結融解 300 サイクル時において、60%を上回っており、十分な凍結融解抵抗性を有しているものと推察される。
- 3) 速硬コンクリートは屋外暴露 5 年においても極端な質量の減少やスケリングは認められなかった。

- 4) 速硬コンクリートの屋外暴露 5 年における透水量、表層透気係数、中性化深さ及び塩化物イオン浸透深さは、PL 供試体に比べて、小さく、その値は圧縮強度に依存する傾向を示した。
- 5) 速硬コンクリートは、高強度であることに加えて、累積細孔量が少なく、緻密な組織構造を形成していることから、凍結融解抵抗性等の耐久性や表層品質に優れているもの考えられる。
- 6) 速硬コンクリート中の水和物が屋外暴露 5 年においても変状しておらず、健全な状態で維持している可能性が示唆される。

## 参考文献

- 1) 国土交通省編：国土交通白書 2019 令和元年版，pp.109-113, 2019.8
- 2) 郭度連：急速施工を可能にする速硬コンクリート，コンクリートジャーナル，54 巻 1 号 pp.122-128, 2016
- 3) 郭度連，長塩靖祐，浜中昭徳，高橋洋朗：速硬性混和材を用いた速硬コンクリートおよび基礎物性，プレレストコンクリート工学会第 21 回シンポジウム論文集，pp.545-548, 2012.10
- 4) 例えば，公益社団法人日本コンクリート工学会：自然環境下におけるコンクリート劣化に関するシンポジウム委員会報告書，2018.9
- 5) 早川健司，水上翔太，加藤佳孝：表面透気試験による構造体かぶりコンクリートの品質評価に関する基礎的研究，土木学会論文集 E2，Vol.68，No.4，pp.385-398, 2012
- 6) 内田浩，沢木大介，羽原俊祐：混合セメントモルタル及びコンクリートの硬化体構造が強度発現に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集，No.44，pp.330-335, 1994.12
- 7) 羽原俊祐：硬化コンクリートの組織及び空隙構造と物性の関係に関する研究，慶応義塾大学博士論文，pp.148-193, 1992
- 8) 郭度連，宇治公隆，國府勝郎，上野敦：養生条件による組織変化と中性化を支配する細孔径の評価，土木学会論文集，Vol.57，No.718/V-57，pp.59-68, 2002.11
- 9) 鳥居和之，川村満紀，笹谷輝彦：コンクリートの塩素イオン透過性に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.44，pp.506-511, 1990.12