

◇報告◇

5年間屋外暴露した速硬コンクリートの耐久性

Durability of Rapid Hardening Concrete after 5-year Outdoor Exposure

岡田 明也*, 長塩 靖祐**

OKADA, Akiya*; NAGASHIO, Yasuhiro**

要 旨

本研究では、呼び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、なら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

ABSTRACT

This paper deals with the durability of rapid hardening concrete made by adding a rapid hardening admixture to ordinary concrete with a different design strength. A five-year outdoor exposure test was carried out in Hokuto City, Hokkaido, for the evaluation of the durability. The rapid hardening concrete in this study after 5 years of outdoor exposure showed no deterioration attributable to frost damage. It was also found that, compared to plain concrete with an air content of about 5%, the rapid hardening concrete had a lower cumulative pore volume and a more densely packed microstructure, being superior in compressive strength, surface quality and resistance to carbonation and chloride ion penetration. The results also showed that the hydration products inside the concrete were in sound condition after 5 years of outdoor exposure.

Keywords : *Rapid hardening concrete, Rapid hardening admixture, Outdoor exposure test, Durability*

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30万橋にもものぼるといわれおり¹⁾、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」およびその製造システムが開発されている²⁾。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。さらに、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³⁾。

しかしながら、その上記報告³⁾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、呼び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

Table 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および供試体の作製

Table 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)に準拠して、呼び強度を27, 33および40, 空気量 $4.5 \pm 1.5\%$, スランプ $15 \pm 2.5\text{cm}$ とした速硬性混和材添加前の普通コンクリートを練り混ぜた。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°C 環境下において可使時間が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 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 分の水溶液を外割添加して練り混ぜた。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練り混ぜ、供試速硬コンクリートを作製した。なお併せて、呼び強度30, 空気量 $5.0 \pm 1.0\%$, スランプ $15 \pm 2.5\text{cm}$ とした配合の比較用コンクリート(PL)も作製した。

作製した各供試コンクリートを動弾性係数およ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°C , 60% (RH)] +27d水中 (20°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および空気量測定するとともに所定の材齢で初期強度についても測定した。

なお、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)に準拠して、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, 動せん断弾性係数および動ポアソン比試験方法)に従って、300サイクルまで30サイクルごとに、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2013~2018年までの5年間屋外暴露した。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°C 以上から 0°C 未満になった回数を1サイクルすると、屋外暴露5年間で514サイクルであった。**Fig. 1**には屋外暴露試験の状況を、**Fig. 2**には2017年の供試体中心温度および北斗市の積雪深を示す。

Table 1 List of material (使用材料の一覧)

Material	Symbol	Type	Note
Cement	C	Ordinary Cement	Density : $3.16\text{g}/\text{cm}^3$
Water	W	-	-
Fine Aggregate	S	Crushed sand	Density : $2.61\text{g}/\text{cm}^3$
Coarse Aggregate	G	Crushed stone	Density : $2.64\text{g}/\text{cm}^3$
Water reduce agent	Ad	AE Water reduce agent	Lignin based
Rapid setting admixture	F	-	Density : $2.93\text{g}/\text{cm}^3$
Retarder	Re.	Citric acid	Oxycarboxylic acid based

Table 2 Mix proportion of the concrete (コンクリートの配合)

Type of Specimen	W/C (%)	W/B* (%)	Nominal Strength	Mix Proportion of Base Concrete (kg/m^3)					Additive (kg/m^3)		
				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

Note, *: B=C+F



Fig. 1 Outdoor exposure test
(暴露場の景観及び暴露状況)

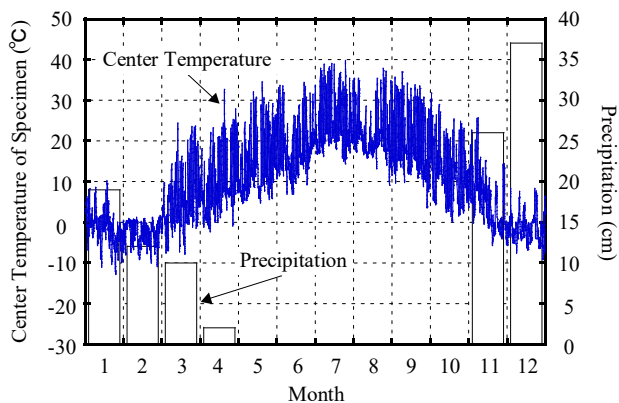


Fig. 2 Center temperature changes of specimen and monthly average snow depth at the outdoor exposure test site since 2017
(年間の供試体内部温度および暴露場の積雪深)

3.4 圧縮強度試験

JIS A 1108(コンクリートの圧縮強度試験方法)に準拠して, 屋外暴露1, 3および5年後において圧縮強度試験を行った。

3.5 相対動弾性係数および質量減少率の測定

JIS A 1127および JIS A 1148(コンクリートの凍結融解試験方法)に準拠して, 屋外暴露前, 屋外暴露0.5, 1, 2, 3, 4および5年後の相対動弾性係数およ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7日間測定した。

3.7 表層透気係数の測定

トンネル施工管理要領⁴⁾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 中性化およ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およ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および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3日静置して, 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, 3~3000nm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)に準拠して, 屋外暴露5年後の70FC供試中の元素 Al_2O_3 , CaO , SiO_2 および SO_3 について面分析を行い, CaO/SiO_2 モル比および 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. 試験結果および考察

4.1 フレッシュ性状および初期強度

Table 3には、コンクリートのフレッシュ性状および普通コンクリートの圧縮強度を示す。普通コンクリートならびに速硬コンクリートである50FC、60FCおよび70FCのスランプおよび空気量は、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および70FCのスランプは、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。

Fig. 3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および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²⁾³⁾。また、材齢28dにおける圧縮強度は、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、おおむね目標値どおりの強度が発現されていた。

4.2 屋外暴露後の圧縮強度

Fig. 4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および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年において、暴露開始から1.7~2.0倍程度増加しており、凍害による強度劣化は認められなかった。

Table 3 Fresh concrete properties and compressive strength of base concrete specimens (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)

Type of Specimen	Base Concrete			Rapid setting Concrete	
	Slump (cm)	Air Content (%)	Compressive Strengths (28day)	Slump (cm)	Air Content (%)
PL	15.0	5.5	38.9	-	-
50FC	16.5	5.9	34.8	20.5	1.1
60FC	15.5	4.8	41.4	20.0	1.1
70FC	13.0	3.5	48.0	17.5	1.5

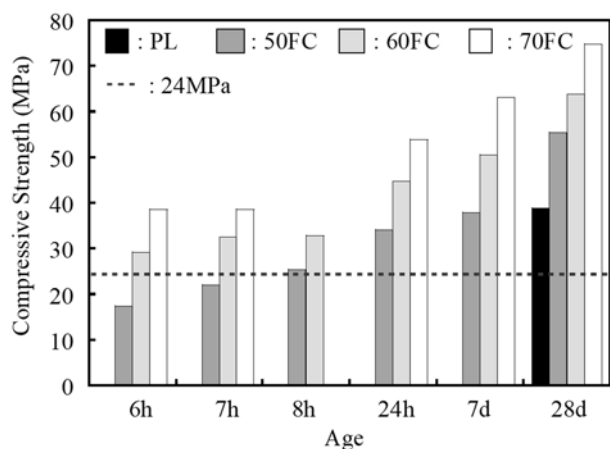


Fig. 3 Compressive strength of the concrete before outdoor exposure (屋外暴露前の圧縮強度)

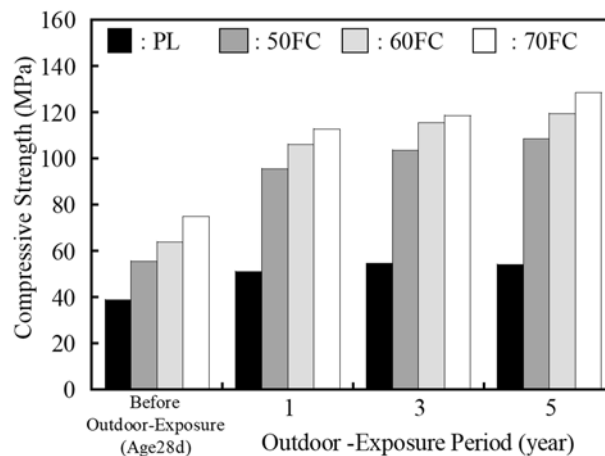


Fig. 4 Compressive strength of the outdoor exposed concrete (屋外暴露後の圧縮強度)

4.3 相対動弾性係数

Fig. 5には、促進凍結融解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および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、Fig. 6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および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、Fig. 4に示したとおり、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、促進凍結融解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⁵⁾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 質量減少率および外観観察

Fig. 7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。この屋外暴露1年までの急激な質量の減少は、スケーリング等の劣化よりむしろ、乾燥の影響が大きいものと考えられる。一方、50FC、60FCおよび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、Fig. 8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リングが認められた。それに比べて、50FC、60FCおよび70FC供試体表面では、スケーリングは認められなかった。

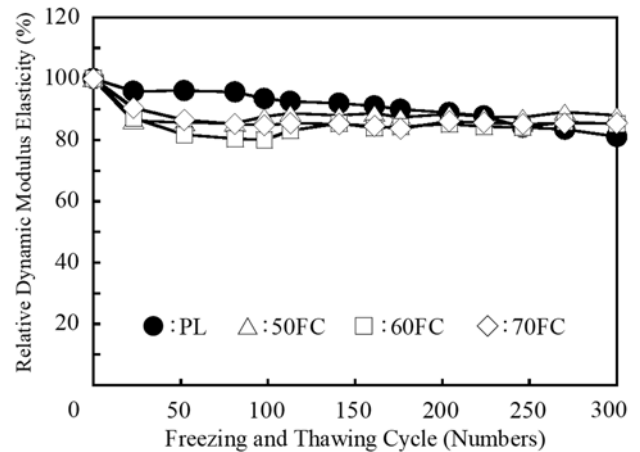


Fig. 5 The relative dynamic modulus of elasticity during freeze thawing cycle test (促進試験における供試体の相対動弾性係数)

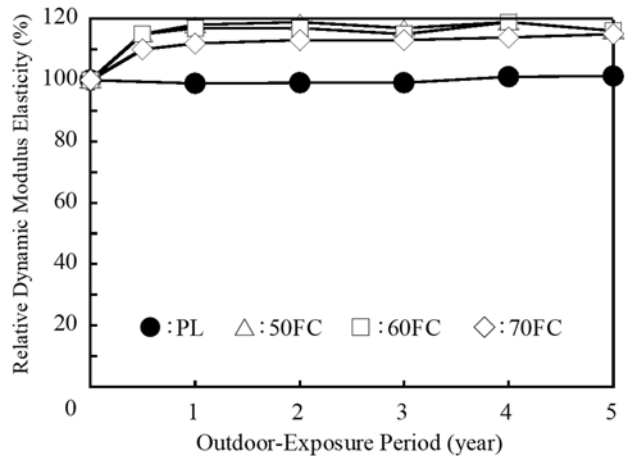


Fig. 6 The relative dynamic modulus of elasticity during outdoor-exposure test period (屋外暴露試験における供試体の相対動弾性係数)

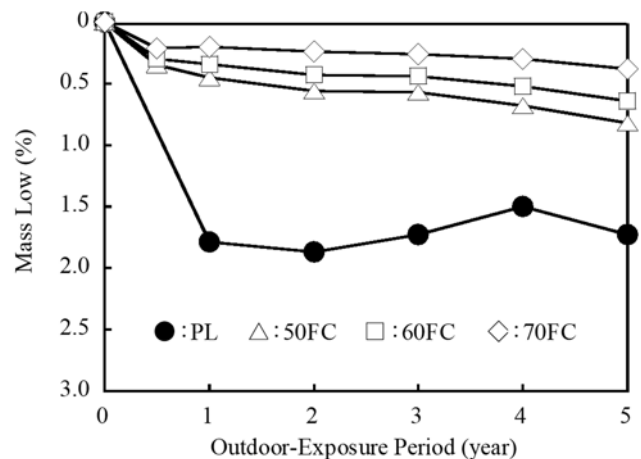


Fig. 7 Mass loss ratio of concrete specimens during outdoor-exposure test period (屋外暴露試験における供試体の質量減少率)

4.5 表層品質

透水量および表層透気係数測定直前の各供試体表面の含水率は3.9~5.2%の範囲にあった。

Fig. 9には、透水試験の結果を示す。50FC, 60FCおよび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、Fig. 10には表層透気係数(kT)を示す。PL供試体の表層透気係数は $0.100 \times 10^{-16} m^2$ であり、評価グレードは「Normal(一般)」であった。一方、50FC, 60FCおよび70FC供試体の表層透気係数は、 $0.007 \sim 0.008 \times 10^{-16} m^2$ 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「Good(優)」であった。これらのことから、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 中性化および塩化物イオン浸透深さ

Fig. 11には、屋外暴露5年後における供試体の中性化および塩化物イオン浸透深さを示す。50FC, 60FCおよび70FC供試体の中性化およ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⁶⁾によると、中性化およ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。



PL 50FC 60FC 70FC

Fig. 8 Surface appearance of specimens (供試体表面の状況)

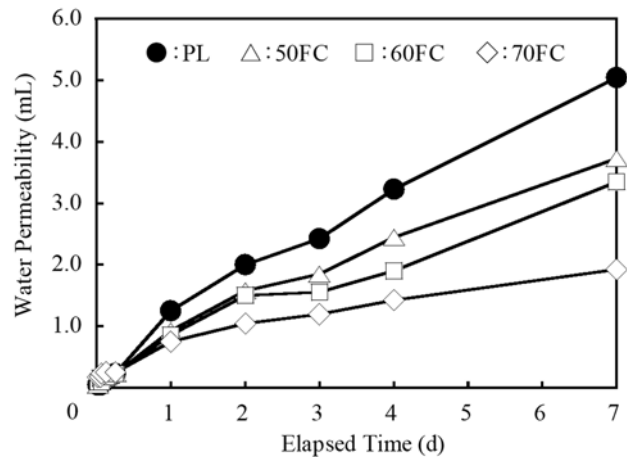


Fig. 9 Water permeability increase of concrete specimens with elapsed time (時間の経過に伴う供試体の透水量の変化)

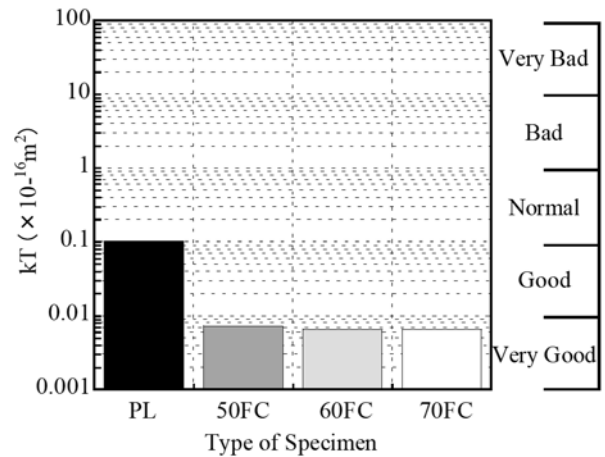


Fig. 10 The surface layer air permeability by kT(Torrent Method) (kT法による供試体の表面透気係数)

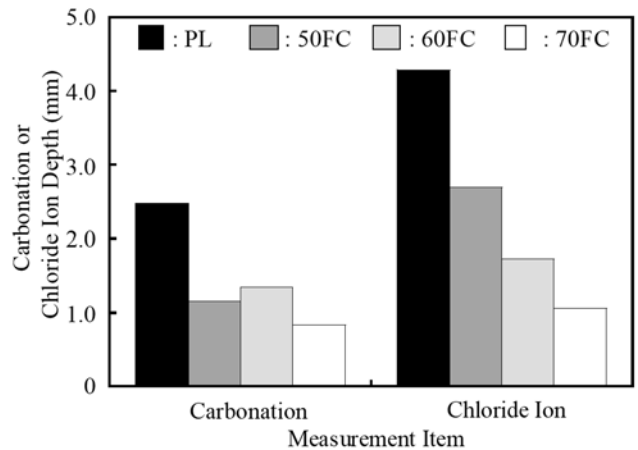


Fig. 11 Carbonation and chloride ion penetration depth into the concrete specimens (供試体の中性化および塩化物イオン浸透深さ)

4.7 細孔径分布

Fig. 12には、PLおよび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⁷⁾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^{7)~10)}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

Fig. 13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ガイトの回折ピークが認められた。

Table 4には、70FC供試体におけるCaO/SiO₂モル比およびCaO/Al₂O₃モル比の濃度分布を示す。70FC供試体のCaO/SiO₂およびCaO/Al₂O₃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。

5. 結 論

本研究を結論づければ以下のとおりである。

- 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年および凍結融解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するものと推察された。

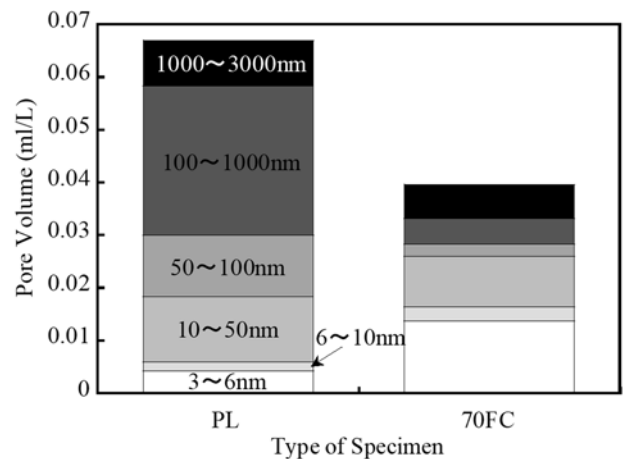


Fig. 12 Pore size distribution in PL and 70FC specimens
(PLおよび70FC供試体の細孔径分布)

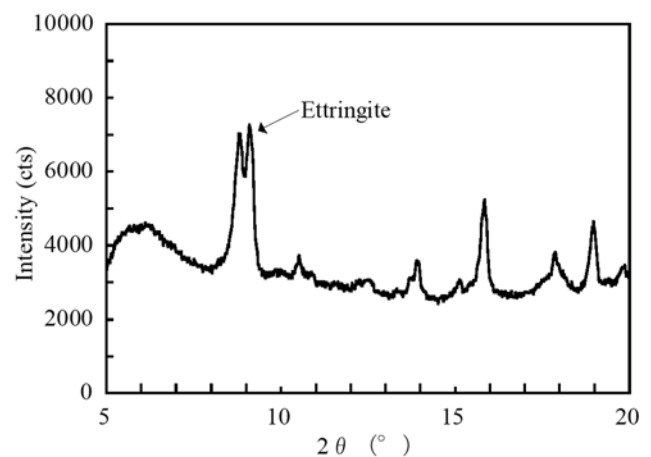
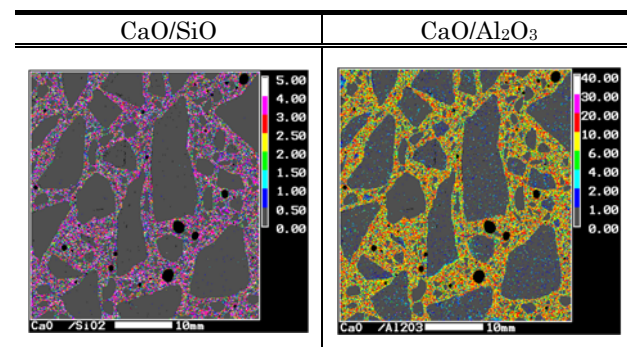


Fig. 13 X-ray diffraction pattern of 70FC specimen
(70FC供試体のX線回折パターン)

Table 4 CaO/SiO₂ and CaO/Al₂O₃ molar ratio distribution in the 70FC specimen
(70FC供試体におけるCaO/SiO₂モル比及びCaO/Al₂O₃モル比の分布)



- 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ー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, 中性化深さおよ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, 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ると考えられた。
- 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, 健全な状態が維持していた。
- 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. 1992, p. 148-193.
- 8) 内川 浩, 羽原俊祐, 沢木大介. 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. 1990, 44, p. 330-335.
- 9) 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. 2002, 57(718), p. 59-68.
- 10) 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. 1990, 44, p. 506-511.

本研究の限りでは, 屋外暴露5年において, 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。また, 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どの程度影響するのかを明確にするに至っていない。これらのことから, 今後も屋外暴露試験を継続していく予定である。

参 考 文 献

- 1) 国土交通省. 国土交通白書2019 令和元年版. 2019, p. 109-113.
- 2) 郭 度 連. 急速施工を可能にする速硬コンクリート. コンクリート工学. 2016, 54(1), p. 122-128.
- 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の製造および基礎物性. 第21回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集. 2012, p. 545-548.
- 4) 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社. トンネル施工管理要領 平成29年7月版. 高速道路総合技術研究所. 2017, p. 51-52.
- 5) 例えば, 日本コンクリート工学会. 自然環境下のコンクリート劣化に関するシンポジウム委員会報告書・論文集(JCI-C95). 2018, p. 47-50.
- 6) 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(材料・コンクリート構造). 2012, 68(4), p. 385-398.