

# 火山ガラス微粉末を用いたコンクリートに関する研究

金沢工業大学 環境土木工学科  
准教授 花岡 大伸

# 研究背景

石炭火力発電所



石炭灰 (FA)

製鉄所



高炉スラグ微粉末 (BFS)

コンクリート用混和材として有効利用 (高耐久化)



希望橋 (橋長34.6m)  
ポストテンション方式PC単純T桁橋



大月橋 (橋長12.0m)  
プレテンション方式PC単純中空床版橋

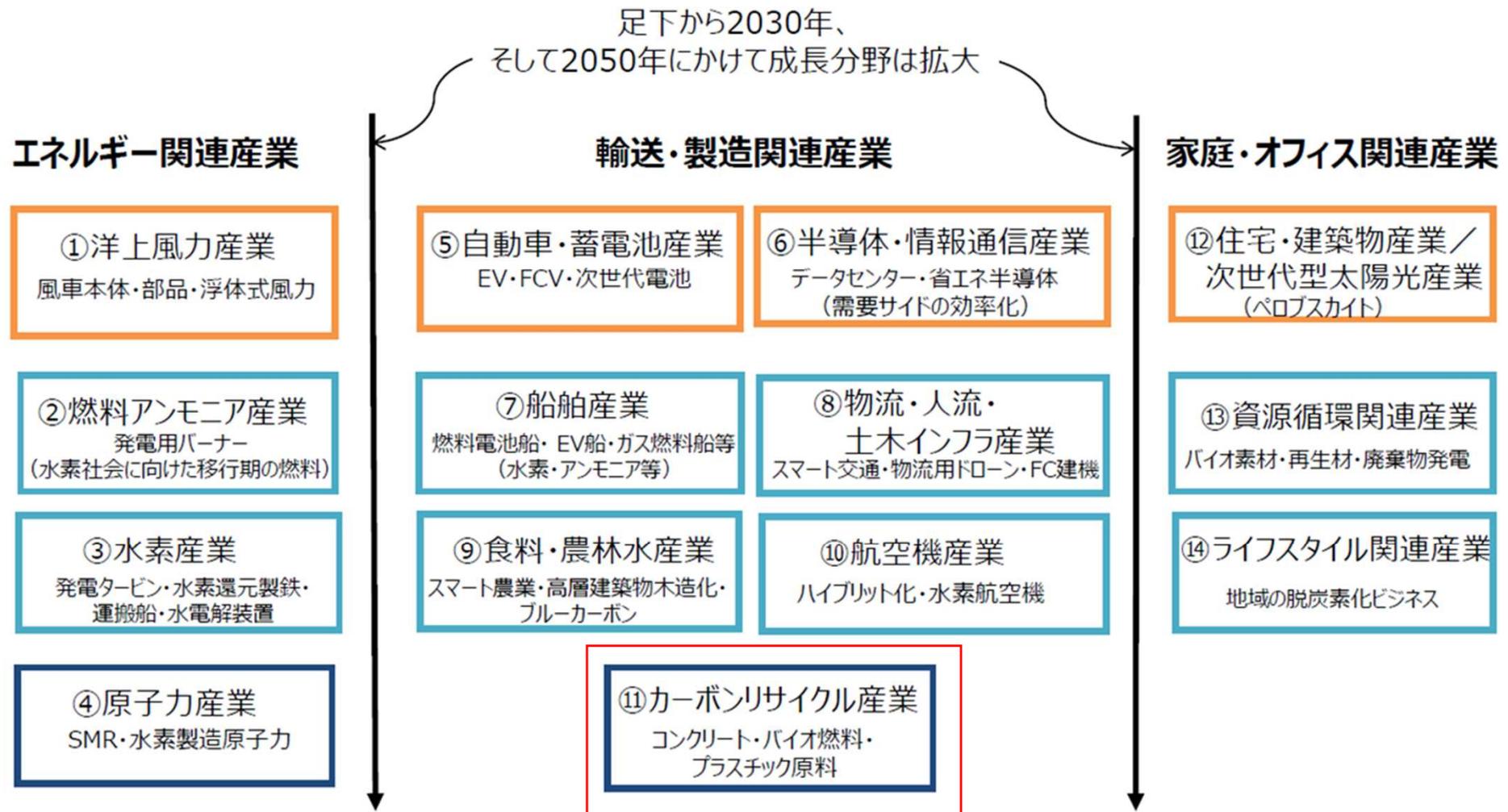


プレキャストPC床版 2

# 2020年10月 政府が「2050年カーボンニュートラル宣言」を発表

→2050年までに脱炭素社会を実現し、  
温室効果ガスの排出を実質ゼロにする具体的な目標を発表

## グリーン成長戦略で策定されている14の重要分野



出典：経済産業省 エネルギー庁HPより

1tのセメントを製造する際に約770kgのCO<sub>2</sub>が排出

FAやBFSなどの産業副産物が安定供給されないことも懸念される

# 天然資源のポゾラン材料（火山堆積物）

## 火山堆積物が使用された事例



小樽築港 北防波堤  
(1908年)

鹿児島県  
シラスコンクリート

天然資源の有効利用、地産地消によるコンクリートの高性能化を目指して、  
2020年3月、**JIS A 6209 コンクリート用火山ガラス微粉末**が制定

↓  
フライアッシュと同様、ポゾラン反応を有する天然材料

資源循環型社会や脱炭素社会を目指すうえで期待される天然材料であるが、FAやBFSに比べて研究事例が少ない。

## 主要な火山および火山堆積物の分布

産総研20万分の1シームレス地質図より

九州南部の入戸シラスだけでも  
高炉スラグの年間副産量の約9,000倍に当たる750億m<sup>3</sup>が賦存

JCI:火山堆積物のコンクリート用混和材としての高度利用に関する  
シンポジウム報告書・論文集2022.03

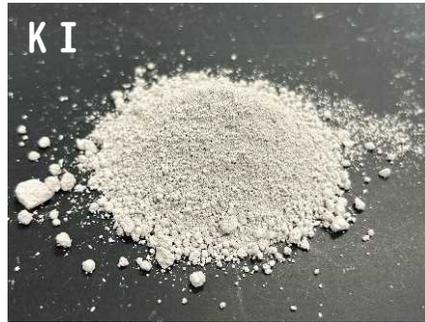
# 研究の目的

本研究では、火山ガラス微粉末の普及・展開に向け、産地、品種が異なる種々の火山ガラス微粉末を用いたコンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度を調べた。また、一部のコンクリートについては、耐久性試験を実施した。

# 種々の火山ガラス微粉末を用いた実験

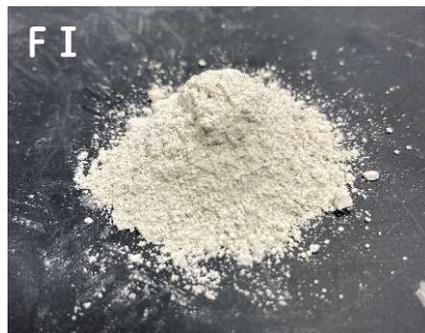
## 鹿児島県産の火山ガラス微粉末

種類	化学組成 %											平均粒径 μm	密度 g/cm <sup>3</sup>	BET比表面積 cm <sup>2</sup> /g
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	強熱減量			
<b>K I</b>	73.0	0.21	13.1	2.38	0.06	0.32	1.51	3.59	3.32	0.04	2.47	2.0	2.37	<b>97,000</b>
<b>K III</b>	74.3	0.19	12.6	1.78	0.05	0.28	1.39	3.75	3.35	0.03	2.25	6.5	2.40	<b>32,000</b>



## 福島県産の火山ガラス微粉末

種類	化学成分 %								密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積		活性度指数 %	
	二酸化けい素	酸化アルミニウム	酸化マグネシウム	三酸化硫黄	遊離酸化カルシウム	塩化物イオン	強熱減量	湿分		BET法 (cm <sup>2</sup> /g)	ブレン値 (cm <sup>2</sup> /g)	7日	28日
<b>F I</b>	70.5	12	0.4	0.26	0.1未満	0.002	1.3	0.3	2.30	<b>99,800</b>	<b>14000</b>	98	104
<b>F II</b>	71.2	11.8	0.2	0.11	0.1未満	0.002	1.2	0.1	2.30	-	<b>6000</b>	97	103



# 種々の火山ガラス微粉末を用いた実験

## 試験練りの配合とフレッシュ性状

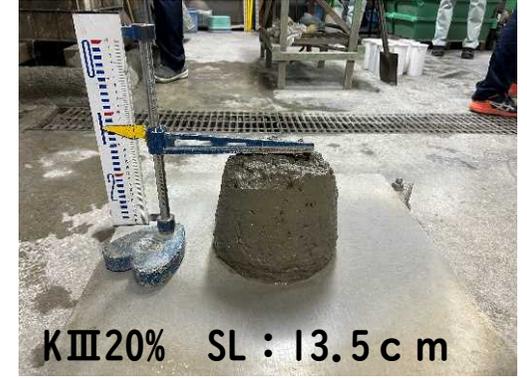
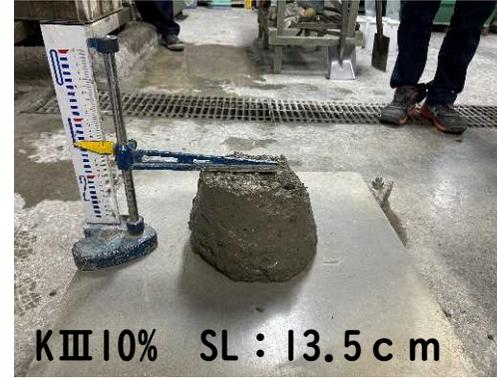
配合No.	配合名	W/B (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )									混和剤種類	添加率 (%)	AE-4 (IA)	SL (cm)	Air (%)	C.T. (°C)	供試体	備考		
				W	C	KI	KII	FI	FII	S	GI	G2										
1	W/C55%-N	55	43.5	167	304	-	-	-	-	789	520	518	SV10	1.0	1.5	12.5	4.2	21	①			
2	W/C55%-KI-10				274	30	-	-	-	783	517	515	SV10	1.2	4.0	14.0	5.3	20	②			
3	W/C55%-KI-20				243	61	-	-	-	781	515	513	SV10	1.2	4.0	12.5	5.0	21	③			
4	W/C55%-KIII-10				274	-	30	-	-	783	517	515	SV10	1.0	3.0	13.5	5.3	21	④			
5	W/C55%-KIII-20				243	-	61	-	-	781	516	514	SV10	1.0	3.0	12.0	4.5	21	⑤			
6	W/C55%-FI-10				274	-	-	-	30	-	783	517	515	SV10	1.2	4.0	8.5	5.1	21	-		SV10でSL未達確認 →SF500S用
														SF500S	1.25	4.0	10.0	3.9	21	⑥		
7	W/C55%-FI-20				243	-	-	61	-	781	515	513	SF500S	1.6	5.0	4.5	4.2	21			SF500SでII標SL未達を確認 →置換率15%で実施	
7-2	W/C55%-FI-15				258	-	-	46	-	781	516	514	SF500S	1.80	5.0	12.5	3.8	20	⑦			
8	W/C55%-FII-10				274	-	-	-	30	783	517	515	SF500S	1.1	4.0	11.0	4.2	21	⑧			
9	W/C55%-FII-20	243	-	-	-	61	781	515	513	SF500S	1.8	5.0	11.5	4.1	21	⑨						
10	W/C45%-N	45	41.5	169	376	-	-	-	-	726	519	517	SV10	1.0	3.0	13.5	4.2	21	⑩			
11	W/C45%-KI-10				338	38	-	-	-	721	516	514	SV10	1.0	5.0	13.0	5.9	21				
12	W/C45%-KI-20				301	75	-	-	-	715	513	511	SV10	1.2	5.0	12.0	5.5	21	⑫			
13	W/C45%-KDI-10				338	-	38	-	-	721	516	514	SV10	1.0	4.0	12.5	5.5	21	⑬			
14	W/C45%-Km-20				301	-	75	-	-	718	513	511	SV10	1.2	4.0	12.5	4.5	21	⑭			
15	W/C45%-FI-10				338	-	-	38	-	721	516	514	SF500S	1.6	4.0	16.5	3.6	21			ISLが大きい-*添加率減少	
														SF500S	1.45	5.0	12.0	4.3	21	⑮		
16	W/C45%-FI-20				301	-	-	75	-	715	513	511	SF500S	2.0	6.0	3.5	3.2	21	-		SF500SでII標SL未達を確認 →置換率15%で実施	
16-2	W/C45%-FI-15				320	-	-	56	-	718	515	513	SF500S	2.0	6.0	3.0	4.2	21	⑯		II標SL未達	
17	W/C45%-FII-10				338	-	-	-	38	721	516	514	SF500S	1.2	6.0	10.5	5.7	21	⑰			
18	W/C45%-FII-20	301	-	-	-	75	715	513	511	SF500S	2.0	6.0	14.0	3.8	21	⑱						

- 火山ガラス微粉末はセメントに対して質量置換（10～20%）
- 目標スランプ12cm±2.5cm、目標空気量4.5%±1.5%
  - 鹿児島県産：ベースコンクリートと同様、AE減水剤で目標スランプを確保
  - 福島県産：AE減水剤では目標スランプを確保できず。  
→高性能AE減水剤で対応（I種は20%置換が困難）

# 種々の火山ガラス微粉末を用いた実験

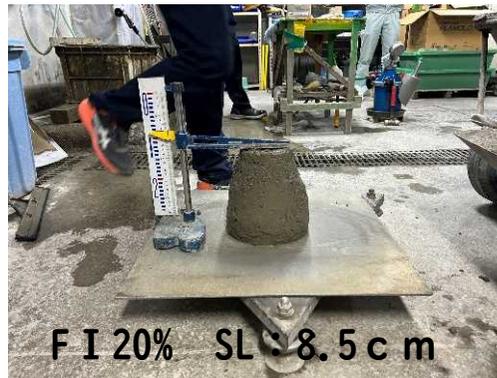
フレッシュ性状（スランプ試験の状況）

鹿児島県産（W/C=55.0%）



置換率10~20%において、AE減水剤で目標スランプを確保

福島県産（W/C=55.0%）



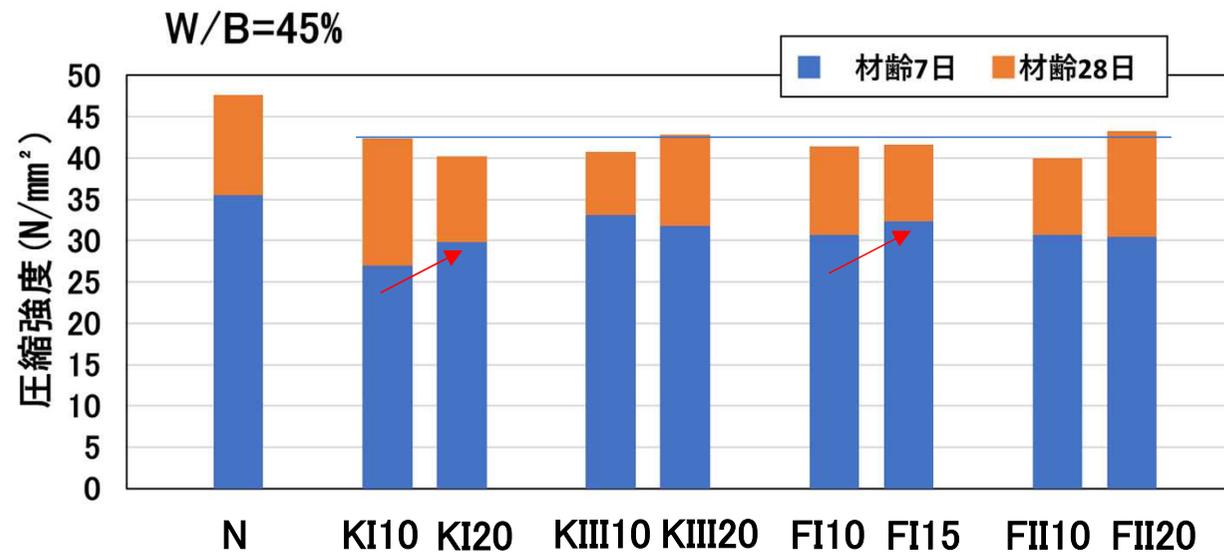
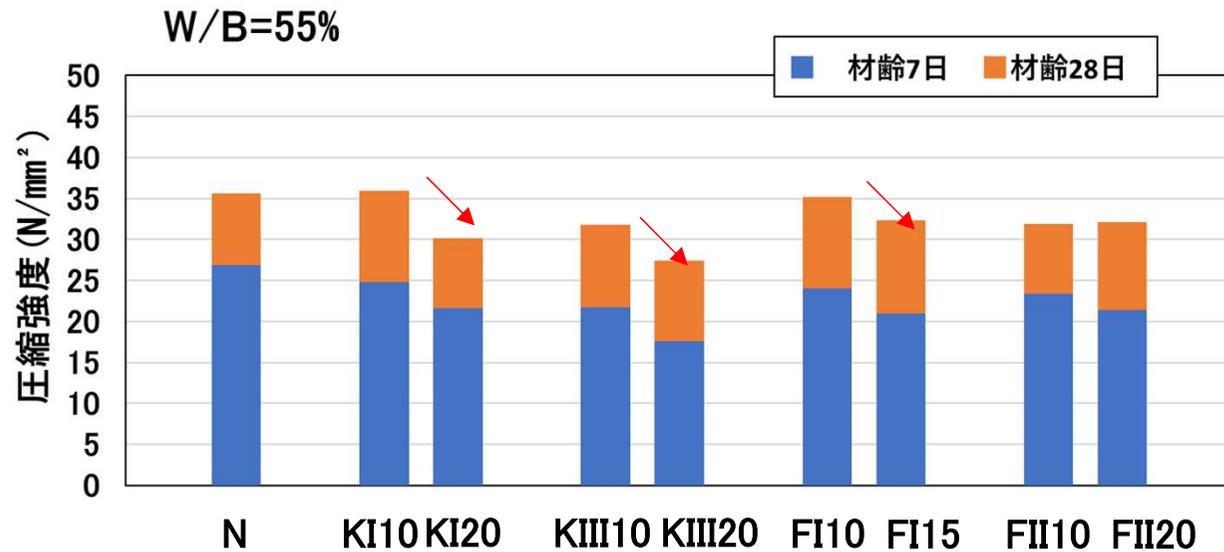
AE減水剤で対応できず

高性能AE減水剤で対応

置換率20%はSLを確保できず

置換率15%に変更

# 種々の火山ガラス微粉末を用いた実験



火山ガラス微粉末の産地・品種やコンクリートの配合によって、フレッシュ性状や強度発現の傾向が異なることが分かった。

# 火山ガラス微粉末を用いたコンクリートの耐久性試験

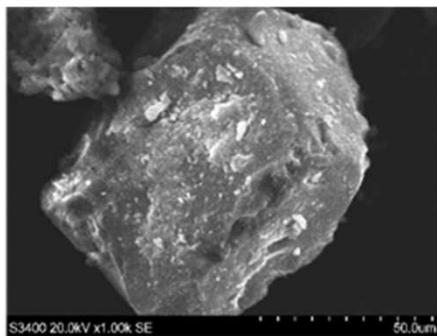
比表面積が異なる福島県産の火山ガラス微粉末を用いたコンクリートを作製し、**フレッシュ性状、表面品質、強度および耐久性**について調べた。

## 実験に使用した火山ガラス微粉末

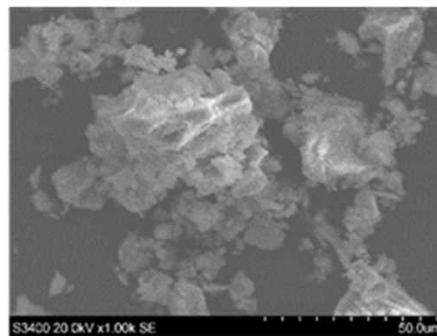
ロールクラッシャーを用いて粉碎し、サイクロンにより分級したものを使用  
→福島県産の火山ガラス微粉末

### 福島県産の火山ガラス微粉末

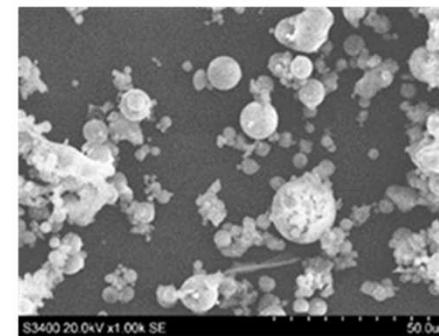
種類	化学成分 %								密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積		活性度指数 %	
	二酸化けい素	酸化アルミニウム	酸化マグネシウム	三酸化硫黄	遊離酸化カルシウム	塩化物イオン	強熱減量	湿分		BET法 (cm <sup>2</sup> /g)	ブレン値 (cm <sup>2</sup> /g)	7日	28日
FI	70.5	12	0.4	0.26	0.1未満	0.002	1.3	0.3	2.30	99,800	14000	98	104
FII	71.2	11.8	0.2	0.11	0.1未満	0.002	1.2	0.1	2.30	-	6000	97	103



微粉末FI  
(ブレン値14000)



微粉末FII  
(ブレン値6000)



分級フライアッシュ  
(ブレン値4440)

SEM画像 (1000倍)

# コンクリートの配合およびフレッシュ性状

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )									スランプ (cm)	空気量 (%)												
			W	C		FA	VGP	S	G	SP	AE														
				OPC	BB						AE1			AE2											
N	50	45	160	320	-	-	-	802	984	1.70	0.48	-	12.5	4.5											
N6000				288			32	798	979	4.32	0.64		14.0												
N14000				288			32	798	979	5.76	1.28		14.5												
FA				272			-	796	976	1.76	-		0.96	14.0	3.5										
FA6000				240	48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
FA14000																		32	791	971	3.52	-	1.28	13.5	4.1
BB				-	320	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-							
BB6000																			32	794	974	1.12	0.96	13.5	3.5
BB14000																			288	32	794	974	3.04	1.60	14.0
N				55	45	160	291	-	-	-	813	997	1.43	0.87	-	14.0	3.6								
N6000	262	29	809				993			2.62	1.16	13.0	3.9												
N14000	262	29	809				993			4.07	1.75	10.0	3.0												
BB	-	291	-				-	-	-	-	-	-		-	-	-	-								
BB6000													262					29	805	988	1.45	1.75	13.0		
BB14000													262					29	805	988	3.78	3.20	12.0	5.5	

## ※火山ガラス微粉末はセメント質量の10%内割置換

OPC:普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm<sup>3</sup>)、BB:高炉セメントB種(密度3.08g/cm<sup>3</sup>)、FA:フライアッシュ(Ⅱ種灰)(密度2.30 g/cm<sup>3</sup>)、VGP:火山ガラス微粉末(密度2.30 g/cm<sup>3</sup>)、比表面積6000cm<sup>2</sup>/g、14000 cm<sup>2</sup>/g、S:細骨材(密度2.57 g/cm<sup>3</sup>)、G:粗骨材(密度2.58 g/cm<sup>3</sup>)、混和剤(AE2(FA用))、SP:高性能AE減水剤、AE剤)

### ・流動性

高性能AE減水剤の添加量を調整することで、目標スランプを得ることができた。

→ただし、ブレン値14000の場合は粘性がかなり増加

### ・空気連行性

目標空気量を得るためのAE剤の添加量は増加する傾向にあるが、現実的な範囲のAE材添加量で目標空気量を得ることができた。

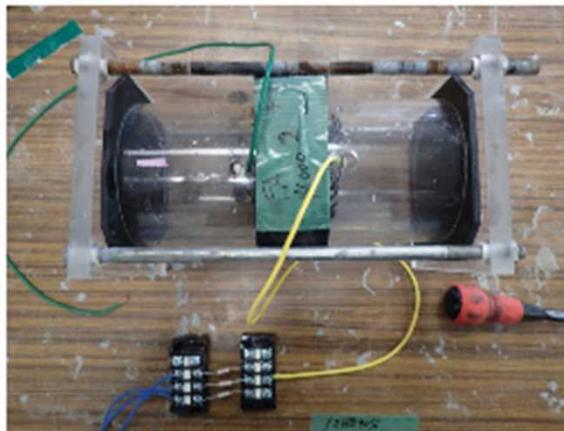
# 試験項目

項目	概要	配合
圧縮強度試験	JIS A 1108 2018 (φ100×200の供試体) 水中養生7,28,91日後に実施	W/B 50%
水分浸透試験	JSCE-G582-2018 水中養生28日後, 温度20℃, 湿度60%の環境で91日間乾燥後に実施	
遮塩性試験	非定常電気泳動試験 (NT BUILD 492 水中養生28日後に実施) 浸漬法 (水中養生28日後, 濃度3.0%のNaCl溶液に91日間浸漬)	
ASR試験	飽和NaCl溶液浸漬法 (デンマーク法) ※反応性骨材材を用いた試験	W/B 50% N配合
凍結融解試験	JIS A 1148 2010 コンクリートの凍結融解試験方法	
細孔径の測定	水銀圧入法 水中養生28日後, 温度20℃, 相対湿度60%の環境で91日間養生後に実施	

## 水分浸透試験



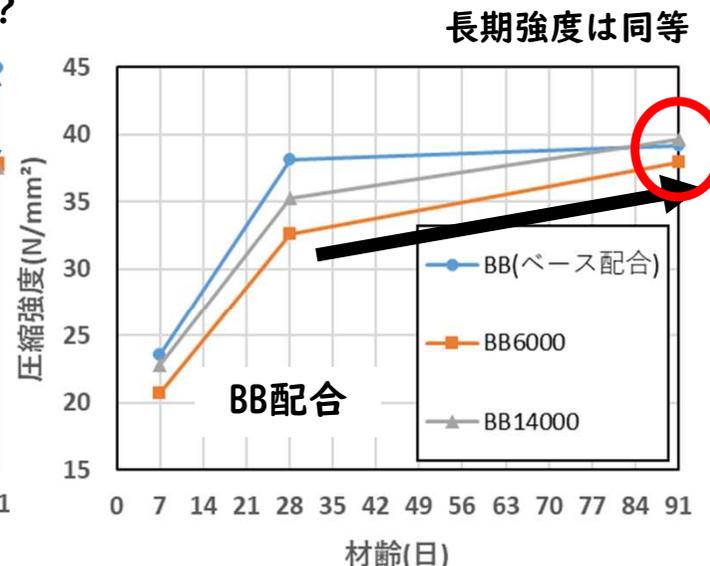
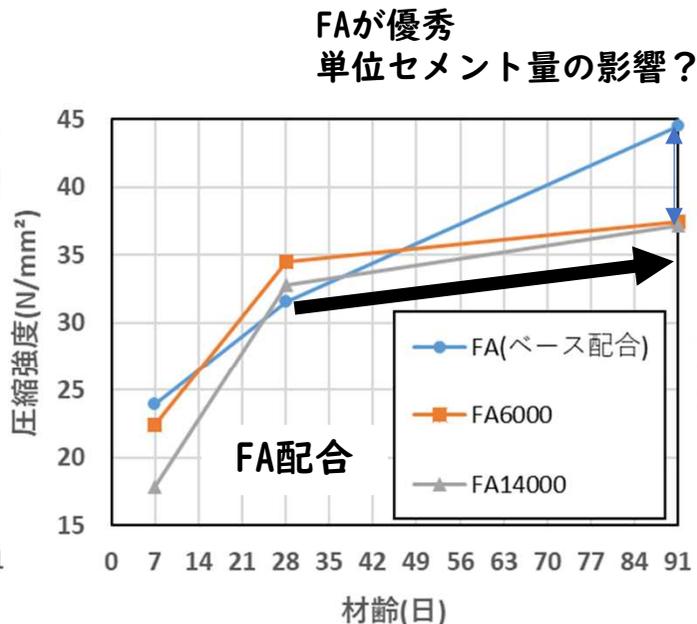
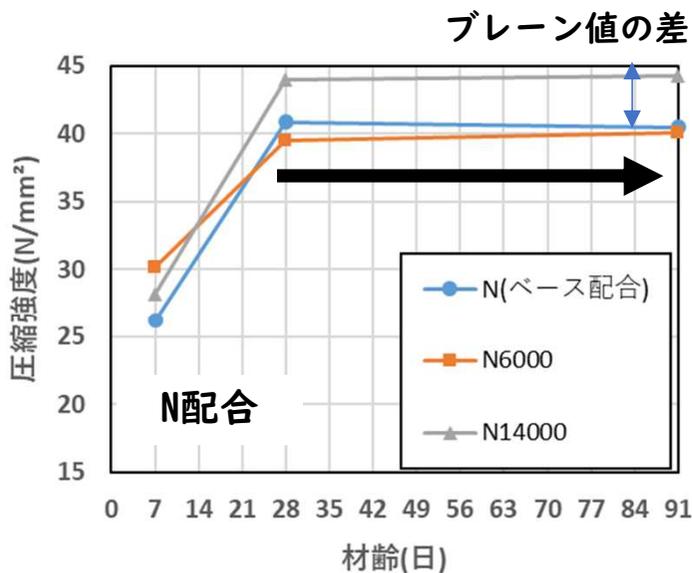
## 遮塩性試験 (非定常電気泳動試験)



## 遮塩性試験 (塩水浸漬試験)

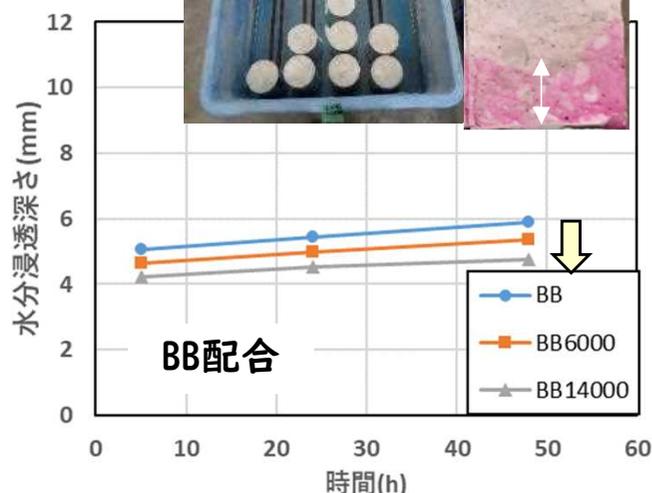
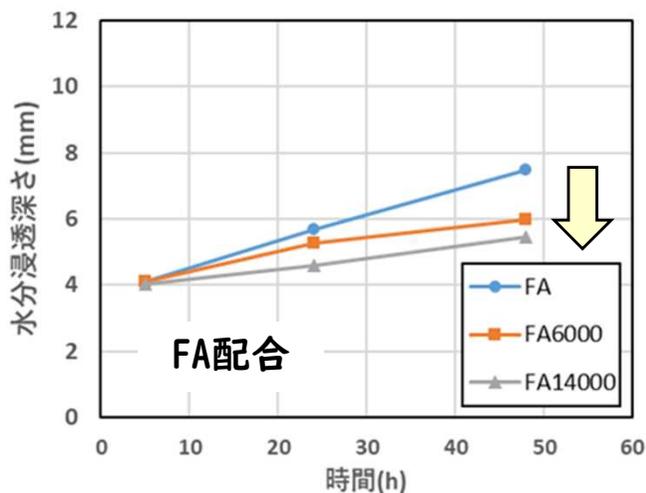
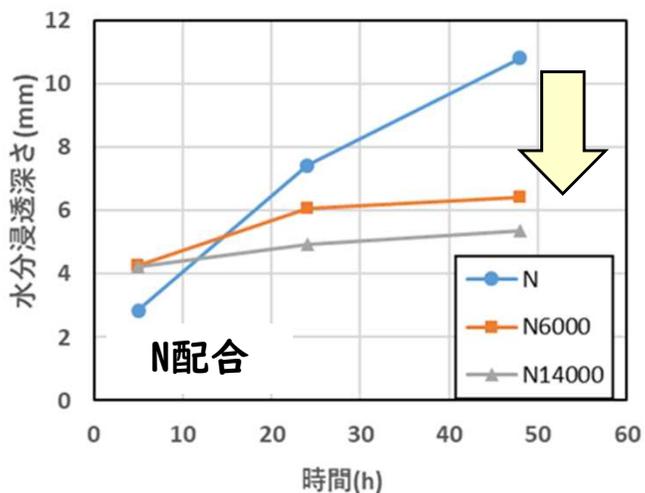


# 圧縮強度



# 水分浸透 (乾燥条件：温度20℃，湿度60%)

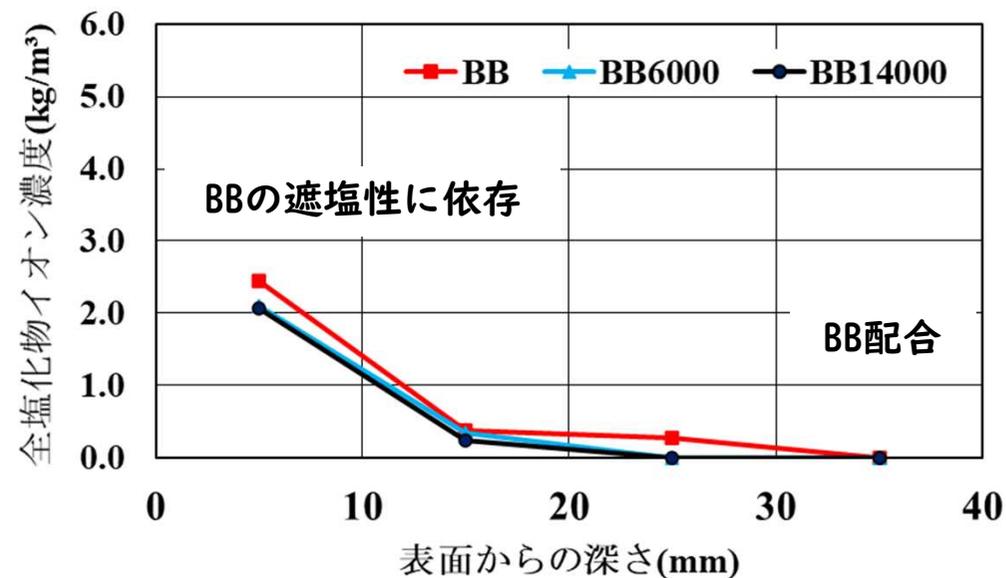
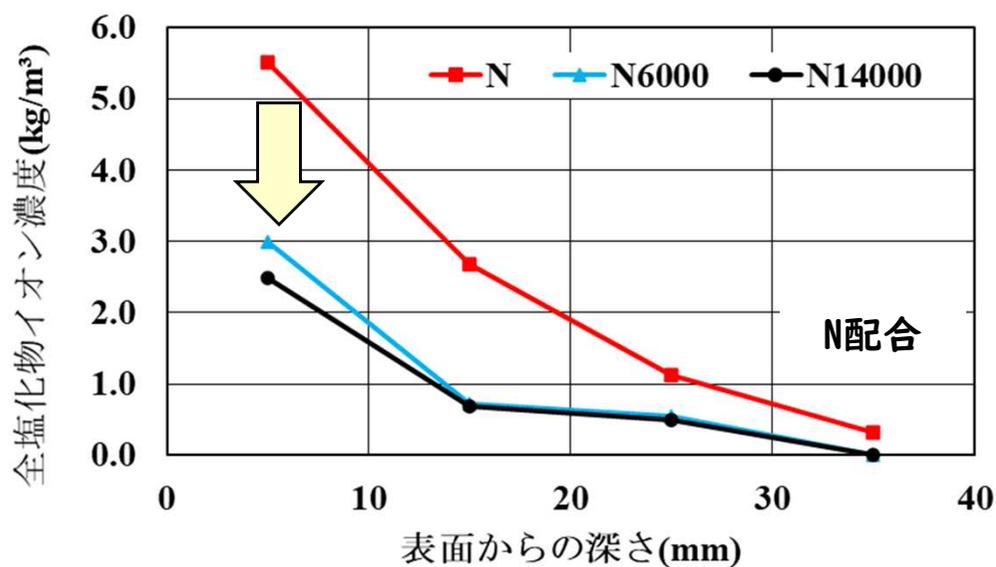
JSCE-G582-2018(短期の水掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法(案))



水分浸透深さが減少、ブレン値による差がみられた。

# 耐塩害性（遮塩性）

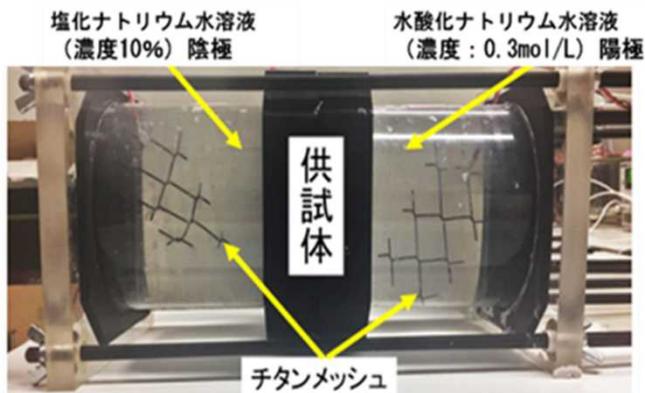
① 浸漬試験（水中養生28日後，濃度3.0%のNaCl溶液に91日間浸漬）



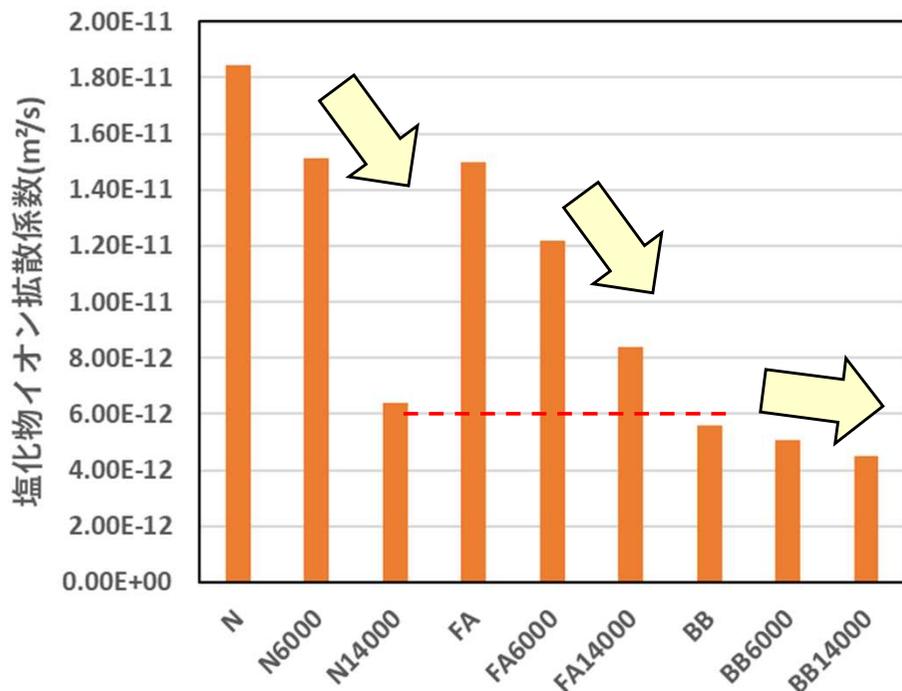
塩分浸透に対する耐久性が向上

# 耐塩害性 (遮塩性)

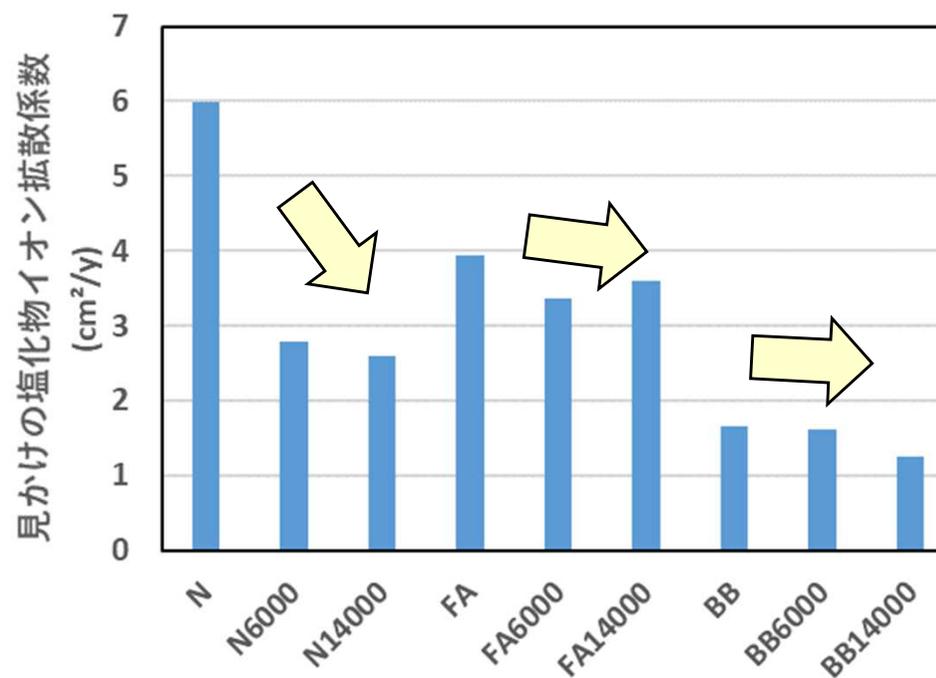
## ② 非定常電気泳動試験 (NT BUILD 492 水中養生28日後に実施)



②非定常電気泳動試験で求めたCl<sup>-</sup>拡散係数



①浸漬試験で求めたCl<sup>-</sup>拡散係数

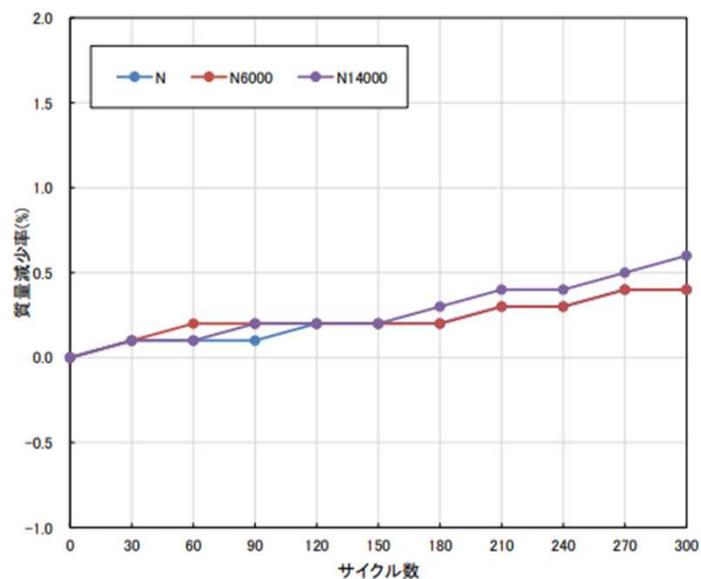
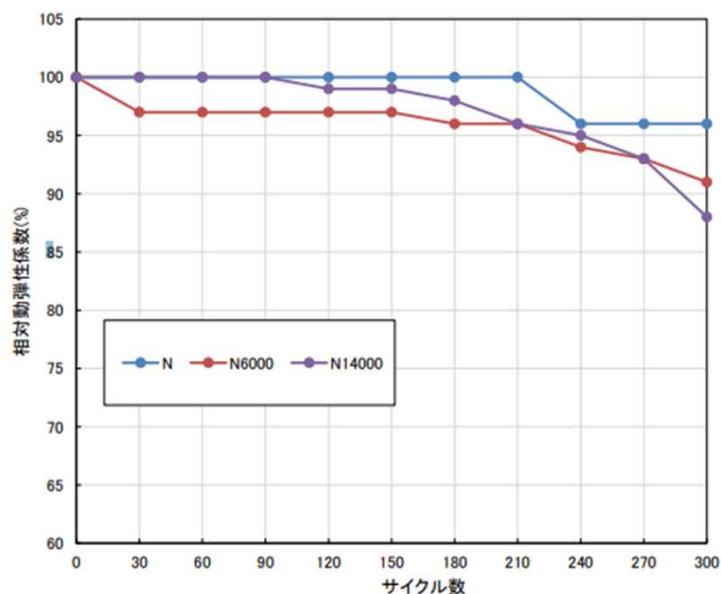


Cl<sup>-</sup>拡散係数の減少、ブレン値による効果の差がみられた。  
 →鋼材腐食開始時期が長くなる = 長期耐久性の確保

# 凍結融解抵抗性

JIS A 1148 2010 コンクリートの凍結融解試験方法

供試体の中心温度が5℃から-18℃に下がった後、-18℃から5℃に上がるのを1サイクルとし、300サイクル行った。



凍結融解試験300サイクル後



N (W/B=50%)



N6000 (W/B=50%)

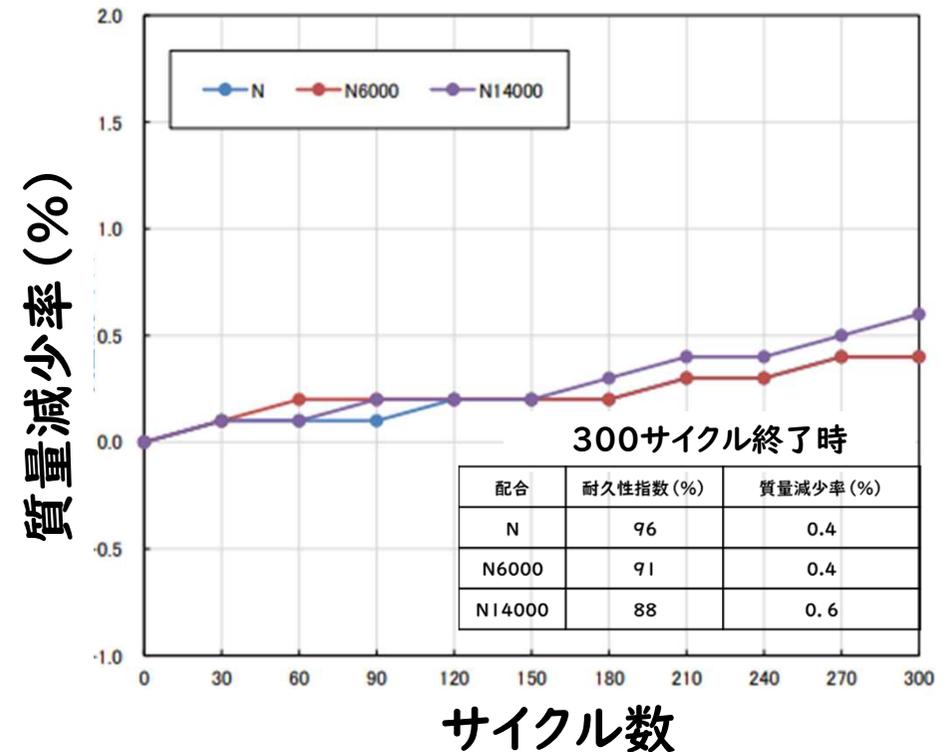
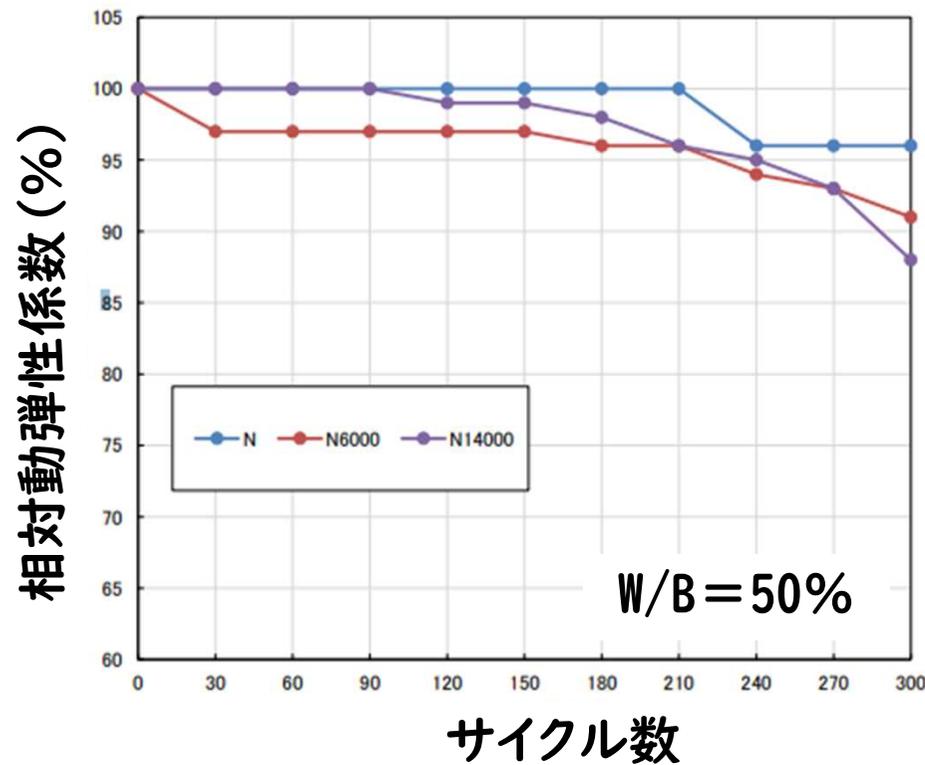


N14000 (W/B=50%)

# 凍結融解抵抗性

## JIS A 1148 2010 コンクリートの凍結融解試験方法

供試体の中心温度が5℃から-18℃に下がった後、-18℃から5℃に上がるのを1サイクルとし、300サイクル行った。



いずれの配合においても耐久性指数60%以上であり、十分な凍結融解抵抗性を有している。

火山ガラス微粉末を添加したコンクリートで耐久性指数が小さくなった理由は、水分の浸透が抑制されたため、コンクリート表面でのスケーリングが生じやすくなったためと考えられる。

# アルカリシリカ反応 (ASR) の抑制効果

## ASR試験に用いたコンクリートの配合

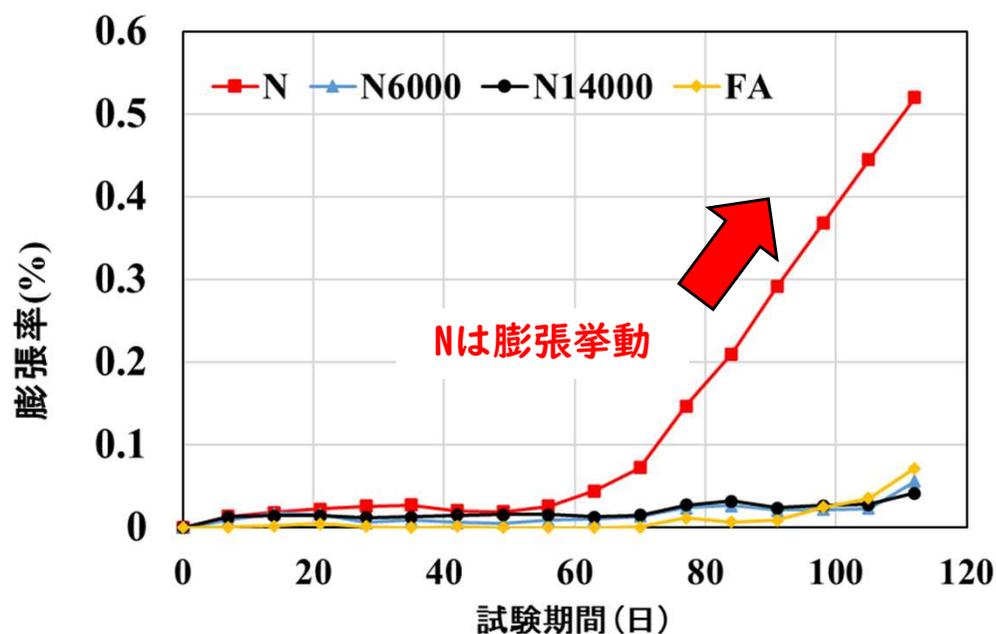
配合	W/B(%)	s/a(%)	単体量(kg/m <sup>3</sup> )										スランプ (cm)	空気量 (%)				
			W	C		FA	VGP	S	G	SP	AE-1	AE-2						
				OPC	BB													
N	50.0	45.0	160	320	—	—	—	845	996	1.57	0.96	—	14.5	5.7				
N6000				288						—	32				841	990	2.08	1.92
N14000																	3.84	1.92
FA				32						—	0.48				—	1.60	12.5	4.0

C:普通ポルトランドセメント (密度3.16g/cm<sup>3</sup>, ブレーン比表面積3340cm<sup>2</sup>/g), FA: フライアッシュII種灰 (密度2.30g/cm<sup>3</sup>, ブレーン比表面積4440cm<sup>2</sup>/g), VGP:火山ガラス微粉末A (密度2.36g/cm<sup>3</sup>, BET比表面積186020cm<sup>2</sup>/g), B (密度2.32g/cm<sup>2</sup>, BET比表面積430310cm<sup>2</sup>/g), S:反応性細骨材 (密度2.708g/cm<sup>3</sup>), G:反応性粗骨材 (密度2.61g/cm<sup>3</sup>), SP:高性能AE減水剤 (SF500S), AE-1:AE剤 (AE-4), AE-2:AE剤 (AE-9B)

モルタルバー法 (JIS A 1146 2017) にて無害でないとは判定された反応性骨材を用いて実験を行った。

## 飽和NaCl溶液浸漬法 (デンマーク法)

(湿潤養生7日後, 飽和NaCl溶液に浸漬, 7日ごとに測定)

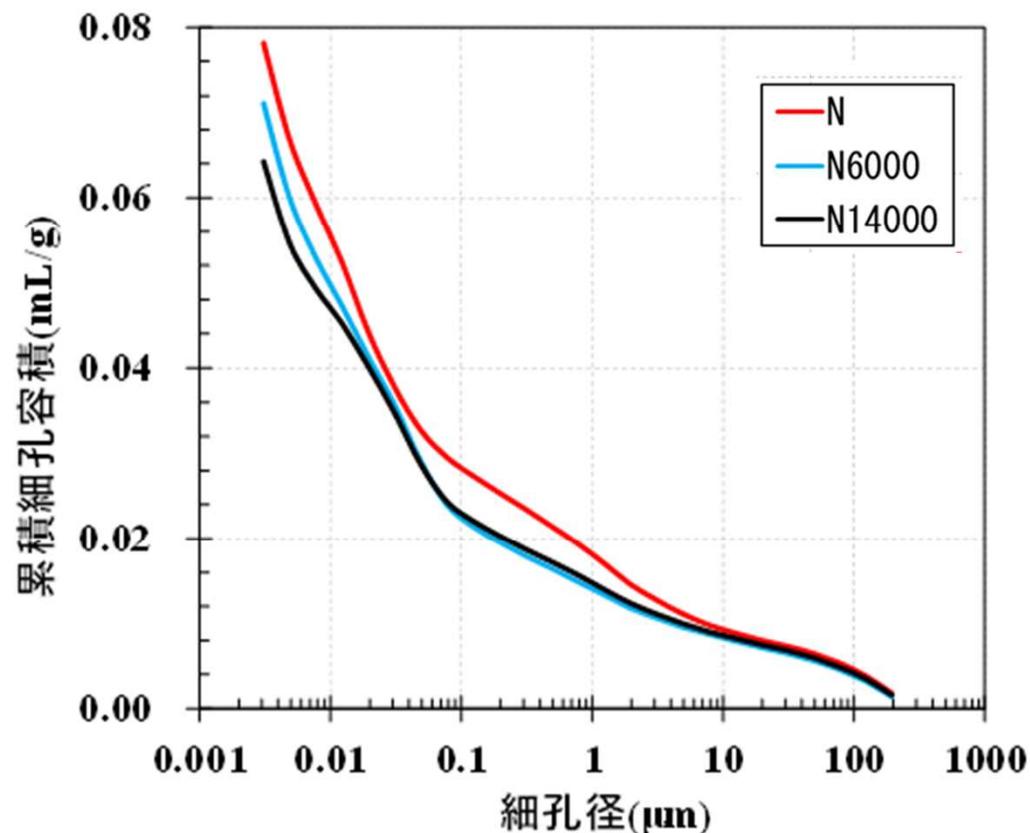
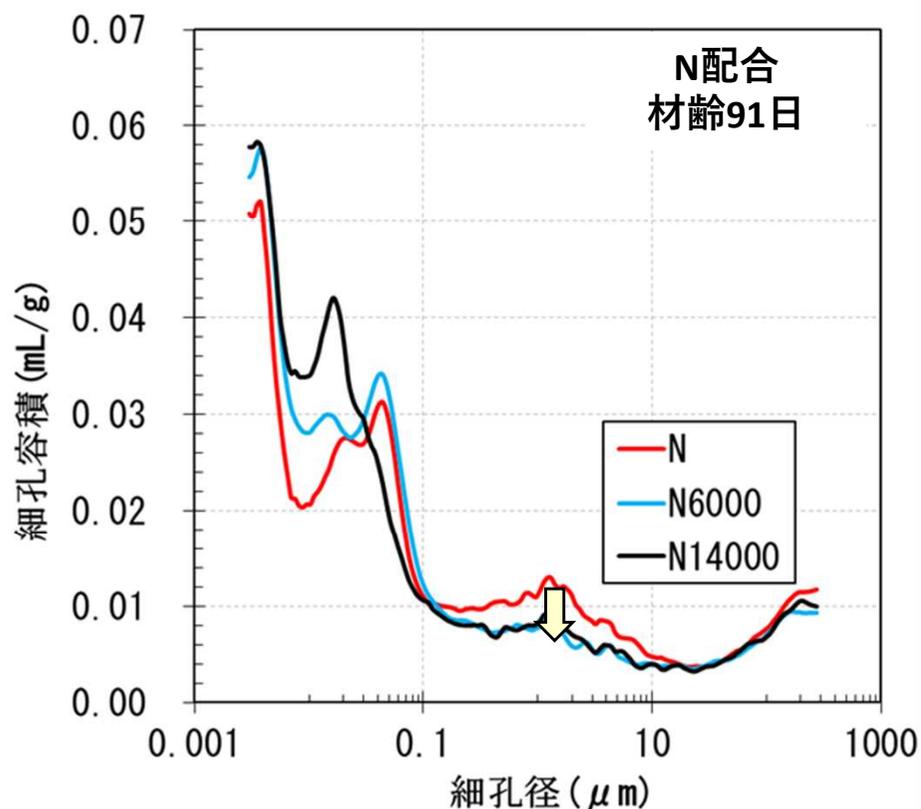


単位セメント量の減少に加え, ポゾラン反応に伴う細孔溶液中のアルカリ成分の吸着やコンクリートの緻密化によるものと考えられる。(FAと同様の効果)

# 細孔径の測定

水銀圧入法

水中養生28日後、温度20℃、相対湿度60%の環境で91日間養生後に実施



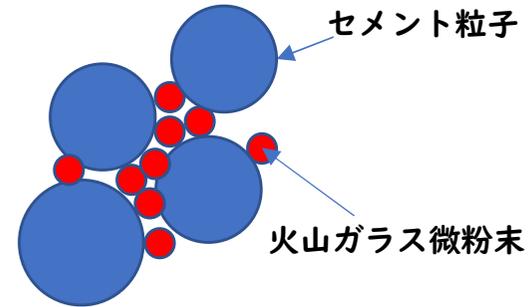
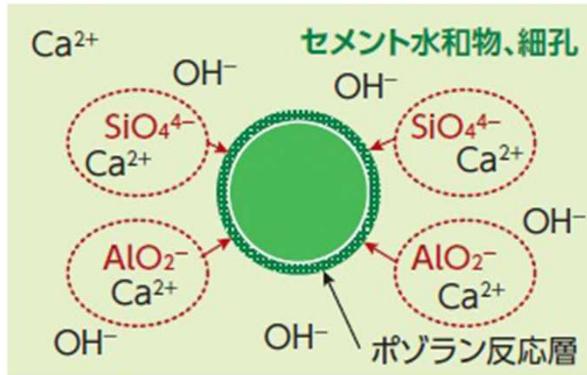
0.1~10 μmの細孔径(空隙)容積が減少、Nに比べて細孔容積が少ない。  
 →火山ガラス微粉末のポズラン反応により細孔組織が緻密化し、水分や塩分の浸透に対する抵抗性が向上したと考えられる。

# 火山ガラス微粉末の使用で期待される効果

ポゾラン反応

+

マイクロファイラー効果



- 緻密な細孔組織の形成
- アルカリ成分の吸着

- ブリーディングの抑制（施工性の向上）
- 品質の向上

ASRの抑制

水分浸透の抑制

塩分浸透の抑制

耐凍害性

鋼材腐食の抑制

※セメント置換で使用する場合は中性化について留意が必要（フライアッシュと同様）

## まとめ

- ① 鹿児島県産の火山ガラス微粉末は、N配合と同程度の混和剤添加率で所定のフレッシュ性状を得ることができた。福島県産の火山ガラス微粉末は、所定のフレッシュ性状を得るには高性能AE減水剤が必要であった。
- ② 火山ガラス微粉末の産地・品種やコンクリートの配合によって、フレッシュ性状や強度発現の傾向が異なることが分かった。
- ③ 火山ガラス微粉末を混和したコンクリートは、遮塩性が向上し、比表面積が大きい火山ガラス微粉末の方が遮塩性の向上が大きい傾向にあった。
- ④ 火山ガラス微粉末を混和したコンクリートは、フライアッシュと同様に、ASRの抑制効果があることが確認された。