

# 論文 北海道に分布する火山灰のポゾラン反応性とコンクリートの耐久性

谷口 円\*1・高橋 徹\*2・吉田 行\*3・佐川孝広\*4

**要旨:** 火山灰の活用によるコンクリートの耐久性向上を目的とし、北海道内の火山灰 4 種を細骨材の一部に置換したコンクリートについて、火山灰種類の相違による物性、耐久性への影響を、火山灰のポゾラン反応が期待される微粒分に着目し、ペースト、モルタル実験の結果と合わせて検討した。その結果、火山灰を使用することで中性化速度係数、塩化物イオンの拡散係数が低下し、その程度は火山灰の微粒分量とペースト実験による火山灰の反応率に依存する傾向が認められた。また、火山灰の反応性は、火山灰中の非晶質相の組成から評価出来る可能性を示した。

**キーワード:** 火山灰, コンクリート, 微粒分, ポゾラン反応, 耐久性, 非晶質相

## 1. はじめに

社会基盤構造物の長寿命化が求められている。ポゾランを使用したコンクリートは、長期強度の増進、物質透過抵抗性の向上やアルカリ骨材反応の抑制効果など耐久性上の優位点があり、長寿命化に寄与すると考えられる。

火山灰がポゾラン反応性を持つことは広く知られ<sup>1)</sup>、火山国である日本には広く分布する。しかしながら、現在我が国では火山灰はほとんどコンクリート材料に利用されていない。北海道には様々な火山があり、膨大な火山灰が存在するが、埋戻し材での利用が大半である。

火山灰のコンクリートへの利用には、混和材として利用する手法、細骨材代替で利用する手法がある。細骨材代替では、武若ら<sup>2)</sup>により、シラスコンクリートが提案・実用化されている。シラス(火山灰)の粒径 0.15mm 以下の微粒分を混合することで、ポゾラン反応による長期強度の増進や耐硫酸塩性に優れることを示している。しかしながら、耐久性向上を目的とした火山灰のコンクリート利用に関して、広範な火山灰を対象とした特性と耐久性向上の関係が得られていない。

以上をふまえ、前報<sup>3)</sup>に引き続き、本研究では、北海道内の火山灰 4 種を使用し、細骨材の一部に置換したコンクリートを作製、強度増進、耐久性について火山灰種類による影響を検討した。特に、火山灰のポゾラン反応

が期待される微粒分に着目し、化学組成、X線回折・Rietveld 解析<sup>4)</sup>を適用した火山ガラスの組成評価を行い、微粒分のみを取り出して、モルタルによる活性度指数およびペーストによるポゾラン反応の評価を行い、微粒分の反応性と耐久性について検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

#### (1)火山灰

本研究で使用した火山灰は、前報<sup>3)</sup>で用いた火山灰のうち、事業性、ポゾラン反応性や微粒分の含有量を考慮し、旭川、釧路、留辺蘂および本別(以下、A,K,R および H とする)の 4 種類選択した。

コンクリートには、5mm ふるいを通過した火山灰を用いた。表-1 に使用した火山灰の物性値を示す。なお、物性値は、2005 年制定「シラスを細骨材として用いるコンクリートの設計施工マニュアル(案)」の各試験規準に準じて試験を行った<sup>5)</sup>。

ペースト、モルタルは、0.075mm ふるいを通過した火山灰を用いた。

#### (2)セメント、骨材

セメントは、密度 3.17g/cm<sup>3</sup>、ブレン比表面積 3360cm<sup>2</sup>/g の普通ポルトランドセメントを使用した。

表-1 骨材および火山灰の物性値

種類	骨材・火山灰の産地	記号	最大寸法 (mm)	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/l)	実績率 (%)	粗粒率	微粒分量 (%)
細骨材	当麻	S	5	2.59	3.0	1.56	62.0	2.83	-
粗骨材	当麻	G	25	2.89	1.7	1.65	58.4	6.64	-
火山灰	旭川	A	5	2.18	7.5	1.21	51.5	1.11	33.6
	弟子屈	K	5	2.20	15.3	1.21	51.0	2.07	17.3
	留辺蘂	R	5	2.02	13.1	1.00	44.1	0.70	50.1
	本別	H	5	2.16	7.2	1.09	48.3	1.29	25.2

\*1 地方独立行政法人北海道立総合研究機構 建築研究本部北方建築総合研究所 環境科学部 博士(工学) (正会員)

\*2 地方独立行政法人北海道立総合研究機構 産業技術研究本部工業試験場 環境エネルギー部 博士(工学) (正会員)

\*3 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地保全技術研究グループ 博士(工学) (正会員)

\*4 日鉄住金セメント(株) 製品開発部 博士(工学) (正会員)

表-2 コンクリートの調合とフレッシュ性状

記号	セメントの種類	火山灰の産地	火山灰置換率 外割(%)	粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				AE減水剤 (セメント量×%)	高性能減水剤 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)		
							水	セメント	細骨材	火山灰						
N	普通ポルトランドセメント	-	-	25	50.0	44.0	45.0	190	380	782	-	1063	1.0	-	18.0	2.8
R		留辺築	30				173	400	518	1063	-	1.0	-	9.5	1.9	
H		本別					185							20.5	1.3	
K		弟子屈					189							24.0	1.4	
A		旭川					187							21.1	1.8	

表-3 火山灰の非晶質量, 化学組成, BET 比表面積および総細孔量

記号	非晶質相の化学組成(%)											非晶質量 (%)	BET m <sup>2</sup> /g	総細孔量 mm <sup>3</sup> /g
	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO			
A	2.8	0.1	15.3	72.6	2.3	0.1	6.3	0.0	0.0	0.3	0.2	85.2	8.7	14.5
K	2.7	0.8	16.5	67.8	6.8	1.8	2.2	0.2	0.0	1.0	0.2	77.5	35.7	37.7
R	2.1	0.2	13.6	74.6	2.3	0.8	6.2	0.0	0.0	0.2	0.1	88.9	12.6	14.6
H	2.6	0.3	14.0	73.3	2.8	1.1	5.5	0.0	0.0	0.2	0.1	89.7	12.3	15.9

モルタルの細骨材は, JIS R5201 に規定される標準砂を使用した。コンクリートの骨材は, 当麻産砕石, 当麻産陸砂を使用した。表-1 に骨材の物性値を示す。

## 2.2 試料の調整および試験体作製

### (1)ペースト, モルタル

ペースト試料の水結合材比は 50% とした。ペーストの混練は JIS R5201 により行い, チャック付きビニル袋に約 10g ずつ密封, 封緘し, 20, 40°C に調整された恒温槽で養生した。養生後の試料は, 多量のアセトンにより水和を停止させ, D-乾燥を行った。乾燥後の試料は乳鉢で粗粉碎後, ボールミルにて微粉碎した。

モルタル試料の作製は, JIS A6201-2008 付属書 2 (規定) フライアッシュのモルタルによるフロー値比及び活性度指数の試験方法に準じて行った。基準用のモルタルは水セメント比 50%, セメント砂比 1:3 である。火山灰はセメントの 25%mass を置換した。

### (2)コンクリート

火山灰種類がフレッシュ性状, 強度および耐久性に与える影響を比較検討するため, 火山灰を使用したコンクリートの水セメント比 50%, 粗骨材かさ容積, 火山灰置換率, 単位水量, 高性能減水剤量を一定とし, 火山灰を細骨材容積の 30% 置換して混合した。調合の決定は, 比較用の火山灰を使用しないコンクリートの調合をもとに, 単位水量を 10kg/m<sup>3</sup> 増加した。比較コンクリートでは, AE 減水剤を用いた。全てのコンクリートで, 空気量の調整は行わなかった。表-2 にコンクリートの調合およびフレッシュ性状を示す。

コンクリートの練混ぜは, 100 リットル強制二軸型ミキサーで行った。練上がったコンクリートは, 圧縮強度試験, 塩化物イオンの実行拡散係数試験および硫酸浸漬試験用の 100 φ 円柱試験体は簡易型枠, 長さ変化および促進中性化試験用の 100 角梁型試験体は鋼製型枠に打設した。コンクリートの養生は, 100 φ 円柱試験体は封緘状態で温度を 20°C, 40°C の 2 水準とした。100 角梁型試験体は, 材齢 1 日まで 20°C 恒温室で養生後脱型し, 脱型後

は温度を 20°C, 40°C とした水中養生を行った。

## 2.3 測定項目

### (1)火山灰

ペースト, モルタルに使用した 0.075mm 以下の火山灰は, 化学組成, X 線回折 (以下 XRD) リートベルト解析および水蒸気等温吸着線を測定した。火山灰の化学組成は, 蛍光 X 線分析法 (FP 法) により測定した。

火山灰の鉱物相の把握と非晶質量を推定するために XRD の測定を実施した。XRD の測定は, 内部標準物質として平均粒径 3 μm のコランダム (α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) を内割 20% 添加して行った。XRD の測定条件は, ターゲット CuKα, 管電圧 40kV, 管電流 30mA, 走査範囲 5~63deg. 2θ, ステップ幅 0.02deg. とした。

リートベルト解析は, SIROQUANT Ver.3 を用い, 解析条件の詳細は前報<sup>3)</sup>と同様に行い, 非晶質相の化学組成および非晶質量を求めた。

火山灰の水蒸気等温吸着線の測定は, 日本ベル製の Belsorp18<sup>+</sup> を使用し, 25°C での等温吸着線を得, BET 比表面積と総細孔量 (相対圧 0.95 での吸着量) を求めた。

表-3 に 0.075mm 以下の火山灰の化学組成, 非晶質量, 非晶質相の化学組成および BET 比表面積と総細孔量を示す。

### (2)ペースト, モルタル

ペーストの測定項目は, 結合水量および 2mol/l 塩酸-5%炭酸ナトリウム溶解法による不溶残分とした。測定材齢は, 7, 35, 91, 182 日とした。

結合水量の測定は, TG-DTA により行った。測定条件は, 昇温速度 20°C/min, N<sub>2</sub> フロー (200ml/min) 環境下で常温から 1000°C の範囲とした。結合水量は 105°C~1000°C の重量減少量とした。

2mol/l 塩酸-5%炭酸ナトリウム溶解法による不溶残分は大沢ら<sup>9)</sup>の既報において, フライアッシュ混合セメントペースト中の未反応フライアッシュを定量する手法として示され, 筆者らの前報<sup>3)</sup>において, ペースト中の未反応火山灰の定量手法としての適用可能性を示した。

本研究でも、同様の手法<sup>3)</sup>により不溶残分を測定した。不溶残分試験は1gの試料で実施し、火山灰単体とセメントペーストでの反応後の不溶残分および強熱減量から以下の式(1)により反応率を算定した。なお、今回使用したポルトランドセメントおよび水和物の不溶残分は1%未満であることを確認し、セメント由来の残分の補正は実施していない。

$$\alpha_t = \frac{P_0 - R_t}{P_0} \times 100 \quad (1)$$

ただし、 $B = S_i(1 - i_g) \times a$

ここに、 $\alpha_t$ ：材齢  $t$  での火山灰の反応率(%),  $P_0$ ：火山灰単体の不溶残分(g),  $R_t$ ：セメントペーストの反応後試料の不溶残分(g),  $S_i$ ：材齢  $t$  での試料量(g),  $i_g$ ：材齢  $t$  での強熱減量(g/g),  $a$ ：火山灰の置換率 (0.25)

モルタルの測定項目は、圧縮強度とし、測定材齢は、7,28,91,182 日とした。

### (3)コンクリート

圧縮強度試験は、JIS A 1108 に準じて行った。養生条件は、20℃および40℃封緘とし、材齢は7, 28, 56 (40℃のみ), 91 および 182 日とした。

長さ変化は、100 角梁型試験体を用い、20℃水中で7 日養生後を起点とし、20℃相対湿度 60%の恒温恒湿室における乾燥時の長さ変化を JIS A 1129-3 コンクリートの長さ試験 (ダイヤルゲージ方法)により測定した。測定材齢は、起点、乾燥日数 7,28,56,91,182 日とした。

促進中性化試験は、JIS A 1153 に準じて実施した。試験体には 100×100×400mm 梁型試験体を用いた。試験開始前の養生は、20℃水中 28 日と 20℃水中 56 日とした。

塩化物イオンの実効拡散係数試験は JSCE-G571 に準拠して行った。試験用の試料は、φ10×20cm 円柱の中央部から厚さ 5cm の試料をコンクリートカッターで切り出し試験に供した。試験開始までの養生条件は、20℃封緘 28 日と 40℃封緘 91 日の2水準とした。

硫酸浸食に対する抵抗性は、JIS 原案「コンクリートの溶液浸せきによる試験方法 (案)」に準じ、硫酸浸漬試験を行った。硫酸の濃度は、5% (≒pH0.4) とした。試験開始までの養生条件は、20℃封緘 28 日、40℃封緘 91 日とした。試験体は、試験開始前に2 日間 20℃水中養生を行い、吸水させた。測定項目は、外観観察、質量変化および中性化深さ測定とした。質量変化は、劣化した脆弱部を流水中で軽く除去し、表乾状態の供試体質量を測定、初期質量に対する質量変化を百分率で示した。中性化深さは、コンクリートカッターで切断した面に1%フェノールフタレインエタノール溶液を噴霧し、赤紫色に発色した部分の直径 ( $D_t$ ) を測定し、浸せき前の供試体直径 ( $D_0$ ) を基準に式(2)により求めた。なお、直径は5

点の平均値とした。

$$\text{中性化深さ} = \frac{D_0 - D_t}{2} \quad (2)$$

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 ペースト、モルタルでの火山灰の反応

図-1 に火山灰別、養生温度ごとに材齢と火山灰の反応率の関係を示す。

すべての火山灰、養生温度で材齢の進行に伴い、反応率の増加が認められた。40℃では、91 日以降で反応率の増加が緩慢となった。また、火山灰種類により反応速度が異なる傾向が認められた。反応速度に及ぼす影響を検討するため、以下の式を近似し、最少二乗法により実験定数をそれぞれ求め、得られた式の一次微分により反応速度を得た。なお、図-1 に示した実線は近似式をプロットしたものである。

$$\alpha(t) = \frac{ct}{1+bt} \quad (3)$$

ここに、 $\alpha(t)$ ：材齢  $t$  の火山灰の反応率(%),  $b, c$ ：定数

図-2 に反応率 15%の時の反応速度と NBO/T<sup>7)</sup>との関係を示す。NBO/T は、非晶質相の構造 (重合度) を表すもので、前報<sup>3)</sup>では火山灰種類による反応率の相違をよく説明していた。ここでも、NBO/T が大きくなると 15% 反応時の反応速度が大きくなり、よい相関が認められた。

以上から、非晶質相の組成に着目することで、反応性を事前に評価できる可能性がある。評価法として確立するためには、適用範囲を拡大し、さらなる検討を進める必要があると考える。

図-3 に材齢とモルタル圧縮強度の関係を示す。図中実線は水セメント比 0.5 の基準モルタル、点線は硅砂微粉末をセメントの 25% 置き換えた比較用モルタルの結果である。火山灰を混合したものは、7, 28, 91 日で、大半が比較用モルタルより低かった。182 日になると比較

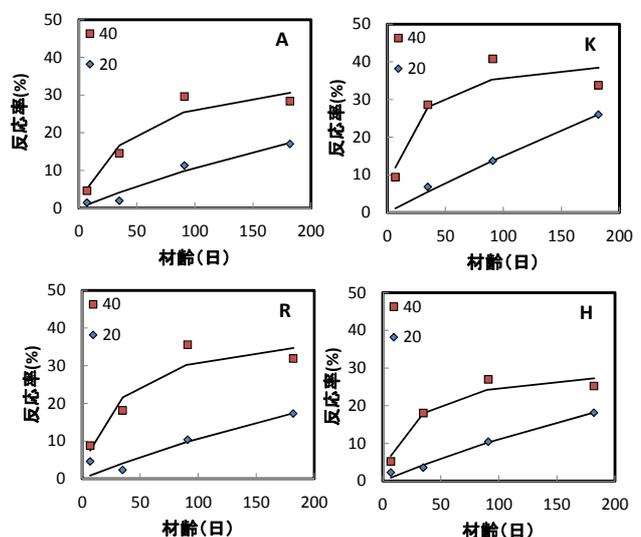


図-1 材齢と反応率の関係

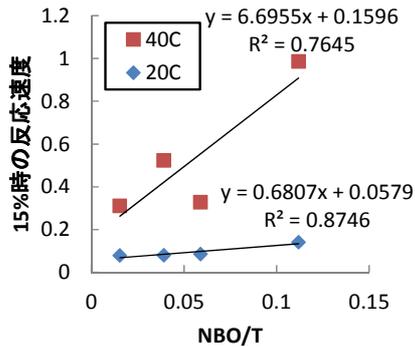


図-2 NBO/Tと反応率 15%での反応速度

用モルタル以上の強度のものが増加した。

図-4 に火山灰自体の総細孔量と圧縮強度の関係を材齢ごとに示す。前報<sup>3)</sup>で得られた図に追加し、本検討の結果は黒塗の点で示した。細孔量は、等温吸着線の相対圧 0.95 での吸着量とした。前報での総細孔量と強度の関係と概ね相違はなく、細孔が多くなると強度が低くなった。最も細孔量の多い K で、材齢の進行に伴い、強度が大きくなっていった。K はペーストでの反応実験では、他の火山灰にくらべ、20°C の長期材齢で反応率が高く、本結果と対応していた。ポゾラン反応性の評価はモルタル強度をもとにした活性度指数で評価される<sup>8)</sup>。しかしながら、火山灰では初期材齢では火山灰自体の細孔量が強度結果に与える影響が大きい。そのため、ポゾラン反応性の評価を圧縮強度のみでは評価できないと考える。

### 3.2 火山灰コンクリートの耐久性と反応

図-5 にコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。いずれの材齢においても火山灰コンクリートの圧縮強度は比較用コンクリートと同等以上だった。

また、コンクリート種類を問わず、40°C 封緘養生は 20°C 封緘養生に比べ、材齢 28 日以降の強度が低く、182 日では 91 日を下回るものもあった。材齢初期に高温履歴を受けたコンクリートの長期強度が停滞することが知られており<sup>9)</sup>、同様の現象によるものと考えられる。

図-6 にコンクリートの圧縮強度について、それぞれの材齢 7 日を 1 とした強度比と材齢の関係で示す。20°C 養生では、比較コンクリートの 91 日以降が 1.4 程度、火山灰コンクリートはすべてそれ以上となった。火山灰コンクリートでは、ポゾラン反応が生じることで比較用コンクリートよりも大きな強度増進が得られたと考えられる。40°C 養生では、比較コンクリートの 91 日以降は 1.2 程度であり、R, H を使用したコンクリートでは、比較コンクリートより高い強度比を示したが、A, K では大差なかった。高温で形成される組織とポゾランの影響など、今後の検討が必要と考える。

図-7 に促進日数と長さ変化および質量減少率の関係を示す。縦軸は収縮側を正としている。火山灰コンクリートの 182 日の長さ変化および質量減少率は、比較コン

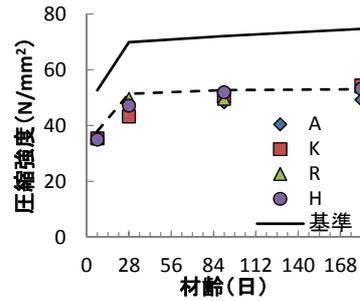


図-3 材齢とモルタル圧縮強度の関係

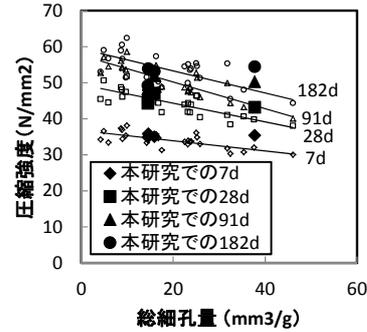


図-4 火山灰の総細孔量とモルタル圧縮強度の関係

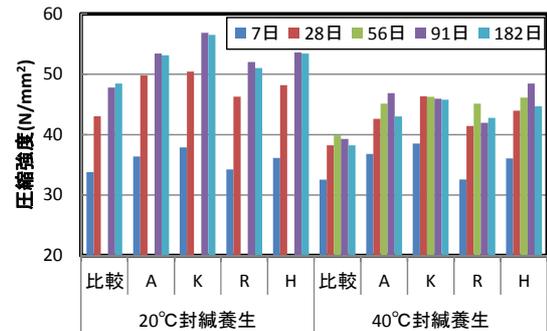


図-5 コンクリート圧縮強度測定結果

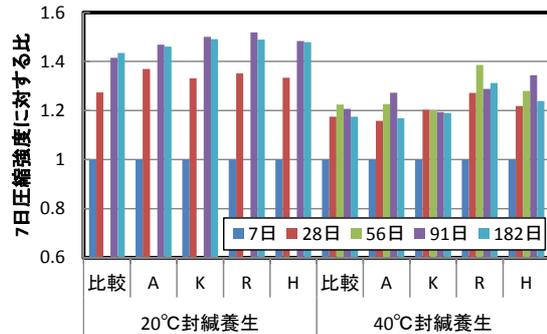


図-6 7日強度を1とした時の圧縮強度比

クリートと大差ない結果となった。また、火山灰種類による相違は小さかった。

図-8 に促進中性化試験による促進日数と中性化深さの関係を示す。試験開始前の養生は、20°C は水中 28 日、40°C は水中 56 日のものである。中性化深さは材齢とともに大きくなり、比較コンクリートが一番大きかった。養生温度の影響は、比較コンクリートでは大差ないが、火山灰コンクリートでは 40°C 養生で中性化深さが小さくなり、種類による相違が認められた。火山灰の反応が 40°C で進行したためと考えられる。

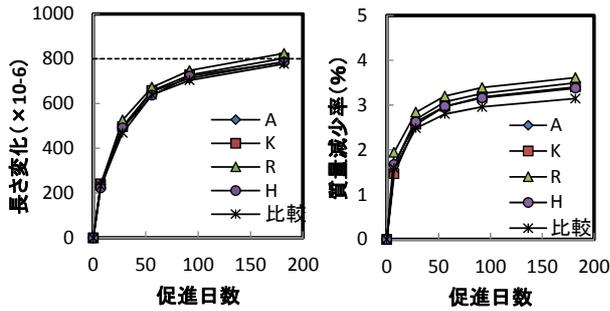


図-7 材齢と長さ変化および質量減量率

図中の実線は実験結果に以下の拡散式を近似した中性化深さと材齢の関係式である。これにより中性化速度係数  $k$  を得た。

$$y = k\sqrt{t} \quad (4)$$

ここに、 $y$ : 中性化深さ(mm),  $k$ : 中性化速度係数,  $t$ : 促進日数 (年)

図-9 に中性化速度係数を示す。比較コンクリートに比べ火山灰を用いたコンクリートの中性化速度係数はいずれも小さく、特に R の火山灰を用いた 40℃養生のコンクリートは小さかった。

図-10 に塩化物イオンの実効拡散係数を示す。比較コンクリートに比べ火山灰を用いたコンクリートの実効拡散係数はいずれも小さかった。また、養生温度が高いもので実効拡散係数は小さかった。火山灰コンクリートでの高温での低下度合が、比較コンクリートに比べ大きい結果となった。40℃養生では、火山灰のポズラン反応が進行したと考えられる。

図-11, 12 に硫酸浸漬試験によるコンクリートの質量変化率および中性化深さを示す。浸漬期間の増加とともに質量は減少した。20℃封緘養生したコンクリートは火山灰種類による差は小さかった。40℃封緘養生では、浸漬期間 4 週までは 20℃養生より質量減少が小さかったが、それ以降は同等であった。また、火山灰種類の差は小さかった。

中性化深さはいずれも材齢とともに大きくなったが、養生温度の明確な差は確認できなかった。火山灰種類による差は小さかった。

以上より、細骨材の 30% を火山灰で置換したコンクリートは比較コンクリートよりも強度が低下することはなかった。長さ変化は比較コンクリートと大差なく、促進中性化、塩化物イオンの実効拡散係数については、小さくなる傾向が確認でき、火山灰のポズラン反応の進行したもので種類による差が認められた。硫酸浸食に対する抵抗性も、比較用コンクリートと大差ない結果となった。

このことから、火山灰を細骨材に置換して 30% 使用した場合には、物質透過抵抗性が向上し、使用する火山灰による差が生じると考えられる。

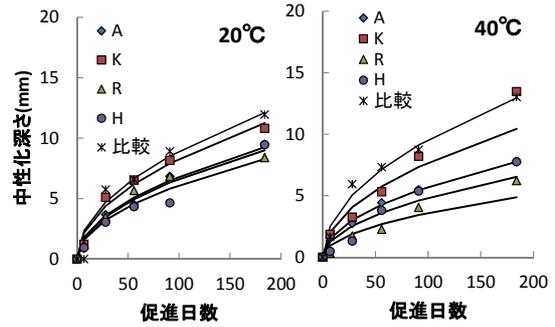


図-8 促進中性化試験結果

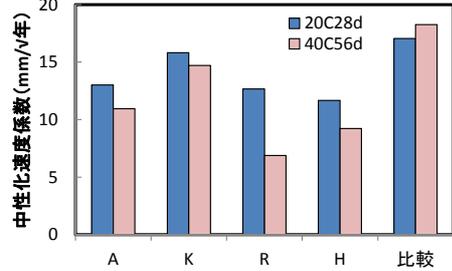


図-9 中性化速度係数

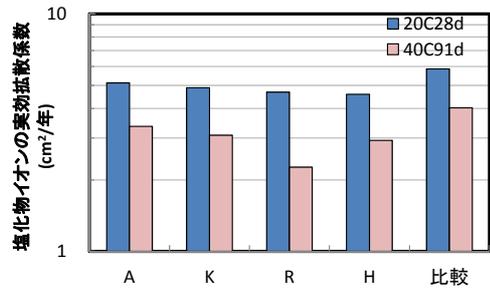


図-10 塩化物イオンの実効拡散係数

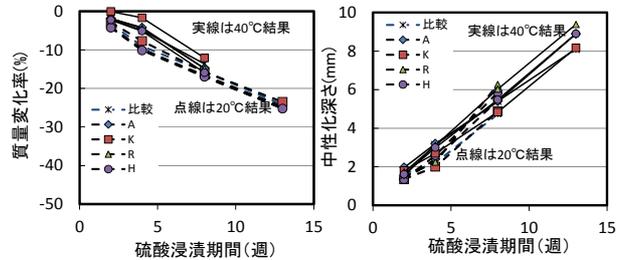


図-11 硫酸浸漬による質量変化率

図-12 硫酸浸漬による中性化深さ

以上をふまえ、火山灰の反応が物質透過抵抗性に及ぼす影響を考察する。火山灰の反応が期待できるのは粒径 0.075mm 以下の粒子と考え、ペーストにおいてコンクリートに使用した火山灰の微粒分を分取し、材齢と反応率の関係式を得た。厳密にはペースト実験とコンクリート実験では条件が異なるが、促進試験開始材齢での火山灰反応率の値を用いて、火山灰の反応が物質透過抵抗性に及ぼす影響について検討した。コンクリートに使用した火山灰は 5mm ふるい通過のものであり、微粒分の割合は火山灰種類により異なる。これをふまえ、物質透過促進試験開始時の火山灰の反応率予測値 (%) に微粒分割合 (g/g) を掛けたコンクリート中の火山灰の反応量を表

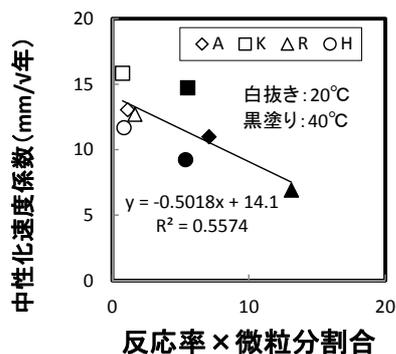


図-13 反応量と中性化速度係数

す数値を指標とし、物質透過性との関係を検討した。

図-13 に火山灰を使用したコンクリートについて火山灰の反応率予測値と微粒分割合の積と中性化速度係数の関係を示す。白抜きは前養生が 20°C、黒塗りは 40°C の結果である。ばらつきはあるが、反応率と微粒分割合の積が増加すると中性化速度係数が減少していた。ここでは、細孔構造の検討を実施していないが、ポゾラン反応による水酸化カルシウムの消費に対し、細孔構造の緻密化が卓越し、劣化因子の侵入が抑制されたと考える。

図-14 に火山灰を使用したコンクリートについて火山灰の反応率予測値と微粒分割合の積と塩化物イオンの実行拡散係数との関係を示す。白抜きは前養生が 20°C、黒塗りは 40°C の結果である。中性化速度係数と同様に反応率と微粒分割合の積と塩化物イオンの実行拡散係数には良い相関が認められた。

これにより、火山灰種類以外はすべて同条件であるコンクリートにおいて、火山灰の反応による物質透過抵抗性の向上が認められ、その程度は使用する火山灰の反応と含まれる微粒分量により説明できた。また、火山灰の反応性は非晶質相の組成から評価が可能と考えられた。今後は細孔構造の緻密化と合わせて検討することで、物質透過抵抗性への効果をさらに明確に評価することができると考える。

本研究の範囲において、耐久性向上を目的とした細骨材代替での火山灰の使用には、微粒分の量、含まれる非晶質相の組成に着目し、フレッシュ性状の低下等の関係を考慮し、適切に火山灰を選択することが必要と考える。

#### 4. まとめ

本研究の範囲で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 火山灰の反応性は、X 線回折の結果から推定された非晶質相の組成から評価できる可能性を示した。
- 2) 火山灰を細骨材置換して使用したコンクリートは物質透過抵抗性が向上した。

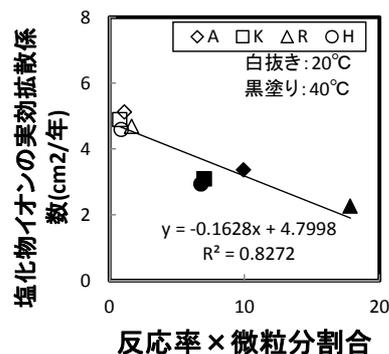


図-14 反応量と塩化物イオンの実効拡散係数

- 3) 物質透過性抵抗性の向上は、火山灰の反応率と微粒分量に依存した。

#### 参考文献

- 1) A. M. Neville: Properties of Concrete (Forth Edition), Longman Limited, p. 83, 1995
- 2) 武若耕司：シラスコンクリートの特徴とその実用化の現状, コンクリート工学, Vol.42, No.3, pp.38-47, 2004
- 3) 谷口円, 高橋徹, 垣原康之, 佐川孝広：北海道に分布する火山灰の特性とポゾラン反応性, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.97-102, 2013
- 4) 星野清一, 平尾宙, 山田一夫：非晶質混和材を含むセメントの鉱物の定量における X 線回折/リートベルト法の適用, セメント・コンクリート論文集, No.59, pp.14-21, 2005
- 5) 鹿児島県土木部監修：【2005 年制定】シラスを細骨材として用いるコンクリートの設計施工マニュアル (案), 鹿児島県建設技術センター, pp.93-112, 2006
- 6) 大沢栄也, 坂井悦郎, 大門正機：フライアッシュセメント系水和におけるフライアッシュの反応率, セメント・コンクリート論文集, No.53, pp.96-100, 1999
- 7) Wei Chen: Hydration of Slag Cement, Theory, Modeling and Application, PhD. Thesis, University of Twente, 2006
- 8) ASTM C618-08a Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete
- 9) 杉山央, 榎田佳寛：初期高温履歴を受けたコンクリートの長期強度発現性, 日本建築学会構造系論文集, 第 515 号, pp.23-30, 1999