

火山灰を用いたコンクリートの工場製品への適用性

Applicability of concrete using volcanic ash for concrete products

土木研究所寒地土木研究所

〇正 員 吉田 行 (Susumu Yoshida)

北海道立総合研究機構北方建築総合研究所

谷口 円 (Madoka Taniguchi)

全国コンクリート製品協会北海道ブロック

秋山 護 (Mamoru Akiyama)

全国コンクリート製品協会北海道ブロック

石塚 浩章 (Hiroaki Ishizuka)

1. はじめに

積雪寒冷地のコンクリート構造物は、過酷な気象・使用環境による劣化が著しいため、維持管理費を抑制する観点からも、その長寿命化が求められている。産業副産物であるフライアッシュ等の人工ポゾランのコンクリートへの利用は、コンクリートの長期強度発現や耐久性の向上が可能となるなど¹⁾、コンクリート構造物の長寿命化対策の一つとして有効である。一方、火山灰は日本国内に広く分布し採取可能な天然のポゾランであり、過去には小樽港の防波堤コンクリート等に利用されるなど、コンクリートの長期的な耐久性向上が期待できる²⁾。しかし、近年では耐久性向上の観点から火山灰をコンクリートに利用した事例はほぼ皆無であり、現在のセメントの品質も過去のものとは異なっていることから、火山灰をコンクリートに利用するには、火山灰のポゾラン反応性に加え、火山灰を用いたコンクリートの強度発現や耐久性に関する検討が必要となる。

このうち、火山灰のポゾラン反応性については、様々な火山灰のコンクリートへの利用を考慮して、北海道内に存在する種々の火山灰を各地から採取し、その特性と反応性について検討を行った^{3,4)}。その結果、火山灰のポゾラン反応性の評価方法には未だ課題があるものの、EN196-5-2005 Methods of testing cement -Part5: Pozzolanicity test for pozzolanic cement に準じた評価では、いずれの火山灰も反応性ありと評価された。また、火山

灰を用いたモルタルの圧縮強度試験結果からも反応性が高いと考えられる火山灰が存在することが確認された。

以上をふまえ、本研究では、火山灰の具体的な活用として、コンクリート工場製品への利用を視野に、産地（特性）の異なる数種類の火山灰を用いたコンクリートを製造して各種試験を実施し、その適用性について検討した。

2. 試験概要

2.1 使用材料

本研究で使用した火山灰は、ポゾラン反応性の検討において北海道内の各地から採取した火山灰の中から、ポゾラン反応性や微粒分の含有量、およびサンプル採取した火山灰と同様の品質の火山灰を量的に確保可能な商業的採取施設が近隣にあるか否か等を考慮して選定した。選定した火山灰は4種類であり、火山灰の産地は留辺蘂、本別、弟子屈および旭川である。これらの産地から比較的近いコンクリート製品工場を3社選定し、コンクリートを製造した。表－1 に各工場で使用した骨材および火山灰の物性を、表－2 にセメントの主な試験成績を示す。火山灰の物性値は、2005 年制定シラス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）に記載されている各試験規準に準じて試験を行った⁵⁾。なお、火山灰以外の材料は、実際に製品を製造することを想定して、各工場で通常使用されているものをそのまま使用

表－1 骨材および火山灰の物性

コンクリート工場 (所在地)	種類	骨材・火山灰 の産地	粗骨材の 最大寸法 (mm)	表乾密度 (g/m ³)	絶乾密度 (g/m ³)	吸水率 (%)	単位容 積質量 (kg/l)	実績率 (%)	微粒分量 (%)	安定性 (%)	粗粒率
Y社 (訓子府)	細骨材	常呂産陸砂	－	2.60	2.57	1.49	1.76	－	0.5	1.6	2.71
	粗骨材	北見産碎石	15	2.88	2.86	0.81	1.66	58.2	0.6	9.2	6.31
	火山灰	留辺蘂	－	2.02	2.02	1.77	0.94	－	28.9	－	1.07
		本別	－	2.15	2.15	2.00	1.01	－	19.6	－	1.72
M社 (釧路)	細骨材	白糠産陸砂	－	2.60	－	1.71	1.67	－	0.6	4.5	2.84
	粗骨材	厚岸産砂利	20	2.68	－	1.65	1.65	62.6	0.2	2.9	6.95
	火山灰	弟子屈	－	2.20	－	15.25	－	－	－	－	2.10
A社 (旭川)	細骨材	当麻産陸砂	－	2.59	2.52	2.86	1.54	－	2.0	－	2.83
	粗骨材	当麻産碎石	20	2.64	2.60	1.65	1.51	58.1	0.6	－	6.67
	火山灰	旭川	－	2.24	2.16	3.83	1.07	－	25.8	－	1.11

表－2 セメントの試験成績

コンクリート工場	セメントの種類	密度 (g/m ³)	比表面積 (cm ² /g)	凝結			化学成分				
				水量 (%)	始発 (h-min)	終結 (h-min)	酸化マグネシウム (%)	三酸化硫黄 (%)	強熱減量 (%)	全アルカリ (%)	塩化物イオン (%)
Y社	早強ポルトランド	3.14	4310	29.4	1-42	2-42	1.24	3.07	1.08	0.51	0.008
M社	普通ポルトランド	3.16	3300	27.2	2-01	3-31	2.37	2.03	1.69	0.47	0.015
A社											

表-3 コンクリートの配合

コンクリート工場	セメントの種類	火山灰の産地	火山灰置換率	粗骨材の最大寸法	水セメント比	細骨材率	目標スラブ	目標空気量	単位量 (kg/m ³)						AE減水剤	高性能減水剤	スランプ	空気量	出荷材齢強度※2		
			外割(%)	(mm)	(%)	(%)	(cm)	(%)	水	セメント	細骨材	火山灰	粗骨材	AE剤※1 (セメント量×%)	(セメント量×%)	(cm)	(%)	(N/mm ²)			
Y社 (訓子府)	早強ポルトランドセメント	-	-	15	38.0	43.0	15.0±2.5	4.5±1.5	162	426	735	-	1079	0.810	-	0.5	15.5	3.8	38.5		
		留辺蘂 本別	30						212	558	443	147	928	7.029	-	0.5	15.0	4.1	39.1		
									194	511	468	166	982	3.220	-	0.5	15.5	4.9	37.7		
M社 (釧路)	普通ポルトランドセメント	-	-	20	35.2	38.0	12.0±2.5		165	469	634	-	1066	1.900	1.4	-	13.0	4.9	40.7		
		弟子屈	30						165	469	444	175	1066	1.900	1.7	-	11.0	4.2	40.2		
A社 (旭川)	普通ポルトランドセメント	-	-	30	20	44.5	46.0		18.0±2.5		161	362	808	-	969	-	1.0	-	18.0	4.4	36.4
		旭川	30			46.5	40.5				191	411	466	172	995	-	1.3	-	20.5	4.1	35.7
		-	-																		

※1:100倍希釈、※2:Y社は出荷材齢7日、他は材齢14日

した。このため、骨材の産地は各工場で異なり、セメントも Y 社では早強ポルトランドセメントを、他の工場では普通ポルトランドセメントを用いた。

2.2 コンクリートの配合

本研究で対象とした工場製品は、最終的には実際に製品を試作して実環境下で暴露試験を実施することを前提として、暴露後のひび割れ等の観察やコア採取が比較的容易な L 型擁壁を選定した。表-3 にコンクリートの配合を示す。配合は、標準的な鉄筋コンクリート製プレキャスト擁壁に求められる設計基準強度 30N/mm² を満足するように、各工場で試験練りを行い決定した。火山灰は、コンクリートの強度確保の観点から、セメントの一部を置換する内割ではなく、細骨材容積の 30%を置換する外割置換とした。このため、火山灰は細骨材と同様に呼び寸法 5mm の網ふるいを通過するものを使用することとしたが、火山灰に多く含まれる 0.15mm 以下の微粒分については、ポズラン反応がより期待できることから、調整を行わずそのまま用いた。

コンクリートの目標空気量はいずれも 4.5±1.5%としたが、スランプについては各工場で骨材や配合が異なるため、供試体作製時の作業性等を各工場で適宜判定し、それぞれ目標値を設定した。

配合試験の結果、Y 社では、火山灰を用いたコンクリートはベースコンクリートより単位水量と AE 剤添加量が大きく増加し、特に微粒分が多い留辺蘂産の火山灰を用いたものは単位水量が 50kg/m³ 増加した。他方、M 社では、AE 剤の添加量以外はいずれも同一だった。また、A 社では、火山灰を用いたコンクリートの単位水量はベースよりも 30kg/m³ 増加したが、設計基準強度を満足する水セメント比は、ベースより 2%大きかった。このように、実用化の観点から強度や施工性を考慮した場合、火山灰の諸特性がコンクリートの配合に大きく影響することを確認した。

2.3 供試体の養生

各工場で作製した供試体は、一般の工場製品と同様に蒸気養生を行い、翌日常温になってから所定の出荷材齢まで封緘状態で室内保存した。なお、出荷材齢は、早強セメントを用いた Y 工場は材齢 7 日とし、普通セメントを用いた他の工場については、材齢 14 日とした。

2.4 試験項目と方法

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、JIS A 1108 に準拠して出荷材齢で実施した。供試体は φ100×200mm 円柱供試体を用いた。

(2) 凍結融解試験

凍結融解抵抗性は、水中凍結融解試験と、一面凍結融

解試験によるスケーリング試験により評価した。

水中凍結融解試験は、JIS A 1148 の A 法に準拠して、蒸気養生終了後に出荷材齢に達するまで封緘状態で保存した供試体を 2 日間吸水させてから試験を開始し、相対動弾性係数と質量変化により評価を行った。

スケーリング試験は RILEM CDF 法に準拠し、+20℃から定速で 4 時間で -20℃まで冷却し、-20℃を 3 時間保持し、定速で 4 時間で +20℃まで加熱した後、+20℃を 1 時間保持する、12 時間 1 サイクルで凍結融解作用を与えた。供試体は、100×100×400mm の角柱供試体を半分に切断して 100×100×200mm としたものを用いた。試験面は型枠面とし、試験面以外はエポキシ樹脂でコーティングした。試験溶液には、3%NaCl 水溶液を用いた。なお、試験は蒸気養生終了後に出荷材齢に達するまで封緘状態で保管後（材齢 7 日または 14 日）、初期の吸水の影響を除くため試験開始前に実験装置内で 7 日間塩水吸水させた後に試験を開始した。

(3) 塩化物イオンの実効拡散係数試験

塩分のコンクリート中への浸透抑制効果を把握するために、塩化物イオンの実効拡散係数試験を JSCE-G571 に準拠して行った。供試体は φ100×200mm 円柱供試体とし、試験用の試料は、円柱供試体の高さ方向の中央部から厚さ 50mm 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。試験用試料は、蒸気養生終了後に製品の出荷材齢（材齢 7 日または 14 日）に達するまで封緘状態で保管した供試体からそれぞれ切り出した。

3. 実験結果および考察

3.1 出荷材齢における圧縮強度

図-1 に各コンクリートの出荷材齢における圧縮強度を示す。いずれも設計基準強度 30N/mm² を上回っており、火山灰を用いたコンクリートとベースコンクリート

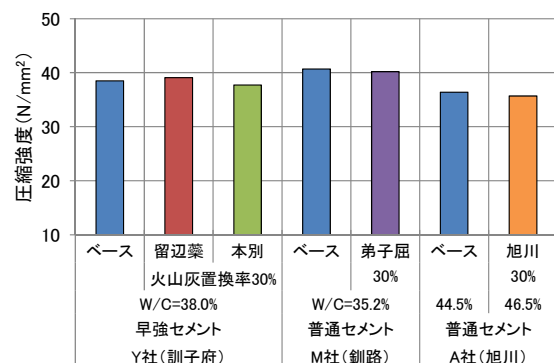


図-1 出荷材齢における圧縮強度

の強度差はほとんど無いことを確認した。

3.2 凍結融解抵抗性（水中凍結融解）

図-2 に水中凍結融解試験結果を示す。

M 社（釧路）のベースコンクリートと火山灰を用いたコンクリートに差は無く、凍結融解抵抗性は極めて高かった。一方、Y 社および A 社のベースコンクリートは凍結融解初期から相対動弾性係数が急激に低下したが、火山灰を用いたコンクリートはいずれもベースより相対動弾性係数の低下が小さく、特に Y 社の場合、火山灰の産地の違いによる差は無く、いずれも凍結融解抵抗性は高かった。なお、A 社は火山灰を用いた場合でも 100 サイクル程度で相対動弾性係数の大きな低下がみられたが、A 社は他社よりも比較的水セメント比が大きいことに加え、AE 剤を使用せず AE 減水剤のみの使用のため良質な気泡の形成が不足している可能性があり、これらが影響したと考えられる。

3.3 スケーリング抵抗性（CDF 試験）

図-3 に CDF 試験開始前に供試体を 7 日間塩水吸水させた後の塩水吸水量を示す。各工場間で吸水量に差はあるが、これは水セメント比の大小が影響していると考えられ、ベースコンクリートと火山灰を用いたコンクリートで吸水量の差はほとんどない。

図-4 に凍結融解サイクルと CDF スケーリング量の関係を示す。また、参考として、写真-1 に A 社で作製した供試体、写真-2 に M 社で作製した供試体の試験終了時における試験面の状況をそれぞれ示す。水セメント比が比較的大きい A 社の供試体は、凍結融解 14 サイクル以降急激にスケーリングが増加し、視覚的にも表面のスケーリングが大きかったが、火山灰を用いたコンクリートはベースコンクリートに比べてスケーリング量は少なかった。その他の供試体はスケーリングが視覚的にも少なく、火山灰の有無による明確な差はみられなかった。

図-5 に凍結融解サイクルと質量変化率の関係を示す。全体に凍結融解サイクルとともに供試体質量は増加しており、CDF 試験開始後も吸水していることがわかる。また、水セメント比が大きいほど質量は増加傾向にあり、火山灰の有無による差はほとんど確認できない。なお、A 社（旭川）の供試体質量が凍結融解 14 サイクル以降減少しているが、これは図-4 に示したようにスケーリングの急増に伴う質量減少を意味している。

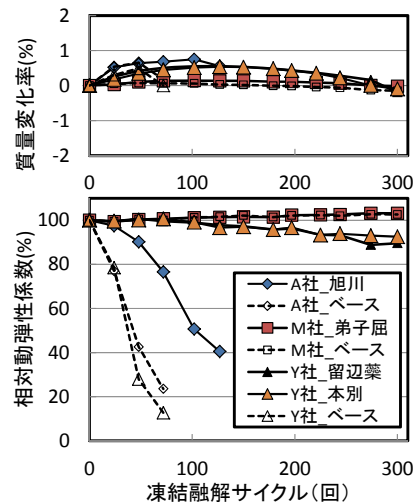


図-2 水中凍結融解試験結果

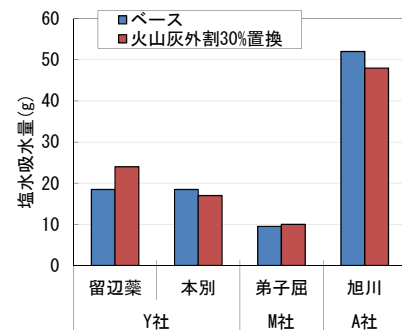


図-3 CDF 試験開始前の塩水吸水量

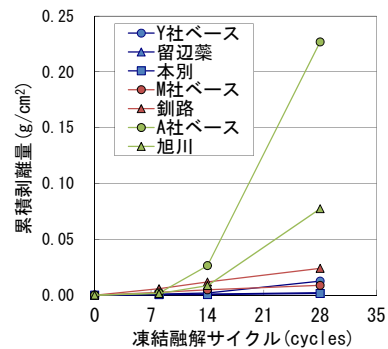


図-4 スケーリング量（CDF 試験）



写真-1 スケーリング試験終了時（A 社）



写真-2 スケーリング試験終了時（M 社）

3.4 塩化物イオンの浸入に対する抵抗性

図-6 に各コンクリートの塩化物イオンの実効拡散係数を示す。ベースコンクリートと火山灰を用いたコンクリートでは、多少の大小はあるものの明確な差はなかった。図-7 にコンクリートの水セメント比と実効拡散係数関係を示す。全体として両者は相関が高く、水セメント比が支配的要因となり、火山灰の効果については明確にはなかった。

以上より、出荷時の圧縮強度を 30N/mm^2 に設定して評価した結果、火山灰を用いたコンクリートは凍結融解抵抗性が向上し、その他の性質はベースコンクリートと同程度の性能を有することが確認できた。このことから、積雪寒冷地で使用するコンクリート製品に火山灰を利用できることが示された。なお、耐久性等をさらに高めるには、火山灰の置換率増加や、セメントの内割利用も含めた火山灰微粒分の積極的な利用に関する検討が必要であり、これらについては今後検討する。

4. まとめ

本研究では、火山灰の利用によるコンクリートの耐久性向上に主眼を置き、その具体的な活用として、火山灰を用いたコンクリートの工場製品への適用性について検討を行った。本研究で得られた知見をまとめると以下のようなになる。

- (1) コンクリート工場製品への利用の観点から、強度や施工性を考慮して配合試験を行った結果、ベースコンクリートよりも単位水量や AE 剤添加量が大きく増加するなど、用いる火山灰の特性がコンクリートの配合に大きく影響することを確認した。
- (2) コンクリートの圧縮強度を 30N/mm^2 に設定して比較した場合、火山灰を用いたコンクリートは凍結融解抵抗性が向上し、その他の性質はベースコンクリートと同程度の性能を有することが確認され、積雪寒冷地で使用するコンクリート製品に火山灰を利用できることが示された。

参考文献

- 1) 土木学会：フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案）、コンクリートライブラリー94、pp.139-203、1999
- 2) 長滝重義監修：コンクリートの長期耐久性〔小樽港百年耐久性試験に学ぶ〕、技報堂出版、1995
- 3) 谷口円、桂修、垣原康之、高橋徹：火山灰の特性と反応性、第 66 回セメント技術大会講演要旨、p. 302、2012

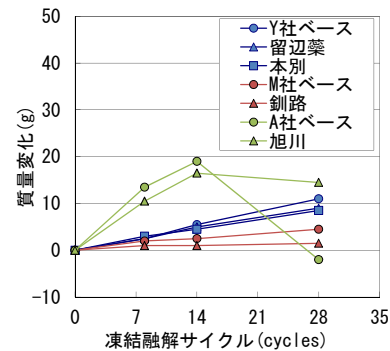


図-5 凍結融解サイクルと質量変化率の関係

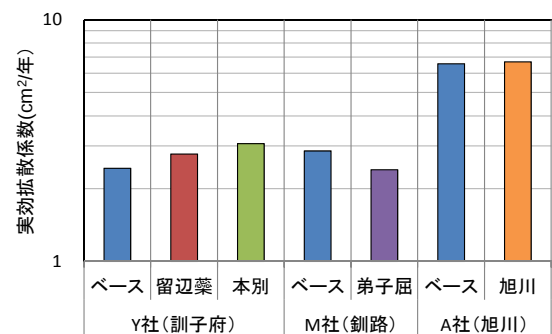


図-6 塩化物イオンの実効拡散係数

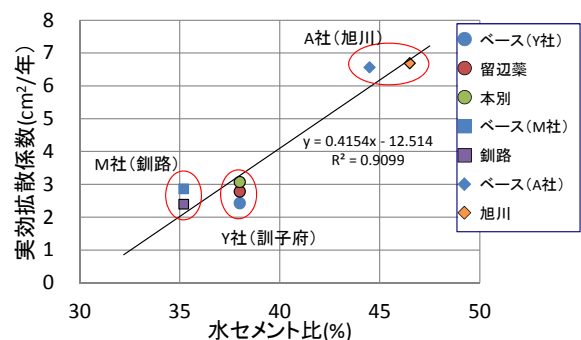


図-7 水セメント比と実効拡散係数

- 4) 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
- 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