

基盤 59 積雪寒冷地における火山灰のコンクリートへの利用に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 24～平 25

担当チーム：耐寒材料チーム

研究担当者：田口 史雄、島多 昭典、
三原 慎弘、嶋田 久俊、
田畑 浩太郎、吉田 行

【要旨】

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、コンクリートの長期的な耐久性向上が期待できる。しかし、火山灰を用いたコンクリートの配合設計法や製造法が体系的に確立されていない。このため、火山灰を利用したコンクリートの物性や耐久性向上効果と、コンクリート工場製品への利用について検討した。具体的には、火山ガラスを大量に含み、均質かつ大量に賦存する北海道の火山灰の特性やポゾラン反応性について、各種試験・評価を実施した。また、火山灰を用いたコンクリートの物性や耐久性について検討した。その結果、火山灰を用いたコンクリートは、耐久性に優れ、鉄筋腐食予防の観点から、構造物の長寿命化が図れる可能性を得た。以上をふまえ、火山灰を使用した長寿命コンクリートの配合設計手法を提案した。さらに、提案した手法により試作したコンクリート工場製品の暴露試験を、長寿命化の実証にむけ開始した。

キーワード：火山灰、コンクリート、長寿命化、コンクリート工場製品

1. はじめに

積雪寒冷地のコンクリート構造物は、過酷な気象や使用環境による劣化が著しいため、ライフサイクルコスト削減の観点からも、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⁾、積雪寒冷地において、効率的かつ効果的な社会基盤整備の推進に極めて有効である。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、小樽港の防波堤コンクリートに利用されるなど、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、火山灰を用いたコンクリートの配合設計法や製造法が体系的に確立されておらず、耐久性向上効果についても十分に明らかにされていないことから、これらを解明し、体系的に整理したマニュアル等の整備が必要である。

以上を背景として、本研究では、コンクリートへの利用が可能な火山灰品質およびコンクリートの耐久性向上効果を明らかにするとともに、火山灰を活用した長寿命化コンクリートの配合設計法を提案し、実環境下における耐久性を検証するため火山灰を利用したコンクリート工場製品を試作して暴露試験を開始した。以下に、本研究の成果について述べる。なお、本研究では、北海道立総合研究機構（北方建築総合研究所、

工業試験場、地質研究所）および全国コンクリート製品協会と共同研究を実施しているため、寒地土木研究所で実施した試験結果だけでは、説明が困難な部分がある。このため、寒地土木研究所が直接試験していない部分については、共同研究成果を引用する形で報告する。

2. コンクリートへの利用が可能な火山灰品質

2.1 概要

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の有無が重要である。火山灰のポゾラン反応は、主として反応性シリカを含む火山ガラスにより生じるが³⁾、供給源となった火山、堆積した時代、風化の程度等により、その特性が大きく異なるため⁴⁾、ポゾラン反応性も様々であると予想される。しかしながら、火山ガラスの化学、鉱物組成を評価する標準的な手法が確立されておらず、火山ガラスの特性とポゾラン反応性の関係は明らかではない。

以上から、北海道立総合研究機構（以下、道総研と記す）において、その特性とポゾラン反応性に関する検討が行われた^{5),6)}。以下にその成果を抜粋して示す。

2.2 火山灰の採取⁶⁾

火山灰は、以下の3点に留意して火山灰を選択・採取している。

表-1 採取された火山灰の物性と化学組成⁶⁾

試料 番号	地層	変質	粘土 鉱物	活性度指数				比表面積		総細 孔量 (mm ³ /g)	強熱 減量 (%)	密度 (g/cm ³)	ふるい(mm) 通過量(%)		化学組成(%)											
				7	28	91	182	フレーン	BET				0.15	0.075	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	TiO ₂	MnO	
				cm ² /g	m ² /g	cm ² /g	m ² /g	cm ² /g	m ² /g				cm ² /g	m ² /g	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	TiO ₂	MnO	
1	十勝火砕流堆積物	-	有	69	70	74	71.5	2840	2.9	4.2	2.3	2.08	35.8	21.5	3.0	0.3	13.8	74.3	1.4	1.4	5.6	0.0	0.0	0.2	0.1	
2	矢矧層	-	無	74	78	80	79.6	2630	5.3	4.9	6.0	2.06	46.5	27.8	2.5	0.1	13.4	73.7	2.6	1.2	6.3	0.0	0.0	0.2	0.1	
3	熊牛層	-	有	68	69	76	76.5	4250	4.8	5.9	2.2	2.16	26.9	14.5	3.2	0.3	13.7	73.6	1.8	1.9	5.1	0.1	0.0	0.2	0.1	
4	屈斜路湖軽石流I	-	無	75	75	79	79.5	4250	8.7	8.7	2.9	2.15	32.1	14.7	3.8	0.5	15.0	69.5	3.9	4.1	2.3	0.1	0.0	0.6	0.1	
5	屈斜路湖軽石流IV	-	無	70	71	76	76.4	4570	11.8	11.8	4.1	2.16	22.3	8.3	3.6	0.5	13.4	72.9	3.2	3.1	2.6	0.1	0.0	0.5	0.1	
6	横真布層	-	無	75	74	76	81.6	3970	9.5	8.9	5.6	2.09	18.9	11.6	2.4	0.3	13.9	74.2	2.0	1.8	5.0	0.0	0.0	0.2	0.1	
7	十勝火砕流堆積物	-	無	71	73	75	69.4	1800	9.9	9.7	3.7	2.00	17.4	9.7	3.1	0.1	13.3	73.4	2.5	1.4	5.8	0.0	0.0	0.2	0.1	
8	東麓層	-	無	77	80	82	84.2	4490	9.1	9.9	2.8	2.22	17.3	9.7	3.7	0.6	15.8	67.7	3.9	5.1	2.2	0.2	0.0	0.6	0.1	
9	支笏火砕流堆積物	-	無	67	68	69	69.5	4430	14.2	14.3	3.0	2.18	20.2	11.9	3.4	0.8	13.9	71.9	3.8	2.7	2.9	0.1	0.1	0.3	0.1	
10	大和層	-	無	72	73	77	77.3	3120	14.7	16.3	5.4	2.01	38.3	19.1	2.6	0.4	13.7	74.3	2.1	1.1	5.6	0.0	0.0	0.1	0.1	
11	富里層	-	無	63	65	68	65.7	3980	12.1	17.5	4.0	2.02	36.1	26.8	3.9	0.4	14.2	72.2	3.6	2.5	2.2	0.1	0.1	0.6	0.2	
12	館層	弱変質	無	70	69	67	67.9	3360	16.7	16.8	5.5	2.02	25.3	14.4	2.7	0.6	13.9	73.8	1.5	1.3	5.8	0.0	0.0	0.2	0.2	
13	摩周軽石流堆積物	変質	有	68	68	68	73.6	6110	19.2	22.5	4.9	2.20	39.1	29.8	3.1	0.6	18.7	65.7	4.9	3.8	2.0	0.2	0.1	0.8	0.2	
14	本別層	変質	無	67	65	67	67.3	3180	30.2	23.2	3.8	2.12	20.0	14.3	3.7	0.5	14.5	70.8	3.8	1.9	4.3	0.0	0.0	0.3	0.1	
15	上多和層	変質	有	69	69	67	74.4	4280	27.5	23.3	3.1	2.03	61.3	37.6	3.4	0.8	14.9	68.8	4.7	4.9	1.5	0.1	0.0	0.6	0.2	
16	北湯沢層	弱変質	無	68	68	66	72.7	3910	26.2	23.9	2.1	2.07	32.8	22.9	2.9	0.9	13.9	71.0	4.0	4.3	2.3	0.1	0.1	0.4	0.1	
17	チャンベツローム層	変質・風化	無	68	65	68	72.2	3650	22.0	23.7	1.4	2.17	23.9	11.9	3.4	1.0	17.7	63.0	6.0	7.1	0.7	0.2	0.0	0.7	0.2	
18	森野層	弱変質	有	73	72	74	74.8	4470	29.3	25.0	4.6	2.13	29.3	16.4	3.5	0.8	15.9	71.1	3.9	1.2	3.1	0.0	0.1	0.3	0.1	
19	館層	弱変質	有	70	72	72	73.7	3330	25.6	25.2	5.3	2.08	43.5	13.8	2.5	0.4	16.6	71.9	1.9	1.3	4.9	0.0	0.1	0.2	0.1	
20	摩周軽石層	変質	有	67	62	64	69.2	3220	32.5	25.8	2.1	2.09	89.9	87.3	3.6	1.2	16.4	64.2	5.7	5.7	1.9	0.2	0.0	0.8	0.1	
21	足寄層	変質	有	64	63	70	74.6	2920	35.8	31.8	4.1	2.07	35.8	21.5	2.8	0.4	13.9	73.7	2.3	2.8	3.8	0.0	0.0	0.1	0.0	
22	下斐冠溶結凝灰岩	変質	有	61	59	62	61.4	2670	35.6	32.4	2.9	1.98	40.5	26.5	3.1	0.6	14.4	72.9	2.6	2.2	3.9	0.0	0.0	0.2	0.1	
23	輪厚砂礫層	-	無	62	63	61	64.8	6060	23.1	35.4	3.6	2.02	38.3	20.2	3.2	0.6	15.6	71.7	3.4	2.0	2.9	0.0	0.1	0.3	0.1	
24	倶多楽火山灰噴出物層	風化	有	65	62	60	59.1	4230	47.0	37.6	4.6	2.10	45.9	15.7	3.3	0.5	17.9	69.3	3.6	2.1	2.6	0.1	0.2	0.3	0.1	
25	大和層	変質	有	61	59	56	59.8	3120	43.5	46.0	6.1	1.96	67.6	53.9	2.3	1.0	14.2	73.8	2.0	1.2	5.2	0.0	0.1	0.1	0.1	
SS	標準砂を粉砕したもの	-	-	77	80	74	71.5	2150	1.2	1.5	0.9	2.67	-	-	-	0.0	0.0	0.1	99.4	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0

- 1) 火山ガラスを多く含む火山灰層であること
- 2) 火山灰層内における粒子構成の変化が小さく、均質性の高いこと
- 3) 火山灰層全体の体積が大きいこと

表-1 に採取された火山灰の物性と化学組成を示す。採取された試料は、火砕流堆積物と再移動堆積物に分けられ、偏光顕微鏡による観察およびX線回折(以下XRD)測定の結果、すべての試料に火山ガラスが含まれることが確認された。また、XRDによる粘土鉱物のピークにより火山灰の変質・弱変質が区分されている。なお、風化試料は採取地で茶褐色を呈していたものを指している。

火山灰の特性およびポゾラン反応性に関する以下の検討では、現地で採取した試料を105℃で乾燥した後、5mmふるいを通過したものを原料とし、その後、20±3℃、相対湿度60±5%の恒温恒湿室で恒量となるまで保管し、ボールミルにて粉砕した後、75μmふるいを通過したものが使用されている。

2.3 火山灰の特性⁶⁾

コンクリート用混和材としてのポゾラン材の標準規格が示されているASTM C618⁷⁾によると、Class N(天然ポゾラン)は、SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃が70%以上、SO₃が4.0%以下、強熱減量は10%以下とされている。表-1の化学組成から、25種類の火山灰はASTM C618のClass Nに適合する組成であった。また、表-1は総細孔量の昇順で記載しているが、変質、風化の認められる火山灰は、水蒸気等温吸着線により測定されたBET比表面積や総細孔量(相対圧0.95での吸着量)が大きい傾向にあることが確認された。

2.4 火山灰のポゾラン反応性評価⁶⁾

図-1にEN196-5-2005 Methods of testing cement -Part5: Pozzolanicity test for pozzolanic cementによるポゾラン反応性の評価を示す⁶⁾。この図は、セメント+火山灰+水試料を40℃で反応を促進させた後の材齢15日における水酸化物イオンとカルシウムイオンをそれぞれプロットしたものである。40℃での水酸化物イオンの関数として示されるカルシウムイオン飽和曲線(図中の曲線)の上側であればポゾラン反応性なし、下側であれば反応性ありと判断される。火山灰試料はいずれも曲線の下側にあり、全てポゾラン反応性ありと判断された。

2.5 火山灰の活性度指数による反応性評価⁶⁾

火山灰の反応性を評価する別の指標として活性度指数による評価が行われた。供試体の作製は、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われ、基準用のモルタルは水セメント比50%、セメント砂比1:3であり、火山灰はセメントの25%massを置換している。活性度指数は以下の式(1)に基づき算定している。各モルタルの活性度指数は表-1に示している。

$$AI = \frac{F_{pm}}{F_n} \times 100 \quad (1)$$

ここに、AI: 活性度指数(%), F_n: 基準モルタル(普通ポルトランドセメントのみのモルタル)の圧縮強度の平均値, F_{pm}: セメントの一部をポゾラン(ここでは火山灰)で置換したモルタルの圧縮強度の平均値

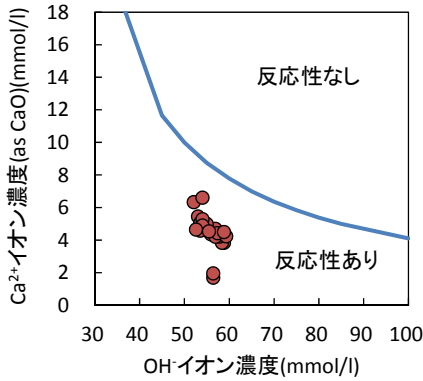


図-1 EN196-5による火山灰の反応性評価⁶⁾

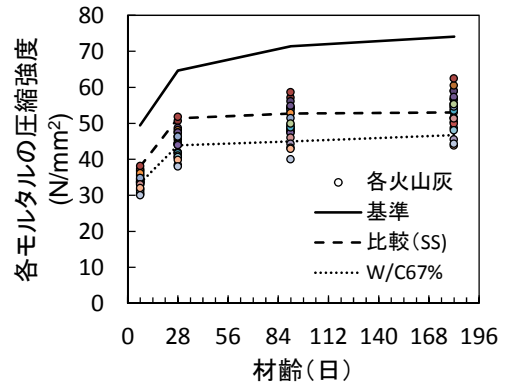


図-2 各モルタルの圧縮強度⁶⁾

また、JIS R5201 に規定される標準砂を微粉碎し、未反応微粉末（以下、SS と表記）としてセメントの25%mass 置換したモルタルや、火山灰で置換したモルタルのセメント量と同量となるように、基準モルタルの単位セメント量を75%とした水セメント比67%のモルタルが作製され、それぞれが比較された。

図-2 に各モルタルの圧縮強度と材齢の関係⁶⁾を示す。図中の○はセメントの25%を各火山灰で置換したモルタル、黒の実線（基準）が火山灰を用いていない基準モルタル、破線（比較(SS))は未反応微粉末SSでセメントの25%を置換したモルタル、点線(W/C67%)は火山灰で置換したモルタルと同量のセメント量とした場合の水セメント比67%のモルタル強度をそれぞれ示している。

SS は材齢 7 から 28 日まで材齢とともに強度が増進したが、28 日以降の強度の伸びが小さかった。火山灰を混合したものは、材齢 7 から 28 日まででは、大半が比較 SS より低く、水セメント比 67%のモルタルよりも低いものも認められた。しかし、材齢 91 以降では比較 SS 以上の強度のものが増加し、大半は水セメント比 67%よりも高い強度となった。

図-3 に基準モルタルに対する火山灰モルタルの活性度指数を示す⁶⁾。活性度指数は長期材齢で高くなるものが多かった。また、図中試料番号 11 より左に位置するのは変質のない火山灰であり、比較的強度発現が大きく、28 日で 60%、91 日で 70%以上と JIS A 6201 に規定されたコンクリート用フライアッシュのIV種灰相当の活性度指数を示した。

2. 6 火山灰の特性と活性度指数⁶⁾

ポゾランに含まれるガラス相の組成は、ポゾラン反応速度や水和生成物量に影響する⁸⁾。ガラス相中の化合物のうち、二酸化ケイ素 (SiO_2) は、セメントの水和反応によって生じた水酸化カルシウムと反応してケ

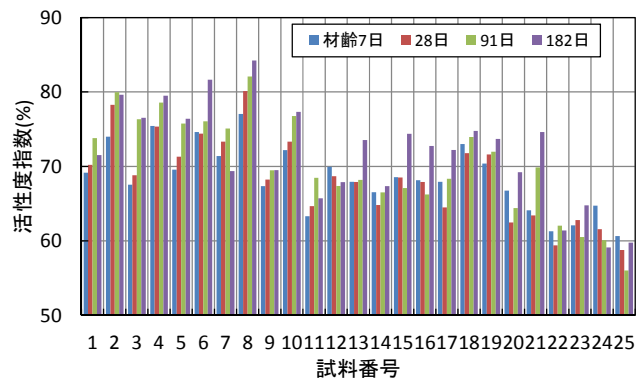


図-3 火山灰の活性度指数⁶⁾

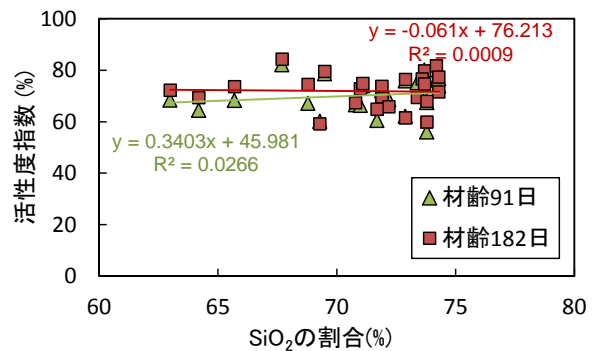


図-4 火山灰の SiO_2 の割合と活性度指数

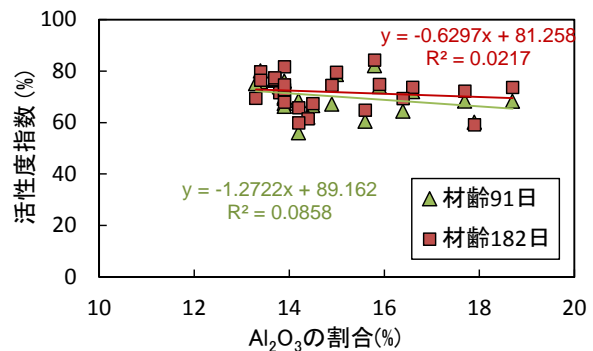


図-5 火山灰の Al_2O_3 の割合と活性度指数

イ酸カルシウム水和物の生成に寄与し、酸化アルミニウム (Al_2O_3) は、エトリンガイトやモノサルフェートなどのアルミネート系水和物の生成に寄与する。また、ポゾラン反応性は粉末度の影響も受け、一般に粉末度が高いほど反応性は大きくなる⁸⁾。

図-4 および図-5 に上記化合物の割合と材齢 91 日以降の活性度指数の関係をそれぞれ示す。いずれの化合物も活性度指数との相関は認められなかった。

図-6 および図-7 に火山灰のブレンまたは BET 比表面積と材齢 91 日以降の活性度指数の関係をそれぞれ示す。ブレン比表面積と活性度指数には相関は認められないが、BET 比表面積が大きいほど活性度指数が小さくなる逆相関となった。

ブレン比表面積は、所定のセルに充填した粉体層に流体を通すとき、粉体粒子が細かいほど通りにくくなる性質を利用して測定する方法であり、セメントの場合には、その種類が異なる場合でも充填状態などの差異が小さいため、充填の影響がほとんどないことが確認されている⁹⁾。しかし、火山灰のように粒子形状が大きく異なるものについては、その充填性の違いが測定値に大きく影響すると考えられる。他方、水蒸気吸着量により測定した BET 比表面積は、粒子表面の形状や空隙等の影響も含めて評価できる。このため、産地や種類の異なる火山灰では、実際の形状や空隙の影響を含む BET 比表面積との相関がみられたと考えられる。これを考慮すると、逆相関となったことについては、火山灰の空隙が強度に影響していることが考えられる。

図-8 は、水蒸気吸着量から求めた火山灰の総細孔量とモルタルの圧縮強度の関係を材齢ごとに示したものである⁶⁾。図には未反応粉末 SS の値も示している。総細孔量と強度には相関が認められ、細孔量が多くなると強度が低くなっている。材齢 28 日までは、比較用の SS を含め、総細孔量と強度の関係を 1 本の直線で表現できるが、材齢 28 日以降では、SS はほとんど強度の増進が認められず、総細孔量と強度の関係は火山灰を混合したものと異なる傾向となっている。このことは、SS はポゾラン反応性を有せず、火山灰のポゾラン反応は材齢 28 日まではほとんど進行しないことを示していると考えられる。一方、火山灰モルタルの近似直線の傾きから、初期材齢 (7, 28 日) では、ポゾラン反応がほとんど進行しておらず、材齢 91 日で総細孔量の小さい火山灰はポゾラン反応により強度が大きく増大し、材齢 182 日では火山灰全体でポゾラン反応の強度への寄与が確認された。

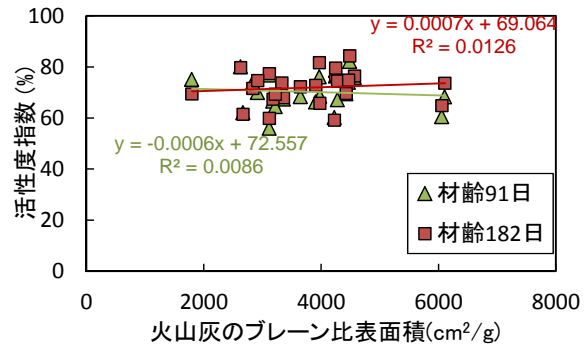


図-6 ブレン比表面積と活性度指数

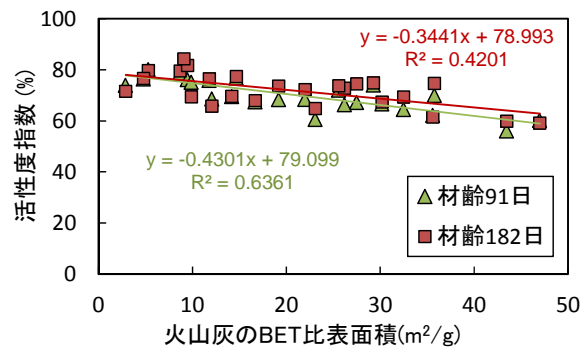


図-7 BET 比表面積と活性度指数

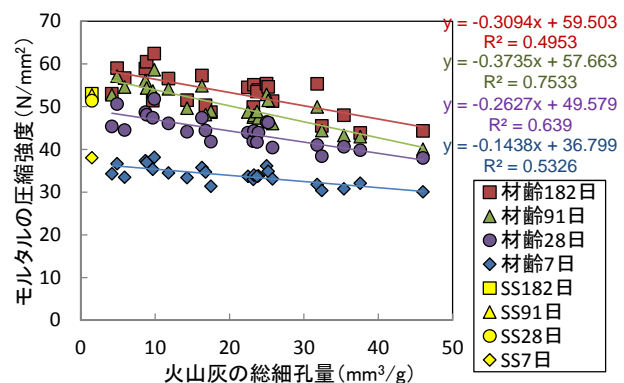


図-8 火山灰の総細孔量と圧縮強度の関係⁶⁾

以上のように、いずれの火山灰も反応性ありと評価されたが、活性度指数はポゾラン反応による強度発現だけでなく火山灰の細孔量による物理的な影響を受けることが示唆され、活性度指数だけでは火山灰のポゾラン反応性を必ずしも評価できないことが確認された。

3. 火山灰を用いたコンクリートの耐久性向上効果

3.1 コンクリート試験の概要¹⁰⁾

コンクリートへの利用が可能となる火山灰品質に関する道総研の検討結果から、いずれの火山灰もポゾラン反応性があると判断された。しかし、活性度指数

による評価、換言すれば材齢の進行に伴う圧縮強度の増加割合だけでは火山灰のポズラン反応性を必ずしも評価できないことが明らかとなった。このため、実際に火山灰をコンクリートに使用することにより耐久性等に与える影響を調べた。

コンクリート試験によるアプローチとして2通りの試験を実施した。1つは、火山灰を用いたコンクリートの基本的性質を検討するために、火山灰以外の材料を同一としたシリーズ1（実験室コンクリートシリーズ）である。もう1つは、火山灰を用いたコンクリートの実用化に関する検討として、コンクリート製品への利用に関する検討を行ったシリーズ2（製品用コンクリートシリーズ）である。なお、本研究では、最終的に、火山灰を用いたコンクリート製品を実際に試作し、工場製品への利用に関する留意事項等について取りまとめを行うとともに、実環境下での耐久性等を検証する観点から暴露試験を開始する。このため、シリーズ2の検討では、コンクリートの製造を実際のコンクリート製品工場で行った。なお、コンクリート製品の対象として、実環境下に暴露した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。

3.2 火山灰の選定

コンクリート試験で使用する火山灰は、道総研で検討された25種類の火山灰から、ポズラン反応性や微粒子の含有量、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絞り込みを行った。

ポズラン反応性については、前章に示した基準モルタルに対する活性度指数に変えて、未反応微粉末SSに対する圧縮強度発現を基準とした活性度指数 AI_{ss} を式(2)により算定し、 AI_{ss} が100%以上の場合、セメント以外の反応、すなわち火山灰のポズラン反応によるものと判定し、材齢91日と182日の活性度により分類した。

$$AI_{ss} = \frac{F_{pm}}{F_{ssn}} \times 100 \quad (2)$$

ここに、 F_{ssn} ：セメントの25%を未反応微粉末（ここでは標準砂）で置換したモルタルの材齢 n における強度、 F_{pm} ：セメントの25%を火山灰で置換したモルタルの材齢 n における強度

また、火山灰の反応速さの指標として、材齢28日の圧縮強度を基準として材齢28日～91日と材齢91日～182日における単位時間（日数）当たりの強度増加率を式(3)により算定し、全25種類の火山灰の平均値

に対する大小により分類した。

$$V_{n1-n2} = \frac{\left(\frac{F_{n2}}{F_{28}} - \frac{F_{n1}}{F_{28}} \right)}{(n2 - n1)} \times 100 \quad (3)$$

ここに、 V_{n1-n2} ：単位時間当たりの強度増加率（火山灰の反応速さ）、 F_{n1} および F_{n2} ：セメントの25%を火山灰で置換したモルタルの材齢 $n1$ 、 $n2$ における強度、 F_{28} ：セメントの25%を火山灰で置換したモルタルの材齢28日における強度、 $n1$ および $n2$ ：材齢（ここでは $n1=28$ 日の時 $n2=91$ 日、 $n1=91$ 日の時 $n2=182$ 日）

AI_{ss} と強度増加率による分類の組合せは、表-2のような16区分になる。全25種類の試料は、分類の結果、16区分のうちグレーで着色されたセルの組合せに分類された。この分類に加え、火山灰の量的確保が可能となる商業的採取施設が隣接する箇所を選定した結果、表中の分類番号3、5、7、16の4区分となり、各区分から1種類ずつを選定した。

表-2 火山灰の反応性の分類

		強度増加率					
		火山灰の平均に対して				材齢	
ポズラン活性度		大		小		材齢28-91日	
材齢		91日	182日	大	小	大	小
SSに対する強度	高い	高い	高い	1	2	4	7
	低い	高い	高い	3	5	8	11
	高い	低い	低い	6	9	12	14
	低い	低い	低い	10	13	15	16

3.3 コンクリート試験シリーズ1概要

3.3.1 使用材料

表-3にコンクリートに用いた骨材および火山灰の物性を示す。前節で述べたように、選定した火山灰は4種類であり、産地は留辺蘂、本別、弟子屈および旭川である。なお、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¹¹⁾。セメントは、表-2に示した普通ポルトランドセメントを使用した。

表-3 骨材および火山灰の物性（シリーズ1）

種類	骨材・火山灰の産地	最大寸法 (mm)	表乾密度 (g/m ³)	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/l)	実績率 (%)	粗粒率
細骨材	当麻	5	2.59	3.0	1.56	62.0	2.83
粗骨材	当麻	25	2.89	1.7	1.65	58.4	6.64
火山灰	留辺蘂	5	2.02	13.1	1.00	44.1	0.70
	本別	5	2.16	7.2	1.09	48.3	1.29
	弟子屈	5	2.20	15.3	1.21	51.0	2.07
	旭川	5	2.18	7.5	1.21	51.5	1.11

3. 3. 2 コンクリートの配合

表-4 にシリーズ 1 で使用したコンクリートの配合を示す。水セメント比は 50% の 1 水準とし、粗骨材容積は一定とした。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 の網ふるいを通しての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、ポゾ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。また、火山灰を用いたコンクリートの単位水量は一定としたが、火山灰の微粒分がフレッシュコンクリートのコンシステンシーに及ぼす影響を考慮して、ベースコンクリートより 10kg/m³ 増加した配合とし、併せて高性能減水剤を用いた。なお、シリーズ 1 では、火山灰の物性値等の違いがコンクリートのフレッシュ性状や強度発現などに及ぼす基本的な影響を把握する観点から、スランプおよび空気量の調整は行わなかった。表-4 には各コンクリートのスランプおよび空気量の実測値も表記している。留辺薬産の火山灰は特に微粒分が多く、他の火山灰に比べてスランプは大きく低下したが、その他の火山灰については大きな変化はなかった。

3. 3. 3 供試体の養生

各供試体の養生は、温度 20℃ および 40℃ の封緘養生とした。養生期間は、材齢 7 日から 91 日とし、各試験内容に応じた材齢で試験を実施した。

3. 3. 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 に準拠して実施した。併せて、JIS A 1149 に準拠して、コンプレッソメータを用いて静弾性係数を測定した。供試体は φ100×200mm 円柱供試体を用いた。試験は、材齢 7 日、28 日および 91 日の 3 材齢で行った。

(2) 促進中性化試験

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。

(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。なお、20℃封緘養生は材齢 28 日、40℃封緘養生は材齢 91 日までそれぞれ養生した後、試験を実施した。

(4) 化学的浸食に対する抵抗性

化学的浸食に対する抵抗性については、硫酸酸性土壌に設置されるコンクリートを想定して、硫酸に対する抵抗性について検討することとした。硫酸に対する抵抗性については、JIS 原案「コンクリートの溶液浸せきによる試験方法(案)」¹²⁾に準拠して、硫酸浸漬試験を行った。硫酸の濃度は、JIS 原案の試験法で硫酸の標準試験液濃度として示されている 5% (≒pH0.4) とした。試験は、20℃封緘養生した供試体については材齢 28 日から、40℃封緘養生した供試体については材齢 91 日から試験を開始した。供試体は、初期の吸水の影響を除くため試験開始前に 2 日間 20℃水中養生を行い、硫酸浸漬試験を開始した。なお、溶液は濃度を一定に保つため随時全量交換した。酸の侵入による中性化深さは、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_i) を測定し、浸漬前の供試体直径 (D_0) を基準に式(4)により求めた。なお、直径は発色部 5 点の平均値とした。

$$\text{中性化深さ} = (D_0 - D_i) / 2 \quad (4)$$

3. 3. 5 実験結果および考察

(1) 圧縮強度試験結果

図-9 にシリーズ 1 における各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を用いたコンクリートの圧縮強度はベースコンクリートと同等以上だった。また、促進養生効果を期待した

表-4 コンクリートの配合 (シリーズ 1)

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 ³)				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	45.0	190	380	782	-	1063	1.0	-	18.0	2.8
R		留辺薬	30			173	200	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

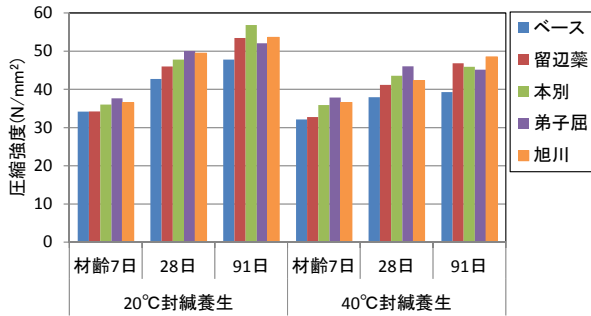


図-9 圧縮強度試験結果 (シリーズ 1)

40°C封緘養生は20°C封緘養生よりも材齢28日以降の強度そのものの値は低かった。明確な原因は明らかではないが、材齢初期に高温履歴を受けたコンクリートは材齢初期の強度は大きくなるものの、長期的な強度発現は小さくなるのが既往の研究で明らかにされており¹³⁾、本研究における40°C養生においても、材齢7日以前の初期に強度が大きく増加し、それ以降の強度発現が小さくなったものと推察される。

図-10 にベースコンクリートに対する圧縮強度比を示す。材齢91日の範囲内では、材齢91日の一部で強度比が低下するものがみられたものの、概ね材齢の進行とともに圧縮強度比は増加する傾向があり、ポズラン反応によるものと考えられる。また、40°C養生の方が20°C養生よりもベースコンクリートに対する強度比は増加しており、養生温度が高いほどポズラン反応が進行したものと考えられる。

(2) 中性化深さと中性化速度係数¹⁴⁾

図-11 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。なお、凡例の記号は表-4 に示したとおりであり、「比較」は火山灰を使用していないもの(表-4 の記号 N)に相当する。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。

図中の実線は実験結果に以下の拡散式(5)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。

$$y = k\sqrt{t} \quad (5)$$

ここに、 y : 中性化深さ(mm)、 k : 中性化速度係数、

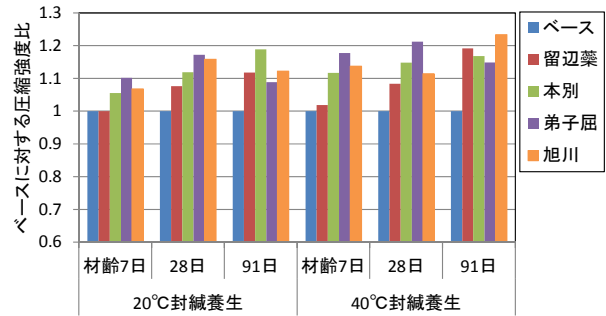


図-10 ベースコンクリートに対する圧縮強度比

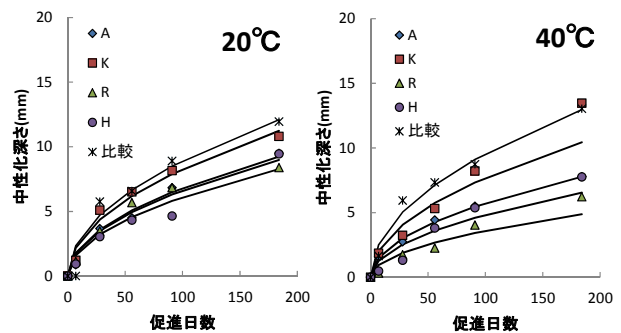


図-11 促進中性化試験結果¹⁴⁾

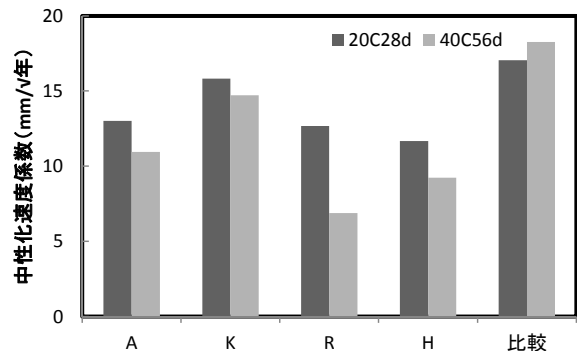


図-12 各コンクリートの中性化速度係数¹⁴⁾

t : 促進日数 (年)

図-12 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 (留辺薬産) の火山灰を用いた40°C養生のコンクリートは小さかった。

(3) 塩化物イオンの実効拡散係数

図-13 に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く、特に微粒分が多い留辺薬産の火山灰を用いたコンクリートは小さかった。また、養生温度が高いほど実効拡散係数は小さく、ベ

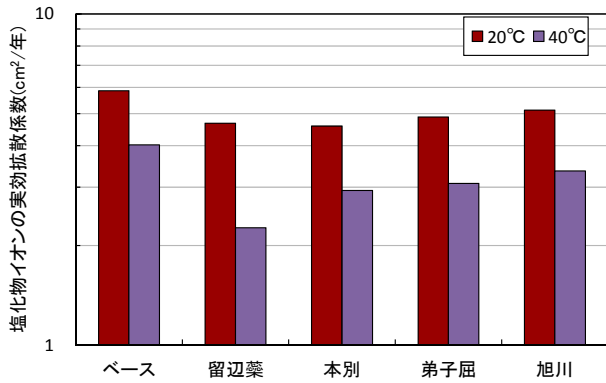


図-13 塩化物イオンの実効拡散係数 (シリーズ1)

ースコンクリートに対する火山灰を用いたコンクリートの低下割合が大きい傾向を確認した。これらは、火山灰のポズラン反応によるものと考えられる。

(4) 硫酸浸漬試験結果

図-14 に硫酸浸漬試験による供試体の質量変化率を示す。いずれも硫酸浸漬期間の増加とともに供試体質量は減少したが、20°C封緘養生したコンクリートは各供試体の差はほとんどない。一方、40°C封緘養生したものは、20°C養生したものより浸漬期間4週までは質量減少が小さい傾向を示したが、それ以降は20°C養

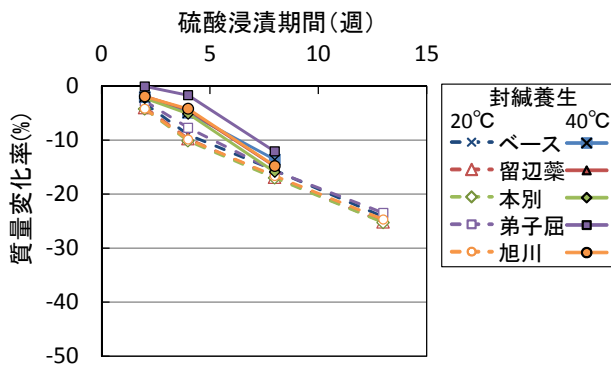


図-14 硫酸浸漬による質量変化率 (シリーズ1)

生したものよりも急激に質量が減少する傾向が認められた。また、弟子屈産の火山灰を用いたコンクリートは他のものよりも質量減少率が小さかったが、その差は小さかった。

図-15 に硫酸浸漬試験によるコンクリートの中性化深さを示す。中性化深さの養生温度による明確な差は確認できなかった。また、弟子屈産は質量変化率と同様、中性化深さが小さい傾向があるがその差は極めて小さい。

以上より、試験シリーズ1では、火山灰を用いたコンクリートの方がベースコンクリートよりも強度発現が高く、塩化物イオンの実効拡散係数が小さい傾向が確認でき、これらは火山灰のポズラン反応によるものと考えられる。

3. 4 コンクリート試験シリーズ2 概要

3. 4. 1 使用材料

選定した火山灰はシリーズ1と同じ4種類であり、火山灰の産地は留辺薬、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社選定した。表-5に各工場で使用した骨材および火山灰の物性を、表-6にセメントの主な試験成績を示す。なお、火山灰以外の材料は、実際に製品を

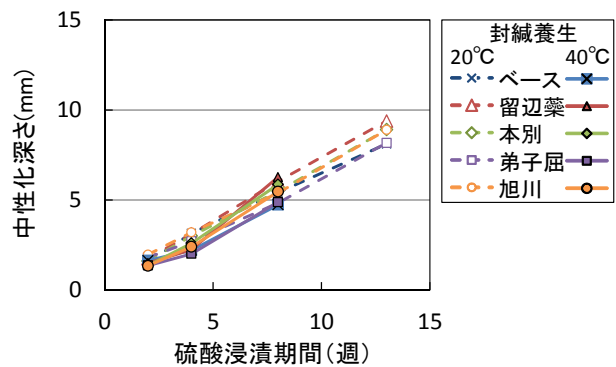


図-15 硫酸浸漬による中性化深さ (シリーズ1)

表-5 骨材および火山灰の物性 (シリーズ2)

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/m³)	絶乾密度 (g/m³)	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	北見産砕石	15	2.88	2.86	0.81	1.66	58.2	0.6	9.2	6.31
	火山灰	留辺薬	-	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	厚岸産砕石	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	当麻産砕石	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-6 セメントの試験成績 (シリーズ2)

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	終結	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
				(%)	(h-min)	(h-min)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
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 A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

表-7 コンクリートの配合 (シリーズ2)

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 外割(%)	粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	目標スランブ (cm)	目標空気量 (%)	単位量(kg/m ³)						AE減水剤 (セメント量×%)	高性能減水剤 (セメント量×%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	出荷材齢強度 ^{※2} (N/mm ²)
									水	セメント	細骨材	火山灰	粗骨材	AE剤 ^{※1}					
									(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)					
Y社 (訓子府)	早強ポルトランドセメント	-	-	30	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
									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	4.5±1.5	165	469	634	-	1066	1.900	1.4	-	13.0	4.9	40.7
									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	-	-	20	44.5	46.0	18.0±2.5	4.5±1.5	161	362	808	-	969	-	1.0	-	18.0	4.4	36.4
									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

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。

3. 4. 2 コンクリートの配合

表-7 にコンクリートの配合を示す。コンクリートの配合は、3. 1 節で述べたようにコンクリート製品として擁壁を想定したことから、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、各工場試験練りを行い決定した。火山灰は、シリーズ1と同様、細骨材の一部を代替する外割置換とし、置換率は30%とした。

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、スランブ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。

3. 4. 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。

3. 4. 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

シリーズ1と同様、塩化物イオンの実効拡散係数により塩分のコンクリート中への浸透抑制効果を調べた。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、試験に供した。

(4) 化学的浸食に対する抵抗性

シリーズ1と同様、化学的浸食に対する抵抗性については、硫酸酸性土壌に設置されるコンクリートを想定して、硫酸浸漬試験により評価した。供試体は、蒸気養生終了後に製品の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2日間20°C水中養生を行い、硫酸浸漬試験を開始した。

3. 4. 5 試験結果および考察

(1) 出荷材齢における圧縮強度

図-16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の強度差はほとんど無いことを確認した。

(2) 凍結融解抵抗性(水中凍結融解)

図-17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) スケーリング抵抗性(CDF試験)

図-18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があるが、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-19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

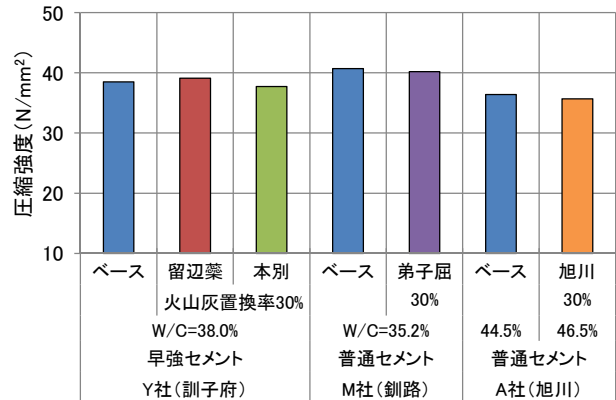


図-16 出荷材齢における圧縮強度

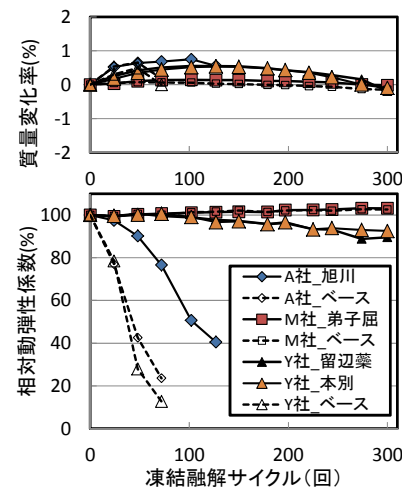


図-17 水中凍結融解試験結果

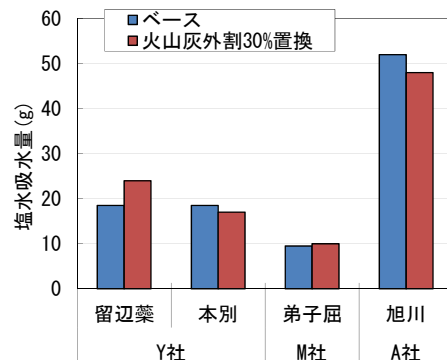


図-18 CDF試験開始前の塩水吸水量

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-20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

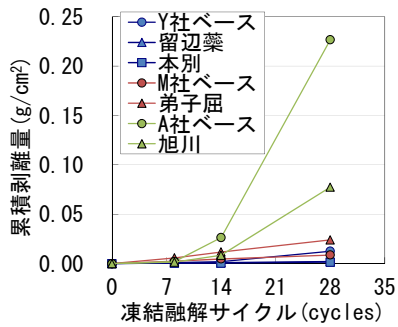


図-19 スケーリング量 (CDF 試験)

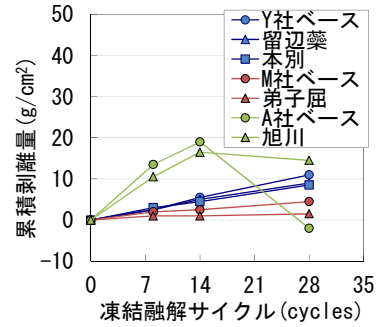


図-20 凍結融解サイクルと質量変化率の関係



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)

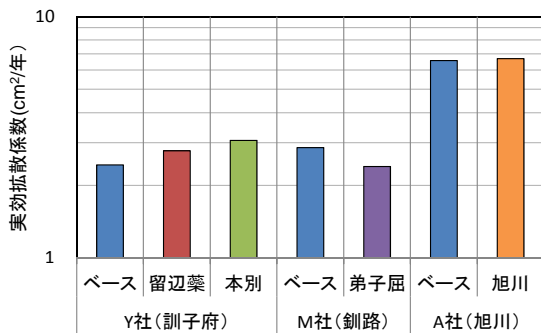


図-21 塩化物イオンの実効拡散係数

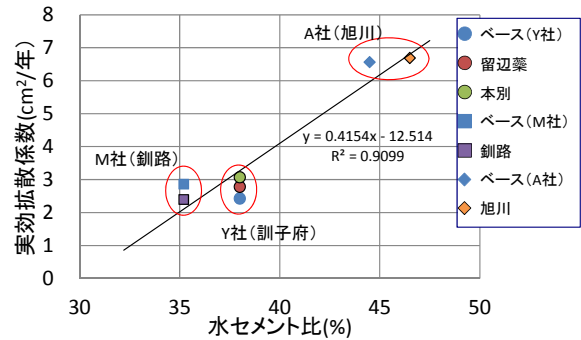


図-22 水セメント比と実効拡散係数

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-17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。

(4) 塩化物イオンの侵入に対する抵抗性

図-21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、多少の差はあるものの明確な差は無かった。図-22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ならなかった。

(5) 化学的浸食に対する抵抗性 (耐硫酸性)

図-23に硫酸浸漬期間と供試体の質量変化率の関係を示す。いずれも浸漬期間の進行とともに質量は減少し、各工場間で差が生じたものの、火山灰の有無による差は確認できなかった。

図-24に硫酸浸漬期間と中性化深さの関係を示す。質量変化率と同様、各工場間で多少の差はあるが、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差はほとんど確認できなかった。なお、Y社製の供試体で硫酸劣化が増大したのは、早強セメントの使用および単位セメント量が多いことにより硫酸と反応する水酸化カルシウム量の生成量が多いためと考えられる。逆にA社製の供試体では、セメント量が他社より少な

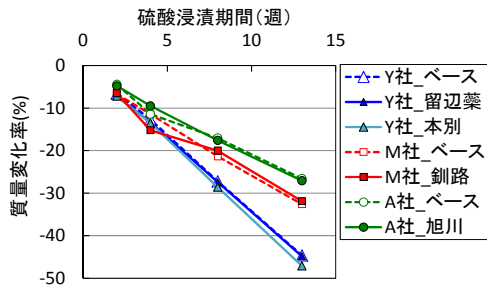


図-23 硫酸浸漬期間と質量変化率の関係

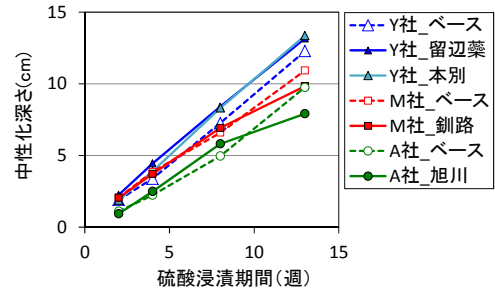


図-24 硫酸浸漬期間と中性化深さの関係

いことが影響したためと考えられる。

以上より、火山灰を用いたコンクリートの実用化の観点から、出荷時の圧縮強度を 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することや、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。

3. 5 火山灰の混和材としての積極的利用

これまでのコンクリート試験結果から、火山灰がポズラン反応性を有し、コンクリートの品質向上が可能なが確認できた。一方、火山灰の混和材料としての効果を高めるには、火山灰微粒分の積極的利用もしくは粉砕により微粉末化した火山灰の利用に関する検討が必要となる。ここでは、前述のコンクリート試験で比較的耐久性の向上効果が確認された留辺薬産の火山灰を抽出し、粉砕した火山灰を用いたコンクリートの耐久性等について調べた。

3. 5. 1 火山灰の粉砕

火山灰の粉砕には試験粉砕用の小型ボールミルを使用した。ボールミルは、直径約 50cm ×長さ約 60cm の閉鎖系であり、回転数は 2 回/秒で一定である。粉砕媒体は、直径 50mm の鉄球と $\phi 25 \times 30\text{mm}$ 程度のシルベップを $1:1$ の割合でミル容積の半分程度用いた。

粉砕手順は、粉砕媒体を投入したミルに、絶乾に乾燥させた火山灰試料を投入し、所定運転時間（ここでは 50 分）後にミルから粉砕媒体と火山灰を排出し、 10mm ふるいでそれらを分離した。なお、必要に応じて火山灰を 0.6mm でふるい、粗大粒子を除去した。運

転時間は、火山灰の粉砕目標値である比表面積 $5000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度になるように、事前に運転時間と火山灰の粉末度の関係を求め決定した。火山灰の比表面積は、セメントと同様、ブレン空気透過装置で測定した。なお、粉砕時には、凝集を防ぐため、粉砕助剤としてジエチレングリコールを 0.02% 添加した。

3. 5. 2 使用材料とコンクリートの配合

粉砕後の火山灰の絶乾密度は 2.34g/cm^3 、ブレン比表面積は $5050\text{cm}^2/\text{g}$ だった。ベースセメントには普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm^3 、ブレン比表面積 $3320\text{cm}^2/\text{g}$ ）を用いた。細骨材は、苫小牧市樽前産の除塩された海砂（密度 2.67g/cm^3 、吸水率 0.87% 、粗粒率 2.85 ）を、粗骨材は、小樽市見晴産砕石（密度 2.67g/cm^3 、吸水率 1.54% 、粗骨材最大寸法 25mm ）を用いた。

表-8 にコンクリートの配合を示す。いずれのコンクリートも粗骨材容積は一定とした。配合は、微粉末化した火山灰の使用によるコンクリートの耐久性向上効果を評価するために、火山灰を用いたコンクリート 1 種類（N50-vash）と、比較用のベースコンクリート 2 種類（N50-base と N38-base）を考慮した。

N50-base は、細骨材容積の一部を火山灰微粒で外割置換した火山灰コンクリートと比較するための配合であり、水セメント比は 50% とした。N50-vash は、このベース配合（N50-base）をもとに、細骨材容積の 30% を火山灰で置換（外割）したものである。

一方、N38-base は、上記により決定した N50-vash の火山灰微粒を結合材と考え、単位セメント量がこの結合材量（セメントと火山灰微粒の合計）と同一とし

表-8 コンクリートの配合

記号	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 (mm)	水セメント比 (%)	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m^3)					高性能減水剤 (セメント量 \times (%))	AE剤	スランプ (cm)	空気量 (%)
			配合1に対する細骨材置換(外割)	配合3に対するセメント置換(内割)					水	セメント	火山灰	細骨材	粗骨材				
N50-base	普通ポルトランド	-	-	-	25	50.0	50.0	47.3	150	300	-	897	1000	0.6	0.003	17.5	3.7
N50-vash	ランド	留辺薬(微粉砕)	細骨材の30%(外割)	セメントの23%(内割)		50.0	38.5	47.3		300	90	794		1.3	0.026	19.7	3.9
N38-base	セメント	-	-	内割対象配合		38.5	38.5	45.2		390	-	822		0.4	0.005	16.5	4.9

た配合である。このため、単位セメント量は N50-base よりも増加し、結果として水セメント比が 38%に低下している。なお、N38-base の単位セメント量 390kg/m^3 に対する N50-vash の火山灰置換率（内割）は 23%程度に相当する。いずれのコンクリートも目標スランプは $18\pm 2.5\text{cm}$ 、目標空気量は $4.5\pm 1.0\%$ とし、試験練りを行って配合を決定した。なお、スランプや空気量を調整するために、高性能 AE 減水剤と AE 剤を用いた。実測のスランプと空気量は、表-8 に示したとおりである。

3. 5. 3 試験項目

コンクリート供試体の養生は、いずれも 20°C 水中養生とした。以下に、試験内容を示す。

(1) 圧縮強度試験および静弾性係数測定

圧縮強度試験は、JIS A 1108 に準拠して材齢 28、56、91 日で実施した。併せて、JIS A 1149 に準拠して、コンプレッソメータを用いて静弾性係数を測定した。供試体は $\phi 100\times 200\text{mm}$ 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、相対動弾性係数と質量変化により評価を行った。試験開始材齢は 28 日とした。

(3) 塩化物イオンの実効拡散係数試験

JSCE-G571 に準拠して、塩化物イオンの実効拡散係数により塩分のコンクリート中への浸透抑制効果を調べた。試験は、材齢 28 日で実施した。

3. 5. 4 試験結果と考察

(1) 圧縮強度と静弾性係数

図-25 に各材齢における圧縮強度を示す。N50-base と N50-vash を比較すると、同じ水セメント比 50%でも圧縮強度は火山灰を用いた方がいずれの材齢においてもベースコンクリートよりも大きかった。これは火山灰のポゾラン反応による効果と考えられる。他方、水結合材比が 38.5%と同じ N50-vash と N38-base を比較すると、N38-base の方が N50-vash よりも、いずれの材齢においても圧縮強度は大きかった。

図-26 に材齢 28 日の圧縮強度をそれぞれ基準とした場合の、各コンクリートの圧縮強度比を示す。材齢 28 日以降の圧縮強度の増加割合は、火山灰を用いた N50-vash が大きく、材齢が増加した方がベースコンクリートとの差が明確になった。これらから、火山灰のポゾラン反応性を確認できた。

図-27 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。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も、

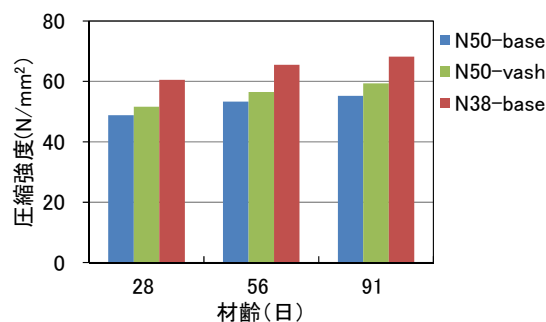


図-25 各材齢における圧縮強度

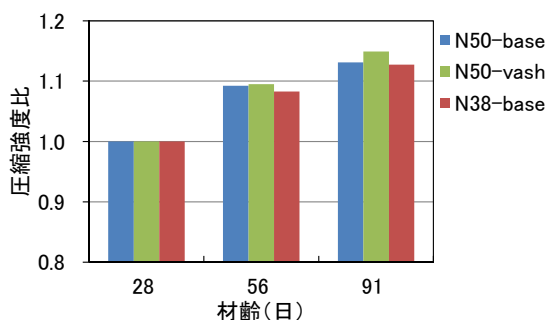


図-26 材齢 28 日を基準とした場合の強度比

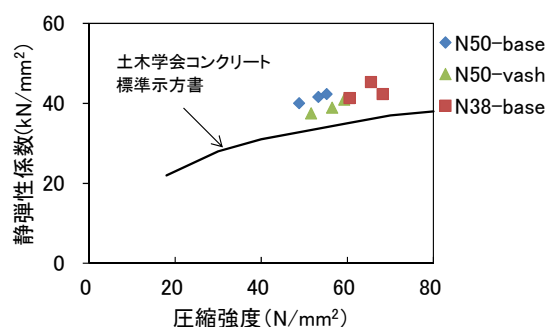


図-27 圧縮強度と静弾性係数の関係

圧縮強度に対する静弾性係数が若干小さくなる傾向があるが、土木学会コンクリート標準示方書設計編に示されている値よりも大きく、標準的な設計値が適用できることを確認した。

(2) 凍結融解抵抗性

図-28 に水中凍結融解試験結果を示す。水セメント比 50%のベースコンクリート (N50-base) は、凍結融解サイクル早期より相対動弾性係数と質量の低下が著しかった。これは、表-9 に示したように、実測空気量が 3.7%と比較的小さかったことが原因と考えられる。一方、火山灰を用いたコンクリートは、ベースコンクリートと同様に実測空気量が 3.9%と比較的小さいものの、相対動弾性係数と質量変化は水セメント比 38%のベースコンクリート (N38-base) と同程度であ

り、高い凍結融解抵抗性が確認できた。

(3) 塩化物イオンの侵入に対する抵抗性

図-29 に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は水セメント比が小さいほど実効拡散係数は低下したが、火山灰を用いたコンクリートは、いずれのベースコンクリートよりも実効拡散係数が小さかった。特に、N38-base と N50-vash は水結合材比が同じだが、圧縮強度は N38-base の方が大きいにもかかわらず、塩化物イオンの実効拡散係数は逆転しており、火山灰のポズラン反応により塩化物イオンの侵入に対する抵抗性が向上したものと考えられる。

以上から、微粉末化した火山灰を用いたコンクリートは、外割、内割いずれの置換方法によっても、物性や耐久性を改善することが可能であることが確認できた。一方、火山灰の微粉末化による効果については、例えば、5mm 以下に粒度調整しただけの留辺薬産の火山灰を外割で使ったコンクリートの 20°C 封緘養生における実効拡散係数 (図-13) と、微粉末化した火山灰を使用した 20°C 水中養生の実効拡散係数 (図-29) を比べると、両者には殆ど差が無い。本研究の範囲内では、使用骨材や配合が、試験を実施したシリーズにより異なるため直接的な比較はできないことから、火山灰の微粉末化による効果についてはさらに検討する必要があるが、火山灰を粉砕して使用する場合には、採取した火山灰の乾燥や粉砕に別途費用が生じるため、実用化に当たってはこれらの課題も含めて判断する必要がある。

4. 実用化に関する検討¹⁵⁾

4.1 事前配合試験

(1) 配合設計方針

実用化の一端として、コンクリート製品を試作した。前述したように、コンクリート製品の対象として、実環境下に暴露した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。製品の配合は、これまでの検討結果をふまえ、強度発現と耐久性向上効果を考慮し、火山灰の混合割合を細骨材の 50% 置換とした。また、プレキャスト擁壁に求められる設計基準強度 30N/mm^2 を満足するように水セメント比を決定し、コンクリートの目標空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ とし、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。

(2) 使用材料

使用する火山灰は、室内試験で差が生じた留辺薬お

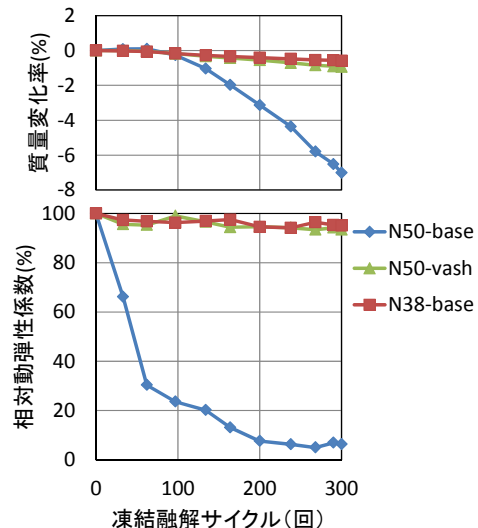


図-28 水中凍結融解試験結果

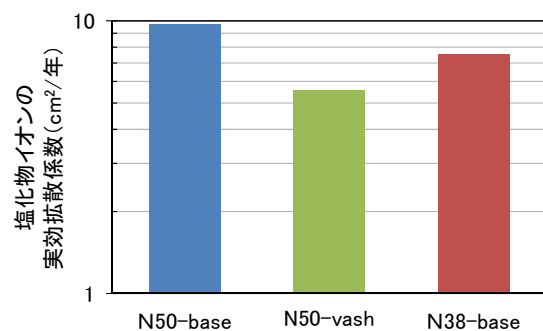


図-29 塩化物イオンの実効拡散係数

よび旭川とし、時間的な制約等から試作品の製造が可能なコンクリート製品工場を 2 社選定して試験を実施した。表-9 に各工場で使用した骨材および火山灰の物性を示す。火山灰の物性は、各社で受け入れ時に 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)」¹¹⁾の各試験規準に準じて測定したものである。なお、火山灰以外の材料は、各工場通常使用されているものをそのまま使用した。このため、骨材の産地は各工場異なるものとなった。

(3) 配合試験結果および考察

表-10 に決定したコンクリートの配合を示す。

配合試験の結果、A 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が大きく、 44kg/m^3 の増加、AE 減水剤量も 0.5% 増加した。それでも、スランプは火山灰コンクリートで 2cm 小さい値となっていた。火山灰コンクリートでは AE 減水剤の使用量が多いが、連行された空気量は小さい値となった。火山灰を使用したコンクリートはベースコンクリートに比べ、水セメント比は 2% 高いが、出荷時強度は、

表-9 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	記号	最大 寸法 (mm)	表乾 密度 (g/m ³)	吸水率 (%)	単位容 積質量 (kg/l)	実績率 (%)	粗粒率	微粒 分量 (%)
A社 (旭川)	細骨材	当麻	S	5	2.59	2.9	1.54	62.0	2.83	2.0
	粗骨材	当麻	G	25	2.64	1.7	1.51	58.5	6.60	-
	火山灰	旭川	A	5	2.24	3.8	1.07	47.8	1.11	33.6
H社 (深川)	細骨材	深川	S	5	2.59	2.3	1.62	62.5	2.77	1.0
	粗骨材	深川	G	25	2.65	2.0	1.58	59.6	6.76	-
	火山灰	留辺蘂	R	5	2.02	13.1	1.00	44.1	0.70	50.1

表-10 コンクリートの配合

コンクリート工場 (所在地)	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 (%)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	単位量(kg/m ³)						AE減水剤 (セメント量×%)	高性能減水剤	スランプ (cm)	空気量 (%)	出荷時強度 (N/mm ²)
									水	セメント	細骨材	火山灰	粗骨材	AE剤*					
A社 (旭川)	普通ポルトランドセメント	-	-	20	44.5	46	15	4.5	161	362	808	-	969	-	1.0	-	14.5	3.9	43.4
		旭川	30		46.5	38	15	4.5	205	441	300	260	998	-	1.5	-	12.5	3.1	45.2
H社 (深川)	普通ポルトランドセメント	-	-	20	42.5	40.5	18	4.5	177	416	676	-	1037	0.002	1.0	-	19.5	4.2	33.1
		留辺蘂	30		42.5	39.3	18	4.5	185	435	320	250	1037	0.012	-	2.0	21	3.7	30.8

*AE剤はセメントに対する割合(%)

若干高い強度を示していた。

H社では、火山灰コンクリートでは、高性能減水剤2.0%の添加量となり、単位水量はベースよりも8kg/m³増加した。また、出荷時強度は火山灰コンクリートで若干低く、試作製品製造時には水セメント比を見直す必要があると考えられた。

火山灰種類が配合に与える影響は、他の条件がすべて異なるため、単純に比較できるものではないが、微粒分が多く粗粒率の小さい留辺蘂の火山灰を使ったコンクリートで単位水量が185kg/m³、微粒分は半分程度である旭川の火山灰で205kg/m³であり、高性能減水剤使用によって、単位水量が低減できることがわかった。また、必要空気量の連行には、AE助剤の必要量が多くなる傾向となっていた。

また、火山灰の表乾状態の判断による吸水率や表乾密度に大きな差があることが認められた。3.3および3.4で行った材料試験結果および本節での結果を比べると、留辺蘂の火山灰での結果が試験者等によって結果が異なることが分かった。本試験は、鹿児島県発行の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¹¹⁾に準じて行った。シラスの場合は、採取する火砕流を限定し、品質が一定の範囲のもので実施されていた。本検討では、火砕流は限定せず、北海道内の広範囲かつ多種多様な火山灰を対象としており、シラスで行われた検討の範囲を超えている場合も考えられる。ひとつの課題として、コンクリートの配合において、火山灰の表乾状態、吸水率をどのように試験、定義するか

は品質管理の上でも検討を要すると考える。

4.2 試作製品用コンクリートの耐久性

試験練を実施時に各工場で作製した供試体を作製し、耐久性に関連する下記の項目について検討を行った。

4.2.1 試験項目と方法

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、JIS A 1108に準拠して実施した。供試体はブリキ製簡易型枠(φ100×200mm 円柱供試体)で作製した。養生条件は、打設翌日脱型後20℃水中養生を行ったもの、ブリキ製型枠に封緘状態のまま製品と同様の蒸気養生(打設後3時間から昇温20℃/時間、6時間保持後自然冷却)を行い、材齢14日まで室内で保管したもの(出荷時強度)、および蒸気養生後14日経過後に脱型し、40℃水中養生を材齢91日まで行ったものとした。

試験材齢は20℃水中養生については、7、28、91、182日、蒸気養生のものは製品出荷時の14日、蒸気養生後40℃水中養生を行ったものは、材齢91日とした。

(2) 塩化物イオンの実効拡散係数試験

暴露試験体の設置場所を海岸地域と計画したため、物質透過抵抗性を評価する観点から、塩化物イオンの透過抵抗性を耐久性状として確認することとした。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。供試体はブリキ製簡易型枠(φ100×200mm 円柱供試体)で作製した。材齢と養生条件は、打設翌日脱型後材齢20℃水中養生を行ったもの、ブリキ製型枠に封緘状態のまま製品と同様の蒸気養生(打設後3時間から昇温20℃/時間、6時間保持後自然冷

却)を行い、材齢14日まで室内で保管したもの、および蒸気養生後14日経過後に脱型し、40℃水中養生を材齢91日まで行ったものとした。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。

4.2.2 実験結果および考察

(1) 圧縮強度

図-30に各コンクリートの材齢と圧縮強度を示す。左が留辺薬産火山灰を使用したH社のもの、右が旭川産火山灰を使用したA社のものである。H社のものでは、4.3で後述する試作製品と同等の養生を行ったものの出荷時強度が設計基準強度 30N/mm^2 をわずかに上回る程度であり、試作品の製造時には配合を見直す必要があると考えられる。この傾向は、火山灰を用いたコンクリートとベースコンクリートで同様であり、強度差もほとんど無いことが確認できた。20℃水中養生では材齢の進行に伴う強度の伸びも大きな差は認められなかった。蒸気養生のものでは、出荷時には火山灰を用いたコンクリートが若干低い強度であったが、材齢の進行に伴い、ベースコンクリートに追いつく結果となった。

A社のものでは、出荷時強度は設計基準強度 30N/mm^2 を満たす結果となった。20℃水中養生では水セメント比が若干高い配合である火山灰を用いたコンクリートの強度が高かった。182日まででベースコンクリートの強度が若干追いつく傾向を示していた。蒸気養生のものでは、出荷時強度に大差はないが、蒸気養生後の40℃水中養生期間の増加に伴い、火山灰を用いたコンクリートの強度が大きくなった。

H社、A社で異なる傾向を示す部分もあるが、火山灰を用いたコンクリートでも、ベースコンクリートと同程度の水セメント比とすることで、圧縮強度は大差ないものとなる。また、蒸気養生を行ったコンクリート(製品)でも、条件によってはその後の強度増進が継続する可能性が示唆された。増加程度は、火山灰を使用したコンクリートで大きい結果となった。このことは、大半のセメントの反応が終了したのちも、未反応物質が残存していることを示し、火山灰ではポゾラン反応によるものと考えられる。

(2) 塩化物イオンの浸入に対する抵抗性

図-31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。出荷時ではベースコンクリートと火山

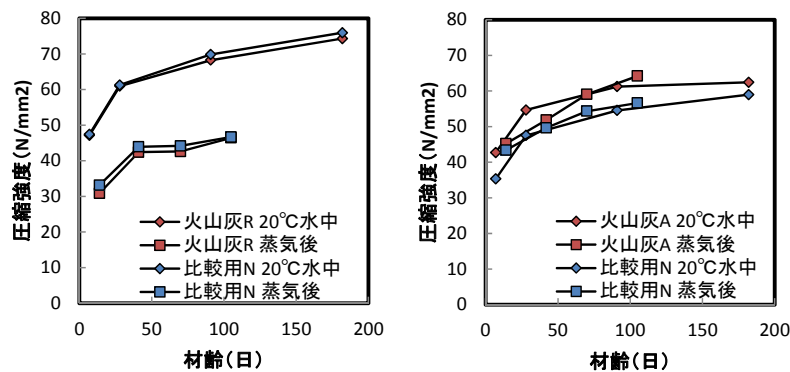


図-30 材齢における圧縮強度

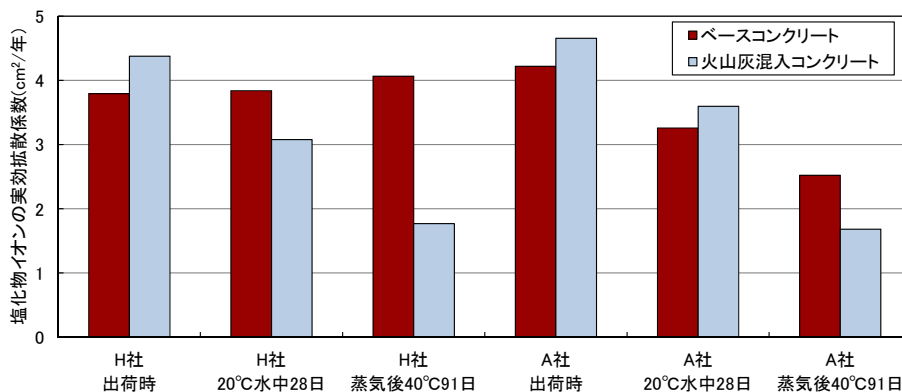


図-31 塩化物イオンの実効拡散係数

灰を用いたコンクリートでは、若干ではあるが、火山灰を用いたコンクリートで実効拡散係数が大きい傾向となった。留辺薬産火山灰を使用したコンクリート(H社)では、20℃水中 28 日養生では、ベースコンクリートより拡散係数が小さくなり、蒸気養生の後 40℃で養生したコンクリートでは、同等の養生を行ったベースコンクリートの半分以下の拡散係数となった。旭川産火山灰を使用したコンクリート(A社)では、20℃水中 28 日養生でも、ベースコンクリートより拡散係数が若干であるが大きくなった。蒸気養生の後 40℃で養生したコンクリートでは、同等の養生を行ったベースコンクリートよりも拡散係数が小さくなった。

いずれの場合も、蒸気養生以降の 40℃水中での養生後に拡散係数が大きく低下した。このことは、火山灰の反応による効果と考えられる。特に、留辺薬産火山灰において、高温養生における火山灰の反応が顕著であった。

4.3 試作品の製造

4.3.1 製造工場

試作品の製造は、事前配合試験と同様に、留辺薬産の火山灰を H 社、旭川産の火山灰は A 社の工場にて実物大の試験体(L型擁壁 H=1500 タイプ)を作製した。

4.3.2 製品の配合および製造方法

コンクリート試作製品は 2 種類作製した。工場で使用している基本配合をベンチマークとして 1 体、火山灰コンクリートとして、細骨材の 50%を火山灰で置換した配合を 1 体、あわせて 2 体作製した。コンクリートは、呼び強度 30N/mm²で統一した。

(1) H 社(留辺薬産)

コンクリートの練り混ぜは、1.0m³ 強制練りパン型ミキサを用いた。練り混ぜ量は 0.8m³ で、混練時間は 120 秒とした。火山灰の投入は、練り混ぜ開始時に別

途計量した袋詰め火山灰をミキサに直接手投入することとした。火山灰の表面水は、JIS A 1111 により測定し表面水相当水量を補正した。コンクリートの配合表を表-11 に示す。

基本配合と火山灰配合の特筆すべき相違点は、コンクリートの流動性を改善する化学混和剤の種類と使用量にある。火山灰の粒度を示す指標となる粗粒率は 0.7 程度であり、常用的に使用している細骨材の 2.73 に比してかなり細かい。さらに、火山灰は 0.075mm を通過する微粒分量が多いため、流動性を確保するためには高い減水性能がある高性能減水剤の使用が必須となった。火山灰コンクリートのフレッシュ性状は、スランプ 22.5cm であったが、塑性粘度が高く作業性は良好とは言いがたい。また、経時によるスランプのロスが大きい。コンクリートの圧縮強度を支配する水セメント比は、両配合とも 42.5%で同じ値を採用した。

型枠へのコンクリートの投入は、専用の鋼製ホッパーを用いて打込み高さは 1.5m を 2 層に分けて打設した。加振の方法は、型枠に外部振動機を取り付けてコンクリートを充填するとともに、表面気泡除去のために内部振動機も併用した。

コンクリート打設後の蒸気養生は、前養生 20℃を 3 時間保持、昇温は 1 時間当たり 20℃以下、最高温度 65℃を 4 時間保持した後、自然徐冷した。

(2) A 社(旭川産)

コンクリートの練り混ぜは、1.0 m³強制練りパン型ミキサを用いた。練り混ぜ量は 0.8m³ で、混練時間は 60 秒とした。火山灰の投入は、練り混ぜ前に表乾状態に精製した火山灰を袋詰めにし、ミキサに直接手投入することとした。コンクリートの配合表を表-12 に示す。

基本配合と火山灰配合を比較すると、単位水量が 44kg/m³、減水剤の使用量が 0.5%(基本配合 C×1.0%に

表-11 コンクリートの配合 (H 社)

記号	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 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)							スランプ (cm)	空気量 (%)
							水	セメント	細骨材	火山灰	粗骨材	減水剤	AE剤		
基本配合	普通ポルトランドセメント	-	-	20	42.5	40.5	177	416	676	0	1037	4.16	-	14.5	4.0
火山灰配合	留辺薬産	細骨材×50%	39.3			185	435	320	250	1037	8.70	-	22.5	6.5	

表-12 コンクリートの配合 (A 社)

記号	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 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)							スランプ (cm)	空気量 (%)
							水	セメント	細骨材	火山灰	粗骨材	減水剤	AE剤		
基本配合	普通ポルトランドセメント	-	-	20	44.5	46.0	161	362	808	0	969	3.62	-	23.0	4.4
火山灰配合	旭川産	細骨材×50%	46.5			38.0	205	441	300	260	998	6.62	-	18.5	5.4

対し、火山灰配合 C×1.5%)何れも火山灰配合の単位量が多くなった。原因としては、火山灰の細粒度分布に由来するものであり、前項の H 社で実施した留辺薬産と同じような傾向であった。コンクリートの水セメント比は、火山灰配合が 2%高い数値を採用しており、このことから、火山灰を置換することでコンクリート強度が上昇することを示す。

型枠へのコンクリートの投入は、専用の鋼製ホッパーを用いて打込み高さは 1.5m を 2 層に分けて打設した。加振の方法は、型枠に外部振動機を取り付けてコンクリートを充填するとともに、表面気泡除去のために内部振動機も併用した。

コンクリート打設後の蒸気養生は、前養生 20°C を 4 時間保持、昇温は 1 時間当たり 20°C 以下、最高温度 55°C を 4 時間保持した後、自然徐冷した。

4. 4 長寿命の実証に向けた暴露試験

写真-3、写真-4 に H 社での製品製造状況と出来上がった製品の写真をそれぞれ示す。

出来上がった製品は、火山灰を使用しない通常の製

品と同等の仕上がりであり、目立つ気泡等の表面の違いは認められなかった。色等についても、大差なかった。

作製した試作品は、長寿命コンクリートの性能を明確に検証するため、特に凍結融解ならびに塩化物イオンの影響の激しい日本海沿岸に位置する増毛暴露実験場に設置し、長期暴露試験を開始した。暴露場所は海岸から 100m 以下の場所であり、飛来塩分、寒暖差等の諸条件が、非常に厳しい環境条件となっている。

写真-5 に暴露状況および非破壊検査状況を示す。

東西に平行で擁壁のそれぞれの壁面が南北をむくよう一定間隔を置いて、火山灰コンクリート、普通コンクリートを交互に会社ごとに配置した。設置日時は、平成 25 年 11 月 28 日であった。非破壊検査の初期値は平成 25 年 12 月 2 日に計測した。非破壊検査の項目は、超音波伝搬速度や 4 プローブ法による電気抵抗率等とした。今後、他の検査手法（コア採取、反発度、透気係数など）による調査等を行い、検証を進めていく予定である。



写真-3 製品の製造状況



写真-5 脱型後の製品の状況



写真-5 暴露状況および非破壊検査状況

4. 5 実用化に向けた課題

火山灰を使用した長寿命化コンクリートの開発に向けた試作品の製造実験として、プレキャスト製品工場において実機ミキサで練り混ぜたコンクリートを鋼製型枠に打設して製品を作製した。実機ミキサで練り混ぜた基本配合と火山灰配合を用いた時のフレッシュコンクリート性状、締固め状況、表面仕上げ易さ及び製品の外観出来形状況を比較した結果をもとに、実用化に向けた課題を以下にまとめた。

①火山灰の表乾状態の判定

火山灰を細骨材の一部として用いる場合、火山灰の品質的な課題として、火山灰の表乾状態の判定があげられる。本研究では結果が試験者等によって結果が異なることが分かった。本試験は、鹿児島県発行の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¹¹⁾に準じて行ったが、シラスの場合は、採取する火砕流を限定し、品質が一定の範囲のもので実施されていた。本検討では、火砕流は限定せず、北海道内の広範囲かつ多種多様な火山灰を対象としており、シラスで行われた検討の範囲を超えている場合も考えられる。コンクリートの配合において、火山灰の表乾状態、吸水率をどのように試験、定義するかが課題となると考える。

②火山灰の含水状態の管理

①とあわせて、火山灰の含水状態の管理がある。シラスコンクリートの先進事例の視察において、採取場での含水率管理の必要性があり、材料費の上昇を招いていた。北海道産の火山灰についても、同様であり、採取場では含水率の高い状態である場合が多く、各工場で労力をかけ、乾燥等の処理が必要であった。先進事例である鹿児島では、採掘業者を限定し、乾燥、前処理を機械化することで、低廉・高品質化に向けた改善を行っている。北海道での実用化においても、これらの成果を活用する必要がある。

③火山灰を用いたコンクリートの流動性の確保

火山灰はコンクリート用に使用されている細骨材と比較して細粒度であるとともに、0.075mmを通過する超細粒度も質量比で20%以上含有している。したがって、コンクリートの流動性を確保するためには、単位水量を増大させるか高性能減水剤を使用することが必要となる。単位水量によって性状を確保する場合には、乾燥収縮などの耐久性が懸念される。他方、高性能減水剤により流動性を確保する場合には、必要以上に塑性粘度が上がり、作業性及び表面気泡の発生による美観性に課題が生じる。

④火山灰を用いたコンクリートのスランプ保持性

火山灰コンクリートはスランプの経時変化が大きく、時間の経過とともに打設ホッパーからのコンクリートの排出が困難となる。この現象は、火山灰の微粒分量に由来するものと推察され、打設ホッパーに静置したフレッシュコンクリートにこわばりが生じる。特に夏期間の製造に於いては、スランプ保持性のある化学混和剤の使用が必要と考える。

⑤火山灰を用いたコンクリートの表面仕上げ

フレッシュコンクリート表面に粘性があるため、金コテ仕上げが困難になる。仕上げ面積が大きい製品には、表面仕上材を散布して均し作業を行う必要がある。

⑥実環境下における耐久性の検証

実環境における暴露試験を実施し、長寿命の検証を行う必要がある。

5. 火山灰を利用した長寿命化コンクリートの配合設計手法

火山灰のコンクリートへの利用に関する研究の整理は、長滝が監修した著書「コンクリートの長期耐久性」¹⁾で行われている。古くはMichaelisの研究¹⁶⁾があり、ポルトランドセメントに火山灰を混ぜると、可溶性ケイ酸が遊離石灰と化学的に結合し、コンクリート

表-13 小樽防波堤コンクリート（斜塊）の配合

防波堤 コンクリート	記録上の配合（容積比）					記録から算出した単位量（kg/m ³ ）					
	セメント	火山灰	砂	砂利、碎石	水（%） （対全量）	水セメント比	水	セメント	火山灰	細骨材	粗骨材
当初	1	0	2	4	12~14	33.6%	130	387	0	639	1302
変更	1	0.8	3.2	6.4	12~14	54.6% （水粉体比）34.5%	130	238	139 （C×37%）	628	1279
現在の配合 RC-6S（参考）	-					48%	157	（高炉B種）327		849	1070
								180	147（スラグ） （C×45%）		

の強度、水密性、化学抵抗性が増すことが発表されたのが1870~1880年頃である。日本では、佐世保港軍港第2船渠（1901年）や小樽港防波堤ブロック（1902年）に、耐海水性が高いコンクリートとして火山灰を用いたコンクリートが利用された。その中でも、小樽港の防波堤ブロックに携わった廣井勇博士の研究成果や知見がその発展に寄与したとされている。

廣井は、小樽港築港工事において、当初は容積比でセメント：砂：碎石=1：2：4であったコンクリートの配合を火山灰を用いた配合に変更して、その配合比をセメント：火山灰：砂：碎石=1：0.8：3.2：6.4とし、水は練上り量の12~14%としている¹⁷⁾。当時の記録から算出した配合は表-13に示すとおりである。参考として、斜塊に相当する「セルラーブロック」で使用される現在のコンクリート配合 RC-6S（設計基準強度24MPa、スランプ12cm、空気量4.5%）も示した。

当時の水量容積比12~14%（全コンクリート量に対する容積比）は、水セメント比で38~44%に相当し、現在のコンクリートよりも小さいが、これは、当時のセメントは粒度が粗く、早期強度発現に寄与するエアライトの量が少ないため、強度を確保するためと考えられる。また、変更設計で用いられた火山灰のセメントに対する重量比は37%程度であり、現在用いられているフライアッシュと対比すると、フライアッシュC種セメントで置換率は30%となることから、火山灰の混合割合は比較的高めである。なお、その後の発表論文^{18)~21)}では、火山灰はセメントと同じ程度の細かさに粉砕され、セメントに混合されたことが述べられている。また、小樽産の火山灰が最も多くのシリカ質を含んでいることが他産地の火山灰より強度発現に有効であったと推論し、配合と養生が適切に行われれば、火山灰は強度や耐久性の増加に有益であると結論づけられている。

このように、過去においても火山灰のコンクリートへの利用に関する研究は行われており、配合の考え方も整理されているが、第2章でも述べたように、火山

灰の特性は採取箇所により異なり、セメントの品質も現在とは異なっているため、火山灰をコンクリートに利用するには、現状を踏まえた配合設計の確立が必要である。

一方、火山灰を利用したコンクリートに関する最近の研究として、鹿児島に分布するシラスを用いた武若らの研究があり、その成果の一つとして、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）」¹¹⁾（以下、シラスコンクリートマニュアルと記述）が刊行されている。この中では、細骨材としてコンクリートに使用するための配合設計法だけでなく、シラス細骨材の物性試験方法等が詳述されている。

本研究では、火山灰を用いたコンクリートの配合に関する基本的事項は、このシラスコンクリートマニュアルが非常に参考になり、これに基づくこととした。しかし、シラスコンクリートマニュアルの適用対象は、始良カルデラから噴出した入戸火砕流を起源とする一次シラスを細骨材あるいはその一部として用いるコンクリートに限定されており、本研究で検討しているような多様な火山灰に対応するには、その特性を考慮する必要がある。このため、本章では、特性の異なる種々の火山灰を、コンクリートに利用する上で留意すべき点について特筆する。なお、コンクリートの配合設計にあたっては、所要の強度や耐久性を満足するように定めることは当然であるが、長期的な耐久性に影響を及ぼす施工時の初期欠陥を未然に防ぐ観点から、構造物の構造条件や施工条件に応じて適切なワーカビリティを有するコンクリート配合を選定する必要がある。ここでは、フレッシュコンクリートと硬化コンクリートそれぞれの観点から、火山灰を用いたコンクリートの配合設計を行う上で留意すべき点について述べる。

5. 1 フレッシュコンクリート

5. 1. 1 火山灰の特性がコンクリートのコンシステンシーに及ぼす影響

火山灰を用いるコンクリートの配合設計に当たっ

表-14 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/m ³)	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/l)	実積率 (%)	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	留辺蘂	A	5	2.02	13.1	1.00	44.1	0.70	50.1
	本別	K	5	2.16	7.2	1.09	48.3	1.29	25.2
	弟子屈	R	5	2.20	15.3	1.21	51.0	2.07	17.3
	旭川	H	5	2.18	7.5	1.21	51.5	1.11	33.6

表-15 コンクリートの配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 ³)					AE減水剤 (セメント量×%)	高性能減水剤 (セメント量×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
							水	セメント	細骨材	火山灰	粗骨材				
N	普通ポルトランドセメント	-	-	25	50.0	45.0	190	380	782	-	1063	1.0	-	18.0	2.8
R		留辺蘂	30				200	400	518	173	1063	-	1.0	9.5	1.9
H		本別					185	1063	-	1.0	20.5	1.3			
K		弟子屈					189	1063	-	1.0	24.0	1.4			
A		旭川					187	1063	-	1.0	21.1	1.8			

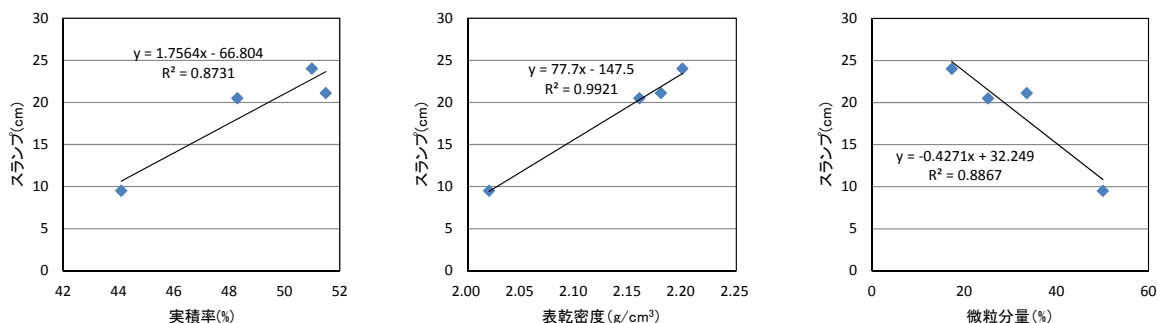


図-32 コンクリートの配合とフレッシュ性状

では、火山灰の特性を十分に考慮し、製造されるコンクリートが所用の性能を満足するように配合を定めなければならない。特に、火山灰の物性がフレッシュコンクリートのワーカビリティに与える影響は大きい。表-14、15は、第3章で示した表-3、4を再掲したものである。この検討では、スランプを18cmとしたベースコンクリート配合（記号N）を基準として、火山灰を用いたコンクリートは単位水量を10kg/m³増加し、かつ減水剤の種類をAE減水剤から高性能減水剤に変更しており、それ以外のスランプ調整は行っていない。火山灰置換率はいずれも細骨材の30%外割置換であるが、火山灰の特性の影響から、用いる火山灰の種類によりスランプが異なっている。

図-32は表-15に示した火山灰コンクリートのスランプと火山灰の各物性値の関係を示している。いずれもスランプとの相関が高く、火山灰の表乾密度や実積率が小さく、微粒分量が多いほどスランプは低下する傾向がある。これらの物性値は、火山灰の形状や多

孔質な性質を表す指標であることから、これらがコンクリートのワーカビリティに影響していることがわかる。シラスコンクリートマニュアルでは、シラスの物性は地域により多少異なるものの、その差がコンクリートのコンシステンシーに及ぼす影響は、シラスの実積率をもとに補正できることが示されている。本研究で比較検討したコンクリートは、火山灰の細骨材容積に対する置換率が30%であり、シラスコンクリートマニュアルにおいては細骨材の一部をシラスで置換した「シラス混合コンクリート」の位置づけとなるが、物性が大きく異なる火山灰を用いた場合は、火山灰置換率が30%程度でもコンシステンシーに及ぼす影響は大きく、実積率だけでなく微粒分量などの物性にも着目して配合試験を実施する必要がある。

5.1.2 化学混和剤によるスランプおよび空気量の調整

上述のように、火山灰を用いたコンクリートは普通砂を用いた場合とはフレッシュ性状が大きく異なり、

普通砂と同程度のコンシステンシーを確保するには、火山灰の種類や置換率にもよるが、上記の一例からも、単純に単位水量で 10kg 以上（実際には AE 減水剤から高性能減水剤に変更しているため、さらに増加が見込まれる）増加する必要がある。しかし、単位水量の増加は、水セメント比一定の場合、セメント量が増加して不経済となるほか、乾燥収縮の増大に伴うひび割れなど、初期欠陥の発生確率が高まることが懸念される。このため、火山灰を用いたコンクリートでは、高性能 (AE) 減水剤の使用を標準とし、材料分離や極端な凝結遅延が生じない範囲で、単位水量が最小となるように使用量を調整する必要がある。また、良質な空気の連行は凍結融解抵抗性や流動性の確保に寄与することから、AE コンクリートとすることを標準とする。

表-16 は普通砂(苦小牧樽前山海砂、密度 2.67g/cm³、吸水率 0.87%) を用いたコンクリート (ベース配合、記号 N) を基準に、火山灰を用いたコンクリートの目標スランプおよび空気量をそれぞれ 18±2.5cm、4.5±1.0% として、高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系) と空気量調整剤 (AE 助剤: 変性ロジン酸化化合物系) を変化させた場合の一例である (記号 1 から

9)。火山灰は、本研究で実際に使用した中で最も微粒分量が多い留辺薬産を用いているが、ベースコンクリートよりも単位水量は 30kg/m³ 多くなった。これについて、当初はベースコンクリートと同じ単位水量 150kg/m³ として、高性能 AE 減水剤をセメント質量×2.5% 添加したものの、コンクリートはスランプせず (ゼロスランプ)、それ以上高性能 AE 減水剤を増量してもスランプが得られなかった。このため、適切な単位水量の目安をつけることを目的として、そのコンクリートに直接加水を試みた。その結果、単位水量を 30kg/m³ 増加した時にスランプが 19cm となったことから、単位水量を 180kg/m³ として検討した。

図-33 は、上記を踏まえて単位水量を 180kg/m³ とした場合の、高性能 AE 減水剤の添加量とスランプの関係を、図-34 は AE 助剤の添加量と空気量の関係をそれぞれ示している。また、赤色で示した凡例は、高性能 AE 減水剤の添加量がセメント質量×2.0% と一定のケースである。このケースのみ抜粋し整理したものが図-35 である。各混和剤添加量の増加により、スランプや空気量が概ね増加する傾向はみられるが、高性能 AE 減水剤と AE 助剤の添加量を同時に調整してい

表-16 火山灰を用いたコンクリートの配合試験の一例

記号	配合	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 ³)					高性能 AE 減水剤(セメント量×%)	AE 助剤 ※1 (A)	スランプ (cm)	空気量 (%)
								水	セメント	細骨材	火山灰	粗骨材				
N	ベース		-	-			47.3	150	300	897	-	1000	0.6	0.3	17.5	3.7
①	火山灰コンクリート配合試験	普通ポルトランドセメント	留辺薬	30	25	50.0	43.4	180	360	766	108	1000	2.5	3.5	21.0	1.9
②													2.0	7.0	13.6	11.5
③													2.2	5.0	10.8	5.2
④													2.4	5.2	16.8	4.0
⑤													3.0	6.0	20.4	2.0
⑥													2.8	7.0	18.5	5.0
⑦													2.0	3.5	17.8	2.7
⑧													2.0	3.9	18.8	3.2
⑨													2.0	5.5	20.0	6.6

※1: AE 助剤添加量の単位: 1A=セメントC(kg)×0.0025%

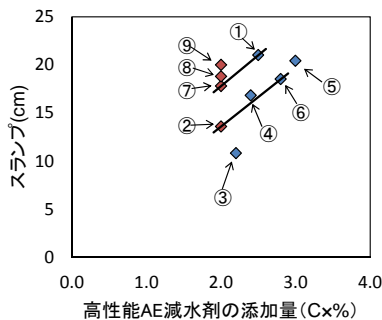


図-33 高性能 AE 減水剤の添加量とスランプの関係

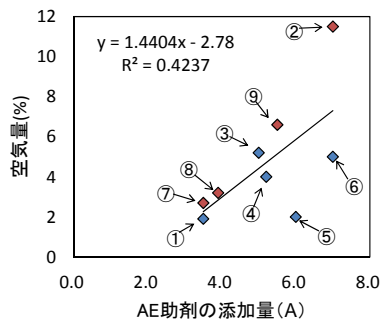


図-34 AE 助剤の添加量と空気量の関係

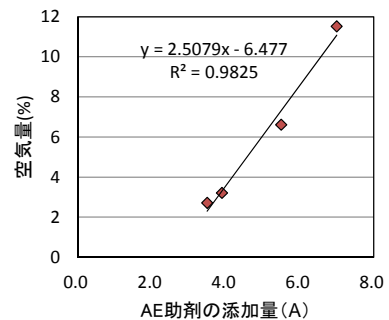


図-35 AE 助剤の添加量と空気量の関係

るため判然としない。しかし、例えば、AE 助剤の添加量が同じ①と⑦、あるいは②と⑥を比較すると（図-33 中の 2 点間の直線）、いずれも高性能 AE 減水剤の添加量の増加に伴いスランプが直線的に増加し、直線の傾きもほぼ同程度であることから、一般的なコンクリートと同様に、高性能 AE 減水剤によるスランプの調整は可能である。

また、図-35 から、高性能 AE 減水剤の添加量が一定の場合には、AE 助剤の添加量の増加とともに空気量は直線的に増加しており、スランプと同様、AE 剤による空気量の調整が可能なのことがわかる。なお、いずれの混和剤も添加量は一般的なコンクリートよりも多くなる点に留意する必要がある。

以上、フレッシュコンクリートの観点から、配合設計における留意すべき事項について、実際の配合試験例とともに示した。いずれにしても、多様な性質を有する火山灰を利用するには、所要の性能を満足するように試験を実施して配合を決定することが原則となる。なお、4.5 でも述べたように、火山灰の含水率の評価・管理手法は配合設計を行う上でも大変重要な課題であり、今後も課題解決に向けた取り組みが必要である。

5.2 硬化コンクリート¹⁴⁾

圧縮強度については、水ポルトランドセメント比を同等とすることで、達成される。火山灰の種類によっては、より高い強度が得られる事例も認められた。事前に試験練を実施し、強度発現性状を確認することで、セメント使用量の削減につながる効果も期待できる場合があると考えられる。

静弾性係数は、土木学会式、建築学会 newRC 式と比較して、同じ強度の時に 10%程度小さくなる傾向が認められた。静弾性係数の値が明確に求められる場合には、水セメント比において考慮する等の対処が必要となる。

凍結融解抵抗性は、JISA1148 A 法による検討にお

いて、同等の製品で使用されると想定される火山灰を使用しないコンクリートと比較して、同程度が若干向上する結果となった。また、スケーリング抵抗性として塩分環境下における凍結融解試験である CDF 試験を実施した結果、多孔質粒子の使用から懸念されるポップアウト等は観察されず、同等の普通コンクリートに比べてスケーリングも若干小さくなった。また、火山灰使用コンクリートにおいても、適切な AE 助剤を使用し、空気を連行することが必要である。

化学浸食に対する抵抗性は、硫酸浸漬による質量変化と中性化深さの進行を検討したが、同等の普通コンクリートと大差ない結果となった。

物質透過抵抗性として、電気泳動による塩化物イオン浸透性と促進中性化試験を実施した。火山灰の混合により、物質透過抵抗性が向上し、高温での養生を行ったもので、その効果が著しい結果となった。その効果は、同材料、同一水セメント比のコンクリートにおいて、火山灰種類の相違により異なった。

ここで、火山灰で細骨材の 30%を置換したコンクリートで得られた促進試験結果 (3.3.5(2)参照) を用いて、実環境における塩化物イオンの浸透に伴う鋼材腐食にかかわる照査と中性化に対する性能の検証を行う。

鋼材腐食にかかわる照査は、2012 年制定コンクリート標準示方書設計編²²⁾2.1.4 塩害に対する照査 に準じて行った。コンクリートの塩化物イオン拡散係数は、促進試験で得られた実効拡散係数を用い、見かけの拡散係数に換算した。計算上の設定は、最小かぶりを 9cm、海岸からの距離 0.25km とし、表面塩化物イオン濃度を 3.0 とした。以上の条件から、表面から鉄筋位置 9cm において、鋼材腐食発錆限界の塩化物イオン濃度に至る年数を算出した。図-36 に算出結果を示す。

養生の程度により年数が大きく異なる結果となっているが、実効拡散係数が火山灰コンクリートの方が若干でも小さいことから、年数も長くなっていた。特に、

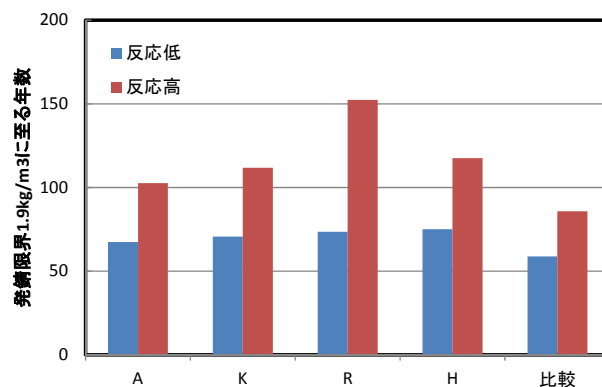


図-36 発錆限界に至る年数

ポズラン反応の進行したものでは、顕著にその効果が大きく、100年を超える長寿命となることが試算された。

中性化に対する性能の検証は、日本建築学会 鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計指針（案）・解説²³⁾ 5.2 中性化に対する性能の検証方法に準じて行った。コンクリートの鉄筋までのかぶり厚さを30mmとし、鉄筋深さまで中性化する期間を算定した。なお、算定に用いる中性化速度係数は、実験からもとめた比較用の普通コンクリートおよび火山灰コンクリート（4種類のコンクリートのうち中央値）中性化速度係数をもとに実環境での値に換算して使用した。図-37に試算結果を示す。鉄筋深さまで中性化が進行するのに要する時間は、比較用の普通コンクリートで約75年、火山灰コンクリートで約130年という結果であった。

以上から、鉄筋の腐食開始を鉄筋コンクリート構造物の寿命とするならば、塩化物イオンの浸透、中性化の腐食要因に対する透過抵抗性を持つ火山灰コンクリートでは、普通コンクリートに比べ、その寿命を大きく伸ばすことが可能と考えられる。

そのために、用いる火山灰の品質の留意点について、以下に述べる。物質透過性を表す塩化物イオンの実効拡散係数および中性化速度係数と、反応率と反応に寄与すると考えられる0.075以下の微粒分量により、図-38、39に示す関係¹⁴⁾が得られている。

また、火山灰種類による反応率、速さの違いには、図-40、41に示す関係^{6), 14)}が得られている。

物質透過抵抗性は、反応量による影響を受けると考えられる。反応量はコンクリート中に含まれる火山灰の微粒分と微粒分の反応性の影響を受ける。微粒分は

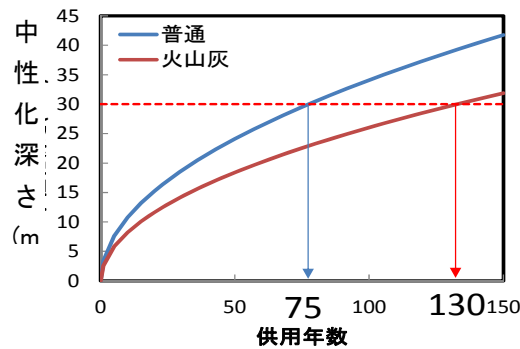


図-37 供用期間と中性化深さの試算

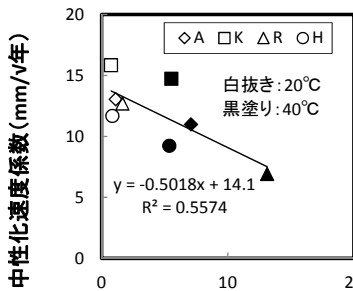


図-38 反応量と中性化速度係数¹⁴⁾

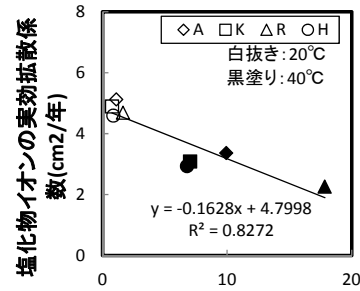


図-39 反応量と塩化物イオンの実効拡散係数¹⁴⁾

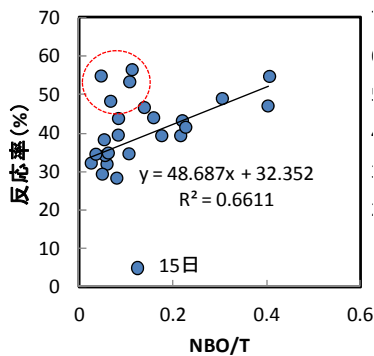


図-40 NBO/T と反応率の関係⁶⁾

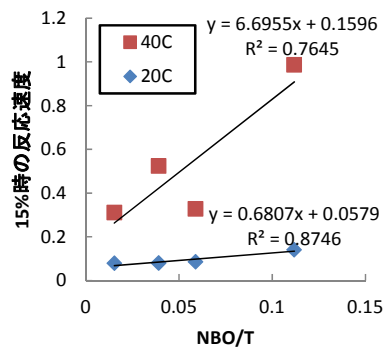


図-41 NBO/T と反応率15%での反応速度¹⁴⁾

多いもので効果の高い結果となっている（留辺蘂の火山灰：微粒分量 50.1%）。ただし、微粒分が多すぎると、単位水量の増加につながり、化学混和剤の使用量等も増加する。必要なフレッシュコンクリート性状、火山灰の反応性、期待する効果等を勘案し、混合量や配合の条件、使用化学混和剤種類、量について、検討を行い、決定するものとする。

微粒部分の反応性は、火山ガラス（非晶質）の組成に依存し、X線回折で得られた回折強度からリートベルト解析により非晶質相の化学組成を推定し、推定した非晶質の化学組成から非晶質相の構造（重高度）を表す NBO/T を計算⁹⁾することで、指標とできる。ただし、必ずしも NBO/T が高いことが必須となるわけではなく、微粒分量や混合率を勘案し、使用法と合わせて、検討し、配合へと反映させる。

以上、フレッシュコンクリートと硬化コンクリートそれぞれの観点から、火山灰を用いたコンクリートの配合設計を行う上で留意すべき点について記した。

6. 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を目的として、コンクリートへの利用が可能な火山灰品質の整理、火山灰を用いたコンクリートの耐久性向上効果に関する検討および火山灰を用いたコンクリートの実用化に向けた検討を行った。本研究で得られた知見をまとめると以下ようになる。

- (1) 本研究で調査した 25 種類の火山灰は、いずれもポゾラン反応性ありと評価されたが、活性度指数はポゾラン反応による強度発現だけでなく火山灰の細孔量による物理的な影響を受けることが示唆され、活性度指数だけでは火山灰のポゾラン反応性を必ずしも評価できないことが明らかとなった。
- (2) 水セメント比一定の条件下で細骨材容積の 30% を火山灰で置換した場合、火山灰を用いたコンクリートの方がベースコンクリートよりも強度発現が高く、塩化物イオンの実効拡散係数が小さくなる傾向があり、これらは火山灰のポゾラン反応による効果と考えられる。
- (3) コンクリート製品への実用化の観点から、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。
- (4) 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することや、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を確認した。

- (5) 火山灰を用いたコンクリートは、蒸気養生を行った場合でも、条件によってはその後の強度増進が継続する可能性が示唆され、増加程度は、一般製品配合コンクリートよりも大きいことを確認した。このことは、大半のセメントの反応が終了した後も、未反応物質が残存していることを示し、火山灰ではポゾラン反応によるものと考えられる。
- (6) 試作製品のコンクリートでは、蒸気養生後の 40°C 水中養生により、大きく塩化物イオンの実効拡散係数が低下し、火山灰のポゾラン反応による効果が確認された。
- (7) 火山灰を用いたコンクリートの配合に関する基本的事項は、既往の成果であるシラスコンクリートマニュアルに基づくことができるが、シラスコンクリートマニュアルの適用対象は限定されているため、多様な火山灰に対しての留意点をフレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの観点から整理し、火山灰を用いたコンクリートの配合設計手法を示した。

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) A. M. Neville: Properties of Concrete (Forth Edition), Longman Limited, p. 83, 1995
- 4) 八幡正弘、垣原康之：北海道における火山ガラス質資源の特性、北海道立地質研究所報告、第 77 号、pp. 77-82、2006
- 5) 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、2012
- 6) 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
- 7) ASTM C618-08a Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete
- 8) セメント協会：CEMENT & CONCRETE エンサイクロ

- ペディア [セメント・コンクリート化学の基礎解説]、pp.87-93、1996
- 9) セメント協会:CEMENT & CONCRETE エンサイクロペディア [セメント・コンクリート化学の基礎解説]、pp.78-79、1996
- 10) 吉田行、田口史雄、谷口円、垣原康之、高橋徹、秋山護：火山灰の反応性と火山灰を用いたコンクリートの特性、寒地土木研究所月報、No.279、pp10-24、2014
- 11) 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
- 12) JIS 原案「コンクリートの溶液浸せきによる耐薬品性試験方法」、コンクリート工学、vol.23、No.3、pp.59-62、1985
- 13) 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
- 14) 谷口円、高橋徹、吉田行、佐川孝広：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、コンクリート工学年次論文集、vol.36、No.1、2014
- 15) 吉田行、谷口円、秋山護、石塚浩章：火山灰を用いたコンクリートの工場製品への適用性、平成 25 年度土木学会北海道支部論文報告集、第 70 号、E-27、2014
- 16) 藤井光蔵: (講義)ポルトランドセメント発達の沿革(15)、セメント・コンクリート、No.126、pp. 37-42、1957.8
- 17) 樋口芳朗：明治のコンクリートに学ぶ、セメント・コンクリート、No.456、pp.2-10、1985.2
- 18) Hiroi, I.: The preparation and Use of Concrete Blocks for Harbor Works, Transactions, ASCE, Vol.LIV. Part A, Paper No.10, pp.211-220, 1904
- 19) Hiroi, I.: On Long-time Tests of Portland Cement, Transactions, ASCE, Vol.LXXVI., Paper No.1263, pp.1027-1044, 1913
- 20) 廣井勇：セメント用法実験報告、東京帝国大学紀要、第 6 刷、第 1 号、pp.13、1913
- 21) Hiroi, I.: On Long-time Tests of Portland Cement, Hydraulic Lime, and Volcanic Ashes: The Journal of the College of Engineering, Tokyo Imperial University, Vol.X., No.7, pp.155-172, 1920
- 22) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書[設計編：標準]、2012
- 23) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針 (案)・同解説、2004

A STUDY ON THE APPLICATION OF CONCRETE USING VOLCANIC ASH IN COLD, SNOWY REGIONS

Budgeted : Grants for operating expenses
General account

Research Period : FY2012-2013

Research Team : Materials Research Team,

Author : TAGUCHI Fumio, SHIMATA Akinori,
MIHARA Norihiro, SHIMADA Hisatoshi,
TABATA Koutaro, YOSHIDA Susumu

Abstract : Volcanic ash which is a collectable natural pozzolan widely distributed throughout Japan can be expected to improve the long-term durability of concrete. However, mix design method or production method of concrete using volcanic ash has not been established systematically. For this reason, the characteristics and pozzolanic reactivity of 25 volcanic ashes in Hokkaido, which are including a large amount of volcanic glasses, were evaluated. In addition, the effect of improving the physical properties and durability of concrete which replaced a part of the sand or cement with volcanic ashes, and the use for the factory products were examined. As a result, as for the concrete using volcanic ashes, a dominant result was provided in the durability for the prevention of corrosion, and possibility of the extension of life of the structure was provided. Thus, the mix proportion method of the long life span concrete using volcanic ash was suggested. The exposure examinations of trial factory products made by suggested method were started to inspect the long term durability of them.

Key words : Volcanic ashes, Concrete, Long Life Span, Factory products