

報告 下水汚泥焼却灰を用いたコンクリートの長期物性と各種耐久性状

原 勇澄^{*1}・小林 孝一^{*2}

要旨：下水汚泥焼却灰を混和材として用いたコンクリートを17年間、太平洋側平野部と山間寒冷地に自然曝露して長期物性を調査したところ、圧縮強度、耐凍害性、耐中性化ともに、良好な結果が得られた。また新たに採取した下水汚泥焼却灰は過去に使用した下水汚泥焼却灰より P_2O_5 含有量が増加しており、混和材として使用する際には注意が必要であることが判明した。各種耐久性については下水汚泥焼却灰の置換率が増加するほど耐凍害性が増加したが、塩化物イオン浸透試験においては置換率が増加することによる浸透抵抗性の向上は認められなかった。

キーワード：下水汚泥焼却灰、五酸化リン、耐凍害性、圧縮強度

1. はじめに

平成28年3月現在、下水道普及率は全国で77.8%に達している¹⁾。今後も下水道普及率は上昇していくと考えられる。しかし発生した下水汚泥を処理する最終処理場の減少や新規処理場の確保が困難な事もあり、下水汚泥の有効利用法と減量化が課題となっている。下水汚泥焼却灰(図-1)は下水処理の過程で発生する汚泥を濃縮・消化・脱水して体積を減らし、焼却炉で約800℃で焼却することで出来る灰である。主な成分は SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , P_2O_5 であり、利用の使途としては建設資源原料・セメント原料・リン回収などが挙げられる。焼却灰はコンクリートの凝結や強度特性に悪影響を及ぼすリン化合物を含んでいる反面、結合材として有効な SiO_2 や CaO を含んでおり、また微粉であることからコンクリート混和材としていくつかの検討事例がある^{2) 3)}。しかしこれらの研究では試験期間が数ヶ月単位での検討のものが多く、長期的な強度や耐久性に関する研究は行われていない。

本研究は17年間野外曝露された下水汚泥焼却灰を混和材として用いたコンクリートの長期物性を調査すると共に、新たに採取した下水汚泥焼却灰を用いてコンクリート供試体を作製し各種物性調査を行う。焼却灰の品質を調査すると共に、セメントに対する置換率を変化させて用いたコンクリートの各種物性調査を行う。それらの結果から焼却灰のコンクリート用混和材としての資源の可能性を明確にすることを本研究の目的とする。

2. 実験概要

2.1 下水汚泥焼却灰を用いたコンクリートの長期物性

17年間、太平洋側平野部(岐阜大学)及び山間寒冷部(高山市下水道センター)に自然曝露試験された供試

体の物性を調査する。



図-1 下水汚泥焼却灰

(1) 供試体概要

配合表を表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。また2箇所の処理施設から採取された焼却灰 A_2 , B_2 をセメント置換して混和材として用い、焼却灰に含まれる P_2O_5 含有量(後述)を考慮し焼却灰 A_2 は置換率10%、焼却灰 B_2 は置換率5%とした。汎用コンクリート(N)は呼び強度24(N/mm²)の1種類、高流動コンクリート(H)は呼び強度40(N/mm²), 60(N/mm²)の2種類の計3種類用意し、汎用コンクリートはスランプ8.0±1.0cm、高流動コンクリートはスランプフロー60±5cmとなるよう、配合を調整した。以上全ての配合に対し平野部、山間部共に耐凍害性試験に用いるものは10×10×40(cm)の角柱供試体で空気量は3.5%, 4.5%の2種類である。同じく圧縮強度試験及び中性化深さ測定に用いるものは空気量4.5%のみでφ10×20(cm)の円柱供試体である。空気量に関してはAE剤を用いて配合毎に調整を行った。

コンクリートに用いた焼却灰の化学成分を表-2に示す。主成分は SiO_2 , Al_2O_3 , CaO と既往の研究²⁾と同様であるが、 P_2O_5 の量が既往の研究²⁾で用いたものより多

*1 岐阜大学 工学研究科 社会基盤工学専攻(学生会員)

*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 教授 博(工)(正会員)

表－1 配合表

	配合	呼び 強度	W/C (%)	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)						A/P (%)
						水	セメント	焼却灰	細骨材	粗骨材	混和剤*	
汎 用	N24-0	24	63.0	63.0	48.5	163	259	－	892	988	0.648	0
	N24-5B ₂ , N24-5A ₃		65.6	62.3	48.4	166	253	13	881	980	0.665	5
	N24-10A ₂ , N24-10A ₃		67.7	60.8	48.1	168	248	28	869	978	0.690	10
高 流 動	H40-0	40	49.1	49.1	53.8	185	377	－	910	810	9.425	0
	H40-5B ₂		50.4	47.9	53.0	185	367	19	889	818	9.650	5
	H40-10A ₂		54.5	49.0	51.4	195	358	40	842	828	11.940	10
	H60-0	60	31.9	31.9	49.5	175	549	－	780	826	6.863	0
	H60-5B ₂		35.6	33.8	50.1	175	492	26	798	826	9.842	5
	H60-10A ₂		39.5	35.6	47.1	190	481	53	723	846	12.816	10

*汎用コンクリートに対してはリグニン系 AE 減水剤，高流動コンクリートに対してはポリカルボン酸系 SP 剤を使用

表－2 化学成分

	化学成分 (%)								重金属 (ppm)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl ⁻	Pb	Cd	Hg	As	Se	T-Cr	
焼却灰 A ₂	36.8	20.2	8.7	1.11	0.50	1.75	13.7	0	88	3.2	ND	7.5	0.37	63	
焼却灰 B ₂	34.2	21.1	7.2	0.27	0.65	1.83	23.5	0	210	7.4	ND	4.9	0.03	350	
焼却灰 A ₃	28.9	17.1	7.0	1.5	0.69	2.40	31.4	0	110	7.3	ND	29	5.3	210	

くなっている。

(2) 曝露条件

供試体を曝露した平野部，及び，山間部の 2015 年 11 月から 2016 年 3 月までの気象条件を表－3 及び表－4 に示す⁴⁾。山間部の方が秋から春にかけての最高気温は 2～5℃程度，最低気温は 4～8℃程度低くなっている。また最高気温が 0℃以下の日が平野部ではほとんどないのに対し，山間部では 1，2 月共に半分近く 0℃以上に達せず，山間部では 1, 2 月共にほとんどの日で降雪があった。曝露の様子を図－2 及び図－3 に示す。山間部の円柱供試体の一部は地中に埋設しているものもあった。また図－4 に示すように W/C が高い汎用コンクリートにおいては藻のような物が供試体に付着していた。

表－3 平野部及び山間部の最高・最低気温⁴⁾

年月	山間部		平野部	
	最高気温 (℃)	最低気温 (℃)	最高気温 (℃)	最低気温 (℃)
2015 年 11 月	22.2	0.4	24.8	3.9
2015 年 12 月	19.6	-4.4	22.1	-0.2
2016 年 1 月	11.2	-9.1	15.0	-5.0
2016 年 2 月	13.1	-10.3	18.2	-2.3
2016 年 3 月	20.0	-5.3	22.6	-0.8

表－4 平野部及び山間部の最高気温 0℃以下の日数⁴⁾と雪日数⁴⁾

年月	山間部		平野部	
	最高気温 0℃ 以下の日数 (日)	雪日数 (日)	最高気温 0℃ 以下の日数 (日)	雪日数 (日)
2015 年 11 月	0	2	0	0
2015 年 12 月	2	15	0	0
2016 年 1 月	12	28	1	7
2016 年 2 月	13	23	0	5
2016 年 3 月	2	12	0	2



図－2 平野部自然曝露供試体



図-3 山間部自然曝露供試体



図-4 汎用コンクリートの様子

(3) 圧縮強度試験

平野部及び山間部で自然曝露されていた供試体の長期的な強度を測定するため圧縮強度試験を行った。供試体は、打設2日後に脱型し、21日間標準養生後、材齢28日から自然暴露を開始した。平野部、山間部共に配合9種類に対し3本ずつ圧縮試験を行い平均値を取った。

(4) 耐凍害性試験

長期曝露された供試体の耐凍害性について検討するためにJIS A1127に従い一次たわみ共鳴振動数を測定した。またJISA1148に従い相対動弾性係数を算出した。

(5) 中性化深さ測定

圧縮強度試験終了時に圧縮試験機において供試体を割裂し、フェノールフタレイン溶液を割裂面に噴霧した。コンクリート表面部から赤紫色に呈色した部分までの距離をノギスを用いて計測した。計測箇所は打設面から5, 10, 15cmの箇所を上下計6箇所測定し平均値を算出した。

2.2 現在の焼却灰を用いた供試体の各種耐久性試験

上記の曝露供試体の作製から17年が経過しているため、現在の焼却灰の状態を確認するため、焼却灰A₂と同一の処理施設から再び焼却灰を採取し(以下A₃とする)、コンクリート混和材として用いて供試体を作製した。それらの供試体に対し各種耐久性試験を行う。

(1) 供試体概要

配合は表-1の汎用コンクリートと同じ3配合で、セメントに対する下水汚泥焼却灰の置換率は0, 5, 10%の

3種類とした。供試体の大きさは耐凍害性試験及び塩分量測定に用いるものは10×10×40 (cm)の角柱供試体で、これら全て配合に対し、耐凍害性試験用に空気量を4.5% (L) と6% (U) の2種類用意し各2本ずつ、塩分浸透試験用に各3本ずつ作製した。空気量に関しては2.1(1)同様にAE剤を用いて配合毎に調整を行った。圧縮強度試験に用いるものはφ10×20 (cm)の円柱供試体で圧縮強度試験用に各配合に材齢3種類を3本ずつ、作製した。供試体は打設後1日で脱型し、20℃の養生室内で塩分浸透試験用に用いる供試体は7日間、圧縮強度試験に用いる供試体は28日間湿布養生し、耐凍害性試験に用いる供試体は28日間水中養生した。作製した供試体を図-5に示す。この供試体は7日間自然曝露した後(晴天時)に撮影したものだが、下水汚泥焼却灰自体が赤褐色をしているので置換率が増加するほど供試体の色が赤くなっている。



図-5 供試体の色の変化
(左から置換率0%, 5%, 10%)

コンクリートに用いた焼却灰A₃の化学成分を表-2に示す。コンクリートの凝結や強度表現に悪影響を及ぼすP₂O₅含有量がA₂, B₂より大幅に増加していた。これは近年、下水汚泥を高度処理する事が可能になり、リン濃度が増大したことが原因だと考えられる⁵⁾。また重金属ではAs, Seの含有量がA₂, B₂と比較するとA₃が多いという結果になった。

(2) 圧縮強度試験

湿布養生終了後、図-3と同様の環境で屋外にて2016年11月1日～2016年11月28日の期間において自然曝露し、曝露期間7日、28日経過した供試体の圧縮強度を測定した。

(3) 耐凍害性試験

JISA1148のA法に従って、30サイクル毎に質量と一次たわみ共鳴振動数を計測した。

(4) 塩化物イオン浸透試験

湿布養生終了後、温度20℃の養生室でNaCl10%水溶液に供試体を2ヵ月間浸漬し、コンクリート内部の塩化物イオン量を計測するためドリル粉を採取した。削孔箇

所は端部から 100mm 間隔で 3 ヲ所とし深さは深さ 10mm 毎に 30mm まで削孔しコンクリート粉を採取した後、蛍光 X 線分析装置を用いて解析し、全塩分量を計測した⁶⁾。

3. 試験結果と考察

3.1 下水汚泥焼却灰を用いたコンクリートの長期物性 (1) 圧縮強度

圧縮強度を表-5 に示す。初期値とは自然曝露開始時（材齢 28 日）における圧縮強度である。汎用コンクリートにおいては下水汚泥焼却灰の置換率に関係なく同程度の圧縮強度が得られたが、高流動コンクリートにおいては下水汚泥焼却灰の置換率が増加するほど、W/C が増加し圧縮強度が低くなるという結果になった。下水汚泥焼却灰の水和物は汎用的な強度は発現出来るが、高強度は発現が出来ない可能性がある。ただし、2.1 で述べたように、本研究では所定のスランプ、スランプフローが得られるように配合を調整しているため、同じ呼び強度でも W/C や W/P が異なる。このことが強度にも影響を与えていることにも留意する必要がある。

また曝露期間 204 ヶ月における平野部及び山間部の供試体の圧縮強度は初期値と比較してもほとんどの配合で増加していた。これは焼却灰がフライアッシュに近い非結晶構造を示すことにより焼却灰中の SiO₂ がポゾラン反応を示し、強度が増加したものと考えられる。

表-5 圧縮強度試験結果

配合	圧縮強度 (N/mm ²)				
	初期値	平野部		山間部	
		曝露期間 (月)			
		4	204	4	204
H40-0	43.5	54.3	58.0	51.3	57.3
H40-5B ₂	44.7	55.4	56.2	53	55.9
H40-10A ₂	43.5	53.6	55.9	51.8	43.0
H60-0	72.7	81.3	75.1	79.7	105.9
H60-5B ₂	66.7	72.1	66.5	70.1	88.7
H60-10A ₂	64.1	62	66.0	58.3	64.5
N24-0	31.5	40.2	41.8	35.8	42.9
N24-5B ₂	32.5	41.3	40.6	38.4	41.4
N24-10A ₂	34.3	43	41.0	42.6	41.4

(2) 耐凍害性試験

耐凍害性試験の結果を表-6 に示す。既往の研究⁷⁾では一般的なコンクリートでは空気量が異なる供試体においても相対動弾性係数は経過年数に伴い増加し続け、長期暴露における相対動弾性係数にほとんど差が見られな

いことが明らかになっている。焼却灰を混入した本研究においても空気量の異なる供試体においても相対動弾性係数の差が確認されなかった。また平野部では置換率が増加すると相対動弾性係数は低下し、山間部では増加するものが多かった。

今回の測定は野外曝露環境下における相対動弾性係数の測定であったため、平野部および山間部での野外曝露年数における ASTM 相当サイクル数を算出した⁸⁾。ただし、そこには岐阜市のデータの記載がなかったため、近隣都市の名古屋市のデータを代わりに用いた。平野部の ASTM 相当サイクル数は 2 (回/年)、山間部の ASTM 相当サイクル数は 29 (回/年) となっており 17 年間野外曝露されていたので ASTM 相当サイクル数は平野部では 34 回、山間部では 493 回となる。空気量が 3.5% であっても、この期間経過後の相対動弾性係数は約 90% あることから、十分な耐凍害性を有していると言える。

表-6 曝露材齢 204 か月における相対動弾性係数

空気量 4.5%	相対動弾性係数 (%)		空気量 3.5%	相対動弾性係数 (%)	
	平野部	山間部		平野部	山間部
H40-0	100.8	89.6	H40-0	98.2	91.7
H40-5B ₂	96.6	95.1	H40-5B ₂	92.4	91.6
H40-10A ₂	87.3	95.1	H40-10A ₂	90.7	93.4
H60-0	102.8	104.8	H60-0	98.8	104.1
H60-5B ₂	97.6	107.4	H60-5B ₂	93.1	107.6
H60-10A ₂	92.8	104.6	H60-10A ₂	85.0	109.1
N24-0	105.5	109.2	N24-0	105.4	109.3
N24-5B ₂	103.9	106.8	N24-5B ₂	107.7	103.2
N24-10A ₂	106.0	104.6	N24-10A ₂	107.6	105.3

(3) 中性化深さ測定

中性化深さ測定の結果を表-7 に示す。割裂面のほとんどの部分で呈色反応を示しており、中性化は見られなかった。また山間部の供試体の方が平野部と比較して中性化が進行していなかった理由として、山間部は寒冷地であり積雪によってコンクリートの含水率が高い状態が長期にわたって継続していたのと、供試体の一部が地中に埋まっており中性化が進行しなかった可能性が考えられる。

またコンクリート標準示方書の中性化予測式⁹⁾(1)を用いることによって W/C から中性化速度係数 a_k を算出した。

$$a_k = -3.57 + 9.0W/C(1)$$

(1)式を用いて算出した結果と実験から求めた a_k を比較したものを表-8 に示す。(1)式においては W/C40% 以下では中性化が進行しないことになるが、今回の研究にお

いても山間部のH40の供試体において中性化は進行していなかった。また他の供試体においても予測値より中性化速度係数が低い値となり、ポズラン反応を有する下水汚泥焼却灰を用いたコンクリートにおいて中性化が進行しやすいということはなかった。

表-7 中性化深さ測定結果

配合	中性化深さ (mm)	
	平野部	山間部
H40-0	0.80	0
H40-5B ₂	2.04	0
H40-10A ₂	0.90	0
H60-0	0	0
H60-5B ₂	0	0
H60-10A ₂	0	0
N24-0	2.12	0
N24-5B ₂	2.01	1.40
N24-10A ₂	2.26	2.73

表-8 中性化速度係数

配合	中性化速度係数 (mm/√年)		
	平野部	山間部	予測
H40-0	0.194	0.00	0.849
H40-5B ₂	0.49	0.00	0.966
H40-10A ₂	0.22	0.00	1.326
H60-0	0.00	0.00	-0.699
H60-5B ₂	0.00	0.00	-0.528
H60-10A ₂	0.00	0.00	-0.366
N24-0	0.51	0.00	2.1
N24-5B ₂	0.49	0.34	2.334
N24-10A ₂	0.55	0.66	2.514

3.2 現在の焼却灰を用いた供試体の各種耐久性試験

(1) 圧縮強度

圧縮強度試験の結果を表-9に示す。表-1に示した配合表の呼び強度よりも圧縮強度は若干低くなったが、曝露28日では呼び強度と同等の結果となった。3.1(1)と同様に置換率の増加による圧縮強度の低下は認められず、また焼却灰を用いた配合は曝露期間の経過に伴う圧縮強度の増加が大きい傾向が見られる。今後、更に長期材齢での強度も検討していく予定である。

表-9 圧縮強度試験結果

配合	圧縮強度 (N/mm ²)	
	曝露7日	曝露28日
N24-0%	20.3	26.1
N24-5%	18.2	26.4
N24-10%	19.0	26.7

(2) 耐凍害性

耐凍害性試験の結果を図-6に示す。300サイクル時点で相対動弾性係数60%を超えていた供試体はL-置換率5%、U-置換率5%、U-置換率10%の3種類となった。空気量で比較すると空気量の多いUの方が凍結融解抵抗性に優れていた。また下水汚泥焼却灰の置換率で比較すると置換していない供試体よりも置換した供試体の方が凍結融解抵抗性に優れている傾向があった。表-9で示すように自然曝露7日における強度発現が十分でなかったため、耐凍害性が非常に悪いことを予期されたが、懸念されたよりは良い耐凍害性を有する結果となった。

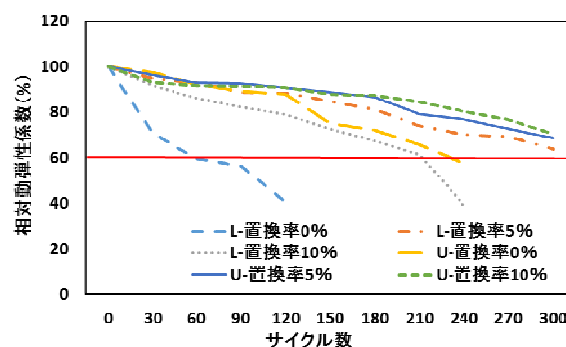


図-6 耐凍害性試験結果

(3) 塩分量イオン浸透試験

塩化物イオン量測定結果を表-10に示す。置換率0%の供試体より置換率5%の供試体と置換率10%の供試体は塩化物イオン量が多くなり置換率5%と10%の塩化物イオン量は同等の塩化物イオン量となった。既往の研究¹⁰⁾ではポズラン反応によって塩分浸透抵抗性を含む化学抵抗性が向上することが明らかになっているが、今回の

表-10 塩化物イオン浸透試験結果

	削孔深さ (mm)		
	10	20	30
置換率 0%	12.057	5.439	2.190
置換率 5%	15.409	7.586	3.402
置換率 10%	17.079	7.206	3.483

研究においては塩化物イオン量が増加してしまった。これはどの供試体においても W/C が 60%を超えておりコンクリートが粗な構造になっていたためだと考えられる。

4. 結論

過去に作製された焼却灰を用いたコンクリートの長期的な強度について検討するため圧縮強度試験・耐凍害性試験・中性化深さ測定を行った。また今年度採取された焼却灰をコンクリート用混和材として混入しコンクリートの各種耐久性試験を行いコンクリート混和材としての使用の可能性を検討し、以下のような結果を得た。

- (1) 過去に作製された下水汚泥焼却灰を用いたコンクリートにおいて各種耐久性試験により長期的な強度が確認された。
- (2) 今年度採取した焼却灰は過去の焼却灰と比較し、 P_2O_5 含有量が増加していた。
- (3) 耐凍害性試験では下水汚泥焼却灰で置換したコンクリートの方が凍結融解抵抗性に優れている傾向があった。
- (4) 塩化物イオン浸透試験では置換率が増加するほど塩化物イオン量が増加し、下水汚泥焼却灰で置換したことによる塩分浸透抵抗性は見られなかった。

謝辞

本研究を実施するにあたり、岐阜大学名誉教授小柳治先生、岐阜県の野崎眞司氏から供試体の使用についてご快諾を頂きました。また、大阪広域生コンクリート協同組合（元（株）中研コンサルタント）野尻拓男氏からは17年前データを発掘するのに大変なご苦勞をおかけいたしました。岐阜市からは下水汚泥焼却灰のご提供を頂きました。高山市からは長期にわたり曝露場所のご提供を頂きました。ここに記して皆様に謝意を表します。

参考文献

- 1) 公益社団法人 日本下水道下水道協会
<http://www.jswa.jp/rate/>
- 2) 野尻拓男, 小柳治, 野崎眞司, 徳田進一郎: 下水汚泥焼却灰のコンクリートへの有効活用について, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.43-48, 2000.7
- 3) 鶴田浩章・木場宏: 下水汚泥焼却灰の品質変動とモルタルの凝結及び強度への影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1897-1902, 2009.7
- 4) 気象庁ホームページ
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/info/coment.html>
- 5) 中村亮太: 下水汚泥焼却灰からのリン回収技術の実用化について, 下水道協会誌, Vol.50, No.607, pp.25-28, 2013.5
- 6) 金田尚志, 石川幸宏, 魚本健人, ポータブル型蛍光 X 線分析装置を用いたコンクリートの分析, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1793-1798, 2006.7
- 7) 加藤利菜, 鮎田耕一, 猪狩平三郎: 20 年間寒冷地の海洋環境下に暴露したコンクリートと凍結融解試験を行ったコンクリートの耐凍害性の比較について, セメント・コンクリート論文集, Vol.63, No.1, pp.466-471, 2009
- 8) 長谷川拓哉, 千歩修, 福山智子: コンクリートの凍結劣化を対象とした劣化予測手法および気象データの違いによる耐用年数の比較, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.859-864, 2015.7
- 9) 土木学会編: 2012 年制定コンクリート標準示方書[設計編], pp.147, 2013.3
- 10) 日本フライアッシュ協会 フライアッシュの化学・物理的性質
<http://www.japan-flyash.com/fchemipphysi.html>