下水汚泥焼却灰を用いたコンクリートの凝結性状の 改善に関する一検討[†]

鶴田 浩章* 竹本 裕樹** 上田 尚史*

A Study on Improving of Setting Properties in Concrete Used Sewage Sludge Incinerated Ash

by

Hiroaki TSURUTA*, Yuki TAKEMOTO** and Naoshi UEDA*

In recent years it tends to increase in the percentage of sewered population and increase in the generation rate of the sewage sludge every year. And weight reduction and effective utilization of sewage sludge and sewage sludge incinerated ash are desired more. In this research, authors aimed to use sewage sludge incinerated ash as admixture for concrete and make the influence to concrete clear. Sewage sludge incinerated ash has high ratio of restraining water, bad dispersibility by powder properties and the phosphorus included in the incinerated ash, make the setting of cement delayed. Therefore improvement of setting properties was measured by giving the condition to suggest reduction of setting time, and it was examined what kind of influence came to properties of setting and strength in mortar or concrete. To improve setting properties, authors used sewage sludge incinerated ash that was controlled the grading, limestone fine powder and accelerator, and to investigate the reason of delay on setting, the initial hydration temperature was measured. As a result, it was found that the use of limestone fine powder or accelerator enabled to reduce the setting time. This is because the promotion of initial hydration of alite by limestone fine powder or accelerator can reduce the setting time. So, authors found out that setting properties were influenced by C-S-H which makes promote initial hydration of alite. It's possible to use many sewage sludge incinerated ash as concrete materials by using these improvement methods, and we can think the utility value as the concrete material may generate.

Key words:

Concrete, Sewage sludge incinerated ash, Setting time, limestone fine powder, Calcium silicate hydrates, Accelerator

1 緒 言

近年の下水道普及率の増加に伴い、下水汚泥の発生量は年々増加傾向にあり¹⁾、最終処分場の残余容量の減少や処分場不足、焼却設備の老朽化への対応による処分費用の高騰等が懸念されている。それにともない、最終処分場への負担軽減や環境への配慮を前提とした廃棄物の発生抑制、有効利用、再資源化への取り組みが求められている。特に、下水汚泥溶融スラグは下水汚泥焼却灰よりも安全面や取扱いに関して優位性があるが、施設の維持管理の費用の増大や下水汚泥溶融スラグのリサイクル率が向上していないことから、下水汚泥焼却灰を軸に処理を行っている施設も多く、下水汚泥の発生量の中でも下水汚泥焼却灰の量が比較的多いという現状がある。また、下水汚泥焼却灰にはコンクリートの結合材として有効なSiO₂、CaOが含まれており²⁾、強度増加をもたらすこと³⁾も確認されており、コンクリート材料としても注目されている。一方、下水汚泥焼却灰に含まれるP₂O₅や焼却灰

の置換量が多くなることで、コンクリートの凝結性状や流動性は悪影響を受け³⁾、置換量を多くすることが難しく、下水汚泥焼却灰が使用しにくい状況を作り出している。

さらに、凝結遅延についてはP₂O₅の量の多少だけでは決まらないこともわかってきた。さらに、凝結に関しては石灰石微粉末を細骨材として置換することでコンクリートの流動性が増加し、凝結時間が短縮したとする報告⁴⁾やエーライトの水和反応は水和発熱曲線のパターンより初期水和、誘導期、加速期、減速期、定常期の5段階に分類され、この誘導期の終わりにセメントの凝結の始発が起きるとする報告⁵⁾がある。

そこで、本研究では、下水汚泥焼却灰をコンクリート用混和材として利用する場合に、凝結時間の短縮が可能となる方法で凝結性状の改善を計り、凝結性状、強度性状にどのような影響が及ぶのかを調べた。凝結性状を改善するため、粒度調整した焼却灰や石灰石微粉末、早強剤による改善検討を行い、凝結遅延の究明を行うため初

[†] 原稿受理 平成28年4月10日 Received Apr.10, 2016 ©2016 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 関西大学 環境都市工学部 〒564-8680 吹田市山手町
Faculty of Urban System, Kansai University, Yamate-cho, Suita, 564-8680.

** 関西大学 大学院理工学研究科 〒564-8680 吹田市山手町
Graduate School of Science and Engineering, Kansai University, Yamate-cho, Suita, 564-8680.

Table 1 Material used.

Materials	Kinds	Density (g/cm ³)
Cement (C)	Ordinary Portland Cement	3.15
Water (W)	Tapped water	1.00
Fine aggregate (S)	River sand	2.57
Sewage sludge incinerated ash (HA)	Polymer-type ash	2.66
Sewage sludge incinerated ash (HAS)	Polymer-type ash	2.67
Limestone fine powder(LF)		2.71
Coarse aggregate(G)	Crushed stone	2.68
AE water reducing agent (Ad1)	Lignin sulphonic acid type	1.25
Super plasticizer(Ad2)	Polycarboxylic acid base	1.07
Accelerator(HE)	C-S-H type	1.20

Table 2 Physical properties of sewage sludge incinerated ash.

Physical properties	HA	HAS	C
Density in oven-dry condition (g/cm ³)	2.66	2.67	3.15
Specific surface area(m ² /g)	12.1	10.5	0.34
Ratio of restraining water β_p	1.61	1.64	1.16
Porosity ε	0.67	0.66	0.47
Ratio of unfree water β_p/β_e	0.79	0.84	1.31

期水和温度の測定を行った。なお、検討においては、効率的に焼却灰を使用するため、まずモルタルを用いた検討を行い、その結果を参考にコンクリートにおける検討で実際の適用状況を把握することにした。

2 焼却灰によるモルタルの凝結への影響の検討

2・1 使用材料および配合

(1) 使用材料

Table 1 に使用材料を、Table 2 に下水汚泥焼却灰の物性値をセメントと比較して示す。下水汚泥焼却灰（以下 HA と略す）は高分子系焼却灰の飛灰であり、水分を含んだ状態で採取した。焼却灰を混和材として利用するために、105℃一定の乾燥炉で 24 時間以上乾燥させ絶乾状態にした。HA は概ね 300 μ m 以下の全量通過する程度の粒度である。凝結改善検討として、改善検討①：粒度調整による改善、改善検討②：石灰石微粉末による改善、改善検討③：早強剤による改善の 3 パターンを行った。改善検討①は HA と 90 μ m のふるいを通過させたもの（以下、HAS と略す）を混和材として使用し、改善検討②は HA に対し石灰石微粉末を置換したもの（以下、HA-LF と略す）を使用し、改善検討③は HA に対し C-S-H 系コンクリート早強剤（C-S-H のナノ粒子を主成分とする液体）を添加して使用した（以下、HA-HE と略す）。なお、Table 2 中の拘束水比、空隙率、保有水率は参考文献 6) および 7) を参考に以下のようにして求めたものである。

まず、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」のモルタルフロー試験を準用し、振動を与えないペーストの広が

Table 3 Mixture proportions of mortar.

	W/C (%)	Unit content (kg/m ³)							
		W	C	S	HA/HAS	LF	Ad1	Ad2	HE
N	50	268	536	1315	0	0	1.34	0	0
N-LF	50	268	536	1265	0	54	1.34	0	0
N-HE	50	268	536	1315	0	0	1.34	0	10.72
HA10	50	308	616	1033	119	0	0	5.54	0
HAS10	50	308	616	1033	119	0	0	5.54	0
HA10-LF	50	308	616	980	113	62	0	5.54	0
HA10-HE	50	308	616	1033	119	0	0	5.54	12.32
HA20	50	360	720	743	192	0	0	6.48	0
HAS20	50	360	720	743	193	0	0	6.48	0
HA20-LF	50	360	720	688	178	72	0	6.48	0
HA20-HE	50	360	720	743	192	0	0	6.48	14.40

りをフロー値として、2 方向で測定した値を平均して以下の式(1)で相対フロー面積比を算出した。

$$\Gamma_p = \frac{\pi \left(\frac{F_p}{2} \right)^2 - \pi \left(\frac{F_0}{2} \right)^2}{\pi \left(\frac{F_0}{2} \right)^2} = \left(\frac{F_p}{F_0} \right)^2 - 1 \quad (1)$$

ここで、 Γ_p ：相対フロー面積比、 F_p ：ペーストのフロー値、 F_0 ：フローコーンの底面の直径 (mm) である。全水量からフロー値の増加に関与しない水量、すなわち、粉体に拘束されると仮定した水量を差し引いたものをペースト中の自由水量と定義すると、自由水粉体容積比は相対フロー面積比に比例することから、相対フロー面積比が 0 となる水粉体容積比を拘束水比 β_p とした⁶⁾。

次に、 ϕ 5.9 cm、高さ 7.4 cm の円筒容器に高さ 10 cm からロートを用いて静かに粉体を充填させ、1 cm の高さから容器を繰り返して落下させた。そして、容器中にそれ以上充填できなくなった状態を粉体の基本充填と考え、その時の質量と容積から空隙率 ε を求めた。さらに、基本充填時の空隙率から $\varepsilon/(1-\varepsilon)$ で算出される空隙比 β_e と実験により求められた拘束水比との比率を保有水率 β_p/β_e ⁷⁾ とした。保有水率の値より、HA はセメントの半分以上の保有水率を有しており、セメントだけの場合と比較して、下水汚泥焼却灰が加わることで 1.6 倍程度の保有水率となることが分かる。また、この下水汚泥焼却灰は拘束水比がセメントよりも大きいことも特徴である。なお、使用した下水汚泥焼却灰が含有するリンの量については、底質調査方法の規定を参考に硝酸一過塩素酸分解法により全リン量 (P 換算) を、肥料等試験法の規定を参考にバナドモリブデン酸アンモニウム吸光光度法により水溶性リン酸量 (P_2O_5 換算) を分析した。その結果、全リン量は 9.8% で水溶性リン酸量は 0.01% であった。

(2) モルタルの配合

Table 3 にモルタルの配合を示す。HA は細骨材に対して内割体積置換し、置換率は 0%(以下 N と略称)、10%、20% とした。HA10、HA20 に関連する配合は W/C=50%、高性能 AE 減水剤の多量使用による凝結の遅延を防ぐために、

高性能 AE 減水剤の添加率を標準使用量であるセメント質量に対して 0.9%に固定し、フロー 190 ± 5 mm を目標に配合を決定した。改善検討②では石灰石微粉末をセメントに対し外割体積置換で 10%，改善検討③では早強剤をセメント質量あたり 2%の添加で行った。また、各改善検討の配合において N, HA10, HA20 の配合と同様の条件に加え、それぞれの改善方法による凝結への影響を見るため、N, HA10, HA20 の配合の単位水量に固定し配合を決定した。

2・2 実験概要

(1) 練混ぜ

モルタルはソイルミキサを使用し作製した。練り鉢およびパドルを本体に取り付け、練り鉢に水とセメントを投入し低速で 30 秒間練り混ぜ停止させた。その後、細骨材および HA を投入し、低速で 30 秒、高速に切り替えて 30 秒練り混ぜて 90 秒間休止した。休止時間中にパドルに付着したモルタルを掻き落とした。休止時間が終わったら、高速で始動させ 60 秒間練り混ぜた。練混ぜ時間は休止時間も含めて 240 秒である。練混ぜが終わったら、練り鉢をソイルミキサから取り外し、練混ぜ用さじで 10 回かき混ぜた。

(2) モルタルの凝結試験

JIS A 1147「コンクリートの凝結試験方法」に準じて行った。試験で使用するモルタルは、(1)で練り混ぜたモルタル試料として、始発時間と終結時間を測定した。

2・3 実験結果および考察

今回使用したモルタルのフローは 185~191 mmであった。

モルタルの凝結試験結果を Fig. 1 に示す。HA と HAS を比較するとほぼ同程度の時間に終結した。これは HA そのものが飛灰であり、それを $90 \mu\text{m}$ ふるいでふるったとしても粒子そのものの細かさも物性も HAS と同程度であることから、このようになったと考えられ、この程度の粒度調整だけでは凝結改善は難しいと考えられる。改善検討②並びに改善検討③は凝結が短縮し N よりも早く終結した。改善検討②においては、参考文献 8)を参考にした Fig. 2 のように、石灰石微粉末を用いることでそれ自身や C3A の反応が促進され水酸化カルシウムの生成量が多くなり、C-S-H が多く生成される⁹⁾ことで、この C-S-H とセメント粒子の周りの水和生成物が核生成を起こし、セメント粒子の周りの水和生成物層が薄くなって、イオンの拡散が促進されセメント粒子の初期水和反応が促進され⁸⁾、凝結が短縮したと考えられる。改善検討③では、早強剤そのものが C-S-H のナノ粒子を主成分としたものであるから、改善検討②と同様の現象が起き、セメント粒子からのイオンの拡散を阻害するセメント粒子表面の水和物層が薄くなり凝結は短縮したと考えられる。しかし、ここで生じている現象のメカニズムが検証されたわけではないことから、このメカニズムの検証を今後の課題としたい。

これらのことから、セメント粒子の初期水和を促進させる C-S-H により凝結性状は左右され、今回の改善検討

Fig. 1 Results of Test for Setting Time of Mortar.

Fig. 2 Image Chart of the Difference on Hydration between Case of Plain and using Limestone powder.⁸⁾

を用いることで、今まで多く置換することができなかった HA を多く置換することができ、コンクリート材料としての利用価値が出てくるのではないかと考えられる。

3 焼却灰によるコンクリートの凝結への影響の検討

3・1 使用材料および配合

(1) 使用材料

使用材料はモルタルの検討で使用したものを使用した。使用材料および焼却灰の物性値は 2・1 節と同様である。検討対象はベースとなる N, HA, 焼却灰モルタルの検討で凝結時間の短縮に成功した改善検討②と改善検討③の計 4 パターンで行った。

(2) コンクリートの配合

Table 4 に配合を示す。HA の置換率および混和剤の添加率はモルタルの検討と同条件で行い、N 以外の細骨材率を 42.5%と一定にし、スランプ 8 ± 1 cm, 空気量 $5 \pm 0.5\%$ を目標として試験練りを行い配合を決定した。また、各改善検討の配合においてもモルタルの検討と同条件で行い、配合を決定した。

3・2 実験概要

(1) 練混ぜ

練混ぜ過程で HA が分散し水を行きわたりやすくするために、ミキサに細骨材と HA とセメントを投入し 30 秒間空練りした後、ミキサを止めてから水を投入し、そして 30 秒間練った後、ミキサを止めミキサの側面に付着しているセメントや焼却灰を掻き落とし、粗骨材を投入して 2 分間練り混ぜた。

Table 4 Mixture proportions of Concrete.

	W/C s/a		Unit content (kg/m ³)								
	(%)	(%)	W	C	S	G	HA	LF	Ad1	Ad2	HE
N	50	44	167	334	766	1016	0	0	0.835	0	0
N-LF	50	44	167	334	752	997	0	33	0.835	0	0
N-HE	50	44	167	334	766	1016	0	0	0.835	0	6.68
HA10	50	42.5	180	360	645	1010	74	0	0	3.24	0
HA10-LF	50	42.5	180	360	632	990	73	36	0	3.24	0
HA10-HE	50	42.5	180	360	645	1010	74	0	0	3.24	7.20
HA20	50	42.5	230	460	502	884	130	0	0	4.14	0
HA20-LF	50	42.5	230	460	487	858	126	46	0	4.14	0
HA20-HE	50	42.5	230	460	502	884	130	0	0	4.14	9.20

Fig. 3 Results of Test for Setting time of Cement on Concrete.

Fig. 4 Results of Compressive Strength Test.

Fig.5 Simple Heat Insulating Device.

(2) コンクリートの凝結試験

JIS A 1147「コンクリートの凝結試験方法」に準じて行った。試験では、練り混ぜたコンクリート試料を JIS Z 88 01-1 に規定される 5 mm の網ふるいでウェットスクリーニングを行い得たモルタル試料を用い、始発時間と終結時間を測定した。

(3) 強度試験

JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じて行い、供試体作製は JIS A 1132「コンクリート強度試験用供試体の作り方」に準じて行った。養生方法は 20℃ の水中養生とし、材齢は 7, 28 日とした。

3・3 実験結果および考察

今回使用したコンクリートのスランプは、6.5～8.5cm、空気量は 4.2～5.4% であった。

(1) コンクリートの凝結試験結果

コンクリートの凝結試験結果を Fig. 3 に示す。モルタルでの検討と同様に石灰石微粉末や早強剤を用いることによって凝結は短縮した。これはモルタルでの検討と同様のことが考えられる。また、モルタルでの検討と比較すると、コンクリートの凝結が少し遅延した。これはコンクリートとモルタルの配合においてセメントの単位量が変わっても、石灰石微粉末や早強剤のセメント質量に対する割合は変わらないが、セメントの単位量が変化したことや細骨材量の変化に伴い下水汚泥焼却灰の単位量が変化したことから、凝結に差が生じたと考えられる。今回の配合においては、モルタルはフロー 195 mm±5 mm の流動性、コンクリートはスランプ 8±1 cm、空気量 5±0.5% を満たすものを得ることを目標に配合を決定したことから、このような状況になっている。今後は、コンクリートの配合から求めたモルタルの性状についても、検討を行う必要があると考えている。しかし、HA においても凝結が短縮し、N に近付いたことから、石灰石微粉末の置換量や早強剤の添加率を増やすことで N と同等の凝結時間にすることができると考えられる。

(2) 強度試験結果

強度試験結果を Fig. 4 に示す。28 日強度では各凝結改善における悪影響は無く、N と N-LF および N-HE、HA10 と HA10-LF および HA10-HE、HA20 と HA20-LF および HA20-HE のようにそれぞれの凝結改善手法ごとにはほぼ同等の強度を発現することがわかった。このことから、焼却灰コンクリートは石灰石微粉末や早強剤を用いることで、凝結遅延を解消しつつ、従来の強度発現を可能にすることができると考えられる。

4 初期水和温度測定

下水汚泥焼却灰による凝結遅延のメカニズムを把握することを目的にした検討を行った。ここでは凝結遅延期水和温度を測定した。測定対象は、N、HA10、HA20、の解明のために焼却灰モルタルおよびコンクリートの初期水和温度を測定した。測定対象は、N、HA10、HA20、改善検討②、改善検討③のモルタルおよびコンクリートの配合におけるモルタル部分を用いて行った。

Fig. 6 Result of Initial Hydration Temperature on Mortar.

Fig. 7 Result of Initial Hydration Temperature on Concrete.

Table 6 Relationships between Maximum Increment of Temperature and Final Setting Time.

	Mortar		Concrete	
	Time of max. increment(h)	Final set (h)	Time of max. increment(h)	Final set (h)
N	8.0	8.1	9.0	7.9
HA10	9.0	9.6	10.0	9.1
HA20	10.0	10.1	10.0	9.3
N-LF	7.0	7.3	9.0	6.9
HA10-LF	8.0	7.7	9.0	8.2
HA20-LF	7.0	7.9	8.0	8.2
N-HE	7.0	6.6	9.0	7.0
HA10-HE	7.0	6.9	9.0	7.8
HA20-HE	8.0	7.3	8.0	8.4

4・1 実験概要

初期水和温度測定は中村らの研究¹⁰⁾で使用された簡易断熱箱による測定方法を参考に Fig. 5 のような簡易断熱装置を用いた。縦 25cm×横 25cm×高さ 25cm のウレタンフォーム製の簡易断熱箱を使用することにより放熱をできるだけ遮断し、簡易断熱箱の中心にΦ5cm×10cm のポリエチレン袋に詰めたモルタルを設置した。参考文献¹⁰⁾ではペーストを用いて実験を行っているが、本検討では焼却灰を細骨材の体積内割置換していることからモルタルを用いて実験を行った。温度の測定は試験体の中心に熱電対を埋め込み、データロガーにて 5 分間隔で 24 時間断続的に計測を行った。各改善検討の計測時間を統一するため、水投入から 30 分後を温度測定開始時間 0 分として計測を行った。簡易断熱箱では完全な断熱が不可能であるため測定中にも放熱作用が働く。そこで、条件を一定とするために試験は室温 20℃に設定された室内で行った。なお、同一条件での試験を 2 回実施して、再現性を確認した。

4・2 実験結果および考察

モルタルおよびコンクリートのモルタル部分における初期水和温度測定結果を Fig. 6, Fig. 7 に示す。また、測定結果より算出した 1 時間ごとにおける温度変化量の最大値とその時の経過時間を Table 5 に示す。

Table 5 Relationships between Maximum Increment of Temperature and Time.

	Mortar		Concrete	
	Value of max. increment (°C/hour)	Time of max. increment (h)	Value of max. increment (°C/hour)	Time of max. increment (h)
N	2.0	8.0	3.0	9.0
HA10	2.4	9.0	4.4	10.0
HA20	3.1	10.0	5.7	10.0
N-LF	2.4	7.0	3.5	9.0
HA10-LF	3.8	8.0	4.9	9.0
HA20-LF	5.6	7.0	6.4	8.0
N-HE	2.3	7.0	3.5	9.0
HA10-HE	3.6	7.0	4.9	9.0
HA20-HE	4.7	8.0	7.1	8.0

Fig. 6 より、モルタルにおいては N よりも HA の温度上昇量が高く、焼却灰の置換率が増加するにつれて上昇する傾向にあり、HA-LF、HA-HE においても同様の結果であった。Table 5 より、N に比べ HA10、HA20 と温度変化量の最大値になる時間が遅くなることがわかった。

Table 6 には、温度変化量の最大値となる経過時間と凝結の終結時間の関係を示す。Table 6 より最大値の経過時間と凝結の終結時間と照らし合わせると、最大値になる時間が遅れるにつれて凝結が遅延している傾向にあった。また、凝結時間が短縮した HA-LF、HA-HE は HA に比べ最大値になる時間が短縮した。

Fig. 7 よりコンクリートにおいてもモルタルと同様の傾向であった。しかし、Table 5 より温度変化量が最大値を示す時間を比較すると、モルタルにおける検討に比べコンクリートにおける検討の方が最大値となる時間も遅延した。これは、凝結性状と同様にコンクリートとモルタルの配合では HA や石灰石微粉末、早強剤の単位量に違いがあるからだと考えられる。

温度変化量が最大値となる時間の短縮については、凝結と同様に C-S-H による初期水和反応の促進によるものではないかと考えられ、セメント粒子における初期水和反応により最大値となる時間が短縮し、それにより凝結時間も短縮したと考えられるが、検証はできていない。

言いかえれば、凝結の遅延はエーライトの水和の遅れ

Fig.8 Image Chart of Delay on Setting of Cement by Sewage Sludge Incinerated Ash.

が原因であると考えられる。下水汚泥焼却灰の主成分である CaO は水和反応性が高く水と反応することで水和生成物を生成し¹¹⁾、Fig.8 に示すようにセメント粒子の周りに吸着することで水和生成物層が厚くなり、セメント粒子の水和が遅れ、凝結が遅延するのではないかと考えている。しかし、上記は検証できていないことから想定するメカニズム等の検証を今後の課題としたい。

また、これらの要因だけでなく、焼却灰の粉体特性である分散性が悪く、拘束水比が大きいことや、リンによる凝結遅延作用といった複合的な要因により、焼却灰による凝結遅延が起きると考えられる。

5 結 言

以下に本検討の範囲で得られた知見をまとめて示す。

- (1) HAS の凝結時間は HA と同じ程度で、これは両方の物性がほぼ同じであることから今回のようなふるいを用いた粒度調整だけでは凝結改善は難しいと考えられる。
- (2) 石灰石微粉末や早強剤を用いることで、下水汚泥焼却灰を混入した場合のセメントの凝結時間は短縮した。これは石灰石微粉末や早強剤を用いることで、セメントペースト中の C-S-H によりセメントの初期水和が促進されたからだと考えている。しかし、このことを検証するには至らなかった。
- (3) モルタルにおける検討に比べ、コンクリートにおける検討の凝結が遅延した。これはコンクリートとモルタルの配合においてセメントの単位量が増えることで、HA や石灰石微粉末、早強剤の単位量が増えたからだと考えられるが、詳細は検討の余地がある。
- (4) 焼却灰を混入したコンクリートの強度性状では、各凝結改善対策による悪影響は無く、凝結改善対策適用後の 28 日強度ではそれぞれの凝結改善対策適用前とほぼ同等の強度を発現することがわかった。
- (5) 初期水和温度測定より、温度変化量の最大値になる時間が遅延するにつれて凝結時間も遅延する傾向にあった。このことから、セメント粒子におけるエーライトの初期水和が遅延することで温度変化量が最大値になる時間も遅延すると考えている。しかし、このことを検証するには至らなかった。
- (6) 焼却灰によるセメント粒子の初期水和の遅延の要因は、下水汚泥焼却灰の主成分である CaO の水和反応性が高

く、水と反応することで水和生成物を生成し、これがセメント粒子の周りに吸着することで水和生成物の層が厚くなったことによると考えられる。

今回の凝結遅延改善手法を用いることで、下水汚泥焼却灰を混入したコンクリートの凝結性状を改善することができ、今まで少量しか置換することができなかった焼却灰を多く置換することができるのではないかと考えられる。また、下水汚泥焼却灰は凝結性状だけでなく、置換することで粘性が増し、所要のフレッシュ性状を満たすための単位水量が増加する問題点がある。そこで流動性改善としてフライアッシュを用いることで単位水量を減らしつつ、今回の改善手法を併用して凝結性状と流動性の 2 つの問題点を改善でき、コンクリート材料としての利用価値が出てくるのではないかと考えている。

参 考 文 献

- 1) Japan Sewage Works Association, The change in amount of sewage sludge generated and recycle rate, <http://www.jswa.jp/data-room/data.html>
- 2) T. Nojiri, W. Koyanagi, S. Nozaki and S. Tokuda, "Effective use of Incinerated sewage sludge in concrete", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.22, No.2, pp.43-48 (2000).
- 3) H. Tsuruta and H. Kiba, "The quality change and effects of sewage sludge incinerated ash on setting and strength of mortar", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.31, No.1, pp.1897-1902 (2009).
- 4) Y. Kaneko, S. Inoue, A. Yoshino and Y. Kuroda, "Improvement of concrete with molten slag for incinerated ash by limestone fine powder", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.30, No.2, pp.505-510 (2008).
- 5) H. Uchikawa, "The effect of mixed admixture on hydration and structure formation in blended cement(Part 2)", Cement Journal, No.484, pp.81-93 (1987).
- 6) H. Okamura, K. Maekawa and K. Ozawa, "High Performance Concrete", pp.38-43 (1993) GIHODO SHUPPAN Co.Ltd.
- 7) T. Midorikawa and K. Maruyama, "Evaluation of particle shape and size distribution of powder on water retention", Journal of JSCE, No.544/V-32, pp.121-130 (1996).
- 8) H. Imoto, S. Koizumi, K. Hanafusa and Y. Baba, "The initial hardening property and breeding reduction effect of the concrete using C-S-H type accelerator", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.36, No.1, pp.2248-2253 (2014).
- 9) Japan Cement Association, "Report of Committee on Limestone Filler", pp.14-15 (2001).
- 10) Y. Nakamura, S. Fujii, K. Kataoka and E. Tazawa, "The influences of double mixing on initial hydration of cement", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.29, No.1, pp.51-56 (2007).
- 11) K. Kawashima and H. Morita, "Effective use technologies of sewage sludge incinerated ash", Civil Engineering Journal, 42-10, pp.465-469 (2000).