論文　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

鶴田　浩章[*1]・木場　宏[*2]

要旨：本論文は，下水汚泥焼却灰のコンクリート用材料としての適用性についての検討の一環として，焼却灰の品質変動とモルタルの凝結や強度への影響について検討したものである。関西地区の下水処理場より採取した下水汚泥焼却灰の品質変動について１年間にわたって調査を行った結果，変動が著しく大きい物理的性質や化学成分等は認められなかった。また，焼却灰に含まれる P_2O_5 の影響といわれるモルタルの凝結の遅れについては，本研究の範囲では焼却灰中の P_2O_5 量の影響より置換率による影響の方が顕著であった。また，モルタルの強度への悪影響は大きくなかった。

キーワード：下水汚泥焼却灰，品質変動，凝結，五酸化リン，モルタル，強度

1. はじめに

近年，下水道普及率の伸びや下水の高度処理の増加に伴い，下水汚泥の発生量が増加している。これらはセメント原料等に有効利用されたり，減量化のため下水汚泥焼却灰（以下，焼却灰と略す）や溶融スラグへ処理され，それらの一部は建設資材などにリサイクルされているが，自治体によっては埋め立て処分に頼っている所もある。これは，埋め立て処理の経費が安いことによる点が大きい。また，最終処分場の残余容量の減少や，新規処分場の確保難，焼却設備の老朽化への対応により，将来，処分場不足や処分費用の高騰が懸念されており，環境保全の意味からも埋め立てに代わる有効利用が望まれている。特に，溶融スラグが安全面で優位性があるにも係わらず，施設の維持管理費の増大やスラグのリサイクル率が向上していかないことから，焼却灰による処理を中心に行っている地方自治体も多い。また，焼却灰のコンクリート混和材料としての利用については，日本材料学会のハンドブック中にも記載があり [1)]，研究レベルでは多くの検討事例がある。しかし，実際にはリサイクル率が向上しているわけではなく，実用上の問題点を抱えている。

そこで著者らは下水汚泥焼却灰に着目し，コンクリート用材料としての使用の可能性を明確にするための検討を行っている。焼却灰を混入することによるコンクリートへの影響についてはフレッシュ性状や強度，凝結，収縮，耐久性などが考えられ，焼却灰中の微量有害成分が溶出するという環境への悪影響も考えられる。本研究ではその中でも特に焼却灰の月ごとの品質変動の程度を把握し，強度と凝結への影響について明確にすることを目的とした。また，海砂採取禁止あるいは規制強化による関西地区の細骨材問題を考慮して，焼却灰は細骨材の一部を置き換えるものとして使用した場合の検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表－1 に使用材料を示す。焼却灰は平成 18 年 9 月～平成 19 年 8 月に関西地区の下水処理場より月 1 回，含水率 40%程度の湿灰を採取し，乾燥機で絶乾状態にした上で使用した。なお，この焼却灰は高分子系の凝集剤を使用した処理の後，排出されるもので高分子系の焼却灰であるが，高分子系凝集剤がどのような形態で焼却灰中に存在するかは把握できていない。また，本研究で使用した焼却灰は，一般に使用されることの多い電気集塵機で回収される飛灰だけでなく，炉底部に溜まった主灰も含めて採取したものである。

2.2 モルタルの配合

表－2 にモルタルの配合について示す。配合は JSCE-F 505 1999「試験室におけるモルタルの作り方」に基づいて決定し，水セメント比は 0.50，フローは 190±5mm を目標として，焼却灰は細骨材の体積に対し内割置換で混入した。焼却灰は絶乾状態で混入するため，モルタルの

表－1　使用材料

材　料	物　性
水	水道水
セメント	普通ポルトランドセメント 密度：3.15 g/cm^3
砂	川砂，表乾密度：2.59 g/cm^3 吸水率：1.56%, F.M.=2.62
下水汚泥焼却灰	絶乾密度：2.54 g/cm^3, F.M.=0.30 (8 月採取のサンプルの場合)
混和剤	リグニンスルホン酸系 AE 減水剤

*1 関西大学　環境都市工学部都市システム工学科准教授　博士(工学)　(正会員)
*2 生和建設（株）工事第一部 第三課

表－2　示方配合（8 月採取のサンプルの例）

置換率 (%)	(S+Ash) /C	W/C	単位量 (kg/m^3)				
			W	C	S	Ash	AE
0	2.7	0.5	268	536	1449	0	1.7
5	2.2		299	599	1251	65	1.9
10	1.8		330	660	1069	117	2.1
30	0.9		429	857	540	228	2.7
50	0.6		482	963	274	270	3.0

流動性が低下する。よって，まず上記土木学会規準にしたがって，焼却灰置換率 0%において，所要の流動性を満足する(S+Ash)/C を質量比で決定し，焼却灰が各置換率において，どの程度余剰な水量を必要とするかを予備試験で把握し，その余剰な水量も含めて各置換率において単位水量を仮決定した。その後，W/C=0.50 として，(S+Ash)/C を変化させて所要のフローを満足する配合を決定した。なお, AE 減水剤はセメント 100kg 当たり 250ml 使用した。

2.3 試験項目

焼却灰の物性を把握するために物性試験として，密度と粉末度，焼却灰中の P_2O_5 含有量を調べた。なお，密度については JIS R 5201「セメントの密度試験」，粉末度については JIS A 5201「網ふるい試験」にしたがって測定した。また，P_2O_5 含有量についてはセメント協会標準試験方法 CAJS 1-11 に従い，試料を溶融分解した後，JIS R 5202「ポルトランドセメントの化学分析方法」により定量した。

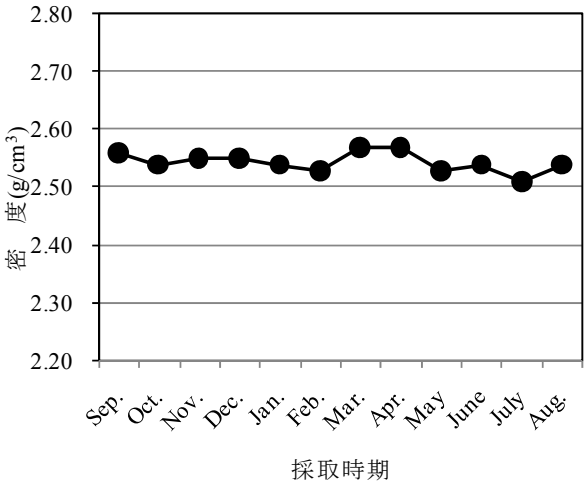
次に, 焼却灰中の P_2O_5 による凝結遅延の程度について調べるためにモルタルの凝結試験を行い，焼却灰混入モルタルの強度を調べるために圧縮強度試験を行った。

3. 実験結果及び考察

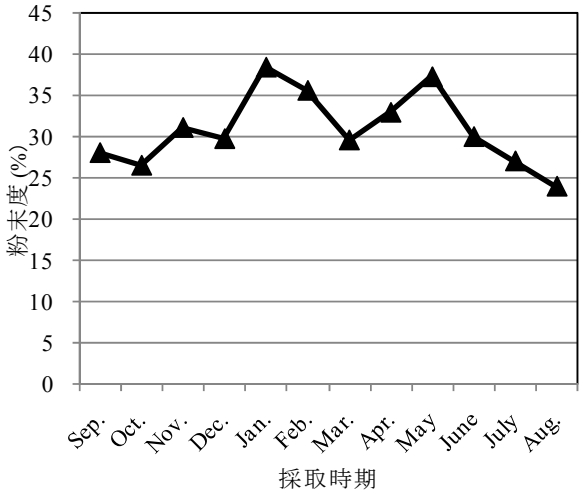
3.1　物性試験結果

写真－1 は，使用した焼却灰の外観である。薄い茶色の粉体である。次に，物性試験の結果として，**図－1** に採取時期による焼却灰の密度の変化について示す。図のように平成 18 年 9 月から平成 19 年 8 月までのサンプリングにおける焼却灰の絶乾密度の変化は大きくなく，2.51~2.57g/cm^3 で変化している，平均値は 2.54 g/cm^3，標準偏差は 0.015 g/cm^3 であり，ばらつきも小さく，既往の研究に示されるデータ [1]とほぼ同等の結果であった。また，川砂の密度に近い値である。

写真－1　使用した焼却灰の外観



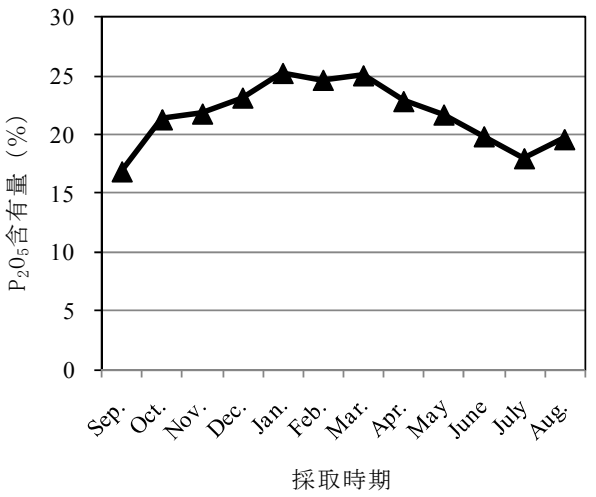
図－1　採取時期による焼却灰の密度の変化



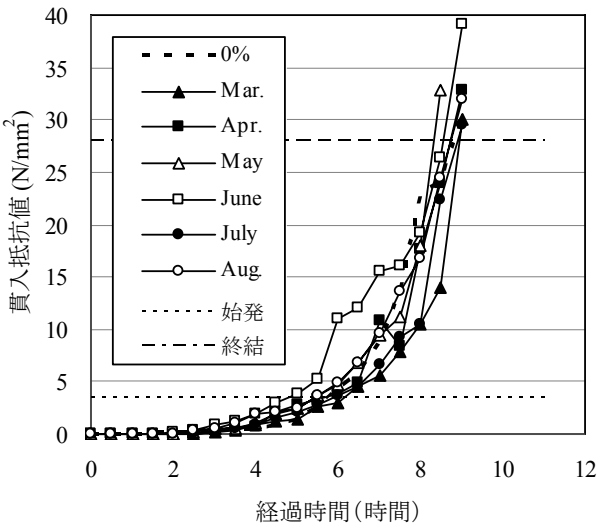
図－2　採取時期による焼却灰の粉末度の変化

図－2 には採取時期による焼却灰の粉末度の変化について示す。粉末度は，24.0~38.5%の範囲で変化しており，平均値は 30.9%, 標準偏差は 4.27%である。変動係数は，0.138 であり，他の物性値と比較するとやや大きめであるが，極端にばらつきが大きいわけではない。また，9 月にサンプリングした焼却灰の粉末度は 28.1%であるが，比表面積を BET 多点法で測定したところ，3600cm^2/g 程度であった。すべての焼却灰の比表面積を測定したわけではないが，この結果から推定すると，平均比表面積は，4000cm^2/g 程度となり，普通セメントと早強セメントの中間に位置する程度とみなすことができる。

次に，**図－3** に P_2O_5 量の定量結果を示す。図のように P_2O_5 量は 16.9~26.2%の範囲で推移しており，平均値は



図－3　採取時期による焼却灰中の P_2O_5 量の変化



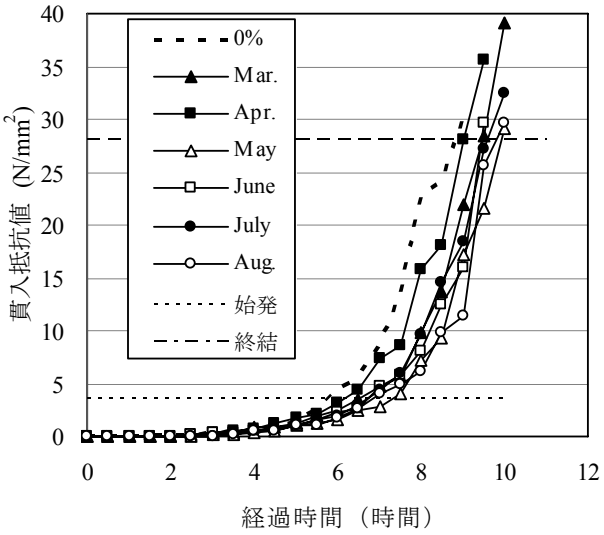
図－5　凝結試験結果（置換率 10%）

21.6%，標準偏差は 2.57%である。傾向としては，1~3 月辺りが最も含有量が多く，それ以降減少傾向を示している。

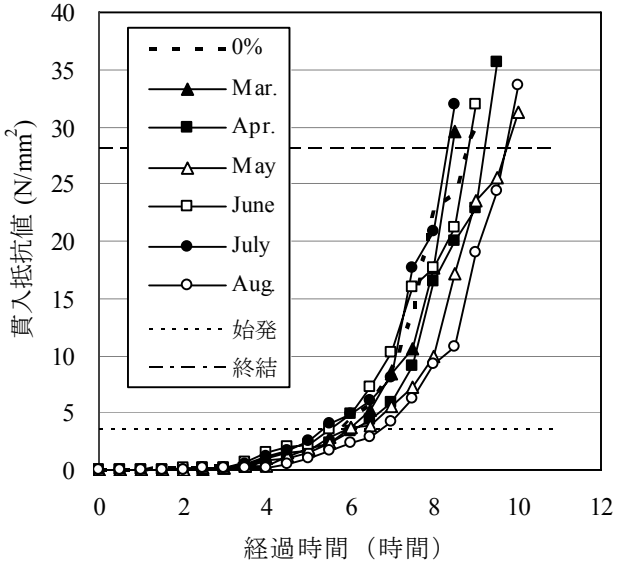
3.2 凝結性状に関する結果

図－4～7 は，焼却灰置換率 5%，10%，30%，50%の場合の凝結試験の際のセメントと水の接触時からの経過時間と貫入抵抗値の関係を示したものである。ただし，ここで使用した焼却灰は，平成 19 年 3 月から 8 月までの 6 か月間に採取したものである。なお，図中には点線で置換率 0%の挙動を示している。

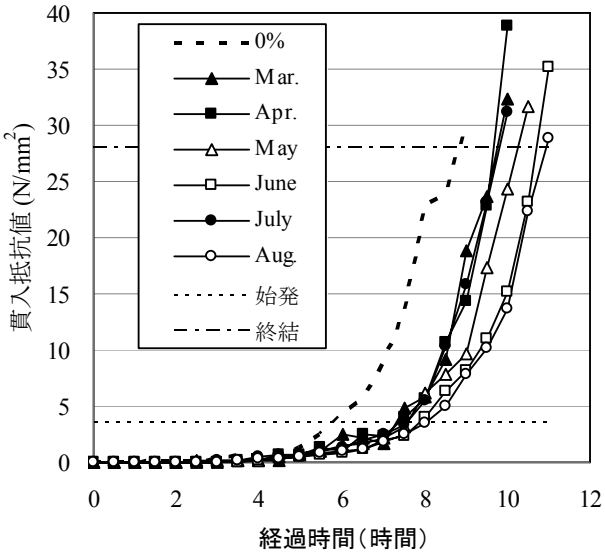
置換率 5%及び 10%では，0%とほぼ同等の凝結性状であるが，置換率 30%では平均すると始発で 60 分程度，終結で 40 分程度置換率 0%の場合から遅れる結果となっている。置換率 50%では平均すると，始発で 110 分程度，終結で 80 分程度遅れる結果となっている。このように，



図－6　凝結試験結果（置換率 30%）



図－4　凝結試験結果（置換率 5%）



図－7　凝結試験結果（置換率 50%）

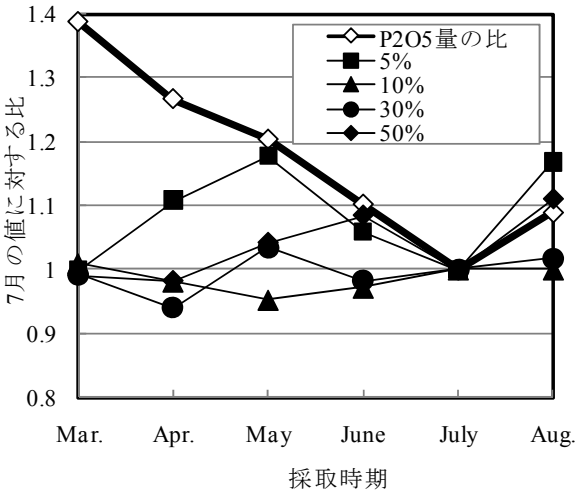
表-3　置換率ごとの凝結時間の置換率 0%に対する割合

置換率(%)	置換率 0%に対する割合の平均値	
	始発時間	終結時間
0	1.00	1.00
5	1.03	1.03
10	0.97	0.99
30	1.18	1.08
50	1.32	1.15

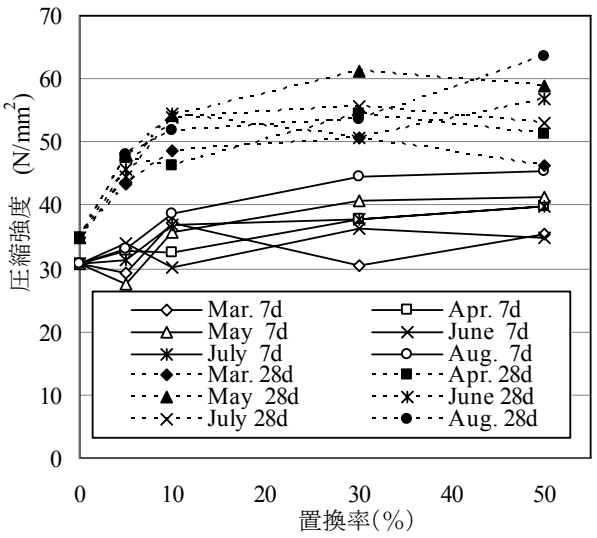
焼却灰の置換率が 30%を超えると凝結が明らかに遅れることがわかる。

表－3 は，置換率ごとに各月の凝結時間を置換率 0%の凝結時間に対する割合を求め，置換率ごとに平均したものである。表からも置換率 30%を超えると，始発，終結時間ともに遅れてくることがわかる。

また，**図－4～7** において 3 月から 8 月の経過時間と貫入抵抗値の関係がほぼひと塊りに存在することから，各月に採取した焼却灰の凝結への影響に関する月間変動は，大きくないものと考えられる。また，P_2O_5 含有量が最も少ないのは 7 月，もっとも多いのは 3 月であることから考えてみても，必ずしも 3 月が最も凝結が遅れ，7 月が最も凝結遅延が少ないとは限らない。それらの関係を明確にするために図示したのが，**図－8** である。これは，P_2O_5 含有量が最も少ない 7 月を 1 として各月の P_2O_5 含有量及び各月の各置換率のモルタルの終結時間を比で表わしたものである。この図より P_2O_5 含有量と終結時間の間には，一部対応関係が見られるが，相関が高くないことがわかる。



図－8　各採取時期における焼却灰の P_2O_5 量と各置換率のモルタルの終結時間の関係（7 月の値を 1 としたもの）



図－9　圧縮強度試験結果（材齢 7 日及び 28 日）

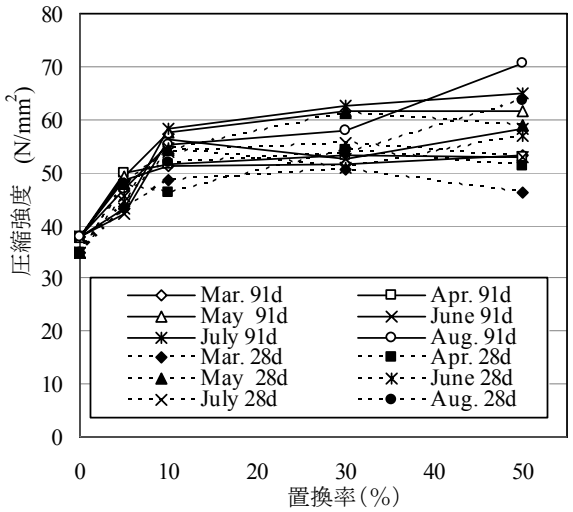
3.3 強度試験結果

図－9 に 3 月から 8 月までに採取した焼却灰を使用したモルタルの材齢 7 日及び 28 日における圧縮強度の変化について示す。なお，比較のため焼却灰を使用していない置換率 0%についてもプロットしており，それぞれのプロットは供試体 6 本の試験値の平均値である。図からわかるように，材齢 28 日においては，すべての採取月及び置換率で置換率 0%の強度より大きい値が得られた。これは，置換率が増えるごとに微粒分である焼却灰によるマイクロフィラー効果により，緻密なモルタルとなっていったからだと考えられる。ただし，これに関しては 1) 焼却灰の吸水あるいは保水による実質の水セメント比の低下，2)焼却灰置換率の増加に伴う細骨材量の減少による骨材界面の減少，などの影響も要因となっていると考えられるが，詳細については明確にできていない。

また，**表－4** は置換率ごとに 3 月から 8 月までの 6 本ずつの供試体の材齢 28 日における圧縮強度平均値の標準偏差と変動係数を示したものである。各置換率における各採取月の試料による強度のばらつきは変動係数で

表－4　置換率ごとの圧縮強度のばらつき状況

置換率 (%)	平均強度の標準偏差 (N/mm^2)	平均強度の変動係数
0	3.16	0.083
5	2.08	0.046
10	3.41	0.066
30	2.15	0.040
50	6.15	0.112



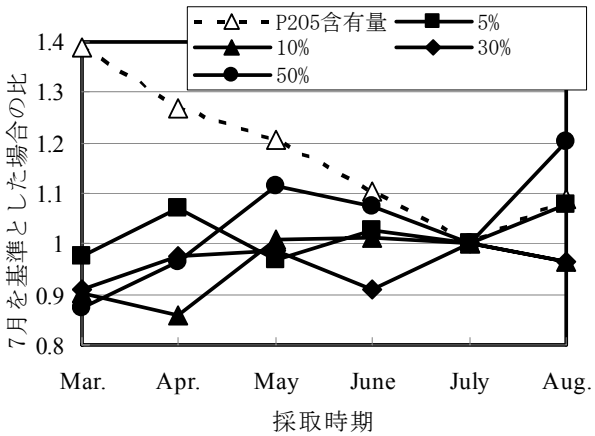
図－10　圧縮強度試験結果（材齢 28 日及び 91 日）

0.040~0.112 程度であり，焼却灰置換率 50%を除いては，置換率 0%の 0.083 と比較して小さい値であり，50%のばらつきがやや大きいことがわかる。したがって，複数月の焼却灰試料を使用したモルタルの圧縮強度のばらつきは置換率 50%を除くと著しく大きいものではないことが分かる。

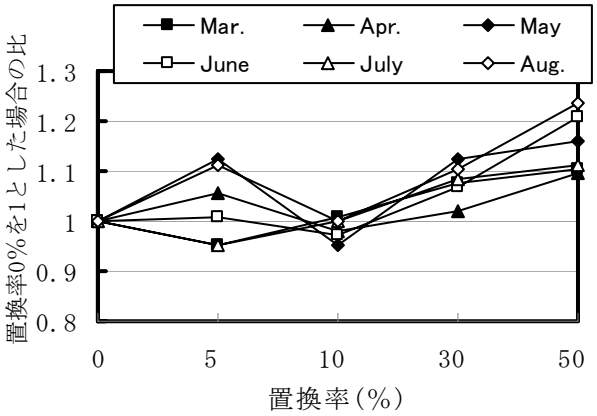
さらに，**図－10** は 3 月から 8 月までに採取した焼却灰を使用したモルタルの材齢 28 日及び 91 日における圧縮強度の変化について示したものである。材齢 28 日と 91 日を比較すると，28 日から 91 日への強度の伸びはほとんどなく，強度の長期的な伸びは期待できないことがわかる。

3.4 凝結時間と圧縮強度との関係

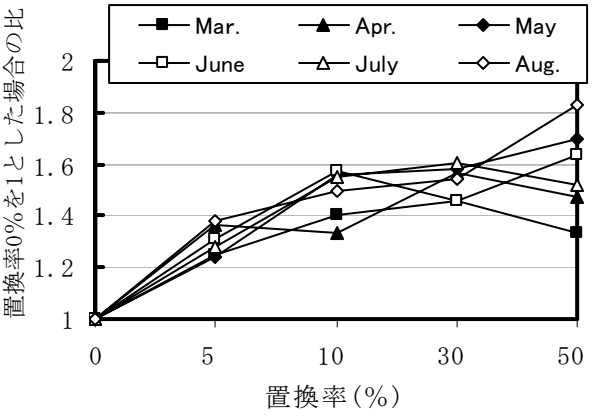
図－11 には同じく P_2O_5 含有量とモルタルの材齢 28 日の平均圧縮強度の割合の変化について示す。**図－8** より P_2O_5 含有量が大きい時期の焼却灰においても，終結時間は大幅に遅れることはなく，P_2O_5 含有量と凝結の終結時



図－11　7 月の P_2O_5 量及び圧縮強度を 1 とした場合の採取時期によるそれぞれの変化の状況



図－12　置換率 0%を 1 とした場合の各置換率の凝結の終結時間の変化

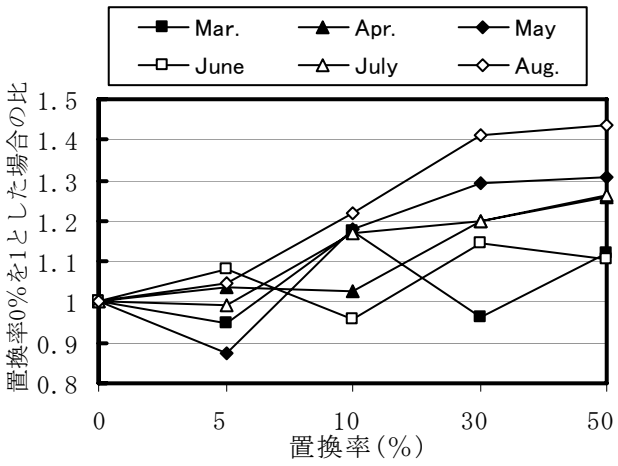


図－13　置換率 0%を 1 とした場合の各置換率の圧縮強度の変化（材齢 28 日）

間は関連が低いことがわかる。また，**図－11** より同様に P_2O_5 含有量とモルタルの圧縮強度との間にも，明確な関係は認められない。

一方，**図－12** は置換率 0%の凝結の終結時間を 1 とした場合の各置換率の終結時間の変化について示したものである。置換率 5%の場合のばらつきが大きいが，置換率 30%，50%では凝結の遅延が大きくなっていることがわかる。**図－13** は，同じく置換率 0%の材齢 28 日の圧縮強度を 1 とした時の各置換率の材齢 28 日の平均圧縮強度の変化について示したものである。置換率の増加に伴い，終結時間の遅れが大きくなる傾向にあるにも係わらず，圧縮強度は置換率の増加に従い低下する傾向にはない。ただし，置換率 50%においてはバラツキが大きく，強度低下を起こしているものもある。

以上のことより，P_2O_5 は，確かに凝結に影響を及ぼしているが，その含有量の影響は大きくなく，圧縮強度にも悪影響を及ぼしていないことがわかる。リンはセメントクリンカー化合物に影響を及ぼすと言われており，具体的には短期強度発現の要因となるエーライト相



図－14　置換率 0%を 1 とした場合の各置換率の圧縮強度の変化（材齢 7 日）

($3CaO \cdot SiO_2$)を減少させ, 短期強度発現が小さいビーライト相($2CaO \cdot SiO_2$)を増加させる働きを有する[2)]。そこで，材齢 7 日の強度について**図－13** と同様の関係を見てみたのが，**図－14** である。各採取時期に置換率 0%の強度を 1 として各置換率の平均圧縮強度を比で表わしたものであるが，傾向としては**図－13** より傾向が明確ではない。材齢 7 日の場合はばらつきが大きく，置換率の増加に伴い，圧縮強度が増加している採取月もあるが，一部の採取時期においては強度の増加が見られないものもあり，前述の短期強度への影響をうかがわせる。ただし，この短期強度発現の阻害は，含有リンよりも溶出リンによるところが大きいとされている[3)]ため，リンの溶出量を把握することが必要になると考えられるが，今回はそこまでの把握はできていない。

4. まとめ

以上の検討より本研究の範囲で，以下のことが知見として得られた。

1) 今回実験に使用した焼却灰の物性値は，1 年間にわたるサンプル調査の結果，極端に大きなばらつきは認められなかった。
2) 焼却灰を使用したモルタルの凝結性状は，置換率が 30%を超えると凝結が遅れる現象が確認できた。しかし，その凝結の遅れは，P_2O_5 の含有量と対応しているわけではなく，明確な傾向は認められなかった。
3) 焼却灰を使用したモルタルの圧縮強度は，置換率の増加に伴い，増加する傾向にあったが，長期強度の伸びは認められなかった。
4) 焼却灰を使用したモルタルの凝結時間と圧縮強度との関係は，P_2O_5 含有量と明確な関係にあるわけではなく，置換率が 30%を超えると凝結は遅れるが，圧縮強度は必ずしも低下する傾向にはないことがわかった。したがって，P_2O_5 はモルタルの凝結には影響を及ぼしているが，モルタルの圧縮強度には悪影響が顕著ではなかった。

参考文献

1) 日本材料学会：コンクリート混和材料ハンドブック, pp.423-435，2004.4
2) 金谷宗輝ほか：クリンカーの品質にリンが及ぼす影響, セメントコンクリート論文集, Vol.53, pp.10-15, 1999
3) 赤木寛一ほか：下水汚泥焼却灰中のリンが流動化処理土の強度特性に及ぼす影響，トンネル工学報告集, 第 16 巻，pp.507-512，2006.11