

清水建設株式会社 技術研究所 正会員 ○堀内 澄夫 玉置 克之
正会員 尾上 篤生 後藤 茂

はじめに 筆者らは、フライアッシュ（以後 PFAと称する）をスラリー化するに際して水を分割添加することにより、①スラリーの乾燥密度を $1.1 \sim 1.3 \text{ g/cm}^3$ にまで高めることができる。②これは、PFAの最大乾燥密度の90～100 %に相当しており、PFAを加湿・締固めした場合と同等以上である。③この高密度スラリーは PFAの自己硬化性により、固化後、数 kgf/cm^2 の圧縮強度を発現する。などのことを明らかにしてきた。^{1,2)}

しかし、自己硬化性は PFAの成分・性質によって大きく変化すると考えられ、スラリーの固化強度特性は PFA の種類によって非常に異なること、場合によっては硬化材の添加が必要となること、が予想される。

本文では、5 種の PFAを使用した室内実験結果をもとに、(1) PFAの種類による影響、(2)石膏の添加による影響、(3)セメントの添加による影響、など、高密度化した PFAスラリーの固化強度特性について報告する。

1. 実験 PFA は、表-1 に示す5 種を用いた。いずれも、乾燥状態の国内産試料である。石膏は試薬用二水石膏を、セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。混練水は水道水を用いた。

PFA の混練・スラリー化、および物性試験は、図-1 に示すフローに従った。供試体 ($\phi 5 \text{ cm} \times h 10 \text{ cm}$) はモールドのまま、 20°C で水中養生した。発現強度は、一軸圧縮試験（至速度 $1 \text{ \% / min}$ ）により確認した。

2. 結果・考察

〔i〕PFA スラリーの固化強度 材令による PFAスラリーの固化強度変化を図-2 に示す。両者の関係は PFAの種類によって大きく異なっているが、B 種、C 種を除き、材令にともなう長期間の強度増加が確認できる。PFAは、成分中の Ca 、 Si 、 Al 、 Fe 化合物が水と化学反応し、膠着物を生成することにより自己硬化性を発現すると考えられる。写真-1 は、固化後の PFA スラリーの電子顕微鏡写真であり、PFAの種類によって、生成物の形状および量が大きく変化している。強度増加の大きさは生成物の量に関係しており、A 種の表面には多くの反応生成物が沈積しているのに対し、B 種、C 種には僅かに存在するのみである。このように、PFA中の成分の種類と量—特に石灰分の量—は、反応生成物の種類・量に影響を及ぼし、その結果として、PFAの発現強度を決定していると推察される。

表-1 PFA の性質

		A種	B種	C種	D種	E種
比重（ g/cm^3 ）		2.25	2.15	2.28	2.18	2.26
比表面積* cm^2/g ）		3050	3360	4720	2710	3360
平均粒径（ μm ）		17.0	23.0	7.8	24.0	14.2
Ig. Loss（%）		3.34	2.64	4.61	3.61	4.27
化 学 成 分	SiO ₂ （%）	53.5	61.0	56.6	52.2	52.6
	Al ₂ O ₃ （%）	23.7	25.7	26.2	21.8	22.9
	Fe ₂ O ₃ （%）	4.81	2.24	3.86	8.27	6.25
	CaO（%）	7.28	3.82	3.40	7.00	5.88
	SO ₃ （%）	0.33	0.14	0.39	0.96	0.79

*ブレン値

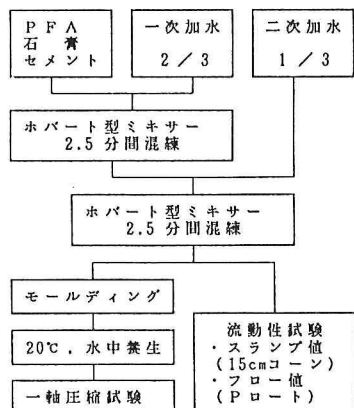


図-1 実験のフロー

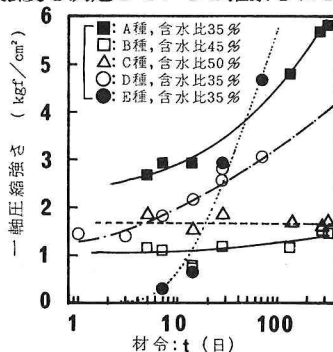


図-2 スラリーの固化強度

流動性 (15cm スランプ値)
A種: 13.0cm B種: 13.9cm
C種: 12.0cm D種: 3.2cm
E種: 12.5cm

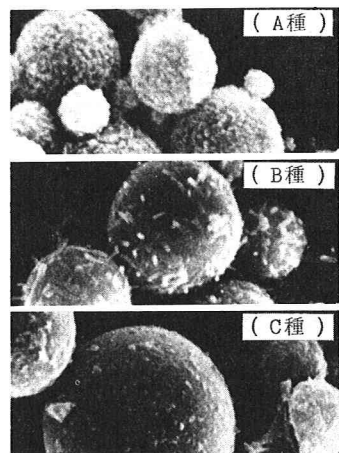


写真-1 固化後の PFAスラリーの微視構造 ($t=28$)

Sutherlandらによれば³⁾、締固めた PFA の強度は、3 年以上にわたって増加し続けるもの、数年後から増加し始めるもの、など、PFA の種類によって大きく異なる。このため、B 種・C 種も数年後に強度を大きく増加させることも考えられる。しかし、土木工事の工程などを考えれば、もっと早い時期—数ヶ月以内—に強度増加の確認ができることが必要である。このため、PFA によっては、硬化材の添加が必須となる。

(ii) 石膏添加による影響 PFA スラリーに石膏を添加したときの強度を図-3 に示す。石膏添加は総じて強度を増加させるが、その程度は PFA の種類によって大きく異なる。写真-2 の電子顕微鏡写真から明らかなように、石膏の効果が大きかった A 種・B 種では反応生成物量が非常に増加しているのに対し、効果の小さかった C 種では生成物量の増加は僅かである。これは、A 種・B 種中には石膏と反応する物質—石灰分—がかなり存在していたのに対し、C 種中にはほとんどなかったためと考えられる。このため、C 種に対しては、セメントなどの石灰系硬化材を添加し、石灰分を補充する必要があると推察される。

また、石膏の添加には、添加率 2～5 % に最適値が存在している。石膏は、アルミナ・水・消石灰と化学反応をおこしてエトリンジャイトを生成し、強度増加に寄与すると言われている。最適添加率は、このエトリンジャイト生成反応における反応物質の量比の影響と考える。なお、生成物は結晶度が低く、X 線回折による反応の追跡は不可能であった。

(iii) セメント添加による影響 セメント・石膏を C 種に添加したときの強度を図-4 に示す。2 % のセメント添加で、強度は 2 倍以上に増加している。これは、PFA がガラス質を多量に含み、比表面積も大きいなど、ポズラン活性に富むためであると考えられる。

セメント添加時の石膏添加は非常に効果がある。たとえば、セメント 2 % 添加時に石膏を 2 % 添加することにより、強度を 2 倍とすることができる。また、石膏添加の効果は、材令とともに顕著となって行き、セメント添加率 0.5 %、石膏添加率 2 % のスラリーでは、材令 71 日で材令 28 日の 2 倍程度の強度を発現する。このように、0.5 % と少量であっても、セメントによる石灰分の補充はスラリーの強度増加に大きく貢献する。

3. 結論 ①高密度化した PFA スラリーの固化強度特性は、PFA の種類によって大きく異なる。②長期的な強度増加が確認できた PFA スラリーは、全 5 種中、3 種であった。③強度増加が確認できなかった PFA スラリーであっても、1 種は 5 % の石膏添加により、残りの 1 種は 0.5 % のセメントと 2 % の石膏添加により、それぞれ充分な固化強度が発現した。

おわりに PFA は年間 280 万 ton 以上も発生しており、その大半が埋立て処分されている。PFA スラリーは、ハンドリングが容易であること、水中での施工が可能であることなどメリットが多く、盛土材や充填材など土木材料として大量に有効利用しうると考える。

参考文献

- 1) 堀内はか：『石炭灰の土木材料としての利用に関する研究（その 5）』第 18 回土質工学研究発表会（1983）pp. 1507～1508
- 2) 堀内はか：『石炭灰の土木材料としての利用に関する研究（その 7）』第 19 回土質工学研究発表会（1984）投稿中
- 3) H.B.Sutherland, T.W.Finlay and I.A.Cram : "Engineering and Related Properties of Pulverized Fuel Ash" Journal of Institution of Highway Engineers (June '68) pp. 19～27

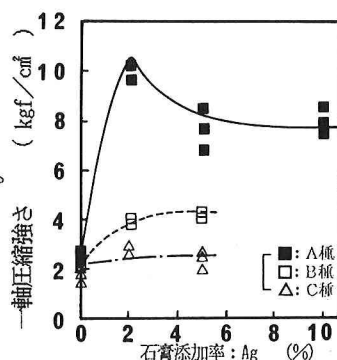


図-3 石膏添加による固化強度への影響 (t=28)
(石膏添加率 A_g は、PFA に対する石膏重量)

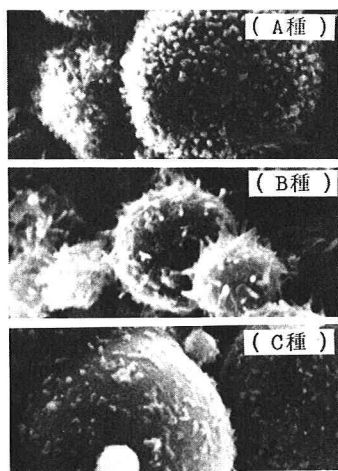


写真-2 固化後の PFA スラリーの微視構造 (+石膏 2 %) (t=28)

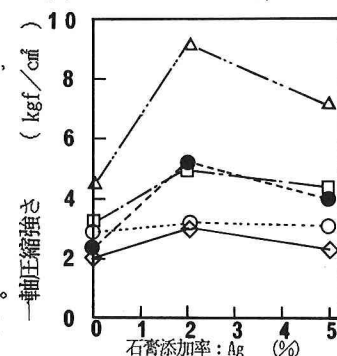


図-4 石膏・セメント添加による固化強度への影響
◇: $A_c=0$ %, t=28日 □: $A_c=1$ %, t=28日
○: $A_c=0.5$ %, t=28日 △: $A_c=2$ %, t=28日
●: $A_c=0.5$ %, t=71日
(セメント添加率 A_c は、PFA に対するセメント重量)