

ペーパースラッジ灰を用いた超硬練りコンクリートの諸特性に関する研究

宇都宮大学大学院工学研究科 学生会員 藤田 浩史
 宇都宮大学工学部 正会員 藤原 浩己
 宇都宮大学工学部 正会員 丸岡 正知
 (株)デイシイ 正会員 鯉淵 清

1. はじめに

製紙業から出る廃棄物のうちの大部分は、ペーパースラッジ(以下 PS)と呼ばれる製紙汚泥である。この製紙汚泥は、製紙原料のうち紙にできなかった微細繊維や、タルク、カオリン、及び古紙混入異物などから出来ている。現在、PS を焼却処理して出来た PS 灰は、土壌改良材やセメント原料、または製鉄保温材などに利用されている。本研究の目的は、PS 灰をコンクリート分野で大量に有効利用する技術の開発とした。本研究は、まず PS 灰をコンクリート用細骨材及びセメントに段階的に置換した場合のコンクリートの強度特性について検討した。次に、PS 灰は、吸水性が高いためコンクリートの流動性が低下してしまうが、本研究では、PS 灰を流動性の低い超硬練りコンクリートへ適用することとし、このときの締め固め特性の把握を行った。

2. PS 灰を混和した超硬練りコンクリートの強度特性

2.1 使用材料

使用材料を表 1 に示し、本研究で使用した PS 灰の化学成分を表 2 に示す。PS 灰の粒度分布を図 1 に示す。本研究に用いた PS 灰は化学成分の約 60%程度がシリカ(SiO₂)及びアルミナ(Al₂O₃)である。このため、PS 灰はセメントの水和によって生じた水酸化カルシウムとのポゾラン反応が期待できる。図 2 に PS 灰の電子顕微鏡による拡大写真を示す。この写真から、PS 灰の粒子形状は、球形粒子を含まず粗い形状を有していることが分かる。

2.2 配合条件

配合条件は、表-3 に示す一般的に用いられている硬練りコンクリートの配合をもとに、PS 灰をセメントに対して 0、10、20、30、40、50%内割体積置換した 6 水準について、それぞれ PS 灰を細骨材(川砂)に対して 0、10、20、30、40、50%内割体積置換した計 36 配合とした。ただし SP 添加量は上限を 5%とし、

表 1 使用材料

種別	記号	名称	密度 (g/cm ³)	吸水率(%)	F.M.	比表面積 (cm ² /g)
セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.15	-	-	3,260
細骨材	RS	川砂	2.56	2.52	2.93	-
粗骨材	G5	砕石5号	2.52	0.38	6.45	-
	G6	砕石6号	2.66	0.49	7.07	-
混和材	PS	ペーパースラッジ灰	2.27	20.63	-	1,360
混和剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤	1.05	-	-	-

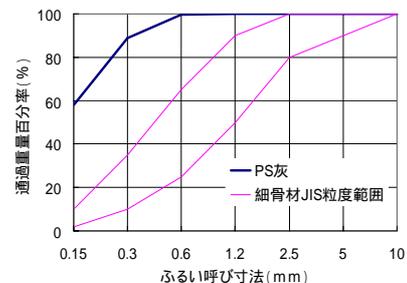


表 2 化学成分

PS	化学成分 (%)												R ₂ O (%)	Cl (%)	
	ig-loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Ti ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	TS			total
	3.6	38.1	21.4	1.1	28.9	3.6	0.39	0.15	1.03	0.30	0.02	0.5	99.1	0.49	0.178

図 1 粒度分布

表 3 基本配合

設計強度 (N/mm ²)	粗骨最大寸法 (mm)	目標空気量 (%)	単位水量 W (kg)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
						水	セメント	細骨材	粗骨材
28	25	5	169	46.9	45	169	360	768	972

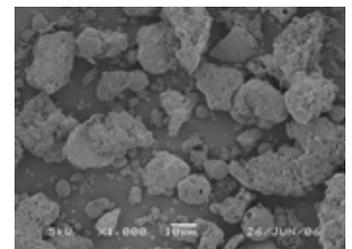


図 2 SEM 写真

キーワード：ペーパースラッジ灰 超硬練りコンクリート 強度特性 締め固め特性

連絡先：〒321 - 8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学工学部建設学科材料研究室 TEL 028-689-6209

表4 成形性評価結果

		セメント置換率 (%)					
		0	10	20	30	40	50
砂置換率 (%)	0						
	10						×
	20					×	×
	30					×	×
	40					×	×
	50				×	×	×

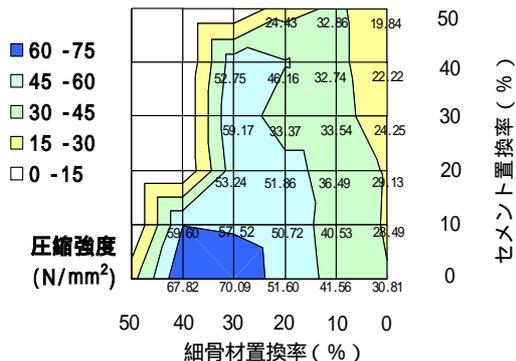


図3 圧縮強度試験結果

5%添加しても振動加圧成型できないものについては試験を行わなかった。

2.3 試験項目

本実験では、以下の項目について試験を行った。
 圧縮強度：JIS A 1108

ただし養生は、蒸気養生とし、養生条件は前置き 2h (20℃、RH60%) 温度上昇 20℃/h、最高温度 60℃、最高温度保持時間 24h とした。材齢 1 日で試験を行った。

2.4 実験結果および考察

コンクリートの成型性評価結果を表4に示す。表中の○は成型可能を、×は成型不能を示す。この結果から単位PS灰量 300 kg/m³以上の配合においてはコンクリートの成型が不可能であったため、これが成形性から定まるPS 灰添加量の限界であると考えられる。細骨材率置換率およびセメント置換率と圧縮強度の関係を図3に示す。図3より圧縮強度のレベル別に見ると、成型可能な範囲内でPS灰無混和コンクリートにおける圧縮強度 30.8N/mm²を下回るものは、単位セメント量 200kg/m³以下もしくは単位PS灰量 100kg/m³以下の配合条件であり、その他の配合ではPS灰無混入の場合よりも強度は増大した。これは単位セメント量 200kg/m³以下の場合には水和反応の際に生成される水酸化カルシウムが少なくPS灰のポゾラン反応が十分に起こらないために圧縮強度が増大しなかったものと考えられる¹⁾。この結果から、単位セメント量 200 kg/m³以上かつ単位PS灰量 100 kg/m³以上 300kg/m³以下の範囲でPS灰をコンクリートに混和させた場合、PS灰無混和のコンクリート以上の圧縮強度をもつコンクリートが製造可能であると思われる。特に、単位セメント量 300 ± 20 kg/m³でかつ単位PS灰量 200 ± 40kg/m³の配合においてはPS灰無混和コンクリート

の 1.5 倍以上の圧縮強度を持つコンクリートが製造可能であることが分かった。

3. PS 灰を混和した超硬練りコンクリートの締め固め特性

強度特性の試験結果より PS 灰のコンクリートへの適用量の範囲を定めることが出来た。ここでは、PS 灰を使用した超硬練りコンクリートの混和剤一定条件下での締め固め特性の把握を行う。

3.1 実験概要

使用材料および基本配合は、前実験と同様である。PS灰置換率はセメントに対して 20、30、40%内割で体積置換した 3 水準について、それぞれPS灰を細骨材(川砂)に対して 10、20、30%内割体積置換した計 9 水準とした。また単位水量をそれぞれの水準毎に 129,139,149,159 および 169kg/m³と変化させた計 27 配合について試験を行った。またSP添加量は 1.5%で一定とした。

3.2 試験項目

本実験では、以下の試験を行った。

- ・ 締め固め性試験：JSCE-F 508

締め固め性試験から以下の指標が得られる。初期充填率 Ci (締め固め前の充填率)、達成可能充填率 Cf (試料を無限に締め固めたときに推定される充填率)、締め固め完了エネルギー E98 (充填率 98%に達するのに必要なエネルギー)、締め固め係数 Ce (1J/l を与えたときの締め固め初期における単位エネルギーによる充填率の増大割合)。

3.3 試験結果

(1) 単位水量一定条件下における締め固め特性
 表5に試験結果を示し、基本配合と単位水量が同様である 169kg/m³での各試験結果と単位PS灰量の関

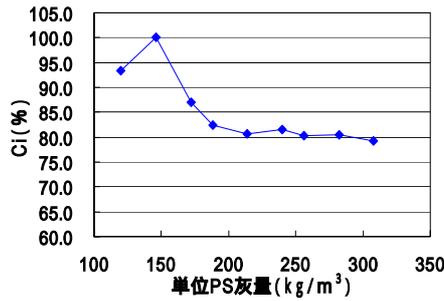


図4 Ciと単位PS灰量の関係
(単位水量 169kg/m³)

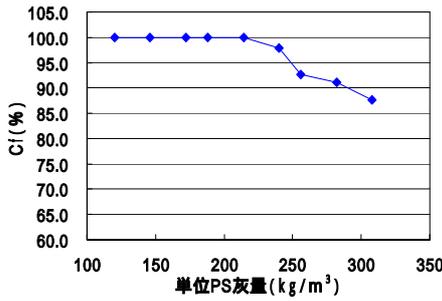


図5 Cfと単位PS灰量の関係
(単位水量 169kg/m³)

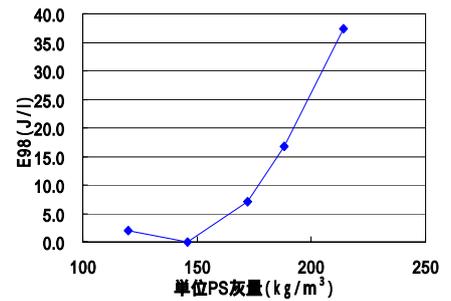


図6 E98と単位PS灰量の関係
(単位水量 169kg/m³)

表5 締め固め性試験結果

配合名	単位水量 (kg/m³)	PS灰セメント置換率 (%)	PS灰細骨材置換率 (%)	単位PS灰量 (kg/m³)	Ci (%)	Cf (%)	E98(j/l)	Ce	
W169 20-10	169	20	10	120	93.3	100.0	2.06	2.79	
W169 30-10				146	100.0	100.0	0.00	0.00	
W169 40-10		172		87.0	100.0	7.10	1.72		
W169 20-20		188		82.5	100.0	16.74	1.72		
W169 30-20		214		80.7	100.0	37.43	1.38		
W169 40-20		240		81.5	97.9	-	1.34		
W169 20-30		256	80.4	92.7	-	0.86			
W169 30-30		282	80.5	91.1	-	0.82			
W169 40-30		308	79.3	87.7	-	0.69			
W159 20-10		159	20	10	121	87.0	100.0	6.74	1.31
W159 30-10					147	88.8	100.0	6.77	1.65
W159 40-10			173		87.6	100.0	10.66	1.48	
W159 20-20	190		83.6		100.2	63.21	1.30		
W159 30-20	216		84.1		99.9	43.95	1.48		
W159 40-20	242		82.2		100.2	88.86	1.53		
W159 20-30	259		83.4	93.5	-	0.87			
W159 30-30	285		80.8	88.9	-	0.60			
W159 40-30	311		77.1	86.0	-	1.00			
W149 20-10	149		20	10	122	86.7	100.0	2.74	0.78
W149 30-10					147	89.5	100.0	4.88	1.84
W149 40-10			174		88.5	100.0	10.53	1.28	
W149 20-20		192	84.6		100.0	18.81	1.68		
W149 30-20		218	83.7		100.0	46.90	1.57		
W149 40-20		244	82.3		95.2	-	1.13		
W149 20-30		262	80.7	90.8	-	0.84			
W149 30-30		288	77.2	87.7	-	1.07			
W149 40-30		314	78.7	88.2	-	0.70			
W139 20-10		139	20	10	123	89.1	100.0	4.68	2.29
W139 30-10					149	89.5	100.0	5.21	2.11
W139 40-10			175		87.6	100.0	26.00	1.35	
W139 20-20	194		86.8		100.3	135.62	0.96		
W139 30-20	220		83.5		96.8	-	1.29		
W139 40-20	246		83.1		94.6	-	1.13		
W139 20-30	265		81.6	90.9	-	0.82			
W139 30-30	291		81.8	89.0	-	0.60			
W139 40-30	317		77.1	87.6	-	0.90			
W129 20-10	129		20	10	124	88.7	100.0	8.21	1.44
W129 30-10					150	88.4	100.0	17.72	1.31
W129 40-10			176		88.9	100.0	68.26	0.97	
W129 20-20		196	81.3		94.5	-	1.31		
W129 30-20		222	83.6		93.1	-	0.93		
W129 40-20		248	85.1		92.6	-	0.68		
W129 20-30		268	77.8	87.8	-	1.18			
W129 30-30		294	81.0	88.1	-	0.68			
W129 40-30		320	82.2	88.4	-	0.54			

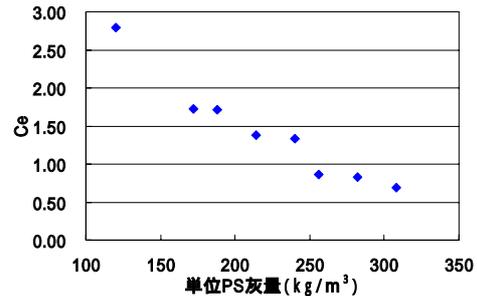


図7 Ceと単位PS灰量の関係 (単位水量 169kg/m³)

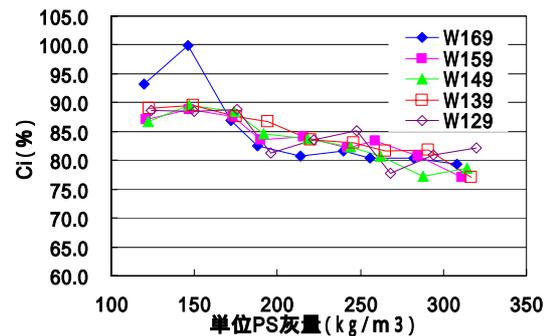


図8 Ciと単位PS灰量の関係

係を、図4～図6にそれぞれ示す。図4より基本配合と同様の単位水量において、単位PS灰量の増加に伴い初期充填率Ciは単位PS灰量 150kg/m³付近でピークを迎えることが確認された。しかし図5に示す達成可能充填率Cfでは、単位PS灰量 240kg/m³付近までは達成可能充填率 98%以上と高い充填率を示した。また240kg/m³付近で変曲点を持ち、これを超えるとCfは低下し始めることが分かった。これは粉体量が増えることで締め固めが困難になったことと、吸水率の高いPS灰が増えることで締め固めに必要な水分が不足したことが原因と考えられる。

次に図6より充填率 98%締め固め可能な配合では単位PS灰量の増加に伴いE98は2次曲線的に増加す

ることが分かった。

また図7より単位PS灰量の増加に伴いCeは直線的に減少する。つまり締め固めに要するエネルギーが大きくなることが分かった。

以上の結果からいずれの結果においても単位水量 169kg/m³では、単位PS灰量 230kg/m³付近で締め固め性能が変化し、それ以上になると締め固めが困難になることが分かった。

(2) 単位水量の違いによる締め固め特性の変化

単位水量を変化させた際の各試験結果と単位PS灰量の関係を図8～11に示す。ここで図8～11の凡例は単位水量を示す。

図8よりいずれの配合においても、単位水量に関係なく、単位PS灰量の増加に伴い初期充填率は減少する傾向にあることが確認された。また図8よりいずれ

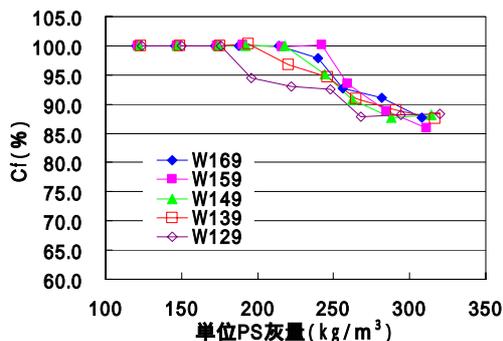


図9 Cfと単位PS灰量の関係

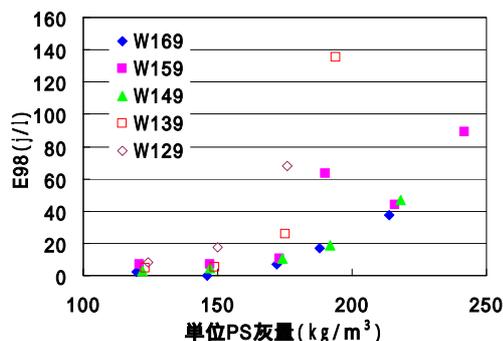


図10 E98と単位PS灰量の関係

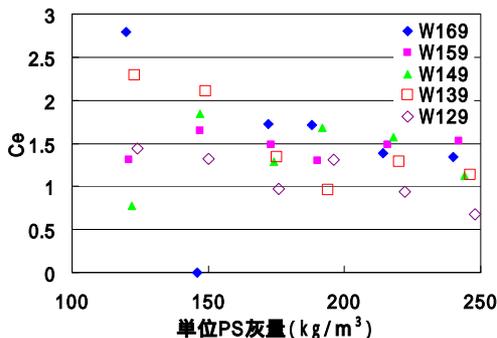


図11 Ceと単位PS灰量の関係

の単位水量においても、単位水量 169kg/m³と同様に単位PS灰量 150kg/m³付近で初期充填率は最も大きくなることが確認された。以上のことから一般的な超硬練りコンクリートと同様に²⁾、PS灰を用いた超硬練りコンクリートにおいても初期充填率は単位水量にあまり影響されず、単位PS灰量による影響のほうが大きいことが確認された。

図9より単位PS灰量の増加に伴い、いずれの単位水量においても充填率 98%を下回る点で変曲点を持つことが確認された。しかし図9よりこの変曲点は単位水量の減少に伴い変化し、水量 159、169kg/m³ではほとんど違いが見られず、この水量を境にCfの変曲点は変化し始めることが分かった。単位水量 149kgでは98%充填可能となるのは単位PS灰量 220kg/m³付近、単位水量 139kg/m³では単位PS灰量 200kg/m³付近、単位水量 129kg/m³では単位PS灰量 180kg/m³付近と締め固め性に差が生じた。また前章の実験結果より単位PS灰量は 200kg/m³付近で最も強度増加が期待できることが確認されていることから、強度増加を目的とした場合、コンクリートの充填性に影響を及ぼさずに成型をするためには、単位水量は 149kg/m³以上にする必要があることが本試験結果より確認された。

図10より単位PS灰量の増加に伴いE98 はいずれの配合においても、2次曲線的に増加することが分かった。また単位水量 149~169kg/m³の範囲では同様の増

加量を示した。しかし 129、139kg/m³ではE98の増加量は他の単位水量に比べ極端に大きく、締め固めにエネルギーを多く必要とすることから締め固めが困難になることが確認された。

図11よりCeは単位水量の影響は少なく、いずれの配合においても単位PS灰量の増加に伴い減少する傾向が示された。

4. まとめ

流動性の低い超硬練りコンクリートにPS灰を適用すると、単位セメント量 200 kg/m³以上かつ単位PS灰量 100 kg/m³以上 300kg/m³以下の範囲でPS灰をコンクリートに混入させた場合、PS灰無混和のコンクリート以上の圧縮強度をもつコンクリートが製造可能であると思われる。

またPS灰の超硬練りコンクリートの締め固めに及ぼす影響として本研究における基本配合の単位水量 169kg/m³において、単位PS灰量 240 kg/m³付近で締め固め性能が変化し、締め固めが困難になることが確認された。また単位水量を変化させた際大きく影響を及ぼす指標はCfおよびE98であった。Cfの低下から、強度増加を目的としてPS灰を用いる際、コンクリートの充填性に影響を及ぼさずに成型をするためには、単位水量は 149kg/m³以上にする必要があることが確認された。

【参考文献】

- 1) 浦野登志雄ほか：パルプスラッジ焼却灰を混合したセメント・コンクリートの強度性状について、セメント・コンクリート論文集、No55、pp.694-700 (2001)
- 2) 超硬練りコンクリート研究委員会報告書、日本コンクリート工学協会 (1998)