

# 論文 微粉碎乾燥スラッジ (PDS) を用いた高流動コンクリートの特性

佐藤 嘉昭\*1・劉 嘉銘\*2・清原 千鶴\*3・末本 千廣\*4

**要旨:** レディーミクストコンクリート工場から排出されるコンクリートスラッジの有効利用方法の一つとして、スラッジケーキを乾燥、粉碎した粉末(PDS)を高流動コンクリートの粉体材料として使用することを提案した。本論文では、PDSの粒径および混入率を変えた高流動コンクリートの場合のフレッシュ性状および硬化性状に関する実験を行い、その結果、PDSの混入率に依存するが、PDSを用いることにより普通コンクリートと同程度の強度ではあるが流動性の高いコンクリートの製造が可能であることが分かった。

**キーワード:** 微粉碎乾燥スラッジ(PDS)、高流動コンクリート、粒径、混入率

## 1. まえがき

筆者らは、レディーミクストコンクリート工場から排出されるコンクリートスラッジの減量化および再資源化を目的とした研究に取り組み、これまでに、JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」でその使用が規定されているスラッジ水よりスラッジ固形分を多く含むものをコンクリート用練り混ぜ水として利用することや、スラッジケーキを乾燥、微粉碎して得られる粉末(微粉碎乾燥スラッジ, Pulverized Dry Sludge, 以下PDS)を混和材料的に利用することに関して実験を行い、その成果を報告してきた<sup>1),2)</sup>。本論文では、PDSが不活性材料であることから、高強度である必要がない、つまり、普通コンクリートと同程度の強度ではあるが高い流動性を備えたコンクリートを製造することを目標に実験に取り組み、そのような高流動コンクリートの特性を明らかにするとともに、PDS混入率の限界について検討した。

## 2. 実験

### 2.1 実験計画

本研究は、PDSの高流動コンクリート用粉体系材料としての適用性を評価するために、異なる粒

表-1 実験条件

種類	混入率 (%)	0	15	30	45	60
	PDS5 $\mu$			—	—	○
PDS10 $\mu$	○	○	○	○	○	○
PDS15 $\mu$			—	—	○	—

○:実験を実施, —:実験を実施せず

表-2 試験項目

コンクリートの性状	試験項目	測定方法
フレッシュ性状	スランプフロー試験	スランプフロー値
		50cmフロー到達時間
		流動停止時間
	V漏斗流下試験	流下時間
硬化性状	U形充填試験	充填高さ
	圧縮強度試験	強度, ひずみ
	乾燥収縮試験	ひずみ, 脱水量

径(平均粒径5,10,15 $\mu$ m)を持つPDSを用いることにより、PDSの種類および混入率(0,15,30,45,60%)が高流動コンクリートのフレッシュ性状および硬化性状に及ぼす影響について検討した。実験条件および試験項目を表-1および表-2に示す。

### 2.2 使用材料

使用した材料は、普通ポルトランドセメント、

\*1 大分大学教授 工学部建設工学科 工博(正会員)

\*2 大分大学大学院 工学研究科環境工学専攻 工修

\*3 大分大学助手 工学部建設工学科 工修(正会員)

\*4 環境技術開発(株)代表取締役

細骨材は陸砂，粗骨材は砂利，混和剤は高性能 AE 減水剤である。使用材料の物理的性質を表-3 に示す。本実験で使用した PDS は，レディーミクストコンクリート工場内に設置したパイロットプラント<sup>3)</sup>を用いて製造した。パイロットプラントは，回収水は無機系凝集剤で処理する凝集沈殿装置と，スラッジ固形分を脱水ケーキ化し，乾燥，粉碎して PDS を製造する 2 つの部分からなっている。ここでは回収水を沈殿槽から採取し，凝集沈殿装置を用いて処理を行い，沈降が終了した時点で凝集沈殿物を脱水ケーキ化し，前処理として含水率が 30% 以下になるように乾燥させた後，風力を利用した装置（ハイパーサイクロン）で微粉碎した。PDS としては，平均粒径が 5, 10, 15  $\mu\text{m}$  程度になるように混合調整した 3 種類のを製造した。PDS の物理的性質および化学分析結果を表-4 に示す。また平均粒径 10  $\mu\text{m}$  の PDS の電子顕微鏡観察結果を普通ポルトランドセメントと対比して図-1 に示す。これによるとセメントに比べてかなり丸みを帯びた微粉末になっていることが分かる。図-2 にレーザ回折式粒度分布測定機（型式：SK LASER PRO7000-S）で測定した PDS の粒度分布を示す。

### 2.3 調合および養生

高流動コンクリートの調合は，図-3 に示すよう

表-3 使用材料の物理的性質

使用材料	種類	性質または成分
セメント	普通ポルトランドセメント	密度: 3.16g/cm <sup>3</sup> 比表面積: 3270cm <sup>2</sup> /g
細骨材	陸砂	表乾密度: 2.62g/cm <sup>3</sup> 吸水率: 1.93% 粗粒率: 2.56
粗骨材	砂利	表乾密度: 2.66g/cm <sup>3</sup> 吸水率: 1.09% 粗粒率: 6.73
混和剤	高性能 AE 減水剤	主成分: ポリカルボン酸エーテル系

表-4 PDS の物理的性質および化学分析

	PDS5 $\mu\text{m}$	PDS10 $\mu\text{m}$	PDS15 $\mu\text{m}$	
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.05	2.21	2.26	
平均粒径* ( $\mu\text{m}$ )	3.45	10.02	15.16	
化学成分 (%)	CaO	52.59	57.73	56.73
	SiO <sub>2</sub>	28.82	25.34	27.02
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.73	6.68	6.59
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.67	3.26	3.51
	MgO	3.09	2.33	2.45
	SO <sub>3</sub>	2.45	3.230	2.10
	TiO <sub>3</sub>	0.553	0.472	0.514
	K <sub>2</sub> O	0.532	0.326	0.435
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.183	0.333	0.264
	MnO	0.157	0.114	0.134
ZnO	0.0263	0.0248	0.239	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0125	0.0113	0.0109	

\*) レーザ回折式粒度分布測定機（型式：SK LASER PRO 7000-S）を使用

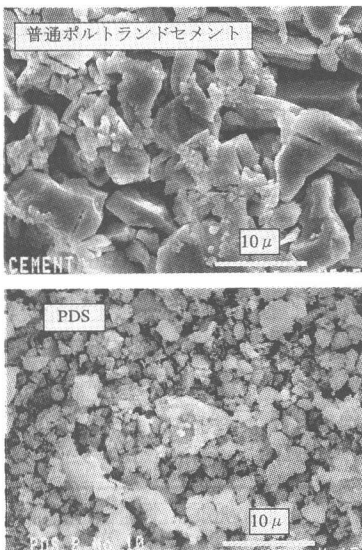


図-1 電子顕微鏡観察結果

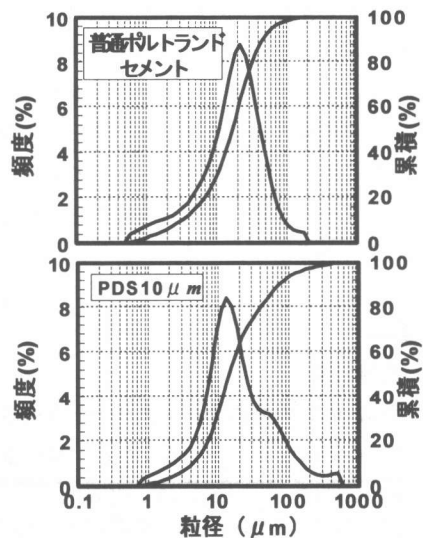


図-2 粒度分布

基本コンクリート					1000ℓ
W	C	S	G	Air	
PDS 混入コンクリート					
W	C	PDS	S	G	Air

W:水, C:セメント, PDS:微粉砕乾燥スラッジ,  
S:細骨材, G:粗骨材, Air:空気

図-3 調合の基本的な考え方

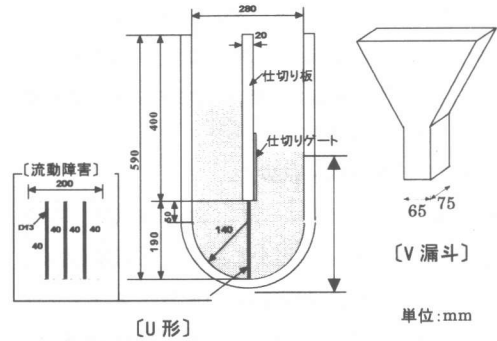


図-4 U形充填試験装置およびV漏斗試験装置

表-5 コンクリートの調合表

	混入率 (%)	$V_w/V_B$ (%)	W/B (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位質量 (kg/m <sup>3</sup> )					
						W	C	PDS	S	G	SP
基本	0	102.4	32.4	32.4	47	170	525	0	775	890	6.819
PDS5 $\mu$	45		38.5	58.9			289	153			10.379
PDS10 $\mu$	15		33.9	38.1			446	55			7.514
	30		35.6	46.3			367	110			7.397
	45		37.5	58.9			289	165			8.392
	60		39.5	81.0			210	220			8.599
PDS15 $\mu$	45		37.2	58.9			289	169			8.232

$V_w$ :水の容積,  $V_B$ :粉体の容積,  $V_w/V_B$ :水粉体容積比, W/B:水粉体比, W/C:水セメント比,  
s/a:細骨材率, W:水, C:セメント, PDS:微粉砕乾燥スラッジ, S:細骨材, G:粗骨材, SP:高性能 AE 減水剤

に絶対容積調合とし, 単位水量 170kg/m<sup>3</sup>, 粉体容積 166ℓ/m<sup>3</sup> で, 骨材量を一定にし, スランプフロー値 60±5cm, 空気量 3±0.5%を得るために高性能 AE 減水剤で調整した。PDS は基本コンクリートのセメント量の内割で 15~60%を混入した。調合の詳細を表-5 に示す。

練混ぜには傾胴ミキサーを用い, 粗骨材, 細骨材, セメント, PDS, 水, 細骨材, 粗骨材の順に投入し, 4 分間練混ぜた。コンクリートは型枠に打設後 2~3 時間程度で表面を平滑にし, その後シートで覆って養生した。材齢 1 日で脱型し, 所定の材齢まで水中養生(温度 20±1℃)を行った。

## 2.4 実験方法

流動性の評価にはスランプフロー試験(目標スランプフロー値 60±5cm)を行い, 材料分離抵抗性には V 漏斗試験(目標流下時間 10±5 秒), 自己充填性は U 形充填試験によって評価した。今回の実験で使用した U 形充填試験装置および V 漏斗試験装置を図-4 に示す。これらのフレッシュ性状に関する試験は練混ぜ直後 10~20 分の範囲内で一斉

に実施し, 経時によるコンクリートの品質変動が試験結果に及ぼす影響を極力排除するようにした。圧縮強度試験(JIS A 1108)は,  $\phi 10 \times 20$ cm の円柱供試体を用いて材齢 7, 28, 91 日において行った。また同時に, コンプレッソメータ(CH-10H)を用いてひずみの測定を行い, ヤング係数を算出した。乾燥収縮ひずみ試験は, 10×10×40cm の角柱供試体を用いて乾燥開始材齢 7 日から測定を開始した。ひずみの測定にはコンタクトゲージ(標点間距離 200mm, 精度 1/1000mm)を用いた。なお, 乾燥収縮ひずみの測定は恒温恒湿室内(温度 20±1℃, 湿度 60±5%)にて行った。

## 3. 実験結果

### 3.1 フレッシュ性状

#### (1) 高性能 AE 減水剤添加量

図-5 に高性能 AE 減水剤の添加量と PDS 混入率の関係を示す。添加量は, 分離が生じない範囲でほぼ最適な高流動コンクリートが得られると判断して定めたものである。スランプフロー値や空気

量を目標範囲内に納めるため、粒径の違いによって高性能 AE 減水剤の添加量に差が生じるが、PDS5 $\mu$  の場合は 10 $\mu$  や 15 $\mu$  に比べて 1.2 倍程度の添加量が必要である。

**(2)スランプフロー試験**

図-6 にスランプフロー値と PDS 混入率の関係を示すが、PDS15 $\mu$  の場合を除いて目標範囲内にあることが分かる。PDS15 $\mu$  の場合、スランプフローが若干大きな値となったが、これは高性能 AE 減水剤の添加量で調整が可能である。

図-7 に 50cm フロー到達速度とスランプフローの関係を示す。スランプフローが同じ値でも、50cm フロー到達速度は異なっており、流動性に違いがあることが分かる。したがって、50cm フロー到達速度が遅いものほど、粘性が高いと判断できる。一般に、図中にハッチで示したように、スランプフローが 60~70cm 程度の建築用高流動コンクリートの 50cm フロー到達速度は、2~5cm/秒であり、土木用高流動コンクリートはもう少し遅く 1~3cm/秒であることが多いが、PDS を用いた高流動コンクリートもほぼこれらの範囲内にあることが分かる。

**(3)V 漏斗流下試験**

図-8 に V 漏斗流下時間と PDS 混入率の関係を示す。一般にスランプフロー値が 60~70cm の高流動コンクリートの流下時間は、通常 5~15 秒の範囲内(図中ハッチをした部分に相当)にあることが多い。本実験では、PDS5 $\mu$  を用いて製造したコンクリートの流下時間が若干長くなっているが、その他の調査は目標範囲内に納まっている。

**(4)U 型間隙通過試験**

図-9 に充填高さ と PDS 混入率の関係を示す。PDS 混入率が 60% のものは若干低い値を示しているが、本実験においては全ての調査において充填高さが 250mm 程度以上であり、充填性が高いことが分かる。

**3.2 硬化性状**

**(1)圧縮強度試験**

表-6 に圧縮強度試験結果の一覧表を示す。また、図-10 に各材齢における圧縮強度と PDS 混入率の

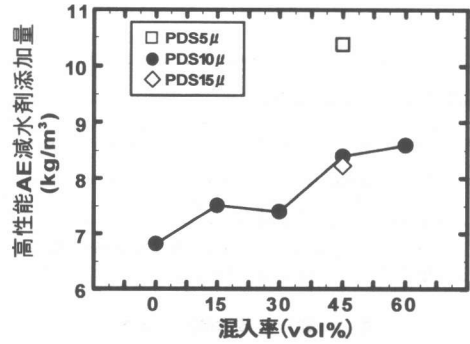


図-5 高性能 AE 減水剤の添加量と PDS 混入率の関係

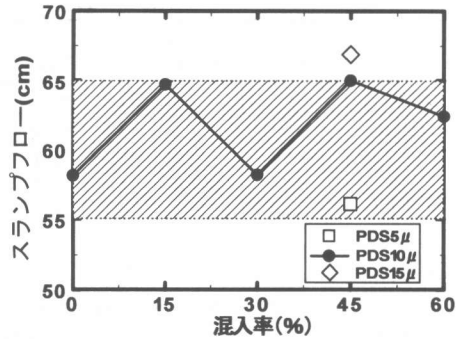


図-6 スランプフローと PDS 混入率の関係

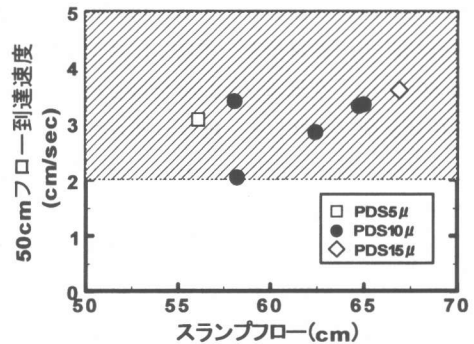


図-7 50cm フロー到達速度とスランプフローの関係

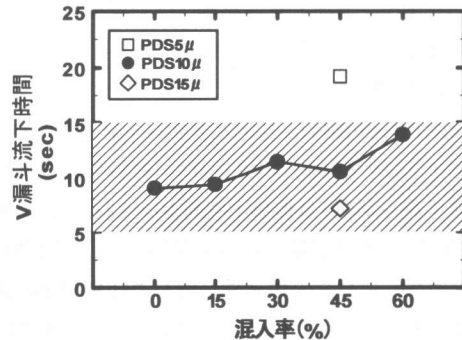


図-8 V 漏斗流下時間と PDS 混入率の関係

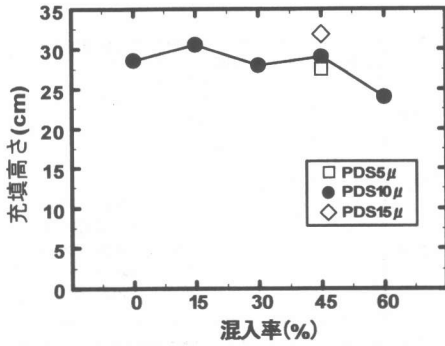


図-9 充填高さ と PDS 混入率の関係

関係を示す。図より PDS 混入率の増加に伴い圧縮強度が直線的に低下していることが分かる。これは PDS をセメント量の内割で混入しているため実質の水セメント比が大きくなることによるものであるが、材齢 28 日の結果を見ると PDS 混入率 60% の場合でも  $30\text{N/mm}^2$  以上の強度が得られており、日本建築学会 JASS 5 における高流動コンクリートの品質規定  $25\text{N/mm}^2$  以上は満足している。粒径の違いによる影響については PDS の粒径が小さいほど若干圧縮強度が大きくなる傾向があるものの、大きな差は見られない。

図-11 に各材齢における圧縮強度とヤング係数の関係を示す。ヤング係数は、応力-ひずみ曲線を求め、圧縮強度の 1/3 の点における割線ヤング係数として算出している。JASS 5 によれば、ヤング係数は  $20\text{kN/mm}^2$  以上と規定されており、すべての調査でこれを満足している。図中の実線は日本建築学会 RC 規準式 (1999 年改定版)<sup>3)</sup> を用いて計算した結果である。これによると本実験の範囲内においてはヤング係数の値は日本建築学会規準式よりも若干小さな値を示しており、PDS を用いたコンクリートのヤング係数の推定においては、補正係数が必要であることが分かる。

## (2) 乾燥収縮試験

図-12 は乾燥収縮ひずみの経時変化を (a) 混入率の違いによる影響および (b) 粒径の違いによる影響に関して示したものである。また図-13 に乾燥期間 180 日における乾燥収縮ひずみと PDS 混入率の関係を示す。これによると乾燥収縮ひずみの値

表-6 圧縮強度試験結果一覧

コンクリートの種類	混入率 (%)	圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )			ヤング係数 ( $\times 10^4 \text{N/mm}^2$ )		
		7日	28日	91日	7日	28日	91日
基本	0	56.71	67.43	77.94	3.27	3.44	3.85
PDS5μ	45	28.89	37.56	40.85	2.29	2.42	2.66
PDS10μ	15	49.90	59.09	68.58	3.10	3.31	3.65
	30	36.81	47.47	51.22	2.60	2.91	3.59
	45	27.27	36.24	40.93	2.42	2.44	2.73
	60	21.20	32.72	39.24	2.14	2.39	2.70
PDS15μ	45	25.88	35.58	42.21	2.37	2.64	2.89

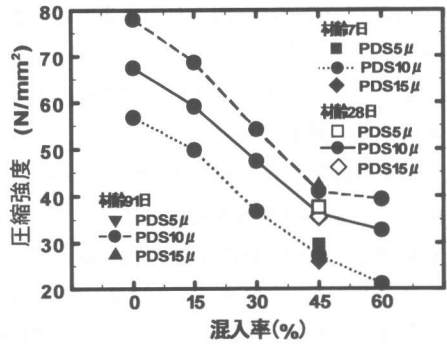


図-10 圧縮強度 と PDS 混入率の関係

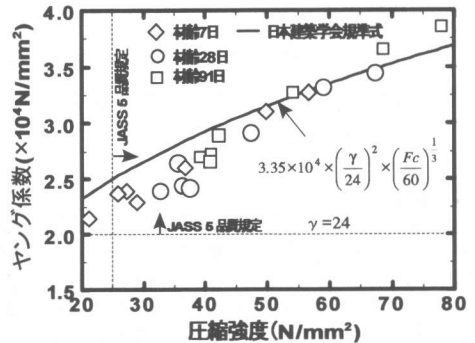


図-11 圧縮強度 と ヤング係数の関係

は PDS 混入率の増加に伴い直線的に増加しているが、これは強度の場合と同様に、実質の水セメント比が大きくなることによるものであり、脱水量にも大きな差が認められた。また、乾燥収縮ひずみに及ぼす粒径の違いによる影響は本実験においてはほとんど見られないことが分かる。JASS 5 によれば、乾燥期間 6 ヶ月における乾燥収縮ひずみは  $800 \times 10^{-6}$  以下と規定されている。これに従えば、PDS 混入率が 45% を超える場合は不適合とな

るが、乾燥収縮ひずみは骨材の種類によって大きく変動することが指摘されており<sup>5)</sup>、この点については今後の課題としたい。

#### 4. 結論

微粉碎乾燥スラッジ(PDS)の高流動コンクリート用粉体系材料としての適用性を評価するために、粒径および混入率が異なる微粉碎乾燥スラッジを用いて高流動コンクリートを製造し、そのフレッシュ性状および硬化性状の特性について実験を行った。本研究の範囲内で得られた結果は以下のようである。

- (1) コンクリートスラッジを乾燥、風砕処理して得られる微粉碎乾燥スラッジ(PDS)はセメントよりも微細な丸みを帯びた粉末である。
- (2) PDS を用いて流動性を備えたコンクリートを製造するためには高性能 AE 減水剤の添加量が多くなるが、容積調合で PDS 混入率 60% の場合でもフレッシュ性状が良好で普通強度程度の高流動コンクリートを製造できる。
- (3) 日本建築学会 JASS 5 の高流動コンクリートの強度、ヤング係数および乾燥収縮ひずみの品質規定に従えば、PDS 混入率が 30% までは十分に対応できる。

#### 【謝辞】

本研究は平成 11 年度ベンチャー企業支援型地域コンソーシアム研究開発(中小企業創造基盤型)(研究開発プロジェクト名:「高機能回収水処理システムを用いた再資源処理技術の実用化に関する研究開発」(委員長:大分大学教授・佐藤嘉昭))および平成 12 年度文部省科学研究費補助金(基盤研究(B), 研究代表者:佐藤嘉昭, 課題番号(2555160))によって行われたものである。また、本研究に参加していただいた全生工組連九州地区本部・技術部長・田口茂久氏, 大分県産業科学技術センター・工業化学部・主幹・佐藤彦氏, ㈱永野工業(代表取締役社長:永野敬喜氏), ㈱アリマ機器(代表取締役:有馬伸氏), ㈱富士商会(代表取締役:佐原純一郎氏)並びに実験に協力していただいた大分県生コンクリート工業組合(木村憲一理事長)の皆様および㈱ポリス物産の方々に謝意を表します。

#### 【参考文献】

- 1) 佐藤, 竹田, 薬師寺他, スラッジ水を積極的に使用したコンクリートの特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No.1, pp. 1123-1128, 1997

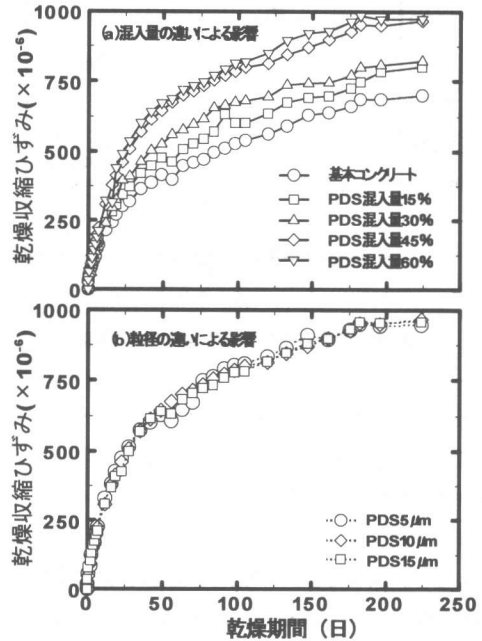


図-12 乾燥収縮ひずみの経時変化

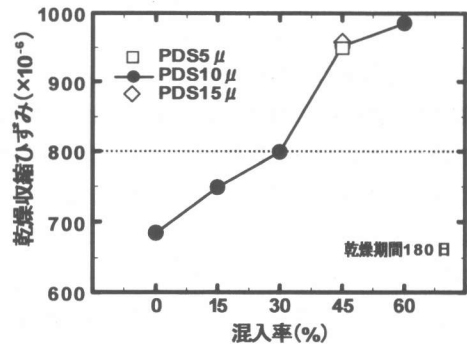


図-13 乾燥収縮ひずみと PDS 混入率の関係

- 2) Y. Sato, Y. Takeda, T. Yakushiji et. al., Studies on the Use of Ready-Mixed Concrete Waste Materials, Int. Conf. on Engineering Materials, Ottawa, Vol. 2, pp. 743-757, June 1997
- 3) 佐藤, 田口, 薬師寺, 完全リサイクル型コンクリートスラッジ処理システムについて, 月刊生コンクリート, Vol. 19, No. 7, pp. 23-33, 2000
- 4) 日本建築学会, 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説一許容応力度設計法一, 1999
- 5) 荒井, 田村, 今本, 木村他, 骨材の品質がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響に関する研究(その5~8), 日本建築学会学術講演梗概集(東北), pp. 647-642, 2000.9