

論文 早強性を有する高流動コンクリートヘスラッジの有効利用に関する研究

添田政司*1・徳光卓*2・大和竹史*3・江本幸雄*4

要旨: PC工場で排出されるスラッジが高流動コンクリートの粉体として利用可能かを明らかにするため、スラッジの成分変動を調べるとともに、コンクリートの流動性、強度および耐凍害性について検討した。その結果、スラッジの添加により流動性は低下するが、練混ぜ方法や高性能AE減水剤の調整で対応できることや、水中養生を行った場合の圧縮強度や耐凍害性に関しては、無混和に比べなんら遜色のないことから早強性を有する高流動コンクリートヘスラッジの有効利用が可能であることなどが明らかにした。

キーワード: スラッジ、高流動コンクリート、蒸気養生、圧縮強度、耐凍害性

1. はじめに

近年、土木・建築関係工事において環境に対する様々な配慮が求められている。コンクリート製品工場における環境問題としては、生コン工場と同様に、製品製造時の残コンクリートやミキサー洗浄などに伴って発生するコンクリートスラッジの問題がある¹⁾。残コンクリートの処理は機械によって、砂分・碎石分・上澄水・スラッジケーキに分類し、このうち、砂分・碎石分はアスファルトコンクリート用骨材として、上澄水は練混ぜ水や洗浄水として再利用が可能である。しかし、スラッジケーキは、品質の安定性や発生するスラッジを全て再利用できないなどの問題から、産業廃棄物汚泥として管理型処分場に廃棄されているのが現状である。

もう一つの環境問題としては、工場周辺住民および作業者に対する騒音対策などである。これについては、工場製品の品質向上も含めて、すでに、PC橋げたに適用できる粉体系の早強性を有する高流動コンクリートの開発²⁾に取り組んできた。その中で、粉体系高流動コンクリートの場合は、材料分離の目的から粉体量が多く、水結合材比も小さいことなどから、高強度になるため、スラッジを粉体の一部として用いた場合

でも利用可能ではないかと考えられた。

そこで本研究では、PC工場で排出されるスラッジが高流動コンクリートの粉体として利用可能かを明らかにするため、スラッジの成分変動を調べるとともに、コンクリートの流動性、強度および耐凍害性について検討したものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料、配合および養生方法

高流動コンクリートの結合材には、早強セメント（比重3.14，比表面積4610cm²/g，略号：HP）と高炉スラグ微粉末（比重2.91，比表面積3830cm²/g，略号：BS）を容積比5：5で使用し、普通コンクリートのセメントには早強セメントを用いた。使用骨材は、細骨材には福岡県甘木産の砕砂（表乾比重2.81，吸水率1.09%，実積率66.9%，略号：S1）と石灰岩砕砂（比重2.63，実積率71.1%，吸水率1.05%，略号：S2）を等量使用した。粗骨材には福岡県甘木産の結晶変岩砕石（表乾比重2.71，吸水率0.84%，実積率56.9%，最大寸法20mm）を使用した。スラッジ（略号：SL）は、PC工場で脱水ケーキ化されたものを、乾燥炉（110℃）で絶乾状態にした後、一様に粉碎するためボールミルで10分間粉碎し

*1 福岡大学講師 工学部土木工学科 工博（正会員）

*2 (株)富士ビー・エス 主任研究員（正会員）

*3 福岡大学教授 工学部土木工学科 工博（正会員）

*4 福岡大学助教授 工学部土木工学科 工博（正会員）

表－１ スラッジの化学成分と物理的性質

No.	化 学 成 分 (%)														物理的性質	
	ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	T-SO ₄	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Total	R ₂ O	比重	ブレン*
1	16.7	24.0	7.32	3.40	42.7	2.09	2.21	0.46	0.26	0.41	0.08	0.14	99.8	0.63	2.06	14070
2	15.9	24.8	7.63	3.56	42.4	2.20	1.86	0.55	0.28	0.42	0.08	0.14	99.8	0.73	2.15	-
3	16.0	24.5	7.40	3.39	42.9	2.20	1.81	0.57	0.29	0.42	0.08	0.15	99.7	0.76	2.16	-

* cm²/g

表－２ コンクリートの配合例

No.	Vw/Vp (%)	W/P (%)	s/a (%)	SL 添加率 (%)	単位量 (kg/m ³)								フレッシュ性状	
					結合材 P			水 W	細骨材		粗骨材 G	SP (Px%)	スランフロー (cm)	空気量 (%)
					HP	BS	SL		S1	S2				
1	99	32.5	54.3	0	340	210	0	180	472	442	800	0.95	70x70	1.8
2	99	32.7	54.3	3	340	196	12	180	472	442	800	1.15	69x69	1.8
3	99	32.9	54.3	5	340	185	19	180	472	442	800	1.25	67x67	1.9
4	-	39.0	42.0	-	428	-	-	167	782	-	1080	1.2	8.5*	1.6

No.1, 2, 3 : 高流動コンクリート No.4 : 普通コンクリート *スランブ

たものを用いた。なお、スラッジはPC工場から5日置きに採取した。スラッジの化学成分および物理的性質を表－1に、電子顕微鏡観察結果を写真－1にそれぞれ示す。混和剤は、高流動コンクリートには銘柄の異なる3種類のポリカルボン酸系の高性能AE減水剤（消泡剤混入、略号：SP）を使用し、普通コンクリートにはナフタレン系の高性能減水剤を使用した。

高流動コンクリートの配合は、水粉体容積比（Vw/Vp）を99%、総粉体量を550kg/m³と一定にした。なお、スラッジは総粉体量の内割りでそれぞれ添加した。また、比較用の普通コンクリートの配合は高流動コンクリートと同一強度が得られるように水セメント比を39%、目標スランブが8±5cmになるように試練りにより決定した。なお、高流動コンクリートと普通コンクリートともにNon-AEコンクリートである。その配合とフレッシュコンクリートの性状を表－2に示す。

練混ぜ方法は、結合材と細・粗骨材を投入して20秒間空練りを行った後、混練水と混和剤を投入し、2分間練混ぜた。練混ぜには、二軸強制練りミキサ（容量50ℓ）を用いた。養生方法は、水中養生（20℃）と蒸気養生の2種類と

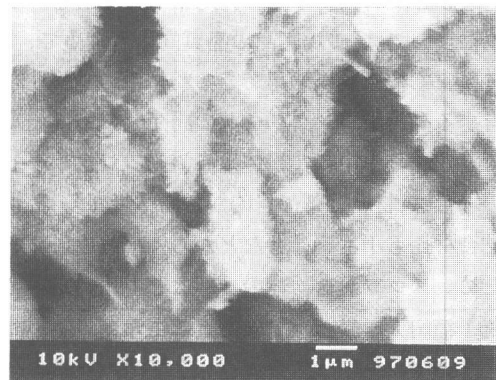
した。蒸気養生は、プログラム蒸気養生槽により、前置き20℃を3時間、昇温勾配20℃/時間、温度保持65℃を3時間、降温勾配5℃/時間で行い、以後は気中養生（温度20℃、湿度70%の室内に放置）を行った。

2.2 試験方法および供試体

流動性の評価にはスランブフロー試験（目標値（70±5cm）を行い、材料分離抵抗性はV75漏斗試験（目標値15±5秒）によって行った。

凝結試験は、JIS A6204に準じて行った。

圧縮強度試験（JIS A 1108）は、φ10×20cmの円柱供試体を用いて材齢1日および28日にそれぞれ行った。



写真－1 スラッジのSEM観察像

乾燥収縮試験は、10 x 10 x 40 cmの角柱供試体を用いて、材齢28日まで水中養生を行った後に恒温恒湿室内（温度20℃、湿度60%）で行った。

凍結融解試験に用いた供試体は、10 x 10 x 40 cmの角柱で、脱型後材齢28日まで所定の養生を行った後に、ASTM C 666 A 法に準じて一日7～8サイクルの水中凍結水中融解試験を行った。

スケーリング試験は、ASTM C 672 に準じて、塩化物溶液（3% NaCl）を23x23 x 7.5 cmの平板供試体内に注いで、自動温度制御装置内（-18±1.5～23±1.5℃）で150サイクルまで行った。なお、スケーリングの評価は、凍結融解後のスケーリング片を採取し、乾燥させた後質量を測定し、供試体の単位面積当たりのスケーリング量により行った。

3. 実験結果および考察

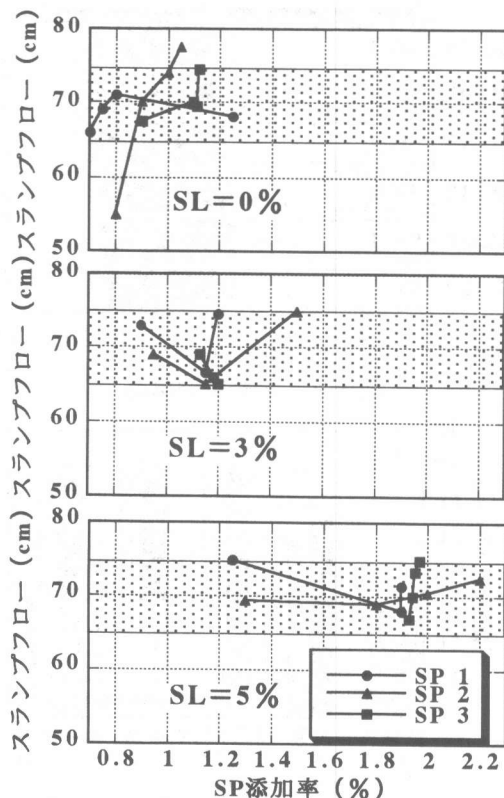
3.1 スラッジの品質特性

スラッジの成分変動を明らかにするため、PC

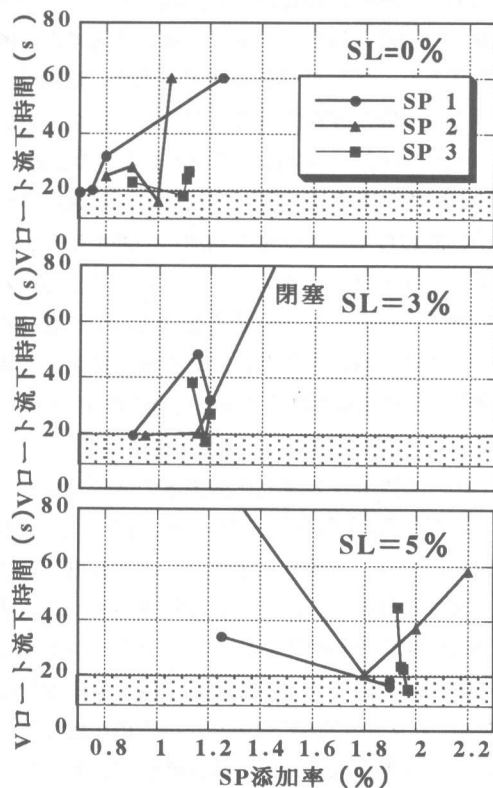
工場から5日置きに採取したスラッジの化学成分を表一に示す。この結果から、スラッジの化学成分は採取日に関わらずほぼ均一な値を示していた。これはPC製品工場においては製品の種類が少ないため、ほぼ同一の配合によってコンクリートを打設しているためスラッジの採取日による顕著な差が生じなかったものと考えられる。また、このときの比表面積はボールミルで粉碎したため、14000 cm²/g 程度となり、早強セメントや高炉スラグ微粉末に比べ3倍程度大きいことが分かった。さらに、SEM 観察の結果では、写真1に示すように、スラッジの表面形状はいびつで針状物が多いことなどが明らかとなった。

3.2 フレッシュ性状

高性能AE減水剤添加率とスランブフローの関係を図一1に、高性能AE減水剤添加率とVロート流下時間の関係を図二に、それぞれスラッジ添加率毎に示す。スランブフロー値は高



図一 1 SP添加率とスランブフローの関係



図二 2 SP添加率と流下時間の関係の関係

性能AE減水剤添加率に関わらずおおむね目標範囲内にあるが、スランプフロー最終到達時間が長くなる傾向にあった。一方、Vロート流下時間は、高性能AE減水剤添加率が多くても少なくとも流下時間が長くなる傾向にあった。しかし、いずれの場合もスランプフローおよび流下時間ともに、高性能AE減水剤の銘柄に関わらずスラッジ添加率が大きいほど高性能AE減水剤添加率が多くなる傾向にあった。これは、スラッジの比表面積が早強セメントや高炉スラグ微粉末に比べ著しく大きいことやSEM観察からもスラッジの表面形状がいびつなため保水性が高まり、流動性が低下したものと考えられる。このようにスラッジは比表面積が大きいことから、次に練混ぜ時間の影響について検討を加えた。

その結果を図-3に示す。なお、練混ぜ時間は材料を全量投入してから時間である。いずれの配合の場合もスランプフローは、練混ぜ時間6分では著しく低下する傾向にあったが、通常の2倍の練混ぜ時間4分では、スラッジの添加率が多いほどスランプフローは、大きくなる傾向にあり、スラッジを添加する場合には適切な練混ぜ時間が存在することが明らかとなった。

図-4は凝結試験の結果を示したものである。凝結時間は始発・終結とも高性能AE減水剤の銘柄に関わらず、スラッジ添加率の増加に伴い若干早くなる結果³⁾となり、スラッジの添加は蒸気養生を行う上で、凝結時間に及ぼす影響は小さいものと判断された。以後の検討においては高性能AE減水剤は全てSP1を用いて行った。

3.2 強度性状

図-5は養生方法と圧縮強度の関係を示したものである。蒸気養生を全く行わなかった材齢1日強度では、スラッジ添加率に伴う強度差は若干でしかなかった。一方、蒸気養生を行った場合はいずれの材齢においても、スラッジ添加率の増加に伴い、圧縮強度は若干低下する傾向にあり、スラッジを5%添加した場合の圧縮強度はスラッジ無混入に比べ1割程度低下した。しかし、いずれの材齢においても目標強度($\sigma_1=40$,

$\sigma_{28}=60\text{N/mm}^2$)を十分に満足しており、スラッジを5%添加した場合でもPC用コンクリートとして適用可能であることが明らかとなった。このようにスラッジを添加した場合でも目標強度を確保できることや、実際にPCホロー桁内部で温度測定を行った結果(図-6)、高流動コンク

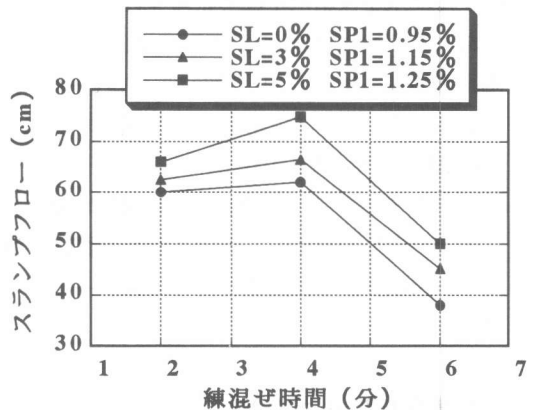


図-3 練り混ぜ時間とフローの関係

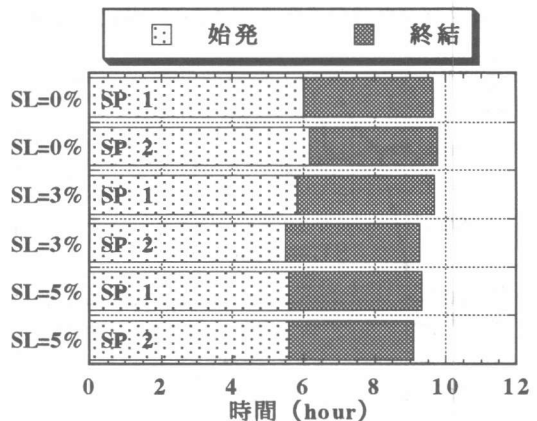


図-4 凝結試験結果

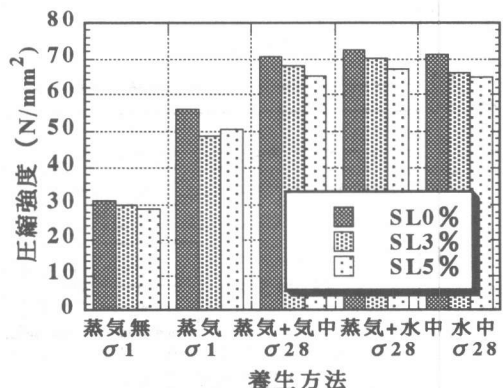


図-5 養生方法と圧縮強度の関係

リートの方が普通コンクリートに比べ温度上昇が著しいこと、さらに、円柱供試体の最高温度は蒸気養生温度を上回ることが明らかとなったため、次に蒸気養生方法について検討を行った。

図-7に、最高温度と上昇温度を変化させ蒸気養生を行ったときの材齢1日の積算温度と圧縮強度の関係を示す。図より、スラッジを添加した場合でも積算温度と圧縮強度には高い相関が認められることが分かった。さらに、目標強度を得るためには、通常の蒸気養生（積算温度 $760^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ ）よりも、スラッジ無混和の場合で約 $160^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ 、添加率3%および5%で約 $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ の低減が可能となることが明らかとなった。このことから、蒸気養生による環境負荷の低減にもつながるものと推察される。

3.3 乾燥収縮

図-8は水中養生を行った場合の乾燥収縮試験結果を示したものである。乾燥収縮ひずみは、普通コンクリートよりも高流動コンクリートの方が若干小さくなる傾向にあった²⁾。また、スラッジ混和による影響では、乾燥日数220日でスラッジ無混和の場合 480μ 、添加率3%で 420μ 、添加率5%で 485μ となり、いずれも 500μ 以下であり、スラッジ添加に伴う乾燥収縮への影響は小さい傾向にあった。竹田ら³⁾は、普通コンクリートにスラッジを混入した場合は単位水量の増加に伴う乾燥収縮ひずみの増加を指摘しているが、本実験のように高流動コンクリートに使用した場合は、単位水量を一定にしているため、乾燥収縮はほぼ同程度を示したものと考えられる。

3.4 耐凍害性

図-9は水中凍結融解試験における凍結融解サイクルに伴う相対動弾性係数の経時変化を示したものである。水中養生を行った場合、スラッジを添加した場合でも十分な耐凍害性を示している。しかし、蒸気養生後気中養生を行った場合、スラッジの混和に関わらず、早いサイクル数で相対動弾性係数は著しく低下していることから、スラッジ添加による影響よりはむしろ養

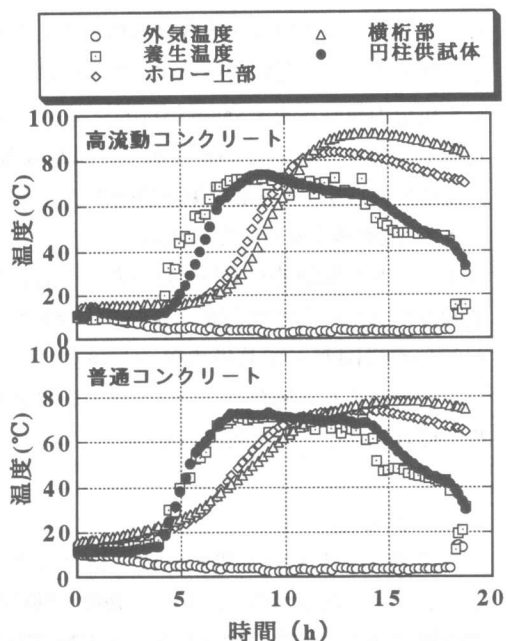


図-6 PC 桁内部温度測定結果

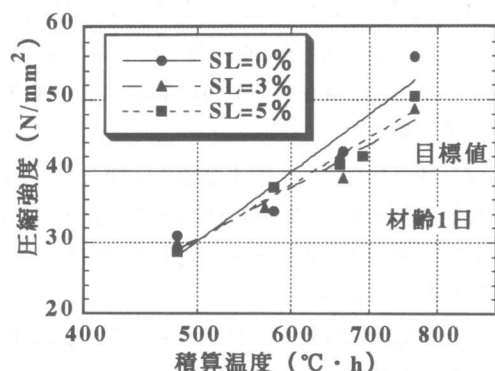


図-7 積算温度と圧縮強度の関係

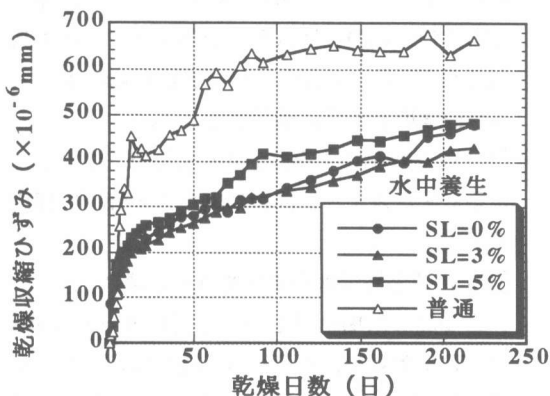


図-8 乾燥収縮試験結果

生方法による影響の方が大きいものと考えられる。従って、耐凍害性を確保するためには、蒸気養生後の後養生を十分に行うか⁴⁾、あるいは適切な空気を連行する必要があると思われる。

次にスケーリング試験結果を図-10に示す。図より、蒸気養生を行った普通コンクリートは、スケーリング量が著しく多くなった。一方、高流動コンクリートの場合は、養生方法やスラッジ添加率に関わらず若干の差でしかなく、スラッジを混入した場合でも、スケーリング抵抗性に優れることが明らかになった。

4. まとめ

高流動コンクリートの粉体の一部としてスラッジを用いた場合の、流動性、強度特性や耐凍害性に及ぼす影響を検討した。本実験で得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) PC製品工場においてはほぼ同一の配合によってコンクリートを打設しているため、スラッジの化学成分は採取日に関わらずほぼ均一な値を示した。
- (2) スランプフローおよび流下時間ともに、高性能AE減水剤の銘柄に関わらずスラッジ添加率が大きいほど高性能AE減水剤添加率が多くなる傾向にあった。
- (3) 凝結時間は始発・終結ともスラッジ添加率の増加に伴い若干早くなった。
- (4) 圧縮強度は、スラッジ添加率の増加に伴い若干低下する傾向にあり、スラッジを5%添加した場合の圧縮強度はスラッジ無混入に比べ1割程度低下した。しかし、いずれの材齢においても目標強度を十分に満足した。
- (5) 乾燥収縮ひずみは、単位水量を一定にしているため、スラッジ混和に関わらずほぼ同程度の値を示した。
- (6) 耐凍害性は水中養生を行った場合、スラッジを添加した場合でも十分な抵抗性を示すが、蒸気養生後気中養生を行った場合は、スラッジの混和に関わらず、早いサイクル数で相対動弾性係数は著しく低下した。

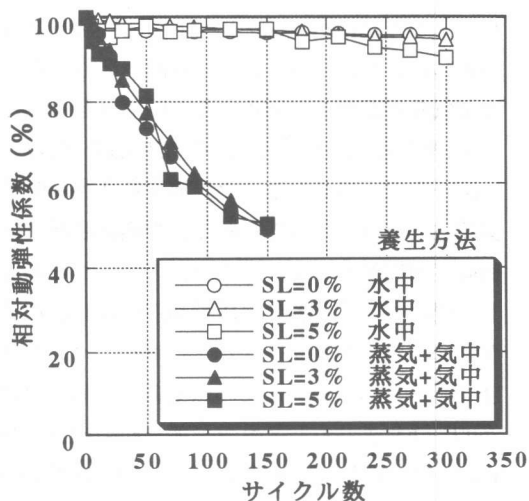


図-9 凍結融解試験結果

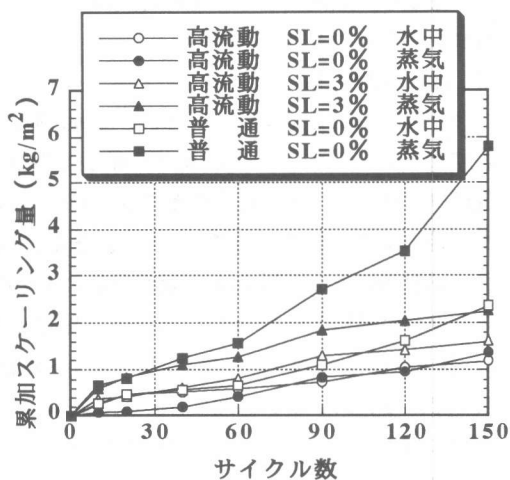


図-10 サイクル数と累加スケーリング量の関係

参考文献

- 1) 畑中重光・谷川恭雄：生コンスラッジに関する研究の現状，コンクリート工学，Vol.33，No.6，pp.14-24，1995.6
- 2) 添田政司・徳光卓・大和竹史：蒸気養生した早強型高流動コンクリートの諸特性について，第7回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.827-832，1997.10
- 3) 竹田吉紹・高野正光・佐藤嘉昭：乾燥スラッジを混入したコンクリートの特性に関する研究，セメントコンクリート論文集，No.48，pp.424-429，1994.12
- 4) M.Soeda, T.Yamato, Y.Sato, Y.Emoto：Freezing and Thawing Durability of High Flowing Concrete Using Different Cementitious Materials, American Concrete Institute, Special Publication 170, Vol. 2, pp. 933 - 948, 1997.8