凝結調整剤を添加したスラッジ水を練混ぜ水に用いた コンクリートの諸特性[†]

中 本 純 次* 戸 川 一 夫*
三 岩 敬 孝* 谷 敏 行*

Some Properties of Concrete Containing Sludge Water with Setting Retarder

by

Junji NAKAMOTO*, Kazuo TOGAWA*, Yoshitaka MITSUIWA* and Toshiyuki TANI*

Authors have been studying for several years as for the effective utilization of sludge water produced in ready mixed concrete plants due to washing of a mixer, agitating truck drum etc. Nowadays, JIS A 5308 permits the usage under 3 percent as solids of sludge for the unit content of cement of new concrete. Recently, it is strongly requested to re-use a further large quantity of sludge water, in order to achieve the zero-emission. Sludge water consists of cement, fine particles of aggregate and water. All materials are one of the constituents of concrete. This study, in order to utilize the larger quantity of sludge water than that now allowed, is to verify the properties of concretes containing sludge which were designed for the identical slump and compressive strength to comparative concrete. From the results of this study, it became clear that as for the sludge concrete containing sludge within the range of 3-15%, there was no problem about the properties of fresh and hardened concrete, that is, slump, bleeding, compressive strength, drying shrinkage, carbonation depth and freezing and showing resistance, etc. In other words, within the range of 15% of sludge solid content, the concrete containing sludge water with setting retarder could obtain good performance as same as comparative concrete. It was also confirmed that the bulk volume of coarse aggregate was available for the design method of concrete mixture.

Key words: Zero-emission, In-plant recycle, Concrete sludge, Setting retarder, Mix design, Properties of fresh concrete, Properties of hardened concrete, Bulk volume of coarse aggregate

1 ま え が き

レディーミクストコンクリートプラント（以下生コンプラントという）では、ミキサやアジテータトラックドラムに付着したコンクリートの洗浄および戻りコンクリートの洗浄によって回収水が発生する。一般に、その回収水から骨材を回収した残りの懸濁水がスラッジ水、またスラッジ水が濃縮され流動性を失った状態のものがスラッジと呼ばれる。¹⁾これまで発生するスラッジの多くはスラッジケーキ化され埋め立て処分されてきたが、埋め立て処分場の枯渇と新規の立地が困難になってきていること、また地球環境保全という視点から再利用、再資源化などリサイクルを図ることにより極力廃棄物を排出しないことが求められている。そのような社会情勢の下、一切の廃棄物を出さない、すなわちゼロエミッションの達成に向けて努力が重ねられてきている。

スラッジ水の利用について、JIS A 5308 では生コンクリートに対して単位セメント量の 3% の固形分の使用を許容しているが、生コンプラント内でゼロエミッションを達成するためには、さらにその使用量を増大することが必要と考えている。著者らの私的な推測ではあるが、現在許容されている 2 倍程度の使用が可能になればスラ

ジ水の完全循環型再利用に近づくものと考えられる。

著者らは、発生するスラッジ水の全量を生コンプラント内で、コンクリートの練混ぜ水として再利用することを目指して、スラッジ水の使用量増加の可能性を検討してきており、凝結調整剤を添加してスラッジ水中のセメント粒子の水和の進行を抑制し、スラッジの固化を防止して、スラッジ水の品質（本報告では、スラッジ水中のセメント粒子の水和の程度ならびにスラッジの固化の程度の 2 項目をもって品質と定義する）の安定化を図ることによってスラッジ材齢 3 日で、コンクリートの単位セメント量に対するスラッジ固形分の添加率（以下、スラッジ固形分率¹⁾と呼ぶ）が 9% までであれば、種々の環境温度条件においても、また配合等が変化してもコンクリートの特性にあまり悪影響を与えることなくスラッジ水を再利用出来ることを明らかにしてきている。^{2)~4)}

本研究は、コンクリートのスランプ値と材齢 28 日の圧縮強度を同じくし、生コンプラントから排出されるスラッジ水と同等な成分を有する人工的に配合されたスラッジ水に凝結調整剤を添加して安定化したスラッジ水を添加したコンクリートとスラッジ水無混入の基準コンクリートの諸特性を比較検討するものである。なお、検討項目

† 原稿受理 平成 15 年 12 月 24 日 Received Dec. 24, 2003

* 正 会 員 和歌山工業高等専門学校環境都市工学科 〒644-0023 御坊市名田町野島, Dept. of Civil Eng., Wakayama National College of Tech., Nada-cho, Gobo, 644-0023

は、フレッシュコンクリートについてはスランブロスならびにブリーディング特性、硬化コンクリートについては圧縮強度、乾燥収縮ひずみ、中性化深さおよび凍結融解抵抗性である。

2 実験概要

2・1 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³）を使用した。細骨材は徳島県那賀川産の川砂（密度 2.61g/cm³、粗粒率 3.01、吸水率 1.84%）、粗骨材は赤穂市西有年産の流紋岩質溶結凝灰岩碎石（密度 2.63g/cm³、粗粒率 6.57、吸水率 0.80%、最大寸法 20mm）を用いた。混和剤は AE 減水剤（リグニンスルホン酸化合物およびポリオール複合体）および AE 助剤（変形アルキルカルボン酸化合物系陰イオン界面活性剤）を使用した。また、使用した凝結調整剤の主成分はアルキルアミノホスホン酸系である。

2・2 スラッジの配合

スラッジ水は、前述の品質やスラッジ水に占める固形分の濃度（以下、スラッジ水の濃度と呼ぶ）が一定に管理できるように実験室内において作成した。また、スラッジ水のかく拌は、生コンプラントのスラッジ水処理設備をモデル化したかく拌機を作成して行った。近隣の生コンプラントで発生するスラッジ水の調査を行ったところ、スラッジ水に占める固形分の割合は約 15%、固形分に占める骨材細粒分の割合は約 20% であった。なお、スラッジ固形分に含まれる骨材細粒分の最大粒径は 0.15mm 程度であった。

本研究では、Table I に示すようにスラッジ水は実際の生コンプラントで発生するスラッジ水に近い配合のものを作成した。スラッジ水は、まずセメント、骨材細粒分および水（水セメント比 60% 相当分）を混入して練り混ぜた。そして、練混ぜ時から 3 時間経過後に水の質量割合が 85% になるようにスラッジ水に残りの水を加えて作製した。また、スラッジ水への凝結調整剤の添加も練混ぜ時から 3 時間後にいった。ここで 3 時間としたのは生コン製造後ミキサー車が生コンプラントを出発して戻ってくるまでの時間を 3 時間と想定したことによっている。なお、スラッジ水は作製時から試験に供するまで 20℃ の環境下でスターラーにより継続してかく拌した。

2・3 凝結調整剤の添加率と実験計画

スラッジ水中のセメント粒子の水和の進行を管理することができればスラッジ水の品質の安定化につながると考えられる。そしてスラッジ水の品質が安定化すれば委員会報告⁵⁾にあるようにスラッジ固形分の使用量の増加が期待できるものと考えられる。ここではスラッジ水中

のセメントの水和の進行によるスラッジの固化を防ぐ目的で凝結調整剤を使用した。スラッジ水中のセメントの水和の進行度合いは粉末 X 線回折試験によって水酸化カルシウムの生成の有無を確認することと強熱減量試験により検証した。

その結果、環境温度 20℃ の場合、スラッジ水中のセメント量 (C) に対して凝結調整剤を 2% 添加することにより練混ぜ後材齢 72 時間まではセメントの水和を抑制してスラッジの固化を防止できることが明らかとなった。そのため本実験では、凝結調整剤の使用量は $C \times 0.02$ の一定⁶⁾とした。

使用スラッジ水の材齢は、これまでの研究^{2), 3)}のとり 1 日と 3 日の 2 段階を考えた。なお、材齢 1 日のスラッジ水については凝結調整剤は添加せずに、材齢 3 日のスラッジ水についてのみ凝結調整剤を添加することにした。コンクリートへのスラッジ固形分率については、これまでの研究で 9% までの使用が可能と判断されたがさらに多量使用の可能性を検討するために、コンクリートの単位セメント量に対して、スラッジ固形分率で 3, 9 および 15% の 3 段階を計画した。実験計画を Table II に示す。

2・4 コンクリートの各種試験方法

フレッシュコンクリートのスランブおよびブリーディングは、JIS A 1101「コンクリートのスランブ試験方法」、JIS A 1123「コンクリートのブリーディング試験方法」により行った。また、硬化コンクリートの圧縮強度試験、乾燥収縮試験および凍結融解試験については、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」、JIS A 1129「モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法（コンタクトゲージ法）」および JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法（A 法）」に準じた。中性化促進試験は、炭酸ガス濃度 15%、温度 35℃、相対湿度 60% の環境下で行った。なお、コンクリートの練混ぜ時、養生時および各種試験時の環境温度は中性化促進試験を除いてすべて 20℃ である。

3 結果の考察

3・1 コンクリートの配合設計方法

本研究では、通常の土木用のコンクリートを想定して、スランブ 8 ± 1 cm、空気量 $4.5 \pm 1\%$ を計画した。また、本実験ではコンクリートの配合設計は、単位粗骨材容積法により行った。同一のワーカビリティを得るための粗骨材かさ容積は、コンクリート標準示方書「施工編」⁷⁾にも示されているように細骨材の粗粒率と線形関係にある。スラッジ水を添加した場合、スラッジは 0.15mm 以下の微粒分なのでそれを細骨材の一部とみなすと細骨材の粗

Table I. Mix proportion of sludge.

Cement (mass%)	Fine sand* (mass%)	Water (mass%)	Setting Retarder (Cement×%)
12	3	85	2

Table II. Test program.

Factor	Level
Sludge content (%)	0, 3, 9, 15
Age of sludge (day)	1, 3
Setting retarder content (Cement×%)	0, 2

粒率が小さくなることになる。すなわち、スラッジ固形分率の増加によって、細骨材の粗粒率は減少することから、粗骨材かさ容積は増加することになる。

基本的に使用する骨材の違いによって、粗骨材かさ容積は変化するがここではスラッジ水を添加しない基準コンクリートについて0.66を選定した。また、スラッジ固形分率が3%程度（JISの許容範囲内）であれば大きな影響はないと判断し、スラッジ固形分率3%の場合の粗骨材かさ容積は基準コンクリートの場合と同じ0.66とした。なお、スラッジ固形分率の増加による粗骨材かさ容積の増加率については、コンクリートがワーカブルでプラスチックな状態にあることを目視で判断して決定した。本実験では、スラッジ固形分率6%の増加で粗骨材かさ容積は0.02増加する結果となった。

配合設計手順としては、それぞれのスラッジ固形分率における粗骨材かさ容積を定めた後、基準コンクリートと同一スランプが得られる単位水量を選定した。スラッジ水に凝結調整剤を添加した場合、減水効果があることから単位水量（W）は若干減少した。そして、基準コンクリートの材齢28日圧縮強度と同一強度を得る水セメント比を定めるためのC/W－強度関係を得るために、ここでは基準コンクリートの水セメント比（57.9%）を中心にしてW/Cを5%増減させた配合を計画した。なお、スラッジ固形分率が一定の場合では、コンクリートの単位水量および粗骨材かさ容積も一定とした。

Fig. 1は、スラッジ水混入コンクリートについて、材齢28日の圧縮強度とセメント水比（C/W）の関係をプロットしたものである。なお、図中の破線は、基準コンクリートの圧縮強度値を示している。同図に示すようにスラッジ水混入コンクリートについても通常のコンクリートと同様に圧縮強度とセメント水比（C/W）の間には線形関係が成立すると考えてよい。

したがって、各スラッジ水混入コンクリートについて、基準コンクリートと同等の圧縮強度を得るための水セメント比は回帰直線関係から内挿法により求めた。なお、15%SRについては、強度改善効果が大きかったため、外挿により求めることとなった。その結果、Table IIIに示すように本配合が定まった。⁸⁾

Table IIIより、凝結調整剤を添加したスラッジ水を用いた場合、スラッジ固形分率が高くなるにしたがって、同一スランプを得るための単位水量は低減し、また同一強度を得るための水セメント比は高くなることがわかる。

Fig. 1. Relationship between compressive strength and nominal C/W.

3・2 スランプの経時変化

Fig. 2はスランプおよび材齢28日の圧縮強度を同一にしたコンクリートのスランプの経時変化を示している。なお、前述したように材齢1日のスラッジ水については凝結調整剤は無添加であり、材齢3日のスラッジ水には凝結調整剤を所定量添加している。

本研究では、いずれのコンクリートについても時間経過に伴うスランプの変化はほぼ同程度であり、基準コンクリートとも違いは認められない。

Fig. 2. Relationship between slump and time after completion of mixing.

Table III. Mix proportion of concrete.

Notation	Sludge Content (%)	Setting Retarder (%)	Slump (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	Unit content (kg/m³)					
							W	C	S	G	AE water reducer *	AE agent **
base	0	0	8±1	57.9	4.5±1	45.8	162	280	843	1003	2.80	1.511
3%NSR	3	0	8±1	56.2	4.5±1	45.7	162	288	836	1003	2.88	1.730
3%SR	3	2	8±1	58.0	4.5±1	46.3	158	272	860	1003	2.72	1.634
9%SR	9	2	8±1	62.5	4.5±1	45.5	155	248	857	1034	2.48	1.340
15%SR	15	2	8±1	64.2	4.5±1	44.1	155	241	833	1064	2.41	1.303

*4 dilution **100 dilution

ちなみにスランプロスはセメント粒子の水和の進行により, 自由水で占められていた部分が水和物により置換される過程で水和物の凝集が起これ, 次第に流動性が失われていくものであり, 水和物の生成量と水隙の関係で定まる。スランプロスについて, 上述したような結果になった理由として, 本研究では Table III より凝結調整剤を添加したスラッジ水を用いた場合には, 同一スランプおよび同一強度を得る単位水量および単位セメント量は減少することがわかる。一方, 後述の Fig. 4 に示されるようにいずれのコンクリートについても補正 C/W はほぼ同程度である。したがって, 水和が同程度であれば凝結調整剤を用いて単位水量が少ない場合の方がスランプロスは大きくなるが, 反面, 凝結調整剤は水和を遅延する働きをするため, それらが相殺されて凝結調整剤を用いない基準コンクリートと同程度のスランプロスとなったものと考えている。

3・3 ブリーディング特性

Fig. 3 は, 各種コンクリートのブリーディング率の経時変化を示している。また, Fig. 4 は, 基準コンクリートと同じ強度を得るための C/W を示している。なお同図では, Fig. 1 から求めた C/W を見かけの C/W (nominal

Fig. 3. Results of bleeding rate of concretes.

Fig. 4. C/W to obtain strength identical to the comparative concrete.

C/W), スラッジ水中のセメント粒子を単位セメント量の一部として計算したセメント水比を補正 C/W (corrected C/W) と定義している。

コンクリートのブリーディング率は, 凝結調整剤添加, 無添加, またスラッジ添加率にかかわらず試験開始後から時間経過とともに増加する。そして凝結調整剤無添加の場合はブリーディングの終了が早くなるといえる。凝結調整剤添加の場合は, 無添加の場合と比較してブリーディングの終了が遅く, その結果ブリーディング率は大きくなっている。

これまで, 基準コンクリートにスラッジを外割添加したスラッジ水混入コンクリートについては, 凝結調整剤無添加のスラッジ水の場合, 最終ブリーディング率は, スラッジ固形分率が増加すれば減少し, 凝結調整剤を添加したスラッジ水を用いた場合, ブリーディング率は凝結調整剤無添加スラッジ水の場合よりも多くなることを明らかにしてきた^{2), 3)}しかし, 本研究では, Fig. 3 に示すように凝結調整剤を添加したスラッジ水を 9% および 15% 添加したコンクリートは最終ブリーディング率が基準コンクリートと同程度になった。これは, 単位水量が少なくなったことと, Fig. 4 に示すように見かけの C/W は小さくなるが補正 C/W はほぼ同程度になることによると考えられる。⁸⁾

3・4 圧縮強度

Fig. 5 は, 各種コンクリートの材齢 7 日, 28 日および 91 日の圧縮強度試験結果を示している。

材齢 28 日の目標圧縮強度は 34N/mm^2 であるが基準コンクリートならびに凝結調整剤を用いないスラッジ固形分率 3% のコンクリート (3%NSR) については, 若干目標強度に至らなかった。このことは, 最初に設定した強度 - C/W 推定直線の若干の不正確さによるものと考えられる。また, いずれの配合についても, 材齢の経過に伴う強度の増進の程度は通常のコンクリートと同様と考えられる。ただ, 3%NSR については強度増進の程度は若干低い結果となった。これは, Fig. 4 に示しているように, 凝結調整剤を用いないスラッジ水を添加した場合,

Fig. 5. Compressive strength of concretes.

同一強度を得るための C/W が大きくなることから、スラッジ水中のセメント粒子が強度増進に悪影響を与えていることが危惧される。

以上のことから、凝結調整剤を用いたスラッジ水の場合、スラッジ固形分率が15%の範囲内では、いずれのコンクリートについても、圧縮強度の面からは問題はないと考えられる。

3・5 乾燥収縮ひずみ

Fig. 6 は、材齢 28 日まで 20℃で水中養生し、以後温度 20℃、湿度 60% で気中養生した場合の各種コンクリートの乾燥収縮ひずみと材齢との関係を示している。

全てのコンクリートについて乾燥材齢初期においては急激に収縮するが材齢の経過とともに増加割合が小さくなる。いずれのスラッジ水を用いたコンクリートの乾燥収縮についても、基準コンクリートと比較して同等か若干小さくなる結果となった。これは、スラッジ固形分率が大きい場合、見かけの W/C は大きくなるので、乾燥収縮ひずみも大きくなることが予想されるが、Fig. 4 に示したように補正 C/W 比はほとんど同じであること、また Fig. 5 に示したように圧縮強度は若干大きいこと、単位水量が少ないこと、さらにスラッジ水中のセメント粒子を単位セメントの一部と考えた場合でも単位セメント量は若干少ないことから、乾燥収縮ひずみは小さくなったものと考えている。

したがって、スランブと材齢 28 日の圧縮強度を同じになるように配合設計した場合、スラッジ水の使用は乾燥収縮の面からは何ら問題ないようである。

Fig. 7 は、水中養生終了時点基準として材齢 355 日までの乾燥収縮ひずみ測定用供試体の質量減少率を示している。スラッジ固形分率が多いコンクリートの方が質量減少量は少ない。これはスラッジ水中のセメント粒子が結合材として有効に働き、また実質的な水セメント比が若干小さくなっていることから、コンクリートがより密実化していることを示しているものと考えられる。

Fig. 6. Drying shrinkage of concretes.

Fig. 7. Mass loss of concretes.

3・6 中性化深さ

Fig. 8 は、材齢 28 日まで水中養生した後、2 週間気中乾燥させたコンクリート供試体を促進中性化させた中性化深さと促進中性化期間との関係を示している。中性化深さは、切断面にフェノールフタレイン 1% エタノール溶液を噴霧し、赤変しない部分の平均深さで表している。図より、中性化深さは 15%SR が最も小さい。また、いずれのコンクリートについても大きな違いは認められない。

スランブと材齢 28 日の圧縮強度を同じになるように配合設計したスラッジ水混入コンクリートについては、中性化に関して普通のコンクリートと同等と考えてよい。なお、本実験結果については、通常の $\sqrt{t}$ 則よりは直線に近い関係となった。

3・7 凍結融解抵抗性

Fig. 9 は、各種コンクリートの耐凍結融解抵抗性試験 (A 法) の結果を示している。

いずれのコンクリートについても耐久性指数が 95 以上と十分に凍結融解抵抗性を有することが確認された。スラッジ水混入コンクリートの凍結融解抵抗性は、スラッジ水無混入のコンクリートの耐凍結融解抵抗性と異なる

Fig. 8. Relationship between carbonated depth and age.

Fig. 9. Results of freezing and thawing resistance of concretes.

ことはなく、耐凍結融解抵抗性の面から、凝結調整剤を添加して安定化させたスラッジ水を固形分率 15% まで用いることは問題ないと考えてよい。

4 結 論

本研究は、スラッジ水の多量有効利用を図る目的で、生コンプラントから排出されるスラッジ水と同等な成分を有する人工的に配合されたスラッジ水に凝結調整剤を添加して安定化したスラッジ水を用いたコンクリートについて、スラッジ水無混入の基準コンクリートと同等の特性（ここでは、スランプならびに材齢 28 日の圧縮強度）を有するスラッジ水混入コンクリートを配合設計し、それらスラッジ水混入コンクリートの諸特性を実験的に検討したものである。

本実験の範囲内で次のことがいえる。

(1) 本研究では、スラッジ水混入コンクリートの配合設計方法に関して、単位粗骨材容積法を用いることを試

みたが、単位粗骨材容積法は有用であることが確かめられた。

(2) スラッジ水混入コンクリートのフレッシュコンクリートのスランプロスはスラッジ固形分率が違ってほぼ同程度であり、基準コンクリートとの違いは認められない。また、ブリーディング率も基準コンクリートと同程度か若干低い結果となった。

(3) スラッジ水混入コンクリートの硬化コンクリートの諸特性について、材齢の経過に伴う強度の増進の程度は基準コンクリートと同様であった。また、乾燥収縮ひずみ、中性化深さ、凍結融解抵抗性についてもスラッジ水混入による悪影響は認められなかった。なお、本実験では、凝結調整剤を用いないスラッジ水の利用については強度増進の程度が若干低い結果となったことから、注意を要する。

以上の結果から、スラッジ水に凝結調整剤を適量添加することで、スラッジ水の品質の安定化が図れ、スラッジ固形分率 15% までの有効利用が可能になったと考えられる。生コンプラントでのゼロエミッションの達成が期待される。

参 考 文 献

- 1) JIS A 5308 レディーミクストコンクリート 附属書 9.
- 2) 中本純次, 戸川一夫, 三岩敬孝, 材料, **49**, 1121 (2000).
- 3) 中本純次, 戸川一夫, 三岩敬孝, 材料, **50**, 812 (2001).
- 4) 中本純次, 戸川一夫, 三岩敬孝, 材料, **51**, 1117 (2002).
- 5) 日本コンクリート工学協会, コンクリートスラッジの有効利用に関するシンポジウム, JCI-C40, 第 I 編 (1996).
- 6) 中本純次, 戸川一夫, 三岩敬孝, 谷 敏行, セメントコンクリート論文集, No.53, 318 (1999).
- 7) 土木学会, コンクリート標準示方書「施工編」付録 I (2002).
- 8) 中本純次, 戸川一夫, 三岩敬孝, 谷 敏行, セメントコンクリート論文集, No.57, 32 (2003).