

論文 結合材として用いるスラッジ固形分の有効利用に関する実験的研究

砂田 栄治^{*1}・古井 博^{*2}・西村 正^{*3}・佐藤 立美^{*4}

要旨：オキシカルボン酸を主成分とする凝結遅延剤を添加したスラッジ水を用い、水セメント比 3 水準、スラッジ固形分の水和進行程度 3 水準、スラッジ固形分率 4 水準の合計 36 配合について実験を行った。実験の結果、スラッジ固形分の強熱減量が 3%程度以下であればスラッジ固形分率 9%まで、強熱減量が 5%程度以下であればスラッジ固形分率 3%までをセメントと置き換えて使用してもコンクリート品質に悪影響を及ぼさないことを確認した。

キーワード：スラッジ水、スラッジ水改質剤、結合材、強熱減量、スラッジ固形分率

1. はじめに

近年、生コン工場においてはスラッジ水脱水ケーキの処理が年々困難になってきている。本研究は、コンクリートの品質に悪影響を及ぼすことなく、スラッジ水を練混ぜ水として全量使用する方法を確立することを最終的な目的として行った。

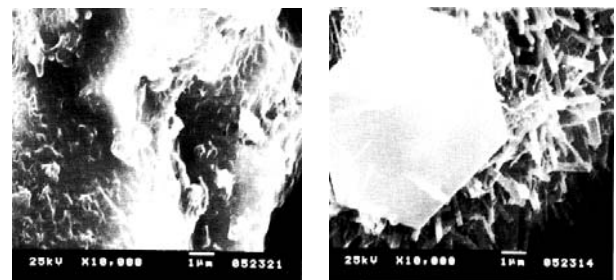
スラッジ水の活用に関する既往の研究には、スラッジ水を脱水後に乾燥粉碎して粉末状にしたものを、計量混合によりコンクリートの結合材として用いる研究など¹⁾²⁾がある。

本研究の特徴は、スラッジ水のままで計量混合することにより、スラッジ固形分（以下、固形分という）をコンクリートの結合材としてセメントと置き換えて用いようとするものであり、オキシカルボン酸を主成分とする凝結遅延剤（以下、スラッジ水改質剤という）を用いることで、スラッジ水中のセメント粒子の水和を抑制管理したスラッジ水（以下、改質スラッジ水という）の有効的な活用方法の研究である。

2. 実験概要

写真 - 1³⁾は、強熱減量がそれぞれ 3%および 13%のスラッジ水中に存在するセメント粒子の電子顕微鏡写真である。写真 - 1(b)でわかるように水和の進んだセメント粒子は細い針状の水和物が生成され、この空隙にはモルタルおよびコンクリートの流動性に寄与しない水の占める割合が、非常に大きくなっていることが推察される。

本実験では固形分の強熱減量（以下、ig-loss という）をスラッジ水中のセメント粒子の水和進行の指標とし、ig-loss の増加がコンクリートの品質にどの程度影響を与えるか調査した。



(a) 強熱減量 3%

(b) 強熱減量 13%

写真 - 1 セメント粒子の電子顕微鏡写真³⁾

2.1 改質スラッジ水の製作

実験に用いた改質スラッジ水は、改質スラッジ水を製作するための予備実験として、a)実際に生コン工場から発生したスラッジ水、b)上水道水に普通ポルトランドセメントを添加した懸濁水（以下、疑似スラッジ水という）および c)疑似スラッジ水に砂分を固形分に対し 10～30w%添加したものなどについて、スラッジ水改質剤の添加時期を変更するなどしてモルタル試験で検証した。なお、スラッジ水濃度（スラッジ水に対する固形分の質量分率で、以下濃度という）は 13%としている。

検証結果⁴⁾では、モルタルフロー比および活性度指数に有意差はなく、接水後 1～3 時間後の疑似スラッジ水にスラッジ水改質剤を添加した固形分の ig-loss 進行程度はほぼ同等であったことから、b)の疑似スラッジ水を採用することとし、スラッジ水改質剤の添加時期は接水後 2 時間とした。

実験の ig-loss 水準は ig-loss 2%、ig-loss 5%および ig-loss 8%と定め、スラッジ水改質剤の添加率を調整し、24 時間保管後の ig-loss がそれぞれ目標の値になるよう管理したものをを用いた。

*1 広島県生コンクリート工業組合 技術委員会 品質技術部会長（正会員）

*2 広島地区生コンクリート協同組合共同試験場 場長（正会員）

*3 グレースケミカルズ（株） 技術部長（正会員）

*4 広島工業大学 工学部教授 工博（正会員）

表 - 1 コンクリート配合と配合条件

記号	W/C(%)	結合材 (B) (kg/m ³)		水 (kg/m ³)	細骨材(kg/m ³)		粗骨材(kg/m ³)		高性能 AE 減水剤 (B×%)
		セメント	スラッジ固形分		砕砂	加工砂	砕石2010	砕石1005	
W/C=60%	60	300		180	763	187	554	299	0.90
W/C=50%	50	360		180	710	174	565	304	1.08
W/C=40%	40	450		180	639	156	576	309	1.62
使用材料の物性	密度 (g/cm ³)	3.16	2.45 ~ 2.96*	-	表乾 2.63	表乾 2.56	表乾 2.69		-
	吸水率(%)	-		-	1.64	1.41	0.38		-
	FM 又は実積率(%)	-		-	2.62		59.3		-
配合条件	セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。また、単位粗骨材かさ容積はW/C=60%において0.535m ³ /m ³ 、W/C=50%において0.545m ³ /m ³ 、W/C=40%において0.555m ³ /m ³ とした。								
備考	* : スラッジ固形分の密度は、試し練り終了後に試験したものであり、配合設計の密度はセメントの密度を用いた。								

2.2 配合の種類と試験項目

濃度 13%で、ig-loss 3 水準の改質スラッジ水を用い、W/C = 60%、50%および 40%のコンクリート配合で、スラッジ固形分率（結合材に対する質量分率で、以下固形分率という）0%、3%、6%および 9%について室内試し練りを行い評価した。なお、固形分率 0%は上水道水のみを用いた配合で本実験の基準配合とし、固形分率 3%、6%および 9%用いた配合を対象配合と呼ぶ。

配合および配合条件は表-1 に示すとおりである。また、スランブは基準配合を 18±1.0cm に高性能 AE 減水剤の添加率で調整し、対象配合では高性能 AE 減水剤の添加率を基準配合と同じにした。空気量は全配合において 4.5±1.5%を満足するように AE 剤と消泡剤の添加率で調整した。

フレッシュコンクリート試験についてはスランブ試験、空気量試験、コンクリート温度を全配合行い、ブリーディング試験および凝結試験を W/C = 50%で行った。

硬化コンクリート試験については圧縮強度試験、静弾性係数試験を全配合行い、乾燥収縮ひずみの測定、凍結融解試験、促進中性化試験を W/C = 50%で行った。また、W/C = 50%で一部気泡間隔係数の測定も追加した。

3. 実験結果および考察

3.1 試し練り時の ig-loss

試し練りは ig-loss 水準ごとに日を変えて行ったが、1日に 10 数バッチ試し練りを実施する約 8 時間のうちに改質スラッジ水の ig-loss は増加する。したがって、8 時間のうちの最初・中間・最後に改質スラッジ水から ig-loss 試験用の試料を採取して、時間ごとの ig-loss 確認し、各試し練りバッチの ig-loss は時間の補間で推定した。

表 - 2 試し練り時の強熱減量 (単位: %)

記号	最大	最小	幅	平均値
ig 2%	2.88	2.22	0.66	2.54
ig 5%	6.97	5.21	1.76	6.16
ig 8%	9.28	7.43	1.85	8.51

表 - 2 に時間の補間で求めた各試し練りバッチの ig-loss 推定値のうち、最大・最小・幅・平均値を示す。

3.2 スランブ

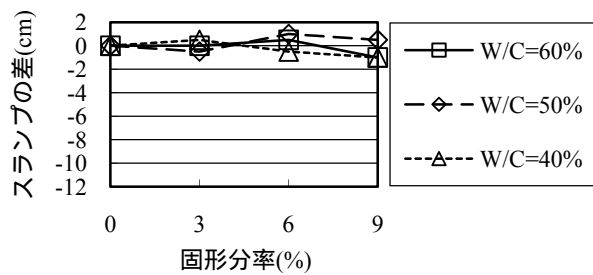
図 - 1 には、ig-loss 水準ごとに、固形分率がスランブに与える影響（対象配合 - 基準配合）を示している。

図 - 1 (a)に示すとおり、ig-loss 2%では、全ての W/C において固形分率 9%までのスランブが基準配合に対して ±1.0cm 以内になった。

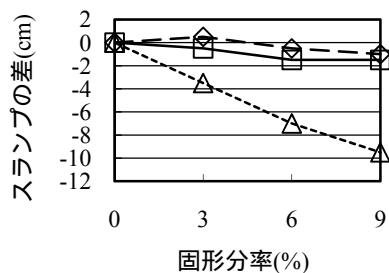
図 - 1 (b)に示す ig-loss 5%では、W/C=50%および W/C=60%の配合において固形分率 9%までのスランブが基準配合に対して ±1.5cm 以内になった。しかし、W/C=40%の配合では、固形分率の増加にともないスランブが大きく低下した。

図 - 1 (c)に示す ig-loss 8%では、W/C=60%の配合において固形分率 9%までのスランブが基準配合に対して ±2.0cm 以内になった。しかし、W/C=50%の配合においては固形分率にともなうスランブの低下がやや大きく、W/C=40%の配合においては極めて大きい結果となった。

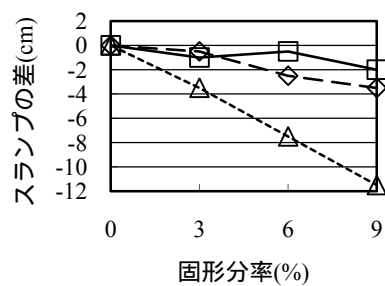
図 - 1 を全体的に見ると、W/C、固形分率および ig-loss がスランブ低下に影響を及ぼすことがわかるが、中でも W/C の影響が大きいことが推測できた。したがって、単位結合材量 × 固形分率 × ig-loss とスランブ低下量の関係において、単位結合材量を累乗した時の指数を徐々に増してみると、指数 3.5 で図 - 2 に示す相関関係が確認で



(a) ig 2%



(b) ig 5%



(c) ig 8%

図 - 1 固形分率がスランプに及ぼす影響

きた。なお、ここで採用した ig-loss は試し練り水準値でなく、3.1 で述べた各試し練りバッチの推定値である。

図 - 2 に示すような相関関係が生コン工場の実際のスラッジ水で確認することができると、生コン工場では、配合ごとにスランプに影響を及ぼすことのない固形分率を設定することが可能になる。仮に図 - 2 の関係式から計算すると、単位結合材量が $400\text{kg}/\text{m}^3$ の配合へ ig-loss 3% の改質スラッジ水を用いるとき、スランプへの影響を 0.5cm 以下に止めるためには、固形分率を 4.88% 以下にすれば良いことになる。

また、ig-loss が大きくなった場合、基準配合（上水道水の配合など）からのスランプへの影響を推定し、高性能 AE 減水剤の使用量を増して単位水量の増加を防ぐなどの対応が可能になる。

3.3 プリーディング

図 - 3 に ig-loss と固形分率がプリーディング量と終了時間に与える影響（対象配合 - 基準配合）を示す。

図 - 3(a)(b) より、プリーディング量は固形分率が大き

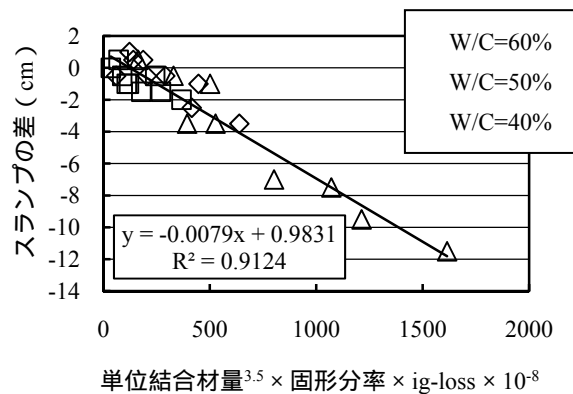
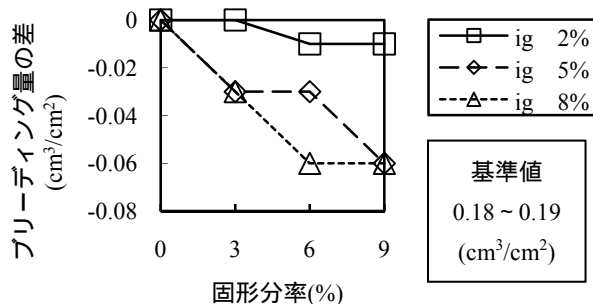
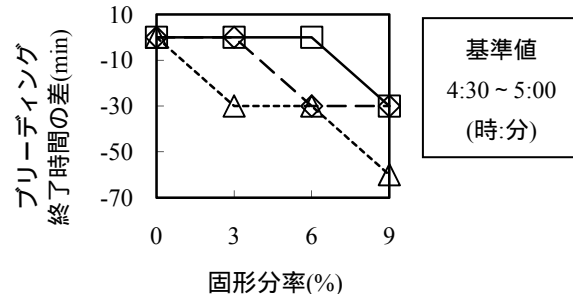


図 - 2 単位結合材量、ig-loss および固形分率がスランプに及ぼす影響



(a) プリーディング量



(b) 終了時間

図 - 3 固形分率がプリーディングに与える影響

きくなるにつれて小さくなっており、終了時間も同様の傾向を示していることがわかる。また、これらの傾向は ig-loss 5% および 8% について特に顕著である。これは、固形分に針状の水和物が生成されたことで、保水性が高くなったことが要因と推察される。

ig-loss 2% について基準配合との差を見ると、最大で、プリーディング量 $-0.01\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 、プリーディング終了時間 -30 分であり、基準配合とほぼ同等であった。

3.4 凝結

図 - 4 に ig-loss と固形分率が凝結時間へ与える影響（対象配合 - 基準配合）を示す。

ig-loss 2% では始発および終結時間の基準配合との差は、固形分率 9% まで ± 11 分以内となり、

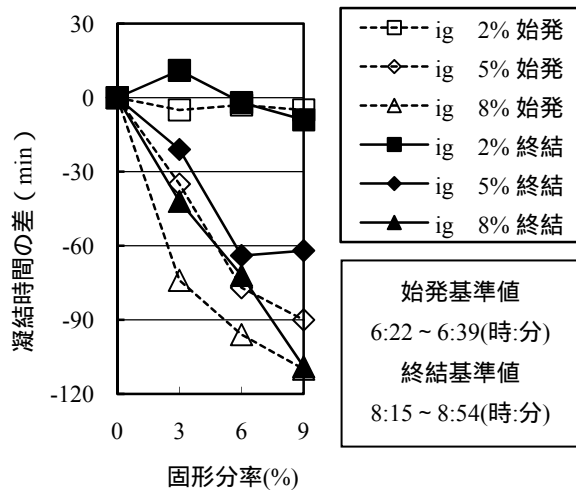


図 - 4 固形分率が凝結時間へ与える影響

凝結時間にほとんど影響を及ぼさないことがわかる。しかし、ig-loss 5%および8%では、固形分率が増加するにしたがい始発および終結時間が早くなる傾向であり、固形分率が6%では始発および終結時間は基準配合に対し60分以上早くなっている。

ig-loss 5%の固形分率3%では始発、終結ともに基準配合との差が35分以内であり、このあたりまでが実用域と考えられる。

3.5 圧縮強度

図 - 5(a)(b)(c)に ig-loss と固形分率が28日圧縮強度比に与える影響(対象配合 / 基準配合)をW/C別に示す。

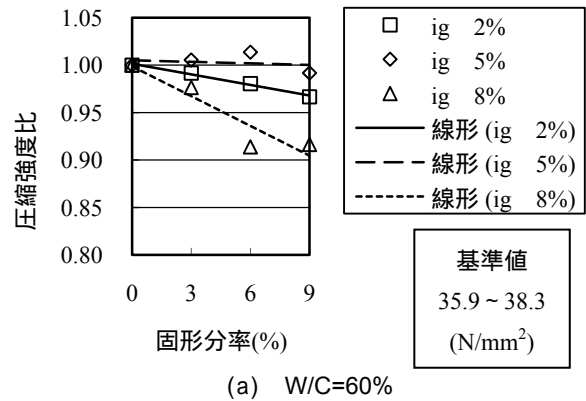
図 - 5に示すとおり(a)W/C=60%における ig-loss 8%と(c)W/C=40%における ig-loss 5%および8%では、固形分率が大きいほど圧縮強度比が小さくなる傾向が顕著である。また、(c)W/C=40%における ig-loss 8%については固形分率9%で圧縮強度比が0.85程度まで低下した。(b)W/C=50%については、各 ig-loss と固形分率の増加に伴う圧縮強度比の傾向は定かでない。

調査設計指針に示す試練り判定基準0.95倍以上⁵⁾を満足するのは、ig-loss 2%では固形分率9%までの全てと ig-loss 5%および8%の固形分率3%である。

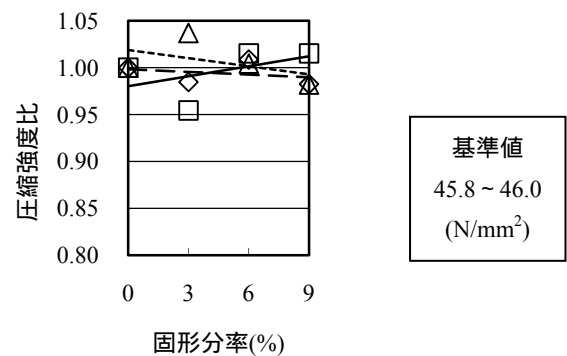
分散分析(それぞれの測定値の分散を比較して同一の母集団に属するか否かの判定)結果⁴⁾から判断すると、ig-loss 2%ではW/Cおよび固形分率を要因とした圧縮強度比に有意性はなく、ig-loss 5%ではW/Cにおいて有意水準(判定の危険率)5%で有意となり、ig-loss 8%では固形分率において有意水準5%で有意となった。

3.6 静弾性係数

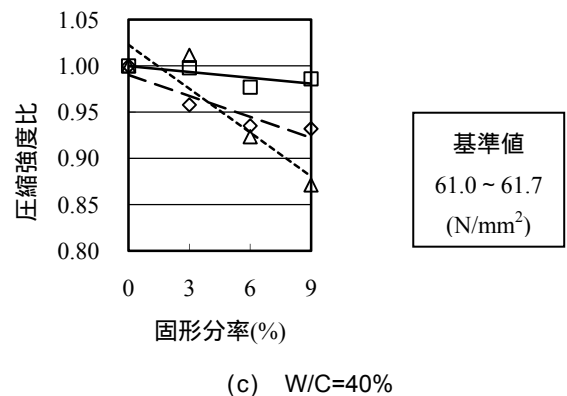
図 - 6は圧縮強度と静弾性係数の関係であるが、圧縮強度60N/mm²程度の領域では、ig-loss 2%の静弾性係数は一般的に指標として用いられるNEW RC式⁶⁾と比較して小さい傾向である。しかし、全体的にはすべての配合



(a) W/C=60%



(b) W/C=50%



(c) W/C=40%

図 - 5 固形分率が28日圧縮強度比に与える影響

において圧縮強度と静弾性係数の関係は、NEW RC式に対して±5%以内となっており、本実験の範囲では、ig-lossおよび固形分率が静弾性係数に与える影響は問題にならない程度といえる。

3.7 乾燥収縮

図 - 7はJIS A 6204 6.1.7 f)で行った乾燥収縮試験結果で、ig-lossと固形分率が乾燥材齢26週の乾燥収縮ひずみに与える影響(対象配合 - 基準配合)を示す。

図 - 7では ig-loss 5%についてのみ、固形分率が大きくなるにつれ乾燥収縮ひずみが大きくなる傾向であるが、分散分析結果は ig-loss および固形分率を要因とした乾燥収縮ひずみの差に有意差は認められなかった。

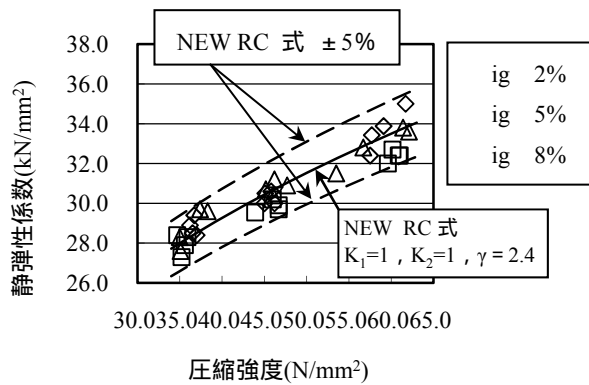


図 - 6 圧縮強度と静弾性係数の関係

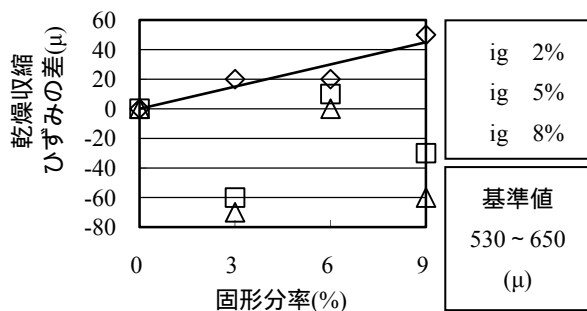


図 - 7 固形分率が乾燥収縮に与える影響

3.8 凍結融解抵抗性

図 - 8 は JIS A 1148 で行った 300 サイクルの相対動弾性係数であるが、ig-loss 2%および 8%は固形分率が大きいほど相対動弾性係数の低下が大きいことがわかる。特に ig-loss 2%は顕著であり、ig-loss 2%においては固形分率 6%および 9%で相対動弾性係数 60%を下まわる結果となった。また、基準配合(上水道水の配合)でも ig-loss 2%は比較的小さい値となった。そこで、原因を調査するため図 - 8 に示す ig-loss 2%の固形分率 0%および 9%と、図 - 9 に示す ig-loss 5%の固形分率 3%で気泡間隔係数を測定した。この気泡間隔係数と 300 サイクルにおける相対動弾性係数の関係を図 - 9 に示す。

図 - 9 に示すとおり、気泡間隔係数と相対動弾性係数の関係に高い負の相関関係が認められ、気泡間隔係数の差が相対動弾性係数に大きな影響を及ぼすことがわかる。コンクリートを凍結融解作用から十分保護するためには、気泡間隔係数を 200 μ m 以下とするのが望ましいといわれている⁷⁾が、本実験では著しく大きな値となった。これは基準配合を含めていえることであり、練混ぜ時に連行された空気泡の気泡径が大きかったといえる。さらに、練混ぜ時には固形分率を大きくするほど連行空気が入りやすく、消泡剤の添加量は増加した。この傾向は ig-loss 2%のケースで顕著であった。以上のことに起因し、ig-loss 2%のケースで相対動弾性係数が大きく低下したと考えられる。

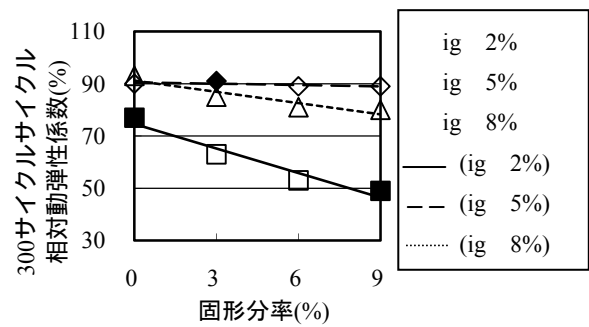


図 - 8 固形分率が相対動弾性係数に与える影響

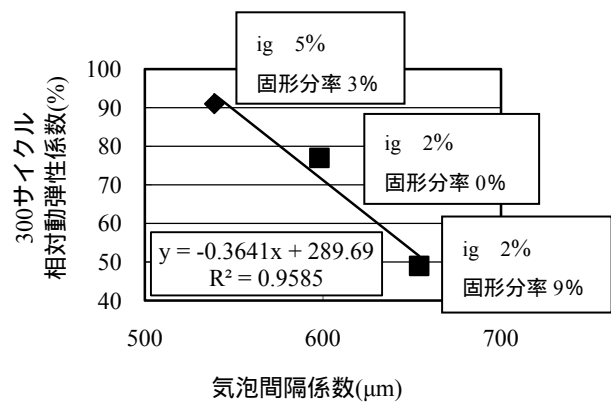


図 - 9 気泡間隔係数が相対動弾性係数に与える影響

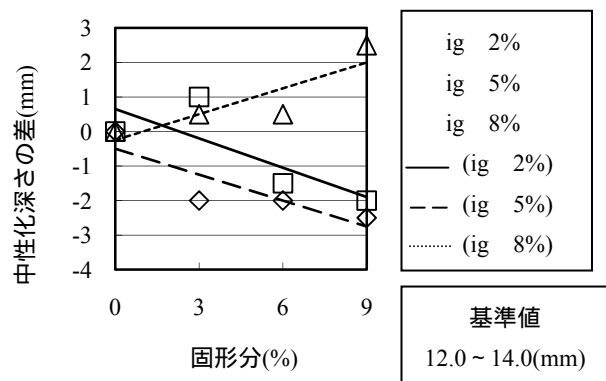


図 - 10 固形分率が中性化深さに与える影響

結果的に本実験では ig-loss と固形分率が凍結融解作用に対する抵抗性へ及ぼす影響を確認することはできなかった。しかし、気泡径が要因として特定できることから、消泡剤を混入した高性能 AE 減水剤などの使用により一定量以上の AE 剤の使用を確保するなどして、適切な空気泡を連行し、気泡間隔係数を小さくするなどの解決策が考えられる。

3.9 中性化

図 - 10 は JIS A 1153 で行った促進中性化試験結果で、ig-loss と固形分率が 26 週中性化深さに与える影響(対象配合 - 基準配合)を示したものである。

図 - 10 より ig-loss 2%および ig-loss 5%で固形分率

が大きくなるほど中性化深さが小さくなることがわかる。逆に ig-loss 8%では固形分率が大きくなるほど中性化深さが大きくなる傾向である。

以上のことより ig-loss 8%では固形分が多いほどコンクリートマトリックスの密実性が低下するといえるが、ig-loss 2%および 5%は、固形分が多いほど密実性が向上するといえる。

4.まとめ

本実験の範囲において、スラッジ水改質剤を用いてスラッジ固形分の強熱減量を抑制管理した時、スラッジ固形分の強熱減量とスラッジ固形分率がコンクリートの品質に与える影響についてわかったことを以下にまとめる。なお、実験では全ての配合でスラッジ固形分を結合材と考え、配合の単位セメント量と置き換える配合補正を行ったものである。また、以下で述べる強熱減量が 2%程度とは強熱減量が 2.22%~2.88%、5%程度とは 5.21%~6.97%、8%程度とは 7.43%~9.28%の範囲である。

- (1)スランプについては、強熱減量を 2%程度に抑制管理することにより、固形分率 9%までの置き換えであればほとんど影響しないことがわかった。強熱減量が 2%程度を超えて進行した場合、スランプの低下する値を推定し、高性能 AE 減水剤の添加率を増すなどの補正が必要であり、基準とする配合（上水道水などを用いる配合）からスランプの低下する値は、強熱減量、固形分率および単位結合材量を要因にした、相関関係より把握できる可能性がある。
- (2)空気連行性とその気泡径については、強熱減量が小さいほど、固形分率が大きいほど気泡径の大きな気泡が増す傾向にあった。消泡剤を混入した高性能 AE 減水剤などの使用により一定量以上の AE 剤の使用を確保するなどして、良質な空気を連行し、気泡間隔係数を小さくするなどの対策が必要である。
- (3)ブリーディングおよび凝結時間については、強熱減量を 2%程度に抑制管理することにより固形分率 9%までであればほとんど影響しないことがわかった。また、強熱減量が 2%程度を超え 8%程度以下であれば、固形分率を 3%以下にすることで実用性が確保できると考えられる。
- (4)圧縮強度については、強熱減量が大きいほど、固形分率が大きいほど低下する傾向が確認できた。しかし、強熱減量を 2%程度に抑制管理すると固形分率 9%まで、強熱減量が 2%程度を超え 8%程度以下であれば固形分率 3%までは圧縮強度比で 0.95 以上を確保することができる。
- (5)静弾性係数および乾燥収縮については、問題となるような影響は認められなかった。

(6)凍結融解作用に対する抵抗性に与える影響については、強熱減量や固形分率による影響を確認することはできなかった。しかし、気泡間隔係数の測定結果から、適切な空気を連行すれば、凍結融解作用に対する抵抗性は確保できると考えられる。

(7)中性化速度については、強熱減量を 5%程度以下に抑制管理した場合、固形分率が大きいほど中性化深さが小さくなることを確認できた。

総じて述べると、スラッジ固形分の強熱減量を 2%程度以下に管理した場合、コンクリートの品質に悪影響を及ぼすことなく、スラッジ固形分率 9%まで用いることが可能といえる。また、スラッジ固形分の強熱減量が 5%程度まで進行した場合は、スラッジ固形分率 3%まで置き換えても耐久性を損なうことはないが、高性能 AE 減水剤などの増量でスランプを確保するなどの対策が必要となる。

5.終わりに

本実験は 2006 年 5 月に社団法人 日本コンクリート工学協会 中国支部に設置された、改質スラッジ有効活用研究委員会が、約 2 年間の研究活動を行った結果を要約したものであり、参加していただいた委員をはじめご協力いただいた広島県生コンクリート工業組合技術委員会並びに広島地区生コンクリート協同組合技術委員会の方々に深く感謝いたします。また、本研究費の一部は平成 18 年度日本コンクリート工学協会中国支部の研究奨励金によったことを付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 山田 祐定, 中西 正, 中西 佳久: コンクリートスラッジの再利用とその有効性について, セメントコンクリート論文集, Vol.40, pp.229-232, 1986
- 2) 畑中 重光, 近原 典子, 湯浅 幸久: 乾燥微粉碎した生コンスラッジの活性度と有効利用に関する一考察, セメントコンクリート論文集, Vol.51, pp.470-475, 1997
- 3) 全国生コンクリート工業組合連合会: スラッジ水を練混ぜ水に用いる品質管理指針, pp.46, 2003
- 4) (社)日本コンクリート工学協会中国支部: 改質スラッジ有効活用研究委員会報告書, 2008.5
- 5) (社)日本建築学会: コンクリートの調合設計指針・同解説, pp.176, 1999.2
- 6) 建設省総合技術開発プロジェクト: 鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発 平成 4 年度 高強度コンクリート分科会報告書, 1993.3
- 7) (社)日本材料学会: コンクリート用化学混和剤, 朝倉書店, pp.109, 1972