

論文 銅スラグ骨材およびスラッジ水を使用したコンクリートに関する基礎研究

三岩 敬孝^{*1}・中本 純次^{*2}・横井 克則^{*3}・天羽 和夫^{*4}

要旨：天然資源の温存と産業副産物の有効利用を目的とし、コンクリート用細骨材として銅スラグ骨材を使用したコンクリートに対して、同様に産業副産物であるスラッジ水を添加することによるフレッシュ時および硬化後のコンクリートに及ぼす影響について検討した結果、銅スラグ骨材の品質による影響はあるものの、銅スラグ骨材を使用することによって増加したブリーディング量がスラッジ水を同時に添加することにより低減することができ、また、凝結時間を短縮できることが明らかとなった。

キーワード：銅スラグ骨材、スラッジ水、ブリーディング、凝結時間

1. はじめに

近年、コンクリート用材料である天然の細骨材や粗骨材の枯渇化により、骨材確保が困難となっているだけでなく、骨材の品質低下によるコンクリートの品質低下が問題となってきた。このため産業副産物をコンクリート用骨材として有効利用し、資源の温存と環境負荷の低減を図ろうとするさまざまな研究が盛んとなっている^{1,2,3)}。

銅スラグ骨材は、銅を精錬する際に副産されるスラグであり年間約 250 万 t に及んでいる。海砂や川砂と比較して密度が大きくガラス質で、吸水率が小さいことが特徴である。銅スラグ骨材をコンクリート用細骨材として利用した場合、その置換率が大きい場合、コンクリートのブリーディング率が大きくなる傾向があることや、凝結時間が遅延する傾向があること等が報告されている⁴⁾。ブリーディングの抑制には微粒分の多いスラグ細骨材やフライアッシュが使用されているものの、フライアッシュの利用については、凝結時間がさらに遅延する可能性も考えられる。

一方、レディーミクストコンクリート工場において、運搬車やプラントミキサ、戻りコンクリートの洗浄により排出される回収水のうち、上澄み水は多くの工場で練混ぜ水として再利用しているにも関わらず、スラッジ水に関しては、JIS A 5308 においてスラッジ固形分率が 3% までの使用が認められているものの、あまり有効利用されていないのが現状である。しかし、最近では、地球規模での環境汚染問題や廃棄物の適正処理に関する管理の面から、3%以上の使用量での研究が進められている⁵⁾。これらの研究によると、凝結調整剤等を使用せずスラッジ水をコンクリート用練混ぜ水として使用した場合、固

形分率の増加に伴ってコンクリート中の微粒分が増加することから、ブリーディング率が小さくなることや、凝結時間が早くなること等が報告されている^{6,7)}。このような現象は、銅スラグ骨材を使用したコンクリートのフレッシュ性状とは全く逆の性状を示している。

そこで本研究では、資源の有効利用を図り、さらに環境汚染対策として、銅スラグ骨材を使用したコンクリートの品質低下を、スラッジ水を使用することによって改善することを目的とし、細骨材の一部に銅スラグ骨材を使用し、練混ぜ水にスラッジ水を使用したコンクリートについて、フレッシュ性状および圧縮強度等、コンクリートの基礎的性質について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) セメント

セメントは普通ポルトランドセメント(密度 3.14g/cm³)を使用した。

(2) 細骨材

細骨材として銅スラグ細骨材および比較用に徳島県吉野川産川砂(表乾密度 2.59g/cm³、吸水率 2.31%、粗粒率 3.23、実積率 65.9%)を使用した。本実験で使用した銅スラグ細骨材の品質を表 1 に示す。

表 1 銅スラグ細骨材の品質

	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水 率(%)	微粒分 量(%)	単位容 積質量 (kg/l)	粗粒 率
銅スラグ細骨材	3.66	0.22	0.54	2.05	3.30
規定値 (JIS A 5011-3)	3.2 以上	2.0 以下	5.0 以下	1.80 以上	—

*1 舞鶴工業高等専門学校 建設システム工学科准教授 博士(工学) (正会員)

*2 和歌山工業高等専門学校 環境都市工学科教授 博士(工学) (正会員)

*3 高知工業高等専門学校 環境都市デザイン工学科准教授 博士(工学) (正会員)

*4 阿南工業高等専門学校 建設システム工学科教授 博士(工学) (正会員)

表－2 コンクリートの配合

種類	目標スランプ (cm)	水セメント比 (%)	目標空気量 (%)	細骨材率 (%)	銅スラグ代替率 (vol%)	スラッジ固形分(%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤 (C×%)	
							水	セメント	スラッジ固形分	川砂	銅スラグ		粗骨材
CU0-0	18±2.5	50	5±1.5	47	0	0	175	350	0	808	0	914	1.2
CU10-0					10					727	114		1.2
CU20-0					20					646	229		1.2
CU30-0					30					565	343		1.2
CU50-0					50					404	572		1.1
CU0-3					0	3			10.5	808	0		1.2
CU10-3					10					727	114		1.2
CU20-3					20					646	229		1.2
CU30-3					30					565	343		1.2
CU50-3					50					404	572		1.2

(3) 粗骨材

粗骨材は兵庫県赤穂産砕石(表乾密度 2.60g/cm³, 最大寸法 20mm)を使用した。

(4) 練混ぜ水

練混ぜ水として使用したスラッジ水は、レディーミクスコンクリート工場から排出されるスラッジ水を直接採取した場合、採取日によって品質が異なることが予想されることから、予め実験室内で普通ポルトランドセメントと水道水とを混合し攪拌したものを使用した。

(5) 混和剤

混和剤として、コンクリートのスランプ値を一定とするため、ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を使用した。

2.2 配合

本実験で使用したコンクリートの配合は、水セメント比を 50%、細骨材率を 47%および粗骨材量を一定とし、細骨材容積に対して、0, 10, 20, 30 および 50vol%の銅スラグ細骨材を置換した。さらに、練混ぜ水として、スラッジ水を固形分が単位セメント量の 3%となるように添加した。

なお、フレッシュ時のコンクリートの性状について検討するため、コンクリートの配合は、混和剤を使用していないものと同量で目標スランプ 18±2.5cm となるように高性能 AE 減水剤により調整したものとした。

表－2 に、高性能 AE 減水剤を使用したコンクリートの配合を示す。

2.3 コンクリートの練混ぜおよび供試体の作製

(1) コンクリート練混ぜ

コンクリートの練混ぜには、パン型強制練りミキサーを使用し、練混ぜ水以外の材料をミキサーに投入し 30 秒間

空練りを行い、その後練混ぜ水を投入し 1 分 30 秒の計 2 分間練り混ぜた。なお、スラッジ水の計量は、攪拌機を停止させた場合、固形分がタンクの底に沈殿し、スラッジ水の濃度が変化することから、攪拌機を作動させた状態で速やかに測定を行った。

(2) 供試体の作製

圧縮強度試験用供試体は、JIS A 1132 に準じて行い、内部振動機により締め固めを行った。なお、供試体は材齢 1 日まで恒温室(室温 20±1℃, 湿度 60%)に静置し、脱型した後、所定の材齢まで水中養生(水温 20±1℃)を行った。

2.4 実験項目および方法

本実験では、スラッジ固形分および銅スラグ骨材の置換率について、現在一般に推奨されている値として、スラッジ固形分については、セメント質量の 3%、銅スラグ骨材については、細骨材に対して 30%までの配合とし、単位容積質量、スランプ値、空気量および圧縮強度について検討した。

また、銅スラグ骨材を使用したことによるコンクリートの品質低下が懸念されるブリーディングおよび凝結については、スラッジ水の効果がより顕著に確認できるように、銅スラグ骨材を増加し、置換率 50%で検討した。

(1) スランプ試験

スランプ試験は、コンクリートの練混ぜ直後 JIS A 1101「コンクリートのスランプ試験方法」に準じて行った。スランプロスの測定は、練り混ぜられたコンクリートを容器に入れ、さらに表面が乾燥しないようにフタをして静置し、スランプ試験の直前に軽く練返しを行ったコンクリートを使用した。なお、スランプ値が 5cm 程度となるまで経時 60 分または 90 分まで測定を行った。

(2) 空気量試験

空気量試験は、コンクリートの練混ぜ直後 JIS A 1118「コンクリートの空気量の容積による試験方法」に準じて行った。なお、使用したコンクリートは、スランプロスの測定に使用したコンクリートと同様とした。

(3) ブリーディング試験

ブリーディング試験は、JIS A 1123「コンクリートのブリーディング試験方法」に準じ、恒温室(室温 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 60%)で行った。試験には、同型の容器を使用し、試験の評価は、ブリーディング量で行った。

(4) 凝結試験

凝結試験は、JIS A 1147「コンクリートの凝結時間試験方法」に準じ、恒温室(室温 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 60%)で行った。

(5) 圧縮強度試験

コンクリートの圧縮強度試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じて $\Phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を用いて行った。なお、試験材齢は 7、28 および 91 日とした。

3. 結果および考察

3.1 単位容積質量

図-1 に細骨材中の銅スラグ骨材の置換率を増加させた時のコンクリートの単位容積質量を示す。本実験では、細骨材として使用した川砂の表乾密度は 2.59g/cm^3 であり、銅スラグ骨材の密度は 3.66g/cm^3 である。このため川砂の置換材料として銅スラグ骨材を使用することよりコンクリートの単位容積質量は増加することとなった。この図では、細骨材容積に対して 30vol%までであるが、鉄筋コンクリートに近い値となっている。従来より、銅スラグ骨材を使用したコンクリートは、単位容積質量が大きくなることは報告されており、港湾材料としての利用例も少なくなく⁴⁾、重量構造物への利用が期待される。

3.2 スランプおよび空気量

図-2 に高性能 AE 減水剤等、混和剤を使用しない場合におけるスランプ値を示す。混和剤による流動調整を行わない場合、銅スラグ骨材の置換率が増加するにつれてスランプ値は増加する傾向がある。本実験で使用した銅スラグ骨材は、 0.15mm 以下の微粒分が 1.3% であり、非常に微粒分の少ない骨材である。一方、川砂においては、比較的粗粒率の近いものを使用しているものの、 0.15mm 以下が 3% であり、銅スラグ骨材に比較して微粒分が多くなっている。細骨材中の微粒分の含有量は、コンクリート中の余剰水の拘束に影響を及ぼすと思われる、銅スラグ骨材を使用した場合、自由水の増加により、スランプ値が大きくなったものと思われる。また、その影

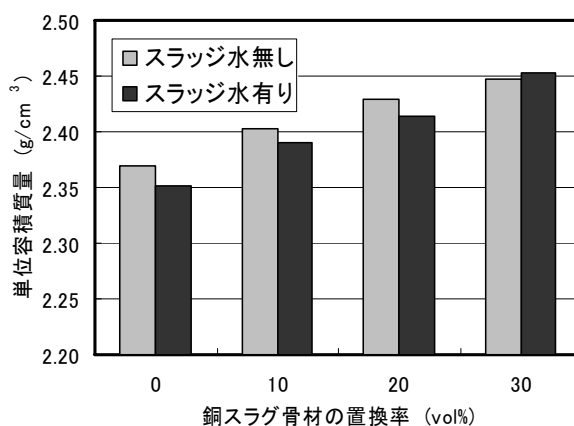


図-1 銅スラグ骨材の置換率と単位容積質量との関係

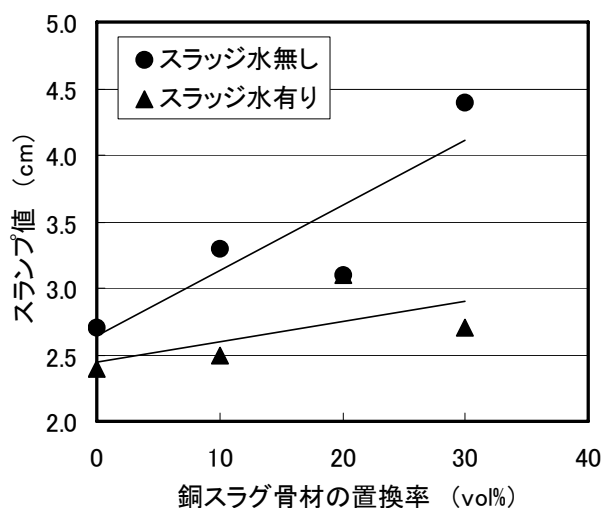


図-2 銅スラグ骨材の置換率とスランプ値との関係 (混和剤無添加)

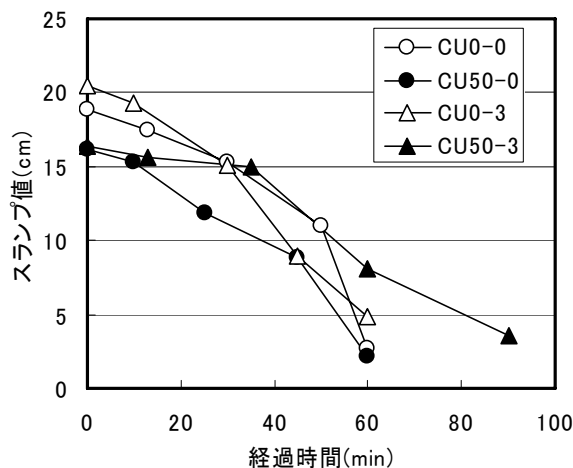


図-3 スランプ値の経時変化

響は、スラッジ水を添加していない場合が顕著であり、スラッジ水を使用することによって、スランブ値の増加を抑制できると思われる。

図-3にスランブの経時変化を示す。目標スランブ値が $18\pm 2.5\text{cm}$ であることから練混ぜ直後のスランブ値は若干異なるものの、銅スラグ骨材を使用したことによる大きな差異は認められない。また、スラッジ水の添加による違いも見られなかった。これらのことから、銅スラグ骨材を使用したコンクリートの場合、練混ぜ直後のスランブ値は普通コンクリートに比較して大きくなるものの、混和剤により調整した場合、スランブロスにはあまり影響がないものと思われる。

図-4に、高性能 AE 減水剤等、混和剤を使用しない場合における空気量、図-5に空気量の経時変化をそれぞれ示す。銅スラグ骨材を使用したコンクリートは、空気量（エントラップトエア）が増加することが報告されており、本実験でも若干ではあるが増加する傾向が見られた。しかし、スラッジ水の添加の有無による影響はほとんど見られなかった。また、この傾向は、空気量の経時変化の図からも確認できる。

3.3 ブリーディング

図-6にブリーディング試験結果を示す。この図より、細骨材容積に対して 50vol%の銅スラグ骨材を使用した場合、普通コンクリートに比較して大きなブリーディング量を示している。これは、前述したように、本実験で使用した銅スラグ骨材は 0.15mm 以下の微粒分量が少ないことが原因であると考えられる。しかし、スラッジ水のみを使用した場合、ほとんどブリーディングが生じていない。スラッジ水の添加によるブリーディング量の変化については、セメント量の違いや、凝結遅延剤等の添加によって異なるものの、本実験のように凝結遅延剤を使用しないとき、配合上 3%のスラッジ固形分は外割り添加であり、また、スラッジ水に含まれる水分量は練混ぜ水の一部として換算し配合および計量しているが、実際はスラッジ中のセメント粒子に化学吸着され、練混ぜ水量（自由水量）として機能しなくなることが原因と考えられる⁶⁾。さらに、配合上、セメント粒子の増加によるコンクリートの粘性が高くなり、自由水の移動を抑制していることが原因と思われる。

一方、銅スラグ骨材とスラッジ水を同時に使用した場合、普通コンクリートとほぼ同程度のブリーディング量を示しており、銅スラグ骨材を使用することによって生じた自由水をスラッジ水が良好に拘束していることが分かる。本配合では、銅スラグ骨材の添加率およびスラッジ固形分は、それぞれ1種類であるが、両材料を同時に使用することにより、普通コンクリートに近い性能とすることができると思われる。

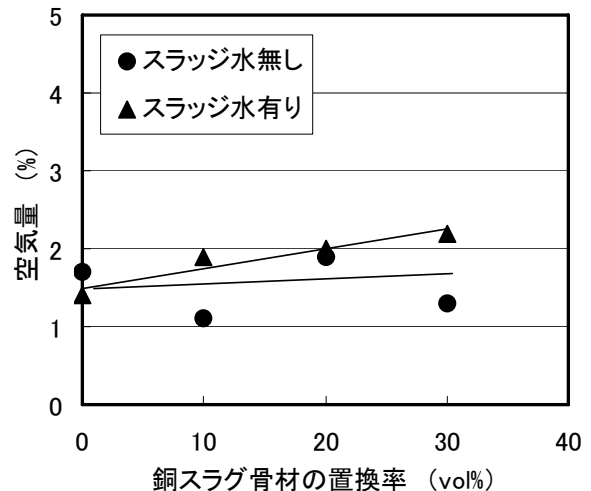


図-4 銅スラグ骨材の置換率と空気量との関係

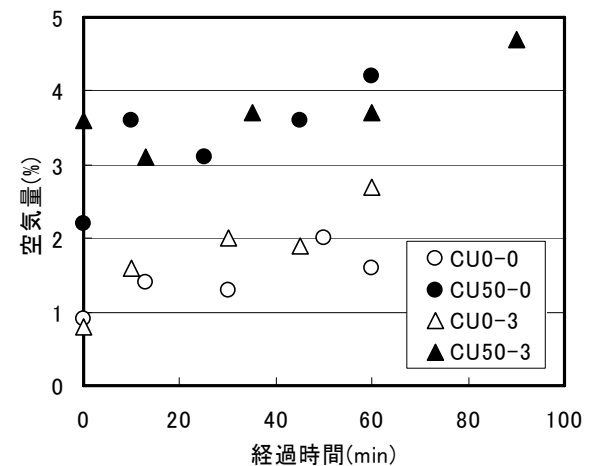


図-5 空気量の経時変化

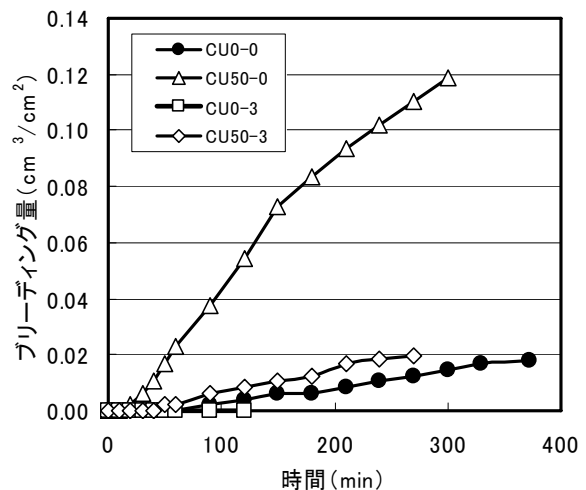


図-6 ブリーディング試験結果

3.4 凝結

図－7に凝結試験結果を示す。銅スラグ骨材を使用したコンクリートは凝結時間が遅延することが報告されている⁸⁾。一方で、凝結遅延を引き起こす原因となる物質は、銅スラグ骨材を水洗いすることで簡単に除去できるとの報告もある⁸⁾。本実験で使用した銅スラグ骨材は、工場で副産された状態から何の処理も行っていないことから、凝結遅延を引き起こす原因となる物質はそのまま含有していると思われる。しかし本実験で使用した骨材に含まれる凝結遅延物質の含有量は明確ではなく、その含有量によって凝結遅延時間は大きく異なるものの⁸⁾、図－7より銅スラグ骨材のみを使用した場合、普通コンクリートに比較して、始発、終結とも4時間程度遅延している。逆に、スラッジ水のみを使用した場合、普通コンクリートに比較して始発、終結とも2時間程度早く分かると分かる。

コンクリートにスラッジ水を使用した場合、始発時間は、スラッジの材齢に関係なく、スラッジの添加率が増加するとともに早くなることが報告されており⁷⁾、本実験においても同様の結果となった。

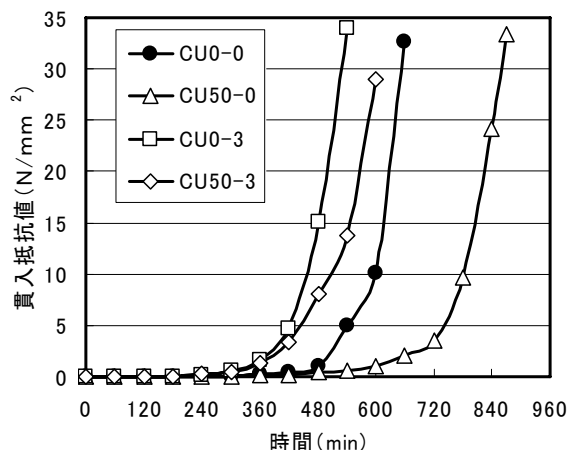
一方、銅スラグ骨材およびスラッジ水を同時に使用した場合、スラッジ水のみあるいは銅スラグ骨材のみを使用したコンクリートに比べて、普通コンクリートに近い傾向を示し、スラッジ水の添加による凝結促進の効果が認められる。

このことから、銅スラグ骨材を使用したことによる凝結遅延は、原因となる物質の含有量の違いにより大きく変化することが報告されているが、その対策の一つとして、スラッジ水の使用は、銅スラグ骨材に対して何の前処理も必要せず、凝結時間を改善できることから有効であると思われる。

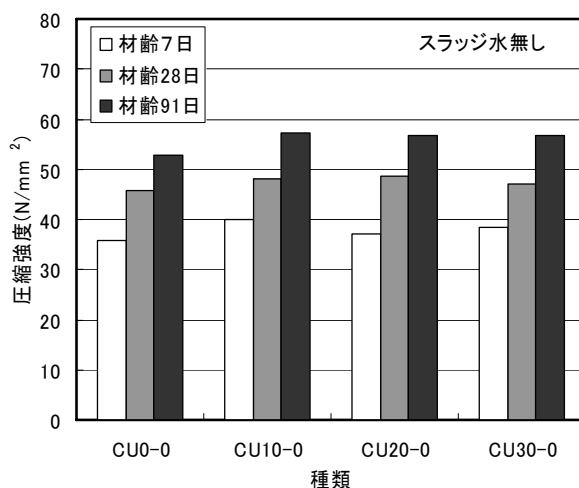
3.5 圧縮強度

図－8および図－9に圧縮強度試験結果をそれぞれ示す。銅スラグ骨材を使用したコンクリートの圧縮強度は、顕著な凝結遅延を生じる骨材を使用した場合、普通コンクリートに比較して、初期強度が低下し、長期強度は逆に大きくなるなど、骨材の品質によって強度に影響があることが報告されているが⁸⁾、本実験では、銅スラグ骨材の使用による圧縮強度への影響は認められなかった。その原因として、使用した銅スラグ骨材は、細骨材容積に対して30vol%と比較的少ないこと、また、図－7に見られるように、普通コンクリートに比較して4時間程度の凝結遅延であり、顕著な遅延ではないことが挙げられる。

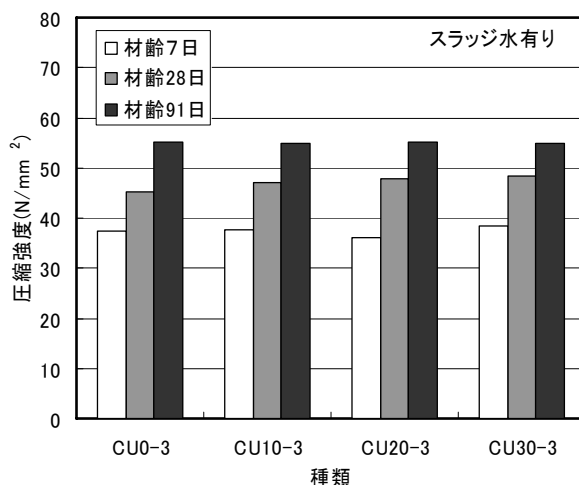
一方、単位セメント量が多いコンクリートにスラッジ水を添加した場合、添加率の増加に伴って、スラッジ水中のセメント粒子が結合材として有効に作用すること



図－7 凝結試験結果



図－8 銅スラグ骨材の置換率と圧縮強度との関係（スラッジ水無し）



図－9 銅スラグ骨材の置換率と圧縮強度との関係（スラッジ水有り）

から圧縮強度は増加すると報告されているが⁶⁾、本実験では、スラッジ水の添加による強度増加は認められなかった。その原因として、スラッジ水の添加率が、スラッジ固形分率で3%と小さいことが考えられる。

4. まとめ

天然資源の温存と産業副産物の有効利用、さらに、環境汚染対策を目的とし、細骨材の一部に銅スラグ骨材を使用することによるコンクリートの品質低下に対して、スラッジ水を同時に添加することによる品質改善効果について検討した。

本実験で得られた結果を要約すると以下のようになる。

- (1) スランブロスは普通コンクリートと比較してあまり変わらない。
- (2) ブリーディング量は、銅スラグ骨材の使用によって増加するものの、スラッジ水の添加によって、普通コンクリートと同程度に抑制することができる。
- (3) 凝結時間は、使用する銅スラグ骨材の品質による影響が大きいものの、スラッジ水を使用することによりいくらか改善することができる。
- (4) 圧縮強度への影響はほとんどみられなかった。

参考文献

- 1) 三岩敬孝，天羽和夫，横井克則，中本純次：スラグ系材料を使用したポーラスコンクリートに関する

基礎研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1391-1396，2006

- 2) 中本純次，戸川一夫，三岩敬孝，谷 敏行：スラッジ混入コンクリートの諸特性に及ぼすスラッジの組成および凝結調整剤の再添加の影響，材料，Vol.52，No.9，pp.1026-1031，2003.9
- 3) 樺山好幸，内田純二，舌間貴宏，檜崎康広，水口裕之：産業廃物を用いたコンクリート用骨材の開発—ゼロエミッションをめざして—，材料，Vol.51，No.10，pp.1092-1098，2002.10
- 4) 来栖一之：コンクリート用銅スラグ骨材，コンクリート工学，Vol.46，No.5，pp.98-101，2008.5
- 5) 中本純次，戸川一夫，三岩敬孝，谷 敏行：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，材料，Vol.53，No.10，pp.1091-1096，2004.10
- 6) 中本純次，戸川一夫，三岩敬孝：スラッジ混入したコンクリートの諸特性，材料，Vol.50，No.8，pp.812-817，2001.8
- 7) 中本純次，戸川一夫，三岩敬孝：凝結調整剤を用いたスラッジの有効利用に関する研究，材料，Vol.49，No.10，pp.1121-1126，2000.10
- 8) 綾野克紀，蔵本 修，阪田憲次：コンクリート用細骨材としての銅スラグの有効利用に関する研究，材料，Vol.49，No.10，pp.1097-1102，2000.10