

論文 銅スラグのコンクリート用材料への有効利用に関する研究

渡辺 純一^{*1}・田村 裕美^{*2}・藤井 隆史^{*3}・綾野 克紀^{*4}

要旨：銅スラグは、細粒分が少なく、ガラス質で角張っているため、銅スラグのみを細骨材として用いた場合には、適切なワーカビリティをもったコンクリートを製造することが難しい。本研究では、銅スラグに砕砂を混合し粒度調整を行うことで、コンクリートの性能が改善されることを確認した。また、砕石工場で発生する岩石副産物の有効利用も図るために、岩石副産物をさらに添加したコンクリートの性能についても検討を行った。岩石副産物の微粒分等により銅スラグ細骨材の粒度調整を行うことで、銅スラグを用いたコンクリートの性能を改善することが可能であることを示す。

キーワード：銅スラグ、岩石副産物、砕砂、粒度調整、ブリーディング、スランプ、圧縮強度、乾燥収縮

1. はじめに

銅スラグは、銅鉱石から銅を製錬する際に発生する副産物である。銅スラグは、年間 200 万トン程度排出されている。銅スラグは、セメントの原料、サンドブラスト材、ケーソンの中詰材等に利用されている。また、銅スラグは、1997 年に JIS A 5011-3「コンクリート用スラグ骨材-第 3 部：銅スラグ骨材」に規格化されており、コンクリート用材料としての利用が認められている材料である¹⁾。しかし、銅スラグのコンクリート用細骨材としての利用実績はほとんどない。その理由として、銅スラグは、ガラス質で硬く角張っており、細粒分が少ないため、ブリーディングが多く²⁾、適切なワーカビリティをもったコンクリートを製造することが難しいことにある。

本研究では、銅スラグを砕砂と混合し、粒度調整を行った銅スラグ混合砂として用いることでコンクリートの性能を改善する効果を検討した。また、中国地方では、年間 2,400 万トンの砕石および砕砂が製造されており、同時に 12 万トンの岩石微粉末が副産物として発生している。本研究では、岩石副産物の有効利用を図ることも目的とし、岩石副産物を加えた銅スラグ混合砂についても実験を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

(1) 細骨材

細骨材には、銅スラグ（表乾密度: 3.45g/cm³, 吸水率: 0.63%）、安山岩砕砂（表乾密度: 2.58g/cm³, 吸水率: 2.04%）、砂岩砕砂（表乾密度: 2.62g/cm³, 吸水率: 2.30%）、粘板岩砕砂（表乾密度: 2.65g/cm³, 吸水率: 2.01%）および石灰岩砕砂（表乾密度: 2.60g/cm³, 吸水率: 2.61%）を用いた。

図-1 の実線は、銅スラグの粒度分布を示したものである。0.6mm 以下の細粒分が少ないことが分かる。銅スラグに、種々の砕砂の粒径が 0.18~0.3mm および 0.3~0.6mm の粒群を加えて、図-1 中の破線に示されるように、JIS A 5005: 2009 に示される砕砂の粒度の範囲の中央値になるように粒度の調整を行った銅スラグ混合砂も作製し、細骨材として用いた。また、岩石副産物の有効利用を目的に、銅スラグ混合砂に岩石副産物を質量比で 7% および 15% さらに加えた銅スラグ混合砂も用いて実験を行った。本実験に用いた砕砂、銅スラグおよび銅スラグ混合砂の物性を表-1 に示す。

(2) セメント、粗骨材および混和剤

セメントは、普通ポルトランドセメント（密度: 3.15g/cm³, プレーン値: 3,300cm²/g）を用いた。粗骨材には、砂岩砕石（表乾密度: 2.75g/cm³, 吸水率: 0.54%）を用いた。混和剤には、ポリカルボン酸系高性能減水剤および AE 剤を用いた。

(3) 配合

水セメント比は 60% で、単位水量は 175kg/m³ で一定とした。また、高性能減水剤および AE 剤の添加率は、それぞれ、セメント質量の 0.4% および 0.006% で一定とした。銅スラグおよび種々の岩種の砕砂を用いたコンクリートの配合を表-2 に示す。また、銅スラグに砂岩砕砂を混合した銅スラグ混合砂を用いたコンクリートの配合を表-3 に示す。

2.2 試験方法

ブリーディング試験は、JIS A 1123-2003「コンクリートのブリーディング試験方法」に従って行った。乾燥収縮ひずみの測定には、100×100×400mm の角柱供試体を用いた。供試体は、材齢 7 日まで水中養生を行なった後、試験を開始した。温度が 20.0±1.0°C で、相対湿度が 65

*1 岡山大学大学院 環境学研究科資源循環学専攻博士後期課程（正会員）

*2 岡山大学大学院 環境学研究科資源循環学専攻博士前期課程（非会員）

*3 岡山大学大学院 環境学研究科資源循環学専攻助教 工博（正会員）

*4 岡山大学大学院 環境学研究科資源循環学専攻教授 工博（正会員）

表－1 実験に用いた細骨材の物性

Type of crushed sand	Only crushed sand	Only copper slag	Mixed sand with crushed sand		
			Dust: 0%	Dust: 7%	Dust: 15%
Andesite	ρ : 2.53g/cm ³ w: 2.04% F.M.: 3.00	ρ : 3.43g/cm ³ w: 0.63% F.M.: 3.23	ρ : 2.97g/cm ³ w: 1.26% F.M.: 2.55	ρ : 3.05g/cm ³ w: 1.20% F.M.: 2.48	ρ : 3.03g/cm ³ w: 0.78% F.M.: 2.49
Sandstone	ρ : 2.56g/cm ³ w: 2.30% F.M.: 2.59		ρ : 3.13g/cm ³ w: 0.72% F.M.: 2.64	ρ : 2.97g/cm ³ w: 1.56% F.M.: 2.41	ρ : 3.10g/cm ³ w: 1.02% F.M.: 2.63
Slate	ρ : 2.60g/cm ³ w: 2.01% F.M.: 3.36		ρ : 3.13g/cm ³ w: 0.93% F.M.: 2.68	ρ : 3.11g/cm ³ w: 0.99% F.M.: 2.66	ρ : 3.07g/cm ³ w: 1.21% F.M.: 2.44
Limestone	ρ : 2.53g/cm ³ w: 2.61% F.M.: 2.58		ρ : 3.12g/cm ³ w: 0.76% F.M.: 2.71	ρ : 3.14g/cm ³ w: 0.70% F.M.: 2.61	ρ : 3.15g/cm ³ w: 0.11% F.M.: 2.54

ρ : Density under oven-dry, w: Water absorption, F.M.: Fineness modulus

表－2 銅スラグ細骨材および種々の岩種の砕砂を用いたコンクリートの配合

Type of sand	G _{max} (mm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	Unit content (kg/m ³)				Admixture (%xC)	
					W	C	S	G	HRWRA* ¹	AE* ²
Only copper slag	20	60.0	4.5	47.4	175	292	1,124	992	0.4	0.006
Only andesite sand				46.0			816	1,018		
Only sandstone sand				44.0			792	1,056		
Only slate sand				47.8			871	984		
Only limestone sand				43.9			785	1,058		

*1 HRWRA: High-range water reducing admixture, *2 AE: Air entraining admixture

表－3 銅スラグ混合砂を用いたコンクリートの配合（砂岩砕砂を用いた場合）

Crushed stone dust under 0.15mm (%)	G _{max} (mm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	Unit content (kg/m ³)				Admixture (%xC)	
					W	C	S* ¹	G	HRWRA* ²	AE* ³
0	20	60.0	4.5	44.8	175	292	973	1,042	0.4	0.006
7				44.6			926	1,046		
15				44.2			952	1,052		

*1 Mixed sand with sandstone sand *2 HRWRA: High-range water reducing admixture, *3 AE: Air entraining admixture

±5%の恒温恒湿度室内でコンタクトゲージ法により測定を行った。中性化試験は、温度が20.0±1.0℃で、相対湿度が60±5%で、炭酸ガス濃度が20.0±1.0%の条件で行った。中性化試験に用いた供試体は、材齢14日まで水中養生を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリート

写真－1は、細骨材に砂岩砕砂を用いたコンクリートと銅スラグのみを用いたコンクリートのスランブを比較し示したものである。砕砂を用いたコンクリートは、高性能減水剤の添加量の増加にとともに、スランブが増加していくのに対し、銅スラグのみを細骨材に用いたコンクリートは、高性能減水剤の添加量を増加させても、材料分離を生じ、スランブは増加しない。図－1に示さ

れるように、銅スラグには細粒分が少ないことが原因と考えられる。図－2は、銅スラグ細骨材を用いたコンクリートのスランブと銅スラグに砕砂を混合し粒度調整を行った銅スラグ混合砂を用いたコンクリートのスランブを比較したものである。これらのコンクリートの単位水量および高性能減水剤、AE剤の添加量は一定である。この図に示される銅スラグ混合砂を用いた結果は、岩石副産物を添加していないものの結果である。銅スラグに砕砂を混合し、銅スラグ混合砂として用いることで、同じ単位水量、高性能減水剤量およびAE剤量であっても、スランブが増加することが分かる。とくに、粘板岩砕砂および石灰岩砕砂を用いたものはその傾向が顕著である。図－3は、銅スラグ混合砂への岩石副産物の添加量がコンクリートのスランブに及ぼす影響を示したものである。図中の○、△および□は、それぞれ、

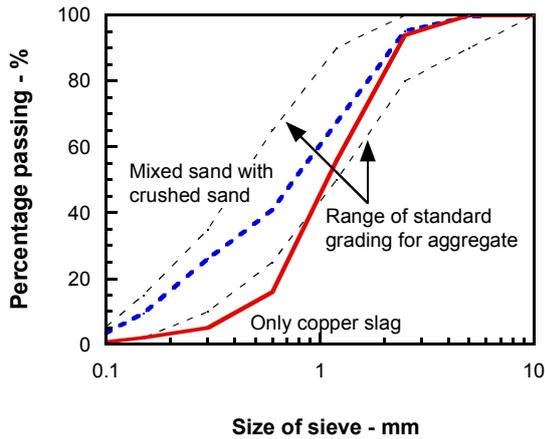


図-1 銅スラグおよび銅スラグ混合砂の粒度分布

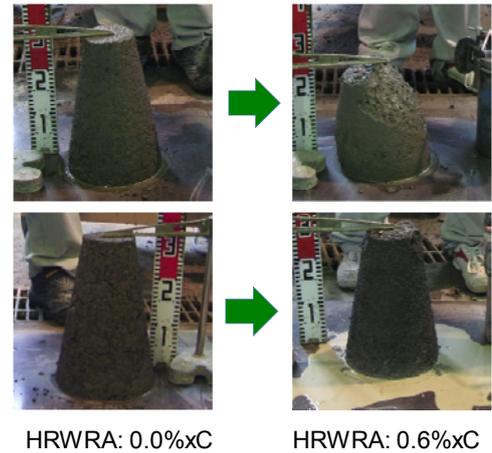


写真-1 スランプの比較

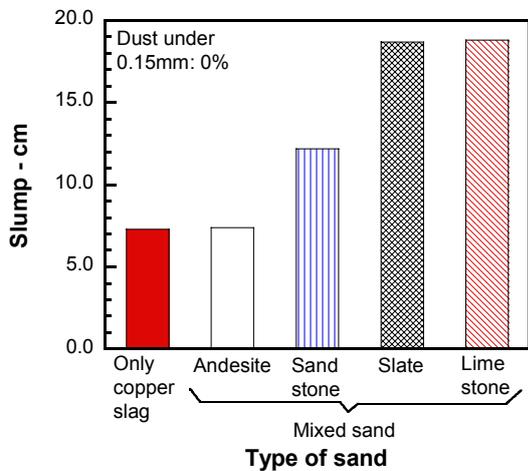


図-2 細骨材の種類がスランプに及ぼす影響

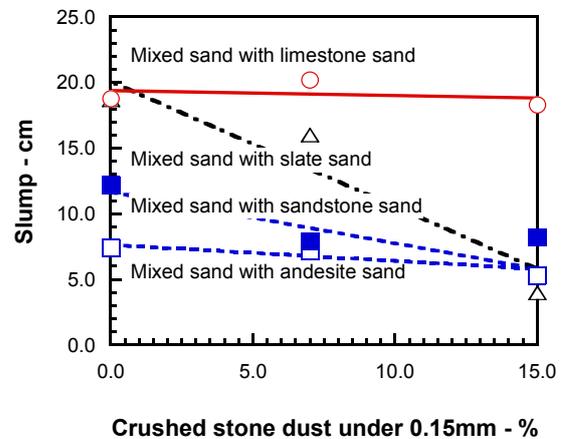


図-3 岩石副産物量がスランプに及ぼす影響

安山岩，砂岩，粘板岩および石灰岩の岩石副産物を加えた銅スラグ混合砂を用いた結果を示している。銅スラグ混合砂への岩石副産物の添加量は，0%，7%および15%である。岩石副産物の添加量が増加すると，スランプが小さくなるのが分かる。とくに，粘板岩砕砂を用いたものは，その傾向が顕著である。

図-4は，銅スラグ細骨材および種々の岩種の砕砂のみを用いたコンクリートのブリーディング量の測定結果を示したものである。図中の は，銅スラグ細骨材を用いた結果を示したものである。また， ， ，△および は，それぞれ，安山岩，砂岩，粘板岩および石灰岩の砕砂を細骨材に用いた通常のコンクリートの結果を示している。銅スラグ細骨材を用いたものは，砕砂を細骨材に用いたものに比べて，ブリーディング量が著しく多いことが分かる。スランプの場合と同様に，銅スラグの細粒分が少ないことが原因であると考えられる。図-5は，銅スラグ混合砂を細骨材に用いたコンクリートのブリーディング量の測定結果を示したものである。ただし，この図に示される結果は，銅スラグ混合砂へ岩石副産物は添加していない結果である。石灰岩砕砂を用いた

ものを除いて，銅スラグ混合砂として用いることで，銅スラグ細骨材を用いた場合に比べて，ブリーディング量が半分以下に抑えられていることが分かる。また，図-6は，銅スラグ混合砂への岩石副産物の添加量が，コンクリートのブリーディング量に及ぼす影響を示したものである。図中の ， ，△および は，それぞれ，安山岩，砂岩，粘板岩および石灰岩の銅スラグ混合砂の結果を示している。銅スラグ混合砂への岩石副産物の添加量は，0%，7%および15%である。この図より，岩石副産物量が増加すると，コンクリートのブリーディングが少なくなることが分かる。図-5に示される石灰岩砕砂を用いた銅スラグ混合砂も，岩石副産物量が増加することで，ブリーディング量が少なくなっている。

銅スラグに砕砂および岩石副産物を混合し銅スラグ混合砂として用いることで，スランプは増加する。また，ブリーディングが抑えられ，良好なワーカビリティをもったコンクリートを製造することが可能となる。

3.2 硬化後の性質

図-7は，銅スラグ細骨材および種々の岩種の砕砂のみを用いたコンクリートの圧縮強度の経時変化を示し

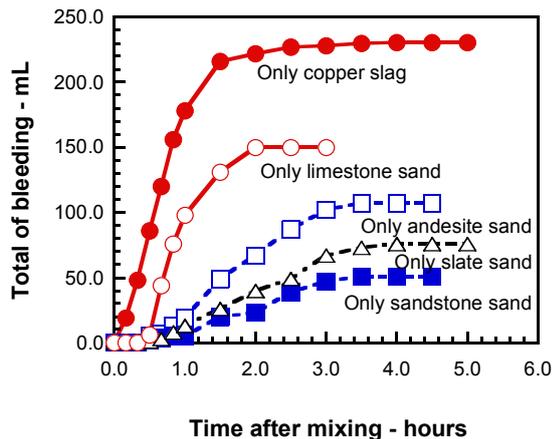


図-4 細骨材の種類がブリーディングに及ぼす影響

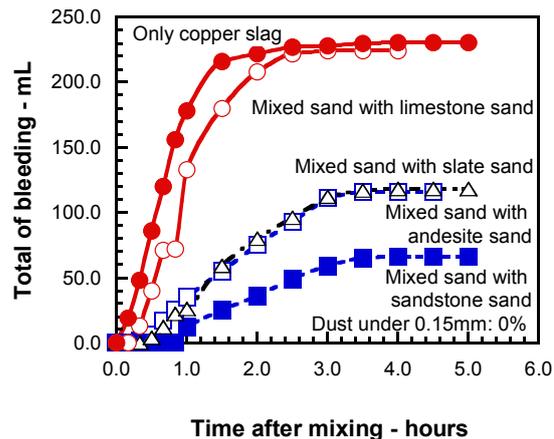


図-5 銅スラグ混合砂を用いたコンクリートのブリーディング試験結果

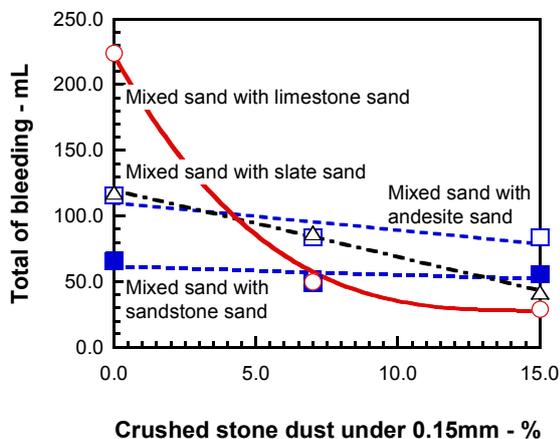


図-6 岩石副産物量がブリーディング量に及ぼす影響

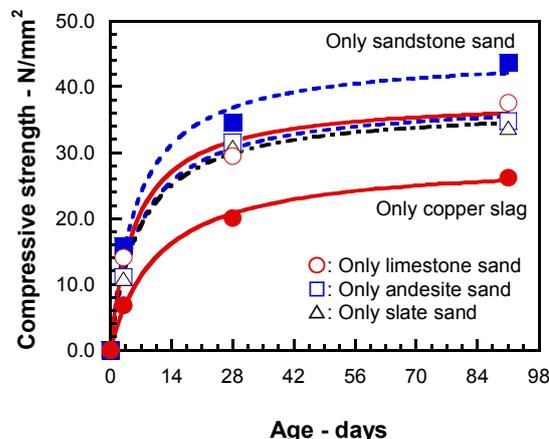


図-7 細骨材の種類が圧縮強度に及ぼす影響

たものである。図中の は、銅スラグ細骨材を用いた結果を示したものである。また、 \square 、 \triangle および \circ は、それぞれ、安山岩、砂岩、粘板岩および石灰岩の砕砂を用いた通常のコンクリートの結果を示している。銅スラグのみを用いたコンクリートの圧縮強度は、砕砂のみを用いたものに比べて、 10N/mm^2 程度小さくなっていることが分かる。一方、図-8は、銅スラグ混合砂を細骨材に用いたコンクリートの圧縮強度の経時変化を示したものである。ただし、この図に示される結果は、銅スラグ混合砂に岩石副産物を添加していないものである。銅スラグ細骨材を用いたものに比べて、圧縮強度が大きくなっていることが分かる。また、図-9は、銅スラグ混合砂への岩石副産物の添加量がコンクリートの材齢28日おける圧縮強度に及ぼす影響を示したものである。銅スラグ混合砂への岩石副産物の添加量は、0%、7%および15%である。岩石副産物の添加量が増加すると、コンクリートの圧縮強度は、増加する傾向にある。とくに、粘板岩砕砂を用いた銅スラグ混合砂の場合では、圧縮強度が 10N/mm^2 程度増加している。岩石副産物を15%添

加したものの圧縮強度は、岩種の砕砂を用いた通常のコンクリートの圧縮強度と同程度になっている。

図-10は、銅スラグ細骨材および種々の岩種の砕砂のみを用いた通常のコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を示したものである。銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、安山岩、砂岩および粘板岩の砕砂を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみより小さく、石灰岩砕砂を用いたものと同程度であることが分かる。銅スラグ細骨材を用いたコンクリートは、ブリーディングが多いものの、ブリーディングによるコンクリート中の水の減少量は、図-4に示される結果から算出すると 3kg/m^3 程度である。2007年制定コンクリート標準示方書[設計編]に示されるコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測式³⁾を用いて、ブリーディングによるコンクリート中の水の減少の影響を算出すると、乾燥収縮ひずみの最終値で 10×10^{-6} 程度と小さいものである。銅スラグ細骨材は、密度が大きく堅固であり、また、吸水率が0.63%で種々の砕砂に比べて3分の1以下と小さいため、銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮

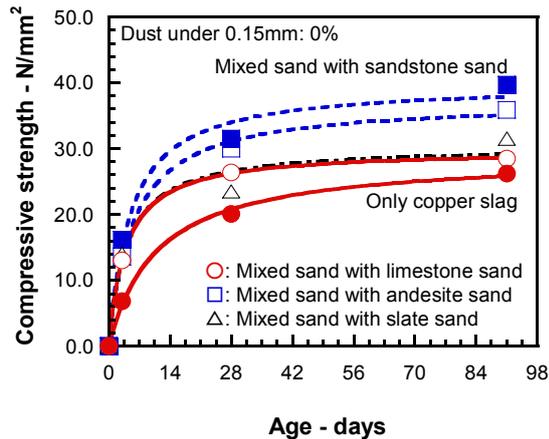


図-8 銅スラグ混合砂を用いたコンクリートの圧縮強度試験結果

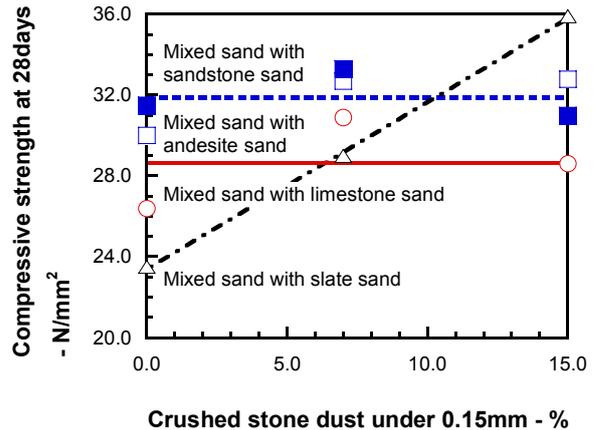


図-9 岩石副産物量が圧縮強度に及ぼす影響

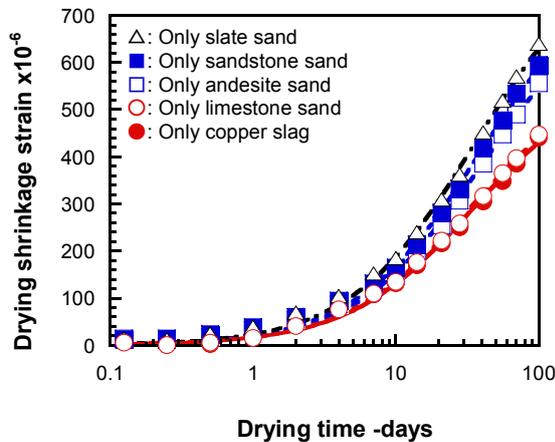


図-10 細骨材の種類が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響

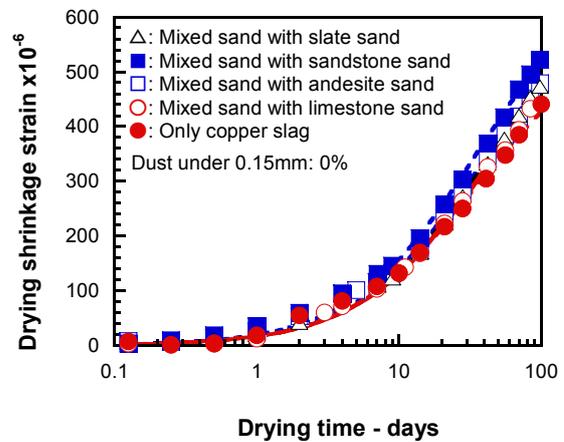


図-11 銅スラグ混合砂を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果

ひずみは、砕砂を用いたものに比べて小さいものと思われる。図-11に、銅スラグ混合砂を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を示す。ただし、この図に示される結果は、銅スラグ混合砂に岩石副産物を添加していないものである。銅スラグ混合砂を細骨材に用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、銅スラグのみを用いたものに比べ、若干大きくなっている。しかし、その差は、 100×10^{-6} 程度と小さいものである。また、銅スラグ混合砂への岩石副産物の添加量がコンクリートの乾燥収縮ひずみの最終値に及ぼす影響を図-12に示す。ただし、乾燥収縮ひずみの最終値は、乾燥収縮ひずみの実験データを式(1)により回帰し求めたものである。

$$\varepsilon_{ds}(t) = \frac{\varepsilon_{ds\infty} \cdot t}{\beta + t} \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon_{ds}(t)$ は、乾燥期間 t における乾燥収縮ひずみで、 ε_{ds} は、乾燥収縮ひずみの最終値で、 β は、乾燥収縮ひずみの経時変化を表す項である。銅スラグ混合砂への

岩石副産物の添加量は、0%、7%および15%である。この図より、安山岩および粘板岩の砕砂を用いた銅スラグ混合砂を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの最終値は、岩石副産物量が増加しても、変わらないことが分かる。一方、石灰岩砕砂の場合には、岩石副産物量の増加に伴い、乾燥収縮ひずみの最終値は小さくなっている。

図-13は、銅スラグ細骨材および種々の岩種の砕砂のみを用いたコンクリートの中酸化試験の結果を示したものである。この図より、銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの中酸化は、種々の岩種の砕砂を用いた通常のコンクリートのものと同程度であることが分かる。図-14は、銅スラグ混合砂を用いたコンクリートの中酸化試験結果を示したものである。ただし、この図に示される結果は、銅スラグ混合砂に岩石副産物を添加していないものである。銅スラグに砕砂を混合し、銅スラグ混合砂として用いても、コンクリートの中酸化に及ぼす影響は小さいことが分かる。また、図-15は、銅スラグ混合砂への岩石副産物量がコンクリートの中酸化速度係数に

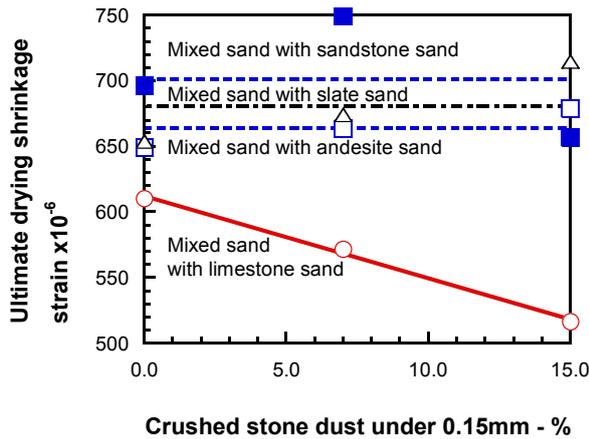


図-12 岩石副産物量が乾燥収縮ひずみの最終値に及ぼす影響

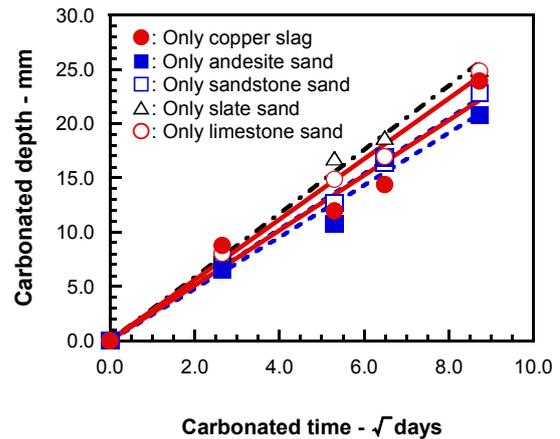


図-13 細骨材の種類が中性化に及ぼす影響

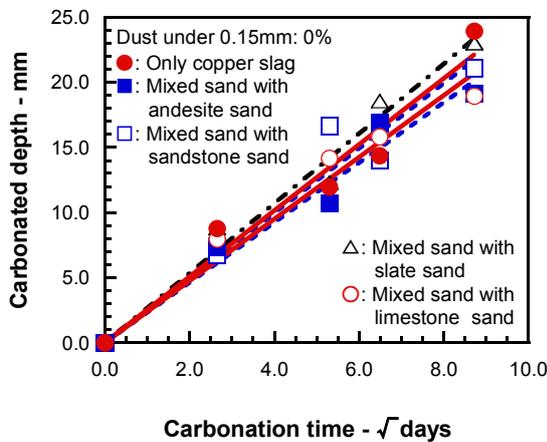


図-14 銅スラグ混合砂を用いたコンクリートの中性化試験の結果

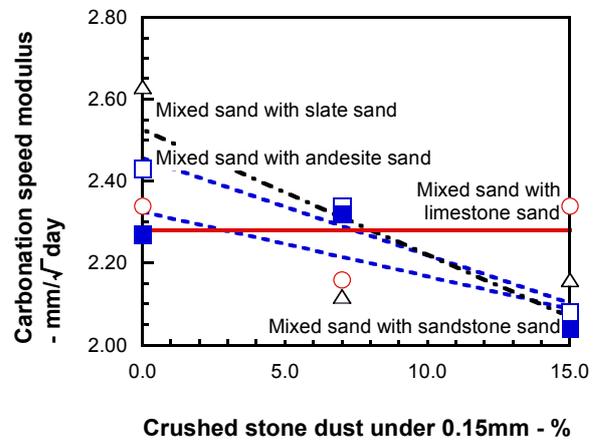


図-15 岩石副産物量が中性化速度係数に及ぼす影響

及ぼす影響を示したものである。ただし、中性化速度係数は、図-13 中および図-14 中に示される直線の傾きである。銅スラグ混合砂への岩石副産物の添加量は、0%、7%および15%である。銅スラグ混合砂への岩石副産物の添加量が増加すると、石灰岩を用いた場合には、中性化速度係数は変わらない。しかし、その他の岩種の場合には、中性化速度係数は小さくなる傾向にある。銅スラグに砕砂の細粒分および岩石副産物を添加し、銅スラグ混合砂として用いても、コンクリートの中性化に及ぼす影響は小さいといえる。

4. まとめ

銅スラグに砕砂の細粒分を加えて銅スラグ混合砂として用いることで、銅スラグのみで用いた場合よりも、材料分離が抑えられた良好なスランプが得られる。また、圧縮強度は増加する。さらに、銅スラグ混合砂に岩石副産物を添加することで、ブリーディングはさらに減少し、中性化の進行は遅くなる。一方、銅スラグ混合砂を用い

たコンクリートの性能を通常の砕砂を用いたコンクリートと比較した場合、その差は小さいが、銅スラグ混合砂を用いたコンクリートの圧縮強度は小さく、ブリーディングは増加する。以上のことから、銅スラグに砕砂の細粒分、さらには、岩石副産物を混合し、粒度を調整した銅スラグ混合砂を製造することで、コンクリート用材料として利用の少ない銅スラグおよび岩石副産物の有効利用が可能になるものと思われる。

参考文献

- 1) 土木学会：銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針，コンクリートライブラリー，92，1998.2
- 2) 仁木孟伯，長滝重義，友沢史紀，梶原敏孝：銅スラグ砂を使用したコンクリートの基礎的性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 17，No. 1，pp.399-404，1995. 6
- 3) 土木学会コンクリート委員会：2007年制定コンクリート標準示方書[設計編]，土木学会，pp. 45，2008. 3