

論文 銅スラグ砂を使用したコンクリートの基礎的性状

仁木孟伯*¹・長滝重義*²・友沢史紀*³・梶原敏孝*⁴

要旨：銅製錬時に副産する銅スラグを、コンクリート用の細骨材として有効利用することを目的に、粉碎加工を施した銅スラグ砂を用いたコンクリートの基礎的な物性試験を実施した。その結果、①粉碎加工処理は銅スラグ砂の粒形改善等に効果的である、②銅スラグ砂を単味使用したコンクリートの流動性は、川砂の場合とほぼ同等であるが、ブリーディングが大きくかつ凝結が遅れる、③長期強度の発現性に優れる、等を確認した。これらの特徴は、銅スラグ砂の銘柄間の差が小さいこと、及び天然砂との混合使用により制御できることから、銅スラグ砂は細骨材として使用できるものと評価される。

キーワード：骨材資源、銅スラグ砂、粉碎加工、細骨材、比重、ブリーディング

1. はじめに

銅製錬時に水砕として副産する銅スラグは、全国でおよそ年間200万tで、その多くはセメント原料、ブラスト材、埋立て材料、等に利用されてきたが、需給状況によっては未利用のまま堆積保管される場合もある。銅スラグの利用に関しては、銅スラグは砂状で産出しており、またその粒子が硬いことから、これまでもコンクリート用細骨材としての検討が一部で進められてきた[1][2][3]。これらの報告によれば、銅スラグを細骨材としてそのまま単味使用した場合には、ワーカビリティが悪くまたブリーディングが大きい問題が認められるが、一方、天然砂などと適切に組み合わせ混合使用すれば、これらの問題も解決できることが示されている。

ここでは、資源の有効利用と骨材資源の枯渇化という観点から、銅スラグのコンクリート用細骨材としての適性を拡大することを目的に、あらかじめ粉碎加工処理を施した銅スラグ砂について、その基礎的な物性を明らかにし、砂としての適性を評価することとした。

本研究は、日本鋳業協会が組織した銅スラグ研究委員会が実施したもので、対象とした銅スラグは全社6工場より産出されるものであるが、試験の内容により代表銘柄を選定して実験した場合もある。

2. 銅スラグの加工処理

銅スラグは水砕として産出するため、その粒子は角ばった形状を呈しているものが多い。このため、産出状態のまま使用した場合には、練混ぜ中にその粒子形状や粒度分布が変化し、フレッシュコンクリートの性状が練混ぜ時間の経過に伴い、明らかに変化することが予察試験で認められた。このことから、産出状態の銅スラグに軽微な粉碎加工を施すことにより、粒形の改善を行うと同時に、練混ぜ中の粒度の変化を抑制することとした。

*1 三菱マテリアル(株)セメント研究所 部長(正会員)

*2 東京工業大学教授 工学部土木工学科、工博(正会員)

*3 東京大学教授 工学部建築学科、工博(正会員)

*4 日本鋳業協会理事 技術部長

表-1 銅スラグの化学組成 (平均的な値、%)

産出工場	銅製錬の方式	Fe	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Cu	Pb	Zn
A	MI法	36.2	34.1	6.0	4.9	1.2	0.7	0.1	0.6
B	反射炉	36.1	33.7	2.9	4.1	1.9	0.7	0.4	2.1
C	自溶炉	38.5	32.0	2.2	5.1	2.7	0.6	0.2	1.6
D	自溶炉	33.4	30.3	2.2	2.8	1.0	0.5	1.3	5.2
E	自溶炉	37.4	33.7	3.6	5.0	0.9	0.6	0.2	1.3
F	自溶炉	36.2	32.3	2.2	6.2	1.1	0.7	0.2	1.5

2. 1 粉砕加工の条件と粉砕産物の物理的性状

銅スラグの粉砕加工にはロッドミルを使用した。その仕様は、ミル寸法Φ1500×3000mm、ロッドΦ80×2400mm・40本、ミル回転数26rpmで連続粉砕した。工場Fの銅スラグを原試料(F₀)として使用し、その供給量を3レベルに変え、粉砕加工程度の異なる産物(試料F₁, F₂, F₃)を得た。これらの物理的性状を表-2に示す。

表-2 粉砕加工処理した銅スラグ砂の物理的性状

試料	粉砕加工程度*	粗粒率	表乾比重	吸水率 (%)	洗い損失量 (%)	単位容積質量 (kg/l)	実積率 (%)
F ₀	未加工	3.20	3.43	0.50	1.2	1.87	54.6
F ₁	小	2.45	3.42	0.44	3.7	2.14	62.8
F ₂	中	2.24	3.45	0.40	5.8	2.27	66.1
F ₃	大	1.91	3.47	0.28	9.2	2.36	68.2

*) 小 : スラグ供給量15.8t/h, 中 : 9.2 t/h, 大 : 5.0 t/h

銅スラグ供給量が減少するにつれ粗粒率は減少し、粉砕加工が進んでいることが判るほか、洗い損失量や実積率は増加し、粒子形状が改善されていることが窺える。

粒度曲線を図-1に示す。試料F₁及びF₂の粒度はJIS A 5011「コンクリート用スラグ骨材」のFNS2.5及びFNS1.2、F₃の粒度はFNS1.2に該当する。また、試料F₀(未加工)はFNS5-0.3に該当する。

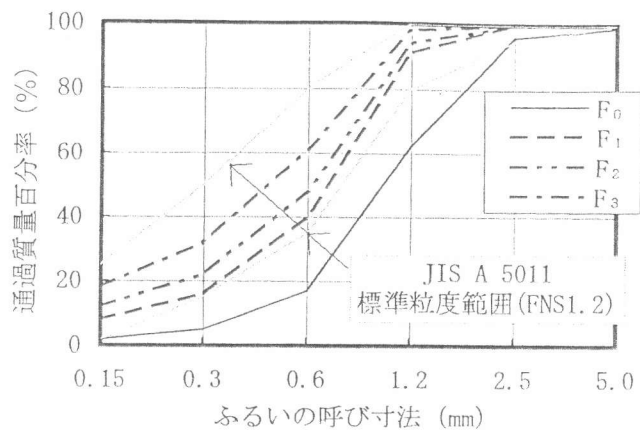


図-1 銅スラグ砂の粒度曲線

2. 2 粉砕の程度とコンクリートの性状

未加工及び粉砕加工程度の異なる銅スラグ砂を、細骨材として単味使用した場合のコンクリートの配合を、比較用に川砂(大井川水系産)を使用した場合を含めて表-3に示す。細骨材率は自然砂の場合と同様に粗粒率を考慮して定めた。練混ぜは、容量50ℓの強制攪拌ミキサーを使用し、練り量30ℓとした。

練混ぜ時間とスランプ及び空気量の関係を図-2及び図-3に示す。同一単位水量とした銅スラグ砂F₀、F₁、F₂及びF₃の練混ぜ時間2分のスランプは、それぞれ1.0、8.5、9.0及び

表-3 コンクリートの配合

試料	目標スランプ (cm)	目標 空気量 (%)	水セメ ント比 (%)	細 骨 材 率 (%)	単位量 (kg/m ³)				A E 減水剤 *	A E 補助剤 **
					水	セメント	細骨材	粗骨材		
F ₀	8	4.5	55.0	49	170	309	1156	924	250	0
F ₁	8	4.5	55.0	45	170	309	1057	998	250	0
F ₂	8	4.5	55.0	44	170	309	1042	1016	250	0
F ₃	8	4.5	55.0	43	170	309	1024	1035	150	0.003
川砂	8	4.5	55.0	45	165	300	823	1008	250	0.004

注) 川砂：大井川水系産 (表乾比重2.63、吸水率1.75、粗粒率2.76)
 粗骨材：青梅産硬質砂岩碎石 (最大寸法20mm、表乾比重2.64、吸水率0.78、粗粒率6.67)
 セメント：普通ポルトランドセメント、3社混合使用
 *：セメント100kg に対する ml **：セメントに対する%

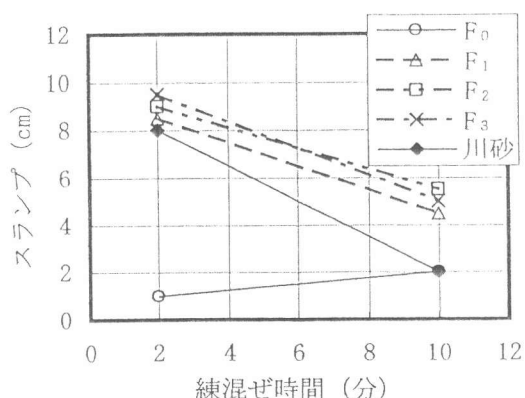


図-2 練混ぜ時間とスランプの関係

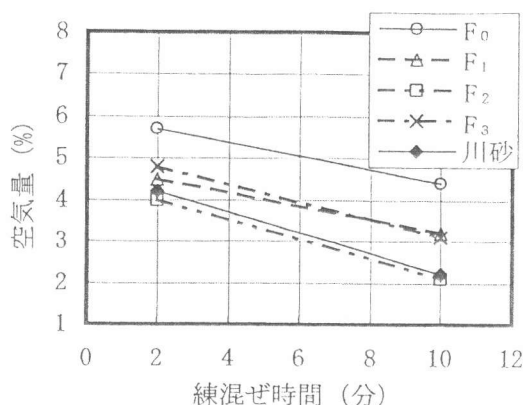


図-3 練混ぜ時間と空気量の関係

9.5 cmであり、加工品のスランプ発現性は著しく改善された。また、粉砕加工程度が進むにつれ、若干スランプが大きくなる傾向が認められるが、いずれもワーカビリティは良好で大差ないのであった。混ぜ時間10分のスランプは、F₀ (未加工)を除きいずれも2分の場合より半減した。この傾向は比較に用いた川砂の場合も同様であり、激しい攪拌に伴う空気量の減少が、大きく影響していると考えられる。

図-4は、練混ぜ後の銅スラグ砂の粒度を、コンクリートを洗い分析し調べたものである。銅スラグ砂は黒色であるため、他の粒子との区別は目視で容易にできる。なお、図-4で練混ぜ時間0分の試料の粗粒率は、洗い損失量を補正して示した。F₀ (未加工)の粗粒率は練混ぜにより減少しているが、加工品の粗粒率はほとんど変化をしていない。このことから、練混ぜ中の粒度分布の変化を、粉砕加工で抑制できることが判った。

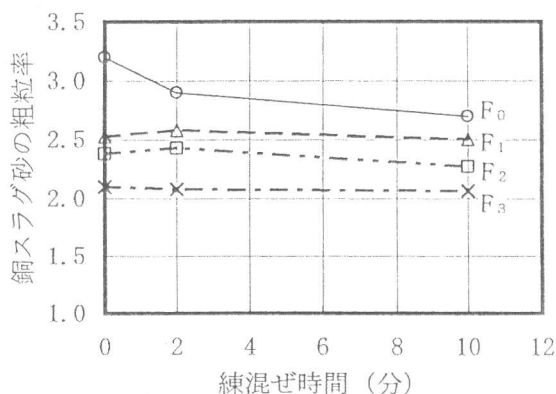


図-4 練混ぜ時間と砂の粗粒率の関係

3. 加工処理した各社銅スラグ砂を用いたコンクリート

3. 1 各社銅スラグ砂の性状

2章に記したロッドミルを用いて、全社6工場の銅スラグを11t/hの供給量で粉砕加工した。得られた銅スラグ砂の物理的性状を表-4に示す。原スラグの粒度が異なるため、得られた銅スラグ砂の粗粒率は2.35~2.70に分布したが、洗い損失量は3.0~5.0%であり、実積率は全て65%以上であった。川砂と比較した場合、粒度分布が異なるので直接的な比較はできないが、粗粒率が同程度の試料Eは、実積率も等しく、川砂に近い粒子形状を有していると判断される。その他、銅スラグ砂は比重が大きく(3.43~3.65)吸水率が小さい(0.48~0.56)特徴を有している。

図-5に各社銅スラグ砂の粒度を示す。その粒度は、いずれもJIS A 5011のFNS2.5及びFNS1.2のいずれか又は両方に該当するものである。

3. 2 フレッシュコンクリートの性状

(1) 最適細骨材率

単位水量 165kg/m^3 、単位セメント量 300kg/m^3 の配合で、細骨材率の変化に伴うスランプの発現性を試験した。その結果、いずれの銅スラグ砂を使用した場合も、比較に用いた川砂(FM2.69)の場合と同様に、

細骨材率45%付近で最大値を示した。銅スラグ砂は川砂に比べ、比重が大きく最大寸法が小さいが、この二つの要素の影響が結果的に川砂の場合と変わらない最適細骨材率を示したものである。このことは、銅スラグ砂を他の砂と混合使用する場合に、使い易い好都合な性状である。

(2) 単位水量及び空気連行性

全銘柄の銅スラグ砂について、硬練り(スランプ8cm)及び軟練り(スランプ18cm)のコンクリートの配合例を表-5に示す。銅スラグ砂の単位水量は川砂より平均で 5kg/m^3 程度多く要し、銘柄により若干の差がある。また、この傾向は硬練りと軟練りで同様である。銅スラグ砂は空気連行性が大きく、使用材料や配合条件によっては、消泡剤を必要とする場合がある。

(3) ブリーディング

銅スラグ砂を使用したコンクリートのブリーディング性状を、川砂及び川砂との混合使用の場合を含め、その一例を図-6に示す。銅スラグ砂は川砂に比べ、ブリーディング量はおよそ3倍で、ブリーディング速度は大きく、かつ終了時間も早い。この傾向は、いずれの銘柄の銅スラグ砂の場合も同様である。銅スラグ砂はガラス質であり表面が滑らかであること、粒度が比較的単

表-4 各社銅スラグ砂の物理的性状

銘柄	粗粒率	表乾比重	吸水率 (%)	洗い損失量 (%)	単位容積質量 (kg/l)	実積率 (%)
A	2.46	3.57	0.52	3.0	2.32	65.4
B	2.50	3.52	0.48	3.7	2.30	65.7
C	2.53	3.63	0.52	4.6	2.40	66.5
D	2.35	3.65	0.50	3.8	2.38	65.6
E	2.70	3.43	0.52	4.2	2.33	68.1
F	2.47	3.46	0.56	5.0	2.30	66.9
川砂	2.69	2.62	1.50	1.1	1.76	68.2

注) 川砂はコンクリート試験に用いたものを示す

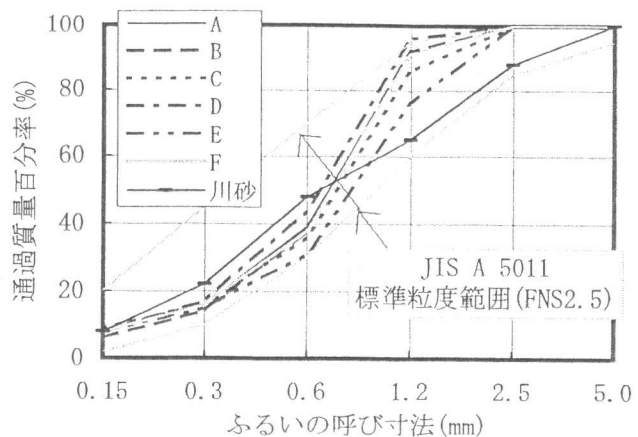


図-5 各社銅スラグ砂の粒度曲線

表-5 コンクリートの配合

銘柄	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				A E 減水剤 *	A E 補助剤 **
					水	セメント	細骨材	粗骨材		
A	8	4.5	55.0	45	165	300	1117	1012	250	0.0005
B	8	4.5	55.0	45	170	309	1088	1002	250	0.0005
C	8	4.5	55.0	45	170	309	1122	1002	250	0.001
D	8	4.5	55.0	45	170	309	1128	1002	250	0.0005
E	8	4.5	55.0	45	165	300	1074	1012	250	0
F	8	4.5	55.0	45	170	309	1069	1002	250	0.0005
川砂	8	4.5	55.0	45	162	295	825	1020	250	0.003
A	18	4.5	55.0	47	180	327	1128	943	250	-0.005
B	18	4.5	55.0	47	185	336	1099	933	250	0.0005
C	18	4.5	55.0	47	185	336	1133	933	250	-0.005
D	18	4.5	55.0	47	185	336	1139	933	250	-0.005
E	18	4.5	55.0	47	183	333	1074	938	250	-0.005
F	18	4.5	55.0	47	185	336	1080	933	250	0.001
川砂	18	4.5	55.0	47	180	327	828	943	250	0.0005

注) 川砂：大井川水系産 (表乾比重2.62、吸水率1.50、粗粒率2.69)
 粗骨材：青梅産硬質砂岩砕石 (最大寸法20mm、表乾比重2.65、吸水率0.72、粗粒率6.63)
 セメント：普通ポルトランドセメント、3社混合使用
 *：セメント100kg に対する ml **：セメントに対する % (-は消泡剤使用)

一であること、及び比重が大きいことが影響し、コンクリートの保水性を著しく低下させていると考えられる。一般にブリーディングが大きいコンクリートは、施工上あるいは耐久性上好ましくないため、その低減対策を用意しておく必要がある。その一つとして、図-6に川砂と混合使用した例を示す。なお、混合比率は容積比である。

(4) 凝結時間

JIS A 6204 付属書1「コンクリートの凝結時間試験方法」により、硬練りコンクリートの場合について試験した。その結果を表-6に示す。銅スラグ砂を使用したコンクリートの凝結は、川砂の場合に比べ始発で3~5時間、終結で4~8時間遅い。凝結遅延のメカニズムに関しては、基礎物性上あるいは使用上の対策からも明らかにしておく必要がある。今後の検討課題の一つである。

3. 3硬化コンクリートの強度性状

(1) 圧縮強度

銅スラグ砂を使用したコンクリートの圧縮強度の発現性を、川砂に対する強度比 (6銘柄の平均値) で表-7に示す。銅スラグ砂を使用したコンクリー

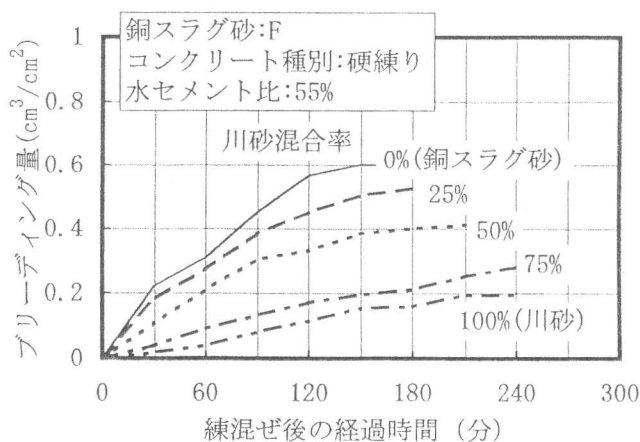


図-6 ブリーディング性状

表-6 硬練りコンクリートの凝結時間

銘柄	凝結時間 (時:分)	
	始 発	終 結
A	13:30	17:00
B	11:10	14:30
C	10:00	12:30
D	9:40	12:30
E	10:30	13:30
F	11:30	15:30
* F 50%	7:45	10:45
川砂	6:25	8:30

*：川砂50% 混合

トの材齢28日の圧縮強度は、川砂と同等である。また、銘柄の違いによる強度比の分布は91~115%の範囲にあり、銘柄間の差は比較的小さい。材齢との関係では、銅スラグ砂は初期（7日）では15%程度小さい場合もあるが、その後の強度増進が大きく、長期（91日）では川砂の強度を10%程度上回る。川砂と混合使用した場合には、この特長が混合比率に応じ薄くなる。

表-7 銅スラグ砂の川砂に対する圧縮強度比

水セメント比	硬練りコンクリート			軟練りコンクリート		
	σ_{7d}	σ_{28d}	σ_{91d}	σ_{7d}	σ_{28d}	σ_{91d}
45 %	97	104	109	102	112	113
55 %	89	99	115	101	102	113
65 %	85	99	111	94	99	105
平均	90	101	112	99	104	110

(2) 引張強度・曲げ強度

引張強度及び曲げ強度を、JIS A 1113「コンクリートの引張強度試験方法」及びJIS A 1106「コンクリートの曲げ強度試験方法」により試験した。銅スラグ砂を使用したコンクリートの引張強度及び曲げ強度は、それぞれ圧縮強度の1/13及び1/7程度であり、川砂の場合と同じである。

(3) 静弾性係数

銅スラグ砂を使用したコンクリートの静弾性係数は、川砂の場合に比べて $2 \sim 3 \times 10^4 \text{kgf/cm}^2$ 程度大きい。この差は、ACI 実験式における単位容積質量差（銅スラグ砂コンクリートの単位容積質量は $2.5 \sim 2.6 \text{t/m}^3$ で川砂の場合より $0.2 \sim 0.3 \text{t/m}^3$ 大きい）の影響に合致する。

4. まとめ

粉碎加工を施した銅スラグ砂を対象とし、これを細骨材として使用したコンクリートの基礎的な物性試験を行った。その結果、

- ① 粉碎加工処理は、銅スラグ砂の粒形改善及び練混ぜ中の粒度変化対策として効果的である。
 - ② 銅スラグ砂を単味使用したコンクリートは、ブリーディングが大きく、かつ凝結が遅れる。
 - ③ 圧縮強度の発現性は、川砂に比べ初期（7日）ではやや小さいが長期（91日）では上回る。
- 等を確認した。これらの特徴は、銘柄間の差が小さいこと、及び天然砂等との混合使用により制御できることから、銅スラグ砂は細骨材として十分使用できるものと評価される。また、銅スラグ砂は重量コンクリートにとっては貴重な資源であり、その特長を生かし単味使用する技術について、配合、施工の両面から今後も検討を進める必要がある。

参考文献

- 1) 赤塚雄三・前川淳：細骨材として銅からみを用いたコンクリートの性質、コンクリート・ジャーナル、Vol.8, No.6 pp.19-22、June 1970
- 2) 秋田県工業技術センター・同和鋳業株式会社、銅製錬工程で発生するスラグの再利用に関する研究成果報告書、平成元年3月
- 3) 住友金属鋳山株式会社・鹿島建設株式会社、コンクリート用細骨材としての住友スラグサンドの利用に関する試験結果報告書、平成元年12月

(付記) 日本鋳業協会・銅スラグ研究委員会

委員長：長滝重義（東京工業大学）、副委員長：友沢史紀（東京大学）、川瀬清孝（新潟大学）
 庄谷征美（八戸工業大学）、依田彰彦（足利工業大学）、山本泰彦（筑波大学）
 国府勝郎（東京都立大学）、福手勤（運輸省港湾技術研究所）、阿部道彦（建設省建築研究所）
 河野広隆（建設省土木研究所）、飛坂基夫（建材試験センター）、野尻陽一（鹿島建設）
 武田一久（大成建設）、武山信（全国生コン工業組合連合会）、及び銅スラグ生産者委員