

[1107] フェロニッケルスラグ微粉末のアルカリシリカ反応抑制効果

正会員 ○秋山 淳(陸上自衛隊施設学校)  
 正会員 山本 泰彦(筑波大学構造工学系)

1. まえがき

著者らは、フェロニッケルスラグ(以下、スラグという)の一部がアルカリシリカ反応性を有し、カルシウム分の少ないガラス質の存在がその原因となっていることを明らかにしてきた[1][2]。また、反応性を有するスラグであっても、天然の反応性骨材の場合と同様な処置を講じれば、コンクリート用細骨材として利用できることも示した[2]。一方、反応性スラグのその他の活用方法としては、その反応性を積極的に利用する用途も考えられる。即ち、反応性スラグを微粉砕してコンクリート中に添加すれば、個々の微粉末粒子の反応が生じて、その反応による膨張の悪影響が分散されて小さくなると同時に、スラグ微粉末がアルカリ消費材としての役割を果たし、他の反応性骨材のアルカリシリカ反応を抑制する効果が期待できると予想されるのである。

本文は、スラグ微粉末の各種の反応性骨材に対するアルカリシリカ反応抑制効果を調べた結果について論じたものである。

2. 使用材料および実験方法

試験に用いたスラグ微粉末は、我が国のスラグの中で最も反応性が強いスラグが排出されている工場から可能な限り冷却速度を早めて製造したスラグを入手し、これをボールミルで粉砕したものである。試験には、ブレン値約2500cm<sup>2</sup>/gのスラグ微粉末を主として用いた。但し、一部の試験ではブレン値約1200および4500cm<sup>2</sup>/gのスラグ微粉末も用いた。また、比較のために、高炉スラグ微粉末、フライアッシュおよび標準砂を粉砕したケイ砂粉も使用した。これらの微粉末の試験結果を表1に示す。なお、表1中のN2には2つの物性値が示されているが、これらは2回に分けて作成した微粉末の物性値が異っていたためにそれぞれの試験値を示している。セメントには、4種類の普通ポルトランドセメントを用いた。これらのアルカリ量は、等価Na<sub>2</sub>O量で0.51、0.57、0.66および1.03

表1 試験に用いた鉱物質微粉末の物理的性質と強熱減量

鉱物質微粉末	記号	比重	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	強熱減量 (%)
スラグ微粉末	N 1	3.03	1260	+0.2
	N 2	3.05	2350	+0.4
		3.08	2490	---
N 3	3.06	4590	+0.2	
高炉スラグ微粉末	BF	2.90	4410	0.2
フライアッシュ	FA	2.15	3650	0.5
ケイ砂粉	H	2.64	4290	0.0

表2 セメントの試験成績

記号	比重	比表面積 cm <sup>2</sup> /g	圧縮強度, kgf/cm <sup>2</sup>			化学成分, %								
			3日	7日	28日	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> Oeq.
C 1	3.15	3050	160	274	421	18.5	5.3	3.4	63.0	1.7	2.2	0.23	0.42	0.51
C 2	3.16	3240	141	230	411	22.1	5.5	3.0	64.9	1.4	1.8	0.28	0.44	0.57
C 3	3.16	3210	142	232	411	22.2	5.4	3.1	65.1	1.2	1.9	0.33	0.50	0.66
C 4	3.15	3430	135	230	378	22.3	5.1	3.0	63.2	1.7	1.9	0.54	0.74	1.03

%であった(表2)。

反応性骨材としては、パイレックスガラス、輝石安山岩系の砕砂2種類および微粉碎処理する前のスラグを細骨材に用い、岩種が安山岩、チャートである2種類の砕石を粗骨材に用いた。反応性骨材の物理的性質は、表3に示した。なお、コンクリートの試験では、粗骨材のみに反応性のものを用い、細骨材には無害な笠間産の砕砂(硬質砂岩、比重=2.61、吸水率=1.25%、粗粒率=3.00)を使用した。また、モルタルの強度を調べる試験では、鬼怒川産の川砂(比重=2.59、吸水率=2.27%、粗粒率=2.71)も用いた。骨材の使用に当っては、モルタルには絶乾状態の細骨材を用いたのに対し、コンクリートには十分に吸水させたものを用いた。

スラグ微粉末のアルカリシリカ反応抑制効果は、モルタルあるいはコンクリート供試体の長さ変化を測定して調べた。これらの試験では、セメント量に対するアルカリ濃度を等価 $\text{Na}_2\text{O}$ 量で0.51~2.0%の範囲に変化させた。アルカリ濃度の調整には、 $\text{NaOH}$ を用いた。

モルタル供試体の試験は、ASTM C 227(モルタルバー法)に準拠して行い、スラグ微粉末を用いる場合には、基準配合のセメントの一部をスラグ微粉末で置換した。

コンクリート供試体(10×10×40cm)による試験では、単位セメント量 $320\text{kg}/\text{m}^3$ 、水セメント比56%および細骨材率46%を基準配合とし、スラグ微粉末は細骨材の一部と置換して用いた。コンクリートの練り混ぜ、供試体の作成および長さ変化の測定は、20℃の室内で行った。供試体は、材令2日で脱型し、基長の測定を行った後、50℃、約100% R.H.の恒温恒湿室内に保存した。供試体の長さ変化は、ダイヤルゲージ法で測定した。

### 3. 実験結果および考察

図1は、パイレックスガラスを細骨材として用い、アルカリ濃度を0.51、1.0または1.4%とした3種類の基準モルタルを考え、それぞれのセメント重量の0~30%をスラグ微粉末N2で置換した場合の6ヶ月後における膨張量とモルタル中のアルカリ量(モルタル1当りの等価 $\text{Na}_2\text{O}$ 量に換算)との関係を示したものである。モルタル中のアルカリ量は、スラグ微粉末で置換したセメント中に含まれているアルカリ量の分だけモルタル中のアルカリ量が減少すると考えて計算した値である。図1によれば、何れの基準モルタルの場合にも、そのセメント量に対

表3 反応性骨材の種類および物理的性質

種別	岩種	記号	表乾比重	吸水率%	粗粒率
細骨材	パイレックスガラス	P	2.20	0.00	2.90
	輝石安山岩	K1	2.53	2.55	2.90
	輝石安山岩	K2	2.76	1.50	2.90
	フェロニックススラグ	S	2.95	1.12	2.90
粗骨材	安山岩	An	2.64	0.52	6.79
	チャート	Ch	2.64	0.56	6.98

最大寸法は20mm

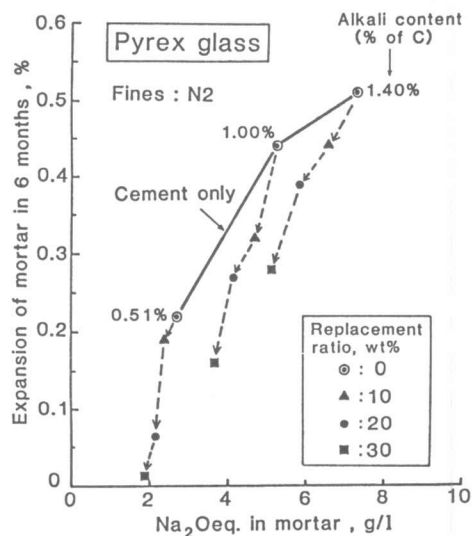


図1 パイレックスガラスを用いたモルタルの試験結果

するスラグ微粉末の置換率が大きくなるにつれて膨張量が減少しており、その減少の程度は、モルタル中のアルカリ量の減少量から予測される値（実線部分の変化量）より相当に大きいことが認められる。この結果は、スラグ微粉末が予期したようなアルカリ消費材としての働きをし、スラグ微粉末によって消費されたアルカリ量の分だけパイレックスガラスのアルカリシリカ反応が抑制されたことを示唆するものと思われる。

ASTM C 441では、パイレックスガラスを用いたモルタル（アルカリ濃度約1%）中のセメント体積の25%と置換した場合には、膨張量を75%以上減少させ、かつ、14日後におけるモルタルの膨張量が0.02%以下となるものを有効な反応抑制材料と定義している。この基準に従えば、アルカリ濃度1%のモルタルに置換率30%で用いた場合でも、膨張量減少率が約65%にとどまっているN2は有効な反応抑制材料とは言えない。しかし、反応抑制効果があると広く認められている高炉スラグ微粉末やフライアッシュの場合でも、一般にはそれぞれの置換率を約50%、25~40%程度以上としなければ上記の基準値が満足されないことが多いと指摘されているのである[3]。これらを考慮すると、スラグ微粉末の場合も、高炉スラグ微粉末やフライアッシュに劣らない反応抑制効果を発揮するものと期待される。

上記の点を確認するために、天然の反応性骨材2種(K1、K2)および反応性スラグを細骨材として用い、上記と同様なモルタル試験を行った。但し、この試験では、アルカリ量を1.57および1.03%としたモルタルに対してのみスラグ微粉末の置換の影響を調べた。また、K1およびK2を用いた試験では、スラグ微粉末N2に加え、比表面積がN2と異なるN1およびN3の効果も試験した。図2~図4は、それぞれの反応性骨材に対する試験結果を示したものであり、図2および図3には、ケイ砂粉H（置換率30%）あるいは高炉スラグ微粉末BF（置換率50%）を用いた場合の結果も示してある。

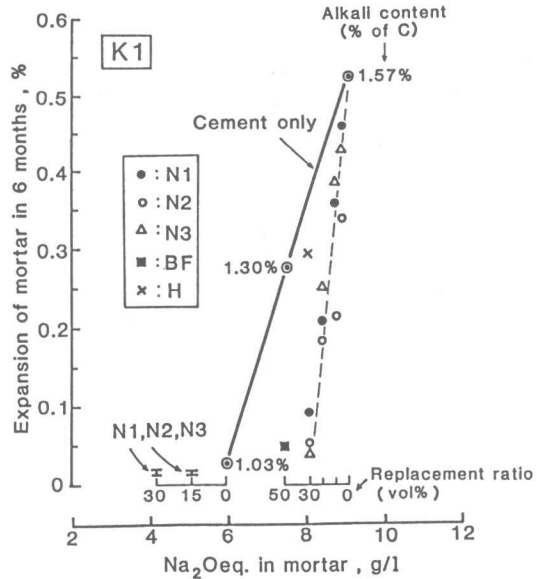


図2 輝石安山岩K1を用いたモルタルの試験結果

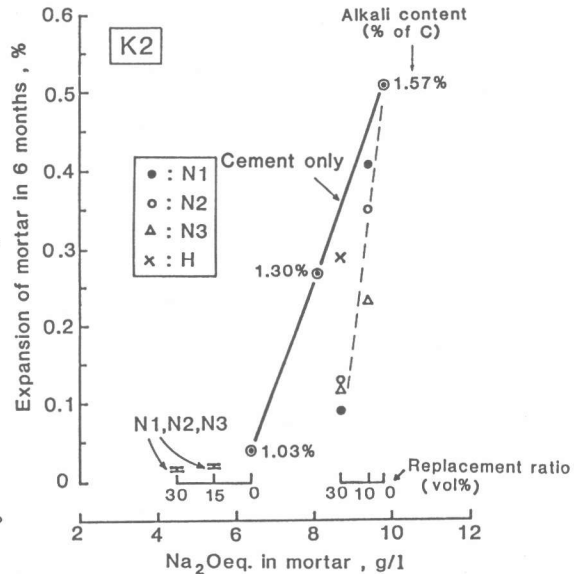


図3 輝石安山岩K2を用いたモルタルの試験結果

試験では、アルカリ量を1.57および1.03%としたモルタルに対してのみスラグ微粉末の置換の影響を調べた。また、K1およびK2を用いた試験では、スラグ微粉末N2に加え、比表面積がN2と異なるN1およびN3の効果も試験した。図2~図4は、それぞれの反応性骨材に対する試験結果を示したものであり、図2および図3には、ケイ砂粉H（置換率30%）あるいは高炉スラグ微粉末BF（置換率50%）を用いた場合の結果も示してある。

図2および図3によれば、K1あるいはK2を用い、アルカリ濃度を1.57%とした基準モルタルの場合にもスラグ微粉末の置換により膨張が著しく抑制されており、特に、置換率を30%とした場合の膨張量は、いずれのスラグ微粉末の場合にも基準モルタルに対する値の約1/5以下となっていることが認められる。この膨張量減少の割合は高炉スラグ微粉末を置換率50%で用いた場合と同等である。また、スラグ微粉末を置換率30%で用いた場合の膨張量は、化学的に安定なケイ砂粉を同じ置換率で用いた場合の約1/3以下になっていることも認められる。一方、アルカリ濃度を1.03%としてK1あるいはK2を用いた場合には、基準モルタルの膨張量はいずれも0.05%以下で極めて小さいが、この場合にもスラグ微粉末の使用により膨張量は更に減少する傾向にある。以上の結果は、K1およびK2を用いたモルタルの膨張量の減少が、単にセメントの置換によるアルカリ量の減少だけに起因したものでないことを示すとともに、これらの骨材に対するスラグ微粉末の反応抑制効果が、高炉スラグ微粉末による反応抑制効果と同程度以上であることを示すものと思われる。

なお、スラグ微粉末の比表面積が異れば、消費されるアルカリ量が異り、その結果、反応抑制効果も相違すると予想したが、このような傾向は明確には認められなかった。

一方、反応性スラグ細骨材に対しては、上述したようなスラグ微粉末の反応抑制効果が全く期待できないことを示す結果が得られた。即ち、図4に認められるように、アルカリ濃度が約1%の基準モルタルのセメントの一部をスラグ微粉末で置換した場合には、アルカリの希釈の影響のみが認められ、アルカリ濃度を著しく高めた範囲では、スラグ微粉末の使用によって膨張量は逆に増加する傾向にあった。このように、スラグ微粉末がこれと鉱物組成が同じである反応性スラグに対してアルカリシリカ反応を抑制する効果を全く有していなかった理由については現在のところ不明であって、今後検討する必要がある。

以上の結果より、スラグ微粉末は、対象となる反応性骨材の種類によっては、そのアルカリ

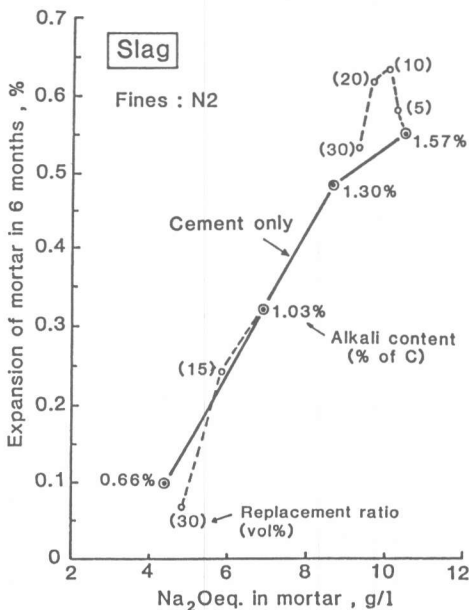


図4 反応性スラグを用いたモルタルの試験結果

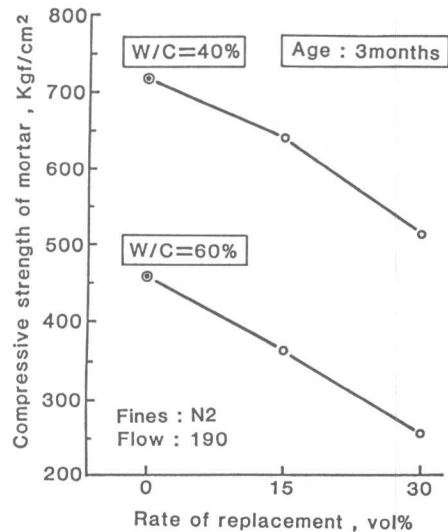


図5 スラグ微粉末の置換率とモルタルの圧縮強度の関係

シリカ反応を抑制する効果をもたらすことが明らかになった。しかし、スラグ微粉末は潜在水硬性を有していないので[1]、セメントの一部をスラグ微粉末で置換する場合にはコンクリートの強度が低下する問題点がある。例えば、図5は、川砂を用いたモルタルにセメントの内割でスラグ微粉末を用いた場合の圧縮強度の試験結果を示したものであるが、置換率を15%とした場合に約10~20%、置換率を30%とした場合には約30~40%も強度が低下するのである。従って、スラグ微粉末をセメントの一部と置換しアルカリシリカ反応抑制材として活用することは、実用的には得策ではない。そこで、次に、セメント量を一定に保ち、骨材中の岩石粉の許容量の範囲内でスラグ微粉末を用いることが可能であるか否かについて

表4 骨材の一部をスラグ微粉末で置換したコンクリートの試験結果

反応性骨材	アルカリ量 (%×C)	スラグ微粉末 <sup>*1</sup> の量 (%×C)	7ヶ月後の <sup>*2</sup> 膨張量 (%)	圧縮強度 <sup>*2</sup> $\sigma_{28}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
安山岩 (A <sub>n</sub> )	1.30	0	0.090 (100)	259 (100)
		10	0.084 (93)	260 (100)
		20	0.076 (84)	285 (110)
		20(BF)	0.142 (158)	378 (146)
	2.00	0	0.268 (100)	203 (100)
		10	0.313 (117)	219 (108)
		20	0.295 (110)	230 (113)
		20(BF)	0.275 (103)	282 (139)
チャート (C <sub>h</sub> )	1.30	0	0.022 (100)	208 (100)
		10	0.033 (150)	236 (113)
		20	0.018 (82)	248 (119)
		20(BF)	0.054 (254)	310 (149)
		20(FA)	0.008 (36)	285 (137)
		20	0.131 (100)	201 (100)
	2.00	10	0.144 (110)	199 (99)
		20	0.138 (105)	213 (106)
		20(BF)	0.115 (88)	271 (135)

<sup>\*1</sup> BFおよびFAは、それぞれ高炉スラグ粉末およびフライアッシュを微粉末として用いたことを示す。  
<sup>\*2</sup> ( )の値はスラグ微粉末0%に対する百分率を表わす。なお、 $\sigma_{28}$ は、材令28日まで20℃の水中養生したコンクリートの圧縮強度である。

いてコンクリートを対象として調べた。この場合のスラグ微粉末の使用量については、我が国の骨材に実際に含まれている岩石粉量[4]を考慮に入れた場合、通常はセメント重量の約20%までの使用が可能と考えられたので、試験では、コンクリート中のセメント重量の10あるいは20%に相当する量の細骨材とスラグ微粉末を置換した。

表4は、安山岩質あるいはチャート質の反応性骨材を粗骨材に用い、アルカリ濃度を1.3および2.0%としたコンクリートに対するスラグ微粉末の添加の影響を試験した結果を一覧表にして示したものである。この表より、スラグ微粉末を骨材の一部と置換して用いればコンクリートの強度低下の問題点は解消できることが認められる。しかし、スラグ微粉末による膨張抑制効果に関しては、アルカリ濃度を1.3%とした場合には、スラグ微粉末の使用によって膨張量が若干減少しているが、この場合の膨張量減少の程度は、前述したモルタル試験におけるスラグ微粉末の効果ほど顕著ではない。また、アルカリ濃度を2%と著しく高めた場合には、スラグ微粉末のアルカリ消費効果は全く認められず、むしろスラグ微粉末の使用によって膨張量が増大する傾向が認められるのである。これらの結果は、骨材の一部と置換してスラグ微粉末

を用いる方法では、スラグ微粉末のアルカリ消費効果が十分に発揮されないことを示すものと考えられる。従って、前述した結果も考慮すると、反応性骨材のアルカリシリカ反応を抑制する目的でスラグ微粉末をコンクリートに用いることは避けた方がよいと思われる。

なお、表4には、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュをセメントの外割で用いた場合（使用量はセメント量の20%）の結果も併記してあるが、高炉スラグ微粉末を用いた場合にも、コンクリートの膨張量は全く減少しておらず、むしろアルカリ濃度が小さい場合には膨張量が著しく増大している。この結果は、高炉スラグ微粉末の場合にも所要の反応抑制効果を得るためにはその多量使用が必要であり、その反応抑制機構には、セメントの置換に伴うアルカリ濃度の希釈の影響が多分に加味していることを示唆するものと思われる。一方、フライアッシュを用いた場合の膨張量はフライアッシュを用いない場合の約1/2以下に減少しているが、これは、フライアッシュの反応抑制機構が高炉スラグ微粉末の場合と異なることを示すものと考えられる。

#### 4. 結論

本研究の範囲内で以下のことが言えると思われる。

- (1) アルカリシリカ反応性を有するフェロニッケルスラグを微粉碎し、セメントの一部と置換して用いれば、対象となる反応性骨材の種類によっては、スラグ微粉末がアルカリ消費材としての役割を果たし、高炉スラグ粉末やフライアッシュに劣らない反応抑制効果をもたらす。しかし、このような使用方法では、スラグ微粉末が潜在水硬性を有さないため、コンクリートの強度が低下する問題点がある。
- (2) セメント量を一定に保ち、スラグ微粉末を骨材の一部と置換して用いれば、コンクリートの強度低下は避けられるが、この方法では十分な反応抑制効果は得られない。
- (3) コンクリート中における高炉スラグ微粉末とフライアッシュのアルカリシリカ反応抑制機構は互いに相違しており、特に高炉スラグ微粉末の場合には、少量添加すると、反応による膨張を逆に増大させる場合もある。
- (4) アルカリ骨材反応を抑制する混和材に対するASTM C 441の規格値は非常に厳しく現実的ではない。

謝辞： 本研究のバイレックスガラスを用いた試験は、日曹マスタービルダーズ(株)中央研究所で行って頂いた。ここに付記して厚く御礼申し上げます。

#### 【参考文献】

- [1] 秋山淳・山本泰彦：コンクリート用細骨材としてのフェロニッケルスラグの利用、土木学会論文集、第366号/V-4、pp.103~112、1986年2月。
- [2] 秋山淳・山本泰彦：フェロニッケルスラグのアルカリシリカ反応性、土木学会論文集、第378号/V-6、pp.157~163、1987年2月。
- [3] 例えば、蒔田實ほか：我が国の高炉スラグ微粉末のASR抑制効果に関する実態調査による研究、第40回セメント技術大会講演要旨、pp.188~189、1986年5月。
- [4] 遠藤武平：全国の骨材品質概況、セメント・コンクリート、No.415、pp.21~30、1981年9月。