

フェロニッケルスラグのアルカリシリカ反応性

ALKALI-SILICA REACTIVITY OF FERRO-NICKEL SLAGS

秋山 淳*・山本 泰彦**

By Atsushi AKIYAMA and Yasuhiko YAMAMOTO

Experiments were conducted to generally clarify the alkali-silica reactivity of ferro-nickel slags. The slag samples tested include one slag that was found to be most reactive in the previous study, three samples prepared by reheating the most reactive slag up to 700, 1 000 or 1 100°C, and one glassy slag. The slags which were composed of only forsterite and glassy phase and contained little CaO as their compositions were found to be reactive. In the case of these slags, amorphous silica in them was considered to be responsible for their reactivity. When about 15 % CaO existed in slag, the dissolution of silica in alkali solution was greatly suppressed, thereby making the slag innocuous. The reactive slag could be converted to innocuous one by reheating it to 1 100°C. Replacing a part of cement with such mineral fines as fly ash and blast furnace slag was quite effective in reducing the expansion of concrete due to alkali-silica reaction.

Keywords: alkali-silica reactions, ferro-nickel slags, mineral compositions, reduction of expansion

1. 序

著者らは、フェロニッケルスラグ（以下、単にスラグとよぶ）をコンクリート用細骨材として活用する場合の問題点や利用方法に関して検討を行ってきており、コンクリートの配合設計を適切に行えば、わが国で排出されているスラグの約半数はコンクリート用細骨材として十分に活用できることをすでに報告した¹⁾。また、残りの約半数のスラグの場合には、これらがコンクリート中においてアルカリシリカ反応やボップアウト現象などの問題を生じる可能性があることも示し、特に、アルカリシリカ反応を起こす可能性のあるものについては、これらが高温で急激に冷却された結果、ガラス質のシリカを多く含むスラグであることを明らかにしたのである。

本文は、スラグのアルカリシリカ反応性に関する上記の結果をさらに一般的に明らかにするために、反応性を有するスラグを3段階の温度まで再加熱してスラグ中のガラス質を結晶化させることを試みた試料、新たに入手したガラス質のみのスラグ等を対象として行った試験結果について論じたものである。また、反応性スラグの活

用法、スラグのアルカリシリカ反応性の判定における化学法の適用性、等についても若干の考察を加えた。

2. 使用材料および実験方法

試験には、前報¹⁾で反応性が最も強く示されたスラグ（S7）、これを電気炉内で再加熱したスラグ3種および新たに入手したガラス質のみからなるスラグ（S5'）を主として用いた。S5'は、前報中のS5と同一の溶融炉（溶鉱炉）から排出されたものである。スラグの再加熱にあたっては、スラグを常温から700, 1 000あるいは1 100°Cまで加熱して、それぞれの最高温度で2時間保持した後、炉内で自然冷却させた。再加熱処理を施したスラグは、加熱の最高温度の低い順に熱処理スラグA、BおよびCとよぶ。なお、一部の試験には、別のスラグも用いたが、これらの品質、呼称等は前報と同じである。また、スラグとの混合使用あるいは比較用の細骨材として、鬼怒川産の川砂（比重=2.59、吸水率=2.27%）、笠間産の碎砂（硬質砂岩、比重=2.61、吸水率=1.25%、F.M.=2.98）、高炉スラグ細骨材（比重=2.60、吸水率=1.73%）なども使用した。

セメントには、アルカリ量が異なる3種類の普通ポルトランドセメントを用いた。これらのセメントのアルカリ量は、等価Na₂O量で0.57, 0.66および1.03%で

* 学生会員 工修 筑波大学大学院 工学研究科
(〒305 茨城県新治郡桜村天王台1-1-1)

** 正会員 工博 筑波大学助教授 構造工学系(同上)

Table 1 Properties of cements.

Cement	Chemical composition, %									Specific gravity	Specific surface (cm²/g)	Compressive strength(MPa)		
	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	SO₃	Na₂O	K₂O	Na₂O eq.			3d	7d	28d
1	22.1	5.5	3.0	64.9	1.4	1.8	0.28	0.44	0.57	3.16	3240	13.8	22.5	40.3
2	22.2	5.4	3.1	65.1	1.2	1.9	0.33	0.50	0.66	3.16	3210	13.9	22.7	40.3
3	22.3	5.1	3.0	63.2	1.7	1.9	0.54	0.74	1.03	3.15	3430	13.2	22.5	37.0

Table 2 Properties of mineral admixtures.

Type	Name	Specific gravity	Specific surface(cm²/g)	ig. loss (%)
Blast * furnace slag	B1	2.90	4410	0.2
	B2	2.89	4500	0.1
Fly ash	F1	2.15	3650	0.5
	F2	2.21	5130	3.5

* Ground powder of water granulated iron-blast-furnace slag. B1 and B2 contain 0 and 2% $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, respectively.

あった。セメントの試験成績は Table 1 に示した。また、一部の試験では、高炉スラグ粉末 2 種 (B1, B2) やおよびフライアッシュ 2 種 (F1, F2) をセメントの一部と置換して用いた。これらの混和材の諸性質は、Table 2 に示した。

スラグのアルカリシリカ反応性は、ASTM C 227 (モルタルバー法) あるいは C 289 (化学法) に従って試験した。ただし、モルタルバー法による試験では、アルカリ濃度をセメントの等価 Na_2O 量で 0.66, 1.03 もしくは 1.66 % とした。アルカリ濃度を 1.66 % とした試験では、アルカリ量が 0.66 % のセメントを用い、 NaOH を添加してアルカリ濃度を調整した。また、化学法の溶解シリカ量の測定には、可視紫外分光光度計を用いた。

混和材の使用によるアルカリシリカ反応抑制効果を調べる試験では、コンクリート供試体 ($10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$) による長さ変化の測定も行った。この試験では、アルカリ量が 0.57 % のセメントを用い、コンクリートのアルカリ濃度がセメントの等価 Na_2O 量で 1.3 % となるように NaOH を添加した。コンクリートの練りませ、供試体の作成および長さ変化の測定は 20°C の室内で行った。供試体は、材令 3 日で脱型し、基長の測定を行った後、アルカリシリカ反応を促進するために 50°C , 85 % R.H. の恒温恒湿室内に保存した。この試験の供試体の保存にあたっては、供試体を湿布で覆い、底部に水を張った蓋付のプラスチック容器内に入れておいたので、供試体は常に湿っている状態であった。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

(1) 反応性スラグの鉱物組成の特徴

Fig. 1 は、700, 1 000 あるいは 1100°C で熱処理したスラグを用い、アルカリ濃度を 0.66, 1.03 および 1.66 % に変化させたモルタルの膨張量をモルタルバー法によって試験した結果を示したものである。また、比較のために、熱処理スラグと同時に試験した未処理スラグ S7 を用いたモルタルの試験結果も併記してある。この図によれば、 1100°C で熱処理したスラグを用いたモルタルの膨張量は、いずれのアルカリ濃度の場合でも、ASTM の限界値 (6か月間で 0.1 % の膨張量) の半分以下となっていることが認められるのであって、この結果は、 1100°C で熱処理した場合にはスラグのアルカリシリカ反応性が著しく改善されたことを示すものと考えられる。

一方、700 あるいは 1000°C で熱処理した場合には、スラグのアルカリシリカ反応性は全く改善されなかつた。すなわち、これらの温度で熱処理したスラグを用いたモルタルの膨張量は、熱処理しないスラグを用いた場合とほぼ同じであって、アルカリ濃度が比較的低い (0.66 %) 場合でも、ASTM の限界値と同じ程度であった。また、アルカリ濃度が高い (1.03 あるいは 1.66 %) 場合の 6 か月後における膨張量は、ASTM の限界値の 3.5~7 倍にも達したのである (Fig. 1 参照)。

魚本らも、本研究で用いた熱処理スラグと同じものを対象とし、これらを用いて造ったモルタル供試体をオートクレーブ養生および高温養生してスラグのアルカリシリカ反応性を調べており、上記と同じ傾向を示す結果を得ている²。しかし、 1100°C で熱処理したスラグだけがアルカリシリカ反応性を有さない理由については、明確にされていない。そこで、熱処理の温度の相違によつて Fig. 1 に示したような差が生じた理由をスラグの鉱物組成の面から検討した。

Fig. 2 は、熱処理スラグおよび未処理スラグ S7 を粉末にし、これらを X 線回折で分析した結果を示したものであり、比較のために、上記のスラグと化学組成がほぼ同じで、かつ、反応性を有さないスラグ S2 (風碎) の X 線回折パターンも併記してある。この図を参照すると、未処理スラグの場合にはフォルステライトのピークのみしか認められないのに対し、熱処理スラグの場合にはいずれも、S2 の場合と同様に、フォルステライトのピークのほかにエンスタタイトのピークも存在していること

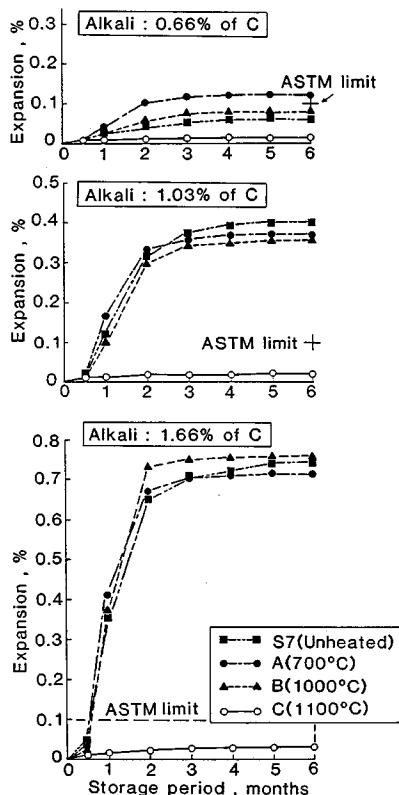
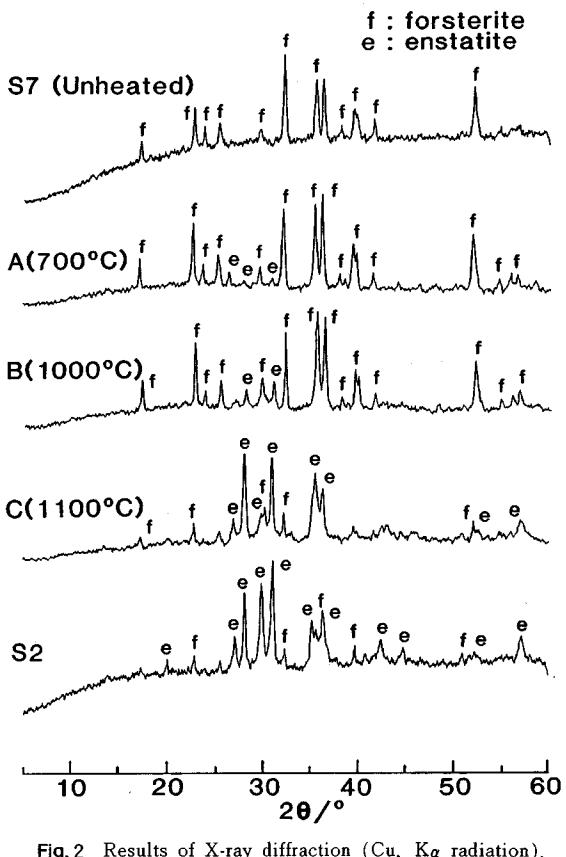
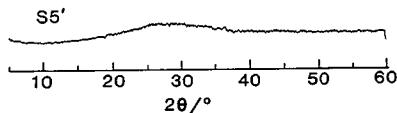


Fig. 1 Results of mortar-bar test.

が認められる。前報では、フォルステライトとエンスタタイトが共存するスラグの場合には、アルカリシリカ反応性を有さないことを示したが、1000°C以下の温度で熱処理したスラグの場合には、これらのピークが共存しているにもかかわらず、前述したようなモルタルの異常膨張を生じさせたことは、一見前報の結論と矛盾するようにも思われる。しかし、この見掛け上の矛盾については次のように考えることができる。

Fig. 2を参照すると、モルタルに異常膨張を生じさせたスラグ(1000°C以下で熱処理したもの)のエンスタタイトのピークは、フォルステライトのピークに比べて相当に小さいことが認められる。これに対し、1100°Cで熱処理した反応性を示さないスラグのX線回折パターンは、アルカリシリカ反応性を有さないS2の場合ときわめて類似しており、エンスタタイトのピークが著しく大きくなっているのである。これらのX線回折ピークの差異から判断すると、1100°Cで熱処理したスラグの場合には、未処理の反応性スラグ中に存在するガラス質のほぼ全量が熱処理によって結晶化するのに対し、1000°C以下で熱処理したスラグの場合にはガラス質の一部がエンスタタイトに変化したのみで、依然としてかなりの量のガラス質が残存していると考えられるのであつ

Fig. 2 Results of X-ray diffraction (Cu, K α radiation).Fig. 3 Result of X-ray diffraction (Cu, K α radiation).

て、このガラス質の存在が前述した反応性の原因となつたと思われる。

ガラス質を含むスラグの反応性をさらに確認するために、溶鉱炉から排出されたガラス質のみからなるスラグS5' (X線回折試験結果はFig. 3に示す)のアルカリシリカ反応性をモルタルバー法によって調べてみた。

Fig. 4は、アルカリ濃度を1.66%として試験したモルタルの膨張量の結果を示したものである。なお、比較のために、前報¹⁾で示した川砂を用いた場合の結果(アルカリ濃度は同じ)も併記してある。この図によれば、S5'を用いた場合の6か月後における膨張量は、ASTMの限界値の1/4程度であり、川砂の場合と比べてもきわめて小さいことが認められる。この結果は、ガラス質を含むスラグの反応性に関する前記の結果と逆である。このような結果が得られた理由については、S5'の化学組成が他と異なっていることが原因していると思

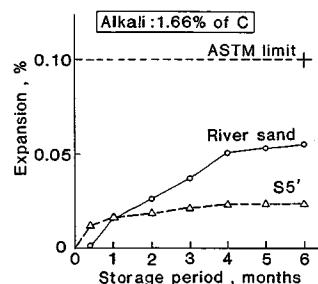


Fig. 4 Results of mortar-bar test.

われる。すなわち、Table 3 は、スラグが排出される溶融炉別にスラグの主要な化学成分の範囲を示したものであるが、溶鉱炉から排出される S5' は原料として石灰石が加えられる関係上、電気炉スラグより多量の CaO を含むところに特徴があるのであって、大部分がガラス質でありながら多量の CaO を含む高炉スラグ細骨材 (Table 3 参照) がアルカリシリカ反応を起こさないことを考慮すると、S5' 中の CaO がガラス質シリカの溶出を抑えている影響とも考えられるのである。そこで、この点を検討するとともに前記の結果を確認するために、本研究で対象としたすべてのスラグおよび高炉スラグ細骨材 (BF) について、ASTM の化学法の試験を行い、溶解シリカ量を調べた。

Fig. 5 は、この結果を溶解シリカ量とアルカリ濃度の減少量との関係で示したものであり、参考のために ASTM C 289 に示されている反応性を判定するための境界線も併記してある。Fig. 5 によると、CaO を多く含むガラス質スラグ (S5') や高炉スラグ細骨材 (BF) は、ASTM の無害域に属し、これらの溶解シリカ量はきわめて小さいことが認められる。この結果は、予期したように、スラグ中に存在する CaO が、これらのスラグに含まれるガラス質シリカの溶出を抑え、骨材を安定したものにしていることを示すものと思われる。

一方、S7 やこれを 1000°C 以下の温度で熱処理した反応性スラグは、いずれも化学法でも有害域に属し、無害な熱処理スラグの場合と比較して溶解シリカ量は 3 倍以上にも達した。また、熱処理温度が高いほど溶解シリカ量が小さくなかった (Fig. 5 参照)。これらの結果は、CaO をほとんど含まないスラグを 1000°C 以下で熱処理した場合に、スラグ中に依然として相当量のガラス質が存在し、これらがアルカリシリカ反応の原因となっていいるとした前述の考え方を裏付けるものと思われる。

(2) 反応性スラグの活用法

前節では、アルカリシリカ反応性を有するスラグは、これらを再加熱してスラグ中のガラス質を結晶化させれば、反応性のないものにできること、スラグの CaO 含有量を多くすれば安定したスラグが得られること、等が

Table 3 Chemical compositions of slags.

Type	Furnace	Chemical composition, %						Slags
		SiO ₂	MgO	CaO	FeO	Al ₂ O ₃	Others	
Ferro-nickel slag	Electric furnace	52.5 5 56.0	33.7 5 37.0	0.2 5 1.5	5.4 5 9.0	1.2 5 2.9	0.5 5 1.3	S2, S2' S3, S6, S7
	Rotary kiln	54.1	28.4	5.5	7.7	2.4	1.9	S4
	Blast furnace	50.6	26.0	14.3	4.4	3.7	1.0	S5', S5
Iron slag*	Blast furnace	34.2	6.8	41.3	0.7	13.7	3.3	BF

* Water granulated iron-blast-furnace slag.

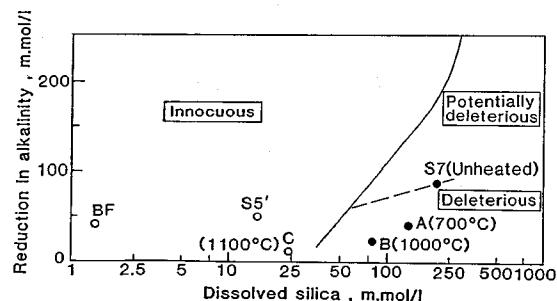


Fig. 5 Dissolved silica vs. reduction in alkalinity.

示された。しかし、スラグを再加熱し無害化する方法は、新たに莫大なエネルギーを必要とし、多量のスラグを対象とした場合には実用的でない。また、スラグの CaO 含有量を多くする方法には、原料中に石灰石などを加える必要があり、原料中のわずか 2~3% 程度の成分を取り出しているフェロニッケルの製造効率をさらに低下させる問題点がある。一方、結晶質の安定したスラグを得る方策としては、スラグの冷却時の温度を下げる方法も考えられるが、CaO 含有量が少ない電気炉スラグの場合には低温域における粘性の増加が著しく、これを急冷すると爆裂の危険があるのである。以上のように反応性のない安定したスラグを得るために方策は種々考えられるが、現段階でこれらを採用することはきわめて困難であると思われる。そこで、反応性スラグであっても、これらをコンクリート用細骨材として有効に活用していくための方法について若干の検討を加えた。

反応性スラグの利用方法の 1 つとしては、これを他の安定な骨材と混合使用し、全体としての膨張量を小さくして用いることが考えられる。しかし、アルカリシリカ反応性を有する骨材の中には、ある混合率で膨張量が極大値を示す性質を有するものが多いことが指摘されており³⁾、この種の骨材の場合には、混合率によっては膨張がかえって増大してしまうのである。そこで、反応性スラグ S6 および S7 を対象とし、これらを川砂と混合使用した場合に膨張量が極大値となる混合率(ペシマム量)が存在するか否かについて調べてみた。

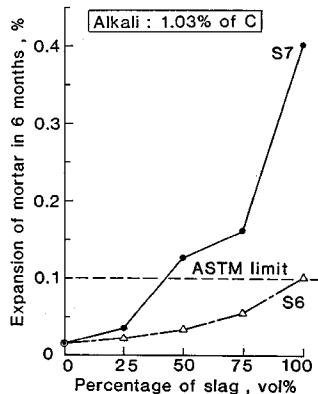


Fig. 6 Volume percentage of slag vs. expansion of mortar in 6 months.

Fig. 6 は、アルカリ濃度を 1.03 % とした場合のスラグの混合率と 6 か月後のモルタルの膨張量との関係を示したものである。この図によれば、モルタルの膨張量はスラグの混合率が大きくなるに伴って増大しており、アルカリ濃度が 1 % 程度では、ペシマム量が存在しないことが認められる。これと同じ結果は、1 種の反応性スラグを用いて試験した柳場らの研究（アルカリ濃度は不明）⁴⁾ にも示されている。

一般に、コンクリートあるいはモルタルの膨張は Ca の量に比べて Na や K などのアルカリ金属を多く含むシリカゲルによってもたらされ、Ca の多いシリカゲルほど安定なゲルと考えられている⁵⁾。そして、ペシマム量が現われるのは、安定な骨材との混合使用によって反応性骨材の単位量当たりのアルカリ量が増加し、この結果として膨張性の高いゲルが生成される確率が高まる影響と反応性骨材の絶対量（膨張性ゲルの絶対量）とのかね合いによるとされている。本研究で対象としているスラグの場合にも、Fig. 7 に示したように、アルカリ濃度の増加に伴ってモルタルの膨張量を著しく増大させており、アルカリ濃度が高い条件下では膨張性の高いゲルが生成されていると考えることができる。このような反応性スラグの性質にもかかわらず、Fig. 6 の試験値が下に凸な傾向を示し、しかもスラグを単独で用いた場合に急激に膨張量が大きくなっていることを考慮すると、少なくとも実際のセメントに含まれているアルカリ量の範囲では、S6 または S7 を他の安定な骨材と混合使用した場合にペシマム量が存在する可能性はほとんどないと考えられる。

なお、Fig. 6 のモルタルの膨張量についてみると、S7 を用いたモルタルの膨張量は、スラグの混合率が大きい範囲では著しく増大しているが、スラグの混合率が約 40 % 以下では ASTM の許容限度以下となっている。

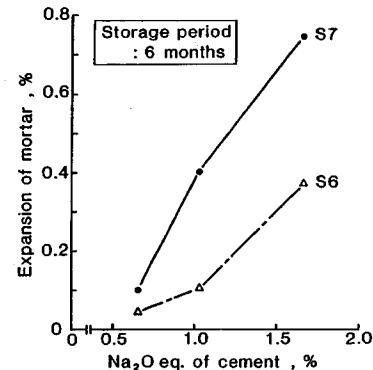


Fig. 7 Relation between alkali content and expansion of mortar made with reactive slags.

一方、S6 の場合には、スラグの混合率が 100 % で ASTM の限界値とほぼ同等の膨張量であり、100 % 未満の混合率では ASTM の許容限度内にある。

上記のように、ペシマム量が存在せず、しかも、スラグの混合率が比較的大きい範囲でも ASTM の許容限度以下となる性質は、この研究で対象としている種類のスラグの大きな特徴と考えられるのであって、この特性を利用すれば、反応性スラグをコンクリート用細骨材として活用することが可能と思われる。この場合のスラグの混合率としては、実際に用いる材料、環境条件、その他を考慮して定める必要があるが、Fig. 6 の試験に用いたセメントのアルカリ量が 1.03 % であったことを考慮すれば、通常の場合には 30 % 以下程度の混合率で用いるのが安全と思われる。

通常の骨材のアルカリシリカ反応は、高炉スラグ粉末やフライアッシュなどの使用によっても抑制できるといわれている³⁾。そこで、次に、これらの混和材の使用が本研究で対象としている種類のスラグのアルカリシリカ反応に対しても抑制効果があるのか否かについて調べた。試験は、コンクリート供試体で行い、反応性細骨材としては反応性が最も強いスラグ S7 を用いた。また、粗骨材としては石灰岩砕石（最大寸法 = 20 mm、比重 = 2.72、吸水率 = 0.74 %、F.M. = 6.77）を用いた。基準とするコンクリートの配合は、単位セメント量 320 kg/m³、水セメント比 56 % および細骨材率 46 % とし、高炉スラグ粉末およびフライアッシュを用いる場合には、これらの混和材をセメントの体積の 30 あるいは 50 % と置換して用いた。コンクリートのアルカリ濃度はセメント量に対する等価 Na₂O 量で 1.3 % とした。

Fig. 8 は、50°C、約 100 % R.H. の条件下に保存した場合のコンクリート供試体の長さ変化を 9 か月間測定した結果を示したものであり、比較のために、S7 の代わりに非反応性の砕砂（硬質砂岩）を用い、かつ、混和材

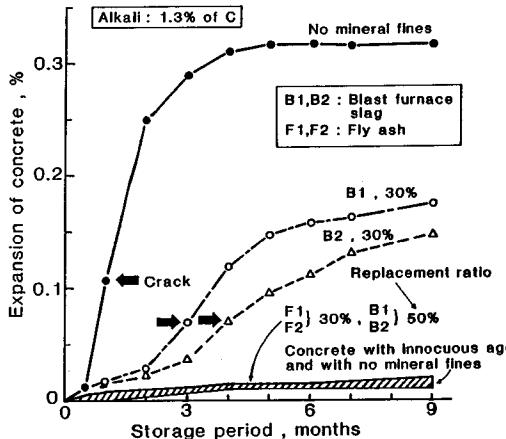


Fig. 8 Expansion of concrete made with reactive slag (S7).

用いないコンクリート供試体（配合は基準コンクリートと同じ）の長さ変化の結果も併記してある。Fig. 8 を参照すると、反応性スラグ S7 を用いたコンクリートの膨張量は、セメントの一部を高炉スラグ粉末あるいはフライアッシュで置換することによって著しく減少していることが認められる。特に、高炉スラグ粉末の置換率を 50 % とした場合およびフライアッシュの置換率を 30 % とした場合の膨張量は、保存期間 9か月においても非反応性の細骨材を用いた場合と同程度まで減少し、これらの供試体の表面にはひびわれも全く観察されなかった。これらの結果は、高炉スラグ粉末あるいはフライアッシュの使用が反応性スラグを用いたコンクリートの膨張抑制にも有効であることを示すものと考えられる。また、Fig. 8 がわが国のセメントに含まれているアルカリ量の最大値（約 1.1 %）⁶⁾と比べて若干多いアルカリ濃度（1.3 %）での試験結果であることを考慮すると、少なくともセメントの 30 % または 50 % をそれぞれフライアッシュまたは高炉スラグ粉末で置換する処置を講じれば、反応性を有するスラグであってもコンクリート用細骨材として十分に活用できると思われる。

なお、F2 は、強熱減量が多く、不定形粒子を多く含む品質の悪いフライアッシュであるが、このようなフライアッシュでも良質な F1 と同様なアルカリシリカ反応抑制効果を有していたことは、注目に値すると思われる。

(3) スラグのアルカリシリカ反応性の判定における化学法の適用性

ASTM C 289 の 17. よりれば、化学法は、蛇紋石 [$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$] のようなマグネシウムの珪酸塩を含む骨材の場合には、その反応性に関する正しい評価を与えない場合もあるとされている。しかし、マグネシウムの珪酸塩の一種であるフォルステライト (Mg_2SiO_4) とガラス質からなるスラグ S7 およびこれを熱処理したス

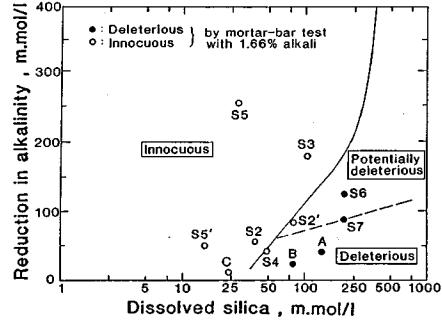


Fig. 9 Results of chemical test (ASTM C 289).

ラグの場合には、モルタルバー法によって試験したスラグの反応性と ASTM の化学法による判定結果がよく一致することが 3.(1) で示された。また、前報¹⁾においても、フォルステライトやエンスタタイト ($MgSiO_3$) を成分とするスラグの化学法に準じた試験（温度を 38 °C にした長期の試験）結果とモルタルバー法による試験結果はきわめてよく一致したのである。したがって、マグネシウムの珪酸塩であっても、フォルステライトとエンスタタイトを生成するような化学組成のスラグの場合には、化学法によるアルカリシリカ反応性の評価が可能であると思われる。この点を確認するために、3.(1) で用いたスラグおよび前報で用いた全スラグを対象とし、これらについて化学法の試験を行い、この結果とアルカリ濃度を 1.66 % として試験したモルタルバー法による判定結果との関係を調べた。

Fig. 9 は、スラグの化学法の結果を示したものであり、モルタルバー法で有害（6か月後のモルタルの膨張量が 0.1 % を超えたもの）と判定されたスラグの試験結果を黒丸印で示し、無害（6か月後の膨張量が 0.1 % より小さい）なものと判定されたスラグの試験結果を白丸印で示してある。この図を参考すると、潜在的有害域と無害域あるいは有害域と無害域の境界に属する S2' および S4 の場合には、モルタルバー法と化学法の結果が逆になっているが、全般的に両方法の判定結果がよく一致していることが認められる。また、S2' および S4 の場合には、これらの試験結果が上記のように境界域に属していることを考慮すると、化学法に付随する実験の精度、ASTM の境界線の引き方、等が原因して矛盾する結果が得られたものと思われる。さらに、有害域あるいは潜在的有害域に属す S6, S7 および熱処理スラグ A, B は、3.(1) および 3.(2) で示したように、アルカリ濃度を低く（1.03 %）して行ったモルタルの試験でも、ASTM の許容限界を超える有害な膨張を生じさせたのである（Fig. 1 および Fig. 6 参照）。したがって、これらの結果を総合して判断すると、マグネシウムの珪酸塩

を含む骨材であっても、本研究で対象としている種類のスラグの場合には、一般的骨材の場合と同様に ASTM の化学法によってそのアルカリシリカ反応性を判定できると考えられる。

4. 結論

フェロニッケルスラグのアルカリシリカ反応性を一般的に明らかにするために、反応性が最も強いスラグ、これを再加熱してスラグ中のガラス質を結晶化することを試みた試料、ガラス質のみからなるスラグ等を対象として試験を行った。実験の範囲内で次のことがいえると思われる。

(1) アルカリシリカ反応性を有するスラグは、化学成分として CaO をほとんど含まず、かつ、フォルステライトとガラス質のみからなるものである。この種のスラグの場合には、ガラス質のシリカの存在がアルカリシリカ反応の原因となっていると考えられ、アルカリ溶液中に溶出するシリカの量が相当多い。

(2) CaO を 15 % 程度含むスラグの場合には、たとえガラス質のみを鉱物組成とするものであっても、アルカリシリカ反応性を有さない。この種のスラグの場合には、アルカリ溶液中に溶出するシリカ量は微量であって、スラグ中の CaO がガラス質のシリカの溶出を抑える働きをしていると考えられる。

(3) アルカリシリカ反応性を有するスラグは、約 1100°C で適当な時間再加熱すれば、反応性のないものにすることが可能である。これは、スラグ中のガラス質のほぼ全量がこの温度での再加熱により結晶化するためである。しかし、1000°C 以下の温度では、再加熱によるガラス質の結晶化はきわめて困難で、反応性の改善も難しい。

(4) 市販のセメントに含まれるアルカリ量の範囲では、反応性スラグと非反応性の細骨材を混合使用した場合のモルタルの膨張量は、スラグの混合率が大きくなるに伴って増大し、膨張量が極大値となる混合率は存在しない。また、最も反応性が強いスラグの場合であっても、その混合率が 30 % 以下の範囲における膨張量は、ASTM の限界値の約 1/2 以下となる。これらの特性を利用すれば、反応性スラグであっても、非反応性の細骨材と適切な割合で混合して用いることにより、コンクリート用細骨材として活用することが可能と考えられ

る。

(5) スラグのアルカリシリカ反応は、天然の反応性骨材の場合と同様に、高炉スラグ粉末あるいはフライアッシュでセメントの一部を置換すれば、これを抑制することができる。本研究の結果では、スラグのアルカリシリカ反応による膨張をほぼ完全に抑えるための置換率は、品質にあまり関係なく、高炉スラグ粉末の場合で 50 %、フライアッシュの場合で 30 % であった。

(6) ASTM の化学法は、マグネシウムの珪酸塩を含む骨材の場合には、そのアルカリシリカ反応性を正しく評価できない場合もあるとされている。しかし、マグネシウムの珪酸塩の一種であるフォルステライト (Mg_2SiO_4)、エンスタタイト ($MgSiO_3$) およびこれらを生成する化学組成のガラス質などからなるスラグの場合には、一般的骨材の場合と同様に化学法によってその反応性が判定できる。

謝 辞：本研究は、土木学会スラグ小委員会の分担研究に、さらに自主的に継続して行った研究の結果を加えてとりまとめたものである。小林正几委員長をはじめ関係各位に厚く御礼申し上げます。また、実験にご協力頂いた筑波大学 飯高 稔技官に感謝致します。

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) 魚本健人・出頭圭三：フェロニッケルスラグ細骨材製造時温度と骨材の反応性、第 40 回セメント技術大会講演要旨、pp. 88~89, 1986 年 5 月。
- 3) 川村満紀・柳場重正：アルカリ・シリカ反応とその防止対策、土木学会論文集、第 348 号／V-1, pp. 13~26, 1984 年 8 月。
- 4) 柳場重正ほか：コンクリート用骨材としての高炭素フェロクロムおよび高炭素フェロニッケルスラグの利用に関する研究、セメント・コンクリート、No. 348, pp. 30~38, 1976 年 2 月。
- 5) 内川 浩：アルカリ骨材反応、コンクリート技術者のためのセメント化学雑論、セメント協会、pp. 109~123, 1985 年 5 月。
- 6) セメント協会：アルカリ骨材反応についての見解、1983 年 10 月。

(1986.5.21・受付)