

[40] 高炉スラグ骨材コンクリートのアルカリ反応に対する安定性

正会員 ○山本 親志(住友金属工業)

千賀 平造(神戸製鋼所)

正会員 森山 容州(新日本製鉄)

正会員 沼田 晋一(新日本製鉄)

1. まえがき

高炉スラグはコンクリート用骨材や高炉セメントなどの結合材として古くから使用されているが、高炉スラグ骨材のアルカリ骨材反応(AAR)について検討した報告は少ない。AAR抑制方法として、フライアッシュなどのボゾランや高炉スラグ微粉末が使用されているが、その抑制メカニズムは十分には明らかでなくまたボゾラン類と高炉スラグの抑制メカニズムの違いについても明らかでない。これら混和材の使用は結合材中のアルカリ量の希釈効果として説明されることもあるが、高炉スラグの場合相当量にアルカリを含むものがあるのでこれだけでは説明できない。¹⁾ 前者のボゾラン類としては、けい藻土やオパール質けつ岩のようにオパールに富むものおよび火山灰、凝灰岩、フライアッシュ、シリカフェームなどのガラスがあるが、これらは骨材とした場合は反応性物質となるものが多い。これらボゾランは微粉末に砕いて用いると、これらの反応性が強いためにアルカリシリカ生成物中のアルカリとシリカの比が小さくなり非膨張性の生成物を得て、抑制効果を発揮するという説明が有力視されている。²⁾ 一方急冷スラグも化学的活性の高い材料であるが、それ自体が上述のボゾラン類のように有害な反応性を示すものであろうか。もしそうであれば急冷した高炉スラグを骨材に用いることは危険となるおそれがある。本報告は、結晶質であるが冷却速度が異なるとみられる徐冷の高炉スラグ、ガラス質の急冷した高炉スラグを骨材とした場合および急冷高炉スラグを微粉砕して混和材とした場合についてアルカリ作用に対する安定性の検討を行い、高炉スラグが粗骨材、細骨材、混和材又は結合材いずれの形態で使用してもアルカリに対して安定であることについて検討した。

2. 実験の概要

高炉スラグの鉱物学的調査、化学法によるAAR安定性、モルタルバー法によるAAR安定性並びに高炉スラグ微粉末のAAR抑制効果を調べた。

2.1 使用材料

- (1) 骨材：徐冷スラグはドライビット冷却のもの2種、ヤード冷却のもの1種、鍋車の鉄皮面に附着してやや急冷されているとみられる鍋付きスラグ1種を用い、急冷スラグは水砕化したもの1種とした。比較材としてAARを起した実例のある2種の安山岩砕石及びバイレックスガラス(Na7740)を用いた。
- (2) 混和材：上述の急冷スラグをプレーン比表面積3650 cm²/gに粉砕した高炉スラグ微粉末を用いた。
- (3) セメント：普通ポルトランドセメントを2種類使用した。骨材のモルタルバー試験にはeqNa₂O 0.79%のものを、高炉スラグ微粉末のAAR抑制効果の試験にはeqNa₂O 1.02%のものをを用いた。

2.2 実験方法

- (1) 骨材の化学分析：骨材の化学分析はJISR5202ポルトランドセメントの化学分析方法に準じて行い、水溶性アルカリはASTMC114によった。
- (2) 骨材の鉱物学的調査：顕微鏡観察及び粉末X線回折による検討を行った。
- (3) 骨材の潜在反応性試験方法(化学法)：ASTMC289に準じた。
- (4) モルタルバー試験：ASTMC227に準じた。セメントのeqNa₂Oを1.6%に調整するため、NaOH及びNaClの2種を用いた。

(5) 高炉スラグ微粉末の A A R に対する安定性：高アルカリポルトランドセメント (eqNa₂O=1.02%) を高炉スラグ微粉末で 25, 40, 50, 65% と置換し、バイレックスガラス骨材を用いたモルタルを、ASTMC 441 の規格試験方法に準じてモルタルバーの膨張試験を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 高炉スラグ、天然砕石及びバイレックスガラスの化学分析結果を表-1 に示す。

表-1 高炉スラグ、天然砕石及びバイレックスガラスの化学成分

試験方法: JIS-R-5202(単位 %)

種別及び記号	ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	FeO	T-S	Na ₂ O	K ₂ O	R ₂ O	水溶性アルカリ		
														Na ₂ O	K ₂ O	R ₂ O
徐冷スラグS-1(ドライビット)	-0.5	34.2	14.2	—	40.1	5.2	1.2	0.4	0.3	0.8	0.23	0.33	0.45	0.007	0.040	0.034
徐冷スラグS-2(ヤード)	-0.9	33.0	13.9	—	40.6	7.3	1.4	0.6	0.2	1.0	0.25	0.37	0.49	0.009	0.034	0.015
徐冷スラグS-3(ドライビット)	-0.8	33.5	13.0	—	43.0	6.5	0.6	0.6	0.6	0.9	0.44	0.24	0.60	0.008	0.049	0.040
徐冷スラグS-4(鋼付)	0.1	34.8	15.0	—	40.6	6.4	0.7	0.4	0.9	0.7	0.20	0.35	0.43	—	—	0.010
急冷スラグS ₀ (水砕)	-0.1	33.6	14.0	—	41.3	5.3	2.5	0.6	0.4	0.8	0.32	0.45	0.62	0.002	0.003	0.004
安山岩 D-1	0.5	58.9	19.2	6.0	8.4	1.1	—	—	—	—	3.35	1.90	4.60	—	—	—
安山岩 D-2	1.2	66.2	16.3	2.9	5.7	1.1	—	—	—	—	3.69	2.80	5.53	—	—	—
バイレックスガラスp※	—	80.9	22.3	—	—	—	B ₂ O ₃ として12.7	0.03	—	—	4.00	0.04	4.02	0.001	0.001	0.001

※試験方法は JIS-R-3105 による。

高炉スラグの化学成分は現在我が国で生産されているものの代表的な範囲にある。高炉スラグ中の全アルカリ (eq.Na₂O) は 0.43~0.62% であるが、水溶性アルカリは 0.004~0.040% と小さい値を示した。全アルカリに対する水溶性アルカリの割合は、急冷スラグの場合 0.6% 程度、徐冷スラグの場合 2~8% であり、後者の方が前者よりも 4~12 倍の溶出比を示した。ASTMC 114 の水溶性アルカリ試験が 10 分間常温抽出法であることからすると、高炉スラグのアルカリ溶出速度はポルトランドセメントクリンカーに比べてかなり遅いことを示している。またバイレックスガラスも同様である。用いた安山岩は SiO₂ が 60% 程度であり火成岩の岩石分類上は中性岩に属するものであり、高炉スラグをこの分類法で分類すると超塩基性岩となる。

3.2 高炉スラグ及び安山岩の顕微鏡写真を写真1~3 に、X線回折の結果を表-2 に示す。

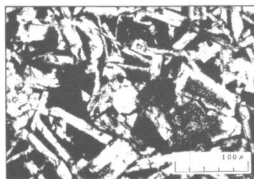


写真1 徐冷スラグ(S-1)



写真2 急冷スラグ(S₀)

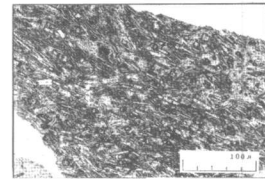


写真3 安山岩(D-1)

表-2 X線による鉱物組成

記号	長石	石英	クリストパライト	輝石	モンモリロナイト	メリライト	ソーダウラストナイト	備	考
S-1						++++	++	++++:多量	
S-2						++++	+	+++ :中量	
S-3						++++	+	++ :少量	
S-4						++++	+	+ :微量	
S ₀	主要なX線回折ピークなし								
D-1	++++	+++	+++	+	+				
D-2	++++	++	+++	+					

却方法の異なる徐冷スラグを選んだがいずれも十分徐冷されており鉱物学的に差はないと考える。急冷スラグは顕微鏡下で気泡が多数認められたが、殆どガラス質であり、X線回折でもガラス質であることが確認された。

安山岩には、D-1、D-2ともクリストパライトを多量に含有しており、かなり不均一で火山ガラスも含んでいる。特に目立つ斑晶鉱物は存在しないが微斑晶鉱物として長柱状の輝石が比較的多量に存在している(D-1は安山岩、D-2は古銅輝石安山岩)。

3.3 骨材の潜在反応性試験（化学法）の結果

表-3 及び図-1 のとおり、高炉スラグは徐冷、急冷とも溶解シリカ量 (Sc) は極めて小さく、アルカリ濃度減少量 (Rc) も小さく全て無害域に属した。なお、S₀ は試験後の溶液量が減少し、水砕スラグとの反応により水和物固相に溶液がとり込まれた。高炉スラグは NaOH 溶液に放出するシリカの量が見掛け上も実質上も極めて少なく、またアルカリ濃度減少量もあまり大きくないことが分かり、

表-3 化学法試験結果

記号	Sc	Rc
S-1	3.3	67
S-2	4.2	67
S-3	2.3	57
S-4	6.3	39
S ₀	4.6	12
D-1	427	103
D-2	614	212
P	778	44

Sc: 溶解シリカ量 ミリモル/ℓ
Rc: アルカリ濃度の減少量 ミリモル/ℓ

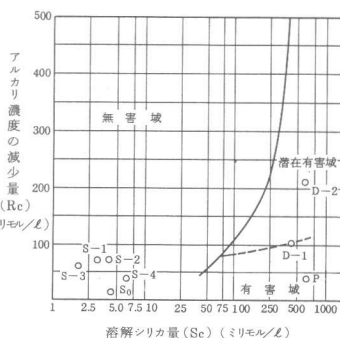


図-1 化学法による骨材の有害判定区分

Mather³⁾らの結果とも一致している。徐冷スラグと急冷スラグを比較すると、溶解シリカ量 (Sc) は殆ど差がないが、アルカリ濃度減少量 (Rc) は急冷スラグが小さい値を示した。また Mather³⁾らのデータによれば4種のフライアッシュは Sc=3.3~5.1, Rc=246~456 ミリモル/ℓ となり、C289の無害域に属し、Scも Rcも高炉スラグに比べ絶対値もバラツキも大きいと報告している。このようなフライアッシュに関するデータと今回の試験結果に示された液量の著しい減少から考えてフライアッシュのOHイオンの消費は高炉スラグよりも大きいと考えられる。よってフライアッシュと急冷スラグはアルカリに対してこの点異なる挙動を示すとみられる。安山岩D-1及びバイレックスガラスPは有害域にD-2は潜在有害域に属した。

モルタルの配合条件を表-4に、モルタルバーの膨張率測定結果を図-2及び図-3に示す。

表-4 モルタルの配合条件

種別	W/C (ℓ)	ASTM フロー率 (ℓ)
S-1	NaCl 51.0	115
	NaOH 51.0	113
S-2	NaCl 52.7	117
	NaOH 52.7	118
S-3	NaCl 53.3	111
	NaOH 52.7	116
S-4	NaCl 51.7	109
	NaOH 52.3	115
S ₀	NaCl 62.7	113
	NaOH 62.7	111
D-1	NaCl 57.0	117
	NaOH 57.0	114
D-2	NaCl 62.0	111
	NaOH 62.0	113

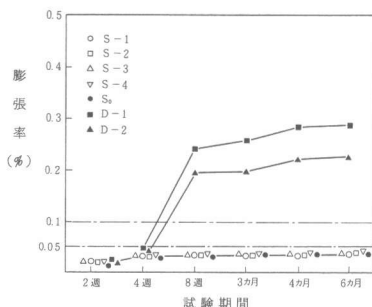


図-2 NaCl (eq. Na₂O 1.6%) 調整による膨張率

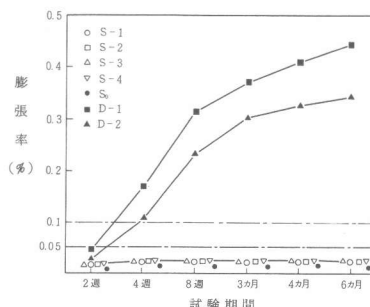


図-3 NaOH (eq. Na₂O 1.6%) 調整による膨張率

高炉スラグ粗骨材及び細骨材を用いたモルタルバーの膨張率は極めて小さく、6か月における膨張率はASTMの規格値 (0.1%) 以下であり、細、粗骨材ともAARに対して安定である。また両者を比較すると粗骨材の方がわずかに大きな長さ変化を示した。今回使用した2種類の天然骨材はいずれも3~4週でASTMの規格値 (0.05%) を上回る有害な膨張を示し、D-1 (有害域) とD-2 (潜在有害域) ではD-1が大きな膨張を示した。アルカリの種類による影響は、NaOHの方がNaClより大きな膨張を示した。高炉スラグ骨材、とくに徐冷スラグは硫酸塩を含むので、Clイオンと複塩水和物を形成することも考えられる。天然砕石の場合NaOHでは14日以降に膨張率が增大しているが、NaClでは1か月以上経過してから膨張が増加しており、アルカリの種類によってモルタルバーの膨張開始までの時間が異なる。

高炉スラグ細骨材はガラス質であり、アルカリに対して敏感と考えられるがモルタルバー試験結果では、有害量の膨張を示さなかった。

3.5 高炉スラグ微粉末を用いたモルタルバーの体積安定性 (ASTMC441)

ポルトランドセメントのアルカリ量を eq. Na₂O=1.02%, バイレックスガラスを骨材としたモルタルの配合条件を表-5に、モルタルバーの膨張率測定結果を図-5に示す。

表-5 モルタルの配合

スラグ置換率(%)	水セメント比(%)	ASTMフロー率(%)
0	44.0	113.0
25	43.3	110.5
40	43.0	108.8
50	43.0	115.0
60	43.0	110.1

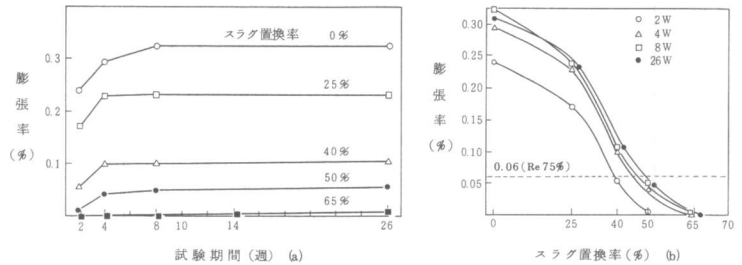


図-5 高炉スラグ微粉末を使用したモルタルバーの膨張率

高炉スラグ微粉末でポルトランドセメントの一部を置換するとモルタルの膨張率は、スラグ置換率が増加するに従って小さくなり、高炉スラグ微粉末のAAR抑制効果がみられる。スラグ中の有害アルカリ量を0と仮定するとポルトランドセメントの見掛けのアルカリ量は、スラグ置換率25%では0.77%、スラグ置換率40%では0.64%、また膨張率がほぼ0%となるスラグ置換率65%では0.36%となる(図-5(b))。スラグのAAR抑制が単なる希釈効果でないことは、筆者の1人が既に報告している。材令14日におけるスラグ置換率50%のモルタルバーの膨張率は0.009%でASTMC595の上限値0.02%を下回っていた。またASTMC441によるモルタル膨張量減少率Re75%は図-5(b)に示すとおり、スラグ置換率40%程度である。

4. あとがき

高炉スラグは徐冷、急冷いずれの形態であってもAARに対し安定的である。(1)化学法のSc, Rcは非常に小さく無害域に属するが、NaOH溶液によって急冷スラグは水和し、スラグの水和硬化体の内にとり込まれるが、少量存在する残液(ろ液)のSc, Rcも小さいことから、硬化体内の細孔液もこれと大差ないとみられる。(2)モルタルバー法における有害な膨張は認められない。(3)高炉スラグ微粉末はAAR抑制効果に有効で、ASTMC595の14日許容膨張量0.02%以下に対しては、スラグ置換率40~50%必要である。

以上のことから高炉スラグは天然の反応性骨材であるけつ岩や凝灰岩とアルカリ反応のメカニズムが異なるとみられる。またAAR抑制に必要なスラグ置換率については今後さらに多くのデータから判断することが望ましい。

本研究の推進にあたっては、鉄鋼スラグ協会 技術委員会の方々に御協力を賜った。また、実験の一部は住友セメント㈱の御協力をいただいた。ここに関係者に深厚の謝意を表するものである。

〔参考文献〕

- 1) F.J.Hogan: "The Effect of Blast Furnace Slag Cement on Alkali Aggregate Reactivity: A Literature Review, "Cement, Concrete and Aggregate vol 7 No. 2 Winter 1985 p100-107
- 2) T.C. Powers and H.L. Steinour: "An Interpretation of Published Researches on the Alkali-Aggregates Reaction", Proc. of ACI No. 51 1955 p497-516, p785-812
- 3) L. Pepper and B. Mather: "Effectiveness of Mineral Admixtures in Preventing Excessive Expansion of Concrete Due to Alkali Aggregate Reacton", Proc. of ASTM June, 1959 p1178-1203
- 4) 小林茂敏, 河野広隆, 沼田晋一, 近田孝夫: "高炉スラグ微粉末のAAR抑制効果のメカニズムに関する考察" 第40回セメント技術大会講演要旨 1986. 5