高炉スラグのコンクリート材料としての利用

総括執筆者（座長）
國分正胤
正会員 工博 武蔵工業大学教授 工学部土木工学科

話題提供者
小林一輔
正会員 工博 東京大学助教授 生産技術研究所第五部

山崎寛司
正会員 工博 日本セメント（株） 大阪工場長

吉田弥智
正会員 工博 名古屋工業大学助教授 工学部土木工学科

担当：中部支部

まえがき

高炉スラグは製鉄業の副産物であるので，その利用はこと新しいものではなく，例えば，これを用いた高炉セメントはすでに65年以前からわが国で製造されている．しかし“高炉スラグの利用”は，最近とみに大きな問題となりつつある．その理由は，鉄鋼業の急激な発展に伴いその発生量が膨大な量に達していること，環境保全の強い要望により従来のように埋立てに用いることが不可能となったこと，等によるものであって，高炉スラグの活用は，いまや鉄鋼界およびコンクリート界の重要な課題となっている．

高炉スラグをコンクリート材料として使用する場合，三種の方式が考えられる．その第一はセメント原料としての利用であって，建設用資源の節約愛護の見地から，これはすこぶる重要である．わが国セメント工業の規模は，NSP キルンの開発その他経済化の研究の進展ともあいまち近年急激に増大し，年生産能力は1億トンを突破し，生産実績もアメリカを凌駕し，ソビエトに次ぎ世界第2位となっている．これはまことに喜ばしいことではあるが，この勢いがさらに加速された場合，主原料である石灰石は国内で十分にまかなえるか？との疑問が湧く．一説によれば100年を待たずして払底するとのことである．セメントが建設材料の王座に君臨する理由の一つとして，原料から生産設備まですべて国産であるという利点があげられるのであるから，石灰石が枯渇に瀕することは，われわれにとって著しいショックである．それでいまのうちに高炉スラグを活用して石灰石の節減を図ることが重要な問題なのである．もちろん高炉セメントには，短期強度が劣ること，寒冷期の工事に用いる場合には入念な注意が必要となること等の問題点もあるので，ポルトランドセメントを一挙に高炉系に変更することは不可能である．しかしポルトランドセメントの使用を特別な構造物だけに限定し，一般の構造物には高炉セメントまたは高炉スラグ混入ポルトランドセメントを多用しようという構想なのである．これは突飛な構想ではなく，フランスその他数箇国では以前からこれに類した使用が広く実施されている．

第二の方式は，混和材としての利用である．これは，良質の高炉スラグをコンクリートの混和材として適当に活用すれば，経済的となるばかりでなく，コンクリートの長期強度や化学的抵抗性が改善され，海洋構造物・ダムその他水理構造物・廃水施設等のコンクリートに有利となる場合があるからである．

第三の利用方式は，骨材として用いることである．粗骨材としてはすでに使用経験もあるが，細骨材としての

使用例はまだほとんどない．急冷砕した高炉スラグを細骨材として用いれば，その潜在水硬性を活用することも可能となるので，この方式の研究は重要である．

50年度の土木学会全国大会における研究討論会の主題の一つに高炉スラグのコンクリート材料としての利用が選ばれた．当日は まず話題提供 として 下記の講演が行われた後，活発な討論が行われたが，満員の盛況で興味深い集会であった．本文は，その概要を取りまとめたものである．

セメント原料としての高炉スラグの利用（小林一輔）
混和材としての高炉水滓の利用　　（山崎寛司）
高炉スラグのコンクリート骨材への利用（吉田弥智）

1. セメント原料としての高炉スラグの利用

（1） 石灰石資源の有効利用と省エネルギー

現在，わが国における石灰石の可採埋蔵量は200億トン以上とされているが，セメント工業の成長率を年に 5 % と抑えても40年で消費し尽くすことになる[1]．石灰石はセメントの原料のほかに，製鉄・製鋼のさいにも大量に使用されている．例えば，製鉄のさいには銑鉄1トンあたり 200～300 kg，製鋼のさいには鋼塊1トンあたり約 50 kg の石灰石が使用されている．49 年度におけるわが国の粗鋼生産高を約1億トンとすれば，約 3 000 万トンの石灰石がこの1年間に消費された計算となる．

これらの石灰石のうち，製鉄のさいに用いられるものは製鉄の過程で鉄鉱石の中にある岩石成分や不純分と化合して高炉スラグとなるが，これは銑鉄1トンあたり約 300 kg が生ずるので，わが国 では 49 年度はこの量が約 3 000 万トンに達したことになる．すなわち，製鉄・製鋼においては消費される石灰石の量にほぼ匹敵する量の高炉スラグが生じているわけである．高炉スラグは元来，表—1[2] および 図—1 に示すように，その化学組成はポルトランドセメントに類似しており，しかも急冷して得た水滓スラグは潜在水硬性を有しているので，わずかではあるが古くから高炉セメントの原料として使用されてきたが，今後は石灰石資源のリサイクルのみならず省エネルギーの面からみても，高炉スラグをセメント原料として積極的に使用することが望まれる．

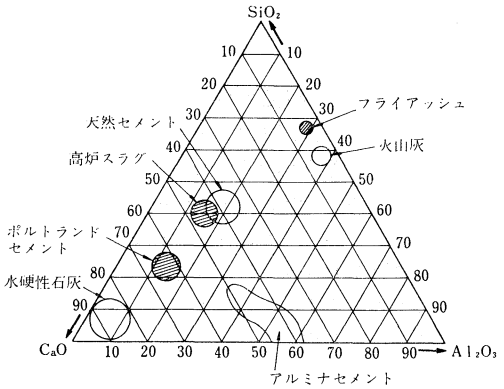
（2） セメント原料としての高炉スラグの品質

セメント原料としての高炉スラグの品質は，その塩基度とガラス量によって，ほぼ決ってくる．

表—1 高炉スラグの化学組成の一例

	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Fe_2O_3	MnO	S
高炉スラグ	34	15	42	4.7	1	0.1	1.1
普通ポルトランドセメント	22	5.5	65	1.4	3	1.5	3.3*

注：*SO_3 として

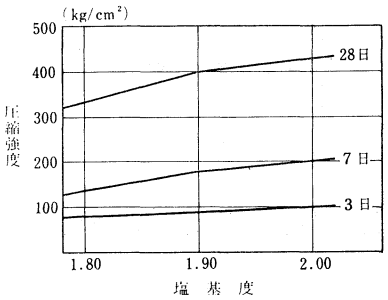


図—1 高炉スラグの CaO-SiO_2-Al_2O_3 三成分系図における位置

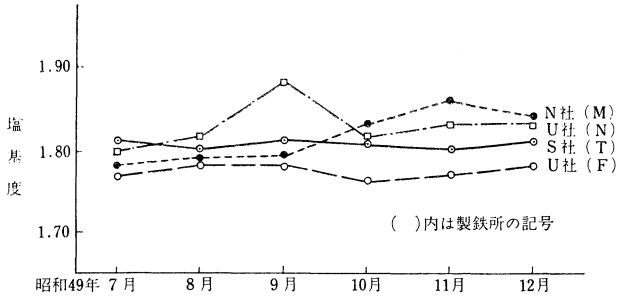
スラグの塩基度は JIS R 5211 では次式で算出された値が 1.4 以上でなければならないと規定されているが，わが国の高炉スラグの塩基度はいずれの製鉄所のものもほぼ 1.7～1.9 の範囲にある．

$$塩基度=\frac{CaO+MgO+Al_2O_3}{SiO_2}$$

図—2[2] は他 の 条件を一定としたときにおけるスラグの塩基度と高炉セメントの強度との関係を示したもので



図—2 塩基度と高炉セメントモルタルの強度

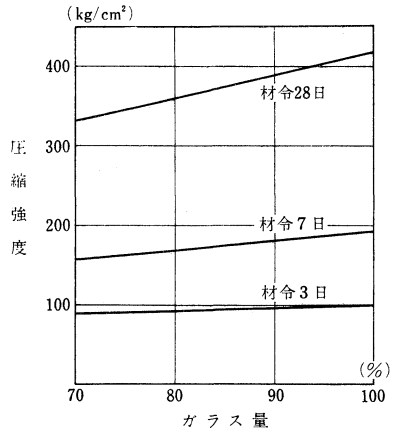


図—3 高炉スラグの塩基度の変化

あって，これによればスラグの塩基度が大きくなると強度が増しており，スラグの反応性がよくなることを表わしている．

図—3 は，現在わが国における高炉セメントの生産量の約 75% を生産している高炉セメントメーカー3社が使用している4つの製鉄所の高炉スラグの塩基度を示したもので，50 年7月から 12 月までの月別の塩基度の変化を調べたものである．

一方，高炉スラグの潜在水硬性の発現にはガラス量が重要な因子となる．高炉スラグを急冷して得た水滓はその製造条件より，数%以下の結晶質以外はほとんど完全なガラス質であり，内部に構造上の不安定性を保ち反応性に富む結晶化エネルギーが保持されている．したがってガラス質が多いほど水硬性が大きいといえる．**図—4**[2] は，他の条件を一定とした場合におけるガラス量と高炉セメントの強度との関係を示したものである．水滓のガラス量は高炉スラグを急冷するさいの冷却方法と，そのときの溶滓の温度によって支配され，ほぼ100% のガラス量とするためには溶滓温度が 1 400 °C より低下しない時点で完全急冷することが必要である[3]．



図—4　ガラス量と高炉セメントモルタルの強度

わが国の高炉セメントに使用されている水滓のガラス量は 95% 以上と推定されている．

（3） 海外諸国における高炉セメント使用の現況

表—2 は海外諸国における高炉セメントの生産量を示したもので，これによると，ソ連をはじめとする東欧諸国，中国，西ドイツ，フランスなどで高炉セメントの生産比率が高く，高炉スラグをセメント原料として有効に活用していることがわかる．特に中国では全セメント生産量の 90% がスラグを 20～85% 配合した高炉セメントで，残りのポルトランドセメントにも 15% 程度スラグが配合されているといわれている[1]．

表—3[1] はフランスにおける各種セメントの生産比率

表—2　各国における高炉セメントの生産量 (1971 年)

	全セメント生産量 ($\times 10^4$ t)	高炉セメント 生産量 (万 t)	高炉セメント 全生産に対する比(%)
ソ連	10 000	2 700	27
アメリカ合衆国	7 000	36	0.5
日本	6 000	360	6
西ドイツ	4 000	930	23
中国	4 000	3 600	90
イタリー	3 200	290	9
フランス	3 000	300 (1 900)	10(63)
イギリス	1 800		
ポーランド	1 300	520	40
ルーマニア	850	300	35
東ドイツ	800	140	18
チェコスロバキア	800	500 (770)	63(96)
ベルギー	700	140	18
ブルガリー	400	40	10
ハンガリー	300	110	40

注：① ( ) 内はスラグ含有ポルトランドセメントを加えた値．
② 中国，フランス，チェコスロバキアのデータは最近の近藤連一氏の調査による．
③ 中国の高炉セメント生産量にはスラグ混入ポルトランドセメントの生産量を含んでいない．中国ではスラグを混入しない純粋のポルトランドセメントは特殊目的以外はに使用されていない．

表—3　フランスにおける各種セメントの割合

種別		%	備考
ポルトランドセメント	超早強	0.4	
	早強	13.6	
	普通	19.5	
ポルトランドセメント (20%以下の混和材を含むもの)		52.4	混和材は高炉スラグのみ，または高炉スラグとフライアッシュの混合物 (3 : 1) を用いる．
高炉セメント	スラグ 30%	5.8	
	スラグ 50	0.2	
	スラグ 70	0.7	
	スラグ 80	2.8	
石灰スラグセメント		1.1	
アルミナセメント，その他		3.5	

を示したもので，この表よりスラグ量が 30% 以上の高炉セメントの生産量は 10% 程度であるが，スラグまたはフライアッシュなどの混合材を混和材として配合したセメントが全体の約 50% を占めていることが注目される．これは省資源を志向した結果であるが，このように普及した直接の原因は高炉スラグを混入してもその量が 40% 以下であれば，その強度は普通ポルトランドセメントとほぼ同等の値が得られ，その他の性質にもほとんど影響がないことなどによるものと考えられる．

現在，高炉セメントを規格化している国は筆者の調査した範囲では 20 数か国に及んでいる．**表—4** はこれらのうち，日本と西欧3か国における規格についてその概要をかかげたものである．

これによると，フランスでは高炉スラグを混入したセメントに関して非常に多様な規格を設けていることがわかる．また，この表でもその傾向がうかがえるし，日本

表—4　各国の高炉セメントの規格

国名	規格	名称		スラグ含有量 (%)	強度による分類	圧縮強度 (kg/cm²) 2(3)日	7日	28日 最小	28日 最大
日本	JIS R5211	高炉セメント	A種	≦30		(≧70)	≧150	≧300	
			B種	30～60		(≧60)	≧120	≧290	
			C種	60～70		(≧50)	≧100	≧280	
西ドイツ	DIN 1164 (1970)	EPZ (鉄ポルトランドセメント)		≦35	250	—	100	250	450
					450 L	—	175	350	550
					450 F	≧100			
		HOZ (高炉セメント)		36～85	450 L	≧100	—	450	650
					450 F	≧200	—		
					550	≧300	—	550	—
フランス	NF P-15 (1974)	CPJ (複合ポルトランドセメント)		≦35[1]	350	—		250	450
					450 —	—		350	550
					450 R	150		350	550
		CHF (高炉セメント)		60～75	550 —	—		450	650
					550 R	225		450	650
		CLK (クリンカースラグセメント)		≧80	T.H.R	300		550	
		CLX (石灰スラグセメント)		≧70	注：① スラグ，フライアッシュ，ポゾラン等を単独または混合したものを使用する．				
		CSS[2] (石膏スラグセメント)			② スラグと石膏の混合物．少量のクリンカーを含む．				
		ポゾランスラグセメント		(P+S)≦35					

とアメリカを除いたほとんどの国々では同じ系統の高炉セメントを材令 28 日の圧縮強度によって 3～4 種程度に区分けして規定している．このような規定の仕方は，必要とする強度に応じた強度のセメントを使用するということを前提にするもので，ヨーロッパに特有の合理主義の現われとみることもできるが資源の有効利用の面から眺めると，わが国でも今後検討に値する方向であると考えられる．

2．混和材としての高炉水滓の利用

高炉水滓（以下スラグと呼ぶ）は高炉セメントの混合材として有効に利用されているが，コンクリートプラントにおける計量練りまぜ装置が発達し，また，コンクリートの使用面が多岐にわたってきている現状の中では，構造物の目的，施工方法，スラグの品質，等に応じ，スラグの混和量を適切に選定してきめ細かい運用をするために，スラグ粉末を混和材の形で使用することが考えられる．すなわち，スラグの乾燥粉末をコンクリートプラントに供給して，各種の条件に応じて適切な混和量を選びミキサに投入する方法である．

本質的には高炉セメントを使用することと著しい差はないといえようが，多岐にわたる対象構造物に対して，セメントの種類別に区分したサイロや計量装置をプラントに設置することは実際上困難な場合が多く，混和材の形で利用できれば便利であり，きめ細かい運用が可能となる．このような考え方から，筆者の行ったいくつかの実験例を引用して考察してみたい．

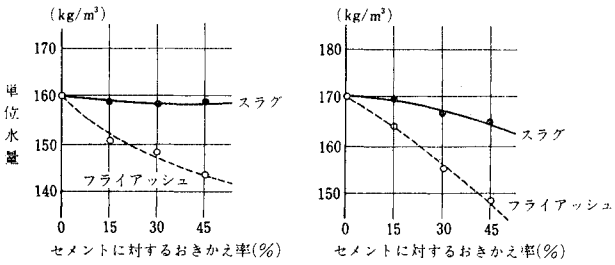
（1） スラグの混和がコンクリートの諸性質に及ぼす影響

（a） コンクリートのワーカビリチー

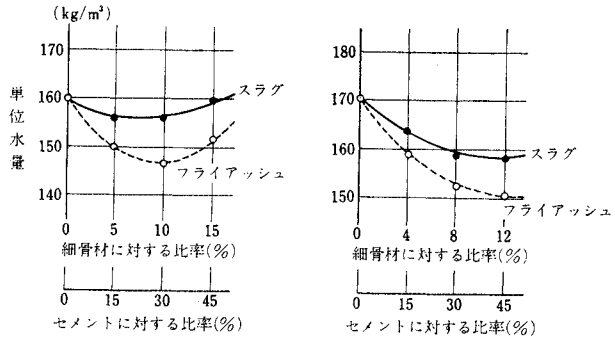
セメントの一部または細骨材の一部をスラグでおきかえた場合，いずれの場合も一般に単位水量を増す必要がなく，むしろわずかに減少させることができる（図—5）．

また，いずれの場合もスラグの混和によってブリージングを減らすことができる（図—6）．

ことに，貧配合コンクリートにおいてスラグを細骨材の一部と置きかえて用いた場合，かなりの単位水量減を示し，かつ著しいブリージングの減少を示したことは，貧配合コンクリートの場合および細骨材の品質が適切でない場合にスラグを適切な方法で混和することによ



（a） セメントの一部をスラグまたはフライアッシュでおきかえた場合



（b） 細骨材の一部をスラグまたはフライアッシュでおきかえた場合

図—5 乾燥水滓（スラグ）粉末を混和したコンクリートの単位水量

り，ワーカビリチーの改善が可能であることを示すものである．

（b） コンクリートの強度

セメントの一部をスラグでおきかえた場合，材令7日ではおきかえ率の増加にしたがって強度は低下するが，材令 28 日および 91 日では基本コンクリートに近い強度を示し，細骨材の一部とおきかえた場合には，初期材令から基本コンクリートより高い強度を示す．細骨材の一部とおきかえた場合の強度の増加は，貧配合コンクリートの場合とくに著しい（図—7）．

スラグの混和がコンクリートの強度に及ぼす効果は，① スラグの潜在水硬性により，スラグ自身が水和物を析出する効果，② 鉱物質粉末を混和した場合に，共通の微粉末混和によりセメントの水和量を増加させるいわゆる微粉末効果，③ ワーカビリチーを改善しコンクリートの内部組織を均整化させることによる効果，等がある．

潜在水硬性は，スラグの化学成分，鉱物学的性質，粉末度，等によって異なるから，使用にあたってはスラグ自体の性質をよく検討することが必要である．また，潜在水硬性の発揮には水の存在および適切な温度が必要であり，利用のさいには入念な養生が必要である．

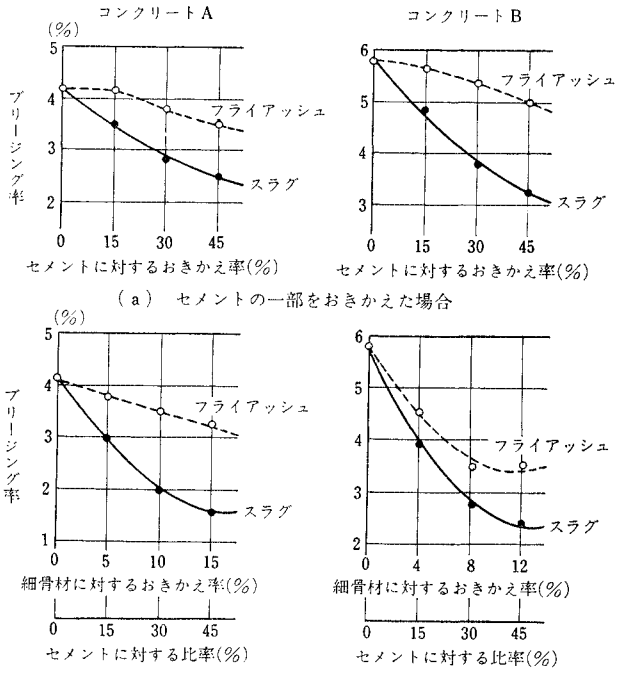
（c） コンクリートの水密性

図—7 コンクリートB（右側）の基本コンクリートで厚さ 15 cm の供試体をつくり 8 kg/cm² の水圧をかけた場合，一，二日で透水がみられたがスラグをセメントの一部または細骨材の一部とおきかえた場合は，ともに 5 日以上水圧を加えても透水がみられなかった．スラグを適切に使用して十分に養生することは，水密性の改善に有効であると考えられる．

（d） 耐 久 性

セメントの一部または細骨材の一部をスラグでおきかえたコンクリートの凍結融解試験の結果は，基本コンクリートの耐久性とほぼ等しい耐久性を示した．スラグを混和した場合の凍結融解耐久性は，適切な養生をすれば特に低下することはないと考えられる（図—8）．

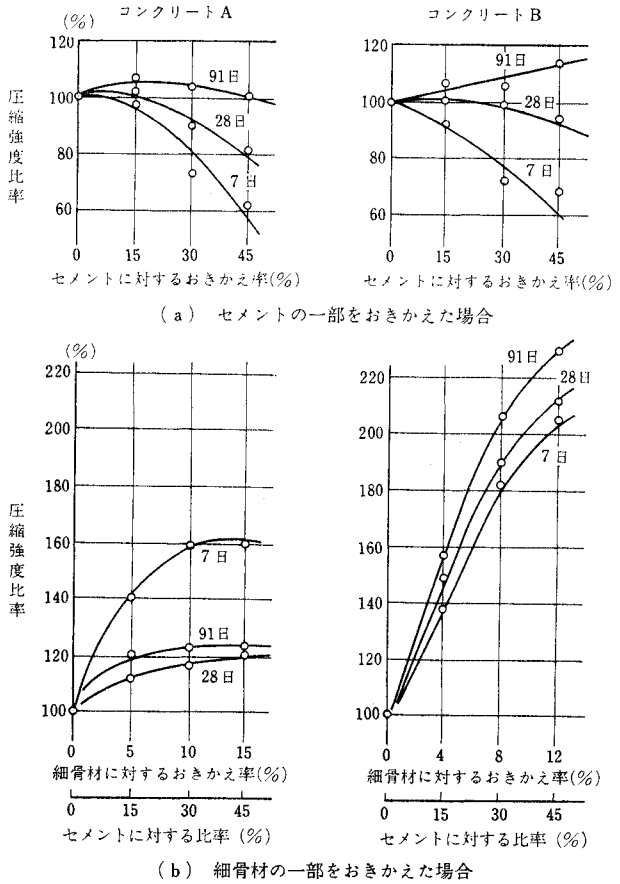
コンクリート中のモルタル分とほぼ等しい配合のモルタル供試体をつくって，硫酸ナトリウムの10% 溶液に浸漬し，反応によってできる水酸化ナトリウムを硫酸で中和し，中和に要した硫酸の量をもって硫酸浸食係数として表わす試験を行った．試験の結果，スラグを混和するといずれの場合も硫酸浸食係数は低下し，モルタル中の成分と



（a） セメントの一部をおきかえた場合

（b） 細骨材の一部をおきかえた場合

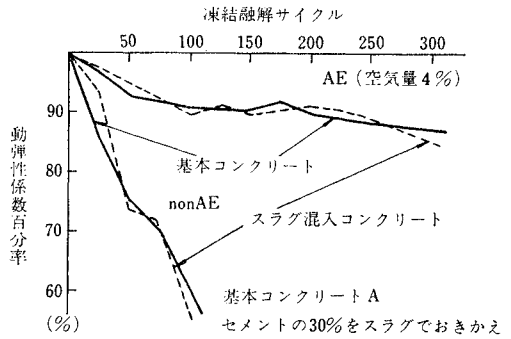
図—6 スラグ粉末を混合したコンクリートのブリージング



（a） セメントの一部をおきかえた場合

（b） 細骨材の一部をおきかえた場合

図—7 スラグ粉末を混和したコンクリートの圧縮強度



図—8　スラグ粉末を混入したコンクリートの凍結融解耐久性

硫酸ナトリウムとの反応量は少なくなることが認められるが，供試体の変形が基本コンクリートまたはフライアッシュ等を混和したコンクリートに比べて著しく，一部の供試体は崩壊を示した．高炉セメントを用いると一般に化学的耐久性が向上するといわれているが，スラグを混和する場合，スラグの化学成分，組成，混和量，混和方法，養生条件，硫酸塩の性質，等によっては必ずしも耐久性の向上を期待できるとは限らないことがあると考えられ，化学的耐久性を要するコンクリートにスラグを混和する場合には，それぞれの場合について慎重に検討することが必要である．

（e）　乾燥による収縮

コンクリート中のモルタル分とほぼ等しい配合のモルタル供試体をつくり，乾燥による収縮試験を行った結果は，スラグをセメントの一部とおきかえた場合，基本モルタルと等しいか，やや大きな乾燥収縮を示し，細骨材の一部とおきかえた場合，混和量の増加にしたがって，乾燥収縮が少しずつ大きくなることが認められた（図—9）．断面が小さく乾燥の影響を受けやすい構造物や，断面が大きくても急激な乾燥を受ける場合に，スラグを混和するときは，ひびわれに対する配慮が特に必要であると考えられる．

（f）　水　和　熱

セメントの 30% をスラグでおきかえたコンクリートの断熱温度上昇は，基本コンクリートに比べて低下したが，フライアッシュを同量混和した場合に比べると，やや大きい値を示した．

（2）　スラグを使用する場合の問題点

以上は，ただ1種類のスラグをセメントと同程度の粉末度に粉砕したものを，セメントの一部または骨材の一部とおきかえて用いた場合の実験例にすぎないが，スラグ粉末を混和材として適切に使用することにより，コンクリートのワーカビリチーを改善し，長期材令の強度を高め，水密性を改善するなどの利点が示された．スラグは潜在水硬性を有する貴重な資源として有効に活用できると考えられる．しかしスラグは工業副産品であり，その品質を確かめ，使用方法を適切にすることが特に必要である．使用上の問題点をあげるとつぎのようである．

① 化学成分および鉱物組成と潜在水硬性との関係の把握

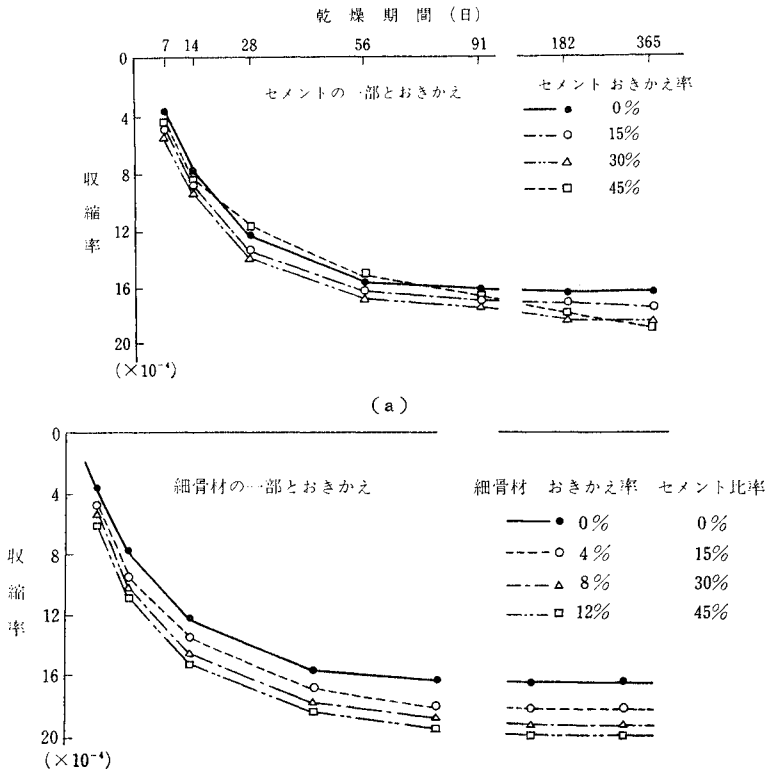
② 適正な粉末度の選定

③ 化学成分，鉱物組成および粉末度の管理

④ 目的に応じた混和量および混和方法の選定

⑤ 計量および練りまぜの管理

⑥ 養生方法，特に湿潤養生期間や寒中コンクリートにおける保温養生期間



図—9　スラグ粉末を混和したモルタルの乾燥収縮

3. 高炉スラグのコンクリート骨材への利用

高炉スラグは溶融スラグを徐冷却し，破砕したスラグ砕石と，溶

融スラグを急冷させた水滓とに大別される．スラグ砕石は従来おもに路盤材料に使用されてきたが，コンクリート用粗骨材としても十分利用できる．製鉄所構内の諸施設の建設において，粗骨材として高炉スラグが使用され好成績が得られている．また，アメリカ合衆国，イギリス，フランス等では一般のコンクリート構造物にも使用されている．水滓は一般に高炉セメントや混和材として利用されているが，細骨材として利用するための研究も始められている．

（1） 高炉スラグ処理方法

高炉から排出される溶融スラグは冷却処理方法によってその性質が大きく変化する．冷却処理方法にはつぎの諸方法がある．

① スラグピット方式：高炉に隣接して，長く狭いピットを設置し，溶融スラグを流し込み，空冷と散水により冷却する．

② 畑方式：高炉から取り出した溶融スラグを鋳物製のなべ（10～30 t）に入れてスラグ処理場に運ぶ．スラグは 25～50 cm に流し，空冷により冷却し，その後種々の方法で冷却する．

③ 水滓：溶融状態のスラグを水中に流下して急冷させると，多孔質でガラス状のスラグが得られる．これを一般に水滓と呼び，潜在水硬性があり，高炉セメントの原料，細骨材等に用いられる．

④ 膨張スラグ：水滓の場合よりも少ない水量で，種々の機械的操作により発泡性のスラグを製造する．これは，コンクリート用軽量骨材として使用される．

コンクリート用骨材に使用される場合，① または ② の方法で冷却したスラグを，破砕工場で砕いて，スラグ砕石とする．スラグは高温度で溶融しているため多くのガスを含んでいる．したがって，徐冷却すればガスは放出され，緻密な結晶体となるが，冷却期間も長く，以後の作業も困難となる．散水冷却すると材質が軟らかくなり，その程度によっては，コンクリート用骨材として不適当なものも生じてくる．

（2） スラグ砕石の特性について

（a） スラグ砕石の化学的特性について

コンクリート骨材として利用するには，化学的に安定でなくてはならない．高炉スラグの化学成分は，CaO，SiO_2，Al_2O_3，MgO 等が主成分で全体の 90% 以上を占め，その他 MnO，S，Fe_2O_3，P_2O_5 等を含んでいる．わが国の高炉スラグの化学成分の一例は，表—5 のとおりである．高炉スラグの化学成分の中に，コンクリートへ悪影響を及ぼすものがあってはならない．アメリカ合衆国，イギリス，フランス等には，化学成分の規格がある（表—6 参照）．

表—5 溶融スラグの化学成分の一例（%）

	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Fe_2O_3	MnO	S
一例	40.8	34.7	14.8	6.4	0.28	0.76	1.03
範囲	38.6～44.7	33.0～36.8	13.3～16.4	4.7～9.4	0.2～0.4	0.5～1.2	0.8～1.3

化学成分の中で，コンクリートに悪影響を及ぼすと考えられる成分は，つぎのとおりである．

① 石灰による不安定性：塩基度の高い高炉スラグにおいては「ふける」という現象において崩壊する．一般に CaO 43% 以下では崩壊は起こらず 50% 以上で起こると考えられる．

② 硫黄による不安定性：硫黄が単体または硫酸塩として存在する場合，セメントバチルスを作り，コンクリートを膨張崩壊する場合がある．しかし高炉スラグの場合，冷却のさい散水により大部分流出し，しかも，ほとんど CaS として存在しているため安定し，コンクリートへの影響はないものと考えられる．

③ 鉄分による不安定性：FeO 3% 以上だとスラグは崩壊するが，それ以下では問題はないと考えられる．

以上の点より，わが国に産する高炉スラグは一般にコンクリート骨材として用いら用いた場合，化学的に安定であると考えられる．

（b） スラグ砕石の物理的特性について

スラグ砕石は，溶融スラグの冷却方法によって，性質が大きく異なってくる．わが国の各工場別のスラグ砕石の物理的特性の一例を 表—7 に示す．また，一工場のば

表—6 コンクリート用スラグ砕石の化学成分の規格 （重量%）

	CaO	SiO^2	Al_2O_3	MgO	Fe_2O_3	MnO	S	SO_3
アメリカ合衆国 ACI 201 委員会推奨値	30～49	32～40	10～17	3～14	2～5		1～2	
フランス P-18-302 規格	40～48	29～36	13～19	6 以下	4 以下	2 以下	2 以下	0.5 以下
イギリス BS-1047	1. 石灰に対する安定性（注①） (a) $CaO+0.8\,MgO \leqq 1.2\,SiO_2+0.4\,Al_2O_3+1.75\,S$ (b) $CaO \leqq 0.9\,SiO_2+0.6\,Al_2O_3+1.75\,S$ 2. 鉄分に対する安定性（注②） 3. いおうに対する安定性 0.7% 以下酸可溶性硫酸塩としては 2% 以下							

注：① 条件 (a) または (b) の一方か両方を満足すること．(a)，(b) の条件を満足しないでも顕微鏡による組織観察に合格すればよい．
② スラグを 12 片以上水中に浸せきし 14 日経ても崩壊などの欠陥がないこと．1片でもあれば再試験のこと．

表—7　スラグ砕石の物理的性質

最大寸法 (mm)	F.M. 値	比重	単位容積重量 (kg/m³)	絶乾比重	実績率 (%)	吸水量 (%)	安定性損失重量 (%)	すりへり値 (%)	破砕値 (%)
25	7.12	2.73	1 606	2.69	59.5	1.28	4.47	25.8	17.8
25	6.89	2.41	1 377	2.32	59.1	3.90	4.86	33.6	25.6
20	6.69	2.54	1 460	2.38	61.3	6.50	5.54	40.5	31.3
25	6.94	2.47	1 321	2.36	56.0	4.64	3.13	32.3	31.9
25	7.42	2.27	1 224	2.12	57.7	7.01	6.00	41.2	37.0
20	6.86	2.61	1 507	2.55	59.1	2.59	4.24	28.7	24.0
20	6.79	2.50	1 424	2.40	59.1	3.86	4.07	34.7	26.6

表—8　物理試験のばらつきの一例

項目			平均	範囲	標準偏差
ふるい分け	粒度百分率	25 mm 以上 (%)	1.2	0.0 ～ 4.0	1.0
		25～20 mm (%)	18.0	11.0 ～27.0	3.6
		10～15 mm (%)	15.4	11.0 ～19.0	2.2
		15～10 mm (%)	45.0	29.0 ～53.0	4.5
		10～ 5 mm (%)	12.2	5.0 ～30.0	1.4
		5 mm 以下 (%)	7.9	4.0 ～13.0	2.0
	F.M.	(−)	6.92	6.70 ～ 7.12	0.043
比重（表乾）		(−)	2.63	2.76 ～ 2.68	0.026
比重（絶乾）		(−)	2.51	2.41 ～ 2.57	0.34
真比重		(−)	2.98	2.96 ～ 3.01	0.014
吸水量		(%)	5.06	4.03 ～ 6.24	0.60
単位容積重量		(kg/l)	1.57	1.43 ～ 1.64	0.046
実績率		(%)	62.4	57.7 ～65.6	1.8
洗い試験損失量		(%)	4.3	3.2 ～ 6.1	0.66
破砕値		(%)	31.6	27.7 ～33.6	1.90
スリヘリ減量		(%)	32.3	28.9 ～36.5	2.13
安定性減量		(%)	4.29	3.39 ～ 5.72	
粒形判定実績率		(%)	57.1	57.0 ～57.2	
NaCl 量		(%)	0.182	0.012～ 0.296	
比重 2.0 以下		(%)	0.2	0.0 ～ 0.3	
コンクリートとしての圧縮強度	高炉スラグ	(kg/cm²)	516	474 ～538	
	天然骨材	(kg/cm²)	487	459 ～502	

らつきを 表—8 に示す．

スラグ原石を φ2.5×5 cm の円筒形に整形して圧縮試験した一例によると，250～900 kg/cm² と大きなばらつきを生じている．これはスラグ砕石内の気孔に大きな関係がある．スラグ砕石の真比重は，2.98～3.00 程度で，天然骨材よりやや大きい程度であるが，表乾比重は気孔の影響を受け，粒子が大きくなるに従って小さくなる．そのため最大寸法の大きな粗骨材など比重が小さくなる．わが国におけるスラグ砕石の比重は 2.2～2.7 程度である．スラグ砕石は多孔質のため吸水量が大きい．また最大寸法の大きいスラグほど吸水量が大きくなる．安定性はよく，すりへり値は天然骨材に比べてかなり大きい．一般にコンクリート用粗骨材としての種々の性質は，スラグ砕石の比重と密接な関係があり，比重が大きいほど，すべての性質が良好である．スラグ砕石がコンクリート用粗骨材として利用できるかどうかは，比重，あるいは単位容積重量の結果を判定の材料としてよいと考えられる．

（3） スラグ砕石を粗骨材としたコンクリートの性質について

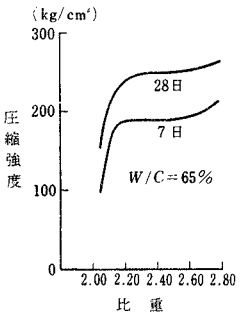
（a） まだ固まらないコンクリートの性質

スラグ砕石は粒の表面に気孔や凹凸があるため，川砂利を用いたときに比較して，コンクリートのワーカビリチーはかなり悪くなる．これはスラグ自身もやや角ばっていることとともに，骨材表面の凹凸のため，モルタル分が多くいるためで，同一ワーカビリチーを得るためには単位水量が増加する．したがって AE コンクリートとして用いることが望ましい．s/a をやや増加させ，適当な減水剤を用いると，ワーカブルなコンクリートをつくることができる．

これらの調整値は実験を行って決定することが望ましい．

（b） 強度特性について

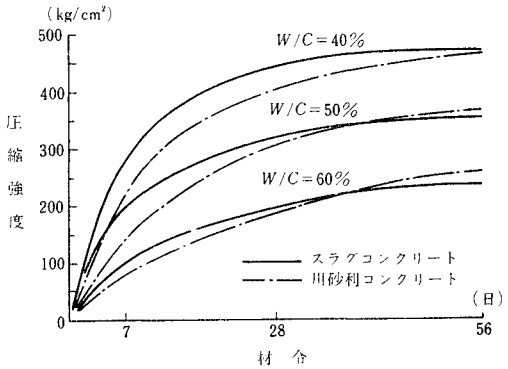
スラグ砕石コンクリートの圧縮強度は，スラグ砕石の比重と，大きな関係がある．図—10 のように比重 2.2～2.3 以下ではコンクリート強度は小さくなる．比重 2.3 以上のスラグ砕石を用いたコンクリートの場合，σ-C/W は直線的変化を示し，川砂利コンクリートとほとんど同じ程度の強度を示す．一般にスラグ砕石コンクリートは，川砂利コンクリートに比較して，初期強度は大きく，長期強度はやや少さくなる傾向がある（図—11 参照）．曲げ強度，および引張強度も同じような傾向を示す．



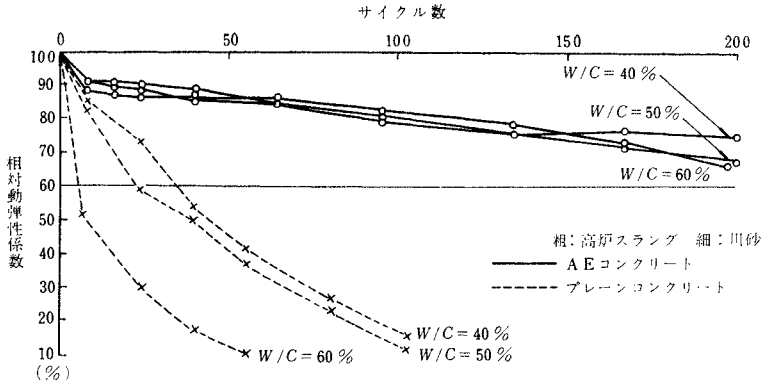
図—10　スラグ砕石の比重とコンクリートの圧縮強度との関係

いずれにしても現在までの研究によると，川砂利コンクリートと同程度の強度を出すことは十分可能である．

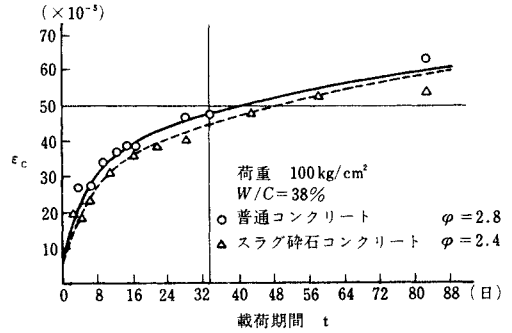
（c） 耐久性，水密性，クリープについて



図—11　材令の圧縮強度との関係



図—12　凍結融解サイクル数と相対動弾性係数との関係



図—13　スラグコンクリートのクリープ曲線

スラグ砕石コンクリートにおいて，プレーンコンクリートの場合には凍結融解に対する抵抗がやや小さく，また水セメント比による影響が大きい．しかし，AE コンクリートにした場合，普通川砂利を用いた場合に比較して同程度である（図—12 参照）．

水密性は普通骨材コンクリートと同程度であり，実際上は問題はないと考えられる．

クリープ係数も，普通骨材コンクリートと同程度と考えられる（図—13 参照）．

（4）　スラグ砕石コンクリート管理上の問題点

高炉スラグ砕石をコンクリート粗骨材として用いる場合，つぎの点に注意する必要がある．

① スラグ砕石のコンクリート粗骨材としての性質はスラグ砕石の比重および単位容積重量と密接な関係がある．しかし，表乾比重は試験方法によって差を生じやすいので，品質管理上は単位容積重量を目安とするのがよい．単位容積重量で 1 250 kg/m³ 以上のものを用いる．また製品の比重や単位容積重量のばらつきが大きい場合には，これがコンクリートの性状に影響するので，スラグ砕石の管理を十分に行う必要がある．

② 高炉スラグ砕石は多孔質のため，表面の乾燥が早く，レデーミクストコンクリートの場合，スランプ低下が大きくなる場合があるので，適度のプレ・ウェッチングを実施する必要がある．

③ 破砕時に生ずる砕粉が骨材表面に付着する場合には，コンクリートのワーカビリチー，スランプ，ブリージングに大きな影響を与える場合があるので，破砕後，水洗いすることが望ましい．

以上の点に注意して施工すればスラグ粗骨材自体の性質は多少変化しても，均一なコンクリートをつくることは十分可能である．

（5）　細骨材としての利用

高炉スラグ骨材は，現在，粗骨材として利用されているが，細骨材として利用の研究も始められている．

水滓について，そのままのものは，コンクリート用細骨材としての性能が著しく劣るため，そのままで利用できない．そのままのものは比重が小さく，また吸水量も大きい．そのため，現在，硬質水滓砂の試作と研究が行われている．硬質水滓砂は，吸水量も少なく，潜在水硬性もあるので，細骨材として利用できるものと考えられる．徐冷滓を破砕する場合に生ずる細骨材の利用も現在進められている．

4. 討　　論

高炉スラグが貴重な建設資源であることは疑いないが，工業副生品の宿命として，その品質が相当に変動することは避けられない．それで まず高炉スラグ の 品質管理の現状について，製鉄関係の会員の説明を求めた．その回答によれば，数年以前から主要製鉄工場では良質なスラグを生産するための研究を継続中であって，すでにスラグの処理施設を改造または新設しつつあるところが多く，努力を重ねている工場で良好な管理成績をあげた例もあることが明らかにされた．

次いで 高炉スラグ の 利用方式について三方式のいずれを推進すべきか？が論議の中心となり，二，三の主張が開陳されたが，その中には細骨材としての使用を強く推す研究者もあった．これは未開発の分野で成果が期待されるだけでなく，わが国には細骨材の入手に悩む地方が多いことによるものであろう．いずれの方式を推進するにしても，経済効果の慎重な検討が先行するのは当然であり，この点を明らかにして欲しいとの要望が強かった．

この種の新しい事業には，永年にわたって継続してきた慣習・経験や施設がかえって障害となることも考えられる．ある程度まで予期されたことではあったが，セメ

ント製造側のスラグ混入セメントに対する開発意欲は意外なほどに低いものであった．高炉スラグの及ぼす化学的効果は十分に認め，水滓スラグを適当に粉砕し混和材として使用することを推奨する研究者であっても，これをセメント原料とすることについては設備費と管理費の高騰を理由にあげ実現は不可能に近いと論じていた．高炉スラグの使用による材料費や燃料費の低減は微々たるものであって，スラグの処理・加工や貯蔵の設備費ならびに労力費の増加が大きく採算に合わないというのである．

前記の論旨は，セメント製造の現状だけを考慮すればまことに当然である．しかし石灰石資源の節用は万難を排しても実限に移す必要があるのであって，強力な政治的処置が要望される．スラグを混入しクリンカーを減じたセメントの場合には，その短期強度は，これを混入しないものに比べていくぶん低下する．しかし，価額は上昇せざるを得ないのであるから，使用面での行政処置が必要なのである．これは一見不合理ではあるが，民族百年の大計のために，やむを得ない処置と考える次第である．

参考文献

1) 近藤連一：セメントの省資源・省エネルギーに関する問題点，JPC セミナー資料，1974 年 12 月．
2) 丸安・小林・阪本：高炉セメントコンクリートの研究，土木学会コンクリートライブラリー，第 25 号，1970 年 4 月．
3) 赤津・池田・志賀・前田：高炉水滓スラグのガラス量について，セメント技術年報 XXⅧ，昭和 49 年．
4) V.I. Satarin : Slag Portland Cement, Proc. of the VI International Congress on the Chemistry of Cement. Moscow, 1974 年．

マークは語る

太平工業株式会社

当社創立は終戦翌年の昭和 21 年9月であるが，昭和 26 年9月の創立5周年記念事業の一環として，社章を制定することとなり，広く従業員から募集し選定されたものである．

本社章は太平工業の「太平工」を図案化したもので，応募者の意図としては，「太平」を工の字で丸く囲んで，平和で円満，団結を希求したということである．

その後，規格を統一して，従業員バッジ，株券その他の印刷物，看板，重機，車両等に使用されている．

（小野一郎・記）

港湾の調査、計画、設計
技術相談及び施工監理

株式会社 日本港湾コンサルタント

取締役社長 工学博士・技術士 鮫島茂
取締役副社長 工学博士・技術士 黒田静夫
専務取締役 技術士 新妻幸雄
常務取締役 工学博士・技術士 山本隆一

本社：東京都渋谷区渋谷2の12の6（共栄ビル）〒150 電話03(400)4157代
水理研究所：千葉市新港146 〒280 電話0472 41)1815・1809
海洋技術研究所：〃 電話0472 (41) 0027
新潟事務所：新潟市花園2の3の4（新潟東亜ビル内）〒950 電話0252(45)7641～2
神戸事務所：神戸市葺合区磯上通6の1の11(三井生命神戸ビル）〒651 電話078(251)6234～5
九州事務所：北九州市小倉北区浅野2の7の12(三省ビル）〒802 電話093(541)0234～5
名古屋事務所：名古屋市港区名港2の9の25 〒455 電話052 (661) 5317
湘南事務所：神奈川県平塚市紅谷町3の20 〒254 電話0463 (23) 3739