高粉末度スラグのコンクリートへの利用 の 現 状 と 展 望

阪本 好史*¹・富沢 年道*²・近田 孝夫*³

概 要 高炉スラグの潜在水硬性を利用して、古くから高炉セメントとして広く用いられてきた高炉スラグ粉末は、さらに近年、粉碎技術の発達とも相まって高粉末度スラグが量産されるようになってきた。ここでは、主として多量の高粉末度スラグを用いた低熱セメントについて、その開発の経緯、諸外国の関連規格、特性、問題点を述べるとともに、利用の現状と展望を示す。

キーワード：高粉末度スラグ、スラグ微粉末、低熱セメント、水中コンクリート、高強度コンクリート、高流動化コンクリート、グラウト

1. ま え が き

製鉄所の溶鋳炉で副産する高炉スラグを急冷したものは、アルカリ等によって刺激されると潜在水硬性を発揮することが、1862年、E. Langen（独）により発見された。それ以来、主としてヨーロッパにおいて、高炉スラグを水硬性材料として利用する研究開発が進められ、高炉セメントも普通ポルトランドセメントと同様に建設材料として欠くことのできないものになった。わが国でも、1910年、当時の八幡製鐵所で高炉セメントの製造研究に着手して以来、幾多の困難を克服して、今日では、わが国の高炉セメントの年間生産量は約1400万トンとなり、全セメント生産量に対する比率が18%強という発展を遂げてきた。

一方、第1次石油ショック以来、世界的に省資源・省エネルギー指向が高まるとともに、わが国では、最近の地球温暖化防止行動計画のCO₂排出抑制対策のなかで、高炉セメントの利用推進があげられている¹⁾。また、自然環境破壊に関係した生態系を保護する面からも、産業副産物をコンクリート材料に利用することが望まれている²⁾。表-1に、世界各国の産業副産物の最近の利用状況を示す²⁾。高炉スラグの利用状況はそれぞれの国の内情により異なっているが、わが国は、その生産量・利用率からみて、高炉スラグを有効に利用している先進国の1つであると言える。このように高炉スラグ

は従来よりも貴重な資源としての評価が再び高まってきた。

そこで、高炉スラグを国内資源として、高炉セメントへの利用の拡大を推進するとともに、高炉スラグ粉末のその他の特性を引き出して、新しい要求性能を満足する製品の開発が進められてきている。従来使用されていた高炉スラグ微粉末は、比表面積4000cm²/g前後のものであった。最近、数々の成果がみられるなかで注目されているものは、コンクリートの混和材料としての従来の高炉スラグ微粉末の利用と、高粉末度スラグ（比表面積6000cm²/g程度以上とする）の特性を生かした新しい製品の開発をあげることができる。ここでは、高粉末度スラグをコンクリート用材料として用いた場合の諸性質と、すでに実用化されつつあるマスコンクリート用

表-1 高炉スラグの生産量と利用率（1984年）²⁾

国 名	生産量 (×10 ⁶ t)	利用量 (×10 ⁶ t)	比 率 (%)
オーストラリア	4.7	0.12	2.6
カナダ	2.9	0.2	6.9
中 国	22	16	72.7
フランス	10.4	1.9	18.3
西ドイツ	15	2.8	18.7
インド	7.8	2.8	35.9
日 本	24	8.2	34.2
オランダ	1.1	1	90.9
ノルウェー	0.1	—	—
南アフリカ	1.5	0.6	40.0
スウェーデン	0.1	0.03	30.0
イギリス	1.5	0.25	16.7
アメリカ	13	1	0.7

* 利用量は、セメント、コンクリートのセメント質材料として用いられた量だけを示す。

*1 さかもと・よしふみ／九州大学教授 工学部 土木工学科（正会員）

*2 とみさわ・としみち／新日鐵化学(株)高炉セメント技術センター 調査役（正会員）

*3 ちかだ・たかお／同上 部長代理（正会員）

低熱セメントおよびその他の用途について展望してみる。

2. 高粉末度スラグの性質

高粉末度スラグの実用化を目指した研究開発が行われるようになったのは、比較的最近のことである。また、コンクリートの混和材料として本格的に研究に着手したのは1985年以降であって、その成果は、土木学会の論文集⁴⁾として発行されている。高炉水砕スラグを高粉末度にする、スラグの粒子が細かくなって水和活性が大きくなるとともに、微粒部分が増すことによってコンクリートの諸特性が、従来の高炉スラグ微粉末を用いた場合に比べて変化することが明らかにされてきている。次に、高粉末度スラグがコンクリートの性質に及ぼす主要な影響について述べる。

2.1 フレッシュコンクリート

コンクリートのスランプが一定の場合、図-1, 2に示すように、単位水量は一般にスラグの粉末度が大きくなるほど、また、スラグ置換率が大きくなるほど小さくなることが認められており⁴⁾、これは、スラグ粉末の表面

図-1 スラグ粉末度と単位水量の関係⁴⁾

が平滑で緻密であることが1つの原因と考えられている。一方、山本ら⁵⁾は、スラグ粉末度とモルタルのフロー値の関係を図-3(スラグ微粉末を用いた場合の結合材料は、セメントだけの体積と同じ)のように示し、

図-2 置換率と単位水量の関係⁴⁾

図-3 プレーン値とスラグ微粉末モルタルのフロー値との関係⁵⁾

Present State and Prospect on Use of High Fineness Granulated Blastfurnace Slag in Concrete

By Y. Sakamoto, T. Tomisawa and T. Chikada
Concrete Journal, Vol.29, No. 4, pp. 17~26, April 1991

Synopsis Blastfurnace slag cement has been used widely as a structural material due to the latent hydraulicity of ground granulated blastfurnace slag (GGBS) for a long time. Recently, high fineness GGBS has been able to make mass-production with the aid of the development of grinding technology. This paper describes mainly the circumstances of the development, related standards of foreign countries, properties and future subjects of investigation of low heat slag cement with a large quantity of high fineness GGBS, and also mentions the present state and prospect on the other uses of high fineness GGBS.

Keywords : high fineness granulated blastfurnace slag, ground granulated blastfurnace slag, low heat cement, concreting under water, high strength concrete, high flowable concrete, grouting

図-4 水セメント比と単位水量との関係⁶⁾

図-5 モルタル・コンクリートのレオロジー量⁷⁾

図-6 スラグ粉末度と空気量調整剤量の関係⁸⁾

図-7 スラグ粉末度がブリージング率に及ぼす影響⁹⁾

粉末度が大きくなるとフロー値は小さくなるという結果を得ている。また、丸安ら⁶⁾は、高炉セメント A 種、B 種、C 種について、コンクリートの水セメント比の小さい領域では、図-4 に示すようにスランブが一定の場合、スラグ量の多いセメントのほうが単位水量が多くなると報告している。西林ら⁷⁾は、高炉スラグ系セメントのレオロジー特性を調べて、モルタル・コンクリートの降伏値はスラグ置換率の大きいセメントのほうが小さい値となり、モルタルのフロー値やコンクリートのスランブ値と対応したという興味ある結果を示している (図-5)。以上のように、フレッシュコンクリートに及ぼす効果は、それぞれの試験条件が異なっていることや、モルタルのフロー値とコンクリートのスランブ値を同一に扱わないなどを考慮しても、スラグ粉末の置換率および粉末度とモルタル・コンクリートの流動性の関係は、現状では明確にはとらえられないようである。したがって、さらに混和剤、流動化剤などとの組合せを含めて解明されることが望まれる。

スラグ粉末の粉末度が大きくなると、所要の空気量を得るための AE 剤量を多く必要とし、ブリージング量は減少する。これらの試験結果の 1 例を図-6⁸⁾、7⁹⁾ に示す。

2.2 硬化コンクリート

コンクリートの圧縮強度は、スラグ粉末の粉末度を大きくすると、水和活性が高まり、とくに初期材令の強度増進が大きい。スラグ置換率 55% の場合の 1 例を図-8¹⁰⁾ に示す。同図によると、スラグ粉末の粉末度が大きいと初期材令の強度増進に比べて、長期材令の強度の伸び率は小さい傾向を示している。引張強度、弾性係数に及ぼすスラグ粉末の影響も、圧縮強度の場合と同じような傾向を示す¹¹⁾。

図-8 スラグ粉末度と圧縮強度の関係¹⁰⁾

乾燥収縮，クリープは，米倉ら¹²⁾によると，図-9，10に示すように，スラグ粉末の粉末度が大きくなると養生がよい場合は小さくなると報告している。一方，小林ら¹³⁾によると，乾燥収縮は，乾燥日数5週程度まではスラグ置換率，粉末度が大きくなるとやや増大するが，その後この差は小さくなり，約1年後では同じ程度になる。クリープは，粉末度による差は認められなかったと述べている。小林らは水中養生7日後の乾燥収縮を測定し，米倉らの研究は7，28日後の試験結果である。これらは，高炉スラグを含むセメントを用いる場合の初期養生の重要性を示唆しているものと考えられる。

耐凍害性について山本ら¹⁴⁾は，スラグ粉末度の影響は小さいが，表面損傷の程度は粉末度の大きい場合のほうが小さいと報告している。

図-9 乾燥収縮ひずみと乾燥日数との関係¹²⁾

図-10 単位クリープと載荷日数との関係¹²⁾
(標準養生期間7日)

図-11 粉末度と中性化係数¹⁶⁾

硫酸塩に対する抵抗性については，松下ら¹⁵⁾は Na_2SO_4 溶液浸漬結果を報告している。それによると，スラグの粉末度が大きくなると水密性は増すが，耐硫酸塩性には大きな差を認めていない。

長滝ら¹⁶⁾は，中性化について報告しているが，その結果の1例を図-11に示す。中性化深さは，中性化試験開始時の圧縮強度により推定でき，スラグ粉末度が大きくなると，中性化係数 ($X_c = b\sqrt{t}$ ， X_c : 中性化深さ (mm)， b : 中性化係数， t : 材令 (週)) が小さくなることを示している。

アルカリ骨材反応に対するスラグ粉末の抑制効果について，スラグ置換率が大きくなると抑制効果が増すことは一般に認められているが，スラグ粉末の粉末度の影響については，明確ではなかったという報告がある¹⁷⁾。

以上に述べてきたように，スラグ粉末のコンクリートへの効果は，まだ現象的にだけ認められていることが多く，あらゆる状態を説明できるような一貫した基礎的解析には至っていない。したがって，ここでは，経験による事実を頼りとして，高粉末度スラグの挙動を判断せざるを得ないので，研究すべき問題を多く今後に残している。

3. 用途開発

3.1 マスコンクリート用低熱セメント

(1) 開発の経緯

マスコンクリートの温度ひびわれを抑制するには，普通ポルトランドセメントよりも低熱タイプのセメントの使用が望ましいことは古くから知られており，従来，中庸熱ポルトランドセメントや低熱型の混合セメントが多く用いられてきた。また，温度ひびわれを抑制するためには，構造物の設計，施工，材料等のそれぞれの点で改善し，総合的に判断して施工しなければならない。これまで，種々の分野で数多くの研究開発がなされ，それぞ

れ成果が得られてきたが、完全に温度ひびわれの発生を制御できたと言える段階ではないようである。

近年、わが国では、本州四国連絡橋明石大橋の建設に先立ち、橋脚・橋台等のマスコンクリートの施工時に、温度ひびわれを従来よりも厳しく制御するための配慮から、各分野にわたり改善策が検討された。その結果、セメントについては、既存の中庸熱ポルトランドセメント、マスコンクリート用混合セメントよりも、さらに水和熱の低いセメントの開発が要望された。そこで、従来よりも粉末度の大きいスラグ粉末を多量混合した2成分系の低熱セメントと、さらにフライアッシュを混合した3成分系の低熱セメントが開発され、一部施工に供されつつある。ここでは、主として2成分系の低熱セメントに関する諸外国の規格、性質および今後の検討課題などについて述べる。

(2) 諸外国の規格

低熱ポルトランドセメントと高炉スラグを多量含有する低熱型セメントについて、世界の主だった国々の規格および高炉スラグ混合量などを表-2に示す¹⁸⁾。フラン

ス、ドイツでは、ポルトランドセメントのほかに、いくつかの混合セメントが規格のなかに含まれているが、とくに低熱セメントとしての規定はなく、水和熱の値の上限値も定められていない。一方、アメリカ、イギリスでは、日本と同様に低熱ポルトランドセメントについて規定があり、また、スラグ系の低熱型高炉セメントが規定されている。スラグ混合量は、わが国の高炉セメントの規格では、高炉セメントC種の場合の70%が上限であるのに対し、フランス、ベルギー、ルクセンブルクなどでは、混合セメントの種類によってスラグ混合量の上限の規定がないものもある。したがって、スラグ混合量が80数パーセントで石こう量の多い高硫酸塩スラグセメントのほかに、スラグ量が80%を超える混合セメントもみられる。その試験結果の1例を表-3に示す¹⁹⁾。現在、一般のセメントの水和熱に関する規定値の7日および28日の上限値は、それぞれ、わが国の中庸熱ポルトランドセメントでは70 cal/g(293 KJ/kg)、83 cal/g(347 KJ/kg)、アメリカの混合セメント(高炉セメント)では293 KJ/kg(70 cal/g)、335 KJ/kg(80 cal/g)と

表-2 世界のスラグ高含有セメントの規格¹⁸⁾

国 名	規 格 ・ 名 称	クリンカー量 (%)	スラグ量 (%)	SO ₃ max. (%)	水和熱 max.(KJ/kg)	
					7 日	28 日
オーストリア	Onorm B 3301, Hochofen (HOZ)	64~20	36~80	4.0	—	—
ベルギー	NBN B 12-105, Haut fourneau 60/85 (HL)	15~40	60~85	3.75	—	—
"	NBN B 12-106, Permetallurgique (LK)	≤15	≥85	5.0	—	—
チェコスロバキア	CNS 722123, Vysokopeci (VPC)	60~18	40~80	3.5	—	—
フィンランド	SFS 3165, Masuuniporlandsementti (BLF)	85~20	15~80	—	250	—
フランス	NF P-15 301, Laitier au clinker (CLK)	≤20	≥80	5.0	—	—
西ドイツ	DIN 1164, Hochofen (HOZ)	20~64	80~36	4.5	—	—
ルクセンブルク	CT 2/75, Permetallurgique (PM)	≤15	≥85	4.5	—	—
オランダ	NEN 3550, Hoogoven (hc)	65~15	35~85	4.0	—	—
ポーランド	PN-74 B-30005, Hutniczy (BLF)	70~20	30~80	3.5	—	—
ポルトガル	decrete n° 49 371, Alto-forno 60/80 (BLF)	40~20	60~80	4.0	65*	80*
スペイン	RC-75, Siderurgico III (S-III)	50~20	50~80	4.5	250	—
トルコ	TS 20, Yuksek firin Portland (CC)	69~15	31~85	4.0	—	—
イギリス	BS 4246, Low Heat Portland Blastfurnace (LHPBLF)	50~10	50~90	3.0	250	290
ユーゴスラビア	B.C. 1.011, Metalurski (M nz k)	70~14	30~85	4.5	—	—
アメリカ	ASTM C-594 Blended Hydraulic Cements	75~35	25~65	3.0	293	335
日 本	JIS R 5211 高炉セメント**	95~30	5~70	3.0	70*	83*

* =cal/g, (KJ/kg)=4 186×(cal/g)

** JIS R 5211 中の中庸熱ポルトランドセメントの水和熱の値を準用している。

表-3 ベルギーの市販セメントの圧縮強度 (ISO)¹⁹⁾

強度クラス	セメントの種類	圧 縮 強 度 psi(kgf/cm ²)			比表面積 (m ² /kg)
		3 日	7 日	28 日	
3870	P 40 100 クリンカー/0 スラグ	2 510 (176)	3 770 (264)	5 030 (352)	342
3870	HK 40 58 クリンカー/42 スラグ	2 320 (162)	3 670 (257)	5 420 (379)	448
2900	LK 30 15 クリンカー/85 スラグ	1 550 (109)	2 510 (176)	3 580 (251)	450

なっている。なお、イギリスではそれぞれ 250 KJ/kg (59.7 cal/g), 290 KJ/kg (69.3 cal/g) と、より小さい値を規定している。

(3) 低熱セメントの性質

スラグ粉末を母材とする二成分系の低熱セメントの性質を紹介するに先立って、スラグ粉末の粉末度および置換率が水和熱、圧縮強度に及ぼす影響について述べる。図-12 は、スラグ微粉末置換率に対する水和熱の関係を示している。

スラグ微粉末の置換率が増すと水和熱は全般に小さくなり、とくに材令初期には明瞭である。また、スラグ置

図-12 スラグ置換率と水和熱の関係²⁰⁾

図-13 スラグ置換率と JIS モルタル圧縮強度の関係²⁰⁾

換率が 70% 程度以上になると水和熱の低下の傾向がいちじるしい。図-13 は、スラグ微粉末置換率に対する JIS モルタル圧縮強度の関係を示している²⁰⁾。圧縮強度の発現性は、水和熱の傾向とやや異なり、スラグ置換率を増すに従って材令初期では圧縮強度の低下が認められるが、材令 28 日以降になるとスラグ置換率が 70% 程度までは強度が大きくなり、70% を超えると強度の低下がいちじるしくなる。しかし、スラグ置換率 90% までは、材令の経過に従って強度の伸びが認められ、90% 置換のものでも材令 28 日で 200 kgf/cm² 程度の強度発現が期待できる。さらにスラグを高粉末度にした場合、図-14 はスラグ置換率 85% の場合のスラグ粉末度と水和熱の関係、図-15 はスラグ粉末度と JIS モルタルの圧縮強度の関係を示している²⁰⁾。セメントの水和熱は材令とともに大きくなり、スラグ粉末の粉末度が大きくなると、水和熱もやや大きくなる傾向がみられる。一方、圧縮強度はスラグ粉末の粉末度が増すと各材令とも

図-14 スラグ粉末度と水和熱の関係²⁰⁾

図-15 スラグ粉末度と JIS モルタル圧縮強度の関係²⁰⁾

増加し、この傾向は、材令の経過とともにより顕著になる。すなわち、スラグ粉末の置換率が70%程度以上の領域では、水和熱をいちじるしく小さくすることができ、スラグ粉末度を大きくすることにより水和熱の上昇を抑え、かつ、材令28日以降の圧縮強度の増大が期待できる性質を示す。したがって、ある程度の設計強度を必要とするマスコンクリートの初期材令における温度ひびわれを抑制するためには、ほぼ目標を満足する特性を備えていると言える。

このような特性に注目して開発された、二成分系の低熱セメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇測定結果を図-16に示す²¹⁾。二成分系の低熱セメントのベースセメントとして使用したポルトランドセメントは、わが国で通常用いられている早強ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、普通ポルトランドセメントと種類が異なったものを用いても、高炉スラグの混合量が70~85%と多いこと、およびスラグ粉末の粉末度が6000 cm²/g程度と大きくしているものもあることが特徴である。それぞれの試製セメントの品質の検討

図-16 断熱温度上昇量と材令の関係²¹⁾

は、本州四国連絡橋公団関係の報告書に詳しい³⁴⁾。

本州四国連絡橋公団では、コンクリートの低発熱化の調査を「構造用マスコンクリート委員会(委員長:長滝重義東工大教授)」に委託し、「低発熱型マスコンクリート仕様(案)」が提案された²¹⁾。同仕様(案)では、低発熱型セメントを次のように定義している。「ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末、またはさらにフライアッシュで構成される混合セメントであり、添加材として少量の石こう等を使用することもある。」同公団では、表-4、5に示すように、高炉スラグ微粉末の規格と低発熱セメントの混合割合を定めている²¹⁾。

低熱セメントは、水和熱が従来の中庸熱ポルトランドセメントよりもかなり低くなっているにもかかわらず、実用可能な程度の圧縮強度の発現が期待できる点に最大の特徴をもつが、そのほかに高粉末度スラグを多量に用いたものは、ブリージング率、乾燥収縮率が小さくなるという報告もある^{22), 23)}。

(4) 施工例

筆者らが、二成分系の低熱セメントを用いて実際のコンクリート構造物を施工した結果を紹介する。

場 所: 北九州市戸畑区

施工月日: 平成2年6月20日~29日

構 造 物: 工場設備機械基礎

形状寸法: 9.6×9.6×1.5 m, 138 m³ 4基

表-5 低発熱セメントの混合割合²¹⁾

混 合 物	2 成 分 系	3 成 分 系
ポルトランドセメント	15% 以上	15% 以上
フ ラ イ ア ッ シ ュ	—	40% 以下
高 炉 ス ラ グ 微 粉 末	85% 以下	60% 以下

本州四国連絡橋公団

表-4 高炉スラグ微粉末の規格(本州四国連絡橋公団)²¹⁾

	比 重	比 表 面 積 (cm ² /g)	塩 基 度	活性度指数 SAI (%)		
				28 日	91 日	
規格値	≥2.8	≥3 500	≥1.7	≥75	≥95	
	モルタルフロー比 (%)	強 熱 減 量 (%)	湿 分 (%)	化 学 成 分 (%)		
				S	SO ₃	MgO
規格値	≥95	≤3.0	≤1.0	≤2.0	≤3.0	≤10.0

表-6 物 理 試 験 結 果

セ メ ン ト	比 重	比 表 面 積 (cm ² /g)	凝 結 試 験			圧 縮 強 さ (kgf/cm ²)				水 和 熱 (cal/g)	
			水 量 (g)	始 発 h-m	終 結 h-m	3 日	7 日	28 日	91 日	7 日	28 日
低熱セメント	2.93	5 780	32.0	3-30	5-45	139	229	366	435	34.9	43.3
高 炉 B 種	3.02	3 850	29.7	2-34	3-47	132	220	427	570	61.8	80.1

表-7 コンクリートの配合と圧縮強度

セメント	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)		養生方法	圧縮強度 (kgf/cm ²)			
		W	C		3日	7日	28日	91日
低熱セメント	59.6	155	260	現場水中	157	190	234	280
				標準養生	114	178	244	295
高炉セメントB種	56.0	164	290	現場水中	153	227	303	366
				標準養生	113	195	308	399

注) 混和剤: ポゾリス No. 70, スランブ: 10 cm, 空気量: 4%

図-17 部材中心の温度履歴

コンクリートの製造・運搬:

生コン工場, トラックアジテータ

コンクリートの打設: コンクリートポンプ車

試験結果: 低熱セメントの性質 (表-6), コンクリートの配合と圧縮強度 (表-7), 温度履歴測定結果 (図-17)

なお, 表-7の低熱セメントと比較対照した高炉セメントB種のコンクリートの配合で, セメント量に差があるのは, 前者はあらかじめ行った配合試験により定めたのに対し, 後者は納入生コン会社の標準配合表によるためである。

本工事では, コンクリート打込み時の気温が30℃程度であったが, 低熱セメントを用いたマスコンクリート中心部の温度上昇を, 計画したとおりに低く抑制することができた。圧縮強度は, 設計基準強度 210 kgf/cm² を満足するとともに, 打込み時の気温が高かった影響もあって, とくに材令初期では予想を上回る強度発現を示した。材令5日の脱型時およびそれ以後の肉眼観察では, 両セメント共に温度ひびわれは認められなかった。また, 部材中心の温度上昇測定結果から温度ひびわれ指数を算出すると, 低熱セメントは1.5以上, 高炉セメントB種では1.5前後であった。

(5) 今後の検討課題

高粉末度スラグを85%程度混合した低熱セメントは, 上記のように, マスコンクリートの温度ひびわれ抑

制のためのセメントとしてきわめて特徴のあるものであるが, スラグ混合量が現行のJISで定められている高炉セメントC種の上限70%を超えるため, 耐久性等に関しては, 検討事例の少ないことが課題として残されている。スラグ混合量が多いという点では, すでにヨーロッパの一部の国で古くから規格に定められ製造されており, このようなセメントを用いて施工された例として, フランスの Serre-Pencon ダム²⁴⁾ やベルギー・アントワープの水門²⁵⁾ などがある。一方, わが国ではその施工実績はみられない。

ここで, 今後の問題点をあげると次のようなことが考えられる。

- 1) 長期の強度性状, 中性化, 表面劣化等の耐久性
- 2) 水和反応メカニズムと水和物の長期性状
- 3) 低温時の諸特性
- 4) 施工管理方法の確立

これらの点について, 早急に解明することが必要である。なお, 現在開発されている低発熱セメントが必要・十分な性能のセメントとは考えていないので, その使用目的によっては, 要求される性能が加えられると思うが, このセメントがマスコンクリートに適したセメントであるという長所を生かして使いこなす技術の発達も期待される。

3.2 水中コンクリート

高粉末度スラグの特性を生かして, 水中不分離性コンクリートへの適用を検討した報告がいくつかみられる^{26)~28)}。これらはいずれも, スラグを高粉末度化することにより, 強度改善, 流動性の向上および温度上昇を抑制すること等を目的として, 研究開発が進められている。次に現場施工試験の1例²⁷⁾を紹介する。

場 所: 福 山

構 造 物: 製鉄所岸壁

打設位置と形状: 図-18に示す。

コンクリートの製造・運搬:

生コン工場, トラックアジテーター

コンクリートの打設: コンクリートポンプ車

コンクリートの配合:

図-18 打設位置の形状²⁷⁾

単位結材量 300 kg/m³

(結合材中のスラグ(比表面積 14 000 cm²/g)置換率 40%)

水結合材比 66%

混和剤 特殊混和剤(セルロース系とアクリル系の混合系), 超遅延形減水剤, 高性能減水剤

その結果, コンクリートコアの圧縮強度は材令 91 日で 269 kgf/cm² (標準偏差 17 kgf/cm²), また, 分離抵抗性, ポンプ圧送性, 流動性などの性質は良好で, 特殊水中コンクリートとして十分実用に供し得ることを確かめている。

3.3 高強度コンクリート

高粉末度スラグを混合すると, いままで述べてきたように, スラグの高粉末度化による効果と表面活性剤の適切な使用によって, ワークアブルなコンクリートの高強度化が期待できる。試験結果の 1 例を 図-19 に示す²⁹⁾。比表面積 6 000, 8 000 cm²/g の高粉末度スラグを 50% 混合したセメントで, 高性能減水剤を用いた水セメント比 25% のコンクリートを標準養生した場合, 材令 28 日では約 1 000 kgf/cm² の圧縮強度が得られる。このことは, 現在検討が進められている建設省総合開発プロジェクトの中の New RC に用いる高強度コンクリートの開発にも寄与するものと考えられる。

長田ら³⁰⁾は, 比表面積 6 060 cm²/g の高粉末度スラグを早強ポルトランドセメントに 50% 混合したセメントを用い, 結合材料 420 kg/m³, 高性能減水剤を用いた配合で, 設計基準強度 400 kgf/cm², プレストレスト導入時強度 350 kgf/cm² の PC スラブげたを蒸気養生して, 材令 1 日でプレストレス導入したものを, 鉄道橋に

図-19 圧縮強度の発現性状²⁹⁾

供用したことを報告している。

3.4 高流動化コンクリート

岡村ら³¹⁾は, 締固め不要のコンクリート(ハイパフォーマンスコンクリート)の開発を行い, その性質を報告しているが, 硬化特性, 流動特性の要求を満足するため, 比表面積 5 500~6 000 cm²/g のスラグ粉末を混合した結合材を用いている。同様に工場製品においても, モルタル・コンクリートの流動性を高めて, 締固めを容易にするかまたは不要にする目的で, 高粉末度スラグの開発研究が行われている。

3.5 グラウト

比表面積 8 000 cm²/g 程度のスラグ粉末は, 微粒子でかつ水硬性がある特徴を生かして, 岩盤注入グラウト材としてすでに利用されており, 青函トンネル, ダム等で使用された実績がいくつか報告されている^{32), 33)}。また, 同様の目的で, コンクリートのひびわれを補修するための注入材の 1 成分としての用途開発も行われ, 実用化されつつある。

4. ま と め

高炉スラグ粉末は, 従来比表面積 4 000 cm²/g 程度のものが実用されていたが, 最近の粉碎技術, 設備などの周辺技術の発達も相まって, 高粉末度スラグの量産が可能になってきた。その用途開発も多分野にわたっており, それぞれ特徴のある施工方法や製品の開発がされつつある。高炉スラグは国内で多量に産出する貴重な資源の 1 つであって, この活用は省資源や環境問題の改善にも直接つながり, 今後の社会の要請に適合した材料である。したがって, この新材料の広範な活用が期待される。

本稿をまとめるにあたり, 多くの方々の貴重な文献, 報告書などを引用, 参照させていただいた。ここに厚く

御礼申し上げ、謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 地球温暖化防止行動計画, 地球環境保全に関する関係閣僚会議決定, 平成 2.10
- 2) P.K. Mehta : Pozzolan and Cementitious By-Products in Concrete-Another Look, Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Proceedings Third International Conference, Trondheim, Norway, pp. 1~43, 1989
- 3) 高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集, 土木学会, 昭 62.3
- 4) 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計施工指針(案) 資料編, 土木学会, pp. 60, 昭 63.1
- 5) 山本泰彦・近松竜一: 高炉スラグ微粉末の水硬性と減水作用に関する考察, 土木学会第 43 回年次学術講演会講演概要集, pp. 146~147, 昭 63.10
- 6) 丸安隆和・小林一輔・阪本好史: 高炉セメントコンクリートの研究, 東京大学生産技術研究報告, Vol. 15, No. 4, p. 13, 昭 41.2
- 7) 吉野 公・西林新蔵・湯谷政博: 高性能 AE 減水剤を添加した高炉スラグ系コンクリートのレオロジー特性について, 土木学会第 45 回年次学術講演会講演概要集, pp. 208~209, 平 2.9
- 8) 遠藤裕悦・児玉和巳・中川 修・高田 誠: 高炉スラグ微粉末がコンクリートの配合と強度におよぼす影響について, 3) と同じ, pp. 73~80
- 9) 今井 隆・大橋 猛・斉藤敦志: 高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの諸性質, 3) と同じ, pp. 67~72
- 10) 8) と同じ
- 11) 森山容州・沼田晋一・木島 徹・小林明夫: 高炉スラグ微粉末コンクリートの配合及び強度発現特性について, 3) と同じ, pp. 81~88
- 12) 米倉重州夫・田中敏嗣: 高炉スラグ微粉末の使用がコンクリートの乾燥収縮およびクリープに及ぼす影響, 3) と同じ, pp. 99~106
- 13) 小林和夫・井上 晋・津田 章: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの乾燥収縮とクリープに関する研究, 3) と同じ, pp. 107~114
- 14) 山本泰彦・竹内 徹: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの配合と耐凍害性, 3) と同じ, pp. 129~134
- 15) 松下博通・中島馨生・白木重治: 高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの耐薬品性に関する実験的研究, 3) と同じ, pp. 135~142
- 16) 長滝重義・大賀宏行・荒井俊晴: 高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの中性化, 3) と同じ, pp. 143~150
- 17) 高炉スラグ微粉末による ASR 抑制に関する共同研究報告書, 土木研究所資料, 2-55-63, 昭 62.12
- 18) Cement Standard of the World, Cembureau, 1980
- 19) G. Frohnsdorff : Blended Cements, ASTM STP 897, pp. 11, 1986
- 20) 阪本好史・富沢年道・長尾之彦: 高炉スラグセメントの発熱性状に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No. 43, セメント協会, pp. 268~273, 1989
- 21) 山田勝彦: 超低発熱-海中コンクリート・気中コンクリート-, 第 249 回コンクリート講演会, セメント協会, pp. 23~34, 1990.2
- 22) 近松竜一・竹田宣典・十河茂幸: 超低発熱性混合セメントを用いたコンクリートの基礎的性状, 7) に同じ, pp. 192~193, 平 2.9
- 23) 近松竜一・竹田宣典・十河茂幸: 超低発熱混合セメントを用いたコンクリートの耐久性に関する一実験, 同上, pp. 190~191, 平 2.9
- 24) M. Regourd : 3 Slag and Slag Cements : Concrete Technology & Design, Cement Replacement Materials, Surrey University Press, Vol. 3, pp. 97, 1986
- 25) P. Pirotte : Huttzement und ihre Anwendung in Belgien, Tonindustrie & Zeitung, 89, Nr. 7/8, pp. 155~158, 1965
- 26) 十河茂幸・小沢郁夫・新開千弘・芳賀孝成: 混和材を多量添加した超低熱特殊水中コンクリートの性質, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol. 11, No. 1, pp. 397~402, 1989
- 27) 佐藤和義・原 幹和・坂本全布: スラグ超微粉末を用いた特殊水中コンクリート, コンクリート工学論文集, Vol. 1, No. 2, pp. 59~68, 1990.7
- 28) 木村勝利・辻子雅則・大倉真人・槇島 修: 水中不分離コンクリートの凍結融解抵抗性の向上について, 7) に同じ, pp. 220~221, 平 2.9
- 29) 三浦律彦・十河茂幸・芳賀孝成: 超微細な高炉スラグ微粉末を用いた超高強度コンクリートに関する基礎研究, 土木学会第 44 回年次講演会講演概要集, pp. 174~175, 平 1.10
- 30) 長田晴道・宮武洋之・近田孝夫: 高炉スラグ微粉末を用いたプレストレストコンクリート桁の鉄道橋への適用, 7) に同じ, pp. 186~187, 平 2.9
- 31) 岡村 甫・國島正彦, 前川宏一・小沢一雅: 7. 流動性-ハイパフォーマンスコンクリート-, 第 249 回コンクリート講演会テキスト, セメント協会, pp. 69~77, 1990.2
- 32) 微粒子注入材, 日鐵セメント(株), 日鐵コロイド主要納入実績カタログ
- 33) 新潟の原ダム建設工事(山口県) グラウトに超微粒子セメント使用, 日経コンストラクション, pp. 40~45, 1990.7.27
- 34) たとえば, 金沢克義・二宮仁司・十河茂幸・新開千弘: 超低発熱セメントの橋りょうマスコンクリート構造物への適用性, コンクリート工学, Vol. 27, No. 5, pp. 31~37, 1989.5