

高炉スラグのコンクリートへの利用に関する研究

STUDY ON THE USE OF BLASTFURNACE SLAG IN CONCRETE

小 玉 克 巳*

By *Katsumi KODAMA*

1. 緒 論

高炉スラグがコンクリート用材料として利用されたのは新しいことではなく、約70年以前からスラグセメントの原料としてわが国でも使用されている。近年、わが国製鉄業の急速な発展により銑鉄生産に伴って発生する高炉スラグは膨大な量に達しているため、その利用については、従来よりもいっそう広汎な研究が開始されている。これは、わが国の資源ならびにエネルギーの節約、自然環境保全の要請に応えることにもなるため、高炉スラグの適切な利用法の研究は、いまや国家的な緊急課題となっている。

高炉スラグをコンクリート用材料として使用するにあたって、3種の方法が考えられる。第1の方法としては、徐冷却してできた高炉スラグ粗骨材をコンクリート用粗骨材として用いることがあげられるが、この方法については、すでに多くの研究が実施され、公表されている調査研究結果も多く^{1)~5)}、製鉄所の建設にこれを利用した実績も少なくない。しかし高炉スラグ粗骨材は、冷却処理の方法、その他によってその品質が著しく異なるものである。そこで品質が相違する高炉スラグ粗骨材をコンクリートに用いた場合コンクリートの性質に及ぼす影響について解明する必要がある。第2の方法は、急冷して破砕処理した高炉スラグ砕砂、高炉スラグ空砕砂を細骨材として用いることである。高炉スラグ砕砂の使用実績は、製鉄所構内の建設工事にわずか使用されているだけで、高炉スラグ空砕砂の使用実績については、ほとんどないのが現状である。しかし最近特にこれらについての研究が活発に行われ始めた^{6)~8)}。これは、高炉スラグ砕砂、高炉スラグ空砕砂のもつ潜在水硬性をも活用しようとする意図に基づくものである。高炉スラグ細骨材は、熔融高炉スラグを水または空気を用いて急冷処理し

たものをロッドミル、ハンマーミル等で適当に破砕し、粒形を整えるとともに粒度を調整したものであるため、これらの品質が冷却および破砕の方法によって相当に異なる。高炉スラグ砕砂の場合には、粗粒のものの強さが川砂の粗粒のものに比べて弱く、粒形も角ばっていることである。高炉スラグ空砕砂の場合には、粗粒のものは丸味を呈しており、粒自身の強さも川砂粒と大差なく、ち密であるが、ほとんどが粒径0.6mm以上であり、0.6mm以下は粗粒のものを破砕して粒度調整を行っているため細粒のものは、粒形が角ばっている。また高炉スラグ細骨材は、破砕して粒度調整するため0.15mm以下の微粒分が多く含まれることもある。これら高炉スラグ細骨材をコンクリートに使用した場合のコンクリートの性質に及ぼす影響についての検討が必要である。第3の方法は、急冷して得られる軟質高炉スラグを適当に粉砕処理した高炉スラグ微粉末をコンクリート用混和材として用いることが考えられる。高炉セメントの原料としての高炉スラグは、すでに古くから実用されている。その使用方法については、ほぼ定説も得られているが⁹⁾、コンクリート用混和材として用いられた例はない。現在市販されている高炉セメントを用いる場合には、高炉スラグの品質、混入量等は限定されることになる。混和材として用いる場合には最も適当と思われる品質の高炉スラグを任意の割合で混入することが可能となる。高炉スラグ微粉末を混和材としてコンクリートに用いた場合の高炉スラグの品質、混入量等がコンクリートの性質に及ぼす影響についても解明することが重要なことである。

本論文は、高炉スラグをコンクリート用材料として用いる場合の基礎的諸事項に関し、武蔵工業大学コンクリート研究室で実施した研究結果を取りまとめたものであって、代表的な高炉スラグ粗骨材、高炉スラグ砕砂、空砕砂ならびに高炉スラグ微粉末の特性についての実験結果に基づき、これらを使用したコンクリートの諸性質について論じたものである。実験の一部には、建材試験セ

* 正会員 工修 武蔵工業大学助教授 工学部土木工学科

ンターコンクリート用高炉スラグ骨材標準化研究委員会の大規模な調査研究の一環として筆者が実施した研究結果も含まれているのである。

2. 高炉スラグ粗骨材がコンクリートのコンシステンシー、強度に及ぼす影響

(1) 使用材料

本実験に用いた粗骨材は、製鉄所の異なる A, B, C の 3 種類の 高炉スラグ と 比較のための 川砂利 である。表-1 は実験に用いた 3 種の 高炉スラグ粗骨材 と 川砂利 の 試験結果 である。細骨材は、いずれも 同じ 川砂 を 用い、試験結果は表-2 のごとくである。

表-1 より単位容積重量は、実験に使用した高炉スラグ粗骨材すべてが土木学会コンクリート標準示方書限度 1250 kg/m³ より大きい値となっている。実績率は 57~60% で川砂利の実績率より小さい値を示しているが、いずれも JISA 5005 「コンクリート用砕石」の規格値 55% を超えており、表-8 の砕石 (1), (2) の実績率の値と大体一致している。すりへり減量値は 41~47% で

表-1 粗骨材の物理的性質

試験項目	高炉スラグ粗骨材			川砂利	普通石
	A	B	C		
表 乾 比 重	2.54	2.31	2.56	2.66	2.60
吸 水 率 (%)	3.34	5.47	2.74	1.11	0.96
単位容積重量(kg/m ³)	1423	1306	1385	1777	1530
実 績 率 (%)	57.8	59.7	55.5	67.0	59.4
洗 い 試 験 (%)	1.20	1.41	1.11	0.93	0.36
すりへり減量 (%)	41.3	46.9	43.5	13.1	13.8
BS 規格による 破 砕 試 験 値 (%)	29.6	31.9	31.1	10.5	13.7
粒 度 (ふるいにとどまるもの重量百分率) (mm)	20	10.0	14.5	14.8	14.7
	15	23.3	28.5	42.2	31.0
	10	69.8	64.5	78.2	80.0
	5	98.4	95.6	98.0	100.0
粗 粒 率	6.77	6.74	6.91	6.95	6.95

表-2 細骨材の物理的性質

表 乾 比 重	吸 水 率 (%)	単位容積重量(kg/m ³)	洗 い 試 験 (%)	粒 度 (ふるいにとどまるもの重量百分率) (mm)					粗粒率
				2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
2.58	3.0	1725	2.56	16.5	30.7	58.6	79.8	97.6	2.83

あり、英国規格による破砕試験値は、30~32% であって川砂利の試験値に比較して両者とも 3 倍の値となっている。また粒形の角ばりの影響も考えられるので普通砕石と比較した結果、両試験値とも約 3 倍の値となっている。これらは、高炉スラグ粗骨材粒が多孔質であるばかりでなく、その材質も一般骨材粒より相当に強さが弱いことを示すものである。

3 種の高炉スラグ粗骨材の使用にあたっては、あらかじめふるい分けたものを所定の粒度に調整して用いた。なお、高炉スラグ粗骨材は、ある程度まで吸水した気乾状態で貯蔵したものを使用前に 24 時間吸水させたのち粒の表面を布でぬぐい表面乾燥飽水状態として使用した。川砂利は、24 時間吸水させ表面乾燥飽水状態で用いた。細骨材は、表面水率を 1% 以内にさせた状態で貯蔵し、これの表面水を測定して用いた。セメントは、日本セメント (株) 製の普通ポルトランドセメントでその試験成績は表-3 のごとくである。

(2) 高炉スラグ粗骨材を用いたコンクリートのコンシステンシー

一定の粒度とした 3 種の高炉スラグ粗骨材と川砂利とを用いた場合について、コンクリートの水セメント比および単位水量を一定に保ちながら細骨材率を変化させ、VB 試験を実施してコンシステンシーの比較検討をした。水セメント比を 40, 50, 60% の 3 種類、単位水量を 150, 160, 170 kg の 3 種類とした組合せで実験したのである。

各細骨材率のコンクリートに対する VB 値を求めた結果の 1 例は、図-1 のごとくである。図-1 より高炉

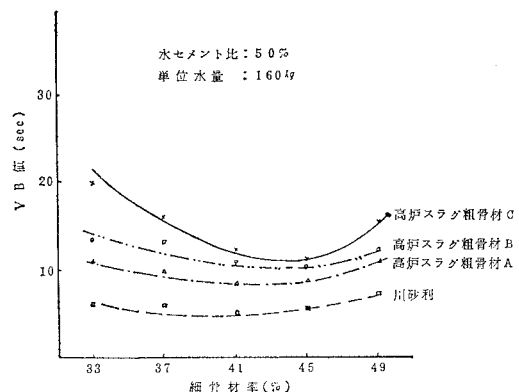


図-1 コンクリートの細骨材率と VB 値との関係

表-3 セメント

比 重	比表面積 ブレン法 (cm ² /g)	凝 結			安 定 性 (煮沸方法)	フロー値 (mm)	曲げ強さ (kg/cm ²)			圧縮強さ (kg/cm ²)		
		水 量 (%)	始 発 (時一分)	終 結 (時一分)			3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日

表-4 コンクリートの最適細骨材率と VB 値 (カッコ内)

水セメント比 (%)	単位水量 (kg)	最適細骨材率 (%) と VB 値 (SEC)				川砂利コンクリート
		高炉スラグ粗骨材コンクリート			川砂利コンクリート	
		A	B	C		
40	140	—	—	—	37 (12)	
	150	42 (14)	43 (16)	44 (17)	39 (8)	
	160	41 (8)	41 (10)	42 (12)	39 (5)	
	170	41 (6)	41 (6)	42 (8)	—	
50	140	—	—	—	41 (9)	
	150	42 (11)	43 (13)	44 (15)	40 (7)	
	160	43 (8)	44 (10)	44 (11)	40 (5)	
	170	43 (6)	44 (7)	45 (9)	—	
60	140	—	—	—	41 (8)	
	150	43 (9)	44 (8)	45 (13)	41 (5)	
	160	43 (6)	44 (6)	44 (9)	41 (4)	
	170	44 (6)	45 (6)	45 (8)	—	

スラグ粗骨材を用いたコンクリートについても、VB 値が最小となる細骨材率の存在することが示されている。水セメント比、単位水量を一定とした場合において、VB 値が最小となる細骨材率を最適細骨材率と考え、その値を示せば、表-4 のようになる。表-4 によれば、高炉スラグ粗骨材コンクリートにおける最適細骨材率は、川砂利コンクリートより 2~4% 程度大きくなっている。

次に、3 種の高炉スラグ粗骨材がコンクリートのコンシステンシーに及ぼす影響を検討した。それぞれの粗骨材に対し、ある水セメント比をもつコンクリートの場合、最適細骨材率における単位水量と VB 値との関係の 1 例を図示すると図-2 のごとくである。また図-2

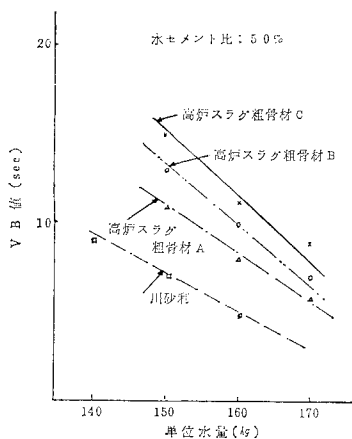


図-2 最適細骨材率における単位水量と VB 値との関係

の試験成績

熱強度減量	不溶残分	化学成分 (%)							合計	水硬率	比率係数			
		二酸化ケイ素	酸化アルミニウム	酸化鉄	酸化カルシウム	酸化マグネシウム	三酸化イオウ	活動係数			けい酸率	アルミナ比	石炭比	灰飽和度
ig. loss	in. sol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Total	H.M.	A.I.	S.M.	I.M.	I.S.D.	
0.4	0.1	22.3	5.2	3.0	65.0	1.2	2.2	99.4	2.08	4.3	2.7	1.7	0.90	

表-5 VB 値が 8 sec のときのコンクリートの単位水量

水セメント比 (%)	VB 値 (SEC)	高炉スラグ粗骨材コンクリート			川砂利コンクリート
		A (kg)	B (kg)	C (kg)	
40	8	160	163	170	150
50	8	160	166	170	146
60	8	157	160	170	143

より VB 値が 8 秒となるコンクリートの単位水量を比較すれば、表-5 のごとくなる。表-5 より、水セメント比 50% の場合高炉スラグ粗骨材コンクリートで川砂利コンクリートと同程度のコンシステンシーを得るためには、単位水量を高炉スラグ粗骨材 A で約 15 kg, B で約 20 kg, C で約 24 kg 増加しなければならない。これは高炉スラグ粗骨材の粒形が角ばっており、表面も粗であることによるものである。

(3) 高炉スラグ粗骨材がコンクリートの強度に及ぼす影響

粗骨材の最大寸法を 25 mm、水セメント比を 50%、60% の 2 種、それぞれスランブを 8 cm としたコンクリートについて、A, B および C の 3 種類の高炉スラグ粗骨材がコンクリートの強度に及ぼす影響を試験した。これらの粗骨材を用いた場合と川砂利を用いた場合とを比較検討した。コンクリートの圧縮供試体は、直径 10 cm、高さ 20 cm の円柱形、曲げ供試体は、15×15×53 cm の角柱形、引張供試体は、直径 15 cm、高さ 15 cm の円柱形であって、それぞれ JIS に準拠して試験を行った。

a) 圧縮強度

図-3 は、21°C 水中で養生した場合の各種粗骨材コンクリートにおける材令と圧縮強度との関係の 1 例を示したもので、表-6 は川砂利コンクリートに対する強度比を示したものである。表-6 より、高炉スラグ粗骨材コンクリートの圧縮強度は、水セメント比およびコンシステンシーを同じにした川砂利コンクリートの圧縮強度より材令 7 日~56 日のいずれの材令においても大きくなるが、大きくなる程度は水セメント比によって相違することが認められる。すなわち圧縮強度比は、水セメント比 60% の場合、高炉スラグ粗骨材 A で 150~131%、B および C で 127~111% であったが、水セメント比 50% とした場合には、3 種類の高炉スラグ粗骨材における差は僅少となり、いずれも 130~110% であり、い

表-6 川砂利コンクリートに対する強度比

水セメント比 (%)	粗骨材の種類	各材令における川砂利コンクリートに対する強度比 (%)												
		圧縮					曲げ			引張				
		7日	28日	56日	7日	28日	56日	7日	28日	56日				
50	川砂利	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	高炉スラグ粗骨材	A	122	平均 126	109	平均 97	平均 108	平均 116	平均 87	平均 89	平均 101	平均 103	平均 103	
		B	122	131	110	103	101	109	113	104	93	91	103	
		C	133	133	111	114	120	115	112	92	103	103		
	60	川砂利	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		高炉スラグ粗骨材	A	150	131	134	127	120	128	143	114	115	106	108
B			126	平均 112	平均 112	平均 123	平均 101	平均 110	平均 131	平均 114	平均 106	平均 108		
C			127	111	112	114	128	126	120	111	118	114	113	114

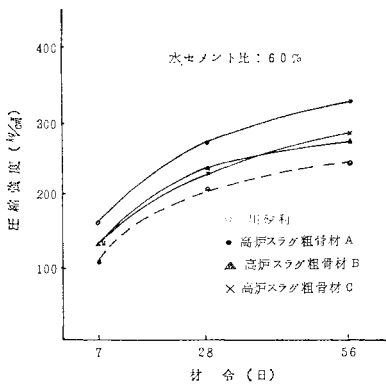
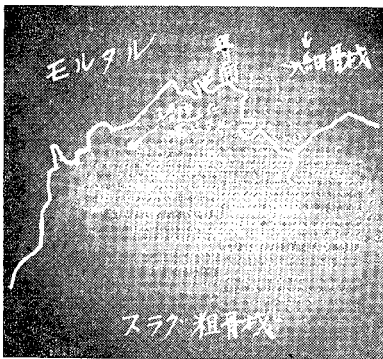


図-3 コンクリートの材令と圧縮強度との関係



(W/C 65%, 材令 56 日, スラグ粗骨材 C の場合)

写真-1 スラグ粗骨材粒界面部の検鏡結果の 1 例 (×160)

ずれの高炉スラグ粗骨材コンクリートも川砂利コンクリートより強度が大きくなるのが認められる。この理由は、高炉スラグ粗骨材の粒表面が粗であるため、写真-1 にみられるように、粒表面の凹部にモルタルが浸透し、高炉スラグ粗骨材界面との結合強度が増すことによって強度が大きくなったと考えられる。

また水セメント比が小さくなることによる各高炉スラグ粗骨材による差が僅少となったのは、高炉スラグ粗骨材粒の凹部にモルタルが浸透し、高炉スラグ粗骨材粒の

弱さをモルタルの強度が補っているものと考えられる。

しかし材令が経過するほど川砂利コンクリートの強度に近くなっている。吉田²⁾の報告によると、材令 7 日の圧縮強度試験では、高炉スラグ粗骨材粒は破壊せず、そのためセメントペーストと骨材の付着強度の大きい高炉スラグ粗骨材コンクリートの強度が大きくなるが、材令 56 日では、セメントペーストの強度がセメントの水和により大きくなり、高炉スラグ粗骨材自身が破壊するようになると述べており、本実験でも同様な結果が認められた。表-1 によれば、各高炉スラグ粗骨材のすりへり減量値ならびに破碎試験値は、川砂利の試験値の約 3 倍に達しており、3 種の高炉スラグ粗骨材粒の強さが川砂利粒の強さに比べて相当に劣ることが示されている。粗骨材の絶対容積を同一に保って比較した実験ではなく、コンクリート中における高炉スラグ粗骨材の絶対容積は、川砂利の絶対容積の約 90% であるので厳密な比較とはいえないが、骨材粒の強さにおいて劣る高炉スラグ粗骨材を用いたコンクリートの方が圧縮強度が大きくなった理由は前述のごとくであると考えられる。

b) 曲げ強度および引張強度

図-4, 5 には、各種粗骨材コンクリートにおける材令と曲げ強度、引張強度との関係の 1 例を示してある。表-6 によれば、高炉スラグ粗骨材コンクリートの曲げ強度は、水セメント比を同じにした川砂利コンクリートの曲げ強度より材令 7 日~56 日のいずれにおいても大きくなるが、大きくなる程度は、圧縮強度の場合と同様に水セメント比によって相違することが認められる。すなわち、曲げ強度比は、水セメント比 60% の場合には、材令 56 日で高炉スラグ粗骨材 A で 128%, B で 110%, C で 118% であったが、水セメント比 50% の場合には、材令 56 日で高炉スラグ粗骨材 A で 116%, B で 109%, C で 120% となり、水セメント比 50% の場合の方が曲げ強度比がわずかに小さくなり、3 種類の粗骨材による曲げ強度の差も小さくなっている。

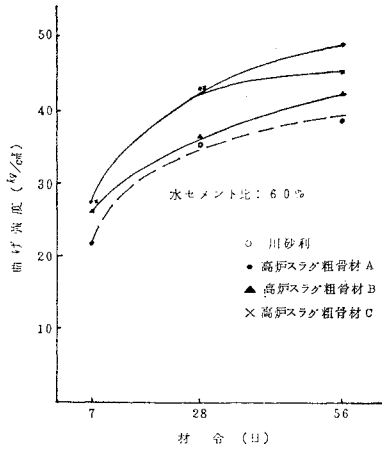


図-4 コンクリートの材令と曲げ強度との関係

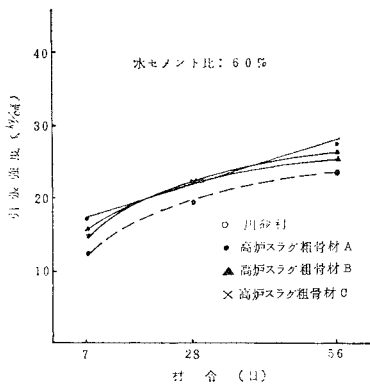


図-5 コンクリートの材令と引張強度との関係

曲げ試験後の供試体の破断面において、高炉スラグ粗骨材がほとんど破断されているのに高炉スラグ粗骨材を用いたコンクリートの方が曲げ強度が大きくなった理由も圧縮強度の場合と同様と考えられる。

表-6 によれば、引張強度は、曲げ強度の場合と若干異なっている。水セメント比 60% の場合には、川砂利

コンクリートより、いずれの材令においても大きくなるが、水セメント比 50% の場合には、川砂利コンクリートの引張強度と同等かやや小さくなっている。また3種の高炉スラグ粗骨材における強度差は、ほとんど認められず、試験後の供試体破断面の高炉スラグ粗骨材粒がすべて破断されており、粒自身の弱いことの影響が、圧縮強度、曲げ強度の場合より著しくなったことによるものである。

3. 高炉スラグ細骨材がコンクリートのコンシステンシー、強度に及ぼす影響

(1) 使用材料

高炉スラグ細骨材として、水で急冷した高炉スラグ砕砂と空気で急冷した高炉スラグ空砕砂を用いた。高炉スラグ細骨材は、ほとんどが破砕加工して細骨材とするため 0.15 mm ふるい以下の微粒分の量が多くなることが予想されるが、この微粒分を洗い去ることは環境を汚染する恐れがあるので不可能と思われる。また高炉スラグ細骨材の潜在水硬性を活用するためには、微粒分はある程度まで多いことが望ましい。

それで高炉スラグ砕砂を用い、各粒が 5~0.15 mm ふるいの範囲内に適当に分布するとともに相当量の微粒分をも含む A と粒の大部分が 1.2~0.15 mm ふるいの範囲内に分布している B を用いたコンクリート、および高炉スラグ空砕砂を用いたコンクリートについて試験し、川砂を用いた場合と比較検討した。

実験に用いた細骨材、粗骨材の物理的性質は、表-7、8 のごとくである。高炉スラグ砕砂の吸水率は、川砂の場合と大差ないので、いずれも湿潤状態とし、使用にあたっては、その表面水率を測定してコンクリートの練り混ぜ用水を補正した。高炉スラグ空砕砂も同様とした。

表-7 細骨材の物理的性質

細骨材の種類	表乾比重	吸水率 (%)	単位容積量 (kg/m³)	実積率 (%)	粒度 (ふるいにとどまるものの重量百分率) (mm)						0.15 mm ふるいを通過する百分率	粗粒率
					5.0	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15		
A	2.67	3.07	1547	59.7	3	23	43	55	67	81	19	2.72
B	2.67	2.00	1440	55.6	0	0	3	33	80	94	6	2.09
川砂 (1)	2.59	2.52	1632	64.6	0	5	22	51	81	96	4	2.55
空砕	2.90	0.54	1859	64.3	0	0.2	36.0	68.0	83.0	94.0	6.0	2.80
川砂 (2)	2.59	3.70	1596	63.9	0	0.2	36.0	68.0	83.0	94.0	6.0	2.80

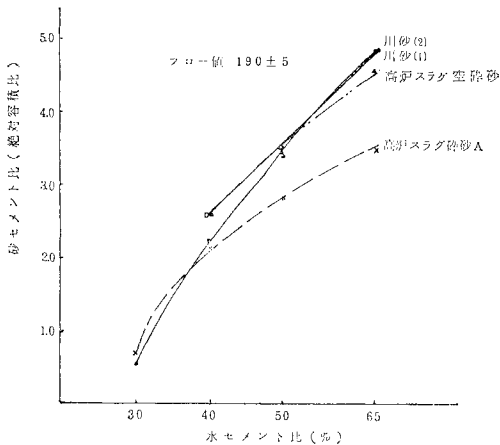
表-8 粗骨材の物理的性質

種類	表乾比重	吸水率 (%)	単位容積量 (kg/m³)	実積率 (%)	粒度 (残留重量百分率) (mm)			粗粒率	用いた試験内容
					15	10	5		
川砂利	2.67	1.11	1699	64.4	35	65	100	6.65	コンシステンシー試験
砕石 (1)	2.61	1.10	1483	57.4	35	65	100	6.65	コンクリート強度試験
砕石 (2)	2.67	1.37	1545	58.7	35	65	100	6.65	コンクリート強度試験

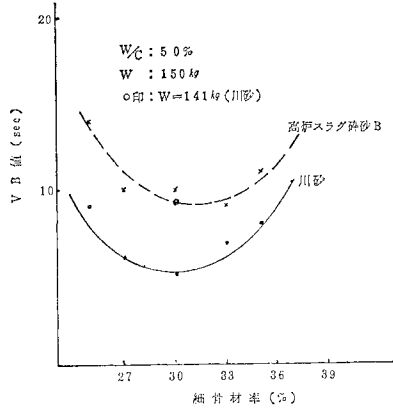
(2) 高炉スラグ細骨材がコンクリートのコンシステンシーに及ぼす影響

a) モルタルのコンシステンシー

表一7 の A の高炉スラグ砕砂と高炉スラグ空砕砂を使用したモルタルのコンシステンシーと、この高炉スラグ細骨材とまったく同一の粒度に調整した川砂 (1), (2) を使用したモルタルのコンシステンシーとを比較した。試験にあたっては、高炉スラグ砕砂を用いた場合、水セメント比を 30, 40, 50, 65% の 4 種、高炉スラグ空砕砂を用いた場合、水セメント比を 40, 50, 65% の 3 種に変え、それぞれの水セメント比において、 190 ± 5 のフロー値が得られるような配合を試的に求めた。水セメント比と砂セメント比 (絶対容積比) との関係は、図一6 のごとくであって、このコンシステンシーのモルタルを得るに必要な配合は、水セメント比 40% 以下の場合には、高炉スラグ細骨材でも川砂とほとんど同じであるが、水セメント比が 50% 以上の場合には、高炉スラグ細骨材モルタルにおいては、砂セメント比を川砂モルタルより小さくし、単位水量は、川砂モルタルより大きくしなければならないことが認められる。単位水量の増加率は、水セメント比 50% の場合、高炉スラグ砕砂使用で 4%、高炉スラグ空砕砂使用で 3%、水セメント比 65% の場合、高炉スラグ砕砂使用で 10%、高炉スラグ空砕砂使用で 4% である。水セメント比の増加に伴って高炉スラグ砕砂使用の場合に単位水量が大きくなる原因は、フローテーブルの落下に伴いモルタルからセメントペーストが分離し、高炉スラグ砕砂の粒が川砂の粒より角ばっており、粒表面も粗であるので、粒自身のかみ合いの影響があるためと考えられる。これに対して、高炉スラグ空砕砂を使用したモルタルは、水セメント比を大きくしてもそれほど単位水量が増加しないのは、高炉スラグ空砕砂粒のうち 0.6 mm 以上のものは、形状が球形



図一6 モルタルの水セメント比と砂セメント比との関係



図一7 コンクリートの細骨材率と VB 値との関係

に近い丸味を呈し、粒表面も滑らかであるためである。

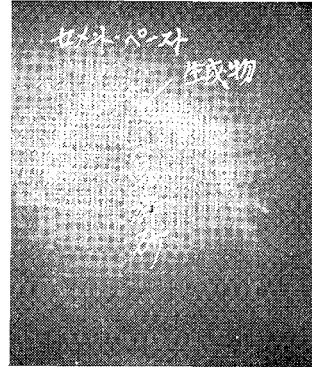
b) コンクリートのコンシステンシー

表一7 の B の高炉スラグ砕砂、表一8 の最大寸法 20 mm の川砂利を使用し、水セメント比を 50% とし、単位水量を 150 kg に保ちながら細骨材率を順次変化させたコンクリートの VB 試験を実施するとともに、これと同じ配合の川砂 (1) コンクリートについても同様の試験を行い、両種のコンクリートにおけるコンシステンシーを比較検討したのである。なお川砂 (1) は、その粒度が高炉スラグ砕砂 B とまったく同一となるよう調整したのを用いた。試験の結果は 図一7 のごとくである。図一7 より VB 値が最小となる細骨材率を最適細骨材率と考えると、高炉スラグ砕砂コンクリートにおけるその値は、川砂 (1) コンクリートの値より 2% 程度大きい値となっている。また、水セメント比を 50% に保ちながら川砂 (1) コンクリートの単位水量を変化させ、高炉スラグ砕砂コンクリートの場合と同じ VB 値を得るに必要な単位水量を試的に求めた結果は 141 kg となり、同じコンシステンシーを得るためには、高炉スラグ砕砂コンクリートの単位水量を川砂 (1) コンクリートより 6% 程度大きくすることが確かめられた。これは高炉スラグ砕砂の粒が川砂 (1) の粒より角ばっており、粒表面も粗であることによるものである。一方高炉スラグ空砕砂コンクリートにおいて表一8 の川砂利を用い水セメント比 65% で川砂 (2) コンクリートと同じコンシステンシーのコンクリートが得られる細骨材率、単位水量は、川砂 (2) コンクリートに比べて、それぞれ 3%, 5% の減となっている。これは、高炉スラグ空砕砂の粗粒分が丸味を呈し、粒表面も平滑であることによるものである。

(3) 高炉スラグ細骨材がコンクリートの強度に及ぼす影響

粗骨材に表一8 に示す砕石 (1), (2) を用い、細骨材

に表-7に示す高炉スラグ砕砂AおよびB, 高炉スラグ空砕砂ならびに川砂(1), (2)を用い, 高炉スラグ砕砂コンクリートは水セメント比を40, 50, 65%の3段階に変化させ, 高炉スラグ空砕砂コンクリートは水セメント比を65%についてそれぞれスランプ値が 8 ± 2 cmのコンクリートが得られるような配合を試的に定め, その配合のコンクリートについて強度を試験した. 圧縮供試体は, 直径10 cm, 高さ20 cmの円柱形, 引張供試体は, 直径15 cm, 高さ15 cmの円柱形, 曲げ供試体は, $10 \times 10 \times 40$ cmの角柱であって, それぞれJISに準じて材令28日, 91日および一部35週で試験を行った. それらの結果は表-9のごとくである. 表-9より高炉スラグ砕砂AおよびBのいずれのコンクリートでもその圧縮強度は水セメント比が50%より小さい場合には, 川砂(1)コンクリートに比べて各材令とも小さく約90%であるが, 水セメント比が65%の場合には, 110~130%となり, 川砂(1)コンクリートより大きい値が示された. 高炉スラグ空砕砂コンクリートでは, 各材令とも川砂(2)コンクリートより小さい値を示している. しかし長期材令になると川砂(2)コンクリートとほとんど同じ値となっている. 高炉スラグ砕砂コンクリートの引張強度も圧縮強度の場合と同様の傾向が示されている. 高炉スラグ空砕砂コンクリートの曲げ強度は, 材令28日までは川砂(2)コンクリートより小さいが, 材令91日以後では, 川砂(2)コンクリートより13%も強度が



(W/C 65%, 材令 91 日, スラグ砕砂 A の場合)

写真-2 スラグ砕砂粒界面部の検鏡結果の1例 (×160)

大きくなっている. これらの関係は, セメントペーストの強さと細骨材粒の強さとの関連, 粒形状や粒表面組織の相違および長期材令における高炉スラグ細骨材の潜在水硬性により, 写真-2にみられるように骨材粒とマトリックスとの界面に水和生成物ができ, 界面の組織が密になったためと考えられる.

各種細骨材の粒自身の強さを検討するため, 各細骨材をあらかじめ, 0.15~0.3 mm, 0.3~0.6 mm, 0.6~1.2 mm, 1.2~2.5 mmの粒径にふるい分けておき, 各粒径のものを鋼製円筒容器に一定量つめ, 荷重15 tを載荷し, その後もとの寸法のふるいでふるい, その通過分を重量百分率で示したものが図-8である. 図-8より高炉スラグ砕砂の粒自身の強さは, 粒径が0.6 mm以下のものは, 川砂粒よりわずかに小さいが, 0.6 mm以上のものは, 川砂粒に比べてかなり劣ることが認められる. 高炉スラグ空砕砂の粒自身の強さは, 川砂粒と大差のないものであることが認められる.

以上より, 水セメント比が小さい場合には, 粒の弱いことが潜在水硬性による強度増加を低減しているのである.

表-9 各種細骨材を使用したコンクリートの強度および強度比

細骨材の種類	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	スランプ値 (cm)	圧縮強度 (kg/cm ²)			引張強度 (kg/cm ²)	
				7日	28日	91日	28日	91日
A	40	45	8.7	340 (91)	411 (80)	497 (84)	31.6 (90)	37.0 (98)
	50	47	7.4	259 (95)	388 (96)	444 (93)	26.1 (96)	29.7 (102)
	65	51	6.2	196 (148)	258 (103)	384 (130)	21.8 (100)	28.2 (112)
B	40	40	9.5	329 (88)	453 (88)	523 (89)	33.2 (95)	33.8 (90)
	50	42	6.7	237 (86)	377 (93)	440 (92)	28.7 (105)	30.5 (104)
	65	42	8.9	154 (117)	273 (109)	364 (123)	23.0 (106)	29.4 (117)
川砂(1)	40	50	8.2	375 (100)	514 (100)	590 (100)	35.0 (100)	37.6 (100)
	50	55	6.0	274 (100)	405 (100)	476 (100)	27.3 (100)	29.2 (100)
	65	55	8.6	132 (100)	250 (100)	296 (100)	21.7 (100)	25.2 (100)

粗骨材は表-8の砕石(1), ()内強度比%

細骨材の種類	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	スランプ値 (cm)	圧縮強度 (kg/cm ²)				曲げ強度 (kg/cm ²)			
				7日	28日	91日	35週	7日	28日	91日	35週
空砕	65	40	8.0	92 (83)	162 (75)	280 (96)	337 (100)	22 (79)	41 (98)	54 (113)	63 (126)
川砂(2)	65	43	8.0	111 (100)	217 (100)	293 (100)	338 (100)	28 (100)	42 (100)	48 (100)	50 (100)

粗骨材は表-8の砕石(2), ()内強度比%

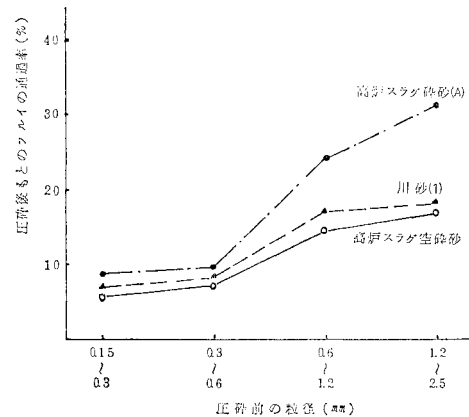


図-8 圧砕による粒径の変化

4. 高炉スラグ砕砂の微粒分がモルタル強度に及ぼす影響について

高炉スラグ細骨材における微粒分の含有量は、高炉スラグの品質、冷却方法、冷却後の破碎方法等によって相違するものであり、ある場合には、微粒分の量が相当に増加することも考えられるので、微粒分の含有量を種々に変化させて実験を行った。

表-10 の KK シリーズに示すように、0.15 mm ふるい以上の粒を川砂とし、0.15 mm ふるい未満の微粒分を高炉スラグ砕砂とした複合細骨材を用いたモルタルの強度を試験したのであるが、微粒分の含有率を 30, 20, 10, 5, 0% の 5 種に変化させたのである。モルタルは、水セメント比を 50% とし、フロー値が 190±5 となるような配合を定め、この配合のモルタルの曲げ強度ならびに圧縮強度を 4×4×16 cm の角柱供試体によって試験した。さらに表-10 の SK シリーズに示すように高炉スラグ砕砂だけを用いて 0.15 mm ふるい未満の微粒分を 30~0% の

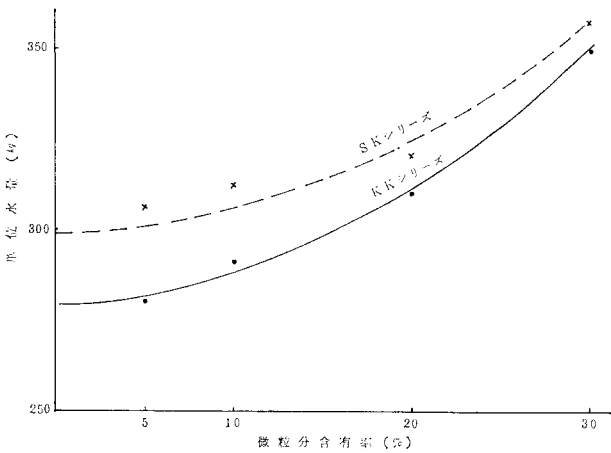


図-9 高炉スラグ微粒分含有率とモルタルの単位水量との関係

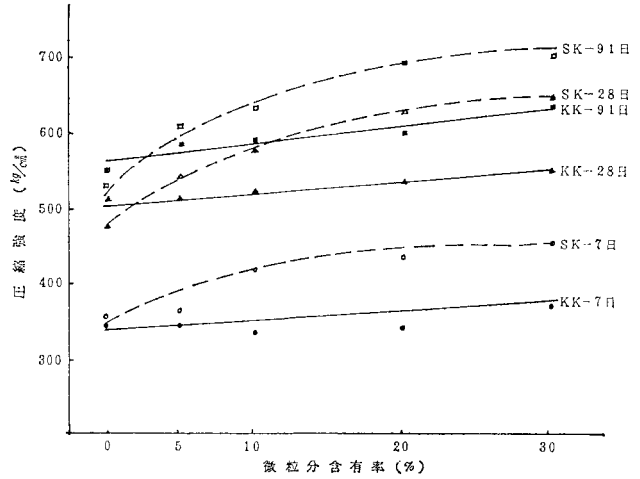


図-10 高炉スラグ微粒分含有率と圧縮強度との関係

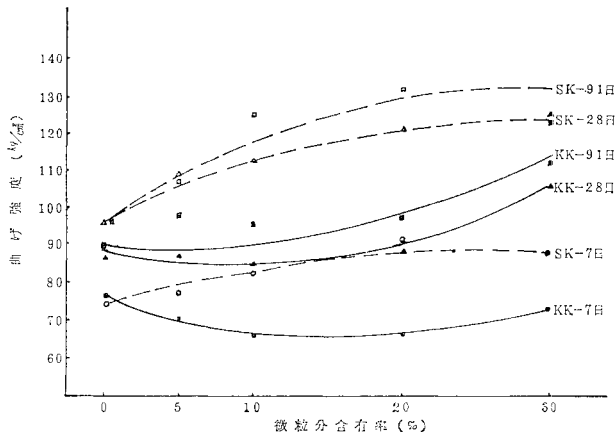
5 種に変化させた細骨材を用いてまったく同様な方法で強度を試験した。

微粒分の含有量が多くなると細骨材粒の表面を覆い、かつその空隙を満たすに必要なセメントペースト量が增加するので同一フロー値を得るための単位水量は増加する。単位水量と微粒分の含有率との関係を示したものが図-9 であって、単位水量の増加は、微粒分の含有率が 20% の場合は、約 10% であるが、微粒分の含有率が 30% となると約 25% に達することが示されている。KK シリーズに比べて SK シリーズの方が単位水量が大きくなっているのは、0.15 mm ふるい以上の粒を川砂でなく、高炉スラグ砕砂粒としたことによる影響と考えられる。

図-10 は、KK シリーズと SK シリーズにおける微粒分の含有率と圧縮強度との関係を示したものである。図-10 より、KK シリーズの圧縮強度は、材令 7 日では、微粒分の含有率が増加してもほとんど変わらないことが示されているが、材令 3 か月では、微粒分の増加に伴う強度の増加が示されている。すなわち含有率が 5~10% で 6~7%、含有率が 30% では 16% だけ強度増加をし

表-10 細骨材の物理的性質

シリーズ名	種類	表乾比重	吸水率 (%)	川砂・粒度 (ふるいにとどまるものの重量百分率) (mm)						高炉スラグ砕砂 (0.15 mm ふるいを通過する百分率)	粗粒率
				5.0	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15		
K K シリーズ	A	2.68	1.20	0	0	5	22	50	70	30	1.47
	B	2.66	1.30	0	0	20	40	60	80	20	2.00
	C	2.63	1.40	0	0	30	65	80	90	10	2.65
	D	2.60	1.60	0	0	33	70	85	95	5	2.83
	E	2.59	1.90	0	0	36	75	90	100	0	3.01
S K シリーズ	A	2.76	1.30	SKシリーズの粒度分布は、KKシリーズと同じですべて高炉スラグ砕砂である。							
	B	2.72	1.70								
	C	2.70	1.90								
	D	2.69	2.00								
	E	2.66	2.40								



図一11 高炉スラグ微粒子含有率と曲げ強度との関係

ている。これは、微粒子のもつ潜在水硬性と微粒子の表面組織等の影響と考えられる。また曲げ強度は図一11より材令28日以後で微粒子の含有率が30%となると強度の増加は、含有率0%に対して21~29%となっている。これも圧縮強度の場合と同様な影響と考えられる。

次に図一10よりSKシリーズの圧縮強度を検討すると、各材令とも微粒子の含有率が多くなるほど強度の増加が認められる。材令28日以後では、微粒子の含有率が20%となると強度の増加が著しくなり、微粒子の含有率0%に対して約30%の強度増加が示されている。

これは、高炉スラグ砕砂粒の大きさがモルタルの強度に及ぼす影響によるものである。粗粒の高炉スラグ砕砂は、図一8の結果からも粒自身が弱いので、微粒子の含有率0%の場合の強度が最も小さくなったのである。

微粒子の含有率が多くなるほど強度増加を示したのは、微粒子が0.6mm以上の粒自身の弱さが及ぼす悪影響を緩和するためと考えられる。

図一10により、KKシリーズとSKシリーズとを各微粒子の含有率によって比較すると、圧縮強度では、含有率が0%において各材令ともSKシリーズの方が小さい強度となっている。これは、高炉スラグ砕砂の粒が川砂粒に比べて脆弱であることによるものである。しかし微粒子の含有率が多くなるとSKシリーズの方が大きい強度となることが示されており、その強度差は、含有率20%で最大となっている。曲げ強度については、図一11より、微粒子の含有率が0%の場合でもSKシリーズの強度が材令7日を除いて大きく、含有率20%では、KKシリーズに比べて材令91日で約34%も大きいことが示されている。

5. 高炉スラグ砕砂の潜在水硬性

高炉スラグ微粉末の潜在水硬性に関しては、結晶学

的、化学的な研究が実施され、その結果に基づいて、これを高炉セメントの原料として用いるための研究が進められており、その塩基度、粉末度、混合量ならびにポルトランドセメントクリンカーの品質および粉末度等については、ある程度の成案が得られている。しかしこれをコンクリート用混和材として用いるための研究は、小林ら¹⁰⁾による研究のほか数も少なく、丸安ら⁹⁾が高炉スラグ粉末度をブレン値 $3800\text{ cm}^2/\text{g}$ のものをを用い、セメントとの置換率を0~90%に変化させたモルタルにおいて強度試験を材令3日~1年までに行っている。これによると高炉スラグ微粉末を混合したものは、材令が経過するにつれて、強さが大きくなり、高炉スラグの潜在水硬性は、材令3日から徐々に発揮され、材令28日以降の効果が大きいと述べている。本研究は、高炉スラグ砕砂の潜在水硬性を現象的に確認するため、高炉スラグ砕砂の種々の粒径のものを結合素材とみなし、これでセメントの一部と置き換えた場合のモルタルの強度についても実験を行い、高炉スラグ砕砂粒の潜在水硬性を検討したものである。

セメントの置換率は、重量比で50%および20%とし、水・セメント・スラグ重量比を50%、フロー値 190 ± 5 が得られる配合を定め、 $4 \times 4 \times 16\text{ cm}$ の角柱供試体で曲げ強度、圧縮強度の試験を行った。高炉スラグ砕砂をふるい分け、0.15mmふるい未満、0.15~0.3mm、0.3~0.6mm、0.6~1.2mm、1.2~2.5mmの5種のものとし、これらを用いて、それぞれセメントの一部を置き換えた。これらは、絶乾状態で使用した。なお比較のために、セメント試験用標準砂を粉砕した0.15mm未満および、0.15~0.3mmの粒径のものについても置換率、配合等を同一として試験を行った。またモルタルの細骨材としては、表一7に示した川砂(1)を使用した。試験結果は、表一11、図一12のごとくである。

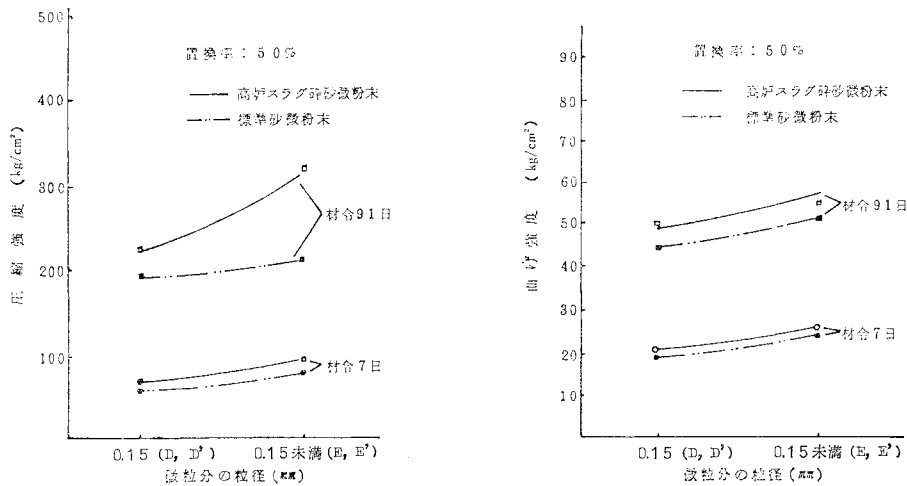
表一11より粒径0.3mm以上の高炉スラグ砕砂を置き換えたモルタルは、圧縮強度、曲げ強度において、各粒径での強度差はほとんどないが、粒径0.3mm未満の高炉スラグ砕砂を置き換えたモルタルの圧縮強度ならびに曲げ強度は、粒径が小さくなるほど増加する傾向が示されており、材令91日ほどその傾向が大である。すなわち高炉スラグ砕砂の潜在水硬性は、粒径が小さいほど発揮されると考えられる。

表一11、図一12より0.3mm未満の粒について高炉スラグ砕砂粉末をセメントの一部として置き換えたモルタルと、標準砂粉末をセメントの一部として置き換えたモルタルの強度について比較すると、置換率50%、置換率20%のいずれの場合も、各強度とも高炉スラグ砕

表一 各粒径の細骨材で置き換えたモルタルの強度

() 内強度比 %

種類	水セメント比 粒徑 (mm)	結合材比 $\frac{W}{C+S}$ (重量比)	材令 (日)	置換率 (%)														
				50			20			20								
				強度 (kg/cm ²)			圧縮強度			曲げ強度			圧縮強度			曲げ強度		
				7	28	91	7	28	91	7	28	91	7	28	91			
高炉スラグ	A	1.2~2.5	50	1.40 1.49	64	133	198	19.2	32.9	42.8	227	388	417	53.4	64.6	74.4		
	B	0.6~1.2	50	1.44 1.52	62	130	196	17.5	33.4	41.8	211	353	415	55.4	66.5	72.9		
	C	0.3~0.6	50	1.46 1.53	63	124	190	18.7	33.5	47.1	210	334	408	55.1	65.0	76.4		
A, B, C の平均値					63 (100)	129 (100)	195 (100)	18.5 (100)	33.3 (100)	43.9 (100)	216 (100)	358 (100)	413 (100)	53.3 (100)	65.4 (100)	74.6 (100)		
砕砂	D	0.15~0.3	50	1.51 1.55	65 (103)	148 (115)	224 (115)	20.7 (112)	35.6 (107)	50.8 (116)	212 (98)	386 (108)	417 (101)	52.7 (99)	68.1 (104)	76.9 (103)		
	E	0.15未満	50	1.51 1.55	94 (149)	197 (153)	323 (166)	25.8 (139)	50.2 (151)	54.9 (125)	238 (110)	389 (109)	475 (115)	49.8 (93)	73.2 (112)	80.1 (107)		
標準砂	D'	0.15~0.3	50	1.43 1.52	59 (94)	131 (102)	180 (92)	19.4 (105)	33.1 (99)	44.7 (102)	153 (71)	309 (86)	428 (104)	38.9 (73)	60.4 (92)	71.6 (96)		
	E'	0.15未満	50	1.44 1.51	80 (127)	152 (118)	200 (103)	25.4 (137)	38.3 (115)	48.4 (110)	166 (77)	337 (94)	441 (107)	42.4 (80)	64.4 (98)	72.6 (97)		
強度比 %	D	スラグモルタル			110	113	124	108	108	114	139	125	97	135	113	107		
	D'	標準砂モルタル																
強度比 %	E	スラグモルタル			116	130	166	102	131	113	143	115	108	117	114	110		
	E'	標準砂モルタル																



図一 置き換えた微粒分の粒径とモルタルの強度との関係

砂粉末を置き換えたモルタルの方が大きい値を示している。これらは、高炉スラグ砕砂の潜在水硬性によるものであるが、0.15 mm 未満の高炉スラグ微粉末のブレン値が 1240 cm²/g である粗い粉末であっても、これだけの効果が見られたことは、注目すべきである。

上述より高炉スラグ微粉末をコンクリート用混和材として利用し、セメントを節約することができると考えられる。高炉スラグ砕砂を粉砕した微粉末をコンクリート用混和材として利用するには、その高炉スラグ微粉末の粉末度、置換率がコンクリートの構造物に適した値となる

ように選定することが問題と考えられる。

そこで高炉スラグ微粉末を混和材としてコンクリートに用い実験を重ねた。すなわち表一12 に示すように化学成分がほとんど同じで、高炉スラグ微粉末の粉末度がブレン値で 2500 cm²/g および 4100 cm²/g と大差のある2種類のものを使用し、セメントの置換率を絶対容積比で 0, 30, 50, 70% の4種に変化させ、水・セメント・スラグ比を 60%, スランプ 8 cm のコンクリートが得られるような配合を定めた。使用した骨材は表一13 のものである。配合を決定するに先立って、コンク

表-12 高炉スラグ微粉末の化学成分

	比重	比表面積 ブレン法 (cm ² /g)	化 学 成 分 (%)							塩 基 度
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₂	MgO	ig. Loss	
高炉スラグ微粉末 (A)	2.82	2500	31.7	16.8	0.4	40.4	0.1	5.2	0.1	1.97
高炉スラグ微粉末 (B)	2.92	4100	33.4	15.5	0.6	40.8	0.1	7.0	0.1	1.90

表-13 骨材の物理試験結果

	比重	吸水率 (%)	単 位 容積質量 (kg/l)	実 績 率 (%)	粒度(ふるいにとどまるもの重量百分率)(mm)					粗 粒 率	
					20~10	10~5	5.0~2.5	2.5~1.2	1.2~0.6		0.6~0.3
砕 石	2.67	1.30	1.55	58.8	65	100					6.65
川 砂	2.59	3.70	1.60	63.9	3	16	56	84	98	100	2.57

リートのコンシステンシーについて実験を行った結果、高炉スラグ微粉末でセメントの一部を置き換えたコンクリートでは、置換率0%のコンクリートと同一スランプを得るための細骨材率は、粉末度、置換率が変わっても、ほぼ同じでこの場合43%程度であり、単位水量は高炉スラグ微粉末の粉末度がブレン値4100cm²/gでセメントの一部を置き換えたコンクリートでは、置換率0%のコンクリートに比べて単位水量を若干減らすことができるようであり、たとえば置換率70%の場合には、単位水量を5%程度減らすことができることが認められた。しかし高炉スラグ微粉末の粉末度2500cm²/gでセメントの一部を30%置き換えたコンクリートでは、置換率0%のコンクリートと同じスランプを得るための単位水量は、5%程度大きくなり、置換率50%ともなると、8%程度大きくなるということが認められた。

強度試験に用いたコンクリートの配合は、表-14のごとくである。この配合のコンクリートを20°C、40°C、5°Cの水中において所定の材令まで養生し、圧縮試験を行った。供試体は直径10cm、高さ20cmの円柱供試体である。その結果を示したものが図-13、14、15である。

図-13より高炉スラグ微粉末のブレン値が相違す

表-14 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの配合表

	置換率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)						スランプ (cm)	空気量 (%)
		水	セメント	スラグ 微粉末	細骨材	粗骨材 (mm)			
						20~10	10~5		
	0	185	308	0	771	684	369	8.2	2.5
高炉スラグ微粉末 (A)	30	195	235	90	785	643	346	8.0	2.5
	50	200	177	156	773	633	341	8.0	2.7
高炉スラグ微粉末 (B)	30	183	218	87	772	686	369	8.0	2.5
	50	180	156	144	775	689	370	8.0	2.0
	70	176	93	200	781	693	373	7.0	2.3

水-セメント・スラグ比60%; 高炉スラグ微粉末(A):2500cm²/g
高炉スラグ微粉末(B):4100cm²/g

る2種類のもので置き換えたコンクリートの強度について検討する。短期材令7日において、ブレン値4100cm²/gの高炉スラグ微粉末でセメントの一部を置き換えたコンクリートは、置換率30%で39%程度、置換率55%で49%、置換率70%で76%程度、置換率0%のコンクリートより強度が劣るのに対し、ブレン値2500cm²/gの高炉スラグ微粉末でセメントの一部を置き換えたコンクリートでは、置換率30%で46%、置換率50%では57%程度、置換率0%のコンクリートより強度が劣ることが認められた。以上材令7日における高炉スラグ微粉末のブレン値が相違することによる置換率0%のコンクリートに対する強度低下は、ブレン値の大きい高炉スラグ微粉末を用いた場合ほど小さいことが認められる。

材令6か月となると、ブレン値4100cm²/gの高炉スラグ微粉末でセメントの30%置き換えたコンクリートの強度は、置換率0%のコンクリートより6%程度大きく、セメントの50%置き換えたコンクリートの強度は2%程度大きく、セメントの70%を置き換えたコンクリートであっても置換率0%のコンクリート強度の85%の強度が得られる。一方、ブレン値2500cm²/gの高炉スラグ微粉末でセメントの30%を置き換えた場合の強度は、置換率0%のコンクリートの98%程度が得られ、50%を置き換えた場合でも83%の強度が得られる。

以上材令6か月の場合、高炉スラグ微粉末のブレン値2500cm²/gであっても、置換率0%のコンクリートに対する強度は、置換率30%程度まではほぼ同程度となる。これは、高炉スラグ微粉末のもつ潜在水硬性が材令が経過するほど顕著とな

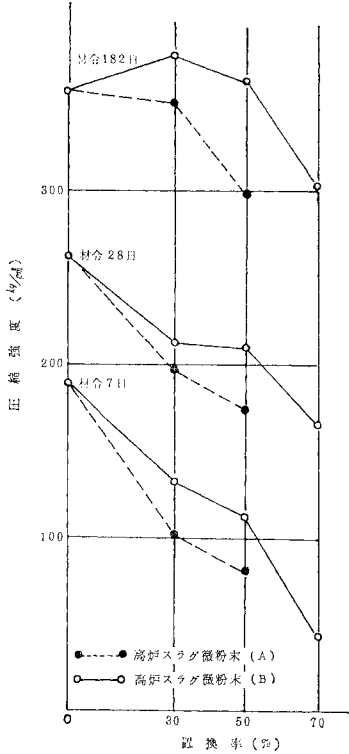


図-13 置換率と圧縮強度との関係
(養生温度 20°C の場合)

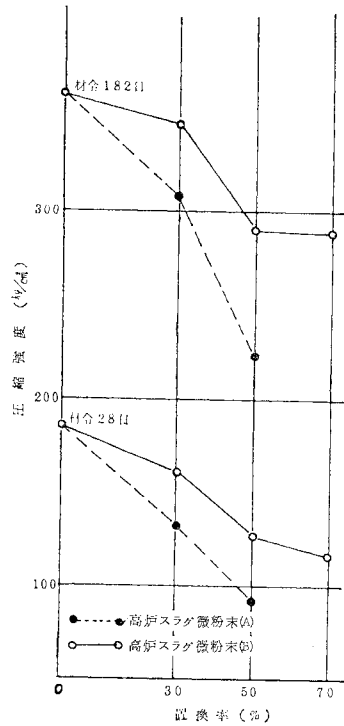


図-14 置換率と圧縮強度との関係
(養生温度 5°C の場合)

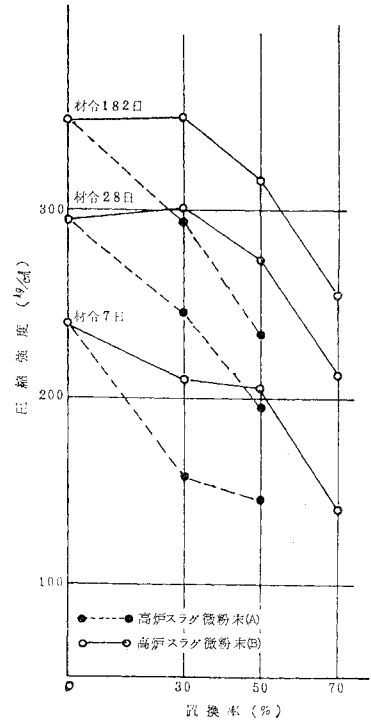


図-15 置換率と圧縮強度との関係
(養生温度 40°C の場合)

ることを示すものである。

上記実験結果より、高炉スラグ微粉末を混和材としてセメントの一部を置き換えて用いたコンクリートの強度は用いる高炉スラグ微粉末の粉末度、セメントとの置換率、材令により明らかに相違することが認められた。

また高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートの強度は、養生温度により相違することが予想される。一般にコンクリートを 40°C のような比較的高温度で養生した場合、水和反応の速度が早くなり、20°C で養生した場合に比べて初期より強度が大きくなるといわれている¹¹⁾。図-15 より高炉スラグ微粉末でセメントの一部を置き換えたコンクリートにおいても同様な傾向があり、材令 7 日においては置換率が大きい場合に特に著しいようである。たとえばブレン値 4 100 cm²/g の場合、置換率 0% のコンクリートでは、40°C で養生した場合の強度が 20°C で養生した場合の強度に比べて 26% 程度大きいものに対し、高炉スラグ微粉末でセメントの一部を 30% 置き換えたコンクリートでは、40°C で養生した場合の強度が 59% 程度大きくなり、置換率 50% のコンクリートでは、81% も大きくなることが認められた。

一方材令が 6 か月となると 40°C で養生した場合、20°C で養生した場合に比べてコンクリートの強度の増加

は小さくなり、高炉スラグ微粉末でセメントの一部を置き換えたコンクリートであっても、普通のコンクリートの場合と同様の傾向が認められた。これは、養生温度が高い場合に高炉スラグ微粉末のもつ潜在水硬性が早期の材令より発揮され、長期の材令となると潜在水硬性は鈍る傾向にあることを示唆するものである。

関分ら¹²⁾は、コンクリート用混和材としてフライアッシュを使用し、高温で養生したコンクリートの強度試験を行っている。これによると、フライアッシュでセメントの一部を置き換えたコンクリートは、高温養生がコンクリートの長期強度に及ぼす悪影響を緩和できると述べている。しかし高炉スラグ微粉末でセメントの一部を置き換えたコンクリートでは、高温で養生した場合長期材令となると強度の伸びが鈍くなるようである。この点フライアッシュを用いた場合と異なることが認められたのである。

また、セメントの一部を高炉スラグ微粉末で置き換えたコンクリートを 5°C のように低温度で養生した場合、図-14 より長期の材令となっても、置換率 0% のコンクリートより強度が著しく劣る。養生温度が低い場合には、セメントの水和速度は遅くなるのであるが、高炉スラグ微粉末のもつ潜在水硬性の発現も鈍くなるようである。

以上より、長期材令で強度が必要となるようなコンクリートの場合に高炉スラグ微粉末を混和材として用いるには、高炉スラグ微粉末の粉末度を $3000 \sim 3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、置換率を 50% 程度に選定すれば、所定の品質のコンクリートの製造も可能となり、すこぶる経済的であり、有利となる場合が多いと考えられる。また養生温度による影響が大きいことから、高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートでは、養生温度に十分な注意を払うことが必要である。

6. 結 論

わが国で現在生産されている代表的な数種の高炉スラグを用い、これらをコンクリート用粗骨材、細骨材ならびに混和材として利用する方法についての基礎的研究を行った。高炉スラグの品質は、溶鉱炉内の製鉄原料の品質および温度ならびに冷却方法および破砕処理方法等により相違し、複雑であるばかりでなく、実験に供した高炉スラグの数が限られているので、明確な結論を得るには至っていないが、実験の範囲内で次のことがいえると思われる。

(1) 高炉スラグ粗骨材の粒形は角ばり、粒の表面も粗であるので、これを用いて同一の粒度の川砂利を使用したコンクリートと同じコンシステンシーのコンクリートを得るためには、細骨材率を平均 3% 大きく、単位水量を平均 19 kg 大きくする必要のあることが示された。

また、高炉スラグ粗骨材粒の強度は弱く、高炉スラグ粗骨材の場合、すりへり減量試験値は、川砂利の場合の約 3 倍に達しているが、これがコンクリートの強度に及ぼす影響は意外に小さいことが示された。すなわち水セメント比を同一に保った場合について、高炉スラグ粗骨材コンクリートの圧縮、曲げ強度を川砂利コンクリートの場合と比較した結果、各材令において川砂利コンクリートより大きいことが示された。しかし強度が大きくなる程度は、水セメント比が大きい場合に著しくなり、水セメント比が 65% の場合には、材令 56 日で約 1.14 ~ 1.34 倍の強度に達した。これらは高炉スラグ粗骨材粒表面が粗であるためセメントペーストとの付着性状が良好であることの影響が粒の弱さの悪影響を補ったことによるものと思われる。

(2) 高炉スラグ砕砂は、粒形が角ばり、粒の表面が粗であるので、粒度をまったく同一とした川砂を用いたコンクリートと同じコンシステンシーのコンクリートを得るためには、細骨材率を約 2%、単位水量を約 6% 大きくしなければならぬことが示された。高炉スラグ空砕砂は、粗粒分が丸味を呈し、粒表面も平滑であるの

で、川砂コンクリートと同じコンシステンシーのコンクリートを得るために、細骨材率を 3%、単位水量を 5% 程度小さくすることができることが示された。

水セメント比を同一に保ったコンクリートについて、高炉スラグ砕砂を用いた場合と川砂を用いた場合との強度を比較すると、水セメント比が 50% のコンクリートでは、各材令とも川砂コンクリートと同等の強度となるが水セメント比が 65% の場合には、材令 3 か月において川砂コンクリートに比べて圧縮強度では約 25% 大きく、引張強度では約 15% 大きい強度となる。また、長期材令ほど細粒分における潜在水硬性によって強度が大きくなることが認められたのである。高炉スラグ空砕砂は、初期材令において川砂コンクリートより圧縮強度は小さい値を示しているが、長期材令になると川砂コンクリートとほとんど同じ値となる。曲げ強度は、材令 91 日で川砂コンクリートより 13% 大きい値が示されている。

また破砕加工を行う過程において、0.15 mm 未満の微粉分が高炉スラグ細骨材中にある程度多く含まれることも考えられるが、これは潜在水硬性を有する成分であるので問題はないと思われる。

(3) 高炉スラグ砕砂の潜在水硬性について、各粒の大きさとモルタルの強度との関連について試験を重ねた結果、0.3 mm 以上の粒を用いたモルタルにおいては、高炉スラグ砕砂粒が弱いことの悪影響が現われ、モルタルの強度は低くなるが、0.3 mm 未満の粒が多い場合、特に 0.15 mm 未満の微粉分が多いほど、強度が大きくなることが示された。これは、粒自身の弱さの影響が薄れるとともに、潜在水硬性が大きくなったことによるものである。

(4) 急冷高炉スラグ砕砂を粉砕した微粉末を混和材としてコンクリートに用い検討した結果、セメントの置換率が 30% 程度の場合には、スラグ微粉末の粉末度が、ブレン値で $2500 \text{ cm}^2/\text{g}$ 程度であっても、材令 6 か月において、微粉末を用いないコンクリートの強度の 90% 以上の値が得られ、ブレン値約 $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ のものでは、置換率を 70% に高めても微粉末を用いないコンクリートの強度の 85% 以上の強度が得られることが示された。これは、高炉スラグ微粉末がコンクリート用の混和材となり得ることを実証するものと思われる。高炉スラグ微粉末がコンクリートにおける長期強度の増進、化学的抵抗性の改善¹³⁾等に役立つことは明らかであり、これで適当量のセメントを置き換えれば、コンクリートの性質の向上と、経済性とを両立できるばかりでなく、硬化熱を緩和して、マスコンクリートに利用できると考えられるのである。

わが国の最大の課題である省資源、省エネルギーに貢

献するための高炉スラグの活用法は、コンクリート用混和材としての利用にあると思われるのであって、この方面の研究がきわめて重要であろう。

本研究を行うにあたっては、國分正胤博士、小林正几博士より終始ご懇厚なるご指導を賜った。また、原田修輔、北村政幸両氏には、実験に多大なるご援助をいただいた。ここに厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 中山道輔・山崎寛司・前川 淳・秋永嘉弘：粗骨材としての高炉鉾サイ砕石の利用に関する研究，セメント技術年報，pp. 266～271，1968.
- 2) 吉田弥智：高炉スラグを粗骨材として用いたコンクリートの強度に関する基礎研究，セメント・コンクリート，No. 260，pp. 20～26，1968.
- 3) 建設省土木研究所コンクリート研究室：河川砂利以外の骨材を使用した場合のコンクリートに関する研究，第22回建設省技術研究会報告，pp. 1～13，1969.
- 4) 吉田弥智・沼田晋一：高炉スラグ砕石のコンクリート骨材への利用に関する研究，セメント・コンクリート，No. 296，pp. 30～35，1971.
- 5) 林 正道：最近のコンクリート用骨材，セメント協会第22回コンクリート講習会テキスト，pp. 46～51.
- 6) 木村志雄：高炉スラグ砕石および水滓を骨材とするコンクリートの配合および強度について，セメント技術年報 XII，pp. 296～303，1958.
- 7) 村上武衛：高炉水砕砂を用いたコンクリートについて，セメント・コンクリート，No. 349，pp. 8～14，1976.
- 8) 仕入豊和・地濃茂雄：高炉水砕スラグのコンクリート用細骨材への適用性に関する研究，建築学会論文報告集第244号，pp. 1～12，1976.
- 9) 丸安隆和・小林一輔・坂本好史：高炉セメントコンクリートの研究，コンクリート・ライブラリー，第25号，1970.
- 10) 小林一輔・伊藤利治：高炉水砕スラグを混合材として用いたコンクリートの圧縮強度と乾燥収縮，第30回セメント技術大会講演要旨，pp. 86～87.
- 11) 吉田徳次郎：コンクリート及び鉄筋コンクリート施工方法，pp. 367.
- 12) 國分正胤・三浦一郎・高野俊介・杉木六郎：養生中の温度および温度がフライアッシュを用いたコンクリートの強度に及ぼす影響，土木学会論文報告集第71別冊，pp. 1～10，1960.
- 13) 小玉克巳・北村政幸：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの諸性質，セメント技術大会第32回講演要旨，pp. 172～173，1978.

(1978.2.15・受付)