

高炉スラグ碎石を用いたコンクリートの強度と凍結融解抵抗性について

前川静男* 岡村 武** 今井益隆***

まえがき

高炉スラグ碎石は、製鉄の際高炉中に生ずる鉄を空中で徐冷し、固化した後に破碎したものであって、道路用の碎石および主として製鉄所関係のコンクリート用碎石として使用されている。

近年河川砂利の不足にともない、今後コンクリート用粗骨材は砂利から碎石へ転換して行くと予想されるが、このような事態に備えて、建設省技術研究会では昭和41年度以来碎石コンクリートおよび高炉スラグ碎石を用いたコンクリートの調査を続けてきた。土木試験所でもこの調査の一部を担当したので、このうちの高炉スラグ碎石を用いたコンクリートに関する試験結果をとりまとめて報告する。

この試験は、高炉スラグをコンクリート用粗骨材として利用するため、高炉スラグ碎石の品質の現況と、高炉

スラグ碎石を用いたコンクリートの強度・凍結融解に対する抵抗性などについての資料を求める目的で実施したものである。

1 高炉スラグ碎石に関する試験

(1) 高炉スラグ碎石の品質

骨材試験およびコンクリート試験用として、高炉スラグ碎石工場の製品堆積場から試料を採取した。製品は、40~25mmと25~5mmの群に区分されているので、各群別別に採取し、試験に際してはJIS A 5005コンクリート用碎石4005の粒度範囲に入るように混合して用いた。

物理試験の結果を表一に示す。また、この試料を土木研究所に送付して化学分析を行なったので、その結果を表二に示す。

表一 高炉スラグ碎石の物理試験結果

比重	吸水量 (%)	単位容積重量 (kg/m ³)	洗い試験で失われる量 (%)	ロサンゼルス試験によるスリヘリ減量 (%)	硫酸ナトリウムによる安定試験の損失 (%)	粗粒率	フルイにとどまる重量の百分率						
							40	30	25	20	15	10	5
2.55	3.17	1530	0.41	30.7	0.5	7.27	0	20	35	50	59	79	98

表二 高炉スラグ碎石の化学分析試験結果 (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MnO	S	insol.	ig.loss	合計
30.9	18.0	39.0	5.0	0.6	0.4	1.2	0.1	4.0	0.3	99.5

(2) 高炉スラグ碎石の品質変動

高炉スラグ碎石は、その製造上の条件から品質の変動が大きいといわれている。粒子に密実なもの、多孔質のものが混在していることからみて、原料や配合が変わらない場合でもスラグの冷却速度、冷却時の天候などによって製品の品質が変動することが考えられる。そこで、室蘭開発建設部の協力を得て、同一工場における高炉スラグ碎石の品質変動状況を調査した。

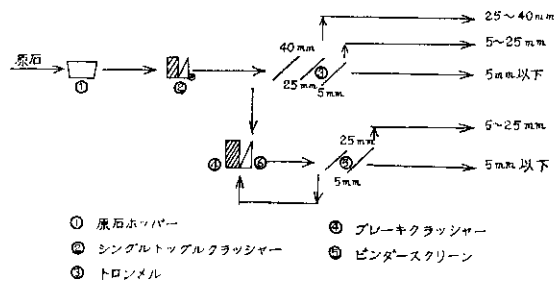
試料の採取は昭和43年5月から7月にかけて13回、1

週間に2回の割合で行なった。高炉スラグ碎石の製造工程は図一に示すとおりであり、試料は40~25mm、25~5mmの2群に分けて、各ホッパーからトラックに積み込まれる際にそれぞれ約70kgを採取した。

骨材の物理試験は室蘭開発建設部総合試験室で行なった。試料は40~25mm群を30%、25~5mm群を70%の比率で混合して試験を行なったが、4回目以降の10回については、40~25mm群、25~5mm群の各群ごとのフルイ分け試験も行なった。

*コンクリート研究室長 **同室主任研究員 ***同室

試験結果は表—3に示す。



図—1 高炉スラグ碎石の製造工程

(3) 結果の考察

イ 単位容積重量を13の試料について測定した結果、平均 1546 kg/m^3 であった。土木学会コンクリート標準示方書には、高炉スラグ碎石の単位容積重量は 1100 kg/m^3 以上でなければならないと規定されているが、今回の試験値はいずれもこの規定値を上まわっていた。

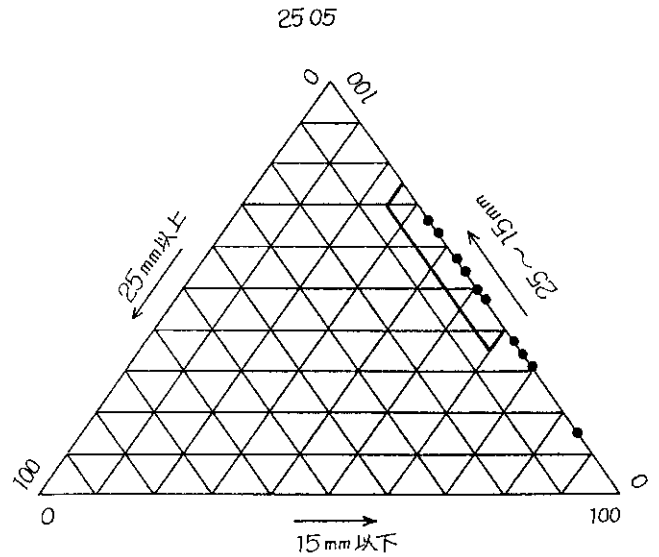
ロ 実積率は平均62.5%であった。この値は普通の碎石に比べて大きい。これには表—3からわかるように、過小粒 (undersize) が多く含まれていることによる影響が大きいと思われる。表—1のようにフルイを通した場合には、5mm以下は2%となり、実積率は59.8%となった。

ハ 比重は最大2.58、最小2.34、吸水量は最大5.86%、最小2.92%であり、変動が大きかった。これは製造の過程でスラグ中に生ずる空げきの相違、およびそのような空げきの多い粒子の表面乾燥飽水状態を求める際の試験上の誤差などによるものと思われる。

ニ 洗い試験で失なわれる量は平均2.9%であった。コンクリート試験に用いた高炉スラグ碎石では、表—1のとおり0.41%と小さかったが、これは室外に積み置き中あるいはフルイ分け再混合の作業中に微粉末が失なわれたことによる。

ホ フルイ分け試験の結果40~25mm群および25~5mm群とも過小粒が多く含まれ、それぞれ38%および12%であった。この工場ではコンクリート用骨材40~5mm級としては40~25mm群と25~5mm群を適宜混合して出荷している。実際の製品の粒度はこの調査ではわからなかった。25~5mm級はこのまま出荷されているので、この粒度分布を図示すると図—2のとおりである。JIS A 5005コンクリート用碎石の粒度範囲をはずれるものがあり、また前記のとおり過小粒が多いので使用に際して留意しなければならない。

ヘ JIS A 5002構造用軽量コンクリート骨材の規定によると、膨張スラグの化学成分の許容値として $\text{CaO} 50\%$ 以下、 $\text{SO}_3 0.3\%$ 以下という値が示されている。 SO_3 は



図—2 高炉スラグ碎石 (25~5mm) の粒度
試料数 10
太枠内は JIS A 5005 碎石 2505 の粒度範囲を示す。

新しい試料に多く含まれていても、水溶性の成分からなるため、雨にさらすか、水洗いするかした後は非常に少なくなると報告されている¹⁾。このことから、本実験に用いた高炉スラグ碎石の SO_3 は0.4%で規定よりやや多かったが、使用の際には通常室外放置の期間があるので、この間に SO_3 を減少させることができると考えられる。その他の化学成分は適当なものといえる。

2 高炉スラグ碎石を用いたコンクリートに関する試験

表—1に示した高炉スラグ碎石を用い、コンクリートのコンシステンシー試験、圧縮強度および凍結融解試験を実施した。なお、比較のために岩石碎石および川砂利を用いたコンクリートの試験も行なった。試験は2回にわけて行ない、1回目は岩石碎石、川砂利を用いたコンクリート (以下碎石コンクリート、砂利コンクリートという) について、2回目は高炉スラグ碎石を用いたコンクリート (以下スラグコンクリートという) と砂利コンクリートについて試験を行なった。

(1) 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメント、細骨材は、苫小牧市錦岡海岸砂であり、これらの物理試験の結果は表—4、5に示す。

また、コンクリート試験で比較のために用いた碎石と砂利の試験結果を表—6に示す。

なお、粗骨材は、高炉スラグ碎石、岩石碎石、川砂利とも40~30mm、30~20mm、20~10mm、10~5mmの4群にフルイ分け、各々25:25:30:20の割合で再混合して使用したが、実験2で再混合した試料をフルイ分け試験し

表-3 高炉スラグ碎石の品質バラツキ試験結果

回数	実積率 (%)	スリヘリ減量 (%)	洗い試験で失われる量 (%)	比重	吸水量 (%)	硫酸ナトリウムによる安定性試験の損失量 (%)	粗粒率	フルイを通					
								40~25mm30% : 25~3mm70%混合					
								40	25	20	15	10	5
1	63.5	35	3.52	2.49	4.10	2.82	6.91	100	82	72	64	27	10
2	66.5	33	3.77	2.47	5.24	0.67	6.59	100	84	71	61	52	18
3	63.9	30	2.54	2.58	5.54	2.35	6.91	100	86	71	53	24	14
4	63.9	31	2.03	2.49	5.13	0.89	6.92	100	81	69	56	25	14
5	59.2	33	2.44	2.46	3.74	0.50	6.92	100	80	68	53	28	12
6	58.7	32	1.81	2.46	2.92	0.57	7.35	100	84	57	38	12	6
7	61.9	33	3.54	2.41	3.00	1.22	7.19	100	84	67	50	10	4
8	63.5	32	2.11	2.50	3.92	0.51	7.02	100	84	66	52	23	8
9	64.3	35	3.07	2.48	3.30	1.05	6.98	100	84	62	51	28	12
10	65.7	35	3.30	2.34	5.86	1.13	7.03	100	82	49	40	29	19
11	57.6	32	0.95	2.55	3.72	1.04	7.04	100	87	61	45	20	15
12	59.7	37	5.64	2.43	3.55	0.44	7.46	100	69	35	17	13	6
13	64.6	36	2.38	2.42	5.27	0.95	7.18	100	73	46	32	21	15
平均値	62.5			2.47	4.25		7.04						
標準偏差	2.6			0.06	0.98		0.21						

る重量の百分率												
40mm ~ 25mm						25mm ~ 5mm						
40	25	20	15	10	5	25	20	15	10	5	2.5	
100	21	2	0			100	88	63	25	12	9	
100	17	2	1	0		100	63	37	11	6	5	
100	41	8	4	2	0	100	67	43	12	5	3	
100	19	6	2	0		100	94	85	39	22	14	
100	37	19	11	3	2	100	86	69	32	15	8	
100	52	10	5	3	0	100	83	66	30	14	8	
100	43	19	13	9	8	100	56	34	21	13	5	
100	48	21	15	8	7	100	70	52	21	11	8	
100	37	6	3	1	0	100	63	50	25	13	9	
100	63	17	8	3	2	100	69	45	11	4	1	

表-4 セメント試験成績表

	製造会社名	比重	粉末度		凝結			安定性	フロー値	強サ					
			比表面積 (cm ² /g)	88μ残分 (%)	水量 (%)	始発 (時・分)	終結 (時・分)			曲ゲ強サ(kg/cm ²)			圧縮強サ(kg/cm ²)		
										3日	7日	28日	3日	7日	28日
実験1	日本セメント	3.16	3050	2.3	26.6	2-30	3-47	良	230	28.9	47.4	73.6	123	230	406
実験2		3.16	3100	2.8	26.5	2-30	3-45	良	234	35.9	54.6	72.8	156	242	418

表-5 細骨材試験結果

	産地	比重	吸水量 (%)	単位容積 重量 (kg/m ³)	洗い試験 で失われ る量 (%)	有機不 純物	硫酸ナトリウム による安定性試 験の損失量 (%)	粗粒率	フルイにとどまる重量の 百分率 (%)					
									5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15
									実験1	苫小牧市	2.76	1.12	1890	0.72
実験2	錦岡海岸	2.75	1.00	1830	0.30	合格	0.8	2.53	0	5	21	49	80	98

表-6 粗骨材試験結果

	名称	産地	岩質	比重	吸水量 (%)	単位容積 重量 (kg/m ³)	実積率 (%)	洗い試験 で失われ る量 (%)	ロサンゼルス 試験によるス リヘリ減 量 (%)	硫酸ナトリ ウムによる 安定性試験 の損失量 (%)	粗粒 率	フルイにとどまる 重量の百分率 (%)						
												40	30	25	20	15	10	5
												実験1	砕石	A 虻田郡京極町 字春日	玄武岩	2.70	1.69	1670
B 古宇郡神恵内 村字清川	変朽 安山岩	2.52	4.39	1480	58.7	1.14	13.9	17.3										
砂利A	C 寿都郡寿都町 矢追町丸山	流紋岩	2.59	2.18	1580	61.0	0.81	15.9	2.7									
	静内郡静内町		2.74	0.93	1820	66.4	0.02	17.8	4.1									
実験2	砂利B	静内川		2.73	1.19	1850	67.9	0	16.9	6.3	7.24	0	19	35	47	53	78	99

たところ、表-1、表-6に示す粒度となり、当初定め
た粒度とはいくぶん相違していた。

(2) コンクリートのコンシステンシー試験

スラグコンクリート、砕石コンクリートおよび砂利コ
ンクリートについてスランブ 3~15cmの範囲でスランブ
と単位水量との関係を求めた。

試験結果は表-7、図-3に示す。

(3) コンクリートの圧縮強度試験

セメント水比2.0, 1.7, 1.4の無空気コンクリートで、
スランブ 7cmとなるよう配合設計を行ない、JIS A1132
にしたがって供試体を作製した。供試体はφ15×30cm円
柱体で、4個1組とし、材令28日でJIS A1108にしたが
って圧縮強度試験を実施した。

試験結果は表-8に示す。

また、セメント水比と圧縮強度との関係は図-4、単位
セメント量と圧縮強度との関係は図-5に示す。

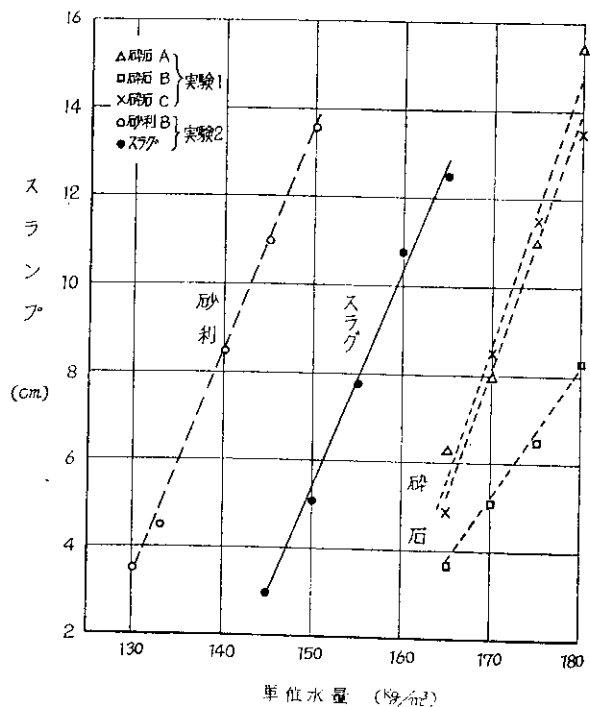


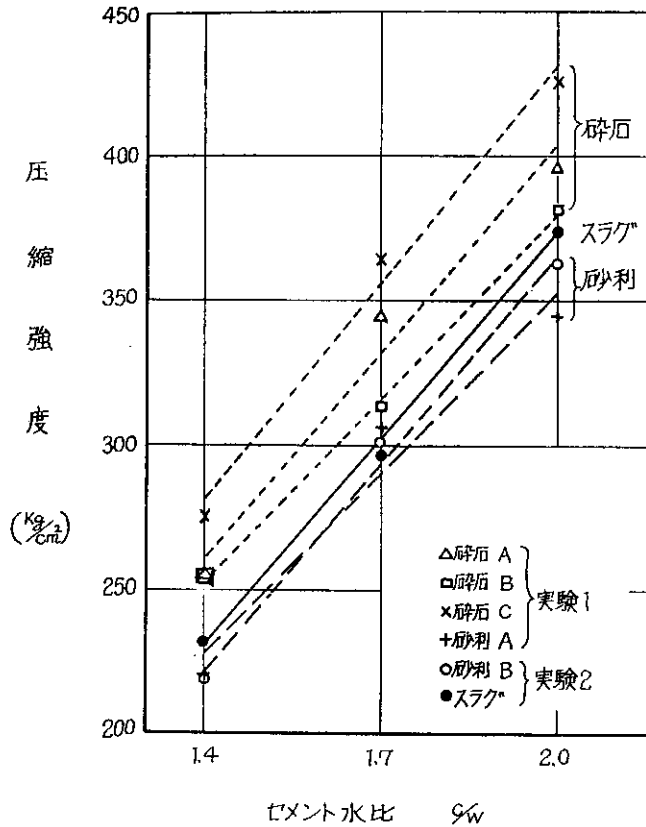
図-3 単位水量とスランブの関係

表一7 コンシステンシー試験結果

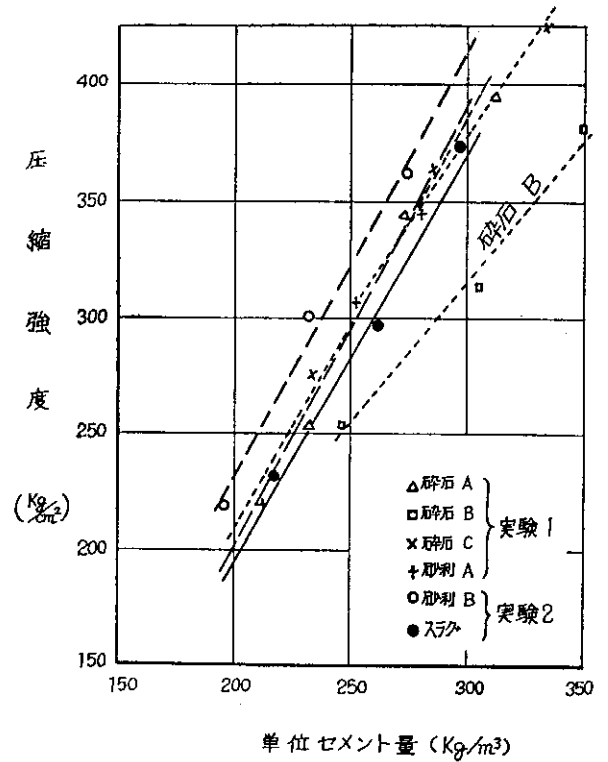
区分	セメント 水 比	粗骨材の 最大寸法 (mm)	配 合				単位粗骨 材容積	単位細 骨材量 (kg)	単位粗 骨材量 (kg)	コンクリ ート温度 (℃)	備 考
			スランブ (cm)	単位 水量 (kg)	単位セメ ント量 (kg)	単位粗骨 材容積					
実 験 1	砕 石 A	1.7	40	6.3	165	280.5	0.70	864	1169	20.0	細骨材の粗粒率 2.83 粗骨材の実積率 61.9%
				8.0	170	289		845		20.0	
				11.0	175	297.5		822		21.0	
				15.5	180	306		800		21.0	
	砕 石 B	1.7	40	3.7	165	280.5	0.70	922	1037	20.0	細骨材の粗粒率 2.83 粘骨材の実積率 58.7%
				5.1	170	289		903		20.0	
				6.5	175	297.5		880		19.5	
				8.3	180	306		858		20.0	
	砕 石 C	1.7	40	4.9	165	280.5	0.70	883	1104	20.0	細骨材の粗粒率 2.83 粗骨材の実積率 61.0%
				8.5	170	289		864		21.0	
				11.5	175	297.5		842		21.0	
				13.5	180	306		820		20.0	
実 験 2	ス ラ グ	1.7	40	3.0	145	246.5	0.727	938	1112	22.0	細骨材の粗粒率 2.53 粗骨材の実積率 59.8%
				5.1	150	255		916		21.0	
				7.8	155	263.5		897		21.0	
				10.8	160	272		875		21.0	
				12.5	165	280.5		853		21.0	
	砂 利 B	1.7	40	3.5	130	221	0.747	809	1382	21.0	細骨材の粗粒率 2.53 粘骨材の実積率 67.9%
				4.5	133	226		795		22.0	
				8.5	140	238		767		21.0	
				11.0	145	247		745		21.0	
				13.6	150	255		723		19.5	

表—8 強度試験結果

区分	セメント水比 C/W	配合					スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (℃)	圧縮強度 φ28 (4個の平均) (kg/cm ²)	
		単位水量 (kg)	単位セメント量 (kg)	単位粗骨材 容積	単位細骨材量 (kg)	単位粗骨材量 (kg)					
実験 1	碎石A	2.0	156	312	0.70	861	1169	6.8	23.0	396	
		1.7	160	272		886		7.1	22.0	346	
		1.4	165	231		908		7.2	22.0	254	
	碎石B	2.0	175	350	0.70	834	1037	7.3	22.0	381	
		1.7	179	304		864		7.6	22.0	314	
		1.4	176	246		922		6.1	23.5	254	
	碎石C	2.0	167	334	0.70	831	1104	7.1	23.0	426	
		1.7	168	286		869		6.7	23.0	365	
		1.4	167	234		919		6.2	23.0	276	
	砂利A	2.0	140	280	0.73	792	1326	6.5	20.5	345	
		1.7	148	252		795		7.4	22.0	306	
		1.4	152	213		820		6.8	22.0	220	
実験 2	スラグ	2.0	149	298	0.727	883	1112	7.5	2.0	20.0	374
		1.7	154	262		899		7.3	2.0	20.0	297
		1.4	156	218		932		7.1	2.0	19.5	232
	砂利B	2.0	137	274	0.747	743	1382	7.1	1.5	20.7	363
		1.7	136	231		784		7.0	1.9	20.7	301
		1.4	140	196		803		6.8	2.3	20.5	219



図一四 セメント水比と圧縮強度の関係



図一五 単位セメント量と圧縮強度の関係

(4) コンクリートの凍結融解試験

単位セメント量 300kg/m^3 、スランブ 7.5cm 、空気量 4.5% とした高炉スラグ碎石を用いたAEコンクリートについてASTM C 290に準じて凍結融解試験を実施した。

すなわち試験は、供試体の大きさを $10 \times 10 \times 42\text{cm}$ のハリ型とし、周囲に厚さ約 3mm の水または氷を保ち、供試

体中心部の温度が凍結時 -18°C 、融解時 $+4^\circ\text{C}$ となるよう1日6~8回の速度で凍結融解を300回繰返した。供試体は3個1組とし、凍結融解は材令14日から開始した。

コンクリートの配合は表一9に示す。実験2では比較のための砂利、碎石コンクリートの凍結融解試験を行なわなかったが、この実験と同産地の細骨材を用いて行なった他の実験の結果があるのであわせて記載する。

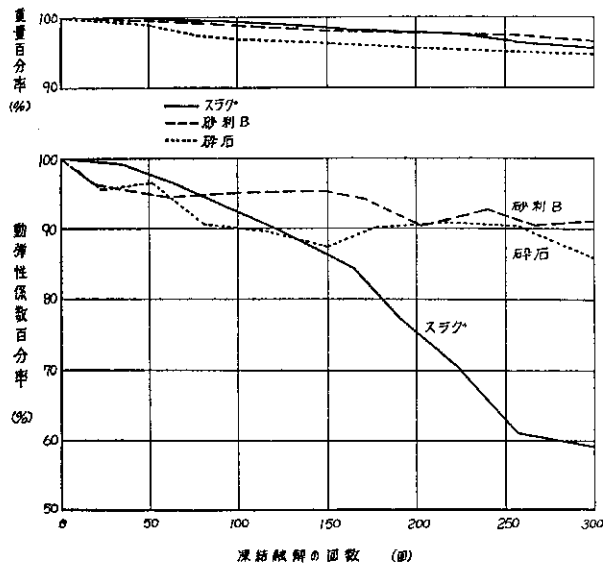
表一9 コンクリートの凍結融解試験配合表

区分	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 w/c (%)	単位水量 W (kg)	単位セメント量 C (kg)	単位粗骨材容積	単位細骨材量 S (kg)	単位粗骨材量 G (kg)	混和剤量 Vinsol (cc)	コンクリート温度 ($^\circ\text{C}$)	備考
スラグ	40	7.3	4.5	43.3	130	300	0.727	809	1112	63	20.0	
砂利B	40	7.6	3.9	58.8	129	219	0.727	751	1345	90	20.3	
碎石	40	7.5	4.2	58.8	155	264	0.707	781	1137	66	19.0	比重2.60吸水量1.00岩質花崗岩

凍結融解の進行にともなうコンクリートの損傷程度はJIS A 1127に規定している共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数を測定するとともに、供試体の重量、供試体の外観などの各変化によって判定した。

凍結融解の回数と重量百分率、および動弾性係数百分

率の関係は図一6に、また、スラグコンクリート供試体の外観は写真一1に示すとおりである。スラグコンクリートについてASTM C 290に従って求めた耐久性指数 (Durability Factor) および凍結融解試験終了時と開始時の強度を表一10に示す。



図一六 凍結融解の回数と重量百分率ならびに動弾性係数百分率

表一〇 凍結融解の繰返しによる強度の減少と耐久性指数(スラグコンクリート)

供試体 記号	試験開始時 (σ_{14})の		試験終了時 (凍融)の (300回)		耐久性 指数
	曲げ強度 (kg/cm ²)	折片による 圧縮強度 (kg/cm ²)	曲げ強度 (kg/cm ²)	折片による 圧縮強度 (kg/cm ²)	
1	53.7	405	6.9	115	59
2	58.5	375	4.5	152	60
3	54.6	384	7.5	147	59
平均	55.6	388	6.3	138	59

(5)結果の考察

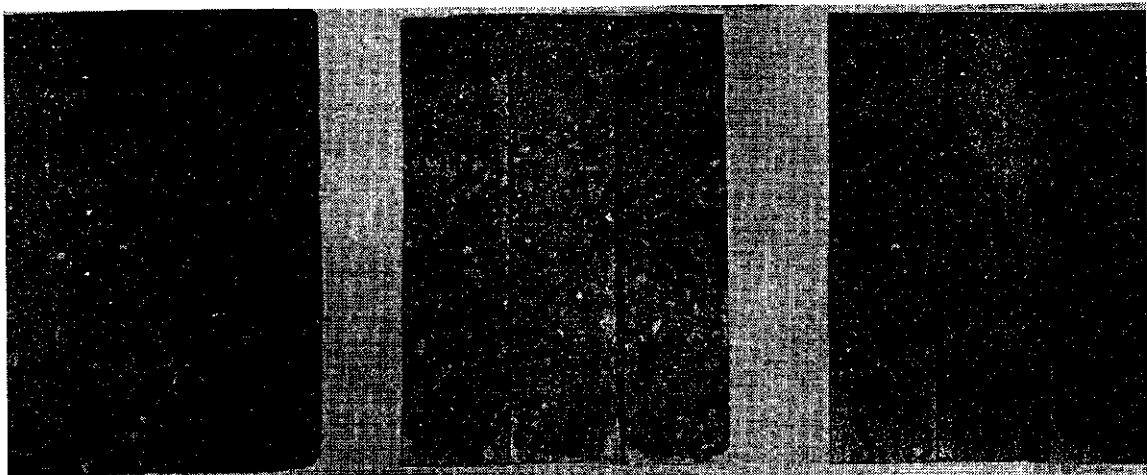
同一コンシステンシーのコンクリートをつくる場合の単位水量は、スラグコンクリートでは砕石コンクリートよりも12~24kg少なく、砂利コンクリートよりも16kg多かった。第21回建設省技術研究発表会「河川砂利以

凍結融解の回数(回)

65

182

300



写真一 凍結融解による外観変化状況

外の骨材を使用した場合のコンクリートに関する研究」によれば、粗骨材の最大寸法40mm、スランプ7cmのコンクリートをつくる際の単位水量の平均は、砕石で167kg、砂利では150kgであり、両者の差は17kgあったと報告されている。本実験の砕石A、砕石Cは道内では平均的な品質であり、砂利はすぐれた品質のもののみなされるので、上記の事柄を勘案して、このスラグコンクリートは砕石コンクリートよりはむしろ普通の品質の砂利コンクリートに近いコンシステンシーをもつものと考えられる。

これは、用いた高炉スラグ砕石が一般の岩石砕石に比較して角ばりが少なく、かつ、扁平なものが少なかった

ことに起因すると考えられる。

同一セメント水比における圧縮強度を比較すると、スラグコンクリートは砕石コンクリートに比べ平均30kg/cm²強度が低かったが、砂利コンクリートとは同程度か、いくぶん高い強度を示した。

単位セメント量一定の場合の強度は、図一五のとおりスラグコンクリートは砂利コンクリートより平均20kg/cm²低かったが、砕石A、Cを用いたコンクリートとはほぼ同程度であった。

一般に、単位セメント量を同一とすると、砕石コンクリートは砂利コンクリートと同程度の圧縮強度が得られるといわれているが、同様なことがスラグコンクリート

についてもいえるようである。

砕石Bは変朽安山岩で、とくに品質の悪い砕石であり一般の基準とはならない。

ハ 凍結融解試験の結果、[スラグコンクリート (w/c=43.3%) の耐久性指数は59, であり水セメント比の大きい砂利B, 砕石を用いたコンクリート (w/c=58.8%) の耐久性指数91, 86に対して低い値を示した。

また、凍結融解300回終了時と開始時の強度比も、曲げ0.11, 圧縮0.36であり、良好な結果ではなかった。

3 む す び

高炉スラグ砕石の品質の現況と、高炉スラグ砕石を用いたコンクリートの性質について検討したが、試験結果を要約すると次のとおりである。

(1) 高炉スラグ砕石は、岩石砕石に比べて比重はいくぶん小さく、吸水量、すりへり減量、洗い試験で失なわれる量は、かなり大きかった。高炉スラグ砕石は、原料の成分あるいは冷却方法などによって、その品質は影響を受けると考えられ、同一工場の製品についても比重、吸水量などに大きな変動が認められた。

(2) 同一コンシステンシーを得るための単位水量は、スラグコンクリートは砕石コンクリートに比較して12~24kg/m³少なく、普通品質の砂利コンクリートに近いものと考えられる。

(3) スラグコンクリートの圧縮強度は、同一水セメント比では砕石コンクリートに比べ約30kg/cm²低かった。同一量の単位セメントを用いると、スラグコンクリート、砕石コンクリート、砂利コンクリートとも同程度の圧縮強度が得られると思われる。

(4) スラグコンクリートの凍結融解試験の結果、標準的な品質をもつ砂利コンクリートあるいは砕石コンクリートに比較して、その抵抗性はかなり低かった。

以上のことから、高炉スラグ砕石は、経済的利点が認められる場合にはコンクリート用骨材として使用できる

が、骨材の品質のパラツキが大きいこと、コンクリートの凍結融解に対する抵抗性が低いことなどから、厳しい気象作用をうける場所の重要な構造物に用いることは避けたほうがよい。

この実験でとり上げた骨材の種類は限られたものであり、また、調査直後に対象とした高炉スラグ砕石工場は設備を全面的に改造したため、高炉スラグ砕石の品質の現況を的確に述べるができなかったが、参考文献5)に、この試験結果の一部も含めた全国の共同試験について報告されているので、これにより高炉スラグ砕石の概況を知ることができる。

終わりに、この試験実施にあたり、室蘭開発建設部総合試験室の諸氏、同部材料試験係長故白井加一氏に協力を頂いたので謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 木村恵雄, 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, 昭和33年
- 2) 栗山, 小林, 千葉, 高炉スラグ砕石のコンクリート骨材への利用(その2), セメントコンクリート, No.129, 昭和32年11月
- 3) 江口, 中村, 高炉スラグ砕石のコンクリート骨材への利用(その1) セメントコンクリート No.129, 昭和32年11月
- 4) 林 正道, 鉍滓を用いたコンクリートの強度・凍結融解試験について, 第18回土木学会年次学術講演会講演概要, 昭和38年
- 5) 建設省土木研究所, 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21回, 第22回建設省技術研究発表会, 昭和42年, 43年
- 6) 前川, 今井, 低品質の粗骨材を用いたコンクリートの諸性質について, 第12回局技術研究発表会論文集, 昭和44年