

報告

[1060] 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの長期強度に関する実験的研究

正会員○遠藤 裕悦 (日曹マスタービルダース)

正会員 児玉 和巳 (日曹マスタービルダース)

正会員 高田 誠 (日曹マスタービルダース)

1. まえがき

本報告は、高炉スラグ微粉末の種類、置換率、石こう量、および養生温度等を変化させた場合の材令3年までの強度発現性状について検討したものであり、先に土木学会の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において報告した論文、「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」の続報である。

2. 実験概要

実験に用いた高炉スラグ微粉末(以下スラグ:Sgと呼ぶ)の品質を表-1に示す。銘柄は、A, Bの2種類とし、粉末度はAは2種、Bについては4種である。また、粉末度4000 cm<sup>2</sup>/gクラスのものについては、石こう(SO<sub>3</sub>)添加率の異なる3種類がある。セメントは普通ポルトランドセメント3銘柄を等量混合して用いた。混和剤は、AE減水剤標準形を用いた。細骨材は、大井川水系陸砂(比重2.63, 吸水率1.53%, FM 2.82), 粗骨材は、青梅産硬質砂岩碎石(MS20mm, 比重2.66, 吸水率0.73%, FM 6.76)を用いた。コンクリ

表-1 スラグの物理・化学的性質

呼び名	記号	SO <sub>3</sub> 量 (%)	比重	粉末度 (cm <sup>2</sup> /g)	塩基度	ガラス化率 (%)
A-3	A3G2	1.95	2.91	3160	1.83	97.5
	A4G0	0.11	2.91	4290	1.78	
A-4	A4G2	1.86	2.91	4300	1.82	98.5
	A4G3	2.80	2.91	4190	1.85	
B-3	B3G2	1.58	2.89	3290	1.96	98.5
B-4	B4G0	0.54	2.90	4410	1.96	
	B4G2	1.75	2.89	4500	1.96	
	B4G3	2.35	2.89	4360	1.97	
B-5	B5G2	2.05	2.89	5580	1.98	
B-8	B8G0	0.51	2.90	7860	1.94	

ートの配合は、スランブ8±1 cm、空気量 4.5±0.5 %を目標とした。コンクリートの練り混ぜには容量 100 l のパン型強制練りミキサを用い、各種試験はすべて関連するJISによった。検討項目は表-2に示す通りである。

3. 試験結果と考察

表-2 検討項目

養生温度20°Cの圧縮強度試験結果を表

-3に示す。

(1)材令による違い  
材令3年までの  
圧縮強度の変化を図  
-1に示す。これに  
よると、スラグを混

検討項目	C+Sg(kg/m <sup>3</sup> )	スラグの種類	Sg/C+Sg(%)	備考
(1) 材令	320	A4G2, B4G2	35, 45, 55, 70	
(2) スラグの種類	320	A3, A4, B3, B4, B5, B8	55	
(3) スラグの置換率	320	A4G2, B4G2	35, 45, 55, 70	
(4) 石こう添加率	320	A4, B4; G0, G2, G3	55	
(5) 単位結合材量	270, 320, 370	A4G2, B4G2	55	
(6) 養生温度	320	A4G2, B4G2	55	5, 20, 30°C養生
(7) 養生方法	320	A4G2, B4G2	35, 45, 55, 70	(表-4参照)

表-3 圧縮強度試験結果 (養生温度20℃)

単位結 合材量 (kg/m <sup>3</sup> )	ス ラ グ			水・結 合材比 (%)	細骨材 率 (%)	圧 縮 強 度 (kgf/cm <sup>2</sup> )										
	置換率 (%)	種 類	SO <sub>3</sub> 量 (%)			20℃ 湿 潤 養 生					20℃ 気中養生					
						3 日	7 日	28 日	91 日	6ヶ月	1 年	3 年	91 <sup>日</sup>	91 <sup>日</sup>	1 <sup>年</sup>	
370	5.5	A-4	0	41.1	41	109	181	397	556	693	770	790	394	539	552	
		B-4		40.3	41	150	244	436	571	648	648	712	442	558	564	
	0	-	-	42.4	42	254	362	522	554	555	578	699	541	633	588	
		A-4		2	41.1	41	102	231	439	638	732	793	857	482	605	702
	B-4	41.1	41		169	263	483	611	648	665	684	508	624	592		
	5.5	A-3	2	41.6	42	110	170	364	513	621	675	721	385	497	508	
		A-4		41.4	41	120	186	420	580	638	764	807	421	566	582	
		B-3		41.1	42	119	212	419	596	671	747	754	389	552	538	
		B-4		40.8	41	153	278	522	675	677	715	764	479	608	619	
	B-5	40.5	40.5	162	296	510	623	678	710	749	518	628	582			
	320	5.5	A-4	0	46.9	43	84.7	142	354	520	644	682	719	323	471	443
			B-4		45.9	43	125	214	406	520	594	611	651	382	514	511
0		-	-	48.4	44	184	303	451	521	522	524	584	477	555	519	
		A-4		2	47.2	43.5	144	228	448	603	648	712	733	462	565	555
B-4		47.2	43.5		148	259	455	568	610	610	635	488	576	545		
3.5		B-8	0	46.6	42	189	366	552	613	605	642	670	570	637	574	
		A-4		2	46.9	43	90.5	182	372	558	622	694	739	380	532	599
B-4		46.9	43		133	228	473	588	601	614	659	439	555	532		
4.5		B-8	0	46.2	41.5	187	390	576	644	666	654	697	603	704	622	
		A-3		2	47.5	44	83.1	137	303	469	532	592	666	333	431	436
		A-4			46.6	43	94.4	149	368	532	602	705	757	369	488	511
		B-3			46.9	44	91.7	179	373	551	588	658	673	358	493	482
B-4	46.6	43	118		232	454	570	613	640	711	441	554	544			
B-5	46.2	42.5	144	270	483	601	624	667	685	490	581	551				
B-8	45.9	41.5	180	380	556	686	670	643	699	640	753	670				
7.0	A-4	2	45.9	42.5	65.1	128	314	435	540	609	656	365	423	439		
	B-4		45.9	42.5	149	227	377	566	570	630	714	438	546	577		
5.5	A-4	3	47.2	43	99.4	154	375	552	640	679	747	373	518	499		
	B-4		47.2	43	116	229	423	563	614	664	673	424	559	530		
270	5.5	A-4	0	56.3	45	53.1	99.2	271	468	551	611	626	237	360	341	
		B-4		54.4	45	86.4	166	345	466	506	499	509	312	440	412	
	0	-	-	57.4	46	137	231	356	428	426	455	466	386	469	428	
		A-4		2	55.6	45	71.4	121	268	455	519	573	574	272	413	470
	B-4	55.6	45		96.1	173	404	480	521	520	567	350	473	432		
	A-3	2	56.3	46	50.5	91.9	225	381	441	500	528	240	346	344		
			A-4	55.2	45	64.5	107	280	433	508	566	607	250	393	382	
			B-3	55.6	46	60.3	125	302	440	491	554	561	282	415	390	
			B-4	55.2	45	86.1	180	376	510	551	538	574	357	456	460	
	B-5	54.8	44.5	100	208	397	506	537	550	553	389	478	456			

(注) 1) 材令7日まで標準養生  
2) 材令28日まで標準養生

和したコンクリートの材令に伴う圧縮強度はスラグの種類、置換率、銘柄の違いにより異なり、初期材令においては無混和のものに比べ低下するものが多いが、粉末度 4500 $\text{cm}^2/\text{g}$  程度のスラグを70%置換えたものでも材令6ヶ月を過ぎれば無混和を上回り、材令3年でもその傾向は続いている。

(2)スラグの種類(粉末度)による違い

スラグの種類とスラグ無混和のものに対する圧縮強度の関係を図-2に示す。これによると、スラグの種類により、材令の経過に伴う強度の発現は大きく異なる。粉末度が高い程初期材令において強度の増大が著しい。結合材量  $320\text{kg}/\text{m}^3$ 、置換

率55%のB4G2では28日で、またB8G0では3日で無混和のものと同程度であり、粉末度が高まる程スラグの潜在水硬性が促進されていることが認められる。また、材令1年以降にはスラグ無混和のものに対する強度比が一定しており、粉末度の違いによる差も小さくなってきている。

(3)スラグの置換率による違い

スラグの置換率とスラグ無混和のものに対する圧縮強度の関係を図-3に示す。スラグの置換率が増加するに従い初期材令の強度の発現は低下する。しかし、材令の経過と

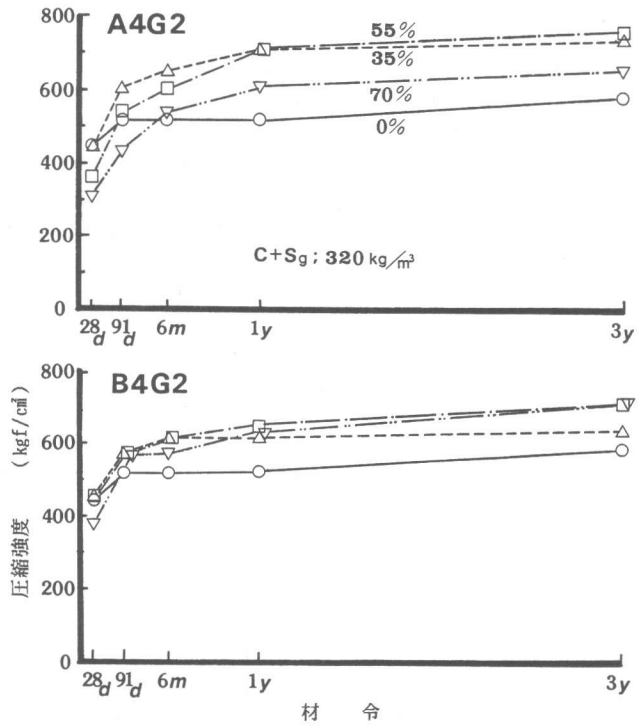


図-1 材令と圧縮強度の関係

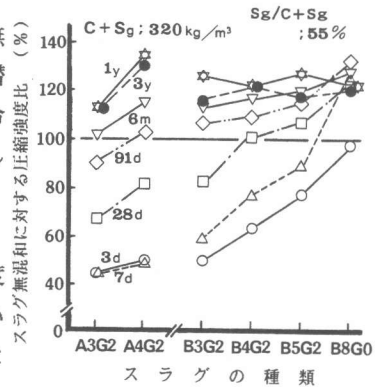


図-2 スラグの種類とスラグ無混和に対する圧縮強度比の関係

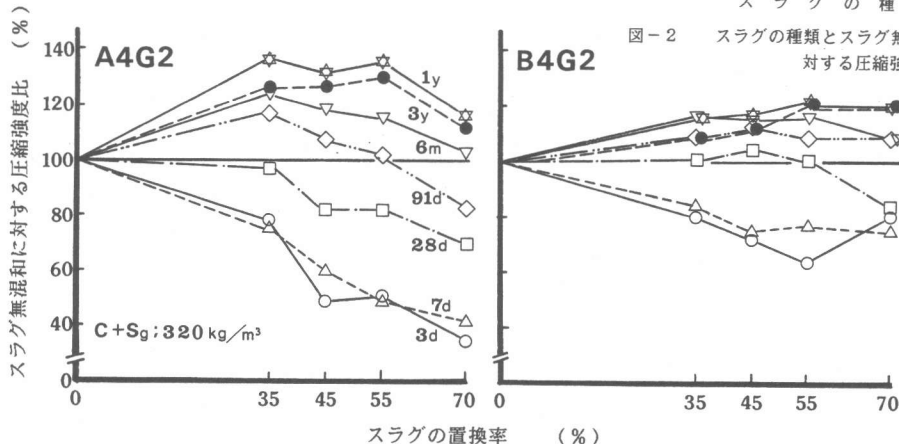


図-3 スラグの置換率とスラグ無混和に対する圧縮強度比の関係

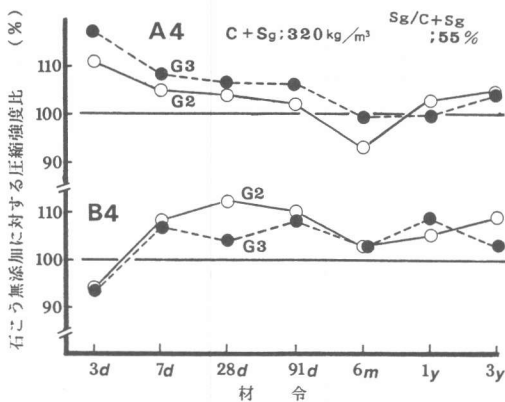


図-4 材令と石こう無添加に対する圧縮強度比の関係

ともに強度比は回復し、置換率による影響も小さくなる。材令の経過に伴う強度回復はスラグAにおいて、また、置換率による影響が小さくなることはスラグBにおいて顕著である。いずれにおいても材令1年以降は強度の増加率が一定となる傾向を示している。

(4) 石こう添加率による違い

石こう添加率と圧縮強度および無添加に対する強度比の関係を図-4, 5に示す。これによると、石こうを2ないし3%添加したものはいずれの材令においても、おおむね0%のものを上回る強度を発現しているがその割合は数%であり、強度低下を大きく改善するという程ではない。従って、石こう添加率3%以下では圧縮強度にとくに影響をおよぼさないといえる。

(5) 単位結合材量の違い

図-6に、スラグ無混和のものに対する強度比を単位結合材量で比較したものを示す。これによると、単位結合材量 270, 320および 370kg/m<sup>3</sup>においてはいずれの場合も、スラグ無混和のものに対する強度比は同程度でありとくに異なる傾向は認められない。

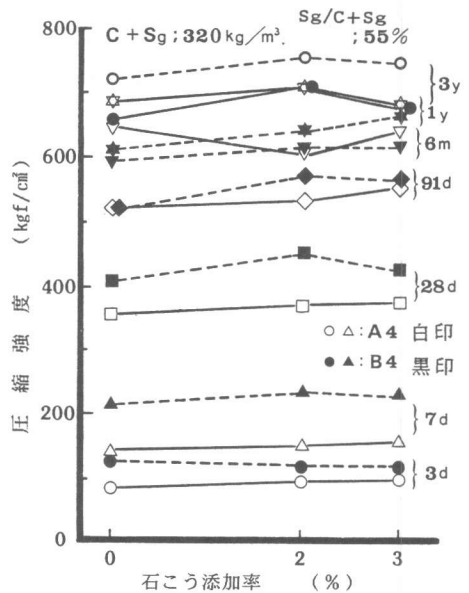


図-5 石こう添加率と圧縮強度の関係

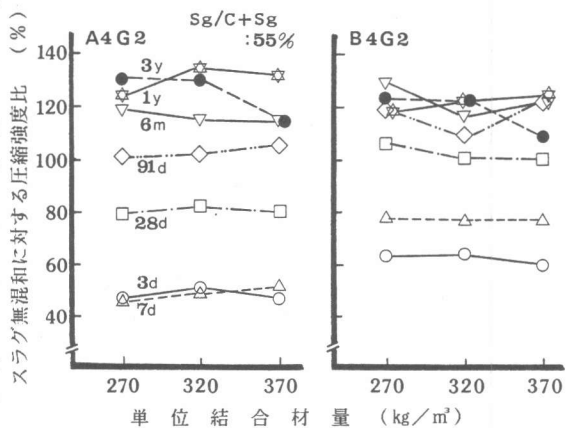


図-6 単位結合材量とスラグ無混和に対する圧縮強度比の関係

表-4 養生方法

練り上がり温度	養生方法	材令						
		3d	7d	28d	91d	6m	1y	3y
20℃	5℃水中	○	○	○	○	○	○	○
	20℃霧室	○	○	○	○	○	○	○
	20℃気中湿度60%	○	○	○	○	○	○	○
	30℃水中	○	○	○	○	○	○	○

表-5 圧縮強度試験結果 (養生温度 5、30℃)

単位結 合材量 (kg/m <sup>3</sup> )	ス ラ グ			水・結 合材比 (%)	細骨材 率 (%)	圧 縮 強 度 (kgf/cm <sup>2</sup> )									
	置換率 (%)	種 類	SO <sub>3</sub> 量 (%)			5℃ 水 中 養 生					30℃ 水 中 養 生				
						7 日	28 日	91 日	1*年	3*年	3 日	7 日	28 日	91 日	1*年
320	0	-	-	48.4	44	269	400	533	590	613	242	330	463	509	567
	35	B-8	0	46.6	42	250	539	711	728	749	251	389	477	533	565
	45			46.2	41.5	254	554	730	759	792	264	399	514	543	558
	55	A-4	2	46.6	43	76.8	183	327	660	733	144	243	464	533	581
		B-4		46.6	43	103	352	525	698	733	176	316	481	551	577
		B-8	0	45.9	41.5	240	538	688	862	826	271	386	557	568	593

(注) ※材令91日以後20℃標準養生  
(6)養生温度の違い

温度20℃で練り混ぜた後ただちに5℃および30℃に振り分けた養生方法を表-4、コンクリートの圧縮強度結果を表-5に示す。図-7に20℃標準養生の強度と比較したものを示す。これによると、スラグを混和した場合の圧縮強度はスラグ無混和のものに比べ、養生温度の違いによる影響が大きいことがいえる。置換率55%の場合5℃養生における強度の低下は、材令7日でスラグ無混和の10%程度に対し、スラグを用いたものは約50%である。この差は材令の経過とともに小さくなり、スラグの種類によりその程度は異なるが材令1年から3年で無混和と同程度になる。逆に、30℃養生の場合はスラグを用いたものが強度増加率が大きく、材令7日では無混和のものを30~50%上回っている。ところが材令91日で差はほぼなくなり、20℃標準養生と同等である。

(7)養生方法の違い

20℃標準養生を7日および28日間行い、その後温度20℃湿度60%の大気中において養生した場合の材令91日の圧縮強度を、20℃標準養生に対する比で示したものが図-8である。これによると、スラグを用いたコンクリートは初期材令における養生方法の違いにより圧縮強度が大きく影響されることが認められる。7日以後気中養生した場合の圧縮強度は標準養生の場合の70~80%程度であるが、28日間湿潤養生を行えばいずれの置換率の場合も標準養生のものに比べ90%以上に増加している。

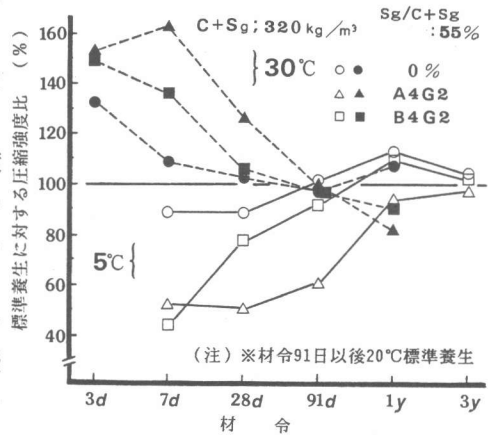


図-7 材令と標準養生に対する圧縮強度比の関係

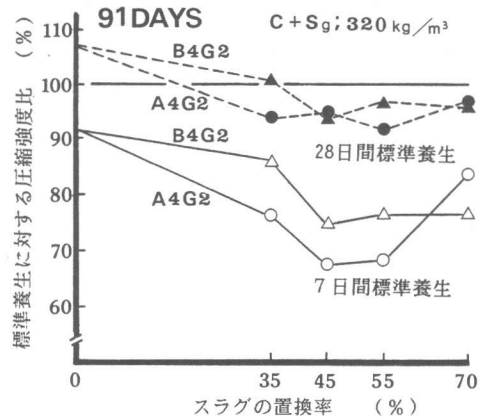


図-8 スラグの置換率と標準養生に対する圧縮強度比の関係

#### 4. まとめ

以上の試験結果をまとめると、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート圧縮強度について、本試験の範囲内で次の様なことがいえる。

##### (1)材令との関係

材令にともなう圧縮強度の増加は大きく、初期材令においてスラグ無混和より下回る組合わせの配合でも、6ヶ月過ぎる頃から無混和を上回る強度を発現するようになる。

##### (2)スラグの種類（粉末度）との関係

スラグの粉末度の違いにより圧縮強度は異なり、粉末度が高くなる程初期強度は増加する。しかし、材令1年を過ぎると粉末度の違いは明確には表われなくなり、無混和のものに対する強度の割合も一定になってくる。

##### (3)スラグの置換率との関係

スラグの置換率が増すと圧縮強度は低下する傾向にあり、初期材令において顕著である。しかし、材令とともに差は小さくなり、早いものでは91日、遅いものでも1年を過ぎれば置換率の差は認められなくなる。

##### (4)石こう添加率との関係

石こうの添加率が3%以下では圧縮強度の増加率は数%であり、スラグの初期強度の低下を補う程の効果は期待できない。

##### (5)単位結合材量との関係

単位結合材量との関係はとくに認められない。

##### (6)養生温度との関係

スラグを用いたコンクリートの圧縮強度は、養生温度の違いによる影響を大きく受ける。とくに初期材令における強度の発現率は標準養生に比べ、5℃では40%ないし50%と小さく、逆に30℃では40%から60%程大きい。

##### (7)養生方法との関係

材令初期における養生方法の違いが圧縮強度におよぼす影響は大きく、標準養生7日間でそれ以後気中養生した場合には、強度の低下率は20~30%におよぶ。しかし、28日間標準潤養生を行えば低下率は数%程度である。

#### 5. あとがき

本研究は、土木学会、コンクリート委員会高炉スラグ混和材研究小委員会活動の一環として実施したものである。

#### 〔参考文献〕

1) 遠藤・児玉・中川・高田：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、土木学会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,1987.