

V-22 高炉スラグ組成物を利用した高耐久性コンクリートに関する研究

北海道開発局土木試験所 齊藤敦志

大橋 猛

日鉄セメント(株) 小出儀治

下林清一

1. まえがき

高炉スラグ微粉末の水和活性を有効に利用する方法として高微粉末化が考えられるが、実際に使用されているスラグ微粉末の粉末度は、ブレン比表面積で3000~4000 cm^2/g である。近年、粉碎技術の進歩により、高炉スラグはさらに高微粉末化することが容易になった。それにより、コンクリートの耐久性の向上あるいは施工の合理化など、用途の多様化に応じて高炉スラグ微粉末の粉末度および置換率などを使い分けることが課題となっている。

本報告は、工業生産した最大粒径10 μm 以下、ブレン比表面積 8030 cm^2/g の高炉スラグ高微粉末(SSP)に乾燥・破碎加工した1.2 mm 以下の高炉スラグ細骨材(CSS)および早強ポルトランドセメントを配合し、高性能減水剤を添加したプレミックスモルタル(NEM)をコンクリートに適用した場合の、高強度・高耐久性コンクリートへの可能性を検討したものである。

2. 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメント(以下OPC)、早強ポルトランドセメント(以下HPC)を使用し、高炉スラグ微粉末は汎用スラグ微粉末(FSP)とスラグ高微粉末(SSP)を使用した。コンクリート試験に用いた高炉スラグ組成物NEMの素材構成は、重量比でHPC 30%、SSP 30%、CSS 40%であり、高性能減水剤(SP剤)をHPCとSSPの合重に対して固形分で0.4%含有している。SP剤はナフタリンスルホン酸塩系のものを用いた。ペーストの初期水和特性に関する試験では、石膏の効果も探るため二水石膏粉末を用いた。セメント・スラグ微粉末・石膏の化学成分を表-1に、セメント・スラグ微粉末・NEM結合材の物理試験結果を表-2に、NEM結合材に用いたHPC・SSPの粒度を表-3に示す。

モルタル試験に用いた細骨材は、表-4に示す豊浦標準砂(SS)とスラ

表-1 セメント、スラグ微粉末、石膏の化学成分

試料	記号	化 学 成 分 (%)					
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
セメント	OPC	21.6	5.4	2.8	64.0	2.4	2.0
	HPC	20.6	5.4	2.7	64.1	2.5	3.3
スラグ微粉末	FSP	30.8	14.3	0.6	43.7	5.9	2.4
	SSP	30.2	14.1	0.4	42.1	6.1	4.8
石 膏	G				31.5		45.3

表-2 セメント、スラグ微粉末、NEM結合材の物理試験結果

試料	比重	比表面積 (cm^2/g)	曲げ強度 (kgf/cm^2)				圧縮強度 (kgf/cm^2)			
			1日	3日	7日	28日	1日	3日	7日	28日
OPC	3.15	3060		36.7	49.1	70.0		145	232	414
HPC	3.1	4180	35.8	55.1	62.9	71.6	140	248	331	453
FSP	2.9	4070								
SSP	2.9	7860								
NEM結合材	3.0	5940	27.3	44.6	59.1	81.7	90	227	379	570
B種高炉	3.0	4150		31.3	45.4	69.6		126	209	416

NEM結合材 HPC : SSP = 1 : 1

B種高炉 HPC : FSP = 1 : 1

表-3 NEM結合材に用いたセメント、スラグ高微粉末の粒度

試料	通過重量百分率 (%)												Dp50 μm
	1	2	4	6	8	10	12	16	24	32	48	64 μm	
HPC	2.9	10.7	20.8	27.9	37.5	43.3	48.6	64.1	78.8	87.7	96.2	100	12.4
SSP	9.2	24.5	54.9	74.0	95.1	100							3.7

グ細骨材（CSS）である。コンクリートのブリージング試験に使用した細骨材は登別産の海岸砂（比重2.74、FM 2.66）、粗骨材は竹浦産の安山岩質碎石（比重2.67、FM 6.57）である。その他のコンクリート試験には、細骨材は苫小牧市錦岡産の海岸砂（比重2.71、FM 2.84）を、粗骨材は手稲金山産の碎石（比重2.67、FM 6.57）を使用した。

表-4 モルタル試験に用いた細骨材の品質

細骨材	記号	比重	単位容積 (kg/l)	実積率 (%)	フルイ通過率 (%)			
					1.2mm	0.8	0.3	0.15
標準砂	SS	2.63	1514	57.4			100	4
スラグ細骨材	CSS	2.80	1539	54.7	100	37	26	2

3. 実験の概要と方法

試験は、ペースト・モルタル・コンクリートの3種に大別される。ペーストの試験は、初期水和収縮と水和発熱速度について行った。初期水和収縮試験は、所定水結合材比のペーストをモルタルミキサーで低速3分間混練した後、ペーストを氷のうに入れ十分脱気し、図-1に示す測定器により各経過時間ごとに水位を測定した。初期水和発熱速度は、あらかじめ材料を20℃に保った後、コンダクションカロリメーターにセットし、所定時間反応させ求めた。

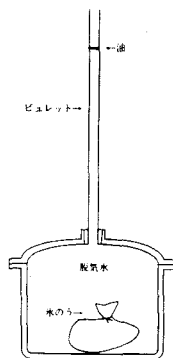


図-1 初期水和収縮試験測定器具

モルタルの試験は、細骨材に標準砂およびスラグ細骨材を用いた場合の養生条件の差異による圧縮強度への影響とNEMの素材であるSSPとCSSの遮塩性効果について行った。モルタルの配合は結合材・細骨材比を1:2とし、混練および強度試験はJIS R 5201に従って行った。遮塩性効果に関する試験は5%NaCl溶液に浸せきし、各浸せき期間ごとに浸透深さを測定した。

コンクリートの練り混ぜには、容量50ℓの強制練りミキサーを使用し、結合材、細骨材を10秒間混合、その後水の1/2を入れて30秒、粗骨材を入れて20秒経過後残りの水を入れ、全材料投入後2分間練り混ぜた。コンクリートの練り上がり温度は20℃となるよう、練り混ぜ水の温度を調節した。試験は、加圧ブリージング量、圧縮強度、弾性係数の測定を行った。加圧ブリージング試験は、加圧ブリージング試験装置（筑波丸東製 CF-77型容量2ℓ）により、加圧後（34.5kgf/cm²）各経過時間ごとのブリージング量を測定した。

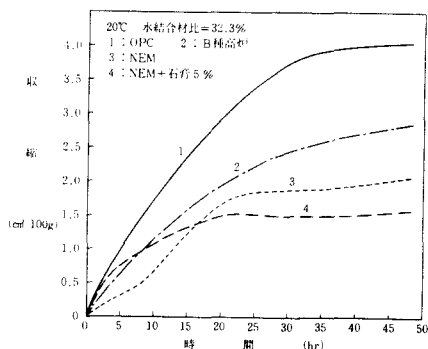
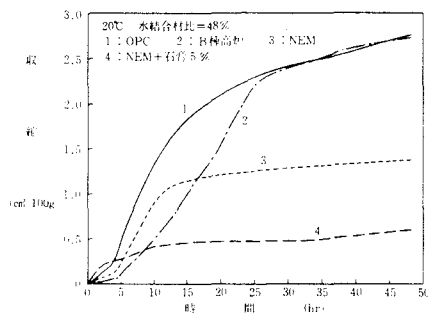


図-2 初期水和による収縮曲線

4. 試験結果と考察

4.1 ペースト試験

4.1.1 初期水和収縮試験

水結合材比48%（SP剤無添加）、32.3%（SP剤0.4%）のペーストの初期水和による収縮曲線を図-2に示す。水結合材比48%の場合、OPCとB種高炉セメントでは初期24時間までの収縮傾向は異なるが、48時間後の収縮量はほぼ同じ値になった。NEM結合材は初期10時間までは収縮

が進むが、それ以降はあまり進行せず、48時間後の収縮量はOPCの1/2 であり、石膏を 5%添加すると収縮量はさらに小さくなった。SP剤を添加した水結合材比32.3%の場合、収縮量は水結合材比48%の場合に比べ各結合材とも大きくなった。この場合もNEM結合材の初期水和収縮はOPCの1/2 程度であり、NEM結合材は初期水和収縮が小さいといえる。

4.1.2 水和発熱特性

水和発熱曲線を図-

3 に示す。第 1ピークは10分以内に認められ、B種高炉がきわめて小さい値となった。第 2ピークは 9時間後より認められた。NEMの場合、石膏の添加有無により傾向が異なり、石膏を添加しない場合、第 2ピークの右肩に緩慢な曲線を示す特異的な傾向が認めら

れた。第 3ピークはB種高炉セメントの33時間後に現れているもので、これはスラグ微粉末の反応によるものである。

水和発熱量を図-4 に示す。OPCとNEMを比較すると、24時間後ではあまり差がないが、NEMはその後も発熱量が大きく、48時間後OPCは48cal/g、NEMは65cal/g となった。また、B種高炉セメントは24時間後でOPCの59%、48時間後では79%であった。これらのことから、NEMは発熱量が大きく、NEMを用いたコンクリートの断熱温度上昇試験において初期の温度上昇量が大きいことは明らかである。NEMの初期発熱速度を制御するためにはスラグ高微粉末（SSP）の配合量が一定の場合、セメント部をOPCさらには中庸熟ポルトランドセメントにすることにより可能と思われる。

4.2 モルタル試験

4.2.1 強度試験

細骨材に標準砂（SS）およびスラグ細骨材（CSS）を用いた養生条件の違いによるモルタルの圧縮強度試験結果を図-5 に示す。材令28日におけるモルタルの圧縮強度は結合材の種類、配合の違いによらず、初期水中養生期間を長くすることにより強度は増進し

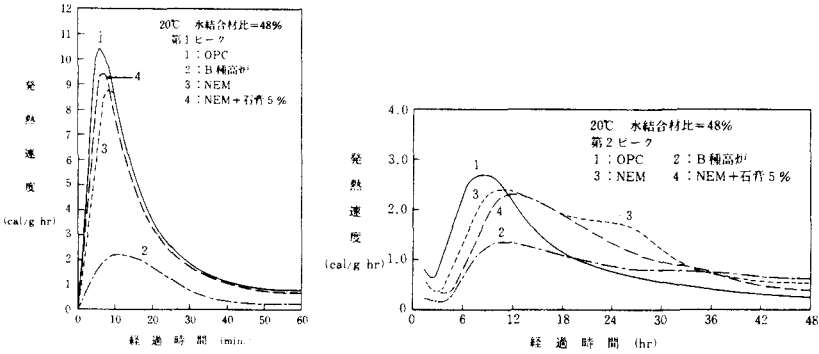


図-3 水和発熱曲線

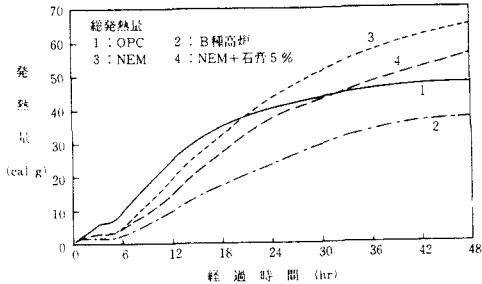
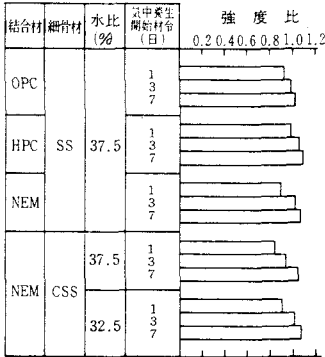


図-4 水和総発熱量



※強度比は材令28日における水中養生強度に対する値である。

図-5 気中養生が圧縮強度に与える影響

た。水中養生 1 日後気中養生した場合は、標準養生強度に比べ小さい値となったが、水中養生 3 日後気中養生した場合には、標準養生による強度と同程度の値であった。

4.2.2 高炉スラグ微粉末（SSP）とスラグ細骨材（CSS）の耐塩性効果

浸せき期間10週における

SSPの配合量と浸透深さ

の関係を図-6 に示す。

SSPを配合することにより10週間浸せき後の塩分浸透深さは、SSPを配合しない場合の1/3 ～ 1/4に

なり耐塩性は向上した。

SSPの配合量が40～70%

の間では配合量が多いほど

耐塩性は向上する傾向にあるが、

顕著な差は認められない。

SSとCSSを比較

すると、CSSを用いた方が耐塩性は向上した。

特にSSPを配合しない場合においてその差が大きかった。また、養生条件による耐塩性の影響は、気中養生することにより浸せき初期での塩分浸透深さが大きくなった。

4.3 コンクリート試験

4.3.1 ブリージング試験

コンクリートの圧送性の

評価方法として、本実験では

ACIで報告されている

コンクリートの脱水性により

評価する加圧ブリージング

試験を行った。

コンクリートの配合と練

り上がり性状を表-5 に、

ブリージング試験結果を図

-7 に、加圧ブリージング

試験結果を図-8 に示す。

通常のブリージング試験では、

NEMコンクリートの

ブリージング率はOPCコン

クリートに比べてきわめて

小さい値となった。しかし、

加圧ブリージング試験

では、NEMコンクリート

とOPCコンクリートのブ

リージング率はあまり差がなく、脱水継続時間は、NEMコンクリートが 3分、OPCコンクリートが 6～

7 分程度であった。NEMコンクリートは圧力下における初期脱水量が多く、圧送性はOPCコンクリート

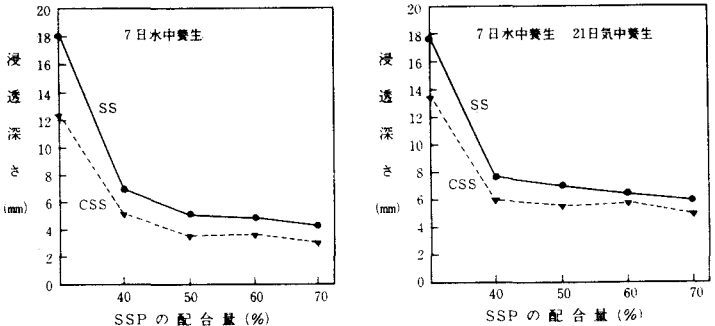


図-6 SSP量および細骨材の違いによる耐塩性効果

表-5 コンクリートの配合と練り上がり性状

セメント NEM	W/C NEM (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m³)				練り上がり性状			
			W	C NEM	S	G	スラン プ(cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	単重 kg/m³
OPC	45	41	167	371	743	1053	13.2	4.4	18.0	2347
	55	43	165	300	804	1053	11.2	4.2	19.0	2355
NEM	29	32	173	600	521	1091	16.5	1.3	19.0	2434
	23	28	180	800	400	1011	16.5	1.8	19.0	2408

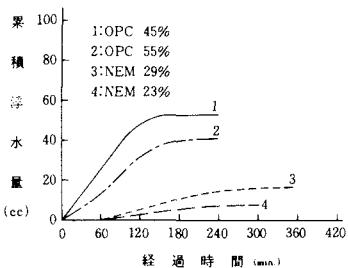


図-7 累積浮水量と経過時間の関係

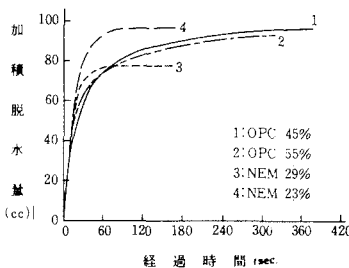


図-8 加圧脱水量と経過時間の関係

よりも劣る傾向であると考えられる。

4.3.2 強度試験

コンクリートの配合と練り上がり性状を表-6 に、各材令ごとのNEM/Wと圧縮強度の関係を図-9 に示す。材令28日までの圧縮強度は単位NEM量が多いほど強度は大きく、NEM量の差異が明確に現れている。しかし、NEM量 800 kg/m³ の場合材令28日以後の強度の伸びが比較的大きく、91日強度は 792～ 805kgf/m³ となり、NEM量1000 kg/m³ との差は明らかでない。養生温度条件の圧縮強度に与える影響を図-10に示す。初期材令（3日）でこの影響が大きく、NEM量 600kg/m³ で5・10℃養生の場合、それぞれ標準養生強度の 52・68%となった。しかし、材令の経過とともにその差は小さくなり、28日では93・96 %となった。また、NEM1000 kg/m³ の場合、材令 3日では標準養生強度の70・ 77%であり、単位NEM量が多いほど養生温度の影響は小さい傾向であった。

4.3.3弾性的性質

圧縮強度試験に先行して測定した一次共鳴振動数より求めた動弾性係数（Ed）と、強度試験に並行してコンプレッソメータによって測定した変位より求めた破壊荷重の1/3 点における割線弾性係数（Es）の、圧縮強度（σc）との関係を図-11に示す。図より両者の関係式を求めると、

$Ed = 11.81 \sigma_c^{0.211} \times 10^4 \quad r = 0.96$

$Es = 3.29 \sigma_c^{0.390} \times 10^4 \quad r = 0.96$

となった。また、Ed/Es は1.06～1.42の範囲となった。

表-6 コンクリートの配合と練り上がり性状

記号	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの縮減 (cm)	細骨材率 s/a (%)	水・結合材比 (%)	単位量 (kg)						スランプ (cm)
					水 W	結合材 C	細骨材 S	粗骨材 G ₁	粗骨材 G ₂	混合利 NL1450	
N-6	25	10 ± 2	34	28.5	171	600	—	577	445	667	9.0
N-8			30	22.3	178	800	—	448	415	623	9.3
N-10			20	19.3	193	1000	—	254	407	804	8.0
NPC			40	32.4	182	—	500	737	439	658	1200*
HPC			37	35.0	175	—	500	681	460	691	1200*

※セメント 100kg当たり

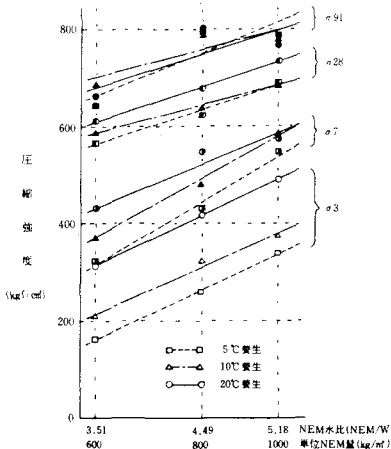


図-9 NEM/Wと圧縮強度の関係

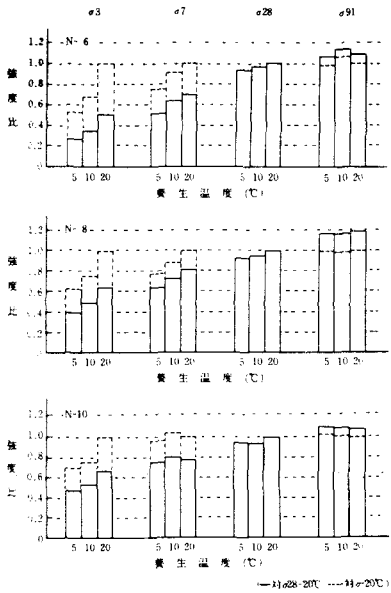


図-10 養生温度条件が強度発現に与える影響

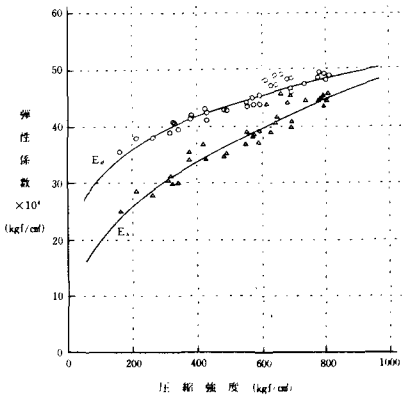


図-11 圧縮強度と動および弾性係数

5. まとめ

本試験の結果を要約すると、以下のとおりとなる。

(1) NEMの初期水和収縮量はOPC・B種高炉に比べて小さく、石膏を添加した場合収縮量はさらに小さくなった。

(2) NEMの水和による総発熱量は、48時間後では65cal/gであった。これは、OPCの1.35倍の値である。

(3) スラグ細骨材(CSS)を用いた高強度モルタルの圧縮強度は、水中養生3日後気中養生した場合においても、標準養生したものと同程度の値であった。

(4) 高炉スラグ微粉末(SSP)を配合することにより、10週間浸せぎ後の塩分浸透深さは、SSPを配合しない場合の1/3～1/4になり耐塩性は向上した。

(5) NEMコンクリートは圧力下における初期脱水量が多く、圧送性はOPCコンクリートに劣る傾向である。

(6) NEMコンクリートの圧縮強度は、材令28日までは単位NEM量の差異が明確に現れているが、91日強度は単位NEM量800と1000kg/m³との差が明らかでない。

(7) 単位NEM量を800kg/m³としたコンクリートの圧縮強度は、標準養生の場合材令28・91日でそれぞれ679・805kgf/cm²となった。

(8) NEMコンクリートの初期材令(3日)での圧縮強度は養生温度の影響を受け、5℃養生の場合の標準養生強度比は、単位NEM量600・1000kg/m³でそれぞれ52・70%となった。しかし、28日強度はそれぞれ93・95%であり、養生温度の影響は小さかった。

参考文献

- 1) 今井益隆、大橋 猛、小出儀治、下林清一；高炉スラグ組成物を利用した高耐久性コンクリートに関する研究、土木試験所月報 No.404, pp.9-22, 1987.1.
- 2) 今井益隆、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、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, pp.67-72, 1987.3.
- 3) 下林清一、小出儀治、大橋 猛、今井益隆；高炉スラグ組成物を利用したコンクリートの諸特性、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, pp.121-128, 1987.3.
- 4) 斉藤敦志、大橋 猛、小出儀治、下林清一；高炉スラグ組成物を利用した高耐久性コンクリートに関する研究(その2)、土木試験所月報 No.411, pp.19-28, 1987.8.