

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

Research on the High Durability Concreting with Blast Furnace Slag Composite

今井益隆* 大橋 猛**
小出儀治*** 下林清一****

Masutaka IMAI, Takeshi OHHASHI
Yoshiharu KOIDE and Seiichi SHIMOBAYASHI

高炉スラグ微粉末の水和特性を有効に活用するために高微粉末化し、これと破碎加工した高炉スラグ細骨材、ポルトランドセメント、高性能減水剤を混合した高品質結合材を日鐵セメント(株)が開発した。このプレミックスモルタルについて、水和性状と微細構造を検討するとともに、コンクリートに適用した場合の施工性、強度特性、耐凍害性など基礎的性質に関する実験を行った。

その結果、非常に緻密な組織構造が得られ、高強度、高耐久性を指向できることが明らかとなった。

《高炉スラグ微粉末；コンクリート；水和度；細孔径分布；圧縮強度；耐凍害性》

Nittetsu Cement, Co., Ltd. has developed a high quality binder that is made by mixing fine aggregate of blast furnace slag, Portland cement, and a superplasticizer with highly pulverized blast furnace slag, to increase the effectiveness of hydration. The hydration properties and fine structure of this pre-mixed mortar, were investigation; experiments were also conducted to determine the basic properties of concrete with this mortar. The handling and placing, strength, and frost resistance were determined.

A very compact microstructure was obtained, proving that high strength and high durability could be developed.

Keywords: pulverized blast furnace slag, concrete, hydration, micro pore distribution, compressive strength, frost resistance.

1. ま え が き

鉄鋼を精製する際に副次的に産出される溶融スラグは、その冷却処理方法によってスラグウール、膨脹スラグ、高炉スラグ細・粗骨材、高炉スラグ微粉末など多岐にわたる目的に従って造られ、活用されている。特に、水・空気などによって粒状化急冷した水砕スラグを粉碎して得る高炉スラグ微粉末は、その水和活性により高炉

セメントの混合材として広く利用されており、また、コンクリートの耐久性向上、施工の合理化あるいはコンクリートの省資源、省エネルギーの見地から、混和材料としての使用方法についても、各方面で種々の検討が行われている。

水砕スラグの水和は、ポルトランドセメントの水和によって生じた $\text{Ca}(\text{OH})_2$ により、スラグ中の主成分であ

*コンクリート研究室副室長 **同室長 ***日鉄セメント(株)専務取締役 ****同社研究開発部課長研究員

る CaO, SiO₂, Al₂O₃ が溶出し、反応した結果、カルシウムシリケート水和物、アルミン酸カルシウム水和物を生成し、空隙を充填することとなる。スラグの水和による硬化は、一般的にはポルトランドセメントクリンカーの OH⁻ と石膏の SO₄²⁻ イオンの刺激作用による潜在水硬性といわれている。なお、長期的には石灰結合機能を示し、ポゾラン反応をも有していると考えられる。

普通ポルトランドセメントの粒子の大きさは 100 μm 以下であるが、スラグ粒子の水和層はポルトランドセメント粒子の 1/5~1/10 とごく薄い層に限られ、決して水和率は高くはない。しかし、緻密性は優れており、強度はこれらの水和度、ポロソナーで論じられている。一方、ポロソナーをベースにした細孔径分布、細孔量、吸着比表面積などの物理的性状が、水・イオン・空気などの透水・透気性を左右する点で、耐久性に影響を与える要因となり、化学的にも未水和の自由水および水和物の化学的安定性の影響が大きいといえる。

また、水砕砂の利用によって、砂の界面にポルトランドセメントの水和で生じる溶脱層を残す可能性があるが、高微粉末スラグのポゾラン反応による CaO の制御でマトリックスを一体化する効果があると思われる。すなわち、高炉スラグ微粉末の水和特性を有効に利用するための一方策として、高微粉末化があげられるものの、製造技術の問題もありコンクリートに適用した研究例も少ない。

本研究は、工業生産した最大粒径 10 μm 以下、ブレン比表面積 8000 cm²/g のスラグ高微粉末 (SSP) と 4200 cm²/g のスラグ微粉末 (FSP) の水和性を比較し、スラグ高微粉末 (SSP) に破碎加工したスラグ細骨材 (CSS-1.2 mm 以下) および早強ポルトランドセメント (HPC) を配合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の可能性を検討したものである。なお、本文は昭和 60 年度に実施した日鉄セメント (株) との共同研究の成果に基づくものである^{1),2)}。

2. 実験の概要

本研究は「高炉スラグ組成物の物性に関する研究」および「高炉スラグ組成物のコンクリートへの適用に関する研究」に大別できる。すなわち、前者ではスラグ微粉末・スラグ細骨材・減水剤がモルタルの物理的性質に及ぼす影響について検討するとともに、湿式分析による水和度・細孔径分布・吸着比表面積・SEM による観察など物理・化学的考察を行った。

また、後者ではコンクリートの配合・ブリージング・凝結硬化速度・スランプの経時変化・養生温度による強度特性・弾性的性質・断熱温度上昇・細孔機構および耐久性試験として、淡水と海水による凍結融解試験を行って性能を検討した。

3. 高炉スラグ組成物の物性に関する研究

3.1 使用材料

モルタルによる流動性・強度特性の検討を行うために、早強ポルトランドセメント (HPC)、スラグ高微粉末 (SSP)、スラグ微粉末 (FSP)、豊浦標準砂 (SS)、1.2 mm 以下の自然砂 (NS)、スラグ砂 (CSS) を使用した (以下、略記号で示す)。

セメント、スラグ微粉末の化学成分、物理試験結果、レーザー法による粒度を、それぞれ表-1~3 に示す。また、スラグ高微粉末の活性度指数³⁾を表-4 に、モルタル試験に用いた細骨材の品質を表-5 に示す。

なお、NEM 主材となる SSP は II 型無水石膏をベースとし、SO₃ を 5.5% に調整したものであり、CSS は乾燥・摩砕・ふるい分け処理をしたものである。

3.2 モルタル強度に与える諸要因の検討

3.2.1 スラグ微粉末の効果

スラグ微粉末の、セメントとしてのバインダー効果を求めるため、FSP・SSP をセメントに対して 40, 50, 60, 70% 置換した場合のモルタルのフロー値の測定と強度試験を行った。

表-1 セメント、スラグ微粉末の化学成分

試料	化 学 成 分 (%)					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fl ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
HPC	20.8	5.0	2.7	65.1	2.5	2.7
FSP	30.6	14.2	0.6	43.9	5.8	2.6
SSP	29.8	13.7	0.5	43.4	5.2	5.5

表-2 セメント, スラグ物理試験結果

試料	比重	比表面積 (cm ² /g)	曲げ強さ (kgf/cm ²)			圧縮強さ (kgf/cm ²)		
			3日	7日	28日	3日	7日	28日
HPC	3.13	4090	55.4	65.4	69.3	264	336	441
FSP	2.93	4270						
SSP	2.91	8030						

表-3 セメント, スラグ微粉末の粒度

試料	通過質量百分率 (%)													Dp50 (μm)
	1μ	2	4	6	8	12	16	24	32	48	64	96	128	
HPC	0.0	5.1	14.8	22.3	33.5	48.8	62.4	77.7	90.3	98.8	100			12.4
FSP	0.8	8.2	23.4	33.1	46.3	61.4	73.7	85.5	94.6	100				9.0
SSP	5.0	16.4	59.0	84.0	100									3.6

表-4 スラグ高微粉末 (SSP) のフロー比と活性度指数

配合記号	配合割合 (%)			フロー値	圧縮強度 (kgf/cm ²)			フロー比 (%)	活性度指数 (SAI) (%)		
	HPC	FSP	SSP		7日	28日	91日		7日	28日	91日
A	100			194	391	446	544	100	100	100	100
B	50	50		190	299	420	583	98	76	94	107
C	50		50	191	479	599	721	98	123	134	133

表-5 使用細骨材の品質

試料	比重	単位容積量 (kg/ℓ)	実績率 (%)	フルイ通過率 (%)						
				1.2mm	0.6	0.3	0.21	0.15	0.105	0.074
CSS	2.76	1.46	52.9	100	40	11	6	2	1	0
SS	2.63	1.51	57.4			100	53	4	1	
NS	2.68	1.69	63.1	100	71	34	18	5	2	0.4

a. 試験方法

試験は、JIS R 5201 のセメント物理試験方法に準じて行った。

なお、細骨材にはSSを用い、結合材・細骨材比は1:2、水・結合材比は50%とした。

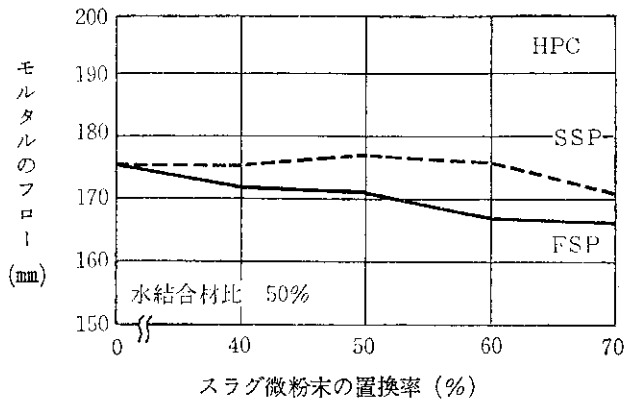
b. 試験結果と考察

モルタルのフロー試験および強さ試験の結果を図-1、

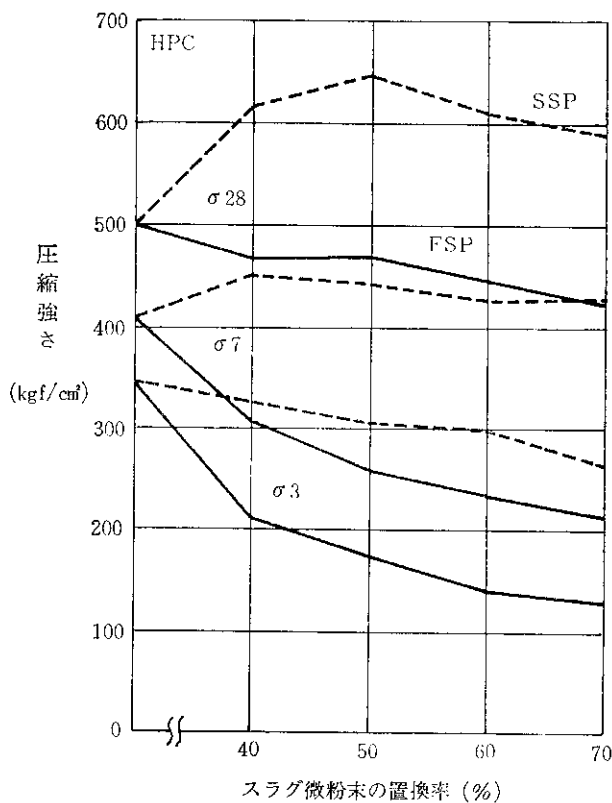
2に示す。

スラグ微粉末の量の増加に伴うフロー値の変化は、図-1のとおりほとんど認められないが、FSPが若干減少の傾向を示した。フロー試験の結果は、コンクリートの施工性を含めた配合設計上の指標となる。

一般に、セメントが高微粉末になるに従ってフロー値は小さくなり、実用に供し得ないことが多いが、スラグ



図一 スラグ微粉末の置換率とモルタルのフロー



図二 スラグ微粉末の置換率とモルタルの圧縮強さ

は比重が小さいため、単位ペースト量が多く厳密な比較とはならない。しかし、スラグの粒度構成と初期水和活性度が大きく影響していると考えられ、SSPは汎用スラグ微粉末と同様に使用できるといえる。

一方、モルタルの圧縮強度は、FSPでは配合量の増加に従って低下したのに対し、SSPでは材令28日では590~650 kgf/cm²ときわめて高い強度が得られた。

SSPの初期材令からの強度発現効果は、粉末度および石膏の作用が影響していると考えられるが、今後さらに検討する必要がある。

3.2.2 スラグ細骨材の効果

細骨材として加工・整粒したスラグを用い、モルタルの強度試験を行って自然細骨材の場合との比較をした。結合材はSSPの置換率を0, 40, 50, 60%とした。

a. 試験方法

モルタルの配合は、結合材・細骨材比を1:2とし、試験はJIS R 5201に準拠した。

b. 試験結果と考察

スラグ高微粉末SSPと細粒細骨材SS, 粗粒細骨材NS, CSSを用いたモルタルの強度試験結果を図-3に示す。

SSPの混入効果をCSSとNSの場合で比較すると、全材令でCSSの強度が上まわった。これはCSS自体の骨材形状効果と、SSPのポズラン反応によるアルカリ濃度の低下が、CSS界面との急激な水和を抑えて反応を制御し、長期的にはCSS界面近傍の緻密化が計られることに起因すると思われる。

これらのことから、実用コンクリートをベースにしたモルタル部分の高強度化・耐久性向上にSSPとCSSの利用が考えられるが、さらに検討を重ねる必要がある。

3.2.3 減水剤の効果

SSPとCSSを合わせたモルタルの高強度化を図るため、高性能減水剤(ナフタリンスルホン酸系)を用いて、フロー値が180~200 mmの範囲内における減水効果と強度を調べた。結合材として用いたSSPは、セメントHPCに対して50%とした。

a. 試験方法

JIS R 5201のセメント物理試験方法に従って試験を行った。

結合材・細骨材比は1:2であり、高性能減水剤(SP剤)は固形粉末で、所定量をあらかじめ結合材と混ぜた上、ミキサに投入した。

b. 試験結果と考察

試験の結果を表-6および図-4に示す。

同一フロー値を得るに必要な水量は、SP剤を添加することによって減少し、1.5%までは十分な減水効果が認められる。SP剤の添加量が0.75%以上になると粘性が増加する傾向にあるが、モルタルベースでは施工上特に問題とはならない程度である。

高強度化は耐久性向上に直接的に関連しないが、施工可能な範囲内で極力水量を低減することは重要であり、CSSを用いたモルタルはSP剤1.5%で水・結合材比は16%低下し、材令3日で593 kgf/cm², 7日で831 kgf/cm², 28日で1033 kgf/cm²の高強度が得られた。

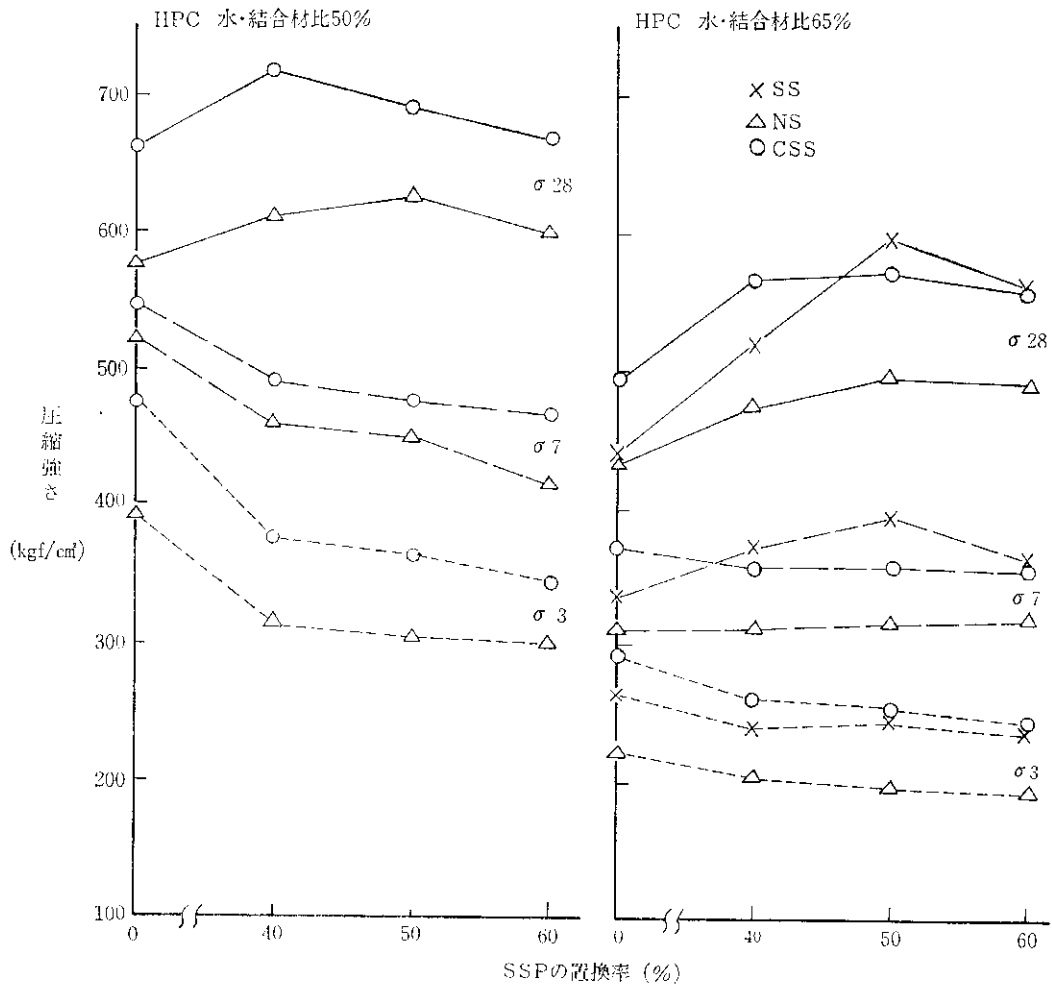
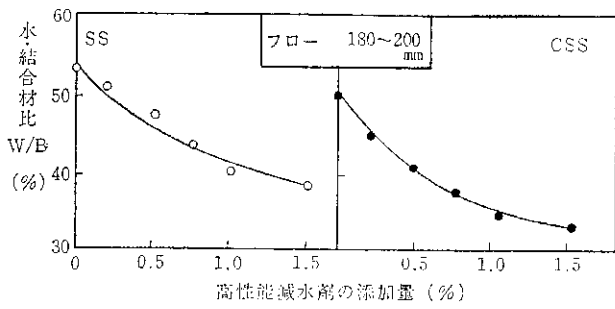


図-3 細骨材の種類とモルタル強度

表-6 減水剤を用いたモルタルの強度

番 号	細骨材の 種 類	減 水 剤 添 加 量 (%)	フ ロー	水 比 (%)	曲 げ 強 さ (kgf/cm ²)			圧 縮 強 さ (kgf/cm ²)		
					3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日
SP-1	SS	0	195	53.5	58.9	72.4	80.7	309	426	658
-2		0.2	199	51.5	59.4	77.4	85.6	347	466	673
-3		0.5	195	47.9	64.0	83.3	93.6	372	518	696
-4		0.75	184	43.4	77.3	86.6	108	456	613	787
-5		1.0	185	40.8	80.1	114	121	498	686	794
-6		1.5	190	38.5	93.0	115	123	505	728	837
-7	CSS	0	190	49.2	66.4	79.9	87.8	350	485	683
-8		0.2	187	46.3	68.8	78.1	103	388	514	736
-9		0.5	196	41.5	83.5	88.0	107	445	588	782
-10		0.75	187	36.9	95.5	118	134	533	677	890
-11		1.0	188	34.3	115	133	153	575	768	934
-12		1.5	185	32.8	115	138	164	593	831	1033

HPC : SSP = 50 : 50 細骨材比 1 : 2



図—4 高性能減水剤の添加量と水結合材比

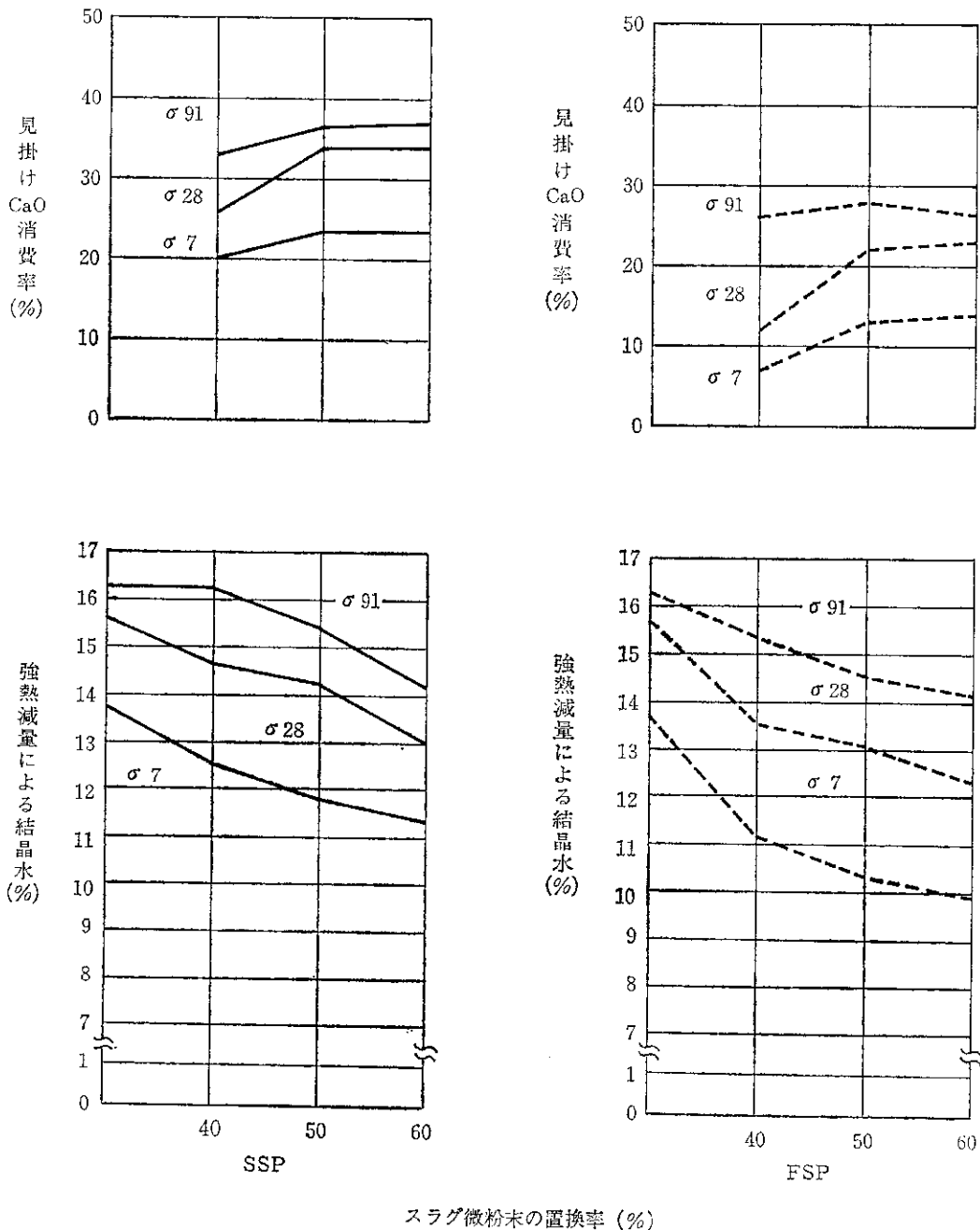
3.3 水和硬化体の物理化学的検討

3.3.1 湿式分析による水和度の測定

スラグ微粉末の相違と置換率による水和効果を、ペーストの強熱減量およびF-CaOの定量を行って検討した。

a. 試験方法

所定材令経過後のペースト硬化体を2mm以下に破碎し、デシケーター中でP-Dryを行って粉碎後、650°Cの電気炉で強熱減量を測定して結合水を求めた。F-CaOの定量は、粉碎後の試料を煮沸しながらグリセリンアルコール溶液にCa(OH)₂を抽出した後、酢酸アンモニウ



図—5 スラグ微粉末の置換率と水和度 (HPC)

ムで逆滴定して測定した。

b. 試験結果と考察

求めたスラグ微粉末による見掛けの CaO 消費率と、強熱減量 (ig. loss) による結合水を図-5 に示す。

SSP を用いた場合、FSP に比べてより多くの CaO を消費し、材令とともに増進した。結合水は配合量の増加に伴って直線的に減少し、その量は材令とともに多くなつた。

これらのことから、SSP ではポルトランドセメントの水和による結合水が少なく、水和はスラグ表面の薄い層に限られていると推定される。また、見掛け CaO 消費率からスラグはボゾラン反応を生じ、その程度は FSP よりも SSP が進んでいると考えられる。

3.3.2 細孔径分布、吸着比表面積

SSP, CSS の水和効果を、Hg および N₂ による細孔径分布と N₂ 吸着による BET 吸着比表面積の測定によって求めた。

試験は、普通ポルトランドセメント (OPC) を加えた表-7 に示すペーストとモルタルを対象とした。

a. 試験方法

試料は所定材令養生後 2 mm 以下に破碎し、100°C 24 時間真空乾燥処理して測定を行った。

b. 試験結果と考察

各試料の細孔量、細孔径、吸着比表面積の測定結果を表-8 に示す。

細孔径分布は、OPC ペーストが 3 日で 1 μ 以下、28 日では 0.3 μ 以下の範囲でブロードな分布を示しているのに対し、SSP を配合した場合は 3 日で 0.25 μ、28 日では 0.065 μ にシャープなピークが認められ、細孔量・平均細孔径とも小さくなった。

吸着比表面積は、ペーストでは 3 日でほとんど差はないが、28 日では SSP を配合した HPC ペーストが OPC の 60% となった。モルタルの場合も試料 E が 11.1 m²/g と小さく、SSP を配合することにより、OPC よりもゲル化が進み緻密化すると考えられる。

3.3.3 SEM による観察

前出の表-7 のうち、モルタル試料 D (OPC-CSS)、E (HPC-SSP-CSS) について材令 28 日の観察結果の一部

表-7 材料の組合わせ

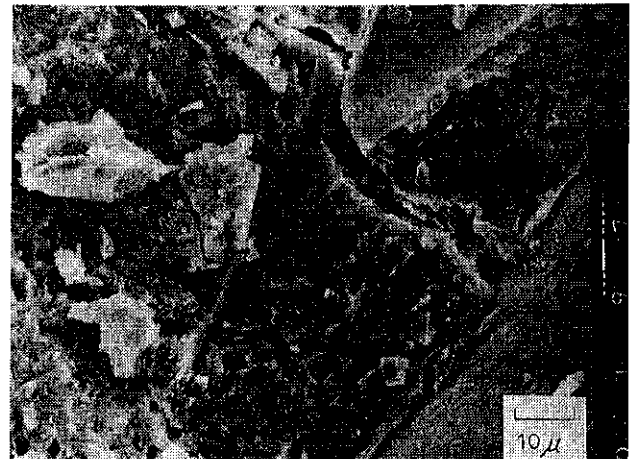
試料	種別	材料組合わせ	重量配合 (%)					水比 (%)
			OPC	HPC	SSP	CSS	SS	
A	ペースト	OPC	100	—	—	—	—	50
B		HPC SSP	—	50	50	—	—	
C	モルタル	OPC SS	33.3	—	—	—	66.7	
D		OPC CSS	33.3	—	—	66.7	—	
E		HPC SSP CSS	—	16.7	16.7	66.7	—	

表-8 細孔量と吸着比表面積

試料	材令 (日)	全細孔量 (水銀) (cc/g)	細孔量 (cc/g)		平均細孔径 (Å)		吸着比表面積 (m ² /g)
			窒素 <300 Å	>1000 Å	窒素 <300 Å	水銀	
A	3	0.313	0.048	0.180	150	1500	19.9
	28	0.248	0.103	0.058	105	260	43.6
B	3	0.320	0.044	0.165	130	1100	21.2
	28	0.225	0.052	0.015	110	320	26.4
C	28	0.087	0.037	0.038	148	590	12.9
D	28	0.082	0.033	0.030	115	500	13.9
E	28	0.106	0.029	0.022	125	450	11.1



①



③



②



④

写真-1~4 SEMによる観察

を写真-1~4に示す。

a. 観察結果と考察

写真-1, 2は試料D, 写真-3, 4は試料Eである。すなわち, 写真-1ではCSSの抜けた面に網目状のカルシウムシリケート水和物が認められ, CSSの表面に対応する凹凸も見られる。写真-2では, CSSとペースト部の界面付近に巨大な板状の水酸化カルシウムの結晶と球状のカルシウムシリケート水和物の集合体が認められた。

写真-3はCSSのまわりをペースト硬化体が被っている状態であり, ペースト中のSSPが水和物中に埋込まれている様相を呈している。また, 写真-4では球状のカルシウムシリケート水和物の集合体の間隙に数μmの板状の水酸化カルシウムの結晶が見られる。

Eの場合, Dに比べて水酸化カルシウムの結晶が小さいのは, SSPの水和反応によって消費されたと考えられる。このため, Dで想定されたCSSの脆弱な組織の生成が抑制され, モルタル自体が長期にわたって安定した

硬化体になると推定される。

4. 高炉スラグ組成物のコンクリートへの適用に関する研究

4.1 使用材料

3に述べた一連の実験結果から, 高炉スラグ組成物としてのプレミックスモルタルNEM(以下, 単にNEMという)は, 早強ポルトランドセメントHPC(C), スラグ高微粉末SSP(α), スラグ砂CSS(β)の素材で構成するものとした。

また, 結合材の水和率を高めマトリックスの緻密化をはかるために, 高性能減水剤を固形分で0.4%プレミックスしている。

コンクリート試験には, 材料構成比 $C+\alpha+\beta$ を0.3, 0.3, 0.4としたNEMと細骨材として苫小牧市錦岡産の海岸砂(比重2.72, 吸水率1.12%, FM2.60), 粗骨材として遠別産の碎石(比重2.73, 吸水率0.84%, MS25mm,

岩質—粗粒玄武岩)を用いた。

4.2. 試験方法

NEMの単位量を500~1000 kg/m³とし、スランブを5~12 cmとして配合を設定した。

コンクリートの練り混ぜには、容量50ℓの強制練りミキサを使用し、砂、NEMを10秒間混合、その後水の1/2を入れて30秒、碎石を入れて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。

なお、コンクリートの練り上がり温度は20°Cとなるよう練り混ぜ、水の温度を調節した。

各種試験は、関連JISあるいはASTM規格に従って実施した。

4.3 試験結果と考察

4.3.1 配合試験

1) 最適細骨材率

単位NEM量ごとに水量一定として、細骨材率とスランブとの関係を求め、スランブが最大となる細骨材率を選定した(表-9参照)。

なお、NEMに含まれるβ部(CSS, 1.2~0.074 mm)40%を細骨材の一部として換算すると、例えばNEM量が800 kg/m³の場合の細骨材率は40%となり、ほぼ通常のコンクリートに近似した値となった。

2) コンクリートの配合

単位NEM量を500, 600, 800, 1000 kg/m³の4種とした。すなわち、NEMに含まれるβ部(CSS)を除いてセメント量を(C+a)として求めると、それぞれ300, 360, 480, 600 kg/m³となる。

スランブの目標値を、基本的にはポンプ施工を考慮して12 cmとしたが、単位NEM量800 kg/m³では、スランブ5および8 cmの場合についても検討することとした。

使用水量とスランブの関係を図-6に示す。

使用骨材を異にする当所と日鉄の結果には多少の差異が生じたが、5~10 cmの中層的なスランブでは通常のコンクリートと同様に、スランブ±1 cmの変化に対し水量±1.2%の調整が必要となり、ワーカビリティもほとんど普通のコンクリートと変わらなかった。

スランブを12 cmとした場合の、各NEM量における水量と細骨材率の関係を図-7に示す。

これらの試験の結果、決定した6種の示方配合は表-9のとおりである。

4.3.2 施工性

1) スランブの経時変化

運搬などによるスランブロス施工性に対して最も関連深い、静置状態におけるスランブの経時変化は図-8

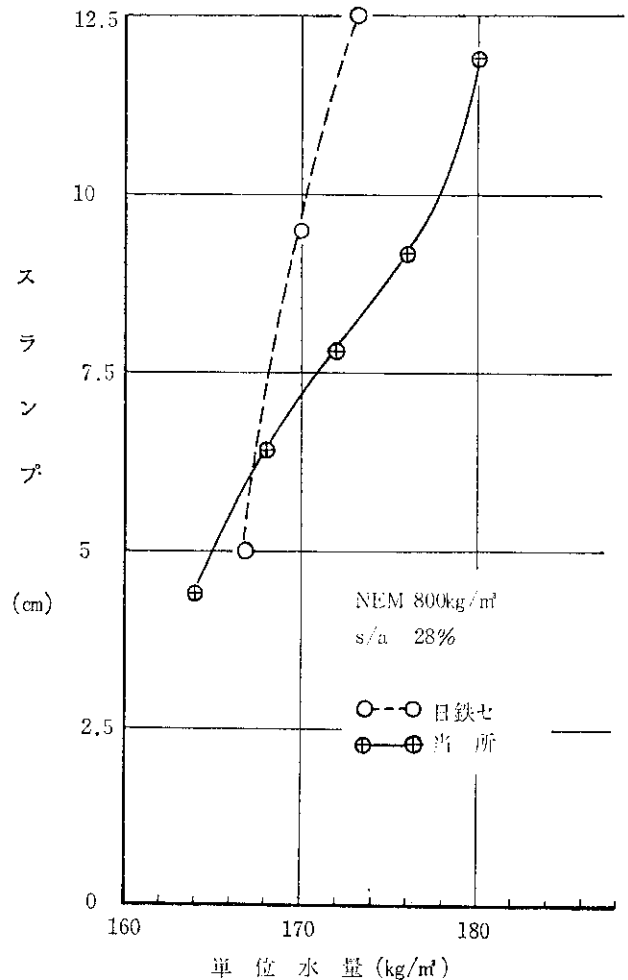


図-6 水量とスランブの関係

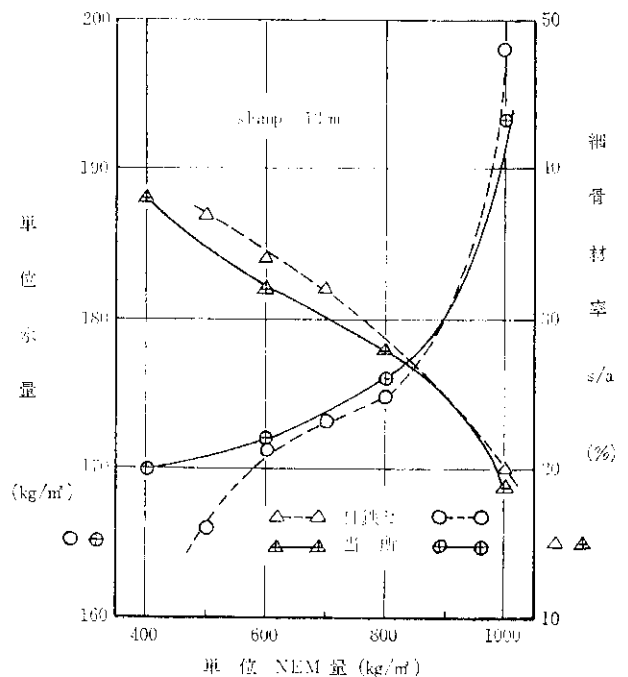


図-7 所定のコンシステンシーを得るに必要な水量と細骨材の関係

表-9 NEM コンクリートの配合

配合番号	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブの目標 (cm)	単 位 量 (kg/m ³)				水・NEM比 (%)	細骨材率 (%)	練り上がり性状					
			NEM	水	細骨材	粗骨材			コンクリート温度 (°C)			スランブ (cm)		
									max	min	n	max	min	n
1	25	12	1000	194	241	1033	19.4	18	22	18	3	12.0	10.0	3
2	25	12	800	180	418	1079	22.5	28	21	19	7	12.5	10.3	7
3	25	8	800	172	424	1095	21.5	28	20	20	3	8.0	7.6	3
4	25	5	800	164	430	1110	20.5	28	19	19	2	4.4	4.4	2
5	25	12	600	173	543	1158	28.8	32	22	20	4	12.6	12.5	4
6	25	12	500	170	629	1173	34.0	35	20	19	2	10.5	10.5	2

に示すとおりである。すなわち、当初 12 cm 程度のスランブをもつコンクリートは 30 分でその値が半減するが、その後の低下量が比較的少なく、90 分経過後もスランブは 5 cm 前後であり、作業性は十分確保できるといえる。

2) ブリージング

ブリージング試験の結果を図-9 に示す。

同一スランブ (12 cm) では、NEM 量の増加に伴ってブリージング量が減少し、その程度は NEM 量 200 kg/m³ の増加について約 1/2 となった。また、同様にブリージングの終息時間も早くなった。

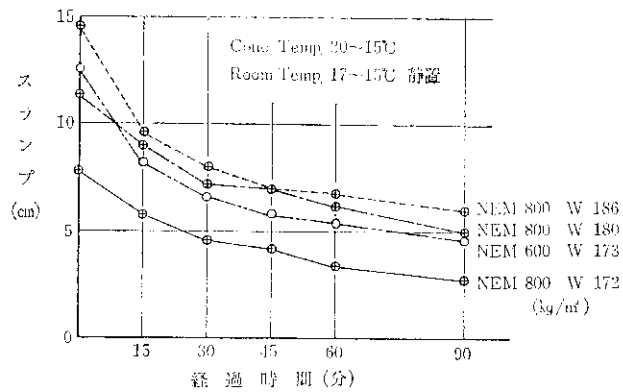


図-8 スランブの営時変化

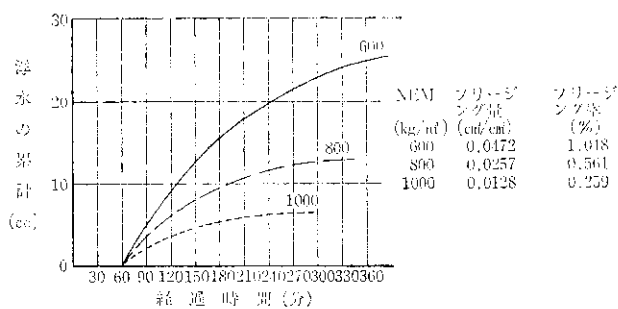


図-9 ブリージング試験結果

3) 凝結硬化速度

プロクターによる貫入抵抗値が 500 Psi の時間を始発、4000 Psi の時間を終結とすると、図-10 に示すように NEM 量が多いほど到達時間は早くなり、始発は約 5~6 時間、終結は約 6.5~8 時間となった。

4.3.3 強度特性

1) 圧縮強度

NEM 量を異にした、スランブ 12 cm のコンクリートの圧縮強度 (3 個の平均値) を図-11 に示す。

材令 7 日までの強度は NEM 量の差異が明確に表われているが、28 日強度は 800 および 1000 kg/m³ で差がなく (755 kg f/cm²)、91 日までの強度の伸びも小さかった。

図-12 に示すように養生温度の影響も顕著であり、特に初期材令 (3 日) では 5°C の場合、標準養生強度の 49% 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、91 日では 97% となった。

図-13 に NEM/W と強度の関係を示した。

その関係を一次式で表わして図中に示したが、材令 28

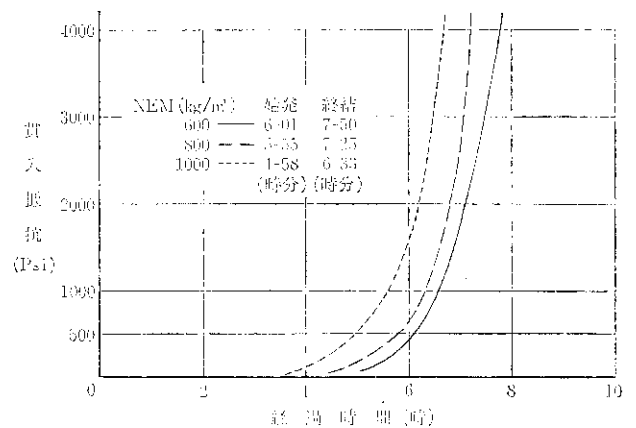


図-10 凝結硬化速度試験結果

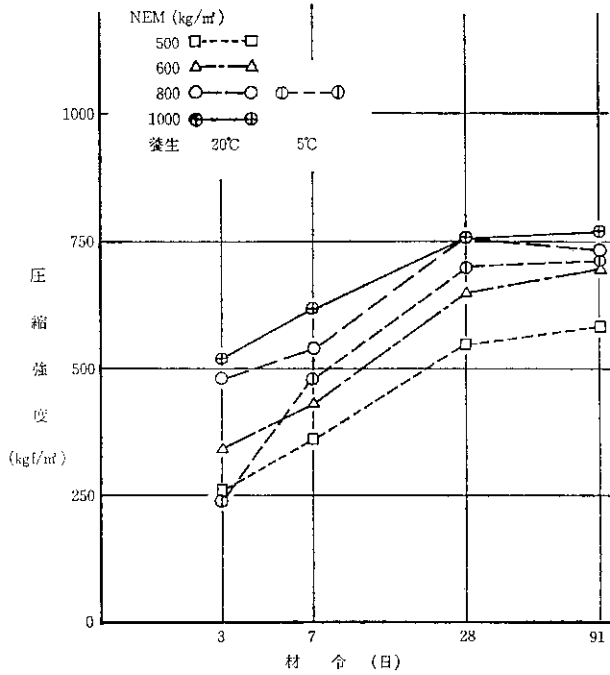


図-11 NEM量を異にしたコンクリートの材令と強度

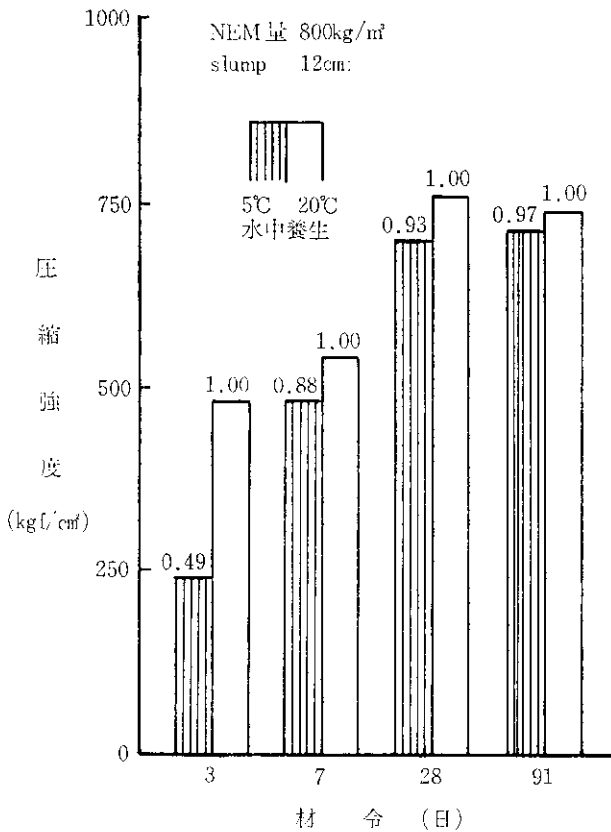


図-12 養生温度が圧縮強度の発現に及ぼす影響

日以降の強度の伸びが小さいことがわかる。

2) 引張強度と曲げ強度

材令 28 日における引張強度と曲げ強度を、NEM/W との関係で示すと図-14 のとおりとなる。

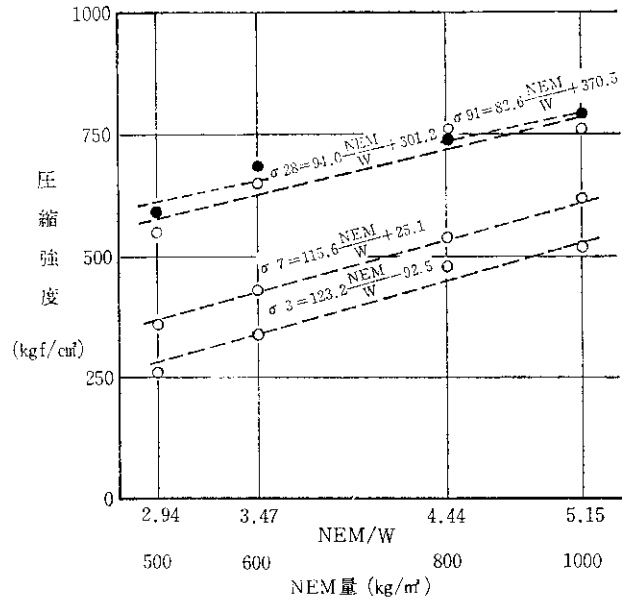


図-13 NEM/W と圧縮強度の関係

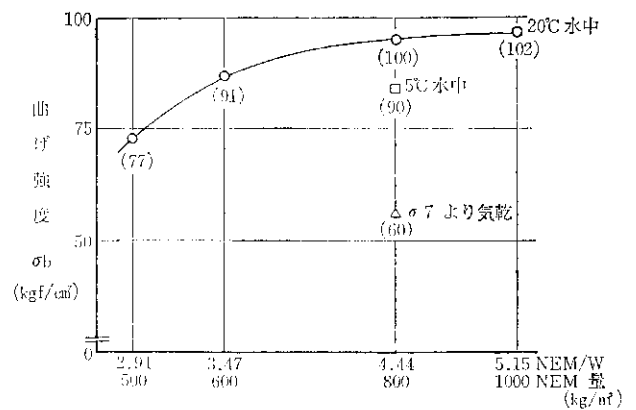
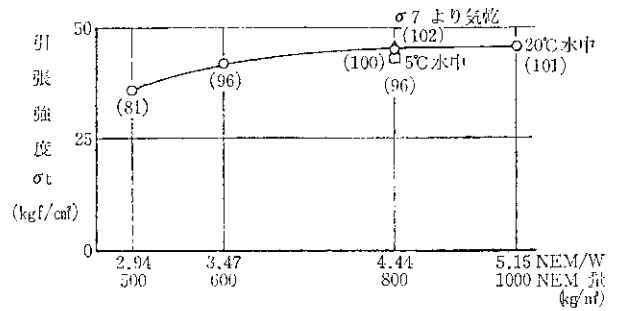


図-14 NEM量と引張・曲げ強度の関係 (材令 28 日)

NEM量 1000 kg/m³ の場合で引張強度は 45.0 kgf/cm², 曲げ強度は 96.9 kgf/cm² が得られた。引張強度は、NEM量・養生程度・養生温度の影響が比較的小さいが、曲げ強度では 7 日以降気乾とした場合、標準養生強度の 60% となり、また、5°C 養生では 90% とそれぞれ低下した。σ_t/σ_c は 1/15~1/17, σ_b/σ_c は 1/7~1/8 となり、強度比は通常のコンクリートに比べやや小さくなっ

たが、高強度コンクリートの特徴といえよう。また、1週間水中養生の後、気乾状態とした場合の供試体表面に微細なひび割れが認められたが、曲げ強度の低下がこのことに起因したとも考えられる。

4.3.4 弾性係数

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 (E_d) と、強度試験に並行してコンプレッソメーター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 (E_s) の、圧縮強度 (σ_c) との関係を図-15に示す。

図より両者の関係式を求めると、

$$E_d = 9.90 \sigma_c^{0.243} (\times 10^4) \quad r = 0.94$$

$$E_s = 2.81 \sigma_c^{0.411} (\times 10^4) \quad r = 0.95$$

となった。また、 E_d/E_s は1.12~1.44の範囲となった。

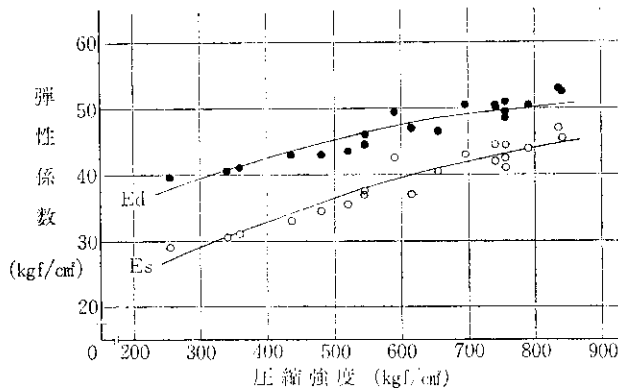


図-15 圧縮強度と動および静弾性係数の関係

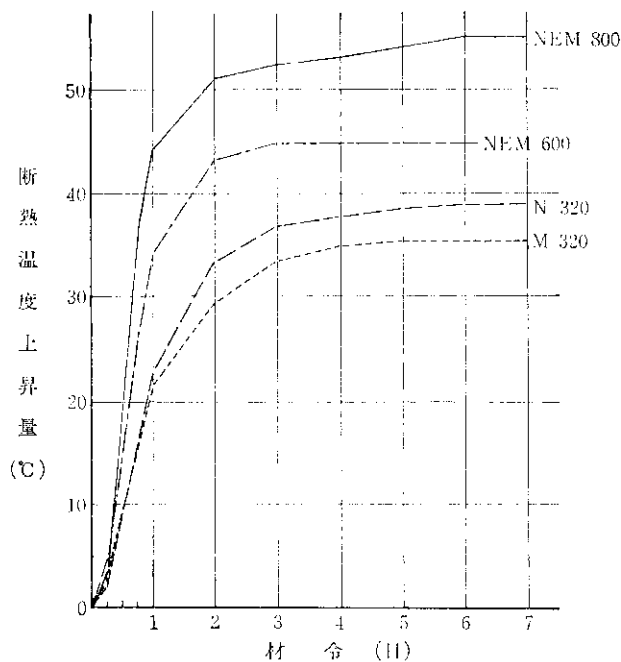


図-16 断熱温度上昇試験結果

4.3.5 断熱温度上昇量

NEM量600および800 kg/m³の場合について、断熱温度上昇量を求めた。

その結果を図-16に示す。なお、別の研究で行った普通・中熱ポルトランドセメント ($C=320$ kg/m³) の結果もあわせて示した。

NEMの場合の温度上昇は初期で著しく、24時間後で最高温度の80%となり、600 kg/m³の場合は3日ではほぼ定常状態となったが、その温度は44.7°Cで800 kg/m³に比べ約10°Cの差が生じた。

コンクリートの断熱温度上昇特性を $T = K(1 - e^{-\alpha t})$ で表わすと、 α はNEM量600 kg/m³の場合1.064、800 kg/m³の場合1.205となった。

4.3.6 凍結融解抵抗性

凍結融解300回終了時の質量減少率と、相対動弾性係数より求めた耐久性指数を図-17に示す。

同図によると、単位NEM量との関係が明らかであり、800 kg/m³以上では作用する水が淡水・海水にかかわらず耐久性指数が97以上となったのに対し、500 kg/m³では海水の場合63に低下し、質量の減少も淡水に比べて大きくなった。また、養生温度の影響も海水の場合で顕著となった。

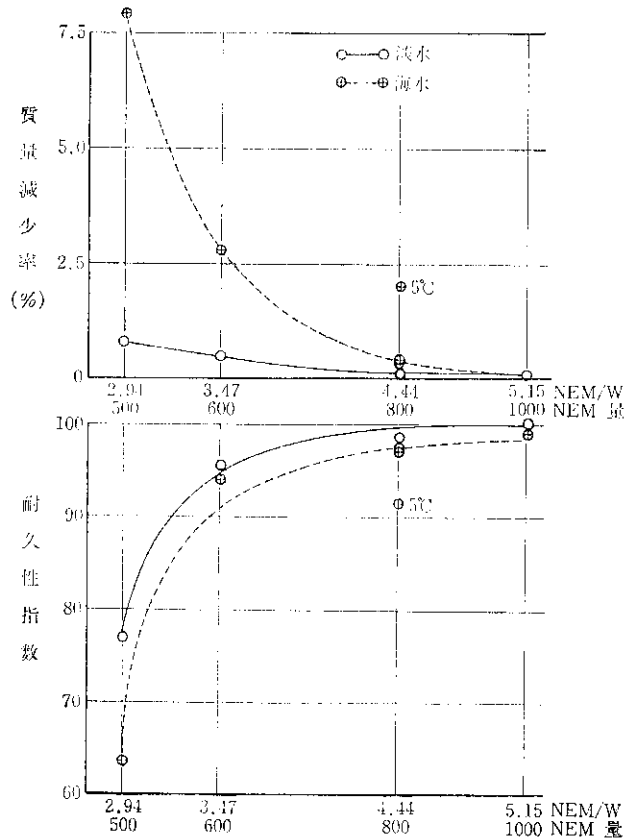
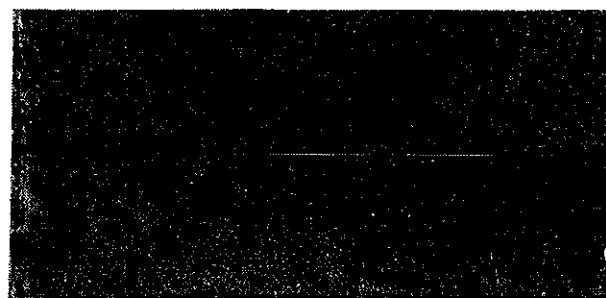
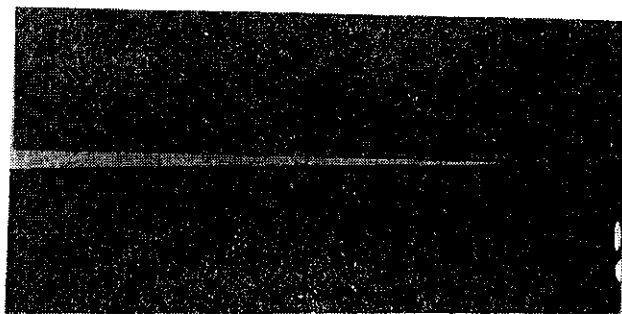


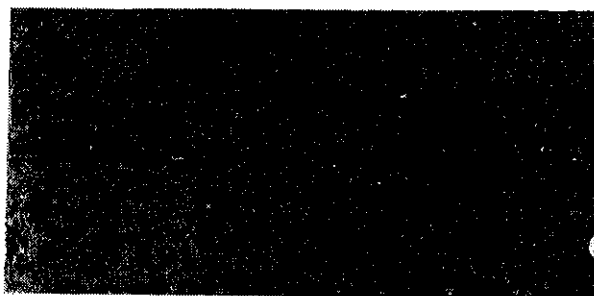
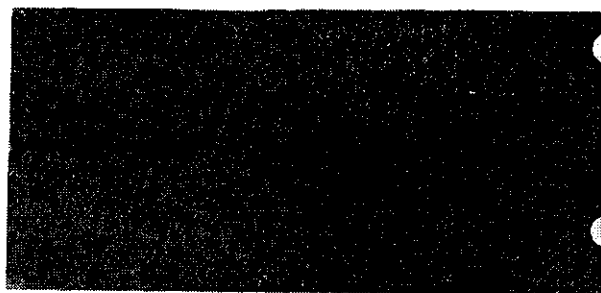
図-17 凍結融解試験結果 (300回終了時)

単位 NEM 量 1000 kg 淡水作用

海水作用



単位 NEM 量 800 kg



単位 NEM 量 600 kg

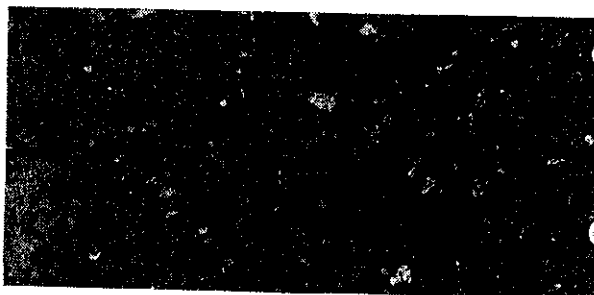
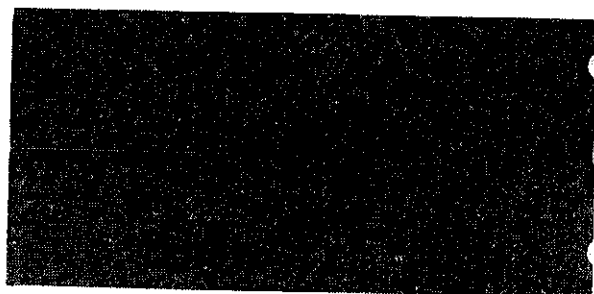


写真-5 凍結融解による供試体表面の変化

試験は 800 回まで継続したが、NEM 量が 800 kg/m^3 以上のコンクリートではほとんど変状が認められなかった。

凍結融解 300 回における供試体の外観を写真-5 に示す。

4.3.7 細孔分布

硬化体の水銀圧入法による細孔径分布の測定結果を図-18, 19 に示す。

材令、NEM 量、養生温度などによる細孔容積・細孔分布の差異が明らかであり、例えば図-18 では、細孔容積 (ΣVp , $\times 10^{-2} \text{ cc/g}$) は 3 Day で 4.46, 7 Day で 3.19, 28 Day で 1.96 と材令の進行とともに減少し、同様に図-19 でも 5°C (800-5) の 3.96 に対し、 20°C (800-20) では 2.59 と養生温度が高いほど少なくなった。また、細孔径分布も半径 $100\sim 500 \text{ \AA}$ 間にあるピークが $50\sim 100 \text{ \AA}$ に移行している。Trinker らはセメント硬化体の細孔の

うち、半径 $1000\sim 10000 \text{ \AA}$ の毛細管空隙が凍害に関する欠陥のひとつであるとしているが、NEM の組織が緻密であることは明確であり、これがきわめて耐久的である理由のひとつといえる。

5. まとめ

高強度・高耐久性コンクリートを指向した高炉スラグ組成物の物性を検討するとともに、スラグ高微粉末・スラグ砂・早強ポルトランドセメントを配合した、プレミックスモルタルを用いたコンクリートの諸性質について検討した。

主な結果を要約すると以下のとおりとなる。

(1) 高炉スラグ高微粉末 (SSP) は、高粉末度にもかかわらずフロー値比が 95% 以上となり、材令 28 日の活性度指数 (SAI) は 140% 以上の高強度を示した。

(2) 1.2 mm 以下の自然砂 NS と水砕砂 CSS を用い

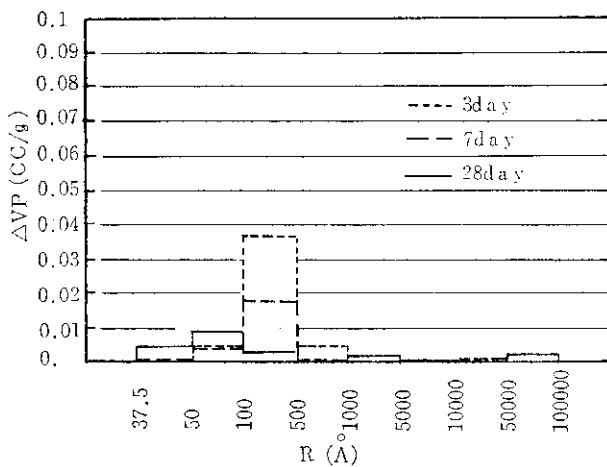
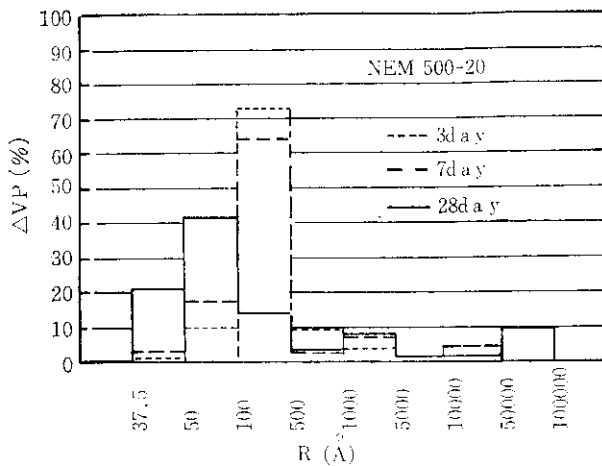


図-18 細孔分布 (材令)

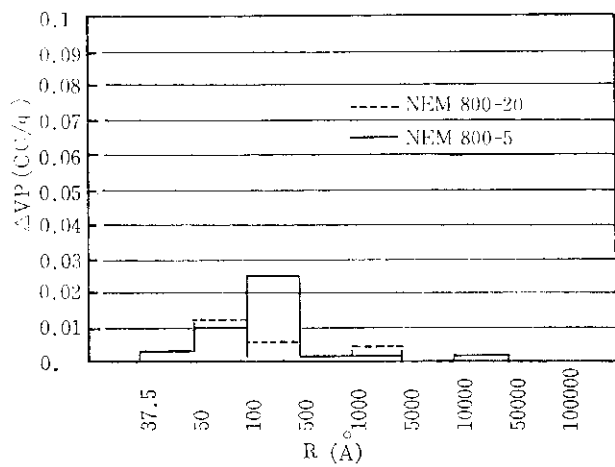
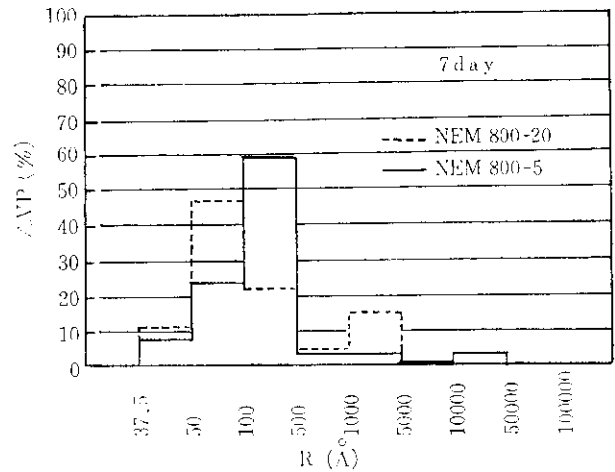


図-19 細孔分布 (養生温度)

たモルタルの強度は、全材令でCSSが上まわり、特に曲げ強度が向上した。

(3) スラグ高微粉末SSPは微粉末FSPに比べ、ig. lossによる結合水が多く、水和が材令とともに進行しており、また見掛けCaO消費率からポゾラン反応の程度もSSPが大きかった。

(4) SSPを配合したペーストの細孔頻度分布はシャープなピークが認められ、細孔径は材令とともに小さくなった。また、モルタルの吸着比表面積はSSPとCSSの配合で最小となった。

(5) SP剤の増量によってコンクリートの水量は減少するが、0.5%を越えると粘性が大きくなり、0.75%以上では効果は少なかった。

(6) プレミックスモルタル(NEM)を用いたコンクリートは、ブリージングが少なくワーカブルとなった。

(7) 初期材令(σ_3)の圧縮強度は養生温度の影響を受け、5°Cでは標準養生の場合の49%となった。しかし、28日強度は乾湿・温度など養生条件による差異は小さくなった。

(8) 単位NEM量を800 kg/m³としたコンクリートの圧縮強度は、材令28日で750 kgf/cm²程度が期待できる。

(9) 単位NEM量によってコンクリートの耐凍害性は異なるが、その緻密性からきわめて耐久であり、海水に対する抵抗性も期待できる。

6. あとがき

今後さらに資料の蓄積を行って使用基準の策定を図るとともに、鉄筋コンクリートに適用するため、付着・疲労などの強度特性および乾燥収縮・ポアソン比などの変形特性についても検討する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 日鐵セメント株式会社；昭和60年度共同研究成果報告書，昭和61年3月。
- 2) 北海道開発局土木試験所；昭和60年度共同研究成果報告書，昭和61年3月。
- 3) 土木学会基準；コンクリート用高炉スラグ微粉末規格(案)。