

# 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3)

## Research on High Durability Concreting with Blast Furnace Slag Composites (III)

齊藤 敦志\* 堺 孝司\*\*  
小出 儀治\*\*\* 下林 清一\*\*\*\*

Atsushi SAITO, Koji SAKAI,  
Yoshiharu KOIDE and Seiichi SHIMOBAYASHI

高炉スラグ微粉末の水和活性を有効に利用するためにこれを高微粉末化したものと、破碎加工した高炉スラグ細骨材、ポルトランドセメントおよび高性能減水剤を混合した高品質結合材を日鉄セメント㈱が開発した。このプレミックスモルタルをコンクリートに適用した場合の高強度および高耐久性コンクリートへの可能性を検討するために、強度特性、耐久性および施工性などに関する試験を行った。

その結果、このプレミックスモルタルを適用したコンクリートは乾燥による曲げ強度の低下が認められること、耐酸性に優れていることおよび流動化コンクリートとしての使用が可能であることなどが確認された。

《高炉スラグ微粉末；コンクリート；曲げ強度；耐酸性》

For the effective use of hydration in ground granulated blast furnace slag, Nittetsu Cement, Co., Ltd. has developed a high quality binder made from Portland cement, fine aggregate of blast furnace slag, superplasticizer, and ground granulated blast furnace slag. To examine the use of this pre-mixed mortar in high strength concretes and durable concrete, experiments were conducted on the strength, durability, and flow of concrete.

Concrete with pre-mixed mortar showed large decreases in flexing strength due to drying, excellent resistance against acid, and the possibility of use in flowing concrete.

Keywords: ground granulated blast furnace slag, concrete, flexural strength, resistance against acid.

### 1. ま え が き

溶鉱炉（高炉）から産出される高炉スラグは、その冷却処理方法によって徐冷スラグ、急冷スラグおよび膨脹スラグの3種類に大別される。急冷スラグは、熔融状態

のスラグを水または空気により急激に冷却したスラグであり、ガラス質で潜在水硬性を有している。高炉スラグ微粉末は、この急冷スラグをさらに粉碎したもので、特に高炉セメントとして広く利用されている。

\*材料研究室員 \*\*同室長 \*\*\*日鉄セメント㈱専務取締役 \*\*\*\*同社研究開発部課長研究員

近年、高炉スラグ微粉末はアルカリ骨材反応の抑制、水和熱による温度上昇の抑制および硫酸塩や海水に対する化学抵抗性の向上などに効果があることが認められ、コンクリート用混和材としてその目的に応じて粉末度および置換率などを使い分けることが検討されている。

日鉄セメント(株)は、工業生産した最大粒径8 $\mu$ m、ブレーン比表面積8,030 $\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ高微粉末を乾燥、破砕加工した1.2mm以下の高炉スラグ細骨材および早強ポルトランドセメントに配合し、高性能減水剤を添加したプレミックスモルタル(NEM)を開発した。材料研究室では、昭和60年度より同社とこの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、高強度および高耐久性コンクリートの可能性について共同研究を実施している。本報告は、昭和60年度および61年度の成果<sup>1-4)</sup>をふまえ、このプレミックスモルタル(NEM)を適用したコンクリートの強度特性、耐久性および施工性について検討した結果について述べるものである。

## 2. 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメント(以下、NPC

と略記)、早強ポルトランドセメント(以下、HPCと略記)を使用し、高炉スラグ微粉末は汎用スラグ微粉末(以下、FSPと略記)とスラグ高微粉末(以下、SSPと略記)を使用した。B種高炉(以下、BBと略記)は、HPCとFSPを重量比で1:1の割合で配合した。モルタル試験に用いた高炉スラグ組成物(以下、NEMと略記)は、HPCとSSPを重量比で1:1の割合で配合した。コンクリートの試験に用いたNEMは、重量比でHPC30%、SSP30%、スラグ細骨材(以下、CSSと略記)40%であり、高性能減水剤をHPCとCSSを合わせた重量に対して固形分で0.4%含有している。高性能減水剤は、ナフタリンスルホン酸塩系のものを用いた。セメント、スラグ微粉末の化学成分を表-1に、セメント、スラグ微粉末およびNEM結合材の物理試験結果を表-2に、NEM結合材に用いた早強ポルトランドセメントおよびスラグ高微粉末の粒度を表-3に示す。

次節以降に述べた圧縮強度特性の試験2および曲げ強度の低下に関する試験のコンクリート試験に使用した細骨材は、苫小牧市錦岡産の海岸砂(比重2.71、粗粒率2.84)、粗骨材は手稲金山産の碎石(比重2.69、粗粒率

表-1 セメント、スラグ微粉末の化学成分

材 料	記 号	化 学 成 分 (%)					
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
セメント	NPC	21.5	5.3	2.9	64.4	2.5	2.0
	HPC	20.4	5.3	2.8	64.7	2.7	2.8
スラグ微粉末	FSP	30.7	14.4	0.6	43.7	6.0	2.4
	SSP	30.1	13.8	0.6	42.5	5.9	4.5

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 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	曲 げ 強 さ (Kgf/ $\text{cm}^2$ )				圧 縮 強 さ (Kgf/ $\text{cm}^2$ )			
			1日	3日	7日	28日	1日	3日	7日	28日
NPC	3.17	3100		34.1	45.6	67.4		140	233	405
HPC	3.14	4130	33.8	46.9	59.3	69.3	135	240	320	440
FSP	2.92	4080								
SSP	2.91	7790								
NEM結合材	3.02	5860	25.1	42.3	55.6	78.6	83	210	348	532
B種高炉	3.03	4120		28.2	42.6	64.2		119	202	403

NEM結合材 HPC:SSP=1:1 B種高炉(BB) HPC:FSP=1:1 JIS R 5201

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 質 量 百 分 率 (%)												Dp 50 $\mu\text{m}$
	1 $\mu\text{m}$	2	4	6	8	10	12	16	24	32	48	64	
HPC	6.7	11.0	21.5	28.9	36.5	—	47.7	62.0	78.1	88.2	96.7	100	12.6
SSP	12.6	25.0	52.2	71.5	88.2	97.8	100						3.9

7.04) である。その他の試験には、細骨材はスラグ細骨材と登別産の海岸砂(比重2.74, 粗粒率2.66)を、粗骨材は竹浦産の安山岩質砕石(比重2.67, 粗粒率6.57)を

使用した。スラグ細骨材の品質を表-4に示す。

NEM流動化コンクリート試験に用いた混和剤の成分を表-5に示す。

表-4 スラグ細骨材の品質

細骨材	記号	比重	単位容積質 (kg/ℓ)	実積率 (%)	フルイ通過率 (%)			
					1.2mm	0.6	0.3	0.15
スラグ細骨材	CSS	2.80	1565	55.1	100	39	28	3

表-5 混和剤の成分

記号	種類	成分
A	減水剤	ナフタリンスルホン酸、変性リグニン
B	流動化剤	ナフタリンスルホン酸、変性リグニン
C	減水剤	ナフタリンスルホン酸、ホルマリン高縮合物
D	流動化剤	ナフタリンスルホン酸、ホルマリン高縮合物
E	A E 減水剤	アニオン型特殊高分子活性材

### 3. 試験の概要と方法

#### 3.1 圧縮強度特性

##### (1) 試験1

コンクリートの練り混ぜには、容量100ℓ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、砕石を入れて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。圧縮試験はJIS A 1108に従って実施した。

##### (2) 試験2

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、練り混ぜ時間は試験1と同様とした。圧縮試験は、JIS A 1127に従って動弾性係数を求めた後JIS A 1108に従い試験を行った。また、同時にコンプレッソメーターを用いてひずみを測定し、静弾性係数を求めた。試験の概要を表-6に示す。

表-6 圧縮強度試験の概要

	結合材	養生条件	材令(日)
試験1	NEM	水中	3 7
	NPC		28 91
	HPC	気中	182
	BB		
試験2	NEM	3日以後気中	3 7
	NPC	7日以後気中	
	HPC	28日以後気中	28 91
		水中	

#### 3.2 気中養生による曲げ強度低下に関する試験

##### (1) モルタル試験

モルタルの練り混ぜおよび曲げ強度試験は、JIS R 5201に基づき行った。物理化学的試験の試料は曲げ強度試験後の供試体を用い、水中7日および28日については中心部のみ、水中7日以後気中21日は中心部と表層部(0~3mm)の採取を行った。採取試料は粉碎し、110°Cにて24時間乾燥し水分を測定した。また、24時間真空乾燥して水銀圧入による細孔径分布の測定を行った。

##### (2) コンクリート試験

曲げ試験は、JIS A 1127に従って動弾性係数を求めた後、JIS A 1106に従い試験を行った。また、気中養生開始時と曲げ試験時の重量を測定し、気中養生による重量減少率を求めた。細孔構造の測定は、曲げ強度試験後のコンクリートを表層部(0~10mm)と内部に分離し、それぞれ金槌で破碎して2.5~5.0mm粒度の試料を採取した。採取した試料はアセトンで洗浄後D-Dry法により乾燥し、溶解率および細孔構造の測定用試料とした。溶解率の測定は1規定HCl溶液中に試料を入れ、マグネチックスタラーで1時間攪はんし、不溶残分を求めた。細孔構造の測定は、水銀圧入式ポロシメーターを用いて測定した。この結果を用いて、セメントペースト中の細孔量(有効細孔量)を求めた。

試験の概要を表-7に示す。

#### 3.3 有機酸に対する耐久性

モルタル供試体を5%濃度の各有機酸に浸せきし、浸

表-7 曲げ強度に関する試験の概要

	結合材	養生条件	材令(日)	試験項目
モルタル 試験1	NEM	水中	7	曲げ強度 水分 細孔構造
	NPC		28	
	HPC	7日以後気中	7	
	BB		28	
コンクリート 試験2	NEM	7日以後気中	7	曲げ強度 質量 細孔構造
	NPC	28日以後気中	28	
	HPC	水中	91	

表-8 有機酸に対する耐久性試験の概要

結合材	養生条件	浸せき液	測定材令(週)	試験項目
NPC	7日水中	酢酸	1 2 4	重量 外観観察
BB	28日水中	乳酸	8 12 16	
NEM				

表-9 NEM流動化試験の概要

混和剤	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	試験項目
A + B	ベース 12±1	ベース 2	圧縮強度 凝結硬化速度 凍結融解試験 コンクリートの経時変化
C + D	流動化 23±1	4±1	
E	23±1	流動化 2 4±1	

せき材令ごとに重量測定を行った。試験の概要を表-8に示す。

### 3.4 NEM流動化コンクリート

NEMコンクリートの施工性改善を検討するため、NEMの高性能減水剤を0%とし高性能減水剤、流動化剤を表-5の記号の組合わせのとおり1) A, B 2) C, D 3) Eとして流動化コンクリートの試験を行った。

コンクリートの練り混ぜは100lの強制練りミキサを使用し、NEMおよび細骨材を10秒間混合、その後水を入れて90秒、粗骨材を入れて90秒間練り混ぜベースコンクリートとした。ベースコンクリートの練り混ぜ開始15分後に流動化剤をコンクリートにふりかけ、30秒間練り混ぜ流動化させた。

スランプおよび空気量の経時変化は、流動化したコンクリートに湿布をかぶせて板上に静置、試験時にミキサに戻し30秒間練り混ぜ後スランプおよび空気量の測定を行った。試験の概要を表-9に示す。

## 4. 試験の結果と考察

### 4.1 圧縮強度特性

#### (1) 試験1

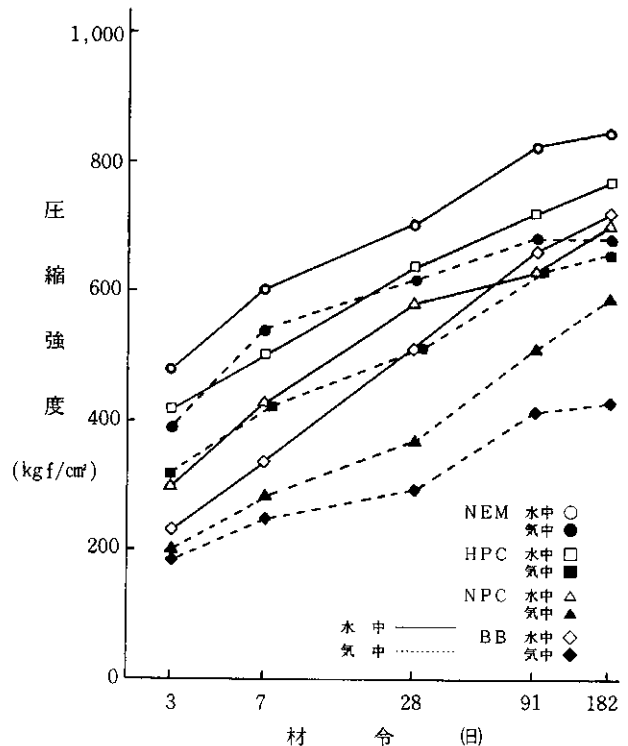


図-1 材令と圧縮強度の関係

表-10 コンクリートの配合および練り上がり性状

結合材	スラップの範囲 (cm)	細骨材率 s/a (%)	水結合材比 (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )						スラップ (cm)	空気量 (%)
				水 W	結 合 材		細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 (1/m <sup>3</sup> )		
					NEM	C					
NEM	12 ± 2	28	22.8	182	800	—	400	1008	—	11.3	2.2
NPC		40	35.4	170	—	480	688	1011	0.96	12.2	5.0
HPC		40	35.4	170	—	480	688	1008	2.40	10.5	5.0
BB		40	35.4	170	—	480	683	1003	1.44	12.1	4.9

表-11 コンクリートの配合および練り上がり性状

結合材	スラップの範囲 (cm)	細骨材率 s/a (%)	水結合対比 (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )						スラップ (cm)
				水 W	結 合 材		細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 (1/m <sup>3</sup> )	
					NEM	C				
NEM	10 ± 2	30	22.9	183	800	—	444	1028	—	10.5
HPC		37	32.0	160	—	500	684	1156	6.00	11.2
NPC		40	29.6	148	—	500	752	1110	6.00	10.4

コンクリートの配合および練り上がり性状を表-10に、材令と圧縮強度の関係を図-1に示す。なお、それぞれの値は供試体3個の平均値である。圧縮強度はセメントの種類および配合によらず脱型後すぐに気中養生した場合より水中養生の方が大きい。28日以後の長期強度の伸びは、NEM および BB の気中養生の場合91日以後頭打ち、他はいずれも増加傾向にある。BB 水中養生および NPC 気中養生は強度の伸びが大きく、28日から182日では約40%増加している。NEM の伸びは約20%で、182日で845 kgf/cm<sup>2</sup>が得られた。

本試験結果から NEM コンクリートの長期圧縮強度特性は、水中養生においては NPC、HPC と同じ傾向にあるといえる。一般に高炉セメントは初期強度は低く、長期強度の伸びが大きい。NEM に使用しているスラグ高微粉末は、粉末度が大きい初期水和反応率が大きく、材令初期に高い強度発現をするために BB ほどの長期強度の伸びはないといえる。気中養生においては NEM、BB とともに材令91日以後の伸びが小さいが、いずれもコンクリートの乾燥によるスラグの水和停止が原因と考えられる。

(2) 試験 2

コンクリートの配合および練り上がり性状を表-11に、材令と圧縮強度の関係を図-2に示す。気中養生による圧縮強度への影響は判然としない。NEM の場合28日強度は、水中養生を続けたものが最大であった。しかし、水中養生の場合28日以後の強度の伸びが小さく、91日強度は7日および28日以後気中養生の場合より小さかった。

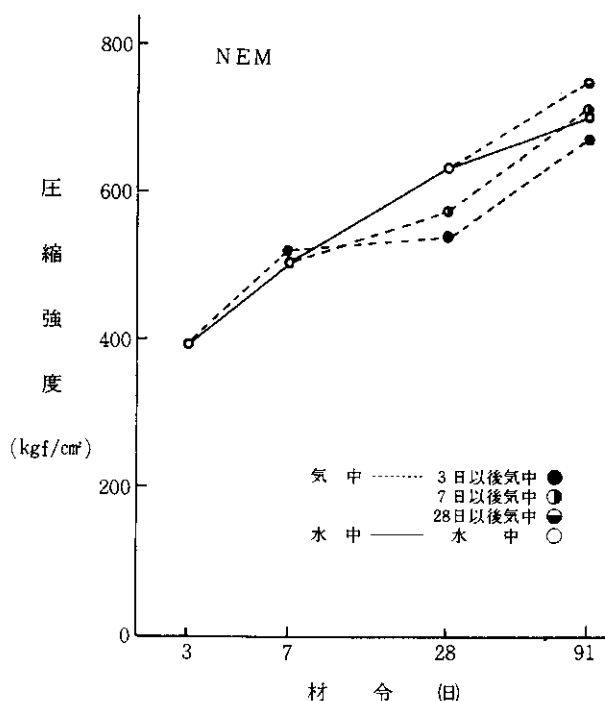


図-2 材令と圧縮強度の関係

圧縮強度と弾性係数の関係を図-3に示す。弾性係数は水中養生と3日、7日および28日以後気中養生の場合とを比較すると、気中養生の方が小さい値となった。圧縮強度に対する気中養生の影響は判然としないが、弾性係数は静および動弾性係数ともに低下し、静弾性係数と動弾性係数には相関性が見られた。

4.2 気中養生による曲げ強度低下に関する試験

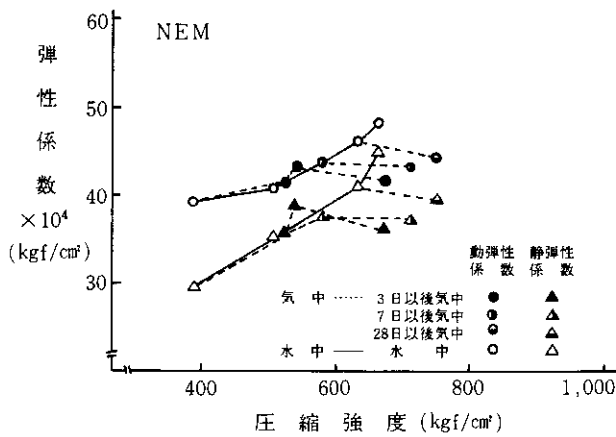


図-3 圧縮強度と弾性係数の関係

(1) モルタル試験

モルタルの配合を表-12に、材令と曲げ強度の関係を図-4に示す。材令28日の曲げ強度は結合材の種類および配合によらず、気中養生することにより水中養生に比べ低下した。結合材がNPCの場合は水結合材比37.5%および30%で気中養生の28日強度は水中養生の28日強度のそれぞれ95%および86%であるが、NEMの場合はそれぞれ48%および47%まで低下した。

表-13のモルタルの水分結果より、水中養生においてNPCに比べNEMの方が自由水が多い。水中養生と気中養生のモルタル中心部の水分の差は、水結合材比37.5%の場合NPCで1.6%、NEMで0.7%、水結合材比30%の場合NPCで1.4%、NEMで0.4%となっている。このことより、NEMは自由水が多いにもかかわらず、気中養生による中心部での水分の散逸が少ないといえる。

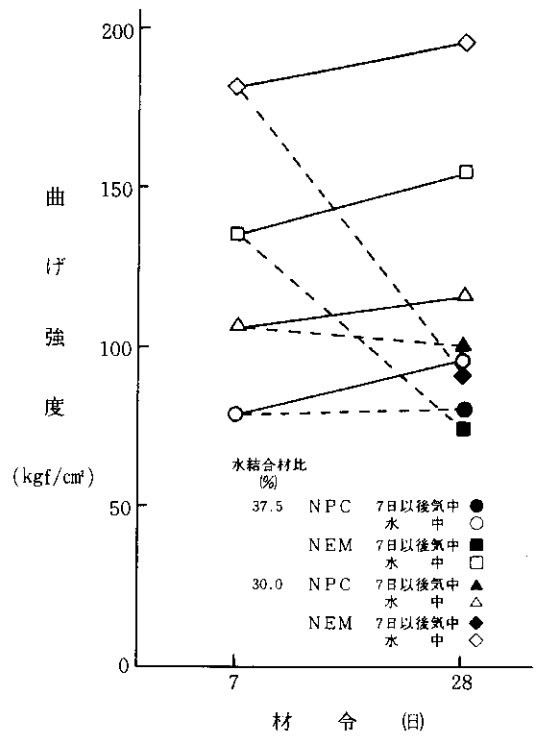


図-4 材令と曲げ強度の関係

また、気中養生したモルタルの表層部と中心部の水分の差は水結合材比37.5%の場合、NPCでは1.0%、NEMで2.0%、水結合材比30%の場合、NPCで2.4%、NEMで4.0%となっている。これらのことから、NEMはNPCに比べ急な湿度勾配をとっていると思われる。

表-14のモルタルの全細孔量の結果より、気中養生による全細孔量の変化は認められないが、平均細孔径はNPC

表-12 モルタルの配合

結合材	水結合材比 (%)	高性能減水剤量 (%)	単 位 量 (kg/m³)			
			水	結合材	CSS	細骨材
NPC	37.5	0.4	302	804	—	1205
NEM			300	800	534	668
NPC	30.0	1.0	256	856	—	1284
NEM			255	852	568	706

表-13 モルタルの水分

	水結合材比 (%)	水中28日	水中28日	気中28日	水中と気中の中心部の水分差 (A-B)	気中の中心部と表層部の水分差 (B-C)
		中心部A	中心部B	表層部C		
NPC	37.5	7.9	6.3	5.3	1.6	1.0
NEM		10.7	10.0	8.0	0.7	2.0
NPC	30.0	6.2	4.8	2.4	1.4	2.4
NEM		7.3	6.9	2.9	0.4	4.0

表-14 モルタルの細孔量

	水結合材比 (%)	採取位置	水中				21日気中	
			7日		28日		7日水中	
			全細孔量 (cc/g)	平均細孔径 (Å)	全細孔量 (cc/g)	平均細孔径 (Å)	全細孔量 (cc/g)	平均細孔径 (Å)
NPC	37.5	中心部	0.073	600	0.050	320	0.037	700
		表層部	—	—	—	—	0.053	2000
NEM		中心部	0.080	480	0.058	450	0.049	400
		表層部	—	—	—	—	0.059	500
NPC	30.0	中心部	0.036	400	0.038	450	0.016	340
		表層部	—	—	—	—	0.046	1000
NEM		中心部	0.070	550	0.047	450	0.053	500
		表層部	—	—	—	—	0.033	400

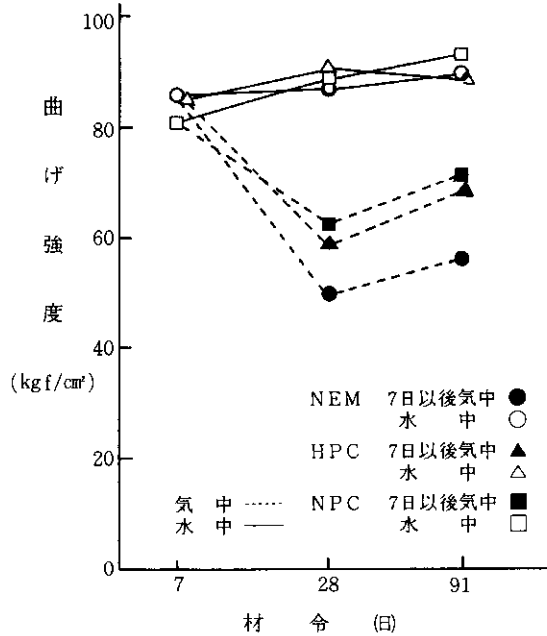


図-5 材令と曲げ強度の関係

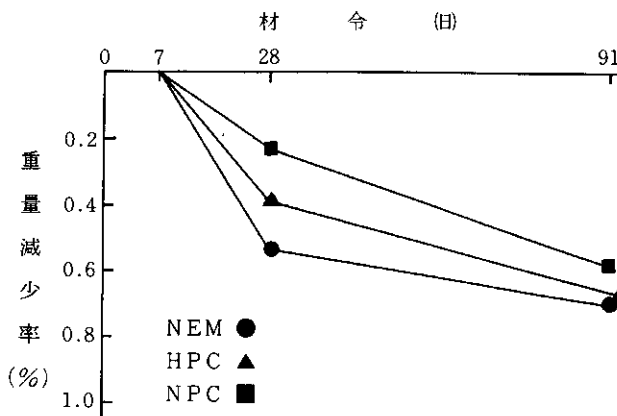


図-6 材令と重量減少率の関係

表-15 コンクリートの細孔量

	採取位置	水中	7日以後気中
		有効細孔量 (cc/g)	有効細孔量 (cc/g)
NEM	中心部	0.064	0.059
	表層部	0.062	0.065
NEM	中心部	0.060	0.052
	表層部	0.050	0.066
NPC	中心部	0.052	0.058
	表層部	0.044	0.051
HPC	中心部	0.053	0.065
	表層部	0.055	0.064

の場合水中養生28日に比べ、水結合材比37.5%で中心部が2倍、表層部が6倍になっている。また、水結合材比30%では中心部は小さくなっているが表層部では2倍となっている。気中養生により細孔構造が変化していることがうかがえる。NEMの場合は気中養生による細孔径の変化は認められない。

以上の結果より、NPCは表層部が多孔質な組織となっているため、中心部からの自由水の蒸発も可能となり表層部と中心部との湿度勾配が緩やかであるが、NEMは表層部も緻密化しているため中心部からの自由水の蒸発が少なく、表層部と中心部との湿度勾配が急になると考えられる。したがって、気中養生によるNEMの曲げ強度の大幅な低下は、モルタル内外の急な湿度勾配により表面に引張応力が働いたためと考えられる。

(2) コンクリート試験

コンクリートの配合および練り上がり性状を表-11に、材令と曲げ強度の関係を図-5に示す。7日以後気中養生の場合、NEM、HPCおよびNPCの28日強度は、それぞれ7日強度の57.7%、68.7%および77.0%に低下

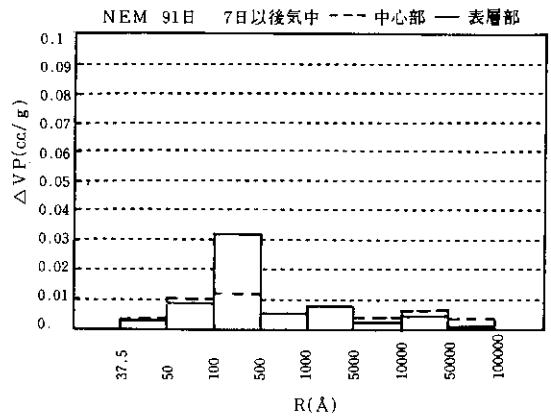
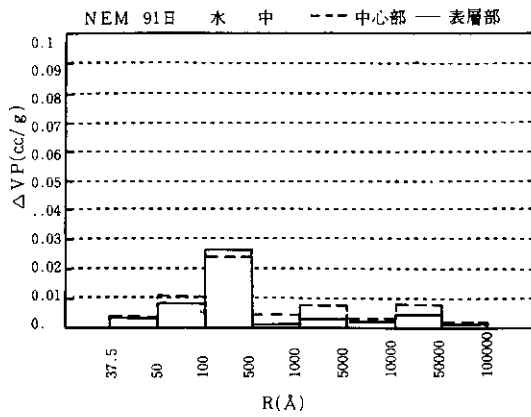
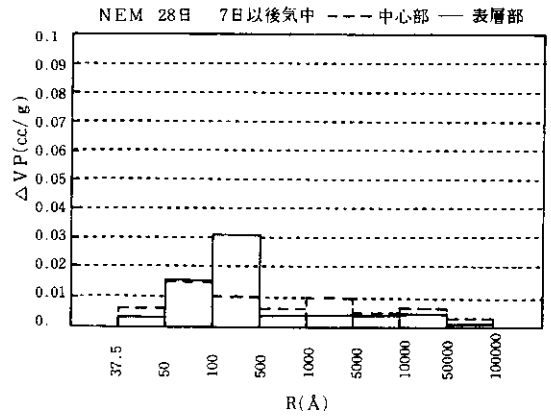
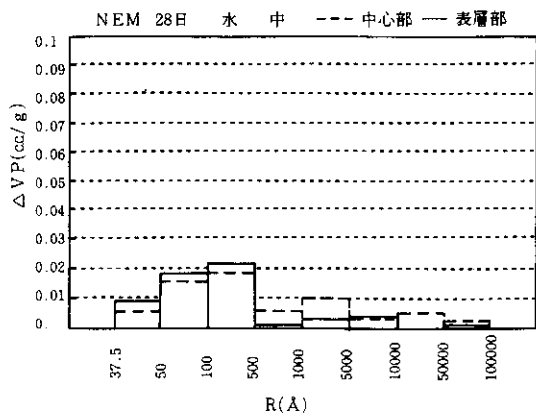


図-7 細孔径分布

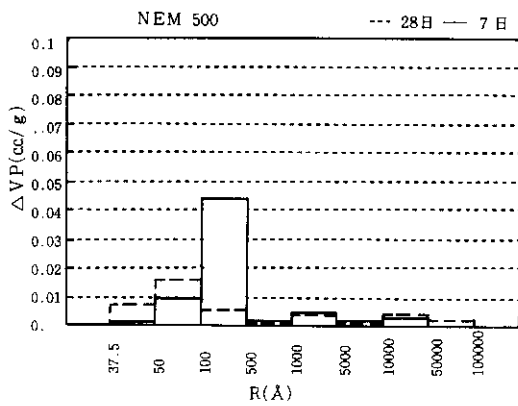


図-8 細孔径分布

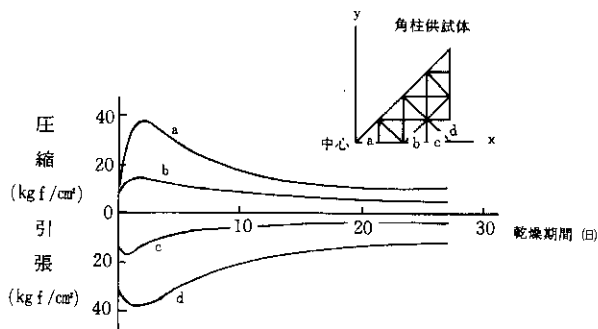


図-9 角柱試験体の内部応力<sup>5)</sup>

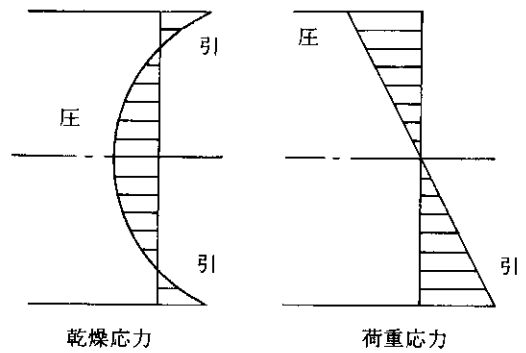


図-10 曲げ試験時断面応力<sup>5)</sup>

しており、低下率はNEMが最も大きかった。材令91日強度は、いずれの場合も28日強度より上昇しており、回復傾向にあると考えられる。

材令と重量減少率の関係を図-6に示す。材令28日での重量減少率は、NEMが最も大きかった。このことは7日以後気中養生した場合、材令28日の曲げ強度の低下率はNEMが最も大きいことと関係していると考えられる。

有効細孔量を表-15に示す。気中養生による表層部と中心部での有効細孔量の差は認められなかった。水中養生と7日以後気中養生における表層部の有効細孔量は、



7日以後気中養生の方が多かった。ただし、この差は0.003~0.016 cc/gとごくわずかであった。

細孔分布を図-7に示す。7日以後気中養生の表層部と中心部の細孔分布を比較すると、細孔径100~500Åの量はいずれの場合も表層部の方が多かった。水中養生と7日以後気中養生の表層部を比較すると、細孔径100~500Åの量は7日以後気中養生の方が多かった。図-8に示したNEM 500 kg/m<sup>3</sup>、材令7日および28日の細孔分布では、材令7日の細孔分布は細孔径100~500Åの量がきわめて多いが、材令28日はその量は少なくなっており、若材令時は細孔径100~500Åの量が多く、水和が進むにつれてこの量が減少していくものと考えられる。これより、7日以後気中養生したものの表層部は、その中心部および水中養生したものに比較して水和が進行していないと考えられる。

永松らの研究<sup>5)</sup>によると、乾燥による強度変化はコンクリート試験体内における脱水量の不均一分布に基づく内部応力による影響、物質が脱水すること自体による強度の増加の影響および乾燥過程における水和の進行などによるもので、曲げ強度は乾燥に伴い数日の間に急激に低下するが、その後徐々に回復するとしている。この原因として、試験体は乾燥により図-9に示すような応力状態となり、試験体の表層部は引張応力、中心部では圧縮応力を生じている。曲げ試験時には断面応力が図-10のような状態であることを考えると、この引張応力の経時変化が試験体を乾燥させた場合の曲げ強度の変化に大きな影響を与えるとしている。

本試験の場合、7日以後気中養生の材令28日から材令91日までの重量減少率は小さく、材令91日ではこの脱水量の不均一に基づく引張応力は減少したと考えられ、このため曲げ強度が材令28日より上昇したと考えられる。

表-16 モルタルの配合

結合材	水結合材比 (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )			
		水	結合材	C S S	細骨材
N P C	48.0	296	617	—	1382
B B		294	613	—	1373
N E M		295	615	410	969
N P C	37.5	302	805	—	1206
B B		299	798	—	1196
N E M		300	800	534	668

#### 4.3 有機酸に対する耐久性

モルタルの配合を表-16に示す。図-11から重量変化率は酢酸およびぎ酸に対してはNEMはBBと同等、NPC

に対しては小さい。乳酸に対してはNEMの重量変化率はNPCおよびBBに比べて小さいといえる。

配合による影響は、乳酸に浸せきしたNPCおよびBBについては水結合材比の小さい方が重量変化率が3~8%小さいがその他は差がない。また、7日水中と28日水中の養生期間の違いによる差は認められない。

3種類の酸の中では、ぎ酸および乳酸の侵食度が大きく酢酸は小さい。これは溶液のPH(ぎ酸1.2, 乳酸1.8, 酢酸2.4)の傾向とほぼ一致している。

本試験の結果から、NEMはNPCに比べて酢酸、ぎ酸および乳酸のいずれに対しても耐酸性に優れている。また、BBとの比較では酢酸、ぎ酸に対しては差は認められないが、乳酸に対しては優れているといえる。

有機酸によるコンクリートの劣化は、次のような機構で進行する。

- 1) 硬化セメントペーストへの溶液の浸透および拡散
- 2) 硬化セメントペーストと溶液の反応
  - a) 水酸化カルシウムとの反応
  - b) カルシウムシリケート水和物との反応
  - c) カルシウムアルミネート水和物との反応
- 3) 2)により生成したカルシウム塩の溶出
- 4) 硬化セメントペーストの劣化および剥離による重量減少

NEMはNPCに比較して、(1)水酸化カルシウムの生成量が少ない、(2)組織が緻密で溶液浸透が小さい、(3)スラグ細骨材の使用により骨材ペースト界面の欠陥が少なく溶液浸透が小さい。以上の理由により、NEMは有機酸に対して優れた抵抗性を有すると考えられる。特に乳酸に対しては、BBとの比較においても大きな差が見られるが、これは以下の理由によるものと思われる。まず、供試体の侵食状況であるが、乳酸に浸せきしたNPC、BBは劣化部と健全部との境界に乳酸カルシウムの生成が観察され、そこからモルタルが剥離するのに対して、ぎ酸では表面から一様に侵食している、すなわち、ぎ酸の場合は生成したぎ酸カルシウムがただちに溶解し、供試体表面を徐々に侵食するのに対して、乳酸では供試体内部に乳酸カルシウムを生成し、膨張によりモルタルを劣化させる。このことから、水酸化カルシウムの生成が少ないBBにおいても、乳酸が供試体内部に浸透し乳酸カルシウムの生成により劣化が進むのに対し、NEMは組織が緻密で溶液の浸透が小さいため劣化が少ないと考えられる。

#### 4.4 NEM流動化コンクリート

コンクリートの配合および練り上がり性状を表-17に示す。

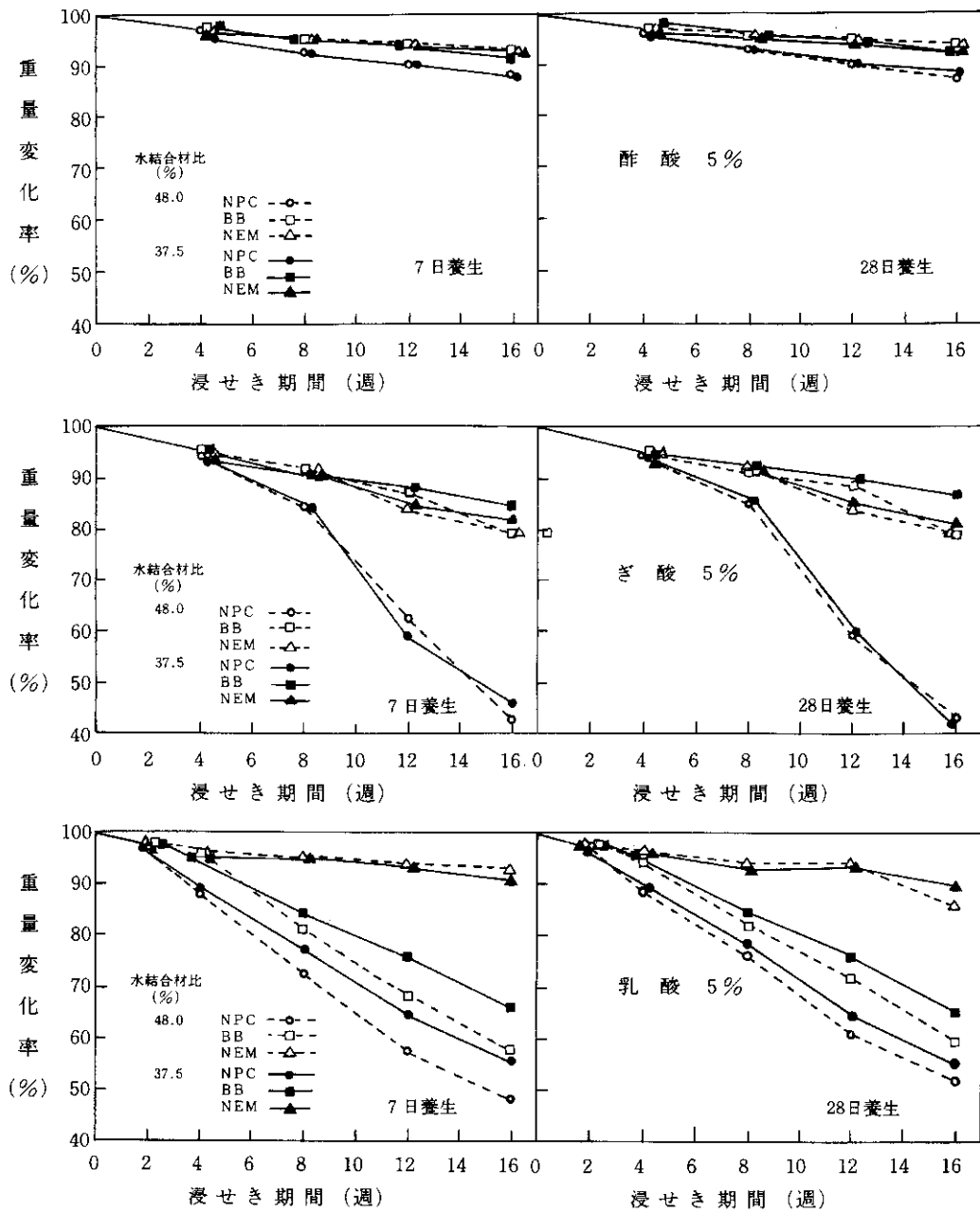


図-11 モルタル供試体の重量変化率

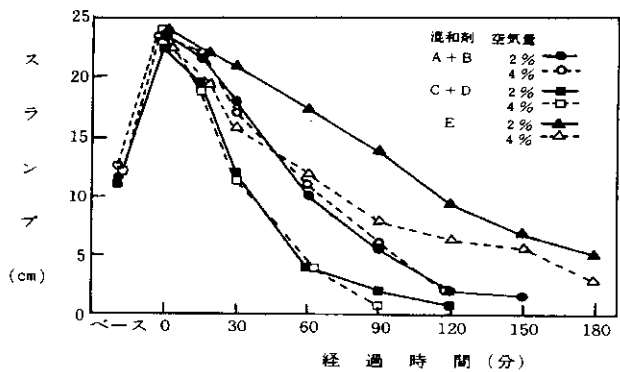


図-12 スランプの経時変化

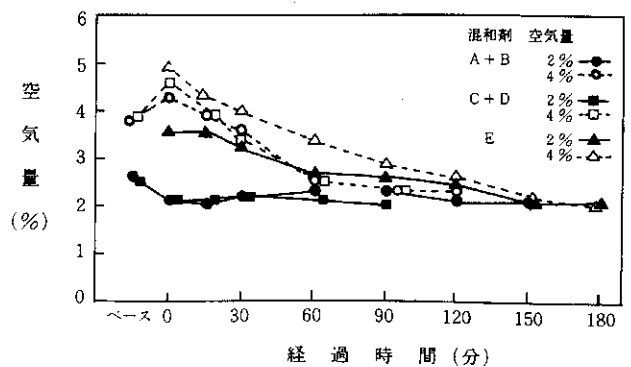


図-13 空気量の経時変化

表-17 コンクリートの配合および練り上がり性状

混和剤	目標スランブ (cm)		目標空気量 (%)		細骨材率 s/a (%)	水結合材比 (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )						目標スランブ (cm)		目標空気量 (%)		
							水	結合材	細骨材	粗骨材	減水剤	流動化剤					A E 剤
	ベース	流動化	ベース	流動化	(%)	(%)	W	NEM	S	G	(C×%)	(C×%)	(C×%)	ベース	流動化	ベース	流動化
A+B	12	23	2	2	32	35.4	163	800	475	987	1.75	0.50	—	12.3	23.0	3.0	2.4
			4	4	30	35.4	163	800	431	979	1.55	0.56	2.50	13.0	22.5	4.0	4.2
C+D	12	23	2	2	32	35.4	163	800	475	987	1.15	0.45	—	13.0	22.5	2.6	2.3
			4	4	30	35.4	163	800	431	976	1.10	0.50	0.038	12.5	24.0	3.8	3.9
E	12	—	2	2	32	35.4	180	800	461	955	2.00	—	—	22.4	—	3.3	—
			4	4	30	35.4	180	800	415	947	2.00	—	0.005	23.5	—	4.2	—

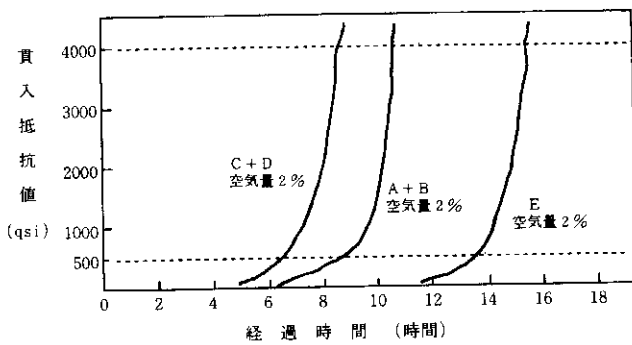


図-14 コンクリートの凝結

(1) スランブおよび空気量の経時変化

図-12よりスランブは混和剤に E を使用したものが最も少なく、次に A+B, C+D の順になっている。空気量による影響は、E が AE コンクリートに比べて non AE コンクリートの方がスランブロスが少ない。他の 2 種は AE, non AE とも同じ傾向を示している。図-13より流動化によって空気量は AE コンクリートが若干増加、non AE コンクリートは減少している。空気量の変化は、流動化60分後で空気連行が失われる傾向を示している。

(2) 凝結性状

図-14より E が凝結時間が最も長く始発までに13時間30分を要しており、凝結遅延の傾向にあるといえる。

(3) 圧縮強度

図-15より圧縮強度は C+D, A+B とほぼ同じ傾向を示し、材令28日で850 kgf/cm<sup>2</sup>が得られた。AE コンクリートとした場合は、プレーンと比較して5~10%強度が低下している。

図-16より養生温度の影響は混和剤の種類によらず大きい、材令が進むにつれて20°C養生との差は小さくなっている。

(4) 凍結融解抵抗性

図-17より、NEM 流動化コンクリートの質量減少率

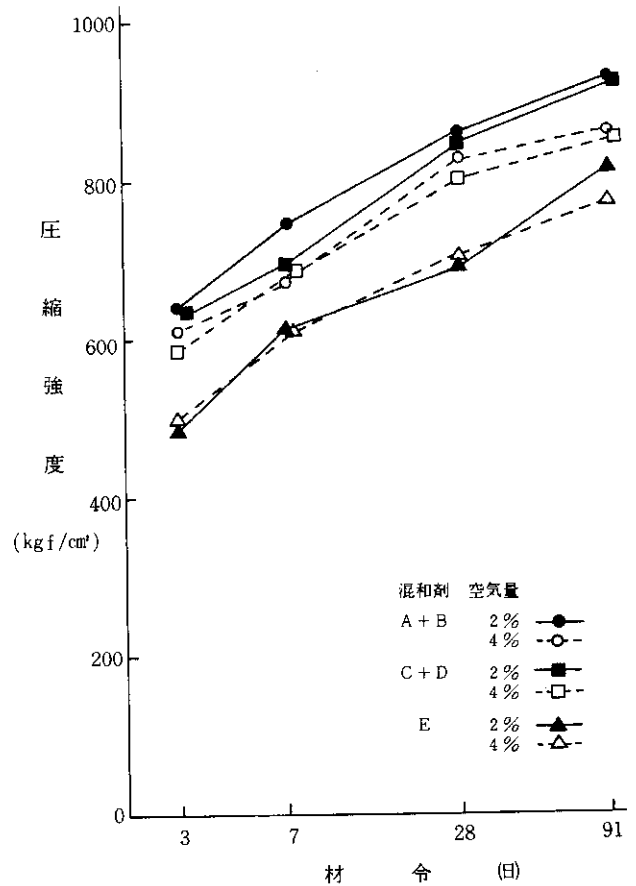


図-15 材令と圧縮強度の関係

および相対動弾係数は AE, non AE コンクリートとも300サイクルでほぼ100%を保っており、NEM コンクリートは凍結融解抵抗性が優れているといえる。

以上の結果から、スランブロス低減に関しては E が有効であり、凍結融解については NEM の場合プレーンコンクリートで十分な凍結融解抵抗性が得られるといえる。圧縮強度については、混和剤の減水率の違いにより水結合材比が異なるため一概に比較はできないが、高性能減水剤+流動化剤の使用が有効と考えられる。

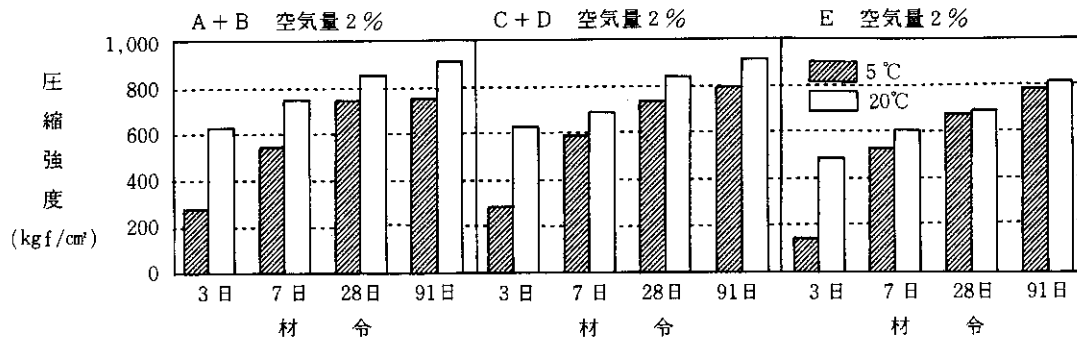


図-16 養生温度と圧縮強度の関係

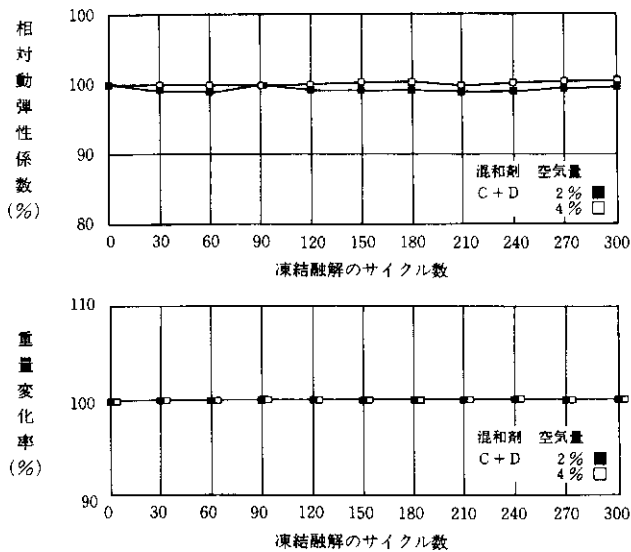


図-17 凍結融解試験結果

## 5. おわりに

以上、本試験の結果をまとめると次のようになる。

- (1) 気中養生による圧縮強度への影響は判然としないが、弾性係数は静および動弾性係数ともに低下し、静弾性係数と動弾性係数には相関性が見られた。
- (2) 気中養生による曲げ強度の低下は、表層部と中心部との急な湿度勾配によるものと思われる。
- (3) 曲げ強度は、7日以後気中養生することにより28日強度は低下したが、91日強度は若干回復した。
- (4) 平均細孔径および細孔分布から、気中養生による表層部での細孔構造の変化が認められた。
- (5) NEM流動化コンクリートのスランプロスは、混和剤Eを使用した場合少なく、凝結硬化速度は混和剤E

を使用した場合、通常のNEMコンクリートに比較して6-7時間遅れる。

(6) NEM流動化コンクリートの圧縮強度は、5°C養生の場合標準養生に比較して初期強度は低いですが、長期強度では差が小さくなる。

(7) NEM流動化コンクリートの凍結融解抵抗性は、AEおよびnon AEコンクリートいずれも優れている。

## 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) 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.
- 3) 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.
- 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, 土木学会北海道支部論文報告集 No. 44, pp. 615-620, 1988. 2.
- 5) 永松静也, 佐藤嘉昭, 竹田吉紹; 乾燥にともなうコンクリートの各種強度変化について, セメント技術年報36, pp. 271-274, 1982. 5.