

運輸省港灣技術研究所

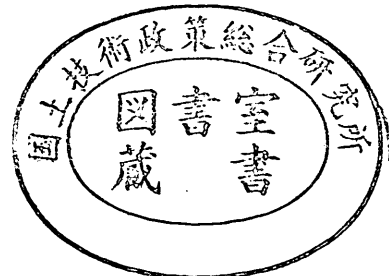
港灣技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 32 NO. 2 JUNE 1993

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I)

第32巻 第2号 (Vol. 32, No. 2) 1993年6月 (June, 1993)

目 次 (CONTENTS)

1. 三陸沿岸を対象とした津波数値計算システムの開発 後藤智明・佐藤一央 3
(Development of Tsunami Numerical Simulation System for Sanriku
Coast in Japan
..... Chiaki GOTO and Kazuo SATO)
2. 沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報) - いわき沖の観測結果 -
..... 永井紀彦・橋本典明・浅井 正 45
(On the Properties of the Directional Wave Spectra Observed in Deep Seas
- 1st Report: The Field Observation off Iwaki -
..... Toshihiko NAGAI, Noriaki HASHIMOTO and Tadashi ASAI)
3. 沿岸波浪の日変動特性と波浪の特異日 永井紀彦・菅原一晃・橋本典明・浅井 正 115
(Annual Fluctuation of the Observed Coastal Waves and Singularities of High
and Low Wave Condition
..... Toshihiko NAGAI, Kazuteru SUGAHARA, Noriaki HASHIMOTO and Tadashi ASAI)
4. 事前混合処理工法による処理土の静的土圧特性
..... 善 功企・山崎浩之・館下 徹・長沢啓介 153
(Static Earth Pressure Characteristics of Coment Treated Sand by
Premixing Method
... Kouki ZEN, Hiroyuki YAMAZAKI, Toru TACHISHITA and Keisuke NAGASAWA)
5. 低置換率 SCP 改良地盤中の矢板式岸壁の挙動 北詰昌樹・村上喜代治 183
(Behavior of Sheet Pile Walls in the Improved Ground by Sand Compaction
Piles of Low Replacement Area Ratio
..... Masaki KITAZUME and Kiyohara MURAKAMI)
6. 費用便益分析による接岸ドルフィンの最適断面の評価 白石 悟・上田 茂 213
(Evaluation of the Optimal Cross Section of Breasting Dolphins by use of
Coast-benefit Analysis Satoru SHIRAISHI and Shigeru UEDA)
7. マスコンクリートとしての温度履歴を受けたコンクリートの材料特性
- 主に耐久性に着目したモルタルによる基礎実験 -
..... 福手 勤・守分敦郎・鈴木康範 247
(An Experimental Study on Mortars to Assess the Durability of Massive
Concrete
..... Tsutomu FUKUTE, Atsurou MORIWAKE and Yasunori SUZUKI)

7. マスコンクリートとしての温度履歴を受けた コンクリートの材料特性

— 主に耐久性に着目したモルタルによる基礎実験 —

福 手 勤*
守 分 敦 郎**
鈴 木 康 範***

要 旨

マスコンクリートのように初期材齢において高い温度履歴を受けたコンクリートの材料特性（特に耐久性に関する項目）を、モルタル供試体を用いて検討した。その結果、初期材齢において高い温度履歴を受けた供試体は20℃で養生された供試体に比較して、

- ① 長期的な強度発現性が劣る。
- ② 中性化速度が早い。
- ③ 塩分浸透性が大きい。
- ④ セメント水和物がポーラスな構造をもつようになる。

など、コンクリートの耐久性が劣る特性を示すことが明らかになった。このことからマスコンクリートの水和熱によるひびわれ防止対策として、断熱養生または加熱養生を行うことは好ましいものではなく、ブレーキング、パイプクーリングなどセメントの水和熱によるコンクリートの温度上昇をできるだけ抑制するような工法が望ましいことがわかった。

キーワード：マスコンクリート、モルタル、耐久性、圧縮強度、中性化、塩分の拡散係数、微細構造、細孔径分布

* 構造部材料研究室長
** 東亜建設工業(株)
*** 住友セメント(株)

7. An Experimental Study on Mortars to Assess the Durability of Massive Concrete

Tsutomu FUKUTE*
Atsurou MORIWAKE**
Yasunori SUZUKI***

Synopsis

This paper examined the influence of high temperature during the initial curing period on the durability of massive concrete. For this purpose, mortar specimens made with three types of cement and different mix proportions were cured in controlled temperature environments. The physical properties studied in this paper are compressive strength, diffusion coefficient of chloride ion, depth of carbonation and microstructure of matrix.

It was recognized from the experiments where specimens were cured at high temperatures that mortar qualities such as long-term strength, resistance to chloride ion penetration and resistance to carbonation, tended to deteriorate in comparison with standard curing at 20°C. Accordingly, more attention should also be paid to the durability in massive concrete in addition to preventing thermal cracking.

Key Words : Massive concrete, Mortar, Durability, Compressive Strength, Carbonation, Diffusion Coefficient of Chloride Ion, Microstructure

* Chief of Materials Laboratory, Structural Engineering Division
** Toa Corporation
*** Sumitomo Cement Co., Ltd.

目 次

要 旨

1. ま え が き	251
2. 供 試 体 の 準 備	251
2.1 実 験 の ケ ー ス	251
2.2 材 料	251
(1) セ メ ン ト	251
(2) 細 骨 材	252
2.3 モ ル タ ル の 配 合	252
2.4 供 試 体 の 製 作 と 温 度 履 歴 の 付 与	252
3. 試 験 方 法	256
3.1 圧 縮 強 度	256
3.2 塩 化 物 イ オ ン の 浸 透	256
(1) 浸 透 深 さ	256
(2) 拡 散 係 数	256
3.3 中 性 化	257
3.4 微 細 構 造 の 把 握	257
4. 試 験 結 果 と 考 察	258
4.1 圧 縮 強 度	258
(1) 温 度 履 歴 の 影 響	258
(2) 温 度 上 昇 量 の 影 響	260
(3) 温 度 上 昇 速 度 の 影 響	260
4.2 塩 化 物 イ オ ン の 浸 透	260
(1) 浸 透 深 さ	260
(2) 拡 散 係 数	261
4.3 中 性 化 深 さ	262
(1) 温 度 上 昇 量 の 影 響	262
(2) セ メ ン ト の 種 類 , W/C の 影 響	263
4.4 微 細 構 造	263
(1) 電 子 顕 微 鏡 観 察	263
(2) 細 孔 径 分 布	266
4.5 微 細 構 造 と 耐 久 性 の 関 連	266
5. 結 論	267

6. あとがき	267
参考文献	268
参考資料-1 D-乾燥	268
参考資料-2 Maturity	268

1. まえがき

近年のコンクリート構造物の大型化に伴い、構造物がマスコンクリートとして施工される事例が増えてきている。マスコンクリートでは、セメントの水和熱による温度ひびわれが構造物の挙動に悪影響を及ぼさないよう、種々の温度応力解析（ひびわれ解析）がなされるようになってきた。その検討手法に関して、精度面ではまだ改良の余地はあるものの、検討の流れや解析手法はかなり開発が進んできている^{1), 2)}。

一方、コンクリートが所定の強度や耐久性を発揮するためには、材齢初期の適切な養生が重要であることはよく知られている。土木学会「コンクリート標準示方書〔施工編〕」³⁾では、普通ポルトランドセメントでは5日間以上の湿潤養生が標準とされている。しかしセメントの水和反応は温度条件にも大きく左右される。例えば日平均気温が4℃以下の場合や、気温が30℃を越えるような温度条件の下でのコンクリートの打込みは、寒中コンクリートまたは暑中コンクリートとして、材料面、施工面、また養生の面から特別な配慮が要求されている。

マスコンクリートでは、断熱養生に近い条件の下でコンクリートの温度が70℃程度にまで達し、しかもそれが長時間にわたって持続するため、コンクリートの養生条件としては、一般の施工条件下でのコンクリートよりもかなり不利なものとなっている。そのため、マスコンクリートとして施工されたコンクリートの品質は、一般のコンクリートと異なっていることが予想されるが、このような観点から検討がなされた事例はほとんどない。

コンクリートの耐久性の確保が大きな技術課題となり、またマスコンクリートとしての施工形態が今後ますます増えると予想される状況下で、マスコンクリートとしての温度履歴を受けたコンクリートの材料特性を把握しておくことは、信頼性のあるコンクリート構造物を建設していく上で極めて重要であると考えられる。

本報告はマスコンクリートと同様な高い温度履歴を若材齢時に受けたコンクリートの材料特性を、モルタル供試体を対象とした室内試験から検討することを目的としてとりまとめたものである。

2. 供試体の準備

2.1 実験のケース

若材齢時に高い温度履歴を受けるマスコンクリートの品質に及ぼす基本的要因として、

① セメントの種類

- ② モルタルの練り上がり温度
- ③ 温度上昇量（最高到達温度）
- ④ 温度上昇速度
- ⑤ 水セメント比（W/C）
- ⑥ 骨材の熱膨張係数

などがあるが、このうち本研究では実験に当たって、①から⑤までの各要因について以下のような条件を選定した。

(1) セメントとしては、普通ポルトランドセメント（OPC）を基本とし、それ以外にマスコンクリートの温度ひびわれ対策として用いられることの多い高炉セメントB種（BB）、低発熱型高炉セメントB種（LBB）を用いた。

(2) 練り上がり温度は20℃を標準とし、特殊な場合としてOPCで10℃のケースを加えた。

(3) 温度上昇量は実際のマスコンクリートでの例を参考にし、OPCで50℃、BBで40℃、LBBで30℃を標準とした。つまり20℃の練り上がり温度を基準として、最高到達温度はOPCで70℃、BBで60℃、LBBで50℃を標準とした。これら以外に、各セメントごとに比較用として温度上昇をさせない20℃での標準養生の供試体も製作した。なお、マスコンクリートの部材表面は中央部における温度より低い傾向にあるため、このような位置にあるコンクリートの性状を検討することを目的として、OPCでは温度上昇量が40℃、30℃の供試体も製作した。

(4) 温度上昇速度は40℃/日を標準とし、一部20℃/日のケースも加えた。

(5) 水セメント比は45%、55%、65%の3条件を標準とした。ただし前述のようなOPCでの温度上昇量が40℃、30℃の場合の水セメント比は、55%のみとした。

これらのパラメーターを適切に組み合わせで作った実験ケースは表-2.1通りである。

2.2 材料

(1) セメント

今回使用した3種類のセメントはいずれも住友セメント社製のもので、OPCはJIS R 5210、BBはJIS R 5211の規定を満足するもので、またLBBはタイプIV（ASTM C 150-89）を高炉セメントB種の範囲（30%を超え60%以下）で高炉スラグ微粉末で置換したものである。各セメントの化学成分および物理的性質を表-2.2および表-2.3に示す。またBBに使用されている原材料の化学成分を表-2.4、またLBBに用いられている原材料の化学成分および物理的性質を表-2.5~7

表-2.1 実験ケース

セメント種類	練上り温度	温度上昇量	上昇速度	水セメント比		
				45	55	65
OPC	20℃	(標準養生)	----	●		
	20℃	(標準養生)	----		●	
	20℃	(標準養生)	----			●
	20℃	30℃	40℃/日		●	
	20℃	40℃	40℃/日		●	
	20℃	50℃	40℃/日	●		
	20℃	50℃	40℃/日		●	
	20℃	50℃	20℃/日		●	
	10℃	50℃	40℃/日		●	
	30℃	50℃	40℃/日		●	
BB	20℃	(標準養生)	----	●		
	20℃	(標準養生)	----		●	
	20℃	(標準養生)	----			●
	20℃	40℃	40℃/日	●		
	20℃	40℃	40℃/日		●	
LBB	20℃	(標準養生)	----	●		
	20℃	(標準養生)	----		●	
	20℃	(標準養生)	----			●
	20℃	30℃	40℃/日	●		
	20℃	30℃	40℃/日		●	
OPC	20℃	(標準養生)	----		●	
	20℃	50℃	40℃/日		●	
	20℃	(標準養生)	----		●	
	20℃	50℃	20℃/日		●	
BB	20℃	(標準養生)	----		●	
	20℃	40℃	20℃/日		●	
LBB	20℃	(標準養生)	----		●	
	20℃	30℃	20℃/日		●	

に示す。

これら3種類のセメントの断熱温度上昇の結果を図-2.1に示す。

(2) 細骨材

使用した細骨材は最大粒径2.5mm, 粗粒率(FM)が2.84の富士川産のもので, 比重などの試験成績表とふるい分け試験の結果を表-2.8, 図-2.2に示す。

2.3 モルタルの配合

実験に用いたモルタルの配合は表-2.9の通りである。

2.4 供試体の作製と温度履歴の付与

モルタルは図-2.3の手順に従って, パン型強制練りモルタルミキサ(公称容量50ℓ)を用いて, 20ℓ単位で練り混ぜた。また供試体は直径5cm, 高さ10cmの金属性簡易型わくに, モルタルを打ち込んで作製した。

フレッシュな状態のモルタルの性状は表-2.10に示す通りである。

供試体は, 作製後1時間30分~2時間程度の前置きの後, 写真-2.1のようなプログラム付き環境試験機(板橋理工工業(株)製, 温度設定範囲:-20~+80℃(±2℃), 湿度設定範囲:30~95%(±5%))によって所定の温度履歴を与えた。温度変化のパターンは図-2.4に示す通りで, 設定した最高温度に達したら, その温度を3日間保持し, その後は上昇速度と同じ速度で温

表-2.2 使用したセメントの化学成分

項目 種類	化学成分(%)											
	ig. loss	insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	total	Na ₂ O	K ₂ O	R ₂ O
OPC	1.0	0.4	21.8	5.8	2.6	63.4	1.5	2.2	98.7	0.28	0.48	0.60
BB	1.3	0.5	25.6	9.0	1.7	55.8	2.6	2.1	98.6	0.23	0.43	0.51
LBB	0.2	0.0	29.8	9.3	2.1	51.3	3.4	1.6	97.7	0.21	0.49	0.53

表-2.3 使用したセメントの物理的性質

項目 種類	比重	比表面積 (cm ² /g)	凝結時間		安定性	圧縮強度 (kgf/cm ²)				曲げ強度 (kgf/cm ²)				水和熱 (cal/g)		
			始発 (h-m)	終結 (h-m)		3日	7日	28日	91日	3日	7日	28日	91日	7日	28日	91日
OPC	3.15	3350	2-29	3-59	良	178	272	412	459	41.2	59.1	75.1	78.0	80.3	92.3	98.2
BB	3.02	4090	2-50	4-35	良	124	205	404	480	31.0	44.0	63.1	82.0	72.0	84.3	90.5
LBB	3.05	4580	3-09	5-06	良	57	109	307	470	16.7	25.2	55.1	56.7	38.0	46.2	56.6

マスコンクリートとしての温度履歴を受けたコンクリートの材料特性
 —— 主に耐久性に着目したモルタルによる基礎実験 ——

表-2.4 BBに用いられている材料の化学成分

項目 種類	化 学 成 分 (%)								
	ig. loss	insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	total
OPC	1.0	0.4	21.8	5.8	2.6	63.4	1.5	2.2	98.7
slag	0.6	0.1	32.0	15.3	0.3	43.5	4.3	2.2	98.3

表-2.5 LBBに用いられている材料の化学成分

項目 種類	化 学 成 分 (%)										
	ig. loss	insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	total	Na ₂ O	K ₂ O
LMC	0.5	0.0	24.8	3.0	4.6	61.2	0.7	3.9	98.7	0.27	0.49
slag	0.3	0.1	33.8	15.1	0.3	44.2	4.5	0.1	98.4	—	—

表-2.6 LBBに用いられているLMCの物理的性質

項目 種類	比重	比表面積 (cm ² /g)	凝 結 時 間		安 定 性	圧 縮 強 度 (kgf/cm ²)				曲 げ 強 度 (kgf/cm ²)				水 和 熱 (cal/g)		
			始 発 (h-m)	終 結 (h-m)		3日	7日	28日	91日	3日	7日	28日	91日	7日	28日	91日
LMC	3.23	3260	2-26	3-40	良	50	93	258	467	15.4	27.4	54.7	77.7	41.9	59.7	—

表-2.7 LBBに用いられている高炉スラグ
微粉末の物理的性質

項目 種類	比重	比表面積 (cm ² /g)	フロー値 比	安 定 性	活 性 度 指 数 (%)		
					7日	28日	91日
LMC	3.231	3260	104	良	62	100	111

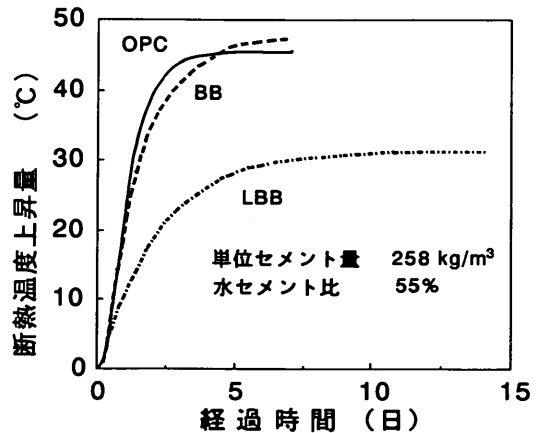


図-2.1 実験に使用したセメントの断熱温度上昇量

表-2.8 細骨材の試験結果

試験項目		試験方法	判定基準		試験結果
ふるい分け		JIS A 1102	JIS A 5308	—	図-2.2 及び本文 参照
比重	表乾 ^ハ -ス	JIS A 1109	—	—	2.61
	絶乾 ^ハ -ス		JIS A 5308	2.5以上	
吸水率				3.5%以上	2.07
単位容積重量		JIS A 1104	—	—	1.72

度を20℃まで低下させた。その後供試体は簡易型わくのまゝ図-2.5に示すようにシール材と金属板で密封し、所定期間(28日または91日)20℃の恒温室内で封かん養生した。このような温度履歴を受けた供試体を本報文では、以下「高温養生供試体」と呼ぶことにする。

なおマスコンクリートにおいて実際に発生する水和熱でコンクリートの温度が上昇した場合の強度発現特性は、小さな供試体に外部から強制的に高い温度を与えてマスコンクリートが置かれている温度状態をシミュレートすることによって、ほぼ再現されることが確認されている⁴⁾。

また比較用に作製した温度上昇を与えない「標準養生供試体」は、モルタル打ち込み1日後に脱型し、そのまま試験に供するまで20℃の水中で養生した。

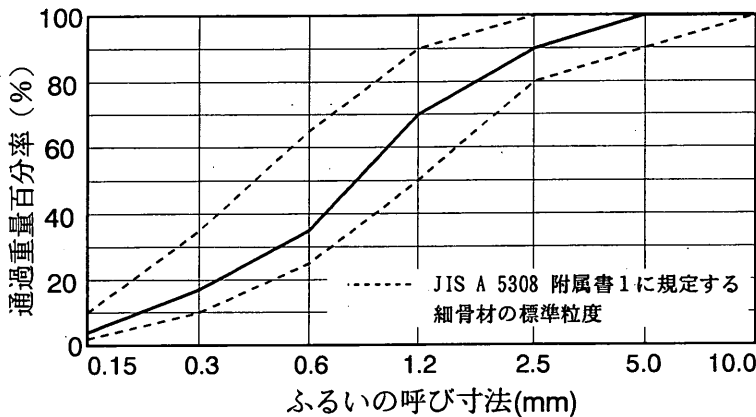


図-2.2 細骨材の試験結果

表-2.9 試験に用いたモルタルの配合

セメントの種類	水セメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)				
		セメント	水	砂	AE減水剤	AE剤
OPC	45	544	232	1345	8.07	5.44
	55	442	233	1452	6.56	4.42
	65	373	233	1516	5.51	3.73
BB	45	540	230	1334	8.01	5.40
	55	439	232	1453	6.52	4.39
	65	371	232	1508	5.48	3.71
LBB	45	541	231	1337	8.02	5.41
	55	440	232	1455	6.53	4.40
	65	370	232	1510	5.49	3.71

マスコンクリートとしての温度履歴を受けたコンクリートの材料特性
 ——主に耐久性に着目したモルタルによる基礎実験——

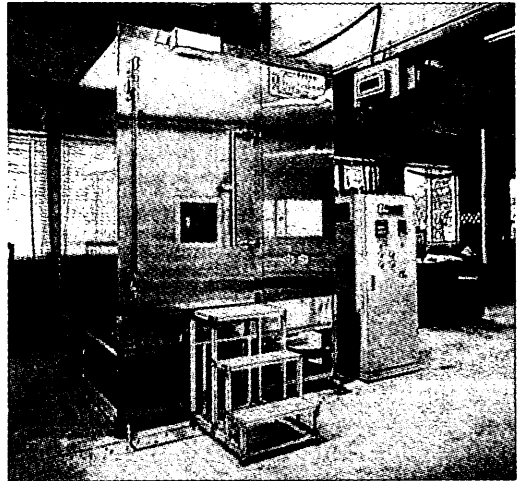
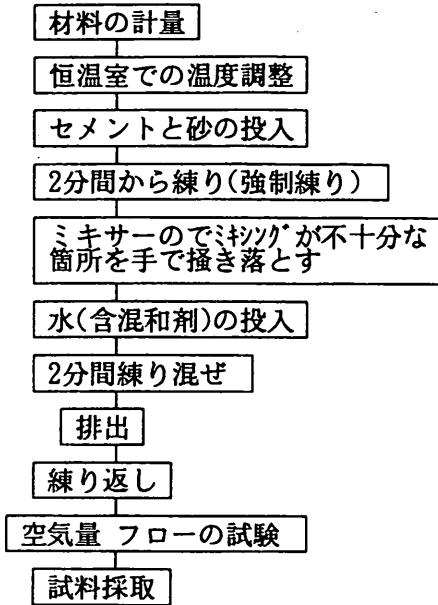


図-2.3 モルタルの練混ぜ手順

写真-2.1 環境試験機

表-2.10 フレッシュなモルタルの性状

セメントの種類	温度条件	フレッシュな状態での性状			前置時間 (時分)
		モルタル温度 (°C)	空気量 (%)	フロー値 (cm)×(cm)	
O P C	練り上がり温度20°C (標準)	18.0	6.0	17.1	1時間50分
		18.0	6.8	17.3	1時間40分
		18.0	6.6	17.6	1時間30分
	20°C+30°C	20.0	7.4	17.9	1時間30分
		20°C+40°C	21.0	8.7	18.5
	20°C+50°C	18.0	6.0	17.1	1時間50分
		18.0	6.8	17.3	1時間40分
		18.0	6.6	17.6	1時間30分
10°C+50°C	12.0	8.0	18.3	1時間30分	
B B	20°C	18.0	8.2	17.8	1時間50分
		18.0	9.0	16.8	1時間40分
		18.0	8.7	17.6	1時間30分
	20°C+40°C	18.0	8.2	17.8	1時間50分
		18.0	9.0	16.6	1時間40分
		18.0	8.7	17.6	1時間30分
L B B	20°C	20.5	8.2	17.2	2時間00分
		20.5	7.3	16.9	1時間50分
		20.5	6.7	16.9	1時間40分
	20°C+30°C	20.5	8.2	17.2	2時間00分
		20.5	7.3	16.9	1時間50分
		20.5	6.7	16.9	1時間40分
O P C	20°C	19.0	1.5	17.3	2時間50分
	20°C+50°C	19.0	1.5	17.3	2時間50分

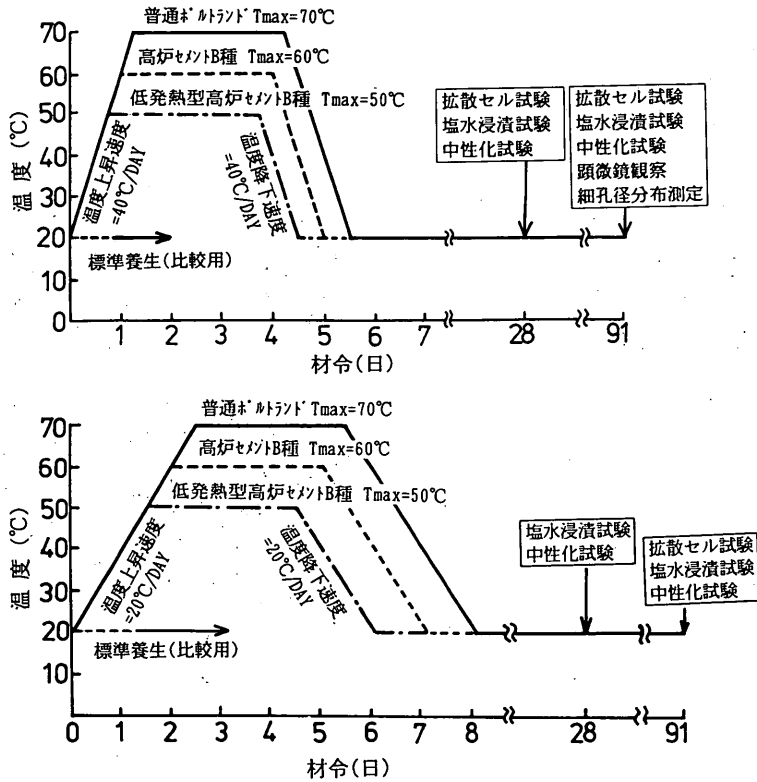


図-2.4 温度履歴のパターン

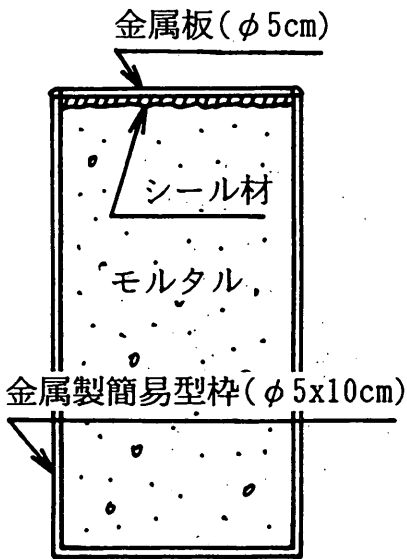


図-2.5 封かん養生の方法

3. 試験方法

3.1 圧縮強度

モルタルの圧縮強度の測定は、材齢7日、28日、91日において、JIS A 110に準拠して行った。

3.2 塩化物イオンの浸透

(1) 塩化物イオンの浸透深さ

供試体の材齢が28日および91日を経過した時点で、各ケースとも2個ずつの供試体を20°Cの海水に浸漬した。海水は横浜市鶴見区安善町の東京湾から採水したものを用了。浸漬1カ月または2カ月後に供試体を割裂し、0.1規定硝酸銀溶液と0.1%フルオロセインナトリウム溶液を噴霧し、変色・蛍光を発生した部分を浸透域として、3箇所を平均を求めた。

(2) 塩化物イオンの拡散係数

供試体の材齢が28日および91日を経過した時点で、図-3.1に示すように型わく底面から10mm離れた位置から内側で厚さ10mmの試料を2、3枚スライスカットした。試料は図-3.2に示す拡散セル⁹⁾内で、蒸留水

マスコンクリートとしての温度履歴を受けたコンクリートの材料特性
 —— 主に耐久性に着目したモルタルによる基礎実験 ——

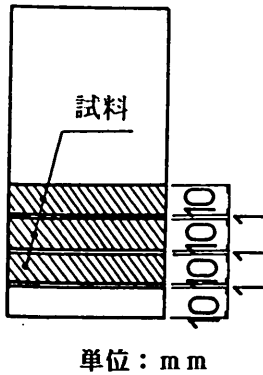


図-3.1 塩化物イオン拡散試験用
 供試体の試料の採取法

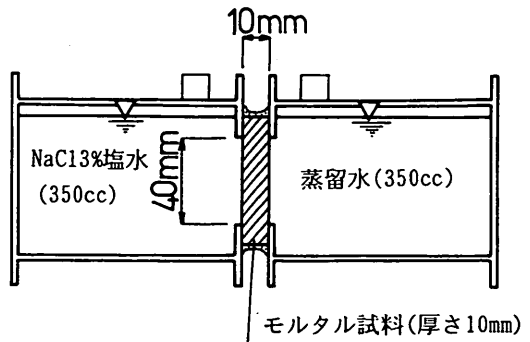


図-3.2 拡散セルによる塩化物イオン拡散試験

と3%の食塩水とはさまれるようにして保持し、所定期間経過後に試料を透過した塩化物イオン量を硝酸銀による電位差滴定法により計測した。拡散係数は、Fickの第2法則に基づく式(3.1)を用いて、誤差関数を積分することにより求めた。

$$C/C_0 = 1 - \text{erf} \left(t / 2 \sqrt{D \cdot T} \right) \dots\dots (3.1)$$

ここに

- C : 試験終了時の蒸留水側の塩化物イオン濃度(%)
- C₀ : 試験終了時の塩水側の塩化物イオン濃度(%)
- t : 試料の厚さ(cm)
- D : 塩化物イオンの拡散係数 (cm²/sec)
- T : 試験期間(sec)

erf : 誤差関数

3.3 中性化

供試体の材齢が28日および91日を経過した時点で、供試体を簡易型わくまたは水中から取り出し、温度20℃、相対湿度60%の恒温恒湿室内に静置した。その後各ケースとも2カ月間および4カ月経過後に供試体を割裂し、割裂面にフェノールフタレインの1%アルコール溶液を噴霧して、赤色に変色しない領域を3箇所測定し、その平均を中性化深さとした。

3.4 微細構造の把握

各材齢のモルタル供試体の中央部分を3~5mm角に砕き、アセトンに2時間浸漬後、D-乾燥(巻末参考資料-1を参照)による水和停止を行い、試料とした。

細孔径分布の測定は、写真-3.1に示す水銀圧入方式ポロシメーター(株式会社マイクロメリティックス社製 Auto-

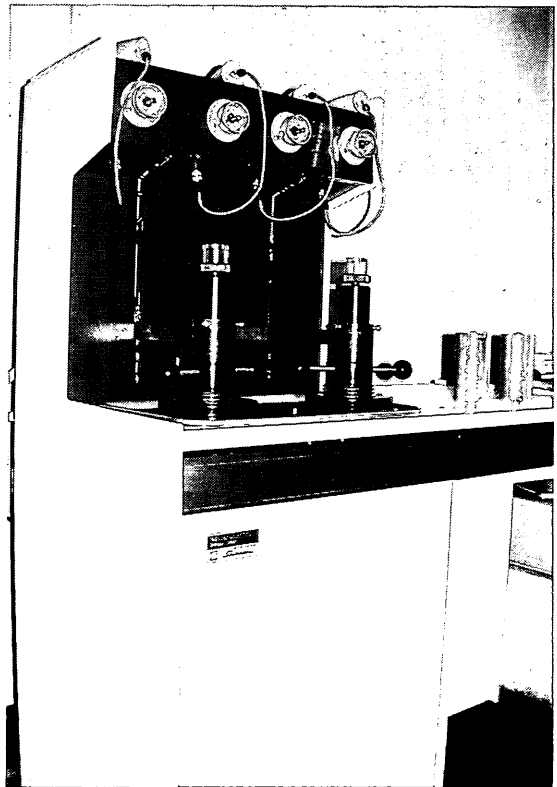


写真-3.1 水銀圧入方式ポロシメーター



写真-3.2 走査型電子顕微鏡

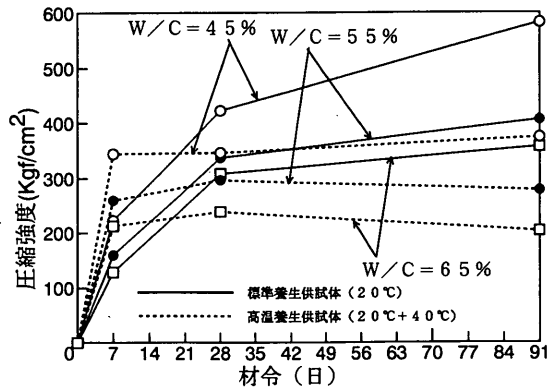
pore I 9220) を用いて行った。また微細構造の観察は、写真-3.2に示す走査型電子顕微鏡(日本電子㈱製 JSM-5400LV)を用いて行った。

4. 試験結果と考察

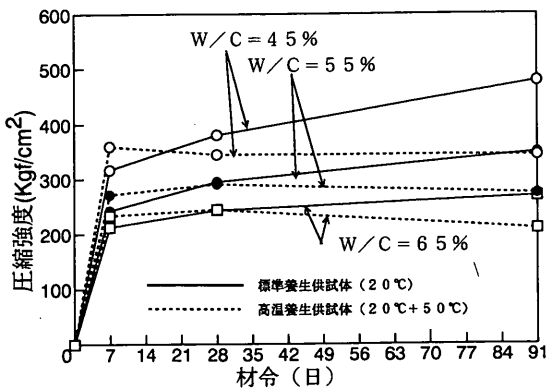
4.1 圧縮強度

(1) 温度履歴の影響

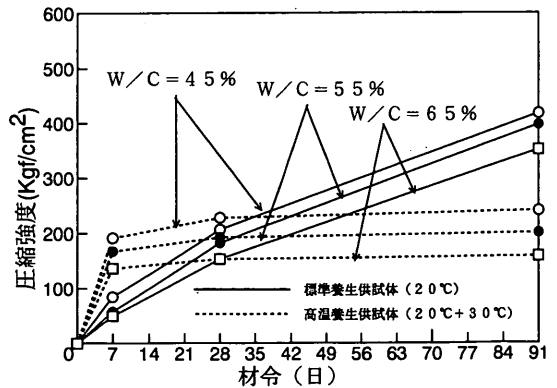
温度履歴を与えた供試体と標準養生した供試体の圧縮強度の測定結果を、図-4.1に各セメントごとに示す。また表-4.1は各材齢における温度履歴を受けたモルタルと標準養生したモルタルの強度比を示したものである。これらの図表から、いずれのセメントにおいても、温度



(b) BB



(a) OPC



(c) LBB

図-4.1 圧縮強度と材齢の関係

マスコンクリートとしての温度履歴を受けたコンクリートの材料特性
 ——主に耐久性に着目したモルタルによる基礎実験——

履歴を受けた供試体の強度は材齢7日では標準養生のものよりも大きいですが、その後の強度の増加はほとんど期待できないため、28日あるいは91日強度は標準養生供試体の強度を下回り、Maturity 則（巻末参考資料-2を参照）は成立していないことがわかる。

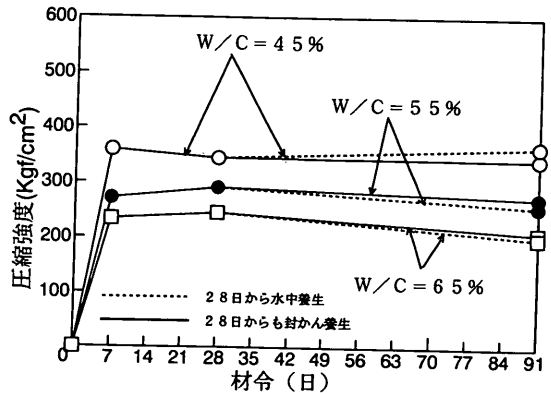
この原因としてまず、OPCでは初期材齢における高い温度履歴によってセメント粒子の表層部分の水和反応が急激に進行し、粒子表面に水和生成物の形成が促進されることでその部分のみの緻密化が進行するため、粒子内部へのその後の水の拡散が阻害されることが挙げられる⁶⁾。

またこれに加えBBやLBBでは、スラグの反応に必要な水酸化カルシウムの量に比べて、ポルトランドセメントの反応物により供給される水酸化カルシウムの量が不足するために、スラグの反応が良好に進行しないことも影響していると考えられる⁷⁾。さらに、ポルトランドセメントと同様にスラグにおいても、高い温度履歴によって粒子表面の緻密化が進み反応が阻害される影響が加わるためと考えられる。

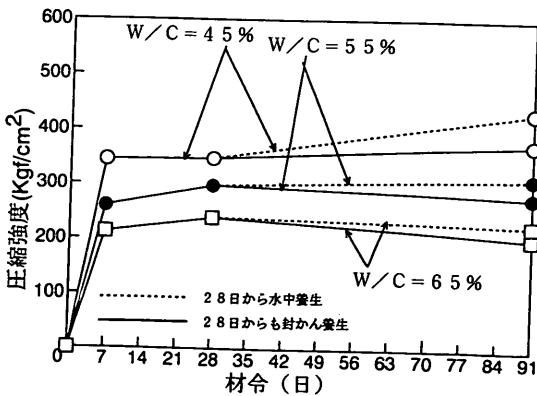
温度履歴を与えた供試体を材齢が28日の時点で型わくから取り出し、その後は20℃の水中で養生したモルタルの強度を、28日以後も20℃で封かん養生を継続したモルタルの強度と併記したものが図-4.2ある。また標準養生供試体との強度比は表-4.1に示している。この結果から、材齢28日以後の水中養生は、封かん養生を継続するよりも、強度の発現が幾らか良好であることがわかる。このように、若材齢時に高温履歴を受けたモルタルでも、十分に水分を補給する湿潤状態で養生す

表-4.1 温度履歴を受けた供試体の標準養生供試体に対する強度比

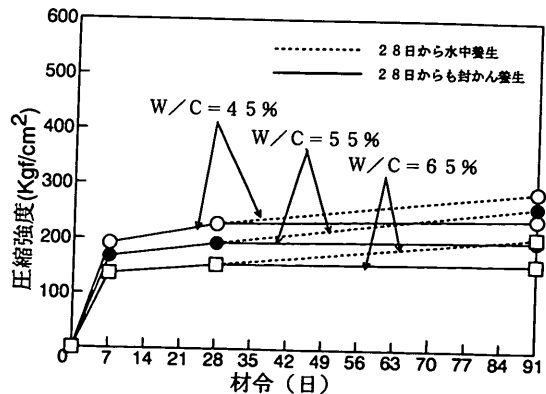
	W/C	材齢7日	材齢28日	材齢91日	
				封かん	28日から水中
OPC	45	1.13	0.91	0.72	0.77
	55	1.12	1.00	0.79	0.74
	65	1.10	1.00	0.78	0.78
BB	45	1.55	0.82	0.64	0.74
	55	1.63	0.88	0.69	0.77
	65	1.65	0.77	0.57	0.64
LBB	45	2.26	1.10	0.58	0.69
	55	2.90	1.05	0.50	0.66
	65	2.74	1.00	0.45	0.59



(a) OPC



(b) BB



(c) LBB

図-4.2 封かん養生の後材齢28日から水中養生した場合の圧縮強度の変化

ることがその後の水和反応やスラグの反応の進行に寄与することができる。しかし、それでも材齢91日の時点では標準養生供試体の強度には至らず、一旦緻密なセメント水和物が形成されてしまうと、その後の十分な量の水を供給しても未水和のセメントにまで水が拡散していきにくいことを示している。

またこの傾向はOPC, BB, LBBの順で顕著になる。これは、高温履歴を受けた場合の水和生成物や形態がセメントの種類によって異なっており、未水和部分の水和進行状態に差が生じるためと思われる。

(2) 温度上昇量の影響

セメントとしてOPCを対象に、W/C = 55%, 温度上昇量が30°C, 40°C, 50°Cの3ケースについて、温度上昇量が強度に及ぼす影響を調べた。その結果を図-4.3に示す。温度上昇量と強度発現との関係には必ずしも顕著な傾向は見られないが、上昇量が50°Cと高い場合の強度は、材齢7日の時点では標準養生供試体よりも明らかに大きい。その後の強度増進は見られない。これに対して、温度上昇量が30°C、あるいは40°Cでは、材齢7日から28日までの強度増加は見られないものの、材齢28日以降においては、標準養生と同様な強度増加傾向を示している。これらの結果より、温度上昇量が大きい方が、長期的な強度増加を阻害する傾向が大きいことがうかがえる。

(3) 温度上昇速度の影響

3種類のセメントを用いて、W/C = 55%, 練り上がり温度を20°Cで一定として、温度上昇速度を40°C/日、20°C/日と変えて、それが強度に及ぼす影響を調べた。温度上昇量はOPCで50°C, Bで40°C, LBBで30°Cである。図-4.4は(温度履歴供試体/標準養生供試体)で定義される強度比に温度上昇速度が及ぼす影響を示し

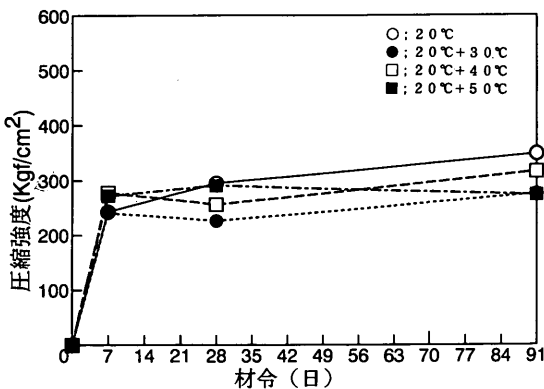


図-4.3 温度上昇量が圧縮強度に及ぼす影響

ている。この図から、材齢28日では20°C/日と温度上昇速度が小さい場合の方が温度履歴が強度発現に悪影響を及ぼす程度が大きいものに対し、材齢91日では逆の傾向を示していることがわかる。

この原因としては以下のことが考えられる。まず温度上昇速度が40°C/日と20°C/日の場合を比較すると、40°C/日の方がより初期材齢の時点から高い温度条件下に

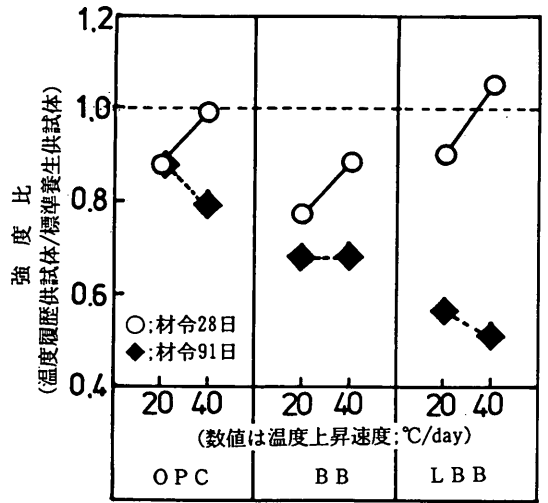


図-4.4 温度上昇速度と強度比(温度履歴供試体/標準養生供試体)の関係

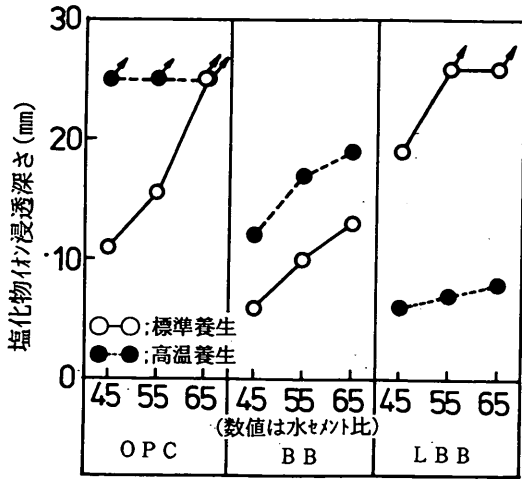
おかれるため、セメント粒子表面の水和生成物の量が多くなりまた緻密化も進むことになり、その結果材齢28日の時点では40°C/日の方が強度の発現が大きくなったのであろう。これに対し、その後の時間の経過に伴い、40°C/日の方がセメント粒子表面の緻密な水和物層の影響でセメント粒子内部の水和の進行が進みにくくなるため、材齢91日の時点では20°C/日の場合と比較して逆に強度発現が悪くなったものと考えられる。

4.2 塩化物イオンの浸透

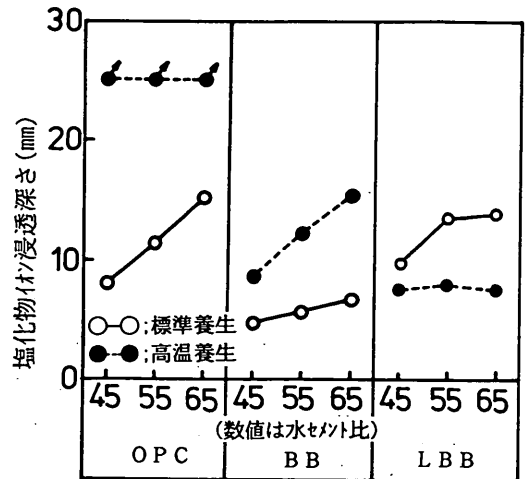
(1) 浸透深さ

供試体を、材齢28日および91日から2カ月間塩水に浸漬した後の塩化物イオン浸透深さの測定結果を図-4.5(a), (b)に示す。これらの結果から以下のようなことが理解される。

標準養生供試体では材齢28日と91日では明らかに後者の方が浸透深さが小さいものに対し、温度履歴を与えたものでは塩分の浸透を開始するまでの材齢の増加にともなう塩化物イオンの浸透の低減はほとんど期待できない。このことは4.1で示した強度の場合と同じ傾向である。



(a) 試験開始材齢：28日



(b) 試験開始材齢：91日

図-4.5 2ヶ月間の塩化物イオンの浸透深さ

OPC, BBともに高温度履歴を受けることにより塩化物イオンの浸透深さが増加している。中でも OPC では温度履歴を与えた場合、浸透深さ 25 mm、すなわち直径 50 mm の供試体の中心部にまで塩化物イオンが浸透していることがわかる。このような温度履歴によるモルタルの品質低下の傾向は、4.1 に示したように温度履歴を与えた場合の強度が小さかったことと一致している。これは Detwiller ら⁹⁾ が普通セメントコンクリートに対する塩分浸透試験で得た結果と同様である。

またこれまでもよく指摘されているように、BB は OPC に比較して塩化物イオンの浸透に対する抵抗性が大きいことが明かで^{9), 10), 11), 12)}、このことは温度履歴を受けた場合にも当てはまることとわかる。これに対し LB B では、標準養生供試体の方が浸透深さ大きい。これは LBB の水和反応、ポソラン反応の進行が他のセメントよりも遅いことに起因すると考えられる。これは標準養生供試体の材齢 91 日からの浸漬では、LBB の浸透深さが大幅に減少していることから理解される。しかしながら、材齢 91 日においても、標準養生供試体の方が浸透深さが大きいことは、材齢 91 日においては標準養生供試体の方が強度が大きかったことと相反する傾向となっている。このことは LBB の場合、強度発現に関するセメント硬化体の組織構造と塩化物イオンの浸透に関する組織構造とは異なっている可能性があることを示唆しているといえる。

(2) 塩化物イオンの拡散係数

材齢 28 日および 91 日から 2 カ月間の塩化物イオン浸透試験から得られた塩化物イオンの拡散係数を拡散セルによって計測した結果を図-4.6 に示す。この図は、先の塩化物イオンの浸透深さの結果と同様な結果を示している。

まず、OPC および BB を用いたモルタルの拡散係数は、温度履歴を受けることにより増加することがわかる。

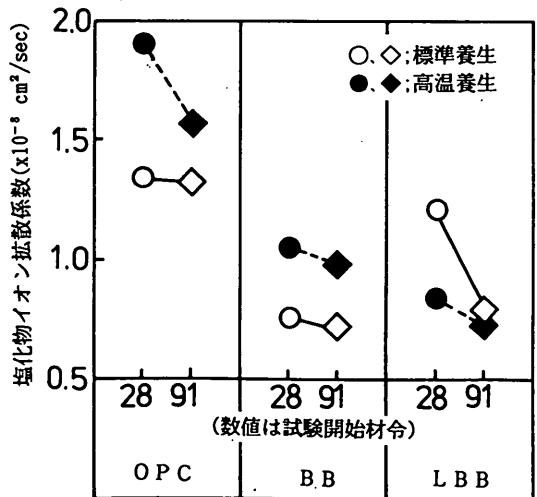


図-4.6 温度履歴の有無、試験開始材齢が拡散係数に及ぼす影響

これとは逆に LBB では、標準養生供試体の方が拡散係数が大きい。しかし LBB においても試験開始の材齢が 28 日から 91 日と大きくなると、標準養生供試体の拡散係数が著しく低下し、温度履歴を受けた供試体の場合とほとんど同様の値となる。

また、温度履歴の有無に関わらず、OPC に比較して BB および LBB では拡散係数が小さいことから、スラグの反応によるセメント水和物の緻密化の効果によって塩化物イオンの浸透に対して高い抵抗性を持つようになることがうかがえる。

さらにそれぞれのセメントに関し、材齢 91 日から 2 カ月間の浸透データからの水セメント比と拡散係数の関係を図-4.7 に示す。モルタルの水セメント比 (W/C) に関し、OPC では W/C が小さいと拡散係数の低減に大きな効果があるが、LBB では W/C は拡散係数に大きな影響を及ぼさないようである。

図-4.8 は W/C が 55% で、セメントの種類ごとに温度上昇量と拡散係数との関係を示したものである。この図から以下のようなことがいえる。まず、OPC に関しては、ばらつきはあるものの、温度上昇量が大きいと拡散係数も増加する傾向にある。また材齢 28 日より材齢 91 日からの試験結果の方が、温度上昇量が拡散係数に及ぼす影響が小さくなるものの、依然温度上昇履歴の影響が認められる。

また材齢 91 日からの試験結果をもとにセメントごと

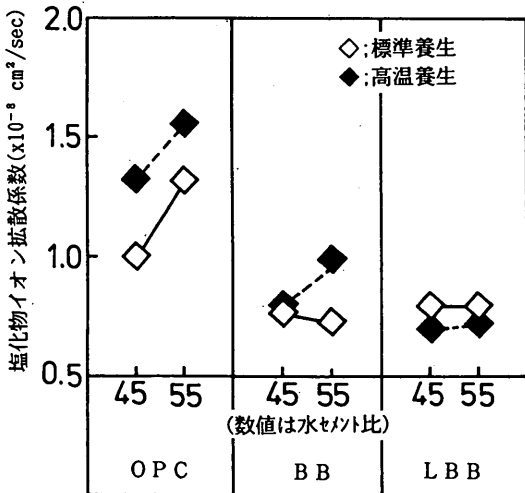


図-4.7 温度履歴の有無、水セメント比が拡散係数に及ぼす影響

に比較すると、OPC と BB では温度上昇量が拡散係数の増加に及ぼす影響度、すなわち図-4.8 における直線の勾配は同程度で 6.6×10^{-11} (cm²/sec/°C) であるが、LBB では温度履歴が拡散係数の値に及ぼす影響はほとんどないことがわかる。

4.3 中性化深さ

(1) 温度上昇量の影響

図-4.9 はセメントを OPC、W/C を 55% とし、温度上昇量が中性化深さに及ぼす影響を示したものである。データは材齢 91 日を起点として、4 ヶ月間のものであり、図中には \sqrt{t} 則を仮定して求めた中性化係数 a も併記している。結果は温度上昇量が增大するとともに中性化深さも大きくなることを示している。中性化係数を比較すると、標準養生のものに対し 50 °C の温度上昇を与えたものはその値が 2 倍以上にもなっている。このことから、養生初期の高温度履歴はモルタルの中性化を促進させることがわかる。

- ; 普通ポルトランドセメント (材齢 28 日からの試験結果)
- ◆; 普通ポルトランドセメント (材齢 91 日からの試験結果)
- ; 高炉セメント B 種 (材齢 91 日からの試験結果)
- △; 低発熱型高炉セメント (材齢 91 日からの試験結果)

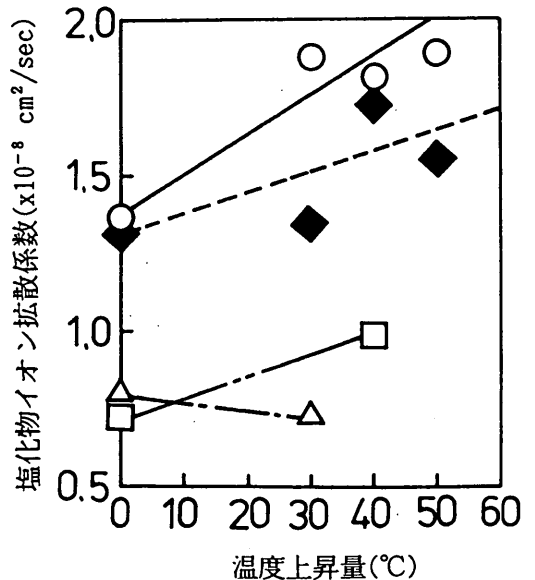


図-4.8 温度上昇量と拡散係数の関係

マスコンクリートとしての温度履歴を受けたコンクリートの材料特性
 ——主に耐久性に着目したモルタルによる基礎実験——

(2) セメントの種類, W/Cの影響

図-4.10はセメントの種類ごとに, W/C, 高温度履歴の有無をパラメーターとして中性化の経時的進行を示し, また表-4.2はそれぞれの場合の中性化係数を示している。まず, 標準養生した供試体では, 中性化係数はOPC, BB, LBBの順で大きくなる。OPCに比較してBBやLBBで中性化深さが大きいのは, セメントの水和反応で生成した水酸化カルシウムがスラグの反応で消費されるため, 一般的な現象であるが^{10), 10)}, 今回のような養生初期に高温度履歴を受けた場合にも同様の傾向があることがわかった。

また, 温度履歴を与えたものを比較すると, 温度履歴はOPC, BB, LBBそれぞれ50℃, 40℃, 30℃であり, OPC, BB, LBBの順でマイルドな温度履歴となっているにもかかわらず, 中性化速度はOPC, BB, LBBの順で大きくなる。このことは, 今回の実験の範囲では, 温度上昇量の影響よりも高炉スラグによる置換の効果の方が, 中性化速度に及ぼす影響が大きいことを示しているといえる。

いずれの養生条件でも, W/Cは中性化に大きな影響を及ぼし, よく言われているようにW/Cが小さいほど, 中性化も小さいという結果が得られている。さらにW/Cが45%のものは, 55%, 65%のものと比較して, 温度履歴の影響は比較的小さい傾向を示していて, 換言すればW/Cが大きい場合は温度履歴を与えることによる中性化の促進倍率は大きい。このことから, 特に温度履歴を受ける場合の中性化の抑制のためには, W/Cの低減が有効であることがわかる。

4.4 微細構造

(1) 電子顕微鏡観察

モルタル試料を電子顕微鏡により観察した結果を表-4.3および写真-4.1に示す。

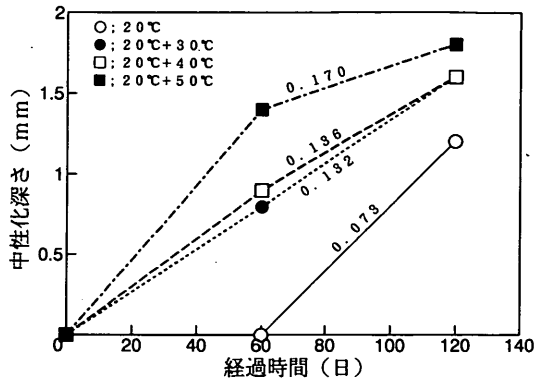


図-4.9 温度上昇量が中性化の進行に及ぼす影響

表-4.2 中性化係数

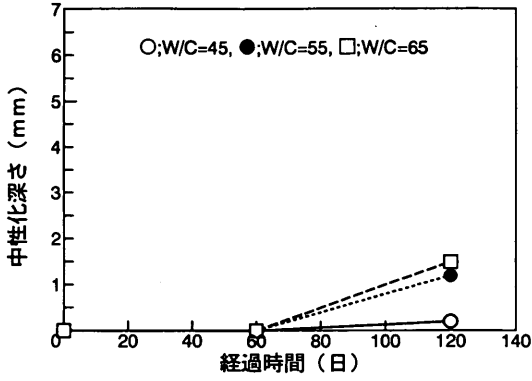
セメントの種類	W/C	中性化係数	
		高温度履歴なし (20℃標準養生)	高温度履歴あり
OPC	0.45	0.012	0.018
	0.55	0.073	0.170
	0.65	0.091	0.265
BB	0.45	0.049	0.157
	0.55	0.147	0.292
	0.65	0.245	0.437
LBB	0.45	0.241	0.282
	0.55	0.326	0.453
	0.65	0.352	0.599

① 気泡の観察

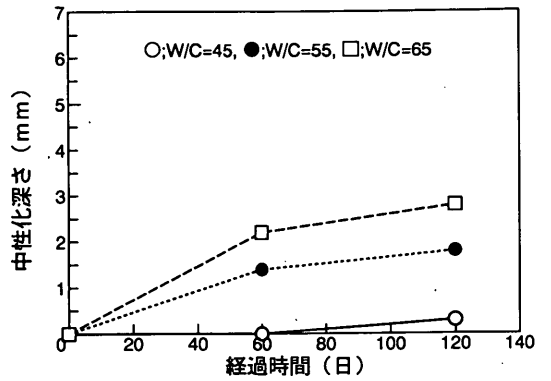
いずれのセメントでも標準養生した供試体に比べて高温度履歴を受けたものは気泡数が多く, 特にLBBを用いた場合にこの傾向が顕著に見受けられる。また気泡の大きさは高炉スラグを混合したものの方が幾分小さくなるようである。BBを用いて水中養生を行った試料には水酸化カルシウムと思われる板状結晶が認められる。ま

表-4.3 電子顕微鏡観察の結果

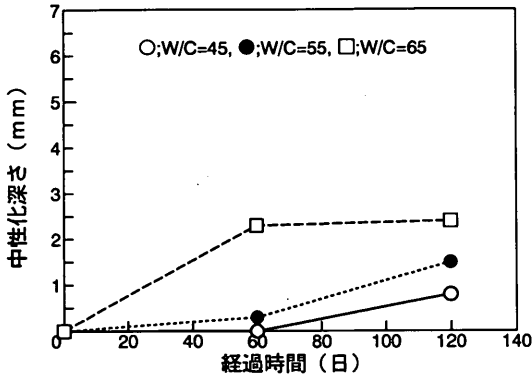
セメントの種類	養生条件	観察結果			
		気泡数	気泡径	緻密性	水和生成物
OPC	水中養生	やや少	大	やや密	C S Hゲル
	高温養生	やや多	大	やや粗	C S Hゲル
BB	水中養生	少	中	密	C S Hゲル, 未反応スラグ
	高温養生	多	中	粗	C S Hゲル
LBB	水中養生	少	小	密	C S Hゲル
	高温養生	多	中	粗	C S Hゲル



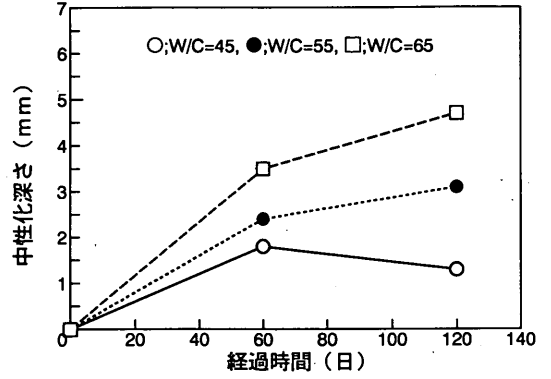
(a) OPC, 標準養生



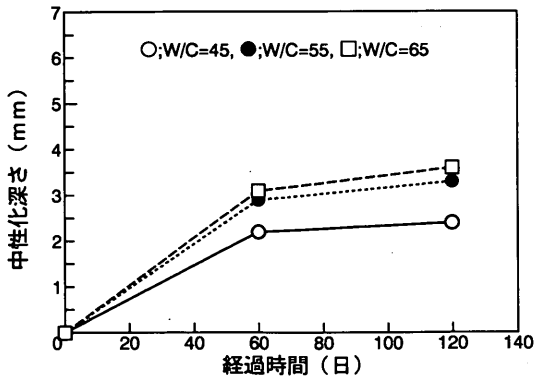
(b) OPC, 高温養生



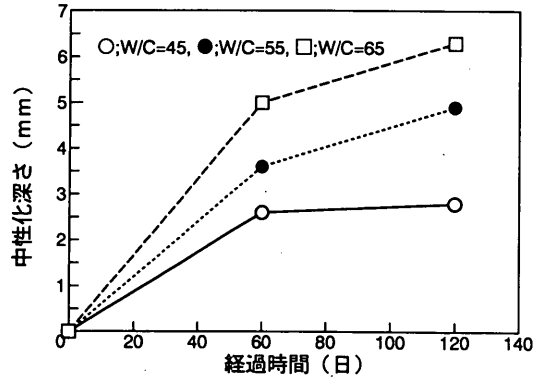
(c) BB, 標準養生



(d) BB, 高温養生



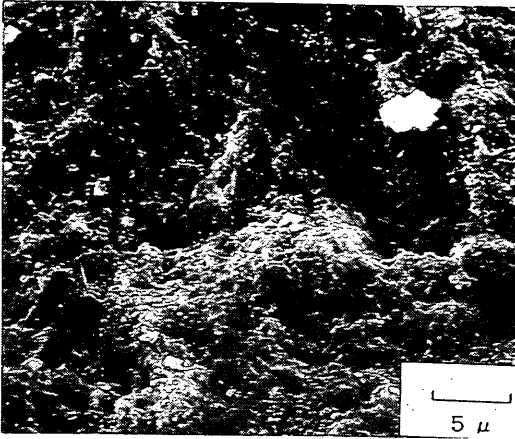
(e) LBB, 標準養生



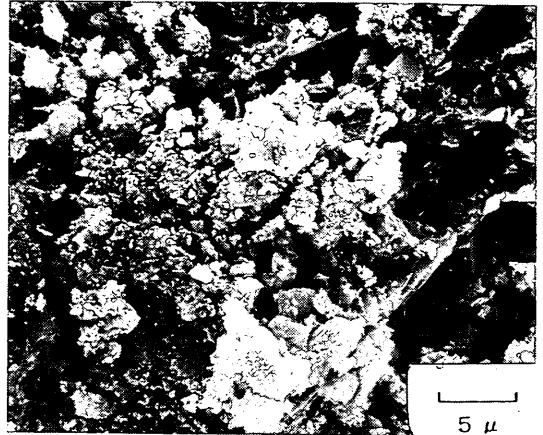
(f) LBB, 高温養生

図-4.10 セメントの種類, 養生方法, W/Cが中性化の進行に及ぼす影響

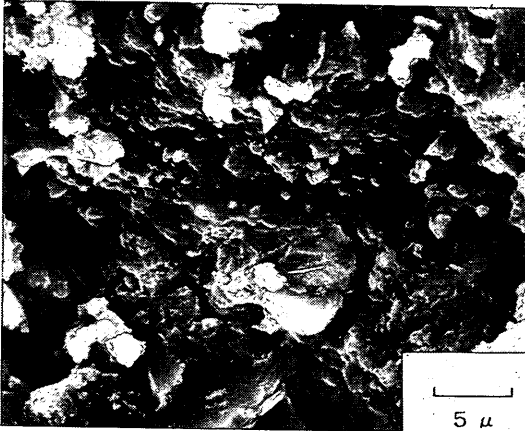
マスコンクリートとしての温度履歴を受けたコンクリートの材料特性
——主に耐久性に着目したモルタルによる基礎実験——



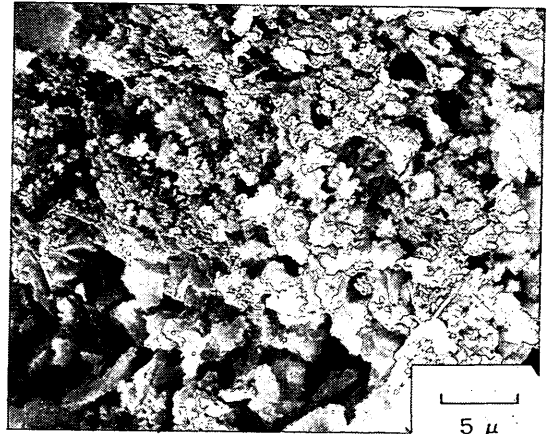
(a) OPC, 標準養生



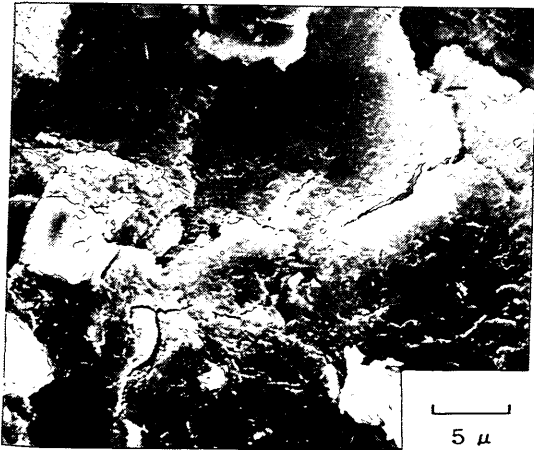
(b) OPC, 温度履歴有り



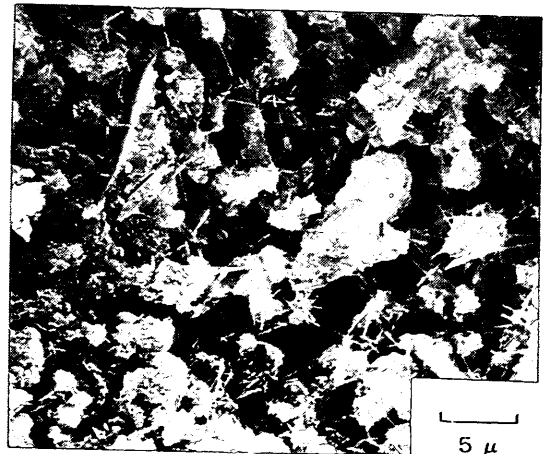
(c) BB, 標準養生



(d) BB, 温度履歴有り



(e) LBB, 標準養生



(f) LBB, 温度履歴有り

写真-4.1 走査型電子顕微鏡によるモルタルの構造観察

表-4.4 硬化モルタルの全細孔量

養生条件	セメントの種類		
	OPC	BB	LBB
標準	0.0933	0.0868	0.0994
温度履歴	0.1033	0.1181	0.1381

単位：ml/g

たLBBを用いて水中養生を行った試料にはひびわれと思われる空隙が比較的多く認められる。ただし採取および水和停止時に試料を乱している場合が考えられるため、直ちにこの空隙がセメントの種類や養生条件によって異なるとは断定できない

② 水和生成物の観察

水中養生の方が高温養生に比べて組織が緻密になり、特に高炉スラグを混合したものではこの傾向が顕著に見受けられる。LBBモルタルに対し、BBモルタルの水中養生では、一部未反応のスラグが認められる。これは

- ① 3.8nm ~ 13.0nm ⑤ 514nm ~ 1750nm
- ② 13.0nm ~ 44.4nm ⑥ 1750nm ~ 5960nm
- ③ 44.4nm ~ 151nm ⑦ 5960nm ~ 42300nm
- ④ 151nm ~ 514nm ⑧ 42300nm ~

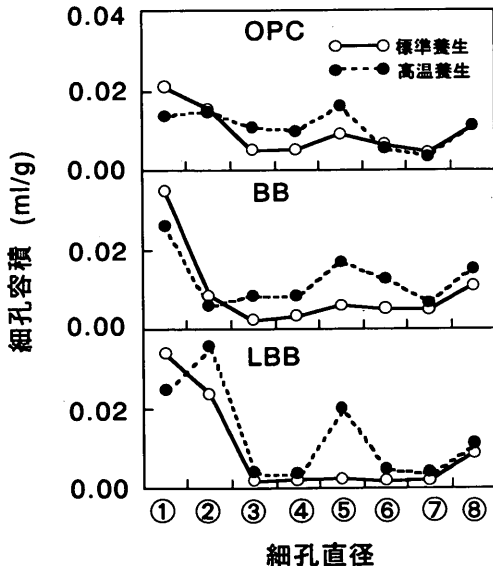


図-4.11 温度履歴が細孔系分布に及ぼす影響

BBに用いられたスラグの粉末度が4500cm²/gであり、LBBに用いられた粉末度が5500cm²/gのスラグよりもやや粉末度が小さいために、スラグの反応率が異なるためと考えられる。

(2) 細孔径分布

図-4.11に各試料について水銀圧入方式ポロメーターを用いて測定した細孔径分布を、また表-4.4に各試料の全細孔容積を示す。

① 20℃水中養生でのセメントの種類と全細孔容積の関係

OPCに比べると、BBとLBBを用いると比較的小径側(0.007μmまたは0.024μm)の分布量が多くなる。特にLBBでは0.007μmの分布が多くなる。また、セメントの種類によって細孔径分布は異なっているが、全細孔容積には大きな差異は認められない。

② 高温封緘養生と20℃水中養生の細孔径分布の比較

高温封緘養生を行った場合の細孔径分布は、20℃水中養生に比べて、各セメントとも比較的大きな細孔径の分布量が増加し、0.007μm以下の分布量が大きく減少した。ただし低発熱型高炉セメントではそれほど増加していない。また、全細孔容積は、高温封緘養生を行った試料では各セメントとも増加し、組織の緻密さが劣る傾向を示している。

4.5 微細構造と耐久性の関連

中性化速度および塩化物イオン浸透性は、透気性とイオン透過性に密接な関係があると推察できる。内川¹⁶⁾によると、明確な関係を定義していないが、モルタルの強度は0.05~2μm、30~1000μmの細孔容積と強い相関があり、また透気性およびイオン透過性は数百nm(1000nm=1μm)以上の細孔径容積および全細孔容積が増加すると増大するとしている。今回の検討では各細孔径ごとの細孔容積とモルタルの物性に明瞭な関係が認められなかったため、内川の研究を参考にして0.081μm以上を比較的大きな径の細孔容積、それ未満を比較的小きな径の細孔容積として区別し、この両者の細孔容積の変化と物性、および全細孔径と物性の関係について検討した。なお0.081μm以上の細孔容積に着目したのはセメントの種類および養生条件によってこの区間の細孔容積が変化しているためである。

今回の実験では、温度履歴を与えた場合にはセメントの種類に関わらずモルタルの長期強度は低下し、中性化速度は大きくなる傾向を示した。また、塩化物イオンの浸透性はOPCとBBで大きくなるが、LBBでは逆に小さくなる傾向を示している。特に、OPCの塩化物イオンの浸透速度は、温度履歴を与えた場合には他のセメ

ントよりも極めて大きくなる。

これに対して、電子顕微鏡観察の結果と細孔径分布の測定結果によれば、温度履歴を与えると全細孔容積が増加するとともに0.081 μm 以上の細孔容積が増加して組織の緻密性が低下することが判明した。これはKjellsenら¹⁰⁾がセメントペーストによる実験をもとに、“高温養生によって全細孔容積が増大するが、なかでも孔径の大きい部分の増大の影響が大きい”と言っているのと同様な結果となっている。この傾向は各セメントに認められ、なかでもOPCとBBはLBBに比べその細孔径分布の変化が大きい。したがって、長期強度の低下、中性化速度の増大、塩化物イオン浸透速度の増大は温度履歴により生じた硬化体組織の変化に起因していると考えられる。ただし、LBBでは温度履歴を受けた場合の塩化物イオンの浸透性が小さくなっているが、これはベースセメントの鉱物組成の違いによる影響と考えられる。

以上のことから、コンクリート打ち込み直後から温度が上昇し、その温度が断熱状態に近い状態でコンクリート内部に蓄積されるマスコンクリートでは、蓄積された温度がセメント水和物の長期的な緻密化を阻害することがわかった。またそれが原因で、モルタルの長期的な強度増加、塩化物イオンの浸透抵抗性、中性化抵抗性が大きく阻害されることも明かとなった。

マスコンクリートの温度ひびわれ対策として、①低発熱型のセメントを用いたり、プレクーリングやパイクーリングなどを用いて、コンクリートの温度上昇を低減する方法と、②断熱材で断熱養生するなどして、水和熱の拡散によって生じるコンクリート内部の温度勾配を減らす方法があるが、上記のことから判断すれば、コンクリート内部に水和熱を蓄積することになる②の方法は、コンクリートの品質を低下させる恐れがあるため、これを採用することは避けるべきであろう。

5. 結論

本研究では、マスコンクリートとしての温度履歴を受けたコンクリートの耐久性に関する材料特性を検討した。普通ポルトランドセメント(OPC)、高炉セメントB種(BB)および低発熱型高炉セメント(LBB)を用いたセメントモルタルを対象に、養生初期に与えた高温度履歴がモルタルの強度特性、塩化物イオンの浸透性、中性化、微細構造に及ぼす影響を調べた結果、以下に示すような結論を得た。

(1) いずれのセメントにおいても、高い温度履歴を受けた供試体の7日強度は標準養生供試体よりも大きくなっ

ている。しかしその後の強度増加は非常に小さく、材齢28日あるいは91日では標準養生供試体の強度を下回るようになる。つまり若材齢時に高い温度履歴を受けると水和反応が促進されるため初期強度は増すが、その後の長期的な強度の増加は阻害される。

(2) 高温度履歴を受けた供試体の塩化物イオンの浸透深さは、OPCとBBを用いた場合は標準供試体に比べて大きい、LBBを用いたものでは逆の傾向を示している。

(3) BB、LBBの塩化物イオン浸透深さはOPCよりも小さく、高温度履歴を受けたものでも、OPCの標準養生供試体よりも小さい。このことは、高炉系の混合セメントは水和反応とスラグの反応により緻密なペーストを形成すること、またモルタルの温度上昇量が小さかったことの相乗効果によるものと考えられる。

(4) 中性化深さも、高温度履歴を受けたものの方が標準養生されたものよりも大きい。しかし、水セメント比が45%と小さければ温度履歴の影響は大きくない。

(5) 細孔径分布は、高温度履歴を受けることによって、小さな径の多い分布から大きな径の多い分布へシフトする。つまり、高温度履歴を受けることで、モルタルはポラスになることがわかった。

(6) マスコンクリートの温度ひびわれ対策として、①低発熱型のセメントを用いたり、プレクーリングやパイクーリングなどを用いて、コンクリートの温度上昇を低減する方法と、②断熱材で断熱養生するなどして、水和熱の拡散によって生じるコンクリート内部の温度勾配を減らす方法があるが、(1)~(5)の結果からは、コンクリート内部に水和熱を蓄積することになる②の方法はコンクリートの品質を低下させる恐れがあることが分かった。

6. あとがき

今回の実験は封緘養生または水中養生された小型モルタル供試体を用いた実験であり、また温度条件も人為的にコントロールされたものであるため、実際のマスコンクリートの挙動とは異なっていることも予想される¹⁷⁾。そのため、現在コンクリート供試体による実験を継続するとともに、屋外に作製したマスコンクリートの供試体を用いて、コンクリートの温度上昇がコンクリートの材料特性に与える影響を検討している¹⁸⁾。それらの結果がまとも次第報告したいと考えている。

なお本報告は、港湾技術研究所、東亜建設工業株式会社および住友セメント株式会社との間の共同研究で得ら

れた成果の一部である。実験の実施，データ整理，解析に当たっては，三浦幸治，西川正夫，羽瀧貴士，秋葉泰男，五十畑達夫，堀口浩司，竹村英樹，大塚昭男の諸氏には大変お世話になった。ここに深く感謝する次第である。
(1993年3月31日受付)

参 考 文 献

- 1) ㈫ 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひびわれ制御指針・同解説，1986年
- 2) ㈫ 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートの温度ひびわれ幅算定方法に関するセミナー，1993年3月
- 3) ㈫ 土木学会：平成3年度版 コンクリート標準示方書〔施工編〕，土木学会コンクリート委員会，平成3年9月
- 4) 桑原隆司，安齋俊哉，森永繁：マスコンクリートの強度管理方法と管理装置の研究，コンクリート工学年次論文報告集，9-2，1987，pp.79~84.
- 5) ㈫ 日本道路協会：道路橋の塩害対策指針（案）・同解説，昭和59年2月
- 6) Verbeck, G. J., Helmuth, R.: Structures and Properties of Cement Paste, Proceedings of 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, 1968, pp.1~32
- 7) 堀口浩司，長曾我部徹，鈴木康範：水中不分離性コンクリートの高温養生強度について，第45回セメント技術大会講演集，1991年，pp.328~333.
- 8) Rachel J. Detwiler, Knut O. Kjellsen, Odd E. Gjorv: Resistance to chloride intrusion of concrete cured at different temperatures, ACI Materials Journal, Vol.88, No.1, Jan.~Feb. 1991, pp.19~24.
- 9) O. E. Gjorv and Vennesland: Diffusion of Chloride Ions from Seawater into Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.9, 1979, pp.229~238.
- 10) 大即信明，森好生，関博：海洋環境におけるコンクリート中の塩素に関する一考察，土木学会論文報告集，No.332，1983年，pp.107~118.
- 11) 茂啓二郎，高木達男，後藤誠史，大門正機：セメント硬化体中のイオンの拡散とセメントの種類，セメント技術年報 37，1983年，pp.112~115.
- 12) 福手 勤，濱田秀則，山本邦夫：海洋環境に20年間暴露されたコンクリートの耐久性に関する研究，土木学会論文集，No.442/V-16，1992.2，pp.43~52.
- 13) 岸谷孝一，西澤紀昭ほか編：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 中性化，技報堂出版，1986年8月.
- 14) 長瀧重義，大賀宏行，荒井俊晴：高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの中性化，㈫ 土木学会，高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用性に関するシンポジウム，1987年，pp.143~150.
- 15) 内川浩：組成と構造の観点からみた硬化セメントペースト，モルタルおよびコンクリートの類似点と相違

- 点，セメント・コンクリート，No.507，1985.5，pp.33~46.
- 16) Knut O. Kjellsen, Rachel J. Detwiler, Odd E. Gjorv: Pore structure of plain cement pastes hydrated at different temperatures, CEMENT and CONCRETE RESEARCH, Vol.20, No.6, 1990, pp.927~933.
- 17) Malvin Sandvik, Odd E. Gjorv: High curing temperatures in lightweight high-strength concrete, Concrete International, Dec.1992, pp.40~42
- 18) 守分敦郎，福手 勤，堀口浩司：マスコンクリートの耐久性に関する検討，コンクリート工学年次論文報告集，第15巻，1993年6月

参考資料-1 D-乾燥

D-乾燥とは，温度を上げて乾燥すると試料が化学反応を起こす場合に，常温で乾燥するために用いられるもので，セメント硬化体中の余剰水（水和反応に使用されていない水）を蒸発除去し， CSH や $Ca(OH)_2$ などの結合水から分離する方法である。装置の概要は図-A.1に示すようなものである。デシケーター部は常温下におかれているが，トラップ部はドライアイスに包まれることにより， $-79^{\circ}C$ に保たれている。この温度における飽和水蒸気圧は $5 \times 10^{-4} mmHg$ になるため，水分を水として除去して，試料を乾燥することができる。すなわちデシケーターから回転ポンプで引かれた水分はトラップ部で水となって水蒸気圧が $5 \times 10^{-4} mmHg$ になり，平衡に達した時点でD-乾燥は終了する。この方法により試料を常圧 $110^{\circ}C$ で乾燥した場合と同量の水分を除去することができる。

参考資料-2 Maturity

コンクリートの強度は材齢と養生温度の両方によって左右されるため，強度を Σ （時間 \times 温度）の関数とすることができ，この総和をMaturity（積算温度）と呼ぶ。式中の「温度」は養生温度と基準温度の差であり，わが国では基準温度としては $-10^{\circ}C$ を採用するのが一般的である。

Maturityの単位は「 $^{\circ}C \cdot 時$ 」，または「 $^{\circ}C \cdot 日$ 」で表す。図-A.2はMaturityの対数と強度が右上がりの直線関係にある例を示している。今回の実験では高温度履歴を受けた試料は $20^{\circ}C$ で養生されたものよりも，少なくとも材齢28日以降は小さい強度を示していることから，標準養生の高温養生のデータをまとめてプロットすると，図-A.2のような傾向は示さないことは明かである。

マスコンクリートとしての温度履歴を受けたコンクリートの材料特性
 ——主に耐久性に着目したモルタルによる基礎実験——

回転ポンプに接続

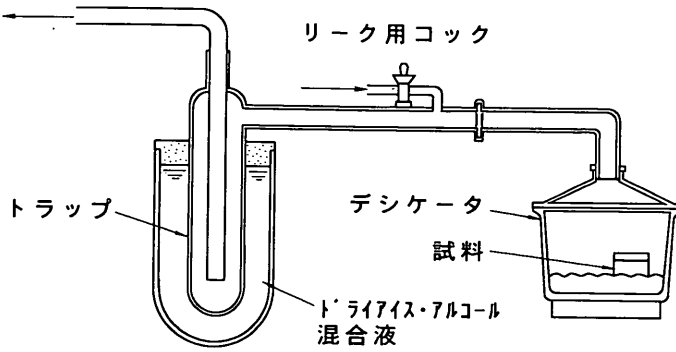


図-A. 1 D-乾燥のための装置の概要

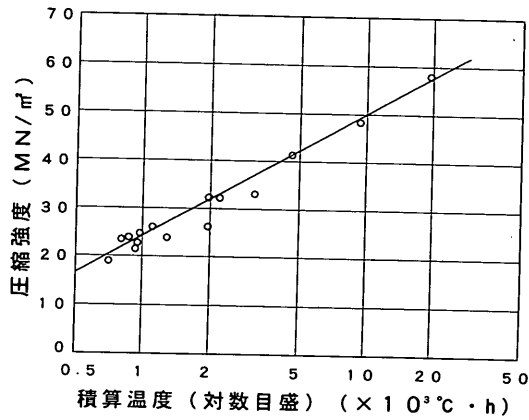


図-A. 2 積算温度 (Maturity) が
 強度発現に及ぼす影響