

打込み温度がマッサコンクリートの強度に 及ぼす影響の研究

正員 工学博士 高野 俊介

INVESTIGATION ON THE EFFECT OF PLACING TEMPERATURE UPON THE STRENGTH OF MASS CONCRETE

(Trans. of JSCE, No. 26, May 1955)

By Dr. Eng., Shun-suke Takano, C.E. Member

Synopsis

This paper describes the results of investigation on the relations between placing temperature and strength of mass concrete. Firstly, the author investigated chemically and physically the relations among the temperature at the time of making cement paste, curing temperature and properties of paste. He observed the fact that the rate of strength development of cement paste made at low temperature was remarkably greater than that of cement paste made at high temperature and tried to explain reason. Secondly, he examined the relations between placing temperature and strength of concrete. The author reached the conclusion that (1) placing of concrete at the lowest possible temperature above freezing point produces favourable effect on the development of strength, (2) placing of mass concrete at low temperature not only reduces maximum temperature in the interior but also develops high strength at a later age, which consequently creates a more favourable condition for avoiding temperature cracking.

要旨 本文は打込み温度とマッサコンクリートの強度との関係の研究結果をのべたものである。まず、セメントペーストを造る時の温度、および、養生温度とセメントペーストの性質との関係を化学的、および物理的に研究し、低温度において造つたセメントペーストの強度増進の大きいことと、その理由とを説明し、つぎにコンクリートについて打込み温度と強度との関係を実験によつて求めた。そして、(1) コンクリートは、凍らない限り、できるだけ低温度で打つ方が強度増進の上に好結果をもたらすこと、(2) マッサコンクリートを低温度で打てば、単にコンクリート体内部の最高上昇温度を低減するばかりでなく、長期におけるコンクリートの強度増進が大きく、従つて、温度ひびわれの発生を防止する上にきわめて有利であることを結論としたものである。

目次

第1章 緒論	第4節 圧縮強度と水和程度を表わす諸量との関係
第2章 材料	第5節 光学顕微鏡、および電子顕微鏡による水和観察
第3章 コンクリート	第6節 セメントペーストの液相組成に関する実験
第4章 コンクリートの断熱温度上昇に関する実験	第6章 マッサコンクリートの打込み温度とセメント主要構成化合物のペーストの性質との関係
第1節 概説	第1節 概説
第2節 実験方法	第2節 硬化したセメントペースト主要構成化合物のペーストの圧縮強度および水和に関する実験
第3節 実験結果およびその考察	(1) ケイ酸三石灰を用いた場合
第5章 マッサコンクリートの打込み温度とセメントペーストの性質との関係	(2) ケイ酸二石灰を用いた場合
第1節 概説	(3) アルミン酸三石灰を用いた場合
第2節 硬化したセメントペーストの圧縮強度試験	第3節 ケイ酸三石灰およびケイ酸二石灰などの水和生成物の組成計算
(1) 供試体 (2) 養生方法 (3) 試験方法	第4節 顕微鏡による水和の観察
(4) 圧縮強度試験の結果およびその考察	(1) 光学顕微鏡による場合
第3節 硬化したセメントペーストの水和進行程度に関する実験	(2) 電子顕微鏡による場合
(1) 空隙率 (2) 結合水量 (3) 水酸化石灰生成量 (4) 熱分析	第5節 初期温度や養生温度がセメントペーストの水和進行に影響を及ぼす理由
(i) 熱天秤による加熱重量減	
(ii) 示差熱分析	
(5) 水和過程における固相(ゲルを含む)の体積測定および硬化したセメントペースト中の水和量の測定	

第7章 マッサコンクリートの打込み温度とコンクリート圧縮強度, 引張強度および動的弾性係数との関係

- 第1節 概 説
- 第2節 供試体の製造および養生方法
- 第3節 強度試験方法
- 第4節 強度試験結果およびその考察
 - (1) 普通セメントを用いた場合
 - (2) 中庸熱セメントを用いた場合

第5節 動的弾性係数に関する実験結果とその考察

第8章 打込み温度とコンクリートと温度変化による引張応力および温度ひびわれ発生との関係

第9章 結 論

文 献
光学および電子顕微鏡写真

第1章 緒 論

ダムのようなマッサコンクリートでは、セメントの水和作用による熱のため、その内部温度が上昇し、あとでこれが冷えると、コンクリート体に引張応力がおこり、その結果ひびわれがでやすい。

しかし、工事を早急に竣工するため、打込み速度を早くし、ブロックの大きさを大きくするのも近來の傾向であり、これがため、セメントの水和熱が十分に放散されず、コンクリートの温度はかなり上昇する。

温度ひびわれを軽減するためには、マッサコンクリートにおける最高上昇温度を制限することも必要であるがコンクリートの引張強度が大きいこともまた大切である。

しかるに、ダムのようなマッサコンクリートが打込み温度によつて強度その他の性質がいかなる影響を受けるか、また、マッサコンクリートの内部における温度変化、および、長く続く高温によつてコンクリートの性質がどのようになるか、というきわめて重要な問題については、R. E. Davis, A. E. Mironoff 氏などの研究により、初期低温度で養生した場合に圧縮強度が大きいこと、その他が多少知られている。しかし、この種の研究の数はきわめて少なく、かつ、くわしい実験報告もないので、たとえば、低温度で打込んだコンクリートの引張強度はどの程度増大するか、また、打込み温度によつてコンクリートの強度増進が影響される理由は何であるか、などについては、ほとんどわかつていない。

要するに、ダム内部のコンクリートの性質については、現在なお不明の問題がはなはだ多い実状である。そこで著者は、打込み温度がマッサコンクリートの強度に及ぼす影響について、さらに詳細に研究し、従来未解決であつた点について解明を試みた。

本文はセメントペーストを造る時の温度 および養生温度と、各種セメントペーストの圧縮強度その他の性質との関係について研究した結果をもとにし、さらに、打込み温度とマッサコンクリートの圧縮強度、および引張強度との関係について研究した結果を述べたもので、打込み温度はコンクリートの強度増進に重大な影響があること、コンクリートを低温度で打込めば、単にコンクリート体内部の最高上昇温度を低減するばかりでなく、長期材令における強度増進にきわめて有利であること、などを実験によつて化学的、および物理的に説明し、マッサコンクリート施工において、打込み温度に関する一提案をしたものである。

本研究については吉田徳次郎博士の懇篤なる御指導をうけた。ここに 恩師 吉田先生に深甚なる感謝の意を表する。

第2章 材 料

(a) セメント

表一1 普通セメントおよび中庸熱セメントの化学成分

セメント	Loss on ignition (%)	Insol. resid. (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Total (%)	H.M.	S.M.	A.I.	I.M.	遊離石灰 (%)
普通	1.54	0.25	22.15	4.76	3.02	64.93	1.41	1.30	99.36	2.14	2.85	4.65	1.58	0.95
中庸熱	0.87	0.27	24.85	3.44	3.56	64.00	1.53	0.91	99.43	1.99	3.55	7.22	0.97	0.15

表一2 普通セメントおよび中庸熱セメントの組成化合物 (%) (Bogue の計算法による)

セメント	3CaO·SiO ₂	2CaO·SiO ₂	3CaO·Al ₂ O ₃	4CaO·Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃
普通	51.8	24.5	7.5	9.2
中庸熱	40.1	41.1	3.1	10.8

小野田普通ポルトランドセメント（以下、これを普通セメントという）、および、小野田中層熱ポルトランドセメント（以下、これを中層熱セメントという）を用いた。これらのセメントの JIS R 5231 5202, および, 5203 (1933) などによる試験成績は 表一1~4 に示すようである。

表一3 普通セメントおよび中層熱セメントの物理的性質

セメント	比重	粉末度		凝 結					安定性	フロー (mm)	曲げ強さ (kg/cm ²)			圧縮強度 (kg/cm ²)		
		ブレン (cm ² /g)	88 (%)	水量 (%)	始発 (時分)	終結 (時分)	室温 (°C)	温度 (%)			3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日
普通	3.15	3250	3.6	24.9	1-33	2-57	20.1	78	良	242	30.6	47.3	63.6	108	218	400
中層熱	3.21	2890	1.8	25.8	3-50	5-40	20.2	84	良	241	21.7	35.9	51.3	71	131	221

表一4 普通セメントおよび中層熱セメントの水和熱 (cal/g)

セメント	7 日	28 日	91 日
普通セメント	67.5	81.4	92.9
中層熱セメント	58.6	69.9	81.1

(b) 骨 材

細骨材は山口県吉敷郡秋徳町産の浜砂を用いた。これは全部 5 mm の網フルイを通過したもので、石質は主として石英質で少量の砂岩、および、長石の破片を混じている。砂のおもな物理的性質を 表一5 に示す。また、フルイ分け試験の結果は 図一1 に示すようである。この砂の使用に当つては、粒度を一定にするため、あらかじめ、ふるい分けたものを一定の割合に配合して用いた。

粗骨材は山口県岩国川（岩国市付近）産の水洗した砂利で、全部 80 mm の板フルイを通過し、5 mm の網フルイにとどまり、その大部分は硬砂岩で少量の頁岩、および、ケイ岩を混じている。粒度を一定にするため、あらかじめフルイ分けたものを一定の割合に配合して用いた。その粒度は 図一1 に示すようである。原砂利の粒径は 80 mm 以下であるが、試験の種類により、この中からある粒径以上のものを除去し、あるいは 80 mm 以上のものを加えることにより、最大寸法を 150 mm, 80 mm, 40 mm, および 20 mm にそれぞれ調整した。原砂利の比重は 2.63, 吸水量は 0.8%, 粗粒率は 8.10, 単位容積の重量は 1.340 kg/m³ であつて、表面乾燥飽和状態として用いた。

表一5 砂の物理的性質

比重	吸水量 (%)	泥土量 (%)	粗粒率	単位容積の重量 (kg/m ³)	空隙率 (%)
2.60	1.2	0.6	2.81	1.575	38.8

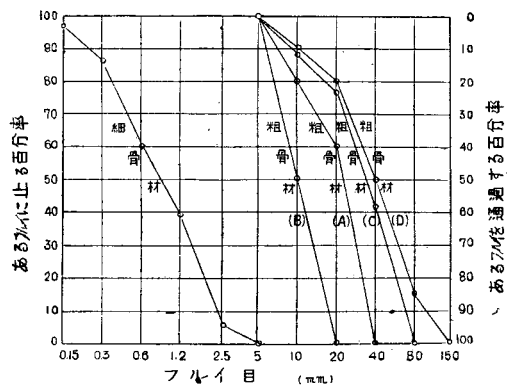
(c) AE 材

AE 材は米国 Hercules powders 社製の NVX を用いた。これは Vinsol resin を NaOH で中和し、乾燥した粉末である。著者はあらかじめ、これを 60°C の温水に溶して 20% 溶液とし、使用に際し、3% 溶液に薄めて用いた。

(d) 水

コンクリートの実験の場合、およびセメントペーストの強度試験の場合はすべて水道の水を用い、セメントペーストの強度試験以外の実験、および、セメントの主要構成化合物のペーストに関する実験には煮沸した蒸留水を用いた。

図一1 砂および砂利のふるい分け曲線



第3章 コンクリート

実験に用いた配合 A ないし C の各種コンクリートは、表一6 の備考に示した配合 D のマッサコンクリートをあるフルイで Wet Screening したとほぼ同じ配合のもので、いずれも AE コンクリートである。これらのコンクリートの配合を 表一6 に示す。

配合 A は第4章のコンクリートの断熱状態における温度上昇試験に、配合 B は第7章の圧縮強度、引張強度、および動的弾性係数の試験に、また、配合 C は本章の圧縮強度および、その他の試験にそれぞれ用いた。配合 C および D は普通のマッサコンクリートに用いる配合に近いものであり、ことに配合 D は一般の重力ダム内部に用いるコンクリートの配合に近いものと思われる。

表一6 実験に用いたコンクリートの配合

配合	項目 粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント 重量比	コンクリート 1m ³ に 用いるセメ ント量 (kg)	コンクリート 1m ³ に 用いる水量 (kg)	粗骨材 重量比	コンクリート 1m ³ に用いる表面乾燥飽和状態における骨材重量			空気量※
							全量 (kg)	細骨材(kg)	粗骨材(kg)	
A	40	6	0.60	254	153	1.49	1.894	760	1.134	4.5
B	20	13	0.60	339	204	0.61	1.644	1.022	622	6.5
C	80	4	0.60	197	118	2.49	2.062	591	1.471	3~4

※ JIS A 1117 (1952) によつて求めたもので、試験時の温度は 20°C である。

(備考) 配合Dのコンクリートは粗骨材の最大寸法 150 mm, スランブ 3~4 cm, 水セメント重量比 0.60, コンクリート 1m³に用いるセメントの量 180 kg, 同じく水量 108 kg 粗骨材重量比 2.91, 空気量 3~4% である

なお、配合 A および B のコンクリートは配合 D のコンクリートを、40 mm, および 20 mm のフルイでそれぞれ Wet screening したものと同一配合になるように、再配合したものである。

次に、配合 C のコンクリートを用いた 30×60 cm の大型円柱供試体の強度と、配合 B のコンクリートを用いた 7.5×15.0 cm の小型円柱供試体の強度との関係を求めるため、これらの供試体の材令 28 日、および 91 日における圧縮強度試験を行つた。コンクリートの練り混ぜは配合 C のものにたいしてはバレル型ミキサ (容量 25 l 練り) を、また、配合 B のものはアイリッヒ型ミキサ (容量 15×30 cm の円柱供試体 3 個練り) をそれぞれ用いた。練り混ぜは、砂とセメントをミキサに投入し、空練り後水を加えてモルタルを造り、さらに砂利を加えて再び練り混ぜた。1 回の練り混ぜ量はバレル型は 25 l, アイリッヒ型は 15 l であり、練り混ぜ時間は空練り 2 分、注水後 3 分である。練り混ぜおよび、供試体の製造は 20°C の恒温室内で行い、脱枠後は 20°C の水槽中で試験材令に達するまで養生した。これらの供試体の圧縮強度試験成績を表一7 に示す。

試験の結果、配合 C のコンクリート供試体の圧縮強度は配合 B のコンクリート供試体の圧縮強度にたいし、材令 28 日および 91 日において、それぞれ 78% および 75% であり、これまでに知られてきた結果に近いことを示している⁴⁾。なお、主として、供試体の大きさだけによる影響を知る目的で、配合 B のコンクリートを用い、上記大型、および小型供試体にたいし、材令 28 日、および 91 日における圧縮強度を比較した。その結果大型供試体の強度は小型供試体の強度にたいし、それぞれ 81%, および 85%, であつた。これも従来言われてきた関係とよく一致している。

表一7 大型および小型円柱供試体の圧縮強度比較

配合	供試体の寸法 (cm)	粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント 重量比	スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (kg/cm ²)		圧縮強度比率	
						28 日	91 日	23 日	91 日
B	φ7.5×15	20	0.60	13.5	6.8	244	312	100	100
C	φ30×60	80	0.60	4	3.5	190	235	78	75

註：供試体 3 個の平均値をもつて圧縮強度とした。

次に参考のため、配合 C の 30×60 cm のコンクリート円柱供試体について材令 91 日における静的弾性係数と動的弾性係数を求めた。静的弾性係数は、Baldwin Southwark SR-4 A-1 型 ストレインゲージ、および SR-4 型指示器を用い、アムスラー型 200 t 圧縮試験機により、単純圧縮の場合の応力ひずみ特性を測定してこれを求めた。

また、動的弾性係数は日本電子測器 KK 製の CT-2 型ヤング率測定器を用い、電気振動による共振周波数を求めてこれを決定した。

30×60 cm, の円柱供試体について試験した結果は、表一8 に示すようであり、材令 91 日における静的弾性係数は応力 20 kg/cm² および、50 kg/cm² のときいずれも供試体 2 個の平均値 283.000 kg/cm², 応力 80 kg/cm², のとき同じく 280.000 kg/cm², また動的弾性係数は供試体 3 個の平均値 353.000 kg/cm² を示した。静的弾性係数は動的弾性係数より約 20%, 小さい。

なお、この静歪特性の測定方法、結果、および誤差の吟味などの詳細についてはすでに報告した²⁾。

表-8 コンクリートの大型円柱供試体 (30×60 cm) の材令 91 日における静的弾性係数と動的弾性係数

供試体号	静的弾性係数 (kg/cm ²)			動的弾性係数 (kg/cm ²)	動的弾性係数 静的弾性係数
	応力 20 kg/cm ²	応力 50 kg/cm ²	応力 80 kg/cm ²		
C-1	30.5×10 ⁴	30.5×10 ⁴	30.5×10 ⁴	37.0×10 ⁴	1.21
C-2	26.0×10 ⁴	26.0×10 ⁴	25.5×10 ⁴	32.9×10 ⁴	1.27
C-3	—	—	—	36.1×10 ⁴	—
平均	23.3×10 ⁴	23.3×10 ⁴	23.0×10 ⁴	35.3×10 ⁴	1.24

第4章 コンクリートの断熱温度上昇に関する実験

第1節 概 説

本実験は普通セメントおよび中需熱セメントを用い、各種温度で打込んだときのコンクリート断熱状態における時間と温度との関係を求め、以後の諸実験における養生条件を決定するためにこれを行つた。

著者の研究はマッサコンクリート、ことに断熱状態に近い大ダム内部のコンクリートを対象としているから、コンクリートをすべて断熱状態とみなして、以後の諸実験や計算を行つた。またこの研究では、コンクリートを冬期低温時、夏期高温時、およびその中間の温暖の時期に打込んだ場合、あるいはブリクERINGした場合など、種々の状況を考慮し、打込み温度を 5°, 10°, 20°, および 30°C の 4 種類とした。

第2節 実験方法

実験装置は普通の石炭発熱量試験用の燃研式断熱カロリメーターを 図-2 に示すように改造したものである。この断熱温度上昇試験には実験の都合上、配合 A のコンクリートを用いた。コンクリート供試体を入れる容器は厚さ約 0.3 mm のブリキ板で作つた内径 15 cm, 内高 20 cm, 容積約 3.5 l の円筒である。

コンクリートを前記の容器に詰め終つたならば、この容器をコンテナの中に入れて、水の浸入を防ぐため、酢酸ビニールを塗つたゴムパッキングを用いて密封し、コンクリート内の中心部に保護管に入れた寒暖計をそう入する（保護管の中にはこれと寒暖計との接触をよくするため、流動パラフィンが入れてある）。

次に、コンクリートをカロリメーター内の水槽中に浸漬し、コルク板で蓋をし、攪拌を続けながら、ヒーターの電流を調節し、コンクリートの温度に外筒の水の温度を正しく追従させた。測温はコンクリートの温度が大体究極の最高上昇温度に達するまでこれを行つた。ただし、中需熱セメントを用い低温で打込んだ場合は、材令 28 日になつても究極温度に達しなかつたが、実験の都合で測温をやめ、便宜上このときの温度をもつて最高上昇温度とみなした。

なお、コンクリートの打込み温度を 5°C および 10°C のような低温にする場合は、20°C の恒温室内ではややもすると練り上りコンクリートの温度が所定の打込み温度以上に昇るので、これを防ぐため材料はあらかじめ打込み温度以下に冷却したものをを用い、かつ、恒温室の温度もできるだけ低くした。

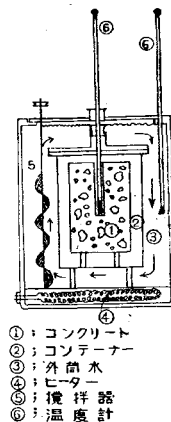
また、コンクリートの打込み温度を 5°C および 10°C にする場合は部屋の気温をこのような低温に保つことは困難なので、カロリメーターそのものを低温恒温槽内に入れ、初めに槽内の気温を打込み時の温度に保ち、コンクリートの温度が上昇して 20°C になつたとき、カロリメーターを低温恒温槽から 20°C の恒温室内に移し、さらに実験を続けた。

第3節 実験の結果およびその考察

この実験に用いた配合 A のコンクリートはセメントの使用量そのほか、本研究において対象とするダム内部コンクリート、すなわち、配合 D のコンクリートの場合とかなり異なるので、このようなマッサコンクリートの場合に適用するためには、上記の実験結果を修正する必要がある。そこで便宜上、コンクリートの比熱は硬化したのちも、骨材、セメント、および水、などの混合物の比熱に等しいと仮定し、計算により配合 D のコンクリートの場合の曲線にそれぞれ修正した。

図-3 および 図-4 は普通セメント、および、中需熱セメントを用いた配合 D のコンクリートの打込み温度

図-2 コンクリートの断熱温度上昇実験に用いた改造断熱カロリメーターの略図



- ①: コンクリート
- ②: コンテナ
- ③: 外筒水
- ④: ヒーター
- ⑤: 攪拌器
- ⑥: 温度計

が 5°, 10°, 20°, および 30°C, の場合の材令 28 日までの断熱状態における時間温度曲線を示す。また, これらの曲線から求めた断熱状態における温度上昇曲線を示せば 図-5 および 図-6 のようである。

なお, 後日大型断熱カロリメーターを購入設置したとき, 中庸熱セメントを用いた配合 D のコンクリートを用いて, 打込み温度が 10°C のときの断熱温度上昇曲線を実験によつて求めたが³⁴⁾, 最高上昇温度において 2°C ほど低い値を示したほか, 曲線の形は計算により修正した曲線には近いので, この程度の差違は, 実用上さしつかえないと考え, 本文の第5章ないし第7章の実験においては, すべてこの 図-3 および 図-4 に示した時間-温度曲線を利用した。

図-3 普通セメントを用いた配合 D の打込み温度を 5°C, 10°C, 20°C および 30°C にしたときのコンクリートの断熱状態における時間-温度曲線

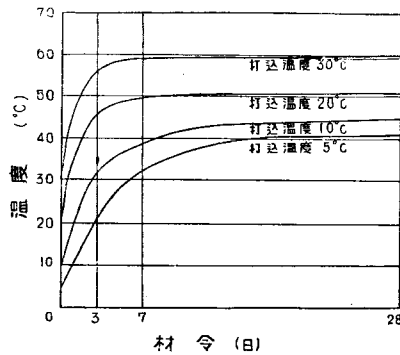
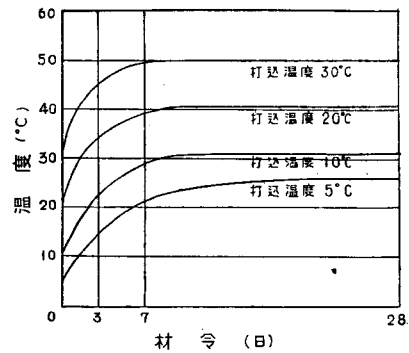


図-4 中庸熱を用いた配合 D のコンクリートの打込み温度を 5°C, 10°C, 20°C および 30°C にしたときの断熱状態における時間-温度曲線



これらの実験結果についてみるに, 普通セメントの場合も 中庸熱セメントの場合も, 時間と, 温度との関係を示す曲線は, 従来知られてきたような傾向が認められる。すなわち, 打込み温度が高いほど発熱が加速され, 早期材令において温度上昇が急速であり, また, 打込み温度が低いほど, 最高上昇温度に達する時期が遅れている。

材令 28 日において, 打込み温度が 5~30°C, の場合, 普通セメントでは, 最高上昇温度は 42~59°C で, 打込み温度を基準とした上昇温度は 37~29°C であり, 中庸熱セメントでは, 最高上昇温度は 27~50°C で, 打込み温度を基準とした上昇温度は 22~20°C である。すなわち, 一般に打込み温度が低いほど最高上昇温度は低い, 打込み温度を基準としたときの上昇温度は高い。

図-5 普通セメントを用いた配合 D のコンクリートの打込み温度を 5°C, 10°C, 20°C および 30°C にしたときの断熱温度上昇曲線

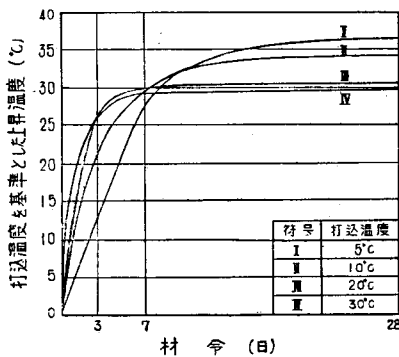
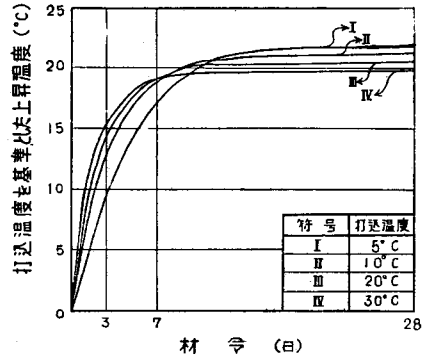


図-6 中庸熱セメントを用いた配合 D のコンクリートの打込み温度を 5°C, 10°C, 20°C および 30°C にしたときの断熱温度上昇曲線



なお, この実験では, 打つときの温度を 1°C 低くすると, 材令 28 日において最高上昇温度が普通セメントでは約 0.6°C, 中庸熱セメントでは約 0.9°C 低減される結果を示している。

第5章 マスコンクリートの打込み温度とセメントペーストの性質との関係

第1節 概 説

コンクリートの強度 その他の性質が一般に、主としてその構成成分であるセメントペーストによつて支配されることは当然である。そこで、打込み温度がマッサコンクリートの強度に及ぼす影響の研究を行うためには、まず、セメントペーストについて、これをコンクリートの場合と同じ温度条件で硬化させたときの初期温度、および養生温度と、セメントペーストの性質との関係を明確にする必要がある。また、緒論で述べたように、初期温度のコンクリートが強度増進の大きいことはすでに知られているが、それが何ゆえであるかは、従来、ほとんど解明されていないので、この点についても、実験によつて化学的、および物理的にその理由を明らかにしておくこともきわめて大切である。

これらの目的のため、著者は、各種セメントペーストで造つた供試体にたいし、これを造るときの温度、および養生温度を変えた場合の材令と、圧縮強度、空隙率、結合水量、および水酸化石灰量など、との関係を求め、さらにペースト中の水和生成物の相互比較のため熱分析を行った。そして、セメントペーストを高温度と低温度で造つたときの水和の進行状態を、顕微鏡を用いてプレパラートの同一視野について観察するとともに、電子顕微鏡を用い、主として初期における水和現象の相違をしらべた。またペースト内でおこる化学反応を明らかにするため、ペーストの液相組成についても実験を行った。

これらの実験結果から、低温度で造つたセメントペーストの強度増進の大きい理由について考察した。

本実験で、セメントペーストを造るときの温度を 30°C と 5°C すなわち、両極端の場合だけを選び、その中の温度の場合の実験を省いたのは、中間の温度によりセメントペーストの性質に及ぼす影響の傾向が変わるとい理由も考えられなかつたからである。

第2節 硬化したセメントペーストの圧縮強度試験

(1) 供試体は 5×10 cm の円柱供試体である。セメントペーストの 1 回の練り混ぜ量は、供試体 4 個分で、すなわち、セメント 1400 g にたいし、水 560 g (セメントの重量にたいし 40%) を加えて、ハチの中で 2.5 分よく練り混ぜ、2 層に分けて型枠に詰めた。供試体は脱枠後、第 7 章 で述べるコンクリート供試体の場合と同様に、厚さ約 0.3 mm で供試体とほぼ同形同大のブリキ缶に密閉、次に示す養生温度スケジュールに従い、試材令がくるまで養生した。

(2) 養生温度スケジュールおよび養生方法 セメントペーストの供試体は、その養生温度を第 4 章第 3 節に示した各種コンクリートの断熱状態における時間温度の曲線のうち、セメントの種類により、区—3 あるいは—4 の中の打込み温度を 5°C および、30°C にした曲線にそれぞれ正しく追従するように変化させた。養生温度が、所定の最高上昇温度に達したならば、以後この温度で養生した。

この目的のため、冷却機を備え 0°C から室温までの温度を自由に調節できる内容積 1 m³ の低温恒温空気槽および室温から 100°C までの温度を調節できる電熱式恒温空気槽の中に入れて養生した。

そして、以下の諸実験においても、各種目的に用いる供試体、顕微鏡のプレパラートその他、すべてこれら装置を用い、同様な方法によつて養生した。これらの恒温槽の精度は ±0.5°C である。

なお今後簡単のため供試体の養生温度条件を表示するにあたり、セメント、およびセメントの主要構成化合

図-7 普通セメントを用いたペーストで造つた供試体の初期温度を 5°C および 30°C とした場合の材令と圧縮強度との関係 (w/c=40%)

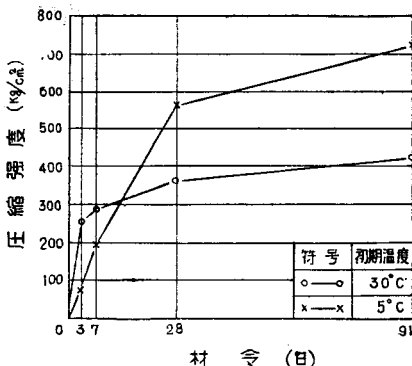
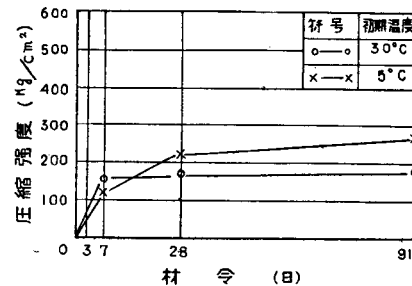


図-8 普通セメントを用いたペーストで造つた供試体の初期温度を 5°C および 30°C とした場合の材令と圧縮強度との関係 (w/c=63%)



のペーストの場合は、初期温度あるいはペーストを造つたときの温度、また、コンクリートの場合は、打込み温度だけの表示にとどめ、その後の養生温度条件についてはこれを省略した。

(3) 試験方法 セメントペーストの円柱供試体は、材令3日、7日、28日、および91日に達したとき、前記恒温槽から取り出し、室温にまで冷えるのを待つて併を破り、供試体の重量をはかり、ただちに60tあるいは20tの油圧式圧縮強度試験機を用いて圧縮強度を試験した。

本試験における圧縮強度は供試体4個の平均値であり、強度値の偏差率(Coefficient of Variationに相当するものであつて、平均値にたいするStandard deviationの割合である、以下同様)は普通セメントを用いた場合は平均約6%、最大約17%、中庸熱セメントを用いた場合は平均約7%、最大約12%、であつた。

なお参考のため行つた早強セメントを用いた供試体では強度値の偏差率は比較的大きく、平均約9%、最大約22%を示した。

(4) 圧縮強度試験の結果およびその考察 試験の結果は、普通セメントを用いた場合も、中庸熱セメントを用いた場合も、初期温度がセメントペースト供試体の圧縮強度に及ぼす影響ははなはだ顕著であり、一般に初期温度が低いほど早期材令では強度が小さいが、長期材令では強度が大きくなり、初期温度の高いものは強度増進が少ないことを示した。

図-7は普通セメントを用いたセメントペーストで造つた円柱供試体の初期温度を、5°Cおよび30°Cにした場合の材令と圧縮強度との関係を示す。また図-8は参考のため、水セメント重量比を63%にした場合の同じく材令と圧縮強度との関係を示したものである。

図-7でみると、普通セメントを用いたペーストは、材令7日までは初期温度が30°Cの方がかなり強いが強度増進が少ないため、材令28日では5°Cのものに比べて約30%小さく、さらに材令91日になると約40%小となり、その差が大きくなる傾向を示している。また図-8でみるとおり、水セメント重量比を63%に変えた場合も大体同じで、水セメント重量比がこの程度に大きくなつても傾向は少しも変わらない。

図-9 中庸熱セメントを用いたペーストで造つた供試体の初期温度を5°Cおよび30°Cとした場合の材令と圧縮強度との関係(w/c=40%)

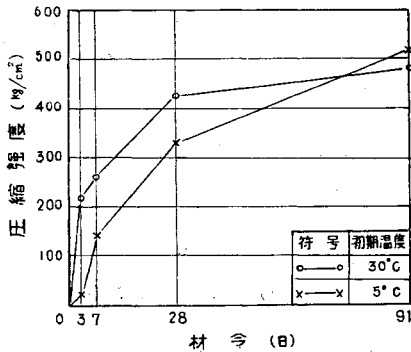


図-10 早強セメントを用いたペーストで使つた供試体の初期温度を5°Cおよび30°Cとした場合の材令と圧縮強度との関係(w/c=40%)

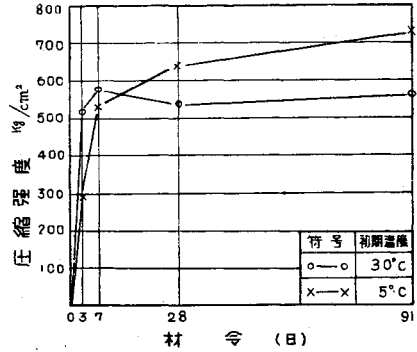


図-9は中庸熱セメントを用いたセメントペーストで造つた円柱供試体の初期温度を、5°Cおよび30°Cにした場合の材令と圧縮強度との関係を示す。

図でわかるように、中庸熱セメントを用いた場合も普通セメントを用いた場合と傾向はほとんど同じであり、ただ、中庸熱セメントは硬化が比較的遅いため、初期温度の影響がいくぶん遅く現われるだけである。すなわち、初めに30°Cで造つたペーストは材令約28日までは強度の増進はかなり大きい、それ以後は増進が少ない。一方、初めに5°Cで造つたものは、材令28日以後も強度の増進は依然大きい、材令91日では30°Cのものよりかえつて強くなり、さらに材令が進めば、ますます差が大きくなる傾向が明らかに認められる。

次に、参考のため図-10に小野田早強セメントについて、普通セメントの場合と同じ試験条件で圧縮強度試験を行つた結果を示す。

図-10でわかることは普通セメントを用いたセメントペーストで造つた供試体の場合と大体において同様であるが、初期温度による影響は、普通セメントの場合よりも硬化が早いため、一層早い時期に現われていること、初期温度が5°Cの場合でも、材令約28日以後は、普通セメントよりも増進の割合が少ないこと、などである。

ここに、きわめて注意を要することは、以上に述べた中庸熱セメントおよび早強セメントの場合である。すなわち、著者が別に行つた研究の結果²⁹⁾³⁰⁾によれば、これらの同種セメントを用いたペーストおよび、モルタルの供試体について、これを造るときから 24 時間までの間の温度を、5°C ないし 50°C に保ち、あとは材令 91 日まで標準温度 (20°C) で養生を行い、その圧縮強度を試験したところ、この早強セメントおよび中庸熱セメントでは、初期温度だけによる影響は、普通セメントの場合に比べそれほど顕著でなかつたことである。このことは、本実験の場合といちじるしく相違する。すなわち、強度増進に影響を及ぼすのは初期温度ばかりでなく、その後の養生温度によることもはなはだ大きいことがわかる。

第3節 硬化したセメントペーストの水和の進行程度に関する実験

(1) 空隙率 硬化したセメントペーストの内部構造と強度発現機構については、篠原氏¹⁷⁾、笠井氏²¹⁾、Powers¹⁹⁾ その他の諸学者の研究により、セメントペーストの空隙率と強度や水和の程度との間に密接な関係のあることが明らかにされている。

この空隙率の測定には、従来種々の方法が用いられているが、著者は乾燥試料のかさ比重と真の比重を測定してこれを求めた。次にその方法をのべる。水セメント重量比 40% のセメントペーストを造りこれをガラス管に密封したまま前に述べたと同じ方法で養生を行い、試験材令に達したとき、ガラス管を破つて供試体を出し、まず、空中および水中における重量をはかつて単位容積の重量を求めたのち、ただちにこれを粉砕し、温度 20°C で恒重になるまで真空乾燥 (真空度、水銀柱で約 2 mm) を行つて乾燥後の重量を求め、乾燥試料のかさ比重を算出した。次に乾燥後の試料をケロシンを用いピクノメーターで真比重を測定し、空隙率をこの乾燥試料のかさ比重と真比重から求めた。図-11 は普通セメント、図-12 は中庸熱セメントを用いたペーストの材令と空隙率との関係を図示したものである。

図-11 普通セメントを用いたペーストで造つた供試体の初期温度を 5°C および 30°C とした場合の材令と空隙率との関係

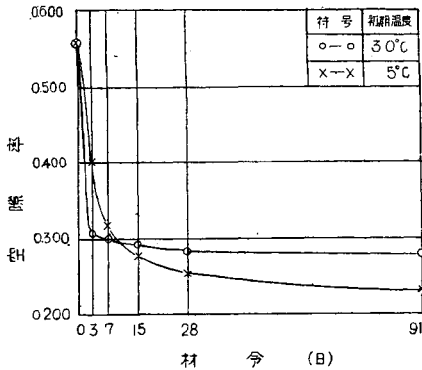
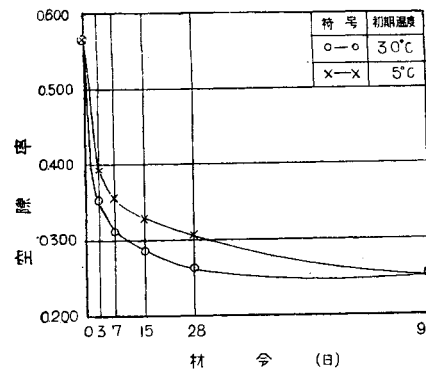


図-12 中庸熱セメントを用いたペーストで造つた供試体の初期温度を 5°C および 30°C とした場合の材令と空隙率との関係



図からわかるように、いずれも材令とともに空隙率は減少することを示している。そして普通セメントの場合も中庸熱セメントの場合も、初期温度の高低により、空隙率の減少が顕著な影響を受ける傾向は圧縮強度の場合とほとんど同じである。

なお、セメントペーストのでき上り高について実験を行つた結果、造つたときのペーストの単位容積中のセメントの重量は、普通セメントでは 1.38 g/cc、中庸熱セメントでは 1.42 g/cc で、空隙率はそれぞれ 56.2% および 55.6% であつた (この場合、最初から混入している空気量は全然考慮しない)。すなわち、中庸熱セメントの方が、最初の空隙率がいくぶん少ない。これは、主としてこのセメントの方が比重が大であつたため、Settling したのちのペーストの密度が大きかつた結果と思われる。

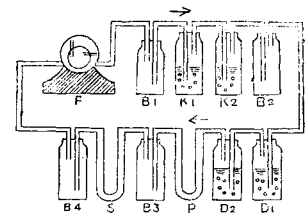
(2) 結合水量 セメントの水和作用に費された水の量、すなわち、結合水量をもつて水和の程度を表わす方法はわが国においても狩野宗三氏⁹⁾、吉田徳次郎氏⁷⁾、篠原謙爾氏¹⁷⁾、また外国でも F.M. Lea⁸⁾、R.H. Bogue¹⁵⁾、D. Werner²⁾ その他の諸氏によつて利用され、種々の実験が行われた。この結合水量によつて水和の程度を測定することは実験操作が簡単で、多数の試料について同時に実験するには比較的便利であるから、著者もこの方法を利用した。以下に著者の行つた方法およびその結果について述べる。水セメント重量比 40% のセメントペーストを造りこれをガラス管に封入し、前項と同様な温度条件で養生し、試験材令に達したならば、ガラス管を破つ

て内容物を取り出し手早く粉碎し、これを近藤、山内両氏¹⁰⁾が行つたように常温(20°C)で乾燥空気を用い、恒重となるまで乾燥し、試料中のいわゆる付着水、吸着水、毛管水などの水分を除去した。乾燥装置の略図は図-13 のようである。

前記(1)空隙率の実験で真空乾燥法を用い、この実験で乾燥空気を用いたのは、真空乾燥法で乾燥の際、試料中の一部の結合水が失われることを懸念したからである。しかし結果においてはどちらの方法も大差は認められなかつた。結合水の測定に先だち、参考のため、乾燥曲線を求めた。図-14~17 がそれで、図の縦軸はセメントペーストの乾燥減量百分率、横軸は乾燥時間を示す。ただし、乾燥量百分率は950°Cで強熱し全水分を除去したものの重量にたいする割合を示す。

これらの図からわかるように、いずれも減量は初め直線的に急減し、のち漸減する。近藤、山内両氏¹⁰⁾はこの直線部は自由水で単なる付着によるものであり、漸減部は半固着水(吸着水、および、毛管水)であるとみなしている。

図-13 セメントペーストの乾燥装置略図



- B₁, B₂, B₃, B₄ ; 安全瓶
 F ; 送風機
 K₁, K₂ ; 苛性ソーダ
 D₁, D₂ ; 濃硫酸
 P ; 五酸化磷粉末入U字管
 S ; 試料入U字管

図-14 普通セメントを用いたペーストの乾燥曲線(初期温度5°C)

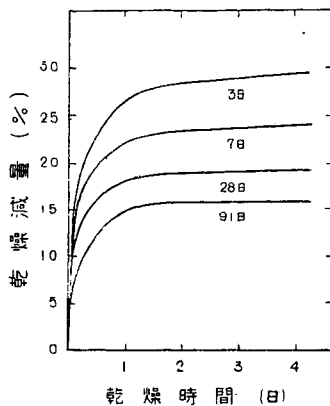


図-15 同上(初期温度30°C)

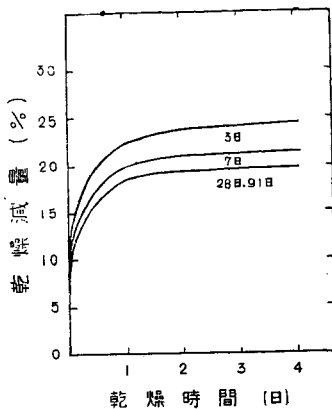


図-16 中庸熱セメントを用いたペーストの乾燥曲線(初期温度5°C)

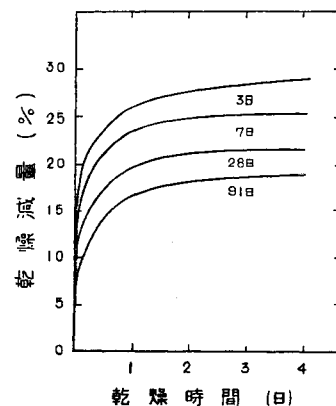
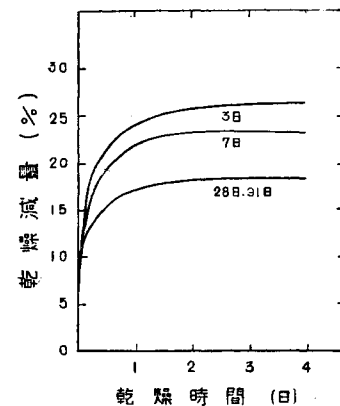


図-17 同上(初期温度30°C)



普通セメントも中庸熱セメントも30°Cで造つたペーストは5°Cで造つたペーストにくらべ、かなり早く恒重に達する。これに反し一般に5°Cで造つたものは恒重に達するに要する時間が長く、ことに早期材令においていちじるしい。この理由についてはいろいろの説があるが、Kalousek¹¹⁾氏は養生温度が高いほど、ゲルの pore size がいちじるしく増大するため、水分が逸散しやすいと考えている。しかし、詳細なことは不明である。

次に、同一試料についてみれば、材令が進むに従つて直線的に急減する部分が少なくなり、乾燥による減量は次第に小となつてゆく。これは一般に硬化の進行につれて結合水が増加し付着水、吸着水、および、毛管水などが減少してゆくためであると思う。なお 30°C で造つたペーストは 28 日以後の減量において、あまり変化が認められないのは、5°C で造つたペーストの場合といちじるしく相違する。

図-18 普通セメントを用いたペーストの初期温度を 5°C および 30°C とした場合の材令と結合水量 (950°C 以下) との関係

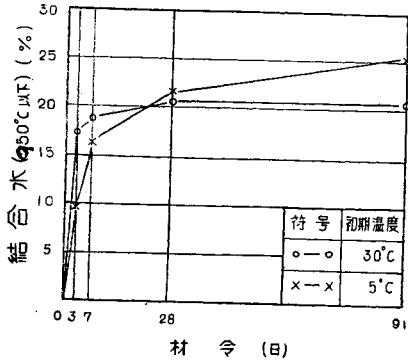


図-20 中庸熱セメントを用いたペーストの初期温度を 5°C および 30°C とした場合の材令と結合水量 (950°C 以下) との関係

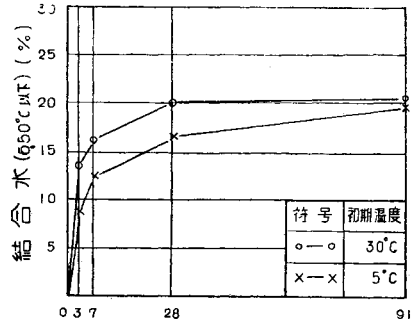


図-19 同上 (550°C 以下)

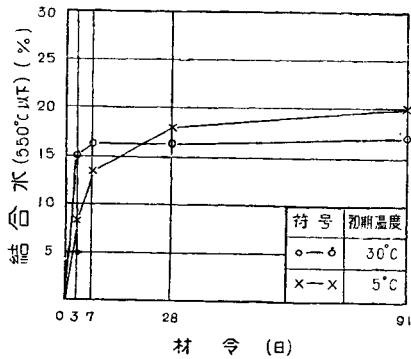
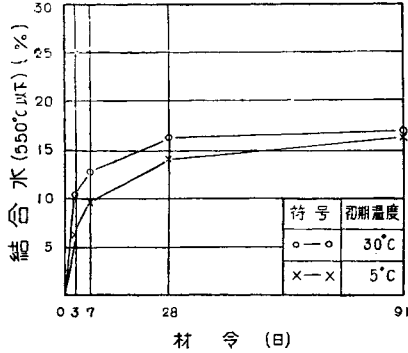


図-21 同上 (550°C 以下)



次に前記乾燥試料を用い 950°C における強熱減量を求めた。この強熱減量中には炭酸石灰の熱分解によつて逸散する炭酸ガスも含まれているが、一応これを結合水とみなした。また参考のため、Lea 氏等⁸⁾の行つた 550°C における強熱減量を求めた。

要するにいずれの方法によるも付着水、半固着水 および結合水などを厳密に決定することはきわめて困難である。

初期温度を 5°C および 30°C としたセメントペーストの材令と結合水量との関係は 図-18~21 に示すようである。ただし結合水量は強熱した試料にたいする百分率をもつて表わす (以下同じ)。

まず、普通セメントの場合についてみるに 950°C 以下の結合水量は、材令 7 日くらいまでは初期温度が 5°C のペーストの方が 30°C のものより少ない。しかるに材令 28 日以後はかえつて 5°C の方が多くなり、材令とともに増加する傾向がみられる。

一方、30°C で造つたペーストは、材令 28 日以後は結合水量の変化は、ほとんどみられない。この点、材令と圧縮強度との場合に傾向がよく一致している。550°C 以下の結合水量の場合も、その傾向は、950°C 以下の場合と全く同じである。

中庸熱セメントの場合は、材令 91 日までの実験ではあるが、各材令を通じて 30°C で造つたペーストは、5°C で造つたものより結合水量が多い。しかし、材令 28 日以後は大して変化がないのに反し、5°C のものは材令とともに結合水量も増加し、材令 91 日以後になれば 30°C のものよりかえつて大きな値を示す傾向がみられる。このことは 550°C 以下の結合水量の場合も同様である。

これらの結果からみても、強度の増進と結合水量の増加とは密接な関係があることがわかる。これについては第4節で改めて論じたい。

なお、本実験において、初めに 30°C で造つたセメントペーストの供試体は、材令約7日ですでに 50°C ないし 59°C の高温度に達するので、このような高温度が長く続けばペースト中の付着水分が蒸発し、その結果、水和作用に必要な水分の不足から、水和作用の進行が阻害されることも一応懸念される。しかし供試体は、脆砕後もすべて密閉状態で養生されているので、この期間における水分の蒸発は考えられない。また、実際、供試体をブリキ缶から取り出したとき、その表面は湿潤状態であること、また各材令における、ペーストの付着水、半固着水、および結合水などの含量は、初期温度の高低、材令の長短にかかわらず大して変化なく、かつ、セメントペーストを造るときに用いた水量と大差ないことなどからみて、高温で造つたペーストが水和するのに必要な水分が不足あるいは逸散することはまず考えられない。また、実際のダムのようなマッサコンクリートの場合も、コンクリート体が乾燥の影響を受けるのは単に表面の部分だけで、内部のコンクリートはほとんど乾燥の影響はないと思われる。従つて高温で造つたセメントペーストが、材令の経過とともに初めに低温で造つたペーストよりも水和が進まなくなるのは、おもに、他の原因によるものであり、供試体の製造および養生の際における乾燥による影響は、きわめて少ないものとする。

(3) 水酸化石灰生成量 (2) の場合と同じ試料を用い、Tribromphenol 法により硬化したセメントペースト中の水酸化石灰を定量した。藤井欽二郎氏⁽¹²⁾はこの方法について研究した結果、硬化したセメントペースト中のケイ酸石灰水和物は、その種類を問わずすべてが Tribromphenol 液により、 $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{aq.}$ なる形にまで分解

図-22 普通セメントを用いたペーストの初期温度が 5°C および 30°C の場合の材令と水酸化石灰量 (CaO として表わす) との関係

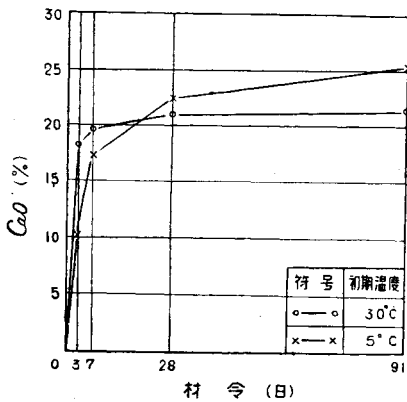


図-23 中庸熱セメントを用いたペーストの初期温度が 5°C および 30°C の場合の材令と水酸化石灰量 (CaO として表わす) との関係

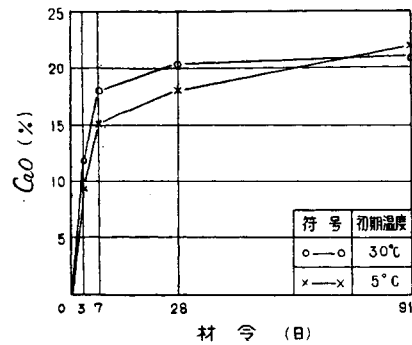


図-24 普通セメントを用いたペーストの初期温度が 5°C および 30°C の場合の材令と水和熱との関係

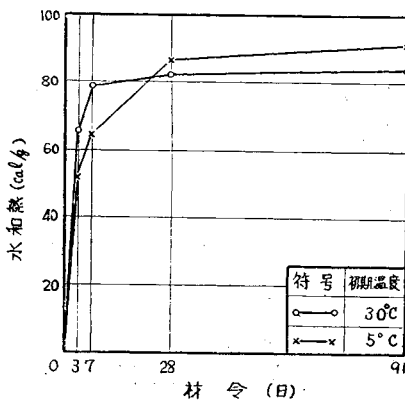
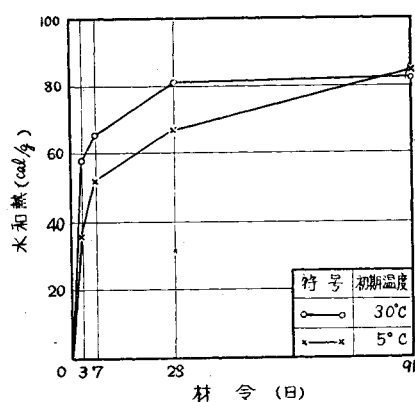


図-25 中庸熱セメントを用いたペーストの初期温度が 5°C および 30°C の場合の材令と水和熱との関係



される。つまり $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{aq}$ は最も安定な形であり、過剰の石灰の吸着媒体とみなしてさしつかえなく、結局この方法で定量された石灰は吸着、および遊離の形の石灰の全量であるという。また藤井氏は、アルミン酸石灰その他の水和物についてもある仮定を設け、この方法で定量した石灰の量からセメントペーストの水和進行度を求めている。

この方法については、今後なお多少の研究を要する点もないとはいえないが、ともかく操作が簡単であるから、著者はこの方法を利用した。

図-22 および 図-23 は材令と、水酸化石灰量 (CaO の形であらわす) との関係を示す。

図からわかるように、前項の (1) および (2) の実験でみられたと同じような傾向を示した。

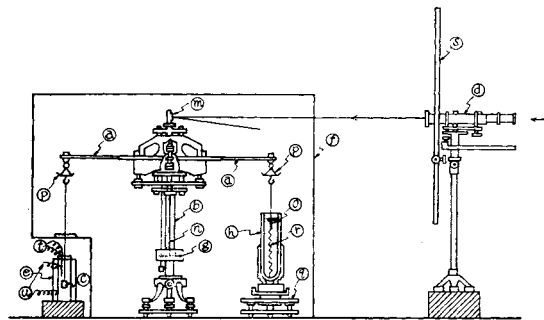
なお、このほか同じ試料を用い、材令と、水和熱との関係を求めた。これを 図-24 および 図-25 に示す。実験結果はやはり、結合水量および水酸化石灰生成量の場合とほとんど同様な傾向を示した。セメントの水和熱が化学反応にもとづくものである以上、当然の結果と思われる。

(4) 熱分析 (1) ないし (2) の実験結果から、初めに低温度で造つたセメントペーストの方が、高温度で造つたセメントペーストより、材令が進むと水和の程度も大きくなり強度も増大することが認められた。しかし、この場合、初期低温度のものと初期高温度のものとの間に、養生温度条件の相違のため、おのおの異なつた水和物が生成していれば、初めに低温度で造つたペーストの方が水和の程度が進んでいるとは断定できない。そこで、この点を確かめるため、まず各材令におけるペーストについて熱分析、すなわち、熱天秤による加熱重量減の測定、並びに示差熱分析などの実験を行つた。

(i) 熱天秤による加熱重量減：(2) の実験と同じ乾燥試料を用い、温度の一定の上昇のもとでの試料の重量の減少状態をしらべた。

図-26 熱天秤装置の構造と装置の概要

熱天秤 (本田式) の概略図 (窯業工学ハンドブック p. 96 窯業協会編) を示せば 図-26 のようである。乾燥試料をメノー乳鉢の中でこまかくすり、その 0.5g をとり、これを小さな白金ルツボ C の中に入れ、電気炉 (B) の中に白金線で下げる。P は分銅をのせる小さな皿であり、a の水平桿は石英ガラスでできている。r は鋼鉄製のスプリングで、魔法ピン (h) の油 (o) の中に入れてある。これは不規則な振動を防ぐためであり、魔法ピンを使用するのは温度により粘性の変化するのを防ぐためである。加熱による試料の重量減は、天秤の桿の中央につけられた鏡 (m) と尺度 (s) 付の望遠鏡 (d) で読みとる。



a: 石英桿 b: 天秤支持 c: 小型白金ルツボ d: 読取望遠鏡 e: 電気炉
f: 木製箱 (硝子鉄) g: 目盛 h: 魔法ピン m: 鏡 n: 指針 o: 硝子油
p: 小皿 q: 水平器平台 r: 鋼鉄スプリング s: 尺度 t: Pt-Rh 熱電対
u: 加熱用コイル

熱天秤による実験は、次の (ii) で述べる示差熱分析を併用することにより、水和生成物の熱的性状を明らかにする上に、はなはだ効果的である。著者は毎分 3°C の上昇速度で加熱減量を測定した。実験結果を 図-27~30 に示す。図の縦軸は加熱重量減 (乾燥試料にたいする百分率)、横軸は加熱温度を表わしたものである。なおこの

図-27 普通セメントを用いたペーストの熱天秤による加熱重量減曲線 (初期温度 5°C)

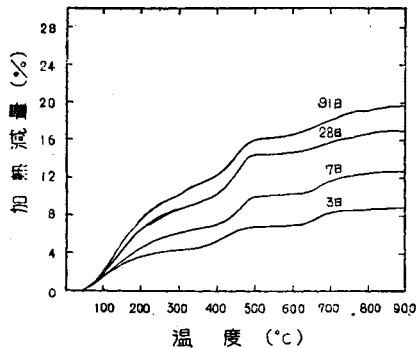
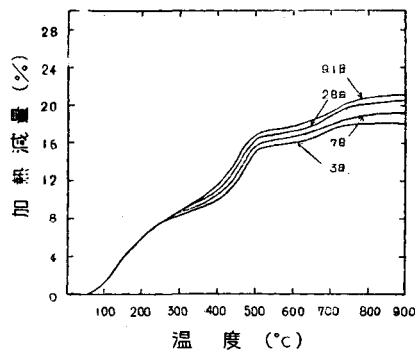
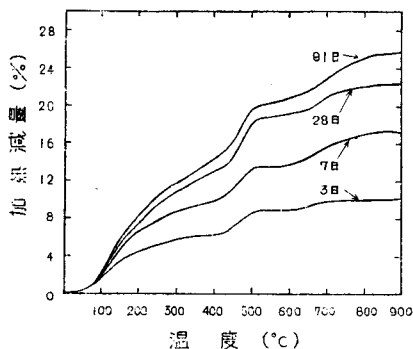


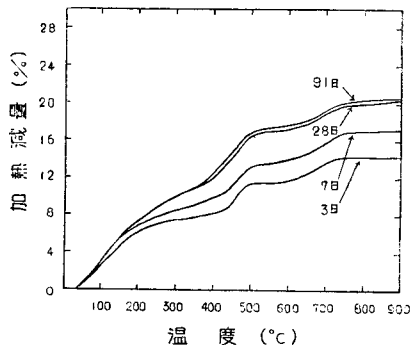
図-28 同 左 (初期温度 30°C)



図一29 中庸熱セメントを用いたペーストの熱天秤による加熱重量減曲線(初期温度5°C)



図一30 同左(初期温度30°C)



加熱重量減曲線は、一定の温度上昇の間における重量変化を測っているのであるから、同一試料でも温度上昇速度が異なれば、重量減の始まる温度が多少移動し、また、重量減を示す部分の傾斜も異なってくる。よつてこの曲線は、何度で減量が始まるかということより、ある温度範囲で何段の重量減があつたかに意義がある。

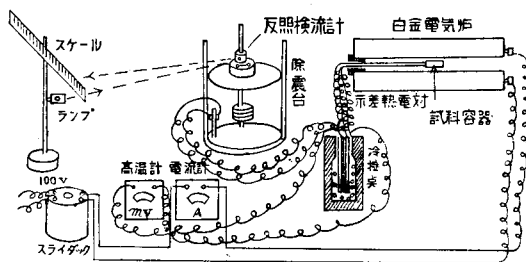
図からわかるように、400°Cまでは徐々に、400°C~550°Cで急激に減量がおこり、その後はゆるやかに、そして900°C~950°Cではほぼ恒重に達する。400°Cまでの減量はおもに、水和生成物の結合水その他の逸散、400°C~550°Cの減量はCa(OH)₂の脱水、そして550°C以上の減量は、主としてCaCO₃の熱分解によるものとみなされる。

これらの曲線についてみるに、一般に、400°Cまでの減量は、材令が3日ないし7日のような早期の間は、初めに30°Cで造つたペーストの方が大きいが、長期材令になると、かえつて初めに5°Cで造つたペーストの方が大となり、明らかに結合水の増加を示している。

本実験の結果からみれば、初期温度や、その後の養生温度の相違により、水和の進行程度の差違は明らかに認められるが、水和物の熱的性状については、大して相違はみられない。

(ii) 示差熱分析：一定の高温および常温で硬化させた場合のセメントの水和物の示差熱分析による研究は、すでにKalousek⁽¹¹⁾⁽¹²⁾その他の諸氏によつて行われており、著者もまた、初期温度だけを異にし、以後20°Cの一定温度で養生した場合の各種セメントペーストについてこれを行つた⁽³⁾。示差熱分析法によれば、水和物の決定および水和程度を知る上に、また、水和物の熱的特性について相互比較のためにはなほ参考となる。示差熱分析法の原理は、全然熱変化をしない中性体と試料とを熱電対で連結し、両者を同一温度の容器内で一定の温度上昇速度で加熱してゆき、ある温度に達したとき、試料が発熱あるいは吸熱をおこすと、その試料と中性体との間の温度差により熱電対に電流を生じ、その電流を鋭敏なガルバノメーターによつて拡大観測するのである(ランプ尺度で読み取る)。本実験に用いた示差熱分析装置の略図を示せば図一31に示すようである。

図一31 示差熱分析装置略図



示差熱電対には、直径0.3mmのアメルクロメル線を用い、スケール上の振れ1mmを生ぜしめる熱電対両端の温度差を0.17°C(常温)とした。加熱用電気炉はφ30×400mmの白金リボン電気炉である。試料の容器は、φ7×11mmの磁製保護管を用い、アルミナと木節粘土によつて作つた試料容器台の上にこれを固定した。試料容器の1個には中性体としてα-アルミナを、他の1個にはあとで述べる乾燥法によつて乾燥した試料約0.8gを充てんした。温度上昇速度は120°C~150°Cまでは2°~3°C/min、それ以上の温度では4°C/minとした。

示差分析に用いた試料は、硬化したセメントペーストをメノー乳鉢で指頭に感じなくなるまで微粉砕したのち、次の乾燥法によつて乾燥を行つたものである。これまでの方法では、試料が恒重に達するまで1~3日を要し、早期材令のものは、乾燥の途中において水和が進行するおそれがあるので、材令3日、までの試料についてはアセトンとエーテルで洗つてある程度の吸着水を除いたのち、(2)で述べた方法で乾燥を行つた。この方法によれ

ば、水和速度の大きい注水後間もない試料でも、乾燥中に水和の進行はほとんど認められないようである。実験結果を 図-32 および 図-33 に示す。

図-32 普通セメントを用いたペーストの示差熱分析曲線

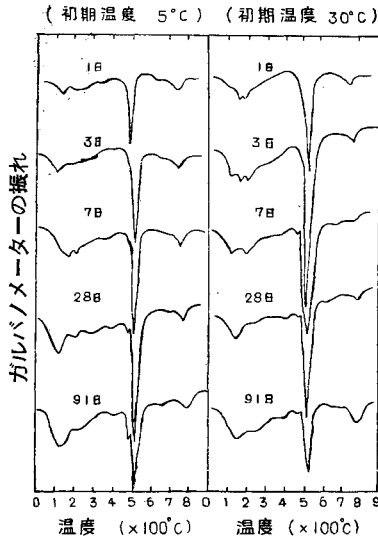
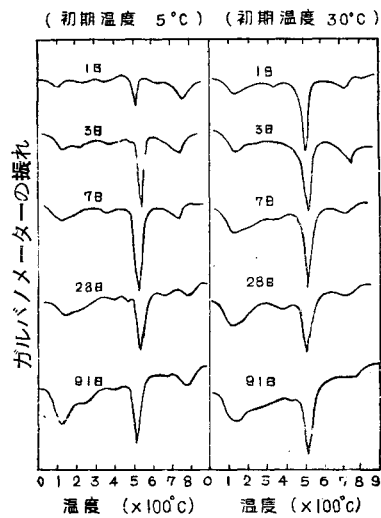


図-33 中庸熱セメントを用いたペーストの示差熱分析曲線



普通セメントの場合も中庸熱セメントの場合も、材令1日ないし3日において 100°~110°C で水分の逸散によると思われる吸熱反応がおこる。材令が進めばこの反応は消失した。普通セメントでは 160°~180°C および 185°~195°C において、それぞれ吸熱反応がおこり、これはさらに材令が進み、28日あるいは91日になると、前者は次第に消失し、ついに後者だけが残った。しかし、中庸熱セメントの場合は、普通セメントの場合にみられた 160°~195°C における吸熱反応は、初期温度や養生温度のいかんにかかわらず、またどの材令においてもみられなかった。

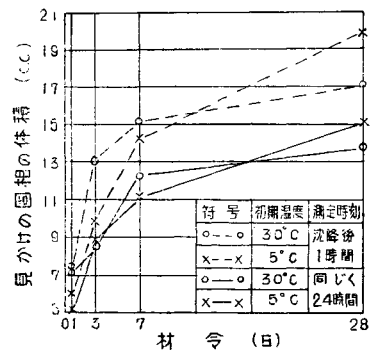
一般に、長期材令においては、120°~130°C で新たに bulge を示し、これは材令とともに、ますます大きくなる傾向がうかがわれる。そして各材令ともに Ca(OH)₂ の脱水と思われる約 490°C における顕著な吸熱反応、および CaCO₃ の熱分解によると思われる約 720°C における吸熱反応がそれぞれ認められた。

初期温度が 5°C および 30°C の場合のセメントペーストの熱分析曲線を比較すると、前者の材令 3~7 日のものと、後者の材令 1 日のものが、吸熱ピークの温度、形、振巾、および面積などからみて、大体同じである。これは早期材令においては、30°C のものが 5°C のものより水和反応が早いことを示すものである。しかし、材令が長期になれば、たとえば中庸熱セメントでは、材令 91 日の曲線は、温度条件の相違による差があまり認められない。

これらの結果、並びに、前項の熱天秤による実験結果を総合してみれば、高温で造つたセメントペーストの強度が材令が進むとあまり増進しなくなり、低温で造つたものが材令とともに強度増進がいちじるしいのは、主として水和の程度の相違によるもので、硬化したセメントペースト中の水和物に大きな差違があつたためではないと考えられる。

(5) セメントの水和過程における固相(ゲルを含む)の測定および重液分離法による水和物と未水和物との創合 セメントの水和過程における固相の体積の測定は、H. Kuhl 氏が行つた方法によつた。普通セメントを用い、試料 5g をとり、20 cc の蒸留水を加えガラスビンに入れ、ただちに回転振とう器にかけ、所定の時間に至るまでこれ続ける。材令 5 時間、1 日、3 日、7 日および 28 日になつたとき、沈でん物を吸引濾過して液相から分離し、こ

図-34 普通セメントを用いたペーストの初期温度が 5°C および 30°C の場合の材令とペースト中の固相の体積との関係



れを無水アルコール中に入れてよく攪はんしたのち、メスシリンダーに入れて静置し、1時間、および、24時間を経て沈でん層の体積を測定した(沈でん物はセメント粒子、ゲルや結晶などの水和物を含む)。

測定の結果を 図-34 に示す。

沈でん物の沈降後、1時間における体積も24時間後の体積も、初期温度が5°Cのものは30°Cのものに比べ早期材令では小さいが、材令が進むと、5°Cで造つた方が次第に体積が増してゆく。これはいくぶん定性的であるが、前に述べた諸実験の結果と傾向を等しくしていることは興味深い。

次に、同じく普通セメントを用いたペーストについて、重液分離法によりペースト中の水和物と未水和物とを分離した。この方法の詳細については第6章で述べる。結果としては、この方法もかなり定性的であるが、従来の実験結果と、傾向がよく一致していることが認められた。

第4節 圧縮強度と水和進行程度を表わす諸量との関係

従来、セメントの水和の進行程度と強度との関係については、Bogue⁽¹⁵⁾、Werner⁽⁹⁾、Anderegg⁽¹⁶⁾、Lea⁽⁸⁾、篠原⁽¹⁷⁾、および、Powers⁽¹⁸⁾などの諸氏の研究発表がある。しかし、養生温度条件を異にした場合の詳細な研究はほとんどみられない。

本節では、これまでの諸実験の結果をもとにし、初期温度やその後の養生温度を異にした場合の硬化したセメントペーストの圧縮強度と、空隙率、結合水量、および水酸化石灰生成量など、水和の進行程度を表わす諸量との間の関係について種々検討した結果を述べる。

図-35は初期温度を5°Cおよび、30°Cとした各種セメントペーストで造つた円柱供試体の圧縮強度と空隙率との関係を示す。図-36は強度軸を対数目盛としたものである。

図-35 初期温度を5°Cおよび30°Cとした各種セメントペーストの圧縮強度と空隙率との関係

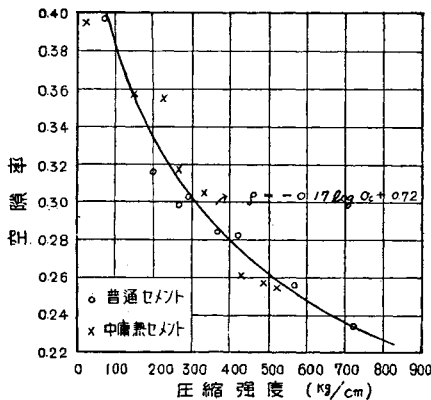


図-36 同じくセメントの圧縮強度と空隙との関係(強度軸は対数目盛)

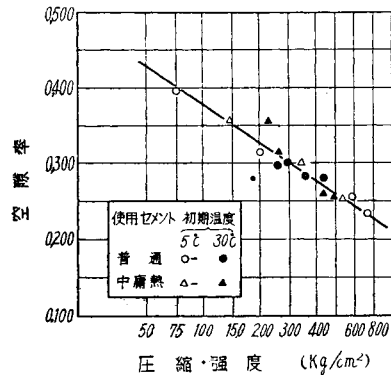


図-35 および 図-36 でわかるように、硬化したセメントペーストの圧縮強度と空隙率との間にはある一定の関係があり、圧縮強度の増加ともなつて空隙率は減少する。図-36 で明らかなようにセメントペーストの圧縮強度の対数と空隙率との間にはほぼ直線関係があり、すなわち、圧縮強度と、空隙率との間に変指数曲線とみなされる明らかな関係がみられる。最小自乗法により、実験式を求めてみると次のようになる(ただし、試験誤差の大きい中庸熱セメント、5°C 3日の数値は除外した)。

$$\rho = 0.17 \log_{10} \sigma_c + 0.72$$

$$\sigma_c = 17700 e^{-13.6\rho}$$

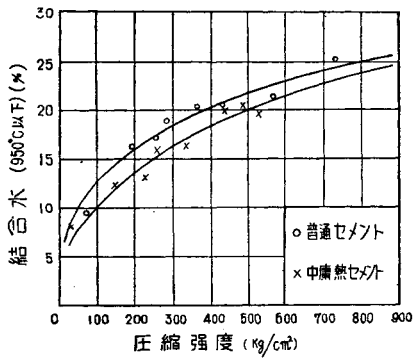
ただし、ρ: ペーストの空隙率

σ_c: 同じく圧縮強度 kg/cm²

また図からわかることは、硬化したセメントペースト(ただし水量一定)の圧縮強度は、大体において空隙率の函数として表わされること、圧縮強度と空隙率との間には、セメントの種類、ことに養生温度条件に大して関係なく、ある一定の関係が存在すること(普通セメントと中庸熱セメントでは多少の差違の生ずることも考えられるが、本実験の場合は、この点明瞭でない)、曲線が強度軸にConvexであることから、水和作用がある程度進めば、以後はもつと大きな割合で圧縮強度が増大すること、等である。

図-37 および 図-38 は各種セメントペーストで造つた供試体の圧縮強度と950°C以下の結合水量との関係

図-37 セメントペーストの圧縮強度と結合水量 (950°C 以下) との関係



を、また図-39 は結合水量と空隙率との関係をそれぞれ示したものである。

図-37 および 38 からよくわかるように圧縮強度の対数と、結合水量との間に、試験誤差の大きい数値 (中庸熱セメント, 材令 3 日) を除けば、ほぼ直線関係が成立し、硬化したセメントペーストの圧縮強度と結合水量との間には、変指数曲線をもつて表わされる明りよな関係が存在する。またこの関係は、温度条件にはあまり関係がないようである。しかし、セメントの種類によつてはかなり相違する。図-36 をみると、空隙率が等しいと、普通セメントでも中庸熱セメントでも、圧縮強度は大して相違がない。しかし、同じ空隙率にたいする結合水量は、セメントの種類によつて異なり、すなわち、普通セメントを用いた場合より、中庸熱セメントを用いた場合の方が、いくぶん少ない。このことはまた図-39 からも明らかである。その理由は、セメントの種類が異なるため、水和生成物が相違していることも考えられるが、そのほかに第 3 節 (1) で述べたように、最初ペーストを造つたときの空隙率がすでに違つていたことも理由として挙げることができる。なお、空隙率と結合水量との関係は、ほぼ直線関係が存在するようである。

次に 図-40 および 図-41 は同じく圧縮強度と、硬化中遊離および吸着された形の全石灰量との関係を示したものである。

図-40 セメントペーストの圧縮強度と水酸化石灰生成量 (CaO として表わす) との関係

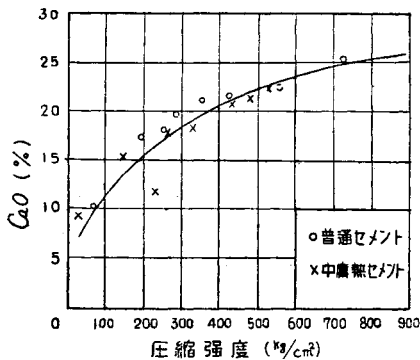


図-38 セメントペーストの圧縮強度と結合水量 (950°C 以下) との関係 (強度軸は対数目盛)

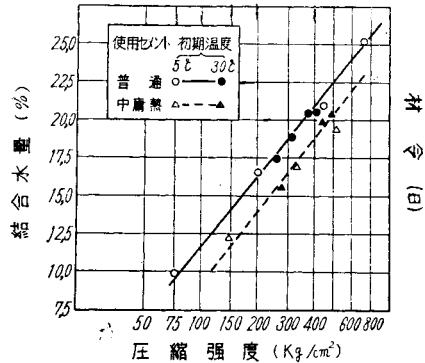


図-39 セメントペーストの結合水量と空隙率との関係

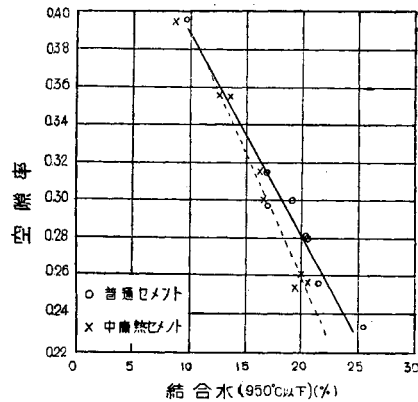


図-41 普通セメントを用いたペーストの材令と液相中の各成分の濃度との関係 (初期温度 5°C)

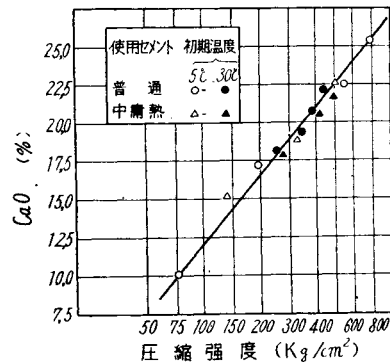


図-40 および図-41 からわかることは、前項の 図-37 および 図-38 で示した圧縮強度と結合水量との関係の場合とほとんど同じである。すなわち、硬化したセメントペーストの圧縮強度と、水酸化石灰生成量との間には、ほぼ変指数曲線をもつて表わされる関係がみられること(ただし、試験誤差の大きい中庸熱セメント、材令3日の数値を除外する)、この関係は養生温度条件にはあまり関係がないこと、また曲線が強度軸に concave であることから、セメントペーストの水和がある程度進めば、それ以後は水酸化石灰生成量(あるいは水和の程度)に比例するよりも、もつと大きな割合で圧縮強度が増大すること、等を示す。なお、この結果からはセメントペーストの圧縮強度と水和進行程度との間の関係が、セメントの種類によつて差違があるかどうかは明らかでない。

次にセメントペーストの圧縮強度と水和熱との関係は、圧縮強度と結合水量あるいは水酸化石灰生成量との関係とほとんど同じ傾向を示したので、ここでは省略する。

セメントペーストの圧縮強度と、水和の程度を表わす諸量との相互関係からみれば、セメントペーストは、水和の進行にともない、まずペースト内部の空隙が水和生成物たるゲル状物質や結晶などの析出、生長のため、次第に充てん結合され、かつ、ゲルの固化、晶化によつて、ペーストの構造が、緻密強固となり、強度が増大してゆくことが考えられる。そして、本実験の温度条件の程度の差では、水和生成物の間に、大きな相違は考えられないことから結局、硬化したセメントペーストの圧縮強度は、かなり長期にわたつて主として水和の程度によつて支配され、初期温度や養生温度はこの場合水和の進行に影響を与える一要素であることがわかる。もちろん硬化したセメントペーストの強度増進は空隙率、ないし、水和生成物の量だけに関係があるとは思われないが、本実験の範囲では初めに低温度で造つたセメントペーストの強度増進の大きいのは、主として水和の程度が増大することによるものと思われる。

第5節 光学顕微鏡および電子顕微鏡による水和観察

(1) 光学顕微鏡による場合 水和作用の進行状態を顕微鏡の同一視野について観察を行つた。セメントの重量にたいし、5倍の蒸留水を用いたペーストの、注水後から普通セメントでは、7日ないし28日、中庸熱セメントでは注水後から材令91日までの水和進行状態を観察撮影した。しかるに、プレパラートはかなり高温にさらされ、ことに初めに30°Cで造つた普通セメントのペーストでは材令7日ですでに60°Cに達する。従つて、一般に長期間完全に密封を続けることはまず不可能である。その上、検鏡の際同一視野を探し求めることは相当困難であり、ときに見失うこともある。

このような事情のため、普通セメントの初期温度が30°Cのもので、材令14日以上にわたつて観察撮影できたものは、皆無であつた。これらの多数の写真のうちから、代表的なものを示せば、写真-1~30のようである。

観察の結果を述べると、一般にプレパラートを造つた直後、大体において、セメントの粒子間の関係位置、間隙部の大きさなどが定まり、時間の経過に従つて、まず、セメント粒子の周囲が次第に水和し、微細な結晶や、ゲル状物質があらわれ、間隙部は次第に狭くなり、一方ゲル状物質も次第に結晶化してゆく。

この場合、普通セメントで初期温度が30°Cのものは材令7日くらいまでは粒子は目立つて膨潤してゆき、析出した結晶(水酸化石灰と思われる)も材令3日くらいまでは大きくなつてゆすが、それ以後はいちじるしい変化はみられない。

初期温度が5°Cのものは、初めはあまり大きな変化はみられないが、材令3日前後から粒子は目立つて膨潤し、同時に液相(間隙部分)中にも小結晶やゲル状物質が現われ始め、間隙は次第に狭くなつてゆく。また、水酸化石灰の結晶と思われる六角板状の結晶も材令の経過とともに順調に生長してゆくのがみられる。

次に、中庸熱セメントの場合は、一般に、普通セメントの場合に比べて水和の進行は緩慢であり、ことに、初期温度が5°Cのものは材令7日くらいまでは、ほとんど変化がないように見える。しかし一般に材令が28日ないし91日になると、粒子の膨潤がかなり目立ち、ことに初期温度が5°Cのものの方が顕著である。

以上のプレパラートにおける各種セメントの水和作用の進行状態を観察した結果、定性的ではあるが、大体において第2節の諸実験の結果と、傾向がよく一致していることがわかつた。すなわち、セメントペーストを造るときの温度が低いときの方が、材令が進むと強度増進の大きいおもな理由は、初期低温度の方が材令の経過とともに水和がよく進み、セメント粒子の膨潤、および、ゲルや結晶などの析出の程度が、初期高温度のものに比べて大きいため、ペースト内の空隙が一層少なくなり、ペーストの構造が緻密強固、かつ、均質になつてゆくためであることが、プレパラートにおける検鏡の結果からも実証しうるものと思われる。

(2) 電子顕微鏡による場合 セメントの重量にたいし、5倍の蒸留水を用いたペーストについて、日立社製

HS-2 型電子顕微鏡を用い初期における水和作用の進行状況を観察，撮影した。ただし，普通セメントでは，参考のため，材令 28 日までこれを行った。

電子顕微鏡用試料は，回転振とうによって得られたセメントの懸濁液を無水アルコールで薄め，遠心分離を行い，液相を分離したのち，固相にイソピルアルコールを加えて懸濁液（固相とゲルの混合物）となし，これを試料支持台に弱つたコイジオン膜上に滴下することによって作製した。撮影した多数の写真の中から代表的なものを示せば，写真—39 ないし 写真—64 のようである。

まず普通セメントについてみるに，初期温度や，養生温度の相違による水和の進行状態の差違は明らかに認められる。すなわち，初めに高温度で造つたセメントペーストでは，セメント粒子の表面に早く，しかも多数の微細な水和物が析出し，また，初めに低温度で造つたペーストの場合にこの析出が遅いことは，明らかに水和作用の進行の遅速を示すものである。

さらに，詳細にみると，ペーストの初期温度が低い場合は，粒子の周囲ばかりでなく，液相中にもゲル状の析出物が多数存在し，一方，初期高温度の場合は，微細な水和析出物が粒子や結晶の周囲にいちじるしく多量に付着被覆するなどの顕著な相違が認められる。しかし，材令が進めば，初めに低温度で造つたものも，セメント粒子や，析出した結晶は次第に微細な析出物によって被覆され，そして，さらに材令が進めば，粒子は析出物のため表面は密実な組織となり，いずれも一様に球塊に近い形となる。

次に，中庸熱セメントの場合も普通セメントの場合と同様，初期高温度のものは，やはり微細は析出物により，セメント粒子や結晶は次第に被覆され，また，初期低温度のものは，セメント粒子の周囲ばかりでなく，液相中にもゲル状物質が比較的少量に見える。

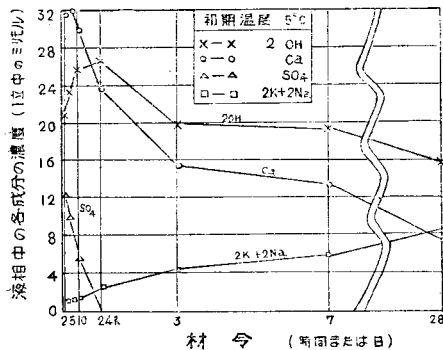
そして材令が進めば，いずれも微細な析出物により密実に被覆される。ただし，その時期は普通セメントの場合よりも遅れている。このように，セメントが水和するときセメント粒子の周囲に微細な水和物，すなわち，ゲル状物質，結晶性のゲル，および，微小な結晶（これらは本実験の写真でも認められるが，さらに，水量を多くした場合は一層明瞭に見える²⁸⁾³³⁾）が析出し，これらの析出物により，セメント粒子が被覆されることは，以後の水和作用の進行にいちじるしい影響を及ぼすものと思われる。しかも，温度条件の相違により，初期水和作用の遅速，ないし，この被膜の生成時期，その他に相違のおこることは，初期温度，および，その後の養生温度と，セメントペーストの水和進行程度との関係に大きな影響を与えるものと考えている。これについて，さらに，セメントの主要構成化合物について同様な実験を進めた上で考察したい。

第 6 節 セメントペーストの液相組成に関する実験

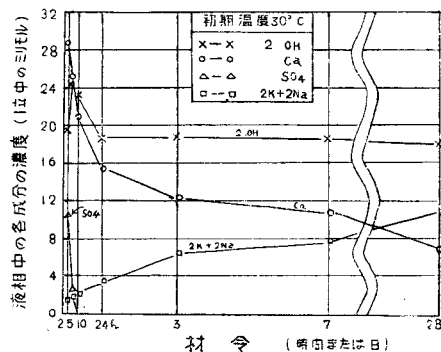
セメントペーストを造るとき温度，および，養生温度を異にした場合，セメントペースト内におけるセメントの各成分と水との化学反応（水和反応）に，いかなる相違があるかをしらべ，かつ，顕微鏡による水和観察，その他の水和に関する実験結果と対比するため，この実験を行った。

普通セメントを用い，セメントの重量にたいし 5 倍の蒸留水を加えて造つたペーストをガラスビンに入れ，回転振とうしながら，前と同じ温度条件のもとに，ペーストを造つてから 2 時間，ないし材令 28 日までの間の各材令において，ペーストの一部を取りだし，吸引濾過して固相と液相とを分離し，液相について，中に溶解している成分を分析した。

図—42 普通セメントを用いたペーストの材令と液相中の各成分の濃度との関係（初期温度 5°C）



図—43 同 左（初期温度 30°C）



図—42 および 図—43 は材令と、液相中の各成分の濃度（1リットル中のミリモル）との関係を示したものである。

図中、 $2K' + 2Na'$ はアルカリの総量を、 SO_4'' は硫酸の溶解量を、 Ca'' は SO_4'' 消滅後は $Ca(OH)_2$ の存在量を、その他の期間中は液相中の Ca 化合物の量を、また、 $2OH'$ は水酸化物の量を、それぞれ示したものである。次に図について考察すれば、

(i) 一般に、アルカリの量は水和の初期には少ないが材令とともに徐々に多くなっている。これは、水和の進行につれてアルカリを含む成分から溶出するためであろう。そして、常に初期温度が $5^\circ C$ のものがアルカリが少ないのは、各材令を通じて養生温度が低いので、初めに $30^\circ C$ で造つたものよりアルカリを含有する成分の水和の進行速度が遅いことを意味するものと思われる。

(ii) SO_4'' は水和の初期に最高値を示し、材令が進むに従って減少し、初期温度が $30^\circ C$ のものは 10 時間また、初期温度が $5^\circ C$ のものは約 1 日で消失する。これは $CaSO_4$ が早急にセメントバチルスを形成し固相に移行することから当然である。

(iii) $Ca(OH)_2$ の溶解度は一般に低温の方が大きく、また、アルカリの存在によりその溶解度が低下することが知られている。 Ca'' は $30^\circ C$ で造つたものは約 5 時間で、また、 $5^\circ C$ で造つたものは約 10 時間でそれぞれ最高値を示し、その後はいずれも減少の傾向を示している。すなわち過飽和によつて最高値に達したのち減少するのは、養生温度の上昇やアルカリの存在による溶解度の低下、あるいは固相への析出による低下などが考えられる。

次に、これらを総合して考察すれば図から明らかなように材令のいかんを問わず全般にわたつてアルカリを除き、 Ca'' 、 SO_4'' 、 OH' とも、概して、 $5^\circ C$ で造つた方が $30^\circ C$ で造つたものより多量である。これらの溶出量はセメントを構成する各成分の溶出と、これらが液相を通じて水和生成物へ移行する分との差を表わしているのであるから、たとえ、 $5^\circ C$ で造つた場合、溶出量が大きであつても水和反応が速やかに行われているとはいえない。むしろ、反応の初期においては、水和反応は $30^\circ C$ で造つた場合の方が速やかに行われていると解せられる。たとえば、いわゆるセメントバチルスの生成は SO_4'' が消失するまでの時間からみて $30^\circ C$ の方が速やかに認められ、また、当然この際 Ca'' および OH' の減少速度も速やかなるべきはずであるが、これは図から明らかである。

しかるに、反応の後期、すなわち、材令 7~28 日における Ca'' の減少は逆に $5^\circ C$ の方が $30^\circ C$ の場合よりも大きい。この現象は、いままでの諸実験の結果と対比し、この期間における水和反応が、 $5^\circ C$ の場合の方が、 $30^\circ C$ の場合より速やかに行われていると解すべきである。そして、材令 28 日における Ca'' の量は初期温度が $5^\circ C$ および $30^\circ C$ のいずれの場合も、ほとんど同値で、共存アルカリ、並びに、材令の増加にともなう温度上昇の影響を考慮に入れてもなおかつ両者とも、純水中における $Ca(OH)_2$ の溶解度以下である。これは初期温度が $5^\circ C$ のものの方が、水和生成物の析出速度と、セメント成分の溶解速度との差が一層大きいための現象と考えられ、その理由は後章で詳述するが、ともかく水和反応はこのような液相を通じて盛んに進行しているものと解せられる。

なお、水セメント重量比を 1 にした場合についても実験を行つたが、その結果は、上記実験結果と大体において同じ傾向を示したので省略する。

第 6 章 マスコンクリートの打込み温度とセメント主要構成化合物のペーストの性質との関係

第 1 節 概 説

第 5 章 の各種実験の結果から、マスコンクリートの打込み温度と、セメントペーストの性質との関係が明らかになつたので、本章では、さらに、セメントの主要構成化合物であるケイ酸三石灰、ケイ酸二石灰、およびアルミン酸三石灰などを合成し、これらの個々の単純化合物について、セメントにおけると同様な実験を行い、第 5 章に示したセメントペーストの実験結果を確かめるとともに、低温で造つたセメントペーストの強度増進の大きい理由を明らかにするための諸実験を行つた。

第 2 節 硬化したセメント主要構成化合物のペーストの圧縮強度および水和に関する実験

(1) ケイ酸三石灰を用いた場合 ケイ酸三石灰 ($3CaO \cdot SiO_2$) の合成は永井彰一郎氏¹⁹⁾が行つた方法によつた。すなわち、純粋に近い炭酸石灰、および、無水ケイ酸の混合物にたいし、弗化ソーダを 2.5% 添加し、エレマ電気炉中で約 $1500^\circ C$ で焼成を 5 時間行い、この操作を 5 回くりかえして合成した。しかし、合成物中の遊離

石灰が、まだ完全に消失するまでにはいたらなかった。ケイ酸三石灰の合成物の分析結果、および、その比重を表-9に示す。

表-9 3CaO·SiO₂ 合成物の化学成分

SiO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	F (%)	Free CaO (%)	Total (%)	C/S 分子比	比重
26.81	0.29	0.12	72.46	0.11	0.08	(0.23)	99.87	2.88	3.11

C=CaO, S=SiO₂

合成したケイ酸三石灰の粉末（ブレン法による粉末度は、3020 cm²/gを示す）にたいし、重量で35%の水を加え、乳鉢の中でよく練り混ぜてペーストを造り、これを内径1cm、内高2cmの真鍮製型枠に充てんし、密閉したまま、第5章第2節で述べた温度スケジュールに従って養生した。

材令が3日、7日および28日に達したとき、供試体を型枠から取り出し、セメントペーストの場合における同様な方法により、まず、空隙率と圧縮強度を試験し、強度試験後の碎片を用いて前章で述べたと同じように、結合水、および、水酸化石灰量を求め、さらに熱天秤による加熱重量減の実験、および示差熱分析などを行った。

これらの実験結果を図-44ないし図-54に示す。

なお、本実験における圧縮強度試験には、小型供試体の圧縮試験用に改造したミハエリス二重テコ型曲げ試験機を用いた。1×2cmの円柱供試体3個の平均値をもつて圧縮強度とした。強度値の偏差率は最高約14%、平均約8%であった。結合水量、および、水酸化石灰生成量の百分率は、950°Cで恒重となるまで強熱したペーストにたいするものである。

図-44で見ると、初期温度が30°Cのペーストは5°Cのものに比べ、圧縮強度は材令3日まではやや大きい、それ以後は強度増進が比較的少ないために、材令28日では5°Cで造つたものより、強度が約60%小さ

図-44 ケイ酸三石灰のペーストで造つた供試体の初期温度を5°Cおよび30°Cとした場合の材令と圧縮強度との関係

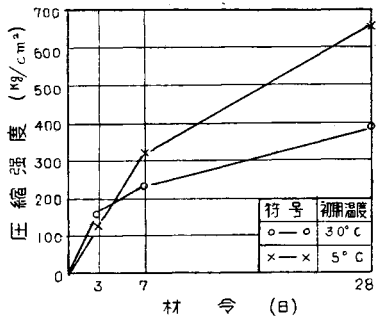


図-45 ケイ酸三石灰のペーストで造つた供試体の初期温度を5°Cおよび30°Cとした場合の材令と空隙率との関係

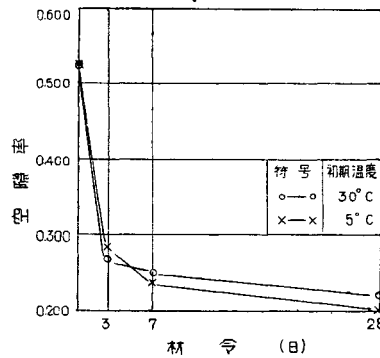


図-46 ケイ酸三石灰のペーストで造つた供試体の初期温度を5°Cおよび30°Cとした場合の材令と950°C以下の結合水量との関係

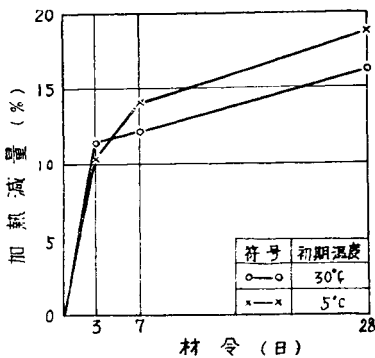


図-47 ケイ酸三石灰のペーストで造つた供試体の初期温度を5°Cおよび30°Cとした場合の材令と水酸化石灰量 (CaOとして表わす) との関係

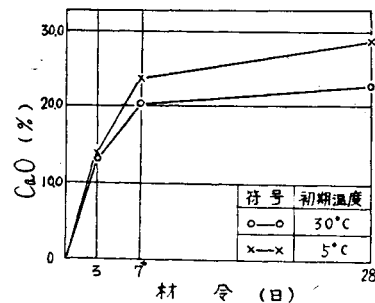


図-48 ケイ酸三石灰のペーストで造つた供試体の初期温度を 5°C および 30°C とした場合の圧縮強度と空隙率との関係

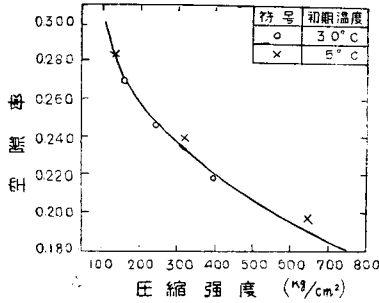


図-49 ケイ酸三石灰のペーストで造つた供試体の初期温度を 5°C および 30°C とした場合の圧縮強度と結合水量 (950°C 以下) との関係

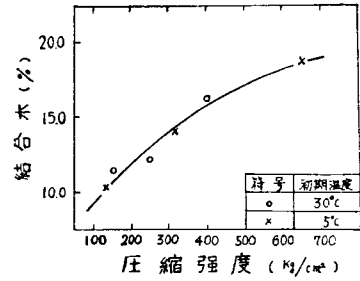


図-50 ケイ酸三石灰のペーストで造つた供試体の初期温度を 5°C および 30°C とした場合の圧縮強度と水酸化石灰との関係

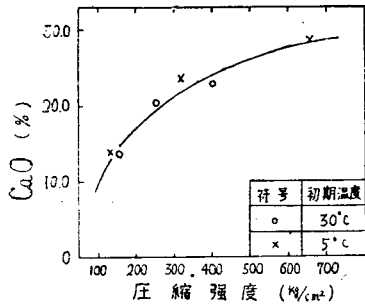


図-51 ケイ酸三石灰を用いたペーストの熱天秤による加熱重量減曲線 (初期温度 5°C)

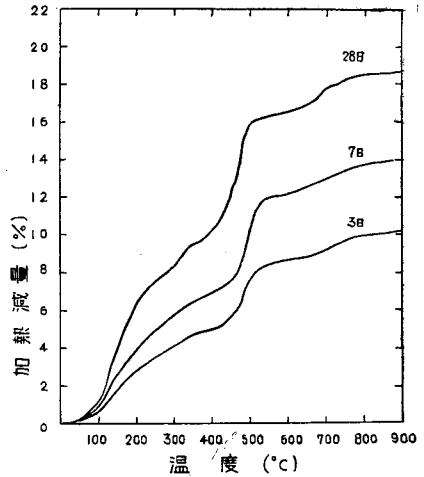


図-52 ケイ酸三石灰を用いたペーストの熱天秤による加熱重量減曲線 (初期温度 30°C)

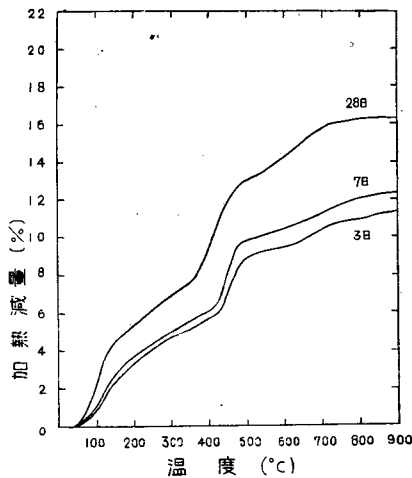
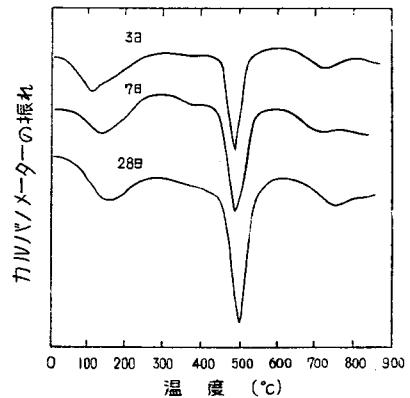


図-53 ケイ酸三石灰を用いたペーストの示差熱分析曲線 (初期温度 30°C)



いことがわかる。また、図-45 ないし 図-47 でみるように、材令と空隙率、その他水和進行程度を表わす諸量との間の関係は、材令と圧縮強度との関係においてみられたと同じような傾向を示しており、そして普通セメントの場合に傾向がよくにている。ただしペーストを造るときに温度や養生温度による影響は普通セメントの場合より一層早期材令で現われるのは注意を要する。そして、図-48 ないし 図-50 に示したペーストの圧縮強度と、水和程度を表わす諸量との関係は、セメントペーストの場合と同様である。すなわち、ケイ酸三石灰のペーストの場合も、圧縮強度と空隙率、その他の諸量との関係は、初期温度、および養生温度のいかんにかかわら

ず変指数曲線をもつて表わされるかなり明らかな関係が認められる。しかし、同じ空隙率にたいする圧縮強度はセメントの場合(図-35)よりもかなり小さい。次に、図-51ないし図-54により5°Cおよび、30°Cで造つたそれぞれのペーストの熱天秤による加熱重量減の曲線、および示差熱分析曲線を比較する。これらの図でわかるように、温度条件による水和進行の遅速は明らかに認められる。そして初期温度により水和程度が異なるため、水和物の生成量に相違をきたし、その結果、主として水和の程度が違うため吸熱曲線のピークの温度、振巾、および面積などに、多少の相違は認められるが、養生温度条件の相違にかかわらず、本質的にはこれらの吸熱曲線の形状は全く同じであり、しかもこれは複雑なセメントの水和の場合と異なり、単純化合物を水和させた場合であること、など

図-54 ケイ酸三石灰を用いたペーストの示差熱分析曲線(初期温度 30°C)

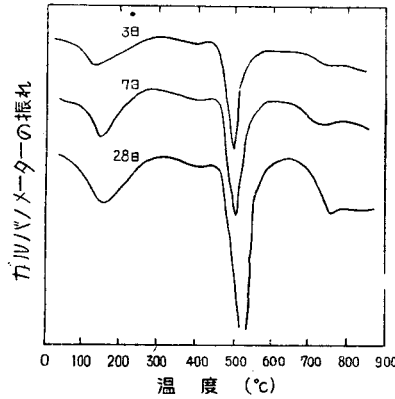
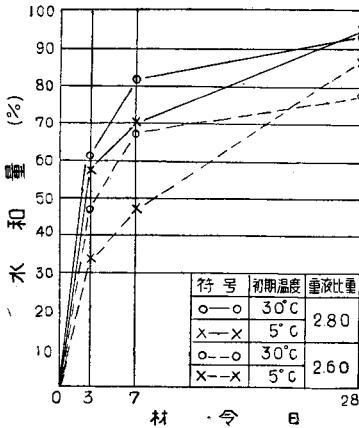


図-55 ケイ酸三石灰のペーストの初期温度を5°Cおよび30°Cとした場合の材令と重液分離法によるペースト中の水和量との関係



から考えて、結局、養生温度の差による水和生成物の差はきわめて少ないものと思われる。これについてはさらに第5節で論じたい。

次に第5章第3節で示したように硬化したペーストについて各材令における試料を乳鉢で砕いて微細な粉末にし、ガラスビンに入れ重液(四臭化エタンとベンゼンとの混合液で、比重2.80、および2.60の2種を調製した)を加え、遠心分離を行い、水和部分と、未水部分とを比重の差によつて分け、材令と、未水部分とを比重の差によつて分け、材令と水和量との関係を求めた。その結果を図-55に示す。

もちろん、硬化したペーストを砕いても、水和物と未水物とを完全に分離することははなはだ困難であるから、得られた結果は定量的とは言えないが、低温度で造つたペーストが材令とともに、高温度で造つたものより水和進行度が大きくなつてゆくのが明らかに認められ、これまでの他の多くの実験結果と傾向がよく一致していることがわかる。ただし、水和量は乾燥した試料にたいする百分率を示す。

(2) ケイ酸二石灰を用いた場合 ケイ酸二石灰(β -2CaO·SiO₂)は純粋に近い炭酸石灰と無水ケイ酸とを用い、これにたいし、酸化クロム(Cr₂O₃)を約1%加え、エレマ電気炉中で1350°~1400°Cに加熱し、焼成物がダステンゲを起さなくなるまで焼成をくりかえして合成した。

合成物の化学成分、および比重を表-10に示す。

表-10 合成した β -2CaO·SiO₂ の化学成分および比重

SiO ₂ (%)	CaO (%)	R ₂ O ₃ (Cr ₂ O ₃ を含む) (%)	Na ₂ O (%)	Free CaO (%)	Total (%)	CaO/SiO ₂ 分子比	比 重
34.60	64.40	0.98	1.10	0	100.08	1.99	3.29

合成した β -2CaO·SiO₂ を乳鉢で細かく砕き、この粉末(粉末度、ブレン法で3.260 cm²/g)にたいし、重量で35%の水を加えて練り混ぜペーストとなし、以下第2節のケイ酸三石灰の場合と同様な方法で成形および養生を行つた。実験の都合上材令15日および78日における圧縮強度、空隙率、結合水量、Tribromphenol法による遊離、および吸着された形の水酸化石灰などを求めた。

これらの実験結果を表-11に示す。

表-11をみると強度値の偏差率はかなり大きく、最大20.5%、平均12.5%を示した。従つて圧縮強度と水和進行程度との間の関係を詳細に論ずることは困難と考えられるが、ここに注意を要するのは、硬化したペーストにおける、同じ程度の空隙率にたいする圧縮強度は、ケイ酸三石灰の場合がセメントの場合よりもかなり小

表-11 ケイ酸二石灰のペーストの材令と圧縮強度、空隙率、結合水量および水酸化石灰量との関係

初期温度 (°C)	圧縮強度 (kg/cm ²)		空隙率		結合水 (%)		水酸化石灰 (CaOとして) (%)	
	15日	78日	15日	78日	15日	78日	15日	78日
5	207	309	0.42	0.38	7.8	11.8	14.7	21.4
30	360	419	0.39	0.37	10.9	12.0	15.3	19.7

註：結合水量、および水酸化石灰量 (CaO として) はいずれも 950°C に恒重になるまで強熱したペーストにたいする百分率を示す。

かつたのに反し、ケイ酸二石灰の場合は、ケイ酸三石灰にたいしてはもちろん、セメントの場合にたいしても、かなり大きいようである。すなわち、この場合の圧縮強度は、必ずしも空隙率ないし水和生成物の量だけに関係するものではないことがわかる。これらの各種ペーストのそれぞれの構造、および強度発現機構、等については、今後さらに十分に研究を進めた上で考察したいと考えている。

次に、表-11 からわかるように、ケイ酸二石灰の場合は、材令 78 日までの実験結果ではあるが、初めに低温度で造つたペーストの方が、早期材令では圧縮強度も水和の程度もともに小さい。しかし、材令が進めば、低温度で造つたペーストの方が、高温度で造つたものより空隙率は減少し、結合水、および Tribromphenol 法による水酸化石灰も増加し、かつ、圧縮強度も増大する傾向は明らかに認められる。ただし、ケイ酸二石灰の場合は、初期温度、および養生温度による影響が、普通セメントやケイ酸三石灰の場合ほど顕著でなく、かつ、これらの場合より、一層長期材令でその影響が現われるようである。この点、ケイ酸二石灰を比較的多く含む中隔熱セメントの場合にその傾向に近い。いずれにせよ初期低温度の方が結局において水和も進み強度の増進も大きいことは明らかである。

次に、熱天秤による加熱重量減の実験、および示差熱分析の結果を 図-56 ないし 図-59 に示す。

これらの図からも、低温度で造つたペーストの水和が材令の経過に従つていちじるしく進むことは明らかに認

図-56 ケイ酸二石灰を用いたペーストの熱天秤による加熱重量減曲線 (初期温度 5°C)

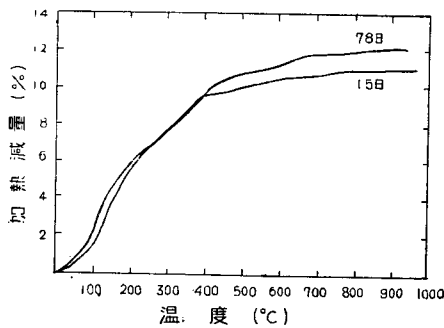


図-57 ケイ酸二石灰を用いたペーストの熱天秤による加熱重量減曲線 (初期温度 30°C)

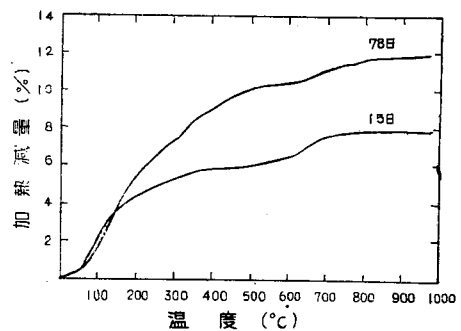


図-58 ケイ酸二石灰を用いたペーストの示差熱分析曲線 (初期温度 5°C)

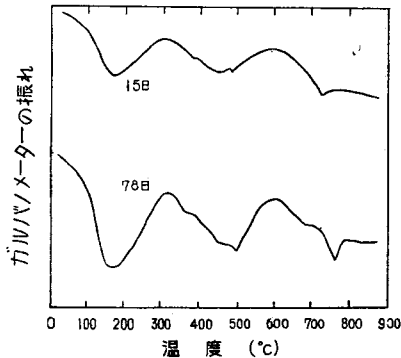
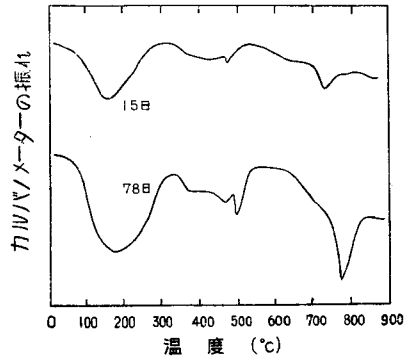


図-59 ケイ酸二石灰を用いたペーストの示差熱分析曲線 (初期温度 30°C)



められ、また養生温度の差による水和生成物の差もあまり認められないようである。そして示差熱分析曲線から明らかなように、一般に水酸化石灰の脱水とみなされる 450°~550°C の吸熱ピークが小さいのは、遊離した水酸化石灰の量がきわめて少ないことを示すものである。またこのことは熱天秤による加熱重量減の曲線からも明らかである。

(3) アルミン酸三石灰を用いた場合 アルミン酸三石灰 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) は純粋に近い炭酸石灰とアルミナを用いてエレマ電気炉中で約 1400°C で 3 時間づつ 6 回くりかえし焼成して造つた。

しかし、表—12 で見るように、まだ 1% 近くの遊離石灰が残つた。合成物を粉末にし、これに 50% の水を加えてペーストを造つたが、急結性を示したので、いわゆる練り殺しの状態のまま前と同様な方法で供試体を造り、結合水と Tribromphenol 法による遊離、および吸着された形の水酸化石灰などを定量した。これを表—13 に示す。

表—12 アルミン酸三石灰合成物化学成分

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	CaO/Al ₂ O ₃ 分子比	Free CaO (%)	Total (%)
0.05	37.69	0.01	62.04	2.95	(0.98)	99.79

表—13 同じく硬化したペーストの材令と結合水量および水酸化石灰量との関係

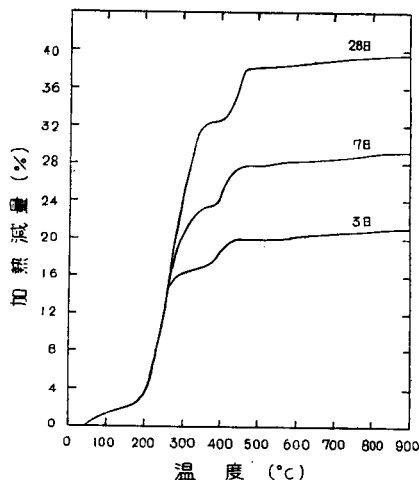
初期温度 (°C)	結合水量 (%)			水酸化石灰量 (%)		
	3 日	7 日	23 日	3 日	7 日	28 日
5	21.1	28.9	38.4	0.16	0.05	0.46
30	35.5	39.3	40.7	0.75	1.61	2.08

結合水量から見れば、前記ケイ酸石灰塩の場合と同様、最初は 30°C で造つたものが結合水量は多いが、これは材令が進んでも、あまり増加しない。一方、5°C で造つた方は材令とともに増大し、材令 28 日では両者の間に大差はなく、さらに、材令が進めば 5°C の方がかえつて多くなる傾向が認められる。

Tribromphenol 法による水酸化石灰量はいずれも少ないが、5°C で造つたものの方が特に少ない。ケイ酸石灰水和物と異なり、一般にアルミン酸石灰水和物は Tribromphenol 液にあまり溶解されないためであろう。

なお、図—60 ないし 図—63 に示した熱天秤による加熱重量減の変化、および示差熱分析の結果から見ても初期低温の方が水和がよく進行する傾向がみられる。そして温度条件の差により、いちじるしく相違した水和物が生成したことも考えられない。

図—60 アルミン酸三石灰を用いたペーストの熱天秤による加熱重量減曲線 (初期温度 5°C)



図—61 同左 (初期温度 30°C)

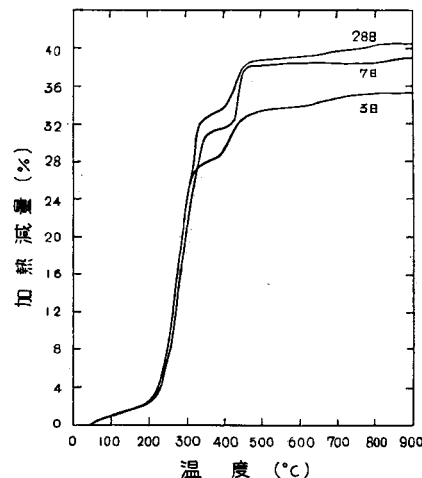


図-62 アルミン酸三石灰を用いたペーストの示差熱分析曲線(初期温度 5°C)

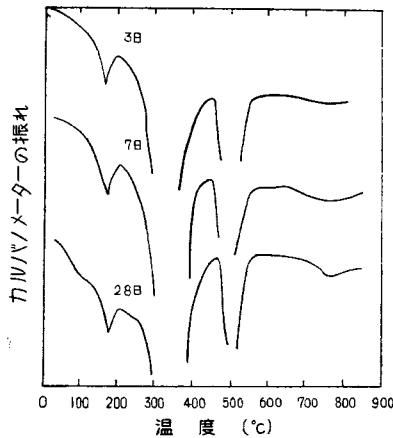
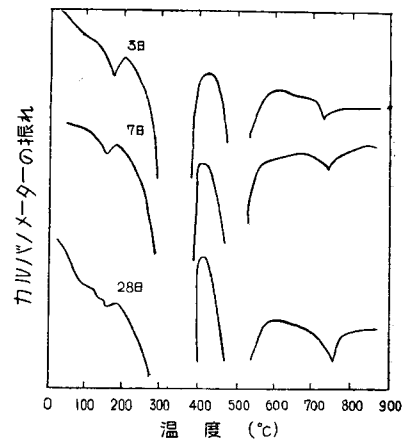


図-63 同左(初期温度 30°C)

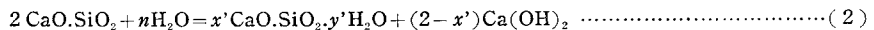
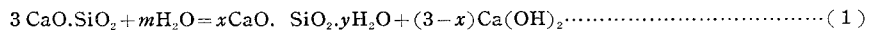


第3節 ケイ酸三石灰およびケイ酸二石灰などの水和生成物の組成計算

(1) 目的 セメントの主要構成化合物であるケイ酸三石灰, および, ケイ酸二石灰などのペーストを造るときの温度や養生温度の差違により, それらの化合物から, かなり異なつた水和物ができるとはならないかという点については, 前節の熱天秤による加熱重量減の測定, および示差熱分析などの熱的研究の結果から, 本実験の程度の養生温度差による水和生成物の差は, 少ないことが一応認められた。

本節では, さらにこれを確かめるため, 前節の諸実験で得られた数値をもととし, ケイ酸三石灰, およびケイ酸二石灰のペーストの初期温度を 5°C および 30°C とし, 以後おのおの 第5章第2節 で述べた温度スケジュールに従つて養生温度を変化させた場合の水和生成物の組成を計算し, これを比較検討した。

(2) 方法 ケイ酸石灰塩の水和反応式にたいしては, 従来いろいろの説があるが, 本計算の場合は簡単のため, 次の(1) および(2) 式に要約する。



もちろん, これは水和生成物の平均組成を示すものである。まず, 硬化したペースト中の水含量を求める。これは全石灰量, すなわち, 完全に水和したときを示す石灰量にたいする Tribromphenol 法により定量された石灰量の割合から近似的に算出した。次に水和の結果, 実際に遊離した $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の量は Bogue の示した方法²⁰⁾, すなわち, 次の(3) 式によつて求める。ただし, この式はセメントの場合だけでなく構成化合物の場合にも適用できるものと仮定した。

$$\text{CaO} = 3.11 \{ \text{Loss}_{556^\circ\text{C}} - 1.09 \text{Loss}_{356^\circ\text{C}} \} \dots \dots \dots (3)$$

これらの値を(1) および(2) 式に適用すれば $(3-x)$, および $(2-x')$, すなわち, x および x' の値がわかる。

一方, (1) 式および(2) 式から導かれる次の関係式(4) および(5) と, そして,

$$y = m - (3-x) \dots \dots \dots (4)$$

$$y' = n - (2-x') \dots \dots \dots (5)$$

結合水分の定量値 m および n から, 実際にケイ酸三石灰, および, ケイ酸二石灰に結合している水分 y および y' が得られ, $x \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot y \text{H}_2\text{O}$, および, $x' \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot y' \text{H}_2\text{O}$ の係数 x, y および x', y' がそれぞれ求められる。

(3) 結果および考察 Tribromphenol 法によつて定量した CaO から求めたケイ酸三石灰, およびケイ酸二石灰の各材令における水含量を示せば 表-14 および 表-15 のようである。

表-14 初期温度を 5°C および 30°C としたときのケイ酸三石灰の水含量

ケイ酸三石灰	初期温度 (°C)	CaO 定量値 (%)			水 和 量 (%)		
		3日	7日	28日	3日	7日	28日
}	5	13.6	23.6	23.7	32.0	55.5	67.5
	30	13.4	20.1	22.7	31.5	47.2	53.4

表—15 初期温度 5°C および 30°C としたときのケイ酸二石灰の水和量

ケイ酸二石灰	初期温度 (°C)	CaO 定置値 (%)		水和量 (%)	
		15日	78日	15日	78日
	5	14.7	21.4	46.7	68.0
	30	15.3	19.7	48.6	62.6

次に、水和物の組成計算結果を次の表—16 および 表—17 に示す。

表—16 3CaO·SiO₂ 水和物の組成計算

初期温度 (°C)	材令 (日)	水和にあずかつた 3CaO·SiO ₂		遊離した形の CaO		遊離した CaO の mol と水和 にあずかつた 3CaO·SiO ₂ の mol との比 (2.88-x)	x	結合水分		結合水分 mol と水和にあずか つた 3CaO·Si O ₂ の mol と の比 (=m)	y
		gr	mol×10 ⁻³	gr	mol×10 ⁻³			gr	mol×10 ⁻³		
5	3	0.320	1.44	0.075	1.34	0.93	1.95	0.079	4.39	3.05	2.12
	7	0.555	2.50	0.124	2.21	0.88	2.00	0.100	5.55	2.22	1.34
	28	0.675	3.05	0.168	3.00	0.98	1.90	0.133	7.39	2.42	1.44
30	3	0.315	1.42	0.093	1.66	1.17	1.71	0.084	4.67	3.29	2.12
	7	0.472	2.13	0.109	1.94	0.91	1.97	0.086	4.78	2.24	1.33
	28	0.534	2.41	0.143	2.55	1.06	1.82	0.116	6.44	2.67	1.61

表—17 2CaO·SiO₂ 水和物の組成計算

初期温度 (°C)	材令 (日)	水和にあずかつた 2CaO·SiO ₂		x'	結合水分		y'
		gr	mol×10 ⁻³		gr	mol×10 ⁻³	
5	15	0.467	2.72	1.99	0.078	4.33	1.59
	78	0.680	3.96	1.99	0.118	6.56	1.66
30	15	0.486	2.83	1.99	0.109	6.06	2.14
	78	0.262	3.65	1.99	0.120	6.67	1.83

以上の計算結果によれば、各材令におけるケイ酸三石灰およびケイ酸二石灰の水和生成物は次のようなものになる。

ただし、C=CaO, S=SiO₂, H=H₂O である。

初期温度	ケイ酸三石灰水和物の組成			初期温度	ケイ酸二石灰水和物の組成	
	3日	7日	28日		15日	78日
5°C	C _{2.0} S·H _{2.1}	C _{2.0} S·H _{1.3}	C _{1.9} S·H _{1.4}	5°C	C _{2.0} S·H _{1.6}	C _{2.0} S·H _{1.7}
30°C	C _{1.7} S·H _{2.1}	C _{2.0} S·H _{1.3}	C _{1.8} S·H _{1.6}	30°C	C _{2.0} S·H _{2.1}	C _{2.0} S·H _{1.8}

以上の計算結果から初期温度が 5°C、および 30°C のケイ酸三石灰、および、ケイ酸二石灰のペースト中のケイ酸石灰水和物における CaO と SiO₂ のモル比は 2 に近いこと、従つてケイ酸三石灰は水と反応して水酸化石灰を遊離するが、ケイ酸二石灰は本実験の水和条件の範囲では、大部分が水酸化石灰を遊離することとなしに直接水和すること、また結合水も初期温度や養生温度の差による相違はきわめて少ないこと、などがわかる。

従来、ケイ酸石灰の水和物の組成については、いろいろの説があり、その結合水も水和硬化時の温度、水分その他の条件により、種々変化すると言われている。もとより水和生成物の組成を厳密に決定することは困難であり、またこのような方法で組成計算を行つた報告もこれまでにほとんど見当たらない。しかし著者の方法は養生温度以外のすべての条件を等しくして行つた実験結果から得られた数値をもとにし、同一方法で計算したのであるから、その途中において多少の仮定を用いてあつても、得られた結果は初期温度や養生温度の差による各種水和生成物の組成の差を示すものであり、従つて、初めに 5°C で造つたペーストにできた水和物と、30°C で造つたペーストにできた水和物の組成は、結局 ほぼ同じものであると言える。また、このことはいままでの多くの実験結果とつき合わせて見ても、なんらの矛盾は認められない。

よつて、この結論が大体において正しいことは、著者の信ずるところである。

なお、これらの水和生成物の組成がさらに材令が進んだ場合、どのように変化するかについては今後の研究を要する問題である。

第 4 節 顕微鏡による水和の観察

(1) 光学顕微鏡による場合 セメントの場合と同様、5倍の水を用いて造つたプレパラートの同一視野について注水時から材令 14 日ないし 40 日における水和作用の進行状態を観察した。まず、ケイ酸三石灰の場合は 写

真一65 ないし写真一72 で見られるように、初めに 30°C で造つたものは、材令 24 時間以後において水和の進行はあまり目だたないが、初めに 5°C で造つたものは、粒子はかなり膨大し、ことに結晶の生長はいちじるしい。これは普通セメントの場合よりも一層顕著である(写真一66~68 の左下方の結晶がいちじるしく生長してゆくのが見られる)。

次に、ケイ酸二石灰の場合は水和が遅く、粒子の膨大が目立たないので、初期温度の高低による水和状態の相違の比較は困難である。なお、ケイ酸二石灰の水和の場合、水酸化石灰の結晶は、各材令を通じて見当らなかつた。これは第2節の実験、および第3節の水和物の組成計算の結果から見ても、水和硬化過程において遊離した水酸化石灰はほとんどないこと、とよく一致する。

アルミン酸三石灰の場合は、初期温度が 30°C のものは、すでに注水後 24 時間で一般によく知られている $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ の偏菱形二十四面体の結晶が析出し、材令が進んでもあまり変化しない。初期温度が 5°C の場合は最初は薄い六角板状の結晶が密に析出している。しかし、材令 3 日の写真では、初期高温の場合と同様な $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ の結晶に変化したことがわかる。結局、初期温度の高低にかかわらず最終生成物は大体において同じものではないかと思われる。

(2) 電子顕微鏡による場合 セメントの場合と同様、ケイ酸三石灰およびケイ酸二石灰の合成物の粉末にたいし、5 倍の水を加えて造つたペーストについて初期における水和現象をしらべた。

試料の製作、養生方法、および養生温度条件はセメントの場合と同様である。まず、ケイ酸三石灰についてみるに、写真一73 ないし写真一86 に示すように初期温度が 5°C と 30°C の場合の初期の水和現象はセメントの場合ほど、明らかな相違は認められないが、初期温度の高低にかかわらず、いずれも注水後 5 分ないし 30 分で粒子の表面に微細な水和物、すなわち、ゲルおよび針状物質(結晶性ゲル)が析出するのが見られ、時間の経過とともにこれらの水和物、特に針状物質が多量に析出し、このため、粒子の表面組織が密実となり、ついに凹凸のない球塊となるのはセメントの場合と同様である(写真は球塊の一部を示す)。

ただし、初期温度が 5°C のものは相当遅れてこのような状態になることが明らかに認められ、かつ、セメントの場合と同様、水和の初期に粒子の周囲ばかりでなく液相中にも水和物がかなり析出する。この粒子の周囲に析出する微細な針状ないし紡すい状の水和物(結晶性ゲル)は竹本博氏²⁹⁾の研究によれば水酸化石灰や炭酸石灰ではなく、ある種の結晶性のケイ酸石灰水和物であると言われている。

ケイ酸二石灰についても同様な実験を行った。初期温度による水和現象の相違は大体の傾向としてはケイ酸三石灰の場合に在るが、ケイ酸三石灰の場合よりも初期温度による相違が一層認めにくい。いずれにせよ、このように水和の初期において微細な析出物が粒子の周囲に被覆沈着して材令の経過に従つて密実な組織になることと、初期温度の相違により、このような状態になる時期に遅速のあることなど、以後の水和作用の進行に顕著な影響を及ぼすものとする。

第5節 マスコンクリートにおける打込み温度がセメントの水和進行程度に影響を及ぼす理由

著者は第5章 および第6章で、マスコンクリートにおける打込み温度が 5°C と 30°C の場合の養生温度差の程度ではセメントの水和生成物の組成の間に大して差は認められないこと、硬化したセメントペースト(ただし、水セメント重量比は一定)の強度増進は、かなり長期にわたり、主として水和の程度に支配されること、この場合、養生温度条件は、水和の進行程度に影響を与える一要素であること、などを実験によつて明らかにした。

次に、マスコンクリートにおける打込み温度がセメントペーストの水和進行程度に影響を及ぼす理由について考察する。セメントペーストの凝結硬化過程においては、前田、山根両氏²⁹⁾も述べているように、原則的にはセメント成分が水に溶けて一たん過飽和状態となり、その濃度が生成すべき水和物の準安定限界にとどけば水和物を析出し、この析出のためにさらにセメント成分の溶解が促進され、かくして溶解、析出、溶解が連続的に起こり、水和が進行するものと思われる。この場合、一般に温度が高ければセメント成分がよく溶解して水和反応は促進され、温度が低ければ水和の進行も遅いことは当然考えられるところである。またこれは、例えば、第5章第6節のセメントペーストの液相組成の実験においても、セメント成分と水との反応の初期には、初めに高温で造つたペーストの方が、水和反応が速やかに行われており、一方、初めに低温で造つたペーストの場合はこれと反対の現象を示している。

しかるに、材令が進めば、高温で造つたセメントペーストの水和の進行が鈍くなり、かえつて低温で造つたセメントペーストの方が、水和がよく進むのは何ゆえであるか、その理由についてはいろいろ想像されているが、著者は次のように考える。すなわち、第5章第5節 および第6章第4節の実験で示したように、セメン

トが水和するとき、セメント粒子の周囲に微細なゲル状水和物が析出する。この水和析出物によつて、ある種の半透膜を形成し、水はこの膜を通じて水和にあずかる。この膜は時日の経過とともに、次第に難透過性を増し、水和反応はだんだん弱つてくると考えられる。Eitel 教授等²³⁾もケイ酸石灰の水和にたいし未水和粒子の表面に半透膜の生成することを考え、Donnan の膜平衡が成立するものとして加水分解過程を説明している。すなわち膜の内外液相中のカルシウムイオンの濃度が、加水分解を支配していることを考えている。その当否は別として、この Eitel 氏等の半透膜生成に関する説は、かなり適切であると思われるが、著者は実験結果から、セメント粒子の周囲にできる膜は、第 6 章第 4 節で述べたように、ゲルのほかに微細な結晶、およびいわゆる結晶性のゲルなどを含んだ「ある種の半透膜」であると考えている。

さて、初期温度およびその後の養生温度が高いと、水和反応が早いので、セメント粒子の周囲（この部分は特に溶液の濃度が高い）にゲル状物質や結晶などの新固相が多量に析出し、これらの微細な水和物により粒子が被覆され一種の半透膜を形成することはすでに実証し得たところであり、この被膜が比較的早く生成することにより、以後の水和の進行が阻害されることもまた明らかに認められた。

一方、初期温度が低くければ、初期水和速度は小で膜の生成も遅く、かつ、膜も高温の場合ほど難透過性でないと考えられるので、水は比較的良好に通り、各種顕微鏡写真でも見られるとおり、水和生成物はセメント粒子の周囲ばかりでなく、液相中にも高温で造つたペーストの場合よりも一層多量に析出する。要するに、低温で造つたペーストでは、セメント粒子の膨潤、ゲル状物質や結晶などの新固相の析出によるセメントペースト内部構造の緻密化、および均質化のために、好都合な Condition をもたらすから、以後の水和の進行、結局はコンクリートの強度の増進に好影響を及ぼすものとする。

なお、初期温度やその後の養生温度とこの膜の組成に関しては、今後の研究にゆづりたい。

第 7 章 マッサコンクリートの打込み温度とコンクリートの圧縮強度、引張強度および動的弾性係数との関係

第 1 節 概 説

第 5 章 および第 6 章 の諸実験によつて、マッサコンクリートの打込み温度と、セメントペーストの性質との関係を求め、低温で造つたセメントペーストの強度増進の大きいことと、その理由を化学的および物理的に説明し、マッサコンクリートの打込み温度を低くすることの有利な根拠を明らかにした。

そこで本章では、実際にコンクリートについて、打込み温度と圧縮強度、ことに従来ほとんど研究されなかつた引張強度との関係を詳細に求めるため、普通セメントおよび中熱セメントを用いたコンクリートで造つた円柱供試体にたいし、第 4 章の実験で求めた各種コンクリートの断熱状態における時間温度曲線に追従させて養生温度を変化させ、材齢 7 日ないし 1 年における圧縮強度、および引張強度をそれぞれ試験した。また、同じ供試体について、打込み温度とコンクリートの動的弾性係数に関する実験もあわせて行つた。

第 2 節 供試体の製造および養生方法

(1) コンクリート コンクリートは次の (3) で述べる供試体の大きさの都合上、第 3 章の表—6 に示した配合 B のコンクリートを用いた。これは配合 D のコンクリートを 20 mm の板フルイで Wet screening したと同じ配合の AE コンクリートである。

まだ固まらないコンクリートの連行空気量は、特に温度によつて差違が大きいので、セメントの種類や打込み温度が異なるごとに、いちいち実験により AE 材の混入量を加減してコンクリートの空気量を調節した。

その結果、セメントの種類、および打込み温度が相違しても、練り上りコンクリートの空気量を $6.5 \pm 0.5\%$ の範囲内に保つことができた。

(2) 練り混ぜ 第 3 章で述べたと大体同じであるから省略する。

(3) 供試体 7.5×15.0 cm の円柱供試体を用いた。供試体を電熱式恒温空気槽、あるいは電熱式恒温水槽の中に入れて所定の温度スケジュールに従い、時間とともに供試体自身の温度を変化させてゆく場合、コンクリートは熱伝導率、あるいは温度拡散率が小さいから、供試体自身の温度変化を容易ならしめるためには、供試体はなるべく小型の方が都合がよい。しかし、供試体の長さが 15 cm 以下になると、動的弾性係数を求める場合、共振周波数が高過ぎて測定が困難であり、かつ精度も悪くなるので、著者は 7.5×15.0 cm の円柱供試体を選んだ。

供試体の製造は標準方法によつた。供試体を型枠からはずしたのちに、厚さ約 0.3 mm のほぼ同形同大のブリ

考慮によつたものである。

なお、同じバッチから造つた供試体を同じ温度条件のもとに、密閉缶に入れて養生したものと、水中で養生したものとにたいし、材令7日から1年までの圧縮強度および引張強度を試験したが、強度の差違はあまり認められなかつたので、今後、密閉したブリキ缶に入れて養生した供試体と、水中養生を行つた供試体との養生様式の差によつて生ずるコンクリートの強度の差は、一応これを考えないことにした。

(4) 養生 供試体の養生方法は、第5章で述べたセメントペーストの場合と同様である。ただし、セメントペーストの際は、打込み温度が5°Cおよび30°Cの場合についてこれを行つたが、コンクリートの実験では、このほかに、その中間の10°Cおよび20°Cの場合もこれに追加した。すなわち、コンクリートの養生温度を第4章第3節の図-3および図-4に示した打込み温度が5°C, 10°C, 20°C, および30°Cの場合の各種コンクリートの断熱状態における、時間-温度曲線にそれぞれ追従するように変化させた。この目的のため、第5章第2節で述べたように、0°Cから室温まで、あるいは室温から100°Cまでを自由に調節できる電熱式恒温空気槽、合計10台と室温から50°Cまでの温度を自由に調節できる電熱式恒温水槽を同時に使用した。

また、本実験においても第4章第2節で述べたように、コンクリートの諸材料はすべて前日から、低温恒温槽あるいは電熱式高温槽の中に入れて、あらかじめ所定の打込み温度よりやや低く、あるいは、やや高い温度に保つておき、練り上りコンクリートの温度が所定の打込み温度にできるだけ一致するようにつとめた。

なお、本実験においては、同種の供試体について標準養生(20°C, 水中, 以下同じ)による試験も行つた。この標準養生にたいし、前記の養生をかりに断熱養生とよぶことにする。

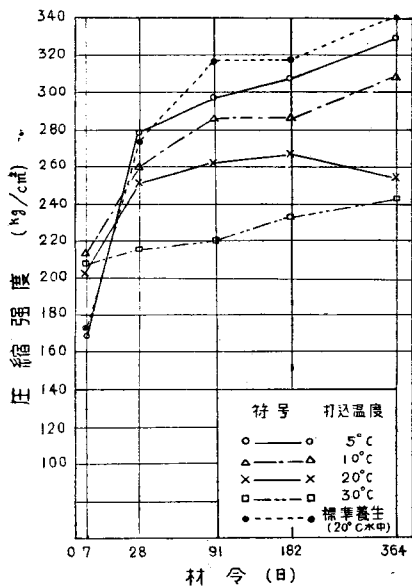
第3節 強度試験方法

供試体は材令7日, 28日, 91日, 6月および1年になつたとき、これを各種恒温槽から取り出し、強度試験室に運び、徐々に冷却し、ほぼ室温になるのを待つて密閉缶から取り出し、まず、その寸法と重量をはかつた。次に動的弾性係数を決定するため、電気振動法により共振周波数を求めた。そして、供試体の半数(3個または4個)について圧縮強度を、残りの半数について引張強度を試験した。これらの試験には60tあるいは20tの油圧式圧縮強度試験機を用いた。供試体を密閉缶から取り出して試験を終るまでの所要時間は5分内外である。

備考 強度について、供試体を恒温槽から取り出した直後と、室温まで冷却した場合との比較試験を行つた。しかし、これらの温度差によるコンクリートの強度の差はほとんど認められなかつた。また、供試体の脱模後と、密閉缶から取り出した直後の重量変化もきわめて少なかつた。

引張強度の試験方法は、JIS A 1107(1951)によつた。この方法により、引張強度が簡単に試験できるようになつてはなはだ便利である。なお、この方法については関分正胤氏がその論文²⁾にくわしく説明し、実用的に相当

図-64 普通セメントを用いた打込み温度を5°, 10°, 20° および 30°C としたコンクリート円柱供試体の材令と圧縮強度との関係



信頼度が高いことを示している。

供試体の弾性係数を動的に決定する Sonic Method は第3章で述べたからここでは省略する。

供試体は圧縮強度も引張強度も、3個ないし4個の平均値を試験値とした。断熱養生を行つた円柱供試体の場合でも、強度試験値の偏差率は、圧縮強度において最大6.7%, 平均2.3%, また、引張強度において、最大10.7%, 平均3.9%であり、かなりよい成績を示した。

第3節 強度試験の結果およびその考察

(1) 普通セメントを用いた場合 試験の結果から、普通セメントを用いたコンクリートの場合も、打込み温度がコンクリートの強度に及ぼす影響は、第5章第2節の普通セメントを用いたペーストの場合と同様はなはだ顕著であり、すなわち、一般に打込み温度が低いものほど、圧縮強度も引張強度も、材令による増進が大きく、打込み温度の高いものは、強度の増進が少ないこと、などを示した。

この事実は、コンクリートの強度を支配するおもなものが、セメントペーストであることから考えて当然である。

図-64は打込み温度を5°, 10°, 20° および30°Cにした場合の各種コンクリート供試体、および標準養生を行つた場合の

コンクリート供試体などの材令と、圧縮強度との関係を示す。図の縦軸（等分目盛）は圧縮強度、横軸（平方根目盛）は材令を表わす。

図でわかるように、打込み温度が 5°C のような低い温度の場合は、材令約 7 日までは強度は小さいが、その増進が大きいため、材令 28 日では、打込み温度が高いものよりかえつて強くなり、材令がさらに進んでもこの傾向は変わらない。

そして、打込み温度が 20°C あるいは 30°C のような高いものは、材令による増進が少ないため、およそ 7 日以後になれば、打込み温度が低いものにくらべて強度が小さいこと、などがわかる。

打込み温度が、5°C および 10°C のコンクリートの材令 1 年における圧縮強度は、打込み温度が 30°C のコンクリートの同材令における圧縮強度にたいし、それぞれ約 40% および約 30% 大きい。

標準養生を行つたものは、材令約 23 日以後において、他のいずれよりも強度が大きい。その理由としては、次のことが考えられる。すなわち、打込み温度が、たとえば 5°C のものでも 供試体の温度は、材令 7 日ですでに 30°C、材令 14 日になると 42°C に達し、かなり高温になる。これにたいし、標準養生を行つたものは、養生温度は常に 20°C であるから初期温度は比較的高いが、その後の養生温度は、他のいずれにくらべてもいちじるしく低い。セメントペーストの水和進行程度、すなわち、強度増進に影響を及ぼすものは、初期温度ばかりでなく、その後の養生温度の高低によることもかなり大きいのは 第 5 章 で述べたとおりである。従つて、他のいずれよりも標準温度で養生したものの方が強い理由は、主として温度条件に関するものであろう。換言すれば、標準養生温度 20°C は硬化の早い最近の普通セメントの強度を十分發揮させるのに、比較的好都合な温度であると考えられる。

著者が同種の普通セメントについて、本研究とは別に、材令 1 年まで行つた試験結果も²⁵⁾、5°C で打込んで 4 時間この温度に保ち、以後、20°C で養生（水中、以下同じ）したコンクリートが最も強く、標準養生（20°C、水中）したものが、これにつき、5°C で打込んで 4 時間この温度に保ち、材令 3 月まで 25°C、以後 20°C で養生したものは、標準養生を行つた場合と大差なく、そして、5°C で打込んで、材令 3 月までのこの温度に保ち、7 日まで 10°C、28 日まで 15°C のように段階的に温度を上げてゆき、材令 28 日以後は 20°C で養生したものは比較的弱く、材令 1 年になつてもまだ標準養生したものにおよばないこと、最初に 30°C で打込んだものは、長期強度がはなはだ弱いこと、などを示した。

図-65 は、打込み温度を 5°, 10°, 20° および 30°C にしたコンクリートの供試体、および、標準養生を行つた供試体、などの材令と、引張強度との関係を示したものである。図の縦軸

図-65 普通セメントを用い打込み温度を 5°, 10°, 20° および 30°C としたコンクリートの円柱供試体の材令と引張強度との関係

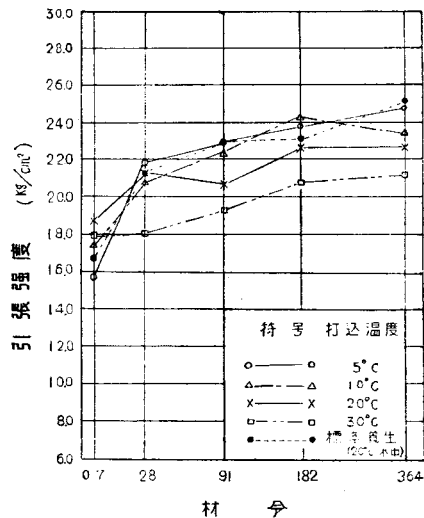
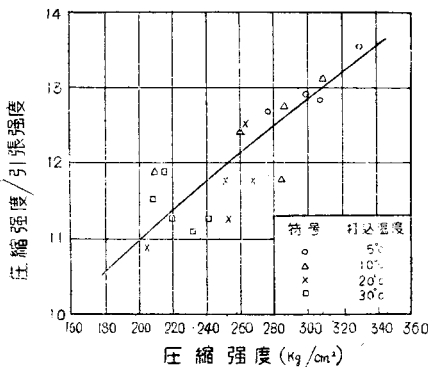


図-66 普通セメントを用い打込み温度が 5°, 10°, 20° および 30°C のコンクリート円柱供試体の圧縮強度と引張強度との関係



は引張強度を、横軸(平方根目盛)は材令を表わす。

図からわかることは、前の 図-64 で述べたとほとんど同じである。打込み温度を、5°C および 10°C にしたコンクリートの引張強度は、打込み温度を 30°C にしたコンクリートの引張強度にたいし、材令 1 年において、それぞれ約 15%、および約 10% 大であり、また、標準養生を行つたものは、圧縮強度におけると同様に、引張強度においても強く、材令 1 年までの試験結果では、断熱養生したものの中で最も強かつた打込み温度が 5°C のものと、ほぼ同程度の強度を示した。引張強度の増進は、材令が早期の場合比較的急速であり、材令が長期になると、緩慢であるため、引張強度は材令が進んでも、圧縮強度ほど増大しない。しかし、圧縮強度の大きいコンクリートは、引張強度も、やはり大き

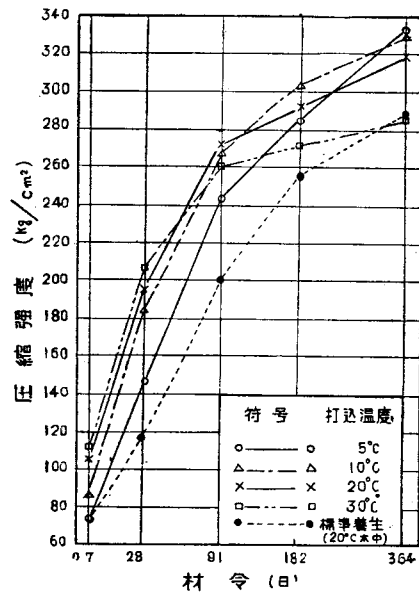
い。

図-66 は各温度で打込んだコンクリートで造つた円柱供試体の材令7日ないし1年における圧縮強度と、引張強度と圧縮強度の比との関係を示す。図の縦軸は、 $\frac{\text{圧縮強度}}{\text{引張強度}}$ 、横軸は圧縮強度を表わす。

図からわかるように、引張強度と圧縮強度との比は、圧縮強度が 170 kg/cm^2 ないし 330 kg/cm^2 の範囲では、約 $1/10$ ないし $1/13$ となつて圧縮強度が大きくなるに従つて次第に減少しており、従来言われてきた関係と大体において一致している。またこの関係は、養生温度によつてあまり影響されないようである。

なお著者が、普通、早強、および高炉セメントを用いたモルタルについて行つた実験結果²⁷⁾も、圧縮強度と引張強度との間には、養生温度にかかわらず、ある一定の関係が存在することを示した。

図-67 中庸熱セメントを用いた打込み温度を $5^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ および 30°C としたコンクリートの円柱供試体の材令と圧縮強度との関係



(2) 中庸熱セメントを用いた場合 中庸熱セメントを用いたコンクリートで造つた供試体について行つた試験結果も、前項の普通セメントの場合と同様、打込み温度がコンクリートの強度に及ぼす影響は顕著であり、また第5章第2節で示した中庸熱セメントを用いたペーストについて行つた実験結果と、傾向がきわめてよく一致している。すなわち、打込み温度が低いほど、圧縮強度も引張強度もその増進が大きく、打込み温度が高いものは増進が少ないこと、しかし、中庸熱セメントは硬化が比較的遅いため、打込み温度による影響がいくぶん遅く現われること、一般に、中庸熱セメントを用いたコンクリートの最高上昇温度は比較的低いため、水和硬化作用が十分に進み、すなわち、材令による強度の増進が普通セメントの場合よりも、一層大きいこと、などを示す。

図-67 は打込み温度を $5^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ および 30°C とした場合の各種コンクリート供試体、および標準養生を行つた場合のコンクリート供試体などの材令と、圧縮強度との関係を示したものである。図の縦軸(等分目盛)は圧縮強度、横軸(平方根目盛)は材令を表わす。

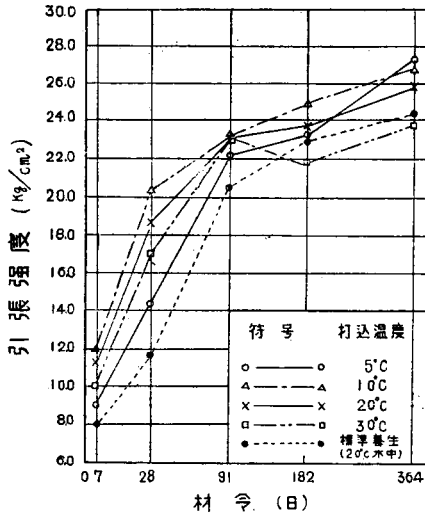
図で見ると、材令約28日までの圧縮強度は、打込み温度が高いものほど大である。しかし、材令が進み、91日、6月、および1年になると、打込み温度が低いものは、セメントの水和作用がよく進み、強度増進が大きいため、打込み温度が高いものより、かえつて強くなり、さらに材令が長期にわたれば、ますます強くなる傾向がみられる。一方、打込み温度が高いものは、材令が進むとセメントの水和作用が次第に鈍くなり、強度の増進率が減退すること、に、打込み温度が 30°C のような高温は、材令91日以後の長期材令における強度増進にたいし、はなはだ有害であることを示す。この事実は、普通セメントの場合と全く同様で、ただ中庸セメントの場合は、打込み温度による影響が、普通セメントの場合よりいくぶん遅く現われるだけである。

中庸熱セメントを用い、打込み温度が 5°C のコンクリートの供試体の圧縮強度は、打込み温度が 30°C のものにたいし、材令1年において約17%大きく、また、これを同材令の普通セメントを用いたコンクリートにくらべると、打込み温度が 5°C のものとはほとんど大差なく、打込み温度が 30°C のものにたいして約40%大きい結果を示した。

中庸熱セメントを用い標準養生を行つたコンクリート供試体は、各材令を通じ比較的弱い。これは、普通セメントを用いた場合と正反対である。

標準養生温度 20°C は、普通セメントの場合は、強度を十分発揮させるに都合のよい温度であつたが、中庸熱セメントの場合は、必ずしも適当な温度ではなく、むしろ不利な温度であることを示している。中庸熱セメントは普通セメントにくらべ、ケイ酸三石灰もアルミン酸石灰も少ないため早期材令における発熱も少なく、硬化も遅いことから考へて、この実験に用いた中庸熱セメントの場合は、初期温度は別として、その後の養生温度としては 20°C よりいくぶん高い温度の方が、水和作用の進行ないし強度発現に好都合のように思われる。すなわち、養生様式の相違による影響は、セメントの種類によつて大いに変化することがわかる。従つて、マッサコンクリ

図-68 中庸熱セメントを用い打込み温度を 5°, 10°, 20°, および 30°C としたコンクリートの円柱供試体の材令と引張強度との関係



ートに用いる各種セメントの強度試験を行うに当たり、一律に同じ養生温度を用いることは、セメント品質の良否の判定にたいして合理的でない。ことに、マッサコンクリート内の高温、および施工時の温度、あるいは打込み温度、などについて考えると、中庸熱セメントを用いたペースト、モルタル、および、コンクリートなどで造つた供試体を、標準温度で養生し、しかも、材令 28 日までの強度値をもつて、セメント品質の良否を論議し、あるいは実際のマッサコンクリートの強度を推定しても、はなはだ意義が少ないと考える。

よつて、ダム用セメントとしての中庸熱セメントの JIS による強度試験は、養生温度、および試験材令に関するかぎり適当でない。

図-68 は中庸熱セメントを用い、打込み温度を 5°, 10°, 20°, および 30°C にしたコンクリートの供試体、および標準養生を行つた供試体などの材令と、引張強度との関係をしめたものである。図の縦軸（等分目盛）は引張強度、横軸（平方根目盛）は材令を表す。

図からわかることは、前の図-67 で述べたとほとんど同じである。打込み温度を 5°C にしたコンクリートの材令 1 年における引張強度は、打込み温度が 30°C のコンクリートの同材令における引張強度にたいして約 15% 大きい。また、これを普通セメントを用いたコンクリートの同材令における引張強度にくらべると、打込み温度が 5°C のもの

にたいしても約 15%、そして、30°C で打つたコンクリートにたいしては、約 30% 大きい結果を示し、このセメントは引張強度がとくに大きいことが認められる。

また、標準養生を行つたものは、圧縮強度の場合と同じように、各材令を通じ、断熱養生を行つたコンクリートよりも、概して弱い。

なお、注意を要することは、この中庸熱セメントは、引張強度と圧縮強度との比が、比較的大きいことである。

図-69 は中庸熱セメントを用い 5°, 10°, 20°, および 30°C で打込んだコンクリートで造つた円柱供試体の材令 7 日ないし 1 年における圧縮強度と $\frac{\text{圧縮強度}}{\text{引張強度}}$ の比、との関係を示す。

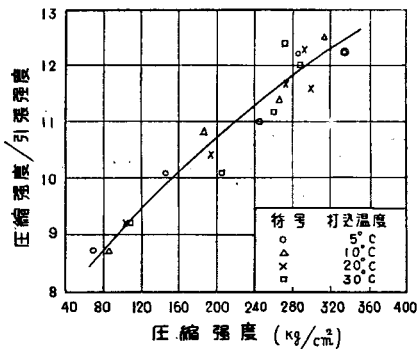
図からわかるように、圧縮強度が、およそ 100 kg/cm² ないし 330 kg/cm² の範囲では引張強度と圧縮強度との比は、大体において、1/9 ないし 1/12 となつている。

またこの関係は、普通セメントの場合と同様、養生温度によつてあまり影響されないようである。

圧縮強度が大きくなつても、この比は、普通セメントの場合ほど小さくならないのは、この中庸熱セメントの持つよい特性である。長期材令においても強度増進が大きく、しかも、引張強度が大きいセメントは、ダム用セメントとして、きわめて適当である。また、中庸熱セメントを用いることは、一般によく知られているとおり、同じ温度でコンクリートを打込んで、普通セメントを用いた場合よりも、最高上昇温度が低く、かつ、硬化過程の初期における水和熱の発生が緩慢であるので、初期の人工冷却、および、熱放散がコンクリートの温度上昇の抑制に、きわめて有効にはたらし、その上、長期材令における引張強度が比較的大きいことは、本実験の結果からも明らかである。そして、このような硬化作用の緩慢なセメントを用いることは、コンクリートのクリープを利用する上においても有効であること、すなわち、コンクリートの伸び能力を増大させるために、有利であること、などが考えられる。よつて、これらの点からみてもダムのようなマッサコンクリートには特別の場合を除き、普通セメントよりも中庸熱セメントを用いる方が適当であることがわかる。

第 5 節 動的弾性係数に関する実験結果とその考察

図-69 中庸熱セメントを用い打込み温度を 5°, 10°, 20°, および 30°C としたコンクリートの供試体の圧縮強度と $\frac{\text{圧縮強度}}{\text{引張強度}}$ との関係



実験の結果は、普通セメントを用いた場合も、中庸熱セメントを用いた場合も、コンクリートの動的弾性係数は、早期材令では打込み温度が高いほど大きい、材令が進むと打込み温度の低いものの方が大きくなることを示した。これは、コンクリートの圧縮強度および引張強度の場合と同じ傾向である。

図-70は普通セメントを用い、打込み温度を5°、10°、20°、および30°Cにしたコンクリートで造つた7.5×15.0 cmの円柱供試体の材令と、動的弾性係数との関係を示す。

図の縦軸(等分目盛)は動的弾性係数、横軸(平方根目盛)は材令を表わしたものである。

図-70からわかるように、普通セメントを用いたコンクリート供試体の材令と、動的弾性係数との関係は、材令と強度との関係の場合と同傾向が大體同じであるが、動的弾性係数は材令による増進の割合が小さく、多くの場合、材令が91日以後の長期になれば、かえつて減退を示す。そして、30°Cで打込んだものは、材令7日以後はあまり増大しない。打込み温度が5°Cのものは30°Cのものにたいし、材令1年における動的弾性係数は約10%大である。また、標準養生を行つたコンクリートの動的弾性係数は、圧縮強度および引張強度の場合と同様、材

図-70 普通セメントを用い打込み温度を5°、10°、20°、および30°Cとしたコンクリートの円柱供試体の材令と動的弾性係数との関係

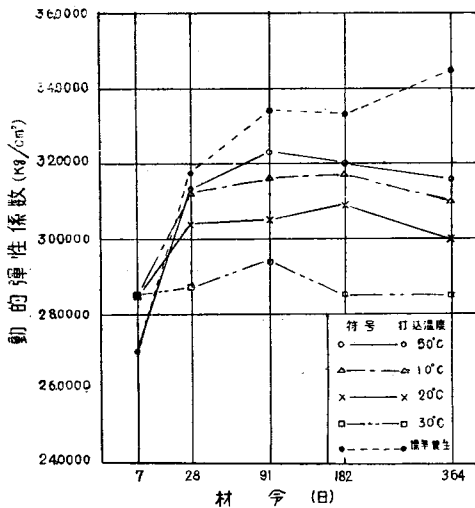


図-71 中庸熱セメントを用い打込み温度を5°、10°、20°、および30°Cとしたコンクリートの円柱供試体の材令と動的弾性係数との関係

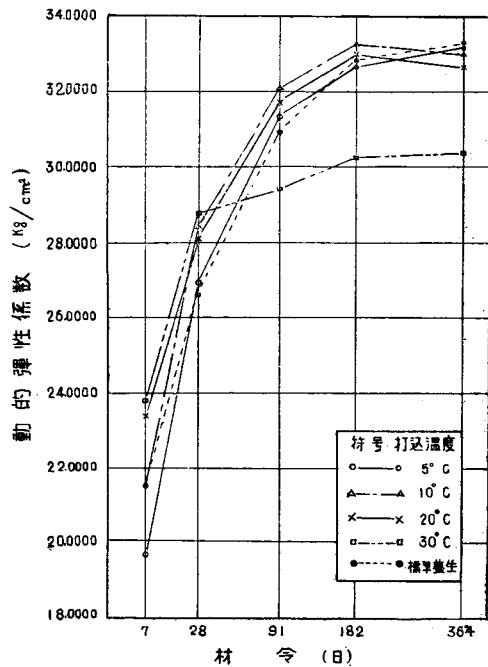
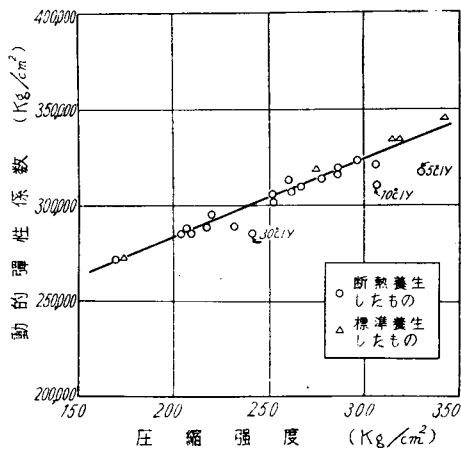


図-72 普通セメントを用い断熱養生および標準養生を行つたコンクリート供試体の圧縮強度と動的弾性係数との関係



令28日以後はいちじるしく大である。

図-71は中庸熱セメントを用い打込み温度を5°、10°、20°、および30°Cにしたコンクリートで造つた7.5×15.0 cmの円柱供試体の材令と、動的弾性係数との関係を示す。図の縦軸(等分目盛)は動的弾性係数、横軸(平方根目盛)は材令を表わす。

図からわかることは、前項の図-67および図-68の中庸熱セメントを用いたコンクリート供試体の材令と、圧縮強度および引張強度との関係について述べたことと同傾向である。ただし、一般に材令28日以後の動的弾性係数は、打込み温度による差は比較的小さい。

なお、ここに注意を要するのは、標準養生を行つた場合の供試体の場合の材令と、動的弾性係数との関係である。すなわち、標準養生を行つたものは、材令による動的弾性係数の増大が顕著で、材令1年になると断熱

養生を行つたものより大きな数値を示した。このことは、中庸熱セメントを用いたコンクリートでは、前節で示したように、標準養生を行つたものの強度が、断熱養生を行つたものの強度にくらべて小さかつたことと、傾向が反対である。

次に、本章の諸実験の結果から、コンクリートの円柱供試体の圧縮強度、および、引張強度と、動的弾性係数との関係についてみるに、強度と動的弾性係数との間には、ある一定の関係があり、強度の増大とともに、弾性係数も増大することがわかる。また、圧縮強度、および、引張強度と動的弾性係数との間には、打込み温度の高低にかかわらず、およそ材令7日から材令91日ないし6月まではかなり明りような関係が存在することを示した。

図-72 および 図-73 は普通セメントを用いたコンクリートで造つた円柱供試体の圧縮強度および引張強度と動的弾性係数との関係をそれぞれ示したものである。

図-72 および 図-73 でみると、普通セメントを用いた各種コンクリートの圧縮強度および引張強度と動的弾性係数との間に、圧縮強度の場合の材令1年の数値と、引張強度の場合の材令6月 および1年の数値などを除外すれば、いずれもほぼ直線（これは定指数曲線の一部と考える）をもつて表わされる関係が認められる。

図-74 および 図-75 は中庸熱セメントを用いたコンクリート供試体の圧縮強度および引張強度と動的弾性係数との関係をそれぞれ示す。

図-73 普通セメントを用い断熱養生および標準養生を行つたコンクリートの引張強度と動的弾性係数との関係

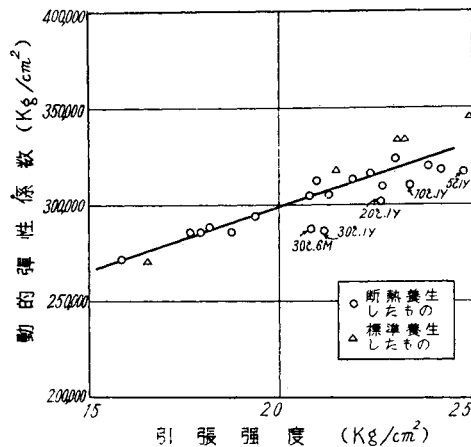


図-75 中庸熱セメントを用い断熱養生および標準養生を行つたコンクリート供試体の引張強度と動的弾性係数との関係

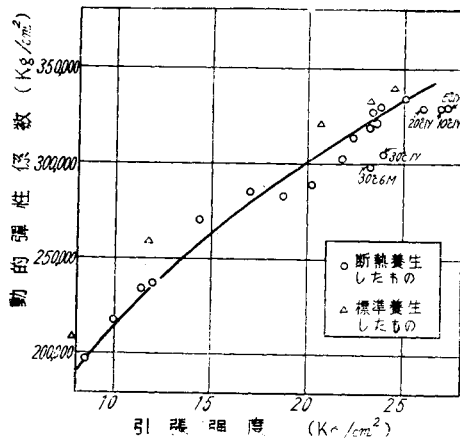
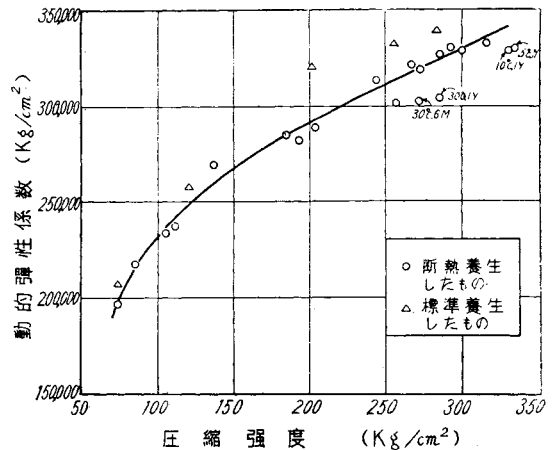


図-74 中庸熱セメントを用い断熱養生および標準養生を行つたコンクリート供試体の圧縮強度と動的弾性係数との関係



これらの図から明らかなように、各種コンクリートの圧縮強度、および引張強度と、動的弾性係数との間には、一般に材令1年の場合における数値と、打込み温度が30°Cの場合の材令6月における一部の数値をそれぞれ除外すれば、ほぼ定指数曲線をもつて表わされる関係が見られる。

図-72 ないし 図-75 においてみるように、普通セメントの場合も、中庸熱セメントの場合も、コンクリートの圧縮強度、あるいは引張強度と、動的弾性係数との関係を示す曲線上の諸点のうち、断熱養生したもので材令6月以上のものは曲線の下方に、また、標準養生したもののうち、主として材令91日以上のは曲線の上方に、それぞれ、曲線からいちじるしく離れている。これらの事実から、コンクリートの強度と動的弾性係数との関係を示す曲線は、養生様式によつて異なり、すなわち、これらの曲線は断熱養生と標準養生の場合とでその傾向が異なり、標準養生を行つたもの

と異なる、すなわち、これらの曲線は断熱養生と標準養生の場合とでその傾向が異なり、標準養生を行つたもの

は断熱養生を行つたものにくらべ、同じ強度にたいして弾性係数の割合がいちじるしく小さくなることなどがわかる。標準養生を行い、しかも骨材の種類および配合が一定なコンクリート供試体では、強度と動的弾性係数との間にかなりよい相関性がみられることは、すでに著者も報告した³¹⁾。これは図—72、ないし図—75からもうかがわれる。また、断熱養生を行つたコンクリートの強度と、動的弾性係数との間にも、材令 91 日ないし 6 月くらいまでは、かなりよい並行性が認められるので、この程度の材令までならば、標準養生の場合と同様に、供試体の動的弾性係数を測つて、その強度を推定することも可能ではないと考える。

なお、標準養生したコンクリート供試体が、断熱養生を行つたものにくらべ、同じ強度にたいし動的弾性係数が比較的大きいこと、および、断熱養生を行つた場合、材令が長期になると、動的弾性係数がかえつて小さくなること、などの理由については、今後の研究によりこれを明らかにしたいと考えている。

第 8 章 打込み温度とコンクリートの温度変化による引張応力 および温度ひびわれ発生との関係

マッサコンクリートにおけるひびわれのうち、コンクリートが岩盤その他に拘束されたためにおこるひびわれもきわめて重大なものである。そこで本章では、打込み温度と、基礎に拘束されたための温度変化による引張応力、および、温度ひびわれ発生との間の関係について検討するため、これまでの諸実験によつて得られた数値、およびある仮定をもととし、次のような計算を行つた。

最近の米国のダムに関する文献「The Fontana Project²⁹⁾」をみると、基礎拘束について、理論および実験結果から次のように述べている。「基礎打 L のダムの断面が一様な温度変化を受けると、その拘束はブロックの中心線に沿い、ダムの基礎面で 100%、基礎上約 0.15 L の箇所て約 50%、そして基礎上約 0.50 L のところでほとんど 0」また、基礎拘束による引張応力度は、次の式で表わされる。

$$f = CE_c R(t_p + t_r - t_f) \dots\dots\dots (1)$$

ここに f : 引張応力度 (kg/cm^2)

C : コンクリートの熱膨張係数 (1°C について)

E_c : 同じく弾性係数 (kg/cm)

t_p : 同じく打込み温度 ($^\circ\text{C}$)

t_r : 同じく打込み後の上昇温度 ($^\circ\text{C}$)

t_f : 同じく究極における安定温度 ($^\circ\text{C}$)

R : 拘束係数

この Fontana Project によれば、 $C=0.000008$ (1°C につき) としてあり、 E_c は実験室における材令 28 日の試験値は、230 000 kg/cm^2 ないし 350 000 kg/cm^2 であるが、プラスチックフロー、その他を考慮して、 $E_c=140000$ kg/cm^2 をとつている。

著者の実験結果も、第 3 章に示したように、配合 C のコンクリート (マッサコンクリートに用いる配合に近い配合のもの) の材令 91 日における動的弾性係数は 353 000 kg/cm^2 、また、静的弾性係数は、上記文献に示された数値に近く、すなわち、283 000 kg/cm^2 であつた。しかし著者は、コンクリートのクリープについてはなんら実験を行つていないし、また、仮定を設けて計算によつてこれを求めることも、はなはだ複雑かつ困難であるから、上記文献の数字をそのまま利用することにした。

次に、拘束係数 R は基礎面における値をとることは適當でないので、かりに基礎上 0.15 L のところをとれば 50% であるから、 $R=0.5$ として、これを (1) 式に代入すると、

$$f = 0.56(t_p + t_r - t_f) \dots\dots\dots (2)$$

すなわち、(2) 式を得、また、 t_r は第 4 章の実験結果から得られた数字を、また、コンクリートの究極における安定温度 t_f は、ダムの上流側下方を 4°C 、下流側のコンクリート体内 1 m のところを 15°C とみなし、その平均を 10°C としてこれらの t_p 、 t_f および打込み温度 t_p の値をそれぞれ (2) 式の中に代入して引張応力度 f を求める。

次に、第 7 章の図—65 および 図—68 から材令 1 年における各種コンクリートの引張強度の試験値をとり、これに第 3 章で述べたコンクリートの大型供試体と小型供試体 (マッサコンクリートを 20 mm のフルイで Wet screening したと同じ配合のコンクリートを用いた) との強度比率 0.75 を乗じて、マッサコンクリートの引張強度 σ を求める。ただし、この比率は圧縮強度における比率であるが、便宜上引張強度の場合も同じであるとみなした。

著者はまた、この研究ではコンクリートをすべて完全な断熱状態におけるものとして実験や計算を行つたのであるが、実際のマッサコンクリートの場合は、打込み後自然冷却がおり、その上さらに新しいコンクリートが打継がれるのであるから、その最高上昇温度は完全断熱状態の場合にくらべて、いちじるしい相違はないにしても、多少は異なるはずである³³⁾。しかし、実際と同じ温度経歴は種々の場合でそれぞれ異なるから、これを示すことは困難である。従つて、著者の研究の場合のように、断熱状態という最悪の養生温度条件で、引張強度を試験したり、引張応力度を計算しておけば、これらの Max Limit を求めることになり、実際の場合の値は安全側にあると思われる。

このようにして求めた打込み温度が 5°C ないし 30°C の場合のマッサコンクリートにおける引張応力度 f と引張強度 z の値を示せば表-18 のようである。

表-18 打込み温度とマッサコンクリートにおける引張応力度および引張強度との関係

セメント 打込み 温度(°C)	普通セメント				中庸熱セメント			
	最高温度 t_p+t_r (°C)	究極温度 t_f (°C)*	引張応力度 f (kg/cm ²)	引張強度 z (kg/cm ²)	最高温度 t_p+t_r (°C)	究極温度 t_f (°C)	引張応力度 f (kg/cm ²)	引張強度 z (kg/cm ²)
5	42	10	18	20	27	10	10	21
10	45	10	20	18	32	10	12	21
20	51	10	23	17	41	10	17	20
30	59	10	27	16	50	10	22	18

以上に示した結果だけからみても、本実験に用いた普通セメントの場合は、打込み温度が 5°C 以下、また、同じく中庸熱セメントの場合は、20°C 以下であれば、引張応力によるひびわれ発生の危険が少ないということが認められる。すなわち、冬期低温時にコンクリートを打つことや、夏期にプレクーリングを行いコンクリートの最高上昇温度を低減することが、いかに有意義であるかがわかり、そして、中庸熱セメントが普通セメントにくらべ、ダム用セメントとして、一般にきわめて有利であるが、冬期には普通セメントを用いてもさしつかえない場合もあること、などがわかる。

マッサコンクリートにおける温度ひびわれを減少するため、いろいろの方法が考えられるが、まず第一に最高上昇温度と、究極における安定温度との差をできるだけ少なくし、これとともに引張強度、結局圧縮強度の大きいコンクリートを造ることにつとめなければならない。そのためには、使用骨材の選択ももちろん必要であるが、マッサコンクリートにおいては、まずコンクリートを凍らせないかぎり、なるべく低温度で打つことが大切である。打込み温度を低くするか低温時に打つことは、コンクリートダムにおいては、リフトの厚さや、ちぢみ目地の間隔を大きくすることができ、従つて、ブロックの数は減少し、施工が容易となるばかりでなく、工事の竣工を早くすることもできるので、安全にしてしかも強いダムを経済的に造る上に、はなはだ有利である。

なお、低温時にコンクリートを打つことは、ダムのようなマッサコンクリートでは、内部まで凍る心配はないので、一般に寒中コンクリートを避ける必要はない。むしろ、寒冷期に施工してかえつて有利な場合もありうる。

第9章 結 論

打込み温度が、マッサコンクリートの強度に及ぼす影響の研究を行うにあたり、まず、この研究の諸実験における養生温度条件を決定するため、普通の重力ダム内部に用いる程度のコンクリートの断熱状態における時間-温度曲線を求め、次にセメント、およびセメントの主要構成化合物のペーストにたいし、養生温度を上記コンクリートの時間温度曲線に追従するように変化させ、打込み温度と硬化したペーストの性質との関係を、化学的および物理的に研究し、これをもとにして、コンクリートについて打込み温度と、圧縮強度、引張強度、および、動的弾性係数との関係を求めた。本実験の範囲内で次のことがいえると思われる。

(1) 普通の重力ダムの内部に用いる程度のマッサコンクリートの断熱状態における温度上昇に関する実験結果をみるに、打込み温度 5°C ないし 30°C の場合、材令 28 日においてこの実験に用いた普通セメントでは、最高上昇温度は 42°C ないし 59°C で、打込み温度を基準とした上昇温度は、37°C ないし 29°C であり、同じく中庸熱セメントでは、最高上昇温度は 27°C ないし 50°C で、打込み温度を基準とした上昇温度は、22°C ないし 20°C であつた。すなわち、打込み温度が低いほど最高上昇温度は低い、打込み温度を基準とした上昇温度は高い。

コンクリートの打込み温度を 1°C 低くすると、材令 28 日において、最高上昇温度が、この普通セメントでは

約 0.6°C 、同じく中庸熱セメントでは約 0.9°C 低減される結果を示した。

(2) マッサコンクリートの打込み温度と、セメントペーストの性質との関係は、普通セメントでは、初めに 30°C のような高温度で造つたペーストの圧縮強度は、同じく 5°C のような低温度で造つたペーストの圧縮強度にくらべ、早期材令ではかなり大きい、材令が進むと強度増進が少ないため、かえつて、初めに低温度で造つたものよりも小さくなる。中庸熱セメントの場合も、やはり同じ傾向を示したが、初期温度や養生温度による影響は普通セメントの場合よりもいくぶん遅れて現われる。打込み温度と硬化したセメントペーストの空隙率、結合水量、水酸化石灰生成量、水和熱、その他、セメントペーストの水和程度を表わす諸量との関係も打込み温度と、圧縮強度との間にみられたとほぼ同様な傾向が認められた。

(3) マッサコンクリートの打込み温度とセメントの主要構成化合物であるケイ酸三石灰、ケイ酸二石灰、および、アルミン酸三石灰などのペーストの性質との関係も(2)のセメントの場合とほとんど同様であるが、初期温度による影響はケイ酸三石灰の場合は、セメントの場合にくらべ一層早期に現われ、ケイ酸二石灰の場合はかなり遅れて現われる。

(4) 普通セメント、および、中庸熱セメントの場合、本実験に用いた養生温度条件の差では水和生成物の組成の間に大きな相違は認められない。また、ケイ酸三石灰およびケイ酸二石灰などの場合も、それらの水和生成物たるケイ酸石灰水和物中の CaO と SiO_2 とのモル比はある程度の長期材令までは大体において2に近いことを示し、そして、本実験の程度の養生温度の差ではケイ酸石灰水和物の組成の差はほとんど認められない。

(5) 硬化したセメントペーストおよびケイ酸三石灰のペースト(ただし、いずれも水量一定の場合)の圧縮強度は大体において水和の程度の函数として表わされ、両者の間にはほぼ、指数函数的な関係が成立する。すなわち、硬化したこれらのペーストの圧縮強度は初期温度や養生温度にあまり関係なく、かなり長期にわたり主として水和の程度に支配され、初期温度や養生温度はこの場合水和進行程度に影響を及ぼす一要素であることを示した。

(6) 低温度で造つたセメントペーストの方が高温度で造つたペーストより材令が進むと強度増進の大きくなる理由は結局、主として水和がよく進むからである。すなわち、初めに低温度で造つたセメントペーストの方が材令が進めばセメント粒子の膨潤、ゲル状物質や結晶の析出、生長、固化の程度が大であり、従つて、ペースト内部の空隙が一層減少し構造が緻密、強固かつ均質になる。これが、初めに高温度で造つたペーストよりも材令が進めば強度の増進が大きくなるおもな理由である。

(7) 初めに高温度で造つたセメントペーストの方が材令の経過に従い水和が進まなくなるおもな理由は一般に、セメントが水和するときセメント粒子の周囲に微細なゲル状物質や、結晶などの析出によりある種の半透膜の形成が考えられるところから、初期温度および養生温度が高いとこの膜が早く生成し難透過性が増すため、以後の水和進行をいちじるしく阻害することが考えられる。一方初期温度および養生温度が低ければこの膜の生成も遅く、かつ高温度の場合ほど難透過性でないと考えられるので、長期にわたる水和の進行に好都合な condition がもたらされ、結局、強度増進に好影響を及ぼすものと思われる。

(8) コンクリートがセメントペーストの場合と同様に打込み温度により強度の増進が顕著な影響を受けるのは当然であり、すなわち、打込み温度が低いほど、普通セメントの場合も、中庸熱セメントの場合も、長期材令における強度が大きい。

これに反し、打込み温度が高いものは、その影響の程度はセメントの種類、および、コンクリートの配合によつて相違するが、打込み温度の低いものに比べてコンクリート強度は早期材令においては大きく、長期材令では小さい。また中庸熱セメントの場合、普通セメントの場合よりも打込み温度による影響が遅れて現われるだけで、打込み温度が強度に及ぼす影響の程度は材令が進めば普通セメントの場合とほぼ同様である。

この実験に用いたセメントでは打込み温度が 30°C のような高温度は、普通セメントでは材令約 28 日以後、中庸熱セメントでは材令約 91 日以後の強度増進にたいし有害である。

なお、普通セメントを用いたコンクリートで打込み温度が 5°C のものは、同じく打込み温度が 30°C のものにたいし、材令 1 年における圧縮強度は約 40%、引張強度は約 15% 大であり、また、中庸熱セメントを用いたコンクリートでは打込み温度が 5°C のものは、同じく打込み温度が 30°C のものにたいし、材令 1 年における圧縮強度は約 17%、引張強度は約 15% 大であつた。

(9) コンクリートの引張強度と圧縮強度との比にたいする打込み温度の影響はあまり認められない。この比はセメントによつて相違するのであつて、例えば、この実験に用いたセメントでは圧縮強度が約 180 kg/cm^2 以上に

なると中庸熱セメントの方がやや大きくなった。

ダム工事に用いるセメントの選定に当つては、単に低発熱性の点ばかりでなく強度増進が大きく、特に引張強度の大きいセメントを選ぶことが必要である。

(10) 普通セメントを用いたコンクリートの場合、標準養生を行つたものよりも概して強く、また、中庸熱セメントを用いたものは各材令を通じ標準養生を行つたものが強度が小さかつた。このことは、標準温度20°Cは、普通セメントの強度を発現させるには比較的好都合の温度であるが、この中庸熱セメントにとつては、強度を十分に発揮させるに都合のよい温度でないことを意味する。養生様式の相違による影響はセメントの種類により大いに變化することから、実際のダム内部の高温度、および、コンクリートの施工時の温度について考えるとき、中庸熱セメントを用いたペースト、モルタル、あるいはコンクリートの供試体にたいし標準養生を行い、しかも、材令 28 日の強度値をもつてセメント品質の良否を論議し、あるいはマッサコンクリートの長期強度を推定してみてもその意義ははなはだ少ない。よつて、ダム用セメントとしての中庸熱セメントないし低熱セメントにたいする現行規格による強さ試験法は、養生温度および、試験材令に関する限り品質試験方法として不適当である。

(11) 打込み温度とコンクリートの動的弾性係数との関係も、打込み温度と、コンクリートの強度との関係と同様に、打込み温度が高いものほど動的弾性係数は早期材令において大であるが、材令が進むと打込み温度が低いものより小さくなる。しかし、打込み温度による動的弾性係数の差違は長期材令では比較的小である。

コンクリートの強度と動的弾性係数との関係は、本実験における諸条件の下では、材令3月ないし6月内の範囲では大体において並行性は認められるが、それ以後の材令では並行性は少ないようである。

(12) 打込み温度とコンクリートが岩盤その他の基礎に拘束されたための温度変化による引張応力、および、温度ひびわれ発生との関係は、コンクリートをすべて完全な断熱状態とみなして実験や計算を行つた結果だけからみると、一般に打込み温度が低いほど、そして同じ打込み温度では普通セメントより中庸熱セメントのような低発熱性のセメントを用いる方が引張応力が小さいこと、そしてコンクリートの打込み温度が低いほど、コンクリートの引張強度も大きいので引張応力による温度ひびわれ発生の傾向も一層軽減されること等が認められる。

これを要するに、マッサコンクリートはなるべく低温度で打つのが有利である。夏期においてはできるだけ低温度にさげる必要があり、寒冷期における施工はコンクリートを凍らせないかぎり有利である。

コンクリートの打込み温度を低くすることは、単にコンクリート体内の最高上昇温度を低減するばかりでなく、コンクリートそのものを強くするから、温度ひびわれの発生を少なくするためにきわめて有利である。

参 考 文 献

- 1) R.E. Davis and G.E. Toroxell: 「Temperature Developed in Mass Concrete and their Effect upon the Compressive Strength」 Proc. of ASTM., vol. 31, 1931.
- 2) R.E. Davis: 「Final Report on Cement and Concrete Investigation for Bonneville Dam.」 US Engr. Office, Second Portland District, 1938.
- 3) A.E. Mironoff: 「The Influence of Low Temperature on Hardening of Cement Mortars」 Proc. of ASTM., vol. 36, 1936.
- 4) Boulder Canyon Project: Final Report Part VII Cement and Concrete Investigation, 1949.
- 5) 吉田徳次郎: 「コンクリート・ハンドブック」 p. 184, 1950.
- 6) 狩野宗三: 「セメントの硬化に対する温度の影響」日本ポルトランドセメント業技術会報告, 16号, 1925.
- 7) 吉田徳次郎: 「セメント糊の研究」九州帝国大学工学集報, 13巻1号, 1938.
- 8) E.M. Lea and F.E. Jones: 「The Rate of Hydration of Portland Cement and its Relation to the Rate of Development of Strength」
- 9) D. Werner u. S.G. Hedström: 「Die Abhängigkeit der technisch wichtigen Eigenschaften des Betons von dem physikalisch-chemischen Eigenschaften」 Zement. Nr. 46, 47, 1931.
- 10) 近藤清治・山内俊吉: 「大気湿度の水和ポルトランドセメントの膨脹収縮に及ぼす影響」第2回国際大堰堤会議提出国内研究論文集, 1936.
- 11) G.L. Kalousek and M. Adams: 「Hydration Products Formed in Cement Pastes at 25° to 175°C」 Jour. of ACI., V. 48, Sept. 1951.
- 12) 藤井欽二郎: 「ポルトランドセメントの硬化に伴い生成する $\text{Ca}(\text{OH})_2$ について」セメント技術年報 VI.

- 1952.
- 13) G.L. Kalousek and C.W. Davis: 「An Investigation of Hydrating Cement and Related Hydrous Solids by Differential Thermalanalysis」 Jour. ACI., V. 45, June, 1949.
 - 14) H.Kühl u. W. Tao: 「Die Reation zwischen Porttand-zement und Wasser」 Zement Seite 105, 1932.
 - 15) R.H. Bogue and W. Lerch: 「Hydration of Portland Cement Compounds」 Ind. and Eng. Chem. Vol. 26, p. 837, 1934.
 - 16) F.C. Anderegg and D.S. Hubbell: 「The rate of hyd-ration of cement Clinker」 ASTM Part II p. 244 1929.
 - 17) 篠原謹爾: 「セメント糊に関する基礎研究」九州帝国大学工学部紀要, 第10冊, 第2号, 1947.
 - 18) T.C. Powers and T.L. Brownyard: 「Studies of physi-cal properties of hardened portland cement paste」 Jour. ACI. April. 1947.
 - 19) 永井彰一郎・高原正光: 「セメントの水硬性化合物の生成に対する弗化物の効果, 第9報」工業化学雑誌, 1936.
 - 20) R.H. Bogue: 「The Chemistry of Portland Cement」 p-75, 1947.
 - 21) 笠井康一: 「モルタル強度式に就いて」日本ポルトランドセメント業技術会報告, 第23号, 1936.
 - 22) 前田 勤・山根 茂: 「ポルトランドセメントの水和反応」日本ポルトランドセメント業技術会報告, 第26号, 1941.
 - 23) W. Eitel u. H.E. Schwiete, 「Gleichgewichte zn Kolloidalen Grenzphasen in wässrigen Silikat-sys-tmen」 Die Naturwissenschaften, Heft. 22/24, 1934.
 - 24) 国分正胤: 「新旧コンクリートの打継目に関する研究」土木学会論文集, 第8号, 1950.
 - 25) 高野俊介: 「コンクリートの養生温度経歴と圧縮強度との関係」小野田研究集報, 第15号, 1953.
 - 26) The Fontana Project, Technical Report, No. 12 ,p. 626 to p. 628 .1953.
 - 27) 高野俊介・渡辺嘉香: 「モルタルおよびコンクリートの養生温度と強度との関係」小野田研究集報, 第15号, 1953.
 - 28) 竹本国博: 「電子顕微鏡によるポルトランドセメント並びにその組成鉱物の水和作用に関する研究, 第3報」セメント技術年報, VIII, 1953.
 - 29) 高野俊介・柳川晃夫: 「初期養生温度がモルタルおよびコンクリートの強度に及ぼす影響, 第1報」セメント技術年報, VII, 1953.
 - 30) 同 上, 第2報, セメント技術年報, VIII, 1951.
 - 31) 高野俊介: 「コンクリートの動的弾性係数と強度との関係」セメント技術年報, V, 1951.
 - 32) 高野俊介・堀 素夫: 「SR-4型ストレインゲージによるコンクリートの静歪特性の測定について」小野田研究集報, 第19号, 1954.
 - 33) 高野俊介: 「大ダム内部の高温度とコンクリートの性質」小野田研究集報, 第19号, 1954.
 - 34) 高野俊介・松田応作: 「コンクリートの断熱温度上昇試験について, 第1報」小野田研究集報, 第21号, 1954.
 - 35) 高野俊介・松田応作・大石健一: 「初期養生温度がモルタルおよびコンクリートの強度に及ぼす影響, 第3報」セメント技術年報, IX, 1955 に発表予定.

普通セメントの水和に関する光学顕微鏡写真（その1）

（セメント 1：水 5，倍率 350）

未水和粒子の膨潤および液相中に新固相の析出する状態を示す

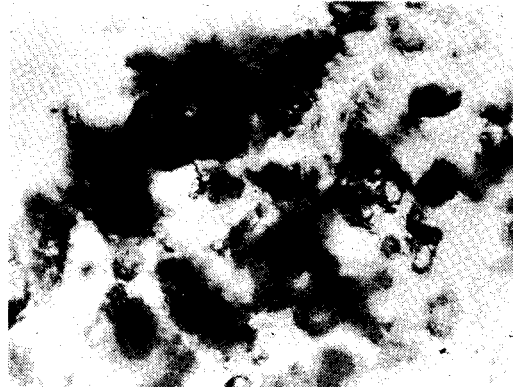
初期温度 5°C



初期温度 5°C

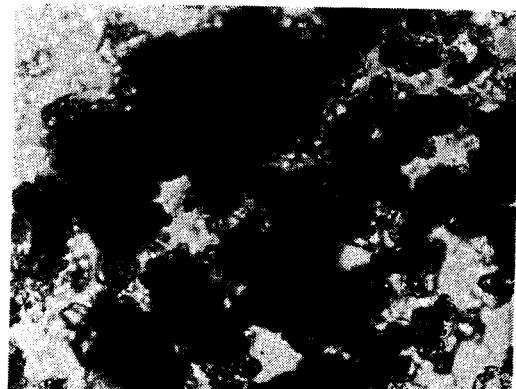
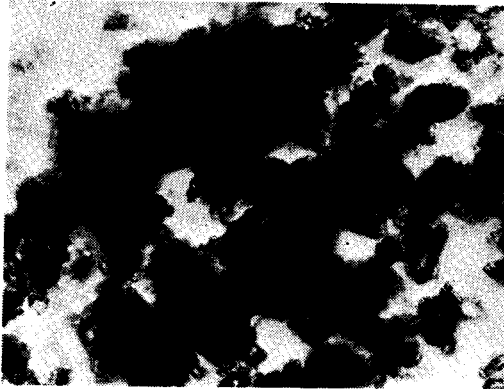
写真-1 注水直後

写真-2 材令 1日



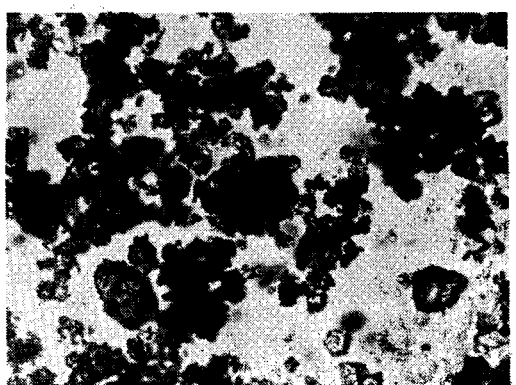
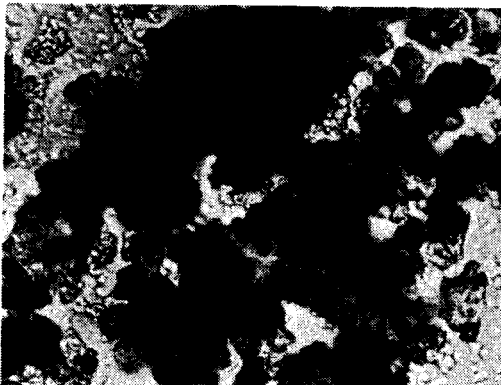
初期温度 5°C
写真-3 材令 3日

初期温度 5°C
写真-4 材令 7日

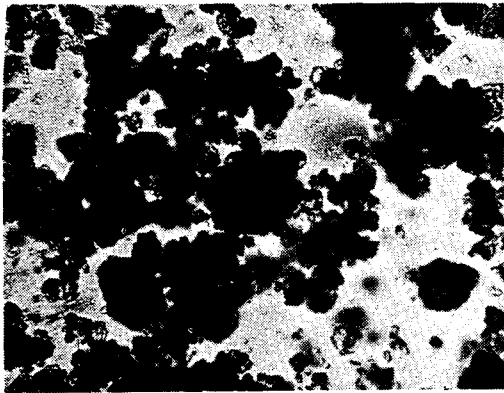


初期温度 5°C
写真-5 材令 28日

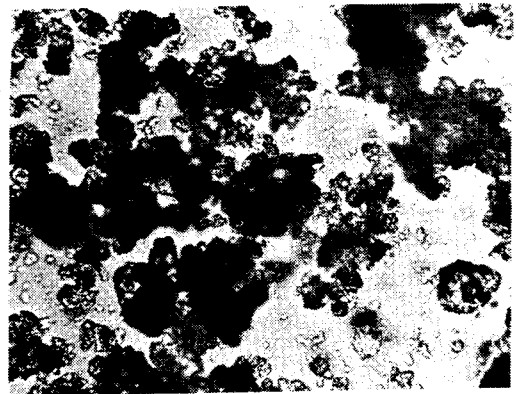
初期温度 30°C
写真-6 注水直後



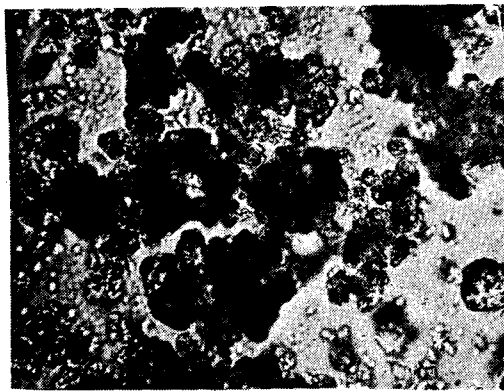
初期温度 30°C
写真-7 材令1日



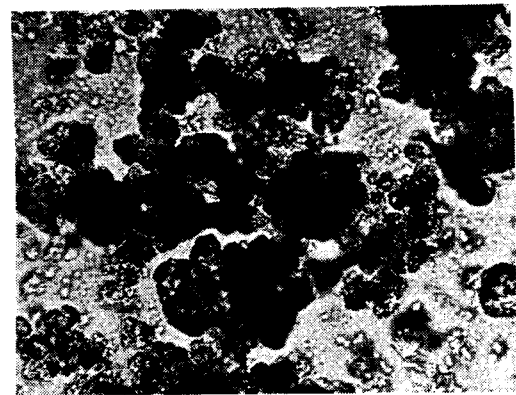
初期温度 30°C
写真-8 材令3日



初期温度 30°C
写真-9 材令7日



初期温度 30°C
写真-10 材令14日

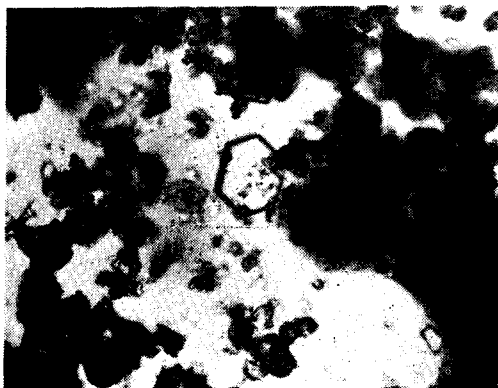


普通セメントの水和に関する光学顕微鏡写真(その2)

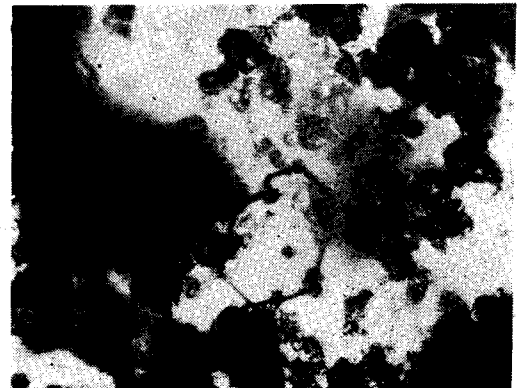
(セメント 1 : 水 5, 倍率 350)

未水和粒子の膨潤および液相中に新固相の析出する状態を示す

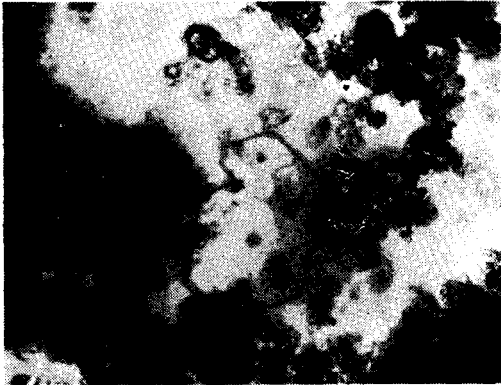
初期温度 5°C
写真-11 材令1日



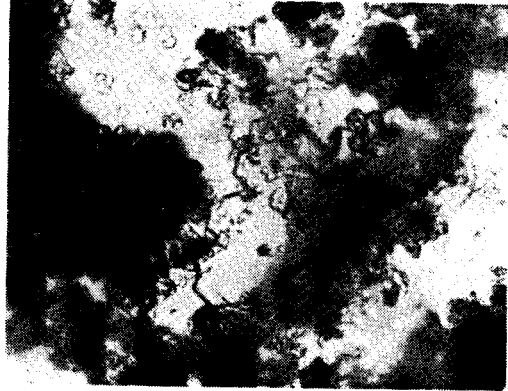
初期温度 5°C
写真-12 材令2日



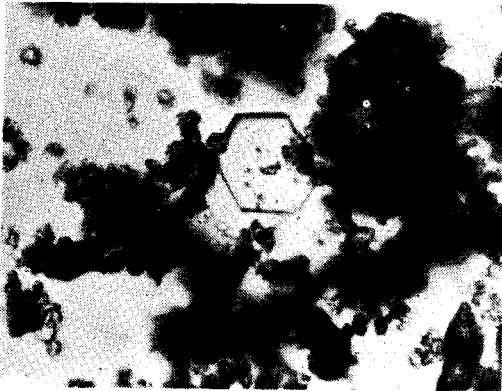
初期温度 5°C
写真-13 材令 3日



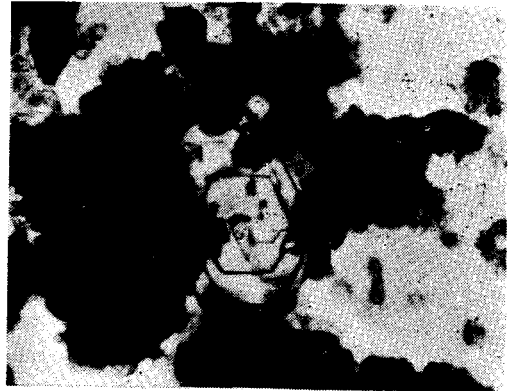
初期温度 5°C
写真-14 材令 7日



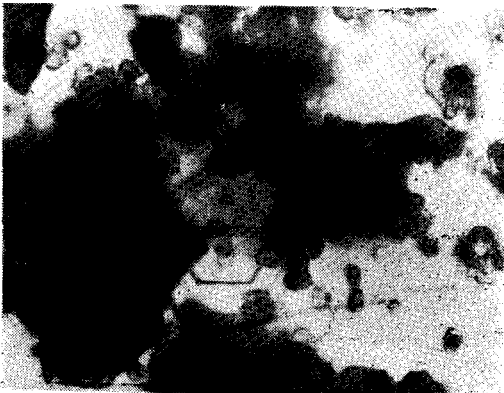
初期温度 30°C
写真-15 材令 5時間



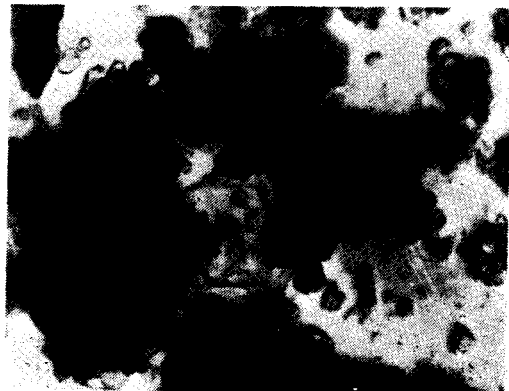
初期温度 30°C
写真-16 材令 1日



初期温度 30°C
写真-17 材令 3日



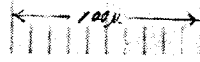
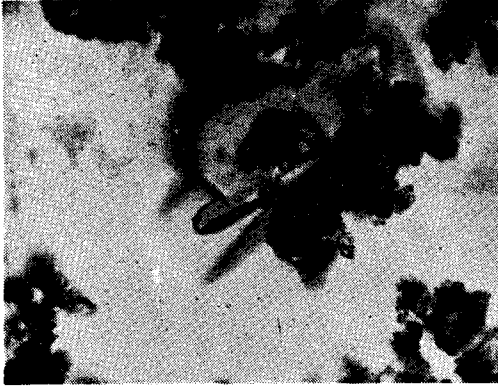
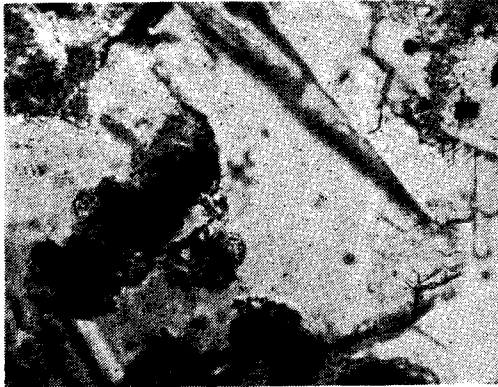
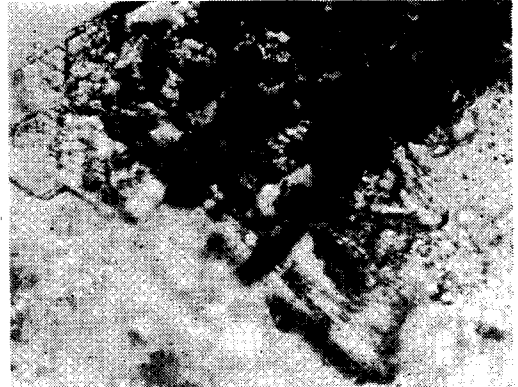
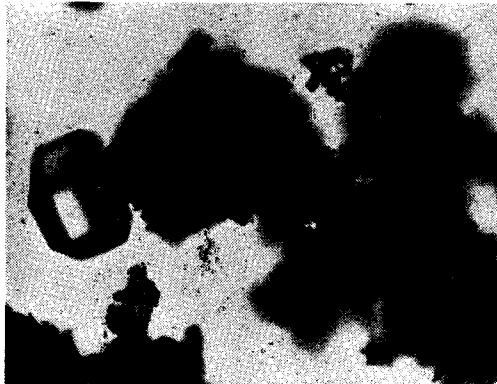
初期温度 30°C
写真-18 材令 7日



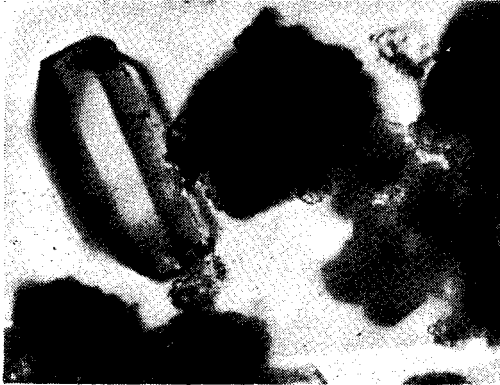
普通セメントの水和に関する光学顕微鏡写真(その3)

(セメント 1 : 水 5, 倍率 350)

未水和粒子の膨潤および水酸化石灰の結晶の析出する状態を示す

初期温度 5°C
写真-19 材令 1日初期温度 5°C
写真-20 材令 3日初期温度 5°C
写真-21 材令 7日初期温度 5°C
写真-22 材令 28日初期温度 30°C
写真-23 材令 5時間初期温度 30°C
写真-24 材令 1日

初期温度 30°C
写真—25 材令 3日



初期温度 30°C
写真—26 材令 7日

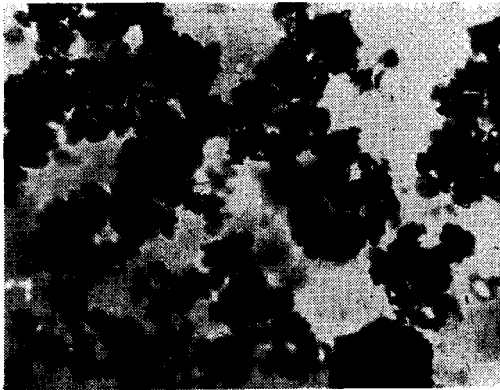


中庸熱セメントの水和に関する光学顕微鏡写真

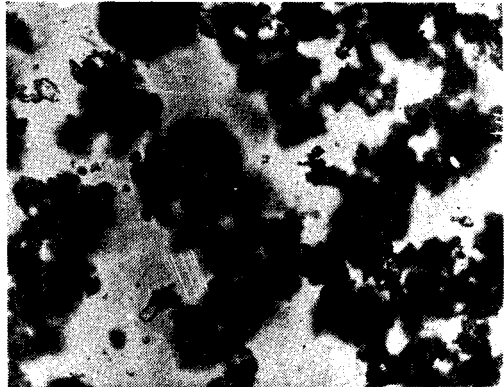
(セメント 1 : 水 5, 倍率 350)

未水和粒子の膨潤および水酸化石灰の結晶の析出する状態を示す

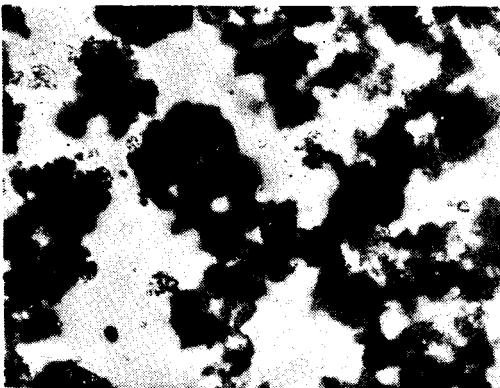
初期温度 5°C
写真—27 注水直後



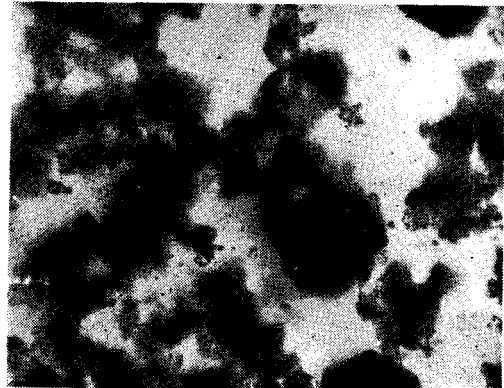
初期温度 5°C
写真—28 材令 1日



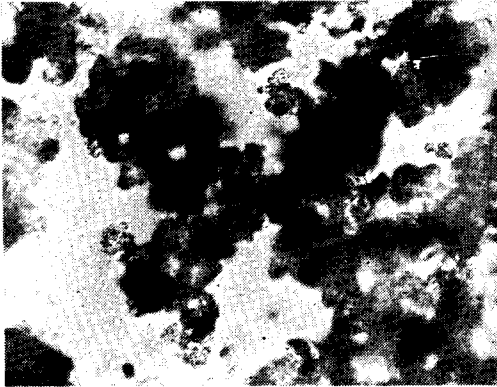
初期温度 5°C
写真—29 材令 3日



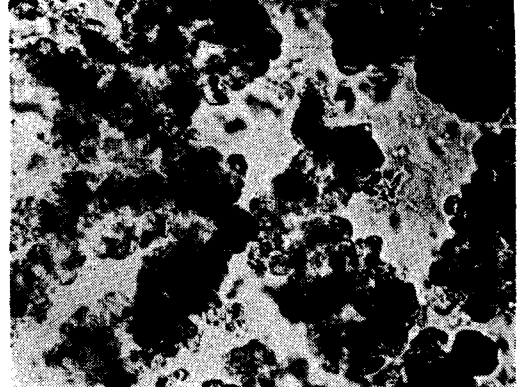
初期温度 5°C
写真—30 材令 7日



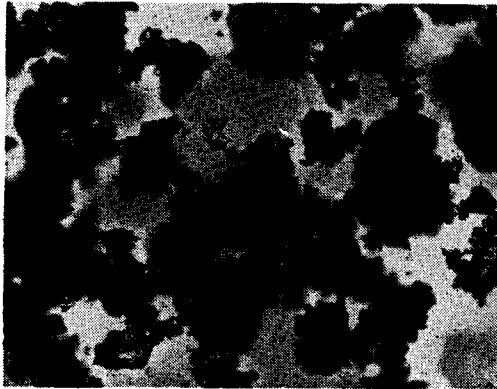
初期温度 5°C
写真—31 材令 28 日



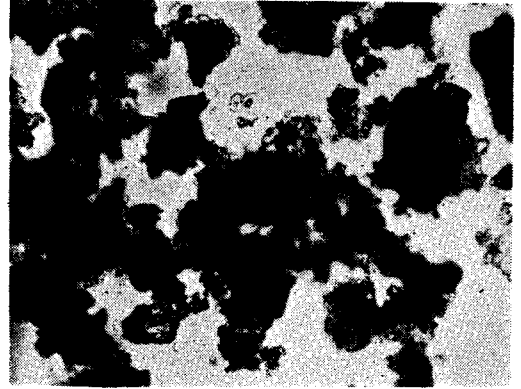
初期温度 5°C
写真—32 材令 91 日



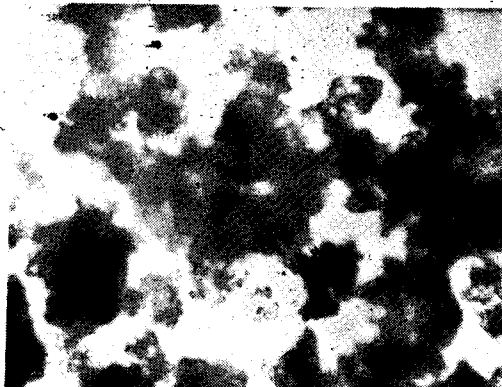
初期温度 30°C
写真—33 注水直後



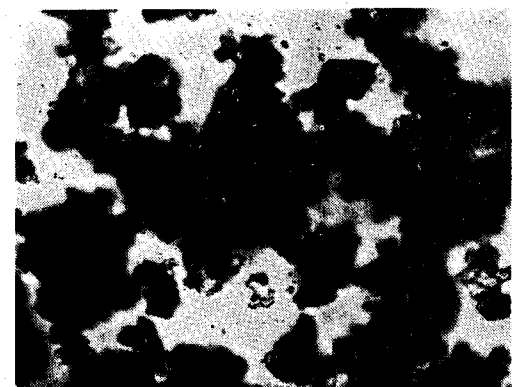
初期温度 30°C
写真—34 材令 1 日



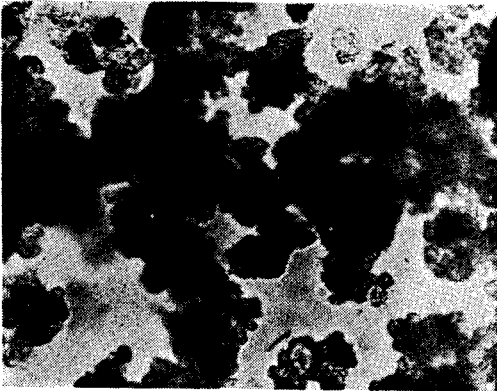
初期温度 30°C
写真—35 材令 3 日



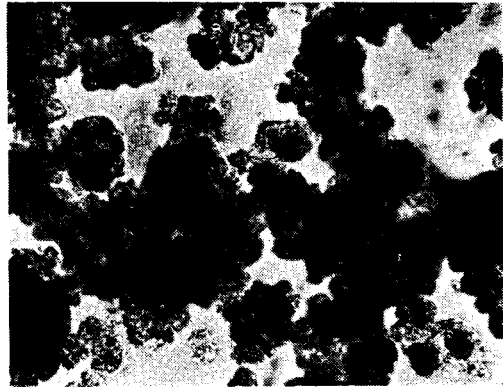
初期温度 30°C
写真—36 材令 7 日



初期温度 30°C
写真—37 材令 28 日

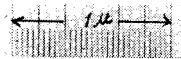


初期温度 30°C
写真—38 材令 91 日

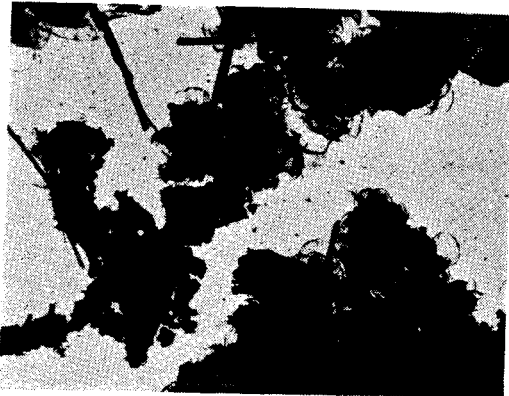


普通セメントの水和に関する電子顕微鏡写真

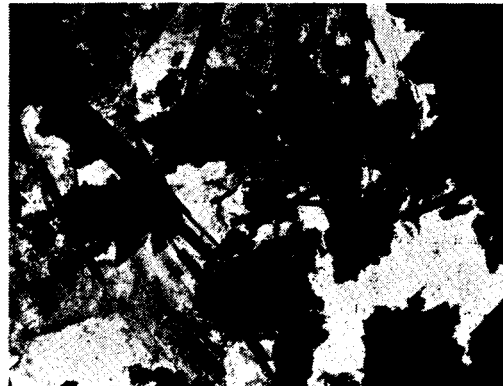
(セメント 1 : 水 5, 倍率 10 000)



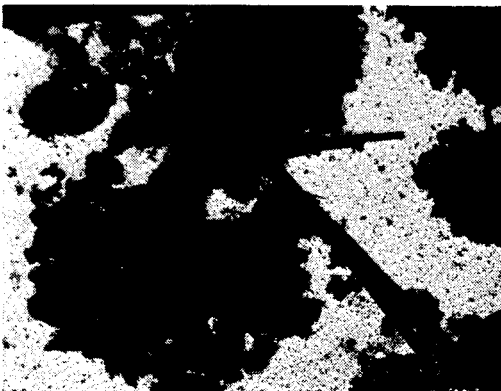
初期温度 5°C
写真—39 材令 2 時間



初期温度 5°C
写真—40 材令 5 時間



初期温度 5°C
写真—41 材令 10 時間



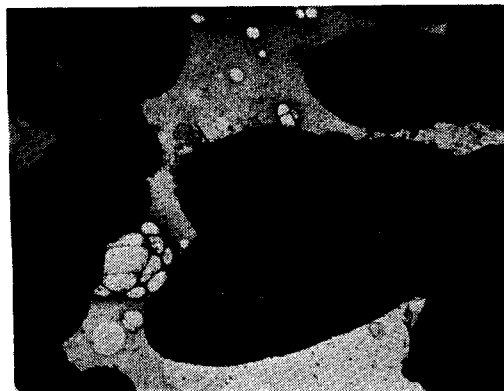
初期温度 5°C
写真—42 材令 1 日



初期温度 5°C
写真-43 材令3日



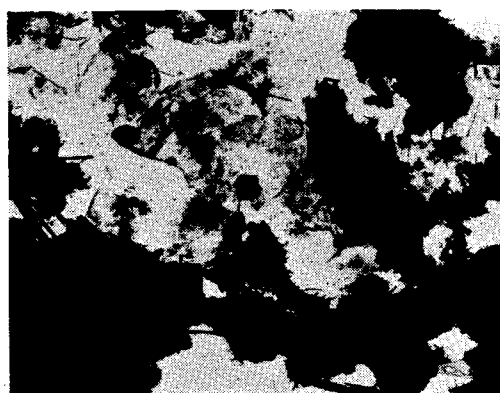
初期温度 5°C
写真-44 材令7日



初期温度 5°C
写真-45 材令28日



初期温度 30°C
写真-46 材令2時間



初期温度 30°C
写真-47 材令5時間



初期温度 30°C
写真-48 材令10時間



初期温度 30°C
写真-49 材令 1 日



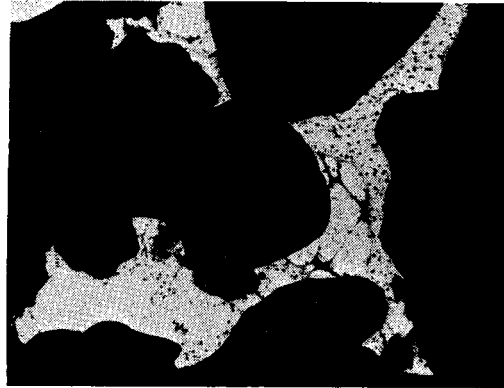
初期温度 30°C
写真-50 材令 3 日



初期温度 30°C
写真-51 材令 7 日

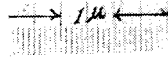


初期温度 30°C
写真-52 材令 28 日

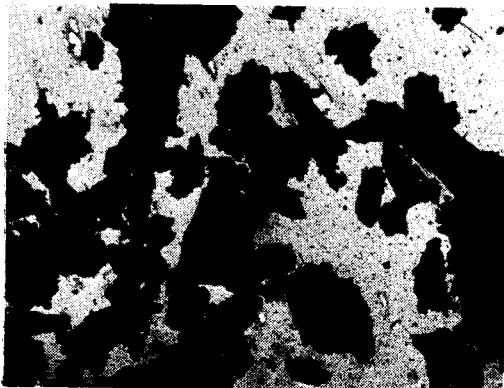


中庸熱セメントの水和に関する電子顕微鏡写真

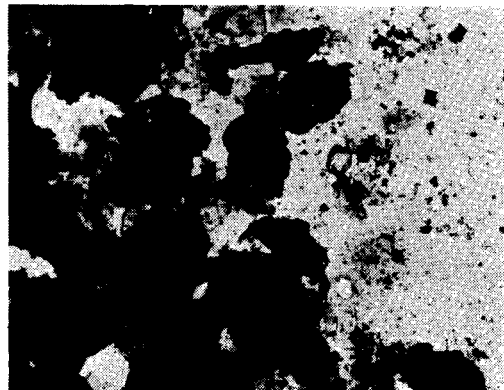
(セメント 1 : 水 5, 倍率 10 000)



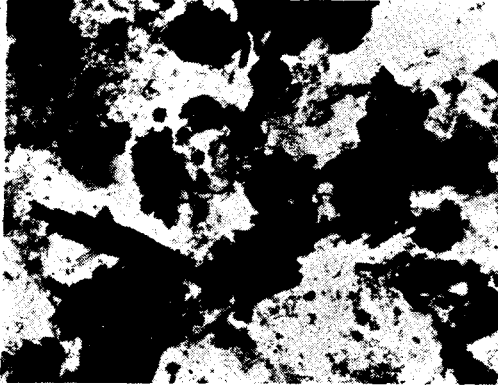
初期温度 5°C
写真-53 材令 2 時間



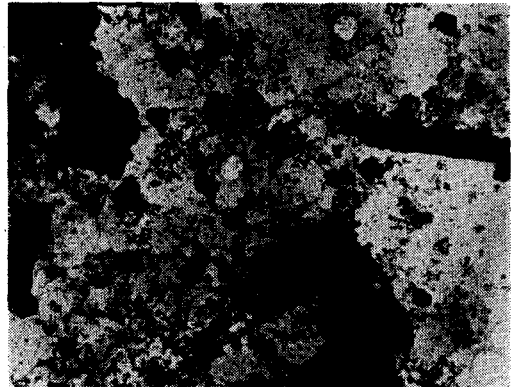
初期温度 5°C
写真-54 材令 5 時間



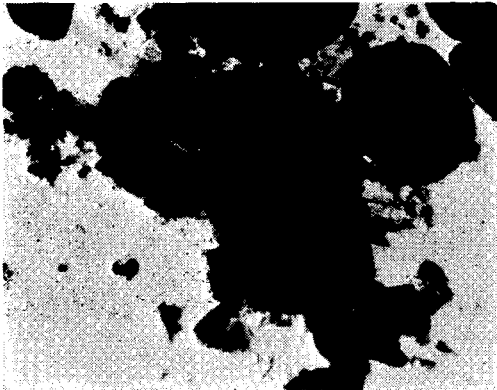
初期温度 5°C
写真—55 材令 10 時間



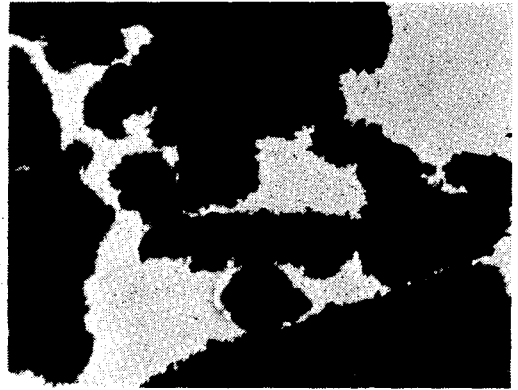
初期温度 5°C
写真—56 材令 1 日



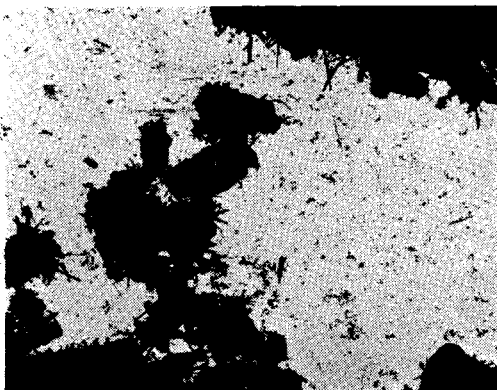
初期温度 5°C
写真—57 材令 3 日



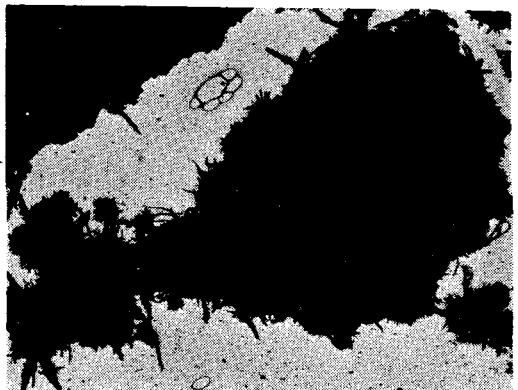
初期温度 5°C
写真—58 材令 7 日



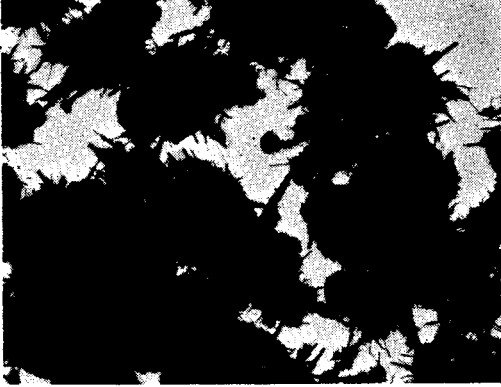
初期温度 30°C
写真—59 材令 2 時間



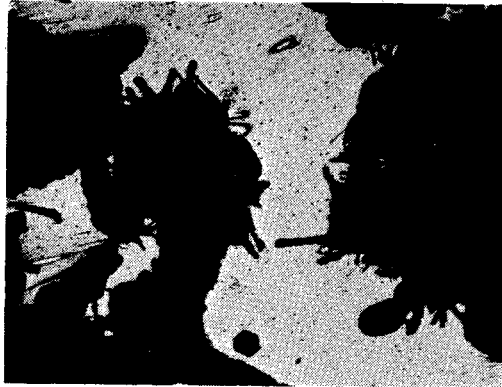
初期温度 30°C
写真—60 材令 5 時間



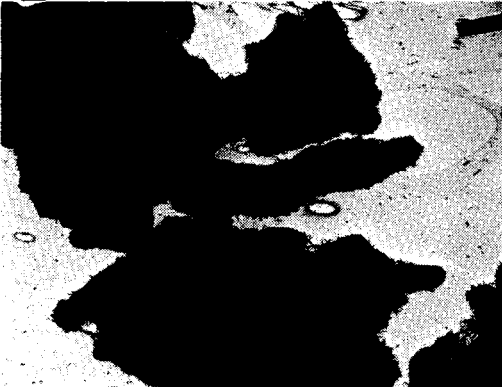
初期温度 30°C
写真—61 材令 10 時間



初期温度 30°C
写真—62 材令 1 日



初期温度 30°C
写真—63 材令 3 日

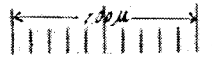
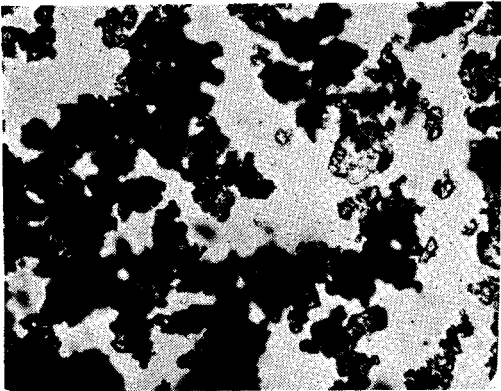


初期温度 30°C
写真—64 材令 7 日

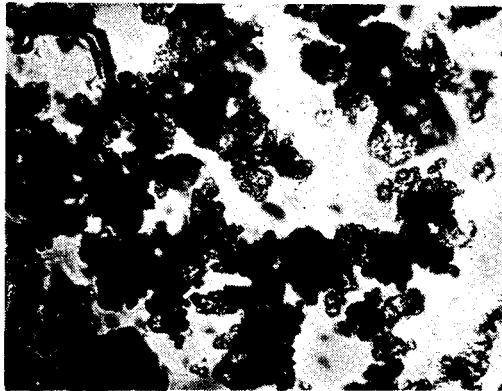


珪酸三石灰の水和に関する光学顕微鏡写真
(珪酸三石灰 1 : 水 5, 倍率 350)

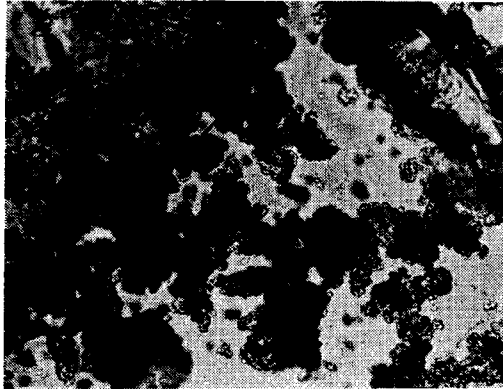
初期温度 5°C
写真—65 注水直後



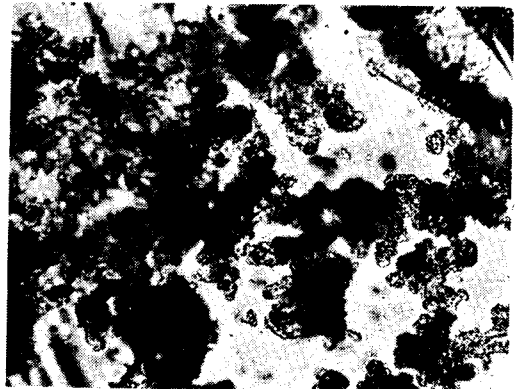
初期温度 5°C
写真—66 材令 1 日



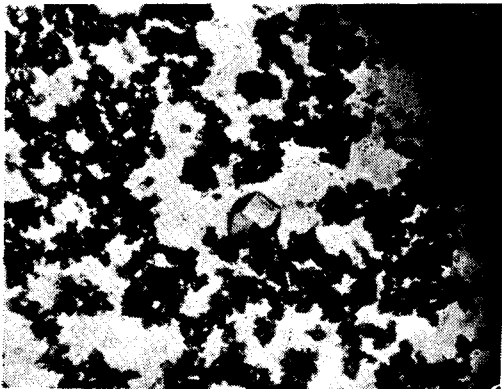
初期温度 5°C
写真-67 材令3日



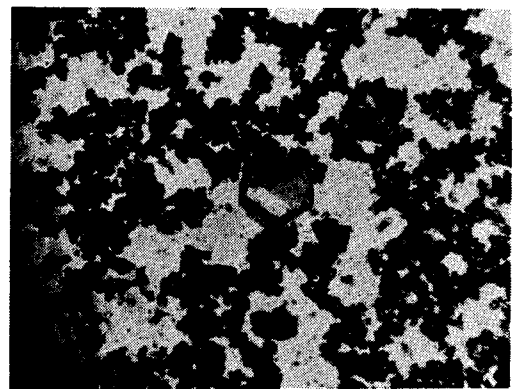
初期温度 5°C
写真-68 材令7日



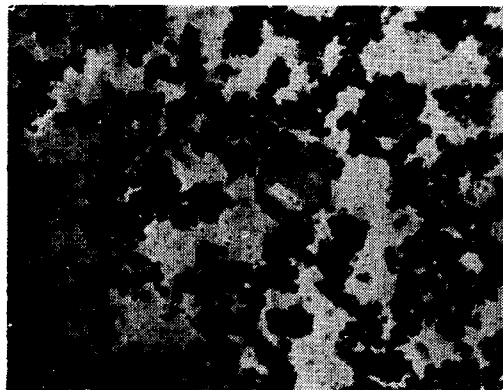
初期温度 30°C
写真-69 注水直後



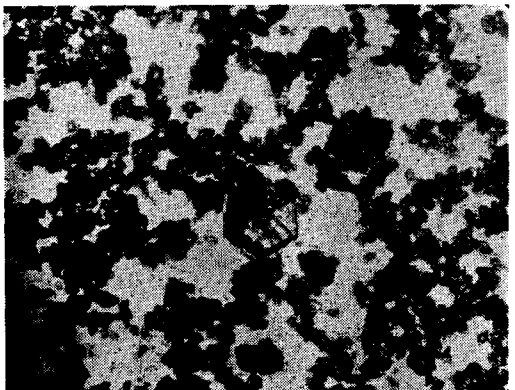
初期温度 30°C
写真-70 材令1日



初期温度 30°C
写真-71 材令3日

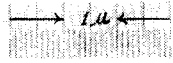


初期温度 30°C
写真-72 材令7日

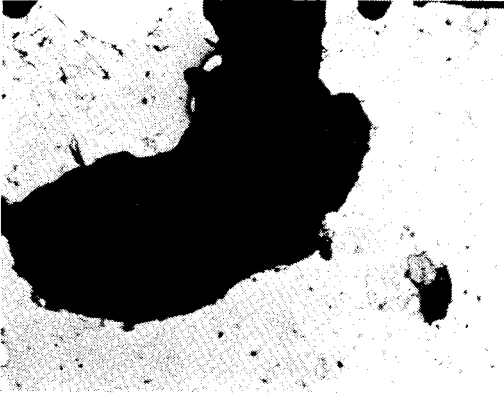


珪酸三石灰の水和に関する電子顕微鏡写真

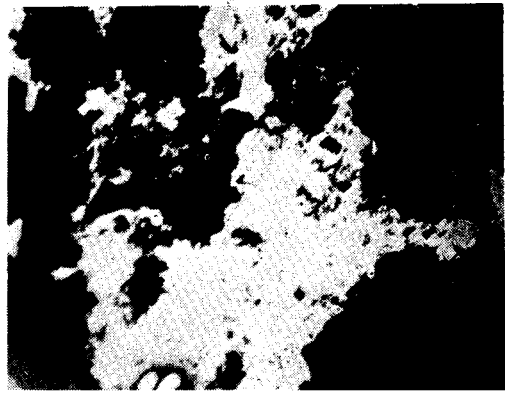
(珪酸三石灰 1: 水 5, 倍率 30 000)



初期温度 5°C
写真-73 材令 5分



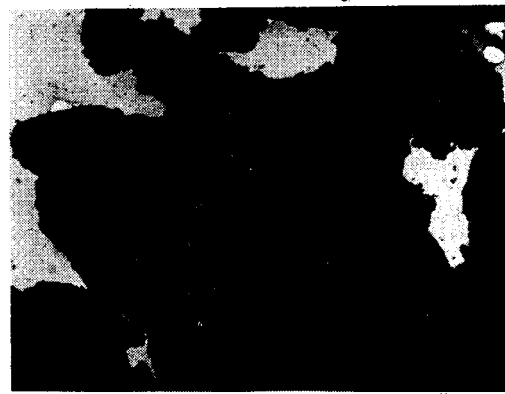
初期温度 5°C
写真-74 材令 30分



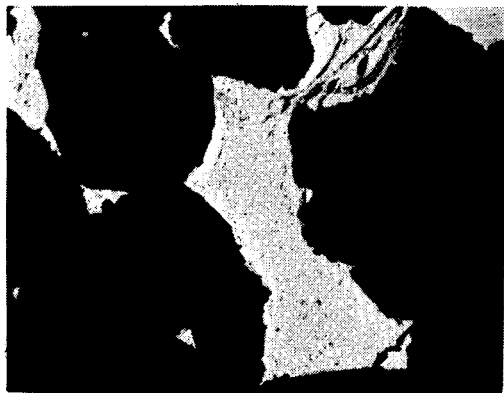
初期温度 5°C
写真-75 材令 2時間



初期温度 5°C
写真-76 材令 5時間



初期温度 5°C
写真-77 材令 10時間



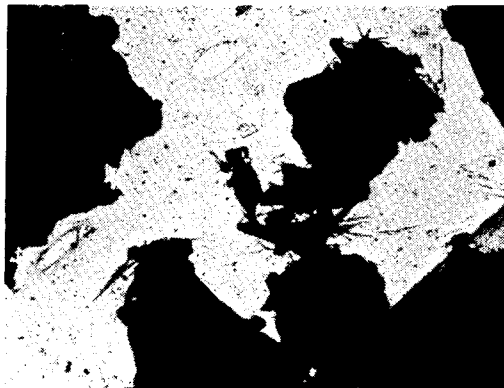
初期温度 5°C
写真-78 材令 1日



初期温度 5°C
写真—79 材令3日



初期温度 30°C
写真—80 材令5分



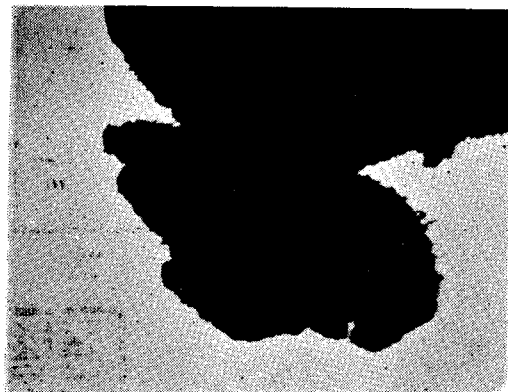
初期温度 30°C
写真—81 材令30分



初期温度 30°C
写真—82 材令2時間



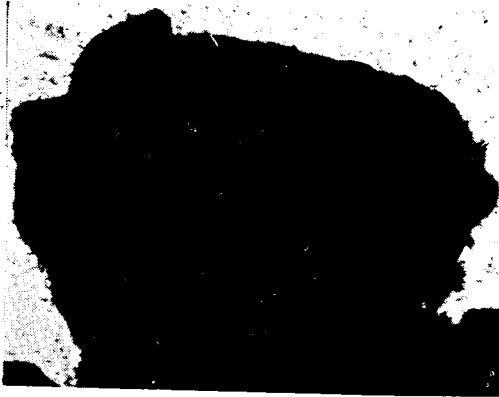
初期温度 30°C
写真—83 材令5時間



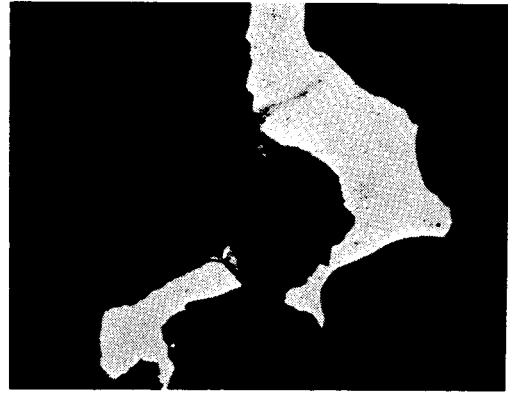
初期温度 30°C
写真—84 材令10時間



初期温度 30°C
写真-85 材令1日



初期温度 30°C
写真-86 材令3日



著 者 略 歴

大正 13 年 3 月	米沢高等工業学校応用化学科卒業
同 13 年 4 月	小野田セメント株式会社へ入社
同 15 年 2 月	同社 大連工場へ転勤 (この間約1ヶ年間九州帝大土木工学科へ社費留学)
昭和 17 年 1 月	同社 八幡工場工務課長
同 21 年 5 月	同社 小野田工場工務課長
同 21 年 10 月	同社 研究所次長
同 28 年 6 月	同社 研究所副所長
同 30年4月8日	工学博士授与

昭和 30 年 5 月 10 日 印刷	土木学会論文集	定価 180 円
昭和 30 年 5 月 15 日 発行	第 26 号	
著 者	山口県小野田市大字小野田 6276 小野田セメント株式会社中央研究所	高 野 俊 介
編集兼発行者	東京都千代田区大手町 2 丁目 4 番地	中 川 一 美
印刷者	東京都港区赤坂溜池 5 番地	大 沼 正 吉
印刷所	東京都港区赤坂溜池 5 番地	株式会社 技 報 堂

東京中央郵便局区内 千代田区大手町 2 丁目 4 番地 電話 (20) 3945・4078
 発行所 社団法人 土 木 学 会 振替東京 16828 番

