

# 超速硬セメントおよび高性能減水剤を用いた低水セメント比の コンクリートの強度発現特性に関する研究

## STUDIES ON STRENGTH CHARACTERISTICS OF CONCRETE USING REGULATED SET CEMENT AND SUPERPLASTICIZER

中嶋清実\*・吉田弥智\*\*

By Kiyomi NAKASHIMA and Hiroto YOSHIDA

When regulated set cement concrete is used for various construction works, first it is necessary to know that property of revealing the strength the regulated set cement concrete shows.

Accordingly, this research was that which experimentally clarified what property of revealing the strength the regulated set cement concrete using a superplasticizer shows in the curing under low temperature, normal temperature and heating. Besides, the characteristics of revealing the strength of regulated set cement concrete were clarified by comparing with those of ordinary concrete, and the reason was considered chemically.

*Keywords: regulated set cement concrete, superplasticizer, strength, construction works, cumulative temperature method*

### 1. ま え が き

コンクリートの強度は経過時間（材令）とともに増大する。その割合は若材令ほど著しい。コンクリートの強度と材令の関係を知るためには、強度に対して材令を時間、日、年をとって表わす方法が一般的に行われている。

また、強度は養生温度によっても著しく影響されることを考慮して、強度を温度と材令の積である積算温度（マチュリティー, maturity）との関係で表わすことが行われている。

積算温度に用いる材令は、普通コンクリートの場合、日（day）が用いられているが、超早強性のセメントを用いたコンクリートのように短期強度を問題にする場合には時間（hour）が用いられる。

超速硬セメントを用いたコンクリート（以下、超速硬コンクリートとよぶ）はきわめて早い時期に实用強度を発現し、練り上がり温度、養生温度によって強度の発現を著しく異にする。したがって、超速硬コンクリートの強度発現状態を正しく把握するには、強度に対して、材

令を時間でとった積算温度で表わすことが最も適当な方法と考えられる。

これまでに超速硬コンクリートの強度発現性状を扱った研究の大部分<sup>1)~4)</sup>は強度と材令（時間および日）の関係で表わされており、積算温度を用いた論文は非常に少ない。積算温度を用いた研究としては、飯岡ら<sup>5)</sup>の補修用超早強性コンクリートに関する研究、大塩ら<sup>6)</sup>の各種混和剤を用いたジェットセメントコンクリートの配合等に関する研究、著者ら<sup>7)</sup>の高性能減水剤を用いた超速硬コンクリートによる寒中コンクリートの研究があるのみで、まだ十分な成果が得られていない。

超速硬コンクリートを各種の工事に使用する場合に、最も重要なことは、若材令での強度を正確に把握することである。そのためには超速硬コンクリートが各種養生条件（低温、常温、加熱）においてどのような強度発現性状を示すかを明らかにする必要がある。

したがって、本研究は超速硬コンクリートの低温、常温、加熱養生条件下での強度発現性状を知ることと、その強度特性を化学的に明らかにしようとするものである。

研究は以下の手順で行った。

研究の第1として、各種の工事を仮定して、各種の温度履歴を超速硬コンクリートに与え、そのときの強度を

\* 正会員 工博 豊田工業高等専門学校校助教授 土木工学科 (〒471 豊田市栄生町2-1)

\*\* 正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)

表-1 セメントの化学成分

項目	化 学 成 分 (%)								鉱 物 組 成 (%)				
	強熱減量 (g loss)	不溶残分 (insol)	二酸化ケイ素 (SiO <sub>2</sub> )	酸化アルミニウム (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	酸化鉄 (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	酸化カルシウム (CaO)	酸化マグネシウム (MgO)	酸化亜硫酸 (SO <sub>3</sub> )	合計	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>4</sub> A <sub>1</sub> - CaF <sub>2</sub>	C <sub>4</sub> AF
超硬セメント	0.8	0.2	11.2	11.1	1.7	58.6	0.6	10.7	97.9	50.4	1.7	20.6	4.7
普通セメント	0.6	0.1	22.2	5.2	3.2	65.2	1.3	1.7	99.5	52.7	23.9	C <sub>3</sub> A, 8.2	9.7

求めた。結果の整理にはコンクリートの内部温度と材令（時間）を考慮した積算温度法を適用した。そして、本実験における養生条件において、積算温度法が適用できる場合と、適用できない場合を明らかにした。

また、超硬セメントコンクリートの強度発現性状は他のコンクリートとはかなり異なるので同品質の普通コンクリートの場合と比較することにより、超硬セメントコンクリートの強度発現性状を明らかにした。

研究の第2として、超硬セメントコンクリートは積算温度150°C・h付近において変曲点があり、その前後では強度の発現を著しく異にする。その発現の違いの程度を同品質の普通コンクリートと比較することにより明らかにした。また、実際の施工においては、変曲点までの強度を発現していれば、十分に実用に供することができるので、変曲点までに要する養生温度と時間の関係を求めた。

研究の第3は、超硬セメントコンクリートは積算温度150°C・h付近において変曲点が存在し、2つの近似式において回帰できるが、その理由を化学的に考察した。

2. 実験概要

(1) 使用材料とコンクリートの配合

セメントは超硬セメントおよび普通ポルトランドセメントを使用した。それぞれの化学成分および物理試験結果は表-1~3のとおりである。

超硬セメントの化学成分および鉱物組成は表-1に示されるように、ポルトランドセメント中に含まれるC<sub>3</sub>S (3CaO・SiO<sub>2</sub>の略)を含むことは共通しているが、C<sub>2</sub>S (2CaO・SiO<sub>2</sub>の略)の量はわずかである。また、ポルトランドセメント中のC<sub>3</sub>A (3CaO・Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の略)の代わりに、超硬セメントではC<sub>11</sub>A<sub>7</sub>・CaF<sub>2</sub>を約20%、無水せっこうを約20%含むことを特徴としている<sup>8)</sup>。

次に物理的性質については、表-2に示されるように比重は3.04で普通セメントに比べて小さく、粉末度はブレン値で5500 cm<sup>2</sup>/g~6000 cm<sup>2</sup>/g程度できわめて高い。さらに、凝結時間はきわめて早く、凝結時間は常温で10~15分である。

また、強さに関しては、表-3に示されるように1:2モルタルで65%の場合、20°Cでは3時間の材令で約100 kgf/cm<sup>2</sup>の強さが得られており、普通セメントの場合とはかなり異なった強度特性を示している。

粗骨材は静岡県天竜川産の川砂利を粒度調整し、最大

表-2 セメントの物理試験結果 (1)

項目	比重	粉末度 比表面積 (m <sup>2</sup> /g)	凝 結 時 間 (分)	凝 結 時 間 (分)		セメント凝結 時 間 (分)	
				水 分 (%)	時 分	時 分	時 分
超硬セメント	3.03	5980	0.2	29.5	0 08	0 14	0 29
普通セメント	3.17	3220	1.0	27.0	2 22	3 20	

(注) 超硬セメントのセメント凝結試験はセメントを2%使用した。

表-3 セメントの物理試験結果 (2)

項目	フロー値	強 さ (kgf/cm <sup>2</sup> )											
		曲 げ 強 さ						圧 縮 強 さ					
		3h	6h	1d	3d	7d	28d	3h	6h	1d	3d	7d	28d
超硬セメント	232	26	29	32	36	53	77	97	144	226	272	386	473
普通セメント	248	-	-	0.2	32.8	48.3	70.0			44	133	228	415

(注) 超硬セメントの強さ試験はセメントを2%使用した。

表-4 骨材の物理試験結果

項目	ふるいを通らぬもの重量百分率										粗粒の比 (FAD)	比重	単位容積 (kg/m <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	実積率 (%)	
	30	25	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.15						
粗骨材	100	90	64	31	27	0	0	0	0	0	7.10	2.86	1664	0.7	64	
細骨材						100	87	69	45	20	6	2.73	3.59	1785	2.1	67

表-5 コンクリートの配合

コンクリートの 種別	目 標 スランパ (%)	水セメント 比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )					高 性能減水剤 (%)	セッター
				セメント	水	粗骨材	細骨材	高 性能減水剤		
J C 350	15 ±	36	45	350	127	856	1073	7.0	0.7	
J C 400		34	43	400	138	789	1073	8.0	0.8	
J C 450		32	41	450	144	691	1113	9.0	0.9	
O C 350		2.5	36	41	350	126	785	1180	6.3	—
O C 400		34	39	400	136	719	1180	6.4	—	
O C 450		32	37	450	144	657	1180	6.7	—	

骨材寸法 25 mm として使用した。

細骨材は岐阜県揖斐川産の粗砂と愛知県木曾川産の細砂を重量比7:3で使用した。その骨材試験結果を表-4に示す。

混和剤はK社製のポリアルキルアリルスルホン酸塩を主成分とする高性能減水剤 (MT-150, C×2%) を使用した。また、超硬セメントを使用する場合には適当なハンドリングタイムを必要とするので、O社製のセッター (C×0.1~0.3%) を使用した。

配合は軟練り、高強度コンクリートに使用されることを想定して、セメント量、高性能減水剤の使用量、ワーカビリティ等を決定し、試し練りより求めた。所要のスランパを15±2.5 cm、単位セメント量を350 kg/m<sup>3</sup>、

400 kg/m<sup>3</sup>, 450 kg/m<sup>3</sup>, W/C をそれぞれ 36 %, 34 %, 32 % とし, 同じワーカビリティを得るための単位水量および最適細骨材率を決定した。

普通コンクリートの配合も超速硬コンクリートと同様に決定した。しかし, 高性能減水剤を超速硬コンクリートと等量使用すると, 減水効果が大きいため, 超速硬コンクリートよりも W/C が小さくなる。したがって, 高性能減水剤の使用量を減じて調節することにより, 超速硬コンクリートの水セメント比と同一になるようにした。本実験における普通コンクリートの C=350 kg/m<sup>3</sup>, 400 kg/m<sup>3</sup>, 450 kg/m<sup>3</sup> に対する高性能減水剤の添加量はそれぞれ C×1.8 %, 1.6 %, 1.5 % である。このようにして求めた結果を表—5 に示す。なお, 表中の記号 JC とは超速硬セメントを用いたコンクリートを表わし, OC とは普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートを表わす。

## (2) 供試体寸法および形状

供試体の寸法および形状は, 外部の温度が短時間のうちに内部まで伝わるように, 直径 10 cm, 高さ 20 cm の円柱形供試体とした。

## (3) 練りませおよび締固め方法

コンクリートの練りませは 100 l のパンタイプ強制練りミキサーを使用し, 練りませ時間を 3 分間とした。

材料の投入順序および練りませは, 細骨材の表面水と超速硬セメントが投入時に水和作用を起こさないように, 粗骨材と細骨材を先に入れ, その後水を入れて 10 秒間練りませた後, セメントを入れて 3 分間練りませた。

供試体の締固めは, φ10 cm×20 cm の型枠に 2 層に分けて, 振動数 8000 rpm の棒型振動機により, 1 層に約 10 秒間の振動締固めを行った。

## (4) 養生装置

供試体の養生は, 20°C の標準養生のみ恒温恒湿室 (湿度 85 % 以上) を使用し, その他に関しては恒温槽 (タ

パイ社製, 内容積 408 l, 冷凍方式: 機械式単段冷凍方式, 温度調節精度 ±0.3°C, 温度範囲 -40°C ~ +85°C) を使用した。

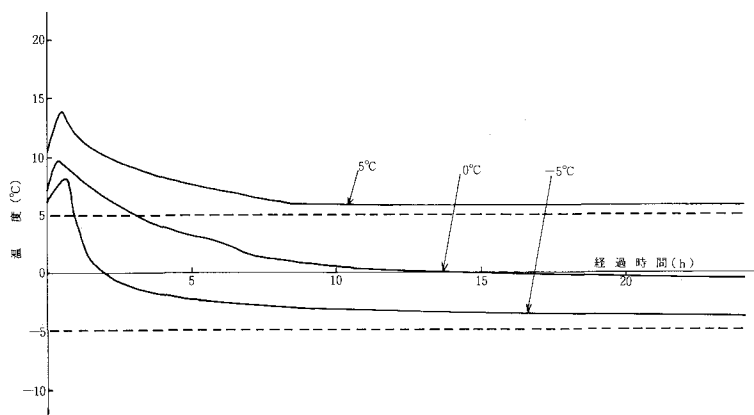
## (5) コンクリートの内部温度の測定と温度測定装置

超速硬コンクリートを恒温槽で養生する場合, 恒温槽が示す温度を供試体の温度とすることは必ずしも正確な温度とはいえない。積算温度を計算する場合には, 供試体の受ける正確な温度履歴を知る必要がある。本実験においては, 供試体の中央部に熱電対を埋め込み, 供試体の内部温度を測定した。供試体中心部の温度を, その供試体の内部温度とした理由は, この程度の寸法の供試体では, 測定位置の相違が温度履歴に現われず, どの位置で計測しても, 供試体の中心部の温度履歴とはほぼ一致することを確認したからである。用いた測定装置は CHI-NO 製電子式温度記録計 (記録方式: 印点式, 測定方式: 熱電式, 指示精度: 測定範囲の ±0.5 %) である。

## (6) 養生方法および圧縮強度試験

超速硬コンクリートはその特性を生かして特に寒冷期に使用される場合が多い。したがって, 実験 I は寒冷期に使用することを主体の養生方法とした。

実験 I は低温で打ち込まれた超速硬コンクリートが直ちに低温にさらされる場合の強度発現性状と, 若材令に凍結を受け, その後 +5°C の低温で水中養生される場合の強度発現性状を明らかにするため, 2 種類の養生を行った。その第 1 の低温養生方法における供試体内部の温度履歴を示したものが図—1 である。はじめに +5°C で供試体を打設し, 水分が蒸発しないように, 型枠上面をビニール袋で密封し, 直ちに型枠のまま恒温槽に 1 日間保管した。1 日後脱型し, 養生温度に近い水 (0°C 養生および -5°C 養生の場合は +2°C 程度の水を使用) とともに供試体を医療用水枕の中に入れ, 再び恒温槽にて所定の温度で養生した。ここで行った低温養生温度は +5°C, 0°C, -5°C の 3 種類である。



図—1 C=450, W/C=32 % の供試体内部の温度履歴 (第 1 の養生方法)

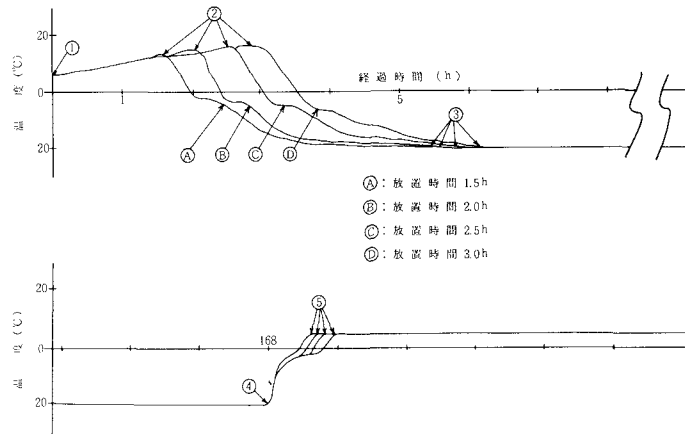


図-2 C=400, w/C=34% の供試体内部の温度履歴 (第2の養生方法)

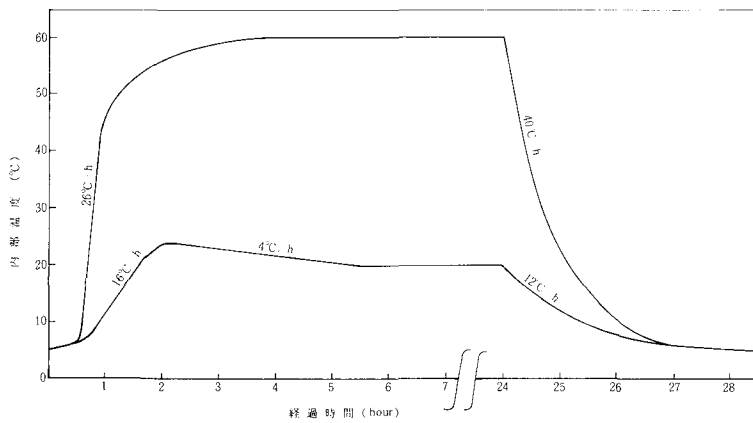


図-3 コンクリート内部温度履歴 (実験Ⅲ 打込み温度5°C)

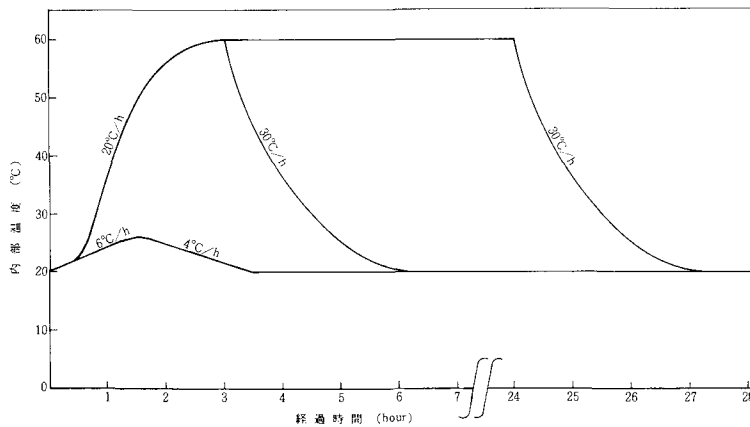


図-4 コンクリート内部温度履歴 (実験Ⅲ 打込み温度20°C)

強度試験を行った材令は、2時間、4時間、6時間、1日、3日、7日、14日、28日である。

第2の養生方法における供試体内部の温度履歴を示したものが図-2である。打込み温度は第1の養生方法と

同様+5°Cである。打込み後恒温槽に保管するまでの放置時間を1.5時間、2.0時間、2.5時間、3.0時間、3.5時間とした。保管場所は気温約5°Cの日陰とした。そして所定の放置時間の後に、型枠のまま-20°Cの恒温

槽に搬入し、供試体を凍結させた。1日後脱型し、+2°C程度の水とともに供試体を医療用水枕の中に入れ、再び-20°Cの恒温槽で材令7日まで凍結させ、以後は材令28日まで+5°Cの水中で養生した。強度試験の材令は6時間、1日、7日、28日であり、この場合の凍結した供試体は凍結を完全に解いてから試験を行った。

実験Ⅱは標準養生した場合の強度発現性状を明らかにするための実験である。供試体を20°Cで打ち込み、20°Cで材令1日まで湿空養生を行い、脱型の後20°Cの恒温水槽で水中養生を行った。強度試験の材令は2時間、4時間、6時間、1日、3日、7日、28日である。

比較のために行った普通ポルトランドセメントを用いた同品質のコンクリートはすべて標準養生とし、強度試験の材令は1日、2日、3日、4日、5日、6日、8日、10日、12日、14日、16日、18日、20日、24日、28日とした。

実験Ⅲは加熱養生が行われた場合の強度発現性を知るための実験である。

図-3は練り上がり温度5°Cの場合のコンクリート内部の温度履歴であり、図-4は20°Cの場合の温度履歴である。図-3、4とも、自動温度記録計で記録紙にプロットした測点を結んだものである。打込み温度5°Cおよび20°Cは、コンクリートの冬期打設および常時打設を想定したからである。打込み後水分の蒸発を防ぐために供試体をビニール袋で覆い、30分間はそれぞれの打込み温度に保った。その後、打込み温度5°Cの供試体は、60°Cの恒温槽と20°Cの恒温恒湿室に保管し、1日間加熱養生を行った。打込み温度20°Cの供試体は、同様に60°Cの恒温槽に保管し3時間および1日間加熱養生を行った。ここで加熱温度を60°Cとした理由は、一般のコンクリートの蒸気養生の最適温度が55°C~75°Cであり、85°C以上の温度は有害とされているからである<sup>9)</sup>。

強度試験の材令は打込み温度5°Cの場合が1時間、3時間、5時間、10時間、1日、10日、28日であり、20°Cの場合が2時間、3時間、1日、7日、28日であった。

なお、すべての圧縮強度試験はイオウキャッピングを行い、JIS A 1108に準じて行っているが、供試体が室温と異なる場合にはキャッピングや圧縮強度試験を行う間に供試体の温度は変化する。したがって、この温度変化が積算温度にどの程度影響するかについて明らかにしておく必要がある。

ここで、本実験において室温と最も異なる加熱養生の場合で考察することにする。図-5は加熱養生途中で圧縮強度試験を行う場合の積算温度の減少量を示してい

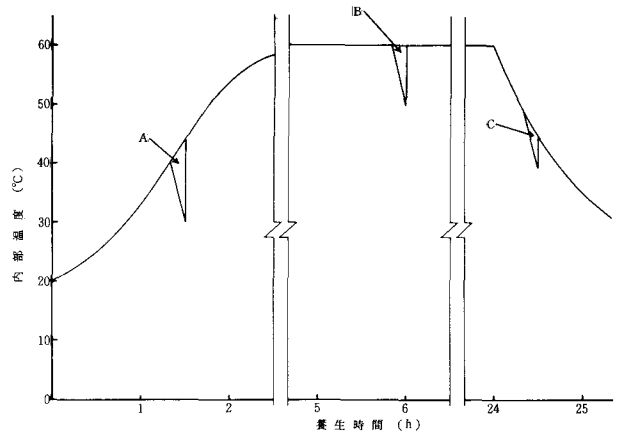


図-5 圧縮試験時の積算温度の減少量(実験Ⅲ)

る。

供試体を恒温槽から取り出して、イオウキャッピングを行い、直ちに圧縮強度試験を行うまでの所要時間は3本で約10分間である。また、その10分間で試験用供試体内部の下降温度は最大20°Cであった。したがって、図-5の三角形部分が①：上昇中、②：平衡中、③：下降中に受ける積算温度の減少量ということになる。この図-5において積算温度を計算すると①=2.3°C・h、②=1.7°C・h、③=1.0°C・hとなる。つまり、最大でも2.3°C・hの減少である。この値は全体の積算温度を考える場合には無視できる値であるので、本実験においては、キャッピングおよび圧縮強度試験における積算温度の変化量は無視した。

### (7) 積算温度法

セメントの水和反応は、材令と養生温度により著しい影響を受ける。

そこで、コンクリートの強度を材令と養生温度の関係で表現しようとする試みが多くの研究者によって行われてきた<sup>10)</sup>。その代表的な考え方が積算温度(マチュリティ)である。これは強度を養生温度と養生時間の積として表現しようとするものであり、積算温度法とよばれる。すなわち積算温度が一定ならば、温度と時間の組合せで一定の強度を与えるとする考え方である。

積算温度を表わす場合には温度の基準点として、どのような温度を採用するかについては、いくつかの提案があるが、-10°Cを採用するのが定説となってきている。この基準温度は、この温度以下では水和反応が停止することを意味する物理的意味をもっている。よって、土木学会RC示方書では、解説に積算温度の一般式として式(1)を掲げている。

$$M = \sum_0^t (\theta + A) \Delta t \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $M$ ：積算温度 ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ または $^{\circ}\text{C}\cdot\text{時}$ )  
 $\theta$ ： $\Delta t$  時間中のコンクリート温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $A$ ：定数で一般に $10^{\circ}\text{C}$  が用いられる。  
 $\Delta t$ ：時間 (日または時)

ゆえに、本実験には  $A$  を  $10$ 、 $\Delta t$  を時間にとった式 (1) を採用した。

積算温度 ( $M$ ) は、温度記録計より記録された温度履歴より求めた。 $-10^{\circ}\text{C}$  を基準に精度  $0.08\%$  のプランニメーターを使用して測定した。所定材令までの積算温度はプランニメーター 5 回の平均値とした。

したがって、実験 I の  $-20^{\circ}\text{C}$  養生における積算温度式の適用は供試体の温度履歴曲線を  $-10^{\circ}\text{C}$  のところで線を引き、 $-10^{\circ}\text{C}$  以上の面積をプランニメーターで測定し、これを積算温度とした。

### 3. 結果および考察

#### (1) 強度発現特性

図-6~図-8 は超速硬コンクリートおよび普通コンクリートのセメント量  $350\text{ kg/m}^3$  ( $W/C=36\%$ )、 $400\text{ kg/m}^3$  ( $W/C=34\%$ )、 $450\text{ kg/m}^3$  ( $W/C=32\%$ ) の各養生温度別の積算温度と圧縮強度の関係を示したものである。実験 I~III の低温、常温 (標準)、加熱養生を施したすべての供試体に対し、積算温度法を適用した。

これまでの研究より、一般のコンクリートにおける積算温度と圧縮強度の関係は、 $\sigma = A + B \log M$  (ここに  $M$ ：積算温度、 $A, B$ ：実験定数) という 1 つの積算温度と強度の式で近似できることがわかっている<sup>11)</sup>。本実験においても普通コンクリートについてはそのことはいえるが、超速硬コンクリートの場合には、積算温度  $150$  ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ ) 付近で、明確な変曲点 (強度増進勾配が変化

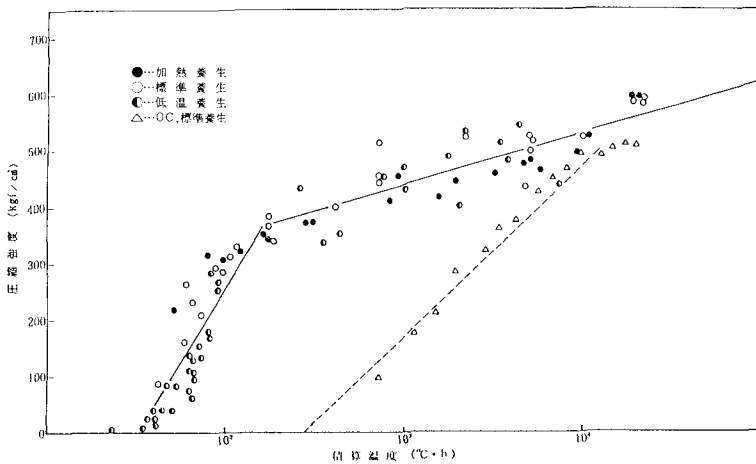


図-6  $C=350\text{ kg/m}^3$ 、 $W/C=36\%$  の超速硬コンクリートおよび普通コンクリートの積算温度と圧縮強度の関係

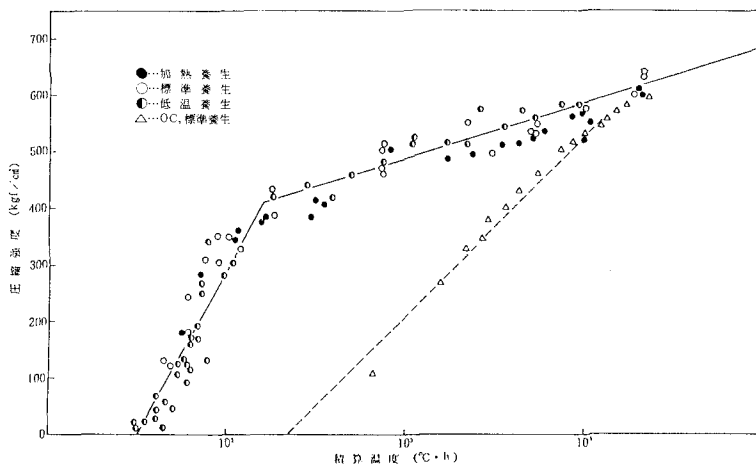
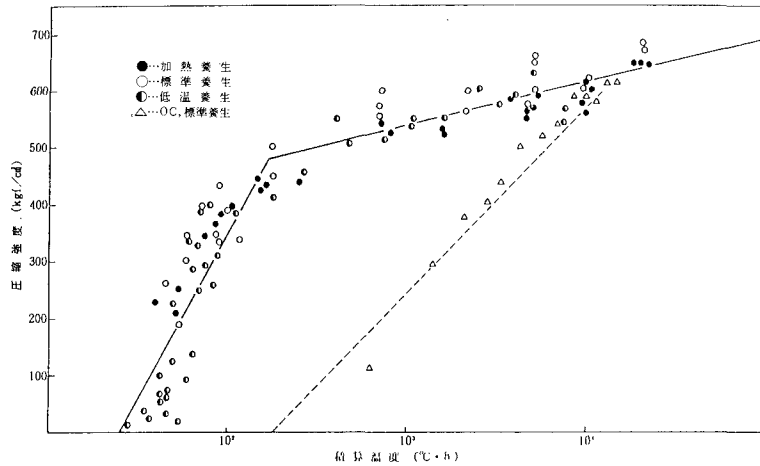


図-7  $C=400\text{ kg/m}^3$ 、 $W/C=34\%$  の超速硬コンクリートおよび普通コンクリートの積算温度と圧縮強度の関係



図—8 C=450 kg/m<sup>3</sup>, W/C=32%の超速硬コンクリートおよび普通コンクリートの積算温度と圧縮強度の関係

表—6 回帰式と相関係数

コンクリートの種類	回 帰 式	相 関 係 数	
J C = 350	M < 150	$\sigma = -800 + 528 \log M$	0.794
	M > 150	$\sigma = 165 + 91 \log M$	0.600
J C = 400	M < 150	$\sigma = -891 + 591 \log M$	0.864
	M > 150	$\sigma = 195 + 98 \log M$	0.833
J C = 450	M < 150	$\sigma = -814 + 583 \log M$	0.691
	M > 150	$\sigma = 305 + 79 \log M$	0.567
O C = 350	$\sigma = -740 + 304 \log M$	0.964	
O C = 400	$\sigma = -742 + 319 \log M$	0.975	
O C = 450	$\sigma = -716 + 322 \log M$	0.934	

する点)が認められるため、2つの関係式で近似することが適当であると思われる。2つの関係式で近似する理由については(3)で述べることにする。図—6～図—8からわかることは、養生温度が異なっても、強度発現性状の差異は認められないということである。このことから、超速硬コンクリートの水セメント比32%～36%のコンクリートも、他のコンクリートと同様、積算温度が一定であれば、強度はほぼ等しくなるとことが明らかとなった。

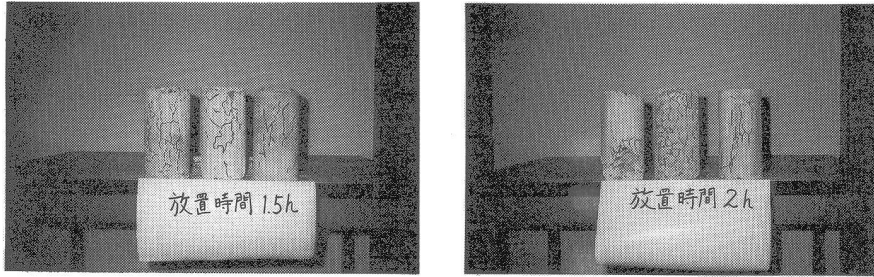
また、超速硬コンクリートの強度発現の開始時期は積算温度で約30°C・hであるのに対し、普通コンクリートは約280°C・hである。このことから比較しても、超速硬コンクリートはきわめて早い時期より強度を発現することがわかる。

表—6にそれぞれの回帰式と相関係数を示す。これらの回帰式は相関係数が0.57～0.98とかなり高いことから、高い適合性を示しているといえる。

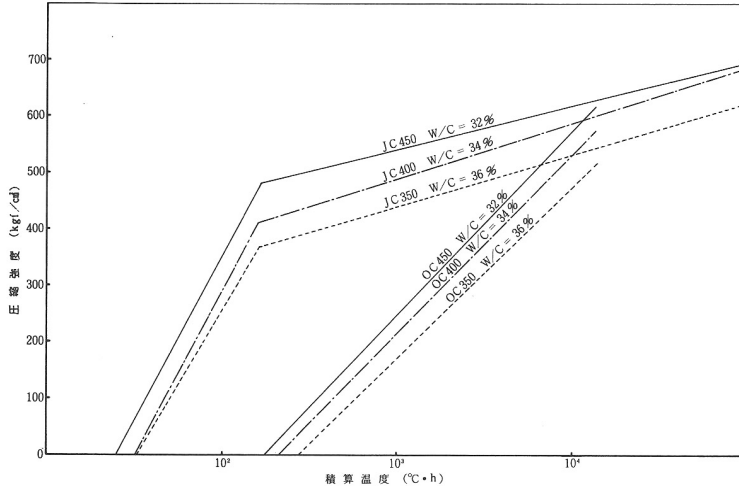
しかし、実験Iで、低温で打設し1.5時間～3時間経過した後、-20°Cで凍結させ、7日後に融解させる第2の養生方法の場合には、積算温度と強度の式に適合し

ない場合があることが認められた。実験Iの第2の養生方法において、放置時間3時間の供試体は、いずれのセメント量のコンクリートも積算温度と強度の式に適合した。しかし、単位セメント量450 kg/m<sup>3</sup>のコンクリートでは放置時間2時間以下、単位セメント量350 kg/m<sup>3</sup>、400 kg/m<sup>3</sup>のコンクリートでは放置時間2.5時間以下の供試体において、材令28日の強度が積算温度と強度の式に適合しなかった。このときの適合しない場合の最大の凍結直前強度はセメント量350 kg/m<sup>3</sup>(W/C=36%)、400 kg/m<sup>3</sup>(W/C=34%)、450 kg/m<sup>3</sup>(W/C=32%)で、それぞれ72.9 kgf/cm<sup>2</sup>、77.4 kgf/cm<sup>2</sup>、121 kgf/cm<sup>2</sup>であった。さらに、水和初期の水中養生時の強度、すなわち図—2の⑤の時点の強度を示せば、セメント量350 kg/m<sup>3</sup>、400 kg/m<sup>3</sup>、450 kg/m<sup>3</sup>が、それぞれ153 kgf/cm<sup>2</sup>、120 kgf/cm<sup>2</sup>、18.8 kgf/cm<sup>2</sup>であった。また、適合する場合の最小の凍結直前強度はセメント量350 kg/m<sup>3</sup>、400 kg/m<sup>3</sup>、450 kg/m<sup>3</sup>で、134 kgf/cm<sup>2</sup>、161 kgf/cm<sup>2</sup>、199 kgf/cm<sup>2</sup>であった。同様に、水和初期の水中養生時の強度は、セメント量350 kg/m<sup>3</sup>、400 kg/m<sup>3</sup>、450 kg/m<sup>3</sup>が、それぞれ283 kgf/cm<sup>2</sup>、334 kgf/cm<sup>2</sup>、344 kgf/cm<sup>2</sup>であった。

ここで、凍結直前強度の低い供試体が材令28日において著しく強度阻害を受ける理由について考察する。実験Iの第2の養生方法の場合には、材令7日で-20°Cの凍結を解いてその後は材令28日まで5°Cの水中養生を行っている。積算温度と強度の式に適合しない供試体は写真—1のように供試体に多くのクラックを生じ強度低下を起こした。クラックを生じる原因としては、コンクリート中の遊離水が凍結して生じる場合と、エトリンガイトの生成による膨張圧のために生じる場合とが考えられる。コンクリート中の遊離水が凍結してクラックを



写真—1 実験 I の第 2 の養生方法におけるクラック (材令 28 日,  $C=400 \text{ kg/m}^3$ )



図—9 超速硬コンクリートと普通コンクリートの近似直線

生じるならば材令 7 日において凍結を解いたときに現われるはずである。しかし、このときには認められず、その後水中養生を行った材令 28 日の供試体において多くのクラックを生じた。

したがって、クラックの原因は凍結を解かれた超速硬コンクリートが  $5^\circ\text{C}$  の水と接することにより、急速に水和が進みそれに伴い多くのエトリングaitを生成して、そのための膨張圧のためにクラックを生じたものと考えられる。

図—9 は各单位セメント量における超速硬コンクリートと普通コンクリートの近似直線を 1 つのグラフに表わしたものである。超速硬コンクリートを単位セメント量別に比較すると、単位セメント量が増加する、いかえれば水セメント比が減少するに従って強度発現の時期は早くなり、圧縮強度が高くなることを確認できる。しかし、水セメント比が変化しても、変曲点の位置は変化せず、ほぼ  $150^\circ\text{C}\cdot\text{h}$  のところにある。

そして、その変曲点の前と後での強度差を  $W/C=36\%$  (単位セメント量  $350 \text{ kg/m}^3$ ) と  $W/C=32\%$  (単位セメント量  $450 \text{ kg/m}^3$ ) とで比較すると、変曲点前では  $60\sim 120 \text{ kgf/cm}^2$  の強度差を生じ、その後では  $70\sim 120$

$\text{kgf/cm}^2$  の強度差がある。

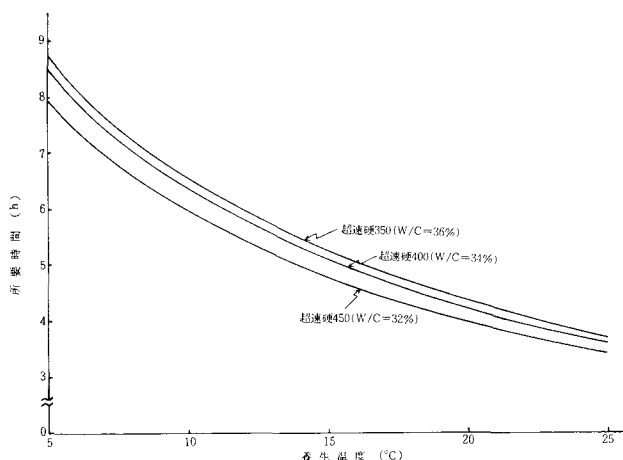
また、普通コンクリートの  $W/C=36\%$  と  $W/C=32\%$  の強度差は  $60\sim 100 \text{ kgf/cm}^2$  であった。

次に、超速硬コンクリートの近似直線の勾配について考えると、たとえばセメント量  $400 \text{ kg/m}^3$  では、積算温度  $30^\circ\text{C}\cdot\text{h}\sim 150^\circ\text{C}\cdot\text{h}$  までの  $120^\circ\text{C}\cdot\text{h}$  上昇する間に  $400 \text{ kgf/cm}^2$  の強度上昇を示しているのに対し、変曲点後  $150^\circ\text{C}\cdot\text{h}\sim 20, 160^\circ\text{C}\cdot\text{h}$  まで上昇する間の強度発現は  $200 \text{ kgf/cm}^2$  である。このことから、超速硬コンクリートは変曲点までの強度増進がいかに大きいかかわかる。

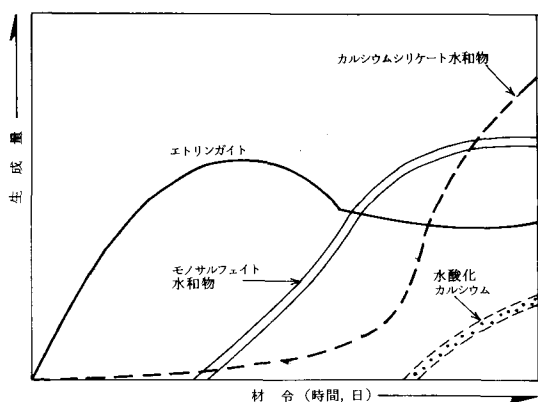
## (2) 養生温度と変曲点までの所要時間

電子式温度記録計より測定した供試体中心部の温度履歴をもとに変曲点までの所要時間を求めたものが図—10 である。この図から練り上がり温度と養生温度を一定とした場合の  $5^\circ\text{C}$  から  $25^\circ\text{C}$  までの範囲で、変曲点までの所要時間を知ることができる。たとえば、単位セメント量  $400 \text{ kg/m}^3$  ( $W/C=34\%$ ) のコンクリートを  $5^\circ\text{C}$  で打ち込み、 $5^\circ\text{C}$  で養生する場合には、変曲点までの所要時間は 8 時間 30 分であるのに対し、 $20^\circ\text{C}$  の場合には 4 時間 15 分であり、 $5^\circ\text{C}$  の場合に比較して  $1/2$  の時間で変曲点に達することがわかる。この図を使用することに





図一10 養生温度と変曲点までの所要時間との関係



図一11 超速硬セメントの水和物生成過程<sup>2)</sup>

より、練り上がり温度と養生温度が一定の場合の変曲点までの所要時間を知ることができる。ただし、図一10は本研究で使用した供試体寸法の場合のように、コンクリートが少量で周囲の温度変化を受けやすい場合に適用できるものである。

### (3) 強度発現特性に対する化学的考察

超速硬コンクリートの場合には初期に急激に強度が増進する領域と、その後緩やかに増進する領域が存在する。その境界では変曲点が生じたので、2つの関係式で近似することを行った。ここでは、この理由について化学的に考察する。内川ら<sup>12)</sup>の研究によると超速硬セメントの水和はその主成分である  $C_{11}A_7 \cdot CaF_2$  と  $CaSO_4$ 、 $C_3S$  の水和に依存し、図一11のような水和過程を有している。

したがって、超速硬セメントは注水後、カルシウムフルオロアルミネート ( $C_{11}A_7 \cdot CaF_2$ ) と無水せっこう ( $CaSO_4$ ) とが水和して、エトリンガイト ( $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ) とモノサルフェイト水和物 ( $C_3A$ ・

$CaSO_4 \cdot 12H_2O$ ) を生成する。その後カルシウムシリケート (主としてエーライト  $C_3S$ ) が水和して、けい酸カルシウム (C-S-H) と水酸化カルシウム [ $Ca(OH)_2$ ] を生成するという水和過程を経る。超速硬セメントの早期強度の発現は主としてエトリンガイトの活発な生成によるものであり、その後の強度の発現はエーライトの水和による C-S-H の生成に依存している。

それゆえ、超速硬コンクリートの積算温度と圧縮強度において2つの関係式が得られたのは、超速硬セメントの生成時期を異にする2種類の水和物、すなわちエトリンガイトが変曲点の前をけい酸カルシウムが後を主に受け持っているからである。

また、変曲点が  $150^\circ C \cdot h$  付近において現われた理由としては、内川ら<sup>12)</sup>の研究によると、 $20^\circ C$  養生を行った場合には  $180^\circ C \cdot h$  まではエトリンガイトのみが生成していて、 $720^\circ C \cdot h$  になるとエトリンガイトにモノサルフェイト、あるいは C-S-H が混在して生成するとしている。変曲点はエトリンガイトからモノサルフェイトあるいは C-S-H に移行する点と考えられるので、内川らの研究と本実験の図一5～図一7の結果から推定して  $150^\circ C \cdot h$  付近であろうと考えた。

したがって、近似式を求める場合  $150^\circ C \cdot h$  未満の値と  $150^\circ C \cdot h$  以上の値に区別して求めた。

## 4. 結 論

超速硬セメントを各種の工事に使用する場合には、はじめに超速硬コンクリートがどのような強度発現性状を示すかを知る必要がある。

したがって、本研究は高性能減水剤を用いた水セメント比 32～36% の超速硬コンクリートが低温、常温、加熱養生下でどのような強度発現性状を示すかを実験により明らかにしたものである。また、超速硬コンクリートの強度発現特性を、普通コンクリートと比較することにより明らかにするとともに、その理由を化学的に考察した。

(1) 積算温度と圧縮強度の関係より、超速硬コンクリートは一般のコンクリートと同様、養生条件に関係なく積算温度が一定であれば圧縮強度は一定であるという積算温度と強度の式が成り立つ。

しかし、実験 I の第2の養生方法においては、積算温度と強度の式に適合する場合と、適合しない場合とがあることを確認した。適合する場合の最小の凍結直前強度は、セメント量  $350 \text{ kg/m}^3$ 、 $400 \text{ kg/m}^3$ 、 $450 \text{ kg/m}^3$  で、それぞれ  $134 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $161 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $199 \text{ kgf/cm}^2$  であり、

適合しない場合の最大の凍結直前強度は  $72.9 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $77.4 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $121 \text{ kgf/cm}^2$  であった。したがって、実験Ⅰの第2の養生方法の材令28日強度において、クラック発生を防止するためには、いずれのセメント量の場合も凍結直前強度を  $130 \text{ kgf/cm}^2$  程度以上発現している必要があるといえる。クラックの原因は凍結を解かれた超硬コンクリートが低温 ( $5^\circ\text{C}$ ) の水と接することにより、急速に水和が進み、それに伴い多くのエトリングaitを生成して、そのための膨張圧のためにクラックを生じたものと考えられる。

(2) 超硬コンクリートの積算温度と圧縮強度の関係は、積算温度を対数にとった場合、普通コンクリートと違って  $150^\circ\text{C}\cdot\text{h}$  付近において変曲点があり、2つの積算温度と強度の式で表わすことが適当である。

積算温度と圧縮強度の関係において、2つの関係式となる理由は、超硬セメントの強度発現過程において、生成時期を異にする2種類の水和物、すなわちエトリングaitが変曲点の前を、けい酸カルシウムが後を主に受け持っているからである。

(3) 超硬コンクリートの強度増加量は変曲点までは急激であり、変曲点を過ぎると緩慢となる。

つまり、セメント量  $400 \text{ kg/m}^3$  ( $W/C=34\%$ ) の場合では、強度発現開始時期 (積算温度約  $30^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ ) より変曲点 (約  $150^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ ) までは  $400 \text{ kgf/cm}^2$  の強度増加しているのに対して、変曲点から  $20, 160^\circ\text{C}\cdot\text{h}$  ( $20^\circ\text{C}$  で28日養生に相当) までの間では、わずか  $200 \text{ kgf/cm}^2$  の強度増加しかしていない。このことから、超硬コンクリートの変曲点までの強度発現がいかに大きいかかわかる。

(4) 積算温度と強度の式は、養生方法が異なってもよく近似することから、現場強度を推定するのにかなり効果的である。

また、積算温度と強度の式を使用すれば目標とする強度における養生温度と時間の設定ができるので、実施工に非常に有用である。実際には、変曲点までの時間と養生温度を確保すれば十分実用に供する強度を得ることができる。

本論文は著者の1人である中嶋清実が昭和62年1月16日付で東京大学より工学博士の学位を受けた学位論文<sup>14)</sup>の内容の一部である。

謝辞：この論文をまとめるにあたり、東京大学教授岡村甫博士には貴重なご助言を頂き、深く感謝の意を表します。

また、本研究を遂行するうえで、多大なご協力を頂きました名古屋工業大学および豊田工業高等専門学校のコンクリート研究室卒業研究生の諸君、および貴重な資料の提供とご支援を賜った小野田セメント中央研究所主席研究員大塩明博士、小野田ケミコ株式会社副部長仰木肇氏、同社技師岡田光芳氏、住友セメント株式会社中央研究所研究員峰松敏和博士に対し厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 河野・堅川・内川・植田・加藤：ジェットセメントの製品用コンクリートへの利用に関する研究，セメント・コンクリート，No.307，pp.22~33，1972. 9.
- 2) 平賀・倉林・毛見：レギュレートッド・セット・セメントを用いたコンクリートの凝結，強度に関する研究，セメント技術年報，26，pp.365~367，1972.
- 3) 中嶋清実：超硬セメントコンクリートの養生温度が強度におよぼす影響，セメント技術年報，31，pp.421~424，1977.
- 4) 鬼丸・古賀・高橋：補修用超硬コンクリートの特性と使用上の問題点，日本道路公団試験所報告，pp.45~57，1985.
- 5) 飯岡・検貝・細田：補修用超早強性コンクリートに関する調査・研究，日本道路公団試験所報告，pp.152~164，1976.
- 6) 大塩・遠藤・吉田：各種混和剤を用いたジェットセメントコンクリートの配合等に関する試験，小野田研究報告，Vol.33，No.106，pp.64~88，1981.
- 7) 吉田・中嶋・仰木：高性能減水剤を用いた超硬コンクリートによる寒中コンクリートの研究，セメント技術年報，38，pp.118~121，1984.
- 8) 大塩 明：特殊な材料を用いたコンクリート (講座その1) I-1，超硬セメント，コンクリート工学，Vol.23，No.8，pp.88~89，1985.
- 9) 近藤・坂：コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，pp.295~296，1965.
- 10) 洪・長島：寒中コンクリート，技術書院，pp.63~69，1968.
- 11) Plowman, J.M. : Maturity and the Strength of Concrete, Magazin of Concrete Research, Vol.8, No.22, pp.13~22, 1956.3.
- 12) 内川・宇智田：加熱養生における超硬セメントの水和，小野田研究報告，Vol.28，No.95，pp.16~29，1976.
- 13) 鎌尾・浅野・小出：超硬セメントを用いたコンクリートへの高性能減水剤の利用，セメント技術年報，28，pp.267~271，1974.
- 14) 中嶋清実：超硬セメントコンクリートの緊急工事および寒中工事への利用に関する基礎研究，東京大学学位論文，pp.31~54，1986.1.

(1987.6.18・受付)