

**投稿論文 (和文)**  
**PAPERS**

# 超速硬セメントコンクリートの低温時の強度 発現特性と耐久性に関する研究

中嶋清実\*・吉田弥智\*\*

本研究は超速硬セメントを寒中コンクリートに使用することを想定して行ったものである。本研究により、コンクリートを若材令に $-20^{\circ}\text{C}$ で凍結させ、凍結を継続させた場合の強度発現性状と、 $-20^{\circ}\text{C}$ 凍結を材令途中で解いた場合の回復強度を求めた。さらに、凍結融解開始時の圧縮強度と凍結融解の繰返しに対する抵抗性の関係を明らかにした。また、超速硬セメントコンクリートを若材令で凍結させ、融解時に水と接触させるとクラックが発生し、強度低下を起こすが、その原因を明らかにし、その防止方法を述べた。

**Key Words**: regulated set cement, strength developing characteristics, freeze-thaw resistance, cold weather concrete.

## 1. ま え が き

建設事業量の急上昇、慢性的な建設技術者不足が叫ばれる今日、工事の省力化は極めて重要な問題であり、今後益々早強性のセメントを用いたコンクリートの需要が増すものと思われる。早強性の要求に応じて、我国では1971年より超速硬セメントが市販され、その需要は年々伸びてきている。超速硬セメントは低温度でも強度発現が著しいこと、初期に高い水和熱を発生させる性質を持っていること、などの理由から各種の緊急工事、寒中工事に使用されてきた。

これまで緊急工事用としては多くの研究<sup>1)~5)</sup>がなされているが、寒中コンクリートの一連の研究となると、著者らの研究<sup>6)</sup>が一編あるのみで、まだ実施されていないのが現状である。

著者らの発表した「超速硬セメントによる寒中コンクリートの研究」では、①超速硬セメントの温度による強度特性、②硬化初期に凍結を受けた場合の凍結が強度におよぼす影響、③若材令でコンクリートが急速凍結融解の繰返しを受けた場合の抵抗性、などが明らかにされている。

しかしながら、この研究を寒中工事用資料として使用するためには、さらに発展させる必要性が生じたため、以下の研究を行い、これをまとめたものである。

① 超速硬コンクリートを寒中コンクリートに使用する場合、高性能減水剤を用いるのが一般的になっているので、プレーンコンクリート、AEコンクリートに加えて、高性能減水剤を用いたコンクリートについても研究を行った。

② 超速硬コンクリートを寒中工事に使用する場合、

強度発現過程に実用に供される場合がある。その場合の凍結融解の繰返しに対する耐久性については、まだ明らかにされていない。したがって、本研究で凍結融解開始時の圧縮強度と耐久性の関係を明らかにした。

③ 超速硬コンクリートを若材令で凍結させ、融解時に水と接触させると、クラックが入り、著しく強度阻害を受けるが、その原因を追求し、その防止対策を述べた。

## 2. 実験概要

### (1) 実験シリーズ

実験Ⅰは、若材令に $-20^{\circ}\text{C}$ で凍結させ、そのまま凍結を継続させ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。一般に、コンクリートが若材令に凍結を受けた場合、コンクリートの圧縮強度が約 $50\text{ kgf/cm}^2$ 以上あれば凍害を受けることが少ないとされている。超速硬コンクリートを若材令で凍結させることによって凍害の程度を知るとともに、凍害を受けないためには、どの程度の強度を必要とするのか明らかにしようとするものである。

実験Ⅱは、若材令に $-20^{\circ}\text{C}$ で24時間凍結させ、以後 $+4^{\circ}\text{C}$ の低温で水中養生を行い融解後の回復強度を求めようとする実験である。若材令に凍結による強度阻害を受けたコンクリートが融解後、低温に保持された場合に、どの程度の回復強度を期待できるかを知らうとするものである。

実験Ⅲは、凍結融解試験を行う以前に、供試体の養生温度を2種類( $+20^{\circ}\text{C}$ ,  $+4^{\circ}\text{C}$ )、材令を7種類(1日, 2日, 4日, 7日, 10日, 14日, 18日)変化させた場合の凍結融解試験である。この実験により、十分な耐久性を得るためには、凍結融解の繰返しを受ける前にどの程度の強度が必要であるかを知らうとするものである。

実験Ⅳは、超速硬コンクリートを若材令で凍結させ、水と接触させて融解させた場合、供試体表面にクラック

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

\*\* 正会員 工博 名古屋工業大学学長

表-1 コンクリートの配合

コンクリートの種類	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/A (%)	スランブの範囲 (cm)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				セッター (g/m <sup>3</sup> )	A E 剤 (cc/m <sup>3</sup> )	高性能減水剤 (cc/m <sup>3</sup> )
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G			
JC 300	1.5	57	41	7.5±1.5	161	300	765	1141	900	-	-
JC 350	1.5	48	39	7.5±1.5	168	350	703	1139	1050	-	-
JC 400	1.5	44	37	7.5±1.5	170	400	644	1136	1200	-	-
JC 450	1.5	40	35	7.5±1.5	181	450	591	1136	1350	-	-
JAC 300	4.5±1.0	51	41	7.5±1.5	153	300	727	1092	900	25.0	-
JAC 350	4.5±1.0	45	38	7.5±1.5	158	350	667	1122	1050	29.0	-
JAC 400	4.5±1.0	41	35	7.5±1.5	163	400	594	1143	1200	66.0	-
JAC 450	4.5±1.0	40	35	7.5±1.5	182	450	546	1097	1350	74.0	-
JRC 350	2.5±0.5	33	45	7.5±1.5	117	350	881	1022	700	-	7000
OC 300	1.5	54	45	7.5±1.5	161	300	839	1062	-	-	-
OC 350	1.5	47	42	7.5±1.5	164	350	763	1091	-	-	-
OC 400	1.5	42	39	7.5±1.5	168	400	890	1116	-	-	-
OAC 300	4.5±1.0	50	42	7.5±1.5	150	300	763	1090	-	22.5	-
OAC 350	4.5±1.0	44	39	7.5±1.5	153	350	690	1117	-	26.2	-
OAC 400	4.5±1.0	39	36	7.5±1.5	157	400	618	1137	-	30.0	-
ORC 350	2.0±0.3	37	41	7.5±1.5	128	350	796	1087	-	-	7000

が発生し、著しく強度阻害を受けるが、その原因を明らかにし、さらにクラックの防止対策について検討したものである。

(2) 使用材料とコンクリートの配合

セメントはO社製の超速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。

粗骨材は静岡県天竜川産の川砂利(比重=2.66, FM=7.10, 最大寸法=25mm)を使用した。

細骨材は岐阜県揖斐川産の川砂と愛知県木曾川産の川砂を重量比7:3の割合で混合した混合砂(比重=2.59, FM=2.73)を使用した。

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。さらにAE剤については、T社製のアルキルサルフェイト系AE剤を1%の水溶液にして使用した。また、超速硬コンクリー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社製の専用凝結遅延剤ジェットセッター(C×0.1~0.3%)を使用した。

超速硬コンクリートおよび普通コンクリートの配合は、試し練りより決定した。所要のスランブを7.5±1.5cm、空気量の範囲を、プレーンコンクリートは1.5±0.5%、AEコンクリートは4.5±1.0%とした。単位セメント量を300kg/m<sup>3</sup>、350kg/m<sup>3</sup>、400kg/m<sup>3</sup>、450kg/m<sup>3</sup>とし、スランブ試験および空気量試験を行い、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。このようにして決定した結果を表-1に示す。なお、表中の記号、JC、JAC、JRCは、それぞれ超速硬セメントのプレーンコンクリート、AEコンクリート、高性能減水剤を用いたコンクリートを表わす。

また、OC、OAC、ORCとは普通セメントのプレーンコンクリート、AEコンクリート、高性能減水剤を用いたコンクリートを表わす。

さらに、数字300、350、400、450は単位セメント量(kg/m<sup>3</sup>)を示す。

実験I、IIに使用した配合は単位セメント量350kg/m<sup>3</sup>のAEコンクリートおよび高性能減水剤使用コンクリートであり、実験IIIでは単位セメント量300kg/m<sup>3</sup>、400kg/m<sup>3</sup>、450kg/m<sup>3</sup>のプレーンコンクリートおよびAEコンクリートである。また、実験IVは単位セメント量350kg/m<sup>3</sup>の高性能減水剤使用コンクリートである。

(3) コンクリートの練り混ぜおよび供試体作製方法

コンクリートの練り混ぜは、100ℓのパンタイプ強制練りミキサーを使用した。材料の投入順序は、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、砂と水を先に入れて空練りし、その後砂利とセメントを同時に投入し、3分間の練り混ぜを行った。超速硬コンクリートの場合、棒突き締固めは時間的に困難であるので、振動数8000rpmの棒形振動機を用いて締固めた。

実験I、IIの供試体は、外部の温度が短時間の内に内部まで伝わるように、直径10cm、高さ20cmの円柱供試体とした。1シリーズに4本作製し、その中の1本は供試体の内部温度用に使用した。

実験IIIの供試体は高さ7cm、幅10cm、長さ40cmのものであり、2層に分けて振動による締固めを行った。

実験I~IIIのコンクリートの練り上がり温度は20~25°Cであった。

実験IVはコンクリートとセメントペーストの両方の供試体で行った。セメントペーストの供試体を作製した理由は、水和に関係しない骨材が入ると反応生成物の解析に支障を来すおそれがあると考えたからである。

コンクリートの供試体は直径10cm、高さ20cmの円柱供試体を用いた。セメントペーストの供試体は直径5cm、高さ10cmのモルタル用型枠を用いて作製した。セメントペーストの練り混ぜは、JISR 5201に示されて

いるモルタルの練り混ぜ方法を参考にした。練り上がったセメントペーストは直径5 cm, 高さ10 cmの型枠に2層に分けて入れ、ガラス棒で各層30回ずつ突き固めた。

#### (4) 供試体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。積算温度を求める場合には、供試体の受ける正確な温度履歴を知る必要がある。本実験の実験Ⅰ、Ⅱ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表われず、どの位置で測定しても、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。

#### (5) 凍結直前強度の測定

20°C程度の供試体を型枠のまま-20°Cの恒温槽に入れた場合、1時間以内に供試体の内部温度は+1°C程度に達する。供試体の温度が+1°C程度に達した時、3本の供試体を短期間にイオウキャッピングを行い、JIS A1108に準じて圧縮強度試験を行った。そして、その試験値を凍結直前強度とした。+1°Cという温度は、コンクリートが-1°C程度で凍結することを確認（凍結温度に達すると温度履歴曲線の勾配が、わずかの時間水平になる）しているため、恒温槽の精度±0.3°Cから考え、供試体がまだ凍結しない直前の強度である。なお、このときの供試体3本のキャッピングと圧縮強度試験に要した時間は約10分である。

実験ⅠのAEコンクリートの目標の凍結直前強度は20 kgf/cm<sup>2</sup>, 50 kgf/cm<sup>2</sup>, 80 kgf/cm<sup>2</sup>とした。高性能減水剤を用いたコンクリートについては10 kgf/cm<sup>2</sup>~250 kgf/cm<sup>2</sup>の範囲とした。

実験ⅡのAEコンクリートの凍結直前強度は30 kgf/cm<sup>2</sup>, 50 kgf/cm<sup>2</sup>とした。これは実験ⅠのAEコンクリートにおいて、凍結直前強度として50 kgf/cm<sup>2</sup>以上発現していれば、凍結を継続しても強度の増進を期待できることを確認したので、実験Ⅱでは目標の凍結直前強度を30 kgf/cm<sup>2</sup>, 50 kgf/cm<sup>2</sup>として回復強度を求めようとするものである。高性能減水剤を用いたコンクリートについては、100 kgf/cm<sup>2</sup>程度では、その後の強度の伸びが期待できないことを実験Ⅰで確認したので、20 kgf/cm<sup>2</sup>~250 kgf/cm<sup>2</sup>の範囲とした。

#### (6) 養生方法および圧縮強度試験方法

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（内

容積408ℓ、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。

-20°Cで凍結させる場合、目標の凍結直前強度を変えるために、コンクリートを打設してから、恒温槽に入れるまでの放置時間を種々変えた。放置時間中は供試体を20°Cの恒温恒湿室に保管し、適当な放置時間を経た後、ビニール袋で封かんして型枠のまま-20°Cの恒温槽に入れた。-20°Cという温度は、日本の寒冷地の最低気温を参考に決定したものである。

+20°C養生の材令1日以内のものは、脱型をして直ちに強度試験を行い、材令1日以上ものは、24時間で脱型して水中養生を行った。

実験Ⅰは上記方法で凍結直前強度を求めた後、材令1日以上供試体は脱型し、水中で凍結させるために医療用水枕に入れ、水を満たした。その水は、供試体温度が+1°C程度になっているので、なるべく供試体温度に近い+4°C程度の水を使用した。その後、所定材令まで-20°Cの恒温槽に保管した。所定材令になったら恒温槽から取り出し、+20°Cの恒温水槽の中に水枕のまま1時間30分程度浸漬し、水枕の水および供試体内部の水を完全に融解させた。この時の供試体の内部温度は+1°C程度である。融解後の供試体について、直ちにイオウキャッピングを行い、圧縮強度試験を行った。

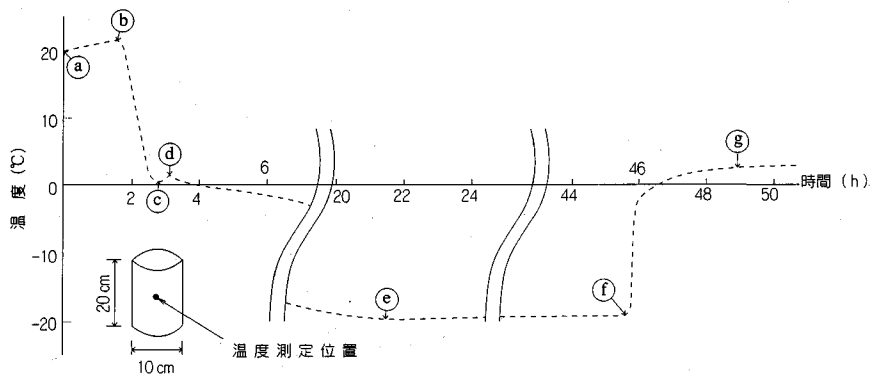
実験Ⅱは、実験Ⅰと同様に凍結直前強度を求めた後-20°Cの恒温槽で24時間凍結させた。24時間凍結後、融解させ所定材令まで+4°Cの低温で水中養生を行った。所定材令の供試体については、イオウキャッピングを行い、圧縮強度試験を行った。

図-1は実験Ⅱの場合の供試体中心部の温度履歴である。図中の記号は、① コンクリートの打込み、② 供試体を-20°Cの恒温槽に型枠のまま保管、③ 供試体の内部温度+1°C到達、直ちに凍結直前強度試験実施、④ 他の供試体を脱型、+4°C程度の水とともに医療用水枕の中に供試体を入れ、再び-20°C養生、⑤ コンクリートの内部温度-20°C到達、⑥ -20°C到達後、24時間凍結終了、水枕のまま供試体を+20°Cの水中に入れて融解、⑦ +4°C水中養生開始、時期である。

実験Ⅲの凍結融解試験を行う前の供試体の養生方法および材令は、20°Cで標準養生した材令1日、7日、10日、14日、18日のものと、+4°Cで湿潤養生した材令1日、2日、4日のものである。

そして、凍結融解開始時の強度と耐久性との関係を明らかにするために、上記養生方法と同一材令での圧縮強度試験を行った。供試体はφ10×20 cmの円柱供試体である。

実験Ⅳは、コンクリートおよびセメントペーストの供試体を用いて行った。積算温度30°C・h以下の供試体を-20°Cで24時間凍結させ、その後供試体を+20°C



図一 実験Ⅱの方法における供試体内部の温度履歴

の恒温水槽の中で融解させた。供試体を融解させる際、供試体をビニール袋で封かん（バック有り）したものと、直接水と接触（バック無し）させる場合を行った。

また、クラックの防止対策に関する実験は、実験Ⅰ、実験Ⅱと同一方法で行った。ただし、養生はバック有りとバック無しの両方で行った。

(7) 凍結融解試験方法

実験Ⅲにおいては、(6)で述べた養生を経た後、供試体の凍結融解試験を行った。方法は、JISA6204（コンクリート用化学混和剤）の附属書2（コンクリートの凍結融解試験方法）に基づいて行った。凍結融解の1サイクルは供試体の中心部が+5°Cから-18°Cに下がり、また-18°Cから+5°Cに上がる機構になっており、1日8サイクルで、1サイクル3時間（凍結時間2時間20分、融解時間40分）として行うものである。

(8) クラック部分の試料採取方法と示差熱分析および電子顕微鏡による観察

材令2日でセメントペースト供試体のクラックが入った部分から、直径10mm程度の破片を1供試体につき、10個ずつ採取した。試験管に試料とアセトンを入れ、振とうを10回行った後、3分間浸漬した。続いて新しいアセトンに換え2回この操作を繰り返した。供試体をアセトンに浸漬したのは、供試体採取後の水和を止めるためである。

なお、試料を採取する際に、材令2日を選んだのはエトリンガイトが他の水和物に変化する<sup>2)</sup>以前に試料を採取するためである。クラック部分に発生した水和物の分析および観察には以下の試験装置を用いた。

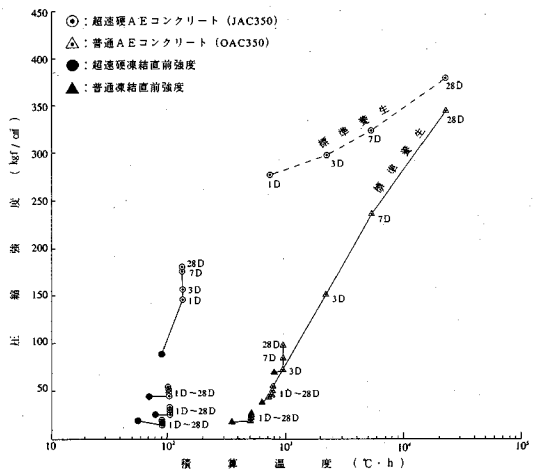
示差熱分析：示差走査熱量計

電子顕微鏡：X線マイクロアナライザー

3. 結果および考察

(1) 若材令に-20°C凍結を受けた超速硬コンクリートの強度発現特性

実験Ⅰの若材令に-20°Cで凍結させて凍結を断続す



図二 若材令に-20°C凍結をうけたAEコンクリートの強度と積算温度の関係

る場合の実験である。

この目的は、凍結中でも強度を増進させるためには最低どの程度の凍結直前強度が必要であるかを知らうとするものである。

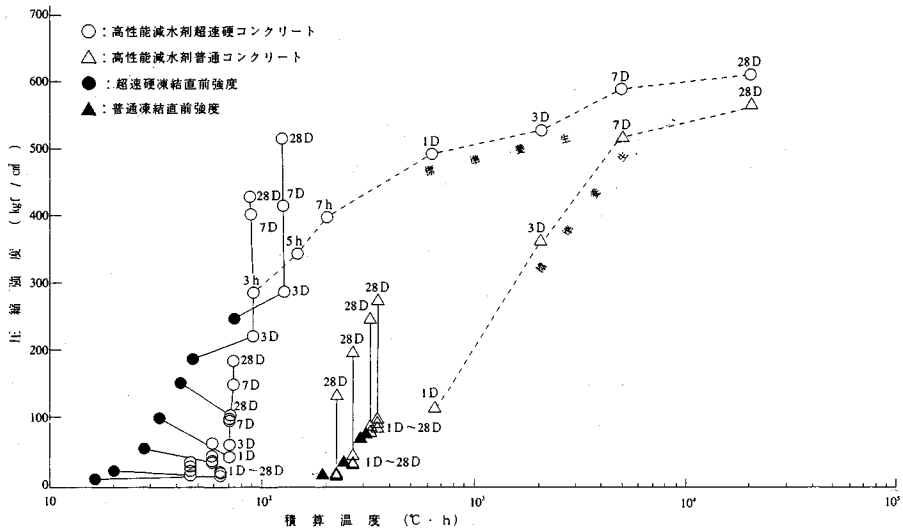
実験のデータをまとめるにあたり、土木学会で示している次式を採用した。

$$M = \int_0^t (\theta + 10) \Delta t \dots \dots \dots (1)$$

ここに、M：積算温度（°C・h）、θ：Δt時間中のコンクリート温度（°C）、Δt：時間（h）

超速硬コンクリートの強度発現性状を述べる場合、練り上がり温度や養生温度が強度発現に著しく影響し、さらに練り上がり後の発熱をも考慮する必要性から考えて、積算温度と強度の関係で表わすことが最も良い方法と考えられるので、本論文は、すべて積算温度法<sup>3)</sup>を用いて結果の整理を行った。

積算温度は圧縮強度試験用供試体と同じ方法で養生した供試体の中心部の温度履歴より求めた。-10°Cを基準に精度0.08%のプランメーターを使用して測定した。



図一三 若材令に $-20^{\circ}\text{C}$ 凍結をうけた高性能減水剤使用コンクリートの強度と積算温度の関係

所定材令までの積算温度はプランメーター5回の平均値とした。

図一2, 3にAEコンクリートおよび高性能減水剤使用コンクリートの結果を示す。

図一2は若材令に凍結を受けた単位セメント量 $350\text{ kg/m}^3$ のAEコンクリートの強度と積算温度の関係である。比較のために、普通コンクリートの場合も示した。

図一2において、超速硬コンクリートの凍結直前強度は $21\text{ kgf/cm}^2$ ,  $28\text{ kgf/cm}^2$ ,  $46\text{ kgf/cm}^2$ ,  $80\text{ kgf/cm}^2$ である。この強度を得るための積算温度は $57^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ ,  $79^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ ,  $98^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ であった。

普通コンクリートの凍結直前強度は $19\text{ kgf/cm}^2$ ,  $40\text{ kgf/cm}^2$ ,  $74\text{ kgf/cm}^2$ であり、この強度を得るための積算温度は $353^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ ,  $635^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ ,  $815^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ であった。

このように、超速硬コンクリートの積算温度は普通コンクリートに比較して著しく小さいことがわかる。

なお、本実験における練り上がり温度は、超速硬コンクリートが $15^{\circ}\text{C}\sim 18.5^{\circ}\text{C}$ であり、普通コンクリートが $15^{\circ}\text{C}\sim 16^{\circ}\text{C}$ であった。

図一2に示すように、凍結直前強度 $50\text{ kgf/cm}^2$ 程度を境にして、その後の伸びに著しい差が認められる。超速硬コンクリートの凍結直前強度 $21\text{ kgf/cm}^2$ ,  $28\text{ kgf/cm}^2$ ,  $46\text{ kgf/cm}^2$ の供試体においては、その後における強度の伸びはほとんど認められない。しかし、凍結直前強度 $80\text{ kgf/cm}^2$ の場合は、明らかに強度の増進を認めることができる。このときの材令28日における圧縮強度は $180\text{ kgf/cm}^2$ になっており、標準養生した材令28日供試体強度の約50%であった。

普通AEコンクリートについても、超速硬コンクリートとほぼ同様な傾向である。凍結直前強度 $50\text{ kgf/cm}^2$

以下の2種類( $19\text{ kgf/cm}^2$ ,  $40\text{ kgf/cm}^2$ )の供試体については、その後の材令における圧縮強度の伸びはほとんど認められない。しかし、凍結直前強度 $74\text{ kgf/cm}^2$ の供試体の場合、超速硬コンクリートの $80\text{ kgf/cm}^2$ のときのような強度の伸びは認められないまでも、強度は増す傾向にある。このときの材令28日の圧縮強度は $101\text{ kgf/cm}^2$ であり、標準養生した材令28日供試体強度の約30%であった。

図一3は、若材令に凍結を受けた単位セメント量 $350\text{ kg/m}^3$ の高性能減水剤使用コンクリートの圧縮強度と積算温度の関係である。この図から、高性能減水剤を使用した超速硬コンクリートは、凍結直前強度 $100\text{ kgf/cm}^2$ 程度では、その後の強度の伸びは期待できないことがわかる。そして、 $158\text{ kgf/cm}^2$ になると材令28日強度で凍結直前強度をやや上回り、 $189\text{ kgf/cm}^2$ ,  $250\text{ kgf/cm}^2$ と凍結直前強度が高くなるにつれて、凍害の程度も減少し、その後の強度の伸びも増加した。ちなみに、凍結直前強度 $250\text{ kgf/cm}^2$ の場合の28日強度は $550\text{ kgf/cm}^2$ であり、標準養生した供試体強度の92%であった。

それにひきかえ、高性能減水剤を使用した普通コンクリートの場合は、凍結直前強度が $15\text{ kgf/cm}^2$ 程度であっても、その後の強度の伸びが期待できる。そして、凍結直前強度が大きければ大きいほど、その後の強度の伸びも大きい。

この理由は、超速硬セメントと普通セメントの水和形態が異なるためであり、超速硬コンクリートの初期強度はエトリンガイト<sup>7)</sup>が、普通コンクリートはC-S-H水和物が主に受け持っているからである。この場合の空気量の影響は、表一1の配合表のとおり、超速硬コンクリート、普通コンクリートとも空気量に差がないこと、さら

に後述するように凍結後、水と接触させて融解させた供試体のみクラックが入ることから考え、無いものと考えられる。

次に、高性能減水剤を使用した場合と、AE剤を使用した場合の超速硬コンクリートの強度発現過程の比較を行うと、当然のことながら、高性能減水剤を使用した方が、低い積算温度で所要の凍結直前強度に達する。しかし、高性能減水剤を使用した場合は、凍結直前強度が  $98 \text{ kgf/cm}^2$  (積算温度 =  $33^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ ) であったとしても、クラックによる強度低下が著しく、その後の強度の増進は望めない。そのクラックの様子は凍結直前強度  $100 \text{ kgf/cm}^2$  以下の供試体に表われ、低強度ほど網目状のクラックが多く表われた。

一方、AE剤を用いたコンクリートの場合には、凍結直前強度が  $75 \text{ kgf/cm}^2$  (積算温度 =  $90^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ ) 程度であればクラックが生じず、強度は増進した。

その理由は、高性能減水剤を用いるとセメント粒子の分散性が良好となり、内川ら<sup>9)</sup>の研究にあるように緻密な水和物が生成する。そのため高性能減水剤を用いた超速硬コンクリートが初期の強度発現過程で水と接触した場合には、わずかなカルシウムフルオロアルミネート ( $\text{C}_{11}\text{A}_7\text{CaF}_2$ ) の水和増進でも、微細な水隙空間の小さい領域にエトリンガイトを生成し、その膨張圧のために強度阻害を多く受けるものと考えられる。

### (2) 若材令に24時間凍結、以後+4°C養生された超速硬コンクリートの回復強度

ここでは、供試体を  $-20^\circ\text{C}$  で24時間凍結させ、その後  $+4^\circ\text{C}$  で材令14日ないし28日まで水中養生を行い、凍結直前強度と回復強度の関係を明らかにしようとするものである。

これまで、凍結後の強度増進量は凍結直前強度によって大きく影響されることを明らかにしてきた。AEコンクリートの  $-20^\circ\text{C}$  凍結の場合、湿空凍結では凍結直前強度  $30 \text{ kgf/cm}^2$  以上<sup>10)</sup>、水中凍結では  $50 \text{ kgf/cm}^2$  以上であれば、凍結を受けてもその後の強度増進が期待できることを確認した。このため、本実験の目標凍結直前強度を、 $30 \text{ kgf/cm}^2$  および  $50 \text{ kgf/cm}^2$  として、回復強度を求めたものが図-4である。図-4は単位セメント量  $350 \text{ kg/cm}^3$  のAEコンクリートである。図-4の強度値は、順に超速硬コンクリートの凍結直前強度、3日強度(融解後約1日)、7日強度(融解後約5日)、14日強度(融解後12日)の値であり、普通コンクリートが凍結直前強度、7日強度(融解後約4日)、14日強度(融解後約12日)の値である。

図-4より、凍結を解いた場合の強度の回復は凍結直前強度の高いほど大きい。このことは、超速硬コンクリートで積算温度  $486^\circ\text{C}\cdot\text{h}$  以上、普通コンクリートで  $2113^\circ\text{C}\cdot\text{h}$  以上の強度をみることによってわかる。ちなみに、

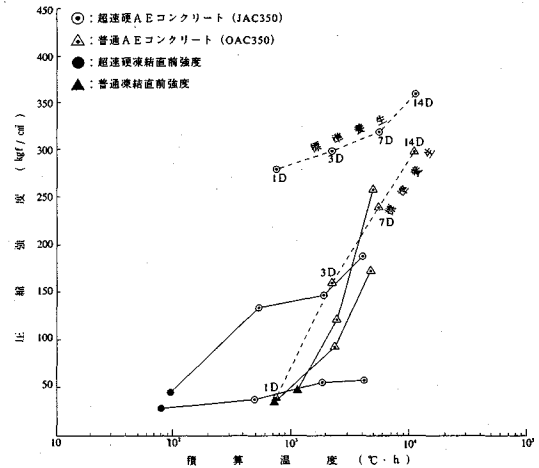


図-4 若材令に  $-20^\circ\text{C}$  で24時間凍結、以後  $+4^\circ\text{C}$  水中養生されたAEコンクリートの強度回復性状

超速硬コンクリートの凍結直前強度  $29 \text{ kgf/cm}^2$  および  $45 \text{ kgf/cm}^2$  の供試体の材令14日強度は、標準養生強度の17%、および50%であった。また、普通コンクリートの凍結直前強度  $36 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $49 \text{ kgf/cm}^2$  における材令14日強度は、標準強度の59%、77%であった。

図-5は、若材令に  $-20^\circ\text{C}$  で24時間凍結、以後  $+4^\circ\text{C}$  で水中養生された高性能減水剤使用コンクリートの回復性状である。普通コンクリートの場合、凍結直前強度が  $25 \text{ kgf/cm}^2$  程度であっても、その後の強度の回復が期待できるのに対し、超速硬コンクリートは、凍結直前強度が  $100 \text{ kgf/cm}^2$  程度であっても、強度の回復が期待できない。図-5よりわかるように、強度の増進の期待できる強度としては、凍結直前強度が少なくとも  $200 \text{ kgf/cm}^2$  程度以上必要である。

この理由は、前述したとおり超速硬セメントと普通セメントの水和形態の違いによるものである。

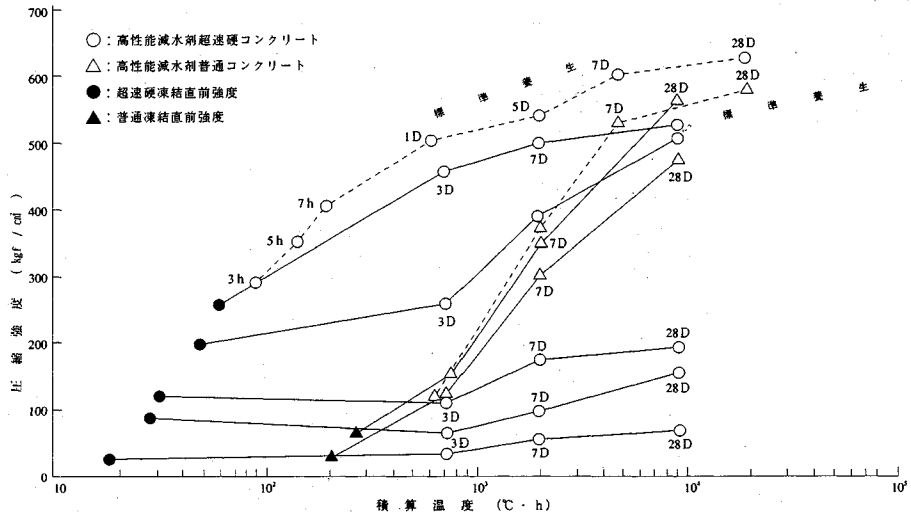
### (3) 硬化初期に凍結融解の繰り返しを受けた場合の強度と耐久性

寒中コンクリートを想定し、硬化初期から凍結融解の繰り返しを受けた場合、どの程度の強度を発現していれば、十分な耐久性を得ることができるかを知ろうとするものである。

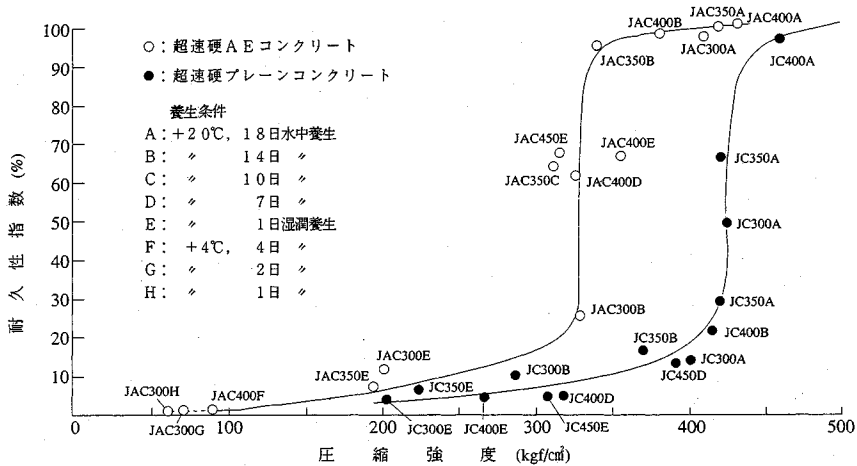
凍結融解の繰り返しに対する抵抗性は、しばしば凍結融解サイクル数と相対動弾性係数との関係で述べられている。また、AEコンクリートの凍結融解抵抗性を気泡間隔係数との関連で考察することが行われている。

これまで、超速硬コンクリートの凍結融解の繰り返しに対する抵抗性を圧縮強度との関係で表わすことは、まだ行われていない。

図-6は  $20^\circ\text{C}$  の恒温恒湿室で所定材令まで養生を行い、凍結融解試験を行った結果を、圧縮強度と耐久性指



図一五 若材令に  $-20^{\circ}\text{C}$  で 24 時間凍結、以後  $+4^{\circ}\text{C}$  水中養生された高性能減水剤使用コンクリートの強度回復性状



図一六 圧縮強度と耐久指数

数で表わしたものである。コンクリートは AE コンクリートとプレーンコンクリートであり、使用したセメント量は、それぞれ  $300\text{ kg/m}^3$ 、 $350\text{ kg/m}^3$ 、 $400\text{ kg/m}^3$ 、 $450\text{ kg/m}^3$  である。また、超速硬プレーンコンクリートの水セメント比が 57%、48%、44%、40% であり、超速硬 AE コンクリートは 51%、45%、41%、40% である。なお、図中の点の末尾の数字は凍結融解試験以前の養生日数を表わす。

図一六から、凍結融解抵抗性は圧縮強度との関連性が極めて大きいことがわかる。特に、超速硬コンクリートの単位セメント量  $400\text{ kg/m}^3$  の材令 14 日標準養生の場合は、300 サイクルの凍結融解の繰り返しを受けても高い抵抗性を示した。この理由としては、超速硬コンクリートはブリージング水が非常に少ないために水みちが少なくなり、浸透水の凍結によるコンクリートの劣化を受け

にくいこと、およびペーストと骨材との付着が強いことなどが考えられる。

図一六から、超速硬プレーンコンクリートおよび超速硬 AE コンクリートとも、ある強度を境にして耐久性が急に増大する境界強度があることがわかる。その境界強度は超速硬プレーンコンクリートが約  $425\text{ kgf/cm}^2$  であり、超速硬 AE コンクリートが約  $325\text{ kgf/cm}^2$  である。したがって、プレーンコンクリートであっても、AE コンクリートの境界強度よりも  $100\text{ kgf/cm}^2$  以上高い強度であれば十分な耐久性を示すということである。

(4) クラックの進行状況、クラックの部分に発生した水和物の観察、クラックの防止方法

高性能減水剤を用いた超速硬コンクリートの場合、凍結直前強度が  $100\text{ kgf/cm}^2$  以下であると、供試体表面にクラックが発生することはすでに述べた。



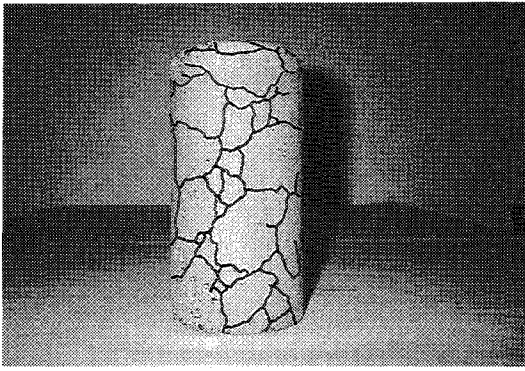


写真-1 クラックの発生した供試体 (積算温度  $18^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ , 材令 3日)

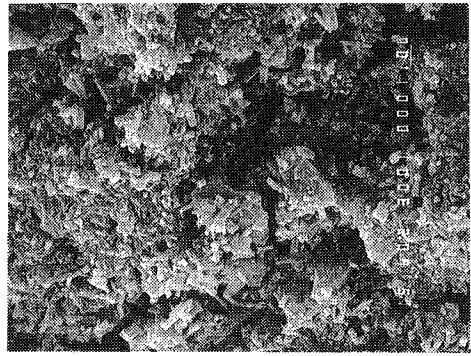


写真-2 セメントペースト供試体の電子顕微鏡写真 (バック有り, 積算温度  $18^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ , 材令 3日, 4200倍)

表-2 示差熱分析結果

項目	全吸熱量 (mj/mg)	Ettringite の吸熱量 (mj/mg)
封かん融解後24時間 (バック有り)	391.0	219.9
水接融解後24時間 (バック無し)	418.4	228.5

写真-1は、積算温度  $18^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$  の供試体を  $-20^{\circ}\text{C}$  で1日凍結し、以後  $+4^{\circ}\text{C}$  水中養生を行った時の材令3日のクラック発生状況である。供試体表面には、材令3日目までにクラックが入り、その後はクラック幅が増大した。

表-2はクラックの原因を追究するために、セメントペースト供試体のクラック部分の一部を採取し、示差熱分析を行った結果である。表-2にエトリングタイトの吸熱量を示しているが、この数字が大きいほどエトリングタイトの量が多いことを示している。この表から、水接で融解して24時間を経過した供試体(バック無し)の方が、封かんで融解(バック有り)した供試体よりもエトリングタイトの量が多くなっていることがわかる。

示差熱分析より、クラックの入った水接(バック無し)の供試体の方がクラックの入らなかった封かん(バック有り)の供試体よりもエトリングタイトが多くできていることが判明した。このことより、クラックの原因に、エトリングタイトが関係しているものと考えられる。

写真-2, 3はセメントペースト供試体のクラック部分に発生した水和物の電子顕微鏡による観察結果である。写真-2がバック有り(ビニール袋で封かんして水との接触を避けたもの)で、写真-3がバック無し(ビニール袋で封かんせず水と直接接触させたもの)の場合である。

写真-2のバック有りのペースト供試体のエトリングタイトの針状結晶の長さは、ほぼ  $1\sim 2\mu\text{m}$  である。一方、



写真-3 セメントペースト供試体の電子顕微鏡写真 (バック無し, 積算温度  $18^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ , 材令 3日, 4200倍)

写真-3のバック無しのエトリングタイトの結晶の長さは、大部分はバック有りと同程度であるが、たまに  $5\sim$  数十  $\mu\text{m}$  の長い結晶が観察された。また、この長い結晶はクラック発生部分に多く存在していた。バック無しの場合のように、コンクリート表面に外部から水の補給がなされる場合には、急激にエトリングタイトが生成し、その膨張圧でクラックが生じ、そのクラック部分には自由に成長できる大きな針状結晶が発達したものと考えられる。

図-8は実験Ⅰ(若材令に  $-20^{\circ}\text{C}$  で凍結させ、そのまま凍結を継続させた場合の強度発現性状を明らかにするための実験)および実験Ⅱ(若材令に  $-20^{\circ}\text{C}$  で24時間凍結させ、以後  $+4^{\circ}\text{C}$  の低温で水中養生を行い、回復強度を求めようとする実験)の方法で行った凍結直前強度と材令28日における圧縮強度の伸びである。図中の値は、標準養生の供試体強度に対する強度割合を示す。

この実験はクラックの防止対策を検討するために行ったものである。図中  $-20^{\circ}\text{C}$  水接とは、実験Ⅰの方法で凍結を解く時に、供試体と水と接触させる場合であり、 $+4^{\circ}\text{C}$  水接とは、実験Ⅱの方法で同じく水と接触させる

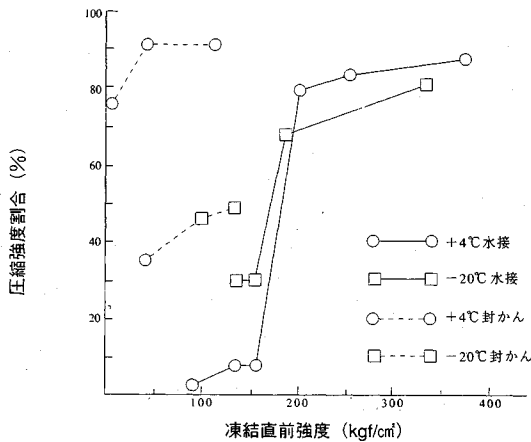


図-7 凍結直前強度と材令 28 日における圧縮強度の伸び

場合である。

また、 $-20^{\circ}\text{C}$  封かんとは、実験 I の方法で凍結を解く時に、ビニール袋で供試体を封かんして融解させる場合であり、 $+4^{\circ}\text{C}$  封かんとは実験 II の方法で同じくビニール袋で封かんして融解させる場合である。図-8 より凍結を解く時に、供試体を水と接触させる場合と、ビニール袋で封かんして融解させる場合には大きな差があることがわかる。ちなみに、若材令に  $-20^{\circ}\text{C}$  で 24 時間凍結させ、以後  $+4^{\circ}\text{C}$  の低温で水中養生を行う実験 II の場合で比較すれば、水接の場合は、凍結直前強度が  $200\text{ kgf/cm}^2$  程度にならないと標準養生強度の 80% 程度にならないが、封かんすれば  $50\text{ kgf/cm}^2$  以下であっても、材令 28 日強度が標準養生強度の 90% 程度発現している。

これらのことから、超速硬コンクリートが硬化初期に凍結を受けた場合には、融解時にコンクリートが水と直接接触しないようにすれば、クラックによる強度障害をほとんど受けないことが確認された。

## 結 論

超速硬セメントコンクリートを寒冷期に使用することを想定して、若材令で  $-20^{\circ}\text{C}$  で凍結させた場合の強度性状、さらに  $-20^{\circ}\text{C}$  凍結を材令途中で解いた場合の回復強度、および凍結融解時の圧縮強度と凍結融解に対する抵抗性の関係を明らかにすることを目的として本研究を行った。

また、超速硬セメントコンクリートを若材令で凍結させ、融解時に水と接触させると、クラックにより強度障害を受けるが、その原因を究明し、その防止対策を検討した。

本研究により、明らかにしたことを述べると以下のとおりである。

(1) AE コンクリートを用いて、若材令に  $-20^{\circ}\text{C}$

凍結させ、そのまま凍結を継続させる場合の超速硬コンクリートの強度発現性状は、凍結直前強度が同一ならば普通コンクリートとほぼ同様である。凍結を継続させて強度の増進を期待できる最低の凍結直前強度としては  $50\text{ kgf/cm}^2$  程度と考えるとよい。

(2) (1) の実験方法で行った場合の高性能減水剤を使用した超速硬コンクリートの強度発現性状は、凍結直前強度が  $200\text{ kgf/cm}^2$  程度以上でなければ、その後の強度の伸びは期待できない。それにひきかえ、普通コンクリートの場合には  $15\text{ kgf/cm}^2$  程度であっても、その後の強度の伸びが期待できる。この理由は、高性能減水剤を用いるとセメント粒子の分散性が良好なため緻密な水和物となる。超速硬セメントは初期の強度発現過程で水と接触すると、わずかなカルシウムフルオロアルミネート ( $\text{C}_{11}\text{A}_7\text{CaF}_2$ ) の水和増進でも微細な水和物の水隙空間の領域にエトリンガイトを生成し、その膨張圧のために強度障害を受けるからである。

(3) AE コンクリートを用いて、若材令に  $-20^{\circ}\text{C}$  で 24 時間凍結させ、以後凍結を解いて  $+4^{\circ}\text{C}$  の低温養生する場合の回復強度は、超速硬コンクリートおよび普通コンクリートとも、凍結直前強度が大きいほど高くなる。しかし、超速硬コンクリートの凍結直前強度が  $40\text{ kgf/cm}^2$  以下の回復強度はエトリンガイトによるクラックのために普通コンクリートに比較して低くなる。

(4) (3) の試験方法で行った場合の高性能減水剤を使用したコンクリートの強度回復性状は、凍結直前強度が  $200\text{ kgf/cm}^2$  以上でなければ、強度の回復が期待できない。それにひきかえ、普通コンクリートの場合には  $25\text{ kgf/cm}^2$  程度であっても、その後の強度の回復が期待できる。この理由は (2) で述べたとおりである。

(5) 凍結融解試験において、凍結開始時の圧縮強度と凍結融解抵抗性の間には、きわめて大きい関連性がある。また、超速硬プレーンコンクリートおよび超速硬 AE コンクリートとも、ある強度を境にして耐久性が急に増大する境界強度がある。本実験においては、超速硬プレーンコンクリートが約  $425\text{ kgf/cm}^2$  であり、超速硬 AE コンクリートが約  $325\text{ kgf/cm}^2$  であった。

(6) 超速硬コンクリートを若材令（注水後 5 時間以内）で凍結させ、その後水中に入れて融解させた場合に発生するクラックの原因は、示差熱分析の結果からエトリンガイトであると考えられる。また、電子顕微鏡による観察から、バック有り無しとは同程度の長さのエトリンガイトの針状結晶を確認したが、時々バック無しに  $5\sim$ 数十  $\mu\text{m}$  の長い結晶が観察された。これは、クラックにより生じた空隙にエトリンガイトがさらに成長発達したものであると思われる。

(7) 超速硬コンクリートを若材令で凍結させ、その後水と接触させて融解させた場合にはエトリンガイトに

よるクラックが発生したが、同じ供試体をビニール袋でバックし水中で融解させた場合には、クラックが入らず十分な強度を発現していることが確認された。従って、クラックの防止対策としては、超速硬コンクリートを寒中で施工し、若材令で凍結した場合には、その後は雨、雪、散水等による水との接触を避けることである。

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の内容の一部「寒中工事への応用」<sup>11)</sup>をさらに発展させたものである。

また、本研究を遂行するうえで、多大な御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御支援を賜った小野田ケミコ株式会社会長 齊藤鶴義氏、同社社長 三浦俊二氏、同社部長 仰木肇氏、同社課長 岡田光芳氏に対し厚く御礼申し上げます。

#### 参 考 文 献

- 1) 鎌尾・浅野・小出：超速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.
- 2) 内川・宇都：超速硬セメントの舗装コンクリートへの適用，セメント技術年報，31，pp. 427～430，1977.

- 3) 内川・宇都・遠藤：超速硬セメントコンクリートの鋼繊維補強コンクリートへの適用，セメント技術年報，33，pp. 339～342，1979.
- 4) 中嶋・吉田：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，土木学会論文集，第390号/V-8，pp. 161～170，1988.2.
- 5) 中嶋・吉田：超速硬セメントコンクリートの緊急工事への応用に関する研究，土木学会論文集，第390号/V-8，pp. 199～208，1988.2.
- 6) 中嶋・吉田：超速硬セメントによる寒中コンクリートの研究，土木学会論文集，第348号/V-1，pp. 95～102，1984.8.
- 7) 内川・宇智田：加熱養生における超速硬セメントの水和，小野田研究報告，Vol. 28，No. 95，pp. 16～29，1976.
- 8) Plowman, J. M. : Maturity and the Strength of Concrete, Mag. of Concrete Reserch, 1956.
- 9) 内川・宇智田：超速硬セメント砂プロセス，鋳造と熱処理，No. 376～378，1979.
- 10) 中嶋清実：超速硬セメントコンクリートの養生温度に関する研究，豊田高専研究紀要，Vol. 12，1979.
- 11) 中嶋清実：超速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. 89～107，1986.1.

(1991.7.25 受付)

## STUDIES ON STRENGTH DEVELOPING CHARACTERISTICS AND FREEZE-THAW RESISTANCE OF REGULATED SET CEMENT CONCRETE AT LOW TEMPERATURE

Kiyomi NAKASHIMA and Hiroto YOSHIDA

These studies were carried out, supposing that regulated set cement is used for cold weather concrete.

By these studies, the strength developing characteristics in the case of freezing the concrete at  $-20^{\circ}\text{C}$  at the early age and continuing the freezing and the restored strength in the case of thawing the freezing at  $-20^{\circ}\text{C}$  halfway during the age were found.

Further, the relation of the compressive strength at the beginning to the repetition of freezing and thawing was clarified. Moreover, when regulated set cement concrete is frozen at the early age, and at the time of thawing, it is brought in contact with water, cracks arise, and the remarkable lowerings of the strength occurs, therefore, its cause was elucidated, and the method of its prevention discussed.