【土木学会論文集 第348号/V-1 1984年8月】

超速硬セメントによる寒中コンクリートの研究

STUDIES ON COLD WEATHER CONCRETING BY THE USE OF SPECIAL SUPER HIGH EARLY STRENGTH CEMENT

中嶋清実*・吉田弥智**
By Kiyomi NAKASHIMA and Hirotomo YOSHIDA

The contents of the study were first to clarify the strength characteristics of the special super high early strength cement at different temperature, secondly, to clarify what effect freezing exerts on the increase of strenght when the concrete is subjected to freezing at the initial period of hardening, and thirdly, to clarify the resistivity when the concrete at the initial period of hardening or after sufficiently hardened is subjected to the repeated rapid freezing and thawing. It was clarified by this study ① that the concrete using special super high early strength cement showed the very high manifestation of strength even at low temperature and short age, ② that when the concrete was subjected to freezing at the initial period of hardening, the lowest compressive strength just before freezing, with which the increase of strength was able to be expected by continuing freezing, was about 50 kg/cm^2 similarly to ordinary concrete.

1. まえがき

超速硬セメントはアメリカのセメント協会研究所で開発された “Regulated Set Cement” の基本技術に，わが国の大手セメントメーカー2社独自の研究を組み合わせて開発されたセメントである．わが国において市販を開始したのは，1971年10月からである．

このセメントを用いたコンクリートの特長は，①2～3時間で実用的強度を発現する．②凝結時間が短く，凝結時間を任意に調節できる．③長期にわたって安定した強度増進を示す．④低温時でも強度発現が著しい．⑤乾燥収縮が少ない．⑥水密性が高い，などである．

また，用途としては，ⅰ）道路，鉄道，滑走路などの緊急工事，ⅱ）寒中工事，ⅲ）コンクリート2次製品，ⅳ）鋳型，砥石，鉱石造粒などの結合材，ⅴ）吹付けコンクリートなどの諸工事に使用されている．

その物性はアルミン酸カルシウム（$3CaO \cdot Al_2O_3$ではなく $11CaO \cdot 7Al_2O_3 \cdot CaF_2$である）の量を多くし，それに対応して硫酸カルシウムの量も多くなっているのを特長とする．その超速硬性は$C_{11}A_7CaF_2$の水和によるものであり，その後の長期にわたる強度発現は主としてケイ酸カルシウムの水和によって引き継がれるものと考えられる．

寒冷期にコンクリートを打設する場合，コンクリート構造物の所定の強度が得られなかったり，耐久性が著しく劣るなどの，寒冷な気象条件による被害をしばしば見受ける．

コンクリートの凍害を考えるとき，次の2つに分けられる．第1はコンクリートの硬化初期に受ける初期凍害である．第2はコンクリートの強度を十分発揮したのちに，凍結融解の繰り返しを受ける場合である．

寒中コンクリート工事における施工対策として，第1に保温，加熱が挙げられる．そのための費用は工事費の中で大きなウエイトを占めている．それで，材料面からの対策として，超速硬性と，初期に多量の水和熱を発生させる性質をもつ超速硬セメントの使用が推奨されている．

ここで，これまでの超早強性のセメントを使用した寒中コンクリートの研究を概観する．

アルミナセメント関係の研究として，アルミナセメントの凝結や，その後の強度発現は水和温度や養生温度によって著しく影響を受ける，という長滝氏らの研究[1)]．

* 正会員 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 名古屋工業大学教授
（〒466 名古屋市昭和区御器所町）

寒冷期のコンクリートにアルミナセメントを用いる場合，硬化初期に凍害を受けると，凍害を受けなかったコンクリートに比較して，強度は著しく低下する，という黒井氏らの研究[2]．アルミナセメントコンクリートの凍結融解抵抗性は転移しない場合，きわめて耐久的である，という塚山，林氏らの研究[3),4)]．アルミナセメントコンクリートの転移後の凍結融解抵抗性は，セメントの種類によって相違するが，水セメント比の大きいほど，その低下率が大きい，という前川氏らの研究[5]，がある．

また，超早強ポルトランドセメント関係の研究として，超早強ポルトランドセメントは普通セメントに比べて，水和熱が高いこと，ブリージング少ないために水みちが少なくなり，水圧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から，寒中施工に有利となる，という土岐氏らの研究[6]，がある．これらの成果はアルミナセメントおよび超早強ポルトランドセメントを寒中コンクリートに使用する場合，大変有効な資料となる．

しかしながら，超速硬セメントを用いた寒中コンクリートの一連の研究は，まだ実施されていないのが現状である．

したがって，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目的に，それに必要な資料を得ようとするものである．

その内容は，第1に超速硬コンクリートの温度による強度特性を明らかにするためのものである．第2に硬化初期に凍結を受けた場合，凍結が強度増進にどの程度影響するかを明らかにするためのものである．第3に硬化初期あるいは十分固まったコンクリートが，急速凍結融解の繰り返しを受けた場合の抵抗性を明らかにするためのものである．

表—1　セメントの化学成分

種別	ig.loss	insol.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	total (%)
超速硬セメント	0.5	0.4	14.5	11.7	1.9	57.3	0.7	11.6	98.6
普通セメント	0.5	0.1	21.9	5.4	3.0	64.9	1.4	1.8	99.0

表—2　セメントの物理試験結果（1）

種別	比重	粉末度		凝結				
		比表面積 (cm²/g)	88 μ残分 (%)	水量 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)	室温 (℃)	湿度 (%)
超速硬セメント	3.04	5630	1.8	30.0	0-12	0-15	20.0	89
普通セメント	3.16	3050	2.5	26.3	2-24	3-37	20.0	89

表—3　セメントの物理試験結果（2）

種別	フロー値	曲げ強さ (kg/cm²)						圧縮強さ (kg/cm²)					
		3h	6h	1D	3D	7D	28D	3h	6h	1D	3D	7D	28D
超速硬セメント	218	26.7	29.3	33.0	36.1	56.0	72.5	110	154	210	251	334	415
普通セメント	245	—	—	—	32.4	48.8	69.6	—	—	—	131	228	402

表—4　使用骨材の試験結果

種別	ふるいを通るものの重量百分率											粗粒率	比重	単重	吸水率	実積率
	30	25	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	(F.M)		(kg/m³)	(%)	(%)
川砂利	100	90	64	51	27	0	0	0	0	0	0	7.10	2.66	1664	0.7	64
川　砂						100	87	69	45	20	6	2.73	2.59	1785	2.4	67

表—5　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 (%)	スランプの範囲 (cm)	単位量 (kg/m³)				専用凝結遅延剤 (g/m³)	AE剤 (cc/m³)
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		
JC 300	1.5	50	41	7.5±1.5	150	300	773	1150	900	—
JC 350	1.5	45	39	7.5±1.5	157	350	712	1152	1050	—
JC 400	1.5	41	37	7.5±1.5	162	400	655	1154	1200	—
JAC 300	4.5±1.0	47	39	7.5±1.5	140	300	715	1158	900	25.0
JAC 350	4.5±1.0	41	37	7.5±1.5	145	350	658	1160	1050	29.0
JAC 400	4.5±1.0	38	35	7.5±1.5	150	400	603	1162	1200	33.0
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	690	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

2.　実験概要

(1)　使用材料

a)　セメント

S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．化学成分および物理試験結果を表—1〜3に示す．

b)　骨　　材

粗骨材は静岡県天竜川産の川砂利を粒度調整し，最大寸法25 mmとして使用した．

細骨材は岐阜県揖斐川産の川砂と愛知県木曽川産の川砂を重量比7：3で使用した．その骨材試験結果を表—4に示す．

c)　混　和　剤

超速硬セメント使用時には，約30分間のハンドリングタイム（作業可能時間）を得るために，専用の凝結遅延剤を単位セメント量に対して0.3％添加した．遅延剤は50％の水溶液として使用した．

また，AEコンクリートの場合は4.5±1％の空気量になるように，T社製AE剤を1％の水溶液にして使用した．

d)　コンクリートの配合

超速硬コンクリートおよび普通コンクリートの配合は，試し練りより求めた．所要のスランプを7.5±1.5 cm，空気量をプレーンコンクリートは1.5±1.0％，AEコンクリートは4.5±1.0％とした．単位セメント量を300 kg/m³，350 kg/m³，400 kg/m³で，スランプ試験および空気量試験を行い，同じワーカビリチーを得るための単位水量および最適細骨材率を決定した．試し練りより求めた結果を表—5に示す．表中のコンクリートの種類で用いた記号は以下のとおりである．

JC ：超速硬セメントを用いたプレーンコンクリート
OC ：普通セメントを用いたプレーンコンクリート
JAC：超速硬セメントを用いた AE コンクリート
OAC：普通セメントを用いた AE コンクリート

また，数字 300，350，400 は単位セメント量（kg/m^3）を示す.

コンクリートの練り混ぜは 100 l のパンタイプ強制練りミキサーを使用し，練り混ぜ時間を 2 分間とした.

（2） 実験方法

a） 超速硬セメントコンクリートの温度による強度特性に関する実験

超速硬セメントを用いたコンクリート強度は，練り上がり温度および養生期間中の温度によって著しく影響を受けるので，超速硬コンクリートの温度による強度特性を明らかにしておくことはきわめて重要である．したがって，このような目的により以下の実験を行った.

1） 供試体の作成，養生方法および圧縮強度試験

供試体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．1 シリーズに 4 本作成し，そのうちの 1 本を使って供試体の内部温度を測定した．測定は自記温度記録計により，供試体作成時より行った.

養生温度については，超速硬コンクリートが 0 °C，+10°C，+20°C，+30°C の 4 種類であり，普通コンクリートが+10°C，+20°C，+30°C の 3 種類である.

材令は，超速硬コンクリートが 2 時間，4 時間，8 時間，1 日，3 日，7 日，28 日であり，普通コンクリートが 3 日，7 日，14 日，28 日である.

なお，供試体を練り混ぜ開始時から 15 分後に，型枠のまま低温恒温器（タバイ社製，内容積 408 l，冷凍方式一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）に放置し，予定材令まで湿空養生を行った．このとき，水分の蒸発を防ぐために，供試体をビニール袋で封かんした.

圧縮強度試験は，予定材令に達した 3 本の供試体をイオウキャッピングを施し，JIS A 1108 に準じて行った.

2） 結果の整理法

データをまとめるにあたり，圧縮強度と積算温度とは関数関係にあるとして，土木学会で示している次式を採用した.

$$M=\sum_{0}^{t}(\theta+10)\Delta t$$

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）

b） 硬化初期に凍結を受ける超速硬コンクリートの強度発現性に関する実験

一般に，コンクリートが硬化初期に凍結を受ける場合，凍結以前にある程度の強度を発現している必要があるといわれている.

この実験は，超速硬コンクリートが十分硬化していない時期に凍結を受けた場合，凍結が強度増進にどの程度影響するかを明らかにするためのものである.

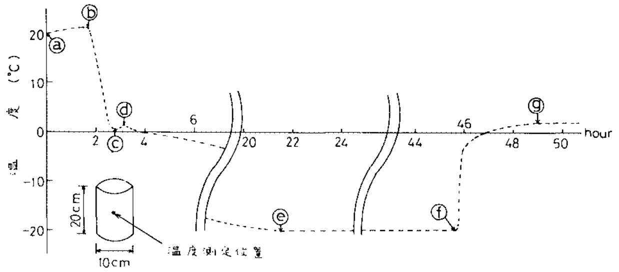
そこで，今回は 2 種類の実験を行った．第 1 は圧縮強度 20 kg/cm^2，30 kg/cm^2，50 kg/cm^2，80 kg/cm^2 程度の凍結直前強度が得られた時点で供試体を－20°C で凍結させ，予定材令の経過の後融解し，ただちに圧縮強度試験を行い，凍結直前強度と強度発現の関係を知ることである．第 2 は圧縮強度 30 kg/cm^2，50 kg/cm^2 程度の凍結直前強度が得られた時点で，供試体を－20°C で 24 時間凍結させ，その後+4°C で材令 14 日まで水中養生を行い，圧縮強度試験をして，凍結直前強度と強度回復の関係を知ることである．なお，凍結温度は日本各地の最低気温を参考にして，－20°C とした.

1） 供試体の作成，養生方法および圧縮強度試験

超速硬コンクリートおよび普通コンクリートとも，使用した単位セメント量は 350 kg/m^3 である．供試体寸法は ϕ 10×20 cm の円柱供試体を使用し，養生には前述と同一の低温恒温器を使用した.

まず，硬化初期に供試体を凍結させるために，コンクリートを打設してから，低温恒温器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 の低温恒温器に入れた．また，温度測定用供試体を使用して，自記温度記録計により，刻々変化する供試体の内部温度を記録した．ここで，**図—1** の記録紙により，第 2 の実験方法の手順を説明する．図中の記号は，ⓐ：コンクリートの打込み，ⓑ：供試体を－20°C の低温恒温器に型枠のまま放置，ⓒ：供試体の内部温度+1°C 到達，ただちに凍結直前強度試験実施，ⓓ：他の供試体を脱型，+1°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，ⓔ：コンクリートの内部温度－20°C到達，ⓕ：－20°C，24 時間凍結終了，水枕のまま供試体を+20°C の水中に入れ融解，ⓖ：+4°C 水中養生開始，時期である.

図—1 からわかるように，供試体の温度降下速度は，



図—1 第 2 の実験方法の手順と温度履歴

練り上がり温度20°C程度の供試体を型枠のまま低温恒温器に放置した場合，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程度に達したとき，3本の供試体を短期間にイオウキャッピングし，圧縮試験を行い，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しているので，低温恒温器の精度から考え，供試体がまだ凍結しない直前の強度である．

圧縮強度試験は，供試体を材令1日，3日，7日，28日で低温恒温器から取り出し，水枕のまま+20°Cの水中に2時間程度浸して，供試体の外部および内部の氷が完全に融解してから JIS A 1108 に準じて行った．

c）硬化初期，あるいは十分硬化した超速硬コンクリートの急速凍結融解の繰り返しに対する抵抗性に関する実験

この試験は十分に硬化したコンクリートが長年月の間に繰り返し凍結融解を受ける場合を想定し，実験室内で急速に凍結融解の繰り返しを行い，反復サイクルに対するコンクリートの抵抗性を求めることにより，耐久性を推定しようとするものである．しかし超速硬コンクリートの特性を考慮すると，緊急工事および寒中工事にその長所を発揮すると考えられる．したがって，20°C標準養生，材令14日の供試体試験とあわせて，短期材令および低温時の硬化初期における供試体の凍結融解試験も行った．

1）供試体の作成，試験方法および気泡組織の測定

供試体の作成，および試験方法はコンクリート用化学混和剤・附属書2・コンクリートの凍結融解試験方法（JIS A 6204）に基づいて行った．供試体寸法は7.5×10×40 cmである．この寸法における凍結融解サイクルは，供試体の温度を交互に+5°C〜−18°Cに低下させ，引き続いて−18°C〜+5°Cに上昇させ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．

供試体の養生方法および材令は，A：20°C恒温水槽内で14日間水中養生，B：20°C恒温室内で1日間湿空養生，C：+10°Cの低温恒温器内で1日間湿空養生，D：+4°Cの低温恒温器内で4日間湿空養生，E：+4°Cの低温恒温器内で2日間湿空養生，F：+4°Cの低温恒温器内で1日間湿空養生，である．

また，凍結融解開始時に，同材令の供試体の圧縮強度試験を行い，圧縮強度と凍結融解の繰り返しに対する抵抗性についての関係を検討した．

次に，コンクリート中に連行された空気泡の組織が，耐久性に及ぼす影響を知るために，硬化コンクリートの気泡組織を測定した．硬化コンクリートの気泡組織の測定は ASTM-C 45-71 の修正ポイントカウント法により行った．

3. 結果および考察

（1）超速硬セメントコンクリートの温度による強度特性に関する実験結果および考察

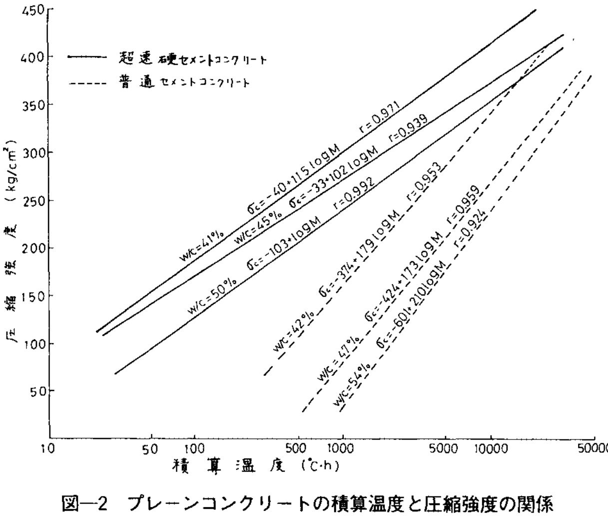
各種養生温度，材令および圧縮強度の関係を示すのに積算温度式を適用して示したものが図—2である．図—2はプレーンコンクリートの場合である．

Plowman は積算温度を対数にとれば，強度と積算温度の関係を直線関係で表わせる[7]としており，著者らの結果からもそのことはいえる．

図—2より，それぞれの水セメント比の任意の積算温度における圧縮強度を推定することができる．図中の実線（超速硬コンクリート），および破線（普通コンクリート）は最小二乗法により求めたものであり，近似式および相関係数 r を示す．

図—2からわかるように，超速硬コンクリートの各積算温度に対する圧縮強度は普通コンクリートより高く，積算温度を下げても，普通コンクリートほど強度の低下を示さない．言いなおすと，超速硬コンクリートは低温で短期材令であっても，強度の発現性はきわめて高い．

ここで，単位セメント量の同一の超速硬コンクリートおよび普通コンクリートの強度を比較する．たとえば，単位セメント量350 kg/m³（超速硬：$W/C=45$ %，普通：$W/C=47$ %）をとると，720°C·h（20°C養生で材令1日に相当）および2 160 °C·h（20°C養生で材令3日）では，超速硬コンクリートの強度は260 kg/cm²，310 kg/cm²であるのに対し，普通コンクリートの強度は50



図—2　プレーンコンクリートの積算温度と圧縮強度の関係

kg/cm², 150 kg/cm² 程度である．このことからも，超速硬コンクリートは初期材令において高い強度を期待できることがわかる．

（２）硬化初期に凍結を受ける超速硬コンクリートの強度発現性に関する実験結果および考察

a）硬化初期に凍結を受けたコンクリートの強度発現性

硬化初期に凍結を受けた単位セメント量 350 kg/m³ の AE コンクリートの強度と材令の関係を**図—3** に示す．実線が超速硬コンクリートで，破線が普通コンクリートである．

図—3 において，超速硬コンクリートの凍結直前強度は 21 kg/cm², 28 kg/cm², 46 kg/cm², 80 kg/cm² であった．この強度を得るための放置時間は 1 時間 34 分，1 時間 39 分，2 時間 15 分，3 時間 20 分であった．

普通コンクリートの凍結直前強度は 19 kg/cm², 40 kg/cm², 74 kg/cm² であり，この強度を得るための放置時間は，13 時間 0 分，26 時間 8 分，32 時間 15 分であった．

このように超速硬コンクリートの放置時間は，普通コンクリートに比較して著しく短いことがわかる．

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°C～18.5°C であり，普通コンクリートが 15.0°C～16.0°C であった．

図—3 に示すように，凍結直前強度 50 kg/cm² 程度を境として，その後の強度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 kg/cm², 28 kg/cm², 46 kg/cm² 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 kg/cm² 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 kg/cm² になっており，標準養生した供試体強度の約 50 % であった．

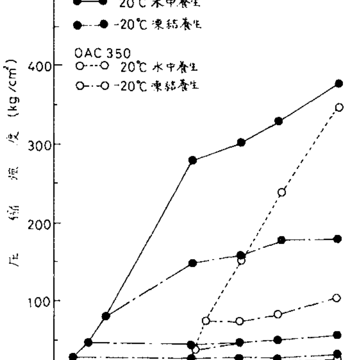
普通 AE コンクリートについても，超速硬コンクリートとほぼ同様な傾向である．凍結直前強度 50 kg/cm² 以下の 2 種類(19 kg/cm², 40 kg/cm²)の供試体については，その後の材令における圧縮強度の伸びはほとんど認められない．しかし凍結直前強度 74 kg/cm² の供試体の場合，超速硬コンクリートの 80 kg/cm² のときの強度の伸びは認められないまでも，強度は増す傾向にある．このときの材令 28 日の圧縮強度は 101 kg/cm² であり，標準養生した供試体強度の約 30 % であった．

つづいて，硬化初期に凍結を受けた単位セメント量 350 kg/m³ のプレーンコンクリートの強度と材令の関係を**図—4** に示す．**図—4** より，凍結直前強度の発現時間が**図—3** の AE コンクリートの場合よりも短いことがわかる．この理由としては，練り上がり温度が超速硬コンクリートで 20.5°C～26.0°C，普通コンクリートで 16.0°C～25.0°C と，AE コンクリートの練り上がり温度よりも高かったためと考えられる．また，AE 剤を使用しないために，多少水和が早くなったことも考えられる．

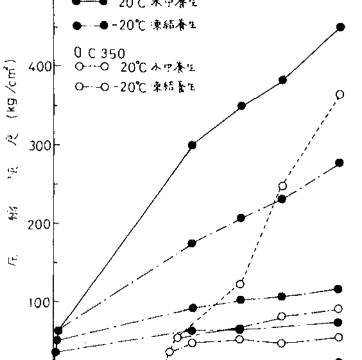
図—4 よりプレーンコンクリートも AE コンクリートと同様，超速硬コンクリートおよび普通コンクリートとも，凍結直前強度 50 kg/cm² を境として，強度の伸びが著しく変化することがわかる．

これらの実験より，−20°C で凍結を継続した場合の超速硬コンクリートは，普通コンクリートと同様，凍結直前強度として 50 kg/cm² 以上発現していれば，凍結を受けてもその後の強度増進を期待できると考えられる．

b）硬化初期に 24 時間凍結，以後 +4°C 水中養生されたコンクリートの回復強度



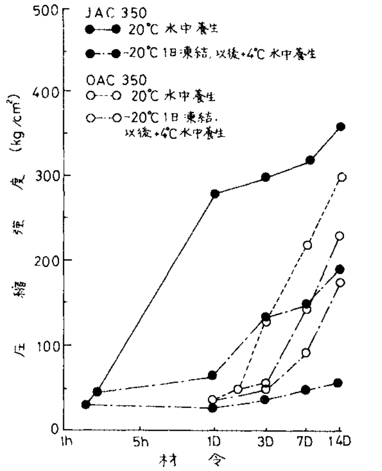
図—3　硬化初期に凍結を受けた AE コンクリートの強度発現性状



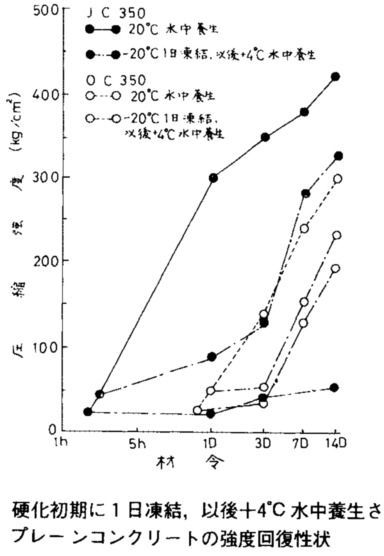
図—4　硬化初期に凍結を受けたプレーンコンクリートの強度発現性状

本実験は圧縮強度 30 kg/cm², 50 kg/cm² 程度の凍結直前強度を得た時点で，供試体を－20°C で 24 時間凍結させ，その後＋4°C で材令 14 日まで水中養生を行い，圧縮強度試験をして，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．－20°C 凍結の場合，湿空凍結では凍結直前強度 30 kg/cm² 以上[8]，水中凍結では 50 kg/cm² 以上であれば，凍結を受けてもその後の強度増進を期待できる．このため，本実験の目標凍結直前強度は，30 kg/cm² および 50 kg/cm² として，回復強度を求めたものが図―5，6 である．図―5 は単位セメント量 350 kg/m³ の AE コンクリートで，図―6 が単位セメント量 350 kg/m³ のプレーンコンクリートである．図―5 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 1 日以後，普通コンクリートで 3 日以後の強度をみることによってわかる．ちなみに，超速硬コンクリートの凍結直前強度 29 kg/cm²，および 45 kg/cm² 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 kg/cm²，49 kg/cm² における材令 14 日強度は，標準強度の 59 %，77 % であった．



図―5 硬化初期に 1 日凍結，以後＋4°C 水中養生された AE コンクリートの強度回復性状



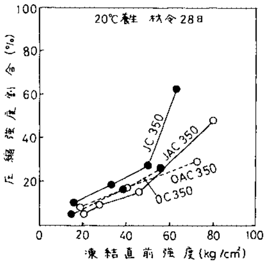
図―6 硬化初期に 1 日凍結，以後＋4°C 水中養生されたプレーンコンクリートの強度回復性状

図―6 はプレーンコンクリートの場合である．全般的には AE コンクリートの場合と似た強度回復性状を示している．しかし，超速硬コンクリートの凍結直前強度 44 kg/cm² 供試体の強度の回復が著しく大きくなっていることが注目される．材令 14 日の回復強度は標準養生強度の 77 % に達している．

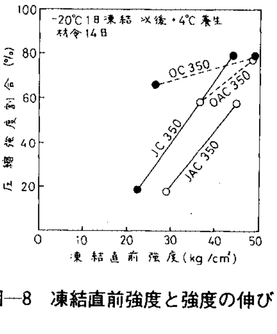
c) 凍結直前強度と強度の伸び

図―7 は，それぞれの凍結直前強度において，材令 28 日まで－20°C で凍結させた強度と，20°C で標準養生させた供試体強度の比を示している．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 50 kg/cm² 以下では同程度の強度の伸びを示している．また，超速硬コンクリートは普通コンクリートに比較して，凍結直前強度を 50 kg/cm² 以上発現していれば，その後の強度の伸びが著しく高くなることがわかる．

図―7 より，標準養生した超速硬コンクリートの 50 % 強度を材令 28 日において発現させるには，プレーンコ



図―7 凍結直前強度と強度の伸び



図―8 凍結直前強度と強度の伸び

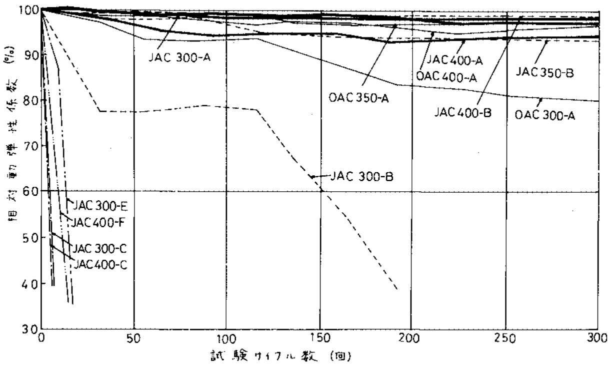
ンクリートおよびAEコンクリートの凍結直前強度は，60 kg/cm^2 および80 kg/cm^2 程度となる．

図—8は目標の凍結直前強度が得られた時点で−20°C，24時間凍結を行い，その後+4°C養生を行った材令14日の強度と標準養生した供試体強度との比を示している．図—8より，凍結直前強度40 kg/cm^2 以下の超速硬コンクリートの強度割合が，普通コンクリートに比較して低いことが認められる．この理由としては，超速硬コンクリートの場合，凍結を解かれて，+4°Cの水と接すると，急速に水和が進み，それに伴い多くのエトリンジャイトを生成するが，供試体は強度を十分発現していないので，エトリンジャイトの生成による膨張圧のためにクラックを生じ，強度低下をしたものと思われる．

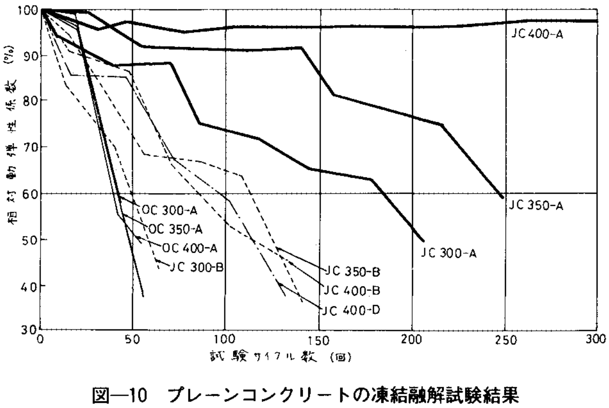
表—6　凍結融解試験結果および気泡組織測定結果

コンクリートの種類	養生方法	供試体番号	練り上り空気量 (%)	圧縮強度 (kg/cm^2)	凍結融解試験結果				気泡組織測定結果		
					最終サイクル数(回)	相対動弾性係数(%)	重量変化率 (%)	耐久性指数 (%)	空気量 (%)	比表面積 (cm^2/cm^3)	気泡間隔係数 (μ)
JC 300	A	1	2.1	424	248	59	-2.35	48			
	B	2		287	63	44	-7.20	9	2.44	83	489
	F	3		48	測定不能				2.08	88	516
JC 350	A	4	1.6	430	208	49	-7.24	34			
	B	5		366	141	36	-1.10	17	1.52	140	400
	F	6		40	測定不能				1.60	115	596
	E	7		53	測定不能						
JC 400	A	8	1.5	459	300	96	-7.60	96			
	B	9		415	132	46	-8.48	20	1.56	87	676
	C	10		371	132	37	-1.75	16	1.44	95	640
JAC 300	A	11	4.2	410	300	97	-1.59	97			
	B	12		331	191	40	-0.62	25	4.52	133	164
	F	13		60	7	39	-17.09	1	4.28	129	179
	E	14		73	17	24	-9.10	1			
JAC 350	A	15	5.0	419	300	99	-0.84	99			
	B	16		342	300	94	-0.13	94	4.72	161	151
	F	17		52	測定不能				4.72	132	185
	E	18		80	測定不能						
JAC 400	A	19	4.6	463	300	95	-0.69	95			
	B	20		435	300	99	-0.21	99	4.52	132	221
	F	21		59	7	21	-5.63	0	4.40	131	229
	D	22		91	15	28	-6.30	1			
OC 300	A	1	1.9	298	43	59	-0.04	8	1.68	81	607
OC 350	A	2	1.5	378	58	35	-12.80	7	1.56	82	665
OC 400	A	3	1.7	436	58	48	-1.24	9	1.44	78	763
OAC 300	A	4	4.4	266	300	81	-8.53	81	4.88	115	169
OAC 350	A	5	4.0	304	300	97	-5.22	97	4.68	138	172
OAC 400	A	6	3.6	334	300	97	-5.58	97	3.16	147	272

(3)　硬化初期，あるいは十分硬化した超速硬コンクリートの急速凍結融解の繰り返しに対する抵抗性に関する実験結果および考察



図—9　AEコンクリートの凍結融解試験結果



図—10　プレーンコンクリートの凍結融解試験結果

a)　AEコンクリートの急速凍結融解の繰り返しに対する抵抗性

超速硬AEコンクリートおよび普通AEコンクリートの試験結果を図—9に示す．図—9より，超速硬AEコンクリートの場合は，単位セメント量を350 kg/m^3 以上で，W/C=41 % 以下とすれば，20°C，1日湿空養生した(B)供試体であっても，14日間標準養生した供試体と同程度の高い抵抗性を示すことが認められた．しかし，超速硬コンクリートがAEコンクリートであっても+4°Cの低温で1日，2日，4日，と養生された強度発現の不十分な（F），(E)，(D）供試体は，いずれのセメント量の場合も，凍結融解に対する高い抵抗性は認められなかった．ちなみに，超速硬AEコンクリートの単位セメント量400 kg/m^3 の+4°C，4日間湿空養生された（D）供試体（JAC 400-D）は，凍結融解サイクル数15サイクルで，21 % の相対動弾性係数となった．

次に，気泡間隔係数の測定結果を表—6に示す．表—6において，気泡間隔係数は同一セメント量のコンクリートで比較すると，超速硬コンクリートの方が普通コンクリートよりも小さくなる傾向にある．

凍結融解試験結果と関連して考察すると，14日間の標準養生した供試体の場合は，両コンクリートとも既往の研究結果と同様，250 μ程度以下の気泡間隔係数であれば，300サイクルの凍結融解作用を受けても，高い抵抗性を示すといえる．

しかし 250 μ 以下の気泡間隔係数の超速硬 AE コンクリートであっても，強度発現不十分な供試体の場合は，凍結融解に対する高い抵抗性を期待することができない．

b) プレーンコンクリートの急速凍結融解の繰り返しに対する抵抗性

超速硬コンクリートおよび普通コンクリートの試験結果を図―10 に示す．

図―10 より，標準養生の超速硬コンクリートは，プレーンコンクリートであっても，いずれのセメント量の場合も，普通コンクリートに比較して著しく高い抵抗性を示すことが認められた．特に，超速硬コンクリートの単位セメント量 400 kg/m^3 の標準養生の場合（JC 400-A）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の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，水圧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．

ブリージング水について，過去に著者らが行った実験[9]によると $W/C=90$ % でわずかに認められるが，それでも普通コンクリートの $W/C=40$ % の場合より少ない結果を得ている．

また，超速硬コンクリートであっても，20°C で 1 日間湿空養生した（B）供試体とか，10°C で 1 日間湿空養生した（C）供試体は，単位セメント量が 400 kg/m^3 であっても，相対動弾性係数が 80 サイクル程度で 60 % ラインに達していることから，標準養生した供試体に比較して抵抗性が低いことがわかる．

4. む す び

超速硬セメントを寒中コンクリートに使用することを目的として，実験的に検討を行い，次のようなことが明らかとなった．

（1） 養生温度，材令および圧縮強度の関係を示すのに積算温度式を適用し，積算温度を対数にとると，圧縮強度と積算温度の関係は，超速硬コンクリートおよび普通コンクリートとも，直線関係を保つ．

また，超速硬コンクリートは積算温度を低くとっても，普通コンクリートに比較して，著しく高い強度を発現する．このことから，超速硬コンクリートが寒中コンクリートに適している．

（2） 超速硬コンクリートは目標とする凍結直前強度を発現するのに要する放置時間を著しく短くできる．しかし，凍結直前強度を普通コンクリートと同一にして凍結させた場合には，その後の強度発現性状は普通コンクリートと，ほぼ同様となる．このとき，−20°C で凍結を継続させて，強度の増進を期待できる最低の凍結直前強度としては，普通コンクリートと同様 50 kg/cm^2 程度と考えてよい．

また，途中で凍結を解いて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，凍結直前強度の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 40 kg/cm^2 以下の供試体の回復強度は普通コンクリートに比較して低い．

（3） 凍結融解の繰り返しに対する抵抗性に関して，超速硬コンクリートは単位セメント量 350 kg/m^3 以上で $W/C=41$ % 以下の AE コンクリートとすれば，20°C で 1 日間湿空養生した供試体であっても，14 日間標準養生した供試体と同程度の抵抗性を示す．

超速硬コンクリートは同一セメント量の普通コンクリートと比較して，きわめて密実なコンクリートとなるため，セメント量 400 kg/m^3，$W/C=41$ % 程度の標準養生したプレーンコンクリートであれば，300 サイクルの凍結融解の繰り返しに十分耐えられる．

また，標準養生された AE コンクリートの場合，両コンクリートとも 250 μ 程度以下の気泡間隔係数であれば，既往の研究結果と同様，300 サイクルの凍結融解作用を受けても高い抵抗性を示すことが確認された．

なお，本研究は昭和 53 年度に土木学会吉田研究奨励金を受けて以来，これまで継続して実施してきた実験資料をもとにまとめたものである．

おわりに，本研究を行うにあたり，労をわずらわした名古屋工業大学および豊田工業高等専門学校の関係卒業生諸君に深く感謝する．

参 考 文 献

1) 長滝・高木・木下：アルミナセメントコンクリートの養生温度に関する研究，セメント技術年報，XX，1966.
2) 黒井・岩崎：アルミナセメントを用いた寒中コンクリートの研究，コンクリートライブラリー第 35 号，1972.
3) 塚山・山下：寒中工事用アルミナセメントコンクリートの研究，セメント技術年報，XXI，1967.
4) 林・前川・今井・渡辺：アルミナセメントコンクリートの力学的諸性質と凍結融解抵抗性に関する研究，セメント技術年報，XXII，1968.
5) 前川・今井：アルミナセメントコンクリートの凍結融解抵抗性，コンクリートライブラリー第 35 号，1972.
6) 土岐・中島・植田・加藤：超早強ポルトランドセメントによる寒中コンクリートの一実験，コンクリートジャーナル，Vol. 9，1971.
7) Plowman, J. M.：Maturity and the Strength of Concrete, Mag. of Concrete Research, 1956.
8) 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.
9) 吉田・中嶋：超速硬セメントコンクリートの新旧打継目に関する研究，セメントコンクリート，No. 347，1976.

（1983. 8. 31・受付）