

# 若材齢コンクリートの耐凍害性

山本泰彦<sup>1</sup>・武田 厚<sup>2</sup>・長合友造<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 Ph.D. 筑波大学教授 機能工学系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

<sup>2</sup>工修 (株)大林組 本山北シールドJV 土木係長 (〒464-0044 名古屋市中種区自由が丘2-12)

<sup>3</sup>工博 防衛庁 陸上幕僚監部防衛部研究課システム計画係 (〒162-8802 東京都新宿区市谷本村町5-1)

十分な空気を混入したコンクリートが約半日から14日までの各材齢に保有している耐凍害性能を通常の急速水中凍結融解試験によって実験的に調べた。実験結果の解析には、試験中にセメントの水和が継続する影響を排除する手法として著者等が過去の研究で提示したデータ解析手法を適用した。

本研究では、若材齢コンクリートの耐凍害性も、強度および含水量に大きく左右され、水セメント比の直接的な影響は小さいこと、飽水状態にあるコンクリートに満足すべき耐凍害性を付与するためには24N/mm<sup>2</sup>以上の圧縮強度が必要であること等を示した。また、寒中コンクリートの養生方法に関し、わが国で標準となっている潤潤養生よりも封かん養生に近い養生方法を探ることが望ましいことを示した。

*Key Words* : freeze-thaw durability, early-age concrete, cold weather concrete, curing

## 1. まえがき

コンクリートの諸性状は一般に時間の経過とともに変化し、これがセメントの水和反応の継続に依るセメントペースト部分の組織・構造の変化に起因していることは良く知られている。このようなコンクリートの性状の経時変化をもたらすセメントの水和は、長期材齢においては遅くなるが、養生を必要とするような材齢（以下、本文では、これを若材齢と呼び、このような材齢のコンクリートを若材齢コンクリートと呼ぶ）においては、水さえ存在すれば、0℃に近い温度条件下においても相当に進行し、温度条件と時間によっては水点下の領域でも無視できない程度に進行することもある<sup>1),2)</sup>。したがって、若材齢コンクリートを対象として、その諸性質に関する正しい情報・知見を得ようとする場合は、“時間の経過に伴う内部構造あるいは力学的性状の変化の影響”を常に念頭に置きながら、試験結果等の解析・考察を行うことがきわめて重要である。

寒中コンクリートの場合、若材齢コンクリートが厳しい気象作用を受けて損傷する危険性が高い。このため、土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕<sup>3)</sup>（以下、土木学会示方書と呼ぶ）を始めとする指針類では、寒中コンクリートが初期凍害を受けないと同時に、養生終了後の凍結融解作用に対しても十分な抵抗性が確保されるよう養生方法を定めている。しかし、国内外の指針類の規定を通覧すると、養生中に保つべきコンクリートの含

水状態に関する考え方に基本的な相違があるだけでなく、同様な条件下で養生する場合でも必要養生日数や養生終了時の所要圧縮強度は指針類によって相当に異なっている。これらは、前述したセメントの水和進行の影響が若材齢において特に顕著であるため、通常の耐凍害性評価手法が適用できず、この結果として、養生を必要とするような硬化段階におけるコンクリートの耐凍害性能に関する客観的な情報が不足している状況を反映しているものと考えられる<sup>2)</sup>。

著者らは、上記の現状に鑑み、寒中コンクリートの養生方法について、コンクリートの耐凍害性能の観点から再検討することにし、まず、若材齢コンクリートの耐凍害性を適切に評価するための手法について検討を重ねた。そして、通常の動弾性係数を測定する方法を採用する場合に対して、凍結融解試験中にセメントの水和が進む影響を補正して耐凍害性を定量的に正しく評価する手法（耐凍害性評価手法Ⅰ）を開発・提案した<sup>2)</sup>。また、凍結融解サイクル数の増加に伴う膨張ひずみの増加速度に関係した指標を利用して若材齢コンクリートの耐凍害性の良否が判定可能であることを見出し、その具体的手法（耐凍害性評価手法Ⅱ）も提案した<sup>4)</sup>。

本文は、前報<sup>2),4)</sup>で用いた急速水中凍結融解試験の結果と新たに追加実施した試験の結果に上記の耐凍害性評価手法Ⅰを適用して、セメントの水和の進行の影響を排除した若材齢コンクリートの耐凍害性能、すなわち、コンクリートが“若材齢の各時点において保有している実

表-1 セメントの物理的性質

記号	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	凝結 (h-m)		圧縮強さ (N/cm <sup>2</sup> )		
			始発	終結	3日	7日	28日
C1	3.16	3260	2-30	3-31	14.7	25.1	41.7
C2	3.16	3320	2-21	3-29	16.8	26.0	41.5
C3	3.16	3340	2-22	3-27	16.5	25.8	41.1

表-2 細骨材の物理的性質

記号	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	粗粒率
S1	2.59	2.47	2.55
S2	2.59	2.48	2.45

表-3 粗骨材の物理的品質

記号	最大 寸法 (mm)	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	実積率 (%)	粗粒率
G1	20	2.67	0.40	61.0	6.68
G2		2.68	0.37	59.6	6.67
G3		2.70	0.51	58.1	6.66

際の耐凍害性能”を調べた結果について論じたものである。実験では、コンクリートの水セメント比、乾燥条件、試験材齢などを変化させた。また、得られた試験結果に基づいて、寒中コンクリートの養生方法についても考察を加えた。

## 2. 使用材料, 配合および試験方法

使用直前までの全材料の貯蔵 (24 時間以上), コンクリートの練混ぜ, 供試体の作製および保管は, 全て 20±2℃に保った同一の恒温室内で行った。また, 水中養生を行う供試体の場合は, 材齢 1 日までこの恒温室内に静置し, その後 20±2℃の水槽中で養生した。

### (1) 使用材料

セメントには, 製造会社は同じであるが, 入荷時期が異なる 3 種類の普通ポルトランドセメントを用いた (表-1 参照)。表-1 中の C1 は前報<sup>2,4)</sup>の試験で用いたセメントである。また, C2 は試験開始時まで封かん養生を継続した供試体の作製に用い, C3 は材齢 1 日まで給水養生あるいは封かん養生 (各養生の具体的方法は, 2. (4) を参照) を行い, その後に水中養生した供試体の作製に用いた。

細骨材には鬼怒川産川砂を使用し, 試験には一般に表-2 中の S1 を用いた。ただし, 材齢 1 日まで給水養生あるいは封かん養生した供試体の作製には同表の S2 を用いた。

粗骨材には笠間産砕石 (硬質砂岩) を使用した。この物理的性質を表-3 に示す。表-3 中の G1 は水セメント

比を 55 および 65%としたコンクリートに使用し, G2 は水セメント比 45%のコンクリートに用いた。ただし, 材齢 1 日まで給水養生あるいは封かん養生した供試体の製造には, 何れの水セメント比の場合も G3 を用いた。

使用した AE 剤は, 天然樹脂系の一般的な市販品であり, 1%水溶液にして用いた。

### (2) 配合

コンクリートの水セメント比は, 45, 55 および 65%とした。目標としたスランプおよび空気量は, それぞれ, 8±1cm および 5.5±0.5%である。ただし, 材齢 1 日まで給水養生あるいは封かん養生した供試体の目標空気量は, 空気量の不足が凍害劣化の直接的な原因とならないことに特に配慮し, 6.0±0.5%とした。配合の詳細とスランプおよび空気量の実測値の範囲を表-4 に示す。表中の M2 が目標空気量を 6.0±0.5%とした配合であり, この配合のコンクリートの製造に, 前記 2. (1) で例外的な表現で記した材料, すなわち, C3 のセメント, S2 の細骨材, G3 の粗骨材を用いた。

### (3) コンクリートの練混ぜおよび供試体の作製

コンクリートの練混ぜには容量 100 リットルの可傾式ミキサを使用し, 1 バッチ当たりの練混ぜ量は 60~80 リットルとした。練混ぜに当たっては, あらかじめ捨て練りを行った後, 計量した各材料を, 練混ぜ水の半量, 粗骨材の全量, 細骨材の半量, セメントの全量, 残りの細骨材, 残りの練混ぜ水の順にミキサ中に投入した。練混ぜ時間は, 全材料の投入後 3 分間とした。AE 剤水溶液は, 練混ぜ水に混合して用いた。

作製した供試体は, 凍結融解試験用および動弾性係数

表-4 コンクリートの配合

記号	目標空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	単位A E 剤量 (C×%)	実測値の範囲	
						スランプ (cm)	空気量 (%)
M 1	5.5±0.5	45	44	166	0.030	8.5	5.3~5.5
		55	45	164	0.025	8.0~9.0	5.4~5.7
		65	48	171	0.023	8.0~8.5	5.5~6.0
M 2	6.0±0.5	45	42	167	0.040~0.046	7.0~8.5	5.4~6.5
		55	44	167	0.031~0.033	7.0~9.0	5.4~6.5
		65	46	172	0.022~0.030	7.0~9.0	5.4~6.6

補正用の角柱供試体 (10×10×40cm) と圧縮強度試験用の円柱供試体 (φ10×20cm) の2種類である。ここで、動弾性係数補正用供試体とは、凍結融解試験結果に、前記の耐凍害性評価手法Ⅰを適用するために必要な供試体であり、コンクリートの積算温度とたわみ動弾性係数の関係を求める目的で作製した。

供試体の数については、各試験条件に対する凍結融解試験用供試体および圧縮強度用供試体を2バッチのコンクリートから3本ずつ作製し、各試験条件に対してバッチが相違する供試体が必ず含まれるよう配慮した。また、動弾性係数補正用供試体は、各バッチから1本ずつ作製した。ただし、水セメント比を65%とし、かつ材齢1日まで開放養生した場合と試験時まで封かん養生を継続した場合に対しては、凍結融解試験機の容量制限により、凍結融解試験用供試体は2本ずつとした。

圧縮強度用供試体のキャッピングに関しては、試験開始材齢が1日以内のもの場合は、試験開始1時間前に石こうキャッピングを行い、試験開始材齢が1日以降となるもの場合は、材齢12時間にセメントペーストのキャッピングを施した。

なお、供試体の養生方法と脱型については次節で詳述するが、キャッピングを上記のように行くと、材齢1日以降に試験を開始したもの場合は、材齢12時間から1日までの養生方法が圧縮強度用供試体と角柱供試体とで相違することになる。しかし、材齢1日以降の養生を水中養生または封かん養生とした本研究では、上記のキャッピング処理の有無が円柱供試体による圧縮強度の値に影響しないことを予め確認できた (本文の3.(4)でも再確認) ので、凍結融解試験開始時に遅滞なく圧縮強度を試験できるキャッピング方法を選定・採用することにした。

#### (4) 供試体の脱型および養生方法

供試体の脱型は、試験開始材齢が1日以内の場合には、試験開始の直前に行い、試験開始材齢が1日以降の

もの場合は、打込み直後から封かん養生を継続した凍結融解試験用供試体の場合を除き、材齢1日に行った。

養生方法に関しては、打込み直後から封かん養生を継続した凍結融解試験用供試体の場合を除き、材齢1日以前と1日以降で異なる養生方法を採用した。以下に、各養生方法を具体的に示す。

##### a) 材齢1日までの養生方法

**開放養生** (記号:a) : 湿度 55±5%, 温度 20±1℃の室内に、型枠に入れたまま、供試体の打込み面を大気にさらした状態で静置した養生。

**湿布養生** (記号:m) : コンクリートの打込み直後に、型枠も含めた全体を十分に吸水させた厚手の麻布で2重に覆い、20±1℃の恒温室内に静置した養生。ただし、麻布の上をビニールシートで覆うなどの特別な措置は採らなかったため、約1日後には、麻布はほぼ乾いた状態になっていた。

**封かん養生** (記号:f) : コンクリートの打込み直後に、型枠上面の縁に限なくシリコン系のシーラントを敷き、その上から厚さ 8mm のアクリル透明板を圧着させて供試体を密封し、この状態のまま 20±1℃の恒温室内に静置した養生。

**給水養生** (記号:w) : コンクリートの打込み直後に、封かん養生の場合と全く同じ方法により供試体を密封し、所定の時間が経過した後に、アクリル板に設けた小孔 (常時はゴム粘土で塞ぐ) から供試体上面とアクリル板との間のすき間 (数 mm) に給水して、供試体の上面を水で覆った状態で 20±1℃の室内に静置した養生。給水を行う時期は、水セメント比 45, 55 および 65% の場合に対し、それぞれ、6, 7 および 8 時間とした。これらは、各コンクリートの凝結の終結時間にほぼ対応する時間である (図-1 参照)。これらの時間に給水を行ったのは、この時期であれば、コンクリートの品質が給水によって損なわれず、かつ、水セメント比が 45% の場合でも、コンクリート表面がほとんど乾燥していない状態にあった理由による。

なお、上記の養生方法のうち、開放養生と湿布養生が前報<sup>2,9)</sup>における試験で採用した養生方法であり、封かん養生と給水養生が新たに追加された養生方法である。

#### b) 材齢1日以降の養生方法

**封かん養生** (記号: f) : 供試体をビニールラップで3~4重に包んだ後、これをビニール袋の中に入れ、袋の内部にできるだけ空気が残らない状態にして袋の口をガムテープで密閉し、湿度 55±5%、温度 20±1℃の室内に静置した養生。ただし、打込み直後から封かん養生を継続した凍結融解試験用供試体の場合は、試験開始材齢まで材齢1日以前の状態(前記 a)の封かん養生)のまま静置した。

**水中養生** (記号: w) : 供試体全体を 20±2℃ の水槽中に没した状態に保った養生。

#### (5) 凍結融解試験および力学的性質の試験

凍結融解試験は、JSCG-G 501(コンクリートの凍結融解試験方法)に準拠し、二槽式凍結融解試験機で行った。ブライン液および供試体中央の温度履歴は前報<sup>9)</sup>に示した。凍結融解の繰返しは、300 サイクルあるいは供試体が破壊するまでとした。供試体のたわみ動弾性係数の測定に際しては、測定中における供試体の乾燥や温度変化を最小限とすべく、一度に試験槽から取り出す供試体の数を6本以内とした。また、測定を終えた供試体には、試験槽に戻すまでの乾燥を防ぐことを目的として、直ちに全体を湿布で覆う措置を施した。

凍結融解試験は、各養生条件のコンクリートに対して、材齢8時間~14日の間で開始した。

動弾性係数補正用供試体のたわみ動弾性係数は、凍結融解試験用供試体と全く同じ養生を継続しながら、その間の適当な時間間隔毎に、通常の方法によって試験した。また、圧縮強度も、前述したキャッピング処理に伴って材齢12時間~1日の間だけ湿度条件に相違が生じた一部の例外もあるが、原則的には凍結融解試験用供試体と同じ養生方法を適用した供試体を用いて試験を行った。

#### (6) 供試体の種類または試験条件の記号

本研究では供試体の水セメント比および養生方法を各種に変化させたので、試験条件を明確にすることを目的として、{%で表した水セメント比}、{材齢1日以内の養生方法の記号}および{材齢1日以降の養生方法の記号}を、この順序で組み合わせた記号によって供試体の種類あるいは試験条件を表すことにした。

例えば、水セメントを45%、材齢1日以内の養生を開放養生(a)とした場合、材齢1日以内に試験を開始したものは45a、材齢1日以降にさらに水中養生(w)を行って試験を開始した供試体であれば、これを45awと表示す

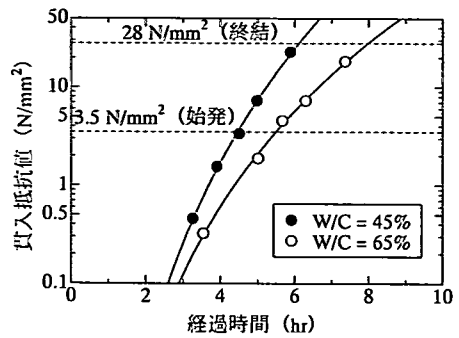


図-1 コンクリートの凝結試験結果

ることにした。

#### (7) 耐凍害性評価手法 I の概要

凍結融解試験用供試体と全く同様に作製・養生した供試体のたわみ動弾性係数( $E_d$ )を、材齢2週程度までの5~7材齢で測定する。それらの結果を式(1)で計算されるそれぞれの積算温度( $M$ )に対してプロットすると、両者の関係は式(2)の双曲線式できわめて良好に近似できる<sup>9)</sup>ので、各試験条件毎に式(2)の定数  $a$ 、 $b$  および  $M_0$  を決定して  $M$  と  $E_d$  の関係式を求める。

$$M = \sum t(\theta + 10) \quad (1)$$

$$E_d = \frac{M - M_0}{(1/a) + \{(M - M_0)/b\}} \quad (2)$$

ここで、 $\theta$ : 供試体中央部の温度(℃)

$t$ : 供試体の材齢(日)

$M_0$ :  $M \sim E_d$  曲線と  $M$  軸との交点(DD)

$a$ :  $M \sim E_d$  曲線の初期接線勾配

$b$ :  $E_d$  の収束値 ( $M \rightarrow \infty$  での値)

式(2)中の3個の定数のうち、 $M_0$ の値としては、たわみ動弾性係数が生じ始める積算温度であるので、コンクリートの凝結の始発から終結の間の適当な積算温度(通常は5~10DD程度)を選べば良い。この際に、本来選定すべき積算温度と5DD程度相違した値を選定しても、 $E_d$ の計算値はほとんど相違しない。一方、 $a$ および $b$ は、式(2)が式(3)の形に変形できるので、 $y = (M - M_0)/E_d$ と $x = (M - M_0)$ を計算し、これらの2つの量の間に存在する直線関係の  $y$  軸との切片と勾配を求めれば決定できる<sup>9)</sup>。図-2に、 $M_0$ としてほぼ始発時間に対応する積算温度を用いて、 $a$ および $b$ を求めた結果の例を示すが、 $x$ と $y$ との相関係数  $r$ は全て0.9990以上となった。

$$\frac{(M - M_0)}{E_d} = \frac{1}{b} (M - M_0) + \frac{1}{a} \quad (3)$$

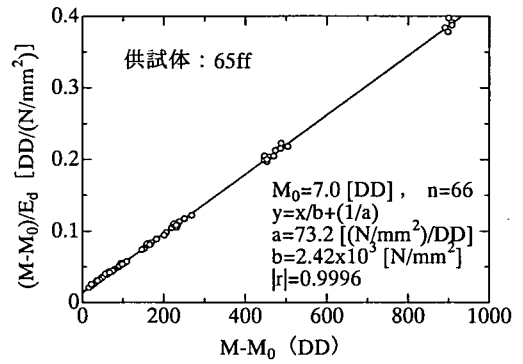
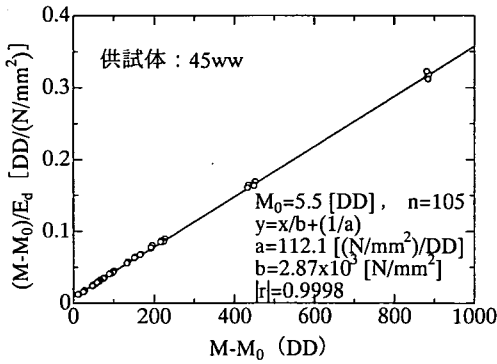


図2  $M-M_0$  と  $(M-M_0)/E_d$  の関係の例

凍結融解試験中における供試体の健全度を表す指標には、式(4)で定義される修正相対動弾性係数 ( $RE_{mi}$ ) を用いる。

$$RE_{mi} (\%) = \frac{E_{mi}}{E_{ci}} \times 100 \quad (4)$$

ここで、 $E_{mi}$  は動弾性係数の実測値であり、 $E_{ci}$  には、打込み直後から  $E_{mi}$  を測定した時点までの凍結融解試験用供試体の積算温度を式(2)に代入して求まる  $E_d$  の値を用いる。ただし、凍結融解試験中に供試体の中央部温度が  $0^\circ\text{C}$  以下となっている期間の積算温度の算出には次式を用いる<sup>1),2)</sup>。

$$M = 0.3 \times \{\Sigma t(\theta+15)\} \quad (5)$$

なお、式(4)の  $E_{ci}$  として試験開始時の動弾性係数を用いると、一般の場合における相対動弾性係数となる。また、同じバッチから作製しても、凍結融解試験用供試体の試験開始時のたわみ動弾性係数が式(2)から求まる値(動弾性係数補正用供試体の値)と 5% 程度相違することがある。このような場合は、最終的に求まる凍結融解サイクル数と修正相対動弾性係数の関係を、修正動弾性係数の初期値が 100% となるよう、平行移動させればよい<sup>2)</sup>。

本研究でも、凍結融解試験中におけるセメントの水和の進行の影響が大きい供試体(試験開始時の材齢が 14 日以内のもの)を対象としたので、データ解析には上述した耐凍害性評価手法を適用した。また、この手法によって求まる凍結融解サイクル数と修正相対動弾性係数の関係から一般の場合と同様に算出した耐久性指数を“(修正)耐久性指数”と呼称することにし、図にはこの表記を用いる。ただし、文章中では、特に誤解の恐れがない限り、単に耐久性指数と記述する。なお、耐久性

指数を求める計算式における“試験を終わらせるサイクル数”は 300 サイクルとした。

### 3. 実験結果および考察

#### (1) 耐凍害性評価手法 I の適用性

図-3 および図-4 は、材齢 1 日以内の養生を封かん養生あるいは給水養生としたコンクリートの凍結融解試験結果(本報のために新たに追加した実験結果)に 2. (7) で述べたデータ解析手法を適用し、それぞれの試験条件に対して求めた修正相対動弾性係数を凍結融解サイクル数との関係で示したものである。図中の各曲線は、2 本の供試体の平均を示した 65ff の場合を除き、3 本の供試体から得た試験結果の平均値である。また、図中には凍結融解試験開始時の各コンクリートの圧縮強度を円柱供試体で試験した結果も示した。

図-3 を通覧すると、試験開始時の圧縮強度が小さいものほど耐凍害性が小さいこと、内部の含水量が大きい場合 (ww) の方が凍結融解試験中における劣化速度が大きいことなど、凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化メカニズム<sup>6)</sup>(毛細管間げき中の水が凍結する際の間げき内圧力の上昇による組織損傷)に照らして合理的な傾向が認められる。また、注目すべき特徴としては、45ff、45ww、55ff および 55ww の場合の全ての供試体と 65ff および 65ww の場合の半数の供試体については、これらの凍結融解試験を供試体作製後 18 時間~5.6 日のごく若い材齢に開始したにも関わらず、凍結融解の繰返し作用を受けながら品質が向上する(修正相対動弾性係数が 100% より大きくなる)といった不合理性は全く認められない。また、耐凍害性がきわめて良好なものは、修正相対動弾性係数が試験中にほとんど低下しておらず、その健全性が適切に反映される形状の曲線とな

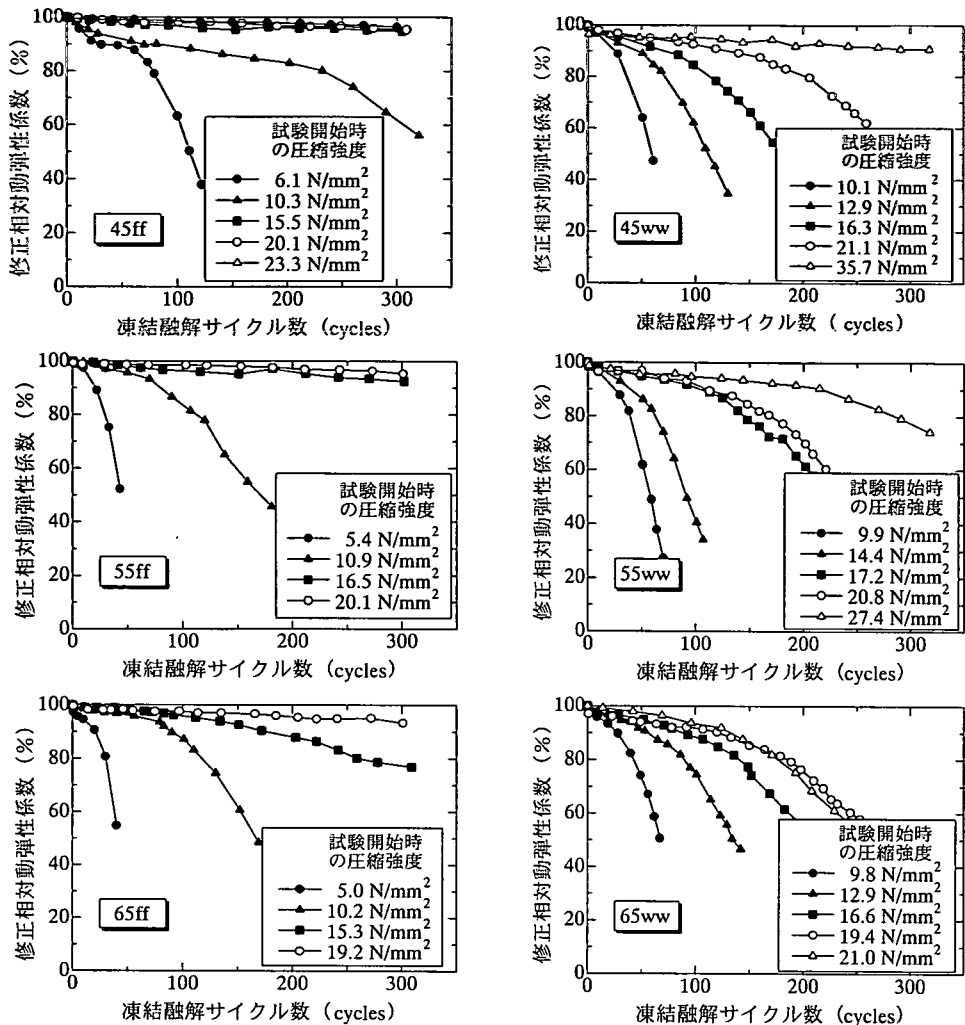


図-3 凍結融解サイクル数と修正相対動弾性係数の関係

っている。これらは、材齢1日以内の養生を開放養生あるいは湿布養生とした供試体に対する前報<sup>2</sup>の結果の場合も全く同様であった。

以上の諸点を考慮すると、若材齢コンクリートの凍結融解試験結果からセメントの水和が継続する影響を評価・排除する目的で提案した著者等のデータ解析手法は、満足すべき適用性を有しており、本研究でもその使用目的を十分に果たしていると考えられる。また、この手法を適用して得た図-3、図-4 および前報の結果は、試験で対象とした各コンクリートが“凍結融解試験開始時に保有している耐凍害性能”を適切に示していると判断して良いと考えられる。

高炉スラグ微粉末（高炉セメント）や低発熱ポルトランドセメント（ピーライトセメント）を用い、かつ十分

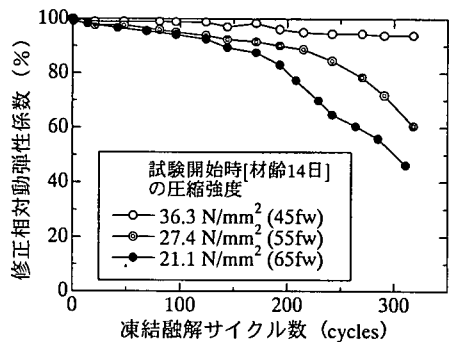


図-4 材齢1日まで封かん養生後、水中養生した供試体の凍結融解試験結果

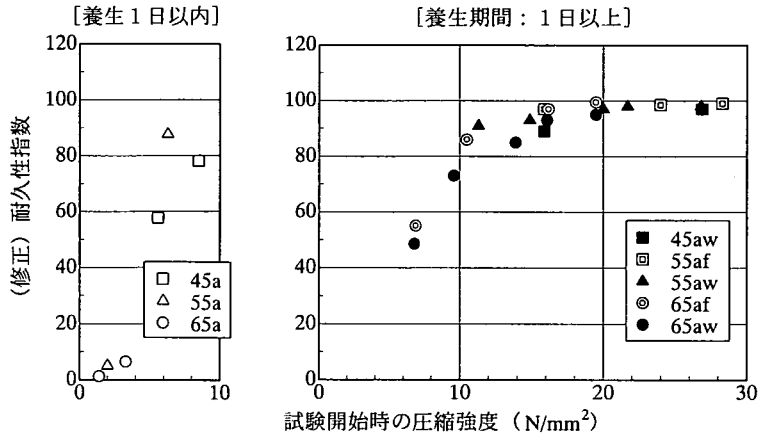


図-5 材齢1日以内の養生を開放養生とした供試体の試験開始時圧縮強度と耐久性指数の関係

なエントレインドエアを混入した一般の AE コンクリートあるいは高流動コンクリートの場合、これらの急速凍結融解試験を標準的な材齢（14 日）で開始しても、試験中に動弾性係数が徐々に増大し、300 サイクルの凍結融解を与えた時点で見かけ上の相対動弾性係数が 105～115%になることが多い<sup>7),8)</sup>。これらの試験結果も、試験中に結合材の水和が相当に進行した（コンクリートの剛性が増した）影響を反映したものと考えるべきであって、実際の耐凍害性能を知るためには、この水和の影響の度合いを定量的に適切に評価し、通常の方法で得られる相対動弾性係数の値を補正する必要がある。本研究で使用したデータ解析手法は、この目的にも効果的に準用（式（2）の代りに動弾性係数の変化を良好に近似できる指数関数などを使用）できるのである<sup>9)</sup>。

なお、土木学会示方書<sup>3)</sup>では凍結融解作用に対する性能照査の指標に相対動弾性係数を用いているが、その規定の内容は、上述した種類の結合材を用いたコンクリートの相対動弾性係数が凍結融解試験中に増加する影響に対する配慮に欠けたものとなっている。今後の検討と適切な対応を望みたい。

## (2) 養生条件が耐凍害性に及ぼす影響

図-5 は、前報<sup>2)</sup>の試験結果を用い、材齢 1 日以内の養生を開放養生（温度 20℃、湿度 55±5% RH の室内に放置）とした場合に対して、凍結融解試験開始時のコンクリートの圧縮強度と修正耐久性指数との関係を示したものである。この図では、試験開始材齢が 1 日以内で、開放養生のみを行った供試体の試験結果と、材齢 1 日まで開放養生した後封かん養生または水中養生を行った供試体（材齢 2～14 日）の試験結果を分けて示した。

図-5 において養生期間が 1 日以上の場合の結果に着

目すると、水セメント比が 65%で、かつ、材齢 1 日以降に水中養生した供試体（65aw）の場合に、同じ圧縮強度に対する耐久性指数が他よりやや小さい傾向にはあるが、全般的には、各試験値はほぼ一つの曲線上にあり、耐凍害性能に大きな差はないことが認められる。また、材齢 1 日以内に試験を開始した場合も含めて、全般的に耐凍害性が高く、圧縮強度が約 7.5N/mm<sup>2</sup>以上に達していれば耐久性指数が 60 以上となることも認められる。

図-6 は、打込み直後から試験開始時（材齢 0.75～11.1 日）まで封かん状態（温度 20℃）に保った供試体と材齢 1 日まで封かん養生し、その後 13 日間水中養生した供試体に対して、図-5 と同様な関係を求めたものである。

図-6 を参照すると、水セメントを 55 または 65%とし、試験材齢まで封かん養生を継続した供試体（55ff および 65ff）の場合は、図-5 と同様に、試験開始時の圧縮強度と耐久性指数の関係は 1 つの曲線で表されることが認められる。しかし、これらと同じ水セメント比の供試体に対する図-5 の結果と比べると、圧縮強度が約 20N/mm<sup>2</sup>より小さい領域における耐久性指数が相当に小さくなっている。また、これらの曲線は、水セメント比を 45%とした供試体に対する曲線より下方に位置しており、養生条件によっては圧縮強度と修正耐久性指数との関係が水セメント比によって相違する場合もあり得ることが示されている。さらに、図-5 の結果と大きく異なる傾向として、封かん養生後材齢 1 日から 13 日間水中養生した供試体（45fw, 55fw および 65fw）の場合は、圧縮強度そのものは 20 N/mm<sup>2</sup>を超える大きな値に増大しているにもかかわらず、同一圧縮強度に対する耐久性指数が著しく低下していることが認められる。

前述したように、凍結融解作用によるコンクリートの

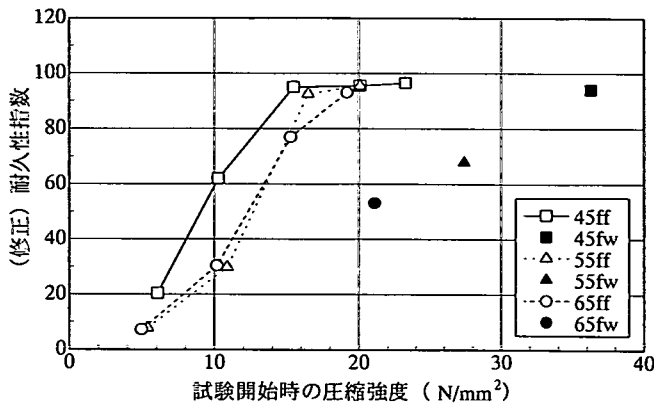


図-6 材齢1日以内の養生を封かん養生とした供試体の試験開始時圧縮強度と耐久性指数の関係

損傷劣化は、コンクリート中の水が凍結する際の毛細管間げき内の圧力上昇に起因して生じると考えられており、凍結時にコンクリート中に残存している水量が多い場合ほど顕著になることが確認されている<sup>9,10</sup>。また、毛細管間げきの体積に占める水の割合（飽水度）が或る限界値（限界飽水度：冷却速度などの条件により相違するが90%程度）以下である場合は、コンクリートの凍結による劣化が大幅に軽減されることも実験的に確認されている<sup>9,10</sup>。これらの諸点を考慮すると、材齢1日以内の養生を開放養生とした供試体の場合（図-5）は、この最初の養生期間中に限界飽水度を十分に下回る程度まで水の逸散が進み、全般的に大きな耐凍害性が確保されたものと推察される。また、図-5において、材齢1日以降の養生を水中養生または封かん養生としても耐凍害性にほとんど差が認められなかったことは、当初の開放養生中に毛細管間げき中の水の一部と置き換わった空気の多くが、その後の水中養生を経てもそのままコンクリート中に残存していたことを示唆していると考えられる。

一方、打込み直後から封かん状態に保ったコンクリートの場合には、大気中への水の逸散は妨げられるが、セメントの水和が進行するため、自由水の一部が化学的結合水となる際の体積の減少により、毛細管間げき中の飽水度が低下する（自己乾燥）。図-6において、封かん養生を継続した場合の耐凍害性が、材齢1日以降に水中養生を行った場合に比べて相当に大きくなっているのは、この自己乾燥による飽水度の低下も耐凍害性の向上に大きく貢献していることを示すものと思われる。しかし、材齢1日まで封かん養生した供試体をその後水中養生した場合に耐凍害性が著しく低下する傾向にあったこと、一度乾燥させたコンクリートを単に水中に放置するだけではその内部の空気を水と置換させることは極めて困難であること<sup>10</sup>、などを考慮すると、少なくとも材齢1日までの封かん養生を終えた段階では、図-6の各供試体

の飽水度は限界飽水度を下回らない範囲にあったものと思われる。また、このような材齢1日までの養生を終えた時点における飽水度の相違によって、前述したような図-5と図-6に認められた耐凍害性能の差異がもたらされたものと考えられる。

なお、図-6において封かん養生を継続した条件に着目すると、水セメント比を45%とした場合に、他の水セメント比の場合に比べ、耐凍害性が大きい傾向にあることが認められる。この理由に関しては、特に検討は行っていないが、単位セメント量が増えて自己乾燥が多くなる影響が水セメント比45%の場合に大きく現われたことも考えられる。

次に、材齢1日までコンクリートの打込み面を湿布で覆って養生し、その後に水中養生を継続した場合（mw）およびコンクリートの内部を常に飽水状態に保つことを目的として採用した養生の場合（ww：給水養生+水中養生）について、試験開始時の圧縮強度と耐久性指数の関係を調べてみた。図-7は、この結果を示したものであり、比較のために、図-5および図-6に示したデータのうち、材齢1日以降に水中養生を行った供試体の試験結果も再掲した。

図-7を参照すると、材齢1日以内の養生を湿布養生あるいは給水養生とし、その後に水中養生した場合にも、試験開始時の圧縮強度と耐久性指数の関係は、水セメント比の相違に関係なく、それぞれの養生毎にほぼ同じ曲線で表されることが認められる。しかし、それぞれの養生に対する曲線は互いに著しく相違しており、コンクリートを飽水状態に保った場合（ww）は、圧縮強度が約20 N/mm<sup>2</sup>に達しても耐久性指数は50程度に過ぎないことが認められる。これに対し、湿布養生を終えた材齢1日から水中養生した場合（mw）は、図-6の封かん養生を継続した場合（ff）の曲線とほぼ同じとなり、耐凍害性は給水養生した場合ほど極端には低下していない。本



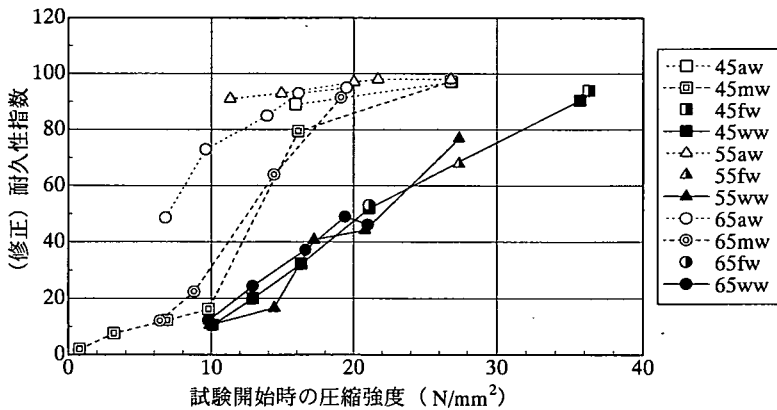


図-7 材齢1日以降に水中養生を行った供試体の試験開始時圧縮強度と耐久性指数の関係

研究の湿布養生の場合には、2. (4)でも述べたように、十分に水で湿らせた厚手の麻布を二重にしたもので供試体を覆ったが、1日後には麻布全体がほぼ乾いた状態になっていた。したがって、材齢1日までの湿布養生を終える時期までにはコンクリートからもその外界条件に応じた水分の逸散があったことは容易に推測できるのであって、これが上記のような差異を生じる原因になったものと思われる。

図-7において、当初に給水養生した場合 (ww) に対する試験開始時の圧縮強度と修正耐久性指数の関係に着目すると、両者はほぼ直線的な関係にあることが認められる。この結果は、飽水状態にあるコンクリートの場合には、その耐凍害性がコンクリートの強度に強く依存していることを示すものと考えられる。そして、この場合の強度としては、前述した凍害による損傷メカニズムを考慮すると、特に引張強度が関与しているように思われる。

なお、図-7には、材齢1日まで封かん養生し、その後13日間水中養生した供試体 (fw) の試験結果も、給水養生後水中養生した供試体 (ww) の場合と同等になっていることが認められる。この結果は、材齢1日まで封かん養生した供試体とその後の水中養生中に飽水状態にほぼ近い状態になったことを示唆していると考えられるのであって、20℃で材齢1日まで封かん養生した供試体の飽水度が限界飽水度を下回らない範囲にあると考えた前記の考察の妥当性を裏付けるものと思われる。

### (3) 一般的に要求される耐凍害性能を確保するための所要圧縮強度の最小値に関する考察

急速水中凍結融解試験の結果と実際の自然環境下におけるコンクリートの耐凍害性との対応関係については未だ不明な点が多い。しかしながら、一般には、300サイクルの急速水中凍結融解を与える試験から求まる耐久性指数が60以上のコンクリートであれば、厳しい自然環

境下においても実用的に満足すべき耐凍害性能が長期間確保されると考えられている<sup>12)</sup>。この考えは、土木学会示方書<sup>3)</sup>の寒中コンクリートに対する養生終了時の圧縮強度が定められた際にも適用されている<sup>13)</sup>。そこで、本節では、上述してきた試験結果を基に、「300サイクルの急速凍結融解試験で得られる耐久性指数60」を一般的に要求される耐凍害性能の下限と考え、このレベルの耐凍害性能を確保するのに必要な圧縮強度の最小値を調べてみることにした。表-5は、この結果を、それぞれの養生条件毎にまとめたものである。

表-5を参照すると、一般的に要求される耐凍害性能を確保するためのコンクリートの圧縮強度の最小値は、養生方法によって著しく相違していることが認められる。しかし、それらの最小値は、打込み直後から封かん養生を継続した場合 (fw) と材齢1日以内に開放養生した場合 (af, aw) を除くと、水セメント比の相違に関係なく、それぞれの養生条件毎に一定になっている。また、水セメント比によって相違する場合でも、水セメント比の違いによる圧縮強度の差は3.5N/mm<sup>2</sup>以下に過ぎない。これらの結果から判断すると、水セメント比を45~65%とした範囲では、良質な骨材を用い、かつ、十分な空気を混入した若材齢コンクリートに満足すべき耐凍害性能を付与するために必要な圧縮強度の下限値は、コンクリートの含水量に影響を及ぼす養生条件に大きく左右され、水セメント比の影響はあまり受けないと考えて良いように思われる。また、このような結果が得られた理由に関しては、圧縮強度が同じ若材齢コンクリートの場合には、内部の毛細管間げきの量 (体積比率) もほぼ同じになっていると考えられるのであって、毛細管間げきの量、その飽水度および強度が同等である条件下で凍結融解作用による損傷もほぼ同程度となったことによるものと思われる。

表-5には、封かん養生後水中養生した場合 (fw) お

表-5 耐久性指数 60 を確保するために必要なコンクリートの圧縮強度の最小値

養生方法			圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		
材齢 1 日以内	材齢 1 日以降	記号	W/C = 45%	W/C = 55%	W/C = 65%
開放養生	封かん養生	af	5~6 (1 日以内の開放養生中に到達)		8.0
	水中養生	aw			
湿布養生	水中養生	mw	14.0		
封かん養生	封かん養生	ff	10.0	13.5	
	水中養生	fw	24.0		
給水養生	水中養生	ww	24.0		

よび給水養生後水中養生した場合 (ww) の圧縮強度の最小値 (24N/mm<sup>2</sup>) も示されており、この値が、飽水状態にあるコンクリートに所要の耐凍害性を付与できる圧縮強度の下限になるものと考えられる。Hilsdorf<sup>16)</sup>は、多くの国家規格あるいは国際規格では、厳しい気象作用にさらされるコンクリート構造物に用いるコンクリートの圧縮強度の最小値を 25N/mm<sup>2</sup> 近辺に定めていることを示している。また、ISO 規格の原案となる欧州規格案<sup>15)</sup>では、飽水状態で凍結融解作用を受ける環境下にある構造物には、コンクリートの圧縮強度の特性値を 30N/mm<sup>2</sup> 以上に設定することを勧めている。これらの諸外国の規格値は、本研究で求めた値と比べて同等あるいは同等以上であり、適切に定められていると思われる。

なお、上記の圧縮強度の最小値 24N/mm<sup>2</sup> は、水セメント比を 65%とした場合に対しては、標準養生供試体の 28 日圧縮強度にほぼ匹敵し、実際の寒中施工でこの強度を得るのには一般には数ヶ月を要するのであって、必ずしも実用的な値ではない。このように、表-5 は単に十分なエントレインドエアを混入したコンクリートの所要圧縮強度の最小値を示しただけのものである点に注意しておく必要がある。

#### (4) 寒中コンクリートの養生方法に関する考察

わが国の指針類の基礎となっている土木学会示方書<sup>3)</sup>や建築学会の JASS 5<sup>12)</sup>では、寒中コンクリートの場合も、所定の強度が得られるまでコンクリートを湿潤状態に保つことを基本としている。これに対し、英国や米国の基準類では、寒中コンクリートを湿潤養生することは一般には避け、コンクリートからの水分の逸散ができるだけ少なくなることに主眼を置いた養生方法 (不透水性シートによる覆いや養生剤の散布) を採ることを推奨している<sup>16),17)</sup>。

凍害によるコンクリートの損傷を防ぐ観点からは、コ

ンクリート中の水分が少ないことが望ましい。このため、寒中コンクリートに湿潤養生または蒸気養生を適用する場合は、養生を終える時期にコンクリートを乾燥させることが勧められている<sup>16),17)</sup>。しかし、養生終了時には、コンクリートの組織が相当にち密になっているので、内部の断面から必要量の水分を均等に逸散させることは容易でないと考えられる。また、その方法を誤ると断面内の湿度勾配の急変により表面ひび割れが発生する可能性もあると考えられる。このため、本研究では、一般的な措置と逆で実務的にも容易な方法、すなわち、打込み直後から暫くの間はコンクリートからの水分の逸散を許容し、ある程度の強度が発現した段階から十分な水を与える複数の養生方法について検討し、これらも耐凍害性改善に有効であることが確認された (表-5 参照)。また、封かん養生を継続した場合 (ff) にも、湿潤状態を保つ場合 (ww) に比べ、所要の耐凍害性能を確保するための圧縮強度をほぼ半減できることが判明した。しかし、初期段階にコンクリートからの水分の逸散を許容する方法の場合は、その後のセメントの水和に悪影響が生じ、正常な強度発現が阻害される可能性もあると考えられる。そこで、少なくとも材齢 12 時間までは凍結融解試験用角柱供試体と全く同様に養生した円柱供試体の圧縮強度試験結果 (図-3 などに示した試験開始時圧縮強度) を用いて、この点について調べてみた。

図-8 は、この結果を水セメント比別に分け、それぞれの養生を経たコンクリートの圧縮強度を自然対数で表した積算温度に対してプロットしたものである。ただし、図中において積算温度が 30 DD 以下の範囲にある点は、1 日以内の養生のみを行った供試体の試験値であり、これらの試験値を得た供試体の養生方法は、凍結融解試験用供試体と全く同じである (2. (3) 参照)。

図-8 を参照すると、多少のばらつきはあるものの、積算温度と圧縮強度の関係は、養生方法の相違に関わら

ず、各水セメント比毎に1つの曲線で表し得ることが認められる。そして、30DD以下の範囲にある開放養生供試体の試験値が特に小さくなる傾向も全く認められない。また、材齢12時間まで開放養生してキャッピングを行い、材齢1日以降に封かん養生または水中養生とした場合 (af または aw) の圧縮強度に着目しても、飽水状態に保った場合 (ww) とほとんど差異がない。さらに、各図には打込み直後から14日間封かん養生した供試体の試験値も含まれているが、これらも飽水状態を保った場合と同等な強度発現を示している。

上記の結果から判断すると、若材齢における強度発現を順調に進行させるためには、必ずしもコンクリートを湿潤状態に保ち続ける必要はなく、自由水が豊富な初期の段階に多少の水分の逸散を許容しても、断面内に存在する大部分のセメントの水和は正常に進行すると考えられる。ただし、圧縮強度の試験値は供試体の平均的な品質を代表するものであり、例えば、乾燥面の近傍のみが過度に乾燥され、この表層部分のセメントの水和が遅れるなどの悪影響が生じていたとしても、これが図-8のような試験結果に現われ難いことも事実である。したがって、打込み直後の早い時期から水分の蒸発を許容して養生する方法については、乾燥条件と乾燥面の局所的な状況や品質との関係を詳細に調べるなどして、その適用性を更に検討していく必要があると思われる。

一方、封かん養生を継続した場合は、断面内の含水分布がほぼ均一になり、コンクリートの強度発現も均等に進むものと思われる。この点と前記の耐凍害性能改善効果を考慮すると、現時点では、養生終了後に厳しい凍結融解作用を受ける恐れのある寒中コンクリートの場合は、湿潤養生はできるだけ避け、封かん養生に近い養生方法、すなわち、コンクリートからの水分の逸散をできるだけ抑えると同時に、断面内の含水分布がほぼ均一になることに主眼をおいた養生方法を採用するのが望ましいと考えられる。

前述した英国や米国の基準類で推奨されている不透水性シートや養生剤でコンクリート表面で覆う方法は、上記の望ましい養生方法を現場コンクリートに適用するための具体策であると言える。この場合、不透水性シートなどを用いても、コンクリートからの水分の逸散を完全に防止することは一般には困難であると考えられる。しかし、コンクリート温度が10℃前後に保たれる一般的な養生条件下では、水分の蒸発量は少なく<sup>10)</sup>、この際に多少の水分が逸散しても、図-8の結果から判断して、コンクリートの強度発現が特に損なわれる可能性はほとんどないと思われる。また、水分の蒸発量が増加する15~20℃程度で養生を行う必要がある場合は、温風に蒸気を含ませたり、透水性シートの上に養生マットを重ね

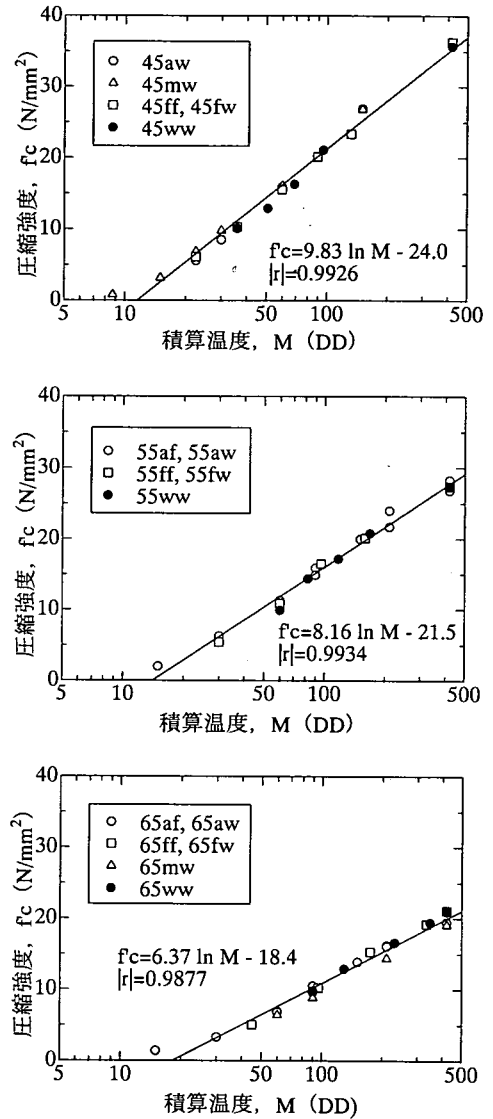


図-8 養生方法を相違させた若材齢コンクリートの積算温度と圧縮強度の関係

で敷くことなどにより、コンクリートの乾燥を最小限に防ぐことも可能と考えられる。このように、寒中コンクリートを封かん状態に近い状態で養生することは、実施工でも比較的容易であり、工学的な問題もほとんどないと考えられる。したがって、わが国でも、上述してきた諸点を参考にし、寒中コンクリートの養生規定を英国や米国と同様な規定に改めるのが望ましいと考えられる。

表-6は、表-5の結果と図-8に示した曲線式を用い、湿潤状態が継続される場合と封かん状態が保たれる場合に対して、満足すべき耐凍害性能が確保される安全側の

表-6 耐久指数 60 を確保するために必要な養生日数

(a) 湿潤養生を継続する（飽水状態を保つ）場合

水セメント比 (%)	所要圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	積算温度 (DD)	必要養生日数 (日)	
			5 °C	10 °C
45	24.0	132	9	7
55		264	18	13
65		777	52	39

(b) 乾燥を防ぎ、かつ湿潤させない（封かん状態を保つ）場合

水セメント比 (%)	所要圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	積算温度 (DD)	必要養生日数 (日)	
			5 °C	10 °C
45	10.0	32	2	1.5
55	13.5	73	5	4
65		150	10	8

養生日数を求めた結果を参考として示したものである。自然環境下にある実構造物の場合は、一般には1サイクル/日以下の緩やかな凍結融解作用を受け、また、この間に生じた内部欠陥がその後のセメントの水和によって自然に修復される可能性もある。したがって、寒中コンクリートの必要養生日数については、自然環境を考慮した別の試験を行って検討する必要がある。表-6の結果はあくまでも参考として扱うのが適切である。ただし、表-6の必要養生日数が水セメント比によって著しく相違している点は注目すべきであり、この点は自然環境を考慮した適切な実験を行っても同じであると考えられる。現行の土木学会示方書では、水セメント比を55%とした場合に対する寒中コンクリートの養生日数の目安を表で示し、その脚注に「水セメント比がこれと異なる場合は、適宜増減する」と記されているが、少なくとも、この注記を「水セメント比がこれと異なる場合は、55%の場合と同じ圧縮強度が得られる日数とする」と修正するのが望ましいと考えられる。

4. 結論

試験中にセメントの水和が継続する影響を排除する独自のデータ解析手法を適用して、十分なエントレインドエアを混入したコンクリートが若材齢の各時点に保有している耐凍害性能について基礎的に調べた。本研究の範囲内で、次のことが言えると思われる。

- (1) 著者等が過去の研究において考案・提示した若材齢コンクリートの耐凍害性能評価手法は、積算温度が15 DD程度のごく若いコンクリートも含め、結合材の水和の進行が無視できない段階にある各種コンクリートの耐凍害性能を正しく判定・評価するために有効に利用できる。
- (2) 若材齢コンクリートの耐凍害性能も、コンクリートの強度と含水状態（乾燥条件）に支配的に左右され、水セメント比の相違による直接的な影響は小さい。ただし、コンクリートの強度発現速度に及ぼす水セメント比の影響は若材齢において特に顕著であり、同等の耐凍害性能を確保するための日数は、水セメント比を小さくすることによって大幅に短縮される。
- (3) コンクリート中の自由水のある限度を超えて逸散させると、その後に湿潤状態に保っても再度飽水され難く、コンクリートの耐凍害性能を向上させる効果が得られる。
- (4) 封かん状態に保たれるコンクリートの場合、一般に要求されるレベルの耐凍害性能を確保するために必要な圧縮強度の最小値は、水セメントが55あるいは65%の時は13.5N/mm<sup>2</sup>、水セメント比が45%の時は10.0N/mm<sup>2</sup>程度である。
- (5) 飽水状態に保たれるコンクリートの耐凍害性能は強度に大きく依存し、この状態にあるコンクリートの耐久指数と圧縮強度の関係は、両者がほぼ正比例する直線関係となる。
- (6) 水でしばしば飽水され、かつ厳しい凍結融解作用を受ける環境下に置かれる構造物の場合は、使用するコンクリートの設計基準強度を24.0N/mm<sup>2</sup>以上の値に設定する

必要がある。

(7) 養生終了後にも厳しい気象作用を受ける恐れのある寒中コンクリートの場合は、湿潤養生はできるだけ避け、コンクリートを封かん状態に近い状態に保つ養生方法を採用することが望ましい。このような養生方法を採用しても、コンクリートの強度発現性状は一般には湿潤養生の場合と同等になる。

謝辞：本研究の実施に当っては、平成5年度文部省科学研究費補助金（一般研究(C)）を受けた。ここに付記し、お礼申し上げる。

#### 参考文献

- 1) Nykänen, A.: Hardening of concrete at different temperatures especially below the freezing point, RILEM Symposium on Winter Concreting, Session B, 1956.
- 2) 長合友造, 山本泰彦: 若材令コンクリートの耐凍害性の評価法に関する基礎研究, 土木学会論文集, No. 433/V-15, pp. 71-80, 1991.
- 3) コンクリート標準示方書〔施工編〕-耐久性照査型, 平成11年度版, 土木学会, 2000.
- 4) 山本泰彦, 長合友造: 膨張ひずみ特性を利用した若材令コンクリートの耐凍害性評価法, 土木学会論文集, No. 460/V-18, pp. 75-84, 1993.
- 5) 近松竜一, 山本泰彦: 高炉スラグ微粉末の活性度の新しい評価方法, 土木学会論文集, No. 414/V-12, pp. 119-128, 1990.
- 6) ACI Committee 201: Guide to Durable Concrete, *ACI Manual of Concrete Practice, Part 1*, 1993.
- 7) 山本泰彦, 竹内 徹: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの配合と耐凍害性, 高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp. 129-134, 1987.
- 8) Yamamoto, Y. and Harada, K.: Freezing and thawing durability of highly-flowable and self-compactable concrete, Proc. of Fourth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, *ACI SP-170*, pp. 899-917, 1997.
- 9) 長谷川寿夫, 洪 悦朗: コンクリートの湿潤程度と耐凍害性の関係について, セメント技術年報 28, pp.311-313, 1984.
- 10) 田畑雅幸, 洪 悦朗, 鎌田英治: コンクリートの凍害の環境要因効果に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 368 号, pp. 8-15, 1986.
- 11) Neville, A. M.: Properties of Concrete, *Sir Isaac Pitman & Sons Ltd*, pp. 348-352, 1968.
- 12) 建築工事標準仕様書・同解説, JASS 5, 鉄筋コンクリート工事, 日本建築学会, 1998.
- 13) コンクリート標準示方書(昭和 49 年版)改訂資料, コンクリート・ライブラリー, 第 38 号, 土木学会, pp. 48-56, 1984.
- 14) Hilsdorf, H. K.: Concrete compressive strength, transport characteristics and durability, *Performance Criteria for Concrete Durability*, RILEM Report 12, Kropp J. and Hilsdorf H.K. eds, E & FN Spon, pp. 165-197, 1995.
- 15) Draft European Standard, Concrete-Part 1: Specification, performance, production and conformity (prEN 206), CEN, 1999.
- 16) British Standard, Structural use of concrete, Part 1, Code of practice for design and construction, *BS 8110: Part 1*, British Standard Institution, 1985.
- 17) ACI Committee 306: Cold Weather Concreting, *Field Reference Manual (ACI SP-15)*, pp. 223-245, 1996.

(2001. 8. 1 受付)

## FREEZING AND THAWING DURABILITY OF EARLY-AGE CONCRETE

Yasuhiko YAMAMOTO, Atsushi TAKEDA and Tomozou CHOUAI

Freeze-thaw resistance of concrete with sufficient entrained air was tested at the ages of about 12 hrs to 14 days by a conventional rapid freezing and thawing test. The effect of continued cement hydration during the test was eliminated from the test results by applying a data-analyzing technique which had been proposed by the authors.

It was shown that the freeze-thaw durability of early-age concrete was dependent on its strength and degree of saturation, and that a minimum compressive strength of 24N/mm<sup>2</sup> was required for a water-saturated concrete to possess a sufficient freeze-thaw durability. Also shown was that a curing method similar to sealed curing was preferable in cold weather concreting rather than a moist curing as recommended in Japanese specifications.