

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

山本泰彦*・長合友造**

凍結融解試験の融解時に測定される残留膨張ひずみによって若材令コンクリートの耐凍害性を評価する手法について検討し、まず、膨張ひずみが約 100×10^{-6} より大きい範囲では、凍結融解サイクル数と膨張ひずみの対数値との間に直線で近似できる相関関係が存在することを示した。次いで、この直線の勾配を用いて計算される1つの量が、一般に用いられている耐久性指数と良好な対応関係にあることを見出し、この量を用いた新しい耐凍害性評価手法を提案した。

Keywords : early age concrete, durability factor, freeze-thaw resistance, new evaluation method, residual strain

1. まえがき

凍結融解作用によるコンクリートの内部劣化やコンクリートの耐凍害性を調べる目的の試験においては、供試体の長さ変化率を測定する方法や動弾性係数の変化を測定する方法が昔から多く用いられてきている。しかしながら、コンクリートの耐凍害性能を試験する場合に限定すると、供試体の動弾性係数の変化を測定している例が圧倒的に多い。これは、動弾性係数の変化を測定する方法に対してのみ、広く認知されている評価指標（相対動弾性係数や耐久性指数）が提供されており、通常は、これらの指標の数値によって耐凍害性の相対的評価が簡便に行えるためと考えられる。

動弾性係数の測定値を利用した上記の評価指標を求める場合には、通常は、材令14日のコンクリート供試体を対象として試験が行われる。これは、この程度の材令で試験を開始すれば、一般には、コンクリートの耐凍害性能に関する妥当な結果が得られる理由によるものと思われる。しかしながら、近年の研究には、このような標準的手法にもその適用に限界があることを示唆する結果も示されている。例えば、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートを対象とした著者らの試験では、材令14日に試験を開始した場合でも、凍結融解サイクル数の増加とともに相対動弾性係数が次第に増加するといった不合理な結果が得られている¹⁾。また、三浦ら²⁾も、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの耐凍害性を比較的若い材令で試験し、著者らと同様な結果を得ている。

上記のような不合理な結果が得られた原因是、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの動弾性係数が、標準的な急速水中凍結融解試験中においても相当に増加した

ためであり、三浦らは、この影響を補正するための実験方法とデータ解析手法を提案している²⁾。動弾性係数の測定結果に、凍結融解試験中ににおけるコンクリートの品質変動を補正する手法に関しては、著者らの提案手法もある。すなわち、著者らは、寒中コンクリートの養生規定を耐凍害性の観点から再検討することを最終目標としている研究の中で、まず、セメントの水和による諸性質の経時変化が著しい段階にあるコンクリート（圧縮強度が 150 kgf/cm^2 程度以下のもの）で、本論文では、これを若材令コンクリートと呼ぶ）の耐凍害性評価方法について検討し、動弾性係数の測定値を利用する場合に対して、材令が1日に満たないコンクリートにも適用可能な新しいデータ解析手法の提案を行った³⁾。しかし、動弾性係数の測定結果に三浦らの手法あるいは著者ら手法を適用する場合には、試験中における動弾性係数の経時変動を補正する必要があるので、単に試験の種類や供試体の数が多くなるだけでなく、手数がかかる解析を行わなければならぬ煩雑さもある。

一方、長さ変化を測定する方法に関しては、凍結融解試験の融解時に測定する残留膨張ひずみ（以下、単に膨張ひずみと呼ぶ）の値に、凍害による内部劣化の程度が良く反映されることが確かめられている^{4), 5)}。また、著者らの予備試験の結果では、長さ変化の測定が可能な程度に硬化（圧縮強度で約 20 kgf/cm^2 以上）したコンクリートの場合には、通常の急速水中凍結融解試験中に進行する程度のセメントの水和が生じても、これによる供試体の膨張ひずみは試験誤差程度であった。したがって、品質の経時変動が大きい若材令コンクリートを対象とした場合には、その耐凍害性の評価に長さ変化（膨張ひずみ）の測定値を利用できる可能性があり、これが可能となれば極めて簡便であると考えられる。

鎌田⁴⁾は、上記のような特徴を有する膨張ひずみを凍伸度と称して、相対動弾性係数が 60% となる破壊状態

* 正会員 工博 筑波大学助教授 構造工学系
(〒305 つくば市天王台1-1-1)

** 正会員 工博 防衛庁技術研究本部第4研究所

に対応する凍伸度の概略値を各水セメント比毎に示している。大和⁶⁾も、相対動弾性係数60%に対応する膨張ひずみの値について調べ、鎌田の場合よりやや大きい値(1200×10^{-6} 程度)を得ている。また、初期凍害の影響の有無の判定に膨張ひずみを利用する試みも諸外国において多数なされており、1回の凍結を受けた後における凍害の有無を判別する基準値として、 $50 \sim 200 \times 10^{-6}$ の範囲にある膨張ひずみの値が提案されている⁷⁾。しかし、これらの研究においては、耐凍害性の良否や劣化の有無などを判定する基準値として膨張ひずみを利用しているに過ぎないのであって、膨張ひずみの値を利用してコンクリートの耐凍害性能を一般的、かつ、定量的に評価する手法は未だ確立されていない。

本論文は、著者らの既往の研究³⁾の中で実施した供試体の長さ変化測定の結果を主なデータとし、膨張ひずみの測定値を利用して若材令コンクリートの耐凍害性を定量的に評価する手法について検討した結果を述べたものである。

2. 使用材料、配合および試験方法の概要

前述したように、本研究で対象とする主要なデータは、前報³⁾の試験で得られたものである。また、一部の追加試験も、前報の試験と同じ材料を用い、前報と全く同様に行なった。したがって、本章では、使用材料、配合、試験方法、等に関する記述は必要最少限に留める。

(1) 使用材料および配合

用いたセメントは、普通ポルトランドセメントである。細骨材には、川砂(吸水率: 2.47%, 表乾比重: 2.59)を、また、粗骨材には、碎石(最大寸法: 20 mm, 吸水率: 0.37%, 表乾比重: 2.68)を用いた。AE剤には、天然樹脂系のヴィンソルを用いた。

コンクリートの水セメント比は、45, 55および65%とした。練上がり時のスランプおよび空気量は、それぞれ、8.0~9.0 cm および 5.3~6.0 % の範囲にあった。

(2) 凍結融解試験用供試体の作製

凍結融解試験用供試体は、 $10 \times 10 \times 40$ cm の角柱である。その作製に当たっては、型枠の長手方向の両端の中央部に長さ変化測定用チップを予め配置しておき、型枠中にコンクリートを2層に分けて詰めた。締固めの際には、 $\phi 16$ mm の突き棒を用い、各層を40回ずつ突いた。

(3) 供試体の養生方法

a) 試験材令が1日以内の供試体の場合

次の2つの何れかの養生方法を採用した。なお、この場合における供試体の脱型は、凍結融解試験の開始直前を行なった。

i) 湿布養生

コンクリートの打込み後、直ちに、十分に濡らした厚手の麻布で型枠も含めた全体を覆って、 20 ± 1 °C の恒

温室に静置した養生。

ii) 開放養生

湿度 $55 \pm 5\%$ 、温度 20 ± 1 °C の室内に、型枠に入れたまま、供試体の上面を開放した状態で静置した養生。

b) 試験材令が1日を超える供試体の場合

上記の何れかの方法で材令1日まで養生したのち脱型し、直ちに、次の何れかの養生を所定の材令まで行った。

i) 水中養生

供試体を温度 20 ± 2 °C の水中に没して養生。

ii) 封かん養生

供試体全体をサランラップで3~4重に包み、更に、これをビニール袋の中に入れ、出来るだけ袋の内部に空気が残らない状態にして、ビニール袋の口をガムテープで密封した養生。この養生は、 20 ± 1 °C の恒温室内で行なった。

(4) 凍結融解試験

JIS A 6204の附属書2に従って、急速水中凍結融解試験を行なった。ただし、供試体の測定項目に関しては、質量とたわみ振動の1次共鳴振動数の他に、JIS A 1129のダイヤルゲージ法に従って長さ変化も測定した。これらの測定は、温度 20 ± 1 °C、湿度 $60 \pm 10\%$ の室内で行なった。また、測定に当たっては、測定中における供試体の乾燥と温度変化を極力防止するよう特に注意するとともに、一度に試験槽から取り出す供試体の数も6本以内とした。

なお、凍結融解試験開始時の圧縮強度が 8 kgf/cm^2 であった供試体を除いた何れの供試体の場合も、 20°C での基長に対し、1サイクルの凍結融解を与えた後(約 5°C)に $(150 \sim 200) \times 10^{-6}$ の「収縮ひずみ」を生じた。この結果は、一般的コンクリートの線膨張係数が $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 程度であることを考慮すると、1サイクルの凍結融解によってこれらの供試体に膨張ひずみが生じたと仮定しても、それらの大きさは無視できる程度のものであることを示すものと考えられる。一方、試験開始時ににおける圧縮強度が 8 kgf/cm^2 であった供試体の場合には、凍結融解1サイクル後の長さが 20°C での初期値とほぼ一致し、この凍結融解中に $(150 \sim 200) \times 10^{-6}$ 程度の膨張ひずみが生じたと推測できる。しかしながら、この供試体の場合には、凍結融解サイクルの進行に伴う劣化が極めて急速であったので、上記した程度の膨張ひずみの初期値の差は、本研究で利用した凍結融解サイクル数と膨張ひずみの関係にほとんど影響を及ぼさないことが確認された。これらの諸点を考慮し、次章以降に示す膨張ひずみの計算に当たっては、温度の相違による影響を除く目的で、全ての供試体に対し、1サイクルの急速凍結融解を与えた後に測定した長さを初期値とした。

3. 実験結果および考察

コンクリートの凍結融解試験においては、同じバッチから作製した供試体を同じ条件で試験しても、供試体毎の試験値に大きな差が認められることがある。このため、本研究の目的が膨張ひずみの測定値を利用して若材令コンクリートの耐凍害性能を定量的に評価するための指標を見い出すことにある点に配慮し、以下の考察では、個々の供試体から得られる測定値を「1個の試験値」として取り扱うことにする。

(1) 膨張ひずみと修正相対動弾性係数の関係

図-1は、試験結果の一例として、水セメント比と養生方法が相違する4種類の条件に対して、圧縮強度レベルが異なる供試体を1本ずつ（それぞれの圧縮強度レベルの試料番号No.1のもの）選び、各供試体の凍結融解サイクル数と膨張ひずみの関係および凍結融解サイクル数と修正相対動弾性係数の関係を示したものである。これらの図における修正相対動弾性係数とは、一般的に定義されている相対動弾性係数と同様な意味を有する量であり、凍結融解試験中におけるセメントの水和により動弾性係数が増大する影響を前報³⁾の手法によって補正したものである。また、図中の一部の曲線に対しては、0サイクルにおける修正相対動弾性係数が100%となるような補正³⁾も行ってある。

図-1を参照すると、凍結融解サイクル数の増加に伴って修正相対動弾性係数が低下する状況と膨張ひずみが増加する状況は、いずれの場合にも非常に良く対応しており、若材令コンクリートの場合にも、凍結融解作用によるコンクリートの劣化の進行状況が膨張ひずみの測定値に良く反映されていることが認められる。

前述したように、膨張ひずみの変化と相対動弾性係数の変化とが上記のような良好な対応を示すことは、十分に硬化したコンクリートの場合には既に確認されている。そして、所定の回数（一般には、200または300サイクル）の凍結融解を与えた後の相対動弾性係数が60%以上であれば実用的には満足すべき耐凍害性を有していると判断される場合が多いこともあり、既往の研究^{4), 6)}では、相対動弾性係数が60%前後となる劣化状態に対応する膨張ひずみの値を1つの基準値と考え、この基準値を耐凍害性の良否の判定に用いようとする試みがなされている。そこで、まず、このような手法が若材令コンクリートの耐凍害性の判定にも適用出来るか否かについて調べてみるとした。

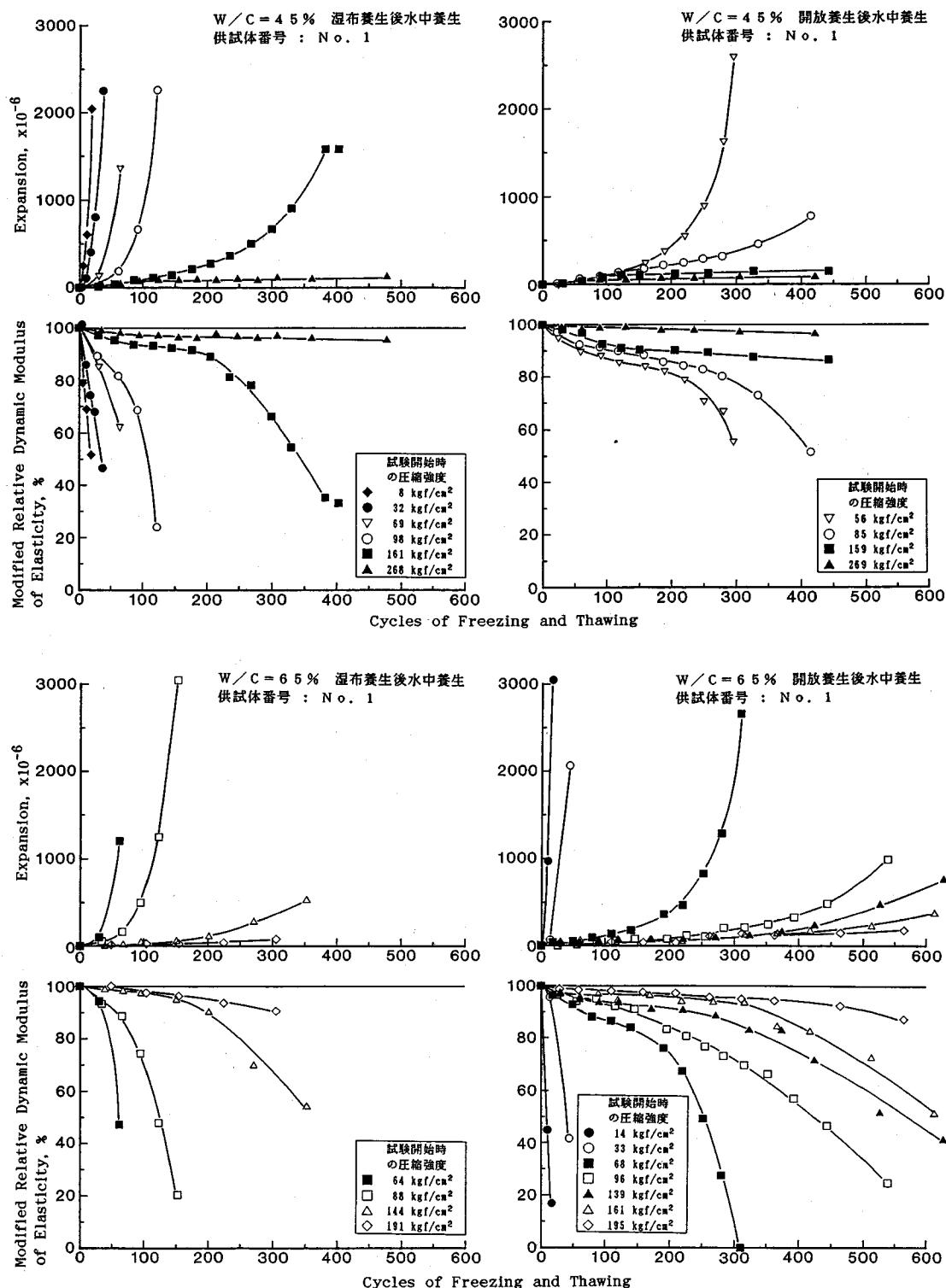
図-2は、修正相対動弾性係数が最終的に80%以下に低下した全ての供試体（300サイクル以上の凍結融解を与えた場合に修正相対動弾性係数の値が80%以下となった供試体も含む）を対象として、凍結融解試験の各段階における膨張ひずみと修正相対動弾性係数の関係を

プロットしたものである。この図を参照すると、膨張ひずみが $1000 \sim 1200 \times 10^{-6}$ を超えると修正相対動弾性係数の値が約70%以下になっていることが認められ、この点に関しては、既往の研究結果^{4), 6)}とほぼ一致した結果が得られた。また、鎌田⁴⁾が指摘しているように、両者の関係が水セメント比によって相当に異なることも認められる。すなわち、ある一定の膨張ひずみに対応する修正相対動弾性係数の値は、水セメント比45%および55%の場合にはほぼ同じであるが、水セメント比65%の場合には水セメント比が小さい場合と比較して小さくなる傾向にある。しかし、修正相対動弾性係数が60%となる膨張ひずみに着目すると、その値は約 $200 \sim 2000 \times 10^{-6}$ の範囲に広く分布していることも認められる。また、図-3は図-2中の水セメント比65%の場合の試験結果を供試体の養生条件別に分類して示したものであるが、この図をみると、水セメント比が同じでも、両者の関係は凍結融解試験開始時の材令や供試体の養生条件により相当に異なっていることが認められる。これらの結果は、凍結融解作用による内部劣化が生じた場合の修正相対動弾性係数の低下と膨張ひずみの増加の関係は、必ずしも一対一の対応関係にあるものではなく、供試体の水セメント比、含水状態、材令、その他によって相当に変化することを明示するものと言える。したがって、少なくとも品質の経時変動が大きい若材令コンクリートを対象とした場合は、膨張ひずみの基準値と実測値の大小関係を調べる手法によって、その耐凍害性を適切に評価することは極めて困難であるように思われる。

(2) 凍結融解サイクル数～膨張ひずみ関係の特性と相関式

図-1において、それぞれの供試体に対する凍結融解サイクル数と膨張ひずみの関係を通観すると、一般に、凍結融解サイクル数の増加（内部劣化の進行）に伴って、膨張ひずみの増加割合が大きくなる傾向にあることが認められる。また、ある一定の膨張ひずみの値に達するまでの凍結融解サイクル数は、耐凍害性が大きいものほど大きくなる傾向にあることも明瞭に認められる。これらは、十分に硬化したコンクリートの場合にも共通して認められる傾向であり、コンクリートの耐凍害性と密接に関連した特性と考えられる。したがって、これらの膨張ひずみ特性を適切な式で表示できれば、その式に含まれる係数あるいは変数を利用してコンクリートの耐凍害性の定量的な評価を行うことも可能になると思われる。そこで、本節では、図-1の凍結融解サイクル数と膨張ひずみとの関係を可能な限り正確に近似できる相関式について検討してみた。

図-1における各供試体の膨張ひずみは、凍結融解サイクル数の増加に伴って指数関数的に増加する傾向にあることが認められる。そして、仮に、この両者の関係が



図一 凍結融解サイクルに伴う膨張ひずみと修正相対動弾性係数の変化の例

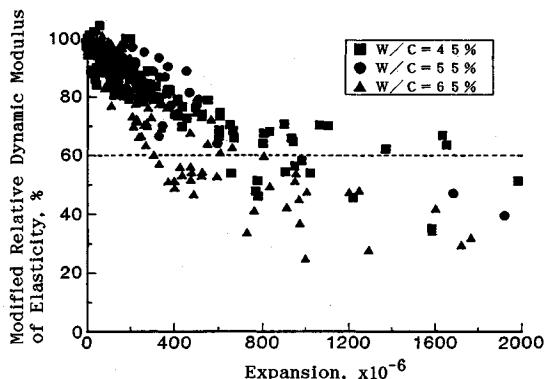


図-2 膨張ひずみと修正相対動弾性係数の関係

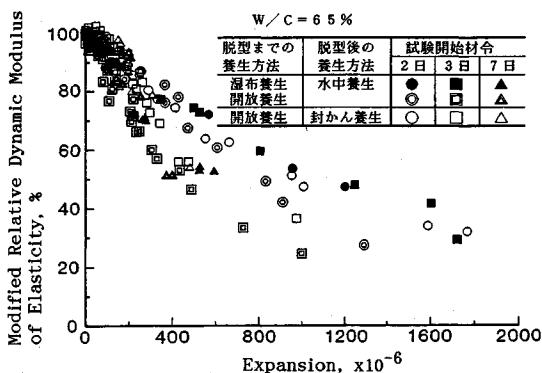
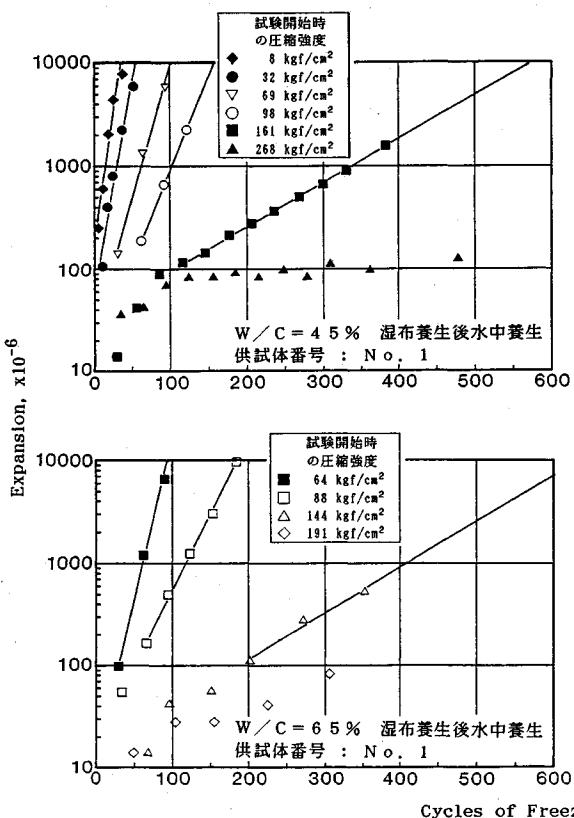
図-3 膨張ひずみと修正相対動弾性係数の関係
(W/C=65% の場合)

図-4 凍結融解サイクル数と膨張ひずみの対数値との関係の例

指数関数で表現できるならば、凍結融解サイクル数と膨張ひずみの対数値との間には直線関係が存在するはずである。この点を調べるために、図-1の縦軸を対数軸にして、膨張ひずみの測定値を再プロットした結果を示したもののが図-4である。この図を見ると、両者の関係は膨張ひずみの値が約 100×10^{-6} となる点を境にして異なった傾向にあることが認められる。すなわち、膨張ひずみが約 100×10^{-6} 以上となる範囲においては、何れの

供試体の場合にも両者の間に良好な直線的な関係が認められる。これに対し、膨張ひずみが約 100×10^{-6} より小さい範囲では、両者の直線的な関係が消失する傾向にあるとともに、プロットされている点のばらつきも大きくなっていることが認められる。

膨張ひずみが約 100×10^{-6} 以下となる範囲において上記のような傾向が認められた理由の1つとしては、膨張ひずみを対数で表示しているために、試験誤差などの僅

表-1 各供試体の膨張ひずみの試験結果を用いて計算した相関係数とKの値

W/C (%)	脱型までの 養生方法	脱型後の 養生方法	試験開始 材令	相関係数		Kの値				
				供試体			供試体			
				No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	
4.5	湿布養生	水中養生	8時間	0.968	0.957	0.983	1.117	1.118	1.177	
			12時間	0.978	0.997	0.998	1.098	1.073	1.064	
			18時間	0.996	0.998	0.992	1.061	1.062	1.068	
			1日	1.000	1.000	0.994	1.042	1.043	1.042	
			2日	1.000	0.991	0.991	1.010	1.003	1.007	
	開放養生		18時間	0.996	0.990	0.985	1.016	1.013	1.013	
			1日	0.996	0.998	0.988	1.006	1.007	1.006	
			2日	0.945	0.924	0.865	1.001	1.001	1.001	
			12時間	0.995	0.998	0.998	1.078	1.074	1.074	
			1日	0.996	0.985	0.976	1.005	1.005	1.004	
5.5	開放養生		2日	0.998	0.998	0.999	1.073	1.072	1.029	
	湿布養生		3日	0.999	0.991	0.993	1.034	1.035	1.029	
			7日	0.990	0.995	0.989	1.010	1.012	1.011	
			12時間	0.997	*** ¹⁾	---	1.154	*** ¹⁾	---	
			1日	1.000	1.000	---	1.120	1.127	---	
	開放養生		2日	0.990	0.987	---	1.014	1.010	---	
			3日	0.984	0.976	---	1.007	1.005	---	
			5日	0.997	0.998	---	1.006	1.004	---	
			7日	0.992	0.969	---	1.003	1.003	---	
			14日	0.878	0.991	---	1.001	1.002	---	
6.5	封かん養生		2日	0.997	1.000	---	1.012	1.019	---	
			3日	0.980	0.972	---	1.006	1.002	---	
			7日	0.981	0.993	---	1.003	1.004	---	
			14日	0.979	0.972	---	1.002	1.001	---	
			総平均 = 0.984							

1)凍結融解試験において急激に劣化したため、1つの測定値しか得られなかった。

かな膨張ひずみの差がこの範囲で特に誇張されて大きく示された影響が考えられる。すなわち、試験に用いた長さ変化測定用コンパレータは標準的な性能（長さ変化量を0.005 mmまで読み取り可能）のもので、 15×10^{-6} 程度の膨張ひずみの差は試験誤差と考えなければならないにもかかわらず、膨張ひずみが 100×10^{-6} 以下の領域では、この程度の差が見かけ上相當に大きく表示されてしまうのである。また、2.(4)で述べたような膨張ひずみを計算する際の初期値の設定誤差、セメントの水和、コンクリートの吸水、その他の複雑な要因による微小な膨張の影響などが、この領域で大きく現われていることも考えられる。しかしながら、何れの理由にせよ、本研究のようにコンクリートの耐凍害性の評価方法を検討する場合には、 100×10^{-6} 以下の小さな膨張ひずみを考慮の対象から外しても実用的にはほとんど問題はないように思われる。すなわち、図-1にも認められるように、300サイクルの急速凍結融解を受けた後に修正相対動弾性係数の低下が数%程度であるコンクリートの場合であっても、その試験中に 100×10^{-6} 程度の膨張ひずみを示すのが一般であって、この程度の膨張ひずみに対応する内部劣化が、実用的に問題となる程度のものであるとは考えにくい。そこで、本研究の以下の考察では、膨張ひずみが約 100×10^{-6} 以上となる範囲、すなわち、凍結融解サ

イクル数と膨張ひずみの対数値の間に直線的な関係が認められた部分を考察の対象としていくことにした。

膨張ひずみが約 100×10^{-6} 以上となる範囲における凍結融解サイクル数と膨張ひずみの対数値との間の直線的な関係は、図-4に示されていない他の供試体の場合にも全く同様に認められた。そこで、次に、全ての供試体の場合について、膨張ひずみが約 100×10^{-6} 以上となる範囲の試験値に前述の直線性を仮定する妥当性を検証してみることにした。この検証に当たっては、まず、各供試体の試験値のうち、膨張ひずみが約 100×10^{-6} 以上となった全ての試験値に対して最小二乗法を適用し、それぞれの供試体に対する凍結融解サイクル数と膨張ひずみの対数値との間の直線関係式を求めた。図-4中に示した各直線はこのようにして求めたものである。次いで、各直線式を求める際に使用した数値について、それらの相関係数を計算した。各供試体の試験値から求めた相関係数の値を、後述するKの値とともに、表-1に示す。ただし、 100×10^{-6} 以上の膨張ひずみの値が2個以下の供試体（試験開始時の圧縮強度が 200 kgf/cm^2 を超える、かつ、300サイクルにおける修正相対動弾性係数が約95%以上のもの）は、この表では対象外となっている。

表-1に認められるように、近似直線を求めるために用いた試験値の相関係数は、ごく一部のものを除き、ほ

とんどの供試体の場合に0.95以上であり、全体の平均値は0.984であった。この結果は、近似直線と試験値との適合性が極めて良好であることを示すもので、膨張ひずみが約 100×10^{-6} 以上となる範囲の試験値に対しては、凍結融解サイクル数と膨張ひずみとの関係を式(1)のような指數関数で表すことができると考えても差し支えないことを立証するものと言えよう。

$$\log_{10}L = aN + b \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで L : 膨張ひずみ

N : 凍結融解サイクル数

a : 近似直線の勾配

b : 近似直線と L 軸との切片

(3) 膨張ひずみ特性と耐凍害性の関係

前節で述べた2つの膨張ひずみ特性のうち、凍結融解サイクル数の増加に伴って膨張ひずみの増加割合が大きくなる傾向に関しては、式(1)の誘導過程の中でこれが考慮されている。したがって、式(1)を利用して膨張ひずみ特性と耐凍害性との関係を検討する場合には、第2の膨張ひずみ特性、すなわち、「ある一定の膨張ひずみに達するまでの凍結融解サイクル数は、耐凍害性の大きいものほど大きい傾向にある」ことを考えればよいことになる。

上記の第2の特性は、「ある一定の凍結融解サイクル数における膨張ひずみの増加割合は、耐凍害性の大きいものほど小さい傾向にある」とも換言できる(図-1参照)。そして、この膨張ひずみの増加割合は、膨張ひずみを対数で表わせば、各供試体毎に一定の値となることが前節で示された(図-4参照)。したがって、図-4に示されている直線の勾配、すなわち、式(1)中の「 a 」が耐凍害性と関連する量となり、「 a 」の値が小さいものほど耐凍害性が大きいことになる。

式(1)を L を求める式に変形し、 $10^b = L_0$ 、 $10^a = K$ とおくと、式(2)が求まる。

$$L = L_0 \times K^N \quad \dots \dots \dots (2)$$

式(2)は、凍結融解サイクル数と膨張ひずみの対数値との関係が直線関係となる範囲で適用できる式であるので、直線関係が成立し始める点の凍結融解サイクル数を N_1 とし、そのときの膨張ひずみを L_1 とすると、次のように表すこともできる。

$$L = L_1 \times K^{(N-N_1)} \quad \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 $N \geq N_1$

式(3)は、膨張ひずみが L_1 以上となる範囲では、膨張ひずみは凍結融解サイクル数の増加とともに等比級数的に増加することを示している。そして、 K は、この場合の等比級数の公比であるので、膨張ひずみが L_1 以上になった後における凍結融解1サイクル当たりの膨張率とも言えるもので、物理的な意味を持った量である。

また、 K の値は、前述したような耐凍害性と密接に関係する「 a 」をべき数とする値($K=10^a$)でもある。そこで、 K の値と耐凍害性との関係を検討してみることにした。

表-1に、各供試体に対し、それぞれの試験結果から求めた K の値も示してある。この表を参照すると、 K の値は1.001~1.177の範囲にあり、供試体間の K の値の差は非常に小さいことが認められる。しかしながら、 K の値は式(3)の指数部の公比であるため、その値が少しでも増加すると膨張ひずみの値は相当に増大する。また、凍結融解サイクル数と膨張ひずみの関係は一般には単調増加曲線($K > 1$)となり(図-1参照)、この単調増加曲線の増加割合が耐凍害性の大小と密接に関係していると考えられる。したがって、膨張ひずみ特性とコンクリートの耐凍害性との関係について検討する場合には、 K の値の小数点以下の数値が特に重要な意味を持つものと考えられる。そこで、以下では、 K の値を

$$K = 1 + \alpha \quad \dots \dots \dots (4)$$

と分割し、「 α 」と耐凍害性との関係を調べることにした。

図-5は、表-1の全ての供試体を対象として、基準となる凍結融解サイクル数および相対動弾性係数を、それぞれ、300サイクルおよび60%とした場合の耐久性指数と「 α 」との関係を片対数グラフにプロットしたものである。ただし、この場合の耐久性指数の計算においては相対動弾性係数の代わりに修正相対動弾性係数を用いたので、図中の縦軸は修正耐久性指数と記した。また、この図には、脱型時まで湿布養生を行い、その後封かん養生した場合に対して、約1年後に実施した追加試験の結果も加えてある。

図-5を参考すると、「 α 」と修正耐久性指数の間には極めて良好な対応関係があり、 α の値が大きい場合ほど修正耐久性指数が小さくなっていることが明瞭に認められる。そして、特に注目すべき点としては、両者の関係を表わす各点が、水セメント比、養生条件、試験の実施時期、などの相違にかかわらず、ほぼ同一の曲線上に位置していることが挙げられる。この理由に関しては、図-5においては、コンクリート内部の劣化状態そのものが対象となっているためと考えられる。すなわち、 α と修正耐久性指数は、個々には共にコンクリートの水セメント比、材令、含水状態などによって大きく左右される量ではあるが、図-5においては、双方とも、劣化の難易や速度とは無関係に、凍結融解作用の結果として生じた内部劣化の程度を表す指標として使用されているためと考えられる。

α と修正耐久性指数が共にコンクリートの内部劣化の程度を表す指標としてのみ使用されているという上記の特性を考慮すると、図-5の関係の一般性は高いものと考えられる。また、 α と修正耐久性指数との対応関係は、

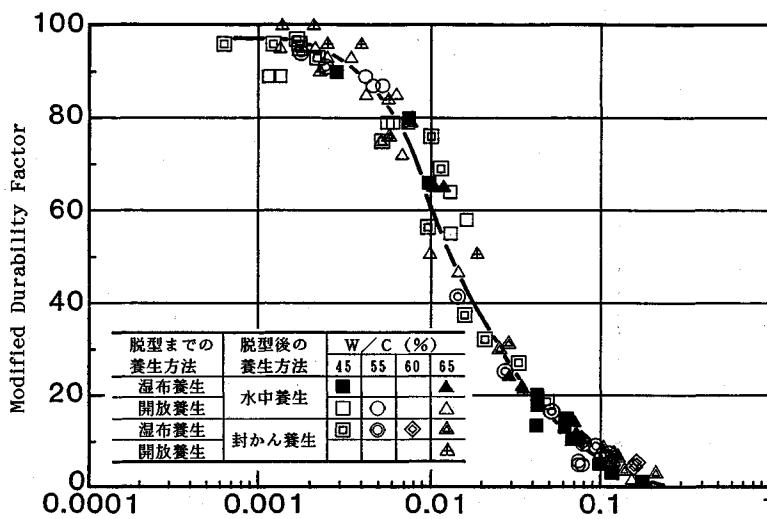
図-5 α と修正耐久性指数の関係

表-2 引用文献の実験概要

引用文献	骨材	W / C (%)	A E 剤	養生条件 ^{・1}	材令 (日)	サイクル数 / 日	供試体寸法 (cm)
鎌田 ⁴⁾	細: 山砂 粗: 軽量 山砂利	50, 60 70, 90	有 無	水中養生	28	1, 8	7.5 x 7.5 x 40
大和 ⁵⁾	細: 海砂 粗: 軽量	53	有 無	水中養生	28	8	7.5 x 10 x 40 $\phi 10 \times 20$
名和ら ⁶⁾	細: 海砂 粗: 川砂利	40, 50 60, 70	有 無	2日脱型 水中養生	14 28	6	7.5 x 7.5 x 40
田畠 ⁹⁾	① 細: 海砂 粗: 川砂利 山砂利	55 60	有 無	10, 20, 30°C 水封 ピニール封緘 気乾 → 脱型	14	6	7.5 x 7.5 x 40
	② 細: 海砂 粗: 川砂利	60	有 無	5, 20, 35°C で水中養生	14(20°C) 積算温度	6	7.5 x 7.5 x 40

備考: 何れの文献でも普通ポルトランドセメントを使用。

田畠の①の試験では、脱型後は水中養生、脱型材令は1~3日、気乾の湿度は40~85%。

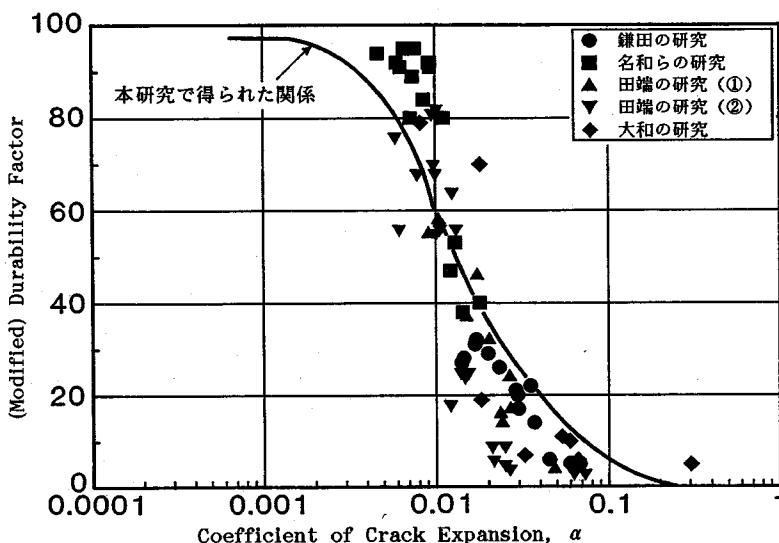
何れの領域でも極めて良好であり、 α の値によって実用的には満足すべき精度で修正耐久性指数を推定できると考えられる。さらに、修正耐久性指数60に対応する α の値を図-5から読み取ると、約0.01であり、この値によって、従来の動弾性係数を測定する場合と同様なコンクリートの耐凍害性の評価（良否の判定）を行うことも可能である。 α の値によってコンクリートの耐凍害性を評価する方法のその他の利点としては、若材令コンクリートの場合でも凍結融解試験中のセメントの水和の進行を考慮せずに耐凍害性を評価できるだけでなく、膨張ひずみが約 100×10^{-6} 以上となれば、凍結融解試験の中間段階でも耐凍害性を判定できることが挙げられる。そこで、本研究では、 α が内部ひびわれによる膨張ひずみの増加割合に密接に関連した量であることを考慮して、この α を「ひびわれ膨張係数」と呼称し、この指標を若材令コンクリートあるいは凍結融解試験中にセメントの水和が継続するコンクリートの耐凍害性能を評価する

指標として用いることを提案したい。

(4) 既往の研究結果に対する提案手法の適用性

著者らの研究室では、材令14日までのコンクリート供試体を対象として、その後も多数の試験を行っており、それらの試験の結果も上述してきた結果と全く同じであった。そこで、本節では、表-2に示した4つの文献に示されているデータを利用して、使用材料、試験条件、その他が相違する場合に対する提案手法の適用性、特に図-5の曲線の一般性について調べてみることにした。これらの文献は、比較的多数の供試体について、それらの膨張ひずみと動弾性係数の双方の試験結果を示している数少ない研究の例である。また、何れの文献の試験においても、普通ポルトランドセメントが用いられている。

選定した文献に示されている図から数値を読み取り、読み取った数値を用いて α および耐久性指数を求めた。図-6は、このようにして求めた α と耐久性指数の関係を示したものである。ただし、次の項目に該当するデー

図-6 ひびわれ膨張係数 (α) と耐久性指数の関係

タは、検討の対象から除外した。

①凍結融解サイクルの進行に伴う膨張ひずみの値が、大きな幅で増加と減少を繰り返しているもの（明らかに不合理なもの）。

②200 サイクルで試験が終了し、この時点における相対動弾性係数が 60% より大きいもの（300 サイクルでの耐久性指数を求めることが困難なもの）。

③試験開始時の材令が 3 日および 7 日のもの（動弾性係数の値に、セメントの水和が継続する影響が考慮されていないもの）。

図-6 を参照すると、既往の研究の試験値から求めた各点は、耐久性指数 60 の近辺を境にして、本研究の結果と幾分異なる位置に分布していることが認められる。すなわち、耐久性指数が 60 より大きい範囲では本研究で得られた曲線より上方に位置するものが多いために対し、耐久性指数が 60 より小さい範囲ではほとんどの点が曲線より下方に位置しており、全般的に、 α の値が本研究の結果より狭い範囲に分布している。このように本研究の結果と既往の研究結果とが必ずしも一致しなかった理由に関しては、次のように考えられる。

大和の研究結果⁶⁾を参照すると、凍結融解試験を行った場合の相対動弾性係数と膨張ひずみの関係は、供試体の形状・寸法によって相當に異なることが示されている。この点に着目して試験に用いた供試体の形状・寸法を比較すると、角柱供試体の場合は、何れの研究においても長さ 40 cm のものが用いられているが、その断面寸法は相違している。すなわち、本研究の供試体の断面寸法は 10×10 cm であるが、引用した研究では、7.5×7.5 あるいは 7.5×10 cm の断面寸法の供試体が使用されている。また、大和の研究では、 $\phi 10 \times 20$ cm の円柱

供試体も使用されている。したがって、このような供試体の断面寸法あるいは形状の相違によって、内部ひびわれの方向性、発生したひびわれによる動弾性係数の低下に及ぼす影響の度合、その他に差が生じ、図-6 のような差異が生じたとも思われる。また、各研究における実験精度、1 つの点を得るための供試体の数、等の相違も上記の差に微妙な影響を及ぼしていることも考えられる。しかし、何れの理由にせよ、既往の研究結果の場合にも、使用材料、コンクリートの配合、養生条件、試験機、などが互いに著しく相違しているにも関わらず（表-2 参照）、 α と耐久性指数の間に比較的良好な対応関係があることは明らかである。また、図-6 には、本研究の結果と同様に、 α の値が 0.01 を超えるか否かが、耐凍害性の良否を判定する一応の基準となり得ることも認められる。これらの結果から判断すると、本研究で提案した手法は、一般のコンクリートに対しても適用できる可能性が十分にあるように思われる。ただし、図-5 の曲線の一般性に関しては、一般性は相当に高いものと考えてはいるが、供試体の形状・寸法を現行 JIS の規定に適合（10×10×40 cm）させて実施した他の研究機関の試験結果を集積して、この点に関する検証を重ねていく必要があろう。

4. 結 論

材令 8 時間から 14 日のコンクリート供試体を対象として標準的な急速水中凍結融解試験を行い、この試験中に測定した供試体の長さ変化の試験結果を利用して若材令コンクリートの耐凍害性を評価する手法について検討した。本研究の範囲内で、次のことが言えると思われる。（1）凍結融解試験の各段階における供試体の（修正）

相対動弾性係数と膨張ひずみの関係は、水セメント比、供試体の含水状態、その他によって著しく相違する。このため、ある基準となる膨張ひずみの値を設定し、この値と膨張ひずみの測定値とを比較してコンクリートの耐凍害性の良否を判定する手法は、個々の条件に対してそれそれに適切な基準値を設定しないと、誤った評価を行う可能性がある。

(2) 膨張ひずみが約 100×10^{-6} 以上となる範囲においては、凍結融解サイクル数 (N) と膨張ひずみ (L) との間には、次式で表わし得る極めて良好な相関関係がある。

$$\log_{10}L = aN + b \quad \dots \dots \dots \text{(I)}$$

ここで、

a : 近似直線の勾配

b : 近似直線と L 軸との切片

(3) 少なくとも、供試体の形状・寸法、使用材料および試験機器と同じにして試験した場合には、式(II)から求まる「 α 」と(修正)耐久性指数の間には、水セメント比、供試体の含水状態、試験材令、養生条件、などの相違に関わらず、1つの曲線で近似出来る良好な相関関係がある。

$$\alpha = 10^a - 1 \quad \dots \dots \dots \text{(II)}$$

(4) 基準とする凍結融解サイクル数および(修正)相対動弾性係数を、それぞれ、300 サイクルおよび 60% として(修正)耐久性指数を算出した場合に、その値が 60 となる供試体の「 α 」の値は、試験機器や使用材料が異なっても、約 0.01 であり、この α の数値を耐凍害性の良否の判定の目安値として用いることが出来る。

(5) 上記の「 α 」は、凍結融解試験中にセメントの水和が継続する影響を考慮することなく、長さ変化の実測値を用いて直接求めることが出来る。また、式(I)の「 a 」を求めることが可能な数だけ測定値が集積された段階において、「 α 」を計算し、耐凍害性能を判定することも可能である。これらの利点と(3)および(4)で述べ

た特徴を有する「 α 」を「ひびわれ膨張係数」と呼称し、この指標を用いる方法を、若材令コンクリートの耐凍害性を簡便に評価する手法として提案する。

謝辞：本研究は、文部省科学研究費（No. 02650331）の課題の一部として行ったものである。ここに付記し、厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 三浦 尚・黒川 聰：高炉スラグ微粉末コンクリートの耐凍害性に関する一考察、セメント技術年報 49、pp. 247~250、1988.
- 3) 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.
- 4) 鎌田英治：コンクリートの凍害性に関する研究（凍伸度を指標とする耐凍害性の判定について）、日本建築学会論文報告集、第 166 号、pp. 11~17、1969.
- 5) Hoff, G. C. and Buck, A. D.: Considerations in the Prevention of Damage to Concrete Frozen at Early Ages, ACI Journal, Vol. 80, No. 5, Sept.-Oct., pp. 371~376, 1983.
- 6) 大和竹史：凍結融解作用によるコンクリートの長さ変化、セメント技術年報 30、pp. 299~301、1976.
- 7) Hoff, G. C. and Buck, A. D.: Considerations in the Prevention of Damage to Concrete Frozen at Early Ages, Proc. of Spec. Conf. Construction Equipment and Techniques in Eighties, pp. 245~258, 1982.
- 8) 名和豊春・鎌田英治・洪 悅郎：硬化セメントベーストの凍結水量とそれによるコンクリートの耐凍害性評価、セメント技術年報 34、pp. 333~336、1980.
- 9) 田端雅幸：コンクリートの凍害における環境条件の影響に関する研究、北海道大学学位論文、1986.

(1992.4.10 受付)

METHOD OF EVALUATING THE FREEZE-THAW RESISTANCE OF EARLY-AGE CONCRETE UTILIZING THE CHARACTERISTICS OF ITS RESIDUAL EXPANSIVE STRAIN

Yasuhiko YAMAMOTO and Tomozou CHOUAI

Results of length change measurement of early-age (8 hr. to 14 days) concretes subjected to freezing and thawing cycles were examined for their relation to the freeze-thaw resistance of respective concrete. Water-cement ratio of concrete was fixed at either 45, 55 or 65%, while the air content was kept constant at 5.5%. The conventional method, in which a certain residual strain is employed as a reference value, was not necessarily adequate for the adequate evaluation of the freeze-thaw resistance of early-age concrete. It was revealed that there existed a straight-line relation between the number of freeze-thaw cycles in a normal scale and the residual strain in a logarithmic scale in the region where the strain exceeded 100×10^{-6} . A factor which was derived from the gradient of the linear relation was found to have a close correlation with the conventional durability factor, regardless of the difference in the mix proportions, ages and curing conditions concrete.