

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

長合友造*・山本泰彦**

圧縮強度が約 10~150 kgf/cm² の範囲にある若材令コンクリートを対象とした場合には、急速凍結融解試験を行っても、試験中に進行するわずかなセメントの水和によって動弾性係数が著しく増大するので、その耐凍害性の評価に、相対動弾性係数を通常の方法によって求める手法を適用すると誤った評価を行ってしまうことを示した。次いで、このようなセメントの水和の進行による影響を考慮できる新しい耐凍害性評価手法の提案を行った。

Keywords : dynamic modulus of elasticity, early age concrete, freeze-thaw resistance, length change, maturity

1. ま え が き

コンクリートの耐凍害性に関しては、昔から多くの貴重な研究がなされてきており、現在では、「通常の水セメント比の範囲では、適当量のエントレインドエアを混入するとともに初期養生を十分に行えば、耐凍害性の大きいコンクリートを造ることができる」という一般的な考え方が確立されている。しかしながら、満足すべき耐凍害性を確保するために必要な初期養生、特に、寒中コンクリートの養生終了時の所要圧縮強度や必要養生日数に関しては、それらの数値や数値の適用範囲は指針類により相当に異なっている。また、土木学会の「コンクリート構造物の耐久設計指針(試案)¹⁾」を参照すると、凍結融解作用と塩分の影響のみが環境指数の増分として考慮すべき重要な因子となっているにもかかわらず、コンクリート工に対する耐久性ポイントは寒中養生の具体的な方法に対して与えられる内容とはなっていない。これらは、性質の経時変動が大きい材令のコンクリート(圧縮強度が 150 kgf/cm² 程度以下のもので、本研究では、これを若材令コンクリートと呼ぶ)を対象とした場合には、その耐凍害性能を適切に試験・評価することが難しいため、上記の諸点に関して直接的に参考となる客観的な情報が不足している現状を反映したものと考えられる。たとえば、若材令コンクリートの耐凍害性に関する既往の文献を参照すると、初期凍害の影響を調べたものが多く、初期材令に数回の凍結を受けた場合における強度発現への悪影響を検討している研究^{2)~7)}や強度と凍結融解に伴う動弾性係数の低下量との関係を調べた研究^{8)~8)}などはある。しかし、性質の経時変動の影響を考慮しながら若材令コンクリートの耐凍害性能を直接的に

論じている研究はほとんど見当たらない。したがって、このような状況を打開し、真の意味での若材令コンクリートの耐凍害性に関する情報を集積していくためには、まず、この時期における耐凍害性能を正しく評価する手法を確立しておく必要があると考えられる。

若材令コンクリートの耐凍害性を通常の凍結融解試験により直接的に調べる場合の最大の問題点は、凍結融解試験中にもセメントの水和が進行すると考えられるので、この影響に対していかに対応するかにあるといえよう。この点に関連した研究としては、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの動弾性係数が凍結融解試験中にも増加する原因の追求を主目的とした三浦ら⁹⁾の研究が唯一のものとして挙げられる。この研究では、凍結融解試験中における真の劣化が試験中の水和による品質の向上量と急速試験による見掛けの劣化量の差であると考え、1 サイクルの積算温度が急速凍結融解 30 サイクルの場合と同じになるように設定した緩速凍結融解試験中における動弾性係数の増加を品質の向上量と考える手法が提案・使用されている。しかし、この手法は、耐凍害性の大きいものに対してはある程度適用可能と思われるが、若材令コンクリートへの適用を現時点で考えるのは適切でないと考えられる。たとえば、三浦らの論文中には、氷点下領域に対する積算温度の算定方法や緩速サイクルの融解領域を与える時期と時間については全く記述されていないが、これらは、後述するように、若材令コンクリートの品質変動や耐凍害性の評価結果に重大な影響を及ぼす要因であって、これらの点が曖昧なままの若材令コンクリートへの適用は誤った結果を得る原因ともなりかねない。また、提案されている方法を若材令コンクリートに適用して正しい試験結果を得るためには、同じバッチから作製した供試体を使用して緩速試験と急速試験を同時に行う必要があるが、このためには、試験機の種類または数が増える難点もある。

* 学生会員 工修 筑波大学大学院工学研究科
(〒305 つくば市天王台 1-1-1)

** 正会員 工博 筑波大学助教授 構造工学系

表一 セメントの物理的性質および化学成分

比重	比表面積 (cm ² /g)	凝結(h-m)		圧縮強さ(kgf/cm ²)			強熱減 量(%)	
		始発	終結	3日	7日	28日		
3.16	3260	2-30	3-31	147	251	417	1.1	
化 学 成 分 (%)								
in. sol	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
0.1	64.7	22.0	5.3	3.0	1.9	1.4	0.57	0.27

表二 細骨材の物理的性質

比重	吸水率 (%)	粗粒率
2.59	2.47	2.55

本研究は、若材令コンクリートの耐凍害性に関する研究を進めるにあたり、あらかじめ検討しておくべき耐凍害性の評価方法について基礎的に調べた結果を論じたものである。まず、目標とする強度になるまで20°Cで養生した供試体の試験結果に基づき、一般に用いられている耐凍害性の評価指標を若材令コンクリートの耐凍害性の評価に適用する場合の問題点について調べた。そして、通常の急速水中凍結融解試験を行っている場合でも、この間のセメントの水和により動弾性係数が著しく増加することを確認し、この影響を考慮に入れることができる新しい耐凍害性の評価手法を提案した。

2. 使用材料、配合および試験方法

使用前24時間の材料の貯蔵、コンクリートの練りませ、供試体の作製および養生などは、いずれも20±2°Cの条件下で行った。

(1) 使用材料

試験に用いたセメントは、普通ポルトランドセメントである。細骨材には、十分に吸水させた鬼怒川産の川砂を表面水率が約0.5%となるように調整して用いた。粗骨材には、笠間産の砕石を表乾状態で用いた。これらの材料の性質は、表一～表三に示すようであった。

AE剤には、天然樹脂系のもを1%の水溶液にして用いた。また、練りませ水には、通常の水道水を用いた。

(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、目標スランプは8±1cmとした。目標空気量は、本研究の目的を考慮して、5.5±0.5%と通常より多めの値に定めた。また、細骨材率は、試練りにより得られた最適細骨材率の値を用いた。コンクリートの配合の詳細は、練りませ直後に測定したスランプおよび空気量の実測値とともに、表四に示した。

(3) 供試体の作製

コンクリートの練りませには、容量100lの可傾式ミキサを用い、1バッチの量は70～80lとした。コンクリー

表三 粗骨材の物理的性質

記号*1	最大寸 法(mm)	表乾 比重	吸水率 (%)	実積率 (%)	粗粒率
A 1	20	2.67	0.40	61.0	6.68
A 2		2.68	0.37	59.6	6.67

*1 A1およびA2は入荷時期が異なる粗骨材で、A1は、水セメント比55%および65%のコンクリートに、A2は、水セメント比45%のコンクリートに使用した

表四 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)		AE剤 (Cx%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
		C	W			
45	44	369	166	0.030	8.5	5.3-5.5
55	45	299	164	0.025	8.0-9.0	5.4-5.7
65	48	264	171	0.023	8.0-8.5	5.5-6.0

注) スランプおよび空気量の値は、実測値の範囲を示す

トの練りませにあたっては、あらかじめ捨て練りを行い、次いで、均一な練りませができるようにミキサに各材料を分割投入した後、3分間練りませた。AE剤溶液は、練りませ水に溶解して用いた。

凍結融解試験用供試体(10×10×40cm)および圧縮強度試験用供試体(φ10×20cm)は、いずれも2バッチずつのコンクリートから試料を採取して作製したが、ミキサと凍結融解試験機の容量に制限があったため、供試体の数は各試験条件に対し3本ずつとした。ただし、水セメント比を65%とし、材令1日まで湿布覆いをしない条件に対しては、試験開始材令の数が他の条件の場合より多くなったため、各試験材令に対する凍結融解試験用供試体の数を2本とした。供試体の作製および試験にあたっては、いずれの場合も、各試験条件に対して各バッチから作製した供試体の試験値が必ず含まれるよう配慮した。なお、圧縮供試体のキャッピングに関しては、材令1日以降で試験するもの場合は、材令12時間にセメントペーストによるキャッピングを行い、試験材令が1日以前のもの場合は、試験開始1時間前に石膏キャッピングを施した。

(4) 供試体の養生方法

試験開始材令が1日以内の供試体の場合は、比較的容易に行い得る次の2つのいずれかの養生方法を採用した。また、これら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に行った。

a) 湿布養生：コンクリートの打込み後、直ちに、型枠も含めた全体を十分に濡らした厚手の麻布で覆って、20±1°Cの恒温室に静置した養生。

b) 開放養生：湿度55±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。

試験開始材令が1日を超える供試体の場合は、上記のいずれかの方法で材令1日まで養生したのち脱型し、

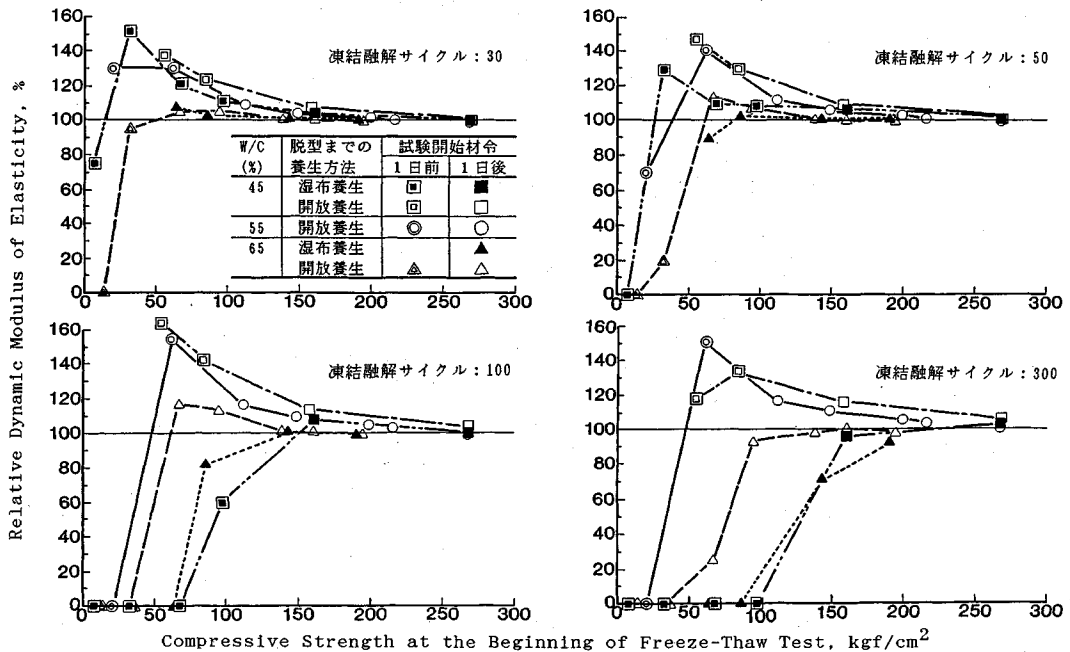


図-1 凍結融解試験開始時の圧縮強度と相対動弾性係数の関係

直ちに、次のいずれかの養生を所定の材令まで行った。

- c) 水中養生： 供試体全体を水中に没して養生。
- d) 封かん養生： 供試体全体をサランラップで3~4重に包み、さらに、これをビニール袋の中に入れ、でき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閉した養生。

材令1日以降における養生中の温度および湿度は、自動湿度記録計により測定した。

(5) 凍結融解試験および力学的性質に関する試験

凍結融解試験は、JIS A 6204の附属書2に従い、2槽式試験機で行った。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次共鳴振動数のほかに、JIS A 1129のダイヤルゲージ法による長さ変化も測定した。これらの測定にあたっては、測定中における供試体の乾燥と温度変化の影響を最小限に抑えるために、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。

各試験材令におけるコンクリートの圧縮強度とたわみ動弾性係数の測定は、凍結融解試験用供試体と同じ養生を行った供試体を用いて、通常の方法で行った。

3. 実験結果および考察

(1) 若材令コンクリートの耐凍害性の評価指標

図-1は、材令8時間~14日のコンクリート供試体について急速水中凍結融解試験を行った結果をもとに、凍結融解の繰り返し数が30, 50, 100および300サイクルとなった時点における相対動弾性係数を求め、それら

を試験開始時のコンクリートの圧縮強度に対してプロットしたものである。これらの図中で、試験開始材令が1日以降となっている各点は、いずれも、脱型(材令1日)直後から水中養生した供試体の試験結果である。なお、各図に示したサイクル数に至る前に、動弾性係数が測定できなくなる程度まで劣化したものに対しては、その相対動弾性係数をゼロ(零)として示した。

図-1を参照すると、試験開始時の圧縮強度がある限度より小さい範囲で相対動弾性係数が急激に低下する試験値が認められる。この圧縮強度の限度値は、供試体の配合や養生条件によって相違してはいるが、同じ種類のコンクリートの場合には、凍結融解サイクル数の増加とともに次第に大きくなっていく傾向にある。これは、コンクリートを劣化させる凍結融解作用の悪影響が凍結融解サイクルの増加とともに徐々に大きくなっていくことを示すものと思われる。しかし、相対動弾性係数が低下する圧縮強度はほとんどの場合に150 kgf/cm²以下の範囲にあり、水セメント比が65%のコンクリートを湿布養生後に水中養生した場合でも、圧縮強度が150 kgf/cm²に達していれば、300サイクルの急速凍結融解を繰り返した後に70%以上の相対動弾性係数の値が確保されていることが認められる。現行RC示方書では、厳しい気象作用を受けるコンクリートの養生終了時の所要圧縮強度の標準として、「連続して、あるいはしばしば水で飽和される構造物の薄い断面」に対し150 kgf/cm²という値を示しているが、この値は、上記と同

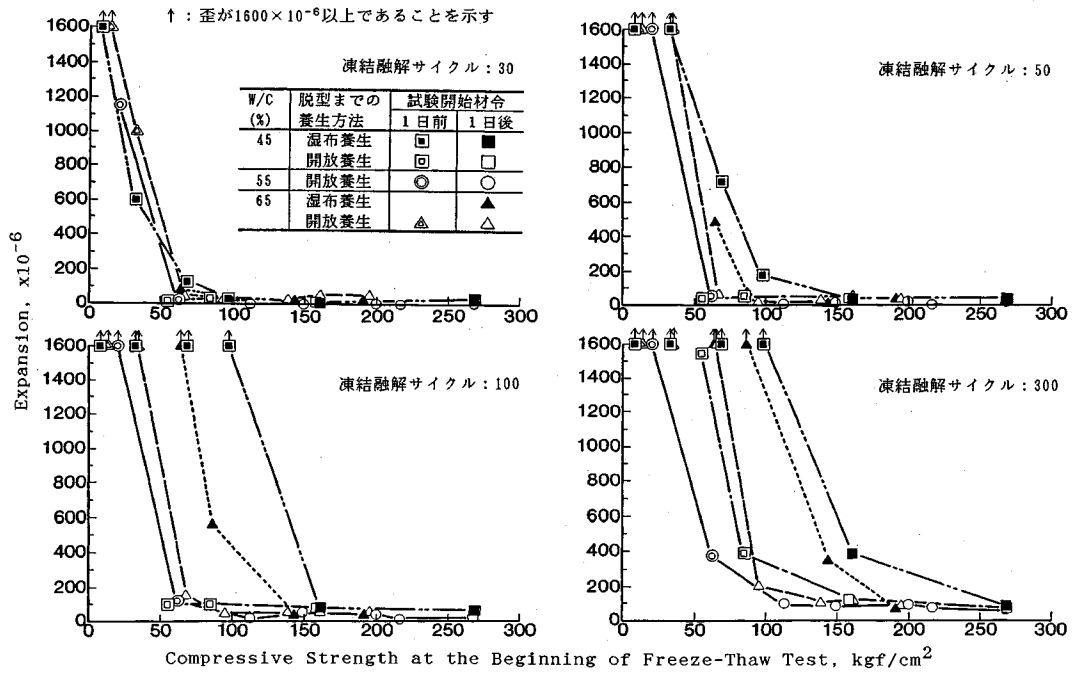


図-2 凍結融解試験開始時の圧縮強度と長さ変化率の関係

様な動弾性係数を測定した多くの研究結果に基づいて昭和49年版のRC示方書の改訂の際に導入されたものであり、本研究の結果とも良く一致している。また、RC示方書の値の妥当性について検討した最近の鮎田¹⁰⁾の研究においても上記と同じ圧縮強度の値が得られている。これらの結果から考えると、動弾性係数の測定値をそのまま利用する通常的手法によって耐凍害性を評価する限りにおいては、「RC示方書の養生終了時の圧縮強度(150 kgf/cm²)は、その時点においてコンクリートが十分な耐凍害性を有していることを保証する値である」という同じ主旨の結論が得られるものと思われる。

しかしながら、図-1を通覧すると、相対動弾性係数の低下が生じていない圧縮強度の範囲においては、試験開始時の圧縮強度が小さいものほど相対動弾性係数の値が大きくなっており、相対動弾性係数の値が150%を超える場合もあることが認められる。これは、急速な凍結融解作用を受けている間でもセメントの水和が進み、その影響の程度が材令が若い場合ほど著しいことを示唆しているものと考えられる。そして、セメントの水和の進行による動弾性係数の増大が図-1に認められるように顕著であれば、内部劣化が相当に進んでいても、動弾性係数の値ではこれを察知できない場合がかなり多いと考えられる。そこで、次に、この点について調べてみた。

図-2は、図-1の縦軸の相対動弾性係数の代わりに、同じ供試体について測定した長さ変化率を採って示したものである。この図と図-1を対比して参照すると、予

期した傾向が認められる。すなわち、試験開始時の圧縮強度が50 kgf/cm²以下のコンクリートについて、これらが30サイクルの凍結融解を受けた時点での試験結果に着目すると、図-2ではすべての試験値が 600×10^{-6} 以上の膨張を示し、これらの供試体の内部では劣化が相当に進んでいると考えられるのに対し、図-1では5個のうち4個の試験値の相対動弾性係数が70%より大きく、しかも、このうちの2個は130~150%の範囲にある。これらは、セメントの水和による動弾性係数の増大が内部劣化による動弾性係数の低下を大幅に上回っていたことを裏付ける結果と考えられるのであって、若材令コンクリートを対象とした場合には、たとえ急速凍結融解試験方法を採用しても、その試験中におけるセメントの水和の進行の影響が無視できないものであることを明瞭に示すものと思われる。また、上述してきた結果から判断すると、若材令コンクリートの耐凍害性の評価に相対動弾性係数あるいはこれから計算される耐久性指数をそのまま用いることは適切でなく、測定値をそのまま用いる場合には、むしろ、長さ変化率の測定結果を利用した方が正しい評価が行えると考えられる。

図-3は、本研究の急速凍結融解試験の温度履歴を示したものである。このような温度履歴のサイクルを供試体に与えたことを考えると、その試験中にセメントの水和が大幅に進むとは考えにくく、凍結融解試験中に動弾性係数の値が前記のように著しく増加したことは一見不合理であるように思われる。この点を確認するため、凍

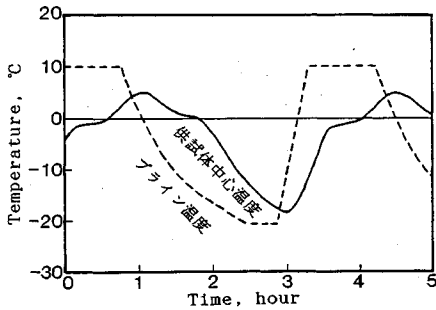


図-3 温度サイクル

結融解試験用供試体と同一条件下で作製・養生した円柱供試体と角柱供試体について、それぞれ、圧縮強度とたわみ動弾性係数を試験し、両者の関係を調べた。その結果、圧縮強度の増加に伴う動弾性係数の増加割合は強度レベルの低い場合ほど大きく、特に圧縮強度が50 kgf/cm²以下の範囲では、圧縮強度の20~30 kgf/cm²程度の増加により動弾性係数の値が倍増することもあり得ることが判明した(図-4参照)。圧縮強度の増加に伴う動弾性係数の増加割合が上記のように顕著であるコンクリートの場合には、その凍結融解試験中における動弾性係数の増加が前述した程度となっても当然のように思われる。また、以上の結果から判断すると、急速凍結融解試験中にセメントが水和する量は若材令コンクリートの場合にもわずかであって、若材令コンクリートの凍結融解試験中における動弾性係数の著しい増加は、主としてセメントの水和による動弾性係数の増加割合が材令が若い場合ほど著しいことに原因したものであると思われる。

(2) セメントの水和の進行の影響を考慮した耐凍害性の評価方法

前節では、若材令コンクリートの耐凍害性の評価に動弾性係数の測定結果(相対動弾性係数)をそのまま用いることは不適當であることが示された。この根本的な原因は、相対動弾性係数の算出に用いる分母の値が実際には一定でなく、試験中に大きく変動(増大)していることにある。換言すれば、試験中の各段階における「損傷を受けない理想的な状態での動弾性係数」の値がわかれば、この値と実測値によって実際に即した相対動弾性係数が計算でき、若材令コンクリートの耐凍害性も一般のコンクリートの場合と同じ手法によって評価できると考えられる。また、このような実際に即した相対動弾性係数を求めることができれば、一般に用いられている判定基準をそのまま利用できる大きな利点もある。前述した三浦らの手法は、この「理想的な状態での動弾性係数」を緩速凍結融解を与えた供試体から求める方法である。しかし、この手法は、各緩速サイクルの終了時(急速

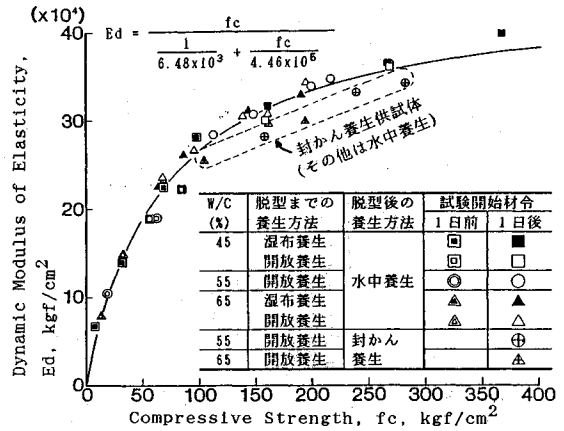


図-4 圧縮強度とたわみ動弾性係数の関係

30サイクルごと)に、その間の品質劣化を求めていく方法であるので、耐凍害性が小さいものの場合には耐久性指数が正確に計算できない欠点がある。また、三浦らの研究では、耐凍害性が比較的大きいものを対象としていることもあり、この手法による解析結果と実際に生じた内部劣化との対応が検証されていない。このため、前節で示されたようなセメントの水和による動弾性係数の増加がきわめて顕著である若材令への適用を考えた場合には、その信頼性に対して疑問が残る。そこで、本節では、まず、急速凍結融解試験の各サイクルごとに「理想的な状態での動弾性係数」を求め得る手法について検討し、次いで、上述した考え方によってセメントの水和の進行の影響を考慮した耐凍害性の評価ができるか否かについて調べることにした。

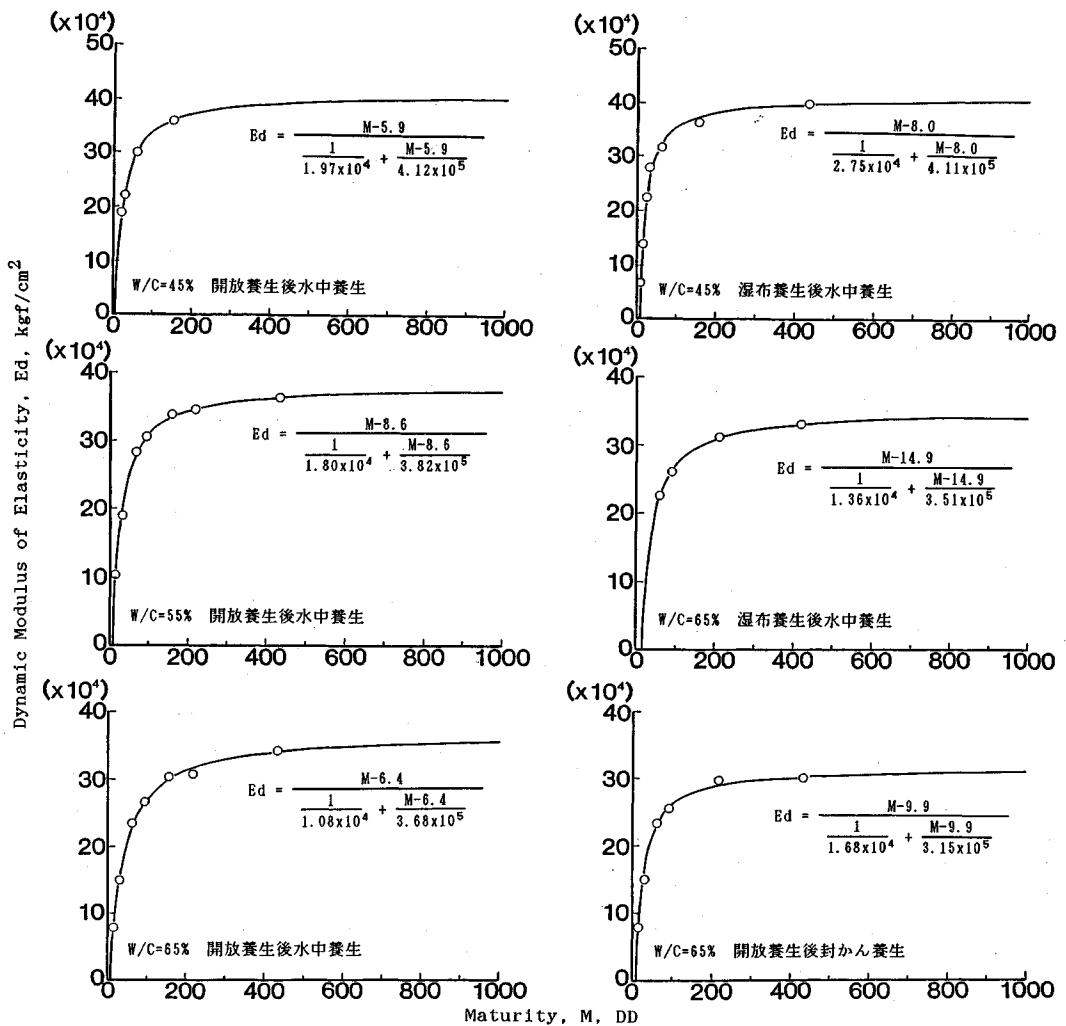
0°C以上の条件下では、コンクリートの圧縮強度に及ぼす温度と材令の影響は、Saul¹¹⁾によって提案された積算温度の考えに従って整理でき、しかも、両者の間に良好な相関関係があることが多くの研究者によって明らかにされている¹²⁾。一方、圧縮強度と動弾性係数の間にも図-4のような良好な相関関係が存在する。これらの結果は、動弾性係数と積算温度の間にも良い相関関係が存在することを示唆するものと考えられる。そこで、前述した凍結融解試験の試験開始時に測定した動弾性係数の初期値を選び、これらの試験値に対する積算温度と動弾性係数の関係を調べてみた。この場合の積算温度の算定にあたっては、約20°Cの条件下で養生した供試体の試験結果を利用したので、一般に用いられている式(1)(Saulの式)を適用した。

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

ここで、t: 材令(日)

θ: 養生温度(°C)

図-5に、それぞれの配合と湿度の条件に対して求めた積算温度と動弾性係数の関係の一部を示す。この図に



図一五 積算温度とたわみ動弾性係数の関係

も認められるように、水セメント比や養生中の湿度条件が同じであれば、両者の間には予期したような良好な相関関係が存在することが確認された。そして、この相関関係は、一般に式(2)で表し得ることが判明した。この式は、若材令コンクリートの圧縮強度-積算温度の関係を表す式として Carino ら¹³⁾によって提案された式と同じ形の双曲線式であり、近松ら¹⁴⁾による高炉スラグ微粉末の活性度に関する研究でもその特徴の有用性が認められて使用されている。また、図一4中に示した関係式も、これと同じ形の式である。

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

ここで、 E_d : たわみ動弾性係数 (kgf/cm^2)

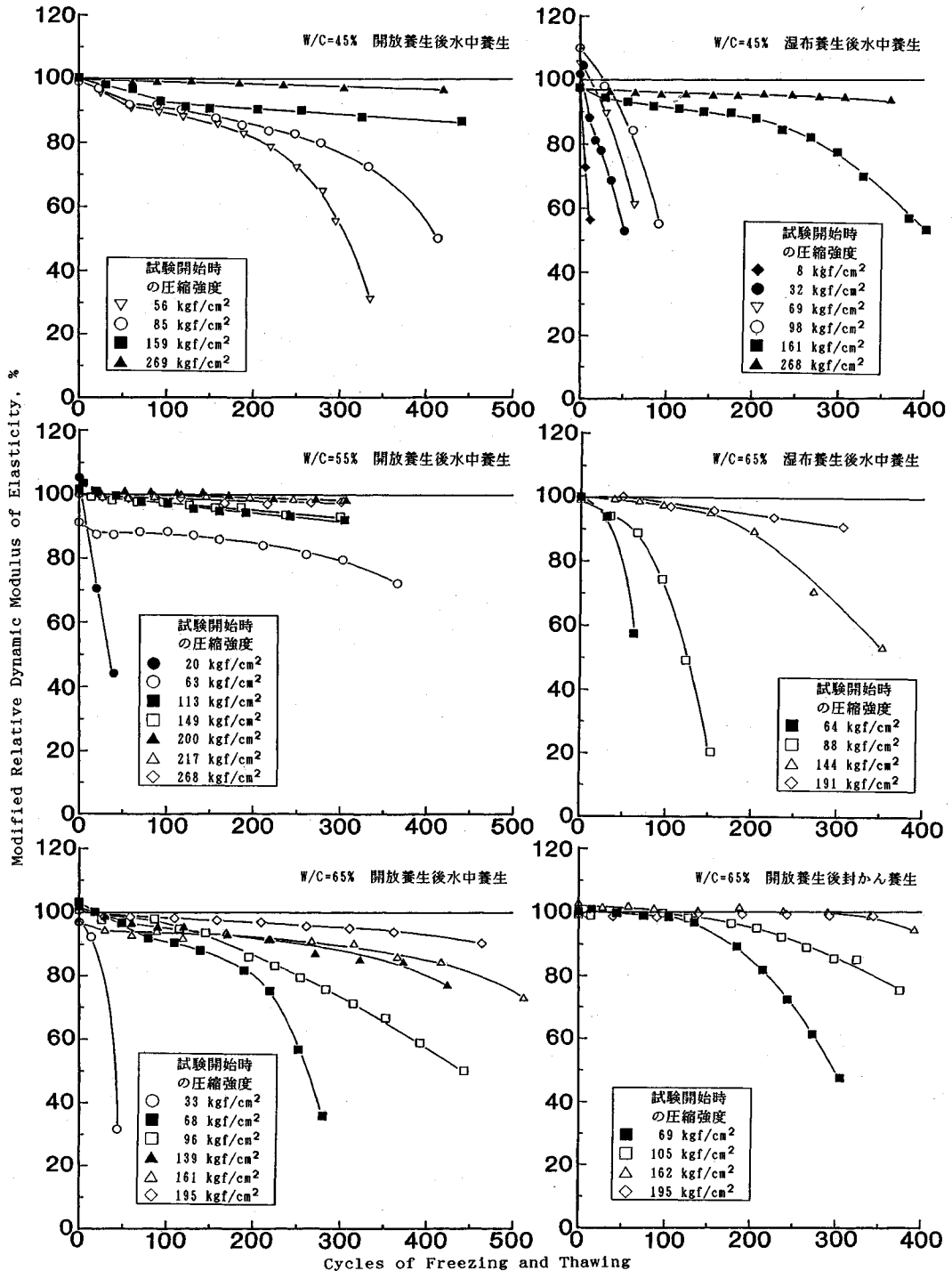
M_0 : $E_d \sim M$ 曲線が M 軸と交わる点の M の値 (DD)

a : 両者の関係の初期接線勾配

b: E_d の収束値 (最大値)

図一5中に示した各式は、それぞれの配合ならびに湿度の条件ごとに、式(2)に最小二乗法を適用して M_0 , a および b を決定した実験式である。これらの各式を参照すると、 M_0 の値 (この図では、約 30 DD が材令 1 日に対応) に関しては、いずれもほぼ妥当な値となっているが、水セメント比と凝結速度との関係と考えた場合に一部の M_0 の値の大小関係が必ずしも合理的でないものも認められる。しかし、実験式と試験結果との適合性は全般的にきわめて良好であることは明らかである。そこで、本研究では、この後者の特徴を利用し、図一5中の各式が、それぞれの配合と湿度の条件下における積算温度と動弾性係数の関係を表すものと考えて解析を行うことにした。

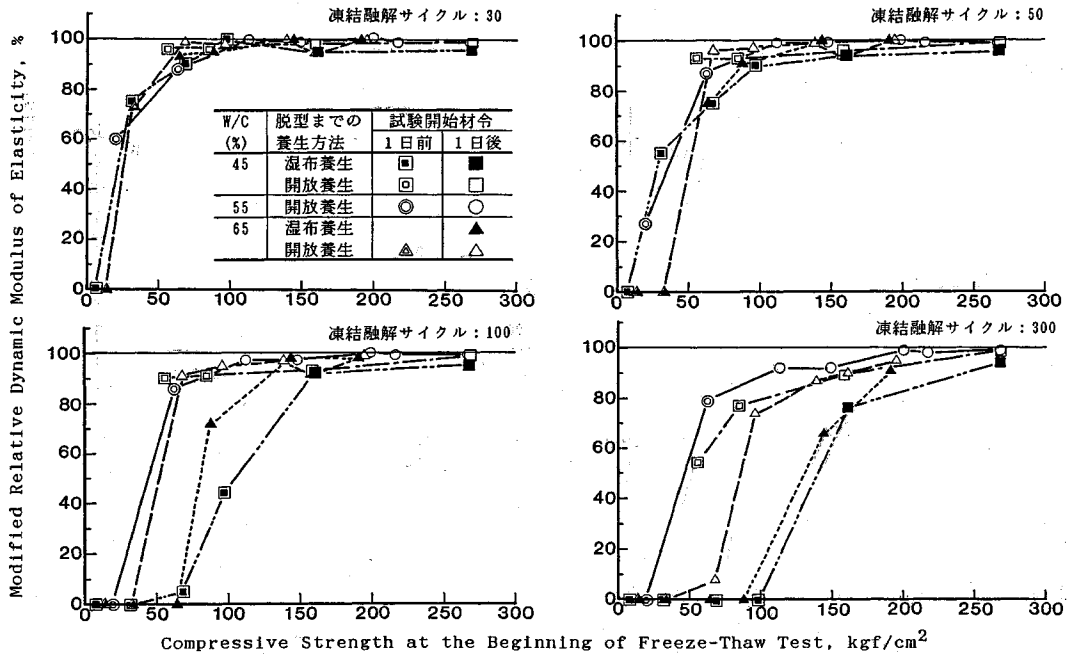
以上のようにして導いた各式を凍結融解試験結果の解析に用いるにあたっては、 0°C 以下となる範囲における



図—6 凍結融解サイクル数と修正相対動弾性係数の関係

積算温度をどのように算定するかが次に問題となる。すなわち、本研究の凍結融解試験で用いた管理供試体の温度履歴は図—3に示したようであるが、この大部分を占める0°C以下の領域では、積算温度の算定に式(1)を

適用することが適当でないといわれているのである¹⁵⁾。これは、氷点下領域でセメントの水和速度が著しく低下する影響が式(1)に含まれていない理由による。この問題を解決する1つの便法としては、0°C以下でのセメ



図一七 凍結融解試験開始時の圧縮強度と修正相対動弾性係数の関係

ントの水和を無視し、この間の積算温度をゼロ（零）とすることも考えられる。しかし、氷点下領域におけるセメントペースト中の水量を調べた Powers の試験結果¹⁶⁾を参照すると、 -1°C で凍結した水量は全体の 44% 程度であったこと、 -8°C でも約 14% の水が未凍結のまま存在したこと、 -15°C ですべての水が凍結したこと、等が示されているのであって、若材令で図一三のような温度サイクルを数多く受ける場合には、 0°C 以下の温度領域でも水和するセメントの総量は無視できない程度になると考えられる。また、若材令コンクリートの場合には、たとえセメントの水和の進行がわずかであっても、これによる動弾性係数の増加が著しく大きい（図一四参照）。これらの諸点を考慮し、本研究では、氷点下となる領域についても積算温度を算定することにした。

図一五の実験式を利用しようとする本研究の解析手法を考えると、 0°C 以下の領域に適用する積算温度式には、この領域に対して計算される積算温度と圧縮強度との関係が、 0°C 以上の範囲に対して式 (1) を適用した場合の積算温度と圧縮強度との関係と等価となる性質が要求される。著者らが知る範囲内で、この要求性能をほぼ満足することが確認されている式としては、前記の Powers の試験結果も考慮して Nykänen¹⁷⁾ が提案した式 (3) が唯一のものとして挙げられる。そこで、本研究では、 0°C 以下の温度領域に対する積算温度の算定には、式 (3) の適用を試みることにした。なお、式 (3) 中の k の値はセメントの種類によって 0.2~0.4 に変動するとされ

ているが、本研究では、Nykänen 自身が提案式の妥当性の検証を試みている $k=0.3$ を用いることにした。

$$M = k \sum t(\theta + 15) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $k: 0.2 \sim 0.4$

以上の諸式を用いて凍結融解試験結果を解析するにあたっては、まず、養生中および凍結融解試験中における温度範囲に応じて式 (1) あるいは式 (3) を適用して凍結融解試験の各段階に至るまでの積算温度を計算した。次いで、それぞれの積算温度に対応する「理想的な状態におけるたわみ動弾性係数」の値 (E_{ci}) を、それぞれの配合と養生条件に対応する図一五中の実験式から求めた。そして、次式のように定義した修正相対動弾性係数の値を凍結融解試験の各段階に対して求めた。図一六は、このようにして求めた修正相対動弾性係数の値を凍結融解サイクル数に対してプロットしたものである。

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

ここで、 RE_{mi} : 修正相対動弾性係数

E_{mi} : 動弾性係数の実測値

E_{ci} : 理想的な状態での動弾性係数

図一六を通覧すると、いずれの場合も、凍結融解サイクルの増加に伴って修正相対動弾性係数の値が増加する現象は全く認められず、凍結融解に伴う各供試体の劣化状況がきわめて明瞭に現れている。また、試験開始時の圧縮強度と耐凍害性の大小関係についても、合理的な結果が示されている。さらに、図一七は、図一の縦軸を

「修正相対動弾性係数」に置き換えたものであるが、この図と図一2を対比すると、両図に認められる各供試体の劣化状況はきわめて良く一致しているのである。これらは、凍結融解試験中にセメントの水和によって動弾性係数が著しく増加する影響が上述してきた解析法によって完全に消去できることを証明するとともに、実験結果の解析に用いてきた諸式が適切なものであったことを裏付けるものと考えられる。

なお、図一6における修正相対動弾性係数の初期値に着目すると、この値は90~110%の範囲にあり、必ずしも100%となっていないものもある。しかし、いずれの場合も、初期値とこれに後続する各点との連続性がきわめて良好であることを考慮すると、その原因は、同じ条件で作製・養生した場合でも各供試体の動弾性係数の値が必ずしも完全に一致しない影響と考えられる。したがって、このような結果が得られたものに対しては、修正相対動弾性係数の初期値が100%の位置に移るように各曲線を平行移動させる修正を行うことが可能と思われる。

以上の諸点を総合して考えると、上述してきた解析法は凍結融解試験中にセメントが水和する影響を十分に考慮できる手法であり、これによって得られる解析結果は実用的には満足すべき信頼性を有していると思われる。また、この手法は、任意の硬化段階にあるコンクリートが任意の凍結融解サイクルを受けた場合の内部劣化の状況把握にも適用できる汎用性も有している。したがって、本節で示した手法は、若材令コンクリートの耐凍害性能を検討する場合の適切なデータ解析手法として、有効に使用できるものと考えられる。

4. 結 論

本研究の範囲内で、次のことがいえると思われる。

(1) 若材令コンクリートの場合には、たとえ急速な水中凍結融解試験を行っても、その試験中に動弾性係数の値が著しく増加し、試験開始材令によってはその増加量が50%を超えることもある。これは、凍結融解試験中にもセメントの水和が進行するためである。しかし、若材令コンクリートを対象とした場合の動弾性係数の著しい増加は、セメントの水和による強度増進の程度が若材令の場合に特に大きいことに起因したものではなく、強度の増加に伴う動弾性係数の増加率が強度が小さい場合ほど大きい理由による。このため、動弾性係数の測定値をそのまま用いる一般の耐凍害性評価手法を若材令コンクリートに適用すると、試験開始時の強度が小さい場合ほど内部劣化を正しく判定することが困難になる。

(2) 使用材料、配合ならびに養生中の湿度環境を同じに保った若材令コンクリートの動弾性係数 (E_d) と積算温度 (M) との間には、次式で表し得る相関関係が

ある。

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

$$M = \sum t(\theta + 10) \dots\dots\dots (II)$$

ここで、 M_0 : $E_d \sim M$ 曲線が M 軸と交わる点の M の値 (DD)

a : 両者の関係の初期接線勾配

b : E_d の収束値 (最大値)

t : 材令 (日)

θ : 養生温度 ($^{\circ}C$)

(3) 次式で定義される修正相対動弾性係数 (RE_{mi}) を用いれば、動弾性係数の測定値 (E_{mi}) を使用して、若材令コンクリートの凍結融解作用に伴う劣化状況や耐凍害性を正しく評価できる。

$$RE_{mi} (\%) = \frac{E_{mi}}{E_{ci}} \times 100 \dots\dots\dots (III)$$

ここで、 E_{ci} は、 E_{mi} を測定した時点における内部劣化を含まない理想的な状態での動弾性係数の値であり、次のようにして求める。

まず、凍結融解試験用供試体と全く同じに作製・養生した供試体について、凍結融解試験用供試体の養生中を中心とした5~7材令で動弾性係数を測定する。次いで、これらの結果をもとに、上記 (I) 式中の定数 a 、 b および M_0 を決定する。この式に、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代入すれば、 E_{ci} が求まる。ただし、この場合、 $0^{\circ}C$ 以下の温度領域における積算温度の計算には次式を用いる。

$$M = 0.3 \cdot \sum (\theta + 15), \quad [\theta < 0^{\circ}C] \dots\dots\dots (IV)$$

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) 土木学会 : コンクリート構造物の耐久設計指針 (試案), コンクリートライブラリー, 第65号, 1988.
- 2) 笠井芳夫・横山 清 : コンクリートの初期凍害に関する研究 (繰り返し凍結を受ける場合), セメント技術年報 19, pp. 374~379, 1965.
- 3) 笠井芳夫・横山 清 : コンクリートの初期凍害に関する研究, セメント技術年報 20, pp. 333~337, 1966.
- 4) 笠井芳夫・横山 清 : コンクリートの凍害耐力および凍害耐力を得るのに必要とする初期養生期間について, セメント技術年報 21, pp. 420~427, 1967.
- 5) 神田 篤 : まだ固まらないコンクリートの凍害被害と所要硬化期間に関する研究, セメント技術年報 17, pp. 335~343, 1963.
- 6) 洪 悦朗 : コンクリートの初期凍害に関する実験, セメント技術年報 11, pp. 321~326, 1957.
- 7) 洪 悦朗 : 初期凍害に対する AE コンクリートなどの効

- 果, セメント技術年報 12, pp.273~278, 1958.
- 8) 洪 悦朗: コンクリートの初期凍害, 日本建築学会論文報告集, 第 57 号, pp. 97~100, 1957.
- 9) 三浦 尚・黒川 聡: 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.
- 10) 鮎田耕一: 寒中コンクリートの強度, 耐久性に及ぼす養生の影響, セメント技術年報 39, pp. 130~133, 1985.
- 11) Saul, A.G.A. : Principle Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure, Mag. of Conc. Res., Vol.2, Ho.6, pp.127~140, 1951.
- 12) Seven G. Bergstrom : Curing Temperature, Age and Strength of Concrete, Mag. of Conc. Res., Vol.5, No.14, pp.61~66, 1953.
- 13) Nicholas J. Carino and Lew, H. S. : Temperature Effect on Strength-Maturity Relation of Mortar, Journal of A. C. I., Vol.80, No.3, May-Jun, pp. 177~182, 1983.
- 14) 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, 第 414 号/V-12, pp. 131~140, 1990.
- 15) RILEM Winter Construction Committee : RILEM Recommendations for Winter Concreting, Bulletin RILEM No.21, December, pp.3~30, 1963.
- 16) Powers, T. C. : A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete, Proceedings of A.C.I., Vol.41, pp.272-1~272-20, 1945.
- 17) Arovo Nykänen : Hardening of Concrete at Different Temperatures Especially Below the Freezing Point, RILEM Symposium on Winter Concreting, Session B, 1956.
- (1990. 8. 20 受付)

A STUDY ON THE METHOD OF EVALUATING THE FREEZE-THAW RESISTANCE OF CONCRETE AT EARLY AGES

Tomozou CHOUAI and Yasuhiko YAMAMOTO

Concrete specimens were tested at early ages for their freeze-thaw resistance by the method prescribed in Appendix 2 of JIS A 6204. Their water-cement ratios were fixed at 45, 55 and 65 %, while the air content was kept constant at 5.5%. It was revealed that the conventional method of measuring the changes in the dynamic modulus of elasticity of specimens frequently over-estimated the freeze-thaw resistance of early age concretes. The reason was due to the remarkable increase in the modulus caused by the continued hydration of cement during the test. A new method of evaluating the freeze-thaw resistance of early age concrete, in which the measured modulus was modified for its increase during the test by introducing maturity concept, was proposed.