

緩速凍結融解作用を受ける若材齢コンクリートの劣化挙動と内部損傷

山本泰彦¹・山元寛哲²・武田 厚³

¹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)

E-mail: yamamoto@kz.tsukuba.ac.jp

²工学士 (株)大林組 名古屋支店 沼津シールド工事事務所 (〒410-0105 沼津市馬込地内)

³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)

飽水度の高い若材齢コンクリートを対象として、冬季の厳しい自然環境を模した1日1サイクルの緩速凍結融解を60サイクル与えた場合における劣化挙動と内部損傷を実験的に調べた。

本研究では、圧縮強度が4.0 N/mm²を超えるまで養生すれば、最初の一冬に生じる内部損傷は長さ変化にほとんど影響しない程度のものであること、封かん状態と同等あるいはこれ以下の含水条件で養生・供用する場合は、水セメント比を60%以下とし、かつ、圧縮強度が5.0 N/mm²を超えるまで養生すれば内部損傷はほとんど生じないこと、コンクリートの凍害損傷を防止するためには、水セメント比を小さくすることが極めて有効であることなどを示した。また、寒中コンクリートの必要養生日数に関する提案も行った。

Key Words : slow freezing and thawing action, early-age concrete, cold weather concreting, curing, hydration of cement

1. まえがき

寒中コンクリートを対象にしている指針類には、一般にはコンクリートの初期凍害防止と養生終了後の耐凍害性能に配慮した養生規定が定められている。しかし、それらの具体的内容は、指針類によって相当に異なっている。例えば、土木学会のコンクリート標準示方書〔施工編〕¹⁾ (以下、土木学会示方書と呼ぶ) では、初期凍害を防止するための規定の他に、「養生終了時の所要圧縮強度の標準値」を定めており、普通の露出状態の場合は5 N/mm²、連続してあるいはしばしば水で飽和される場合に対しては、断面厚さに応じて、10~15 N/mm²の値が示されている。これに対し、日本建築学会の建築工事標準仕様書 JASS 5²⁾ (以下、JASS 5と呼ぶ) では、初期凍害を防止するための養生を特に初期養生と呼称し、「初期養生を打ち切ってもよい所要圧縮強度の標準値」として5 N/mm²を定めている。また、全ての湿潤養生を打ち切ることができる所要圧縮強度の下限は、施工時期に特に関係なく、構造物の計画供用期間の級に応じて、10または15 N/mm²に定められている。

一方、海外の指針類の例として ACI の現場施工マニュアル³⁾ を参照すると、ACI Committee 306 の報告が原文のまま掲載されており、初期凍害防止の目的に対しては、養生温度、使用セメントの種類および構造物の露出状態

に応じて、1~3日の範囲にある養生日数が規定されている。この規定は、外部から水が供給されない条件下では、圧縮強度が3.5 N/mm² (Powers⁴⁾ の提案値3.0 N/mm² に安全を考慮した値) に達すれば、1回の初期凍害を受けても内部損傷は残らないとの基本的な考えに基づいて定められており、養生中にコンクリートに荷重が作用しない場合は、この初期凍害防止のための養生日数をそのまま寒中コンクリートの必要養生日数と考えてよいとしている。また、養生中に荷重が作用する場合は、その大きさに応じた必要養生日数が定められている。ただし、飽水状態にあるコンクリートの場合は、圧縮強度が24 N/mm² に達する以前の段階で凍結融解作用を受けさせてはならないと定めている³⁾。

その他の例としては、ACI 基準が適用される前の旧カナダ規格 (CSA A23.1) では、養生終了前12時間はコンクリートを自然乾燥させることを条件として、養生終了時の所要圧縮強度の目安値として7~10.5 N/mm²を示していた⁵⁾。また、凍害を受ける恐れがなくなる圧縮強度の下限として、スウェーデンでは2.5~4.5 N/mm²、ソ連では5~9 N/mm²、スイスでは15 N/mm²程度の値がそれぞれの規定に盛り込まれているようである⁶⁾。

養生中または養生後間もないコンクリート (以下、若材齢コンクリートと呼称する) が凍結した場合の影響に関する実験的研究は、主に1950~1970年代に実施されて

おり、供試体に、①1回のみ凍結を与えている研究⁷⁾⁸⁾、②数回～20回程度の緩速凍結融解を与えている研究⁹⁾¹⁰⁾、③200回の急速水中凍結融解を与えている研究¹⁰⁾¹⁷⁾などがある。これらの研究には、試験条件の厳しさに著しい差があり、この当然の結果として、凍結による損傷を回避できる圧縮強度として提示されている値には大きな相違がある。しかし、それらの値が0.5～15 N/mm²の範囲にあり、前述した指針類の諸値のほとんどがこの範囲に含まれることを考慮すると、寒中コンクリートの養生規定が指針類によって異なっている背景には、寒中コンクリートの養生方法に関する基本的考え方や指針類の対象構造物が互いに相違し、それぞれの指針類の内容と性格を勘案した試験の結果から規定を定めていることがあると推察される。例えば、海外では、寒中コンクリートの養生中に外部から水を供給することを禁じている国々が多いが³⁾⁹⁾¹⁰⁾、このような国々の指針類では、1回または数回の凍結を与えた試験の結果あるいは Powers の研究結果⁹⁾を基に規定を定めている可能性が高いと考えられる。また、JASS 5 の初期養生の規定は数回の凍結を受けた場合の試験結果を参考にして定められているが²⁾、これには養生期間中の建物部材の含水状態の実態が考慮されているものと思われる。これに対し、今日の土木学会示方書の規定は、寒中でも湿潤養生を行うことを原則としているためと思われるが、昭和49年の改訂時に、数回～10回程度の凍結を与えた試験結果のほかに、通常の急速水中凍結融解試験の結果も参考にして定められている¹⁹⁾。

しかしながら、凍結の影響を実験的に検討している過去の文献を通覧すると、ほとんどの研究において、試験結果の解析が適切になされていないように思われる。すなわち、一般にはセメントの水和が著しく進行しつつある段階にある若材齢のコンクリートを対象にしているにもかかわらず、それらの凍結による損傷の程度を、その後の強度発現性状、強度回復の程度または通常の方法で求めた動弾性係数の値の変化によって判定しているものがほとんどであり、これらの性状または数値に及ぼすセメントの水和の進行の影響が考慮されていないのである。Hoff 等⁹⁾も、著者らと同様な問題意識を持ち、セメントの水和の影響がない方法、すなわち、供試体の膨張ひずみを測定する方法で1回の凍結を受けた場合に生じる損傷を調べ、ACI の規定値 (3.5 N/mm²) の妥当性を検証している。また、Hoff 等は、このような1回の凍結による試験結果は長期における耐凍害性を保証するものではないとも述べている。

そこで、著者等は、寒中コンクリートの養生期間について基本に戻って再検討することにし、まず、凍結融解試験中に生じる若材齢コンクリートの内部損傷の程度を正しく評価するための手法について検討して、修正相対動弾性係数を用いる方法²⁰⁾と膨張ひずみ特性を利用する

方法²⁰⁾を提案した。次いで、通常の急速水中凍結融解試験の結果に修正相対動弾性係数を用いる方法を適用して、AEコンクリートが“若材齢の各時点において保有している耐凍害性能”を明らかにするとともに、この結果に基づいて寒中コンクリートに対する“安全側の必要養生日数”を提示した²¹⁾。しかし、実際の自然環境下にあるコンクリートの場合、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、若材齢であるが故に、このような緩やかな凍結融解作用を受けている間にセメントの水和が相当に進み、劣化抵抗性が増加する可能性もある。したがって、寒中コンクリートの必要養生日数等については自然環境を考慮した試験の結果に基づいて検討するのが適切であると考えられる。

本研究は、水セメント比、強度レベルおよび含水条件を変化させた若材齢コンクリートを対象として、実際の厳しい自然環境を模した1日1サイクルの緩速凍結融解試験を実施し、この結果に著者らが過去の研究で提案したデータ解析手法を適用するとともに、通常の急速水中凍結融解試験をはじめとするその他の試験も併用して、自然の凍害環境下で生じるコンクリートの内部損傷やこれに及ぼすセメントの水和の影響を検討した結果について論じたものである。また、得られた結果に基づいて、寒中コンクリートの養生日数に関する考察も加えた。

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、供試体の作製は、全て 20±2℃ に保った同一の恒温室内で行った。

(1) 使用材料

セメントには、1種類の普通ポルトランドセメントを用いた。この物理的性質を表-1に示す。

細骨材には鬼怒川産川砂を用い、粗骨材には笠岡産砕石 (硬質砂岩) を使用した。これらの骨材の物理的性質は、表-2 および表-3 のようであった。

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、後述する給水養生供試体の場合は45, 50, 55, 60および65%とし、封かん養生供試体の場合は55, 60および65%のみとした。スランブおよび空気量は、それぞれ、8±1cm および 6.0±0.5% を目標にした²²⁾。なお、緩速凍結融解試験の厳しさについて確認した一部の試験では、プレーンコンクリート (Non-AE) も作製し、この場合の水セメント比は65%と

表-1 セメントの物理的性質

| 密度 (g/cm ³) | 比表面積 (cm ² /g) | 凝結 (h-m) | | 圧縮強さ (N/mm ²) | | |
|----------------------------|------------------------------|----------|------|---------------------------|------|------|
| | | 始発 | 終結 | 3日 | 7日 | 28日 |
| 3.16 | 3340 | 2-22 | 3-27 | 16.5 | 25.8 | 41.1 |

表-2 細骨材の物理的性質

| 密度 (g/cm ³) | 吸水率 (%) | 粗粒率 |
|----------------------------|------------|------|
| 2.59 | 2.48 | 2.45 |

表-3 粗骨材の物理的品質

| 最大 寸法 (mm) | 表乾密度 (g/cm ³) | 吸水率 (%) | 実積率 (%) | 粗粒率 |
|------------------|------------------------------|------------|------------|------|
| 20 | 2.70 | 0.51 | 58.1 | 6.66 |

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 ³) | 単位AE剤量 (C×%) | 実測値の範囲 | |
|--------|--------------|------------|------------|---------------------------|-----------------|--------------|------------|
| | | | | | | スランブ (cm) | 空気量 (%) |
| AE | 6.0±0.5 | 45 | 42 | 167 | 0.040~0.046 | 7.0~8.5 | 5.4~6.5 |
| | | 50 | 43 | 167 | 0.036 | 7.0~9.0 | 5.5~6.0 |
| | | 55 | 44 | 167 | 0.023~0.033 | 7.0~9.0 | 5.4~6.5 |
| | | 60 | 45 | 169 | 0.019~0.025 | 7.5~8.5 | 5.7~5.9 |
| | | 65 | 46 | 172 | 0.018~0.030 | 7.0~9.0 | 5.4~6.6 |
| Non-AE | — | 65 | 49 | 193 | — | 8.0 | 2.8 |

した。これらのコンクリートの配合の詳細とスランブおよび空気量の実測値の範囲を表-4に示す。

(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40リットルのアイリッヒ型ミキサーを使用し、1バッチ当たりの練混ぜ量は35リットルとした。練混ぜに当たっては、まず、細骨材の半量、粗骨材の全量、セメントの全量、残りの細骨材の順に材料をミキサーに投入し、1分間の空練りを行った。その後、練混ぜ水をミキサーに投入して3分間の練混ぜを行った。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、凍結融解試験用角柱供試体(10×10×40cm)、動弾性係数補正用角柱供試体(10×10×40cm)および圧縮強度試験用円柱供試体(φ10×20cm)の3種類である。動弾性係数補正用供試体は、凍結融解試験中にセメントの水和が進行する影響を補正する目的に用いた^{20,22)}。

供試体の数については、配合、養生方法、試験開始材齢等が相違する個々の試験条件に対して1バッチずつコンクリートを練り混ぜ、各バッチから凍結融解試験用供試体2本、動弾性係数補正用供試体1本および圧縮強度

用供試体3本を作製した。ここで、凍結融解試験用供試体を2本としたのは、緩速凍結融解試験後に行った急速凍結融解試験の試験機の容量制限(最大31本)を考慮したためである。ただし、緩速凍結融解試験を行った後に回復養生の影響を調べたシリーズの試験では、各バッチから作製する凍結融解試験用供試体の数を3本とした。圧縮強度用供試体には、強度試験の直前に硫黄キャッピングを施した。

なお、緩速凍結融解試験中における劣化の程度を圧縮強度で調べた試験の供試体は、上記とは異なる別バッチのコンクリート(水セメント比65%)から作製した。

(4) 供試体の養生および脱型

本研究では、ほぼ封かん状態に保った供試体(以下、封かん養生供試体と呼ぶ)および内部がほぼ飽水された状態に保った供試体(以下、給水養生供試体と呼ぶ)を対象として、緩速凍結融解試験を実施した。これらの供試体の養生および脱型は、以下のように行った。

封かん養生供試体(記号: f) :

コンクリートの打込み直後に、型枠上端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、このまま $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の恒温室内に静置した。

供試体の脱型は、緩速凍結融解試験を開始する7時間前に行った。

脱型後は、直ちに供試体を大判の食品用ラップフィルムで3~4重に包み、次いで、その全面を堅く絞った濡れタオルで覆い、更にその上からラップフィルムで1~2重に包む措置を施した。

上記の処置を施した供試体は、直ちに、 10°C に温度設定した環境試験槽に移し、試験開始時まで 10°C で養生を継続した。

給水養生供試体 (記号:w) :

コンクリートの打込み直後に、上記の封かん養生供試体と同じ方法により供試体を密封し、 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の室内で養生を開始した。次いで、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) に注射器によって給水して、供試体の上面を水で覆った状態にさせた。給水を行う時期は、各コンクリートの凝結の終結時間にほぼ対応する時間 (水セメント比に応じ、6~8時間) とした²⁾。

供試体の脱型時期および脱型後の養生温度は、前記の封かん養生供試体の場合と全く同じである。ただし、給水養生供試体の場合は、脱型直後に供試体全体を水で濡らしたタオルで2重に包み、その上からラップフィルムで3~4重に包む措置を施した。また、給水養生供試体のうち、水セメント比を45%とし、試験開始時の目標圧縮強度を 4 N/mm^2 としたものの場合は、試験開始前7時間の時点では脱型可能な強度に達していなかったため、型枠に入れたまま 10°C の環境試験槽に移し、緩速凍結融解試験の直前に脱型して他の供試体と同じ措置を施した。

なお、供試体を、緩速凍結融解試験の開始前7時間前に脱型し、その後 10°C に設定した環境試験槽内で養生したのは、次々節 (6) で述べるように、この環境試験槽を使った緩速凍結融解試験を 10°C から開始し、試験中における供試体の長さ変化の測定も供試体中心部の温度が約 10°C となった時点で行った理由による。

(5) 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種類または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]および[前節(4)に示した供試体の記号]を、この順序で組み合わせた記号によって供試体を区分・表示することにした。

例えば、水セメントを45%とした給水養生供試体であれば、これを45wと表示する。

(6) 凍結融解試験

緩速凍結融解試験は、プレハブ型の環境試験槽を用い

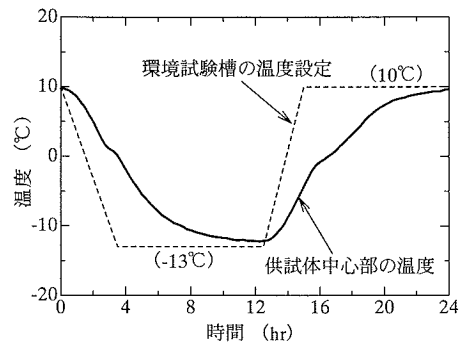


図-1 緩速凍結融解試験の温度履歴

て行い、1日1サイクルの凍結融解 (試験槽内の温度範囲: $-13 \sim 10^\circ\text{C}$, 角柱供試体中央部の温度範囲: $-12.3 \sim 9.7^\circ\text{C}$) を供試体に60サイクル与えた。

図-1に緩速凍結融解1サイクル分の温度履歴を示す。この緩速凍結融解試験における温度範囲と凍結融解サイクル数は、わが国における冬季の厳しい自然の凍結融解作用と環境試験槽の性能を勘案して定めたもので、次のような根拠に基づいている。

まず、気象庁発行の「日本気候表その5」²⁾により、30年間における全国各地の日別最高・最低気温の平滑年値を調査した。その結果、最低気温が -12.8°C を下回っている場合は、その日の最高気温は何れも 0°C 未未満で、コンクリートは一般には融解し難い条件下にあることが判明した。そこで、本研究では、この調査結果と順調な試験を行うための環境試験槽への負荷を考慮して、環境試験槽の槽内温度の下限を -13°C に定めた。一方、槽内温度の上限は、試験槽の冷凍機配管に固着する氷を融解させるために必要な温度と時間を考慮して、 10°C に設定した。

次いで、上記と同じ資料を参照して、日本各地における1年間の凍結融解の繰返し数と凍結時の最低温度を調査した。表-5は、この調査結果の中から、凍結融解の繰返し数が多く、かつ、凍結時の最低温度が相対的に低い4都市を選び、それらの都市における凍結融解繰返し数を、凍結時の最低温度の範囲毎に示したものである。この表にも示されているように、これらの都市における1年間の凍結融解繰返し数は110回程度となっている。特に、浦河における凍結融解の繰返し数は、115回であり、この数は全国で最も多い回数であった。しかし、凍結融解作用によるコンクリートの劣化は、凍結融解の回数だけに支配されるものではなく、凍結時の最低温度にも大きく影響される。例えば、凍結融解作用によるコンクリートの劣化に及ぼす凍結時の最低温度の影響を検討した田畑らの研究結果²⁾によれば、コンクリートの劣化の程

表-5 凍結融解作用が厳しい都市における凍結時の最低温度範囲別の凍結融解繰返し数*1

| 都市名 | 凍結融解の繰返し数 (回) | | | | 換算サイクル数*3 (cycles) |
|-----|-----------------|-------------|----------------|-----|-----------------------|
| | 凍結時の最低温度範囲 (°C) | | | 合計 | |
| | -0.1~ -5.0 | -5.1~ -10.0 | -10.1~ -12.8*2 | | |
| 帯広 | 44 | 37 | 16 | 97 | 55 |
| 釧路 | 53 | 44 | 7 | 104 | 53 |
| 浦河 | 62 | 53 | 0 | 115 | 55 |
| 江差 | 72 | 39 | 1 | 112 | 48 |

*1: 1年間当たり。毎日の最高温度および最低温度から求めた。(30年間の平滑平均値)

*2: 最低温度が-12.8°Cを下回った日は、実績として、気温は0°C以下(融解は生じない)。

*3: 最低温度範囲の厳しさを考慮して、本研究の緩速凍結融解試験のサイクル数に換算した値

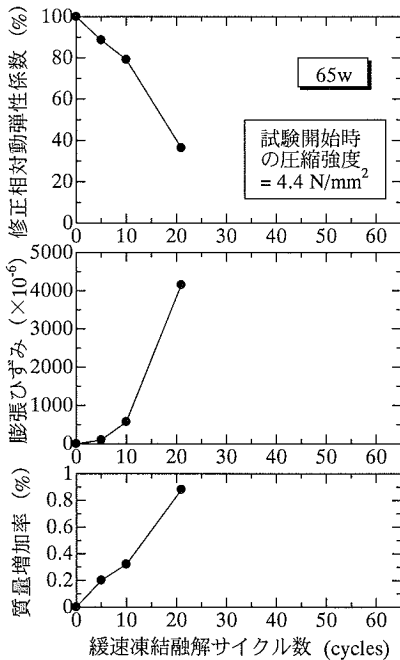


図-2 プレーンコンクリートに対する緩速凍結融解試験結果

度は、凍結最低温度の下降にほぼ比例して大きくなっており、凍結時の最低温度が-10°Cの場合における劣化程度を1とすると、凍結時の最低温度が-5°Cの場合における劣化程度は、約0.5となることが示されている。そこで、この研究結果を利用し、表-5における凍結時の最低温度が-10.1~-12.8°Cの範囲にある凍結融解作用の厳しさを1とし、-5.1~-10.0°Cの範囲の厳しさを0.75、-0.1~-5.0°Cの範囲の厳しさを0.25と考えて、各都市の自然環境下における凍結融解の繰返し数を、図-1の凍結融解サイクル(最低温度: -13°C)を適用する場合の繰返し数に換算してみた。その結果を表-5中に「換算サイクル数」と称して示してあるが、何れの都市の場合も、換算サイクル

数は50回程度となった。これらの換算サイクル数の値に基づいて、本研究では、図-1に示す凍結融解サイクルを供試体に60回与えることにしたのである。

緩速凍結融解試験は、脱型後に供試体に2.(4)に記した措置を施した状態のまま、養生に引き続き実施した。すなわち、試験開始まで封かん養生を行った供試体は、緩速試験中も封かん状態を保ち、給水養生供試体は、緩速試験中も湿潤状態を保った。

緩速凍結融解試験は、コンクリートの圧縮強度が約4, 8, 12, 16および20N/mm²に達した時点に開始することを目標とした。緩速凍結融解試験中は、供試体のたわみ振動の一次共鳴振動数、質量および長さの変化量を測定した。これらの測定は、供試体中心部の温度が9.5~9.7°Cにある時点で行った。

なお、本研究では、緩速凍結融解試験中にセメントの水和が継続する影響を試験結果から除去する解析手法を適用した。また、所定の緩速凍結融解試験を行った後にコンクリートが保有している耐凍害性能を確認するために、急速水中凍結融解試験も実施した。これらの解析手法および試験方法については、前報^{20,22)}と全く同じであるので、本文では省略する。

3. 実験結果および考察

(1) 緩速凍結融解試験の厳しさの確認

一連のシリーズ実験を行う前に、本研究で採用した緩速凍結融解試験の厳しさの程度を確認する試験を行った。この試験では、凍結融解作用による損傷を受けやすいコンクリートを試料とすることにし、水セメント比を65%としたプレーンコンクリート(Non-AE)で供試体を作製した。また、養生は給水養生供試体と全く同じ方法とし、試験開始時の目標圧縮強度は4N/mm²とした。

図-2は、この緩速凍結融解試験で得られた供試体の修正相対動弾性係数(=緩速試験中におけるセメントの水

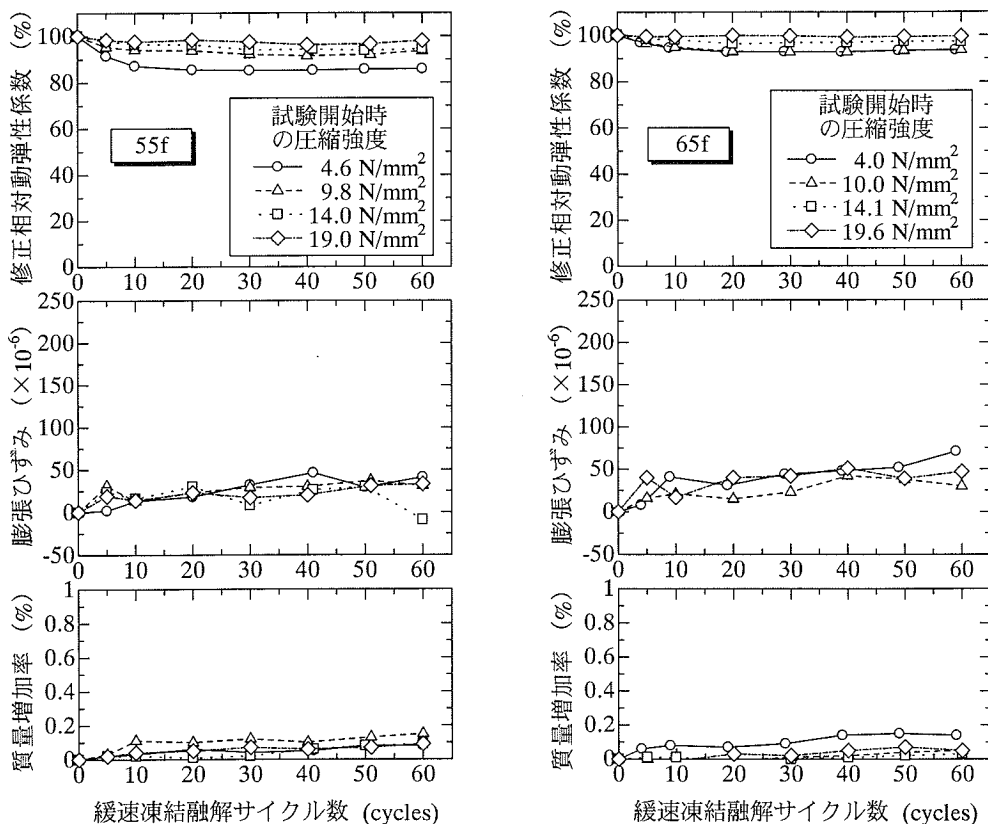


図-3 封かん養生供試体に対する緩速凍結融解試験結果の例

和の進行の影響を除去した相対動弾性係数), 膨張ひずみおよび質量増加率の結果を示したものである。この図にも認められるように, 試験で対象としたプレーンコンクリートの場合, 緩速凍結融解試験のごく初期から急速に劣化が進行し, 約 20 サイクルの凍結融解を与えた時点で, 修正相対動弾性係数が 40% 以下に低下するとともに, 膨張ひずみは $4,000 \times 10^6$ を超えた。この段階では, それぞれの角柱供試体の隅角部に大きな表面剥離が 10 箇所程度ずつ生じていたが, 中央部分の表面には目立った損傷は認められなかった。また, 30 サイクルの凍結融解を与えた時点では, 供試体が割れて完全に崩壊した。この凍結融解サイクル数に伴う劣化進行の速度は, 30 N/mm^2 程度の圧縮強度を有するプレーンコンクリートに対して, 通常の急速水中凍結融解試験を行った場合の劣化進行速度とほぼ同等である。これらの諸点を考慮すると, 本研究で採用した緩速凍結融解試験は, 通常の急速水中凍結融解試験よりは緩やかではあるが, コンクリート(供試体)には相当に厳しい自然の環境条件を模した試験条件を与え得るものと考えてよいと思われる。

(2) 緩速凍結融解試験結果に対する考察

図-3 は, 封かん養生供試体を対象とした緩速凍結融解試験(以降, 本文中では, 緩速試験と略称する)の結果の例として, 水セメント比を 55 または 65% とし, 試験開始時の圧縮強度(以降, 本文中では, 試験開始強度と略称する)を 4 段階に変えたコンクリートについて求めた修正相対動弾性係数, 膨張ひずみおよび質量増加率の試験結果を緩速凍結融解サイクル数に対してプロットしたものである。

図-3 における修正相対動弾性係数の試験結果に着目すると, 修正相対動弾性係数の値は, 緩速凍結融解サイクル数の増加とともに徐々に低下しており, 試験開始強度が小さい場合ほど小さくなる傾向にあることが認められる。しかし, その低下量は全般的に小さく, 60 サイクルの凍結融解を与えた後においても, 何れも 85% 以上の高い修正相対動弾性係数の値となっている。

一方, 膨張ひずみの試験結果を見ても, 凍結融解サイクル数の増加に伴って全般的に膨張する傾向は見られるものの, 60 サイクル終了時の膨張量は, 全て 70×10^6 程

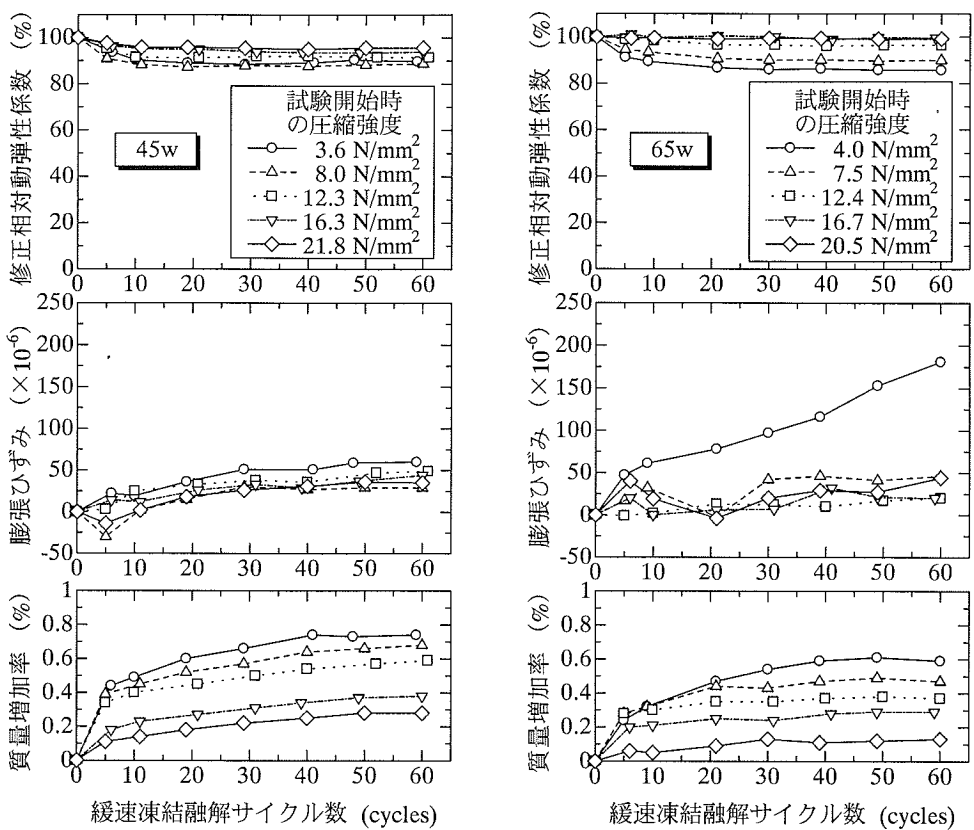


図-4 給水養生供試体に対する緩速凍結融解試験結果の例

度以下の範囲にあり、極めて小さいことが認められる。また、膨張ひずみの大小と試験開始強度との間に特に明確な対応関係も認められない。

次に、図-3の質量増加率の測定結果をみると、全ての場合に僅かながら質量の増加が認められる。この質量の増加は、供試体が水分を吸収したためと考えられ、この水分は、供試体をラップフィルムで2~3重に包んだ上に配置した堅く絞った湿気タオルから供給されたものと考えられる。すなわち、封かん養生供試体からの水分の逸散を防止する目的で施した措置が逆に供試体に水分を供給してしまったことを示していると考えられる。しかしながら、図-3に示されている質量増加率は全て0.2%未満と小さく、少なくとも供試体からの水分逸散を防止する目的(凍害劣化の過小評価を防止する目的)は確保されている。したがって、ここで実測された程度の水分吸収量は、寒中コンクリートの必要養生日数等について検討する本研究の最終的な目的には特に支障となるものではない(安全側の結果となる)と考えられる。

図-4は、給水養生供試体の緩速試験結果の例として、水セメント比を45および65%としたコンクリートの試

験結果を、封かん養生供試体の場合と同じ形式で示したものである。この図にも認められるように、給水養生供試体の場合にも、修正相対動弾性係数に関しては、上記の封かん養生供試体の場合とほぼ同様の結果が得られ、60サイクルの凍結融解を与えた後においても、全て85%以上となった。また、膨張ひずみに関しては、図-4に示されている水セメント比65%、試験開始強度4.0N/mm²の場合のみ、60サイクル終了時で約180×10⁶と比較的大きい値を示したが、その他の試験要因の場合は全て70×10⁶以下となり、封かん養生供試体と全く同様であった。

一方、質量増加率に関しては、前記の封かん養生供試体の場合と相違した結果が得られた。すなわち、給水養生供試体の場合は、表面はく離がやや増加する傾向にあったにもかかわらず、図-3の結果と比べて、質量増加率が一段と大きくなった。また、その値は、試験開始強度が小さい(材齢が若い)場合および水セメント比が小さい場合に大きいことが明瞭に認められる(図-4参照)。これらの結果は、給水養生供試体の試験条件が常に十分な水が供給される状態にあることを考慮すると、緩速試験中にもセメントの水和が進み、これに消費された自由

水が結晶水となる際の体積減少を補てんする形で供試体中に水が吸収された結果を反映しているものと考えられる。また、この結果から判断すると、本研究の給水養生供試体の場合は、緩速試験中も内部がほぼ 100% 飽水された厳しい状態にあったものと思われる。

上述してきたように、本研究の緩速試験で得た修正相対動弾性係数は、供試体の水セメント比、含水量（養生方法、試験条件）、試験開始材齢等が相違しても大差がなく、60 サイクルの緩速凍結融解を終了した時点でも 85% 以上の大きい値が確保されていた。しかし、この結果から供試体の内部が健全な状態にあると速断することは必ずしも適切でないように思われる。すなわち、通常の急速水中凍結融解試験結果^{20,22}を通覧すると、例えば、100 サイクル程度で崩壊するコンクリート供試体でも、60 サイクル程度の凍結融解を受けた段階では 85~100% の（修正）相対動弾性係数を保持しており、その後に急速に劣化・崩壊していくケースが多いのであって、修正相対動弾性係数が 85% 以上であっても、これがほぼ 100% でない限り、内部に何らかの損傷が生じていると考える方が合理的であるように思われる。

一方、膨張ひずみの値について考えると、通常の急速水中凍結融解を 300 サイクル与えた場合に耐久性指数が 60 以上となるような耐凍害性の良好なコンクリートの場合でも、急速凍結融解を 60 サイクル与えた段階で 50×10^6 程度の膨張を生じることが多い。また、耐久性指数が 95 以上となるコンクリートでも、300 サイクルの急速水中凍結融解試験の間に 100×10^6 程度の膨張を示すのが一般的である²¹。これらの値と比較すると、本研究のほとんどの供試体で実測された前記の 70×10^6 以下の膨張ひずみの値は特に過大であるとは言いがたく、この膨張ひずみの実測値から内部損傷の有無や程度を推測することは困難である。

そこで、膨張ひずみが 70×10^6 以下となったものの中で最も損傷を受け易いと考えられる条件の供試体、すなわち、水セメント比を 60%、試験開始強度を 4.1 N/mm^2 とした給水養生供試体（補助的に作製・試験していた 1 本の角柱供試体）について、その緩速試験終了直後の断面を実体顕微鏡で観察してみた。しかしながら、切断・研磨した断面（ $10 \times 10 \text{ cm}$ ）を 40 倍に拡大した顕微鏡による観察では、断面内に存在した最も大きい粗骨材粒子とモルタル相の界面に、ブリーディングによる水膜とも思われる長さ 5 mm 程度の微細なひび割れ状の空隙が 1 つ確認されただけで、その他には異常は全く認められなかった。

緩速試験を終えたコンクリートの内部損傷の有無を更に確認するため、水セメント比を 65% としたコンクリートを対象として、緩速凍結融解を 60 サイクル与えた円柱供試体の圧縮強度を調べる追加試験を実施した。この試

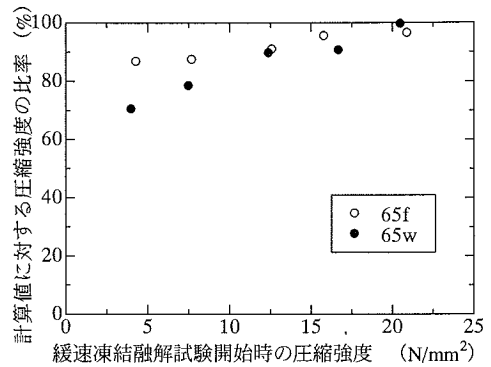


図-5 緩速凍結融解試験を受けたコンクリートの圧縮強度

験に用いた供試体は封かん養生供試体および給水養生供試体の 2 種類であり、これらの作製、養生および試験中の保存方法は、前記の緩速試験用供試体と全く同じにした。試験結果を図-5 に示す。この図における圧縮強度比とは、60 サイクルの緩速試験を終えた供試体の圧縮強度を、積算温度が同じ標準養生供試体の圧縮強度で除した値であり、積算温度の計算には、氷点下の温度範囲の影響も考慮する式^{20,22}を用いた。

図-5 を参照すると、圧縮強度比は緩速試験の試験開始強度が小さいものほど小さいこと、この傾向は給水養生供試体の場合に顕著であることなど、凍害損傷を受け易いと考えられるものほど圧縮強度比が小さくなる傾向が明確に認められる。特に、試験開始強度が最も小さい（約 4 N/mm^2 ）給水養生供試体の場合は、圧縮強度比が約 70% にも低下している。一般に内部損傷の影響は圧縮強度には反映され難いことが知られているが、これにも関わらず、図-5 のような合理的、かつ、明確な傾向を有する結果が得られたことは、少なくとも圧縮強度比が 10% 以上低下している供試体の場合には内部損傷が残存していた可能性が高いことを強く示唆しているものと思われる。

以上の諸点を総合して判断すると、少なくとも本研究の一部の供試体の場合には、緩速試験中にその内部に何らかの損傷が生じていた可能性は十分にあると考えられる。また、その形態は、コンクリートの膨張ひずみにほとんど影響しないような形態、例えば、内部に点在する局所的な微細ひび割れまたは局所的な組織の緩みのようなものであろうと推測される。

(3) 緩速試験を終えたコンクリートの耐凍害性能

前節では、少なくとも一部の供試体には、緩速試験中に何らかの内部損傷が生じた可能性が強いことが示された。しかし、水セメント比や養生条件の相違による損傷の程度の差異、その損傷がその後の耐凍害性に及ぼす影

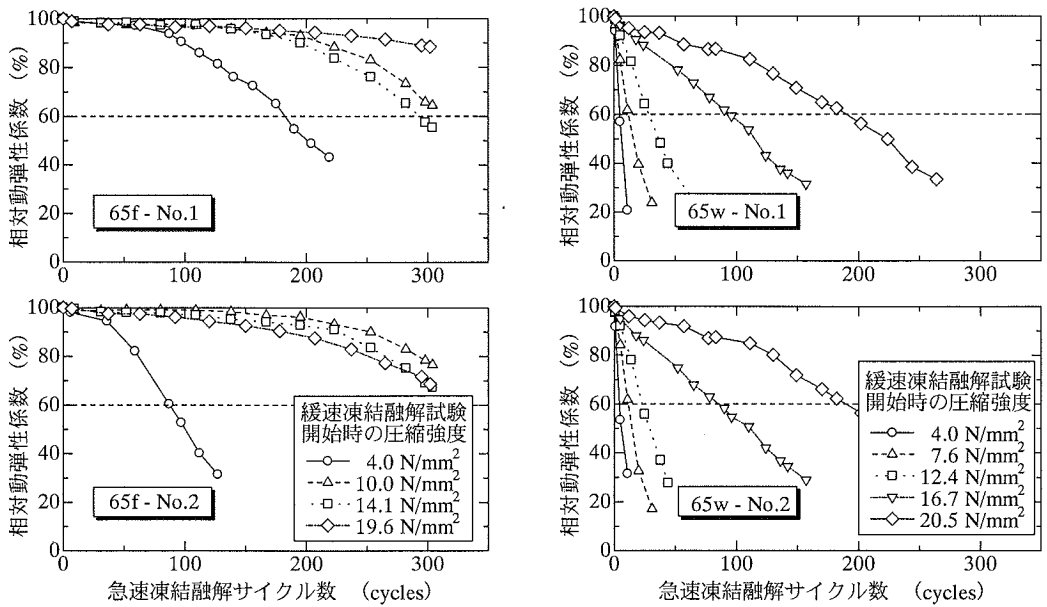


図-6 緩速凍結融解試験を終えた供試体に対する急速水中凍結融解試験結果の例

響,等については依然として不明のままである.そこで,これらの諸点を検討するために,前節の緩速試験を終了した直後の供試体に対し,300サイクルの急速水中凍結融解試験を実施し,緩速凍結融解を60サイクル与えた直後に各コンクリートが有している耐凍害性能を調べることにした.

緩速試験を終えた供試体に対し,さらに急速凍結融解試験を行った結果の例を図-6に示す.この図では,各試験条件に対して試験した2本ずつの供試体をそれぞれNo.1およびNo.2とし,供試体毎の結果を示した.また,この急速凍結融解試験を開始する時点におけるコンクリートの積算温度は,何れも490DD(20℃で約16日間養生することに相当)以上であったことから,図の縦軸は,試験中におけるセメントの水和の影響を考慮しない通常の相対動弾性係数で表してある.

この例にも認められるように,緩速試験に引き続いて行った急速水中凍結融解試験においては,特に封かん養生供試体の場合に各供試体の試験値に大きなばらつきが生じた.このため,本節で示す以降の図-7および図-8においても,各供試体毎の値を示すことにする.

図-7は,本研究で作製した全ての封かん養生供試体の場合について,図-6のような急速凍結融解試験結果から算定した耐久性指数を,緩速試験における試験開始強度に対してプロットしたものである.また,水セメント比65%の配合条件に対しては,当初に計画した試験の結果だけでは両者の相関関係の把握が困難であったので,追加して実施した試験の結果も併記した.

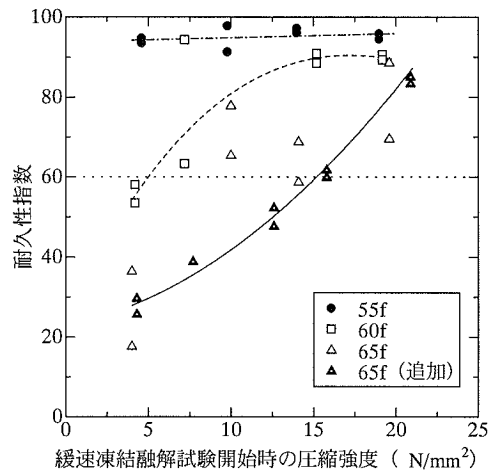


図-7 封かん養生供試体の耐久性指数

この図を参照すると,実験値のばらつきがかなり大きいものもあるが,全体的には,両者の間に図中の曲線で示したような相関関係があり,また,水セメント比が小さい場合ほど耐久性指数が大きくなっていることが認められる.すなわち,水セメント比が55%の場合には,耐久性指数が全般的に極めて大きく,圧縮強度が5N/mm²程度の段階で緩速試験を開始したものでも,90を超える耐久性指数が確保されている.これに対し,水セメント比が60%の場合には,試験開始強度が約15N/mm²以上の範囲では耐久性指数は85を上回っているが,圧縮強度が5N/mm²程度まで小さくなると耐久性指数の値は約60ま

で低下している。また、水セメント比 65% の場合は、試験開始強度の減少とともに耐久性指数がほぼ直線的に減少する傾向が見られ、耐久性指数は、試験開始強度が約 20 N/mm² の場合に 80 程度、試験開始強度が約 5 N/mm² では 30 程度となっている。このように水セメント比が小さいほど耐久性指数が大きくなった理由に関しては、水セメント比が小さい場合ほど、緩速試験中におけるセメントの水和が多く進み、この結果として、強度（劣化抵抗性）が増すと同時に、内部の飽水度が低下する影響が大きくなったためと考えられる。

なお、封かん養生供試体のデータに図-7 のような大きなばらつきが生じた原因については定かではない。ただし、①供試体の中で自己乾燥の影響が最も大きい水セメント比 55% の場合は何れも 90 以上の耐久性指数が得られていること、②図-7 では、特に 3 個の試験値が耐久性指数の大きい方向に大きくばらついていると考えることもできること、等を考慮すると、緩速試験を終えるまでの段階における封かん養生供試体の自己乾燥の程度および前述した乾燥防止用タオルからの水分供給の程度が供試体によって幾分相違し、この差が凍害損傷に与える含水量の値（例えば、凍害を生じる限界飽水度）に無視できない影響をもたらしたことも考えられる。

図-8 は、図-7 と同様な関係を給水養生供試体の場合に対して求めたものである。この図にも認められるように、給水養生供試体の場合は、水セメント比 55% でも耐久性指数が著しく低下するとともに、水セメント比が絶対値で 5% 程度相違しただけで耐久性指数に大きな差が生じることが判明した。例えば、水セメント比を 55~65% の範囲に変化させた場合の耐久性指数の値は、水セメント比が小さくなるほど若干大きくなる傾向にあるものの、全般的には著しく小さくなり、緩速試験の試験開始強度を 20 N/mm² 程度にしたものの場合でも 60 に満たなかった。これに対し、水セメント比を絶対値で 5% 小さくして 50% にした場合は、耐凍害性能は相当に向上し、緩速試験の試験開始強度が約 15 N/mm² 以上となる範囲で 60 以上の耐久性指数が得られた。また、水セメント比をさらに 5% 減少させて 45% とした場合は、耐凍害性能は著しく改善され、圧縮強度が 3.6 N/mm² の段階で緩速試験を開始しても 50~60 程度の耐久性指数が確保された。

図-9 は、前報²⁾に示した試験結果のうち、材齢 1 日までは本研究と全く同じ封かん養生 (f) または給水養生 (w) を行い、その後は水中養生 (w) した供試体（記号：fw または ww）の急速水中凍結融解試験結果を再掲したものである。この図にも認められるように、内部がほぼ飽水状態にあるコンクリートに対し、そのまま直ちに 300 サイクルの急速水中凍結融解試験を実施した場合は、水セメント比 (45, 55 および 65%) の相違に関わらず、試験開始時の圧縮強度と（修正）耐久性指数との関係はほぼ同

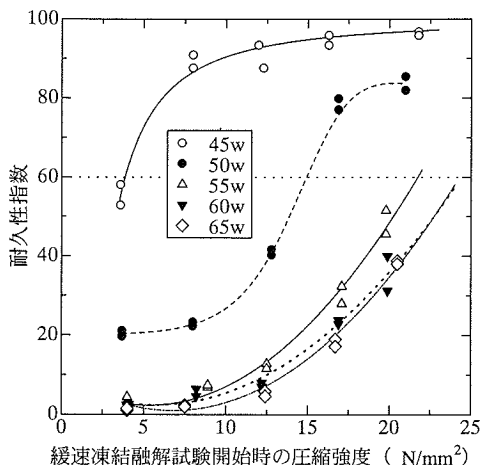


図-8 給水養生供試体の耐久性指数

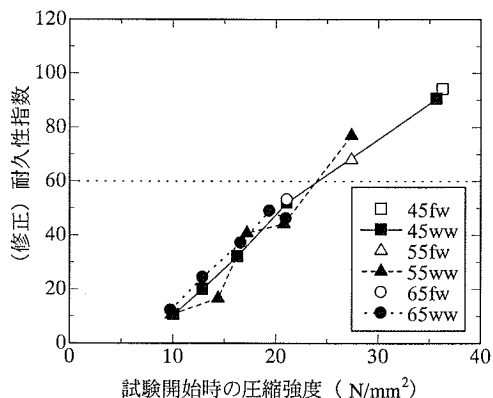


図-9 急速水中凍結融解試験のみを行ったコンクリートの耐久性指数（前報²⁾の結果）

一となり、また、試験開始時の圧縮強度が 24 N/mm² の場合に耐久性指数が約 60 となった。この結果と図-8 の結果を比較すると、図-8 における水セメント比 55~65% の場合に対する圧縮強度と耐久性指数の関係は、定量的に図-9 の関係と類似しているようにも見受けられる。しかしながら、図-8 の横軸は緩速試験の試験開始強度であって、縦軸の耐久性指数を求めた急速水中凍結融解試験の開始時には、全ての供試体の実際の積算温度が 490 DD を超えていたことに注意する必要がある。すなわち、水セメント比が 60% 以下で、積算温度が 490 DD を超えた健全なコンクリートであれば、一般には圧縮強度が 24 N/mm² 以上になり、耐久性指数が 60 を下回ることはない（図-9 参照）のであるが、図-8 中の水セメント比が 55~65% の範囲にある供試体の耐久性指数は全て 60 を大きく下回っているのである。したがって、これらの結果

は、少なくとも水セメント比が55%より大きい給水養生供試体の場合は、緩速試験を終えた段階で、その後の耐凍害性能を低下させる原因となる内部損傷が残存していたことを示すものと考えられる。これは、内部損傷の存在に関する前節の推測の妥当性を裏付けているものとも言える。

(4) 緩速試験中におけるセメントの水和の影響

強度が小さく、かつ、飽水状態に近いコンクリートが凍結融解の作用を受ければ、何らかの内部損傷が生じると考えられる。これにも関わらず、前節の試験で水セメント比を45%とした場合には、圧縮強度が比較的小さい段階で緩速試験を開始しても、その終了時にはその後の耐凍害性能を悪化させるような内部損傷がほとんど残存していないことを示唆する結果が得られた(図-8参照)。このような結果が得られた理由については、緩速試験中におけるセメントの水和の進行によって、強度が増進する効果と損傷が修復される効果が考えられる。そこで、前述した前報²⁾の結果、すなわち、飽水状態にあるコンクリートは、圧縮強度が24 N/mm²の場合に耐久性指数が約60となること(図-9)を参考にし、給水養生供試体に対する前節の結果をさらに解析してみることにした。

まず、緩速試験における給水養生供試体の試験開始強度を求めた試験結果を利用して、各水セメント比毎に、積算温度と圧縮強度の関係式を求め、圧縮強度が24.0 N/mm²になる積算温度を計算した。次いで、それぞれの試験条件に対し、緩速試験開始時までの積算温度と緩速凍結融解1サイクル当りの積算温度(7.6DD)を使って、「健全ならば圧縮強度が24.0 N/mm²(=内部損傷が生じ難くなる最小強度)に到達すると推定される緩速凍結融解サイクル数」(以下、24 N/mm²到達サイクル数と略称する)を計算した。図-10は、このようにして求めた24 N/mm²到達サイクル数と図-8の試験で求めた耐久性指数の関係を示したものである。なお、この図には、各水セメント比毎に5個ずつの試験値が示されているが、それらは、左端の最も耐久性指数の大きいものから順に、それぞれ、緩速試験の試験開始強度を約20, 16, 12, 8および4 N/mm²とした場合の値である。

図-10を参照すると、初期材齢における強度発現速度が最も大きい水セメント比45%の場合には、試験開始強度が約8 N/mm²に過ぎなかったものでも、緩速凍結融解13サイクルで24 N/mm²到達サイクル数に達し、約90の耐久性指数が確保されている。これに対し、試験開始強度を約20 N/mm²まで高めておいたもの(各水セメント比グループの左端の試験値)であっても、24 N/mm²到達サイクル数が15サイクル以降になっている水セメント比55, 60および65%の場合には、耐久性指数は60を下回っていることが認められる。ただし、何れの水セメント比の場

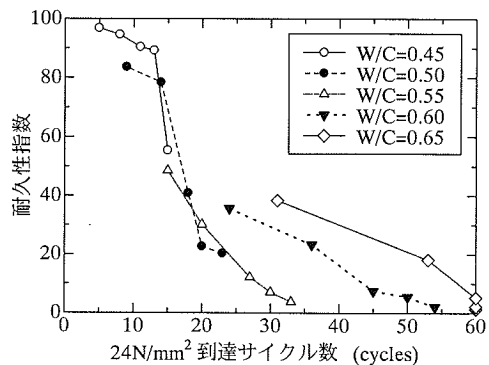


図-10 圧縮強度が24 N/mm²に達する緩速凍結融解サイクル数と耐久性指数の関係(給水養生供試体)

合も、試験開始強度が大きいものほど耐久性指数が大きく、試験開始強度を20 N/mm²まで高めておいた場合は、水セメント比が55%より大きい条件下でも耐久性指数の低下は35~50程度に留まっている。これらの諸点を考慮すると、飽水状態に近いコンクリートが緩速凍結融解作用を受ける場合も、その繰返し数の増加とともに内部損傷が徐々に発生または進展し、その速度はそれぞれの凍結時における健全部コンクリートの強度に大きく左右されているように思われる。そして、水セメント比が小さい場合のように、緩速試験中の比較的早い時期に健全部の強度が「損傷が生じ難い強度(例えば、24 N/mm²)」に達し、その後も相当量のセメントの水和が期待出来る場合は、初期に生じた内部損傷の一部または全部がその後のセメントの水和によって修復されている可能性が高いと思われる。ただし、水セメント比を45%とし、試験開始強度を約4 N/mm²とした場合の試験結果は、たとえ水セメント比が小さくても、強度が過度に小さい段階から緩速凍結融解作用を受けると、損傷を受けにくくなる強度に達する以前に多数の凍結融解作用を受けることになり、緩速凍結融解を受けながらのセメントの水和の継続だけでは十分に修復されない程度の内部損傷が生じてしまう可能性もあることを示唆していると思われる。

図-10では、水セメント比が55%より大きい場合に対しては、セメントの水和の継続による内部損傷修復効果があまり明確でない。そこで、水セメント比を55, 60および65%とした場合について、この点を確認する別のシリーズ実験を行った。このシリーズ実験では、緩速試験を終えるまでは前記の給水養生供試体の場合と全く同様に試験を行い、緩速試験終了直後に供試体を20℃の水中で10日間養生した。この水中養生を終えた直後から前記と同じ急速水中凍結融解試験を実施して、10日間の水中養生による損傷修復効果について調べた。

本章の(2)でも述べたように、緩速試験を終了した時点

における修正相対動弾性係数は 85%以上の高い値となる。このためと思われるが、緩速試験後に 10 日間の水中養生を行っても、この間における修正相対動弾性係数の増加は、最大でも約 4%に過ぎなかった。しかし、この後に急速凍結融解試験を行って求めた耐久性指数の結果は、水セメント比によっては前記と相違するものとなった。すなわち、図-11 に、このシリーズ実験で得られた結果を前記の図-8 の結果（平均値で表示）と併記して示したが、水セメント比を 55%とした場合の耐久性指数は図-8 の結果に比べて全般的に相対的に大きくなった。また、この場合の耐久性指数の増加は、試験開始強度が小さい場合、換言すれば、水中養生を開始した時点で未水和セメントが多く残存していると考えられる場合ほど大きくなっていることが認められる。これらの結果を考慮すると、水セメント比が 55%の場合の耐久性指数の増加は、緩速試験後の水中養生中におけるセメントの水和の進行の影響を反映したものと考えられる。この場合に、耐久性指数が増加する要因としては、セメント水和物が内部損傷を修復する効果の他に、毛細管間けきを充てんする効果もあると考えられる。しかし、①水中養生期間中における耐久性指数の増加が数%であったこと、②内部損傷がそのまま残存したならば図-8 とほぼ同じ結果となるであろうと考えられること等を考慮すると、図-11 に認められる水中養生（回復養生）の有無による耐久性指数の差は、主として、内部損傷が修復された影響によるものと思われる。また、積算温度が 490DD を超えた段階の比較的少ない量のセメントの水和で大きな耐久性指数の増加が得られたことを考慮すると、この試験結果も、緩速試験で生じた内部損傷が比較的修復され易い形態、例えば、微細なひび割れあるいは組織の緩みが各所に分散した形態のものであったことを示唆していると考えられる。

なお、上述してきたセメントの水和による内部損傷修復効果と内部損傷の形態を考慮すると、圧縮強度が少なくとも 4.0 N/mm²を超えた段階でコンクリートが数回の凍害を受けても、未水和セメントが多く残存している場合は、その後養生を継続すれば、内部の凍害損傷の影響を克服できるものと考えられる。

一方、水セメント比を 60あるいは 65%とした場合は、図-8 の結果と比べ、耐久性指数の増加は最大 10%程度に過ぎない。したがって、これらの場合には、水中養生中におけるセメントの水和の進行が少なく、内部損傷の多くが修復されずにそのまま残存した影響が現われているものと思われる。

(5) 寒中コンクリートの養生期間に関する考察

表-6 は、緩速試験終了後に急速水中凍結融解試験を行った結果を示した前記の図-7 および図-8 から、養生種別

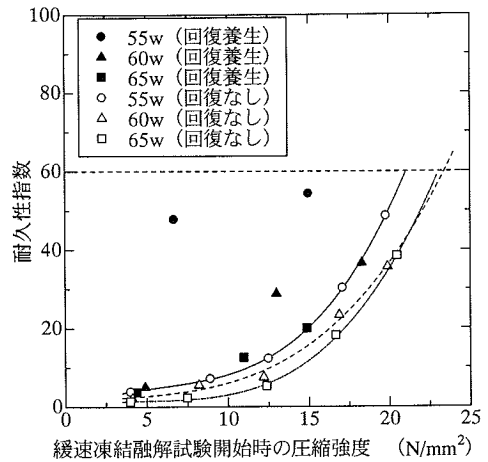


図-11 緩速凍結融解試験後の回復養生の効果

表-6 耐久性指数^{*1} 60を確保するために必要な緩速凍結融解試験開始時の最小圧縮強度

| 供試体 | W/C (%) | 圧縮強度 (N/mm ²) | 参考値 ^{*2} (N/mm ²) |
|----------|---------|---------------------------|--|
| 給水養生供試体 | 45 | 4.0 | 24.0 |
| | 50 | 15.0 | |
| | 55 | 22.0 | |
| | 60 | 24.0 | |
| | 65 | 24.0 | |
| 封かん養生供試体 | 45 | 対象外 ^{*3} | 10.0 |
| | 55 | — | 13.5 |
| | 60 | 5.0 | |
| | 65 | 15.0 | |

*1: 緩速凍結融解試験終了直後に保有している耐久性指数 (300 サイクルの急速水中凍結融解試験で判定)

*2: 緩速凍結融解試験を経ない場合の最小圧縮強度²⁰

*3: W/C=45%は、本研究では対象外とした。

および水セメント比別に、耐久性指数 60 に対応する緩速試験の試験開始強度（圧縮強度）を求めた結果を一覧表にしてまとめたものである。また、表中には、参考値として、通常の 300 サイクルの急速水中凍結融解試験のみを行った場合に耐久性指数 60 が得られる AE コンクリートの試験開始強度として求めた前報²⁰の結果も示した。

この表において本研究の結果と前報の結果を比較すると、両者には根本的な相違が認められる。すなわち、満足すべき耐凍害性能を確保するのに必要な圧縮強度の最小値として求めた前報の値は、45f の場合を除くと、水セメント比によって相違していないが、本研究の試験から求めた圧縮強度は水セメント比によって異なった値とな

っている。また、本研究の圧縮強度の値に着目すると、水セメント比が60%を超える範囲では前報の値とほぼ同じであるが、水セメント比が60%より小さい範囲では、水セメント比が小さくなるにつれて圧縮強度が小さくなり、この傾向は水セメント比の小さい範囲で特に顕著となっている。これらの結果は、凍結融解作用が自然環境下におけるように緩やかに進み、かつ、対象が若材齢コンクリートである場合には、前述したような、凍結融解作用を受けている間におけるセメントの水和の影響が極めて大きいことを明示していると考えられる。したがって、寒中コンクリートの養生規定を検討する場合には、本研究の結果のように、養生終了後に緩速凍結融解を受けている間のセメントの水和の影響も含む試験結果に基づくのが合理的であると言える。

2章にも示したように、本研究の緩速試験では、順調な運動を行うための環境試験槽の能力に配慮して、各サイクル毎に環境試験槽の温度を+10℃に約8時間保持した。これに対し、冬季における実際の現場では、比較的多くの凍結融解作用をうける地域でも、最高気温が+10℃まで上昇する日は少なく、かつ、気温が0℃以上となる時間が1日当たり数時間程度であることも多いと思われる。このような現場では、セメントの水和が進行する影響は本研究の緩速試験におけるより相当に小さくなるので、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などを定める際に表-6の結果を利用する場合は、本研究の緩速試験においてセメントの水和進行の影響が相当にあったと考えられたケース、すなわち、水セメント比が50%以下の範囲にある値に対しては、個々の現場の温度条件に応じて、それぞれに何らかの補正を施す必要があると考えられる。しかし、現時点ではこの補正量については不明であり、また、この補正量に関する一般的情報を得るためには更に多くの実験を重ねる必要がある。ただし、水セメント比が小さい場合は、強度発現速度が大きいので、養生終了時の所要圧縮強度に大きな安全を見込んで、必要養生日数にはそれほど大きな差が生じない特徴がある。この特徴を勘案すれば、当面は、水セメント比が50%より小さく、かつ、養生および供用とも水で飽和され易い条件に置かれるコンクリートに対しては、その養生終了時における所要圧縮強度として、水セメント比55%の場合とほぼ同等な22 N/mm²程度の値を定めておくことが現実的な対応策の1つになると思われる。

一方、水セメント比が55%を超える場合は、本研究の試験結果に緩速試験中におけるセメントの水和の影響が特に大きく反映されていなかったことを考慮すると、表-6の諸値を適用しても一般には特に問題は生じないと思われる。

表-6には、水セメント比が55%の封かん養生供試体に

対する値は示されていない。これは、水セメント比を55%とした場合は、緩速試験の試験開始強度が最も小さい4.6 N/mm²の場合でも、緩速試験終了後における耐凍害性が極めて優れていたためである。したがって、封かん状態に近い条件下で養生し、供用中も特に飽水されることのないコンクリートの場合は、水セメント比が55%以下の条件に対する養生終了時の所要圧縮強度を5.0 N/mm²に定めておけば、十分な耐凍害性が確保されることが考えられる。

なお、日中もコンクリート中の水が凍結した状態にあることが多い極寒地域の場合には、表-6にも示してある前報の急速水中凍結融解試験に基づく圧縮強度の値を基準にすれば良いと思われる。この場合、水セメント比が65%の封かん養生供試体に対する圧縮強度については、前報の値の方が約10%小さく、合理的でないようにも思われる。しかしながら、水セメント比が大きい封かん養生供試体の場合は、急速水中凍結融解試験の結果が大きくばらつくのであって(図-7参照)、表-6の値に10%程度の相違が生じることは止むを得ないと思われる。また、これらの強度差に対応する耐久性指数の差は、図-7では約6に過ぎない。したがって、水セメント比が65%の封かん養生供試体に対する圧縮強度については、表-6の何れの値を用いても実際には耐凍害性に有意な差は生じないと思われる。ただし、養生期間等を定める基礎データの場合は安全側の値であることが望ましいので、本報では、この研究の実験で得られた大きい方の値をそのまま使用することにする。

養生中と緩速試験中におけるコンクリートの含水状態が相違するケースについては、試験が困難なために、本研究では実験を行っていない。しかしながら、封かん養生終了後にしばしば水で飽和される環境に置かれる場合に対しては、封かん養生の直後から水中で300サイクルの急速凍結融解試験を行って耐久性指数が60以上となることを確認した前報²⁾結果を適用しても特に問題はないと考えられる。

一方、湿潤養生後に特に水で飽和されない環境条件(普通の露出状態)に置かれる場合に対しては、必要に応じて、更に別の試験を行って検討する必要がある。ただし、前報²⁾にも記したように、封かん状態を保てば湿潤状態とほぼ同等な強度発現が得られるので、寒中コンクリートの場合は、コンクリートをできるだけ湿潤させない養生方法(米国や西欧の方法)を採用する方向を考えていくのが望ましいと思われる。

以上の考察に基づいて、本研究では、寒中コンクリートの養生終了時の所要圧縮強度とこのための必要養生日数の目安に関し、5℃と10℃で養生する場合に対して、表-7の値を提案したい。この表の数値は、全ての養生条件と環境条件の組み合わせをカバーするものではないが、

表-7 耐久性指数 60 を確保するための養生終了時の所要圧縮強度とこのための養生日数の目安

(a) 湿潤状態で養生し、養生後も、しばしば水で飽和される場合

| 水セメント比 (%) | 所要圧縮強度 (N/mm ²) | 積算温度 (DD) | 養生日数の目安 (日) | |
|------------|-----------------------------|-----------|-------------|-------|
| | | | 5 °C | 10 °C |
| 45 | 22.0 | 108 | 8 | 6 |
| 50 | | 159 | 11 | 8 |
| 55 | | 220 | 15 | 11 |
| 60 | 24.0 | 442 | 30* | 22 |
| 65 | | 622 | 42* | 31* |

*必ずしも実用的な値ではないが、参考として示した。

(b) 封かん状態で養生し、養生後も、水で飽和される可能性が少ない（普通の露出状態）場合

| 水セメント比 (%) | 所要圧縮強度 (N/mm ²) | 積算温度 (DD) | 養生日数の目安 (日) | |
|------------|-----------------------------|-----------|-------------|-------|
| | | | 5 °C | 10 °C |
| 55 以下 | 5.0 | 30 | 2 | 2 |
| 60 | 5.0 | 37 | 3 | 2 |
| 65 | 15.0 | 181 | 12 | 9 |

(c) 封かん状態で養生し、養生後は、しばしば水で飽和される場合⁺

| 水セメント比 (%) | 所要圧縮強度 (N/mm ²) | 積算温度 (DD) | 養生日数の目安 (日) | |
|------------|-----------------------------|-----------|-------------|-------|
| | | | 5 °C | 10 °C |
| 45 | 10.0 | 32 | 3 | 2 |
| 55 | 13.5 | 88 | 5 | 4 |
| 65 | 15.0 | 189 | 13 | 10 |

+ 前報²⁾の試験結果、すなわち、封かん養生後に急速水中凍結融解試験を行った試験結果から作成

寒中コンクリートの養生規定や養生方法を検討する際の有用な基礎情報になり得るものと考えられる。

4. 結論

十分な量のエントレインドエアを混入した、飽水度の高い若材齢コンクリートを対象として、冬季の厳しい自然環境を模した1日1サイクルの緩速凍結融解を60サイクル与えた場合の劣化状況を調べるとともに、寒中コンクリートの養生期間についても考察を加えた。本研究の範囲内で、次のことが言えると思われる。

(1) 圧縮強度が4.0 N/mm²を超えた段階のAEコンクリートを寒中の自然環境下にさらした場合は、たとえ最初の一冬が経過するまでに内部損傷が生じたとしても、それらは、コンクリートをほとんど膨張させない形態のものであり、例えば、内部に点在する局所的な微細なひび割れまたは組織の緩みのようなものである可能性が高い。

(2) 養生条件が同じコンクリートを同一圧縮強度に達した段階で寒中の自然環境下にさらす場合、その後の凍結融解作用によるコンクリートの損傷の程度は、自然環境下にさらす時点で未水和セメントが多く残っている（＝水セメント比が小さい）場合ほど小さくなる。

(3) 封かん状態と同等あるいはこれ以下の含水条件で養生・供用するコンクリートの場合は、水セメント比を60%以下とし、かつ、圧縮強度が5.0 N/mm²を超えるまで養生を継続すれば、自然の凍結融解作用に対する抵抗性に優れたものとするができる。

(4) 飽水状態に近い状態（湿潤状態）で養生・供用されるコンクリートの場合は、自然の厳しい凍結融解作用にさらすことが可能な圧縮強度が水セメント比によって大きく相違する。このような条件のコンクリートの場合は、必要養生日数などを勘案すると、一般には、その水セメント比を50%以下に定めるのが望ましい。

(5) 自然環境下では、融解時などにおけるセメントの水和の進行により、次に受ける凍結時の劣化抵抗性が増した

り、既存の内部損傷が修復される効果が期待できる。この効果を利用すれば、圧縮強度が 4.0 N/mm^2 を超えた段階にある湿潤コンクリートが数回の初期凍害を受けても、未水和セメントが多く残存している場合は、その後に養生を継続することにより、内部に生じた損傷を修復することが可能であると考えられる。ただし、養生終了後の供用期間中にこれと同種の効果による耐凍害性の大幅な改善を期待できるのは、供用中にセメントの水和が顕著に進み、かつ、残存している内部損傷が微細である場合に限定される。

(6) 本研究で提案した寒中コンクリートの養生終了時の所要圧縮強度と必要養生日数は、寒中コンクリートの養生規定や養生方法を検討する際の有用な基礎情報になり得るものと考えられる。

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) コンクリート標準示方書〔施工編〕, 2002年制定, 土木学会, 2002.
- 2) 建築工事標準仕様書・同解説, JASS5, 鉄筋コンクリート工事, 日本建築学会, 1997.
- 3) Field Reference Manual, Standard Specifications for Structural Concrete (ACI 301-96), SP-15, American Concrete Institute, pp. 223-245
- 4) Powers T. C.: Prevention of frost damage to green concrete, Research Bulletin 148, R&D Laboratory of PCA, 1962.
- 5) Canadian Standards Association : Standard A23.1, Cold Weather Requirements, 1973.
- 6) Hoff G. C. and Buck A. D. : Consideration in the Prevention of Damage to Frozen at Early Ages, Journal of A.C.I., Sep-Oct, pp.371~376, 1983.
- 7) 神田 衛 : 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.
- 8) 神田 衛 : コンクリートの初期硬化と凍害に対する所要硬化期間の研究, セメント技術年報 18, pp. 302~309, 1964.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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
- 12) B. M. Sadgrove : Freezing of Concrete at an Early Age, Cement and Concrete Association, Technical Report TR503, pp.3~12, Oct. 1974.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 鮎田耕一, 宮田秀一, 林 正道 : 寒中コンクリートの養生終了時の所要圧縮強度について, 土木学会第35回年次学術講演会講演概要集, pp. 331~332, 1980.
- 17) 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.
- 18) British Standard, Structural use of concrete, Part 1, Code of practice for design and construction, BS 8110: Part 1, British Standard Institution, 1985.
- 19) 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37号, 土木学会, pp. 47-56, 1974.
- 20) 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.
- 21) 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.
- 22) 山本泰彦, 武田 厚, 長合友造 : 若材令コンクリートの耐凍害性, 土木学会論文集, No.704/V-55, pp.187-199, 2002.
- 23) 気象庁 : 日本気候表 その5〔日・旬別平滑平年値, 半旬別気温解説用階級区分値 (1951-1980)〕, 1983.
- 24) 田畑雅幸, 洪 悦郎, 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367号, pp. 8~15, 1986.

(2003. 9. 1 受付)

DETERIORATION BEHAVIOR AND INTERNAL DAMAGE OF EARLY-AGE CONCRETE SUBJECTED TO SLOW FREEZING AND THAWING ACTIONS

Yasuhiko YAMAMOTO, Hiroaki YAMAMOTO and Atsushi TAKEDA

Early-age concretes with high degrees of water saturation were examined for their deterioration behavior and internal damage by subjecting them to slow freeze-thaw cycles which simulated a severe cold weather condition in Japan.

It was found that, if concretes were exposed to cold weather at a compressive strength level higher than 4.0 N/mm^2 , their internal damage during the first winter would be such magnitude as to cause little expansion. Concrete with a lower water content than its sealed condition had little internal damage, provided its water-cement ratio was smaller than 60% and exposure strength exceeded 5.0 N/mm^2 . Lowering water-cement ratio was quite effective to prevent the frost damage in concrete. A proposal was also made for the length of protection period for cold weather concrete.