

論文 部材の乾燥を考慮した高強度コンクリートの凍結融解抵抗性

酒井 正樹^{*1}・千歩 修^{*2}・長谷川 拓哉^{*3}・木村 信孝^{*4}

要旨：標準的な凍結融解試験で高い耐凍害性を示す non-AE 高強度コンクリートでも、屋内放置・屋外暴露を行うと耐凍害性が低下するものがあることが報告されている。本研究では、実際の部材を考慮した大断面試験体およびこれと乾燥条件を合わせたシール試験体を半年間の屋内放置・屋外暴露を行った試験体、および断面寸法が異なる円柱試験体を1年間屋内放置・屋外暴露後の試験体に対し、それぞれ凍結融解試験を行った。その結果、切断をした大断面試験体は凍結融解抵抗性が低下し、断面寸法が異なる試験体では、寸法によりひび割れの入り方に違いがある事がわかった。

キーワード：凍結融解抵抗性、微細ひび割れ、屋内放置、屋外暴露、部材寸法

1. はじめに

2週水中養生直後に行った標準的な凍結融解試験で凍結融解抵抗性が高いと評価された non-AE 高強度コンクリートであっても、屋内放置または屋外暴露後に同じ凍結融解試験を行うと凍結融解抵抗性が低下するものがあることが報告されている¹⁾。この凍結融解抵抗性の低下の理由の一つとして、屋内放置および屋外暴露により、コンクリート表層が乾燥または乾湿繰り返しにさらされ、表層が収縮し、内部の高含水率の部分がそれを拘束することで、コンクリートの表面に微細クラックが発生することが考えられる。

本研究では、乾燥時の収縮の拘束条件が異なるように大断面試験体およびその暴露時と同じ乾燥条件をシールにより再現し、切断後の寸法に合わせたシール試験体、ならびに断面寸法が異なる円柱試験体を作製し、屋内放置・屋外暴露を行った後に凍結融解試験を行った。

2. 実験の概要

2.1 実験計画

実験の概要を表-1に示す。本実験では、乾燥と収縮の内部拘束の条件が異なるように表に示す3種類の試験体を作製し、2週間水中養生後、

表-1 実験の概要

| 試験体 | | 粗骨材 種別 | 暴露条件 (期間) | 備考 | |
|--------------|--|------------|--------------------------------------|--|--|
| 形状 | 作製方法 | | | 試験体の特徴 | 試験項目 |
| 大断面切断 [B] | 24×32×40cmの試験体を 7.5×7.5×40cmに切断 | 青梅産 [O] | 暴露なし 屋外暴露[o] 屋内放置[i] (26週間) | 中心部[0], 縁部[1], 隅角部[2] []内数字は側面の露出面数 | 凍結融解試験 (JIS A 1148) |
| シール [S] | ポリエチレンシートを打ち込み シール面(0~4面)を設ける (7.5×7.5×40cm) | 青梅産 [O] | | 乾燥面数 0[0], 1[1], 2[2], 4[4] | |
| 円柱 [C] | 各種サイズの塩化ビニル製の パイプを用いて作製 (各断面寸法×40cm) | 青梅産 [O] | 屋外暴露[o] 屋内放置[i] (1年間) | 断面寸法(cm) φ4.4[44], φ5.6[56] φ7.1[71], φ10.6[106] φ15.3[153] | 収縮性状 の測定 (JIS A 1129-3) ※C試験体のみ |
| | | 常盤産 [T] | | | |

※表中の [] 内の記号を用い、試験体記号を「試験体形状」+「使用粗骨材」+「暴露条件」+「試験体の特徴」とする

例) S0i-2...シール面(2面)を設けた青梅産砕石を用いたコンクリートを屋内放置後に凍結融解試験を行ったもの

*1 北海道大学 大学院工学研究科 空間性能システム専攻 (正会員)

*2 北海道大学 大学院工学研究科 空間性能システム専攻教授 工博 (正会員)

*3 北海道大学 大学院工学研究科 空間性能システム専攻助教授 博(工) (正会員)

*4 北海道大学 大学院工学研究科 空間性能システム専攻 (非会員)

屋外暴露または屋内放置し、凍結融解試験を行ったものである。

大断面切断試験体[B]は切断前において大断面であるため暴露の際に試験体内部の大部分が含水率の高い状態を保持する試験体であり、これを12本の約 $7.5 \times 7.5 \times 40\text{cm}$ の試験体に切断して凍結融解試験を行ったものである。切断の位置により、屋外暴露等時に乾燥面2面を持つ隅角部、乾燥面1面を持つ縁部、さらに乾燥面をもたない中心部の3種類である。シール試験体[S]は大断面試験体と乾燥条件を合わせたものであり、大断面試験体のような内部拘束の効果のないものである。また比較のためにシールのない乾燥面数4の試験体も作製した。暴露期間はB,S共に半年であり、それぞれ屋外暴露・屋内放置後、水中凍結融解試験(A法)を行った。また、断面寸法を変化させた円柱試験体[C]は、1年間の屋外暴露・屋内放置において収縮性状を測定し、その後気中凍結水中融解試験(B法)を行った。なおこの試験体では、粗骨材を2種類とし、粗骨材種別の影響も検討する。

2.2 試験体の作製

コンクリートの調合および基礎性状を表-2に示す。セメントは普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm^3)、細骨材は勇払産陸砂(表乾密度 2.65g/cm^3 、吸水率1.26%)を使用した。粗骨材には青梅産碎石と比較として常盤産碎石を用いた。高性能AE減水剤(SP8S)はフローが60cmになるように調整して添加した。

B試験体は $24 \times 32 \times 40\text{cm}$ の鋼製型枠を用いて作製した。暴露終了後、石材カッターを用いて、暴露面と切断面をもつ約 $7.5 \times 7.5 \times 40\text{cm}$ の大きさに切断した。S試験体は打設の際に梁型鋼製型枠にポリエチレンシートをあらかじめ備えておき、ポリエチレンシートの上からコンクリートを打設し、密着させた。屋外暴露・屋内放置終了後そのシートを取り除き、凍結融解試験を行った。C試験体はJIS規格品である塩化ビニル管で作製した型枠を用い、断面寸法の異なる5種類の試験体を作製した。養生条件は

打設後、材齢1日で脱型し、その後材齢14日までS・Bに関しては湿布養生、Cに関しては水中養生を行った。また、屋外暴露・屋内放置を行った後、2日間の水中浸漬を行い、凍結融解試験を開始した。

2.3 試験方法

凍結融解試験はJIS A 1148に準じて行った。S・Bに関してはA法に基づき水中凍結融解を行い、Cに関してはB法に基づき気中凍結水中融解を行った。Cでは1次共鳴振動数の測定が困難であったため、相対動弾性係数と相関が高いとされる長さ変化率を劣化指標として用いることとする。凍結融解試験結果は水中浸漬後の値を基準にした。測定の終了は凍結融解300サイクルもしくは、目視による観察の際、1-2mm以上の明らかなひび割れが生じた時点とした。

S・C試験体に関しては屋内放置・屋外暴露時の収縮性状をJIS A 1129-3に準じて測定した。

屋内放置は北海道大学建築棟実験室内(温度管理されていない)で行い、屋外暴露は同大学建築棟屋上にて行った。暴露期間はB・Sは2004年10月19日から2005年4月19日まで、Cは2004年8月4日から2005年10月14日までである。

3. 実験結果

3.1 大断面切断試験体 (B試験体)

図-1にB試験体の凍結融解試験結果を示す。暴露なしの試験体(切断を行っていない)は高い凍結融解抵抗性を示しているが、大断面を切断した試験体は、側面の露出面数に関わらず、凍

表-2 コンクリートの調合と基礎性状

| W/C (%) | Air (%) | flow (cm) | 単位量 (L/m ³) | | | | SP8S (Cx%) |
|---------|---------|-----------|-------------------------|---------|-----------|-----------------------|------------|
| | | | 水 | セメント | 細骨材 | 粗骨材 | |
| 25 | 1.0 | 60 | 175 | 222 | 233 | 360 | 1.3 |
| 形状 | 粗骨材 | | | コンクリート | | | |
| | 種別 | E (GPa) | 吸水率 (%) | Air (%) | flow (cm) | σ_{\max} (MPa) | E (GPa) |
| 大断面 | 青梅 | 59.8 | 0.60 | 1.1 | 49.0 | 86.8 | 35.2 |
| | | | | 1.1 | 52.0 | | |
| 円柱 | 常盤 | 49.7 | 2.69 | 0.9 | 67.0 | 99.8 | 35.4 |
| | | | | 0.9 | 62.0 | 90.1 | 36.7 |

※SP8S:高性能AE減水剤(セメント質量%)

E:ヤング係数 σ_{\max} :最大圧縮強度

結融解抵抗性が低くなっている。露出面のない中央部の試験体も劣化する結果となった。この原因として、屋外暴露・屋内放置の際に試験体全体に応力が生じたこと、切断作業の影響、切断面自体の凍結融解抵抗性が劣ること等が原因として考えられる。そこで、追加実験として $16 \times 7.5 \times 40\text{cm}$ の試験体を水中養生後に約 $7.5 \times 7.5 \times 40\text{cm}$ に切断し、暴露を行わずに凍結融解試験を行った結果を図-1に合わせて示す。その結果、この試験体（暴露なし(切断)）は、凍結融解抵抗性に劣るという結果になった。劣化状況は、写真-1に示すように、切断面側にひび割れが発生するとともに試験体全体が切断面側に凸に変形を示した。また、劣化が進むと、切断面の粗骨材自体の剥落が観察され、粗骨材とモルタルの界面に劣化が進んでいるものと考えられる。このことから、切断作業が凍結融解抵抗性を低下させること、または切断面の粗骨材-モルタル界面の露出が凍結融解抵抗性を低下させることが考えられる。なお、暴露後に切断した大断面切断試験体は暴露をしない切断試験体に比べて凍結融解抵抗性が低く、屋内放置及び屋外暴露は凍結融解抵抗性を低下させているものと考えられる。

3.2 シール試験体 (S試験体)

図-2にS試験体の屋内放置・屋外暴露時における長さ変化率を示す。屋外暴露が冬季のため、積雪の影響でS0oは乾燥が進まず、ほとんど収縮挙動を示していない。とりわけS0o-0は、長さの増加を示した。屋内放置では、S0i-0は乾燥面数が0面であるが、S0i試験体は乾燥面数に関わらず、ほとんど同様な収縮挙動を示した。これは暴露が進むにつれシールの機能が低下し



写真-1 凍結融解試験後のひび割れ

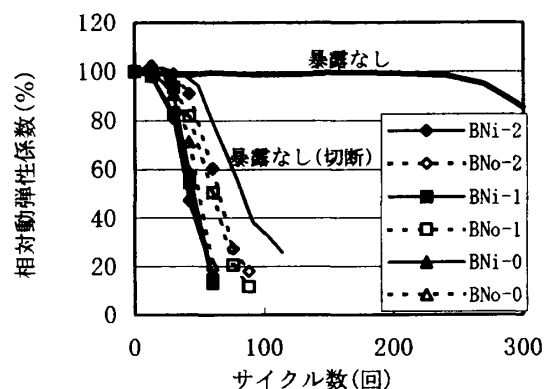


図-1 大断面切断試験体の凍結融解試験結果

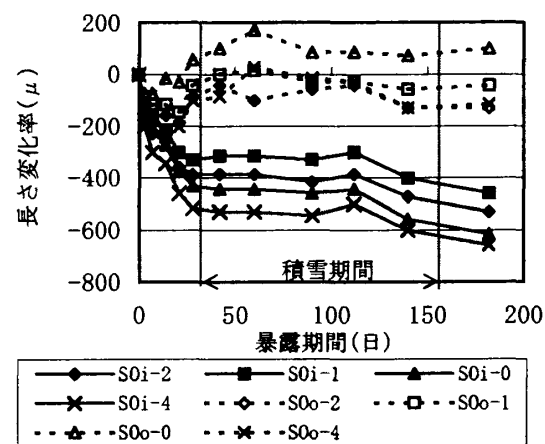


図-2 シール試験体の長さ変化

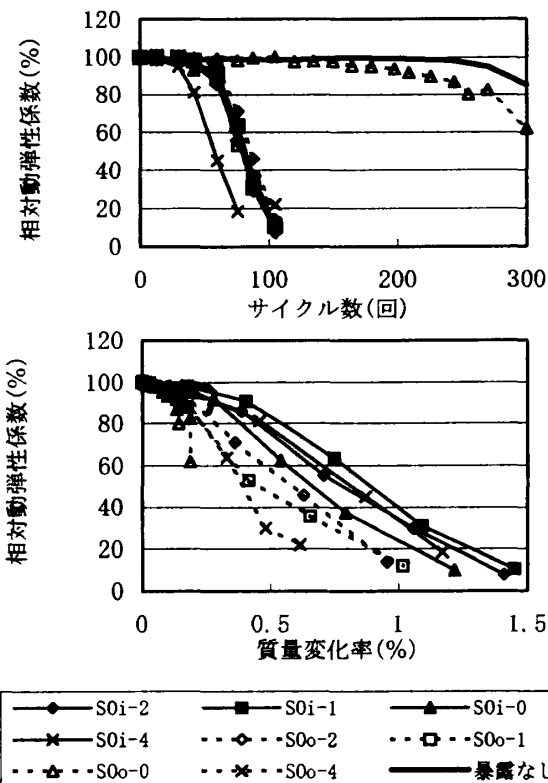


図-3 シール試験体の凍結融解試験結果

たため、また、側面からの乾燥面数が0面でも、小口面からの乾燥があり、その影響が大きかったためと考えられる。

図-3にS試験体の凍結融解試験結果を示す。サイクル数と相対動弾性係数の関係を見ると、暴露をしないもののがもっとも凍結融解抵抗性が高く、次にS0o-0試験体が高いことがわかる。S0o-0試験体は、屋外暴露で雨水や雪により水分が供給され、ポリエチレンシート内に水が溜まったため、養生され、乾燥が進まなかったものと考えられる。凍結融解抵抗性のもっとも低いのはS0i-4であり、これはもっとも乾燥収縮が大きいものである。このことから、屋内において乾燥のみを受けるものは、乾燥の程度が大きいほど凍結融解抵抗性が低くなると考えられ、屋外暴露では雨水の供給等やシールによって乾燥が進まない場合は、凍結融解抵抗性が低下しないものと考えられる。

質量変化率と相対動弾性係数の関係を見ると、質量変化率のある点を境に相対動弾性係数が低下しており、屋内放置と屋外暴露では傾きがほぼ等しくなっているといえる。屋内放置と屋外暴露に違いがあるのは、相対動弾性係数が低下し始める質量変化率に差があるためであり、水中浸漬2日後の凍結融解試験開始時点で、屋内放置に比べ、水分供給のある屋外暴露の方が高い含水状態にあり、乾燥による影響が異なることによるものと考えられる。

3.3 (試験体

(1) 室内放置における収縮性状

図-4にC試験体の室内放置における収縮性状を示す。長さ変化率に関して見ると、収縮は断面寸法に関わらず、屋内放置200日程度で収束しているといえる。また、寸法による違いも明らかであり、断面寸法が大きい試験体は収縮率が小さくなっている。これは、寸法が大きい試験体は内部に水分を多く保持していることによるものといえる。C0i44とC0i56試験体はほぼ同様の挙動を示しており、内部の含水状態は同様となっていることが考えられる。

長さ変化率と質量変化率の関係をしてみると、どの寸法の試験体に関しても同じ挙動を示している。このことから、寸法の大きな試験体は乾燥程度が低いことがわかる。

(2) 凍結融解試験結果

図-5にC試験体屋内放置の凍結融解試験結果を示す。サイクル数と長さ変化率の関係をみると、凍結融解開始直後から長さ変化率は増加し、

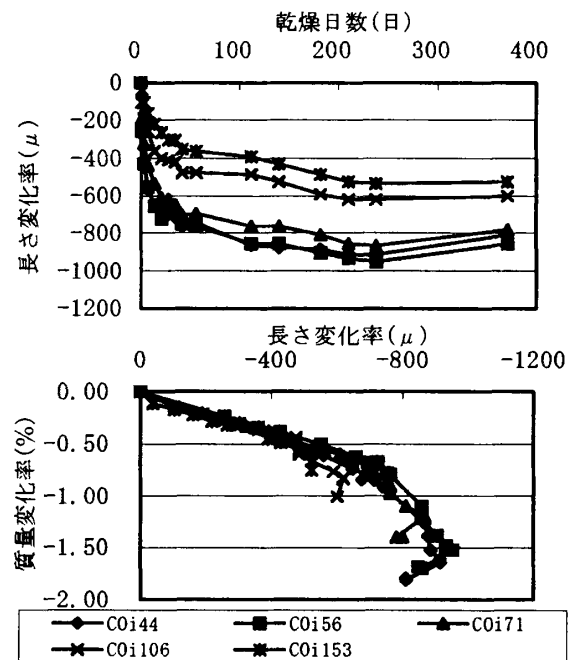


図-4 円柱試験体の長さ変化率と質量変化率

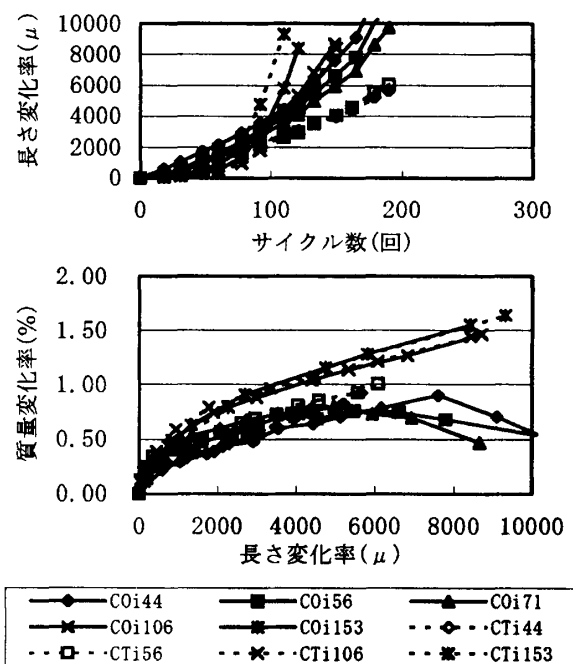


図-5 屋内放置試験体の凍結融解試験結果

すべての試験体が劣化を示した。大断面になるほど、初期の長さ変化率の増加が小さく、その後の長さ変化率の増大が大きいという傾向がある。また、長さ変化率と質量変化率の関係をみると大きな断面の試験体ほど質量変化率が大きくなっている。これは、ひび割れの発生状況によるものであり、 $\phi 153$ 試験体と $\phi 44$ 試験体の試験終了時のひび割れを写真-2に示す。断面が小さい試験体は微細なひび割れが全体的に均一に広がっているのに対し、断面の大きい試験体は幅2mm以上のひび割れが試験体に発生している。大断面の試験体では、大きなひび割れが入ることによって大きな長さ変化率および質量の増大をもたらしているといえる。このことから大断面試験体では、表層の乾燥する部分を内部の乾燥しない部分が拘束し、表層にひび割れを発生させ、このひび割れが凍結融解作用により拡大していることが考えられる。

粗骨材種別の影響を図-5のサイクル数と長さ変化率の関係をみると、大断面の場合、CT1試験体が弱く、小断面ではCO1が弱くなる傾向にあるが、これはひび割れの発生状況によるものと考えられ、1年間の室内放置においては粗骨材種別の影響は小さいものと考えられる。

凍結融解試験時の長さ変化率が1000(μ)程度になった時に相対動弾性係数が60%になることが報告²⁾されている。このことから、長さ変化率が1000(μ)に達した時のサイクル数を、相対動弾性係数が60%になるサイクル数と仮定し、そのサイクル数を用いて耐久性指数を推定した。

図-6に耐久性指数の推定値と試験体断面半径の関係を示す。この図の傾向として、屋内放置を行った試験体に関しては断面半径に関わらず、低い凍結融解抵抗性を示しているのに対し、屋外暴露試験体は断面半径が小さい $\phi 44$ 試験体で凍結融解抵抗性が高くなっていることがわかる。これは屋内放置では十分に乾燥が進み、どの試験体についてもコンクリート内部にひび割れが発生しているのに対し、屋外暴露では表層だけが乾燥し、内部は湿潤状態が保たれるため、内

部の拘束効果が低い $\phi 44$ 試験体では、乾燥によるひび割れが発生しにくいためと考えられる。

図-7に屋内放置時における単位面積あたりの水分逸散量の経時変化を示している。比較として、それぞれ同じ寸法形状の水セメント比55%の試験体の値³⁾も示す。この結果、水セメント比55%の試験体は大断面になるほど、水分逸散量が大きくなっている。これは、コンクリート内部からの水が平衡により表層に移動し外部へ逸散したためであると考えられる。しかしながら、水セメント比25%の試験体の値を見てみると、

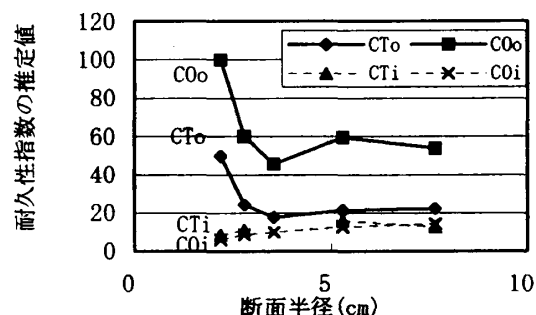


図-6 断面半径と耐久性指数の関係

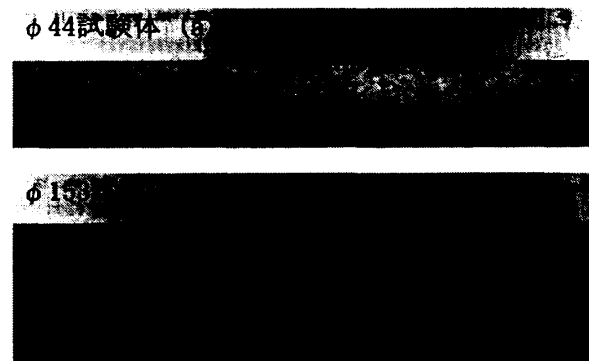


写真-2 円柱凍結融解試験終了時

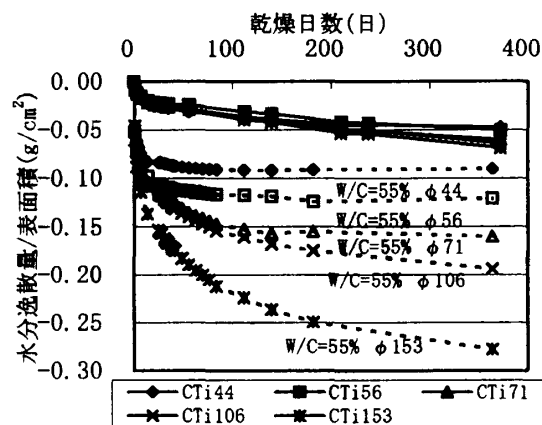


図-7 単位表面積あたりの水分逸散量

断面寸法に関わらず、ほぼ一定の値を示している。これは、逸散する水分量が高水セメント比と比較して、元々少ないことも考えられるが、内部からの水の移動が少ないことを示しているといえる。佐藤らの研究結果⁴⁾では含水率の経時変化はコンクリート表面のみで低下し、内部は深さによらず乾燥91日においてもほぼ一定の値を示している。よって、断面寸法が異なっていながら単位面積あたりの水の逸散量がほぼ等しいということは、高強度コンクリートではごく表層部分のみから水分が逸散していることが考えられる。その結果、小断面試験体では内部拘束が小さいため、写真-2(a)のような微細なひび割れが発生するのにに対し、大断面試験体では内部拘束が大きいため、写真-2(b)のような幅の大きいひび割れが生じたと推測できる。

(3) 温度履歴の測定

大断面試験体と小断面試験体の凍結融解試験時の破壊状況が異なる原因として、別な観点から考えられることとして試験体内部の温度分布の影響がある。そこで、CT153試験体の内部に銅-コンスタンタン熱電対を図-8の右図のように埋設し、凍結融解試験時の温度履歴を測定した。図-8にA・B・C間の温度差の測定結果を示す。この結果、凍結融解試験時には表層と中央部で20℃程度の温度差が生じており、このとき、A-B間で15℃程度の温度差があり、表層ほど大きな温度差が生じている。このことから、温度差15℃で、コンクリートの線膨張係数約11($\mu/\text{℃}$)、ヤング係数36.7(GPa)から算出すると、その間には約6(MPa)の応力が生じていることになる。断面寸法が小さい試験体では内部の

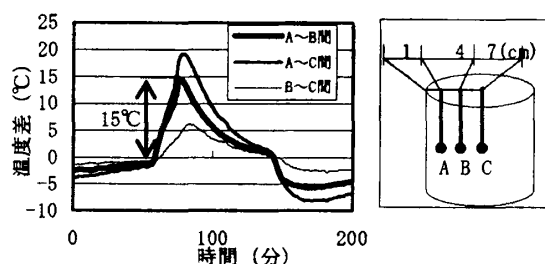


図-8 凍結融解試験におけるφ153試験体の深さ方向の温度差

温度分布が小さく、熱ひずみによる応力が低いため、凍結融解抵抗性が高くなった可能性も考えられる。しかし、図-6の屋内放置では断面寸法による凍結融解抵抗性に差は小さく、本実験の範囲の温度分布の影響は小さいと思われる。

4. まとめ

本研究では、non-AE高強度コンクリートについて以下のことが明らかとなった。

- (1) 切断面をもつ試験体の凍結融解抵抗性は低下する。
- (2) 半年間の屋外暴露・室内放置により不完全なシールを行った試験体の凍結融解抵抗性は低下する。半年間の屋外暴露において、シールにより乾燥を防止した試験体は、凍結融解抵抗性の低下が小さい。
- (3) 断面寸法が大きな試験体は、屋外暴露・屋内放置後の凍結融解試験で大きなひび割れが発生する。
- (4) 屋外暴露では、断面寸法の小さな試験体の凍結融解抵抗性が大きくなり、乾燥時の内部拘束が試験体表層にひび割れを発生させていることが考えられる。

参考文献

- 1) 千歩修, 濱田英介, 友澤史紀: 養生・放置条件が低水セメント比の耐凍害性におよぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 1, pp. 969-974, 2004
- 2) 鎌田英治: コンクリートの耐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. 12
- 3) 木村信孝, 足立裕介, 千歩修: コンクリートの含水率分布を考慮した乾燥収縮モデルの検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 305-306, 2004. 8
- 4) 佐藤幸恵, 榊田佳寛, 河上浩司, 鹿毛忠継: 高強度コンクリート構造物内部での含水率の変化と強度発現性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No1, pp. 1031-1036, 2003