論文　液体窒素を用いた急速凍結融解試験によるコンクリート表面劣化の定量化

湯北　記代彦[*1]・橋本　紳一郎[*2]・加地　貴[*3]・橋本　親典[*4]

要旨：本研究では，JIS 規格の「コンクリートの凍結融解試験」に代わる新しい試験方法として，これまで筆者らが提案してきた「液体窒素を使用した簡易的凍結融解試験方法」の詳細な検討を行った。その結果，本試験方法では，水分量や材齢の違う供試体で相対動弾性係数の変化の違いを確認できた。また，簡易凍結融解試験終了後の供試体の表面強度を測定することで，表面強度の違いによる耐久性指数の変化も確認できた。液体窒素吹き付け時の供試体内部の温度変化を計測することで，表面部分だけでなく内部まで凍結させていることが明らかとなった。

キーワード：液体窒素，簡易的凍結融解試験方法，相対動弾性係数，耐久性指数，温度

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化の原因として環境条件や外力がある。これにより発生したひび割れから水や炭酸ガスが浸入し，コンクリートの耐久性を低下させる。実コンクリート構造物において環境条件や外力を避けることは不可能である。よって，ひび割れを含むコンクリート表面から内部へ移動する水の浸入のしやすさ，または抵抗性を定量的に評価できる実験は，実コンクリート構造物の劣化診断を評価する上で意義のある試験になる。

現在，我国ではコンクリートの凍結融解作用に対する抵抗性を検討する試験方法として，2001 年に JIS 規格基準（JIS A 1148）に制定されたものを使用している。この JIS 規格試験方法は，凍害劣化であるコンクリート内部組織の膨張による脆弱化を捉える有効な方法とされてきた。しかし，その試験に非常に多大な労力と時間が必要とされることや，評価に用いる相対動弾性係数のための共鳴振動による動弾性係数測定試験（JIS A 1127-2001）は，任意のサイズや形状に適用できない等の制約がある。本試験方法だけでは様々な凍害劣化の評価は難しいという報告がある [1)]。

これまでに筆者らは，JIS 規格の「コンクリートの凍結融解試験」に代わる新しい試験方法として，液体窒素を使用した簡易凍結融解試験方法を提案してきた [2)]。この試験方法では，表層部の劣化を短いサイクル数で確認でき，その試験方法の有効性を十分示すことが可能となった。しかし，その試験方法を表面劣化の評価として使用していくためには，試験の詳細についての検討が必要となる。そこで，本研究ではコンクリートの配合，コンクリートの湿潤・乾燥の違いや凍結温度条件などの影響を JIS 規格の試験も含めて検討した。

2. 液体窒素を用いた簡易的凍結融解試験方法

2.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm^3）を使用した。骨材は，細骨材に徳島県阿南市下大野町産川砂（密度：2.62g/cm^3，

＊1 徳島大学大学院　工学研究科建設工学専攻（正会員）
＊2 函館工業高等専門学校　環境都市工学科　助手　博士(工学)（正会員）
＊3 四国総合研究所　土木技術部（正会員）
＊4 徳島大学大学院　ソシオテクノサイエンス研究部　教授　工博（正会員）

F.M：2.84)，粗骨材に最大寸法 25mm の徳島県鳴門市撫養町産砕石（密度：2.56g/cm^3，F.M：6.85）を使用した。混和剤には，AE 減水剤，および空気量調整剤として AE 剤を使用した。

2.2 コンクリートの配合

使用したコンクリートの配合を**表－1** に示す。配合は，スランプを一定とし，AE 剤の混入有無，水セメント比を変化させた合計 6 配合とした。表中の配合名は，水セメント比－（AE 剤の混入有無）を示す。

2.3 供試体形状寸法

供試体の形状寸法は，φ100×200mm の円柱供試体である。**図－1** に熱電対と供試体寸法を示す。供試体内部に熱電対を底面から深さ 10mm で外面から 20mm の位置 A と中心位置 B および深さ 30mm で外面から 20mm の位置 C の 3 本配置し，凍結・融解時の温度を測定した。

簡易凍結融解試験に用いた供試体の材齢は 14 日，28 日とし，材齢 28 日においては各配合で湿潤状態，乾燥状態の 2 種類で試験を行った。湿潤状態の供試体は，水中養生させた供試体を材齢 28 日後に取り出し，表面の水分を拭き取り試験を行った。乾燥状態の供試体は，湿潤状態と同様の供試体を，各サイクルの凍結開始前に供試体の含水率が吸水率の 50%になるまで乾燥させ試験を行った。なお，含水率 Q(%)は以下の式(1)から求めた。

$$Q = (m - m_d)/(m_s - m_d) \times 100 \qquad (1)$$

Q：含水率(%)

m：測定時のコンクリートの質量(g)

$\mathbf{m_s}$：十分に吸水させたコンクリートの質量(g)

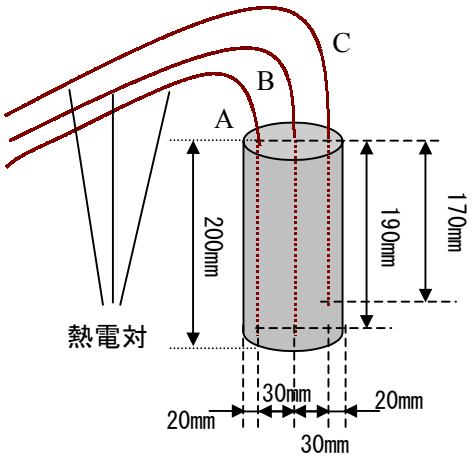
$\mathbf{m_d}$：完全に乾燥させたコンクリートの質量(g)

2.4 凍結融解試験方法

凍結融解試験は，液体窒素を用いた簡易的試験方法と JIS 試験方法の両方で比較検討を行った。

(1) 液体窒素を用いた簡易凍結融解試験

液体窒素を用いた簡易凍結融解試験は，既往の研究[3)]から材齢 14 日および 28 日後に次のような手順で行った。



図－1　熱電対の位置と供試体寸法

写真－1　試験に使用した容器

表－1　コンクリートの配合

配合名	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	細骨材率 s/a(%)	単位量(kg/m^3) 水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水剤	AE 剤
45-(AE)	8.0±2.5	5.0±1.5	45	44	168	373	765	951	C×0.015	C×0.007
45-(Non-AE)		－		46	187	416	797	914	－	－
55-(AE)		5.0±1.5	55	46	171	311	820	940	C×0.015	C×0.007
55-(Non-AE)		－		48	190	345	856	906	－	－
65-(AE)		5.0±1.5	65	48	174	268	869	920	C×0.015	C×0.005
65-(Non-AE)		－		50	193	297	907	887	－	－

まず，供試体を容器（**写真－1**）に入れ，30秒間液体窒素を吹き付ける。供試体内部温度が-5℃以下になったところで容器から取り出し，供試体内部温度が約 30℃になるまで約 40℃程度の温水に浸し融解させる。完全に融解した後，供試体の水分を拭き取り各種測定を行う。この手順を 1 サイクルとし，この作業を繰り返し行い，相対動弾性係数が 60%以下になった時点，またはサイクル数 10 回で試験終了とした。動弾性係数は，非破壊検査手法に用いられている超音波伝播時間を超音波測定器により測定し，その値から求めた。測定位置は，最もよく凍結している供試体底面部から 15mm 離れた側面とした。伝播距離は 100mm である。

また，試験開始から終了まで，供試体内部の温度を随時測定した。

(2) 水中凍結融解試験

水中凍結融解試験方法は，コンクリートの凍結融解試験方法(JIS A 1148)に基づいて行った。

2.5 評価方法

(1)相対動弾性係数

各試験で測定した超音波伝播時間を用いて動弾性係数は，緒方ら[4)]の研究より以下の式(2)から求めた。

$$Ed = 4.038VL^2 - 14.438VL + 20.708 \quad (2)$$

Ed：動弾性係数(GPa)

VL：超音波伝播速度(km/s)

また，凍結融解試験を評価する相対動弾性係数は，上記式(2)の動弾性係数の値を使用して，式(3)から求めた。

$$\text{相対動弾性係数}(\%) = Ed_n/Ed_0 \times 100 \quad (3)$$

Ed_n：サイクル数 n の超音波伝播速度から評価した動弾性係数(GPa)

Ed_0：凍結融解試験の開始前に測定した超音波伝播速度から評価した動弾性係数(GPa)

(2) 耐久性指数

耐久性指数は以下の式(4)で求めた。なお，今回の試験ではこの試験用として試験終了時のサイクル数を 10 回とした。

$$DF = P \times N/M \quad (4)$$

DF：耐久性指数

P：N サイクルのときの相対動弾性係数(%)

N：相対動弾性係数が 60%になるサイクル数，または 10 サイクルのいずれか小さいもの

M：10 サイクル

(3) 表面強度

試験終了後の供試体の強度測定は，硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法（JSCE-G504-1999）に基づいて行った。

なお，推定強度式として式(5)を使用した。

$$F = [-18.0 + 1.27 \times (R_0 + R_1 \pm R_2)] \times \alpha \quad (5)$$

F：推定強度(N/mm^2)

R_0：テストハンマーの反発度

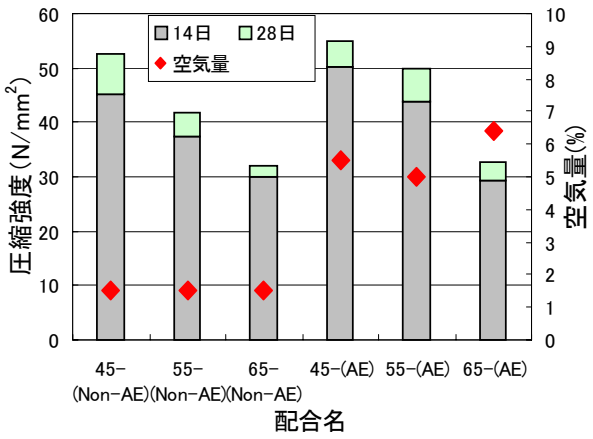
R_1，R_2：反発補正値

α：材齢係数

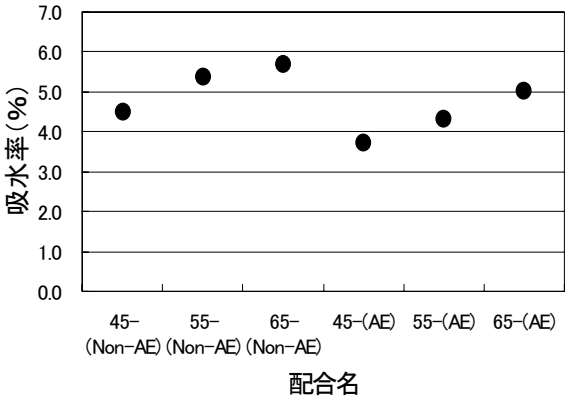
3. 試験結果及び考察

3.1 空気量と強度試験結果

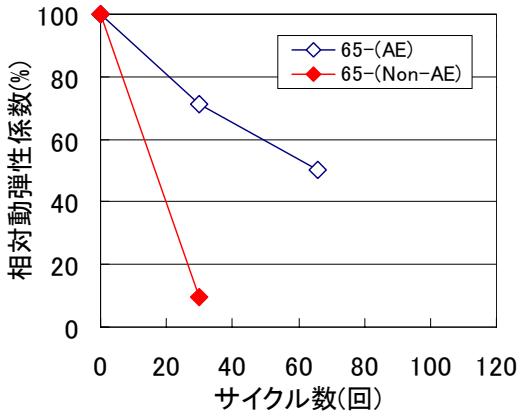
図－2 に各配合の空気量と材齢 14，28 日の圧縮強度試験結果を示す。各水セメント比における強度の違いは十分確認できた。また，AE 剤とともに AE 減水剤を使用し，単位水量を減らしたため AE コンクリート，Non-AE コンクリートとも同じ水セメント比における強度は同程度となった。



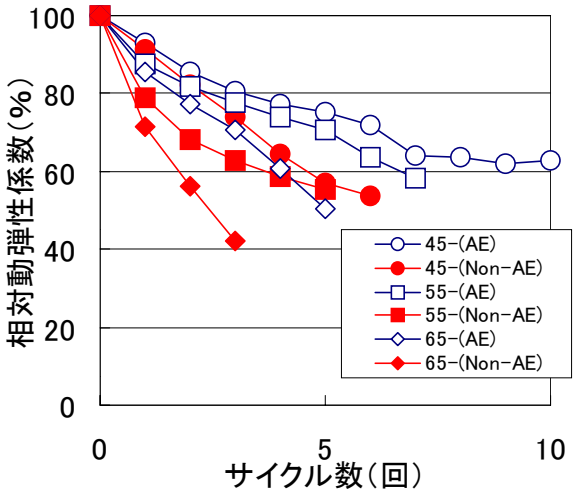
図－2　各配合の空気量と圧縮強度試験結果



図－3　各配合の吸水率



図－4　サイクル数と相対動弾性係数の関係（JIS 法）



図－5　サイクル数と相対動弾性係数の関係（材齢 28 日）

3.2 吸水率試験結果

図－3 に各配合における吸水率を示す。水セメント比が大きくなるに従い，吸水率が大きくなる。同じ水セメント比では，AE コンクリートの方が吸水率は小さい。これは，空気量の違いによるもので，エントレインドエアは外部からの浸透水を遮断する効果もあると考えられる。凍結融解試験に使用した乾燥状態での供試体は，各吸水率の値が約半分になるまで乾燥させ試験を行った。

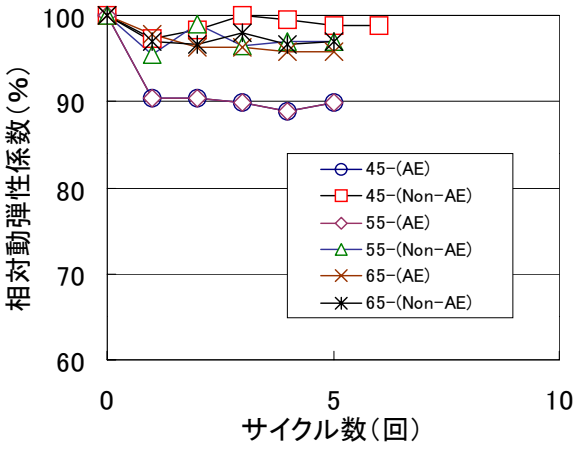
3.3 水中凍結融解試験結果

図－4 に水中凍結融解試験方法によるサイクル数と相対動弾性係数の関係を示す。AE 剤を混入していない 65-(Non-AE)は 30 サイクルで相対動弾性係数が 60%以下となった。また，AE 剤を混入した 65-(AE)は，68 サイクルで表面部のスケーリングの進行とポップアウトが確認でき，相対動弾性係数も 60%以下に低下する結果となった。水セメント比 65%では，今回の空気量 6%は，凍結融解抵抗性に必要とされるエントレインドエアの混入量としては少なかったと考えられる。

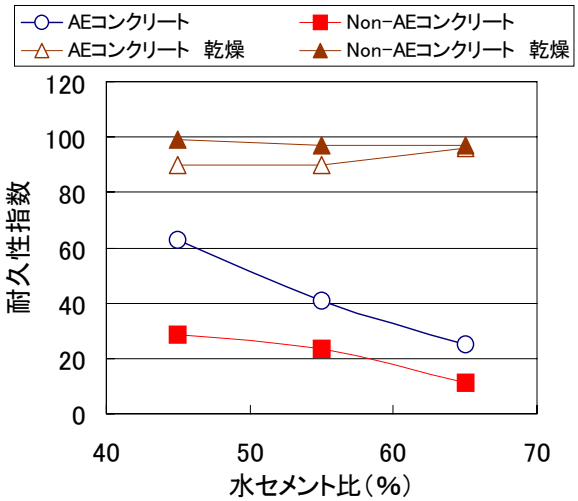
3.4 液体窒素を用いた簡易的凍結融解試験結果

図－5 に材齢 28 日における各配合でのサイクル数と相対動弾性係数の関係を示す。AE コンクリートと Non-AE コンクリートを比較すると，AE コンクリートの方が相対動弾性係数の低下率が小さく，AE 剤の混入有無の違いは明確となった。水セメント比が小さくなるにつれて AE コンクリート，Non-AE コンクリートとも相対動弾性係数の低下率は小さくなった。水セメント比の違いによる傾向が確認できた。

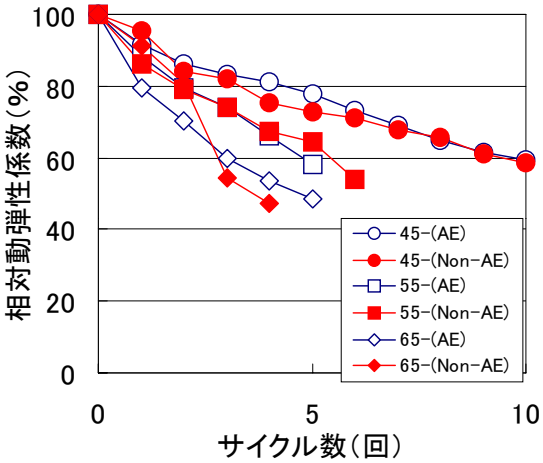
65-(AE)では，AE 剤を混入したが 5 サイクルで相対動弾性係数は 60%以下まで低下した。これは，水セメント比が他の配合に比べて大きいためである。図－4 の JIS 法の凍結融解試験結果でも 65-(AE)は少ないサイクル数で劣化しており，同様の傾向であった。劣化メカニズムは異なるが，AE コンクリートと Non-AE コンクリートの相対動弾性係数の低下傾向は，JIS 試験方法と簡易凍結融解試験方法において相関関係が確認でき，サイクル数は約 10 分の 1 まで短縮できた。



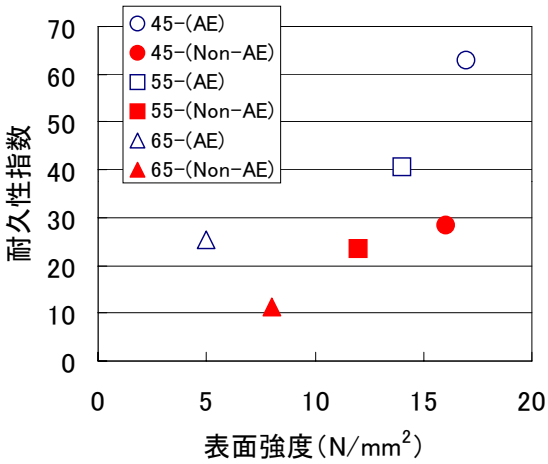
図－6　乾燥状態の供試体のサイクル数と相対動弾性係数の関係（材齢 28 日）



図－8　水セメント比と耐久性指数の関係（材齢 28 日）



図－7　サイクル数と相対動弾性係数の関係（材齢 14 日）



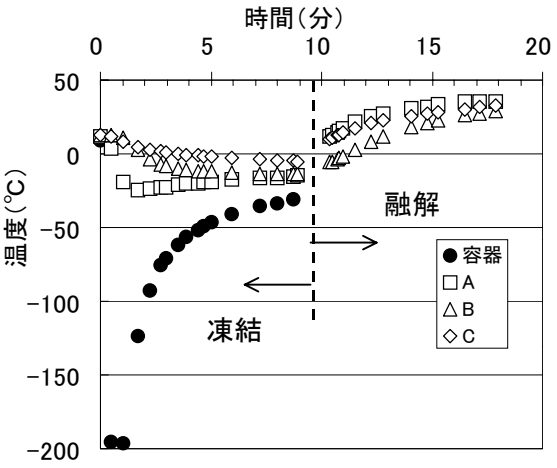
図－9　表面強度と耐久性指数の関係（材齢 28 日）

図－6 に吸水率を 50%とした乾燥状態での供試体を使用した各配合でのサイクル数と相対動弾性係数の関係を示す。試験供試体を乾燥させて試験を行った結果では，配合の種類，AE 剤混入有無にかかわらず，相対動弾性係数はほとんど低下せず，供試体にひび割れや剥離も全く見られなかった。供試体内部の水分量が湿潤状態の半分程度と少ないため，液体窒素を用いて急速に凍結させた場合でも，凍結による膨張が行われなかったものと思われる。そのため，相対動弾性係数はほとんど低下しなかったと考えられる。また，水分量の違いによる相対動弾性係数の変化を確認できた。

図－7 に各配合での材齢 14 日におけるサイクル数と相対動弾性係数の関係を示す。材齢 14 日で簡易凍結融解試験を行った結果，AE コンクリートと Non-AE コンクリートの相対動弾性係数の低下率にほとんど違いは見られなかった。材齢 14 日では十分な強度が発現していないため AE 剤混入の有無を明確にすることが出来なかったと思われる。液体窒素による凍結は相当に厳しい試験と考えられ，本試験方法では，材齢 28 日で試験を行うのが望ましいと考えられる。

3.5 耐久性指数

図－8 に水セメント比と耐久性指数の関係を



図－10　温度変化と時間の関係
（45 -（AE），湿潤状態，材齢 28 日）

示す。AE コンクリートと Non-AE コンクリートを比較すると，湿潤状態では水セメント比が小さいほど耐久性指数は高い。乾燥させた供試体では，配合の違いによる耐久性指数への影響は見られない。したがって，本試験方法は，乾燥と湿潤状態のコンクリート表面の違いを識別できる試験方法と位置づけすることができる。

図－9 に表面強度と耐久性指数の関係を示す。AE コンクリート，Non-AE コンクリートとも表面強度が高くなると，耐久性指数が高くなる。凍結融解作用が起こる供試体の表面部分の強度が高く，組織が緻密なコンクリートは凍害に対して抵抗性が高いと考えられる。

図－10 に材齢 28 日における 45-(AE)の凍結融解 1 サイクル目の温度変化と時間の関係を示す。配合の種類，吸水率に関係して概ね，1 サイクルの所要時間は約 20 分と短い時間で試験が可能であった。液体窒素を吹き付けた直後の容器内の温度は約-194℃まで低下し，時間とともに上昇した。深さが 10mm の A 点が最も早く温度が低下し，深さ 30mm の C 点が最も遅く低下した。熱電対は約-15℃以下になっており，セメント硬化体の毛細管中の水分は凍結したと考えられる。中心部の B 点は，融解する時間が一番遅かった。配合の種類，吸水率，サイクル数によって誤差はあるが，ほぼ同様の傾向を示した。本試験方法は，供試体の表面部分だけでなく，深さ 30mm の内部まで凍結・融解させている試験方法であることを明確にした。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

(1) 液体窒素を用いた簡易凍結融解試験方法は，乾燥状態と湿潤状態の供試体の違いによる相対動弾性の変化を確認できた。
(2) 液体窒素を用いた簡易凍結融解試験方法は，材齢 28 日，湿潤状態の供試体を使用して行うことでコンクリートの種類の違いによる相対動弾性係数の変化を確認できた。
(3) 試験終了後の供試体の表面強度が高いほど耐久性指数も高くなる傾向を示した。
(4) 液体窒素を使用することで，供試体の表面部分だけでなく内部まで凍結させていることが明らかとなった。

謝辞

本研究の一部は，日本学術振興会平成 17 年度科学研究費補助金の基盤研究(B)(2)（課題番号：17360205，研究代表：橋本親典）に基づき実施されたものであることを付記し，感謝の意を表します。

参考文献

1) 庄谷征美，月永洋一：東北地方のコンクリート構造物の凍害について，コンクリート工学，Vol.42，No.12，pp.3-8，2004.12
2) 橋本紳一郎，橋本親典，渡辺健，上田隆雄：液体窒素を用いたコンクリートの簡易的凍結融解試験の提案，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.27，No.1，pp.757-762，2005
3) 原田貴典，橋本親典，渡辺健，石丸啓輔：簡易的な凍結融解法の提案，土木学会四国支部講演概要集，　pp.313-314，2003.5
4) 緒方英彦，服部九二雄，高田龍一，野中資博：超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.1，pp.1563-1568，2002