

論文 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

橋本 紳一郎^{*1}・橋本 親典^{*2}・渡辺 健^{*3}・上田 隆雄^{*4}

要旨：一般に JIS 規格の「コンクリートの凍結融解試験」は、その試験に多大な労力と時間がかかる。本研究では、液体窒素を用いた簡易的凍結融解試験を新しく提案し、その可能性について検討した。その結果、液体窒素を用いることにより、JIS 規格試験と劣化のメカニズムは異なるが、表層部の劣化を短いサイクル数で確認できた。また、現場での測定可能な持ち運びのできる液体窒素を用いた簡易試験装置を試作し、超音波伝播時間による定量的評価により、その試験方法の有効性を検討した。その結果、簡易試験装置により、コンクリートの種類による相対動弾性係数の変化を確認でき、その有効性を十分示すことができた。

キーワード：液体窒素、超音波伝播速度、相対動弾性係数、簡易的凍結融解試験装置

1. はじめに

現在、我国で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は、2001年に JIS 規格基準 (JIS A 1148) として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⁾。

本研究では、主にコンクリートの表面を基点として急激に凍結融解作用を繰り返させるために液化窒素を使用する方法を提案し、時間の短縮と容易性を図ることとした。また、さらに現場へ持ち運びの可能な簡易的凍結融解試験装置を試作し、試験装置の有効性について検討した。

共鳴振動による動弾性係数測定試験の代わりに、非破壊試験に用いられる超音波測定器により超音波伝播時間を測定し、相対動弾性係数を

求めた。

2. 液体窒素を用いた簡易的凍結融解試験 (シリーズ 1)

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: 2.64g/cm^3 , F.M: 3.04)、粗骨材に最大寸法 25mm の徳島県鳴門大麻産砕石(密度: 2.62g/cm^3 , F.M: 6.85)を使用した。混和剤には、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及び供試体形状寸法

使用したコンクリートの配合を表-1 に示す。配合は、水セメント比を一定とし、AE 剤の混入有無の 2 種類で行った。供試体の形状寸法は、 $100\times 100\times 400\text{mm}$ である。なお、空気量の実測値は、AE コンクリートが 8.0%、普通コンクリートが 0.5%であった。

2.3 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 徳島大学大学院 工学研究科マクロ制御工学専攻 (正会員)

*2 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

*3 徳島大学助手 工学部建設工学科 工学 (博士) (正会員)

*4 徳島大学助教授 工学部建設工学科 工学 (博士) (正会員)

表-1 コンクリートの配合

種類	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 剤
AE	8.0±2.5	5.0±1.0	55	45	175	318	794	970	C×0.006%
普通		—			175	318	854	1040	



写真-1 試験に使用した容器

(1) 液体窒素を用いた簡易的凍結融解試験

液体窒素を用いた簡易的凍結融解試験は、既往の研究²⁾から材齢28日後に次のような手順で行った。

まず、供試体を容器(写真-1)に入れ、210mlの液体窒素を注ぐ。容器のふたをして、30秒後に供試体を取り出し、融解するまで約10分間程度お湯(約40℃程度)に浸す。完全に融解したら、供試体の水分を拭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%以下になった時点で試験終了とした。

液体窒素は非常に気化し易く、供試体全体を凍結させることは困難であるため、共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数を測定することは出来なかった。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、その値から動弾性係数を求めた。

測定位置は、最もよく凍結している供試体底面部から5mm離れた側面とした。伝播距離は100mmである。

(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。

共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数の測定と同時に簡易的凍結融解試験と比較するために超音波伝播時間の測定を行った。

2.4 評価方法

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³⁾の研究より以下の(1)式から求めた。

$$E_d = 4.038VL^2 - 14.438VL + 20.708 \quad (1)$$

E_d : 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(1)式の動弾性係数の値を使用して、(2)式から求めた。

$$\text{相対動弾性係数}(\%) = E_{d_n}/E_{d_0} \times 100 \quad (2)$$

E_{d_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)

E_{d_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)

2.5 試験結果及び考察

(1) 水中凍結融解試験結果

図-1 は共鳴振動による動弾性係数測定から相対動弾性係数を評価した結果、図-2 は超音波伝播時間から相対動弾性係数を評価した結果を示す。

普通コンクリートは、30サイクルで相対動弾性係数が60%以下となり、AEコンクリートと普通コンクリートの相対動弾性係数の違いは明確となった。30サイクル時の共鳴振動による動弾性係数測定は非常に困難であったが、超音波測定器では問題なく計測を行うことができ

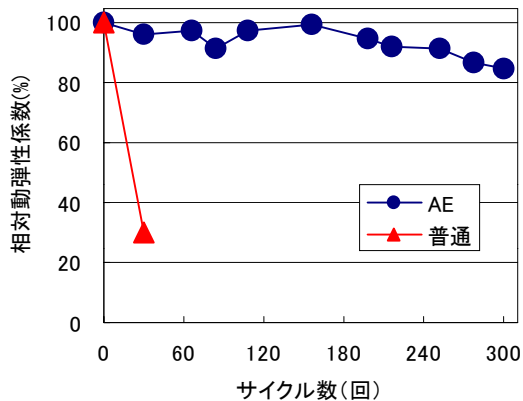


図-1 共鳴振動測定によるサイクル数と相対動弾性係数の関係

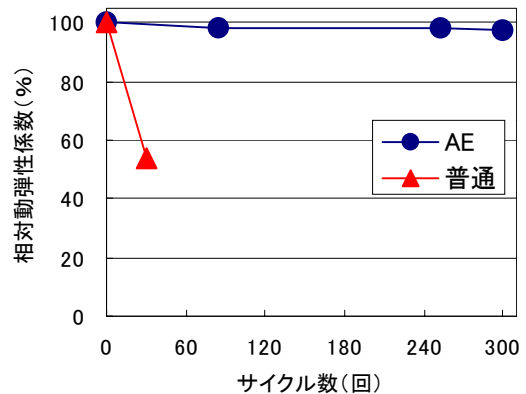


図-2 超音波伝播速度によるサイクル数と相対動弾性係数の関係

た。また、共鳴振動による動弾性係数測定と超音波測定の結果より相対動弾性係数に同様の傾向が見られていることから、超音波測定による評価は十分に可能である。

(2) 液体窒素を用いた簡易的凍結融解試験結果

図-3 は液体窒素を用いた簡易的凍結融解試験の結果を示す。液体窒素は約 -193°C と非常に低温であるため、極度の供試体の劣化が予測されたが、いずれの結果もサイクル数が増加すると相対動弾性係数は比例して低下し、普通コンクリートは5サイクルで相対動弾性係数が60%以下になった。しかし、AE コンクリートと普通コンクリートの相対動弾性係数は、JIS 規格試験の水中凍結融解試験結果と異なる傾向を示した。これは、JIS 規格試験は供試体内部組織の膨張によって劣化が生じるのに対して、液体窒素を用いた簡易的凍結融解試験は浸透の早い供試体表層部のみで繰り返し劣化し、スケーリングを生じたためと考えられる。凍害の生じるメカニズムが異なるため、表層部の劣化によるスケーリングが生じるまで相対動弾性係数は下がらなかったと考えられる。以上から、JIS 規格試験と劣化のメカニズムは異なるが、液体窒素を用いて急激な凍結と融解を繰り返すことにより、表層部の劣化を短いサイクル数で確認できた。

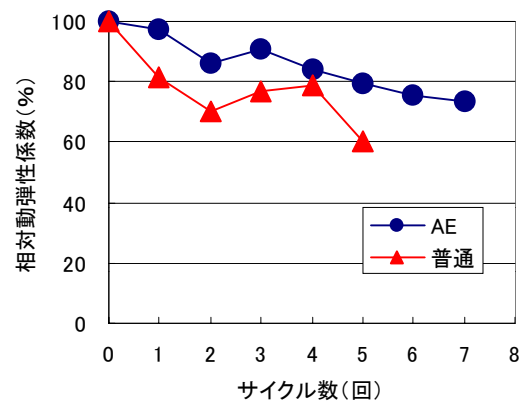


図-3 液体窒素を使用した場合のサイクル数と相対動弾性係数の関係

3. 液体窒素を用いた簡易的凍結融解試験装置の検討 (シリーズ2)

3.1 使用材料、コンクリートの配合及び供試体の形状寸法

コンクリートに使用した材料は、全てシリーズ1で使用した材料と同様である。使用したコンクリートの配合を表-2 に示す。配合は、AE 剤の混入有無、目標空気量、水セメント比の違いから合計6配合とした。水セメント比が耐凍害性に与える影響を見るため、水セメント比は比較的高い配合を設定した。表中の配合名は、水セメント比-(AE 剤の混入有無・空気量)を示す。供試体の形状寸法は、 $200 \times 200 \times 100\text{mm}$ である。

3.2 試験方法

表-2 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(%)	単体量(kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE 剤
72-(AE5%)	12±2.5	5.0±1.0	72	49	195	274	861	870	C×0.006%
72-(AE2%)		2.0±1.0		52	215	301	906	819	C×0.006%
72-(Non-AE)		2.0±1.0		53	220	306	956	841	
55-(AE6%)	8.0±2.5	6.0±1.0	55	45	175	322	797	945	C×0.006%
55-(Non-AE)		2.0±1.0		50	215	391	869	870	
80-(Non-AE)	12±2.5	2.0±1.0	80	55	223	279	1001	812	

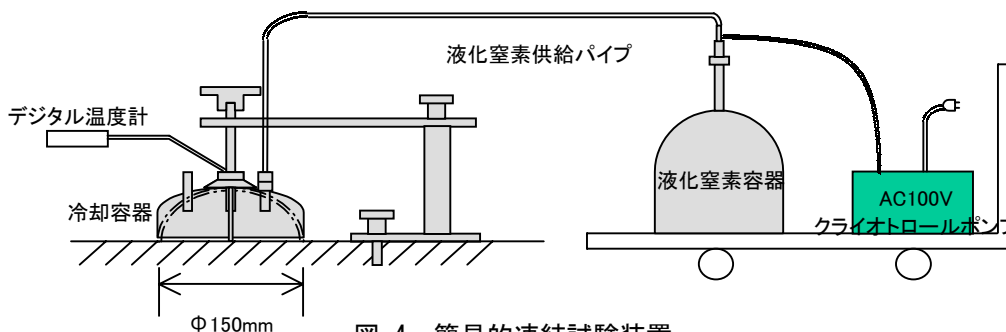


図-4 簡易的凍結試験装置

図-4 に液体窒素を用いた簡易的凍結融解試験装置を示す。簡易的凍結融解試験装置は、電源を入れると冷却容器から1分間に約420mlの液体窒素が吹付けられる仕組みになっている。この試験装置を使用して、材齢28日後に次のような手順で試験を行った。

まず、供試体表面を水で濡らし、冷却容器(図-4)を当て、1分間液体窒素を吹付ける(コンクリート表面温度計測)。1分間後に冷却容器を取外し、供試体が融解するまで約5分間程度お湯(約40℃程度)に浸す。完全に融解したら、供試体の水分を拭取り各種測定を行う。この作業を1サイクルとして繰り返し行い、相対動弾性係数が60%以下になった時点又はサイクル数10回で試験終了とした。

3.3 測定方法

シリーズ1と同様に超音波測定器により超音波伝播時間を測定し、その値から動弾性係数を求めた。また、動弾性係数、相対動弾性係数も同様に(1)式、(2)式から算出した。

図-5に供試体の測定位置を示す。測定は合計3箇所とし、吹付け表面に1箇所(C-C間)と側

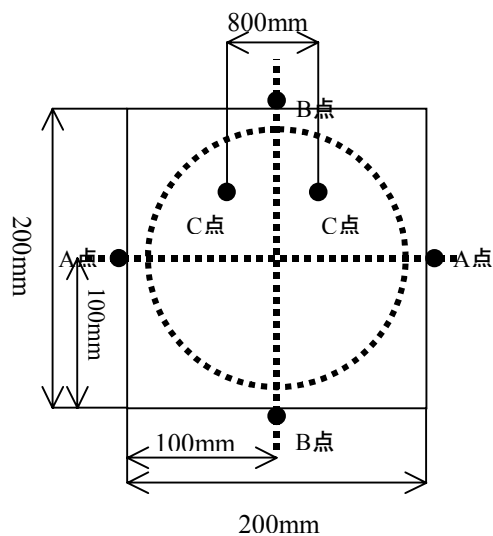


図-5 測定位置

面に2箇所(A-A間、B-B間)の超音波伝播時間を測定した。吹付け表面の測定箇所は、最も液体窒素が当たっている位置で、その吹付け表面個所に対して、A-A間方向とB-B間方向を側面の測定箇所とした。側面の測定箇所は、表面から約5mmの位置にセンサーを取り付けて測定を行った。

3.4 試験結果及び考察

(1) 空気量と強度試験結果

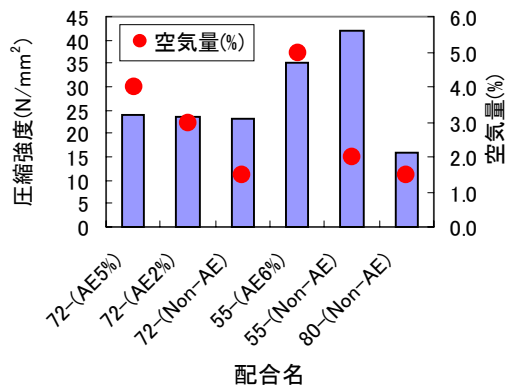


図-6 各配合の空気量と圧縮強度試験結果

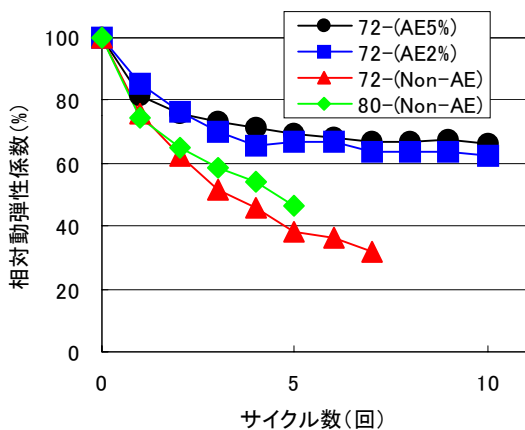


図-7 側面の測定によるサイクル数と相対動弾性係数の関係

図-6 に各配合の空気量と材齢 28 日の圧縮強度試験結果を示す。同じ水セメント比で AE 剤を使用したことによる圧縮強度の大きな違いは見られなかった。また、空気量は目標値内であったことから、水セメント比、空気量、AE 剤の混入有無の違いを簡易的凍結融解試験装置により検討することとした。

(2) 液体窒素を用いた簡易的凍結融解試験結果

図-7 に水セメント比の高い配合、図-8 に水セメント比の低い配合の供試体側面の測定によるサイクル数と相対動弾性係数の関係を示す。AE 剤の混入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になった。しかし、配合名: 72-(AE5%) と配合名: 72-(AE2%) の空気量の違いや配合名: 72-(Non-AE) と配合名: 80-(Non-AE) の水セメント比の違いまでは確

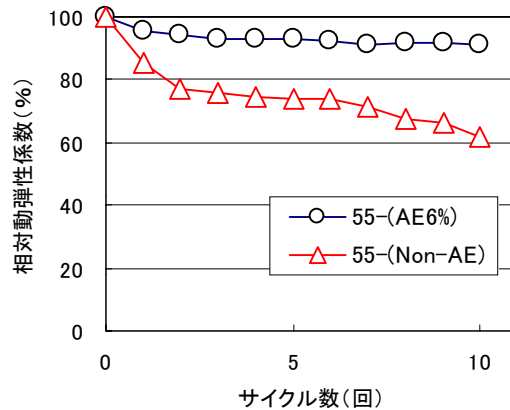


図-8 側面の測定によるサイクル数と相対動弾性係数の関係

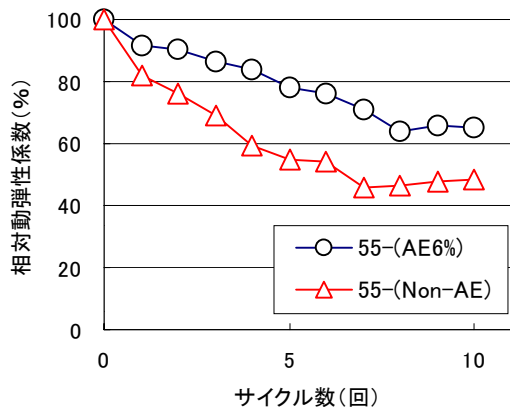


図-9 表面の測定によるサイクル数と相対動弾性係数の関係

認することができなかった。これは、空気量の実測値や水セメント比に差があまりなかったためと考えられる。

これに対して水セメント比の低い配合の結果では、AE 剤の混入有無の違いは見られたが、AE 剤を混入していない配合名: 55-(Non-AE) は、図-7 の結果のようにサイクル数初期で相対動弾性係数が 60% まで低下しなかった。これは水セメント比の違いによるためと考えられ、AE 剤を混入していない場合でも水セメント比が低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。この装置は供試体表層部で劣化させているため、供試体全体ではなく表層部の緻密性の影響をより強く受けるものと思われる。

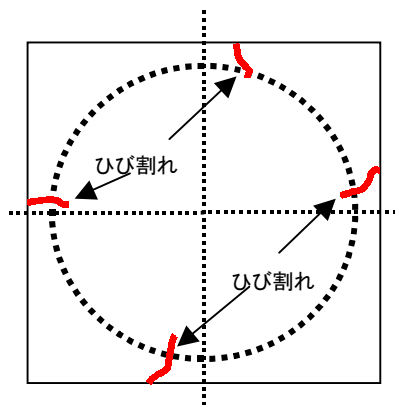


図-10 試験終了後の供試体の状況

図-9 に水セメント比の低い配合の供試体表面の測定によるサイクル数と相対動弾性係数の関係を示す。AE 剤の混入有無の違いを確認できたが、表面を測定した場合、超音波伝播時間の測定にばらつきが見られ、特に水セメント比の高い配合では測定が困難であった。

しかし、いずれの配合の試験結果もサイクル数とともに相対動弾性係数は低下する傾向であり、AE 剤の混入有無による凍結融解抵抗性は従来の見解と一致することが明らかになった。

図-10 に試験終了後の供試体の状況模式図を示す。ひび割れはサイクル初期で発生し、ひび割れの発生した場所は液体窒素が吹付けられている面（円形内）ではなく、外側へ生じた。このようなひび割れは、特に AE 剤を混入していない配合名：72-(Non-AE) と配合名：80-(Non-AE) で顕著に見られた。これは、液体窒素吹付け時のコンクリート表面温度が平均約 -192°C と非常に低かったことから、コンクリート中の水分の急激な凍結により膨張の量と速度が速められ、サイクル数の初期にひび割れが生じたと考えられる。また、この供試体は中央部が膨張し、周辺部は膨張しないことにより液体窒素の吹付け面ではなく側面方向にひび割れが生じたと考えられる。

以上から本研究の簡易的凍結融解試験装置と超音波測定器を使用することにより、コンクリートの種類によって、相対動弾性係数の低下に与える影響が変化することを明らかにした。しかし、今回の実験では、液体窒素の吹付け量や

時間は一定とし、その凍結状況を供試体の表面温度と目視の他に計測していないため、今後、この試験装置により、液体窒素の吹付け量や時間とコンクリートの凍結深さの関係を計測及び検討しなければならない。

4. まとめ

本研究で液体窒素を用いた凍結融解試験の可能性と液体窒素を用いた簡易試験装置を試作し、その試験方法の有効性について検討した結果を以下にまとめる。

- (1) 液体窒素を用いた凍結融解試験方法は、サイクル数とともに相対動弾性係数は低下する傾向を示した。
- (2) 液体窒素を用いた凍結融解試験方法は、JIS規格試験と劣化のメカニズムは異なるが、表層部の劣化を短いサイクル数で確認できた。
- (3) 液体窒素を用いた簡易試験装置と超音波測定器を用いることで、コンクリートの種類によって、相対動弾性係数の低下に与える影響が変化することを明らかにした。

謝辞

本研究を行うにあたり、ご協力を頂きました株式会社四国総合研究所の加地貴様をはじめとする関係各位に深謝申し上げます。

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) 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
- 3) 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