

# 論文 液体窒素を用いた残存凍結融解抵抗性を評価する試験方法の提案

青江 匡剛\*1・橋本 親典\*2・石丸 啓輔\*3・渡邊 健\*4

**要旨：**現在，凍結融解作用に対する抵抗性を評価する方法として，JIS A 1148：2010 が適用される。既存のコンクリート構造物のかぶりコンクリートの残存凍結融解抵抗性を評価する場合，この JIS 規格の試験方法は非常に多大な労力と時間，コアの採取を必要とする。本研究では，かぶりコンクリートに液体窒素を直接吹き付け，工業ドライヤーにより融解させるという簡易な残存凍結融解試験方法を提案した。かぶりコンクリートを模擬した平板供試体を用いてこの試験方法の適用性の可能性を検討した。その結果，AE 剤の有無を明確に判別でき，従来の JIS 法と類似した傾向が確認でき，残存凍結融解抵抗性の評価の可能性を見出した。

**キーワード：**液体窒素，凍結融解試験方法，相対動弾性係数，AE 剤，再生粗骨材

## 1. はじめに

現在，我が国ではコンクリートの凍結融解作用に対する抵抗性を評価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 規格の試験方法は，凍害劣化であるコンクリートの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いる。この試験を，既存のコンクリート構造物のかぶりコンクリートの残存凍結融解抵抗性を評価する試験として適用した場合，2 カ月程度の試験期間やコアの採取が必要等，多大な労力を要する。また，評価に用いる相対動弾性係数は共鳴振動による相対動弾性係数を測定する試験（JIS A 1127:2001）によって算出されるが，任意のサイズや形状に適用できない等の制約がある。よって，既存コンクリートの残存凍結融解抵抗性を評価するために，短期間かつ現場で行える簡易的な試験方法が望ましい。

これまでに，湯北ら<sup>1)</sup>はこの JIS 規格の「コンクリートの凍結融解試験」に代わる簡易凍結融解試験の提案をした。この試験は，コンクリートの表層部を起点として急激に凍結融解作用を繰り返し作用させるために液化窒素を使用する方法であり，時間の短縮と容易性を図るこ

とを可能とした。また，弓場上ら<sup>2)</sup>は再生骨材を用いて，液体窒素を用いた簡易試験方法の 10 サイクルが JIS 法の 300 サイクルに相当することを確認した。

しかし，コアの採取を必要としない現場で行える簡易凍結融解試験手法の有効性は得られていない。そこで，本研究においては液体窒素の直接吹き付けによって現場で簡易的に見える凍結融解試験方法の有効性を検討した。

## 2. 実験概要

本研究は，現場を想定した簡易凍結融解試験装置を使用して液体窒素を平板供試体表面に直接吹き付けて耐凍害性を評価する試験方法を主とし，JIS 法との比較や湯北らが考案した簡易的に円柱供試体を液体窒素に浸して表面を評価した試験<sup>1)</sup>との比較を行った。

### 2.1 使用材料

表－1 にコンクリートの使用材料を示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。粗骨材は徳島県板野大坂産の砕石及び再生粗骨材を使用し，細骨材は徳島県阿波市市場町産の細砂，再生細骨材および高炉スラグ細骨材を使用した。再生骨材は電柱として使用され廃品となったプレストレストコンクリートポール（水セメ

表－1 コンクリートの使用材料

| 使用材料 | 産地・種類             | 記号  | 性状等                                                         |
|------|-------------------|-----|-------------------------------------------------------------|
| セメント | 普通ポルトランドセメント      | C   | 密度:3.16 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積:3370cm <sup>2</sup> /g     |
| 細骨材  | 阿波市市場町産砕砂         | NS  | 表乾密度:2.57g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:1.77%, 粗粒率:2.63, 実積率66.6%  |
|      | 再生細骨材             | RS  | 表乾密度:2.32g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:9.59%, 粗粒率:3.32, 実積率62.4%  |
|      | 福山産高炉スラグ細骨材       | BFS | 表乾密度:2.74g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:0.49%, 粗粒率:2.53            |
| 粗骨材  | 板野町大坂産砕石(5-10mm)  | NG  | 表乾密度:2.57g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:1.60%, 粗粒率:6.37, 実積率:55.4% |
|      | 板野町大坂産砕石(15-20mm) | NG  | 表乾密度:2.57g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:1.62%, 粗粒率:7.08, 実積率:57.6% |
|      | 再生粗骨材             | RG  | 表乾密度:2.54g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:4.21%, 粗粒率:7.51, 実積率:57.8% |
| 混和剤  | AE減水剤             | WRA | リグニンスルホン酸系                                                  |
|      | AE剤               | AEA | 高アルキルカルボン酸系                                                 |

\*1 国土交通省 四国地方整備局 土佐国道事務所 道路保全課 技官 (正会員)

\*2 徳島大学大学院 理工学研究部 理工学部門 社会基盤デザイン系 教授 工博 (正会員)

\*3 徳島大学大学院 理工学研究部 理工学部門 社会基盤デザイン系 (正会員)

\*4 徳島大学大学院 理工学研究部 理工学部門 社会基盤デザイン系 准教授 博 (工) (正会員)

表-2 コンクリートの配合 (シリーズ 1)

| 配合名      | W/C (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |        |        |        |             |             | Slump (cm) | Air (%) |
|----------|---------|---------|--------------------------|--------|--------|--------|-------------|-------------|------------|---------|
|          |         |         | 水 W                      | セメント C | 細骨材 NS | 粗骨材 NG | WRA (C × %) | AEA (C × %) |            |         |
| 45-AE    | 45      | 44      | 168                      | 373    | 751    | 955    | 0.15        | 0.02        | 2.0        | 4.3     |
| 45-NonAE |         | 46      | 187                      | 416    | 788    | 925    | —           | —           | 1.0        | 0.9     |
| 55-AE    | 55      | 46      | 171                      | 311    | 805    | 945    | 0.15        | 0.02        | 4.0        | 6.0     |
| 55-NonAE |         | 48      | 190                      | 345    | 846    | 916    | —           | —           | 2.0        | 1.0     |
| 65-AE    | 65      | 48      | 174                      | 268    | 853    | 924    | 0.15        | 0.02        | 4.0        | 6.1     |
| 65-NonAE |         | 50      | 193                      | 297    | 897    | 897    | —           | —           | 2.0        | 1.2     |

表-3 コンクリートの配合 (シリーズ 2)

| 配合名         | W/C (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |        |     |     |     |     |     |           | Slump (cm) | Air (%) |           |
|-------------|---------|---------|--------------------------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|------------|---------|-----------|
|             |         |         | 水 W                      | セメント C | 細骨材 |     |     | 粗骨材 |     | WRA (C×%) |            |         | AEA (C×%) |
|             |         |         |                          |        | NS  | RS  | BFS | NG  | RG  |           |            |         |           |
| N-AE        | 55      | 46      | 171                      | 311    | 805 | —   | —   | 945 | —   | 0.15      | 0.02       | 4.0     | 6.0       |
| N-NonAE     |         | 48      | 190                      | 345    | 846 | —   | —   | 916 | —   | —         | —          | 2.0     | 1.0       |
| R-AE        |         | 46      | 171                      | 311    | —   | 726 | —   | —   | 926 | 0.1       | 0.01       | 16.0    | 9.0       |
| R-NonAE     |         | 48      | 190                      | 345    | —   | 764 | —   | —   | 899 | —         | —          | 9.0     | 5.5       |
| R・BFS-NonAE |         | 48      | 190                      | 345    | —   | —   | 902 | —   | 899 | —         | —          | 4.0     | 5.5       |

ント比 30%, 単位セメント量 500kg/m<sup>3</sup> 程度) を破碎・洗浄したものを使用した。高炉スラグ細骨材は、「JIS A 5011-1:2013 コンクリート用スラグ骨材第一部：高炉スラグ骨材」に適合するものを使用した。

## 2.2 配合

表-2, 3 に配合および練混ぜ直後のフレッシュ性状を示す。本試験の配合は 2 シリーズから成る。シリーズ 1 は, AE 剤混入の有無, 水セメント比の比較を目的としている。骨材は全て普通骨材を使用した。シリーズ 1 の配合名は, 数字が水セメント比(%), 後の英文字が AE 剤混入の有無を表す。目標スランプ 3±2cm のため AE 剤を含んだ配合 (以下, AE コンクリートと称す) の単位水量を約 170kg/cm<sup>3</sup>, AE 剤を含んでいない配合 (以下, NonAE コンクリートと称す) 配合単位水量を約 190kg/cm<sup>3</sup> に設定した。シリーズ 2 は AE 剤混入の有無及び骨材種類を比較するための配合である。水セメント比は 55% を一定とした。シリーズ 2 においては, 先頭の英字が骨材種類を表し, 続く英文字が AE 剤混入の有無を表す。

## 2.3 試験項目および方法

### (1) コンクリートのフレッシュ性状

JIS A 1128:2005 「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法—空気室圧力方法」, JIS A 1101:2005 「コンクリートのスランプ試験方法」に準じた。

### (2) 圧縮強度試験方法及び静弾性係数試験

圧縮強度試験は JIS A 1108:2006 「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じた。コンクリートの静弾性係数は JIS A 1149:2010 「コンクリートの静弾性係数試験方法」に基づき行った。試験材齢は共に 28 日とした。標準水中養生で行い, φ100×h200mm の円柱供試体を用いた。

### (3) 凍結融解試験方法 (JIS)

JIS A 1148:2010 「コンクリートの凍結融解試験方法 (A 法)」に準じた。コンクリート供試体は φ100×h200mm の円柱供試体を使用し, 材齢 56 日間の水中養生を行った。



写真-1 円柱供試体を用いた簡易凍結融解試験装置



写真-2 保冷容器

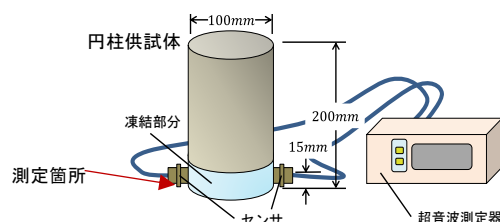


図-1 超音波伝搬速度の測定位置



写真-3 実構造物に対する実施状況

### (4) 円柱供試体表面の簡易凍結融解試験方法

写真-1 に使用した試験装置を示す。円柱供試体を用いた簡易凍結融解試験では, 写真-2 に示す保冷容器を使用し, 容器内に円柱供試体を入れ, 容器内に約 210ml の液体窒素を注ぐ。供試体底部から 15mm 程度の高さで 1 分間液体窒素に浸した後, 供試体を容器から取り出し, 約 40℃の温水に 5 分間浸し融解させる。完全に融解した後, 供試体の水分を拭き取り, 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, 測定が行え

なくなった時点、またはサイクル数 10 回で試験終了とした。相対動弾性係数は、超音波伝搬速度を超音波測定器（端子直径 φ12mm、公称周波数 200kHz）により測定し、次式にて算出した。

$$\text{相対動弾性係数}(\%) = \left( \frac{VL_n^2}{VL_0^2} \right) \times 100 \quad (1)$$

$VL_0$ ：試験開始前における超音波伝播速度(km/s)

$VL_n$ ：n サイクル後における超音波伝播速度(km/s)

測定位置は図-2 に示す通り、供試体を液体窒素に浸すため、最もよく凍結している供試体底部から 15mm 離れた側面とした。伝搬距離は 100mm である。

#### (5) 平板供試体表面の簡易凍結融解試験方法

本試験は写真-4、5 のようにコアを採取せずに現場非破壊試験で直接評価を行うことを想定した凍結方法である。今回は試験段階であるため実験室レベルで行った。供試体の形状寸法は 200×200×100mm、試験実施材齢は 56 日とした。試験方法は円柱供試体の場合とほぼ同様であるが、保冷容器は使用しない。供試体も液体窒素に浸すのではなく、液体窒素を供試体の表面に吹き付ける。液体窒素を吹き付けた時間は、1 分 30 秒間（約 630ml）とした。吹き付け直後の供試体表面を写真-6 に示す。

融解方法は 4 種類を検討した。第 1 方法は、2.3(4)で述べた円柱供試体を用いた試験方法と同様で 40℃のお湯に 6 分間浸して融解を行った。第 2 方法は、凍結融解による劣化を促進させるため、図-2 に示す箇所に直径 6mm、深さ 50mm のドリル削孔を凍結融解試験直前に施し、40℃のお湯で 6 分間融解を行った。第 3 方法は、実際に現場で行える試験方法を想定し、水道水で散水を行いながら、工業ドライヤー（電源:100V、電流 12A、温風吐き出し口：直径 3cm）を用いて 6 分間融解を行った。工業ドライヤーを用いたのは現場で 40℃のお湯の準備ができないためである。今回使用したドライヤーは 100℃程度の温風を放つ一般家庭用のものではなく、融解の際に 550℃の温風を放つことが可能な工業用のものを使用した。工業ドライヤーによってコンクリート表面が乾くごとに散水を行った。第 4 方法は、第 2 方法と同様に、削孔を行い、工業ドライヤーで 6 分間融解する方法である。工業ドライヤーによってコンクリート表面が乾くごとに散水を行った。表層を削孔したのはより厳しい凍結条件にするためである。融解状況を写真-7 に示す。

図-3 に超音波伝播速度を測定するための発信端子と受信端子の設置位置を示す。測定は全部で 7 箇所（透過法 2 箇所、表面法 5 箇所）とし、透過法での測定位置は表面から 15mm、測定距離 200mm の位置 A-A 間、B-B 間、また表面法での測定は測定距離 170mm の C-C 間、D-D 間、測定距離 80mm の E-E 間、測定距離 100mm F-F 間、測定距離 85mm G-G 間で計測を行う。



写真-4 平板供試体に吹き付け装置を設置した状況



写真-5 液体窒素を吹き付けている状況



写真-6 吹き付け装置を外した直後の平板供試体

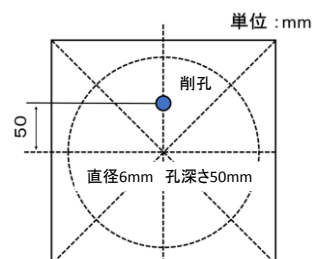
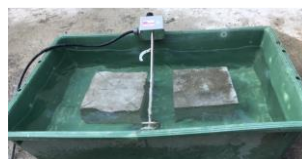


図-2 平板供試体の削孔位置



お湯に浸漬



工業ドライヤー

写真-7 融解状況

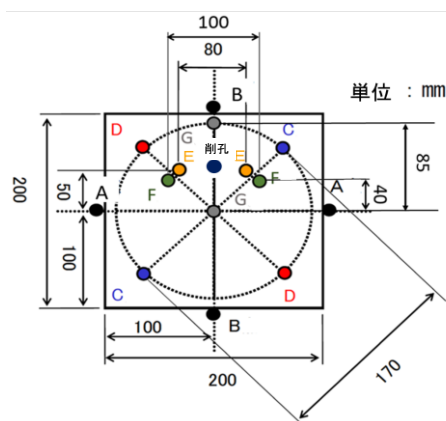


図-3 平板供試体の測定位置

### 3. 試験結果

#### 3.1 圧縮強度試験及び静弾性係数試験

##### (1) シリーズ 1 の結果

材齢 28 日の圧縮強度と静弾性係数試験の結果を図-4 に示す。AE, NonAE に関わらず、各水セメント比における強度の違いは確認できた。水セメント比が 65%以外での配合では AE コンクリートより NonAE コンクリ

ートの方が強度は大きくなった。これは NonAE コンクリートが AE コンクリートに比べ単位セメント量が大きく空気量が小さいことが理由として考えられる。静弾性係数試験の結果は 45-AE を除けば、圧縮強度試験の結果と相関していた。

## (2) シリーズ 2 の結果

材齢 28 日の圧縮強度と静弾性係数試験の結果を図-5 に示す。一般的な知見と同様に本研究においても再生骨材コンクリートは普通コンクリートに比べ、強度は小さくなった。これは再生骨材の吸水率が大きいことや密度が小さいことが要因として考えられる。また、シリーズ 2 においても AE コンクリートは NonAE コンクリートに比べ強度が低くなることが確認できた。

## 3.2 平板供試体を用いた簡易凍結融解試験

### (1) 測定箇所の選定

図-6 から図-9 に材齢 56 日の平板供試体における簡易凍結融解試験結果を示す。なお、図中の凡例は、図-6 から図-9 で同じである。これらの結果は配合及び融解方法をそれぞれ 55-AE : 40℃のお湯、55-NonAE : 40℃のお湯、55-AE : 削孔+工業ドライヤー、55-NonAE : 削孔+工業ドライヤーで行った結果である。A, B, C, D 点の 4 点に関しては A-A 点と B-B 点、C-C 点と D-D 点でそれぞれ平均し、相対動弾性係数を算出した。

AE 剤の有無や試験方法によらず、G-G 点の相対動弾性係数の低下が最も大きかった。これは G-G 点付近で最も液体窒素が吹き付けられるためだと考えられる。E-E 点、F-F 点も直接吹き付けられる箇所であるが、測定点の間隔が短いことから、凍結融解による劣化が G-G 点ほど検出できなかったと考えられる。

これより次節 3.3 以降の平板供試体における簡易凍結融解試験結果は G-G 点で計測を行ったものを示す。

### (2) 融解方法の比較

図-10~14 に配合名 55-AE における融解方法を変えた場合の簡易凍結融解試験結果を示す。図-10~14 には A-A 点・B-B 点の平均、C-C 点・D-D 点の平均、E-E 点、F-F 点、G-G 点の計測点における結果を表している。

図-10、図-11 より、A-A 点・B-B 点および C-C 点・D-D 点で測定を行ったものは融解方法の違いによる相対動弾性係数の低下の差は見られなかった。しかし、図-12 から図-14 に示す E 点、F 点、G 点においては融解方法による明確な差が見られた。工業ドライヤーを用いた融解方法は 40℃のお湯で浸漬する融解法より相対動弾性係数の低下が小さくなった。これは工業ドライヤーで融解する際の散水量が不十分であったことが要因だと考えられる。本試験による散水方法は一定に水を与え続けるのではなく、供試体表面が工業ドライヤーにより渴き

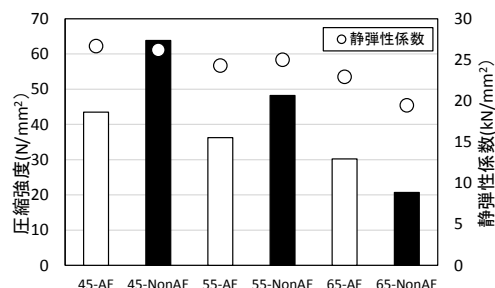


図-4 圧縮強度と静弾性係数試験結果(シリーズ 1)

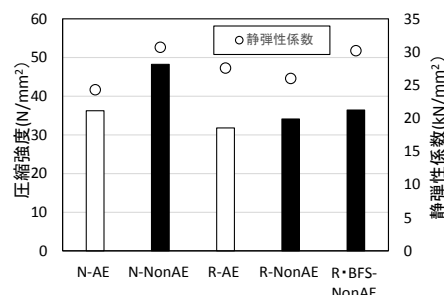


図-5 圧縮強度と静弾性係数試験結果(シリーズ 2)

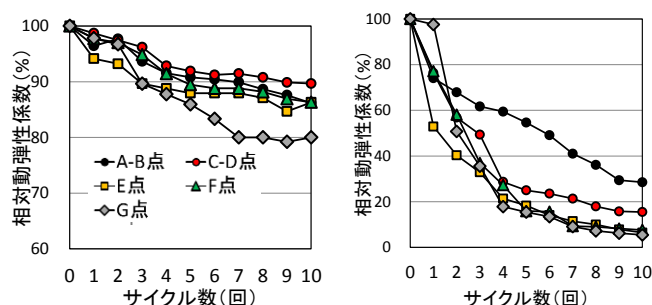


図-6 55-AE : 40℃のお湯 図-7 55-NonAE : 40℃のお湯

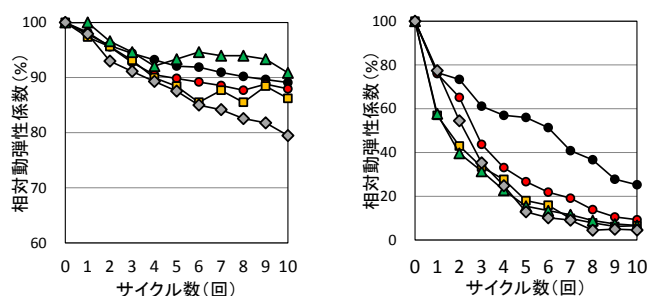


図-8 55-AE : 削孔+工業ドライヤー

図-9 55-NonAE : 削孔+工業ドライヤー

始めた都度、散水を行うようにした。そのため、凍結を行う際に含水状態が十分でなかったことが影響したと推察される。今後の課題として散水量の調整が必要である。

また、削孔により凍結融解による劣化を速めることが確認できた。これは 1 つの理由として削孔を行ったことで凍結融解する表面積が増え、劣化が速まったことが考えられる。もう 1 つは削孔を行った際に孔の周囲に微細なひび割れが生じる。そのひび割れ間に水が入り込み凍結し、膨張することによってひび割れが拡大したと考えられる。

工業ドライヤーによる融解方法でも削孔を組み合わせると、湯北ら<sup>9)</sup>が考案した従来のお湯による融解と同様の結果が得られることがわかった。

### 3.3 平板供試体による簡易凍結融解試験（シリーズ1）

図-15 にシリーズ1における材齢56日の平板供試体を用いた簡易凍結融解試験の結果を示す。測定点はG-G点、融解方法は実際の現場を想定した削孔+工業ドライヤーによるものとした。AEコンクリートとNonAEコンクリートを比較すると、NonAEコンクリートの方が相対動弾性係数の低下率が大きくなり、AE剤の混入の有無による傾向が試験結果に表れた。また、AE剤混入の有無に関わらず、水セメント比が小さくなるにつれて相対動弾性係数の低下率が小さくなり、水セメント比の違いも明確な差が表れた。

#### (1) JIS法との比較（シリーズ1）

図-16 にシリーズ1における材齢56日のJISに基づいて行った凍結融解試験の結果を示す。3.3で行った平板供試体を用いた簡易試験（融解方法：削孔+工業ドライヤー、計測点：G-G点）とJIS試験との比較を行った。弓場上らの研究<sup>2)</sup>を踏まえ、当研究においても液体窒素を用いた簡易試験の1サイクルはJIS法の30サイクルと見なす。

AE剤有無の判別という点においては平板供試体を用いた簡易凍結融解試験はJIS法に比べNonAEコンクリートの相対動弾性係数の低下が小さかった。また、平板供試体を用いた簡易凍結融解試験法はJIS法に比べ、W/Cの違いが明確になった。これは平板供試体を用いた簡易凍結融解試験では凍結した際に生じる水圧膨張による劣化だけでなく、急激な温度変化による劣化も生じたことが推察される。従来のJIS法は供試体の温度変化が-18℃～5℃の間で行われているのに対し、簡易凍結融解試験法（融解方法：削孔+ドライヤー）によるコンクリート表面付近の温度変化は-190℃～550℃と想定される。そのため、急な温度変化による膨張と収縮を繰り返すことにより、温度応力による劣化も生じたことが考えられる。

#### (2) 円柱供試体を用いた簡易凍結融解試験法の比較（シリーズ1）

図-17 にシリーズ1における円柱供試体を用いた簡易凍結融解試験結果を示す。円柱供試体を用いた試験結果においても平板供試体と同様な劣化曲線を示した。これは平板供試体を用いた簡易凍結融解試験と同様の劣化メカニズムが生じたと推察される。円柱供試体を用いた試験においてもコンクリート表面付近の温度変化が-190℃～40℃とJIS法と比較すると、1サイクルにおける温度変化が大きい。このことから、平板供試体を用いた簡易凍結融解試験と同様に内部組織の膨張による脆弱化だけでなく、温度応力による劣化が生じたと考えられる。

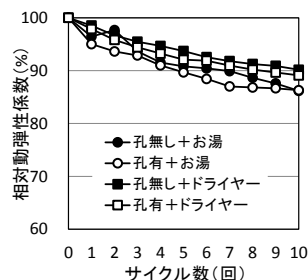


図-10 A-A, B-B点での結果

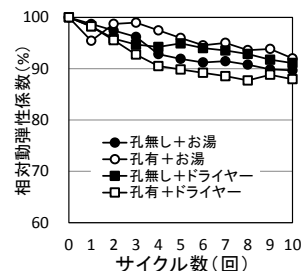


図-11 C-C, D-D点での結果

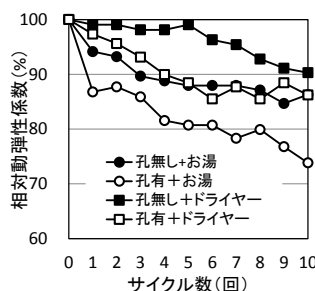


図-12 E-E点での結果

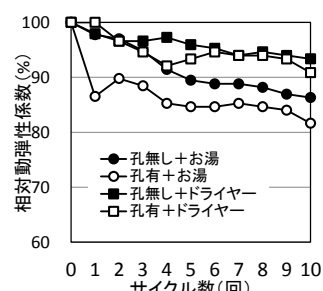


図-13 F-F点での結果

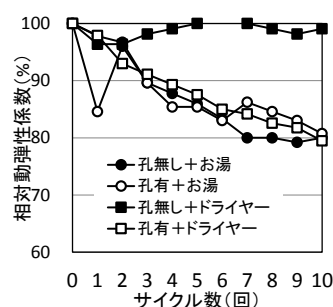


図-14 G-G点での結果

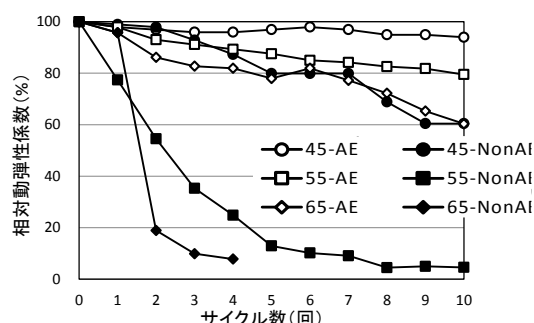


図-15 平板供試体を用いた簡易凍結融解試験(シリーズ1)

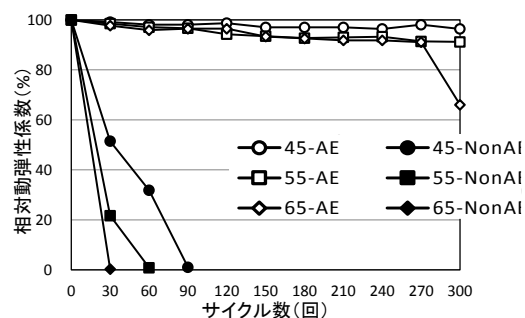


図-16 JIS法(シリーズ1)

### 3.4 平板供試体による簡易凍結融解試験（シリーズ 2）

図-18 にシリーズ 2 における材齢 56 日の平板供試体を用いた簡易凍結融解試験の結果を示す。測定点は G-G 点、融解方法は実際の現場を想定した削孔+工業ドライヤーによるものとした。骨材の種類（再生骨材、普通骨材、高炉スラグ細骨材）の種類に関わらず、NonAE コンクリートの相対動弾性係数は低下が著しく、耐凍害性の低下が確認できた。

また、既往の研究通り再生骨材を使用した配合は普通骨材を使用した配合のものに比べ相対動弾性係数の低下が著しかった。高炉スラグ細骨材を使用した配合は他の再生骨材の配合に比べ、相対動弾性係数の低下が小さくなり、耐凍害性が向上した。これは、コンクリートに高炉スラグ細骨材を使用することで、粗骨材モルタルとの界面に析出する水酸化カルシウムの量が少ないために水酸化カルシウムが溶け出した後に間隙を埋める水が凍ることによって発生する膨張圧が少ないためであると考えられる<sup>3)</sup>。

### 3.5 JIS 法との比較（シリーズ 2）

JIS 法の凍結融解試験結果を図-19 に示す。JIS 法においても平板供試体を用いた簡易凍結融解試験と同様で 300 サイクルの時点で相対動弾性係数 60%以上を維持できた配合は普通骨材を使用した AE コンクリートのみであった。また、JIS 法においても高炉スラグ細骨材を使用した配合は他の再生骨材の配合に比べ、相対動弾性係数の低下が小さくなった。これは 3.4 で述べた内容と同様のことが考えられる。

## 4. まとめ

本研究では、液体窒素を用い、現場で簡易に行う残存凍結融解抵抗性を評価する試験方法の可能性を実験的に検討した。以下に本研究で明らかになったことを記す。

- (1) 液体窒素の直接吹き付けによる凍結方法、工業ドライヤーによる融解方法は、サイクル数とともに相対動弾性係数を低下させる傾向を示した。
- (2) 平板供試体を用いた簡易凍結融解試験は JIS 法と劣化メカニズムは異なるが、表層部の劣化を短い試験期間で確認できた。
- (3) 平板供試体を用いた簡易凍結融解試験においても JIS 法との比較から、コンクリートの特徴による劣化傾向（AE 剤混入の有無、骨材の種類別、水セメント比）を的確に評価できることを確認した。

## 謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会平成 27 年度科学研究費補助金の挑戦的萌芽研究（課題番号 25630188、研

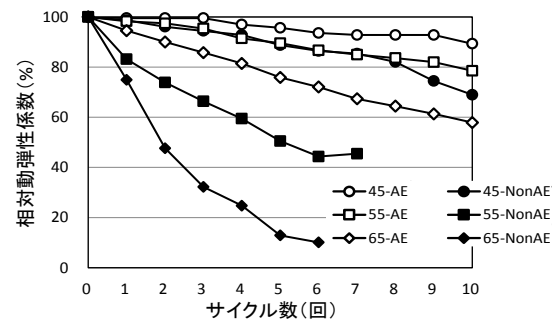


図-17 円柱供試体を用いた簡易凍結融解試験（シリーズ 1）

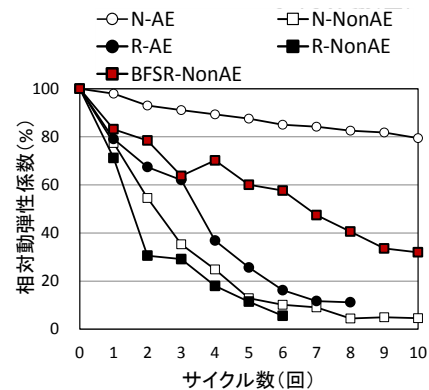


図-18 平板供試体を用いた簡易凍結融解試験 (シリーズ 2)

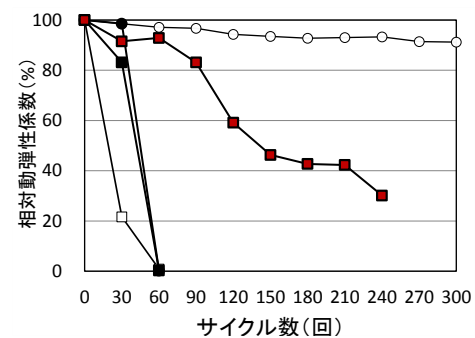


図-19 JIS 法 (シリーズ 2)

究代表者：橋本親典)に基づき実施されたものである。ここに付記し、深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 湯北記代彦, 橋本伸一郎, 橋本親典, 渡辺健: 簡易凍結融解試験装置による表面緻密性の評価, コンクリート年次論文集 Vol.29, No.1, pp897-902, 2007
- 2) 弓場上有紗, 橋本親典, 渡辺健, 石丸啓輔: 再生骨材コンクリートによる JIS の凍結融解試験(A 法)と液体窒素を用いた簡易凍結融解試験方法の比較, コンクリート工学年次論文集, Vol33, No.1, pp941-946, 2011
- 3) 綾野克紀, 藤井隆史: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に関する検討, 土木学会論文集, Vol70, No.4, pp412-427, 2014