

論文 コンクリート供試体の形状および一次共鳴振動数の測定方法の違いが凍結融解抵抗性の評価結果に及ぼす影響

浅津 春花^{*1}・新井 みのり^{*2}・大塚 桃菜^{*2}・緒方 英彦^{*3}

要旨：本論文では凍結融解試験において供試体の形状と一次共鳴振動数の測定方法が相対動弾性係数に与える影響を明らかにするため、配合の異なる二つのコンクリートで作製した角柱・円柱供試体を用い、たわみ振動と縦振動の一次共鳴振動数による相対動弾性係数を比較した。その結果、高炉セメント B 種を使用した凍結融解抵抗性の低いコンクリートの円柱供試体は角柱供試体より少ないサイクル数で相対動弾性係数が低下した。また、たわみ振動と縦振動から算出した相対動弾性係数は強い正の相関が認められ、一次共鳴振動数の測定方法は相対動弾性係数の算出に影響を及ぼさないことが確認された。

キーワード：凍結融解試験, 相対動弾性係数, 角柱供試体, 円柱供試体, たわみ振動, 縦振動

1. はじめに

コンクリートの凍結融解抵抗性を試験する方法として、我が国では JIS A 1148:2010(コンクリートの凍結融解試験方法)が用いられている。この試験方法は、供試体として 10×10×40cm の角柱供試体を用いることになっている。また、相対動弾性係数は JIS A 1127:2010(共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法)に規定されているたわみ振動による一次共鳴振動数から求めることになっている。JIS A 1127 では、角柱供試体における一次共鳴振動数の測定だけでなく、円柱供試体における一次共鳴振動数の測定についても規定しているが、JIS A 1148 は円柱供試体における試験方法を規定していない。既往の研究では、円柱供試体と角柱供試体の形状の違いによる動弾性係数の明確な差異はないとの報告¹⁾がある。ただし、この結果は凍結融解による劣化を伴わないコンクリートにおける動弾性係数について検証したものである。また、長谷川・洪はコンクリート供試体の寸法が小さいほど凍結融解抵抗性が低くなることを報告²⁾している。中村・濱はコンクリート供試体の形状、寸法によって供試体の中心温度履歴が異なることが凍結融解による劣化に影響を与える可能性を指摘³⁾している。このように、形状の違いが凍結融解作用を受けたコンクリートの相対動弾性係数に与える影響について、検討されている事例はあるが、十分な検討がなされていない現状にある。一方、JIS A 1127 にはたわみ振動だけでなく縦振動による一次共鳴振動数の測定方法が規定されているが、JIS A 1148 の相対動弾性係数はたわみ振動に限られている。しかしながら、一次共鳴振動数の測定方法が形状の異なる供試体の凍結融解抵抗性の評価に及ぼす影響について十分な検討がなされ

ていない。

本研究では、供試体の形状および相対動弾性係数の算出に用いる一次共鳴振動数の測定方法に着目し、配合の異なる二つのコンクリートで作製した角柱供試体および円柱供試体を用いて凍結融解試験 A 法(水中凍結融解試験)を実施した。たわみ振動の一次共鳴振動数と縦振動の一次共鳴振動数を測定し、それぞれの測定値から相対動弾性係数を算出することで、供試体の形状および一次共鳴振動数の測定方法が凍結融解抵抗性の評価に与える影響について考察を行った。

2. 凍結融解試験

2.1 使用材料および配合

本論文では、呼び強度 27N/mm² の普通強度のコンクリート供試体（以下、普通強度供試体）と、呼び強度 50N/mm² の高強度のコンクリート供試体（以下、高強度供試体）で凍結融解試験を行った。その配合を表-1 に、配合条件およびフレッシュ性状について表-2 に示す。普通強度供試体は、セメントに高炉セメント B 種(密度 3.04g/cm³)、水セメント比 53.5%、混和材は膨張材として石灰系膨張材（標準添加量 20kg/m³, メーカー仕様）、細骨材(1)は陸砂(表乾密度 2.58g/cm³, 粗粒率 2.00)、細骨材(2)は砕砂(絶乾密度 2.52g/cm³, 吸水率 2.49%, 粗粒率 3.33)、粗骨材は碎石 2005(絶乾密度 2.68g/cm³, 吸水率 1.04%, 実積率 60.2)、混和剤は AE 減水剤としてリグニンスルホン酸系化合物を使用した。高強度供試体は、セメントに普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³)、水セメント比 31.4%、混和材は膨張材としてエトリンサイト系膨張材（標準添加量 30kg/m³, メーカー仕様）、細骨材は砕砂(絶乾密度 2.59g/cm³, 吸水率 1.23%, 実積率 65.3)、粗骨材は

*1 鳥取大学 農学部生命環境農学科 (学生会員)

*2 鳥取大学 農学部生命環境農学科

*3 鳥取大学 農学部生命環境農学科教授 博士(農学) (正会員)

表-1 配合

配合表(kg/m ³)								
	セメント	混和材	水	細骨材(1)	細骨材(2)	粗骨材	混和剤(1)	混和剤(2)
普通強度供試体	288	20	154	570	243	1,037	2.88	
高強度供試体	525	25	165	741		886	5.12	0.157

表-2 配合条件およびフレッシュコンクリートの性状

種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	呼び強度 (N/mm ²)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	フレッシュ性状	
					スランプ又は スランプフロー (cm)	空気量 (%)
普通強度供試体	20	27	53.5	45.1	12	4.0
高強度供試体	20	50	31.4	46.0	50	4.5

表-3 供試体の諸情報

名称	形状	本数	試験開始材齢	養生条件
NS	角柱	3	28 日	材齢 7 日まで 10℃で保温しながらシート養生, 以降材齢 28 日まで封緘養生
NC	円柱	3	28 日	
HS	角柱	3	28 日	材齢 14 日までシート養生, 28 日まで封緘養生
HC	円柱	3	28 日	

碎石 2005(絶乾密度 2.62g/cm³, 吸水率 0.99%, 実積率 59.4), 混和剤(1)は高性能減水剤としてポリカルボン酸エーテル系化合物, 混和剤(2)は AE 剤として変性ロジン酸化合物系陰イオン活性剤を使用した。

フレッシュコンクリートのスランプおよびスランプフローは, 普通強度供試体において 12cm, 高強度供試体において 50cm であった。空気量は普通強度供試体において 4.0%, 高強度供試体において 4.5%であった。

2.2 供試体

試験に使用した供試体の名称, 形状, 本数, 凍結融解試験開始材齢および養生条件を表-3 に示す。表中の NS(Normal Square specimen)および NC(Normal Circle specimen)は普通強度供試体の角柱供試体および円柱供試体を表し, HS(High strength Square specimen)および HC(High strength Circle specimen)は高強度供試体の角柱供試体および円柱供試体を表す。角柱供試体の寸法は規定の 10×10×40cm, 円柱供試体の寸法は規定の φ10×20cm である。供試体は配合ごとに円柱供試体を 3 体, 角柱供試体を 3 体作製した。

養生方法は, 普通強度供試体では打設後材齢 7 日まで室内温度を 10℃に保った状態でシート養生を行い, 以降は 20℃に保った室内で材齢 28 日まで封緘養生を行った。高強度供試体では, 室外で打設後材齢 14 日までシート養生を行い, 以降は 20℃に保った室内で材齢 28 日まで



図-1 凍結融解試験槽

封緘養生を行った。すべての供試体は材齢 28 日で凍結融解試験を行った。

それぞれの配合のコンクリートにおける標準水中養生 (20±1℃の水中) の圧縮強度は, 普通強度供試体において材齢 7 日で 25.5N/mm², 材齢 28 日で 37.9N/mm² であった。高強度供試体においては材齢 28 日で 76.7N/mm², 材齢 49 日で 81.1N/mm² であった。

2.3 凍結融解試験

(1) 試験方法と供試体容器

図-1 に, 凍結融解試験槽と使用した供試体容器を示す。角柱供試体の供試体容器は JIS A 1148 で示されてい

表-4 試験終了時における供試体表面

	打設面	底面	側面(1)	側面(2)
NS (150)				
NC (80)				
HS (300)				
HC (300)				

るものと同寸法のものを用いた。円柱供試体の供試体容器においては、角柱供試体と同様に供試体表面において約 3mm の水膜が保持できるように設計したゴム製の供試体容器を作製し使用した。

(2) 測定項目

測定項目は質量変化率および相対動弾性係数とした。質量変化率は式(1)によって算出した。

$$W_n = \frac{w_n - w_0}{w_0} \times 100 \quad (1)$$

ただし、 W_n は凍結融解 n サイクル時の質量変化率(%), w_n は凍結融解 n サイクル時の供試体の質量(g), w_0 は凍結融解 0 サイクル時の供試体の質量(g)である。

相対動弾性係数は、たわみ振動の一次共鳴振動数および縦振動の一次共鳴振動数を用い、式(2)より算出した。ただし、縦振動の一次共鳴振動数は円柱供試体へのみ測定を行った。

$$RE_D = (f_n^2 / f_0^2) \times 100 \quad (2)$$

ここに、 RE_D は凍結融解 n サイクル時のコンクリート供試体の相対動弾性係数(%), f_0 は凍結融解 0 サイクル時のコンクリート供試体の一次共鳴振動数(Hz), f_n は凍結融解 n サイクル時のコンクリート供試体の一次共鳴振動数(Hz)である。

(3) 測定サイクルと凍結融解温度

試験の測定サイクルは JISA 1148 に準拠し、36 サイクルを超えない範囲で 10~30 サイクルの間隔を空けた。特に NS, NC は劣化が急激に起こった際にも質量および一次共鳴振動数のデータを取得するため、HS, HC より

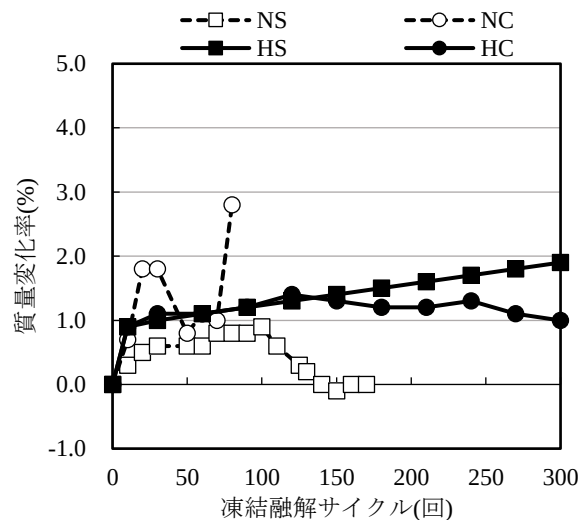


図-2 質量変化率

も測定間隔を密にした。

凍結融解温度は、角柱供試体の中心温度を用いて管理した。供試体の中心温度は凍結時 5℃, 融解時-18℃とした。

3. 試験結果と考察

3.1 養生が凍結融解抵抗性に及ぼす影響

(1) 質量変化率

表-4 に、試験終了時における各供試体の画像を示す。表中に示しているのは、3 体ずつ試験を行ったもののうち 1 体のみである。供試体の画像は一体につき 4 枚撮影し、それぞれ打設面、底面、2 方向からの側面(側面(1), 側面(2))とした。供試体名称の下に括弧書きで示している

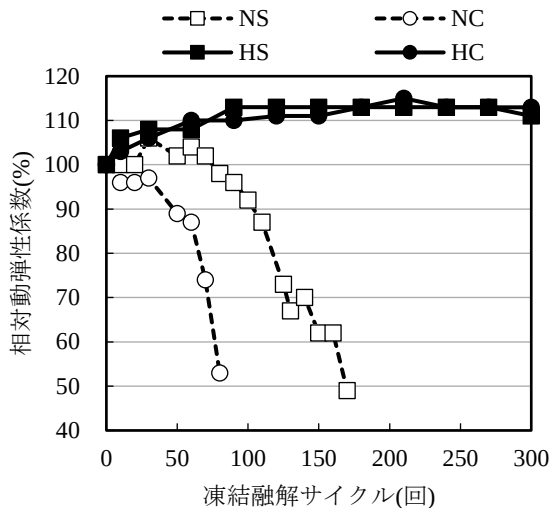


図-3 たわみ振動の相対動弾性係数

数値は試験終了サイクルである。ただし、NSにおいては、試験終了サイクルは170サイクルであるが、表中においてはその前の150サイクルの画像を示す。

図-2 に凍結融解サイクルと質量変化率の関係を示す。NCでは、概ね増加の傾向が見られたが、質量変化率は著しく増減した。NSでは100サイクルまで増加し、以降最大0.1%まで低下した。高強度供試体であるHS、HCにおいては増加する傾向であった。すべての供試体の質量変化率は、特に凍結融解試験の初期において急激に増加する傾向が見られた。すべての供試体で質量変化率が増加する傾向が見られた理由として、供試体の養生が考えられる。本論文においてすべての供試体はシート養生と封緘養生を行っているため、供試体は凍結融解試験の直前まで飽水状態にはなかった。そのため、凍結融解試験によって供試体に水分が供給され、供試体の吸水により質量変化率が増加したと考えられる。また、NSの質量変化率が100サイクル以降減少した理由は、スケーリングの進行によるものと考えられる。封緘養生を行ったコンクリート供試体において、高炉セメントは普通ポルトランドセメントより凍結融解試験におけるスケーリング量が多いとの報告⁴⁾⁵⁾がある。また、一般的に角柱供試体では隅角部においてスケーリングが顕著に現れることが知られている⁶⁾。本論文では高強度供試体と普通強度供試体で水セメント比および空気量が異なるため一律に比較することはできないが、高炉セメントを使用した普通強度供試体における質量変化率は、供試体の吸水による質量増加とスケーリングの促進による質量減少も関係し、高強度供試体の質量変化率と異なった推移になると考えられる。

(2) 相対動弾性係数

図-3 に、各供試体のたわみ振動の一次共鳴振動数に

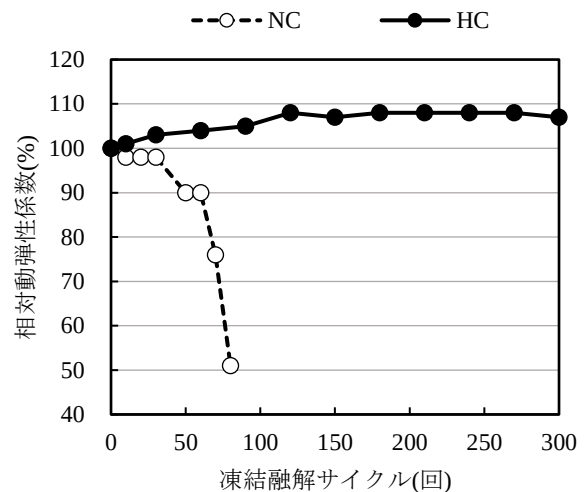


図-4 縦振動の相対動弾性係数

よる相対動弾性係数を示す。普通強度供試体の試験終了サイクルはNSで170サイクル、NCで80サイクルであった。このように、普通強度供試体の凍結融解抵抗性は高強度供試体と比較して低くなった。寒冷地で供用されるコンクリートにおいて、水セメント比と空気量は凍結融解抵抗性を確保するために適切な値に設定される必要がある。水セメント比と空気量について、普通強度供試体は水セメント比53.5%、空気量4.0%であるのに対し、高強度供試体の水セメント比31.4%、空気量4.5%である。寒冷地において、気象条件が激しく水で飽和される環境下におけるAEコンクリートは、断面が薄い場合において55%以下の水セメント比を選定する必要がある⁷⁾が、普通強度供試体の水セメント比は55%以下に設定されていた。また、フレッシュ時の空気量は4.0%と、 $4.5 \pm 1.5\%$ の範囲内であったため、凍結融解抵抗性を確保するのに十分な空気量⁸⁾であった。そのため、普通強度コンクリートは数値上から十分な凍結融解抵抗性を確保できていると考えられる。

普通強度供試体は凍結融解抵抗性を確保されていたと考えられるにもかかわらずNS、NCの試験終了サイクルが300未満になった理由として、供試体の養生方法による可能性がある。凍結融解試験開始時に供試体が飽水状態にない場合、凍結融解試験の初期段階において供試体容器で保持している水膜から供試体が水分を吸水しやすくなり、前記の質量変化率の考察で述べているように、含水量が増加する。そのため、凍結膨張圧が大きく働き、凍結融解作用による劣化がより進行しやすくなると考えられる。既往の研究によると、比較的水セメント比が大きく、かつ初期の湿潤養生が不十分である場合において、高炉セメントを使用したコンクリートの試験終了サイクルは空気量が4.5%確保されていても300サイクルを下

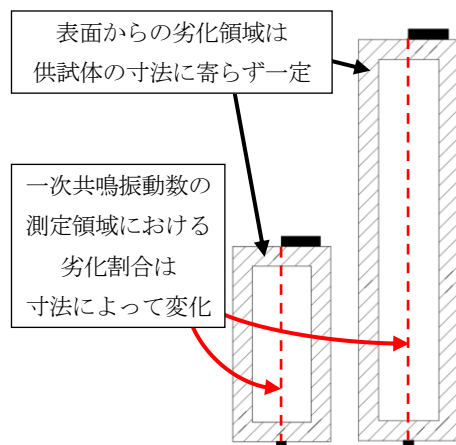


図-5 供試体の寸法によって異なる劣化割合
(左：円柱供試体 右：角柱供試体)

回る結果⁴⁾が報告されている。このことから、本論文において普通強度供試体の凍結融解抵抗性が著しく低下した原因は養生条件による影響が大きいと考えられる。また、硬化後の空気量や気泡間隔係数の影響も考えられるため、今後検討する必要がある。

3.2 供試体の形状が相対動弾性係数の算出に及ぼす影響

円柱供試体における縦振動の一次共鳴振動数による相対動弾性係数を図-4に示す。図-3および図-4において、普通強度供試体であるNSとNCの相対動弾性係数は両者とも凍結融解サイクルの増加とともに低下し、NSの相対動弾性係数は170サイクル、NCの相対動弾性係数は80サイクルで60%以下となり、両者ともに試験終了サイクルは300サイクル未満となった。一方、高強度供試体であるHSとHCの相対動弾性係数は、試験終了まで低下しなかった。また、高強度供試体の相対動弾性係数は角柱供試体と円柱供試体で同様の傾向を示した。したがって、凍結融解作用による供試体の劣化がほとんど見られないHSとHCの角柱供試体と円柱供試体の相対動弾性係数は、同様の傾向を示すことが明らかになった。加えて、NSとNCの角柱供試体と円柱供試体の相対動弾性係数は、同様の傾向で低下するものの、円柱供試体の方がより少ないサイクル数で低下し、試験終了サイクルも円柱供試体の方が小さいことが分かった。

NCの相対動弾性係数がNSより少ないサイクル数で低下する原因は、第一に形状そのものが供試体温度に影響を及ぼす可能性が考えられる。本論文では角柱供試体と円柱供試体を同一の凍結融解試験槽に入れて試験を行った。その際、凍結融解温度の管理は角柱供試体で行ったため、角柱供試体と円柱供試体で中心温度および凍結速度が異なる可能性がある。また、供試体の形状の違いから、凍結融解時における供試体の温度分布も異なると

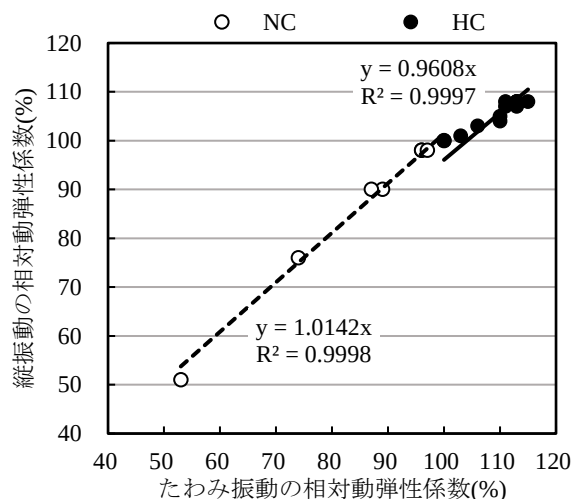


図-6 たわみ振動と縦振動から算出した
相対動弾性係数の相関

考えられる。既往の研究では、最低温度、凍結速度は凍結融解作用に影響を与えることが明らかになっており⁹⁾、供試体形状によって凍結融解作用による劣化の程度が異なる可能性が示唆される。また、同様の研究を行った中村・濱も同様の可能性を指摘³⁾している。供試体形状による温度の変化から考察を行うには、温度解析を行うなどの検討が必要であり、今後の課題である。

第二に、供試体形状によって一次共鳴振動数の測定距離が異なることが影響を与えている可能性がある。本論文では、角柱供試体および円柱供試体は規定の寸法であり、角柱供試体の長さは40cm、円柱供試体の長さは20cmと長さが2倍異なる。そのため、たわみ振動および縦振動の一次共鳴振動数を測定する領域の大きさも異なる（図-5）。したがって、供試体の形状にかかわらず供試体表面からの劣化程度が同じであっても供試体の寸法が異なるために測定領域内での劣化割合に差異が生じる。すなわち、円柱供試体の方がより少ないサイクル数で相対動弾性係数が低下するのは供試体の形状によって劣化の程度が異なるからではなく、一次共鳴振動数の測定領域における劣化部の割合が異なることが一次共鳴振動数の測定値に影響を及ぼすことが原因だと推察される。

3.3 一次共鳴振動数の測定方法が相対動弾性係数の算出に及ぼす影響

NCとHCについて、たわみ振動の一次共鳴振動数から算出した相対動弾性係数と縦振動の一次共鳴振動数から算出した相対動弾性係数の散布図を図-6に示す。近似曲線および決定係数から、HC、NCにおいてたわみ振動と縦振動で相対動弾性係数は強い正の相関が認められ、一次共鳴振動数の測定方法は相対動弾性係数にほぼ影響を与えないことが明らかになった。

一次共鳴振動数の測定について、凍結融解試験の相対

動弾性係数および耐久性指数の算出にはたわみ振動を用いるよう規定されているが、その根拠は以下の文献⁹⁾に求めることができる。樋口はたわみ振動と縦振動について、たわみ振動は表面の劣化をより鋭敏に捉えることができるため、表面からの劣化によって品質が変化する試験に適していることを示している。一方で、縦振動は供試体の軸方向における一次共鳴振動数を測定するため、供試体の品質管理を目的とする場合に適した測定方法であるとしている。このことから、たわみ振動の方が凍結融解試験における相対動弾性係数の算出に適していると考えられる。しかしながら、たわみ振動での測定は偽共鳴¹⁰⁾(供試体の一次共鳴振動数とは無関係の波形のピーク)を起こしやすく¹¹⁾、本論文の試験においても角柱供試体、円柱供試体ともに頻繁に確認できた。加えて、偽共鳴は劣化の進行が著しいNSやNCで特に確認された。そのため、凍結融解抵抗性の高いコンクリート供試体における一次共鳴振動数の測定には、感受性の高いたわみ振動を用いることが適しているが、凍結融解抵抗性の低いコンクリート供試体における一次共鳴振動数の測定には縦振動を用いるか、たわみ振動と縦振動の測定を両方行い偽共鳴の判別をすることが望ましいと考えられる。

4. まとめ

本論文によって得られた知見を以下に示す。

- 1) フレッシュ時に空気量が確保されている場合でも凍結融解試験開始までの養生次第では、凍結融解抵抗性が低下することがあることが再確認された。
- 2) 凍結融解抵抗性の高いコンクリート供試体では、角柱供試体と円柱供試体で相対動弾性係数への影響はほとんど見られないことが再確認された。
- 3) 高炉セメント B 種を使用した凍結融解抵抗性の低いコンクリートでは、円柱供試体の相対動弾性係数は角柱供試体より小さいサイクル数で低下したことが再確認された。
- 4) 相対動弾性係数は、たわみ振動と縦振動で強い正の相関が認められた。このことから一次共鳴振動数の測定方法は、凍結融解抵抗性の評価において相対動弾性係数に影響を与えないことが示唆された。

謝辞：本論文をとりまとめるにあたり、地独)北海道立総合研究機構建築研究本部北方建築総合研究所の谷口円氏にはご助言をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 樋口芳朗：コンクリートの動弾性係数の利用方法，土木学会誌，Vol.43，No.7，pp.19-24，1958.7
- 2) 長谷川寿夫，洪悦郎：コンクリートの凍結融解試験方法の確立に関する研究：その 2，供試体の太さ，容器の材質，水中凍融方式による影響，日本建築学会北海道支部研究報告集，Vol.50，pp.163-166，1979.3
- 3) 中村暢，濱幸雄：モルタル・コンクリートの凍結融解試験結果に及ぼす試験体寸法・形状の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)，Vol.2013，pp.643-644，2013.8
- 4) 湯浅昇，笠井芳夫，松井勇，鎌田英治：若材齢から乾燥を受けたコンクリートの耐凍結融解性，日本建築学会構造系論文集，Vol.64，No.526，pp.9-16，1999.12
- 5) 檀康弘，伊代田岳史，兼安真司，植木康知：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの凍害および凍結防止剤に対する劣化抵抗性，土木学会論文集 E，Vol.65，No.3，pp.291-299，2009.7
- 6) 加藤直樹，加藤清志，河合紘茲：促進形凍結融解試験法の開発に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.1075-1080，1999.6
- 7) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，土木学会，pp.165-167，2018.3
- 8) JIS A 5308：2019，レディーミクストコンクリート
- 9) 草間祥吾，田口史雄，林田宏，遠藤裕丈：コンクリート構造物の凍害劣化要因の検討，換地土木研究所月報，No.659，pp.27-31，2008.4
- 10) JIS A 1127：2010，共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数，動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法
- 11) 國分正胤：土木材料実験，技報堂，p.388，1969