

論文 乾湿繰返しが混和材を使用したコンクリートの細孔構造と凍結融解抵抗性に及ぼす影響に関する検討

宮菌 雅裕^{*1}・岸 利治^{*2}

要旨: 早強ポルトランドセメントに混和材としてシリカフェームもしくは高炉スラグ微粉末を併用したコンクリートについて、乾湿繰返しが細孔構造と凍結融解抵抗性に及ぼす影響を検討した。早強ポルトランドセメントのみを使用した供試体に乾湿繰返しを与えた場合、毛細管空隙中の連続性の高い空隙量(連続空隙量)が増加し、凍結融解試験による供試体の質量減少を確認した。一方、混和材として高炉スラグ微粉末を併用した供試体の細孔構造および供試体質量の変化は、早強ポルトランドセメントのみを使用した供試体よりも少なく、シリカフェームを併用した供試体の細孔構造および供試体質量の変化は僅かであることを確認した。

キーワード: 乾湿繰返し, 細孔構造, 凍結融解抵抗性, シリカフェーム, 高炉スラグ微粉末

1. はじめに

コンクリートの凍結融解抵抗性は、一般的に JIS A 1148 によって得られる耐久性指数や質量減少率、長さ増加比で評価される。これは、標準養生を施した供試体について、凍結及び融解の急速な繰返しを与え、供試体の相対動弾性係数や質量、長さ変化率を測定する試験である。既往の研究では、標準養生を施した供試体において高い耐久性指数を示した配合にも拘わらず、実際の構造物が置かれる実環境に曝された場合、相対動弾性係数が低下したり、スケーリングが発生する例が報告されている¹⁾。実構造物に凍害劣化を与える外的・内的要因としては凍結融解回数、最低温度、海水の作用、凍結防止剤、日射条件、水分量、乾燥条件等が指摘されている²⁾。

筆者らは、結合材に早強ポルトランドセメントを使用したセメント硬化体に、乾湿繰返しを与えた場合、脱水や吸水によって生じる水分の移動によってインクボトル空隙のボトルネック部が開口し連続空隙割合が増加すること、乾湿繰返しを受ける前は凍結融解抵抗性を有するコンクリートであっても、乾湿繰返しを与えることによって、連続空隙割合が増加するため、供試体表層部からの吸水量が増加し、凍結融解試験による質量減少が増大することを確認している³⁾。

本研究では、混和材の使用が乾湿繰返しによる細孔構造と凍結融解抵抗性に及ぼす影響の評価を目的とした。つまり、早強ポルトランドセメントに混和材としてシリカフェームもしくは高炉スラグ微粉末を用いた供試体に乾湿繰返しを与えた。そして、細孔構造として、毛細管空隙中の連続空隙量とインクボトル空隙量の変化を確認した。さらに、乾湿繰返しによる細孔構造の変化が凍結

融解抵抗性に及ぼす影響を確認した。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び配合

(1) モルタル

乾湿繰返しが細孔構造に及ぼす影響についてモルタル供試体で検討した。使用材料を表-1に示す。混和材

表-1 使用材料

材料	概要
水	上水道水
セメント	早強ポルトランドセメント(密度:3.13g/cm ³)
混和材	シリカフェーム(密度:2.25g/cm ³) 高炉スラグ微粉末(密度:3.04g/cm ³)
細骨材	山砂(表乾密度:2.57g/cm ³ , 吸水率:2.27%)
粗骨材	砕石(表乾密度:2.65g/cm ³ , 吸水率:0.64%, 最大寸法:20mm)
混和剤	AE減水剤(リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体) 高性能AE減水剤(ポリカルボン酸コポリマー)

表-2 モルタルおよびコンクリートの配合

モルタル 供試体	単位量(kg/m ³)				
	W	HC	BFS	SF	S
HC	308	560	-	-	1120
HC+SF	308	448	-	112	1120
HC+BFS	308	280	280	-	1120

コンクリート 供試体	単位量(kg/m ³)						
	W	HC	BFS	SF	S	G	AD
HC	168	305	-	-	797	1005	3.360
HC+SF	168	244	-	61	788	994	3.055
HC+BFS	168	153	153	-	796	1003	3.360

*1 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 修(工)(正会員)

*2 東京大学生産技術研究所 教授 博(工学)(正会員)

表-3 養生方法

試験水準	検討項目	前養生	養生方法
乾湿×0	細孔径分布 (モルタル)	40℃水中 14日	
乾湿×1		40℃水中 14日	40℃乾 3日 → 40℃湿 1日
乾湿×4		40℃水中 14日	40℃乾 3日 → 40℃湿 1日 → 40℃乾 2日 → 40℃湿 1日 → 40℃乾 3日 → 40℃湿 1日 → 40℃乾 2日 → 40℃湿 1日
乾湿×6		40℃水中 14日	40℃乾 3日 → 40℃湿 1日 → 40℃乾 2日 → 40℃湿 1日 → 40℃乾 3日 → 40℃湿 1日 → 40℃乾 2日 → 40℃湿 1日 → 40℃乾 3日 → 40℃湿 1日 → 40℃乾 2日 → 40℃湿 1日
水中浸漬	吸水量	40℃水中 14日	40℃湿 21日
促進乾燥		40℃水中 14日	40℃乾 21日
乾湿×6	凍結融解 抵抗性 (コンクリート)	40℃水中 14日	40℃乾 3日 → 40℃湿 1日 → 40℃乾 2日 → 40℃湿 1日 → 40℃乾 3日 → 40℃湿 1日 → 40℃乾 2日 → 40℃湿 1日 → 40℃乾 3日 → 40℃湿 1日 → 40℃乾 2日 → 40℃湿 1日

としてシリカフェーム、もしくは高炉スラグ微粉末を使用した。それは、セメントの水和反応の生成物である水酸化カルシウムと反応させて、安定なケイ酸カルシウム水和物を生成させることで、硬化体の組成を変化させることを意図した。配合は表-2 に示すように、W/B=55%、S/B=2 とした。供試体には、乾湿繰返しを与える際に水と反応によって細孔構造が変化する影響を排除するため、40℃の水中で前養生を施しており、試験の起点は表-3 に示すように材齢 14 日とした。

(2) コンクリート

乾湿繰返しが凍結融解抵抗性に及ぼす影響についてコンクリート供試体で検討した。配合は、W/B=55%、s/a=45%であり、混和材をモルタルと同様の置換率で使用した。目標スランブは12±2.5 cm、目標空気量は凍結融解抵抗性を持たせるために4.5~6.0%とした。

2.2 実験水準

(1) モルタル

実験水準は、配合と乾湿繰返し回数である。配合は、表-2 に示すように、結合材として早強ポルトランドセメント 100%使用、結合材質量の 20%をシリカフェームで置換、結合材質量の 50%を高炉スラグ微粉末で置換の 3 水準とした。乾湿繰返しの条件は、乾燥工程を相対湿度 23±5%、温度 40℃の恒温恒湿槽に静置、湿潤行程を 40℃の水酸化カルシウム飽和溶液中に浸漬として、表-3 に示す乾湿繰返しのサイクルを与えた。湿潤工程において、試料を水酸化カルシウム飽和溶液に浸漬させたのは、試料からのカルシウムイオンの溶脱による細孔構造の粗大化を回避するためである。乾湿繰返しの回数は0, 1, 4, 6 回の 4 水準とし、乾湿繰返しを与えた後に細孔構造を評価した。

(2) コンクリート

実験水準は、配合と養生方法である。配合は表-2 に

示すように混和材の置換率をモルタル供試体と同様とした 3 水準である。養生方法は、水中養生を 35 日間施したケース、水中養生 14 日後に 21 日間の促進乾燥を与えたケース、水中養生 14 日後に乾湿繰返しを 6 回与えたケースの 3 水準について凍結融解試験を実施した。

2.3 実験方法

(1) 細孔径分布測定

表-3 に示す乾湿繰返しを与えた供試体の細孔構造を水銀圧入法により評価した。アセトン置換による水和停止と D-dry 乾燥を実施した試料について、水銀圧入ポロシメータにより細孔径分布を測定した。供試体の形状は、寸法Φ50×100mmのモルタル 供試体の上下約 1 cm を除き、コンクリートカッターで 5mm 角に整形したものとした。

測定方法は、水銀の圧入・排出を段階的に繰返し実施する方法を用いた。繰返し測定を実施することで、試料の総空隙量や、試料の表層から中心部へ繋がる連続空隙とインクボトル空隙を分離して抽出することが可能となる⁴⁾。本検討では、圧入原点を 3000nm とし、測定範囲は、圧入曲線の包絡線に乖離が認められない範囲の細孔径 10~3000nm とした。また、総空隙量、連続空隙量は細孔径 10nm における水銀圧入量とし、総空隙量と連続空隙量の差分をインクボトル空隙量とした³⁾。

(2) コンクリートの吸水量測定

乾湿繰返しによって連続空隙量が増加するため、水分移動が容易となり供試体への吸水量が増加することが考えられる³⁾。本検討では、混和材を使用した供試体の吸水量を測定することで、乾湿繰返しが細孔構造の変化に及ぼす影響を評価した。吸水量は、表-3 に示した乾湿×6 の試験水準にある供試体について、乾燥工程終了後の質量と湿潤工程終了後の質量の差とし、乾湿繰返し回数によるコンクリート供試体の吸水量の変化を評価した。

(3) コンクリートの凍結融解試験

コンクリートの凍結融解試験は、JIS A 1148 A 法（水中凍結水中融解試験方法）に準じて実施した。供試体の寸法は 100×100×400mm の角柱供試体、供試体の個数は各水準 2 体とした。表-3 に示した乾湿繰返しを与えた後に 300 サイクルの凍結融解を与えた。凍結融解の温度の管理は、供試体中心部の温度によって行い、各サイクルにおける最高温度は 5±2℃、最低温度は-18℃±2℃の範囲内、1 サイクルに要する時間は、3 時間以上 4 時間以内とした。測定項目は、たわみ振動の一次共鳴振動数と供試体の質量の測定、外観状況観察としており、材齢 14 日の水中養生終了直後に凍結融解 0 サイクルの値を測定した。

3. 実験結果

3.1 乾湿繰返しが細孔構造に及ぼす影響

HC 供試体の総空隙量とインクボトル空隙量および連続空隙量の乾湿繰返し回数による変化を図-1 に、連続空隙分布を図-2 に示す。HC 供試体の細孔構造は、乾湿繰返し回数に依り連続空隙量が増加し、インクボトル空隙量が減少した。一方、総空隙量は、乾湿繰返し回数による明確な傾向は認められない。この傾向は、既報と同様である³⁾。連続空隙分布に着目すると、乾湿繰返し回数に依り、細孔径 10~100nm 連続空隙が増加した。乾湿繰返しが細孔構造に及ぼす影響は、総空隙量を増加させるよりも、インクボトル空隙のボトルネック箇所を開口させて連続空隙を増加させる影響が大きいと考えられる。

次に、混和材を使用した供試体の細孔構造を評価する。混和材を使用した場合、硬化体の細孔構造は HC 供試体と大きく異なると考えられる。そのため、すべての供試体の空隙量を絶対値で比較するのではなく、供試体毎に乾湿繰返し回数による変化を相対的に評価する。HC+SF 供試体の総空隙量とインクボトル空隙量および連続空隙量の乾湿繰返し回数による変化を図-3 に、連続空隙分布を図-4 に示す。HC+SF 供試体の場合、着目すべきは、乾湿繰返しを与えても連続空隙量および連続空隙分布の変化が殆ど認められない点である。この原因として、シリカフェームはセメント硬化体中の水酸化カルシウムとのポズラン反応によって、CaO/SiO₂比が 1.3 程度の不溶性で安定なケイ酸カルシウム水和物を生成させる⁵⁾。このため、毛細管空隙の壁面が強固な構造となり、乾湿繰返しを与えた場合においても細孔構造の変化が小さく、連続空隙が増加しなかったと考えられる。

HC+BFS 試体の総空隙量とインクボトル空隙量および連続空隙量を図-5 に、連続空隙分布を図-6 に示す。HC+BFS 供試体の場合、乾湿繰返し回数に依り連続空隙

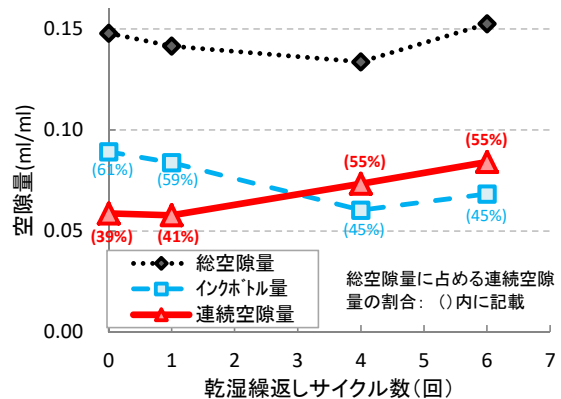


図-1 HC 供試体の細孔構造

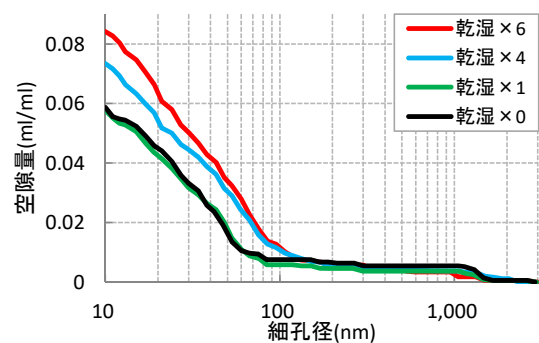


図-2 HC 供試体の連続空隙分布

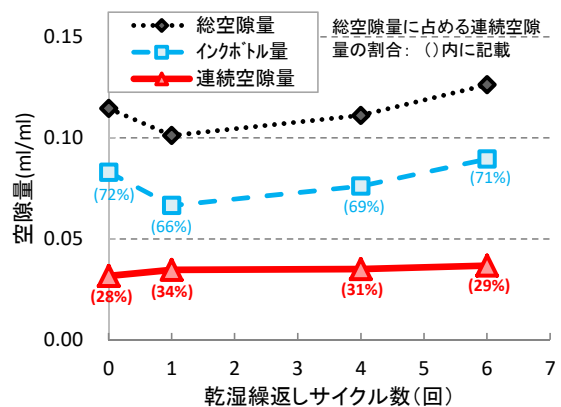


図-3 HC+SF 供試体の細孔構造

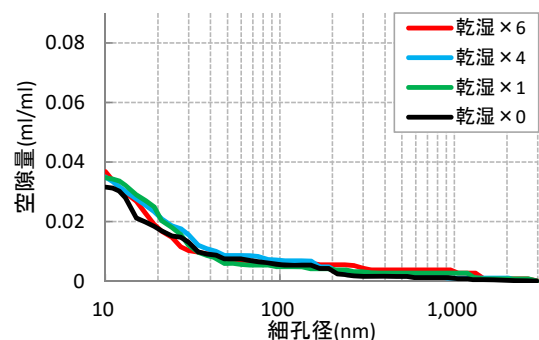


図-4 HC+SF 供試体の連続空隙分布

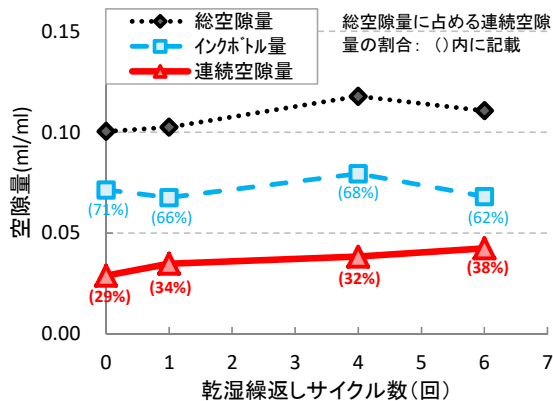


図-5 HC+BFS 供試体の細孔構造

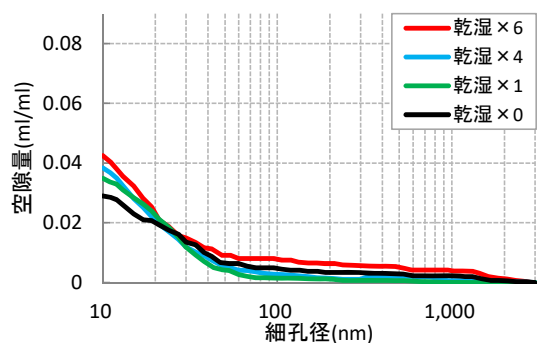


図-6 HC+BFS 供試体の連続空隙分布

量が増加する傾向にあるが、その増加量は HC 供試体ほどではない。高炉スラグ微粉末は、潜在水硬性を有するとともに、セメント硬化体中の水酸化カルシウムとも反応することで、ポルトランドセメントよりも CaO/SiO_2 比の小さいケイ酸カルシウム水和物を生成させるため⁶⁾、毛細管空隙の壁面が強固な構造となると考えられる。このため、乾湿繰返しを与えても、細孔構造の変化が抑制される傾向であったと考えられる。

乾湿繰返し回数によるコンクリートの吸水量の変化を図-7に示す。図にはそれぞれの近似直線を併記した。HC 供試体の吸水量は、近似直線の切片、傾きともに最大であった。この結果は、HC 供試体の細孔構造を図-1に示したように、連続空隙量およびその占有割合が多いことや、乾湿繰返し回数による連続空隙の増加の傾向と対応している。一方、HC+SF 供試体の吸水量は、同様に図-3に示した連続空隙量およびその占有割合が少なく、乾湿繰返し回数による変化が小さい結果と対応している。従って、HC 供試体は、乾湿繰返しによって供試体の連続空隙量が増加したことが要因で、水分の移動が容易となり供試体表層部からの吸水量が増加したが、混和材を使用した供試体の場合、連続空隙量の増加を抑制するため、吸水量の変化も小さかったと考えられる。

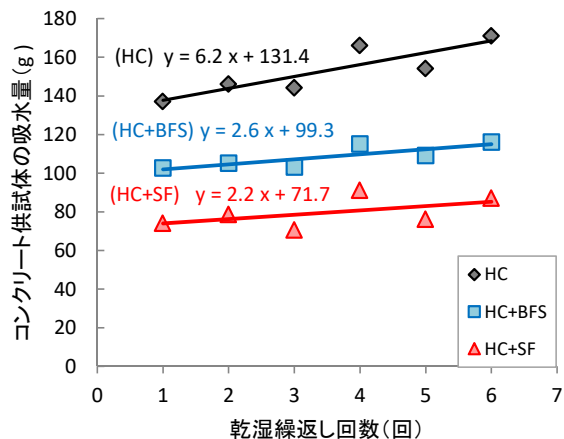


図-7 乾湿繰返し回数と吸水量の関係

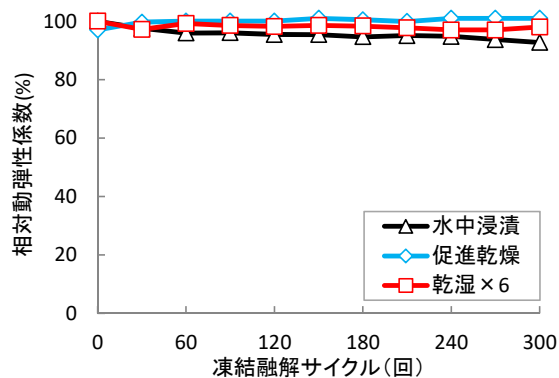


図-8 HC 供試体の相対動弾性係数

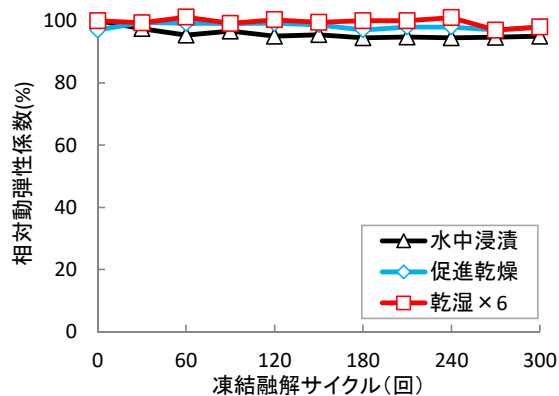


図-9 HC+SF 供試体の相対動弾性係数

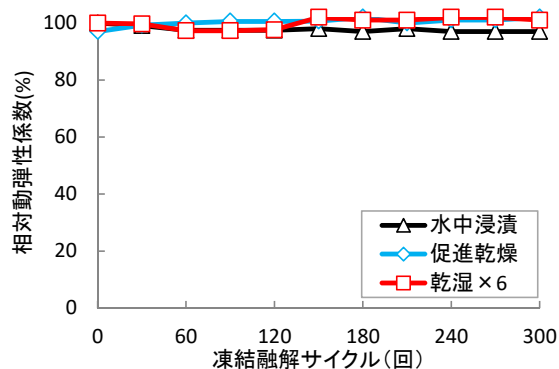


図-10 HC+BFS 供試体の相対動弾性係数

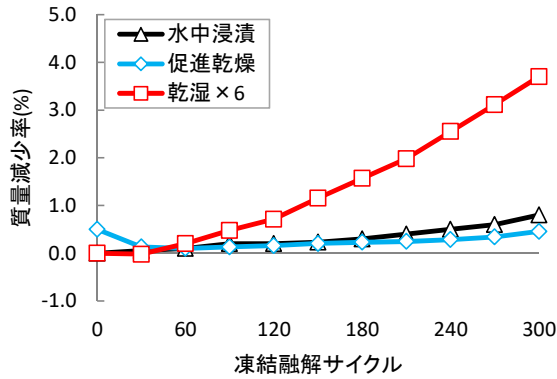


図-11 HC 供試体の質量変化率

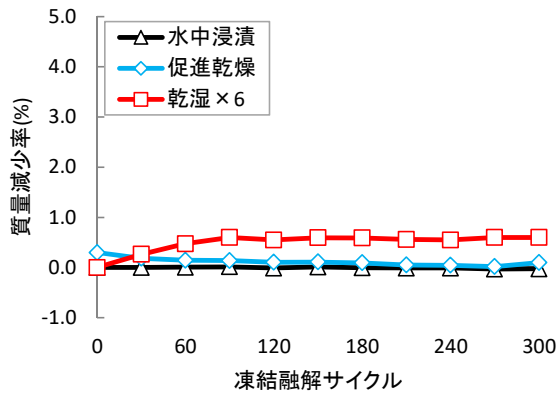


図-12 HC+SF 供試体の質量変化率

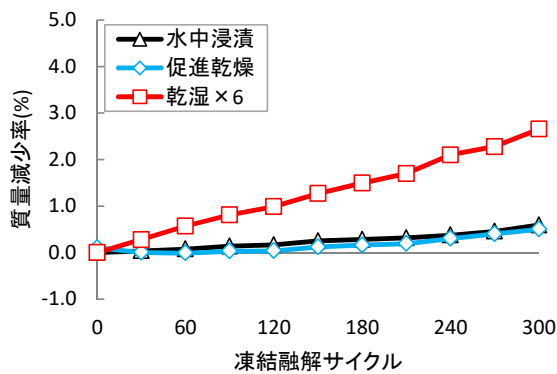


図-13 HC+BFS 供試体の質量変化率

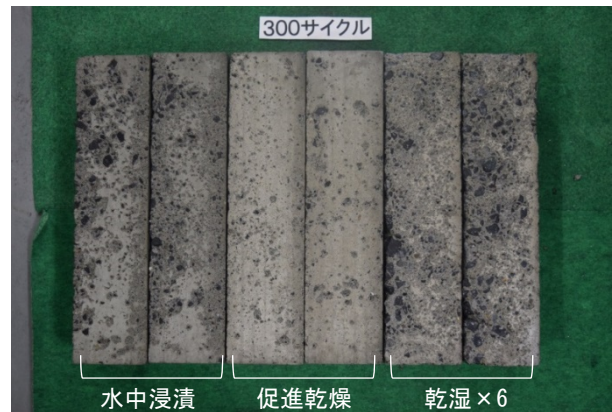


写真-1 HC 供試体

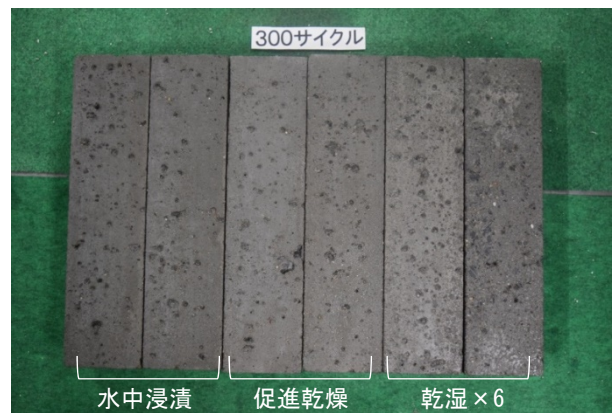


写真-2 HC+SF 供試体

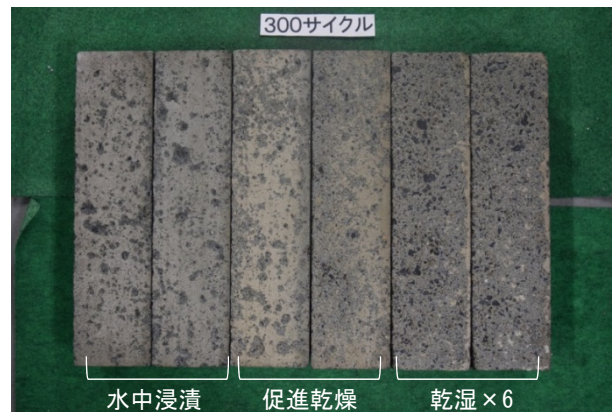


写真-3 HC+BFS 供試体

3.2 乾湿繰返しが凍結融解抵抗性に及ぼす影響

水中浸漬, 促進乾燥, 乾湿繰返しを与えた HC 供試体, HC+SF 供試体および HC+BFS 供試体について, コンクリートの凍結融解抵抗性を検討した。供試体作製に用いたコンクリートの空気量は, HC 供試体の場合 5.8%, HC+SF 供試体の場合 5.9%, HC+BFS 供試体の場合 5.5%と, 何れの供試体についても空気量は目標の上限値に近い値とした。また, 凍結融解試験開始の材齢 35 日において, 供試体を目視観察した結果, 何れの供試体についても表面ひび割れは認められなかった。

水中浸漬, 促進乾燥, 乾湿繰返しを与えたコンクリー

ト供試体の相対動弾性係数を図-8, 9, 10 に示す。すべての供試体について, 耐久性指数はすべての供試体で 90%以上であり, 養生方法や配合条件による特筆すべき差異は認められなかった。コンクリートには, 十分な量のエントレインドエアを導入したため耐久性指数で現わされるコンクリート内部の劣化は生じず, さらに, 乾湿繰返しがコンクリート内部の劣化に及ぼす影響は僅かであったと考えられる。

次に, 水中浸漬, 促進乾燥, 乾湿繰返しを与えたコン

クリート供試体の質量減少率を図-11, 12, 13に, 300サイクル終了後の外観状況を写真-1, 2, 3にそれぞれ示す。供試体の質量減少は, 養生方法, または配合条件によって顕著な差が現れた。まず, 養生方法に着目すると, 何れの配合においても乾湿×6の質量減少率が最大であった。3.1節に示したように, 乾湿繰返しによって供試体の連続空隙量が増加するため, 水分の移動が容易となったため, 供試体表層部の吸水量が増加し, 質量減少が顕著に表れたものと考えられる。配合条件に着目すると, 質量減少は, HC 供試体が最大であり, 次いで, HC+BFS 供試体, HC+SF 供試体の順であった。さらに, HC+SF 供試体に乾湿×6を与えた場合, 凍結融解 90 サイクルまでは質量が減少するが, 120 サイクル以降は横ばいとなる挙動を示した。これについて, HC+SF 供試体は, 乾湿繰返しを与えても図-3に示したように連続空隙量の変化が僅かであり, 図-7に示したように吸水量の変化が最小であったことから, 乾湿繰返しによる細孔構造の変化が他の供試体よりも狭い領域で生じたため, 質量減少が抑制されたと考えられる。

コンクリートの凍害劣化は飽水度が限界飽水度に達すると急速に進行することがよく知られている(例えば7)。本検討では, 乾湿繰返しによって連続空隙量が増加し, 特に供試体表層部の飽水度が高くなると考えられることや, 何れの試験水準においても同じ W/C であることから, 図-14に示すように吸水量と凍結融解抵抗性の関係を考察する。吸水量は図-7に示した乾湿繰返し6回目のコンクリートの吸水量としており, 凍結融解抵抗性は凍結融解 300 サイクル終了時点の質量減少量とした。図より, 吸水量の多い供試体のほうが凍結融解 300 サイクル時の質量減少量が高い傾向が認められた。この結果は, 乾湿繰返しによって吸水量の増加で現わされる細孔構造の変化と, 細孔構造が変化することによる凍結融解抵抗性の低下を関連づけるものであると考えられる。また, 混和材の使用は, 乾湿繰返しによる細孔構造の変化を抑制するため, 凍結融解試験による質量減少を抑制させる効果があると考えられる。

4. まとめ

本検討では, 早強ポルトランドセメントにシリカフェームもしくは高炉スラグ微粉末を併用した硬化体について乾湿繰返しを与えた後に, 細孔構造の変化を水銀圧入法で, 凍結融解抵抗性を JIS A 1148 (A 法) で評価した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 供試体に乾湿繰返しを与えた場合, 連続空隙量が増加し, その原因は脱水や吸水によって生じる水分の移動によってインクボトル空隙のボトルネック部

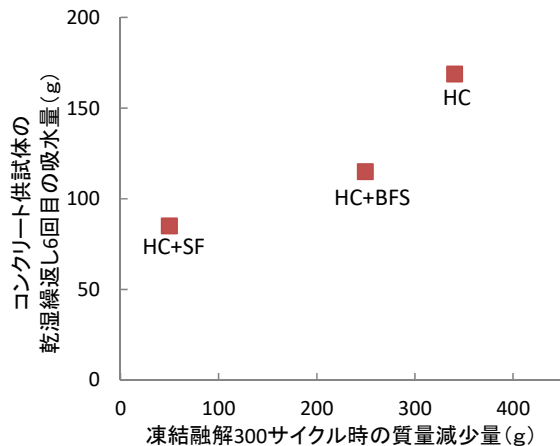


図-14 吸水量と凍結融解抵抗性の関係

が開口するためと考察したが, 混和材の使用は, 乾湿繰返しを与えた場合の連続空隙量の増加を抑制する結果を確認した。

- (2) 混和材を使用したコンクリートは, 乾湿繰返しによる連続空隙量の増加を抑制するため, 供試体表層部から吸水しにくくなり, 凍結融解試験による質量変化が抑制された。

参考文献

- 1) 田畑雅幸, 平野彰彦, 濱幸雄: 北見市に 26・27 年屋外暴露したコンクリートの耐凍害性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.635-636, 2009.8
- 2) 河野広隆, 千歩修, 田口史雄, 名和豊春, 阿波稔, 近松竜一, 片平博: コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員会, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.41-50, 2008
- 3) 宮菌雅裕, 岸利治: 乾湿繰返しがコンクリートの細孔構造と凍結融解抵抗性に及ぼす影響に関する検討, コンクリート工学年次論文集 Vol.39, No.1, pp.787-792, 2017
- 4) 吉田亮, 岸利治: 水銀の漸次繰返し圧入による空隙の連続性抽出と有効圧力範囲に関する研究, 生産研究, Vol.60, No.5, pp.516-519, 2008
- 5) C&C エンサイクロペディア, 社団法人セメント協会, pp.104-106, 1996
- 6) C&C エンサイクロペディア, 社団法人セメント協会, pp.98-100, 1996
- 7) 岡本修一, 魚本健人: コンクリートの凍結融解性状に関する基礎研究—モルタルの伸縮挙動と内部空隙の凍結状況—, 生産研究, Vol.48, No.10 pp.507-510, 1996