

論文 複数微細ひび割れを導入した HPFRCC の耐凍害性ならびに引張性能

加藤 久也^{*1}・森山 守^{*2}・林 承燦^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（HPFRCC）によりダンベル型供試体を作製し、気中と水中の2水準で養生した後、一軸引張試験によりひずみ（0.2～1.0％）を導入した。凍結融解試験後に再び一軸引張試験を行った。144 サイクルの凍結融解試験において相対動弾性係数は導入ひずみレベルの増加にともない低下したが、導入ひずみ 0.2％ならびに 0.5％供試体では 85％以上であった。凍結融解試験後に行った一軸引張試験では、導入ひずみレベルの増加にともない終局ひずみに若干の減少傾向がみられたが、ひび割れの有無に関わらず、凍結融解作用による大幅な引張性能の低下は確認されなかった。

キーワード：HPFRCC, 複数微細ひび割れ, 凍結融解試験, 耐凍害性, 引張性能

1. はじめに

複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（以下 HPFRCC）は引張応力および曲げ応力作用下において、擬似ひずみ硬化挙動や複数微細ひび割れを形成する材料である。HPFRCC は、剛性の向上や疲労耐久性の向上を目的とした複合部材への適用、ひび割れ分散性や物質透過抑制を期待したコンクリート壁面への適用が検討され、実施されている¹⁾。

HPFRCC が凍結融解作用の厳しい地域において適用される場合もあるが、複数微細ひび割れが生じた HPFRCC の耐凍害性や、凍結融解作用が HPFRCC の引張性能に及ぼす影響などについては、十分には明らかにされていない²⁾。

本研究では、気中と水中の養生期間が異なるダンベル型供試体に一軸引張試験を行い、供試体の養生条件の差異が凍結融解試験後の HPFRCC の引張性能に与える影響について検討した。ひずみを導入したダンベル型供試体に凍結融解試験を行い、ひび割れ性状の違いが質量減少率と相対動弾性係数に与える影響について

検討した。凍結融解試験終了後に再び一軸引張試験を行い、凍結融解作用が HPFRCC の引張性能に与える影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体

本研究で用いた HPFRCC の配合概要を表-1 に示す。繊維には、長さ 12mm、直径 0.04mm、のポリビニルアルコール（PVA：引張強度 1600MPa、弾性係数 400GPa、比重 1.3）と、長さ 9mm、直径 0.012mm のポリエチレン繊維（PE：引張強度 2600MPa、弾性係数 88GPa、比重 1.0）を混合して使用した。作製した供試体の寸法と種類を図-1 および表-2 に示す。供試体寸法は断面寸法を 30×30mm、検長をダンベル形状中央の 80mm の区間とするダンベル型とした。供試体は各種 4 体ずつ、ひずみを 0.2％

表-1 HPFRCC の配合概要

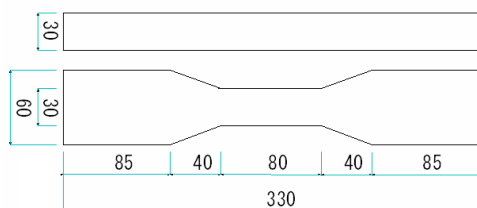
プレミックス粉体 (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	ポリマー (kg/m ³)	繊維混入率 (vol%)
1550	259	71.4	2

*1 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻（正会員）

*2 中日本高速道路株式会社 中部地区 清見工事事務所 飛騨工事長（正会員）

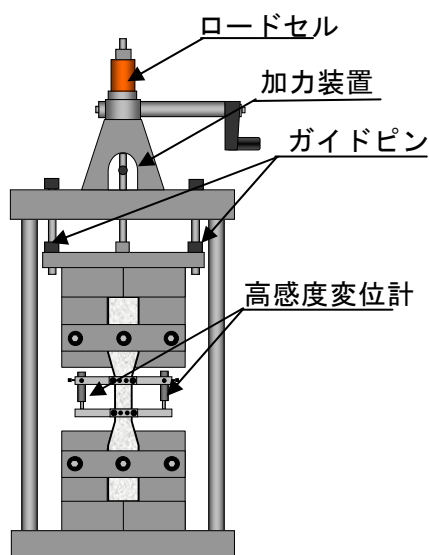
*3 (株) デーロス 材料研究室 工博（正会員）

*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 工博（正会員）



単位：mm

図－1 ダンベル型供試体



図－2 一軸引張試験装置

導入した供試体のみ3体ずつ作製した。また、凍結融解試験のJIS規格に則った供試体として100×100×400mmの角柱供試体を3体作製した。HPFRCCの物性値を表－3に示す。

2.2 一軸引張試験

本研究で用いた一軸引張試験装置を図－2に示す³⁾。加力装置（容量：4kg，手回し式）を鋼製フレーム上に置き，加力棒を介して引張载荷を行った。加力により，上側の掴み具を2本のガイドピンに沿って引き上げた。計測項目は荷重と変位とし，荷重を加力装置上部に設置したロードセル（容量：100kN）により計測した。変位は供試体の両側面に設置した2個の高感度変位計（精度：1/500）により計測した。変位より算出したひずみを戴荷時の制御に用いた。

前述のように本研究では，凍結融解試験の前後で一軸引張試験を行った。凍結融解試験前に行った一軸引張試験では，ひずみを0.2%，0.5%，1.0%まで導入した引張载荷と，破断までの引張

表－2 供試体の種類

供試体名称	一軸引張試験	凍結融解試験	一軸引張試験
	载荷条件		载荷条件
W4+A2	破壊		
W4+A2+A9			破壊
W4+A2+F9		有	破壊
W4+A2+F9+ ε	$\varepsilon = 0.2, 0.5, 1.0\%$	有	破壊
W4+W2	破壊		
W4+W2+W9			破壊
W4+W2+F9		有	破壊
W4+W2+F9+ ε	$\varepsilon = 0.2, 0.5, 1.0\%$	有	破壊

W:水中養生 A:気中養生 F:凍結融解試験
数字:期間(週) ε :導入ひずみ(%)

表－3 HPFRCCの物性値

空気量 (%)	フロー値 (cm)	圧縮強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	動弾性係数 (kN/mm ²)
7.8	49	54.1	16.6	19.7	19.3

表－4 ひび割れ性状

平均ひび割れ幅 (mm)	W4+A2+F9+ ε			W4+W2+F9+ ε		
	$\varepsilon = 0.2\%$	$\varepsilon = 0.5\%$	$\varepsilon = 1.0\%$	$\varepsilon = 0.2\%$	$\varepsilon = 0.5\%$	$\varepsilon = 1.0\%$
最大幅 (mm)	0.010	0.009	0.008	0.012	0.014	0.016
本数 (本)	0.014	0.017	0.013	0.023	0.039	0.032
	3	8	11	4	8	11

载荷とを行った。ひずみを導入した供試体では，引張载荷終了後に供試体背面の検長間に中心線を引き，その線に沿ってマイクロスコープ（倍率100倍）を移動させ，ひび割れ性状の確認を行った。ひび割れ性状を表－4に示す。

凍結融解試験後に行った一軸引張試験（以下凍結融解後一軸引張試験）では，供試体が破壊するまで引張载荷を行った。

2.3 凍結融解試験

本研究の凍結融解試験はJIS A 1148 A 法³⁾を基に行ったが，主たる供試体の形状寸法は独自のものである。ゴム製の供試体容器（100×100×400mmの角柱供試体用）1本に，ダンベル型供試体は4体（図－3），通常の角柱供試体は1体挿入した。ダンベル型供試体の場合，供試体の配置位置による凍結融解過程への影響が少ないよう，中心線を基準とした点対称な配置とした。また，写真－1に示すように，検長間に発泡スチロール製の当て物をし，コンクリート製の中心柱を挿入することで，水の凍結時の体積膨張にともなう，供試体への曲げ作用防止や水量低減を行った。温度管理は中心温度センサーを中心柱に挿入することで，凍結過程 5℃から

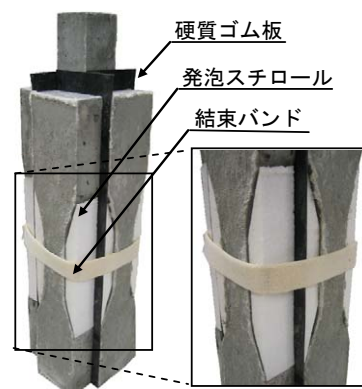
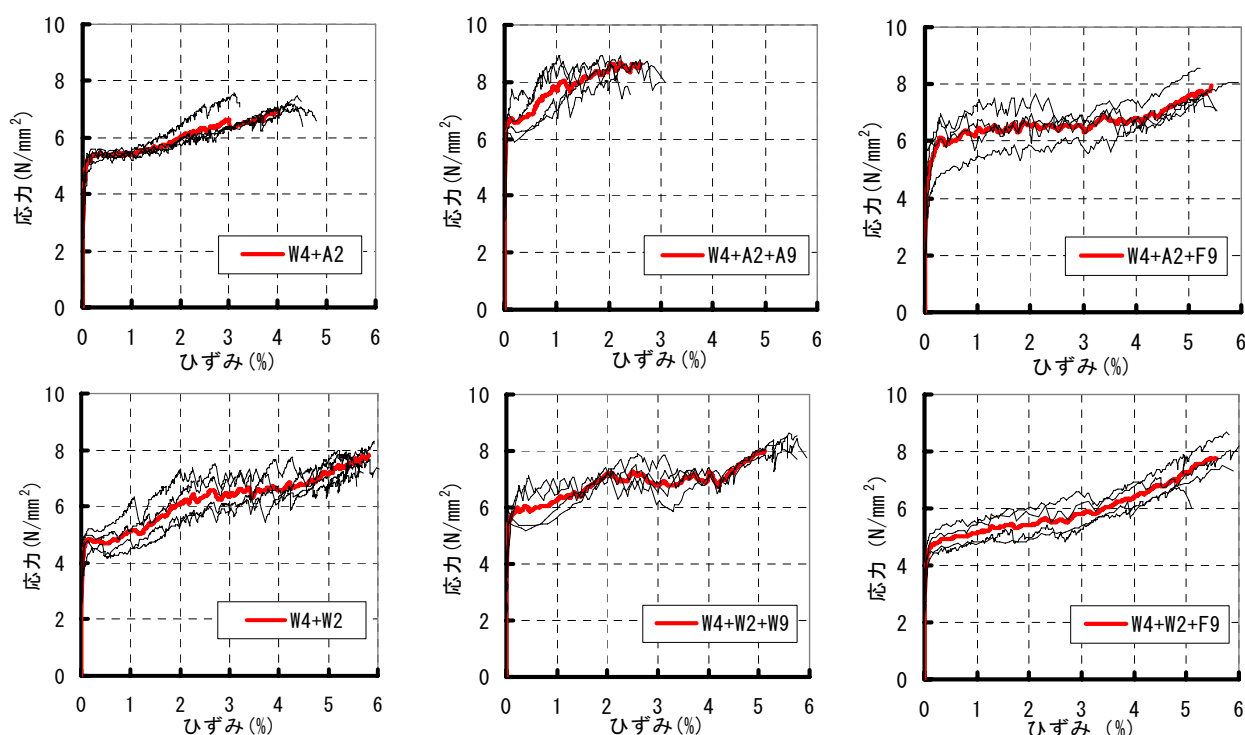


写真-1 曲げ作用防止対策



-18℃、融解過程-18℃から 5℃を合わせて 1 サイクルとし、1 サイクルは 6～7 時間とした。試験終了サイクルは 144 サイクルとした。計測項目は質量と一次共鳴振動数とし、36 サイクル毎に計測を行った。質量から質量減少率を算出し、スケーリングの評価指標とした。一次共鳴振動数から相対動弾性係数を算出し、内部劣化の評価指標とした。質量減少率と相対動弾性係数の算出式を式(1)、式(2)に示す。

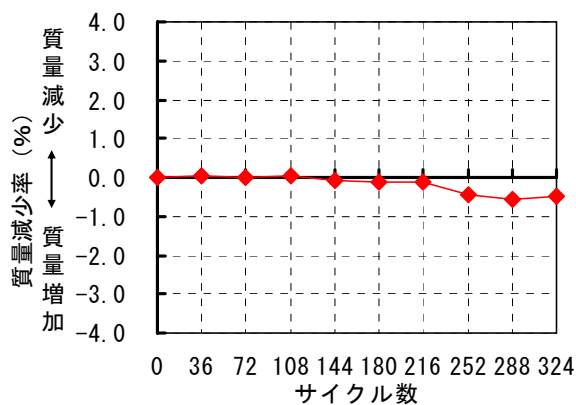
ここで、 W_n は凍結融解 n サイクル後の質量減少率 (%), w_n は凍結融解 n サイクル後の供試体

$$P_n = \left[\frac{f_n^2}{f_0^2} \right] \times 100 \quad (2)$$

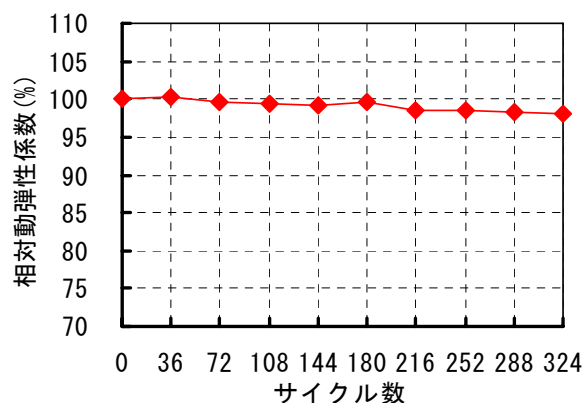
3. 実験結果

3.1 養生条件の異なる供試体の一軸引張試験

養生条件の異なる供試体の一軸引張試験の結

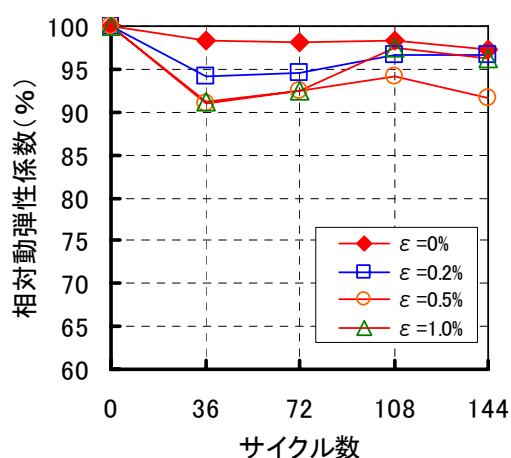


(a) 質量減少率

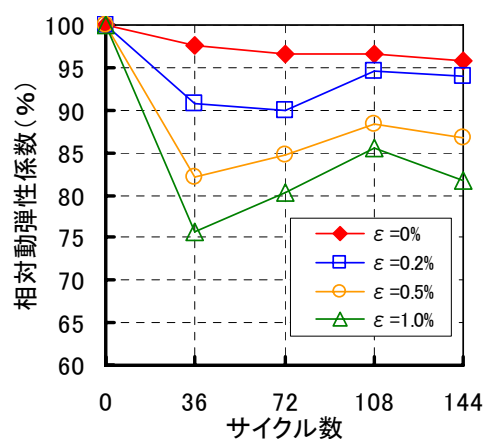


(b) 相対動弾性係数

図-5 角柱供試体の凍結融解試験結果



(a) W4+A2+F9+ ε 供試体



(b) W4+W2+F9+ ε 供試体

図-6 ダンベル型供試体の凍結融解試験結果

果を図-4 に示す。図中の太線は、計測した曲線の平均曲線である。

6週間あるいは15週間水中養生を行った供試体 (W4+W2, W4+W2+W9) に比べ、4週間の水中養生後に2週間あるいは11週間の気中養生を行った供試体 (W4+A2, W4+A2+A9) では、気中養生期間が長いほど乾燥の影響により、終局ひずみが小さくなった。

凍結融解作用を受けた供試体 (W4+W2+F9) と受けていない供試体 (W4+W2+W9) の比較より、一軸引張試験結果 (終局ひずみや引張強度) に明瞭な差異はなく、凍結融解作用が HPRCC の引張性能に与える影響は小さいことがわかる。

凍結融解作用を受ける前に2週間の気中養生を行った供試体 (W4+A2+F9) と気中養生を行っていない供試体 (W4+W2+F9) の一軸引張試

験結果にも明確な差異は認められず、いずれも5.5%程度の大きな終局ひずみとなった。

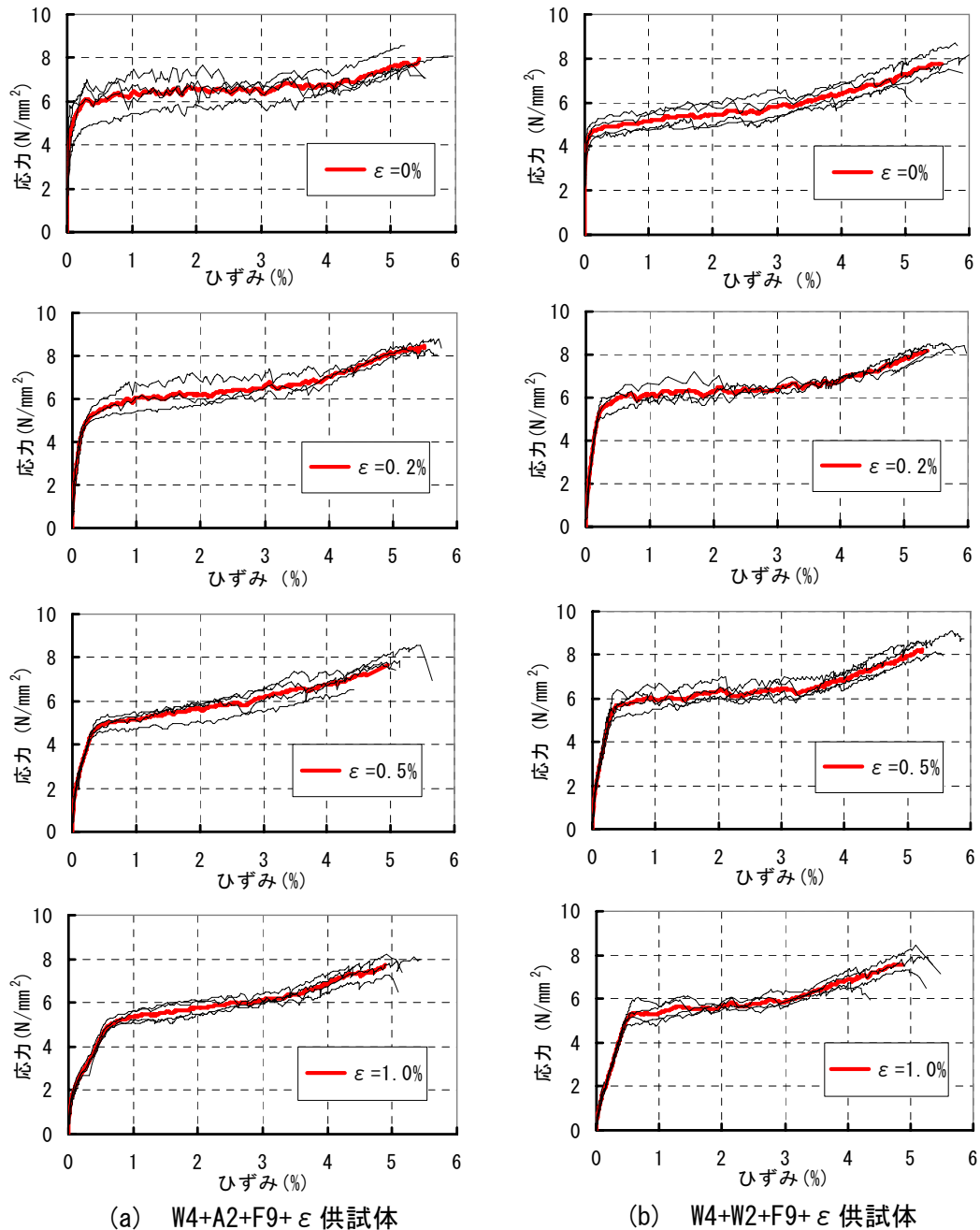
3.2 凍結融解試験

(1)角柱供試体

角柱供試体の凍結融解試験結果を図-5 に示す。質量、相対動弾性係数ともに明確な低下は認められなかった。このことから HPRCC では、マトリクス間を繊維が架橋し、スケーリングと内部劣化を抑制したものと考えられる。質量が若干増加した原因として、スケーリングを伴わない表面付近の微細ひび割れ部が吸水したことが考えられる。

(2)ダンベル型供試体

ダンベル型供試体の凍結融解試験結果を図-6 に示す。なお、144 サイクル終了時点の質量は全供試体でほぼ 100%に近い値であった。相対



図－7 凍結融解試験後一軸引張試験結果（太線は平均曲線）

動弾性係数は、導入ひずみが 0%の供試体（図－6 中で◆印）では 100%に近い値を示した。気中養生後に凍結融解作用を受けた供試体（W4+A2+F9+ ε ）では、導入ひずみレベルの大きさに関わらず相対動弾性係数の著しい低下は確認されなかった。一方、気中養生を行っていない供試体（W4+W2+F9+ ε ）では、導入ひずみレベルが大きいほど相対動弾性係数が低下したが、144 サイクルまで行った本研究の範囲内では、相対動弾性係数はいずれも 75%以上あり、

導入ひずみ 0.2%, 0.5% 供試体では 85%以上あった。角柱供試体に比べダンベル型供試体の相対動弾性係数の低下が大きい原因として、ダンベル型供試体では、断面寸法が小さく厚さが薄いため、表面劣化が動弾性係数に影響を与えやすいことが考えられる。気中養生後に凍結融解作用を受けた供試体（W4+A2+F9+ ε ）の方が、気中養生を行っていない供試体（W4+W2+F9+ ε ）に比べ、相対動弾性係数の低下が小さい原因として、凍結融解試験前に導入したひび割れ

幅が小さかった（表－4）ことが考えられる。

3.3 凍結融解後一軸引張試験

図－7 に凍結融解後に行った一軸引張試験結果を示す。図－7 の最上段の結果は、図－4 の W4+A2+F9, W4+W2+F9 供試体を再掲したものである。ひずみを導入した供試体については、応力－ひずみ曲線の立ち上がり勾配は、導入ひずみレベルが大きくなるにつれ小さくなった。

凍結融解試験前の養生条件の差異に関わらず、導入ひずみレベルの増大にともない、終局ひずみに減少傾向が確認された（表－5）。しかし、導入ひずみ 1.0% 供試体の終局ひずみは約 4.9%（初期に導入したひずみは考慮していない）であり、導入ひずみ 0% 供試体の終局ひずみの約 90% であった。このことから、本研究の範囲内では、凍結融解作用がひび割れを導入した HPFRCC の引張性能に与える影響は小さいといえる。

以上のことから、凍結融解作用が HPFRCC の引張性能に及ぼす影響について検討する場合、質量減少率や相対動弾性係数の計測だけでなく、凍結融解試験後に一軸引張試験を実施することが妥当であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、養生条件の異なる 2 種類の複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（HPFRCC）のダンベル型供試体に一軸引張試験を行ってひび割れを導入し、144 サイクルの凍結融解試験後に再び一軸引張試験を行った。このように、凍結融解試験の前後で一軸引張試験を行った点が本研究最大の特徴である。得られた結果を下記に示す。なお、得られた結果は、本研究の条件範囲内での結果である。

表－5 凍結融解試験後平均終局ひずみ

供試体名称	平均終局ひずみ (%)			
	$\varepsilon = 0\%$	$\varepsilon = 0.2\%$	$\varepsilon = 0.5\%$	$\varepsilon = 1.0\%$
W4+A2+F9+ ε	5.44	5.50	4.96	4.89
W4+W2+F9+ ε	5.58	5.64	5.23	4.87

- (1) HPFRCC 角柱供試体の凍結融解試験において、質量、相対動弾性係数ともに低下は確認されなかった。
- (2) ひび割れを導入した HPFRCC ダンベル型供試体では、導入ひずみレベルが大きいほど相対動弾性係数が低下したが、いずれの供試体においても 75% 以上を示した。
- (3) 気中養生、水中養生と養生条件に差異を設けた場合、水中養生のみを行った供試体に比べ、試験前に気中養生を行った供試体の終局ひずみは小さな値を示した。
- (4) 凍結融解試験前後で行った一軸引張試験結果より、HPFRCC が有する引張性能の著しい低下は確認されず、ひび割れの有無に関わらず、凍結融解作用が HPFRCC の引張性能に与える影響は小さかった。
- (5) HPFRCC の耐凍害性について検討する場合、凍結融解試験後に一軸引張試験を実施することが妥当であった。

本研究では、HPFRCC の引張性能に及ぼす凍結融解作用の影響を評価するための試験方法を提案しているが、供試体の形状寸法等の条件は、通常とは大幅に異なっている。こうした条件の影響についてはさらに検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強モルタルの評価と利用，コンクリート技術シリーズ，No.64，pp.1-32，2005.7
- 2) 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強モルタルの評価と利用，コンクリート技術シリーズ，No.64，pp.付 33-付 34，2005.7
- 3) 森山守，林承燦，内田裕市，六郷恵哲：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料の引張性能と試験装置，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.311-316，2006