

1. はじめに

高強度ビニロン(PVA)繊維あるいは高強度ポリエチレン(PE)繊維を容積比で 1~2%混入した繊維補強高靱性モルタル(PVA-SHCC あるいは PE-SHCC)¹⁾は、引張力下において疑似ひずみ硬化挙動と複数微細ひび割れ挙動を示す材料であり、道路構造物や鉄道構造物の補修などへの利用が徐々に広がっている。しかし、SHCC の引張試験は、常温で行われる場合が多く、引張試験結果に及ぼす温度の影響について検討した研究は多くない。

筆者らは²⁾、PE-SHCC では、供試体温度が高くなるとひび割れ強度と引張強度が小さくなり、終局ひずみが大きくなること、強度や終局ひずみの値は除熱期間が長いと明確に増加することを報告している。

本研究においては、PVA-SHCC の場合にも供試体温度が高くなるとひび割れ強度と引張強度が小さくなり、終局ひずみが大きくなるかどうかを確認するため、加熱期間や除熱期間を変えて引張試験を行い、供試体内部の温度や乾燥状態の違いが強度や終局ひずみに及ぼす影響について検討した。供試体の中心と表面の温度の推移についても計測した。また、繊維単体を乾燥器で加熱しその様子も観察した。

2. 加熱が繊維に及ぼす影響

2.1 試験方法

本試験では PE, PVA 繊維を乾燥器によって 20~120℃の 20℃間隔でそれぞれ 20 分間加熱し、その様子を目視またはマイクロスコブ(50 倍)で確認した。20℃の場合は室温が 20℃の状態とする。

2.2 試験結果と考察

目視で確認したところ、100℃加熱時に PVA 繊維が少し黄色に変色し始めた。熱により繊維が影響を受けた可能性がある。しかし、目視およびマイクロスコブでも繊維が溶融している、弾力性が増減した等の変化は見受けられなかった。この結果より、高温状態で SHCC の終局ひずみが大きい理由として、加熱による繊維の変化よりもモルタルマトリックスの強度が低下したことが大きく起因している可能性が考えられる。

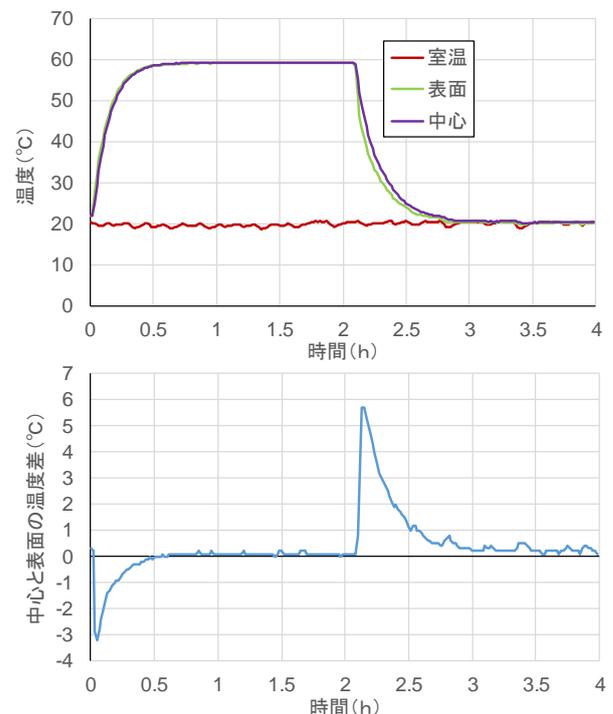


図-1 モルタル版の中心と表面の温度の変化

3. モルタル版を用いた表面と中心の温度測定

3.1 温度計測用のモルタル版の作製

試験時における供試体の内部(中心)と表面の温度の変化の様子を知るため、15×30×200mmのモルタル版を作製した。まず 7.5×30×200mmのモルタル版を作製し、打設翌日に打設面の中央付近に熱電対を設置し、モルタルを打ち継ぎ、モルタル版の表面(側面)にも熱電対を設置した。PE-SHCC の配合²⁾で繊維を混入していないモルタル(圧縮強度: 91N/mm²)を用いた。温度計測時のモルタル版の材齢は 4 ヶ月で、室内で乾燥した状態であった。

3.2 モルタル版の温度計測結果

モルタル版を 60℃の乾燥器の中に入れ約 2 時間置いた後に 20℃の室内に取り出した場合について、版中心ならびに表面の温度と時間との関係、ならびに中心と表面の温度差と時間との関係を図-1 に示す。厚さ 15mm のモルタル版を 60℃の乾燥器に入れると、約 30 分で版中心の温度は乾燥器内温度と同じ 60℃となった。版を室内に取り出すと、約 1 時間で版中心温度が室温(20℃)と同じになった。乾燥器からモルタル版を取り出した直後では、版の中心よりも表面の温度が約 6℃低く、15 分程度後でも温度差は約 3℃あった。なお、90℃の乾燥器にモル

表-1 PVA-SHCC 供試体の引張試験条件

(I) 加熱温度の影響

加熱期間:2hours 除熱期間:直後	加熱温度(°C)			
	-20	20	60	100
	I-a	I-b	I-c	I-d

(II) 加熱期間の影響

加熱温度:60°C 除熱期間:直後	加熱期間(hours or day)			
	1h	2h	6h	1d
	II-a	I-c	II-b	II-c

(III) 除熱期間と再加熱の影響(加熱温度 60°C)

加熱温度:60°C 加熱期間:1day	除熱期間		
	直後	1day	1week
	II-c	III-a, III-c	III-b

(IV) 除熱期間の影響(加熱温度 100°C)

加熱温度:100°C 加熱期間:1day	除熱期間		
	直後	1day	1week
	IV-a	IV-b	IV-c

※III-c: 1日加熱後に1日除熱を行い、さらに2時間加熱を行った直後に試験

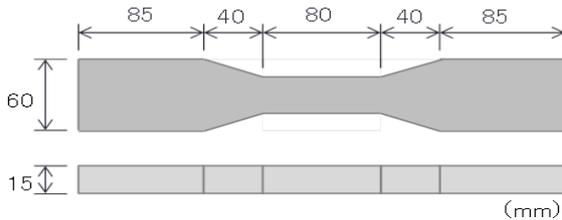


図-2 ダンベル供試体

タル版を入れて取り出した場合、版の中心と表面の温度差は取出し直後では約 10°C、15 分後には約 7°Cであった。実際に引張試験には 3~10 分を要するため、表面とモルタル版の中心には数°Cの温度差があったため、この間にモルタルの内部で応力差が発生し、ひずみが大きくなった可能性も考えられる。

4. 一軸引張試験と圧縮試験

4.1 使用材料と配合

本研究で用いた PVA-SHCC は市販のもので、水結合材比(W/B)が 42%、単位水量が 332kg/m³、PVA 短繊維(直径:0.04 mm、長さ:12 mm、引張強度:1.56GPa)を 1.9vol%混入したものである。モルタルは、SHCC と同じ配合で繊維を混入していないものを指す。セメントには普通セメントを用い、細骨材には 0.5mm 以下の珪砂を用いた。

4.2 実験の種類と条件

表-1 に示すように 60°Cを中心に、-20~100°Cの範囲で、加熱(あるいは冷却)期間や 20°Cの部屋に取り出してからの除熱期間を変化させ、温度や乾燥状態が異なる供試体を用い

て引張試験ならびに圧縮試験を行った。

4.3 供試体と温度

一軸引張試験用に、図-2 に示すダンベル型供試体(供試体長さ:330mm、検長区間の断面:30×15mm、検長区間長さ:80mm)を作製した。圧縮試験用に円柱供試体(直径:50mm、高さ:100mm)を作製した。

打設の翌日脱型し、1 週間の水中養生を行い、その後試験材齢(材齢 5 ヶ月以降)まで 20°Cの恒温温室で気中養生を行った。温度履歴が-20°Cの場合は冷凍庫、60°C、100°Cの場合には乾燥器を用いた。

4.4 載荷試験

各試験条件で、一軸引張試験には 5 個(20°Cの場合のみ 9 個)のダンベル型供試体を、圧縮試験には 3 個(20°Cの場合のみ 5 個)の円柱供試体を用い、強度等の試験結果を平均値で示した。

引張荷重はロードセル(容量 10kN)によって測定し、検長区間の変形は区間の上下端に取付けた変位計(容量 25mm)により測定した。供試体を取り出してから試験終了までに 3~10 分程度を要した。

PVA-SHCC の一軸引張試験では、引張応力-ひずみ曲線において応力が初めて大きく低下する点あるいはひずみが急増する点からひび割れ強度を、応力が最大となる点から引張強度を、引張強度時のひずみから終局ひずみを求めた。モルタルの一軸引張試験では、引張強度(=ひび割れ強度)を求めた。

4.5 引張試験の結果と考察

PVA-SHCC ならびにモルタルで作製したダンベル型供試体の引張試験結果として、引張応力-ひずみ曲線を図-4、6、8、10 に、加熱条件が各強度と終局ひずみに及ぼす影響をそれぞれ図-5、7、9、11 に示す。

(i) 冷却温度ならびに加熱温度の影響

図-4、5 からわかるように、PVA-SHCC ダンベル型供試体を-20°C、20°C、60°C、100°Cの温度に 2 時間置き、取り出した直後に引張試験を行った場合、与えた温度が高いほど、ひび割れ強度と引張強度は小さくなり、終局ひずみは大きくなり、PE-SHCC²⁾と同様な結果(図-3)が得られた。取り出した直後の引張試験時に、供試体内部において温度分布だけでなく乾燥状態も均一でないために、供試体の表面に引張応力が生じ、ひび割れ強度が小さくなり、終局ひずみが大きくなった可能性が考えられる。この点は今後の検討課題である。

モルタル供試体においても、ひび割れ強度(=引張強度)は、与えた温度が高いと小さくなった。

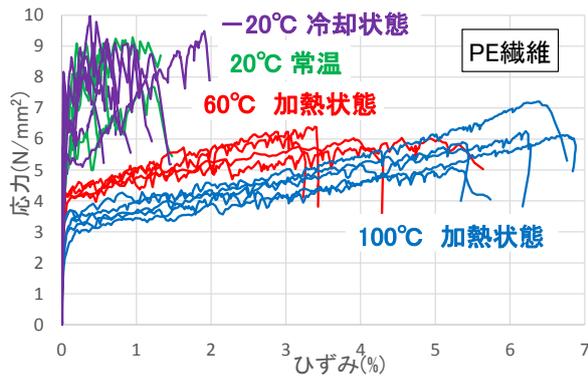


図-3 引張挙動(加熱温度の影響: PE 繊維)

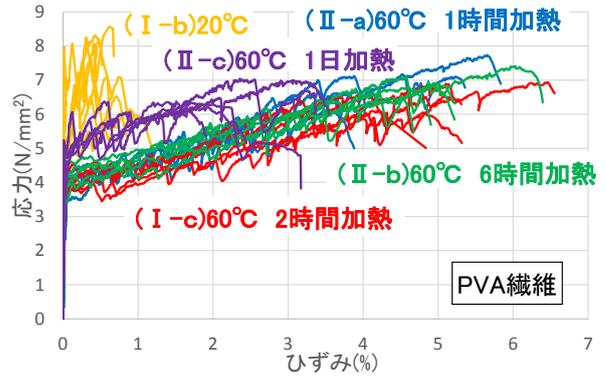


図-6 引張挙動(加熱期間の影響)

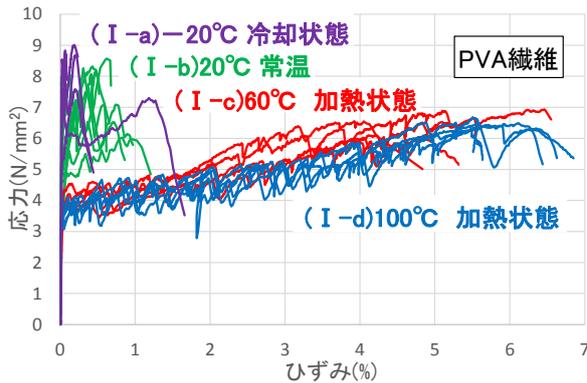


図-4 引張挙動(加熱温度の影響: PVA 繊維)

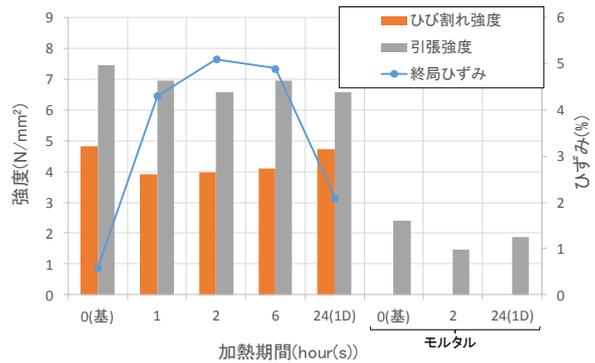


図-7 強度と終局ひずみ(加熱期間の影響)

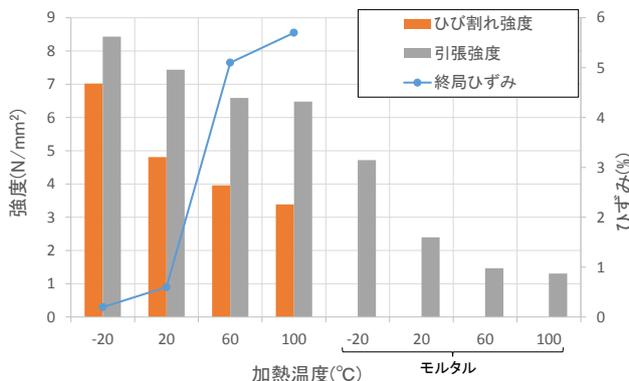


図-5 強度と終局ひずみ(加熱温度の影響)

(ii) 加熱期間の影響

図-6, 7 からわかるように, PVA-SHCC ダンベル型供試体を 60°C の乾燥器内に 1, 2, 6, 24 時間置き, 取り出した直後に引張試験を行った場合, 引張強度は同程度であった. 加熱期間が 1, 2, 6 時間の場合には, ひび割れ強度も終局ひずみもさほど変わらなかったが, 24 時間(1日)の場合にはひび割れ強度は 2 割程度増加し, 終局ひずみは半減した. 加熱期間が長くなると乾燥が進み, 加熱期間が 24 時間の場合には供試体内部の乾燥の程度が一様に近づいたために, ひび割れ強度が増加した可能性が考えられる. モルタル供試体においても, 加熱期間が 1

日の場合には, 2 時間の場合に比べ, ひび割れ強度は 3 割程度増加した.

(iii) 除熱期間と再加熱の影響

図-6(II-c), 図-8, 9, 10, 11 からわかるように, PVA-SHCC ダンベル型供試体を 60°C あるいは 100°C の乾燥器内に 1 日置き, 除熱期間を 1 日, 1 週間と長くして引張試験を行った場合には, 取り出した直後に行った場合に比べ, ひび割れ強度は大きくなり, 終局ひずみは非常に小さくなった. 除熱期間が長いと, 供試体内部の温度分布や乾燥の程度が均一に近くなったために, ひび割れ強度が大きくなり終局ひずみが小さくなった可能性が考えられる.

60°C で 1 日加熱して 1 日除熱した供試体を再び 60°C で 2 時間加熱した直後に引張試験を行うと(図-8(III-c)), 供試体内部に温度勾配があるため, ひび割れ強度は小さくなり, 終局ひずみが大きくなった.

モルタル供試体においても, 除熱期間が長いとひび割れ強度は明確に増加した.

5. 圧縮強度試験の結果

PVA-SHCC とモルタルで作製した円柱供試体を用いて, 温度履歴を受けた状態と除熱(冷)した直後に行った. 先に行った PE-SHCC とモルタルの実験²⁾の結果と同様に, 本実験にお

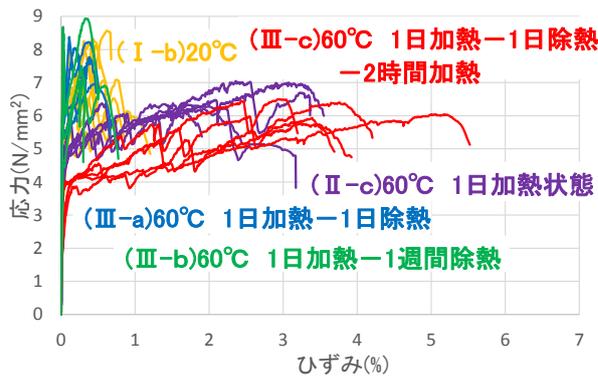


図-8 引張挙動(除熱期間と再加熱の影響)

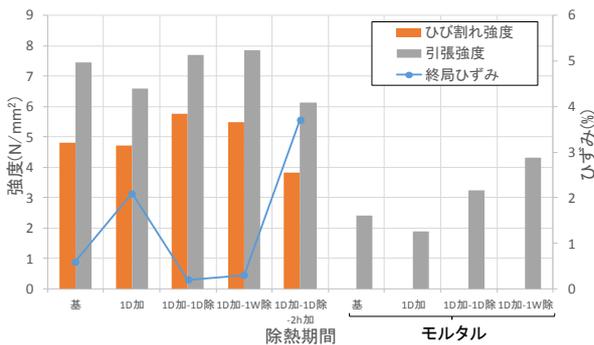


図-9 強度と終局ひずみ
(除熱期間と再加熱の影響)

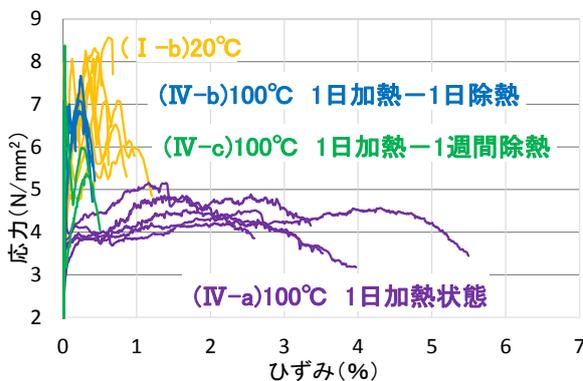


図-10 引張挙動(除熱期間の影響 : 100°C)

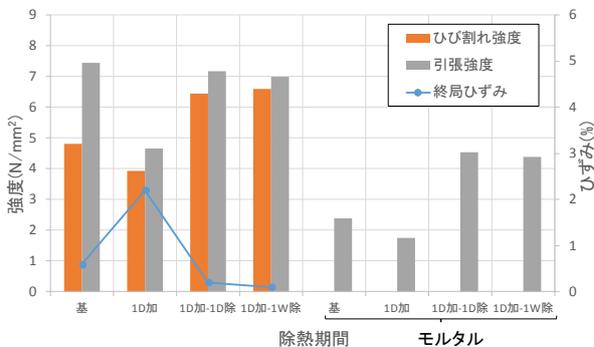


図-11 強度と終局ひずみ(除熱期間の影響)

いても、PVA-SHCC とモルタルの圧縮強度は供試体の温度が高くなると小さくなり、逆に温度が低くなると大きくなった。圧縮強度は除熱期間が長いと明確に増加した。

6. まとめ

PVA-SHCC とモルタルでダンベル型供試体と円柱供試体を作製し、加熱期間と除熱期間を変化させて引張試験と圧縮試験を行った。PVA-SHCC の引張試験の主な結果は下記のとおりである。

1. PVA-SHCC を -20°C 、 20°C 、 60°C 、 100°C に 2 時間置き、取り出した直後に引張試験を行った場合、与えた温度が高いほど、ひび割れ強度と引張強度は小さくなり、終局ひずみは大きくなった。
2. PVA-SHCC を 60°C で加熱した期間が 1, 2, 6 時間の場合に比べ、1 日の場合にはひび割れ強度は 2 割程度増加し、終局ひずみは半減した。PVA-SHCC を 60°C あるいは 100°C に 1 日置き、除熱期間を 1 日、1 週間と長くすると、取り出した直後に比べ、ひび割れ強度は大きくなり、終局ひずみは非常に小さくなった。
3. PE-SHCC の試験結果に比べ、PVA-SHCC の試験結果は、測定値のばらつきが若大きいものの、同様の試験条件のもとでは、ひび割れ強度や終局ひずみの傾向は同様であった。
4. 60°C に 2 時間置いたモルタル版を取り出した直後では、版の中心より表面の温度が約 6°C 低く、15 分程度後でも温度差は約 3°C あった。SHCC の終局ひずみは引張試験時の供試体内部の温度や乾燥の影響を受けやすいため、供試体内部における温度や湿度の勾配が小さくなるよう、早めに(例えば 1 日以上前に)供試体を試験環境に置くことが望まれる。

参考文献

- 1) 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリー，第 127 号，2007.3.
- 2) 林 大智，他：低温から高温までの温度履歴を受けた HPFRCC の引張性能の評価，コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集，Vol.15，pp.453-458,2015.