

論文 超速硬セメントを用いた SHCC の引張性能と施工性に関する基礎的な検討

林 承燦*¹・森井 直治*¹・新家 一秀*²・六郷 恵哲*³

要旨：本研究では、超速硬セメントを用いた SHCC において、パン形強制練混ぜミキサで練混ぜを行い、フレッシュ状態の性状、ひずみ硬化特性、複数微細ひび割れ特性並びにポンプ圧送性についての基礎的な検討を行った。その結果、低動力のパン形強制練混ぜミキサで、安定した SHCC の練混ぜが可能であることを確認した。短繊維混入率による可使用時間や圧縮強度の差は殆どないが、短繊維混入率が 1.8vol%以上で、安定した曲げ及び引張性能が得られ、スランプフローが 500mm 程度であり、スクィーズポンプにより安定したポンプ圧送が可能であることを確認した。

キーワード：SHCC, 超速硬セメント, ひずみ硬化, 複数微細ひび割れ, パン型強制ミキサ, ポンプ圧送性

1. はじめに

ひずみ硬化型セメント複合材料 (Strain Hardening Cement-based Composites, 以下 SHCC) は、1990 年代から活発な研究開発が進められ、2007 年に土木学会のコンクリート委員会より設計・施工指針 (案)が発表された。ひずみ硬化特性や複数微細ひび割れ特性を有した SHCC は、コンクリート構造物の耐久性向上を目的とした補修・補強分野の断面修復や表面被覆に多く利用されている^{1, 2)}。

SHCC のひずみ硬化特性及び複数微細ひび割れ特性は、短繊維の混入率、良好なフレッシュ性状、短繊維の分散性ならびに配向性と最も密接な関係があることが指摘されている^{3, 4)}。このため、SHCC の練混ぜには、オムニミキサやホバート型ミキサ並びに高速回転が出来るインバーター付の高動力のパン形強制練混ぜミキサ等の汎用性に劣るミキサが多く用いられている。なお、結合材としては、用途範囲が最も広い普通ポルトランドセメントを用いた研究が主である。しかし、近年では、高速道路の場合、工事に伴う渋滞や通行止めの低減、鉄道の場合、夜間の列車が運休する短い時間内に施工を終わらせる目的等で、超速硬セメントの利用が多くなっている。また、施工方法においては、経済性や施工空間の制約等より低動力のパン形強制練混ぜミキサによる練混ぜ後、小型ポンプ圧送による施工も多く望まれている。

以上より、本研究では、超速硬セメントを用いた SHCC において、汎用性を考量したパン形強制練混ぜミキサで練混ぜを行い、フレッシュ状態の性状、ひずみ硬化特性、複数微細ひび割れ特性並びにポンプ圧送性についての基礎的な検討を行った。

表-1 SHCC の配合

| W/B (%) | S/B (%) | W (kg/m ³) | 短繊維混入率 (vol%) |
|---------|---------|------------------------|-----------------------|
| 42 | 75 | 332 | 0,1.3,1.5,1.7,1.8,1.9 |

*B:結合材, S:珪砂, W:水

2. 試験概要

2.1 SHCC の配合及び短繊維混入率

表-1 に SHCC の配合と短繊維混入率を示す。セメントは、急硬性成分を含んだ超速硬セメントとし、細骨材は 0.5mm 以下の珪砂を用いた。短繊維は、PVA (長さ:12mm, 直径:0.04mm, 引張強度:1.56GPa) 繊維とし、その混入率は体積比で 0, 1.3, 1.5, 1.7, 1.8, 1.9% の 6 種類とした。

なお、SHCC に用いるセメントが超速硬セメントであることより、フレッシュ状態の物性の測定並びに供試体の成形等の作業時間の確保の目的で遅延剤 (工業用の酒石酸系) を用いた。遅延剤の添加量は超速硬セメントの約 0.5% とした。

2.2 試験項目

(1) 練混ぜミキサ

SHCC の練混ぜには汎用性を考量した低動力のパン形強制練混ぜミキサとし、ドラム寸法 600φ×300mm 程度、電圧 100V, 動力 400W, 重量 50 kg 程度、羽の回転速度は 40 回/分のものを用いた。練混ぜ量は約 24L/回とした。

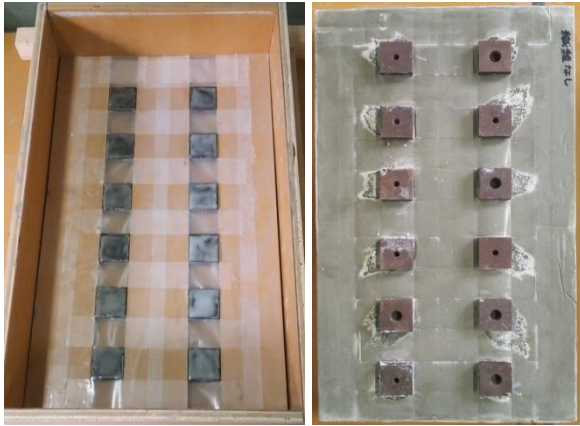
(2) フロー及びスランプ試験

フロー試験は、練混ぜ直後にセメントの物理試験方法である JIS R 5201 に従い、落下運動前と 15 回の落下運動を与えた後の広がりを測定する方法でフロー値を求めた。

*1 株式会社デーロス・ジャパン 工博 (正会員)

*2 トーヨーマテラン株式会社 技術部 工博 (正会員)

*3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 教授 工博 (正会員)



(a) 付着治具と型枠 (b) 脱型後

図-1 付着試験供試体概要

なお、スランプフロー試験は、練混ぜ直後にコンクリートのスランプフロー試験方法である JIS A 1150 に従い、広がり の 両直径の平均値を測定した。

(3) 可使時間

可使時間は、流し込み法による打設、締固め及びコテ仕上げ等の施工が可能である時間とし、練混ぜ直後から材料の内部温度が上昇し始めるまでの時間を可使時間とした。なお、練混ぜ直後から材料内部の温度が上昇し始めるまでは、水和反応によるマトリックスの塊が無いことを手触りで確認するとともにコテ仕上げが可能であることも確認した。

(4) 圧縮及び曲げ試験

圧縮及び曲げ強度試験用供試体は、供試体寸法を $40 \times 40 \times 160 \text{mm}$ とし、流し込み法で作製した。養生方法は、材齢 7 日までは、温度 $20 \sim 23^\circ\text{C}$ 、湿度 $55 \pm 5\%$ の室内気中養生とし、それ以降は室内湿潤養生(温度 $20 \sim 23^\circ\text{C}$)とした。圧縮及び曲げ試験方法は、JIS R 5201 による 3 点曲げ試験時における最大荷重を曲げ強度とし、曲げ試験後の角柱の両折片を用い圧縮試験を行った。

(5) 付着試験

付着強度の試験については、打継材としてエポキシプライマーを用いることを想定し、エポキシプライマーと SHCC の付着強度を求める方法で試験を行った。付着供試体作製状況を図-1 に示す。型枠底面に付着強度試験用治具(アタッチメント)を埋め込み、アタッチメント上面にエポキシプライマー塗布後に SHCC の打設を行った。材齢 2.5 時間後に型枠を外し、材齢 3 時間、1 日、3 日及び 7 日目に建研式付着強さ試験器を用い付着試験を行った。養生方法は、温度 $20 \sim 23^\circ\text{C}$ 、湿度 $55 \pm 5\%$ の室内気中養生とした。

(6) 長さ変化試験

長さ変化試験は、流し込み法で作製した $40 \times 40 \times 160 \text{mm}$ 供試体を用い、JIS A 1129 のダイヤルゲージ法にて行った。供試体は、材齢 3 時間で型枠を外し、脱型直後を基

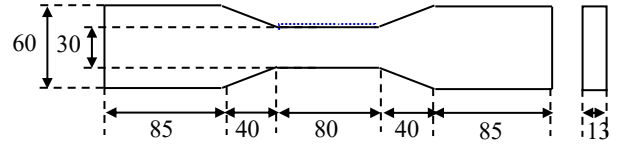


図-2 ダンベル型供試体 (単位: mm)

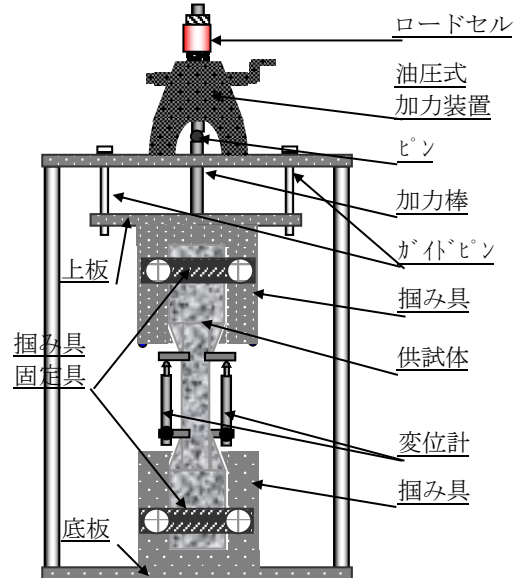


図-3 引張試験装置



図-4 パン形強制練混ぜミキサと練混ぜ後の状況

長として、温度 $20 \sim 23^\circ\text{C}$ 、湿度 $55 \pm 5\%$ の室内で、材齢 28 日まで測定を行った。

(7) 一軸直接引張試験

引張供試体の形状は、図-2 に示すダンベル型供試体とした。中央部の検長区間の寸法は、長さ 80mm 、幅 30mm 、厚さ 13mm とした。

一軸直接引張試験装置を図-3 に示す。供試体の端部の固定条件については、下端を固定支持、上端を回転支持とし、検長区間の変位は試験体両側に取り付けた高感度変位計で計測した。材齢 7 日と 28 日目に一軸直接引張試験より引張応力-ひずみ関係を求めた。

(8) ポンプ圧送試験

SHCC の圧送試験に用いたポンプは、スクィーズ式グラウトポンプとし、出力: $5.5 \text{kw} \times 200 \text{V}$ (三相)、最大吐出圧力: 2.5MPa 、ポンピングチューブ: $\phi 50 \times \text{L}1400 \text{mm}$ 、圧送ホース: $\phi 40 \text{mm}$ を用いた。圧送距離は、垂直 8m 、水平

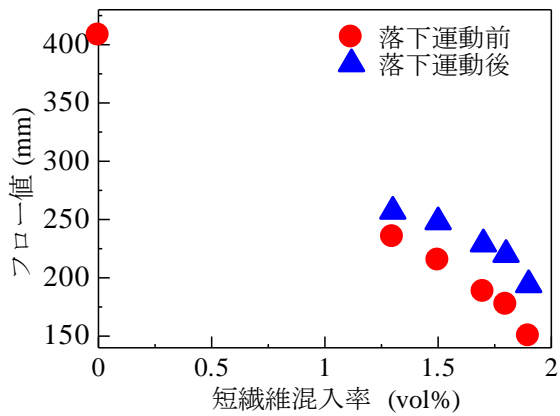


図-5 短繊維混入率とフロー値

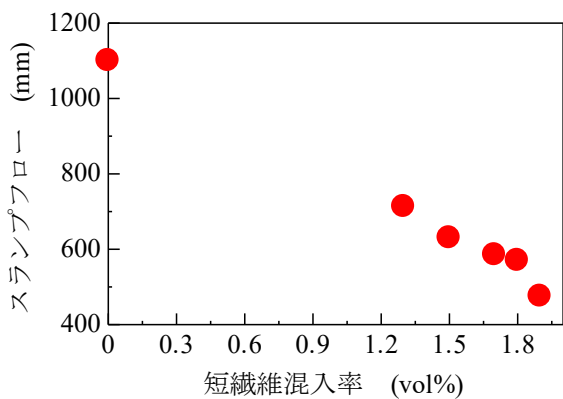


図-6 短繊維混入率とスランプフロー

42m の合計 50m とした。

3. 試験結果

3.1 練混ぜ方法と短繊維の分散性

本研究で用いたミキサは、小規模工事に幅広く用いられる低動力のパン形強制練混ぜミキサとした(図-4)。SHCC の練混ぜ方法については、マトリックス粉体と水の順にミキサに投入し、約 30 秒間練混ぜ後、短繊維を投入し、2.5 分間練混ぜを行った。短繊維投入前にマトリックス粉体と水を練混ぜ、SHCC の流動性を確保した上で短繊維を投入することより、短繊維混入による練混ぜ時の初期負荷を大きく低減させることが可能であった。また、合計 3 分程度の練混ぜ時間で、短繊維の固まりがなく、均等に分散されていることが手触り等で確認された。

3.2 フロー及びスランプフロー

図-5 と 6 に短繊維混入率とフロー値並びにスランプフローを示す。フロー試験においては、フローコーンを取り除いた直後と 15 回の落下運動後の両方の広がり測定を行った。短繊維混入率が 0vol% の場合、15 回の落下運動後の広がり長さ(フロー値)がフローテーブルの直径以上であったので、落下運動前のフロー値のみの測定とした。

短繊維混入率とフローとの関係においては、短繊維混

表-2 遅延剤添加量と可使用時間

| | 遅延剤 添加量 | 短繊維混入率(vol%) | | | | | |
|-----------------|------------|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | 0 | 1.3 | 1.5 | 1.7 | 1.8 | 1.9 |
| 可使 時間 (分) | 0.35% | — | — | — | — | — | 42 |
| | 0.50% | 51 | 52 | 52 | 54 | 61 | 60 |
| | 0.65% | — | — | — | — | — | 83 |

入率が多いほどフロー値が小さくなる結果であった。フロー試験時の落下運動の影響においては、落下運動後のフロー値が大きく、短繊維混入率が多いほど落下運動前後のフロー値の差が大きくなる傾向を示した。

短繊維混入率とスランプフローの関係においては、短繊維混入率の増加とともにスランプフローも低下する傾向となり、短繊維混入率 1.5vol% までは、スランプフローが 600mm 以上、それ以上の短繊維混入率においては、スランプフローが 600~500mm 程度であった。

以上より、簡易的な締固め方法での流し込み法による打設が可能であることが確認された。

3.3 可使用時間

SHCC の短繊維混入率と可使用時間との関係を表-2 に示す。可使用時間の測定は、20℃の室内に SHCC の粉体、短繊維並びに水を 48 時間静置させ、各材料の温度が 20±1℃ 範囲内であることを確認後に練混ぜを行い可使用時間の計測を行った。なお、超速硬セメントに対する遅延剤の添加量は 0.5% とした。一方、短繊維混入率 1.9vol% においては、遅延剤の添加量 0.35 と 0.65% においても可使用時間の測定を行った。

超速硬セメントに対する遅延剤の添加量 0.5% での可使用時間は 50~60 分の範囲内と短繊維混入率が多いほど可使用時間も若干長くなる傾向を示した。なお、短繊維混入率 1.9vol% における遅延剤添加量と可使用時間の関係においては、遅延剤添加量が多いほど可使用時間も長くなり、その差は約 20 分程度であった。これより、現場作業においても、遅延剤の添加量を変えることで可使用時間の調整が可能であることが確認された。

3.4 圧縮強度及び曲げ強度

材齢ごとの短繊維混入率と圧縮強度及び曲げ強度との関係を図-7 と 8 に示す。短繊維混入率による圧縮強度の差は殆どないが、曲げ強度においては、短繊維混入率による影響が明らかに表れた。短繊維混入率 0vol% の場合、材齢とともに曲げ強度も増加する傾向を示したが、曲げ強度は短繊維混入配合の半分程度であった。

短繊維を混入した配合においては、短繊維混入量が多いほど曲げ強度が高く、材齢 7 日までは曲げ強度が急激に増加する傾向を示した。しかし、材齢 7 日以降におい

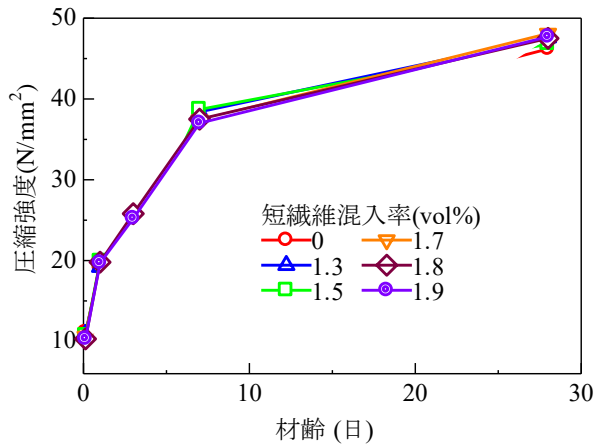


図-7 材齢と圧縮強度

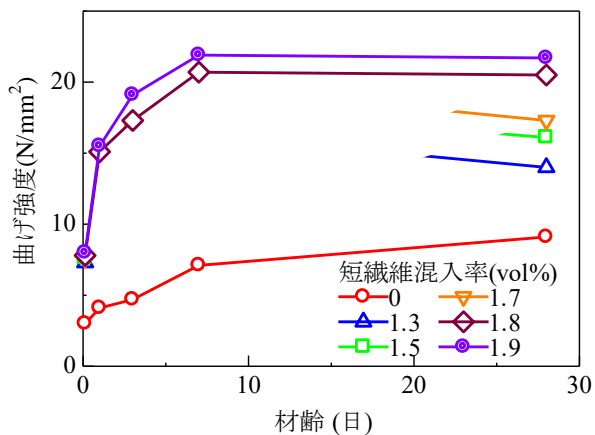


図-8 材齢と曲げ強度

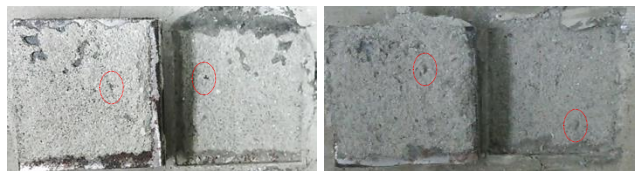
ては、短繊維混入率 1.8, 1.9vol%の場合、曲げ強度の増減は無いが、短繊維混入率 1.3, 1.5, 1.7vol%の場合、曲げ強度が低下する傾向を示した。本試験における SHCC のマトリックスの配合は同じである。これより、全ての短繊維混入率における材齢ごとの初期ひび割れ発生強度は短繊維混入率 0%とほぼ同程度であると考えられる。なお、短繊維混入配合の場合は、初期ひび割れ発生後での短繊維の架橋効果により曲げ強度が大きくなったと考える。しかし、繊維混入率が少ない配合における材齢 7日以降の曲げ強度の低下については、マトリックスの強度増大と架橋応力との関係等が考えられるが、今後、検討が必要である。

3.5 付着強度

短繊維混入率と付着強度との関係を表-3 に示す。短繊維を混入した配合においては、短繊維混入率の違いによる付着強度の差が殆どなく、試験材齢毎の付着強度のバラツキも殆どない結果であった。しかし、短繊維混入率 0vol%の場合、短繊維混入配合に比べ材齢ごとの付着強度が小さく、付着強度のバラツキも大きい結果であった。付着試験後の破壊状況を図-9 に示す。全ての配合において、付着試験における破壊箇所は、SHCC のマト

表-3 短繊維混入率と付着強度

| 材齢 | 試験箇所 | 短繊維混入率(vol%) | | | |
|------|------|--------------------------|-----|-----|-----|
| | | 0 | 1.3 | 1.7 | 1.9 |
| | | 付着強度(N/mm ²) | | | |
| 3 時間 | No.1 | 1.2 | 1.4 | 1.3 | 1.4 |
| | No.2 | 1.4 | 1.3 | 1.2 | 1.4 |
| | No.3 | 1.0 | 1.5 | 1.4 | 1.4 |
| | 平均 | 1.2 | 1.4 | 1.3 | 1.4 |
| 1 日 | No.1 | 1.7 | 1.9 | 1.8 | 1.8 |
| | No.2 | 1.5 | 1.8 | 2.0 | 1.9 |
| | No.3 | 1.2 | 1.8 | 1.9 | 2.0 |
| | 平均 | 1.5 | 1.8 | 1.9 | 1.9 |
| 3 日 | No.1 | 2.1 | 2.0 | 2.5 | 2.6 |
| | No.2 | 1.4 | 2.1 | 2.5 | 2.4 |
| | No.3 | 2.1 | 2.1 | 2.4 | 2.5 |
| | 平均 | 1.9 | 2.1 | 2.5 | 2.5 |
| 7 日 | No.1 | 3.3 | 3.6 | 3.4 | 3.5 |
| | No.2 | 3.5 | 3.5 | 3.4 | 3.4 |
| | No.3 | 2.7 | 3.4 | 3.5 | 3.5 |
| | 平均 | 3.1 | 3.5 | 3.5 | 3.5 |



(a) 短繊維混入率:0vol% (b) 短繊維混入率:1.3vol%



(c) 短繊維混入率:1.7vol% (d) 短繊維混入率:1.9vol%

図-9 付着試験後の破壊状況 (○気泡)

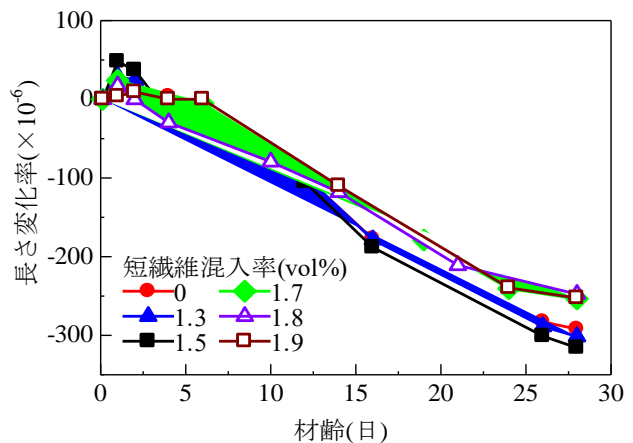


図-10 繊維混入率と長さ変化率

リックス内での破壊であった。付着強度のバラツキは、SHCC のマトリックス内に形成された気泡等の初期欠陥によるものと考えられる。これは、短繊維混入率 0vol% の数ヶ所の付着強度が短繊維混入配合と同程度であるこ

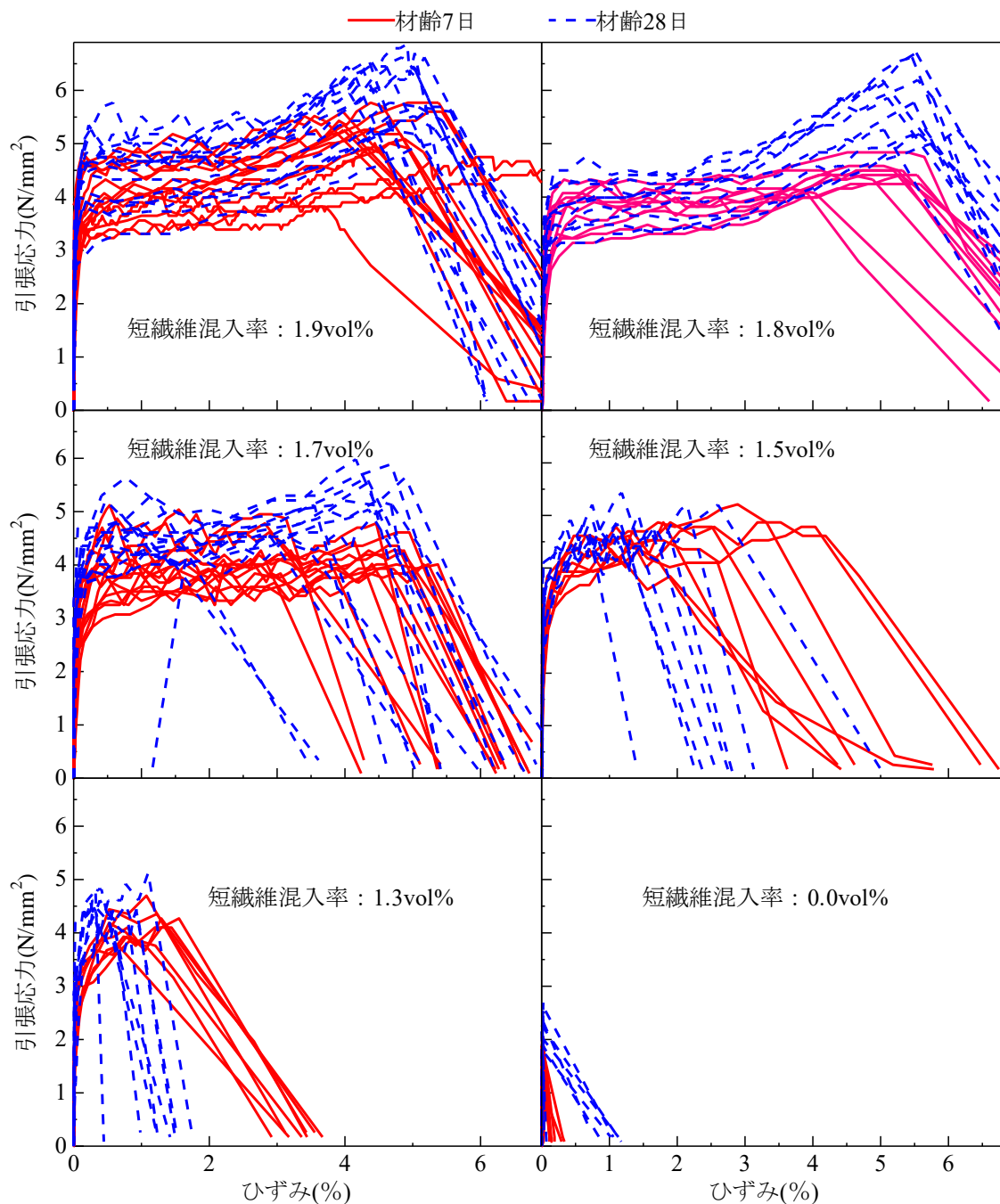


図-11 引張応力-ひずみ関係

とから推定できる。なお、短繊維混入配合の場合、付着試験時の短繊維の架橋効果より、初期欠陥に起因した応力低下が低減され、付着強度のバラツキも小さくなったと考えられるが、今後検討が必要である。

3.6 長さ変化率

短繊維混入率と長さ変化率との関係を図-10 に示す。全ての配合において、材齢2日目までは膨張の傾向を示し、その後、材齢の経過とともに収縮が進行する結果となった。初期膨張率は $10\sim 50\times 10^{-6}$ 程度と非常に小さく、短繊維混入率による違いは観察されなかった。初期膨張

の傾向は、超速硬セメントに含まれているカルシウムアルミネートと石膏類等による影響であると考えられる。一方、収縮率においては、材齢の経過に伴い収縮率の差が表れ、短繊維混入率1.8と1.9vol%の場合、他の短繊維混入率に比べ材齢28日における長さ変化率の差が約 50×10^{-6} 程度と収縮率が若干小さくなる結果となった。

3.7 引張性能

一軸直接引張試験による引張応力-ひずみ関係を図-11 に示す。引張強度においては、短繊維混入率が1.8と1.9vol%の場合、材齢の経過とともに引張強度も増加し、

材齢 28 日の引張強度が 6N/mm^2 程度と短繊維混入率 0vol%の引張強度(約 2N/mm^2)の約 3 倍程度であった。しかし、短繊維混入率 1.8vol%未満においては、短繊維混入率が少ないほど引張強度も小さくなり、材齢の経過に伴う引張強度の増加も殆どない結果であった。

引張終局ひずみにおいては、短繊維混入率が 1.8 と 1.9vol%の場合、いずれの材齢においても 5%程度の引張終局ひずみが得られた。しかし、短繊維混入率 1.8vol%未満においては、短繊維混入率が少ないほど引張終局ひずみも小さくなった。また、材齢の経過に伴い引張終局ひずみが低下する傾向を示した。引張終局ひずみは短繊維の配向状況と短繊維本数の分布状況に大きく依存されるところと考えられるが、本試験の範囲内においては、短繊維の混入率が異なることより、終局ひずみの支配因子は短繊維の本数とその分布状況であると考えられる。なお、短繊維混入率 0vol%の材齢 7 日に比べ材齢 28 日の引張強度が大きい。これより、繊維混入率が少ない配合における材齢 7 日以降の引張終局ひずみの低下については、SHCC マトリックスの引張強度の増加と短繊維の本数及びその本数の分布状況との関係による影響であると考えられるが、今後、検討が必要である。

引張応力-ひずみ関係の曲線形状においては、短繊維混入率が 1.8 と 1.9vol%の場合、ひずみが 3.5%付近から引張応力が急激に増加する傾向を示した。これは、新たなひび割れの発生に加え、各ひび割れ部でのひび割れ幅の拡大に伴う短繊維の架橋応力の増大等による影響と考えられるが、今後、検討が必要である。

3.8 ポンプ圧送性

SHCC の圧送試験に用いたポンプは、ポリマーセメントモルタル等による断面修復や表面被覆に幅広く用いられるスクィーズポンプとした。スクィーズポンプは、ポンピングチューブと呼ばれる円筒形の筒を回転式のローラーで絞ることによりチューブ内のフレッシュコンクリートを送り出すタイプのポンプである。スクィーズポンプによる圧送距離は、垂直 8m、水平 42m の合計 50m とし、短繊維混入率 1.9vol%、 0.5m^3 の SHCC を連続圧送する方法で圧送試験を行った。圧送試験により、圧送中に短繊維の塊等によるポンプ詰まりがなく、安定したポンプ圧送が可能であることを確認した。また、その吐出量は 15~20L/min 程度であった。

一方、現場施工においては、練混ぜ不足による短繊維

の塊、又はミキサの羽に付着した短繊維の塊によりポンプ詰まりが生じるとの報告があり、注意が必要である。

4. まとめ

本試験では、超速硬セメントを用いた SHCC において、汎用性を考量したパン形強制練混ぜミキサで練混ぜを行い、短繊維混入率とフレッシュ状態の性状、引張性能並びにポンプ圧送性に関する基礎的な検討を行った。得られた結果は、以下のとおりである。

- (1) 小規模工事に幅広く用いられる低動力のパン形強制練混ぜミキサで、安定した SHCC の練混ぜが可能であることを確認した。
- (2) 短繊維混入率が多いほど流動性が低下したが、短繊維混入無しでのスランプフローが 1000mm 以上の SHCC のマトリックスに 1.9vol%の短繊維を混入した場合のスランプフローは 500mm 程度であった。
- (3) 短繊維混入率による可使時間や圧縮強度の差は殆どないが、曲げ及び引張性能においては、短繊維混入率による影響が明らかとなり、短繊維混入率が 1.8vol%以上で安定した曲げ及び引張性能が得られた。
- (4) 短繊維混入により付着強度が若干大きくなり、そのバラツキも小さくなる結果が得られた。
- (5) スクィーズポンプにより、安定したポンプ圧送が可能であることを確認した。

参考文献

- 1) 閑田 徹志, 坂田 昇, 国枝 稔, 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 (HPFRCC) の研究の現状と構造利用の事例, コンクリート工学, Vol.44, No.3, pp.3-10, 2006
- 2) 六郷 恵哲, 藤元 安宏: ひび割れ幅が細かく引張力を分担できる繊維補強モルタルの構造利用, プレストレストコンクリート技術協会, 第 15 回シンポジウム論文集, 特別講演 II, pp.9-18, 2006.10
- 3) 稲熊 唯史, 内田 裕市, 六郷 恵哲: HPFRCC の曲げ挙動の寸法効果ならびに引張特性との関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.369-374, 2007
- 4) 大島 章弘, 森宗 義和, 川西 貴士, 平田 隆祥: 高じん性セメント系複合材料における連糸状ポリプロピレン短繊維の分散性能に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.301-306, 2009