

# 論文 拘束収縮下におけるハイブリッド・ファイバー・コンクリートの若材 齢引張力学特性

小島 一樹\*1・中村 成春\*2

**要旨:** 本研究は、拘束収縮下におけるハイブリッド・ファイバー・コンクリートについて、引張力学特性を実験的に検討した。拘束引張力学特性は静的直接引張および完全拘束実験により評価した。まず、材齢経過時の潜在的な保有直接引張強度発現を求め、また、完全拘束しつつ所定材齢で直接引張に切り替えることで、拘束引張作用が及ぼす潜在的に保有している引張力学特性を定量した。さらに、微細繊維と短繊維を混入し、拘束収縮下の破壊進行領域の微細ひび割れを強制的に抑制し、拘束収縮下の引張力学メカニズムを考察した。

**キーワード:** 拘束, 収縮, ひび割れ, 繊維, コンクリート

## 1. はじめに

コンクリートの収縮ひび割れを制御するには、持続拘束下の引張力学特性を解明する必要がある。Al-Kubaisy, M.A.ら<sup>1)</sup>は、持続拘束引張試験を行い、拘束が長期間作用すると強度と剛性が低下することを示し、その主原因がクリープであると推察した。この考え方が広く現在の応力強度比説<sup>2)</sup>に踏襲されてきたが、厳密にそのメカニズムを検討した事例はほとんど無い。本研究は、完全拘束した若材齢コンクリートについて、拘束を作用させる時間を段階的に変化させて、拘束状況下で引張クリープ作用が及ぼす潜在的に保有している引張力学特性を実験検討した。また、拘束時に累積すると考えられる微細ひび割れをハイブリッド・ファイバーによって補強し、持続拘束時の損傷を軽減させることで、その保有引張力学特性の影響を実験検討した。

## 2. 実験概要

実験は、それぞれ自己充填性を有するコンクリートと繊維を混入したコンクリートとモルタルの計3種類を用い、それぞれ matrix-c, hfc-c, hfc-m とした。表-1 に使用材料、表-2 に調合条件を示す。試験体は端部にボルトを埋めたド

ッグボーン型とし、打設後、打設面をラップした鋼製型枠内で、20℃、60%RH で約 24 時間養生した後、脱型し、図-1 に示す拘束試験機により 20℃、60%RH の条件下で試験を行った。まず、試験体脱型後、すぐに（材齢 24 時間）0.0008 mm/min の载荷速度で静的直接引張試験を行った。その他の試験体は表-3 に示す材齢まで 20℃、60%RH 条件下で気乾養生した後に試験に供した。供試体数は基本的に 1 本だが、拘束時間が長期と短期の結果が重複し、ばらつきが少ないことを確認しており、結果は実測代表値を示した。

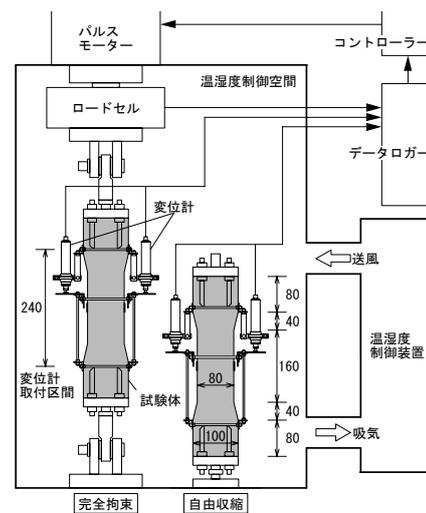


図-1 拘束試験機概要

\*1 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻博士前期課程 (正会員)

\*2 宇都宮大学 工学部建設学科建築学講座 准教授 工博 (正会員)

表-1 使用材料

種類	記号	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	備考
普通ポルトランドセメント	OPC	3.16	
シリカフェューム	SF	2.2	
鬼怒川産川砂	S	2.58(表乾)	
硬質砂岩碎石	G	2.66(表乾)	最大寸法20mm
高性能減水剤	SP	1.1	ポリカルボン酸エーテル系
PVA繊維	fa	1.3	長さ:3mm、直径:0.2mm ヤング係数29.4GPa
	fb		長さ:30mm、直径:0.4mm ヤング係数29GPa

表-2 調合条件

	matrix -c	hfc -c	hfc -m
W/B	18		
s/a	41.6	100	
s/m	35		
SF(C×wt%)	10		
S(vol%)	23.5	35	
G(vol%)	33		
SP(C×wt%)	3		
fa(vol%)	0	3	
fb(vol%)	0	0.3	
実測空気量(%)	1~2	3~4	

表-3 試験条件

種類	直接引張試験 材齢(hr)	拘束引張試験 材齢(hr)
matrix-c	24, 48, 72, 96	48, 72
hfc-c	24, 48, 72, 96, 216	48, 72, 96, 216
hfc-m	24, 48, 72, 96	48, 72

次に、完全拘束をかけてから、適宜、所定材齢で静的直接引張試験に切り替える実験を行った。この実験を拘束引張試験と呼ぶ。2本の試験体を完全拘束試験および自由収縮ひずみモニタに供し、表-3に示した材齢で完全拘束状態のまま、静的直接引張試験に切り替えた。また、直接引張試験への切り替えを行わない完全拘束試験のみの実験も行った。

実験時の変位計測については、静的直接引張試験時は試験体両脇に貼り付けたひずみゲージを用い、完全拘束試験時は変位計を取り付け基準長240mmとしてひずみに換算した。完全拘束などの緩速載荷の場合、ひずみゲージを用いた場合、はがれる恐れがあり、変位計で計測することとした。静的直接引張載荷の場合、載荷速度に対して変位計の応答が遅くなり、計測誤差が大きい。そのため、静的直接引張載荷の場合にはひずみゲージ値を用いることとした。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 静的直接引張試験

図-2に静的直接引張試験結果を、図-3と表-4に各調合条件の引張力学特性結果を示す。こ

こで、表-4に従い引張強度 $f_t$ 、ヤング率 $E_t$ 、 $f_t$ 時ひずみ $\epsilon_t$ とする。ヤング率及び剛性の算出は、ひずみ $\epsilon_t$ が $10\mu$ 程度から、強度 $f_t$ の約1/3までを直線近似した1/3割線法を用いた。調合条件によらず、材齢24時間以降の経時変化は大きく、ヤング率の値から内部組織構造はまだ柔らかく、コンクリートとしては未成熟であると考えられる。ヤング率はその後材齢とともに上昇するが、材齢が進むほど頭打ちとなる。直接引張強度は24時間程度で高く、その後低下している。これは20℃、60%RH条件下で気乾養生された試験体は、試験体表面と内部の湿度差によって内部拘束を発生させて微細なひび割れを誘発し、強度を低下させるためと考えられる。それと同時に材齢の経過によって、強度上昇が起こる。この両者が同時に進行するため、引張強度の若材齢経時変化は、複雑な挙動を示すと考えられる。しかし、216時間経過すると、乾燥状態が定常化し、内部拘束の影響は少なくなると考えられる。

調合別に見ると、 $f_t$ は繊維を混入したhfc-c、hfc-mとmatrix-cで差が見られ、繊維補強効果が現れている。しかし、hfc-c、hfc-mの違いはほとんど無く、粗骨材は $f_t$ の発現にあまり影響を及ぼさず、微細ひび割れを抑制する効果も少ないと考えられる。 $E_t$ は粗骨材の混入によって、大きくなることが確認できる。粗骨材は、コンクリート中のモルタル(マトリクス)よりもヤング率が高い。このため、複合材料であるコンクリートのヤング率は変形一体化により、マトリ

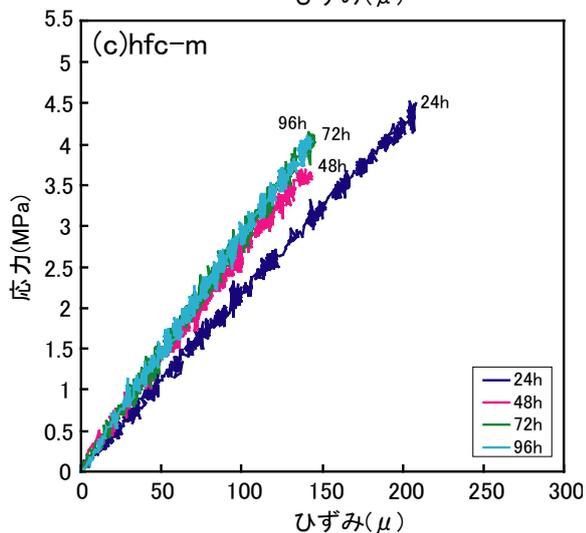
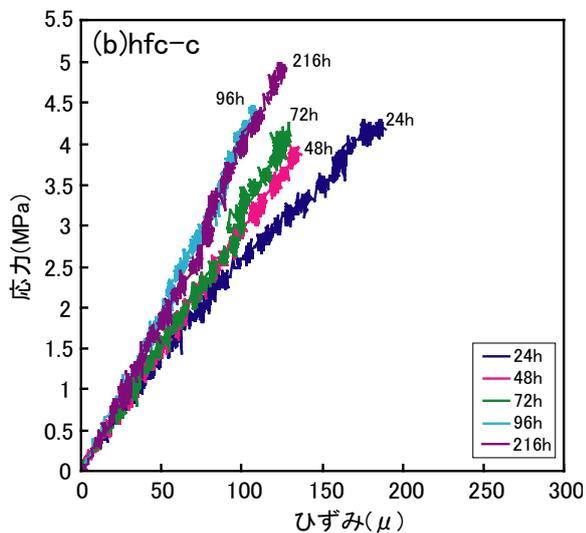
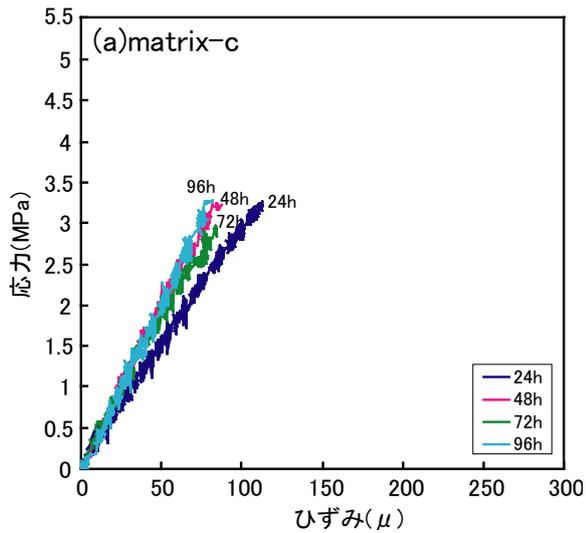


図-2 静的直接引張試験の応力-ひずみ結果

クスだけのヤング率よりも高くなる。一方、繊維のヤング率はマトリクスに比べて高いが、繊維を混入した hfc-c のヤング率は小さくなった。一般に、短繊維を練り混ぜ混合すると、空気が

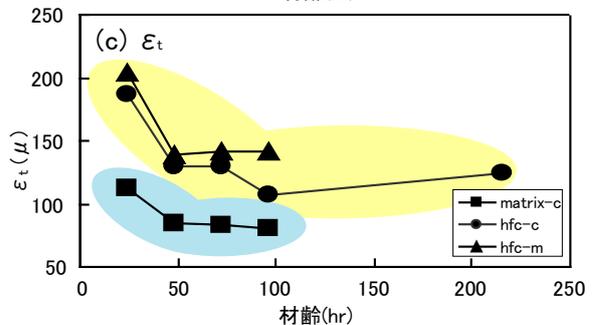
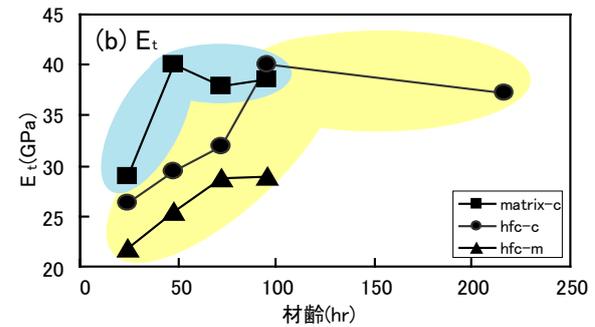
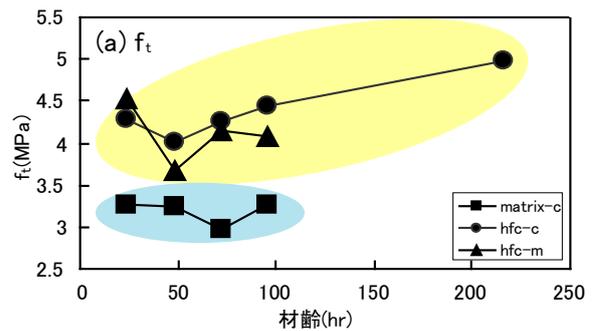


図-3 静的直接引張試験の引張力学特性結果

巻き込まれることが多く、その連行空気の影響が引張力学特性に現われたと考えられる。

$\epsilon_t$  は、繊維を混入していることで繊維補強効果が働き、微細ひび割れを抑制するため大きくなる。また、粗骨材を混入すると、相対的なマトリクスと繊維の体積比を小さくするため、繊維が微細ひび割れを抑制する効果を減少させ、 $\epsilon_t$  が小さくなったと考えられる。

### 3.2 完全拘束試験

図-4、表-5 に完全拘束試験結果を示す。ここで matrix-m, hfc-m は過去の実験データ(m60-2, hfc60-2)<sup>3)</sup>を参照した。matrix-m は自己充填性を有したモルタルである。比較すると、拘束応力の上昇の仕方にはあまり違いは無いが破壊までの拘束材齢に大きな違いが見られる。繊維を混入している方が、微細ひび割れを抑制するので、より長時間拘束载荷に耐えることができる。ま

表-4 静的直接引張試験結果

種類	材齢 (hr)	引張強度 $f_t$ (MPa)	ヤング率 $E_t$ (GPa)	$f_t$ 時ひずみ $\epsilon_t$ ( $\mu$ )
matrix-c	24	3.26	28.9	112.45
	48	3.25	40.1	84.15
	72	2.97	37.9	83.7
	96	3.27	38.5	81.3
hfc-c	24	4.29	26.3	187.45
	48	4.01	29.4	130.4
	72	4.26	32	129.8
	96	4.45	40	106.8
	216	4.99	37.3	124.6
hfc-m	24	4.53	21.8	204.95
	48	3.68	25.5	140
	72	4.14	28.8	142
	96	4.09	28.9	141.4

た、粗骨材のみを混入した matrix-c は 65 時間と最も短時間で破壊した。これは、粗骨材とマトリクスとの界面遷移帯が欠陥となりやすいため生じたと考えられる。

自由収縮ひずみは、繊維混入、粗骨材混入ともにマトリクス単体よりも収縮が小さく、収縮抑制効果が見られる。このことは、粗骨材、繊維は収縮せずに、マトリクスの収縮に伴って作用する拘束引張力で全体の収縮を抑制しているためと考えられる。繊維の収縮抑制については、文献<sup>3)</sup>で定量化している。

### 3.3 拘束引張試験

図-5 に拘束引張試験結果を、図-6、表-6 に各調合条件による引張力学特性を示す。3.1 と同様に、表-6 に従い拘束引張強度  $f_{tr}$ 、剛性  $S_{tr}$ 、 $f_{tr}$  時ひずみ  $\epsilon_{tr}$  とする。剛性は直接引張時の応力-ひずみ曲線の傾きから評価した。 $f_{tr}$  は  $f_t$  と同様でほぼ強度低下は見られないが、繊維無混入のものは強度低下の傾向が見られる。この理由は微細ひび割れ説<sup>2)</sup>により考えられる。 $S_{tr}$  も繊維無混入のものが低下しているのに対し、繊維混入のものは、ほぼ一定値をとっていることから、微細ひび割れが剛性低下に寄与していることがわかる。拘束時間が長くなると微細ひび割れが増え、剛性は低下するが、繊維を混入することで微細ひび割れの発生や進展を抑制していると考えられる。 $\epsilon_{tr}$  は調合条件に関係なく材齢と共に上昇している。また、繊維混入している方が

表-5 完全拘束試験結果

種類	最大拘束応力時		
	拘束材齢 (hr)	拘束応力 (MPa)	拘束ひずみ ( $\mu$ )
matrix-c	65.33	3.32	175.42
matrix-m	85.2	3.81	278.8
hfc-c	138.03	4.16	196.67
hfc-m	95.4	3.94	253.3

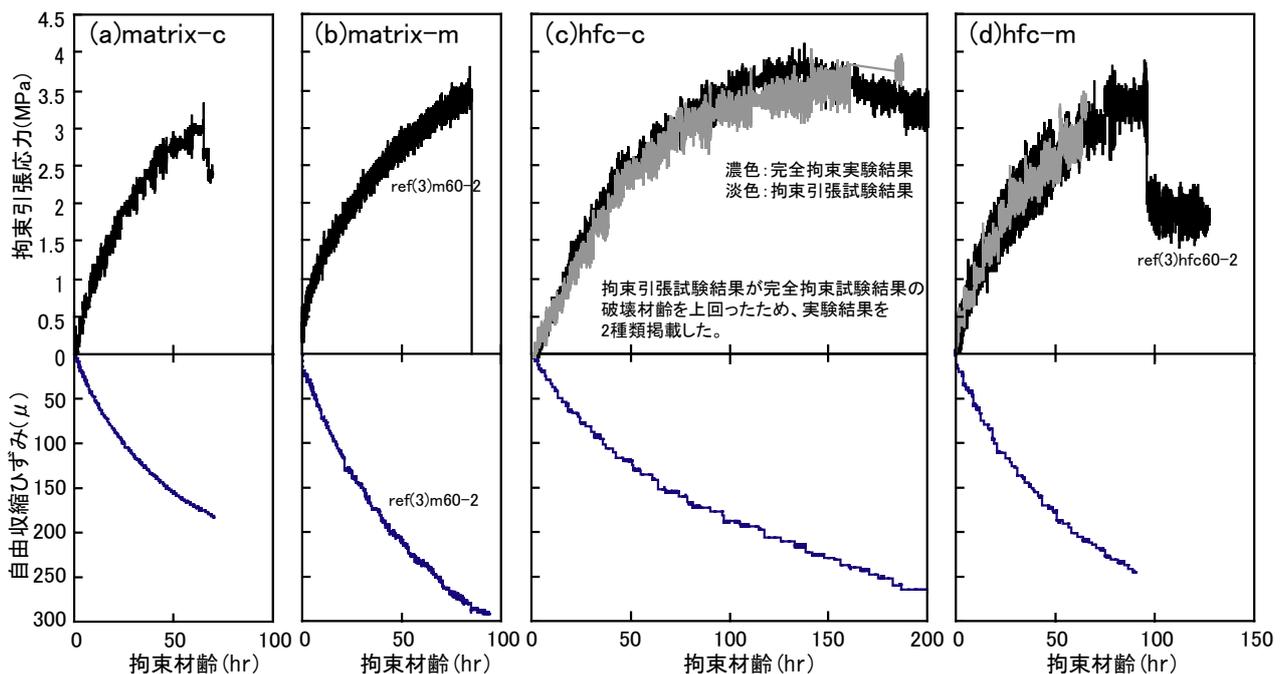


図-4 完全拘束試験の応力-ひずみ経時変化結果

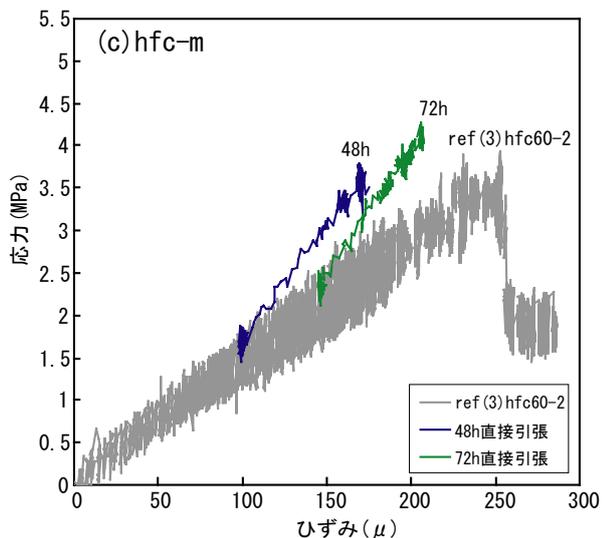
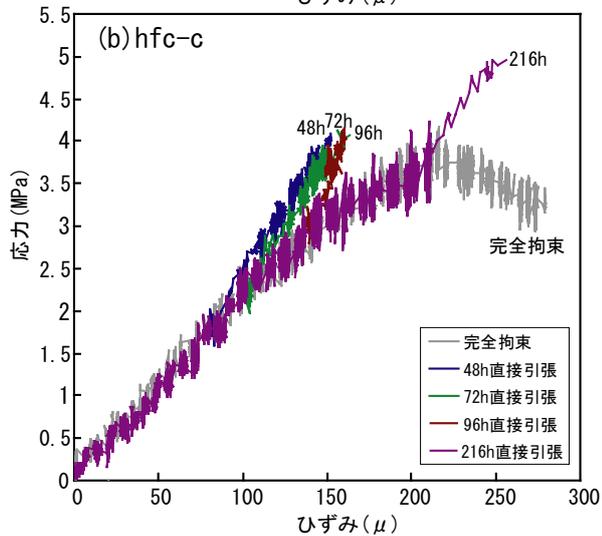
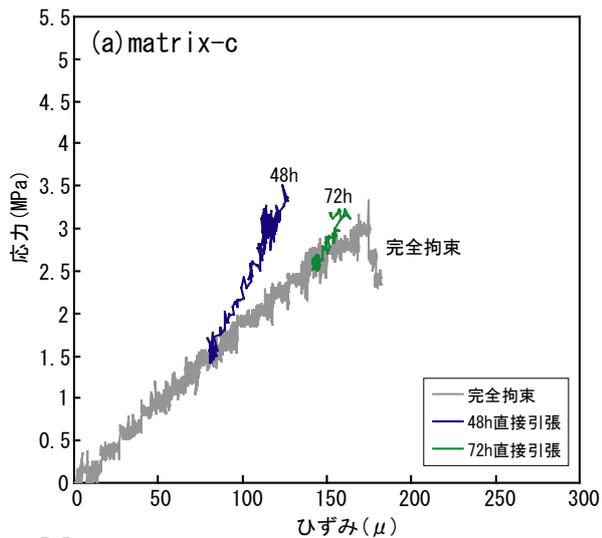


図-5 拘束引張試験の応力-ひずみ結果

繊維補強効果により、同材齢での  $\epsilon_{tr}$  や、その後の  $\epsilon_{tr}$  の伸び率が大きくなる。

### 3.4 引張力学特性および拘束作用の影響

図-7 に直接引張試験と拘束引張試験の同一

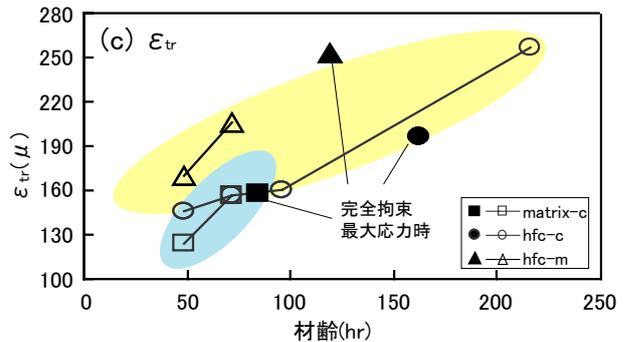
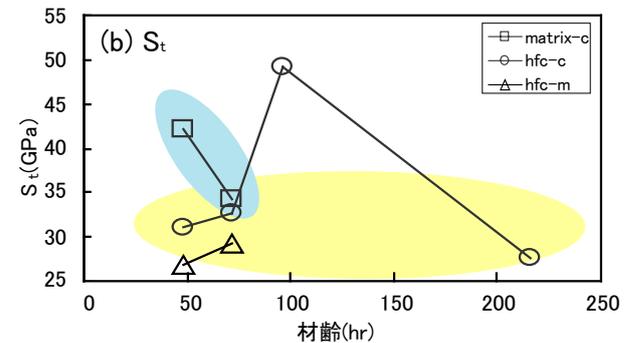
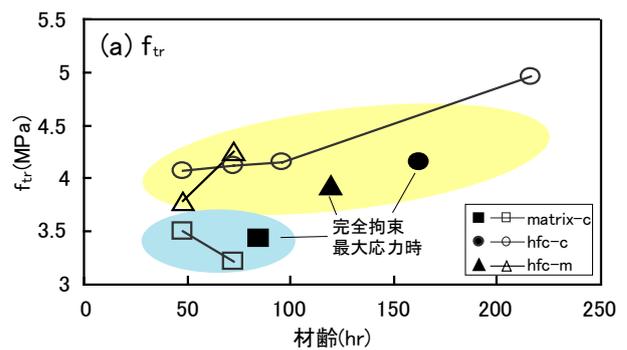


図-6 拘束引張試験の引張力学特性結果

材齢での引張力学特性の比較結果を示す。若材齢からの引張拘束作用を受けると、引張クリープによって、試験体内部に微細ひび割れのダメージが蓄積される。(a) 図の引張強度比較から、繊維補強した方が、強度が高く、微細ひび割れを抑制していることがわかる。(b) 図の剛性を比較した場合、完全拘束から静的直接引張に切り替えた時の、応力-ひずみの状態が大きく関与している。応力-ひずみが増大すると、拘束作用による微細ひび割れが多くなる。そのため、切り替え材齢が早い場合は、拘束作用による微細ひび割れが少なく直接引張と拘束引張とが1対1関係になっている。しかし、最大強度時レベルに近いレベルで静的直接引張をした場合、概ね拘束引張の剛性の方が小さくなる傾向があり、拘束によってダメージが蓄積されていることが

表一6 拘束引張試験結果

種類	材齢 (hr)	拘束引張強度 $f_{tr}$ (MPa)	剛性 $S_t$ (GPa)	$f_{tr}$ 時ひずみ $\epsilon_{tr}$ ( $\mu$ )
matrix-c	48	3.5	42.2	124.36
	72	3.22	34.3	157.32
hfc-c	48	4.08	31.1	145.98
	72	4.13	32.7	156.9
	96	4.15	49.2	160.72
hfc-m	216	4.96	27.6	256.61
	48	3.79	26.8	169.82
	72	4.26	29.2	206.37

わかる。また、(c) 図より、拘束引張の方がひずみ量が大きく、引張クリープが強く作用していることがわかる。

#### 4. まとめ

(1) 持続拘束引張後の直接引張強度は、同材齢の無拘束の直接引張強度とほぼ同じであるが、剛性は拘束を長期間受けると、減少傾向にある。

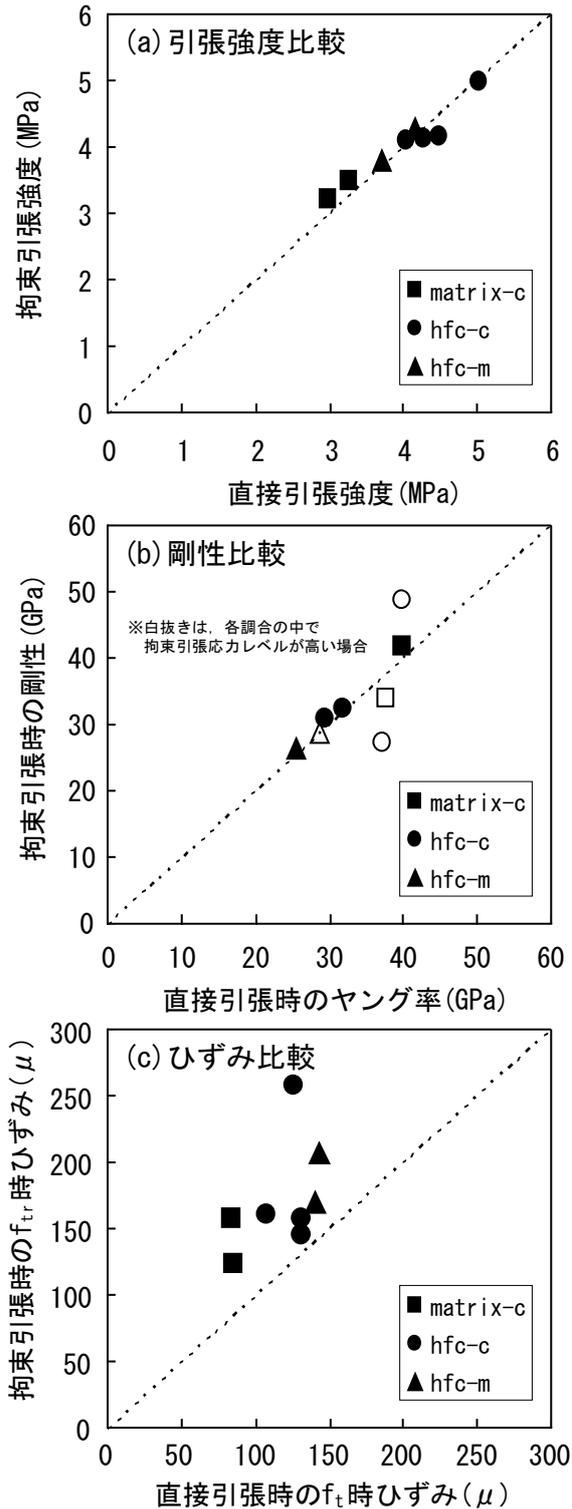
(2) 拘束状態が長時間作用すると、破壊しやすくなるが、ハイブリッド繊維補強により破壊までの時間を遅延、抑制できる。

#### 謝辞

本研究の一部は、平成 17, 18 年度文部科学省科学研究費助成金、若手研究 B(課題番号:17760448, 研究代表者:中村成春), ならびに財団法人トステム建材産業振興財団平成 17 年度(第 14 回)研究助成金の助成を受けました。また、本論文での実験実施にあたり、当時宇都宮大学 4 年生の井坂幸俊君に協力を頂きました。ここに記し、謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) Al-Kubaisy, M.A., Young, A.G., : Failure of concrete under sustained tension, Magazine of Concrete Research, Vol.27, No.92, pp.171-178, Sep.1975
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 丸善, 2006.2



図一7 同一材齢での引張力学特性比較結果

- 3) 小島一樹ほか: PVA 繊維を使用したハイブリッド・ファイバー・コンクリートの拘束収縮変形特性ー完全拘束実験と収縮変形力学モデル化の検討ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)材料施工, vol.A-1, pp.311-312, 2006.9