

論文 ひずみ硬化セメント複合材料の引張靱性能へ及ぼす試験体寸法および固定条件の影響

菊田 貴恒^{*1}・三橋 博三^{*2}・西脇 智哉^{*3}

要旨: 一軸引張試験法は材料の応力-ひずみ関係を直接的に計測できることから、引張応力時の靱性を期待するひずみ硬化セメント複合材料などの材料特性の評価に有効な試験法であるとされている。しかし、一軸引張試験法には材料性能に及ぼす固定条件の影響など、まだ不明な部分も多数存在している。そこで本研究では、ひずみ硬化セメント複合材料の靱性能に及ぼす試験体寸法及び固定条件をパラメータとした実験を行った結果、薄板状のダンベル型試験体を用いた一軸引張試験においては、引張終局ひずみに及ぼす試験体寸法や試験体の両端の固定条件の違いによる影響は非常に小さいことが明らかとなった。

キーワード: ひずみ硬化型セメント複合材料, 一軸引張試験, ダンベル型試験体, 固定条件

1. はじめに

ひずみ硬化セメント複合材料 (Strain Hardening Cementitious Composites, 以下 SHCC) は、初期ひび割れ後に引張応力も引張ひずみも共に増加する挙動を示し、その挙動過程では、複数ひび割れ (Multiple Cracking: 引張力に対して直角方向に多数のひび割れが生ずる状態) が現れる特徴を有しており、ひび割れ抵抗性能が極めて高く、靱性に富んだ材料である。また、SHCC のひび割れ幅は 0.1mm 前後から 0.2mm 以下となり、引張ひずみの増加に伴い、ひび割れ幅が増加するのではなく、ひび割れ本数が増加するため¹⁾、従来のコンクリートに比して、ひび割れが局所化しにくい特徴がある。近年では実際の構造物にも SHCC の適用が始まってきており^{2), 3)}、構造物の長寿命化に繋がると考えられる⁴⁾。

SHCC の優れた性質を生かした構造物への適用を今後より一層進めるには、引張性状の評価法の規準化が重要であり、特に一軸引張応力下における引張応力ひずみ関係を適切に評価することが必要である。これまでに一軸引張性状を評価するための試験方法は各所で提案されており、例えば佐藤ら⁵⁾ はシリンダー状の試験体を用いる試験方法を、福田ら⁶⁾ は薄板のダンベル型試験体を用いる試験方法を提案している。また、コンクリート工学協会の高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会 (2001~2004 六郷委員長) において、高靱性複合材料の共通引張試験が実施され、数種類の試験法による結果がまとめられ、それぞれの試験法による差異が報告されている⁷⁾。

これら複数提案されている一軸引張試験法の中で、薄板のダンベル型試験体を用いる試験方法は、SHCC の特

徴であるひずみ硬化域での応力ひずみ関係を評価するために、多数用いられており、近年では一部の現場施工においても適用されている。この試験方法は、薄板状の試験体を用いるため、繊維の配向性が 2 次元的になってしまうことや、試験体作製に専用の型枠を要するなどの問題点も挙げられるが、試験が他の試験方法と比して容易であり、尚且つ短時間に多くの試験を実施できる等の特徴もあることから、効率性の優れた一軸引張試験方法でもあり、SHCC の構造物への適用をより進めるのに適した試験方法であると考えられる。したがって、このダンベル型試験体を用いた一軸引張試験によって、SHCC の引張性状を適切に評価するためにも、引張性状に影響を及ぼすとされる、試験体両端の固定条件や試験体寸法の差異による評価値の違いをより詳細に把握しておく必要がある。森山ら⁸⁾ は、厚さ 13mm, 30mm, 50mm のダンベル型試験体を用い、その断面寸法の違いによる応力ひずみ関係や、ひび割れ発生傾向等を実験的に明らかにしているが、試験体数が比較的少なく、試験体の固定条件もピン固定に限定されている。

そこで本研究では、薄板のダンベル型試験体を用いた一軸引張試験を実施し、試験体の寸法を 2 段階 (厚さ 13mm, 30mm) に変化させ、固定条件を両端固定 (fix-fix) とピン固定 (pin-fix) に設定し、靱性能評価値へのそれぞれの影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調査

本研究に使用した材料は、早強ポルトランドセメント、フライアッシュ II 種、細骨材として 7 号珪砂、ポリカル

*1 東北大学大学院 都市・建築学専攻 助教・博士 (工学) (正会員)

*2 東北工業大学 工学部建築学科 教授・工博 (正会員)

*3 東北大学大学院 都市・建築学専攻 准教授・博士 (工学) (正会員)

ボン酸系高性能減水剤，セルロース系増粘剤である。詳細を表-1 に示す。また，使用したポリビニールアルコール繊維（以下 PVA 繊維）の物性値を表-2 に示す。混入した PVA 繊維は 2 種類あり，これは著者ら⁹⁾の研究を参考に，繊維径，繊維長の違う 2 種類の PVA 繊維を混入したハイブリット型の繊維配合とした。この結果，1 種類の PVA 繊維を単独で混入した場合よりも，ひずみ硬化域の増加が予備試験から確認され，試験体寸法や固定条件の影響を，より大きな変形域でも確認できることとなることが期待された。

本研究に用いた調合を表-3 に示す。水結合材比 (W/B) を 40Wt.%，砂結合材比 (S/B) を 40Wt.% に設定し，マトリクスと繊維の分離低減，及び繊維の分散性を向上させる目的で増粘剤を 0.3 Wt.% 混入した。PVA 繊維は R100 を 2.3Vol.%，R15 を 0.75Vol.% 混入し総繊維量を 3.05 Vol.% とした。

2.2 練混ぜおよび養生

試験体の練混ぜには，容量 10 リットルのオムニミキサーを用い，粉体及び細骨材を空練後，水と高性能減水剤を投入して 4 分混練，PVA-R15 繊維を投入して 4 分混練，最後に PVA-R100 繊維を投入して 4 分混練した。練上がり直後のテーブルフロー値は概ね 210mm であった。試験体の養生方法は，打設後 24 時間湿空養生を行い，脱形後は標準養生として材齢 7 日で実験を行った。

2.3 試験体形状および一軸引張試験方法

本研究で使用したダンベル型試験体は，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）（土木学会発行）³⁾ に記されたダンベル型試験体と同形状とし，引張性状に及ぼす厚さの影響を検討するため，厚さ 13mm と 30mm の 2 種類の試験体を製作した。

一軸引張試験は最大容量 30kN の小型万能試験機（インストロン社製）を用い，引張性状に及ぼす試験体端部の固定条件の影響を検討するために，万能試験機のクロスヘッド側の固定条件を固定及びピン（ユニバーサルジョイント）とし，載荷速度 0.4mm/min で変位制御にて実施した。写真-1 に小型万能試験機の全景を示す。万能試験機への試験体の取り付けには専用の治具を用い，引張力の伝達が十分に行えるように，試験体の前後を厚さ 10mm の鉄板で挟み込み，ネジ止めた。試験体挟み込み治具の詳細を図-1 に示す。

試験体の変位計測は，図-1 に示すように試験体の材軸と平行になるように高感度変位計を設置すると共に，面外方向への変形を評価する目的で，試験体両端部を挟み込む鉄板にパイ型変位計を設置した。

2.4 試験条件と試験体名称

表-4 に試験体名称とその試験条件を示す。試験体は 1 バッチごとに 24 体 (t=13mm:12 体，t=30mm:12 体)

表-1 使用材料

材料名称	略号	備考
セメント	C	早強ポルトランドセメント(密度:3.14g/cm ³)
細骨材	S	珪砂7号(密度:2.61g/cm ³)
フライアッシュ	FA	フライアッシュ II 種(密度:2.33g/cm ³)
高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系(密度:1.05g/cm ³)
増粘剤	V	高粘性タイプ(密度:1.25g/cm ³)

表-2 使用繊維物性

繊維名	略号	密度	長さ	直径	引張強度	弾性係数
		g/cm ³	mm	μm	MPa	GPa
ポリビニールアルコール (PVA)	R15	1.3	6	40	1600	40
	R100		12	100	1100	25

表-3 調合

W/B	S/B	FA/B	SP/B	V/W	R100 12mm	R15 6mm
wt.%	wt.%	wt.%	wt.%	wt.%	vol.%	vol.%
40	40	30	0.9	0.3	2.3	0.75

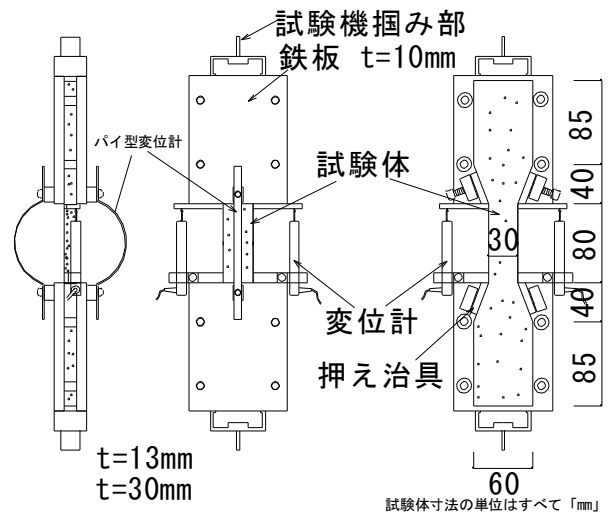


図-1 挟み込み治具詳細



写真-1 小型万能試験機

打設し、試験条件ごとに6体の試験体を用いた。試験は試験体厚さと固定条件の影響を検討するために、試験結果のばらつきを考慮しバッチ1, 2の計48体用いることとした。試験体名称中に、固定条件は両端固定のFFシリーズとピン固定のPFシリーズ、それに続く2桁の数字13及び30は試験体厚さを表す。さらに、最後の数字はバッチの番号を表す。なお、試験体寸法は試験体ごとに計測し、それぞれの計測した値を用いてひび割れ応力や最大引張応力を算出した。

本研究に用いた厚さ13mmおよび30mm試験体の硬化後の平均厚さはそれぞれ13.56mm(標準偏差:0.24mm)、30.31mm(標準偏差:0.36mm)であり、参考文献³⁾に示される試験体厚さの許容誤差1mm以内に収まっている。

2.5 引張終局ひずみの定義

SHCCの引張性状における評価項目は、ひび割れ応力、最大引張応力および引張終局ひずみとした。図-2は引張応力ひずみ関係における力学特性値の定義を示したものである。これらのうち、SHCCの引張性状評価において特に重要となる引張終局ひずみに関しては、ひずみ硬化挙動から軟化挙動に移行する点、すなわちあるひび割れの拡幅を伴いながら荷重が低下し始める点を引張終局ひずみと定義した。

3. 実験結果および考察

3.1 引張応力-ひずみ関係

一軸引張試験から得られた、バッチ1シリーズの引張応力-ひずみ関係を図-3に示す。いずれの試験条件においても、ひび割れ発生後、ひずみの増大に伴ってひずみ硬化挙動が確認できる。

試験体厚さ13mmのFF13-1シリーズでは、すべての試験体においてひずみがおおむね3%付近までに達し、一部の試験体では引張終局ひずみが5%を超える値となっている。PF13-1シリーズは、引張終局ひずみが1.7%から6.5%と値の幅が広く、6体中4体の引張終局ひずみが3%未満となった。また、最大引張応力の値もばらつき大きい結果を示した。

試験体厚さ30mmのFF30-1シリーズは、引張終局ひずみが1.2%から5.2%と値の幅が広く、同じ固定条件のFF13-1シリーズの引張応力-ひずみ関係と比較しても、そのばらつきが大きいことがわかる。一方、PF30-1シリーズは、ひび割れ発生後のひずみ硬化挙動が安定しており、6体中3体の引張終局ひずみが5%を超える大きな値を示し、また、最大引張応力の値も他の試験条件と比較して大きくなっている。

3.2 ひび割れ応力および最大引張応力

ひび割れ応力における試験体厚さと固定条件の関係について図-4に示す。同一厚さの試験体について固定

表-4 試験体名称と試験条件

試験体名称	厚さ (mm)	固定条件	バッチ
FF13-1	13	Fix-Fix	1
PF13-1	13	Pin-Fix	
FF30-1	30	Fix-Fix	
PF30-1	30	Pin-Fix	
FF13-2	13	Fix-Fix	2
PF13-2	13	Pin-Fix	
FF30-2	30	Fix-Fix	
PF30-2	30	Pin-Fix	

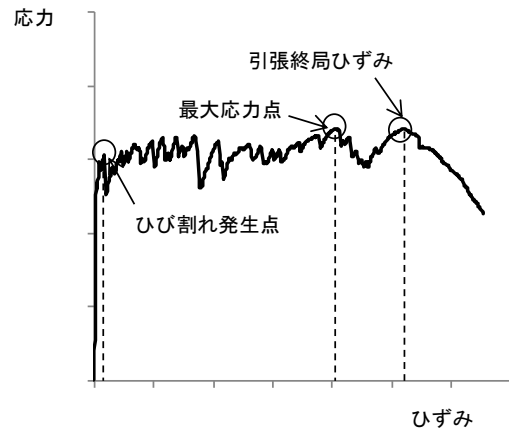
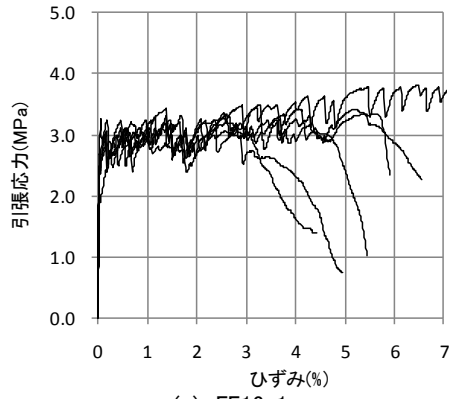


図-2 SHCCの引張応力-ひずみ関係における力学特性値の定義

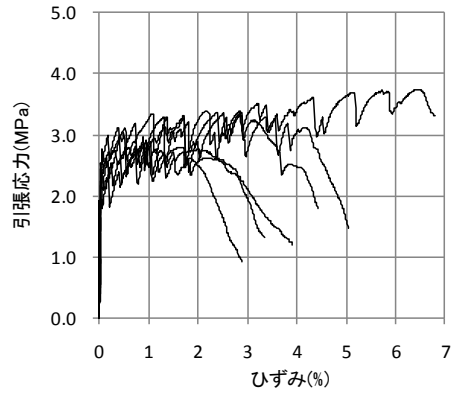
条件の影響に着目すると、厚さ13mmの試験体では、固定条件をPin-Fixとした場合の方が、Fix-Fixとした場合と比べて約7.6%ひび割れ応力が低い値を示している。一方、厚さ30mmの試験体では、固定条件の違いによるひび割れ応力の差はほとんど生じていない。これは、厚さ13mm試験体の断面形状が幅に対し厚さが薄く、なおかつ弱点となりやすい打設面が薄い面側になるため、試験体の回転拘束が低いPin-Fixの場合に、その影響が現れたためと考えられる。

ひび割れ応力に対する試験体厚さの影響については、特にFix-Fixの固定条件の場合に顕著に現われており、30mm試験体を用いた方が13mm試験体より平均4.7%程度低いひび割れ応力値となった。このひび割れ応力値の差については、試験体寸法が大きくなることにより、ひび割れを引き起こす欠陥の存在する確率が増加することや、打込み時の欠陥生起確率が大きくなるためであると推定されるが、固定条件をPin-Fixに限定すると、試験体厚さの影響はほとんど現われていないことから、ひび割れ応力に及ぼすその影響は非常に小さいと考えられる。

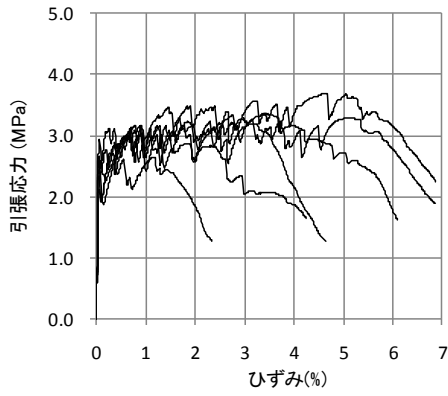
図-5に試験体厚さ及び固定条件と最大引張応力の関係を示す。厚さ13mmの試験体では、ひび割れ応力と同様に固定条件をPin-Fixとした場合の方が、最大引張応



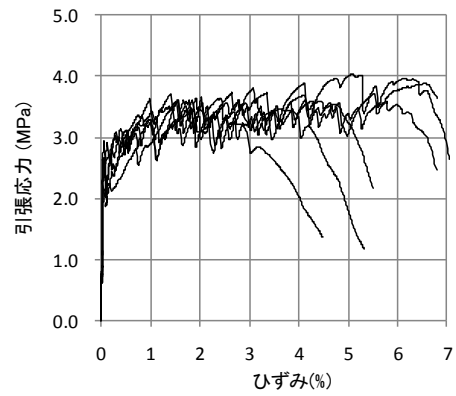
(a) FF13-1



(b) PF13-1

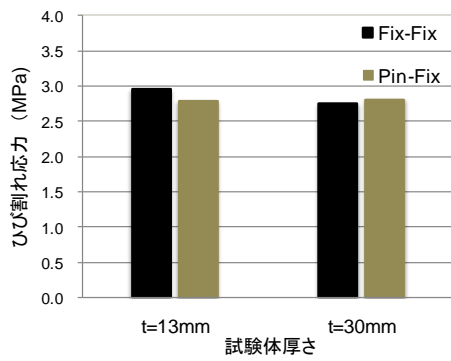


(c) FF30-1

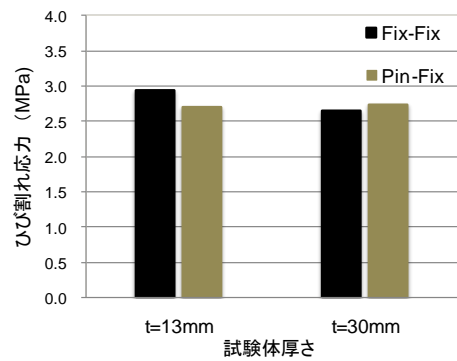


(d) PF30-1

図-3 引張応力-ひずみ関係 (バッチ1)

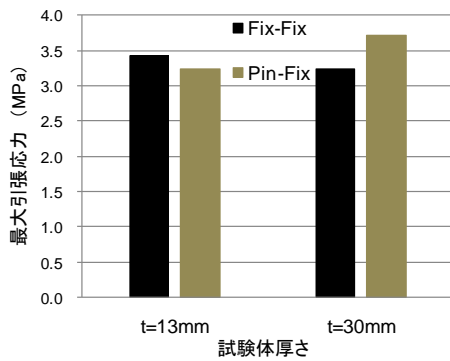


(a) バッチ 1

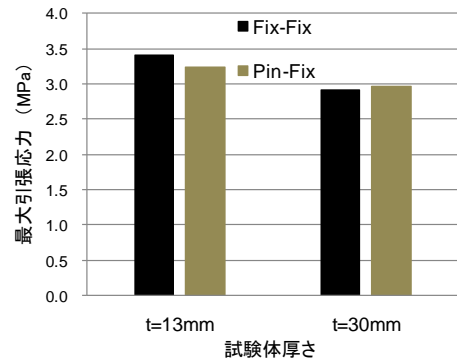


(b) バッチ 2

図-4 ひび割れ応力と試験体寸法及び固定条件の関係



(a) バッチ 1



(b) バッチ 2

図-5 最大引張応力と試験体寸法及び固定条件の関係

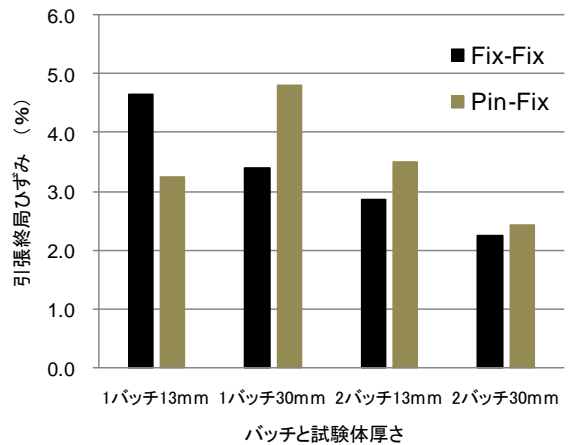
力が小さな値となった。しかし、この固定条件の違いによる最大引張応力の差は、ひび割れ応力に達した時点での応力差とほぼ同程度であることから、ひび割れが生じた後の応力上昇に固定条件が与える影響はほぼ無いと考えられる。また、厚さ 30mm の試験体についても 1 バッチ目の PF30-1 シリーズの最大引張応力が特異的に大きな値を示しているが、他の試験体結果から判断して、厚さ 30mm の試験体も厚さ 13mm 試験体と同じ傾向にあると考えられる。

試験体厚さによる最大引張応力への影響は、固定条件に関わらず、厚さごとの平均値を算出すると、厚さ 13mm 試験体の最大引張応力値が 3.30MPa、厚さ 30mm の試験体ではバッチごとの差が若干見られるが約 3.2MPa と、その影響は非常に限定的である。一般的な繊維の混入されたセメント複合材料の場合、断面寸法が大きくなることは、繊維の配向性がよりランダムになるため繊維の架橋に対して不利になることが知られているが、本研究で得られた結果からは、試験体厚さが 13mm と 30mm 程度の厚さ比では、そのような影響はほとんど無いと考えられる。

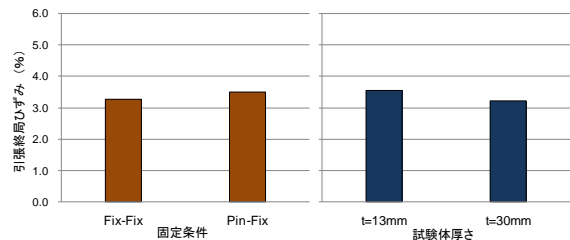
3.3 引張終局ひずみ

試験体両側面に取り付けられた高感度変位計で計測された、引張終局ひずみと試験条件の関係を図-6 に示す。図-6(a)より、固定条件を Fix-Fix とした場合、厚さ 13mm 試験体の FF13-1 の引張終局ひずみが最も大きく平均 4.6% であった。一方、固定条件を Pin-Fix とした場合は、PF30-1 の引張終局ひずみが最も大きく平均 4.9% の値を示しており、Pin-Fix とした場合の方が若干大きな値となった。また、図-6(b)に示すように試験体厚さに関わらず、同固定条件時の引張終局ひずみを平均すると、Fix-Fix とした場合平均 3.3%、Pin-Fix とした場合は平均 3.5% となり、固定条件の違いによる引張終局ひずみ値の差は 0.2% 程度の小さな差異であることがわかる。一方、図-6(c)に示すように固定条件に関わらず、試験体厚さごとの引張終局ひずみ値を平均すると、厚さ 13mm 試験体の平均値が 3.56%、厚さ 30mm 試験体の平均値が 3.22% となり、13mm 試験体を用いた方が引張終局ひずみの値が若干大きくなった。

これらの結果から、薄板のダンベル型試験体を用いた場合、引張終局ひずみに与える固定条件および試験体厚さの影響は、ひずみの差で 0.2%~0.3% 程度と極小さい範囲にあるものと考えられる。Mechtcherine¹⁰⁾らは繊維の配向性の観点から、試験体表面からの増加する距離で配向性はより不規則になるとし、それにより、小さな断面で計測した引張性能値は、より大きな断面から得られた引張性能値よりも高い値を示すとしているが、厚さ 13mm 試験体と 30mm 試験体との比較においては、断面

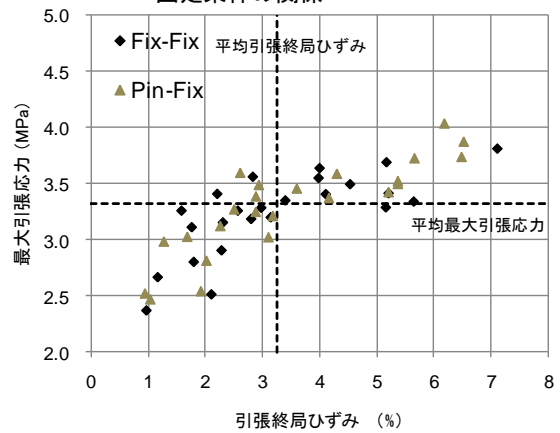


(a) 各試験シリーズの平均引張終局ひずみ

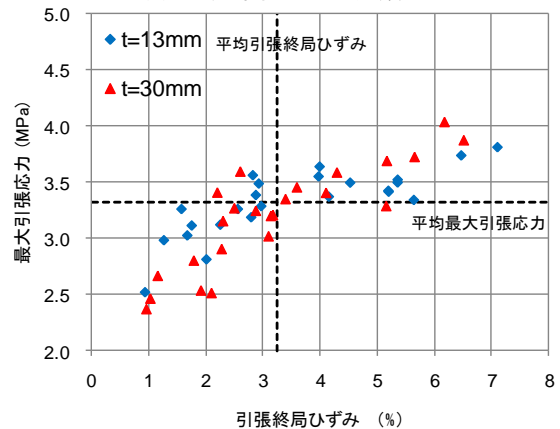


(b) 各固定条件の平均引張終局ひずみ (c) 各試験体寸法の平均引張終局ひずみ

図-6 引張終局ひずみと試験体寸法及び固定条件の関係



(a) 固定条件による分類



(b) 試験体寸法による分類

図-7 バッチ 1, 2 全 48 試験体の最大引張応力-引張終局ひずみ関係

の厚さ比が比較的小さいため、繊維配向の変化が微小となり、その結果本研究では引張終局ひずみ値に大きな差異が生じなかったものと考えられる。

図-7 にバッチ 1, 2 全試験体の最大引張応力-引張終局ひずみ関係を、固定条件および試験体厚さで分類しプロットしたものを示す。なお、図中に全試験体の最大引張応力と引張終局ひずみの平均値を点線で示す。図-7 より、試験条件ごとの引張終局ひずみと最大引張応力の分布を検討すると、引張終局ひずみおよび最大引張応力が共に平均値より大きい試験体は、固定条件別に、Fix-Fix が 10 体、Pin-Fix が 10 体と同数であり、試験体厚さにおいては、13mm 試験体が 11 体、30mm 試験体が 9 体となった。

一方、それぞれの値が平均値より小さい試験体は、固定条件別に Fix-Fix が 12 体、Pin-Fix が 11 体となり、試験体厚さにおいては、13mm 試験体が 10 体、30mm 試験体が 13 体となった。これらの結果より、引張終局ひずみおよび最大引張応力の値が共に平均値より大きい領域および小さい領域には、それぞれの試験条件の試験体がほぼ均等に分布していることがわかる。

したがって、薄板のダンベル型試験体を用いた場合、最大引張応力と引張終局ひずみの関係において、固定条件や試験体厚さによる特定の分布傾向は生じず、むしろ試験体ごとの繊維分散の不均一性などに起因すると思われる材料特性のばらつきの方が靱性能により大きな影響を及ぼしているものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、薄板状のダンベル型試験体を用いた一軸引張試験法において、引張特性に及ぼす試験体寸法と固定条件の影響を検討した。その結果から得られた知見を以下に示す。

- (1) ひび割れ応力及び最大引張応力に及ぼす固定条件および試験体厚さの影響は非常に小さい。
- (2) 薄板のダンベル型試験体を用いた場合、引張終局ひずみに与える固定条件および試験体厚さの影響は、ひずみの差で 0.2%~0.3%程度と極小さい。
- (3) 薄板のダンベル型試験体を用いた場合、最大引張応力と引張終局ひずみの関係において、固定条件や試

験体厚さによる特定の傾向は確認されず、むしろ試験体ごとの繊維分散の不均一性などに起因すると思われる材料特性のばらつきの方が靱性能により大きな影響を及ぼしているものと考えられる。

参考文献

- 1) 稲熊唯史, 閑田徹志, 林承燦, 内田裕市: 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状の評価, コンクリート工学, Vol.44, No.7, pp.3-8, 2006.7
- 2) 丸田誠ほか: プレキャスト ECC 連結梁を用いた高層 RC 新架構, コンクリート工学, Vol.43, No.11, pp.18-26, 2005
- 3) 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), 土木学会コンクリート委員会, 2007
- 4) (社)日本コンクリート工学協会: 高靱性セメント複合材料を知る・使う・使う, 2002
- 5) 佐藤幸博, 福山洋, 諏訪田晴彦: 高靱性セメント系複合材料の一軸引張-圧縮繰返し試験方法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 539 号, pp.7-12, 2001
- 6) 福田一郎, 平石剛紀, 閑田徹志, 須田久美子: 高靱性セメント複合材料に生じる引張ひずみとひび割れ幅の関係に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.27, pp.353-358, 2005
- 7) Knakubo, T.: Tnsile Characteristics Evaluation Method for Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composites, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.4, No.1, pp.3-17, 2006
- 8) 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報告集, Vol.28, No.1, pp.353-358, 2006
- 9) 三橋博三, 菊池俊文, 秋田宏, 山田人司: 高靱性セメント複合材料の簡易型引張性能評価法に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.60, pp.483-490, 2006
- 10) Mechtcherine, V., Jun, P.: Behavior of Strain Hardening Cement-Based Composites in Tension and Compression, Seventh Intl. RILEM Symp. on Fibre Reinforced Concrete, pp.471-481, 2008
- 11) 秋田宏, 小出英夫, 三橋博三: コンクリートの直接引張試験における 4 つの誤解, コンクリート工学論文集, Vol.16, No.1, pp.77-86, 2005