論文 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

森山 守*1・林承 燦*2・内田裕市*3・六郷恵哲*4

要旨:本研究では,HPFRCC を対象として,簡便な引張試験方法を提案するとともに,一 軸直接引張試験を行い,HPFRCC の引張性能と供試体厚さの影響について検討した。本研究 で提案した試験装置により引張試験を確実に行うことが可能であった。供試体厚さの違いに よる引張強度や引張降伏強度の差はほとんど認められなかったが,引張終局ひずみのバラツ キは,供試体厚さが大きいほど大きくなる傾向であった。全ての供試体厚さにおいて,引張 終局ひずみが4%以上の場合、ひずみが約1%までは,ひび割れの幅が大きくなり,それ以上 のひずみでは,ひび割れ幅の増大が小さく,最大ひび割れ幅は0.2mm以下であった。 キーワード:HPFRCC,ひずみ硬化,直接引張試験,複数ひび割れ

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と呼ぶ)は,引張力を受 けても脆性的に破壊せず,変形(あるいはひ ずみ)の増大に伴って,引張荷重(あるいは 引張応力)が増加する「ひずみ硬化特性」と, 複数の細かいひび割れが分散して生じる「複 数ひび割れ特性」を示す点に特徴がある。こ のような,従来のモルタルやコンクリートと 異なる特性を利用目的や使用条件に応じて有 効に利用するためには,引張終局ひずみ(引 張ピークひずみ),引張応力ひずみ曲線,ひ び割れ性状(幅,本数,間隔)並びにこれら 引張性能への寸法効果等を明らかにするとと もに,引張性能の評価試験方法を確立するこ とが大切である^{1, 2, 3)}。

本研究では,ひずみ硬化挙動を示す複数微 細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (HPFRCC)を対象として,ダンベル形状の供試 体を用いた簡便な引張試験方法を提案する ことを目的としている。また,提案した試験 方法により、HPFRCCの一軸直接引張試験を行 い、HPFRCCの引張性能やその供試体厚さの 影響について検討する。

2. 一軸直接引張試験と試験装置の提案 2.1 引張試験に求める性能と問題点

HPFRCC 引張性能の評価には,ひび割れ(幅, 本数,間隔),引張強度,引張降伏強度,引 張終局ひずみが特に重要となる。引張試験に おおける,以上の項目を安定的に計測するた めには,以下の三つの問題点に対する対策が 必要である。まず, 掴み部分の破壊を生じ させることなく供試体に試験機から引張力を 伝達すること, 供試体の「く」の字形の変 形を抑えること, 初期ひび割れ発生後のひ ずみ硬化部分の挙動を安定的に制御すること が重要である。上記の の問題については, ひび割れは供試体のある箇所から断面全体に 広がろうとするため,供試体の「く」の字形 の変形を完全に防ぐことは本質的に不可能で はあるが,低減することは可能であると考え

*1 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) *2 (株)デーロス メンテナンス事業本部 工博 (正会員) *3 岐阜大学 総合情報メディアセンター教授 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)



図 - 1 引張試験装置の形状

られる。なお,普通コンクリートに比べて HPFRC の場合には,ひび割れ幅が大きくなら ずに進展する傾向にあるので,「く」の字形 の変形は,大きくなり難い。

本研究では,上記 ~ の引張試験の問題 点を解決するとともに,供試体に生じた複数 ひび割れを容易に観察することを目標とし, 操作性と安全性に配慮した簡便な引張載荷試 験装置を開発した。

2.2 引張試験装置と操作手順

開発した引張試験装置を図 - 1と写真 - 1に 示す。鋼製フレーム(質量:約30kg,外寸: 250×200×500mm)の中で,上下の掴み具によ リダンベル形状の供試体の肩の部分を掴んで いる。掴み具に供試体を摩擦力により固定し て引張力を伝達する構造¹⁾も用いられている が,ここでは,掴み具により供試体の肩の部 分を掴んで引張力を伝達させる構造とした。

なお,引張試験機への供試体の取り付けや 取り外しを容易とするため,上下の掴み具と もに,一方(図 1の左側)の掴み具は底板に固 定させたが,他方(右側)の掴み具は左右にス ライド(約5mm)できる構造とした。供試体の セット後には,上下の右側の掴み具を底板に ボルトで固定した。上下とも、左右の掴み具

写真 - 1 引張試験装置の写真

を掴み具固定具を用いて固定した。上下の掴 み具が同一直線上となるように,掴み具連結 棒を使用した。

建研式付着試験装置の加力部分(4kg,手 回し式)を鋼製フレーム上に置き,加力棒を 介して供試体へ引張力を与えた。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。引張試験の境界条件としては,下 側掴み具は,鋼製フレームの底板に固定させ た「固定支持」とし,上側掴み具は加力棒の 中にヒンジを設け,「ピン支持」とした。

引張試験における荷重-変位関係は,供試体に直接取り付けた変位計と建研式付着試験 装置の上面に設けたロードセルにより測定した。

3. 引張性能と寸法効果

- 3.1 実験概要
 - (1) 使用材料

HPFRCC の配合ならびに短繊維の物性を表 - 1 に示す。HPFRCC マトリックスには,プレ ミックスされたポリマーセメントモルタルに 粗骨材(Gmax=10mm,単位量:323 kg/m³)を 混入したものを用いた。繊維(混入率:2vol%) には,長さ12mm(直径40µm)のPVA(polyvinyl

| 表 1 HPFRUUの配 |
|--------------|
|--------------|

| 単位量(kg/m³) | | | | スランプ | 穴与旱 | |
|------------|-----|------|-----|--------|-------|------|
| モルタル | 粗骨材 | ポリマー | 水 | PVA 繊維 | フロー | エメ里 |
| 1225 | 323 | 71 | 257 | 26 | 420mm | 6.8% |

表-2 供試体の概要

| 供試体名 | 供試体厚さ(mm) | 圧縮強度 (MPa) | 弾性係数 (GPa) |
|--------|-----------|---------------|---------------|
| PVA-13 | 13mm | | |
| PVA-30 | 30mm | 34.4 | 16.3 |
| PVA-50 | 50mm | | |





alcohol)繊維を使用した。単位水量は 257kg/m³とし,スランプフローは420mmで, 空気量は6.8%であった。HPFRCCの材料をミキ サーに一括投入して5分間練り混ぜた。打設 の際には,突き棒や内部振動機を使わずに木 づちで振動を与える方法により供試体を作製 した。打設後2日目に脱型し,試験材齢(28 ~36日)までは実験室内(室温10~20 程度) において気中養生を行った。強度試験のため, 圧縮試験用及び曲げ試験用供試体を,引張試 験用供試体と同じ方法により作製した。

(2) 供試体の概要

表 - 2 と図 - 2 に引張試験用の供試体の概 要及びダンベル形状の供試体寸法を示す。引 張試験用供試体寸法は,断面の平面寸法を一 定とし,厚さのみ 13mm,30mm,50mmの 3 種類とし、それぞ れ供試体を5体ずつ 作製した。

(3) 引張載荷試験及びひび割れ観察の概要

供試体の引張載荷試験の様子 を写真 - 1 と図 - 1 に示す。変位 計測時の検長は中央の 80mm と し,試験供試体の両側面に設置 した高感度変位計(精度: 1/1000mm)により計測を行った。 また,載荷速度は 0.5mm/分程度 であった。

ひび割れの観察は,マイクロ スコープ(VH 5000,Keyence

社製)を用い,各供試体の種類ごとに3体ず つ行った。ひび割れの観察は,引張ひずみ 0.25%,0.63%,0.95%,1.25%,1.88%,2.5%, 3.13%,3.75%,5.0%の各段階で載荷を止めて 行った。観察区間は,ひび割れの観察が容易 で,ひび割れ幅が最も大きいと考えられる供 試体底面(型枠面)の側面寄りの領域幅:10mm, 長さ:80mm)とした。この領域に沿ってカメ ラを移動させ,ひび割れの計測を行った.カ メラの倍率は,25倍とした。

3.2 圧縮及び曲げ試験結果

表 2 と図 3 に圧縮及び曲げ試験結果を 示す。曲げ試験は三等分点曲げ試験によって 行った。圧縮強度は34.4MPaで,弾性係数は 16.3GPaであった。曲げ荷重 変位関係には, ひび割れ発生後に変位(ひずみ)の増加に伴っ て荷重が増加する,「たわみ硬化特性」が明確 に現れた。また,曲げ試験後の複数の微細ひ び割れが発生していることが目視により確認 された。

3.3 引張試験結果および考察

本研究で提案した試験装置により引張試験 を行った結果,全ての供試体において,検長



図 - 5 各ひずみ段階におけるひび割れ発生状況(ひび割れ観察領域: 10×80mm)

内で破壊が生じ,引張試験を確実に行うこと が出来た。

(1) 応力 ひずみ関係の寸法効果

引張供試体の厚さごとの引張応力 ひずみ 関係を図 - 4 に示す。いずれの供試体厚さに おいても,初期ひび割れ発生後,脆性的に破 壊せず,ひずみの増大に伴って,引張応力が 増加する「ひずみ硬化特性」が現れた。引張 終局ひずみは , バラツキが大きい結果となっ た。

平均引張強度は、約 4MPa 程度と供試体の厚 さの違いによる差はほとんど無かった。しか し,供試体の厚さ 13mm の場合は,厚さ 30mm と 50mm に比べ引張強度のバラツキが大きい 結果となった。

供試体の厚さの違いによる引張降伏強度の



図-6 ひび割れ幅 ひずみ関係

差はほとんど無かった。しかし,引張終局ひ ずみは,厚さが 13mm と 30mm の場合,ほとん どの供試体が 3~4%程度であるが,厚さ 50mm の場合 2~6%程度とバラツキが大きくなった。

(2) ひび割れ発生傾向と寸法効果

引張ひずみが 0.63%, 1.88%及びマイクロ スコープで観察した最終ひずみ段階での,ひ び割れ発生状況を図 - 5 に示す。また,図中 の太い線で示されているひび割れは,その幅 が特に大きいものである。

全ての供試体において,複数のひび割れが 発生するとともに,ひずみの増加に伴ってひ び割れも多くなった。いずれの供試体厚さに おいても,引張終局ひずみが大きいほどひび 割れ本数が多く,ひび割れ発生領域も広くな る結果となった。

供試体の厚さ 13mm の供試体 No.3 の場合は, 引張終局ひずみが 5%以上であるが,引張終 局ひずみが約 3%程度の他の供試体に比べひ び割れ発生数が少ない結果となった。これは, 供試体の厚さの違いによる影響より,マイク ロスコープによるひび割れを観察した領域が 狭い範囲であるからであると考えられる。

厚さ 50mm の供試体の場合,発生したひび 割れ形状が一本の長いひび割れであるが,供 試体の厚さ 13mm の場合,非常に短いひび割れ が発生し,ひずみの増加と伴いひび割れの長 さが進展するとともに,新たな短いひび割れ が発生する傾向であった。厚さ 30mmの供試体 のひび割れ形状は,供試体の厚さ 13mmと 50mm の中間的な結果となった。

(3) ひび割れ幅と寸法効果

図 - 6 にひび割れ幅 - ひずみ関係を示す。 マイクロスコープにより測定したひび割れは, 図 - 5 の ~ までに各種ブロックで示され ているひび割れであり,図 - 6 に同じ形状の ブロックを用い ~ のひび割れ幅を示した。 ひび割れ幅の測定は,最初発生した3本のひ び割れとひび割れ幅が最も大きいと判断され る3本で,合計6本のひび割れを対象とした。

引張終局ひずみが 4%以上(グラフ中の終局 ひずみ参考)の供試体の場合では,ひずみが約 1%まではひび割れ幅が大きくなるが,それ以 上のひずみでは,ひずみの増加に伴うひび割 れ幅の増大は非常に小さくなり,最大ひび割 れ幅も0.2mm以下であった。しかし,供試体 の厚みが大きくなるに伴い,最大ひび割れ幅 のバラツキが若干大きくなる傾向であった。 しかし,このことについては,ひび割れ観察 範囲を広げてさらに検討する必要がある。

引張終局ひずみが 4%以下(グラフ中の終局 ひずみ参考)の供試体の場合では,ひずみが 1%以上において,ひび割れ幅が大きく増大す るものと幅の増大がほとんど無いものの,2 種類に区別される結果となった。これは,図 -5 に示したように,ひび割れ発生範囲が比 較的に局所化するからであると考えられる。 この傾向は,いずれの供試体の厚さにおいて も同じ傾向であった。

4.まとめ

直接一軸引張試験により得られた結果を以 下にまとめる。

- (1)本研究で提案した試験装置により引張試 験を行った結果,全て
- (2)の供試体において,検長内で破壊が生じ,

引張試験を確実に行うことが可能であっ た。

- (2)いずれの供試体厚さにおいても、ひずみ硬 化特性があらわれた。また,供試体厚さの 違いによる,引張強度や引張降伏強度の差 はほとんど無いが,引張終局ひずみについ ては,供試体厚さが大きいほどバラツキが 大きい結果となった。
- (3)ひび割れ性状については、供試体の厚さが 50mmの場合、一本のひび割れの長さが長い が、供試体の厚さが13mmの場合、短いひ び割れが発生し、ひずみの増加に伴いひび 割れの長さが増加するとともに、新たな短 いひび割れが発生する傾向であった。
- (4)供試体厚さがいずれの場合も、ひずみが約 1%までは、全てのひび割れの幅が大きくなった。引張終局ひずみが4%以上の場合、ひずみが1%以上では、ひずみの増加に伴うひび割れ幅の増大はほとんど無く、最大ひび割れ幅も0.2mm以下であった。しかし、引張終局ひずみが4%以下の場合、ひずみが1%以上においても、ひび割れ幅が大きく増大するものと幅の増大がほとんど無いもの、2種類に区別される結果となった。

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,N0.64,2005.7
- 2)日本コンクリート工学協会:高靭性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書,2004.5
- Li. V.C.: Reflections on the Research and Development of Engineered Cementitious Composites (ECC), Proceedings of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC) - Application and Evaluation -, JCI, pp.1-21, 2002.10