論文 繊維補強セメント系複合材料の圧縮軟化特性に関する基礎的研究

下川 博之*1・金子 佳生*2・三橋 博三*3

要旨:本論文では繊維補強セメント系複合材料の圧縮軟化特性を解明するため,形状や寸法の異なる試験体を用いた圧縮試験を行い,圧縮軟化領域での破壊挙動及び試験体寸法や繊維 混入量の圧縮軟化特性に及ぼす影響について有意義な知見を得たので報告する。 キーワード:繊維補強セメント系複合材料,圧縮軟化特性,圧縮構成モデル

1. はじめに

コンクリートが構造部材として用いられる場 合,その圧縮強度が高いことを生かして,一般 的には圧縮力を受け持つ材料として利用される。 したがって,コンクリートの圧縮破壊特性を解 明することは重要な課題の一つである。しかし ながら,コンクリートは擬似脆性材料であるた め,ひび割れ発生後の軟化領域(以下,圧縮軟化 領域と称す)を把握することは容易ではない。現 在ではプレーンコンクリートの圧縮軟化領域で の挙動が解明され,コンクリートは圧縮軟化領 域では局所破壊し,通常材料の基本となる応力 ーひずみ関係が試験体寸法に依存する^Dため,パ ラメータとして「ひずみ」ではなく「変位」を 使うべきであるとされており,その構成モデル が構築されている。

近年,コンクリートを鋼繊維や合成繊維で補 強した材料の建築構造物への適用の可能性が指 摘され,その力学特性に関する研究が進んでき ている。このうち鋼繊維補強セメント系複合材 料(以下,SFRCCと称す)の圧縮軟化特性に関する 研究において,比較的単純な構成モデルが構築 されている²⁰。しかし,現段階では充分なデータ が得られておらず,更なる検証が望まれる。ま た,合成繊維補強セメント系複合材料(以下, FRCCと称す)の圧縮軟化特性についても充分に は解明されていないのが現状である。圧縮軟化 領域においてプレーンコンクリートと異なった 試験体寸法の影響を確認することにより,局所 破壊の有無を判断することは可能である。即ち, 圧縮軟化特性は繊維混入の効果を見るうえでの 判断材料になると考えられる。また,圧縮構成 モデルの構築により,繊維補強セメント系複合 材料を含んだ部材の解析において,より実現象 に近い結果が得られ,繊維補強セメント系複合 材料の実用化に向けた一歩になると期待される。

以上述べた背景に対し,本研究では,繊維補 強セメント系複合材料で作製した試験体の寸法 を変化させて圧縮試験を行い,圧縮破壊挙動を 比較することにより,圧縮軟化特性を明らかに することを目的とする。

2. プレーンコンクリートに関する既往の研究

van Mier ら ¹⁾は断面積(100×100 mm ²)が等し く,高さの異なる(50,100,200 mm)角柱試験体で 圧縮試験を行い,圧縮応力および試験体全長の 変位を測定し,試験体高さによって圧縮軟化曲 線にどのような違いが見られるかを検討した。 なお,実験装置には端面摩擦を低減する工夫が なされている。

図-1にその実験結果を示す。図は高さの違う 試験体の応力を各々の圧縮強度で規準化した強

- *1 東北大学大学院工学研究科 修士課程(正会員)*2 東北大学大学院工学研究科 助教授(正会員)
- *3 東北大学大学院工学研究科 教授(正会員)

-339-

度比(以下,規準化圧縮応力と称す)を縦軸にとっ て,横軸にひずみをとって比較したものである。 このグラフからわかるように圧縮強度前では試 験体の高さに関係なく,ほとんど同様の軌跡を 描いているが,圧縮軟化領域においては試験体 の高さによって明らかに異なっている。即ち, 破壊変形を表すパラメータとして「ひずみ」が 適用できないことがわかる。そこで,試験体の 高さに依存しない「変位」をパラメータとして 用いたのが図-2である。図-2は図-1の圧縮 軟化領域での変位からピーク時の変位を引いて 横軸にプロットしたものである。この場合,試 験体の高さに関係なく,ほぼ一定の軌跡を描い ている。

以上のように、プレーンコンクリートでは圧 縮軟化領域において肉眼で観察できるようなひ び割れが発生し、破壊は局所化し、連続体とし て扱うことはできなくなるため、応カーひずみ 関係は意味をなさず、巨視的挙動は応力と破壊 域の変形、即ち変位で表現する必要がある³⁾。





3. 相似な試験体寸法を変化させた実験A

文献¹⁾の実験を基にし、繊維補強セメント系複 合材料における破壊の局所化の有無,圧縮軟化 領域での試験体寸法依存性を確認するため,第 一段階として以下に示す実験を行った。なお、 本論に示す実験A,Bにおいては特別な端面摩 擦低減処理を行っていない。

3.1 実験概要

本実験では、FRCC と SFRCC で作製した直径 ϕ 50 mm×100 mmと ϕ 100 mm×200 mmの2種類の相似 な試験体の圧縮挙動を観察した。

調合と材齢と圧縮強度を表-1 に示す。ここで W/B は水結合材比, シリカはマイクロシリカフュ ームである。使用した繊維は、鋼繊維として、 繊維の表面を加工していないストレートファイ バー(略称:ST,繊維長 12.5mm)と繊維表面に凹凸 をつけたインデント型鋼繊維(略称:IN,繊維長 15mm)を用い、合成繊維には繊維長 6mm と 12mm の PVA-R(略称:PV(6), PV(12))とポリエチレン (略称:PE, 繊維長 15mm)を用いた。用いた繊維の 略称を各試験体名とした。試験体名の後の数値 は繊維混入体積率 V_fを表し、また 1Wと表記し ているものが材齢7日の試験体であり、それ以 外は28日の試験体である。各々の調合に対しφ 50mm×100mm(以下, 100 シリーズと称す)と o 100mm×200mm(以下,200シリーズと称す)の円柱 試験体を3体ずつ作製した。

圧縮試験方法は図-3 に示すように各試験体 にコンプレッソメータ(変位計)を装着して変位 を測定し, 圧縮応力-変位関係を求めた。なお, 100 シリーズの変位計の測定範囲は 50 mm, 200 シリーズは 100 mmとしている。



表一1 調合と材齢と圧縮強度												
試験体名	W/B	混和剤 結合材比	水	セメント	シリカ	細骨材	減水剤	繊維	増粘剤	$V_{\rm f}$	材齢	圧縮強度
			(g/l)							(%)	(週)	(MPa)
ST4	0.28	0.04	222	768	158	1182	37	328	0.67	4.2	4	68.4
IN4	0.24	0.04	191	790	162	1217	38	341	0	4.3	4	107.9
IN6	0.24	0.04	191	790	162	1217	38	506	0	6.4	4	120.5
PV(6)2	0.62	0	568	916	0	366	0	27	8	2	1,4	22.6(1週), 31.2(4週)
PV(12)2	0.62	0	568	916	0	366	0	27	8	2	1,4	21.4(1週), 30.0(4週)
PE1.5	0.45	0	473	1087	0	435	16	14.8	2.9	1.5	1,4	38.4(1週), 64.2(4週)





IN6ST4PV(6)2-1WPE1.5-1W図-5200 シリーズの破壊状況(載荷終了後)

3.2 実験結果と考察

図-4 に変位及びひずみをそれぞれ横軸とし た圧縮軟化曲線の比較を示す。図から変位,ひ ずみ共に若干寸法依存性が見られたが,ひずみ の方が比較的寸法による差異が小さい軟化曲線 を描いている。また,SFRCC,FRCCいずれにおい ても試験体の大きさによってピーク直後の軟化 勾配の違いが目立った。図-5に200シリーズの 載荷終了後の破壊状況を示す。100シリーズにお いても比較的類似した破壊状況が観察された。 SFRCCでは斜めに大きくひび割れが生じ,枝分か れするケース(図-5のST4)とひび割れが試験体 全体に分散するケース(図-5の IN6)が観察された。FRCC においては大きなひび割れが局所的に発生し、大きなひび割れから微細なひび割れが 枝分かれすることが観察された。

実験結果より得られた軟化曲線を2つのパタ ーンに分類し、それぞれ曲線パターン1と曲線 パターン2と称し、図-6に示す。すべての100 シリーズの軟化曲線は曲線パターン1と同傾向 の曲線であった。200 シリーズは曲線パターン 1,2が半々程度であった。実験観察に基づき曲線 パターン1,2を図-6の①~⑤の破壊ゾーンに分 類し、試験体内部の挙動と関連させて考察する。 ①、④:これらのゾーンでは繊維が架橋応力を発 生させる段階にはいたっておらず、プレーンモ ルタルに近い脆性的な軟化性状を示していると 考えられる。そのため、繊維の架橋の効果が発 揮される段階まで主として圧縮応力のみが低下 し、この様な挙動を描いたと考えられる。

②, ⑤:これらのゾーンでは①, ④のゾーンに比べ, 大きなひび割れ面のせん断すべりと繊維の

架橋応力が発生していると考えられる。そのため、ひび割れ進展に対し、繊維の架橋により応力低下が軽減されている。特にFRCC では実験中このゾーンで、試験体から合成繊維の破断音が聞こえた。このことから、ひび割れ面の繊維の架橋応力分が繊維の付着すべりや破断により徐々に減少し、緩やかな軟化を示したと考えられる。なお SFRCC の場合はほとんどの試験体で ⑤の挙動を明確に測定できなかった。これは、FRCC と比較して SFRCC のセメントマトリクス引

張強度が高く、ひび割れ発生後急激に破壊が進行したことにより、繊維による架橋があまり起こらなかったものと考えられる。

③:このゾーンでの試験体の破壊挙動は本実験 では高い破壊速度のため充分に観察できなかっ たが、このゾーンの有無が 100 シリーズと 200 シリーズの違いとして観察された。

なお,本報では①,④を軟化第1勾配,②,⑤ を軟化第2勾配と称す。



図-6 圧縮軟化特性の分類 図-7 試験状況(実験B)

4. 試験体高さを変化させた実験B

断面形状の違いによる差異,並びに損傷領域 分布のばらつきを観察するため,既往の研究⁴⁾ に基づいて高さと測定距離及び V_fを変えた実験 Bを行った。

4.1 実験概要

高さ辺長比 H/D=1,2,4, V_f=0%,0.02%,0.1%, 0.5%と変化させ,試験体高さや V_fによる破壊挙 動の変化を観察した。

試験体の調合は V_f 以外表 -1 の PV (6) 2 と同様 のものとし、1 週間養生により断面積 40×40 mm で高さ 160, 80, 40 mmの試験体を各々3体ずつ作 製した。図 -7 に示す実験装置により試験体全長 の変位を測定した。

4.2 実験結果と考察

図-8 に破壊状況を示す。ここで、 V_f =0%、 0.02%では共にひび割れ幅が大きく、載荷中に 試験体に剥離が生じ、 V_f =0.1%、0.5%ではひび割 れ幅が小さく、載荷中試験体に剥離が生じるこ とは無かった。

図-9に圧縮軟化曲線の比較を示す。H/D=1 で は緩やかな軟化曲線を示す。また,H/D=2 と H/D=4 の曲線を観察すると変位で表記する方が Vf が小さくなるに従い曲線の重なりが多くなり, 比較的寸法に依存しない軟化曲線を描いている ことがわかる。

破壊領域の検討にあたり, H/D=4 において一番 大きなひび割れは試験体上部から高さ約 2D の範 囲に集中して生じた。また,図-9 において,全 ての調合で H/D=1 と H/D=2,4 に違いが見られた こと,さらに, H/D=2 と H/D=4 の変位で表記した 軟化曲線に比較的重なりが多く見られたことか ら,局所化損傷領域の大きさを示す指標として 約 D~2D が考えられる。

ここで、多くの試験体で見られたひび割れ形 状と、想定される内部の応力伝達機構を図-10 に示す。また, 表-2 に全試験体を V_fと H/D を パラメータとして、図-10 に挙げる三つのひび 割れ形状のパターンを分類した。なお, H/D=1の 試験体に対しては繊維の架橋によってパターン 3の剥離を生じにくいため、明らかでないものは ④とした。図-10からわかるように試験体上面 (H/D=1 の場合下面にも発生)に角錐形にひび割 れが生じている。この角錐は主に剥離が見られ た試験体(V_f=0%,0.02%)に顕著に見られ,観察 された高さは 30~40 mm程度(H/D=0.75~1.0)で あった(図-11 参照)。H/D=4 では、この角錐状 物質がくさびとして試験体に縦ひび割れを発生 させるようなパターン1が多く見られた。この パターンは H/D=2 でもいくらか見られた。H/D=2 で一番多く見られたのが、試験体表面に斜めに ひび割れが入るパターン2である。このパター ンでは圧縮上下面の角錐が断続し、斜めにせん 断破壊を起しているものと考えられる。H/D=4 で



も V_f=0.1%以上の場合,載荷面から H/D=2 程度 に斜めにひび割れが入る試験体が見られた。実 験Aでも形状は異なるが,類似のひび割れ形状 の傾向が見られた(図-5の ST4 参照)。これは繊 維の架橋効果によりパターン1の割裂がなくな り,載荷面の角錐が斜めにせん断すべりを生じ ることにより,パターン2と類似したひび割れ



0 角柱 0.02 ③3体 ①3体 ③:パターン3 31休)3体 ①2体)1休 <u>①2体, ②1体</u> 〕1体, ②5体, ④6体 0.5 Vf(% 1.5 ④:上記以外の 円柱 <u>2</u> 4 <u>212体, ④12体</u> 25体, ④7体 全パターン ②2体 ④3体

パターンとなったと考えられる。また, H/D=2 に おいても V_fが増加するに従い、同様の理由によ り、パターン1に対するパターン2の割合が増 加した。最後に H/D=1 で多く見られたパターン 3は、上下の角錐が試験体中央でぶつかり、側 面に剥離が生じるパターンである。このパター ンでは角錐の接触部分から力が伝達されるため せん断すべりがなく, 圧縮応力が直接伝達され るため、ひび割れ後の軟化が緩やかとなってお り, H/D=1の試験体では他のシリーズと違う軟化 曲線を描いたものと考えられる。なお文献4)にお いても, 圧盤などによる端部摩擦がプレーンコ ンクリート試験体に作用している場合,H/Dが2 以下の試験体では,H/D が減少するにともない強 度が増大し、靭性も増大するとの報告があり本 考察と整合するものと考える。

図-12 に H/D=4.0 の試験体に対し、V_fと軟化 曲線の関係を示す。また、得られた軟化曲線を バイリニアモデルとし、表したものを図-13 に 示す。図から軟化曲線をバイリニアとした時の 軟化第1勾配と軟化第2勾配は比較的 V_f に依存 しない軌跡を描いていることがわかる。ただし、 V_f が増加するに従い、第2勾配は規準化圧縮応 力が増大する方向に平行移動した。この応力上 昇は合成繊維の架橋応力効果によるものと考え られる。第1勾配は限界圧縮変位 $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ 程度 に到達し、既往の構成モデル²⁾と整合する。プレ ーンモルタル(V_f =0%)の試験体は規準化圧縮応 力0.2程度から第2勾配に移行し、限界圧縮変 位4 mm程度に到達する勾配となる。また、 V_f =0.1 ~0.5%程度では V_f =0%に比べ規準化圧縮応力が 0.1程度上昇している。



5. V_fと軟化パラメータの関係

図-14 に実験A, Bの寸法による比較例を示 す。H/D=2,4の試験体の軟化曲線の重なり度合い から実験BのFRCCにおいてV_fが0~0.5%程度の 場合, 軟化パラメータとして「変位」を用いる ことにより寸法依存性が減少することがわかる。 一方,実験Aでは「変位」をパラメータとした 場合、「ひずみ」に比べ軟化曲線にばらつきが大 きくなっており, SFRCC においても V_f=4~6%と高 い V_rに対しては「ひずみ」を軟化パラメータと して用いる方が妥当であると考えられる。FRCC 1.5~2.0%についても、ばらつきがあるものの比 較的同様の傾向が見られた。以上より,実験A, Bで形状は異なるが、V_fが高くなるに従い「ひ ずみ」をパラメータとする妥当性も高くなって いることがわかる。これは V_fが高くなるにつれ て、繊維の架橋により破壊領域が広がり、破壊 の局所化が軽減されるものと考えられる。



6. まとめ

本実験の範囲内において,以下の知見が得 られた。

- 1) 100 シリーズ(H/D=2.0, H=100 mm)に比べ, 200 シリーズ(H/D=2.0, H=200 mm)ではピ ーク直後,緩やかな軟化の後応力が大き く低下する軟化曲線を描く試験体が見ら れた。即ち,相似形の大小の試験体にお いて圧縮軟化曲線のピーク直後の初期勾 配に相違が見られた。
- V_f =0~0.5%程度の FRCC において, 圧縮 軟化曲線の第1勾配は V_fに依存せず, 第 2 勾配は V_fが増加するにつれ圧縮応力が 上昇した。
- 3) H/D を変化させた場合、内部応力伝達機構の相違により H/D=2.0 前後を境界として軟化曲線に顕著な相違が見られた。
- 4) V_fが大きくなるにつれ、繊維の架橋により破壊領域が分散するため破壊の局所化は緩和された。

〈参考文献〉

- van Mier J.G.M.: Multiaxial Strain-softening of Concrete, Part I :fracture, Materials and Structures, RILEM, Vol.19, NO.111, 1986.
- 金子佳生他「鋼繊維補強セメント系複合材料の単純化した一軸 構成モデル」日本建築学会技術報告集, 第 11 号, pp. 5-8, 2000.
- 3) 内田裕市、市之瀬敏勝「破壊のメカニズムと破壊の力学」コン クリート工学 Vol. 37, NO. 9, 1999
- 4) 「コンクリート構造物のポストピーク挙動評価と設計への応用」日本コンクリート協会, pp. 101-111, 2003.8