高強度化軽量気泡繊維補強コンクリートの破壊特性

FRACTURE PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH LIGHT-WEIGHT AERATED FIBER REINFORCED CONCRETE

橘高義典*, 高橋仁智**, 吉岡昌洋**

Yoshinori KITSUTAKA, Yoshinori TAKAHASHI and Masahiro YOSHIOKA

The fracture properties of high-strength light-weight aerated fiber reinforced concrete (HLAFRC) were investigated. Optimum mixing condition of HLAFRC which consists of the high-strength paste matrix, the short cut fiber, the entrained air and the artificial light-weight aggregate, was clarified. Three-point bending tests on pre-notched beam specimen of HLAFRC were performed. Fracture parameters of specimen were analyzed based on the poly-linear approximation analysis of tension softening diagram by using the data of a load-load point displacement curve. In this investigation, very ductile concrete of about 1 specific gravity with 20 MPa compressive strength was obtained. The compressive strength and fracture energy of HLAFRC decreased with increase of the volume content of entrained air. The toughness of HLAFRC was significantly improved by mixing short-cut fibers.

Keywords : fracture parameters, high-strength light-weight aerated fiber reinforced concrete, recycle materials, short cut fiber, fracture mechanics, tension softening diagram

破壊パラメータ, 高強度化軽量気泡繊維補強コンクリート, リサイクル材料, 短繊維, 破壊力学, 引張軟化曲線

1. はじめに

コンクリートの重要な構成材料である骨材に関して, その枯渇化, 低品質化, 環境破壊, リサイクル性などが大きな問題となっている。また, 高強度化が大きく進む近年のコンクリートにおいては, ベーストに対する粗骨材強度は相対的に低く, 欠陥部としての要素が強くなり, 従来のコンクリートのような応力伝達の主体という骨材の機能は見だしにくくなっている。一方で, 粗骨材を含まない高強度モルタルにより小断面・高強度の部材を作製することは可能であるが, 建築部材としての機能から見ると, 剛性の確保, 破壊時のエネルギーの吸収, 断熱性能などである程度の部材厚が必要となり, 小断面部材が必ずしも理想的とはならない。すなわち, 部材容積を確保するための内包物という機能が粗骨材にはある。近年の軽量骨材の使用は, 高強度部材の軽量化という目的の他にも, 同一重量で部材断面を厚くできるという容積効果にも着目すべきである。

このような容積効果としての骨材の機能を押し進めると, 最も軽量でかつ効率のよいものは空気泡ということになる。天然骨材の代わりに独立気泡あるいは気泡を多く含む人工骨材を使用し, 高強度ペーストマトリックスと組み合わせることで, 建築部材性能に優れた効率的なコンクリート部材が得られる。特に, 2次部材や増設耐震壁などの軽量かつ部材厚が必要な部材への適用が考えられる。

軽量気泡コンクリートの研究は古くから行われ数多くの成果が発

表されているが^{1) 2)}, 強度の面で不十分であり, 通常は特殊養生を必要とした。しかしながら現在の高強度化技術により常温での製造も可能と考える。従って, 特殊養生に要するエネルギーおよび天然粗骨材が不要で省資源省エネルギーに対しても有利である。さらに, 空気泡とセメント系材料のみでは完全リサイクルも可能となる。一方で, 気泡を含むコンクリートにおいては, 収縮, ひび割れ, 引張に対する靱性などについての性能低下が危惧されるが, この点については短繊維混入などによる靱性向上が有効と考えられる(図-1)。

本研究では, 高強度ペースト中に, 空気泡, 人工軽量骨材, 短繊維等を混入した高強度化軽量気泡繊維補強コンクリートについて, その破壊特性を実験検討した。各種試験体の切欠き梁3点曲げ試験を行い, 荷重-荷重点変位曲線を計測し, 引張軟化曲線の逆解析結果に基づき破壊パラメータを算出し, マトリックス強度, 空気量, 短繊維長などが破壊パラメータに及ぼす影響を考察した。

図-1 高強度化軽量気泡繊維補強コンクリートの概念図

* 東京都立大学大学院工学研究科建築学専攻 助教授・工博

** 東京都立大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生

Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Building Science, Graduate School of Eng., Tokyo Metropolitan Univ., Dr. Eng.
Graduate Student, Dept. of Architecture, Graduate School of Eng., Tokyo Metropolitan Univ.

2. 実験概要

2.1 試験体の概要

表-1 に使用材料を示す。セメントには2次部材への適用を考慮し早強ポルトランドセメントを用いた、細骨材には比重が比較的小さいガラス廃材による発泡人工軽量骨材（最大径5mm、1号：2号：3号＝8：1：1（質量比））を用い、混和剤には高性能 AE 減水剤及び AE 剤を使用した。起泡剤にはアニオン系特殊界面活性剤を使用した。短繊維は、既報³⁾より高強度モルタルの靱性改善効果に有効であると考察されたビニロン繊維を選定し、その容積混入率は1%とし、繊維長の影響を見るために15mmと30mmの2種類とした。ペースト強度の影響を見るため、水結合材比（W/B）を20%（記号 H）と30%（記号 M）の2水準とし、前者にはシリカフェームを混入した。気泡を導入する試験体の起泡剤の添加量は予備実験結果より粉体質量の0.5%とし、添加無しの試験体と比較した。表-2 に試験体の調査条件を示す。なお、予備実験において、W/B＝20%、繊維長＝30mmの条件で、起泡剤の添加量を0、0.25、0.50、0.75（%）の4段階に設定し、起泡剤の添加量と試験体の比重及び空気量との関係を求め、最も空気連行量が多くなる起泡剤添加量を求めることとした。

試験体の練混ぜには二軸強制練りミキサーを使用し、空練りを30秒間行い、加水して90秒間、起泡剤を添加し混練後、短繊維を少しずつ投入しながら計7分間の混練を行った。圧縮強度試験用供試体の寸法はφ100×200mm、破壊靱性試験用の曲げ試験体の寸法は100×100×450mmとし、各条件につき3本ずつ作製した。なお、空気量の計測に関し10%以上のものは試験体作製時の単位容積質量及び調査から換算し求めた。試験体は打設後2日で脱型し、その後20℃の水中で材齢8週まで養生した。表-3 に各試験体のフレッシュコンクリートでの性状及び硬化後の圧縮強度を示す。

2.2 破壊特性の評価

試験体の破壊特性を評価するために RILEM 法⁴⁾に準じた切欠き梁の3点曲げ試験を行った。試験体寸法は100×100×450mmで中央にダイヤモンドカッター（刃厚1mm）により、梁せいの半分（50mm）の切欠きを入れた。支持点スパンは400mmとした（スパンははりせい比4）。試験装置には、図-2 に示すクローズドループシステム（閉回路機構）を有するサーボ・コントロール式油圧試験機（MTS社製）を用いた。切欠き端部のひび割れ開口変位（CMOD）を高感度クリップゲージ（MTS-632.02）により計測し開口変位速度を制御した。開口変位速度は安定破壊が得られるよう繊維無混入試験体では0.02 mm/min、繊維混入試験体では0.04 mm/minとした。さらに2本の変位計により荷重点変位を計測し、引張軟化曲線解析用のデータとした。荷重点変位の計測には、特性のアタッチメントを使用し、計測精度を上げるとともに変位計のセッティングを簡便にした。また、変位計は試験体に固定した治具に取り付け、試験体載荷部のめりこみによる変位計の誤差を取り除いた。図-3 に試験体および変位計の取付け概要を示す。

切欠き梁の3点曲げ試験より得られる荷重－荷重点変位曲線を基に、多直線近似法⁵⁾により引張軟化曲線（破壊進行領域を結合モデルにより仮想ひび割れでモデル化したときでの結合力とひび割れ開口変位との関係、TSDと略す）を求めた。本解析法は、ひび割れ進展解析を進めながら多直線型のTSDを逐次最適化し求めるもの

表-1 使用材料

記号	材 料	性 質
C	セメント	早強ポルトランドセメント 比重3.20
SF	シリカフェーム	SiO ₂ 96.8% 比重2.20
VF	ビニロン繊維 (RF1500)	比重1.30、繊維径240×720(μm) 引張強度900(MPa)、ヤング率29(GPa)
GL	発泡ガラス骨材	1号：2号：3号＝8：1：1、比重0.70
SP	高性能AE減水剤 (SP8HE)	ポリカルボン酸エーテル系
AE	AE剤 (MA303A)	アルキルアリルスルホン酸化合物系
FA	起泡剤 (FA200)	アニオン系特殊界面活性剤

表-2 試験体の計画調査

記 号	W / B (%)	添加 量 (%)	起 泡 剤 (mm)	纖 維 長	計 画 調 合 (kg/m ³)								
					水	セ メント C	骨 材 GL	混 和 材 SF	混 和 剤				纖 維 VF
									SP	FA	AE		
H0	20	—	—	150	677	420	75	30.1	—	4.5	—		
H15			15	147	660		73	29.3	—	4.4	13.0		
H30			30	147	660		73	29.3	—	4.4	13.0		
HA0		0.5	—	150	677		75	30.1	3.8	4.5	—		
HA15			15	147	660		73	29.3	3.7	4.4	13.0		
HA30			30	147	660		73	29.3	3.7	4.4	13.0		
M0	30	—	—	194	647		—	6.5	—	3.9	—		
M15			15	189	631		—	6.3	—	3.8	13.0		
M30			30	189	631		—	6.3	—	3.8	13.0		
MA0		0.5	—	194	647		—	6.5	3.2	3.9	—		
MA15			15	189	631		—	6.3	3.2	3.8	13.0		
MA30			30	189	631		—	6.3	3.2	3.8	13.0		

表-3 試験体の性状

記号	スラン プ (cm)	ス ラ ン プ フ ロ ー イ (cm×cm)	比重	空気量 (%)	圧縮強度 (Mpa)
H0	28.5	80×79	1.31	3.5	32.6
H15	25.0	—	1.35	0.0	38.6
H30	18.6	—	1.32	2.3	37.1
HA0	27.0	54×56	0.86	36.6	11.2
HA15	26.5	47×50	0.89	33.7	18.5
HA30	26.5	49×50	0.87	35.4	12.8
M0	26.5	—	1.17	9.3	26.1
M15	21.9	—	1.21	5.9	29.5
M30	22.1	—	1.21	6.0	29.5
MA0	26.0	48×48	0.85	34.5	9.7
MA15	25.5	50×52	0.83	36.0	7.5
MA30	25.5	48×48	0.83	35.4	7.9

*) 起泡剤添加材料の空気量は打設後の比重と調査から算定

図-2 システムフローチャート

図-3 試験体および変位計取付け概要

である⁵⁾。なお、繊維補強の場合、変形量が大きくなると梁上部縁が圧壊となる可能性も考えられるが、圧縮域は線形弾性と仮定し引張軟化曲線を求めた。また、TSD で囲まれた面積は、破壊時に消費されるエネルギーの評価値となるが、繊維補強コンクリート等の非弾性変形が大きな材料では、完全な破断に至らず限界開口変位の評価が難しいため、開口変位 0.5mm までの面積を有効破壊エネルギー G_F^u として評価した³⁾ (図-4(a))。既報⁶⁾において、TSD の逆解析の過程より算定される結合力モデルでのエネルギー解放率 G_p により、破壊進展に伴うエネルギー消費、すなわちひび割れ進展抵抗性を精度良く評価できることが明らかにされている。そこで、 G_p と切欠き端部のひび割れ開口変位 (CMOD) の関係をプロットし、破壊進展に伴うひびわれ進展抵抗性を評価した。ここで G_p (N/m) は、結合力モデルにおいて単位ひび割れ進展 da 当たり結合力 $\alpha(\delta)$ の成した仕事である (式 (1)、図-4(b)参照)。

$$G_p = \frac{d}{da} \int_{\alpha_0}^{\alpha(\delta)} \alpha(\delta) \cdot \Delta \delta dx \quad (1)$$

3. 実験結果および考察

3.1 起泡剤添加量と比重及び空気量との関係

図-5 に予備実験で求めた起泡剤添加量と比重及び空気量との関係を示す。なお、ここでの比重はコンクリート打設時の単位容積質量とした。起泡剤添加量が 0.5% までは添加量の増加に伴い比重は低下する。起泡剤添加量 0.5% 以上では横這いとなり、それ以上の添加量に見合う気泡導入効果は得られないことより、本実験での起泡剤添加量は 0.5% とした。今回の材料条件により起泡剤添加量 0.5% で約 35% の空気連行量が得られた。なお、各調査条件でのフレッシュコンクリートは、表-3 のスランプ値及びフロー値に示すように、適度な流動性を有し骨材の分離は見られなかった。すなわち、従来の軽量骨材コンクリートにおいては、フレッシュ時の骨材の浮き分離が問題となるが、気泡を導入することでペーストマトリックスが低比重となり軽量骨材との比重差が小さく、分離が生じにくくなるものと考えられる。

3.2 比重及び空気量と圧縮強度との関係

図-6 に、圧縮強度と比重及び空気量との関係をそれぞれ示す。比重が大きくなるほど圧縮強度は大きくなり、両者はほぼ比例関係にある。これは図-6. 右に示すように、比重が小さいものは空気量が多く、欠陥部が増加し全体の強度が低下するためである。本実験条件により比重約 1 で約 20MPa の圧縮強度が得られた。

3.3 荷重-荷重点変位曲線

図-7 に切欠き梁 3 点曲げ試験で得られた荷重-荷重点変位曲線 (以下、LPD 曲線) を調査条件別に示す。図中には同一条件での 3 本の LPD 曲線を平均化したものを示した。全ての試験体条件において安定した LPD 曲線が得られた。全体的に、起泡剤の混入により最大荷重は小さくなる傾向を示す。これは、気泡の増加により欠陥部が増し応力を伝達する有効面積が低下することが主な理由と考えられる。

プレーン(PL)の条件では、W/B=20%は W/B=30%に比べて、最大荷重は大きい最大荷重以降の下降度も大きく脆性的となる。こ

図-4 引張軟化曲線とエネルギー変化

図-5 起泡剤添加量と比重及び空気量との関係

図-6 圧縮強度と比重及び空気量との関係

図-7 荷重-荷重点変位曲線 (平均化)

の理由として、ペースト強度が増加するほど相対的に軽量骨材の強度が低下し、骨材部が欠陥となりひび割れが伝達しやすくなることが考えられる。

また、 $W/B=20\%$ 、 $W/B=30\%$ とも短繊維(VF)を混入することにより、最初の荷重ピーク直後に一旦荷重が低下するが、その後再び荷重が増加する硬化現象を示し、靱性が大きく向上している。起泡剤添加の試験体についても同様である。荷重変位曲線の上昇の程度は、 $W/B=20\%$ が $W/B=30\%$ に比べて大きくなっており、繊維混入(VF)の場合にはプレーン(PL)とは逆に高強度のペーストの方が靱性に優れる。この理由は、ペースト強度が大きいほど、繊維の付着強度が大きく、繊維の引き抜けに対する抵抗力が大きくなり靱性が向上するためと考えられる。また、繊維長が15mmよりも30mmの方が曲線で囲まれた面積は大きくなり靱性に優れる傾向にある。この理由は、繊維混入量が同一であっても繊維長が長いほど、一本の繊維表面とペーストとの付着面積が大きく、引抜けに対する伝達力が大となり、ひび割れ進展に対する抵抗力が増加するためと推察される。

3.4 引張軟化曲線

図-8にLPD曲線から多直線近似解析によって求めた引張軟化曲線(TSD)を示す。初期の変化を比較しやすいように開口変位0.1mmまでを示した。TSDはLPD曲線を反映しており、LPD曲線で靱性に優れるものはTSDの軟化度が緩やかで、TSDで囲まれた面積も大きくなる。また、繊維混入試験体(VF)においては一時的に横這いあるいは右上がりとなる引張硬化の傾向がみられる。

特徴的なことは、一部の繊維混入試験体では初期の軟化により結合応力が0近くとなり、その後、結合応力が増加している点である。この理由として、初期の軟化性状はモルタルマトリックスの性状を反映するため、特にモルタルの破壊が脆性的な場合には、繊維のブリッジング作用が有効に生じる開口変位に達する以前に、モルタルが限界ひび割れ開口変位に達してしまい伝達応力がほぼ0近くとなり、その後、繊維のブリッジング作用が有効に作用し応力が伝達されていくことが考えられる。

各条件において、起泡剤の添加により材料の本質的な引張強度に相当する初期結合応力は大きく低下する。この理由は応力伝達に有効な面積が減少するためと考えられる。しかしながら、TSDの初期の軟化の程度は起泡剤無添加の条件よりもやや緩くなり延性的になっている(例えばM0とMA0)。この理由として、空気泡の存在により、ひびわれが平面的に進展せず、偏向し分散しながら複雑に進展し、エネルギーの消費量を増加させていることが考えられる。また、繊維混入により初期結合応力は大きくは増加せず、無混入とほぼ変わらないことより、初期結合応力はモルタルマトリックスの特性を反映していると考えられる。

3.5 有効破壊エネルギー

図-9に、各条件での有効破壊エネルギー(G_F^u)の平均値と比重及び空気量との関係を示す。繊維無しの試験体(図-9上)では、 $W/B=20\%$ では空気量が多い方が G_F^u はやや低下する。しかしながら、圧縮強度に見られるような大きな低下度ではない。また、 $W/B=30\%$ では空気量増加によっても G_F^u はあまり変わらない。これらの理由は図-8でも考察したように、空気泡の存在により破壊が延性的になるためと考えられる。

図-8 引張軟化曲線

図-9 有効破壊エネルギーと比重及び空気量との関係

繊維補強試験体(図-9下)においては、各試験体とも空気量の増加によって G_F^u は低下する。これは、空気泡の存在により繊維とペーストとの付着面積が低下し、エネルギー吸収が小さくなるためと考えられる。しかしながら、繊維無しの試験体に比べると大きなエネルギー吸収を示しており、繊維混入による靱性向上効果は大きい。また、各試験体において繊維長15mm(黒塗り)に対し30mm(白抜き)の方が G_F^u は大きい。この理由は、繊維長が長いほど一本の繊維のペーストとの付着面積が大きく、引抜けに対する伝達力が大となるためと考えられる。

図-10 ひびわれ進展抵抗曲線

3.6 ひび割れ進展抵抗曲線

図-10 に表面ひびわれ開口変位 (CMOD) とひび割れ進展抵抗値 G_p の関係 (R カープ) を示す。本図より破壊進展に要するエネルギーの変化を考察すると以下のようなものである。繊維無しの試験体はひび割れに対する抵抗が小さく脆性的な破壊形態を示すといえる。それに対して繊維混入の試験体は初期の抵抗力は繊維無しの試験体と同様低いが、ひび割れが進展するにつれてグラフは右上がりの傾向を示し急激に靱性が向上する。この上昇は繊維のブリッジング作用によるものと考えられる。各繊維混入試験体とも $W/B=20\%$ の方が $W/B=30\%$ よりもひび割れ進展抵抗性は大きい。また、両者とも起泡剤の添加によりひび割れ進展抵抗性は低くなる。繊維長 30mm と 15mm の試験体とでは、表面開口変位 1 mm 程度までのひび割れ進展に対してはほぼ同じ抵抗力を示すが、30mm の方がやや抵抗力が大きい。

4. まとめ

高強度化軽量気泡繊維補強コンクリートに関し、ペースト強度、起泡剤の添加、繊維の有無、繊維長などが、諸物性及び靱性能に及ぼす影響を検討した。その結果、今回行った実験の範囲で以下のことが明らかとなった。

(1) 起泡剤添加量が増加するほど空気連行量は多くなるが、ある添加量で空連行効果は頭打ちとなる。今回用いた起泡剤では結合材質量 0.5% の添加量で頭打ちとなり約 35% の気泡量が得られた。

(2) 気泡導入によりペーストマトリックスを低比重とすることで、

骨材との比重差を小さくでき骨材の材料分離を生じにくくすることが可能である。

(3) 試験体の連行空気量が多くなるほど圧縮強度は小さくなり、連行空気量約 35% までの範囲で両者には反比例関係がある。

(4) 繊維混入によって試験体の靱性能は大きく向上し、特に繊維長が長い方が破壊に要するエネルギーは大きく、靱性能に優れる。

(5) 試験体の空気量が増大するほど、応力伝達の有効面積の低下・欠陥部の増加等により、試験体の引張強度を支配する初期結合応力は低下する。また、初期結合応力はモルタルマトリックス自体の特性に依存し、繊維混入によっては大きくは増加しない。

(6) 繊維無混入の試験体は脆性的な破壊を示すが、空気量の増加によって破壊エネルギーは大きくは低下しない。その理由として空気泡の存在がひび割れの偏向作用を生じていることが考えられる。

(7) 繊維混入の試験体は、繊維無混入の試験体に比べ大きな破壊エネルギーを示し靱性に優れる。ただし、空気量が増大するほど、繊維のペーストとの付着面積低下などの理由により破壊に要するエネルギーは低下する。

謝 辞

本研究を行うに当たり、実験にご協力頂いた、東急建設 (株)・大岡督尚氏、ご助言頂いた (株) フジタ・青木治雄氏に深く感謝いたします。さらに、試料を提供してくださった、山宗化学 (株)、相武生コン (株)、クリスタルクレイ (株)、クラレ (株)、に感謝の意を表します。なお、本研究の一部は文部省科学研究費 (基盤 C) の助成を受けました。

参考文献

- 1) 白山和久, 上村克郎: 「気泡コンクリート」, オーム社, 1964
- 2) 山本康弘, 戸祭邦之, 山田哲夫他: 高品質軽量気泡コンクリート (FLC) の開発: 大成建設技術研究所報, 第 20 号, pp.109-113
- 3) 橋高義典, 大岡督尚: 高強度モルタルマトリックスの破壊ハラメータに及ぼす短繊維の影響, 一高強度繊維補強コンクリート (HFRC) の破壊性状に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.497, pp.1-8, 1997.7
- 4) RILEM Draft Recommendation, Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-point Bend Test on Notched Beams, Materials and Structures, Vol.18, No.106, pp.285-290, 1985
- 5) 橋高義典, 上村克郎, 中村成春: コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 453, pp.15-25, 1993.11
- 6) 橋高義典: 引張軟化曲線の多直線近似解析によるコンクリートの弾塑性破壊ハラメータの評価, 日本建築学会構造系論文集, No.469, pp.17-24, 1995.3

(1999年5月10日原稿受理, 1999年9月9日採用決定)