論文 発泡スチロールを組み込んだ軽量 HPFRCC 部材の曲げ耐荷性能

松島 雄平*1・中野 昂人*2・藤代 勝*3・六郷 恵哲*4

要旨:本研究では,複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料(HPFRCC)に粒径数 mm の EPS 粒子を体積で45%混入した材料(HPFRCC+EPS)を提案した。本研究で用いた HPFRCC+EPS は,みかけの密度は 1.1g/cm³ となり,HPFRCC に比べ圧縮強度は約 1/6,引張強度は約 1/3 となったが,引張力下で複数微細ひび割れ挙動を示した。小さな供試体質量でより大きな耐荷性能と安定した変形性能を確保するには,鉄筋補強した HPFRCC 内へ EPS ブロックを配置することや,HPFRCC+EPS に鉄筋を配置して鉄筋の定着を確実にすることが有効なことが明らかとなった。

キーワード: HPFRCC, 軽量, 発泡スチロール, RC 部材, 曲げ載荷試験

1.はじめに

より強く,より軽く,より粘り強いことは、コンク リート部材をはじめとする構造材料の利用の可能性を 大きく拡げる。高強度短繊維を混入した複数微細ひび 割れ型繊維補強セメント複合材料(以下 HPFRCC)¹⁾ は、通常のコンクリートに比べ、引張力下で大きな変 形性能を有し、耐衝撃性能に優れ、高靱性な材料であ る。

本研究においては、HPFRCC に発泡スチロール(EPS) 粒子を混入したり、EPS ブロックを HPFRCC 部材の中 に配置したりする方法により、軽く、かつ耐荷性能と 変形性能に優れたコンクリート部材(軽量 HPFRCC 部 材)を開発することを目的としている。

実構造物においては、EPS ブロック等の空洞を RC 部材の中に配置して,部材の軽量化がはかられている。 EPS ブロックの周囲をフェロセメントで覆った部材が 提案されている²⁾。軽量化を目的として,粉砕した廃 EPS を混入したコンクリートに関する研究が行われて いる³⁾。筆者らは,空気量の確保を目的として,EPS 粒子(粒径 0.2mm 程度)を体積比で 10%程度した HPFRCC に関する研究を行っている⁴⁾

本研究の特徴は、HPFRCC に EPS 粒子を体積で 1/2 近 く混入する方法により、HPFRCC の引張変形性能を保ち、 かつ密度が 1g/cm³に近い軽量セメント系複合材料を提案 する点にある。本研究では、EPS 粒子を混入した HPFRCC の圧縮試験と一軸引張試験を行うとともに、この材料で 作製した RC はり部材の曲げ試験を行い、耐荷性能や変 形性能を、HPFRCC やモルタルで作製したものと比較し た。

2. 実験概要

2.1 試験の種類と内容

HPFRCCに粒径数mmのEPS粒子を体積で45%混入した材料(以下 HPFRCC+EPS), HPFRCC, モルタル(以下 NM)の3種類の材料を対象として, 圧縮試験ならびに一軸引張試験を行うとともに, これらの材料を用いて作製したはり部材の曲げ試験を行った。

円柱供試体の圧縮試験では、材料の種類と載荷面(端 面)の仕上げの種類が、圧縮強度と供試体の破壊箇所に 及ぼす影響について検討した。ダンベル供試体を用いた 一軸引張試験では、EPS 粒子の存在が、引張強度、複数 微細ひび割れ性状、引張変形性能に及ぼす影響について 検討した。はり供試体の曲げ試験では、材料の種類、部 材厚さ、鉄筋の有無、内部 EPS ブロックの有無、EPS 粒 子混入の有無が、部材質量、曲げ耐荷性能ならびに曲げ 変形性能に及ぼす影響について検討した。

2.2 使用材料と養生と材齢

使用した材料を**表-1** に, HPFRCC, HPFRCC+EPS と NM の配合を**表-2** に示す。セメントには, 早強ポルトラ

表-1 使用材料

材料		物性等						
高強度ポリエチレン繊維		繊維径 12μm, 繊維長 12mm,密度 0.98g/cm³, 引 張強度 2.6GPa, 弾性係数 88GPa						
セメント		早強ポルトランドセメント, 密度 3.13g/cm ³						
细母封	7号珪砂	密度 2.63g/cm³						
和百行的	川砂	密度 2.59g/cm ³						
泪和刘	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系						
)比个11月1	AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物						
混和材	石灰石粉	密度 2.71g/cm³, 比表面積 3050cm²/g						
粒状発泡 スチロー ル	EPS中	平均粒径 4mm, 発泡倍率 50倍,密度 0.02g/cm ³						
	EPS小	平均粒径 2mm, 発泡倍率 50倍,密度 0.02g/cm ³						

*1岐阜大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 (正会員)
*2岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 (正会員)
*3 鹿島建設(株)関東支店 (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)

	水セメント比 (%)	単位量 (kg/m³)							EDS 粘工(V_10/)			
配合		水*	セメント	エロエキシ	モニー 細骨材	材	高性能AE	AE減水剤	増粘剤	PE繊維	LI 04±1 (V01707	
				石灰石杤	7号珪砂	川砂	減水剤				2mm	4mm
NM	40	250	625	-	-	1278	-	1.56	I		I	I
HPFRCC	40	340	900	300	462	I	22.0	-	0.63	9.71	I	I
HPFRCC+EPS	40	187	495	165	254		12.0	-	0.35	5.34	22.5	22.5

*水は AE 減水剤および高性能 AE 減水剤を含まれない

表-3 はり供試体の種類



図-2 はり供試体の形状寸法

ンドセメントを使用した。HPFRCC では、収縮低減のた め、セメント量の 25%を石灰石粉で置換した。高強度ポ リエチレン繊維の混入率は、体積率で 1.0% とした。 HPFRCC+EPS は、HPFRCC に、粒径約 2mm と 4mm の 2 種類の EPS 球状粒子を等量ずつ体積割合で合計 45%混入 して作製した。EPS の公称発泡倍率は 50 倍 (内部空間率 98%程度) であった。

すべての供試体は、材齢3日で脱型し、試験材齢まで 20℃の恒温室内で湿布養生を行った。試験材齢は、圧縮 試験および曲げ試験では2週間、一軸引張試験では3週 間とした。

2.3 練混ぜ

HPFRCC の製造では、ミキサーに粉体と繊維を入れて

図-3 EPS ブロックの形状寸法

空練りを行った後に、水と高性能 AE 減水剤を入れ、均 ーになるまで練り混ぜた。HPFRCC+EPS では、練り終え た HPFRCC に EPS 粒子を投入し、目視により、均一にな るまで練り混ぜた。

2.4 供試体

(1) 円柱供試体

円柱供試体の形状を写真-1 および写真-2 に示す。直径 50mm,高さ100mmの円柱供試体を用いた。HPFRCC+EPS では、供試体作製時,打設面で EPS 粒子が浮上ることを 防ぐとともに、打設面を滑らかにするため、打設面に鋼 板を当てその上に錘を乗せ、脱型時まで静置した(鋼板 当て仕上げ)。なお、供試体内部で、EPS 粒子の片寄り等 の分離は認められなかった。HPFRCC と NM 円柱供試体





図-4 はり供試体の曲げ試験

の打設面は研磨仕上げとした。HPFRCC+EPS 円柱供試体 の打設面を研磨すると,写真-1(左端)で示すように, EPS 粒子が現れ,圧縮試験時にこの部分が弱点となりや すい。圧壊がこの上部の弱い部分ではなく,円柱供試体 の中央付近で生じるように打設面のすぐ下の側面に鋼線 を3重に巻いて拘束し,鋼線を巻いた部分を石膏(圧縮 強度約 5N/mm²)で固めるとともに載荷面を平滑に仕上 げた(鋼線拘束石膏仕上げ)。HPFRCC+EPS 円柱供試体 では,打設面の研磨仕上げの有無と鋼線拘束石膏仕上げ の有無を組み合わせて,4種類の仕上げを行った。

(2) ダンベル供試体

ダンベル供試体の形状を図-1 に示す。ダンベル供試体 の寸法は、長さ 330mm,幅 60mm,厚さ 30mm であり、 引張試験部の寸法は、長さが 80mm,幅と厚さが 30mm である。打設時に EPS 粒子の浮上りを防ぐとともに、打 設面を滑らかにするため、打設面に薄シートを介して鋼 板を当て、錘を乗せて脱型日まで静置した。

(3) はり供試体

はり供試体の形状と供試体の種類を図-2 および表-3 に示す。はり供試体の寸法は、長さ 600mm,幅 150mm とし、厚さを 55mm,100mm の2 種類とした。はり供試 体の内部に配置する EPS ブロックの形状寸法を図-3 に示 す。EPS ブロックの寸法は、長さ 570mm,幅 120mm と し、厚さを 20mm, 25mm, 50mm の3種類とした。予備 試験の結果をもとに、EPS ブロックの中央部には、長さ 500mm,幅 20mm の中空部を加工した。厚さ 55mm のは り供試体を鉄筋で補強する場合には、D10 鉄筋(降伏強 度 356N/mm²)を、かぶり 8mm で、供試体の幅の中央の 位置に、圧縮側と引張側に 1 本ずつ計 2 本配置した。厚 さ 100mm のはり供試体の補強には D13 鉄筋(降伏強度 390N/mm²)を、かぶり 12mm として配置した。鉄筋の端 部にはフックを加工していない。打設時に EPS 粒子と EPS ブロックの浮上りを防ぐため、スペーサーと薄シー トを介して打設面を鋼板で押さえ重錘を載せた。

2.5 載荷試験

(1) 圧縮試験

円柱供試体の圧縮試験では,アムスラー型万能試験機 を用い,最大荷重を超えて供試体の破断箇所が明確とな るまで載荷を行った。なお,ひずみの計測は行わなかっ た。

(2) 一軸引張試験

ダンベル供試体の一軸引張試験では,**写真-3**に示す載 荷装置を用い,荷重をロードセル(容量10kN)で,引張 試験部(検長80mm)の変位を高感度変位計(容量25mm) で検出し,引張応カーひずみ曲線を計測した。載荷は, 荷重が最大を超えて明確に下降するまで行い,引張強度 と終局ひずみ(引張強度点の見掛けの引張ひずみ)を求 め,ひび割れ性状を目視で観察した。載荷試験後に,ひ び割れをマイクロスコープにより観察した。

(3)曲げ載荷試験

はり供試体の曲げ載荷試験は、図-4 に示すように、2 点載荷で行い,荷重をロードセル(容量10または100kN), 供試体の載荷点変位(たわみ)を高感度変位計(容量 25mm)により検出し,荷重-変位曲線を計測した。載荷 試験時においては,所定の変位に達するごとに除荷し再 び載荷を行った。載荷試験時には,ひび割れを目視によ り観察した。

3.実験結果

3.1 円柱供試体の圧縮載荷試験

円柱供試体の圧縮載荷試験結果を表-4 に示す。EPS 粒 子を混入した HPFRCC+EPS 供試体の破壊の様子の例を, 写真-4 に示す。

表-4 に示すように, HPFRCC+EPS 供試体のうち, 打 設面を研磨仕上げしたすべての供試体では供試体の上部 (研磨側) で破壊が生じ,鋼板当て仕上げした供試体で は1個を除き上部で破壊が生じた。これは,打設面に近 い上部が弱点となっているためと考えられる。一方,鋼 線拘束石膏仕上げを行った HPFRCC+EPS 供試体では, 上部以外の箇所で破壊する供試体が増えた。

材料	端面仕上	最大荷重 (kN)	E縮強度	平均 (N/mm ²)	破壊個所	
		159.5	81.3	(1)/11111/		
HPFRCC	研磨仕上	147	74.9	78.8	中央部	
		157.5	80.3			
		106.5	54.3		中央部	
NM	研磨仕上	116.0	59.1	58.1		
		119.5	60.9			
	鋼板当て 仕上	21.5	11.0		上部	
		24.0	12.2	11.1	中央部	
		20.0	10.2		上部	
	研磨仕上	17.0	8.7			
		22.5	11.5	10.7	上部	
		23.5	12.0			
EDS	鋼板当て	26.5	13.5		上部	
EPS	仕上	22.0	11.2	120	上部	
	鋼線拘束 石膏仕上	27.0	13.8	12.0	上部および下部	
	研磨仕上	30.0	15.3		中央部	
	鋼線拘束	24.2	12.3	13.1	上部	
	石膏仕上	23.0	11.7		中央部	

表-4 円柱供試体の圧縮試験の結果





中央部破壊の例 写真-4 円柱

上部破壊の例

写真-4 円柱供試体の破壊箇所



図-5 応力ーひずみ曲線

表-4 からわかるように、HPFRCC+EPS 供試体の打設 面を鋼板当て仕上げした場合と研磨仕上げした場合では、 圧縮強度の測定値は同程度であった。HPFRCC+EPS 供試 体の打設面に鋼線拘束石膏仕上げを施した供試体では、 この仕上げを施さない供試体に比べ、圧縮強度の測定値 は約2割大きくなった。ここでは鋼線拘束石膏仕上げを 施した供試体から得られた強度(13.1N/mm²)を、 HPFRCC+EPS の圧縮強度とみなす。この HPFRCC+EPS 供試体の圧縮強度は、HPFRCC 供試体の圧縮強度 (78.8N/mm²)の1/6であった。

3.2 ダンベル供試体の一軸引張試験

ダンベル供試体の一軸引張試験で得られた引張応力-ひずみ曲線を図-5 に示す。図-5 に示す HPFRCC+EPS 供 試体の結果で,実線は引張強度が 2N/mm² 以上で明確な 複数微細ひび割れが生じたものを,破線は引張強度が 2N/mm² 未満で単一ひび割れしか生じなかったものを示 す。複数微細ひび割れが生じた HPFRCC+EPS 供試体と 複数微細ひび割れが生じなかった供試体の破断面の例を, それぞれ**写真-5** に示す。**写真-5** に示す破断面において, 断面に占める EPS 粒子の表面(白色)の割合(2 つの破



複数微細ひび割れが 生じた場合 複数微細ひび割れが 生じなかった場合

写真-5 HPFRCC+EPS ダンベル供試体の破壊面の例

表-5 破壊面の EPS 粒子の混入個

/# =+ /★	引張強度	EPS粒子の個数		EPSが占め
洪武冲	(N/mm^2)	粒径4mm	粒径2mm	る面積(%)
複数微細ひび割れ有	2.60	15	54	57
複数微細ひび割れ無	1.60	25	42	60

面での値の合計)を画像解析ソフトで求め、現れている EPS 粒子の数とともに、表-5 に示す。解析では、供試体 の破断面を EPS 粒子の表面は白色、その他の部分を黒色 に塗り分けた 2 値化画像に加工した。複数微細ひび割れ が生じなかった供試体では、破断面に大きい寸法(粒径 4mm)の EPS 粒子の数が多いことから、EPS 粒子が集ま った箇所が弱点となり、初期のひび割れ発生強度が小さ くなり、複数微細ひび割れが生じなかったものと考えら れる。

図-5 からわかるように、引張強度は、HPFRCC供試体 では平均 6.5N/mm²程度であるのに対し、複数ひび割れが 生じた HPFRCC+EPS 供試体では平均2.1 N/mm²程度と小 さく、HPFRCC 供試体の3分の1程度であった。終局ひ ずみは、HPFRCC 供試体では1.5%程度であったが、複数 ひび割れが生じた HPFRCC+EPS 供試体では、0.7%程度 であり、およそ半分の値であった。

3.3はり供試体の曲げ載荷試験

はり供試体の曲げ試験で得られた荷重-変位曲線を, 部材厚が 55mm のものと 100mm のものに分けて,それ ぞれ図-6 と図-7 に示す。図-8 には,無筋のはり供試体



EPS ブロックなし供試体

EPS ブロックあり供試体





図-7 荷重-変位曲線(部材厚 100mm)

EPS ブロックなし供試体

EPS ブロックあり供試体



図-8曲線(無筋 部材厚 55mm)

(部材厚 55mm)の荷重-変位曲線を拡大して示す。表 -6には、はり供試体の質量、みかけの密度(鉄筋等を含 む質量を供試体の体積で除した値),最大荷重,最大荷重 時の変位,RCはり供試体の破壊形式を示す。

HPFRCC で作製した RC はり供試体では,いずれも引 張鉄筋が降伏する曲げ破壊が生じた。部材厚が 100mm で EPS ブロックを内部に配置した供試体では,ウエブ厚が 薄いため,曲げ破壊後にウエブがせん断破壊した。鉄筋





補強した HPFRCC 中への EPS ブロックの配置は、大きな 耐荷力を維持した上で軽量化に有効であった。

HPFRCC+EPS (みかけ密度 1.1g/cm³) で作製した RC はり供試体では, HPFRCC+EPS の引張抵抗性能が小さい ために,引張鉄筋の定着破壊や薄いウエブのせん断破壊 が生じたが,比較的大きな耐荷性能を得ることができた。 HPFRCC+EPS には,細径の鉄筋を使う,鉄筋端部にフッ クを加工する,メッシュ筋を用いるといった方法を用い

材料	部材厚(mm)	ራዙ ራሎ	EPSブロックの	質量	見掛け密度	最大荷重	最大荷重時の	RC板部材の
		亚大 用力	厚さ(mm)	(kg)	(g/cm³)	(kN)	変位 (mm)	破壊形式
				11.0	2.23	4.49	0.17	
	55		25	8.1	1.64	4.76	0.26	_
	55	D10		11.6	2.35	10.9	2.75	曲げ破壊後に
NM		D10	20	9.3	1.88	9.23	3.06	定着破壊
		D13		20.8	2.31	40.0	3.01	曲げ破壊
	100	D13	50	14.6	1.62	23.3	1.30	せん断破壊
			50	13.5	1.50	8.95	0.10	
				10.0	2.02	9.77	2.63	
	55		25	8.0	1.61	8.63	2.29	
		D10		10.8	2.19	18.4	6.68	曲げ破壊
		D10	20	8.8	1.77	17.8	5.82	曲げ破壊
HEFROO	100	D13		20.0	2.22	60.7	2.86	曲げ破壊
		D13	50	14.1	1.56	59.6	5.11	曲げ破壊後に せん断破壊
			50	13.5	1.50	23.5	1.48	
	55			5.5	1.12	3.15	5.59	
			25	3.9	0.78	1.74	1.55	
HPFRCC+ EPS		D10		7.0	1.42	11.0	5.65	曲げ破壊後に 定着破壊
		D10	20	5.8	1.17	10.4	4.04	定着破壊
	100	D13		12.3	1.36	34.0	1.98	定着破壊
		D13	50	9.3	1.03	24.5	2.09	せん断破壊

表-6 はり供試体の試験結果

ることが望まれる。HPFRCC+EPS を用いた RC はり供試 体に EPS ブロックを配置することにより、本研究で対象 としたような小型の供試体で、みかけ密度を 1.0 程度に することが可能であった。

NM で作製した RC はり供試体では, HPFRCC+EPS の 場合と同じように, 定着破壊やウエブのせん断破壊が生 じ, 耐荷性能も同程度であった。この理由として, NM では, HPFRCC と比べた場合に圧縮強度は同じ程度であ るが, ひび割れ発生後の引張変形性能が小さく鉄筋を定 着する能力が小さいことが考えられる。

図-9 には、供試体の質量と最大荷重との関係を示す。 EPS ブロックを内部に配置したものを矢印で示す。より 小さな供試体質量でより大きな耐荷性能と安定した変形 性能が望ましいと考えると、鉄筋補強した HPFRCC 内へ の EPS ブロックの配置や、HPFRCC+EPS に鉄筋を配置 して鉄筋の定着を確実にすることが有効なことが、この 図からわかる。

4.おわりに

軽く、かつ耐荷性能と変形性能に優れたコンクリート部材を開発することを目的とした本研究では、EPS 粒子を混入した HPFRCC+EPS の圧縮試験と一軸引張 試験を行うとともに、この材料で作製した RC はり部 材の曲げタルで作製したものと比較した。はり部材に は、EPS ブロックを内部に配置したものも作製した。 得られた主な結果は、次のとおりである。

 (1) HPFRCC に粒径 2mm と 4mm の EPS 粒子を体積の 45%混入した材料(HPFRCC+EPS)では、みかけ の密度は 1.1g/cm³となり、圧縮強度と引張強度は、 EPS 粒子を混入する前の HPFRCC のそれぞれ 1/6 と 1/3 程度となったが,引張力下で明確な複数微 細ひび割れが生じた供試体もあった。

- (2) HPFRCC+EPS 円柱供試体の圧縮試験では、打設面 に近い上部を鉄線で巻いて拘束し石膏で固める方 法により、この部分の破壊を生じにくし、安定し た圧縮強度を得ることができた。
- (3) 小さな供試体質量でより大きな耐荷性能と安定した 変形性能を得るには、鉄筋補強した HPFRCC 内へ EPS ブロックを配置することや、HPFRCC+EPS に鉄 筋を配置して鉄筋の定着を確実にすることが有効な ことが明らかとなった。

参考文献

- 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),コンクリートライブラリ 一,No.127, pp.1-4, 2007.3
- 木村亨,福澤公夫,鈴木勇生,平岡勝也:フェロセメントと発泡スチロールからなる軽量複合部材の曲げ性状、コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.2191-2196,2009
- 3)福島誠司,長谷川聖史,伊藤祐二,笠井哲郎:廃
 EPS 粉砕品を用いた軽量モルタルの諸物性,コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1583-1588,2006
- 近藤遊,浅野幸男,前田徳一,六郷恵哲:袋練混ぜ 方法により作製した HPFRCC の配合と力学特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.245-250,2011