

# 粒状 EPS を混入した軽量 HPFRCC の開発と供試体落下試験による耐衝撃性能の評価

破壊診断工学研究室 松島 雄平

## 1. はじめに

本論文は、複数微細ひび割れ型セメント複合材料（以下 HPFRCC）の新しい利用方法の可能性を示すため、HPFRCC に発泡スチロールを組み合わせた軽量 HPFRCC を対象として、5 つの章で構成されている。本概要では、論文の第 4 章に記載した軽量 HPFRCC による投下型コンクリートブロックの作成と供試体落下試験による耐衝撃性能について、実験の概要と結果および考察を記す。



写真-1 投下型コンクリート部材の例 (富士砂防HP)

## 2. 背景と目的

富士山西側斜面の大沢崩れの対策に、道路のない山岳地域の砂防工事では、立体十字型などのコンクリート部材 (写真-1) をヘリコプターで投下して排水層を形成するブロックスクリーン工が用いられることがある。こうしたコンクリート部材の耐衝撃性能を高め軽くすれば、より寸法の大きな部材をより高い場所に運搬し、効率のよい施工を行うことができる。

筆者ら<sup>1)</sup>は、HPFRCC に粒径 2~4mm の EPS 粒子を体積率で 45% 混入した軽量 HPFRCC (以下 HPFRCC+EPS) を開発している。

本研究においては、山岳地帯の砂防工事に用いられる投下型の立体十字コンクリートブロックを模した供試体を、HPFRCC、HPFRCC+EPS、普通コンクリートの 3 種類のコンクリートで作製し、供試体そのものを落下させる衝撃試験を行い、供試体の耐衝撃性能を高めるための条件について検討した。

## 3. 実験概要

### 3.1 使用材料と配合

HPFRCC、HPFRCC+EPS と NC の使用した材料を表-1 に、配合を表-2 に、圧縮強度を表-3 に示す。セメントには、早強ポルトラ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 30% を石灰石粉で置換し、長さ 12mm の高強度ポリエチレン繊維を体積率で 1.25% 混入した。HPFRCC+EPS では、HPFRCC をベースに、セメント量の 25% を石灰石粉で置換し、長さ 20mm の高強度ポリエチレン繊維を使用し、細骨

表-1 使用材料表

材 料	物 性 等
高強度ポリエチレン繊維	繊維径 12 $\mu$ m、繊維長 12mmor20mm 密度 0.98g/cm <sup>3</sup> 、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 <sup>3</sup>
細骨材	7号珪砂 密度 2.63g/cm <sup>3</sup>
	川砂 密度 2.59g/cm <sup>3</sup>
混和剤	高性能AE減水剤 ポリカルボン酸系
	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/cm <sup>3</sup> 、比表面積 3050cm <sup>2</sup> /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 <sup>3</sup>
	EPS小 平均粒径 2mm、発泡倍率 50倍、密度 0.02g/cm <sup>3</sup>

材を用いず、増粘剤を増やし、粒径約 2mm と 4mm の 2 種類の EPS 球状粒子 (内部空間率約 98%) を等量ずつ体積率で合計 45% 混入した。

### 3.2 立体十字供試体と三本足供試体

供試体落下試験には、立体十字供試体、三本足供試体、小型立体十字供試体の 3 種類の足付供試体を用いた。これらの足付供試体の形状、質量および種類を写真-2、写真-3、写真-4 および表-4 に示す。

3 種類の足付供試体の全ての断面の寸法を 105×105mm とした。立体十字供試体は、3 軸方向に中央から長さ 210mm の足が 6 本張り出した形状とした。小型立体十字供試体では、足の長さを 105mm とした。三本足供試体は立体十字供試体の足を 6 本から 3 本に減らした形状であり、質量は小型立体十字供試体と同程度である。供試体の作製には、図-1 に示すような一辺 105mm の木材を切断したブロックを組み立てた型枠を用いた。

表-2 配合

配合	水セメント比 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )											EPS粒子(Vol%)	
		水	セメント	石灰石粉	細骨材		粗骨材	高性能AE減水剤	AE減水剤	増粘剤	PE繊維	2mm	4mm	
					珪砂	川砂								
HPFRCC	42.8	380	887	380	351	-	-	19	-	0.4	12.1	-	-	
HPFRCC+EPS	40.2	238	630	210	-	-	-	15.4	-	0.84	6.79	22.5	22.5	
NC	55.0	180	327	-	-	810	920	-	1.02	-	-	-	-	

表-3 圧縮強度試験結果

材料	最大荷重 (kN)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	平均 (N/mm <sup>2</sup> )
HPFRCC	91.0	46.4	45.9
	86.5	44.1	
	93.0	47.4	
HPFRCC+EPS	22.0	11.2	12.0
	25.0	12.7	
	23.5	12.0	
NC	262	33.4	34.9
	295	37.6	
	264	33.6	

表-4 落下試験供試体種類

	材料	鉄筋	質量(kg)	見掛け密度(g/cm <sup>3</sup> )	
小型立体十字供試体	NC		19.1	2.4	
		三本足供試体		19.4	2.4
				18.7	2.3
立体十字供試体	HPFRCC		29.7	2.0	
		D6	31.9	2.1	
	HPFRCC+EPS		18.3	1.2	
		D6	19.7	1.3	
	NC		35.9	2.4	
		D6	38.3	2.5	



写真-2 小型立体十字供試体



写真-3 三本足供試体



写真-4 立体十字供試体



写真-5 内部鉄筋形状

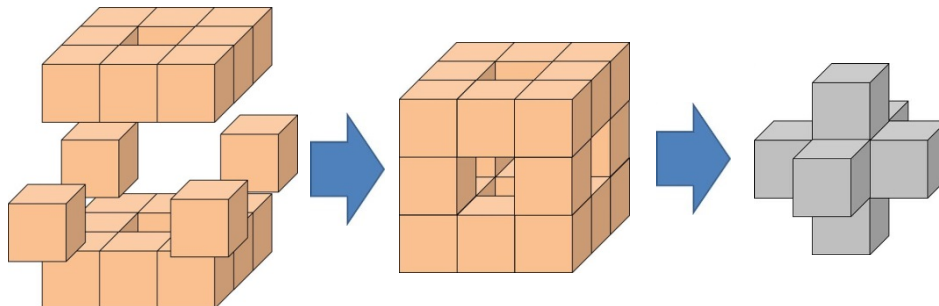


図-1 小型立体十字供試体の作製イメージ図

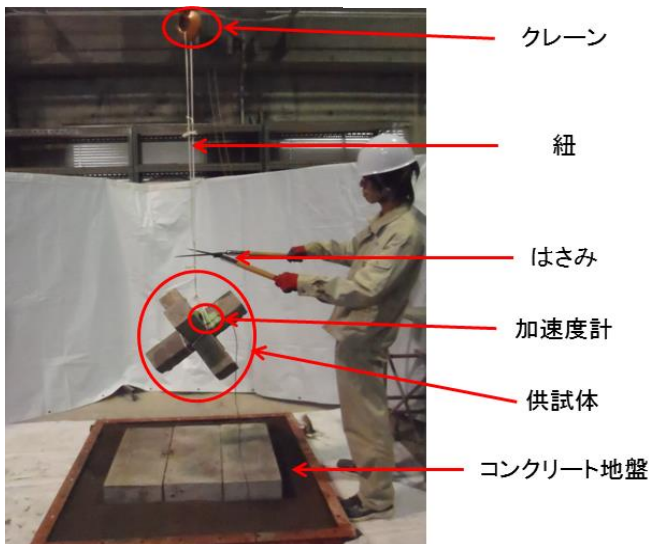


写真-6 供試体落下試験

有筋の立体十字供試体では、D6 鉄筋（降伏強度 332N/mm<sup>2</sup>，引張強度 458N/mm<sup>2</sup>）を写真-5 に示す形状に組み立てて配置し、20mm~25mm のかぶりを確保した。

### 3.3 供試体落下試験

供試体落下試験では、写真-6 に示すように、供試体をポリエチレン製の紐で吊るし、クレーンで所定の高さまで上昇させ、紐を鉋で切って供試体を自由落下させた。落下高さは、供試体に明確な破壊が生じるか、あるいは最大 1400mm または 1600mm までとし、原則として 100mm あるいは 200mm ずつ増やした。

実験室の床（支持杭上の RC 床）に厚さ約 130mm の砂を敷き、コンクリート版（HPFRCC 製、寸法

表-5 供試体落下試験結果

高さ (mm)	小型立体十 字供試体	三本足供試体		立体十字供試体						
	NC無筋	NC無筋①	NC無筋②	NC無筋①	NC無筋②	NC有筋	HPFRCC+EP S無筋	HPFRCC+EP S有筋	HPFRCC無筋	HPFRCC有筋
100	-			-	-	-	-			
200	角かけ	角かけ		-	-	-	-	-	-	-
300	-			-	-	-	-			
400	-	-		破壊	破壊	角かけ	角つぶれ	角つぶれ	角つぶれ	角つぶれ
500	-					-	-			
600	-	-				-	-	-	-	-
700	-					-	0.02mmの初期 ひび割れ			
800	-	-				-	0.02mm	-	-	-
900	-					0.05mmの初期 ひび割れ	0.02mm			
1000	-	-				2, 3本に進展	2, 3本に進展	0.05mmの初期 ひび割れ	0.02mmの初期 ひび割れ	0.02mmの初期 ひび割れ
1100	-					0.1mm	0.05mm			
1200	-	-	角かけ			0.1mm	0.05mm	0.05mm	0.05mm	0.02mm
1300	-		-			根元から 3方向に進展	0.05mm			
1400	-	破壊	破壊			0.2mm	0.1mm	0.05mm	1.0mm	0.02mm
1500						0.2mm	0.2mm			
1600						0.2mm	上面破壊	0.05mm	破壊	0.02mm

\*白抜きは試験を実施した高さ、黒塗りは実施していない高さ、斜線は変化なしを表す



写真-7 NCの角かけ



写真-8 HPFRCC+EPSの角つぶれ



写真-9 HPFRCCの角つぶれ

100×270×630mm) を3枚並べ、その上に供試体を落下させた。

#### 4. 実験結果

##### 4.1 小型立体十字供試体と三本足供試体の試験

供試体落下試験の結果を表-5に示す。NC無筋小型立体十字供試体(6本の足の長さ105mm)の供試体落下試験を、200mm刻みで高さ1400mmまで行ったが、供試体の衝突部に角欠けがみられたが、足の付け根等にひび割れの発生は無く、供試体は破壊しなかった。

NC無筋小型立体十字供試体に比べ質量が同程度で足

の長さが2倍あるNC無筋三本足供試体(3本の足の長さが210mm)の供試体落下試験を、200mm刻みで高さ1400mmまで行った(表中NC無筋①)。高さ200mmから落下後に、衝突部に角欠けが観察された。高さ1400mmからの落下で足が折れ破壊に至った。

高さ1400mmに至るまでの途中の落下試験において供試体の衝突部の角が次第に欠けて、衝撃力を吸収しやすい形状になっていると考えられたので、もう一つのNC無筋三本足供試体(表中NC無筋②)について、初期落下高さを1200mmとし、100mm刻みで落下させる試験を行った。その結果、最初の供試体と同様に高さ1400mm



写真-10 無筋立体十字供試体試験終了時の破壊性状

から落下後に供試体の足が折れ破壊した。

一つ目のNC無筋三本足供試体では、3本の足の付け根のすべてにひび割れが確認され、3本の足に衝撃力が作用したと考えられる。一方、二つ目のNC無筋三本足供試体では、1本の足の付け根にひび割れが生じ、この1本の足に衝撃力が集中したと考えられる。

質量が同程度のNC無筋小型立体十字供試体とNC無筋三本足供試体の試験結果から、同程度の質量であっても足が長いと、接地時に足の付け根への衝撃作用が大きくなり、破壊が生じやすくなることがわかる。

#### 4.2 立体十字供試体の試験

HPFRCC、HPFRCC+EPS、NCの3種類のコンクリートで作製した無筋ならびに有筋の立体十字供試体（6本の足の長さが210mm）の供試体落下試験を、高さ1600mmまで行った。

2個のNC無筋立体十字供試体に、初期高さを100mmとし、100mm刻みで落下試験を行ったところ、いずれも高さ400mmから落下させると足が折れ破壊した。

NC有筋（鉄筋配置）立体十字供試体についても、初期高さを100mmとし、100mm刻みで落下試験を行ったところ、高さ1000mmから落下させた段階で微細なひび割れが観察された。その後3本の足の付け根にひび割れが発生するとともにひび割れ幅が徐々に大きくなったが、高さ1600mmから落下させても破壊には至らなかった。写真-7に示すように足の先端の衝突部の欠け落ちやコンクリートの剥離が確認された。

HPFRCC+EPS無筋立体十字供試体では、初期高さ100mmから100mm刻みで落下試験を行った。写真-8に示すように足の衝突部の角が欠けることなく平らに潰れていった。高さ700mmから落下後に足の付け根にひび割れが確認され、1000mmから落下後に3本の足の付け根のいずれにもひび割れが進展した。さらに落下高さを高くするとひび割れ幅が大きくなり、高さ1600mmから落下した際に、衝突する下側の3本の足の付け根は破壊しなかったが、上部の足の1本が折れて破壊した。原因としては、締固め不良があった可能性が考えられる。

HPFRCC+EPS有筋立体十字供試体では、初期高さ

200mmから200mm刻みで落下試験を行った。高さ1000mmから落下後にほとんど視認できない程度の微細なひび割れが生じたが、その後のひび割れの進展はなく、高さ1600mmから落下させても破壊しなかった。

無筋ならびに有筋のHPFRCC立体十字供試体の落下試験を、初期高さ200mmから200mm刻みで行った。HPFRCC無筋立体十字供試体では、高さ1000mmから落下後にひび割れが確認され、その後ひび割れが徐々に進展し、高さ1600mmからの落下時に足が折れ破壊に至った。HPFRCC有筋立体十字供試体では、高さ1000mmから落下後にHPFRCC+EPS有筋の試験結果と同様に微細なひび割れが確認されたが、その後のひび割れの進展はなく、高さ1600mmから落下しても破壊には至らなかった。写真-9に示すようにHPFRCC+EPS供試体の場合と同様に、HPFRCC供試体では足の衝突部の角欠けはあまり確認されず、角が潰れた。

EPS粒子を混入したHPFRCC+EPSは、HPFRCCに比べ、密度は60%と軽く強度は1/4~1/3と小さい。供試体落下試験において同等な耐衝撃性能を発揮した。

前述のように、無筋の立体十字供試体は、足が1本折れて破壊した（写真-10）落下する供試体の耐衝撃性能を高めるうえでは、鉄筋を配置することが重要であり、供試体の質量が小さいことも有効なことがわかる。

#### 5. おわりに

道路の無い山岳地域の砂防工事においてヘリコプターで運搬投下して用いられるコンクリート部材への利用を想定して、HPFRCCにEPS粒子を混入した軽量HPFRCC（HPFRCC+EPS）を含む3種類のコンクリートで立体十字型の供試体を作製し、供試体を落下させる衝撃試験を行った。得られた主な結果は、次のとおりである。

落下する供試体の耐衝撃性能を高めるうえでは、鉄筋を配置することが重要であり、供試体の質量が小さいことが有効であった。

落下する足付供試体の質量が同程度であっても、足が短いと、落下時に破壊が生じにくかった。供試体の落下により足の衝突部に、NCの場合は角欠けや剥離が生じたが、HPFRCCとHPFRCC+EPSの場合には衝突部の角欠けはあまりなく、角が潰れる破壊性状であった。

#### 参考文献

1) 松島雄平他：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、コンクリート工学年次論文集、Vol.35, No.1, pp.259-264, 2013.