

論文 投下型コンクリートブロックへの軽量 HPFRCC の適用と供試体落下試験による耐衝撃性能の評価

松島 雄平^{*1}・大久保 仁人^{*2}・藤代 勝^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨: 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 2~4mm の EPS 粒子を体積率で 45% 混入した軽量 HPFRCC (HPFRCC+EPS) の改良型を提案するとともに, 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作製し, 供試体そのものを落下させる試験を行った。繊維長を通常の 12mm から 20mm に変更し, 細骨材を除き, マトリックスの粘性を高めることにより, 引張終局ひずみが 3% と大きくかつバラツキの少ない HPFRCC+EPS (密度 1.2g/cm³) が得られた。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, 質量が小さいことも有効なことを明らかにした。

キーワード: HPFRCC, 軽量, 引張性能, 供試体落下試験

1. はじめに

富士山西側斜面の大沢崩れ (写真-1) の対策¹⁾にみられるように, 道路のない山岳地域の砂防工事では, テトラポット型や立体十字型などのコンクリート部材 (写真-2) 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 (図-1) 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²⁾は, 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (以下 HPFRCC)³⁾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) を開発しているが, 引張性能として最も重要な終局ひずみ (引張強度点の見掛けのひずみ) が小さくかつバラツキが大きいことが課題であった。

本研究においては, HPFRCC+EPS の改良型を提案するとともに, 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+EPS を含む 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。

2. 実験概要

2.1 実験の内容

HPFRCC, HPFRCC+EPS, 普通コンクリート (以下 NC) の 3 種類のコンクリートを用いて立体十字供試体を作製し, 供試体の落下試験を行い, 材料の種類, 鉄筋の有無, EPS 粒子混入の有無, 部材質量が供試体の破壊性能ならびに耐衝撃性能に及ぼす影響について検討した。

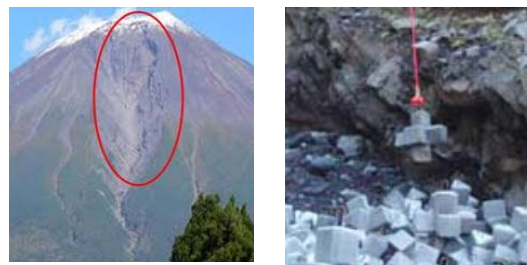


写真-1 富士山の崩壊地「大沢崩れ」 写真-2 投下型コンクリート部材の例 (富士砂防 HP)

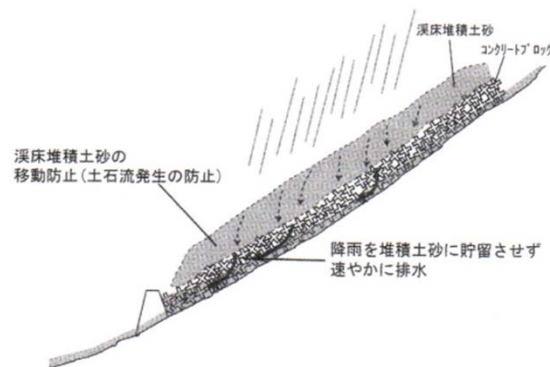


図-1 ブロックスクリーン工の構造

これらの 3 種類のコンクリートの圧縮強度試験と, HPFRCC+EPS と HPFRCC の一軸引張試験を行った。

2.2 使用材料と配合

HPFRCC, HPFRCC+EPS と NC の配合を表-1 に, 使用した材料を表-2 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。

*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

*3 鹿島建設(株) 土木設計本部 (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)

表-1 配合

配合	水セメント比 (%)	単位量(kg/m ³)										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 ²)	平均 (N/mm ²)
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-2 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 μ m, 繊維長 12mmor20mm 密度 0.98g/cm ³ , 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
細骨材	7号珪砂 密度 2.63g/cm ³
	川砂 密度 2.59g/cm ³
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 ³ , 比表面積 3050cm ² /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

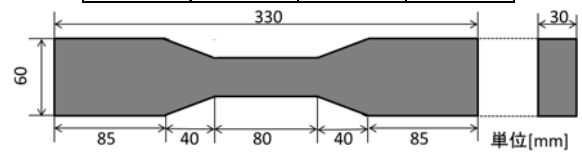


図-2 ダンベル供試体の形状寸法



写真-3 小型立体十字供試



写真-4 三本足供試体



写真-5 立体十字供試体



写真-6 内部鉄筋形状

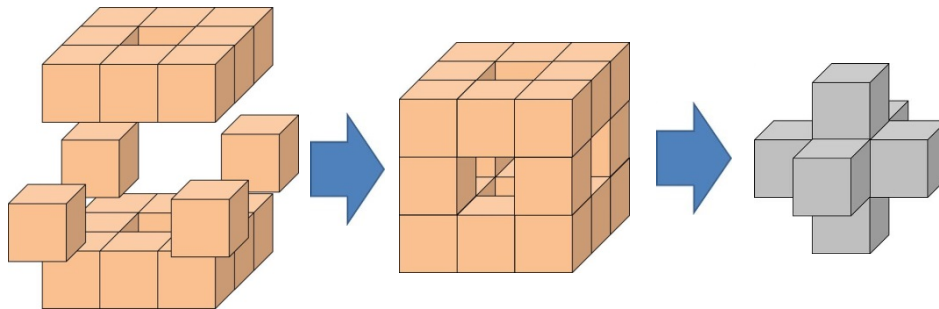


図-3 小型立体十字供試体の作製イメージ図

HPFRCC+EPS では、HPFRCC の配合をベースに、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。なお、EPS 粒子を混入することにより、マトリクス強度が小さくなり、繊維の定着長を長くする必要があったため繊維長を長くした。EPS が細骨材の役割を果たしていると考え、細骨材を用いなかった。

すべての供試体は、材齢 2~3 日で脱型し、試験材齢 (10~14 日) まで 20℃ の恒温室内で湿布養生を行った。

2.3 供試体

(1) 円柱供試体

HPFRCC および HPFRCC+EPS では直径 50mm、高さ 100mm、NC では直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体を用いて圧縮強度を測定した。HPFRCC+EPS 圧縮供試体の打設側の端部を研磨後に石膏と針金で補強²⁾した。圧縮強度試験結果を表-3 に示す。

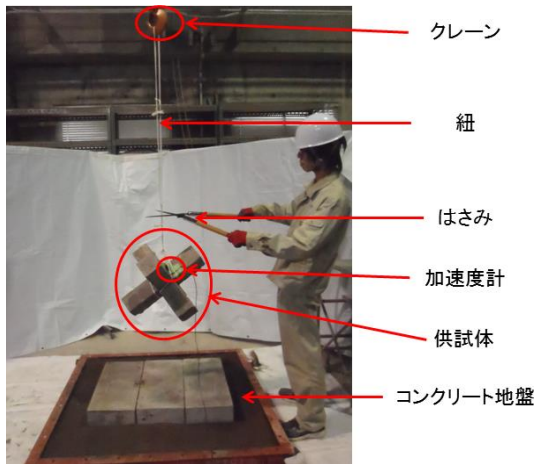


写真-7 供試体落下試験

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 ³)
小型立体十字供試体	NC		19.1	2.4
三本足供試体	NC		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	35.8	2.4
		38.3	2.5	

(2) ダンベル供試体

HPFRCC と HPFRCC+EPS の一軸引張試験に用いたダンベル供試体を図-2 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。

(3) 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。実施工（写真-2）においても立体十字型のコンクリートブロックが用いられているので、本研究では、小型の立体十字供試体を作製し、さらに同じ質量で足の長さが 2 倍の三本足供試体と、質量および足の長さが 2 倍の立体十字供試体を作製し、足の長さおよび質量が試験結果に及ぼす影響について検討した。これらの足付供試体の形状、質量および種類を写真-3、写真-4、写真-5 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-3 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。

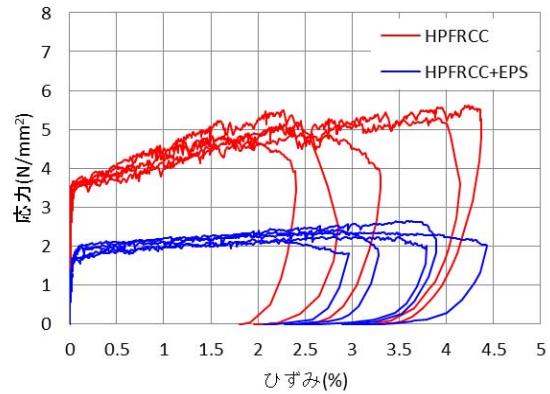


図-4 応力-ひずみ曲線（今回）

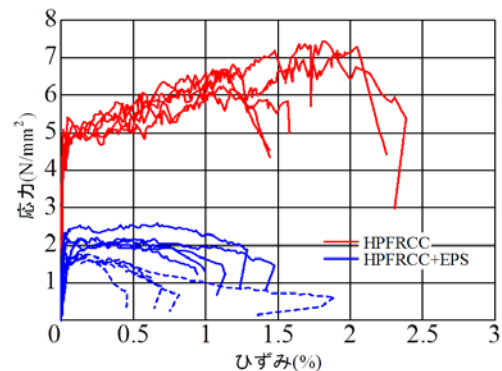


図-5 応力-ひずみ曲線（前回）

有筋の立体十字供試体では、D6 鉄筋（降伏強度 332N/mm²、引張強度 458N/mm²）を写真-6 に示す形状に組み立てて配置した。鉄筋にはプラスチックスペーサを取り付け、20mm～25mm のかぶりを確保した。

2.4 載荷試験

(1) 一軸引張試験

ダンベル供試体の一軸引張試験では、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、引張応力-ひずみ曲線を計測した。

(2) 供試体落下試験

供試体落下試験では、写真-7 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、紐を鉤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。

供試体を落下させるごとに、ひび割れ、衝突部（接地部）の変状を含む全体の破壊性状について、目視により観察した。立体十字供試体の中央の上部に加速度計（容量 2000m/s²）を取り付け、衝突時の加速度を計測した。

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 100×270×630mm）を 3 枚並べ、その上に供試体を落下させた。

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、横棒は変化なしを表す



写真-8 三本足供試体①破壊性状

3. 実験結果

3.1 ダンベル供試体の一軸引張試験

HPFRCC と HPFRCC+EPS のダンベル型供試体の一軸引張試験で求めた引張応力-ひずみ曲線を、図-4 に示す。参考として、筆者らが以前に行った同様の試験結果²⁾を図-5 に示す。HPFRCC の引張応力-ひずみ曲線の形状のバラツキは、今回と以前のものとほぼ同程度であった。一方、HPFRCC+EPS の引張応力-ひずみ曲線のバラツキは、以前のものに比べ、今回は大幅に改善された。HPFRCC+EPS の終局ひずみは、以前のものの (0.7%程度) と比較しても、今回は 3.0%程度と大きかった。

HPFRCC+EPS では、EPS 粒子を混入して軽量化しており、マトリックスの強度が弱くなるため、今回の試

験では、繊維長を以前の 12mm から 20mm に変更した。またマトリックスの粘性を高めて材料分離を生じにくくした。これらの改善により、引張応力-ひずみ曲線の形状のバラツキが少なくなったと考えられる。

3.2 供試体落下試験

供試体落下試験の結果を表-5 に示す。

(1) 小型立体十字供試体と三本足供試体の試験

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ものの、足の付け根等にひび割れの発生は無く、供試体は破壊に至らなかった。

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可能性が考えられた。そこで、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 から落下後に供試体の足が折れ



写真-9 NCの角かけ



写真-11 HPFRCC+EPSの角つぶれ



写真-13 HPFRCCの角つぶれ



写真-10 NC有筋の破壊性状



写真-12 HPFRCC+EPS有筋の破壊性状

破壊に至った。

一つ目のNC無筋三本足供試体では、写真-8に示すように、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本の足の付け根のみにひび割れが生じ、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。また、落下回数を増すと、3本の足とも角がなくなり接地時に衝撃が均等に加わる傾向があった。

(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ついて、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から落下させたところ足が折れ破壊に至った。また、写真-9に示すような角かけを確認した。

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。その後写真-10に示すように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。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刻みに落下試験を行った。写真-11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。着地した足ではなく、上部の足がなぜ破壊したか理由はよくわからないが、原因としては、締固め不良があった可能性も考えられる。

HPFRCC+EPS有筋立体十字供試体では、初期高さ200mmから200mm刻みに落下試験を行った。高さ1000mmから落下後に写真-12に示すような目視では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には至らなかった。

無筋ならびに有筋のHPFRCC立体十字供試体の落

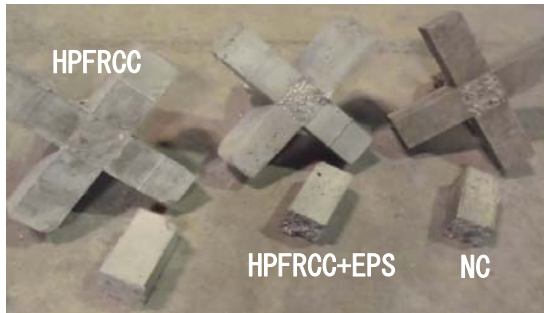


写真-14 立体十字供試体の破壊の様子

下試験を、初期高さ 200mm から 200mm 刻みに行った。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。HPFRCC+EPS 供試体の場合と同様に、写真-13 に示すように 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。

3 種類のコンクリートで作製した無筋ならびに有筋の 6 種類の立体十字供試体のうち、NC 無筋を除く残りのすべての供試体に共通することは、高さ 400mm から落下後に角欠けが観察され、高さ 700mm～1000mm から落下後に初期ひび割れが発生し、鉄筋により補強することによりひび割れの進展が抑えられ高さ 1600mm から落下後も供試体は破壊に至らなかった。また、無筋の立体十字供試体は写真-14 に示すように試験終了後は足が 1 本折れる破壊性状を確認した。

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發揮した。

以上のことから、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。また、EPS 粒子を体積比で 45%混入することにより、混入していない場合に比べ圧縮強度は 25%減、引張強度は 50%減、引張変形性能(終局ひずみ)は同程度となり、供試体落下による衝撃破壊性状も同程度となった。このことから、EPS 粒子を混入することにより強度は低下したが、質量が小さくなったため、耐衝撃性能を維持できたと考えられる。

NC 有筋立体十字供試体の中央上部に加速度計を取り付けて、衝突時の加速度を計測したところ、高さ 100mm では 600m/s^2 程度、高さ 200mm では 1000m/s^2 程度の加速度が計測された。さらに落下高さを高くし

て加速度の計測を行ったが、衝突先のコンクリート版の移動、落下時の供試体の姿勢、供試体の角欠けの具合などにより計測される加速度の値が大きく変化したため、加速度の正確な値を確認できなかった。

4. 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) の改良型を提案するとともに、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て、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。

- (1) 混入する繊維の長さを 20mm と長くし、マトリックスの粘性を高めることにより、引張終局ひずみが 3%と大きくかつバラツキの少ない HPFRCC+EPS (密度 1.2g/cm^3) が得られた。
- (2) 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る。
- (3) 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い。
- (4) 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。

5. 今後の課題

本実験では、3 本の足ができるだけ同時に着地するように姿勢を整えて落下試験を行った。しかし、供試体そのものを落下させる本実験の性格上、3 本の足を同時に着地させ均等に反力を得ることは難しく、実際には、3 本のうちのいずれか 1 本の足が最初に着地したと考えられる。供試体の姿勢と着地による反力との関係は複雑であるため、今後の検討課題である。

参考文献

- 1) 岩本年正, 完全無人化施工に向けて-富士山大沢崩れ源頭域調査工事-, 土木技術 64 巻 11 号, pp.27～32, 2009.11
- 2) 松島雄平, 中野昂人, 藤代勝, 六郷恵哲: 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.
- 3) 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ー, No.127, pp.1-4, 2007.3