論文 高速飛翔体の衝突実験による高靭性セメント複合材料の破壊特性

南 正樹*1・篠原 保二*2・阿藤 敏行*3・金 圭庸*4

要旨:高靭性セメント複合材料は曲げ応力下において複数のひび割れ性状を示し、曲げ、引張、圧縮破壊時の靭性が大福に向上する材料である。しかしながら高靭性セメント複合材料の高速飛翔体衝突実験による動的破壊特性は、まだ明らかになっていない。従って、本研究ではビニロン繊維及び鋼繊維を体積混入率1.5% としたパネル型の高靭性セメント複合材料試験体を製作し、飛翔体の衝突速度が約400~1,000m/sの条件で衝撃試験を行った。その結果、繊維無補強試験体に比べて高靭性セメント複合材料の耐衝撃性能が向上することを確認し、混入繊維の物理的特性が破壊抑制に及ぼす影響を検討した。

キーワード:高靱性セメント複合材料,高速飛翔体,衝突速度,クレータ,スポール,耐衝撃性能

1. はじめに

コンクリート構造物に爆発荷重が作用すると,爆風圧 による直接的な被害が生じるだけでなく,破壊されたコ ンクリート塊や金属破片(以下,飛翔体という)が数 100 ~数 1000m/s の高速度で飛散し,人命や構造物に対して 二次的被害をもたらすことが報告されている¹⁾⁻³⁾。従っ て,爆発被害を受ける可能性が高い施設や社会的に重要 な施設は,飛翔体の高速衝突による損傷を低減するよう に設計する必要がある。

衝撃荷重を想定した高速飛翔体衝突実験によるコン クリートの破壊現象を検討する研究は数多く行われて いる。しかしコンクリートの脆性的な性質により,飛翔 体の衝突によってひび割れが発生し,その裏面に大きい 損傷が生じるため,コンクリート部材厚を大きくして衝 撃エネルギーを吸収・分散する必要がある。一方,コン クリート材料の裏面破壊を抑制するために,裏面補強や コンクリートの破壊靭性を改善する方法も考慮すべき との考え方がある⁴。

コンクリート系構造材料の構造性能や耐久性の大幅 な向上が期待できる繊維補強セメント複合材料 ^{5),6)}を耐 衝撃性能型の構造材料として適用することが検討され ている。この材料は,従来のセメント系材料に代わる高 性能な補修用材料,衝撃緩衝材料,鋼材の被覆材など, 新しい各種の用途があり,土木建築のコンクリート工学 分野に技術革新をもたらす可能性を有している。初期ひ び割れが発生後もひずみ硬化能力を有する高靱性セメ ント複合材料は,高応力を負担する部材に適用が可能で あり,耐爆性能に対しても一般コンクリートより部材厚 さを薄くできる可能性があると思われる。

しかし、繊維補強セメント複合材料はその調合及び使

用繊維の能力によって力学特性が大きく異なり,高速飛 翔体の衝突実験の研究事例が少ない。また,繊維補強セ メント複合材料を用いた耐衝撃性能を構造材料に適用 するためには,まだ解決しなければならない問題が多く, 耐爆設計に繊維補強セメント複合材料を実用化するた めには破壊特性の把握が重要な問題になっている。

そこで、本研究ではポリビニールアルコール繊維(以下, PVA 繊維という)あるいは、鋼繊維を 1.5%(体積混入率) 混入した高靭性セメント複合材料を用いて、高速飛翔体 の衝突実験を行い、衝撃破壊性状について繊維を混入し ないプレーンモルタル(圧縮強度 56N/mm²)と比較し、破 壊抑制効果について検討した。

2. 実験計画及び方法

2.1 実験計画

表-1 に本研究の実験計画を示す。高速飛翔体の衝突 実験に用いた試験体は3種類として繊維無補強の Plain, PVA 繊維及び鋼繊維を混入した試験体とし,飛翔体の寸 法や衝突速度によって15体の試験体を計画した。試験 体の寸法は300×300×100mm(横×縦×厚さ)であり,球 体のステンレス(SUS 304)の直径と質量が異なる2種類 の飛翔体を約400~1,000m/sの速度で衝突実験を行った。

また,評価項目は衝突実験後の試験体の外観破壊状況 によって破壊等級,表面貫入(以下,クレータという)直 径,裏面剥離(以下,スポールという)直径,クレータ深 さ,スポール厚さ,損傷面積率,質量変化率及び破壊状 況と衝突条件の関係とした。

一方,試験体の調合に使用した材料の種類と物理的性質を表-2に,試験体の調合を表-3に示す。結合材は 普通ポルトランドセメントにフライアッシュを 20%置

*1 東京工業大学 建築物理研究センター 研究員 博(工)(正会員) *2 東京工業大学 建築物理研究センター 准教授 博(工)(正会員) *3 東京工業大学 セキュアマテリアル研究センター 准教授 博(理) *4 大韓民国 忠南大学校 建築工学科 教授 博(工)(正会員)

実	衝擊条件						
試驗休	混入繊維	試験体	飛翔体			相空油庫	評価項目
の種類*1)	の種類	の寸法 (mm)	直径 (mm)	質量 (g)	材質 及び形状	速度速度 (m/s)	
Plain 1			9.54	3.52		450	
Plain 2			9.54	3.52		1,000	The second
Plain 3	なし		19.05	28.13		450	 試験体の破壊等級
Plain 4			19.05	28.13		150	▪ クレータ直径(mm)
Plain 5			19.05	28.13		300	
PVA 1			9.54	3.52		1,000	• スホール直径(mm)
PVA 2		横×縦×厚さ 300×300×100	19.05	28.13	ステンレス (SUS 304) 球体	800	▪ クレータ深さ(mm)
PVA 3	PVA 繊維		19.05	28.13		450	- フポール厚さ(mm)
PVA 4			19.05	28.13		700	 スホール厚さ(mm)
PVA 5			19.05	28.13		600	 損傷面積率(%)
S 1			9.54	3.52		1,000	 ·
S 2			19.05	28.13		800	
S 3	鋼繊維		19.05	28.13		450	 破壊状況と衝突条件の関係
S 4			19.05	28.13		700	
S 5			19.05	28.13		600	

表-1 実験計画

*1) Plain:モルタル, PVA: PVA 繊維補強セメント複合材料,S:鋼繊維補強セメント複合材料

表-2 使用材料の種類と物理的性質

	種類	物理的性質				
セメント		普通ポルトランドセメント(JIS R 5210) 密度:3.16g/cm ³ ,粉末度:3,630cm ² /g				
フライアッシュ		II種(JISA 6201) 密度:2.20g/cm ³ ,粉末度:3,228cm ² /g				
細骨材(硅砂)		密度:2.56g/cm ³ ,吸水率:0.49%				
	混和剤	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤				
繊	PVA (polyvinyl alcohol)	ポリビニールアルコール 密度:1.3g/cm ³ , 直径:0.04mm, 長さ:12mm, 引張強度:1,200N/mm ²				
維	steel	スチール 密度:7.8g/cm ³ , 直径:0.16mm, 長さ:12mm, 引張強度:2,776N/mm ²				

換し、細骨材は7号硅砂を使用した。また、高靭性セメ ント複合材料試験体は、長さ12mmのPVA 繊維及び鋼繊 維を1.5%の体積混入率で補強した。全ての試験体は高性 能 AE 減水剤の添加によってフレッシュ状態でのフロー 値を180±20mmを目標に作製し、28日の材齢まで温度2 0±3℃,湿度 $60\pm5\%$ のチャンバーで養生した。衝突実 験に使用した試験体の圧縮強度は、Plain 試験体が約 55. 9MPa、PVA 試験体が約 41.5MPa、S 試験体が 47.2MPa であった。

2.2 実験方法

図-1 及び図-2 に火薬式飛翔体衝突試験装置の概要 及び衝突試験装置の外観及び試験体の設置状況を示す。 本研究での衝突実験は,火薬式飛翔体衝突試験装置により加速された高速飛翔体を試験体に衝突させることに よる方法である。衝突試験装置は火薬チャンバーで燃焼 させた無煙火薬の燃焼ガスの膨張を推進力として利用

表-3 試験体の調合^{*1)}

		H U			-			
試験体		繊維	単位量 (kg/m ³)					
の種類	W/B	混人率 V _f (%)	W	С	FA	S	F	
Plain				889	222	444	-	
PVA	0.4	1.5	438	975	210	129	19.2	
S				075	219	430	115.3	

*1) 目標フロー: 180±20mm

し,飛翔体を加速する装置である。飛翔体速度の計測は, 試験体衝突面の直前にある速度計測器により測定した。 速度計測器は,等間隔に配置された2対のレーザーセン サーで構成されており,飛翔体がレーザー光を横切る時 間差を計測することにより飛翔体速度を求める仕組み となっている。また,飛翔体を加速させるためにつけた サボは,衝突直前でサボキャッチャーによって先端のス テンレス球と分離をし,ステンレス球のみを衝突させた。 飛翔体の概要を図-3に示す。本研究では,直径9.54mm, 質量3.52gと直径19.05mm,質量28.13gの2種類のステ ンレス製(SUS 304)球を飛翔体として使用した。

また、衝突実験後の試験体の損傷測定方法を図-4 に 示す。破壊等級は(I)クレータ、(II)スポール、(III)貫通 の3水準に分類し、クレータ深さ、スポール厚さ、質量 変化率、表面及び裏面の損傷面積率を測定した。高速飛 翔体の衝突によるクレータ深さ及びスポールの厚さは、 試験体表面及び裏面から損傷最深部までの距離とした。 また、表面及び裏面損傷面積率は試験体の全体面積に対 する高速飛翔体の衝突によって損傷したクレータ及び スポール部分の4箇所以上の直径を計測し、最大直径と 最小直径を除いた平均直径を用いて損傷面積の割合を 求めた。さらに、表面及び裏面のイメージ写真を使用し



図-4 試験体の損傷測定方法

100 個のグリッドによる損傷部の割合を算出した。一方, ひび割れによる面積損傷率はひび割れの幅と長さを測 定し,その面積を求めた。

3. 実験結果及び考察

3.1 試験体の外観損傷及び破壊等級

図-5 に高速飛翔体の衝突を受けた試験体の表面及び 裏面の破壊状況を示す。実験計画の想定速度によって行った高速飛翔体の衝突実験に対する結果であり、実際の 衝突速度,運動エネルギー及び試験体の破壊等級を示す。 直径 19.05mm の飛翔体は、衝突速度が遅くても質量の影 響で直径 9.54mm の飛翔体より、運動エネルギーが大き くなる場合がある。高靭性セメント複合材料試験体は、 鉄筋が配筋されてない状況でもモルタル試験体と異な る。すなわち、スポールや貫通した場合にも試験体の形 状を保持することが有効であると考えられる。質量 3.52 g, 直径 9.54mm の飛翔体を使った場合において, 衝突速 度 412m/s で Plain1 試験体の破壊等級は(I)クレータと評 価されたが, 衝突速度 962m/s の Plain2 試験体の場合は (II)スポールの破壊等級が見られた。また, Plain2 試験体 とほぼ同じ衝突条件である PVA1 試験体及び S1 試験体は 裏面にひび割れも生じず(I)クレータの破壊等級で評価 され, Plain2 試験体に比べて高い耐衝撃性を有すること が認められた。

一方,質量 28.13g,直径 19.05mm の飛翔体による衝突 実験における Plain 試験体は衝突速度が最も低い条件で 評価された Plain4 試験体を除いて裏面剥離が生じた。特 に Plain3 試験体の場合は(III)貫通の破壊等級であり,裏 面剥離量も最も大きく現れた。Plain2 試験体と飛翔体の 運動エネルギーがほぼ同じ Plain5 試験体は飛翔体の衝突 速度が 345m/s と Plain2 の実験より低いため表面の破壊 程度は少なかったが,裏面破壊状況は同等水準と見られ た。

また、高靭性セメント複合材料試験体の番号は想定速 度が同じであり、高靭性セメント複合材料試験体では、 同じ混入率でも混入繊維の種類によって異なる結果が 明らかに認められた。4番の試験体を除いて、破壊等級 はPVAとS補強試験体は繊維種別によらず同等水準と評 価されたが、外観から見られる表面及び裏面の破壊状況 はS補強試験体が著しく損傷量が大きいことが分かった。 同じ破壊等級でも,発生したひび割れやクレータ,スポ ールの程度に差が見られ、PVA 補強試験体の耐衝撃性が より高いと考えられる。4番の試験体の破壊等級につい て、PVA4 試験体は(I)クレータ、S4 試験体は(Ⅱ)スポー ルと評価された。高速飛翔体の衝突によって生じた裏面 のひび割れにおいて、図-6に示すように S4 試験体より PVA4 試験体の方が飛翔体の衝突によるひび割れが多数 発生しており、裏面に伝達される衝撃力を分散させる効 率が向上したと思われる。

3.2 試験体の損傷測定結果

表-4 に高速飛翔体の衝突を受けた試験体の損傷測定 結果を示す。同等水準の衝突速度におけるクレータ直径 は、PVA 試験体が最も小さいと評価された。クレータ直 径は試験体が高速飛翔体の衝突を受けた瞬間での衝撃 力と相関があると思われる。S 試験体より PVA 試験体の 方が混入繊維の密度が小さいことから、同じ繊維混入率 でもセメント複合材料のマトリックスに分散された繊 維の個数が多いため表面のひび割れを抑制し、クレータ 直径が広くなることを防止したと考えられる。しかし、 クレータ深さについては、飛翔体が試験体に衝突瞬間か らその運動エネルギーが消失されるまでの課程であり、 飛翔体が進行する方向での試験体の組織の剛性や緻密 度の影響が大きいため、混入繊維の剛性及び引張強度が



Plain 1 (412m/s, 298J), (I)クレータ





PVA 1 (919m/s, 1485J), (I) クレータ





S1 (926m/s, 1507J), (I)クレータ



S4 (678m/s, 6466J), (II)スポール



Plain 2 (962m/s, 1504J), (II)スポール



Plain 4 (162m/s, 369J), (I)クレータ Plain 5 (345m/s, 1674J), (I)スポール



PVA 2 (725m/s, 7536J), (Ⅲ)貫通



PVA 4 (667m/s, 6257J), (I) クレータ PVA 5 (582m/s, 4764J), (I) クレータ



S 2 (746m/s, 7702J), (皿)貫通



S5 (606m/s, 5165J), (I) クレータ

図-5 試験体の表面及び裏面の破壊状況



Plain 3 (462m/s, 3002J), (亚)貫通



PVA 3 (442m/s, 2749J), (I)クレータ



S3 (425m/s, 2541J), (I)クレータ

試験体の種類(衝突速度,飛翔体の運動 エネルギー),破壊等級



図-6 PVA4 及び S4 試験体の断面ひび割れ状況

大きいS試験体の方がPVA試験体よりクレータ深さが抑 制されたと考えられる。また、クレータ損傷率は表面か ら損傷された面積率を算定したものであり、クレータ直 径の結果に比例的な傾向が見られた。

一方,スポール直径においても同等水準の衝突速度で は、PVA 試験体の方がS試験体より損傷を抑制すること が見られた。ただし S4 試験体の場合,完全に裏面から 剥離しなかったため、隆起した部分をスポールと想定し、 損傷程度を測定した。試験体の裏面にまだスポールした

試驗休	:	クレータ	7	2	質量		
の種類	C (mm)	C _d (mm)	損傷率 (%)	S (mm)	S _d (mm)	損傷率 (%)	変化率 (%)
Plain 1	7.1	10.5	4.3	0.0	0.0	0.0	0.40
Plain 2	23.3	47.5	46.7	15.3	52.0	10.3	8.87
Plain 3	19.6	23.7	28.5	25.6	76.3	55.7	24.89
Plain 4	6.8	10.4	3.2	0.0	6.0	0.0	0.28
Plain 5	16.4	13.0	14.8	16.3	73.8	5.6	6.37
PVA 1	2.2	46.2	0.7	0.0	0.0	0.0	0.12
PVA 2	5.6	60.5	3.1	16.7	39.5	18.1	2.63
PVA 3	6.2	33.2	4.3	0.0	0.0	0.0	0.55
PVA 4	6.5	48.9	3.6	0.0	0.0	0.2	0.06
PVA 5	5.9	43.0	3.3	0.0	0.0	0.1	0.06
S 1	8.1	29.3	4.3	0.0	0.0	0.1	0.39
S 2	11.7	53.4	13.5	26.5	46.6	28.4	5.26
S 3	7.8	26.7	5.1	0.0	0.0	0.0	0.56
S 4	10.7	47.9	10.8	$(20.4)^{*1}$	0.0	(21.3)*1	0.85
S 5	10.2	41.6	10.1	0.0	0.0	0.1	0.94

表-4 試験体の損傷測定結果

*1 裏面に励起された部分をスポールと想定した結果

部分が残っているが, 試験体として機能が損なわれてい るためスポール損傷と判断した。また, 貫通した PVA2 試験体及び S2 試験体のスポール厚さとクレータ深さの 合計が試験体の厚さであり, PVA2 試験体のクレータ深 さが大きいためスポール厚さが小さくなった。なお, 試 験体のクレータ深さとスポール厚さの比率については, Plain 試験体が約 2.5:7.5, PVA 試験体が約 6:4, S 試験体 が約 5.5:4.5 となり, PVA 繊維及び鋼繊維の混入によって スポール厚さの発生比率が低減された。

衝突実験前後の質量変化率は,貫通した Plain3 試験体 が 24.89%で最も大きい質量変化率となった。また,スポ ールの破壊等級の Plain2 及び Plain5 試験体は,貫通した PVA2 試験体及び S2 試験体より質量変化率が大きくなっ た。高靭性セメント複合材料試験体では,高速飛翔体が 衝突した部分が集中的に損傷し,飛翔体が貫通していっ たが, Plain 試験体の場合は,高速飛翔体が衝突した部分 だけではなく,衝突箇所の周囲のコンクリートも脆性的 に破壊し,飛散したため質量変化率が大きくなったこと に起因している。

3.3 破壊状況と衝突条件の関係

図-7 に高速飛翔体の質量と速度から計算した試験体 が受ける運動エネルギーとクレータ深さの関係を示す。 同じ寸法の飛翔体の場合,クレータと運動エネルギーの 間に比例的な関係が見られた。しかし,小型飛翔体を用 いた Plain2, PVA1 及び S1 試験体の場合,飛翔体の運動 エネルギーが Plain3, PVA3 及び S3 試験体に使った飛翔 体の運動エネルギーより小さかったが衝突速度が約 2 倍 以上であり,飛翔体の寸法と速度がクレータ深さに大き く影響したと考えられる。また,鋼繊維を混入した S 試



験体の方が剛性や繊維の引張強度が PVA 試験体より大きいため、同等運動エネルギーの範囲でのクレータ深さ

が小さくなったと思われる。

図-8 に高速飛翔体の衝突条件により試験体が受ける 運動エネルギーとスポール厚さの関係を示す。Plain 試験 体の場合は,飛翔体の運動エネルギー1,500J 以上から試 験体厚さの半分以上のスポールが生じた。試験体の衝突 面に生じるクレータ厚さを除いて裏面のスポール厚さ は試験体の全体厚さの約80%以内の範囲で形成されるこ とが分かった。また,高靭性セメント複合材料試験体に おいて,S4 試験体は裏面の一部が隆起したが,飛翔体の

表-5	繊維とマ	トリ	ックス	の比表面積の関係
-----	------	----	-----	----------

試験体 の種類	1m ³ 体積に対する 混入繊維の個数	1m ³ 体積に対する 混入繊維の比表面積(mm ²)
PVA	9.95E+8	1.50E+9
S	6.2E+7	3.80E+8

運動エネルギー7,000J 以内の範囲では試験体のスポー ルを抑える耐衝撃性が見られた。さらに飛翔体の貫通に 伴ってスポールが観察された PVA2 試験体のスポール厚 さは,試験体の全体厚さの 50%以内となり,裏面損傷は 限定的であった。

図-9 に高速飛翔体の衝突条件によって試験体が受け る運動エネルギーと質量変化率の関係を示す。飛翔体の 運動エネルギーと質量変化率の関係は、衝突実験によっ て生じる試験体の飛散破片を混入繊維が抑制する破壊 特性を把握する基礎資料として検討した。その結果、飛 翔体の運動エネルギーが増加するほど質量減少率が大 きく、より多く飛散する傾向が見られた。また、その関 係式の勾配は Plain 試験体が最も大きく、相関係数 R² も 0.93 で高い相関性が認められた。一方、本研究で飛翔体 の運動エネルギーが一番大きい約 7,500~8,000J の場合 においても、PVA 試験体は 2.63%、S 試験体は 5.26%の 質量変化率であり、Plain 試験体より著しく小さく、飛散 に対する繊維補強の効果が認められた。

本研究の範囲では、高速飛翔体の衝突条件と試験体の 破壊状況の関係から、高靭性セメント複合材料の耐衝撃 性は、Plain 試験体と比較すると、衝突面のクレータより 裏面のスポール損傷が大きく改善されることが明らか になった。

表-5に高靭性セメント複合材料のPVA 繊維及び鋼繊 維とマトリックスの比表面積の関係を示す。PVA 繊維と 鋼繊維の物理的特性の差からマトリクス内の分散は異 なり、例えば、1m³の体積に 1.5%の体積混入率の場合, 混入繊維の個数はPVA 繊維が鋼繊維より約16倍であり、 繊維の比表面積は、径の細いPVA 繊維で 1.50E+9mm², 径の太い S 繊維で 3.80E+8mm²となる。すなわち、PVA 試験体の方が S 試験体より密にマトリクスを補強でき, 高速飛翔体の衝突による損傷抑制に対して効果が高く なった要因と考えられる。しかし、高靭性セメント複合 材料の破壊特性をより明らかにする為には、使用する混 入繊維の引張強度や繊維表面特性などの影響について は、今後検討する必要がある。

4. まとめ

高速飛翔体の衝突実験による高靭性セメント複合材 料の破壊特性を検討した結果,本実験範囲内で以下の結 論を得た。

- (1) 高靭性セメント複合材料試験体は繊維無補強モルタル試験体の約4倍以上の飛翔体の運動エネルギーでもクレータのみ生じる結果となり、鉄筋が配筋されてない状況で、スポールや貫通された場合にも、試験体の形状を保持することが出来た。
- (2) 試験体のクレータ深さとスポール厚さの比率については、Plain 試験体が約 2.5:7.5、PVA 試験体が約 6:4、
 S 試験体が約 5.5:4.5 となり、高靭性セメント複合材料はスポール厚さの発生比率が低減された。
- (3) 衝突実験前後の試験体の質量変化率と飛翔体の運動 エネルギーの関係から、高靭性セメント複合材料は 貫通された試験体でも質量変化率が最大 5.26%であり、試験体の損傷抑制効果が認められた。
- (4) ある体積に分散されている混入繊維全体とマトリッ クスとの比表面積はS試験体よりPVA試験体が大き いため、高靭性セメント複合材料中でも異なる破壊 性状が見られたが、使用する混入繊維の引張強度や 繊維表面特性などの影響については、今後検討する 必要がある。

謝辞

本研究は 2014 年度東京工業大学応用セラミックス研 究所共同利用研究事業(国際 B)の支援を受けました。こ こに感謝の意を表します。また,使用繊維の提供につい て株式会社クラレ及び東京製綱株式会社の関係者にも ご感謝致します。

参考文献

- Luccioni BM, Ambrosini RD and Danesi RF : Analysis of building collapse under blast loads, Engineering Structures, Vol. 26, pp. 63-71, 2004
- Osteraas JD : Murrah building bombing revisited; a qualitative assessment of blast damage and collapse patterns, Journal of Performance of Constructed Facilities(ASCE), Vol. 20, pp. 330-335, 2006
- Islam AKMA and Yazdani N : Performance of AASHTO girder bridges under blast loadings, Engineering Structures, Vol. 30, pp. 1922-1937, 2008
- McVay MK : Spall damage of concrete structures. U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experimental Station; Technical report SL88-22, 1988
- 5) 高靭性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会:高靭性セメント複合材料を知る・作る・ 使う、日本コンクリート工学会、2002
- 6) 高靭性セメント複合材料の性能評価と構造利用研 究委員会報告書(Ⅱ),日本コンクリート工学会, 2004