

論文 ポリプロピレン繊維補強セメント複合材料の高速衝突実験

南 正樹*1・篠原 保二*2・阿藤 敏行*3・金 圭庸*4

要旨: 高速衝突現象に対する高靱性繊維補強セメント複合材料の耐衝撃性能は、優れた引張・曲げ性能の影響で高くなることが報告されている。しかし、強度が比較的低い一般の繊維補強セメント複合材料の高速衝突実験に対する破壊特性は、まだ明らかになっていない。従って、本研究ではポリプロピレン繊維を体積混入率 1.0, 2.0 及び 3.0%としたパネル型の繊維補強セメント複合材料を用いて、衝突速度が約 400~700m/s の条件で高速衝突実験を行った。その結果、繊維無補強試験体に比べてポリプロピレン繊維補強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、繊維混入率が衝撃破壊抑制に及ぼす影響を検討した。

キーワード: ポリプロピレン繊維, 繊維混入率, 繊維補強セメント複合材料, 高速衝突実験, 耐衝撃性能

1. はじめに

近年、繊維補強セメント複合材料は建築・土木分野において、主に耐震性能が要求される構造物の柱、梁及び橋のジョイント部などに補強材として適用事例が増加し、特に引張・曲げ性能が高い高靱性繊維補強セメント複合材料(ductile fiber reinforced cementitious composite, DFRCC), あるいは、高性能繊維補強セメント複合材料(high performance fiber reinforced cementitious composite, HPRFCC)が多く採用されている。この高靱性繊維補強セメント複合材料及び高性能繊維補強セメント複合材料には、変形能力を高めるために、繊維の引張強度や繊維とセメントマトリックスとの架橋効率が優れたポリエチレン(polyethylene)繊維(以下, PE 繊維), ポリビニールアルコール(polyvinyl alcohol)繊維(以下, PVA 繊維)及び鋼繊維が採用されている¹⁾。

また、高靱性繊維補強セメント複合材料及び高性能繊維補強セメント複合材料は耐震性能を向上させるだけではなく、偶発的な爆発や高速衝突事故のように極限衝撃荷重を受ける可能性がある重要な施設の防護性能を高めるための構造材料としても適用が検討されている。コンクリート材料は脆性的な性質があるため、飛翔体の衝突によってひび割れが急速に進展し、その裏面に大きい損傷が生じることからコンクリート部材厚を極厚にして衝撃エネルギーを吸収・分散するのが一般的である。しかし、高靱性繊維補強セメント複合材料の耐衝撃・耐爆性能に関する既往の研究では、高速衝突や爆発に対するコンクリート材料の脆性的な破壊性状が高靱性繊維の架橋作用によって抑えられ、通常のコンクリートより部材厚を低減できることが報告されている²⁾。

また、耐衝撃性能については、高靱性繊維補強セメン

ト複合材料及び高性能繊維補強セメント複合材料だけではなく、PE 繊維, PVA 繊維や鋼繊維より経済的なポリアミド繊維やポリプロピレン(polypropylene)繊維(以下, PP 繊維)などを混入した繊維補強セメント複合材料についても検討されている^{3),4)}。これらの研究報告によると、繊維補強セメント複合材料の引張・曲げ強度などの力学特性は耐衝撃性能に大きく影響を及ぼすが、力学特性が相対的に低い繊維でも混入量が増加するとセメントマトリックスの剥離抑制効率が向上することが明らかになっている。

しかし、一般の繊維補強セメント複合材料に対する高速飛翔体の衝突実験の研究事例は、高靱性や高性能の繊維補強セメント複合材料と比較して少ない。そこで、本研究では PP 繊維を 1.0, 2.0 及び 3.0%(体積混入率)混入した繊維補強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、繊維を混入しないプレーンモルタル、また、高靱性繊維補強セメント複合材料として PVA 繊維及び鋼繊維を混入した試験体に関する既往の研究結果の一部と衝撃破壊性状について比較し、PP 繊維補強セメント複合材料の破壊抑制効果を繊維の混入率に基づいて検討した。

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 PP 繊維の体積混入率を 1.0, 2.0 及び 3.0%とする 3 種類、さらに飛翔体の衝突速度を 3 段階とする合計 9 体である。また、PP 繊維補強セメント複合材料の高速衝突実験結果を既往研究から得られた高速衝突実験に対する破壊特性と比較するために、繊維

*1 東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所 研究員 博(工)(正会員)

*2 東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所 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(工)

*4 大韓民国 忠南大学校 建築工学科 教授 博(工)(正会員)

表-1 実験計画

実験要因及び水準				飛翔体の 衝突想定速度 (m/s)	評価項目
試験体 種類	混入繊維の 種類	繊維 混入率 V_f (%)	試験体 寸法 (mm)		
PP1.0	ポリプロピレン	1.0	横×縦×厚さ 300×300×100	400-700	<ul style="list-style-type: none"> 試験体の破壊形式 クレータ及びスポール直径(mm) クレータ及びスポール深さ(mm) 質量変化率(%) 破壊性状と衝突条件の関係
PP2.0		2.0			
PP3.0		3.0			
Plain*	繊維なし	0.0		450	
PVA1.5*	ポリビニールアルコール	1.5		600	
S1.5*	スチール	1.5	600		

* 既往研究の試験体の一部、参考文献 2)

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(JIS A 6201) 密度：2.20g/cm ³ ，粉末度：3,228cm ² /g
細骨材(珪砂)	密度：2.56g/cm ³ ，吸水率：0.49%， 粒径：0.3~0.8mm
混和剤	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤
PP 繊維	polypropylene，弾性係数：4GPa 見掛け密度：0.91g/cm ³ ，直径：0.043mm， 長さ：12mm，引張強度：560MPa
PVA 繊維	polyvinyl alcohol，弾性係数：32GPa 見掛け密度：1.30g/cm ³ ，直径：0.04mm， 長さ：12mm，引張強度：1200MPa
鋼繊維	steel，弾性係数：200GPa 見掛け密度：7.80g/cm ³ ，直径：0.16mm， 長さ：12mm，引張強度：2700MPa

表-3 試験体の調合

試験体 の種類	W/B	繊維 混入率 V_f (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	FA	S	F
PP1.0	0.4	1.0	438	875	219	438	9.0
PP2.0		2.0					17.8
PP3.0		3.0					26.5
Plain*		0.0					0.0
PVA1.5*		1.5					19.2
S1.5*		1.5					115.3

* 既往研究の試験体の一部、参考文献 2)

を混入しないプレーンモルタル(Plain)及びPVAと鋼繊維をそれぞれ1.5%混入した高靱性繊維補強セメント複合材料(PVA1.5及びS1.5)の結果を参照²⁾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)の飛翔体を約400~700m/sの速度で衝突させる実験を行った。また、評価項目は衝突実験後の試験体の外観破壊性状から判断した破壊形式、表面貫入(以下、クレータ)直径、裏面剥離(以下、スポール)直径、クレータ深さ、スポール深さ、質量損失率及び破壊性状と衝突条件の関係とした。

また、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

表-4 静的力学特性評価の試験体寸法及び規準

評価項目	試験体寸法	試験規準
圧縮強度	φ100×200mm	JIS A 1108
割裂引張強度	φ100×200mm	JIS A 1113
破壊エネルギー	□100×100×400mm	JCI-S-001-2003

普通ポルトランドセメントにフライアッシュを20%置換し、細骨材は7号珪砂を使用した。PP繊維は長さ12mm、引張強度560MPaのものを各々1.0、2.0、3.0%の体積混入率で混入した。全ての試験体は28日の材齢まで温度20±3℃、湿度60±5%のチャンバーで養生した後に静的力学特性評価及び衝突実験を行った。

2.2 実験方法

表-4に静的力学特性評価に使用した試験体の寸法及び規準を示す。ここで、圧縮強度及び割裂引張強度は、それぞれJIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」及びJIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」に準じてφ100×200mmの円柱形の試験体を用いて評価した。また、破壊エネルギーはJCI-S-001-2003「切欠きはりを有したコンクリートの破壊エネルギー試験方法」に準じて□100×100×400mmの角型試験体の中央に約5mm幅のノッチを入れ、3点曲げ試験と荷重-ひび割れ開口部変位(CMOD)曲線を用いて求めた。

一方、図-1及び図-2に火薬式飛翔体衝突試験装置の概要、試験体の設置状況及び飛翔体の諸元を示す。本研究では、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方法で衝突実験を行った。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、飛翔体を安定して加速させるために装着した飛翔体のサボは、衝突直前でサボキャッチャーによって

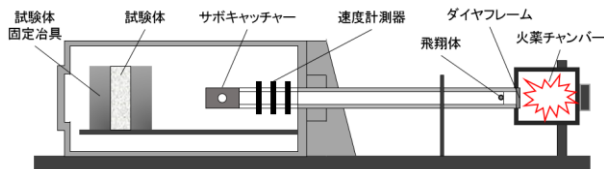


図-1 火薬式飛翔体衝突試験装置の概要

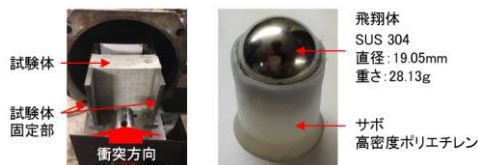


図-2 試験体の設置状況及び飛翔体の諸元

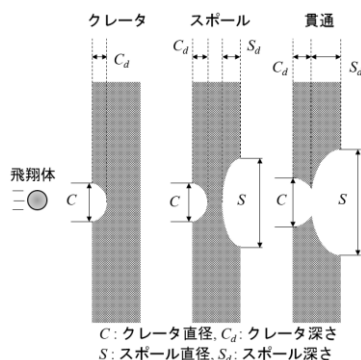


図-3 試験体の損傷測定方法

先端の金属と分離させ、金属のみを衝突させた。本研究では、直径 19.05mm 及び質量 28.13g のステンレス(SUS 304)の球体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-3 に示す。破壊形式は(I)クレータ、(II)スポール、(III)貫通の3水準に分類し、クレータ直径及び深さ、スポール直径及び深さ、質量変化率を測定した。高速飛翔体の衝突によるクレータ及びスポールの直径は、表面及び裏面の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とした。また、クレータ及びスポールの深さは、試験体表面及び裏面から損傷最深部までの距離とした。

3. 実験結果及び考察

3.1 静力学特性評価結果

表-5 に PP 繊維補強セメント複合材料及び既往研究での Plain, PVA1.5 及び S1.5 試験体の静的力学特性評価結果を示す。全ての繊維補強セメント複合材料は 1.0% 以上の高い繊維混入率の影響で、Plain 試験体に比べて圧縮強度は低くなったが、引張強度及び破壊エネルギーは増加した。また、PP 繊維補強セメント複合材料の引張強度は、繊維混入率が増加するほど上昇したが、PP 繊維の混入率が 3.0% でも高性能繊維を 1.5% 混入した PVA1.5 試験体及び S1.5 試験体よりも引張強度が低くなることが確認された。また、PP 繊維補強セメント複合材料の破壊エ

表-5 静的力学特性の評価結果

試験体の種類	圧縮強度 (MPa)/(σ)*	割裂引張強度 (MPa)/(σ)*	破壊エネルギー (N·m/m ²)/(σ)*
PP1.0	35.7(1.6)	4.0(0.1)	3636.4(475.3)
PP2.0	39.9(5.4)	5.7(0.1)	6679.3(297.3)
PP3.0	37.5(1.9)	6.1(0.5)	10911.0(596.7)
Plain	55.2(4.0)	3.1(0.1)	752.8(118.6)
PVA1.5	41.1(1.1)	6.7(0.2)	7087.5(237.3)
S1.5	42.4(2.3)	7.1(0.3)	8577.7(341.7)

* : 標準偏差

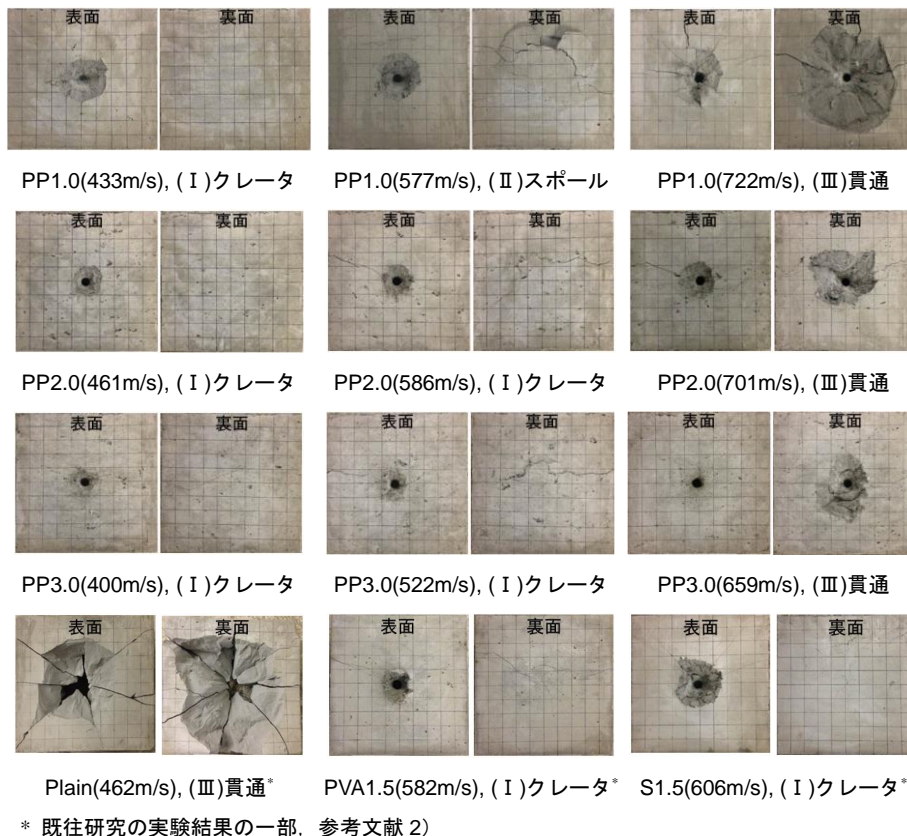
ネルギーは繊維の混入率 2.0% までは繊維混入率 1.5% の高靱性繊維補強セメント複合材料より小さいが、PP 繊維の混入率 3.0% である PP3.0 試験体では PVA1.5 及び S1.5 試験体より破壊エネルギーが大きいことが分かった。

3.2 外観損傷及び破壊形式

図-4 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性状を示す。実験計画で示した想定速度に基づいて行った高速飛翔体の衝突実験の結果であり、計測した衝突速度及び試験体の破壊形式を示す。Plain 試験体と PP 繊維補強セメント複合材料試験体の破壊性状における大きな差は、試験体の形態保持能力であり、裏面剥離と共にひび割れによる破断が発生した Plain 試験体に比較して、PP 繊維補強セメント複合材料試験体は、貫通が生じた場合も試験体の形態は保持された。破壊形式の把握によって PP 繊維補強セメント複合材料の耐衝撃性能が Plain 試験体と比較して飛躍的に向上していることが分かった。

PP 繊維補強セメント複合材料は Plain 試験体が貫通破壊した衝突速度より速い衝突速度の範囲(500m/s 以上)において、クレータや部分的なスポールの破壊形式が見られた。また、PP 繊維補強セメント複合材料は高速飛翔体の衝突速度が 522~577m/s の範囲において繊維の混入率による破壊形式の差が認められた。PP1.0 試験体は、衝突速度が 577m/s で裏面が部分的にスポールした。また、PP2.0 と PP3.0 試験体の場合は裏面に幅広いひび割れは生じたが破壊形式はクレータのみとなった。なお、PP 繊維補強セメント複合材料試験体は繊維の混入率に関わらず衝突速度が約 650m/s 以上の範囲で全て貫通した。しかし、PP 繊維の混入率が増加するほど貫通した試験体の裏面側の損傷は低減された。

一方、衝突速度が約 600m/s 程度での PVA1.5 試験体及び S1.5 試験体の破壊形式と比べると、部分的にスポールした PP1.0 試験体を除く PP2.0 試験体及び PP3.0 試験体の破壊形式はクレータである。試験体によって衝突速度は少し異なるが、衝突速度が 520~600m/s の範囲では混入率 2.0% 以上の PP 試験体はスポールが生じず、PVA1.5 及び S1.5 とほぼ同等の耐衝撃性能を示した。また、衝突速度が 660~720m/s の範囲では全ての PP 試験体が貫通



* 既往研究の実験結果の一部、参考文献 2)

図-4 試験体の表面及び裏面の破壊性状

したが、繊維の混入率が 2.0%以上になると裏面の損失面積が明確に減少した。

3.3 定量的な損傷測定結果

図-5 に高速飛翔体の衝突を受けた試験体のクレータ直径を示す。比較用の Plain 試験体は本実験における飛翔体の衝突速度の中では比較的遅い 500m/s 以下の速度で最もクレータ直径が大きくなった。また、PP 繊維補強セメント複合材料試験体では、繊維の混入率が増加するほど架橋作用の効果が高くなり、クレータ直径を低減できることが分かった。衝突速度が約 400m/s 以上の高速範囲での PP 繊維補強セメント複合材料試験体では、繊維の混入率がクレータ直径に及ぼす影響が大きいことが確認された。一方、この結果を高靱性繊維補強セメント複合材料試験体と比べると PP1.0 試験体は S1.5 試験体と同等のクレータ直径となり、PP2.0 試験体及び PP3.0 試験体の場合は PVA1.5 試験体と同等のクレータ直径となった。

図-6 に飛翔体の衝突速度と試験体のスポール直径の関係を貫通した試験体も含めて示す。貫通した Plain 試験体及び部分的にスポールした PP1.0 を除く全ての繊維補強セメント複合材料試験体は、約 600m/s 以下の衝突速度ではスポールが抑制された。貫通によってスポールした PP 繊維補強セメント複合材料試験体においては、繊維の混入率が増加するほどスポール直径が減少した。ス

ポール直径の低減効果は、PP 繊維の混入率が 1.0%の試験体より 2.0%以上の繊維混入率の試験体で明確に現れた。

また、以上の測定結果から得られたクレータ直径とスポール直径との関係を図-7 に示す。繊維補強の有無によらず、高速飛翔体の衝突によってスポールが発生するとスポール直径はクレータ直径より大きくなることがわかった。一般的にセメント系複合材料は圧縮力より引張力に弱いので、損傷領域が表面より裏面で幅広く進展し、このような傾向が現れたと考えられる³⁾。

図-8 に飛翔体の衝突速度と試験体のクレータ深さの関係を示す。全ての試験体において高速飛翔体の衝突速度が増加するほどクレータ

深さが深くなる傾向が見られた。また、PP 繊維補強セメント複合材料試験体のクレータ深さを繊維混入率の観点から比較すると、繊維の混入率が高いほどクレータ深さは増加する傾向が見られた。一般的にセメント系複合材料の場合、試験体の衝突面の強度や剛性がクレータ深さに及ぼす影響が大きい。PP 繊維の混入率が増加するほど混入繊維の影響でセメントマトリックスの空隙が多くなり、衝突面の剛性が低下するため、Plain 試験体に比べてクレータ深さが増加したと考えられる。

図-9 に飛翔体の衝突速度と試験体のスポール深さの関係を貫通した試験体も含めて示す。貫通によってスポールが生じた PP 繊維補強セメント複合材料試験体は、衝突速度が約 600m/s 以上の範囲では繊維の混入率が高いほどスポール深さが浅くなった。一般的に繊維補強セメント複合材料は、混入した繊維の本数が多いほどセメントマトリックスと繊維の間の比表面積が大きくなる。すなわち、PP 繊維補強セメント複合材料試験体の一部組織が試験体の内部から裏面の方向にスポールする場合、PP 繊維の混入率が高いほど試験体からスポールするセメントマトリックスをより拘束することが出来るためと考えられる。

また、以上の測定結果から得られたクレータ深さとスポール深さの関係を図-10 に示す。PP 繊維補強セメント複合材料試験体のクレータ深さとスポール深さの関

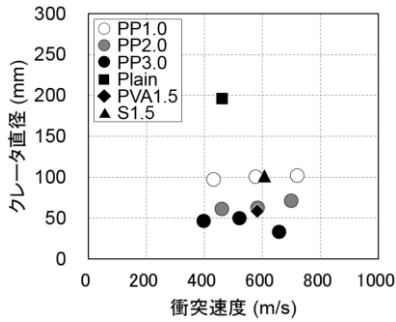


図-5 クレータ直径

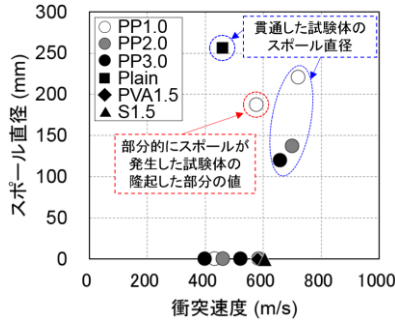


図-6 スポール直径

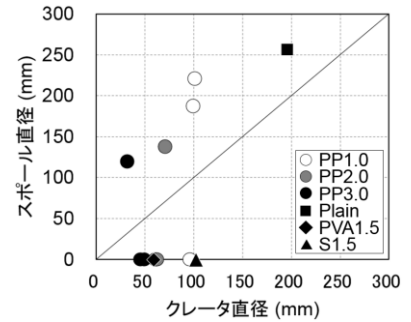


図-7 表面と裏面の破壊直径関係

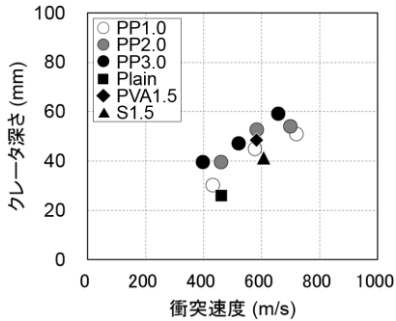


図-8 クレータ深さ

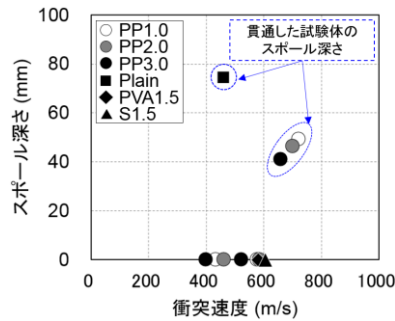


図-9 スポール深さ

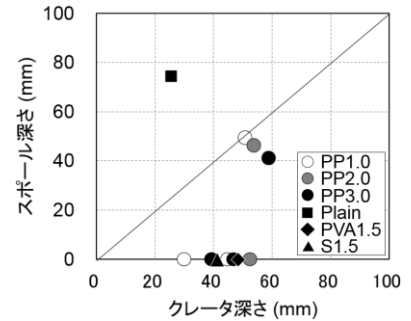


図-10 表面と裏面の破壊深さ関係

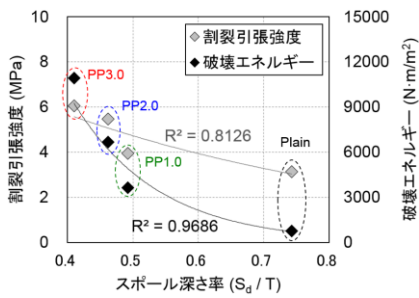


図-11 力学特性とスポール率の関係

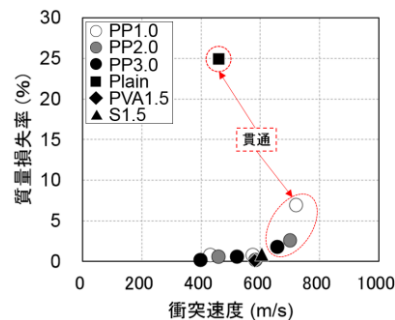


図-12 質量損失率

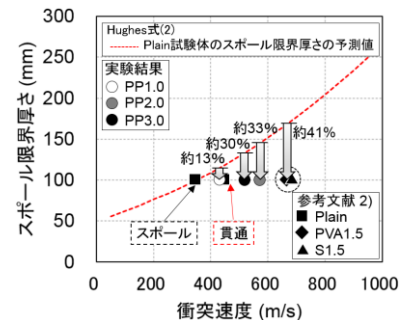


図-13 スポール限界厚さ

係は、前述したクレータ直径とスポール直径の関係と異なる傾向が見られた。貫通した試験体においては、Plain 試験体はクレータ深さよりスポール深さが試験体厚さに対して占める割合が大きかったが、PP 繊維補強セメント複合材料試験体の場合、クレータ深さに比べてスポール深さが試験体厚さに対して占める割合が小さかった。なお、その傾向は PP 繊維の混入率が増加するほど明確に認められた。

図-11 に割裂引張強度及び破壊エネルギーとスポール深さ率(試験体の厚さに対するスポール深さ)の関係を示す。引張強度及び破壊エネルギーの増大がスポール深さ率の低減に作用していることが確認できた。また、引張強度と比較して破壊エネルギーの方が試験体のスポール深さ率の低減に大きく作用することが分かった。

図-12 に高速飛翔体の衝突速度と試験体の質量損失率の関係を示す。Plain 試験体は 462m/s の衝突速度で約 25%の質量損失率となったが、PP 繊維補強セメント複合材料試験体の場合は、貫通破壊でも PP1.0 試験体は約 7%、PP2.0 試験体及び PP3.0 試験体は 3%以下の質量損失率と

なった。一方、クレータの破壊形式と判断された全ての繊維補強セメント複合材料試験体の衝突実験後の質量損失率は 1%以下となり、400m/s 以上の飛翔体の高速衝突速度でも混入繊維の補強効果によりセメントマトリックスの脆性的な破壊を抑制することが出来たと考えられる。

3.4 PP繊維補強セメント複合材料の耐衝撃性能

図-13 に Hughes が提案したスポール限界厚さに関する評価式から予測した Plain 試験体のスポール限界厚さに対する PP 繊維補強セメント複合材料のスポール限界厚さの低減率を示す。Hughes が提案したスポール限界厚さに関する評価式は、高速飛翔体の衝突条件に対してコンクリート系材料のスポール限界厚さを予測する式(2)である。

$$I = \frac{MV_0^2}{f_t D^3} \quad (I \leq 3500) \quad (1)$$

$$\frac{s}{D} = 1.74 \left(\frac{x}{D} \right) + 2.3 \quad (2)$$

ここで、 I : 衝撃係数, M : 飛翔体の質量(kg),

V_0^2 : 衝突速度(m/s), f_t : 引張強度(N/mm²),
 D : 飛翔体の直径(cm), x : クレータ深さ(cm),
 s : スポール限界厚さ(cm)

Plain 試験体の場合, 本実験で採用した試験体の厚さと飛翔体の直径及び質量の範囲では, 350m/s 以上の衝突速度でスポールが生じると Hughes 式では予測された。Plain 試験体の衝突実験結果と Hughes 式から予測したスポール限界厚さがほぼ一致していることが分かった。また, PP 繊維補強セメント複合材料試験体のスポール限界厚さの低減効果は, 高靱性繊維補強セメント複合材料試験体である PVA1.5 及び S1.5 試験体のスポール限界厚さで見られた低減効果に比べるとやや小さくなった。しかし, Plain 試験体のスポール限界厚さに比べて, PP 繊維補強セメント複合材料試験体は同じ試験体の厚さでもより速い衝突速度までスポールを抑制することが出来た。Plain 試験体から予測したスポール限界厚さより PP1.0 試験体は約 13%, PP2.0 試験体及び PP3.0 試験体は約 30% 以上試験体の厚さを低減させることが出来ると考えられる。

表-6 に, Plain 試験体の衝突速度 462m/s での損傷レベルを基準とした PP 繊維補強セメント複合材料の損傷抑制率を衝突速度ごとに示す。この損傷抑制率は, Plain 試験体と同じ損傷レベルであれば 0%, Plain 試験体の損傷が全く無ければ 100%となる。クレータ直径の損傷抑制率は, 試験体の幅(300mm)に対する値であり, PP1.0 試験体が 48~51%, PP2.0 試験体が 64~69%, PP3.0 試験体が 75~83%であり, 衝突速度の影響は小さいが, 混入率の増加に伴って損傷抑制効果が大きくなる。また, 最も速い衝突速度における PP1.0, PP2.0 及び PP3.0 のスポール直径で評価した損傷抑制率は, それぞれ 14%, 46% 及び 53%となり, スポール直径の抑制効果は PP 繊維の混入率が 2%以上から鈍化し, 補強限界が確認された。また, スポール深さの損傷抑制率は, 試験体の厚さ(100mm)に対する値であり, PP1.0, PP2.0 及び PP3.0 は, それぞれ 34%, 38%及び 45%となり, 繊維混入率の影響は小さくなった。質量損失率における損傷抑制率は, 衝突速度

表-6 PP 繊維補強セメント複合材料の損傷抑制率

試験体の種類	衝突速度 (m/s)	クレータ直径(%)	スポール直径(%)	スポール深さ(%)	質量損失率 (%)
PP1.0	433	51	100	100	97
	577	49	27	100	97
	722	48	14	34	72
PP2.0	461	69	100	100	98
	586	68	100	100	99
	701	64	46	38	90
PP3.0	400	77	100	100	99
	522	75	100	100	98
	659	83	53	45	93

722m/s での PP1.0 試験体を除いて, 全ての PP 繊維補強セメント複合材料は約 90%以上となり, 比較用の Plain 試験体に比べて優れた耐衝撃性能が確認された。

4. まとめ

ポリプロピレン繊維補強セメント複合材料の高速衝突実験から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) Plain 試験体が貫通した衝突速度より速い速度範囲である 500~600m/s において PP1.0 は部分的にスポールしたが, PP2.0 及び PP3.0 はクレータの破壊形式となり, 高い耐衝撃性能が認められた。
- (2) PP 繊維補強セメント複合材料の引張強度及び破壊エネルギーが増大するほどスポール深さ率は低減し, 特に破壊エネルギーの増大が大きく貢献していることが分かった。
- (3) PP 繊維補強セメント複合材料の繊維混入率が増加するほどスポール直径が減少し, 繊維混入率が 2%以上となるとその効果が明確に見られた。また, 繊維混入率が 2%以上になると試験体が貫通破壊しても衝突実験後の質量損失率は 3%以下となった。
- (4) Plain 試験体の破壊性状に基づく PP 繊維補強セメント複合材料の損傷抑制率及び Hughes 式から予測したスポール限界厚さを検討した結果, 高速飛翔体の衝突に対する耐衝撃性能から判断すると繊維混入率 2%以上で 30%の部材厚を低減できることが分かった。

謝辞

本研究は 2015 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。

参考文献

- 1) 高靱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
- 2) 南正樹, 篠原保二, 阿藤敏行, 金圭庸: 高速飛翔体の衝突実験による高靱性セメント複合材料の破壊特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.583-588, 2015
- 3) Kim H, Kim G, Gucunski N, Nam J, and Jeon J: Assessment of flexural toughness and impact resistance of bundle-type polyamide fiber-reinforced concrete, Compos Part B: Engineering, Vol. 78, pp. 431-446, 2015
- 4) Badr A, Ashour AF and Platten AK: Statistical variations in impact resistance of polypropylene fibre-reinforced concrete, International Journal of Impact Engineering, Vol. 32, pp. 1907-1920, 2006