

ポリプロピレン繊維補強コンクリートパネルの裏面剝離抑制効果 に関する研究

Local failure resistance of polypropylene fiber reinforced concrete panels subjected to projectile impact

森広毅*, 別府万寿博**, 市野宏嘉***, 室賀陽一郎****
Koki Mori, Masuhiro Beppu, Hiroyoshi Ichino, Yoichirou Muroga

*防衛大学校, 理工学研究科前期課程学生 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

** 博 (工), 防衛大学校教授, 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

*** 博 (工), 防衛大学校准教授, 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

****バルチップ (株), (〒101-0035 東京都千代田区神田紺屋町 7)

キーワード: 飛来物衝突, ポリプロピレン繊維補強コンクリート, 局部破壊

Keywords: *projectile impact, polypropylene fiber reinforced concrete, local failure*

1. 緒言

近年, 世界各国において爆破テロや爆発事故が多発している。爆破テロや爆発事故が発生すると, 構造物は爆風圧によって被害を受けると同時に, コンクリート片等の爆発飛散物が生じる。爆発飛散物の速度は数 100m/s に及び, 周囲の構造物に衝突すると構造物は 2 次被害を受ける。したがって, 爆破テロの標的となりやすい原子力発電所等の社会的に重要な構造物および爆発事故を起こす可能性のある化学プラントや火薬工場の周辺施設に対して, 全体破壊とともに局部破壊に対する設計法や補強方法を確立する必要がある。

コンクリート版の局部破壊を抑制するために, 様々な検討が行われている。Dancygier¹⁾や Tai²⁾は, 高強度コンクリート版に対して高速衝突実験を行い, コンクリートの高強度化による局部破壊抑制効果を検討している。一方で近年, 構造物の耐衝撃性能を向上させる方法の一つとして繊維補強セメント複合材料 (Fiber Reinforced Cementitious Composite, FRCC) の適用について検討が行われている。FRCC はモルタルやコンクリートに鋼繊維, ポリプロピレン (PP) 繊維, ポリビニルアルコール (PVA) 繊維およびガラス繊維等の繊維を混入した材料で, 繊維がマトリクス間のひび割れを架橋することにより靱性を向上する目的で開発されたものである。FRCC に代表される繊維補強コンクリート (Fiber Reinforced Concrete, FRC) では主に舗装, 床板のひび割れ抑制効果を向上させるために鋼繊維を用いた FRC が開発されている。また, 鋼繊維に代わる材料として PP 繊維, PVA 繊維やアラミ

ド繊維などの有機繊維が使用されている。有機繊維は鋼繊維よりも耐腐食性が高く軽量であるため, トンネルでのコンクリート剥落防止を目的とした覆工などに用いられている。FRC の耐衝撃補強効果を調べた研究も過去に行われている。Almusallam³⁾らは, PP 繊維および鋼繊維を単一で混入させた RC 版と, 2 種類の繊維を混合して混入させた RC 版に対して高速衝突実験を行い, 繊維の有無や種類によらず貫入深さは同程度であるが, 損傷領域が低減することを述べている。

以上のように, FRCC や FRC が飛翔体の衝突による局部破壊の抑制に効果的であることは定性的に知られているが, 局部破壊抑制効果に関する定量的な検討は少ない。また, PVA 繊維や鋼繊維, 繊維補強とシート補強の組み合わせによる補強の検討に関しては行われているが, PP 繊維補強のみの検討については少ない。

本研究は, 2 種類の PP 繊維を混入した FRC パネルに対して高速衝突実験を行い, PP 繊維の混入によるコンクリートパネルの裏面剝離抑制効果について検討したものである。まず, 繊維の寸法及び混入率の異なる 2 種類の PPFRC に対して曲げ実験および圧縮実験を行い, PPFRC の動的強度特性について検討した。次に, 前述した 2 種類の PPFRC に加えて, PP 繊維を 2 種混入した PPFRC を加えた計 3 種類の PPFRC に対して高圧空気式発射装置を用いて衝突実験を行い, PP 繊維の混入による裏面剝離の抑制効果について検討した。また, 修正 NDRC 式を用いて各 FRC パネルの裏面剝離限界版厚の評価を行った。

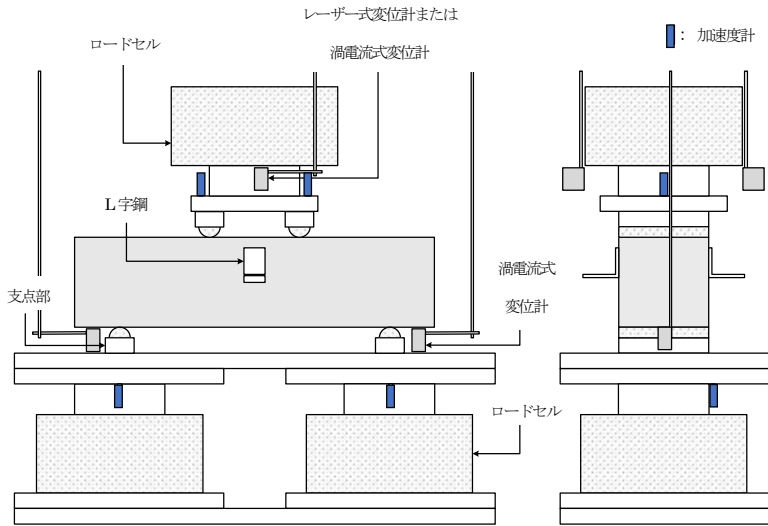


図-1 曲げ実験の外観

表-1 実験ケース

曲げ	実験名称	静的曲げ実験	高速曲げ実験
	ひずみ速度		$10^{-6}/s$
種類	PPFRC1	4	5
	PPFRC2	5	4



(a)PP1

(b)PP2

図-2 繊維の外観

表-2 繊維の力学特性

種類	長さ (mm)	直径 (mm)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	密度 (g/cm ³)
PP1	30	1.0	500	10000	0.91
PP2	12	0.043	390	5000	0.91

表-3 PPFRC の使用材料

記号	材料	仕様
C	セメント	普通ポルトランドセメント, 密度 $3.16g/cm^3$
W	水	水道水
S	細骨材	山砂, 密度 $2.62g/cm^3$
G	粗骨材	石灰石砕石2005, 表乾密度 $2.70g/cm^3$
F	PP繊維	ポリプロピレン繊維, 表-2参照
SP	混和剤	高性能AE減水剤, SP8SV BASFジャパン製

2. 曲げ強度特性

2.1 曲げ実験の概要

サーボ制御式急速载荷装置を用いて、静的および高速曲げ実験を行った。サーボ制御式急速载荷装置は、変位速度を一定に保持した状態で载荷できる機能を有しており、载荷速度が試験体の力学特性に及ぼす影響を調べることが可能である。図-1に、曲げ実験の外観を示す。静的および動的曲げ実験における計測では、荷重及び支点反力はロードセルで計測した。試験体下部の中央にひずみゲージを貼付し、計測したひずみ-時間関係からひずみ速度を算定した。試験体のたわみについては、静的および動的曲げ実験ではレーザー式変位計および渦電流式変位計を用いた。試験体に設置したL字鋼の変位量から支分部の変位量を差し引いて、試験体のたわみを算出した。表-1に示すように、合計18体の実験を行った。

2.2 繊維の特性

図-2および表-2に、PPFRCパネルに使用したPP繊維

の種類および力学特性を示す。PP1は繊維長30mm、直径0.5mmであり、PP2は繊維長12mm、直径0.043mmである。PPはポリオレフィン樹脂から作られており、比重が小さく、繊維成形性に優れている。短繊維とコンクリートマトリクスの付着については、PPは化学的付着が弱いので、表面凹凸状に加工し、機械的付着を大きくしている。引張強度およびヤング係数はともにPP1の方が高く、PP1の引張強度はPP2の約1.3倍、ヤング係数はPP2の2倍である。両繊維の密度は $0.91g/cm^3$ であり、同じ混入量ではPP2の本数はPP1の約338倍である。表-3に、PPFRCの作製に使用した材料を示す。表-4に、コンクリートの配合を示す。コンクリートマトリクスに対して、PP1は外割りの体積比で2.0%、PP2は0.4%を混入した。以降では、PP1およびPP2を混入したFRCを、それぞれPPFRC1およびPPFRC2と称する。

2.3 実験結果

図-3に静的および高速曲げ実験における試験体の破壊性状を示す。PPFRC2の一部を除き、すべてのPPFRCで純曲げ区間にひび割れが生じた。ひび割れの本数につ

表-4 コンクリートの示方配合および空気量・スランプ試験結果

Type	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				F(g/m ³)		SP	空気量 (%)	スランプ (cm)
			W	C	S	G	PP1	PP2			
PPFRC1	53	60	195	453	928	666	18.2	0	1.0%	5.7	14.8
PPFRC2	53	60	195	453	928	666	0	3.6	1.0%	2.5	6.4

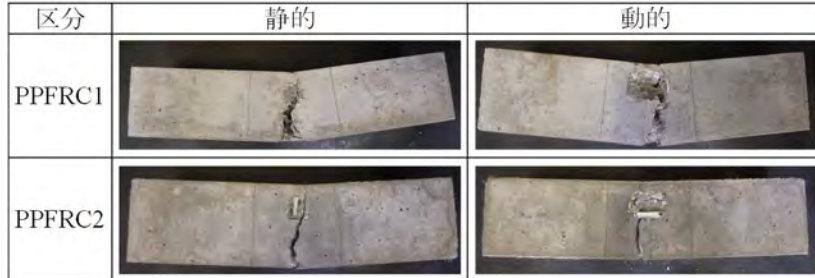


図-3 曲げ実験の破壊性状

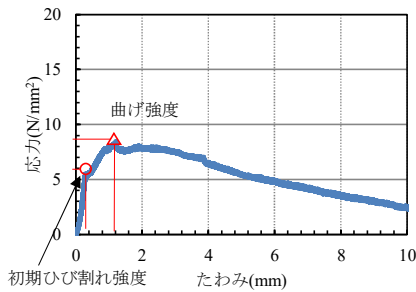


図-4 応力-たわみ関係の例

いては、ひび割れ分散効果により多数のひび割れが生じることが予想されたが、どのケースも生じたひび割れは1本のみが生じた。

図-4 に、応力-たわみ関係の一例を示す。応力-たわみ関係の初期勾配において、試験体にひび割れが生じて不連続となる部分(○部)を初期ひび割れ強度、最大応力点(△部)を曲げ強度と呼ぶ。ひずみ速度 10⁻⁶/s における PPFRC1 および PPFRC2 の初期ひび割れ強度の平均値は、それぞれ 6.53N/mm², 5.88N/mm²であった。また、ひずみ速度 10⁻¹/s における PPFRC1 および PPFRC2 の初期ひび割れ強度の平均値は、それぞれ 9.48N/mm², 10.4N/mm²であった。岩根ら⁴⁾が過去に行った同種類の FRC と PPFRC1 を比較すると、ひずみ速度 10⁻⁶/s において PPFRC1 の初期ひび割れ強度は約 60%高く、ひずみ速度 10⁻¹/s においては同程度の結果となった。ひずみ速度 10⁻⁶/s における PPFRC1 および PPFRC2 の曲げ強度の平均値は、それぞれ 9.48N/mm², 5.88N/mm²であった。また、ひずみ速度 10⁻¹/s における PPFRC1 および PPFRC2 の曲げ強度の平均値は、それぞれ 12.2N/mm², 10.4N/mm²であった。すなわち、PPFRC1 も PPFRC2 もひずみ速度の増加に伴い、曲げ強度が増加した。岩根ら⁴⁾が過去に行った同種類の FRC と PPFRC1 を比較すると、ひずみ速度 10⁻⁶/s において PPFRC1 の曲げ強度は約 60%高く、ひずみ速度 10⁻¹/s においては同程度の結果となった。

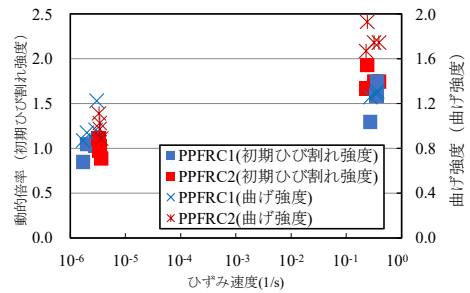


図-5 動的倍率(初期ひび割れ強度および曲げ強度) - ひずみ速度関係

図-5 に初期ひび割れ強度および曲げ強度の動的倍率-ひずみ速度関係を示す。ここで、動的倍率とは、ひずみ速度 10⁻⁶/s における平均初期ひび割れ強度および平均曲げ強度に対する動的曲げ実験時における初期ひび割れ強度および曲げ強度の倍率である。ひずみ速度 10⁻¹/s における PPFRC1 および PPFRC2 の初期ひび割れ強度の動的倍率はそれぞれ 1.54, 1.77 であり、PPFRC2 の値が PPFRC1 よりも約 15%大きくなった。岩根ら⁴⁾が過去に行った同種類の FRC と PPFRC1 を比較すると、ひずみ速度 10⁻¹/s において PPFRC1 の動的倍率が約 30%低い結果となった。ひずみ速度 10⁻¹/s における PPFRC1 および PPFRC2 の曲げ強度の動的倍率は 1.27, 1.87 であり、PPFRC2 の値が PPFRC1 よりも約 50%大きくなった。岩根ら⁴⁾が過去に行った同種類の FRC と PPFRC1 を比較すると、ひずみ速度 10⁻¹/s において PPFRC1 の動的倍率は同程度の結果となった。

図-6 に、たわみ 2mm における曲げ破壊エネルギー-ひずみ速度関係を示す。ここで曲げ破壊エネルギーは、荷重-たわみ関係を積分して求めた値を示す。たわみ 2mm, ひずみ速度 10⁻⁶/s における PPFRC1 および PPFRC2 の曲げ破壊エネルギーの平均値は、それぞれ 44.6kN・mm, 13.6kN・mm であった。また、ひずみ速度 10⁰/s における PPFRC1 および PPFRC2 の曲げ破壊エネルギーの平均値は、それぞれ 60.1kN・mm, 14.1kN・mm であった。岩根

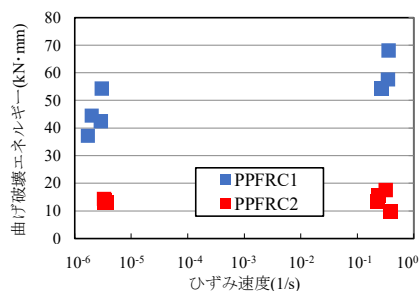


図-6 曲げ破壊エネルギー—ひずみ速度関係

表-5 実験ケース

圧縮	実験名称	静的载荷	高速载荷
	载荷速度	0.03m/s	2.0m/s
	ひずみ速度	$10^{-5}/s$	$10^0/s$
種類	PPFR C1	4	4
	PPFR C2	4	4

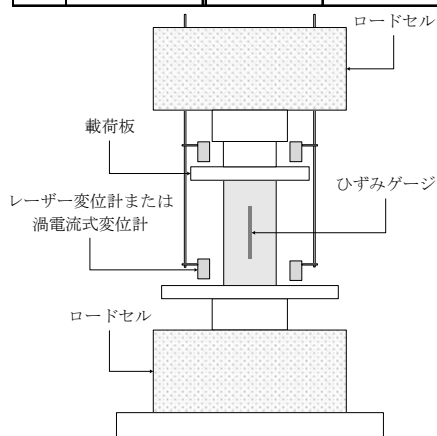


図-8 圧縮実験の外観

ら⁴⁾が過去に行った同種類のFRCとPPFR C1を比較すると、ひずみ速度 $10^{-6}/s$ においてはPPFR C1の曲げ破壊エネルギーは約10%高く、ひずみ速度 $10^0/s$ においては同程度の結果となった。図-7に、たわみ2mmにおける曲げ破壊エネルギーの動的倍率—ひずみ速度関係を示す。たわみ2mmにおけるひずみ速度 $10^{-5}/s$ のPPFR C1およびPPFR C2の曲げ破壊エネルギーの動的倍率は、それぞれ1.35、1.36であり、PPFR C1とPPFR C2の値に差はなかった。岩根ら⁴⁾が過去に行った同種類のFRCとPPFR C1を比較すると、同程度の結果となった。

3. 圧縮強度特性

3.1 圧縮実験の概要

前章と同じサーボ制御式急速载荷装置を用いて、静的および動的圧縮実験を行った。静的および動的圧縮実験における計測は、図-8に示す要領で行った。荷重については、ロードセルを試験体の上下に設置して計測した。試験体の変位量については、静的圧縮実験ではレーザー式変位計を用い、動的圧縮実験では渦電流式変位計を用いて試験体の上下に設置した载荷版の変位を計測し、そ

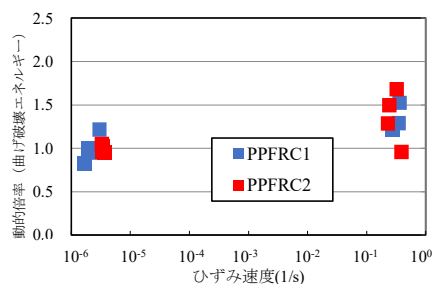


図-7 動的倍率（曲げ破壊エネルギー）—ひずみ速度関係

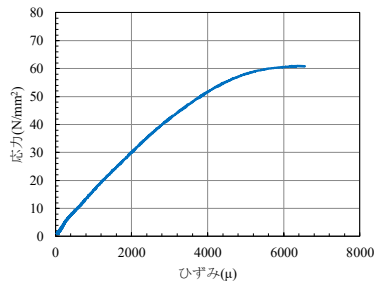


図-9 圧縮実験の破壊性状

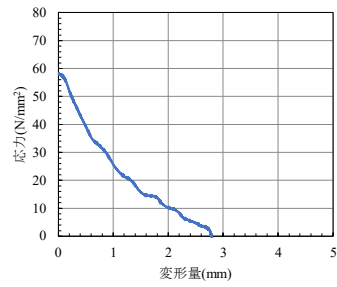
の差分から算出した。コンクリートの配合は曲げ実験と同じものを使用した。表-5に示すように、合計16体の実験を行った。

3.2 実験結果

図-9に、圧縮実験における試験体の破壊性状を示す。FRC試験体は载荷速度によらず、斜めひび割れによるすべり破壊が生じた。図-10に、応力—ひずみ関係および応力—変形量関係の一例を示す。図-11に、圧縮強度—ひずみ速度関係を示す。ここで圧縮強度は、プレピーク領域における応力—ひずみ速度関係上の最大応力点とした。ひずみ速度 $10^{-5}/s$ におけるPPFR C1およびPPFR C2の圧縮強度の平均値は、それぞれ $52.0kN/mm^2$ 、 $57.0kN/mm^2$ であった。また、ひずみ速度 $10^0/s$ におけるPPFR C1およびPPFR C2の圧縮強度の平均値は、それぞれ $58.9kN/mm^2$ 、 $74.3kN/mm^2$ であった。すなわち、ひずみ速度 $10^{-5}/s$ においてはPPFR C1およびPPFR C2の圧縮強度はほぼ同じ値であったが、ひずみ速度 $10^0/s$ においてはPPFR C2の圧縮強度がPPFR C1よりも約25%程度大きい値を示した。図-12に、圧縮強度の動的倍率—ひずみ速度関係を示す。ひずみ速度 $10^0/s$ におけるPPFR C1およびPPFR C2の動的倍率は、それぞれ1.13、1.30となり、PPFR C2の値がPPFR C1よりも約15%大きくなった。すなわち、ひずみ速度が大きくなるにしたがってPPFR C2の圧縮強度の動的倍率はPPFR C1よりも大きくなるのがわかる。図-13に、圧縮破壊エネルギー—ひ



(a) プレピーク領域の応力-ひずみ関係



(b) ポストピーク領域の応力-変形量関係

図-10 応力-たわみ関係および応力-変形量関係の例

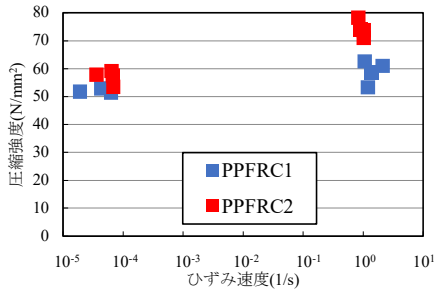


図-11 圧縮強度-ひずみ速度関係

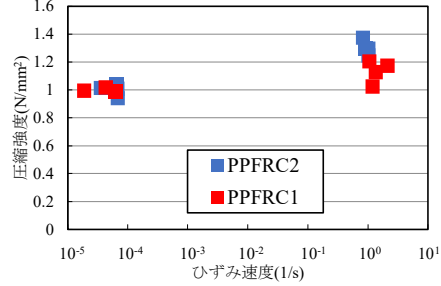


図-12 動的倍率 (圧縮強度) -ひずみ速度関係

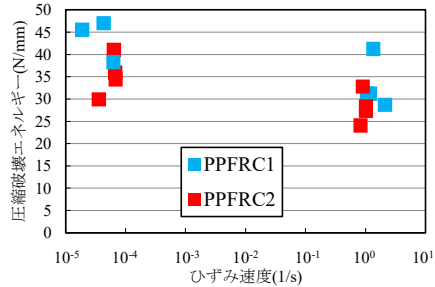


図-13 圧縮破壊エネルギー-ひずみ速度関係

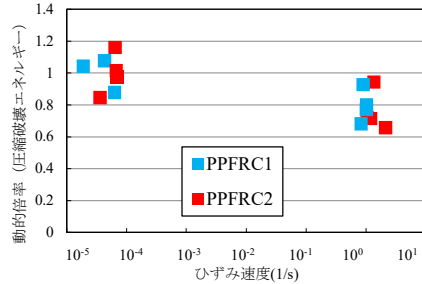


図-14 動的倍率 (圧縮破壊エネルギー) -ひずみ速度関係

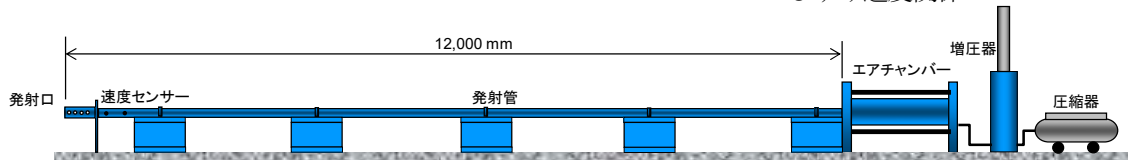


図-15 高圧空気式発射装置



図-16 飛翔体の外観

ずみ速度関係を示す。ここで圧縮破壊エネルギーは、ポストピーク領域における応力-変形量関係を積分して求めた。図-14に、変形量1mmにおける圧縮破壊エネルギーの動的倍率-ひずみ速度関係を示す。ひずみ速度 $10^0/s$ におけるPPFRC1およびPPFRC2の動的倍率は、それぞれ、0.76、0.80となり、PPFRC1とPPFRC2の値に大きな差はなかった。

4. 局部破壊特性

4.1 衝突実験の概要

図-15に、高圧空気式発射装置の概要を示す。この装置は、圧縮機、増圧器、エアチャンバーおよび発射管で構成されており、圧縮空気力を調整することで質量50g~1000gの飛翔体を速度約100m/s~500m/sで発射することができる。飛翔体の速度は、発射口付近に、50cm間隔で設置されたレーザー式速度センサーおよびユニバーサルカウンタを組み合わせて使用することで、分解能1cm/sで計測することができる。

図-16に、実験で使用した鋼製飛翔体を示す。飛翔体の先端部は半球形状に成形されており、質量は46g、直径は25mmである。飛翔体は、ナイロン製の固定具に装着してエアチャンバーに挿入され、固定具とともに発射

表-6 実験ケースおよび結果

No	ケース	繊維	配合率 (%)	版厚 (cm)	速度 (m/s)	破壊モード	貫入深さ (cm)	表面破壊直径 (cm)	裏面剥離深さ (cm)	裏面剥離直径 (cm)
1	PPFRC1-6.1	PP1	2.0	6	193	表面破壊	1.7	8.1		
2	PPFRC1-6.2				251	表面破壊	1.7	8.1		
3	PPFRC1-6.3				279	裏面剥離	1.9	8.5	3.2	15.8
4	PPFRC1-6.4				297	裏面剥離	1.9	8.3	3.9	14.4
5	PPFRC1-8.1			8	298	表面破壊	2.4	8.3		
6	PPFRC1-8.2				407	表面破壊	2.8	9		
7	PPFRC1-8.3				409	表面破壊	2.5	9.7		
8	PPFRC1-8.4				423	裏面剥離	2.7	13.7	4.5	19.4
9	PPFRC2-6.1	PP2	0.4	6	193	表面破壊	4.3	6.9		
10	PPFRC2-6.2				251	表面破壊	1.5	7.9		
11	PPFRC2-6.3				278	裏面剥離	2.0	9.9	2.8	16.6
12	PPFRC2-6.4				298	裏面剥離	2.3	9.8	3.5	20.9
13	PPFRC2-8.1			8	299	表面破壊	2.0	10.8		
14	PPFRC2-8.2				407	裏面剥離	2.2	12.8	5.2	24.6
15	PPFRC2-8.3				408	表面破壊	2.2	12.3		
16	PPFRC2-8.4				423	裏面剥離	2.9	12.6	4.6	17.9
17	HFRC-8.1	PP1	0.3	8	297	表面破壊	2.0	8.2		
18	HFRC-8.2	PP2	0.3		374	表面破壊	2.3	10.1		
19	HFRC-8.3				409	表面破壊	1.8	12.1		
20	HFRC-8.4				409	表面破壊	2.4	10.0		

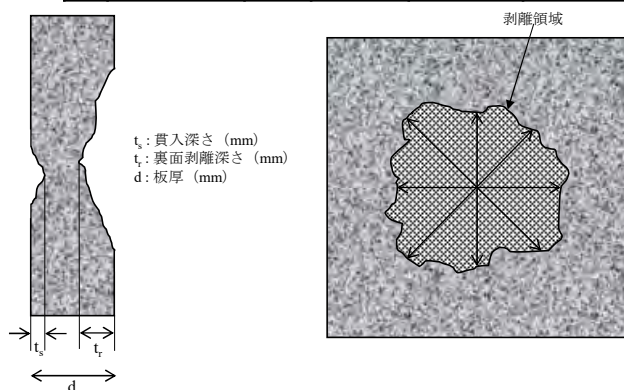


図-17 破壊領域の計測要領

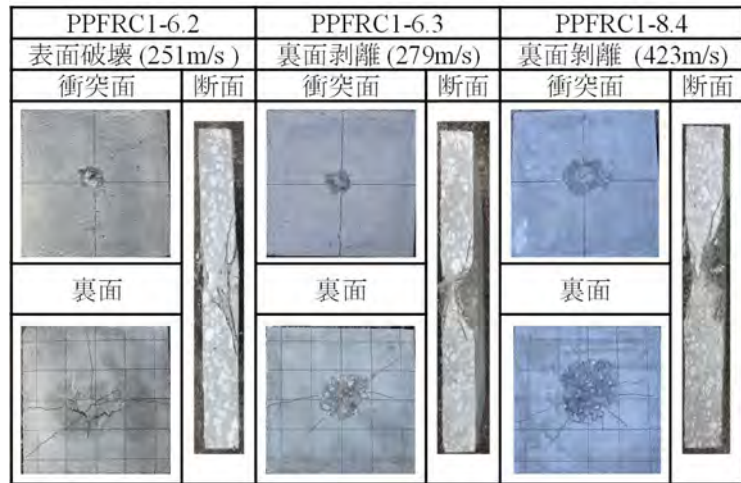
される。図-17に、局部破壊の計測位置を示す。貫入深さまたは裏面剥離深さは、表面または裏面から破壊によって生じたへこみの最も深い位置までの距離である。表面破壊直径および裏面剥離直径は、コンクリート版を中心として、垂直方向、水平方向および斜め45度方向を計測し、その平均値を直径とした。

表-6に、実験ケースを示す。材料は2種類（PP1とPP2）の繊維をコンクリートマトリクスに混入したFRCパネルで、短繊維の種類と混入量を変化させた。コンクリートマトリクスにPP1およびPP2を混入したFRCパネルを、それぞれPPFRC1パネルおよびPPFRC2パネルと呼称する。コンクリートマトリクスに対して、PP1は外割の体積比で2.0%、PP2は0.4%混入した。また、PP1とPP2をそれぞれ0.3%ずつ混入したFRCパネルも作製した。これをHFRC（Hybrid Fiber Reinforced Concrete）パネルと呼称する。なお、試験体の寸法は500mm×500mmで、版厚を60mmまたは80mmとした。また、試験体の設置要領は、2辺支持とした。

4.2 実験結果

表-6に、衝突実験で得られた各FRCパネルの局部破壊の寸法を示す。また、図-18に、各FRCパネルの破壊状況を示す。版厚6cmのPPFRC1パネルは、衝突速度193m/sおよび251m/sにおける破壊モードは表面破壊であったが、衝突速度279m/sにおける破壊モードは裏面剥離となった。また、衝突速度297m/sにおける破壊モードは貫通限界に近い裏面剥離であった。版厚8cmのPPFRC1パネルは、衝突速度407~409m/sにおける破壊モードは表面破壊、衝突速度423m/sにおいて版厚8cmのPPFRC1パネルの破壊モードは裏面剥離となった。

版厚6cmのPPFRC2パネルは、衝突速度193m/sおよび251m/sにおける破壊モードは表面破壊であったが、衝突速度278m/sおよび298m/sにおいては、破壊モードは裏面剥離となった。版厚8cmのPPFRC2パネルは、衝突速度299m/sにおいて、破壊モードは表面破壊となった。衝突速度408m/sにおける破壊モードは、裏面剥離限界に近い表面破壊であったが、衝突速度407m/sにおける破壊モードは貫通限界に近い裏面剥離となった。このような違いが出た原因として繊維の配向性の違い、FRCでは裏面剥離限界と貫通限界版厚の差が小さいことが考えられる。衝突速度423m/sにおいては、破壊モードは裏面剥離となった。なお、衝突速度407~423m/sにおいて、版厚8cmのPPFRC2パネルには曲げ破壊も同時に生じた。版厚8cmのHFRCパネルは、飛翔体の衝突速度297~409m/sにおける破壊モードはいずれも表面破壊となった。



(a) PPFRC1



(b) PPFRC2

(c) HFRC

図-18 各 PPFRC 版の破壊性状

4.3 修正 NDRC 式による比較

実験結果と既往の研究から、FRC パネルはプレーンコンクリート板およびモルタル板と比較して裏面剥離抑制効果が高いことが報告されている。本実験においても、PPFRC パネルの裏面剥離抑制効果が高いことがわかった。また、PP1 を 2.0% 混入した FRC 版と、PP2 を 0.4% 混入した FRC パネルの裏面剥離抑制効果が同程度であることもわかった。ここでは、修正 NDRC 式を用いて FRC パネルの裏面剥離抑制効果を評価する。

式(1)に修正 NDRC 式による貫入深さの評価式を、式(2)に裏面剥離限界版厚の評価式を示す。

$$\left(\frac{x}{d}\right) = 2G^{\frac{1}{2}} \quad \frac{x}{d} \leq 2 \quad (1a)$$

$$\left(\frac{x}{d}\right) = G + 1 \quad \frac{x}{d} \geq 2 \quad (1b)$$

ただし、

$$G = 3.8 \times 10^{-5} \frac{NM}{d\sqrt{f_c}} \left(\frac{V_o}{d}\right)^{1.8}$$

$$\frac{s}{d} = 7.91 \left(\frac{x}{d}\right) - 5.06 \left(\frac{x}{d}\right)^2 \quad \frac{x}{d} \leq 0.65 \quad \frac{s}{d} \leq 3 \quad (2a)$$

$$\frac{s}{d} = 2.12 + 1.36 \left(\frac{x}{d}\right) \quad 0.65 \leq \frac{x}{d} \leq 11.75 \quad \text{or} \quad 3 \leq \frac{s}{d} \leq 18 \quad (2b)$$

ここに、 x : 貫入深さ(m)、 d : 飛翔体直径(m)、 N : 飛翔体の形状係数(半球形の場合 0.84)、 M : 飛翔体の質量(kg)、 V_o : 飛翔体の衝突速度、 f_c : コンクリートの圧縮強度(N/m²)、 s : 裏面剥離限界版厚(m) である。

図-19 に、本実験における FRC パネルの破壊モードを、版厚と衝突速度の関係中に示す。なお、図-19 中には、PPFRC1 パネルおよび PPFRC2 パネルの実験結果に適合するように、修正 NDRC 式により算出したプレーンコンクリート板の裏面剥離限界版厚に低減係数 $\alpha 1$ および $\alpha 2$ を乗じた裏面剥離限界版厚を示している。破壊モードに適合する低減係数 $\alpha 1$ および $\alpha 2$ を検討したところ、 $\alpha 1=0.86$ 、 $\alpha 2=0.75$ となった。すなわち、PPFRC1 パネルおよび PPFRC2 パネルの裏面剥離限界版厚は、プレーンコンクリート板よりも約 15%~25% 小さくなることを示している。Ueno⁹⁾らが過去に行った同種類の

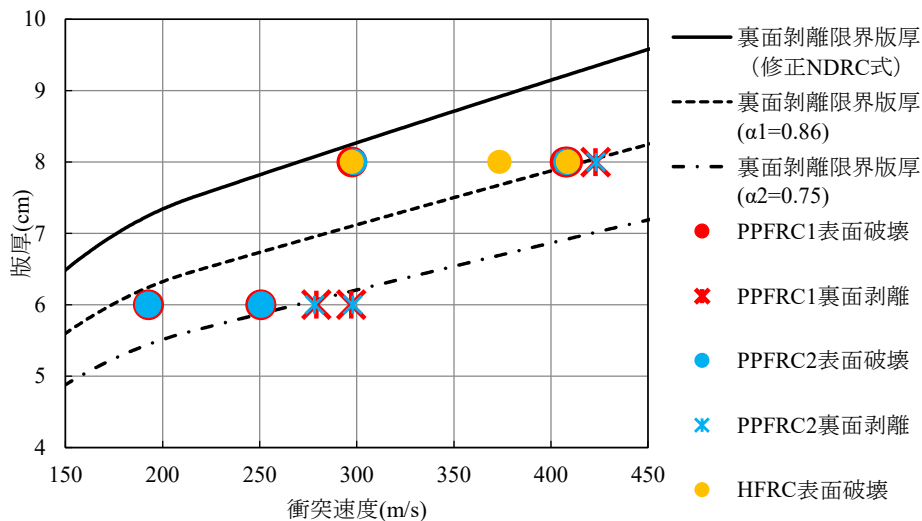


図-19 修正 NDRC 式との比較

FRC と比較をすると、同程度の裏面剥離抑制効果を有することがわかった。

5. 結言

本研究は、寸法の異なる 2 種類の PP 繊維を混入した FRC パネルに対して高速衝突実験を行い、PP 繊維の混入による裏面剥離の抑制効果について検討したものである。本研究の成果を以下に要約する。

- (1) 曲げ実験から、ひずみ速度 $10^{-1}/s$ における PPFRC1 (太径繊維混入) および PPFRC2 (細径繊維混入) の曲げ破壊エネルギーの動的倍率は、それぞれ 1.35, 1.36 であり、PPFRC1 と PPFRC2 の値に大差はなかった。
- (2) 圧縮実験から、ひずみ速度 $10^0/s$ における PPFRC1 および PPFRC2 の変形量 1mm における圧縮破壊エネルギーの動的倍率は、それぞれ 0.76, 0.80 であり、PP1 と PP2 の値に大差はなかった。
- (3) 高速衝突実験から、PP1 を 2.0%混入した FRC パネルと、PP2 を 0.4%混入した FRC パネルの裏面剥離抑制効果が同程度であることがわかった。
- (4) 修正 NDRC 式との比較から、PPFRC1 パネルおよび PPFRC2 パネルの裏面剥離限界版厚は、プレーンコンクリート板よりも約 15%~25%小さくなることがわかった。

参考文献

- 1) Dancygier, A. N. and Yankelevsky, D. Z.: High strength concrete response to hard projectile impact, International Journal of Impact Engineering, Vol.18, No.6, pp.583-599,1996
- 2) Tai, Y. S.: Flat ended projectile penetrating ultra-high strength concrete slab target, theoretical and Applied Failure Mechanics, Vol51, No2, pp.117-128,2009
- 3) Almusallam, H. T., Siddiqui, A.N., Iqbal, A.R and Abbas, H.: Response of hybrid-fiber reinforced concrete slabs to hard projectile impact, International Journal of Impact Engineering58, pp.17-30, 2013
- 4) 岩根利浩, 上野裕稔, 別府万寿博, 小川敦久: PP および PVA 繊維補強セメント複合材料の動的一軸圧縮特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.64A, pp.833-846, 2018
- 5) Ueno H, Beppu M, Ogawa A: A method for evaluating the local failure of short polypropylene fiber-reinforced concrete plates subjected to high-velocity impact with a steel projectile, International Journal of Impact Engineering 105 pp.68-79, 2017