

# 飛来物衝突を受ける鋼繊維補強無孔性コンクリートパネルの 耐衝撃性能に関する実験的研究

Experimental study on the impact resistant performance of steel fiber reinforced porosity free concrete panels  
subjected to projectile impact

森広毅\*, 別府万寿博\*\*, 市野宏嘉\*\*\*, 河野克哉\*\*\*\*, 岸良竜\*\*\*\*, 溝口愛実\*\*\*\*\*  
Koki Mori, Masuhiro Beppu, Hiroyoshi Ichino, Katsuya Kono, Ryo Kishira, Manami Mizoguchi

\*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)

\*\*\*\*博 (工), 太平洋セメント (株), 中央研究所 (〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2)

\*\*\*\*\*太平洋セメント (株), 中央研究所 (〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2)

キーワード: 鋼繊維補強無孔性コンクリート, 飛来物衝突, 局部破壊

Keywords: steel fiber reinforced porosity free concrete, projectile impact, local failure

## 1. 緒言

土木・建築構造物が速い衝突作用を受けると, 衝突部近傍のみに破壊が集中する. このような破壊は局部破壊と呼ばれ, コンクリート構造物の場合には表面破壊・貫入, 裏面剥離および貫通に区分される<sup>1)</sup>. 表面破壊・貫入とは, 衝突部の表面だけに破壊が生じる, あるいは飛来物が構造物表面に留まる破壊を示す. 裏面剥離とは, 応力波の影響や局所的な変形によって, 衝突部の反対面が剥離する現象である. 貫通とは, 表面破壊・貫入と裏面剥離が連結し, さらに飛来物が構造物を突き抜ける現象を示す.

コンクリート構造物の裏面剥離を低減するための対策としては, RC 版の裏面に鋼板や連続繊維シートを貼付する方法が提案されている. 一方で, 近年では, 鋼繊維をコンクリートやモルタルに混入した繊維補強コンクリート (Steel Fiber Reinforced Concrete, SFRC) や高強度の反応性粉体に短繊維を混入した超高強度繊維補強コンクリート (Ultra high strength Fiber reinforced Concrete, UFC) が開発され, 飛来物衝突を受ける SFRC および UFC 部材の局部破壊の抑制効果について検討が行われている. 例えば, Almusallam ら<sup>2)</sup>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 版に対して質量 0.8kg の飛翔体を速度 300m/s で衝突させ, 裏面の損傷が低減することを報告している. また, 上野ら<sup>3)</sup>は, 圧縮強度 150~200N/mm<sup>2</sup> の UFC 版に

質量 50g の鋼製飛翔体を速度 200~400m/s で衝突させ, UFC の高い耐衝撃性を確認している. 武者ら<sup>4)</sup>も, 速度 10m/s の低速衝突に対して UFC 版が高い耐衝撃性を示すことを報告している. UFC の耐衝撃性が高い理由は, 高い強度を有するマトリクスに繊維を混入することでひび割れ分散性に優れ, かつ破壊エネルギーが飛躍的に増加するためと説明されている. さらに, 近年では, 圧縮強度が 400N/mm<sup>2</sup> を超える無孔性コンクリート (Porosity Free Concrete, PFC) が開発された<sup>5)6)</sup>. PFC は最密粒度となる結合材を使用し, 脱型直後の強制吸水処理とその後の 2 段階の熱養生によって, マトリクス中に存在するマイクロ空隙を消失させたものである. また, PFC に鋼繊維を混入した鋼繊維補強無孔性コンクリート (繊維補強 PFC) も開発され, 材料特性や低速度衝突を受ける PFC 梁の衝撃挙動に関する研究も行われている<sup>7)8)</sup>. 前述したように SFRC や UFC が局部破壊に対して高い耐衝撃性を有していることから, 繊維補強 PFC も局部破壊の抑制が期待できると考えられる.

本研究は, 質量 300g の鋼製飛翔体を用いて衝突実験を行い, 繊維補強 PFC パネルの裏面剥離抑制効果を調べたものである. 実験では圧縮強度 340N/mm<sup>2</sup> 程度の繊維補強 PFC を用い, 鋼繊維の混入率 2.0 および 3.5vol% の版状試験体を作製した. 飛翔体の衝突速度を 50~240m/s とし, 衝突実験を行い, RC 版の破壊と比較することで, 繊維補強 PFC パネルの耐衝撃性を調べた.

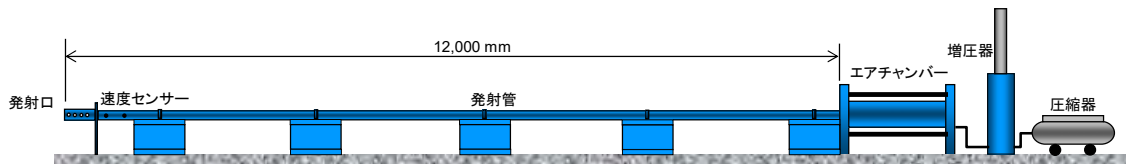


図-1 高圧空気式飛翔体発射装置



写真-1 飛翔体の外観

表-1 コンクリートの使用材料

種類	名称	略号	成分ならびに物性
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度：3.16g/cm <sup>3</sup> ，比表面積：3070cm <sup>2</sup> /g
細骨材	山砂	S	静岡県掛川産，表乾密度：2.55g/cm <sup>3</sup> ，絶乾密度：2.52g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	碎石	G	茨城県桜川産，表乾密度：2.66g/cm <sup>3</sup> ，絶乾密度：2.65g/cm <sup>3</sup>
混和剤	AE減水剤	AD	リグニンスルホン酸系
	AE剤	AE	アルキルエーテル系

表-2 コンクリートの配合

水準	W/C(%)	s/a(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				混和剤添加率(%)	
			W	C	S	G	AD	AE
RC	60	47	160	267	862	996	1.6	0.002

## 2. 実験の概要

### 2.1 実験装置

図-1 に、飛翔体を発射するために用いた高圧空気式飛翔体発射装置の概要を示す。本装置は、空気圧縮機、エアチャンバー、飛翔体つかみ部および加速管で構成されており、油圧を用いて飛翔体つかみ部によって飛翔体尾部を拘束固定することでエアチャンバーが密閉される。その後、空気圧縮機によってエアチャンバーに空気圧を蓄圧し、飛翔体固定部のつかみ部を開くと蓄圧した空気圧が開放され、飛翔体が加速管内に押し出されて発射される構造である。

写真-1 に、実験に用いた先端が半球状の飛翔体の概要を示す。質量は300gであり、先端部の直径は25mmである。先端部の材料には、比較的剛性の大きな合金工具鋼（JIS:SKS93）を用いた。胴体部には、質量を調整しやすいように剛性が大きく軽量の超々ジュラルミン（JIS:A7075B）を用いた。飛翔体の速度については発射口付近にレーザー光照射器を50cm間隔で2箇所設置し、飛翔体の通過時間から算定した。

### 2.2 試験体の概要

実験では、RC版と繊維補強PFCパネルを作製した。

PFCは、通常の型枠に流し込んで成型することで圧縮強度400N/mm<sup>2</sup>以上の硬化マトリクスが得られるもので

ある。PFCは最密粒度となる結合材を使用し、脱型直後の強制吸水処理とその後の2段階の熱養生によって、マトリクス中に存在するマイクロ空隙を消失させている。PFCの特徴を以下に示す<sup>7,8)</sup>。

- (1)結合材を構成する多成分粉体の粒度分布を考慮したシミュレーションにて混合粉体中の未充填となる空間を最小化する設計を採用している。
- (2)流し込んだ型枠を脱型した直後に密閉容器中で脱気による吸水あるいは開放容器中で煮沸による吸水に供して内部に水分を含ませる処理を行っている。
- (3)含んだ水分と最密粒度結合材の反応を90℃程度となる高温の蒸気養生にて促進させる。
- (4)反応に使用されずに残存した内部の水分は常圧下で180℃程度の熱養生に供して逸散させて超強度を発現させる。

PFCは硬化マトリクスの強度発現を最大限に発揮できるように粗骨材を使用していないため、脆性破壊の抑制については繊維によるマトリクス補強を基本としている。なお、繊維を練り混ぜることで気泡が混入し、マトリクス中には硬化後もマクロ空隙が残ることから、繊維補強PFCの圧縮強度は最高でも380N/mm<sup>2</sup>程度となっている。表-1および表-2に、それぞれコンクリートの作製に使用した材料および配合を示す。表-3および表-4に、それぞれ繊維補強PFCの作製に使用した材料およびPFCの配合を示す。PFCには写真-2に示す鋼繊維を混入し

表-3 PFC の使用材料

種類	名称	略号	成分ならびに物性
結合材	PFC専用プレミックス粉体	B	最密粒度粉体, 密度2.97g/cm <sup>3</sup>
細骨材	珪砂	S	最大寸法0.3mm, 密度2.61g/cm <sup>3</sup>
短繊維	鋼繊維	F	直径0.2mm, 長さ15mm, 密度7.84g/cm <sup>3</sup> 引張強度: 2,800N/mm <sup>2</sup> , ヤング係数: 210kN/mm <sup>2</sup>
混和剤	高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系
	消泡剤	DF	ポリグリコール系

表-4 PFC の配合

水準	W/B(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
		W	B	S	F	SP	DF
PFC-2.0	14	191	1360	934	157	31	2.7
PFC-3.5					273	34	2.7



写真-2 鋼繊維の外観

た。鋼繊維の直径および長さは、表-3 に示すようにそれぞれ0.2mm および15mm であり、引張強度およびヤング係数はそれぞれ2800N/mm<sup>2</sup> および210kN/mm<sup>2</sup> である。

図-2 に、RC 版の寸法、配筋図および繊維補強 PFC パネルの寸法を示す。試験体は板形状とし、普通強度の鉄筋コンクリート (RC) ならびに鋼繊維の混入率を2通りに変化させた PFC を用いた。各版は2辺を支持して固定した。RC 版の場合、図-2(a)に示すような縦500mm×横500mm×厚さ100mm の寸法とし、内部にD10 鉄筋を格子状に配置した。一方、繊維補強 PFC パネルの場合は、図-2(b)に示すように RC 版と同一の縦500mm×横500mm、厚さを40mm, 50mm および60mm に変化させた。なお、内部には鉄筋を配置していない。また、繊維補強 PFC は、鋼繊維をコンクリート体積に対して外割で2.0vol.%ならびに3.5vol.%混入して補強した。各版に使用したコンクリートの圧縮強度は、RC では28N/mm<sup>2</sup>、鋼繊維2.0vol.%および3.5vol.%で補強した PFC ではそれぞれ347N/mm<sup>2</sup> および337N/mm<sup>2</sup> である。各版に使用したコンクリートの引張強度は、RC では2.1N/mm<sup>2</sup>、鋼繊維2.0vol.%および3.5vol.%で補強した PFC ではそれぞれ11.0N/mm<sup>2</sup>、および11.3N/mm<sup>2</sup> である。

## 2.3 実験ケースと計測項目

表-5 および表-6 に、それぞれ RC 版および繊維補強 PFC パネルの実験ケースを示す。RC 版の場合は版厚100mm に対して飛翔体を119~244m/s の速度で衝突させ

た。繊維補強 PFC パネルの場合には版厚40~60mm に対して51~242m/s の速度で衝突させた。

計測項目については、裏面の破壊挙動を撮影した。試験体裏面の破壊挙動の撮影については、高速度ビデオカメラ (Photoron Fastcam : SA-Z) による撮影を行った。撮影時のサンプリングレートおよび解像度は、最大20000 フレーム/秒および26万画素 (縦512×横512) である。また、実験後の試験体に生じる破壊の寸法 (貫入深さおよび裏面における剥離直径) を計測するため、図-3 に示すように、貫入深さについては試験体表面に生じたへこみの最深部をノギスで計測した。表面破壊および裏面剥離の直径については、鋼製定規を用いて4方向の直径を計測し、それらの平均値をそれぞれの直径とした。

破壊モードの分類は、既往の研究<sup>3)</sup>を参考にした。すなわち、試験体の破壊性状において表面だけが破壊して裏面に剥離が生じなかったものを表面破壊、裏面が剥離したものを裏面剥離、飛翔体が完全に試験体を通り抜けたものを貫通と判定した。上記に加え、裏面に円周状のひび割れが生じているが剥離片が飛散していない状態を裏面剥離限界、衝突部に孔が生じているが飛翔体が試験体を通り抜けていない状態を貫通限界とした。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 破壊性状

表-5 および表-6 に、それぞれ RC 版および繊維補強 PFC パネルの破壊モードと局部破壊の寸法を示す。本実験により、RC 版および繊維補強 PFC パネルには表面破壊、裏面剥離および貫通の破壊モードが生じた。写真-3(a)に、衝突後の RC 版の破壊性状を示す。実験ケース RC-100-1 (衝突速度119.8m/s) では、裏面および断面にひび割れが生じていないため、破壊モードは表面破壊と判定した。実験ケース RC-100-2 (衝突速度151.4m/s) では、裏面に1本のひび割れが生じるとともに、断面に斜めひび割れが生じている。このことから破壊モードは

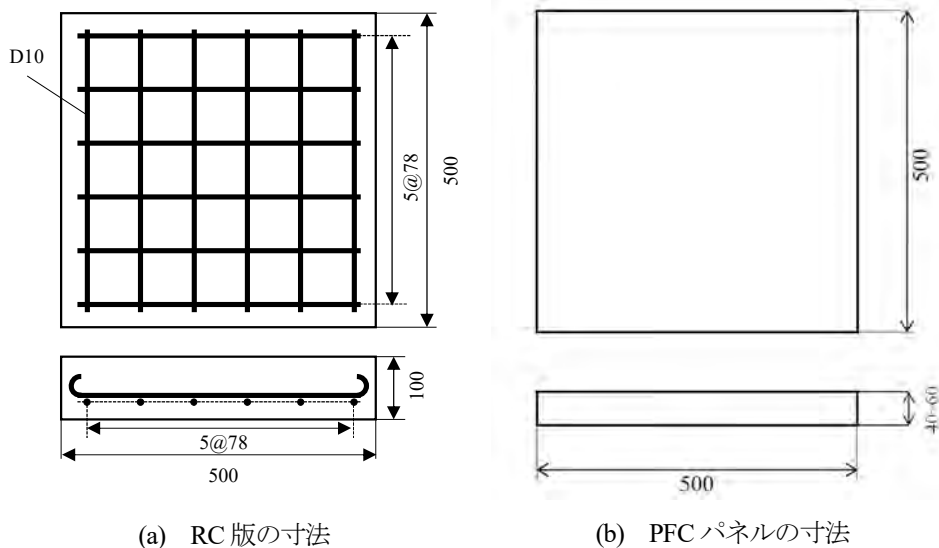


図-2 試験体の寸法

表-5 衝突実験結果 (RC版)

ケース	衝突速度(m/s)	破壊モード	貫入深さ(mm)	表面破壊直径(mm)	裏面剥離直径(mm)
RC-100-1	119.8	表面破壊	23.7	109.5	-
RC-100-2	151.4	裏面剥離限界	9.0	48.3	-
RC-100-3	181.4	裏面剥離	-	152.8	326.0
RC-100-4	207.6	貫通限界	-	175.0	356.0
RC-100-5	244.0	貫通	-	169.5	271.0

表-6 衝突実験結果 (PFCパネル)

ケース	衝突速度(m/s)	破壊モード	貫入深さ(mm)	表面破壊直径(mm)	裏面剥離直径(mm)
PFC2.0-40-1	51.6	表面破壊	4.3	40.5	-
PFC2.0-40-2	60.3	裏面剥離	2.7	23.5	123.0
PFC2.0-40-3	82.6	裏面剥離限界	9.0	48.3	-
PFC2.0-40-4	110.9	貫通限界	32.0	52.0	185.0
PFC2.0-40-5	153.3	貫通	-	59.5	145.0
PFC2.0-50-1	61.6	表面破壊	8.5	39.0	-
PFC2.0-50-2	107.7	裏面剥離	15.0	52.3	121.0
PFC2.0-50-3	125.4	貫通限界	10.0	54.3	191.0
PFC2.0-50-4	152.8	貫通限界	12.0	69.5	201.0
PFC2.0-50-5	200.1	貫通	-	97.3	169.0
PFC2.0-60-1	92.0	表面破壊	8.0	48.8	-
PFC2.0-60-2	150.2	裏面剥離	15.0	70.8	168.0
PFC2.0-60-3	184.7	貫通限界	15.0	89.0	142.0
PFC2.0-60-4	207.0	貫通	-	97.8	193.0
PFC2.0-60-5	220.0	貫通	-	120.0	170.0
PFC3.5-40-1	58.2	表面破壊	3.0	37.0	-
PFC3.5-40-2	81.4	表面破壊	10.0	52.3	-
PFC3.5-40-3	90.5	裏面剥離	7.0	47.8	-
PFC3.5-40-4	110.5	貫通限界	14.0	48.0	143.0
PFC3.5-40-5	152.8	貫通限界	10.0	117.5	68.5
PFC3.5-50-1	63.1	表面破壊	8.0	30.0	-
PFC3.5-50-2	109.7	表面破壊	12.2	52.5	-
PFC3.5-50-3	129.9	表面破壊	15.7	65.3	-
PFC3.5-50-4	151.9	貫通限界	38.0	63.5	166.0
PFC3.5-50-5	206.5	貫通	-	61.0	156.0
PFC3.5-60-1	97.9	表面破壊	12.0	50.0	-
PFC3.5-60-2	153.0	表面破壊	16.0	65.5	-
PFC3.5-60-3	179.2	裏面剥離限界	20.0	68.8	-
PFC3.5-60-4	213.3	裏面剥離限界	25.0	85.3	-
PFC3.5-60-5	242.0	貫通	-	104.3	158.0

裏面剥離限界とした。実験ケース RC-100-3 (衝突速度 181.4m/s) では、裏面剥離が生じた。実験ケース RC-100-

4 (衝突速度 207.6m/s) では、裏面剥離に加えて孔が生じているが、飛翔体は通り抜けていないため破壊モードは

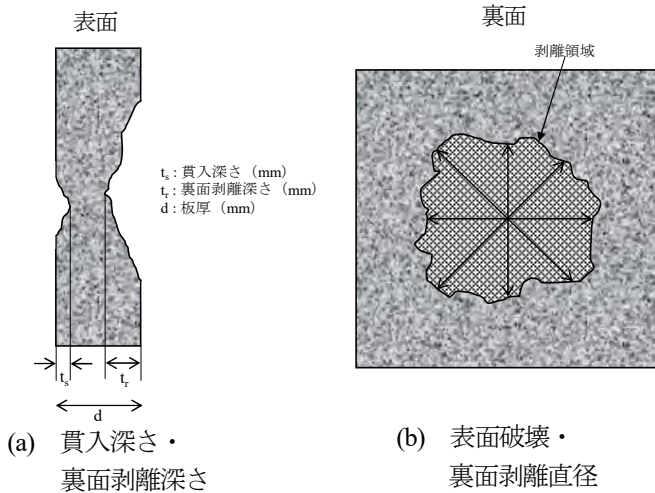


図-3 破壊領域の計測方法

貫通限界とした。実験ケース RC-100-5（衝突速度 244.0m/s）では、飛翔体が RC 版を通り抜けたため破壊モードは貫通とした。

写真-3(b)に、衝突後の鋼繊維量 2.0%の繊維補強 PFC パネルの破壊性状（版厚 60mm）を示す。実験ケース PFC2.0-60-1（衝突速度 92.0m/s）では、断面に細い斜めひび割れが生じたが裏面に進展しておらず、裏面にはひび割れが生じていないため破壊モードは表面破壊とした。PFC2.0-60-2（衝突速度 150.2m/s）のケースでは、断面に複数の斜めひび割れが生じ、ひび割れは裏面まで進展して裏面剥離が生じた。PFC2.0-60-3（衝突速度 184.7m/s）のケースでは、断面に複数の斜めひび割れが生じていた。衝突部に孔が生じたが、飛翔体は PFC パネルを通り抜けなかったため破壊モードは貫通限界とした。PFC2.0-60-4（衝突速度 207.0m/s）および PFC2.0-60-5（衝突速度 220.0m/s）のケースでは、複数の斜めひび割れが生じ裏面まで進展している。衝突部に孔が生じ、飛翔体が PFC 版を通り抜けたため破壊モードは貫通とした。

写真-3(c)に、衝突後の繊維補強 PFC パネル（鋼繊維量 3.5%）の破壊性状（版厚 60mm）を示す。実験ケース PFC3.5-60-1（衝突速度 97.1m/s）では、裏面にひび割れが生じていないため破壊モードは表面破壊とした。PFC3.5-60-2（衝突速度 153.0m/s）のケースでは、断面に明瞭なひび割れが生じている。裏面をみると、微小なひび割れが生じているが、裏面は剥離していないため破壊モードは表面破壊とした。PFC3.5-60-3（衝突速度 179.2m/s）および PFC3.5-60-4（衝突速度 213.3m/s）のケースでは、断面に複数の明瞭なひび割れが生じており剥離片が形成されている。裏面をみると、円周状のひび割れが生じているが、剥離片は飛散していないため破壊モードは裏面剥離限界とした。PFC3.5-60-5（衝突速度 242.0m/s）のケースでは、衝突部に孔が生じ、飛翔体が PFC 版を通り抜けたため破壊モードは貫通とした。

### 3.2 貫入深さ

修正 NDRC 式<sup>9)</sup>による貫入深さと裏面剥離および貫通限界版厚の算定式を以下に示す。

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

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

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

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

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

$$\frac{e}{d} = 3.19 \left(\frac{x}{d}\right) - 0.718 \left(\frac{x}{d}\right)^2 \quad \frac{x}{d} \leq 1.35 \text{ or } \frac{e}{d} \leq 3 \quad (3a)$$

$$\frac{e}{d} = 1.32 + 1.24 \left(\frac{x}{d}\right) \quad 1.35 \leq \frac{x}{d} \leq 13.5 \text{ or } 3 \leq \frac{e}{d} \leq 18 \quad (3b)$$

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/m<sup>2</sup>),  $s$ : 裏面剥離限界版厚(m),  $e$ : 貫通限界版厚(m)である。

図-4に、飛翔体の貫入深さ-衝突速度関係を示す。図中の黒線は、修正 NDRC 式により算定した貫入深さである。繊維補強 PFC の圧縮強度は修正 NDRC 式の適用範囲を超えているが、参考のために比較した。実験結果および修正 NDRC 式による貫入深さの算定値は、いずれのケースにおいても衝突速度の増加に伴い貫入深さも増大している。また、PFC2.0 の場合は、実験値は修正 NDRC 式よりやや小さい値を示したが、繊維混入率 3.5%の繊維補強 PFC パネルはよい一致を示した。RC 版と繊維補強 PFC パネルの貫入深さを比較すると、繊維補強 PFC パネルの貫入深さは RC 版の 50%以下となった。

### 3.3 裏面剥離および貫通限界版厚

図-5に、本実験で得られた各ケースの破壊モードおよび修正 NDRC 式による評価結果を版厚-衝突速度関係中に示す。なお、図中には、各繊維補強版の実験結果に適合するように、修正 NDRC 式により算出した RC 版の裏面剥離限界版厚および貫通限界版厚に低減係数  $\alpha$  および  $\beta$  を乗じた限界版厚を示している。修正 NDRC 式と RC 版の結果を比較すると、RC 版の裏面剥離および貫通限界版厚に対する低減係数はそれぞれ 1.0 および

RC-100-1		RC-100-2		RC-100-3		RC-100-4		RC-100-5	
衝突速度119.8m/s		衝突速度151.4m/s		衝突速度181.4m/s		衝突速度207.6m/s		衝突速度244.0m/s	
表面破壊		裏面剥離限界		裏面剥離		貫通限界		貫通	
表面	断面	表面	断面	表面	断面	表面	断面	表面	断面
裏面		裏面		裏面		裏面		裏面	

(a) RC

PFC2.0-60-1		PFC2.0-60-2		PFC2.0-60-3		PFC2.0-60-4		PFC2.0-60-5	
衝突速度92.0m/s		衝突速度150.2m/s		衝突速度184.7m/s		衝突速度207.0m/s		衝突速度220.0m/s	
表面破壊		裏面剥離		貫通限界		貫通		貫通	
表面	断面	表面	断面	表面	断面	表面	断面	表面	断面
裏面		裏面		裏面		裏面		裏面	

(b) PFC2.0

PFC3.5-60-1		PFC3.5-60-2		PFC3.5-60-3		PFC3.5-60-4		PFC3.5-60-5	
衝突速度97.9m/s		衝突速度153.0m/s		衝突速度179.2m/s		衝突速度213.3m/s		衝突速度242.0m/s	
表面破壊		表面破壊		裏面剥離限界		裏面剥離限界		貫通	
表面	断面	表面	断面	表面	断面	表面	断面	表面	断面
裏面		裏面		裏面		裏面		裏面	

(c) PFC3.5

写真-3 破壊性状

1.1 となった。繊維混入量 2.0% および 繊維混入量 3.5% の繊維補強 PFC パネルについて、破壊モードに適合する低減係数を検討したところ、繊維混入量 2.0% および 繊維混入量 3.5% の繊維補強 PFC パネルでそれぞれ ( $\alpha=0.65$ ,  $\beta=0.70$ ) および ( $\alpha=0.55$ ,  $\beta=0.65$ ) となった。RC 版の裏面剥離限界版厚の低減係数  $\alpha=1.0$  と比較する

と、繊維混入量 2.0% および 繊維混入量 3.5% の繊維補強 PFC パネルで、それぞれ 40% および 35% 低減した。RC 版の貫通限界版厚の低減係数  $\beta=1.1$  と比較すると、繊維混入量 2.0% および 繊維混入量 3.5% の繊維補強 PFC パネルで、それぞれ 31% および 36% 低減した。繊維混入量 2.0% と 繊維混入量 3.5% の繊維補強 PFC パネルの裏面剥

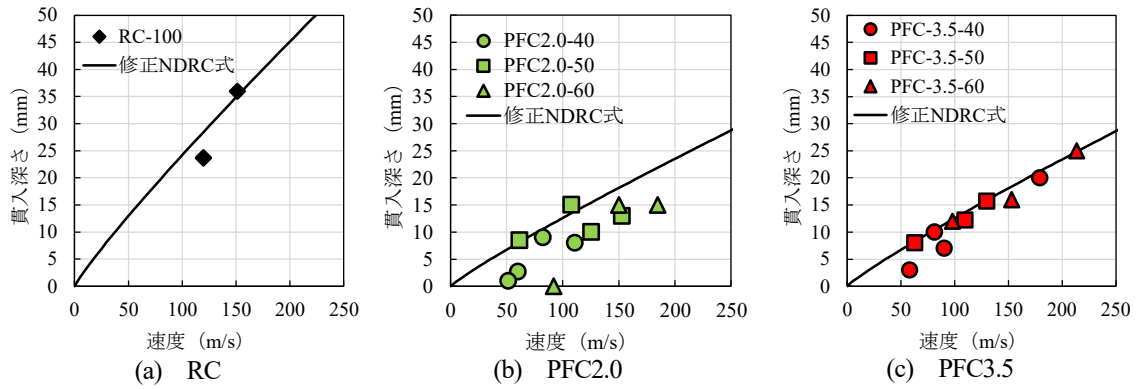


図-4 貫入深さ-衝突速度関係

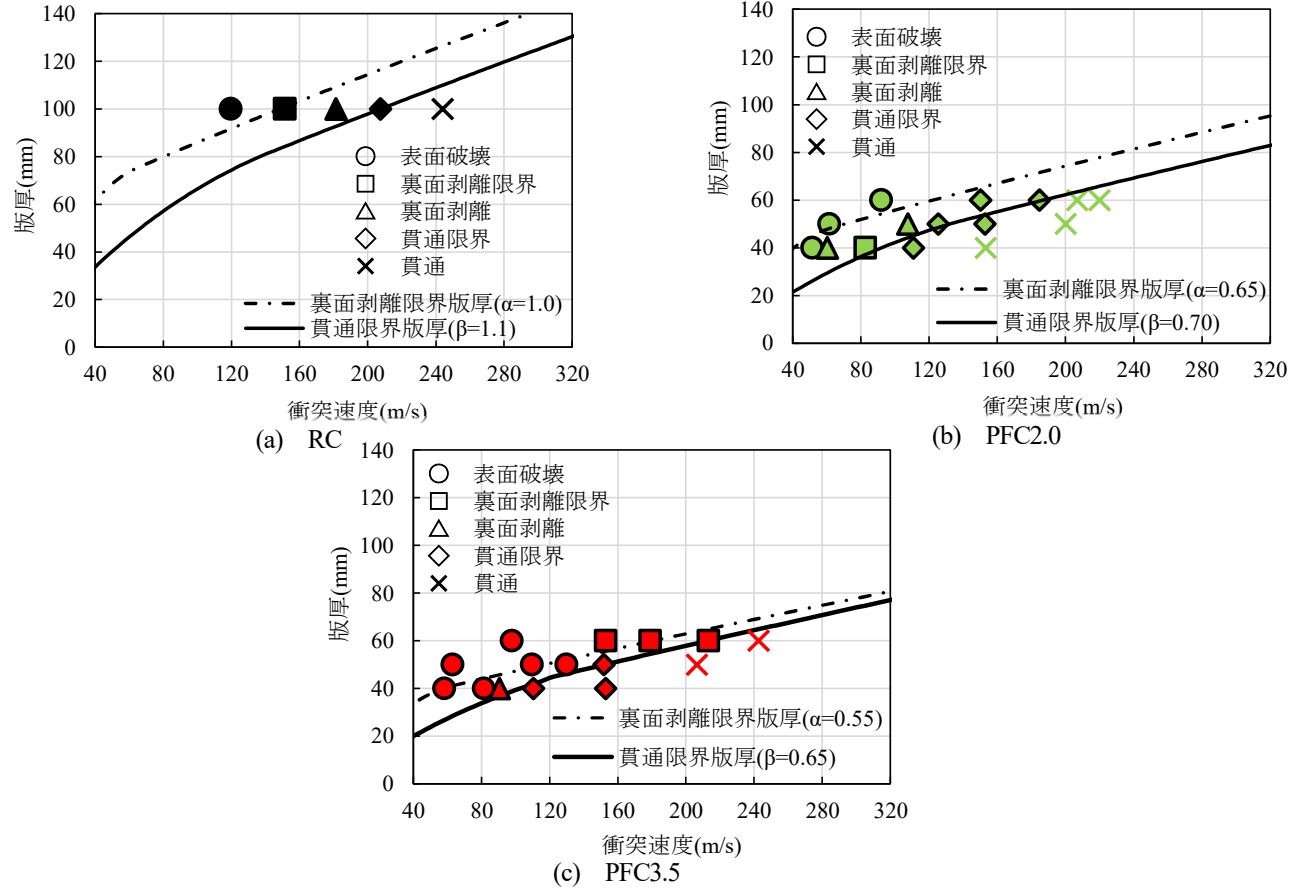


図-5 版厚-衝突速度関係

離限界版厚の低減係数  $\alpha$  を比較すると、繊維混入量3.5%の低減係数は繊維混入量2.0%の低減係数より10%高い。このことから、繊維混入量の増加により裏面剥離抑制効果が向上することがわかる。

#### 4. 結言

本研究は、質量300gの鋼製飛翔体を用いて衝突実験を行い、繊維混入量2.0%および3.5%の繊維補強PFCパネルの局部破壊抑制効果を調べたものである。本研究の成果を以下に要約する。

(1) 繊維混入量2.0%および3.5%の繊維補強PFCパネル (PFC2.0およびPFC3.5パネル) は、RC版と比べて高

い局部破壊抑制効果を有することがわかった。

(2) PFC2.0およびPFC3.5パネルの貫入深さは、圧縮強度の増加によって、いずれもRC版の50%以下であった。

(3) PFC2.0およびPFC3.5パネルの裏面剥離限界版厚は、RC版に比べてそれぞれ65%および55%低減することがわかった。また、PFC2.0およびPFC3.5パネルの貫通限界版厚は、RC版に比べてそれぞれ70%および65%低減することがわかった。

#### 参考文献

1) Kennedy, R. P.: A review of procedures for the analysis a design of concrete structures to resist missile impact effects, Nuclear Engineering and Design 37, 1976.

- 2) 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 Engineering*58, pp.17-30, 2013.
- 3) 上野裕稔, 別府万寿博, 市野宏嘉, 武者浩透, 岡本修一: 超高強度繊維補強コンクリート板の裏面剥離評価に関する基礎的検討, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.38, pp.1345-1350, 2016.
- 4) 武者浩透, 別府万寿博, 岡本修一: 重錘落下実験による UFC 版の耐衝撃性に関する研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.35, No.2, pp.1273-1278, 2013.
- 5) 河野克哉, 森香奈子, 多田克彦, 田中敏嗣: 世界最高強度を誇るコンクリートの開発ならびに性能向上の可能性, *コンクリート工学*, Vol.54, No.7, pp.702-709, 2016.
- 6) 河野克哉, 中山莉沙, 多田克彦, 田中敏嗣: 450N/mm<sup>2</sup>以上の圧縮強度を発現するセメント系材料の製造方法と硬化組織の変化, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.38, No.1, pp.1443-1448, 2016.
- 7) 柳田龍平, 中村拓郎, 河野克哉, 二羽淳一郎: 鋼繊維で補強した無孔性コンクリートの圧縮・引張に対する力学モデル, *土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)*, Vol.74, No.1, p.10-20, 2018.
- 8) 栗橋祐介, 河野克哉, 曾根涼太, 小室雅人, 多田克彦: 圧縮強度 400N/mm<sup>2</sup>を有する鋼繊維補強コンクリート梁の耐衝撃挙動, *構造工学論文集*, Vol.63A, pp.1201-1209, 2017.
- 9) NDRC: Effects of impact and explosion, Summary Technical Report of Division 2, National Defence Research Committee, Vol.1, Washington, D. C., 1946.