

論文 高速衝突を受ける繊維補強セメント系複合材料板の局部破壊低減効果に関する実験的検討

上野 裕稔^{*1}・別府 万寿博^{*2}・小川 敦久^{*3}

要旨：本研究は、剛飛翔体の高速衝突を受けるポリプロピレン繊維またはポリビニルアルコール繊維を使用した繊維補強セメント系複合材料板の局部破壊低減効果について検討したものである。3種類の繊維補強セメント系複合材料板に対して質量46gの鋼製剛飛翔体を速度200m/s～400m/sで衝突させ、それぞれの破壊性状と短繊維による補強効果を考察した。なお、全ての補強板に対して貫通が生じるまで実験を行った。実験の破壊モードと、修正NDRC式に低減係数を乗じて算出した裏面剥離および貫通限界板厚を比較し、繊維補強セメント系複合材料の局部破壊限界板厚の評価手法を提案した。

キーワード：高速衝突、繊維補強セメント系複合材料、局部破壊、裏面剥離、貫通

1. 緒言

不測の爆発事故や爆破テロが世界的に頻発している。爆発災害が起こると、爆風圧によって構造物や人命に対して直接的な被害が生じるだけでなく、爆発物および爆発によって破壊された破片等が飛散・衝突することによって2次的な被害が生じる。コンクリート部材に飛散物等が高速度で衝突すると、曲げ破壊やせん断破壊など部材の全体破壊だけでなく、飛翔体の衝突部近傍において局部破壊、すなわち表面破壊、貫入、裏面剥離および貫通が発生することがわかっている。したがって、社会的に重要な構造物に対しては、全体破壊だけでなく、これらの局部破壊に対しても設計法や補強方法を確立する必要がある。現在までに、プレーンコンクリート板や裏面を連続繊維シートまたは鋼板等で補強したプレーンコンクリート板の局部破壊に関する研究が行われている^{1),2)}。

近年、短繊維をコンクリートまたはセメント等に混入した繊維補強セメント系複合材料が、耐震補強あるいはトンネル覆工等におけるコンクリートの剥落防止のために使用されている。繊維補強セメント系複合材料は、短繊維の架橋効果やひび割れ分散効果によって靱性に優れ、コンクリートの脆性的な性質を改善することから、コンクリートの局部破壊を低減する効果が期待される。山田ら³⁾は、ポリエチレン繊維で補強した板厚11.5mmのモルタル板に対する高速衝突実験を行い、ポリエチレン繊維を混入させることにより、損傷が低減することを明らかにしている。

塩見⁴⁾は、ポリプロピレンまたはポリビニルアルコール繊維を用いた繊維補強セメント系複合材料板に対する高速衝突実験を行い、これらの短繊維補強によって耐衝撃性が向上することを明らかにしている。また森田ら^{5),6)}は、質量46gの剛飛翔体を用いてポリプロピレン短繊維と鉄筋で補強したコンクリート板に対する高速衝突実験を行い、短繊維や鉄筋による補強が局部破壊を抑制することを報告している。ただし、塩見および森田らの実験の中では、繊維補強セメント系複合材料板の破壊モードとしては裏面剥離までを考察しており、貫通に関する検討は行っていない。

本研究は、ポリプロピレンまたはポリビニルアルコール製の繊維補強セメント系複合材料板に対する高速衝突実験を行い、短繊維補強による局部破壊の低減効果を検討したものである。なお、全ての補強板に対して貫通が生じるまで実験を行った。実験の破壊モードと、修正NDRC式に低減係数を乗じて算出した裏面剥離および貫通限界板厚を比較し、繊維補強セメント系複合材料の局部破壊限界板厚の評価手法を提案した。

2. 実験の概要

2.1 実験装置の概要

実験は、図-1に示す高圧空気式飛翔体発射装置を用いて行った。高圧空気式飛翔体発射装置は、圧縮空気圧力を調節することにより、質量約50g～1,000gの飛翔体

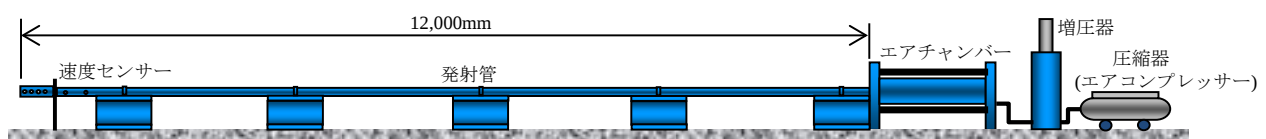


図-1 高圧空気式飛翔体発射装置の概略図

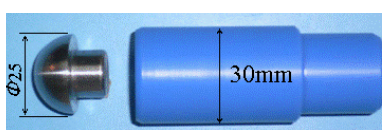
*1 防衛大学校 理工学研究科前期課程 (学生会員)

*2 防衛大学校 建設環境工学科 准教授 博士(工) (正会員)

*3 (株)クラレ 繊維資材事業部 博士(工) (正会員)

表－1 実験ケースおよび結果

番号	実験ケース名	設定速度 (m/s)	計測速度 (m/s)	破壊モード	貫入深さ (mm)	表面破壊直径 (mm)	裏面剥離深さ (mm)	裏面剥離直径 (mm)
1	PPFRC-1	200	198.62	表面破壊	14.6	77.9	-	-
2	PPFRC-2	200	186.92	表面破壊	13.9	80.0	-	-
3	PPFRC-3	250	250.62	表面破壊	14.3	80.5	-	-
4	PPFRC-4	300	294.74	貫通	-	91.8	-	178.9
5	VFRC-1	200	207.97	表面破壊	14.1	70.8	-	-
6	VFRC-2	250	244.78	表面破壊	16.3	68.5	-	-
7	VFRC-3	300	296.77	裏面剥離	19.8	89.3	31.7	199.8
8	VFRC-4	400	407.69	貫通	-	92.5	-	210.9
9	DFRC-1	250	241.66	表面破壊	17.5	66.0	-	-
10	DFRC-2	300	289.9	表面破壊	20.3	56.7	-	170.5
11	DFRC-3	400	408.32	貫通	-	108.1	-	165.7



写真－1 鋼製剛飛翔体



写真－2 試験体の設置状況

表－2 短繊維の材料特性

種類	直径 (mm)	長さ (mm)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング率 (kN/mm ²)	密度 (g/cm ³)
PP	0.70	30	500	10	0.91
PVA-1	0.66	30	900	23	1.30
PVA-2	0.10	12	1,200	28	1.30

を速度約 100m/s～500m/s で発射することができる。写真－1 に鋼製剛飛翔体を示す。飛翔体は、先端形状が半球形で、質量 46g、直径 25mm である。飛翔体は、ナイロン製の固定具に取り付けて発射される。発射された飛翔体の速度は、レーザー式速度センサーおよびユニバーサルカウンタにより、飛翔体が発射口を通過する直前に計測した。写真－2 に試験体の設置状況を示す。試験体の寸法は縦 50cm×横 50cm とし、板厚は 6cm である。試験体は木製の治具および L 型クランプを用いて上下 2 辺を固定した。実験のパラメータは、飛翔体の速度および繊維補強セメント系複合材料の種類とした。すなわち、後述する 3 種類の材料(PPFRC, VFRC および DFRC)を用いた各試験体の破壊モードが貫通となるまで、速度を

200m/s, 250m/s, 300m/s および 400m/s と変化させた。実験ケースの一覧を表－1 に示す。PPFRC および VFRC は 4 ケース、DFRC は 3 ケースの合計 11 ケースの実験を行った。計測項目は、破壊モードならびに貫入深さ、表面破壊直径、裏面剥離深さおよび裏面剥離直径である。破壊モードは、表面破壊、裏面剥離および貫通の 3 種類のモードに分類した。貫入深さおよび裏面剥離深さは、表面または裏面から破壊によって生じた凹みの一番深い位置までの距離、表面破壊直径および裏面剥離直径は、試験体の中心を通り、縦、横および斜め 45 度の 3 方向で計測した値の平均値とした。

2.2 繊維補強セメント系複合材料の材料特性

表－2 に、繊維補強セメント系複合材料に用いられている短繊維の種類および材料特性を示す。PPFRCはポリプロピレン繊維(PP)、VFRCおよびDFRCはポリビニルアルコール繊維(PVA-1, PVA-2)で補強したものであり、PPおよびPVA-1 はコンクリートに、PVA-2 はモルタルにそれぞれ体積比で 2%混入している。PP, PVA-1 の直径は約 0.7mm、長さは 30mmである。PVA-2 は直径 0.1mm、長さ 12mmと細く短い。引張強度およびヤング率はともに、PVA-2, PVA-1, PPの順に高く、PVA-2 の引張強度はPPの 2.4 倍、ヤング率はPPの 2.8 倍である。短繊維とマトリクスとの付着については、PPの表面は凹凸形状になっているため機械的な付着が高い。一方、PVA-1 およびPVA-2 は、親水性があり化学的な付着が高い特徴がある。PPFRC,VFRCおよびDFRCの圧縮強度はほぼ同じ約 43N/mm² であり、ヤング率はDFRCとVFRCは約 29kN/mm² であるのに対し、PPFRCは約 22kN/mm² と 30%程度小さい。本実験で用いた繊維補強セメント系複合材料とは強度がやや異なるが(PPFRC, VFRC および DFRC の圧縮強度は、47.0N/mm², 48.7N/mm² および 40.3N/mm²)、神田ら⁸⁾はこれらの同一材料に対する高速一軸引張実験を行い、図－2 に示す引

張強度の増加率(静的強度に対する動的強度の比)とひずみ速度の関係調べている。図中のプレーンコンクリートの増加率については、文献⁹⁾から引用した。図から、高速引張によってひずみ速度が高くなると、プレーンコンクリートおよび繊維補強セメント系複合材料は、いずれも引張強度が増加する。プレーンコンクリートの高速載荷時($\dot{\epsilon}$ = 約 10^{-1} (1/s))の引張強度は静的載荷時の 1.6 倍となるが、VFRCは 1.9 倍、PP は 2.5 倍、DFRCは 3.6 倍となり、繊維補強セメント系複合材料の動的引張強度は、プレーンコンクリートよりも高いことがわかる。

3. 実験結果及び考察

3.1 実験結果

表-1 に実験結果の一覧を示す。本研究ではプレーンコンクリート板に対する実験を行っていないため、プレーンコンクリート板については修正 NDRC 式¹⁰⁾を用いて破壊モードを評価する。なお、修正 NDRC 式は、本研究で用いた実験条件では、貫入深さをやや過大に評価

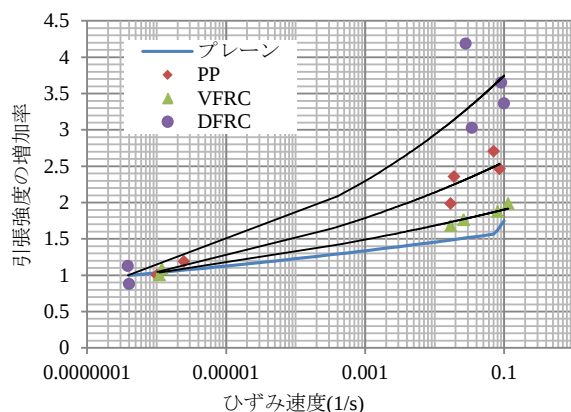


図-2 引張強度の増加率～ひずみ速度関係⁸⁾

するが、実験の破壊モードは良好に再現することがわかっている¹⁾。式(1)に貫入深さの評価式を、式(2)および(3)に裏面剥離限界板厚の評価式、貫通限界板厚の評価式を示す。なお、圧縮強度については、繊維補強セメント系複合材料の強度の平均値 43N/mm^2 を入力した。

$$G\left(\frac{x}{D}\right) = 1.513 \times 10^{-2} \frac{NWD}{D\sqrt{f'_c}} \left(\frac{V_0}{D}\right)^{1.8} \quad (1)$$

$$\text{ただし、} \begin{cases} G\left(\frac{x}{D}\right) = \left(\frac{x}{2D}\right)^2 & x \leq 2D \\ G\left(\frac{x}{D}\right) = \frac{x}{D} - 1 & x > 2D \end{cases}$$

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

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

ここに、 x : 貫入深さ(cm), s : 裏面剥離限界板厚(cm), e : 貫通限界板厚(cm), N : 先端形状係数(0.84), W : 飛翔体の質量(kg), D : 飛翔体の直径(cm), V_0 : 飛翔体の衝突速度(m/s), f'_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm^2)である。

修正 NDRC 式による板厚 6cm のプレーンコンクリート板の破壊モードは、200m/s および 250m/s で裏面剥離、300m/s および 400m/s で貫通となった。

写真-3 に PPFRC 板の破壊状況を示す。衝突速度 200m/s, 250m/s では破壊モードは表面破壊となった。試験体の断面を見ると、2 ケースともに板の中央部から裏面に向かって斜めひび割れが発生していることがわかる。また、衝突速度 250m/s では、断面に生じた斜めひび割

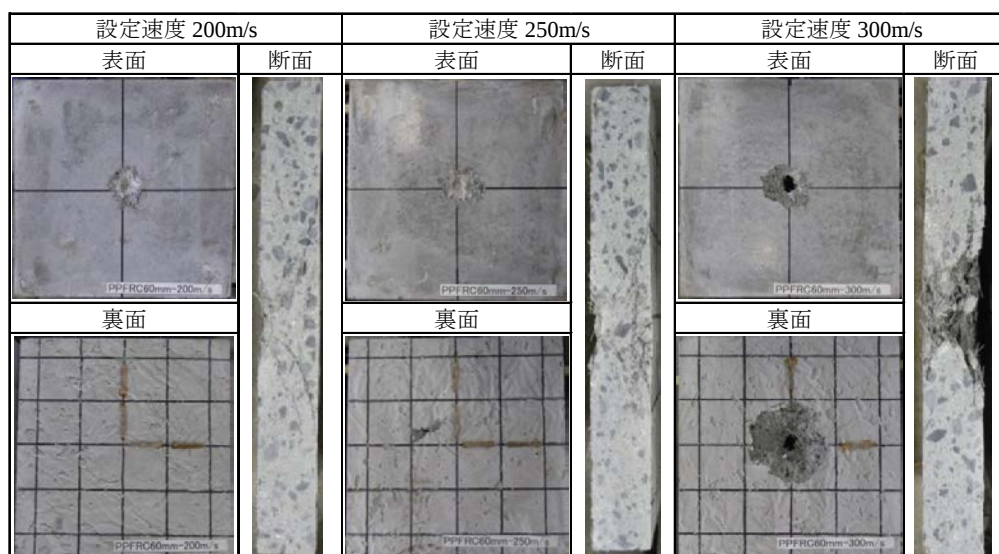


写真-3 PPFRC の破壊状況

れの内側において、板の表面と平行方向のひび割れが発生していることが確認できる。これらのひび割れは、飛翔体の貫入により押し抜きせん断的に発生するひび割れと、飛翔体の衝突により入射された応力波の反射・干渉によって生じるひび割れが複合しているものであると考えられる。また、衝突速度 300m/s では破壊モードは貫通となり、表面破壊と裏面剥離が結合して貫通孔が生じていることがわかる。プレーンコンクリート板の破壊モードと比較すると、衝突速度 200m/s, 250m/s では裏面剥離を抑制し、表面破壊となったが、衝突速度 300m/s ではプレーンコンクリート板と同じ貫通となった。

写真-4 に VFRC 板の破壊状況を示す。衝突速度 250m/s では破壊モードは表面破壊となった。試験体の裏面には円弧上のひび割れが発生しているとともに、断面には斜めひび割れが発生していることがわかる。衝突速度 300m/s では破壊モードは裏面剥離となり、断面を

見ると裏面剥離の外側に 2~3 本の斜めひび割れが発生していることがわかる。衝突速度 400m/s では貫通が生じ、試験体裏面では剥離が発生しているとともに、裏面中央から水平方向に向かってひび割れが発生していることがわかる。これは、貫通の後に曲げひび割れが生じたものと考えられる。VFRC 板とプレーンコンクリート板の破壊モードを比較すると、衝突速度 250m/s, 300m/s では、それぞれ裏面剥離が表面破壊に、貫通が裏面剥離となったが、衝突速度 400m/s ではプレーンコンクリート板と同じ破壊モードである貫通となった。

写真-5 に DFRC 板の破壊性状を示す。衝突速度 250m/s, 300m/s では、破壊モードは表面破壊となった。衝突速度 250m/s では、断面内に複数本の斜めひび割れが明瞭に確認できる。衝突速度 300m/s では、断面内の斜めひび割れとともに裏面に膨らみが生じ、一部に亀裂が発生して裏面剥離片を形成しようとしている。しかし、

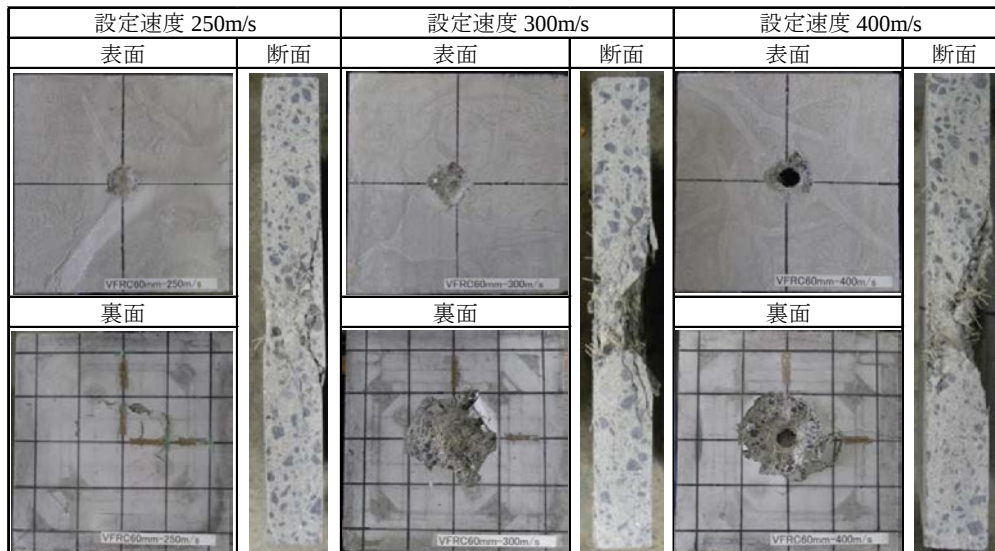


写真-4 VFRC 板の破壊状況

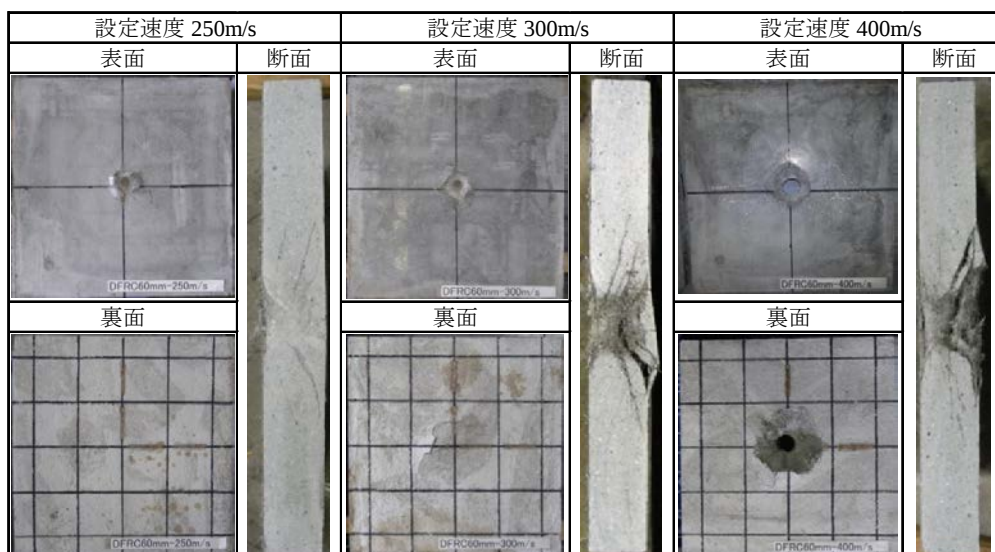


写真-5 DFRC 板の破壊状況

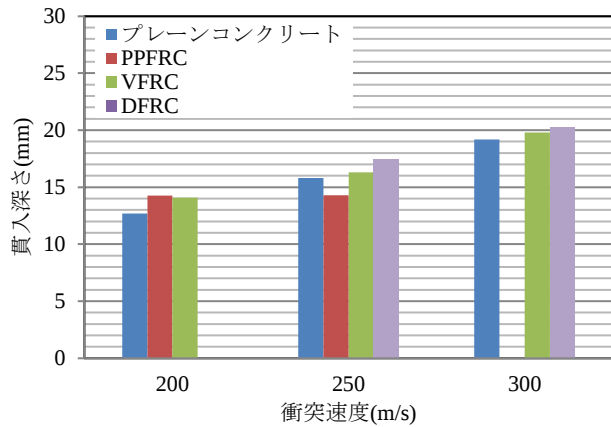
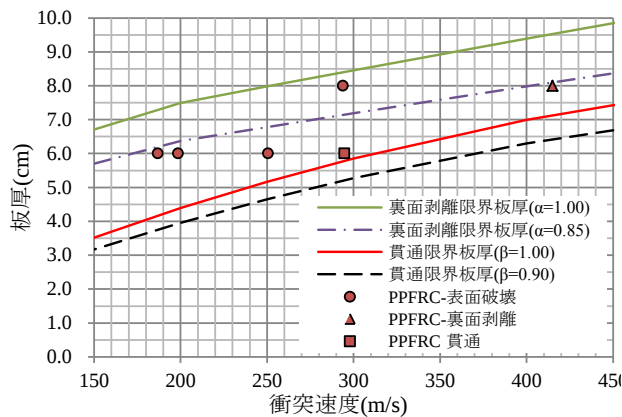
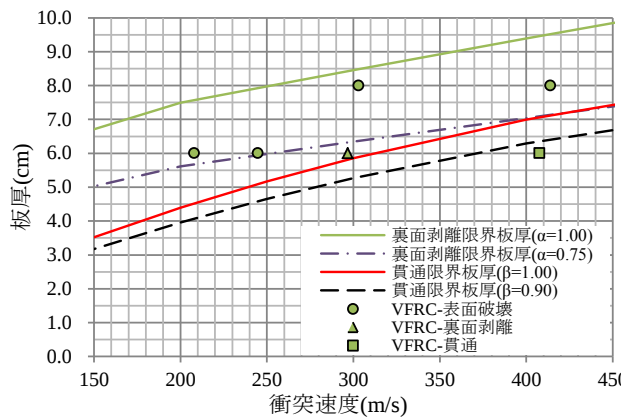


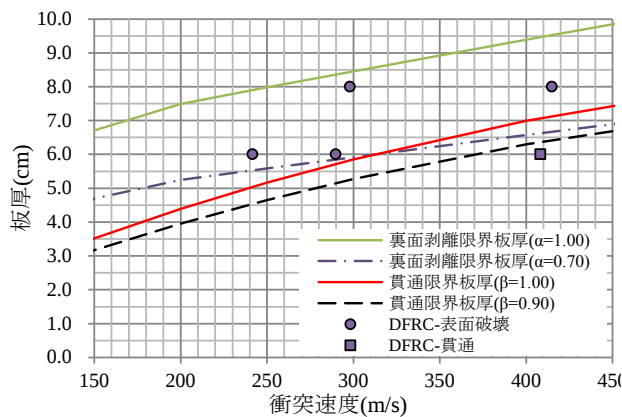
図-3 貫入深さ



(a) PPFRFRC



(b) VFRC



(c) DFRC

図-4 裏面剥離および貫通限界板厚の比較

繊維の架橋効果によって剥離が抑制されたため、裏面剥離限界(破壊モードとしては表面破壊)になったものと考えられる。衝突速度 400m/s では、破壊モードは貫通となった。断面を見ると、裏面剥離の外側に複数の斜めひび割れが発生している。DFRC 板では、いずれの速度でも断面内に微小な斜めひび割れが数多く認められたが、これはモルタルに多数混入した、非常に細く短い PVA-2 繊維によるひび割れ分散効果によるものと考えられる。

以上から、各繊維補強セメント系複合材料の破壊状況を比較すると、PPFRFRC 板は衝突速度 200m/s, 250m/s において、VFRC 板および DFRC 板は衝突速度 250m/s, 300m/s において、プレーンコンクリート板に比べて局部破壊が抑制された。また、衝突速度 300m/s 以下においては、DFRC, VFRC, PPFRFRC の順に局部破壊を抑制する効果が高いことがわかった。この理由は、これらの材料の動的引張強度が高いため、ひび割れの発生を抑制したものと考えられる。ただし、PPFRFRC 板では衝突速度 300m/s, VFRC 板および DFRC 板では衝突速度 400m/s で貫通が生じ、プレーンコンクリート板と同じ破壊モードとなった。

3.2 表面破壊および貫入深さについて

図-3 に、各繊維補強セメント系複合材料板における貫入深さを示す。なお、プレーンコンクリート板の貫入深さは、三輪らの提案する解析的判定法¹¹⁾により算出した値を示している。図から、全ての材料において、衝突速度の増加とともに貫入深さが大きくなっていることがわかる。プレーンコンクリート板と各繊維補強セメント系複合材料板を比較すると、貫入深さの差は最大で約 10%であり、材料強度のばらつき等を考慮すると、両者の貫入深さはあまり変わらないことがわかる。

3.3 裏面剥離および貫通限界板厚の評価について

図-4 に、本実験および塩見⁴⁾の実験による板厚 8cm の繊維補強セメント系複合材料板の破壊モードを示す。なお、図中には、各繊維補強セメント系複合材料板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板厚および貫通限界板厚に低減係数 α および β を乗じた限界板厚を示している。この低減係数は、プレーンコンクリート板に対する繊維補強セメント系複合材料の各限界板厚の低減比率を示している。PPFRFRC 板、VFRC 板および DFRC 板の破壊モードに適合する低減係数を検討したところ、それぞれ ($\alpha=0.85$, $\beta=1.00$), ($\alpha=0.75$, $\beta=0.90$) および ($\alpha=0.70$, $\beta=0.90$) となった。すなわち、PPFRFRC 板、VFRC 板および DFRC 板の裏面剥離限界板厚は、プレーンコンクリート板と比べて、それぞれ約 15%, 25%, 30%低減する。また、VFRC 板および DFRC 板の貫通限界板厚は、プレーンコンクリート板と比べて約 10%低

減する。なお、PPFRC 板については、貫通限界板厚の向上は認められなかった。神田ら⁸⁾の高速一軸引張試験によると、ひずみ速度が高くなると、繊維とコンクリートマトリクスとの動的な付着特性が静的な場合と異なるため、VFRC および DFRC の破壊エネルギーは増加するが、PPFRC の破壊エネルギーは低下する傾向があることが報告されている。つまり、ひずみ速度が高くなると、PPFRC の動的破壊エネルギーは低下するため、貫通に対する抵抗力が向上しなかったものと考えられる。なお、繊維補強セメント系複合材料では裏面剥離限界板厚と貫通限界板厚の差が小さくなっている。これは、繊維補強セメント系複合材料は、繊維の架橋効果によって裏面剥離を抑制するが、プレーンコンクリートよりも裏面剥離時の貫入深さが大きくなるため、両限界板厚の差が小さくなったものと考えられる。ただし、本研究においては、データ数が少ないため、今後より多くのデータを収集して低減係数の妥当性を検証する必要があると考えている。

4. 結言

本研究は、ポリプロピレンまたはポリビニルアルコール製の繊維補強セメント系複合材料に対する鋼製剛飛翔体の高速衝突実験を行い、短繊維補強による局部破壊の低減効果について検討したものである。本研究で得られた成果を要約すると以下ようになる。

- (1) PPFRC 板、VFRC 板および DFRC 板は、プレーンコンクリート板より局部破壊が抑制されることがわかった。しかし、ある程度以上の速度(PPFRC 板では衝突速度 300m/s、VFRC 板および DFRC 板では衝突速度 400m/s)になると、破壊モードはプレーンコンクリート板と同じ貫通となった。
- (2) 繊維補強セメント系複合材料板の貫入深さは、プレーンコンクリート板とほぼ同等であることがわかった。
- (3) 修正 NDRC 式に低減係数を乗じることで、各繊維補強セメント系複合材料板の限界板厚を評価した。PPFRC 板、VFRC 板および DFRC 板の裏面剥離限界板厚は、プレーンコンクリート板と比べてそれぞれ約 15%、25%、30%低減することがわかった。VFRC 板および DFRC 板の貫通限界板厚は、プレーンコンクリート板と比べて約 10%低減するが、PPFRC 板の貫通限界板厚は低減しないことがわかった。

謝辞

本研究の一部は、科研費(25289139)の助成を受けて行われたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 別府万寿博, 三輪幸治, 大野友則, 塩見昌紀: 鋼製剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の局部破壊に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol.63, No.1, pp.178-191, 2007.3
- 2) 別府万寿博, 三輪幸治, 高橋順: 高速衝突を受けるコンクリート板の裏面剥離発生メカニズムと連続繊維シート補強の効果, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.68, No.2, pp.398-412, 2012.6
- 3) 山田昌義, 田邊靖宏, 国枝稔: 飛翔体衝突下でのポリエチレン繊維補強モルタルの破壊性状, 材料, Vol.60, No.4, pp.325-331, 2011.4
- 4) 塩見恭平: 剛飛翔体の高速衝突を受ける短繊維補強コンクリート板の耐衝撃性に関する研究, 防衛大学校本科卒業論文, 2011.3
- 5) 森田武, 別府万寿博, 鈴木誠: 高速衝突を受けるポリプロピレン短繊維補強コンクリートの耐衝撃性能, 日本建築学会構造系論文集, 第 684 号, pp.319-327, 2013.3
- 6) 森田武, 別府万寿博, 鈴木誠: 剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の局部破壊性状における短繊維補強と鉄筋補強の効果に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.35, No.2, pp.667-672, 2013.7
- 7) C. Redon, V. C. Li, C. Wu, H. Hoshino, T. Saito and A. Ogawa: Measuring and modifying interface properties of PVA fibers in ECC matrix, Journal of Materials in Civil Engineering, November/December, pp.399-406, 2001
- 8) 神田健輔, 別府万寿博, 小川敦久, 高橋順: 短繊維補強セメント系複合材料の動的引張特性に関する実験的研究, 第 38 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, 2013.3
- 9) 藤掛一典, 篠崎敬一, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤: 急速一軸圧縮载荷を受けるコンクリートのポストピーク挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.627/V-44, pp.37-54, 1999.8
- 10) R. P. Kennedy: A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects, Nuclear Engineering and Design, 37, pp.183-203, 1976
- 11) 三輪幸治, 別府万寿博, 大野友則, 伊東雅晴, 片山雅英: 改良理論モデルによるコンクリート板の局部破壊評価法, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.4, pp.844-858, 2009.10