

繊維補強セメント複合材料板の材料特性が裏面剥離限界板厚に及ぼす影響に関する一考察

防衛大学校 学生会員 ○上野 裕稔 正会員 市野 宏嘉 別府万寿博

1. 緒言

飛散物がコンクリート部材に高速度で衝突すると、飛翔体の衝突部近傍で局部破壊が発生する。著者らは、局部破壊に対する補強方法の一つとして、繊維補強コンクリート（以下、FRC と呼ぶ）や超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC と呼ぶ）等の繊維補強セメント複合材料による局部破壊の抑制効果を検討してきた^{1),2)}。本研究は、既往のプレーンコンクリート（以下 PC と呼ぶ）板³⁾、FRC 板⁴⁾および UFC 板²⁾に対する高速衝突実験結果から、各種材料の力学特性が裏面剥離限界板厚に及ぼす影響を考察したものである。

2. 高速衝突実験の概要

本研究で引用した高速衝突実験は、いずれも図-1 に示す高圧空気式飛翔体発射装置⁵⁾を用いている。全ての実験において使用された飛翔体は同一のものであり、先端形状は半球形で、直径 25mm、質量 46g である。また、衝突速度は 200m/s～400/s である。試験体の寸法は縦 50cm×横 50cm で、板厚は PC 板が 3cm～13cm、FRC 板が 6cm～8cm、UFC 板が 4cm～9cm である。表-1 に、実験で用いた繊維補強セメント複合材料の種類および短繊維の材料特性を示す。FRC は 3 種類を用いており、PPFRC はポリプロピレン（以下 PP と呼ぶ）をコンクリートマトリックスに、VFRC および DFRM はポリビニルアルコール（以下 PVA）製の繊維をそれぞれコンクリートおよびモルタルマトリックスに混入したものである。UFC は、反応性粉体コンクリートを用いた高強度のモルタルマトリックスに対し鋼繊維を混入したものである。FRC 板および UFC 板の繊維混入量は、いずれも体積比で 2.0vol%である。

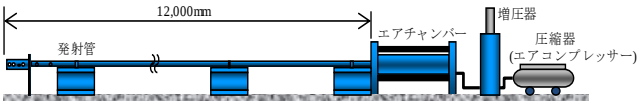


図-1 高圧空気式飛翔体発射装置の概要

表-1 繊維補強セメント複合材料の種類および短繊維の材料特性

種類	短繊維の材料特性					混入量 (vol%)	マトリックス
	種類	直径 (mm)	長さ (mm)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング率 (kN/mm ²)		
PPFRC	PP	0.7	30	500	10	2.0	コンクリート
VFRC	PVA-1	0.66	30	900	23		モルタル
DFRM	PVA-2	0.1	12	1,200	28		
UFC	鋼繊維	0.2	15	2,800	210		反応性粉体 コンクリート

表-2 繊維補強セメント複合材料の材料特性

種類	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度			破壊エネルギー		
		静的 (N/mm ²)	動的 (N/mm ²)	動的 倍率	静的 (N/mm)	動的 (N/mm)	動的 倍率
PC	25	2.2	5.5	2.50	0.035	0.060	1.71
PPFRC	47	2.89	5.98	2.07	4.82	2.46	0.51
VFRC	48	3.09	5.36	1.73	2.30	2.29	0.99
DFRM	40	2.06	6.22	3.01	1.18	3.48	2.95
UFC	219	11.2	13.5	1.21	22.6	25.8	1.15

3. 繊維補強セメント複合材料の静的および動的材料特性

表-2 に各材料の静的圧縮強度、静的およびひずみ速度約 10⁻¹(1/s)における引張強度ならびに破壊エネルギーを示す。表中の動的倍率は、動的な引張強度および破壊エネルギーを静的な値で除したものである。なお、PC は藤掛らの研究⁴⁾を、FRC は神田らの研究⁵⁾を、また UFC は Fujikake らの研究⁶⁾を引用した。なお、UFC の破壊エネルギーについては Fujikake らが提案した引張軟化モデル⁶⁾を用いて算出した。表から、FRC は PC と比較して静的引張強度は約 0.9～1.4 倍であり、破壊エネルギーは約 34～138 倍と大きくなることがわかる。UFC は PC と比較して引張強度で約 5.1 倍、破壊エネルギーでは約 645 倍と突出して高いことがわかる。また、動的倍率については、各材料によって引張強度は 1.2～3.0 倍、破壊エネルギーは 0.5～3.0 倍と大きく変動することがわかる。

4. 材料特性が裏面剥離限界板厚に与える影響

写真-1 に、板厚 60mm の場合に裏面剥離を示した各繊維補強セメント複合材料板の破壊断面を示す。写真は、試験体を支持方向に対して垂直に切断して撮影したものであり、図中に示すように飛翔体は写真左側から衝突している。なお、衝突速度については、PC 板および FRC 板に対してそれぞれ約 300m/s、UFC 板に対しては約 450m/s である。写真から、DFRM 板および UFC 板には、相対的に多くのひび割れが発生していることがわかる。この理由は

いずれもマトリックスがモルタルであることや、混入した繊維の比表面積が大きいこと、ひび割れ分散性能が高くなったものと考えられる。

図-2 に、PC 板、FRC 板および UFC 板の実験結果に対して適合させた修正 NDRC 式による裏面剥離限界板厚曲線を示す。衝突速度 200m/s～400m/s の範囲では、UFC 板、DFRM 板、VFRC 板、PPFRC 板および PC 板の順に裏面剥離限界板厚が小さくなっていることがわかる。また、高いひび割れ分散性能を発揮した DFRM 板および UFC 板の裏面剥離限界板厚が小さくなった。特に UFC 板は、高いひび割れ分散性能に加えて高い強度特性によって裏面剥離を抑制しており、PC 板の裏面剥離限界板厚の 50～60%程度となっている。

次に、動的引張強度および破壊エネルギーと裏面剥離限界板厚の関係を考察する。図-3 は、各材料の動的引張強度および破壊エネルギーと速度 300m/s に対する裏面剥離限界板厚の関係を示している。図から、動的引張強度が高くなるにつれて、また破壊エネルギーが大きくなるにつれて裏面剥離限界板厚が小さくなる傾向が明瞭に示されている。すなわち、動的引張強度および破壊エネルギーが高くなるほど、裏面剥離抑制効果が向上することがわかる。

5. 結言

過去に実験を行った繊維補強セメント複合材料板の材料特性が裏面剥離限界板厚に及ぼす影響について考察した。繊維補強セメント複合材料板に対しては、動的な引張強度および破壊エネルギーが高くなるほど裏面剥離限界板厚が小さくなる傾向があることがわかった。

参考文献

- 1) 上野裕稔, 別府万寿博, 小川敦久: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.36, No.2, pp.517-522, 2014.
- 2) 上野裕稔, 別府万寿博, : 高速衝突を受ける超高強度繊維補強コンクリート板の局部破壊に関する実験的検討, 土木学会平成 27 年度全国大会第 70 回年次学術講演会, 2015.
- 3) 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.
- 4) 藤掛一典, 上林勝敏, 大野友則, 江守克彦: ひずみ速度の影響を考慮したコンクリートの引張軟化特性の定式化, 土木学会論文集, No.669, Vol.50, pp.125-134, 2001.
- 5) 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.
- 6) Fujikake, K., Senga, T., Ueda, N., Ohno, T. and Katagiri, M.: Effects of strain rate on tensile behavior of Reactive Powder Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.4, No.1, pp.79-84, 2006.

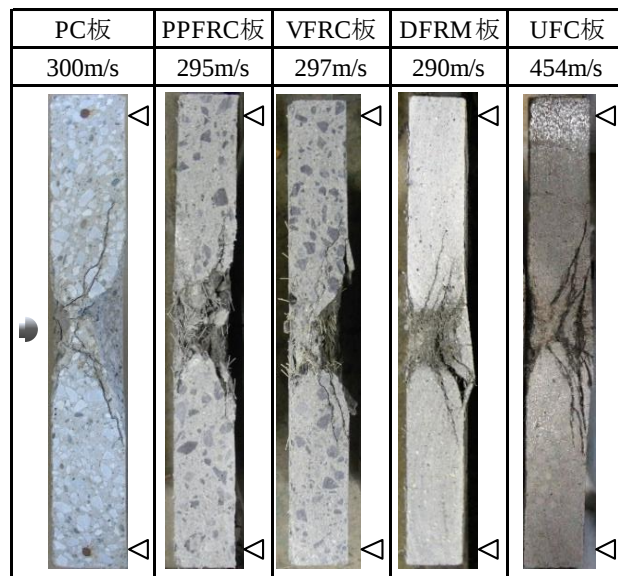


写真-1 繊維補強セメント複合材料板の破壊断面

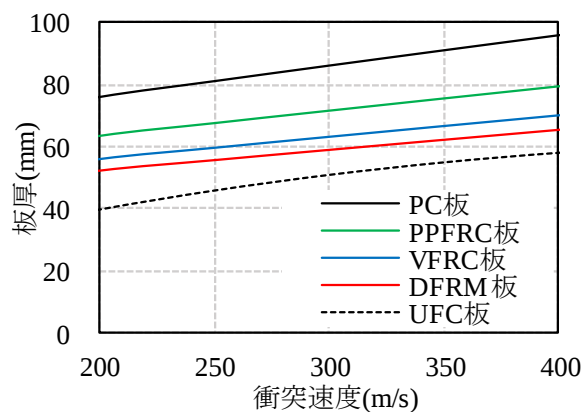


図-2 各材料の裏面剥離限界板厚

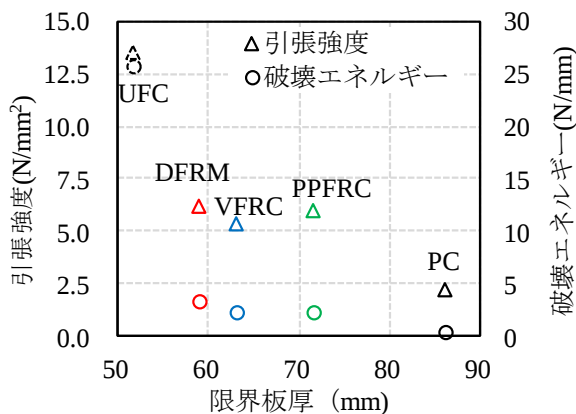


図-3 動的引張強度および破壊エネルギーと裏面剥離限界板厚の関係