

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

防衛大学校 学生会員 ○上野 裕稔 正会員 別府 万寿博
大成建設(株) 正会員 武者 浩透 岡本 修一 龍 尊子

1. 緒言

コンクリート部材に飛散物が高速度で衝突すると、飛翔体の衝突部近傍において局部破壊（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．著者らは，これまでに超高強度繊維補強コンクリート（以下 UFC という）板に対する低速衝突実験を行い，UFC 板の高い耐衝撃性能を確認した¹⁾．本研究は，UFC 板に対する高速衝突実験を行い，UFC 板の局部破壊に対する耐衝撃性能について検討したものである．

2. 高速衝突実験の概要

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．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 であり，ナイロン製の固定具に取り付けて発射した．試験体の寸法は縦 50cm×横 50cm で，上下 2 辺を木製板および L 型クランプを用いて固定した．表-1 に，本実験に使用した UFC および繊維の材料特性を示す．UFC は，反応性粉体モルタルに鋼繊維を混入したものである．鋼繊維は，直径 0.2mm，長さ 15mm，引張強度 2,800N/mm² である．圧縮強度は 205N/mm² であり，普通強度コンクリート（以下 PC という）に比べて非常に高いことがわかる．表-2 に実験ケースを示す．実験は，板厚 4cm から 9cm までの試験体に対して衝突速度を 200m/s から 500m/s まで変化させ，破壊モードおよび局部破壊の大きさを計測した．

3. 実験結果および考察

3. 1 破壊性状

図-2 に，実験の一例として，板厚 5cm の破壊性状を示す．衝突速度 350m/s では，破壊モードは表面破壊となった．断面を見ると斜めひび割れが発生するとともに，その内側には板裏面と水平方向の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，破壊モードは裏面剥離となった．断面を見ると，繊維の架橋効果により，裏面剥離の外側にも斜めひび割れが多数発生していることがわかる．

3. 2 貫入深さおよび表面破壊直径

図-3 に，実験で得られた UFC 板の貫入深さを破壊モード毎に示す．なお，図中の青い破線は UFC 板の貫入深さ，赤い破線は PC 板の貫入深さ²⁾の回帰直線を示している．図から UFC 板の貫入深さは，

キーワード：高速衝突，超高強度繊維補強コンクリート，鋼繊維，局部破壊

連絡先：〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校建設環境工学科 Tel：046-841-3810 E-mail：em52054@nda.ac.jp

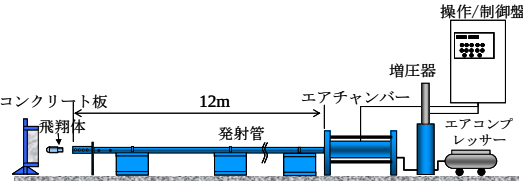


図-1 高圧飛翔体発射装置の概要

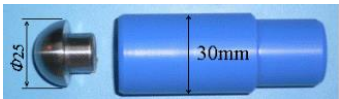


写真-1 剛飛翔体の概要

表-1 UFC および繊維の材料特性

種類	繊維				混入量 (vol%)	圧縮強度 (N/mm ²)	マトリクス
	材料	直径 (mm)	長さ (mm)	引張強度 (N/mm ²)			
UFC	鋼繊維	0.2	15	2,800	2.0	205	反応性粉体 モルタル

表-2 実験ケース及び結果

No	実験ケース	衝突速度※ (m/s)	板厚 (mm)	破壊モード	貫入 深さ (mm)	表面破壊 直径 (mm)
1	UFC-4-200	211	40.5	表面破壊	9.0	57.8
2	UFC-4-250	259	40.1	貫通		69.0
3	UFC-4-300	307	42.1	貫通		78.3
4	UFC-5-200	217	52.1	表面破壊	7.3	62.8
5	UFC-5-350	343	54.8	表面破壊	12.9	91.0
6	UFC-5-400	408	52.0	裏面剥離	15.1	101.3
7	UFC-6-300	305	63.3	表面破壊	11.2	83.0
8	UFC-6-400	411	63.5	表面破壊	12.0	116.0
9	UFC-6-450-1	(450)	62.9	裏面剥離	16.7	160.5
10	UFC-6-450-2	454	62.5	表面破壊	19.5	126.5
11	UFC-6-500-1	495	58.8	貫通		109.5
12	UFC-6-500-2	501	62.8	貫通		108.0
13	UFC-8-500	(500)	82.9	表面破壊	17.0	112.8
14	UFC-9-500	493	91.2	表面破壊	17.8	119.8

※ 衝突速度の括弧書きは計測不良のため設定速度を記載

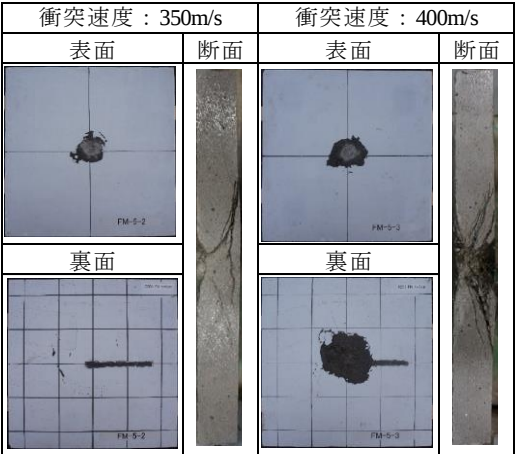


図-2 破壊性状（板厚 5cm）

PC 板と比べて約 50%低減することがわかる。

図-4 に、UFC 板の表面破壊直径～衝突速度関係を破壊モード毎に示す。図中の青い破線は UFC 板の表面破壊直径の回帰直線を、図中の赤い破線は PC 板の表面破壊直径²⁾の回帰直線を示している。図から、UFC 板の表面破壊直径は、PC 板と比べて約 30% 低減することがわかる。

UFC 板に裏面剥離が発生する場合の局部破壊深さについて、別府らが提案した相対貫入深さ²⁾（貫入深さを板厚で除した値）を用いて考察する。図-5 に、相対貫入深さ～衝突速度関係を各板厚および破壊モード毎に示す。図中の赤い破線は、PC 板において裏面剥離が生じる場合の相対貫入深さ 0.25²⁾を示している。これより UFC 板は、裏面剥離が発生する場合の相対貫入深さが 0.25 に達しており、PC 板と同様の傾向を示していることがわかる。

3. 4 裏面剥離および貫通限界板厚

図-6 に、UFC 板の破壊モードを板厚～衝突速度関係中に示す。図中の赤い実線および破線は、修正 NDRC 式³⁾で算定した PC 板の裏面剥離および貫通限界板厚を示している。図中の青い実線および破線は、修正 NDRC 式で算定した UFC 板の各限界板厚曲線であるが、実験結果に適合するように係数（裏面剥離限界板厚に対し 0.75，貫通限界板厚に対し 1.05）を乗じて補正している。図中の各限界板厚をみると、UFC 板は PC 板と比べて裏面剥離限界板厚を約 40%，貫通限界板厚を約 25%低減していることがわかる。すなわち、UFC 板は、裏面剥離に対して PC 板の約 60%，貫通に対して約 75%の板厚で PC 板と同等の耐衝撃性能を有することがわかった。

4. 結言

本研究は、UFC 板に対して高速衝突実験を行い、局部破壊に関する耐衝撃性能について検討したものである。

- (1) UFC 板は、PC 板に比べて貫入深さを約 50%，表面破壊直径を約 30%低減することがわかった。
- (2) UFC 板に裏面剥離が発生する場合の相対貫入深さは約 0.25 であり、PC 板と同様の性質を示すことがわかった。
- (3) UFC 板は裏面剥離に対しては PC 板の約 60%，貫通に対しては約 75%の板厚で PC 板と同等の耐衝撃性能を有していることがわかった。

参考文献

- 1) 武者浩透，別府万寿博，岡本修一：重錘落下実験による UFC パネルの耐衝撃性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.35，No.2，pp.1273-1278，2013.7.
- 2) 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) 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.

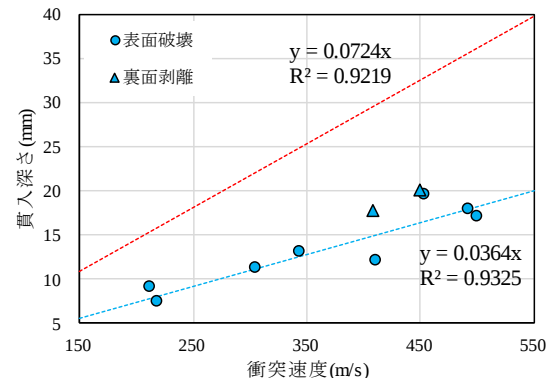


図-3 貫入深さ～衝突速度関係

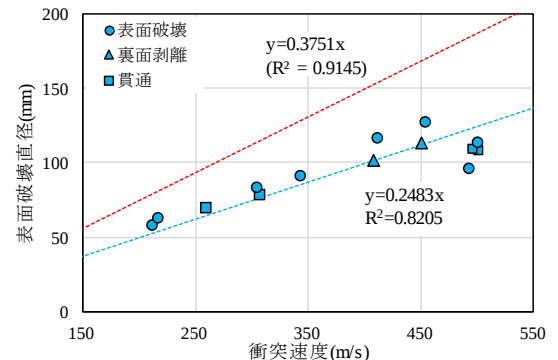


図-4 表面破壊直径～衝突速度関係

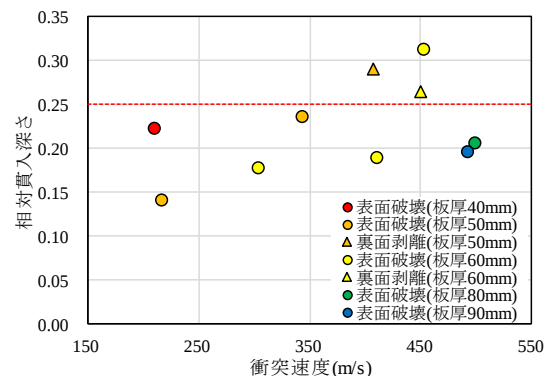


図-5 相対貫入深さ～衝突速度関係

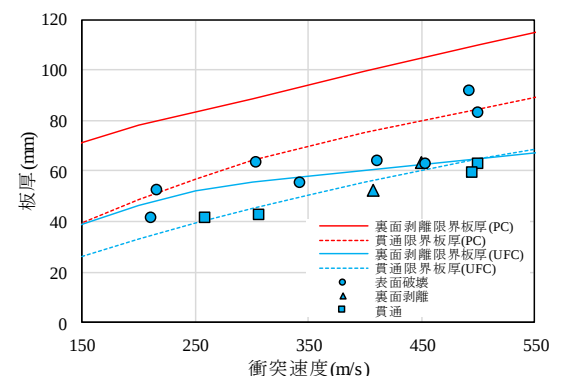


図-6 裏面剥離および貫通限界板厚の比較