

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評価法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

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．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）板に対する高速衝突実験を行い，UFC 板の高い耐衝撃性能を確認している¹⁾．今後，UFC 板を用いた局部破壊に対する設計法を確立するためには，破壊限界板厚の評価方法を検討する必要がある．本研究では，飛翔体の運動エネルギー（以下衝突エネルギー： E_i という）が等しい条件を設定し，飛翔体の質量と衝突速度の組み合わせが破壊モードに与える影響を検討した．また，衝撃係数^{例え ば 2)}を用いて局部破壊限界を評価する方法について検討した．

2. UFC 板の高速衝突実験

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 に実験に使用した飛翔体を示す．飛翔体の先端部は直径 25mm の半球形状となっており，質量はそれぞれ 300g および 550g である．試験体の寸法は縦 50cm×横 50cm で，板厚は 80 および 90mm の 2 種類である．表-1 に，UFC および繊維の材料特性を示す．本実験に用いた UFC は，超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）³⁾に適合する標準配合粉体に鋼繊維（直径 0.2mm，長さ 15mm，引張強度 2,800N/mm²）を混入したものである．なお，UFC の圧縮強度は平均 219N/mm² である．表-2 に実験ケースおよび実験結果をまとめて示す．各 UFC 板に対して，質量 300g および 550g の飛翔体の衝突エネルギーがそれぞれ約 8,200J および約 15,000J となるよう衝突速度を設定した．すなわち，衝突エネルギーが約 8,200J の場合における飛翔体の質量と衝突速度の組み合わせは，質量 300g，衝突速度約 234m/s および質量 550g，衝突速度約 172m/s である．また，約 15,000J の場合の組み合わせは，質量 300g，衝突速度約 316m/s および質量 550g，衝突速度約 234m/s である．

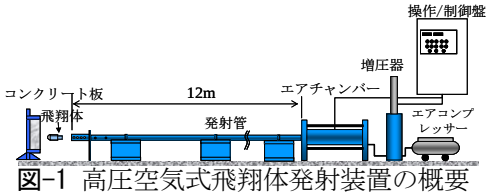


図-1 高圧空気式飛翔体発射装置の概要



写真-1 鋼製飛翔体および固定具(300g および 550g)

表-1 UFC および繊維の材料特性

	材料	繊維				圧縮強度 (N/mm ²)	マトリクス
		直径 (mm)	長さ (mm)	引張強度 (N/mm ²)	混入量 (vol%)		
UFC	鋼繊維	0.2	15.0	2,800	2.0	219	反応性粉体 コンクリート

表-2 実験ケースおよび結果

No	実験ケース	飛翔体 質量 (g)	衝突速度 (m/s)	衝突 エネルギー (J)	板厚 (mm)	貫入 深さ (mm)	破壊モード
1	UFC-80	300	233	8,143	80	34.3	表面破壊
2		550	174	8,326	80	-	貫通
3	UFC-90	300	234	8,213	90	28.7	表面破壊
4			323	15,649	90	-	貫通
5		550	176	8,518	90	31	表面破壊
6			169	7,854	90	31	表面破壊
7			235	15,187	90	-	貫通

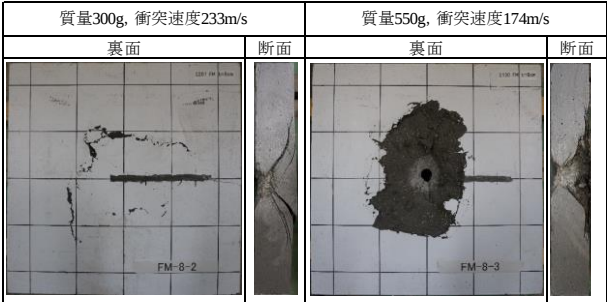


図-2 UFC-80 の破壊状況

図-2 に UFC-80 において，衝突エネルギー約 8,200J のケースで生じた破壊状況を示す．破壊モードは，質量 300g，衝突速度 233m/s (E_i : 8,145J) のケースで表面破壊，質量 550g，衝突速度 174m/s (E_i : 8,287J) のケースでは貫通となった．質量 300g のケースでは，破壊モードは表面破壊となったが，断面には明瞭なひび割れが生じて裏面に到達し，裏面剥離が発生する寸前である．すなわち，破壊モードは裏面剥離限界または貫通限界に近いものと考えられる．一方，質量 550g のケースでは，衝突エネルギーがやや大きいため，上記の裏面剥離・貫通限界の状態が進行して貫通したものと考えられる．図-3 に，UFC-90 において衝突エネルギーが約 8,200J となるように設定

キーワード 高速衝突，超高強度繊維補強コンクリート，局部破壊，防護設計

連絡先 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校建設環境工学科 TEL. 046-841-3810 E-mail : ed15003@nda.ac.jp

したケースを示す。質量300g, 衝突速度234m/s ($E_i: 8,213\text{J}$) および質量550g, 衝突速度176m/s ($E_i: 8,518\text{J}$) のいずれも破壊モードは表面破壊となっていることがわかる。以上から, 同じ衝突エネルギーであれば飛翔体の質量および衝突速度が異なってもほぼ同じ破壊モードとなることがわかった。

3. UFC 板の局部破壊評価法に関する検討

プレーンコンクリート板に対する既往の局部破壊評価式においては, 次元解析により得られる衝撃係数

$$I = \frac{mV^2}{d^3 f'_c} \text{ を変数とした式} \text{ (例えば 2)} \text{ が提案されている。ここ}$$

に, m : 飛翔体質量 (kg), V : 飛翔体速度 (m/s), d : 飛翔体直径 (m), f'_c : コンクリートの圧縮強度 (N/m^2) である。

この無次元量は分子が mV^2 となっており, 衝突エネルギーを無次元化した値とも解釈できる。この衝撃係数 I を用いて UFC 板の貫入深さ, 裏面損傷限界板厚および裏面剥離限界板厚の評価を試みる。なお, 貫入深さと各限界板厚は同じ関数形として次式を仮定する。

$$\frac{x}{d} = \alpha_1 I^{\beta_1}, \quad \frac{s}{d} = \alpha_2 I^{\beta_2} \quad (1)$$

ここに, x : 貫入深さ (m), s : 裏面剥離限界板厚, α_1 , β_1 , α_2 および β_2 : 材料定数である。

UFC板およびプレーンコンクリート板の貫入深さの評価に用いる係数 (α_1 , β_1) を, 回帰分析を行って次式のよう

$$\frac{x}{d} = 0.35I^{0.77} \quad (2)$$

図-4 に, UFC 板の無次元化した貫入深さ (無次元化貫入深さ) と衝撃係数の関係を本実験および既報¹⁾の実験データと比較して示す。図から, 衝撃係数により UFC 板の貫入深さを評価できることがわかる。次に, 裏面剥離限界板厚の評価に用いる係数 (α_2 , β_2) については, 実験結果を安全側に評価するように決定した。例えば, UFC 板の裏面剥離の場合, すべての衝撃係数に対して評価式によって算定される限界板厚が実験において裏面剥離が生じた板厚よりも大きくなるように係数を決定した。上記の要領で得られた UFC 板の裏面剥離限界板厚評価式は, 次式のとおりである。

$$\frac{s}{d} = 1.8I^{0.40} \quad (3)$$

図-5 に, 無次元化した裏面剥離限界板厚 (無次元化裏面剥離限界板厚) と衝撃係数の関係を実験結果と比較

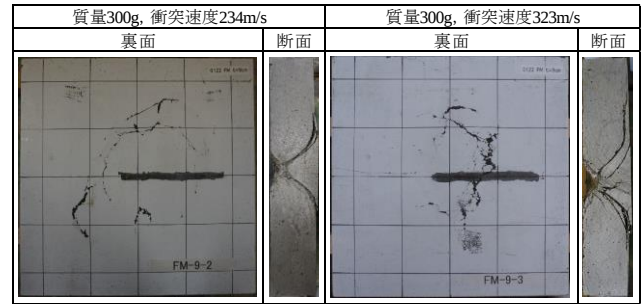


図-3 UFC-90 の破壊状況

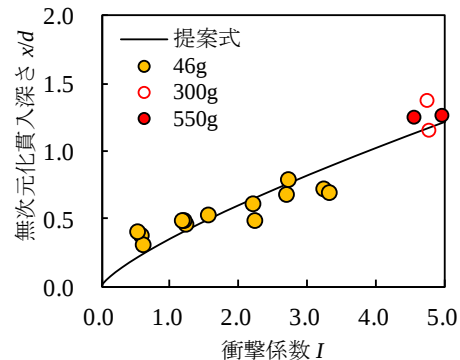


図-4 無次元化貫入深さ～衝撃係数関係

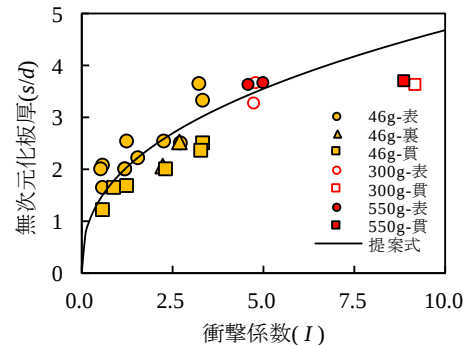


図-5 無次元化板厚～衝撃係数関係

して示す。図から, 提案式は UFC 板の実験結果とよく整合していることがわかる。

4. 結言

UFC 板の破壊性状は, 同じ衝突エネルギーであれば飛翔体の質量および衝突速度が異なってもほぼ同じとなることがわかった。また, 衝撃係数 I を用いることで貫入深さおよび裏面剥離限界板厚を評価できることがわかった。

参考文献

- 1) 上野裕稔, 別府万寿博, 武者浩透, 岡本修一, 龍尊子: 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, 第40回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, 2015.
- 2) Haldar, A., Hatami, M., and Miller, F.: Concrete structures: penetration depth estimation, Journal of Structural Engineering, Vol.109, pp.245-250, 1983.
- 3) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリート繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案), 2004.