

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に関する一考察

防衛大学校 学生会員 ○最上 舜久 正会員 別府 万寿博
大成建設 正会員 武者 浩透 岡本 修一 龍 尊子

1. 緒言

コンクリート部材が高速衝突を受けると、表面破壊、裏面剥離および貫通などの局部破壊が生じる。これらの局部破壊を評価する方法は、主として実験に基づいた評価式で行われてきた。しかし、過去に提案された実験式は、ばらつきが非常に大きいという問題点がある。そこで三輪ら¹⁾は、局部破壊メカニズムに基づいて裏面剥離を解析的に判定する方法(解析的判定法)を提案している。近年、経済的な構造物を設計するため高強度、高じん性、高耐久性を有した超高強度繊維補強コンクリート(UFC)が開発され、実用に供されている²⁾。本研究は、解析的判定法をUFC板の局部破壊に対する評価へ適用することを試みたものである。

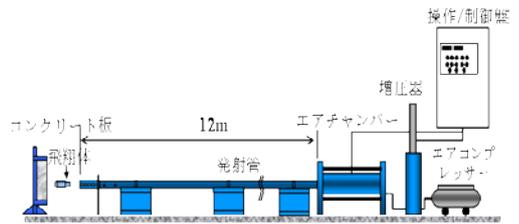


図 - 1 高圧空気式飛翔体発射装置の概要

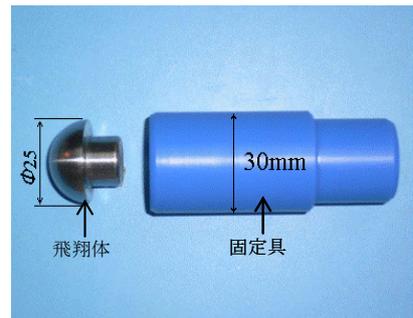


写真 - 1 剛飛翔体の概要

2. 高速衝突実験および実験結果

実験は、図 - 1 に示す高圧空気式飛翔体発射装置を用いて、写真 - 1 に示す鋼製剛飛翔体(質量 46g)を UFC 板に衝突させた。供試体は、発射管出口から約 1m の位置にある固定台に設置した。飛翔体の衝突速度は 200~415m/s の範囲とした。UFC に配合した鋼繊維の引張強度は 2,800N/mm²、直径は 0.2mm、長さは 15mm である。供試体は、縦 50cm 横 50cm、板厚は 3cm および 5cm の 2 種類を作製した。供試体の圧縮強度の平均値は 205N/mm²であった。高速衝突によって生じる UFC 板の局部破壊は、表面破壊、裏面剥離、貫通の 3 種類のモードに区別し評価を行った。表 - 1 に実験ケースと実験で得られた破壊モードをまとめて示す。破壊の例として、実験ケース FM-5-1, FM-5-2 の破壊性状を写真 - 2 に示す。衝突速度 205m/s、板厚 5cm のケース FM-5-1 では、表面破壊のみが生じた。同じ板厚で衝突速度 302m/s のケース FM-5-2 では、表面破壊に加え裏面剥離も生じた。断面を見ると大きなひび割れとともに、短繊維の架橋効果によってひび割れが分散している。また、貫入と裏面剥離のひび割れが連結寸前であり、貫通限界であったと考えられる。

鋼繊維シリーズ			
FM-5-1		FM-5-2	
衝突速度 205.1m/s : 表面破壊		衝突速度 302.3m/s : 裏面剥離	
表面	断面	表面	断面

写真 - 2 UFC 板の破壊状況

図 - 2 に、既往の実験式と実験結果を比較して示す。既往の評価式の適用範囲は約 50N/mm² 以下であるが、参考のために比較した。図から衝突速度 200 ~400m/s では Chang 式、400~500 m/s では修正 NDRC 式に整合していることがわかる。

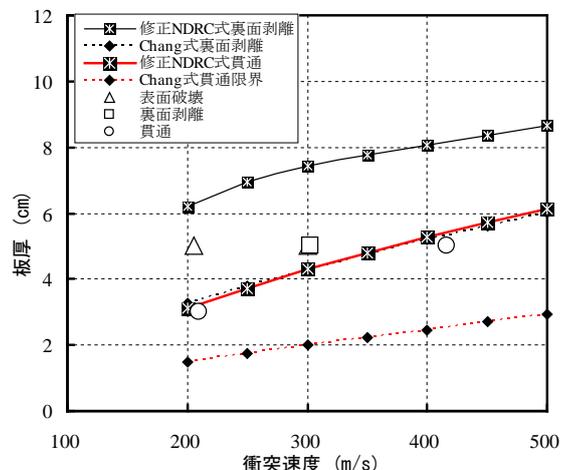


図 - 2 実験と各評価式との比較

キーワード: 高速剛飛翔体, コンクリート板, 局部破壊, 防護設計

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 : s57631@ed.nda.ac.jp

表 - 1 実験結果と理論式の比較

ケース	コンクリート板		飛翔体			実験結果			理論式			
	板厚	強度	先端形状	質量	直径	衝突速度	貫入深さ	破壊モード	貫入深さ	裏面剥離限界板厚	貫入深さ誤差	破壊モード
	mm	N/mm ²		kg	mm							
FM-3-1	30	205	半球型	0.05	25	210	-	貫通	-	33.2	-	裏面剥離以上
FM-5-1	50					205	10.0	表面破壊	5.0	33.0	-50.0	表面破壊
FM-5-2	50					302	11.8	裏面剥離	7.3	40.3	-38.1	表面破壊
FM-5-3	50					416	-	貫通	-	47.9	-	表面破壊
FM-5-4	50					301	11.8	表面破壊	7.3	40.3	-38.1	表面破壊
FM-3-2-3-3	60					304	11.3	表面破壊	7.4	40.4	-34.5	表面破壊

3. 解析的判定法の概要

図 - 3 に解析的判定法のフローチャートを示す. まず, 貫入深さの算出については Li らの力学モデルに対して非線形型の Drucker-Prager 降伏基準およびひずみ速度効果による強度増加を考慮したモデルとなっている¹⁾. まず, 全体の貫入深さ x を微小量 Δx で n 個に分割し, 運動エネルギーと仕事の保存則を適用する. ステップ i における抵抗力 F_i に対する増分仕事 ΔE_i と飛翔体の運動エネルギーの減少量 ΔE_{ke} を等置して貫入深さを求める. この理論モデルでは, 貫入深さとともに荷重も求めることができる.

次に, 裏面剥離に対する抵抗力を求める. 裏面剥離耐力は, 破壊モードを押し抜きせん断型と仮定して, 板厚から貫入深さを減じた板厚の押し抜きせん断耐力としている. 上記で求めた最大衝突荷重 F_{max} と裏面剥離耐力 V_{pc} とを比較して, F_{max} が V_{pc} を越えなければ表面破壊, 超える場合には裏面剥離以上の破壊モードと判定する.

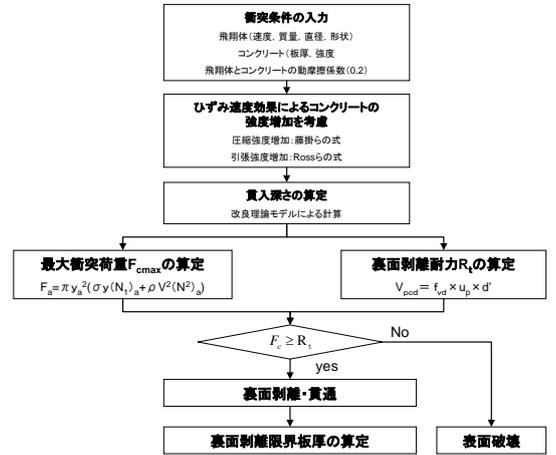


図 - 3 解析的判定法のフローチャート

4. 解析的判定法による破壊モード

UFC-FM の押し抜きせん断耐力は, UFC 指針(案)²⁾に示されている次式を用いた.

$$V_{pcd} = f_{vd} \times u_p \times d' \tag{1}$$

ここで, f_{vd} は超高強度繊維補強コンクリートの引張強度 (N/mm²), u_p は設計断面周長 (mm), d' は有効板厚 (mm) である.

理論モデルの降伏応力および裏面剥離耐力算定時の引張強度は, 三輪の研究¹⁾を参考にしてひずみ速度 10^1 (1/s) における圧縮強度の増加率 1.62, 引張強度の増加率 2.54 を考慮した. 解析的判定法による結果と実験結果の比較を表-1 に示す. FM-5-2, FM-5-3 の実験における破壊モードは裏面剥離, 貫通であったのに対し, 解析的判定法はどちらも表面破壊と危険側の判定をしている. この理由は, 解析的判定法では動的な押し抜きせん断耐力を小さく評価しているためと考えられる. そこで, 裏面剥離耐力に補正係数を乗じて解析結果を修正する. 裏面剥離耐力に 0.5 ~ 0.7 を乗じて求めたときの裏面剥離限界板厚を図 - 4 に示す. 図 - 4 より裏面剥離耐力に 0.6 を乗じることで実験結果と理論式の破壊モードが整合することがわかる.

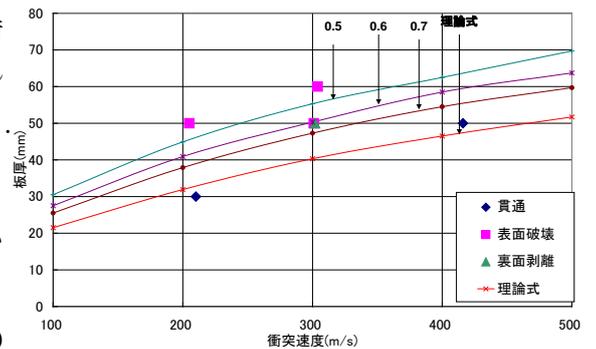


図 - 4 解析的判定法の修正

5. 結言

本研究は, 解析的判定法を超高強度繊維補強コンクリート板の局部破壊へ適用したものである. 解析的判定法は, 実験結果を危険側へ評価することがわかった. 解析的判定法を用いる際に, 裏面剥離耐力に補正係数 0.6 を乗じることで実験の破壊モードと整合した.

参考文献

- 1) 三輪幸治: 剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板内部の裏面剥離発生メカニズムと耐衝撃補強に関する研究, 防衛大学校理工学研究科後期 (博士) 課程論文, 2010.3
- 2) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案), 丸善, 2004