

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シミュレーション

防衛大学校 学生会員 ○三輪 幸治 正会員 別府万寿博
正会員 大野 友則 正会員 片山 雅英

1. 緒言

テロ活動や不測の爆発事故によって生じる爆発荷重がコンクリート構造物に作用すると、構造物が爆風圧によって直接的な被害を受けるだけでなく、破壊された構造物のコンクリート片や金属片等が高速で飛散して、人命や構造物に二次的被害をもたらす可能性がある。このような飛散物の高速衝突によるコンクリートの局部的破壊を抑止する設計法を確立するためには、局部破壊の程度を精度よく評価できる解析法が必要である。本研究は、剛飛翔体の高速衝突を受けて生じるコンクリート板の局部破壊を数値シミュレーションする場合に、ひずみ速度効果が解析結果に与える影響について検討を行ったものである。

2. コンクリート板に対する高速飛翔体の衝突実験

2.1 実験の概要

数値シミュレーションの対象となる実験は、飛翔体を数種類の速度（180～490m/sの範囲）でコンクリート板に衝突させたものである。実験ケースを、表-1に示す。図-1に、飛翔体発射装置の概要を示す。装置は、エアクンプレッサー、増圧装置、エアチャンバー、発射管（長さ：12m、内径：35mm）および操作・制御盤から構成される。飛翔体は、エアクンプレッサーおよび増圧装置で圧縮した空気を所定の高圧力に設定して発射させる。コンクリート板は、発射管出口から1mの位置に設置し、上下2辺をクランプで固定している。

2.2 飛翔体およびコンクリート板

飛翔体の概要を、写真-1に示す。飛翔体は頭部と尾部から構成され、質量はいずれも50gである。頭部は鋼製で、直径25mm、先端形状は半球型である。尾部はナイロンMC901製で、直径35mmである。コンクリート板の寸法は、縦50cm×横50cm、強度は25N/mm²、板厚は3～13cmの供試体を8種類作製した。

2.3 局部破壊の状況

高速衝突によって生じるコンクリート板の局部破壊モードは、図-2に示すように表面破壊、裏面剥離、貫通の3種類に区分される。破壊の一例として、写真-2に裏面剥離が生じたケース（コンクリート板厚8cm、飛翔体速度310m/s）の表面および裏面の破壊の状況を示す。これより、表面破壊の直径は約12cm、裏面剥離の直径は約20cmであり、裏面の破壊領域が表面の破壊領域より大きいことがわかる。

3. 数値シミュレーション

3.1 解析モデル

本解析では、衝撃解析コードAUTODYN¹⁾により、写真-2に示した裏面剥離が生じたケース（コンクリート板厚8cm、飛翔体速度310m/s）をシミュレートした。図-3に解析モデルを、表-2に材料の構成モデルを示す。解析では、コンクリート板および飛翔体頭部とも2次元モデルを作成した。コンクリート板は1要素2.5mm×2.5mmの大きさに3200要素に分割した。飛翔体頭部は28要素に分割した。コンクリートの構成モデルは、図-4に示す非線形型のDrucker-Prager降伏条件を用い、鋼材にはvon-Misesの降伏条件を用いた。

表-1 実験ケース

板厚(cm)	速度(m/s)	板厚(cm)	速度(m/s)
13	490	8	310
12	415	8	210
10	490	7	310
10	310	6	200
9	420	3	210
8	415	3	180

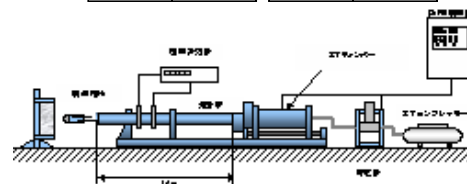


図-1 高圧空気式飛翔体発射装置

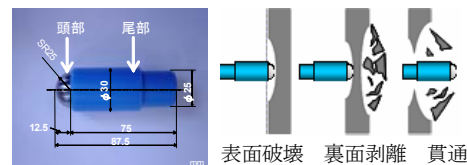


写真-1 剛飛翔体

図-2 局部破壊モード

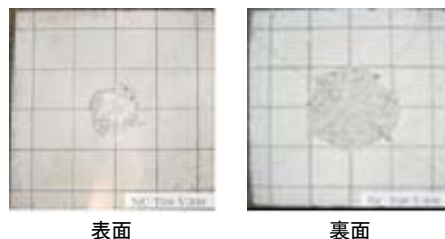


写真-2 裏面剥離のケースの破壊状況

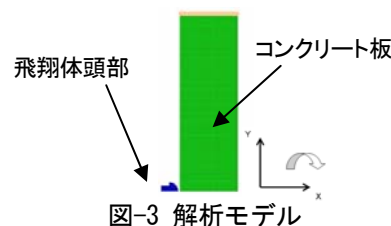


図-3 解析モデル

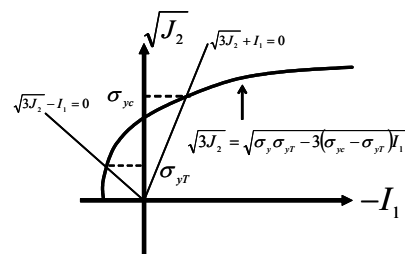


図-4 非線形型 Drucker-Prager モデル

キーワード：高速衝突、コンクリート板、数値シミュレーション

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(ex3521) E-mail : g44051@nda.ac.jp

一般に、材料が衝撃荷重を受けると大きなひずみ速度効果を示すことがわかっている。材料モデルにひずみ速度に応じた強度の増加を反映させる必要がある。ひずみ速度効果によるコンクリートの一軸圧縮および引張強度増加の評価式として、以下に示す藤掛および Ross らの式がある。

動的圧縮強度の増加率：藤掛らの式¹⁾

$$\frac{f'_{cd}}{f'_{cs}} = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s} \right)^{0.006 \left[\log \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s} \right) \right]^{1.05}} \quad (1)$$

ここに、 $\dot{\varepsilon}_s$ ：静的載荷時のひずみ速度 $[1.2 \times 10^{-5} (1/s)]$ 、 $\dot{\varepsilon}$ ：急速載荷時のひずみ速度 $(1/s)$ 、 f'_{cs} ：静的載荷時の圧縮強度 (N/mm^2) 、 f'_{cd} ：動的載荷時の圧縮強度 (N/mm^2) である。

動的引張強度の増加率：Rossらの式²⁾

$$\eta(\dot{\varepsilon}) = \frac{f'_{td}}{f'_{ts}} = \exp \left[0.00126 \left(\log \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s} \right)^{3.373} \right] \quad (2)$$

ここに、 $\dot{\varepsilon}_s$ ：静的載荷のひずみ速度 $[1.0 \times 10^{-7} (1/s)]$ である。本解析では、コンクリートの引張強度を圧縮強度 $25 N/mm^2$ の $1/10$ と仮定した。また、 $10^{-5} \sim 10^1 (1/s)$ の範囲で4種類のひずみ速度を仮定して、これらの式より求めた動的圧縮および引張強度の増加を構成則に反映させた。表-3に解析ケースを示す。

3.2 ひずみ速度の影響

解析結果を、図-5および表-4に示す。まず、図-5の破壊状況をみると、ひずみ速度が上昇するにつれて、破壊の領域がしだいに局所的になっていることがわかる。とくに、板の裏面におけるひび割れが大幅に低減されている。この原因として、表-3に示すように同じひずみ速度を与えたとき、圧縮よりも引張強度の増加が著しいためと考えられる。また、構成モデルはひずみ速度が $10^0 (1/s)$ を用いた場合が最もよく実験をシミュレートしていることがわかる。

3.3 実験のシミュレーション解析

前節で選定した材料モデルを用いて、全ての実験ケースについてシミュレーションを行った。図-6に、解析により得られた破壊モードを実験結果と比較して示す。図から、表面破壊については、解析結果は実験結果とほぼ一致していることがわかる。一方、貫通および裏面剥離に対しては、衝突速度 $200 m/s$ で板厚 $3 cm$ のときの貫通、衝突速度 $300 m/s$ で板厚 $8 cm$ 、 $400 m/s$ で $9 cm$ のときの裏面剥離を除き、解析結果は破壊モードを小さめに評価している。この理由は、解析に用いたコンクリートの引張強度値の設定が大きかったことによると考える。図-7は、衝突速度～表面破壊深さ関係を示している。これより解析による表面破壊深さは、実験値とほぼ一致している。

4. 結言

本研究より、剛飛翔体の高速衝突を受けて生じるコンクリート板の局部破壊に関する数値シミュレーションにおいて、コンクリートの材料モデルにひずみ速度効果を適切に考慮すると、局部破壊を比較的良好にシミュレートできることがわかった。

参考文献

- 1) 藤掛一典, 上林勝敏, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤: ひずみ速度効果を考慮した三軸応力下におけるコンクリートの直交異方性構成モデルの定式化, 土木学会論文集, No.669, V-50, 109-123, 2001.2
- 2) Ross, C.A, Thompson, P.Y. and Tedesco, J.W.: Split-hopkinson pressure-bar tests on concrete and mortar in tension and compression, ACI Material Journal, V.86, No.5, pp.475-481, September-October, 1989

表-2 材料の構成モデル

材料	状態方程式	せん断降伏	引張破壊	エロージョンひずみ
コンクリート	線形	Drucker-Prager	cut-off	2.5
鋼材	線形	Von-Mises	破壊しない	なし

表-3 解析ケース

ひずみ速度 $(1/s)$	ひずみ速度効果(倍率)		強度 (N/mm^2)	
	圧縮	引張	圧縮	引張
10^{-5} (静的)	1	1	25.0	2.5
10^{-1}	1.25	1.70	31.4	4.25
10^0	1.43	2.44	35.9	6.11
10^1	1.69	4.05	42.4	10.15

表-4 解析結果

ひずみ速度	破壊モード	表面破壊深さ (cm)
10^{-5} (静的)	裏面剥離	2.5
10^{-1}	裏面剥離	2.1
10^0	裏面剥離	2
10^1	表面破壊	1.5

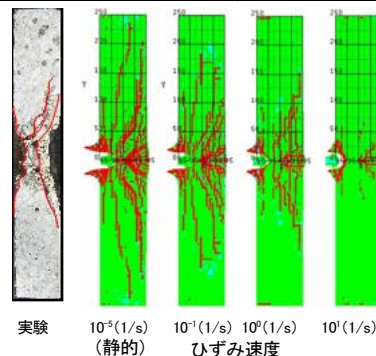


図-5 解析による破壊状況

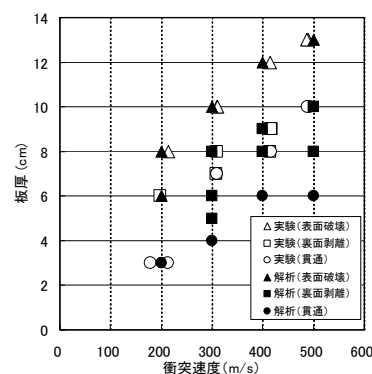


図-6 局部破壊モードに対する実験と解析結果の比較

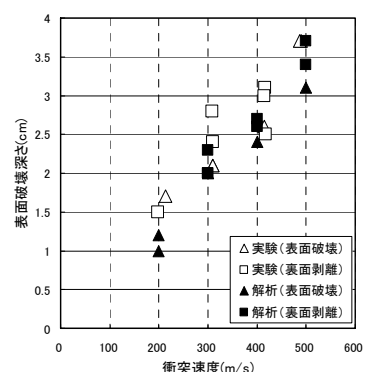


図-7 表面破壊深さに対する実験と解析結果の比較