

論文 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基礎的研究

三輪 幸治^{*1}・別府 万寿博^{*2}・大野 友則^{*3}・片山 雅英^{*4}

要旨: 本研究は、剛飛翔体がコンクリート板に高速で衝突した際に生じる局部破壊について、実験および数値解析的に検討を行ったものである。まず実験を行うにあたり、高圧空気式飛翔体発射装置を開発した。この装置を用いて板に対する高速衝突実験を行い、衝突速度や板厚が破壊に及ぼす影響を調べた。次に、実験に対するシミュレーション解析を行い、高速衝突を受ける場合のコンクリート材料のモデル化やひずみ速度効果の影響を検討した。解析と実験結果を比較して、数値シミュレーションの妥当性について検討を行った。

キーワード: 高速衝突, コンクリート板, 局部破壊, 数値シミュレーション

1. はじめに

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破片等が高速度で飛散して、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な損傷・破壊を抑止する設計法を確立するためには、その局部破壊の程度を精度よく評価できる実験や解析法が必要である。しかし、実験を行うためには特別な装置が必要であることから、高速衝突を受けるコンクリートの局部破壊に関する実験はあまり行なわれていないのが現状である。一方、コンピューターの発達とともに、有限要素法や有限差分法を利用した数値シミュレーションによる衝突解析が進歩してきている。例えば、伊東・片山らは衝撃解析コード AUTODYN を用いて、航空機の衝突を受けるコンクリート壁の破壊挙動を 3 次元モデルでシミュレート¹⁾し、大規模計算によるコンクリートの局部破壊予測の可能性を示している。数値

解析においては、材料の構成モデルの種類や解析パラメータの選択により、解析結果が大きく影響を受けると考えられるが、コンクリートの局部破壊に対するこれらの検討はほとんど行われていない。

本研究は、高圧空気式飛翔体発射装置を開発し、剛飛翔体の衝突を受けるコンクリートの局部破壊に関する実験および数値解析的検討を行なったものである。まず、コンクリート板に対する高速衝突実験を行い、衝突速度が破壊モードや表面破壊深さに及ぼす影響を調べている。次に数値解析を行い、衝突解析においてコンクリート材料の構成モデルや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ている。

2. 剛飛翔体の高速衝突実験

2.1 実験の概要

図-1 に、高圧空気式飛翔体発射装置の概要を示す。装置は、エアコンプレッサー、増圧器、エアチャンバー、発射管（長さ：12m、内径：35mm）から構成される。飛翔体は、エアコンプレッサーおよび増圧器で圧縮された空気の高圧力によって発射される。飛翔体

*1 防衛大学校 建設環境工学科 理工学研究科前期課程学生 (正会員)

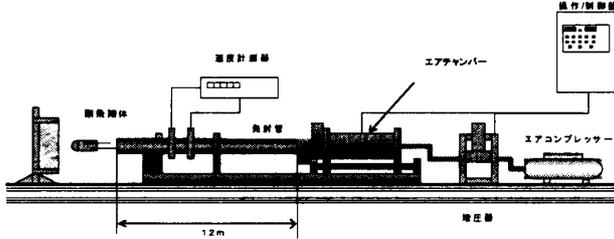
*2 防衛大学校 建設環境工学科 講師 博(工) (正会員)

*3 防衛大学校 建設環境工学科 教授 工博 (正会員)

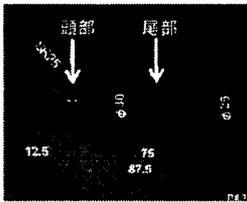
*4 ㈱CRC ソリューションズ 科学システム事業部 博(工) (非会員)

表—1 実験ケース

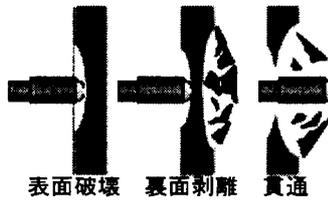
板厚(cm)	速度(m/s)	板厚(cm)	速度(m/s)
13	490	8	310
12	415	8	210
10	490	7	310
10	310	6	200
9	420	3	210
8	415	3	180



図—1 高圧空気式飛翔体発射装置



写真—1 剛飛翔体



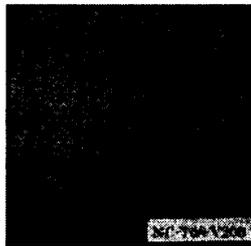
図—2 局部破壊モードの区分

は写真—1 に示す寸法であり、頭部と尾部から構成されている。全質量は 100g (頭部と尾部の質量はそれぞれ 50g), 頭部は鋼製で直径 25mm の半球型, 尾部の材質はナイロン MC901 で直径 35mm である。コンクリート板は、縦 50cm×横 50cm の寸法で、厚さ 3~13cm の 8 種類の供試体を作製した。コンクリート板の強度はすべて 25N/mm² である。供試体は、発射管出口から 1m の位置に置いた固定台に設置し、上下 2 辺をクランプで固定した。設置した供試体に対して、飛翔体を速度 180~490m/s の範囲でコンクリート板に衝突させた。飛翔体の速度は、発射管の出口に設置した速度検出センサーで計測した。また、コンクリート板に生じた局部破壊の区分と表面破壊の深さを調べた。表—1 に実験ケースを示す。

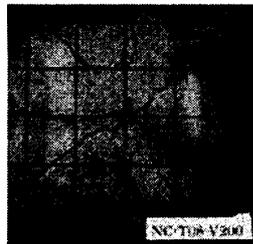
2.2 実験結果および考察

(1) 破壊モード

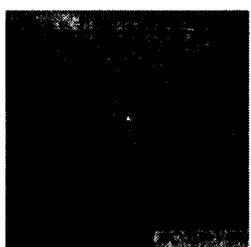
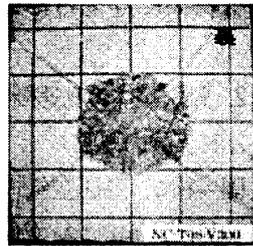
高速衝突によって生じるコンクリート板の局部破壊は、図—2 に示すように表面破壊、裏面剥離、貫通の 3 種類のモードに区分される²⁾。写真—2 に、コンクリート板に生じた表面破壊、裏面剥離、貫通の状況を示す。写真—2 は板厚 8cm で、(a) は表面破壊、(b) は裏面剥離、(c) は貫通のケースを示している。衝突速度 210m/s では、表面に直径 10cm 程度の表面破壊が生じ、裏面には放射状のひび割れが発生した。衝突速度 310m/s になると、表面破壊とともに裏面剥離が生じていることがわかる。衝突速度 415m/s になると速度 310m/s のときより大きな離面剥離が生じるとともに、貫通した。すなわち、局部破壊の大きさは、同じ板厚、強度であっても衝突速度によって変化することがわかる。なお、写真—3 は裏面剥離した断面内の損傷を示しているが、板の内部には斜めに発達したひび割れも確認できる。



(a) 表面破壊(板厚 8cm, 速度 210m/s)



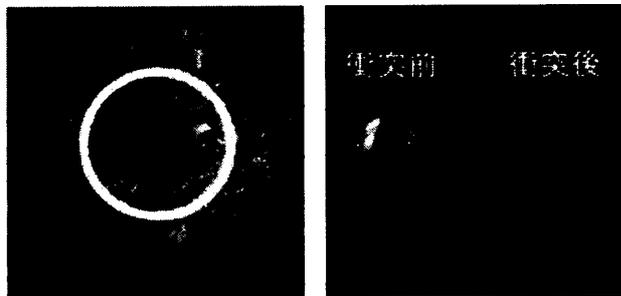
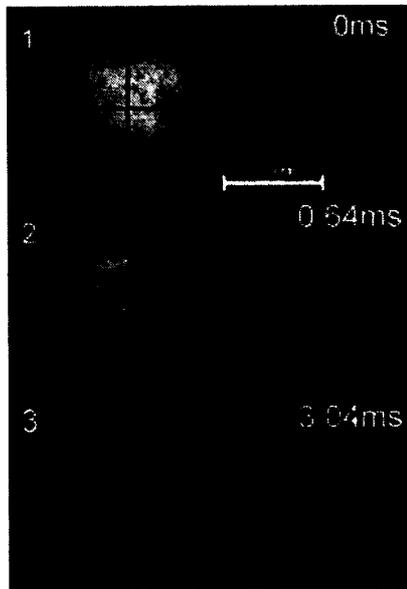
(b) 裏面剥離(板厚 8cm, 速度 310m/s)



(c) 貫通(板厚 8cm, 速度 415m/s)

写真—2 局部破壊の様子

写真—4 は、表面破壊の破壊状況(板厚 10cm, 衝突速度 310m/s) を高速ビデオカメラで撮影 (12500 コマ/秒) した映像である。これより、衝突後 0.64ms においてコンクリートは粉末状に飛散し、飛翔体胴体部は完全に破壊していることがわかる。写真—5 は、実験後の供試体と飛翔



体の損傷を示している。写真-5(a)より、コンクリート板と飛翔体との接触部には飛翔体頭部の形状がそのまま残っており、飛翔体はコンクリートに接触した状態を保ったまま押し込むように進行したことを示している。写真-5(b)より、衝突後の飛翔体頭部には線状の傷が深くついており、コンクリートとの接触間に大きな摩擦が働いたものと考えられる。

(2) 衝突速度と破壊モードの関係

図-3に、衝突速度と板厚の関係における破壊モードの発生状況を示す。図には、修正 NDRC式³⁾による裏面剥離と貫通の限界線も示してい

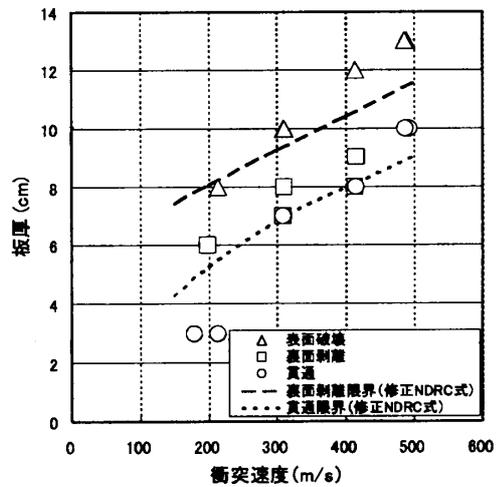


図-3 衝突速度による破壊モードの推移

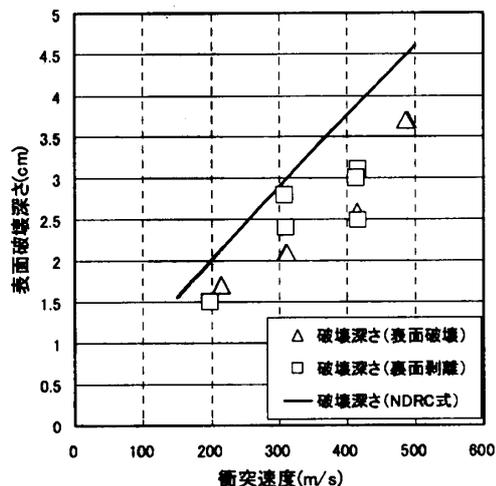


図-4 衝突速度～表面破壊深さ関係

る。修正 NDRC 式は、飛翔体の質量、直径、衝突速度およびコンクリートの強度を入力して、限界厚を求めるものである。本実験では、胴体部が衝突の際に破壊したため、式の適用に当たっては飛翔体頭部の質量 50g のみを考慮している。図より、実験と修正 NDRC 式はほぼ一致しており、衝突速度の増加または板厚の減少にしたがって、局部破壊モードは表面破壊、裏面剥離、貫通の順に変化することがわかる。図-4に、衝突速度と表面破壊深さ関係を示す。これより、表面破壊深さは飛翔体の衝突速度の増大とともにほぼ線形に増加することがわかる。

表—2 材料の構成モデル

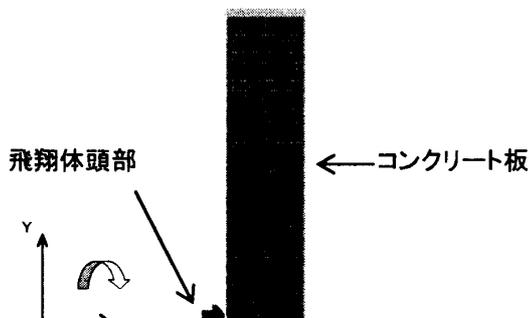
材料	状態方程式	せん断降伏	引張破壊	エロージョンひずみ
コンクリート	線形	Drucker-Prager	cut-off	2.5
鋼材	線形	Von-Mises	破壊しない	なし

表—3 解析ケース

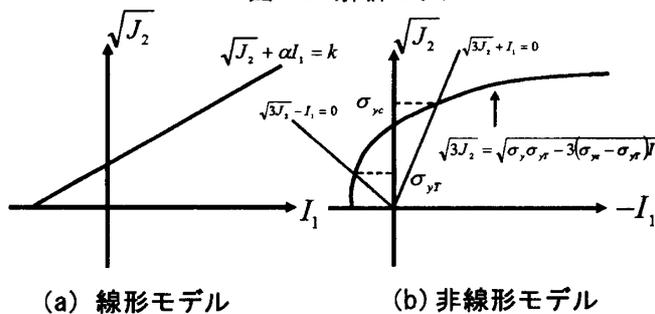
ひずみ速度(1/s)	ひずみ速度効果(倍率)		強度(N/mm ²)	
	圧縮	引張	圧縮	引張
10 ⁻⁵ (静的)	1	1	25.0	2.5
10 ⁻¹	1.25	1.70	31.4	4.25
10 ⁰	1.43	2.44	35.9	6.11
10 ¹	1.69	4.05	42.4	10.15

表—4 解析による破壊モードと表面破壊深さ

ひずみ速度	線形型		非線形型	
	破壊モード	表面破壊深さ(cm)	破壊モード	表面破壊深さ(cm)
なし(静的)	裏面剥離	0.5	裏面剥離	2.5
10 ⁻¹	裏面剥離	0.5	裏面剥離	2.1
10 ⁰	裏面剥離	0.5	裏面剥離	2
10 ¹	表面破壊	0.5	表面破壊	1.5



図—5 解析モデル



図—6 Drucker-Prager の降伏条件

3. 数値シミュレーション

3.1 解析モデル

剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリートの局部破壊に関して数値解析的に検討した例は少ないので、まずコンクリートのモデル化について基本的な検討を行った。次に、全実験ケースのシミュレーションを行った。なお、解析には衝撃解析コード AUTODYN Ver.5.2 を用いて2次元軸対称系でモデル化した。解析の対象は、飛

翔体速度 310m/s、コンクリート板厚 8cm のケース(破壊モード:裏面剥離)である。図—5 に解析モデルを、表—2 に材料の構成モデルを示す。コンクリート板は1要素あたり 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には、図—6 に示す線形および非線形型の Drucker-Prager 降伏条件を用いた。また、貫通現象の表現には、貫通を伴う解析においてよく用いられるエロージョンという方法を用いた。すなわち、変形した要素の相当ひずみが 2.5 を超えた場合には、その要素のせん断強度をなくすものである。ただし、体積ひずみに応じた圧力は生じるものとしている。鋼材には Von-Mises の降伏条件を用いた。

材料が衝撃荷重を受けると大きなひずみ速度を示すことがわかっている²⁾ので、解析モデルにもひずみ速度に対応した強度の増加を反映させる必要がある。写真—4 より、コンクリートの破壊は 1ms 前後で終了していること、およびコンクリートは一般に数 100~数 1000μ 程度のひずみで損傷、破壊することより、実験の範囲内で生じるひずみ速度は、10⁻¹~10²(1/s)のオーダーと考えられる。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⁴⁾

$$\frac{f'_{cd}}{f'_c} = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{0.006} \left[\text{Log} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right) \right]^{1.05} \quad (1)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_s$:静的載荷時のひずみ速度[1.2 × 10⁻⁵(1/s)], $\dot{\epsilon}$:急速載荷時のひずみ速度(1/s), f'_c :静的載荷時の圧縮強度(N/mm²), f'_{cd} :動的載荷時の圧縮強度(N/mm²)である。

動的引張強度の増加率:Rossらの式⁵⁾

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

ここに、 $\dot{\epsilon}_s$:静的載荷のひずみ速度[1.0 × 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

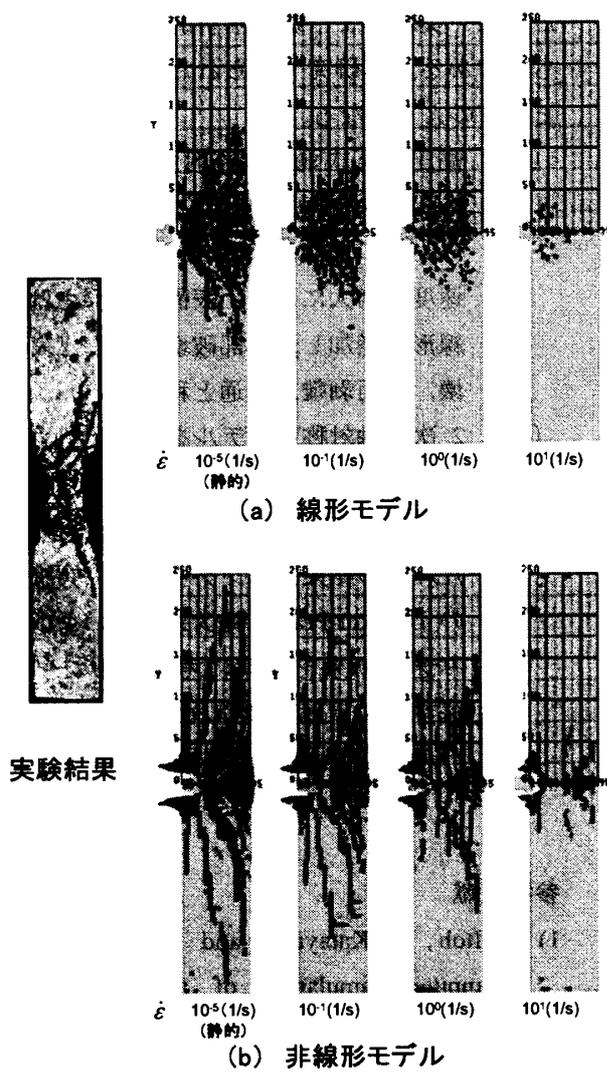


図-7 解析による破壊状況

25N/mm² の 1/10 と仮定した。また、10⁻⁵~10¹(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 解析結果

解析結果を図-7 および表-4 に示す。まず、図-7の破壊状況をみると、いずれのひずみ速度においても線形モデルにおけるひび割れ分布は、非線形モデルに比べ小さくなっていることがわかる。また、表面破壊深さについても、非線形モデルの方が線形モデルよりも大きく、実験値にも近いことがわかる。この理由は、実験では衝突時にかなり大きな圧力が生じると考えられるが(写真-3, 4参照)、線形モデルの方が非線形モデルに比べ、高い静水圧において降伏応力が大きくなるため、

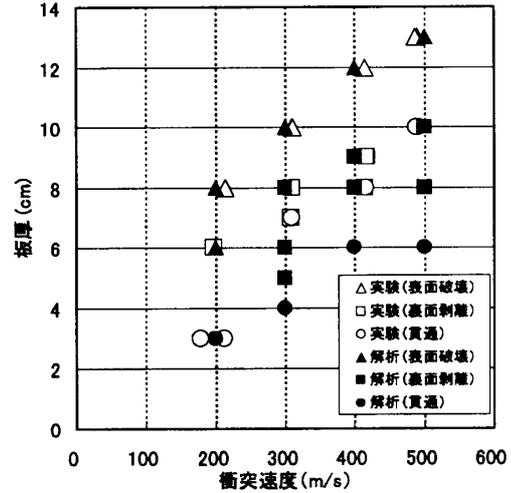


図-8 局部破壊モードに対する実験と

解析結果の比較

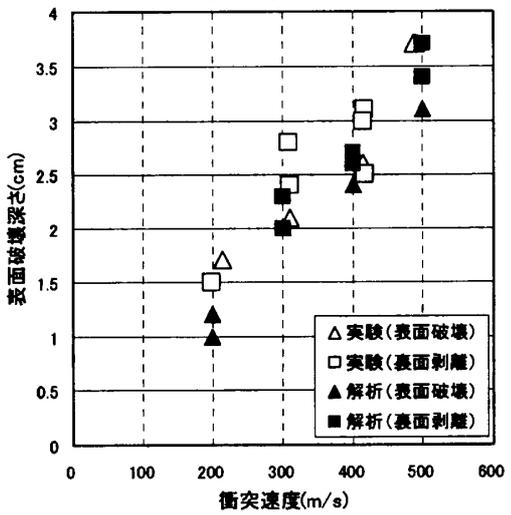
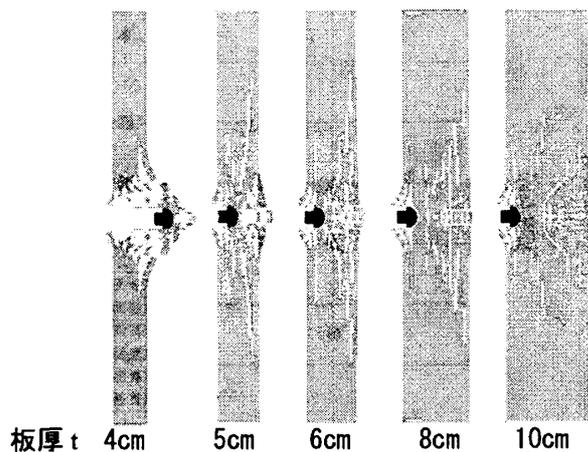


図-9 表面破壊深さに対する実験と

解析結果の比較

降伏しにくいことが考えられる。ちなみに、大きな側圧を受けるコンクリートの破壊曲線は非線形モデルに近いことが報告されており⁴⁾、本解析結果は妥当であると考えられる。また、ひずみ速度が上昇するにつれて、線形および非線形モデルともに、破壊の領域がしだいに局部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。この原因としては、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。

以上の検討より、構成モデルは非線形モデル、ひずみ速度は 10⁰(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。



図—10 板厚による局部破壊の相違(衝突速度 300m/s)

3.3 実験のシミュレーション解析

ここでは、前節で検討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—8に、解析によって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 200m/s で板厚 3cm のときの貫通、衝突速度 300m/s で板厚 8cm、400m/s で 9cm 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—9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。図—10には、衝突速度 300m/s のときに、板厚が破壊に及ぼす影響について示している。図—10より、板厚が大きくなると、表面破壊深さが減少するとともに、裏面のひび割れ破壊も小さくなることわかる。

以上より、適切な数値解析モデルを構築すれば高速衝突を受けるコンクリートの表面破壊深さや破壊モードを比較的良好にシミュレートできるといえる。

4. 結言

本研究は、剛飛翔体の高速衝突を受けてコンクリート板に生じる局部破壊について検討する

ために、実験および数値解析的検討を行なったものである。本研究で得られた成果を要約すると以下ようになる。

- (1) 高圧空気式飛翔体発射装置を開発して、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ついて調べた。衝突速度の増大により、表面破壊深さはほぼ線形に増加し、局部破壊モードは表面破壊、裏面剥離、貫通と移行する。
- (2) 2次元軸対称系モデルを用いて、コンクリートの局部破壊解析における構成モデルやひずみ速度効果の影響を検討した。その結果、コンクリートに非線形型の Drucker-Prager 降伏条件式およびひずみ速度効果を適切に考慮することで剛飛翔体の高速衝突に対するコンクリートの破壊現象を比較的良好にシミュレートできる。

参考文献

- 1) M.Itoh, M.Katayama and R. Rainsberger : Computer simulation of an F-4 Phantom crashing into a reinforced concrete wall, Computational Ballistics II, pp.207-217, 2005
- 2) 構造物の衝撃挙動と設計法, 土木学会構造工学シリーズ 6, pp.275~292, 1994.1
- 3) R.P.Kennedy : A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects, Nuclear Engineering Design, 37, pp.183-203, 1976
- 4) 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
- 5) 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.5pp.475-481, September October,1989