

(22) 剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の 局部破壊に及ぼす先端形状の影響に関する数値シミュレーション

A NUMERICAL SIMULATUON FOR INFLUENCE OF PROJECTILE NOSE SHAPE ON
LOCAL DAMAGE OF CONCRETE PLATE

三輪幸治*, 別府万寿博**, 伊藤雅晴***, 片山雅英****, 大野友則*****
Koji Miwa, Masuhiro Beppu, Masaharu Itoh, Masahide Katayama, Tomonori Ohno

- * 防衛大学校理工学研究科学生 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)
- ** 博 (工) 防衛大学校講師 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)
- *** 工修 (株)CRCソリューションズ科学システム事業部(〒136-8581 東京都江東区南砂 2-7-5)
- **** 博 (工) (株)CRCソリューションズ 技術スペシャリスト 科学システム事業部
(〒136-8581 東京都江東区南砂 2-7-5)
- ***** 工博 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

キーワード: 高速衝突, 剛飛翔体, コンクリート板, 局部破壊
(high-velocity impact, rigid projectile, concrete plate, local damage)

1. はじめに

近年、爆破テロ活動や花火工場等における不測の事故による爆発災害が増加しつつある。爆発によって発生する爆発荷重がコンクリート構造物に作用すると、構造物は爆風圧による直接的な被害だけでなく、破壊されたコンクリート塊や金属破片および周囲の設置物等が高速度で飛散し、人命や構造物に対して二次的被害をもたらす可能性がある。このような飛翔体の高速衝突によってコンクリートに生じる局部的な損傷・破壊を抑止する設計法を確立するためには、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。

コンクリートの局部破壊は、図-1 に示すように表面破壊、裏面剥離および貫通の3つの破壊モードに区分される¹⁾。剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリートの局部破壊は、飛翔体の先端形状、剛性、質量の影響を受けることがわかっており²⁾、これまでに表面破壊深さおよび破壊モードを予測するため評価式が提案されている^{1),2)}。

一方、コンピュータの発達とともに数値シミュレーションを用いたコンクリートの局部破壊に関する解析が進みつつある³⁾。ただし、現時点では数値解析にも多くの課題が残されている。例えば、①解析に用いる要素寸法や材料の構成モデルによって解析結果が大きく異なること、②解析結果の適否の尺度となる実験データが少ないため、実験と解析を比較

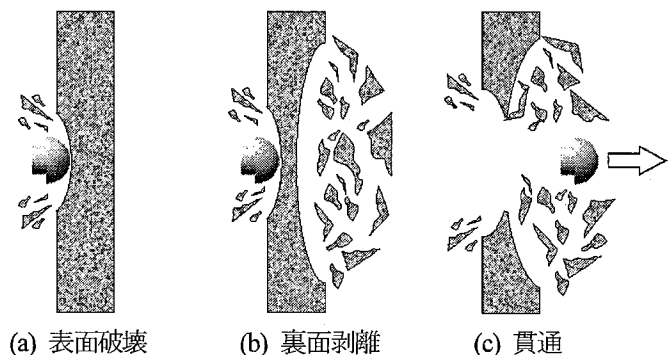


図-1 局部破壊の種類

する際には最終的な破壊(形状、深さ)のみが用いられる場合が多く詳細な比較が難しい、ことが挙げられる。

本研究は、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及ぼす先端形状の影響について、数値シミュレーションにより検討を行ったものである。まず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において、コンクリートのひずみ速度効果が解析結果に与える影響について調べた。次に、飛翔体の先端形状がコンクリート板の局部破壊に及ぼす影響について数値シミュレーションにより検討した。

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

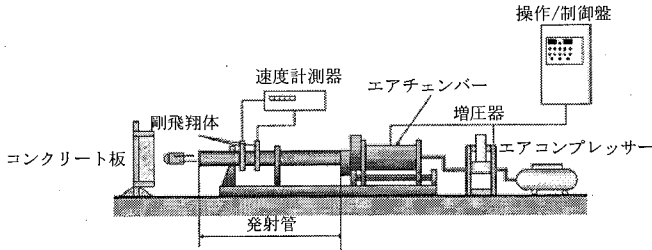


図-2 高圧空気式飛翔体発射装置

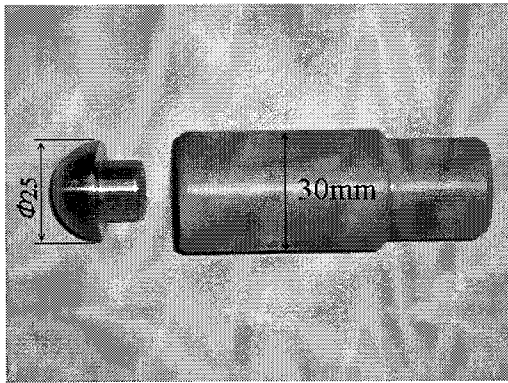


写真-1 剛飛翔体 (半球型)

2. コンクリートの局部破壊シミュレーションにおける数値モデルの検討

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-2 に、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) および操作・制御盤から構成される。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。飛翔体の概要を、写真-1 に示す。飛翔体はナイロン製の固定具に組み込まれエアチャンバーに挿入され、その後固定具とともに発射される。用いた飛翔体は、材質: 鋼材 (SS400), 先端形状: 半球型, 直径: 25mm, 質量: 50g である。コンクリート板の寸法は縦 50cm×横 50cm, 強度は 25N/mm² であり、板厚が 3~13cm の供試体を 8 種類作製した。

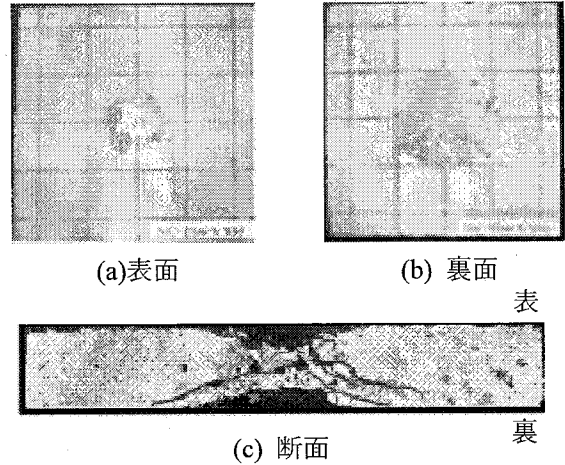


写真-2 裏面剥離のケースの破壊状況

2.2 局部破壊の状況

コンクリート板の局部破壊の一例として、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写真-2 に示す。この例では、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。また、断面をみると衝突部から斜め方向に大きなひび割れが生じていることがわかる。

2.3 解析モデル

衝撃解析コード AUTODYN.Ver.6.0 により、写真-2 に示した裏面剥離が生じたケースのシミュレーションを試みる。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とも 2 次元軸対称系でモデル化した。コンクリート板は 1 要素 2.5mm×2.5mm の大きさで 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、鋼材は弾性体とした。

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ため、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。

1) 動的圧縮強度の増加率: 藤掛らの式⁴⁾

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

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'_{cs} : 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。

表-2 材料の構成モデル

材料	状態方程式	降伏	引張破壊	エロージョン
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(1/s)	表面破壊深さ(cm)	破壊モード
10 ⁻⁵ (静的)	2.5	裏面剥離
10 ⁻¹	2.1	裏面剥離
10 ⁰	2.0	裏面剥離
10 ¹	1.5	表面破壊

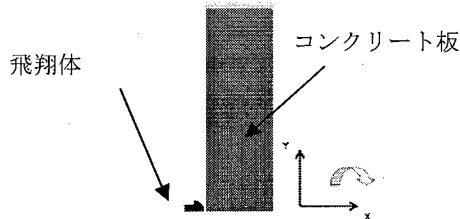


図-3 解析モデル

2) 動的引張強度の増加率: Ross らの式⁵⁾

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

ここに、 $\dot{\epsilon}_s$:静的载荷のひずみ速度 [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 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。

2.4 ひずみ速度効果の影響

解析結果を、図-5 および表-4 に示す。図-5 に示した破壊状況を見ると、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部的になることがわかる。とくに、板の裏面におけるひび割れが減少している。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、本構成モデルにおいて板の破壊の状況や表面破壊深さについて実験結果と比べたときに、ひずみ速度が 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。

2.5 実験のシミュレーション解析

前節で選定した 10⁰(1/s)のひずみ速度を考慮して、

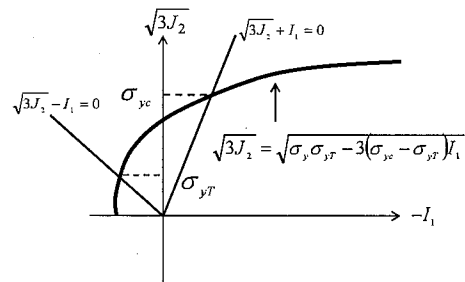


図-4 非線形型Drucker-Pragerモデル

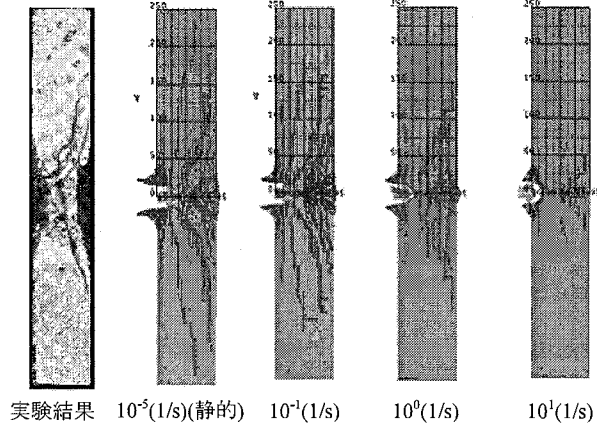


図-5 解析結果

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 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-7 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 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 のケースで生じた裏面剥離を除き、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。

3 先端形状の影響に関する数値シミュレーション

3.1 解析モデル

飛翔体先端形状のモデルを図-8 に示す。検討の対象とした先端形状は、半球型、円錐型(30°), 平坦型の 3 種類である。質量はすべて 50g である。飛翔体の衝突速度は 300m/s, 490m/s の 2 ケースを設定した。

3.2 解析結果

(1) 表面破壊に及ぼす影響

先端形状が表面破壊深さに及ぼす影響を調べるため、図-9 に示すように表面破壊深さに対して十分に厚い、縦 50cm, 厚さ 20cm のコンクリート板モデルを作成した。1要素の大きさは、図-3 に示したモデルと同じく 2.5mm×2.5mm であり、全要素数は 16000 である。解析で得られた表面破壊深さを表-5 および

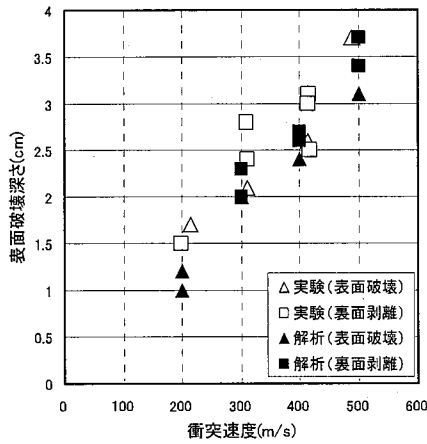


図-6 表面破壊深さに対する実験と解析結果の比較

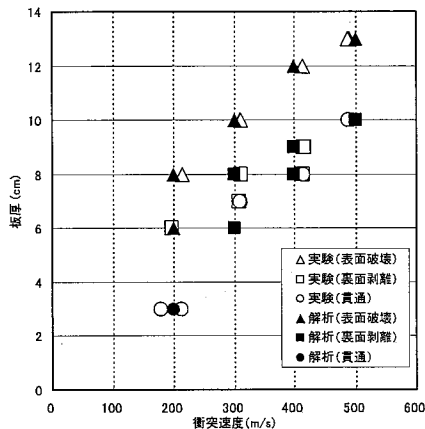


図-7 局部破壊モードに対する実験と解析結果の比較

図-10 に示す。表-5 および図-10 には、既往の実験式のうち、表面破壊深さの推定において先端形状の影響が考慮できる修正 NDRC 式¹⁾による算定結果も示している。本式は、飛行体の寸法・諸元およびコンクリート強度を与えて、表面破壊深さを評価するものである。修正 NDRC 式の表面破壊深さ評価式を次に示す。

$$x = 3.89946 \cdot 10^{-3} \sqrt{NWd(V/d)^{1.8} / \sqrt{f'_c}} \quad x \leq 2d \quad (1a)$$

$$x = \left\{ 3.7873 \cdot 10^{-6} NW(V/d)^{1.8} / \sqrt{f'_c} \right\} \quad x \geq 2d \quad (1b)$$

ここに、 x ：貫入深さ(cm)、 N ：飛行体の先端形状係数、 d ：飛行体の直径(cm)、 V ：飛行体の衝突速度(cm/s)、 f'_c ：コンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 W ：飛行体の質量(kg)である。

先端形状係数 N とは、先端形状が表面破壊深さに与える影響を示したもので、その具体的な数値は、「鋭い」：1.14、「球状」：1.0、「平坦」：0.72 が与えられている。表-5 および図-10 より、数値解析ではいずれの衝突速度においても円錐型、半球型、平坦型

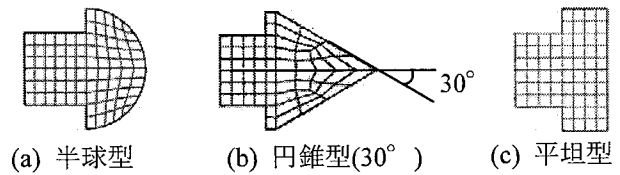


図-8 飛行体先端形状のモデル

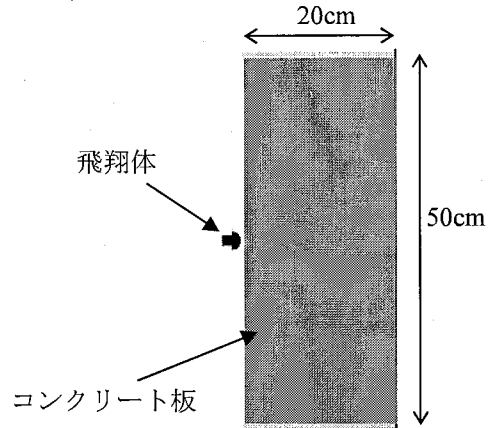


図-9 解析モデル

の順に表面破壊深さが大きいことがわかる。また、修正 NDRC 式も同じ傾向を示している。両者の大きさを比較すると、円錐型はほぼ同等であるが、半球型では約 1cm、平坦型では 1.5cm~2.0cm ほど修正 NDRC 式による算定値の方が大きいことがわかる。図-11 は、各先端形状に対する損傷状態を示したものである。先端形状の相違によらず、衝突速度 300m/s に比べ衝突速度 490m/s の場合には、表面破壊深さが大きくなっているだけでなく、板の内部あるいは裏面の損傷も進行していることがわかる。つまり、半球型および円錐型では、損傷が衝突部前方の局部的領域に進展している。一方、平坦型では、板内部から裏面にわたって損傷の領域が広がっていることがわかる。これは先端形状によってコンクリート板内部に伝播する応力の大きさや方向が異なるためと考えられる。

表-6 は、半球型を基準としたとき他の先端形状による表面破壊深さととの比を示している。修正 NDRC 式による評価では表面破壊深さ比は衝突速度の大小に依存しないことがわかる。数値解析による結果では、円錐型の場合は、衝突速度 300m/s で 1.45、衝突速度 490m/s では 1.29 となっており、速度が大きくなると表面破壊深さ比は低下している。平坦型の場合は、衝突速度 300m/s で 0.43、衝突速度 490m/s で 0.48 であり、表面破壊深さ比は衝突速度とともに多少大きくなっている。すなわち、数値解析と修正 NDRC 式では先端形状の影響はかなり異なることがわかる。

(2) 破壊モードの相違

図-12 は、板厚 8cm のコンクリート板に衝突速度

表-5 表面破壊深さの比較

区分	数値解析		修正NDRC式	
	形状	表面破壊深さ(cm)	形状	表面破壊深さ(cm)
300	半球型	1.95	球状	2.92
	円錐型(30°)	2.82	鋭い	3.11
	平坦型	0.84	平坦	2.47
490	半球型	3.74	球状	4.54
	円錐型(30°)	4.83	鋭い	4.85
	平坦型	1.80	平坦	3.85

表-6 表面破壊深さ比の比較

区分	数値解析		修正NDRC式	
	形状	表面破壊深さ比	形状	表面破壊深さ比
300	半球型	1	球状	1
	円錐型(30°)	1.45	鋭い	1.06
	平坦型	0.43	平坦	0.84
490	半球型	1	球状	1
	円錐型(30°)	1.29	鋭い	1.06
	平坦型	0.48	平坦	0.84

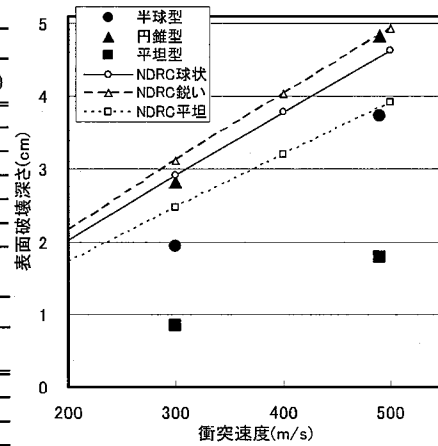


図-10 数値解析と修正NDRC式による表面破壊深さの比較

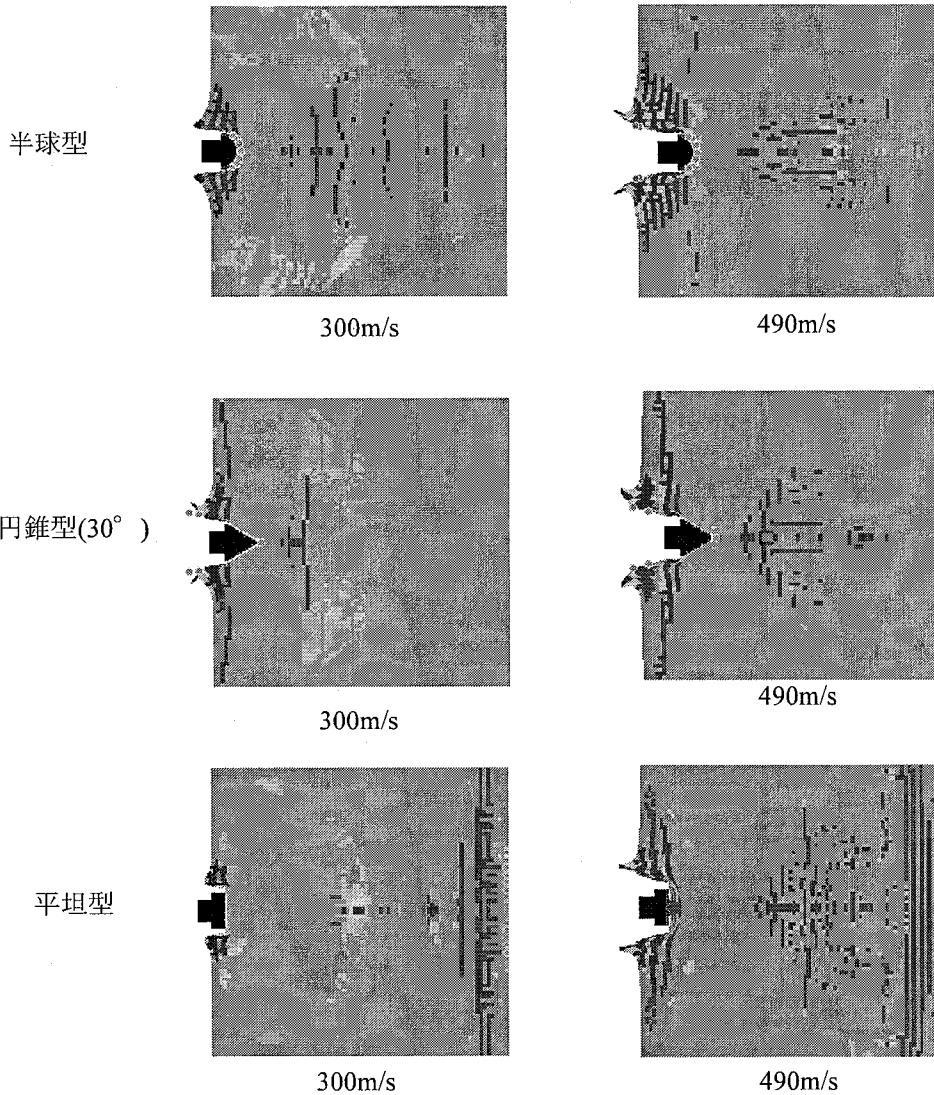


図-11 解析による損傷の比較 (衝突部の拡大図)

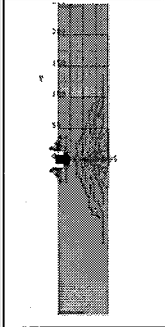
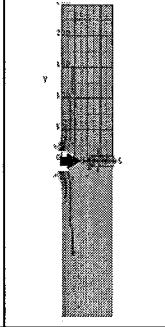
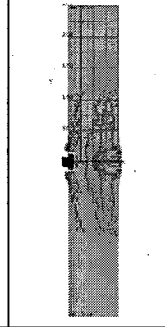
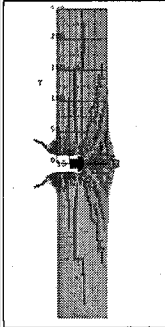
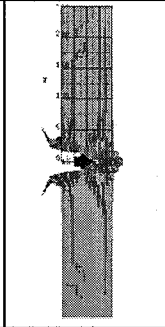
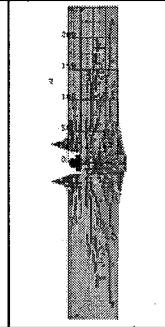
300m/s			
	半球型	円錐型	平坦型
490m/s			
	半球型	円錐型	平坦型

図-12 解析による破壊モードの比較 (板厚: 8cm)

300m/s, 490m/s で衝突させたときの破壊モードの比較である。衝突速度が 300m/s の場合、半球型では衝突部から板の斜めに発達したひび割れによる破壊の領域が発生し、裏面剥離が発生している。円錐型では主に進行方向の非常に狭い範囲に集中して内部から裏面剥離が生じている。一方、平坦型では板内部広くにひび割れが生じており、裏面剥離は円錐型に比較してやや広い範囲で生じている。衝突速度 490m/s の場合は、半球型および円錐型の場合は貫通したが、平坦型で裏面剥離であった。

4. 結言

本研究は、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及ぼす先端形状の影響について、数値解析的検討をおこなったものである。

本研究の成果を要約すると、以下のようになる。

- (1) 剛飛翔体の高速衝突に対するコンクリート板の局部破壊現象を数値シミュレーションする際、コンクリート材料モデルとして非線形型 Drucker-Prager 降伏条件にひずみ速度効果を適切に考慮すると比較的良好にシミュレートできる。
- (2) 数値シミュレーションによる検討を行った結果、表面破壊深さは円錐型、半球型、平坦型の順に大きくなった。なお、修正 NDRC 式による表面破壊深さの評価とは異なる傾向を示しており、今後検討する必要がある。
- (3) 数値シミュレーションにおいて、破壊モードは

先端形状によって破壊の進展が異なった。今後は、実験的検討を行ってこれらの検証を行い、飛翔体の先端形状が応力の伝播やエネルギーの伝達に及ぼす影響について検討する必要がある。

参考文献

- 1) 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
- 2) 土木学会衝撃問題研究小委員会: 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, 平成 6 年 1 月。
- 3) 大野友則: 飛翔体の衝突に対する RC 版の挙動に関する研究の現状, コンクリート工学, pp.20~28, Vol.41, No.4, 2003.4.
- 4) 藤掛一典, 上林勝敏, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤: ひずみ速度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, Vol.86, pp475-481, September October, 1989.