

先端形状が異なる剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の 局部破壊に関する数値シミュレーション

A numerical simulation of the local damage on concrete plate subjected to impacted by different nose shape projectile

三輪幸治*, 別府万寿博**, 伊東雅晴***, 片山雅英****, 大野友則*****

Koji Miwa, Masuhiro Beppu, Masaharu Itoh, Masahide Katayama and Tomonori Ohno

*修(工), 防衛大学校, 理工学研究科学生 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

**博(工), 防衛大学校准教授, 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)

***工修, 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 (〒100-6080 東京都千代田区霞が関 3-2-5)

****博(工), 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 (〒100-6080 東京都千代田区霞が関 3-2-5)

*****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)

Key Words: (nose shape, rigid projectile, high-velocity impact, concrete plate, local damage, numerical simulation)

キーワード: 先端形状, 剛飛翔体, 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. 緒言

物体がコンクリートに高速度で衝突すると局部的な損傷や破壊が発生する。コンクリートの局部破壊に関する研究は、これまで諸外国において数多くの実験が行われており、局部破壊評価式が提案されている。評価式は、飛翔体の質量や速度、剛性および先端形状やコンクリート板の強度、板厚、鉄筋量等が局部破壊に及ぼす影響を考慮して貫入深さ（衝突面に生じる表面破壊の深さ）や裏面剥離発生限界板厚、貫通発生限界板厚などの局部破壊の大きさを予測するものである。評価式のうち、飛翔体の先端形状の影響を考慮している式は、修正 NDRC 式¹⁾、Degen 式²⁾、電力中央研究所の式³⁾、修正 Haldar-Miller 式⁴⁾、UKAEA 式⁵⁾等がある。Degen 式以外の評価式は、修正 NDRC 式が報告された 1976 年以降に提案されたものであり、すべての式には修正 NDRC 式において提案された先端形状係数 N の値がそのまま用いられている。すなわち、飛翔体の先端形状の影響については、修正 NDRC 式が提案されて以降、検討された例は少ない。

著者らはこれまでに、半球型飛翔体を用いた高速衝突実験を行い⁶⁾、コンクリートの局部破壊メカニズムについて数値解析的検討⁷⁾を行っている。また、Chen ら⁸⁾の理論モデルに基づいて、先端形状が表面破壊に及ぼす影響について検討を行っている⁹⁾。しかし、飛翔体の先端形状が板内部や裏面の損傷に及ぼす影響については検討していない。

本研究は、剛飛翔体の先端形状がコンクリート板の局部破壊の相違に及ぼす影響について数値解析的な検討を

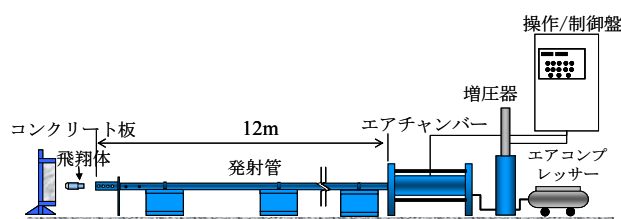


図-1 高圧空気式飛翔体発射装置

行ったものである。まず、剛飛翔体の先端形状が貫入深さやコンクリート板の破壊モードの進展に及ぼす影響を調べるために、半球型、円錐型、平坦型の3種類の先端形状を有する飛翔体を用いて高速衝突実験を行って、先端形状が局部破壊に及ぼす影響について調べた。次に、数値解析を行って、先端形状がコンクリート板の局部破壊のメカニズムに及ぼす影響について考察した。

2. 異なる先端形状の剛飛翔体を用いた高速衝突実験

2.1 実験の概要

実験は、図-1に示す高圧空気式飛翔体発射装置を用いて、剛飛翔体（以後、飛翔体という）を速度約 200m/s でコンクリート板に衝突させた。飛翔体の先端形状は、写真-1に示す半球型、60°の円錐型（以後、円錐型という）、平坦型の3種類である。コンクリート板の設計強度は 25N/mm²であり、寸法は縦 50cm×横 50cm、板厚 5, 7, 9 および 13cm の 4 種類である。板厚 13cm のケースでは、図-2に示すようにひずみゲージを貼付したアクリル棒をコンクリート板の中央に設置し、表面から 6.5cm および 11.5cm の位置における板内部のひずみを計測し

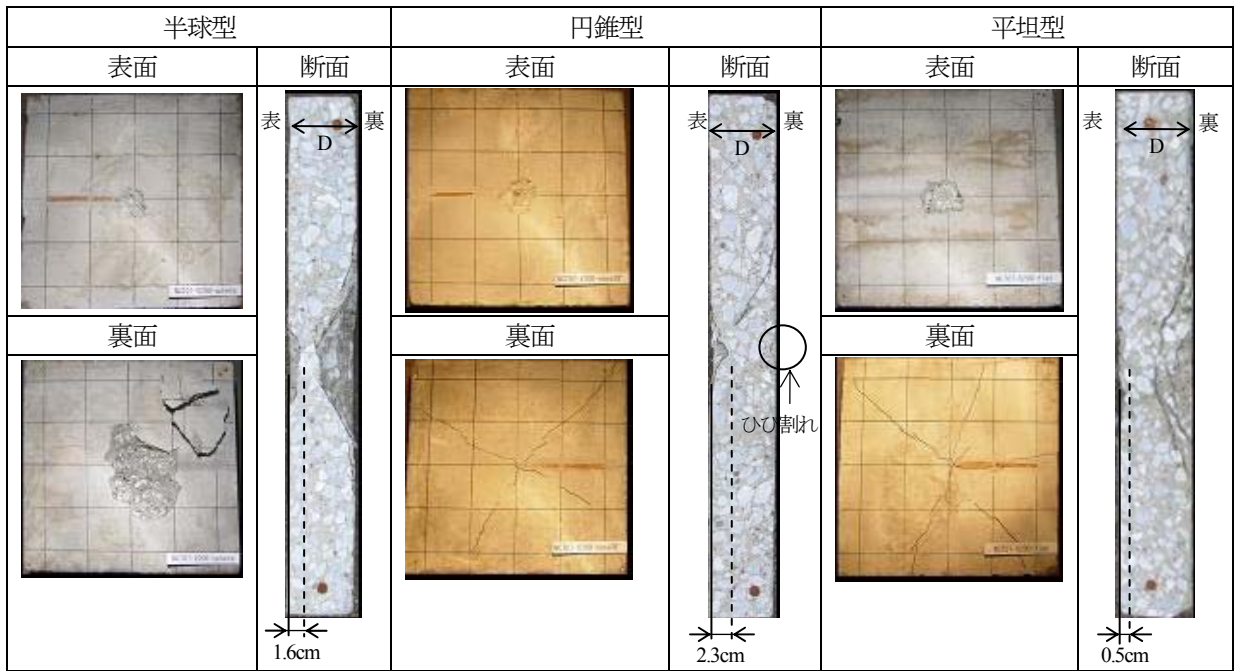


図-3 コンクリート板の損傷状況の比較 (板厚 7cm, 衝突速度約 200m/s)



(a) 半球型 (b) 円錐型 (c) 平坦型

写真-1 飛翔体の先端形状

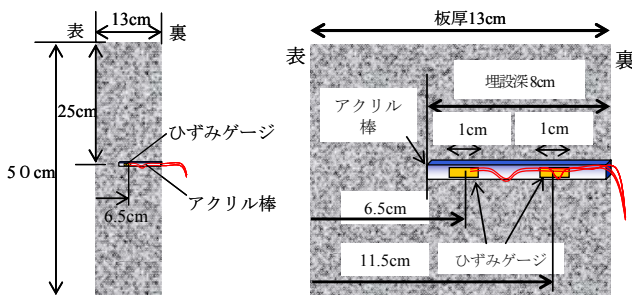


図-2 アクリル棒設置要領 (板厚13cm)

ている。なお、アクリル棒は、コンクリートとの一体化を図るために側面に突起を有している。アクリル棒の弾性係数は約 4.0kN/mm^2 であり、コンクリートの弾性係数 25kN/mm^2 に比べてかなり小さく、コンクリートの挙動を拘束することはないと考えられる。

2.2 実験結果

図-3は、板厚 7cm の場合のコンクリート板の損傷状況である。半球型の場合は貫入深さ 1.6cm の表面破壊と裏面剥離が生じた。円錐型では、貫入深さが 2.3cm であり、板内部から斜め方向にひび割れ (以後、斜めひび割れという) が生じた。また、わずかであるが、裏面にもひび割れが生じた。平坦型では貫入深さが 0.5cm であり、板

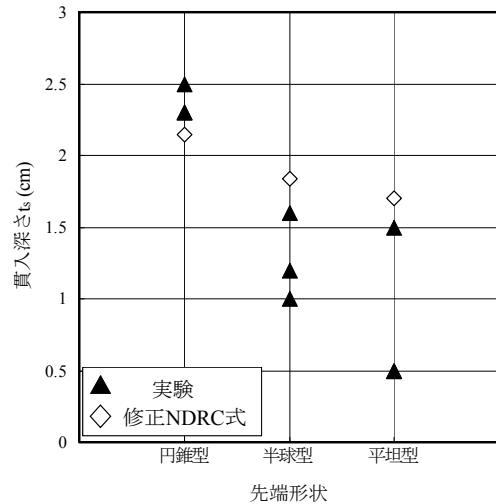


図-4 各先端形状の貫入深さの比較

内部から裏面に多くのひび割れが生じた。ちなみに、円錐、平坦の場合は、裏面剥離は生じなかった。

図-4は、先端形状の相違による貫入深さを比較したものである。図には修正 NDRC 式を用いて算定した貫入深さも示している。図から、貫入深さは、円錐型、半球型、平坦型の順に大きいことがわかる。修正 NDRC 式による計算値は実験結果に比べて半球型、平坦型では大きく、円錐型ではやや小さく評価しており、実験値と差異があることがわかる。

図-5は、コンクリート板の板厚と破壊モードの関係を示している。板厚 13cm, 9cm の場合は、どの先端形状とも破壊モードは表面破壊であったが、板厚 7cm の場合は、図-3 に示したように半球型では裏面剥離、円錐型および平坦型では表面破壊であり、半球型の破壊が最も進展した。また、板厚 5cm では半球型、円錐型は貫通したが、

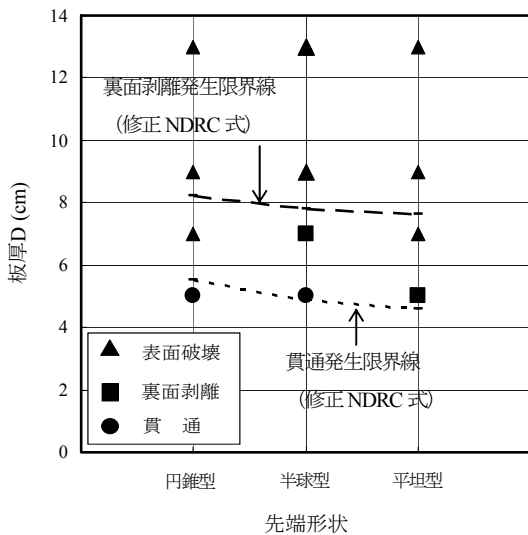


図-5 コンクリート板厚と破壊モードの関係

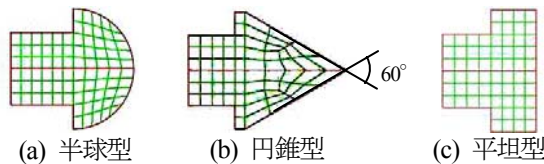


図-6 飛翔体先端形状のモデル

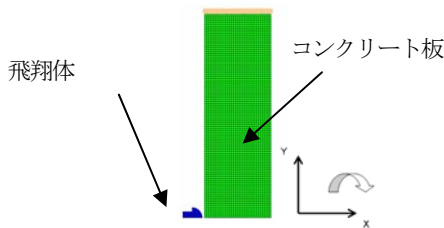


図-7 解析モデル(板厚7cm)

平坦型は裏面剥離であった。すなわち、先端形状の違いによって、裏面に生じる破壊の大きさが異なることがわかる。また、参考のために修正 NDRC 式による裏面剥離・貫通限界板厚と比較すると、半球型では裏面剥離・貫通限界板厚ともに実験と一致している。円錐型の場合は、修正 NDRC 式による裏面剥離限界板厚は 8.2cm であり、板厚 7cm のときは裏面剥離すると判定されるが、実験では裏面剥離は生じなかった。また、板厚 5cm のときは修正 NDRC 式の判定と同じく貫通が生じた。平坦型では、板厚 7cm の場合に修正 NDRC 式では裏面剥離と判定されるが、実験では剥離は生じなかった。以上の結果は、飛翔体の先端形状の相違により、コンクリート板の破壊モードや板内部の損傷状況が変化することを示している。

3. 先端形状が局部破壊に及ぼす影響に関する数値シミュレーション

3.1 解析モデル

表-1 コンクリートの解析定数

状態方程式	線形型	
降伏条件	Drucker-Prager降伏基準	
破壊基準	引張破壊	
エロージョンひずみ	2.5	
圧縮強度(N/mm ²)	静的: 25.0	動的(10 ¹ (1/s)): 42.5
引張強度(N/mm ²)	静的: 2.5	動的(10 ¹ (1/s)): 10.2
弾性係数(kN/mm ²)	25.5	
ポアソン比	0.15	
密度(g/cm ³)	2.3	

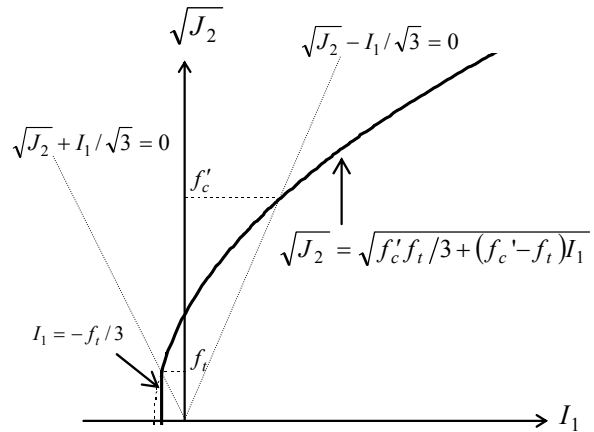
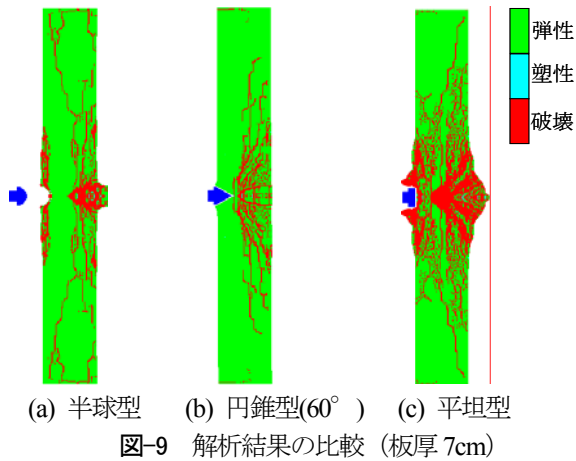


図-8 非線形型Drucker-Pragerの降伏条件

解析は、板厚 7cm, 13cm に半球型, 円錐型, 平坦型の飛翔体を衝突速度約 200m/s で衝突させた実験ケースに関して、衝撃解析コード AUTODYN Ver.6.0 を用いて 2 次元軸対称系で行った。図-6 に各先端形状のモデルを、図-7 に解析モデルを示す。コンクリート板は 1 要素 1.25mm×1.25mm の大きさと板厚 7cm では 11,200 要素、13cm では 20,800 要素に分割した。表-1 にコンクリートの材料モデルに用いた解析定数を示す。コンクリートの構成則には図-8 に示す Drucker-Prager 降伏条件を用いた。コンクリート材料が衝撃荷重を受けると大きなひずみ速度を示すので¹⁰⁾、解析モデルにはひずみ速度に対応した強度の増加を考慮した。本解析では静的な状態でのコンクリートの圧縮強度は 25N/mm²、引張強度は圧縮強度の 1/10 の 2.5N/mm² とし、ひずみ速度 10¹(1/s) による圧縮強度の増加については藤掛ら¹⁰⁾の式、引張強度については Ross ら¹¹⁾の式に基づいて考慮した。なお、飛翔体のモデルに用いた鋼材は弾性体とした。

3.2 解析結果

図-9 に、板厚 7cm の破壊モードを示す。貫入深さは半球型, 円錐型および平坦型に対してそれぞれ 0.9cm, 2.1cm, 0.5cm となり、実験とはほぼ一致した。また、図-3 に示した実験における 1) 半球型の場合は板内部から裏面にひび割れが発生し、裏面に剥離領域が生じていること、2) 円錐型の場合は板内部から裏面に斜め方向にひび割れが発生していること、3) 平坦型では、裏面付近にかなり多くのひび割れが生じていること、を比較的良好に再現し

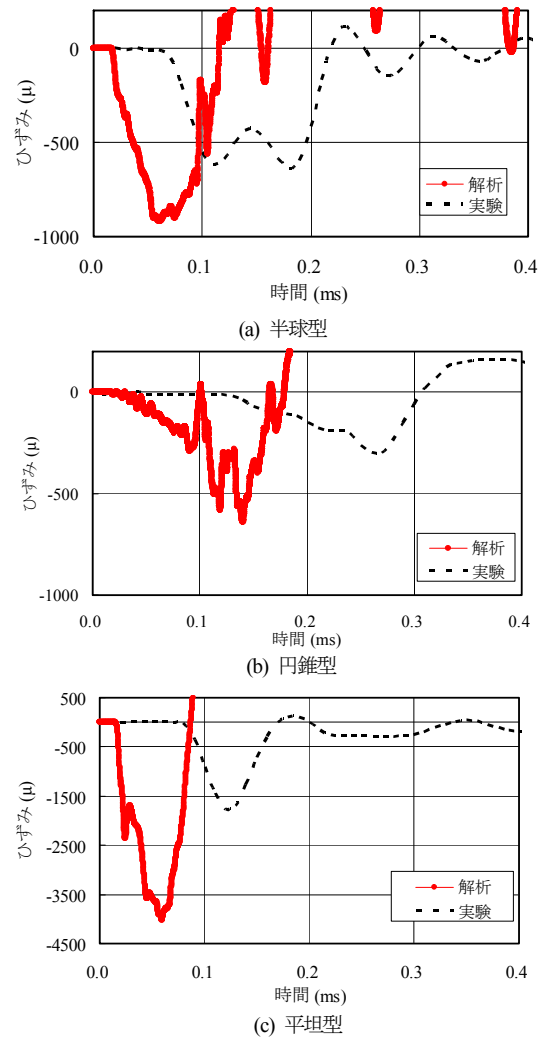


ている。

図-10に、板厚 13cm の場合に板内部 (表面から 6.5cm の位置) に生じたひずみについて、解析値と実験値を比較して示す。解析では、実験と同じく板の表面から 6.5cm の位置におけるひずみを測定するために変位出力点を 2 点設定し、2 点間の変位差からひずみを計算している。飛翔体の衝突 ($t=0\text{ms}$) 後、発生時間は異なるが解析および実験ともに圧縮ひずみが生じている。各先端形状とも解析値は実験に比べて 1.5~2 倍程度大きい。その最大値は平坦型、半球型、円錐型の順に大きくなる傾向を再現することができた。また、半球、平坦型の場合は衝突後、急に圧縮ひずみが立ち上がり、円錐型の場合は緩やかにひずみが増加して最大値に達しており、解析でもこれらの特徴を比較的良く再現していることがわかる。以上より、先端形状の相違が板内部の損傷状況やひずみに与える影響について比較的良好に再現できるといえる。

3.3 先端形状が破壊メカニズムに及ぼす影響

図-11に、半球型飛翔体が衝突したときのコンクリート板の損傷過程と圧力分布の時間変化を示す。これより、半球型の場合は、衝突 ($t=0\text{ms}$) 後、時刻 $t=0.010\text{ms}$ には最大圧力約 380MPa の正圧領域が飛翔体の衝突部分から円形状に広がっていることがわかる。その後 $t=0.033\text{ms}$ には、板の裏面付近に負圧およびひび割れが生じていることがわかる。この負圧とひび割れは、衝突によって生じた圧縮応力波 (正圧) が裏面で自由端反射して負圧に転じ、コンクリートの引張強度を超えてひび割れが生じたものである。 $t=0.11\text{ms}$ では飛翔体はさらに貫入し、裏面の負圧領域が拡大してひび割れも進展し、 $t=0.18\text{ms}$ には、板内部から裏面まで斜め方向にひび割れが到達して剥離領域が形成されたと考えられる。図-12に、円錐型飛翔体の場合の損傷過程と圧力分布の変動を示す。円錐型の場合は、衝突直後の $t=0.014\text{ms}$ では最大約 80MPa の正圧が飛翔体の頂点部分付近にのみ集中している。 $t=0.072\text{ms}$ では、半球型の場合と同じく板裏面で圧縮応力波が反射して板の裏面付近には負圧領域が生じているが、ひび割れの発生は半球型の場合に比べてかなり小さいことがわ



かる。これは、円錐型の場合は半球型と比べて、衝突直後の飛翔体とコンクリートとの接触領域がかなり小さいため、応力波が裏面に伝播する範囲が狭くなったためと考えられる。時刻 $t=0.096\text{ms}$ には、板の内部から斜めひび割れが飛翔体の頂点付近を中心として生じている。このとき、飛翔体の頂点部分が接触しているコンクリートは最大圧力 400MPa まで大きくなっていることがわかる。 $t=0.16\text{ms}$ には、斜めひび割れが板の裏面方向に進展しているが、最終的には裏面まで到達しなかったため剥離領域は形成されていないと判定した。平坦型の場合は、図-13に示すように時刻 $t=0.005\text{ms}$ には飛翔体が接触している部分付近のコンクリートは 400MPa~800MPa の高圧状態となり、 $t=0.025\text{ms}$ には圧力は 100MPa~270MPa まで低下しているものの、正圧領域が板内部から裏面まで拡大している。 $t=0.060\text{ms}$ 以降にひび割れが板裏面付近で広く生じたのは、広い正圧領域が板裏面で負圧に転じたためと考えられる。また、 $t=0.14\text{ms}$ には斜め方向のひび割れが板の表面から内部まで生じているが、衝突直後に裏面で生じたひび割れと連結していないため、剥離領域は形成されていないと判定した。すなわち、半球型の場合は圧縮応力波が裏面で自由端反射したことと板内部

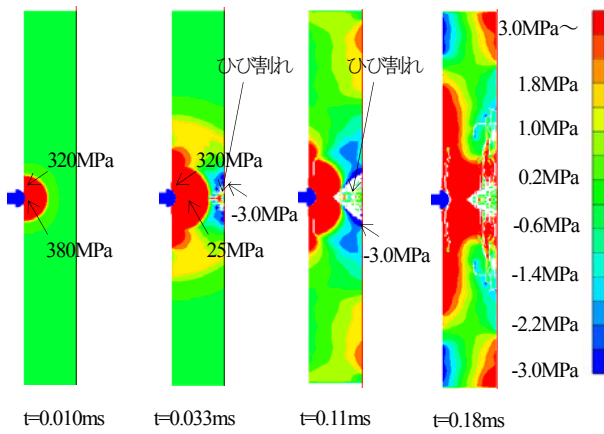


図-11 損傷および圧力分布の時間変化
(半球型：板厚 7cm)

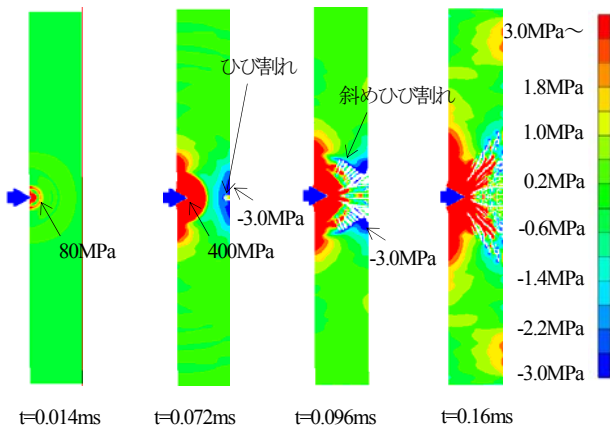


図-12 損傷および圧力分布の時間変化
(円錐型：板厚 7cm)

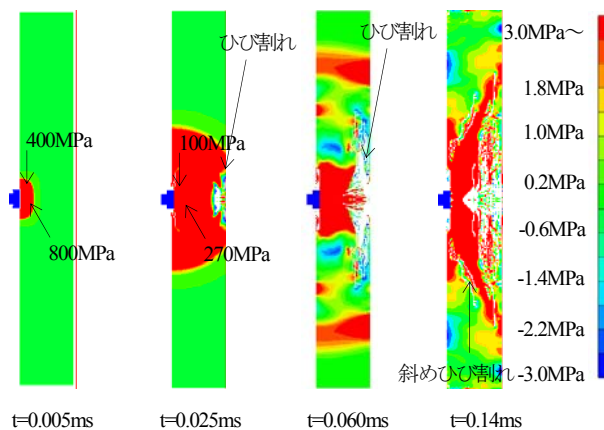


図-13 損傷および圧力分布の時間変化
(平坦型：板厚 7cm)

から生じた斜めひび割れが連結するため裏面剥離が生じるが、円錐型の場合は斜めひび割れが内部から生じるが裏面付近の損傷が小さく、ひび割れが連結しないため剥離せず、平坦型の場合は裏面付近の損傷は大きいものの表面から生じる斜めひび割れが裏面まで達していないため裏面剥離が生じないことを示している。

図-14 に、板厚 7cm の場合の衝突荷重と時間の関係を示す。衝突荷重は、飛翔体の運動量を微分して求めた。半球型では、荷重は衝突後徐々に増加し、先端部分が全

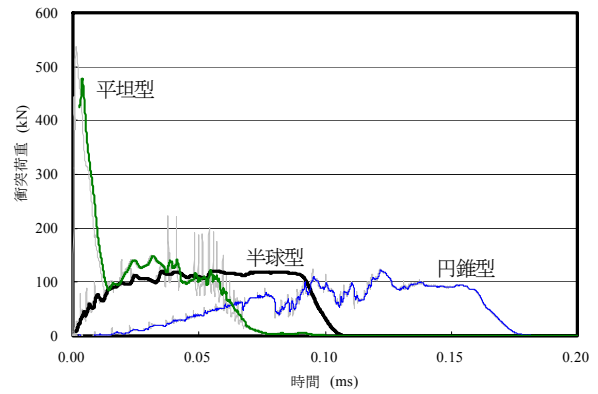


図-14 衝突荷重～時間関係の比較

て貫入した時点で 131kN に達した。円錐型では飛翔体の貫入にともなって増加し、半球型と同様に先端部分が完全に貫入したときに最大荷重 125kN を示した。平坦型の場合は、衝突とほぼ同時に最大衝突荷重 537kN となった。これは、衝突荷重が飛翔体とコンクリート板の接触面積の大きさにより変化するため、衝突直後の接触面積が大きい平坦型では円錐型や半球型に比べて約 5 倍の最大荷重を生じたものと考えられる。すなわち、先端形状の相違によって最大衝突荷重や荷重特性がかなり異なることがわかる。また、各形状の力積は半球型 $10.05\text{N}\cdot\text{s}$ 、円錐型 $9.98\text{N}\cdot\text{s}$ 、平坦型 $9.55\text{N}\cdot\text{s}$ となり、形状による違いはほとんどなかった。

図-15 に、衝突後の飛翔体の速度の時間変化を示している。半球型では、衝突後からほぼ線形に減少し、 $t=0.09\text{ms}$ には貫入が終了 (0m/s) し、その後跳ね返った。円錐型では衝突後、緩やかに減速して約 0.15ms で 0m/s になった。平坦型では、速度は衝突直後から急激に減少し $t=0.06\text{ms}$ には 0m/s になった。また、速度を積分すると、貫入深さは、半球型：0.9cm、円錐型：2.1cm、平坦型：0.5cm である。すなわち、衝突直後の接触面積が大きい平坦型は、半球型や円錐型と比べて大きな抵抗力を受けて、速度は急激に減少するので貫入深さは小さくなり、衝突直後の接触が飛翔体の頂点だけである円錐型は、半球型や平坦型と比べて飛翔体を受ける抵抗力は小さく、貫入にともなって徐々に抵抗力が増えるため、速度は緩やかに減少するので貫入深さが大きくなった、といえる。

図-16 に、飛翔体の衝突によるコンクリート板の塑性仕事と時間の関係を示す。飛翔体の初期運動エネルギーは約 940J であり、コンクリート板の塑性仕事は最終的に半球型では約 820J、円錐型では 630J、平坦型では約 835J となり、平坦型、半球型、円錐型の順に大きいことがわかる。すなわち、コンクリートの塑性に消費されるエネルギーは平坦型と半球型はほぼ同程度であり、円錐型に比べてかなり大きく、板の内部の損傷は半球型や平坦型が円錐型に比べて大きいといえる。

以上より、先端形状の相違によりコンクリートとの接触状況が異なると衝突荷重の特性も異なるため、貫入深

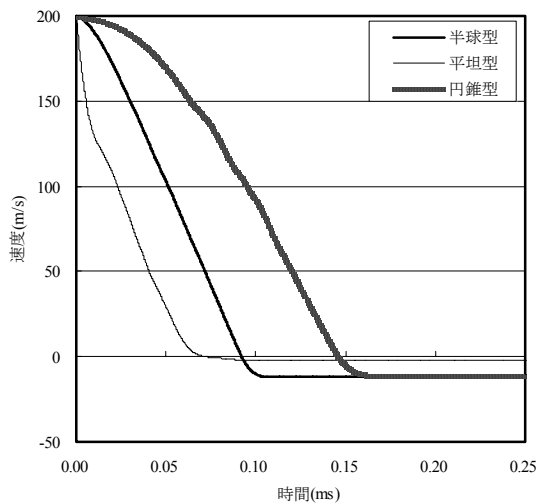


図-15 速度の変化の比較

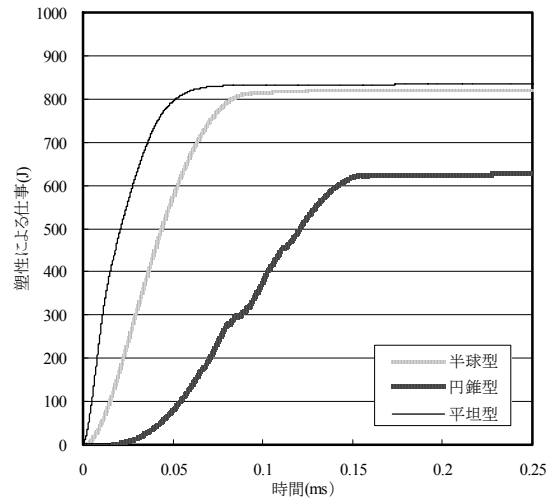


図-16 塑性による仕事の比較

さや板の損傷の状況が変化しているといえる。裏面剥離が半球型の場合においてのみ発生したのは、半球型では、1)板の内部や裏面における損傷領域がある程度大きいこと、2)斜めひび割れが裏面のひび割れと連結すること、によって剥離が生じていると考えられる。また、円錐型では板内部からの斜めひび割れが裏面付近まで進展するものの、板内部や裏面の損傷が小さく、ひび割れが連結しにくいいため剥離しない、平坦型では、板内部や裏面の損傷領域は最も大きい斜めひび割れが裏面付近まで到達しないため剥離が生じない、ことが考えられる。

4. 結言

本研究は、異なる先端形状の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ついて数値解析的検討を行ったものである。本研究の成果をまとめると以下ようになる。

- (1) 数値シミュレーションにより、先端形状の相違が板内部の損傷状況やひずみ応答に及ぼす影響について比較的良く再現できた。
- (2) 半球型の場合は 1)板の内部や裏面の損傷がある程度大きいこと、2)斜めひび割れが裏面のひび割れと連結すること、によって裏面剥離が生じていると考えられるが、円錐型は板内部からの斜めひび割れが裏面付近まで進展するものの板内部や裏面の損傷が小さいこと、平坦型は板内部や裏面の損傷領域は最も大きい斜めひび割れが裏面付近まで到達しないこと、によって裏面剥離が生じにくい、と考えられる。

参考文献

- 1) Kennedy, RP. : A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects, Nuclear Engineering and Design, 37, pp.183-203, 1976.
- 2) Degen, PP. : Perforation of Reinforced Concrete Slabs by Rigid

- Missiles, Journal of the Structure Division, Proceedings of ASCE, Vol.106, No.ST7, pp.1623-1642, 1980.
- 3) 電力中央研究所:飛来物の衝突に対するコンクリート構造物の耐衝撃設計手法, 電力中央研究所報告 U24, 1991.
- 4) Haldar, A. and Miller, FJ. : Penetration depth in Concrete for Nondeformable Missiles, Nuclear Engineering and design, 71,1982.
- 5) Barr, P.: Guidelines for the design, assessment of concrete structures subjected to impact, UK Atomic Energy Authority, HMSO, London, 1990.
- 6) 別府万寿博, 三輪幸治, 大野友則, 塩見昌紀: 鋼製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関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol.63, No.1, pp.178-191, 2007.
- 7) 別府万寿博, 三輪幸治, 伊東雅晴, 片山雅英, 大野友則: 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発生メカニズムに関する数値解析的検討, 構造工学論文集, Vol. 53A, pp. 1293-1304, 2007.
- 8) Li, QM. and Chen, XW.: Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile, Int. J. of Impact Engrg., pp.93-116, 28, 2003.
- 9) 三輪幸治, 別府万寿博, 大野友則: 剛飛翔体の高速衝突によって生じるコンクリート板の表面破壊に先端形状が及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol. 54A, pp. 989-998, 2008.
- 10) 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, pp.109-123, 2001.
- 11) Ross, CA. : Thompson, PY. and Tedesco, JW. : Split-hopkinson pressure-bar tests on concrete and mortar in tension and compression, ACI Material Journal, Vol.86, pp.475-481, 1989.