

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

A numerical study on mechanism of the local damage of concrete plate subjected to impact by rigid projectile

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

*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)

**防衛大学校理工学研究科前期課程学生, 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)

***工修, 伊藤忠テクノソリューションズ(株), 科学システム事業部(〒100-6080 東京都千代田区霞ヶ関 3-2-5)

****博(工), 伊藤忠テクノソリューションズ(株), 科学システム事業部(〒100-6080 東京都千代田区霞ヶ関 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)

This study presents mechanism of the local damage of concrete plate subjected to high velocity impact by rigid projectile. First, characteristics of the local damage of concrete plate subjected to collision by rigid projectile were explained. Then, a numerical model which can describe dynamic behavior of concrete was investigated in terms of combination of failure model and strain rate effect of concrete. Based on the proposed numerical model, mechanism of the local damage of concrete plate was illustrated. Finally, energy transition of initial kinetic energy of projectile and energy consumption in eroded area were discussed

Key Words: high velocity impact, local damage, concrete plate, rigid projectile

キーワード: 高速衝突, 局部破壊, コンクリート板, 剛飛翔体

1. はじめに

剛飛翔体が高速度でコンクリートに衝突すると, 局所的な損傷や破壊が発生する. コンクリートの局部破壊は, 飛翔体の質量, 速度, 剛性および先端形状の影響を受けるため, 飛翔体の諸元やコンクリートの特性を変化させて, 破壊モードとの関係を調べる研究が多く行われている¹⁾⁻⁶⁾. また, 実験結果に基づいてコンクリートの局部破壊予測式も提案されている. しかしながら, これらの予測式によって求められる局部破壊の程度を比較すると, かなりの差異があることがわかっている. これは, 実験条件やコンクリートが有するばらつきなどが結果に影響したものと考えられている.

著者らは, 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対する防護設計法を確立するため, 実験および理論解析的な検討を進めている^{7),8)}. 先に述べたばらつきの原因を解明し防護方法を検討するためには, 高速衝突を受けるコンクリートの局部破壊の発生メカニズムを解明することが不可欠であり, このためには数値解析が有効な手段であると考えられる. 近年, 離散モデ

ルの一つである個別要素法を用いて衝撃荷重を受けるコンクリート構造物の破壊シミュレーション^{9),10)}が行われ, その有用性も示されている. しかし, 個別要素法では要素の初期配列に応じてバネ定数を求める必要があるなど解決すべき問題¹¹⁾も少なくない. 一方, 連続体力学に基づいた有限要素法(FEM)によって, コンクリートのひび割れ, 剥離および飛散をともなう表面破壊, 裏面剥離および貫通現象を数値的に表現することは極めて困難であるといわれている¹²⁾. この理由は, 解析における構成モデルにおいて, 材料の強非線形および不連続挙動を考慮しなければならないためであり, 例えば陰解法に基づいたFEM解析では安定して計算を行うことも難しい. そのため, 計算を中断して, 再び要素を分割するなど特別な工夫を要するが, 数万回以上の時間ステップを必要とする衝撃解析を行うことは現実的に不可能である. そこで, 衝撃解析に適した陽解法を改良して, これらの破壊をシミュレートする必要がある.

本研究は, 有限差分コードのAUTODYNを用いて, 剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリートの局部破壊をシミュレートできる数値モデルを検討し, 局部破壊の

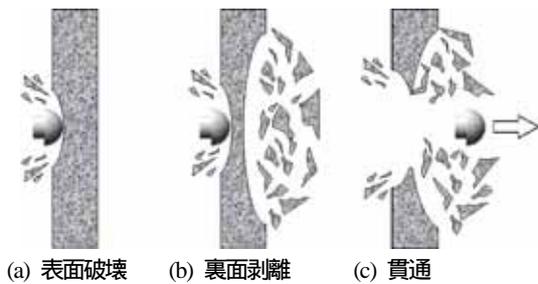


図-1 局部破壊の種類

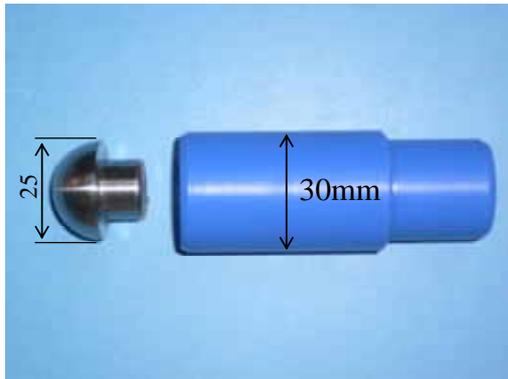


写真-1 飛翔体および固定具

表-1 実験ケース

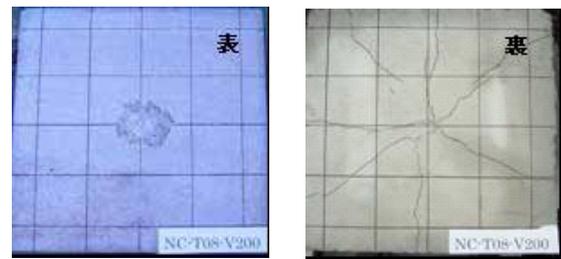
| 板厚 (cm) | 速度 (m/s) | 板厚 (cm) | 速度 (m/s) |
|---------|----------|---------|----------|
| 3 | 180 | 8 | 415 |
| 3 | 210 | 9 | 420 |
| 6 | 200 | 10 | 310 |
| 7 | 310 | 10 | 490 |
| 8 | 210 | 12 | 415 |
| 8 | 310 | 13 | 490 |

発生メカニズムを調べたものである。有限差分法は、弾性から大変形挙動まで比較的容易に表現でき、計算時間を短縮できる利点がある。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、コンクリートの構成モデルやひずみ速度効果が解析結果に与える影響を調べた。次に、表面破壊、裏面剥離および貫通の数値シミュレーションを行い、これらの損傷過程や損傷の発生メカニズムを調べた。最後に、飛翔体が衝突前に有していた運動エネルギーと局部破壊でなされる塑性仕事との関係や、コンクリート内部で破壊に消費されるエネルギーの特徴について検討を行った。

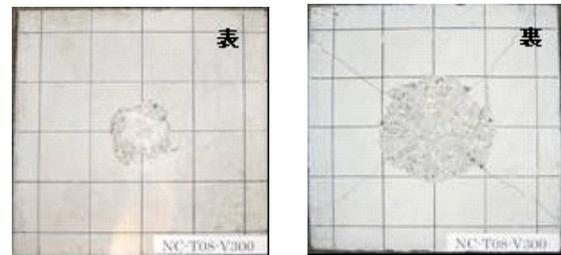
2. 剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の局部破壊の特徴^{7),8)}

2.1 実験の概要

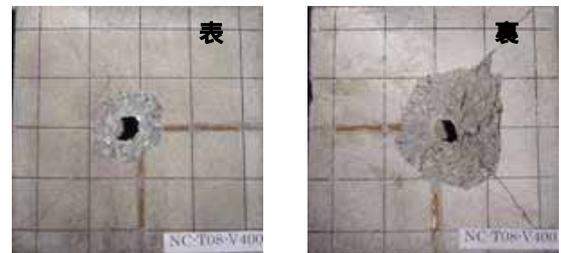
鋼製飛翔体を写真-1に示す。飛翔体はナイロン製の固定具に組み込まれてエアチャンパーに挿入され、その後、



(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

固定具とともに発射される。用いた飛翔体の諸元は、材質：鋼材 (SS400)、先端形状：半球型、直径：25mm、質量：50gである。供試体は、普通強度 (圧縮強度 25N/mm^2) コンクリートを用いて無筋コンクリート板供試体を作製した。コンクリート板の寸法は縦50cm×横50cmとし、数種類の板厚を作製した。実験ケースを表-1に示す。コンクリート板は、上下2辺をクランプで固定した。

2.2 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-1に示すように表面破壊、裏面剥離、貫通の3種類の破壊モードに区分される³⁾。写真-2に、剛飛翔体を板厚 8cm のコンクリート板に衝突させたときに生じた表面破壊、裏面剥離、貫通の状況を示す。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 のときより大きな裏面剥離が生じるとともに貫通した。

2.3 破壊の特徴

写真-3は、表面破壊の破壊状況 (衝突速度 310m/s、板厚 10cm) を高速ビデオカメラで撮影 (12500コマ/秒)

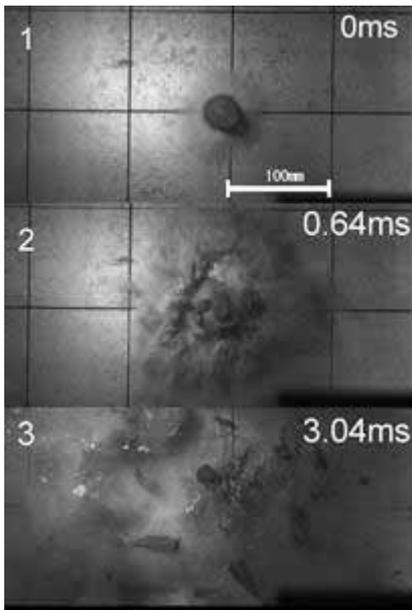
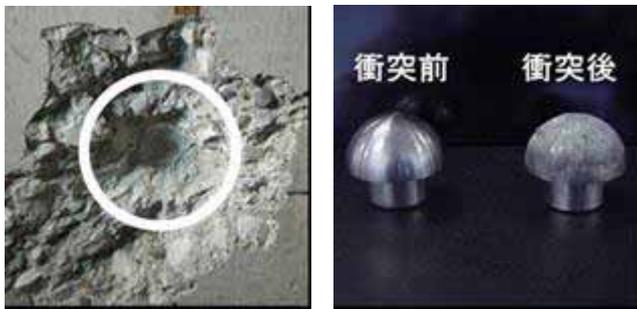


写真-3 表面破壊の映像



(a) コンクリート板接触部 (b) 飛翔体頭部

写真-4 衝突後の飛翔体の状況

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ていることがわかる。写真-4は、実験後の供試体と飛翔体の損傷を示している。写真-4(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んだことを示している。写真-4(b)より、衝突後の飛翔体に変形は生じていないことが確認できる。

写真-5は、裏面剥離したコンクリート板（衝突速度 310m/s、板厚 8cm）を切断したものである。これより、表面破壊のくぼみの中から斜めに発達した大きなひび割れが確認できる。

3. コンクリート板の局部破壊シミュレーション

ここでは、有限差分法に基づいた衝撃解析コード AUTODYN Ver.6 を用いて、コンクリート板の局部破壊をシミュレートできる数値モデルの検討を行い、局部破壊の発生メカニズムを調べる。



写真-5 断面の破壊状況（裏面剥離）

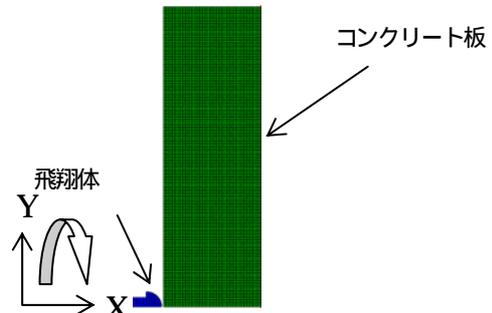


図-2 解析モデル

3.1 解析の概要

(1) 解析モデル

解析モデルを図-2に示す。モデルは2次元軸対称系で作成した。コンクリート板は、1要素あたり 1.25mm×1.25mm の大きさで 12,800 要素に分割した。飛翔体は 28 要素に分割した。コンクリートの弾性係数は、 $25.5 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ 、ポアソン比は 0.15 とした。

(2) 降伏とひび割れ発生基準

飛翔体は鋼製であり、実験後に変形は生じていなかったため弾性体としてモデル化した。コンクリートには Drucker-Prager の降伏基準を適用した。写真-3, 4 に示した破壊状況からわかるように、衝突部には大きな圧縮力が作用し、この部位の解析要素には大きな静水圧（圧力）が発生すると考えられる。通常の Drucker-Prager の降伏基準では、降伏強度は静水圧に比例する形になっているが、藤掛らが行った急速3軸圧縮試験¹³⁾によると、降伏強度は静水圧の増大とともに緩やかに増加することが報告されている。そこで、降伏基準の形状の影響を調べるために図-3に示す線形と非線形のモデルを比較することにした。なお、本研究で用いた非線形モデルは、一軸引張強度 f_t および一軸圧縮強度点 f'_c を通過するように定式化したモデルである。これらの式は、それぞれ次のように表される。

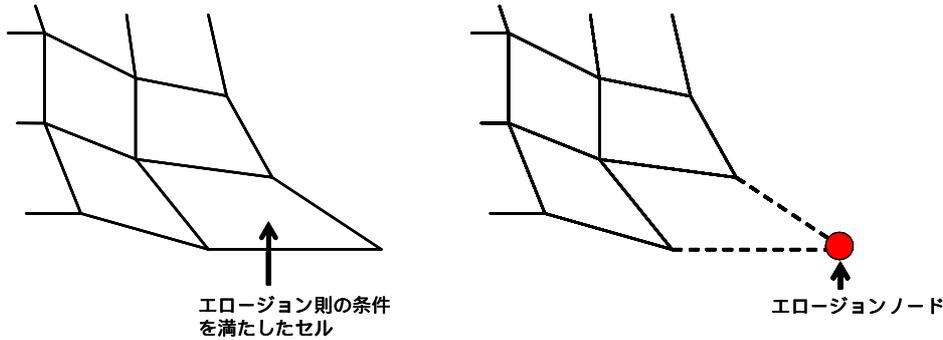


図-4 要素削除（エロージョン）則の概要

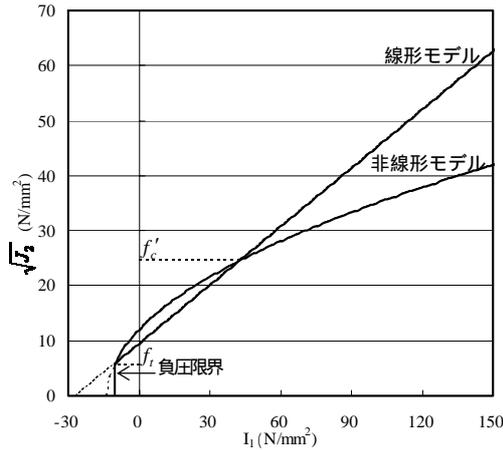


図-3 降伏基準モデル

線形モデル：

$$\sqrt{J_2} + \alpha I_1 = k \quad (1)$$

非線形モデル：

$$\sqrt{3J_2} = \sqrt{f'_c f_t - 3(f'_c - f_t) I_1} \quad (2)$$

ここに、 J_2 ：偏差不偏量の第2成分、 I_1 ：不偏量の第1成分、 α ：材料定数、 k ：降伏基準値、 f'_c 、 f_t ：コンクリートの一軸圧縮および引張強度を示す。

式(1)の材料定数 α と降伏基準値 k は、次式で与えられる¹⁴⁾。

$$\alpha = \frac{f'_c - f_t}{\sqrt{3}(f'_c + f_t)} \quad (3a)$$

$$k = \frac{2f'_c f_t}{\sqrt{3}(f'_c + f_t)} \quad (3b)$$

引張破壊については、図-3に示すように、静水圧が膨張圧となり一軸引張強度に相当する値 ($I_1 = -f_t/3$) に達したときに生じ、その後は強度を失うものと仮定した。

(3) 貫入・貫通現象のモデル化

剛飛翔体がコンクリート板に衝突すると、飛翔体がコンクリートに貫入し、衝突速度がさらに大きくなると貫

通する。このような材料の剥離や飛散挙動を表現するため、要素の相当ひずみ ε_{eff} が設定した値を超えたときに要素を削除する方法を用いた。図-4にこの操作の概要を示している。一般に、この操作のことをエロージョンと呼び、設定したひずみのことをエロージョンひずみという。相当ひずみ ε_{eff} は次式で与えられる。

$$\varepsilon_{eff} = \frac{2}{3} \left[\left(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2 \right) + 5(\varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_2 \varepsilon_3 + \varepsilon_3 \varepsilon_1) - 3\varepsilon_{12}^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

ここに、 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 は主ひずみ、 ε_{12} は主せん断ひずみを示す。

要素を削除した後は、内部のエネルギーを失うが、運動エネルギーは保存させている。なお、エロージョンひずみは、Hayhurst¹⁵⁾らが推奨している2.5を用いた。

(4) ひずみ速度効果

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³⁾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。実験結果より、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1000 μ 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、 $10^{-1} \sim 10^2$ (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¹³⁾

$$\frac{f'_{cd}}{f'_{cs}} = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s} \right)^{0.006 \left[\text{Log} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s} \right) \right]^{1.05}} \quad (5)$$

ここに、 $\dot{\varepsilon}_s$ ：静的載荷時のひずみ速度 [1.2×10^{-5} (1/s)]、 $\dot{\varepsilon}$ ：ひずみ速度 (1/s)、 f'_{cs} ：静的圧縮強度 (N/mm²)、 f'_{cd} ：動的圧縮強度 (N/mm²) である。

動的引張強度の増加率：Rossらの式¹⁶⁾

$$\eta(\dot{\varepsilon}) = \frac{f'_{td}}{f'_{ts}} = \exp \left[0.00126 \left(\text{Log} \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s} \right)^{3.373} \right] \quad (6)$$

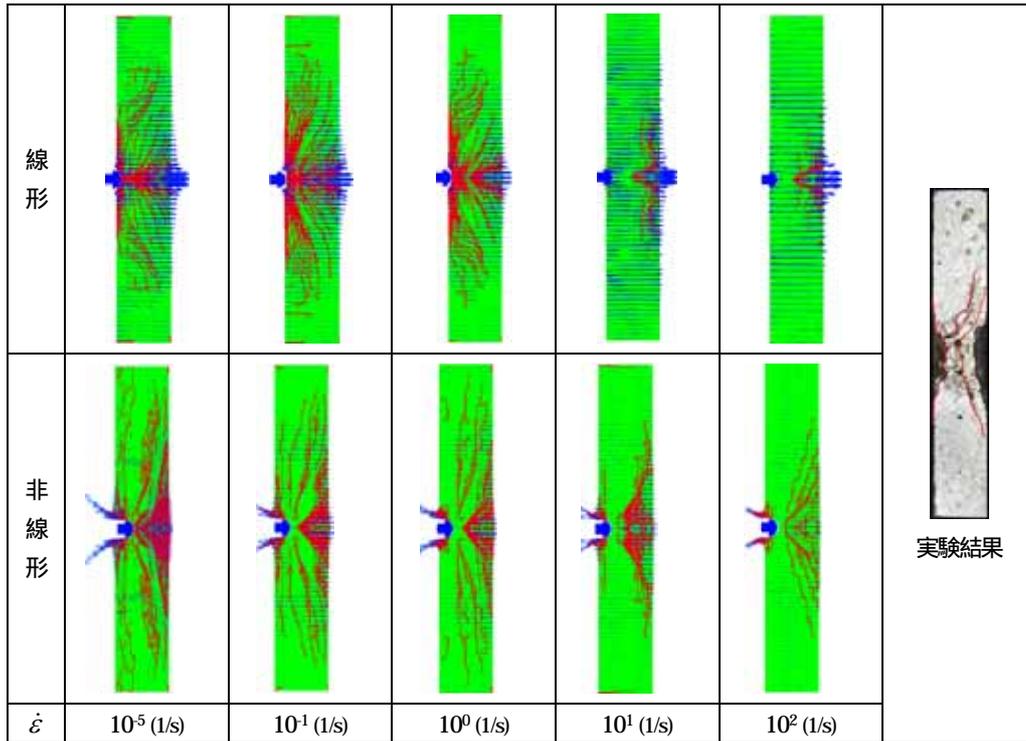


図-5 降伏基準とひずみ速度が解析結果に与える影響（速度のスケール：H 10m/s）

表-2 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 |
| 10 ² | 2.07 | 8.04 | 51.8 | 20.14 |

ここに、 $\dot{\epsilon}_s$:静的載荷のひずみ速度 1.0×10^{-7} (1/s), f'_{ts} :静的引張強度(N/mm²), f'_{td} :動的引張強度 (N/mm²)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/mm^2 の $1/10$ と仮定した。また、 $10^{-5} \sim 10^2$ (1/s) の範囲で5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-2 に解析ケースを示す。通常、解析モデルの各要素でひずみ速度が異なるため、解析の時間ステップごとに全ての要素におけるひずみ速度を求め、強度の増加を考慮する方法が好ましい。しかし、この方法は計算時間が長くなるため、本研究では便宜的に、全要素のひずみ速度は等しいと仮定した。

3.2 降伏基準モデルとひずみ速度効果の影響

飛翔体の衝突速度 310m/s, 板厚 8cm の実験ケース(破壊モード;裏面剥離)を対象として、降伏基準モデルの形状とひずみ速度効果が解析結果に与える影響につい

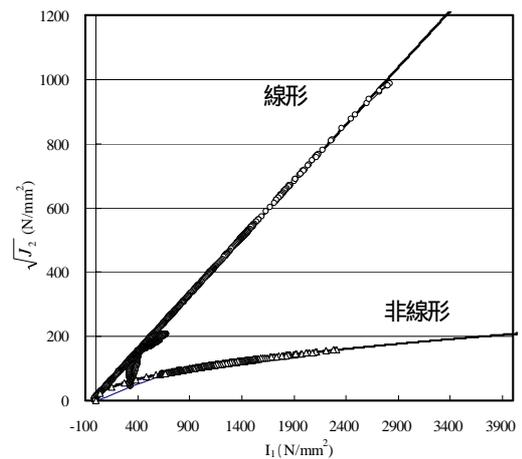
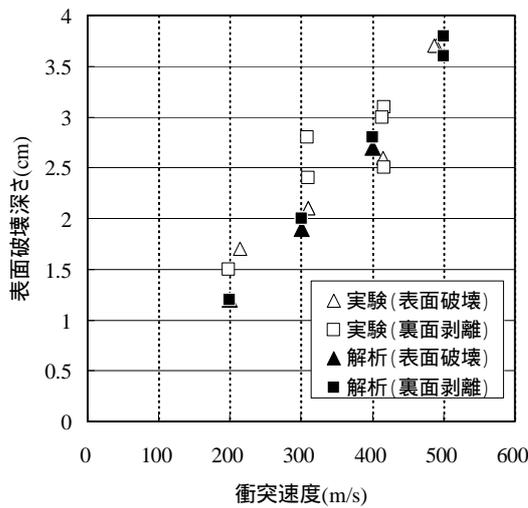


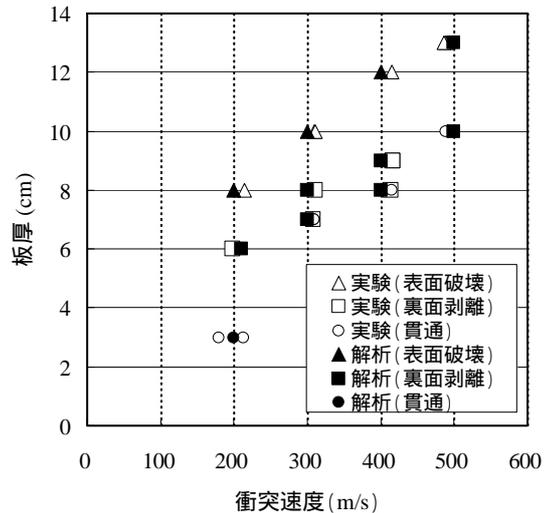
図-6 降伏状態の履歴

て考察する。

図-5 に、解析による最終的な損傷分布を示す。図中には、速度ベクトルも描いている。なお、解析モデル中で塗りつぶされた要素は、ひび割れが発生したことを示している。図から、線形および非線形の降伏基準ともに、ひずみ速度が大きくなるにしたがって、衝突側および裏面の破壊領域が小さくなっていくことがわかる。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-2 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、いずれのひずみ速度においても線形モデルにおける表面破壊の程度が小さいことがわかる。図-6 に、ひずみ速度 10^1 (1/s) を用いて解析したときの点 A (図-7 参照) の降伏履歴を示す。これより、線形モデ



(a) 表面破壊深さ



(b) 破壊モード

図-8 解析と実験の比較

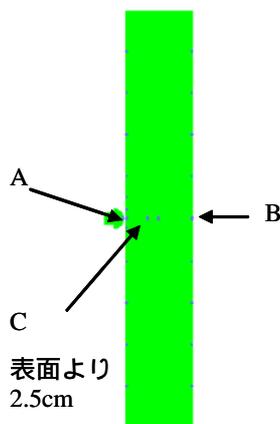


図-7 履歴出力点

ルの方が非線形モデルに比べ、5 倍程度高い降伏応力を示している。すなわち、線形の降伏基準モデルは衝突部を相対的に硬く評価するため、変形が小さくなったものと考えられる。

解析による損傷を実験と比較すると、非線形の降伏基準モデルにひずみ速度 1.0×10^1 (1/s) を考慮すると、図中の速度ベクトルが示すように、剥離したコンクリートが塊となって後方に移動するなど、実験とよく整合している。よって、以下の解析では、非線形 Drucker-Prager 降伏基準、ひずみ速度 1.0×10^1 (1/s) を用いて解析を行う。

図-8 は、表-1 に示した全ての実験ケースをシミュレートした結果である。図-8(a)に示す表面破壊深さより、衝突速度 200m/s のときの表面破壊深さはやや小さいが、全体的にはほぼ良好に実験値を再現できている。図-8(b)の破壊モードをみると、衝突速度 500m/s のケースを除き、解析と実験はほぼ良好に一致している。以上より、衝突速度が大きいケースでは、解析結果は破壊モードを小さめに評価するが、選定した解析条件により実験は比

較的良好に再現されることがわかる。

3.3 破壊のメカニズム

表面破壊、裏面剥離および貫通の各破壊モードの損傷プロセスおよび破壊の発生メカニズムについて考察する。解析は、板厚 8cm のコンクリート板に 200m/s、300m/s、500m/s の速度で衝突させ、それぞれ表面破壊、裏面剥離および貫通が生じた場合である。

(1) 表面破壊 (板厚 8cm、衝突速度 200m/s)

図-9 に、表面破壊の損傷過程を示す。なお、本ケースの最終的な損傷状況 ($t=1.58 \times 10^{-1}$ ms) をみるとコンクリート板の内部にもひび割れは生じているが、ひび割れの進展は止まっており、また裏面が大きく剥がれる挙動は示さなかったため表面破壊と判定した。ちなみに、写真-2 からわかるように、表面破壊の場合でも裏面中央には衝突によって小さなひび割れが生じることがわかっている。図より、飛翔体の衝突直後に衝突点から塑性領域が進展している。時刻 $t=3.49 \times 10^{-2}$ ms では応力波が裏面に到達し、ひび割れが発生している。なお、波動論によれば、コンクリート中の弾性波速度は、次元の場合に $c = \sqrt{E/\rho}$ (E はヤング係数、 ρ は密度) で与えられ、 $c = 3000$ m/s となる。したがって、板厚 8cm では応力波が裏面に到達するのに要する時間は理論上約 2.7×10^{-2} ms である。本ケースでは、塑性化しているため波動の伝播速度がやや遅くなったと考えられるが、理論とほぼ対応している。応力波が裏面に到達するとほぼ同時にひび割れが発生し、最終的には衝突部真裏にひび割れが集中した。

図-10 に、点 A の降伏履歴を示す。飛翔体が衝突した直後 ($t=0.92 \times 10^{-3}$ ms) において点 A は降伏し、降伏曲

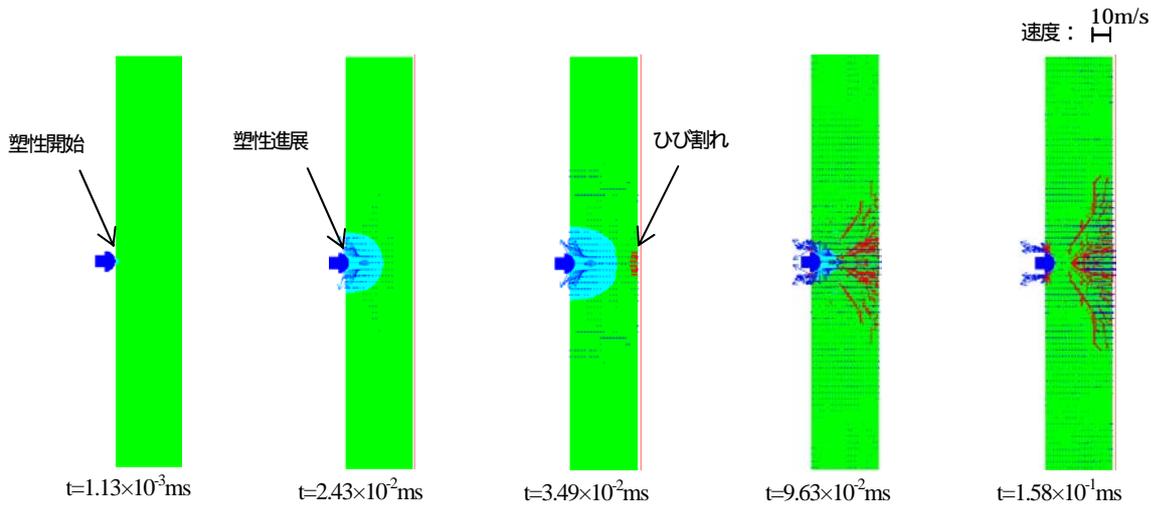


図-9 表面破壊の損傷過程

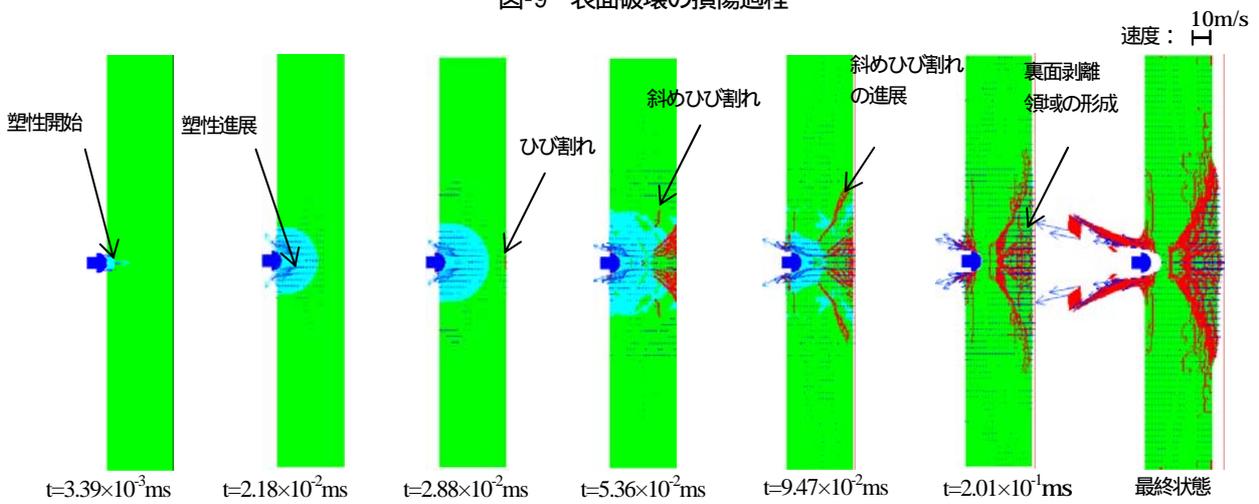


図-11 裏面剥離の損傷過程

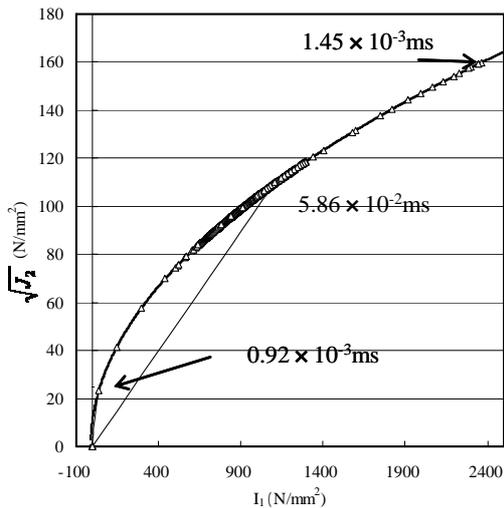


図-10 点Aの降伏履歴 (表面破壊)

面上を上昇している．最大降伏応力は $t=1.45 \times 10^{-3}$ ms のときに生じて，その大きさは約 160 N/mm^2 である．その後，飛翔体が貫入し， $t=5.86 \times 10^{-2}$ ms のとき点 A の要素はエロージョンひずみに達して強度を失った．

(2) 裏面剥離 (板厚 8cm, 衝突速度 300m/s)

図-11 に裏面剥離の損傷過程を示す．裏面剥離の場合も，衝突直後に衝突点から塑性領域が広がり，応力波が裏面に到達すると同時にひび割れが発生している．その後 $t=5.36 \times 10^{-2}$ ms において板内部に斜め方向のひび割れが発生し，上下に進展している．最終的にはこの斜めひび割れが裏面に到達して，裏面剥離したコンクリート塊を形成していることがわかる．

図-12 に点 A, B および C における降伏履歴を示す．点 A では，表面破壊時と同様に衝突直後に降伏して，最大降伏応力は約 200 N/mm^2 まで増加している．なお，点 A は時刻 $t=3.73 \times 10^{-2}$ ms でエロージョンした．裏面の点 B では，まず衝突によって発生した圧縮の応力波が伝達したため時刻 $t=1.98 \times 10^{-2}$ ms の時点では圧縮の静水圧 (圧力) が生じている．その後，裏面における自由端反射によって膨張波が生じて $t=2.85 \times 10^{-2}$ ms で引張限界線に達して強度を失っている．表面から 2.5cm 内部にある点 C では，点 A からやや遅れて $t=1.01 \times 10^{-2}$ ms に降伏しているが， $t=4.06 \times 10^{-2}$ ms には弾性復帰している．

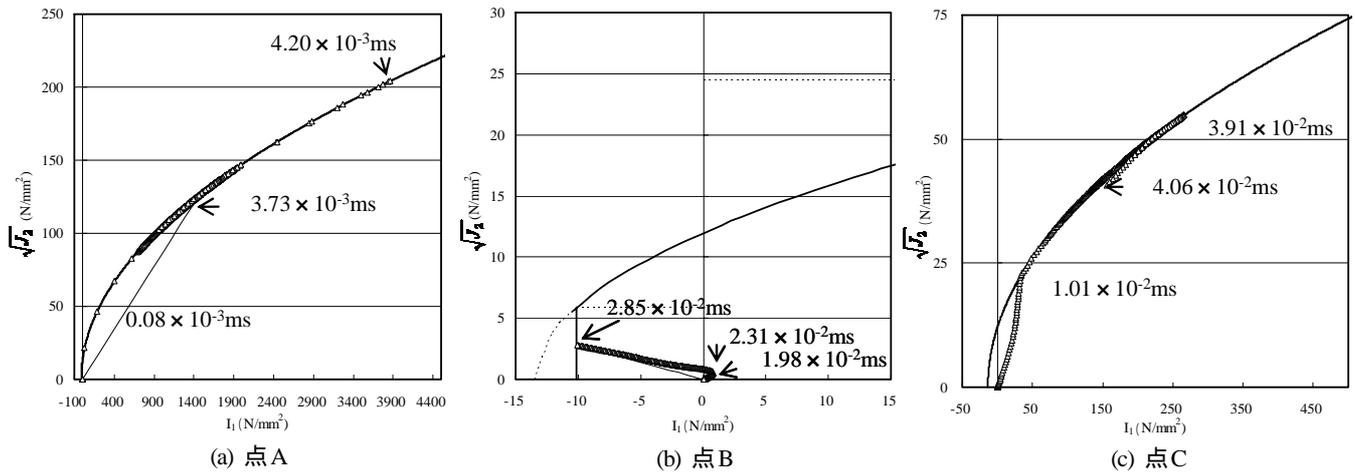


図-12 裏面剥離時の降伏履歴

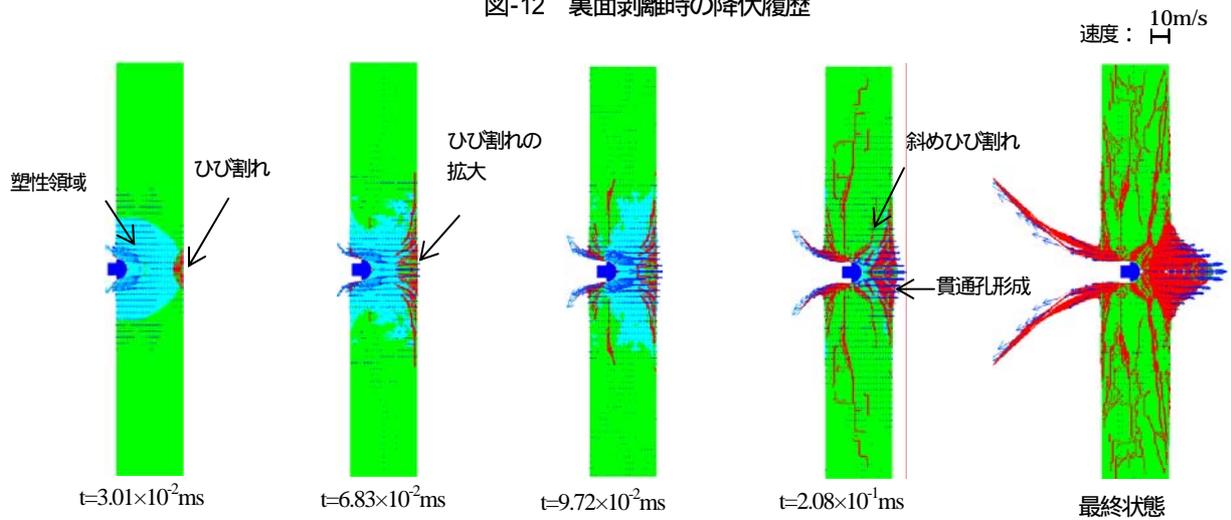


図-13 貫通の損傷過程

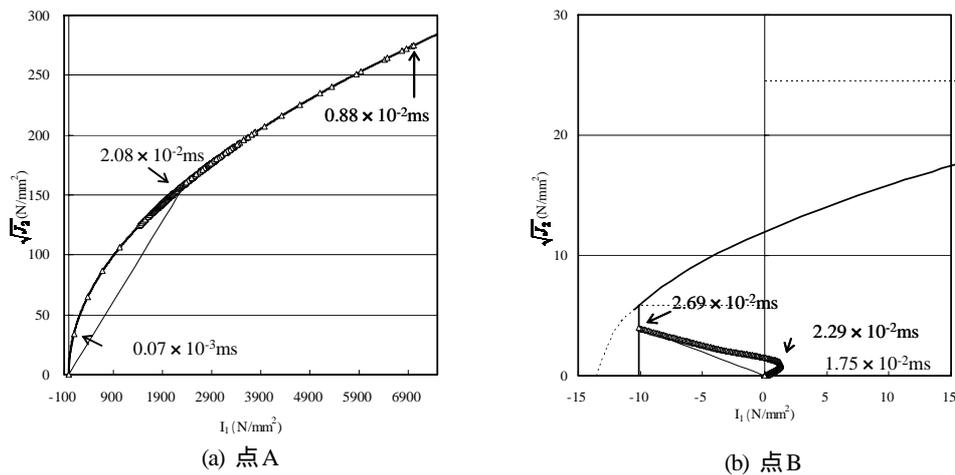


図-14 貫通時の降伏履歴

(3) 貫通 (板厚 8cm, 衝突速度 500m/s)

図-13 に貫通時の損傷過程を示す。裏面にひび割れが発生する時刻はこれまでと同じであるが、飛翔体の衝突速度が大きいので、 $t = 3.01 \times 10^2 \text{ms}$ の時点では表面の広い領域が塑性化している。また、裏面にも広いひび割れ領域が発達している。その後、裏面剥離と同様に斜めの

ひび割れも確認できるが、斜めひび割れが進展する前に貫通孔が形成された。図-14 に、点 A, B における降伏履歴を示す。点 A では最大降伏応力 275N/mm^2 を示し、裏面剥離のときより早い時刻 $t = 2.08 \times 10^2 \text{ms}$ でエロージョンした。裏面の点 B では、 $t = 2.69 \times 10^2 \text{ms}$ で引張限界線に達して強度を失っている。

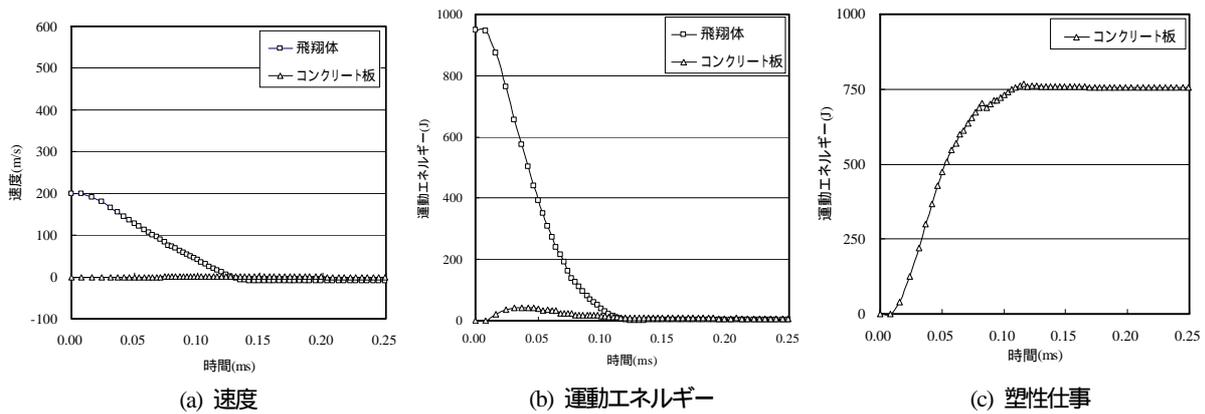


図-15 表面破壊時の速度およびエネルギーの時刻歴

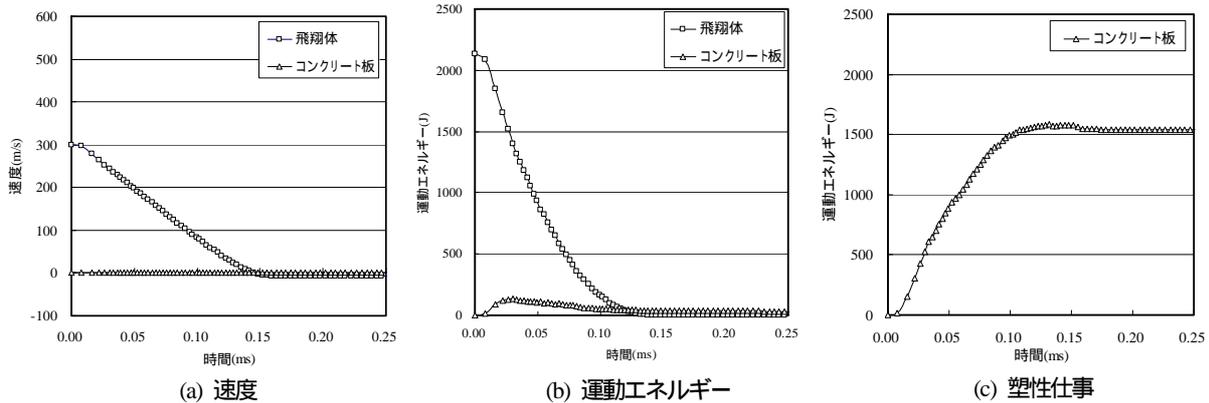


図-16 裏面剥離時の速度およびエネルギーの時刻歴

4. エネルギーの推移に関する考察

衝突前に剛飛翔体が有していた運動エネルギー（以下、入力エネルギーという）は、コンクリート板への衝突によって、コンクリート板の局部破壊に使われる仕事、飛翔体内部のひずみエネルギー、飛散したコンクリート片の運動エネルギー、跳ね返りあるいは貫通後の飛翔体の運動エネルギー、その他の音や熱エネルギーに変化する。ここでは、入力エネルギーが、時間とともにどのように推移していくかを考察する。ただし、音や熱エネルギーは、数値的に評価していないので考察の対象から外した。また、ひび割れの発生位置などを事前に予測することが困難であるため、ひび割れによる破壊エネルギーは考慮せず、主としてコンクリート板内部の塑性に費やされたエネルギーに着目して考察を行った。

4.1 エネルギーの推移状況

図-15は、表面破壊時の速度およびエネルギーの推移を示している。まず、図-15(a)より、飛翔体は約0.12msの間コンクリート板と接触し、図からは読み取りにくい約2m/sの速度で跳ね返った。同図(b)に示すように、衝突前の飛翔体の運動エネルギーは約940Jであるが時間とともに急に低下している。衝突直後にコンクリート

板の運動エネルギーが増加しているのは、衝突によってコンクリート板の振動が生じたためと考えられる。図-15(c)にはコンクリート板でなされた塑性仕事の時刻歴を示している。これより、コンクリートで消費されるエネルギーは衝突直後からほぼ線形に増大し、最大で約750Jの値を示している。すなわち、入力エネルギーの約80%がコンクリートの塑性仕事として消費されたことを示している。残りのエネルギーは、主としてコンクリート板のひび割れで消費されるとともに、飛翔体内部のひずみエネルギーや跳ね返り後の運動エネルギーに変換されると考えられる。

図-16, 17に裏面剥離および貫通時の速度およびエネルギーの時刻歴を示す。図-16(a)より、裏面剥離のケースでは飛翔体は約15m/sの速度で跳ね返っていることがわかる。一方、図-17(a)の貫通時の場合をみると、飛翔体の速度は完全にはゼロになっていない。これは、貫通の計算の場合には、途中からエネルギーの誤差が蓄積され計算の進行が極度に遅くなったため、計算を中断したからである。コンクリート内部でなされた塑性仕事は、裏面剥離の場合で約1570Jで、入力エネルギーの約73%の割合である。貫通の場合の塑性仕事は約4000Jで、入力エネルギーの約66%の割合であった。

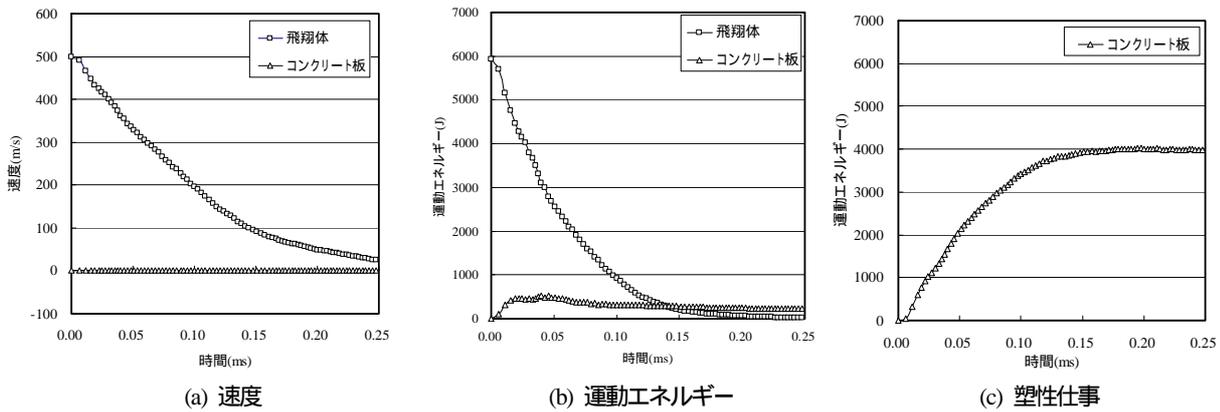


図-17 貫通時の速度およびエネルギーの時刻歴

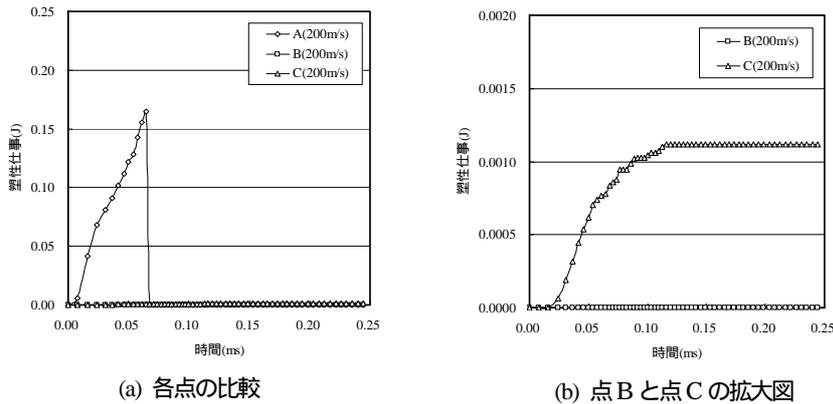


図-18 表面破壊時の単位質量あたりの塑性仕事の比較

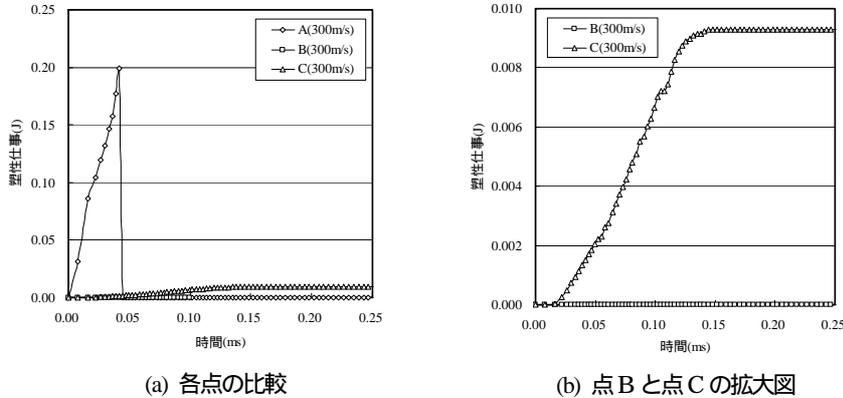


図-19 裏面剥離時の単位質量あたりの塑性仕事の比較

4.2 コンクリート内部の塑性仕事

コンクリートの局部破壊で消費された塑性仕事について考察する。表面破壊の場合に、図-15(c)に示したコンクリート内部の塑性仕事と図-9の損傷時刻歴を比較してみると、裏面に微小なひび割れが入る時刻 $t=0.035\text{ms}$ にはすでに入力エネルギーの約40%程度が塑性仕事として使われている。裏面剥離と貫通の場合も同様に、裏面にひび割れが発達する前に入力エネルギーの30~40%程度が塑性仕事として消費されている。そこで、破壊モードごとに点A, Bおよび点Cでなされた単位質量あたりの塑性仕事を調べてみる。

図-18に、表面破壊のときに各点でなされた単位質量あたりの塑性仕事の時刻歴を示す。点Aは衝突とほぼ同時に降伏するため、降伏による塑性仕事は急激に増大している。点Aは時刻約 $t=0.06\text{ms}$ でエロージョンしたためエネルギーを失っている。また、点BとCでなされた塑性仕事をみると、点Aに比べて無視できるほど小さいことがわかる。図-18(b)は点BとCを拡大して表示したものであるが、塑性領域内にある点Cに比べてひび割れ部の点Bでなされた仕事はほとんどない。図-19には、裏面剥離のときの単位質量あたりの塑性仕事を示す。これより、表面破壊と同様にエロージョンによって失われ

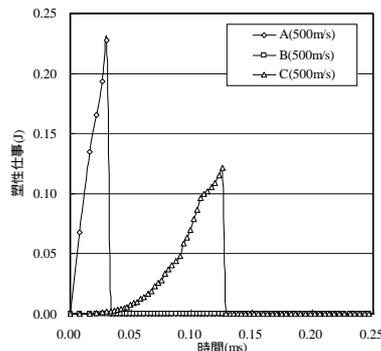


図-20 貫通時の各点の単位質量あたりの塑性仕事の比較

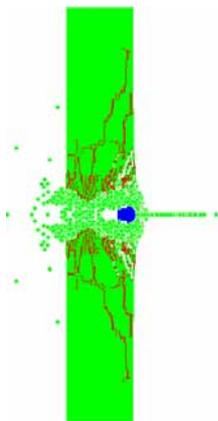


図-21 エロージョンひずみが0.1のときの損傷

るエネルギーが卓越していることがわかる。また点Cでは、表面破壊のときよりもやや大きな仕事が行なわれていることが確認できる。図-20には貫通の場合を示しているが、貫通の場合には板内部の点Cもエロージョンしたため、点Aと同様に大きな塑性仕事を示している。

上記の結果は、一点における仕事量を示しており、コンクリート板内部での総量ではないが、コンクリートの内部で消費される塑性仕事の中で、飛翔体とコンクリートの接触部において失われるエネルギーが占める割合が非常に大きいことを示している。実験においても、写真-3, 4に示したように、衝突直後にはコンクリートが粉末状に飛散し、また飛翔体の先端形状を残すようなくぼみを確認されており、このような破壊に相当量のエネルギーが消費されたことを示している。

以上の解析より、飛翔体とコンクリートの接触部位で失われるエネルギーがかなり大きいことがわかった。これは、エロージョンの判定基準であるエロージョンひずみの設定が解析結果に大きな影響を与えることを示唆している。今回の解析では、エロージョンひずみの値として、Hayhurst¹⁵⁾が推奨している2.5を用いたが、比較のためエロージョンひずみを0.1にして解析を行った。解析の対象は、裏面剥離（衝突速度300m/s、板厚8cm）のケースとした。解析による損傷を図-21に、全エネルギー

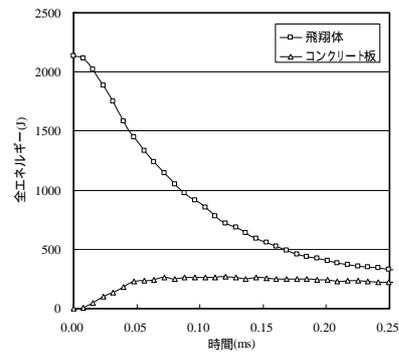


図-22 全エネルギーの時刻歴

一の時刻歴を図-22に示す。図-21の損傷図は解析途中の結果であるが、飛翔体が貫入した後のコンクリート部は脆い損傷状態を示している。ちなみに、飛翔体はこの後に貫通した。図-22のエネルギーの時刻歴からも、塑性仕事はかなり小さいことがわかる。これらの結果からも、衝突による貫入や貫通現象を解析する際には、飛翔体と被衝突体との接触部で失われるエネルギーを適切にモデル化する必要があることがわかる。

5. 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をシミュレートできる数値モデルを検討し、局部破壊の発生メカニズムを調べたものである。本研究の成果を以下に示す。

- (1) 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をシミュレートできる数値モデルの検討を行った。非線形のDrucker-Prager降伏基準に 1.0×10^1 (1/s)のひずみ速度を考慮すると、解析結果は実験結果と比較的良好に一致した。
- (2) 局部破壊の発生メカニズムについて調べた。剛飛翔体が衝突すると、ほぼ同時に衝突部近傍は塑性化し、大きな降伏値を示すことがわかった。また、裏面に伝達された圧縮の応力波が引張波となってひび割れが発生することがわかった。裏面剥離の場合は、コンクリート板内部に発達する斜めひび割れが裏面に進展して、後方に飛散するコンクリート塊を形成すること、また貫通の場合にはこの斜めひび割れが裏面に達する前に貫通孔が形成されることがわかった。
- (3) 衝突前に飛翔体が有していたエネルギーとコンクリートの局部破壊で消費されるエネルギーとの割合を調べた。表面破壊では約80%、裏面剥離では約73%、貫通では約66%のエネルギーが消費されていることがわかった。
- (4) 衝突による貫入や貫通現象では、接触・貫入によって失われるエネルギー量が多いことがわかった。

したがって、数値解析を行う際は、これらの損失エネルギーを適切にモデル化する必要がある。

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 and Design, 37, pp.183-203, 1976.
- 2) G.E. Sliter: Assessment of empirical concrete impact formulas, ASCE, Vol.106, No.ST5, pp.1023-1045, 1980.
- 3) 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, 1994.
- 4) 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, 1991.
- 5) 電力中央研究所: 高速飛来物に対する鉄筋コンクリート構造物の設計評価式, 電力中央研究所報告, 1988.
- 6) 伊藤千浩, 白井孝治, 大沼博志: 剛飛来物の衝突に対する鉄筋コンクリート構造物の設計評価式, 土木学会論文集, No.507/ -30, pp.201 ~ 208, 1995.
- 7) 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貫入深さに関する理論的考察, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.1209-1218, 2006.3.
- 8) 三輪幸治, 別府万寿博, 大野友則, 片山雅英: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.28, No.2140, 2006.7.
- 9) 森川博司, 澤本佳和, 小鹿紀英: 個別要素法を用いたコンクリートの破壊解析, 日本建築学会構造系論文集, 第473号, pp.127-135, 1995.7.
- 10) 原木大輔, 香月智, 藤掛一典: 個別要素法のコンクリート破片飛散シミュレーションへの応用, 応用力学論文集, Vol.9, pp.667-678, 2006.8.
- 11) 阿部和久: 個別要素法における連続体解析におけるバネ定数の設定, 土木学会論文集, No.543/I-36, pp.83-90, 1996.7.
- 12) Werner Goldsmith: Non-ideal projectile impact on targets, International Journal of Impact Engineering, Vol.22, pp.95-395, 1999.
- 13) 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, 2001.2.
- 14) M. Itoh, M. Katayama, S. Mitake, N. Niwa, M. Beppu and N. Ishikawa: Numerical study on impulsive local damage of reinforced concrete structures by a sophisticated constitutive and failure model, Structures under shock and impact, Computational, Mechanics Publications, pp.569-578, 2000.
- 15) Colin J. Hayhurst, H. John Ranson, David J. Gamer and Naury K. Bimbaum: Modeling of microparticle hypervelocity oblique impacts on thick targets, International Journal of Impact Engineering, Vol.17, pp.375-386, 1995.
- 16) 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, pp.475-481, September October, 1989.

(2006年9月11日受付)