

鋼製飛翔体の中速度衝突を受けるコンクリート版の 衝撃応答解析に対する改良版個別要素法の適用性

Applicability of Refined Distinct Element Method to Impact Response Analysis
of Concrete Slab Subjected to Moderate Velocity Impact by Steel Projectile

古川 愛子¹, 後藤雅登¹, 清野純史¹, 中瀬仁²

Aiko FURUKAWA¹, Masato GOTO¹, Junji KIYONO¹ and Hitoshi NAKASE²

¹ 京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻

Department of Urban Management, Graduate School of Engineering, Kyoto University

² 東電設計株式会社

Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.

In this study, applicability of a refined distinct element method (Refined DEM) to simulation of moderate velocity impact phenomena between a steel projectile and a concrete slab was investigated. Firstly, two simple phenomena, a perfectly elastic collision and a perfectly inelastic collision were simulated and the validity was confirmed. Next, a stress-strain model was improved to enhance the analysis accuracy. Energy consumption due to compression failure and tension softening of concrete was introduced. Finally, the impact experiment between a steel projectile and a concrete slab was simulated. The analysis results generally showed good agreements with the experiment. Three failure modes, namely surface failure, backside failure and penetration were successfully simulated.

Keywords: refined DEM, moderate velocity impact, steel projectile, concrete slab, stress-strain model, energy consumption, tension softening

1. はじめに

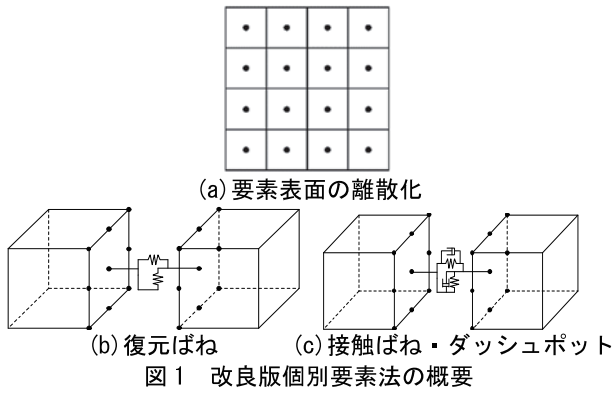
近年、日本における竜巻発生は増加傾向にあり、2007年～2015年の竜巻発生確認数は、1年あたり25件（海上竜巻を除く）にも及ぶ¹⁾。竜巻によって巻き上げられた飛来物が構造物に衝突し、被害を及ぼした事例も多数報告されている。このような背景から、これまであまり検討されてこなかった衝撃力に対する構造物の設計手法の確立が望まれるようになってきており、2013年には、原子力発電所の竜巻影響評価ガイドが制定された²⁾。しかし依然として、飛翔体の衝突を受ける構造物の耐衝撃設計に関する研究成果の蓄積は十分ではなく、特に、竜巻の飛来物等に想定される中速度（10m/s～100m/s）の衝突について扱った研究事例は非常に少ない。中速度衝突を扱った実験的な研究としては、別府ら³⁾、片岡ら⁴⁾による研究があり、鋼製飛翔体の中速度でコンクリート版に衝突させる衝突実験が行われている。数値解析を実施したもののとしては、Kataokaら⁵⁾が、有限要素法により衝突実験の再現解析を行い、破壊特性の分析を行っている。

耐衝撃設計手法の確立には、実験と数値解析の両面からの検討が必要であるが、現状では有限要素法を用いた数値解析⁶⁾が主流である。飛来物が衝突した場合の鉄筋コンクリート構造物の破壊モードは、局部破壊と全体破壊の複合破壊であり、局部破壊には、表面破壊、裏面剥

離、貫通の3つの破壊モードがある⁴⁾。衝突速度が増加するにつれて、表面破壊、裏面剥離、貫通へと破壊モードはシフトし、より大変形・大変位を伴う破壊挙動となる。

連続体力学に基づく有限要素法⁶⁾に比べ、離散体力学に基づく個別要素法⁷⁾は、本来、大変形・大変位を伴う破壊挙動の解析に適した手法であると考えられる。個別要素法を用いた衝撃応答解析の例としては、粒状体要素を用いたものがある⁸⁾⁹⁾が、定量的な再現性については開発途上である。個別要素法は、ばねで連結された剛体要素の集合体として構造物をモデル化し、要素間のばねを切断することによって破壊を表現する単純なモデルであることから、有限要素法のように材料特性を詳細に表した複雑な構成モデルを扱うことが困難であるため、定量的な再現性に課題を有していると考えられる¹⁰⁾。

一般に、個別要素法（DEM）には剛体要素をつなぐばね定数を理論的に導き出すことができないという欠点がある。改良版個別要素法¹¹⁾（Refined DEM）は、剛体ブロックの要素表面をセグメントに分割し、セグメント毎にばねを配置することによって、ばね定数を材料特性から理論的に導けるようにしたものである。これまで、地震時の組積造の破壊挙動の数値解析に適用されており、振動解析の実績はあるが、衝突解析の実績はない。



本研究では、改良版個別要素法を用いて鋼製飛翔体を中速度でコンクリート版に衝突させる衝突実験⁹⁾の再現解析を行い、衝撃応答に対する適用性を検証することを目的としている。衝突問題に適用するのは本研究が初めてであるため、基本的な衝突現象である完全弾性衝突、完全非弾性衝突の再現性を確認することから始めた。また、これまでは目地の引張破壊が支配的となる組積造の地震時破壊挙動を主に扱ってきたことから¹¹⁾、圧縮破壊に適した構成モデルではなかったため、圧縮側の構成モデルを改良した。さらに、引張側についても、引張軟化特性を考慮した構成モデルに改めた。改良した構成モデルにより、飛翔体の変位時刻歴、速度時刻歴、コンクリート版の破壊状況を再現できるかどうかを検証した。

2. 改良版個別要素法¹¹⁾

(1) 概要

改良版個別要素法は、構造物を剛体ブロック要素の集合体としてモデル化する。従来の剛体ブロックを用いた個別要素法では、要素同士が接触した領域に仮想のばね・ダッシュポットを設置し、要素同士の貫入距離に基づいた力を伝達する。力の算定の際に接触面積は考慮されないこともあり、ばね定数を理論的に決定することが困難である。これに対し、改良版個別要素法では要素表面をセグメントに離散化して、それぞれのセグメントの代表点にばね・ダッシュポットを設置する。図 1(a)の例では、接触面を 4×4 の 16 個のセグメントに分割し、それぞれの中心（黒丸の点）にばね・ダッシュポットを設置する。そして、各セグメントの代表点が他の要素と連続または接触しているかを調べ、連続または接触している場合はばね・ダッシュポットを介して力を伝達することとした。各ばねは受け持つ面積（セグメントの面積）を有することになり、セグメント毎の力のつり合い式から、ばね定数を物性値から理論的に決定できるようになったことが改良点である。弾性挙動は要素間に設置する復元ばね（図 1(b)）によって表現する。もともと一体となって連続している要素間に設置するばねを復元ばねと定義し、復元ばねによって連結することで一体となって挙動するようにしている。破壊現象は復元ばねの切断によってモデル化している。もともと連続していない要素同士が接触する場合や、復元ばねで連結されていた要素間が、破壊後に再接触する場合に要素間に設置するばね・ダッシュポットを接触ばね・接触ダッシュポットと定義する（図 1(c)）。復元ばねと接触ばねのばね定数の算定式は同じであるが、上記のように区別している。接触ダッシュポットは衝突によるエネルギーを消散させるためのものであり、接触ばねと並列に設置する。以上が概要であるが、詳細は文献¹¹⁾を参照して頂きたい。

(2) 解析パラメータ

a) 要素のばね定数

要素間のばねには復元ばねと接触ばねの 2 タイプが存在するが同じばね定数としている。ばねは要素表面に対して、法線方向 (n) と接線方向 (s) の両方に取り付けられる。法線、接線方向の単位面積あたりのばね定数は次式で表される。

$$\bar{k}_n = \frac{E}{(1-\nu^2)\ell} \quad \bar{k}_s = \frac{E}{2(1+\nu)\ell} \quad [1]$$

ここに、 E は要素の弾性係数、 ν はポアソン比、 ℓ は要素重心から表面までの距離である。

b) 要素間のばね定数

2 つの要素 A, B が連続または接触しているとする。要素 A, B の弾性係数を E_A, E_B 、ポアソン比を ν_A, ν_B 、重心から表面までの距離を ℓ_A, ℓ_B で表す。ここでは、式[1]で求めたばねが直列につながっていると想定し、要素間の単位面積あたりのばね定数は次式で与えることとする。

$$k_n = \frac{1}{\frac{\ell_A}{E_A/(1-\nu_A^2)} + \frac{\ell_B}{E_B/(1-\nu_B^2)}} \quad [2]$$

$$k_s = \frac{1}{\frac{\ell_A}{E_A/2(1+\nu_A)} + \frac{\ell_B}{E_B/2(1+\nu_B)}} \quad [3]$$

c) 減衰係数

復元ばねで結ばれていない要素 A と B が接触・再接触した際は、要素間には接触ばねに加えて接触ダッシュポットが設置される。ダッシュポットは、接触時の衝突によるエネルギーを消散するために導入される。

減衰定数を h とし、単位接触面積あたりの減衰係数は次のように表わされるとする。

$$c_n = 2h\sqrt{m_{ave}k_n}, \quad c_s = 2h\sqrt{m_{ave}k_s} \quad [4]$$

$$m_{ave} = \rho_A \ell_A + \rho_B \ell_B$$

ここに、 m_{ave} は単位接触面積あたりの要素 A, B の質量の和、 ρ_A, ρ_B は要素 A, B の質量密度である。

(3) 応力

復元ばねおよび接触ばねの法線・接線方向の伸びを (u_n, u_s) とすると、法線・接線方向の応力 (σ, τ) は次式で表される。

$$\sigma = k_n u_n, \quad \tau = k_s u_s \quad [5]$$

ここに、法線方向の応力は引張を正とする。

(4) 破壊の取扱い

復元ばねに発生する応力が弾性限界に達すると、復元ばねを切断することで破壊現象を表す。本研究では、引張破壊と圧縮破壊を考慮し、法線方向の応力に制約を設けた。詳細は 4 章で述べる。

(5) 接触力

復元ばねは前節で定義した破壊が発生すれば消失する。接触・再接触の際は、接触ばねと接触ダッシュポットが発生する。この接触ばねは、接触しているときだけ発生するものであるため、引張力には抵抗せず、圧縮力のみ受け持つ。また、接線方向の接触力は、摩擦限界によって制限されているとする。内部摩擦角を ϕ とすると次式のようになる。

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad [6]$$

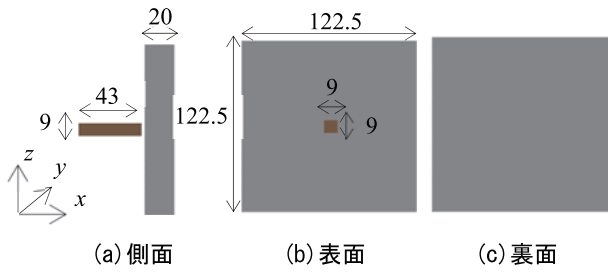


図2 解析モデル (寸法の単位は cm)

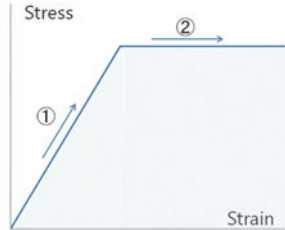
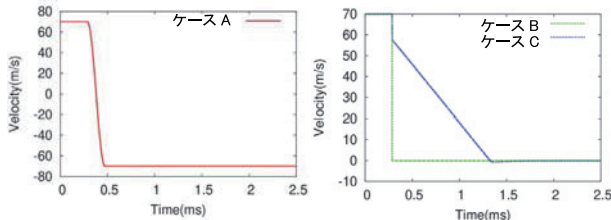


図3 応力-ひずみ関係 (圧縮側)



(a) 完全弾性衝突 (b) 完全非弾性衝突
図4 飛翔体の速度時刻歴

(6) 運動方程式

要素の運動は、重心の並進運動の運動方程式と重心回りの回転運動を表す Euler の運動方程式を解くことによって求めた。

重心の並進運動を表す 3 次元運動方程式は次式で表される。

$$m\ddot{\mathbf{x}}_g(t) = -m\mathbf{g} - m\ddot{\mathbf{z}}(t) + \sum \mathbf{F}(t) \quad [7]$$

ここに、 $\mathbf{x}_g(t)$ は時間 t における要素重心の変位ベクトル、 m は要素の質量、 $\mathbf{g}$ は重力加速度ベクトル、 $\ddot{\mathbf{z}}(t)$ は地動加速度ベクトル、 $\sum \mathbf{F}(t)$ は要素間のばねとダッシュポットによって作用する力の総和である。

次に、重心回りの回転運動方程式について述べる。要素重心が原点で、要素の慣性主軸を主軸とする剛体に固定した座標系を慣性座標系とする。慣性座標系における角速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}(t)$ は、次の 3 次元の Euler の運動方程式を解くことによって求めることができる。

$$\mathbf{I}\dot{\boldsymbol{\omega}}(t) + \boldsymbol{\omega}(t) \times \mathbf{I}\boldsymbol{\omega}(t) = \sum \mathbf{R}(t)\mathbf{r}(t) \times \mathbf{R}(t)\mathbf{F}(t) \quad [8]$$

ここに、 $\times$ は外積を示す。 $\mathbf{I}$ は慣性座標系における慣性モーメントテンソル、 $\mathbf{r}(t)$ は要素重心から外力 $\mathbf{F}(t)$ が作用する点へと向かうベクトル (絶対座標系)、 $\mathbf{R}(t)$ は絶対座標系から慣性座標系へと変換する座標変換マトリックスである。 $\sum$ はすべての作用力によるモーメントを足し合わせることを意味している。

(7) 個別要素法の解の安定条件

並進運動の運動方程式の加速度項の離散化に Leap-frog 法¹²⁾を、速度項の離散化に Euler 法を使用することより、解の安定条件は次式となる。 Δt は計算時間間隔である。

$$\Delta t \leq \sqrt{\rho \ell^2 (1 - \nu^2) / E} \{ \sqrt{h^2 + 1} - h \} \quad [9]$$

3. 完全弾性衝突と完全非弾性衝突の再現性検証

(1) 概説

改良版個別要素法を用いて衝突現象を扱うのは本研究が初めてである。そこでまず初めに、基本的な衝突現象である完全弾性衝突と完全非弾性衝突を再現することができるのかを検証する。ここで完全弾性衝突とは、衝突後の速度が衝突前の速度と大きさが同じで向きが逆となるケース、完全非弾性衝突とは、衝突後の速度が 0 となる衝突と定義する。

(2) 解析モデルおよび解析条件

検証に用いた解析モデルを図 2 に示す。灰色で示すコンクリート版に、茶色で示す鋼製飛翔体を衝突させた。コンクリート版は、幅が 122.5cm、高さが 122.5cm、奥行きが 20cm の直方体とした。鋼製飛翔体は、1 辺 9cm の正方形断面を有する長さ 43cm の直方体とした。コンクリート版も鋼製飛翔体も、要素分割は行わずに 1 要素で表した。要素表面に設置するばねの間隔は、飛翔体の衝突面が 1 辺 9cm であるので、これを 4 分割し、2.25cm 間隔で設置した。コンクリート版については、1 辺 122.5cm を 55 分割し、2.227cm 間隔とした。このように、飛翔体もコンクリート版も、衝突面のばね間隔が等しくなるように設置した。

コンクリート版は拘束されておらず浮いた状態とし、飛翔体に x 軸方向の初速度 (70m/s) を与えて、コンクリート版の中央に衝突させた。初期状態における飛翔体とコンクリート版の距離は 2.6cm である。なお、重力加速度は考慮していない。

解析に用いる材料特性は 4 章で述べる衝突実験で使用された試験体の要素試験結果を用いた。飛翔体は、質量 8.3kg、ヤング率 2.05×10^{11} N/m²、ポアソン比 0.3 とした。コンクリート版は、密度 2.3×10^3 kg/m³、ヤング率 2.793×10^{10} N/m²、ポアソン比 0.2 とした。計算時間間隔は、式[8]を満たす値として 8.0×10^{-7} s を採用した。

(3) 解析ケース

解析ケースとして、ケース A、B、C の 3 ケースを考えた。ケース A は完全弾性衝突のケース、ケース B と C は非弾性衝突のケースである。

ケース A では、飛翔体とコンクリート版の間のばねを線形に、ダッシュポットの減衰係数を 0.0 とした。

ケース B では、飛翔体とコンクリート版の間のばねを線形に、式[4]で定義されるダッシュポットの減衰定数を 38.0 とした。次の節で解析結果を示すが、式[4]で定義される減衰定数を 0.0 から徐々に増やしていき、38.0 にしたときに初めて衝突後の飛翔体の速度が 0 となった。

ケース C では、飛翔体とコンクリート版の間のばねを非線形に、ダッシュポットの減衰定数を 1.0 とした。コンクリートの圧縮強度は 4.5×10^7 N/m² とし、図 3 に示す完全弾塑性型の応力-ひずみ関係を採用した。図 3 の応力-ひずみ関係を用いても、ダッシュポットの減衰定数を 0.0 にした場合は衝突後の飛翔体の速度が 0 とはならず、ダッシュポットの減衰定数を 1.0 としたときに初めて衝突後の飛翔体の速度が 0 となった。

(4) 解析結果

衝突前後の飛翔体の速度の推移を図 4 に示す。飛翔体とコンクリート版の間の距離が 2.6cm で飛翔体の速度が

70m/sであるため、0.371ms後に衝突が開始している。

a) ケース A

解析結果は図 4(a)に示すとおりであり、衝突後の速度は-70m/s となり、完全弾性衝突を再現することができた。衝突後に飛翔体の速度の向きが反転して、飛翔体のコンクリート版への貫入が解消されると、ばねに吸収されるエネルギーは 0 となる。減衰エネルギーも考慮していないため、運動エネルギーが保存され、衝突後の飛翔体の速度が-70m/s になったと考えられる。

b) ケース B

ダッシュポットの減衰エネルギーにより、飛翔体の運動エネルギーが吸収され、衝突後の飛翔体の速さは衝突前よりも小さくなる。減衰エネルギーが衝突前の飛翔体の運動エネルギーに等しい場合に、飛翔体の速度が 0 になると考えられる。数値解析でも、式[4]で定義される減衰定数を 38.0 としたときに衝突後の速度が 0 となり、運動エネルギーはすべて吸収され、完全非弾性衝突が再現できた(図 4(b))。図 4(b)からわかるように、ダッシュポットは、速度を瞬時に減少させる効果があるのが見て取れる。なお、本研究における減衰定数は式[4]で定義されたものであり、振動工学における一般的な減衰定数とは異なることを断っておく。

c) ケース C

ケース C では、図 3 に示す完全弾塑性型の応力-ひずみ関係を用いた。飛翔体がコンクリートに衝突して破壊するまでは①、破壊後静止するまでが②であり、ハッチを付けたエリアがばねが吸収したエネルギーである。

ケース C では、ばねの吸収エネルギーだけでは衝突後の速度を 0 にすることができなかつたため、ダッシュポットも組み合わせて用いた。ばねの吸収エネルギーに加えて、ダッシュポットの減衰定数を 1.0 とすることにより、衝突後の速度が 0 となり、完全非弾性衝突を再現することができた。

図 4(b)より分かるように、衝突直後に速度が 70m/s から約 56m/s まで瞬時に減少しているのはダッシュポットの減衰エネルギーによる影響であり、その後、56m/s から 0m/s まで徐々に速度が低下するのは、ばねの吸収エネルギーの影響である。

以上から、改良版個別要素法により、完全弾性衝突と完全非弾性衝突の両方を再現することがわかった。

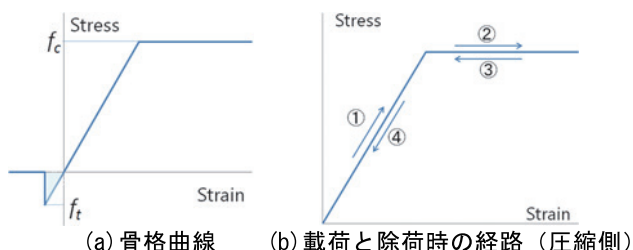


図 5 従来の応力-ひずみ関係

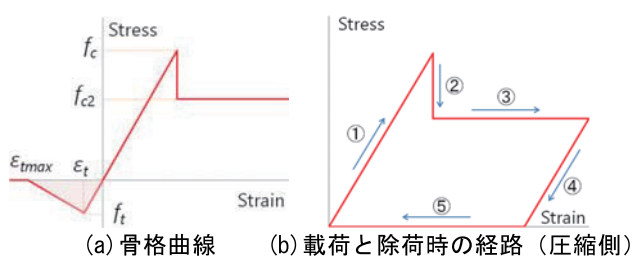


図 6 改良した応力-ひずみ関係

4. 応力-ひずみ関係のモデル化の改良

(1) 概説

第 3 章より、ばねによる吸収エネルギーやダッシュポットの減衰エネルギーによって飛翔体の衝突後の速度が変化することから、エネルギー吸収を精度よくモデル化することが重要であることがわかった。また、ダッシュポットによる減衰エネルギーは衝突時に瞬時に飛翔体の速度を低下させること、履歴吸収エネルギーは徐々に飛翔体の速度を低下させることがわかった。

5 章で示す飛翔体とコンクリート版の衝突実験において、飛翔体の速度が衝突時に瞬時に低下する現象は観察されなかったことから、3 章の解析結果を併せて考えると、非線形ばねの履歴吸収エネルギーが支配的であると判断された。このことから、衝突現象を精度よく再現するためには、応力-ひずみ関係を適切にモデル化して履歴吸収エネルギーの精度を高めることが必要不可欠であることがわかった。そこで本研究では、従来の改良版個別要素法の構成モデルの改良を行った。

(2) 従来の応力-ひずみ関係

従来の応力-ひずみ関係の骨格曲線を図 5(a)に示す。正が圧縮、負が引張を示す。

引張側は、引張応力が引張強度 f_t に達すると引張破壊が生じ、ばねを切断するモデルとしており、ハッチ面積が引張破壊による吸収エネルギーである。引張軟化特性を考慮できず、引張破壊による吸収エネルギーを過小評価している。

圧縮側の骨格曲線は、図 5(a)に示す完全弾塑性型であった。履歴特性は、図 5(b)のように載荷時に①→②、除荷時に③→④という経路をとる非線形弾性のモデルとなっていたため、圧縮破壊による履歴吸収エネルギーが適切に考慮されていない。

(3) 改良した応力-ひずみ関係

改良した応力-ひずみ関係の骨格曲線を図 6(a)に示す。

引張側は、コンクリートに特有な引張軟化特性を考慮した。 ϵ_t は引張強度に達したときの引張ひずみ、 ϵ_{tmax} は引張抵抗を考慮に入れる最小の引張ひずみである。ハッチ面積である吸収エネルギー(単位体積当たり)に要素間距離を乗じたものが破壊エネルギー G_F に一致するように ϵ_{tmax} を決定した。

圧縮側の骨格曲線は、圧縮軟化を考慮したモデルとした。図 6(a)に示すように圧縮応力が圧縮強度 f_c に達すると圧縮破壊が生じ、圧縮応力が f_{c2} まで減少するモデルとした。ここでは、 f_{c2} を終局強度と呼ぶこととする。本論文では簡単なモデル化となったが、今後はより詳細なモデル化手法を開発したい。履歴特性は、図 6(b)のように、載荷時に①→②→③、除荷時に④→⑤という経路をとるモデルとし、除荷時の勾配④は初期勾配①と同じとした。このように、非線形非弾性のモデルを採用し、圧縮破壊による履歴吸収エネルギーを考慮できるモデルとした。

5. 鋼製飛翔体の中速度衝突を受けるコンクリート版の衝撃応答の再現解析

(1) 実験の概要

本章では、東電設計株式会社と防衛大学校が実施した鋼製飛翔体とコンクリート版との中速度衝突実験⁹⁾の再

現解析を行い、改良版個別要素法の適用性を検証する。

実験装置および試験体の外観を図 9 に示す。コンクリート版は、幅および高さが 122.5 cm で、版厚は 10, 20, 30cm の 3 通りである。飛翔体は先端が直径 8cm の半球状で、最大直径 10cm、長さ 43cm、質量 8.3kg である。

コンクリート版の版厚と飛翔体の衝突速度の異なる 4 ケースを対象として解析を行った。ケース一覧を表 1 に示す。表 1 に示す衝突速度は、提供を受けた飛翔体の速度時刻歴から衝突時の速度を読み取ったものである。実験で観察された破壊モードを表 1 および図 10 に示す。

(2) 解析モデル

解析モデルを図 11 に示す。灰色で示すコンクリート版に、茶色で示す鋼製飛翔体を衝突させた。赤色は床を表す固定要素であり、コンクリート版の底面を固定要素と接着した。なお、表 1 の試験体は鉄筋コンクリートであるが、同じ版厚の無筋コンクリートと鉄筋コンクリートの実験結果に大きな差が見られなかった⁵⁾ことから、本研究では鉄筋をモデル化せず解析を行った。

コンクリート版は、幅と高さが 122.5m で、版厚が 10cm, 20cm, 30cm の 3 通りである。コンクリート内部の破壊を考慮するために、幅 3.0625cm、高さ 3.0625cm、

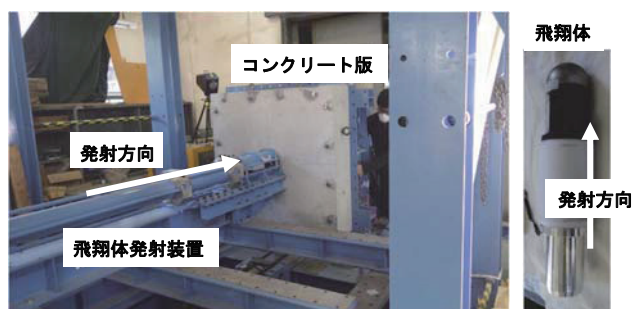
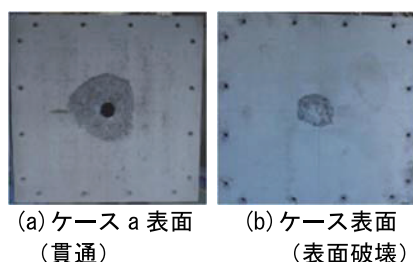


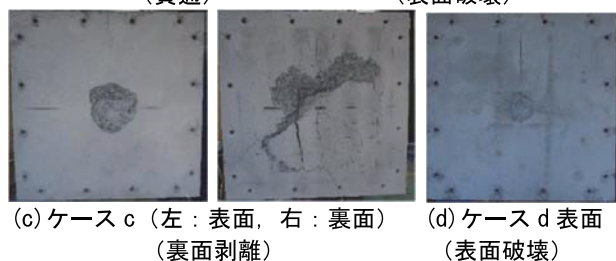
図 9 実験装置および試験体の外観

表 1 再現解析を実施した実験ケースおよび破壊モード

ケース	版厚[cm]	衝突速度[m/s]	破壊モード
a	10	69.7	貫通
b	20	56.7	表面破壊
c	20	81.2	裏面剥離
d	30	81.9	表面破壊



(a) ケース a 表面 (貫通) (b) ケース b 表面 (表面破壊)



(c) ケース c (左: 表面, 右: 裏面) (裏面剥離) (d) ケース d 表面 (表面破壊)

図 10 実験で観測された破壊モード

奥行き 2.5cm の直方体要素を基本とし、要素を積み上げてコンクリート版をモデル化した。要素の配置方法を図 12 に示す。コンクリートの側面 (図 12(a) の x - z 平面) は、 z 方向 (高さ方向) には要素境界が一直線となるが、 x 方向 (衝突方向) には要素境界が一直線とならないように、表面側 (図 12(a) の左側) から数えて偶数列目を z 方向に半個分ずらして要素を積み上げた。そのため、偶数番列の上下端の要素は高さが半分となっている。コンクリート版を上から見たとき (図 12(b) の x - y 平面)、 y 方向には要素境界が一直線となるが、 x 方向には要素境界が一直線とならないように、表面側 (図 12(b) の左側) から数えて奇数列目を y 方向に半個分ずらして要素を積み上げた。そのため、奇数番列の両側端の要素は幅が半分となっている。コンクリートの y - z 平面は、 y 方向にも z 方向にも要素境界が一直線となるように積み上げた。奇数番列は図 12(c) のように左右端の要素の幅が半分となっており、偶数番列は上下端の要素の高さが半分となっている。要素境界が x 方向に一直線となるように配置すると、境界で亀裂が生じやすいため、一直線とならないように並べた。

鋼製飛翔体は、実際の先端形状は直径 8cm の半球であるが、最大径が 10cm であることから、平均をとり 1 辺 9cm の正方形断面を有する長さ 43cm の直方体とした。実験で破壊しなかったため、要素分割は行わずに 1 要素で表した。質量が 8.3kg になるように密度を調整した。先端の半球形状の詳細なモデル化は今後の課題である。

初期状態における飛翔体とコンクリート版の距離は 2.6cm であり、表 1 に示す衝突速度を飛翔体の初期速度として与えた。自重を考慮しており、飛翔体とコンクリート版の要素は z 方向下向きに重力加速度を受ける。境界条件として、コンクリート版を支える高さ 10cm の固定要素を考慮した。

要素表面のセグメントの分割数は 4 分割とした。

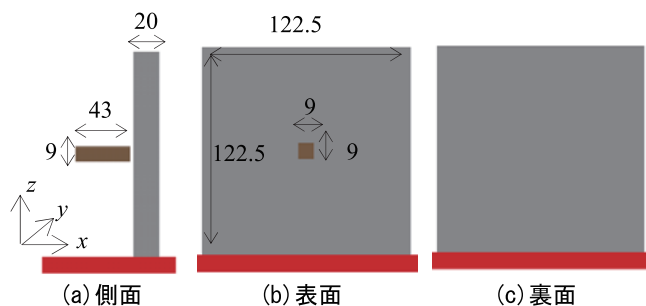
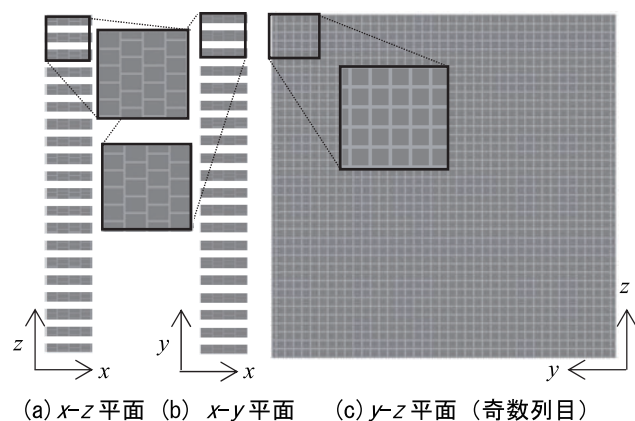


図 11 解析モデル (寸法の単位は cm)



(a) x - z 平面 (b) x - y 平面 (c) y - z 平面 (奇数列目)
図 12 要素の配置

(3) 解析定数

解析に用いる材料特性は、衝突実験で使用された試験体の要素試験結果を用いた。

飛翔体は、質量 8.3kg、ヤング率 2.05×10^{11} N/m²、ポアソン比 0.3 とした。コンクリート版は、密度 2.3×10^3 kg/m³、ヤング率 2.793×10^{10} N/m²、ポアソン比 0.2 とした。

コンクリートの圧縮強度は $f_c = 4.5 \times 10^7$ N/m²、圧縮破壊後の終局強度を $f_{c2} = 2.5 \times 10^7$ N/m²、引張強度を $f_t = 4.5 \times 10^6$ N/m² とした。圧縮強度は試験体の要素試験によって得られた値であり、引張強度は圧縮強度の 1/10 に設定した。終局強度は、実験結果を再現する値としてキャリブレーションによって決定した。

コンクリートの引張軟化特性のモデル化について述べる。図 6(a) のハッチ面積である吸収エネルギー（単位体積あたり）に要素間距離を乗じたものが、コンクリートの破壊エネルギーに一致するように最小ひずみ ε_{max} を決定した。破壊エネルギー G_F [N/m] は、コンクリート標準示方書[設計編]¹³⁾に従い、式[10]により求めた。

$$G_F = 10(d_{max})^{1/3} \cdot f_{ck}^{1/3} \quad [10]$$

ここに、 d_{max} は粗骨材の最大寸法[mm]、 f_{ck} は設計基準強度[N/mm²]である。本研究では、粗骨材の最大寸法を 20mm と仮定し、 f_{ck} に圧縮強度を代入した。

コンクリートの材料特性にはひずみ速度依存性のあることが知られている¹⁴⁾が、静的な要素試験で得られた物性値を用いた場合の再現精度が最も高かったこともあり、本研究ではひずみ速度依存性を考慮していない。

3 章の解析結果から、ダッシュポットの減衰エネルギーを考慮する場合は、衝突時に飛翔体の速度が瞬時に減少することがわかった。実際の衝突実験では、瞬時に速度が減少する傾向は確認できなかったため、ダッシュポットの減衰定数を 0.0 に設定した。

計算時間間隔は、式[9]を満たす 8.0×10^{-7} s を採用した。

(4) 応力-ひずみ関係のモデル化が解析結果に及ぼす影響

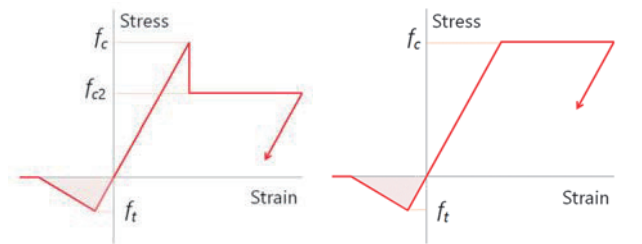
4 章で示した応力-ひずみ関係の妥当性検証のため、ケース b を対象に、図 13 および図 14 に示す様々な応力-ひずみ関係を用いた解析結果と実験結果を比較した。

a) 圧縮側の応力-ひずみ関係のモデル化の影響

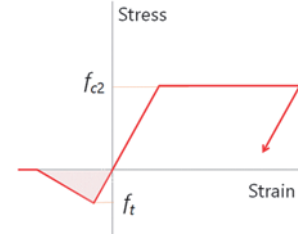
圧縮側の応力-ひずみ関係のモデル化が解析結果に及ぼす影響を調べるため、図 13 に示す 3 通りの応力-ひずみ関係を用いてケース b の再現解析を実施した。

図 13 の 3 モデルは、引張側の応力-ひずみ関係は同じ（引張軟化特性考慮）で、圧縮側の応力-ひずみ関係のモデル化が異なる。図 13(a) は 4 章で提案した圧縮軟化特性を考慮したものである（図 6 に同じ）。圧縮強度が f_c で、軟化後の強度を f_{c2} としている。図 13(b) (c) はいずれも完全弾塑性型であり、図 13(b) は f_c を圧縮強度としたもの、図 13(c) は f_{c2} を圧縮強度としたものである。

実験と解析結果の比較を図 15 に示す。衝突時を時間 0 としている。圧縮軟化特性を考慮したモデルが、最も実験結果に近いことが見て取れる。提案モデルは、最大変位に至り変位が僅かに減少する約 1.7ms までの変位時刻歴を良好な精度で再現できており、最大変位に達した後徐々に変位が減少する様子も再現できている。速度時刻歴はモデルによる差が小さいが、提案モデルは約 1.7ms までほぼ実験結果に一致しており、最も再現性が高い。提案モデルは、最大強度に達すると瞬時に強度が下がるモデルとなっているが、時間差を伴って破壊が進行するため、変位時刻歴は滑らかなグラフとなっている。

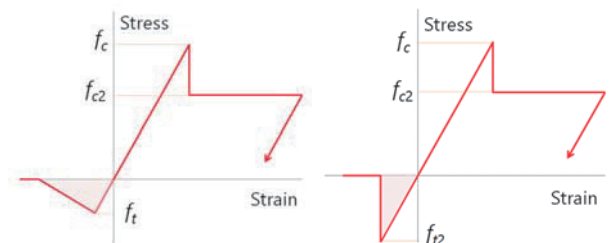


(a) 圧縮軟化特性考慮 (提案) (b) 圧縮側完全弾塑性 (強度 f_c)

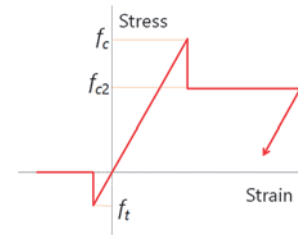


(c) 圧縮側完全弾塑性 (強度 f_{c2})

図 13 圧縮側が異なる 3 通りの応力-ひずみ関係 (引張軟化特性考慮)

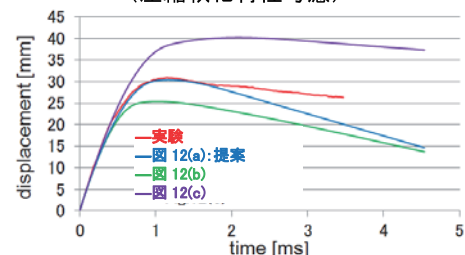


(a) 引張軟化特性考慮 (提案) (b) 引張軟化特性非考慮・破壊エネルギー考慮

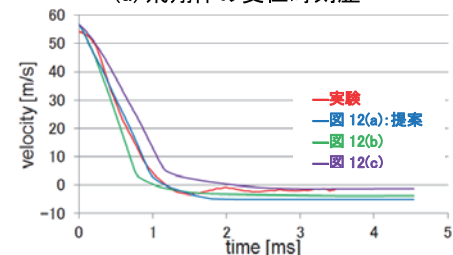


(c) 引張軟化特性非考慮・破壊エネルギー非考慮

図 14 引張側が異なる 3 通りの応力-ひずみ関係 (圧縮軟化特性考慮)



(a) 飛翔体の変位時刻歴



(b) 飛翔体の速度時刻歴

図 15 圧縮側の応力-ひずみ関係の解析結果への影響

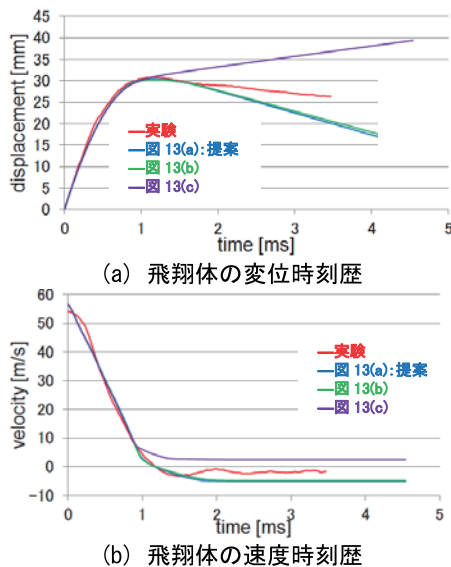


図 16 引張側の応力-ひずみ関係の解析結果への影響

完全弾塑性型の 2 つのモデルは、強度の大きい図 13(b) のモデルは変位を過小評価しており、強度の小さい図 13(c) のモデルは変位を過大評価している。以上の比較から、圧縮軟化特性を考慮することの有意性を確認することができた。

b) 引張側の応力-ひずみ関係のモデル化の影響

引張側の応力-ひずみ関係のモデル化が解析結果に及ぼす影響を調べるため、図 14 に示す 3 通りの応力-ひずみ関係を用いてケース b の再現解析を実施した。

図 14 の 3 モデルは、圧縮側の応力-ひずみ関係は同じ（圧縮軟化特性考慮）で、引張側の応力-ひずみ関係が異なる。図 14(a) は 4 章で提案した引張軟化特性を考慮したモデル（図 6、図 13(a) に同じ）で引張強度が f_t である。図 14(b) は引張軟化特性を考慮していないが、ハッチを付けた部分の面積が図 14(a) と等しくなるように引張強度 f_2 を決めたものである。図 14(a) より大きな引張強度となるが、破壊エネルギーは図 14(a) と同じである。図 14(c) は引張軟化特性も破壊エネルギーも考慮せず、引張強度 f_t に達するとばねを切断するモデルであり、破壊エネルギーを過小評価したモデルとなっている。

実験結果と解析結果の比較を図 16 に示す。破壊エネルギーを考慮した図 14(a) と図 14(b) のモデルの解析結果はほぼ一致しており、実験結果の再現性も高い。これに対して、引張軟化特性も破壊エネルギーも非考慮の図 14(c) のモデルの解析結果は、衝突後も変位が増加しており、貫入を続けている。引張破壊によって吸収されるエネルギーを過小評価しているためであることがわかる。また、図 14(a) (b) のモデルの解析結果がほぼ一致したことから、衝突実験の再現解析においては、降伏強度よりも破壊エネルギーが支配的なパラメータであることが示唆される。

c) まとめ

以上の比較から、圧縮軟化特性を考慮することと、引張側の破壊エネルギーを考慮することの重要性が明らかとなった。衝突によるコンクリート版の破壊現象は、圧縮破壊と引張破壊が混合した破壊モードであることもわかった。本研究が提案する図 6（図 13(a)、図 14(a)）の妥当性を検証することができたので、次節では、提案モデルを用いてケース a～d の再現解析を行い、解析結果と実験結果を比較する。

(5) 衝突実験の再現解析

図 6 の応力-ひずみ関係を用いてケース a～d の再現解析を実施した。各ケースの飛翔体の変位と速度時刻歴を図 17 に示す。また、解析で再現されたコンクリート版の破壊の様子を図 18 に示す。

ケース a の貫入のケースは、比較する変位・速度時刻歴の実験結果がないが、衝突しても変位が増え続け、貫入する様子を再現することができた。また、図 18(a) の側面図より、飛翔体が貫入していく様子が再現できているのがわかる。表面、裏面図において貫通穴が開いていないのは、飛び散ったコンクリート片が一緒に写っているためである。

ケース b～d の表面破壊と裏面剥離のケースにおける、変位および速度の時刻歴を実験と解析とで比較したものを図 17(b)～(d) に示す。ケース b では 1.5ms 以降に若干ずれるが（図 17(b)）、ケース c とケース d では非常に一致を示した（図 17(c), (d)）。また、コンクリート版の破壊モードについても、いずれのケースでも実験と同様の破壊モードを再現することができた（図 18(b)～(d)）。以上のことから、全体として良好な再現ができたと考えられる。

以上のように、圧縮軟化特性と引張軟化特性を考慮に入れた応力-ひずみ関係を用いた改良版個別要素法解析により、中速度衝突実験における貫入、表面破壊、裏面破壊のいずれの破壊モードも良好な精度で再現することができた。

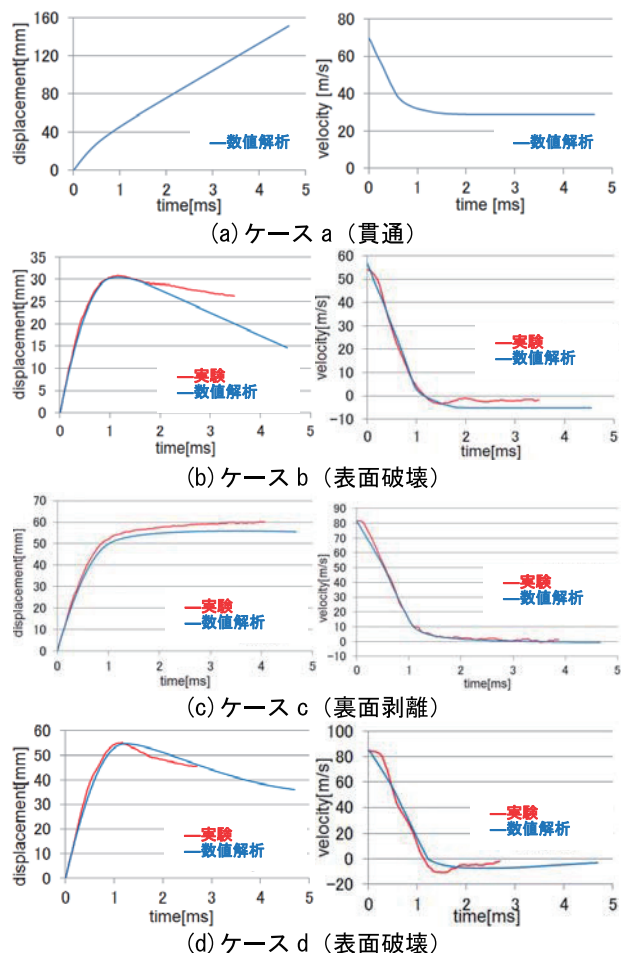


図 17 飛翔体の変位時刻歴(左)と速度時刻歴(右)の比較

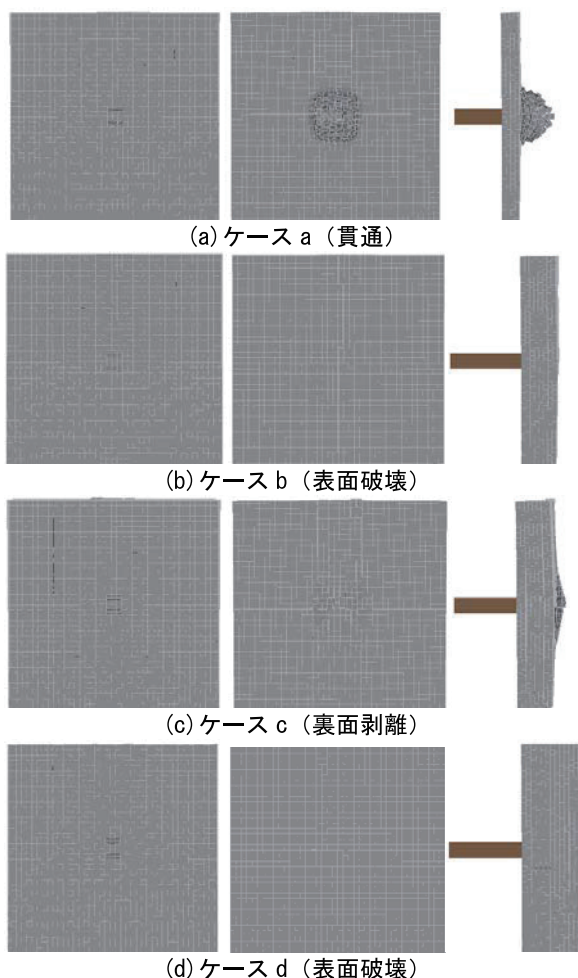


図 18 再現解析結果（左：表面，中：裏面，右：側面）

6. 結論

本研究では，鋼製飛翔体の中速度衝突を受けるコンクリート版の衝撃応答の数値解析に対する改良版個別要素法の適用性について検証した。

最初に，改良版個別要素法を用いて完全弾性衝突と完全非弾性衝突を再現できることを確認した．ばねが吸収する履歴吸収エネルギーと，ダッシュポットが吸収する減衰エネルギーによって，飛翔体の運動エネルギーが吸収され，飛翔体の速度が低下することがわかった．ダッシュポットの減衰エネルギーは飛翔体の速度を瞬時に低下させること，ばねの吸収エネルギーは変形とともに増加し，徐々に飛翔体の速度を低下させることがわかった。

次に，コンクリートの応力-ひずみ関係のモデル化を改良し，圧縮軟化特性と破壊エネルギーに基づく引張軟化特性を考慮できるモデルを提案した．様々な応力-ひずみ関係を用いて衝突実験の再現解析を行い，実験結果と比較したところ，提案モデルが最も実験結果をうまく再現できることがわかった。

提案した応力-ひずみ関係のモデルを用いて，鋼製飛翔体の中速度衝突を受けるコンクリート版の衝撃応答の再現解析を行った．版厚と衝突速度の異なる 4 ケースに対して解析を行った結果，飛翔体の変位時刻歴，速度時刻歴，コンクリート版の破壊モードを，良好な精度で再現できることも確認した。

今後の課題は次の通りである．本研究で提案した応力-

ひずみ関係における圧縮軟化特性のモデル化が単純であるため，より詳細なモデル化をコーディングする手法を検討したい．また，本研究では飛翔体を直方体としてモデル化したが，実際の飛翔体の先端部は半球状になっているため，より実験に忠実なモデル化を行いたい。

参考文献

- 1) 気象庁：竜巻の突風データベース，<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/>. (2018 年 5 月 7 日最終閲覧)
- 2) 原子力規制委員会：原子力発電所の竜巻影響評価ガイド，2013，<http://www.bousai.go.jp/fusuigai/tatsumakikyokucho/pdf/h25/s12.pdf>. (2018 年 5 月 7 日最終閲覧)
- 3) 別府万寿博，上野裕稔：剛飛翔体の中速度衝突を受けるコンクリート板の損傷に関する基礎的考察，防衛大学校理工学研究報告 第 52 冊，第 2 号，pp.21-30，2015.
- 4) 片岡新之介，上野裕稔，別府万寿博，市野宏嘉：剛飛翔体の中速度衝突を受けるコンクリート版の衝撃応答に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.62A，pp.1084-1096，2016.
- 5) Shinnosuke Kataoka, Masuhiro Beppu, Hiroyoshi Ichino, Tatsuya Mase, Tatsuya Nakada and Ryo Matsuzawa: Failure behavior of reinforced concrete slabs subjected to moderate-velocity impact by a steel projectile, International Journal of Protective Structures, Vol.8, No.3, pp.384-406, 2017.
- 6) O.C.Zienkiewicz, R.L. Taylor: The finite element method, 5th edition, Vol.1, 2, 3, Butterworth Heinemann, 2000.
- 7) P.A. Cundall: Formulation of a three-dimensional distinct element model-Part I. A scheme to detect and represent contacts in system composed of many polyhedral blocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sei. & Geomech, Vol.25, No.3, pp.107-116, 1988.
- 8) Wenjie Shiu, Frederic Victor Donze, Laurent Daudeville: Discrete element modelling of missile impacts on a reinforced concrete target, Int. J. Computer Applications in Technology, Vol.34, No.1, pp.33-41, 2009.
- 9) Kaishin Liu, Lingtian Gao, Shinji Tanimura: Application of Discrete Element Method in Impact Problems, JSME International Journal, Series A, Vol.47, No.2, pp.138-145, 2004.
- 10) Federico A. Tavarez, Michael E. Plesha: Discrete element method for modelling solid and particulate materials, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.70, pp.379-404, 2007.
- 11) A. Furukawa, J. Kiyono, and K.Toki: Proposal of a numerical simulation method for elastic, failure and collapse behaviors of structures and its application to seismic response analysis of masonry walls, Journal of Disaster Research, Vol.6, No.1, pp.51-68, 2011.
- 12) 古川愛子，清野純史，土岐憲三：3 次元個別要素解析における Leap-Frog 法に基づいた剛体回転運動の時間積分手法，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol.66, No.1, pp.342-351, 2010.
- 13) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書[設計編]，2008.
- 14) P. H. Bischoff, S. H. Perry: Compressive behavior of concrete at high strain rates, Materials and Structures, Vol.24, pp.425-450, 1991.

(原稿受付 2018. 5. 13)

(登載決定 2018. 9. 2)