

SPH法を用いたコンクリート版の衝撃貫通破壊に関する基礎的研究

園田, 佳巨
九州大学大学院工学研究院社会基盤部門 : 教授

後藤, 航
九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 : 修士課程

<https://hdl.handle.net/2324/4793194>

出版情報 : Journal of structural engineering. A. 63A, pp.1141-1148, 2017-03. Japan Society of Civil Engineers

バージョン :

権利関係 :



SPH 法を用いたコンクリート版の衝撃貫通破壊に関する基礎的研究

A fundamental study on the impact penetration failure of a concrete slab using SPH method

園田佳巨[†], 後藤航^{*}

Yoshimi Sonoda, Ko Goto

[†]工博, 九州大学大学院教授, 工学研究院社会基盤部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地)^{*}九州大学大学院修士課程学生, 工学府建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地)

Recently, consideration of high velocity flying object impact for infrastructure is needed in order to protect human life from natural disasters due to tornadoes or volcanic eruptions. Although many experiments on the impact strength of concrete structural members have been performed so far, prediction of local failure such as penetration or scabbing of concrete caused by high velocity flying object impact is still difficult and inaccurate. Hence, Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) Method is applied to simulate the local failure of concrete structural members (beam and slab). At first, the accuracy of SPH analysis is confirmed by elastic plastic behavior of RC beam under low speed impact load. After that, penetration failures of concrete slab under high speed impact are simulated and discussed the penetration failure limit of concrete slab using analyses results.

Key Words: concrete slab, SPH method, impact penetration failure

キーワード: コンクリート版, SPH 法, 衝撃貫通破壊

1. 緒言

近年、竜巻や火山噴石などの自然災害から人命を守るために、飛来物の衝突を想定した防護構造物の重要性が認識され始めている。例えば、原子力規制委員会は、原子力関連施設を防護する構造物に対して、竜巻による飛来物の衝突を考慮した設計の規定¹⁾を定めている。また、火山噴石に関しても、2014 年(平成 26 年)9 月 27 日に発生した御嶽山の火山噴石による事故を契機として、噴石シェルター等の防護工の設計法の検討がなされており、これら防護構造物の飛来物に対する耐衝撃性能(貫通防止機能)を正確に評価することが求められている。

これまで、コンクリート版の貫通防止性能に関する研究として、森田らは、短繊維補強と鉄筋補強による局部破壊の抑制効果を実験的に検討し、裏面剥離限界や貫入深さの評価式を提案している²⁾。三輪らは、剛飛翔体の衝突を受けるコンクリート版の局部破壊に関して、実験的な検討および有限差分法による解析で検討している³⁾。

解析的な研究としては、三上らは降伏強度や降伏条件式の違いがコンクリート版の衝撃挙動に与える影響につ

いて有限要素解析で検討している⁴⁾。また、別府らはメッシュフリー法の一つである MPS 法を適用し、コンクリート版の弾性および弾塑性衝撃解析への適用性について検討を行っている^{5,6)}。

一般に、コンクリート版の貫通防止性能を実験的に評価するには、安全性の確保や費用的な制約を考慮して小さな供試体を用いた実験が行われ、実規模のコンクリート版を用いた貫通実験は殆ど見受けられない。

一方、衝撃応答解析に関しては、圧潰や破断などが生じない比較的小さな塑性変形を予測することは、汎用有限要素解析ソフトを用いて容易に行えるが、飛来物が衝突・貫通するような構造部材の破壊の予測は困難であり、未だに解析結果の信頼性も高くはない。

本研究では、これらのことを踏まえて、固体の大変形にともなう破壊を容易に表現できるメッシュフリー法(SPH 法⁷⁾を適用)を用いて、圧潰や貫通などの局部破壊を再現するための力学モデルの検討を行い、無筋コンクリート版の貫通防止性能を評価する方法について検討した。

[†] 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: sonoda@doc.kyushu-u.ac.jp

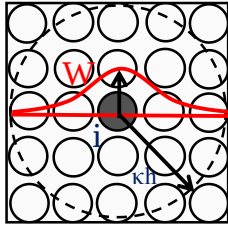


図-1 SPH 粒子による固体の離散化

2. 解析手法

本研究では、隣接する要素間で変位の連続性を仮定する FEM では取り扱いが困難な破壊現象を解析するため、大変形時も解析精度の低下が少ないメッシュフリー法である SPH 法を採用した。

SPH 法は、図-1 に示すように固体を粒子の集合体として離散化し、各粒子の影響範囲内に存在する他の粒子の物理量を用いて、kernel 関数による重み付き平均によって応答を求める手法である。SPH 法の基礎式を式(1)、式(2)に示す。ここで、 W : kernel 関数、 κ : kernel 関数で決まる定数、 h : 影響半径、 $\langle \cdot \rangle$: SPH 近似された関数、 Ω : 影響半径内の積分領域、 $x_{i,j}$: ある粒子 i の位置および i の影響半径内の粒子 j の位置である。

$$\langle f(x_i) \rangle = \int_{\Omega} f(x_j) W(x_i - x_j, h) dx_j \quad (1)$$

$$\langle \nabla f(x_i) \rangle = \int_{\Omega} f(x_j) \nabla W(x_i - x_j, h) dx_j \quad (2)$$

本研究では、SPH 法での諸量について、影響半径を粒子径の 2.3 倍、kernel 関数は 3 次スプライン関数を採用し、時間刻みはクーラン条件を考慮して、4 章で 3.4×10^{-7} (s)、5 章で 2.0×10^{-7} (s) と設定している。

3. コンクリート材料の力学モデル

一般にコンクリート材料の弾塑性挙動を解析する際には、降伏条件として圧縮依存性を考慮できる Drucker-Prager の条件式を用いることが多い。しかし、貫通現象のように、衝突箇所に非常に大きな圧縮力が作用することが想定される場合には、コンクリートの圧縮強度を過大評価する可能性が高いことが指摘されている⁸⁾。そこで、本研究では貫通現象を対象とした解析には、圧潰曲面を設けることにした。さらに、通常の Drucker-Prager の線形の降伏曲面 ($\sqrt{J_2} - I_1$ 平面包絡線) を非線形に変えた降伏条件式を既往の研究³⁾⁹⁾を参考に採用し、両者の衝撃挙動に対する影響を比較検討した。

なお、線形および非線形 Drucker-Prager の降伏関数はそれぞれ以下の式で表される。

$$f(I_1, J_2) = \sqrt{J_2} + \alpha I_1 - k = 0 \quad (3)$$

ここで、 I_1 は応力の 1 次不変量、 J_2 は偏差応力の 2

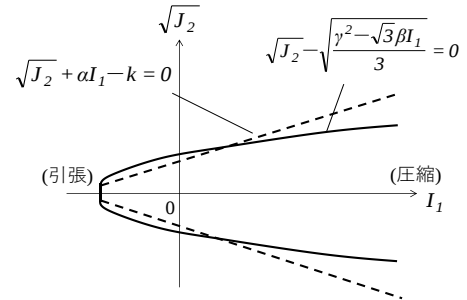
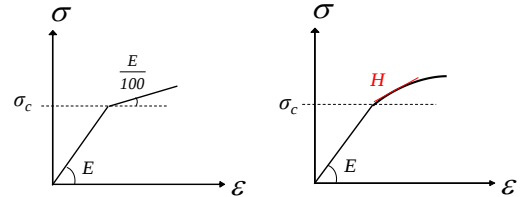


図-2 Drucker-Prager の降伏曲面



(a) 線形 Drucker (b) 非線形 Drucker

図-3 応力-ひずみ関係(単軸換算)

次不変量、 α, k は材料によって決まる定数である。

$$f(I_1, J_2) = \sqrt{J_2} - \sqrt{\frac{\gamma^2 - \sqrt{3} \beta I_1}{3}} = 0 \quad (4)$$

$$\gamma = \sqrt{\sigma_c \sigma_t}, \quad \beta = \sigma_c - \sigma_t \quad (5)$$

ここで、 σ_c : 一軸圧縮強度、 σ_t : 一軸引張強度である。

図-2 に $\sqrt{J_2} - I_1$ 平面における線形 Drucker-Prager および非線形 Drucker-Prager の降伏曲面の比較を示す。この図より、特に高圧縮領域において降伏曲面の相違が大きくなり、静水圧が大きくなるにつれ、非線形 Drucker-Prager による解析の方が、せん断破壊し易い特徴を有することがわかる。なお、一般的に von Mises や線形 Drucker-Prager の降伏条件を用いた解析で硬化を考慮する場合には、図-3(a) に示すように単軸換算時の応力-ひずみ関係で一定の硬化係数 (初期剛性の 1/100 の値を用いる場合が多い) が用いられるが、本解析では図-3(b) に示すような非線形な硬化係数を導入した。具体的には、SPH 法の陽解法の解析手順の中で、各時間刻みで、図-3(b) のように相当応力増分を相当塑性ひずみ増分で除した値 (図中 H) を硬化係数として計算し、この値を弾塑性構成則の式に適用することで、時刻歴に変化する非線形な硬化を考慮した。

$$H = \frac{d\sigma}{d\varepsilon^p} \quad (6)$$

これら非線形な降伏条件式が、コンクリート部材の挙動に与える影響については次節以降に述べる。

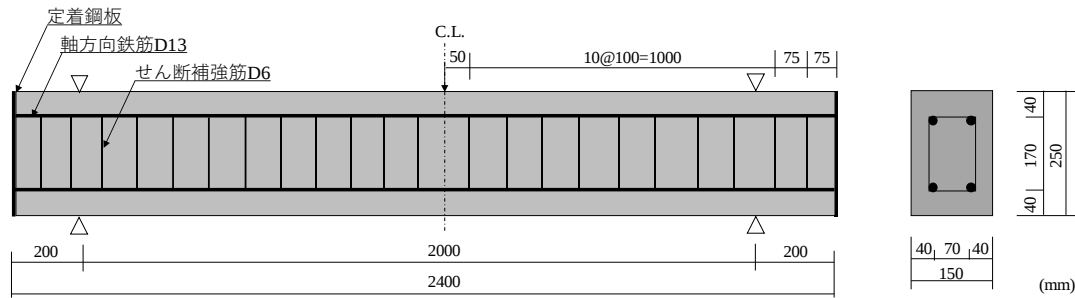


図-4 RC はりの形状寸法および配筋状況

4. SPH 法を用いた衝撃応答解析の妥当性の検証

一般的な線形 Drucker-Prager 式と前節で示した非線形 Drucker-Prager 式を用いて、既往の RC はりに対する低速度衝突実験¹⁰⁾を解析し、実験結果と比較することで SPH 法を用いた衝撃応答解析の妥当性の検証を行なった。

4.1 実験モデルおよび解析概要

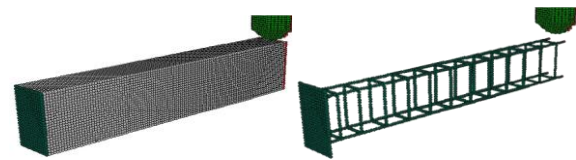
RC はりの形状寸法および配筋状況を図-4 に示す。RC はりは 150×250mm (はり幅×はり高)、全長が 2400mm であり、軸方向鉄筋には D13 をかぶり高さ 40mm の位置に上下端に 2 本ずつの合計 4 本配筋されている。さらに、せん断補強筋として D6 を、支点間で 100mm 間隔毎に配筋されている。実験に用いられた重錘は、質量 300kg、全長 1400mm、重錘先端の曲率直径が 90mm の円柱状鋼製重錘が用いられており、RC はりの中央上面に衝突させている。これらの衝撃実験は、室蘭工業大学の岸らが、土木学会構造工学委員会の衝撃委員会の活動として行ったものである。鉄筋およびコンクリートの材料特性は、表-1 に示している。

本節で用いた解析モデルの全体図および配筋状況を図-5 に示す。具体的には、粒子径を 10mm で離散化した 1/2 モデルを用いて RC はりの衝撃応答解析を行った。境界条件は、支点位置の底面上の粒子は鉛直方向変位を拘束し、さらに 1/2 対称面上の粒子の水平 (はり軸方向) 変位を拘束した。また、今回の解析では、第一撃の衝撃応答を主たる対象として検討を行っているので、支点治具についてはモデル化を省略した。なお、解析上での不連続面に対して、ひび割れによる損傷を考慮した異方性剛性を採用し、鉄筋-コンクリート間には重み関数による低減で評価している。衝突物は実験同様に塑性が生じない線形弾性体とし、重錘との衝突モデルは、粒子同士の間入分の体積と粒子体積の比を体積ひずみとみなして静水圧応力を算出し、その値を粒子間の反力として作用させている。

鉄筋材料の降伏条件には、von Mises を採用し、図-6(a) に示すように圧縮側と引張側の両方に初期剛性の 1/100 となる硬化を考慮している。コンクリート材料の構成則

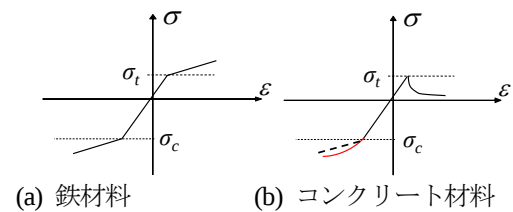
表-1 材料特性

材料名	鉄筋		コンクリート
	D6	D13	
密度 (kg/m ³)	7853	7853	2500
静弾性係数 (kN/mm ²)	206	206	23.1
圧縮、降伏強度 (N/mm ²)	368	373	41.4
引張強度 (N/mm ²)	—	—	4.14
ポアソン比	0.30	0.30	0.23



(a) 全体図 (b) 配筋状況

図-5 1/2 解析モデル (斜視図)



(a) 鉄材料 (b) コンクリート材料

図-6 応力-ひずみ関係 (単軸換算)

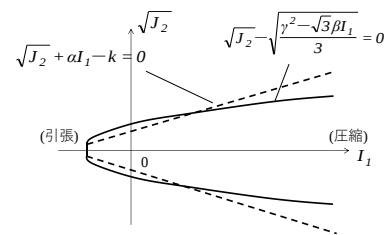


図-7 降伏条件

については、図-6(b)に示すように、引張側では軟化を、圧縮側では硬化を考慮しているが、線形 Drucker の場合は鉄筋と同じように一定値の硬化係数を、非線形 Drucker については赤線で示すような非線形の硬化係数を考慮した。なお、降伏曲面については図-7 に示す前節と同じものを用いている。

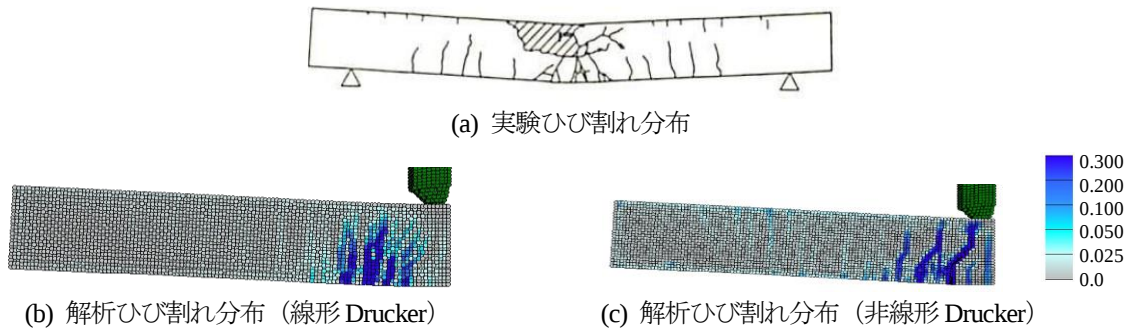


図-8 RC はりのひび割れ分布の比較

4.2 解析結果

(1) 破壊状況の比較

図-8 にひび割れ分布の比較を示す。なお、一般にコンクリートは数 100μ ～数 1000μ 程度の引張ひずみで視認できるひび割れが生じることから、解析結果については、最大主ひずみの分布を表している。図-8(b),(c)より非線形 Drucker の方がより明瞭に、RC はり底面から中央衝突部に向かってひび割れが進展する状況が認められ、ひび割れ状況を適切に再現しているものと考えられる。

(2) 応答波形の比較

図-9～11 にそれぞれ重錘衝撃力波形、支点反力波形、変位波形について、実験結果と解析結果を比較している。

まず、図-9 から、第 1 撃目の波形の勾配および最大衝撃力は実験値および解析値で概ね一致していることが確認でき、線形 Drucker 式と非線形 Drucker 式で解析結果の差は殆ど見られない。次に、図-10 より、支点反力の波形も衝突直後の約 10ms までは実験値と解析値で概ね同様の波形を示していることがわかる。最初に負の支点反力が生じるのは、衝撃時に RC はり支点部に浮き上がりが生じる衝撃応答特有の現象で、解析においても明確に再現されていることが判る。最大支点反力に達するまでの時間は解析値の方が早い。最大支点反力は実験値と概ね等しいことが認められる。また、線形および非線形の Drucker の式で最大支点反力波形に差異が殆どないこともわかった。一方、最大支点反力以降に、実験値と解析値で支点反力に大きな相違があるのは、解析では跳ね上がり防止用の治具を省いた簡易なモデルを用いたことと、図-8 の破壊状況から分かるように、実験では重錘の衝突箇所にコンクリートの圧潰が生じて貫入することで、実験結果の方が重錘衝撃力が長く作用していることが考えられる。

図-11 に示す、RC はり衝突部底面の変位波形に関しては、実験値および非線形 Drucker 式の結果は応答の立ち上がりから最大変位に達し、変位が復元する過程の 40ms まではほぼ一致していることが認められる。両者の最終的な残留変位には約 10mm の差が生じているが、これは前述のように重錘の貫入状況と重錘衝撃力の作用時間の相違が影響したものと考えられる。一方、線形

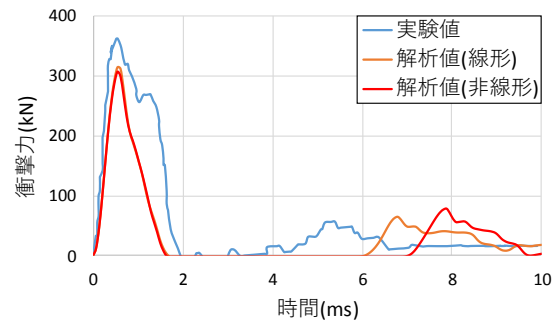


図-9 衝撃力—時間関係

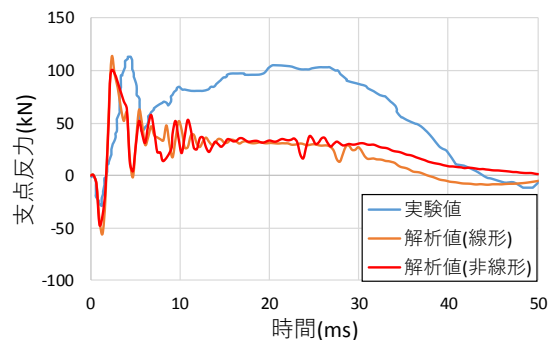


図-10 支点反力—時間関係

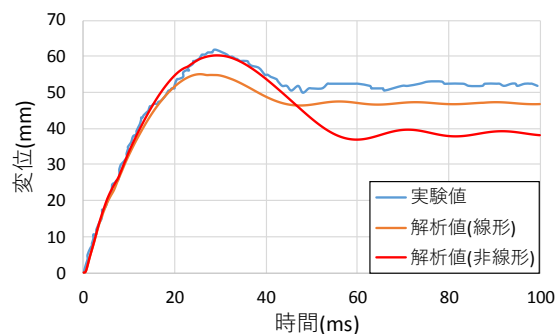


図-11 変位—時間関係

Drucker 式は最大変位を過小評価しているが、これらの結果も概ね変位応答を再現できているものと考えられ、これらの検証結果を踏まえて SPH 法を用いた衝撃応答解析は定量的に信頼できるものと考えられる。

5. 無筋コンクリート版の貫通破壊シミュレーション

コンクリートの降伏曲面に圧潰基準を導入し、SPH 法を用いて飛来物の衝突を受ける無筋コンクリート版の貫通破壊のシミュレーションを行った。ここでは、衝突速度を 10 ケース想定し、飛来物が無筋コンクリート版に衝突した時の破壊形態・衝撃力・力積などを調べ、無筋コンクリート版の貫通防止性能の評価法について考察した。

5.1 解析モデル

解析に用いたコンクリート版の幾何形状および寸法は、図-12 に示すように $2000 \times 2000 \times 200\text{mm}$ の板部材で、支点間距離 1750mm の 4 辺単純支持を想定した。衝突物は、質量 300kg 、先端形状は半球体（曲率半径 80mm ）とし、版中央上面に衝突させた。コンクリートの材料特性は、既往の衝撃実験を参考¹⁾に表-2 のように設定した。コンクリート粒子の力学特性には、図-13 に示すように単軸表記では圧縮側で硬化、引張側に軟化を考慮した応力-ひずみ関係を設定した。

本節では、無筋コンクリート版の貫通現象を解析するために、図-14 のように線形 Drucker-Prager 式と非線形 Drucker-Prager 式の 2 ケースそれぞれに、コンクリートの圧潰を表現する球状の曲面を設けることにした。圧潰とは、圧縮破壊の中でも粒子が完全に押し潰された状態を示す。具体的には、圧潰曲面を設け、曲面上の応力値に達したコンクリート粒子は圧潰が生じたとみなして、質量保存則を保持するために該当粒子の消去は行わないが、応力と剛性を強制的に零となる処理を施した。なお、今回の圧潰曲面は、静水圧が圧縮強度の 2 倍のときの Drucker-Prager の降伏曲面上の点と圧縮強度の 3 倍のときの静水圧軸上の点を結ぶ球形とした。

解析モデルについては、粒子径を 10mm で離散化した 1/4 モデルを用いて衝撃応答解析を行なった。そのため、支点位置の粒子は面外方向変位を拘束し、さらに 1/4 モデル対称面上の粒子は、対称面に直交する変位成分を拘束した。なお、衝突物については破壊が生じない線形弾性体を仮定した。鉄筋-コンクリート間やひび割れの不連続面の処理および重錘との衝突モデルは、前節に述べたものと同様である。

5.2 解析結果

(1) 貫通現象の再現

図-15 に衝突速度 30m/s の際に飛来物が無筋コンクリート版に貫入する過程を求めた計算結果を時刻歴に示すが、これらの図より、メッシュフリー法に分類される SPH 法を用いることで、コンクリートの圧潰を伴いながら衝突物が貫通していく過程を視覚的に分かり易く再現できることが分かる。

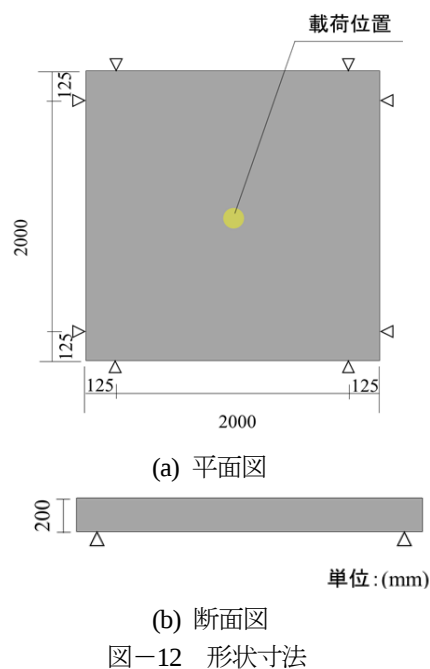


図-12 形状寸法

表-2 コンクリートの材料特性

密度 (kg/m^3)	2500
静弾性係数 (kN/mm^2)	29.0
圧縮強度 (N/mm^2)	34.1
引張強度 (N/mm^2)	3.41
ポアソン比	0.22

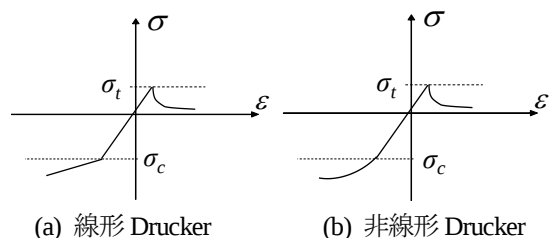


図-13 応力-ひずみ関係（単軸換算）

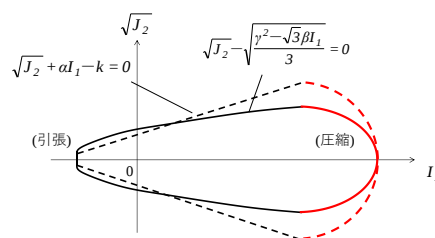


図-14 圧潰条件

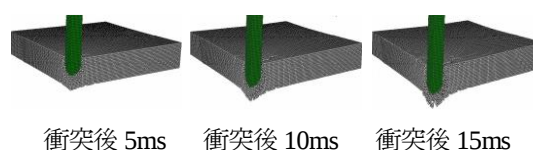
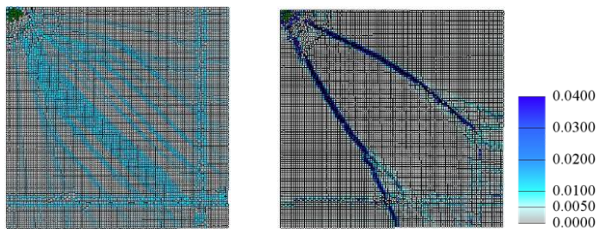


図-15 貫通現象の再現



(a) 線形 Drucker (b) 非線形 Drucker
図-16 コンクリート版裏面の最大主ひずみ分布

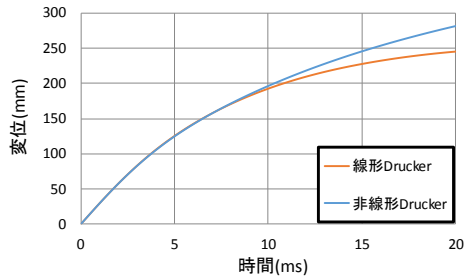


図-17 変位-時間関係

(2) 降伏条件によるコンクリート版の破壊状況の検討

図-16 は、コンクリートの降伏条件を線形 Drucker 式と非線形 Drucker 式の 2 ケースで、重錐の衝突速度が 30m/s の場合のコンクリート版裏面の最大主ひずみ分布を 1/4 モデルで比較したものである。この図より、(a)の線形 Drucker 式を用いた場合には、ひび割れ方向は図左上の衝突部裏面から版頂角部にかけて何本にも分かれて分散するのに対して、(b)の非線形 Drucker 式では衝突部裏面から頂角部にかけて 2 本の大きなひび割れ線が進展している様子が確認できる。このことから、降伏曲面を非線形にすると、損傷領域に局所化が起り、ひび割れの発生本数も減少する傾向にあることが推察される。

図-17 は、コンクリート版に衝突した飛来物の変位を線形と非線形の 2 種類の Drucker 式で時刻歴に比較したものである。この図より、初期変位はどちらも等しいが、8ms 以降に両者に差が生じ、線形 Drucker 式の場合は飛来物が貫入した状態で停止したのに対し、非線形 Drucker 式の場合は飛来物が貫通してしまう結果が得られた。これは、両方でコンクリートの初期剛性は同じであるのに対して、高圧縮域(大きな静水圧状態)では非線形 Drucker 式の方が線形 Drucker 式より降伏曲面が小さく、塑性状態に移行し易いためであると考えられる。従って、降伏条件を線形 Drucker 式から非線形 Drucker 式に変えることで、ひび割れ進展状況および応答変位量が明確に異なることが確認できた。本研究で用いた 2 つの式の場合、非線形 Drucker 式の方が線形 Drucker 式よりも構造部材の耐荷性能を安全側に評価できることが分かった。

(3) 衝突速度による衝撃力および力積の検討

図-18 では、重錐の衝突速度を変化させた時の発生衝撃力-時間関係を示している。なお、ここで示す衝撃力は、

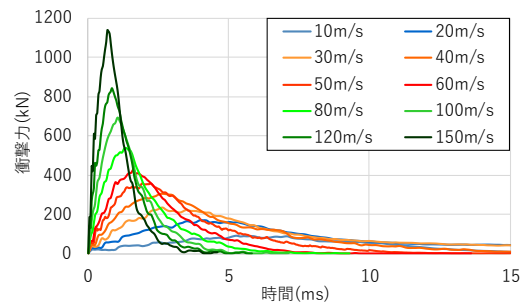


図-18 衝撃力-時間関係

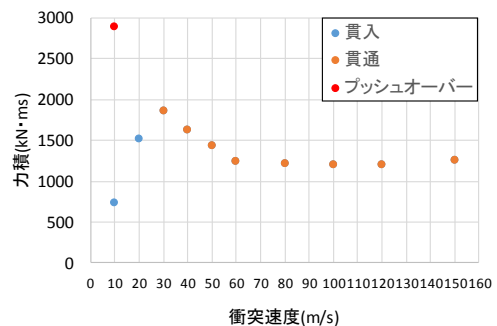


図-19 力積-衝突速度関係

重錐の加速度に質量を乗じて求めたものである。図-18 より、衝突速度が大きいほど最大衝撃力が大きくなり、発生時間も早くなる傾向が明瞭に認められた。また、衝突速度が 80m/s 以上になると、最大衝撃力の起ち上がり勾配が急に大きくなること、衝突速度が 50m/s 以下になると、最大衝撃力以降の除荷勾配が小さくなっていくことがわかる。次に、図-19 に衝撃力-時間曲線の面積を積分した力積と衝突速度の関係を示す。図-19 を見ると、衝突速度と力積の間には明確な傾向があり、まず、飛来物が 10 m/s~20m/s の低速度で衝突して貫通に至らない場合には、力積は速度に比例して線形的に増加することが分かる。一方、30 m/s ~50m/s の中速度で衝突してコンクリート版を貫通する場合には、貫通に要する力積が速度の増加とともに減少する結果が得られた。さらに衝突速度が 60 m/s ~150m/s と高速になると、コンクリート版の貫通に必要な力積はほぼ一定となることが確認できた。このことから、衝突する物体の速度がある閾値以上になると、貫通に必要な力積は殆ど変わらなくなると考えられる。さらに、飛来物の衝突による破壊と比較するために 10m/s の一定速度で版を押し抜くプッシュオーバー解析を行った結果、版の押し抜きに必要な力積は、図-19 の赤点部分で示す約 3000 (N・s) と、飛来物の高速衝突で貫通に要する力積よりはるかに大きいことも確認できた。

以上のことから、高速度で衝突する物体の貫通への対策として、閾値となる衝突速度と貫通に必要な力積量を示すことで、無筋コンクリート版の貫通限界を把握できると考えられる。

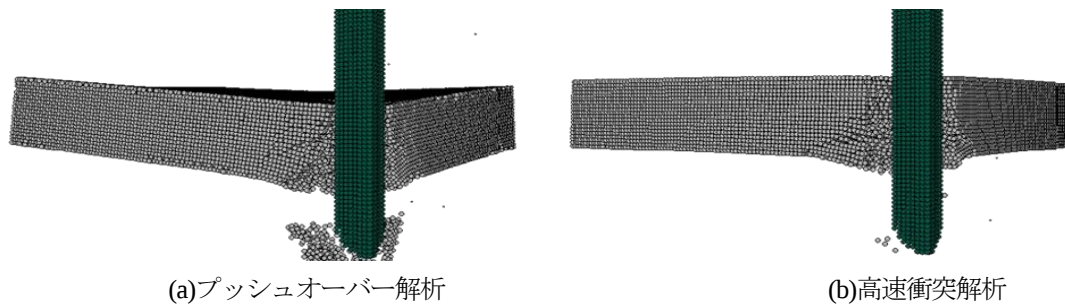


図-20 プッシュオーバー解析と高速度衝突解析の変位比較

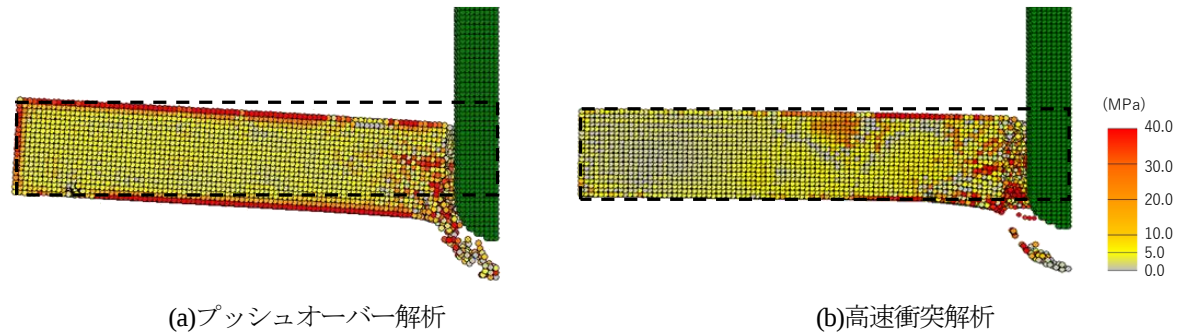


図-21 プッシュオーバー解析と高速度衝突解析の相当応力の比較

(4) プッシュオーバー解析と高速衝撃解析の比較

図-20 に非線形 Drucker 式を用いてプッシュオーバー解析と高速衝突解析を行って得られた破壊状況を図示している。なお、プッシュオーバー解析は衝突物が 10m/s の一定速度でコンクリート版を押し抜く条件を与えて解いた強制変位解析であるのに対し、高速衝突解析は衝突速度 100m/s で衝突させた場合の衝撃応答解析である。

この図より、プッシュオーバー解析では、コンクリート版が全体的に曲げ変形していることが確認できる。一方、高速衝突解析では図-20(a)に比べて、衝突箇所近傍に局部的なせん断変形が卓越しており、脆性的な押し抜きせん断破壊が生じていることが認められる。

さらに図-21 に、横断面における相当応力分布（図中の黒点線により囲まれた領域は無筋コンクリート版の初期位置）を表している。この図からも、(a)と(b)の応力状態には明確な差異が認められ、図-21(a)の相当応力分布には衝突部近傍だけでなくコンクリート版の上下縁に曲げ変形を示す大きな相当応力が認められ、曲げ破壊と押し抜きせん断破壊が混在していると考えられる。図-21(b)には上下縁に曲げ破壊を示す大きな相当応力は分布しておらず、貫通する飛来物との接触面に表面から裏面につながる大きな相当応力値が分布していることから、押し抜きせん断破壊モードであることが推察される。

(5) 線形 Drucker 式と非線形 Drucker 式の比較

ここでは、高速衝突時の無筋コンクリート版の応答を線形 Drucker 式と非線形 Drucker 式で比較した。図-22 は、速度 100m/s で重錐が衝突した 3ms 後の相当応力分布および破壊モードを比較したものである。この図より

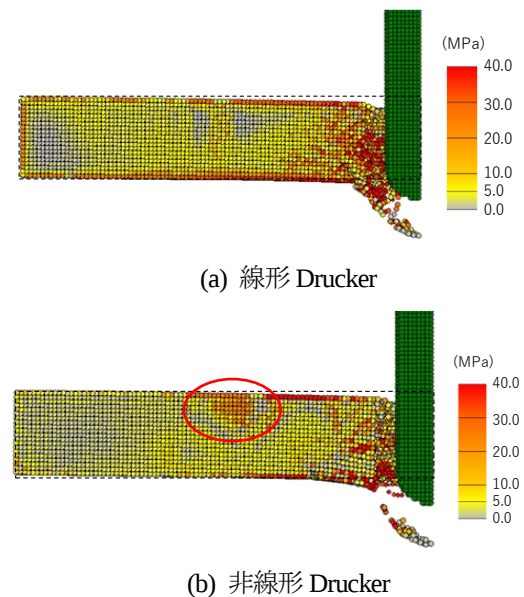


図-22 高速衝突時の相当応力比較

線形 Drucker-Prager の降伏条件を用いた図-22(a)は、(b)よりも上下縁に 30~40MPa 以上の大きな相当応力が広範囲で認められ、曲げ破壊の割合が高いと思われる。一方、(b)では衝突部から底面にかけて斜めにコンクリート版が変形していること、上縁 1/4 点に大きな相当応力エリアが認められ、破壊モードは押し抜きせん断破壊の割合が高いことが推察された。

6. 結論

本研究は、飛来物の衝突によるコンクリート版の局部破壊（貫通限界）を表現するための解析手法を提示し、貫通阻止性能を数値解析で評価するための基礎的な検討を行ったものである。本研究の成果を以下に要約する。

- (1) SPH 法を用いた RC 梁の衝撃曲げ破壊実験のシミュレーション解析の結果から、重錐衝撃力や変位応答を精度良く再現できることが認められ、解析手法の妥当性が検証できた。
- (2) RC 梁の衝撃曲げ解析では、2 種類のコンクリートの降伏条件（線形・非線形 Drucker 式）で、変位応答等に大きな差異は無いが、ひび割れ分布には相違が認められた。
- (3) 本解析で用いた非線形 Drucker 式は、線形式よりも高圧縮応力域で降伏強度が小さくなるため、衝突荷重によるコンクリート部材の挙動は、塑性変形の局所化とひび割れ本数の減少（ひび割れ幅は増大）をもたらし、安全側の結果を与えることが確認できた。
- (4) コンクリートの降伏曲面の圧縮側に圧潰基準を設け、静水圧が非常に大きい場合の圧潰を想定することで、コンクリート版に飛来物が貫入・貫通する局部破壊を良好に再現できることが確認できた。今後、本解析の定量的な妥当性については、検証する必要があると考えられる。
- (5) 無筋コンクリート版に飛来物が衝突する場合、衝突速度によって破壊形態や力積は変化するが、ある一定値以上の衝突速度になると、貫通に必要な力積は変わらないことがわかった。また、低速度で押し抜くために必要な力積は、高速衝突の力積より大きいことが確認できた。今後、臨界衝突速度と貫通に必要な力積量について詳細に検討することで、貫通破壊に対する安全性照査を示すことができると考えられる。

参考文献

- 1) 原子力規制委員会：原子力発電所の竜巻影響評価ガ

イド，原規技術第 1409172 号，2013，改正，2014

- 2) 森田 武，別府 万寿博，鈴木 誠：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性状における短繊維補強と鉄筋補強の効果に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.2，2013
- 3) 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
- 4) 三上敬司：衝撃荷重を受けるコンクリート床板の降伏条件における影響，第 8 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，pp.93-96，2006
- 5) 別府 万寿博，園田佳巨，玉井宏樹：粒子法による鋼および RC はりの弾塑性衝撃応答解析に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.52A，pp.1179-1188，2006
- 6) 別府 万寿博，園田佳巨，玉井宏樹：粒子法によるコンクリートおよび RC はりの非線形解析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.2010，2006
- 7) Gingold, R.A., Monaghan, J.J. : Smoothed particle hydrodynamics : Theory and application to non-spherical stars, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol.181, pp.375-389, 1977
- 8) 藤掛一典：高ひずみ速度下におけるコンクリートの引張・圧縮特性に関する研究，筑波大学博士学位論文，1999
- 9) 三輪幸治：剛飛翔体の高速衝突を受けて生じるコンクリート板の裏面剥離の発生メカニズムと耐衝撃補強に関する研究，防衛大学校博士論文，2010
- 10) 土木学会：衝撃実験・解析の基礎と応用，土木学会構造工学シリーズ 15，pp.73～93，2004.
- 11) 岸 徳光，三上 浩，栗橋祐介：低速度衝撃を受ける四辺単純支持 RC 版の耐衝撃設計法に関する一提案，構造工学論文集，Vol.55A，pp.1327-1336，2009

(2016 年 9 月 26 日受付)

(2017 年 2 月 1 日受理)