

ひずみ速度効果を考慮したペリダイナミクスによる 鋼製避難シェルターに対する噴石衝突の破壊解析

Failure analysis of a cinderblock impact on a steel evacuation shelter
by peridynamics considering strain rate effects..

柴田良一¹⁾

Ryoichi Shibata

1) 博(工) 岐阜工業高等専門学校 建築学科 (〒501-0495 岐阜県本巣市上真桑2236番2, E-mail: ryos@gifu-nct.ac.jp)

In order to reproduce destructive phenomena as a future development of this research, a numerical study of the impact of a cinder block on a steel evacuation shelter is attempted using Peridigm, a destructive analysis system based on Peridynamics theory, which discretises the integral equation without using spatial differentiations.

Key Words : Peridynamics, Fracture Analysis, Strain Rate Effects, Volcanic Cinder Cones, Steel Shelters

1. 背景と目的

日本は110の活火山を有する世界有数の火山国であり、火山噴火による直接的被害の対策として、噴石の衝突のような災害に対する構造物の安全性の確保が重要な課題となっている。噴石の衝突時の速度としては最大50m/s～300m/sと推定され、噴石の大きさについては内閣府による「活火山における退避壕等の充実に向けた手引き¹⁾」では、対策の対象とする大きさを直径10cm以下、10cm～30cm、30cm～50cm、50cm超と区分している。この噴石の速度と大きさの情報から、噴石衝突の構造物破壊の影響は著しく大きいと推定される。そのため、衝撃実験や数値解析により、耐衝撃性評価および避難シェルター等の安全性の検証が進められている。

これに対して本研究では、鋼製避難シェルターへの噴石衝突について、空間の微分量を用いずに積分方程式を粒子により離散化する手法に注目し、Peridynamics理論の破壊解析システムPeridigmによる、高速度衝突の噴石の材料特性への影響を考慮した数値解析の研究を試みる。この材料特性への影響の考慮については、文献2)より、鋼材の力学特性に及ぼすひずみ速度の影響として、ひずみ速度の増加により降伏応力が増加するなどの変化があると考えられるため、粒子モデル破壊解析においてもひずみ速度効果に着目し、噴石衝突の正確な分析への効果を検討する。

2. Peridynamicsにおける材料特性の設定研究手法

(1) Peridynamics理論

Sillingら2)によって提唱されたPeridynamics理論は、物体を粒子で表現し、粒子の運動によって変形や破壊を再現する解析手法である。粒子を計算点として時間刻みごとに運動をさせることで、物体の挙動を再現する。また、

粒子同士の相互作用を消失させることで、亀裂や破断といった物体のつながりを断つような不連続性を含む破壊現象を再現することが可能である。なお、支配方程式は積分形式で記述されるため、変形の連続性を前提とする空間微分によるひずみを用いないことが特徴である。

(2) ひずみ速度効果の適用

Sillingら2)によって提唱された本研究で行うPeridigmによる解析では、設定する材料物性値のパラメータの降伏応力について、ひずみ速度効果を考慮した動的降伏応力を設定することで、ひずみ速度効果を適用した解析を行う。動的降伏応力の算定式については、鋼材のひずみ速度効果による応力の上昇を考慮した高橋ら4)の式(式[1])を用いることとする。

$$\sigma_{y,d}/\sigma_y = 1.202 + 0.04 \cdot \log \dot{\epsilon} \quad [1]$$

($\sigma_{y,d}$:動的降伏応力, σ_y : 静的降伏応力, $\dot{\epsilon}$: ひずみ速度)

シェルターのひずみ速度については、本研究で取り扱うシェルターの噴石衝突が面外方向の変形であることから、曲げ変形が卓越し、軸ひずみが微小になると考えられるため、ひずみ速度の代わりとして本研究提案の「面外たわみ速度」を用いるものとする。面外たわみ速度は、板の面外方向の衝突変形について、面外方向の最大変位量(たわみ)を変位にかかった時間で割り、さらに衝突部の面外方向の長さ(板の厚み)で割ることで無次元化したものである。最大変位量とかかった時間については、実験やひずみ速度効果を適用していない静的物性値による解析の結果を用いるものとする。

3. 面外方向の変形へのひずみ速度効果適用

本章では、本研究提案の面外たわみ速度から算出される動的物性値の有効性を、実験と再現解析の結果を比較することにより検証する。また、取り扱う実験は、既往研

究5)の板厚6mmのSS400鋼板(1150mm×1150mm)の中心に対して質量6kgの飛翔体を速度41.6m/sで衝突させている。

(1) ひずみ速度効果適用の有効性の検証概要

材料物性値を表1、解析モデルを図2に示す。鋼板は、厚さ6mm、大きさ1150mm×1150mmで、周囲を固定面とした。また、衝突物は、直径50mmの円柱とし、質量を約6kgとした。なお静的な通常材料特性で、動的は歪速度効果適用の場合である。

表1 破壊解析の物性値

対象	材料	密度 [kg/m³]	降伏応力 [N/m²]
衝突物	弾性	10180	-
鋼板：静的	弾塑性	7850	323000000
鋼板：動的	弾塑性	7850	427948963

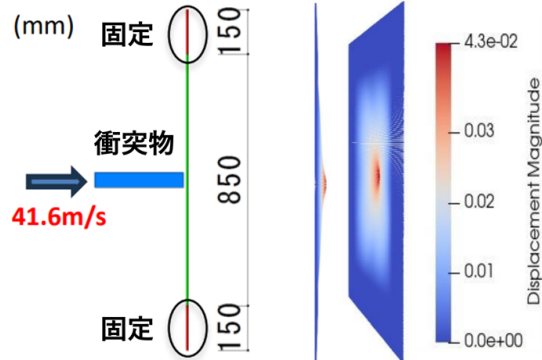


図2 解析モデル

図3 解析結果

(2) ひずみ速度効果適用の有効性の検証

図3に鋼板の変形状態を示す。静的物性値と動的物性値による解析では、変位の数値には明確な違いがあるが、変位分布が類似している。

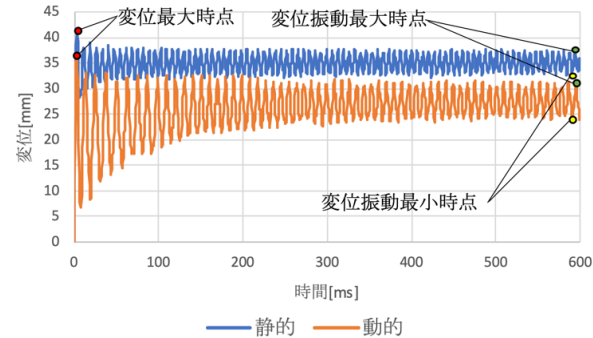


図4 鋼板中心部での時間変位関係

図4から静的と動的の共通点として鋼板中心部では、解析初期(衝突開始初期)の段階で、変位が最大となり、その後、変位の値が振動のように上下する挙動があることが確認できる。相違点として、全体を通じて鋼板中心部の変位の大きさに差があり、ひずみ速度効果を考慮した動的物性値の解析の方が、最大変位や変位振動の基準となる変位帯の大きさが、静的より小さいことが確認できる。また変位振動について、定量的に比較すると、静的では、最大変位後、約5mm～10mmの幅で変位振動が発生しているが、動的では、変位後の初期では、約25mmの変位振動があり、その後徐々に約5mmの振動に変化していくという時間-変位関係が確認できる。加えて、鋼板中心の変位振

動の基準となる変位帯については、静的物性値では約36mm、動的物性値では約28mmと、動的の方が約8mm小さいことが分かる。

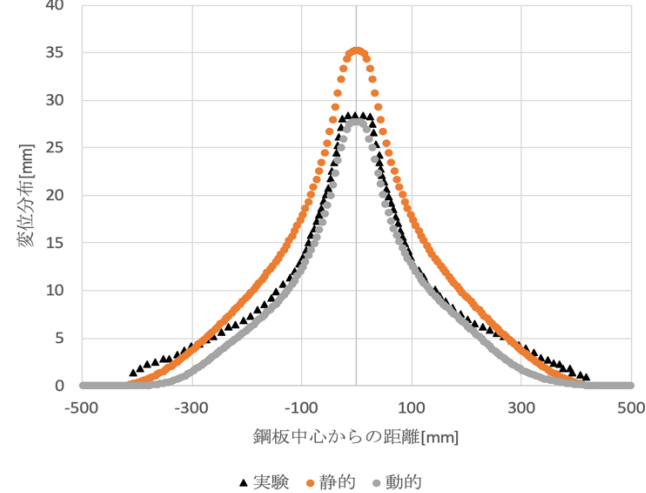


図5 鋼板全体での変位振動平均値分布

図5から変位振動の平均値における鋼板全体の変位を比較すると、実験が28.4mmであるのに対して、静的物性値の解析は35.2mmと6.8mm(24%)の差があり、動的物性値の解析は27.8mmと-0.6mm(2%)の差がある。この結果から、面外たわみ速度による動的降伏応力の設定は、実験値との誤差を6.2mm、22%小さくすることができ、より実験に近い変形状態を解析により再現できたといえる。

4. まとめ

本以上の解析結果の考察から、Peridigmにおいて、面外たわみ速度によるひずみ速度効果を考慮した動的物性値は、鋼板の局所的な変形における弾性的挙動を再現するのに、比較的良好な精度を出すといえる。

参考文献

1) 内閣府(防災担当)：活火山における退避壕等の充実に向けた手引き，2015.12.
2) 伊藤義人，笹田俊治，大野隆：非線形衝撃応答解析を用いたひずみ速度効果に関する研究，鋼構造論文第3巻，第11号，pp.47-58，1996.9.
3) S.A. Silling：Reformulation of elasticity theory for discontinuities and long-range forces，Journal of the Mechanics and Physics of Solids，Volume 48，Issue 1，pp.175-209，2000.1.
4) 高橋芳彦，大野友則，太田俊昭，日野伸一：衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの弾塑性挙動に及ぼす材料のひずみ速度効果，構造工学論文集，Vol.37A，pp.1567-1580，1991.3.
5) 濱田匠李，別府万寿博，堤成一郎，市野宏嘉：平坦状の先端を有する飛来物衝突を受ける鋼板の貫通挙動に関する研究，土木学会論文集 A2(応用力学)，Vol.77，No.2，pp.I_359-I_370，2021

謝辞：本研究の展開は、藤野壮人氏(岐阜高専専攻科)のご協力を頂いたことに感謝いたします。