

## (38) 3次元個別要素法を用いた落石作用を受ける敷砂の衝撃伝達挙動の解析

Analysis of impact response of the sand cushion by rock fall using three-dimensional DEM

渡辺高志\*, 榎谷浩\*\*, 油谷勇佑\*\*\*, 佐藤彰\*\*\*\*

Takashi Watanabe, Hiroshi Masuya, Yusuke Aburaya, Akira Satoh

\* 修(工), (株)構造計画研究所, 防災・環境部 (〒164-0011 東京都中野区中央 4-5-3)

\*\* 工博, 金沢大学教授, 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

\*\*\* 修(工), 西宮市, 防災・安全局 (〒662-8567 兵庫県西宮市六湛寺町 10-3)

\*\*\*\* 日本サミコン(株), 技術部設計開発課 (〒950-0925 新潟県新潟市中央区弁天橋通 1-8-23)

Key Words: (Rock fall, Impact analysis, Sand cushion, Distinct Element Method, Shape of rock)

キーワード: 落石, 衝撃解析, サンドクッション, 個別要素法, 落石形状

## 1. まえがき

我が国は地質が脆弱な上に地震も多く, 多雨多雪地域であるために山岳地帯に建設された構造物は地滑り, 崖崩れや落石などの自然災害の大きな問題を抱えている。

山間部における自然災害に対する落石覆工等の防護構造物は, 落石等による衝撃荷重を受けることが前提となることから, クッション材を使用しない覆工も海外では一部見られるものの, クッション材を利用した設計が現在でもなお合理的と考えられる。既存の構造物の補修・補強の点からもクッション材の適切な利用を進めていく必要があると考えられる<sup>1,2)</sup>。

クッション材に関する研究は長年行われているものの, このような緩衝材を通して構造物に伝達される衝撃力の評価や緩衝効果は, 十分には明らかにされていないわけではない。また, クッション材の複雑な衝撃挙動は理論的な説明が難しく, 性能照査型設計を行うためにも実験・解析的研究の進展が望まれている。

そこで本研究では, 緩衝材の1つであるサンドクッション上への重錘衝突による室内実験を行い発生衝撃力について調べた。次に個別要素法を用いて, 実験に使用した重錘を精度よくモデル化する手法を具体的に示し, サンドクッション層を異なる大きさの個別要素の集合体としてランダムにモデル化することについて検討した。最後に本手法の解析結果は, 実験結果をよりよく再現できることを示した。

## 2. 実験概要

写真-1 は金沢大学構造工学研究室ハードラボに設置



写真-1 実験装置全体



写真-2 土槽底面に配置した土圧計

されている自由落下式実験装置である。幅 2.35m, 奥行き 3.5m, 高さ 4.5m の重錘落下用フレームを用いて重錘を中心に設置した土槽に自由落下させる装置である。土槽は 1.1m 四方の面積に砂を敷くことができ, 敷厚は 0.75m まで対応可能である。写真-2 に示すように土槽

底面には土圧計を設置しており、底面への伝達衝撃力を計測できる。重錘の落下は中央位置に限定しており、対称性を考慮して四分の一の正方形の領域に36個の土圧計を設置した。土槽には緩衝材として厚さ30cm, 50cm, 70cmの敷砂材を敷設し、2.0kNの重錘をそれぞれ落下高さ0.5m, 1.0m, 1.5m, 2.0m, 2.5m, 3.0mから3回ずつ全てスパン中央位置に落下させた。

図-1は用いた2種類の重錘を示したものである。底面が平らな円であるもの(以後、平底と呼ぶ)と円錐形状であるもの(以後、錐底と呼ぶ)の2種類を使用した。いずれも重量は2kNであり、断面の直径が0.5mである鋼殻にコンクリート充填した円筒形状の重錘である。重錘には3次元加速度計を設置しており、これにより重錘衝撃力を測定した。

本実験装置の測定システムでは、各計測器より得られた出力を100 $\mu$ sのサンプリング間隔(サンプリング周波数: 10KHz)で測定している。

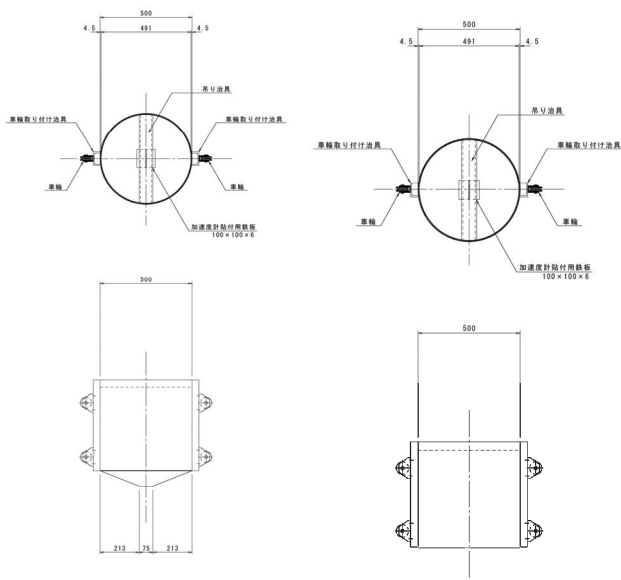


図-1 重錘構造図

### 3. 個別要素法による数値解析

著者らの既往の研究においては規則配列によるモデル化を用いていたが<sup>3)</sup>、これらの配列は作用力の伝達が単調であり、モデル配列が解析挙動に与える影響が極めて大きいことから、解析においては問題となる衝撃形式などの違いによって配列の決定を行う必要があった。本論文で報告する解析については、重錘は格子配列を採用し、緩衝材はランダム配列でモデル化した。

#### 3.1. 重錘のモデル化

著者らの既往の研究では、重錘を大径粒子としてモデル化しており、平底重錘のような形状効果を表現しにくいことが明らかになっている。

そこで本解析では、実際の重錘形状データを用いて格子配列の複数粒子で構成される重錘モデルの作成を行った。格子配列粒子による重錘のモデル化は粒子座標が形状表面の内側にあることを判定し実現した。本解析における重錘モデルは凸な形状であるため、全ての表面三角形に対して内外判定を実施するだけで実現可能である。しかし、完全に凸な形状でない場合には問題があり、より複雑な形状に対応するために、表面形状を凸な形状である四面体要素に分解し四面体毎に処理を実行することにした。四面体分解には3次元デローニー分割<sup>4,5)</sup>を利用した。図-2に錐底重錘の表面形状データと四面体分解後のメッシュ図を示す。また、図-3に格子配列で粒子化した平底と錐底の重錘モデルを示す。表-1に作成した重錘モデルの詳細を示す。

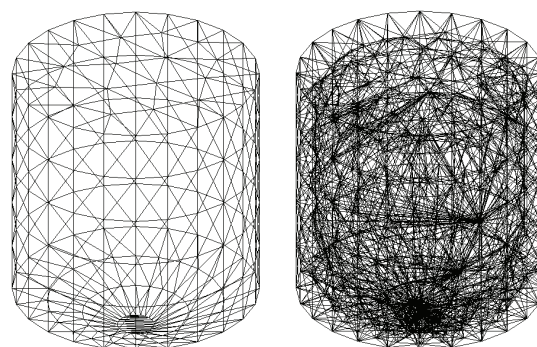


図-2 錐底重錘の表面形状(左)と四面体分解後(右)

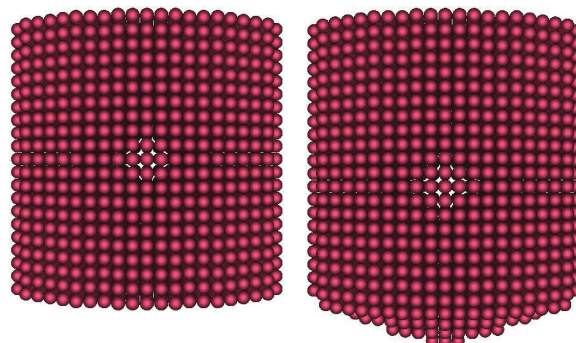


図-3 平底重錘モデル(左)と錐底重錘モデル(右)

表-1 重錘モデルの詳細

	平底重錘	錐底重錘
質量[kg]	200.6	202.5
粒子半径[mm]	12	12
粒子数[個]	7161	7681
粒子密度[kg/m <sup>3</sup> ]	3869.7	3642.6

#### 3.2. 重錘の剛体計算

重錘は緩衝材と比べて極めて剛であり、緩衝材粒子間と同様にしてこれに対応した非常に大きなばね定数を設定することは可能である。しかし、本研究では、計算の効率化のため、重錘粒子間の要素接続については剛体であると仮定し、これらの重錘を表す粒子同士は接触判

定の対象としなかった。

剛体粒子の移動は重心の並進移動量と重心回りの剛体回転の和として計算される。剛体回転は初期状態における重心回りの個々の粒子の相対位置関係に対して、初期の姿勢から現在の姿勢へ変換する回転行列を乗じることで計算した。剛体の慣性テンソルも、剛体回転と同様に初期状態でのテンソルに回転行列を乗じることで更新した。計算に用いる回転行列は剛体の姿勢より時々刻々と更新し、姿勢の管理は4元数を利用した<sup>6)</sup>。

### 3.3. 緩衝材のモデル化

本論文にて報告する解析対象とする土槽形状は直方体と単純であり、規則配列によって簡便に緩衝材粒子を充填できる。しかしながら、前述したように規則配列では、粒子に大きな変位がない状態では力の伝達に方向性が存在することなどにより、実験で測定される衝撃力波形の十分な再現が困難であることが既往の研究より分かっている。

そこで本研究では、緩衝材モデルをパッキング計算によりランダム配列として作成した。実際の緩衝材の粒度分布をモデルで忠実に再現することは現時点では困難であるが、本研究では、ある粒度分布モデルを設定した。モデルは供試体の粒度分布を参考に4階級に分級し、重力落下解析によるパッキング計算により作成した。実際に作成した緩衝材モデルの粒子径と質量分率を表-2に、緩衝材モデルの粒子半径別粒子数を表-3に示す。また、供試体の単位体積重量を元に算出した緩衝材モデル粒子の密度を表-4に示す。図-4に層厚70cmの緩衝材モデルと錐底重錘モデルの組み合わせを示す。

表-2 緩衝材モデルの粒子径と質量分率

質量[%]	供試体	緩衝材モデル
13.2	2.000-5.000mm	40.0mm
12.4	0.850-2.000mm	32.0mm
27.3	0.425-0.850mm	24.0mm
47.1	0.000-0.425mm	16.0mm

表-3 緩衝材モデルの粒子半径別粒子数

層厚[cm]	粒子径別粒子数				総粒子数
	16.0mm	24.0mm	32.0mm	40.0mm	
h=70	37486	24302	8613	4130	74531
h=50	27026	17501	6145	2972	53644
h=30	16379	10650	3745	1770	32544

表-4 緩衝材モデルの粒子密度

層厚[cm]	緩衝材質量[kg]	粒子総体積[m <sup>3</sup> ]	粒子密度[kg/m <sup>3</sup> ]
h=70	1460	0.542472	2691.386
h=50	1040	0.389662	2668.979
h=30	620	0.235782	2629.549

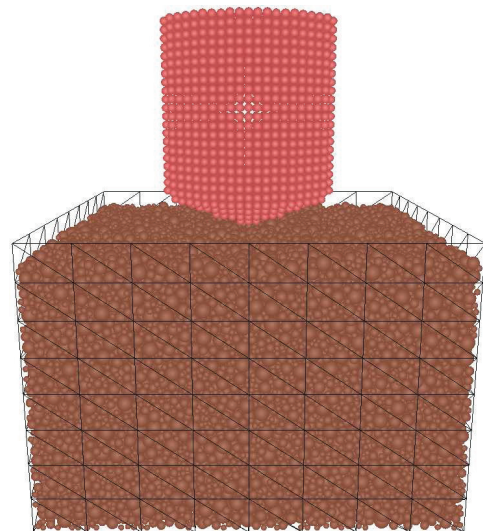


図-4 層厚70cmの緩衝材モデルと錐底重錘モデル

### 3.4. 解析ケース

解析ケースは実施した実験の条件に沿うように設定した。全てのケースを網羅すると数が多くなるため、本論文で報告するケースは落下高を1.0mと1.5mに限定して設定した。緩衝材の層厚によってランダム配置の影響により若干間隙比が異なるため、粒子密度はケース毎に異なる値を設定している。解析ケースの一覧を表-5に示す。

表-5 解析ケース一覧

解析ケース	重錘型	層厚[cm]	落下高[m]
JHT30F10	平底	30	1.0
JHT30F15	平底	30	1.5
JHT50F10	平底	50	1.0
JHT50F15	平底	50	1.5
JHT70F10	平底	70	1.0
JHT70F15	平底	70	1.5
JST30F10	錐底	30	1.0
JST30F15	錐底	30	1.5
JST50F10	錐底	50	1.0
JST50F15	錐底	50	1.5
JST70F10	錐底	70	1.0
JST70F15	錐底	70	1.5

### 3.5. 解析パラメータ

過去の著者らの研究<sup>7)</sup>より法線方向ばね定数の影響が接線方向のばね定数に比べ非常に大きいことが判明している。そこで、接線方向ばね定数は法線方向ばね定数の1/4に固定し、法線方向ばね定数を実験結果と比較しながら試行錯誤により定めた。ばね定数算出の基本ケースとしては、粒子数が多く再現性が高いと考えられる層

厚 70cm のケースを選定し、最小粒子径の粒子間ばね定数を基準ばね定数としてパラメトリックに決定した。減衰係数は臨界減衰を基準に設定したが、波形への影響を考慮して臨界減衰の 5%とした。時間増分は解に影響を及ぼさなくなる大きさの刻み幅とし、最小径の緩衝材粒子の一質点系の固有周期 $T$ の1/100程度とした<sup>7-9)</sup>。全ての解析ケースにおいて共通で用いた解析パラメータを表-6に示す。

表-6 解析パラメータ

法線方向基準ばね定数	1.60(kN/mm)
接線方向基準ばね定数	0.40(kN/mm)
減衰定数	0.05
内部摩擦角	44.5 度

#### 4. 解析結果および考察

##### 4.1. 実験と解析の衝撃力波形比較

実験と解析の衝撃力波形の比較を行った。平底重錘落下ケースの比較を図-5に、錐底重錘落下ケースの比較を図-6に示す。

図-5より平底重錘落下ケースについては、実験波形と解析波形は良く似ており、特に層厚 70cm と 50cm のケースで現象の再現性が高い。JHT50F15 では波形がほぼ重なっており、立ち上がりだけでなくその後の重錘の浮き上がり過程も正確に計算出来ていることが分かる。

これは、重錘を大径粒子1つでモデル化した場合は得られなかった結果であり、重錘を正確にモデル化する有効性が確認できた。層厚 30cm のケースで衝撃力の継続時間にややずれが認められるが、これはばね定数の設定を層厚 70cm のケースで行っていることや、層厚が薄いため厚さ方向の要素分割数が不足したためだと考えられる。このことは、十分な分解能を確保することで解決できるものと考えている。

図-6より錐底重錘落下ケースでは、継続時間は概ね再現出来ているものの、最大荷重が全ケースで小さいことが確認できる。これは重錘を格子配列でモデル化しているため、重錘先端部の円錐形の斜面部分の凹凸の影響が表れたものと考えられ、特に低速度衝突のケースで顕著である。この影響は波形に出ており、貫入時に凹凸を乗り越える際の滑りが生じていることが重錘衝撃力波形の振動から窺える。

この問題は重錘のモデル化精度を上げることで解消できる可能性が高いと考えられる。重錘を構成する剛体粒子数を増やすことで影響を抑制することが可能だとは考えられるが、一方で敷砂モデルの分解能も高くする必要のあることから計算時間の増大が予想される。そこで、今後は重錘モデルを4面体要素集合による剛体モデルとして扱うことでこの問題に対応することを検討していく。

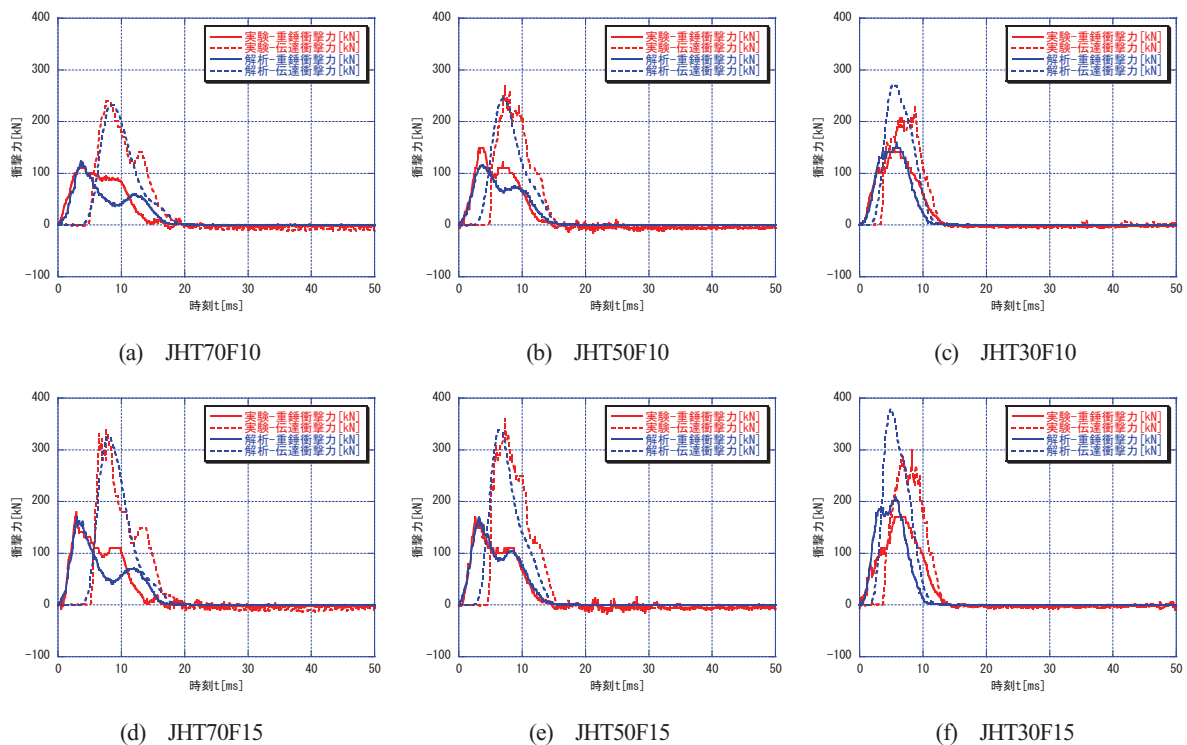


図-5 平底重錘落下ケースの衝撃力波形比較

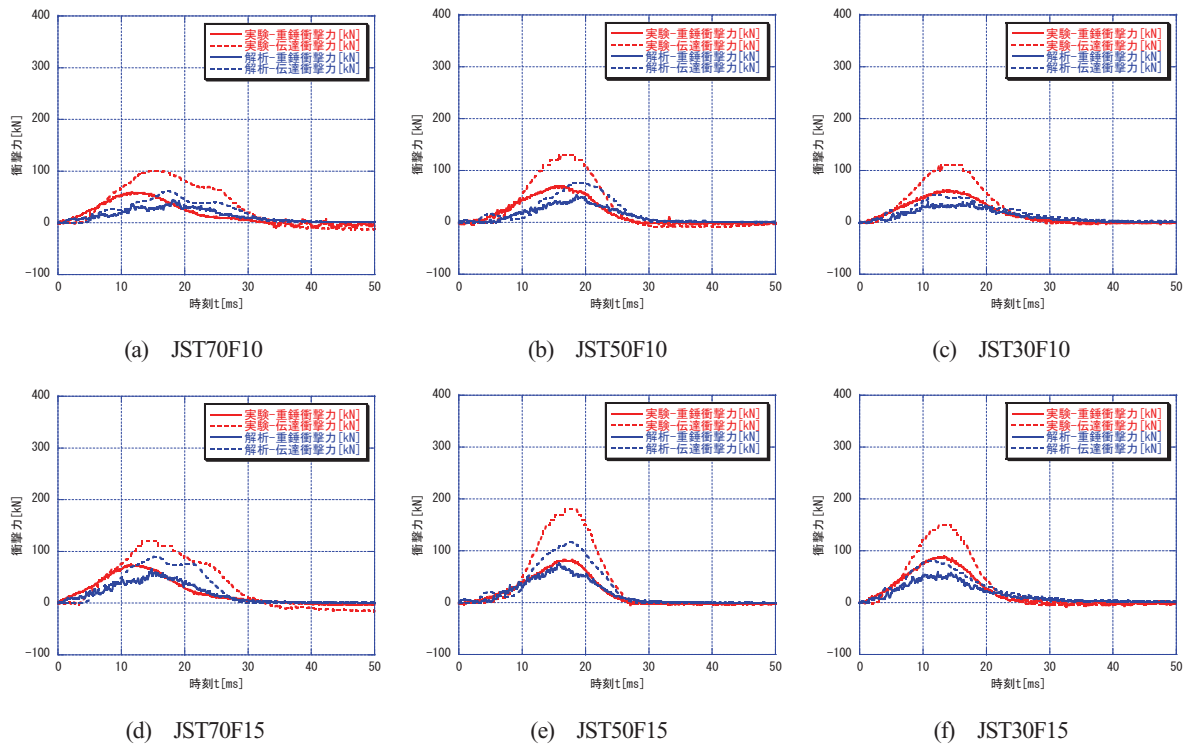


図-6 錐底重錘落下ケースの衝撃力波形比較

#### 4.2. 重錘の貫入過程

既往の研究ではサンドクッションを規則配列でモデル化していたため、重錘が砂層に貫入していく過程の再現が特に最密配列モデルで困難であった。衝撃力波形より、最も現象の再現性が高いと考えられる JHT50F15 の

ケースについて、重錘の貫入過程を正面より奥行き方向中央断面を描画することで確認した。図-7 に粒子の移動を時間断面毎の画像で示す。先端がフラットな形状のため、一般に他の形状の重錘に比べ貫入量の小さい平底重錘でも敷砂層へもぐりこんでいることが確認できる。

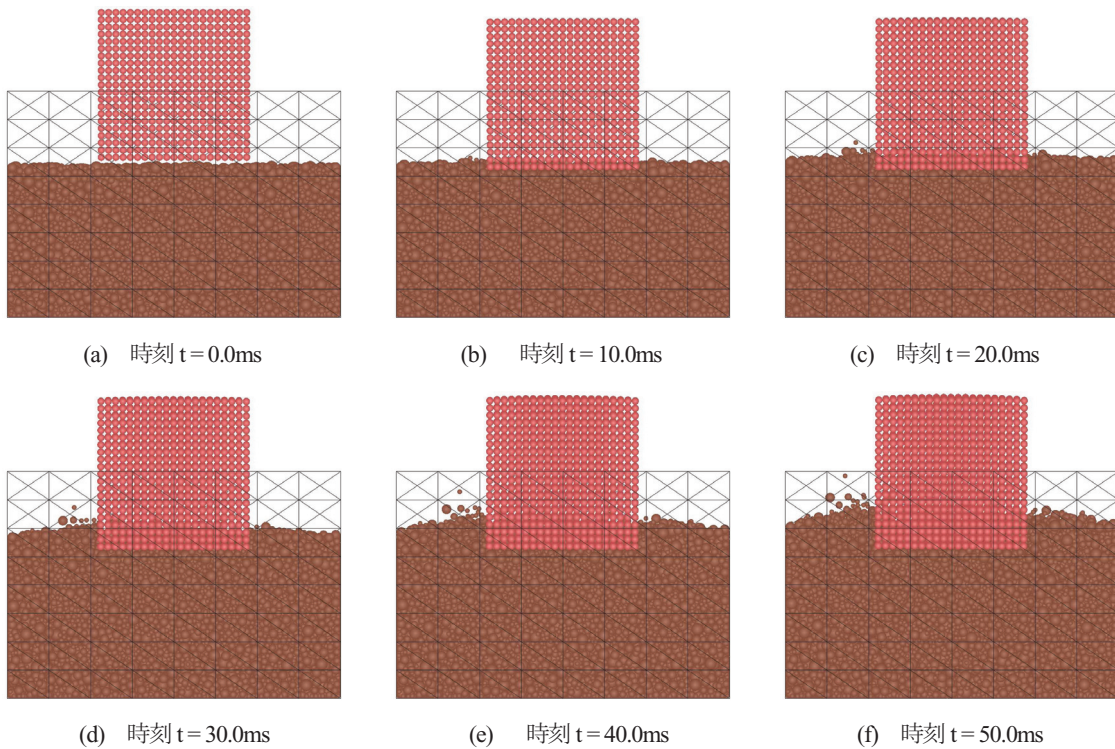


図-7 JHT50F15 の重錘貫入過程を示す中央断面での時刻歴

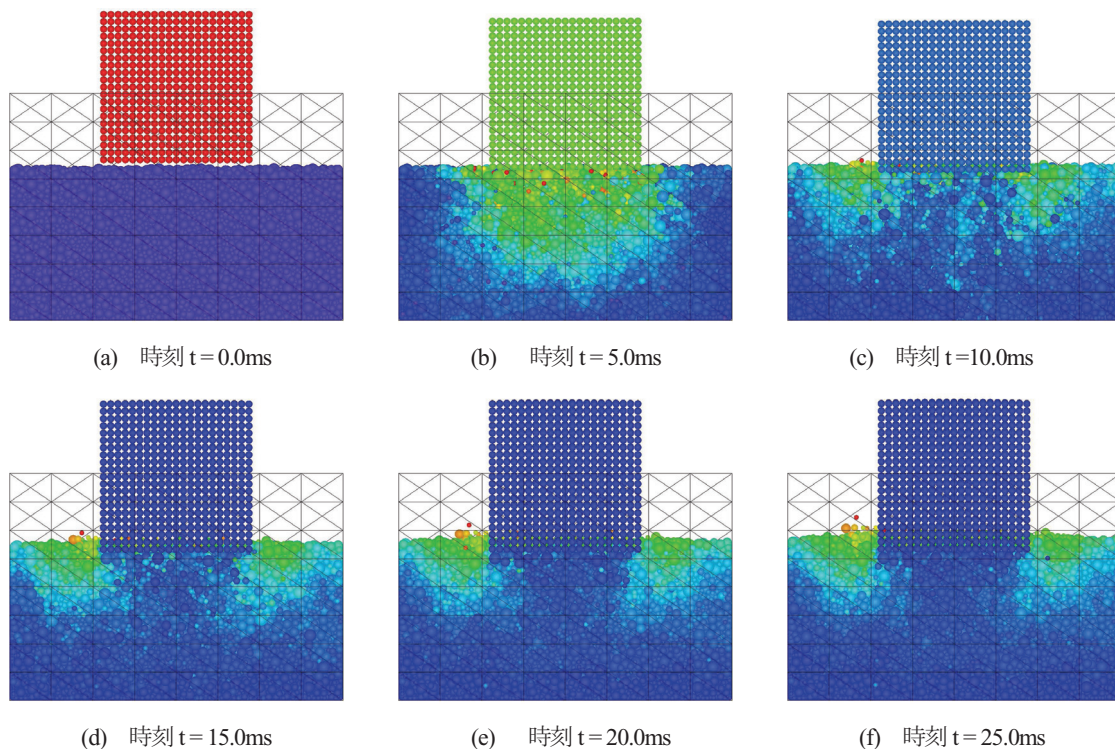


図-8 JHT50F15 の重錘貫入過程を示す中央断面での粒子速度分布時刻歴

### 4.3. 重錘の貫入による緩衝材の運動

前節と同じ JHT50F15 のケースについて、重錘の貫入過程における奥行き方向中央断面の粒子速度分布時刻歴を図-8 に示す。粒子の色は速度の大きさを意味しており、暖色ほど粒子速度が大きい。剛体である重錘の構成粒子は重心での並進速度を全構成粒子で出力しており、剛体回転により生じる速度差は出力していない。

重錘は初速度でサンドクッションに衝突し、重錘の直下でない砂粒子は、その後盛り上がり重錘を覆っていく過程が粒子の運動量の変化を観察することで確認できる。このように本解析手法は、実験では確認しづらい、クッション材と重錘の細かな現象の理解に有効である。

### 5. 結論

本研究で得られた結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 重錘を複数粒子の剛体で表現することで、衝突物である重錘の形状効果を確認した。重錘を詳細にモデル化することで、高い精度で衝撃力波形を再現できることを示した。
- (2) 重力落下によるパッキング解析によりランダム配列の実物に則したサンドクッション解析モデルを作成し、実験結果との比較により解析上の有用性を確認した。
- (3) 実験と解析の衝撃力波形を比較し、ある程度的一致が認められた。特に平底重錘のケースに関しては十分な再現性があるといえる。
- (4) 重錘衝撃力、伝達衝撃力共に平底に関して、概ね一

致している反面、錐底の解析結果では実験値との差異は平底に比べ大きく、重錘表面の凸凹の影響が少なからずあると考えられる。

### 参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，2000.6.
- 2) 土木学会：ロックシェットの耐衝撃設計，構造工学シリーズ8，土木学会，1998.11.
- 3) 渡辺高志，榎谷浩，佐藤彰，中村佐智夫：3次元DEMを用いた重錘落下による実物大サンドクッションの衝撃応答解析，構造工学論文集，土木学会，Vol.55A，pp.1296-1303，2009.3.
- 4) 谷口健男，森脇清明：3次元FEMのための自動要素分割法，森北出版，2006.12.
- 5) 山下優耶，森脇清明，谷口健男：3次元体表面上の点座標が与えられた場合の形状生成法，日本計算工学会論文集，Vol.2001，pp.257-264，2001.5
- 6) 越塚誠一：粒子法シミュレーションー物理ベースCG入門，培風館，2008.2
- 7) 吉田博，榎谷浩，今井和昭：個別要素法による敷砂上への落石の衝撃特性に関する解析，土木学会論文集，第392号/I-9，pp.297-306，1988.4.
- 8) 榎谷浩，中田吉彦，梶川康男：個別要素法の衝撃問題への適用に関する一考察，構造工学論文集，土木学会，Vol.38A，pp.1477-1487，1992.3.
- 9) 後藤仁志：数値流砂水理学ー粒子法による混層流と粒状体の計算力学，森北出版，2004.9.