

(27) 落石衝突を受ける敷砂層の3次元個別要素法による衝撃挙動解析

Analysis of dynamic behavior of the sand cushion layer by the collision of a rock fall using three-dimensional DEM

渡辺高志*, 榎谷浩**, 佐藤彰***, 中村佐智夫***
 Takashi Watanabe, Hiroshi Masuya, Akira Satoh, Sachio Nakamura

* 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)

*** 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, Performance based design)

キーワード: 落石, 衝撃解析, サンドクッション, 個別要素法, 性能照査型設計

1. まえがき

落石防護構造物は想定される落石・崩土に対して,十分に耐えるべく設計しなければならない。一方で,ロックシェッドのような大規模な構造物の建設費用は一般に高価となり,より合理的に設計し維持するため,一般に緩衝効果に優れた敷砂やEPS等の緩衝材を構造物上面に設ける必要がある^{1,2)}。しかし,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は十分明らかにされていない。また,合理的な設計を行う上では,伝達された衝撃力が緩衝材や構造物の各部位にどの程度の力が作用するのかを把握することは重要である。各種衝突条件に対する複雑な衝撃挙動は理論的な説明が難しく,実験・解析的研究の発展が望まれている。防護構造物の限界状態を明らかにして性能照査型設計を行う上でも応用性が高く信頼できる解析手法の利用が必要であろう^{3,4)}。

そこで著者らは,敷砂材に落石等の衝撃荷重が作用した際の衝撃挙動と構造物への伝達荷重の推定手法の確立を目的として,緩衝機構の衝撃応答解析への3

次元個別要素法による適用について検討した。この解析においては,防護構造物上の土槽を細かなメッシュ分割された境界として扱う効率的で応用性の高い方法を開発し,土槽各部の伝達衝撃力の時刻歴応答解析を行った。解析の実設計への適用を評価する指標として,著者らが行った,実規模の土槽への重錘落下実験データを利用し,比較することで本手法の有効性の検証を行った。

2. 実験概要

著者らは,既往の研究で不足している斜め入射に対する実験データを得ること,底面および側面の伝達衝撃力を精度良く計測することで設計上役立つ定量的な知見を得ることを目的として,2006年12月に写真-1に示す一連の衝撃実験を行った。

実験は,底面および側面に計72個の土圧計を配置した6m四方の土槽に,厚さ150cmの敷砂材を敷設した緩衝機構へ,50kNの重錘を入射角度45度,60度,75度および90度,落下高さ10mおよび15mから落下位置を変更しながら落下させることで行った。そのときの,重錘衝撃力および敷砂材を介して生じる底面土圧,側面土圧を測定し,重錘衝撃力と伝達衝撃土圧を記録した。入射角は,一端を支点として可動するレールの他端に重錘落下装置を設け,クレーンで吊り上げることで制御し,落下位置はレールの支点部材をスライドさせることで調節し,側壁から1m,2m,3m地点に落下させた。重錘は落下装置の電磁石を切るにより落下させ,レール先端部に2箇所設置したレーザー変位計により落下速度を計測した。

重錘衝撃力は重錘の重心付近に設けた三軸加速度計



写真-1 実規模実験の写真

の測定値から求め、伝達衝撃力は各土圧計の測定値を受圧面積で除した土圧に、各部の有効面積を乗じて算出した。

土槽の構造図を図-1に、重錘の形状を図-2に示す。

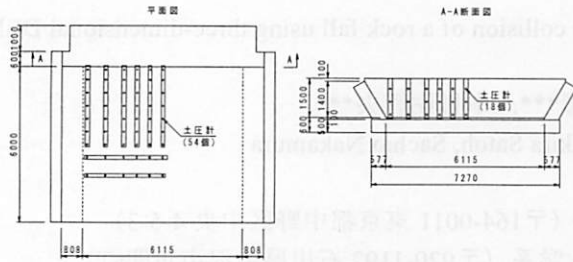


図-1 土槽構造図

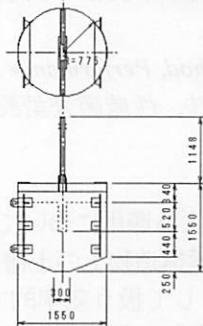


図-2 重錘形状図

3. 本手法における球形要素-壁面要素間接触の取り扱い

構造躯体表面に相当する壁面境界のモデル化方法は幾つか考えられるが、球形要素の集合体としてモデル化するには壁面要素数が多くなり、壁面境界を巨大な平面要素としてモデル化する場合には、境界面の細かな衝撃力分布を調べるのが困難になるという問題がある。そこで著者らは、境界面の壁面要素を小さな三角形平面要素の集合体としてモデル化を行った。この章において球形要素と壁面要素の接触判定方法を説明する。

3.1. 球形要素と壁面要素の距離

x 軸が鉛直下向きの右手系直行座標系 xyz において、任意の壁面要素 m を包含する平面が次式で表されるとする。

$$A_m x + B_m y + C_m z + D_m = 0 \quad (1)$$

この平面と任意の球形要素 i の中心点 v_i との距離は次式の絶対値 $|d_{mi}|$ で表される。

$$d_{mi} = \frac{A_m x_i + B_m y_i + C_m z_i + D_m}{\sqrt{A_m^2 + B_m^2 + C_m^2}} \quad (2)$$

ここで、 (x_i, y_i, z_i) は v_i の座標であり、 A_m, B_m, C_m は壁面要素 m の法線ベクトル成分であり、外積より求ま

る。また、 D_m は壁面要素 m を包含する平面と原点の距離であり、壁面 m の頂点の1つ $v_1(x_1, y_1, z_1)$ を用いて次式で得られる。

$$D_m = -(A_m x_1 + B_m y_1 + C_m z_1) \quad (3)$$

d_{mi} が正のとき、点 v_i は壁面要素 m の法線ベクトルの指す向きに存在し、負のときには逆方向に存在する。球形要素 i の半径を r_i とすると、壁面 m を包含する平面との接触判定は次式で行える。

$$|d_{mi}| \leq r_i \quad (4)$$

3.2. 内外点判定

平面上の多角形に任意の点が存在するか否かを、計算負荷の高い関数を用いず判定する手法として、著者らは以下のような方法を考えた。

図-3に示すように、三角形の3つの頂点 v_1, v_2, v_3 を包含する平面上に任意の点 v_0 が三角形の内側または外側にあるとき、三角形の各辺を構成する2つの頂点と v_0 を直線で結んで出来る3つの三角形 $v_1 v_2 v_0, v_2 v_3 v_0, v_1 v_3 v_0$ を考える。

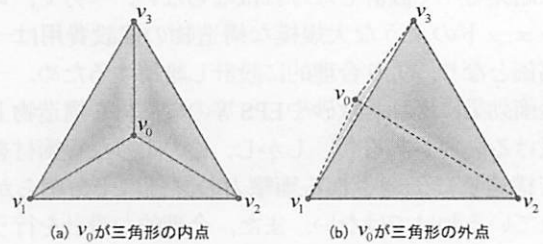


図-3 任意の点と各辺を結ぶ三角形

v_0 が三角形の内点であれば、これらの面積和は三角形 $v_1 v_2 v_3$ の面積と一致するのは自明である。しかし、外点であれば3つ三角形の内、2つの一部領域がもう一つの三角形の領域と重複する。よって面積和は三角形 $v_1 v_2 v_3$ の面積より大きくなる。この簡単な幾何学的関係を利用して平面上の内外点判定を行うことができることから、空間上の任意の点を要素平面に投影して判定することにした。空間上の任意の点 v_i から、三角形壁面要素 m を包含する平面の投影点 $v_0(x_0, y_0, z_0)$ は次式を用いて計算できる。

$$\begin{Bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{Bmatrix} + d_{mi} \begin{Bmatrix} L_m \\ M_m \\ N_m \end{Bmatrix} \quad (5)$$

ここで、 L_m, M_m, N_m は壁面要素 m の方向余弦であり、 A_m, B_m, C_m を正規化することで得られる。

三角形 $v_1 v_2 v_3$ の面積を A_{123} 、投影点 v_0 と各辺が成す

3つの三角形の面積をそれぞれ $A_{012}, A_{023}, A_{013}$ とするとき v_0 の内外判定は,

$$A_{012} + A_{023} + A_{013} = A_{123} \quad (6a)$$

のとき v_0 は三角形の内点であり,

$$A_{012} + A_{023} + A_{013} > A_{123} \quad (6b)$$

のとき v_0 は外点である.

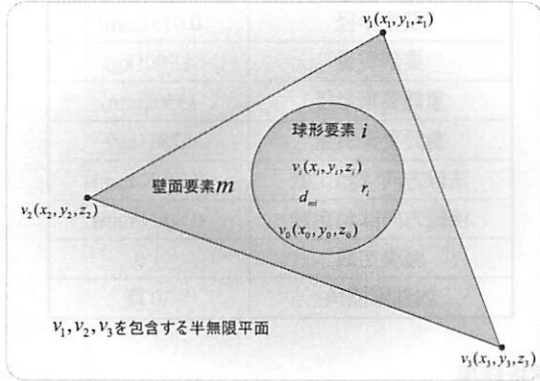


図-4 投影点の内外判定

3.3. 凸面接触

前節で述べた内外点判定方法は、壁面要素 m の方向余弦を用いて投影を行うため、1辺を共有して隣接する壁面要素の法線ベクトルの成す角 θ によって接触判定漏れを起こす。この問題は、 θ が反時計回りを正とするとき、 $\theta > 0$ (2壁面は凸面を成す)の時、 θ の範囲がどちらの面にも属さない領域となることから生じる。

このような凸面の形成を判定するには、辺を共有して壁面 m に隣接する壁面 n の頂点の内、共有しない頂点 v_n に対して(2)式を適用すれば良い。即ち、壁面 m を包含する平面と v_n の距離 d_{mn} が,

$$d_{mn} < 0 \quad (7)$$

の場合、凸面を成す。

この論文で報告する解析については、そのような面が存在しないため問題とならないが、複雑な斜面上の落石問題等にも応用できるように、以下に述べるような対策を行った。

図-5は凸面接触時の内外判定に用いた諸変数の対応する位置関係を示したものである。凸面接触の可能性がある場合、 θ の範囲が接触判定の対象から漏れないよう、壁面 m, n の境界をそれぞれ $\tan \theta / 2$ ほど拡張する。すなわち、 m, n の面積を、共有する辺が底辺で高さが次式で示す延長距離 h_{mn} となる三角形の面積 A_{mn} を加えて判定する。

$$h_{mn} = |d_{mi}| \sqrt{\frac{1 - L_m L_n - M_m M_n - N_m N_n}{1 + L_m L_n + M_m M_n + N_m N_n}} \quad (8)$$

ここで、 $L_m, M_m, N_m, L_n, M_n, N_n$ は壁面要素 m, n の方向余弦である。

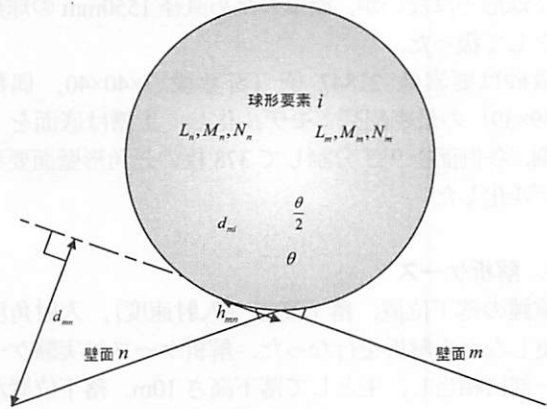


図-5 凸面接触時の内外判定

凸面接触の可能性がある場合、接触判定は h_{mn} を高さとする三角形の面積 A_{mn} を計算し、(6)式の代わりに次式を用いて判定を行う。即ち、

$$A_{012} + A_{023} + A_{013} \leq A_{123} + 2A_{mn} \quad (9a)$$

のとき内点であり、

$$A_{012} + A_{023} + A_{013} > A_{123} + 2A_{mn} \quad (9a)$$

のとき外点である。

4. 解析概要

前章で述べた境界面接触判定を行う3次元個別要素法プログラムを用いて、実際の問題への適用性について検討するため2.で示した実験を対象として解析を行った。

4.1. 解析モデル

実規模実験では、大きな荷重応答を得るために敷砂をよく締め固めていることから、敷砂は等粒子径の最密配列でモデル化した。実験で用いた土槽は向かい合う側壁面の内、1組が壁面と底面の成す角が直角ではないものであったが、最密配列で充填する都合、これを完全に対称な箱型として扱った。解析モデルを図-6に示す。

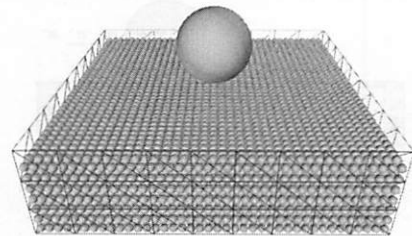


図-6 解析モデル図

敷砂は6000mm×6000mm×1500mmの範囲にあるとし、これを囲う土槽の寸法を6000mm×6000mm×1600mmとした。実験の土槽高さは1500mmであるが、要素分割の

粗い解析モデルで粒子が溢れ出るのを防ぐため、大きめの寸法を採用した。実験で用いた重錘は図-2 に示すように球形ではないが、簡単のため直径 1550mm の球形要素として扱った。

敷砂は要素数 21847 個（奇数段 7×40×40, 偶数段 7×39×39）の最密配列でモデル化し、土槽は底面を 9×9 分割, 各側面を 9×3 分割して 378 枚の三角形壁面要素でモデル化した。

4.2. 解析ケース

重錘の落下位置, 落下高さ (入射速度), 入射角度を変更しながら解析を行なった。解析ケースは実験ケースの一部に相当し, 主として落下高さ 10m, 落下位置が側壁面 1 から 3m (土槽の中心) のケースを行った。解析事例を表-1 に示す。落下位置と入射角度に関しては図-7 に詳細を示す。

表-1 解析ケース

解析例	落下位置の側壁面 1 からの距離	落下高さ	入射角度
CASE 1	3m	15m	90°
CASE 2	1m	10m	90°
CASE 3	2m	10m	90°
CASE 4	3m	10m	90°
CASE 5	2m	10m	75°
CASE 6	2m	10m	60°
CASE 7	2m	10m	45°

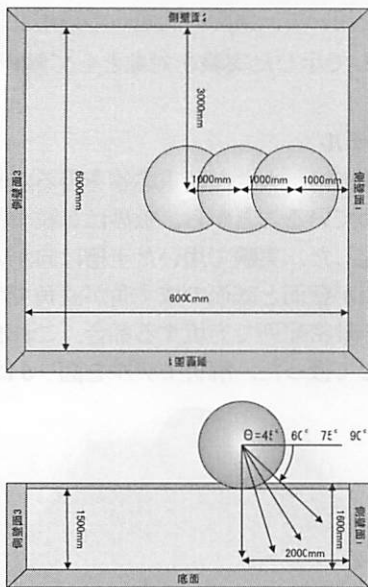


図-7 落下位置と入射角度

4.3. 解析パラメータ

時間増分は予め行ったテスト解析の結果から, 解に影響を及ぼさなくなる大きさの刻み幅とし, 一つの砂要素を一質点系とする固有周期 T の $1/100$ 程度とした⁵⁻⁸⁾。

個別要素法では, 定数の決定が理論的には定まっておらず実験結果などの再現性で定数を定める場合も多い⁵⁻⁸⁾。本研究では, 法線方向ばね定数は, CASE1を対象とする解析を試行錯誤法により行うことにより定めた。接線方向はこれの $1/4$ とした⁸⁾。なお, 解析全てのケースにおいて同じ値を用いた。

用いた解析パラメータを表-2に示す。

表-2 解析パラメータ

要素半径	0.075 (mm)
要素質量	4.700 (kg)
重錘要素半径	1550 (mm)
重錘要素質量	5281 (kg)
法線方向ばね定数	3.2 (kN/mm)
接線方向ばね定数	0.8 (kN/mm)
減衰定数	1.0
内部摩擦角	30 度

5. 解析結果

解析の結果, 衝撃力の時刻歴応答, 敷砂の衝撃挙動と各要素応力の時刻歴応答, および各壁面要素応力の時刻歴応答を得た。それらの結果については以下の各節において述べる。

5.1. 衝撃力応答

実験波形の重錘衝撃力は加速度計の落下方向成分より算出し, 底面および側面衝撃力は各土圧計より得られた応力度を有効面積で乗じて合計したものである。解析波形も同様に, 重錘衝撃力は重錘要素の作用力波形とし, 底面および側面衝撃力はそれぞれ壁面の法線方向に作用する作用力の合計を波形として算出した。なお, 図-7における側壁面 1 を以後側面と表現する。

図-8に解析CASE1と実験衝撃力応答波形を示す。

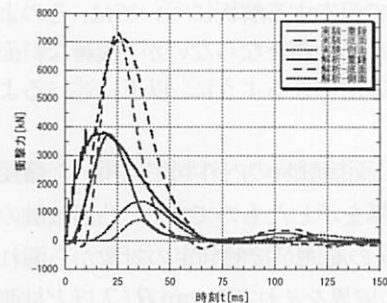


図-8 衝撃力応答波形(CASE1)

底面衝撃力波形が重錘衝撃力波形の2倍程度の大きさとなる実験の事実を解析により再現できている。底面衝撃力と側面衝撃力は, 実験に比べやや速く立ち上がっているが, 概ね良好に一致していることがわかる。

図-9は他のケースを示したものである。全解析ケースの比較結果からもCASE1と同様の傾向が見られる。同じ落下高さにおいても斜め衝突の角度が小さくなるほど、どの衝撃力にも認められる低下傾向を再現していること

が分かる。底面衝撃力でその傾向は顕著である。斜め衝突の角度が小さくなるほど、側面衝撃力は解析結果がやや大きくなっている。

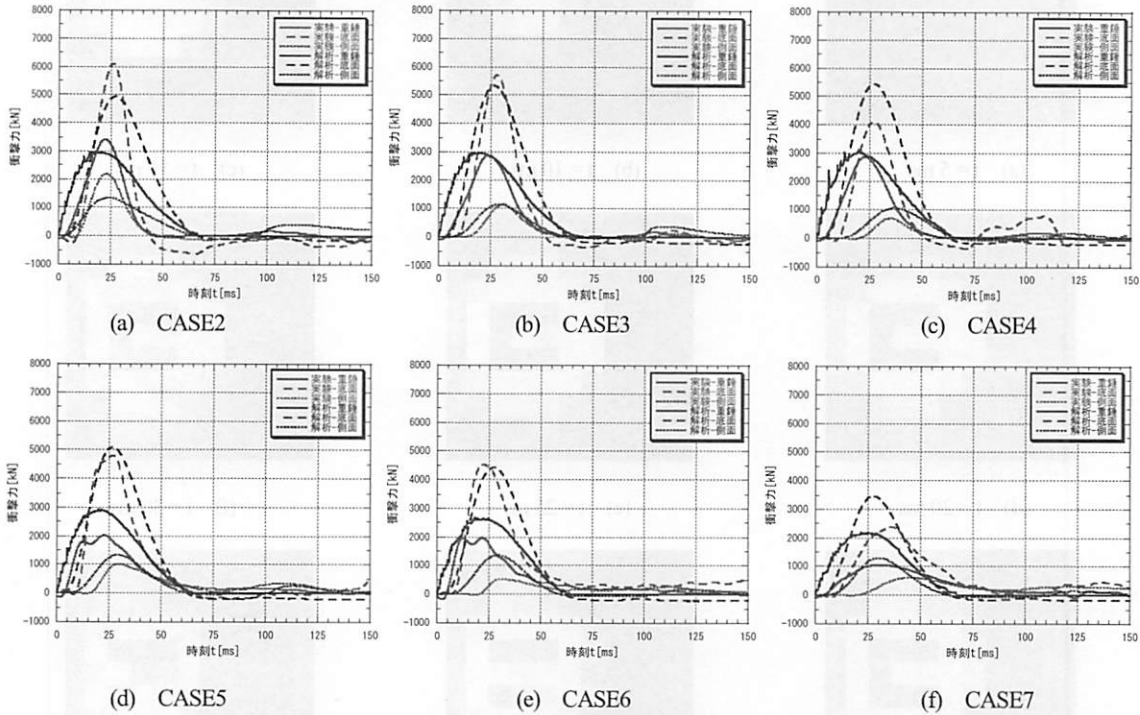


図-9 各ケースの衝撃力応答波形

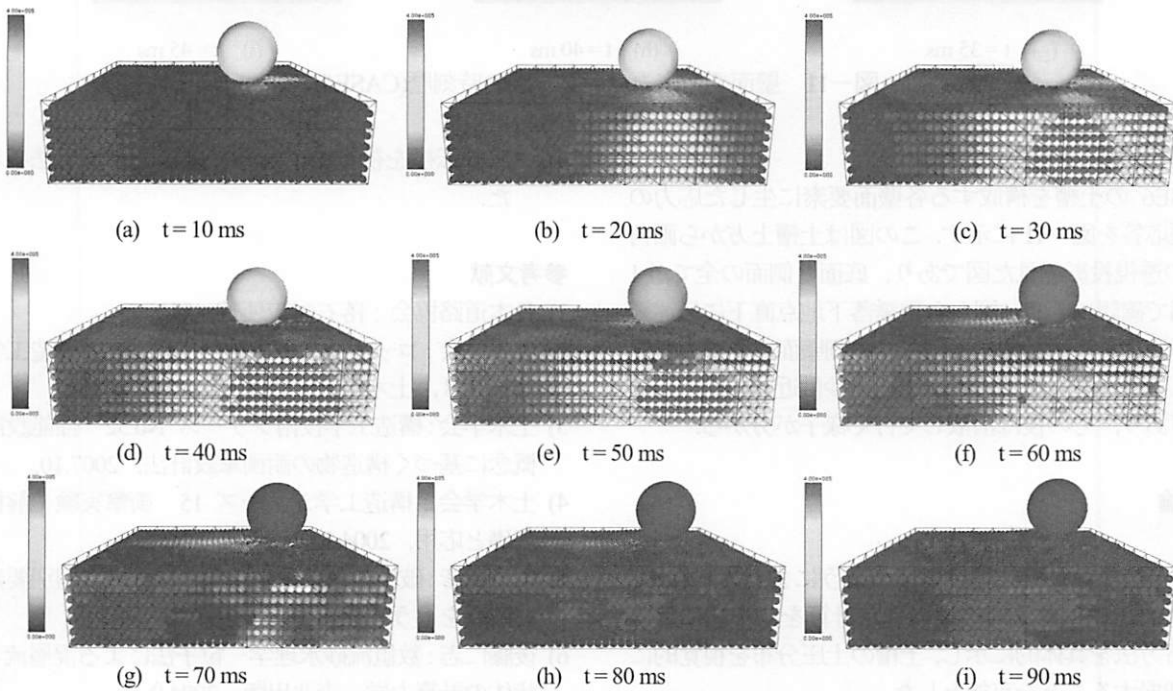


図-10 敷砂の衝撃挙動と要素応力コンター図の時刻歴(CASE6)

5.2. 敷砂の応力時刻歴応答

敷砂の衝撃挙動を、各要素の応力の大きさでコンター表示を行い描画した。CASE6の衝撃挙動時刻歴応答を図-10に示す。コンター表示に用いた応力の値は、各要素が接触により受けた全法線方向作用力の内、最大の成分

を球の断面積で除することでその要素の応力とした。斜め入射の重錘落下直後は進行方向と側面方向へ弾性波動が伝播し、側壁面で大きな応力を生じていることが視認できる。t=50 ms以降、進行方向と逆方向へ弾性波動が伝播し、収束して行く様子が図から確認できる。

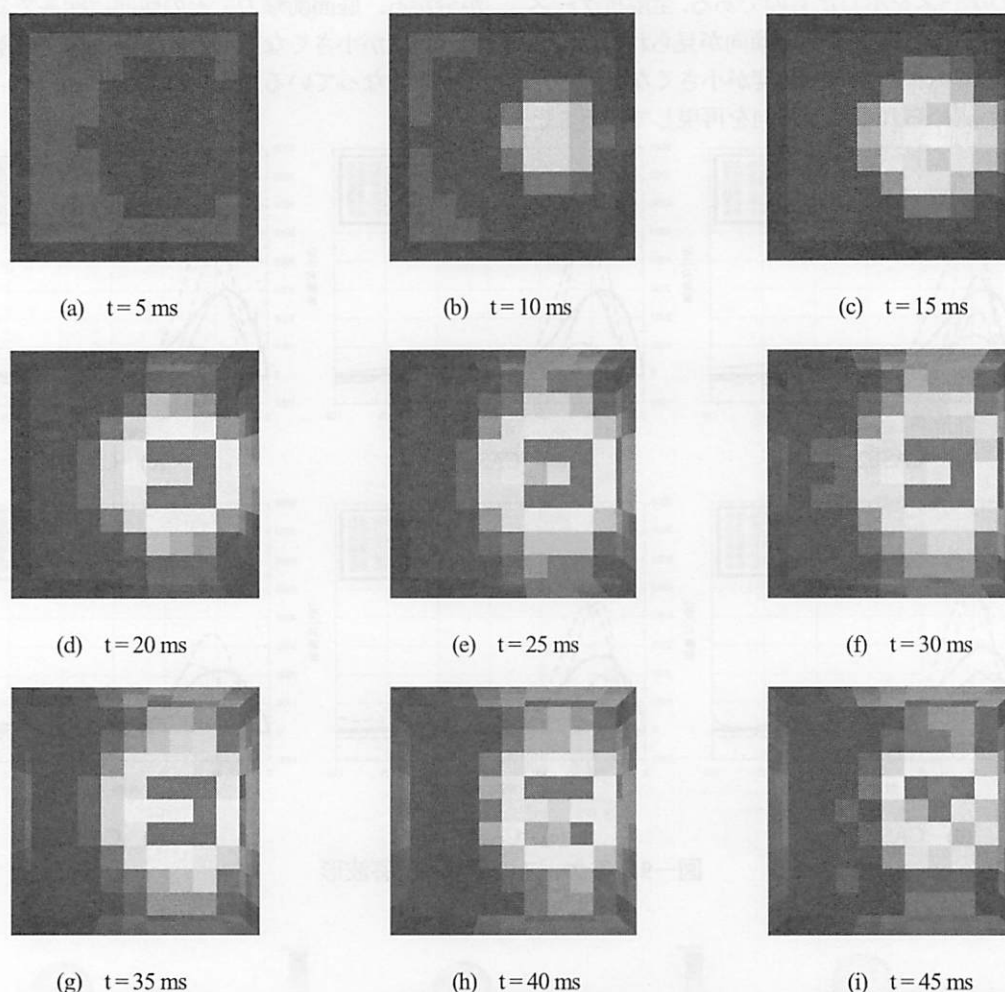


図-11 壁面要素応力コンター図の時刻歴(CASE6)

5.3. 壁面の応力時刻歴応答

CASE6 の土槽を構成する各壁面要素に生じた応力の時刻歴応答を図-11 に示す。この図は土槽上方から画角45度の透視投影で見た図であり、底面と側面の全てが1枚の図で確認できる。図から重錘落下地点直下に伝達衝撃力が到達し、進行方向と側方向の側壁面へ衝撃力が伝達される過程を認識でき、 $t=30$ ms 秒付近に衝撃力のピークがあり、その後は消散して行く様子が分かる。

6. 結論

本研究で得られた結論は以下のようにまとめられる。

- 1) 壁面と球形要素間接触の判定計算を効率的に行える方法を具体的に示し、土槽の土圧分布を視覚的に把握することを可能とした。
- 2) 解析で使用する定数については今後さらに検討すべきと考えるが、本研究で示した試行錯誤法による解析でも概ね実験結果と一致しており、衝撃力波形の再現がある程度可能であることを示した。
- 3) 底面衝撃力が重錘衝撃力の2倍程度の大きさとなる実験的事実の再現ができた。

- 4) 波動伝播を視覚的に容易に確認できる手法を示した。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，2000.6.
- 2) 土木学会：ロックシェッドの耐衝撃設計，構造工学シリーズ8，土木学会，1998.11.
- 3) 土木学会：構造工学技術シリーズ No.52 性能設計の概念に基づく構造物の耐衝撃設計法，2007.10.
- 4) 土木学会：構造工学シリーズ 15 衝撃実験・解析の基礎と応用，2004.1.
- 5) 伯野元彦：破壊のシミュレーション－拡張個別要素法で破壊を追う，森北出版，1997.10.
- 6) 後藤仁志：数値流砂水理学－粒子法による混層流と粒状体の計算力学，森北出版，2004.9.
- 7) 榊谷浩，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.
- 8) 吉田博，榊谷浩，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.