

## 敷砂緩衝材の数値解析モデルに関する一検討

A CONSIDERATION OF FE ANALYSIS MODEL  
OF SAND ELEMENT FOR IMPACT RESPONSE ANALYSIS

岡田 慎哉\*, 今野 久志\*\*, 岸 徳光\*\*\*, 西 弘明\*\*\*\*

Shin-ya OKADA, Hisashi KONNO, Norimitsu KISHI and Hiroaki NISHI

\*修(工) 北海道開発土木研究所研究員 構造研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

\*\*博(工) 北海道開発土木研究所主任研究員 構造研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

\*\*\*工博 室蘭工業大学教授 工学部 建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

\*\*\*\*博(工) 北海道開発土木研究所副室長 構造研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

キーワード：衝撃解析，砂モデル，敷砂緩衝材  
(Impact Analysis, Sand Model, Sand cushion)

## 1. はじめに

近年，コンピューターの進歩・発展は著しく，その適用範囲も非常に多岐に渡っている．土木・建設の分野においても，コンピューターを用いた設計や照査が実際に行われており，その可能性はまだまだ計り知れない．また，コンピューターを用いた数値解析的研究も，各研究機関において盛んに実施されている．

著者らもこれまで様々な RC / PC 部材や構造物の衝撃応答問題を対象とした数値解析的研究を行い<sup>1)~5)</sup>，それらの解析手法の妥当性を実験結果と比較する形で確認，検討してきた．しかしながら，これまでの数値解析では，計算コストの問題からモデルを簡略化し，かつ全体構造系から主構造体のみを取り出して解析が行われていた．このように簡易モデルを用いて数値解析を行う場合には，実験結果との比較によってその信頼性や妥当性を確認しておくことが肝要である．

耐衝撃用途構造物に着目すると，実構造物の場合には緩衝構造を設置している場合が多い．しかしながら，数値解析においては緩衝構造のモデル化が困難なことから，実験的に得られた伝達衝撃力波形を直接構造物に入力することにより解析を行っているのが現状である．しかしながら，緩衝構造を含めた全体構造系に対して解析が可能になれば，より精度

の高い解析が可能になると共に，これまで以上に様々な構造物に関する実現象の解明が可能になる．

このような観点から，本研究では土木構造物の緩衝構造体としてよく用いられる敷砂緩衝材の衝撃応答解析用物性モデルを構築することを目的として，敷砂単層に関する重錘落下時の衝撃応答解析を試み，実験結果を同定することによってモデル化の妥当性の検討を行った．

検討項目は，重錘衝撃力波形，基部への伝達衝撃力波形およびその空間的な分布性状である．なお，本数値解析は三次元弾塑性衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA Ver.960<sup>6)</sup>を使用している．

## 2. 実験の概要

本研究では，平成 6 年に実施された敷砂緩衝材の緩衝性能や衝撃分散性能を明らかにするための実規模重錘落下実験<sup>7)</sup>で得られた結果を基に，数値解析を実施している．

図-1には，敷砂緩衝材に関する重錘落下実験の概要を示す．実験は北海道江別市角山にある開発土木研究所角山大型実験場の屋外実験施設にて実施した．

実験は，厚さ 80 cm の鉄筋コンクリート基礎上に 4,000 mm × 4,000 mm の範囲に敷砂緩衝材を設置し，3,000 kg の重錘を脱着装置を介してクレーンでつり上げ，所定の高さから落下，衝突させること

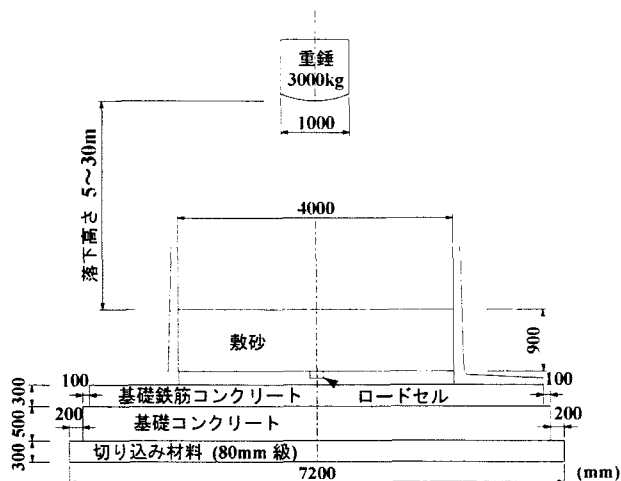


図-1 実験概要

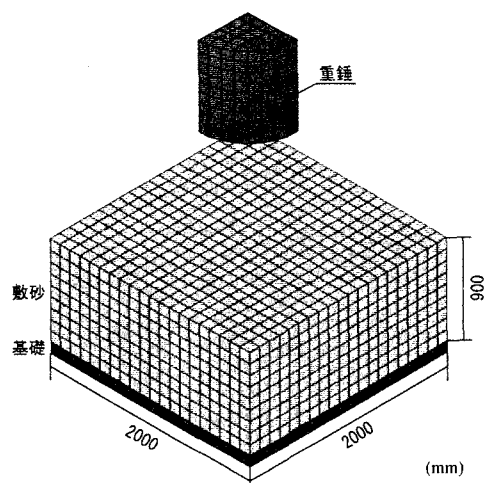


図-2 数値解析モデルの要素分割状況

により実施している。重錘は、直径 1 m、高さ 1 m の鋼製円柱型で、衝突面には片当たり防止のため  $R = 800 \text{ mm}$  で高さ 18 cm のテーパが施されている。なお、重錘内には質量を調整するために鋼塊やコンクリートで満たされている。また、重錘内には加速度計も設置しており、重錘の加速度が計測可能となっている。計測項目は、重錘に設置した加速度計より得られる重錘加速度、基礎コンクリート部に 100 mm ピッチで一列に取り付けられた衝撃土圧計より得られる伝達応力である。重錘には容量が 200 G、500 G のひずみゲージ型加速度計を各 2 個設置している。その応答周波数はいずれも 2 Hz 以上である。また、衝撃土圧計は基礎コンクリート表面と面一になるように設置されており、受圧部直径 25 mm、容量 30 MPa で応答周波数 DC ~1.5 kHz となっている。

表-1には、本解析で対象とした実験ケース一覧を示している。敷砂緩衝材は 90 cm 厚とし、重錘落下高さ  $h$  を 5 m から 30 m まで 5 m ずつ漸増させた計 6 ケースの実験を対象とした。

### 3. 解析概要

本研究では、前述の重錘落下実験に対する詳細な三次元衝撃応答解析を実施し、提案の砂モデルの適用性を検討することを目的としている。本研究で用いた LS-DYNA コードは有限要素法による空間の離散化と、中心差分に基づく陽的時間積分法を用いた非線形問題解析用の汎用プログラムである。以下に、数値解析モデルの詳細を述べる。

#### 3. 1 解析モデル

図-2には、敷砂緩衝材に関する解析モデルのメ

表-1 実験ケース一覧

	重錘落下高さ $h$ (m)	重錘落下速度 $V$ (m/s)
敷砂緩衝材	5, 10, 15, 20, 25, 30	9.9, 14.0, 17.1, 19.8, 22.1, 24.2

表-2 材料物性一覧

物性	弾性係数 $E$ (GPa)	ポアソン比 $\nu$	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
砂	—	0.06	1,600
基礎	24.0	0.20	2,350
重錘	206.0	0.30	4,370

ッシュ分割状況を示している。モデルの総節点数、総要素数はそれぞれ 5,191, 4,216 である。解析モデルは、敷砂部と鋼製重錘部を別々にモデル化した。解析では、重錘部と敷砂部間に接触・剥離を考慮した滑りを伴う接触面を設定し、重錘要素全体に設定衝突速度を入力することで敷砂に衝突させている。

なお、敷砂緩衝材の下には基礎部として、底面の一層をコンクリートのソリッド要素としてメッシュ分割した。この下面には完全固定として境界条件を設定している。

数値解析は対称性を考慮して、1/4 モデルに対して実施した。対称面には鏡面境界条件 (シンメトリ条件) を設定している。解析では自重を考慮するため、重力を設定している。

表-2には、本解析で用いた材料特性の一覧を示している。なお、砂の材料特性の詳細は後述する。基礎部および重錘は実験において損傷が認められて

いないことより、共に弾性体と仮定した。

基礎部の物性は、一般的なコンクリートと同様の弾性係数  $E = 24 \text{ GPa}$ 、密度  $\rho = 2,350 \text{ kg/m}^3$  とした。実重錘はコンクリートを充填した鋼製であるが、簡略化して材質を鋼製と仮定して弾性係数  $E = 206 \text{ GPa}$  とし、密度は重錘全体の質量が等価となるように  $\rho = 4,370 \text{ kg/m}^3$  に調整してモデル化している。

### 3. 2 砂の材料特性

図-3には、数砂の応力-ひずみ曲線を示している。本研究では、現実の砂の構成を検討するのではなく、有限要素法による衝撃解析において、数砂緩衝材を連続体として表現するための合理的なモデルを提案するところにある。実験結果より、重錘は大きく貫入し、リバウンドもほとんど発生せずそのまま残留することが明らかになっていることより、連続体と仮定する場合には、塑性化していると見なせるため、弾塑性体としてモデル化することとした。

また、その衝突速度と貫入量の関係に2次放物線状の関係が見られたことより、2次放物線状の応力-ひずみ曲線を基本とすることとした。この基本モデルの物性値を試行錯誤的に設定した予備解析を実施し、実験結果と比較することによって最終的な応力-ひずみ関係を決定した。

ポアソン比、密度はそれぞれ  $\nu_{\text{sand}} = 0.06$ 、 $\rho_{\text{sand}} = 1,600 \text{ kg/m}^3$  とした。ポアソン比は一般の砂として用いられる値と大きく異なるが、これはポアソン比が解析結果に与える影響が大きく、伝達衝撃力の分布範囲および重錘衝撃力波形の性状が最もよく一致する値を用いているためである。密度に関しては、その値が解析結果に与える影響は微小であったため、一般的な値を用いることとした。提案の砂モデルの応力-ひずみ関係は、次式のように示される。

$$\sigma_{\text{sand}} = 50 \varepsilon_{\text{sand}}^2 \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_{\text{sand}}$  は平均応力 (MPa)、 $\varepsilon_{\text{sand}}$  は体積ひずみである。なお、荷重除荷勾配は重錘重量、衝突速度等によって大きく変化するものと推察されるが、本研究では 3,000 kg 重錘が 20 m 落下する場合を基準として  $E_{\text{ul}} = 10 \text{ GPa}$  と設定した。

### 4. 実験結果と解析結果との比較検討

ここでは前述の物性モデルを用い、実験と同一条件の下に実施した数値解析結果を実験結果と比較・

表-3 重錘衝撃力積一覧

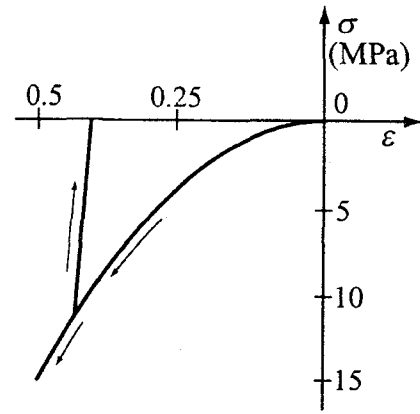


図-3 砂モデルの応力-ひずみ曲線

力積 (kNs)	実験値	解析値
$h = 5 \text{ m}$	29.28	33.61
$h = 10 \text{ m}$	44.74	45.27
$h = 15 \text{ m}$	57.28	55.03
$h = 20 \text{ m}$	65.32	64.66
$h = 25 \text{ m}$	73.45	72.18
$h = 30 \text{ m}$	80.27	81.54

検討することとする。

検討項目は、重錘落下衝突実験で計測した重錘加速度に重錘重量を乗じて得られる重錘衝撃力波形、コンクリート基礎部に設置されたロードセルより得られる伝達応力波形、また、伝達応力を円周方向に積分することで得られる伝達衝撃力波形である。以下、各項目毎に述べる。

#### 4. 1 重錘衝撃力波形

図-4には、落下高さ毎の重錘衝撃力波形を、実験結果と解析結果を比較して示している。図より、数値解析結果の重錘衝撃力波形において、初期勾配は、重錘の衝突速度にかかわらず実験結果を比較的よく再現していることが分かる。

また、実験結果の波形は衝突速度にかかわらず2波の波形成分から構成され、2波目の振幅が1波目より大きく示されている。本解析ではこの波形性状も比較的よく再現されている。しかしながら、その応答の最大値は実験値と差があり、衝突速度が小さな場合には解析結果が大きな値を示す傾向が強いことが分かる。

表-3には、各落下高さにおける重錘衝撃力の力積の値を一覧にして示す。この重錘衝撃力波形について時間積分を実施すると、実験結果と解析結果で

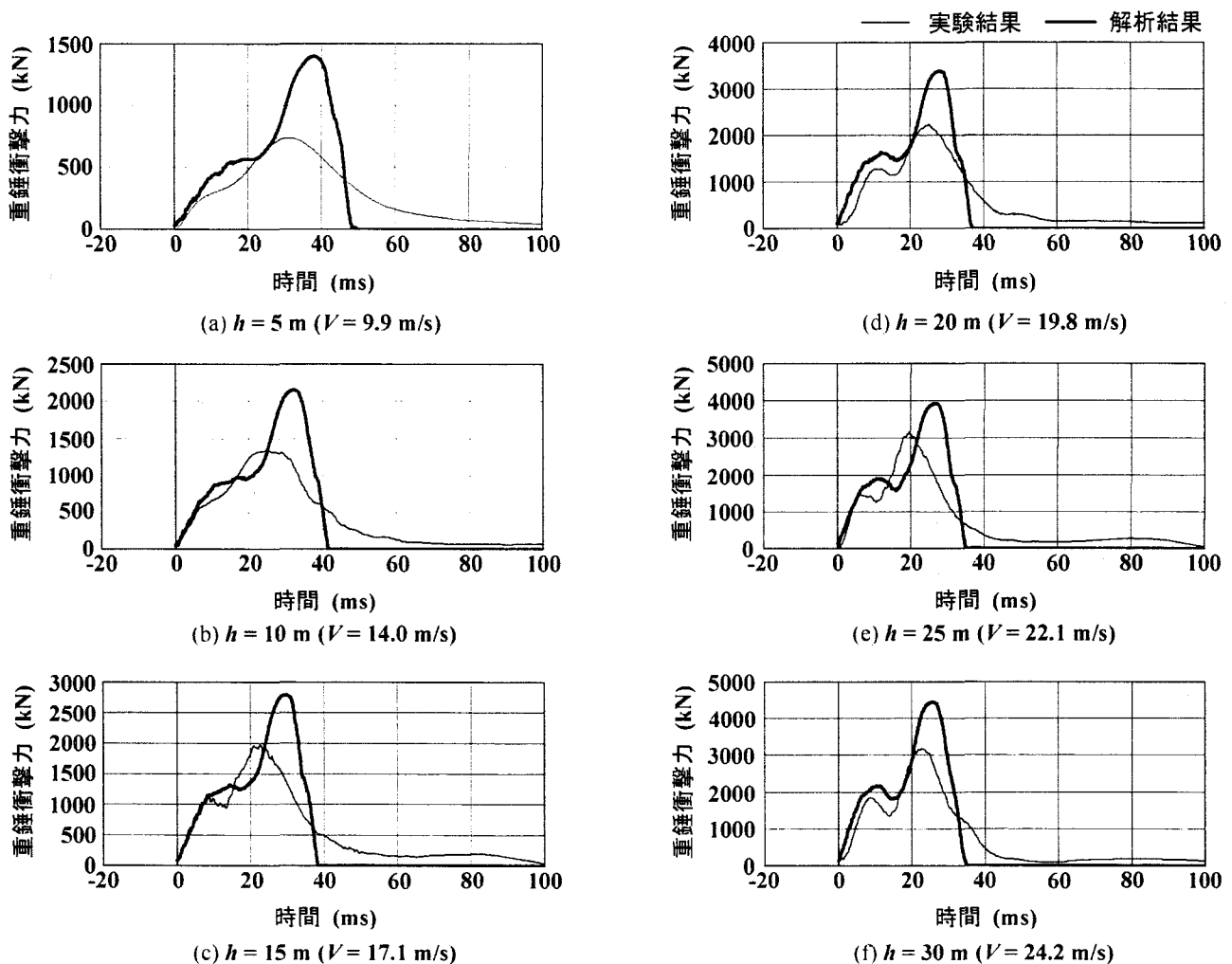


図-4 敷砂緩衝材に関する実験結果の重錘衝撃力波形と数値解析結果の比較

ほぼ同一となる。すなわち、実験結果と解析結果において力積が等しく、さらに力積を質量で除すことにより速度が得られることから、速度もほぼ同一になっていることが分かる。

これより、重錘衝撃力波形に関しては、提案の解析モデルは応答性状の傾向はある程度再現可能であるものの、その最大振幅については高い再現性は得られないことが明らかとなった。

#### 4. 2 伝達衝撃力波形

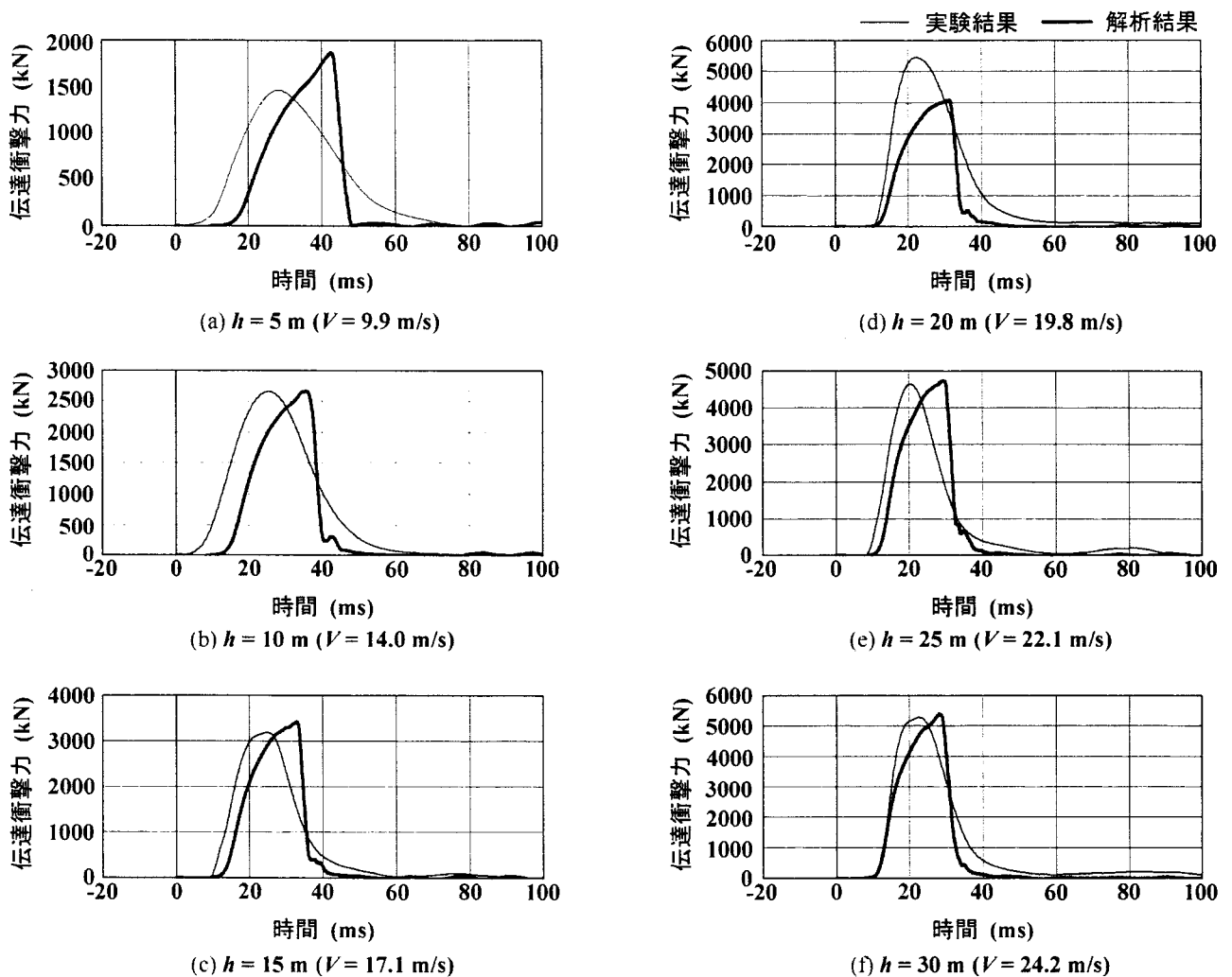
図-5には、伝達衝撃力波形に関する実験結果と解析結果を比較する形で示している。本波形は後述の伝達衝撃応力波形を時間軸を合わせて集積することにより得られたものである。図より、実験結果の波形は、重錘衝突時より 10 ms 程度遅れて励起し、重錘衝突後 20 ~ 30 ms 時点でピーク値に達している。その後、徐々に零レベルに低減している。一方、解析結果は、波動の立ち上がりが実験結果と比

較して数 ms 程度遅れる傾向が見られるものの、その立ち上がり勾配は重錘の落下高さにかかわらず実験結果とよく対応していることが分かる。最大応答値に関しては、重錘落下高さ  $h = 5 \text{ m}$ ,  $20 \text{ m}$  の場合を除き実験結果と大略一致する傾向を示している。また、その発生時刻に関しては、実験結果に比較して 5 ~ 15 ms 程度実験結果よりも遅延していることが分かる。

最大応答値到達後の挙動は、実験結果に比較して除荷勾配が大きく示されており、重錘が実験結果と比較して急激にリバウンド状態に至っていることをうかがわせる。

解析結果の除荷勾配は、実験結果に比較して重錘衝撃力波形、伝達衝撃力波形ともに大きい。これは解析結果がリバウンド時の応答を完全に再現できていないためと考えられる。

以上より、本モデルは重錘落下高さ  $h \geq 10 \text{ m}$  において実験結果と類似の伝達衝撃力分布を示すこ



図－5 敷砂緩衝材に関する実験結果の伝達衝撃力と数値解析結果の比較

とが明らかとなった。なお、落下高さ  $h = 20 \text{ m}$  の場合における最大伝達衝撃力は、実験結果と解析結果で大きく異なる値を示している。しかしながら、実験結果の最大値が、落下高さ  $h = 25 \text{ m}$  の場合よりも大きい値を示していることより、 $h = 20 \text{ m}$  の場合の実験結果には実験的な不具合により多少大きな誤差が含まれているとして処すべきであると判断される。

#### 4. 3 伝達衝撃応力分布

図－6には、敷砂緩衝材における各重錘落下高さに対する伝達衝撃応力分布について、横軸に重錘衝突直下からの距離を、縦軸に伝達衝撃応力値を、奥行方向に時間を取って示している。なお、図の上段には実験結果を、図の下段には解析結果を示している。図より、伝達衝撃応力の分布範囲は実験結果と解析結果で類似していることが分かる。また、各点の応力波形に関しても解析結果は大略実験結果を再

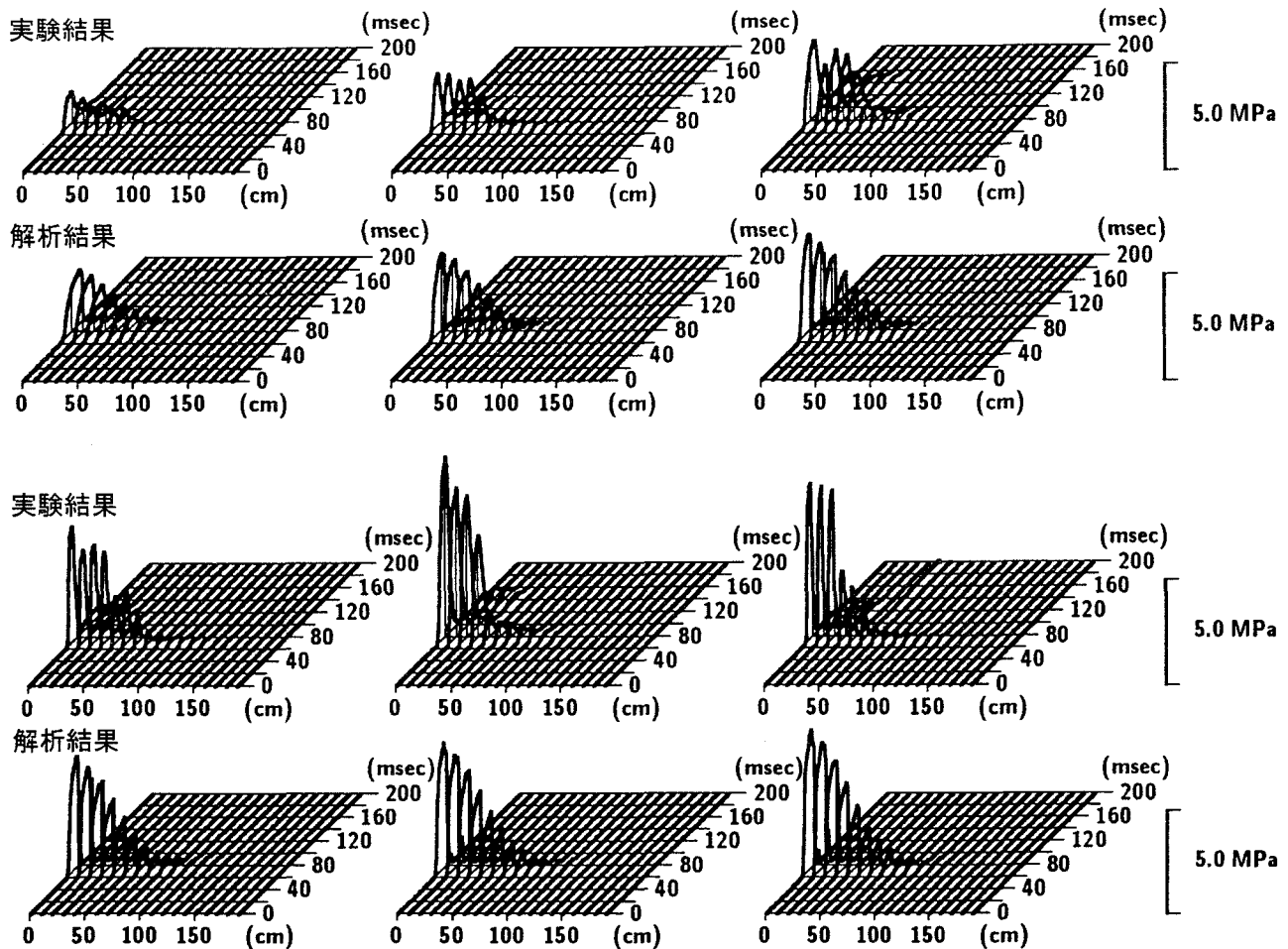
現していることがわかる。そのピーク値も類似している。

以上より、解析結果の伝達衝撃応力の分布性状は実験結果と比較的よく対応しているものと判断される。一方、解析結果の最大伝達衝撃応力値は、落下高の小さい領域で実験結果よりも多少大きく評価される傾向にあるが、全解析ケースに対して大略類似しているものと判断される。

#### 5. まとめ

本研究では、敷砂緩衝材の簡易で合理的な衝撃応答解析用物性モデルを構築することを目的として、2次放物線型の応力－ひずみ関係を設定して敷砂緩衝材に関する数値解析を実施した。その実解析への適用の妥当性検討は野外で実施した実規模実験結果と比較する形で行った。本論文で得られた結果を整理すると、

1)重錘衝撃力波形に関しては、応答性状が比較的類



図一六 敷砂緩衝材における伝達衝撃応力分布図

似する傾向を示すが、その振幅の再現性は低い。

- 2)伝達衝撃力波形に関しては、数値解析結果は最大応答発生時刻に実験結果と比較して多少遅れる傾向がみられるが、落下高さが  $h=10\text{ m}$  以上の場合には、初期勾配、最大応答値とも大略一致している。
- 3)ただし、除荷勾配は数値解析結果が実験結果よりも大きめに評価される傾向にある。
- 4)伝達衝撃力分布に関する数値解析結果は実験結果とよく対応しており、モデルの再現性は高い。

参考文献

- 1)岸 徳光, 佐藤昌志, 今野久志: 敷砂や三層緩衝構造を設置した場合の柱式 RC 覆道の衝撃挙動解析, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1773-1782, 1998.3
- 2)岸 徳光, 佐藤昌志, 今野久志, 松岡健一: 落石防護擁壁の重錘衝突実験と数値解析的検討, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.1677-1688, 1999.3

- 3)岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 安藤智啓: 静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の弾塑性衝撃応答解析, 土木学会論文集, No.619/I-47, pp.215-233, 1999.4
- 4)岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 安藤智啓: せん断補強筋を有しないせん断破壊型 RC 梁の弾塑性衝撃応答解析, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1093-1102, 2001.3
- 5)岸 徳光, 川瀬良司, 今野久志, 岡田慎哉: 二層緩衝構造を用いた落石防護擁壁の重錘衝突実験と数値解析的検討, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.1567-1578, 2002.3
- 6)John o.Hallquist: LS-DYNA User' s Manual, version 960, Livermore Software Technology Corporation, 2001.1
- 7)岸 徳光, 中野 修, 松岡健一, 西 弘明: 野外実験による敷砂の緩衝性能, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.1587-1597, 1993.3