

敷砂材の緩衝特性評価のための数値解析モデルに関する一考察

A consideration for constitutive model of sand element for estimation of impact analysis

岸 徳光*, 岡田 慎哉**, 今野 久志***, 池田 憲二****

Norimitsu KISHI, Shin-ya OKADA, Hisashi KONNO and Kenji IKEDA

*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)

**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)

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

In order to establish an appropriate FE model of sand element for impact response analysis, dynamic response analysis of sand cushion and three-layered absorbing system subjected to falling-weight impact force was conducted by using LS-DYNA code. An applicability of proposed model for sand-cushion element was discussed comparing the numerical results with the prototype experimental results. From this study, it was seen that using the sand element proposed here, dynamic characteristics of impact stress transmitted to rigid base though sand-cushion and three-layered absorbing system can be almost similar to those of experimental results.

Key Words : *impact analysis, sand model, sand cushion, Three-Layered Absorbing System*

キーワード: 衝撃解析, 砂モデル, 敷砂緩衝材, 三層緩衝構造

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の研究も, 各研究機関において盛んに実施されている。

著者らもこれまで種々の 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^{1)~5)}, 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, 検討を行ってきた。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て, 全体構造系から主構造体のみを取り出して計算を行っている場合が多く見られた。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, 妥当性を確認しておくことが肝要である。

また, 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。このような場合には, 緩衝構造の適切なモデル化が困難なことから, 実験結果に基づいて評価された伝達衝撃力波形を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, 緩衝構造に関する合理的な数値解析モデルの適用が可能になれば, 緩衝構造

を含めた全体構造系に対する解析が可能となり, より精度の高い衝撃挙動解析を実現することができるものと判断される。

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しばしば用いられる敷砂緩衝材に関する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, 通常汎用解析コードに組み込まれている程度の単純な構成則を適用した場合における, 敷砂単層や三層緩衝構造に対する重錘落下衝撃時の衝撃応答解析を試み, 実験結果と比較することにより数値解析モデルの妥当性に関する検討を行った。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汎用コード LS-DYNA Ver.960⁶⁾を用いて実施している。

2. 実験の概要

本研究では, 平成6年に北海道開発局開発土木研究所と室蘭工業大学との共同研究として実施した, 敷砂緩衝材および三層緩衝構造の緩衝性能や衝撃荷重分散性を明らかにするための実規模重錘落下実験^{7),8)}の結果を基に, 数値解析を行うこととした。

図-1には, 敷砂緩衝材および三層緩衝構造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

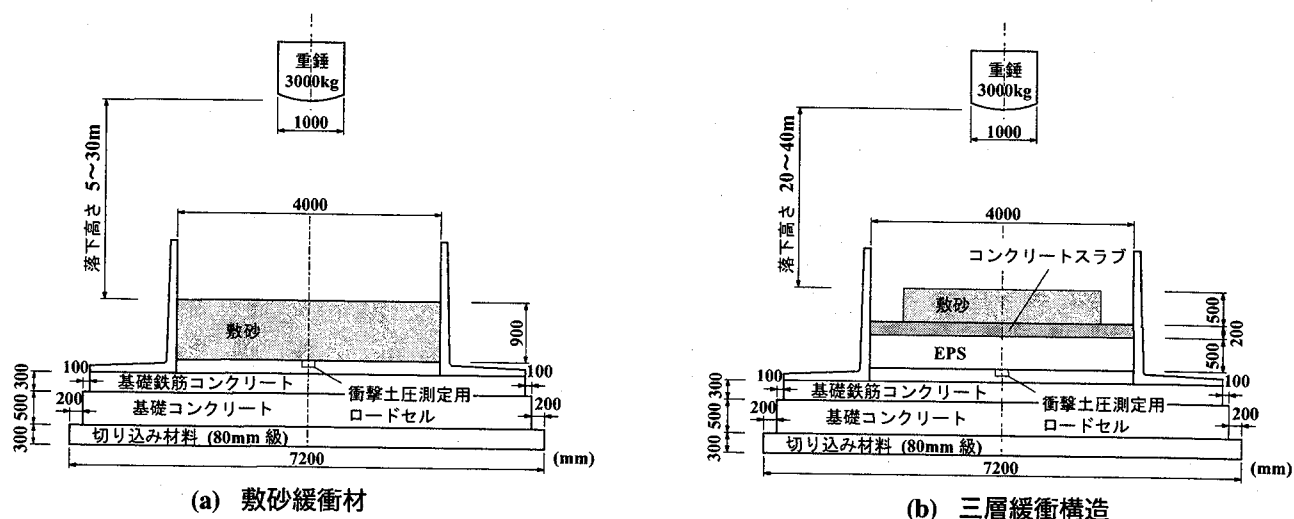


図-1 実験概要

表-1 実験ケース一覧

	重錘落下高さ h (m)	重錘衝突速度 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
三層緩衝構造	20, 30, 40	19.8, 24.2, 28.0

山にある北海道開発局第2機械製作所内の屋外実験施設にて実施した。

実験は、厚さ80cmの鉄筋コンクリート基礎上に4,000×4,000mmの範囲に敷砂緩衝材あるいは三層緩衝構造を設置し、質量3,000kg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、衝突させることにより実施している。なお、三層緩衝構造の敷砂層は、芯材RC版上に型枠を設置しその中のみ敷き詰めている。重錘は、直径1m、長さ1mの鋼製円柱型で、衝突面には片当たり防止のために $R=800$ mmのテーパが施されている。なお、重錘は鋼塊やコンクリートを充填して所定の質量に調整している。また、重錘内部にはその中心部に加速度計を設置しており、重錘の加速度が計測可能となっている。なお、重錘内部の加速度計は、容量が200, 500 G、応答周波数が2 kHz以上のものを各2個設置している。

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、基礎コンクリートの表面に面一状に100mmピッチで埋設された衝撃土圧測定用ロードセルから得られる伝達応力である。なお、衝撃土圧測定用ロードセルは受圧部直径25mm、容量30MPaで応答周波数DC~1.5kHz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90cm厚とし、重錘落下高さ（以後、単に落下高さ） h を $h=5\sim30$ mまで5mずつ漸増させた計6ケースの実験を対象とした。また、三層緩衝構造は表層敷砂厚が500mm、芯材RC版厚が

200mm、裏層発泡ポリスチロール（以後、単にEPS）材厚が500mmの場合を対象とし、落下高さを $h=20\sim40$ mまで10mずつ漸増させた計3ケースを対象とした。

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、提案の数値解析用敷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

(1) 敷砂緩衝材

図-2(a)には、敷砂緩衝材に関する解析モデルの要素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。数値解析では、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、コンクリート基礎部は、一層のみを考慮し固体要素を用いてモデル化している。その下面に対しては、完全固定として境界条件を設定している。

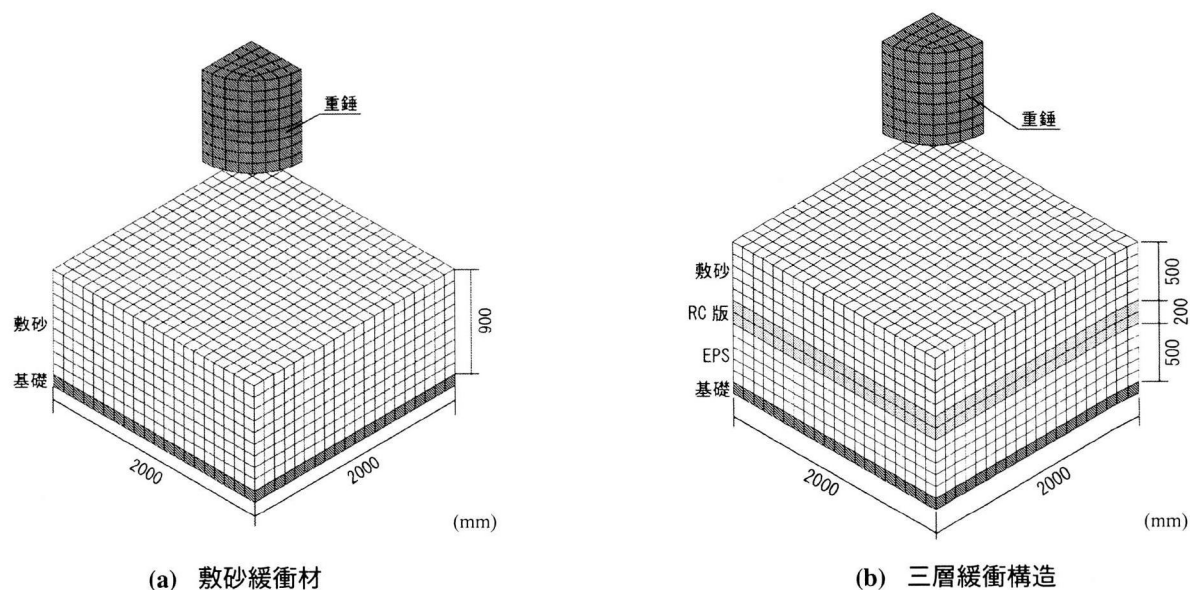


図-2 数値解析モデルの要素分割状況

表-2 解析に用いた物性値一覧

物性		弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν	密度 ρ (kg/m ³)	材料強度 (MPa) 圧縮側 / 引張側	備考
砂		－	0.06	1,600	－	－
コンクリート	芯材	20.0	0.20	2,350	－30 / 3	－
	基礎	24.0			－	弾性体
EPS		0.22	0.00	20	－ / 0.1	－
鉄筋		206.0	0.30	7,850	－350 / 350	－
重錘				4,370	－	弾性体

また、数値解析は構造および変形の対称性を考慮して、1/4 モデルに対して実施した。対称面には鏡面境界条件（シンメトリー条件）を設定している。解析では各材料の自重を考慮するため、全体に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なかったことより、共に弾性体と仮定した。

コンクリート基礎部の物性は、一般的なコンクリートと同様に弾性係数 $E_c = 24$ GPa、密度 $\rho_c = 2,350$ kg/m³ と仮定した。実重錘は鋼製シェルにコンクリートを充填したものであるが、これを簡略化して全体を鋼製と仮定し、弾性係数 $E_w = 206$ GPa とした。密度は重錘全体の質量が等価となるように $\rho_w = 4,370$ kg/m³ に調整してモデル化している。

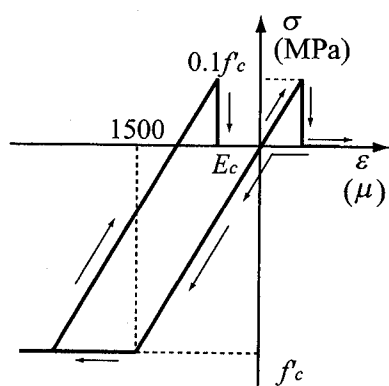
(2) 三層緩衝構造

図-2 (b) には、三層緩衝構造に関する解析モデルのメッシュ分割状況を示している。モデルの総節点数、

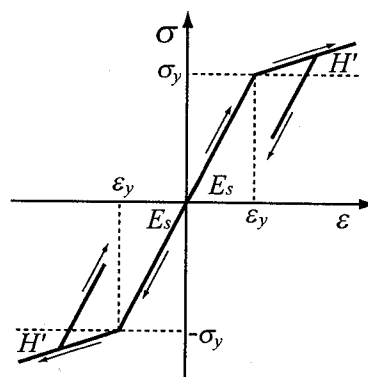
総要素数はそれぞれ 6,514、5,796 である。三層緩衝構造の解析モデルに関しても敷砂緩衝材モデルと同様に、緩衝構造部と重錘部を別々にモデル化している。解析は敷砂緩衝材と同様に 1/4 モデルに関して行った。芯材である RC 版において、コンクリート部は固体要素を用いてモデル化し、鉄筋は断面積、軸剛性、曲げ剛性が等価な梁要素を用いてモデル化している。

図-3 (a) にはコンクリート要素の応力-ひずみ曲線を示している。コンクリート要素はひび割れを考慮した弾塑性体と仮定し、弾性係数 $E_c = 20$ GPa、ポアソン比 $\nu_c = 0.2$ 、密度 $\rho_c = 2,350$ kg/m³ としている。その材料強度は、圧縮強度 $f'_c = 30$ MPa とし、引張強度 f_t を圧縮強度 f'_c の 1/10 と仮定している。なお、降伏の判定は von Mises の降伏条件に従うものとした。また、引張領域に関してはひび割れの発生とひび割れの発生による引張応力の解放をモデル化するために、応力が引張強度に達した時点で応力を零レベルまで低減させ、かつ引張応力を伝達しないように仮定した。

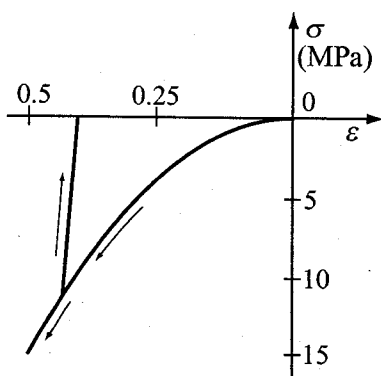
図-3 (b) には鉄筋要素の応力-ひずみ曲線を示して



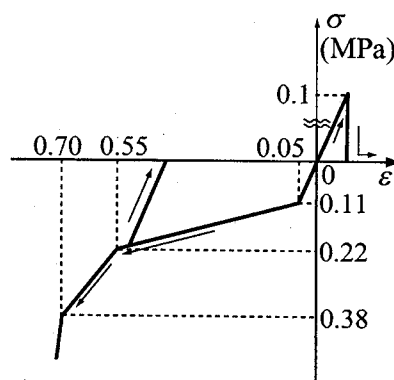
(a) コンクリートモデル



(b) 鉄筋モデル



(c) 敷砂モデル



(d) EPSモデル

図-3 各材料要素に関する解析モデルの応力-ひずみ曲線

いる。鉄筋要素は等方硬化則に従うバイリニア型の弾塑性体モデルとし、弾性係数 $E_s = 206 \text{ GPa}$ 、降伏強度を $\sigma_y = 350 \text{ MPa}$ 、ポアソン比 $\nu_s = 0.3$ 、密度 $\rho_s = 7,850 \text{ kg/m}^3$ と仮定している。なお、塑性硬化係数は $H'_s = E_s / 100$ とした。

3.2 敷砂の材料特性

図-3 (c) には、敷砂要素の応力-ひずみ曲線を示している。本研究の目的は、まえがきにも述べているように、静的な物性特性に基づいた敷砂要素に関するモデルの構築ではなく、有限要素法による衝撃応答解析において敷砂の緩衝特性をより精度よく表現するための数値解析モデルの構築にある。ここでは、実験結果から、1) 重錘がほとんどリバウンドを発生せずに大きく貫入しそのまま残留していること、2) その衝突速度と貫入量には2次放物線的な関係があること等、が明らかになっていることより、敷砂要素は弾塑性体としてモデル化し、かつ2次放物線状の応力-ひずみ曲線を有するものと仮定した。この基本モデルの物性値は、試行錯誤的に予備解析を実施し、実験結果と比較することによって応力-ひずみ関係を決定した。その結果、ポアソン比、密度はそれぞれ $\nu_{sand} = 0.06$ 、 ρ_{sand}

$= 1,600 \text{ kg/m}^3$ とした。ポアソン比は通常の砂の物性値と大きく異なった値を設定している。これは、ポアソン比の数値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を最もよく近似する時の値を採用したことによるものである。密度に関しては、その値が解析結果に与える影響が小さいことより、通常物性値として用いられる値を採用することとした。

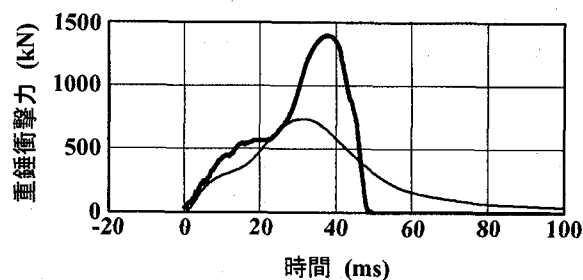
以上より、提案の砂要素の応力-ひずみ関係は、次式のように示される。

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

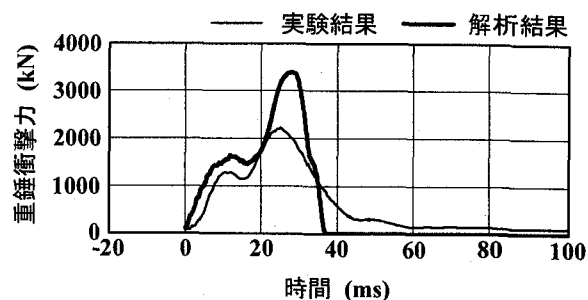
ここで、 σ_{sand} は平均応力 (MPa)、 ε_{sand} は体積ひずみである。なお、荷重除荷勾配 E_{ul} は重錘質量、衝突速度等によって大きく変化するものと推察されるが、本研究では質量 $3,000 \text{ kg}$ の重錘が 20 m 落下する場合を基準として $E_{ul} = 10 \text{ GPa}$ と設定した。

3.3 EPSの材料特性

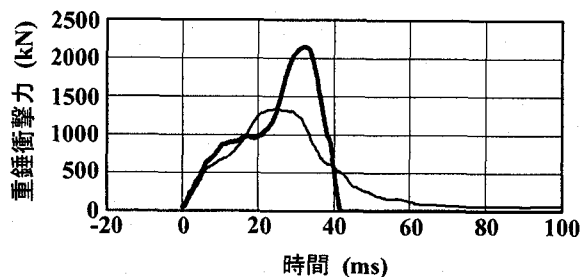
図-3 (d) には、EPS材の応力-ひずみ曲線を示している。EPS材は、著者らの過去の研究成果⁵⁾に基づき決定した。すなわち、弾性係数 $E_{eps} = 0.22 \text{ GPa}$ 、ポア



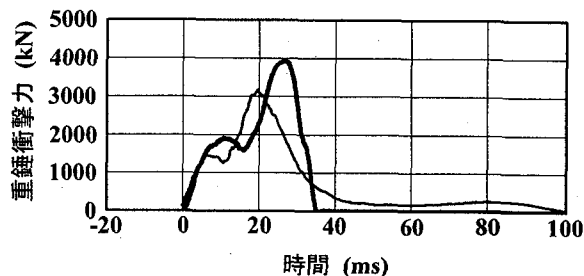
(a) $h = 5 \text{ m}$ ($V = 9.9 \text{ m/s}$)



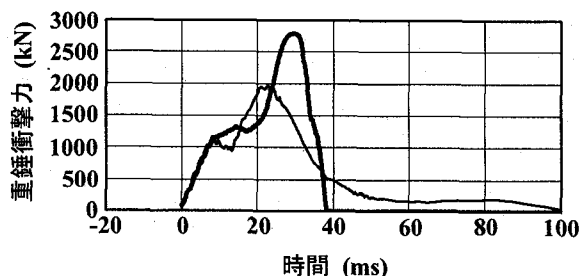
(d) $h = 20 \text{ m}$ ($V = 19.8 \text{ m/s}$)



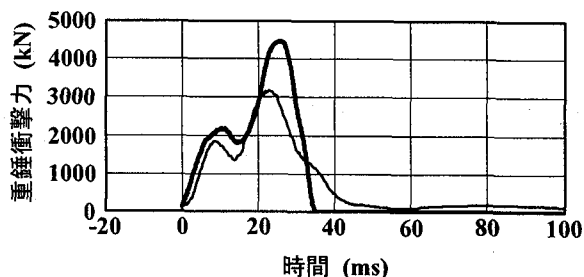
(b) $h = 10 \text{ m}$ ($V = 14.0 \text{ m/s}$)



(e) $h = 25 \text{ m}$ ($V = 22.1 \text{ m/s}$)



(c) $h = 15 \text{ m}$ ($V = 17.1 \text{ m/s}$)



(f) $h = 30 \text{ m}$ ($V = 24.2 \text{ m/s}$)

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

ソソ比 $v_{eps} = 0.0$ 、密度 $\rho_{eps} = 20 \text{ kg/m}^3$ とし、静的載荷実験結果より得られた分布性状を基にテトラリニア型にモデル化している。なお、引張応力に関しては、コンクリートモデルと同様に応力 0.1 MPa の状態でテンションカットオフを考慮している。

4. 実験結果と解析結果との比較検討

ここでは前述の各緩衝構造に関して各物性モデルを用い、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検討を行うこととする。

4.1 敷砂緩衝材

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

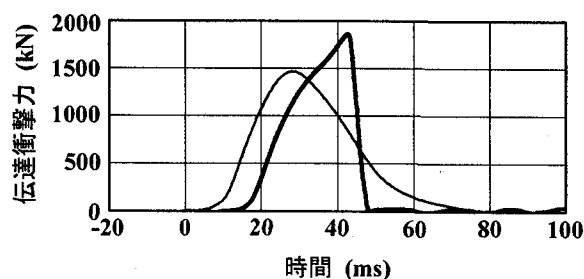
毎に述べる。

(1) 重錘衝撃力波形

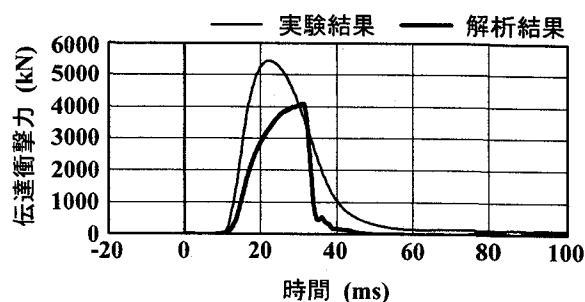
図-4 には、落下高さ毎の重錘衝撃力波形を、実験結果と解析結果を比較して示している。図より、数値解析結果の重錘衝撃力波形において、初期勾配は、重錘の衝突速度にかかわらず実験結果を比較的よく再現していることが分かる。

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解析値との間で差があり、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にあることが分かる。

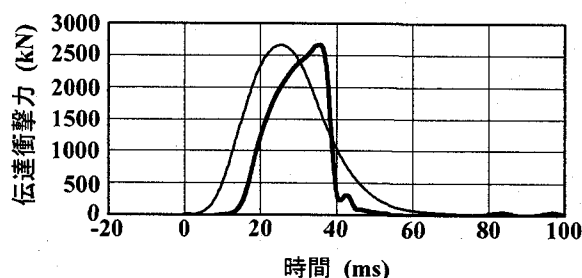
表-3 には、各落下高さにおける重錘衝撃力の力積の値を一覧にして示している。ここで、実験結果からの力積は重錘衝撃力波形を時間的に積分して得られたものであり、解析結果のそれは重錘先端部の接触反力



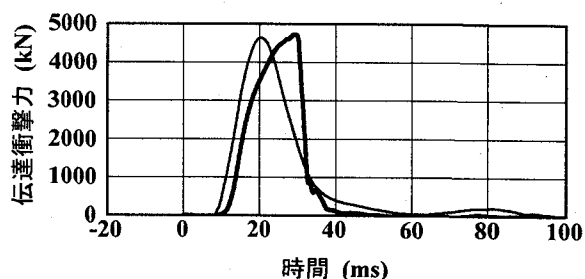
(a) $h = 5 \text{ m}$ ($V = 9.9 \text{ m/s}$)



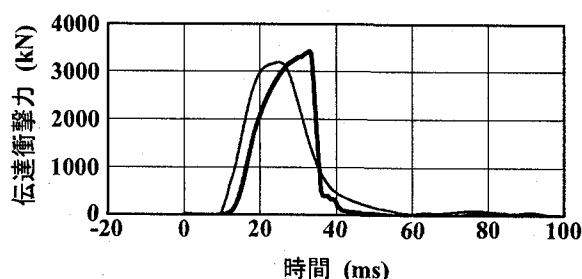
(d) $h = 20 \text{ m}$ ($V = 19.8 \text{ m/s}$)



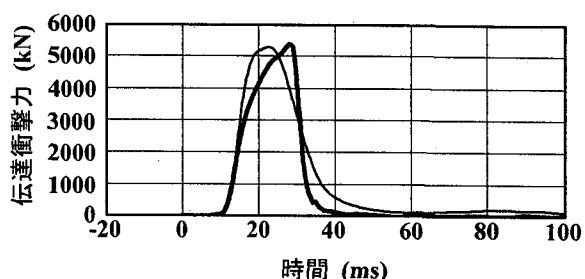
(b) $h = 10 \text{ m}$ ($V = 14.0 \text{ m/s}$)



(e) $h = 25 \text{ m}$ ($V = 22.1 \text{ m/s}$)



(c) $h = 15 \text{ m}$ ($V = 17.1 \text{ m/s}$)



(f) $h = 30 \text{ m}$ ($V = 24.2 \text{ m/s}$)

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

を同様に積分して求めたものである。表より、両者は互いに類似の値を示していることより、提案の解析モデルを用いることにより実験結果の力積を適切に評価可能であることが分かる。

以上より、重錘衝撃力波形に関しては、提案の解析モデルを用いることにより応答性状の傾向や力積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。

(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 にピーク値に達している。その後、徐々に零レベルまで低減している。

一方、数値解析結果は、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、

表-3 重錘衝撃力の力積一覧

落下高さ h (m)	力積 (kNs)	
	実験値	解析値
5	29.28	33.61
10	44.74	45.27
15	57.28	55.03
20	65.32	64.66
25	73.45	72.18
30	80.27	81.54

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、落下高さ $h = 5 \text{ m}$, 20 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。

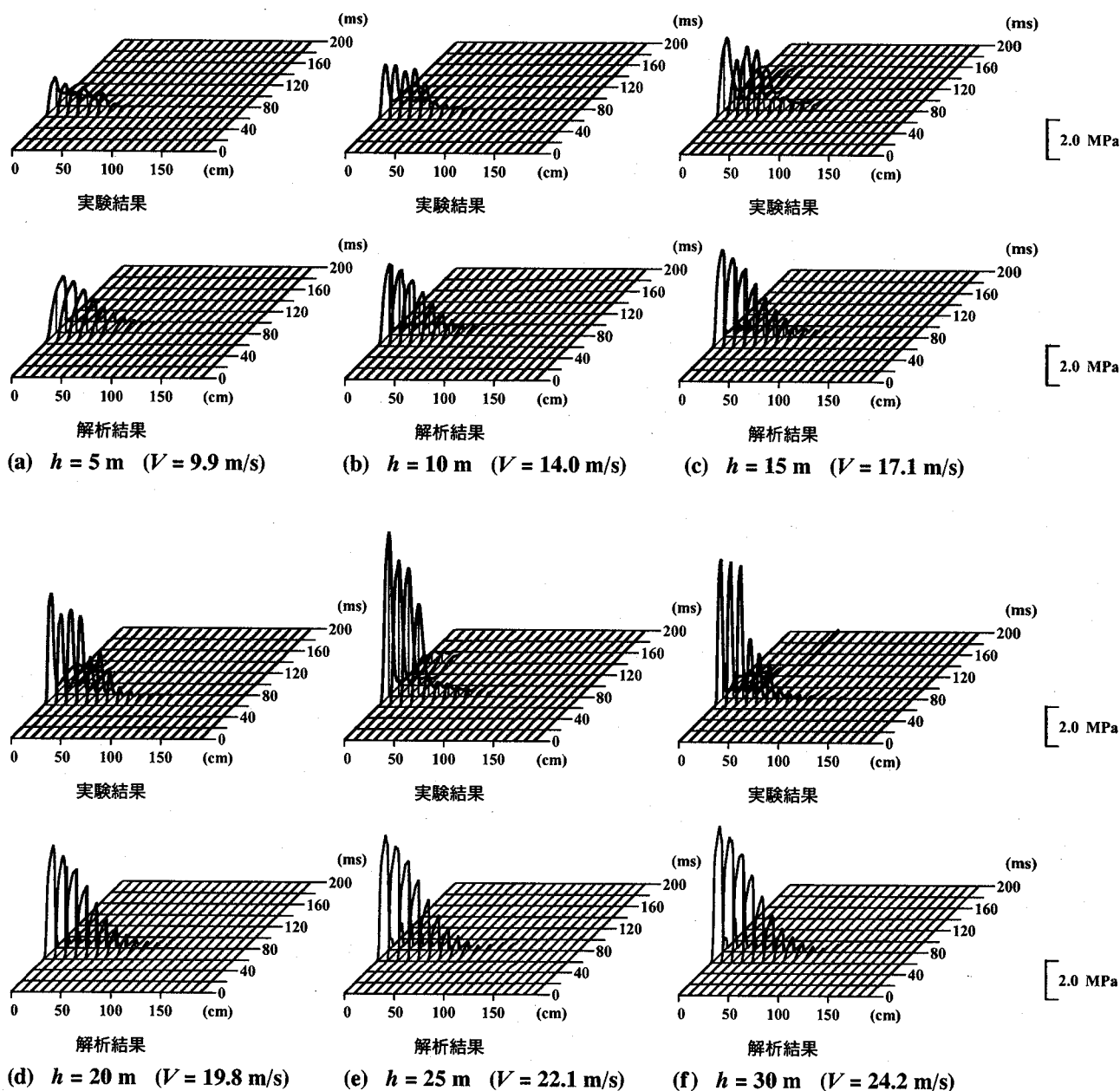


図-6 敷砂緩衝材における伝達衝撃応力分布図

数値解析結果におけ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。解析結果における除荷勾配が、重錘衝撃力波形、伝達衝撃力波形ともに実験結果よりも大きくなる現象は、重錘のリバウンドを適切に評価できていないためと推察される。

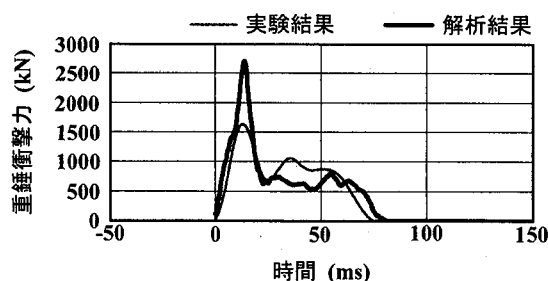
以上より、提案の解析モデルを用いることによって、落下高さ $h \geq 10 \text{ m}$ における実験結果の伝達衝撃力分布を適切に評価可能であることが明らかとなった。なお、落下高さ $h = 20 \text{ m}$ の場合における最大伝達衝撃力は、実験結果と解析結果で大きく異なる値を示している。しかしながら、実験結果の最大値が、落下高さ h

$= 25 \text{ m}$ 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ことが予想される。

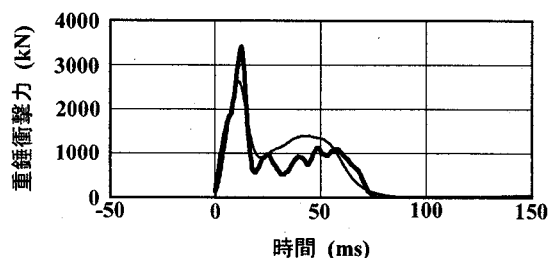
(3) 伝達衝撃応力分布

図-6 には、敷砂緩衝材における各落下高さに対する伝達衝撃応力分布について、縦軸および横軸にそれぞれ伝達衝撃応力値、重錘衝突直下からの距離を取り、奥行方向に時間を取って示している。なお、図の上側には実験結果を、下側には解析結果を示している。図より、数値解析結果の伝達衝撃応力の分布範囲、応力の応答性状、最大応答値とも大略実験結果を再現していることが分かる。

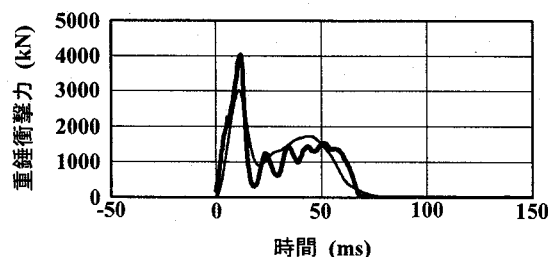
以上より、提案の解析モデルを用いることにより、



(a) $h = 20 \text{ m}$ ($V = 19.8 \text{ m/s}$)

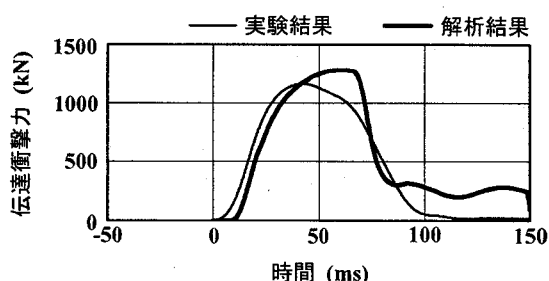


(b) $h = 30 \text{ m}$ ($V = 24.2 \text{ m/s}$)

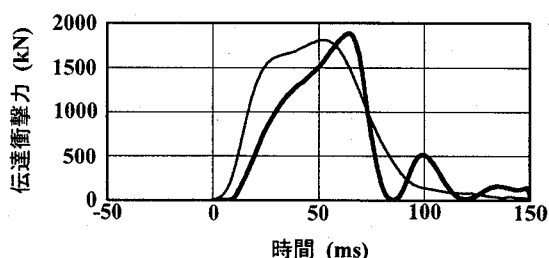


(c) $h = 40 \text{ m}$ ($V = 28.0 \text{ m/s}$)

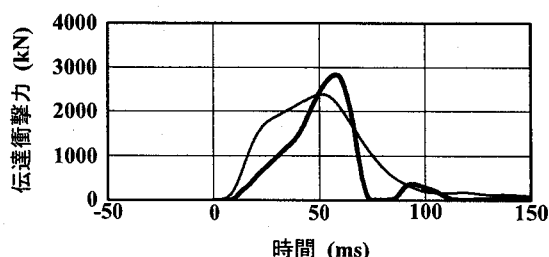
図-7 三層緩衝構造における重錘衝撃力波形



(a) $h = 20 \text{ m}$ ($V = 19.8 \text{ m/s}$)



(b) $h = 30 \text{ m}$ ($V = 24.2 \text{ m/s}$)



(c) $h = 40 \text{ m}$ ($V = 28.0 \text{ m/s}$)

図-8 三層緩衝構造における伝達衝撃力波形

伝達衝撃応力に関する実験結果は数値解析的に大略再現できることが明らかになった。

4.2 三層緩衝構造

ここでは、提案の敷砂モデルを三層緩衝構造に適用した場合の妥当性について検討を行うこととする。検討項目は、敷砂緩衝材の場合と同様に、重錘衝撃力、伝達衝撃力、伝達衝撃力分布の3波形とする。

(1) 重錘衝撃力

図-7には本解析で得られた各落下高さ毎の重錘衝撃力波形を、実験結果と比較して示している。図より、実験結果は重錘衝突後10 ms程度で最大応答値に達し、約20 ms後に1000 kN前後まで低減し、約50 ms継続後に徐々に零レベルまで減少している。解析結果は実験結果と類似の応答性状を示していることが分かる。最大応答値に着目すると、落下高さ $h = 20 \text{ m}$ における数値解析結果は実験結果よりも大きな応答値を示しているが、他 $h = 30, 40 \text{ m}$ の場合には両者類似の値を示していることが分かる。

(2) 伝達衝撃力波形

図-8には、伝達衝撃力波形を示している。図より、実験結果の応答波形は重錘衝突時より10 ms程度遅れて励起し、継続時間が90 ms程度の正弦半波状の分布を示し、その後徐々に零レベルに漸近している。

数値解析結果は、主波動が励起された後に減衰自由振動的な性状を示しているが、落下高さ $h = 40 \text{ m}$ の場合を除き大略実験結果と類似の分布性状を示していることが分かる。落下高さが $h = 40 \text{ m}$ の場合には、数値解析結果の波動の立ち上がり勾配が実験結果のそれと著しく異なっている。これは、実験時に入力エネルギーが大きいことによって芯材RC版が著しく損傷を受けてたことを確認していることより、数値解析がこのような状態に対して追従できないことを暗示している。

(3) 伝達衝撃力分布

図-9には、三層緩衝構造における伝達衝撃力分布波形について、敷砂緩衝材の場合と同様にして整理している。なお、図の上側には実験結果を、下側には解析結果を示している。

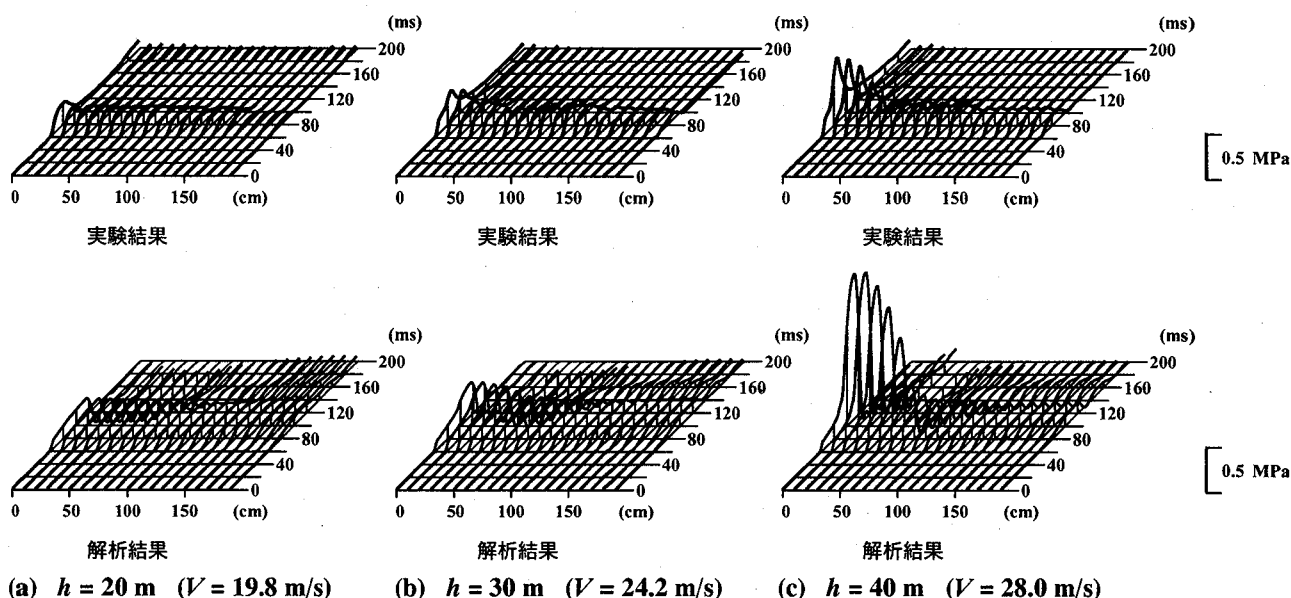


図-9 三層緩衝構造における伝達衝撃応力分布図

図より、数値解析結果の伝達衝撃応力の分布性状は、落下高さ $h = 40 \text{ m}$ の場合を除き実験結果と比較的よく一致していることが分かる。ただし、落下高さ $h = 40 \text{ m}$ の場合における差異は、前述のように衝突エネルギーが過大であったことにより、数値解析結果が実験結果に精度良く追従できないことによるものと判断される。

以上の検討より、提案の解析モデルは三層緩衝構造のような複合緩衝構造物に対しても、芯材 RC 版が著しい損傷を受けない範囲で、十分に適用可能であることが明らかとなった。

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および三層緩衝構造に関する数値解析を実施した。その妥当性は野外で実施した実規模実験結果と比較する形で検討を行った。本論文で得られた結果を整理すると、

- 1) 敷砂緩衝材に関する数値解析結果より、重錘衝撃力波形に関しては、応答性状が実験結果と比較的類似する傾向を示すものの、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が実験結果と比較して遅れる傾向がみられるものの、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、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。
- 5) 提案の敷砂モデルを三層緩衝構造の表層に適用した場合において、数値解析結果の重錘衝撃力、伝達衝撃力、伝達衝撃応力の各応答波形は、芯材 RC 版に著しい損傷が生じる場合を除き、実験結果と類似である。これより、本論文で提案の敷砂解析モデルの衝撃応答解析への適用性は高いものと判断される。

今後は、敷砂の解析モデルのさらなる高精度化を図ることによって、重錘衝撃力波形に関しても適切な評価を可能にしたいと考えている。

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の検討, 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: セン断補強筋を有しないセン断破壊型 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

8) 岸 徳光, 佐藤昌志, 中野 修: 三層緩衝構造の緩衝性能に関する大型野外実験, 構造工学論文集, Vol.41A, pp.1257-1265, 1995.3

(2002年9月13日受付)