

緩衝材を伝達する衝撃荷重の簡易推定法に関する研究

STUDY ON THE ESTIMATION OF IMPACT LOAD THROUGH THE SHOCK ABSORBER

園田佳巨*・松葉美晴**・彦坂熙***

Yoshimi SONODA, Yoshiharu MATSUBA and Hiroshi HIKOSAKA

* 工博 九州大学助教授 工学研究科建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

** 日本サミコン株式会社 開発事業部 (〒950-0925 新潟市弁天橋通 1-8-23)

*** 工博 九州大学教授 工学研究科建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

キーワード：衝撃荷重、衝撃緩衝材、応力波
(impact load, shock absorber, stress wave)

1. 緒言

ロックシェッド等の衝撃的な荷重の作用が想定される構造物の場合、信頼性の高い衝撃荷重の推定は最も重要であり、これまで数多くの研究がなされてきた。落石荷重に関する代表的研究としては、吉田や榊谷らによる敷砂を用いた場合の実験的評価¹⁾、や、岸らによる敷砂および三層緩衝構造を用いた一連の実験・理論解析^{2),3)}があり、敷砂等を介して伝達される落石荷重の特性に関して多くの知見が得られており、通常の条件下(落石規模、敷砂条件等)であれば、これらの成果をもとに落石対策便覧式を適用すれば実用上の問題はないと言える。一方、任意の剛性を有する緩衝材に任意の衝突物が作用するような対象を特定しないケースでは、衝撃荷重の評価は非常に難しく、個別の衝撃実験により評価されることが多いようである。

本研究では、任意条件下における衝撃荷重の評価を簡易に行うことを目的として、一次元的な波動伝播解析をもとにした算定法を提案するものである。一般に剛性の小さい緩衝材は、衝突物の貫入にとともに大変形を生じるため、通常の有限要素法ではメッシュの再分割等の手法を駆使することが要求され、容易に解が得られるような状況にはない。一方、現実の重錘落下実験データによると、敷砂等の緩衝材を介して伝達される衝撃荷重の分散勾配は、従来の設計において想定したものよりかなり小さく、衝突物の貫入が大きくなるほど一次元的な応力の伝播が支配的になる傾向にあることが指摘されている⁵⁾。そこで、本研究では緩衝材を介して伝達される衝撃

応力を一次元的なものに近似できるとした大きな仮定を設け、理論的な厳密性には欠けるが緩衝材の大変形を容易に取り扱える解析プログラムを作成し、衝撃荷重の簡易推定法を提案する。また、敷砂を用いた重錘落下実験のシミュレーションを行い、本法の適用可能性について検討した。

2. 解析手法の概要

落石等の衝突により緩衝材中を伝播する衝撃力を簡易に考慮するため、以下の仮定を用いた。

1) 発生する応力波の波長が緩衝材の厚さに対して十分に大きいことを想定し、緩衝材中を一次元的に伝播するものとする。2) 衝突物(落石等)は、緩衝材と比べて非常に大きな剛性を有するものと考えて剛体とみなす。したがって、衝突物自体の変形は無視し、その剛体移動量を緩衝材に対する強制変位とする。3) 衝突物の形状には球などに代表される軸対称なものを想定し、緩衝材に対しても衝突位置中心を対称軸とした三次元応力場を想定する。ただし、一次元的な波動伝播の仮定との整合を図るため、せん断応力は考慮しない。また、載荷軸直交方向ひずみは生じないものとする。ただし同方向応力の計算は三次元の場合で行い、載荷軸方向応力への影響を考慮するものとした。4) 緩衝材底面の各位置で算出した載荷軸方向応力を面積分することにより、伝達衝撃力を算定する。

以上の仮定のもとに、図-1に示すように緩衝材を軸対称な有限幅の領域に分割し、各領域で敷厚方向に多質点に離散化したモデルを用いて波動伝播解

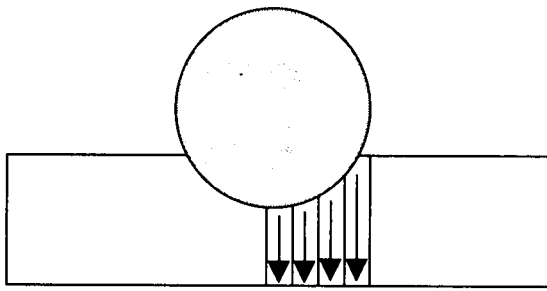


図-1 緩衝材中の応力伝播の仮定

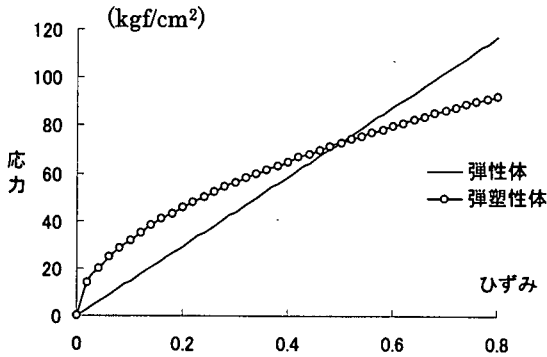


図-3 緩衝材の単軸応力-ひずみモデル

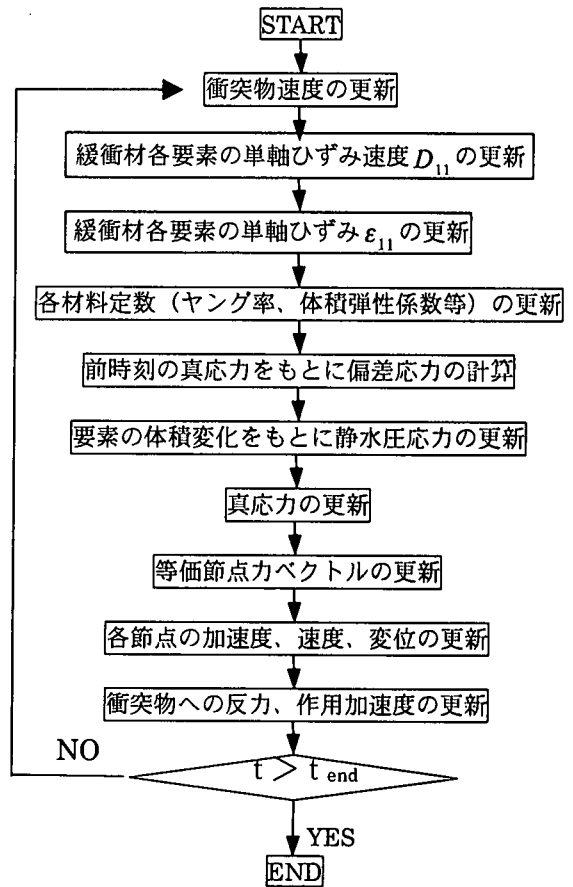


図-2 解析のフローチャート

析を試みた。解析は各時間ステップで、(1)緩衝材のひずみ、応力の計算、(2)衝突物の挙動、衝撃荷重の計算の2段階に分けられる。その要点を以下に示す。

2.1 緩衝材中のひずみ、応力の計算

①現時点の要素の両端節点座標および速度を用いて、垂直ひずみ速度を式(1)により計算する。

$$D_{11} = \frac{v_{i+1} - v_i}{x_{i+1} - x_i}, D_{22} = D_{33} = -\nu D_{11} \quad (1)$$

ここに、 v_i : 節点 i の速度、 x_i : 節点 i の座標

②全要素に対して、前時刻の剛性から求めた応力波伝播速度を考慮したクーラントの条件を満たす時間刻みを求め、最小の時間刻み Δt_{\min} だけ式(1)で得た載荷軸方向ひずみ速度の時間積分 $d\varepsilon_{11} = \int_t^{t+\Delta t_{\min}} D_{11} dt$ を数値的に行い、ひずみ増分を

求める。なお、他の成分については、一次元的な変位場の仮定のもとに考慮しない。

③②で求めたひずみ増分を前時刻のひずみに加算して全ひずみを更新した後、予め想定した応力-ひずみ関係式を用いて各材料定数を更新する。

$$E(\varepsilon) = \frac{d\sigma(\varepsilon)}{d\varepsilon}, K(\varepsilon) = \frac{E(\varepsilon)}{3(1-2\nu)}, G(\varepsilon) = \frac{E(\varepsilon)}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

ここに、 $E(\varepsilon)$: ヤング率、 $K(\varepsilon)$: 体積弾性係数、 $G(\varepsilon)$: せん断弾性係数、 ν : ポアソン比

④静水圧応力 $\bar{\sigma}$ および偏差応力 s_{ij} を、以下の式により更新する (ただし、 s_{12}, s_{23}, s_{31} は考慮しない)。

$$s_{ij}^{t+\Delta t_{\min}} = \sigma_{ij}^t - \sigma_{kk}^t \delta_{ij} / 3 + 2G(\varepsilon)(D_{ij} - \bar{D})\Delta t_{\min} \quad (3a)$$

$$\sigma_{ij}^{t+\Delta t_{\min}} = -K(\varepsilon) \cdot \log_e \left(\frac{V_i^{t+\Delta t_{\min}}}{V_i^t} \right) \quad (3b)$$

ここに、 σ_{ij}^t : 前時刻の真応力、 V_i^t : 前時刻の要素 i の体積 (側方変位はゼロとする) 、

$\bar{D} = (D_{11} + D_{22} + D_{33})/3$: 平均ひずみ速度

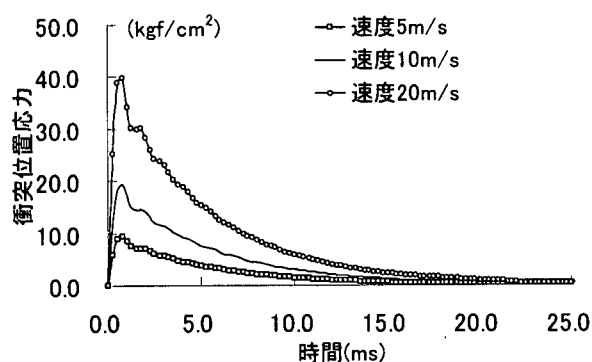
⑤真応力を更新する。

$$\sigma_{ij}^{t+\Delta t_{\min}} = s_{ij}^{t+\Delta t_{\min}} - \sigma_{kk}^{t+\Delta t_{\min}} \delta_{ij} / 3 \quad (4)$$

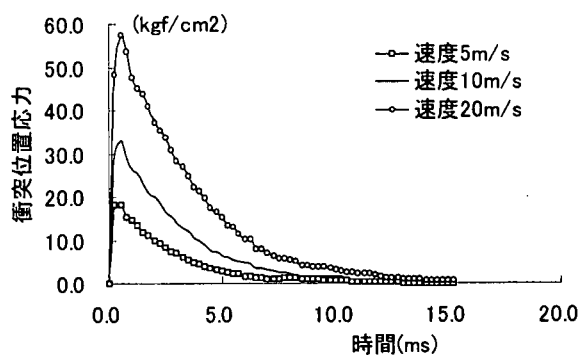
これらの定式化で、一次元的な応力の伝播を仮定してはいるが、載荷軸直交方向応力も求められ、側方変位の拘束にともなうポアソン効果が緩衝材中を伝播する応力波の値へ反映されることになる。

2.2 衝突物の挙動および衝撃荷重の計算

①緩衝材上面の節点座標値をもとに接触判定を行い、

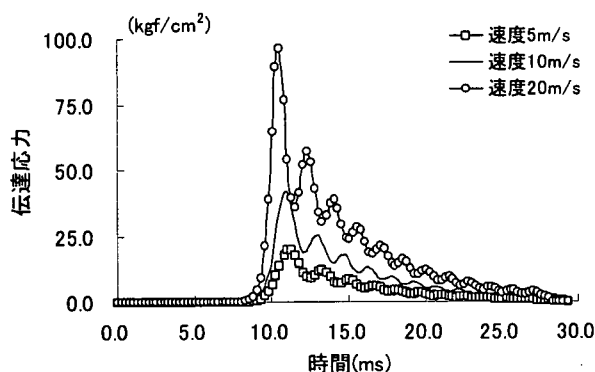


(a) 弾性体を用いた場合

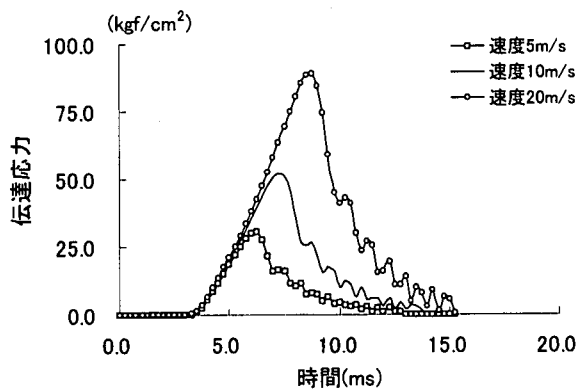


(b) 弾塑性体を用いた場合

図-4 衝突位置における発生応力の比較



(a) 弾性体を用いた場合



(b) 弾塑性体を用いた場合

図-5 緩衝材底面における伝達応力の比較

全接触要素の真応力(式(4)で得られる)より等価節点力の総和を求め、衝突物への反力とする。

②①で求めた反力から衝突物への負の加速度を求め、次の時刻の加速度、速度および変位を更新する。

③更新し衝突物変位を緩衝材への貫入量とみなし、接触要素への強制変位として各節点座標を更新する。

以上の考え方に基づき、図-2に示す手順のもとで衝撃応答解析を行った。なお、単軸方向以外のひずみ速度成分は一次元的な挙動の仮定のもとに求めている。したがって、本解析では隣接する領域間の相対変形やそれともなう力の伝達は考慮されないため、緩衝材中で荷重分散が大きなケースに対する適用には無理がある。

3. 数値計算例および考察

3.1 緩衝材の材料特性の影響に関する考察

基礎的な考察として、最初に緩衝材の材料特性が衝撃荷重に与える影響について検討した。すなわち、図-3に示すような単軸応力-ひずみ特性を有する弾性体と弾塑性体の2種類の簡易モデルを想定し、同一衝突物が作用した時の緩衝材底面への応力波の

伝播状況を比較した。なお、弾性緩衝材の材料定数として $E = 145.0(\text{kgf/cm}^2)$ 、ポアソン比 $\nu = 0.15$ 、単位体積重量 $w = 0.0025(\text{kgf/cm}^3)$ を与えた。一方、比較対象とした弾塑性緩衝材は、弾性緩衝材とほぼ等価な剛性(50%ひずみ時に同一応力とし、除荷時には初期剛性を与えた)とエネルギー吸収能力(80%ひずみ時に同一吸収量とした)を有するように配慮して、図-3に示す応力-ひずみ曲線を与え、20~80%のひずみ域における両者の緩衝性能が比較できるように衝突条件を設定した。なお、衝突部形状は緩衝材への貫入量に対して大きな影響を与えるため、緩衝材の材料特性との相互作用の影響が考えられる。したがって、ここでは平底状の衝突物が衝突・貫入し、緩衝材が一様に圧縮変形するケースについて、衝突物への反力から求めた重錘衝撃応力および緩衝材底面への伝達衝撃応力を比較した。図-4は、敷厚100cmの2種類の緩衝材に対して、重量3tの平底状の重錘が3通りの速度で衝突したときに発生する

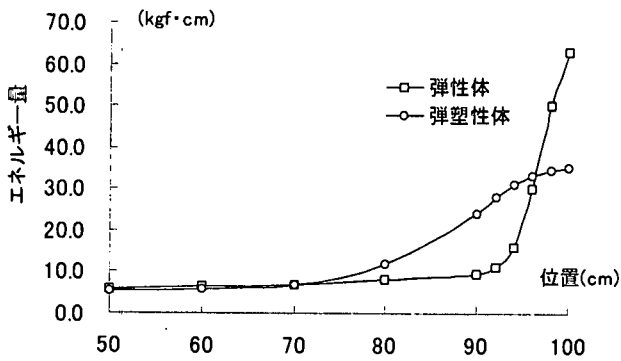


図-6 緩衝材中の伝達エネルギー分布

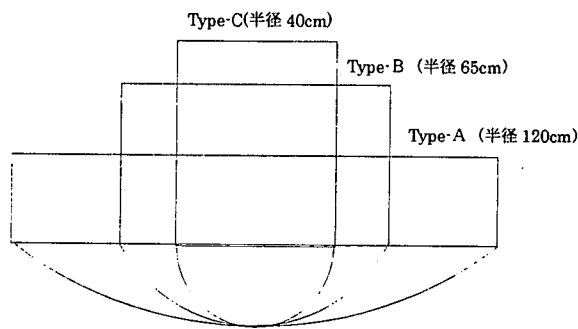
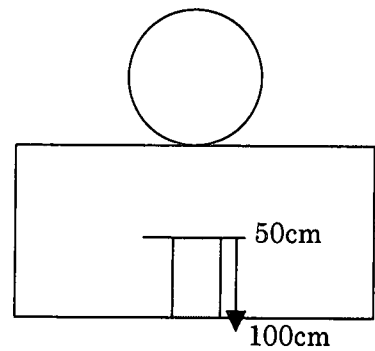


図-7 想定した重錘の先端形状

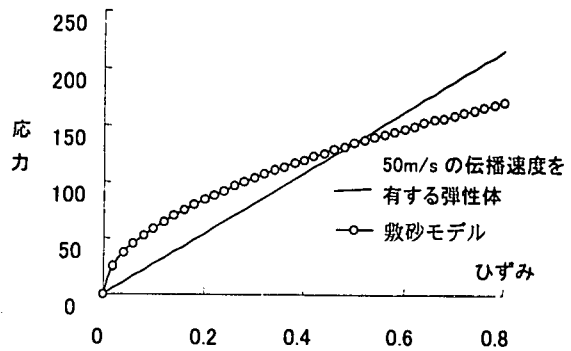


図-8 敷砂材の応力-ひずみ関係モデル

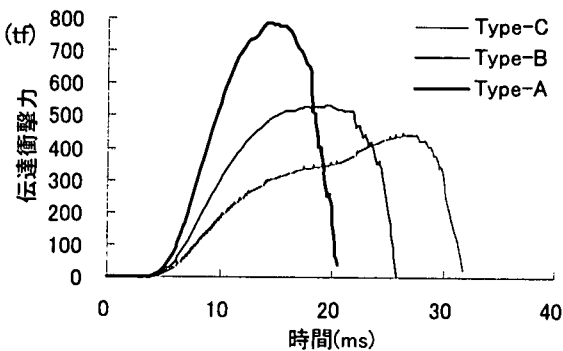
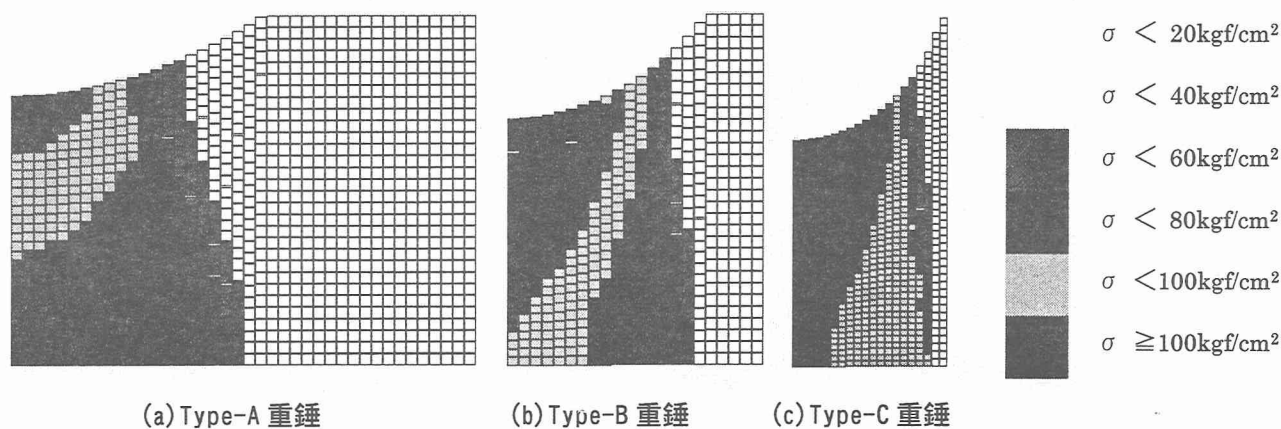


図-9 重錘形状と伝達衝撃力の関係

重錘衝撃応力を比較したものである。この図より、両者ともに最大応力は衝突直後に発生しており、緩衝材の持つ初期剛性が支配的要因であることがわかる。弾性緩衝材の場合、本計算による最大衝撃応力は、剛体が弾性体へ衝突時の衝撃応力の理論解 $\sigma_0 = \rho_0 c_0 v_0$ (ρ_0 : 緩衝材密度, c_0 : 初期応力波伝播速度, v_0 : 剛体の衝突速度) とほぼ同じ値を示し、(例えば、衝突速度 20m/s のケースでは、 $\sigma_0 = \rho_0 c_0 v_0 = \frac{0.0025}{980} \times \sqrt{\frac{145.0 \times 980}{0.0025}} \times 2000 = 38.5 \text{ kgf/cm}^2$) 衝突物速度に比例して増大する傾向にあることがわかる。一方、弾塑性緩衝材の場合、初

期剛性が弾性体比べて大きい(図-3参照: 変形開始時で約7倍、10%ひずみ時で約2倍)、衝突後1msに得られる最大応力は弾性体より50%程度も大きくなる。また、応力波の伝播速度が刻々と変化するため、衝突位置の最大応力は必ずしも衝突物速度に比例しないことも確認された。図-5は、緩衝材底面への伝達衝撃応力について比較したものである。この図より、初期の応力-ひずみ曲線の勾配が大きな弾塑性緩衝材の方が底面への応力の伝達は約4msと早いが、最終的な応力の上昇勾配や最大値は小さくなる傾向にあることが明瞭に認められる。すなわち、弾性緩衝材の場合には底面へ応力が到達してから最大値に達するまでに僅か1ms程度しか要しないのに対し、弾塑性緩衝材の場合には3~5ms程度と数倍の時間が経過している。これは、弾塑性緩衝材はひずみの進展とともに応力波の伝播速度が小さくなるため、衝突物が持っていた運動エネルギーを長い時間をかけて底面へ伝播させる傾向にあるためであると考えられる。

次に、2種類の緩衝材で底面への伝達応力に顕著な差が生じる理由をより明確に把握するため、応力波が伝播する過程における緩衝材中のエネルギーの位置的分布を比較した。図-6は、2つの緩衝材で底面への伝達衝撃力が最大になる時刻に緩衝材下層(表面から50~100cmの範囲)のエネルギー分布を



(a) Type-A 重錘 (b) Type-B 重錘 (c) Type-C 重錘
 図-10 重錘形状が敷砂内応力分布に与える影響 (最大伝達衝撃力発生時)

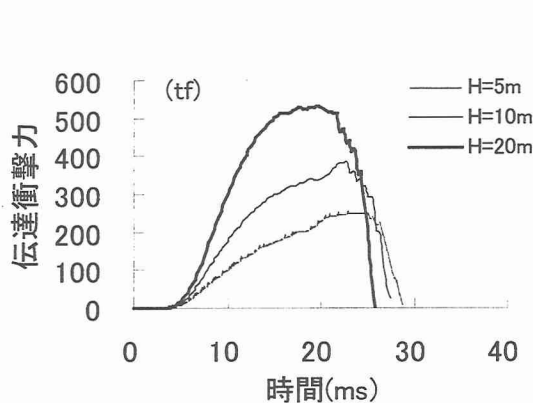


図-11 重錘条件と伝達衝撃力

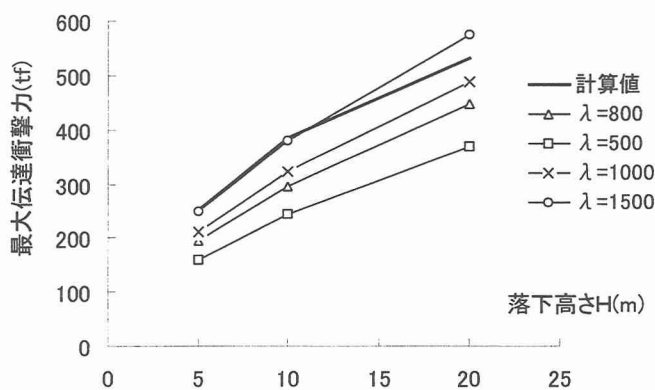


図-12 最大伝達衝撃力の推定値

比較したものである。この図より、弾塑性緩衝材の方が、空間的勾配が小さい応力分布が得られることがわかる。これは、弾塑性緩衝材の場合、ひずみの増大とともに剛性が減少し、後続の応力波の伝播速度が低下し、内部で裾野が広い応力分布へと移行していくことに起因していると考えられる。その結果、衝突物速度が大きく緩衝材の変形量も大きいケースでは、弾塑性緩衝材の方が底面への伝達衝撃応力が相対的に小さくなることになり、本解析でも 20m/s のケースで約 10% 小さい結果が得られている。ここでは、単軸応力-ひずみ関係において剛性とエネルギー吸収能力が同程度の 2 種類の緩衝材で比較を行ったが、緩衝材に致命的な大変形が発生しない範囲であれば、高ひずみ域における剛性が小さな弾塑性体が、衝撃緩衝材に適していることがわかる。

3.2 敷砂材に対する計算結果

本法で、落石の衝突により敷砂底面に伝達する衝撃荷重の評価を試みた。本来、敷砂の挙動は砂粒子の側方流動や締め固まりなどによって強度の非線形性を有し、大変形域までを網羅した材料特性（衝突物の貫入抵抗特性）を決定することは非常に困難である。しかし、ここでは敷砂の挙動を単軸応力-ひ

ずみ特性モデルで表現したうえで、本法を用いて衝撃荷重の推定がどの程度可能であるか、既往の重錘落下実験結果との比較により考察した。

a) 重錘形状の影響に関する考察

最初に、重錘底面の衝突部形状が衝撃荷重の計算結果に与える影響について検討した。一般に、重錘落下衝撃実験で用いられる重錘は、衝突部が一定の曲率を持つ曲面を有している。一方、落石形状は全くの任意であるため、設計等で落石を想定する場合には球形を仮定することが多く、必ずしも整合性はない。そこで、重錘底面の形状として図-7に示すような 3 種類を仮定し、衝突部形状が衝撃荷重に与える影響について検討した。なお、過去の実物大重錘落下試験結果⁴⁾によると、敷砂中の圧縮応力波の波動伝播距離を（敷砂厚-重錘貫入量）とみなし、一次元弾性波動論を用いて換算した場合、伝播速度は 50m/s 程度とみなせることが指摘されている。そこで、敷砂の材料特性として、図-8に示す非線形な応力-ひずみ特性を考え、50%ひずみ時の割線勾配で換算した弾性応力波の伝播速度が 50m/s となるように設定した。また、ポアソン比については敷砂に通常用いられる値として、 $\nu = 0.45$ を想定した。

したがって、3.1 で仮定した緩衝材よりもポアソン効果がかかなり大きく作用し、変形の増大とともに大きな貫入抵抗が働くことから、応力波動はひずみ硬化型の応力-ひずみ特性を与えた場合に近い結果が得られることになる。図-9は、重錘重量3tf、落下高さ20mの条件で、3種類の形状の重錘により発生した敷砂底面の伝達衝撃力を比較したものである。この図より、形状が平底に近くなるほど衝撃力の継続時間が短くなるとともに最大値が大きくなるなど、重錘形状により顕著に異なることが認められた。図中のType-Cのように重錘先端形状が鋭利になると、緩衝材への貫入量が大きくなり、底面からの反射波が重錘先端で反射・増幅される影響が顕著になると考えられ、衝撃力波形に2つのピークが現れることがわかる。なお、本解析ではエネルギー保存および運動量保存を前提とした解析を行っているため、緩衝材を介して底面へ伝達する力積は3ケースともほぼ等しいものとなっている。図-10は、各ケースで最大伝達衝撃力発生時の緩衝材中の応力分布を示したものである。一次元的な応力伝播の仮定より、Type-AからType-Cへと重錘先端が鋭利になるほど応力伝達領域が狭く、衝突位置直下に大きな応力が伝達することがわかる。図-10の計算値は、荷重分散の影響や敷砂中の衝撃エネルギーの散逸を考慮していないため、非常に過大な応力を示しており、緩衝効果を精度良く評価することはできないが、緩衝材の必要厚を安全側の観点から評価するには有用であると思われる。

b) 重錘条件が衝撃力に与える影響

図-11は、実際の衝撃実験に用いられる重錘に形状的に近いType-B型の重錘(重量3tf)を用いて、落下高さを5m, 10m, 20mの3通りに変えたときの伝達衝撃力波形を比較したものである。この図より、当然ながら落下高さが大きくなるにつれて、最大伝達衝撃力も単調に増加することがわかる。次に、各ケースの落下高さを横軸に、最大伝達衝撃力を縦軸の値として整理した結果を図-12に示す。図中には、落石対策便覧式に用いるラーメ定数を $\lambda = 500 \sim 1500 (tf/m^2)$ と仮定したときの衝撃力を併記している。この図より、本解析による伝達衝撃力は大きな値を示す傾向にあり、落石対策便覧式にラーメ定数として $1500tf/m^2$ 程度を与えた場合に非常に近いことがわかる。一方、岸らの実験³⁾によると、実際に敷砂底面に発生する最大伝達衝撃力は、落石

対策便覧式にラーメ定数として $1000tf/m^2$ 程度の値を用いて推定できることが指摘されている。現実の敷砂の場合、敷砂中を応力波が伝播する過程で締め固まりによる間隙の減少や敷砂の飛散および側方流動等が発生し、それにとまなうエネルギーの散逸が敷砂底面への伝達衝撃力に対して少なからぬ影響を与えるものと推察される。したがって、本法は約20%の過大な評価を与えるが、落下高さとも最大伝達衝撃力の関係は良好に捉えていることから、散逸エネルギーを考慮した補正係数を与える等の簡易な修正を行うことで、より精度の高い伝達衝撃力の推定が可能となり、実用面において有効な伝達衝撃力の評価手段となりうるものと思われる。

4. 結論

本研究で得た成果を要約すると以下ようになる。

- (1) 緩衝材中の荷重の分散が小さい場合には、簡易な一次元解析で衝突による伝達応力を定量的に評価できることが確認された。
- (2) 同程度の剛性とエネルギー吸収能力を有する弾性緩衝材と弾塑性緩衝材を比較すると、弾塑性緩衝材の方が伝達衝撃力は小さくなる傾向にあり、弾性緩衝材よりも適していると考えられる。
- (3) 敷砂を用いた衝撃実験のシミュレーションを行った結果、本法は伝達衝撃力を約20%過大評価する傾向にある。この点については、敷砂の挙動特性をより正確に反映した手法の改善が必要である。

今後の検討課題として、(1)荷重分散の影響を踏まえた本法の適用可能範囲の具体的検討、(2)敷砂等のエネルギーの散逸をとまなう場合の評価、(3)任意の緩衝材、衝突条件に対する本法の有効性の検討等が挙げられる。

参考文献

- 1) 吉田博、榎谷浩、佐藤真、井原朋美：落石実験データベースの作成と落石の衝撃力評価について、構造工学論文集, Vol. 33A, pp. 571-583, 1987年3月
- 2) 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年3月
- 3) 岸徳光、中野修、今野久志、松岡健一：三層緩衝構造の緩衝効果に関する室内実験、構造工学論文集, Vol. 38A, pp. 1577-1586, 1993年3月
- 4) 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, pp. 57-72, 1997年11月