

緩衝材を介して伝達する衝撃荷重の簡易推定法に関する研究

STUDY ON THE ESTIMATION METHOD 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

*正会員 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)

**正会員 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)

***正会員 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)

Reliable estimation of impact load is the most important matter for the protective structure design such as Rock Shed structure. There were many studies with respect to impact load by falling rock, and it is possible to estimate the impact load under the ordinary rock-fall conditions (weight, height). But once the rock-fall condition exceeds the ordinary range, it is difficult to predict it. This paper proposes a simple stress wave analysis in order to estimate the impact load in the arbitrary collision case. In general, when a hard body hits the soft shock absorber, large deformation occurs in the shock absorber and re-meshing work must be performed to simulate the behavior of it by using the ordinary FEM code. In order to avoid this difficulty, a simple stress wave analysis was developed on the assumption that impact stress wave propagates one dimensionally through the shock absorber, and examined the validity of this method comparing with existing falling weight experimental results.

Key Words: impact load, shock absorber, stress wave

1. 緒言

ロックシェッドに代表される衝撃的な外力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。その中でも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), 2)}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^{3), 4)}があり、敷砂等を介して伝達される落石荷重の特性に関する多くの知見が得られている。その結果、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ることで、衝撃荷重の評価に関して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、これに対応できる汎用的な衝撃荷重の算定法に関する検討も少ないため、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、衝突物の貫入にともない大変形を生じるため、通常の有限要素法でその変形挙動を追跡することは非常に困難であり、場合によって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とした大きな仮定を設けることにより、理論的な厳密性には欠けるが緩衝材の大変形を想定できる解析プログラムを作成し、荷重分散が小さい場合の衝撃荷重の推定を容易に行える手法を提案した。また、敷砂やEPS単層の緩衝材を用いた重錘落下実験のシミュレーションを行い、実験結果との比較を通して本手法の適用可能性を検討した。

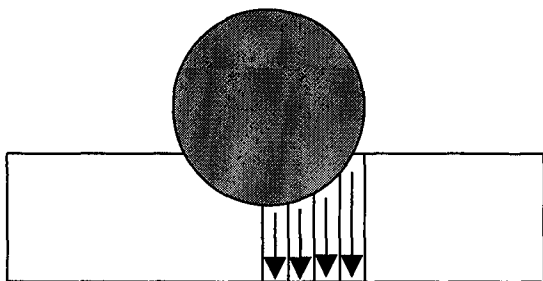


図-1 緩衝材中の応力伝播の仮定

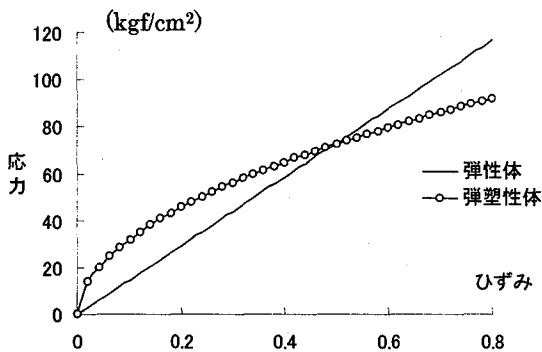


図-3 緩衝材の単軸応力-ひずみモデル

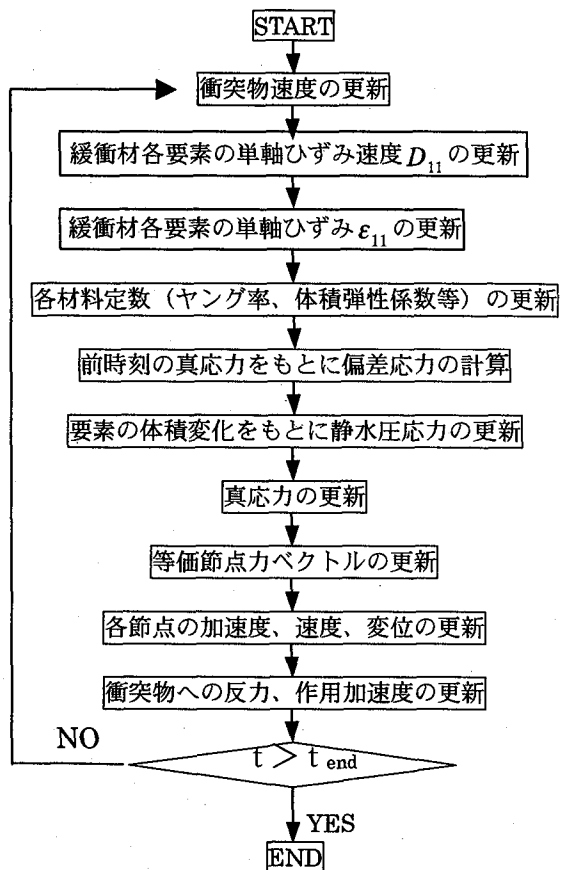


図-2 解析のフローチャート

2. 解析手法の概要

本解析では落石等の衝突により緩衝材中を伝播する応力波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、载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、载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载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、各領域内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析を試みた。解析は各時間ステップで、(1) 緩衝材中のひずみ、応力の計算、

(2) 衝突物の挙動および衝撃荷重の計算の2段階に分けて行った。その要点のみを以下に示す。

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

(x_i : 载荷軸)

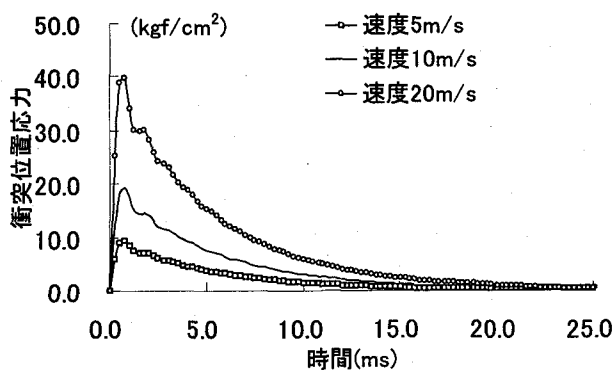
②全要素に対して、前時刻の剛性から求めた応力波伝播速度を考慮したクーラントの条件を満たす時間刻みを求め、最小の時間刻み $\Delta t_{\min}$ だけ式(1)で得た载荷軸方向ひずみ

速度の時間積分 $d\varepsilon_{11} = \int_t^{t+\Delta t_{\min}} D_{11} dt$ を数値的にを行い、ひ

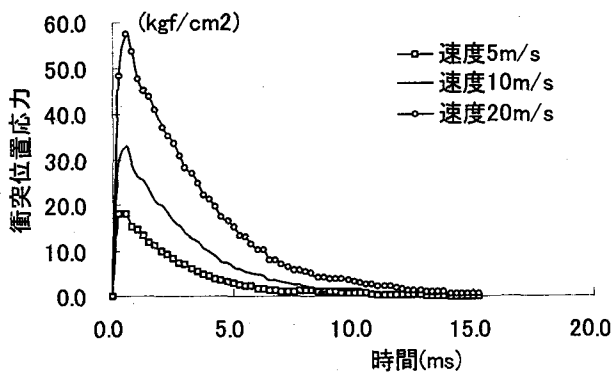
ずみ増分を求める。なお、他の成分については、一次元的な変位場の仮定のもとに考慮しない。

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。

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

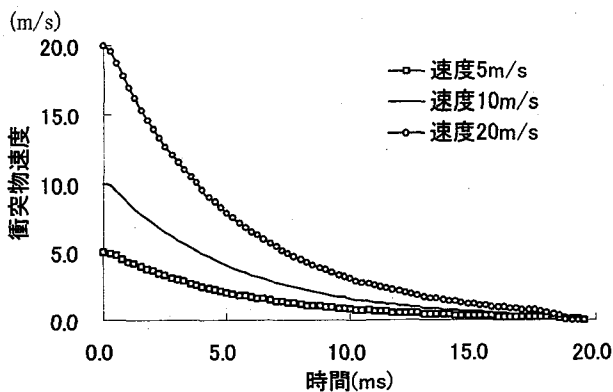


(a) 弾性体を用いた場合

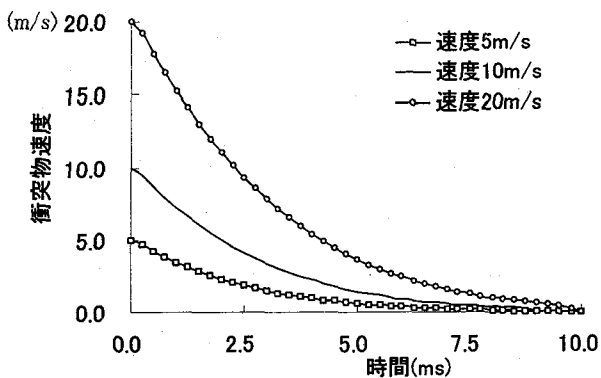


(b) 弾塑性体を用いた場合

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 衝突物速度の時間的変化

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 (一定とした)

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)。

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

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

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。

$$\sigma_{ij}^{t+\Delta t_{\min}} = s_{ij}^{t+\Delta t_{\min}} - \bar{\sigma}^{t+\Delta t_{\min}} \quad (4)$$

これらの定式化により、一次元的な応力伝播を仮定しているが、載荷軸直交方向応力が得られ、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 緩衝材上面の各節点に対して座標値をもとに接触判定を行い、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。

② ①で求めた反力を用いて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。

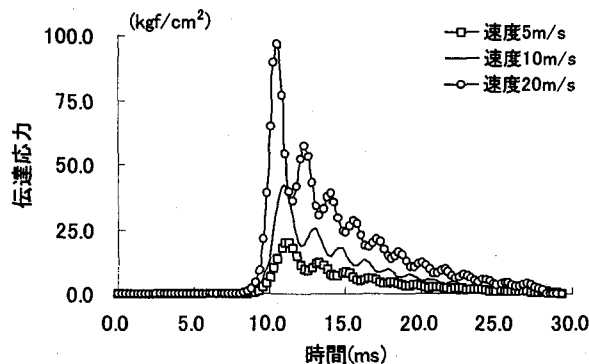
③ 更新された衝突物変位を緩衝材への貫入量とみなし、接触要素への強制変位として各節点座標を更新する。

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ない。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と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ことになる。

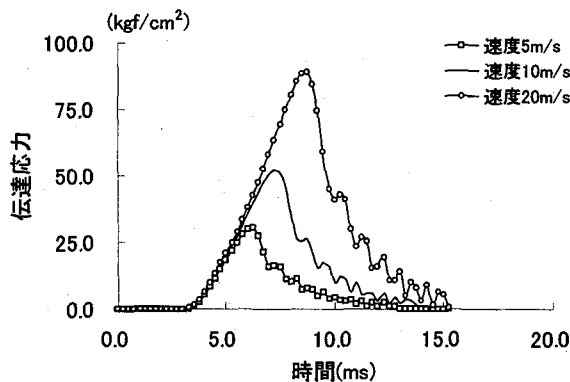
3. 数値計算例および考察

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の相違が



(a)弾性体を用いた場合



(b)弾塑性体を用いた場合

図-6 緩衝材底面における伝達応力の比較

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、弾性体に用いる弾性係数は数秒程度の剛性を有する緩衝材を仮定してヤング率 $E = 145.0(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 、ポアソン比には数秒より小さな $\nu = 0.15$ 、単位体積重量には

$w = \rho_0 g = 0.0025(\text{kgf}/\text{cm}^3)$ を与えた。一方、比較対象とした弾塑性体は、弾性体とほぼ等価な剛性 (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に示すような応力-ひずみ曲線を与え、20~80%の広範囲な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。ところで、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うため、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、ここでは材料特性の影響のみを明確に把握するために、平底状の形状を有する衝突物を想定した解析を行った。すなわち、平底状の衝突物が衝突・貫入することで、接触領域内の緩衝材が一様に圧縮変形するケースについて計算し、衝突物側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 の弾性体と弾塑性体2種類の緩衝材に対して、重量 3tf 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重錘衝撃応力を比較したものである。この図より、どちらの緩衝材においても衝突位置における最大応力は衝突直後に発生しており、緩衝材の初期剛性が支配的要因であることがわかる。弾性体の場合、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、 $\sigma_0 = \rho_0 c_0 v_0 =$

$$\frac{0.0025}{980} \times \sqrt{\frac{145.0 \times 980}{0.0025}} \times 2000 = 38.5 \text{ kgf}/\text{cm}^2$$

衝突物速度に比例して増大する傾向にあることが認められる。一方、本計算で仮定した弾塑性体の場合、初期剛性が弾性体に比べて大きい (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%程度も大きくなる結果が得られている。また、応力波の伝播速度が刻々と変化することから、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。次に、図-5は同一ケースで衝突物速度の時間的变化を2種類の緩衝材で比較したものである。この図より、当然の結果として衝突直後に大きな応力を生じる弾塑性体の方が衝突物速度の低下が早く、短時間で衝突物から緩衝材へのエネルギーの授受が行われていることが推察された。なお、衝突位置における緩衝材の最大ひずみには両者で大きな差は見られず、30%程度の値であった。図-6は、緩衝材底面への伝達衝撃応力について2種類の緩衝材で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体の方が底面への応力の伝達は約 4ms と早い、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、弾性体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、弾塑性体の場合には 3~5ms 程度と数倍の時間が経過している。これは、弾塑性体は緩衝材中の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緩衝材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、弾性体と弾塑性体とで底面への伝達応力に顕著な

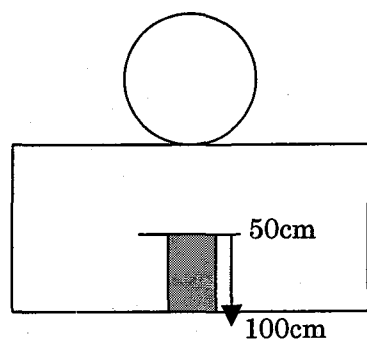
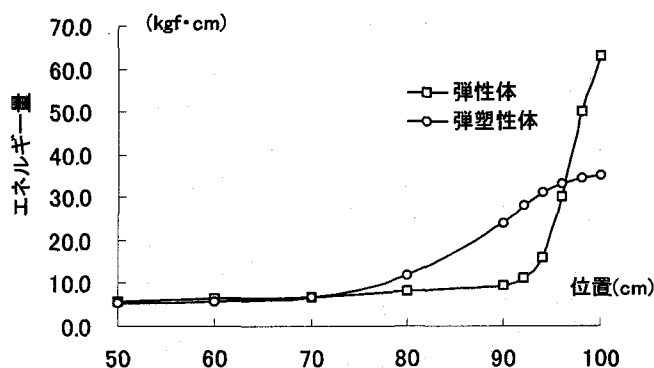


図-7 緩衝材中の伝達エネルギー分布

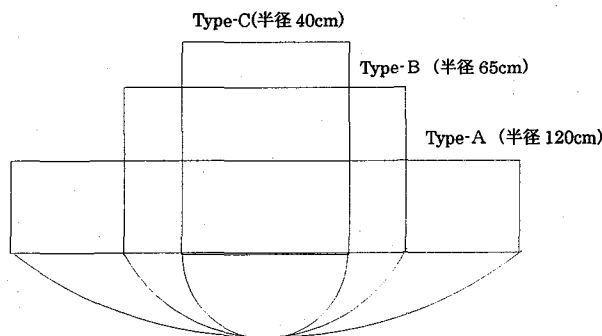


図-8 想定した重錘の先端形状

差が生じる理由をより明確に把握するため、緩衝材中に応力波が伝播する過程におけるエネルギーの位置の分布を比較した。図-7は、弾性体と弾塑性体の2つの緩衝材で、底面への伝達衝撃力が最大になる時刻のエネルギー分布について、緩衝材下層（表面から50cm～100cmの範囲）で比較したものである。この図より、弾塑性体の方が空間的勾配が小さい応力分布が得られていることがわかる。これは、弾塑性体が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するために、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ものと考えられる。その結果、衝突物の速度が大きく緩衝材の変形量も大きくなるケースでは、弾塑性体の方が底面への伝達衝撃応力が相対的に小さくなる傾向にあり、本解析例でも20m/sのケースで約10%小さくなる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弾性体と弾塑性体の緩衝材としての特性比較を行ったが、緩衝材自体が致命的な大変形に達しない範囲であれば、一般に高ひずみ域における剛性が小さい弾塑性体の方が、弾性体よりも衝撃緩衝材に適しているものと推察される。

3.2 敷砂材に対する計算結果

次に、落石と敷砂との衝突により敷砂底面に伝達する衝

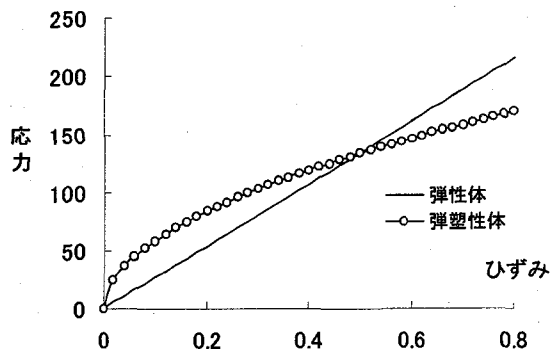


図-9 敷砂材の応力-ひずみ関係モデル

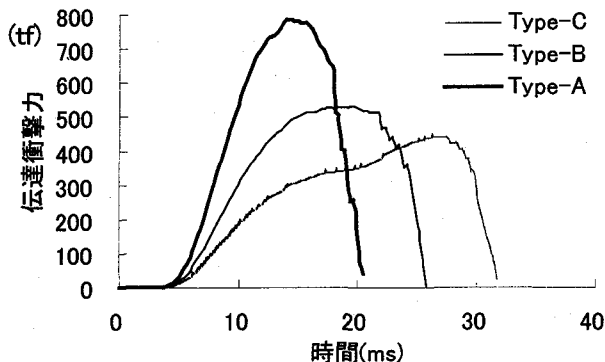


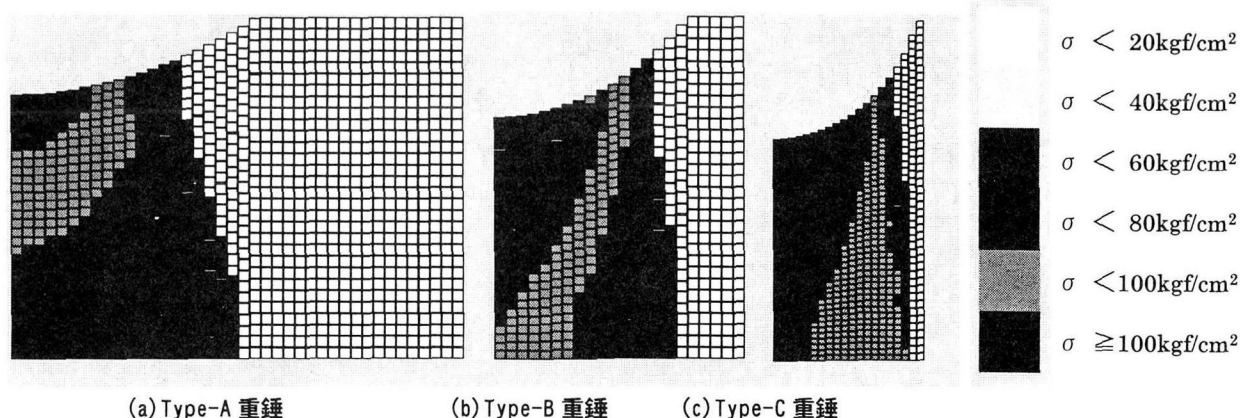
図-10 重錘形状と伝達衝撃力の関係

撃荷重に対する本解析法の適用可能性について検討した。

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（衝突物への貫入抵抗特性）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できるものと仮定し、本法を用いてどの程度の精度で衝撃荷重の推定が可能であるか、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



(a) Type-A 重錘 (b) Type-B 重錘 (c) Type-C 重錘
図-11 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)

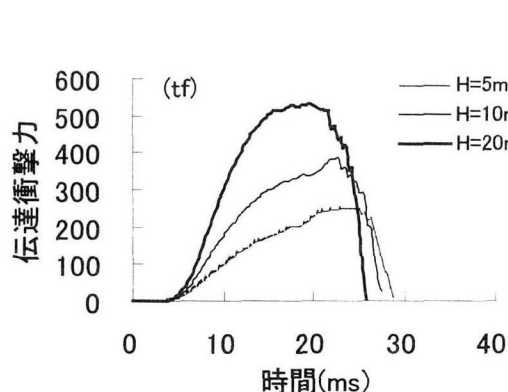


図-12 重錘条件と伝達衝撃力

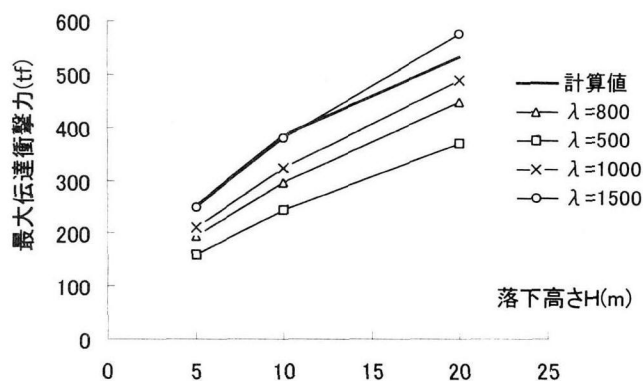


図-13 最大伝達衝撃力の推定値

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-8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⁵⁾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-9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-10は、それぞれ重錘重量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

値が大きくなる傾向が見られるなど、伝達衝撃力波形は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のように重錘先端部が鋭利な形状になると、緩衝への貫入量が大きくなるため、底面からの反射波が重錘先端で反射・増幅される影響が大きくなるものと考えられ、衝撃力波形に2つのピークが現れることがわかる。なお、本解析では散逸エネルギーについて理論的な評価をしておらず、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ことから、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-11は、各ケースで最大伝達衝撃力が発生した時の緩衝材中の応力分布を示したものである。本法では一次元的な応力の伝播を仮定していることから、Type-AからType-Cへと重錘先端が鋭利になるほど緩衝材中の応力伝達領域が狭く、衝突位置直下近傍の底面に大きな応力が伝達することがわかる。図-11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、構造側の諸元を定量的に検討するための資料にはなり得ないが、緩衝材の必要厚を安全側の観点から検討するには有用であると思われる。

b) 重錘条件 (重量, 落下高さ) が衝撃力に与える影響

図-12は、実際の落錘式衝撃実験に用いた重錘形状に

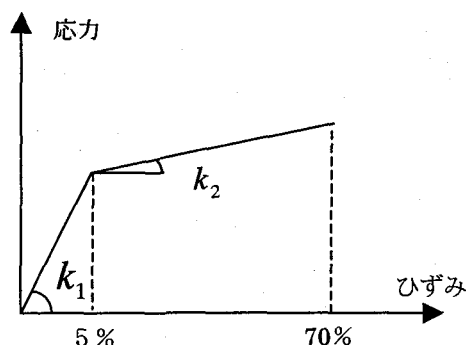


図-14 E P S材の応力-ひずみ関係モデル

表-1 E P S材の材料特性

単位体積重量 (kgf/m^3)	初期剛性 $k_1(\text{kgf}/\text{cm}^2)$	後続剛性 $k_2(\text{kgf}/\text{cm}^2)$
12.0	26.0	5.10
15.0	21.0	4.54
20.0	14.6	3.73

近い Type-B 型の重錘 (重量 3 tf) を用いて、落下高さを 5 m, 10 m, 20 m の 3 通りに変えたときに発生する伝達衝撃力波形を比較したものである。この図より、当然の結果として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傾向にあることがわかる。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-13 に示す。図中には、落石対策便覧式に用いるラーメ定数を $\lambda = 500 \sim 1500 (\text{tf}/\text{m}^2)$ 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全般的に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 $1500 \text{tf}/\text{m}^2$ 程度を与えたケースに非常に近い衝撃力を示すことがわかる。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 $1000 \text{tf}/\text{m}^2$ 程度の値を用いることで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、それにとも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必ずしも無視できない影響を与えるものと推察される。したがって、本法による計算値は約 20% の過大な評価を与えているが、落下高さとの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など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。

3.3 E P S 材の衝撃緩衝効果に関する考察

E P S (発泡スチロール) 材は、非常に軽量かつ適度の耐圧縮性を有することから、特に既設のロックシェッドで

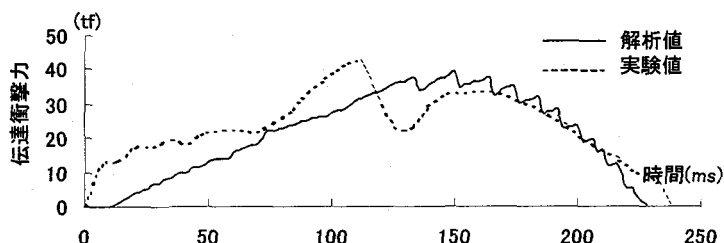


図-15 E P S による伝達衝撃力波形 ($W=3 \text{tf}$, $H=20 \text{m}$)

表-2 E P S 材を用いた時の最大伝達衝撃力の比較

単位体積重量	最大伝達衝撃力 (tf)		備 考 (重錘条件等)
	実験値	解析値	
$\rho_E = 12 \text{kgf}/\text{m}^3$	131.7	× (fail)	$W=3 \text{tf}$, $H=20 \text{m}$ EPS 要素のひずみが 70% を超過
$= 15 \text{kgf}/\text{m}^3$	44.78 22.31	42.27 21.59	$W=3 \text{tf}$, $H=20 \text{m}$ $W=3 \text{tf}$, $H=10 \text{m}$
$= 20 \text{kgf}/\text{m}^3$	30.74	29.53	$W=3 \text{tf}$, $H=20 \text{m}$

設計条件を上回る落石の危険性がある場合に、落石荷重を既設構造の設計耐力以内に抑えるための増設の緩衝材として用いられる事例が増えている。ここでは、本解析法が E P S 材の衝撃緩衝効果に対しても実用レベルで評価可能であるか、既往の重錘落下実験結果⁹⁾をもとに検討した。

一般に E P S 材は、単位体積重量により材料の応力-ひずみ関係が異なることは良く知られている。そこで、単位体積重量 $\rho_E = 12, 15, 20 \text{kgf}/\text{m}^3$ の 3 種類の E P S 材を用いた衝撃実験のシミュレーションを試みた。E P S の一般的な力学特性として、5 % 程度のひずみで剛性が一度は小さくなる弾塑性的な挙動を示すが、70 % 程度のひずみレベル以降は逆に剛性が増大することが知られている。したがって、70 % ひずみまでが柔軟な緩衝材として利用できる範囲で、それ以降は発泡材中の空隙がほぼ完全に潰され圧壊が生じる領域とみなされる。緩衝材は構造本体を防護するためにあり、終局時に緩衝材自体が破壊することは許容されと考えられるが、ここでは E P S 材が柔軟に機能する 70 % ひずみを限界値とした解析を行った。

図-14 および表-1 は、単位体積重量が異なる 3 種類の E P S に関する単軸圧縮試験結果をもとに、静的な応力-ひずみ関係を簡易なバイリニア型にモデル化したものである。図-15 は単位体積重量 $\rho = 15 \text{kgf}/\text{m}^3$ の E P S を敷厚 $h=200 \text{cm}$ で設置し、重量 3 tf の重錘を 20 m の高さで落下させたときの伝達衝撃力を、実験値と計算値で比較したものである。この図より、解析値の方が衝撃力の起ち上がりの方がやや遅く線形的な傾向を示すなど波形の形状には相違が見られるが、最大値はいずれも 100 ms 頃にほぼ同じ値をとることがわかる。表-2 は、3 種類の E P S (敷厚 $h=200 \text{cm}$) を用いた時の最大伝達衝撃力を実験値と解析値で比較・整理したものである。やはり各ケースで伝

達衝撃力の起ち上がり時の波形に若干の相違は見られたが、この表より最大伝達衝撃力は実験値を良好に再現していることが認められる。なお $\rho_E = 12 \text{ kgf/m}^3$ のケースでは、約 90ms 経過時に衝突位置近傍のひずみが限界値である 70% を上回り、EPS の破壊が生じたものと判定された。本ケースでは、実験においても EPS の圧壊が認められ、他ケースの 3 倍以上の伝達衝撃力が発生しており、比重が軽い EPS ほど敷厚を大きくしないと緩衝材としての目的を果たせない可能性があることが指摘されている⁶⁾。したがって、EPS の静的な応力-ひずみ関係を利用して本法による衝撃応答解析を行えば、最大伝達衝撃力の推定だけでなく適切な EPS 敷厚の設定等も行えるものと考えられる。

4. 結論

本研究では、緩衝材を介して伝達する衝撃荷重の簡易な推定法を提案し、その適用可能性について既往の重錘落下実験結果との比較を行いながら検討した。本研究で得られ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、高ひずみ域における剛性が小さい弾塑性緩衝材の方が伝達衝撃応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ことがわかった。ただし、これは緩衝材自体に致命的な変形を生じない範囲に限られる。

(3) 弾塑性緩衝材は、高ひずみ域になるほど衝撃エネルギーを広範囲で吸収する(エネルギー量の位置的な勾配が小さい)傾向にあり、このことが(2)の結果をもたらしていることが推察された。

(4) 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とが明らかとなった。この点については、敷砂の動的特性を考慮した手法の改善が必要であると思われる。

(5) EPS を用いた衝撃実験のシミュレーションを行った結果、波形自体には若干の相違が見られるが、本法は最大伝達衝撃力を良好に推定できることが明らかとなった。

以上の結果より、簡易な一次元応答を仮定した本法は、緩衝材中の荷重分散の影響が小さい場合に範囲が限られるが、緩衝材を介して伝達する衝撃荷重を実用レベルで評価することが可能であることが認められた。

なお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、榊谷浩、鈴木哲次：敷砂上の落石の衝撃加速度と衝撃土圧に関する実験的研究，土木学会論文集，第 352 号/III-2，pp. 61-70，1984 年 12 月
- 2) 吉田博、榊谷浩、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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 吉田博、松葉美晴、法貴貫志郎、久保田努：発泡スチロールの落石に対する緩衝効果に関する実験的研究，土木学会論文集，第 427 号/VI-14，pp. 143-152，1991 年 3 月

(1999 年 9 月 17 日受付)