室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

緩衝構造の緩衝特性に関する数値解析的検討

メタデータ	言語: Japanese
	出版者: 土木学会北海道支部
	公開日: 2013-03-25
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 中野, 修, 西, 弘明, 菅田, 紀之, 安藤, 智啓
	メールアドレス:
	所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/1965

室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

緩衝構造の緩衝特性に関する数値解析的検討

その他（別言語等）のタイトル	Numerical Analysis on Absorbing Properties of Shock Absorber
著者	中野　修，西　弘明，菅田　紀之，安藤　智啓
雑誌名	論文報告集
巻	49
号	I-31
ページ	151-156
発行年	1993-02
URL	http://hdl.handle.net/10258/1965

Ⅰ－31　緩衝構造の緩衝特性に関する数値解析的検討

開発土木研究所　正員　中野　修
開発土木研究所　正員　西　弘明
室蘭工業大学　正員　菅田紀之
室蘭工業大学　学生員　安藤智啓

1. はじめに

落石や崩落の危険を有する場所に建設される道路には、道路の保護、強いては人命を守るための安全施設として落石覆工構造物が設けられいる。覆工上には、通常落石によって発生する衝撃力を緩和することを目的として緩衝構造が設置されている。現在、緩衝構造表層に重錘が衝突する際に生じる衝撃力や緩衝構造を通して覆工本体に作用する伝達衝撃力を評価するための実験的研究が盛んに行われている。これらの研究成果より重錘衝撃力と覆工に伝達される伝達衝撃力の大きさが異なっていることが明らかとなってきている[1),2)]。

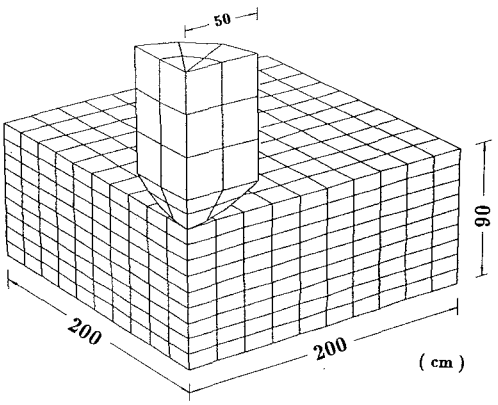
一方、落石覆工の衝撃応答解析や設計計算は、緩衝構造と覆工を一体として考慮せず、覆工本体に衝撃荷重を作用させることにより行っている。ここで述べた衝撃荷重は従来は、Hertzの衝撃理論から導かれた振動便覧式[3)]をはじめ、各種の実験結果より提案された実験式等[4)]、重錘衝撃力を意味するものであった。しかしながら、覆工本体に真に作用する荷重は緩衝構造の底部に伝達される衝撃力であり、上述した最近の実験結果からも重錘衝撃力とは異なった応答を示すことが報告されている。以上より緩衝構造と覆工を一体として考慮する場合に、まず落石覆工上部に注目して重錘衝撃力と伝達衝撃力の関係を明らかにすることが重要である。

本論文では、このような観点から、数値解析的に重錘衝撃力及び伝達衝撃力の特性を明らかにすることを目的として緩衝構造の緩衝特性に関する数値シュミレーションを３次元有限要素法による非線形動的応答解析プログラムDYNA3D[5)]を用いて行った。ここでは著者らが行った敷砂に関する大型実験をモデル化して重錘衝撃力や伝達衝撃力の経時変化及び伝達応力の分布性状について検討を行った。また、実験結果と解析結果を照合させて解析に用いる材料定数の同定も行っている。

2. 解析の概要

2.1 解析モデル

本解析に用いたモデルは平成４年８月に江別市角山にて行われた屋外実験を参考としている。解析ではモデルの対称性を考慮し、緩衝構造が敷砂単層の場合 4m × 4m × 0.9m の 1/4 モデルを用いて解析を行っている。また重量 3tf の重錘についても 1/4 にモデル化し、緩衝構造中央に自由落下させる形で解析を行った。ここで図－１は敷砂単層を用いた場合の解析モデルを示している。



図－１　解析モデル

2.2 物性モデル

本解析に用いた重錘及び砂層の物性モデル、及びパラメータは平成３年２月に建設省土木研究所で解析で用いられたものに準拠している[6)]。表－１に今回の解析に用いた物性モデル並びにパラメータを示す。砂層で用いている土質モデルは、表に示しているように砂の剛性が圧力の増加とともに増大するような評価モデルを用いていること、また降伏関数を砂の内部摩擦角と粘着力により評価しているモール・クーロンの式で与えられていることの二つの特徴を有する構成則に従っている。砂のせん断強さと垂直応

Numerical Analysis on Absorbing Properties of Shock Absorber
by Osamu NAKANO, Hiroaki NISHI, Noriyuki SUGATA and Tomohiro ANDO

力の関係は図－2に示すとおりである。モール・クーロンの式を応力の不変量を用いて示せば以下のようになる。

$$J_2^{\frac{1}{2}}\left[\sin\left(\theta+\frac{\pi}{3}\right)-\frac{1}{\sqrt{3}}\cos\left(\theta-\frac{\pi}{3}\right)\sin\phi\right]$$

$$=\frac{1}{3}I_1\sin\phi+C\cos\phi \qquad (1)$$

また、ここで θ は、

$$\theta=\frac{1}{3}\cos^{-1}\left(\frac{3\sqrt{3}}{2}J_3(J_2)^{-\frac{3}{2}}\right) \qquad (2)$$

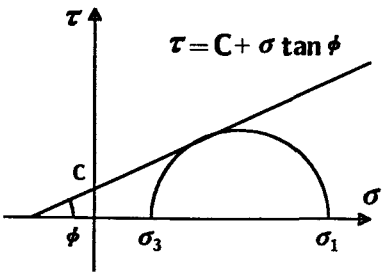
とする。したがって、降伏関数をfとすると、

$$f=\left(\frac{1}{3}I_1\sin\phi+C\cos\phi\right)/\left(\sin\left(\theta+\frac{\pi}{3}\right)-\frac{1}{\sqrt{3}}\cos\left(\theta-\frac{\pi}{3}\right)\sin\phi\right) \qquad (3)$$

となる。ここで、I_1 は1次の応力不変量、J_2, J_3 は偏差応力成分で表した2次、3次の不変量を示している。今回使用した土質モデルで採用されているアルゴリズムでは、$J_2 > f^2$の場合を降伏と判断するように解析している[7]。

表―1　物性モデル及びパラメータ

	土	重錘
物性モデル名	土質モデル	剛体
特徴	圧力依存型剛性 Mohr-Coulomb降伏条件	非変形
縦弾性係数 (kgf/cm^2)	----------	5.1×10^5
ポアソン比	0.45	0.3
せん断係数 (kgf/cm^2)	$G = ap^b + c$ $a = 510\ (\mathrm{kgf/cm^2})^{1/2}$ $b = 0.5$ $c = 0.051\ (\mathrm{kgf/cm^2})$	----------
降伏条件	$\tau = C + \sigma\tan\phi$ $C = 1.02\ (\mathrm{kgf/cm^2})$ $\phi = 30°$	降伏しない
比重量 (kgf/cm^3)	0.0018	0.00452



図―2　モール・クーロンモデル

2.3　体積歪－圧力の関係

砂層のせん断係数式中の圧力 P は体積歪(e)の関数として折線近似で与えなければならない。ここでは静水圧状態を仮定し以下のように体積歪と圧力の関係を適用している。

$$P=-\frac{E}{3(1-2\nu)}\ e \qquad (4)$$

ここで砂層の E及びνをどのように決定するのかが問題となる。実際には実験により決定することが望ましいが、ここでは落石対策便覧等で用いられているデータに基づき検討した。落石対策便覧では、砂の剛性を評価するラーメ定数λを軟らかいもので 100tf/m^2、硬いもので 1000tf/m^2 として算定することを薦めているため、本論文では重錘重量 3tf、落下高 10, 20, 30m の各実験ケースに関して、上式の弾性係数 E には λ を 100, 500, 1000tf/m^2 の3通りを適用し、実験結果と解析結果を照合することにより、解析時のラーメ定数の同定を試みた。なお、ポアソン比は ν を 0.45 とし、せん断係数の決定に用いるパラメータ a,b,c は全てのケースで表―1の用に一律とした。

2.4　境界条件及び初速度条件

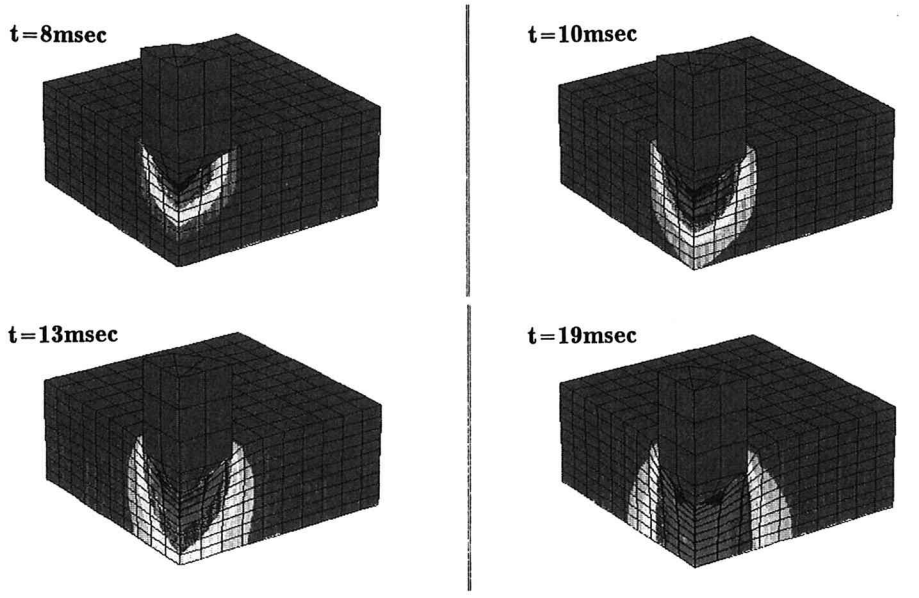
砂層に関する境界条件は、底面は完全拘束とし、外側面は実験において外枠を設けて砂の横方向への移動を拘束しているため、解析でも同様に横方向への移動を拘束し、縦方向の移動のみ許すこととした。また、接触が予想される砂層表面及び重錘底面にスライディング・インターフェースを定義している。

重錘の初速度に関しては、重錘と砂層が衝突を開始した時点から解析を行っているため、重錘の落下高さより換算した自由落下速度を入力している。本論文では、角山の実験ケースと同様に落下高さ 10m, 20m, 30m の3ケースについて解析を行っているため初速度についてもそれぞれ 14, 19.8, 24.2m/sec を用いている。

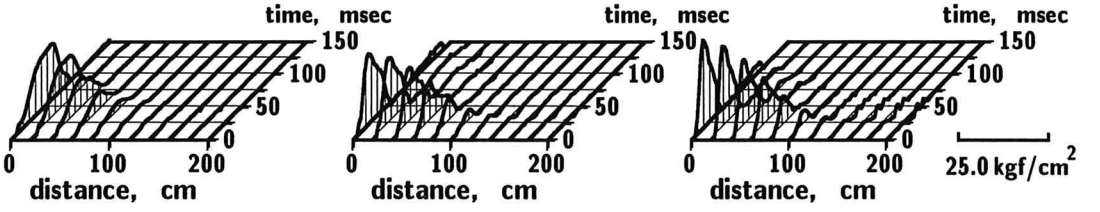
3.　解析結果

3.1　敷砂の変形及び衝撃応力の伝播状況

上で述べた解析条件により解析した結果から、落下高さ 30m で λ = 500tf/m^2 の場合の出力例を図―3に示す。図は重錘が砂層へ貫入するに従い変形及び応力が伝播されている状況を示したものである。ここでは衝撃応力が敷砂



図―3　敷砂の変形及び衝撃応力の伝播状況の例



(a)　λ = 100 tf/m^2　　(b)　λ = 500 tf/m^2　　(c)　λ = 1000 tf/m^2

図―4　敷砂底部の伝達衝撃応力の時系列分布

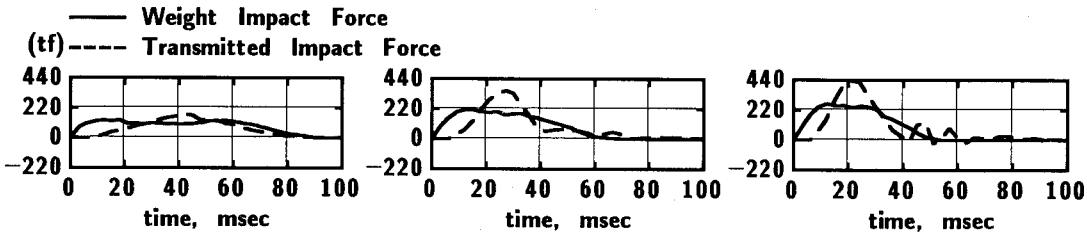
底部に到達するまでの変化を 4 ケース示したが、衝撃波が伝播している様子を良く現している。

3.2　伝達衝撃応力の時系列分布

図―4 は同様に落下高さ 30m の場合の敷砂底部における伝達衝撃応力の時系列分布を示したものである。図より各ラーメ定数とも応力が 1m の範囲に分布しており、特に中央部に応力が集中しているのがわかる。波形の立ち上がりに注目してみると、砂の剛性が大きくなる程最大応答値までの立上がりが急になり、敷砂底部の応力が短時間で急激に増大し、その後は急激に減少している様子が顕著に現れている。また、砂層の中心及び中心から同距離だけ離れたどの点と比較してみても、砂のラーメ定数が大きいほど最大応答値が増大している様子が示されている。

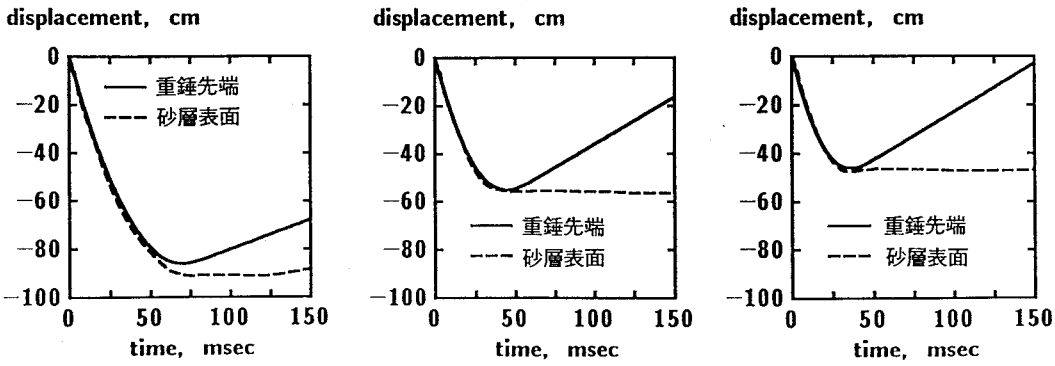
3.3　重錘衝撃力及び伝達衝撃力の時刻歴波形

図―5 には重錘が敷砂表層に衝突した際の重錘加速度より算定される重錘衝撃力と敷砂底部に伝達された衝撃応力の総和としての伝達衝撃力の時刻歴波形を示している。ここでは 30m 落下の解析結果を取り上げ考察を行うこととした。図より伝達衝撃力の最大値は、ラーメ定数 100tf/m^2 の場合を除くと重錘衝撃力のそれの 1.7 倍程度の応答を示していることがわかる。この傾向は過去の著者等の実験結果と良く一致している。次に重錘衝撃力に着目してみると、砂の剛性が大きくなる程応答時間は 80, 65, 50msec と短くなり、逆に最大応答値は 130, 200, 250kgf/cm^2 と増大



(a) λ = 100 tf/m^2　(b) λ = 500 tf/m^2　(c) λ = 1000 tf/m^2

図—5　重錘衝撃力及び伝達衝撃力の時刻歴波形



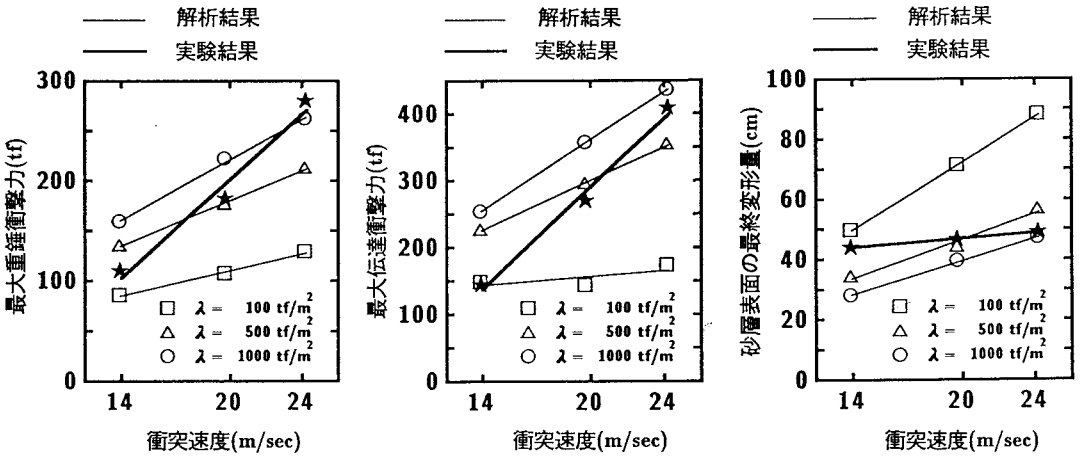
(a) λ = 100 tf/m^2　(b) λ = 500 tf/m^2　(c) λ = 1000 tf/m^2

図—6　重錘先端の貫入量及び砂層表面の変形量

しているのがわかる。重錘衝撃力波形の分布形状でみると、各ケースとも約 12msec で最大応答を示した後ラーメ定数 100tf/m^{2}で50msec、 500tf/m^2 で 25msec、 100tf/m^2 で 20msec の間、最大値と同程度の応答を持続し、以後ゆるやかに減少している様子がわかる。また伝達衝撃力に着目してみると、各ラーメ定数ではほぼ同時刻の 10msec 程度から応答の立ち上がりを示した後、剛性の低い方から順に 40, 30, 20msec で最大応答値を示し、その後重錘衝撃力の場合と異なり急激に減少している。応答終了時刻はこの図からは正確には判断できないが、重錘衝撃力の応答が終了する時刻とほぼ等しいと思われる。伝達衝撃力波形の分布形状については、重錘衝撃力波形の場合とは異なり凸な分布を示しているのがわかる。

3.4　重錘先端の貫入量及び砂層表面の変形量

図—6も同じく落下高さ 30m の場合で各ラーメ定数に対しての重錘先端の貫入量及び砂層表面の変形量の時刻歴変化を示したものである。重錘貫入量の最大値発生時刻に注目すると、ラーメ定数の小さい方から順に 60, 45, 30 msec と剛性が大きくなる程短い時間で貫入が終了し、その後はねかえり始めている様子がわかる。また各ケースとも重錘の貫入量の最大時に砂層の変形量も最大になっているのがわかる。次に重錘最大貫入量及び砂層の最大変形量に注目してみると、ラーメ定数が 100tf/cm^2, 1000tf/cm^2 の場合は重錘の最大貫入量に比して砂層表面の変形量の方が若干大く、 500tf/cm^2 の場合は重錘の最大貫入量と砂層表面の最大変形量はほぼ一致していることがわかる。さらに重錘の最大貫入量及び砂層の変形量が最大値を示す時間以降に注目すると、砂層表面は最大変形量と同程度の変形の状態で継続している。重錘は砂の剛性が小さい程はねかえる速度も小さいことから衝突時に生ずるエネルギーは砂層の変形により吸収されているものと思われる。



図―7　衝突速度で整理した実験結果との比較図

3.5　実験結果との比較

以上、落下高さ 30m の場合のラーメ定数 3 通りに着目した解析結果について論じてきたが、ここではさらに 10m, 20m の各ラーメ定数についても整理を行い、実験結果と比較することにより検討を行った。図―7 は横軸に衝突速度を取り、縦軸にそれぞれ最大重錘衝撃力、最大伝達衝撃力、砂層表面の最大変形量を取って整理したものである。なお、それぞれの直線は各ラーメ定数あるいは実験結果を回帰直線で示したものである。各図において、解析結果及び実験結果とも衝突速度にほぼ比例し、衝突速度の増大とともに増加しているのがわかる。また解析結果にのみに注目すればいずれの図においてもラーメ定数が大きい程、傾きが大きくなっている。最大重錘衝撃力及び最大伝達衝撃力に関しては実験結果の傾きが解析結果のそれに比して大きいことがわかる。また、実験結果が衝突速度 14m/sec の場合は、ラーメ定数 100tf/m^2 を用いた解析結果に、19.8m/sec の場合はラーメ定数 500tf/m^2、24.2m/sec の場合（落下高 30m）はラーメ定数 1000tf/m^2 を用いた解析結果に近い値を示しているようである。このことから実際の敷砂は衝突速度によってかなり大きく剛性が変化しているものと考えられる。砂層表面の最終変形量に関しては、実験結果の回帰直線の傾きはほぼ水平に近い緩やかな増加程度で、実験結果には衝突速度による変形量の大きな変化はあまり顕著に現れていないことがわかる。しかしここでも同様に、衝突速度が 14m/sec, 19.8m/sec, 24.2m/sec の実験結果がそれぞれ解析結果のラーメ定数 100, 500, 1000tf/m^2 に近い値を示している。

4.　まとめ

以上敷砂緩衝構造への重錘落下衝撃による衝撃応答解析をDYNA3Dを用いて行った。DYNA3Dを用いる場合、材料物性値や材料の構成式をどのように決定するのかが問題であるが、ここでは建設省土木研究所の解析で用いられたものを採用し、砂層のラーメ定数を変化させた場合の解析を行い、敷砂の緩衝特性を検討するとともに実験結果との比較検討も行ないラーメ定数の同定を試みた。解析ケースはそれ程多くはないが、今回の研究で得られた結果を以下に示す。

(1)ラーメ定数が大きな場合は、最大伝達衝撃力は最大重錘衝撃力のほぼ 2 倍になる。

(2)ラーメ定数が大きくなるに従い、伝達衝撃力、重錘衝撃力ともに最大値は大きくなり、応答時間は短くなる。

(3)伝達衝撃力はいずれのラーメ定数でも、砂層での分散効果は少なくほぼ重錘直径と等しい範囲に分布する。

(4)重錘は落下後、砂層中で跳ね返りがみられる。その量はラーメ定数の大きなものほど大きい。

(5)ラーメ定数によらず、衝撃力、貫入量とも衝突速度にほぼ比例する。

(6)重錘衝撃力と伝達衝撃力の応答状況は実験結果を良くシュミレートしている。

(7)数値的には、落下高さ 10m, 20m, 30m の実験結果とラーメ定数 λ = 100, 500, 1000tf/m^2 の解析結果は多くのデータで比較的良く合っている。

以上のことから、DYNA3Dによる衝撃応答解析は、材料定数を的確に同定することにより、緩衝構造の緩衝性能に関する検討にも有効であることが明らかとなった。

参考文献

1) 中野修、松岡健一、岸徳光、金子学、尾山靖史：敷砂を緩衝材とした場合の重錘加速度と底部伝達力, 土木学会北海道支部論文報告集, 第48号

2) 三上敬司、能町純雄、松岡健一、岸徳光：落石による落石覆工への衝撃力に関する評価, 構造工学論文集, Vol.33A, 1987.3

3) 日本道路協会：落石対策便覧, 日本道路協会, 1983

4) 吉田博、桝谷浩、鈴木哲治：敷砂上の落石による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, pp.61〜70, 1984.12

5) J.O.Hallguist:Dyna3D User's Manual,Univercity of California, Laurence Livevmore National Laboratory,Rept.UCID-19592,Rev.4,1988-4

6) 建設省土木研究所動土質研究室：落石による衝撃力の解析業務, 平成3年2月

7) 建設省土木研究所動土質研究室：落石による衝撃力の解析業務, 平成2年3月