

専修大学北海道短期大学 正員 三上敬司

日本大学生産工学部 正員 能町純雄

1. まえがき 落石覆工上の緩衝材として従来では砂が用いられていたが、最近では軽量化や緩衝性能向上のために EPS (発泡スチロール) や三層構造 (砂, RC床板, EPS を組み合わせたもの) などが用いられている。砂単層や三層構造の緩衝効果を実証および落石覆工の設計を目的として、室蘭工業大学と北海道開発局開発土木研究所の共同研究^{1),2)}によって重錘落下実験が行なわれている。これらの解析においては汎用解析ソフト Dyna-3D³⁾などを用いて解析を行なっている。しかし、これは高価な解析ソフトなどの理由であり一般的には普及していない。

そこで、緩衝材を1次元弾性棒としてその先端部に剛体が落下した場合に先端の変位が永久変位を生じるか否かを確認する。その上で、もし弾性棒が永久変位を生じなければ、簡単のためにそれを Maxwell 体または Voigt 体で置き換えてモデル化してそれらが永久変位するかどうかを検証する。

前述した結果を踏まえて、本解析では落石覆工を無限板とし、その上の緩衝材の緩衝特性を評価するためにバネとダッシュポットから構成される粘弾性体の減衰バネ系に仮想質量を考慮に入れた四要素バネモデルとして提案する。(砂の場合は図2(a)に、三層構造の場合は図2(b)に示した。)本理論の妥当性検証のために文献1),2)における実験結果と比較検討する。なお、解析には運動量保存の法則が成立するものと仮定して衝撃力等を求める。

2. 理論解析

1) 弾性棒の波動伝播 図1に示すように、先端部が自由で他端が固定されている長さ a の弾性棒の波動方程式およびその式から時間を無限大として棒の先端部の永久変位 u_0 を求めると、

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad u_0 = \lim_{s \rightarrow 0} s u_0 = \frac{s M V_0}{M s^2 + \frac{E A}{a}} \quad (1), 2)$$

ここで、 ρ : 密度, A : 面積, s : ラプラス演算子とする。2)式より、この解析における弾性棒の変位は永久変位を生じないことがわかる。

次に、1次元弾性棒を弾性定数 E_m , 粘性定数 η_m とする Maxwell 体および Voigt 体と仮定して2)式中の弾性定数 E を E'_m として置き換えて求めると

$$\text{Maxwellの場合 } E'_m = \frac{E_m s}{s + \frac{\eta_m}{E_m}} \quad (3)$$

$$\text{Voigtの場合 } E'_m = E_m + s \eta_m \quad (4)$$

3) 式より Maxwell 体では永久変位が生じ、Voigt 体では生じないことが理論的証明された。

以上のことから、本研究で検討する砂層や三層構造緩衝材などは重錘がその中に貫入しそれ自身永久変位を生じることから、緩衝材は Maxwell モデル系とする。

2) 砂層のモデル化 砂層の場合は図2(a)に示したようにバネ定数

k_1 , 減衰定数 c_1 をもつ Maxwell 体とバネ定数 k_2 , 減衰定数 c_2 をもつ Voigt 体との間に仮想質量 M_2 を考慮した

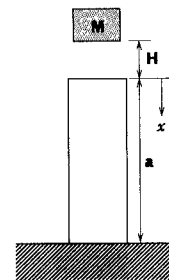
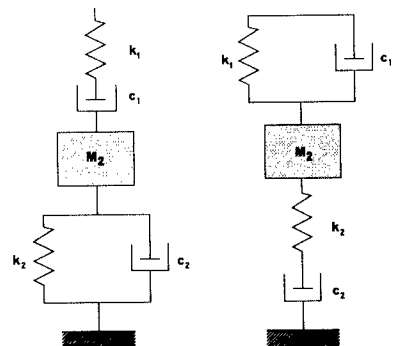


図1 1次元弾性棒モデル



(a) 砂層モデル (b) 三層構造モデル

図2 Maxwell要素モデル

Maxwell 系の四要素モデルと仮定する。

3) 三層構造のモデル化 三層構造の場合は図2(b)に示したようにバネ定数 k_1 , 減衰定数 c_1 をもつ Voigt 体とバネ定数 k_2 , 減衰定数 c_2 をもつ Maxwell 体との間に仮想質量 M_2 を考慮した Maxwell 系の四要素モデルと仮定する。

3. 解析結果と実験結果と比較

本研究は実験をシミュレーションするために、剛基礎上に前述した2種類の四要素モデルを設けて、その上へ質量 M_1 をもつ重錘を高さ H から落下させた場合について理論解析しその結果と実験結果とを比較検討する。

1) 砂単層緩衝工の衝撃力の時刻歴応答分布 理論解析のパラメータはバネ定数 $k_1=1000\text{tf/m}$, $k_2=25000\text{tf/m}$, 減衰定数 $h_1=1.0$, $h_2=0.04$, 重錘質量 $M_1=3\text{t}$, 仮想質量 $M_2=1.3\text{t}$ と仮定する。図3(a), (b)は落下高さ $H=10\text{m}$ における重錘および伝達衝撃力の時刻歴応答分布である。なお、実験結果は砂層厚 90cm の場合を用いた。図(a)における解析結果では主波動が減衰自由振動状態に移行しているが、実験結果における主波動では過減衰状態を示している。また、解析結果における最大衝撃力に達する時間は実験結果と比較して約1.4倍となっているものの、最大衝撃力および載荷継続時間では両結果とも概ね大差がないと思われる。一方、図(b)の両結果を比較すると、載荷継続時間、最大衝撃力に達する時間およびその最大値はほぼ近似していると思われる。

2) 三層構造緩衝工の衝撃力の時刻歴応答分布 理論解析のパラメータは $k_1=2000\text{tf/m}$, $k_2=1000\text{tf/m}$, $h_1=0.6$, $h_2=0.6$, $M_1=3\text{t}$, $M_2=8.6\text{t}$ と仮定する。図4(a), (b)は落下高さ $H=10\text{m}$ における重錘および伝達衝撃力の時刻歴応答分布である。図(a)の解析結果では実験結果と比較して最大値に達する時間とその値に関してはほぼ近似しているが、載荷継続時間および波形的にはそれほど近似していないようである。一方、図(b)の解析結果では波形的および最大衝撃力に関して酷似しているものの最大衝撃力に達する時間および載荷継続時間に若干差が見られる。

4. あとがき 本論文では、1次元弾性棒を Maxwell モデルに置き換えて衝撃応答解析を行ない、その変位を求めるとそれは永久変位を生じることが明らかにした。この結果を用いて、本解析は実験をシミュレートするために砂単層や三層構造緩衝工を仮想質量を考慮した四要素 Maxwell モデルを提案し実験結果と比較検討した。その結果、落下高さ $H=10\text{m}$ における衝撃力の時刻歴応答に関して解析結果は実験結果と概ね近似していると思われる。

本研究に用いた実験データは室蘭工業大学建設システム工学科構造力学研究室より提供してもらったものであり、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岸徳光ら：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。
- 2) 中野修：落石覆道における三層緩衝構造の開発に関する研究，北海道大学学位論文，1993年3月。
- 3) 中野修ら：緩衝構造の緩衝特性に関する数値解析的検討，第2回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.13-16，1993年6月。

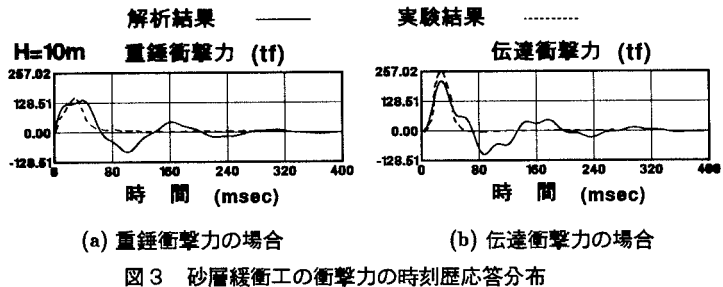


図3 砂層緩衝工の衝撃力の時刻歴応答分布

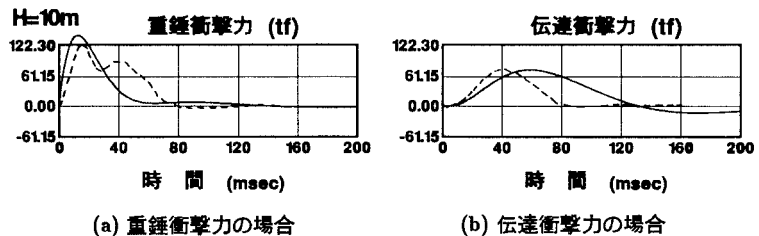


図4 三層構造緩衝工の衝撃力の時刻歴応答分布