

落石覆工の緩衝材の緩衝特性に関する評価

I-54

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

海岸や山岳地帯では落石によって交通障害を起こすことが多々ある。このような危険地帯では落石覆工を設けることによってかなり安全性を確保することができる。しかし、落石が直接落石覆工上に落下した場合には落石覆工に作用する衝撃力が大きくなれば、結局落石覆工を破壊によって交通の安全性のみならず交通の確保ができなくなる。このため、落石覆工上の衝撃緩衝材としては経済的な見知から砂が普及していたがメンテナンスが容易でないことから、最近ではメンテナンスフリーに近くかつ緩衝効果もかなり期待できる EPS（発泡スチロール）や三層緩衝構造体などが実用化されている。このような緩衝材の緩衝効果および落石覆工の合理的な設計を目的とする実物大の実証実験が行なわれ、合理的な設計法が確立されつつある。また、これらの解析については個別要素法や汎用解析ソフト DYNA-3D を用いる衝撃応答解析が行なわれている。しかし、これらは要素数を多く取ると解析時間がかかりかかるとかや高価な解析ソフトであるために一般的には普及していない。さらに、この種の問題では Newton 力学の基本である運動量保存の法則の成立について、十分な議論が行なわれていないようである。

本論文では、重錘が緩衝材に貫入する実際的な現象を表現するために1次元弾性棒の先端部に剛体が落下する場合、その弾性棒が永久変形を生じるか否かを確認する。その上で、もしそれが永久変形しなければ、簡単のためにそれを Maxwell 体または Voigt 体で置き換えてこれらのモデルが実測の情報を表現しているかどうかについて検討する。

このような見知から、理論解析では、落石覆工を無限平板としクッション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した五要素バネモデルを仮定する。なお、解析過程において運動量保存法則が成立するようにパラメータを設定している。さらに、本論文では文献 1), 2) の実験データと比較検討し、落石覆工の設計に対する緩衝材の緩衝効果に関する評価を試みることにする。

2. 理論解析

緩衝材を1次元弾性棒とみなして棒の先端部に重錘を落下させた場合の変位を求めることにする。

2.1. 弾性棒の波動伝播

図-1 に示したように、先端部が自由で他端が固定されている長さ  $a$ 、棒の密度  $\rho$ 、弾性定数  $E$  の1次元弾性棒の波動方程式は次式となる。

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \text{ Hookの法則より } \sigma_x = E \frac{\partial u}{\partial x} \quad (1), 2)$$

2) 式を 1) 式に代入して初期条件を適合してラプラス変換<sup>3)</sup>すると、

$$E \frac{\partial^2 L[u]}{\partial x^2} = \rho s^2 L[u] \quad (3)$$

ここで、 $L[.]$  はラプラス変換記号、 $s$  はラプラス演算子である。3) 式の両辺を  $\sin \frac{m\pi}{a} x$  を掛けて 0 から  $a$  までフーリエ積分すると

$$E \int_0^a \frac{\partial^2 L[u]}{\partial x^2} \sin \frac{m\pi}{a} x dx = \rho s^2 \int_0^a L[u] \sin \frac{m\pi}{a} x dx \quad (4)$$

境界条件を境界値  $x=0$  で  $u_0$ 、 $x=a$  で  $u_a=0$  において 4) 式に適用すると次式となる。(なお、 $S_m[.]$  はフーリエ変換記号である。)

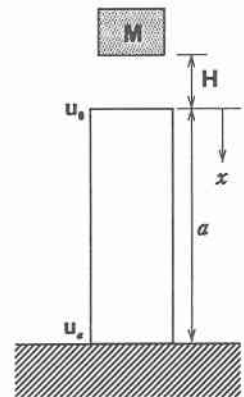


図-1 1次元弾性棒モデル

Evaluation of Shock Absorbing Properties of Cushion System on a Rock-Shed  
 by Takashi MIKAMI, and Sumio G. NOMACHI

$$S_m[u] = \frac{\pi}{m^2 + \lambda^2} L[u_0] \quad \text{ここで、棒の伝播速度 } c_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad \lambda = \frac{a}{c_1 \pi} \quad 5)$$

5) 式をフーリエ逆変換公式<sup>4)</sup>よりフーリエ変換すると

$$L[u] = \frac{\sinh \pi \lambda (1 - \xi)}{\sinh \pi \lambda} L[u_0] \quad 6)$$

次に、質量  $M$  を持つ剛体が初速度  $V_0$  で末端が固定されている棒の先端部に落下させた場合の先端部の変位を  $u_0$ 、衝撃力を  $P_0$  とすると、剛体の運動方程式および初期条件  $t=0$  で  $u_0=0$ ,  $\dot{u}_0 = V_0 = \sqrt{2gH}$  としてラプラス変換を行なうと次式となる。

$$M \frac{d^2 u_0}{dt^2} - P_0 = 0, \quad Ms^2 L[u_0] - MV_0 - L[P_0] = 0 \quad 7), 7)'$$

7) 式に 2) 式を適用してラプラス逆変換し無限時間後の永久変位  $\dot{u}_0$  を求めると

$$\dot{u}_0 = \lim_{s \rightarrow 0} s u_0 = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s M V_0}{Ms^2 + \frac{EA}{a}} = 0 \quad \text{ここで、} A: \text{棒の断面積} \quad 8)$$

8) 式より、緩衝材を 1 次元弾性棒と仮定した場合は永久変形が生じないことがわかった。

次に、1 次元弾性棒を弾性定数を  $E_m$ 、粘性定数を  $\eta_m$  とした場合の Maxwell または Voigt モデルで仮定すると、ラプラス逆変換した場合の無限時間後の永久変位  $\dot{u}_0$  はそれぞれ次式のように求められる。

$$\text{Maxwell モデルの場合} \quad E = \frac{E_m s}{s + \frac{E_m}{\eta_m}} \quad \dot{u}_0 = \frac{M V_0}{\frac{\eta_m A}{a}}, \quad \text{Voigt モデルの場合} \quad E = E_m + s \eta_m \quad \dot{u}_0 = 0 \quad 9)$$

9) 式の Maxwell モデルの場合は永久変形を生じることから、粘性項  $\eta_m$  は永久変形に大きな影響を及ぼしていること、また Voigt モデルの場合は永久変形が生じないことが理論的証明された。

本研究では、前述の結果を踏まえて砂層や三層構造緩衝材を五要素バネモデルに仮想質量を設けた Maxwell モデル体と仮定する。なお、重錘が緩衝材に貫入する物理現象は Maxwell 体のダッシュポット部で表現する。

## 2.2. 三層構造緩衝材のモデル化

三層構造の場合は図-2 に示したようにバネ定数  $k_1$ 、減衰定数  $c_1, c_1'$  をもつ三要素体とバネ定数  $k_2$ 、減衰定数  $c_2$  をもつ Maxwell 体との間に仮想質量  $M_2$  を設けた Maxwell 系の五要素モデルと仮定する。その上へ質量  $M_1$  をもつ剛体が高さ  $H$  から落下させた場合の剛体および無限板に作用する衝撃力  $P_1, P_2$  と永久変位  $\delta$  を求める。

三要素体の剛体による変位  $\delta_1$  とすると剛体  $M_1$  の運動方程式、各要素ごとの力の釣り合い式を次式に示すと、

$$M_1 \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} = -P_1, \quad P_1 = P_1' + P_1'' \quad \left( P_1' = k_1 \delta_{k_1} = c_1' \frac{d\delta_{c_1'}}{dt}, \quad P_1'' = c_1 \frac{d\delta_1}{dt} \right) \quad 10), 11)$$

なお、三要素体の各要素の変位は  $\delta_{k_1}, \delta_{c_1'}, \delta_{c_1}$  とおく。相対変位は、 $\delta_1 - \delta_2 = \delta_{k_1} + \delta_{c_1}' = \delta_{c_1}$  12)

Maxwell 体の剛体による変位  $\delta_2$  とすると剛体  $M_2$  の運動方程式は Maxwell 体のバネ部の変位  $\delta_{k_2}$ 、ダッシュポット部の変位  $\delta_{c_2}$ 、板のたわみ  $w_0$  および相対変位は次式のように示す。

$$M_2 \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} = P_1 - P_2, \quad P_2 = k_2 \delta_{k_2} = c_2 \frac{d\delta_{c_2}}{dt}, \quad \delta_2 - w_0 = \delta_{k_2} + \delta_{c_2} \quad (\text{板のたわみ: } \dot{w}_0 = \frac{P_2}{a}) \quad 13), 14), 15)$$

10) ~ 12) 式および 13) ~ 15) 式より求められた式をそれぞれラプラス変換すると次式のようになる。

$$\left\{ s^2 + \frac{k_1}{M_1} \left[ \frac{M_1}{c_1} + \frac{c_2}{k_1} \left( 1 + \frac{M_1}{M_2} \right) \right] s + \frac{k_1}{M_1} \left( 1 + \frac{M_1}{M_2} \right) \right\} L[P_1] - \left\{ \frac{c_1}{M_2} s + \frac{k_2}{M_2} \left( 1 + \frac{c_1}{c_1'} \right) \right\} L[P_2] = \dot{P}_{10} \quad 16)$$

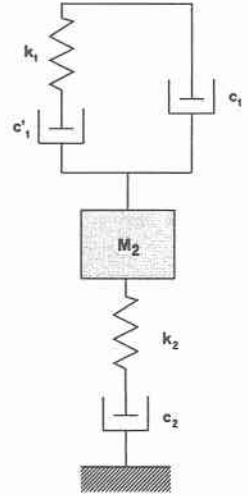


図-2 三層構造モデル

$$-\frac{k_2}{M_2}L[P_1]+\left\{s^2+k_2\left(\frac{1}{c_2}+\frac{1}{a'}\right)s+\frac{k_2}{M_2}\right\}L[P_2]=\dot{P}_{20} \quad (17)$$

ただし、 $\ddot{P}_1, \ddot{P}_2$  に初期条件を適用すると、 $\int_0^\infty \ddot{P}_1 e^{-st} dt = -\dot{P}_{10} + sP_{10} e^{-st} \Big|_0^\infty + s^2 \int_0^\infty P_1 e^{-st} dt = -\dot{P}_{10} + s^2 L[P_1]$ 、 $\int_0^\infty \ddot{P}_2 e^{-st} dt = -\dot{P}_{20} + sP_{20} e^{-st} \Big|_0^\infty + s^2 \int_0^\infty P_2 e^{-st} dt = -\dot{P}_{20} + s^2 L[P_2]$ 、 $\dot{P}_{10}, \dot{P}_{20}$  は  $t=0$  における  $P_1, P_2$  の境界値である。

また、時間に関する関数  $f(t)$  とすると、 $\dot{f}, \ddot{f}$  は時間  $t$  に関する 1 次および 2 次微分を表している。

16), 17) 式の連立方程式を解いて  $L[P_1], L[P_2]$  を求め、その式をラプラス逆変換すると

$$P_1 = \sum_{i=1}^4 b_i A_i e^{-b_i t} \dot{P}_{10} + \frac{c_1}{M_2} \sum_{i=1}^4 b_i B_i e^{-b_i t} \dot{P}_{20}, \quad P_2 = \frac{k_2}{M_2} \sum_{i=1}^4 b_i C_i e^{-b_i t} \dot{P}_{20} + \sum_{i=1}^4 b_i D_i e^{-b_i t} \dot{P}_{10} \quad (18), (19)$$

ここで、 $b_1, b_2, b_3, b_4$  はラプラス演算子  $s$  の四次方程式の根であり、各根は共役な複素数かまたは実数の三組の組み合わせである。重錘が減衰バネ系に衝突した場合の運動量保存の法則  $Ft = M_1 V_0$  が次式のように成立すると、

$$\int_0^\infty P_1 dt = M_1 V_0, \quad \int_0^\infty P_2 dt = M_1 V_0$$

18), 19) 式に適用し連立方程式を解いて  $\dot{P}_{10}, \dot{P}_{20}$  を求め、それを 18), 19) 式に代入して重錘衝撃力  $P_1$  および伝達衝撃力  $P_2$  を求める。また、永久変位  $\delta$  を求めると

$$P_1 = \frac{M_1 M_2 V_0}{k_2} \sum_{i=1}^4 b_i A_i e^{-b_i t}, \quad P_2 = M_1 V_0 \sum_{i=1}^4 b_i D_i e^{-b_i t}, \quad \delta = a_0'' + \frac{M_1 V_0 a_1}{k_2} \quad (20), (21), (22)$$

### 2.3. 砂層緩衝材のモデル化

砂層の場合は図-3 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  $c_2, c_2'$  をもつ三要素体との間に仮想質量  $M_2$  を設けた Maxwell 系の五要素モデルと仮定する。その上へ質量  $M_1$  をもつ剛体が高さ  $H$  から落下させた場合の剛体および無限板に作用する衝撃力  $P_1, P_2$  および永久変位  $\delta$  を求める。

Maxwell 体の剛体による変位  $\delta_1$  とすると剛体  $M_1$  の運動方程式、Maxwell 体のバネ部の変位  $\delta_k$ 、ダッシュポット部の変位  $\delta_{c_1}$  とすれば、力の釣り合いおよびその相対変位は次のようになる。

$$M_1 \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} = -P_1, \quad P_1 = k_1 \delta_k = c_1 \frac{d\delta_{c_1}}{dt}, \quad \delta_1 - \delta_2 = \delta_k + \delta_{c_1} \quad (23), (24), (25)$$

Voigt 体の剛体による変位  $\delta_2$  とすると剛体  $M_2$  の運動方程式、三要素体の力の釣り合い式を示す。

$$M_2 \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} = P_1 - P_2, \quad P_2 = P_2' + P_2'' \left[ P_2' = k_2 \delta_k = c_2 \frac{d\delta_{c_2}}{dt}, \quad P_2'' = c_2' \frac{d(\delta_2 - w_0)}{dt} \right] \quad (26), (27)$$

なお、途中の過程は三層構造の場合と同様なので、重錘衝撃力  $P_1$ 、伝達衝撃力  $P_2$ 、永久変位  $\delta$  を結果のみ示すと、

$$P_1 = \frac{k_1 V_0}{M_1 F_1} \sum_{i=1}^4 b_i A_i e^{-b_i t}, \quad P_2 = \frac{k_1 c_2 V_0}{M_1 M_2 \left(1 + \frac{c_2}{a}\right) F_1} \sum_{i=1}^4 b_i D_i e^{-b_i t}, \quad \delta = \frac{V_0}{F_1} \left[ a_0'' + \frac{\eta k_1}{M_1} b_0 \right] \quad (28), (29), (30)$$

ただし、永久変位量は実験における重錘の貫入量を意味している。 $F_1 = k_1 k_2 (1 + c_2 / c_2') / M_1 M_2 (1 + c_2 / a)$

また、ここで用いている減衰定数および固有振動数等を次のようにおくことにする。

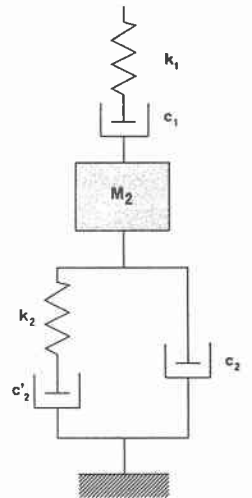


図-3 砂緩衝材モデル

$$\frac{k_1}{M_1} = \omega_1^2, \quad \frac{c_1'}{M_1} = 2h_1'\omega_1, \quad \frac{c_1}{M_1} = 2h_1\omega_1, \quad \frac{c_2}{M_2} = 2h_2\omega_2, \quad \frac{c_2'}{M_2} = 2h_2'\omega_2, \quad \frac{k_2}{M_2} = \omega_2^2, \quad \frac{a'}{M_2} = \omega_0, \quad a' = \sqrt{\rho D d}, \quad d \text{ は板厚,}$$

板剛度  $D = \frac{E d^3}{12(1-\nu^2)}$ ,  $A_i, B_i, \dots, a_1, a_0'', b_0$  はラプラス変換および逆変換の際に生じる定数である。

### 3. 解析結果と実験結果との比較

重錘落下衝撃実験は  $6.8m \times 6.8m \times 1m$  のコンクリート基礎上に、三層緩衝構造体（砂厚  $50cm$ ，RC 床板厚  $20cm$ ，EPS 厚  $50cm$ ）および  $4m \times 4m$  の敷砂（砂厚  $90cm$ ）をそれぞれ設置しその中央部に底部形状が球（直径  $100cm$ ，高さ  $17.5cm$ ）で重量  $3tf$  の重錘を所定の高さまでクレーンで引き上げ自由落下させることによって行なわれた。実験に用いた三層緩衝構造体は、表層材に砂、芯材にコンクリート床板、裏層材に EPS 材を組み合わせさせたものである。本論文に用いた砂緩衝材のデータはその厚さが  $90cm$  のものである。

#### 3.1. 三層緩衝構造体の場合

##### 3.1.1. 貫入量と落下高さとの関係

表-1 には 3 ケースにおける減衰バネ定数を示し、それらを用いた落下高さに対する重錘貫入量の解析結果および実験結果を図-4 に示している。なお、重錘の落下高さは  $10, 20, 30m$  であり、重錘貫入量は三層緩衝体へ貫入した際の重錘の最終貫入量である。実験結果は、上述した三層緩衝構造体の寸法を用い、のデータを用いている。その RC 床板は圧縮強度  $\sigma_c = 210kgf/cm^2$ ，単鉄筋および複鉄筋断面における鉄筋比がそれぞれ  $0.5, 1\%$  である。各試験体名を簡略化するために、単鉄筋および複鉄筋断面をそれぞれ S, W とし、鉄筋比  $p = 0.5\%, 1$  をそれぞれ  $0.5, 1$  と記号化して用いている。解析結果と実験結果を比較すると、解析結果における case-1 では、落下高さ  $H = 10m$  で実験結果と良く一致し、 $H = 30m$  の場合では実験結果にはバラツキが見られるものの、解析結果は W-0.5 の場合よりも若干大きめの値を示している。case-2 の場合では各落下高さにおける実験結果よりも包絡線的に大きめの値を示している。case-3 の場合では  $H = 10m$  で実験値より約  $5cm$  程低く、また  $30m$  の場合では W-1 と S-0.5 の中間値を示している。これより、貫入量と落下高さとの関係における case-1 の解析結果は実験結果を概ね近似しているものと考えられる。

表-1 3 ケースにおける減衰バネ定数（三層構造の場合）

(  $M_1 = 3t, M_2 = 8.6t, k_1, k_2: tf/m$  )

case-1	$k_1 = 1500, k_2 = 2000, h_1 = 0.1, h_1' = 1, h_2 = 0.5$
case-2	$k_1 = 1500, k_2 = 4000, h_1 = 0.1, h_1' = 1, h_2 = 0.3$
case-3	$k_1 = 1500, k_2 = 3000, h_1 = 0.1, h_1' = 1, h_2 = 0.6$

##### 3.1.2. 衝撃力の時刻歴応答分布

図-5 (a), (b) は落下高さ  $10, 30m$  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、実験における重錘の衝撃力は重錘の加速度に質量を掛けたものである。伝達衝撃力はロードセルより測定された応力が軸対称に作用しているものと仮定してその作用面積を掛けて求めている。ここで用いられた実験結果は W-1 の場合を用いている。(a) 図の落下高さ  $H = 10m$  の解析結果における波動は最大値に達する時間  $t_{max} = 16msec$  で最大値  $179tf$  に達した後単調に減少し、その後、波動はほぼ自由減衰振動を呈している。一方、実験結果では  $t_{max} = 13msec$  で最大値  $138tf$  に達した後、時間約  $t = 35msec$  あたりで第 2 ピーク点が現われ  $t_d = 70msec$ （載荷継続時間）で零レベルに戻り、その後ほぼ過減衰状態を呈している。 $H = 30m$  の場合の解析結果では  $H = 10m$  の場合と同様に波動伝播状況を示し、その最大衝撃力に達する時間  $t_{max} = 16msec$  となり、その値は落

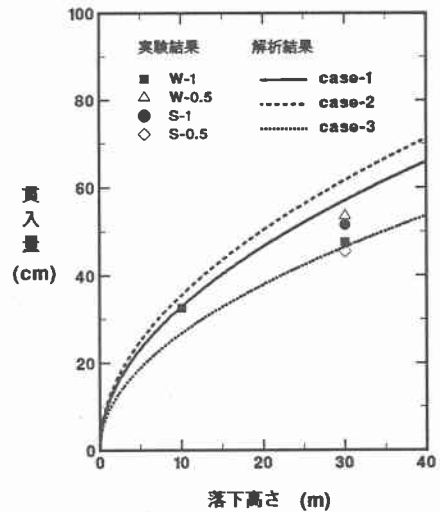
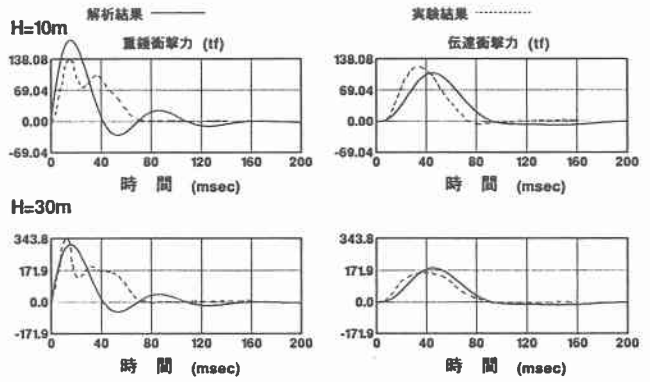


図-4 貫入量と落下高さとの関係

下高さに対して約311tfとなっている。また、落下高さ  $H=30m$  に対して載荷継続時間は  $t_d=41 msec$  となっている。それに対して、 $H=30m$  の場合の実験結果では、最大衝撃力に達する時間が約  $t_{max}=8msec$  となり、その最大値は落下高さに対して約 344tf となって解析値と概ね一致している。

一方、(b) 図の伝達衝撃力における解析結果では、いずれの落下高さでも時間  $t_{max}=45 msec$  で最大衝撃力に達し、その後単調に減少して載荷継続時間が  $t_d=94msec$  となっていることがわかる。また、その最大衝撃力はそれぞれ落下高さに比例して 107, 185tf

と徐々に増加していることがわかる。一方、実験結果では、最大衝撃力および最大衝撃力達する時間が重錘衝撃力の第2ピーク点に達する時間とほぼ一致している。また、その最大値は各落下高さに対して 118, 156tf で、載荷継続時間は  $t_d=80msec$  前後となっている。解析結果と実験結果と比較すると、両者は若干時間的なずれはあるものの、各落下高さに対する重錘および伝達最大衝撃力については概ね一致していることがわかる。



(a) 重錘衝撃力の場合 (b) 伝達衝撃力の場合  
図-5 衝撃力の時刻歴応答分布

### 3.2. 砂単層緩衝材の場合

#### 3.2.1. 貫入量と落下高さとの関係

表-2 には 3 ケースにおける減衰バネ定数を示し、それらを用いた落下高さに対する重錘貫入量の解析結果および実験結果を図-6 に示している。なお、重錘の落下高さは 5, 10, 15, 20, 30m であり、重錘貫入量は砂層緩衝材へ貫入した際の重錘の最終貫入量である。解析結果は落下高さが高くなるにつれて放物線的に増加していることがわかる。それに対して、実験結果では各落下高さごとにバラツキが見られるが、実験結果も落下高さが高くなるにつれて放物線的に増加しており解析結果とほぼ同様な傾向を示していることがわかる。両者を比較すると、case-1 の解析結果は実験結果には前述したようにバラツキが見られるものの  $H=10m$  では実験値の下限値を、 $H=20m$  で

表-2 3 ケースにおける減衰バネ定数 (砂単層の場合)

$$(M_1=3t, M_2=1.3t, k_1, k_2: tf/m)$$

case-1	$k_1=1500, k_2=3000, h_1=0.8, h_2=0.4, h_2'=0.7$
case-2	$k_1=1500, k_2=3000, h_1=0.8, h_2=0.6, h_2'=0.2$
case-3	$k_1=1500, k_2=3000, h_1=0.8, h_2=1.0, h_2'=0.5$

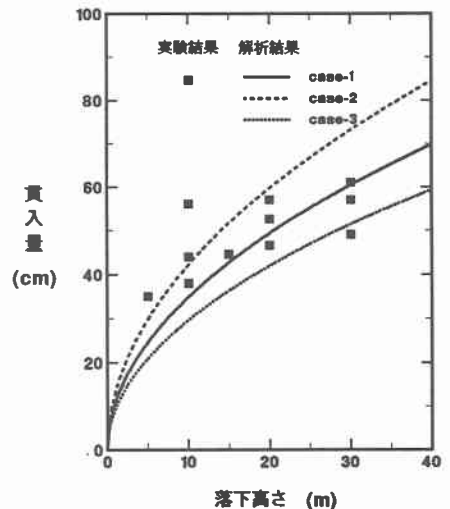


図-6 貫入量と落下高さとの関係

ほぼ中間値を、また  $H=30m$  では上限値を示していることがわかる。case-2 の場合は  $H=10m$  で実験値の中間値より低めで、20m 以上ではほぼ上限値を越えていることがわかる。case-3 の場合は  $H=20m$  以下では実験値の下限値より 3.5cm 以上の差が見られるが、30m の場合ではほぼ下限値を示していることがわかる。これより、case-1 の解析結果は実験結果における重錘の貫入量と落下高さとの関係を概ね近似しているものと考えられる。

### 3.2.2. 衝撃力の時刻歴応答分布

図-7 (a), (b) は落下高さ 10, 30m 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。(a) 図における解析結果の場合の主波動は、各落下高さに対して最大衝撃力に達する時間  $t_{\max}=24msec$  でその値はそれぞれ  $P_{\max}=153, 265tf$  となり、また載荷継続時間は、 $t_d=60msec$  となっている。その後の波動は減衰自由振動状態に移行している。一方、実験結果は各落下高さに対して最大衝撃力に達する時間  $t_{\max}=28, 20msec$  でその値は  $P_{\max}=145, 300tf$  となり、落下高さ 10, 30m ではほぼ近似しているものと考えられ

る。載荷継続時間については波動が最大値に達した後過減衰状態を示しているためにあまり明確ではないものの、主に主波動が作用している時間をほぼ  $t_d=80msec$  とみなすと解析結果と大差がないものと考えられる。

(b) 図の解析結果の場合では最大衝撃力に達する時間  $t_{\max}=28msec$  でその値  $P_{\max}=266tf$  となり、実験結果では  $t_{\max}=25.6msec$  で  $P_{\max}=257tf$  となり解析結果は実験結果とほぼ近似している。また、載荷継続時間では解析結果および実験結果ともに約  $t_d=60msec$  となっている。このような傾向は落下高さが 30m においても同様に示されている。これより、いずれの主波動も概ね近似していることがわかる。

#### 4. あとがき

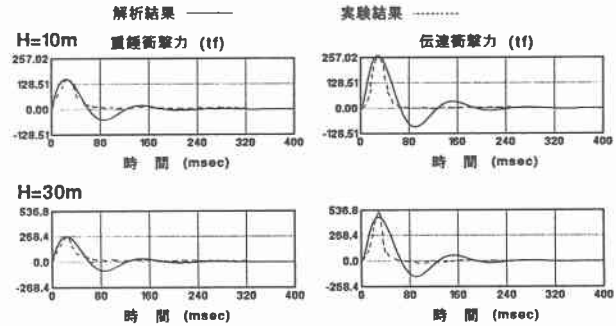
本論文ではまず最初に 1次元弾性棒の先端に重錘を落下させた場合の棒自身が永久変形を生じないことを明らかにした。次に、その弾性棒を Maxwell モデルまたは Voigt モデルで仮定して同様な解析を行なった結果、前者は永久変形を生じ後者は弾性棒と同様に永久変形を生じないことがわかった。その結果、本理論は落下衝撃実験をシミュレートするために三層および砂緩衝材を仮想質量を設けた五要素 Maxwell モデルとして提案し、また運動量保存の法則が成立することを含めて解析した。本論文ではその解析結果と実験結果とを比較検討し落石覆工の設計に対する緩衝材の緩衝効果に関する評価を試みた。その結果をまとめると、

- 1) Maxwell 体系のダッシュポット要素は重錘が砂および三層構造への貫入する物理現象を簡易的に表現するような場合に適当なレオロジーモデルであることが明らかになった。
- 2) 本解析に用いたパラメータは、重錘が各緩衝材へ最終的に貫入する量と落下高さとの関係を実験結果と比較して求めると、三層緩衝構造の場合は  $k_1=1500tf/m$ ,  $k_2=2000tf/m$ ,  $h_1=0.1$ ,  $h_1'=1$ ,  $h_2=0.5$  となった。  
砂単層の場合は、 $k_1=1000tf/m$ ,  $k_2=3000tf/m$ ,  $h_1=0.8$ ,  $h_2=0.4$ ,  $h_2'=0.7$  となった。
- 3) 三層緩衝構造体や砂単層の緩衝材における効果について、本モデルの解析結果が実験結果をほぼ近似していることを明らかとなった。

なお、本論文で用いた実験結果は室蘭工業大学建設システム工学科構造力学研究室および北海道開発局開発土木研究所による資料提供によるもので、ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 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。
- 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) 加藤愛雄, 菊池武彦: ラプラス変換関数表, 日刊工業新聞社, 1968年。
- 4) 井口鹿象: 直交関数数列および Fourier 展開とその応用 (第1および第2部), 室蘭工業大学土木工学科構造工学研究室, 1967年。



(a) 重錘衝撃力の場合 (b) 伝達衝撃力の場合  
図-7 衝撃力の時刻歴応答分布