

落石覆工上の緩衝材の緩衝特性に関する評価

EVALUATION OF SHOCK ABSORBING PROPERTIES OF CUSHION SYSTEM ON A ROCK-SHED

三上敬司 * 能町純雄 **

Takashi MIKAMI and Sumio G. NOMACHI

* 工修 専修大学北海道短期大学教授 土木科 (〒079-01 美瑛市光珠内町)

** 工博 北海道大学名誉教授 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

To ensure the safety of rock-shed structure against falling rock, it is important to study the issues on simply analysis of impact force due to falling rock, making the dynamic behavior of rock-shed under impact load, establishment of a rational design procedure of RC structures against impact load.

Authors attempt theoretically the impact force and the penetration arising a model weight falling into the sand cushion and three-layered absorbing system, referring to the test conducted by Muroran Institute of Technology etc., which was modified the rock falling on two cushion systems. Maxwell model is well satisfied with the arising phenomenon such as weight penetration into those cushion systems, and the analysis keeps the conservation rule of momentum.

Authors propose the rheology model of the five elements with a virtual mass, and it leads to the results which appreciately is in good agreement with these of the model experiments.

Key Words : impact response analysis , impact force , absorbing system , rheology model

1. はじめに

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では落石覆工に作用する衝撃力が大きくなれば、結局落石覆工の破壊によって交通の安全性のみならず交通の確保することができなくなる。経済的な見地から敷砂緩衝材が普及していたが、メンテナンスが容易でないことや緩衝効果が十分期待できないことから、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)¹⁾や三層緩衝構造体^{2)~4)} (砂, 各種補強筋を用いたコンクリート床板, EPS を組み合わせたもの) などが実用化されている。砂および三層緩衝構造体の緩衝効果に関する研究は北海道開発局開発土木研究所と室蘭工業大学の共同研究によって、落石覆工の合理的な設計法確立を目的とする実物大の実証実験が行われている⁵⁾。その結果、敷砂厚 $h=90\text{cm}$ を用いた実験結果では、最大重錘衝撃力および伝達衝撃力はそれぞれラメ定数 $\lambda=200\text{tf}/\text{m}^2$, $1000\text{tf}/\text{m}^2$ とした振動便覧式で評価可能であることを示している。三層緩衝構造体の場合では、重錘衝撃力は剛基礎上の敷厚 60cm の敷砂緩衝材への重錘重量 3tf , 落下高さ 30m での実験結果を参考にして、作用時間を 30msec の正弦半波で、伝達衝撃力はエネルギー論的観点からエネルギー吸収時の裏層 EPS 材の塑性応力によって算定し、これらの算定式が実用的に評価可能であることを示している⁶⁾。また、園田もエ

ネルギー基準より落石覆工の合理的な設計法を提案している⁷⁾。一方、これらの理論解析については、個別要素法^{8),9)}や汎用有限要素法解析ソフト Dyna-3D¹⁰⁾を用いて衝撃応答解析が行われている。しかし、これらの解析ソフトを用いて三次元解析するためには、多くの要素数を必要することから計算機環境が十分整備されていなければ解析時間が相当長くなるのが現状であるものと考えられる。

以上のことを踏まえて、本論文では比較的簡単な弾性バネモデルを提案し、文献 2) ~ 6) の実験データと比較して本解析を 1) ~ 4) の計算過程に従って検討することとする。なお、前述したエネルギー論的な観点から衝撃問題へのアプローチも重要であるものと考えられるが、本論文では緩衝材の衝撃力、継続時間、荷重分散性などについて着目して検討を行うこととする。

- 1) 緩衝材の材料を Maxwell 体および Voigt 体で表現し、これらのモデルで実測の情報を表現できるかどうかについて検討する。
- 2) 理論解析では落石覆工を無限平板とレ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 (三層緩衝構造体の場合は図-2に、砂の場合は図-3に示している)。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。
- 3) 2)で提案した五要素モデルのパラメータスタディを行い、それを踏まえてクッション材への貫入量との

関係から各パラメータを決定する。

- 4) 3)で決定したパラメータを用いて各緩衝材を含めた落石覆工に対する最大衝撃力と落下高さ（または衝突速度）、重錘が受ける衝撃力および落石覆工に伝達する衝撃力の時刻歴応答波形について実験データと比較検討する。

2. 理論解析

2.1 粘弾性棒の波動伝播および重錘落下衝撃応答

(1) Voigt体の場合

図-1 (a) 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 l の粘弾性棒の1次元波動方程式は次式となる。

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

拡大Hookeの法則より

$$\sigma_x = E_1 \varepsilon + E_2 \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (2)$$

$$\text{ただし, } \varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3)$$

E_1 は弾性バネ定数, E_2 は粘性バネ定数である。また、有限Sine積分変換式を以下に示すと、

$$S_m[f] = \int_0^l f \sin \frac{m\pi}{l} x dx \quad (4)$$

s をラプラス演算子として、ラプラス変換式を示すと

$$L(f) = \int_0^\infty f e^{-st} dt \quad (5)$$

上式を用いて、(1), (2), (3) 式に適用し $S_m[L(f)]$ を求め、この式の逆変換定理を以下に示す。

$$L^{-1} \left[\frac{2}{l} \sum_{m=0}^\infty S_m[L(f)] \sin \frac{m\pi}{l} x \right] = f \quad (6)$$

上式を用いて、変位 u を誘導することができる。初期条件 $t=0$ で棒の変位 u と速度が0の場合、次式となる。

$$L \left\{ S_m[u] \right\} = \frac{\left[\frac{m\pi}{l} \right] L \left\{ u_0 - (-1)^m u_l \right\}}{\left[\frac{m\pi}{l} \right]^2 + \frac{\rho s^2}{E_1 + E_2 s}} \quad (7)$$

ここで、 $\lambda = \frac{l}{c_1 \pi} s$, 棒の伝播速度 $c_1 = \sqrt{\frac{E_1}{\rho}}$, 棒の密度 ρ , 境界値を $x=0$ で u_0 , $x=l$ で $u_l=0$ とおく。また、いま Voigt 体を弾性体と考えると $E_2=0$ となる。フーリエ逆変換公式¹¹⁾ は $\xi = \frac{x}{l}$ とおくと、次式のように表される。

$$\sum_{m=1}^\infty \frac{m}{m^2 + \lambda^2} \sin m\pi \xi = \frac{\pi}{2} \frac{\sinh \pi \lambda (1-\xi)}{\sinh \pi \lambda} \quad (8)$$

(7) 式に (8) 式を適用してフーリエ逆変換すると

$$L[u] = \frac{\sinh \pi \lambda (1-\xi)}{\sinh \pi \lambda} L[u_0] \quad (9)$$

次に、図-1(a) に示したように、質量 M の剛体を落下高さ H から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、剛体の運動方程式は次式となる。

$$M \frac{d^2 u_0}{dt^2} - P_0 = 0 \quad (10)$$

なお、(10) 式の重力による慣性力項は衝撃力にそれ程大きな影響を与えないことから考慮に入れないことにする。初期条件 $t=0$ で $u_0=0$, $du_0/dt = V_0 = \sqrt{2gH}$ (g は重力加速度である) としてラプラス変換する。さらに、上式を $L[P_0]$ について整理し、ラプラス変換した (10) 式に (9) 式を適用すると像空間における u_0 が求まる。

$$L[u_0] = \frac{MV_0}{Ms^2 + \frac{\pi \lambda E_1 A \cosh \pi \lambda}{l \sinh \pi \lambda}} \quad (11)$$

(11) 式の両辺にラプラス変換演算子 s を掛けて無限時間後の永久変位 $\dot{u}_0$ とすると $\dot{u}_0=0$ となる。

これより、緩衝材を粘弾性棒と仮定する場合は永久変形を生じないことが明かとなった。

(2) Maxwell体の場合

次に、本解析では緩衝材を1次元レオロジー体と見なし、棒の先端部に重錘落下させた場合の変位を求める。粘弾性棒を図-1 (b) に示した弾性定数 E_m , 粘性係数 η_m とした Maxwell 体と仮定すると、その振動方程式¹¹⁾ は各要素のひずみをそれぞれ ε_1 , ε_2 とし全ひずみを ε とし、また $d\varepsilon_2/dt = \dot{\varepsilon}_2$ とおくと

$$\sigma = E_m \varepsilon_1 = \eta_m \dot{\varepsilon}_2 \quad (12)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (13)$$

(13) 式を時間 t について微分し、その式に (12) 式を代入し、さらにラプラス変換を施して整理すると

$$L[\sigma] = E_m' L[\varepsilon] \quad \text{ここで, } E_m' = \frac{E_m s}{s + \frac{E_m}{\eta_m}} \quad (14)$$

(11) 式中の E_1 を (14) 式の E_m' で置き換え、ラプラス演算子 s を両辺に掛けて無限時間後の永久変位 $\dot{u}_0$ を求

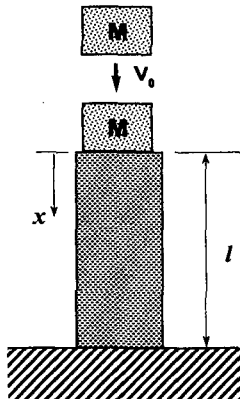


図-1(a) 粘弾性棒への重錘衝撃

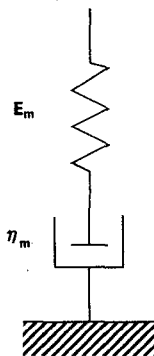


図-1(b) Maxwell 体

めると、次式のように示される。

$$\dot{w}_0 = \frac{MV_0}{\eta_m A / l} \quad (15)$$

(15)式より Maxwell 体の場合は粘弾性棒の場合と異なり永久変位を生じることがわかった。このことより、Maxwell 体の粘性項 η_m は永久変形に大きな影響を及ぼしていることが理論的に明らかとなった。

前述の結果を踏まえて、本論文では検討する砂層や三層緩衝構造体をバネとダッシュポットで組み合わせた五要素バネモデルに仮想質量を設けた Maxwell 系モデルと仮定することにした。なお、本バネモデルの基本的な役割は、重錘が緩衝材へ貫入して潜り込む物理現象を Maxwell モデルのダッシュポットで、また重錘が緩衝材へ貫入した際に重錘のみならず緩衝材にも付加質量的な慣性力が励起されることと重錘衝撃力と伝達衝撃力との区別をするために仮想質量を設定した。落石覆工本体部分はできるだけ簡便な解析を行うために無限版でモデル化することにした。

2.2 三層緩衝構造体のモデル化とその解析

三層緩衝構造体の場合は文献 2) の実験結果によると緩衝材の緩衝効果によって重錘衝撃力に対する伝達衝撃力が約 1/2 程度と報告されている。これより、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 系の五要素バネモデルとして無限版上に設定することにする。この緩衝材上へ質量 M_1 の重錘を高さ H から落下させた場合の重錘および無限版に作用する衝撃力 P_1 、 P_2 と永久変位 δ を求めることとする。

重錘による三要素体の変位 δ_1 とすると重錘 M_1 の運動方程式は次式のように示される。

$$M_1 \ddot{\delta}_1 = -P_1 \quad (16)$$

ここで、 f を時間に関する任意関数とし、1, 2, 3次の導関数を $\frac{df}{dt} = \dot{f}$, $\frac{d^2f}{dt^2} = \ddot{f}$, $\frac{d^3f}{dt^3} = \dddot{f}$ とおくことにする。 $P_1 = P_1' + P_1''$ とおくと、 P_1 の分力 P_1' および P_1''

は次式のようになる。

$$P_1' = k_1 \delta_{k_1} = c_1' \dot{\delta}_{c_1'} \quad (17)$$

$$P_1'' = c_1 \dot{\delta}_1 \quad (17)'$$

三要素体のバネ部の変位 δ_{k_1} 、ダッシュポット部の変位 δ_{c_1} 、 δ_{c_1}' とすれば、それらの相対変位は、

$$\delta_1 - \delta_2 = \delta_{k_1} + \delta_{c_1}' = \delta_{c_1} \quad (18)$$

重錘による Maxwell 体の変位 δ_2 とすると仮想質量 M_2 の運動方程式とその式を時間に関して 1 度微分すると、

$$M_2 \ddot{\delta}_2 = P_1 - P_2 \quad (19)$$

$$M_2 \ddot{\delta}_2 = \dot{P}_1 - \dot{P}_2 \quad (19)'$$

Maxwell 体のバネ部の変位 δ_{k_2} 、ダッシュポット部の変位 δ_{c_2} 、無限版のたわみ w_0 とすれば、 P_2 および相対変位 δ は次式となる。

$$P_2 = k_2 \delta_{k_2} = c_2 \dot{\delta}_{c_2} \quad (20)$$

$$\delta = \delta_2 - w_0 = \delta_{k_2} + \delta_{c_2} \quad (20)'$$

無限版の密度 ρ 、厚さ d 、剛度 $D = Ed^3/12(1-\nu^2)$ とすると、無限版の中央点に伝達衝撃力が作用する場合の中央点のたわみ速度は文献 13) より、

$$\dot{w}_0 = \frac{P_2}{a} \quad (\text{ここで、} a = \sqrt{\rho D d}) \quad (21)$$

(16) ~ (18) 式より、重錘が受ける衝撃力 P_1 に対する微分方程式は次式のように求めることができる。

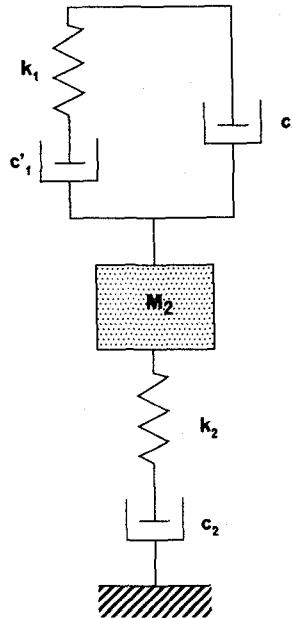
$$\begin{aligned} \ddot{P}_1 + \frac{k_1}{M_1} \left\{ \frac{M_1}{c_1'} + \frac{c_1}{k_1} \left[1 + \frac{M_1}{M_2} \right] \right\} \dot{P}_1 \\ + k_1 \left\{ \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right\} \left[1 + \frac{c_1}{c_1'} \right] P_1 - \frac{c_1}{M_2} \dot{P}_2 \\ - \frac{k_2}{M_2} \left[1 + \frac{c_1}{c_1'} \right] P_2 = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

(16) ~ (21) 式より、伝達衝撃力 P_2 に対する微分方程式は次式となる。

$$\begin{aligned} \ddot{P}_2 + k_2 \left\{ \frac{1}{c_2} + \frac{1}{a} \right\} \dot{P}_2 + \frac{k_2}{M_2} P_2 \\ - \frac{k_2}{M_2} P_1 = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

P_1 、 P_2 に初期条件を適用し (22)、(23) 式をそれぞれ時間に関してラプラス変換して、その連立方程式を解いて $L[P_1]$ 、 $L[P_2]$ を求めると、次式のように示される。

図-2 三層緩衝構造体モデル



$$L[P_1] = \frac{1}{F(s)} \left[\left(s^2 + a_1 s + a_0 \right) \dot{P}_{10} + \frac{c_1}{M_2} \left(s + a_1' \right) \dot{P}_{20} \right] \quad (24)$$

$$L[P_2] = \frac{1}{F(s)} \left[\frac{k_2}{M_2} \dot{P}_{10} + \left(s^2 + a_1' s + a_0' \right) \dot{P}_{20} \right] \quad (25)$$

ここで、上式中の未知数 $\dot{P}_{10}$ および $\dot{P}_{20}$ は $t=0$ における境界値 P_1 , P_2 を時間 t で微分した境界値である。

$$\begin{aligned} F(s) = s^4 + & \left[k_2 \left(\frac{1}{c_2} + \frac{1}{a} \right) + \frac{k_1}{M_1} \left\{ \frac{M_1}{c_1'} + \frac{c_1}{k_1} \left(1 + \frac{M_1}{M_2} \right) \right\} \right] s^3 \\ & + \left[\frac{k_2}{M_2} + \frac{k_1 k_2}{M_1} \left\{ \frac{M_1}{c_1'} + \frac{c_1}{k_1} \left(1 + \frac{M_1}{M_2} \right) \right\} \right] \left(\frac{1}{c_2} + \frac{1}{a} \right) \\ & + \frac{k_1}{M_1} \left(1 + \frac{M_1}{M_2} \right) \left(1 + \frac{c_1}{c_1'} \right) \right] s^2 + \left\{ \frac{k_1 k_2}{M_1 M_2} \left\{ \frac{M_1}{c_1'} + \frac{c_1}{k_1} \right\} \right. \\ & \left. + k_1 k_2 \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right) \left(1 + \frac{c_1}{c_1'} \right) \left(\frac{1}{c_2} + \frac{1}{a} \right) \right\} s \\ & + \frac{k_1 k_2}{M_1 M_2} \left(1 + \frac{c_1}{c_1'} \right) = (s+b)(s+c)(s+d)(s+f) \\ , \quad a_1 = & \frac{k_2}{c_2} \left(1 + \frac{c_2}{a} \right), \quad a_0 = \frac{k_2}{M_2}, \quad a_1' = \frac{k_1}{c_1} \left(1 + \frac{c_1}{c_1'} \right) \\ , \quad a_1' = & \frac{k_1}{M_1} \left\{ \frac{M_1}{c_1'} + \frac{c_1}{k_1} \left(1 + \frac{M_1}{M_2} \right) \right\} \\ , \quad a_0' = & k_1 \left\{ \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right\} \left(1 + \frac{c_1}{c_1'} \right) \end{aligned}$$

上式中の b, c, d, f はラプラス演算子 s の四次方程式の根であり、各根の組合せは2組の共役な複素数かまたは1組の共役な複素数と2つの実数根かまたは4つの実数根の3組である。また、(24), (25) 式中の境界値を求めるためには、重錘が減衰バネ系に衝突した場合の運動量保存の法則 $\int F dt = M_1 V_0$ が次式のように成立しなければならない。

$$\int_0^\infty P_1 dt = M_1 V_0, \quad \int_0^\infty P_2 dt = M_1 V_0 \quad (26)$$

(26) 式を (24), (25) 式に適用して整理すると、次式に示す連立方程式となる。

$$\frac{a_0}{b c d f} \dot{P}_{10} + \frac{c_1 a_1'}{M_2 b c d f} \dot{P}_{20} = M_1 V_0 \quad (27)$$

$$\frac{k_2}{M_2 b c d f} \dot{P}_{10} + \frac{a_0'}{b c d f} \dot{P}_{20} = M_1 V_0 \quad (28)$$

(27), (28) 式の連立方程式を解いて $\dot{P}_{10}$, $\dot{P}_{20}$ を求めて、これらを (24), (25) 式に代入して重錘衝撃力 P_1 , 伝達衝撃力 P_2 をそれぞれ次式のように求められる。

$$P_1 = \frac{M_1 M_2 V_0 b c d f}{k_2} \left[A_1 e^{-bt} + B_1 e^{-ct} + C_1 e^{-dt} + D_1 e^{-ft} \right] \quad (29)$$

$$P_2 = M_1 V_0 b c d f \left[A_3 e^{-bt} + B_3 e^{-ct} + C_3 e^{-dt} + D_3 e^{-ft} \right] \quad (30)$$

(29), (30) 式に示した記号は以下に示すとおりである。

$$\begin{aligned} A_1 = & \frac{b^2 - a_1 b + a_0}{(c-b)(d-b)(f-b)}, \quad B_1 = \frac{c^2 - a_1 c + a_0}{(b-c)(d-c)(f-c)} \\ C_1 = & \frac{d^2 - a_1 d + a_0}{(b-d)(c-d)(f-d)}, \quad D_1 = \frac{f^2 - a_1 f + a_0}{(b-f)(c-f)(d-f)} \\ A_3 = & \frac{1}{(c-b)(d-b)(f-b)}, \quad B_3 = \frac{1}{(b-c)(d-c)(f-c)} \\ C_3 = & \frac{1}{(b-d)(c-d)(f-d)}, \quad D_3 = \frac{1}{(b-f)(c-f)(d-f)} \end{aligned}$$

(15) ~ (21), (24), (25) 式より、 δ_1 , δ_2 を求め、要素全体の変位 $\delta = \delta_1 + \delta_2$ より無限時間における永久変位 $\hat{\delta}$ を求めると、次式となる。

$$\hat{\delta} = a_0'' + \frac{M_1 V_0 a_1}{k_2} \quad (31)$$

ただし、永久変位 $\hat{\delta}$ は重錘の貫入量に相当する。

ここで、前述した記号を以下のようにおくこととする。

$$b_1 = \frac{k_2 \left\{ \frac{1}{c_1'} + \frac{1}{a} \left(1 + \frac{c_2}{c_1'} \right) \right\}}{1 + \frac{c_2}{a}}, \quad a_2'' = b + c + d + f$$

$$a_1'' = b(c+d) + c(d+f) + f(b+d)$$

$$a_0'' = bc(d+f) + df(b+c) - \frac{b c d f a_1}{a_0}$$

2.3 敷砂緩衝材のモデル化とその解析

砂層の場合は文献 5) の実験結果によると緩衝材の緩衝効果によって重錘衝撃力に対する伝達衝撃力が約 2 倍程度と報告されている。これより、図-3 に示したように敷砂緩衝材はバネ定数 k_1 , 減衰定数 c_1 をもつ Max-

well 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 体系の五要素モデルとして無限版上に設定する. その上へ質量 M_1 の剛体を高さ H から落下させた場合の剛体および無限版に作用する衝撃力 P_1, P_2 および永久変位 δ を求める.

剛体による Maxwell 体の変位 δ_1 とすると剛体 M_1 の運動方程式は次式となる.

$$M_1 \ddot{\delta}_1 = -P_1 \quad (32)$$

Maxwell 体のバネ部の変位 δ_{k_1} , ダッシュポット部の変位 δ_{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.

$$P_1 = k_1 \delta_{k_1} = c_1 \dot{\delta}_{c_1}, \quad \delta_1 - \delta_2 = \delta_{k_1} + \delta_{c_1} \quad (33)$$

剛体による三要素体の変位 δ_2 とすると剛体 M_2 の運動方程式は次式となる.

$$M_2 \ddot{\delta}_2 = P_1 - P_2 \quad (34)$$

三要素体の力の釣り合いは次式となる.

$$\left. \begin{aligned} P_2 &= P_2' + P_2'' \\ P_2' &= k_2 \delta_{k_2} = c_2 \dot{\delta}_{c_2} \\ P_2'' &= c_2' \dot{\delta} \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

上式中の三要素体の相対変位 δ は次式となる.

$$\delta = \delta_2 - w_0 = \delta_{k_2} + \delta_{c_2} \quad (36)$$

(32) 式を ~ (36) 式より, 三層緩衝構造モデルの場合と同様な解析手順に従って重錘衝撃力 P_1 , 伝達衝撃力 P_2 , 永久変位 δ を求め, これらの結果のみを示すと

$$P_1 = \frac{bcdfk_1 V_0}{M_1 F_1} \left[A_1 e^{-bt} + B_1 e^{-ct} + C_1 e^{-dt} + D_1 e^{-ft} \right] \quad (37)$$

$$P_2 = \frac{bcdfk_1 c_2 V_0}{M_1 M_2 \left[1 + \frac{c_2}{a} \right] F_1} \left[A_4 e^{-bt} + B_4 e^{-ct} \right]$$

$$+ C_4 e^{-dt} + D_4 e^{-ft} \quad (38)$$

永久変位 δ は, 次式のように求めることができる.

$$\delta = \frac{V_0}{F_1} \left[a_0'' + \frac{\eta k_1}{M_1} b_1 \right] \quad (39)$$

ここで, (37) ~ (39) 式内の記号を以下に示す.

$$A_1 = \frac{b^2 - a_1 b + a_0}{(c-b)(d-b)(f-b)}, B_1 = \frac{c^2 - a_1 c + a_0}{(b-c)(d-c)(f-c)}$$

$$C_1 = \frac{d^2 - a_1 d + a_0}{(b-d)(c-d)(f-d)}, D_1 = \frac{f^2 - a_1 f + a_0}{(b-f)(c-f)(d-f)}$$

$$A_4 = \frac{a' - b}{(c-b)(d-b)(f-b)}, B_4 = \frac{a' - c}{(b-c)(d-c)(f-c)}$$

$$C_4 = \frac{a' - d}{(b-d)(c-d)(f-d)}, D_4 = \frac{a' - f}{(b-f)(c-f)(d-f)}$$

$$F_1 = \frac{k_1 k_2 \left[1 + \frac{c_2}{c_2'} \right]}{M_1 M_2 \left[1 + \frac{c_2}{a} \right]}, \quad a' = \frac{k_2}{c_2} \left[1 + \frac{c_2}{c_2'} \right], \quad \eta = \frac{M_1}{M_2}$$

$$a_1 = \frac{k_2}{1 + \frac{c_2}{a}} \left\{ \frac{c_2}{M_2 k_2} + \frac{1}{c_2'} + \frac{1}{a} \left[1 + \frac{c_2}{c_2'} \right] \right\}$$

$$a_0 = \frac{k_2 \left[1 + \frac{c_2}{c_2'} \right]}{M_2 \left[1 + \frac{c_2}{a} \right]}, \quad a_1' = \frac{k_1}{c_1}, \quad a_0' = \frac{k_1}{M_1} \left[1 + \eta \right]$$

$$b_1 = \frac{k_2 \left\{ \frac{1}{c_2'} + \frac{1}{a} \left[1 + \frac{c_2}{c_2'} \right] \right\}}{1 + \frac{c_2}{a}}, \quad a_2'' = a_1 + a_1'$$

$$a_1'' = a_0 + a_1 a_1' + \frac{k_1}{M_2}, \quad a_0'' = a_1' a_0 + \frac{k_1}{M_2} b_1$$

3. 解析結果と実験結果との比較

3.1 パラメータスタディ

本論文の提案した 2 つのモデルのパラメータが, 重錘および伝達衝撃力, 貫入量に与える影響についての検討を行なうこととする. なお, 本論文で用いた 2 つのモデルのパラメータを次のようにおくことにする.

1) 三層緩衝構造モデルの場合

$$\frac{k_1}{M_1} = \omega_1^2, \quad \frac{c_1'}{M_1} = 2h_1' \omega_1, \quad \frac{c_1}{M_1} = 2h_1 \omega_1, \quad \frac{c_2}{M_2} = 2h_2 \omega_2$$

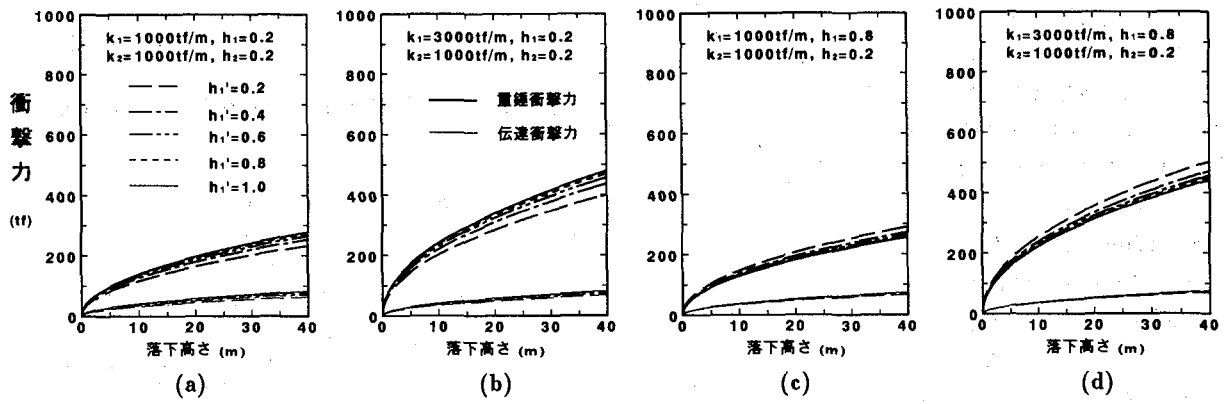


図-4 三層緩衝構造体モデルの場合（衝撃力）

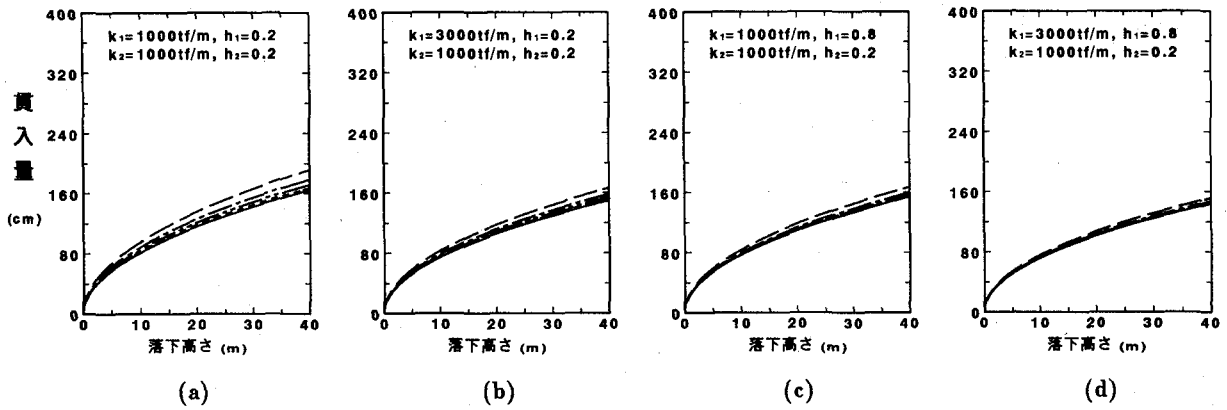


図-5 三層緩衝構造体モデルの場合（貫入量）

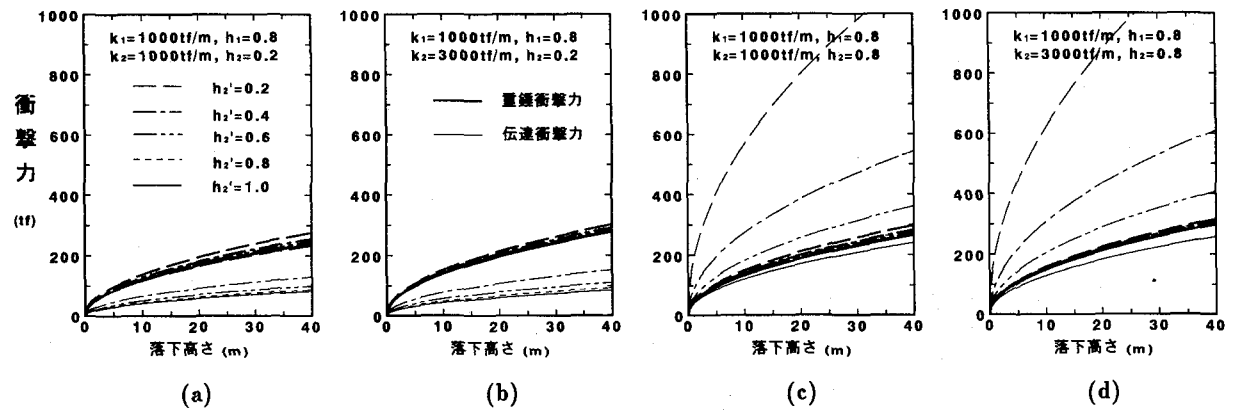


図-6 砂緩衝材モデルの場合（衝撃力）

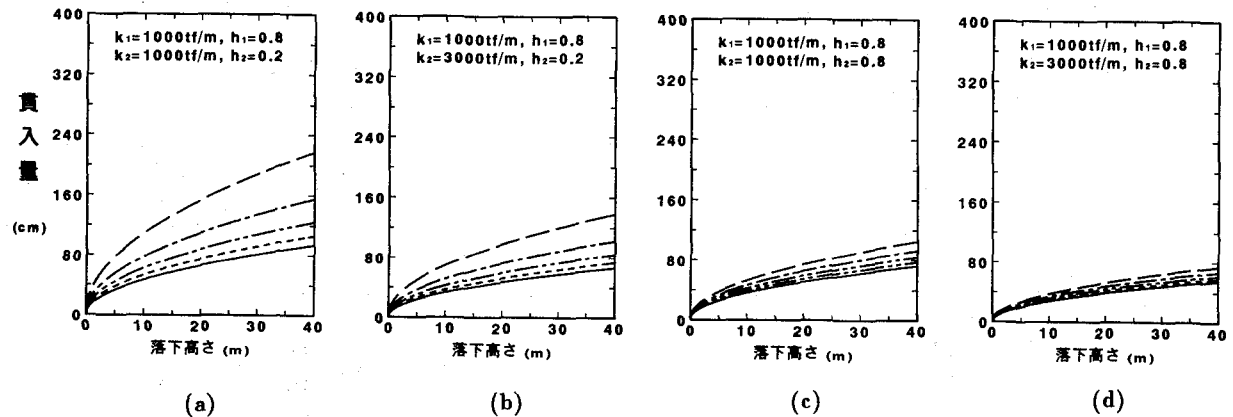


図-7 砂緩衝材モデルの場合（貫入量）

$$h_1' = \frac{c_1'}{2\sqrt{k_1 M_1}}, h_1 = \frac{c_1}{2\sqrt{k_1 M_1}}, h_2 = \frac{c_2}{2\sqrt{k_2 M_2}}$$

$$\frac{k_2}{M_2} = \omega_2^2, \frac{a}{M_2} = \omega_0$$

2) 砂層緩衝材モデルの場合

$$\frac{k_1}{M_1} = \omega_1^2, \frac{c_1}{M_1} = 2h_1\omega_1, \frac{c_2}{M_2} = 2h_2\omega_2, \frac{c_2'}{M_2} = 2h_2'\omega_2$$

$$h_1 = \frac{c_1}{2\sqrt{k_1 M_1}}, h_2 = \frac{c_2}{2\sqrt{k_2 M_2}}, h_2' = \frac{c_2'}{2\sqrt{k_2 M_2}}$$

$$\frac{k_2}{M_2} = \omega_2^2, \frac{a}{M_2} = \omega_0$$

三層緩衝構造モデルの場合は、重錘質量 $M_1=3t$ 、仮想質量 $M_2=8.79t$ 、バネ定数 $k_2=1000tf/m$ 、減衰定数 $h_2=0.2$ を一定とし、バネ定数 $k_1=1000, 3000tf/m$ 、減衰定数 $h_1=0.2, 0.8$ 、 $h_1'=0.2\sim 1.0$ と変化させた場合、これらのパラメータが最大重錘および伝達衝撃力、最大貫入量と落下高さとの関係に及ぼす影響について検討する。なお、三層緩衝構造体の場合は衝撃力がコンクリート床版全体で分散し下部の EPS 材に伝達されることから、仮想質量 M_2 は床版および EPS 材ともに全質量に、後述するように重錘底面積に砂の質量と敷砂厚を掛けたものを加えて求めている。いま、敷砂密度 $\rho_s=1.6t/m^3$ 、床版の密度 $w=2.5t/m^3$ 、EPS の密度 $\rho_e=0.02t/m^3$ 、敷砂厚 $h_s=50cm$ 、床版厚 $h_c=20cm$ 、EPS 厚 $h_e=50cm$ とすると、仮想質量は $M_2=8.79t$ となる。

図-4, 5(a) ~ (d) は三層緩衝構造モデルの最大重錘および伝達衝撃力、最大貫入量と落下高さとの関係について示している。最大重錘、伝達衝撃力および貫入量は落下高さが高くなるといずれも 2 次放物線的に増加する。重錘衝撃力は $k_1=1000tf/m$ と $3000tf/m$ の場合と比較して $k_1=3000tf/m$ の場合の方が約 1.7 倍大きくなる。 $h_1=0.2$ の場合では h_1' が大きくなると重錘衝撃力は僅かながら大きくなり、 $h_1=0.8$ の場合では h_1' が大きくなると重錘衝撃力は逆に小さな応答値を示している。伝達衝撃力の場合では重錘衝撃力に比べて k_1, h_1, h_1' の影響をほとんど受けていない。また、両衝撃力を比較すると伝達衝撃力に対する重錘衝撃力は $k_1=1000tf/m$ の場合で約 2 倍以上、 $k_1=3000tf/m$ の場合で約 4 倍以上の値を示している。一方、貫入量の場合では k_1, h_1 が大きくなるとより小さな応答値となる傾向を示している。

以上より、三層緩衝構造モデルの場合は各バネ定数を $1000tf/m$ 以上および減衰定数 h_1', h_2 を大きな値とすると、衝撃力は本計算結果より大きな応答値を、また貫入量は逆に小さな応答値を示す傾向にあることから実験結果を近似できるものと推測される。

敷砂緩衝材モデルの場合は、重錘質量 $M_1=3t$ 、仮想

質量 $M_2=1.13t$ 、バネ定数 $k_1=1000tf/m$ 、減衰定数 $h_1=0.8$ を一定とし、バネ定数 $k_2=1000, 3000tf/m$ 、減衰定数 $h_2=0.2, 0.8$ 、 $h_2'=0.2\sim 1.0$ と変化させた場合、これらのパラメータが最大重錘および伝達衝撃力、最大貫入量と落下高さとの関係に及ぼす影響について検討する。なお、敷砂緩衝材は、実験結果から重錘による衝撃応力が 1 次的に下方に伝達されることから、本論文では解析における仮想質量は重錘底面に敷砂厚と砂の密度を掛けたものとして求めることにする。砂の密度 $\rho_s=1.6t/m^3$ 、重錘の直径 $r_d=1m$ 、一般的な敷砂厚 $h=90cm$ として仮想質量を計算すると、仮想質量 M_2 は、

$$M_2=\pi \times \rho_s \times r_d^2 / 4 \times h = 1.13t \text{ となる。}$$

図-6, 7(a) ~ (d) は敷砂緩衝材モデルの重錘および伝達衝撃力、貫入量と落下高さとの関係について示している。敷砂緩衝材の場合も三層緩衝構造モデルの場合と同様に落下高さに対して 2 次放物線的に増加している。重錘衝撃力では k_2, h_2, h_2' による影響をあまり受けていないことがわかる。一方、伝達衝撃力では k_2 による影響をそれ程受けていないが、 h_2, h_2' による影響を大きく受けていることがわかる。両衝撃力を比較すると、 $h_2=0.2$ の場合では重錘衝撃力の方が伝達衝撃力よりも約 2 倍程度の応答値を示しているが、 $h_2=0.8$ の場合では h_2' が小さな値になるにつれて伝達衝撃力の方が重錘衝撃力よりも大きな応答値を示していることがわかる。また、貫入量の場合は k_2, h_2, h_2' を大きな値にすると本モデルが硬くなることから小さな応答値を示すものと思われる。

以上より、敷砂緩衝材モデルの場合はバネ定数 $k_2=3000tf/m$ でかつ減衰定数 $h_2>0.4, h_2'>0.2$ とすれば、本解析結果における衝撃力は実験結果を近似できるものと推測される。

3.2 三層緩衝構造体の場合

本研究は衝撃実験をシミュレーションするために、各緩衝材に対して剛基礎上にバネとダッシュポットに仮想質量を設けた五要素モデルと仮定して、重錘を落下高さ H からその上に落下させた場合の各衝撃力および貫入量について解析結果と実験結果とを比較検討する。

(1) パラメータの決定

前述したパラメータスタディを踏まえて、本解析では各パラメータを表-1 に示した case-1 ~ 3 として落下高さに対する重錘の貫入量を求め、図-8 で示したように実験結果と比較して決定することにする。なお、重錘の貫入量は三層緩衝構造体へ貫入した際の重錘の最終貫入量である。実験結果は、砂層 50cm、コンクリート床板の板厚 20cm、EPS 厚 50cm における三層緩衝構造のデータを用いている。このコンクリート床板は圧縮強度 $\sigma_c=210kgf/cm^2$ 、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

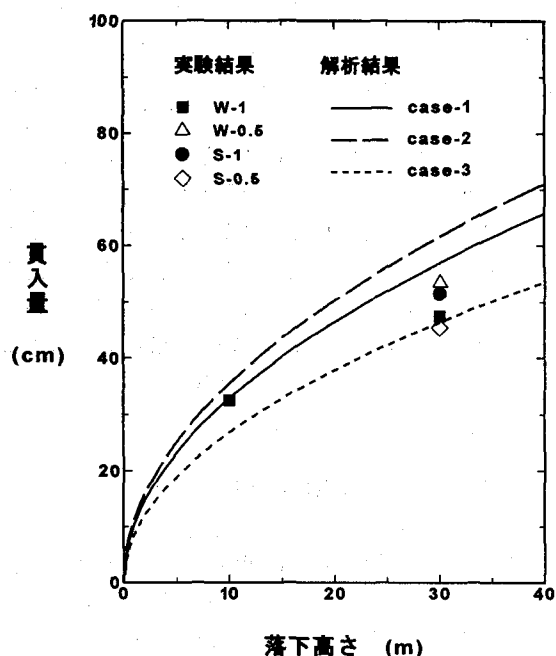
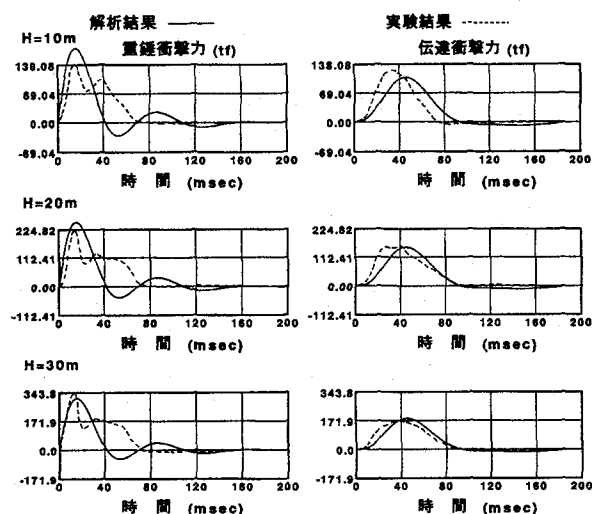


図-8 貫入量と落下高さとの関係

表-1 3 ケースにおける減衰バネ定数 (三層緩衝構造の場合)

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	$k_1=1500, k_2=3000, h_1=0.1, h_1'=1, h_2=0.6$

表中の k_1, k_2 の単位は tf/m である。



(a) 重錘衝撃力の場合 (b) 伝達衝撃力の場合
図-9 衝撃力の時刻歴応答波形

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、解析結果の case-1 の場合は、落下高さ $H=10m$ の場合では実験結果に良く一致し、 $H=30m$ の場合では実験結果にバ

ラツキが見られるものの、W-0.5 の場合よりも若干大きな値を示している。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な値を示している。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。

以上より、貫入量と落下高さとの関係より、case-1 の解析結果は実験結果を概ね近似できるものと考えられる。従って、本解析ではバネ定数 $k_1=1500tf/m, k_2=2000tf/m$ 、減衰定数 $h_1=0.1, h_1'=1, h_2=0.5$ として応答計算を行うことにする。

(2) 衝撃力の時刻歴応答波形

図-9(a), (b) は落下高さ $H=10\sim30m$ における重錘および伝達衝撃力の時刻歴応答波形である。なお、実験結果は前述した三層緩衝構造体のデータを用いている。(a) 図の落下高さ $H=10m$ の解析結果における衝撃力波形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、衝撃力波形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示している。 $H=20, 30m$ の場合の解析結果では $H=10m$ の場合と相似した衝撃力波形を示し、その最大衝撃力に達する時間 $t_{max}=16msec$ となり、その値は各落下高さに対して約 254, 311tf となっている。また、各落下高さに対する載荷継続時間はいずれも $t_d=41msec$ となっている。それに対して、 $H=20, 30m$ の場合の実験結果では、最大衝撃力に達する時間がいずれも約 $t_{max}=8msec$ となり、その最大値は各落下高さに対してそれぞれ約 225, 344tf となって解析値に比較的一致している。

一方、(b) 図の伝達衝撃力における解析結果では、各落下高さに対して時間 $t_{max}=45msec$ 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、その最大衝撃力は各落下高さに比例して 107, 151, 185tf と徐々に増加していることがわかる。実験結果では、最大衝撃力および最大衝撃力に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。その最大値は各落下高さに対してそれぞれ 118, 146, 156tf となり、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最大重錘および最大伝達衝撃力についてはほぼ等しいことがわかる。

これより、三層緩衝構造体の時刻歴応答波形における両結果は若干時間的な応答差がみられるものの、解析結果は三層緩衝構造体の緩衝性状などの実験結果を概ね近似できるものと考えられる。

(3) 最大衝撃力と落下高さとの関係

図-10 (a) ~ (d) は重錘質量 $M_1=2, 3, 5t$ における

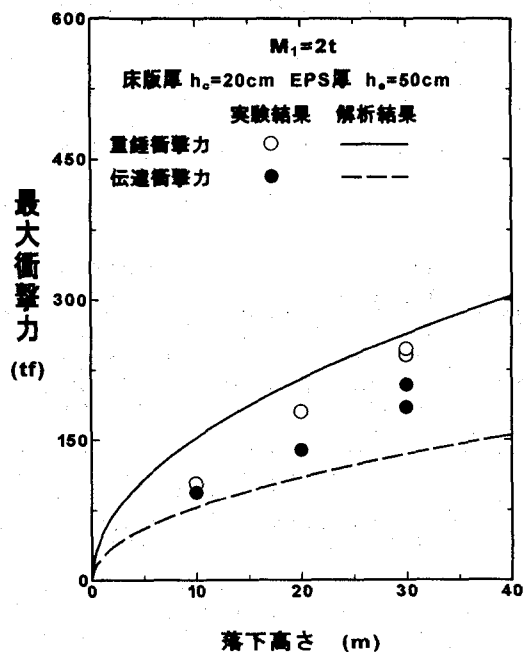


図-10(a) 最大衝撃力と落下高さとの関係
($M_1=2t$, $h_c=20\text{cm}$, $h_e=50\text{cm}$)

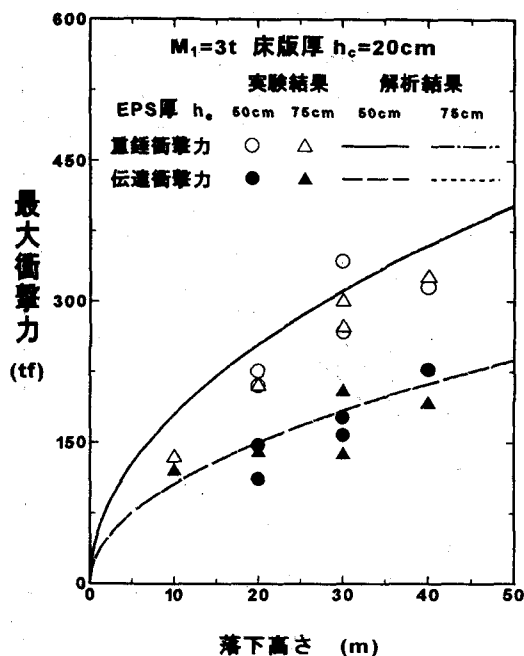


図-10(b) 最大衝撃力と落下高さとの関係
($M_1=3t$, $h_c=20\text{cm}$, $h_e=50, 75\text{cm}$)

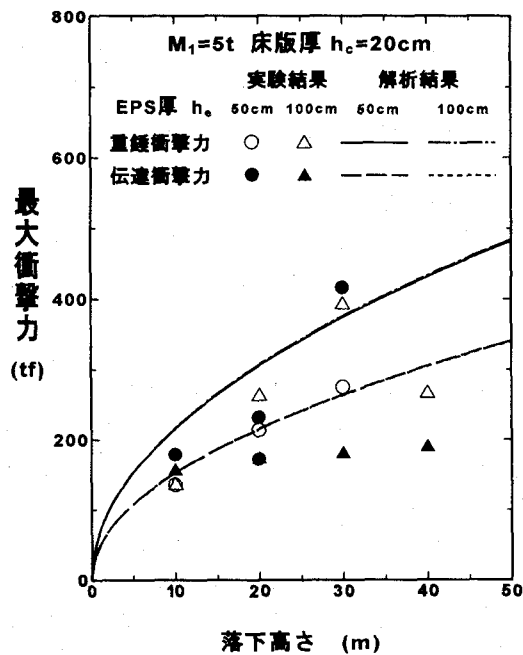


図-10(c) 最大衝撃力と落下高さとの関係
($M_1=5t$, $h_c=20\text{cm}$, $h_e=50, 100\text{cm}$)

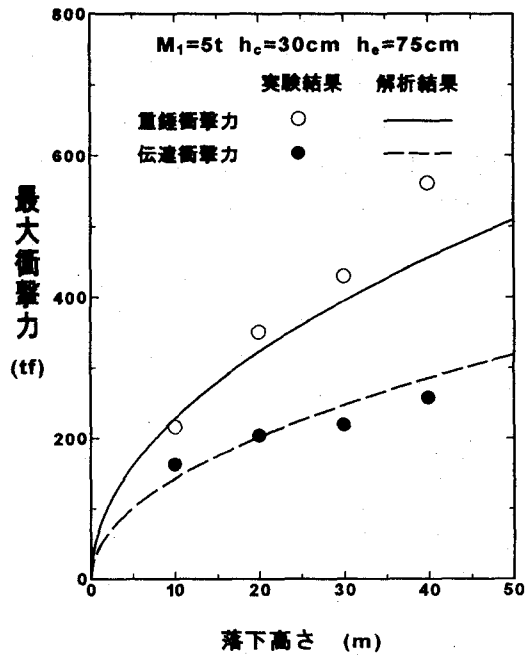


図-10(d) 最大衝撃力と落下高さとの関係
($M_1=5t$, $h_c=30\text{cm}$, $h_e=75\text{cm}$)

落下高さに対する最大重錘衝撃力、最大伝達衝撃力を示している。なお、実験に用いられている三層緩衝構造体の寸法は床版厚 $h_c=20\text{cm}$ の場合には EPS 厚 $h_e=50, 75, 100\text{cm}$ 、床版厚 $h_c=30\text{cm}$ の場合には EPS 厚 $h_e=75\text{cm}$ の 4 種類である。それに対して、本解析では 3.2(1) で求めたパラメータを、前述した実験データに相当する仮想質量 M_2 を計算するとそれぞれ 8.79, 8.87, 8.95, 12.87t となり、これらを用いて各応答計算した。

(a)図は三層緩衝構造体が $M_1=2t$, $h_c=20\text{cm}$, $h_e=50\text{cm}$ の場合である。重錘衝撃力の場合では解析結果の方が各落下高さに対して実験結果よりも大ききな応答値を示しており、伝達衝撃力の場合では逆に実験結果より小さきな応答値を示している。解析結果では最大伝達衝撃力と最大重錘衝撃力との比が約半分となっているが、実験結果では重錘質量が比較的軽いために緩衝材の緩衝性能を十分発揮せずに両衝撃力にはそれ程の大きな応答差

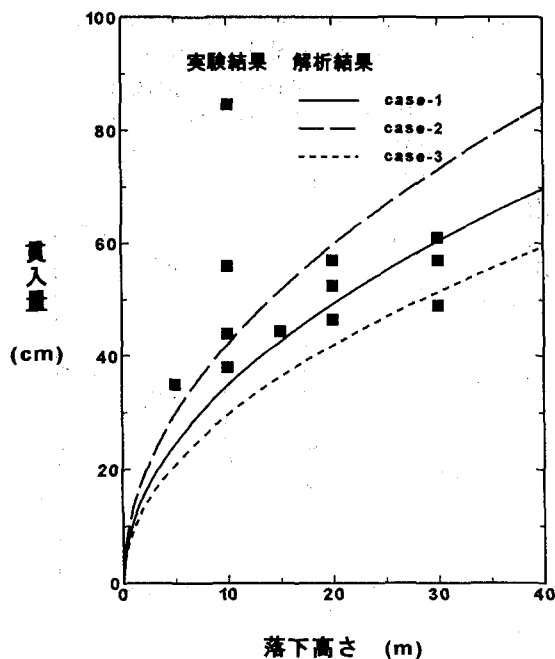


図-11 貫入量と落下高さとの関係

が現われなかったものと考えられる。

(b)図は $M_1=3t$, $h_c=20cm$, $h_e=50, 75cm$ の場合である。解析結果と実験結果を比較すると、実験結果は各落下高さに対して多少のばらつきがあるものの、最大重錘および伝達衝撃力ともに解析結果にほぼ一致している。また、解析および実験結果ともに EPS 厚が $25cm$ 増加しても大差が見られないことがわかる。

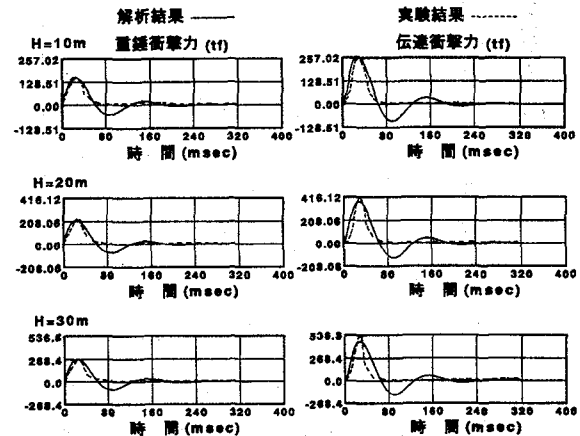
(c)図は $M_1=5t$, $h_c=20cm$, $h_e=50, 100cm$ の場合である。EPS厚 $h_e=50cm$ の場合の実験結果は、重錘質量が $M_1=5t$ と重いために、衝撃エネルギーに対するEPS材のエネルギー吸収性能が十分得られなかったことから、重錘衝撃力よりも伝達衝撃力の方が大きな応答値を示しているものと考えられる。しかし、EPS厚 $h_e=100cm$ の場合ではEPS厚 $h_e=50cm$ の場合と異なり伝達衝撃力は重錘衝撃力よりも小さな応答値を示していることから、緩衝材の荷重分散効果やエネルギー吸収性能による緩衝効果が十分得られていることがわかる。一方、解析結果ではEPS厚 $h_e=50cm$ と $100cm$ の場合と比較すると、両結果はEPS厚が2倍厚くなってもほぼ同値となっている。また、解析結果と実験結果とを比較すると、解析結果における重錘衝撃力では EPS厚 $h_e=100cm$ の場合の実験結果にほぼ一致している。伝達衝撃力では $h_e=100cm$ の場合の実験結果は落下高さに対して緩やかな増加傾向を示しているものの、解析結果は落下高さに対して放物線的に増加している。これより、解析結果は $H \geq 20m$ で実験結果よりも大きな値を示していることがわかる。

(d)図は $M_1=5t$, $h_c=30cm$, $h_e=75cm$ の場合である。重錘衝撃力の解析結果は実験結果と比較すると $H \leq 30m$ で、伝達衝撃力の場合は各落下高さに対して実験結果にほぼ一致していることがわかる。

表-2 3 ケースにおける減衰バネ定数 (砂単層の場合)

case-1	$k_1=1000, k_2=3000, h_1=0.8, h_2=0.7, h_2'=0.4$
case-2	$k_1=1000, k_2=3000, h_1=0.8, h_2=0.2, h_2'=0.6$
case-3	$k_1=1000, k_2=3000, h_1=0.8, h_2=0.5, h_2'=1.0$

表中の k_1, k_2 の単位は tf/m である。



(a) 重錘衝撃力の場合 (b) 伝達衝撃力の場合

図-12 衝撃力の時刻歴応答波形

以上のことから、本解析結果は三層緩衝構造体の緩衝効果が荷重分散効果やエネルギー吸収性能が十分期待できる場合の実験結果に良く近似していることがわかる。

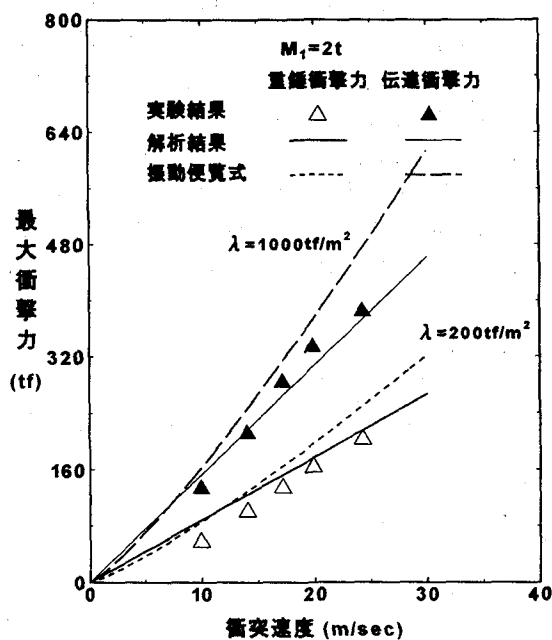
3.3 敷砂緩衝材の場合

本解析結果では敷砂厚 $h=90cm$ が実際に多くの現場で使用されていることからこの厚さに対して検討する。

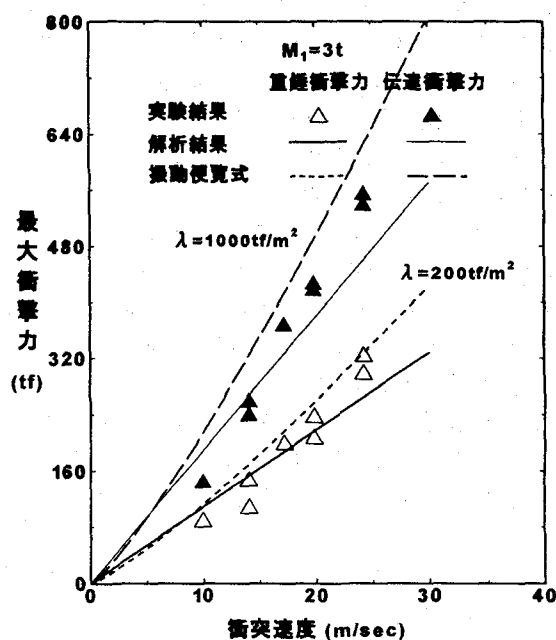
(1) パラメータの決定

前述したパラメータスタディの結果を踏まえて、各パラメータを case-1 ~ 3 として応答計算し、落下高さに対する最終貫入量に関して解析結果と実験結果を図-11に示している。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、実験結果は各落下高さごとにバラツキが見られるが、大略的に見ると落下高さが高くなるにつれて放物線的な増加傾向を示していることから、解析および実験結果はほぼ同様な傾向を示しているものと思われる。両者を比較すると、実験結果では前述したようにバラツキが見られるものの、case-1 の解析結果における $H=10m$ の場合では実験値の下限値を、 $H=20m$ の場合ではほぼ中間値を、また $H=30m$ の場合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。

以上の結果より、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



(a) $M_1=2t$ の場合



(b) $M_1=3t$ の場合

図-13 最大衝撃力と衝突速度との関係

ものと考えられる。これより、理論解析に用いるパラメータはバネ定数 $k_1=1000\text{tf/m}$, $k_2=3000\text{tf/m}$, 減衰定数 $h_1=0.8$, $h_2=0.7$, $h_2'=0.4$ とする。

(2) 衝撃力の時刻歴応答波形

図-12 (a), (b)は落下高さ $H=10\sim 30\text{m}$ における重錘および伝達衝撃力の時刻歴応答波形である。(a)図における解析結果の場合の衝撃力波形は、各落下高さに対して最大衝撃力に達する時間 $t_{\max}=24\text{msec}$ でその値はそれぞれ $P_{\max}=153, 216, 265\text{tf}$ となり、また载荷継続時間は、 $t_d=60\text{msec}$ となり、その後の衝撃力波形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 $t_{\max}=28, 20, 20\text{msec}$ でその値は $P_{\max}=145, 240, 300\text{tf}$ を示している。このことから、両結果を比較すると各落下高さに対して解析結果は実験結果にほぼ近似しているものと思われる。载荷継続時間については衝撃力波形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、主に衝撃力が作用している時間をほぼ $t_d=80\text{msec}$ とみなすと解析結果とは大差がないものと思われる。

(b)図の解析結果の場合では、最大衝撃力に達する時間 $t_{\max}=28\text{msec}$ でその値 $P_{\max}=266\text{tf}$ となり、実験結果では $t_{\max}=25.6\text{msec}$ で $P_{\max}=257\text{tf}$ となることから、解析結果は実験結果にほぼ一致した応答値を示している。また、载荷継続時間は解析結果では各落下高さに対して $t_d=64\text{msec}$ と一定となり、実験結果では落下高さに対して約 $t_d=60\text{msec}$ 前後となることから、両者はほぼ一致しているものと思われる。解析結果における最大衝撃力では $P_{\max}=266, 376, 461\text{tf}$ となり、それに対して実験結果では $P_{\max}=257, 416, 537\text{tf}$ となる。両結果を

比較すると、両者は最大値、最大値に達する時間や载荷継続時間についていずれもほぼ近似しているものと思われる。しかし、 $H=20\text{m}$ 以上の場合では両結果の差が僅かながら広がる傾向を示している。

以上より、重錘および伝達衝撃力の時刻歴応答波形は落下高さが高い場合 ($H\geq 20\text{m}$) では解析と実験結果に若干応答差が見られるものの、両者は概ね近似した応答波形を示しているものと考えられる。

(3) 最大衝撃力と衝突速度との関係

図-13(a), (b)は重錘質量が $M_1=2, 3t$ における衝突速度に対する最大重錘および伝達衝撃力について、解析結果、実験結果および振動便覧式とを比較して示している。なお、振動便覧式による衝撃力はラーメ定数 $\lambda=200, 1000\text{tf/m}^2$ の値を用いて求めている。解析結果は重錘質量の変化に依らず 3.3(1) で求めたパラメータを用いて応答計算した。(a)図の重錘衝撃力の解析結果では各衝突速度に対して実験結果の上限値を示している。一方、解析結果と $\lambda=200\text{tf/m}^2$ における振動便覧式と比較して、両者は衝突速度 $V\leq 14\text{m/sec}$ の場合ではほぼ一致し、 $V>14\text{m/sec}$ の場合では徐々に応答差が広がっていることがわかる。一方、伝達衝撃力における解析結果では衝突速度に対して実験値とほぼ一致しているが、 $\lambda=1000\text{tf/m}^2$ における振動便覧式と比較すると、振動便覧式の方が解析結果よりも大きめの応答値となり衝突速度が速くなるにつれて両者の差が広がっていることがわかる。(b)図の重錘衝撃力における解析結果と実験結果とを比較すると、解析結果は $V\leq 14\text{m/sec}$ で実験結果の上限値を、 $V\geq 17.15\text{m/sec}$ で下限値を示している。また、解析結果と $\lambda=1000\text{tf/m}^2$ の場合の振動便覧

式とを比較すると、両者は $V < 9.9 \text{ m/sec}$ の場合では一致しているが、 $V \geq 9.9 \text{ m/sec}$ の場合では両者の差が広がっていることがわかる。一方、伝達衝撃力における解析結果と実験結果とを比較すると $V \leq 19.8 \text{ m/sec}$ の場合では両者はほぼ一致しているが、 $V = 24.25 \text{ m/sec}$ の場合における解析結果では実験値の下限値を示している。また、解析結果と $\lambda = 200 \text{ tf/m}^2$ における振動便覧式と比較すると、両者は重錘衝撃力の場合と同様に $V < 9.9 \text{ m/sec}$ の場合では一致しているが、 $V \geq 9.9 \text{ m/sec}$ の場合では両者の差が広がっていることがわかる。敷砂緩衝材の場合では緩衝効果がある場合の三層緩衝構造体と異なり、一次元的に衝撃力が伝達することから三層緩衝構造体とは逆に最大伝達衝撃力の方が最大重錘衝撃力よりも約 1.5 ～ 2.0 倍大きな値を示し、解析結果もこのことを十分満足していることがわかる。

これより、衝突速度に対する最大重錘および伝達衝撃力における解析結果はラーメ定数 $\lambda = 200, 1000 \text{ tf/m}^2$ における振動便覧式よりも衝突速度が速くなると徐々に差が広がっているものの、実験結果を概ね近似できるものと考えられる。

4. まとめ

本論文ではまず最初に 1 次元粘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位を生じないことを明らかにした。次に、その粘弾性棒を Maxwell 体で表現し同様な解析を行なうと永久変位が生じた。その結果を踏まえて、本理論は落下衝撃実験をシミュレートするために、三層緩衝構造体や敷砂緩衝材に対して仮想質量を設けた五要素 Maxwell モデルを提案し、また運動量保存の法則が成立するように考慮し解析を行った。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。なお、各緩衝材の厚さが変化した場合でも各緩衝材に対応したパラメータを一定とし、仮想質量のみを変化させて数値解析を行った。

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緩衝構造体への貫入する物理現象を簡易に表現できた。
- 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た。それらの結果を以下に示す。
 - i) 三層緩衝構造体の場合
 $k_1 = 1500 \text{ tf/m}$, $k_2 = 2000 \text{ tf/m}$, $h_1 = 0.1$, $h_1' = 1.0$, $h_2 = 0.5$
 - ii) 砂単層の場合
 $k_1 = 1000 \text{ tf/m}$, $k_2 = 3000 \text{ tf/m}$, $h_1 = 0.8$, $h_2 = 0.7$, $h_2' = 0.4$
- 3) 理論解析は簡単な指数関数として求めることができ計算時間が数秒で完了する。

- 4) 三層緩衝構造体の場合、本解析モデルは緩衝材が上から砂層、コンクリート床版、EPS材の順で設置されかつ緩衝効果が十分期待できる実験結果に関して概ね近似することができた。
- 5) 敷砂緩衝材（敷砂厚 90cm）の場合において、本解析モデルは実験結果を概ね近似することができた。
- 6) 三層緩衝構造体や敷砂緩衝材における効果について、本解析結果は実測情報を概ね表現できる一つの簡略方法を考えた。

今後は、レオロジーモデルに対してより明確な役割分担を含め、エネルギー的観点から理論的にアプローチする予定である。なお、本研究に当っては私学振興財団の補助を受けて行ったこと並びに北海道開発局開発土木研究所の資料を提供してもらったことに対してここに感謝の意を述べる次第であります。

参考文献

- 1) 吉田博, 松葉美晴, 法貴貫志郎: 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, 1991.3.
- 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.
- 3) 中野修, 岸徳光, 菅田紀之, 三上隆: 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.
- 4) 土木学会: 構造物の衝撃挙動と設計法, pp.192～195, 1994.
- 5) 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, 1993.3.
- 6) 佐藤昌志, 岸徳光, 松岡健一: 三層緩衝構造の伝達衝撃力算定式の定式化, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.1337～1346, 1993.3.
- 7) 園田恵一郎: 落石覆工の設計法についての一提案, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.1563～1572, 1993.3.
- 8) 吉田博, 榎谷浩, 今井和昭: 個別要素法による敷砂上への落石の衝撃特性に関する解析, 土木学会論文集, 第392号/I-9, pp.297～306, 1988.
- 9) 園田佳巨, 佐藤紘志, 石川信隆: 個別要素法によるサンドクッションの衝撃応答特性に関する解析, 土木学会論文集, 第483号/I-26, pp.51～60, 1994.
- 10) 中野修, 岸徳光, 菅田紀之, 三上隆, 安藤智啓: 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, 土木学会構造工学委員会衝撃問題研究委員会, pp.13～16, 1993.
- 11) 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.
- 12) Kolsky, H: Stress Waves in Solids, DOVER, pp.115～116, 1963.
- 13) 三上敬司, 金子孝吉: 落石覆工上の緩衝材の緩衝特性に関する評価, 専修大学北海道短期大学環境科学研究所報告, 第3号, pp.69～79, 1995.

(1998年9月26日受付)