

## 敷砂上の落石の衝突現象に関する考察

### A CONSIDERATION ON IMPACT PHENOMENON BY FALLING ROCK TO SAND LAYER

古賀 泰之\*・佐々木 康\*\*

By Yasuyuki KOGA and Yasushi SASAKI

The impact phenomenon of a falling rock to sand layer was examined and compared with experimental results. Five model weights with different weight, size and bottom shape were used in the experiments. The equation of motion of the weight was expressed by a free vibration of a mass with viscous damping. The viscous term was determined so that the calculated impact acceleration of flat bottom weights coincides with experimentally obtained value. The restoring force was assumed to be given by a plastic bearing capacity theory of a shallow circular foundation. The calculated acceleration time history and maximum penetration of the weights showed a good agreement with measured values in the experiments.

#### 1. まえがき

道路沿いの斜面上方からの落石による被害を防ぐための1つの対策工法として落石覆工が用いられ、これに作用する衝撃力の緩和と分散を図るために覆工の上部床版上に砂等を敷くことが行われている。この敷砂層を介して作用する落石による衝撃荷重の算定のために、従来からいくつかの理論式・実験式が提案されている。著者らも別報<sup>1)~3)</sup>において、重錘落下実験よりみた個々の重錘条件下の最大衝撃力の実験的特性に重点をおいて述べた。

本論文では、種々の重錘条件下での衝撃力の一般的特性を明らかにする第一歩として、別報に述べた実験結果に対して、まず実測された実験値相互の関係を統一的に説明できるように重錘落下による衝突現象のモデルを組み立てることを試みた。その結果として、落石の落下衝突現象は、従来多用されていた土木学会編「土木技術者のための振動便覧」の式のように単なる2物体の弾性体衝突現象としてではなく、衝突に伴って地盤に生ずる波動の逸散等に伴う減衰効果および衝撃载荷に伴う地盤の塑性破壊を考慮することにより、実験に用いた各重錘の

衝突現象の相互の関係が、衝撃加速度の最大値のみならず時間的变化を含めて良好に把握できることが見出された。

#### 2. 落石の衝撃力に関する従来の理論的研究

落石衝撃力を理論的に求める方法として第1に提案されたものは、土木学会「土木技術者のための振動便覧」<sup>4)</sup>に示された式(以下振動便覧式と略称)である。これは、2つの弾性球の衝突に Hertz の接触変形理論に基づいて、落石を重量  $W$  の剛体球、土層を半無限弾性体として、自由落下高  $H$  に相当する衝突時の解から衝撃力  $P$  を求めるものであり、 $P$  に  $W$ 、 $H$  のみならず土層の変形性が影響することを示している。山口ら<sup>5)</sup>は、砲丸を用いた実験結果の解析において、土層を半無限長の1次元棒として、その一端に球体が衝突したときの縦波動理論を用い、衝撃力と貫入変位の時間変化を算定し、実測した衝撃力の波形との対応がよいことを示している。これを少し簡単にした平底物体の衝突を対象とした同種の理論解は古典的な成書<sup>6)</sup>にも述べられている。さらに、Scott ら<sup>7)</sup>は、Lysmer らによる半無限弾性体上の剛性円形基礎の加振問題に対する解<sup>8)</sup>に準じて、地表面に重錘を落下させる動圧密工法を対象に、重錘衝撃力を解析的に取り扱っている。

\* 正会員 建設省土木研究所機械施工部動土質研究室長  
(〒305 茨城県筑波郡豊里町旭1)

\*\* 正会員 建設省土木研究所地震防災部振動研究室長(同上)

これらの解の相互の関係を数式を用いて表わせれば次のようである。簡便のために、重錘の形状は円柱平底とする。振動便覧式に用いられている2弾性体衝突問題としての考え方を円柱平底の重錘について適用すると、衝突重錘の運動は次式で表わされる<sup>2)</sup>。

$$\frac{W}{g} \frac{d^2u}{dt^2} + Ku = 0 \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $u$ ：重錘の貫入量、 $W$ ：重錘の重量、 $K$ ：重錘の底面における荷重～貫入関係に対するばね係数で、半無限弾性体上の半径  $R$  の円形剛体載荷に対しては  $K = 4GR/(1-\nu)$ 、( $G, \nu$ ：弾性体のせん断弾性係数、およびポアソン比)となる。

衝撃を受ける地盤を1次元弾性棒として取り扱う山口らの考え方によれば、重錘の運動方程式は次のとおりである。

$$\frac{W}{g} \frac{d^2u}{dt^2} + C \frac{du}{dt} = 0 \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 $C$ ：粘性減衰係数で、 $C = \rho C_R$ 、 $\rho$ ：地盤密度、 $C_R$ ：棒中の圧縮波速度

次に Lysmer らによる半無限弾性体上で鉛直加振力を受ける円形基礎にならった Scott らによる重錘の運動方程式は次式で与えられる。

$$\frac{W}{g} \frac{d^2u}{dt^2} + C \frac{du}{dt} + Ku = 0 \dots\dots\dots(3 \cdot a)$$

ここに、

$$C = \frac{3.4}{1-\nu} R^2 \sqrt{G\rho}, K = \frac{4GR}{1-\nu} \dots\dots\dots(3 \cdot b)$$

以上のように、衝突現象の考え方により式(1)、(2)、(3・a)のように異なった運動方程式を得る。中でも、式(3・a)は式(1)、(2)を含む一般的な式とみなすことができる。

一方、吉田ら<sup>9)</sup>は、測定加速度波形を三角形、2次曲線、3次曲線で仮定するとともに、重錘が静止するまでの時間  $T_0$  と重錘重量  $W$  との実験的關係を用いて、最大衝撃加速度および衝撃力を求める算定式を導いている。これは、重錘の衝突時から静止に至るまでの運動量変化をその間の加速度変化をもとにした力積の総和に等しいとおくものであり、静止時間と最大衝撃力の間の密接な関係を反映したのものとなっている。

以上に述べた理論的な研

究の中で、山口らは小規模な実験ながらも実測値との対比を行っている。また、吉田らの式の考察は、実測された重錘の加速度波形に基づいたものになっている。






### 3. 落石の衝突現象の実験的性状<sup>1)~3)</sup>

著者らが実施した落石の衝突現象に関する実験によれば、別報<sup>1)~3)</sup>に報告したように衝撃加速度等に関して以下のような知見が得られている。この実験は、表-1に示すような、落石を模して寸法・形状・重量を変えた5種の重錘を山砂を踏み固めて作った土層の上に自由落下させて行ったものである。実験条件として、重錘種類のほか、重錘落下高、敷砂層厚・密度・支持条件を変えた。実験から得られた知見のうち、本論文で考察する内容に関連する事項のみを述べる。

#### a) 測定加速度波形のパターン

測定した重錘の加速度波形の性状は、一般に短い立上り部分と1つの高いピーク後の減衰部分からなる。これ

表-1 重錘諸元表

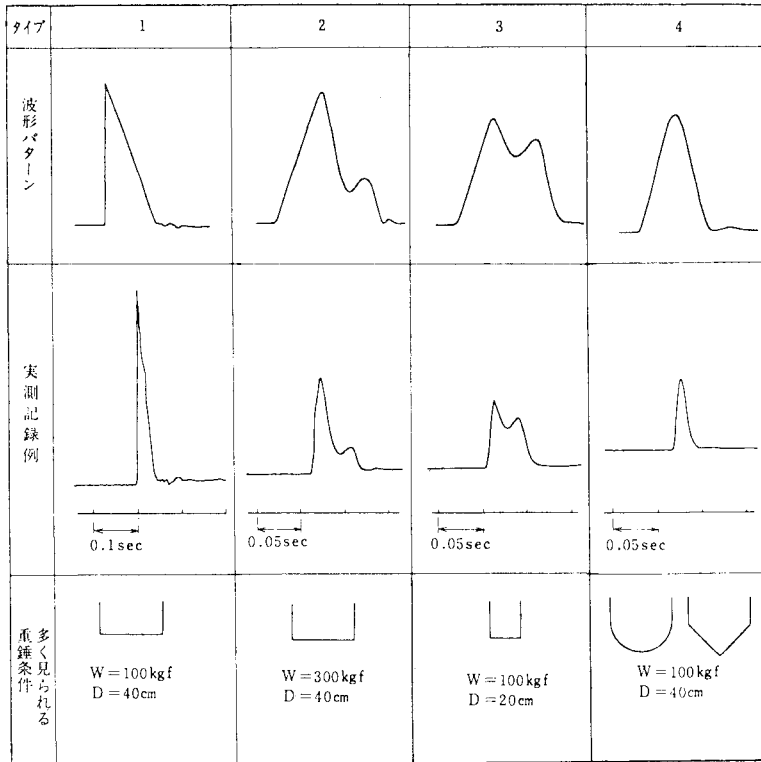
略称重量 $W$ (kgf)	実重量 $W_0$ (kgf)	底面形状	直径 (cm)	備 考
100	94	平底	40	 鉄殻 コンクリート充填
300	284	平底	40	 鉄
100	91	平底	20	 鉄
100	99	球底	40	 鉄殻 コンクリート充填
100	91	錐底	40	 鉄殻 コンクリート充填

(1 kgf=9.8 N)

表-2 実験条件一覧

実験 予備	重錘タイプ			落下高 $H$ (m)	砂厚 $h$ (cm)	支持条件	砂層 製作方法	測定項目
	重量 $W$ (kgf)	形状(底)	直径 $D$ (cm)					
予備	100	円柱(平)	40	4~8	50	コンクリート床		衝撃加速度 表面貫入量
1	100	円柱(平)	40	2~8	30~90	コンクリート床	20 cm ごと 足踏み	衝撃加速度 表面貫入量
	300	"	"	"	30~110			
	100	"	20	"	30~70			
	"	円柱(球)	40	"	30~50			
2	100	円柱(平)	40	2~8	30~70	コンクリート床	10 cm ごと 足踏み	衝撃加速度 表面貫入量 砂層変形 砂層底面土圧
	"	円柱(球)	"	8	"			
	"	円柱(錐)	"	"	"			
3	100	円柱(平)	40	4~8	30~70	鋼床版	10 cm ごと 足踏み	衝撃加速度 表面貫入量 砂層変形 砂層底面土圧 床版・支承ひずみ
	"	"	"	"	"	コンクリート床版		

(1 kgf=9.8 N)



1kgf=9.8N

図一 実測加速度波形のパターン分類

は、さらに重錘の形状・寸法・重量等の条件や敷砂層厚・密度条件に依存して図一のような4パターンに分けることができる。図一には、これらの4パターンが多くみられた重錘条件を記した。これらの波形の分類は必ずしも明瞭に行にくい場合もある。パターン1は、立上り時間のごく微小なもので、ピークの後急激に減少するものである。パターン2は、パターン1よりも立上り時間が長く、ピーク後の減少過程において土槽底面(床)からの反射波による小さなピークがみられる。パターン3は、パターン2に類似しており、さらに第2のピークが著しいものである。さらに、パターン4は、立上り時間と減少時間とがほぼ同じであり、パターン2, 3にみられた第2のピークはみられない。

実用上重要なものは、上述した波形中の最大値である第1のピークであり、これを衝撃加速度  $\alpha_{max}$  と呼ぶ。

b) 重錘貫入による敷砂層変形のパターン

重錘貫入による敷砂層変形パターンは、重錘の形状にかかわらず、地盤破壊せん断面が地盤中および地表面とも明確に現われずに重錘直下の土層が圧縮されるパンチせん断のようにみられた。

c) 衝撃加速度に及ぼす重錘形状の影響

重錘の寸法・重量が一定の場合、平底・球底・錐底の

重錘の  $\alpha_{max}$  を比べると、一般に平底重錘が大きく、球底・錐底重錘は平底重錘より小さく、両者はほぼ同じである。

d) 衝撃加速度に及ぼす重錘重量・寸法(重錘直径)の影響

形状の中では上限の  $\alpha_{max}$  を与える平底重錘における重錘の重量  $W$ ・寸法(直径  $D$ )による  $\alpha_{max}$  への影響は、同一の  $D$  に対して  $W$  が大きいと  $\alpha_{max}$  は小さく、同一の  $W$  に対して  $D$  が小さいと  $\alpha_{max}$  は小さいといえる。

e) 衝撃加速度に及ぼす敷砂層厚の影響

敷砂層厚  $h$  が増加するにつれ  $\alpha_{max}$  は減少し、ほぼ一定値に近づく。

f) 衝撃加速度を与える実験式

平底の場合について、重錘重量  $W$ 、寸法(直径  $D$ )、落下高  $H$ 、敷砂層厚  $h$ 、単位体積重量  $\gamma_d$  を考慮して衝撃加速度  $\alpha_{max}$  を求める実験式は次のとおりである。

$$\alpha_{max} = 1.84 h^{-0.413} D^{1.19} \gamma_d^{0.64} W^{-0.372} H^{0.489} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、単位はそれぞれ、 $\alpha_{max}$ : G,  $W$ : tf,  $h, H, D$ : m,  $\gamma_d$ : tf/m<sup>3</sup> である。

4. 重錘落下による衝突現象の理論的考察

(1) 理論モデルと測定波形の考察

a) 考察モデルとその特性の試算

重錘落下に伴う衝突現象に関する既往の理論的モデルの運動方程式を表わす式(1), (2), (3)は、いずれも貫入に伴う反力を弾性ばね力とし、また、弾性波動逸散に伴う粘性減衰を想定するものである。ここでは、これらのモデルの適用性をおおよそ把握するために、これらのモデルにより得られる加速度波形について検討を試みる。さらに、貫入に伴う反力が剛体基礎の支持力理論に基づくような塑性ばね力<sup>2)</sup>と仮定する場合も検討する。この後者の場合にも、弾性体の場合と同じ弾性波動に基づく粘性減衰が作用するものとする。

結局ここで検討するモデルは、次のとおりである。

弾性ばね力を考えるモデル: 式(1)  $M-K$  モデルと呼ぶ。

弾性波動を考えるモデル: 式(2)  $M-C$  モデルと呼ぶ。

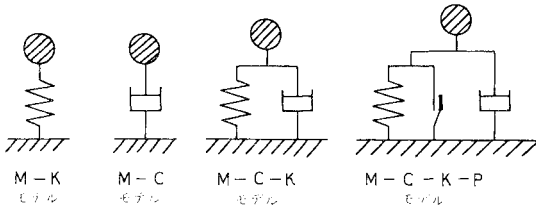


図-2 各力学モデル概念図

弾性ばね力と弾性波動を考慮するモデル：式 (3・a)  $M-C-K$  モデルと呼ぶ。

塑性ばね力と弾性波動を考慮するモデル：次式  $M-C-K-P$  モデルと呼ぶ。

$$M \frac{d^2 u}{dt^2} + C \frac{du}{dt} + K_p u + L = 0 \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $K_p$ ,  $L$  は、塑性ばねに基づく反力を表わす定数である。

これらのモデルは、図-2 のように概念的に示される。中でも、 $M-C-K-P$  モデルにおける定数  $K_p$ ,  $L$  は、円形剛基礎の根入効果を考慮した全般せん断破壊に対する支持力理論<sup>10)</sup>を用いれば、粘着力のない砂に対して、次式のように与えられる。

$$K_p = \gamma N_q \cdot \pi R^2, \quad L = 0.6 \gamma N_r \cdot \pi R^3 \dots\dots\dots (6 \cdot a)$$

ここに、 $\gamma$ ：地盤の単位体積重量、 $N_q$ ：土被り圧に関する支持力係数、 $N_r$ ：内部摩擦に関する支持力係数

実際の重錘の貫入性状は、前述したようにパンチせん断とみられるもので、この性状を考慮した考察・解析は今後の課題である。

$N_q$ ,  $N_r$  は、図-3 のように与えられ、通常の砂の内部摩擦角の範囲において、ほぼ同じ程度の値となるため、ここでは、 $N_q = N_r = N_b$  として、式 (6・a) を次のように書き換えて用いる。

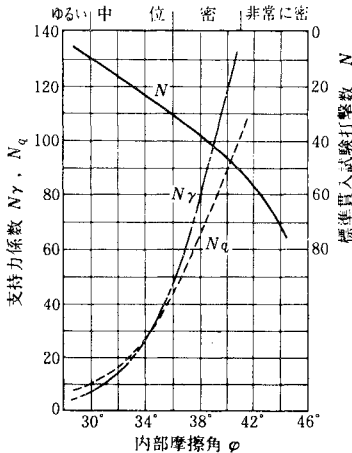
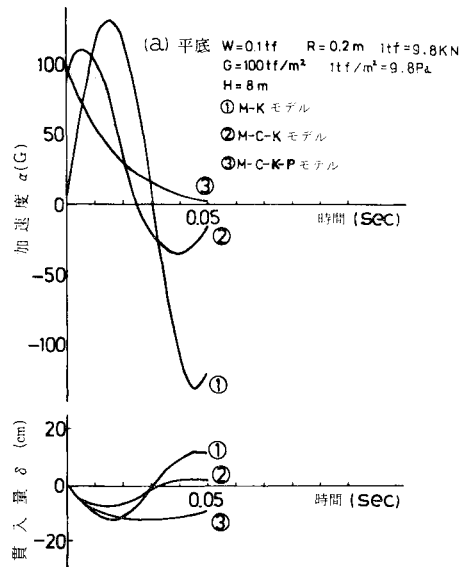


図-3 砂地盤の支持力係数および  $N$  値と内部摩擦角の関係

$$K_p = \gamma N_b \cdot \pi R^2, \quad L = 0.6 \gamma N_b \cdot \pi R^3 \dots\dots\dots (6 \cdot b)$$

このような種々のモデルに対する解の特性を調べるために、実験に用いた重錘を対象に、 $\gamma = 1.5 \text{ tf/m}^3$  ( $14.7 \text{ kN/m}^3$ ),  $G = 100 \text{ tf/m}^2$  ( $0.98 \text{ MPa}$ ),  $\nu = 0.25$ ,  $N_b = 40$  ( $\phi \approx 35^\circ$ ) の条件のもとに行った解析結果を示す。なお、これらの解析において、図-2 に示したモデルの各ばねおよび粘性抵抗は、圧縮および引張に対して可逆性と仮定している。図-4 は、3種の平底重錘について、前述したモデルのうち  $M-K$ ,  $M-C-K$ ,  $M-C-K-P$  モデルによる加速度の時間変化を示している。 $M-K$  モデルの場合には、重錘加速度に比例する衝撃力は重錘貫入量に一義的に比例したもので、時間とともに加速度および貫入量ともに同様に増加し振動的性状を示し、衝突の初期にきわめて短い立上りとその後に単調な減衰のみられる実測波形(図-1参照)とは一致しない。 $M-C-K$  モデルでは、粘性項の効果により  $M-K$  モデルとは振動的性状に位相のずれがみられ、重錘加速度は衝突初期にある大きさの零でない値となっているが、基本的には振動的な性状を示しており、実測波形とは一致しない。 $M-C-K$  モデルは、衝突直後のある大きさの零でない値から単調に減少するという基本性状は実測波形に近いものである。

$M-C-K-P$  モデル式 (3・a) と  $M-C-K-P$  モデル式 (5) に対する解の特性の差は、両モデルの固有角振動数  $p_1$ ,  $p_2$  および減衰定数  $h_1$ ,  $h_2$  の差に起因している。すなわち、 $M-C-K$  モデルにおいては、ばね係数  $K$  が大きいので、 $p_1$  が大きく、一定の  $C$  に対して  $h_1$  は小さい。ここで対象とした3種の重錘の場合に、それぞれ  $h_1 = 0.34, 0.20, 0.12$  で1より小さく、どの場合にも



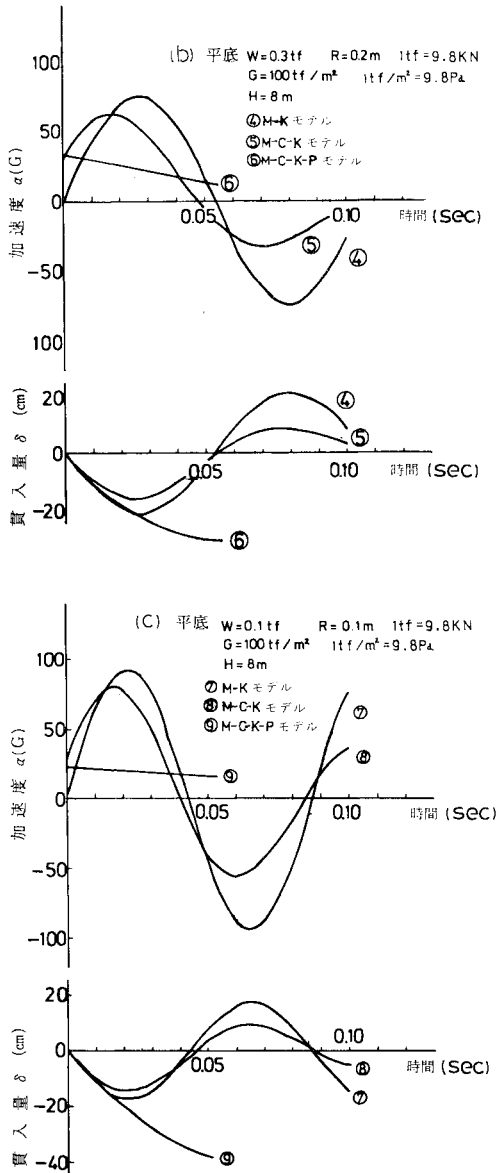


図-4 重錘加速度および貫入量の計算波形

振動的な性状が卓越する。M-C-K-P モデルにおいては、ばね係数  $K_p$  が小さいため、 $p_2$  が小さく、一定の  $C$  に対して  $h_2$  は大きい。  $W=0.1tf$  (0.98 kN),  $R=0.2$  m の場合には、 $h_2=1.28$  で 1 より大きく非振動的である。他の 2 ケースの場合には、 $h_2=0.74, 0.64$  で 1 より小さく基本的には振動的な性状であるが、 $p_2$  が小さく固有周期が長いためにこの描かれた時間の範囲内では振動的な性状がみられない。したがって、図-2 に記したモデルの中では M-C-K-P モデルが比較的良好なものとなり得る可能性があると考えた。ただし、図-4 (a) に示した  $W=0.1tf$  (0.98 kN),  $R=0.2$  m の場合に得

られた衝撃加速度および減衰性状とも実測された性状にかなり近いものである一方、図-4 (b), (c) に示された  $W=0.3tf$ , (2.94 kN),  $R=0.2$  m および  $W=0.1tf$  (0.98 kN),  $R=0.1$  m の場合には、現象は単調減少であるけれども、値および減衰性状は実測されたものにはほど遠いものである。

M-C-K-P モデルによる 3 種の平底重錘の間の相互の関係は、次のように考えられる。  $t=0$  において加速度が最大とすれば、平底重錘の最大加速度は、式 (5) を用いて、次式で与えられる。

$$\frac{|\ddot{u}_{max}|}{g} = \frac{|\ddot{u}_{t=0}|}{g} = \frac{C}{W} v_0 + \frac{L}{W} \dot{v}_0 \dots \dots \dots (7)$$

いま、 $C$  は、弾性波動による逸散を考慮すると、式 (3・b) により与えられる。したがって、一定の地盤剛性  $G$  を仮定するとき重錘の重量・寸法による最大加速度の変化は  $R^2/W$  で規定されることになり、3 種の平底重錘については、4 : 1.3 : 1 となる。しかるに、実験的に得られた一例として、 $H=8$  m,  $h=50$  cm のときに、実測によるこの比は 1.6 : 1 : 1 程度であり、弾性波動による粘性減衰を考える限り、3 種の平底重錘の相互の関係は説明できない。

b) 平底重錘の衝撃加速度実測結果を用いたモデルの修正

上述したように、M-C-K-P モデルは、平底重錘の一部の実測衝撃加速度性状に近い特性をもつが、実測した 3 種の重錘相互の関係を統一的に説明するうではいまだ不十分なものである。これは本来、貫入による反力を塑性的なものとしながらも、粘性減衰項は弾性的とするという中途半端な修正法をとっている点にその原因があると考えられる。しかし、衝突が塑性的であるときの、波動逸散に伴う粘性減衰がどのような形をとるものかは、現時点では理論的には導き得ない。また、塑性変形時には地盤の内部減衰も無視し得ないであろう。したがって、平底の場合には、式 (12) で与えられる  $t=0$  での加速度が最大値であるものとして、平底 3 種の重錘の相互の関係が矛盾しないような特性を粘性減衰係数  $C$  がもつものとして検討を行う。

平底 3 種の重錘の最大衝撃加速度を与える実験式は、式 (4) によって与えられている。これを式 (7) と等置すると  $C$  について次式を得る。

$$C = 0.946 \cdot \gamma_d^{6.64} h^{-0.413} R^{1.19} W^{0.628} H^{-0.011}$$

このうち、 $H^{-0.011} \approx 1.0$  ゆえ上式は次式のように書ける。

$$C \approx 0.946 \cdot \gamma_d^{6.64} h^{-0.413} R^{1.19} W^{0.628} \dots \dots \dots (8)$$

これは、波動や内部減衰等に起因すると考えられる粘性減衰項の係数を平底重錘についての実験から定めたものである。

(2) 球底・錐底重錘への近似的拡張

以下では，上に実験的に定めた  $C$  と支持力理論より定めた  $K_p$  を用いた式 (5) を基本に考察をする。

先に述べたように，球底・錐底重錘では，貫入とともに接触面積，すなわち接触半径が変化する。したがって，式 (8)，(6・b) で与えられる諸定数は接触半径の関数として表わされているが，球底・錐底重錘に対しては，貫入時々刻々の半径を用いたこれらの変化する定数を用いて運動方程式 (5) を解くものとする。すなわち，式 (8)，(6・b) において，重錘の接触半径を表わす  $R$  を次のように与える。

$$\text{球底の場合， } R = \sqrt{2R_0 u - u^2}$$

$$\text{錐底の場合， } R = u \tan \alpha$$

ここに， $R_0$ ：球底面の曲率半径， $2\alpha$ ：錐底の頂角である。これは，球底・錐底の重錘の貫入機構を近似的に扱ったものである。

### (3) 実験条件への適用

前述した定数を用いて実験重錘条件に対する加速度および貫入量の時間変化を線形加速度法により求めた。計算条件は， $\gamma = 1.5 \text{ tf/m}^3$  ( $14.7 \text{ kN/m}^3$ )， $N_b = 40$  ( $\phi \doteq 35^\circ$ )，

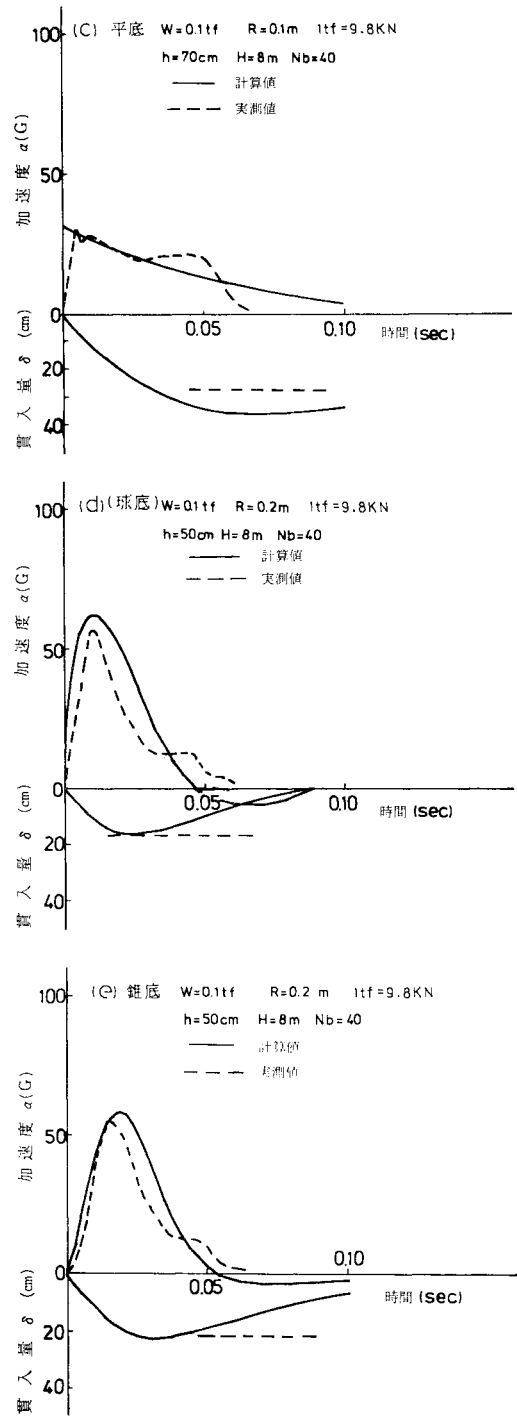
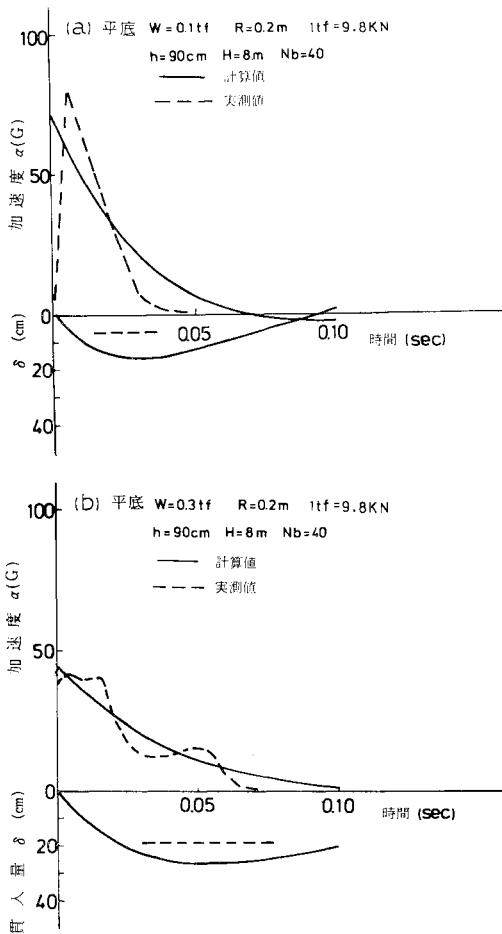


図-5 計算および実測による加速度および貫入量の波形 (実測貫入量は最終値のみ)

$h = 30, 50, 70, 90, 110 \text{ cm}$  である。

図-5 は，各重錘条件について 1 例ずつ計算による加速度と貫入量の時間変化および実測による加速度の時間

変化と最終貫入量を示したものである。計算においては、前述したように、ばね項および粘性減衰項を貫入量に対して可逆性としているので、実現象との対応からいえば貫入量が最大となる時点までの結果を妥当とすべきであろう。特に貫入量は塑性的成分が卓越すると思われるので、計算上得られる最大値と、実測した最終貫入量（図中では時間に関係なく時間軸に平行な破線として表わした）とを比較すべきである。

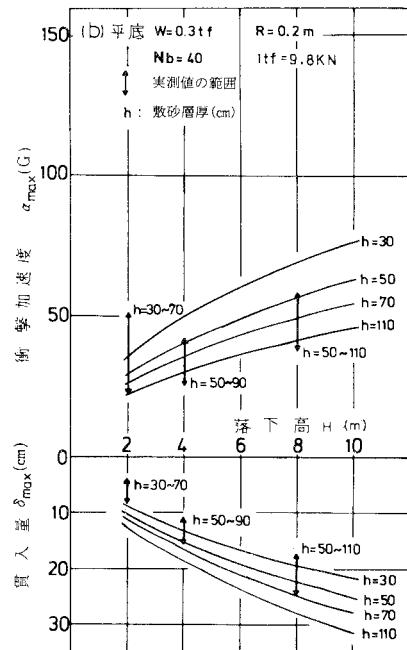
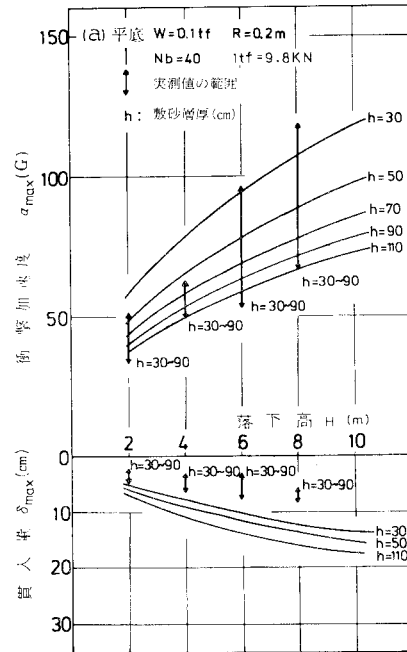
図—5により、衝撃加速度波形はどの重錘の場合もかなりよく合っているとみなせる。細かくみると、平底重錘の場合には、実測では短いながらも有限の立上り時間でピークとなっており、特に  $W=300\text{ kgf}$  ( $2.94\text{ kN}$ )、 $D=20\text{ cm}$  の場合にはこの立上り時間がやや長くなっていることがみられる一方、計算では立上り時間ゼロでピークに達し、その後単調に減少している。これは、重錘の若干の傾きや地盤表面の若干の凹凸のために解析において理想化したように瞬間に全面接触する状態にはないことがその原因と考えられる。また、実測値においては、減少過程において再びピーク値がみられることがあるが、これは、土槽底面からの反射波によるものであり、このような現象は解析モデルでは考慮していないので解析結果には現われない。なお、支持力理論から求めた  $K_p$  についてその値を変えると、ピーク後の減衰時間やピークの値が変化する。したがって、剛基礎の支持力理論を用いて設定した  $K_p$  の値がおおよそ妥当であったことを示している。

また、図—6に各重錘について、落下高と衝撃加速度および貫入量の関係を示した。これらの図における計算条件は上と同一であり、実測値は各落下高におけるすべての  $h$  に対する範囲として示している ( $h$  の範囲は図中)。貫入量は計算値の最大値としている。

図—6における衝撃加速度の値と落下高の関係については次のようにいえる。まず、平底重錘については、実測値に合うように粘性減衰の値を決めたから、実測値と計算値とがよく合うのは当然である。球底・錐底重錘の場合の計算値の特徴は、敷砂層厚の大小にほとんど依存しないことである。計算衝撃加速度は、平底重錘の場合には、重錘の貫入の生じない時間  $t=0$  のときにも抵抗力として作用する粘性減衰項に支配される。一方、球底・錐底重錘の場合には、貫入初期には、接触面積が小さいために、平底重錘の場合に支配的であった粘性減衰項の効果は小さく、むしろ貫入とともに抵抗が大きくなるばね反力項の影響が大きくなる。

そして、上述の計算モデルでは、粘性減衰係数には実測結果を反映して敷砂層厚の影響が入っている一方、ばね反力項は支持力理論によっているため、敷砂層厚の影響は入っていない。したがって、球底・錐底重錘の場合

には、計算された衝撃加速度は敷砂層厚の影響をほとんど受けないものとなり、この場合には実測された下限値に近い値を与えている。上述のモデルでは支持力理論により変形の塑性成分のみを考慮していることになるが、荷重の小さい段階で生ずる弾性的変形成分を考慮する



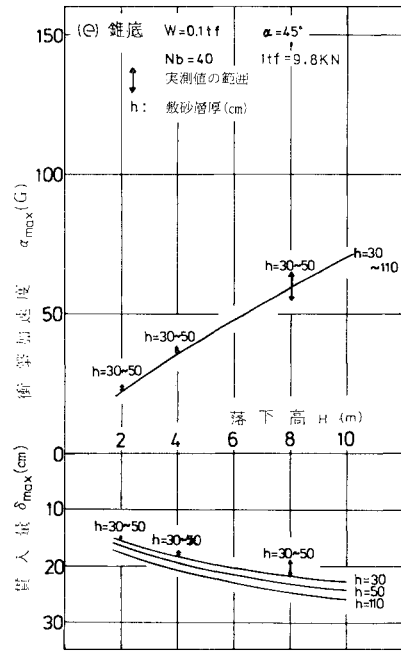
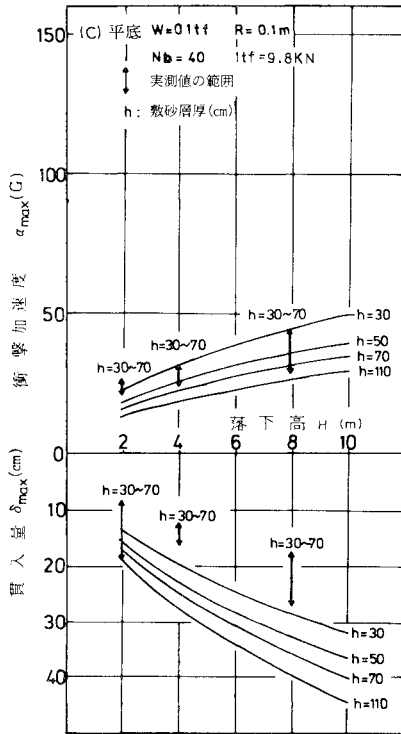
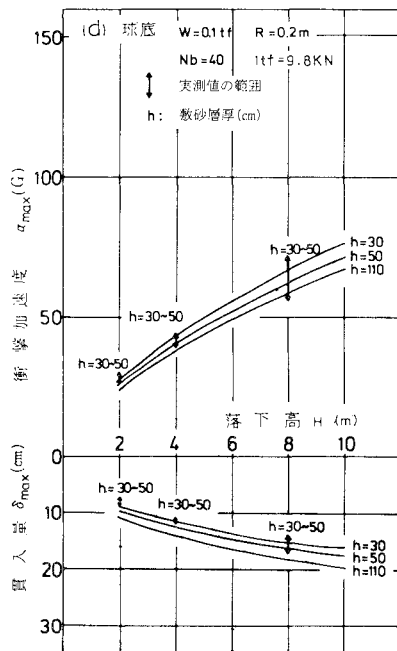


図-6 計算および実測による衝撃加速度および貫入量と落下高の関係



と、荷重～変形関係は、敷砂層厚の影響を受けるため、結果として衝撃加速度が敷砂層厚に依存するような解を得ることは可能であると考えられる。

しかし、貫入量については、平底重錘の場合、一致の程度は必ずしも良好とはいえない。この場合、計算値が一般に実測値よりも大き目で、特に落下高の大きいところで、計算値が実測値より 50～100% も大きい場合がある。これに比べて、球底・錐底重錘の場合は、計算値は実測値よりもやや大きめではあるが、かなりよい一致度を示している。論理的には、平底重錘の場合の衝撃加速度が比較的合うように粘性減衰係数を定めて、その結果を単純な仮定のもとに、球底・錐底重錘の場合に適用したものであるから、球底・錐底重錘の場合に合致度がよいからこれでよいということには必ずしもならないが、現時点では、ここに組み立てたモデルは、平底重錘および球底・錐底重錘の間の関係を第 1 近似として良好に表わしたものと考える。

(4) 理論的考察のまとめ

ここでは、重錘落下による衝突現象について、従来提案されているいくつかのモデルにより、加速度波形を算定し、測定された波形と比較することにより、妥当性のありそうなモデルとして、波動逸散に伴う粘性減衰を考慮したモデルを選択した。さらに、寸法・重量の異なる平底重錘の測定結果の相互関係に矛盾しないように粘性



減衰係数を実験的に定めると同時に、重錘の貫入を剛基礎の支持力理論に基づく塑性的なものとした修正モデルを提案した。これを球底・錐底重錘の場合にまで拡張したモデルにより加速度および貫入性状を算定した結果、時間変化および最大値とも実測されたものに比較的良好な適合する結果を得た。すなわち、本研究において提案した修正モデルは、衝撃加速度の大きさおよび時間変化に及ぼす重錘形状・重錘寸法・重錘落下高の影響を合理的に取り入れたものとなっている。

今後の課題としては、重錘の貫入機構にパンチングせん断としての特性を考慮した定式化を図ること、粘性減衰項・ばね力項を地盤の基本的な力学的性質と関連づけること、本モデルの考え方の他の実験結果への適用性を検討すること等が挙げられる。

#### 参 考 文 献

- 1) 佐々木康・古賀泰之：敷砂上の落石の衝撃力に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第340号，pp.127～137，1983.
- 2) 佐々木康・古賀泰之，ほか：敷砂上の落石の衝撃力に関する実験報告書，土木研究所資料，1822号，1982.
- 3) 佐々木康・古賀泰之，ほか：敷砂上の落石の衝撃力に関する実験，土木技術資料，24-7，pp.8～14，1982.
- 4) 土木学会：土木技術者のための振動便覧，pp.320～324，1966.
- 5) 山口柏樹，ほか：落体衝撃力に対する地盤応答，第8回土質工学研究発表会，pp.589～592，1973.
- 6) Timoshenko, S. and Goodier, J.N. : Theory of Elasticity, McGraw-Hill, pp.383～384, 1951.
- 7) Scott, R. A. and Pearce, R. W. : Soil Compaction by Impact, Geotechnique, Vol.25, No.1, pp.19～30, 1975.
- 8) Lysmer, J. and Richart, F. E. : Dynamic Response of Footings to Vertical Loading, Jour. of SM, Proc. ASCE, SM 1, pp.65～91, 1966.
- 9) 吉田 博，ほか：ロックシェード上の落石による衝撃力の推定法に関する研究，道路，pp.38～43，1978-2.
- 10) たとえば，赤井浩一：土質力学，朝倉書店，pp.193～224，1966.

(1983.2.7・受付)