

敷砂上の落石の衝撃力に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON IMPACT LOAD TO SAND
LAYER BY FALLING ROCK

佐々木 康*・古賀 泰之**

By Yasushi SASAKI and Yasuyuki KOGA

1. ま え が き

道路沿いの斜面上方からの落石から道路交通を防護する一つの対策工法として落石覆工が用いられる¹⁾。これは、予想される落石の規模が大きく、他の工法のみでは道路への影響が避けられない場合に用いられる構造物である。一般に、落石覆工に作用する衝撃力の緩和と作用荷重の分散を図るために、落石覆工の床版上には緩衝材としての砂等を敷くことが行われている。覆工の部材の設計のためには、この敷砂の重量を死荷重の一部として考慮するとともに、敷砂を介して作用する落石による衝撃荷重を算定することが必要である。敷砂上への落石の衝撃力を算定するために提案された理論式、実験式がいくつかあるが^{2)~5)}、理論上の仮定や実験条件と現実とあり得るさまざまな条件とに差異があることや、算定式に用いる定数を決定する方法が明確でないこと等のために、算定式の選択に迷う場合がある。著者らは、このような背景のもとに、いくつかの単純化された条件において敷砂上への落石の衝撃力がどのように変化するかを室内土槽において重錘を自由落下させる方法により実験的に調べた^{6)~7)}。その結果として、落石覆工の設計に用いる落石の衝撃力に対する影響因子の抽出と、それらのいくつかを考慮した実験式の誘導、測定された衝撃力と既往算定式による算定結果との比較考察等を行ったので、ここに報告する。

2. 従来の研究

このような土層上への落石による衝撃力に対して、直接または間接的に関連した従来の研究として以下のよう

なものがある^{6)~7)}。

まず、落石衝撃力の推定を目的としたかなり大規模な実験が、鋼材クラブ³⁾、吉田ら⁴⁾、北海道開発局土木試験所⁵⁾によって行われている。用いられた重錘は0.1~3tfの重量で、底面形状は半球、部分球面、長方形平面とさまざまである。また、土層の材料は、各種の砂、礫や粘土混じり土、砂質粘性土であり、層厚は0.3~2mの範囲である。さらに、その土層は各種の形鋼や版、実際の覆工の上に支持されている。これらの実験結果は、一般に衝撃力 P を重錘重量 W 、落下高 H 、敷砂層厚 h 等の因子を用いて次式の形で表わされている。

$$P = aW^b H^c h^d \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 a, b, c, d は実験から求める定数。山口らは、重さ約7.3kgfの砲丸を用いた小規模な実験を行っている⁹⁾。

次に、落石衝撃力を理論的に求める方法として提示されているものに、「土木技術者のための振動便覧²⁾」に示された式（以下振動便覧式と略称）がある。これは、2つの弾性球の衝突に Herz の接触変形理論を用いて、落石を剛体球、土層を半無限弾性体とした衝突時の解から衝撃力 P を求めるものであり、 P には 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。すなわち、衝撃力 P は球体の比重が2.6のとき

$$P = 2.455 \lambda^{2/5} W^{2/3} H^{3/5} \dots\dots\dots (2)$$

と表わされる。ここに、 λ : 半無限弾性体のラーメの定数であり、非常に軟らかいもの=100tf/m² (0.98kPa)、軟らかいもの=300~500tf/m² (2.94~4.9kPa)、固いもの=1000tf/m² (9.8kPa) の値を用いることが提案されている。

山口ら⁹⁾は、前述の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する理論式を示している。最大衝撃力は式(2)のように W, H の解析的関数としては表わされず時間変

* 正会員 建設省土木研究所機械施工部動土質研究室室長

** 正会員 建設省建築研究所国際地震工学部第二耐震工学室室長

化を解析的に求めるようになっている。

Scott ら¹⁾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¹⁰⁾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、重錘衝撃力等を解析的に取り扱っている。

吉田らは、実測した衝撃力を式(1)の形で実験式として表わすりと同時に、測定加速度波形を三角形、2次曲線、3次曲線で仮定し、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、最大衝撃力を求める算定式を導いている⁹⁾。結果は、彼らが用いた3種の砂について多少異なった係数を用いるようになっていたが、たとえば、山砂の場合、衝撃力 P は次式で表わされる。

$$P = \frac{W}{g} \cdot \frac{2}{T_0} \sqrt{2gH} \text{ (tf)}$$

$$T_0 = 0.0220 W + 0.0485 \text{ (s, } W : \text{tf)}$$

.....(3)

上述してきた実験・理論的研究の多くにおいては、落石による衝撃力を求めることを第一義としているが、さらに、吉田らや土木試験所、山口らの実験においては、砂層内の土圧の伝播および分布性状をも測定している。また、山口らは、表面衝撃力により砂層に励起される慣性力を考慮した土圧分布を理論的に求めている。鋼材クラブの実験では、表面衝撃力が砂層内で45°に分布するとして、砂層を支えるはりに作用する荷重を求めはりのたわみを計算するとよく一致することが示されている。

以上に従来の研究を概観したところによると、比較的大規模な実験を行ったものにおいては吉田らの研究以外に理論的な考察を行ったものはなく、また逆に、理論的研究においては実験値との照合は行われていないのが現状である。また、重錘の衝撃荷重に対応する土圧分散についてもまだ研究は十分とはいえない。

3. 落石衝撃力に関する実験^{6),7)}

(1) 実験目的

以下に報告する敷砂層上への落石の衝撃力に関する実験は、現実の岩石の代わりに人工的に製作した重錘を所定の高さから自由落下させるものであり、その目的は次のとおりである。

a) 敷砂層上への落石の衝撃力に及ぼす落石重量・形状・寸法、落下高、敷砂層厚等の諸因子の影響度を実験的に調べ、既往の実測値や理論式の意義づけを行うこと。

b) 落石の衝撃力の下部への伝播・緩和機構を敷砂層の変形や土圧分布観測により検討し、a)の結果と合

せて落石衝撃力緩和のための敷砂層厚の合理的算定法を立てること。

(2) 実験方法および実験条件

a) 土槽および重錘

十分な厚さ(1.5m)をもつコンクリート床上に設けた2.4m(幅)×2.4m(奥行)×1.8m(高さ)の鋼製枠(底版はなし)からなる土槽の中に砂層を作り、この上方から、重錘を自由落下させた。

落石を模した重錘として表-1に示した5種を用いた。すなわち、略称で重量 W は100, 300 kgf (0.98, 2.94 kN)、底面形状は、円柱平底、円柱半球底、円柱錐底であり、寸法は円柱部の直径で20 cm, 40 cmである。

これらの重錘を実験棟の天井走行クレーンのフックに吊金具を介して敷砂の真上の所定の高さに静止させ、ひもで吊金具を操作することにより重錘を落下させた。






b) 敷砂層材料および床版

敷砂層に用いた材料は、表-2に示す特性を有する山砂である。また、一部の実験においては、現実の落石覆工に近い条件として、砂層が完全に剛でなく多少たわみ性のある床版上に敷かれた場合についても実験を行った。用いた床版は、コンクリート製、鋼製であり、寸法はそれぞれ2.4m×2.4mおよび2.2m×2.2mである。

c) 敷砂層の製作方法

敷砂層は、含水比10%程度の湿潤砂をベルトコンベアで土槽中に投入して10~20cmごとに足踏みで締め固めて製作した。1回の重錘落下に対して、影響があったと思われる範囲より広い範囲をほぐし再び締め固めた。

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 砂の特性

| 比重 G_s | 10%粒径 D_{10} (mm) | 60%粒径 D_{60} (mm) | 均等係数 U_c | 曲率係数 U_c | 最大乾燥密度 γ_{dmax} (g/cm ³) |
|-------------|------------------------|------------------------|---------------|---------------|--|
| 2.71 | 0.18 | 0.40 | 2.22 | 0.035 | 1.65 |

表-3 実験条件一覧

| 実験 ノ メ ー タ | 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 | | | |
| " | " | 円柱(錐) | " | " | " | | | |
| 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)

d) 実験条件

実施した実験条件を、表-3 に示す。

i) 予備実験：敷砂層は毎回一定の製作法をとるようにしたが、そのような方法をとったときに実験結果にどの程度の再現性があるかを明らかにする実験。

ii) 実験 1：敷砂層をコンクリート床上に直接作った場合に、重錘の落下衝撃が重錘の寸法・形状・重量とともにどのように異なるかを調べる実験。

iii) 実験 2：敷砂層をコンクリート床上に直接作った場合に、重錘の落下に伴う砂層の変形状および砂層底面での土圧分散性状を調べる実験。

iv) 実験 3：敷砂層をたわみ性の床版上に作った場合に、重錘の落下衝撃が ii), iii) の場合とどのように異なるか、また、土圧分散性状および床版の変形状を調べる実験。

e) 測定項目・方法

各実験において測定した共通項目は、重錘の加速度（鉛直加速度、一部を除いては 2 水平成分も加えて計 3 成分）および敷砂層の表面沈下（重錘の貫入量）である。その他に、実験 2・3 では、敷砂層の層別変形および敷砂層底部での土圧を、さらに実験 3 では床版および支承のひずみを測定した。

上述の加速度 3 成分測定は、重錘落下時の傾きによる影響も含めた合成加速度を測定しようとしたものであるが、合成加速度と鉛直加速度は一般に大きな差がないので、ここでは一応鉛直方向の実測加速度を中心にした整理を行っている。

(3) 実験結果

実験結果のうち、主として重錘の落下衝撃力またはそれに等価な重錘の衝撃加速度および砂層内

での衝撃力の分散について述べる。

表-3 に示したように、一連の実験において重錘の重量・形状・寸法・落下高、敷砂層厚、敷砂層密度、敷砂層支持条件を変えて実験を行った。それぞれの条件がどのように重錘の衝撃加速度および荷重分散に影響を与えるかを述べる。以下の記述においては、重錘をよぶとき実重量ではなく略称重量による。また、重錘の衝撃力は、重錘の衝撃加速度に重錘質量を乗じて求められるので、実験結果を衝撃加速度を用いて説明する。

a) 測定波形およびその整理法

測定した重錘の加速度記録は、一般に短い立上り部分と一つの高いピークの後の単調減衰部分とからなり、振動的な性状は一般には少ない。しかし、実験ごとに細かくみてゆくと波形のパターンはいくつかのものがああり、それらは重錘条件および敷砂層厚と密度の影響を受けているようである。図-1 は、これらのいくつかのパターンを 4 つに分類してみたものである。パターン 1 は、立上り時間のごく微小なもので、ピークに達した後急激に減少する。測定加速度がゼロに戻った頃に多少振動的な性状がみられるが一般に小さい。このパターンは、重錘の形状が円柱平底で直径 40 cm、W=100 kgf (0.98 kN) のときに生じた。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再度小さなピークがみられる。これは、土槽底面（床）からの反射

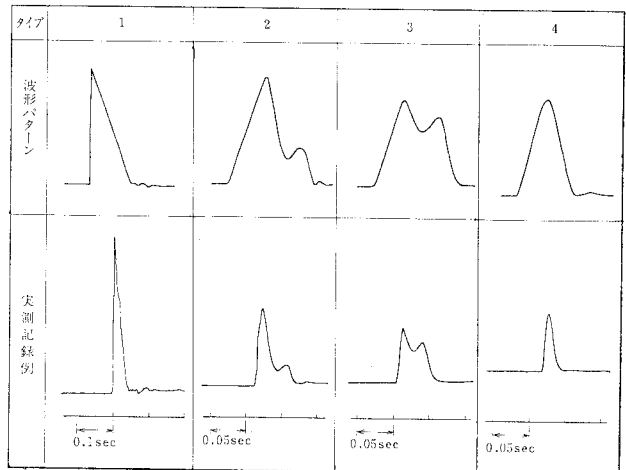


図-1 実測加速度波形のパターン分類

波によるものと思われる。このパターンは、円柱平底で直径 40 cm, $W=300$ kgf (2.94 kN), または、球底のときにみられた。球底の場合には立上り時間が長く、減少時間よりやや短い程度である。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り、これは、平底で直径 20 cm, $W=100$ kgf (0.98 kN) のときにみられた。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。このパターンは錐底の場合にみられた。

以上の波形の分類は、必ずしも明瞭に区分できない場合もあり、たとえば、平底で $W=300$ kgf (2.94 kN) の場合の一部はパターン 3 に含まれるものもあり、また、球底の一部はパターン 4 に含まれるものもあった。全体として、これらのパターンの違いは、重錘の形状・寸法に伴う敷砂層への貫入特性の違い、砂層中の応力波の伝播速度と層厚の関係等の動力的特性を反映したものと考えられる。

以下の実験結果の整理では、上述した波形の第 1 のピークについて読み取って最大値を求めた。これを以下では衝撃加速度とよび α_{max} と表わす。また、重錘の砂層への貫入量を δ_{max} と表わす。なお、 δ_{max} は重錘底面の中心部の貫入痕跡を測定して求めた。

b) 実験結果の再現性

実験結果の再現性は、予備実験において 3.(2), c) のような方法で製作した砂層上に同一の重錘を、一定の高さから一定の方法で落下させたときの衝撃加速度 α_{max} および貫入量 δ_{max} がどの程度の範囲にあるかによって検討した。また、落下時の重錘の傾きも目視によって観察した。

実験方法は表-3 に示したように、直径 40 cm, 略称重量 100 kgf (0.98 kN) の円柱平底の重錘を、敷砂層厚 50 cm の砂層上に高さ $H=4, 8$ m からそれぞれ 10 回ずつ落下させたものである。砂層は重錘を 1 回落下させるごとに重錘の落下中心付近の上部 30 cm 程度を土槽外に搬出し再度足踏みによる整地を行い製作したものである。まず、落下時の重錘の傾きは定量的に測定されたものではないが、かなり傾いて落下する場合もあった。この傾きが大きい場合には、鉛直加速度も他の場合と比べて小さく、測定結果は参考値にとどめた。

実測した α_{max} および δ_{max} は、図-2 のようであり、できるだけ一様に製作した砂層においても、この程度のばらつきがある。このばらつきを、変動係数で評価

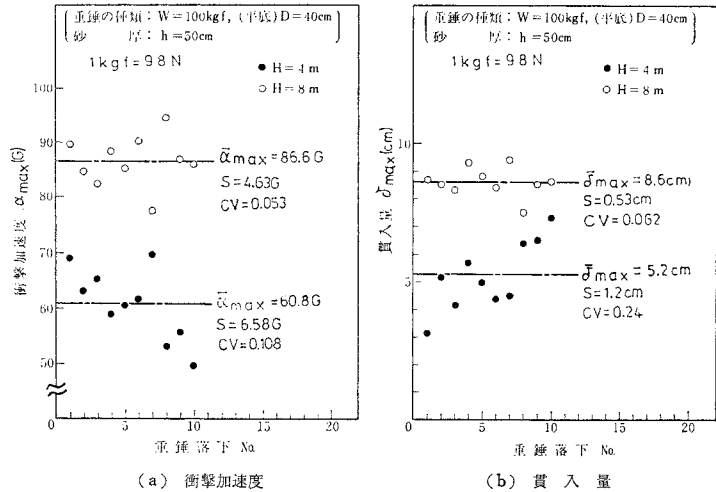


図-2 予備実験の衝撃加速度および貫入量のばらつき

すると、落下高 $H=8$ m のとき、 α_{max} について 0.053, δ_{max} について 0.062, $H=4$ m のとき、 α_{max} について 0.11, δ_{max} について 0.24 であり、 H が大きくなるとばらつきは小さくなる。

したがって、以後に述べる諸条件での実験においても、個々の実測値は実験ごとに砂層製作上のばらつきの影響をある程度反映したものとなっており、実測値にはある幅があるものとするのがよい。

また、図-3 のように、 α_{max} と δ_{max} とを比較すると、両者の間には、図中に破線で示したような相互に反比例的な関係があり、 δ_{max} が大きいと、 α_{max} は小さく、 δ_{max} が小さいときは、 α_{max} が大きいことがみられる。これは、落下重錘が有していたエネルギーが、地盤の変形によって消費される場合に、地盤が硬いと最大

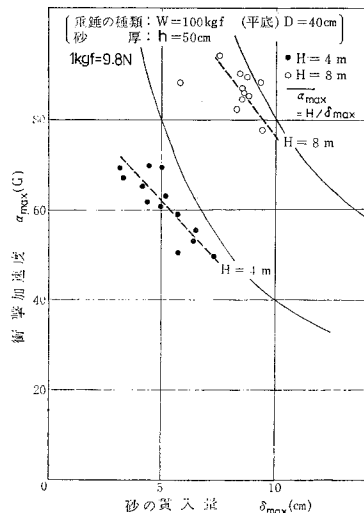


図-3 予備実験の衝撃加速度および貫入量の関係

加速度または衝撃力が大きく変形が小さく、また、地盤が軟らかいと最大加速度または衝撃力が小さく変形が大きくなると理解される。特に、重錘貫入時における荷重～変形特性を完全剛塑性のばねとみなすと、重力加速度単位で表わした衝撃加速度は $\alpha_{max}(G) = H/\delta_{max}(H, \delta_{max})$ (同単位) と表わされる⁹⁾。図-3 には参考のためにこの式による関係を実線により示したが、実測値の関係はこの場合に近いと同時に、それよりも若干 α_{max} は小さくなっている。このことは、重錘のエネルギーが地盤の1次元的な変形のみならず周辺への波動伝播等に費やされたためと考えられる。

さて、既往の研究結果によれば、衝撃加速度に影響を及ぼす因子として、第1に重錘落下高、次いで重錘重量が考えられている。さらに、敷砂層厚に影響されることも知られている。ここでは、まず、既往の研究においてほとんど考慮されていない重錘の形状・寸法の影響について実験結果を述べ、次いでその中でも上限値を与える平底の場合について既往の研究結果との比較を述べる。

c) 衝撃加速度に及ぼす落下高の影響

図-4, 5 は、種々の形状・寸法・重量の重錘に対する衝撃加速度 α_{max} と落下高 H との関係を示したものである。両図によりどの重錘の場合にも、 α_{max} は H が増加すると増加することがみられる。両者の関係は、1次比例の関係ではなく、後に(4), a) で述べるように、平均的には大略 $\alpha_{max} \propto \sqrt{H}$ の関係に近い。

d) 衝撃加速度に及ぼす重錘形状の影響

図-4 は、重錘の寸法・重量が一定の場合に、重錘の形状による衝撃加速度への影響を示したものである。表-1 に示したように重錘の形状は、平底、球底、錐底で

あり、 $W=100 \text{ kgf}$ (0.98 kN)、最大部分の直径 $D=40 \text{ cm}$ である。図により、 $H=2 \text{ m}$ では三者の α_{max} はあまり変わらないが、 H が大きくなるにつれ、平底の場合に α_{max} が最大となり、球底・錐底の場合は平底より小さく、 $H=8 \text{ m}$ でも平底に対して6割程度の値となっていることがわかる。平底に比べて、球底・錐底の場合に、 α_{max} が小さい理由は次のように考えられる。平底は貫入時に接触底面積が一定である一方、球底・錐底のように貫入とともに接触面積が増大する場合には、貫入初期において接触面積が小さく、貫入抵抗が小さく、地盤が相対的に軟らかくなったものと同等と考えられる、このとき、図-3 に示された関係のように、 δ_{max} の増大とともに α_{max} が小さくなる。

したがって、複雑な形状をもった実際の落石について考えると、とがったものより偏平なものを想定する方が設計上安全側の荷重を与えるといえる。

e) 衝撃加速度に及ぼす重錘重量・寸法の影響

図-5 は、平底重錘について重錘の重量 W ・寸法(直径 D)により α_{max} がどのように異なるかを示したものである。この図において顕著なことは、 H が大きいときに同一の D に対して、 W が増加すると α_{max} が低下すること、同一の W であっても D が小さいと α_{max} が低下することである。

W が増加した場合に α_{max} が低下することは、弾性体の衝突を想定した振動便覧式(2)によっても説明できる。同一の W で D が小さい場合に生ずる α_{max} の低下は、d) で説明したのと同様に、接触面積が小さいと貫入抵抗が小さく、地盤が相対的に軟らかく貫入量が増加することによると考えられる。

したがって、d) に述べたのと同様に、同一重量であれば接触面積が大きく偏平なものほど、大きい α_{max} を

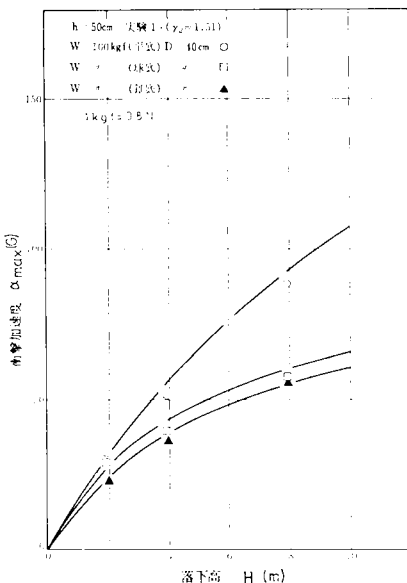


図-4 衝撃加速度に及ぼす重錘形状の影響

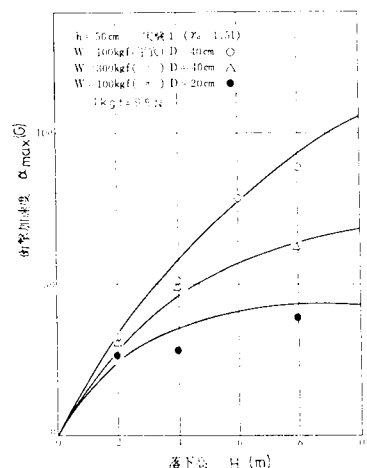


図-5 衝撃加速度に及ぼす重錘の重量・寸法の影響 (平底重錘の場合)

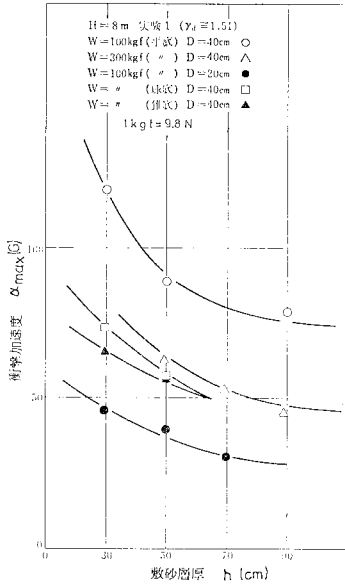


図-6 衝撃加速度に及ぼす敷砂層厚の影響（すべての重錘を含む）

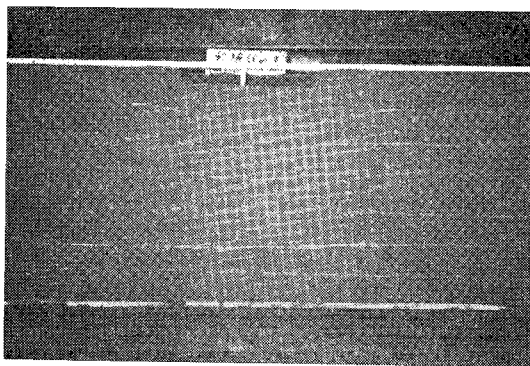
与えるといえる。

f) 衝撃加速度に及ぼす敷砂層厚の影響

ここでは、種々の重錘条件に対する結果をまとめて図-6 に示す。これによると、重錘の形状や重量によらず、敷砂層厚 h が増加するにつれ α_{max} が減少し、ほぼ一定値に近づくようである。 h が小さいところでの α_{max} の増大は、 h が薄くなると敷砂層の変形性が小さく、敷砂層の見かけの剛性が増加するためと考えることができる。

g) 重錘貫入による敷砂層変形

実験 2, 3 においては、敷砂層製作時に 10 cm 厚ごとにアルミ箔を敷き、重錘落下後に敷砂層を鉛直に切り出し、敷砂層の変形を観察・測定した。写真 1 は、重量 100 kgf、直径 40 cm の平底重錘を高さ 8 m から落下さ



（重量 100 kgf、直径 40 cm、平底重錘）
落下高 8 m の場合

写真-1 重錘落下による敷砂層の変形性状

せた場合の砂層の変形状態を示すものである。球底・錐底の場合も同様のものであり、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、重錘直下の土層が圧縮されるいわゆるパンチせん断のパターン¹²⁾がみられる。

h) 衝撃加速度と貫入量の関係

すでに 図-3 でみたように、一定の落下条件において α_{xma} と δ_{max} との間には次式のような反比例に近い関係がある。

$$\alpha_{max} \cdot \delta_{max} = \eta H \dots \dots \dots (4 \cdot a)$$

そして、予備実験の場合には、 $\eta = 0.75 \sim 1.0$ 程度であった。実験 1, 2 についても、同様の関係を調べるために描いたものが 図-7 である。この図では、異なった H のデータをひとまとめにするために式 (4・a) を

$$\alpha_{max} = \eta \cdot H / \delta_{max} \dots \dots \dots (4 \cdot b)$$

と書き換えて α_{max} と H / δ_{max} の関係を示している。図には異なった重錘ごとに回帰直線を求め記入してある。データ数の多い平底、 $W = 100 \text{ kgf}$ (0.98 kN)、 $D = 40 \text{ cm}$ の場合は、ばらつきも多いが、式 (4・b) と合わせて各重錘ごとに多少異なった勾配 η をもつようである。ここに得られた η の範囲は $\eta = 0.5 \sim 1.5$ 程度である。

i) 実測衝撃加速度と振動便覧式の比較

図-8 に、この実験で使用した $W = 100 \text{ kgf}$ (0.98 kN) の重錘の中で最大の衝撃加速度を与えた平底で $D = 40 \text{ cm}$ の場合と、同じく平底で $D = 40 \text{ cm}$ 、 $W = 300 \text{ kgf}$ (2.4 kN) の重錘について、種々の h 、 H における α_{max} の結果を示した。また、同図には、振動便覧式に

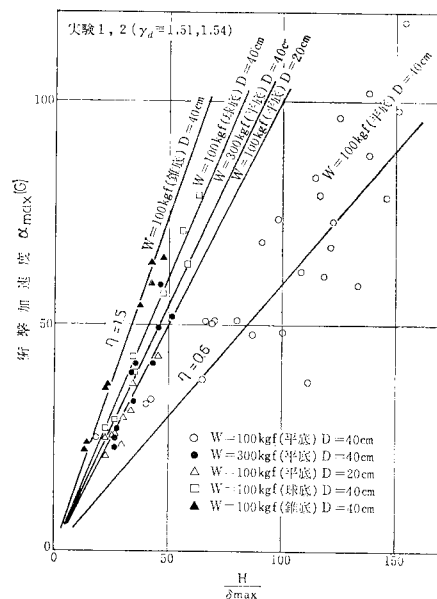
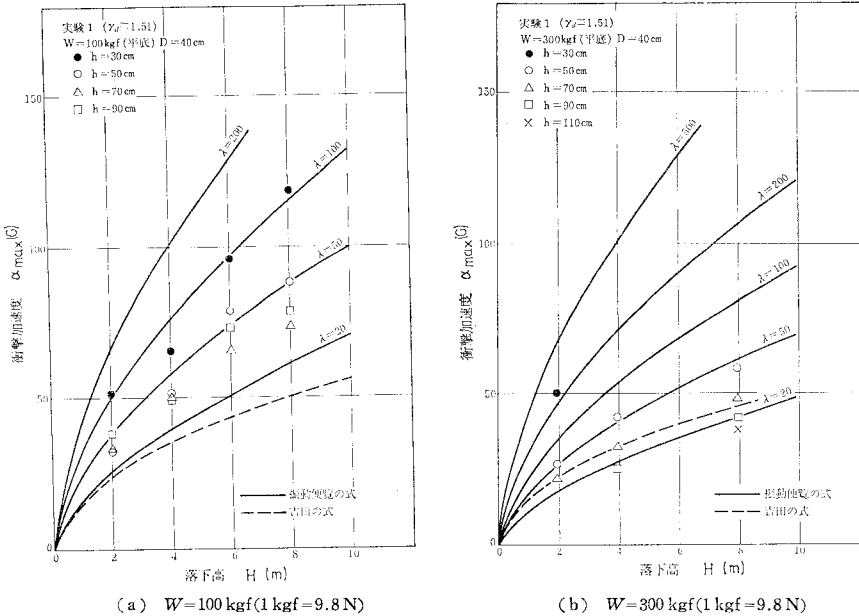


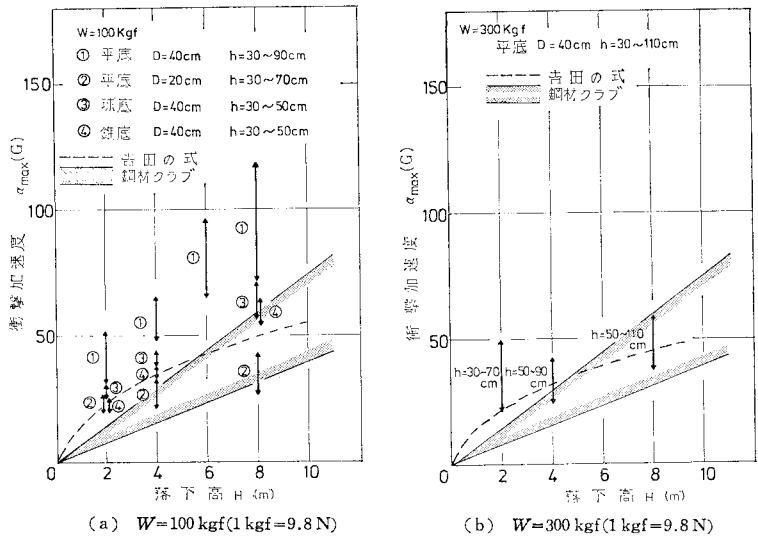
図-7 衝撃加速度と落下高/貫入量の関係



図一 落下高と衝撃加速度の関係

において地盤の変形特性（一様弾性体と想定してラーメの定数 λ で表わす）を数段階に変えて算定した曲線も記した。

全体的にみて、振動便覧式において、敷砂層のラーメの定数 λ を適宜選ぶことによって諸条件での実験結果を比較的よく近似する関係を得ることが可能である。しかし、実験値をフィットさせる曲線を振動便覧式から求めた場合、逆算される λ は一定ではなく、平底で h が薄いときに λ は大きくなる。表一4は、行った各実験条件について実験結果から逆算される大略の λ をまとめたものであるが、これから、今回の重錘の範囲内で、 α_{max} が最も大きくなる平底の場合でも、 $h=30$ cmの場合を除いて、実測された衝撃加速度は振動便覧



図一 実測衝撃加速度と従来の実測値の比較

式において $\lambda=100 \text{ tf/m}^2$ (0.98 MPa) において算定される値を越えていないことがわかる。

j) 実測衝撃加速度と従来の実測値の比較

図一9には、今回の実測衝撃加速度の一部と、吉田らの実験式等による計算値を示した。

この図において、吉田らの式での計算値は、今回の実測値に対して、平底 $D=20$ cmの場合を除いた他の場合のほぼ下限値に相当している。これは、吉田らの実験は、球底重錘を用いて行われたものであることおよび敷砂層の締固めを特に行っていないことがその原因と考えられる。

表一4 逆算入 (平均値, 実験1)

| 形状 | W(tf) | h(cm) | | 30 | 50 | 70 | 90 | 100 |
|----|-------|-------|-------|----|----|----|----|-----|
| | | W(tf) | R(m) | | | | | |
| 平底 | 0.1 | 0.2 | | 87 | 45 | 34 | 43 | — |
| | 0.3 | 0.2 | (250) | 50 | 31 | 17 | 16 | — |
| | 0.1 | 0.1 | | 12 | 10 | 6 | — | — |
| 球底 | 0.1 | 0.2 | | 24 | 20 | — | — | — |
| 錐底 | 0.1 | 0.2 | | 18 | 14 | — | — | — |

(λ : tf/m^2 , $1 \text{ tf/m}^2=9.8 \text{ kN}$)

鋼材クラブの実験結果は、重錘が落石覆工に落ちる場所によって衝撃加速度が異なることを示しており、図中にはその上下限の値を記してある。今回の実験で得られた結果は、その上限の値に近い。鋼材クラブの実験においては、敷砂層の締固めが十分行われていないものも含まれており、また、敷砂層がたわみ性のある落石覆工に支えられていることの影響等のために、鋼材クラブの式の方が小さめになっているものと考えられる。

k) 衝撃加速度に及ぼす床版支持条件の影響

敷砂層が鋼製およびコンクリート製床版に支えられた場合の衝撃加速度は、コンクリート床の場合とほとんど同じであった。これは、今回の床版支持条件が、衝撃加速度に影響を与えるほどたわみ性でなかったためと考えられる。

1) 衝撃土圧の特性

敷砂層底面であるコンクリート床上面に土圧計を設置し、重錘衝撃力の分散を測定した結果は次のようであった。図-10は、 $W=100\text{ kgf}$ (0.98 kN)、 $D=40\text{ cm}$ 、 $H=8\text{ m}$ の場合に、敷砂層厚 h の違いに伴う底面土圧 σ の変化を、重錘衝撃力を重錘断面積で除した単位面積当たりの衝撃力 p で無次元化して示したものである。図-10において横軸の距離 0 は重錘中心の落下目標位置を意味する。実際には落下位置が目標位置から多少ずれるため、図-10中の $h=30\text{ cm}$ の場合のように測定土圧の最大値の位置が中心からずれるものと考えられる。図-10によると、 h が小さいときには、砂層底面での σ は p よりも大きいことを見出される。さらに、 h が増加するにつれ、測定土圧の分布は、最大値が小さいのみならず、それらを積分した合計荷重としても減少しており、この土圧分布が砂層厚による内部減衰的な影響も受けていることを示していると考えられる。また、実際上意味をもつ衝撃土圧の分布範囲は、 $h=30, 50, 70\text{ cm}$ の場合に、それぞれ、落下中心を囲む半径 $60, 70, 70\text{ cm}$ 程度の範囲である。したがって衝撃土圧の分布範囲

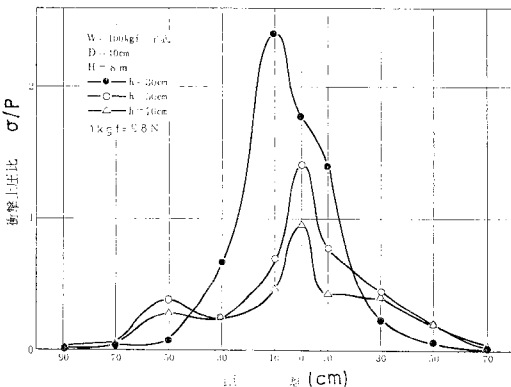


図-10 衝撃土圧の分散性状

は砂層表面の落下中心から45°の領域よりも広い。次に、底面での測定土圧を積分して求めた土圧合力 P_e と重錘の衝撃加速度から計算した重錘の衝撃力 P_{max} とを比較したものが、図-11である。この積分は、図の土圧分布断面をある高さごとに水平に切り、その水平に切られたスライスが、それぞれ載頭円錐であるとして各スライスの体積を求め、全体にわたって加えて行った。土圧がほとんどゼロである最遠距離は、全体的な土圧分布性状から外挿した。この図には、敷

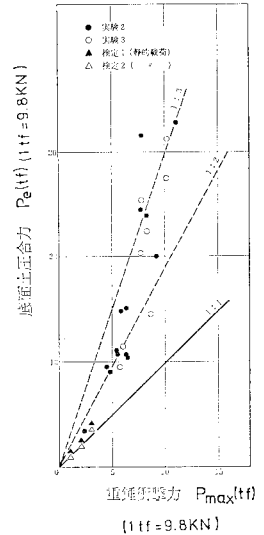


図-11 重錘衝撃力と底面土圧合力の比較

砂層表面に静的に載荷した場合と同様の整理を行った結果も記入してある。これによると、底面土圧合力 P_e の重錘衝撃力 P_{max} に対する比は P_{max} が増加すると大きくなり、静的載荷試験では $1\sim 1.5$ 程度、それ以外ではこの比は大略2から3の範囲にある。図-10に示したことと合わせ、底面土圧は重錘の衝撃荷重を敷砂層表面に作用する静的荷重に置換して考えることができないことを示している。これは荷重が衝撃的であると同時に重錘下の砂層が質量を有するばねとして作用するため、砂層底面での力には、重錘からの衝撃力以外に砂層の質量の一部による慣性力が付加されるためと考えられる。

(4) 考 察

a) 衝撃加速度を与える実験式

今回の実験においては、比較的狭い範囲ではあるが、衝撃加速度に影響する因子として、重錘重量 W ・形状・寸法 (直径 D)、落下高 H 、敷砂層厚 h ・密度 ρ_d を変えて実験を行った。このうち、最も多くの条件を変えたデータの得られている平底の場合について、上述したいくつかの因子を考慮した

$$\alpha_{max} = ah^b D^c \rho_d^d W^e H^f \dots\dots\dots (5)$$

なる形の実験式を回帰分析によって求めた。得られた実験式のうちで、 W, H, h のみを因子に取り上げた式および上記のすべての因子を取り上げた式を例として紹介しておく。

(W, H, h を因子とした式)

$$\alpha_{max} = 8.54 h^{-0.495} W^{-0.375} H^{0.545} \dots\dots\dots (6)$$

(W, H, h, D, ρ_d を因子とした式)

$$\alpha_{max} = 1.84 h^{-0.413} D^{1.19} \rho_d^{0.64} W^{-0.372} H^{0.489}$$

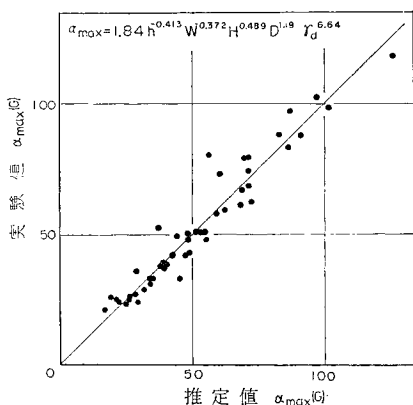


図-12 実験式による衝撃加速度

$$\dots\dots\dots(7)$$

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

以下では、主として式(7)により検討を行う。式(7)による計算値と実測値を比較したものが図-12である。この図により、実験式による計算値は、実測値とよく合っているといえるが、この式が今回の実験条件の範囲外まで適用されるかどうかは、他の実験結果を用いて検討する必要がある。

なお、弾性衝突理論によれば、平底重錘に対する衝撃加速度 $\alpha_{max}(G)$ は次式で表わされる⁹⁾。

$$\alpha_{max} = 2 \left(\frac{G}{1-\nu} \right)^{0.5} \cdot D^{0.5} \cdot W^{-0.5} \cdot H^{0.5} \dots\dots(8)$$

ここに、 G, ν : 弾性体のせん断弾性係数, ポアソン比である。式(8)と前述の式(6),(7)と比べると次のことがみられる。 H に関するべき指数は式(6),(7)とも理論的に予想される0.5に近い。 W に関するべき指数は理論的に予想される-0.5に対し実験的には約-0.37で実験結果の方が W に対する依存性がやや小さい。さらに、式(7)においてみられる D のべき指数は1.19で、 α_{max} が D にほぼ1次比例することになり、弾性理論に基づく式(8)にみられる0.5乗比例とはまったく異なった特性を示しており複雑な衝撃現象を解析するうえでの弾性理論の適用性に限界があることを示している。

球底・錐底については、 h, H のみを変えて実験を行ったもので、得られる実験式は実用上重要な因子である重量や寸法等の影響を表わせないものであまり実用的な意味がないのでここには省略する。

b) 設計外力を求めるうえでの振動便覧式の適用

今回用いた重錘に限って言えば、振動便覧式において $\lambda=100 \text{ tf/m}^2$ とおいて求める衝撃加速度は安全側の値を与えることは、すでに(3), i)で述べた。しかし、実験値を回帰させた実験式(7)によれば、重錘の直径が増

加するにつれ衝撃加速度が増加することが示されている。とすると、現実に落石の大きさが実験時のものより大きくなったときに、上の結論は妥当であろうかという疑問が生ずる。ここでは次のように考える。式(7)にみられるように、重量 W が一定で直径 D が増加して扁平になると衝撃加速度が増加するのは当然であるが、現実の落石に極端に扁平なものは考えられず、 W と D の間にはある範囲の関係が成立するとみなすのが現実的である。振動便覧式では、落石の形状を重量の等しい比重2.6の球体に置換している。ここでは平底を想定するのが安全側であるから、設計計算用の落石を仮に直径 $D(m)$ 、高さ $\beta D(m)$ の円柱で比重2.6と想定してみる。この結果

$$W = 2.04 \beta D^3 \text{ (tf)} \dots\dots\dots(9)$$

となる。式(9)を式(7)に用いると次式を得る。

$$\alpha_{max} = 1.39 h^{-0.413} r_d^{6.64} \beta^{-0.397} W^{0.0247} H^{0.489} \dots\dots\dots(10)$$

この式は、落石形状が上述したような円柱状で、寸法・重量が変化した場合の衝撃加速度を今回の実験値から推定するのに用いられる。 h, r_d, H が同一の場合に落石規模が変化したときの α_{max} の比率は次のように与えられる。

$$\frac{(\alpha_{max})_f}{(\alpha_{max})_l} = \left(\frac{\beta_l}{\beta_f} \right)^{0.397} \cdot \left(\frac{W_f}{W_l} \right)^{0.0247} \dots\dots(11)$$

添字 l, f はそれぞれ、実験値および現場を想定した落石規模の大きい場合の値を意味する。実験に用いた平底、 $W_l=0.1 \text{ tf} (0.98 \text{ kN}), D=0.4 \text{ m}$ の場合は $\beta_l=0.76g$ となる。現実の落石の重量は $0.5 \sim 1 \text{ tf}$ のものが最も多くなっている¹³⁾ことを考慮して、実験に用いた重錘と相似な形状をもった ($\beta_f=\beta_l$) $W_f=10 \text{ tf} (9.8 \text{ kN})$ の落石を想定すると式(11)から

$$\frac{(\alpha_{max})_f}{(\alpha_{max})_l} = 1.12$$

となり、落石重量が100倍程度増加しても衝撃加速度の増加は12%程度の増加にすぎず、結局、落石の規模が増大しても、衝撃加速度はそれほど大きく変化はしないであろうと推定される。したがって、振動便覧式において $\lambda=100 \text{ tf/m}^2 (0.98 \text{ MPa})$ とおけば実験値の上限を包絡するという結論は、落石規模が増大しても成立すると考えられる。ただし、この計算のもととなった実験式(7)は、 $D=0.2, 0.4 \text{ m}$ のわずか2条件のもとでの実験結果から導かれたものであり、今後さらに D の大きい条件での実験結果の活用を図る必要がある。

c) 衝撃力と底面土圧

すでに、図-10, 11によって重錘に作用した衝撃力よりもはるかに大きな力が敷砂底部に作用することがみられた。この理由として、重錘の衝突に伴い重錘のみな

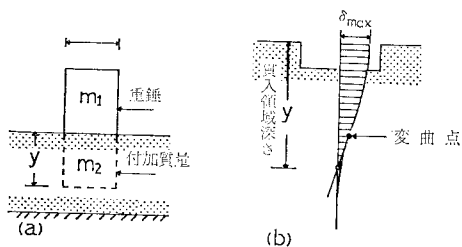


図-13 付加質量を考慮して衝撃力を求める方法

らず、地盤にも慣性力が励起されることが考えられる。いま、図-13のような重錘を質点、地盤をばねとした1自由度系の振動モデルにおいて、通常のモデルとは異なり、ばねが単位長当たり質量 ρ を有するものとする、この系の運動方程式は次式で表わされる¹⁴⁾。

$$\left(m + \frac{\rho L}{3}\right) \frac{d^2x}{dt^2} + kx = 0 \dots\dots\dots (12)$$

ここで、質量項に相当する $m + \rho L/3$ は、質点の質量とばねの質量の一部から成り立っており、ばね力である kx が、ばねの質量に起因する慣性力により質点の慣性力よりも増加することがみられる。この $\rho L/3$ を付加質量とよぶ。次に、図-13(a) に示すような、重錘とともに貫入する地盤の一部を付加質量と考えて次式により補正衝撃力 P_{max}' を求めてみる。

$$P_{max}' = (m_1 + m_2) \alpha_{max} \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 m_1 ：重錘質量

m_2 ：重錘直径と貫入領域深さ y から成る円柱状領域からなるものとした付加質量

y ：図-13(b) に示すように、重錘直下の層別沈下曲線の変曲点において引いた接線と鉛直線の交点として定めた深さ、この y は、敷砂層厚 h との間に $y = (0.6 \sim 0.8) h$ の関係があることが見出されている。

式(14)により求めた補正衝撃力 P_{max}' と底面での作用土圧合力 P_e とを比較したものが図-14である。こ

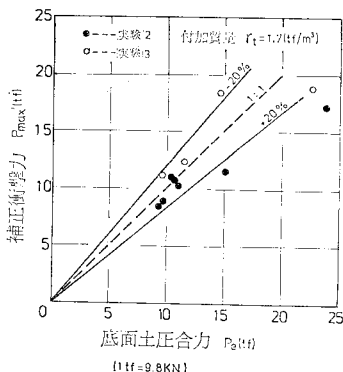


図-14 付加質量を考慮した補正衝撃力と底面土圧合力の比較

のように付加質量を考慮して補正した衝撃力 P_{max}' は作用土圧合力 P_e に対し約 $\pm 20\%$ の範囲で近似している。このことは、底面に作用する土圧合力を推定するのに、重錘の衝撃力を静的に置換するだけではなく、重錘とともに貫入する地盤部に励起される慣性力を考慮しなければならないことを示している。

したがって、重錘衝撃力を求めるうえでの振動便覧式の適用性は前述したが、それはあくまで重錘自体の衝撃力についてであり、敷砂層底部での作用土圧を求める場合には、ここに述べた敷砂層の動的応答効果を考慮しなければならないことを示唆しているものと考えられる。

敷砂層の動的応答効果を考慮するために、上述したように重錘と一体となって運動する付加質量 m_2 を敷砂層の変形状から推定した試算を行ったところ、実験結果を比較的よく説明できることが示されたが、このような方法の適用性に関してはさらに検討が必要と考えられる。

4. ま と め

寸法・形状・重量の異なる重錘を敷砂層に自由落下させる実験により明らかにされたおもな点は次のとおりである。

(1) 実測した衝撃加速度と落下高の関係は、振動便覧式によって大略表わすことができる。しかし、その場合に想定する弾性定数 λ は詳細にみれば重錘重量・寸法・形状、敷砂層厚によって異なった値を用いなければならない。しかし今回の実験条件において、衝撃加速度の上限値を与える平底の場合でも、 $\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$ と設定すれば振動便覧式は、敷砂層厚がごく薄くない限り安全側の値を与える。また、このことは、限られた実験条件下の実験結果から導いた衝撃加速度の実験式に基づいてあえて推論すれば、実験に用いた重錘と相似な形状の落石を想定する限り、落石規模の大きい場合にもいえそうである。

(2) 平底の場合に、重錘重量・直径、落下高、敷砂層厚・密度を考慮して衝撃加速度を求める実験式を求めた。

(3) 敷砂層厚底面での衝撃土圧は、砂層表面に作用する衝撃荷重を静的に作用させて均質弾性体として計算したものよりも大きい。これは砂層の動的応答効果によるものと考えられる。砂層の動的応答効果についてはさらに検討が必要と考えられる。

なお、ここに報告した実験の実施にあたって舟見清己氏(現・土木研究所ダム構研究室)、西 幸博氏、新井新一氏(建設企画コンサルタント)の多大な協力を得た。ここに記して感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧 pp. 93～99, 1983.
- 2) 土木学会：土木技術者のための振動便覧, pp. 320～324, 1966.
- 3) 鋼材クラブ：新しい落石覆の開発に関する研究, 1973.
- 4) 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に関する実験, 道路, pp. 35～41, 1976-10.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 岡田治憲, ほか：覆道の衝撃実験について, 第23回北海道開発局技術研究発表会, pp. 249～255, 1979.
- 9) 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.
- 10) Lysmer, J. and F.E. Richart : Dynamic Response of Footings to Vertical Loading, Jour. of SM, Proc. ASCE, SM 1, pp. 65～91, 1966.
- 11) Scott, R.A. and R.W. Pearce : Soil Compaction by Impact, Geotechnique, Vol. 25, No. 1, pp. 19～30, 1975.
- 12) Vesić, A.S. : Bearing Capacity of Shallow Foundations, Ch. 3 of Foundation Engineering Handbook, Ed. by Winterkorn, H.F., et al., Van Nostrand Reinhold Company, pp. 121～147, 1975.
- 13) 佐々木康, ほか：落石防護工の被害に関する実態調査(第1報), 土木研究所資料, 第1572号, p. 5, 1980.
- 14) Meirovitch, L. : Elements of Vibration Analysis, McGraw-Hill, pp. 27～28, 1975.

(1983.1.21・受付)