

敷砂上の落石の衝撃加速度と衝撃土圧に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY OF IMPULSIVE ACCELERATION AND EARTH PRESSURE BY FALLING ROCKS ON A SAND LAYER

吉田 博*・榎谷 浩**・鈴木哲次***

By Hiroshi YOSHIDA, Hiroshi MASUYA and Tetsuji SUZUKI

For a rational estimation of the design impulsive load to rock fall protection structures due to rock falls, a test set-up with a tower of 24.8 m height for the rock fall experiments has been constructed.

Using this test set-up, the impulsive accelerations of weights simulating falling rocks and the impulsive earth pressure through a sand layer which acts to the rock fall protection structures are experimentally measured. The effects of the weights, shapes and falling heights of the falling rocks to the impulsive acceleration and the earth pressure are investigated.

1. ま え が き

わが国は狭小なうえに山間部が多く、道路の建設もやむなく山岳地帯を選ばねばならないケースが多く、また、既存の道路の整備に伴い、道路交通の安全確保の上からも道路を落石から保護する必要性がますます増大している。

第 9 次道路整備五箇年計画が昭和 58 年度に発足し、その目標とする 21 世紀をめざした道路作りの第一に、交通安全と防災の確保をめざした道路交通が挙げられている。この第 9 次道路整備五箇年計画の発足により、今後、落石防護工としての落石覆いが多数建設されるようになるものと思われる。

しかし、これまで建設された多くの落石覆いの計画・設計における荷重および構造の選択は、現場の状況より判断して、その都度経験工学的に決定されているのが現状のようである。このような経験工学的な方法より脱し、理論あるいは実験に基づく合理的な解析が望まれてきたが、比較的地形、地質条件に恵まれている欧米諸国には

参考となるデータに乏しく、わが国においても落石防護施設に関する調査報告書^{1),2)}、手引³⁾、便覧^{4),5)}等があるものの、落石覆い上への落石による衝撃力に関しては、わずかな研究が発表されているに過ぎない⁶⁾⁻¹³⁾。

落石が落石覆いに及ぼす衝撃力に関する因子として、落石質量、落下高さ、斜面の形状および勾配、落石の形状および岩質、サンドクッション材の厚さおよびその諸性質、落石覆いの構造形式等が考えられる。

本研究においては、落石がサンドクッション上に鉛直落下する場合の衝撃加速度およびサンドクッション中を伝播し、落石覆い構造物に及ぼす衝撃土圧およびその分布について、落石の質量および形状、落下高さを変化させた数多くの実験結果より検討を行った。

2. 実験方法

(1) 実験用設備および装置

石川県能美郡辰口町地内の金沢大学辰口団地内に落石実験場を建設した。実験場には、送電用の鉄塔の上部を切断して取り除いた高さ 24.8 m、底部幅 7.4 m × 6.25 m の落石実験用鉄塔を建設した。鉄塔最上部には、最大容量 5.0 t のホイストクレーンを取り付けた。鉄塔脚内部は、まず、厚さ 20 cm で栗石を敷きつめ、その上に直交 2 方向に配筋し、厚さ 30 cm のコンクリートを

* 正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木工学科
(〒920 金沢市小立野 2-40-20)

** 正会員 工修 金沢大学助手 工学部土木工学科(同上)

*** 正会員 工修 愛知県技師 企業庁三河港工事事務所

Table 1 Properties of used sand.

10%粒径	60%粒径	均等係数	曲率係数
$D_{10}(\text{mm})$	$D_{60}(\text{mm})$	U_c	U
0.09	0.14	1.56	0.10

幅 6 m × 6 m の範囲で打設した。このコンクリートスラブ上に鋼製形枠を組み立て、幅 5 m × 5 m、高さ 1.5 m の土槽を製作した。落石覆いに使用されるサンドクッション材としては、一般に、いわゆる、川砂、海砂、山砂、砕砂等が用いられるが、本実験では、一般に現場で最も容易に採取が可能であると考えられる、山砂を用いた。その主な特性を Table 1 に、また、その粒径加積曲線を Fig. 1 に示す。

前述のとおり、落石の衝撃力に及ぼす因子は非常に多いが、落石自身に起因するものは、落石の質量およびその形状である。落石の質量とその形状を考慮した 7 種の重錘を製作した。まず、質量は 300 kg、1000 kg および 3000 kg の 3 種とし、形状はいずれも円筒状であるが、質量が 300 kg および 1000 kg のものについては、その底面の形状の影響を調べるために底面が球面の一部を成すもの（以下、球底という）、底面が円錐形のもの（以下、錐底という）および底面が平面のもの（以下、平底という）の 3 種ずつ、計 6 種とした。また、質量が 3000 kg のものは球底のみとした。重錘は鋼殻にコンクリートを充填して所定の質量となるように製作した。なお、コンクリート充填部分の高さと直径の比をほぼ 1.0 となるようにし、また、重錘の重心位置での衝撃加速度が測定できるように、300 kg および 1000 kg の重錘には直径 20 cm の円筒を埋め込み、その底面に加速度計を取り付けられるようにした。用いた 7 種の重錘の形状および寸法を Fig. 2 に示す。

重錘を容易にかつ安全に落下させることができるように、電気的自動落下装置を開発した。詳細は文献(13)を参照されたい。

(2) 測定項目および測定方法

a) 衝撃加速度

重錘を所定の高さまで吊り上げ、電気的自動落下装置

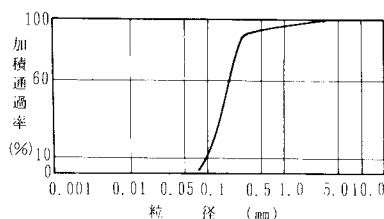


Fig. 1 Particle size accumulation curve.

を作動させて初速度零で鉛直自由落下させ、重錘がサンドクッションに衝突し静止するまでの重錘の衝撃加速度を測定した。重錘が傾斜して落下する場合も考えて、重錘の重心位置に 3 方向加速度計（容量 500 g）をボルト締めして固定し、直交する 3 方向の加速度（鉛直成分および水平直交 2 成分）を測定した。

加速度計で測定する衝撃加速度はリード線による損失を少なくするため、重錘に取り付けた加速度用増幅器で増幅した後リード線を通して後述する 2 種の方法で同時に 2 台のマイクロコンピュータに入力し、A/D 変換を行い、数値データをカセットテープに記録すると同時に最大衝撃加速度等をただちに計算し、これらの計算結果と波形をディスプレイ上にグラフィック出力させて、実験結果の観察を行い、各種データをプリンターに出力した。

A/D 変換は 2 種の方法で行った。一つは、加速度計の高周波成分も含めた出力を直接マイクロコンピュータ（TEAC 社製、PS 80）に入力し、2000 Hz のサンプリング速度で 2 秒間、データ数 4000 で A/D 変換を行った。以後、このサンプリング方式を高速サンプリングとよぶことにする。他は、加速度計の出力の高周波成分を除去するために、加速度計の出力を 200 Hz のローパスフィルターを通してマイクロコンピュータ（TEAC 社製、PS 85）に入力し、600 Hz のサンプリング速度で 2 秒間、データ数 1200 で A/D 変換を行った。以後、このサンプリング方式を低速サンプリングとよぶことにする。

b) 土 圧

土槽の中心から 15 cm または 30 cm の間隔で 5 または 6 個の土圧計を配置した。土圧計は土の動きによるずれを防ぐために、鋼製の保持装置にはめ込み、周囲を石

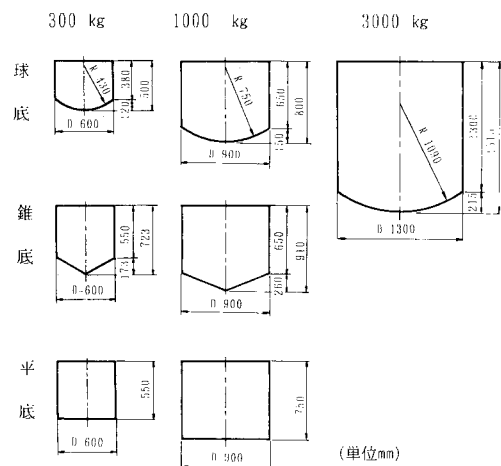


Fig. 2 Shapes and dimensions of weights.

膏で固めた。土圧の測定は動ひずみ測定器を介してマイクロコンピュータ (TEAC 社製, PS 85) に入力し, 600 Hz のサンプリング速度で, 加速度の低速サンプリングと同時に, 2 秒間, データ数 1 200 で A/D 変換を行い, 数値データをカセットテープに記録すると同時に最大上圧等をただちに計算し, これらの計算結果と波形をディスプレイ上にグラフィック出力させて, 実験結果の観察を行い, 各種データをプリンターに出力した。

c) 落下位置

落下した重錘の中心の座標を, あらかじめ土槽内に定めた $x-y$ 座標系により cm 単位で測定した。

d) 貫入量

重錘が落下したとき, 落下以前のサンドクッション表面より計測した重錘底面中心 (以後, 落下点中心という) の沈下量を, 重錘の貫入量とした。

e) 含水比および密度

サンドクッションの状態を調べるために, 1 日 1 回, 最初のサンドクッション製作時にコンクリートスラブ上部から 20 cm ごと, サンドクッション表面の含水比および密度の測定を行った。密度は直径 10 cm, 高さ 5 cm のステンレス製の円筒を用いて採取を行い測定した。

f) コーン支持力

簡易型静的貫入試験器により, 表面より 10 cm ごとに測定したサンドクッション材の平均貫入抵抗力をコーンの断面積で除したものであり, 本実験ではサンドクッション材の締め固めの程度または貫入抵抗の程度を表わす指標として用いる。

なお, 本実験で用いた実験設備と計測システムを Fig. 3 に示す。

(3) 実験方法

本実験では, コンクリートスラブ上に土槽を設け, そ

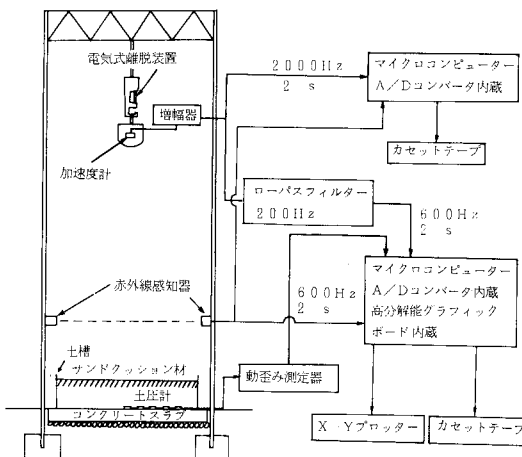


Fig. 3 Test set-up and measuring system.

の中にサンドクッション材を敷き, 鉄塔に取り付けた電気ホイストクレーンにより各種の重錘を吊り上げ, 5, 10, 15 および 20 m の各高さから自由落下させた。

実験は以下の順序で行った。

a) サンドクッションの製作

サンドクッションの厚さは, 300 kg および 1 000 kg の重錘に対しては 90 cm, 3 000 kg の重錘に対しては 120 cm とした。これは, 文献 6), 7) によると, これ以上のサンドクッション厚に対して, 緩衝効果の増大が期待できないことが明らかにされているからである。

サンドクッションの製作は以下の 2 通りの方法で行った。

掘り返し状態——サンドクッションをコンクリートスラブ上面まで掘り返し, 20 cm 厚ずつサンドクッション材を投入して足踏みにより締め固め, サンドクッション厚が 90 cm の場合, 最後の表面は 10 cm 厚で同様に締め固めるもの。

自然状態——重錘の落下後, 重錘によりできたくぼみの表面およびその周辺をほぐしながら 20 cm 厚ずつ埋め戻し, 足踏みにより締め固め, 最後に表面を同様に締め固めるもの。

実験は, 最初, 掘り返し状態で行い, その後, 自然状態で 2~3 回行った後, 再び掘り返し状態とした。

b) サンドクッション材の含水比および密度の測定

c) 落下前のサンドクッションのコーン支持力の測定

d) 衝撃加速度 (低速および高速サンプリング) および土圧の測定

サンドクッション表面上, 約 5 m の鉄塔上に取り付けた赤外線センサーに重錘が到達したときに, マイクロコンピュータによる衝撃加速度および土圧のサンプリングを自動的に開始するようにした。

e) 重錘の落下位置の測定

f) 重錘の貫入量の測定

g) 落下後のサンドクッションのコーン支持力の測定

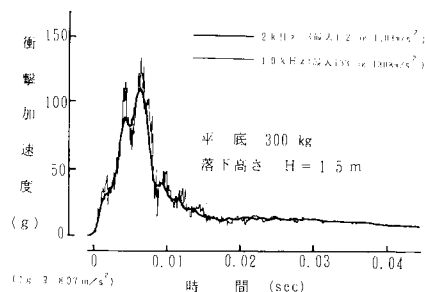


Fig. 4 Shapes of accelerations.

3. 実験結果および考察

(1) 測定衝撃加速度の波形

測定衝撃加速度の波形は必ずしも滑らかな波形ではなく、低い周波数成分の波の上に高周波成分が載る波形であり、平底の重錘においてその傾向は顕著に現われる。Fig. 4は、300 kgの平底の重錘を高さ15 mから落下させたときの衝撃加速度を2台のマイクロコンピュータを用い10 kHzでサンプリングしたものと、200 Hzのローパスフィルターを通し、2 kHzでサンプリングしたものの波形の比較を行ったものである。10 kHzでサンプリングされた加速度波形を周波数分析した結果をFig. 5に示す。図中、破線で示されている周波数成分は、同一の重錘の底面をハンマーで打撃したときの弾性波による卓越した周波数を示している。これより、重錘の衝突による弾性波の周波数成分が卓越していることがわかる。したがって、高周波成分を含めた加速度は本研究の目的には不適当であり、低周波成分のみのサンプリングで十分であると思われるので、衝撃加速度は200 Hzのローパスフィルターを通し、600 Hzのサンプリングですべての測定を行うことにした。これはまた、後述する測定土圧の検討結果からも、妥当であると思われる。

測定された衝撃加速度の波形は、おおよそ、Fig. 6に示すように4つのパターンに分類できる。タイプ1のパターンは平底の重錘にみられるものであり、鋭い立ち上がりとピーク後の鋸歯状の減衰を有している。タイプ2のパターンは、比較的滑らかな1つの単調な波形から成っており、球底および錐底の重錘でサンドクッションが比較的軟らかいときのものである。タイプ3およびタイプ4のパターンは2つの山を有する波形で、タイプ3は第1のピークが卓越しており、第2のピークが小さいもので、300 kgの球底および錐底の重錘によくみられるパターンである。タイプ4は、第1および第2のピークと

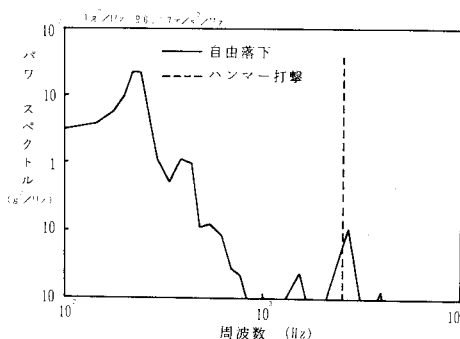


Fig. 5 Frequency analysis of impulsive acceleration (Flat bottom, $W=1\,000\text{ kg}$, $H=15\text{ m}$).

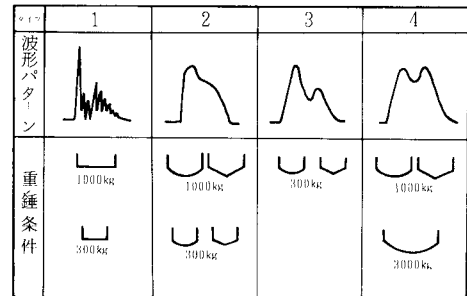


Fig. 6 Patterns of acceleration.

もほぼ同程度の大きさであり、1 000 kgの球底、錐底および3 000 kgの重錘に多くみられるパターンである。

タイプ1のパターンは、平底の重錘が平面でサンドクッションに衝突することにより、急激な立ち上がりと大きなピークを有することは理解できるが、タイプ3および4における2つのピークとその大小関係がどのようにして発生するかはいまだ推論の域を脱せず、さらに研究が必要である。

(2) 最大衝撃加速度

Fig. 7および8は、それぞれ、300 kgおよび1 000 kgの球底、錐底および平底の重錘を、5 m、10 m、15 mおよび20 mから落下させたときの最大衝撃加速度と落下高さの関係を示している。

それぞれ、度数分布で示されているものは球底の重錘に対するものであり、300 kgおよび1 000 kgの度数分布より、実験値によく一致する確率密度関数は、対数正規分布であると思われるので、図中にこれも示した。三角印および四角印は、それぞれ、錐底および平底の重錘の

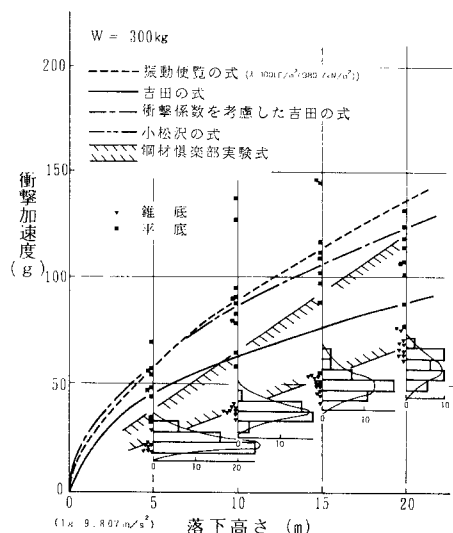


Fig. 7 Relationship between impulsive accelerations and falling heights (300 kg).

実験結果を示している。

Fig. 9は、3 000 kgの球底の重錘を5 m, 10 m, 15 m, 17 m および 18 m から落下させたときの最大衝撃加速度と落下高さの関係を示している。実験値は、黒丸印と度数分布の両方で示されている。

これまで、落石による衝撃力の推定を目的としたいくつかの理論式および実験式が提案されている^{5)~8), 12), 14)}。その主なものは次のとおりである。

a) 振動便覧の式⁵⁾

落石の衝撃現象を2つの弾性体間の衝突現象とみなすものであり、A. E. H. Loveの2つの弾性体が衝突するときの物体間の圧力に関する基礎方程式より出発し、Herzの接触論を用いている。主な仮定としては半無限弾性体上に密度2.6 g/cm³の剛球が一定速度で衝突するものとして、衝撃力を求めたものである。

衝撃力 $P(t)$ は、

$$P = 2.46\lambda^{2/5}W^{2/3}H^{3/5} \dots\dots\dots (1)$$

にて与えられている。ここに、 λ はサンドクッション材のラーメの定数であり、非常に軟らかい土で $\lambda=100$ tf/m² (980.7 kN/m²)、軟らかいもので $\lambda=300\sim 500$ tf/m² (2 942~4 903 kN/m²)、硬いもので $\lambda=1 000$ tf/m² (9 807 kN/m²)とされており、 W は落石質量(t)、 H は落下高さ(m)である。落石対策便覧⁴⁾では、落石による設計衝撃力として式(1)に $\lambda=100$ tf/m² (980.7 kN/m²)として求めた値を用いることを推奨している。

また、落石の形状とサンドクッション厚を考慮に入れた改良式⁸⁾およびサンドクッションの粘性減衰を考慮した改良式¹²⁾も提案されている。

b) 小松沢の式¹⁴⁾

サンドクッション材を弾性ばねと仮定し、そのばねの上に落石が衝突するものとして、エネルギー法を用いて衝撃力を計算している。

$$P = 1.619k^{1/4}W^{5/6}H^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 k はサンドクッション材のばね定数で、普通の土で $k=500$ tf/m³ (4 903 kN/m³)であるとされている。

c) 鋼材倶楽部の式⁶⁾

落石による衝撃力の基本的問題点を解明するために、落石の規模と発生する衝撃力との相関性、サンドクッション材の緩衝効果、分布効果、および実物構造物を試験し、落石覆い全体についての落石による衝撃力と構造的力学的特性を究明することを目的とした最初の実験である。重錘質量1 000 kg、最大落下高さ15 mで実験を行い、その結果衝撃加速度と落下高さの関係は、ある幅をもった直線の範囲内に入るとしている。

d) 吉田らの実験⁷⁾

300 kg、1 000 kg および 3 000 kgの重錘を最大13 mの高さからコンクリートスラブ上およびPC桁上に落

下させて、衝撃加速度の測定を行っている。この実験結果より、重錘がサンドクッションに衝突してから静止するまでの時間は落下速度にほとんど関係せず、落石質量のみに関係することに着目し、衝撃力は次式で表わすのがよいとしている。

$$P = 2\alpha \frac{W}{T_0} \sqrt{2gH} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 α は所定の信頼度に対する係数であり、 W は落石質量、 H は落下高さ、 g は重力の加速度、 T_0 は落石が静止するまでの時間である。

いま山砂の場合で、95%の信頼度について示せば、

$$P = 2.42 \frac{W}{gT_0} \sqrt{2gH} \dots\dots\dots (4)$$

$$T_0 = 0.0220W + 0.0485 \text{ (s)} \dots\dots\dots (5)$$

であるとされている。

また、実験および実験結果を用いた動的応答計算より、実験に用いたPC製落石覆いには、衝撃係数として0.4を用いることを推奨している。

Fig. 7~9においては、上記の各種推定式が示されている。まず、破線は式(1)で示される振動便覧の式に、落石対策便覧で採用されている $\lambda=100$ tf/m² (980.7 kN/m²)を適用したものである。実線は式(4)による吉田の式を、一点鎖線は式(4)に設計用の衝撃係数として0.4を用いたものである。二点鎖線は式(2)の小松沢の値であり、斜線で囲まれた範囲は鋼材倶楽部の実験の範囲を示している。

Fig. 7~9に示された最大衝撃加速度と落下高さの関係より以下のことが明らかとなった。

a) 衝撃加速度は重錘質量とともに減少する。

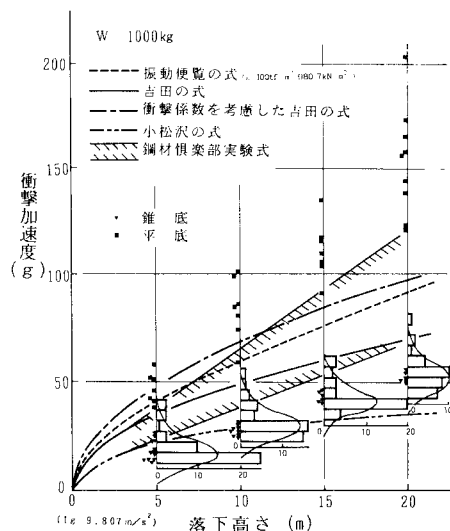


Fig. 8 Relationship between impulsive accelerations and falling heights (1 000 kg).

- b) 錐底の重錘の衝撃加速度は球底のものとはほぼ等しく、両者の差異は認められない。
- c) 平底の重錘の衝撃加速度は、球底および錐底のものに比較して極端に大きい。
- d) 吉田の式は実験値の上限によく一致している。
- e) 振動便覧の式 ($\lambda=100 \text{ tf/m}^2 (980.7 \text{ kN/m}^2)$) は、衝撃を考慮した吉田の式と全範囲にわたってよく一致している。
- f) 小松沢の式は落石質量が小さく、落下高さも小さい範囲では実験値の平均的な値を与えるが、落下高さが大きい範囲では、実験値の下限を与える。しかし、3 000 kg の重錘に対する実験結果に対しては、その平均値に一致する。

g) 鋼材倶楽部の実験から得られた衝撃加速度の範囲は、落下高さが大きい場合、実験値の範囲より上方に位置する。

(3) 衝撃加速度に及ぼすその他の因子の影響

衝撃加速度に及ぼす落石以外の影響因子としてはサンドクッション材の種類、厚さ、含水比、締め固めの程度等が考えられる。サンドクッション材の厚さが衝撃加速度に与える影響は、過去の研究^(6),7)より、厚さが60 cm から90 cm 程度以上では衝撃加速度にほとんど変化がみられないことが明らかにされている。ここでは、衝撃加速度と貫入量の関係、衝撃加速度に与えるサンドクッションの含水比および締め固めの影響を検討する。なお、サンドクッション材の種類が衝撃加速度に与える影響の検討は重要な課題であるが、本研究においては、まだ検討しておらず、さらに研究が必要である。

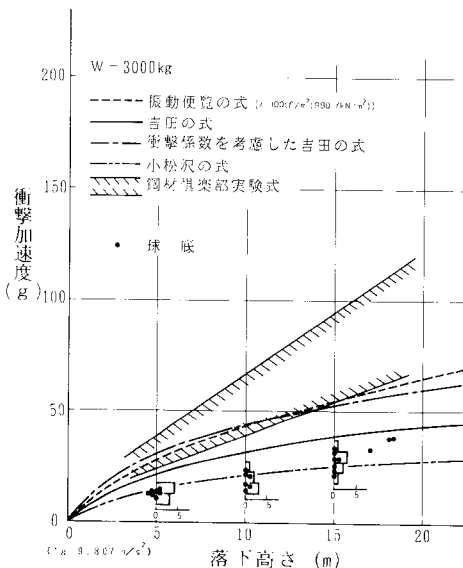


Fig. 9 Relationship between impulsive acceleration and falling heights (3 000 kg).

a) 重錘加速度と貫入量

重錘質量が1 000 kg の球底について貫入量と衝撃加速度の関係を示したものがFig. 10である。同・落下高さに対しても、貫入量と衝撃加速度の両方にかんがりのばらつきが認められる。これは、主にサンドクッションの状態に起因するものと考えられる。しかし、貫入量の増加に伴い衝撃加速度が減少する傾向が認められる。

落下前の重錘の位置エネルギーは衝撃力がサンドクッションに対して成す仕事に等しいとすると、次式が成り立つ。

$$mgH = \int_0^{T_0} F(t)v(t)dt \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 m は重錘の質量、 g は重力の加速度、 H は落下高さ、 $F(t)$ は時刻 t におけるサンドクッションに作用する衝撃力、 $v(t)$ は時刻 t における重錘の速度および T_0 は重錘が静止するまでの時間である。

ここで、上式が、最大衝撃力 $F_{\max} = m\alpha_{\max}$ と貫入量 δ の積に比例すると仮定すると次式が得られる。

$$\alpha_{\max} = cg \frac{H}{\delta} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 c は定数である。

Fig. 11 は衝撃加速度と（落下高さ／貫入量）の関係を示したものである。図より、落下高さに関係なく、衝撃加速度と（落下高さ／貫入量）の間に直線関係が認められる。これより、式 (7) は衝撃力と貫入量の関係を表わすのに妥当なものと考えられる。

b) 衝撃加速度とサンドクッション材の含水比

Fig. 12は衝撃加速度とサンドクッション材の含水比の関係を重錘質量1 000 kg の球底について落下高さ別に示したものである。なお、締め固め試験により得られたサンドクッション材の最適含水比は20%であった。落

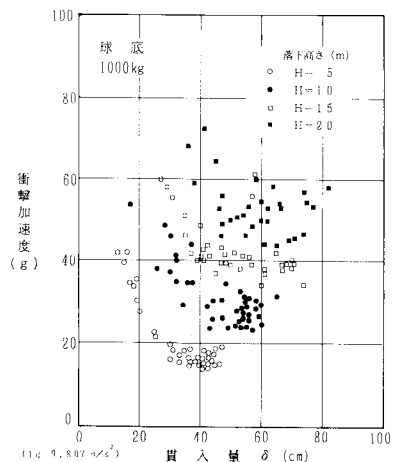


Fig. 10 Relationship between impulsive accelerations and penetrations.

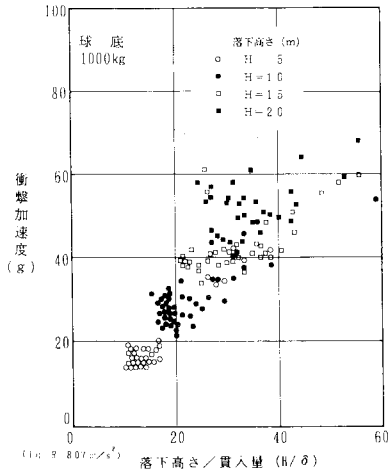


Fig. 11 Relationship between impulsive accelerations and ratios of falling height to penetration.

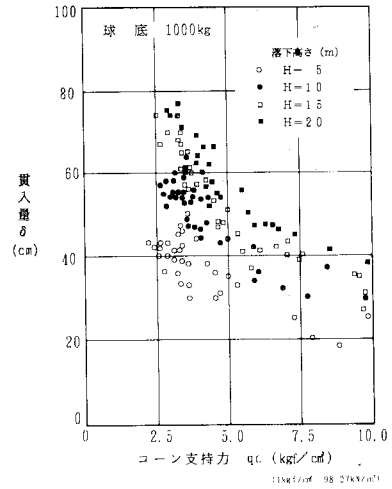


Fig. 13 Relationship between penetrations and cone bearing capacities.

下高さが小さい範囲では、含水比が小さいほど衝撃加速度は大きくなる傾向が認められるが、落下高さが20 mの場合にはその傾向は明確でない。本実験は屋外で行ったため最適含水比以下でのデータはなく、その点についての検討は行うことはできなかった。

c) コーン支持力と衝撃加速度

Fig. 13は、コーン支持力と貫入量の関係を重錘質量1 000 kgの球底の重錘について落下高さ別に示したものである。コーン支持力の増加に伴い貫入量の低下が明確に認められる。

Fig. 14は重量1 000 kgの球底の重錘の衝撃加速度とコーン支持力の関係を落下高さ別に示したものである。

コーン値の増加とともに衝撃加速度の増加が認められる。すなわち、サンドクッション材の締め固めの程度が大きく、静的貫入抵抗が大きいほど衝撃加速度が大きくなることが認められる。

(4) 衝撃土圧

以上の考察においては、重錘に発生する衝撃加速度の測定値より重錘がサンドクッションに与える衝撃力について論じてきた。

しかし、落石覆い構造物が受ける衝撃力は、重錘によりサンドクッションが受ける衝撃力ではなく、サンドクッション中を伝播し、拡散してサンドクッションの底部、すなわち、落石覆い構造物の屋根の表面に作用する

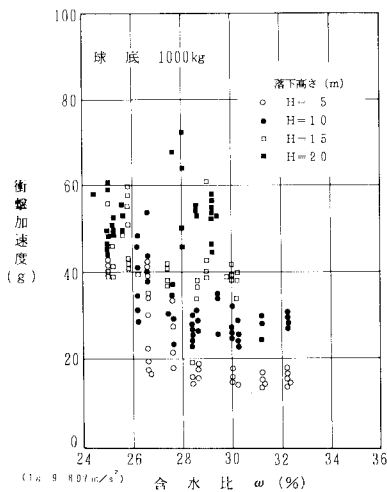


Fig. 12 Relationship between impulsive accelerations and moisture contents.

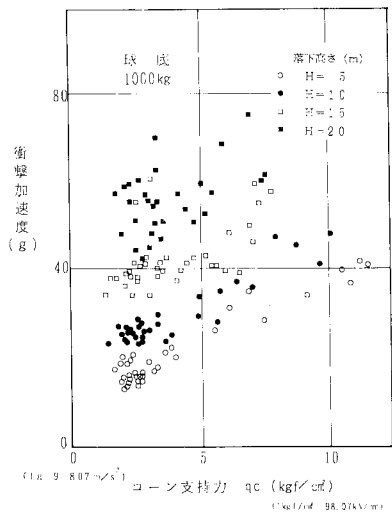


Fig. 14 Relationship between impulsive accelerations and cone bearing capacities.

衝撃土圧である。

ここでは、サンドクッションの底部に設置した土圧計により測定された土圧より落石覆い構造物に作用する衝撃力を評価してみた。

a) 土圧分布の時間的变化

Fig. 15 (a) および (b) は、それぞれ、球底の質量 1 000 kg の平底および球底の重錘を高さ 15 m から落下させた場合の各位置における土圧の時間的变化を重錘がサンドクッションに接触した瞬間から示したものである。

球底の落下点における土圧は、重錘の衝突より 0.015 秒程度遅れて立ち上り、比較的緩やかな増加の後に最大値を示し、その後、緩やかに減少している。落下中心より離れるに従い、土圧の立ち上りは時間的に遅れ、かつ、小さくなっており、その波形はより単調なものとなっていることが認められる。

平底の重錘においても、落下点における土圧は球底の重錘の場合と同様に、重錘の衝突時より 0.015 秒程度遅れて立ち上っており、最大値を示した後、多少の起伏を示し、非常に緩やかに減少している。平底の重錘の衝撃加速度にみられた急激な波形の変化は、土圧では認められない。

Fig. 16 は質量 1 000 kg の平底および球底の重錘を高さ 15 m より落下させた場合の重錘落下中心から半径方向の衝撃土圧分布を土圧の立ち上り時間より 0.01 秒間隔で示したものである。なお、土圧の測定点間はスプラ

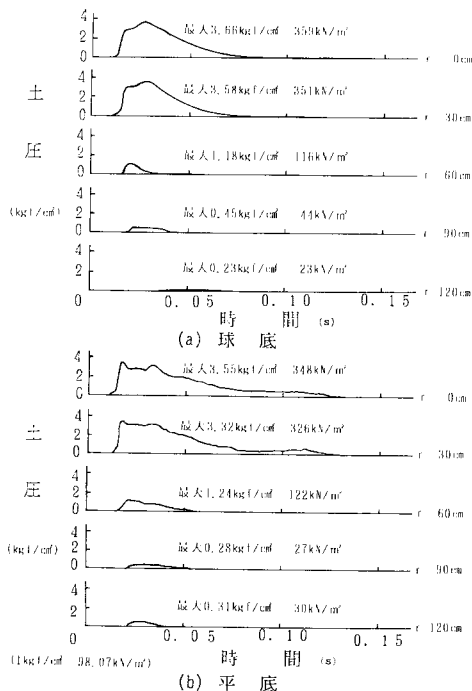


Fig. 15 Earth pressures at each point.

イン関数で補間してある。

最初、落下中心付近に発生する土圧は比較的短い時間で半径方向に広く分布するようになり、その後、緩やかに分布域は減少している。

土圧の立ち上り時には、平底の重錘による土圧の方が球底の重錘によるものより大きい。その後の土圧分布は、落下中心付近では球底の重錘の方が平底の重錘より大きく、落下中心より離れるに従って逆に、平底の重錘の方が球底より大きくなっていく。その後、両者とも土圧は小さくなっていくが、平底の重錘による土圧は球底の重錘によるものより大きい。

平底と球底の重錘による土圧分布の時間的变化の観察より、各位置での土圧の最大値が同時に発生しないので、サンドクッションの底部で得られる全衝撃土圧は、各位置での最大土圧からは求まらず、時間的变化を考慮する必要があると考えられる。

b) 土圧による衝撃力の時間的变化と重錘の衝撃力

構造物に作用する時刻 t の土圧による衝撃力 $P_e(t)$ は、土圧分布を軸対称と仮定すると、

$$P_e(t) = 2\pi \int_0^{\infty} rP(r, t)dr \dots\dots\dots (8)$$

と表わされる。ここに、 $P(r, t)$ は重錘の落下点中心からの距離 r における時刻 t での土圧である。

Fig. 15 で示した実験結果より、 $r = 120$ cm 以上では土圧はほとんど発生していないので、積分範囲を $r = 120$ cm までとした計算結果を以下に示す。

Fig. 17 (a) は質量 1 000 kg の球底の重錘を高さ 15 m から落下させた場合について、重錘の測定加速度から求めた衝撃力および式 (8) より得られた土圧による衝撃力の時間的变化を示したものである。土圧による衝撃力は重錘のサンドクッションへの衝突後約 0.15 秒遅れて生じており、土圧による最大衝撃力は重錘の衝撃加速度による最大衝撃力よりやや小さくなっている。重錘の加速度より得られた衝撃力では、2つのピークを有するが、土圧による衝撃力の時間的变化は単調である。

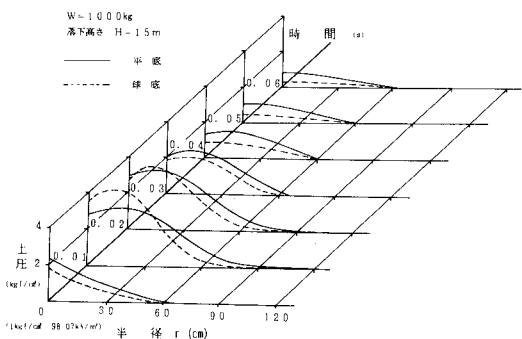


Fig. 16 Distributions of earth pressure.

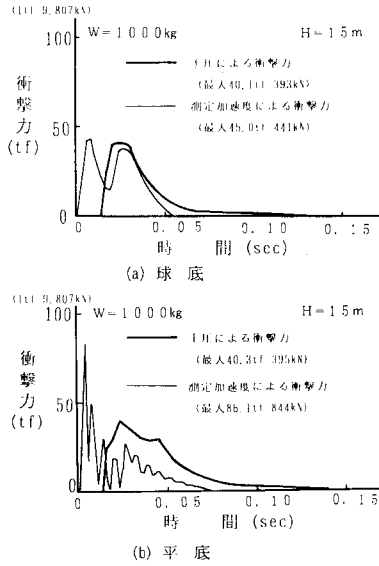


Fig. 17 Impulsive load of integrated earth pressure.

球底他のケースでも同様の傾向が認められており、重錘の測定加速度より得られた最大衝撃力と土圧による衝撃力の最大値はほぼ一致した。また、錐底の重錘においても球底の重錘とほぼ同様な結果で、有意な差は認められなかった。

Fig. 17(b)は質量1000 kgの平底の重錘で、Fig. 17(a)と同様に落下高さ15 mの場合について、重錘の測定加速度より得られた衝撃力および、土圧による衝撃力の時間的変化を示したものである。衝撃加速度より得られた最大衝撃力はFig. 17(a)に示した球底に比較して非常に大きいですが、土圧による衝撃力の最大値はその2分の1程度の大きさであり、球底の場合とほぼ同じである。このことより、平底の重錘より得られる衝撃加速度の鋭いピークは、そのまま伝播されず、サンドクッション中で

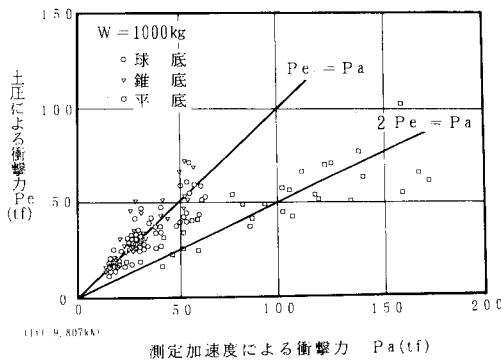


Fig. 18 Relationship between integrated earth pressures and impulsive forces of falling weight.

減衰しているものと推定される。

球底と平底の重錘による全土圧波形の相違としては、平底の重錘による土圧による衝撃力は最大値に達した後の減衰が緩やかであることである。

Fig. 18は重錘質量1000 kgの場合の測定最大加速度より求まる最大衝撃力 P_a と土圧による衝撃力の最大値 P_e の関係を示したものである。これより、球底と錐底の重錘については、測定最大加速度より求まる最大衝撃力と土圧による衝撃力の最大値、すなわち、落石覆い構造物に作用する衝撃力の最大値はほぼ等しいが、土圧による衝撃力の最大値は平底の重錘については、測定衝撃加速度より得られる最大衝撃力のほぼ2分の1となっていることがわかる。

Fig. 19は、質量1000 kgの球底、錐底および平底の重錘を5 m、10 m、15 m および 20 m から落下させたときの土圧による最大衝撃力と落下高さの関係を示したものである。平底の重錘による衝撃力でも、他のものよりやや大きい程度であり、落石覆い構造物に作用する最大衝撃力に及ぼす落石の形状の影響は、ほとんど認められないことがわかる。

4. 結論

本研究においては、落石がサンドクッション上に鉛直落下する場合の衝撃加速度およびサンドクッション中を伝播し、落石覆い構造物に作用する衝撃土圧およびその分布を実験的に知るため、高さ24.8 mの落石実験用鉄塔を建設し、落石の質量および形状、落下高さを変化させた数多くの実験を行った。

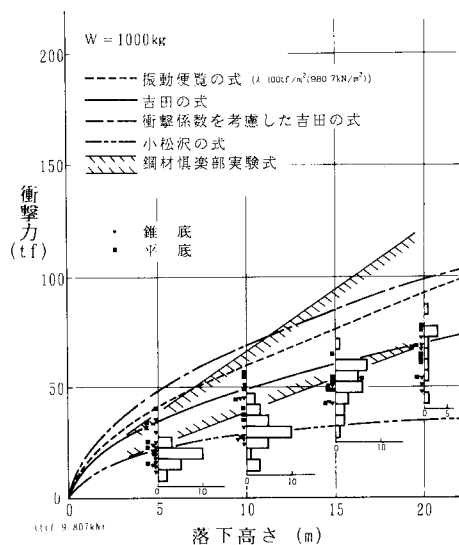


Fig. 19 Relationship between integrated earth pressures and falling heights.

その実験結果を検討した結果、以下の結論を得た。

(1) 球底および錐底の重錘の衝撃加速度の波形は比較的滑らかな変化を示すが、平底の重錘のものは、鋭い立ち上がりとピーク後の鋸歯状の減衰を有している。

(2) 球底と錐底の重錘における衝撃加速度はほぼ等しく、両者の差異は認められない。しかし、平底の重錘より得られた衝撃加速度は他のものに比べて極端に大きい。

(3) 重錘質量の増加とともに衝撃加速度は減少する。

(4) 衝撃加速度は落下高さと同貫入量の比に比例する。

(5) サンドクッションがよく締め固まり、コーン支持力が大きいほど重錘の貫入量は小さく、衝撃力は大きい。

(6) 重錘の衝撃力の高周波成分はサンドクッション中で減衰する。球底および錐底の重錘による土圧分布は落下点付近に集中する。平底の重錘によるものは比較的広い範囲に分布し、測定衝撃加速度にみられたような鋭いピークは認められない。

(7) 球底と錐底の重錘では、土圧による衝撃力の最大値は、測定衝撃加速度による衝撃力の最大値とほぼ等しい。

(8) 平底の重錘では、土圧による衝撃力の最大値は重錘の測定衝撃加速度による衝撃力の最大値の約2分の1程度の値であり、球底および錐底による土圧による衝撃力と同程度である。しかし、土圧による衝撃力の時間的变化は、球底および錐底の土圧による衝撃力とは異なり、最大値に達した後の減衰が緩やかである。

(9) 土圧による衝撃力の最大値を落石覆い構造物に作用する落石による衝撃力とすると、平底を含めたすべての実験値の上限を吉田の式で近似することができる。

(10) 土圧による衝撃力の時間的变化は重錘の形状によって異なるが、これの落石覆い構造物に及ぼす動的効果については、今後の研究課題である。

なお、同一条件下での実験においても、測定結果にはばらつきが認められた。このばらつきの因子は数多く考えられるが、落石覆い構造物の設計荷重の評価のためには、さらに数多くの実験を行い、これらの実験結果の統計的な処理が必要であると考えられる。また、実験結果

をできる限り忠実に表現できる解析法を開発することにより、実際の落石覆い構造物への適用範囲も拡大すると思われるが、今後の研究課題である。

本研究のデータ整理にあたり、金沢大学電子計算機センターの FACOM M-170 F を使用した。

参 考 文 献

- 1) 高速道路調査会：落石防護施設の設置に関する調査研究報告書，高速道路調査会（日本道路公団委託），1974-2.
- 2) 日本道路協会・道路防災施設調査特別委員会：道路防災施設調査報告書，日本道路協会，道路防災施設調査特別委員会，1980-3.
- 3) 日本鉄道施設協会：落石対策の手引—日本国有鉄道施設局土木課編，日本鉄道施設協会，1978-3.
- 4) 日本道路協会：落石対策便覧，日本道路協会，1983-7.
- 5) 土木学会：土木技術者のための振動便覧，pp. 320～324，1966.
- 6) 鋼材倶楽部：新しい落石覆いの開発に関する研究，鋼材倶楽部，研究報告書，1973-4.
- 7) 吉田 博・石塚賢吉・細川 豊：ロックシェッド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.
- 8) 建設省土木研究所動土質研究室：敷砂上の落石の衝撃力に関する実験報告書，土木研究資料，1822号，1982-3.
- 9) 吉田 博・榎谷 浩・鈴木哲次・岡 衛・永木卓美：サンドクッション上への落石の衝撃力とその伝播について，第1回落石の衝撃力およびロックシェッドの設計に関するシンポジウム論文集，pp. 1～8，1983-7.
- 10) 吉田 博・榎谷 浩・岡 衛：落石の衝撃力の推定実験およびその結果の考察について，第38回土木学会年次学術講演会講演概要集，第Ⅲ部門，pp. 351～352，1983-9.
- 11) 吉田 博・榎谷 浩・鈴木哲次：落石の衝撃加速度とロックシェッドへの作用衝撃力について，第38回土木学会年次学術講演会概要集，第Ⅲ部門，pp. 353～354，1983-9.
- 12) 岡田恵一郎・小林俊俊・鈴木輝男：ロックシェッドに対する落石荷重計算法（ヘルツ式の改良）について，第1回落石の衝撃力およびロックシェッドの設計に関するシンポジウム論文集，pp. 25～35，1983-7.
- 13) 金沢大学工学部土木工学科構造力学研究室：敷砂上への落石実験報告書，1983-12.
- 14) 和仁達美・赤沢 稔：鉄道土木施工法講座，pp. 263～271，1963.

(1983.12.19・受付)