

(17) 落石のサンドクッションへの斜め衝突による水平力に関する実験的研究

日本サミコン (株)	若林 修
日本サミコン (株)	大澤 廣
日本サミコン (株) 研究所	後藤 吉晴
日本サミコン (株) 研究所	○ 佐藤 彰

1. まえがき

ロックシェッド等を設計する際、落石による設計衝撃力は、落石のサンドクッションへの衝突角度に関係なく、鉛直落下するものとして算出しており、斜め衝突により発生すると考えられる水平衝撃力成分を、設計では考慮しないのが一般的であった。

しかし、1989年7月に発生した福井県越前海岸でのロックシェッドの崩壊事故以来、落石時の水平力が防護構造物に及ぼす影響の検討の必要性が指摘されている。

そこで、著者らは、重錘を任意の角度から落下させることができる装置を作成し、重錘を砂の入った土槽上に、数種類の角度から落下させ、重錘が砂に衝突するときに発生する鉛直力および水平力を測定した。

本報告では、これらの結果について報告するとともに、設計用水平力算出式の導出を行う。

2. 実験

2.1 実験装置

図-1に示すような縦1.35m、横0.92m、深さ0.50mの大きさの土槽、および重錘を任意の角度で任意の位置に落下できるような装置をH鋼で作成した。砂は土槽の表面まで入れた。重錘はH鋼に取り付けてある電磁石(移動可能)から切り放されることにより、H鋼の上を重錘に取り付けてある車輪で滑走し、土槽内の砂の上に落下する。土槽の脚は、ひずみの検出が容易になるようにヤング率の小さいアルミ材とし、重錘は鋼製の容器にコンクリートを詰め、先端径が同じ重量の石(球形)の径になるようにした。その形状寸法および重量を図-2に示す。

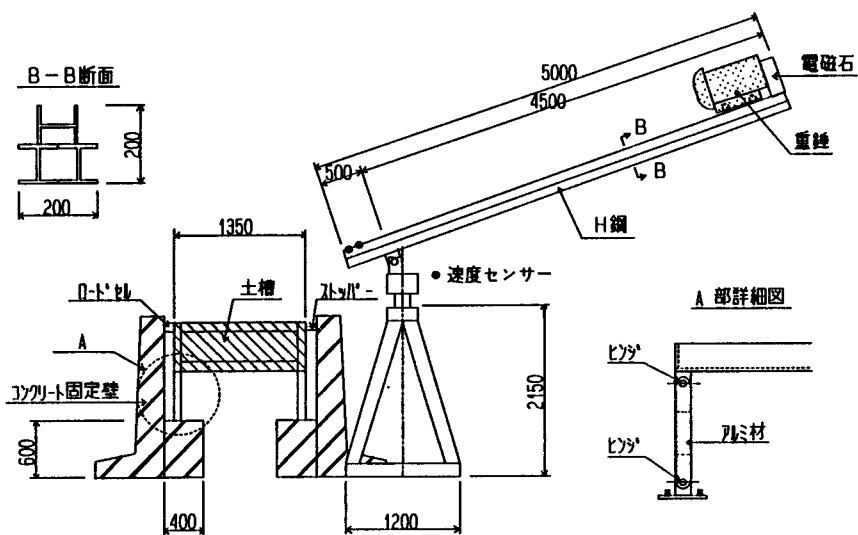


図-1 実験装置

2. 2 測定方法

重錘が砂上に斜め入射したとき、土槽に作用する重錘加速度、水平力および鉛直力を、以下の方法で測定した。

(A) 重錘加速度

重錘の重心付近に取り付けた加速度計（東京測機製 AR-200E）により、重錘が砂に衝突するときの落下方向の加速度を測定した。

(B) 水平力

水平力は、図-1に示すように固定壁に取り付けた荷重計（東京測機製KC-5M）より測定した。

(C) 鉛直力

鉛直力は、土槽の1脚につき2箇所（計8箇所）に貼付けたひずみゲージ（東京測機製FLA-3-1L-11）より、ひずみを測定し、別に実験より求めたひずみ-荷重換算係数を測定されたひずみに乗じて求めた。

それぞれの測定結果は、動ひずみ計（東京測機製DA-14D）およびA/D変換機を介し、1msec間隔で2秒間サンプリングし、パソコン（PC9800）によりフロッピィディスクに格納した。

2. 3 実験の種類

緩衝材としての砂は、図-3に示す粒度分布を有する川砂を使用し、砂を室内に放置し充分乾燥させた乾燥状態、屋外に放置した中間状態および充分に水を掛けた湿潤状態の3種類（表-1）を用い、実験は落下角度、砂の含水比の2つのパラメーターに対し行った。すなわち、落下角度を水平面に対し30、45、60、75および90度の5種類、砂の含水比を上記3種類の含水比とし、それぞれの組合せに対し3回、合計45回の実験を行った。

また、重錘の落下高さは、全角度とも同じ高さ（緩衝材表面より、 $H=3.15\text{ m}$ ）とした。砂の締め固めは行わず、実験毎に掘起こしを行った。

3. 実験結果および考察

実験結果を述べる前に次のように言葉を定義する。

入射角度・・・重錘が緩衝材に衝突した時の水平面に対する角度。

重錘衝撃力・・・重錘が緩衝材に衝突した時の最大加速度に重錘質量を乗じた値。

H鋼を滑走する際の摩擦による速度の影響を調べるために、H鋼に速度計を取り付け重錘がH鋼を離れるとき速度を測定した。その結果、理論値（自由落下時の速度）とよく一致していることが確認された。

入射角度と重錘衝撃力の関係を図-4に示す。入射角度が小さくなるにつれ重錘衝撃力も小さくなっている。砂の状態で比較すると、各入射角度とも乾

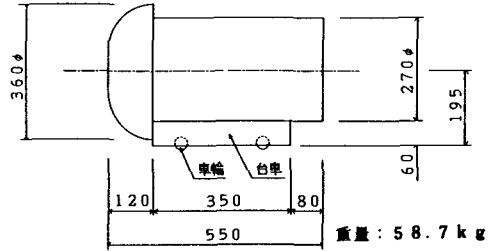


図-2 重錘形状と重量

表-1 砂の含水比測定結果

状態	含水比 (%)
湿潤	14.8
中間	4.0
乾燥	0.3

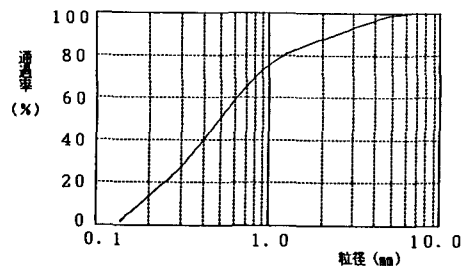


図-3 砂の粒度分布図

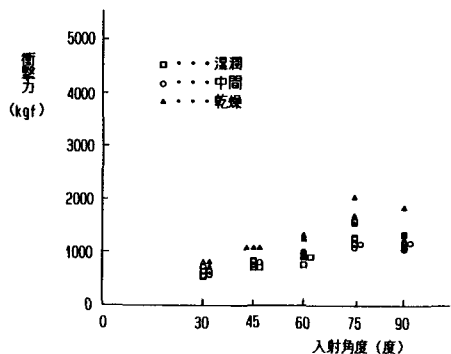


図-4 入射角度と衝撃力

燥，中間，湿潤の順で小さくなっている。つぎに，重錘衝撃力の鉛直成分およびひずみより求めた鉛直力と入射角度の関係を図-5に，また，重錘衝撃力の水平成分および荷重計から測定された水平力と入射角度の関係を図-6にそれぞれ示す。図中，黒塗記号は重錘衝撃力から得られた各成分を，白抜き記号はひずみより求めた鉛直力および荷重計で測定された水平力を表している。図-5から，入射角度が小さくなるにつれ，両者とも小さな値となっているが，ひずみより求めた鉛直力の値が重錘衝撃力の鉛直成分の値に比べ，2～6倍程度大きな値を示している。砂の状態と比較すると，ひずみより求めた鉛直力は乾燥，中間，湿潤状態の順でその値が小さくなっているが，重錘衝撃力の鉛直成分は，乾燥状態が他の状態より大きな値を示しており，中間と湿潤状態はほぼ同程度の値を示している。つぎに，図-6の重錘衝撃力の水平成分および荷重計から測定された水平力と入射角度の関係をみると，入射角度が小さくなくても水平力は増加せず，入射角度が60度以下になると両者ともほぼ一定の値になっており，両者にはっきりとした差は見られない。砂の状態を比較するために，縦軸に荷重計で測定された水平力をとり，横軸に重錘衝撃力の水平成分をとると図-7のようになる。図中実線は，両者が等しい時を表している。入射角度が小さく，砂の状態が乾燥，湿潤状態のとき，重錘衝撃力の水平成分の値が荷重計で測定された水平力より小さい傾向になっている。これらを整理すると以下ようになる。

(A) 重錘が斜めに落下し緩衝材に衝突すると，鉛直落下に比べ衝撃力は小さくなり，そのとき生じる水平力は入射角度が小さくなくても大きくなり，ある一定に値に収束する。この原因として，斜めに重錘が落下すると，砂にせん断力が働き，重錘衝撃力がこのせん断力以上になると，砂に滑りや飛散などが生じる結果と考えられる。また，図-7で述べた重錘衝撃力の水平成分の値が荷重計で測定された水平力より小さい傾向になっていることもこの原因と考えられる。

(B) 重錘衝撃力の鉛直成分とひずみより求めた鉛直力の値には，大きな差が生じた。この現象は，既往の鉛直落下実験でも確認されており，その原因として砂の付加質量，あるいは装置の固有周期の影響などが考えられるとされているが，そのメカニズムは解明されておらず，今回の実験においても判明していない。また，重錘衝撃力の水平成分と荷重計から測定された値に大きな差が生じていないのは，荷重計を土槽の上部に設置したためと推測される。

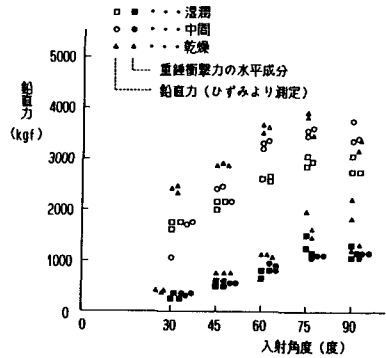


図-5 入射角度と鉛直力

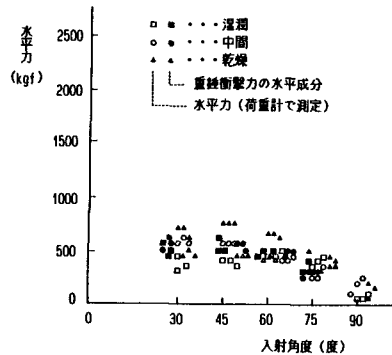


図-6 入射角度と水平力

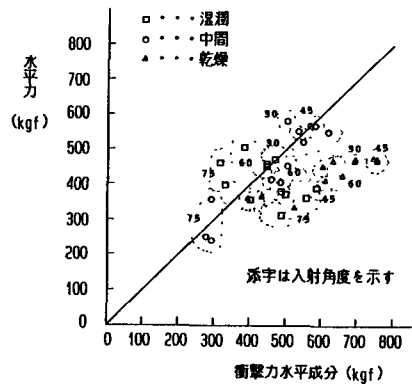


図-7 衝撃力水平成分と水平力

4. 水平力算出の実用式の提案

これまでの実験結果に基づき、設計水平力算出のための実用式の提案を行う。

今回の実験で測定された項目を、それぞれつぎのように定義する。荷重計から測定された水平力を P_{HR} 、重錘衝撃力から求めた水平成分を P_{HA} 、ひずみより求めた鉛直力を P_{US} および重錘衝撃力から求めた鉛直成分を P_{UA} とする。 P_{US} の測定結果は図-5よりわかるように、 P_{UA} に比べ2~6倍程度大きな値を示しており、前述したように各種の要因を含んだ値であり、水平力の検討には適さないので除外する。また、重錘衝撃力は図-4に示したように、入射角度が小さくなると小さくなっている。これは、砂に滑りや飛散などが生じた結果と考えられるが、これらの要因を考慮して水平力を検討するには不明な点が多い。

現在設計に使用されている衝撃力公式¹⁾は、鉛直落下に対するものである。ここでは設計の簡便さと安全性を考慮して、入射角度が90度(鉛直落下)の場合の鉛直重錘衝撃力の平均値 P_{U0} を基準に考えることにする。

重錘が斜めに落下したときの衝撃力を P 、水平成分を P_H 、鉛直成分を P_U 、水平面に対する入射角度を θ とすると、 $P_H = P \cos \theta$ (1)、 $P_U = P \sin \theta$ (2) で表せる。いま、縦軸に P_H / P_U を、横軸に入射角度をとり、各入射角に対する P_{HR} (荷重計で測定された水平力) を P_{U0} で除した結果をプロットすると図-7のようになる。図中、実線は砂に滑りなどが生じない場合 ($P_H / P_U = P \sin \theta / P \cos \theta = \cot \theta$) を表している。その結果、入射角度が60度以下になると値は一定となり、砂に滑りなどが生じていることを表している。このことは、水平力が60度以下で一定となることと一致する(図-5)。また、この時の値は、0.25~0.45の範囲にあることがわかる(図中の破線は0.35の時を示す)。この値を μ とすると、 $P_H = \mu P_U$ (3) と表される。一方、滑りが発生しない75度以上の入射角度については、 $P_H = P_U \cot \theta$ (4) で表される。これらの式(3)および(4)に式(2)を代入すると、それぞれ、 $P_H = \mu P \sin \theta$ (5)、 $P_H = P \cos \theta$ (6) となる。いま、砂が滑り始めるときの入射角度を求めると、 $0.35 = \cot \theta$ より、 $\theta \approx 70$ 度となる。

実際の設計における水平力の算出にあたっては、設計衝撃力 P を求め、安全側の設計になるよう μ を0.45にとり式(5)および(6)より得られる P_H に代入し、その結果の小さい方の値を採用すればよいと考えられる。

5. あとがき

落石が斜めに落下する時に発生する水平力を求める実用式の提案を行ったが、まだ不明な部分も多く今後も引き続き研究が必要である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，1983年7月。

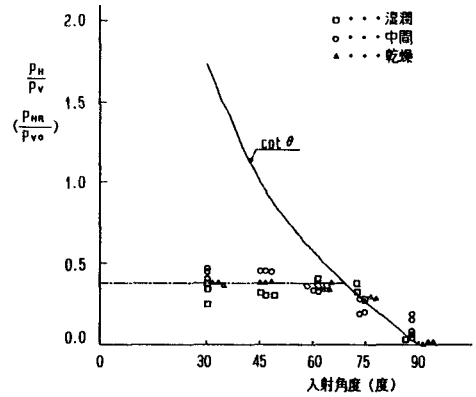


図-8 入射角度と P_H / P_U