

1. はじめに

土石流が堤体に衝突した際に発生する衝撃力について検討するとき、これまでのいくつかの研究例にみられるように、衝撃荷重の発生原因によってその考え方を大きく二つに分けることができる。一つは衝撃荷重の発生を堤体と土石流中に含まれる巨礫との衝突によるとする考え方（固体理論による土石流荷重）であり、もう一方は土石流という流体と堤体との衝突によるとするもの（流体理論による土石流荷重）である。本研究はこのうち土石流を流体として扱ったときに発生する衝撃力に着目し、水路実験を行うことによって衝撃力発生時に起こっている現象の把握、説明を試みるものであり、今回は土石流が堤体に直角に衝突する場合について述べる。具体的には、土石流の衝撃力を水路実験で直接測定できる堤体型の荷重測定器を製作し、これを用いることによって諸条件に応じた土石流の衝撃荷重を測定すると共に、衝撃荷重発生時前後の流体の形状変化と荷重の相関を経時的に捉え、さらに衝撃荷重の発生機構について考察を加えた。

2. 実験方法

実験装置の概要を図1に示す。水路は長さ7m、幅15cm、深さ15cmの鋼製水路で、側面はアクリル板張りとなっている。水路床には使用した試料と同じものが全面に張り付けてある。試料は直径5mmのほぼ球形のガラスビーズで密度は 2.53g/cm^3 である。水路は勾配 16° で設置しており、下流の方に荷重測定器を取り付け、その直上から4mにわたって試料であるガラスビーズを5cm厚に敷き詰めた。ここへ上流から初期給水 $Q_0(0.191/\text{s})$ を与えて完全に飽和させた後、発生装置内の水 $Q(8\sim 151)$ を一度に放流すると擬似土石流が発生する。堤体型荷重測定器に、発生させた土石流が衝突するときに測定器が受ける荷重を動歪み測定器を介した電磁オシロによって記録し、このときの様子をハイスピードビデオ(200f.p.s)によって側面から録画した。

荷重測定器は図2に概要を示したよう

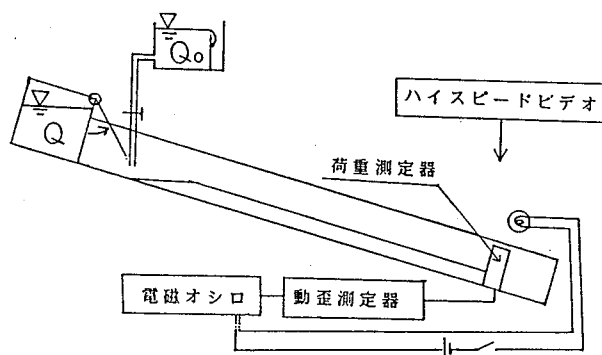


図1 実験装置

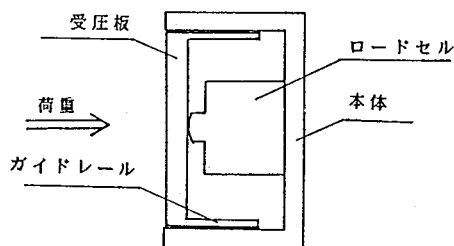


図2 荷重測定器概念図

なもので、鋼製の本体枠組みの前面にガイドレールによって水路長方向にのみ可動である鋼製の受圧板を取り付け、ここで受けた荷重を本体内部に取り付けたロードセルによって測定できるようにした。

この荷重測定器から電磁オシロまでのシステムとしての計測精度については、予備実験を行うことによって、数100HZの応答周波数を持ち、受けた荷重はほぼ正確に測定できることが確かめられた。

また、同一回路でビデオの画面内にパイロットランプを点灯させると共にオシロに信号を送ることにより、ビデオとオシロの時間軸をあわせた。

3. 衝撃荷重について

発生した土石流は流速が140～240cm/s、波高が4.5～6.0cmである。実験により得たオシロの出力波形の一例を図3に示す。これは代表的な波形例であり、計測された荷重は0.05～0.1secという短時間内にピークを持ち、その後は全ての例でほぼ一定の収束荷重まで減少していった。計測された最大荷重を流体断面積で除したものと流速との関係を図4に示す。図4中の線は流動を定常噴流と見なしたときの動水圧を示したものであり、これは次式(1)で与えられる。なお、このとき密度は実際にサンプリングを行った結果から 1.4g/cm^3 で均一であるとして用いた。

$$P = (\rho/g)V^2 \quad \text{----- (1)}$$

P: 定常噴流の動水圧 ρ : 密度 g: 重力加速度 V: 流速

図4を見ると最大荷重は流速に応じて大きくなる傾向がみられ、各流速で定常噴流と見なした時の動水圧の1.3～2.3倍の大きさとなっている。

4. 段波形状の変化と荷重の相関について

土石流段波が堤体型荷重測定器に到達する時点前後の0.01sec毎の段波形状を図5に、それらの時点

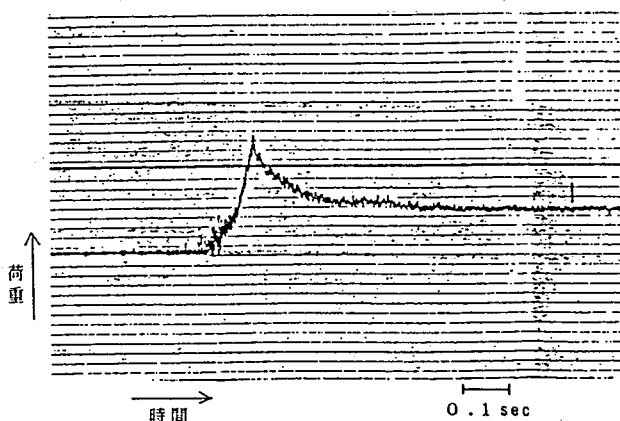


図3 電磁オシロ出力波形例

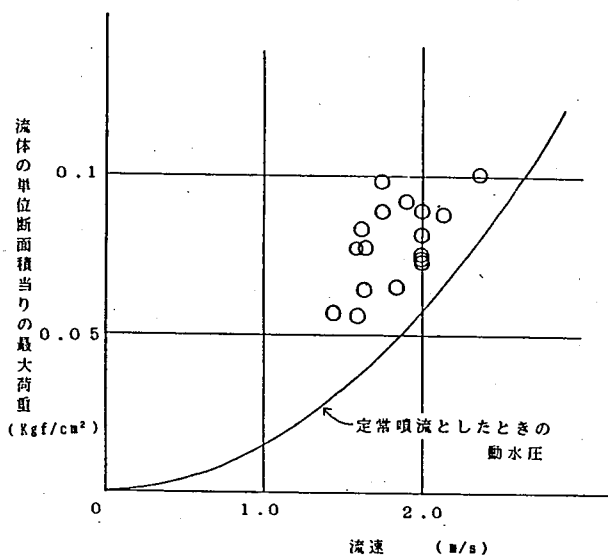


図4 流速と荷重の関係

で測定された荷重を図6に示す。ここで用いた土石流段波は流速200cm/s、波高4.2cmで、最大衝撃圧0.091Kgf/cm²（定常噴流とみなしたときの動水圧の1.5倍）を記録しており、段波形状が代表的な変化をした例である。これによると段波は堤体に到達した後、堤体面に沿って噴流状に上昇し、上昇部分が水路上流側に広がる0.05～0.06秒後に最大荷重を記録する。また0.04秒後から堤体前面と河床のつくるコーナーに堆積域が現れはじめ、その後数秒を要して成長していった。

5. 運動量変化による衝撃荷重の発生

ここで、流体の運動量変化を用いた衝撃荷重発生の説明を試みる。

まず、前章で取り上げた実験例を用いて段波が堤体に衝突したときの流体の運動量変化を読み取り、これによって各時点で堤体が受ける荷重を求めてみた。図5の点線で示すように土石流先端部を堤体との衝突の影響がないと考えられる後続流の一点で切り離し、この部分をひとつの質点系と考える。この部分が3次元方向（水路幅方向）に均一であると仮定して、側面からのビデオ画像から1/100秒毎の波形をX-Y2次元座標に投影していき、各時点での波形を表す平面の重心を求め、そのX成分（水路長方向成分）の変化から各微小時間毎のX方向の平均速度を求め、さらにその変化から各微小時間毎の平均加速度を算出した。一方、密度と投影図形面積、水路幅からこの質点系の質量を求め、これと加速度によって荷重を計算した。以上のようにして運動量変化から求めた荷重と実測荷重を図6に示す。これを見ると荷重がほぼ最大になるまでは計算値と実測値にかなりの一致がみられ、この範囲においては流体の運動量変化がそのまま荷重となって現れているといえる。その後計算値は実測値に比べて小さくなるが、これはこのころから現れたす堆積域の影響と思われる。

次に簡単なモデルを用いて、土石流先端部が堤体へ衝突した時の変形過程で発生する荷重の大きさについて考察を加える。図7に示すように波形をX-Y2次元座標に投影して、波高H、長さX_εの

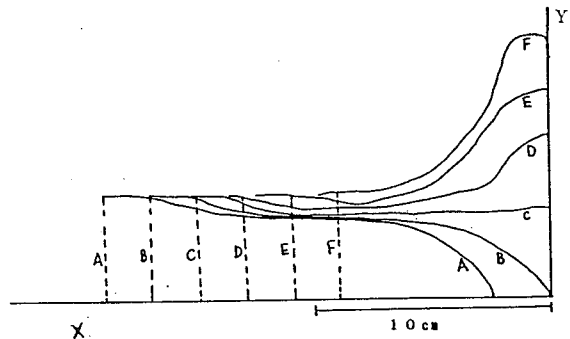


図5 先端部の変形

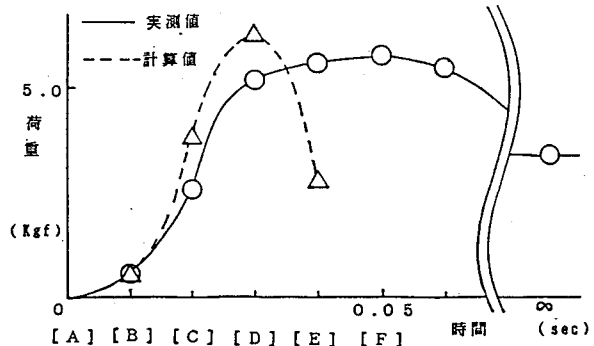


図6 実測荷重と運動量変化からの計算荷重

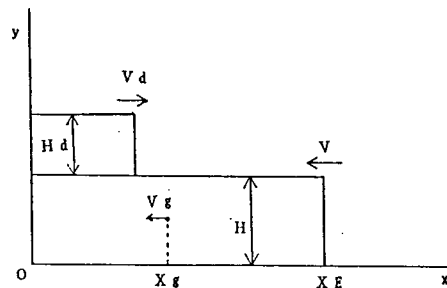


図7 先端部の変形モデル

矩形段波が速度 V で堤体に向かってきて衝突したとき、段波変形部分が元の段波の上部に高さ H_d 、幅 X_c の矩形に盛り上がり、この部分の上流側の端が速度 V_d で遡っていくとしたら、若干の計算の後、時刻 t におけるこの部分の重心の X 成分 X_g 、重心の速度の X 成分 V_g 、加速度 α は次のようになる。

$$X_g = \frac{1}{2 X E} \left\{ \left(1 + \frac{H}{H_d} \right) V^2 t^2 + 2 X E V t + X E^2 \right\} \quad (2)$$

$$V_g = \frac{1}{2 X E} \left\{ \left(1 + \frac{H}{H_d} \right) V^2 t + X E V \right\} \quad (3)$$

$$\alpha = \left(1 + \frac{H}{H_d} \right) \frac{V^2}{X E} \quad (4)$$

このとき、この部分の質量 M は

$$M = \rho H X E \quad (5)$$

であるから荷重 F は (4)、(5) より

$$F = M \alpha = \left(1 + \frac{H}{H_d} \right) \rho H V^2 \quad (6)$$

一方、この次元での定常噴流の動水圧力を表す式は次のようになる。

$$F_p = \rho H V^2 \quad (7)$$

(6)、(7) よりこのような波形変形をするとき、運動量変化によって得られる荷重の大きさは定常噴流の動水圧による荷重の $(1 + H/H_d)$ 倍であり、この値は H_d のとりかた (V_d のとりかた) により、いくらでも大きくなることがわかる。これを実際に起こる現象に当てはめて考えると、波形変形過程の中に部分的に上述のような変形要素はいることにより実験でみられたような大きな衝撃荷重が発生すると思われる。

5. おわりに

今回の実験から土石流段波が堤体に衝突するときの衝撃荷重の大きさについての情報、およびこのときの波形と荷重の関係についての経時的情報を得ることができた。また、先端部の変形のしかたによっては運動量の荷重への変換によってかなり大きな衝撃力が発生する可能性があることを示し、この考え方を実験に適用してみるとこれで発生荷重を説明できることがわかった。今後は様々な条件での衝撃力発生について研究を進めていきたい。

参考文献：水山高久；砂防ダムに対する土石流衝撃力算定とその問題点－新砂防，112, S54

平尾公一、他；段波の衝撃圧に関する基礎的実験－新砂防，76, S45