

京都大学農学部 ○三好岩生 小橋澄治 鈴木雅一

1. はじめに

筆者らはこれまで、土石流の流体としての取扱による衝撃力について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を把握し、そのメカニズムを解明すべく研究を進めてきた。前報¹⁾において、水路実験を行って土石流が堤体に衝突する際の衝撃荷重を測定した結果を報告すると共に、段波先端部を質点系的に取扱うと、この部分の運動量変化により衝撃荷重を説明できることを示した。本報では、更にいくつかの実験を行ったので、この結果を報告し、段波先端部の変形過程と衝撃荷重の関係について考察を進める。

2. 実験方法

実験装置の概要を図1に示す。水路は長さ7 m、幅15 cmの鋼製水路で、側面は透明の亚克力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を全面に張り付けて河床粗度をつけた。試料は直径5 mmのほぼ球形のガラスビーズで密度は 2.53 g/cm^3 である。手法としては、予め水路に試料であるガラスビーズを5 cm厚に敷き、ここにまず初期給水を与え完全に飽和させたのちに水路上流部の発生装置から水を一度に放水することによ

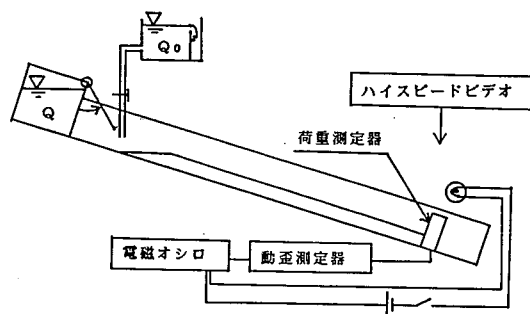


図1 実験装置

て疑似土石流を発生させた。各測定システムは前報¹⁾と同様であり、発生した土石流は、水路下流端に設置した堤体型の荷重測定器に衝突し、このときの荷重を記録すると共に、このときの様子をハイスピードビデオ(200fps)によって側面から録画した。

3. 衝撃荷重値と段波先端部の挙動について

土石流が堤体へ直角に衝突するときの力を広い流速範囲で測定し、最大荷重と流速の関係で示したのが図2である。図2の中に示した主働土圧とは土石流の停止後に堤体に作用する筈である静的な土圧であり、土石流の最終堆積形状からクーロンの土圧公式によって算定した。この値は今回の実験範囲では最終堆積形状が常に等しいので流速に関わらず一定となる。これによると測定最大荷重がこの主働土圧に一致するのは流速が非常に遅い範囲だけであり、明確な衝撃力が現れる流速範囲では静的な力、あるいは重力の影響は小さく、測定される荷重のほとんどが動的な力であるといえよう。

図3は流速に対する測定された最大荷重を土石流体の断面積で除したもののとの関係を示している。この図に示される定常噴流の動水圧による荷重は(1)式によって示される。

$$F = (\rho / g) A V^2 \quad (1)$$

ここでは密度は 1.4g/cm^3 として計算してある。この図からわかるようにほとんどの流速範囲において測定最大荷重は定常噴流の動水圧の約2倍前後であり、定常噴流の動水圧のみでは説明できないことになる。

図4は土石流が堤体に衝突した後の先端部の挙動を示すものである。最大衝撃力発生時の形状を表すのは図4のFの形であるが、このとき堤体との衝突によって変形しているのは先端から約20cm以内の部分である。

次に衝撃力発生時の土石流段波と堤体の位置関係について検討する。段波が堤体に衝突してから最大衝撃力が発生するまでの時間（作用時間ということにする）と土石流流速の関係を図5に示す。これによると流速が大きくなるほど作用時間は小さくなり、流速と作用時間を掛け合わせた値はほぼ一定となり、つまり先端部が衝突してから衝撃力が発生するまでの土石流の移動距離はほぼ一定(10cm)ということであり、最大衝撃力発生時に堤体に達している部分の元の流動深は、この土石流の最大流動深よりも小さく、徐々に大きくなっていく途中であるといえる。

これらの点から考えると今回の実験で捉えた土石流の衝撃力の発生は土石流段波が堤体に衝突したときの形状変化が直接的要因であると考えられる。また当然、土石流の衝撃力を評価するのに必要な要素（温度など）は土石流の後続流は無関係であり、先端部のそれが採用されるべきであろう。

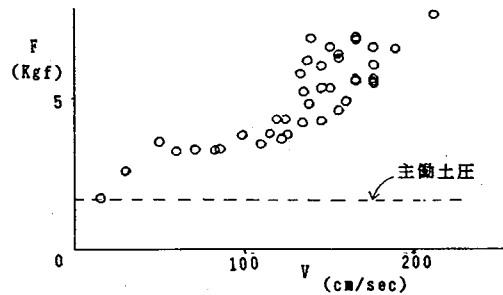


図2 流速と荷重

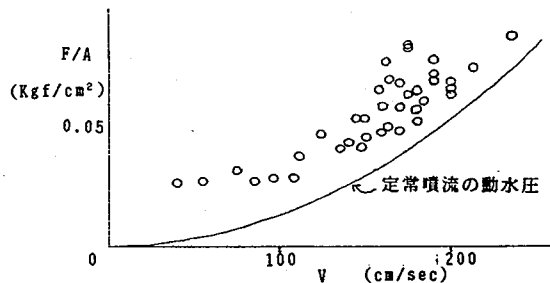


図3 流速と流体断面積当りの荷重

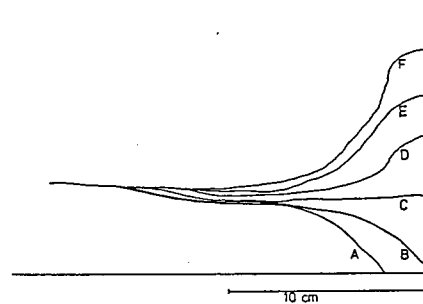


図4 土石流先端部の形状変化

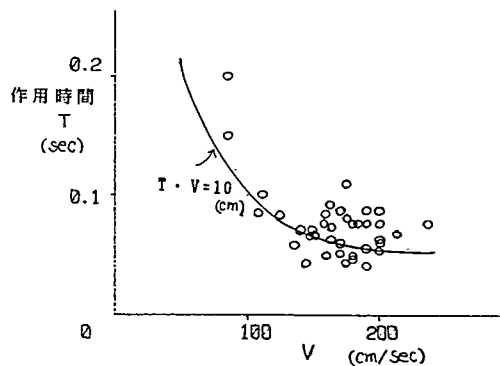


図5 流速と作用時間

4. 段波先端部の変形と衝撃力

前報¹⁾では衝撃力の発生機構として図6のモデルで土石流先端のある部分を質点系として取り扱い、この部分の堤体に衝突する際の変形による重心の移動から土石流体のX方向の運動量変化を考え、土石流体にこの運動量変化が起こる反作用として衝撃荷重が発生するとした。すなわち、図6で先端部が堤体に衝突した後に、土石流段波の変形部分（元の波高から上へ盛り上がる部分）が上流へ遡るときに図の記号を用いると(2)式で示される力が堤体に加わることがわかった。

$$F = (1 + H/H_d) \cdot \rho \cdot H \cdot V^2 \quad (2)$$

この力は定常噴流の動水圧による荷重に比べて $1 + H/H_d$ 倍となるため、 H_d のとり方によってはいくらでも大きい力が発生する可能性があることになる。

ここではこの考え方を発展させ、段波先端部の変形と衝撃力の変化を考察することにする。

まず、図7において、次々とX方向からきた非圧縮性の土石流体の矩形段波が、堤体面に沿って次々と H_d の幅で積みあがっていくものとする。それぞれの時間での先端部の変形は H_d によって決定され、この H_d が時間とともに変わっていくことによって各時間での衝撃力と変形を決定できる。 H_d の変化は衝撃力と変形過程を規定する重要な要素であるが、ここでは元の段波の波高 H と堤体との衝突後に上昇して行くときの幅 H_d との比 $\alpha = H_d/H$ を考え、 α は時間の関数で $\alpha(t)$ とすると、このときに堤体与えられる荷重 F は次の(3)式で表される。

$$F = (\rho/g)AV^2 + (\rho AVH/2g) \cdot d\alpha/dt \quad (3)$$

ここに、 A は流体の断面積である。この式の右辺第1項は定常噴流の動水圧を示し、第2項に示されるように、堤体の受ける荷重 F は α の時間に対する増加率 $d\alpha/dt$ によって規定され、言い替えれば堤体に衝突した段波の変形部分に遡上成分が急激に増加するときに大きい衝撃荷重が発生する。

次にこのモデルを用いて、実験でみられた土石流の衝撃力発生時の段波先端部の変形と、このときに測定された衝撃荷重のシミュレーションを試みる。

土石流の波高 H と密度 ρ が元の段波の先端からの長さの関数であるとしてそれぞれ $H(x)$ 、 $\rho(x)$ とする。これらの先端からの長さの関数として表されるものは、元の土石流の流速を与えることにより時間の関数とみることできる。 $(x = Vt)$ つまり、これらの関数形を決めることによって各時間での段波先端部の形状と衝撃荷重がわかることになる。各関数形の決定方法としては、波高 $H(x)$ は実際の波形から適当な関数形を決定することにし、密度 $\rho(x)$ は実際にサンプリングを行った結果を基に、経験式として次式(4)のように決めた。(図8)

$$\rho(x) = (0.15x)^{1/2} + 0.2 \quad (4)$$

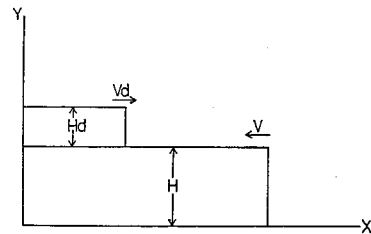


図6

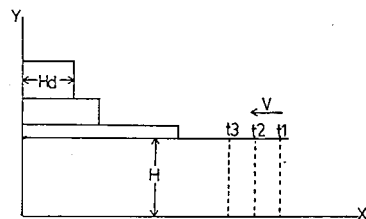


図7

$\alpha(t)$ は流体の90度方向を変えて堤体に沿うY方向へ進む成分と180度方向を変えてX軸方向に遡る成分の比を示すとも理解できる。もちろん、 $\alpha(t)$ は現段階で一義的に決定できないので、実験結果に合うよう決定する。 $\alpha(t)$ は土石流の衝撃力の発生機構を解明する上で重要な要素であると考えられ、まだまだ検討の余地を残しているが、ここでは一例として式(5)のように与えた。

$$\alpha(t) = 1.1 + 200t - \cos \{ (1000t + 5)/20 \} \quad (5)$$

段波が堤体に達してからの時間と α 、 $d\alpha/dt$ との関係を図9に示す。

図10が実験結果と計算結果を比較したものである。計算は実験で経時的に測定された衝撃力と土石流先端部の堤体への衝突による変形形状とにできるだけ合致する $\alpha(t)$ の関数形を決定して行ったものである。ほぼ満足すべきシミュレーション結果といえるだろう。

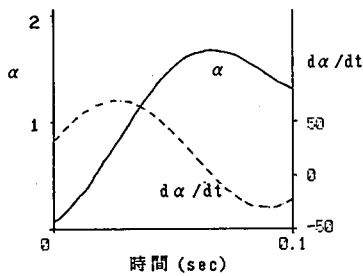


図9 α 、 $d\alpha/dt$ の例

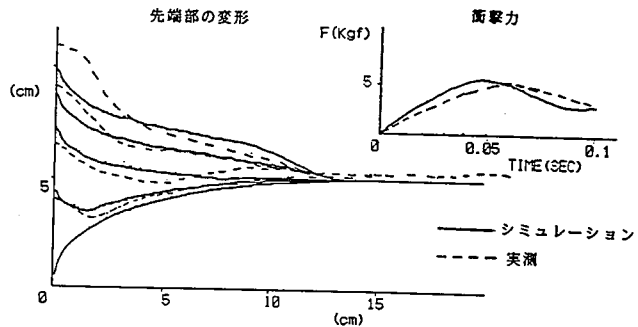


図10 土石流の衝撃力、先端部の変形のシミュレーション結果

先端部の変形を表す線は下から 衝突後
0sec, 0.01sec, 0.03sec, 0.05sec, 0.07sec
での形状を示す

5. おわりに

水路実験によって土石流の衝撃力の値を測定し、土石流段波が堤体に衝突した後の衝撃荷重の経時変化と段波先端部の変形過程を明らかにすることにより、段波先端部の変形に伴う流体の運動量変化によって衝撃荷重を説明することを試みた。噴流に模したモデルを用いて、段波先端部の変形を規定する数値 α を適当な時間の関数としたシミュレーションによって実験でみられた段波先端部の変形と衝撃荷重の経時的な変化をほぼ再現することができた。今後は土石流の衝撃力の発生機構に大きい役割を果たす段波先端部の変形を規定する値 α についてさらに詳しく検討する予定である。

参考文献 1)三好・武居・笹原：土石流の衝撃力に関する実験的研究、昭和63年度砂防学会研究発表会概要集