

立命館大学理工学部 正員 大同 淳之 学生員 ○吉栖 雅人 中嶋 健太

1. はしがき 土石流衝突時に、重力式砂防ダムのブロック状破壊および鋼性ダムの座屈がみられる。そして、破壊の状態から破壊時の応力を推算すると、その応力は、土石流の衝突速度から求めた運動量から推算される力より大きい。本報告では、土石流を非圧縮性流体または圧縮性流体とみなして、それぞれの衝撃圧の発生機構を考察し、それぞれのモデルを実験結果に適用して、その妥当性を検討し、式中の数値を求めた。さらに構造物の設計に役立つよう、必要な物質常数を測定した結果について述べる。

2. 1 土石流が非圧縮性流体とみなせるときの衝撃力

流体の運動方程式を積分して、ポテンシャルを Ω とすると
$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + \int \frac{dp}{\rho} + \frac{u^2}{2} + \Omega = 0 \quad (1)$$

連続式は、 $u = \text{grad } \phi$ より、非圧縮性を考慮して
$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (2)$$

となる。式(1)は衝突の瞬間 u と Ω が消失するとみなせるので
$$p = \rho \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \quad (3)$$

となる。したがって、流体の非定常性によって、引起こされる衝撃力 p は、式(2)を適当な境界条件で解き、得られた ϕ を(3)に代入することによって得られる。

2. 2 土石流が非圧縮性流体とみなせるときの衝撃力の測定

砂礫、砂礫と水の混合体、または砂礫をペーパーボンドでブロック状に固めたものを幅10cm深さ30cmの水路で流動させ、水路下端にとりつけた真鍮板に衝突させ、そのときの圧力を測定した。圧力計は、底面より1.5cmの位置にとりつけた。衝突するときの土砂の形状および衝突速度はビデオより求めた。また式(2)は差分近似解法によって解く。その時の境界条件は流れの表面で $\phi=0$ 、水路底面で $\phi_z=0$ 、上流側の遙か離れた所で $\phi=0$ 、衝撃版位置で $u=\phi_x$ という速度をもつとした。ここで z は水路底面に対して垂直方向、 x は流動方向を示す。衝撃力は ϕ を式(3)に代入することによって得られるのであるが、土石流の衝突後の時間的挙動は明らかでないので解析的に解くことができない。そこで速度ポテンシャル ϕ は堤体衝突時の最大値 ϕ_0 が Δt 後に0になりその間は線形的に変化すると仮定する。即ち、式(3)を差分で表し、

$$p = \rho \frac{\phi_0 - \phi_1}{\Delta t} \approx \rho \frac{\Delta \phi_0}{\Delta t} \quad (4)$$

と表す。式(4)において、 ϕ_0 は式(2)に上述の境界条件を与えて求め、圧力 p は実験値による測定値を与え、これを満足する速度減衰時間 Δt を求める。 Δt は砂礫の場合 $1.5 \times 10^{-3} \text{sec}$ 、砂礫と水の混合体の場合 $5.8 \times 10^{-4} \text{sec}$ 、ボンドで固めた砂礫の場合 $1.6 \times 10^{-4} \text{sec}$ となった。測定圧力は1秒を単位とする運動量差による力と比較すると、砂礫の場合3~8倍、砂礫と水の混合体の場合2~40倍、ボンド固めた砂礫の場合500~5000倍となった。以上の考察によると、堤体直前の速度ポテンシャル ϕ が大きい場合に衝撃力が大きくなる。前述した方法により ϕ を求めた結果、堤体の下部ほど衝撃力が大きくなることが分かった。砂防ダムの破壊例を調べると、砂防ダムの下部が底抜けのような形で抜けている場合がある。実験における例として寺本らは、崩土が滑動してきたときの圧力分布を測定し、底面ほど大きな圧力が生じることを示した。これは一様な速度で衝突したケースと解釈される。構造物の設計にあたって受圧面の傾斜による圧力の変化を数値計算で調べた。計算は受圧面の頭部が前方に 45° 、垂直、後方に 45° 傾斜した場合について、また流速分布としてa) 表面で最大、底面で零の直線分布、b) 一様分布、c) 底面で最大、表面で零の直線分布、d) 表面で最大の二次曲線で、いずれも流速は最大値10m/secとした。前に傾斜、後に傾斜かわらず、a)、c)、d)の分布形では流速の大きい付近に圧力の最大が生じるが、b)の一様分布では底面近くで圧力の最大が生じる。後ろに傾斜の時は前に傾斜および鉛直に比べて圧力が大きくでている等の結果を示した。計算の結果、

得られた全圧力の大きさはa)のケースを1とすると、前に傾斜および鉛直の場合c)は1.18倍、d)は1.37倍、b)は2.2倍である。後に傾斜しているときはa)は1.2倍となるが他は前の2者の場合とそれほど変わらない結果を示した。以上で、 Δt を与える限り土石流の衝突速度とその密度が与えられるとその衝撃力は計算できることが示された。

3. 1 土石流が圧縮性流体とみなせる時の衝撃力

対象とする現象が圧縮性の場合、連続式は

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho \nabla^2 \phi \quad (5)$$

となる。圧縮度 S を $S = (\rho - \rho_0) / \rho_0$ を用いると式(1)は、 $\frac{\partial \phi}{\partial t} = C_L^2 S + \frac{u^2}{2} + \Omega$ (6)

となる。衝突直後では、右辺第2項、第3項は省略でき、式(5)は、 $\nabla^2 \phi = \frac{1}{C_L^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}$ (7)

となる。圧力の偏り $\bar{p}$ は、 $\bar{p} = p - p_0 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right) (\rho - \rho_0) = C_L^2 \rho_0 S = \rho_0 \frac{\partial \phi}{\partial t}$ (8)

となる。したがって圧縮性流体のときは、式(7)を解き、この ϕ を式(8)に代入することによって圧力が得られる。式(7)を満たす解は $\frac{\partial \phi}{\partial (x - C_L t)} = u$ と表すことができ、ここで $\phi = f(x - C_L t)$ に

注意すると次式が得られる。 $p = \rho C_L u$ (9)

3. 2 土石流が圧縮性流体とみなせるときの衝撃力の測定

砂礫をペーパーバンドで固めた媒体の場合の衝撃力と速度の測定値は図1のように直線を示し、式(9)が成り立つことを示している。各媒体の衝撃波の伝播速度によりいくつかの直線に分類されている。式(9)

で衝撃力を予測する際、物質中の圧縮波の伝播速度 C_L は、試料の一端に超音波のパルスによって歪みを与え、これを他端で受け、2点間の歪の伝播時間より求めることにした。測定に使用した装置の試料の大きさは10cm x 30cm x 30cmで、10cmの部分で測定した。その結果、乾いているときより飽和しているときのほうが伝播速度が大きいことが分かった。土石流はフレッシュ

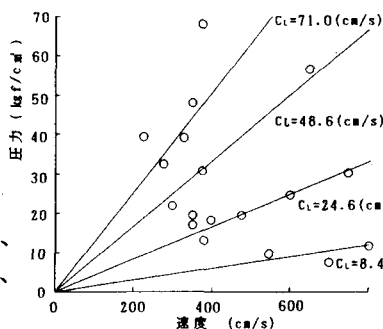


図1 圧力と速度の関係の一例

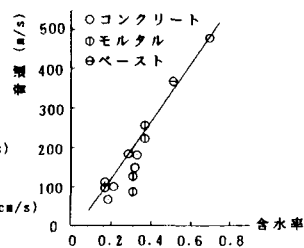


図2 フレッシュコンクリートの場合の伝播速度

コンクリートの状態に近いといわれる。フレッシュコンクリートについて測定した結果を図2に示す。これによって土石流の場合の伝播速度を推定できる。

4. むすび 土石流の衝撃力を非圧縮性流体の時と圧縮性流体の時に分けて、その算定法を提案した。非圧縮性流体の時は(5)式で速度ポテンシャルを求め、その時間についての微分値から圧力を求める方法について説明し、衝撃力は、速度減衰時間 Δt 中の速度ポテンシャルの変化に相当することを示した。この値は、1 secを単位として求めた運動量差から求められる力の何倍ぐらゐの力が Δt の間に生じているのかを示した。圧縮性流体の時の最大衝撃力は、非圧縮性流体の時と同じ取り扱いで密度の圧縮性を考慮してその解が $p = \rho C_L V$ と表せることを示した。実験結果も p と u の関係は直線関係を示した。土石流に相当する密度の範囲について衝撃波の伝播速度を測定して設計に役立つようにした。個液混合体では、含水比が大きいほど衝撃波の伝播速度は大きくなる結果を示した。 1) 大同：土石流が構造物に作用する衝撃力；第2回落石などによる衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集 pp89-94 1991