

土石流による衝撃力

Impact Force of Mud-Debris Flows Acting on Structure

大同淳之* 吉栖雅人** 中嶋健太***

By Atsuyuki DAIDO, Masahito YOSHIKUMI and Kenta NAKAJIMA

The pressure of mud-debris flow acting on an obstacle was evaluated for cases in which the mud-debris flow was regarded as a non-compressible, then as a compressible fluid. In a non-compressible fluid, an equation of the fluid motion describes an equilibrium between pressure and potential rate. For a compressible fluid, the force is calculated by the density, impact velocity, and propagation velocity of pressure in the fluid. Analytical results showed that in a very few times, the force acting on a structure was some times the expected momentum value(per second)

Keyword: fluid force, water hammer, impact

1. はしがき

土石流衝突時に、重力式砂防ダムブロック状破壊および鋼製ダムの座屈がみられる。その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。土石流の衝撃力が果たして異常に大きいものかについては、推測の域を出ないので、実験によって衝撃力を測定し、観測結果をもとにして、モデル化を試み、実験値との比較を行った。

衝突現象は、衝突する物体と受ける物体の相互作用で両者の物性、衝突面の形状、衝突速度に関係して、種々の挙動を示し、それぞれによって現象を説明する力学モデルが変わることが予想される。すなわち、土石流の衝突速度が大きいときは衝突時に流体は弾性体としての反応を示す。この場合には流体の圧縮性を考慮にいたした力学モデルでなければならない。一方、衝突速度が遅いときは、非圧縮性流体として取り扱うことが可能である。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。

* 正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科

** 学生員 立命館大学 理工学部土木工学科

*** 立命館大学 理工学部土木工学科

(〒603 京都市北区等持院北町56番地の1)

2. 土石流が非圧縮性流体とみなせるときの衝撃力

2・1 衝撃力の発生機構

流体の運動式、連続式は、

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \text{grad } p + K \quad (1)$$

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \text{div } u = 0 \quad (2)$$

となり、式(1)は、積分して、力のポテンシャルを Ω とすると、

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + \int \frac{dp}{\rho} + \frac{u^2}{2} + \Omega = 0 \quad (3) \quad \text{kgf/cm}^2$$

連続式(2)は、 $\text{div } u = 0$ より、 $u = \text{grad } \phi$ (4)

となり、 $\nabla^2 \phi = 0$ (5)

が得られる。衝突直後では、 $\frac{u^2}{2} + \Omega$ が消失するので

$$p = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (6)$$

となる。したがって、流体の非定常性によって、起こされる衝撃力 p は、式(5)を適当な境界条件で速度ポテンシャル ϕ について解き、それを式(6)に代入することによって得られる。

2・2 土石流の衝撃力の測定

砂れき、砂れきと水の混合体、または砂をペーパー用接着剤で固めた固体を幅10cm、深さ30cmの水路で重力流動、またはレール上を滑动させて、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および6.0cm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。このときに下端の圧力計で測定された圧力の一例を図-1に示す。上側の圧力計は、流れの流動深さより高い位置にあるため、直接衝突を受ける前に、先にも下端に衝突した流れの上昇流にさえぎられたためか、一般に下段に比べて圧力は小さかった。

式(5)を図-2に示す境界条件のもとに、上下間との速度が等しい場合について、差分法によって ϕ を求めた結果を、図-3に示す。境界条件は、流れの表面は、衝突後の微小時間内では、衝突の直前と同じ流体表面を維持するとして、 $\Phi = 0$ 、底面からのフラックスはないとして $\phi'_x = 0$ 、上流側のはるか離れたところで $\Phi = 0$ 、壁面では $u = \phi'_x$ という速度をもつとした。図-3(a)は、堤体直前および $x = 10.0\text{cm}$ 離れた点での ϕ を示し、底面ほど大きい。(b)は水路床に沿う ϕ の値で、堤体前面が一番大

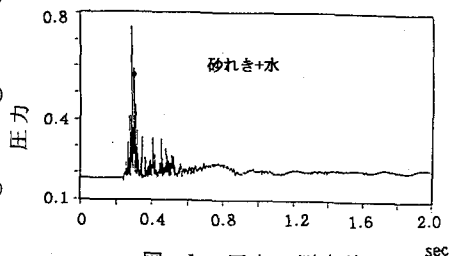


図-1 圧力の測定値

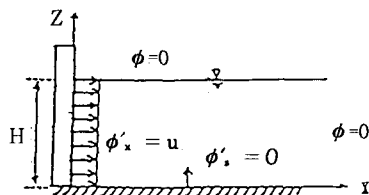


図-2 ϕ の計算のための境界条件

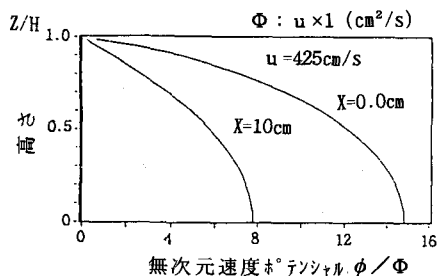


図-3 (a) ϕ の計算結果の一例

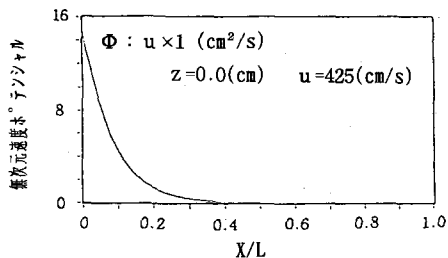


図-3 (b) 床面に沿う ϕ の分布

きい。計算に用いる流動長さは、土石流の層厚の4倍以上にとれば、計算値に長さの変化は表れていない。

衝撃力は、 ϕ を式(6)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。すなわち、式(6)を差分で表し、

$$p = \rho \frac{\phi_0 - \phi_1}{\Delta t} \approx \rho \frac{\phi_0}{\Delta t} \quad (7)$$

と表す。式(7)において、 ϕ_0 は式(5)に適切な境界条件を与えて求め、圧力 p は実験による測定値を与えて、式(7)を満足するポテンシャルの減衰時間 Δt を求める。水路底より1.5cmの高さにとりつけてある圧力計の測定値 p を用いて、求めた Δt は、衝突時の現象の複雑さを反映して、一定値ではなく、図4に示すように分布する。速度減衰時間 Δt と速度ポテンシャルおよび衝撃力との関係を図5に示す。

ϕ_0 と衝撃力 p を結び付ける最も適切と思われる Δt は、平均値であって、この場合 1.5×10^{-3} secである。砂れきの空隙内に水が満たされている状態のものについて測定した結果を図4(b)に示す。このケースでは、平均値は 1.7×10^{-3} sec、砂をペーパー用接着剤で固めたものでは 1.6×10^{-4} secとなった。

一般に設計に用いる衝撃力は、衝突速度が秒速で与えられるため、1sec間に通過する質量、および秒速 u を用いて運動量差から計算される。ここに示すように、衝撃は、 $\Delta t = 1.5 \times 10^{-3}$ sec程度の時間内の現象であるから、当然運動量を求めるときは、この Δt を時間単位として算定する必要がある。1secを単位として求めた運動量差から求めた力と実験による測定値を比較すると、例えば砂れきの場合について図6のようになり、測定値 $= k \cdot (1\text{secを単位とする運動量差から求めた力})$

として、 k の値を求めると、 $k = 3 \sim 8$ となり、平均して5.5となる。すなわち、1sec間を単位時間として求めた力の約5.5倍が、 Δt の間に作用することになる。砂をペーパー用接着剤で固めたものについて

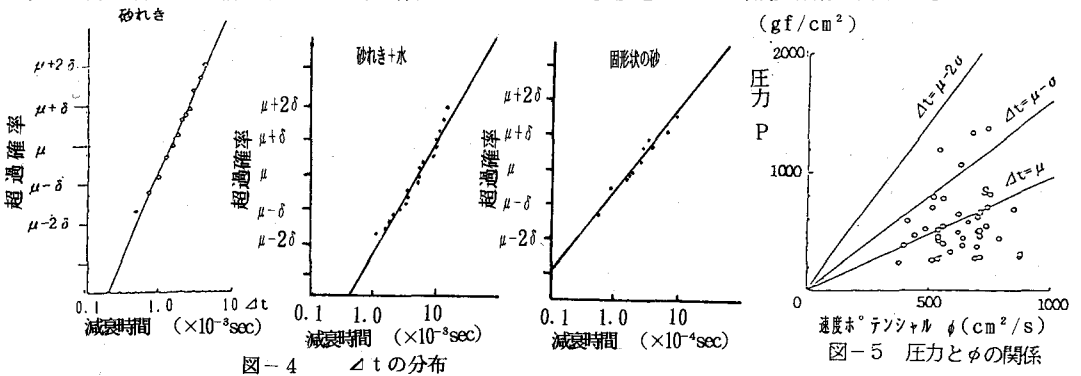


図-4 Δt の分布

図-5 圧力と ϕ の関係

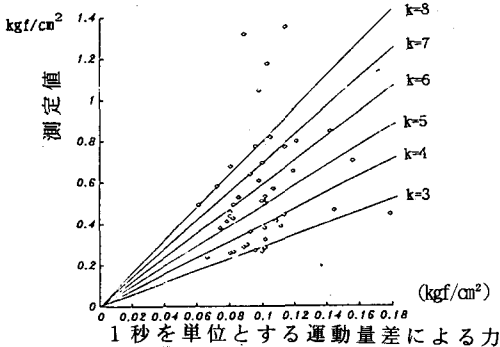


図-6 測定圧力と1secを単位とする運動量の差から得られた圧力との関係(砂れきの場合)

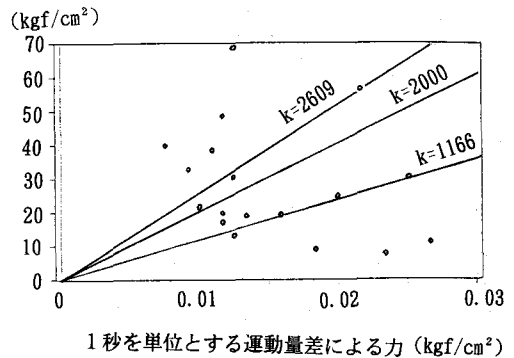


図-7 測定圧力と1secを単位とする運動量の差から得られた圧力の関係(固形状の砂の場合)

は、単位面積で長さ20 cmの質量がそれぞれの速度で衝突したとして運動量を求め、この力と測定圧力との比較を図-7に示す。この場合、 k の値は、1200~2600となっている。1秒間を単位として求めた運動量差による力 $\times 1\text{sec} = \text{衝撃力} \times \Delta t$ と考えると測定圧力は、この式の衝撃力の約1/2程度しか計測されていない。これは、圧力センサーの性能あるいは、圧力のサンプリング間隔が微小時間の力を正確に捉えていないと考えられる。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圧力が大きくなる。したがって図-3(a)のように、鉛直方向に一樣な速度で衝突したときは堤体の下部ほど衝撃圧力が大きくなる。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、図-8は、崩土が滑動してきたときの圧力分布を、寺本²⁾らが測定したもので、底面ほど大きな圧力を示している。これは一樣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知る必要がある。ただ、土石流を流動させて実験を行うと装置をかなり大規模にしない限り浅い流れになり、衝撃圧の分布を知ることは難しいので、数値計算で圧力に及ぼす構造物の受圧面の傾斜の影響を調べた。計算は受圧面の頭部が前方に 45° 、垂直および後方に 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) 一樣分布、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、いずれも最大流速は1.0 m/secとした。境界条件は、図-2に示すものと同様で、傾いた壁面で $u = \partial \Phi / \partial x$ という速度をもつとした。計算結果の一例を図-9に示す。絶対値は実験で検証しなければならないが、傾向は把握できる。前に傾斜、後ろに傾斜にかかわらず、どの場合も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)の一樣分布では、底面近くで圧力の最大が生じる。後ろに傾斜のときは、前に傾斜および鉛直に比して圧力が大きくでている等の結果を示した。圧力の無次元化に用いた Φ_0 は与えた流速と単位長さの積で表し、 Δt は減速時間 $1.5 \times 10^{-3}\text{sec}$ 、 ρ は衝突物の密度で、この計算では、 $\Phi_0 = 1.0 \text{ m}^2/\text{sec}$ としている。この計算で与えた運動量はa)、c)の場合を1とするとb)は4倍、d)は1.7倍を与えたことに相当する。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。後ろに傾斜しているときはa)について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。図-10は受圧面の傾斜による圧力分布の違いを示す。

ポテンシャルの減衰時間 Δt と衝突する物質との関係を、今後考察する必要があるが、 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、その衝撃圧力は計算できることが示された。

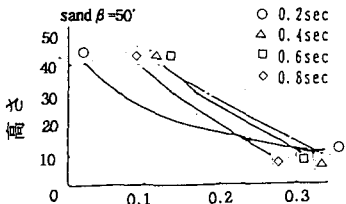


図-8 崩土の滑動に伴う衝撃圧力

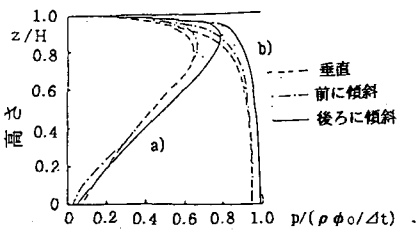


図-10 受圧面の傾斜による圧力分布の違い

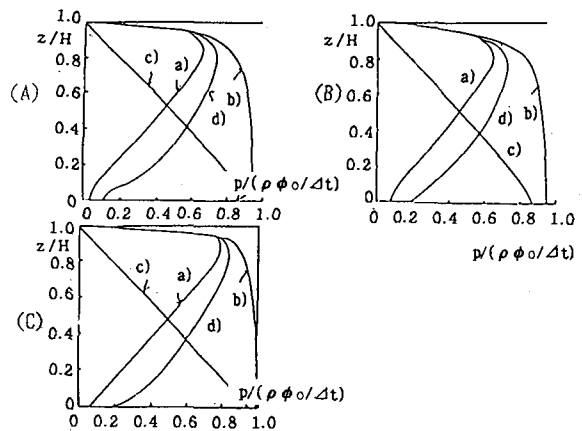


図-9 圧力分布 (A)前に 45° 傾いているとき
(B)垂直 (C)後ろに 45° 傾いているとき

3・1 土石流が圧縮性流体とみなされる場合

対象とする現象が圧縮性の場合、式(2)の連続式は、

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho \nabla^2 \phi \quad (8)$$

となる。圧縮度 S を $S = (\rho - \rho_0) / \rho_0$ とすると、式(6)は、

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial S}{\partial t} \quad (9)$$

となる。式(3)の圧力項は、

$$\int_{\rho_0}^{\rho} \frac{dp}{\rho} = \int_{\rho_0}^{\rho} \frac{\partial p}{\partial \rho} \frac{d\rho}{\rho} = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_0 \log \frac{\rho}{\rho_0} = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_0 S \quad (10)$$

となる。したがって、式(3)は、

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = C_L^2 S + \frac{u^2}{2} + \Omega \quad (11)$$

となる。運動の変化が、激しいとき右辺第2項、第3項は省略でき、式(8)は、

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{C_L^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (12)$$

となる。圧力の偏り $\bar{p}$ は、

$$\bar{p} = p - p_0 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right) (\rho - \rho_0) = C_L^2 \rho_0 S = \rho_0 \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (13)$$

となる。したがって圧縮性流体のときは、式(12)を解き、この ϕ を式(13)に代入することによって圧力が得られる。

圧縮性を考慮する場合、堤体が受ける衝撃力は、流体中を伝わる波動の反力によってもたらされる。圧縮性流体中を平面波が伝わる時、式(12)を満たす解は、

$$\frac{\partial \phi}{\partial (x - C_L t)} = u \quad (14)$$

と表すことができる。ここで、 $\phi = f(x - C_L t)$ (15) に注意すると、

$$p = \rho C_L u \quad (16)$$

が得られる。流体が弾性体と見なされるとき、 σ を応力、 λ をラメ定数、 μ を剛性率、 δ を Kronecker のデルタ、 ν をポアソン比とすると、Hooke の法則より、圧力 p は、

$$p = \rho C_L u \quad C_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (17)$$

となる。

3・2 土石流を圧縮性流体と見なせるときの衝撃力の測定

式(17)によると、衝撃力 p は、速度の一乗に比例することになる。 p と v との測定値は、図-11のように直線を示し、式(17)が成り立つことを示している。このデータで I、II、III は土石流先端の衝突形状を表し、I は先端部が垂直状態、II は若干勾配をもち、III は先端部が崩れた状態であった。これらは、それぞれ、衝突したときの流体密度の差を表しているといえる。また、 p と v の関係の勾配は、 ρC_L を示し、 C_L の値は図-11の線に示した値になる。

式(17)で、衝撃力を予測するとき、 C_L の値が必要である。水路実験では、流動する固液混合体の範囲が水路勾配で固定し、異なった混合状態の物質の C_L を求めることが困難なので、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、物質中の圧縮波の伝播速度を求め

ることとした。測定に使用した装置の試料の大きさは、
 10 cm × 30 cm × 30 cm で、10 cm の距離で測定した。

この方法は、金属などの特性値の測定に用いられている。圧力 (kg/cm²)

本測定でも、ヤング係数 E、ポアソン比 ν が既知のジュラルミンを用いて測定した C_L と式 (18) で求めた C_L は、ほぼ一致している。一般に、空気中の伝播速度は 331 m/sec、水では 1480 m/sec、また石柱について測定した値は 5420 m/sec と示された。図-12 は、ガラスまたは砂れきの場合、およびそれらの空隙が水で飽和されている場合の伝播速度を測定したもので、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を示す。土石流はフレッシュコンクリートの状態に近いと言われる。フレッシュコンクリートについて測定した結果を図-13 に示す。これらによって土石流の場合の伝播速度を推定できよう。

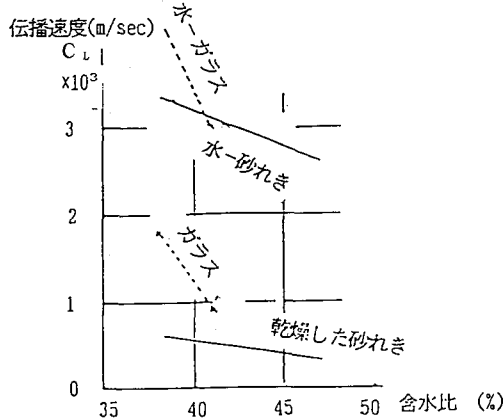


図-12 ガラス球および砂れきの場合の伝播速度

4. むすび

- 1) 土石流の衝撃力を非圧縮性流体の時と圧縮性流体に分けて、算定法を提案した。
- 2) 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、実験値と比較して、衝撃力は、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数倍の力が Δt の間に生じることを示した。
- 3) 圧縮性流体の時の最大衝撃力は、非圧縮性流体の場合と同じ取り扱いで密度の圧縮性を考慮して、その解が $p = \rho C_L u$ 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。
- 4) 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。

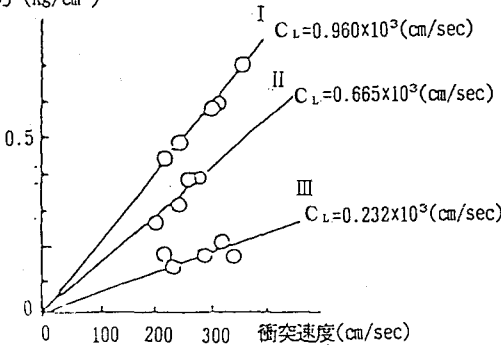


図-11 圧縮性流体とみなしたときの
 圧力と衝突速度の関係

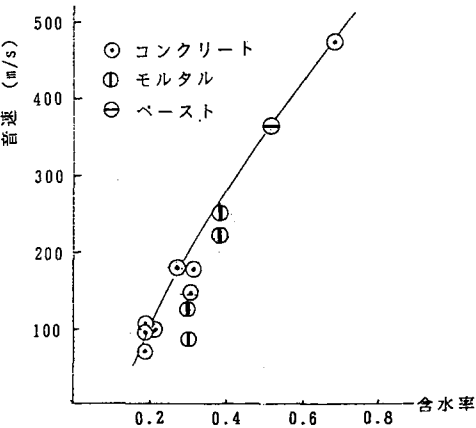


図-13 フレッシュコンクリート
 の場合の伝播速度

1) 大同：土石流が構造物に作用する衝撃力：第2回落石等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 2) 寺本、右近、工藤：崩壊土砂が擁壁に及ぼす衝撃力に関する実験、砂防学会研究発表会概要集 pp140-141 1986