

### (37) 土石流による衝撃力と構造物の応答

立命館大学理工学部 大同 淳之

#### 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製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。土石流の衝撃力が果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。即ち、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れた力学を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、式中の係数を求めた。これらの結果についてのべる。

#### 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、

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \text{grad} p + K \quad (1) \quad \frac{D\rho}{Dt} + \rho \text{div} u = 0 \quad (2)$$

となり、式(1)は、積分して、ポテンシャルを $\Omega$ とすると、

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

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

$$\nabla^2\phi = 0 \quad (5)$$

が得られる。急激な速度変化が生じるとき

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

となる。したがって、流体の非定常性によって、引起こされる衝撃力 $p$ は、式(5)を速度ポテンシャル $\phi$ 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. 土石流が非圧縮性とみなせられるときの衝撃力の測定

砂れきまたは砂れきと粘土混合体を幅10cm、深さ30cmの水路で重力流動させ、水路下端にとりつけた真鍮板に

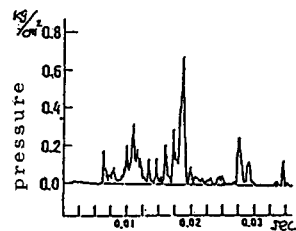


図1 測定圧力の測定値

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に位置にとりつけた。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もとめた。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、一般に下段にくら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、上下間の速度が等しい場合について、有限要素法によって求めた結果を、図3に示す。図3(a)は、堤体直前および $X=3.0$ 離れた点での $\phi$ を示し、低面ほど大きい。(b)は水路床における $\phi$ で、堤体前面が一番大きい。計算に用いる流動長さは、堤長の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、 $\phi$ を式(6)に代入することによって得られるのであるが、土石流が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 $\phi$ は堤体衝突時の最大値 $\phi_0$ が、 $\Delta t$ 後に零になり、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、

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

と表す。(7)式において、 $\phi_0$ は式(5)に適切な境界条件を与えて求め、圧力 $P$ は実験値による定値を与えて、これらを満足するポテンシャルの減衰時間 $\Delta t$ をもとめる。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、式(7)を満たすように定めた $\Delta t$ 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 $\Delta t$ 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。 $\phi_0$ と衝撃力 $p$ を結び付ける最も適切と思われる $\Delta t$ は、分布の平均値であって、この場合 $1.5 \times 10^{-3}$ secである。

一般に衝撃力は、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 $u$ をもち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 $\Delta t$ 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、図6のようになり、

$$\text{測定値} = k \cdot (1\text{secを単位とする運動量から求めた力})$$

として、 $k$ の値を求めると、 $k=3\sim 7$ となり、平均して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倍が、 $\Delta t$ の間に作用することになる。

衝撃圧力の測定値を運動量の差 $m'u'$ から求めるとき、

$$m'u' = kmu$$

ここに、 $a$ は単位面積、 $l$ は圧力に関与する土石流体積に相当する単位面積当たりの長さで、 $u=u'$ とおけるので、その長さは、

$$\sigma' l / \sigma l = k \Delta t$$

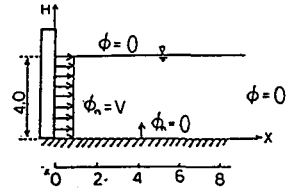


図2  $\phi$  の計算のための境界条件

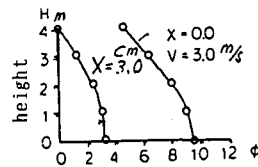


図3(a)  $\phi$  の計算結果の一例 (a)

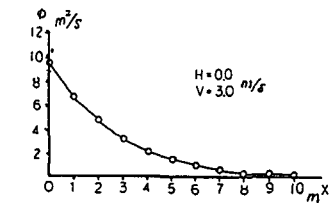


図3(b) 床面に沿う  $\phi$  の分布

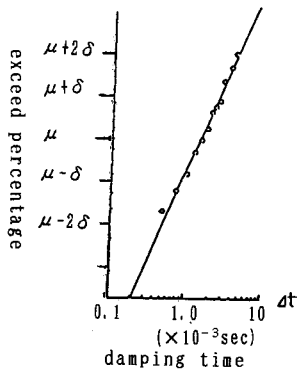
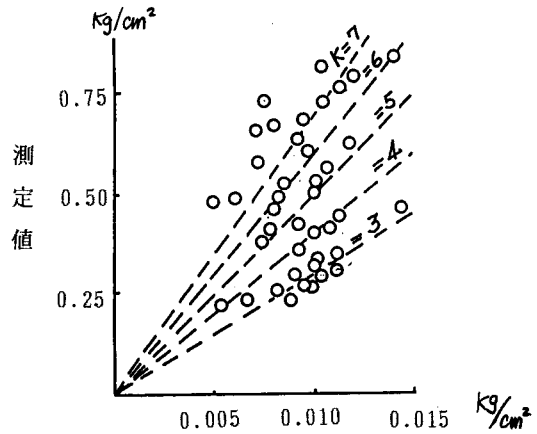


Fig.5 図4 Δt の分布



一秒を単位とする運動量差による力

図6 m' にそうとうする衝撃圧伝播速度の分布

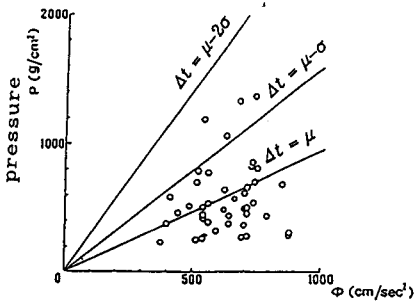


図5 圧力とφの関係

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6の場合で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しらべると、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1は、崩土が滑動してきたときの圧力分布を、寺本らが測定されたもので、底面ほど大きな圧力を示している。これは一様な速度で衝突したためと解釈される。

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、流速分布としてa)表面で最大、底で零の直線分布、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、いずれも最大値は流速10m/secとした。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 $\partial\Phi/\partial z=0$ 、上流側はるかにはなれたところで $\Phi=0$ 、壁面では $V=\partial\Phi/\partial x$ という速度をもつとした。計算結果の1例を図8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、後に傾斜かわらず、どの場合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。Φは与えた流速と流れの高さの積で表しΔtは減速時間を

用いる。 $\rho$ は衝突物の見かけの密度で、この計算では $\Phi_0 = 10\text{m}^2/\text{sec}$ とした。

この計算で与えた運動量はa)、c)の場合と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8は変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 $\Delta t$ が、実際の土石流において、 $1.5 \times 10^{-3}\text{sec}$ になるかと言う点について、今後考察する必要があるが、 $\Delta t$ 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。

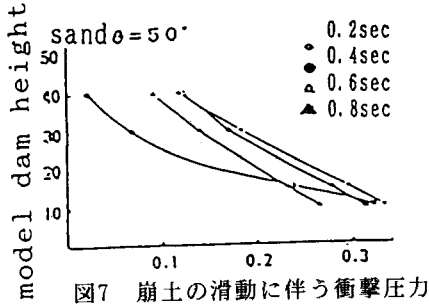


図7 崩土の滑動に伴う衝撃圧力

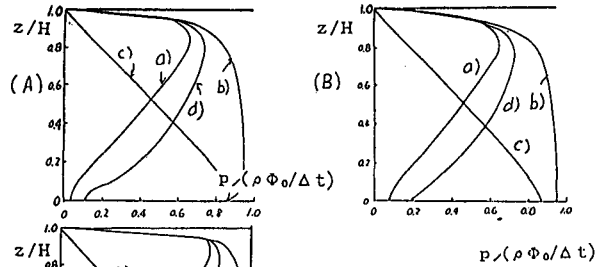


図8 圧力分布 (A)前に45°傾いているとき (B)垂直 (C)後ろに45°傾いているとき

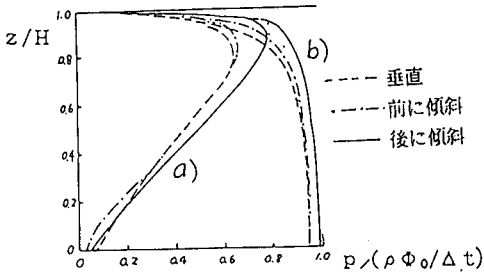


図9 受圧面の傾斜による圧力分布の違い

### 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、

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho_0 \nabla^2 \Phi \quad (8)$$

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、

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

となる。運動の変化が、はげしいとき右辺第2項、第3項は省略でき、式(8)は、

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

となる。圧力の偏り  $p$  は、

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

となる。したがって圧縮性流体のときは、式(12)を解き、この  $\phi$  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、堤体を受ける衝撃力は、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)をみたす解は、

$$\frac{\partial \phi}{\partial (x - Ct)} = v \quad (14)$$

と表すことができる。ここで、

$$\phi = f(x - Ct) \quad (15)$$

に注意すると、これを積分することによって、

$$\phi = v(x - Ct) \quad (16)$$

この式を(13)に代入すると、

$$p = \rho C v \quad (17)$$

が得られる。流体が弾性体と見なされる時、 $\sigma$  を応力、 $\lambda$  をラメ定数、 $\mu$  を剛性率、 $\delta$  を Kronecker のデルタ、 $\nu$  をポアソン比とすると、Hooke の法則より、圧力  $p$  は、

$$p = \rho C_L v \quad C_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (18)$$

となる。

### 3.2. 土石流を非圧縮性流体と見なせる時

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  $v$  との関係は、図10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、 $C_L$  を示し、それらの値は図10の線上に示した値になる。

式(17)で、衝撃力を予測するとき、 $C_L$  の値が必要である。先の実験では、流動する固液混合体の範囲が固定し、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にした。測定に使用した装置の試料の大きさは、10cm × 30cm × 30cm で、10cm の部分で測定した。用いた試料は、2、3 の粒径の砂を対象に、飽和度および空隙率を変えるため、発砲スチロールの粒子を混合して、空隙率を変えたものについて測定した。この方法は、金属などの特性値の測定に用いられている。本測定でも、ヤング係数  $E$ 、ポアソン比  $\nu$  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。測定した結果を図10に示す。一般に、空気中の伝播速度は 331m/sec、水では 1480m/sec、また、石柱について測定した値は 5420m/sec と示された。これに対し、図12の値はかなり小さい。

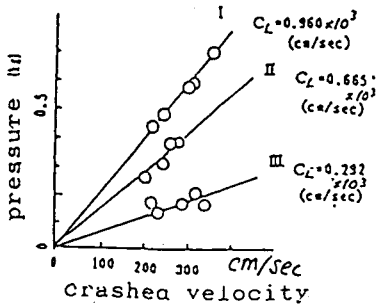


図10 圧力流体とみなしたときの圧力と衝突速度の関係

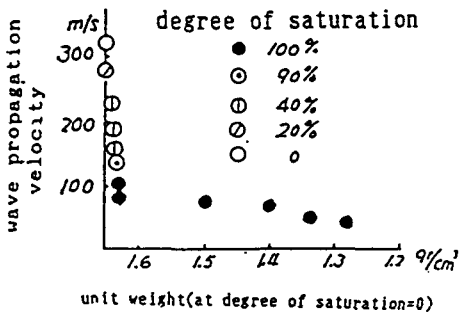


図11 伝播速度と土石流単位変量との関係

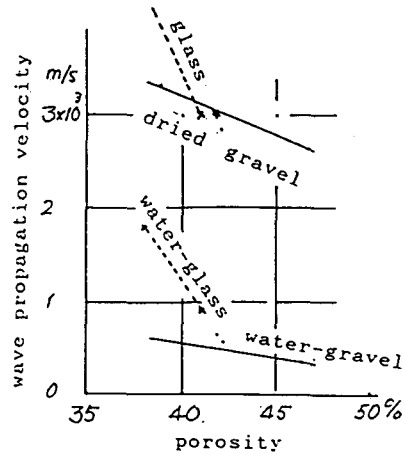


図12 ガラス球および砂れきの場合の伝播速度

#### 4. むすび

- 1) 土石流が非圧縮性流体または圧縮性流体のときのそれぞれについて、衝撃圧の発生機構を考察した。
- 2) 非圧縮性流体のときは(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、 $\Delta t = 1.5 \times 10^{-3}$  secの減衰時間中の速度ポテンシャルの変化に相当することを示した。そして、1secを単位として求めた運動量差から求められる力の5倍ぐらいの力が $\Delta t$ の間に生じ、このときの質量 $m'$ は $\Delta t$ の間に物体中の衝撃波が伝播する領域の質量に近いことを述べた。
- 3) 圧縮性流体のときの最大衝撃力は、 $p = \rho C_L V$ と表せることを示した。そして、土石流の密度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。

- 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