

## (19) 土石流が構造物に作用する衝撃力

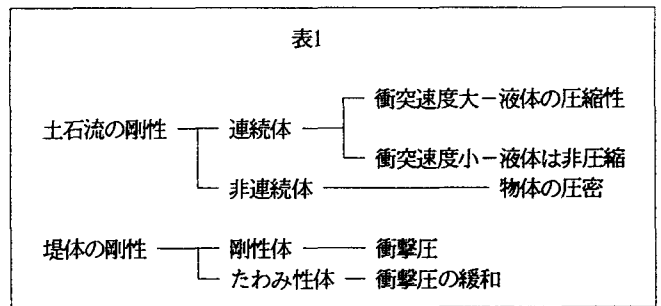
立命館大学理工学部 大同 淳之

### 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とも云われている。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、土石流衝突の様相及びその時の砂防ダムの応答について観察されていないため、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たし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。また、土石流が崩壊土砂のように、流体を含まず固体分のみから成るような場合、固体粒子の間に空隙が存在することから、衝突時にはまず固体分の圧密が生じ、圧密に要する時間が衝撃加圧時間より大きい場合には、衝撃圧力は圧密作用に費やされて、構造物の受ける力は大きくならないと予想される。また、構造物の剛性によっても変化する。これらの組合せは表1の通りである。

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. 衝撃力の発生機構

土石流が堤体におよぼす衝撃力を算定するとき、一番問題にしなければならないのは、土石流のモデル化である。衝撃力という点からみて流体力学的に扱うか、固体力学的に扱うかである。これは、衝突の速度と、土石流の性質によって決まる。ここでは流体力学の立場から求めることにする。

#### 2.1. 土石流を非圧縮性流体とみなせるときの衝撃力

流体の運動式は、

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

となり、連続式は、

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

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、

$$u_j = \text{grad}\Phi \quad (4)$$

より、

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

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)の連続式の  $u \text{grad} \rho = 0$  を考慮して、

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} = \rho_0 \nabla^2\Phi \quad (7)$$

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

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

となる。式(3)の圧力項は、

$$\int_{\rho_0}^{\rho} \frac{dp}{\rho} = \int_{\rho_0}^{\rho} \frac{\partial p}{\partial \rho} \frac{d\rho}{\rho} = \left( \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_0 \log \frac{\rho}{\rho_0} = \left( \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_0 S \quad (9)$$

となる。したがって、式(3)は、

$$\frac{\partial\Phi}{\partial t} = C^2 S + \frac{u^2}{2} + \Omega \quad (10)$$

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、

$$\nabla^2\Phi = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2} \quad (11)$$

となる。圧力の偏り $\bar{p}$ は、

$$\bar{p} = p - p_0 = \left( \frac{\partial p}{\partial \rho} \right) (\rho - \rho_0) = C^2 \rho_0 S = \rho_0 \frac{\partial\Phi}{\partial t} \quad (12)$$

となる。したがって圧縮性流体のときは、式(11)を解き、この $\phi$ を式(12)に代入することによって得られる。

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(11)をみたす解は、

$$\frac{\partial\Phi}{\partial(x-Ct)} = v \quad (13)$$

と表すことができる。ここで、

$$\Phi = f(x-Ct) \quad (14)$$

に注意すると、これを積分することによって、

$$\Phi = v(x - Ct) \quad (15)$$

この式を(12)に代入すると、

$$p = \rho Cv \quad (16)$$

が得られる。流体が弾性体と見なされるとき、 $\sigma$ 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、

$$\sigma_{ij} = \lambda e_{kk} \delta_{ij} + 2\nu e_{ij} \quad , \quad \lambda = \frac{\nu E}{(1+2\nu)(1-\nu)} \quad , \quad \nu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (17)$$

より、圧力  $p$  は、

$$p = \rho C_L v \quad (18)$$

ここに

$$C_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

となる。

土石流は、水、粘土、石などが混在した物質で、この物質が堤体衝突時に波動を伝播させる物質であるか考察する必要があるが、一部は、水、空気のような媒質を通して、一部は固体粒子間の圧力あるいはせん断の形で力を伝えると考えられるので、単純なモデル化での考察では、現象の本質を見誤る恐れがあるので、水、粘土および石が混在する一つの物質として扱うことにする。

### 3. 土石流の衝撃力に付いての模型実験

3.1. 砂れきまたは砂れきと粘土混合体の衝撃力測定実験  
幅10cm、深さ30cmの水路で土砂を重力流動させ水路下端にとりつけた真鍮板に土砂を衝突させ、そのときの圧力を真鍮板にとりつけた圧力計で測定した。圧力計は、低面より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。図に衝突前後の砂れきの流動体の縦断形状を砂れきのみ及び砂れきと粘土の混合体について示す。流れは、衝突したあと、一部は壁の全面に堆積し残りは壁に沿って上昇する。後続の流れは堆積した土砂の上をせん断流動して衝突し、先の流れと同じことを繰り返す。このときに下端の圧力計で測定された圧力の一例を図3に示す。図3の圧力は3つの相に分けられ、Iの相は先端が衝突した直後の圧力で最大値を示し、IIの相は、ピーク後の圧力減少期で、IIIの相はそのあとまた圧力が増加していることから、板前面に堆積が生じた後の圧力と考えられる。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。

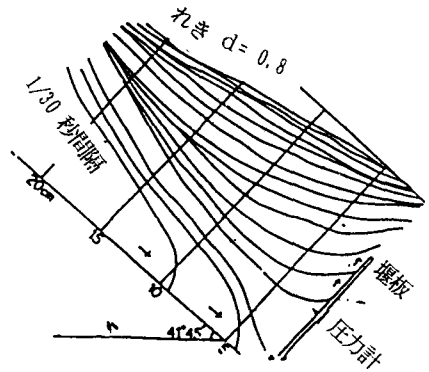


図1. 衝突前後の流動形状(砂れき)

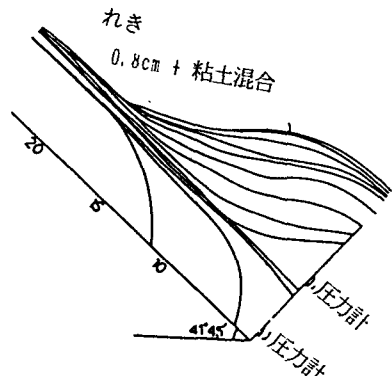


図2. 衝突前後の流動形状(砂れき+粘土+水)

図4は砂れきをみの土砂流についての測定圧力を示す。

#### 4. 衝撃力の算定

##### 4.1. 土石流が非圧縮性とみなされるとき衝撃力

式(5)を図6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 $\phi$ を求めた結果は、図7に示すようにとおりである。図7(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。図7(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)にお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、定式化されていないので、式(6)を解析的に解くことはできない。そこで、速度ポテンシャル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、

$$p = \rho \frac{\Phi_0 - \Phi_1}{\Delta t} \approx \rho \frac{\Phi_0}{\Delta t} \quad (19)$$

と表す。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(19)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、それらは図5に示すように分布する。こうして得られた速度減衰時間 $\Delta t$ と速度ポテンシャルおよび衝撃力の関係を図8に示す。 $\phi$ と衝撃力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。

以上の考察によると、堤体直前の速度ポテンシャル $\phi$ 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9は、寺本らによって測定されたもので、底面ほど大きな圧力を示している。このような事例について、個々に述べた方法で説明できるものと思われる。

図10は、流速分布が放物線分布、直線分布および一様分布のときに、 $\phi$ の値の変化を求めたもので、流速は上層の流速は3m/secに一致させている。(1)は等速度ポテンシャル線、(2)は堤体前面の速度ポテンシャル、(3)は衝撃力で $\rho=1.39\text{g/cm}^3$ 、 $\Delta t=1.5\mu\text{sec}$ を用いている。

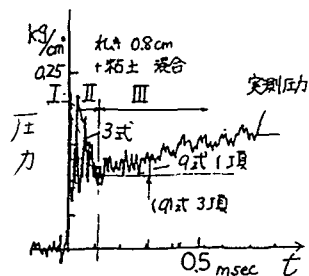


図3. 測定圧力の一例

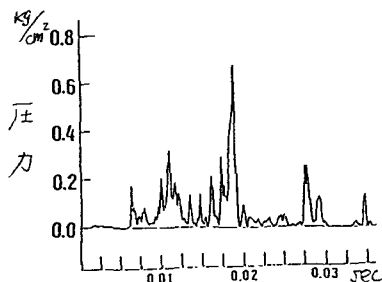


図4. 衝撃力の記録波形例

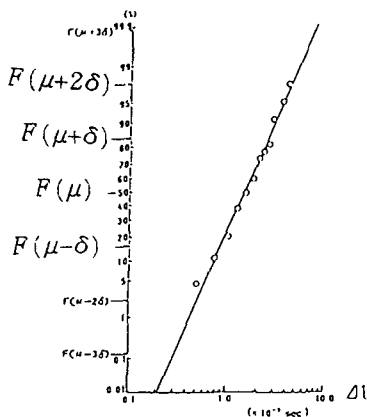
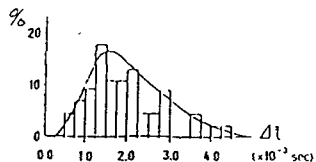


図5.  $\Delta t$ の確率曲線

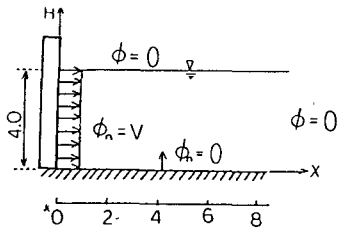


図6 境界条件

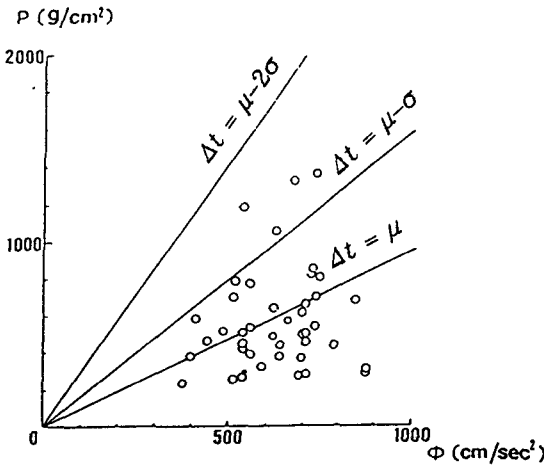


図3.5.2

図8 速度ポテンシャルと衝撃力と速度減衰時間との関係

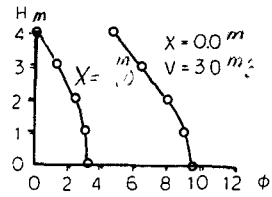


図7(a) 堤体前面部(x=0.0)での速度ポテンシャルの値

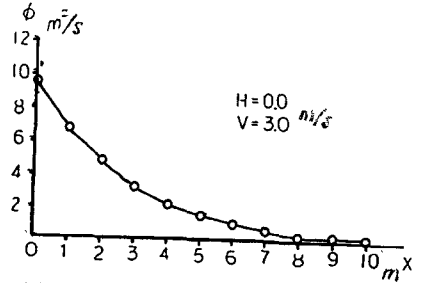


図7(b) 河床部(H=0.0)における水平方向の速度ポテンシャルの値

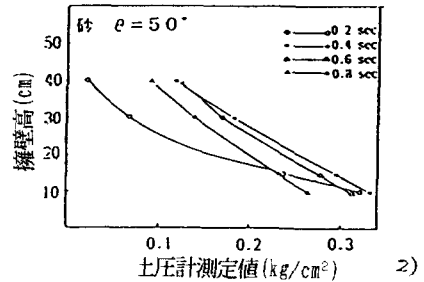


図9 寺本らによる衝撃圧の測定値

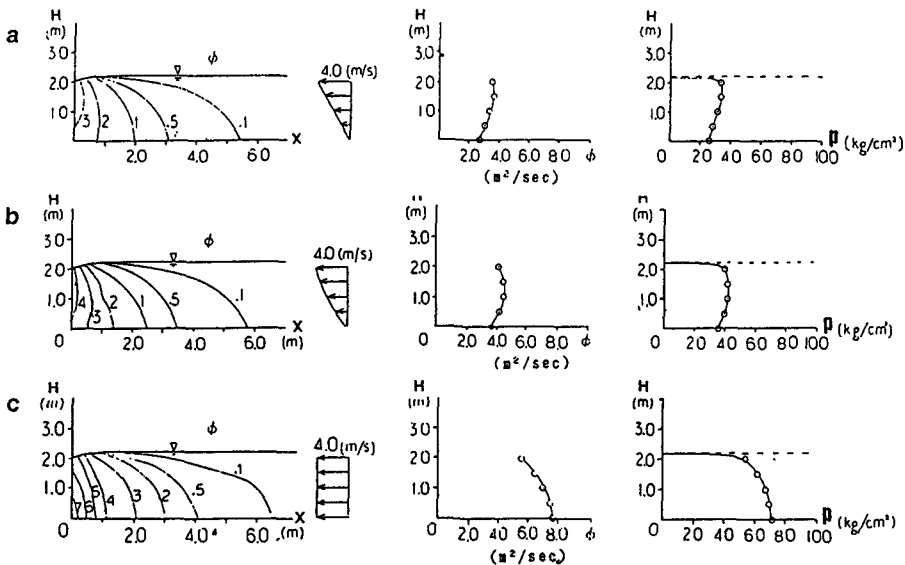


図10 流速分布の変化による衝撃圧の変化

#### 4.2. 土石流を 圧縮性流体と見なせるとき

式(16)によると、衝撃力 $p$ は、速度の一乗に比例する。実験の $p$ と $v$ との関係は、図11のように直線を示し、式(3)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。式(16)で、衝撃力を予測するとき、 $C_L$ の値が必要である。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。この装置でヤング係数 $E$ 、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(2)で求めた $C_L$ は、ほぼ一致している。測定に使用した装置の試料の大きさは、 $10\text{cm} \times 30\text{cm} \times 30\text{cm}$ で、 $10\text{cm}$ 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。測定した結果を図12に示す。一般に、空気中の伝播速度は $331\text{m/sec}$ 、水では $1480\text{m/sec}$ 、また、石柱について測定した値は $5420\text{m/sec}$ と示された。これに対し、図12の値はかなり小さい。これは、式(17)は弾性体を対象として表した式であるため、固液混合体のように、完全弾性体でないものについては、見掛けの $C$ になること、また与える波長に比して大きな障害物、たとえば空隙などがあると反射、散乱を起こす、あるいは減衰する等の問題がある。しかしながら、この測定の結果によると、従来より水路実験で得られた $C_L$ の値は、粒子が個々に衝突しているケースもあり、一般には、本測定で行っている場合よりも、れきの密度が小さいのでこの測定値はほぼ妥当と見なしてよい。この測定値から推測すると、粒子間でのパルスの伝播は、水中や空気中を伝わることなく、れき表面の摩擦力によって伝播していると推測される。

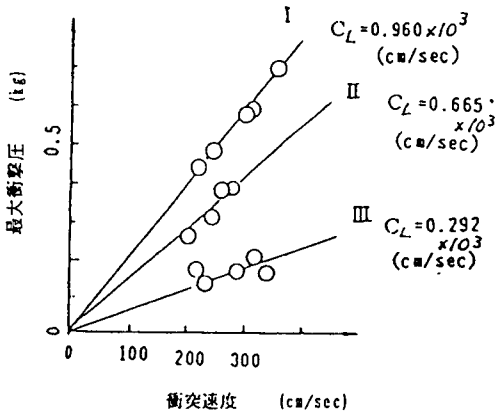


図11 衝撃圧と流速の関係

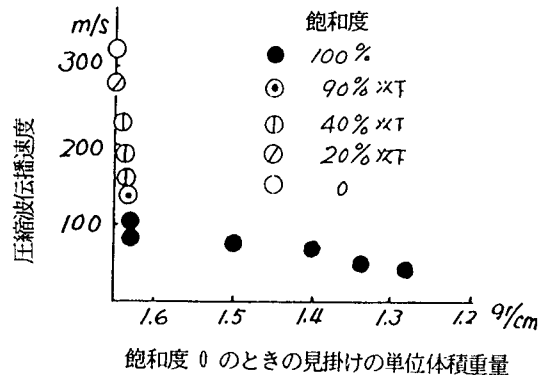


図12 圧縮波伝播速度

#### 5. 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、衝撃圧の発生機構について考察した。
  - 2) 非圧縮性流体のときは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、 $\Delta t = 2 \times 10^{-3} \text{sec}$ 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。
  - 3) 圧縮性流体のときの最大衝撃力は、次前に報告したように $p = \rho C_L V$ と表せることを示した。実験に用いた材料と衝突速度の範囲において、実験の結果は圧縮性流体とも見なせることを示した。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 落石の衝撃力およびロックシェッドの設計に関するシンポジウム論文集 pp74-76 1986
  - 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 1986
  - 3) 奥井：堤体に作用する土石流の衝撃力に関する研究、立命館大学大学院修士論文 1987