

II-276

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 著者はさきに、土石流が弾性体であるとみなして、一次元的取扱を行い、結果として衝撃圧 p を $p = \rho c V$ 、ここに ρ : 土石流の密度、 c : 土石流中の音の伝播速度、 V : 衝突速度と表した。この式は、流体が弾性体として扱える衝突速度の範囲では正しいが、衝突速度が遅いときは、土石流が弾性体としての応答をするかどうか不明である。また流れの規模が取り入れられない欠点があった。そこで、土石流の種々の性質、規模が取り入れられる形に考察を行う。

2. 衝撃力の発生機構

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、連続式はそれぞれ

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

式(1)を、積分して、ポテンシャルを Ω とすると、ベルヌーイの式

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

になる。連続式(2)は、 $\text{div } u = 0$ より、 $u = \text{grad } \Phi$ (4)

これを(1)式に代入すると

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

が得られる。急激な速度変化が生じるとき式(3)で第3項、第4項を無視できるので

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

となる。したがって、流体の非定常性によって、引き起こされる衝撃力 p は、式(5)を速度ポテンシャルについてとき、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せる場合

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

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (7)$$

となる。 $(\rho - \rho_0) / \rho_0 = s$ とおき、 s を圧縮度とすると

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial s}{\partial t} \quad (8) \text{ となる。式(3)の圧力項は、}$$

$$\int_{s=0}^s \frac{dp}{\rho} = \int_{s=0}^s \frac{\partial p}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\rho} = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_0 \log \frac{\rho}{\rho_0} = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_0 s \quad (9)$$

と書き表せる。したがって、式(3)は $\left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_0 = C^2$ とすると

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

となる。運動の変化がはげしいとき、第2項、第3項は省略でき、式(8)は、

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

となる。圧力の変化 $\bar{p}$ 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)をとき、この Φ 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

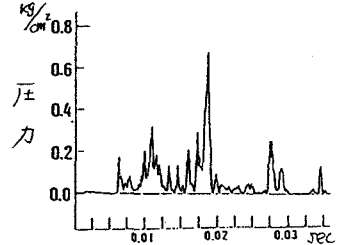


図1. 衝撃力の記録波形例

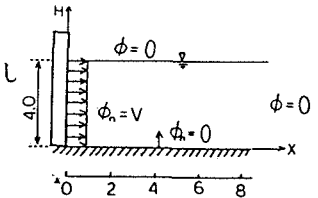


図2 境界条件

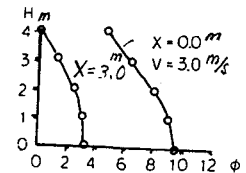


図3 堤体前面部 (x=0, 0) での速度ポテンシャルの値

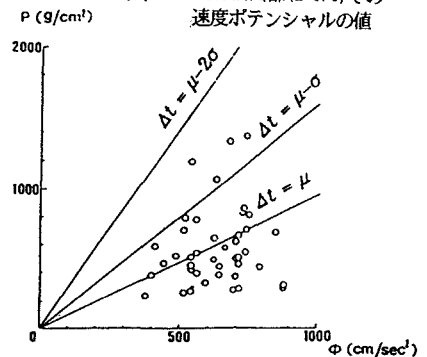


図3.5.2

速度ポテンシャルと衝撃力と速度減衰時間との関係

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
とき、式(11)をみたす解は $\Phi = v(x - Ct)$ (13)となる。
これを、式(12)に代入すると

$$p = \rho C v \quad (14)$$

が得られる。もし、流体が弾性体とみなされるとき、 σ を応力、
 λ をラメ定数、 μ を剛性率とすると、圧力 p は、

$$p = \rho C_L v \quad \text{ここに、} C_L = \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho} \quad (15)$$

と表せるものである。

3. 土石流の衝撃力についての模型実験

3.1 砂礫または砂礫、粘土および水の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。図1は砂礫のみの流れについての測定
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

衝撃圧を求めるにあたって Φ の時間的変化は力学的モデルがな
いので、まず式(5)で Φ を求め、それを式(6)に代入する。式(5)を
図2に示す境界条件のもとに、一様速度が等しい場合について、
有限要素法によって Φ を求めた結果を、図3に示す。図3は、
堤体直前および $x=3.0$ 離れた点での Φ を示し、 Φ は、底面ほど大き
い。速度ポテンシャルは堤体衝突時の最大値 Φ_0 が、 Δt 後に零に
なり、その間は線形的に変化する、と仮定する。式(6)を差分で表
し、

$$p = \rho \frac{\Phi_0 - \Phi_1}{\Delta t} \approx \rho \frac{\Phi_0}{\Delta t} \quad (16)$$

と表す。水路床より1.5cmの高さにとりつけてある圧力計の測定値
 p を代入して、式(16)を満たすように定めた Δt は、衝突時の現象
の複雑さを反映して、一定値ではなく、それらは図4に示すよ
うに分布する。これから速度衰退時間 Δt は、 1.5×10^{-3} secが望
ましい。

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。したがって図3の場合では堤体の下
部ほど衝撃圧力が大きくなる。

図5は、流速分布を放物線分布、直線分布および一様分布に変
えたときの、 Φ の値を求めたもので、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 $\rho = 1.39 \text{g/cm}^3$ 、 $\Delta t = 1.5 \mu$
secを用いている。一様流速で衝突するc)では、底面の圧力が最
大で上部ほど少なく、表面の流速が大きいa)では表面で圧力が
最大、放物線分布のb)は表面より少し下がった位置で圧力が最
大になる。

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6のように直線を示し、式(3)が成り立つこと
を示している。式(16)で、衝撃力を予測するとき、 C_L の値が必要
である。2, 3の粒径の砂を対象に、飽和度および空隙率を変
えて測定した結果を図7に示す。

本研究は、J R総研奥井氏の尽力によるものが多い。

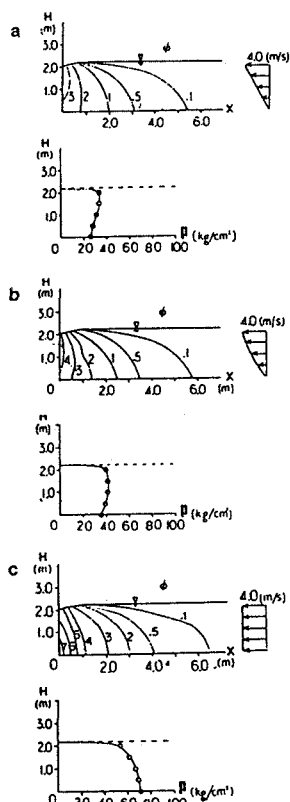


図5 流速分布の変化による衝撃圧の変化

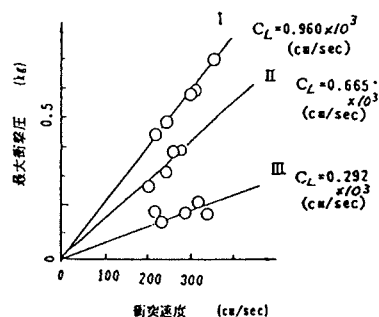


図6 衝撃圧と流速の関係

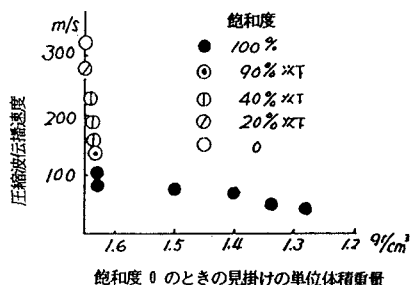


図7 圧縮波伝播速度