

6 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

土石流衝撃時に、重力式砂防ダムのブロック上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する力より大きい。著者はさきに、土石流が弾性体であるとみなして、一次元的取扱いを行い、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。また流れの規模を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。土石流衝突の模様およびその時の砂防ダムの応答については観察されていないため、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。

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。

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、連続式はそれぞれ

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

式(1)を、積分して、ポテンシャルを Ω とすると、ベルヌーイの式になる。

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

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

これを(1)式に代入すると (5)

$$\nabla^2 \Phi = 0$$

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

$$u \operatorname{grad} \rho = 0 \text{ を考慮して、 } \nabla^2 \Phi = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (7)$$

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

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

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

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とき、式(11)をみたす解は、

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

と表すことができる。積分すると $\Phi = v(x - C t)$ $\quad (14)$ となる。これを、式(12)に代入すると

$$p = \rho C v \quad (15)$$

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、 δ を Kroneckerのデルタ、 ν をボアソン比とすると、Hookeの法則、

$$\sigma_{ij} = \lambda e_{xx} \delta_{ij} + 2\nu e_{xx}, \quad \lambda = \frac{\nu E}{(1+2\nu)(1+2\nu)}, \quad \nu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (16)$$

より、圧力 p は、

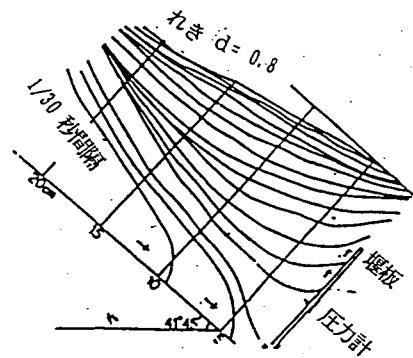


図1. 衝突前後の流动形状(砂れき)

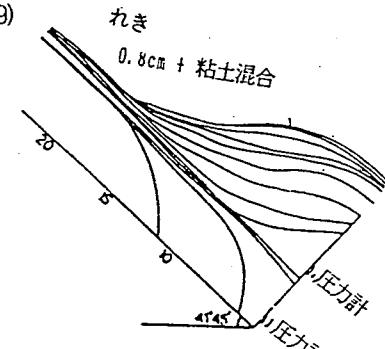


図2. 衝突前後の流动形状(砂れき+粘土+水)

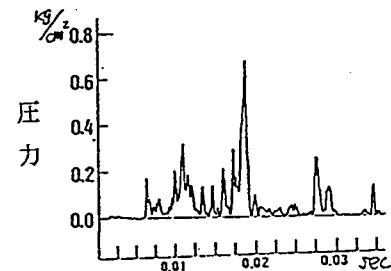


図3. 衝撃力の記録波形例

$$p = \rho C_L v \quad \text{ここに、} C_L = \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho} \quad (17)$$

と表せるものである。

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、空気のような媒体を通して、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とする。

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。圧力計は、低面より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。図1に衝突前後の砂礫の流動体の縦断形状を、図2に砂礫、粘土および水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。図3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の衝撃力

衝撃圧を求めるにあたって Φ の時間的变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5に示す境界条件のもとに、一様速度の場合について、有限要素法によって Φ を求めた。図4は、堤体直前および $x=3.0\text{cm}$ 離れた点での Φ を示す。 Φ は、低面ほど大きい。計算に用いる流動長さは、堤長の4倍以上にすれば、計算値に長さの変化は表れていない。速度ボ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)に代入するについては、式(6)を差分で表し、

$$p = \rho \frac{\Phi_0 - \Phi_1}{\Delta t} = \rho \frac{\Phi_0}{\Delta t} \quad (18)$$

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

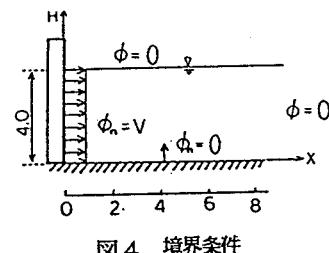


図4 境界条件

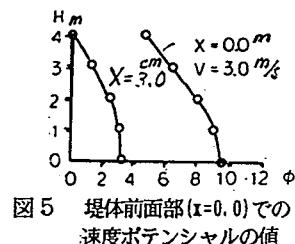


図5 堤体前面部($x=0.0\text{ m}$)での速度ボテンシャルの値

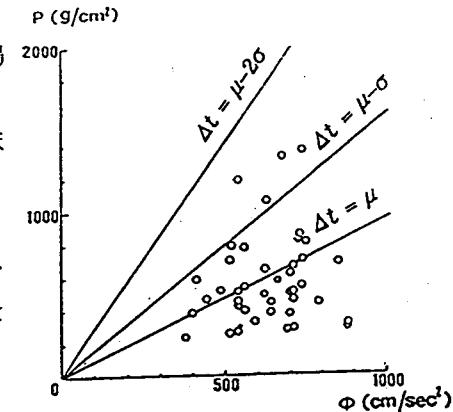


図6 速度ボテンシャルと衝撃力と速度減衰時間との関係

測定値 P を代入して、式(18)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5に示すように分布する。この図から速度衰退時間 Δt は、分布の平均値 1.5×10^{-3} sec とする。

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力が大きくなる。したがって図5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。これは一様速度で衝突したものと思われる。図7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 $\rho = 1.39\text{g/cm}^3$ 、 $\Delta t = 1.5\mu\text{sec}$ 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 土石流を圧縮流体と見なせるとき

式(15)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8のように直線を示し、式(15)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9に示す。固液混合体は完全弾性体ではないので、測定した値は見掛けの値である。また与えた波長に比して大きな衝害物、例えば空隙があると、反射、散乱又は減衰を生じる。ただ先の水路実験から得た C と比較すると、ほぼ妥当と考えられる。流体衝突で水の圧縮性を考慮する必要があるので、 $V/C > 0.25$ としている。したがって、図8で式(15)の関係が成り立つのもうなづける。

5. むすび

i) 土石流を非圧縮性とみなしたとき、衝撃力はポテンシャル Φ の $\Delta t = 1\mu\text{sec}$ 内での変化として表された。

ii) 実験の結果は見掛けの弾性体としても成り立つことを示した。) 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

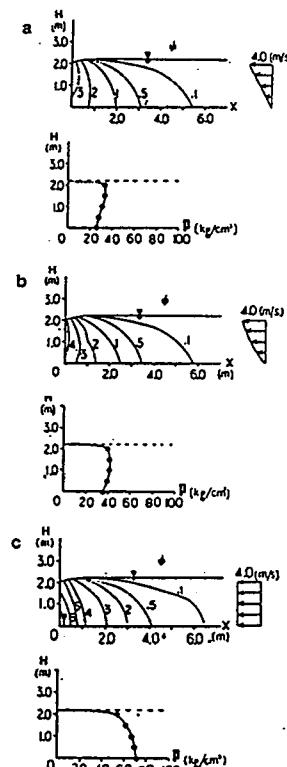


図7 流速分布の変化による衝撃圧の変化

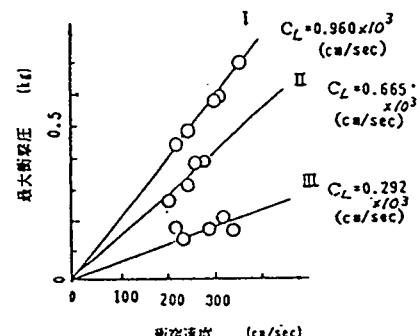


図8 衝撃圧と流速の関係

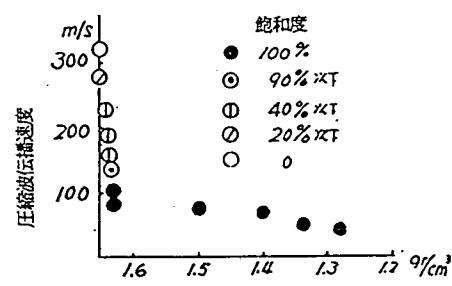


図9 圧縮波伝播速度