

立命館大学理工学部 正員 大同淳之
立命館大学大学院 学生員○竹林洋史

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及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は、土石流が圧縮性の性質を示すことによって生じる衝撃力が加わっていると考えられる。著者らは模型水路で固液混合体を流動させて衝撃実験を行ったが小規模水路では衝突速度及び流動物質を原型に近い状態にすることは難しく、衝撃算定に重要な物質中の波の伝搬速度を原型に近いものについて得ることが難しかった。そのため、敷砂上への重錘落下による衝撃力を解析して C_L を求めることを試みた。解析方法としては、砂層を半無限弾性地盤とみなし、動的圧力球根の式を使うことによって求め、その結果から衝撃力に及ぼす C_L を推定したい。

2. 土石流を圧縮性流体と見なす場合の基礎式¹⁾

土石流を巨視的に密度 ρ の固液混合体と見なすと流体の運動式及び連続式は次のように表される

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + \int \frac{dp}{\rho} + \frac{u^2}{2} + \Omega = 0 \quad \dots\dots (1)$$

$$\partial \rho / \partial t = \rho \nabla^2 \phi \quad \dots\dots (2)$$

圧縮度 S を $S = (\rho - \rho_0) / \rho_0$ とすると、

$$\nabla^2 \phi = \partial S / \partial t \quad \dots\dots (3)$$

となる。従って、運動方程式は、

$$\partial \phi / \partial t = C_L^2 + u^2 / 2 + \Omega \quad \dots\dots (4)$$

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(3)は

$$C_L^2 \nabla^2 \phi = \partial^2 \phi / \partial t^2 \quad \dots\dots (5)$$

となる。圧力の偏り $\bar{p}$ は、

$$\bar{p} = p - p_0 = (\partial p / \partial \rho)(\rho - \rho_0) = C_L^2 \rho_0 S = \rho_0 \partial \phi / \partial t \quad \dots\dots (6)$$

となる。したがって圧縮性流体のときは、式(5)を解き、この ϕ を式(6)に代入することによって圧力が得られる。

式(5)を満たす解は、

$$\partial \phi / \partial (x - C_L t) = u \quad \dots\dots (7)$$

と表すことができる。流体が弾性体と見なされるときHookeの法則より、圧力 p は、

$$p = \rho C_L u \quad C_L: \text{物質中の縦波の速度} \quad \dots\dots (8)$$

となる。縦波の速度 C_L が水路による流動の実験では、固体の規模から見て土石流にほど遠かった。そこで圧力の最大値である、砂が最密に詰まった状態の C_L を求めるため、敷砂に重錘が落下したときのデータから求めることにする。

3. 解析方法²⁾

地盤を弾性体とみなし、半無限弾性体の表面 $z=0$ とし、鉛直軸 z

Atuyuki DAIDO, Hiroshi TAKEBAYASHI

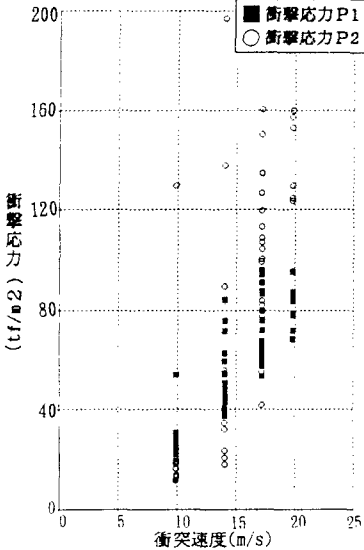


図1 衝撃応力と衝突速度の関係(球底1 t)

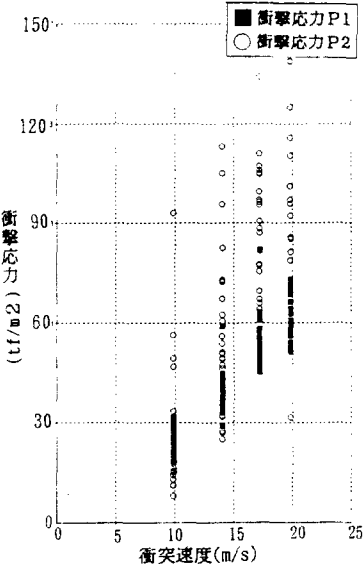


図2 衝撃応力と衝突速度の関係(球底0.3 t)

を下方に向けた円筒座標 (r, θ, z) で U_r, U_z をそれぞれ r, z 軸方向の変位成分とする。変位は z 軸に関して対象であるから、 θ 方向は考えない。垂直方向 σ_z は次のように書ける。

$$\sigma_z = \lambda \Delta + 2\mu \partial U_z / \partial z \quad \dots \dots (9)$$

ここで、 $\Delta = \partial r(r \cdot U_r) / r \partial r + \partial U_z / \partial z$ λ : ラーメ常数 μ : 剛性係数
加重作用点の垂直真下での応力では、せん弾力はゼロである。波動方程式の解は次のように与えられる。

$$U_r = (kAe^{-n_1 z} + n_2 B e^{-n_2 z}) J_1(kr) e^{i p t} \quad U_z = (n_1 A e^{-n_1 z} + k B e^{-n_2 z}) J_0(kr) e^{i p t}$$

境界条件を以下のように与えて常数を決定すると、応力は以下のように表せられる。

$$\sigma_z|_{z=0} = -P e^{i p t} \quad (r=0) \quad \sigma_z|_{z=0} = 0 \quad (r>0)$$

$$\sigma_z = P e^{i p t} \left\{ k \left(\frac{2\sigma}{1-2\sigma} \frac{p^2}{a^2} - n_1^2 \right) \left(2k^2 - \frac{p^2}{\beta^2} \right) e^{-n_1 z} + 4k^2 n_1 n_2 e^{-n_2 z} \right\} / \left(2k^2 - \frac{p^2}{a^2} \right) \left(2k^2 - \frac{p^2}{\beta^2} \right) + 4k^2 n_1 n_2 \quad (10)$$

ここに、 k : 波数 J_0, J_1 : Bessel 級数 A, B : 常数 p : 角振動数 a : V_p β : V_s

金沢大学工学部土木工学科構造力学研究室が行った実験のデータを使用して、式(10)を使い地中の応力から地表面に生じた力を逆算した。実験の土は、 $\sigma = 0.4, \rho g = 1.56 \text{ t/m}^3$ とし、式(8)と式(10)より C_L を計算した。実験内容は5, 10, 15, 20mの高さから球底1t, 0.3t, 錘底1t, 0.3tの重錘を自由落下させたものである。また、衝撃力は、(重錘の重さ) $\times$ (衝突加速度) で求め、この衝撃力を P_1 とし、式(10)から求めた $z=0$ での衝撃力を P_2 とした。 P_2 を求めるための土圧は地盤の表面から90cmの点で測定された。ただ常に一定の深さで測定されたので圧力分布は測れていない。重さによる違いは、衝撃の大きさによって C_L の値がどのように変化するかを見たものである。重錘の形の変化は土石流でいえば、流速分布の変化に対応すると考えられる。また、1tと0.3tでは底面積の射影面積が違うので応力に換算している。

4. 解析結果³⁾

表1 C_L の平均値(m/s)

	球底 1 t	球底 0.3 t	錘底 1 t	錘底 0.3 t
P2	33.4	32.4	32	36.8

表2 衝撃応力の平均値

	球底 1 t	球底 0.3 t	錘底 1 t	錘底 0.3 t
P1	53.6	44	47.1	51.9
P2	84.2	82.9	75.7	138.9

表3 P_1 に対する P_2 の比

	球底 1 t	球底 0.3 t	錘底 1 t	錘底 0.3 t
P_2 / P_1	1.5	1.77	1.52	1.77

図1, 2において衝撃力がばらついた値がでてきているがこれは土の密度に変化があったものと考えられ、密度が一定であれば C_L の値も一定になると考えられる。表2からもわかるように、 P_1 よりも P_2 の方が、大きな値が生じており、これは地盤が圧縮性を示すことによる衝撃力が発生しているためと考えられる。重錘の形状による違いについては P_2 / P_1 の値は球底も錘底もほとんど同じ値が出てきている。重錘の重さによる変化は、底面積の大きい1tの方が地盤を圧縮しやすいため

0.3tよりも大きな値がでると考えられたが、球底も錘底も0.3tのほうが大きい値が出てきている。これは0.3tの時のほうが地盤への貫入量が大きくて地盤が弾性体と見なせなかったためと考えられる。

5. むすび 衝撃力を考慮に入れた応力が衝突体の運動量から求めた力に対して無視し得ないほどの応力であり、砂防ダムなどを設計するときに衝撃力を考慮に入れて設計すべきであるということがわかった。また、その時の C_L の大きさは35m/sぐらいであり、流速分布などの影響はほとんどないと考えられる。

参考文献 1) 大同淳之: 土石流が構造物に作用する衝撃力: 第2回落石など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) 伯野, 藤城, 横山: 動的圧力球根について: 第24回年次学術講演会論文集 pp109-110

3) 金沢大学工学部土木工学科構造力学研究室: 落石実験報告(Ⅰ) 昭和59年1月

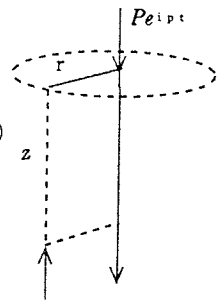


図3