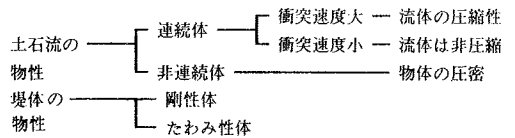


1. はしがき 土石流発生時に砂防ダムがブロック状破壊あるいは鋼製ダムの座屈がみられる。土石流の衝撃力が果して異常に大きいものについても推測の域を出ないので、実験によって衝撃力予測の手掛りを得んとした。衝突現象は、衝突する物体と受ける物体の相互作用で、両者の物性、衝突面の形状、衝突速度に関係して種々の挙動を示すと予想できる。これは下表のように考えられる。

本文では、これらのうち、土石流の流動深さより高い平面の剛性体に衝突する場合について考察した。



2. 土石流の弾性衝突とみなしたときの衝撃圧

2-1. 砂れき又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、底面より1.5cmおよび0.0cm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によりとめた。板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、一部は壁の前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、さきの流れと同じことをくり返す。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。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、直接衝突を受けるまえに、先にも下端に衝突した流れの上昇流にさえぎられるためか下段にくらべて圧力は小さかった。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が最大値を示し、IIの相は、ピークの後の圧力減少期で、III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。

2-2. 土石流の弾性衝突による衝撃力

物体の受ける衝撃圧は、土石流が弾性衝突したときの圧力とする。

物質の流れが自由衝突するとき、一次元的取扱いが可能である。運動式は

$$p + \rho C_R v = 0 \tag{1}$$

ここに p : 衝撃圧, ρ : 流動体密度, v : 衝突速度, C_R : 圧縮伝播速度で、一般にヤング係数 E , ポアソン比 ν あるいは圧縮係数 E_c を用いて、

$$C_R = \{E(1-\nu)/(1+\nu)(1+2\nu)\}^{1/2} = \{E_c/\rho\}^{1/2}$$

と表わされている。

$p = m(dv/dt)$ と表わされるから、式(1)は $t=0$ で $v = v_0$ とすると、

衝撃力 F は
$$F = -\rho C_R A v_0 e^{-\frac{\rho C_R A}{m} t} \tag{2}$$

となり、最大衝撃力 F_{max} は、

$$F_{max} = -\rho C_R A v_0 \tag{3}$$

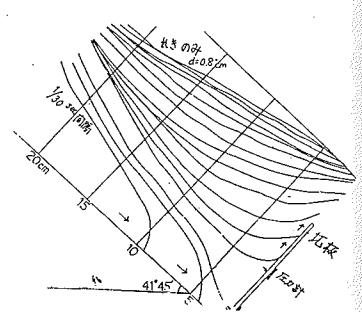


図1. 衝突前後の流動形状(砂れき)

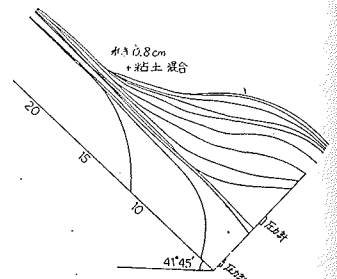


図2. 衝突前後の流動形状(砂れき+粘土+水)

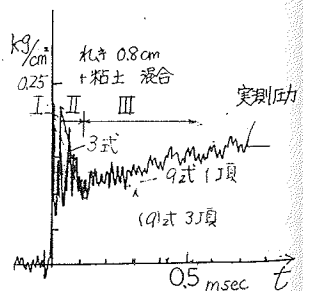


図3. 測定圧力の一例

と表される。砂等のヤング係数等はまだ確定していないので、実験値より求めることにする。実験値の F_{max} を衝突速度 v との関係を示すと、図4のようになるので、図上の直線の勾配より C_R さらに E_c の値を求めると表1のようになる。この値は、Wetzelが円柱を乾燥砂上に自由落下させて衝突加速度から求めた $E_c = 752 \times 10^3 \text{ g/cm}^2$ (乾燥密詰め砂), $618 \times 10^3 \text{ g/cm}^2$ (乾燥粗詰め砂) と比較すると、かなり小さい。得られた C_R を用いて、最大衝撃圧以後の圧力の時間変化と比較すると、図5のようになり、式(2) が成立つことを示している。直線の傾きより、衝撃圧に関与した質量 M を求めると、最大衝撃圧を示す $\Delta t = 6.34 \times 10^{-6} \text{ sec}$ の間に断面を通過する質量とはほぼ同じで、運動量から求まる衝撃圧と等しいことを示す。

以上によって最大衝撃圧は、土石流を弾性体とみなした、式(2)で予測できることを示す。

2-3 最大衝撃圧の予測

土石流の衝撃圧力を式(3)で予測できることが示された。この実験に用いた流動体は砂れきまたは砂と粘土の混合物で、実験水路の規模から、砂れきの流動厚さが小さいため、流れの先端で砂れき粒子が空気中に拡散し、流れの密度が低下しているため、測定される圧力は必ずしも高くない。しかし弾性体として整理した結果は、密度が低くても弾性体としての取扱いが可能であることを示した。したがって、任意の密度の粒状体が M となつて衝突したときの衝撃圧は、その物質の密度と圧縮波伝播速度を式(3)に用いることによって予測することが可能である。

土石の圧縮伝播速度は、Wetzelによると先述のように、密詰め砂および粗詰めについて $E_c = 752 \times 10^3 \text{ g/cm}^2$ および $618 \times 10^3 \text{ g/cm}^2$ の値を得ている。かりに土石流がこの E_c を持っていたとして式(3)を計算すると、それぞれの衝突速度に対して、表2のようになる。運動量の変化より求まる衝撃圧と比較すると

$$\frac{\text{弾性衝突圧速度}}{\text{運動量の差から求まる圧力強度}} = \frac{\rho C_R u}{\rho u^2} \quad (4)$$

となり、 $C_R > u$ の流体においては、運動量の差から求まる力より、 C_R/u だけ、大きい衝撃圧を受けることになる。

3. Ⅲ相における圧力

3-1 圧力現象のモデル化

圧力計が堆積物中であつて、堆積物の自重と堆積表面のせん断力を受けるときの圧力は図6のようにモデル化される。堆積高さ z の面に作用する圧力 Q_u は

$$Q_u = \text{三角形の土砂の重量} + ac \text{間に作用するせん断力} + ac \text{間に作用する粘着力}$$

で、これを式化し単位高さあたりの圧力 F_u で表わすと

$$F_u = \frac{Q_u}{z} = \frac{\gamma_s}{2} z \sin \theta + \{C' + \gamma_s h \sin(\theta + \psi)\} \tan \phi \sin \omega \quad (5)$$

堰前面の堆積高さ z の時間変化は

$$\text{連続式} \quad q_u \Delta t = \Delta z \cdot \lambda / (1 - \lambda) \quad (6)$$

$$\text{運動式} \quad q_u = u_* \Phi h_*^{3/2}, \quad \Phi = \psi_* \frac{2}{5} (K \sin \theta)^{3/2} (1/d) \quad (7)$$

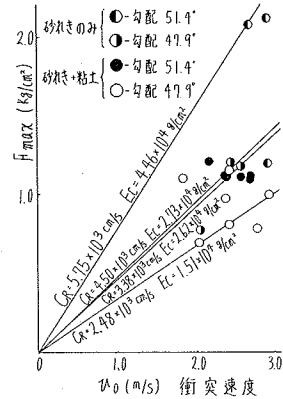


図4. 最大衝撃力と衝突速度の関係

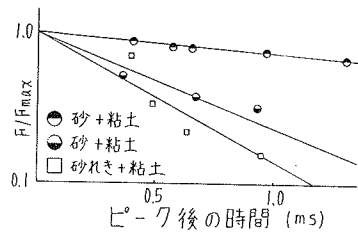


図5. Ⅲ相における圧力の測定値と式(2)との比較

表1. 実験材料の C_R , E_c

平均粒径	重量比	C_R	E_c
砂れき $d_n = 0.13mm$	砂れき 100%	5.75×10^3	4.46×10^4
	砂れき 71.8%	4.50×10^3	2.73×10^4
	土 15.6%		
砂 $d_n = 0.86mm$	砂 100%	1.73×10^3	0.40×10^4
	砂れき 33.8%	0.92×10^3	0.11×10^4
土 42.5%			
土 $d_n = 0.20mm$	水 23.7%		

表2. 密な砂の衝撃圧の予測

γ_s	E_c (kg/cm^2)	衝突速度 m/sec		
		4.0	15.0	7.0
1.77	752×10^3	14.9	18.6	26.0
1.77	618×10^3	13.5	16.9	23.6

より、

$$z = \sqrt{\frac{2(1-\lambda) \frac{\tan \phi}{\sqrt{1+\tan^2 \phi}}}{\sqrt{g \sin \theta \Phi h_0^{0.5} t}}} \quad (8)$$
 となる。

式(5)中の摩擦角は、高速で動いてきたものが停止する制動抵抗であるから、静止摩擦角ではなく制動抵抗角でなくてはならぬ動摩擦角は、まだ十分確定した値とはなっていない。そこで、動摩擦角に近いものとして、支持力の算定に用いられる支持力係数を用いることにし、次のように変形する。

$$F_u = \frac{Q_u}{z} = N_{c1} \gamma_s \frac{z}{\tan \phi} + N_{c1} C' + \gamma_s h N_{r1} \quad (9)$$

ここに、 $N_{c1} = \tan \omega$ 、 $N_{r1} = \sin(\omega + \theta) \tan \phi \tan \omega$ 、 $N_{r1} = (1/2) \sin \theta$ である。

基礎に作用する極限支持力は、図7において、AC, BCを壁面と考え、そこに作用する全受動土圧を表わしている。これは図6のac面に作用する力 $N C' + \gamma_s h_1 N_{r1}$ にはかならない。

図7の二次元の基礎において、 Q_u は

$$Q_u = 2(Q_r + Q_{ac}) \cos(\omega - \phi') + 2C_a \sin \omega - \frac{\gamma B^2}{4} \tan \omega \quad (10)$$

ここに $Q_r =$ 自動による受動圧 $(= K_r \gamma_s B^2)$ 、

$Q_{ac} =$ 粘着力 + 表面荷重 $\{= B(K' C' + K_a P_0)\}$ でこれは

$$q_u = \frac{Q_u}{B} = N_c C' + N_a P_0 + N_r \frac{\gamma_s B}{2} \quad (11)$$

ここに $N_c = 2K_r (\cos \omega - \phi)$ 、 $N_a = 2K_a \cos(\omega - \phi)$ 、 $N_r = 4K \cos(\omega - \phi) \tan \omega$ となる。式(9)との相似から、 $N_c = N_{c1}$ 、またac面に作用する摩擦角に作用する項はac面においてなす仕事と、単位時間に堰の近傍で表面が盛上る高さとはほぼ等しいと考えると、

$$\frac{\{\gamma_s h \sin(\omega + \theta) \tan \phi\} \frac{z}{\cos \omega}}{u_1} = \gamma_s u_1 = \rho_0 u_0$$

また、図6の流動層厚さを、図7の塑性域の幅は変わらないと、仮定すると、式(10)の $N_a P_0$ の項は、 $\gamma_s h_1 N_{r1}$ とおくことができる。式(9)は静的な釣合式であるが、 N_{r1} に動的支持力係数を用いることによって、衝撃の算定に適用できるとする。

3-2 動的支持力係数

動的支持力係数は、落石実験の落下体の加速度と、そのときのめり込み深さδの関係から求める。すなわち、弾性体の衝突において、δを変位とし、δは力Pに比例するとすると

$$m \ddot{\delta} = -P = f(\delta) \quad (12)$$

積分して、
$$\frac{m}{2} (\dot{\delta}^2 - u_0^2) + \int f(\delta) d\delta = 0 \quad (13)$$

δ=0のとき、δ=δmax、より
$$\int_0^{\delta_{max}} f(\delta) d\delta = \frac{m}{2} u_0^2 = WH \quad (14)$$

ここにW：落下体の重量、H：落下高さとなる。落下体断面は円形であるから、式(10)に代って、円形フーティングの支持力公式を用いて、

$$q_u = N_a \gamma_s D_r + 0.6 N_r (\gamma_s B/2) \quad (15)$$

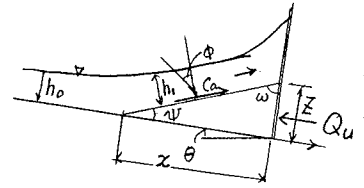


図6. III相における圧力の釣合い

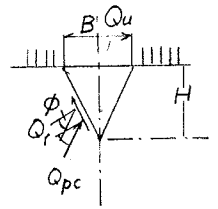


図7. 二次元の基礎支持力

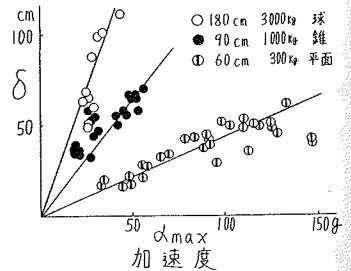


図8. 落石実験におけるめり込み深さδと加速度の関係

表3. 土砂の動的支持力係数

落下体	重量(kg)	N_a	砂の種類
球	1000	83.0	山砂
球	300	71.4	山砂
錐	1000	76.6	山砂
錐	300	70.7	山砂
平底	1000	205.3	山砂
球	3000	51.9	山砂
平底	300	153.3	山砂
球	1000	71.4	砂
球	3000	59.0	F

$$\text{より } q_u = a \delta + b, \quad a = \gamma_s \frac{\pi D^2}{4} N_f \quad (16)$$

$$\text{とで、 } \int_0^{\delta_{max}} f(\delta) d\delta = \int_0^{\delta_{max}} (a \delta + b) d\delta = WH \quad (17)$$

となる。 $N_f \Rightarrow N_f$ とすると

$$\delta_{max} = -\left(\frac{1.3C}{\gamma_s} + 0.3B\right) + \frac{\alpha_{max}(W/g)}{\frac{\gamma_s \pi D^2}{4} N_f} \quad (18)$$

と表わされる。

吉田の落石実験³⁾における、加速度とめり込み深さのデータを再整理すると図8が得られる。こ
うして求めた支持力係数 N_f を表2に示す。 N は一般に摩擦角の関数として表され、例えば図9のよ
うに示されている。吉田の実験ではクッション材料の摩擦角が示されていないので、直接比較する
ことは出来ないが、図9のそれに対して表2はいくらも大きい傾向を示す。この差は動的な支持力
係数のためと考えるとよからう。

3-3 田相の圧力強度

式(5)の γ に、式(8)を入れ、 N_{f1} として例えば表2の値を用いると、田相に作用する単位高さあた
りの圧力が求められよう。

式(5)の第1項は時間と共に増加し、第2、第3項はほぼ一定値と予想されるから、図3の実測値
の基底の部分と、2、3項がその上の時間と共に増加している分を、第1項が受持っているのみとみなすことができよう。

図3の例について計算すると、この例では $\theta = 41^\circ 45'$ 、 $\psi = 12^\circ$ 、 $\omega = 78^\circ$ である。 $\gamma_s = 1.32 \text{ g/cm}^3$ 、 $h_1 = 3 \text{ cm}$ 、 $N_{f1} = 51.9$ とすると、

$$q_u = 0.013 \text{ kg/cm}^2 + 0.205 \text{ kg/cm}^2 = 0.218 \text{ kg/cm}^2$$

となり、図3の田相のオーダーと近い。もちろん、実験に用いた土砂の N_{f1} は51.9より小さいと予想できる。

4. むすび

1) 河川構造物とくに砂防ダムのような剛性体に土石流が衝突したときの衝撃力を求めるために実験を行ない、測定結果を、土石流が弾性衝
突すると考えて整理すると、理論と一致することを見出した。

2) 最大衝撃力は、式(3)によって表現でき、式中の衝撃流体の圧縮波伝播速度 V_c を与えることができれば、土石流の衝撃力を求められると
した。そして、最大衝撃圧力は運動量の差から求めた力の C_v/v 倍であることを述べた。

3) 土石流の先端が衝突して、現体の前部に堆積した後の圧力は、前面に堆積した土の重量と、堆積上を流れる土石流の摩擦力の和である
としてモデルを作り、式中の摩擦角は、制動摩擦力であることから、動摩擦力を見出すため、式を支持力公式の形で表わし、式中の支持力係
数 N_{f1} を、落石実験のデータより求めた。その結果は田相の傾向を説明することができた。

参考文献

- 1) R. Wetzel, Axisymmetric Stress Wave Propagation in Sand, Proc. of ASCE, SM 5 Sep. 70¹.
- 2) 建設省土木研究所動土質研究室、敷
砂上の落石の衝撃力に関する実験報告書 1982-3.
- 3) 金沢大学構造力学研究室、防護覆い上への落石による衝撃力の推定に関する研究
59.10.
- 4) 大同：立命館大学理工研紀要 82

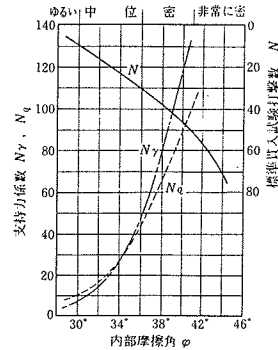


図9. 砂地盤の支持力係数および
 N -値と内部摩擦の関係