

1. はしがき、土石流発生時に、砂防ダム等河川構造物の破壊が見られる。著者の観察例では、堤体が大きなフロック状に切断される、あるいはダムの下部が底抜け状に基礎地盤と共に流出しているケースがあった。破壊の原因として、外力の予想以上の大きさと堤体施工接手の不備、ダムを境とする土砂堆積圧の変化による地盤流失に因るダム不安定が原因とも考えられる。堆積圧による地盤の流動について著者が検討した結果では、急こう配の河道でその可能性はあるが、通常のこう配のところでは可能性が低いという結果が得られた。他方、外力については、たとえ施工が不備であったとしてもかなり大きい外力が作用したと予想できる。

この被害を防ぐ対策として、外力の推定と部材応力の究明がある。衝撃をうける部材応力については研究<sup>2)</sup>があるが、外力についてはあまり研究されていない。これは構造物前面の土石流の運動量を正確に把握できれば求められるという考えのためであろう。しかし、運動量の変化を求めるについてもごく微小時間に生じる衝撃力に対応する流体質量の大きさおよび密度をどのように考えるのが正しいかに大きな問題が残されている。

本文では、土石流が均質な流体として挙動する場合と、固体相と水とが別々に行動する場合とに分け、前者では、流体面と堤体のなす角が小さいときには、流体の圧縮性を考慮する必要があると考えその場合の圧力式を示すと共に、開水路において堤体面に平行に水面を衝突させることは難しいことから、静止水面に物体を衝突させて、式が妥当なことを確かめた。つぎに均質な流体として期待できない場合は衝突時に流体、とくに固体層の圧密が生じ、これによって衝撃圧が左右されることを述べる。

## 2. 土石流が均質な流体として挙動する場合

堤体衝突時に、流体相の水と固体相の土砂が同時に運動し、みかけ上均質な流れとして取り扱うことができる場合の衝撃力については、宮本ら<sup>3)</sup>によって考察された。これはつぎのとおりである。

### 2-1. 流動深 $h$ より堤体の高さ $H$ が低いとき

流れの中におかれた物体の受ける力を求めることであり、物体が水面に衝突すると考えて解析する。従来の水面衝撃で用いる手法、すなわち、物体の仮想質量を平板のそれでおき変えるという解析法は、水面と堤体の接触角度が小さいときは衝撃力が解析上無限大になるという不都合があることから、衝突時に流体の圧縮性を考慮すると、連続式は $\phi$ をポテンシャルとして、 $\frac{d\phi}{dt} + \Delta\phi = 0$  (1)、運動式は  $p = -\rho(d\phi/dt)$  (2) 状態方程式  $dp = (\partial p / \partial \rho) \cdot d\rho$  (3) を用いると

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - C^2 \Delta \phi = 0 \quad (4) \quad C = \sqrt{(\partial p / \partial \rho)} \quad (5)$$

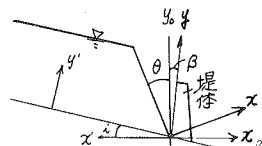


図 1. 座標

が得られる。この波動方程式の解より、衝突直後の衝撃圧力  $F$  は (4) 式より、単位面積あたり、

$$F = \cot(\theta + \beta) \rho C U^2 t \quad (6)$$

ここに、 $C$  は水中での音速、 $U$  : 衝突速度、 $t$  : 時間である。この式は堤体が剛体のときに成立する。堤体が弾性体のとき、堤体はひずみ、みかけ上相対速度は低くなる。堤体と流体の境界で、流体の圧力と物体の弾性応力が等しい、として

$$\rho C (U - U_e) = \sqrt{\sigma_b \left( E + \frac{4}{3} G \right)} U_e \quad (7)$$

ここに、 $U_e$  は相対速度の減少量、 $\sigma_b$  は堤体の密度、 $E$  は堤体のヤング率、 $G$  はせん断弾性率である。

(7) 式は

$$U_e / U = \rho C / \left\{ \rho C + \sigma_b \left( E + \frac{4}{3} G \right) \right\} \equiv K \quad (8)$$

と書き直される。したがって、堤体が弾性体のときは、(6) 式中の  $U$  の代りに、

$$U_e = (1 - K) U \quad (9)$$

を用いればよい。 $K$  は流体と堤体材料により決定される定数である。

また、運動量の変化として衝撃力を考えるとき、計算にとり入れる質量要素としては、(3) 式の波動方程式の範囲の質量を用いて、

$$M = \rho \frac{1}{2} \pi (Ct)^2 \cdot B \cdot \bar{w}(K, t) \quad (10)$$

ここに、 $\bar{w}(K, t)$  は領域内の平均流速、 $B$  は堤体の幅である。運動量方程式  $F dt = M$  (11)

より、単位幅に作用する衝撃力  $F$  は、

$$F = \pi \rho C \cot^2(\theta + \beta) \frac{U^5 \cdot t^3}{\varepsilon^2(K)} \quad (12)$$

ここに、 $\varepsilon$  は  $K$  の関数で、 $K$  は流体と固体の材料を表わす定数である。

(6) 式と (12) 式を比較すると、(6) 式のほうが大きい。したがって衝撃の初期の力は (6) 式で、それにつづく力を (12) 式が示すことになる。両者の境界を示す時間は、

$$0 < t \leq \sqrt{\frac{(1-K)}{\pi} \tan(\theta + \beta) \frac{C \varepsilon^2(K)}{U^3}} \quad (13)$$

のときは (6) 式で、これより大きくなると、(12) 式である。また、このような圧縮性を考えないといけない限界は、着水速度  $v \cot(\theta + \beta)$  と音速  $C$  との比  $Me$  を用いて、

$$Me = \frac{v \cot(\theta + \beta)}{C} > \frac{2}{\pi} (1 - K) \div 0.64 (1 - K) \quad (14)$$

であることが示された。

以上の解析が妥当であるかどうか実験を行なった。実験は、水面と堤体とを平行にするために、静止水面に平滑平面を有する物体を衝突させて行なった。

実験に用いた着水物体は、平滑な平面で衝突するので、 $Me = \infty$  である。(8) 式の  $K$  はアルミニウムのヤング率  $E = 7.03 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ 、 $G = 2.16 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ 、アルミの密度  $\sigma_b = 2690 \text{ kg/m}^3$ 、水中の音速  $1500 \text{ m/sec}$  を用いて、 $K = 0.10$  である。さきに述べた考察を、実験の条件に合わせて書き直した加速度  $G$  と着水速度  $V_0$  の関係式 (A) と実験値は良く一致した。

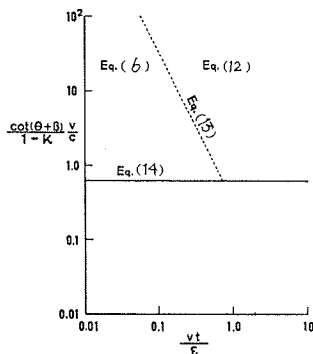


図2 式の適用範囲

$$\frac{V \cot \theta}{C} < \frac{1}{0.42} \left( \frac{r}{\mu h} \right)^{2/3} (1-K)$$

において

$$G \cdot g \frac{M_0}{\rho \pi r^2} = (1-K) C V_0 \quad (A)$$

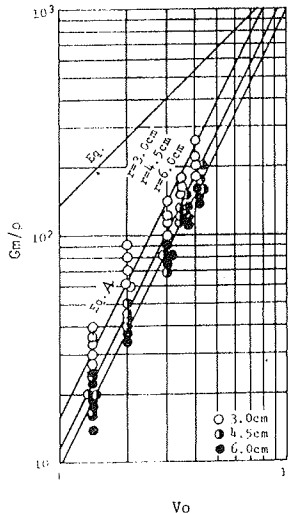


図3. 加速度Gと速度V<sub>0</sub>の関係

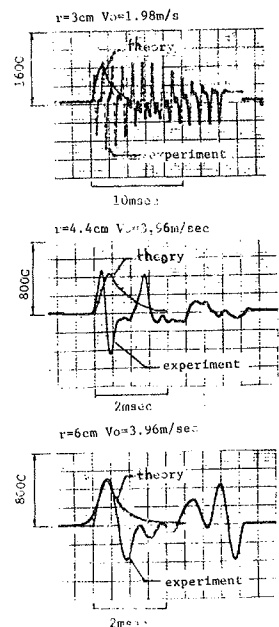


図4. 実験値との比較

2-2. 流動深hより堤体の高さHが高いとき、

この場合も流体の圧縮は生じると予想されるが、拘束が少なく流線は全面的に方向を変えるため、全体の流れの運動量変化を求めればよい。

3. 土石流が均質な流体として挙動しない場合

さきの解析は、流れが均質、例えば泥状の土石流に対して適用されるが、土石流の組成が比較的粗い固体相と流体とから形成されている場合、堤体に衝突するような急激な流れの変化が生じているところでは、固体相と流体相が必ずしも一体となって挙動せず、みかけ上の密度変化も生ずるものと思われる。この場合でも、現象を説明するための数学モデルとしては、上記の考え方で応用できる。しかし、現実の土石流、特に、その連続体としての扱い方にモデル化が許されるかどうかについては検討を必要とする。そこで、傾斜水路に、砂れきのみ、あるいは、砂・粘土および水の混合物を流下させ、金属板に衝突させて金属板前面にとりつけた圧力計で衝撃力を測定した。

3-1. 実験の方法。幅0.1m、深さ0.2m、長さ2.0mの水路の下流端に圧力計を取り付けた金属板をおき、圧力計から0.9mの位置に仕切板をおき、仕切板の背後に砂れきのみ、または、砂、粘土および水の混合物を置き、仕切り板をとって自由流下させ、金属板に衝突させた。実験勾配は34°40'～55°50'の範囲である。砂の粒径は中央径dが0.5、0.8および1.8cmのほぼ均一粒径のものと、砂のみ0.8cmと粘土との混合物を用いた。圧力計の直径は1.5cmで4cm離して2個設置し、下段のものは底面より粒径の1.33倍より1.67倍のところに設置した。圧力計の容量は10kg/cm<sup>2</sup>で、トランジェントメモリーに記録した。圧力計の精度は静的な方法で検査した。図5に砂のみの流れが金属板に衝突する前後の流動形を、図

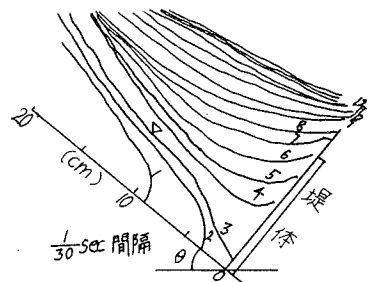


図5. 衝突前後の流動形

6に圧力計の記録値の一例を示す。砂れきの流れの速度および流動厚さはビデオで、容積濃度は砂れきの重量計測より求めた。

3-2. 単位時間当りの運動量と衝撃値の比較. 測定した衝撃値と運動量の変化とを比較すると、衝撃を示している  $\Delta t = 0.43 \times 10^{-3}$  sec 間の運動量に対しては測定衝撃力が大きい。参考までに 1sec 当りの運動量の変化よりはもちろん小さい。かりに1個の砂れきが衝突したとして比較すると粒径の数倍からときには20倍程度の厚みの物体が衝突したかに等しい。

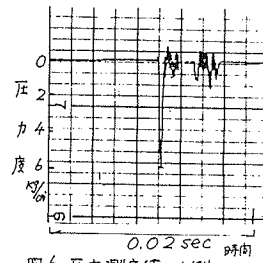


図6 圧力測定値の一例

### 3-3. 固体と塑性体の衝突としての解析

土石流の組成が石に近いとき、堤体の前面で土石流の圧密が生じると考えられる。このような状況に対して、2つの固体が衝突するときの力の考え方を適用する。2つの物体  $m_1, m_2$  が速度  $v_1, v_2$  で衝突して変形するとき、変形量  $\delta$  は、

$$\dot{\delta} = v_1 + v_2 \quad (15) \quad \ddot{\delta} = (dv_1/dt) + (dv_2/dt) = -p \{ (m_2 + m_1) / m_1 m_2 \} \quad (16)$$

$$\text{となり、そのときの圧力 } p \text{ は、} p = k \delta^{3/2}, \quad k = \frac{4}{3\pi} \sqrt{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} \frac{1}{R_1 + R_2} \quad (17)$$

が成り立つとされている。圧縮力の最大値  $P_{max}$  は  $\delta_{max}$  のとき生じ、

$$P_{max} = k \delta_{max}^{3/2}, \quad \delta_{max} = \left\{ (5/4R) \{ m_1 m_2 / (m_1 + m_2) \} v_0 \right\}^{2/5} \quad (18)$$

と表わされている。これをいまの実験の場合に適用する。

静止している土砂に堤体が速度  $U_0$  で衝突 するとして、 $m_1 = \infty, m_2 = m$  とすると、

$$\ddot{\delta} = -p(1/m), \quad m \ddot{\delta} + p = 0 \quad (19)$$

$$p = f(\delta) \text{ として、(19) 式に } \delta \text{ をかけて整理すると、} (m/2)(\dot{\delta}^2 - U_0^2) + \int_0^\delta f(\delta) d\delta = 0 \quad (20)$$

$$\text{これより、} \dot{\delta} = 0 \text{ のとき、} \delta = \delta_{max} \text{ より、} \int_0^{\delta_{max}} f(\delta) d\delta = (m/2) U_0^2 \quad (21)$$

$$\text{となる。砂れき層の場合} \quad p = k \delta^n \quad (22)$$

$$\text{と表わせることから、} \quad \delta_{max} = k^{-\frac{1}{n+1}} \{ (n+1)(m/2) U_0 \}^{1/(n+1)} \quad (23)$$

$$\text{したがって} \quad P_{max} = k^{\frac{n}{n+1}} \{ (n+1)(m/2) \}^{\frac{n}{n+1}} \cdot U_0^{\frac{2n}{n+1}} \quad (24)$$

$$\text{これから} \quad P_{max} \cdot \delta_{max} = (n+1)(m/2) U_0^2 \approx (n+1)(1/2)(m U_0^2) \quad (25)$$

と表わされる。その結果、 $P_{max} \cdot \delta_{max} = \text{一定の初期エネルギー}$ 、の関係

を示している。このような機構のもとでは、堤体の前面では、くさび型の部分において圧密が進行するものと考え、この圧密に伴う圧縮力が、衝撃力となって表われるものと考えてよい。ちなみに杭の動的支持力公式は、極限支持力を  $R_d$ 、最大貫入量  $S$ 、落下物重量  $W$ 、重錘の自由落下高  $h$  としたとき、 $R_d \cdot S = \epsilon W h$  --- (26) と、(24)式と同型である。

$P_{max}$  を (24) 式で表わすことにして、 $P_{max}$  と  $\frac{m}{2} U_0^2$  との関係を調べると、空隙率73%の砂の流動に対して  $\delta$  は 14.3 ~ 4.9 程度の値を示した。 $\delta$  と空隙率の関係はさらに明らかにしたい。

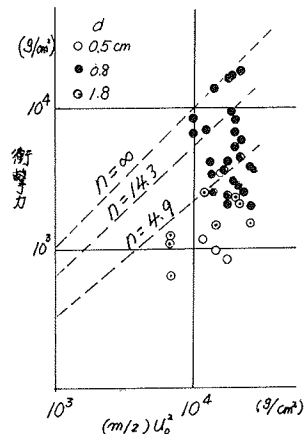


図7. 実験値と(24)式の比較

1). 大同; 砂防ダムに及ぼす土石流の作用: 第19回自然災害シンポジウム 論文集, 1982

2). 建設省土木研究所; 富士山土石流衝撃力実験報告書Ⅰ～Ⅲ, 土研資量 55-57号

3). 岩本, 大同; 堤体に作用する土石流段波の衝撃力に関する研究Ⅰ, 立命館大学理工学紀要 1984.