

土石流による河床の洗掘について

宮崎大学農学部 谷口義信・高橋正佑
宮本満則

1. まえがき

筆者等はさきに模型実験によって土石流段波による洗掘について調べた¹⁾。そこでは特に溪流内工作物と土石流段波による洗掘深、最大洗掘の発生位置との関係について論じ、工作物下流側に発生する最大洗掘面の存在が一種の滝と同様の役目を果し、この後退がダム基礎部を露出させ、ダムの倒壊につながる大きな要因であることを明らかにした。本研究ではこうした現象に対し、若干の力学的考察を加える。

2. 実験方法および実験結果

実験は図-1に示す20cm×20cm×400cmの水路を用い、水路先端には貯水槽(容量7ℓ)を取付け、貯

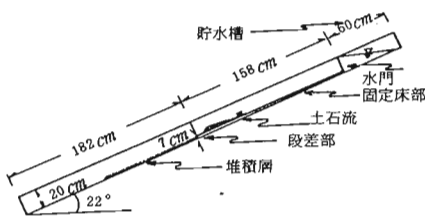


図-1 水路概略図

表-1 使用材料の物理常数

平均粒径(mm)	0.71
比重	2.72
内部摩擦角(°)	42

水槽から158cmの区間は7cmだけ水路底面を高くし、この区間に厚さ4cm、長さ50cmにわたって砂を敷いた。また同図段差部から下流側100cmの区間に3~6cmの厚さの堆積部を作り、段差部の下流19cmと31cmの2箇所には

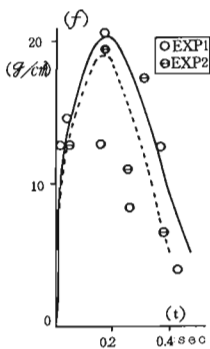


図-2 衝撃力fの経時変化(地表面と同地表面下3cm)

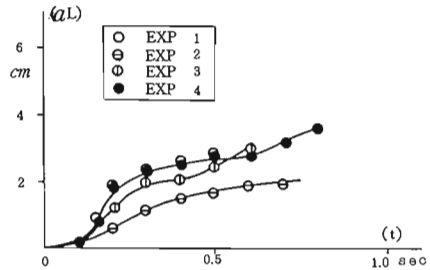


図-3 洗掘深qLの経時変化

の位置に応力センサーを設置した。使用した砂の物理常数は表-1のとおりである。

実験は図-1の水門扉を一挙に転倒して固定床部分で土石流を発生させ、これが段差部を落下して堆積土砂を洗掘する状況を高速カメラで撮影すると同時に、応力センサーによりその衝撃力を測定した。またこのときの土石流試料を採取し、その濃度も測定した。撮影フィルムからは一定時間毎の洗掘深や土石流ナップ厚、流速、ナップ進入角などを測定した。

図-2は土石流ナップの衝撃力fの経時変化であり、図-3は洗掘深qLの経時変化である。

3. 考察

Schokitschは実験結果からダム下流側の洗掘深が砂礫の平均粒径d、落下高Tおよび流量cの3つの変数の関数として表わされることを示した²⁾。林はこれまでの洗掘平衡理論から、最大洗掘深までの水クッションの水深hが次式のように表わされることを明らかにした。

$$\left(\frac{h}{d \sin \theta}\right)^{2P} = \frac{3}{4} \cdot c_1 \cdot \frac{C_D}{\tan \phi} \cdot \frac{1}{\frac{\sigma}{\rho} - 1} \cdot \frac{qv}{g d^2} \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^{2P-1} \quad (1)$$

ここにdは砂礫の平均粒径、θはナップの進入角、c₁、Pは常数、C_Dは抗力係数、φは砂礫の内部摩擦角、σ、ρは砂礫粒子および水の密度、qは単位幅当り流量、vは衝突直前のナップの流速、gは重力加速度、Dはナップの厚さである。(1)式は噴流による砂礫のつり合い条件から導かれたもので、礫の限界掃流力の考え方を

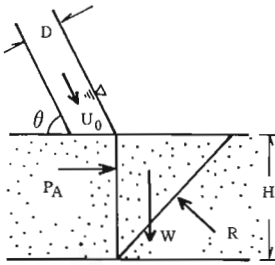


図-4 土砂移動のモデル
すなわち土石流落水脈が工作物下流側の堆積面に衝突し、この衝撃力が受働土圧として働き、重量W、抵抗Rの土塊が押し上げられるものとする。この考え方は土石流段波のような集合運搬体がある土塊に衝突するとき、土塊は急激な非排水変形作用を受け、ほぼ1つの物体として弾塑性的な変形を起こすであろうという考えに基づくものである。

土石流段波がダム天端から落下して、下流側堆積面に衝突するときの流れ方向の単位幅当りの流体力をPAとすると、PAは次式のように表わされる⁴⁾。

$$P_A = C_D (U^2 / 2g) \gamma D \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここにUは水路縦断方向成分の速度であり、γは土石流の単位体積重量、Dはナップ厚である。一方水路内の堆積物が土石流段波によって衝撃力を受けたときの堆積面に直角方向の単位面積当りの流体力をp、地表面から最大すべり面までの深さをHとするときの受働土圧Pはつぎのようになる。

$$P = \frac{1}{2} \gamma_0 H^2 K + PHK_p \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここにγ₀は堆積土砂の単位体積重量であり、K_pは土砂の内部摩擦角φと堆積面の勾配iによって決まる係数である。そしてpおよびK_pはつぎのように表わされる。

$$p = \gamma C (U \tan \theta)^2 / 2g$$

$$K_p = (\cos i + \sqrt{\cos^2 i - \cos^2 \phi}) / (\cos i - \sqrt{\cos^2 i - \cos^2 \phi})$$

(2)式と(3)式から土石流段波によって押し上げられる限界の土砂厚を求めるとつぎのようになる。

$$H = \frac{P}{\gamma} \cdot \left\{ \sqrt{1 + \frac{2\gamma\gamma_0 C_D (U^2/2g) D}{K_p p^2}} - 1 \right\} \quad \dots\dots\dots(4)$$

簡単のため大きな洗掘をひき起こす時間内では流速Uは初期のナップ流速U₀に比べて相対的に大きな変化はないと考え、ここではU=constとして、また、D=D₀e^{-αt}を仮定すると⁵⁾、(4)式はつぎのようになる。

$$H = \left(\frac{\gamma}{\gamma_0} \right) \cdot C_D \cdot \frac{(U \tan \theta)^2}{2g} \cdot \left\{ \sqrt{1 + \frac{(\frac{\gamma}{\gamma_0}) \cdot 2D_0 e^{-\alpha t}}{K_p \cdot C_D \cdot U^2 \tan^4 \theta / 2g}} - 1 \right\} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここにD₀は初期のナップ厚、αは常数である。(5)式からある時間内における洗掘深a_Lを求めると

$$a_L = \left(\frac{\gamma}{\gamma_0} \right) \cdot C_D \cdot \frac{(U \tan \theta)^2}{2g} \cdot \left\{ \sqrt{1 + \frac{(\frac{\gamma}{\gamma_0}) \cdot 2D_0 e^{-\alpha t}}{K_p \cdot C_D \cdot U^2 \tan^4 \theta / 2g}} - 1 \right\} \quad \dots\dots\dots(6)$$

洗掘は初期の時間内では著しいが、それ以降は急激に

小さくなるので、ここでは一応時間tの範囲を0~∞と考えても差支えないものとするれば、上式はつぎのようになる。

$$a_L = \left(\frac{\gamma}{\gamma_0} \right) \cdot C_D \cdot \frac{(U \tan \theta)^2}{2g} \cdot \left\{ 1 + \log \left\{ \left(\sqrt{1 + \frac{(\frac{\gamma}{\gamma_0}) \cdot 2D_0}{K_p C_D \frac{U \tan^4 \theta}{2g}} - 1} \right) \sqrt{1 + \frac{(\frac{\gamma}{\gamma_0}) \cdot 2D_0}{K_p C_D \frac{U^2 \tan^4 \theta}{2g}} + 1} \right\} \right\} \quad \dots\dots\dots(6)$$

実験結果によればα≈1、γ₀/γ≈0.86、C_D≈2であったので、これらとU₀、D₀等の測定値を用いてa_Lの値を計算したのが表-2のa_L計算値であり、フィルムから読み取ったものがa_L実験値である。計算値と実験値は比較的良好な対応を示しているものもあり、ある程度図-4に示すような土砂移動モデル(受働土圧モデル)の適用が可能であることが知れる。

表-2 土石流による洗掘深

実験No.	U ₀ (cm/sec)	θ (°)	D ₀ (cm)	a _L 計算値 (cm)	a _L 実験値 (cm)
1	160	12	2.9	2.2	2.0
2	146	12	3.8	1.9	2.5
3	169	11	4.0	2.1	2.0
4	161	10.5	3.9	1.8	2.7
5	192	11	3.9	2.7	2.5

4. まとめ

土石流が集合運搬形態であることを前提にすれば洗掘に対しても当然同様の考え方をとるべきであると考え、ダム下流側における土砂の変形移動に対し、ここでは受働土圧のモデルを用いて、その最大洗掘深を求めた。その結果計算値と実験値とのある程度の対応性が見られ、土石流による洗掘がある程度同モデルによって説明可能であることを見出した。しかし同モデルは流速やナップ進入角などを一定として解いている。実際にはこれらは時間とともに変化し、ダム下流側の堆積面角度も単純な受働土圧モデルのような形にはならず、時間とともに変化するので、その洗掘はもっと複雑な現象を呈することは明らかである。今後これらに対してはさらに綿密な実験的研究が必要である。

引用文献

(1) 谷口義信・高橋正佑：日林九支研論33, 291~292, 1980
 (2) 尾張安治：実用砂防工学, pp. 109, 朝倉, 1960
 (3) 林 拙郎：三重大学術報告66, pp. 107, 1983
 (4) 日浦啓全・大手桂二・日置象一郎：京都府大学術報告19, pp. 33, 1974
 (5) 谷口義信：土石流段波と河床せん断応力の関係, 文部省科研報告書, pp. 14, 1983