

78 土石流発達過程における浸透の影響に関する実験的考察

宇都宮大学農学部 ○鈴木勇二・伊藤誠記

1. はじめに

堆積層に表面流が供給され、堆積層中のある深さでせん断抵抗力をせん断力が上回ると土石流が形成され、流動にともなう堆積層を侵食し堆積層の砂礫を取り込むことによって土石流段波は波高と濃度を増大させながら流下する。しかし、無限に増加することはない、堆積土砂の性質や溪床勾配によりある平衡状態が存在する。砂礫堆積層における土石流の発達モデルとしては高橋のモデルがある。これは段波は定速で流動するとして、段波の先端部の一定長 L の部分に流動にともなう侵食砂礫が蓄積されて波高および濃度が発達するというものである。砂礫濃度 C_d および波高 h の発達式は次のとおりである。

$$C_d = \frac{C_* C_e \{1 - \exp(Kt)\}}{C_* - \{s + (1-s)C_*\} C_e \exp(Kt)} \quad (1)$$

$$h = \frac{Q_0 [C_* - \{s + (1-s)C_*\} C_e \exp(Kt)]}{U \{C_* - (s + (1-s)C_*) C_e\}} \quad (2)$$

$$K = \frac{U [C_* - \{s + (1-s)C_*\} C_e]}{L (C_* - C_e)} \quad (3)$$

$$C_e = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho) (\tan \phi - \tan \theta)} \quad (4)$$

ただし、 s は堆積層中の間隙の水による飽和度、 C_* は堆積層の砂礫分の容積濃度、 C_e は土石流段波中の砂礫分の平衡濃度、 U は段波の流速（定速）、 Q_0 は上流端からの表面流量、 ρ および σ は水および砂礫の密度、 θ は堆積層の傾斜角、 ϕ は砂礫の内部摩擦角または息角である。

土石流の室内実験では、ある厚さに砂礫を固定床上に敷き上流端から表面流を供給して土石流を発生させる方法が一般的である。この場合、同一の表面流を上流端から給水しても、堆積層の厚さや水による飽和状態によっては段波先端部の流動速度や規模には明らかに差異がみられる。これは、堆積層への水の浸透により土石流発生に関与する表面流量が減少するためであると考えられる。本研究では、堆積層への水の浸透が土石流の形成過程でどの様に影響するかを実験的に考察を行うことを目的とした。

このモデルについては飽和堆積層で発達過程をよくあらわしていることが実験的に明らかにされているが、透水性の高い不飽和堆積層では式(2)の飽和度や L の値を変えても適合しにくく、表面流からの浸透による損失を考慮する必要があると考えられる。式(1)および式(2)には堆積層の水による飽和度が含まれているが、不飽和である場合には侵食深よりもさらに深い堆積層の部分への浸透が考えられるはずであり、段波の流動速度に比して浸透速度は小さいと思われるが、 L というある区間を考えれば、浸透による上流端から供給された表面流の損失が無視できないと考えられる。堆積層に浸透した水でも、土石流に侵食によって再度取り込まれ L の部分に蓄積されるものもあるが、この損失部分はさらに深部へ浸透してしまうものである。この点については前述のモデルに含まれてい

ない。段波の先端部付近では、表層の相対的に高速な層を運ばれてきた土砂と水の混合物が河床に落ち込み段波内に巻き込まれるようにして進行することが観察される。また、椿らの実験結果によると土石流の流動に伴う堆積層の移動層はごく表面に限られている。したがって、この先行する最先端部からの浸透により発達過程モデルにおいて侵食を受けるLの部分に到達する以前に飽和しているものと考え、さらに深部のみが不飽和状態にあって、この部分に浸透した水が表面流からの損失と考えることができるであろう。すなわち、この先端部を先行する部分と考え、上述の侵食土砂が蓄積される一定長Lの部分はこの後方の部分と考えた方が妥当である。

そこで、Lの区間の水収支を考える。段波中の水は上流端から供給された表面流と堆積層の侵食によって砂礫といっしょに取り込まれた水からなり、堆積層が不飽和である場合には堆積層へ水が浸透し、侵食によって土石流に取り込まれる堆積層表面付近のもの以外は直接土石流には関与しない深さへ浸透してしまうと考えることができる。したがって、次のような関係が成り立つ。

$$(1 - C_d) Q_t = Q_o + \frac{1 - C_{*}}{C_{*}} C_d s Q_o - Q_f \quad (5)$$

ただし、 Q_f は深部に浸透し失われる流量である。式(5)より Q_f について解けば次式のようなになる。

$$Q_f = Q_o - \frac{C_{*} - \{s + (1 - s) C_{*}\} C_d}{C_{*}} Q_t \quad (6)$$

堆積層が飽和しているときは $Q_f = 0$ でかつ $s = 1$ であるから、式(6)は式(2)と一致する。また、堆積層が不飽和の場合でもLの段波本体に先行する部分により侵食の対象となる堆積層表面は飽和していると考えれば、 $Q_f > 0$ でかつ $s = 1$ となるから次式のようなになる。

$$Q_f = Q_o - \frac{C_{*} - C_d}{C_{*}} Q_t \quad (7)$$

発達過程にある土石流流量と濃度を測定し、式(7)より Q_f を計算できる。この Q_f が一定であるとすれば、式(2)の発達モデルに、 Q_o のかわりに Q_o から Q_f をひいた有効表面流量を用いることができる。すなわち、 Q_f は流動中は一定と考え、 $s = 1$ および $Q_{oe} = Q_o - Q_f$ において、式(2)のかわりに次式が成立する。

$$h = \frac{Q_{oe} \{C_{*} - C_e \exp(Kt)\}}{U(C_{*} - C_e)} \quad (8)$$

2. 実験方法

実験水路において、土石流の流動状況を写真撮影により測定し、式(8)が不飽和砂礫堆積層における土石流形成過程に適用できるかを検討する。そのためには、流動速度および Q_f が流動過程で一定であることなどのモデルのパラメータを検討し式(8)の適合性を検討する。

実験装置は、幅10cm、深さ20cm、長さ4mの両面透明アクリル製の水路と、一定流量を給水できる水槽からなっている。アクリル製の一方の壁面には目盛りがつけられている。用いた砂は、粒径が2.00~4.76mm、比重が2.69、内部摩擦角が36.1度(一面せん断試験)、水中息角が34.8度、堆積濃度(容積濃度)が0.548である。堆積層の厚さは、4, 8, 12cmの3種類とし、水路床に砂を敷く際には、散水などにより水による飽和度を変え、上流端から表面流を与える直前に堆積層の

飽和度を測定した。

35mmモータドライブカメラで土石流の動きを撮影し、デジタイザによりその形状変化を測定する。また、土石流段波の砂礫濃度は、水路の4カ所において、段波先端部の一部を採取し測定を行った。今回の実験では、水路勾配は19度、上流端給水量は単位幅当り77.7cc/秒とした。モータドライブカメラによる撮影間隔は最小で約0.25秒であり、土石流の流速により撮影間隔は調整を行った。

3. 測定結果および考察

砂礫濃度の発達については、飽和度が10.7%から100%の範囲の62例の実験を行った。飽和度の低いものほど測定値にばらつきはあるものの、堆積層の厚さや飽和度による明かな差は認められなかった。図-1に式(1)において $s=1$ したときの最適曲線および測定値を示した。パラメータの最適値は、 $L=154.8$ cm、 $C_e=0.477$ となり、内部摩擦角の測定値から計算される式(4)の平衡濃度よりも幾分小さい。

波高の測定においては、各実験の流動速度は一定値を示したが、表-1に示したように、飽和度や堆積層の厚さによりその速度には差がみられる。図-2は、式(8)による曲線と測定値を示した1例である。浸透による表面流の損失を考慮しない場合と比較すると、モデルと測定値の適合度が向上している。また、表-1には、式(8)の平衡濃度、段波の長さおよび有効表面流量の最適値を示した。土石流の流下にとまなう堆積層の

飽和部分の拡大状況を観察すると、ほぼ段波の流動速度と同じ速さで下流に拡大して行くことが確認された。したがって、次のような式で浸透深 D_f が求められる。

$$D_f = \frac{Q_f}{U(1-C_f)(1-s)} \quad (9)$$

このようにして求められた浸透深の値は、測定項目のばらつきを考慮してながめると、堆積層の飽

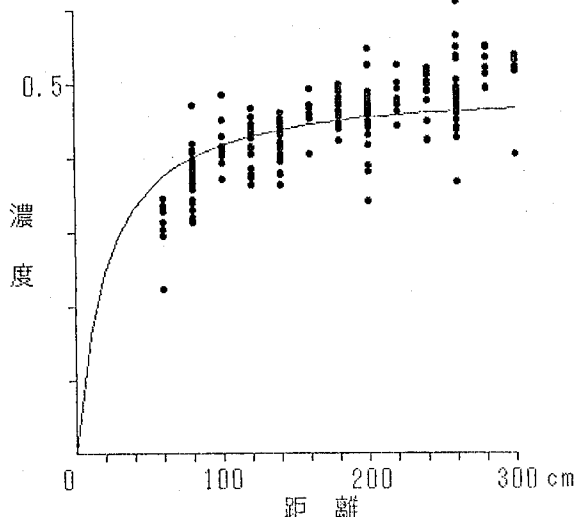


図-1 濃度発達曲線と測定値

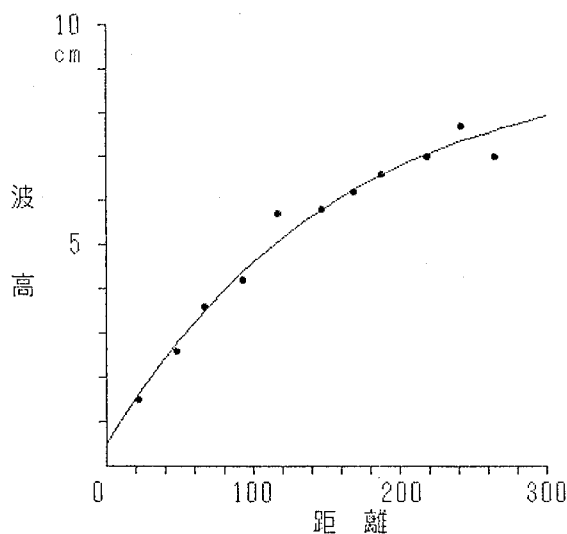


図-2 浸透を考慮した波高発達曲線と測定値

和度が高い場合を除いてはほぼ堆積層の厚さ以内の値を示している。浸透流量が多いほど流動速度が小さくなる傾向が見られる。この結果はダイラタント流体の $3/2$ 乗則の流速式が当てはまるとしたら、浸透が多いほどバグノルドの係数 a_i が大きくなることになり、浸透の影響で a_i が1オーダー程度大きくなるという高橋の結果と同じ傾向になる。なお、濃度測定結果から、式(1)の濃度発達式を求め、波高の連続写真測定による各位置における濃度を推定し、段波中の水の流量を推定し、上流端表面流量との差として浸透流量を求めると、各流下位置における浸透流量は一定になることも確かめられている。

表-1 浸透を考慮した波高発達モデルの最適値

堆積層厚 (cm)	飽和度	流動速度 (cm/sec)	平衡濃度	段波長 (cm)	表面流量 (cc/sec)	浸透深 (cm)
12	0.794	47.9	0.513	163.0	23.0	12.3
	0.654	28.2	0.499	191.0	22.1	12.6
	0.489	30.2	0.501	191.4	21.7	8.1
	0.371	27.1	0.520	198.5	13.9	8.3
	0.348	22.7	0.520	149.1	8.8	10.3
	0.290	20.1	0.494	269.0	23.0	8.5
	0.197	17.4	0.421	149.4	24.9	8.3
	0.146	12.9	0.452	149.4	20.6	11.4
	0.125	15.0	0.460	161.8	22.2	9.4
8	0.805	45.6	0.504	162.3	24.5	13.2
	0.737	48.4	0.512	163.2	22.5	9.6
	0.618	55.8	0.516	122.3	21.6	5.8
	0.521	36.8	0.521	205.9	14.5	7.8
	0.400	33.1	0.502	189.6	23.3	6.0
	0.383	27.3	0.505	270.6	23.1	7.2
	0.331	28.9	0.521	196.6	13.6	7.3
	0.220	21.2	0.494	269.9	23.2	7.3
	0.187	21.5	0.489	270.0	27.0	6.4
4	0.150	18.7	0.519	158.1	9.1	9.5
	0.807	54.0	0.513	162.7	23.8	11.4
	0.756	53.2	0.504	162.4	24.5	9.1
	0.646	52.3	0.502	162.7	23.7	6.4
	0.578	51.5	0.513	162.8	23.7	5.5
	0.378	45.7	0.503	162.3	24.7	4.1
	0.279	39.9	0.503	162.7	23.5	4.2
	0.215	35.5	0.500	163.1	22.8	4.3
	0.141	31.8	0.505	270.3	23.2	4.4

4. おわりに

堆積層の飽和度および砂礫濃度、段波先端部の砂礫濃度などは、あまり高い測定精度は期待できないので、モデルの最適値のばらつきが大きい、土石流の形成過程における堆積層への水の浸透の影響が明らかにできた。実験土石流という特殊な状況ではこの影響はかなり大きい、土石流の浸透堆積について否定的意見もあり、実際の土石流の形成過程においてはどの程度意義があるかについては今後さらに検討したい。

【文献】(1) 芦田和男ほか：河川の土砂災害と対策，260p，森北出版，東京，1983

(2) 橋本一郎ほか：土石流における粒子間応力と流動特性，土木学会論文報告集，第317号，

pp.79-91, 1982