

81 ガラスビーズを使用した土石流実験 (V)

- 波形の伝播速度と先端部の形成機構について -

京都大学農学部 ○中島皇 武居有恒 小橋澄治

はじめに

土石流には縦断形状が凸型に盛り上がった先端部とそれに続くほぼ一定の流動深を持つ疑似定常部が存在し、これらの部分はほぼ一定の波形を保って流下することが観測並びに実験によって知られている。この過程については高橋¹⁾によって土石流段波の形成機構として論じられているが、筆者らが行った実験結果から、2・3の新たな知見が得られ、別の過程を考えた方が現象をうまく説明できると思われる。本報では、前報で報告した一粒径土石流²⁾のデータも参考にして、数厚の違いによる影響について検討した後、波形の伝播速度と先端部での取り込みについて報告する。

1. 実験方法

長さ 7 m、高さ 15 cm、幅 15 cm の透明なアクリル製水路を勾配 $\theta = 16^\circ$ に保ち、直径 5 mm の球形ガラスビーズ ($\sigma = 2.53 \text{ g/cm}^3$) を元河床濃度 $C^* = 0.59$ (容積濃度) になるように、数厚 $D_b = 5, 3, 1.5 \text{ cm}$ に敷き詰める。 D_b の違いに応じて、元河床を $Q_0 = 4.53 \sim 12.67 (\text{ml/s} \cdot \text{cm})$ で飽和させた後 $Q = 38.67 (\text{ml/s} \cdot \text{cm})$ を給水する飽和度 $SR = 100$ の条件で土石流を発生させ、ハイスピードビデオ (200 f.p.s.) を用いて側方から撮影し、その画像から濃度、粒子の動きを読み取り、解析した。

2. 解析方法及び結果

2.1 段波の形状と速度

発生させた土石流の段波の形状と速度は図 1、図 2 に示す通りである。土石流段波の形状は D_b の大きさが異なっても殆ど変化がなくほぼ一定と見なすことができる。段波の移動速度は D_b が

大きいほど大きくなっている。また、先端部のさらに前方では既に河床部で移動が始まっており、その結果段波先端より前方で河床は僅かに盛り上がりを見せる。この盛り上がり部分の長さ及び高さは D_b が大きいほど大きくなり、河床から段波中に取り込まれる材料の量と対応している。

2.2 濃度分布

先端部と疑似定常部の濃度分布を図 3 に示す。濃度の求め方は平野・岩元³⁾に従って、精度を上げるため側面から読み取った粒子の面積率によって算出した。つまり、

$$C = C_0 \cdot (P/P_0)^{1.5} \text{ ----- (1)}$$

ここに、 C_0 : 基準の部分の濃度、 P_0 : 基準の部分の粒子の面積率

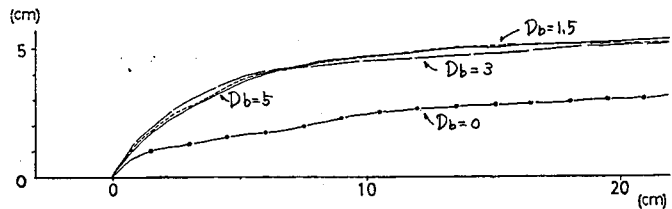


図 1 段波形状

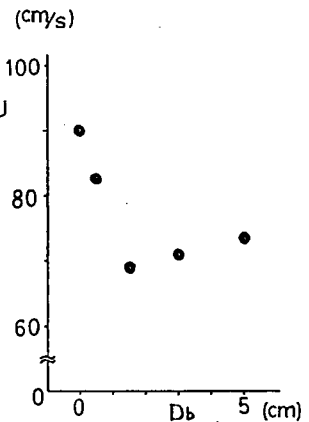


図 2 数厚と段波の移動速度

C: 求める部分の濃度、P: 求める部分の粒子の面積率

濃度の換算は、ある深さにおいて20~30個の1 mmのメッシュが側方から読み取ったビーズの領域内にはいるか否かで各深さ毎の面積率を出し、それらの深さ方向の移動平均をとって各部分の平均濃度とした。算出した値にはかなりばらつきがあるが、先端部では元河床部から段波部分まで、ほぼ均一濃度と見なせるような傾向を示し、疑似定常部については、元河床の上部から徐々に濃度が小さくなるような上に凸の分布形を示す傾向にある(図3)。これらの傾向は、槽ら⁴⁾や高橋⁵⁾が提案している濃度分布の式が示す下に凸の分布形とは逆になっているが、彼らの実験値も本実験の分布形に近い傾向を示していることから、今後より詳しく検討する必要がある。

2.3 流速分布

濃度分布を測定した部分の粒子の速度をプロットした(図3)。先端部では表面に近い部分では下に凸、元

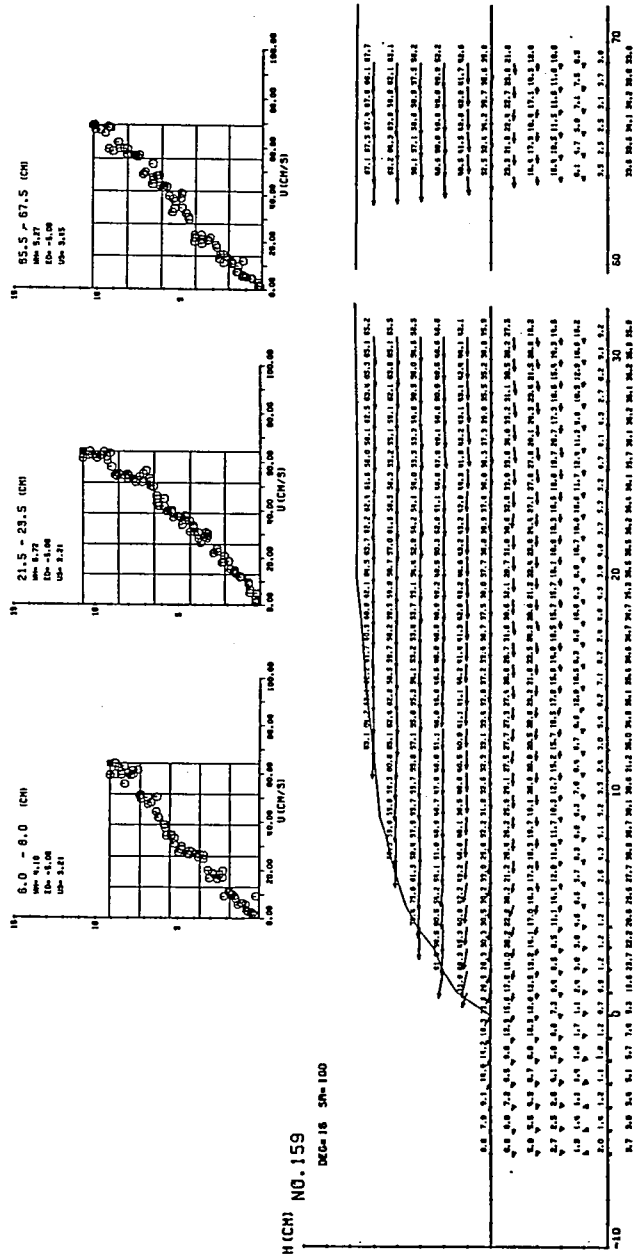
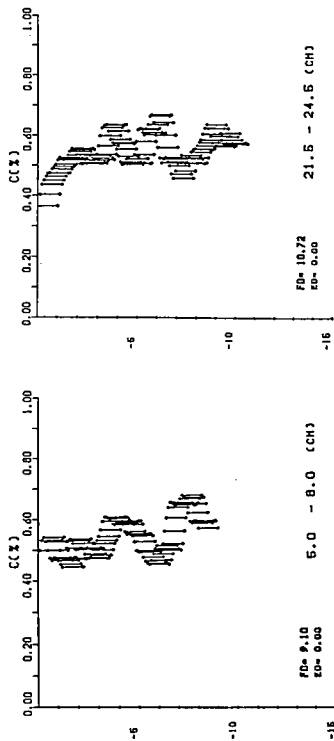


図3 濃度分布、流速分布の一例

河床部では上に凸または直線的な分布形を示しており、これら二つの領域では抵抗則が異なることが予測される。疑似定常部分では下に凸な分布形を示し、無次元表示にすると、

$$U/U_s = 1 - (y/h)^{1.5} \quad \text{--- (2)}$$

ここに、U：深さyにおける流速

U_s：表面流速

y：表面からの深さ、h：流動深

という関係式でほぼ近似できるようである。

後続流部では流速分布は直線的になり、濃度分布の範囲がさらに広がるため、全体に流れの構造が複雑である。

実験結果の一覧を表1に示す。

3. 考察

3.1 段波の伝播速度

段波の伝播速度U_bで移動するような座標系で考えると、先端前方の河床部分から単位時間に供給されている量は流速U_bと元河床の深さh_bとの積で表される。先端部から疑似定常部にかけては表面形は変化しないので、疑似定常部の後端から同じ量が流れ出ていることになる。

$$U_b \cdot h_b = U_n \cdot (h_b + h_d) \quad \text{--- (3)}$$

ここに、U_n：疑似定常部の平均流速、h_d：土石流段波の波高
h_dの大きさはh_bの大きさに係わりなくほぼ一定であるから、定常部の深さはほぼh_d + h_bで近似でき、実験値でもこれに近い値である。定常部の固定座標系におけるにおける平均流速U_mに平均流速U_nを加えると段波の速度U_bに等しくなるはずである。すなわち、

$$U_m + U_n = U_b \quad \text{--- (4)}$$

(3)、(4)式よりU_nを消去すると

$$U_m + U_b \cdot h_b / (h_b + h_d) = U_b$$

となり、これをU_b、U_mについて解くと

$$U_b = (1 + h_b / h_d) \cdot U_m \quad \text{--- (5)}$$

$$U_m = h_d / (h_b + h_d) \cdot U_b \quad \text{--- (6)}$$

が得られる。

これと実験値を比較してみる。各断面のU_mを表1から求め、(5)式によってU_bを求めると(66.7, 72.5, 65.5)・(58.9, 63.7, 62.0)・(57.5, 64.3, 68.3)となる。実測値では正確な値の計測は難しいが平均値を探ると73.3・70.8・69.1 cm/s (図2)となり、まずまずの値といえる。

土石流の密度(c)・剪断力と垂直力の比(T/N)・流速(u)
 $\tan \phi = (T/N)$

先端部 (移動床の厚さ 5.0 cm)					疑似定常部 21.5 ~ 24.5 cm					後続部 65.0 ~ 68.0 cm				
y	c	T/N	φ	u	y	c	T/N	φ	u	y	c	T/N	φ	u
1.00	0.47	0.684	34.4	59	1.00	0.39	0.772	37.7	83	1.00	0.32	0.864	41.0	68
2.00	0.53	0.682	33.5	54	2.00	0.47	0.723	35.9	80	2.00	0.40	0.808	38.9	82
3.00	0.58	0.648	33.0	45	3.00	0.51	0.698	34.8	55	3.00	0.44	0.772	37.7	58
4.00	0.57	0.640	32.6	37	4.00	0.53	0.682	34.3	51	4.00	0.47	0.748	36.7	47
5.00	0.57	0.635	32.4	28	5.00	0.54	0.672	33.9	48	5.00	0.51	0.723	35.9	39
6.00	0.57	0.632	32.3	24	6.00	0.54	0.665	33.8	40	6.00	0.51	0.709	35.4	30
7.00	0.58	0.628	32.1	18	7.00	0.55	0.660	33.4	34	7.00	0.53	0.698	34.9	21
8.00	0.58	0.626	32.0	8	8.00	0.55	0.658	33.2	28	8.00	0.53	0.691	34.6	14
9.00	0.58	0.624	32.0	4	9.00	0.55	0.652	33.1	20	9.00	0.54	0.684	34.4	8
9.10	0.58	0.624	32.0	.5	10.00	0.55	0.650	33.0	14	10.00	0.54	0.678	34.2	2
					10.72	0.55	0.648	33.0	5	10.27	0.54	0.677	34.1	1
c=0.577 Q=273.1					c=0.520 Q=414.8					c=0.480 Q=345.7				
(移動床の厚さ 3.0 cm)					37.3 ~ 41.3 cm					78.5 ~ 80.5 cm				
y	c	T/N	φ	u	y	c	T/N	φ	u	y	c	T/N	φ	u
1.00	0.47	0.684	34.4	53	1.00	0.39	0.772	37.7	85	1.00	0.32	0.869	41.0	78
2.00	0.51	0.667	33.7	55	2.00	0.47	0.723	35.9	81	2.00	0.40	0.808	38.9	80
3.00	0.55	0.653	33.2	43	3.00	0.51	0.698	34.8	53	3.00	0.44	0.772	37.7	59
4.00	0.57	0.643	32.8	33	4.00	0.53	0.682	34.3	47	4.00	0.47	0.748	36.7	45
5.00	0.57	0.638	32.4	22	5.00	0.54	0.672	33.9	39	5.00	0.51	0.723	35.9	32
6.00	0.57	0.634	32.4	13	6.00	0.55	0.664	33.6	32	6.00	0.51	0.709	35.4	22
6.95	0.58	0.630	32.2	4	7.00	0.55	0.658	33.4	22	7.00	0.53	0.698	34.9	15
					8.00	0.56	0.654	33.2	12	8.00	0.53	0.691	34.6	5
					8.22	0.56	0.653	33.1	3	8.18	0.54	0.689	34.6	1
c=0.545 Q=232.6					c=0.513 Q=332.7					c=0.485 Q=321.2				
(移動床の厚さ 1.5 cm)					22.0 ~ 25.0 cm					84.0 ~ 87.0 cm				
y	c	T/N	φ	u	y	c	T/N	φ	u	y	c	T/N	φ	u
1.00	0.48	0.983	34.7	72	1.00	0.39	0.772	37.7	73	1.00	0.33	0.850	40.4	84
2.00	0.51	0.871	33.9	61	2.00	0.48	0.729	36.1	69	2.00	0.42	0.788	38.2	70
3.00	0.55	0.856	33.3	49	3.00	0.53	0.698	34.8	61	3.00	0.47	0.748	36.2	54
4.00	0.57	0.845	32.6	33	4.00	0.54	0.679	34.2	47	4.00	0.51	0.718	35.7	34
5.00	0.58	0.838	32.5	20	5.00	0.55	0.668	33.8	38	5.00	0.53	0.701	35.0	17
5.68	0.58	0.834	32.4	8	6.00	0.56	0.660	33.4	21	5.30	0.54	0.698	34.9	4
					6.30	0.58	0.658	33.3	5					
c=0.539 Q=239.0					c=0.508 Q=307.5					c=0.457 Q=280.2				
y:cm c:gf/cm ³ u:cm/sec					c, u はyの直上層の平均値									

表1 実験結果の一覧

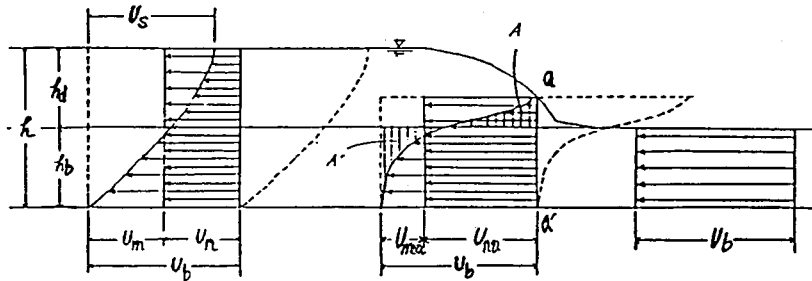


図4 先端部の取り込み機構

(2)式で疑似定常部の流速分布は表面流速から深さの3/2乗に比例する項をひいたものとして近似できることを述べたが、この関係を用いると

$$U_m = 3 U_s / 5 \quad \text{----- (7)}$$

となる。(6)、(7)式より、固定床の場合は $h_d = 0$ とおくと、 $U_m = U_b = 3/5 \cdot U_s$ になり段波の速度は表面流速の3/5倍になる。また h_b が h_d の2/3より大きくなると表面流速より段波速度の方が速くなる。

3.2 先端部の形成機構

先端部の取り込み機構は先の移動座標系で考えると、図4において段波前面上の点aでは波面上を遡る流れがある。また底面は静止しているので $-U_b$ の速度を持つ。流れの連続の条件から面積AとA'とは同じ大きさでなければならない。この流速分布の平均値 U_m は(3)より、 $U_b - U_n$ で与えられるが、aの位置が h_b より低いときは河床面上の高さでの流速より小さく、 h_b と同じ深さになると段波速度のちょうど半分になる。この $A = A'$ で示される面積に相当する流量が先端からa-a'断面の間で元河床から段波の中に取り込まれることになる。

疑似定常部では(7)式が成立し、またAの大きさは $y^{1.5}$ を0から $h_d / (h_b + h_d)$ まで積分した値と $U_s \cdot (h_b + h_d)$ の積に $(U_b - U_s) \cdot h_d$ を加えた値になる。 $h_b = h_d$ のときには

$$\begin{aligned} A &= U_b \cdot h_b \cdot \{ (0.4 \cdot 0.5^{2.5}) \cdot 5/3 + 1/6 \} \\ &= 0.285 \cdot U_b \cdot h_b \end{aligned}$$

となり、全流量の28.5%が河床から取り込まれたことになる。

この考察は単純化するために水と粒子を一緒にして取り扱っているが、実際には部分によって粒子濃度が変化するため正確にはこれらを別々に取り扱う必要がある。

4. まとめ

実験値の解釈については、種々の問題があるが、今後、疑似定常部と共に先端部の抵抗則についても検討を加えていきたいと考えている。

引用文献

- 1) 高橋保；土石流の発生と流動に関する研究、京都大学防災研究所年報 20-B-2、405～435、1977
- 2) 中島皇ほか；ガラスビーズを使用した土石流実験、砂防学会研究発表概要集、263～266、1986
- 3) 平野宗夫・岩元賢；土石流先端部に関する実験的研究、新砂防 121、1～7、1981
- 4) 椿東一郎ほか；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 317、79～91、1982
- 5) 高橋保；土石流の流動機構、混相流シンポジウム、187～203、1983