

II-7 階段地形上の土石流氾濫範囲の推定手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 15～平 17

担当チーム：火山・土石流チーム

研究担当者：栗原淳一、秋山一弥

【要旨】

土石流の氾濫域、特に扇頂部は地形勾配が急なためにこのような区域に開発が進むと階段状に土地の造成が行われる。このような地形上における土石流の氾濫・堆積過程は十分に解明されていないため、氾濫範囲を精度よく推定するのが困難である。本研究では、階段地形の実態を収集して地形条件との関係を分析し、階段地形上における土石流の氾濫・堆積形態を明らかにした。また、水理模型実験を行い、階段地形の有無、形状による土石流の氾濫・堆積形態の変化を把握し、階段地形上における土石流氾濫範囲を推定する手法を提案した。

キーワード：土石流、宅地造成、階段地形、水理実験、氾濫範囲

1. はじめに

近年、都市開発、宅地化の進展により土地の改変が著しい。このうち、宅地造成に伴い形成される地形として階段地形がある。谷の出口は、一般に狭く勾配も急なことから階段状に造成して土地の有効利用が図られてきた。一般的な扇状地形における土石流の氾濫・堆積過程については、様々な研究がなされ解明されてきているが、階段地形を対象とした検討は十分にはなされていないと考えられる。砂防事業において、低落差の床固工などが連続的に施工される場合があるが、土砂の流出が抑制されることが確認されており、階段地形においても同様の現象が予想される。このような背景により、階段地形における土石流の氾濫範囲を推定し、被害予測を正確に行う手法を検討する必要がある。

本研究は、階段地形を含む氾濫域における土石流の氾濫特性を明らかにし、その氾濫範囲推測の精度向上を図ることを目的に実施した。

まず、階段地形における土石流の災害事例を収集し、階段地形の形状の分析を行った。そして、事例を基に平均的な階段地形のモデルを作成し、土石流を階段状及び階段のない斜面で流下させ、流下距離等、氾濫、堆積に関するデータを計測した。その結果から、階段地形の形状（長さ、幅等）や階段地形の有無による土石流の氾濫・堆積形態の変化を把握し、階段地形の形状と氾濫範囲との関係を求め、階段地形における土石流氾濫範囲の推定に適用する手法を提案した。

2. 階段地形に関する実態の把握

階段地形が土石流の氾濫に与える影響を検討するにあたり、階段地形の実態を調査し、土石流の氾濫範囲の諸

元との関係を考察した。

図-1は、実際の土石流危険渓流の想定氾濫域における階段地形であるが、これらは自然に形成されたのではなく大半が宅地造成や圃場整備の過程で人工的に階段状に地形が改変されていったものと思われる。階段地形の実態を把握するため、平成15年より過去10年以内に階段地形を呈する区域で実際に土石流が発生したケースを調査した。その結果、29の事例を収集したので、それらについて地形条件と氾濫域との関係を整理した。

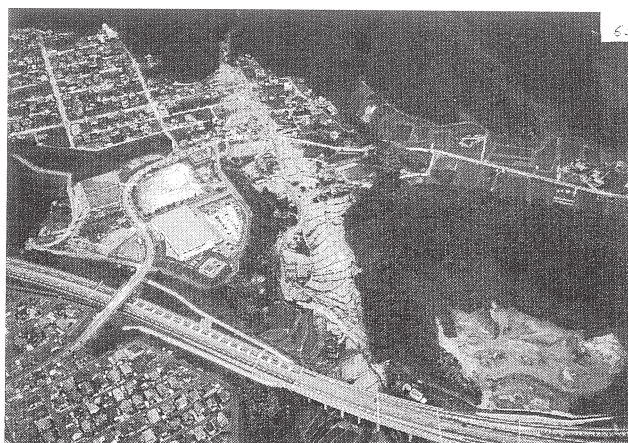


図-1 階段地形の事例

2. 1 階段地形形状

以下において、平坦部、階段部、比高、平均勾配および流下距離を図-2のように定義する。

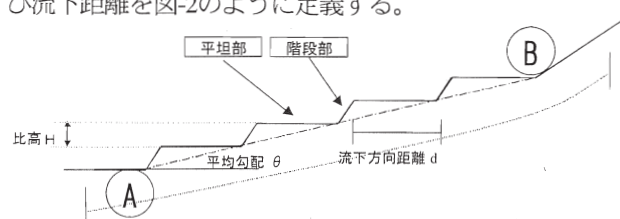


図-2 階段地形における各部の定義

①平坦部の流下方向距離

平坦部の流下方向距離を整理すると最も頻度が多いのは16~20mで、10mから30mで全体の半数以上を占める(図-3)。わが国の一般的な家屋の一边の長さが10m前後であるので、平坦部の流下方向距離は家屋1~2軒程度の広さを有していることになる。

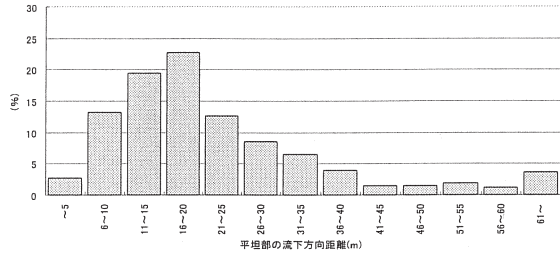


図-3 平坦部の氾濫流下方向距離の分布

②平坦部の氾濫幅(最大値)

平坦部での氾濫範囲の横断方向の最大幅を見ると、10m~50mの間に同様の出現頻度で形成されている(図-4)。

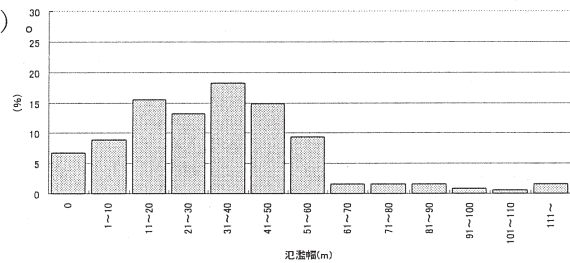


図-4 平坦部の氾濫幅(最大値)の分布

③比高

階段部の比高は、0.5m~2mのものが多いことがわかる。家屋の高さよりも低い高さが階段地形の平均的な比高といえる。後述する実験結果から明らかなように、この比高によって堆積長が大きく変わる(図-5)。

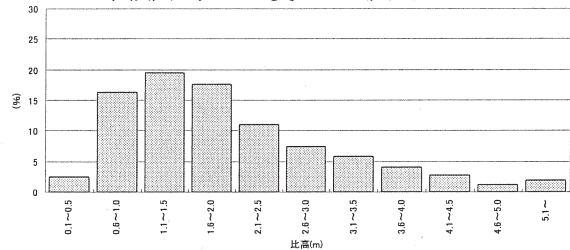


図-5 比高の分布

④階段数

氾濫が生じた範囲内にある階段数を見ると、大半が10段以内のもので、そのうち4段までで全体の半数を超えている。一方で階段数が20段を数えるものがあったが、これは、平成11年広島災害の屋代川の階段地形で、比高が

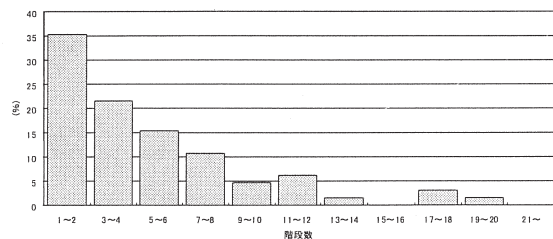


図-6 階段数の頻度

約1m、平坦部の流下方向距離が平均で12m、階段数が20であった(図-6)。比高が大きくなると、100mあたりの階段数は概ね減少する傾向にある。特に勾配の大きい箇所ほどその傾向が明瞭である(図-7)。

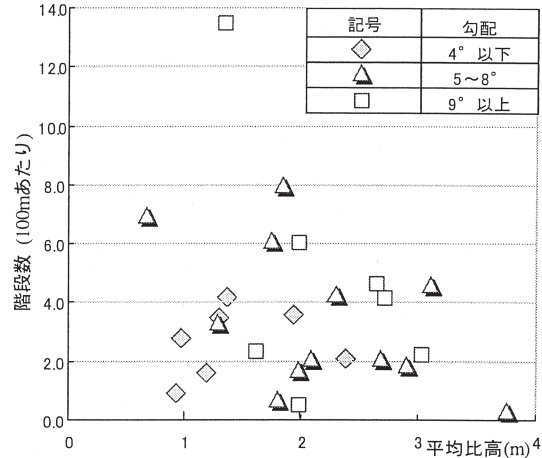


図-7 平均比高と階段数

2. 2 階段地形が堆積に与える影響

次に、上記29溪流を対象に土石流の堆積状況と階段地形の関係について整理した。溪流によって水理条件、地形条件などが異なるので厳密に比較することは難しいが、概略の傾向を把握することは可能である。

階段の比高と停止距離の関係を図-8に示す。停止距離は、階段の比高が大きくなるに従い停止距離が短くなることと想定されたことから、勾配や氾濫面積をパラメータとして各々の関係を見たが、図-8からはそのような関係は見いだされなかった。ただし、停止距離の上限は、比高が高くなるにつれ短くなる傾向にあるようである。階段地形の場合、階段の落差と平坦部の影響により、階段のない様な斜面に比べ、停止距離は短くなると思われる。図-8は、この考えを実態として示すものであるが、より詳細に地形条件との関係を明らかにするため、実験により比高や階段の数と停止距離の関係について解析する必要がある。

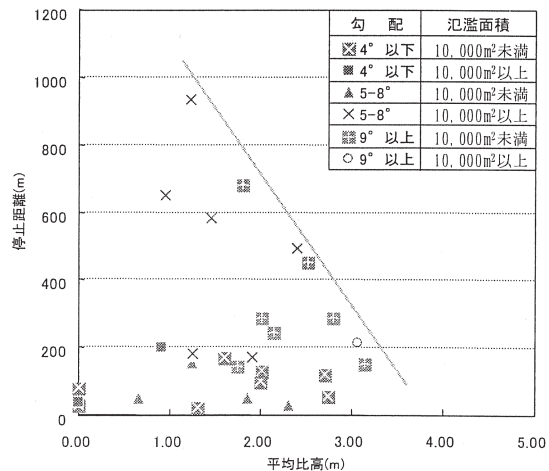


図-8 平均比高と停止距離

3. 水理模型実験による階段の影響に関する観察

3. 1 エネルギー評価による階段の影響

階段の落差による減勢効果をエネルギー損失として捉え、損失水頭で表すことを目的に水理実験を行った。水路長は6m、水路幅は20cm、水路は水平とし、落差（比高）を変え、階段部を基準に上下流一定の距離の地形において水深、流速を計測した。水路上には、平成11年広島豪雨災害の現地の粒径分布を参考に土砂を敷き詰めた。流水は土砂を混入させず清水とした。計測の断面位置の模式図を図-9に示す。

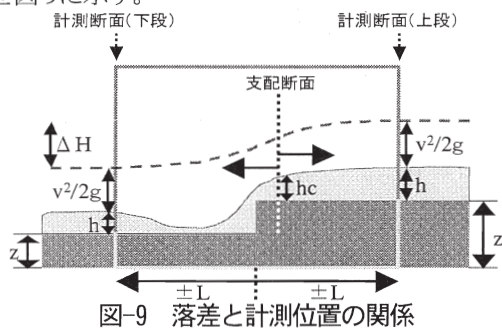


図-9 落差と計測位置の関係

実験結果を図-10に示す。

ここで、 ΔH は段差から等距離での全水頭 H の上下流間の差で

$$H = z + h + v^2/2g \quad (1)$$

とする。ここに、 z :河床高、 h :水位、 v :流速である。評価を一般化するため、 ΔH を限界水深 hc で除して図-9に d/hc (d :落差)との関係を示した。図-10より、全水頭差 $\Delta H/hc$ と落差 d/hc はほぼ等しく、落差分が全水頭差になっており、比エネルギー損失がみられない結果となっている。これは、水路断面が一樣で、流速が減少していないため、階段地形の減勢効果は横方向への拡がりを持った条件で評価する事が必要であることを示している。図-10には、点線で全水頭差 $\Delta H/hc$ と落差 d/hc が同一となる線を入れた。これと比較すると、平均的には全水頭差の方がわずかに落差より小さく、多少落差による減勢効果が表れているといえるが、その差はわずかである。

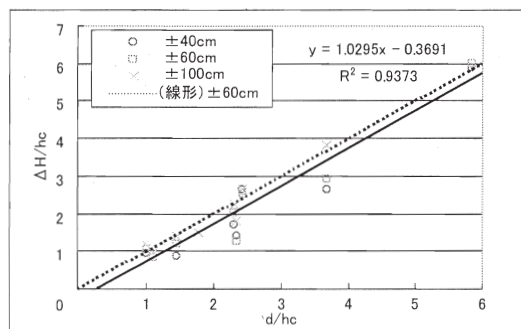


図-10 落差と水頭差の関係

3. 2 扇状地模型による実験

本実験では、2章で収集した29の事例を参考に、階段

地形を有する扇状地模型を製作し、実際に土石流を氾濫させて到達距離等を計測した。

3. 3 実験装置

実験は、図-11に示すような階段地形を模した模型を作成し、土石流を階段のない斜路部から流下させ、階段状の扇状地部に堆積させた。その結果から、階段地形の形状（長さ、幅等）や階段地形の有無による土石流の氾濫・堆積形態の変化を把握し、階段地形の形状と氾濫範囲との関係を検討した。実験条件は、階段地形を有し平成11年広島災害で被災した屋代川などの数箇所での氾濫実績をもとに、氾濫区間勾配（A-B間：4°、8°、10°）、流下部勾配（10°、15°）、100mあたり階段数（3、5、10）、平均粒径（0.3m、0.051m）、総流量（3,600m³、10,000m³）等の諸条件を設定し、合計49ケースを行った。なお、上記も含め、実験に係る数値は実物の値に換算して表示する。模型の縮尺は1/60としている。図-12に実験に用いた土砂の粒度分布を示す。

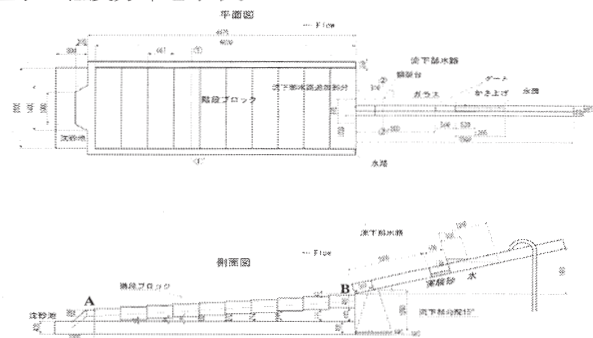


図-11 実験模型（階段地形の場合）

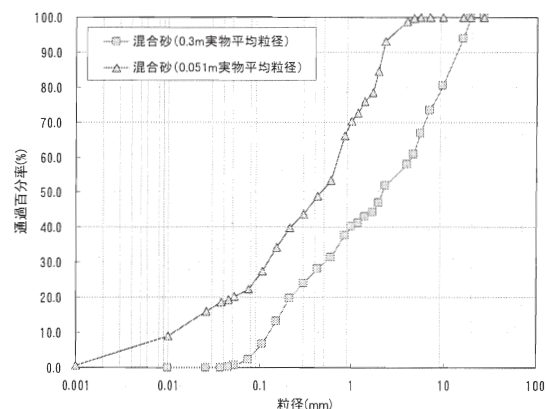


図-12 実験に用いた粒度分布

3. 4 実験結果

実験による流下の一例を図-13及び14に示す。図-13の場合、堆積は、粒径の大きい粗粒分が上流に堆積し（写真太線で囲んだ範囲）、その下流側に粒径の小さい粗粒土砂が堆積している。このケースでは、粗粒分と細粒分の違いが明瞭となっている。一方、図-14の場合、粗粒分の範囲は分かるものの、細粒分の範囲は不明瞭で、到達範

囲を特定することが困難である。このため、今回の実験では、粗粒分の堆積範囲を「到達距離」として以下の考察を行うが、実際の災害でも大径礫が堆積した範囲よりも下流に高濃度の流れが家屋等を直撃して被害をもたらしている事があり、実験結果を現地に適用するにはこの点の配慮が必要である。

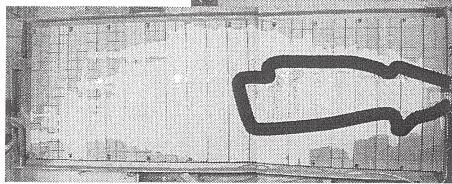


図-13 細粒分の堆積範囲が明瞭なケース

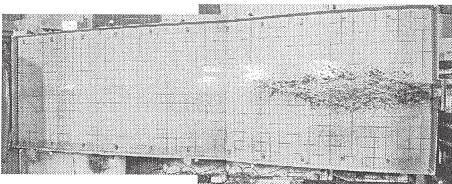


図-14 細粒分の堆積範囲が不明なケース

実験で計測した項目は、到達距離、堆積幅（最大値）および堆積高（最大値）であり、比高、土石流総流量、土砂濃度および粒径の変化に伴う到達距離との関係を観察した。なお、2章で調査した29例の約7割を占める「平均的な比高」(0.5~2.0m)の範囲を図-15~17に併せて示す(注：図中において、 L_0 は階段なしの場合の到達距離、 L は階段ありの場合の到達距離、 h_0 は階段なしの場合の堆積高、 h は階段ありの場合の堆積高を表す)。

(1) 平均比高と到達距離

図-15に勾配、総流量 ΣQ 、土砂濃度 C_d をパラメータとして、平均比高と到達距離の比(L/L_0)の関係を示す。氾濫区間勾配が同じ場合、平均比高が増加するにつれて到達距離の比(L/L_0)は減少する。その減少率は比高の増加に伴って変化し、比高が大きいくほどその値は小さくなる。比高が1m未満のようなわずかな比高でも L/L_0 の値は大きく減少する傾向を見せ、逆に比高が3mを超えると L/L_0 の減少割合は鈍くなる。前述した「平均的な比高」の範囲では、階段のない場合に比べ到達距離の比は0.8~0.35の範囲で減少し、到達距離が短くなっている。これらのことから、比高の大小が土石流の到達に大きな影響を及ぼすことがわかった。

(2) 土石流の総流量と到達距離

図-15より、土石流総流量が大きいくほど到達距離の比(L/L_0)の減少割合は小さくなるのがわかる。土石流総流量が10,000 m^3 の場合、到達距離の比が0.5~0.7であるのに対し、3,600 m^3 の場合には0.4~0.6である。

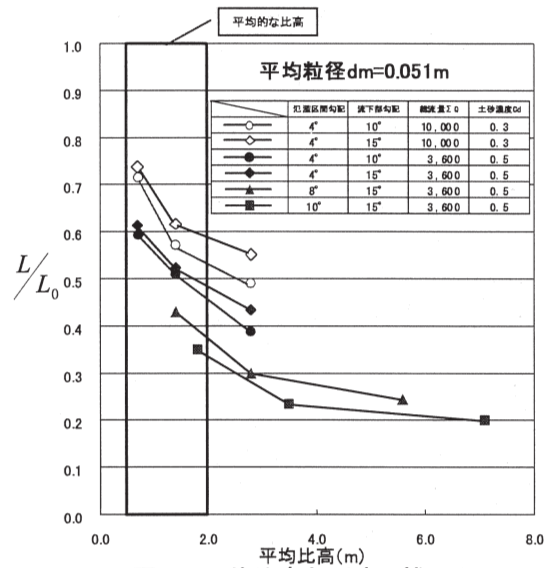


図-15 平均比高と到達距離の比
(土石流総流量での比較)

(3) 土砂濃度と到達距離

図-16に土砂濃度 C_d 以外は同一条件とした実験結果を示す。これによると、土石流濃度の大小による到達距離の比(L/L_0)に大きな変化はみられない。

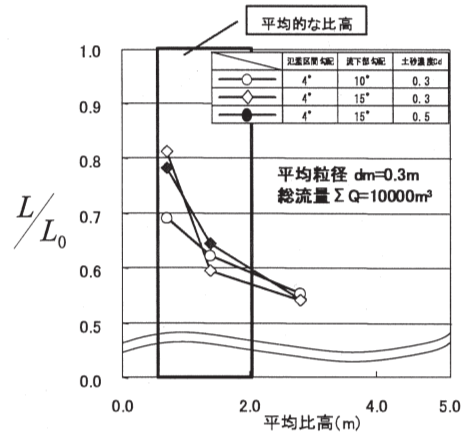


図-16 平均比高と到達距離の比
(土石流濃度 C_d での比較)

(4) 粒径と到達距離

図-17に粒径 d_m 以外は同一の条件とした実験結果を示す。これによると、粒径の大小による到達距離の比(L/L_0)に大きな変化はみられない。

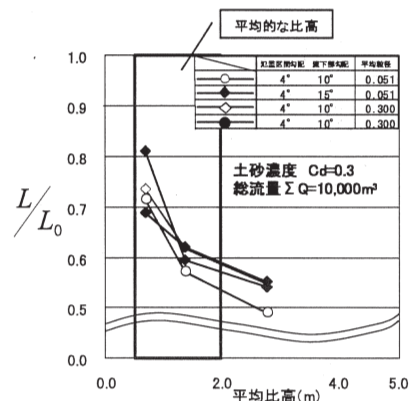


図-17 粒径と到達距離の比
(平均粒径 d_m での比較)

(5) 堆積高、堆積幅

図-18に平均比高と h/h_0 の関係を示す。階段地形により、到達距離が短くなる一方、堆積高が増加する事がわかる。

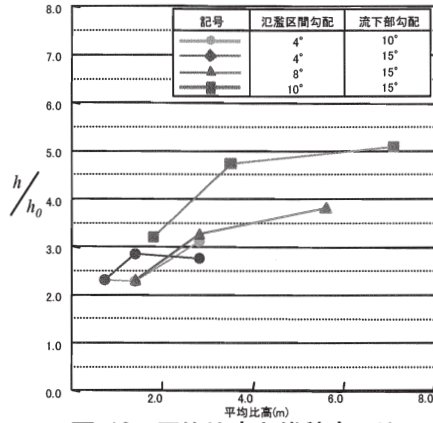


図-18 平均比高と堆積高の比

図-19に示すように、堆積幅は階段地形の影響を受けず、階段なしの場合の堆積幅と同程度の値を記録した。

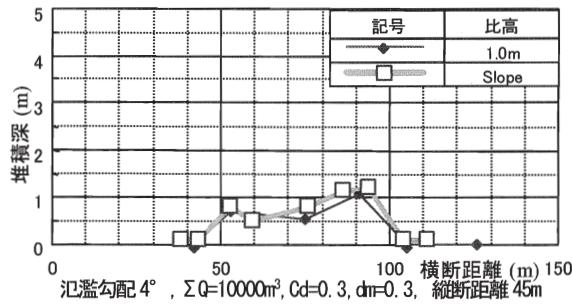


図-19 堆積横断面図 (代表的なケース)

(6) 衝撃の力

以上は、落差による減勢効果を到達距離を指標にして分析したが、ここでは、以下の(2)式が成立する範囲を計測データから算定して評価する。

$$F_d > P_2 \quad (2)$$

F_d : 土石流により建築物に作用すると想定される力の大きさ

P_2 : 通常の建築物が土石流に対して住民等の生命又は身体に著しい危害が生ずるおそれのある損壊を生ずることなく耐えることのできる力の大きさ

$$F_d = \rho_d U^2 \quad (3)$$

$$P_2 = \frac{35.3}{H_3(5.6-H_3)} \quad (4)$$

ここに、 ρ_d : 土石流の密度、 U : 土石流の流速、 H_3 : 土石流により力が通常の建築物に作用する場合の土石流の高さである。

ここでは、(4)式の H_3 を流下中の土石流の高さとして継続的に計測する事ができないので以下の(5)式を用いて

$$U = \frac{h^{2/3} (\sin \theta)^{1/2}}{n} \quad (5)$$

土石流の高さ h を流速 U の関数として求めた。その他の値は、実験条件及び一般値から代入し、 $F_d > P_2$ となる流速を求めた。計算結果を表-1に示す。この表から、流速の境界値は概ね4m/secと捉える事ができる。

表-1 $F_d > P_2$ となる流速

氾濫区間勾配 θ	$F_d > P_2$ となる流速
4.0°	4.0 m/sec
8.0°	4.5 m/sec
10.0°	4.6 m/sec

ビデオカメラで撮影した画像から、土石流の先端の流速を一定の時間経過ごとに読み取りグラフに整理した一例を図-20に示す。土石流の先端流速は、図-20に示すように境界の4m/sec付近で微妙に変動して停止するため、明確に4m/sec以下になる地点を求めることができないケースがあった。このため、流下方向に40mおきに流速の読

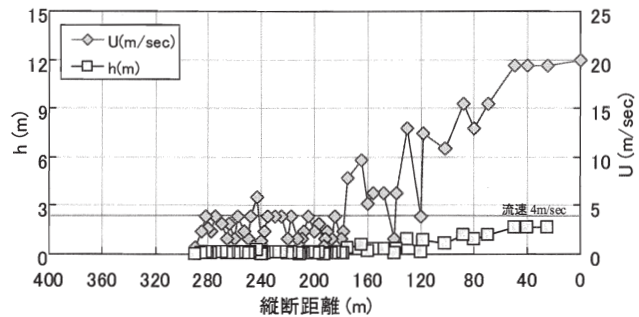


図-20 土石流の先端部の流速 (不明瞭なケース)

み取りを行った。その一例を図-21に示す。この手法の結果は、図-20より比較的明確に見えるが、境界の4m/secになると以下になるポイントの精度が劣るとともに、他ケースはこの方法でも不明瞭なものがあり、本手法による評価は困難と判断した。

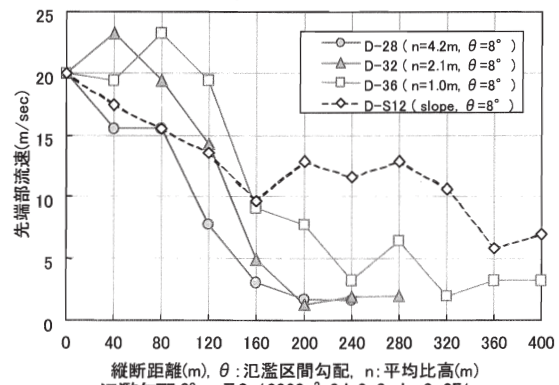


図-21 土石流の先端部の流速 (明瞭なケース)

(7) 粗粒分と細粒分の到達距離の関係

3.4節に示したように、実験では細粒分の到達距離が不明確なケースがあったため、粗粒分についての堆積範囲を到達距離として表示した。但し、実験の中には、両者の判別ができたものがあるので、可能なものを対象に図-21に整理した。図-21より、細粒分は粗粒分より1.2倍程度下流方向に達している事がわかる。

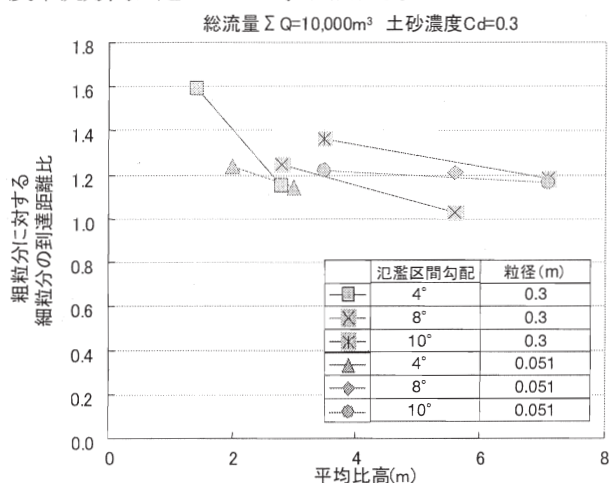


図-21 粗粒分に対する細粒分の到達距離の比

3.5 階段地形における土石流氾濫実態の解明

以上の検討より、以下の点が明らかとなった。

階段地形は、比高が1~2m前後、一つの平坦部の流下方向の大きさが約20mで、階段数が10段くらいまでのものが土石流災害のあったケースの大半を占めている。階段部の落差と平坦部の減勢効果により、粗粒分の土砂は階段地形がない場合に比べ、その到達距離は短くなる。比高差が大きくなると減勢効果も大きくなるが、その減勢割合は次第に小さくなる。

なお、減勢効果は、横方向に拡がりを持っていることが条件であり、実態からは平均で30~40mの幅に堆積している。

3.6 階段地形上での土石流氾濫範囲を推定する手法の提案

以上の検討結果より、階段地形上での土石流氾濫範囲を推定する手法を提案する。なお、下記は横断方向に十分な拡がりを持つ階段地形の場合に適用される。

- ①階段地形の場合、階段地形を有しないケースに比べ、大径礫の到達範囲は短く、階段部の平均比高により大きく影響を受ける
- ②具体には、図-13の関係が得られたので、これを参考に推定することが望まれる。
- ③なお、土石流の総流量が大きいほど減勢効果は小さくなり、土砂濃度や粒径による影響はあまり見られない。

④堆積幅は、階段地形がない場合と比べてほとんど変化はなく、到達距離が短くなる分、堆積高が増すと推定される。

⑤なお、上記の知見は粗粒分の土砂に関するものであり、細粒分の土砂の動態については今後の研究課題である。

4. おわりに

本研究では、階段地形における土石流の氾濫範囲を推定する手法の提案を目的に、階段地形上における土石流の氾濫・堆積形態の解明と階段地形の形状から同地形上での氾濫・堆積範囲を推定する手法を検討した。堆積・氾濫は、堆積幅にはあまりあまり変化はなく、階段部の比高の変化により、流下方向の到達距離に大きく影響することがわかった。実験結果から、これらの関係を示すグラフを作成したので、これを基に到達距離を示すことが可能となった。また、この他に到達距離に影響を与えるパラメータも抽出してその関係を示した。なお、今回解析に用いたのは、粗粒の砂礫に関するデータであり、これらの堆積範囲の外側に細粒分の堆積が想定される。実験でその境界を判別することが困難であったため、これらについては検討の対象から外したが、今後の重要な課題となる。

引用文献

- 1) 水山高久・栗原淳一：多段落差工の水理と水位上昇防止工法，新砂防Vol. 42 No. 2 (163) Jul. 1989, PP. 11-15
- 2) 6.29広島県土砂災害対策検討業務委託報告書、広島県土木建築部砂防課、平成11年12月
- 3) 平成11年砂防調査業務委託—平成11年9月15日台風16号災害実態調査—報告書、岐阜県高山土木事務所、平成12年3月