降雨による斜面浸食と 形成される流路群に関する水路実験

EXPERIMENTAL STUDY ON BARE-SLOPE EROSION CAUSED BY RAINFALL AND CHANNEL NETWORK FORMATION

関根正人¹・多田篤史²・石川 学²

Masato SEKINE¹, Atsushi TADA² and Manabu ISHIKAWA²

¹ 正会員 工博 早稲田大学理工学術院教授 (〒 169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

² 学生会員 早稲田大学大学院創造理工学研究科 (同上)

Experimental investigations were conducted on the process of surface erosion and channel network formation on the bare slope. This is the process of sediment yields on the river basin. Some experiments were conducted to clarify the process of the erosion by varying both the gradient of slope and the width of mouth at the downstream end. It was found that characteristics of channels were different among the experiments, such as length, width, branches and interruptions. As a result, it became clear that the steepness of slope affects the length of the channel network in longitudinal direction. The width of the mouth, on the other hand, affected the width and the pattern of channel network in lateral direction.

Key Words : surface erosion, channel network formation, sediment yield, artificial rainfall, experiment

1. 序論

持続可能な土砂管理を実現するためには、河川流域における土砂移動のメカニズムを山地から河口まで連続的に解明することが必要である。しかし、河川上流域での土砂生産過程には不確定の要因が多く残され複雑であるために、これを定量的に予測することが可能であるとは未だ言えないのが現状である。本研究では、土砂生産過程の 1 つである「降雨による斜面の表面浸食過程」に注目しており、基礎的な実験を通して現象理解を深めることを目的とする。

本研究で対象とする斜面の表面浸食は、実河川流域で生じているリル浸食・ガリ浸食と同様に、流路がネットワークを構成するように発達するという特徴をもつ。すなわち、斜面が一様に浸食するのではなく、流路が形成されてそこに流れが集中し、その結果として浸食が拡大していくという現象を取り扱う。

著者らは、これまでこのような表面浸食現象を対象とした研究を継続してきており、降雨や斜面構成材料についての諸条件を変化させた一連の実験を行ってきた。その結果として、「降雨強度」・「雨滴径」・斜面構成材料の「粒径」・「粘着性」・「透水性」といった要因が浸食過程に及ぼす影響¹⁾²⁾³⁾が、段階的に明らかになってきたと考え

ている。さらに、斜面に植生がある場合に、その根系や葉系が表面浸食過程に与える影響についても検討が進められた⁴⁾。

これまでの著者らの研究では、Open-Book 型と呼ばれる谷状の斜面で実験が行われ、谷部分に形成・発達する流路群の地形特性について比較してきた。本研究では、このような実験の結果を踏まえて、より一般性が高いと考えられる「フラットな斜面」を対象として、この上にどのように流路が刻まれて発達していくかについて調べることにした。ここに、フラットの斜面とは、谷地形とは異なり、横断方向に平坦な斜面のことを指す。これにより、表面浸食に伴う流路群の形成過程についてさらに理解を深めることができると考えた。

実験では、水路に砂を敷き詰めて用意した模擬斜面に上方から人工降雨を与え、これにより引き起こされる斜面浸食の様子を調べた。ここでは、水路の縦断勾配や開口部の幅・個数などを変化させた系統的な実験を行っており、これらの条件が流路群の形成に及ぼす影響を明らかにするよう努めた。

なお、本研究で注目している浸食現象と関連のあるテーマの実験が地形学の分野でも行われつつあり、興味深い結果が報告されている⁵⁾。

写真-1 実験水路

図-1 下流端の横断面形状と開口部の位置
上：開口部1つの場合，下：開口部2つの場合

2. 実験の概要

(1) 実験手順

実験には、写真-1に示すような全長160cm、幅100cmのステンレス製の水路を用いた。この水路は、長さ方向（縦断方向）に勾配を変化させることができる。また、下流端にはアクリル製の板が取り付けられており、そこに開けられた開口部を通して水ならびに土砂が流出するような構造になっている。なお、このアクリル板は取り替え可能であり、図-1に示すように開口部の個数や幅を変化させることができる。

実験に当たっては、水平にした水路内に硅砂を敷き詰め、平坦な砂層を作成した。次に、この砂層が水路内全体にわたって飽和状態になるように、霧吹きを用いて静かに水を供給した。その後、実験水路自体を所定の縦断勾配になるように傾け、これを模擬斜面とした。実験は、その直後から人工降雨を供給することにより開始さ

表-1 実験条件

Case 名		縦断勾配 (%)	下流端開口部		
			個数	幅 (cm)	中心位置の 横断方向座標 (cm)
Case 0		5.0	1	4	50
Case A	1	7.1			
	2	9.4			
Case B	1	5.0		8	
	2			50	
	3			100	
Case C			2	4	25, 75

れた。

実験時には、水路上方の散水ノズルから30分間にわたって一様な人工降雨を与えた。なお、開口部には予め取り外し可能な堰を設置しておき、降雨開始と同時にこれを取り外すことにした。これにより、開口部からの水ならびに土砂の流出が始まり、浸食が発生することになる。

降雨によって供給された水は、下流に向かって流量が大きくなり、開口部から流出することになる。また、斜面で浸食された土砂も開口部から流出する。この際、流出する水と土砂の混合物を1分ないし2分間隔で採取した。実験時には斜面が浸食される様子を観察するとともに、ビデオカメラによる撮影を行なった。

(2) 実験条件

実験は、表-1にまとめられているように、縦断勾配・開口部の幅ならびにその個数をそれぞれ変化させて行った。

Case 0が基本となる実験であり、Case A1とA2は縦断勾配を変化させた実験、Case B1～B3は開口部の幅を変化させた実験、Case Cは開口部の個数を変化させた実験である。このうち、Case B3は開口部の幅を100cmとした実験であり、下流端全体から水ならびに土砂が流出可能な条件になっている。なお、すべてのCaseに対して、同一条件下での実験は2回以上は繰り返し行っており、結果の再現性を確認した。

これ以外の条件は、全ての実験に対して共通である。斜面構成材料としては硅砂7号を用いた。その60%粒径は0.15mm、透水係数は0.02cm/sである。また、水路内に形成された斜面の砂層厚は6.5cmである。降雨強度は斜面全域にわたって60mm/hとし、時間によらず一定とした。雨滴径は250μmであり、霧状の雨である。また、斜面下流端の開口部には、図-1に示す通り、初期斜面上面から下方に4cmの位置に固定壁があり、この位置での浸食深が4cmを超えないように制御されている。

(3) 計測内容と方法

実験では、斜面の表面形状を計測したほか、下流端から流出する水ならびに土砂の量を連続計測した。斜面形状の計測には、超音波式変位センサならびにレーザ式変位センサを用い、降雨を供給する前と浸食実験終了後に3次元的な計測を行った。ここで、降雨の供給前後の高さの差を浸食深と定義し、この面的な分布をコンター図としてまとめた。さらに、必要に応じて実験後に任意の地点で水位を計測した。なお、Case B3の場合には、水路全幅にわたって流路が形成されるため、縦断方向に10cm間隔に横断測線を取り、この線上を横切って延びる流路の本数を数えた。

実験時に採取した水ならびに土砂は、実験終了後に計

測され、流出水量ならびに流出土砂量の時間変化としてまとめた。なお、Case Cの場合には開口部が二つ存在するため、それぞれの開口部を通過する水ならびに土砂を別々に計測し、左右の差も調べるようにした。

3. 実験結果

(1) 流路群が形成されるプロセスの比較・検討

実験時に観察された斜面浸食過程は、いずれの条件下であっても、降雨開始直後に開口部付近の土砂が崩落を起こし、そこが起点となって流路が斜面上方に遡上するように発達していった。降雨供給中の模擬斜面には、浸透流に加えて広い範囲に表面流が生じていることが確認

写真-2 浸食進行状況：(a) 基本となる条件 (Case 0), (b) 縦断勾配を7.1%とした場合 (Case A1), (c) 縦断勾配を9.4%とした場合 (Case A2), (d) 開口部の幅を8cmとした場合 (Case B1), (e) 開口部の幅を50cmとした場合 (Case B2), (f) 開口部の幅を100cmとした場合 (Case B3), (g) 下流端の開口部を二つにした場合 (Case C); 上から、開始2分、5分、10分、30分後の写真を表す。

された。たとえば、主たる流路内ではその水深は数 mm 程度であることも確認されている。一方、流路と流路の間に当たる畝状の部分には表面流は見られず、この部分では不飽和浸透流の状態になっていた。また、流路群が形成されていない上流側の斜面には、薄層流（シートフロー）状態の表面流が発生していた。ただし、斜面上端付近では不飽和浸透流の状態となっていたものと推察され、表面流を認めることはできなかった。

実験時に撮影された一連の写真を写真-2 にまとめて示す。ここには、表-1 に示した実験条件毎に縦に並べ、降雨開始 2 分、5 分、10 分ならびに 30 分後の写真が示されている。これにより斜面の浸食状況の概略を知ることができる。それぞれの条件毎に特徴的な流路群が形成されたことが確認できる。

流路群の平面形状には二つのパターンがあり、複数の流路が放射状に伸びる場合と、縦断方向上向きに平行に並んで伸びる場合とがこれに当たる。たとえば、写真-2 (a)～(d) に相当する Case 0 と A1・A2 ならびに B1 の場合には、開口部のある下流端中央付近から放射状に流路群が遡上している。このうち、縦断勾配の大きな Case A1 と A2 では、降雨開始から 10 分を過ぎると、そのフロント（流路の上流端）が徐々に斜面上方に向かうようになる。降雨開始から 30 分後の写真を見ると、ほとんどの区間で複数の流路が平行に上流方向に伸びていることがわかる。流路の遡上方向は、その場に生じている表面流の方向に伸びる傾向があるものと推察される。降雨として供給された水は、斜面の下流端付近では開口部を目指して集められるように流れるが、下流端から離れると重力の影響から、縦断方向に流れ下るようになる。この流れの方向と、流路の伸びる方向とはほぼ一致しているように見受けられた。

次に、それぞれの要因が流路群の形状に及ぼす影響について、順に見ていくことにする。まず、縦断勾配の異なる Case 0、A1、A2（写真-2 (a)～(c) 参照）を比較すると、縦断勾配の大きな Case A2 ほど流路の遡上範囲は斜面上方にまで及んでいることがわかる。これは、縦断勾配が大きいほど表面流の流速が大きくなり、掃流力が大きくなる傾向にあるからと考えられる。

また、Case 0 と B1（写真-2 (a)、(d) 参照）を比較すると、開口部の幅を 4cm から 8cm に変化させても浸食には大きな違いは見られないことが理解された。ただし、浸食開始直後は、開口部の全幅にわたってほぼ同様の崩落が生じるために、浸食範囲がやや広範囲に及ぶ傾向にある。しかし、時間の経過とともに両者の差は小さくなる。この程度の開口部幅の違いが浸食ならびに流路群形成に及ぼす影響は小さいと言える。しかし、写真-2 (e)、(f) のように幅がさらに大きくなり、水路自体の半幅である 50cm あるいは全幅に当たる 100cm にまでなると、その違いは明確になる。すなわち、流路が横断方向にほぼ等

表-2 Case B3 での流路の本数

下流端からの距離 (cm)	流路の本数	分岐	途切れ
10	8	-	
20	8	1	1
30	8	1	1
40	10	3	1
50	8	0	2

間隔に並んで遡上する傾向となり、浸食される範囲は斜面横断方向全域に及ぶようになる。

最後に、他の Case とは異なり、下流端開口部が二箇所設置された場合について見ておく。これが Case C であり、一箇所当たりの開口部幅を Case 0 と同じ 4cm としたため、開口部幅の合計は Case B1 と一致する。写真-2 の (g) を見るとわかるように、それぞれの開口部から二組の流路群が放射状に形成されている。ただし、斜面全体に降った雨を二つの流路群が奪い合うように集めるため、開口部一つ当たりの流出水量は、他の条件に比べて半減する。そのため、各流路群の規模は Case 0 および B1 よりも小さなものに留まっている。なお、実験では、浸透水の流れについてまで確認することはできなかったが、斜面に浸透した水の流れにも顕著な違いが現れると考えられる。どの範囲に降った雨がどちらの開口部から流出するかという点に注目すると、これは河川における集水域に相当するものといえることができる。この実験は極めて小規模ながら、このような現象を見ているものと捉えることもできる。

(2) 斜面に刻まれた流路群の幾何学的形状

前掲の写真-2 を示しながら説明したように、下流端を起点とする主流路は、時間の経過とともに斜面上方へと伸びていく。しかし、全ての主流路がそのように真っ直ぐ遡上を続けるわけではなく、その一部はある地点で途切れてしまったり、あるいはある地点で分岐が生じて枝分かれることがある。ここでは、前者を流路の消滅、後者を分岐と呼ぶことにし、こうした事象と流路本数の時間変化との関係に注目して実験結果を整理してみた。

表-2 には降雨終了時の流路の本数などの結果をまとめてある。この検討は、斜面下端を全て開放状態とした Case B3 を例にとり、この場合について行うことにした。実際の計測は、斜面下端を原点として上流方向に 10cm 毎に横断測線を取り、 $x = 10 \sim 50(\text{cm})$ までの範囲を対象に行われた。この表からわかることは、たとえば、下流端から 10cm の位置では横断測線上に 8 本の流路が存在しているのに対し、下流端から 20cm の横断測線に到るまでにこのうちの 1 本が途切れて消滅したほか、新たに 1 本の流路が分岐し枝分かれを起こしたということである。

表-2 を見ると、斜面下端から遡上するように発達す

図-2 浸食深コンター図の比較：(a) 基本となる条件 (Case 0), (b) 縦断勾配を7.1%とした場合 (Case A1), (c) 縦断勾配を9.4%とした場合 (Case A2), (d) 開口部の幅を8cmとした場合 (Case B1), (e) 開口部の幅を50cmとした場合 (Case B2), (f) 開口部の幅を100cmとした場合 (Case B3), (g) 下流端の開口部を二つにした場合 (Case C)。

る流路は、不規則とはいえ、ある頻度で途切れて消滅したり、分岐を起こしていることがわかる。その結果として、下流端から50cmまでの区間の流路の本数は8本程度と大きく変化していない。また、それぞれの流路が互いに等しい間隔で伸びている。

次に、流路の消滅と分岐の関係について考察する。実験時に撮影された動画を確認すると、左右に隣接する流路に比べて遅れて発達・遡上することになった流路ほど途中で途切れてしまう傾向にあることがわかった。一方、これと隣り合う流路を見ると、先ほどの流路が途切れた位置の少し上流側（斜面上方側）の地点を回り込むように、枝流路を伸ばしていくこともわかっている。このように、流路は地上の表面流の水のみならず浸透水をも集めることになり、その範囲を「集水域」と呼ぶならば、この面積を新規に獲得し拡大を続けていくことになると考えられる。

図-2には、実験時に生じた各地点の浸食深の実測値を図化したコンター図を示す。青色の濃い部分ほど大きな浸食が生じたことを意味しており、これにより浸食し

た斜面の形状を定量的に比較することができる。各条件下で計測された結果を図-2 (a)に示された基本となるケースであるCase 0のものと比較しながら考察を加える。

まず、縦断勾配の異なるCase A1, Case A2ならびにCase 0を比較する。図-2の(a)～(c)を見ると、勾配の大きさの順に流路が斜面のより上方にまで達していることがわかる。一方、開口部の幅が異なる場合や開口部の数を変えて行った実験の結果を比較すると、図-2の下段の(d)～(g)よりわかるように、いずれの場合も浸食の範囲は下流端から60cm程度までであり、大きな違いは見られない。このうち、開口部幅を大きく広げた図-2 (e)のCase B2と同図 (f)のCase B3では、開口部の複数箇所から流路が遡上するように形成され、より広範囲にわたって浸食が生じる結果となった。

また、流路の形状に注目すると、図-2 (c)に示すように、縦断勾配の最も大きなCase A2の下流端付近で幅の広い流路が確認されている。これ以外には顕著な差は見られず、傾向として斜面上方に達した流路ほど幅の狭

図-3 時間別の流出土砂量の変化とその比較

いものとなっていた。その理由としては、降雨によって供給された水が流路に流れ込み、下流端の開口部に運ばれるため、上流側ほど流量が少ないことが挙げられる。さらに、流路の深さに関しては、これが下流端から遡上するように発達していくため、下流側ほど深くなっている。流路幅が流れ方向に異なるのはこれも一因となっている。

以上のように、流路群は斜面下端の開口部から上方に向けて形成・発達し、斜面縦断勾配が大きいほどより上方にまで遡上することができる。開口部の幅が変化しても、浸食の遡上範囲に大きな差は見られない。ただし、その幅が広いほど、浸食範囲が横断方向に大きくなることがわかった。

(3) 流出土砂量

図-3 には、開口部から流出した土砂量の10分毎の体積の変化を示した。ここでは詳細を説明することを省略するが、斜面の浸食土砂体積の総和と、開口部から流出した土砂体積の総和が一致することを確認している。

まず、縦断勾配の大きいCase A2ほど流出土砂量が大きく、30分間を通してこの傾向は変わらない。これは、前述のように、縦断勾配が大きいほど表面流の掃流力が大きくなり、流路群がより上流にまで遡上するためである。

また、開口部の幅が大きいほど、当然のことながら流出土砂量は大きくなった。ただし、単位幅当たりの値で見ると、傾向はむしろその逆になる。この差は開始10分までの結果で顕著に表れているが、降雨開始直後に開口部付近の土砂が不安定となり崩落を起こすためである。しかし、それ以降に関しては、開口部幅の違いによる流出土砂量の差は小さくなる。

幅4cmの開口部を2つ設けたCase Cの場合を、開口幅の合計値が等しいCase B1と比較すると、流出土砂量に顕著な差はなく、わずかに大きくなる程度に留

まっている。これは、2つの開口部が離れた位置にあるために、浸食範囲が横断方向に広がるためである。

4. 結論

本研究では、実験水路内に用意された模擬斜面に人工降雨を与えることにより、斜面が浸食され、流路群が形成・発達するプロセスに注目した一連の実験を行った。ここでは、斜面の縦断勾配、下流端開口部の幅、開口部の数の違いが浸食現象に及ぼす影響について考察を加えた。本研究の主要な結論は以下の通りである。

勾配の大きい斜面では、流路群がより上方にまで遡上することが確認された。また、下流端開口部の幅を大きくすると、流路群が横断方向に広がるように形成されるものの、縦断方向の範囲に顕著な違いはないことがわかった。また、枝流路の消滅あるいは分岐についても検討を行い、流路群の形成パターンについて考察を加えた。

現在、ここで説明した実験的研究と並行して数値解析による検討も進めている。これについては別の機会に報告する。今後は実斜面あるいは崩壊地などで生じている浸食現象に注目し、研究をさらに進化させていくつもりである。

謝辞：本研究の遂行に当たり、田中翔真君（当時、早稲田大学大学院学生）の協力を得ている。また、この研究の一部は科学研究費基盤研究C（研究代表者：関根正人、課題番号No.21560546）の補助を受けて行われたものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 関根正人, 田中翔真, 鍋島康大: 雨滴径の異なる降雨による斜面の浸食過程, 土木学会年次学術講演会, II -048, 2011.
- 2) 関根正人・長濱正憲・西森研一郎: 粘土を含有する裸地斜面の降雨による表面浸食過程に関する研究, 水工学論文集, 第50巻, 1045-1050, 2006.
- 3) 関根正人, 田中翔真, 多田篤史: 斜面浸食により形成される流路群とこれに及ぼす材料の透水性ならびに粘着性の影響, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.69, No.4, I_1021-1026, 2013.
- 4) 関根正人・鍋島康大: 植生の根系と葉系が降雨による斜面浸食過程に及ぼす影響, 水工学論文集, 第54巻, 655-660, 2010.
- 5) Shunji Ouchi: Effects of uplift on the development of experimental erosion landform generated by artificial rainfall, Geomorphology, 127, 88-98, 2011.

(2013. 9. 30 受付)