

# 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

STUDY ON THE SURFACE EROSION OF BARE SLOPE  
WITH COHESIVE SEDIMENT DUE TO AN ARTIFICIAL RAINFALL

関根正人<sup>1</sup>・長濱正憲<sup>2</sup>・西森研一郎<sup>3</sup>

Masato SEKINE<sup>1</sup>, Masanori NAGAHAMA<sup>2</sup> and Ken-ichiro NISHIMORI<sup>3</sup>

1 正会員 工博 早稲田大学理工学部社会環境工学科 (〒 169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

2 学生会員 早稲田大学大学院理工学研究科 (同上)

3 学生会員 修士(工学) 早稲田大学大学院理工学研究科 (同上)

The effect of cohesiveness of sediment on the erosion process of bare-slope was investigated in this study. Experiments were conducted to understand the topographic change in model slope in an experimental flume due to an artificial rainfall. The clay content ratio is a parameter to be changed in this experiment, and it was seen that the main channel formed on the slope grew narrower and deeper as the clay content ratio increases. And vertical erosion on the bed was found to be more dominant than the lateral bank erosion. It was also understood that the erosion process and the geometry of channel network in case of cohesive slope have different characteristics than those of cohesionless slope.

*key word* : surface erosion, cohesive sediment, bare slope, clay content ratio, artificial rainfall.

## 1. 序論

降雨による裸地斜面の表面浸食は、崩壊地からの土砂の生産・流出、あるいは畑地からの土壌流出の問題の本質であることから、浸食過程の理解とあわせて浸食量の予測手法の開発が求められている。表面浸食に強く寄与する外力因子は、斜面接線方向に作用する水流による掃流力と、垂直方向に作用する雨滴による衝撃力であると言われている。後者は、シートフローとしての流れの水面に雨滴が衝突し、その際に発生する過剰な圧力が斜面表層に伝搬して作用することで、表層土砂の初期移動が促進されることである。実際には、この両者が複雑に絡み合っているため、この表面浸食の理解を難しくしていると考えられる。こうしたことに鑑み、著者ら<sup>1)</sup>は、霧状の降雨により引き起こされる裸地斜面の表面浸食を対象とした実験と、これに関する数値解析を通じて検討を行った。本研究でもこの点は同様であり、雨滴衝撃の影響を考慮する必要のない条件下での現象を取り扱う。さて、これまでの研究を通じて、非粘着性土からなる斜面に関しては、その表面浸食のプロセスがかなりのところまで明らかと

なり、同時にこのプロセスを数値的に再現することも可能となった<sup>1)</sup>。しかし、本来対象とすべき斜面には少なからず粘土が含有され、斜面自体が粘着性を有していることは否定できない。この粘着性土を対象とした浸食の問題は、粘着力発現のメカニズムの複雑さなどから、長年にわたりほとんど手つかずの状態におかれてきたといえることができる。そして、こうした斜面の浸食に関しては、芦田・澤井<sup>2)</sup>の基礎的な研究や芦田・江頭ら<sup>3)</sup>の現地斜面での研究など限られた数の検討がなされているに過ぎない。こうした状況の中、著者ら<sup>4)</sup>は、近年、粘着性土の浸食過程に関する系統的な実験を進めてきており、浸食進行過程ならびに浸食速度に関する基礎的な知見を蓄積することに努めてきた。また、粘着性土の浸食実験を行う上では、材料に含有する水分量の制御や、材料の空間的な一様性を確保することなどの重要性を示し、実験技術についての検討も進めてきた。本研究では、これまでの基礎研究を通じて培ってきた実験技術を駆使して粘着性斜面の浸食実験を行い、その結果から、斜面材料がもつ粘着性がこの浸食過程にどのような影響を及ぼすかについて明らかにすることを目的とする。

## 2. 実験概要

### (1) 実験対象

実験は、写真-1に示すような全長160 cm、幅100 cmの水路内に裸地斜面を形成し、この上方から霧状の人工降雨を与えることを行った。初期斜面の形状は、流下方向に一様に傾斜するとともに、水路中心軸を谷線として横断方向にも左右対称に傾斜した“Open-book”型のものとした。そこで、この斜面の横断面形状はV字型であり、その傾斜角は縦横断方向ともに5%となっている。この斜面の下流端には、中心軸の延長線上に幅4 cmの開口部（スリット）が設けられており、水ならびに浸食された土砂はこの開口部から排出される。この開口部の下方には、堰（固定壁）が設置されており、開口部においては土層の浸食深が4 cm以上及ばないように制御されている。

斜面構成材料は、硅砂7号とTAカオリンを所定の比率で混ぜ合わせたものを用いる。各々の粒度分布を図-1に示す。本研究では、現地で報告されている粘土の含有率などを参考に、また、設置した供試体が流動化することのないように留意して、粘土含有率（砂ならびに粘土の総重量に対する粘土の重量の比率） $R_{cc}$ を0～0.15（すなわち0～15%）に設定することにした。粘土としてTAカオリンを用いている点は著者らのこれまでの研究と同様である。本論文では、粘土0%（硅砂7号のみ； $R_{cc}=0$ ）、粘土10%（硅砂90%； $R_{cc}=0.10$ ）ならびに粘土15%（硅砂85%； $R_{cc}=0.15$ ）の3通りの実験結果を例に報告する。実験開始時の斜面の作製手順は、著者らのこれまでの粘土の浸食実験におけるものと基本的には同一である。すなわち、所定の量の砂と粘土に水を加えて均一になるまで混合した後、水路上で十分脱気する。その後、斜面上部をシートで被い、そのシートの上に水深10 cmの水を張って、この水圧下で1日自然圧密をかける。本研究では、これまでとは異なりシートで被うことにしたが、これは、著者らのこれまでの浸食実験に比べて粘土含有率が低く、水中に静置している際に粘土分が溶け出てくる恐れがあるためである。十分な圧密の後、供試体上部の水を静かに排出し、シートを取り外してから斜面表面を整形したものを初期斜面とし、これを浸食実験に供するものとした。なお、この圧密時には実験斜面を水平にし、供試体内の初期含水比は空間的に一様に保たれている。また、実験終了時にも含水比が初期値から大きく変わらないことを確認している。



写真-1 実験装置の概要：

中央のBox部分が水路であり、ここに模型斜面を構成する。また、写真上端に設置された6個のノズルを通して斜面全域に均一な霧状の人工降雨を与える。水路手前に見えるのが斜面下流端に設けられたスリットであり、ここから水および土砂が流出する。

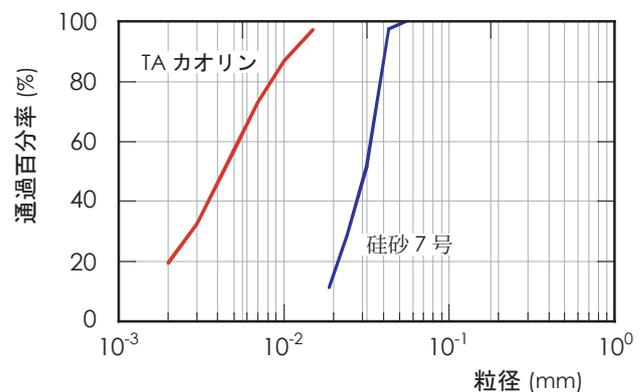


図-1 砂ならびに粘土の粒度分布

また、人工降雨としては、水路上方から6個の散水ノズルを用いて霧状の雨を与えることにした。その量は時間的に一定とし、しかも斜面全域にわたってほぼ均一になるように留意した。実際の降雨量の計測は、斜面全域を49（＝流下方向7×横断方向7）の区画に分け、その各々におかれた容器に貯まった水量を計ることで行った。その結果、単位時間当たりの降雨量に大きな偏りのないことが確認されたため、その空間平均値をもって降雨強度とした。

本論文では、主として降雨開始から30分間の浸食過程を検討対象としており、実験時には浸食が進行する状況を写真ならびにビデオ画像として記録し



図-2 斜面の浸食過程 ( $R_{cc}=0.10$ )

た。また、斜面下端の開口部から流出する水ならびに土砂についても、1分毎に連続採取し、実験後にその計量を行った。また、斜面形状に関しては、降雨停止後の最終形状をレーザ式変位センサー（キエンス社製）を用いて計測した。この際、縦断方向の測線を斜面横断方向に1 cm 間隔で設け、その測線に沿ってセンサーを自動走行させることで、各測線上の斜面高を連続データとして記録した。

なお、実験斜面の透水性を調べるため、変水位透水試験を別途行ったところ、透水係数の値が粘土含有率0%の条件下では0.015 m/s、15%では0.0048 m/sであることがわかった。また、粘土含有率が10%ならびに15%の実験における斜面材料の含水比は、それぞれ25%ならびに30%程度であった。

### 3. 結果と考察

#### (1) 粘着性斜面の浸食過程

ここでは、まず粘着性斜面の浸食進行過程につい

て見ておくことにする。図-2には、粘土含有率を10% ( $R_{cc}=0.10$ )とした実験時に撮影された斜面の浸食状況の連続写真を示してある。この一連の写真から、斜面の浸食は下流端の開口部付近から始まり、時間の経過とともに主流路が上流側に遡上していくことが見てとれる。ただし、砂のみの斜面では、側方からの水および土砂の流入が活発であり、しかも主流路の側方への浸食が卓越するために、支流路が左右に大きく伸びた流路パターンとなることが確認された。これに対し、粘土が10%含有されるだけでその浸食パターンが大きく異なり、主流路が狭く深く刻まれていることが見てとれる。これは、斜面材料に占める粘土の比率が高いほど、次のような要因が働くためと考えられる。すなわち、(1)耐浸食性の向上により、表面浸食自体が起こり難くなる、(2)粘着性の向上により、流路側岸の斜面崩落が起こり難くなる、(3)透水性の低下により斜面土中から主流路への湧き出し（すなわち復帰流）が抑制され、一部これにより誘発されていた側岸浸食が抑制

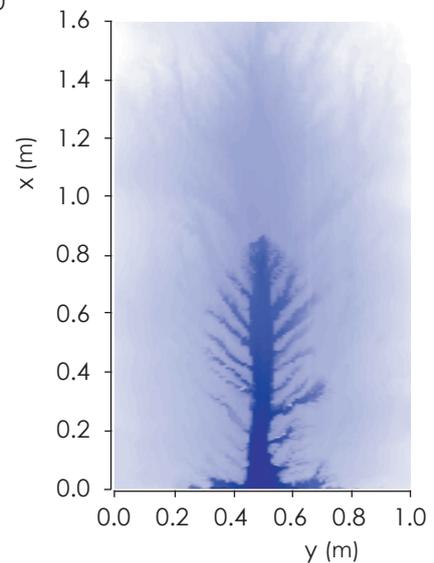
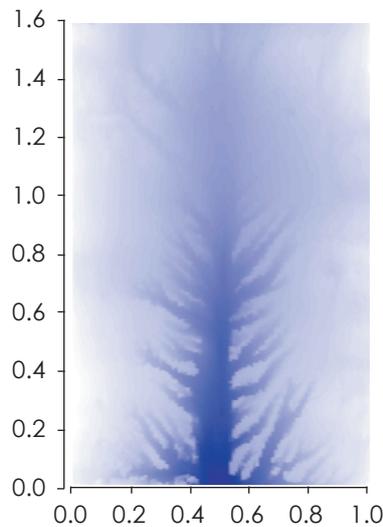
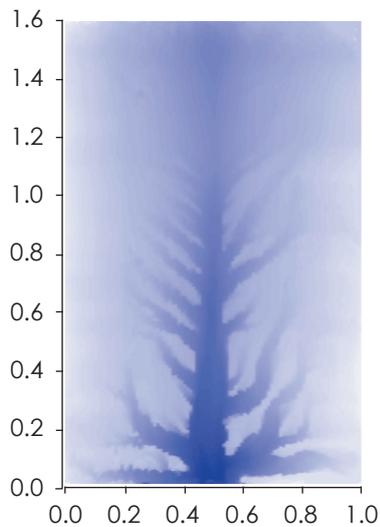
(a) 粘土含有率 0%



(b) 粘土含有率 10%



(c) 粘土含有率 15%



される，ことなどである．それでは，次にこの点についてデータを示しつつ詳しく説明していくことにする．

## (2) 浸食地形に現れる粘着性の影響

ここでは，粘土含有率が 0%，10% ならびに 15% の場合について，降雨開始から 30 分後の浸食状況を比較しながら，材料の粘着性の違いによって形成される浸食地形のパターンにどのような影響が現れるかを説明する．図-3 には，斜め上方から撮影された写真と，レーザ式変位センサによって計測された斜面高のコンター図を示している．なお，粘土含有率が 15% の場合に限り，浸食量自体が少ないことを考慮して実験を 60 分まで継続している．そのため，ここでは 30 分後と 60 分後の写真，ならびに 60 分後の斜面高のコンター図を示している．また，図-4 には，水路中心軸上の斜面の縦断面形状と，下流端から 0.4 m 上流側の横断面の形状をそれぞれ示した．図-4 の横断面図の中央に見られる凹部が主流路であり，その両側に見られる小さな凹部が枝

図-3 粘土含有率の違いによる浸食パターンの違い：最下段が斜面高のコンター図を表す．(a)，(b) は降雨開始から 30 分後，(c) は最上段の写真のみ 30 分後で，それ以外は 60 分後．

流路である．また，縦断面図を見ると，粘土含有率が 15% の (c) の図において  $x=0.84(\text{m})$  の位置に主流路の明確なフロントを見てとることができる．

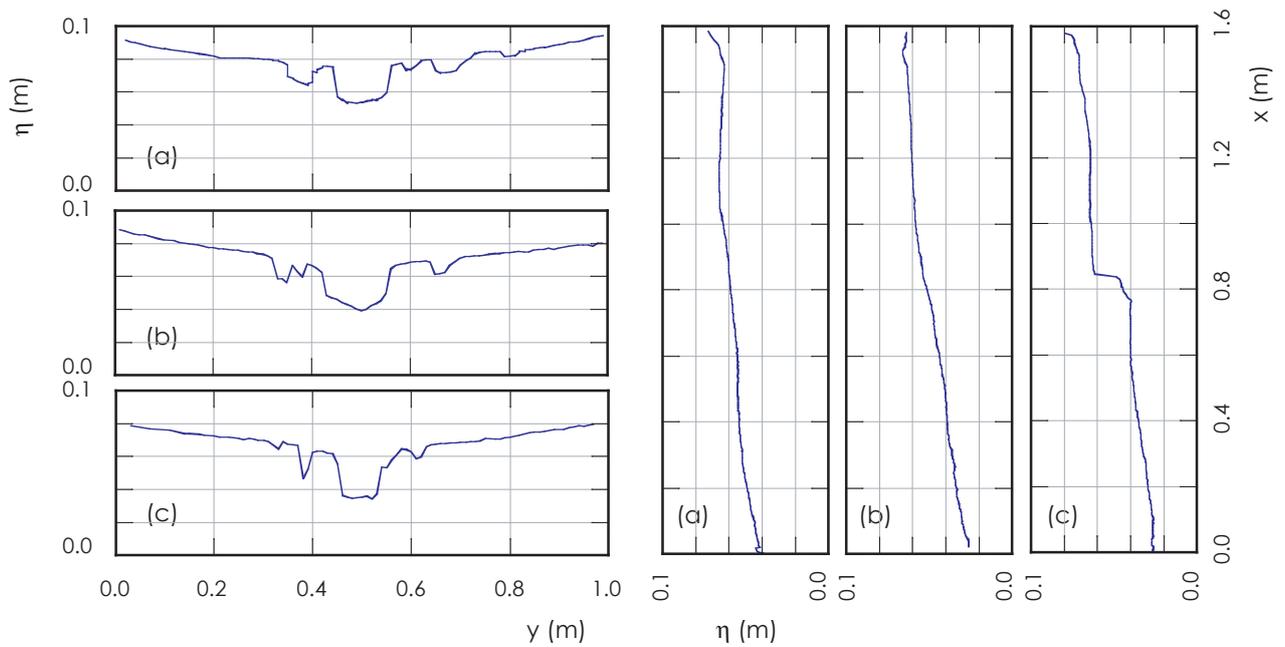


図-4 粘土含有率の違いによる横断面ならびに縦断面形状の違い：(a)  $R_{cc}=0.0$ , (b)  $R_{cc}=0.10$ , (c)  $R_{cc}=0.15$   
横断面図(左)は下流端から0.4 m地点 ( $x=0.4(m)$ ), 縦断面図は水路中心軸上 ( $y=0.5(m)$ )

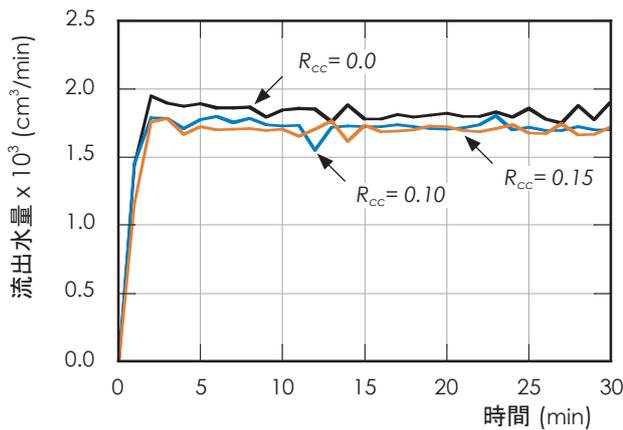


図-5 流出水量の時間変化

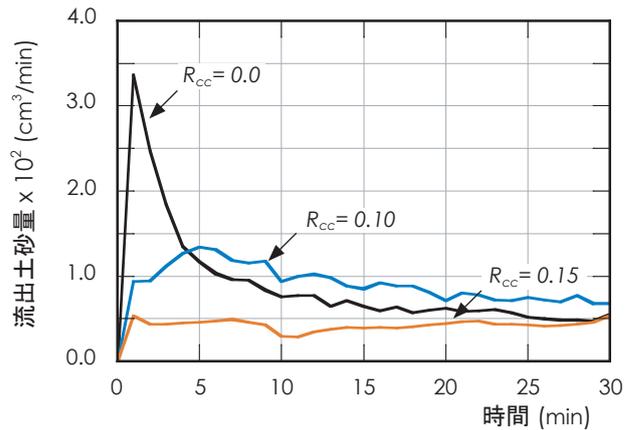


図-6 流出土砂量の時間変化

これらの図を相互に比較することにより、次のようなことが理解された。すなわち、粘土含有率が高いほど次のような傾向にある。(1) 浸食は緩やかに進行し、流路の発達ならびに遡上速度も小さい、(2) 縦浸食(下方への浸食)が卓越し、幅が狭く深い主流路となり、側岸も切り立ったものとなる、(3) 主流路・支流路ともに発達が抑制され、浸食を受ける範囲が限定されるため、流路群の形成スケールが小さくなる。これについては、一部記述が重複するものの次のように説明できるのではないかと考えている。粘土が含有されると斜面全域にわたって耐浸食性が向上するため、ほとんどの区域では浸食が生じることはない。しかし、斜面を Open-book 型にしていることから、雨水は斜面中心軸さらには下流端

に設けられた開口部に向かって集められることになる。また、粘土分が増大すると斜面の透水性が低下し、降った雨の大半が表面流となることから、時間の経過とともに下流端付近ほど掃流力の大きな流れが生じることになる。そのため、開口部付近で崩落を伴う浸食が生じると、それ以降はこの主流路内に流れが集中することになり、その路床では耐浸食性が向上しているにもかかわらず浸食(縦浸食)が促進される。また、側岸では元々浸食が生じ難いため、側方浸食は起こり難い。そこで、結果として縦浸食が卓越する前述のような浸食パターンになるのではないか。

最後に、図-5ならびに図-6の計測結果を見ながら、斜面下流端の開口部から流出する水ならびに土

砂の単位時間当たりの体積の傾向について説明する。実験時の降雨強度は、砂のみの場合が 59.7 mm/h、それ以外の場合が 58.3 mm/h であった。そのため、粘土 0% の場合の流出水量が幾分大きめの値をとっているが、降雨開始から 5 分程度で斜面全域に降った雨と同量の水が流出するようになっている。このことは、単位時間当たりに斜面に降った雨の総量（流入量）と下流端からの流出水量の総和が等しくなっていることを意味し、斜面全体の水の流れがほぼ定常の状態に達したことを表している。一方、流出土砂量に関しては、次のような傾向を見てとることができる。まず、既に述べた通り、浸食された土砂量は粘土含有率が 15% の場合に最も小さくなる。また、粘土含有率が 10% のデータを見ると 0% のデータと大小関係が入れ替わっているが、これが測定誤差によるものか、あるいは別の要因によるものかは現時点では定かではない。粘着性のない斜面の場合には、降雨開始後速やかに浸食が進み、浸食可能な土砂が急速に減少していく傾向にあり、これがこの一因であることは確かである。しかし、それだけではなく、材料に粘土分が加わると耐浸食性が向上する一方で透水性が低下し、掃流力の増大をもたらされる。そこで、十分な量の粘土が含まれない場合には、掃流力増大の影響が卓越して、全体としての浸食量が増加してしまうことも考えられる。このようなことになる限界が 10～15% の間にあるとすれば理解しやすい。ただし、これについては、現時点ではあくまでも推測に過ぎず、今後の課題と位置づけている。また、砂だけの場合には流出土砂量が時間とともに低減する傾向にあることは述べたが、粘土含有率が大きくなるほど浸食が緩やかに進み、30～60 分程度の時間ではその低減が見られなかった。これについても今後理解を深めていく必要がある。なお、参考までに、流出土砂全体に占める粘土の体積比率を算定したところ、粘土 10% ならびに 15% の実験に対してそれぞれ 11%、16% 程度となり、誤差の範囲と見ることもできるが、元々の斜面構成材料の比率に等しいかあるいはわずかに多くの粘土が流出している結果となった。また、図-6 に示した下流端からの 30 分間の流出土砂の総体積と、この時間内に生じた斜面全体の総浸食土砂体積の計測値（レーザ式変位センサによるもの）を比較したところ、その誤差が 5% 程度であることが確認された。

## 4. 結論

本研究では、著者らがこれまで培ってきた実験技術を駆使し、またこれまでの知見を基礎として、粘着性斜面の浸食過程を実験的に検討することで、浸食のパターンならびに形状に現れる粘着性の影響を明らかにした。粘土含有率を 10～15% 程度まで増加させると、砂のみの斜面の場合とは明らかに異なる浸食特性を示すようになる。すなわち、粘土分の増加により耐浸食性が高まると、側方浸食（横浸食）が抑制され、下方浸食（縦浸食）が卓越した現象となり、幅が狭く深い流路が形成されることが理解された。また、主流路・支流路ともにその発達を抑制され、浸食を受ける範囲が限られてくる傾向にある。

著者らがこれまで進めてきた粘着性土の浸食に関する研究は、粘土含有率が 30% より大きな供試体材料を対象としたものであったが、本研究で対象としたそれ以下の粘土含有率からなる粘着性土に関しては未だ不明の点が多い。粘着性土の実験は、材料の不均一さによって突発的に大きな浸食が生じることもあるため、引き続き丁寧に検討を進めていくことで、現象の本質に迫りたいと考えている。また、今後は著者らが提案している浸食速度式を適用することで、ここで説明した浸食過程を数値的に再現できるように努めていきたいとも考えている。

**謝辞：**本研究の遂行に当たり、日本学術振興会科学研究費基盤研究(C)（研究代表者：関根正人、No.17560463）の助成を受けた。また、実験の遂行に当たり当大学学生横田尚之君の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 関根正人、菱沼志朗：降雨により生じる裸地斜面の表面浸食とこれに伴う土砂流出に関する数値解析，水工学論文集，第 48 巻，961-966，2004。
- 2) 芦田和男・澤井健二：裸地斜面における流路の形成過程に関する研究(2)一流路の三次元形状一，京都大学防災研究所年報，第 20 号 B-2，371-385，1977。
- 3) 芦田和男・江頭進治・金屋敷忠義：斜面侵食による濁質物質の生産・流出機構に関する研究，第 24 回水理講演会論文集，135-141，1980。
- 4) 関根正人，西森研一郎，藤尾健太，片桐康博：粘着性土の浸食進行過程と浸食速度に関する考察，水工学論文集，第 47 巻，541-546，2003。

(2005. 9. 30 受付)