

植生の根系が斜面の表面浸食に及ぼす影響 に関する実験的研究

EFFECTS OF VEGETATION ROOT SYSTEM ON SURFACE EROSION CAUSED BY RAINFALL

関根正人¹・大前謙友²・松島貴之³

Masato SEKINE¹, Kensuke OMAE² and Takayuki MATUSHIMA³

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 早稲田大学大学院理工学研究科 (同上)

³ 学生会員 早稲田大学大学院創造理工学研究科 (同上)

In this study, the effect of vegetation root system on surface erosion was investigated by conducting a series of experiments on slope erosion by artificial rainfall. Both a bare slope of sand and that with various densities of vegetation roots were set in the experiment flume, and oats were used here. As a result, it was found that the amount of eroded sediment from the slope with vegetation was considerably smaller than that from bare slope, and it was also proved that the surface erosion was obviously reduced by the root system. It was also found that the extension of eroded channel network was strongly affected by the arrangement of vegetations.

key word : slope erosion, sediment yield, bare slope, vegetation, artificial rainfall.

1. 序論

山腹斜面は、河川によって流送・堆積される土砂の生産源の一つであるが、この斜面を被う多種の植生が周囲に様々な影響を及ぼす。例えば、土壌育成、降雨の一次貯留、大気の浄化、水質改善、生態系の安定化などがそれである。この中でも、例えば薄井ら¹⁾の調査から、根系による土壌層の緊縛効果や杭効果が、斜面表層の安定化や崩壊の防止に寄与し、土砂生産量の制御に大きく関わっていることが理解されている。こうしたことから、河床の変動や海岸浸食といった土砂生産に起因する諸問題に対して「水系一環土砂管理」を実施する上で、これまでの芦田ら^{2),3)}による斜面浸食に関する基礎的な研究や現地斜面での研究などに加えて、植生の影響についての検討が不可欠である。特に、沖縄のパイナップル畑からの赤土の流出のように、農地からの土砂流出問題への対処は環境に即した措置が望ましく、植生の具体的な影響を理解することが求められる。

著者らは、これまで砂により構成された裸地斜面が降雨によって浸食されていく過程に関する実験的研究⁴⁾を進めてきた。本研究では、このような斜

面が植生に被われている場合を対象とした実験を行い、植生の根系が斜面の浸食過程に及ぼす影響について調べることにした。実験は、植生に被われた斜面（以下、これを「植生斜面」と呼ぶ）と裸地斜面のそれぞれに人工降雨を与え、それぞれの浸食過程を比較検討することで、根系によって斜面の浸食ならびに土砂流出がいかにより抑制され、浸食形状にどのような影響が現れるかを明らかにすることを目的とする。なお、本研究では、実験斜面を小規模ながら実スケールの斜面の一部と見なし、ここで生じている現象を調べることによって、実斜面での現象を理解する上で有益な知見が得られると考えている。

2. 実験の概要

実験は、著者らのこれまでの実験⁴⁾と同様に、全長 160 cm、幅 100 cm の水路内に斜面を形成し、その水路上方から 7 個の散水ノズルを用いて霧状の人工降雨を与えることで行った（写真-1 参照）。この斜面は、水路中心軸を谷線として左右対称に傾斜した“Open-book”型の横断面形状をもち、流下方向には一様に傾斜しているものとし、縦横断方向の

傾斜をそれぞれ 5 % とした。降雨量は、斜面全域を 405 (流下方向 27 × 横断方向 15) の区画に分け、単位時間当たりの降雨量に空間的な偏りがないことを確認した上で、原則として時間的に変化することなく、また斜面全域にわたってほぼ一様となるようにノズルの位置を調節して与えた。降雨量を特徴づける降雨強度に関しては、その空間平均値をとることにした。本実験の場合の平均降雨強度は 60.6 ～ 62.0 mm/h であった。図 -1 には、後述する実験 A の場合に計測された降雨強度分布を一例として示した。人工降雨は霧状であるため、雨滴衝撃による影響は無視できる。ここでは、表 -1 にその概要を示すように、後述するエンバクを 5 種類の間隔で播種・育成した植生斜面と、裸地斜面とを対象としているが、その斜面構成材料としては珪砂 7 号 (平均粒径 0.105 mm) を用いた。また、この斜面の下流端の中心軸上には幅 4 cm の開口部 (スリット) が設けられており、水と浸食された土砂とがここを通過して流出する。この開口部の下方には、固定堰が設置されており、土層の浸食深が 4 cm 以上に及ばないように制御されている。浸食実験開始時の初期斜面は、空隙が浸透水で満たされた状態にあり、およそ飽和状態にある。

本研究では、植生としてエンバク (*Avena sativa*) を用いたが、これはイネ科の一年草であり、3 本の種子根を有するヒゲ根型根系を持ち、成長が早く短期間で育成可能である。そのため、本研究で目的とするような実験には適した植物と言える。本研究では、この植物の地上部の高さを目安に、育成期間を播種後 10 ～ 15 日とした。また、播種間隔を格子状にそれぞれ 2.0 cm, 2.5 cm, 3.0 cm, 3.5 cm, 4.0 cm とした 5 ケースの実験を行った。実験前の斜面の状況を写真 -2 に示す。ここでは、根系の緊縛効果および杭効果が耐浸食性の向上にいかにかに寄与するか注目しているため、葉によって雨滴が分散・集中されないように、実験直前に地表面から高さ約 4 cm の位置で植生の地上部を切り揃えた。砂地斜面を対象として実験を行う場合には、植生の地上部が伸びすぎると倒伏が生じてしまうため、本研究ではこうしたことにならない時期ということで上記のような育成期間としている。なお、実験後の測定により、ほぼ全ての種子根が想定される最大浸食深である 4 cm よりも長かったことから、根系が浸食に及ぼす影響を考慮するには十分であったと判断している。参考までに 2.5 cm 間隔に播種したケースについてふれると、エンバクは播種から 2 日後に発芽し、浸食実験開始時の地表面からの高さは 13.9 ～ 29.0 cm (平均 22.7 cm)、茎の太さは 0.7 ～ 2.0 mm (平均 1.4



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 7 個のノズルを通して斜面全域に一様な霧状の人工降雨を与える。水路手前に見えるのが、斜面下流端に設けたスリットであり、ここから水および土砂が流出する。

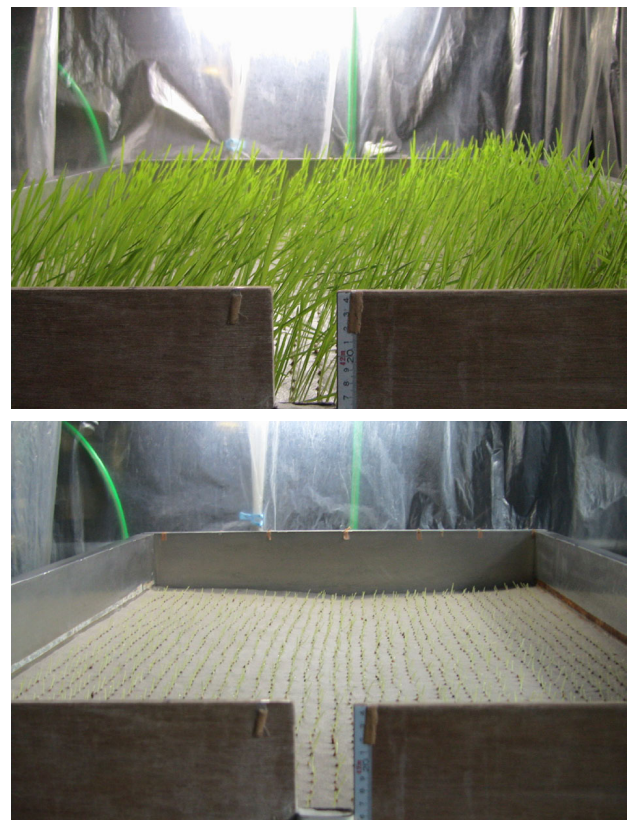


写真 -2 植生の生育状況：上段は茎を切り揃える前、下段は切り揃えた後の斜面を表す。

mm) であり、種子根の長さは平均 6.7 cm であった (写真 -3 参照)。また、播種間隔 3.5 cm の実験において深さ 0 ～ 4 cm について根長密度を計測した

表-1 実験条件と含水比

実験	播種間隔	植生平均高さ	直後含水比
A	植生無し	—	32.1%
B	4.0 cm	26.1 cm	31.9%
C	3.5 cm	25.1 cm	30.7%
D	3.0 cm	18.3 cm	30.8%
E	2.5 cm	22.7 cm	34.9%
F	2.0 cm	22.5 cm	32.9%



写真-3 実験直後のエンバクの根の様子

が、その値は 0.29 cm/cm^3 であった。この値は本実験で根系の影響を調べるには十分な値であると考えられる。

実験は、原則として降雨開始から 30 分間の浸食過程を調べるものとし、実験時には浸食が進行していく状況を写真ならびにビデオ映像として記録した。斜面の地形形状に関しては、降雨を開始する前後にレーザ式変位センサーを用いてその高さの面的な計測を行った。計測に当たっては、縦断方向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。また、斜面下流端の開口部からの流出水ならびに土砂については、1 分毎に連続採取し、それぞれ計量した。また、植生については、伐採前の地上部の高さ、茎の太さ、種子根の長さ、根長密度などを計測した。斜面については、実験前後の含水比についての計測も行った。

3. 実験結果と考察

(1) 斜面浸食過程

図-2には、植生斜面の一例として播種間隔を 2.5 cm とした実験 E における実験の結果をまとめて示した。この図には、裸地斜面を対象として行った実験 A の結果も比較のため併記してある。図中の (a) ~ (e) は、実験開始直前、開始 3 分後、10 分後、15 分後、終了後に撮影された写真であり、(e)' は実験後に計測した浸食深のコンター図（実験前の斜面高

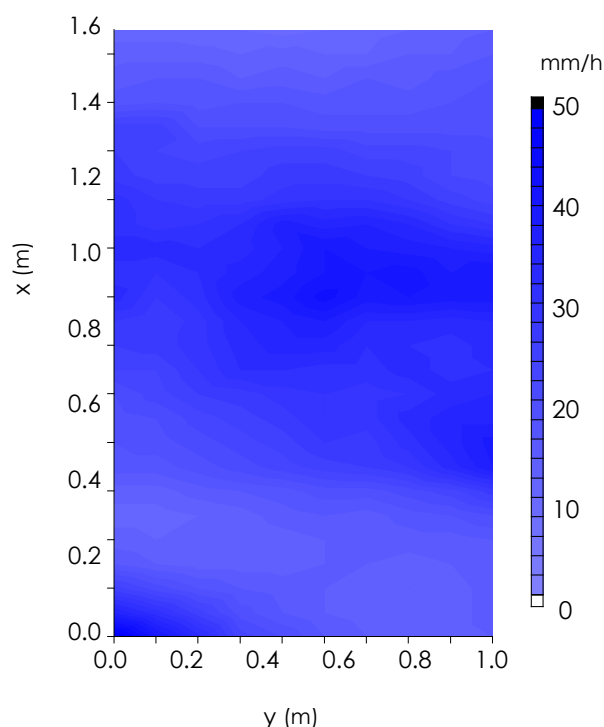


図-1 降雨強度分布

データから実験後の斜面高データを差し引いた斜面高変化量を表す) を表している。いずれのケースも斜面下流端の開口部付近から浸食が始まり、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わかる。斜面が浸食を受け流路が形成されていく過程には、実験初期の側岸ならびに流路のフロントにおいて生じる斜面崩落と、その後の表面流の掃流力によって浸食範囲を拡大する表面浸食の 2 つが確認できる。図中の 2 つの斜面について浸食形状を比較すると、植生根系により耐浸食性が向上したことに伴い、主として斜面崩落が抑制され、流路の遡上方向への発達が遅れるとともに、茎の抵抗による流速の低下の影響も加わって、浸食範囲の拡大が抑制される結果となることが確認された。ただし、浸食初期の段階に限れば、表面流による表面浸食に対して根系の緊縛効果はあまり顕著でない。

本実験において、植生の根系の影響が顕著に現れるのは、主流路・枝流路が形成される初期の段階であり、特に下流端付近の流路と斜面との落差が大きな地点においてであった。連続的な斜面崩落により流路が上流側に遡上していくプロセスにおいて、根系が乏しい地点では緊縛効果が小さいために崩落を起こしやすく、崩落面が斜面上方に向かって遡上する。また、植生斜面の場合に主流路が枝流路と分岐する地点を調べると、その地点に植生が存在していたり、または当初存在していたがその後浸食されたことがわかり、流路が植生を回避して遡上する様子が見てとれる。この緊縛効果により流路側岸の斜面

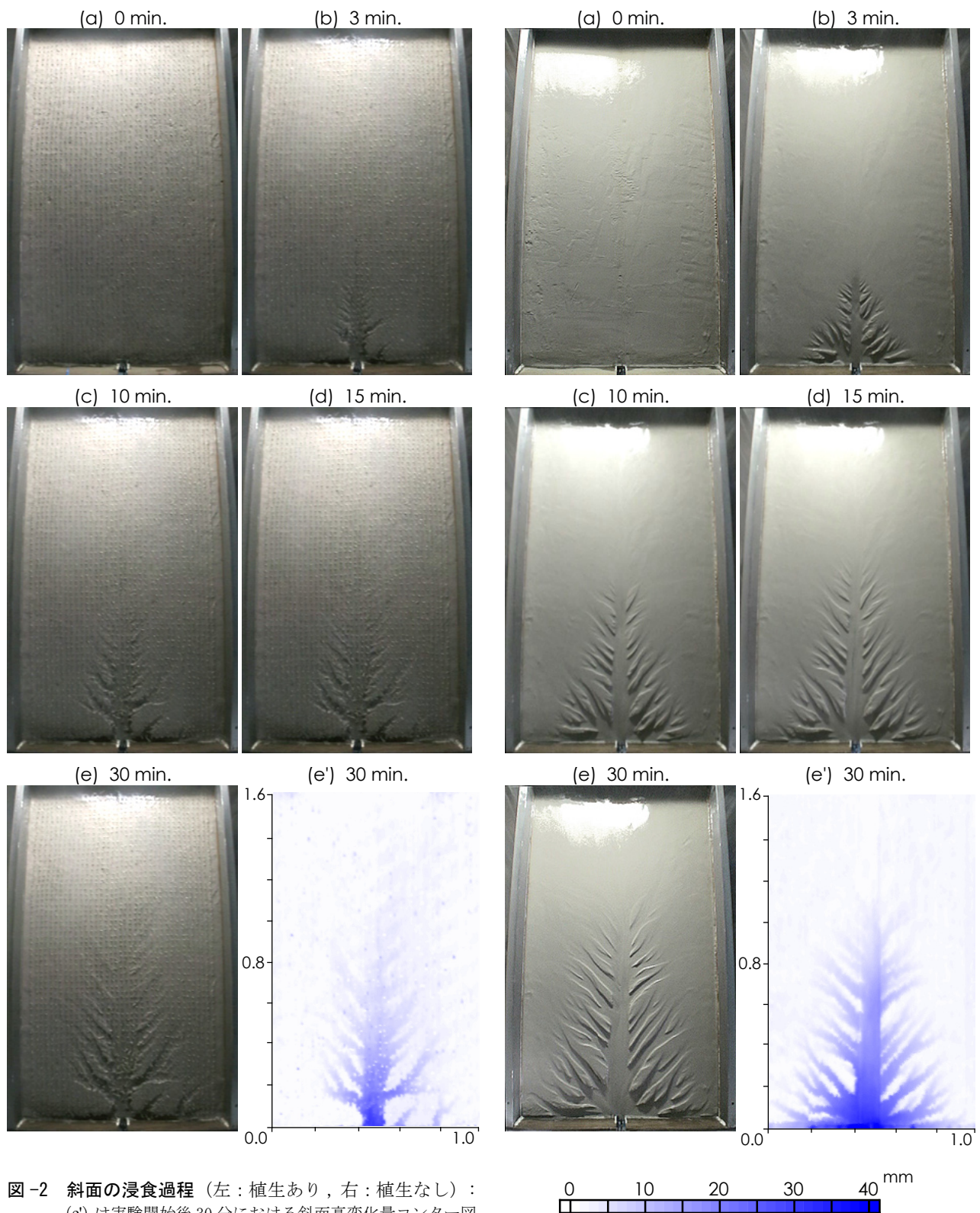


図-2 斜面の浸食過程（左：植生あり，右：植生なし）：
 (e') は実験開始後 30 分における斜面高変化量コンター図
 (図の縦・横軸の数値は m 単位)

崩落が抑制されるために、植生斜面では主流路・支流路ともに複雑な側岸の形状となっている。

また、実験後の浸食範囲について測定した値を表-2 に示す。主流路の長さは、裸地斜面の場合で 133 cm であったのに対して、たとえば播種間隔 2.5 cm の植生斜面で 111 cm であった。主流路の規模を下

流端より 20 cm の地点での幅で示すと、裸地斜面で 9.2 cm、播種間隔 2.5 cm の植生斜面で 8.3 cm となり、上流に向かうにつれてその差は大きくなった。植生斜面では、流路の側岸が安息角を超えているものやオーバーハングしたような状態にまで達しているものも多く見受けられた（写真-4）。また、支流路が



写真-4 植生による浸食抑制の様子
流路床は裸地斜面と同様に流路が形成されるが、側岸は安息角を越えて、地表面では流路幅が狭まっている。

表-2 浸食範囲の長さ測定結果

実験	播種間隔	主流路長	主流路幅	支流路範囲	支流路幅
A	植生無し	1334	92	765	32
B	4.0 cm	1166	63	752	43
C	3.5 cm	1321	90	720	34
D	3.0 cm	1227	95	626	30
E	2.5 cm	1109	83	604	31
F	2.0 cm	1008	119	436	36

(単位 :mm, 幅と範囲は下流端より 20cm 地点の値)

形成された範囲を下流端より 20 cm 程度の地点で調べると、裸地斜面で 76.5 cm、播種間隔 2.5cm の植生斜面で 60.4 cm であった。また、支流路の幅は、裸地斜面で 3.2 cm、播種間隔 2.5 cm の植生斜面で 3.1 cm であった。この支流路の幅には、植生の播種間隔の影響が現れており、播種間隔 4.0 cm から 3.0 cm までは流路幅が播種間隔に等しくなる傾向が見られたが、播種間隔が裸地斜面に生じた流路の幅よりも狭い場合には、逆に流路幅が広がる結果となった。

図-3 には、流路が植生間を遡上していく素過程を調べた結果の一例を示した。これは、播種間隔を 4cm とした植生斜面を対象として行った実験 B のビデオ画像を解析することで求めたものである。図上の黒い点は植生のある箇所を表し、その他の点は各時刻毎の流路のフロントの位置を表している。また、直線は各流路の中心線を表している。図より、流路の遡上は基本的に植生を避けて行われること、一定時間内の遡上距離は斜面上端側ほど長くなることがわかる。また、流路の分岐点に関しては、裸地の場合には安息角が重要な意味を持つと考えられるが、植生斜面の場合には前述のとおり植生が分岐点となる傾向が見られる。

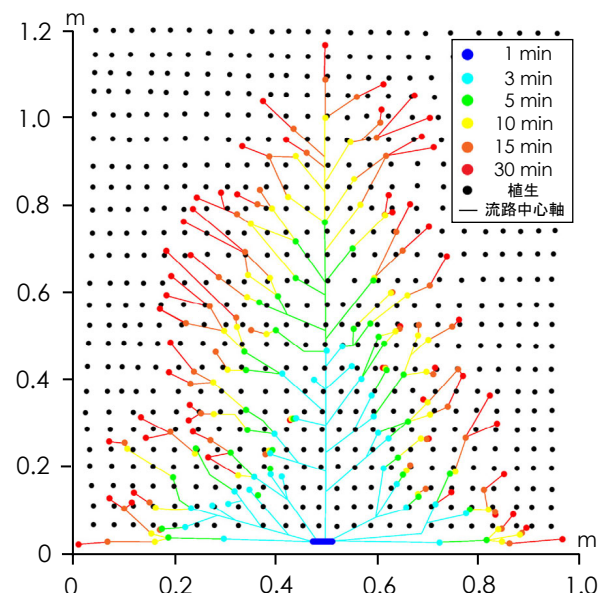


図-3 植生配置と流路の遡上経路の関係

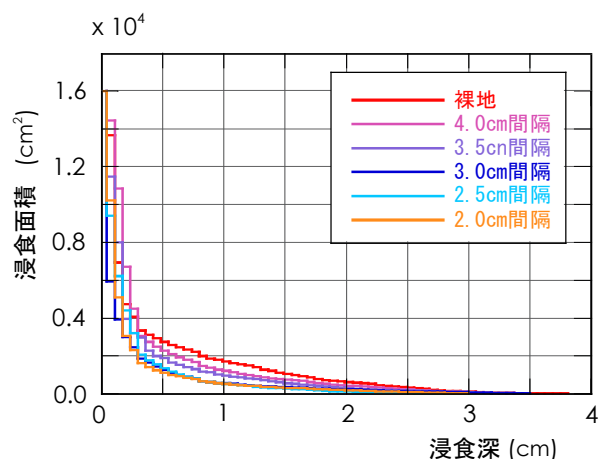


図-4 表面浸食量の計測結果：縦軸はある深さ以上の浸食が生じた区域の面積の総和を表す。

次に、実験 A ～ F についての実験後の浸食深と浸食面積との関係を図-4 に示す。図の縦軸は、横軸に示した浸食深以上の浸食が生じた区域の面積の総和を表している。この図より、播種間隔が狭まると浸食面積が減少すること、ただし播種間隔が 3.0 cm より密になっても浸食面積に大きな差が現れないこと、などがわかる。これは、後述する流出土砂量の結果から得られる考察と同様である。

(2) 土砂流出特性

図-5 ならびに図-6 には、斜面上流端の開口部から流出した水ならびに土砂の単位時間当たりの体積の時間変化を示している。流出水量に関しては、実験開始後 4 分程度でほぼ一定となり、裸地斜面・植生斜面ともに降雨量とほぼ等しくなった。また、流出土砂量に関しては、植生斜面の場合にはいずれの条件下であっても裸地斜面の場合より小さくなった。

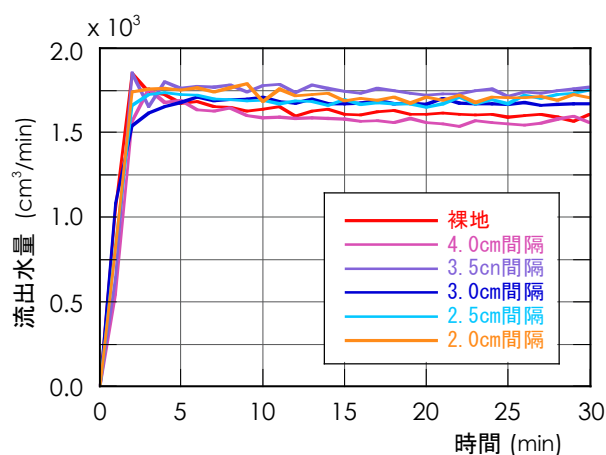


図-5 流出水量の時間変化

た. このうち, 実験開始直後の流路形成時期の差異は, 植生によって斜面崩落が抑制され, 浸食範囲が狭められたことによると推測される. 降雨開始から10～30分後の時間帯には土砂流出がほぼ一定となるが, これは主として表面浸食によるものである. 表面浸食は, 図-2の浸食深のコンター図からわかるように, 斜面崩落もしくはフロント部の浸食が進行した流路上やその付近の範囲で起こる. このため, 実験初期の段階において流路形成に大きな影響を及ぼす斜面崩落が, 植生によって抑制される結果となったことが, 表面浸食量の減少に繋がったと考えられる. 植生密度の異なる5通りの実験結果からは, 播種間隔が狭まるほど流出土砂量が減少する傾向が見てとれるが, 一方で播種間隔が3.0 cmより狭められても, 流出土砂量はほとんど変化しない. これは, 植生密度を高めたとしても, ある程度までしか浸食抑制効果を期待することができないという意味の限界があることを示している.

4. 結論

本研究では, 今後に向けて行うべき研究の第一歩として, エンバクという植物を対象として, 植生の根系が斜面の浸食に及ぼす影響を実験的に明らかにすることを目的とした. 実験の結果, 砂質土であっても根系により斜面の耐浸食性が大きく向上することが確認された. また, 根系の密度を高めることで, 耐浸食性も同様に向上することが確認された. ただし, ある一定以上の密度になると, 耐浸食性に変化は見られなくなり, その効果に限界があることも示唆された. また, 植生を配置することによって, 浸食による流路の形成過程に顕著な影響が現れることを明らかにした. 植生密度の上昇によって浸食面積

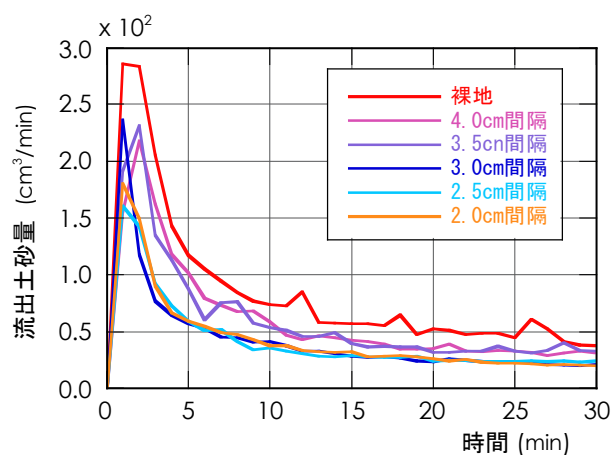


図-6 流出土砂量の時間変化

は減少するが, その密度によっては植生の間隔に問わずに流路幅が広がる傾向も見られ, 形成される流路を制御したりあるいは予測することが容易でないことも理解された.

今後は, これらの結果を踏まえ, さらに精緻な実験によって根系の影響を具体化することが求められる. また, 他の種類の植生に対する検討も試み, ここでの知見がどの程度一般性をもつかを見極めていく必要があると考えている.

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)の助成を受けた. また, 実験の遂行に当たり中日本高速道路(株)の長濱正憲氏の協力を得た. ここに記して謝意を表する.

参考文献

- 1) 薄井五郎・成田俊司・清水一・柳井清治: 根系による山腹崩壊防止機能-日高豪雨災害調査の結果から-, 北海道立林業試験場 光珠内季報昭和59年度, No.60, 17-20, 1984.
- 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)-流路の三次元形状-, 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, 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.

(2007. 9. 30 受付)