

Channel inception and bifurcation processes by overland flow

(表面流による初期水路形成と分岐特性)

学位論文内容の要旨

A comprehensive study of channel inception and bifurcation processes is presented after conducting several experiments and analytical solutions. Channel inception on mild slope and steep slope is studied using four series of experiments for different scenarios. An analytical solution is proposed for channel inception for the case of steep slope using linear stability analysis. In addition, this study includes a study on channel bifurcation by conducting experimental studies. This study used two theories, developed by Izumi and Parker [2000] and Mizushima et al. [2007], as a basis for the study.

Izumi and Parker [2000] have performed a linear stability analysis of channel inception, and have obtained a result states that the growth of channels is maximized when the channel spacing is 10 times the Froude critical depth divided by the bottom friction coefficient. In this study, laboratory experiments were conducted to study details of the formation processes of first-order channels and the validity of results obtained by Izumi and Parker [2000]. According to the experimental results, when the slope was sufficiently mild for flow to be subcritical in the Froude sense, local erosion immediately upstream of the precipice at the downstream end was dominant for channelization, and channels were initiated at the downstream end of the slope. When the slope was steep, erosion on the slope surface was dominant, and channels started to be formed at the middle of the slope. In the case of high clay content soil, channels have a high tendency to bifurcation, and consequently show random configuration compared with those in the case of low clay content soils. The channel spacing observed in the experiments seemed to be generally smaller than that predicted by the theory. However, we found that channel spacing becomes small when the bottom shear stress at the point where the Froude number is unity is only slightly larger than the critical shear stress for the onset of erosion, and that, by taking account of this, the agreement between prediction and

observation is good.

Besides, a theoretical study was performed on channel inception for the case of steep slopes, as extension of the theory of downstream driven channel formation. The conceptual model for the channelization process under steep slope is formulated by considering uniform steady shallow water, flowing on a typically smooth straight plain ending with upward concave steep slope gradually changing to a very mild slope. The flow on the steep slope is assumed to be supercritical whereas the flow on mild slope is assumed to be subcritical in the Froude sense. Two-dimensional depth-averaged shallow water equations were used in the formulation process. A linear stability analysis is used to study the problem. The problem is an eigenvalue boundary problem, solved using the spectral collocation method with the Chebyshev polynomials. Finally, we found a relation between growth rate of perturbation and characteristic wavenumber for the case of steep slopes. The dominant wavelength is found to be 0.2 to 0.29 times the Froude critical depth divided to bed friction coefficient.

Regarding channel bifurcation, Mizushima, et al [2007] have performed linear stability analysis, and they proposed that channel bifurcates when the discharge per unit width divided to bed friction coefficient is smaller than $1/1000$ to $1/500$ of the radius of the channel. The experimental setup was premeditated in a way that able to evaluate the validation of the theoretical study, to study the details of channel head bifurcation processes, and to set the threshold conditions for the onset of channel bifurcation. Therefore, in this study, threshold condition for the onset of channel head bifurcation is presented, which is expressed by Froude critical depth, bed friction coefficient, and channel head radius. A Channel bifurcates when the ratio of Froude critical depth to bed friction coefficient and radius of channel is less than 0.02. In addition, It is observed that channel head bifurcates when the channel head is enlarged in width to the extent the flow depth on the top of the channel head is sufficiently reduced until the flow is starting to split into two or more concentrated flows, and the bifurcation is realized when each small concentrated flows still persists enough energy to cause channel incision. In general, the experimental results are found to be consistent with the theoretical results.

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 泉 典 洋
副 査 教 授 清 水 康 行
副 査 准教授 山 田 朋 人

学 位 論 文 題 名

Channel inception and bifurcation processes by overland flow

(表面流による初期水路形成と分岐特性)

地上に降り注いだ雨水は表面流を形成し地表上を流れ海へと流下する。その際、表面流が地表面を侵食することによって様々な地形が形成される。中でも特徴的なのが、血管網や樹枝にも例えられる複雑な幾何形状を持った水路網である。水路網形成初期の斜面上には、斜面方向に平行に並んだ水路群がほぼ等間隔で形成される様子が観察される。斜面の勾配が十分小さく等流が常流となるような場合、水路群の間隔は限界水深 (Froude 数が 1 となる水深) の 1000 倍程度となることが Izumi and Parker (2000) によって理論的に示されているが、これは未だ検証されていない。また勾配が大きく等流が射流になるような場合についての水路形成プロセスについては未だほとんどわかっていないのが現状である。さらに初期に観察される単純な水路群が複雑な水路網へと発達する際、一つの水路頭部が複数の水路に分岐している様子が観察されるが、この現象についても未だ不明な点が多い。そこで本研究では、下流端にステップを有し、粘性土で構成された一様勾配斜面上に表面流によって水路群を形成させる実験を行うことによって緩勾配斜面に関する既存の理論の検証を行うと同時に、急勾配斜面における水路群形成理論を提案した。また水路頭部を半円形の開口部で模擬した実験を行うことによって、水路の分岐過程を実験的に明らかにした。

第 1 章では、本研究の背景と目的を記述している。

第 2 章では、下流端にステップを有し、粘性土で構成された一様勾配斜面上に表面流を発生させ、表面流による侵食によって水路群を形成させる実験を行った。実験では粘土とシルトを異なる割合で混合した粘性の高い粘土と低い粘土の二種類の粘土を用いた。実験によると、形成される水路間隔は限界水深の数百倍となることが明らかとなった。これは理論によって予測される水路間隔の十パーセントから数十パーセントの値である。緩勾配斜面の場合、実験では表面流によるせん断力が小さいため、侵食は下流端のステップ直上流に集中しており下流端の影響が上流の狭い領域にしか及ばないため水路間隔は小さくなる。この効果を考慮した理論を用いたところ実験結果は理論によって良好に説明することが可能となった。また、急勾配斜面上における水路群の形成実験を行い、その

結果を解析した。その結果、急勾配斜面上に形成される水路群は斜面中ほどから形成されること、急勾配斜面上に形成される水路群間隔は緩勾配斜面上と比較して若干小さくなること、水路群形成に斜面下流端形状は影響を及ぼさないことが明らかとなった。

第3章では、急勾配斜面上における水路群形成の理論を提案した。一様な急勾配斜面に横断方向にサイン型の微小擾乱を与え、擾乱のその後の発達速度を線形安定解析の手法を用いて明らかにした。擾乱の振幅を微小パラメータとして線形化を行うことによって得られる摂動方程式は、境界条件とともに固有値問題を構成する。この固有値問題を Chebyshev 多項式展開を使ったスペクトル法を用いて解いた。その結果、斜面上に形成される水路群の間隔は限界水深を底面摩擦係数で割った値の0.2倍～0.29倍となり、緩勾配斜面上に形成される水路群の形成間隔と比較すると若干小さくなることが明らかとなった。

第4章では、水路頭部の分岐過程を明らかにするための実験を行った。粘性土で構成された平坦面の下流端に半円形の開口部を設け、表面流による侵食によって開口部周辺が侵食されていく様子を観察した。開口部の半径に対して流量が大きい場合、開口部周辺はほぼ一様に侵食されていくが、流量がある値より小さくなると開口部の一部のみが侵食されていく。これが水路頭部の分岐に対応すると考え、水路頭部が分岐する条件を実験的に明らかにしたところ、限界水深を底面摩擦係数で割った値が、水路頭部の半幅の0.2程度より小さくなると水路頭部が分岐することが明らかとなった。水路が発達し水路頭部が上流に進展するにつれて水路頭部の集水面積が小さくなり水路頭部が集める流れが減少することで、水路分岐が発生すると考えられる。

第5章では、これまでの結果をまとめている。

これを要するに、著者は粘性土で構成された緩急勾配斜面上における水路の初期形成間隔を実験および理論の両面から明らかにすると同時に、発達した水路が複数の水路へと分岐する条件を実験によって明らかにした。これらの成果から平坦な斜面上に複雑な水路網が形成されるプロセスが明らかとなり、地形形成の数値モデルの構築や生産土砂量の予測モデルに反映することができる。これは土砂水理学、理論地形学の進展に寄与するところ大である。よって、著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。