

氏 名	Sazia Afreen
博士の専攻分野の名称	博士（学術）
学位記番号	博理工乙第233号
学位授与年月日	平成28年3月24日
学位授与の条件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	Investigation of Downstream Equilibrium Scour Pattern and Gully Scouring after Levee Overtopping (堤防越流後の平衡洗掘パターンに関する研究)
論文審査委員	委員長 教 授 田中 規夫 委 員 教 授 浅枝 隆 委 員 教 授 川本 健 委 員 准教授 八木澤順治 委 員 准教授 李 漢洙

論文の内容の要旨

Three dimensional and two dimensional experiments were conducted in the present research to investigate the changes of scour pattern due to hydraulic (overtopping height) and geometric (levee height overtopping width) parameter variation.

In the present study, gully scours created along the levee slopes of two rivers (Omotogawa and Sakarigawa Rivers) in Iwate Prefecture and three rivers (Nanakitagawa, New Kitakamigawa and Abukumagawa Rivers) in Miyagi Prefecture were investigated. These gully scours were created by the 2011 Great East Japan Tsunami. The energy head during levee overtopping for each location was calculated from the overtopping flow information obtained from post tsunami surveys.

From the 3D experimental analysis of downstream scour profiles, it has been observed that five distinct types of scour pattern were created for different hydraulic and geometric parameters.

For overtopping width (W_{bank}) to levee height (h_{bank}) ratio of 2 to 6.7, single scour hole ('Type 1-S') was formed for overtopping height (d_{bank}) to levee height (h_{bank}) ratio of 0.1 to 0.4, while for $W_{\text{bank}}/h_{\text{bank}} = 6$ to 8, double scour holes were created in the transverse direction (perpendicular to the overflow direction) when $d_{\text{bank}}/h_{\text{bank}} = 0.25$ to 0.4 ('Type 2-DT'). In case of $W_{\text{bank}}/h_{\text{bank}} = 3.3$ to 6.7, double scour holes appeared along the longitudinal direction (along the overflow direction) with $d_{\text{bank}}/h_{\text{bank}} = 0.5$ to 0.83 ('Type 3-DL'). For comparatively higher $W_{\text{bank}}/h_{\text{bank}}$ (6 to 13.3), multiple scour holes were created along transverse direction ('Type 4-MT') for $d_{\text{bank}}/h_{\text{bank}} = 0.1$ to 0.2. For $W_{\text{bank}}/h_{\text{bank}} = 10$ to 13.3, multiple scour holes were created both in the transverse and longitudinal directions ('Type 5-MTDL') when $d_{\text{bank}}/h_{\text{bank}} = 0.33$ to 0.83. The formation of five types of scour patterns differed because of three dominant flow mechanisms which are back water effect along the levee slope, periodic deflection of hydraulic jump in the transverse direction and periodic deflection of hydraulic jump along the longitudinal direction.

Among them back water effect played an important role for the formation of multiple strip flow, which created 'Type

4-MT' scour pattern. Periodic deflection of hydraulic jump along transverse direction acted as the dominant factor for creating double scour holes along transverse direction, forming 'Type 2-DT' scour pattern. Periodic deflection of hydraulic jump along longitudinal direction played as the vital factor for creating double scour holes along longitudinal direction ('Type 3-DL'). Due to the combined effect of periodic deflection in transverse and longitudinal directions, multiple scour holes were created along both directions forming 'Type 5-MTDL'.

From the relation between non-dimensional energy head and non-dimensional overtopping width considering Froude number, occurrence of different types of scour pattern was described. Moreover from the relation of non-dimensional maximum scour depth with nondimensional maximum scour length, vulnerability of the levee structure was analyzed in the present research. It was observed that 'Type 2-DT' is vulnerable for the levee structure, while 'Type 3-DL' and 'Type 5-MTDL' affect both the levee structure and the valuable property at the downstream of the levee.

From the comparison between 2D and 3D scour data, it was observed that for 3D experimental results larger scour depth and shorter scour length were created compared to 2D experiments. This might be due to overtopping flow dispersion and concentrated flow in the middle section in case of 3D experiments. From this result, it is evident that for levee design 3D experimental analysis is very important as 2D cases tend to under-predict the scour depth which is one of the most important parameters for the levee stability.

The gully scour analyses from field investigation clarified that gully scour dimensions were greatly dominated by two important phenomena: i) overflow type (free overflow or submerged overflow), and ii) soil texture at the scoured region. In cases of flow from land side to riverside, due to the submergence effect on the riverside, the average non-dimensional energy head required to create the same scour width was found to be 2.1 times greater than that at the landside where flow is from riverside to landside. When previous research data was included, average non-dimensional gully scour width for high-erodible soil was found to be 1.5 and 3.8 times higher than the value for medium-erodible and low-erodible types of soil, respectively. The results of this study on a real scale could be utilized to obtain the overtopping flow height for post tsunami analysis. The results can also be used in levee design where gully scouring caused by overtopping of tsunami flow direction is critical for levee stability.

論文の審査結果の要旨

当学位論文審査委員会は、平成 28 年 1 月 22 日に論文発表会を開催し、論文内容の発表に続いて質疑と論文内容の審査を行なった。以下に審査結果を要約する。

近年、頻発する大規模洪水による破堤が各地で報告されている。また、2011 年の東北地方太平洋沖地震津波時には多くの地点で堤防からの越流が発生し、堤体侵食および法尻付近の洗掘によって、堤防自体が大規模なダメージを受けたことは記憶に新しい。こうした津波や洪水などの大規模水害時において、堤防の破堤に至る過程とその機構を把握することは、今後の防災・減災対策を計画するという観点から非常に重要である。申請者は越流時の堤体侵食（ガリー侵食）と法尻付近の洗掘現象に着目して研究を進めた。ガリー侵食に関する既往研究では、平面二次元流れの方程式をもとにした理論解析を実施し、堤防天端の越流水深とガリー侵食量の関係が把握されている。しかしながら、一様斜面の降雨流出によるガリー侵食を対象としていたため、越流水深が非常に小さい条件を仮定している。東北太平洋沖地震津波時にみられた堤防越流のように降雨流出と比較して大きな越流水深条件下での適用性については不明な点が多い。一方、法尻付近の洗掘現象に関する既往研究では、越流による堤体侵食に着目した研究は多いものの、そのほとんどが鉛直二次元場で検討されている。東北地方太平洋沖地震津波時に被災した堤防をみると、いくつかの洗掘パターンが存在することが確認されている。こうした異なる洗掘形態が生じる要因は流れの三次元性に起因することが予想される。従って、側壁で拘束された二次元実験条件下においては、実際と異なる洗掘現象が生じている可能性があり、その点に課題が残されている。

申請者は、学位論文の第三章で、東北地方太平洋沖地震津波時に堤防裏法に形成されるガリー侵食が生じた 5 つの河川（岩手県の小本川、盛川と宮城県の七北田川、北上川、阿武隈川）で得られたガリー侵食量と当該地点の水理・地盤特性との関係の把握を試みている。その結果、ガリー侵食量は、1) 堤防天端におけるエネルギー水頭、2) 越流タイプ（越流した先に水深がない場合の越流（free overtopping, 以下 FO）、越流した先に水深がある場合の越流（submerged overtopping, 以下 SO）、3) 堤防の土質特性（粒度分布、土質性状）、が重要な要因であることを示している。特に、越流タイプの違いはガリー侵食幅に影響が大きく、同程度のエネルギー水頭をもって越流した場合、FO の条件で形成されるガリー侵食幅は、SO よりも大きくなることを示した。

学位論文の第四章では、東北地方太平洋沖地震津波時に被災した堤防でみられたような異なる洗掘パターンの発生機構を明らかにすることを目指している。そのため、平面水路に堤防モデル（木製：固定床）と法尻以降に移動床を設置して水理模型実験を実施している。越流幅・越流水深を系統的に変化させた計 40 ケースの実験を実施し、1) 単一洗掘孔、2) 横断方向に二つの洗掘孔、3) 縦断方向（流れ方向）に 2 つの洗掘孔、4) 横断方向に複数の洗掘孔、5) 縦横断方向に複数の洗掘孔、という 5 つの洗掘形態が生じることを明らかにしている。また、流れ場の観察から、5 つの洗掘形態の発生要因として、a) 堤防裏法面上の背水による影響、b) 周期的に移動する横断方向の跳水、c) 周期的に移動する縦断方向の跳水、を挙げている。a) は主に 4) の洗掘形態が生じる際に重要な役割を果たし、流れのせん断不安定性によって横断方向に流れの強弱がつくことによってこのような洗掘形態が生じることを指摘している。また、b) の周期的に移動する横断方向の跳水は、2) のような横断方向に二つの洗掘孔が生じる洗掘形態を発生させること、c) の周期的に移動する縦断方向の跳水は、3) のように縦断方向に二つの洗掘孔が生じる洗掘形態を発生させること、を示している。

さらに、5) のように縦断方向に複数の洗掘孔ができるような洗掘形態は、b) , c) が同時に生じるような複雑な流れ場であるとしている。その上で、洗掘パターンだけでなく、定常状態となった際の洗掘量（深さ、

幅、長さ)を整理し、2)のように横断方向に二つの洗掘孔ができる洗掘形態において、最も洗掘深が大きくなることを明らかにしている。このことは、越流時にある水理条件(2)の洗掘形態が生じる条件)となった場合に、法尻付近の洗掘という観点から、堤防の不安定性を判断できる可能性があることを意味しており、重要な知見である。

さらに、第四章では、5つの洗掘形態の発生条件を一般化するため、越流の状態を表すエネルギー水頭、堤防の地形・地質特性を表す越流幅、堤防の平均粒径、を含めた2つの無次元パラメータを導出している。それら二つの無次元パラメータを用いると、5つの発生形態が概ね分類できるとともに、他の洗掘パターンよりも洗掘深が大きく、堤防の安定性に影響を及ぼす可能性のある洗掘パターン(2)や5))を分類できることを明らかにした。

以上のように、本論文は、堤防越流時における法尻付近の洗掘形態の発生機構を水理実験により解明しその発生パターン进行分类する無次元量を導出していること、各洗掘パターンに応じた洗掘量を明らかにしていることより、法尻付近の洗掘という観点から堤防の安定性に関して重要な示唆を与えている。このことから、当学位論文審査委員会は、本論文が博士(学術)の学位に相応しい内容であると判断した。

なお、本論文の内容は、第三章が Journal of Earthquake and Tsunami に受理され、第四章の一部は、Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering) に、1編が発表済み、1編が発表予定である。