

堤防天端の縦断的な凹凸の周期性が越流時の ガリー侵食に及ぼす影響

THE EFFECT OF PERIODIC IRREGULARITIES AT THE CREST OF EMBANKMENT ON GULLY EROSION

八木澤順治¹・正村亮太²
Junji YAGISAWA and Ryota MASAMURA

¹正会員 博(学) 埼玉大学大学院准教授 理工学研究科 (兼・埼玉大学研究機構レジリエント社会研究センター)
(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

²非会員 埼玉大学 工学部 建設工学科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

At Typhoon No.19 in 2019, overtopping flow from embankment occurred at many locations in the Arakawa River tributaries, and gully erosions have been confirmed. In a previous study, the relationship between the wavelength of irregularities at crest of embankment and gully erosion was examined by laboratory experiments. However, since this experiment was conducted with the overflow water depth limited, the effect of changes in overflow depth on gully erosion characteristics has not been clarified. Therefore, the objectives of this study are 1) to clarify the effect of increasing overflow depth on the gully erosion characteristics by hydraulic experiment, and 2) to confirm the similarity between gully erosion characteristics obtained by experiments and actual phenomena in the field. As a results of hydraulic experiment and field survey, it was confirmed that dimensionless erosion depth and interval of neighboring gully erosions were similar to the experimental values.

Key Words : *embankment, overtopping, gully erosion, irregularities on embankment crest*

1. はじめに

2019年10月の台風19号時には、主に関東・東北地方の多くの河川で越水、破堤が生じた。荒川流域においても越辺川、都幾川をはじめとした支川群の複数箇所破堤が生じている。こうした破堤点付近では、破堤には至らなかったものの図-1に示すように裏法面に周期的なガリー侵食が確認されている。こうした周期的な侵食痕は2015年関東・東北豪雨時においても、複数の地点で確認されている¹⁾。越流により生じる裏法面のガリー侵食は、特に越流初期の裏法面の地形を決めるとともに、侵食箇所へ流れが集中することで、その後の堤体侵食過程や破堤までの時間、すなわち堤防の粘り強さにも影響を与えられと考える。泉ら²⁾は、一様斜面上に形成されるガリー侵食を実験的・理論的に検討しており、水深の1000倍程度の周期でガリー侵食が生じることを明らかにしている。しかし、上記の検討では、主に降雨によって生じる表面流を想定した水深が非常に浅い場合を対象としており、本研究で対象とする堤防越流のように、数cm-10数cmの大きな越流水深に対して生じるガリー侵食の特

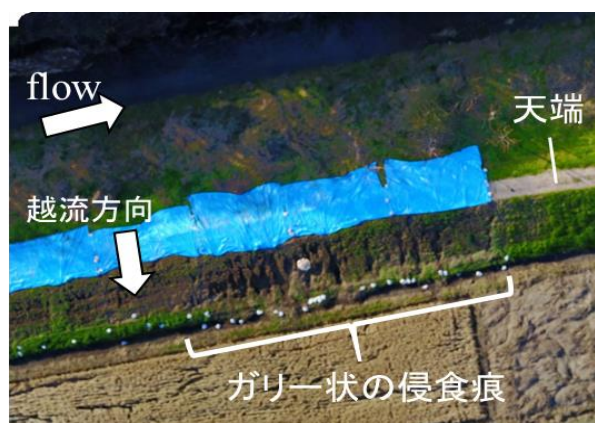


図-1 台風19号時に裏法面で確認された侵食痕

性に関しては不明な点が多い。また、実際の堤防天端では不等沈下等によって、堤防の縦断方向に周期的な凹凸が形成されることが報告されており³⁾、縦断的に異なる越流水深となる。このような状況下で、天端凹凸が裏法面の侵食規模にどのような影響を与えるかを把握することは、堤防の維持管理の観点から極めて重要である。

飯塚・八木澤⁴⁾はこの点に着目し、室内模型実験において、凹凸波長と裏法面に形成されるガリー侵食との関

係を調べている。その結果、天端凹凸波長が大きくなると、ガリー侵食の侵食深が大きくなるだけでなく、隣り合うガリー同士の間隔が狭くなることを明らかにしている。しかし、この実験は一定の越流水深(無次元越流水深が $h/E_H=0.03$ 程度 (h , E_H はそれぞれ越流水深(m), 堤防高(m))で実施されている。実現象においては、場所に応じて様々な越流規模が想定されるため、異なる越流水深条件におけるガリー侵食の発生周期、侵食規模(侵食深、幅等)を把握する必要がある。そこで本研究では、越流水深の変化がガリー侵食に及ぼす影響を水理模型実験により明らかにするとともに、台風19号時に実河川堤防においてガリー侵食が生じた複数地点を対象にした侵食調査結果と比較検討することを目的とする。

2. 侵食箇所の現地調査および室内模型実験方法

(1) 現地調査方法

本研究では、越流と裏法面の侵食が確認された都幾川6.6km付近左岸、8.0km付近右岸および新江川0.4km付近右岸の合計3地点(図-2)を対象にして、a)天端凹凸の状況、b)洪水痕跡調査による越流水深規模、c)裏法面の侵食状況、を調査した。

a) 天端凹凸波長 λ 、振幅 a の把握

各調査地点の天端凹凸波長 λ 、振幅 a を把握するため、ネットワーク型RTK-GPS(R-10:Trimble社)を用いて、図-1に示す侵食痕調査地点の前後50mを含む120 – 190 m程度の範囲を対象に、天端上を縦断方向に1mピッチで標高を測定した。得られた天端標高の移動平均値を基準とし、天端凹凸波長 λ および振幅 a を把握した。

b) 各調査地点における越流水深の推定

各調査地点における越流水深を把握するため、図-2に示す白丸地点で洪水痕跡調査を実施した。具体には、堤外側の堤防近傍に繁茂した樹木群に捕捉された流下物の地面からの高さを計測するとともに、当該地点の地盤標高を前述したRTK-GPSで計測した。これらから得られる痕跡水位から、a)で把握した堤防天端標高を差し引くことで越流水深 h を推定した。

c) 裏法面のガリー侵食深 S_d 、ガリー間隔 l の把握

ガリー侵食深 S_d 、ガリー間隔 l を把握するため、裏法面の侵食深の平面分布を得る必要がある。そこで、越流後の地表標高はUAV(Mavic 2 Pro : DJI社)によって空撮画像を取得し、画像解析ソフト(Photo scan : Agisoft社)を用いて、位置と高さの情報をを持った点群データを生成した。得られた点群データを20cm四方のグリッドで平均化することで越流後の標高分布を取得した。なお、画像解像度は今回設定したグリッドサイズで十分平均化されるよう、2.3cm/pixelとした。また、越流前の地表標高は2014年に取得されたLPデータを元に、同様のグリッドサイ

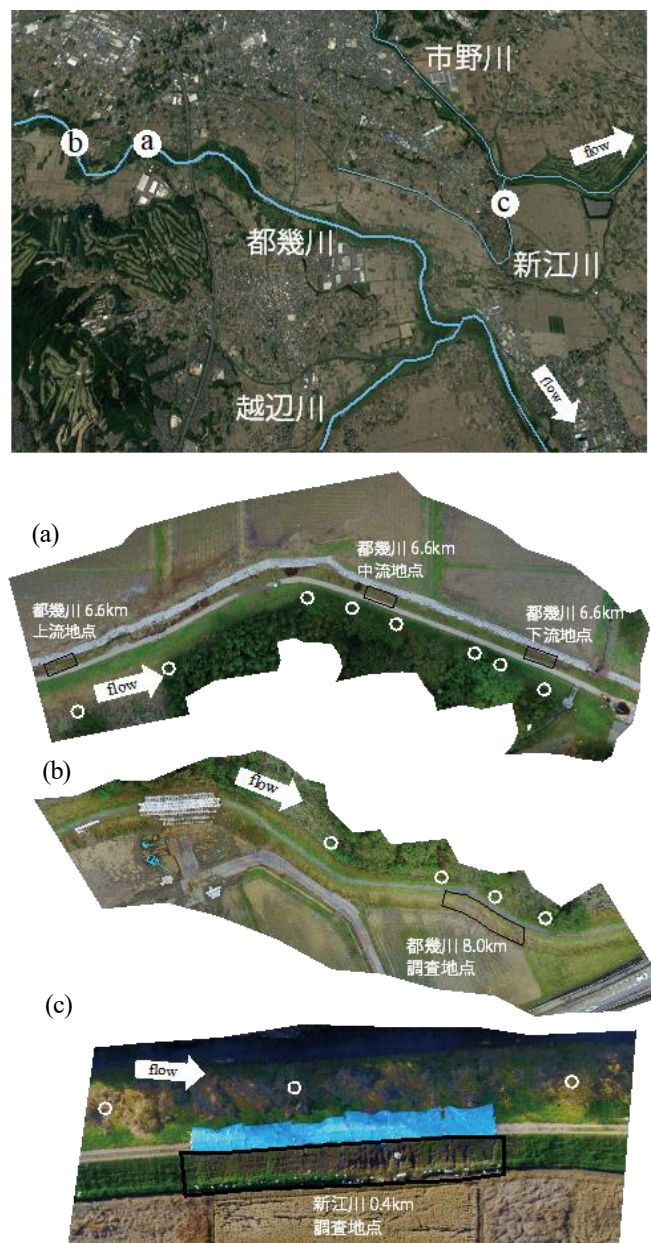


図-2 越流による堤体侵食が確認された調査地点

(a) 都幾川6.6km付近、(b) 都幾川8.0km付近、(c) 新江川0.4km付近 (図中の白丸は痕跡水位データ取得箇所を示す)

ズで平均化を施した。これらより、各調査地点の侵食深分布を取得した。

(2) 越流侵食実験方法

本研究では、長さ18m、幅2.7m、高さ0.9mの水路に図-3に示すようなスケールの堤防モデルを設置した移動床実験を実施した。実験では、まず、長さ3.1m、厚さ0.2mで基盤層を作成し、その上に、同様の材料で表、裏勾配1/2、長さ2.12m、高さ0.5mの堤防モデルを粘土(荒木田土)で締固め度約90%になるように設置した。その後、裏法面および裏法尻以降に細粒分質礫質砂を敷き、ハンドタンパーを用いて10cm層厚ごとに転圧し、締固め度約70%として一様な厚さ(20cm)で設置した。今回使用し

た細粒分礫質砂は、礫分21%、砂分52%、シルト・粘土分で構成される細粒分が26.2%であり、平均粒径、最大粒径がそれぞれ0.65mm、19mmの材料である。なお、締固めが不均質となると土壤材料の移動限界が変化するため、全ケースにおいて、締固め後に裏法面上の水路中央で流下方向に3点と、裏法尻(水路横断方向中央)の1点、計4点でコアサンプリングし、締固め度を計測した。全サンプリングで多少ばらつきはあるものの、65.9 - 71.4%であったことから、場所による締固め度の差は小さいものとした。また、粘土・シルトといった細粒分を含む土質材料の場合、含水比も侵食限界に影響を与える⁹⁾。全サンプリングで28.4 - 31.3%であったことから、含水比の影響も小さいものと判断した。上記事前準備を経て、細粒分礫質砂の部分で越流による侵食を発生させた。

図-3に示す天端モデル設置箇所には、異なる波長を有するサインカーブ状の凹凸モデルを設置した。凹凸モデルは3Dプリンター(X-MAX : QIDI社)により再現し、材料にはABS樹脂を用いた。凹凸の波長は、表-1に示すように20cm、40cm、80cmの3ケースに、水平なケースも加えた4ケース(Case1-4)を実施し、振幅は1.0cmと一定値とした。また、越流水深は水平ケースで2.5cmとなるよう流量を調整し、他のケースにおいても同一流量で実施した。また、より大きな λ を対象とするため、Case4の λ 以外のパラメータを1/2スケールで縮小したケース(Case5-6)も合わせて実施した。

越流時間は、Case4を対象とした予備実験により、侵食深が設置した細粒分礫質砂内で収まる時間を把握したうえで、全ての実験において2分間とし、通水を止めたあと地盤高を測定した。測定区間は裏法尻より上流方向50cm、下流方向20cmの計70cm区間とし、横断方向に関しては、左右岸側壁から35cmを除いた中心2.0mの範囲の地盤高を測定した。測定には2Dレーザー変位計(LJ-V700 : KEYENCE社)を用い、横断方向0.4mm、流下方向5cm間隔で計測した。得られた地盤高は横断方向に3cmで平均化し、横断方向に3cm、流下方向に5cmのグリッドを生成し、地盤高分布を取得した。なお、実験前に上記と同様の方法であらかじめ取得した初期地盤高から、実験後の地盤高を差し引くことで、侵食深分布を把握した。また、本研究では法尻から発達し、地表流の顕著な集中が確認できる1cm以上の侵食深が見られたものをガリーと判断し、各ケースで生じたガリー侵食の深さ(S_d)、各ガリーの形成間隔(l)を計測した。

3. 結果

(1) 現地調査結果

図-4に各調査地点で得られた侵食深分布を示す。ここでは、明瞭に周期的なガリー侵食が確認できた3地点の結果を示す。図の赤点線は天端位置を、縦軸の堤防横断

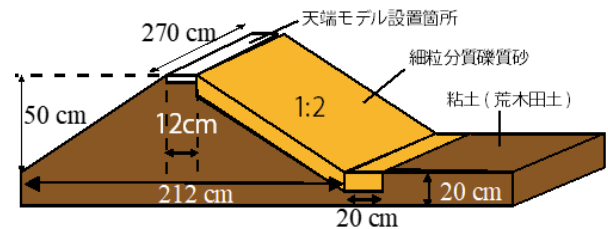


図-3 越流侵食実験に用いた堤防モデル概要

表-1 実験ケース一覧

No.	凹凸波長 λ (cm)	凹凸振幅 a (cm)	堤防高 E_H (cm)	越流水深 h (cm)
Case 1	0	1	50	2.5
Case 2	20	1	50	2.5
Case 3	40	1	50	2.5
Case 4	80	1	50	2.5
Case 5	80	0.5	25	0.8
Case 6	80	0.5	25	1.25

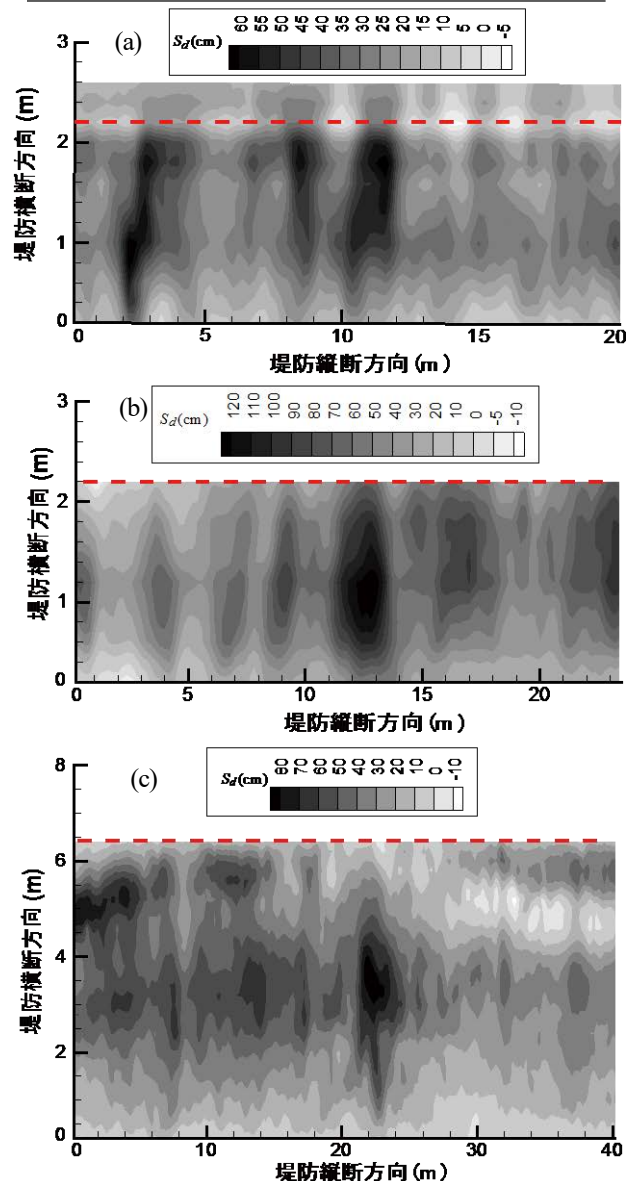


図-4 現地調査より把握した侵食深分布

(a) 都幾川6.6km中流地点、(b) 都幾川6.6km上流地点、(c) 新江川0.4km地点 (図中の赤点線は天端を、堤防横断方向距離0mが法尻を示す)

表-2 各現地調査地点の凹凸特性およびガリー侵食特性

No.	堤防高 E_H (m)	凹凸波長 λ (m)	凹凸振幅 a (m)	越流水深 h (m)	平均ガリー 侵食深 ds (m)	平均ガリー 間隔 l (m)	無次元ガリー 侵食深 ds/E_H (-)	無次元ガリー 間隔 l/λ (-)
Site 1 (都幾川6.6km上流)	2.8	8.3	0.018	0.190	0.67	4.17	0.24	0.50
Site 2 (都幾川6.6km中流)	2.8	8.0	0.027	0.147	0.33	3.75	0.12	0.47
Site 3 (都幾川6.6km下流)	2.8	7.7	0.017	0.154	0.59	2.69	0.21	0.35
Site 4 (都幾川8.0km)	2.0	5.4	0.024	0.131	0.34	1.66	0.17	0.31
Site 5 (新江川0.4km)	3.0	5.6	0.039	0.179	0.59	2.41	0.20	0.43

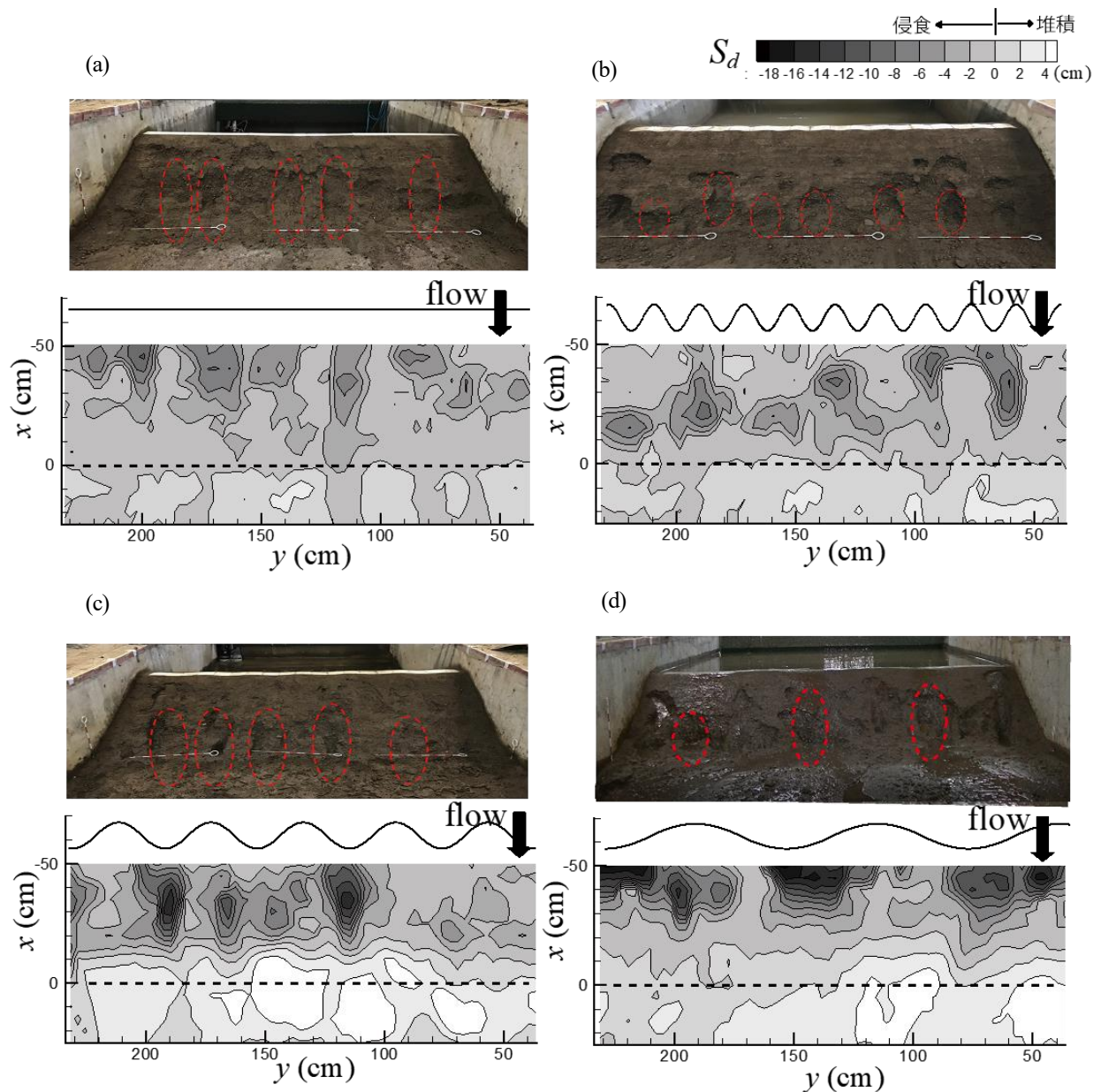


図-5 異なる天端凹凸波長 λ における裏法面でのガリー形成状況および侵食深分布

(a) Case1 (水平ケース), (b) Case2 ($\lambda=20$ cm), (c) Case3 ($\lambda=40$ cm), (d) Case4 ($\lambda=80$ cm)

(各写真中の赤点線はガリー侵食の形成位置, 図中の黒実線は天端凹凸の峰・谷の位置, 黒点線は裏法尻位置を表す)

方向距離(裏法面に沿う方向)が0は裏法尻である。また, S_d が正の値が侵食を意味している。

示した3地点の中で最も侵食を受けた地点は, 都幾川6.6km上流地点であった。表-2に示すように, この地点

は他の地点に比べ若干越流水深が高いことが原因だと考えられる。また, ガリー侵食痕の間隔を見ると, 図-4(c)の新江川地点で他の2地点と比較して細かい周期で侵食痕が形成していることがわかる。表-2をみると, こ

の地点は凹凸波長が比較的短い傾向にある。こうした凹凸波長や越流水深の違いが、ガリー侵食深やガリー間隔の変化を説明可能かどうか、3.(3)において、室内模型実験で得られる結果と比較する。

(2) 実験結果

図-5に各ケースの越流後における裏法面の侵食状況と、計測範囲の侵食深分布を示す。侵食深は越流前の地盤高と越流後の地盤高の差分を表したものであり、負の値が侵食していることを意味する。まず、ガリー侵食の形成状況を確認すると、Case1(水平)、Case2($\lambda=20\text{cm}$)、Case3($\lambda=40\text{cm}$)では5-6個の侵食痕が確認でき、凹凸波長で形成状況は大きく変化していないことがわかる。その一方で、Case4($\lambda=80\text{cm}$)では、3個の大きな侵食痕が確認でき、他のケースよりガリー侵食痕が少ないことがわかる。また、各ケースの侵食深コンターについて注目すると、天端凹凸がない水平のケース(Case1)が最も低く、凹凸波長の増加に伴って、侵食深が大きくなっていることがわかる。

この侵食深コンターから、各ケースの平均ガリー侵食深 S_d 、ガリー間隔 l を求めた結果を図-6に示す。なお、本研究では、横断方向3cm毎に侵食深が最も大きい値を求め、それを個々のガリー侵食ごとに平均化し、さらにその値を各ケースで平均した値を平均ガリー侵食深 S_d としている。平均ガリー間隔 l についても同様に平均化して求めた。また、各ケースの標準偏差をエラーバーで示す。

図-6(a)の λ と S_d の関係についてみると、凹凸波長が大きくなるにつれて、 S_d も大きくなっていることがわかる。同図には著者らの既往研究⁴⁾の結果も合わせて示しているが、越流水深が本研究のほうが大きいいため S_d の値自体は大きいものの、凹凸波長の増加とともに、 S_d が大きくなるという同様の傾向が確認された。この原因として、凹凸波長が大きい程、凹凸の最下部(谷)の部分に流れが集中しやすくなるためと考えられる。

図-6(b)の λ とガリー間隔 l についてみると、越流水深が小さなケース⁴⁾では、波長が増加するにつれて、緩やかではあるが、ガリー間隔も減少している。一方、越流水深が大きな本研究のケースでは、波長が増加するにつれて、特に $\lambda=40\text{cm}$ より大きくなると、 l が大きくなることを確認できる。その原因として、天端凹凸の頂部とガリー侵食の位置関係が関連していると考えられる。特に l が大きくなったCase3($\lambda=40\text{cm}$)やCase4($\lambda=80\text{cm}$)では、本研究のように相対水深(h/E_H)を増加させることで、天端凹凸の粗度としての効果が弱まり、凹部の最下点(谷)付近にガリー侵食箇所が集中したと考えられる。以上のことから、凹凸波長が大きな条件下で相対水深が増大した場合、侵食量の観点からは堤体欠損は大きくなるものの、ガリー同士の間隔は広がることから、ガリー同士が結合することでより大規模な侵食を誘発する可能性は低くなる

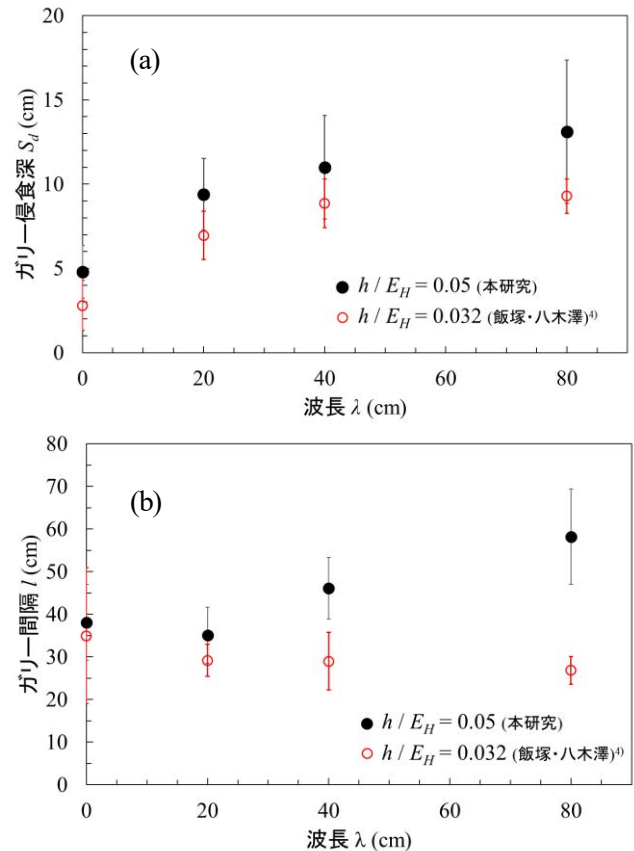


図-6 天端凹凸波長 λ と侵食特性との関係

(a) ガリー侵食深 S_d , (b) ガリー間隔 l

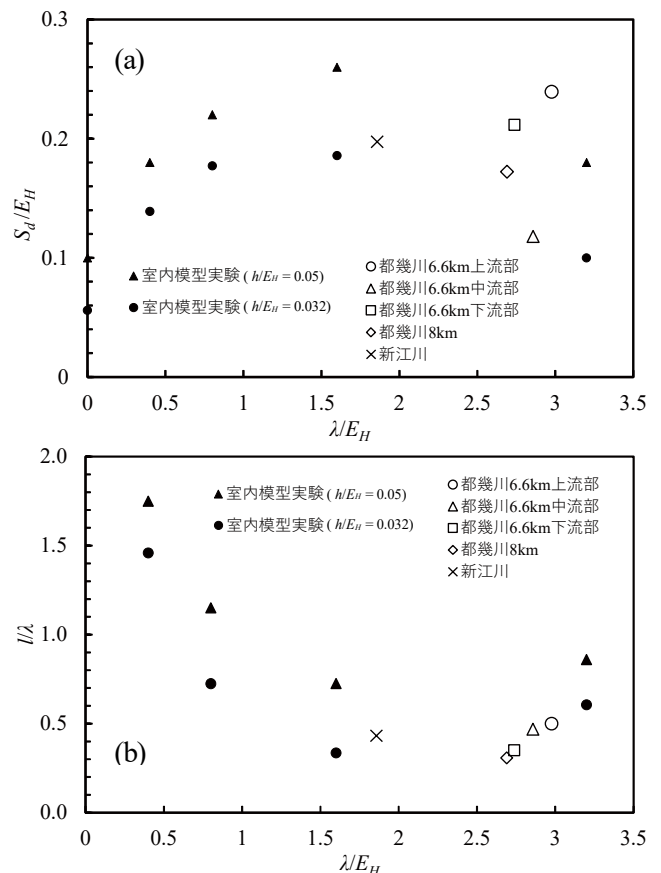


図-7 無次元波長(λ/E_H)に基づく実験結果と現地調査結果の比較

(a) 無次元侵食深 (S_d/E_H), (b) 無次元ガリー間隔 (l/λ)

と考えられる

(3) 現地と実験との類似性

室内模型実験より把握した天端凹凸波長がガリー侵食に及ぼす影響が、実現象でも同様の傾向となるかを確認する。両者の比較のため、無次元波長 λ/E_H と無次元侵食深 S_d/H (S_d は侵食深)、無次元ガリー間隔 l/λ を用い、図-7にそれらの関係を整理した図を示す。なお、本図には、縮尺を小さくすることで長波長を表現したCase 5およびCase 6の実験結果($\lambda/E_H=3.3$ の2つのプロット)も追加している。まず、図-7(a)について室内模型実験の結果から得られる傾向を見ると、無次元ガリー侵食深 S_d/E_H は、無次元凹凸波長 λ/E_H の増加とともに上昇し、 $\lambda/E_H=1.6$ 付近でピークを迎え、それ以降は減少していることがわかる。無次元越流水深 h/E_H で値は変化するものの、どちらも同じ傾向が確認できる。また、天端が水平($\lambda/E_H=0$)の時の S_d/E_H とピーク時の値を比較すると、無次元越流水深 h/E_H が0.05, 0.032の場合それぞれ2.6倍, 3.3倍となっている。これらのことから、越流規模が同等でも堤防天端の凹凸波長によっては、侵食が進行しやすい危険な条件があることが示唆される。また、実際に現地で把握した各地点のデータ(表-2)をプロットしてみると、都幾川6.6km上流地点でやや大きな S_d/E_H を示すなど、やや室内模型実験から得られた傾向から外れている点も見受けられるものの、概ね同様な範囲にプロットされていることがわかる。

一方、図-7(b)について室内模型実験の結果から得られる傾向を見ると、無次元ガリー間隔 l/λ は、無次元凹凸波長 λ/E_H の増加とともに減少し、 $\lambda/E_H=1.6$ 付近でピークを迎え、それ以降は再び増加していることがわかる。ガリー間隔に関しても無次元越流水深 h/E_H で値は変化するものの、どちらも同じ傾向が確認できる。また、同図より、凹凸波長よりも短い間隔でガリー侵食が生じる条件($l/\lambda < 1$)は、 λ/E_H が概ね0.8以上であり、本実験条件の範囲では、 λ/E_H が1.6のとき、 l/λ が最小で0.3程度となることがわかる。このことから、ガリー間隔の観点から、ガリー同士が結合しやすく、大きな侵食を伴う危険な状態となる凹凸波長の条件があることがわかる。

また、実際に現地で把握した各地点のデータ(表-2)をプロットすると、新江川地点以外は室内模型実験結果と比較してやや小さな l/λ を示しているものの、概ね同様な範囲にプロットされていることが確認できた。

4. おわりに

本研究では、堤防天端の縦断的な凹凸が裏法面での侵食現象に与える影響を、水理模型実験により検討するとともに、令和元年台風19号で越流侵食が生じた荒川支川の複数地点を対象に現地調査を実施した。得られた結論

を以下に示す。

- 1) 実験より、無次元ガリー侵食深(S_d / E_H)については、同じ無次元越流水深(h/E_H)の条件下において、無次元波長(λ/E_H)の変化に対して上に凸の傾向がみられ、 λ / E_H が1.6程度で S_d / E_H が最大となることが分かった。一方、無次元ガリー間隔(l/λ)は、 λ/E_H の変化に対して、下に凸の傾向がみられ、 λ/E_H が1.6程度で l/λ が最小となることが分かった。これらのことから、越流規模が同程度でも、裏法面での侵食傾向が強まる(侵食量が大きく、ガリー同士の間隔も狭い)天端凹凸波長が存在することが明らかとなった。
- 2) 台風19号でガリー侵食が確認された複数地点で得られた越流水深、天端凹凸波長、侵食規模のデータより、室内模型実験と類似した現象の有無が確認できるか検討した。その結果、 λ/E_H が小さい領域(λ/E_H が1.6以下)については実堤防の侵食に関するデータが得られず比較ができなかったものの、 λ/E_H が1.6-3.3の範囲については、概ね実験と同様の傾向となることを確認できた。

本検討では、天端凹凸の振幅の影響、ガリー侵食の特性を整理する力学的な無次元指標については室内模型実験データの不足により議論することができなかった。数値解析の実施により詳細な検討が必要であり、今後の課題である。

謝辞：本研究を行なうにあたり、JSPS科研費(JP19K04611)の助成を受けた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 八木澤順治, 田中規夫: 2015年9月関東・東北豪雨において生じた堤防法面上のガリー侵食量と越流規模との関係, 土木学会年次学術講演会講演概要, Vol.71, II-048, 2016.
- 2) 泉典洋, Gary Parker: 斜面下流端から発生する水路群について, 土木学会論文集 No. 521/II-32, 79-91, 1995.
- 3) 末永博, 八木澤順治: 河川堤防における不等沈下の発生状況調査, 第45回土木学会関東支部技術研究発表会, Vol.44, 2018.
- 4) 飯塚大和, 八木澤順治: 堤防天端の縦断的な波長が裏法面のガリー侵食に与える影響, 第45回土木学会関東支部技術研究発表会, Vol.44, 2018.
- 5) Hanson, G.J., Hunt, S.L.: Lessons learned using laboratory JET method to measure soil erodibility of compacted soils, Applied Engineering in Agriculture 23(3), 305-312, 2007.
- 6) Knapen, A., Poesen, J., Govers, G. Gyssels, Nachtergaele, J.: Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review, Earth-Science Reviews 80, 75-109, 2007.

(2020. 4. 2受付)