

# AIを活用した越水状況の画像解析から 水面下の堤防の侵食状況を把握する手法の検討

三好朋宏・高橋亮丞・福島雅紀

## 1. はじめに

近年、気候変動の影響により、治水施設能力を上回る規模の洪水が頻発している。特に、複数箇所で堤防の越水が生じた場合には氾濫水の拡大により、現地に近づくことができず、堤防の被災状況を確認することが困難になり、防災情報の発信が遅れるおそれがある。迅速かつ的確な災害対応のため、堤防の越水・決壊等を検知する技術の開発が求められている。特に、越水が生じた場合に堤防裏のり部の侵食状況を把握することは重要であるが、水面下となるため侵食状況を把握しにくい。

決壊等につながる堤防の侵食を検知する技術として、CCTV画像の活用を視野に入れ、AIを活用した画像解析技術に着目した。近年、当該技術を用いてアスファルト舗装のひび割れ<sup>1)</sup>やコンクリート表面の変状<sup>2)</sup>火山の噴火<sup>3)</sup>などの異常を検知する技術の開発が進んでいる。一方で、CCTV画像から高水敷や堤防表のり面の侵食状況を検出する技術の提案はあるが<sup>4)</sup>、堤防裏のり部の侵食状況を把握するための技術開発は進んでいない。

そこで、本研究では、フィージビリティスタディとして、裏のり面を流れる越流水表面の白波の発生状況から堤体裏のり部の侵食状況の推定の可能性を検討した。具体的には水理模型実験で白波の発生状況を撮影した画像を用い、AIによる画像解析を行った。なお、画像に降雨が写り込むことによる解析精度への影響については、検討対象外とした。

## 2. 白波と堤防の侵食状況の関係

### 2.1 白波の発生と堤体の侵食の関係

国土技術政策総合研究所（以下「国総研」という。）では過去に高さ3m、幅2.3m、天端幅2m、のり面勾配2割の堤防模型に、越流水深0～20cm

で通水させた実験を行っている。図-1と図-2に通水前と通水中の堤防模型の裏のり面を撮影した画像を示す。通水前の裏のり面は、一様に整形された土羽である。通水開始後、越流水は裏のり面に沿って流下するが、越流水深が大きくなるにつれて、のり面を流下する越流水の侵食力が増大する。そして、堤体の耐侵食力を超えると、裏のり面が侵食され始める。侵食により表面に凹凸が生じるため、そうした箇所では越流水が乱れ、白波が発生しやすいと考えられる。白波の状況と堤防の侵食状況に関係性が見られれば、白波の状況を把握することが堤防の侵食状況を把握することにつながる。

### 2.2 白波の濃淡と堤防の侵食状況の関係

実験画像から、場所によって白波に濃淡があることが分かった（図-2）。白波の濃淡を鮮明にするため、1秒当たり約30フレームある動画を用い、多数のフレームの色情報を重み付きで平均し、1枚の画像（以下「移動平均画像」という。）を作成することを行った。図-3に移動平均画像と、図-4に通水後にレーザープロファイラで計測した堤体の形状を示す。裏のり尻を原点とし、横断距離は川表側に向かう方向を正とした。図-3と比較した結果、白波の濃い場所では堤体が切り立った形をしていることが確認された。このことから白波の濃淡と侵食される堤防の形状に関係性があることが示唆される。



図-1 過去実験における通水前の裏のり面の状況



図-2 過去実験における通水中の裏のり面の状況



図-3 移動平均画像

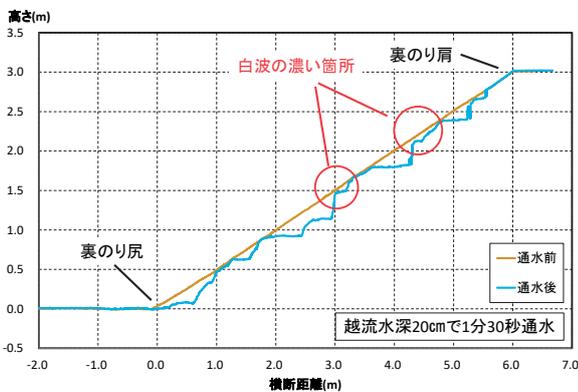


図-4 通水前後の堤体の状況

### 3. 学習データ取得のための水理模型実験

#### 3.1 実験模型の概要

AIによる画像解析に使用する学習データを取得するため、土堤の堤防模型を用いた越水実験（以下「土堤実験」という）を実施した。越流水によって堤体が侵食されることに伴い発生する白波の画像およびその時刻の堤体の形状を記録するため、堤防模型は越水後90分程度で堤防の裏のり面や天端面が侵食されるように、敢えて侵食されやすい堤防となるようにした。

図-5に土堤実験の堤防模型を示す。実験水路に縮尺1/5の堤防模型を製作した。堤防模型の寸法は、堤防高1m、幅6m、天端幅1mとし、のり面勾配を2割に設定した。堤体材料としては、一般的な築堤材料である粘性土を用い、締固め度を85%程度とし、予備実験により、侵食されやすい堤防模型となっていることを確認した。また、過去の越水実験から、堤防模型と水路壁との境界部は侵食されやすく、その侵食部に越流水が集中すると水路中央部ののり面の侵食が生じにくくなる傾向が見られる。そこで、水路壁面から幅1m程度の地盤高を15cmかさ上げし、壁際からの侵食を抑制した。

#### 3.2 実験方法、計測方法の概要

越流水深を裏のり面の侵食状況に応じて5cm、10cmを目安として徐々に大きくし、合計で90分程度通水した。なお、水の流れを止めることなく、堤防の侵食状況を確認するために、裏のり面、天端および裏のり尻に加速度センサやICタグ（以下「加速度センサ等」という）を埋設し、侵食に伴い流出した時間を記録した。これにより、白波の発生状況と堤防の侵食状況を照らし合わせることにした。加えて、ビデオカメラで実験状況を記録した。同様の条件で上記の実験を合計9回実施した。

#### 3.3 堤体形状の推定方法

図-6に越水開始から20分後、越流水深6.4cmの時の堤防模型の状況を示す。図-7に加速度センサ等から推定した越水開始から20分後の堤体形状を示す。図-7の堤体形状は、図-6の測線位置の断面の形状を示す。埋設されたままの加速度センサおよびICタグは橙色、流出したものは水色で示している。この流出状況と目視で観察された結果から実験後の堤体形状を推定し、赤の破線で示した。

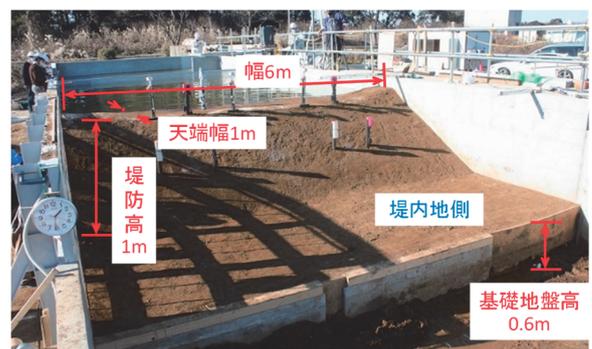


図-5 土堤実験に用いた堤防模型

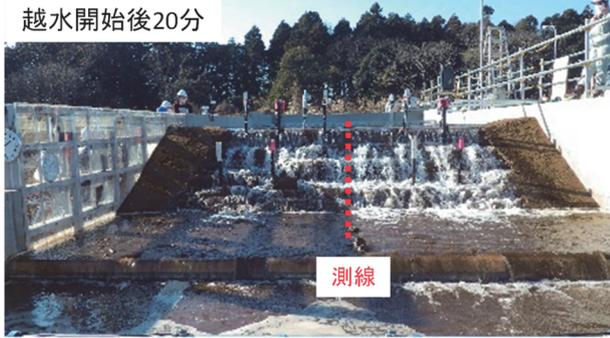


図-6 越水開始後20分後の堤防模型の様子

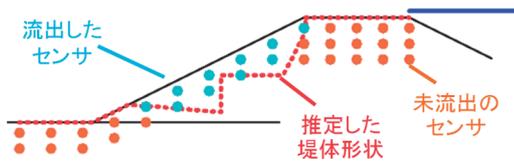


図-7 加速度センサ等の流出状況から推定した堤体形状

## 4. AIモデルの作成

### 4.1 白波の発生領域を検知するAIモデルの検討

2.より、白波と堤体の侵食状況に関係性があることが示唆された。そこで、白波の発生領域を自動で判別するAIモデル（以下「白波検知AI」という）を作成し、侵食範囲の推定を試みた。構築したAIモデルはピクセル毎に白波かどうかの判定を行う分類モデルである。学習データは3.で実施した実験の動画から作成した移動平均画像を学習の入力データとし、この画像を元に「白波」と「白波以外」にラベリングした画像を正解データ（図-8）とした。学習データは、合計540枚作成した。作成した学習データをモデル構築時の訓練データ（486枚）と、モデル検証用の検証データ（54枚）に分けた。

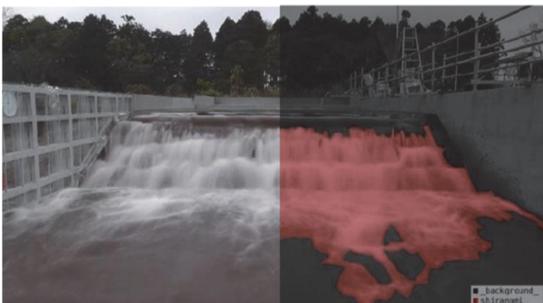


図-8 学習データの例（左：元画像、右：正解用画像）

### 4.2 白波の発生状況から堤防の形状を推定するAIモデルの検討

2.より、白波の濃淡と侵食される堤防の形状に関係があることが示唆された。そこで、堤防の侵食形状を推測するAIモデル（以下「侵食推定AI」

表-1 白波検知AIの検証結果

学習データ数		評価指標		
合計	訓練データ	正検知率	誤検知率	未検知率
	検証データ			
540	486	0.935	0.007	0.065
	54	0.901	0.013	0.099

という）を作成し、白波検知AIによって推定された侵食範囲における侵食程度の推定を試みた。構築したAIモデルは画像データから堤防の変位量を出力する回帰モデルである。学習データは、3.で実施した実験の動画から作成した移動平均画像から、センサ埋設測線上の切り出し画像（①越水前、②越水時）を作成し、入力データとした。また、センサの流出時間と目視の結果から③堤体の変位量（横断座標）を推定し、正解データとした。上記①～③の組み合わせを合計239セット作成した。訓練データは209セット、検証データは30セットとした。なお、データセットの作成間隔は5～30分間隔とした。

## 5. AIモデルの検証結果

### 5.1 白波検知AIモデルの検証結果

作成した白波検知AIモデルの検証結果を表-1に示す。モデルの精度検証には、正検知率（＝AIが正しく正解値と予測したピクセル数／正解値のピクセル数）、誤検知率（＝AIが誤って正解値と予測したピクセル数／不正解値のピクセル数）、未検知率（＝AIが誤って不正解値と予測したピクセル数／正解値のピクセル数）の3つの検知率を用いた。検証データの正検知率が0.901であり、9割を超えていることから、白波領域を高精度で検知できていることがわかる。一方で、人が被った白いヘルメットの動きを白波と誤検知してしまう場面や、日陰部分が未検知となる傾向も見られた。

### 5.2 侵食推定AIの検証結果

作成した侵食推定AIモデルの検証結果を表-2に示す。評価指標は、式(1)に示す2乗平均平方根誤差とし、その誤差は0.11mであった。すなわち、加速度センサ等から推定した堤防形状とAIにより推定した堤防形状では平均して10cm程度の誤差が生じたことを意味する。しかし、日陰部の影響が少ないなど、状況によっては、図-9に示す例

表-2 侵食推定AIの検証結果

学習データ数		評価指標
合計	訓練データ	RMSE (m) (2乗平均平方根誤差)
	検証データ	
239	209	0.02
	30	0.11

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - t_k)^2} \quad (1)$$

y: AIによる推定値 t: 実験値 n: データ数

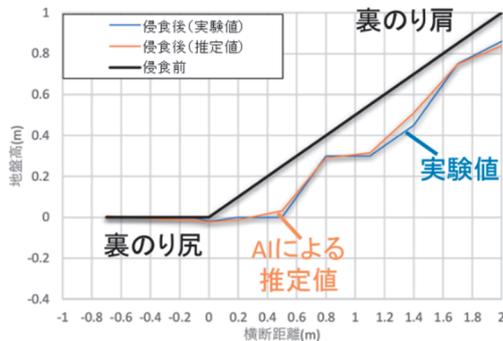


図-9 AIにより推定した堤体形状と加速度センサ等から推定した堤体形状 (実験値)

のように、AIにより堤防形状を良好に推定できる可能性が示された。

## 6. おわりに

本研究では、越流水により堤防が侵食される際に発生する白波と堤防の侵食程度の関係に着目し、AIを用いて越水時の画像から侵食された堤体形状を推定することを試みた。検証の結果、白波の発生領域を概ね良好に検知し、縮尺1/5の堤防模型においては10cm程度の誤差で堤体の形状を推定することができたことから、白波の発生状況か

ら堤体の侵食状況の推定の可能性が示唆された。

しかしながら、本検証は、天候が良好であったこと、堤防模型表面が土羽であったことなど、限られた条件での推定結果であり、現地の植生や護岸、樋門・樋管等の境界部、坂路等による裏のり面の流れへの影響にも注意しなければならない。実用化に向けては、気象や堤体の形状・表面などを変えた場合の検証も必要だと考えられる。

また、侵食の進行度合いと堤防の安全性の関係を考慮し、堤防の安全性に影響を与えるほどの侵食量の求め方や、それを踏まえた情報発信のタイミングの検討なども今後の課題である。

最後になるが、上記の検討に併せて越水や侵食に伴う河川堤防の変状を捉える検知システムの検証も行った。公募により選定した光ファイバや傾斜計などを用いた10の検知システムについて、同様の実験により検証を行った結果を国総研河川研究室のHP (<http://www.nilim.go.jp/lab/fbg/>)に掲載しているので、参照されたい。

## 参考文献

- 1) 都築幸乃、全邦釘、山根達郎：苦手タイプ改善型ディープラーニングを用いたアスファルト舗装のひび割れ自動検出、AI・データサイエンス論文集、第1巻、pp.168~179、2020。
- 2) 青島亘佐、山本拓海、中野聡、中村秀明：深層学習によるセグメンテーション手法を用いたコンクリート表面の変状領域の検出、AI・データサイエンス論文集、第1巻、pp.481~490、2020。
- 3) 山脇正嗣、上山晃、中村直人、木川堅司、石田孝司、谷保和則、吉崎皇淑：深層学習による活火山監視効率化に関する研究、土木学会論文集F3 (土木情報学)、第75巻、pp.22~29、2019。
- 4) 大石哲也、横山洋、島田友典、矢部浩規：CCTVを用いた画像解析による河岸・堤防侵食の変状検知とアラート発信に関する検討、寒地土木研究所月報、No.798、pp.18~24、2019。

三好朋宏



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室 主任研究官  
MIYOSHI Tomohiro

高橋亮丞



研究当時 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室 研究官、現 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課河川保全企画室 係長  
TAKAHASHI Ryosuke

福島雅紀



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室長、博士(工学)  
Dr. FUKUSHIMA Masaki