

分布型光ファイバセンサを用いた河川堤防モニタリング技術に関する実験的検討

—その1 ひずみ計測—

鹿島建設(株) 正会員 ○榎谷麻衣 永谷英基 川野健一 今井道男
山口大学 学生会員 中村仁美 正会員 森 啓年 佐古俊介

1. はじめに

河川堤防は、洪水リスク管理に不可欠な社会インフラであり、効率的なモニタリング技術を用いた維持管理への関心が高まっている。しかしながら、長大な河川堤防を縦断方向かつ連続的にモニタリング可能な技術は確立されていない。そこで近年、土木構造物などへの適用が進んでいる分布型光ファイバセンサ（以下、光ファイバ）に着目し、河川堤防モニタリングへの適用性を検討した。光ファイバによる計測では、レイリー計測と呼ばれる微小な静的ひずみ計測手法や、DAS（Distributed Acoustic Sensing）と呼ばれる振動計測手法が知られている。これらの計測手法では、光ファイバの延長方向に高分解能での計測が可能である。また、光ファイバは耐久性が高く安価であるため、長期にわたる現場計測や長大な構造物の計測に適しており、河川堤防のモニタリング技術としての親和性が高いと考えられる。筆者らは河川堤防の越水とそれに伴う侵食を対象に、光ファイバを埋設した模型実験を実施した。本稿では、レイリー計測による静的ひずみの計測結果を報告する。

2. 分布型光ファイバセンシング

光ファイバによる計測は、捉える散乱光の種類によりいくつかの計測方式¹⁾があり、それぞれに対応するアナライザと呼ばれる計測器を光ファイバに接続して計測する。本実験で採用したレイリー計測では、近年では最小分解能 2cm、計測間隔 1cm で計測可能なアナライザも製造されている。これは、光ファイバ延長方向 1cm 毎に、それを中心とした±1cm 区間（計 2cm 区間）に生じたひずみの平均値を出力できることを意味している。

3. 試験方法

堤体材料には 6 号珪砂と木節粘土を乾燥質量比 8:2 で混合したものを用いた。堤体は一層 2.5~5.0cm 毎に、締固め度 $D_c=95\%$ となるように水平地盤を作製後、切り出して整形した。図-1 に模型寸法とセンサー配置を示す。レイリー計測用の光ファイバは堤防縦断方向に埋設し、計測線-1~8 とした。また、計測線-1, 2 の中央、および貯水槽内に熱電対を埋設、設置した。上流側には貯水槽と四角堰を設置し、下流端にも堰を設置し、越流水を排水した。

試験手順を表-1 に示す。堤体に生じるひずみを段階的に計測するため、継続時間 10sec の越水を 3 回繰り返したのち（Step3~5）、光ファイバが露出するまで越水を継続し（Step6）、各ステップの前後でひずみ計測を実施した。ここでは、分解能 10cm、計測間隔 5cm とした。給水設備の事前検定から、越流量 $Q=33.9\text{L}/\text{min}$ 、越流水深 $h=1.3\text{cm}$ であった。また $x=0\text{cm}$ を中心として、±5cm 間隔で堤体表面の高さの変化をレーザー変位計で計測した。併せて動画撮影を行い、越水状況とそれに伴う侵食・堆積状況を観察した。

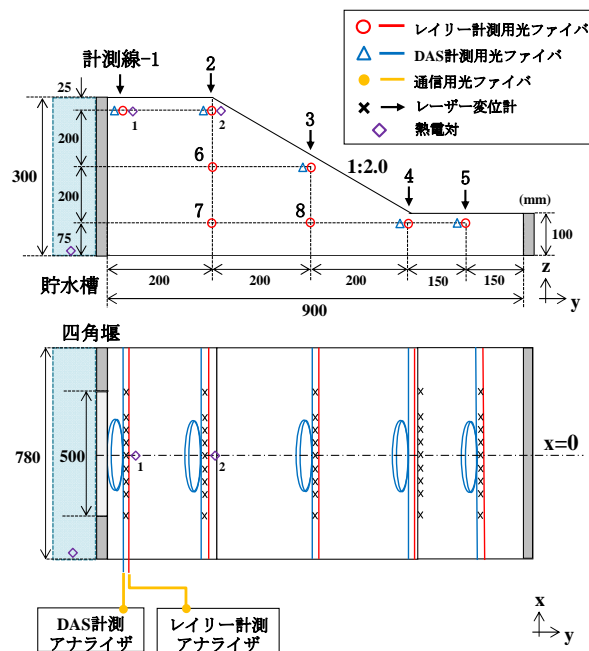


図-1 模型寸法とセンサー配置
(上段：断面図 下段：平面図)

表-1 試験手順

Step	手順	備考
Step1	初期状態	—
Step2	貯水	水位 $H=0 \rightarrow 30\text{cm}$
Step3~5	越水①~③	継続時間 10sec
Step6	越水④	継続時間 60sec

キーワード 河川堤防, モニタリング, 越水, ひずみ, 分布型光ファイバセンサ

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株) 技術研究所 TEL 042-485-1111

4. 試験結果

1) 侵食・堆積状況

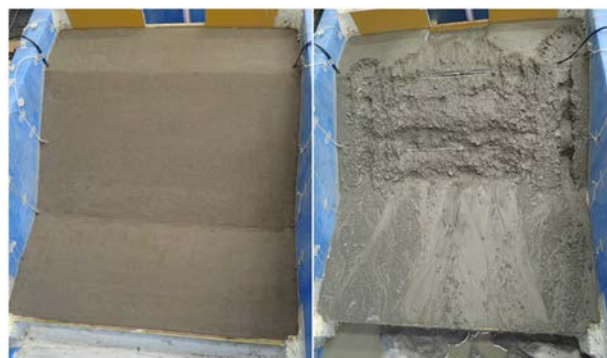
図-2 に試験前後の侵食・堆積状況を示す。越水が進行するにつれて、法肩から法面にかけて侵食され、Step6 越水④時では計測線-2 および3 で光ファイバが露出した。斜面下部から法先にかけては、土砂が面的に広がり堆積した。

2) 堤体の侵食・堆積深と光ファイバのひずみ計測結果

堤体の侵食・堆積深および光ファイバで計測したひずみの結果を図-3 に示す。なお、ひずみは引張を正とする。法肩の

計測線-2 では、水位上昇後引張ひずみが生じ (Step2), 越水とそれに伴う侵食の進行に伴い引張ひずみが増加した (Step3~6)。

対照的に法先の計測線-4 では、土砂の堆積に伴い圧縮ひずみが進行した。これらの結果より、堤防に生じた数 mm 程度の侵食や堆積に伴う地中応力の変化を、縦断方向に埋設した光ファイバの計測によって、微小なひずみの変化の分布としてとらえられることが示された。しかし法面の計測線-3 では、光ファイバ露出後に計測不良が発生したことから、急激な変状への追従性が課題であるといえる。



Step1 初期状態 Step6 越水④後

図-2 侵食・堆積状況

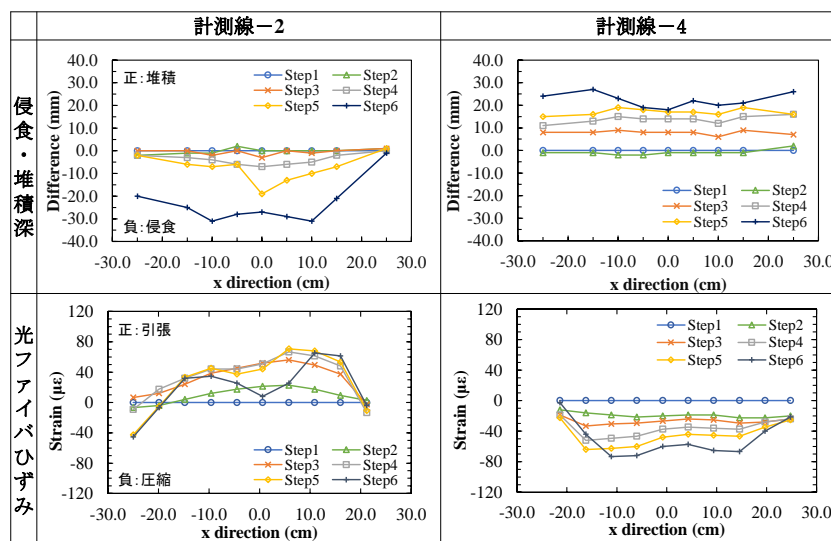


図-3 鉛直変位および光ファイバひずみ計測結果

3) 光ファイバで計測したひずみへの温度変化の影響

図-4 に熱電対で計測した堤体内の温度変化を示す。天端に設置した熱電対-1 では、越水開始後も温度変化はほぼ生じなかった一方で、法肩に設置した熱電対-2 では、Step6 越水④時に露出して越流水に接したため、貯水槽の温度に漸近した。このとき、図-3 に示した計測線-2, Step6 のひずみは、熱電対-2 設置付近 ($x=0.0\text{cm}$) で圧縮側に移行した。レイリー計測によるひずみは、後方散乱光の周波数差分から算出しており、ここには物理的な伸縮による成分と、温度変化による成分が含まれる。河川堤防などの土構造物の変形挙動は、堤体内の水分状態と密接に関係していることから、光ファイバで計測したひずみから、急激な越流水の流入等に伴う温度変化成分の抽出・分離処理が必要であると考えられる。

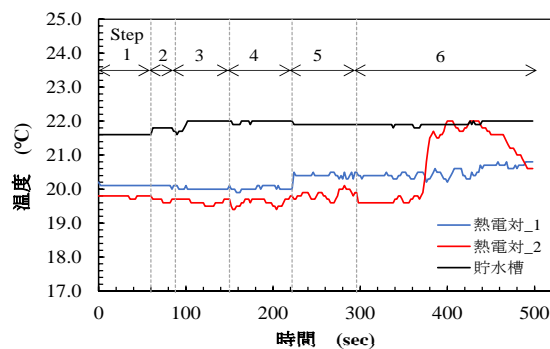


図-4 堤体内の温度変化

5. まとめ

河川堤防の模型実験を実施し、越水によって堤体に生じるひずみを、分布型光ファイバセンサを用いて計測した。本結果から、水位上昇や越水に伴う侵食により発生する微小ひずみを延長方向に高精度で計測できることがわかった。このことから、分布型光ファイバセンサは河川堤防の挙動を監視するシステムとしての適用性が高いと考えられる。これらのひずみ計測結果の妥当性の検証には、応力解析との比較が必要であり、引き続き検討を進める所存である。

参考文献

- 1) 今井道男, 青鹿弘行, 吉村雄一, 川端淳一, 永谷英基: レイリー散乱光を用いた分布型光ファイバセンサの基礎検討, 第76回土木学会年次学術講演会概要集, CS9-50, 2021.