

河川管理用光ファイバ歪み・変位センサおよび湿潤度分布センサの検討
Optical Fiber Strain & Displacement Sensor and Soil Moistness Sensor for River Management

山本 哲* 福地圭介** 菱田康之*** 海野 修司****
By Satoshi YAMAMOTO*, Keisuke FUKUCHI**, Yasuyuki HISHIDA***, Shuji UNNO****

1.はじめに

河川管理施設は流域に分散し、一般にその施設情報の収集は職員などによる定期的な点検及び巡視によっている。特に、堤防はその延長が極めて長く、さらに堤体内部の土質構成が複雑であることから、本来管理上有効な項目である内部の水の動き、これに伴う堤体そのものの動きは、日常・非常時の巡視員の経験による目視点検に頼っているのが現状である。このため、河川全体の常時監視が困難、豪雨・夜間などの危険作業に伴う、地震などの広域災害時の情報収集が困難、等の問題がある。

一方、河川管理の高度化を目的に、流域に光ファイバネットワークの構築が進められようとしている。光ファイバには一般に用いられている情報伝送機能の他、光ファイバ自体が各種物理項目を直接計測できるセンサとしての機能も持っている。光ファイバの低損失性、耐電磁誘導性を生かし、また、各種光学的効果により、従来のセンサでは実現できなかったセンシングも可能となっている。例えば、長さ方向の歪み分布計測 ①や温度分布計測 ②を行う手法が確立されている。

これらのセンシング機能および情報伝送機能を河川管理に適用できれば、堤防を含めた河川施設の予防保全を含め、利用価値は高いと予想される。しかし、これまでに河川で必要な計測項目を光ファイバを用いて計測する技術は確立されていない。そこで、河川管理に必要な計測項目を光ファイバセンサを用いて実現するための基本検討を行った。

2.河川管理用センサの測定項目及び所用精度

光ファイバセンサには分布測定ができるという長所があり、この点を生かせ、かつ、河川管理に有益な計測項目を抽出した結果を表 1 に示す。

堤防決壊の予知や、地震が起きた後の異常箇所早期発見を行うために、堤防長手方向の歪み・変位分布を測定することが有効と考えられる。決壊予知には、堤体断面方向の数 mm 程度の変位を検知する必要があり、また、異常箇所の発見を行うためには短時間で広範囲の堤防を監視できることが重要であり、地震発生後数 10 分程度で異常の発見ができると有効と考えられる。

従来、堤体内の水位（水飽和状態のレベル）によ

表 1 河川管理用光ファイバセンサの所用性能

目的	計測項目	計測範囲	所用精度	備考
堤防崩壊予兆検出	堤防長手方向の歪み、変位分布	・断面方向の数 cm 程度の変位 ・長さ方向 10km 程度	数 mm (断面方向変位)	
堤防の異常箇所発見（地震時等）	堤防長手方向の歪み、変位分布	・断面方向の数 10cm 程度の変位 ・長さ方向 10km 程度	数 cm (断面方向変位)	計測時間：数 10 分程度
堤体内部への降雨・河川水の浸透状況把握	堤体垂直方向の湿潤度分布	・湿潤度：0%～飽和レベル ・深さ：～8m	・飽和、不飽和の区別が可能 ・±10%程度	

keywords:河川計画、防災計画

* 正会員 工修 日立電線(株)オートシステム研究所第3部 研究員
** 同上 研究員
*** 同上 研究員
**** (財)河川情報センター河川情報研究所研究第2部 部長

*,**,***〒319-1414 茨城県日立市日高町 5-1-1
TEL0294-25-3836、FAX0294-43-8355
**** 〒102-8474 東京都千代田区麹町 1-3
TEL03-3239-3221、FAX02-3239-8174

り堤体の管理が行われてきた。しかし、堤体内部への降雨・河川水の浸透による不飽和状態の計測も行えば、堤体強度変化の予知を行える可能性もある。飽和レベルまでの湿潤度を 10%程度の精度で深さ方向の分布として計測できれば、利用価値が高いと考えられる。

3.歪み・変位分布計測

3.1 歪み分布測定方法

堤防の歪みや変位の長手方向の分布を計測するために、光ファイバの歪み分布を計測することのできる計測装置¹⁾を利用することを考えた。表 2 に示すように、20km 以上の距離に亘り、2m 毎に 0.02%の精度で歪み分布を測定可能である。この測定器を用い、光ファイバを堤防に沿って埋設することにより、堤防の断面方向の歪みや変位を計測することができる。

表 2 光ファイバ歪み分布計測装置の性能例

項 目	仕 様
歪み測定範囲	3%
距離分解能	2m
歪み測定精度	±0.02%
測定距離	約 27km(光ファイバの損失による)

3.2 歪み・変位センサの実装方法と測定性能

光ファイバケーブルの寸法が小さく、また、長さ方向に引っ張り力を受けるため、堤体内に単に埋設しただけでは、光ファイバケーブルが土砂の移動に追従しない可能性がある。そこで、一定間隔(x_0)で錘を取り付けて埋設することとした(図 1)。土砂の移動に伴って錘が d だけ断面方向に移動し、光ファイバケーブルに引っ張り歪み(x_1/x_0)が発生する。断面方向変位分解能は、歪み分解能が 0.02%、錘取り付け間隔が 2m の場合、4cm となる。将来、歪み測定分解能が向上すれば、さらに小さな変位が計測可能となる。

表 3 歪み・変位分布測定の実験性能

項目	性能、等
断面方向変位検出分解能	4cm
長手方向距離分解能	2m(錘取付間隔による)

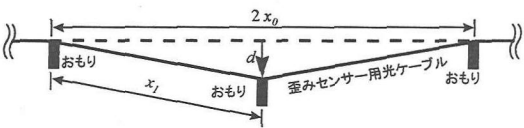


図 1 歪み・変位センサの実装方法

3.3 模擬堤防での実験方法

模擬堤防を用いて歪み・変位分布センサの検出特性評価を行った(図 2)。2m 間隔で質量 10kg の錘を取り付けた光ファイバケーブルを幅 20m、高さ 3m 法面の傾斜角 27° の模擬堤防に、法尻から 3m の距離に深さ 50cm で埋設した。約 12 時間の人工降雨の後、貯水部に 2.2m 深さの湛水を行い、そのまま放置して堤防中に水を浸漬させた。模擬堤防を構築した土壌は、実験時間短縮のため砂質土を用いた。堤体内への水の浸漬状態を把握する目的で、法尻からの距離に対する堤体内水位を別途計測した。センサ用光ファイバケーブルには、図 3 に示した溝付きスぺーサに光ファイバ心線を複合した構造のものをを用いた。テンションメンバの強度を通常の光ファイバケーブルの約 1/10 と弱くして土壌の移動に追従しやすくした。

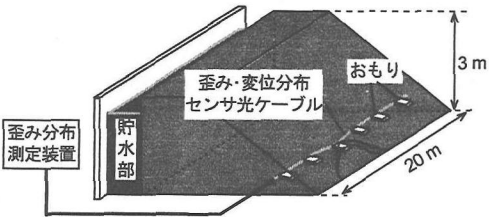


図 2 歪み・変位センサ計測系

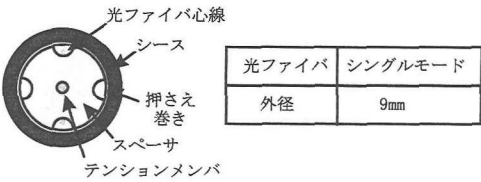


図 3 歪み・変位センサ用光ファイバケーブル

3.4 模擬堤防崩壊実験結果

実感開始後 34 時間頃に光ファイバケーブル埋設位置の約 1m 下の部分が深さ 30cm 程度崩壊し、45 時間後に埋設位置まで崩壊が進行した(図 4)。

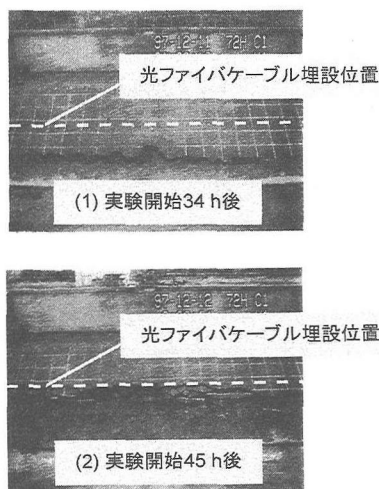


図4 模擬堤防崩壊状況

20 時間後から 48 時間後までに計測した光ファイバの歪み分布を図 5 に示す。44 時間後以降、歪みが印加されている様子が明確に読み取ることができ、ケーブル埋設部分近傍の土壌が崩落すれば、容易に検知可能であることが分かった。

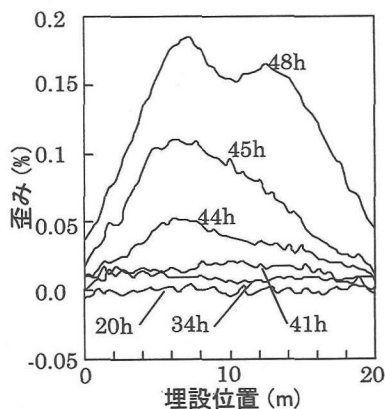


図5 距離方向の歪み分布

7m 地点の 50 時間までの歪み経時変化を堤体内水位データと共に図 6 に示す。ケーブル埋設部付近の崩壊が始まっていない 32~40 時間にかけて歪みが変動していることが観測される。このとき、法尻から 1.5m の位置の水位が変動しており、ケーブル埋設位置の水位が埋設深さまで到達(水位 1m)した頃から変動が始まっている。これらのことから、ケーブル埋設位置の崩壊に先立ち、堤体内の水位変化に起因してケーブルの歪み変化が生じて検出された

ものと考えられる。ケーブルを法尻近傍に配置することで、崩壊の予兆を検出できる可能性がある。

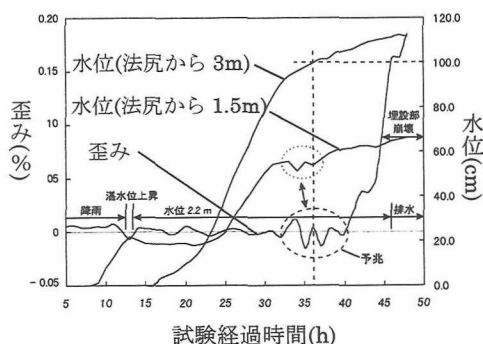


図6 歪み及び堤体内水位の経時変化

4. 湿度分布計測

4.1 湿度分布測定法

堤体内土壌に含まれる水分量によって、土の熱容量が異なる。そのため、所定熱量で加熱した場合、湿度が高くなると温度上昇幅が小さくなり、この関係から土壌の湿度を求めることができる。一方、光ファイバの温度分布を計測する装置²⁾が実用化されている(表 4)。ヒータ複合光ファイバケーブルを用いて、ヒータ加熱時の温度を温度分布計測装置で計測することにより、その温度変化から光ファイバに沿った各部の湿度が算出できる。ヒータ複合光ファイバを円筒に螺旋状に巻き付けて円筒を堤体内に垂直に設置することにより垂直方向の湿度分布を計測することができる。

土中の含水比は、一般に(1)式であらわされる。湿度の定義として、この含水比を用いた。

$$\text{湿度} = \text{含水比} = \frac{\text{土壌質量} - \text{乾燥土壌質量}}{\text{乾燥土壌質量}} \times 100 \quad (1)$$

表4 光ファイバ温度分布計測装置の性能例

項目	仕様
温度測定範囲	-200~500℃
距離分解能	1m
温度測定精度	±1℃
測定距離	2km

4.2 構造および測定性能

センサの構造例を図 7 に示す。直径 170mm の塩化ビニール製の筒に外径 4mm のヒータ複合光ファ

イバケーブルを 6mm ピッチで巻き付けた。このケーブルは、金属管で被覆した光ファイバに絶縁層を施したものを用いた。金属管に通電することにより発熱させてヒータの役割をさせた。

光ファイバ式温度分布センサの距離分解能（約 1m）と、円筒 1 周あたりの光ファイバ長、及び、巻き付けピッチから垂直方向の分解能を求めると約±1cm となる。したがって、垂直方向の湿潤度、及び、浸潤線を±1cm 程度の分解能で測定できることになる（表 5）。

表 5 湿潤度分布センサの測定性能

項目	性能、等
湿潤度	±10%
垂直方向分解能	±10mm
計測範囲	0～3400mm（センサ長による）

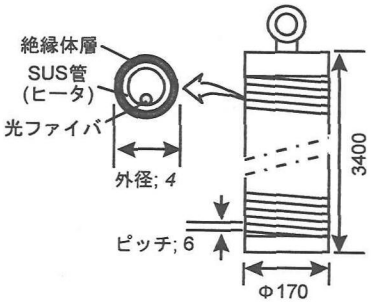


図 7 湿潤度分布計測センサの構造

4.3 模擬堤防での実験方法

模擬堤防での実験方法を図 8 に示す。模擬堤防の構造、降雨等の実験条件は歪み・変位センサと同じである。センサ部は、ヒータで 1 時間加熱し、その後 1 時間自然冷却するサイクルを繰り返し、この間、約 1 分間隔で温度分布測定を行った。

4.4 模擬堤防での実験結果

加熱冷却サイクルでの加熱開始直前の温度分布測定結果を図 9 に示す。今回の実験に用いた土壌で温度変化幅と湿潤度の関係の評価した結果に基づいて算出した湿潤度レベルを同図中に示した。水の浸漬に伴う、堤体高さ方向の湿潤度変化の様子を捕らえることができた（実験に用いた土壌の飽和レベルは約 40%）。

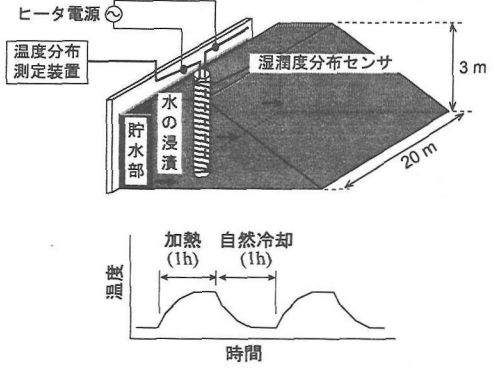


図 8 湿潤度分布センサの模擬堤防での実験方法

5. おわりに

河川管理用に光ファイバセンサを応用することを考え、堤防の歪み変位分布測定、及び、堤体内土壌の高さ方向湿潤度分布測定システムを考案すると共に、模擬堤防を用いてこれらのセンサの検出性能の評価を行った。歪み変位分布センサでは、堤防崩壊の予兆と見られる歪み変化を検出し、また、崩壊に伴い明確な歪み変化を捕らえることができた。湿潤度分布センサでは、堤体への水の浸漬に伴う堤体内の高さ方向湿潤度分布を計測することができた。

今後、実堤防への適用を考慮した改良を行い、河川管理に役立つセンサとして実用化したい。

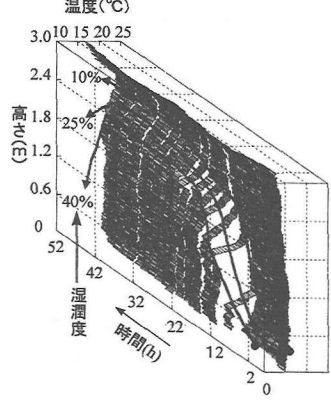


図 9 堤体内高さ方向湿潤度分布測定結果

参考文献

- 1) 光ファイバ歪み/損失分布測定器、安藤電気（株）カタログ、1997
- 2) 小川、他、光ファイバ温度レーダの開発、日立電線、9、pp.7-12、1990