

ダム基礎処理工における光ファイバを用いた岩盤の開口亀裂の挙動計測

Measurement of Crack Opening of Rock Mass for Dam Grouting by Distributed Fiber Optic Strain Sensing

小 泉 悠 黒 川 紗 季 升 元 一 彦
今 井 道 男 川 端 淳 一¹⁾ 宮 石 雅 子

要 約

ダム工事では、堤体下における岩盤の亀裂にセメントミルクを注入し、岩盤の止水性を向上させる基礎処理工が施工される。しかし、注入圧力の適正な管理が行われない場合、注入に伴う開口亀裂の拡大（目開き）が発生し、止水性の確保が困難となる。従来、目開きによる変位計測技術として、岩盤変位計が用いられてきたが、計測精度に加えて目開きの発生箇所が特定できないという課題があった。そこで、センサケーブル上のひずみ分布を測定できる光ファイバ計測技術の導入に着手した。はじめに、室内および現場で目開きを再現した計測試験を行い、使用するセンサケーブルや充填材の仕様を定め、高い計測精度を確認した。さらに本計測技術をダム現場に適用し、その有効性が確認できたので、ここに報告する。

目 次

- I. はじめに
- II. 光ファイバによる目開きひずみの計測コンセプト
- III. 室内での目開きひずみの計測精度検証試験
- IV. 現場での目開きひずみの計測検証試験
- V. ダム現場での注入に伴う目開きひずみの計測実績
- VI. まとめ

I. はじめに

ダム工事では、堤体下における岩盤の亀裂にセメントミルクを注入し、岩盤の止水性を向上させる基礎処理工が施工される。しかしながら、適正な施工管理が行われずに注入圧力が過大となった場合、注入の形態が浸透型から割裂型へと変化することで、開口亀裂の拡大（以下、目開きと呼ぶ）が発生し、基礎処理工の効率低下や止水性の品質低下の原因となる。このような過大な注入圧力によって発生する目開きを計測する従来技術として、岩盤変位計が挙げられるが、計測されるのは、Fig.1 に示すように不動孔と変動孔間の2点間の累積変位であり、目開きの発生箇所が特定できないという課題があった。

そこで、著者らは光ファイバによる分布型ひずみ計測技術

2), 3)に着目した。本計測技術では、光ファイバ中を伝搬する光の後方散乱光を解析することで、センサケーブル沿いのひずみ分布が計測できる。従来、光ファイバによるひずみ計測では、ブリルアン散乱光の周波数変化に着目する方式が主流であったが、ここでは、より高いひずみの計測精度と、よりシャープな空間分解能（計測データが代表する計測位置前後の空間範囲）での計測を実現するレイリー散乱光に着目する方式⁴⁾を採用した。今井ら⁵⁾は、光ファイバを接着した角パイプに強制変位を与える実験により、ブリルアン方式に比較して、レイリー方式でのひずみの計測精度が著しく高いことを示している。

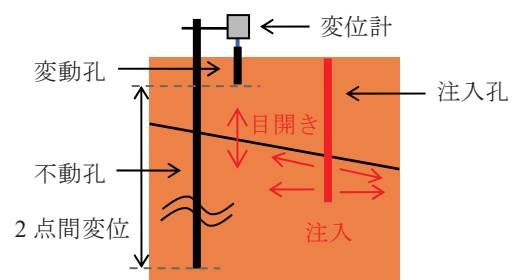


Fig.1 岩盤変位計による目開き計測
(Displacement Measurement of Crack Opening
by Conventional Method)

1) 土木管理本部 Civil Engineering Management Division

キーワード : 光ファイバ, 分布型ひずみ計測, ダム, 注入, 亀裂, 目開き

Keywords : optical fiber, distributed strain sensing, dam, grouting, crack, opening

本報では、ダム工事において、注入に伴って発生し得る岩盤の目開きを計測すべく、はじめに光ファイバによる目開きひずみの計測コンセプトを決定した。そして、室内および現場において、目開きの再現試験を行い、使用するセンサケーブルや注入材の仕様を定め、その計測精度を検証した。それらを踏まえ、ダム現場において注入に伴う目開きを計測したので、ここに報告する。

II. 光ファイバによる目開きひずみの計測コンセプト

注入に伴う目開きの分布を計測するため、Fig.2 に示す計測コンセプトを考案した。つまり、注入孔の下流側に計測孔を削孔し、光ファイバケーブルを設置した後、充填材によって岩盤と一体化させる。注入時に限界圧力を超える過大な圧力で注入が行われた場合、岩盤が目開きし、これに追従して充填材が伸びると想定される。このようにして、岩盤から光ファイバケーブル、光ファイバ素線へと伝播する引張ひずみを計測できると考えた。

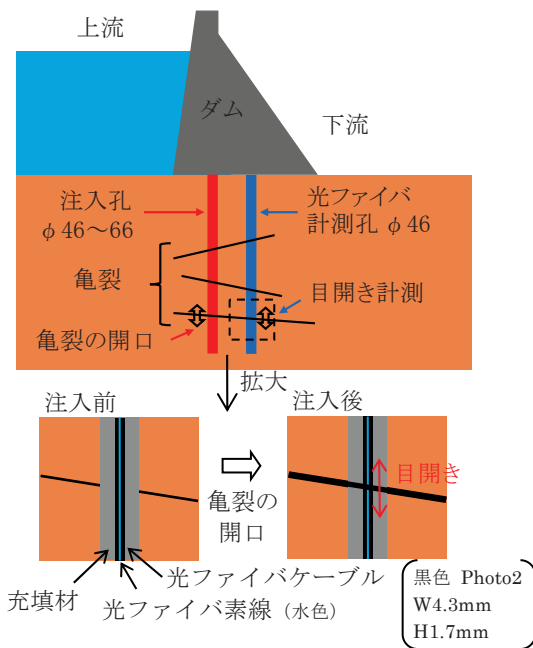


Fig.2 光ファイバによる目開き計測のコンセプト
(Concept of Displacement Measurement of Crack Opening by Distributed Fiber Optic Strain Sensing)

III. 室内での目開きひずみの計測精度検証試験

前述した計測コンセプトの有効性の検証をする上で、充填材～光ファイバケーブル～光ファイバ素線間の引張ひずみの追従性を確認する必要があると考え、目開き計測の室内模擬試験を実施した。製作した試験装置および試験状況をPhoto 1に示す。計測孔を模擬した塩ビ管 (内径 65mm) に選定した光ファイバケーブル (Photo 2) を設置し、セメントベ

ントナイトで充填した。充填材の要求仕様として、岩盤の目開きを拘束しない程度に低強度、低剛性である必要があると考えられた。強度試験およびブリージング試験により配合を勘案し、セメント量 540kg/m³ (水セメント比 150%) のセメントベントナイトとした。Fig.3 に、上下パーツを強制的に分離することで目開きを再現し、その時の光ファイバのひずみ分布を示す。このひずみ分布を距離で積分することで得られた目開き変位は 0.018mm であり、ダイヤルゲージで直接計測した 0.020mm とよく整合した。複数の計測結果からも同様の整合が得られており、充填材～光ファイバケーブル～光ファイバ素線間の良好な引張ひずみ追従性が確認された。なお、ここで例示した目開き試験は、セメントベントナイト

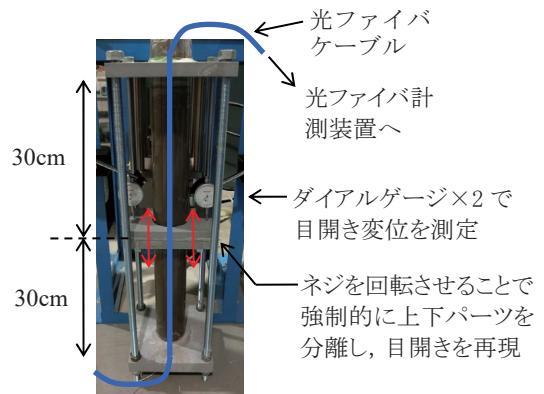


Photo 1 目開きを模擬した室内試験状況
(Laboratory Measurement Test for Simulating Crack Opening)

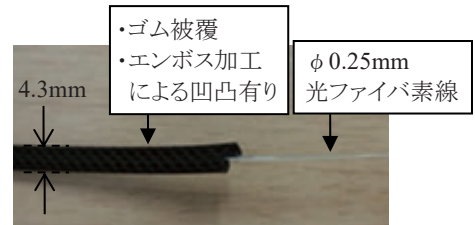


Photo 2 使用した光ファイバケーブル
(Used Optical Fiber Cable)

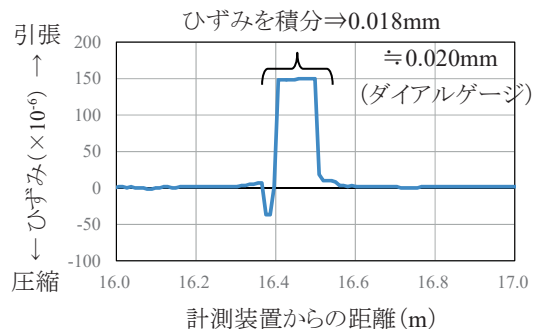


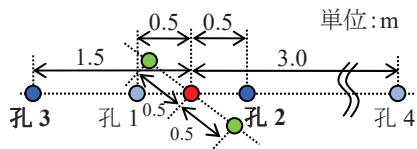
Fig.3 目開き位置での引張りひずみ分布
(Distribution of Tensile Strain at Location of Crack Opening)

の打設翌日に実施し、セメントベントナイトの一軸圧縮強さ（材齢 1 日）は 1.0N/mm^2 であった。

IV. 現場での目開きひずみの計測検証試験

(1) 強制目開き試験の孔レイアウト

室内試験に続き、現場においても目開きを再現し、それに伴うひずみを計測する試験（強制目開き試験と呼ぶ）を実施した。強制目開き試験の孔配置を Fig.4 に示す。中央の注入孔（図中赤色）に対し、離隔が 0.5m, 1.5m, 3.0m となる位置に計測孔 1~4 を削孔した。孔の深度はいずれも 30m とした (Fig.5)。光ファイバケーブルは錘を取り付けて沈降させた後、前章で検証したセメントベントナイトで孔を充填し、岩盤と一体化させた (Photo 3 および Photo 4)。また、注入孔から離隔 0.5m の位置に、比較のため、既存の計測技術である岩盤変位計を設置した。約 2 週間後、深度 10~30m にかけて、1 ステージ長を 5m とした注水およびセメントミルクの注入を 1 ステージ/日で計 4 ステージ行い、光ファイバケーブル沿いのひずみ分布の変化を計測した。



凡例:

- : 注入孔
- : 光 F 計測孔 (本報で結果掲載)
- : 光 F 計測孔 (本報で結果非掲載)
- : 岩盤変位計

Fig.4 注入孔および光ファイバ計測孔の配置 (平面図)

(Layout of Injection Hole and Measurement Holes for Ffiber Optic Sensing (plan view))

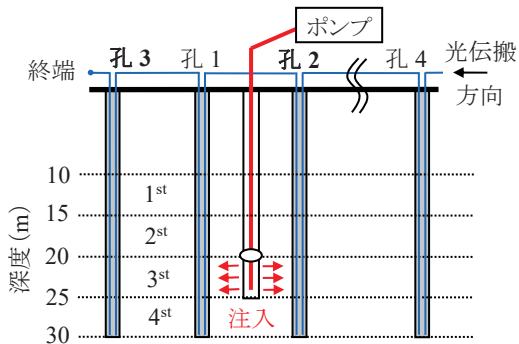


Fig.5 注入孔および光ファイバ計測孔の配置 (縦断図, ステージ 3 注入状況)

(Layout of Injection Hole and Measurement Holes for Fiber Optic Sensing (cross sectional view))

(2) 目開きに伴うひずみ分布の計測結果

Fig.6 に、ステージ 3 における注水およびセメントミルク注入の注入圧力と流量の経時グラフ、計測孔 2 および 3 のいずれも深度 20.1m におけるひずみの経時変化を示す。同図より、午前の注水#1 に伴い、計測孔 2 および 3 でひずみの増大が認められた。注水量が供給の限界となる 70l/min に達して注水を終了した際、ひずみが急減した。このとき計測孔 2 で 7.3μ 、計測孔 3 で 4.5μ の残留ひずみが認められた。なお、岩盤のルジオン値は 14.9Lu と比較的高透水であった。

次に、セメントミルク（水セメント比 200%）の注入を行ったところ、10:48 に注入圧力の急減と流量の増大が生じ、目開きの発生が認められた。ただし、このとき検知されたひずみの増加は、計測孔 2 で 1.7μ 、計測孔 3 で 4.1μ のみであった。この要因として、発生した目開きが計測孔 2 や 3 の方向に進展しなかった可能性が考えられる。

午後に注水#2 を行ったところ、14:30 に注入圧力の急減と流量の増大が生じ、再度目開きの発生が認められた。このとき、計測孔 2 で 35μ 、計測孔 3 で 29μ のひずみの急増が計測された。また、目開きの発生より 30 分ほど前（14 時頃）からひずみの増加が認められ、目開き発生の前兆を示していたものと考えられる。つまり、本計測技術によりひずみの増

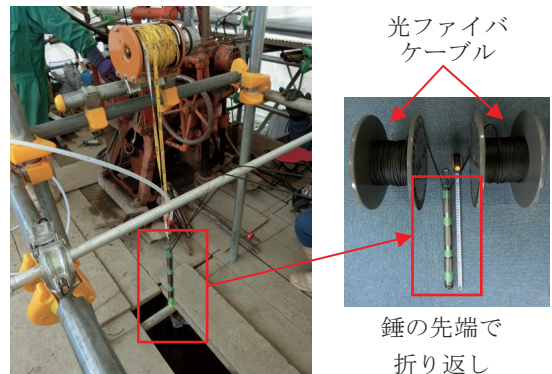


Photo 3 光ファイバケーブルの沈降状況 (Optical Fiber Cable Placed in Borehole)



Photo 4 セメントベントナイトによる光ファイバ計測孔の充填状況 (Cement-Bentonite Grout Filled for Borehole)

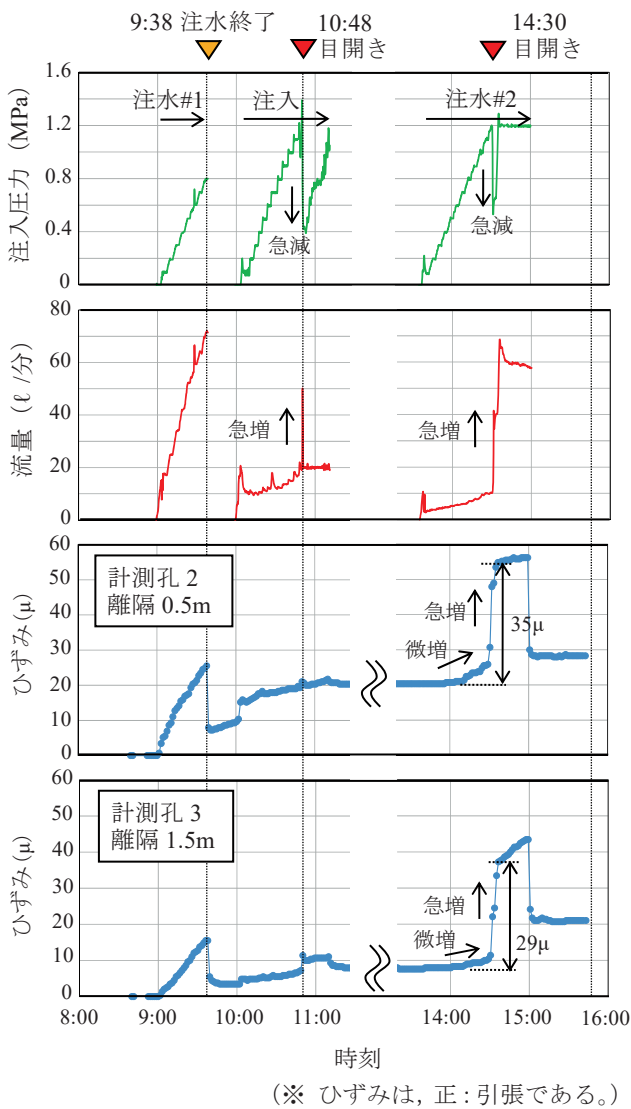


Fig.6 注入圧力、流量およびひずみの経時変化
(Transition of Injection Pressure, Flow Rate and Tensile Strain)

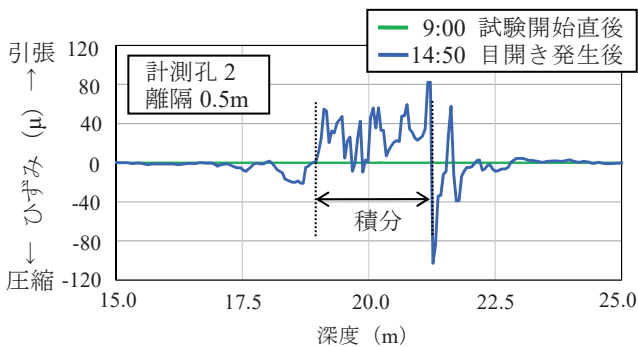


Fig.7 目開き発生深度付近でのひずみ分布
(Distribution of Strain at Location of Crack Opening)

加を捉えることで、目開きの発生を事前に予測し、目開きが発生しないよう、注入圧力を低下させるといった対策が可能であることが示された。

さらに、計測孔 2 の深度 15~25m におけるひずみ分布を Fig.7 に示す。注水#2 での目開き発生後のひずみ分布を、図中に示す引張ひずみの卓越区間で積分した結果、算定された目開き変位量は 0.069mm であった。なお、計測孔 2 の近傍に岩盤変位計を設置したが、目開きの発生とは無関係に計測誤差程度の変位が計測された程度で、有意なデータは得られなかった。

以上、光ファイバを用いた分布型ひずみ計測技術の高い計測精度と、距離情報から目開きの発生位置が特定できる利点 が示された。

V. ダム現場での注入に伴う目開きひずみの計測実績

建設中のダム現場のカーテングラウチングの施工に合わせ、本技術の現場適用試験を行った。計測孔は、注入孔から下流側へ 50cm 離れた位置に、外径 $\phi 46\text{mm}$ のビットを用い、注入孔と同深度である 70m まで削孔した。光ファイバケーブルは、前述した室内および現場試験で使用したものと同一で、本試験では錘の先端で光ファイバケーブルを折り返すことなく、設置が容易な片端計測とした。この際、終端での光の反射を抑制するため、光ファイバ素線の終端部を油分に浸す処理を施した (Photo 5)。その他作業としては、前述した現場試験と同様に先端に錘を取り付けて沈降させた (Photo

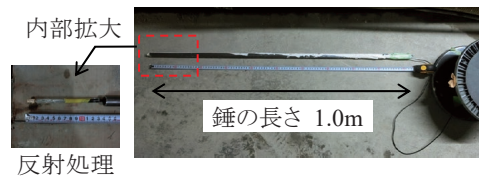


Photo 5 光ファイバケーブルの先端錘部
(Sinker of Optical Fiber Cable)

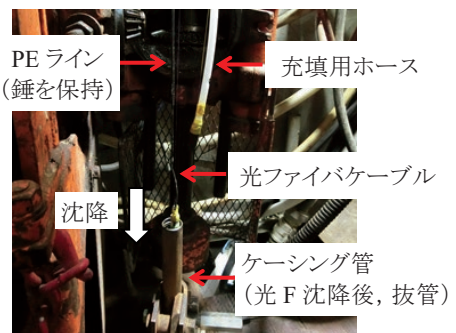


Photo 6 光ファイバケーブルおよび
充填用ホース
(Optical Fiber Cable and Injection Hose)

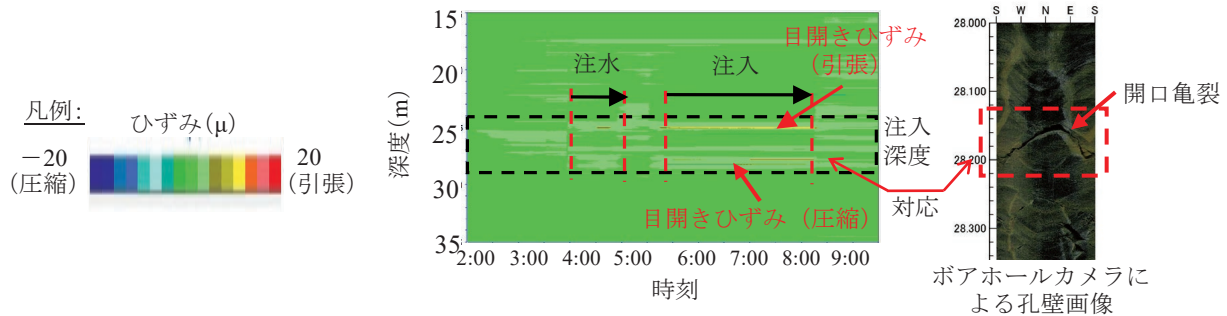


Fig.8 目開きひずみの計測結果の一例
(Example of Measured Strain by Crack Opening)

6). 孔の充填は、セメントベントナイトのブリージングやそれに伴う強度・剛性のばらつきを抑制すべく、孔底より充填用ホースをゆっくりと引き揚げながら実施した。なお、本試験では片端計測を行ったが、維持管理段階においてカーテンライン全体を計測する場合、多数の孔に光ファイバケーブルを設置する必要性が生じ得る。同時計測が可能な計測機付属のチャンネル数は4Chであり、光スイッチを接続するにしても上限がある。このため、片端のみならず、光ファイバケーブルを孔底で折り返す設置方法の確立について、今後、取り組む所存である。

計測パラメータは、計測距離間隔5cm、空間分解能10cm、計測時間間隔1分とし、連続計測を行った。注水およびセメントミルク注入時のひずみに関し、計測結果の一例をFig.8に示す。同図に示すように、注水および注入を行ったステージと同深度で、引張および圧縮のひずみが計測された。なお、ひずみが検出された深度では、事前に実施したボアホールカメラによる孔壁画像において開口亀裂(Fig.8)が観察されており、この亀裂が開口した可能性が考えられた。計測されたひずみは、局所的に最大 10μ 程度を確認した。これは、Fig.8で示した結果以外にも同様であり、仮に 10μ のひずみが1mにわたったとしても、その目開き変位は 0.01mm と算定される。これは、本現場の管理基準値 $0.1\sim 0.2\text{mm}$ の $1/10$ 以下であり、岩盤の止水性に悪影響を及ぼす目開きを発生させることなく、注入が実施されたことが示された。今後、施工管理へのフィードバックがより容易となるような表示システムの改善を進めていく予定である。

VI. まとめ

ダム工事における基礎処理工の施工管理法を高度化すべく、本開発では、光ファイバによる分布型ひずみ計測技術の導入に取り組んだ。はじめに、従来の計測技術である岩盤変位計では2点間の累積変位しか計測できないといった現状の課題を整理した。これに対し、光ファイバ計測技術による目開きひずみの計測コンセプトを提示し、岩盤のひずみ分布を高精度に取得し、目開きの発生量と位置まで計測できると

想定した。目開きを模擬した室内試験により、適切なセンサーケーブルおよび充填材の仕様を定め、本技術によるひずみの計測精度の高さを示した。次に、現場にて強制的に目開きを発生させる試験を実施し、目開きに伴う 30μ 程度のひずみの急増を捉え、さらに目開きの発生30分前からひずみが増加したことから、目開きの予兆が捉えられることを確認した。最後に、ダム現場における基礎処理工に本計測技術を適用した。その結果、潜在的に亀裂が存在した深度で、注入に伴って 10μ 程度の微小なひずみの発生が認められるという妥当な計測結果が得られた。

以上より、光ファイバ計測を適用することで、目開きの予兆が捉えられることからその発生が抑制でき、ダムの基礎処理工の効率や止水性の品質が向上できると考えられる。また、仮に目開きが発生したとしても、目開きの発生位置が特定できることから、追加注入により止水性を保証できると考えられる。また、時間経過とともに絶縁抵抗性を失い計測不能となる従来の電気式計器に対し、光ファイバは長期耐久性に優れる。施工時に岩盤内に埋設した光ファイバは、湛水試験時や維持管理段階においても、漏水の有無やその発生箇所の検知、また地震等発災後の迅速な点検等に活用できると考えられる。これらダムのライフサイクルにおいて、光ファイバを有効に活用すべく、光ファイバケーブルの岩盤への実装方法や計測方法、計測結果の表示方法等、実用化に向けてさらなる改善を進めていく所存である。

謝 辞

本開発を実施するに当たり、鹿島建設株式会社 東北支店の奈須野恭伸氏、松本信也氏から、ダム工事の基礎処理工に関する現状の課題とニーズについて助言を頂いた。また、現場での計測試験を行うに当たり、鹿島建設株式会社 九州支店の小原隆志氏に現場での工程調整にご協力頂いた。感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 地盤工学会；薬液注入工法の理論・設計・施工，2009.

- 2) 光防災センシング振興協会；光ファイバセンサ入門，
2012. ハイブリッド分布測定システムの開発，電子情報通信学
会 信学技報，Vol.112，No.403，2013，pp.37-42.
- 3) Cedric Kechavarzi et al.；Distributed Fibre Optic Strain
Sensing for Monitoring Civil Infrastructure，Cambridge
Centre for Smart Infrastructure & Construction，2016. 5) 今井道男ら；高精度光ファイバセンサを用いたひずみ・
変位計測の検証実験，土木学会全国大会 第75回年次学
術講演会，2020，pp.CS9-27-28.
- 4) 岸田欣増ら；SMF におけるひずみと温度が識別できる

Measurement of Crack Opening of Rock Mass for Dam Grouting by Distributed Fiber Optic Strain Sensing

*Yu Koizumi, Saki Kurokawa, Kazuhiko Masumoto, Michio Imai,
Junichi Kawabata¹⁾ and Masako Miyaishi*

At a dam construction site, cement grout is injected into the cracks of the rock mass under a dam to decrease the permeability of the ground. If the injection work is done poorly, such as with excessive injection pressure, however, the permeability of the ground could increase due to further opening of the cracks. In order to prevent such crack opening, conventionally, the ground displacement is measured by a displacement meter, but this has the disadvantage that the depth where the crack opening occurs is unknown. Therefore, we are developing a new measurement method to detect crack opening by distributed fiber optic strain sensing. We conducted laboratory and field experiments where we intentionally produced crack openings to evaluate the accuracy of our proposed measurement method. As a result, the increase of strain due to crack openings was measured with high accuracy. It was also found that subtle increases of strain were measured before the crack openings occurred, which indicated that such opening could be avoided. We applied our method to a dam construction site, and showed that measurement using optical fiber sensors would efficiently improve the quality of dam grouting.