

港湾空港技術研究所 資料

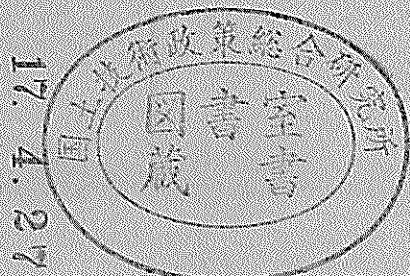
TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1095 March 2005

ケーソン中詰砂の流出監視へのBOTDRの応用

藤田 勇

独立行政法人 港湾空港技術研究所
Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan



目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 測定原理	4
3. ケーソン中詰砂の流出監視模型実験	6
4. 光ファイバの長期信頼性に関する考察	14
5. まとめ	17
参考文献	17

An Application of BOTDR to Real Time Observation of Sand Leakage from Caisson

Isamu FUJITA*

Synopsis

This article discusses an application of optical fiber sensing to observation or diagnosis of structural facilities in ports or coastal areas. A BOTDR (Brillouin Optical-Fiber Time Domain Reflectometer) has been applied to real time observation of sand leakage from the inside of caissons on trial. Experiments with a small model of caisson have been conducted for verifying whether the BOTDR is a realistic measure for such a need. In the experiments, three types of the fiber sensor were employed. This paper includes the principle of the BOTDR, experimental descriptions as well as a theoretical analysis on the long-term reliability of the optical fiber sensor.

Key Words: BOTDR, long term reliability,

* Senior Research Engineer, Construction and Control System Division
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5065 Fax : +81-46-844-0575 e-mail:fujita@pari.go.jp

ケーソン中詰砂の流出監視への BOTDR の応用

藤田 勇*

要 旨

光ファイバセンサを港湾構造物等のリアルタイム計測や診断に用いることを目的として、BOTDR (Brillouin Optical-Fiber Time Domain Reflectometer) により、ケーソン中詰砂の流出のリアルタイム計測を試みた。実験では、ケーソンに見立てた小型のモデルを用いBOTDRにより中詰砂の流出がモニターできることを確認した。実験では3種類の形状について検証した。本資料では、BOTDRの測定原理、実験の内容および実際に光ファイバセンシングを長期間行う上で注意すべき光ファイバの破断確率に関する理論解析について述べる。

* 施工・制御技術部 主任研究官
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所
電話：046-844-5065 FAX：046-844-0575 e-mail:fujita@pari.go.jp

1. まえがき

光ファイバは現在高速データ通信用の媒体として広く普及しているが、一方各種物理量の計測用デバイスとしての潜在的ポテンシャルも高い[1][2]。光ファイバは線材形状をしていることから空間的に広い範囲の物理量分布の常時計測監視に適している。また光ファイバの素材は化学的に安定な石英ガラスであり信頼性が高く一旦敷設してしまえば長期間の使用が可能で経済的にも優れている。光ファイバによる物理量測定としては、ラマン散乱光におけるストークス光と反ストークス光の散乱強度の差にもとづいた温度計測がある。また歪計測用としては、光ファイバにマイクロベンドを発生させることで変化するレイリー散乱を利用したもの、ブリルアン散乱光を利用したBOTDAやBOTDR、あるいは局所的に光ファイバ長手方向に屈折率の異なる細かい縞を複数形成し、そこで反射する光の波長を計測するファイバグレーチングなどが知られている。

こうした光ファイバの優れた特性を港湾や海岸などの構造物の維持管理や診断に活用するのが本研究の目的である。本研究ではその一例として、原子間距離によって変化するブリルアン散乱光シフトから光ファイバの歪を計測するBOTDRを用いた応用システムの構築を試みる。ここでは具体的な事例としてケーソン内部の中詰め砂の流出モニタシステムを考える。ケーソン内部にあらかじめ光ファイバ歪センサを張っておくことで、ケーソン上部のコンクリートスラブを撤去あるいは穴を空けることなく内部に詰められた砂の移動を常時監視でき、中詰め砂の流出に伴う事故を未然に防ぐことができるシステムである。このようなシステムに適した光ファイバ歪センサのセンサ形状に関して3通りの試作を行い、模型実験を通して各方式の特性と実用化への可能性を調査した。

さらに光ファイバセンサを長期間連続使用する上では光ファイバの寿命特性を十分に把握しておく必要がある。一般的に光ファイバの材質としては石英ガラスが用いられており、応力腐食を伴う脆性材的な振る舞いをする。特に応力負荷状態で使用されることが多い光ファイバセンサの場合長期信頼性は重要である。そのため本資料に応力負荷状態におかれた光ファイバの破断確率に関して理論的な考察を加えた。

2. 測定原理

2.1 ブリルアン散乱

ここではBOTDRを用いた光ファイバ歪計測の原理を解説する。図-1に示すように媒質中に周波数 ν_0 の光が入射すると媒質を構成している原子や電子との相互作用により幾つかの散乱光が発生する。散乱光は発生のメカニズムにより波長や強度が異なる。入射光が媒質中で弾性的に反射されることにより発生するレイリー散乱光、媒質を構成している物質の格子振動との相互作用に起因するラマン散乱光及びブリルアン散乱光などがある。レイリー散乱では散乱光は入射光と同じ周波数を持つ。一方ラマン散乱及びブリルアン散乱においては、散乱光の周波数は入射光の周波数と異なり、そのずれを各々ラマン周波数シフト、ブリルアン周波数シフトと称する。ラマン散乱とブリルアン散乱は、格子振動即ちフォノンによる光の散乱と解され、ラマン散乱は光学フォノンによるものであり、またブリルアン散乱は音響フォノンによるものである。波長 $1.3\mu\text{m}$ (約 200THz)の光を入射させた場合、ラマン周波数シフトは十数THz程度であり、一方ブリルアン周波数シフトは十数GHzである。ブリルアン周波数シフトを利用すると媒質に生じている歪を計測することができる。ブリルアン散乱光の特徴は入射光の周波数と散乱光の周波数の差が媒質の屈折率によって変化することで、周波数のシフト ν_B は

$$\nu_B = \frac{2nV_a}{\lambda} \quad (1)$$

と与えられる。ここで n は光ファイバの屈折率、 V_a は媒質中の音速、 λ は入射光の波長である。この式は超音波進行波によるドップラー効果と考えて導くこともできる。媒質の屈折率は媒質の歪によって変化するのでブリルア

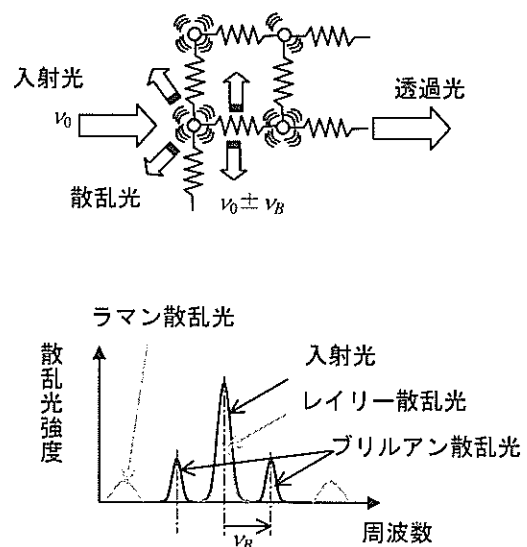


図-1 光ファイバ中の散乱光

ン散乱光の周波数シフト量 ν_B を計測すれば、上の式より屈折率 n が求まる。さらに歪と屈折率の関係から歪が、また物質のヤング率が既知であれば、応力を求めることが可能となる。実際には音速や屈折率を求めることなく、歪が生じている場合の Brillouin 周波数シフト $\nu_B(\epsilon)$ と歪の間の線形関係式を仮定して

$$\nu_B(\epsilon) = \nu_B(0)(1 + C\epsilon) \quad (2)$$

により歪を求めるのが一般的である。ここで $\nu_B(0)$ は歪のない状態での Brillouin 周波数シフト、 ϵ は歪量、 C は比例係数である。

2.2 BOTDR

Brillouin 周波数シフトを計測する方法としては光ファイバ中を対向伝搬するポンプパルス光とプローブ CW 光間の Brillouin 光増幅を利用した対向型歪分布測定である BOTDA (Brillouin Optical-Fiber Time Domain

Analysis) [3] や本研究で用いる BOTDR [4] などがある。BOTDR は Brillouin Optical Time Domain Reflectometer の略であり、後方散乱された自然 Brillouin 散乱光を検出する手法である。BOTDA ではファイバの両端に高い安定性を有した周波数安定化光源を必要とするのに対し、BOTDR ではファイバの片端のみに光源を設置すれば良く運用上有利である。ここでは BOTDR の動作原理の概要を説明する。

図-2 に BOTDR の基本構成と信号波形を示す。BOTDR では、基準光源の発する周波数 ν_0 のパルス光を光周波数シフタにより周波数を ν_s ずらし、 $\nu_0 + \nu_s$ のパルス光に変換し被測定ファイバの片端から入射する。ファイバ内で後方散乱された光を周波数 ν_0 の参照光と合波しコヒーレント検波回路に導く。Brillouin 散乱光は入射パルス光に対して Brillouin 周波数シフト ν_B 分ずれているので入射パルス光 $\nu_0 + \nu_s$ と参照光 ν_0 の周波数差に Brillouin

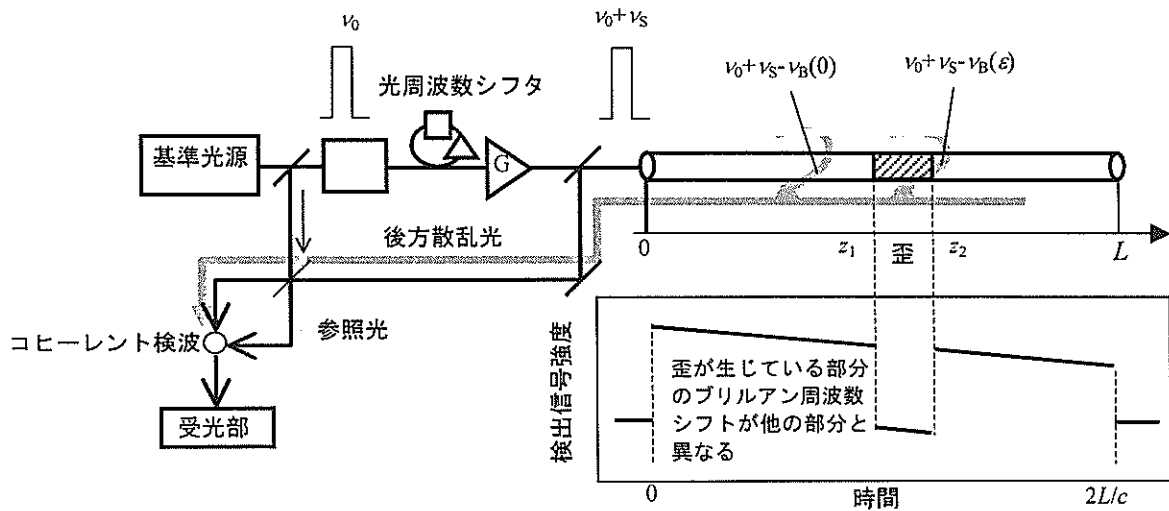


図-2 BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer) の基本構成

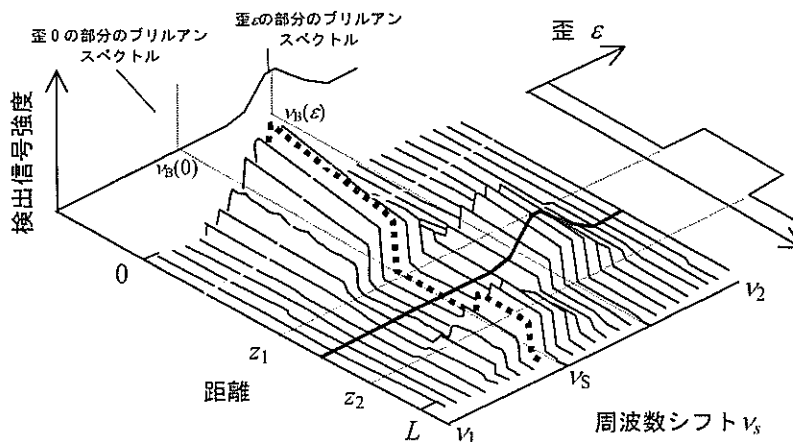
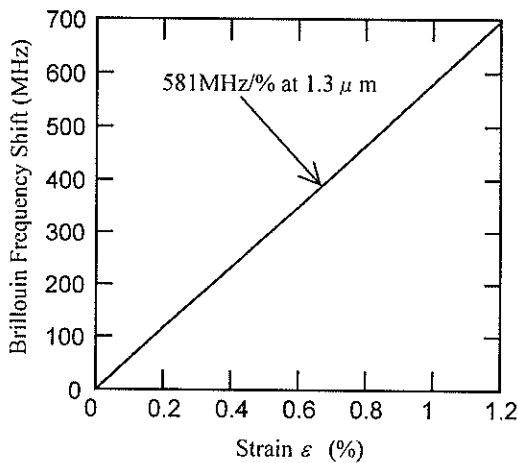


図-3. BOTDR における Brillouin 散乱光のスペクトル

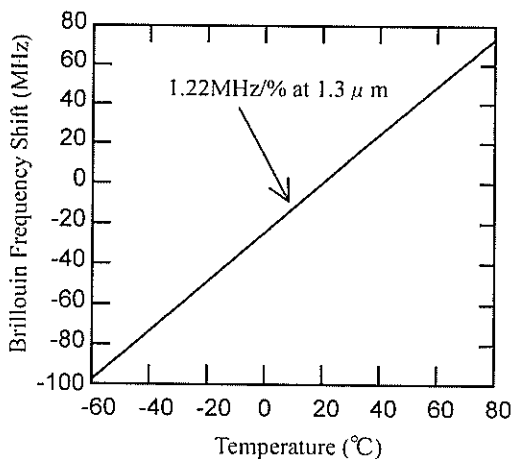
ン周波数シフト ν_B が合致した場合、大きな検波出力が得られる。今図-2においてシフト周波数 ν_B が歪の無い部分の Brillouin 散乱周波数に一致している場合を仮定すると、ファイバの長手方向で ε_1 から ε_2 の区間を除く部分で大きな検波信号が得られる一方、 ε_1 から ε_2 の区間では信号が小さくなる。次に周波数シフトによりファイバへの入射光の周波数を掃引することで、 Brillouin 散乱光のスペクトラムを取得できる。その様子を図-3に模式的に示す。今区間 $[Z_1, Z_2]$ に歪が加わっておりそれ以外の区間には歪は無いと仮定する。周波数シフト ν_B を一つ定めて Brillouin 後方散乱光を測定すると、被測定ファイバの各部分から戻ってくる後方散乱光の分布として破線で

表されるような Brillouin 散乱光のファイバ長手方向の強度分布が一本の線として得られる。周波数シフト量を ν_1 から ν_2 まで離散的に掃引し、各々の周波数についてファイバ長手方向の散乱光の強度分布を測ることで図のような3次元的な分布が得られる。今度は特定な位置に着目して周波数シフト量と散乱光強度の関係を調べる。一つの地点についてガウス分布状の Brillouin 散乱光スペクトルが得られ、そのピークの周波数を Brillouin 周波数シフトとする。今の場合区間 $[Z_1, Z_2]$ では周波数シフトは $\nu_B(\varepsilon)$ であり、他の部分の $\nu_B(0)$ と異なる値を示している。これは区間 $[Z_1, Z_2]$ には歪が生じているためであり、歪の値は前述の式(2)により求めることができる。

Brillouin 周波数シフトは波長 $1.3 \mu\text{m}$ 帯の光に対しては $\pm 13\text{GHz}$ 、 $1.55 \mu\text{m}$ 帯では $\pm 10.9\text{GHz}$ 程度である。 Brillouin 周波数シフトの変化は歪と温度に依存しており、その変化は図-4に示すようにおおそ比例している。また比例係数は入射する光の波長にも依存する。入射光の波長が $1.3 \mu\text{m}$ と $1.55 \mu\text{m}$ の場合には表1のようになる。0.1%の歪を温度変化が 10°C 程度変動する環境下で測定する場合を想定すると、温度変動に由来する周波数シフトは 12MHz 、一方歪に起因する周波数シフトの変化量は 58MHz となるので、20%程度の誤差を許す用途であれば温度補正無しでも歪測定が可能である。精度を要求する計測監視であれば、当然温度補正等が必要になる。



(a) Brillouin 周波数シフトの歪依存性



(b) Brillouin 周波数シフトの温度依存性

図-4 Brillouin 周波数シフトの歪/温度依存性

3. ケーソン中詰砂の流出監視模型実験

3.1 実験方法

実験の手法を以下に示す。ケーソンにみため試験槽に砂を入れ、砂の上面あるいは内部に光ファイバセンサを敷設する。敷設状態での Brillouin 散乱スペクトルを取得した後、試験槽内部の砂を容器下部より徐々に抜き Brillouin 散乱スペクトルの変化を計測した。散乱スペクトルの変化より光ファイバ歪センサに生じる歪を計算し、ぬけていく砂のモニタが可能であるかどうかを評価

表-1 Brillouin 周波数シフトの変化量 (UV 被覆ファイバ)

	1.3 μm	1.55 μm
温度依存性 $\frac{\partial \nu_B}{\partial T}$	1.22MHz/ $^\circ\text{C}$	1MHz/ $^\circ\text{C}$
歪依存性 $\frac{\partial \nu_B}{\partial \varepsilon}$	581MHz/%	493MHz/%

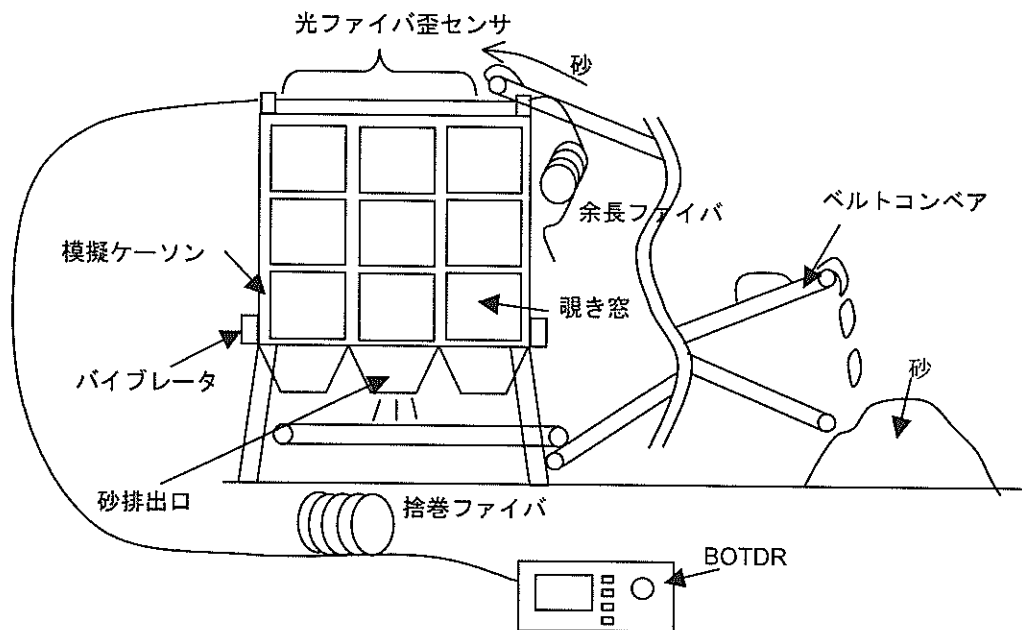


図-5. 実験装置の全体構成

した。試験装置の概要を図-5に示す。また、試験槽、使用した光ファイバ及びBOTDRの諸元を表2に示す。光ファイバは図-6に示すように、光ファイバ芯線をインコロイ製のチューブで被覆したものを用いた。被覆管は1m間隔でかしめてあり、光ファイバ芯線と被覆管がずれるのを防いでいる。光ファイバ芯線には予め0.3~0.4%の引っ張り歪が与えられている。

砂流出監視センサは光ファイバ歪センサと砂の動きを光ファイバに伝える仕組みとからなる。本研究では3種類の中詰砂監視センサを試作し実験を行った。以下で各セ

ンサの概要を示す。

被覆管内部では光ファイバ芯線に0.3~0.5%の引張歪が予め与えられている。

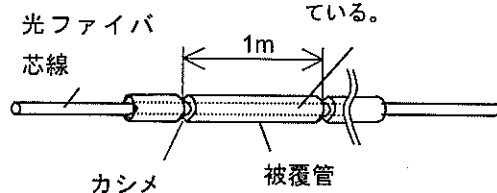


図-6 光ファイバセンサの構造

表-2 実験装置諸元

構成要素	緒元
試験槽	寸法：巾2000mm×奥行800mm×高さ2000mm 前面窓：透明塩化ビニル板 砂流出口：試験槽下部3箇所
センサ	金属管入り光ファイバ：日鐵溶接工業(株)製 ピコストレインセンサ 構造：図-6参照 光ファイバ：UV硬化樹脂被覆1.3μm用シングルモードファイバ 被覆管材質：インコロイ 被覆管寸法：外径2.0mm 肉厚0.2mm 負余長率：0.3~0.5% カシメ間隔：1m
測定機	BOTDR：安藤電気(株)製 AQ8602B 外観：図-7参照 歪測定精度：±0.03% 距離分解能：1m

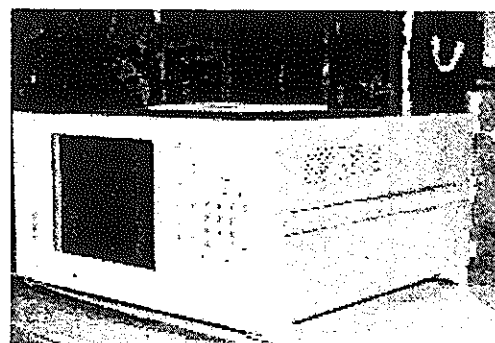


図-7 BOTDRの外観

A型センサ (図-8参照)

光ファイバを試験槽上部に設置し、砂表面に配した平面状ウエイトと光ファイバをスプリング機構により接続した。今回、平面状ウエイトを光ファイバに500mmピッチで3ヶ所吊り下げた (1452g)。

B型センサ (図-9参照)

A型センサと同様に光ファイバを試験槽上部に設置し、ウエイト216g、5個を250mmピッチで取り付け付けたワイヤを砂中に埋設し、最上部を光ファイバと接続した。(500mmピッチ3箇所)。

C型センサ (図-10参照)

ゴムシート (1500mm×200mm) 2枚で中心に光ファイバを挟み込んだもので (3セット)、砂面の - 300mm、- 600mm、- 900mmの位置に埋設した。

次にセンサ布設および試験要領を示す。それぞれの砂面流出監視センサを、砂を入れた試験槽に設置し、槽下部に設けた3ヶ所の排出口より砂を断続的に排出させて砂面を変化させた。砂およびセンサの動きは試験槽前面の透明塩化ビニル板を介して目視で観察するとともに砂

面の位置を槽上部よりコンベックスで測定した。A,B及びCの各センサに特有の事項については以下に従った。

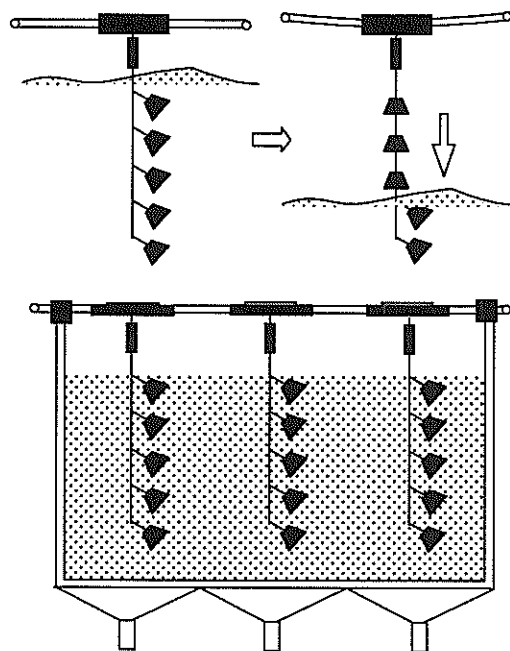


図-9 B型センサ構造概要

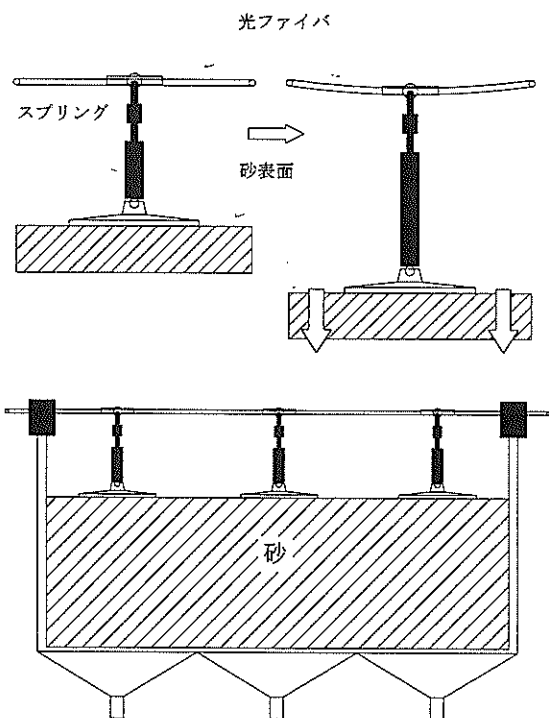


図-8 A型センサの構造概要

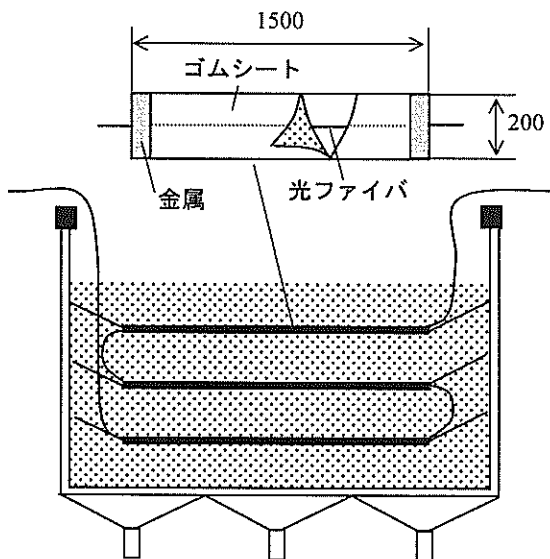


図-10 C型センサの構造概要

A型センサによる歪測定

1. 試験槽の上端60cmまで砂を入れ、光ファイバ、ばね、ウェイトをセットした。この状態にてBOTDRで歪を測定し、これを無負荷時の値（初期値）とした。
2. 試験槽の砂排出口を開き、砂を25cm降下させてBOTDRにて測定した。
3. 同様に砂を降下させ、-50cm、-110cmの状態にて測定した。
4. さらに砂を排出し、ベースが宙吊りになった状態で測定した。

B型センサによる歪測定

1. センサアームを試験槽上部に取り付け、シャコ万力にてウェイト付ワイヤをセンサアームに仮固定した。
2. ウェイト付ワイヤを埋設しながら、A型センサの時と同様に、順次、砂を試験槽内へ投入し試験槽の上面から60cmの高さ（最上部のウェイトが砂で隠れる）まで砂を満たした。
3. ウェイト付ワイヤを光ファイバに固定し、この状態にてBOTDRで歪を測定する。これを無負荷時の値（初期値）とした。
4. 試験槽の排出口を開き、砂を抜きながら砂面を降下

させ、順次BOTDRにて測定をおこなった。

5. 最終的にウェイト付ワイヤが宙吊りになる状態で測定した。

C型センサによる歪測定

1. A型センサの時と同様に、試験槽内へ砂を詰めてゆき、試験槽の上面から150cmの高さまで砂を満たし、1枚目のシート状センサを砂表面上にセットした。
2. シート状センサの上から、さらに砂を投入し、試験槽の上面から120cmの高さまで砂を満たし2枚目のシート状センサを1枚目と同様にセットした。さらに試験槽の上面から90cmの高さまで砂を満たし、3枚のシート状センサを1、2枚目と同様にセットした。
3. さらに砂を投入し試験槽の上端から60cmの高さまで砂を満たした。
4. 各光ファイバセンサをコネクタにて接続し、この状態にてBOTDRで歪を測定し、これを無負荷時の値（初期値）とした。
5. 試験槽の排出口を開き、砂を抜きながら砂面を降下させ、順次BOTDRにて測定した。
6. 最終的にセンサが露出し、宙吊りになるまで砂を抜いて測定した。

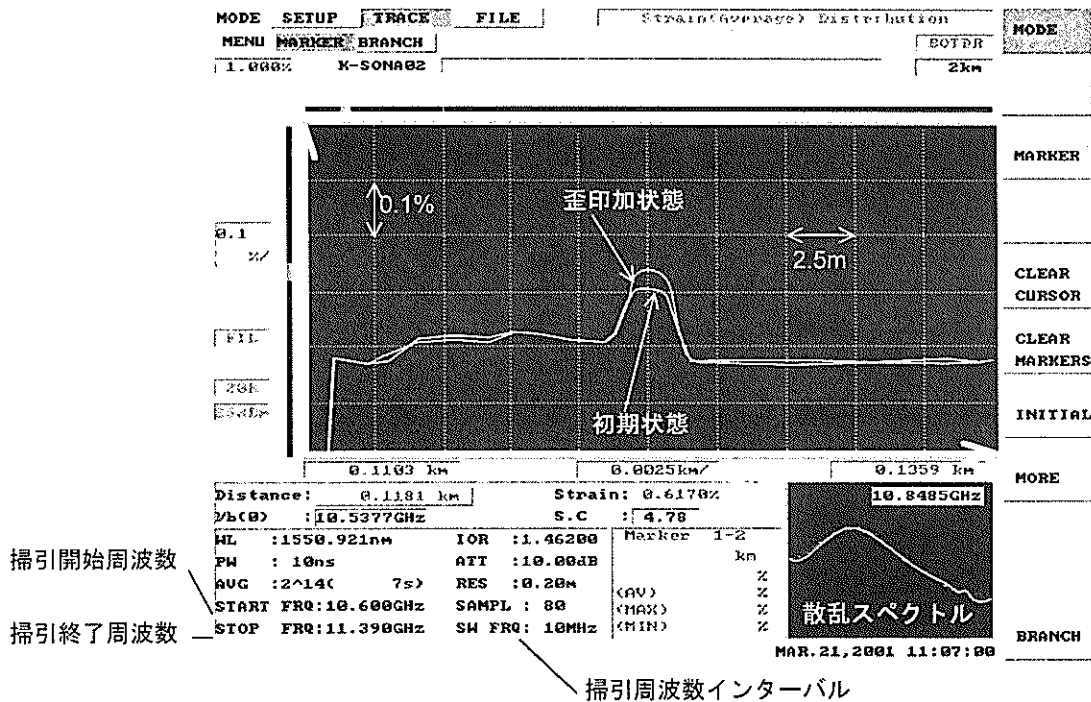


図-11 BOTDR の計測画面

3.2 実験結果と考察

各センサによるケーソン内部の砂流出監視実験の結果を述べる。

A型センサ

BOTDRの計測画面の一例を図-11に示す。横軸がファイバ長手方向の位置を示し、縦軸は歪を示している。図ではセンサ敷設直後の初期状態と、ある程度砂を抜いた時

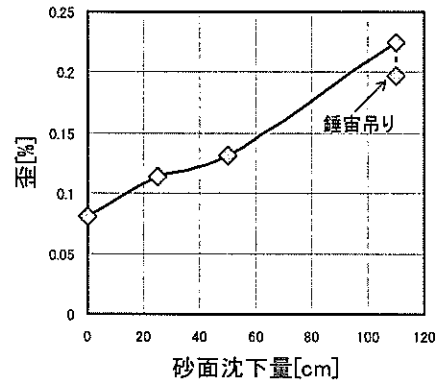


図-13 A型センサにおける砂面沈下量と歪の関係

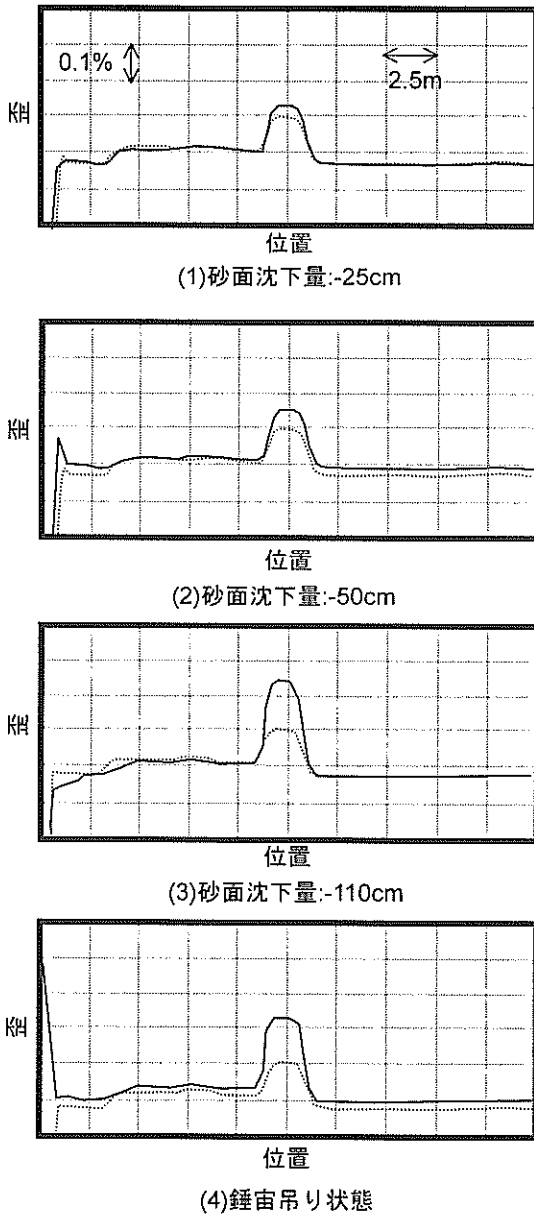


図-12 BOTDRにおける歪の変化



図-14 センサAにおける錘の挙動

点の歪を示している。歪印加部分が画面の中央部に位置している。砂の流出が発生すると、その部分にかかる歪が増大し、ピークの高さが初期状態に対して大きくなる。このように初期状態との対比により、歪の経時変化を測定することができる。砂流出の各段階におけるBOTDRの計測画面の変化を図-12に歪値を図-13に示す。

砂面の降下にとまない光ファイバセンサの歪量も大きくなっており、砂の降下量と歪量にほぼ線形的な相関がみられる。砂面 - 110 cmでの歪量が最大となった。その後センサ宙吊り状態の歪量が - 110cmの場合より小さくなっているが、砂面が沈下して行く際の錘の挙動に関係している。図-14にその様子を示す。初期状態では錘は砂の上に乗った状態になっている。砂を槽下部から抜くと砂面の沈下に伴って錘も下方に移動しバネを引き伸ばし光ファイバセンサに歪を生じる (図-14(2))。その後さらに砂面が沈下すると錘は砂の内部に引き込まれた状態となる (図-14(3))。更に砂面が下がると没していた錘は砂から脱し宙吊り状態となる (図-14(4))。(3)と(4)の状態では、(3)の方が錘が砂に埋没して引っ張られている分4よりもバネの伸びが大きく、光ファイバセンサの歪もその分大きく出たものと考えられる。

B型センサ

B型センサを用いた場合の砂面沈下量と歪の関係を図-15に示す。またケーソン内部のセンサの挙動を図-16に示す。砂面の降下と共に、歪量も大きくなり、砂面-40cmで最大0.659%の歪を観測した。更に砂面沈下量を増加させると歪量の減少が観察された。これはウエイト露出により砂への引き込みが弱くなったためだと推測される。また、試験後のセンサよりウエイトを取り外して測定したところ初期値に比べ約0.17%歪が増大しており、金属鞘管の塑性変形が原因として考えられる。図-17に示す鞘管の材質であるインコロイの応力-歪線図を示す。インコロイの弾性変形領域は約0.4%までであり、それ以上の歪が加わると塑性変形を起こす。鞘管が塑性変形を起こした分がウエイト除去後も残留応力として計測されたと考えるのが妥当である。

C型センサ

砂面沈下量と3種類の深さに埋設したC型センサの示す歪量の関係を図-18に示す。C型センサにおいても砂面の沈下が20cm程度までは沈下量と伴に歪量の増加が見られる。深さ30cmに埋設したセンサでは沈下量が40cmのところ歪量の大幅な増加を示したのち沈下量が60cmのところでは歪量が大きく減少し、更に砂面沈下量が大きくな

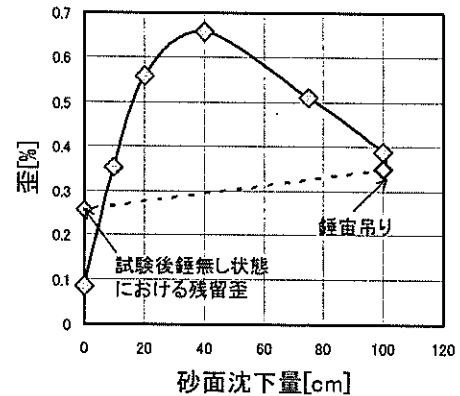


図-15 B型センサにおける砂面沈下量と歪の関係

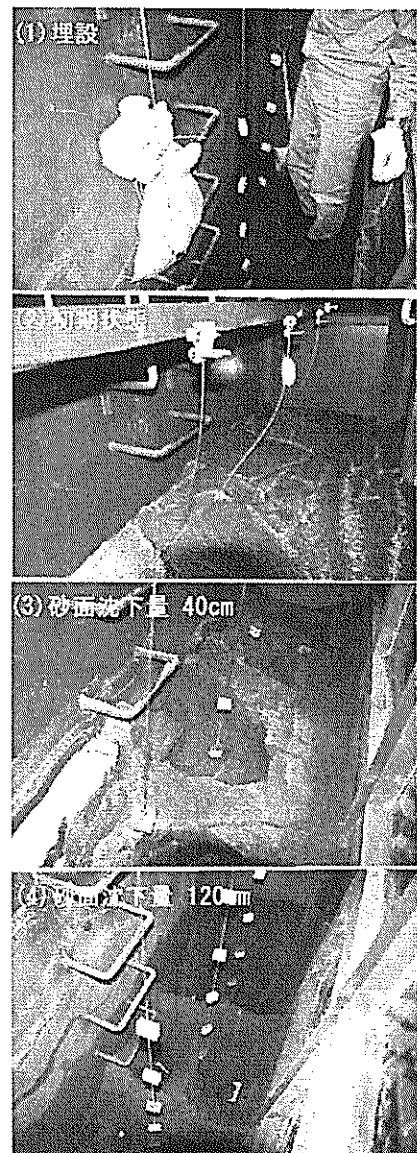


図-16 B型センサにおける錘の挙動

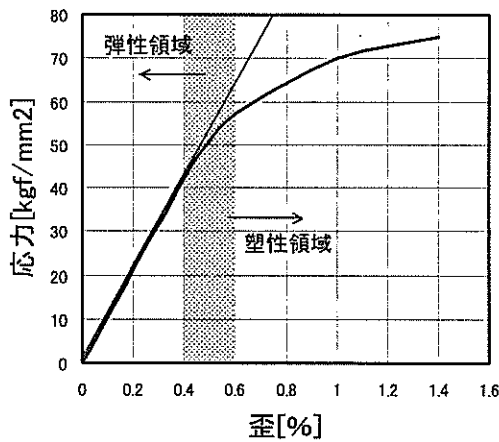


図-17 インコロイの応力-歪線図

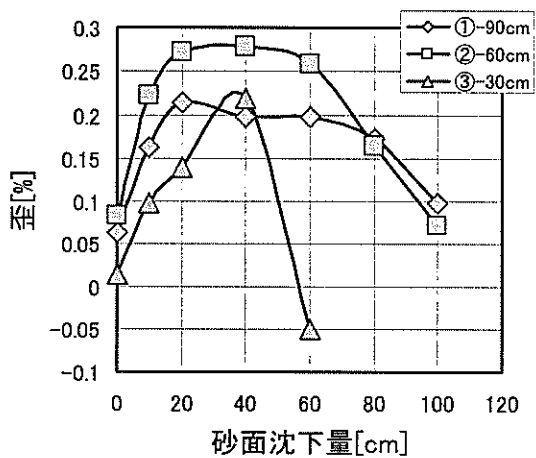
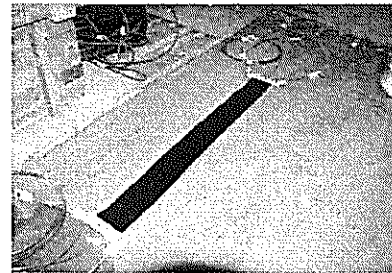
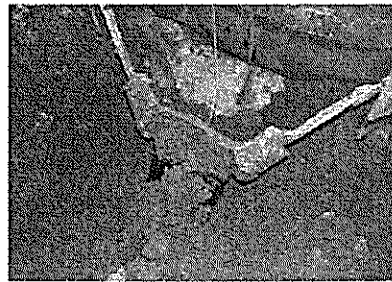


図-18 C型センサにおける砂面沈下量と歪の関係

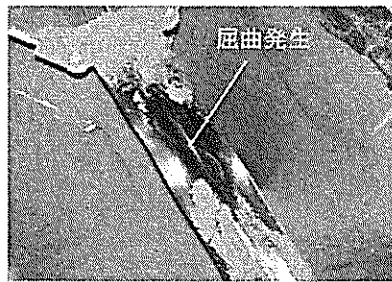
ると測定が不可能になるという現象がみられた。試験の様子を図-19にBOTDRの計測画面を図-20に示す。砂面沈下量が小さい時には図-20(1)~(3)に示す様に、センサを埋設した部分にきれいな3つのピークが観察される。しかし(4)になると、③のセンサの部分のピークが消失し、(5)では③のピークがあった部分のデータがおかしくなっていることがわかる。これはセンサが砂から露出するとシート端部に図-19で示すような著しい変形が発生し、BOTDRの測定においては光の減衰が著しくなったことによる。詳しく観察すると、シートが砂から露出する際に、砂の重量により伸ばされていたゴムシートが徐々に収縮し、最終的に金属管入り光ファイバがゴムシートに押し曲げられるかたちとなっていた。また、試験後のシートを分解して調べたところ、ゴムシート同士は強力に接着して



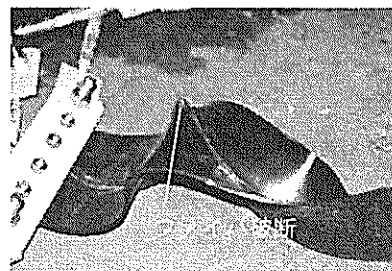
(1)C型センサ埋設前



(2)C型センサ埋設状態



(3)C型センサ宙吊り状態



(4)C型センサ試験後の状態

図-19 C型センサの様子

いるが、金属管とゴムでは接着力が弱く、すべりが発生していた。この事より、シートに歪が掛りはじめると金属管とゴムシートが滑りながら伸ばされる状態となり、歪が解除されるとゴムシートの収縮に金属管が追従できなくなり、金属管が折れ曲がったもの（座屈したもの）

と推測される。

今回の試験より、3種類のセンサ共にある程度の砂面の変動を、光ファイバの歪量として検知できることがわかった。A型のように砂上面の変化を追跡する形のものでは歪量は砂面の降下に対してほぼ線形的に変化するが、充填された砂の内部に空隙が発生するのみで砂上面までその影響が伝わらない様な初期流出の検知は難しい可能性がある。それに対してB型場合、砂面の降下量との一致はあまり期待できないが、ある意味では砂と一体化しており初期の微細な変動などを検知できる可能性がある。さらにC型の様に光ファイバ自体を砂層内部に直接設置する場合には砂の微細な変動を検知できるが、砂の大量流出時にはファイバに大変形が生じて破断するなどの問題

がある。何れの方法によっても砂の流出監視は可能である一方、固有の問題も残っており、今後の更なる検討を要するところである。

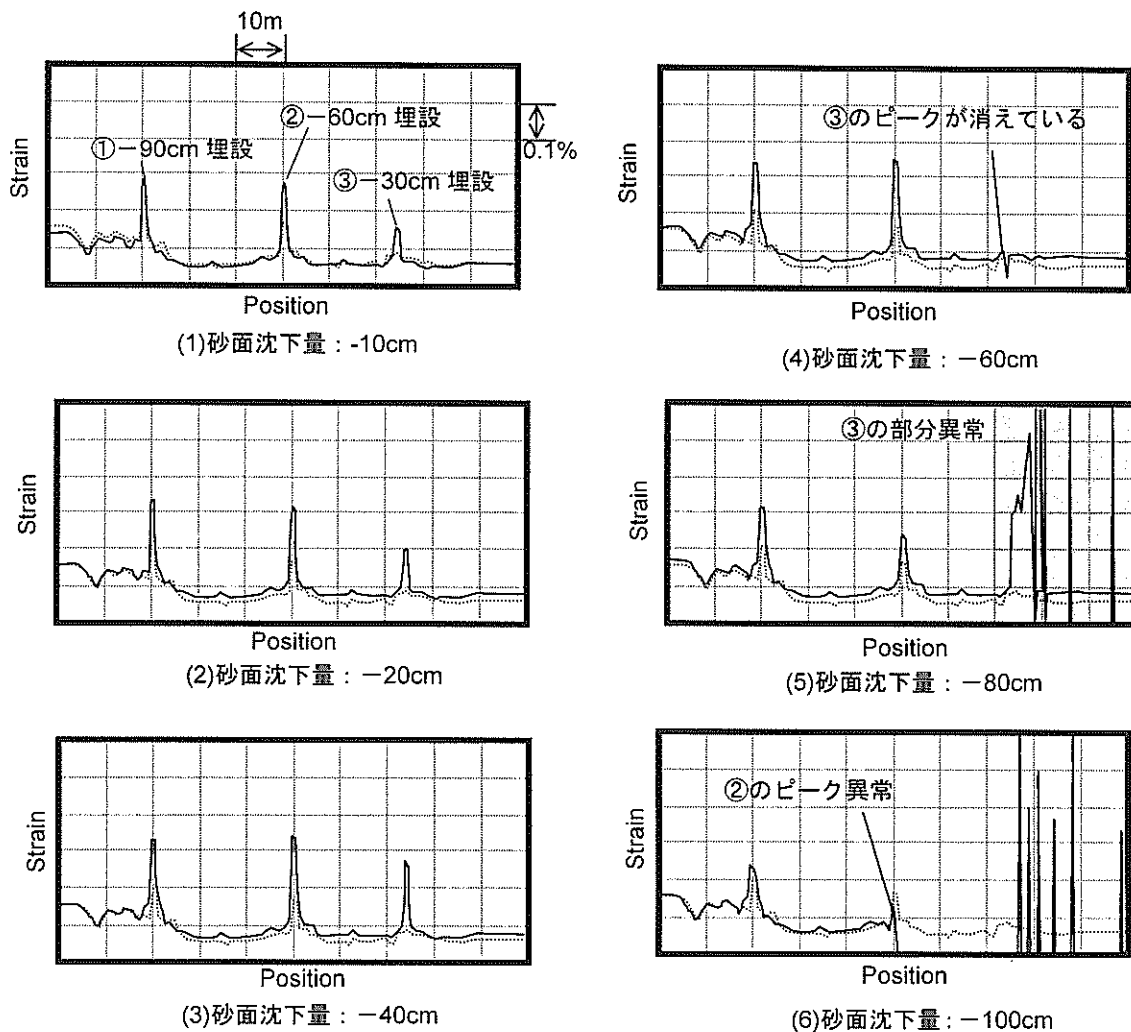


図-20 C型センサのBOTDR計測画面

4. 光ファイバの長期信頼性に関する考察

光ファイバの材質は通常石英ガラスであり、脆性材料特有の性質を持っている。ガラス表面に微小な傷や内部に欠陥等が存在すると著しく強度が低下するのがそれである。また応力腐食と呼ばれる現象もあり、引っ張り応力が負荷された状態で長時間置いておくと強度低下を起こすことが知られている。光ファイバはそもそも通信用の媒体として開発が進められてきたものであり、通信用光ファイバケーブルを設計するには内部の光ファイバ芯線に如何に応力を掛けないようにするかに多大な労力が払われてきた。一方近年はBOTDRの開発等により光ファイバを歪センサとして用いる等の従来用途以外の使い道も注目を集めている。そのようなフィールドではファイバに歪を生じさせることで何らかの計測を行うことが多い。本資料で紹介した鞘管入りの光ファイバにしても圧縮方向の歪も計測するために負余長率0.3~0.5%、すなわち予めファイバには0.3~0.5%の引っ張り歪が付与されている。ここではこうした歪のもとにおかれた光ファイバが破断することなく長期的な使用に耐えうるものかどうかについて検討する。

まずは単一の亀裂がファイバ上に存在する場合について、どの程度の時間でその亀裂がファイバを破断させるに至るのかについて考える。光ファイバの破断に至る過程を模式的に図-21に示す。初期状態で非常に微小なクラックが光ファイバ表面に存在すると引っ張り応力負荷状態で亀裂は徐々に成長していく。そしてある臨界状態に達すると、亀裂の成長速度は一気に増大し、カタストロ

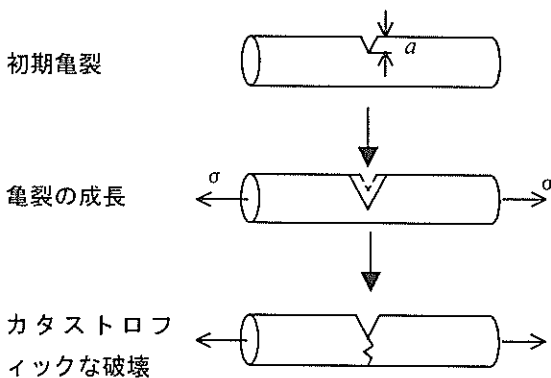


図-21 光ファイバの破断過程

フィックな崩壊をもたらす。

以下では、数式を用いて現象を記述する。脆性材料の破壊に関しては微細な亀裂周辺の応力状態が重要であり、それを記述するのに一般的に応力拡大係数が用いられる。今大きさが a の亀裂に応力 σ がかかっているとすると亀裂先端の応力拡大係数 K_I は

$$K_I = Y\sigma a^{1/2} \quad (3)$$

で与えられる。ここで Y は形状に関する無次元パラメータである。脆性材料特有のカタストロフィックな破壊が生じるのは応力拡大係数がある臨界値を超えた場合であり、それは

$$K_I \geq K_{IC} \quad (4)$$

と表現できる。さらにある応力下に置かれたファイバは経時的に強度劣化を起こす。強度劣化は亀裂の成長と解釈され、その成長は応力拡大係数の関数として

$$\frac{da}{dt} = \dot{a} = AK_I^n \quad (5)$$

で表される。ある亀裂の大きさ a を与えた場合に式(3)が(4)の条件を満たす応力 σ を不活性強度 (inert strength) といひ通常 S で表す。すなわち

$$K_{IC} = YSa^{1/2} \quad (6)$$

である。時刻 t_1 の時の不活性強度 (以下強度) を S_1 、 t_2 の時の強度を S_2 とすると、式(5)と(6)より、強度の低下を表す式

$$S_2^{n-2} = S_1^{n-2} - \frac{1}{B} \int_{t_1}^{t_2} \sigma^n(t) dt \quad (7)$$

が得られる。ここで B は

$$B^{-1} = \left(\frac{n}{2} - 1\right) AY^2 K_{IC}^{n-2}$$

である。式(7)において $t_1=0$ とし、このときの初期強度を S とし、ある応力下にファイバをおいた時、時刻 $t_2=t_f$ においてファイバが破断したと仮定する。このとき $S_2=\sigma(t_f)$ となるので、式(7)は

$$\frac{1}{B} \int_0^{t_f} \sigma^n(t) dt + \sigma^{n-2}(t_f) = S^{n-2} \quad (8)$$

と書ける。通常破断時の応力は初期強度に比べて小さいので σ は S に対して無視することにとすると、式(8)は

$$\int_0^{t_f} \sigma^n(t) dt = BS^{n-2} \quad (9)$$

と近似できる。式(9)は次のことを述べている。右辺は初

期状態で決まる定数であり、負荷の条件には依存しない。一方左辺は基本的には印加した応力の時間積分になっており、印加時間 t_f に伴って増加していく。この場合応力 σ がいかに小さくとも、ある程度の時間が経過すると左辺の積分は右辺と等しい値になり、ファイバは破断するのである。従ってファイバ上に存在する初期亀裂のうちの最も大きいもの、すなわち最も小さい S に関して右辺を計算し、左辺の積分が右辺の値と等しくなる時間 t_f を計算すれば、それが光ファイバの寿命ということになる。

負荷する応力のパターンとして静的な応力を負荷した場合には式(9)の左辺は

$$\int_0^{t_f} \sigma^n(t) dt = \int_0^{t_f} \sigma_s^n dt = \sigma_s^n t_f \quad (10)$$

と評価できる。一方動的に変化する応力の代表として時間に比例して大きくなる応力あるいは歪を想定すると、式(9)の左辺は

$$\begin{aligned} \int_0^{t_f} \sigma^n(t) dt &= \int_0^{t_f} (\dot{\sigma}_d t)^n dt = \frac{t_f^{n+1}}{n+1} \dot{\sigma}_d^n \\ &= \frac{\sigma_{df}^{n+1}}{\dot{\sigma}_d^{n+1}} \end{aligned} \quad (11)$$

と表すことができる。ここで、 $\dot{\sigma}_d$ は応力負荷速度であり、 σ_{df} はファイバ破断時の応力である。静的負荷はファイバに錘などをつるし放置したような場合の代表であり、一方式(11)で表される動的な応力負荷状態は、引っ張り試験機などにおいて一定速度でファイバを引っ張った場合のような加速度試験において実現される。

従って、ある一定の引っ張り応力下に置かれた光ファイバが破断するまでの時間は、予め行った動的引っ張り試験の結果を用いて、式(9)と(11)を等値することから、

$$t_{sf} = \frac{1}{n+1} \left(\frac{\sigma_{df}}{\sigma_s} \right)^n \left(\frac{\sigma_{df}}{\dot{\sigma}_d} \right) \quad (12)$$

として求めることができる。式(12)から実際に寿命を推定するためには亀裂の成長速度の応力拡大係数への依存性をあらわすパラメータ（一般的に n 値と呼ぶ）を決定しなければならない。 n 値は異なる応力負荷速度における引っ張り試験を行うことで算出できる。今同一サイズの初期亀裂に対して二つの異なる応力負荷速度、 $\dot{\sigma}_{d1}$ および $\dot{\sigma}_{d2}$ で引っ張り試験を実施し各々の速度に対してファイバの破断応力 σ_{df1} および σ_{df2} が得られたとしよう。この場合式(11)より

$$\frac{\sigma_{df1}^{n+1}}{\dot{\sigma}_{d1}^{n+1}} = \frac{\sigma_{df2}^{n+1}}{\dot{\sigma}_{d2}^{n+1}} \quad (13)$$

が成り立つ。これを n に関して整理すると、

$$n+1 = \frac{\ln \dot{\sigma}_{d1} - \ln \dot{\sigma}_{d2}}{\ln \sigma_{df1} - \ln \sigma_{df2}} \quad (14)$$

が得られる。ちなみに一般的な石英光ファイバでは $n=20$ 程度、ガラス表面をカーボン等で被覆したハーメチックファイバでは100以上を示すことが知られている[5]。但し n 値が大きくなると、計測誤差も n の二乗に比例して大きくなることから[6][7]、破断確率分布にばらつきが大きい場合には注意が必要である。

以上から、単一亀裂に対する破断時間の評価ができることになる。但しここで注意が必要なのは式(12)がただ一つの亀裂が存在し、しかも動的な加速度試験と静的な負荷状態で初期亀裂の大きさが全く同じ場合にのみ成り立つということである。実際の光ファイバでは表面の初期亀裂は必ずしも一つではなく、むしろ無数に存在しているため、式(12)はそのままでは光ファイバの寿命推定に用いることはできない。無数に存在する亀裂を扱うためには、どの程度大きさの亀裂がどの程度の数存在するのか、すなわち初期強度分布を予め知っておく必要がある。そのためファイバを破断させる加速度試験を行い、初期強度分布を推定するなどの統計的な手法がとられる。そして、得られた分布に基づいて予測される寿命については「長さ L のファイバに引っ張り応力 σ_s をかけておいたら、ある時間 t 経過後にそのファイバが破断している確率は F である」といった確率論的な表現で記述されることとなる。

通常初期強度分布の推定では引っ張り試験が用いられることが多い。静的な歪を負荷して破断するまでの時間を計る方法も存在するが、完全な分布形状が得られるまでに要する時間が長いことや、破断時間の自動計測に使用される機器がOTDRやアコースティックな方法など高価なものになってしまうことにもよる。図-22に引っ張り試験によって得られる光ファイバの強度分布の例を示す。この例は長尺引っ張りの例であり、試験長5mのファイバを単位時間当たり12MPa/secの応力増加率で引っ張り応力を増加させていった場合の累積破断確率をワイブル目盛上にプロットしたものである。ちなみに光ファイバの材質である石英ガラスのヤング率は 7.31×10^{10} Paなので、この場合の歪速度は 1.64×10^{-4} [1/sec]程度である。

ワイブルプロットでは、分布が完全にワイブル分布に従う場合、直線で表現されるという性質を持つ。ワイブル

ル分布の関数形は

$$f = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma_{df}}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (15)$$

で表される。 f は累積破断確率であり、 m は形状パラメータ、 σ_0 は位置母数と呼ばれる。特別な場合として $m=1$ の場合ワイブル分布は指数分布に一致し、 $m=2$ の場合はレイリー分布となる。図-22の例ではファイバの破断確率分布は直線とはなっておらず、完全なワイブル分布とは言えない。然しながら、ある長さの光ファイバを敷設した場合の信頼性は、低強度部における破断確率によって支配されることから、図において破線で示す様に、破断応力の小さい部分をワイブル分布にフィッティングして形状パラメータ及び位置母数を推定することが許される。この例では $m=7.5$ 、 $\sigma_0=3.1\text{GPa}$ が得られる。この例のように強

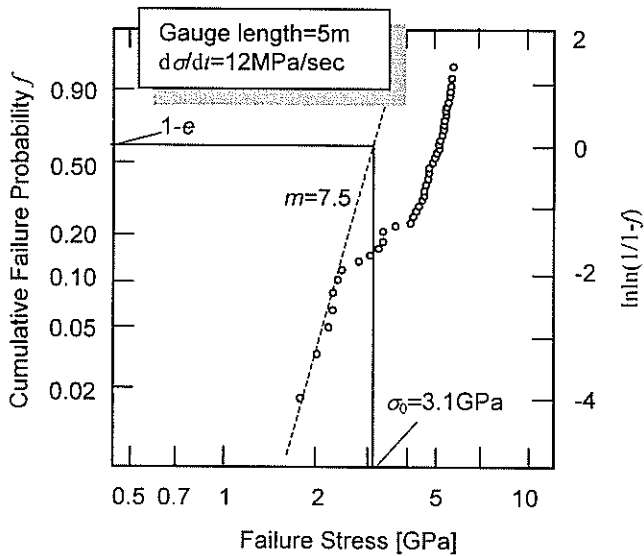


図-22 光ファイバの動歪引っ張り試験例[8]

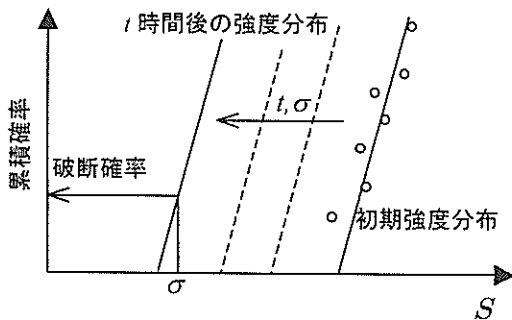


図-23 光ファイバの寿命評価のイメージ

度の大きい部分と強度の小さい部分で異なる分布を持つことが光ファイバの場合の大きな特徴であり、寿命特性に大きな影響を与える低強度部を除去するために光ファイバは製造時に1.2%前後の歪を付与し、それより弱い部分は取って切ってしまう生き残った部分のみを出荷するというブルーテストなどが行われる。

図-23は初期強度に分布を持つ光ファイバに応力を負荷した場合の経時的な強度劣化の様子を模式的にあらわしている。右側の直線を初期強度分布とする。応力 σ をファイバに負荷しておく、式(7)に示すような強度劣化が起こり、強度分布は図の左側へと変化する。時間 t_f 経過時のファイバの強度分布を左側の実線で表す。このとき光ファイバの強度 S が負荷されている応力 σ より小さい部分のファイバは破断する。 t_f 時間 σ_s の応力下に置かれた光ファイバの破断確率 f は式(12)を σ_{df} について解いて式

(15)に代入することにより、

$$f = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\{\dot{\sigma}_d \sigma_s^n t_{sf} (n+1)\}^{\frac{1}{n+1}}}{\sigma_0} \right)^m \right] \\ = 1 - \exp \left[- \frac{\{\dot{\sigma}_d (n+1)\}^{\frac{m}{n+1}} (\sigma_s^n t_{sf})^{\frac{m}{n+1}}}{\sigma_0^m} \right] \quad (16)$$

で表すことができる。但し式(16)はファイバ単位長さ(動歪試験時のゲージ長 L_0)に関する破断確率である。一方長さ L のファイバについての破断確率 F は

$$1 - F = (1 - f)^{\frac{L}{L_0}} \quad (17)$$

で表される。この式は、長さ L のファイバ全体が切れないでいる確率 $1-F$ が、それを構成している長さ L_0 の小要素が L/L_0 個切れないでいる確率に等しいことを意味している。これより長さ L のファイバの破断確率は

$$F = 1 - \exp \left[- \frac{L}{L_0} \frac{\{\dot{\sigma}_d (n+1)\}^{\frac{m}{n+1}} (\sigma_s^n t_{sf})^{\frac{m}{n+1}}}{\sigma_0^m} \right] \quad (18a)$$

となる。なお式(18a)中の応力は歪に置き換えてもそのまま成り立ちその場合、

$$F = 1 - \exp \left[- \frac{L}{L_0} \frac{\{\dot{\epsilon}_d (n+1)\}^{\frac{m}{n+1}} (\epsilon_s^n t_{sf})^{\frac{m}{n+1}}}{\epsilon_0^m} \right] \quad (18b)$$

となる。

光ファイバが実際にどの程度の破断確率を有するのかを検証してみる。計算に使ったパラメータを表3に示す。

これらのパラメータは図-22に示す光ファイバの動歪引っ張り試験の例を参考にし、光ファイバの代表的な値として採用したものである。計算結果を図-24に示す。横軸、縦軸は各々時間と累積破断確率を示している。ファイバの想定長は1kmで、図の各線はファイバに負荷される歪を表している。今回の研究で使用した光ファイバセンサは鞘管内部で0.5%程度の歪が予め与えられており、図に○で示したように1年で約1%の確率で破断してしまうことがわかる。通信用の光ファイバでは20年後の許容破断率を $1.8 \times 10^{-5}/\text{km}$ 程度に設定する[9]ことを考えれば、この値は相当に大きいといえる。従って光ファイバ歪センサを数年に渡る長期間のモニタリングに利用する場合には、ファイバに予め付与する歪（負余長率）に関しては慎重に検討の上定める必要があると考える。或いはセンサ用ファイバの複数本化といった工夫も有効な手段であると考える。

表3 光ファイバの寿命に関する計算パラメータ

ゲージ長 L_0	(m)	5
歪速度 $\dot{\epsilon}$	(%/sec)	1.6×10^{-2}
ワイブル位置母数 ϵ_0	(%)	4.2%
ワイブル形状係数 m		7.5
亀裂の進展係数 n		20

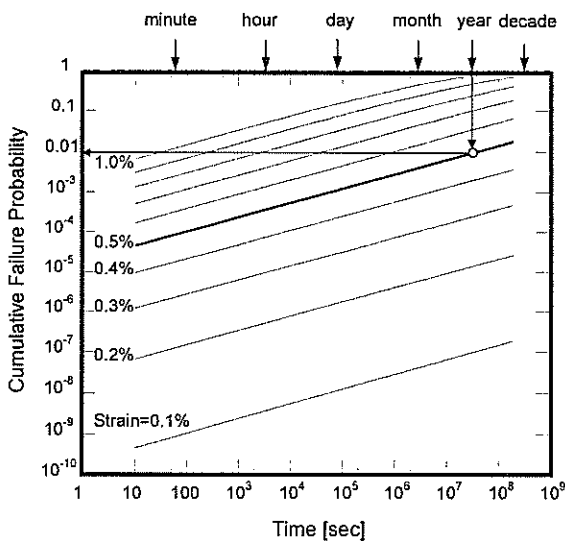


図-24 光ファイバセンサの破断確率

5. まとめ

光ファイバセンシング技術を港湾構造物等の維持管理に活用する目的でBOTDRによる歪測定をケーソン中詰砂の流出監視に応用を試みた。今回の試験より、3種類のセンサ共にある程度の砂面の変動を、光ファイバの歪量として検知できることがわかった。A型センサの場合、歪量は砂面の降下に対して傾向的に一致したが、ウエイトが砂に埋没した場合に多少の問題が残る。B型センサの場合、砂面の降下量との一致はあまり期待できないが、ある意味では砂と一体化しており初期の微細な変動などを検知できる可能性がある。C型センサの場合も砂の微細な変動を検知できる可能性があるが、シート部が砂面に露出した場合ファイバに大変形が生じて破断するなどの問題が生じるため、シートの材質や光ファイバの種類等を検討しなければならない。

また光ファイバの長期信頼性に関する検討を行った結果、0.5%の歪を付与したファイバの1年後の破断確率は0.01/kmと大きく、光ファイバ歪センサを長距離、長期間のモニタリングに利用する場合には、ファイバに予め付与する歪（負余長率）に関しては慎重に検討の上定める必要があることがわかった。

今後、光ファイバ測定がケーソンの管理や地盤沈下等の監視等、港湾構造物の維持管理或いは診断に応用されていくことを期待する。

参考文献

- [1] 保立和夫, 「光ファイバセンシングの最新動向」, 第203回光産業技術マンスリーセミナー資料, (2000)
- [2] 堀口常雄, 「光通信線路システムにおける光ファイバセンシング」, 光学 27(1988), pp360-366
- [3] 堀口常雄 他, 「プリルアン分光による光ファイバのひずみ分布測定」, 電子情報通信学会論文誌 B-I, Vol.J73-B-I, No.2(1990), pp.144-152
- [4] 内山晴義 他, 「光周波数変換技術とコヒーレント検波技術を用いた光ファイバ歪/損失測定器の開発 AQ8602 光ファイバ歪/損失アナライザ」, ANDO TECHNICAL JOURNAL October 1996, 17-22
- [5] I.Fujita et al., "Improvement of Fatigue Behavior of the Spliced Portion on Hermetically Carbon Coated Fiber" *Information and Communication Engineers (IEICE) Trans.*, (1993)
- [6] 藤田勇 他, 「動疲労試験におけるn値の不確かさ解析」, 1993年電子情報通信学会秋期大会 (1993)
- [7] I.Fujita et al., "Statistical Analysis for Uncertainty of n-value of Optical Fibers", *Optical Fibre Measurement Conference (OFMC) Proceedings*, (1993)
- [8] Y.Mitsunaga et al., "Failure prediction for long length optical fiber based on proof testing", *J.Appl.Phys.*, 53(1982), pp.4847-4853
- [9] 満永豊 他, 「スクリーニング試験による光ファイバ強度保証法」, 電子情報通信学会論文誌 66(1983), pp.829-836

港湾空港技術研究所資料 No.1095

2005.3

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所(有)湘南写真工芸社

Copyright © (2005) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。