

トンネル覆工変状監視への 光ファイバ計装システムの適用性研究

STRAIN MONITORING SYSTEM USING OPTICAL FIBER SENSOR TO LINING OF TUNNELS

伊藤裕昌¹⁾・小島芳之²⁾・六車崇司³⁾・佐野力³⁾・山浦剛俊⁴⁾
Hiromasa ITOH, Yoshiyuki KOJIMA, Takashi MUGURUMA, Chikara SANO, Taketoshi YAMAURA

Nowadays, the “Brillouin Optical Time Domain Reflectometer” method, which measures the strain using optical fiber, is drawing the attention as monitoring method of tunnels, earth structures, and steel structures.

In this study, the aim is to apply the optical fiber sensor to the strain monitoring system of the lining of tunnels.

This paper reports the study results by the punching test modeled on the lining reinforced by fiber sheet for application of detection of fall of fiber sheet and the lay down test on the lining of tunnel of the optical fiber at site for the confirmation of lay down procedure and endurance.

Key words: optical fiber, strain monitoring, maintenance, tunnel, lining

1. はじめに

トンネル変状の進行性や近接施工の影響に対する監視計測には、一般に内空変位計による計測や、ひずみ計によるひび割れ幅の計測などが行われているが、これらの計測は煩雑で多大な労力を要しているのが現状であり、長大な区間を長期間にわたり連続監視することは困難であった。

そこで著者らは、覆工面に光ファイバを設置し、ブリルアン散乱光のひずみ依存性を利用して連続的なひずみ分布を遠隔監視する手法 (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer 以下 BOTDR と略す) に着目し、そのトンネル覆工の変状監視への適用性を評価するための基礎的な研究を行ってきた。¹⁾

本論文では、補強繊維シートの剥離検知への適用性評価を目的に実施した、覆工面に繊維シート補強を行っているトンネルを模擬した覆工模型による押抜実験²⁾およびこれまでの研究成果に基づき立案した施工方法と実トンネルに近い条件下での耐久性の検証を目的に実施した現地施工試験について報告する。

2. BOTDR法のひずみ計測原理

光ファイバの片端からレーザパルス光を入射すると、光の伝播に伴い光ファイバ内部で種々の散乱光が生じ、その一部は入射端へ戻る後方散乱光となる。

BOTDR法によるひずみ計測原理を図1に示す。

ブリルアン散乱光は後方散乱光の一種で、光ファイバに発生したひずみに比例して、その周波数がシフトする特性があるため、ブリルアン散乱光の周波数を計測することでひずみを算出できる。また、ブリルアン散乱光が戻ってくるまでの時間を計測することでブリルアン散乱光の発生した位置を算出できる。

ブリルアン散乱光は任意の位置で発生するため、光ファイバに沿ったひずみ分布が得られることになる。

-
- 1) 正会員 三菱重工業(株)横浜製作所
 - 2) 正会員 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部
 - 3) 西日本旅客鉄道(株) 神戸土木技術センター
 - 4) 三菱重工業(株)長崎研究所

3. 研究フローと本研究の位置づけ

図2に研究全体のフローを示す。トンネル覆工模型実験においては光ファイバを敷設したトンネル覆工模型（縮尺 1/3）を用いた載荷試験を行い、ひずみやひび割れの発生位置と進展を実用上十分な精度で検知できること、一定間隔で光ファイバを固定する方式がひずみ検知に適している等の基礎的な知見を得た。また室内要素試験においては実トンネルでの光ファイバ設置の際、問題となる列車通過時の光ファイバ取付部の耐風性や短時間施工等の要素技術検討を行った。

本研究では、覆工面に繊維シート補強を行っているトンネルを対象として、繊維シートの剥離検知への適用性を評価することを目的として、図2の繊維シート補強覆工模型実験において光ファイバを繊維シート表面に敷設した覆工模型の押抜実験を行うとともに、これまでの研究成果に基づき立案した施工方法および実トンネルに近い条件下での耐久性の検証を目的として、西日本旅客鉄道（株）神戸支社管内のトンネル斜坑底において現地施工試験を行った。また、その知見に基づき、光ファイバによるトンネル覆工変状監視法の適用性について評価した。

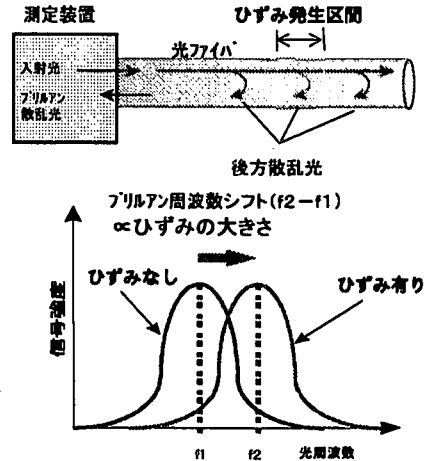


図1 BOTDR法のひずみ計測原理

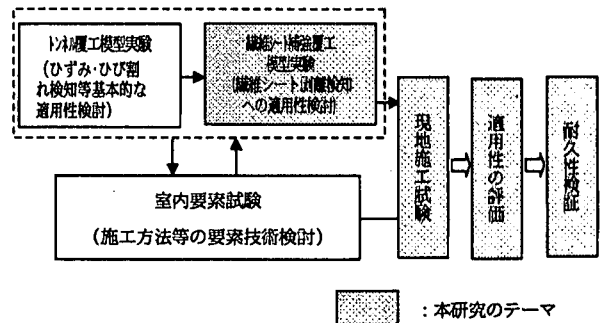


図2 研究フローと本研究の位置づけ

4. 繊維シート補強覆工模型実験

4-1 目的

本実験では、覆工面に敷設した繊維シートが剥落した覆工コンクリートや覆工背面の地山の自重により剥離するケースを想定し、繊維シートの挙動を光ファイバにより計測することでシートの剥離検知を行う手法について、その適用性を評価することを目的とした繊維シート補強覆工模型を用いた押抜実験を行った。

4-2 実験方法

(1) 実験概要

図3に実験概要図を示す。繊維シート補強されたトンネル覆工面を模擬するためにコンクリート板供試体に繊維シートを接着し、覆工コンクリートの剥落を模擬するために供試体中央の圧子に強制変位を与え、押抜実験を行った。なお、光ファイバは既に繊維シート補強されたトンネルへの適用を想定し、繊維シート表面に光ファイバの全長を接着する方法で敷設した。

(2) 実験ケース

実験ケースを表1に、光ファイバ敷設パターンを図4に示す。

ケース1は光ファイバの敷設パターンの相違がひずみ検出能力に与える影響を把握することを目的とし、光ファイバを折返してループ状に敷設した。これはBOTDR計測器のゲージ長（以下GLと略す）が1mと長い

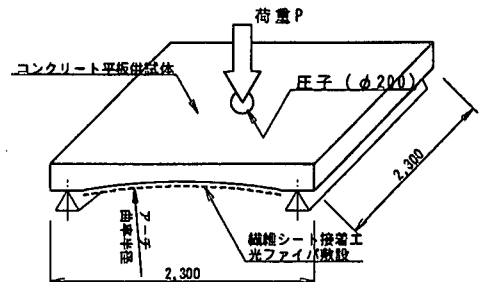
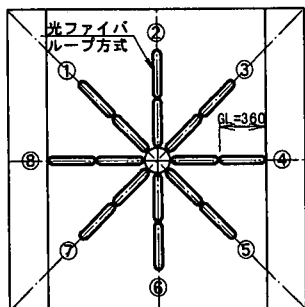


図3 繊維シート補強覆工模型実験概要図

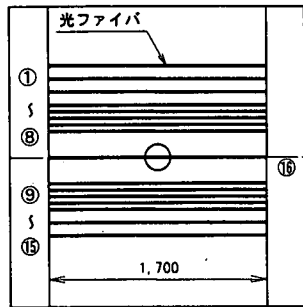
ため、折返して敷設することにより見かけのゲージ長を短縮し、局所変形に対する検出能力向上を図ったもので、ケース1のGLは360mmとなっている。³⁾ ケース2およびケース3では、トンネルアーチ方向に光ファイバを敷設することを想定し、トンネル形状の影響を把握するために、アーチ曲率半径をパラメータとした。ケース2は新幹線複線断面を、ケース3は在来線単線断面を想定している。

表1 実験ケース

NO.	アーチ曲率半径(m)	光ファイバ敷設方向	光ファイバ敷設パターン	想定断面	使用材料
1	∞(平板)	放射状	ループ方式	—	・シート; 2方向炭素繊維シート (1層、200g/m ²) ・接着剤 グライマ0.25kg/m ² +エポキシ樹脂 0.3kg/m ² ×2回
2	4.75	アーチ方向	直線	新幹線複線	
3	2.22	アーチ方向	直線	在来線単線	

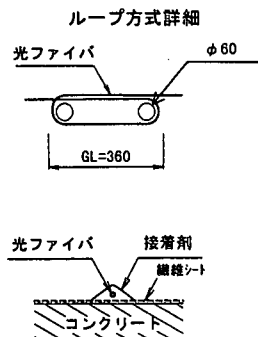


ケース1



ケース2およびケース3

注) ○数字:測線番号



4-3 実験結果

図4 光ファイバ敷設パターン

(1) 図5に、ケース2において大きなひずみが発生した圧子直下の測線⑩におけるひずみ分布を示す。光ファイバにより得られたひずみ分布形状は、ひずみゲージによるものと比べひずみのピークが低く、ひずみ発生範囲が広いなだらかな形状となっている。これはGLの違い(光ファイバ:1m、ひずみゲージ:5mm)に起因するもので、光ファイバが広い範囲の平均ひずみを検出していることを示している。また、押込み量の増加に伴いひずみが増加していく傾向は光ファイバにおいても検出できている。

(2) ひずみゲージ面積平均値との相関関係

ひずみゲージにより計測されたひずみ分布の面積平均を、

$$\text{ひずみゲージ面積平均値} = \int_0^{GL} \epsilon \, dl / GL \quad (GL: \text{ゲージ長})$$

で算出し、光ファイバによるひずみ計測結果と比較した。

① ケース1 (R=∞)

図4において、光ファイバのループ番号①③⑤⑦は繊維方向に対し45°方向を、②④⑥⑧は繊維方向を示している。

図6に繊維シートの剥離状況を示す。押込みに伴う繊維シートの剥離は繊維方向が卓越し、最大押込み量70mmのケースでは、繊維方向は外側のループまで剥離したが、45°方向は内側のループしか剥離しなかった。

計測結果を図7に示す。繊維方向の測線④、繊維と

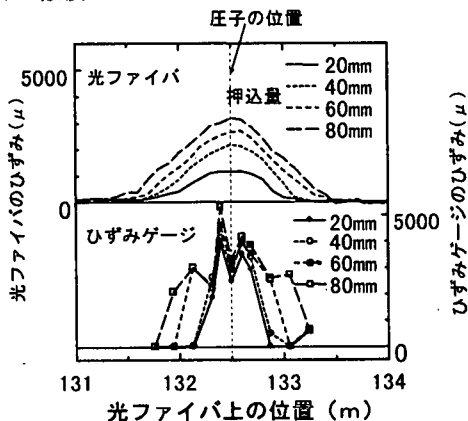


図5 ひずみ分布計測結果 ケース2 (R=4750)

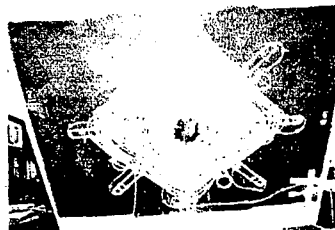
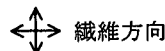


図6 繊維シート剥離状況 ケース1 (R=∞)

45° 方向の測線③とも、ひずみゲージ面積平均値と良い相関を示している。また、測線④では、剥離範囲が増大し剥離が外側のループにおよんだ現象を検出しており、繊維シートの剥離状況とも良い相関を示している。

② ケース 2 ($R=4750$)

図 8 に繊維シートの剥離状況を示す。押込みに伴う繊維シートの剥離はトンネル軸方向（光ファイバと直角方向）に卓越する傾向があり、圧子から離れるほど、光ファイバ敷設方向のシートの剥離は少なくなっている。

ひずみ計測結果を図 9 に示す。圧子直下の測線⑤では、ひずみゲージ面積平均値と良い相関を示し、シートの剥離に伴うひずみの増加傾向を計測できている。また、圧子から 700mm 離れた測線①では、押し込み量 70mm でシートが剥離を始める現象を検出しており、繊維シートの剥離状況とも良い相関を示している。

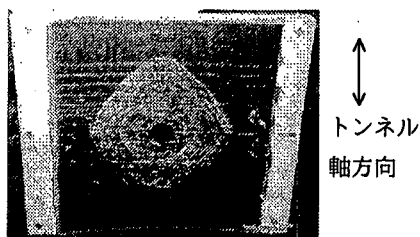


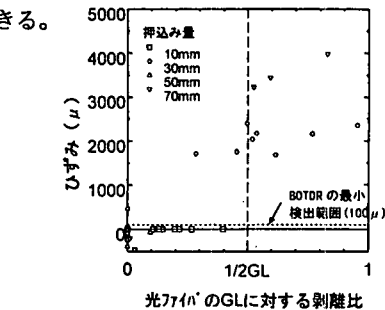
図 8 繊維シート剥離状況 ケース 2 ($R=4750$)

4-4 繊維シート剥離検知能力の評価

ここでは繊維シートの剥離比に着目し、ケース 1 およびケース 2 について検出可能な剥離長さを評価した。

光ファイバにより計測されたひずみと剥離比の関係を図 10 に示す。光ファイバで検出可能な最小ひずみは 100μ であるので、計測データの信頼性の点から、 100μ 以上のひずみが発生すると光ファイバにより繊維シートの剥離検知が可能となる。図 10 において圧子直下の測線⑤に着目すると、 $0.1GL$ 程度の剥離比で 100μ 以上のひずみを検出することがわかる。また、圧子から離れた部分では、 100μ 以上のひずみを検出するのは、ケース 1 では約 $1/2GL$ 、ケース 2 では約 $1/3GL$ 以上の剥離比のときである。これを剥離長さに換算すると、ケース 1 では $0.18m$ 、ケース 2 では $0.33m$ 、となる。以上の結果をまとめると、繊維シート剥離検知能力について、以下のように評価できる。

- (1) 剥落塊直下の光ファイバでは、 $0.1GL=0.1m$ 程度繊維シートが剥離すればその剥離を検知できる。
- (2) 剥落塊から離れた光ファイバであっても剥離検知が可能で、 GL 1m のケースで $1/3GL=0.3m$ 程度のシート剥離を検知できる。



ケース 1 ($R=\infty$)

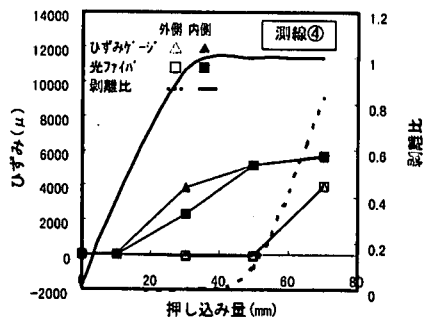
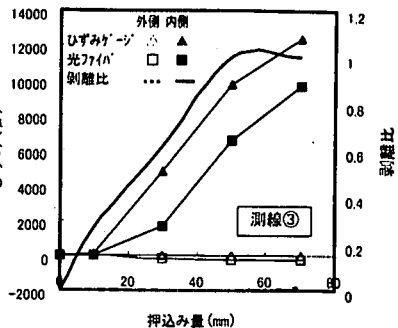


図 7 ひずみ計測結果 ケース 1 ($R=\infty$)

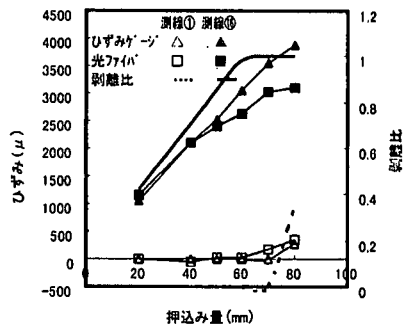
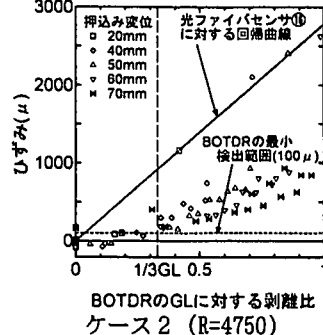


図 9 ひずみ計測結果 ケース 2 ($R=4750$)



ケース 2 ($R=4750$)

図 10 光ファイバによるひずみ計測値と剥離比

5. 現地施工試験

5-1 目的

適用対象トンネルとして、施工条件的に厳しい新幹線トンネルを想定し、新幹線トンネルでの施工に際し問題となる下記の課題の現地での検証を目的として、現地施工試験を実施した。

- (1) 夜間の限定された作業時間内に施工可能な短時間施工法（実働3時間を想定）
- (2) 列車通過時の風圧に耐え得る光ファイバ敷設方法（風速 55m/s を想定）

5-2 試験概要

(1) 試験場所

試験は西日本旅客鉄道（株）神戸支社管内のトンネル斜坑底において実施した。

(2) 短時間施工法の概要

今回試験した短時間施工法と従来工法の比較表を表2に示す。また短時間施工法の概要を以下に示す。

① プリテンションファイバの採用

現場での施工時間を短縮し、かつ圧縮ひずみも計測可能とするため、工場で樹脂チューブに光ファイバを挿入し、あらかじめ約 0.2%のプリテンションを与えたものを用いた。

② 覆工面への溝切加工

覆工面に巾 10mm、深さ 7mmの溝切を行い、溝内にプリテンションファイバをエポキシ樹脂系接着剤で埋込む方法とした。これにより、接着前の下地処理の省略等による作業時間短縮に加え、覆工面からの突出をなくすことで、列車通過時の風圧に対する耐久性や安全性向上も図っている。

(3) 試験ケース

試験ケースを表3および図11に示す。また各ケースの試験目的、特徴を以下に示す。

① ケース1およびケース2

覆工コンクリートにアーチ状に光ファイバを敷設するケースを想定したもので、以下の課題検証を目的としている。

- a. 短時間施工方法の検証
- b. 光ファイバ迂回部の耐久性検証

覆工表面に照明等の付属品が取り付けられている箇所では、覆工面に溝を掘ることができないため、光ファイバを覆工面から浮かせて付属品を迂回させる必要がある。この迂回箇所が列車通過時の風圧に対し耐久性の上で最も弱点となると考えられるため、フレキシブルチューブにより保護することとした。

c. 温度補正によるひずみ計測精度の向上

BOTDR 計測器には、光学的な温度依存性（20 μ/℃）があるため、光ファイバに沿って温度分布を計測し、ひずみ計測値の温度補正をすることで、計測値の精度を向上させることができる。本試験では、温度計測用光ファイバをひずみ計測用光ファイバに沿って敷設し、ラマン散乱光の温度依存性を利用した温度計測（Raman Optical Time Domain Reflectometer, 以下 ROTDR と略す）を実施した。

表2 従来工法と短時間施工法の比較

従来工法	短時間施工方法	備考
・現場で光ファイバにテンションをかけながら敷設	・工場で樹脂チューブに光ファイバを挿入し、ブリーション導入	・圧縮ひずみ計測も可能とするためブリーション導入
・接着前の下地処理として、覆工面のサンダーがけ、清掃、プライマ塗布が必要	・覆工面へ溝切を行うことで左記の工程を省略、効率化	・溝内へファイバを埋めることにより耐久性・安全性も向上
・光ファイバの位置決め、仮止めの労力大		

表3 試験ケース

敷設パターン	No.	溝掘	迂回部保護	備考
半断面敷設	1-1	無	フレキチューブ	ブリーションファイバ
	1-2	有	フレキチューブ	ブリーションファイバ
	1-3	有	無	ブリーションファイバ
全断面敷設	2-1	有	フレキチューブ	ブリーションファイバ
	2-2	有	フレキチューブ	ブリーションファイバ
	2-3	有	フレキチューブ	・ブリーションファイバ ・温度ファイバ 分割敷設
施工中断時を模擬	3-1	—	フレキチューブ	固定間隔 1.0m
	3-2	—	フレキチューブ	固定間隔 0.5m
	3-3	—	無	固定間隔 0.5m
繊維シート上に敷設	4-1	—	—	全面接着
	4-2	—	—	全面接着
	4-3	—	—	—

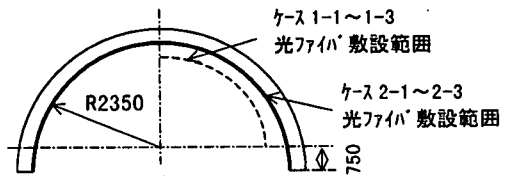


図11 斜坑底断面図

② ケース 3

実トンネルでの施工において、作業を中断する場合、端末接続のために余長分を溝から出した状態で放置するため、余長部の耐久性検証を目的に光ファイバ余長部の固定間隔をパラメータとした。

③ ケース 4

覆工面を繊維補強したトンネルを対象としたもので、ケース 4-1, 4-2 では模型実験と同様に光ファイバを全面接着した。ケース 4-3 では作業時間短縮をねらって、金具のみで固定する方法とした。

5-3 試験結果および評価

(1) 施工性評価

溝切りによる下地処理による省略、プリテンションファイバの採用により、中断することのできない作業は光ファイバの仮止めから接着までの工程のみとなった。

この工程の施工試験での作業効率は 12 分/m 程度で、新幹線複線断面 ($R=4.75\text{m}$) での全断面敷設のケースでも約 180 分で作業が完了し、実働 3 時間の条件下であっても十分施工可能であることが確認された。

(2) 耐久性評価

ひずみ計測値の経時変化を比較することで、列車走行の影響等に対する耐久性の評価を行った。

ひずみ計測結果を図 12 に、温度計測結果を図 13 に示す。ひずみについては、BOTDR 計測器の計測精度 $\pm 100\mu$ を考慮するとほとんど変化がなく、接着剤硬化までの耐久性および接着剤硬化後 3 か月までの耐久性は問題ないことが確認された。また、温度については光ファイバにより計測された温度は、熱電対より若干低い傾向にあるが、ROTDR 計測器の精度 $\pm 3.5^\circ\text{C}$ の範囲内であり、温度計測用光ファイバの併設による温度補正も適用可能であることが確認できた。

6. おわりに

光ファイバを用いたひずみ計測手法のトンネル覆工の変状監視への適用において、繊維シートで補強されたトンネルを模擬した覆工模型を用いた押抜実験を行い繊維シートの剥離検知への適用が可能であることを確認するとともに、現地施工試験において短時間施工法の妥当性および短期間ではあるが実トンネルに近い条件下での光ファイバの耐久性を確認することができた。今後は経時計測により耐久性評価データを蓄積するとともに、変状が進行中のトンネルでの検証試験を行い、本システムの実用化を進めてゆく予定である。

なお、本研究は(財)鉄道総合技術研究所と三菱重工業(株)との共同研究として実施したが、覆工模型実験については国土交通省(旧運輸省)の鉄道技術開発費補助金を得て(財)鉄道総合技術研究所が実施した。

参考文献

- 1) 高橋、朝倉、小島、紀：光ファイバー歪みセンサを用いたトンネル変状検知に関する実験、土木学会第 54 回年次学術講演会、1999. 9
- 2) 六車、小島、吉川：繊維シート接着工によるトンネル覆工コンクリートの剥落対策における覆工曲率の影響、土木学会第 56 回年次学術講演会、2001. 10
- 3) 紀、山浦、秋山、伊藤、村田、小島：光ファイバひずみ計測のゲージ長に関する実験的考察、第 44 回日本学術会議材料研究連合講演会、2000. 9

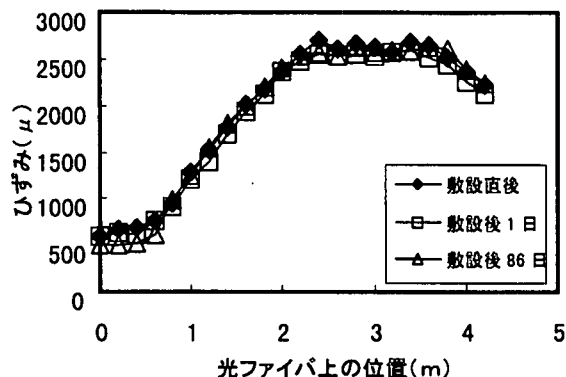


図 12 光ファイバによるひずみ計測結果ケース 1-3

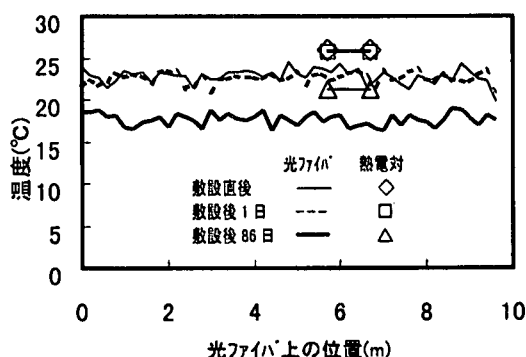


図 13 光ファイバによる温度計測結果ケース 2-3