

光ファイバーセンサーによる トンネル覆工コンクリート載荷試験の変形計測

Deformation Measurement by Optical Fiber Sensors in Loading Test of Tunnel Concrete Lining

馬場 弘二¹⁾・城間 博通²⁾・伊藤 哲男³⁾

Koji BABA, Hiromichi SHIROMA and Tetsuo ITO

In view of the new observation technology of a tunnel concrete lining behavior, several optical fiber sensors were installed on the surface of the actual size loading test specimen of a concrete, which simulates a tunnel concrete lining, to measure the deformation of the specimen. The relationship between the behavior of the concrete specimen and the sensor location or sensor length was studied to investigate an applicability of the sensors for measurement of a concrete lining. It was concluded that optical fiber sensors can be one of the long term observation systems of a tunnel concrete lining behavior.

Key Words: optical fiber sensor, concrete lining, deformation measurement, monitoring, behavior observation

1. はじめに

トンネルの変状原因のひとつとして、供用後に塑性圧、偏圧、地山の緩みによる鉛直圧、地震、地下水位の上昇などの新たな外力の発生が挙げられ、これら外力が大きいトンネルでは長期的な挙動監視が必要である。また、供用下のトンネルに近接して新たに地下構造物（二期線トンネルなど）が施工される事例が増加しており、走行する車輛の安全を確保するためにも、近接工事の影響を把握する安全監視が必要とされている。

このような挙動監視の基本項目は、覆工表面の観察、天端沈下及び内空変位量、ひび割れの発生・進展などが挙げられ、これらを補完する目的で覆工ひずみ計、地中変位計などが使用されている。

これら従来の挙動計測技術は各々得られる結果の用途が異なるものの、「局所的な計測が主」である点や「計測機器の長期安定性」に問題がある点において、維持管理における状態監視の手法として課題を有している。さらに、一般的には供用後に新たに何らかの計測機器を設置することになるため、供用下の高速道路では取付けの容易なものが望まれている。

今回、覆工コンクリートの挙動監視手法として、①従来の局所的な変形計測に対し全体的な挙動を計測することにより問題点の早期発見が可能、②材質面で長期的に安定し電気ノイズに強い、③遠隔監視が可能 といった特徴を有する新しい計測技術の光ファイバーセンサーに着目し、覆工コンクリートの計測への適用性について模擬実験により得られた知見について報告する。

2. 試験の目的

これまでのひずみゲージによる計測値は短区間のひずみを現すため、ひび割れの影響が少ない線形領域（弾

-
- 1) 日本道路公団 試験研究所 道路研究部 トンネル研究室
 - 2) 正会員 日本道路公団 試験研究所 道路研究部 トンネル研究室 室長
 - 3) 正会員 日本道路公団 試験研究所 道路研究部 トンネル研究室 主任

性領域）では有効であるが、ひび割れの進展により非線形性が強くなると、計測結果の工学的意味が失われることになる。また、一般的に実施される内空変位計測はトンネルの変状を現す指標の一つではあるが、内空変位から覆工コンクリートに生じているひずみや応力を解析的手法により推定することは可能であっても、損傷状態を評価する精度に問題が残る。

一方、今回使用した光ファイバーセンサーは測定長が長く、長区間のひずみを現すことになり、線形領域からひび割れが進展し非線形性が強い領域まで連続的に計測することが可能であると考えられる。

このため、実物大の覆工コンクリートによる載荷試験において、計測区間長の違いが及ぼす影響についてひずみゲージとの比較確認を行うとともに、覆工コンクリートの計測工としての適用性を検討するために、光ファイバーセンサー取付け位置やセンサー長の違いによる覆工コンクリートの挙動との関連を把握することを目的として、試験計測を実施した。

表－１ 試験体の材質及び主要寸法

材 質		ビニロン繊維混入コンクリート
寸法	内半径	4, 9 0 0 mm
	厚 さ	3 0 0 mm
	幅	1, 0 0 0 mm
圧縮強度		20.54 N/mm ² (材齢 14 日)
曲げ強度		4.43 N/mm ² (材齢 14 日)
曲げタフネス		4.00 N/mm ² (材齢 14 日)

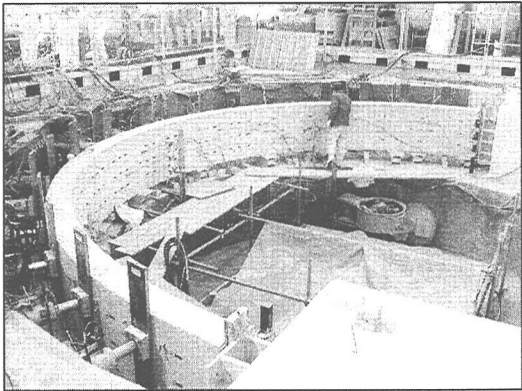
3. 覆工コンクリート載荷試験の概要

3. 1 試験体

試験体は、トンネル覆工コンクリートの一部を模擬した半円形のものである。試験体の材質及び主要寸法等を表－１に、試験体の形状を写真－１に示す。

3. 2 載荷方法

試験体への載荷は、試験体の周囲に配置された油圧ジャッキを用いて、試験体両端付近（10° ,20° ,30° ,40° , 140° ,150° ,160° ,170° ）は反力ジャッキとし、90° （天端に相当）に配置した油圧ジャッキにより変位制御載荷を実施した。図－１に載荷概略図を示す。



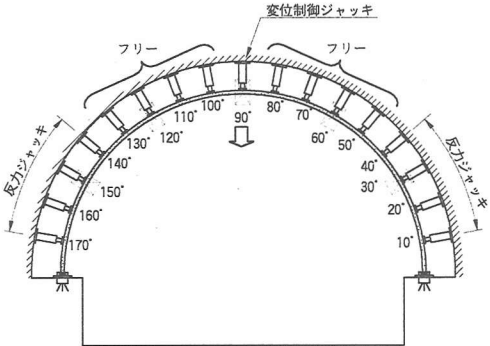
写真－１ 試験体形状

3. 3 光ファイバーセンサーの仕様

今回使用した光ファイバーセンサーの仕様を表－２に示す。システムの構成は、光学センサー部と、光／電気変換器及びパソコンからなる計測部とで構成される。

表－２ 光ファイバーセンサーの仕様

タイプ	3本の光ファイバーを燃った長尺の光学センサー
測定長さ及び使用本数	1 m×4本、2 m×4本
精 度	0.02mm（スモールレンジ） 0.10mm（フルレンジ）
感 度	0.004mm
温度範囲	-20～60℃
温度の影響	0.0006mm/K/m



図－１ 載荷概略図

3. 4 光ファイバーセンサーの取付け位置

光ファイバーセンサー取付け位置は、ひび割れの挙動を把握できる箇所とし、これまでの同条件の載荷試験においてひび割れが発生した角度（90° ,65° ,40° 付近）に1 mセンサーと2 mセンサーとを平行に取付けた。また、内面ひび割れの発生角度 90° と外面ひび割れの発生角度 65° の中間に2 mセンサーを1本、さらに反力ジ

ジャッキのある 20° に 1 m センサーを 1 本取付けた。センサー取付け位置を図-2 に、センサーの取付け状況を写真-2 に示す。センサーは、試験体の曲面に沿うように中間部を数箇所留めているが、被覆管内部のセンサーは自由に伸縮することが出来る。

なお、比較対象として設置されているひずみゲージや変位計の取付け位置についても図-2 に示す。

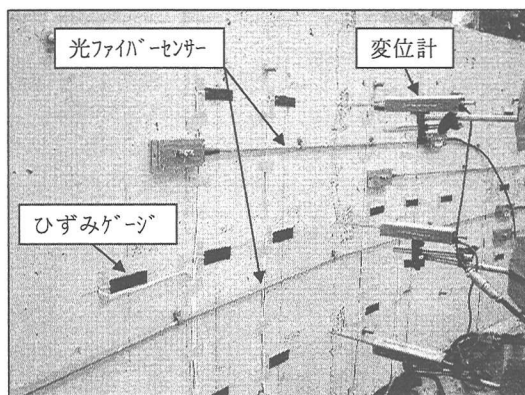


写真-2 光ファイバーセンサー取付け状況(90° 付近)

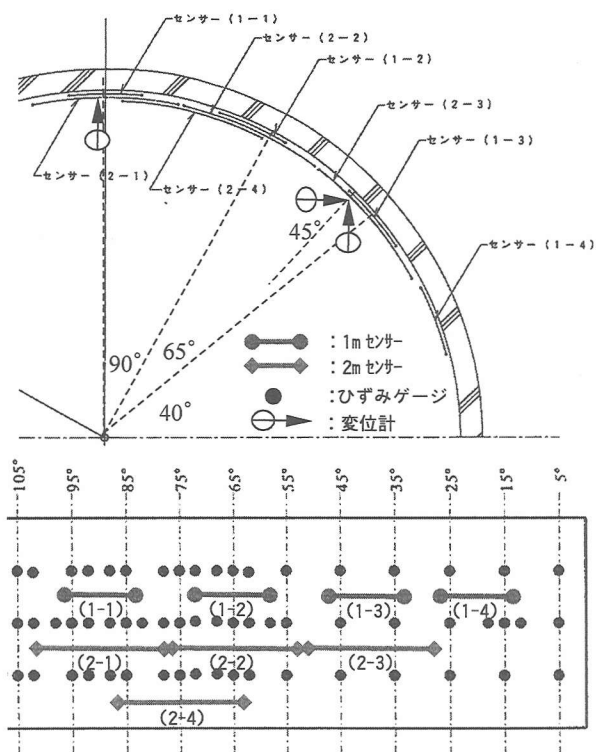


図-2 センサー取付位置図

4. 試験結果

4. 1 試験体のひび割れ発生状況

最大荷重付近のひび割れ発生状況を図-3 に示す。ひび割れの発生順序は、変位制御の天端変位量が、0.2mm 時に 90° 付近内縁側 (①)、3.5mm 時に 60° 及び 117.5° 付近外縁側 (②)、8.5mm 時に 112.5° 付近外縁側 (③)、9.5mm 時に 40° 付近内縁側 (④) であった。90° 付近内縁側 (①) に発生したひび割れ幅は、荷重の増加に伴って増大し、天端変位量が 9.5mm 時には 4.0mm まで達していた。

4. 2 光ファイバーセンサーによる測定結果

90° 付近の荷重点へ取付けられた 1 m センサー (1-1) 及び 2 m センサー (2-1) の測定結果を例として図-4 に示す。図-4 の縦軸は各センサー長さ区間における試験体の変形量を表している。15時25分に両センサー共に動きがそれまでと逆になっているのは (a)、ジャッキを解放し荷重を除荷したことによるものであり、最終の値が残留変形である。1 m センサー (1-1) の測定結果が 15 時 10 分に不連続となっているのは (b)、このセンサーの測定値がセンサーの測定範囲 (1 m センサーで 5.0mm) を超える可能性があったためセンサー計測値の盛り替え実施によるものである。その後の測定値は有効であり、不連続的に減少させた量をその前の測定値に上乘せることによって、破線で示すような連続的な曲線となる。

今回得られた結果は、ひび割れ発生前の変形の小さい線形領域 (弾性領域) からひび割れが大きく進展した非

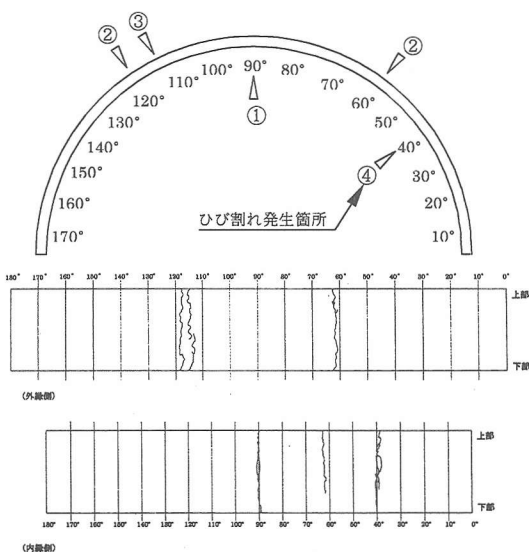


図-3 ひび割れ発生状況

線形領域まで連続的に、試験体の変形を測定することが出来ている。このことは、従来のひずみゲージがひび割れ発生後の測定が困難であることと大きく異なる点である。また、各々のセンサー取付け位置により強い非線形を示し始める時間が異なることも明らかであったが、これはひび割れの発生し始める時間と対応していた。

4. 3 1 m及び2 mセンサーの比較

測定値に及ぼすセンサー長の影響を明らかにするために、90°、65°、40°付近に1 mセンサーと2 mセンサーとを平行に取付けているが、各々のセンサー取付け位置ごとに試験開始時から1 mセンサーと2 mセンサーの変形量と比較して表-3に示す。この結果から得られた知見を以下に示す。

①線形領域では、非常に小さい値ではあるが内面ひび割れの発生角度90°及び40°付近と外面ひび割れの発生角度65°付近ともに、センサー長が長い方が大きい値を示す。これは測定区間のひずみの積分値を表しているためであるが、2 mセンサーが1 mセンサーの値の2倍でないのは、センサー長の範囲でひずみが一定でないことが原因と考えられる。

②ひび割れ発生開始領域～最大荷重時においては、各々の角度に取付けられた1 mセンサーと2 mセンサーの両者の値が近づいてきているが、これは長さに影響される線形領域からひび割れ発生によりひずみが解放され、ひび割れの開口幅計測へと移行したことによるものと考えられる(図-5)。ただし、これは同一のひび割れをセンサーが共有したケースであり、2 mセンサーのみが計測するようなケースでは、両者は異なった値を示すものと推測される。

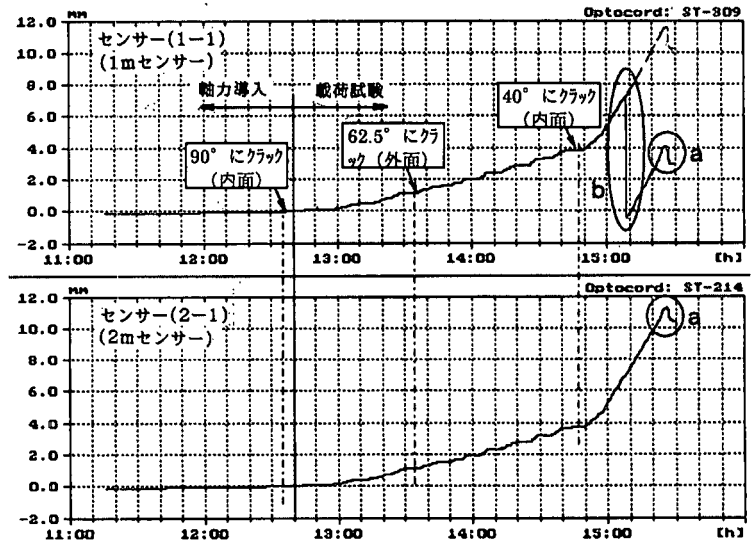


図-4 1 mセンサーと2 mセンサーの測定結果 (90° 付近)

表-3 試験開始からの各センサーの変形量の比較 (mm)

センサー番号		1 mセンサー	2 mセンサー
線形領域 11 時 50 分時点	1 (90° : 引張)	0.06	0.09
	2 (65° : 圧縮)	-0.03	-0.05
	3 (40° : 引張)	-0.04	-0.07
	4 (75° : 引張～圧縮)	—	0.01
ひび割れ発生 開始領域 12 時 35 分時点	1 (90° : 引張)	0.15	0.19
	2 (65° : 圧縮)	-0.08	-0.11
	3 (40° : 引張)	-0.04	-0.07
	4 (75° : 引張～圧縮)	—	-0.02
最大載荷時 15 時 24 分時点	1 (90° : 引張)	11.1	11.2
	2 (65° : 圧縮)	-1.3	-1.8
	3 (40° : 引張)	6.8	7.5
	4 (75° : 引張～圧縮)	—	-0.8

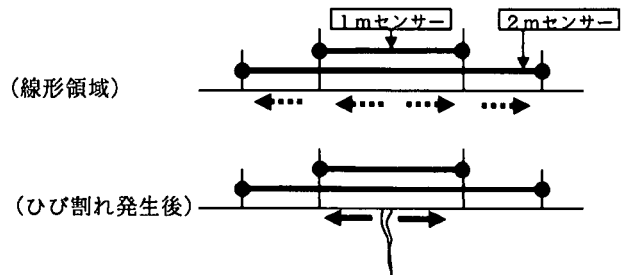


図-5 ひび割れ発生前後の計測概念図

4. 4 引張領域と圧縮領域の間に取付けたセンサーの動き

引張領域と圧縮領域にまたがって取付けた場合のセンサーの動きを明らかにするために、2 mセンサー (2-4) を内面ひび割れの発生角度90°と外面ひび割れの発生角度65°の中間となる75°付近に取付けた。変形量の計測値について、75°付近のセンサー (2-4) と90°付近のセンサー (2-1) 及び65°付近のセンサー (2-2) を比較して図-6に示す。また、試験開始時からの各々のセンサーの変形量は前述の表-3に示している。この結果

から、引張領域と圧縮領域にまたがって取付けた場合のセンサー（2-4）の値は、線形領域においては引張領域と圧縮領域のひずみ状態が相殺され“0”に近くなっている（c）。最大荷重時には、引張領域のセンサー（2-1）の値が圧縮領域のセンサー（2-2）の値よりもはるかに大きくなっているにもかかわらず、センサー（2-4）の値はセンサー（2-2）の値に近い値となっている（d）が、これは 90° 付近に大きなひび割れが存在するために、このひび割れ近傍の試験体表面の引張ひずみが解放され、主に 65° 付近の圧縮ひずみを測定しているものと考えられる。

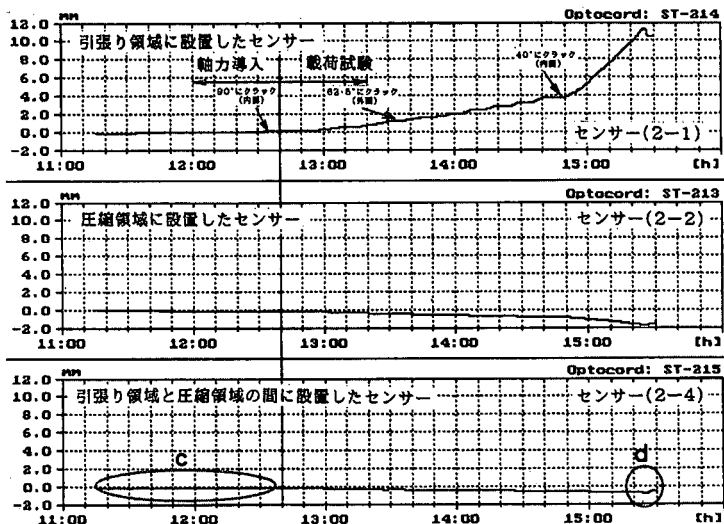


図-6 設置位置による変形量の測定結果比較

4. 5 荷重とセンサー変形量及び鉛直変位量の関係

載荷点となる 90° 付近に取付けた 1 m センサー（1-1）及び 2 m センサー（2-1）によって計測された変形量及び変位計によって計測された鉛直変位量（実トンネルでは天端沈下量）と荷重（上下 2 本のジャッキ荷重の合計）の関係を図-7 に示す。ひび割れ発生時のみならず全体的な挙動が近似しており、これら両者の計測値の間には密接な関係があることが推測できる。図-8 に両者の計測値を各々縦軸及び横軸に取った関係を示す。この図より、62.5° にひび割れが発生する点及び 40° にひび割れが発生する点を境にして、3 直線で近似することができることが判明した。このことは、本試験ケースのような外力が発生する場合においては、光ファイバーセンサーを用いて載荷点の変形を計測することによって、ひび割れの発生した覆工の鉛直変位量を求められる可能性を有しているものと考えられる。

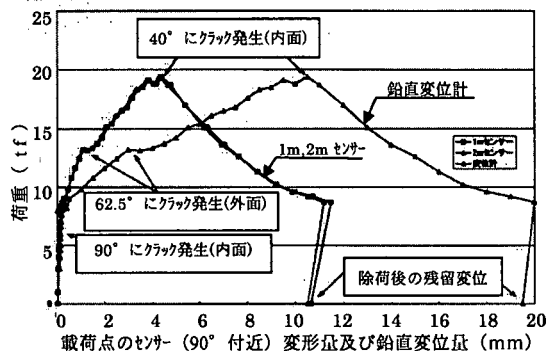


図-7 荷重と載荷点のセンサー変形量及び鉛直変位量の関係（1）

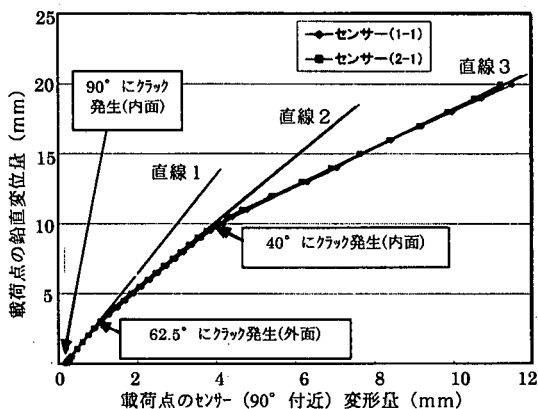


図-8 荷重と載荷点のセンサー変形量及び鉛直変位量の関係（2）

4. 6 ひび割れ発生時の動的挙動

今回の載荷試験は、試験体にビニロン繊維混入コンクリートを使用しており、プレーンコンクリートに比べてひび割れの発生や進展に対する抵抗が大きく、さらに載荷方法も変位制御を採用したことから非常に時間をかけて載荷されたため、試験全体としてひび割れの進展は静的な挙動であった。しかしながら、光ファイバーセンサーを用いることで部分的に動的な挙動も観測された。図-9 に 90° 付近の 1 m センサー（1-1）と 2 m センサー（2-1）のひび割れ発生時の動的挙動状況を示す。変形は非常に小さなものであるが同時刻に検知しており（e）、さらに本文では示していない他の全てのセンサーについても同様の挙動を検知していることから、明らかにひび割れ発生時の動的挙動を検知したものと考えられる。

4.7 光ファイバーセンサーとひずみゲージの比較

引張領域となる 90° 付近の1mセンサー (1-1) 及び近接した 85° 、 95° のひずみゲージの計測値について荷重との関係を図-10に示す。また、この図のうち(f)部の横軸を拡大して図-11に示す。センサーによるひずみは、線形領域においてはセンサー長にわたる平均ひずみを表すが、ひび割れ発生後は計測値に占めるひび割れ開口幅の割合が大きくなるため、このひずみは見掛け上のひずみとなることに注意が必要である。 90° 付近にひび割れが発生するまでは同様の傾向を示す (g) もの、その後はひずみゲージの値は一定あるいは“0”付近に収まる傾向にある。これはひび割れ発生に伴いその近傍のひずみが解放されたことによるもので、ひずみゲージの計測値はゲージを貼る位置に極端に依存し、結果の工学的意味が失われる可能性を示すものである。

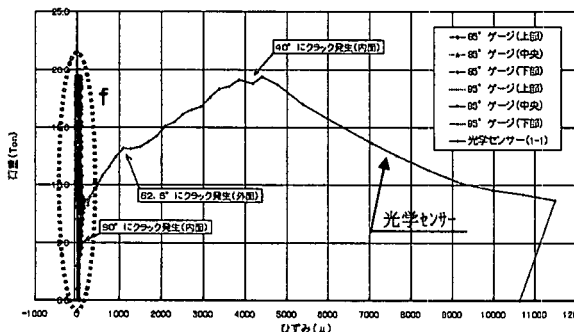


図-10 荷重-ひずみ図 (90° 付近)

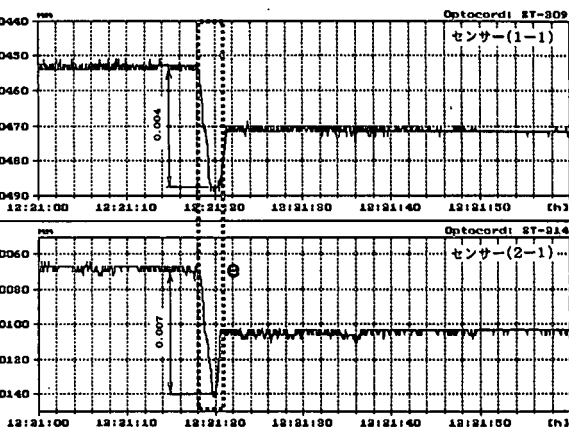


図-9 ひび割れ発生時の動的挙動状況 (90° 付近)

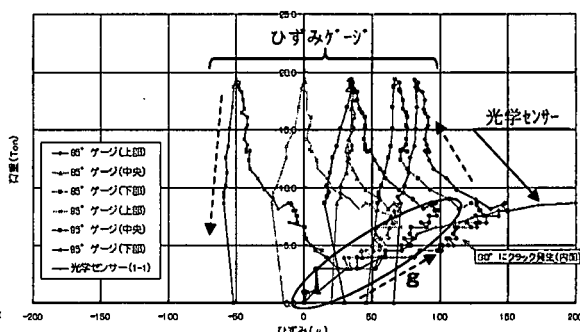


図-11 荷重-ひずみ (f 部) 拡大図

圧縮領域においては引張領域の場合と異なり、センサーとひずみゲージとは荷重-ひずみ曲線において同様の傾向を示していた。ただし、外面にひび割れが発生した後は、引張領域ほど顕著ではないがひずみゲージ貼付位置の影響を受けるものであった。

5. まとめ

今回の光ファイバーセンサーを用いた変形計測から得られた知見を以下に示す。

- ① 覆工コンクリートの変形やひび割れの発生状況を的確 (規模、発生時間等) に捉えることができる。
- ② 計測結果は線形領域においてはひずみゲージの結果と一致するが、ひずみゲージでは計測できない非線形領域 (ひび割れが発生した後の領域) でも連続的に計測できる。よって、構造物が健全な状態から破壊に至るまで連続的かつ定量的にモニタリングが可能である。
- ③ 外力の作用状態によっては、荷重作用点について今回の載荷試験と同様のモニタリングを実施することにより、ひび割れの発生した覆工の荷重作用点における鉛直変位量を推測できる可能性がある。

以上より、覆工コンクリートの計測工への適用性を考えた場合、更なる荷重条件での検証は必要ではあるが、光ファイバーセンサーはトンネル覆工の長期状態監視システムとしての一手法に成り得るものと考えられる。

なお、使用上の留意点として、センサーの長さにより線形領域では多少の差が見られ、ひび割れ発生後は開口幅の計測へと移行するためセンサーが跨ぐひび割れ本数に影響を受けること、また、センサーの取付け位置が引張領域・圧縮領域の各々の領域に跨って設置される場合、領域特性の優勢な側へ引っ張られることとなり荷重状態による設置位置の検討が必要になること、などが挙げられる。