

光ファイバセンサによる構造物の長期連続モニタリング

Long term continuous monitoring of structures by optical fiber sensors

門万寿男*, 佐藤拓哉**

Kado Masuo, Sato Takuya

* 工修 日揮株式会社, OSMOS事業部 (〒220-6001 横浜市西区みなとみらい2-3-1)

** 工博 日揮株式会社, OSMOS事業部 (〒220-6001 横浜市西区みなとみらい2-3-1)

The superannuated infrastructures or public structures are required to be used as long as possible with minimum maintenance cost. It is also required to maintain safety. A long term structural monitoring by optical fiber sensors is a new approach to solve this problem. The key point of a structural monitoring is to understand the real behavior and present state of structures and to estimate the behavior in near future based on monitoring data. An optical fiber sensor will present interesting and useful information in this field. In this paper, a new approach of maintenance of structures is proposed and several examples of long term monitoring are presented for the existing bridge, tunnel and the landslide.

Key Words: optical fiber sensor, monitoring, maintenance, structural integrity

1. はじめに

わが国の社会基盤は、昭和30年代後半から40年代の高度成長期に建設されたものが多く、長期間の供用による損傷や環境の影響による劣化が顕在化しており、多額の維持管理・更新費用を必要とする状況になってきた。従来のように老朽化が進んだものは順次更新するということが今後も継続していくことは困難であり、既存構造物の長寿命化が強く要求されるようになってきた¹⁾。これは、近年特にクローズアップされてきた地球環境の保護(省資源、省エネルギー)にも貢献することになる。

構造物の維持管理は、これまでは主に目視観察による材料の変質やひび割れ状況などの外観調査を行い、必要に応じて非破壊検査や採取した試料について材料試験を行うものであった。これらの方法は主に材料面の性能劣化を評価し、それに基づいて構造物の健全度をランク付けするものであり、構造面からの評価が十分行われているとはいえない。これは構造物の健全度を評価するために適当なパラメータを定量的に計測する手段が欠けていたことによるものと考えられる。

老朽化が進んだ構造物が多くなった現在、その構造物が本来持っている耐力を定量的に評価し、有効に使い切るための技術、老朽化した構造物をどうにかしてそのまま使い続けるための技術が必要になってきたと言える。そのためには、安全性をどのようにして保証するかが技術的な課題となる。それに対して有効な回答を与えるのが長期連続モ

ニタリングである。これまでも長期モニタリングが行われてきた例もあるがその多くは、例えば1日1データのようなスポット的な計測であったり、モニタリング結果の評価基準が絶対値であり、必ずしも長期モニタリングの有効性が発揮されているとはいえない。

光ファイバセンサは従来のセンサにはない優れた特性を有しており、構造物の維持管理や長寿命化に大きく貢献するものと期待されている。本論文では、光ファイバセンサを適用した長期連続モニタリングの概念を明確にするとともに、構造物の維持管理への新しい適用を提案するとともに、これまでに実施された実構造物についての長期連続モニタリングデータを紹介してその有効性を示す。

2. 構造物の維持管理における長期連続モニタリングの役割

これまでの構造物の維持管理は、定期的な目視検査や非破壊検査の情報、各種計測の結果などを基に補修あるいは補強方法を決め、それに対応できないものは更新するという対応が採られてきた。目視検査や非破壊検査は構造物の損傷や劣化を調べる上で基本となるものであるが、その結果は必ずしも定量的なものではない。いくつかの項目を評価して健全度のグレード分けが行われるため、評価項目が多くなるほど健全性が損なわれているという結論になりがち傾向は否めない。

定量的な情報を得るために、変位やたわみなどを定期的

に計測するケースがある。一般に、構造物は機械的な外力の他に気温や日照などの変動に伴って日単位に、あるいは年単位で周期的に熱変形する。橋梁などの交通荷重に対する動的変形を計測する場合は温度の変化を特に問題にする必要がないが、長期的な変状を問題にする場合はこの熱変形はオーダー的に無視できない場合が多い。通常、構造物は非均一温度場となるので、定期的な計測の場合は熱変形を補正することが困難であり、計測値の信頼性を損なうことがある。橋梁など、日照の影響を直接受ける構造物においてはこの傾向は特に顕著である。

図-1は構造物の変形の一般的な傾向を示したものである。変状が生じなければ、構造物はパスAのように周期的変形を繰り返すはずである。定期的計測の場合、特に変状がなければ図中の×印のようにほぼ同じ計測値が得られる。もし有意な変状があれば図中の●印のように前年までの結果から大きくかけ離れた計測値が得られたことになるが、どのような経過を経てそのような値になったのか分からないので、原因を特定するのが難しいことが多い。

これに対して、構造物の変形を長期間連続的にモニタリングした場合、周期性の崩れ方から変形がどのような経緯で生じたかが明確になり、原因の特定が容易になるのでの確な対応が可能となる。

図-1のパスBは材料の劣化、ひび割れの進行などによって構造物の変形が時間とともに変形が進行するものであり、一般的な経年変化を表す。この場合、変形の進み具合に応じて対策をとることになる。

パスCは、地震や近接工事の影響などの突発的事象によって短時間に大きな変形が進み、事象が終わった後は再び元のような周期性を繰り返すものである。このような現象においては、変形量が極端に大きくない限り構造的に問題になることは少ない。

パスDは、パスCと同様な原因で短時間に大きな変形が進み、事象が終わった後も変形が進行するものである。このような現象は、その事象によって構造物が大きな損傷を

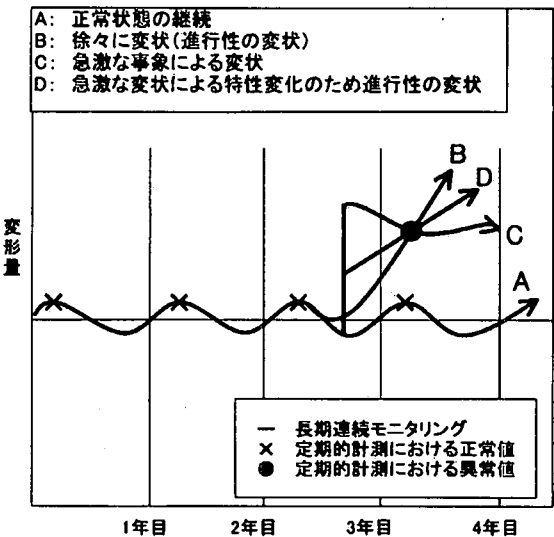


図-1 定期的計測と長期連続モニタリング

受けていることを表しており、適切な対応が必要となる。

以上のことから、構造物の維持管理における長期連続モニタリングの役割を以下のようにまとめることができる。

- ① 構造物の健全度を定量的に評価するための情報を提供する。
- ② 変状が生じた場合、原因の特定が容易になるのでの確な対応が可能となる。
- ③ 後述のように絶対値による管理に加え、傾向管理を行うことによって健全度を正確に把握できる。
- ④ 構造物の温度変動による変形とそれ以外の原因に起因する変形を分離しやすいので、変状評価の信頼性が増す。

従来の維持管理方法に長期連続モニタリングを組み合わせた維持管理の流れを図-2に示す。

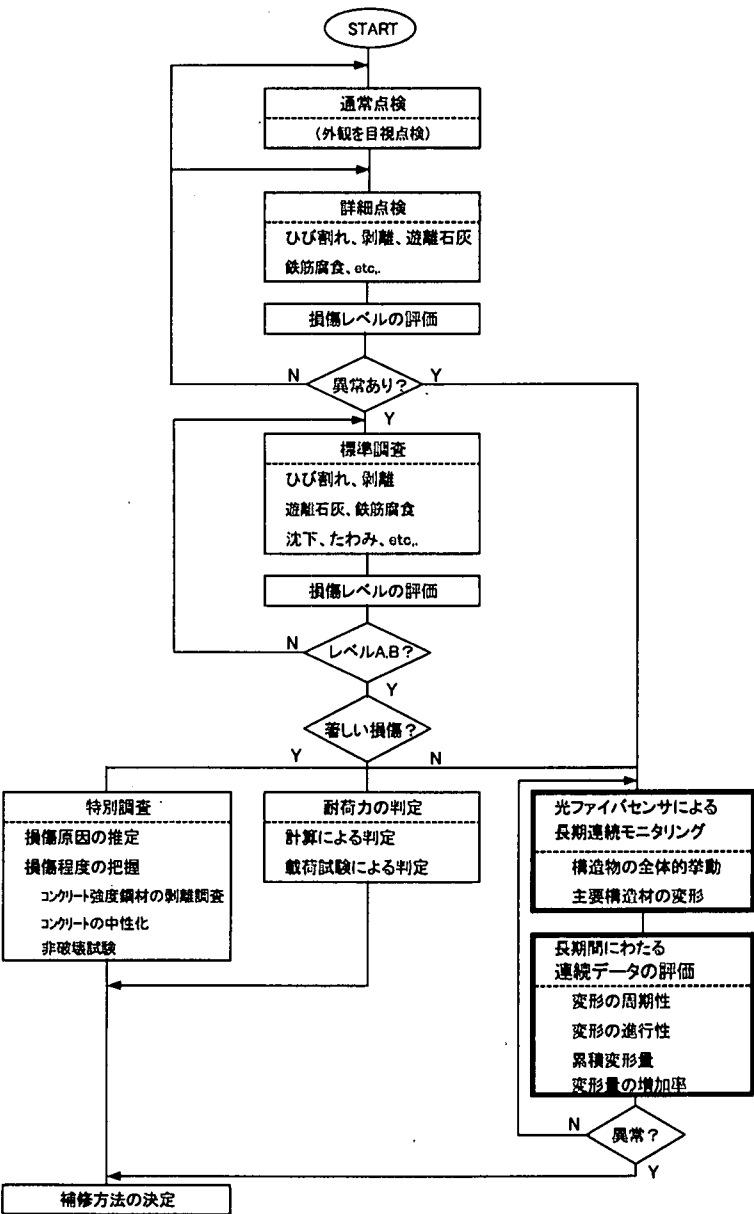


図-2 長期連続モニタリングを組み合わせた構造物の維持管理の流れ

3. 長期連続モニタリングの概念

3.1 状態の分類

構造モニタリングにおいて最も重要なことは、構造物に変状が生じていないかどうか、その兆候が見られるかどうかを監視することである。計測値そのものもできるだけ正確であることが必要であるが、それ以前に構造物の動きがどのような傾向を示しているかを正確に把握することが最も重要である。そのために構造物の状態を次の3つ分類することを提案する。

(1) 通常状態 (Normal Condition)

長期的にかつ連続的にモニタリングするということは、まずその構造物にとってどのような状態が通常の状態 (Normal Condition) なのかを理解することが基本となる。荷重や温度変化によって構造物の変形状態は変動するが、荷重や温度が元に戻った時に変形も元に戻っていれば、仮に局所的な劣化や損傷があったとしても、構造物は通常の状態を維持していると判断する。

(2) 通常でない状態 (Unusual Condition)

複雑な荷重を受ける構造物は、時として予想外の挙動を示すことがある。しかし、しばらくして元の状態に戻るようであれば、通常ではない状態 (Unusual Condition) ではあるが、それ程心配がないと判断する。

(3) 異常状態 (Abnormal Condition)

問題は、荷重や温度が元に戻っても変形やひずみが元の状態に戻らない場合、あるいは同じ荷重条件にもかかわらず変形が徐々に進行する場合である。このような状態は異常状態 (Abnormal Condition) の始まりと判断でき、「アラームを発報」、「精密な検査の実施」、「供用の停止」、「交通規制」、「精密な検査の実施」などの対応を検討する必要がある。

3. 2 絶対値管理と傾向管理

構造モニタリングにおいて重要な課題として、管理値 (得られた結果を評価し、対応を決定するための判断基準) の決め方がある。これまでは主に絶対値管理が行われてきたが、これは設計における許容値の概念の延長線上にあるものである。また、定期的な計測を行った場合、絶対値そのもので管理せざるを得ないということも影響していると考えられる。

しかしながら、老朽化が進んだ構造物の場合、ひび割れの発生状況や材料特性の劣化、さらには支持部の劣化 (境界条件の変化) などがあり、一律に管理値 (許容値) を決めることが難しい。地盤や岩盤などの影響を強く受ける構造物のモニタリングの場合は、変形特性はそれぞれの場所

によってまったく異なり、絶対値としての管理値はほとんど意味がないと言って過言ではない。

これに対して、長期連続モニタリングを行った場合、従来の絶対値による管理に加え、変形量の増加率によっても管理 (傾向管理) することが可能となる。変形量がある管理値 (絶対値) を越える場合も、図-3に示すようにいろいろなパスがあり、それぞれのパスの持っている意味が異なる。

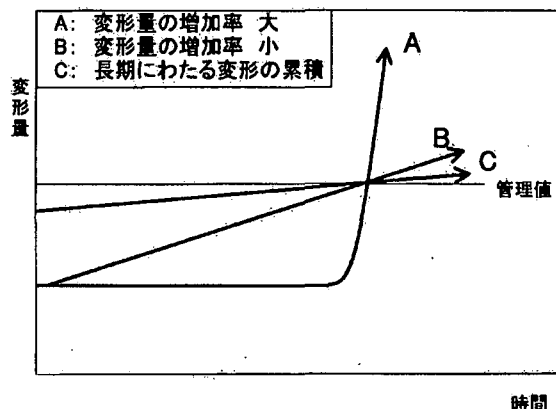


図-3 管理値を超える様々なパス

最も緊急を要するものは、何らかの原因で変形量の増加率が急激に大きくなったパスAであり、「アラームの発報」、「供用の停止」、「交通規制」などの緊急措置をとり、補修や補強等の対策を早急にとる必要がある。一方、パスBやパスCのように長期間にわたってゆっくりとした変形が累積して管理値を越えた場合、直ちに「構造物の安定性が失われている」あるいは「異常状態の前兆が現れた」とは判断し難く、詳細な検査を実施した上で慎重に判断する必要がある。

変形量の増加率についての管理値を決めることも容易ではないが、実用的には、同じ荷重に対して変形量の増加率が顕著になってきた (例えば通常時の増加率に比べてオーダー的に大きくなった) ことによって構造物の損傷が進み、危険な状態に近づいてきたものと判断することができる。

同じ管理値を超えた場合でも、パスBやパスCのように変形量の増加率が小さい場合は緊急を要さない。しかし、パスBの場合は増加率の変化に十分注意を払う必要があり、時間とともに増加率が大きくなる傾向が見られる場合は何らかの対策が必要となる。

パスCは長期にわたる変形の累積によって管理値を超えるパターンであり、必ずしも構造的安定性が失われているとは言えない。この場合は、管理値の妥当性を見直すことも必要であろう。

このように、従来のような絶対値管理と傾向管理を併用することによって老朽化した構造物の健全度や安定性の

評価の信頼性を増すことが可能となる。特に、地盤や岩盤、トンネルの安定性のように不確定要素が多く、絶対値としての管理値を決めにくいようなケースに対して異常状態の前兆を察知する方法として有効である。

4. 長期連続モニタリングのためのシステム

構造物の長期連続モニタリングを行うためのシステムに求められる要件を以下に示す。

- ① センサが長期間安定していること
システムが長期間（10～50年）安定していることが重要である。特にセンサ部の安定性は不可欠であり、光ファイバセンサはこの要求を満足している。
- ② 対象構造物の全体的な挙動を把握できること
長期連続モニタリングの目的は、材料的な劣化やひび割れなどの損傷のある構造物の健全度や安定性を評価することである。ひずみゲージのようにゲージ長さの短いものは、弾性領域では正確な計測が可能であるが、ひび割れが発生した後は歪及び応力の再分布が生じるためデータのバラつきが激しくなり、構造モニタリングとしての有効性が失われる²⁾。ひび割れなどの局所的な影響を受けずに構造物の全体的な挙動を把握するためには、測定長さの大きいセンサが必要である。
- ③ 静的及び動的挙動を把握できること
長期連続モニタリングは、主にゆっくり進行する変状を評価するものであるが、地震のような突発的な事象に対しても自動的に動的測定ができることが重要である。
- ④ 測定感度が高いこと
構造物のわずかな変形から変状の初期段階を把握

- ⑤ 温度の影響がないこと
実際の構造物は温度によっても変形する。一般的には不均一温度場となるので温度による変形とそれ以外のものに起因する変形を分離することは容易ではない。少なくともセンサ自体は温度の影響を受けないものである必要がある。
- ⑥ ノイズの影響を受けないこと
センサは電気ノイズや雷の影響を受けないものであることが必要である。一般に、光ファイバセンサはこの要求を満足している。
- ⑦ センサの取付けが容易であること
センサの取付けが容易であれば、取付け場所の制約がなく、どのような場所、どのような表面状態でも設置できることを意味する。また、道路施設や鉄道施設の場合、設置作業時間の制約が大きいので、センサ取付けが容易であることは実用上非常に重要となる。
- ⑧ 電源喪失に対して問題がないこと
長期モニタリングの間には必ず電源喪失（停電）がある。データの連続性の確保、遠隔モニタリングの観点から、仮に一時的に電源喪失があっても自動復帰するシステムであり、再調整が不要なシステムでなければならない。
- ⑨ 自動で連続測定ができ、遠隔地からモニタリングできること
長期にわたってモニタリングするためには、データ収集の自動化と遠隔モニタリングシステムが構築されていることは必須である。遠隔モニタリングシステムの概念を図-4に示す。（現在提案されている光ファイバセンサーの種類と比較については文献(1)を参照されたい）

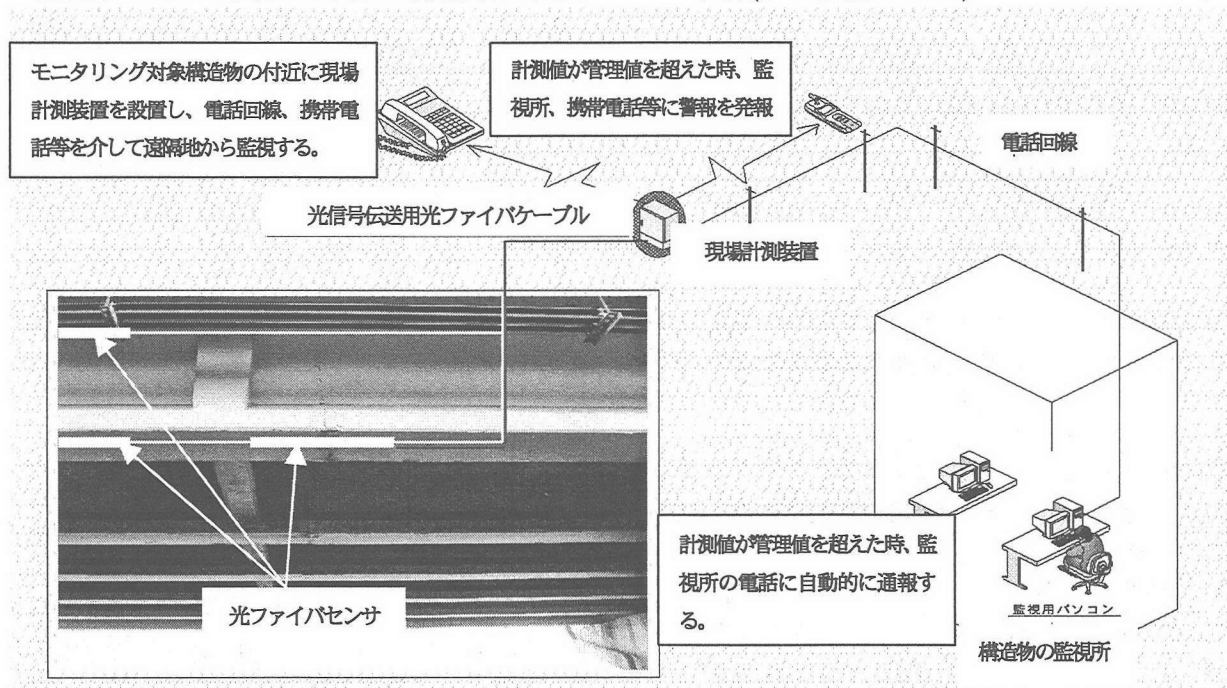


図-4 遠隔モニタリングシステムの概念

5. 長期連続モニタリングの実施例

現在実際に長期間連続モニタリングを実施している土木構造物の代表的な実施例として、非常に古い鉄道高架橋と道路トンネルおよび法面についてのモニタリング結果を以下に示す。

5.1 鉄道高架橋

(1) モニタリングの概要

この高架橋は古いレンガ造の連続アーチ高架橋である。モニタリング目的は、通常はアクセスが難しく検査が困難な部位について、遠隔で長期的な変状を監視することである。高架橋の端部に近い一つのスパンを抽出し、図-5に示すように、長さ2mの光ファイバセンサ4本をアーチに沿って設置した。

モニタリングは30分に1回の頻度でデータを保存する静的計測と、必要に応じて列車の通過に対する挙動の動的計測や、地震などの突発的な事象に対する動的計測を行っている。

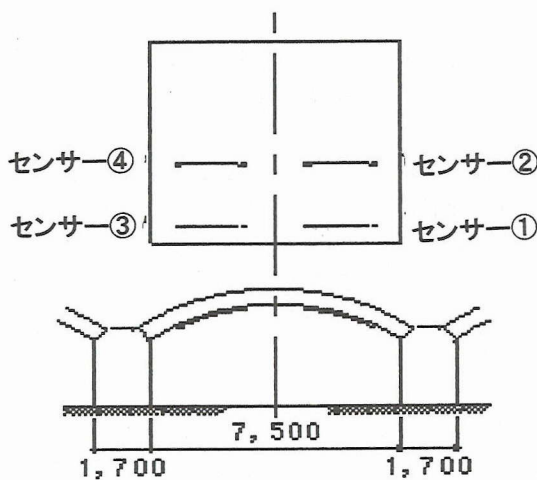


図-5 光ファイバセンサ設置位置

(2) モニタリング結果

モニタリング開始から900日間（約2.5年）の連続モニタリング結果を図-6に示す。図中の変形量は、長さ2mのセンサを固定した両端の間の相対変位を表す。

センサ①、②とセンサ③、④の測定値は1年周期で逆モードの変形となっている。これは、以下のような理由による。上部構造が季節的な温度変動によって膨張、収縮しよ

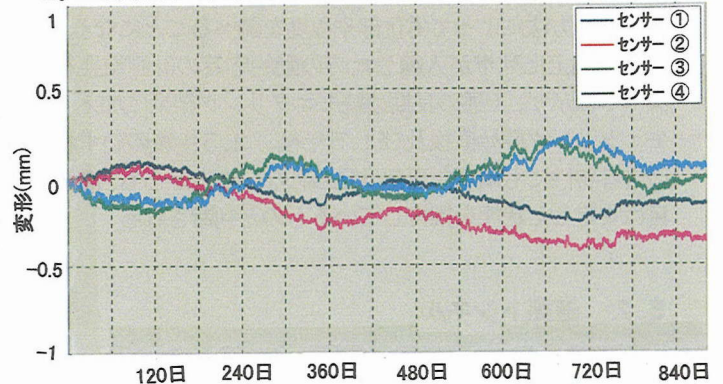
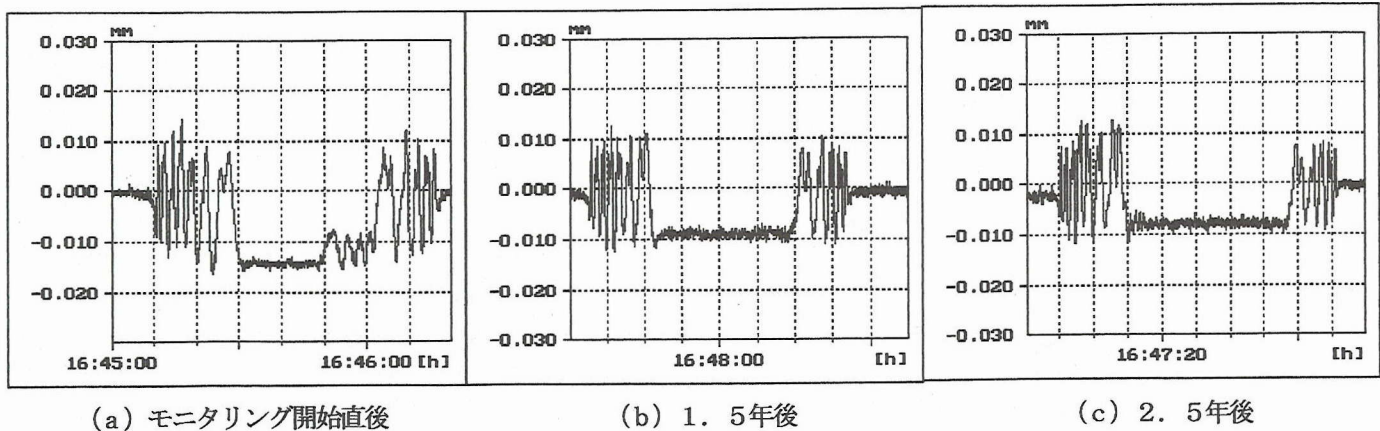


図-6 モニタリング開始から900日間（2.5年）にわたるアーチ部の変形の推移

うとするのに対し、基礎部が固定されているため連続高架橋には中央部を中心に左右対称にゆがみが生じる。このゆがみは連続高架橋の端部に近くなるほど大きくなる。本モニタリングは連続高架橋の端部に近いスパンを抽出して行ったので、アーチ部には図-6に示すような逆対象の変形が生じた。長期的な傾向としては、センサ①、②の変形は圧縮側に、センサ③、④の変形は引張り側にわずかにシフトする傾向がみられる。しかし、このシフト傾向は2.5年後の現在は停止する傾向を示している。

1年周期の変形が上部構造の温度変化に起因するものであることに対し、シフト傾向は経年的な変化と解釈する



(a) モニタリング開始直後

(b) 1.5年後

(c) 2.5年後

図-7 列車が入線した時の動的応答波形

ことができる。経年変化の原因としては、例えば基礎の不
均一な沈下や構造材の劣化などが考えられる。しかし、シ
フト量は非常に小さい値であり、構造全体としては安定し
た状態を維持しているものと判断される。

一般に、構造物の剛性が低下すると、固有振動数や振幅
などの動的特性が変化する。この変化に着目することによ
って構造物の損傷状態を評価することもできる。

現状においては、動的特性の変化量と部材の劣化の定量
的關係は不明である。しかし、モニタリングにおいては異
常の兆候を把握することが重要であり、兆候が見られた場
合は他の方法によって劣化部や程度を調べることになる。

高架橋上に列車が入線した時の動的応答の計測結果を
図－7に示す。上述の長期連続モニタリング結果に加え、
モニタリング開始直後及び1.5年後、2.5年後のいずれ
の応答特性にも顕著な変化は見られないことから、高架
橋は安定した状態を維持しているものと判断される。

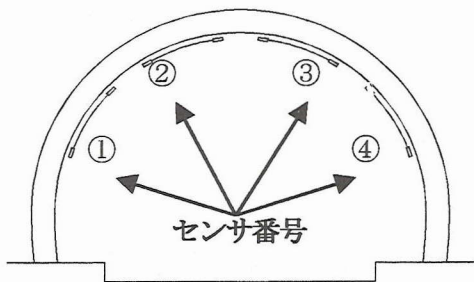
5.2 道路トンネル

(1) モニタリングの概要

このトンネルは山岳工法で建設された総延長約6 Km
の道路トンネルである。モニタリング目的は、地山の動き
に伴う覆工コンクリートの変状を長期にわたって監視す
ることである。

センサは坑口から約3 Km地点の数カ所の計測断面に
対し、図－8に示すように、長さ2 mの光ファイバセン
サをトンネルの天端中心振り分けで4本設置した。

モニタリングは30分に1回の頻度でデータを保存す
る静的計測と、地震などの突発的な事象に対する動的計測
を行っている。



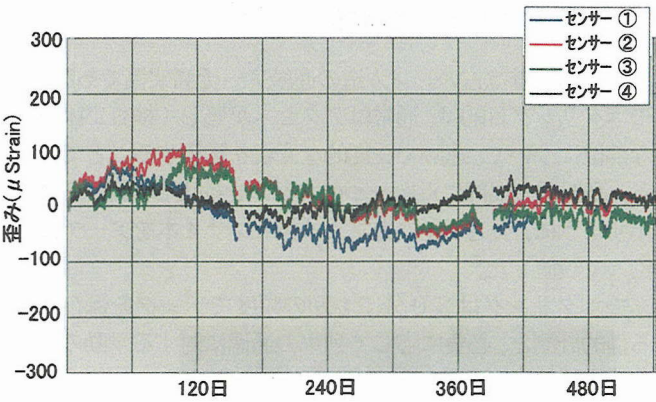
図－8 光ファイバセンサ設置位置

(2) モニタリング結果

モニタリング領域の代表的な計測断面について、モニタ
リング開始から約540日（約1.5年間）におけるモニ
タリング結果を図－9に示す。センサによって多少の差は
あるものの、いずれのセンサの結果も、日々の温度変動に

伴って変動しながら、全体的には1年周期の季節変動に伴
って圧縮、膨張を繰り返している。長期的に見れば、いず
れも基軸がわずかに圧縮側にシフトしている。このシフト
の原因は現段階では特定できないが、背面土圧の変動のよ
うな何らかの進行性成分の存在を示唆している。

このモニタリング結果は、覆工コンクリートの構造健全
性の観点からは、特に問題となるような大きな変形は認め
られず、構造的には安定な状態が維持されているものと判
断される。



図－9 モニタリング開始から540日間（1.5年間）
の覆工コンクリート表面歪み

図－9のモニタリングデータには、季節的な温度変動に
よる周期的な成分と基軸をシフトさせるような進行性成
分が含まれている。このモニタリングデータから、周期性
成分と進行性成分を分離する方法を試みた。

基本的考え方は次のとおりである。

- ① 計測値の平均値に対する1次近似関数を求める。
- ② 計測値の平均値と1次近似関数との差を求める。

上記の方法を適用した結果を図－10に示す。
赤線が図－9の計測値の平均を表し、その1次関数近似を
黒線で、赤線と黒線の差を青線で示す。青線で表される周
期性成分は1年サイクルの季節変動の周期に一致するこ
とが明らかである。

図－10で得られた周期性成分と覆工コンクリートの
表面温度から計算した覆工コンクリートの自由熱膨張歪
み（ただし、覆工コンクリートの温度は厚さ方向に温度勾
配をを持っているのに対し、温度計測は覆工コンクリート
表面のみで行ったので、見掛け上の熱膨張量はコンクリー
トの自由熱膨張の0.6倍と仮定した）の比較を図－11
に示す。赤線が歪みの計測値の周期性成分、黒線が熱膨張
歪みである。両者とも周期性を持っているが、位相にズレ
が見られるので、熱膨張歪みに3ヶ月の位相を加えた（3
ヶ月遅らせた）結果を青線で示す。この結果は赤線で表さ
れる歪み計測値の周期とよく一致する。

この事実より、長いトンネルの中央付近においては、覆
工コンクリートの熱変形は、坑内温度にほぼ一致すると思
われる覆工表面温度に対して一定の時間遅れで現れるこ

とが分かる。また、見掛けの熱膨張量をコンクリートの自由熱膨張量の0.6倍にすればよく一致することは、覆工コンクリートの熱変形が、覆工の表面温度ではなく中立面付近の温度に支配されていることを表している。

これらの現象は、覆工コンクリートの熱変形は坑内温度だけではなく、覆工背面にある地山の温度の影響も強く受けることを表しており、どの程度の時間遅れがあるかは、トンネルの長さ、地山の条件（かぶりの深さ）、地下水の条件などによって変化するものと思われる。この時間遅れを理論的に導くことは難しいが、長期モニタリングにおい

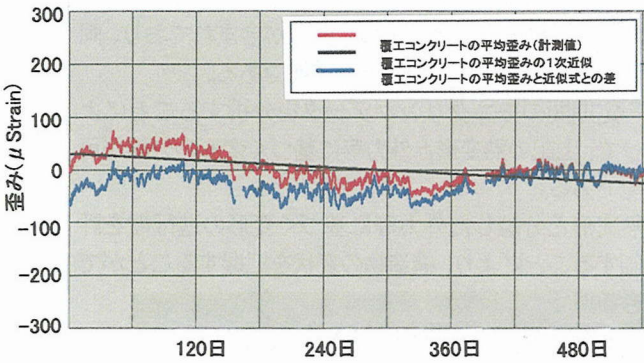


図-10 覆工コンクリートの平均歪みにおける
周期性成分と進行性成分の分離

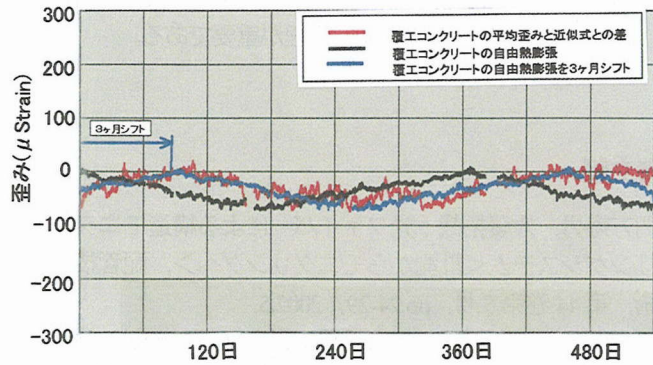


図-11 覆工コンクリートの平均歪みにおける
周期成分と坑内温度から求めた覆工
コンクリートの自由熱膨張との関係

ては、一定期間の累積データを分析することによって容易に導くことが可能である。

以上のように、モニタリングデータから周期性成分と進行性成分を分離することにより、地山の動きや覆工背面土圧の急激な変化などに起因する変状を把握することが可能となる。

5.3 法面

(1) モニタリングの概要

この法面は鉄道軌道用として建設された盛土の法面であり、一部に集中豪雨により小規模な地滑りが発生した。地滑り箇所を復旧するとともに、長期的な法面の遠隔監視を目的としてモニタリングが実施された。

センサは、地滑りが発生し復旧した個所に1本、復旧個所の周辺の法面に3本、合計4本設置した。センサの設置方法としては、センサを取付けた杭を垂直に埋め込み、杭の曲げ変形によって地滑りの発生を検知できるようにした。法面形状及びセンサー設置位置を図-12に示す。

モニタリングは30分に1回の頻度でデータを保存する静的計測と、地震などの突発的な事象に対する動的計測を行っている。さらに、計測値が管理値を越えた場合、管理事務所に自動的に警報を送信するシステムとした。

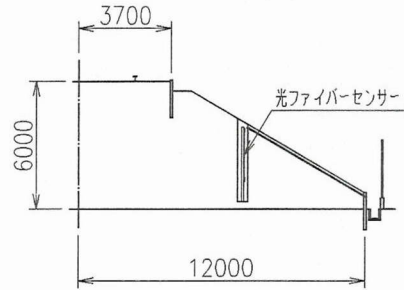


図-12 法面形状及び光ファイバー設置図

(2) モニタリング結果

モニタリング開始開始から1年間のモニタリング結果を図-13に示す。縦軸は杭の変形量であり、法面の動きはこの測定値の約20倍である。図より、復旧箇所以外では大きな動きが見られず、安定した状態が続いていることが分かる。これに対して、復旧箇所では最初の半年間わずかずつ変形が進行している。これは降雨のたびに復旧箇所の地盤が徐々に締め固まってきたことを表している。モニタリング開始半年後に急激な動きが見られるが、これは台

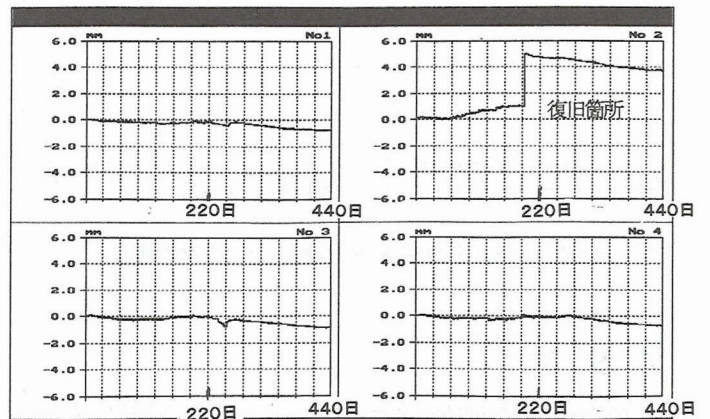


図-13 モニタリング開始から約1年間の法面の動き

風による集中豪雨に伴い、まだ完全に安定化していない復旧個所に地滑りが再発したことを表している。ただし、計測値の急激な変化量が約4mmであり、法面の動きに換算すると約80mmと小規模なものであることが分かる。このことは、実際の地滑りが表層土のわずかな崩れだけであったこととよく一致する。

復旧個所の急激な動きを拡大したものを図-14に示す。この図から、地滑りは瞬間的に発生するのではなく、徐々に法面の变形速度が大きくなり、次第に不安定な動きに結びつく挙動であることが明らかである。今回のケースでは、地滑りが小規模であったため、法面が動き始めてから約5時間で变形が収束した。

今回のモニタリングシステムでは管理値を3mm(杭の変形量)としていたので、变形速度が大きくなり始めてから約2時間半後に管理事務所に警報が自動的に送信された。警報を受信した係員が現場に急行し、目視で法面の状態を監視し、列車の安全運行に支障があるかどうかいち早く判断することができた。地滑り発生が深夜だったこともあり、モニタリングを行っていなければ地滑りが発見されるのが大幅に遅れたと考えられる。

今回のケースは図-3で示したパスAに相当するものであり、变形の絶対値に加え、变形速度の変化率にも着目して管理値を設定すれば、さらに早期に地滑りの前兆を捉えることができることが明らかになった。

地滑り現象は場所によって大きく異なるため、一律の管理値を決定することは困難である。長期連続モニタリングを実施した場合、当該個所の通常の動き(例えば雨量と变形速度の関係など)を把握できるので、このデータの蓄積によって信頼性の高い管理値を設定することが可能である。

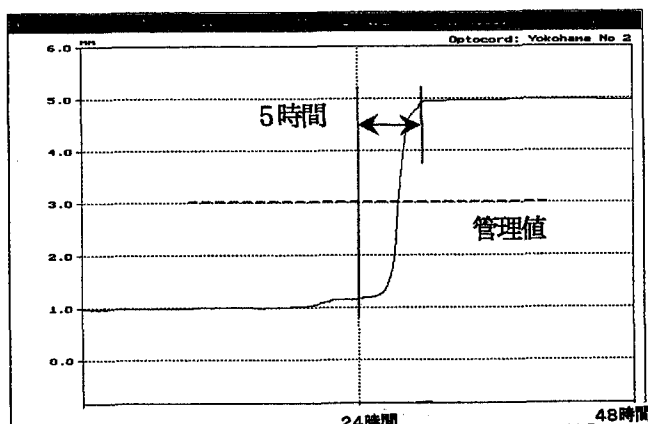


図-14 地滑り発生時の法面の急激な動き

6. 結 論

筆者らは、長期連続モニタリング技術を「老朽化した構造物を、必要最小限の維持管理費によって使い続けるため

に不可欠な技術」として位置付け、長期連続モニタリングの役割、概念、モニタリングに求められるシステムについて考察した。また、光ファイバセンサによる実構造物の長期連続モニタリング結果について考察し、次の結論を得た。

- ① 構造物の維持管理を行う手法の一つとして、構造物の变形や歪み、振動特性などを長期にわたって連続的にモニタリングすることは非常に有効である。
- ② そのためには、測定基軸がずれず、長期間安定した計測ができる遠隔モニタリングシステムの確立が不可欠である。
- ③ 一般に、モニタリングデータには構造物の温度変動に伴う熱変形と外力等に基づく变形が含まれており、両者を分離して評価することが重要である。
- ④ 一定期間のモニタリングデータを分析することによって、上記の熱変形と外力等に基づく变形の分離が可能である。
- ⑤ 熱変形と分離した外力等に基づく变形の進行性を評価することにより、構造物の変状を把握することができる。
- ⑥ 動的荷重を受ける構造物の場合、長期連続モニタリングに加え、定期的に動的計測を実施し、動的応答特性の変化から構造物の変状を評価することができる。
- ⑦ モニタリング結果の評価においては絶対値管理と傾向管理の2つの方法が考えられるが、多くのクラックが存在し、材料劣化が進んだ構造物に対しては傾向管理が有効である。特に、法面などのように不確定要素の多い構造物に対しては傾向管理が重要である。

参考文献

- 1) 門万寿男, 佐藤拓哉: 光ファイバーによる構造モニタリングシステム<計測からモニタリングへ>, 配管技術, 第44巻第6号, pp.24-29, 2002.5.
- 2) 馬場弘二, 城間博通, 伊藤哲男: 光ファイバーセンサによるトンネル覆工コンクリート載荷試験の变形計測, 土木学会トンネル工学研究論文・報告集, 第11巻, 2001.11, 報告(19)

(2003年4月18日受付)