

第6回 PC 構造物で使用される長期モニタリング手法

講師：羅 黄順*1, 岡本 卓慈*2

1. はじめに

Structural Health Monitoring Based Maintenance (SHMBM) は、供用期間を通じて構造物をモニタリングし、その観測情報を活用して合理的に健全性を維持しようとする Life Cycle Management (LCM) 手法です。

構造物が種々の不確定性負荷をうけると、その応答メカニズムは必ずしも明確ではないが、一連の応答挙動を長期間監視し続けることによって健全度の評価や破壊に関する警告を可能にするような効果的な情報が得られる可能性があります(図-1)。たとえば、最大変位(ひずみ)の増加状況や、部材の実応力の変化などは有力な情報です。

このような情報源としてのセンサの開発コンセプトを、Accuracy, Benefit, Compact, Durability, Express すなわち 'AtoE' の5つの要求性能を満たすものとし、

SHMBM は構造物を長期間にわたって監視すること、対象構造物の大半は健全であり監視点検は人の健康診断に類似したものです。そのコストは一定限度内にとどめる必要があるなど、これまで使用されてきたセンサでは満足できない特性が要求されます。上述の要求特性のうち、とくに①センサの寿命は、監視する構造物と同等以上の寿命を有することとし、少なくとも50~100年を目標とする。②供給コストが小さく監視点検の障害にならないシステム価格の実現。③計測情報はインターネットなどの情報網を通じて任意に取得可能なこと。④巨大地震などハザード対応ができていないことなどを重視します。

SHMBM では、まず対象橋梁の諸元についてデータベースを構築し、これをもとにモニタリングの事象、位置、情報収集手段などが選択されます。一般的に、高速道路橋などでは、設備や要員の配置からモニタリングは比較的实现しやすく、コスト負担比率も相対的に小さい場合が多く、また、直轄国道では沿線に光ファイバー網が設置されるなど通信手段が整備されており、電源設備なども利用可能な場合が多い状況にあります。しかし、大半の地方道では、通信手段や電源などの設備がなく、要員確保、モニタリング機器の導入・運営等が困難な場合が多く、また全体に劣化事象が緩慢で過負荷損傷などの発生頻度が小さいなど、モニタリングのほとんどが事象待ち受け時間となることな

ど、モニタリングが有する課題も多いのが実態です。この課題に関しては、きわめて長期間の耐久性能や、無電源での待ち受け機能をもつ知能型センサなどが開発されつつあります。

その他に、モニタリングは定期的な点検調査などと組合せて実施されることが一般的ですが、点検調査では経験豊富な技術者が要求されることから、その不足を補うことを目的に、エキスパートシステムが研究・開発されています。このように、道路橋のモニタリング技術は、まだ成熟したものとはなっておらず、今後の開発が期待されています。

以下、鋼製引張材を対象にした実応力監視センシング技術、支承・制震装置などの最大変位記憶センシング技術、コンクリートの応力変化センシング技術について述べます。

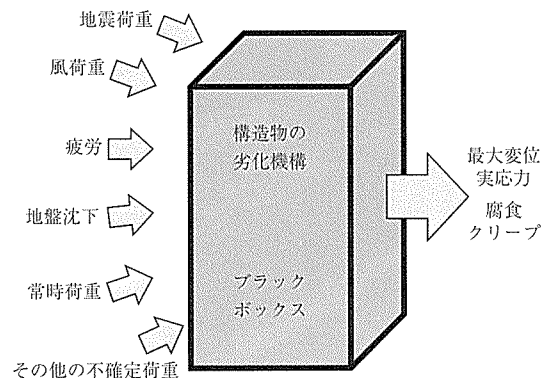


図-1 構造物の劣化要因例

2. パルス型磁歪センシング技術

鋼材について、Elastic-Magnetic (EM) 現象を利用し、応力と透磁率および温度との関係付けを行えば、被測定体はもちろんのこと、保護用被覆さえも傷つけることなく、ケーブル、鋼棒、鋼より線などの実応力を測定することができます。最近、パルス型EM現象を利用して、複雑な鋼材のヒステリシス曲線全体を用いずに、微分的な磁界強さと磁束密度から透磁率を測定し、瞬時に鋼材の応力を算定することができる応力測定方法が開発されています。

EMセンサは、1次コイルおよび2次コイルと温度センサ

*1 Sunaryo SUMITORO : President, Smart Structures 社, イリノイ, アメリカ

*2 Takuji OKAMOTO : (株)計測リサーチコンサルタント 代表取締役社長

を含んだ円筒型コイルであり、被測定体に接着しないので任意位置にセットすることができます（図 - 2）。1次コイルに変動電流を流すと、ソレノイドの中の被測定体（鋼材）に磁束密度の変化が生じて、2次コイルに誘導電圧が発生します。

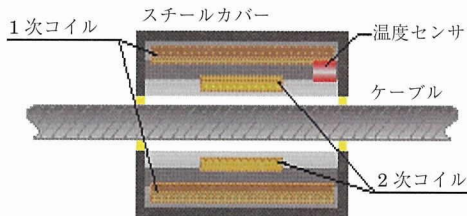


図 - 2 EM センサの構造

EM センサは、磁ひずみの原理を応用した磁性線材の実応力計測センサですので（図 - 3）、ひずみ～応力変換でなく直接応力を検出すること、対象線材の周辺に装着するだけで保護材を損傷せず、ロードセルのように構造系に介入することも少ないなど、多くの長所があります。

図 - 4 は、EM センサを斜張橋の主ケーブルに装着して、建設時の張力制御から開通後のケーブルの維持管理までを連続して実現したモニタリング事例です。EM センサは施



図 - 3 大量生産されている EM センサ

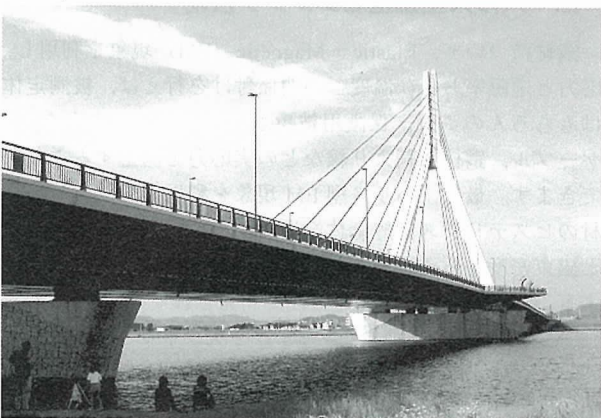


図 - 4 EM センサを設置した斜張橋

工時の設置だけでなく、既存のケーブル張力の計測も可能であり、また、緊急度に応じてマニュアル計測や自動・遠隔監視を行うことができるなど、システムの柔軟性に富んでいます

図 - 5 は同じく EM センサを用いて、外ケーブルの張力監視を実施した事例です。新素材を用いたケーブル被覆と偏向部（deviator）との摩擦抵抗による張力ロスを検出するなど、高精度の張力管理を実現しています。

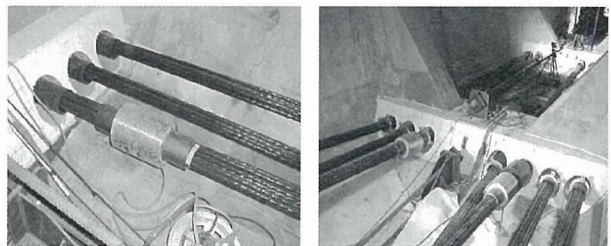


図 - 5 外ケーブルへの EM センサの設置

EM センサによる応力測定は、非破壊・非接触で操作が簡単なこと、残存応力を含めた実応力が容易に測定できることから鋼材の応力モニタリングに適しています。以下にこれまでに得られた EM センサ技術に関する主な知見をまとめて示します。

- ① EM センサは一組の磁束印加コイル（入力）と磁束検知コイル（出力）で構成されています。PC 鋼材は強磁性体として、その透磁率が応力に比例して敏感に変化します。EM センサはこの透磁率の変化をセンサコイルによって検出します。
- ② あらかじめいく種類かの PC 鋼材をキャリブレーションしておけば、蓄積されたデータを同規格の鋼材の応力測定のために用いることができます。
- ③ PC 鋼材の磁気特性のばらつきは、鋼材の物理的特性とは関係ありません。EM 測定の精度を高めるためには、鋼材の磁気特性とそのばらつきに関する知見が大切です。PC 鋼材における磁気特性（透磁率）のばらつきは蓄積されたデータによると、海外製（スロヴァキア、スペイン、英国、米国、カナダなど）は 5% 以内であり、日本製は 3% 以内です。
- ④ EM センシング技術では、応力や温度に依存する PC 鋼材の透磁率変化を、検知コイルに生じる誘導起電力として検知するので、測定結果にはコイル周辺の磁場強度や磁束密度分布が関与します。非磁性体でできた鋼材の被覆は問題ないが、センサの周辺に強磁性体がある場合、周辺の磁束分布に影響を及ぼします。この場合不安定な磁場変化を防ぐために、センサ周辺の十分な磁気保護を考慮する必要があります。

3. 最大変位センシング技術

地震や過大交通荷重など一過性の外力を受ける構造物の変位やひずみなどは、これまで動的測定システムで計測されてきました。しかしこのシステムは電源・記録器などを整備した高価なシステムとなる一方、機能保持にも課題が

多いと考えられます。ピークセンサは図-6のように、変動する変位（ひずみ）の最大値を記憶保存するので、適当な時間間隔で計測することで過去の最大値の履歴を読みとることが可能です。

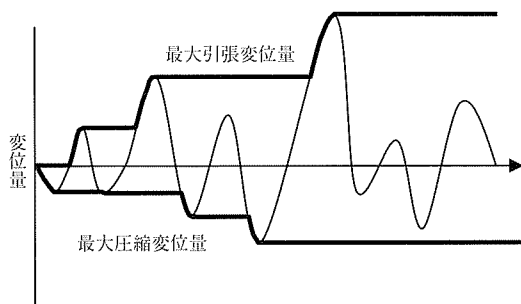
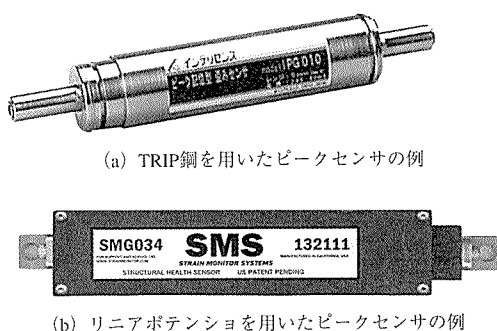


図-6 変位の経時図

大多数の地方道など通信設備や電源のない道路橋のモニタリングを、いかに低コストで合理的に実現するか、今後の大きな課題です。ピークセンサはこの課題に答えようとするひとつの提案です。一般に多くの道路橋は日常の点検を基調として、過負荷積載車両や地震などの異常外力による応答が課題となります。しかしこのような事態の発生はきわめて稀であり、計測装置はそのため無制限な待ち受け状態となります。そこでこの待ち受け期間にはセンサは無電源で休止状態とし、過去にないような大きな異常事態が発生したときにはその応答値をピーク値として無電源状態でも記憶できるようなセンサが考案されています。

ピークセンサを実現する方法はこれまでに、TRIP (Transformation Induced Plasticity) 鋼を用いた最大ひずみ記憶特性を応用するものや、従来のリニアポテンシオメータを利用するものなどが考案されています。図-7にピークセンサの例を示します。



(a) TRIP鋼を用いたピークセンサの例

(b) リニアポテンシオを用いたピークセンサの例

図-7 ピークセンサの例

図-8はこのセンサを用いて桁の最大ひび割れ幅を監視する概念図です。なおTRIP鋼の最大ひずみ記憶特性はこのようなセンサとしてでなく、RC用鉄筋のような構造物材料に加工して利用することも研究されています。

また図-7(b)はリニアポテンシオメータを応用して最大・最小値記憶を可能としたセンサの例です。図-9はこ

のセンサを用いてゴム沓の変形監視を実施した事例です。免震構造として開発されたゴム沓は、平常時に交通振動に共振して橋桁の振動をかえって増幅する傾向が発生するなどの課題への対応も含めて、ゴム沓の最大変位の実態を観測しています。

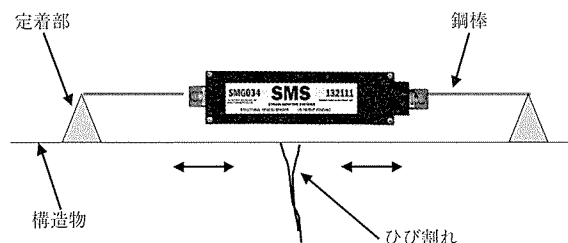


図-8 PC 構造物の最大ひび割れ幅のモニタリング

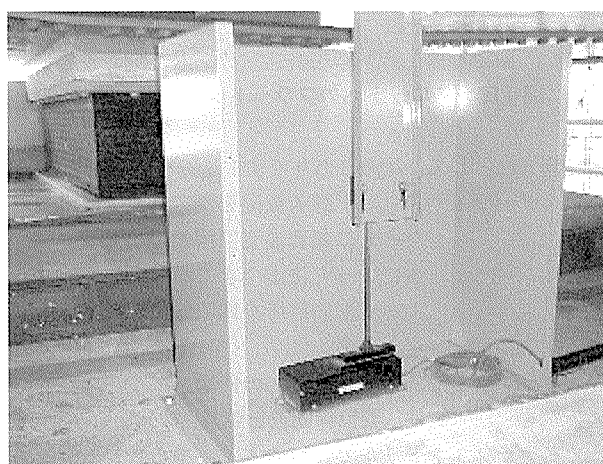


図-9 実橋でのゴム沓の変形監視

4. コンクリートの応力変化センシング技術

スロットストレスはコンクリート構造物 (RCまたはPC) のストレスを測定するための効率的かつ正確な方法です。このセンシング技術は長期間モニタリング手法ではありません、しかし、対象構造物をモニタリングする前に、その既設構造物の現有応力、すなわち、現有性能を検知することにあたって、最適な手法です。この方法では、測定箇所切込 (スロット) を入れ、その中にフラットジャッキを挿入して、直接的にコンクリート中のストレスを、ストレス開放法の原理に基づいて測定します。適用構造物を以下に示します：

- ・ RC 構造物：トンネル、橋脚、壁面等に発生する応力とその分布状態を把握します。
- ・ PC 構造物：梁、ボックスガダー、タンク等の残存プレストレスを測定し、プレストレスの減少量や、プレストレスの分布状態を把握します。

この方法は、図-10に示すように測定すべきストレスと垂直な方向に幅 11 mm × 80 ~ 150 mm 正方形の切込を切削した後、特別に用意したフラットジャッキを用いて、切削により発生したコンクリートの変位を元に戻すことによ

り応力を測定するものです。

スロットストレスは従来型なストレス開放法と比較して、いくつかの改善が加えられています。特殊な形状のフラットジャッキが、切削面に均一な応力領域を形成し、正確な測定を可能にしています。

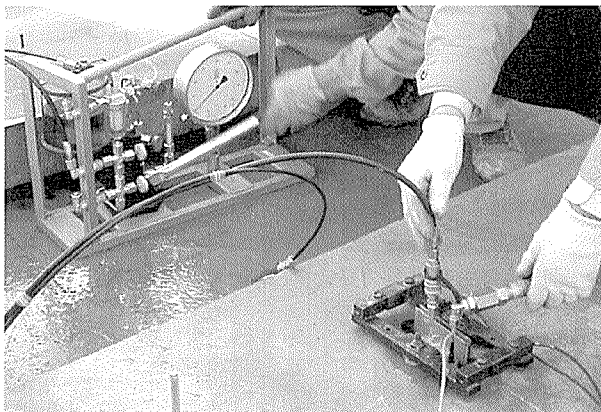


図-10 スロットへのフラットジャッキの挿入

実施方法として、次のとおりです：

- ・ステップ1：スロット挿入位置を決定します。これはたとえば超音波変位探知機の取付けやすさによって決定できます。鉄筋探査機によって配筋箇所を確認し、切削箇所を決定します。
- ・ステップ2：スロットエリアの両端に二つの基点を設け、変位探知機を設置します。
- ・ステップ3：ドリルで二つの穴と一つのスロットを作ります。ストレスが残留していれば、ドリリングの過程において、スロット両端のコンクリート間距離 d は減少します。(図-11 参照)。

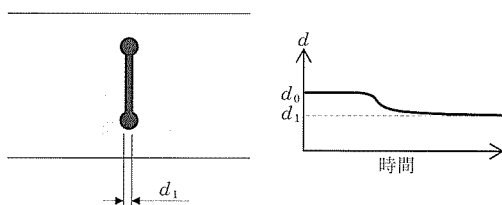


図-11 スロットの変化

- ・ステップ4：フラットジャッキを挿入します。ジャッキに圧力を加えることにより二端は離れていきます。切込前の距離に復元するのに必要な圧力はスロットに垂直方向の働く圧縮力そのものとなります。ソフトウェアがデータ認識と温度との相関性を処理します。
- ・ステップ5：測定後、スロットの穴をモルタルで充填しますので、非破壊検査の範疇に入ります。

機材は以下のものよりなります。

- ・水圧式コアドリル、水圧式コンクリートカッター (図-12、スロット切込用)
- ・変位探知機、圧力・温度探知機、デジタルバス (携帯式コンピューターに接続するため)
- ・リムのない長方形フラットジャッキ、高精度水圧式ハンドポンプ

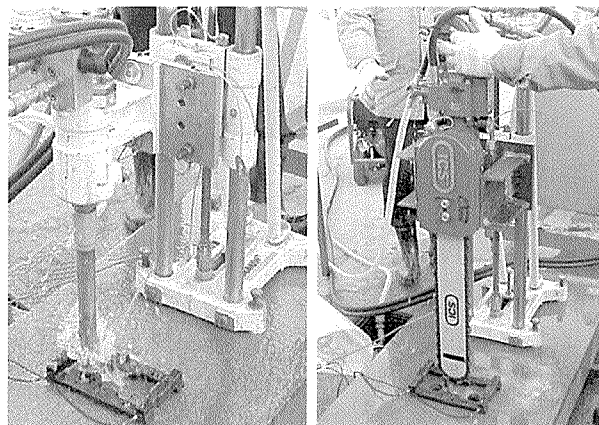


図-12 水圧式コアドリル、コンクリートカッター

すべての器材は大型ボックス一つに収納でき、総重量は200 kg ぐらいであり、おのおの器材は一人の人力運搬で可能です。

図-13に示すように、本センシング技術は既設PC構造物のコンクリートの応力変化を検知するのは最適です。

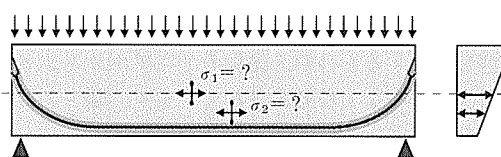


図-13 PC梁への適用例

5. おわりに

これからの数年間にセンサはもちろん、計測・通信・データ評価手法などを開発し、標準化して実用に耐える技術を完成する必要があります。以下、これからのPC構造物など土木構造物一般のヘルスマonitoringについて、課題・展望などをまとめます。

- ① 構造物データベースの構築：橋梁データベースはモニタリングを活用してアセットマネジメントを進める基盤となります。現時点では、(旧)道路公団、国土交通省、地方公共団体など管理主体ごとに整備されています。今後はこれらを統括し、保存情報を統一してより多面的な活用が可能なものとするのが望まれます。たとえば(財)道路保全センターで進められているデータベースの整備・運用などに期待するところが大きいと考えております。
- ② 次世代通信システムの利用：とくに地方道橋のよう

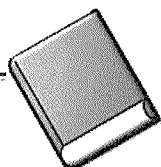
な、離散的で電源や通信手段をもたない橋梁のモニタリング情報の収集には、次世代携帯電話網など、無線通信網の安価かつ確実な通信網が必要と考えられます。これまで運用されている防災無線システムなどは信頼性が高いが高価でチャンネル数も限定的である。一般に普及するモバイルシステムに緊急・防災枠を設定して地震時などの回線を優先的に確保するなどの工夫をすれば相当の進展が期待できる。もちろん直轄国道に沿った光ファイバー網の利用も考えられる。今後整備が進む通信基盤を積極的に活用すべきだと思われる。また一方では、ユビキタスのようなIT技術や燃料電池・太陽電池などの電源の進展に期待するところも多い。

- ③ あたらしいセンサの開発： 事例でも紹介したように、筆者らはピークセンサ、EMセンサなどの研究開発に取り組んできました。また最近では光ファイバーセンサの活用も開発されています。筆者はセンサのも

つべき特性として、A to E (Accuracy, Benefit, Compact, Durability, Express) の5つを提唱しており、今後これらの特性をより向上させていく必要があります。さらに、センサの性能を客観的に評価・保証する機構や規格の制定など、社会的技術基盤の整備も必要であります。

- ④ 官学民の連携とNPOの活用：橋梁の点検調査やモニタリングシステムの保守などは、日常定型的作業でありながら適切な専門的判断を迫られるなど、その実施には課題が多い。専門性・要員の確保や公共性・技術の伝承などの課題を解決する手段として、コンサルタントなどの専門技術者と大学などの研究機関、学生との協調が不可欠です。また、市民がNPOとして社会基盤の保守管理に参加することも非常に意義あるものと思われます。これらの連携を誘導するしくみづくりが期待されます。

【2005年10月27日受付】



● 関連書籍のご案内

● 初期応力を考慮した
RC 構造物の非線形解析法とプログラム

平成16年3月発行

田辺忠顕編著／技報堂出版刊

B5判・358頁（本体価格6,000円＋税5%）

技報堂出版

〒102-0075 東京都千代田区三番町8-7 第25興和ビル

TEL03(5215)3165 FAX 03(5215)3233