

インフラストラクチャーにおける状態監視技術



曾我 健一
Kenichi Soga

ケンブリッジ大学
工学部 土木工学専攻 教授
[専門分野]地盤工学



山田 聖治
Seiji Yamada

構造物技術研究部
建築研究室 主任研究員
[専門分野]建築構造, 環境振動

現在、世の中には鉄道をはじめとした多くのインフラストラクチャーがあります。インフラストラクチャーの老朽化による劣化や近接工事時の変形は、時として事故を引き起こす可能性がありますので、その状態を監視し、事故を未然に防ぐことが重要となります。本稿では、インフラストラクチャーの状態監視技術や、それに関連する要素技術について、著者らの取り組みを中心に紹介します。

はじめに

鉄道や道路などのインフラストラクチャーでは、使用時の構造体の劣化または近接工事時の変形を監視することによって、事故を未然に防ぐ必要があります。ここでは、このような維持管理・施工管理に利用する状態監視技術について紹介します。

インフラストラクチャーの維持管理における状態監視

日本をはじめとした先進諸国では、インフラストラクチャーの老朽化対策が喫緊の課題となっています。

表1は国土交通省がまとめた資料で、鉄道以外のインフラストラクチャーで建設後50年以上経過するものの割合を示しています。日本では、高度経済成長期にインフラストラクチャーが集

中の整備されているため、今後老朽化した施設の割合が急増することがわかります。

老朽化したインフラストラクチャーでは、適切な保全を行わない場合、例えばコンクリート剥落のような事象を起こす可能性があるだけでなく、場合によっては構造体そのものの崩落のような重大事故を引き起こす可能性もあります。そのため、このような事象や事故を防ぐためのインフラストラクチャーの維持管理が重要となり、構造物の状態を把握する状態監視技術が重要な技術となります。

表1 建設後50年以上経過する日本国内の社会資本の割合

出典：インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議(第1回) 参考資料

	H24年3月	H34年3月	H44年3月
道路橋 [約40万橋注1](橋長2m以上の橋約70万のうち)	約16%	約40%	約65%
トンネル [約1万本注2]	約18%	約31%	約47%
河川管理施設(水門等) [約1万施設注3]	約24%	約40%	約62%
下水道管きよ [総延長:約44万km注4]	約2%	約7%	約23%
港湾岸壁 [約5千施設注5](水深-4.5m以深)	約7%	約29%	約56%

注1) 建設年度不明橋梁の約30万橋については、割合の算出にあたり除いている。
 注2) 建設年度不明トンネルの約250本については、割合の算出にあたり除いている。
 注3) 国管理の施設のみ。建設年度が不明な約1,000施設を含む。(50年以内に整備された施設については概ね記録が存在していることから、建設年度が不明な施設は約50年以上経過した施設として整理している。)
 注4) 建設年度が不明な約1万5千kmを含む。(30年以内に布設された管きよについては概ね記録が存在していることから、建設年度が不明な施設は約30年以上経過した施設として整理し、記録が確認できる経過年数毎の整備延長距離割合により不明な施設の整備延長を按分し、計上している。)
 注5) 建設年度不明岸壁の約100施設については、割合の算出にあたり除いている。

インフラストラクチャー施工における状態監視

インフラストラクチャーの施工途中段階で、予想外の変状が発生すると、周辺の既存構造物の状態に悪影響を及ぼす可能性があるだけでなく、工事そのものを進めることができなくなる可能性があります。そのため、このような変状を生じていないかを状態監視をしておくことが重要となります。

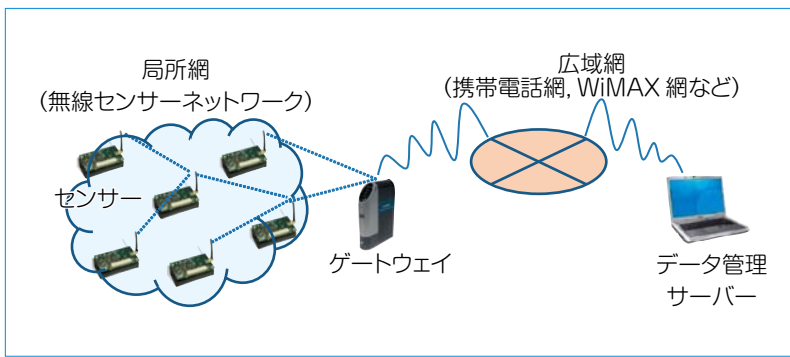


図1 無線センサーネットワークの概念図

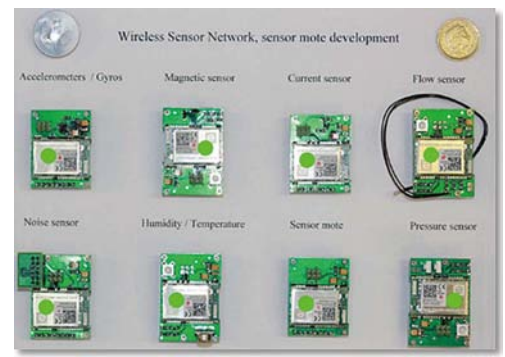


図3 Contiki OSを用いた無線センサー

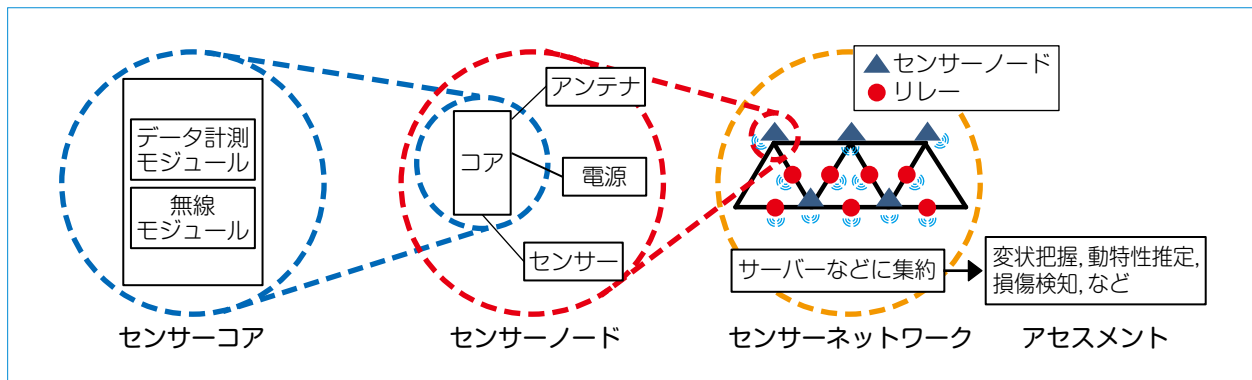


図2 WSNによる構造ヘルスマニタリング

状態監視技術

状態監視技術は、従前から、レーザー変位計や加速度計などのセンサーを利用して行われています。ただし、これらのセンサーでは、監視できる情報が基本的に点になります。また、センサーそれぞれに配線が必要であることから、多数のセンサーを設置することに課題があります。

一方、光ファイバー技術も多く使われています^{1)~3)}。光ファイバーでは、ひずみを連続的に測ることができるだけでなく、計測と情報伝達を1本の光ファイバーでまとめて行え、効率的な状態監視が可能になります。

さらに、近年では無線技術を活用した無線センサーネットワーク (Wireless Sensor Network, 以下 WSN) を用いた状態監視技術の研究や開発が盛んに行われています。この WSN について、以下で紹介します。

無線センサーネットワーク

WSNとは、情報を取得したい場所

に無線センサーを配置し、これらから得られる情報を収集するための無線ネットワークを構築するものです(図1)。センサーネットワークはもちろん有線でも構築可能です。ただし、インフラストラクチャーに適用する場合、有線では通信ケーブルを敷設する距離が長くなり、準備に必要な時間とお金が多くなる場合があります。また、そもそも通信ケーブルが敷設できない状況もありえます。無線センサーを使用することは、センサー設置や通信ケーブル敷設の費用の節約につながるため、従来よりも大規模なセンサーネットワークの構築を容易に実現できる可能性を有しています。

WSNを用いた構造ヘルスマニタリング

次に、WSNによるインフラストラクチャーの状態監視の1つである構造ヘルスマニタリング (Structural Health Monitoring, 以下 SHM) (参照) を図2で説明します。この図か

らわかるように、WSNを用いたSHMは、データ計測モジュールと無線モジュールを組み合わせたセンサーコアに、電源とセンサー、アンテナを組み合わせるとしてセンサーノードとし、これを構造物のさまざまな場所に設置することで、構造物のデータを取得(および評価)するものと表現できます⁴⁾。

センサーコアおよびセンサーノードは、世界中でさまざまなものが開発されており、著者らの1人は、Contiki OS (参照) を利用した無線センサー(図3)や、非常に小型で低消費電力な無線センサーである UtterBerry⁵⁾

構造ヘルスマニタリング

構造物にセンサーを設置し、そのセンサーから得られる構造物の応答を用いて、構造物の性能や状態を把握する技術です。

Contiki OS

メモリの少ない組み込みコンピューターでも実行可能なオープンソースのオペレーティングシステム(OS)です。

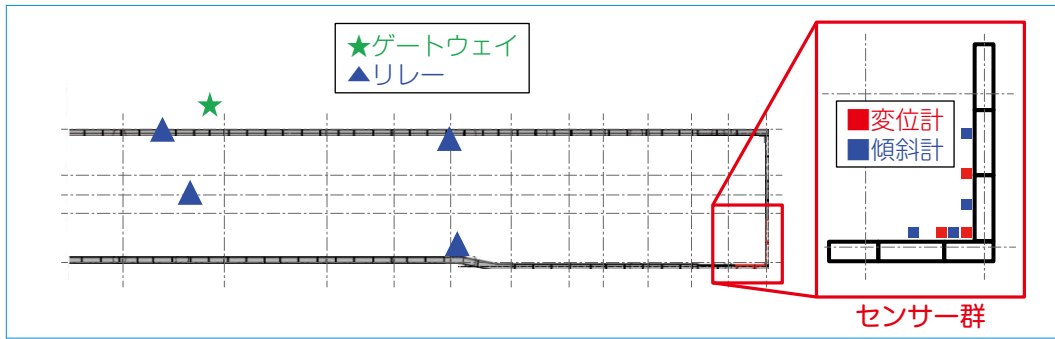


図5 実際の地下駅におけるWSN構築事例

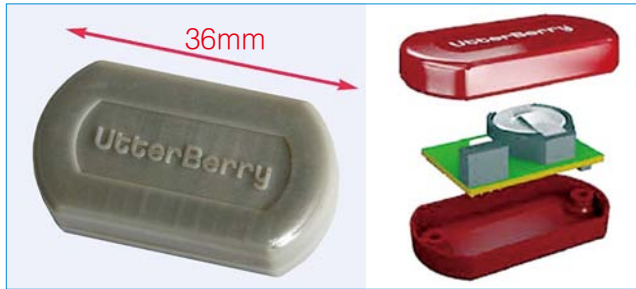


図4 UtterBerry

(図4)を開発し、実際の現場で適用してきています。

図5は、ロンドンにおける実際の地下駅の建設現場におけるWSNの構築事例です。図の右下には多数の変位計と傾斜計が壁に沿って設置されていて、施工による壁の動きをモニタリング(図6)しています。そして、このような結果を図5中央部にあるリレーを介して、図5左上にあるゲートウェイまで送っています。さらに、ゲートウェイから状態監視用サーバーにも無線送信されますので、施工現場にいなくても施工現場の状態を監視することができるようになっていきます。

エネルギーハーヴェスティング

図2に示したように、WSNで用いるセンサーモジュールでは、センシングや無線を動かすためにある程度の電源が必要になります。これまでに紹介したものも、乾電池やボタン電池での駆動が現時点では必要です。一方で、計測現場の環境を利用した発電(エネルギーハーヴェスティングといいます)

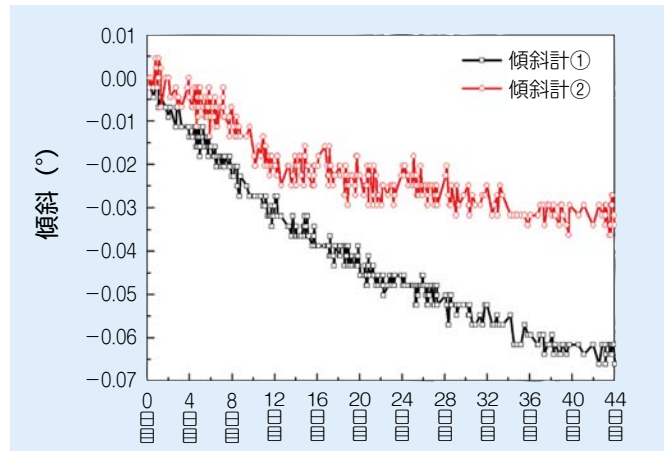


図6 計測データの例(傾斜計)

が可能であれば、必要な電源を減らすことができ、理想的には無電源でのモニタリングが可能となります。このような技術では太陽光発電や風力発電が一般的に知られていますが、ここではインフラストラクチャーで発生している環境振動を利用した発電について紹介します。

図7が著者らの1人が開発したParametric Resonance(☞参照)の原理を使った振動発電モジュールです。図では開発中のMEMS(☞参照)のものを示していますが、より大きい機械的なマクロバージョンでは実際の橋りよ

うにおける発電実験で、数十mW程度の発電量を確認⁶⁾できており、WSNでの活用など、今後ますます発展が望まれる技術の一つとなっています。

ポイントクラウドの活用

ここまで紹介したものは、センサーを対象物に直接設置するものでしたが、最後にポイントクラウドを活用した状態監視技術を紹介します。

ポイントクラウドとは、3Dスキャナーなど、3次元変位測定機器によって測定された離散的な点の集合のことで、点群とも呼ばれています。前述

☞ Parametric Resonance

対象物固有のパラメーターにある変化を与えることで、対象物の振動を大きくする現象です。パラメトリック励振ともいいます。

☞ MEMS

機械・電子などのさまざまな機能を基板の上に集積化した微細デバイスのことで、日本語では微小電気機械システムといいます。Micro Electro Mechanical Systemsの頭文字をとってMEMSと記載することが一般的です。

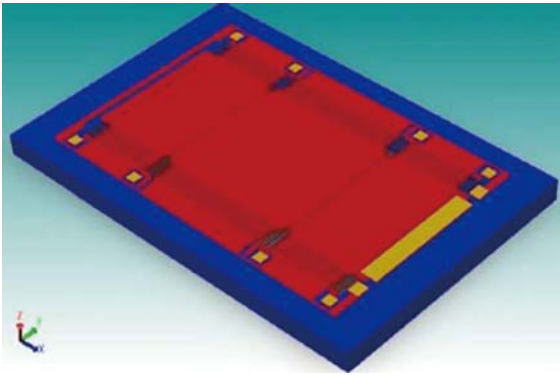
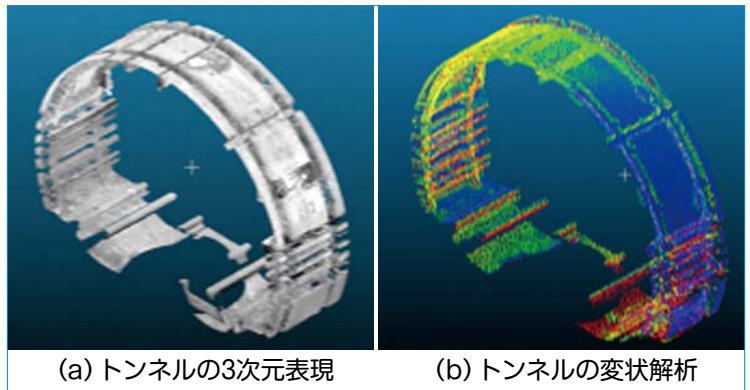


図7 MEMS振動発電モジュール



(a) トンネルの3次元表現

(b) トンネルの変状解析

図8 3Dレーザースキャナーとトンネルの変状解析

のWSNと比べると、現時点の測定精度は高くありませんが、WSNが「点」で測定するのに対して、この方法では「面」で測定することに大きな利点を持っています。また測定機器を対象物上に直接設置し続けなくてよいことも利点です。

この技術を、ロンドンの新しい地下鉄であるクロスレールプロジェクトにて、下部に別トンネルが施工されるあるトンネルに適用した事例を図8 (a)に示します。ここでは、わかりやすいように1リング分を切り出していますが、トンネル内の数か所で測定したデータをつなぎ合わせることで、トンネル全体の3次元的な把握も可能になります。この図からは、トンネルの凹凸が非接触で測定できていることがわかります。さらに、別トンネルが施工される前後での、トンネル断面の変状を解析した結果を図8 (b)に示します。この図では、トンネル壁面の変化量を示しており、別トンネルの施工によって、トンネルの壁面が内側に狭まるように変形していることを示しています。

状態監視技術の課題と展望

インフラストラクチャーの状態監視では、対象となる構造物の数が非常に多く、測定すべき物理量がさまざまであることに難しさがあります。また、

状態監視を詳細に実施しようとすればするほど、必要なセンサーの数が増えていくことも課題となります。

状態監視技術は、日々進歩している分野ですが、直面する全ての課題をクリアすることは容易ではありません。そのため、対象構造物の特性や監視したい状態(物理量)に特化したセンサーの開発や、状態監視すべき場所・センサー設置密度の明確化、状態監視技術と対になるアセスメント手法の開発などを行っていくことが重要と考えられます。

おわりに

インフラストラクチャーの状態監視技術について、著者らの取り組みを中心に紹介しました。

状態監視技術は、監視対象である構造物だけでなく、電子、通信、情報など、さまざまな分野の知見が必要であり、その相互理解と技術間の調整も重要となります。今後、インフラストラクチャーの状態監視技術がさらに発展することを期待しています。RRR

文献

- 1) Stajano,F., Hoult,N., Wassell,I., Bennett,P., Middleton,C., and Soga,K. : "Smart Bridges, Smart Tunnels : Transforming Wireless Sensor Networks from Research Prototypes into Robust Engineering Infrastructure," Ad Hoc Networks, Vol.8, pp.872-888, 2010
- 2) Cheung,L.L.K., Soga,K., Bennett,P.J., Kobayashi,Y., Amatya, B. and Wright,P. : "Optical fibre strain measurement for tunnel lining monitoring" Proceedings of ICE, Geotechnical Engineering, Vol.163, No.GE3, pp.119-130, 2010
- 3) Mohamad,H., Bennett,P.J., Soga,K. Mair, R.J. and Bowers,K. : "Behaviour of an Old Masonry Tunnel Due to Tunnelling Induced Ground Settlement," Géotechnique, Vol.60, No.12, pp.927-938, 2010
- 4) Mohamad,H., Soga,K., Bennett,P.J., Mair,R.J. and Lim,C.S. : "Monitoring Twin Tunnel Interactions Using Distributed Optical Fiber Strain Measurements" Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol.138, No.8, pp.957-967, 2012
- 5) Heba Bevan, Kenichi Soga, Tim Embley and Nigel Marsh : "Monitoring Wireless sensors on Crossrail's C360" Geospatial Engineering, Chartered Institution of Civil Engineering Surveyors, pp.19-21, September 2014
- 6) Y.Jia, J.Yan, K.Soga and A.A.Seshia : "A parametrically excited vibration energy harvester", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.25, No.3, pp.278-289, 2014