

ケンブリッジ大学における 研究プロジェクトへの参加

流王 智子, 柴田 宗典, 羽田 明生

(公財)鉄道総合技術研究所では、2006年よりケンブリッジ大学と共同研究を実施し、毎年一名が客員研究員として現地のプロジェクトに参加しています。共同研究の中で取り組んできた研究テーマの中から、オペレーションズ・リサーチ分野に近い事例として、ワイヤレスセンサネットワークと光ファイバモニタリングに関する研究の概要を紹介いたします。

キーワード：状態監視技術，ワイヤレスセンサネットワーク，鉄道構造物，費用最小化，光ファイバモニタリング，不確実性の定量化

1. はじめに

英国にあるケンブリッジ大学は、1209年に創設された世界でも歴史のある大学の一つです。(公財)鉄道総合技術研究所(以下、鉄道総研)とケンブリッジ大学とは2006年より共同研究を実施しており、センサ技術を構造物の監視に適用するための研究開発を行っています。

近年、情報通信技術やセンシング技術の発展により、状態監視技術を効率的にかつ安価に実現できる環境が整ってきました。構造物の維持管理は、目視による健全度判定が基本となっており、判定のミスや異常箇所の見落としが重大事故につながる場合があります。また、対策をする必要性のない箇所に対して過剰なメンテナンスを行い、維持管理費が増大する可能性もあります。そのため、構造物の状態を継続的に監視し続けるために状態監視技術を導入することは、安全性の担保やメンテナンスの低コスト化において非常に有効であると考えられます。状態監視技術が構造物の維持管理にもたらす効果を図1にまとめます[1]。状態監視技術の適用場面として、平常時は検査や保全に活用することが考えられます。検査の場面では、早期の異常検出やより高精度な評価・診断によって検査の質の向上が見込まれます。また、検査困難箇所への対応支援など、検査の省力化も可能です。保全の場面では、検査

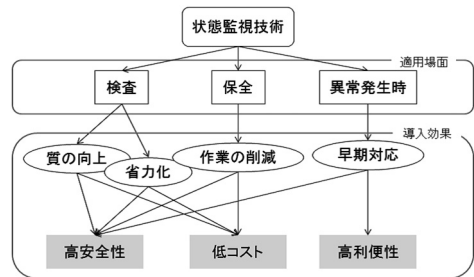


図1 状態監視技術がもたらす効果

箇所絞り込みによる保全リソースの重点化、保全計画の最適化などによって、保全作業の削減が見込まれます。異常時に関しては、安全確認作業の支援による対象構造物の早期使用許可が挙げられます。このように、状態監視技術を導入することで、監視対象構造物の安全性が担保されるとともに、メンテナンスコストが低減でき、利便性も高まるなどの効果が期待されます。

この記事では、海外におけるオペレーションズ・リサーチの事例研究を紹介し、海外へ出ることの意義や楽しさについて伝えることができればと思います。

2. ケンブリッジ大学におけるプロジェクト

鉄道総研の職員は、大学の正式なメンバーである「客員研究員(Visiting Researcher)」という立場で約1年間滞在し、現地の研究室に籍を置いて研究プロジェクトに参加します。大学の中で鉄道総研の客員研究員が所属する研究室は、工学部地盤工学グループです。地盤工学グループの担当する研究分野は構造物の状態監視だけでなく、地盤の数値モデル化、地滑りなどの地盤の動的解析、地熱などの地中エネルギーの活用、土

りゅうおう さとこ, しばた むねのり, はだ あきお
 公益財団法人鉄道総合技術研究所
 〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38
 ryuo.satoko.56@rtri.or.jp
 shibata.munenori.51@rtri.or.jp
 hada.akio.71@rtri.or.jp

壤汚染防止などの環境マネジメントなど、多岐にわたります。構造物の状態監視に関する研究は2011年からさらに拡大し、構造物の最新モニタリング技術などを活用して情報技術で土木構造物の将来をスマート化するというビジョンを掲げたプロジェクトとなり、そのプロジェクトを推進する組織としてCSIC (Cambridge Centre for Smart Infrastructure and Construction) が英国政府のファンディングにより工学部内に設置されました [2]。CSICには、土木工学分野のみならず、情報、電気、数学などさまざまな分野の研究者が集まっています。さらに欧州を中心とした建設コンサルタント、建設会社といったインフラを施工する組織、鉄道事業者、道路管理者といったインフラを保有、運営する組織から、センサなどの情報機器を供給する電気機器・情報機器メーカーまでのさまざまな産業界の組織が参画しており、CSICは産官学共同研究を推進する一大拠点となっています。

2006年に共同研究が開始された当初は、主にワイヤレスセンサネットワークを用いた構造物の状態監視技術の開発や実際の鉄道現場での設置・計測を行っていました [3]。2009年からはワイヤレスセンサネットワークや光ファイバといったモニタリング技術で得られたデータをどのように構造物の状態監視に活用するかという研究や、ワイヤレスセンサネットワークの設計最適化手法や光ファイバセンサの設置位置評価手法の開発を行いました [4]。2012年からはこれまでの研究により得られたワイヤレスセンサネットワークの設計最適化手法の実用化に向けた計算プログラムの拡張や、得られたデータにより構造物を解析するための適切な補間技術の開発などを行っています。

3. 現地での研究活動について

本節では、これまでの共同研究の中でオペレーションズ・リサーチ分野に近い研究事例を紹介したいと思います。まず、3.1節ではワイヤレスセンサネットワーク（以下、WSN）のトンネルへの設置問題 [5, 6] を紹介します。次に3.2節では光ファイバを用いたモニタリングを紹介し、光ファイバの杭基礎への設置問題 [7] を紹介します。

3.1 WSN プロジェクト

3.1.1 WSN を用いたモニタリング

WSNとは、無線機の搭載されたセンサを観測箇所を設置し、観測されたデータを無線で送信するネットワークシステムです。無線センサに異常が発生した場合でも伝送ルートを制御することにより、観測データ



図2 WSNを設置した現場の状況（ロンドン地下鉄） [5, 6]

を継続して収集することができます。一般的にセンサからは温度、湿度、傾斜角や加速度などを取得しています。

WSNは、通信線や電源線といった配線が不要のため、構造物の計測したい箇所に容易に設置できるというメリットがあります。たとえば、構造物に近接した工事が実施される際に、その工事の影響を監視するために構造物に無線センサを設置し、工事開始前から開始後の状態を監視する用途などに活用することができます。また、観測頻度にもよりますが、常時データを取得し続けるため、異常を早期に発見できるという利点があります。

このプロジェクトは共同研究開始当初から取り組んだもので、センサの開発から実際のトンネル断面の変形を長期的に監視できるようなWSNのプロトタイプ構築（図2）、ネットワークの設計を最適化する研究などを行いました。ここで扱った無線センサからは、温度、湿度、傾斜角を取得しました。

3.1.2 WSN 最適設計手法の開発

鉄道設備の状態監視に適用するWSNは、通常、長期にわたる継続的な運用を前提としています。ここで示すWSNはセンサ、リレー（中継装置）、ゲートウェイ（データ集約装置）から構成され、センサやリレーの電源はそれらに搭載された電池です。したがってWSNの導入に際しては、センサやリレーなどの購入コストだけではなく、電池交換などの長期にわたって発生する運用費用についても検討しておく必要があります。たとえば、リレーを多く設置すると、ネットワーク内の各電池の電力消費量が平準化され、電池交換のための巡回間隔を長くできるという特徴があります。また、各センサや各リレーの送信出力水準の設定やセンシングデータを伝送するためのルートの設定も、リレー設置費用や電力消費費用などに大きく関係します。このように、WSNを設置し運用する際に発生する諸費用は

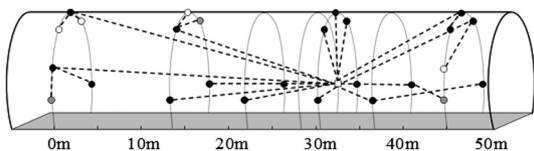


図3 WSN 最適設計案の出力例 [5, 6]

互いに密接に関係しており、それらの間にはさまざまなトレードオフが存在します。そこで、設置費用と運用費用の総和である総費用が最小となるように、WSNを総合的に計画するための数理モデルとその近似解法を開発しました [6]。

具体的には、WSN の設計問題を、リレーの設置数とその設置場所、各センサと各リレーの送信出力水準、伝送ルートを制御変数、総費用を目的変数として数理最適化問題を定式化し、近似解を求めるために、ラグランジアン・ヒューリスティックを援用した近似最適解を求解するアルゴリズムを開発しました。この最適設計手法をロンドン地下鉄に設置された WSN に適用し、コストを 10% 程度削減できる WSN 設計案が出力されることを確認しました (図 3)。

さらに、WSN の中・長期にわたる運用におけるコスト低減とネットワークの信頼性の向上を目指して、最適設計手法の拡張に関する研究を行っています。具体的には、WSN の設置・運用に関する中・長期的なプロセスを「導入段階」、「運用段階」、「調整段階」の 3 段階に分けて WSN を設計・調整・再設計するスキームを構築するとともに、文献 [6] の最適設計手法を、実際の現場における電波の伝搬状況、電池の消費速度、機器の故障率など、WSN の運用段階で取得できる情報を活用して WSN の調整・再設計を行う手法へと拡張しました。この手法により刻々と変化する WSN 設置現場の状況を適宜反映させた WSN の調整・再設計を行うことで、中・長期にわたってコストを削減しながら安定的に WSN を運用することが可能となります。

3.2 光ファイバプロジェクト

3.2.1 光ファイバを用いたモニタリング

無線センサネットワークを活用すると、無線センサを設置した点の情報を取得することができますが、設置した場所に依存する離散的な情報です。トンネルの断面の変形などはその断面に沿って連続的にその挙動を観測することによって、より詳細に状態を把握することができます。そこで、連続的に構造物の状態を把握するモニタリング手法として、光ファイバを用いたモニタリング手法があります。

光ファイバモニタリングとは、対象構造物に光ファイバケーブルを沿わせて、その対象物の状態を計測するモニタリング手法のことです。光ファイバの片端から測定用のパルス光を入射し、光ファイバの中から戻ってくるブリルアン散乱光の周波数分布を測定・解析することで、光ファイバの長さ方向のひずみを計測します。この光ファイバを用いて、斜面や立坑¹の挙動を把握します。地すべりの可能性が考えられる斜面のモニタリングでは、光ファイバを敷設したビニルパイプをボーリング孔に挿入することにより、光ファイバを地中に設置します。英国では、立坑は鉄筋かごと場所打ちコンクリートで側壁を構築した後に内部を掘削します。立坑のモニタリングでは、側壁を構築する前に地上で鉄筋かごにあらかじめ光ファイバを設置します。このように対象構造物の部材や目的に合わせて光ファイバを設置し、長期にわたってその値を計測することにより、構造物の挙動を把握することができます。

しかしながら、光ファイバを一度設置してしまうと、設置のやり直しが難しく、また、線状のセンサなので破損する可能性もあり、その設置には計画性と正確性が求められます。また WSN のように、常時監視データが取得されるわけではなく、計測機器を現場に運び、そこで計測することでデータを取得しなければなりません。鉄道総研のメンバーはこのプロジェクトの中で、主に光ファイバの設置作業や計測作業を行いました。

3.2.2 光ファイバ設置問題

前述したように、光ファイバを用いてモニタリングを実施することで、深さ方向のひずみ分布を把握することができます。設置可能箇所すべてに光ファイバを設置してモニタリングを行うことが理想的ですが、設置コストや計測コストがかかり現実的ではありません。そこで、設置をする箇所数とその効果を定量的に表すことが求められます。しかしながら、その設置数や設置位置に関しては、合理的に決定する手法が提案されていなかったため、経験的にモニタリングの位置を決めていきました。設置する箇所数や効果などが数値で示されることによって、光ファイバモニタリングを導入する説得材料にも成りうる可能性があります。そこで、杭基礎の支持力のモニタリング²を事例とし、光ファイバセンサによるモニタリングを実施する効果を定量的

¹ 鉛直に掘られた坑道で、施工時のシールド機の発進・到達や、供用開始後の換気などに用いられる構造物。

² 住宅や建物の荷重は基礎や杭を通じて地盤に伝えられますが、それを支えることのできる荷重の大きさのことを支持力と言います。ここでは、杭基礎を対象としているため、杭を支えることのできる荷重の大きさを対象としています。

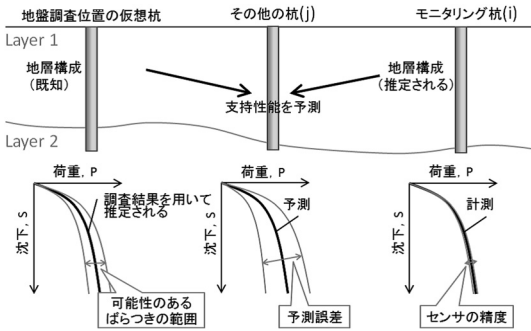


図 4 各杭の支持性能

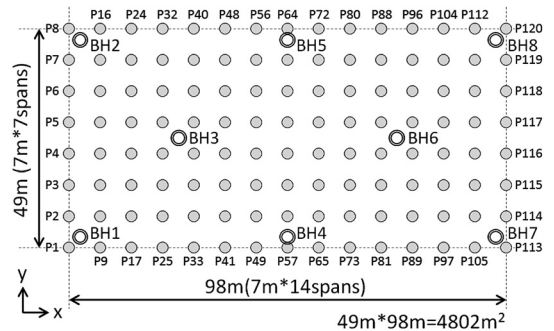


図 5 想定した杭基礎と地盤調査位置

に評価する方法について検討しました。ここでは、光ファイバを設置する候補地点は、杭基礎になります。

杭基礎とは、主に地盤の弱い箇所における構造物の建設において、深く杭を打ち込み構造物を支える基礎のことです。杭基礎に光ファイバを設置してモニタリングを行う目的は、構造物構築時や完成後の基礎全体の沈下量を把握するためです。また、設計時に杭そのものの支持性能を把握する目的があります。

3.2.3 不確実性のモデル化

構造物を建設する前には、必ず地盤調査を実施します。地盤調査によって、その地盤の地層構成を得ることができます。通常は、その地層構成に基づいて基礎全体の支持力を算定します。しかしながら、その算定には地層厚、地盤物性値、施工のばらつきを考慮しなくてはなりません。これに対して、光ファイバを設置して杭基礎をモニタリングすることにより、モニタリング地点の荷重に対する沈下量を把握することができ、その杭の支持力を正確に把握することができます。そこで、地盤調査位置に仮想杭があると想定し、その地点の支持力を、地層厚、地盤物性値、施工のばらつきを考慮して算定します。一方、モニタリングを実施する地点の支持力はセンサ精度のばらつきを考慮して算定します。それぞれに算定された支持力を用いて基礎全体の支持力と各杭位置の予測誤差を算出します(図4)。この支持力の計算を複数回繰り返して、各杭位置の予測誤差の平均値を不確実性と定義します。

最適なモニタリング地点・数量に関する数値実験を、120本杭基礎モデルに対して三種類の地盤構造モデルを想定して実施しました。次節でそのケーススタディを紹介します。

3.2.4 地盤条件や設置数量を変化させた場合のケーススタディ

想定した杭基礎は、120本の単独杭が7m間隔に設置されているもので、平面規模は7スパン×14スパン

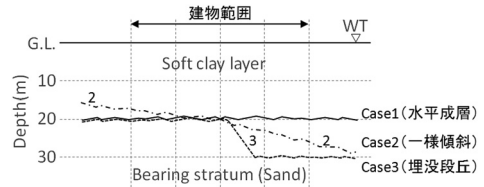


図 6 想定地盤構造の模式図

です(図5)。地盤調査位置は基礎平面内に合計8カ所を想定し、地盤構造として、水平成層地盤、一様傾斜地盤、埋没断丘地盤を想定しました。いずれの地盤構造も、地表から軟弱な粘土層が堆積しており、その下方に密な砂質土層が出現するものとした(図6)。どの杭をモニタリングすることが工学的に最も適切であるかを判断するための指標として以下のような二つの評価基準を提案しました。

- ・ 評価基準 1 各杭の不確実性の和(基礎全体の不確実性)が最小となる杭位置
- ・ 評価基準 2 非超過確率 10%の支持力の和(基礎全体の非超過確率 10%の支持力)が最大となる杭位置

評価基準 1 では、基礎全体の不確実性を最小化して杭位置を選択することにより安全性が確保されます。したがって、値が低いほうがよい結果であることを表します。評価基準 2 の非超過確率 10%の支持力とは、支持力分布が正規分布であると仮定し、その標準正規分布の右側 10%点の値を示します。支持力を評価値とすることで、高い支持力の値を想定して、杭の直径や長さを縮小することができ、合理的な設計につながります。したがって、より高い値をとるほうが望ましいです。

モニタリング数を 0 カ所から 10 カ所まで増加させたときに、モニタリング箇所数と効果の関係を、評価基準 1 については図 7 に、評価基準 2 については図 8

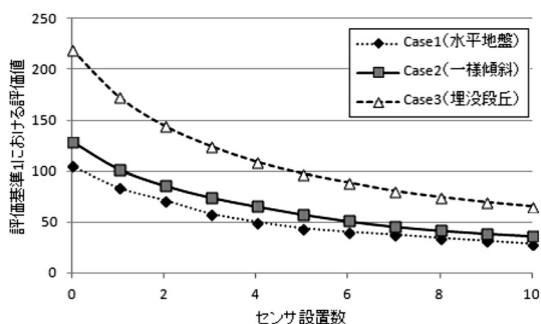


図 7 各地盤構造においてモニタリングを複数箇所で行う効果 (評価基準 1)

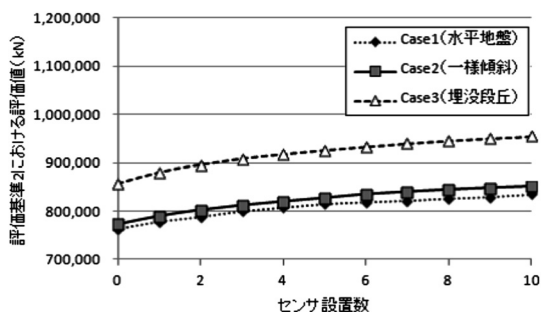


図 8 各地盤構造においてモニタリングを複数箇所で行う効果 (評価基準 2)

に示します。評価基準 1 の値は、モニタリングを行わないとき、Case1 (水平成層地盤) では 105.03, Case2 (一様傾斜地盤) では 128.14, Case3 (埋没段丘地盤) では 219.18 です (図 7)。基礎平面内で地盤構造があまり変化しない Case1 での評価値が一番小さく、地盤構造の変化が大きくなる Case2, Case3 の順に評価値が大きくなっていることがわかります。これは、地盤構造の変化が大きいくほど、基礎の支持性能の推定における不確実性が高くなることを表現しており、提案した不確実性モデルが妥当であることを示しています。評価基準 1 においては、モニタリング箇所数を増やすにしたがって、評価値が小さくなっています。たとえば、モニタリングを 4 カ所の適切な杭位置で行うと、評価値はおおむね $1/2$ となっており、杭の支持性能の不確実性が半減することがわかります。モニタリングを 9 カ所適切な杭位置で行うと、評価値はおおむね $1/3$ となります。

評価基準 2 では、モニタリング箇所数を増やすにしたがって、評価値はおおむね線形的に大きくなる傾向が認められました (図 8)。これは、モニタリングを行った杭の支持性能の変動が小さくなるため、当該杭について非超過確率 10% の極限支持力が大きくなるため

です。杭の支持性能のモニタリングを 10 カ所で行うとき、モニタリングを行わないときに比較して、評価基準 2 での評価値 (非超過確率 10% 極限支持力の合計値) は、Case1 (水平成層地盤) では 1.09 倍、Case2 (一様傾斜地盤) では 1.10 倍、Case3 (埋没段丘地盤) では 1.12 倍となっています。本ケースで想定した杭基礎モデルにおいては、120 本の杭のうち 10 カ所で支持性能のモニタリングを行って不確実性を低減させると、構造設計において 1 割程度大きな極限支持力が採用できることを示しています。

このように、杭の支持力の不確実性を定量化することで、モニタリングの効果を数値で表すことができました。また、三つの地盤ケースで数値実験を行うことで、設置位置と地盤の構成の関係を明らかにし、さらに複数箇所のモニタリングも考慮することで、設置数と不確実性の低減効果、設置数と極限支持力との関係を示しました。

3.3 まとめ

このように、現地のプロジェクトの中で研究を行ってきましたが、客員研究員としての派遣期間が終わっても、その研究内容の適用や拡張を継続して行っています。WSN 最適設計手法では、国内でのある現場に対して、開発した手法を用いて、WSN の設計を行いました。光ファイバ設置問題では、地盤調査位置数を変化させるなどのケーススタディを引き続き行っています。

4. 現地での研究環境

最後に、現地で筆者が感じたことを記述したいと思います。工学部と聞くと日本では男性中心の研究室をイメージするかもしれませんが、ケンブリッジ大学では女性の教官や学生もたくさん所属しています。派遣当時は研究スタッフ (助教) や博士課程に所属する学生らと比較的年齢も近く、早くに打ち解けることができました。工学部の建物の中には、地盤工学グループのほかにも、機械工学や電気・電子工学などの専攻の人たちもいて、喫茶スペースでは異なる専攻の人とも話をする機会もありました。研究の話はもちろん、他愛のない話、友人関係の悩み、日本に対する印象などいろいろな話をしました。ちなみに、喫茶スペースには無料で紅茶とミルクと砂糖が常設されていました。

非常に印象に残ったことは、どの研究スタッフや学生も「めりはり」をもって研究に取り組むという姿勢です。日本の大学の研究室では深夜まで残って研究をするイメージがどうしてもありますが、ケンブリッジ

大学では17時近くになるとほとんどのスタッフや学生は研究を切り上げ、自身のプライベートの時間を楽しんでいました。客員研究員として派遣されている海外からの研究者も多く、人の出入りに応じて、飲み会なども頻繁に開催されました。日本での飲み会というと、後輩が先輩のグラスに常に目を光らせ、残りが少なくなった途端に先回りして注文し、お会計は先輩が少し多めに支払う、といったスタイルがほとんどだと思います。イギリスでは、お酒を飲みたい場合は、飲み物カウンターへ自身で出向き、その場で代金を支払う方式なので、自分のペースや懐事情に応じて飲み進めることができます。

また、格安航空会社（いわゆるLCC）を利用してイギリスを拠点に情報収集や観光などヨーロッパのさまざまな都市を見て回りました。それぞれの都市の治安や環境、交通システムなどを自身の肌で感じられたことは大きな勉強となりました。さまざまな都市を訪れる中で、イギリス、特にケンブリッジは治安もよく、非常に安全に過ごせる街であることも同時に実感しました。

初めは自身に客員研究員が務まるのか不安もあり、話を受けるかどうか非常に悩みましたが、「行けばなんとかなる、なんとかする」という気持ちをモットーに周りの友人や同僚、そして家族に支えられ一年間を乗り切りました。「わからない」と「助けてください」

といった意思をはっきりと示し、親切にしてくれた人には「ありがとう」の気持ちをしっかりと伝えること、これが海外では（日本においても）一番大事な姿勢だと思います。

参考文献

- [1] 土屋隆司, “地上設備の状態監視保全技術と診断技術,” 鉄道総研講演会, 2013, <http://bunken.rtri.or.jp/PDF/cdroms1/0009/2013/0009000186.pdf> (2015年9月16日閲覧)
- [2] Cambridge Centre for Smart Infrastructure and Construction, <http://www-smartinfrastucture.eng.cam.ac.uk/> (2015年9月16日閲覧)
- [3] 平井力, 小林裕介, 阿部慶太, 羽田明生, “ケンブリッジ大学との共同研究,” *RRR*, **68**(2), pp. 12–15, 2011.
- [4] 流王智子, 津野究, “海外における研究プロジェクトへの参加,” *RRR*, **70**(1), pp. 24–25, 2013.
- [5] 羽田明生, 廣瀬壮一, “鉄道構造物ヘルスマニタリングにおける無線センサネットワークの総費用最小化計画,” *オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学*, **57**(9), pp. 518–523, 2012.
- [6] A. Hada, K. Soga, R. Liu and I. J. Wassell, “Lagrangian heuristic method for the wireless sensor network design problem in railway structural health monitoring,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, **28**, pp. 20–35, 2012.
- [7] S. Ryuo, Y. Asaka and K. Soga, “A role of monitoring to reduce the uncertainty in the performance of pile foundations,” *Geotechnical Safety and Risk IV*, L. M. Zhang, Y. Wang, G. Wang and D. Q. Li (eds.), CRC Press, pp. 357–363, 2013.