

(57) 鉄道路線を対象とした地震時点検用センサーの効果的な配置法の提案

名波 健吾¹・和田 一範²・豊岡 亮洋³

¹正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター
(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

E-mail: nanami.kengo.88@rtri.or.jp

²正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター
(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

E-mail: wada.kazunori.73@rtri.or.jp

³正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター
(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

E-mail: toyooka.akihiro.58@rtri.or.jp

近年、2018年大阪府北部地震をはじめとして、鉄道構造物本体にはほぼ損傷が見られないものの、点検のために長時間鉄道運行が停止する事例が発生している。ここで、近年発達が著しいリモートセンシング等の技術を活用することにより、点検を省力化して早期復旧を図ることが考えられる。ただし、鉄道における点検箇所は多岐にわたり、すべての対象箇所にセンサーを取り付けることは費用面から容易ではない。そこで、本稿ではセンサー設置箇所として支承部を対象に、点検時間や移動時間を踏まえた鉄道路線におけるセンサーの効率的な配置方法を提案した。提案法を用いることにより、総当たり計算を実施する場合と比較して計算時間を大幅に低減させつつも、点検時間を効果的に低減させるための配置が評価できることを検証した。

Key Words: remote sensing, inspection time, placement strategy, optimization calculation

1. はじめに

2018年大阪府北部地震をはじめ、鉄道構造物本体にはほぼ損傷が見られないものの、点検のために長時間運行が停止する事例が発生しており、地震発生後の早期運転再開が重要視されている¹⁾。ここで、被害が生じ得る箇所をリモートセンシング等^{例えば2)}で計測できれば、効率的に点検が実施できる可能性がある。このとき、経費や施工等の観点から全ての構造物へセンサーを設置することは非現実的であるため、限られた箇所へのセンサー設置で点検時間を可能な限り低減できることが望ましい。

そこで本稿においては、鉄道路線においてセンシング技術を導入できた部分については直接現地に出向くことなく点検が実施できる環境が構築された場合を仮定して、センサーの効果的な配置方法を提案する。このとき、センサーを配置可能な箇所の組合せ数は膨大であることから、現実的な計算量で効果的な配置箇所を選定可能な手法を提案し、簡易な仮想路線で手法の検証を行った。

2. 点検時間の算出方法

(1) 対象とする問題設定

本稿では鉄道路線の地震直後の点検時間の算出方法を整理する。構造物は図-1に示されるような鉄道路線に位置し、支承部の点検にセンサーを活用する場合を想定する。このとき、例えば、構造物高さが高い橋脚や河川上の橋脚の点検には現場へのアクセスや作業の効率などの観点から点検に時間を要すると考えられることから、支承によって点検に要する時間が異なるとする。また、路線沿線には作業員詰所があり、各詰所の複数の点検チームが各々の受け持つ点検箇所に同時に向かうものとする。また、センサーが設置されている構造物については地震発生直後にセンサーの表示値をウェブブラウザ等で確認することで、現地に出向くことなく点検が完了すると仮定する。

上記の前提条件の下において、次節の算定式に基づいて点検時間を算出する。

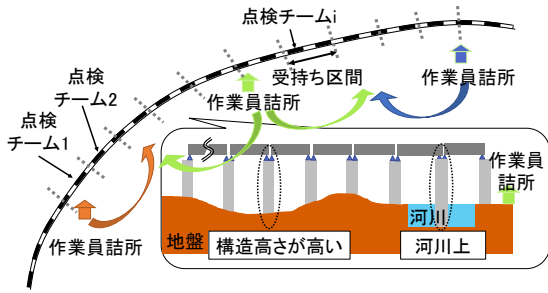


図-1 鉄道路線と作業員詰所，点検箇所配置イメージ

(2) 点検時間の算出方法

点検チーム i の点検に要する時間（点検時間） T_i は、以下の式(1)に示されるように、各チームの移動時間と現地点検時間の和として定義する。全体の総点検時間 T は、以下の式(2)に示されるように、点検チームのうち必要時間が最大となる点検チームの点検時間として算出される。

$$T_i = T_i^{mov} + \sum_j D_{ij} \cdot T^{ins} \quad (1)$$

$$T = \max\{T_i\} \quad (2)$$

ここで、 T_i^{mov} は点検チーム i の総移動時間、 T^{ins} は1箇所当たりの標準点検時間である。また、 D_{ij} は点検チーム i が担当する点検箇所 j の点検難易度指標であり、 T^{ins} を基準として点検時間が伸びる割合を比で表現したものである。例えば、目視点検に対して点検が難しい箇所の D_{ij} を引き上げることにより、より実態に近い点検時間の設定を可能とする。

一方で、センサーを設置した箇所の点検に要する時間は、計測値を遠隔で確認するために要する時間であるが、これはウェブブラウザ等で確認できるため、極めて短い時間で実施可能であるため、各チームの点検時間は直接点検する時間により規定されることとなる。

3. 効果的なセンサー設置方法の提案

センサーを鉄道路線上に配置する際、考えられる全通りを総当たりで計算して最適な配置を選定することは計算時間の制約から現実的でない。そこで、本稿では計算コストを抑えつつ、総点検時間を最小化できるセンサー配置を算定する方法を提案する。具体的には、図-2のフローチャートに示す手順によって、あるセンサー設置数の場合に総点検時間 T が最小となると考えられる設置箇所を選定する。各手順の詳細は以下に示す。

- Step1：センサーの設置がない場合の点検時間、コストを算出する。

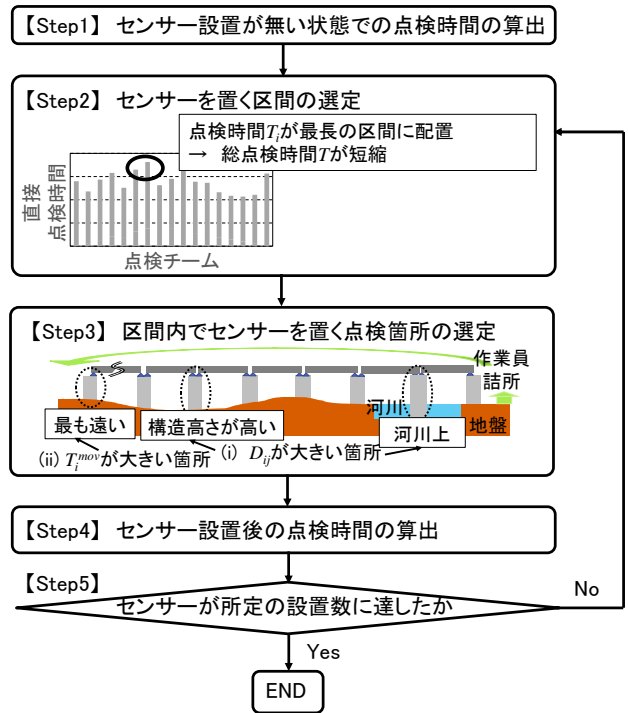


図-2 センサーを置く箇所の選定フロー

- Step2：総点検時間 T は各チームの点検時間 T_i の最大値で規定される。 T_i が最大となるチームの点検時間を削減することで、総点検時間 T の低減が可能となる。このため、最も点検時間 T_i が長いチームの受け持ち区間にセンサーを配置する。
- Step3：Step2 で選択された受け持ち区間内、最も点検時間 T_i の短縮効果が大きくなると考えられる地点にセンサーを配置する。具体的には、以下の2地点が想定される。
 - (i) 受け持ち区間内で点検時間が最大となる点検箇所 (D_{ij} が最大の箇所)
 - (ii) 移動時間が最大となる点検箇所 (T_i^{mov} が最大となる箇所)
 上記の(i), (ii)の両方について点検時間 T_i を算出し、よりチーム内における T_i の短縮効果が大きい箇所にセンサーを設置する。
- Step4：センサーの設置後の点検時間を算出する。
- Step5：所定のセンサーの設置数に達するまで Step2～Step4 の手順を繰り返し、所定の設置数に達した段階で算出を終了する。

なお、本稿では紙面の関係から省略するが、点検時間の評価だけでなく、直接点検に要する人件費や機材費、センサーの導入および維持管理に要する費用、点検によって鉄道路線が封鎖されることによって生じる機会損失などを含めたコスト試算も別途行っている³⁾。

表-1 各パラメータの設定値

点検時の移動速度 V_i	20km/h
支承1基当たりの標準点検時間 T^{ps}	7.5分
支承Aの点検難易度指標 $D_{ij(A)}$	1.0
支承Bの点検難易度指標 $D_{ij(B)}$	2.0

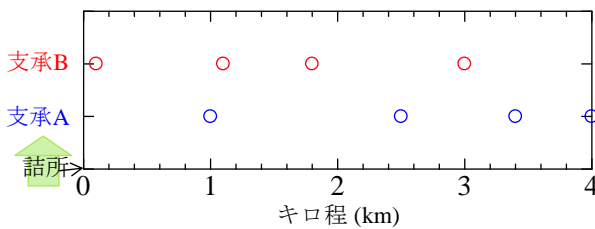


図-3 支承の分布

4. 提案法の検証

(1) 検証方法

本章では、3章に示した手法（以下、提案法と呼ぶ）を用いることにより、総点検時間を算出する。また、総当たりにより設置可能な全通りのセンサー配置の場合の総点検時間を算出し、提案法による評価結果と比較することで、提案法により効果的に総点検時間の最適化が可能であることを確認する。

(2) 検証条件

検証条件として、支承部の点検をセンサーで代用する場合を想定した。対象路線は全長4kmで、区間内に点検対象となる支承が8箇所存在する条件を仮定した。また、点検作業員の詰所はキロ程0kmの地点に存在し、1チームで全区間を点検することを仮定した。この路線が運行停止となり、8箇所すべての点検が完了するまで運行が再開できないとする。

総点検時間を評価するために必要なパラメータは表-1に示すように設定した。点検時の移動速度 V_i は、線路沿いを移動するものとして算出するが、実際は一般の道路網を利用するため、路線延長と移動距離は必ずしも一致しないことから、ここでは仮に20km/hと設定している。点検難易度指標 D_{ij} については、地上からの目視等によって比較的短時間で点検が実施可能な支承Aと、高所作業車等の特別な機材が必要となって点検に時間を要する支承Bの2種類に区分した。具体的な位置を図-3に示す。 D_{ij} および1箇所当たりの標準点検時間 T^{ps} の具体的な値は、点検経験者へのヒアリングに基づいて設定した。

(3) 検証結果

本節では提案法を用いて点検時間を評価した結果を示す。これと合わせて、比較のために考えられる全通りのセンサーの配置の場合における総点検時間も評価し、提

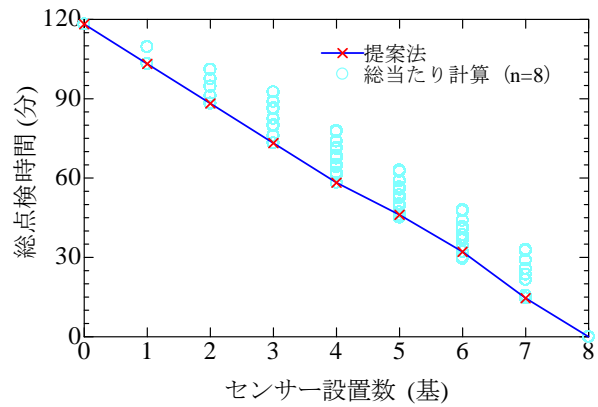


図-4 提案法と総当たり計算に基づく総点検時間の比較

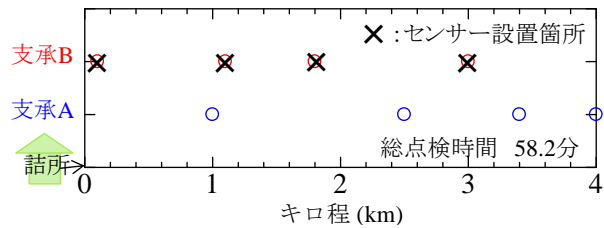


図-5 センサー設置数4基の場合のセンサー配置
(提案法, 最適解)

案法による評価結果と比較した（図-4）。

本図より、センサー設置数に依らず提案法の総点検時間が総当たり計算よりも下側に位置することが確認できる。一方で、センサーの設置数が5基、6基の場合に着目すると、僅かではあるものの提案法により選定したセンサー配置と比較して総点検時間がさらに小さくなる配置があることが確認できる。この理由について考察する。

センサー設置数が4基の場合について、提案法で選定されるセンサー配置を図-5に示す。図中におけるxのプロット位置がセンサーの配置箇所である。図-5に示すセンサーを4基設置する場合には、図-4より提案法で選定される配置が総点検時間を最小とする最適解であることが確認できる。

続いてセンサー設置を5基配置する場合、提案法では図-5に加えてセンサーを1基追加することとなる。この時点で点検に時間を要する支承Bは残っていないことから、必然的に移動時間を短くするために詰所からの移動距離が一番長いキロ程4kmの箇所に配置されることとなる。この結果、提案法による配置は図-6(a)となる。一方で、センサー設置数が5基の場合に総点検時間を最小とする最適解を確認すると、図-6(b)の場合となる。このことから、センサー5基の場合については、提案法の配置によった場合の総点検時間は、最適解と比較して僅かに長くなることが確認された。この理由として、センサー5基の場合は、3章のStep3の(i), (ii)で述べた支承の点検時間と移動時間を総合的に踏まえた配置が最適解となる

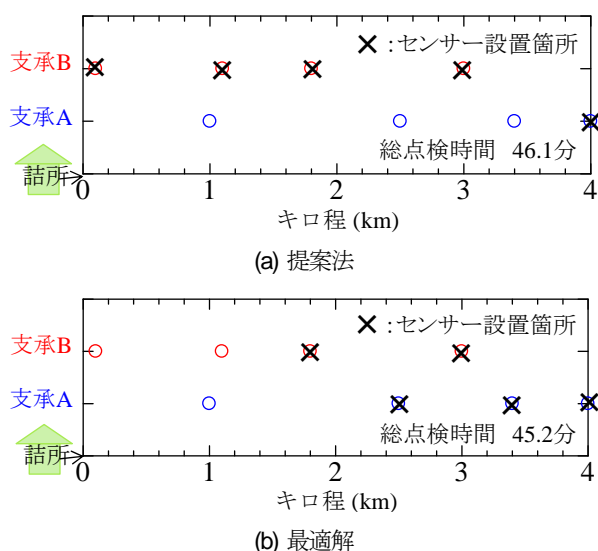


図6 センサー設置数5基の場合のセンサー配置

ためである。すなわち、提案法ではセンサー4基の配置を基にセンサーを1基追加する、という配置方法しか選択されないため、上述した最適解が選択できない。ただし、提案法と最適解の総点検時間の差異は1分程度であり、提案法で良好な評価が実施できている。なお、センサー6基の場合についても同じ理由で、提案法が最適解とはならないが、センサー7基の場合には、再び提案法と最適解の配置が一致する。この理由として、センサーが支承全体の大部分に設置されると、設置箇所のパターンが少なくなり、提案法と最適解が一致する可能性が高まるためと考えられる。

上述したように、提案法の配置は一部のケースを除き最適解となること、最適解にならない場合でも最適解と提案法で点検時間の差異は小さく、提案法により効果的な配置が選定されていることが確認できた。

(4) 計算量の比較

本節では提案法と全通りの総当たり計算の計算量を比較することにより、提案法の有用性を確認する。

ここでは、支承箇所数を n とするとき、センサー設置数を1から n までの全てを計算する場合の数について、提案法と全通りの総当たり計算で比較する。

提案法は、センサーが無い場合(1通り)の点検時間を算定した後、センサーを1つ追加するために3章 Step3 で示した(i)と(ii)の2通りの計算を行う必要がある。これをセンサー設置数が n になるまで計算するため、全部で $2n+1$ 通りの計算を行う必要がある。

一方で、総当たり計算の場合は、考えられるセンサー配置の全ての組合せについて計算を行う必要がある。センサーが無い場合は1通りであり、センサー設置数が1の場合には、 ${}_nC_1$ 通りの配置がある。同様にセンサー設

置数が2の場合には、 ${}_nC_2$ 通りの配置があるため、すべての計算では、

$$1 + {}_nC_1 + {}_nC_2 + \dots + {}_nC_n = \sum_{k=0}^n {}_nC_k \quad (3)$$

通りの計算が必要となる。

以上より、提案法を用いることにより、総当たり計算と比較して場合の数を以下の比率 r_c まで低減できる。

$$r_c = (2n + 1) / \sum_{k=0}^n {}_nC_k \quad (4)$$

例えば、本稿のセンサーを8基設置する条件の場合では、提案法を用いることにより、計算に必要な場合の数を総当たり計算の概ね1/15に低減できることが分かる。センサー設置数が大きい場合には、総当たり計算におけるの通り数が非常に多くなるため、計算時間における提案法の優位性が確認される結果となった。

本稿の検討では提案法により最適解に近い解が導出できることを確認するため、全長が4kmの路線を対象としたが、実際の鉄道路線はこれよりも延長が長いものがほとんどであり、その分点検を要する箇所も増える。例えば、2016年熊本地震時の九州新幹線の支承部の点検事例りでは、全長54.5kmの路線上に位置する約1,300基の支承を点検していた。式(4)より、このような場合に総当たり計算を行うことは現実的でないといえる。現実的な計算量で、総点検時間の観点において(3)のように最適解に近い結果が得られる点で、提案法は有用と考えられる。

5. おわりに

本稿では鉄道路線にセンサーを設置する際に、限られたセンサーの設置数量で最大の点検時間削減効果を得るために、センサー設置箇所の選定方法を提案した。具体的な事例で試算した結果、計算量を大幅に削減しつつも、最適解に近い配置を選定することができた。

今後は提案法を適用して実路線における評価を実施し、有用性、問題点等について検討を深度化したい。

参考文献

- 1) 笠裕一郎, 海老原毅, 中島英明, 前川聡幸: 平成28年熊本地震による鉄道路橋の被害報告, 橋梁と基礎, pp.40-42, 2016.
- 2) 小野寺周, 吉田善紀, 豊岡亮洋, 林吾介, 高橋宏寿: 変位センサーによる支承部の地震後推定手法の開発, 鉄道総研報告, Vol.35, No.5, pp.47-52, 2021.
- 3) 名波健吾, 和田一範, 豊岡亮洋, 小野寺周: 地震後の支承部点検を支援する変位センサーの効果的な配置法の提案, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.26, 2022 (投稿中).