

論文 地震後の支承部点検を支援する 変位センサーの効率的な配置法の提案

名波 健吾¹・和田 一範²・豊岡 亮洋³・小野寺 周⁴

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 (Corresponding Author)

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

⁴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: onodera.meguru.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。著者らの一部は、点検上のネックである支承部の変位を遠隔で把握可能な変位センサーを開発している。このセンサーにより点検時間の短縮が期待できる一方で、すべての支承部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、本稿では各支承の点検にかかる時間や沿線の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法を提案した。提案法を用いて仮想路線にセンサーを設置した際の点検時間や機会損失を含めたコストを算出した結果、無作為にセンサーを設置する場合に比べて総点検時間および機会損失も含めた総コストの減少が確認された。

Key Words: inspection time, opportunity cost, placement strategy, sensor for displacement measurement

1. はじめに

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おり、このような地震発生後の早期運転再開が重要視されている。こうした事象は、地震の大きさが規制値を超過したことに起因して生じるものである。点検は一般的に作業員が現地に出向いて個別に目視確認して実施されることから、結果として時間を要する場合がある。例えば、2016年熊本地震後における九州新幹線の支承部の全線点検には4日間を要した¹⁾。この4日間には、桁の移動量が大きいと想定される箇所抽出を目的とした遠方目視点検と、該当箇所に対する高所作業車等を使用した近接目視点検が含まれている。

ここで、例えば支承部の変位を遠隔にて計測することができれば、現地に直接出向くことなく点検を実施できる可能性がある。実際に、土木分野においては支承部等の変位²⁾、あるいは橋桁のボルト部分の緩み³⁾を遠隔計測可能なシステムが、また建築分野においては建築物の健全度判定やモニタリングなどを実施するシステム⁴⁾が構築されている。計測されたデータは地震時も含めて任意のタイミングでパソコンやスマートフォンを通して確認できるシステムが構築されている場合が多く、地震後の点検の省力化への貢献が期待される。構造部材に被害が生じない程度の中小規模地震が発生した場合には、このようなセンシング技術を活用することにより、点検時間を短縮できる可能性がある。

一方で、鉄道構造物は線状に延長が長い場合、前記のようなセンサーを用いて点検が実施可能な環境を路線全

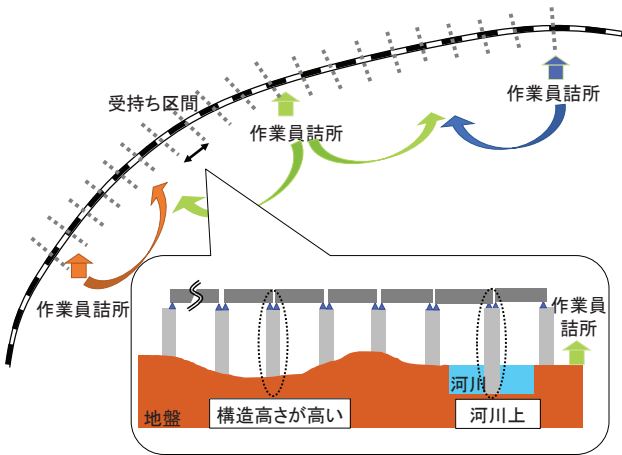


図-1 鉄道路線と作業員詰所, 点検箇所配置イメージ

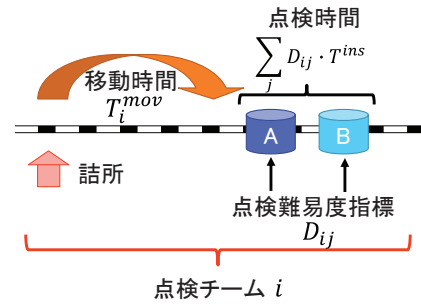


図-3 直接点検時間の算出方法

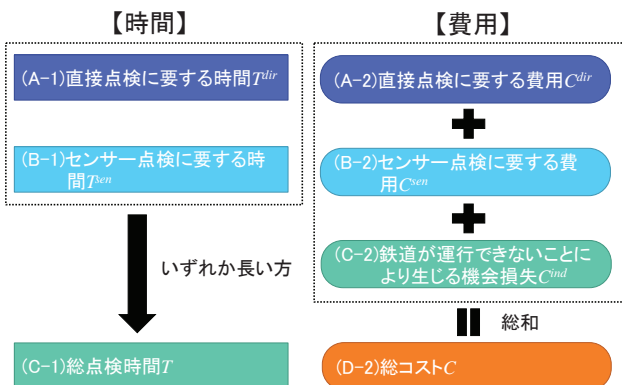


図-2 総点検時間と総コストの算出フロー

体で構築することは、費用、および労力の観点から難しいといえる。その場合、限られた箇所へのセンシング技術の適用で点検を効率化させ、点検時間とコストを可能な限り低減できることが望ましい。

上記目的を達成するためには、地震時の鉄道システムの復旧日数や経済損失を把握する必要があるが、このような既往の研究事例、特に、センサーのような機材を配置した場合の復旧日数短縮効果やコストメリットを算出した事例は少ない⁵⁾⁶⁾。コストメリットが定量評価できれば、センシング機材を導入するインセンティブとなり、結果として点検時間の短縮につながる可能性が期待される。

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向かう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、限られたセンサーを効果的に配置する方法に関する検討を行った。最初に、点検時間や点検に係わるコストの算出方法を整理した。次に、点検時間が最小となるようなセンサーの配置方法を決定する手法を提案した。最後に仮想路線を対象に算出を実施し、提案法の有効性を検証した。

2. 点検時間およびコストの算出方法

(1) 対象とする問題設定

本稿では、仮想鉄道路線を対象とした場合に、地震直後の点検時間およびコストの算出方法を提案する。この前提として、地震発生直後には、センサーが設置済の構造物についてはセンサーの表示値により損傷または無損傷の判定を行い、点検が不要であると仮定する。構造物は図-1に示されるような鉄道路線に位置し、各構造物の支承の点検の難易度は異なる状況を想定する。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がかかると想定される。また、路線沿線には各所に作業員詰所があり、地震発生時にはここから路線上各地点に点検に向かうものとする。点検の際には事前に細かく区切られた点検区間割に従って、点検チームが編成されているものとする。

具体的な計算方法としては、図-2に示すフローに基づいて点検に要する時間と費用を算出するものとする。点検またはセンサーに係る各種パラメータの定義も図中に併せて示す。最終的に、算出された時間またはコストをセンサーの導入前後で比較することにより、センサー導入により得られる効果を確認する。

(2) 点検時間の算出方法

a) 直接点検に要する時間 T^{dir}

各チームの直接点検に要する時間（直接点検時間） T^{dir} 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（図-3）。全体の直接点検に要する時間は、以下の式(2)に示されるように、最大となる点検チームの直接点検時間として算出される。

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

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

ここで、 T^{dir} は点検チーム i が点検に要する総時間、 T^{mov} は点検チーム i の総移動時間、 D_j は点検チーム i が担当する支承 j の点検難易度指標、 T^{ps} は支承 1 基当たりの標準点検時間である。

b) センサー点検に要する時間 T^{sen}

本項ではセンサーを設置した支承について、計測値を確認することにより遠隔で点検を行う場合に要する点検時間を整理する。ここでは著者らの一部が開発したシステムに準拠し、計測値の確認はウェブブラウザ上からリアルタイムに確認可能な環境が構築されていることを仮定する²⁾。この場合、画面を開いた段階ですぐに計測値が確認できることから、支承数に依らずに一定時間で確認が完了するものとする。この確認に要する時間は、前項で述べた直接点検に要する時間 T^{dir} と比較してきわめて短くなると考えられることから、下式が成立する。

$$T^{sen} \ll T^{dir} \quad (3)$$

c) 総点検時間 T

a) の直接点検および b) のセンサー点検は同時に実施可能であることから、両者に要する時間のうちより長い方の時間に基づいて総点検時間 T が規定される。前項で述べた通り、センサー点検に要する時間 T^{sen} は直接点検に要する時間 T^{dir} と比較して極めて短くなることから、下式が成立する。

$$T = \max\{T^{dir}, T^{sen}\} = T^{dir} \quad (4)$$

(3) コストの算出方法

a) 直接点検に要する費用 C^{dir}

直接点検に要する費用 C^{dir} は、人件費と機材費の和で定義されるものとした。各チームについて前記の点検費用が発生し、それらの全チーム分の和をとることで全体の点検費用を算出するものとして、下式を定義した。

$$C^{dir} = \sum_i (N_i \cdot C^{lab} + C_i^{eqp}) \cdot T_i^{dir} \quad (5)$$

ここで、 N_i は点検チーム i の作業員人数、 C^{lab} は単位時間あたりの 1 人の作業員に要する人件費、 C^{eqp} は単位時間あたりの点検チーム i に要する点検機材費である。

b) センサー点検に要する費用 C^{sen}

センサーを用いた点検に要する費用 C^{sen} は、センサーの設置数から設定した。このとき、センサーに要する費用は地震 1 回当たりの費用に正規化することとして、下式で定義した。

$$C^{sen} = \sum_i \sum_j C_{ij}^{sen} \cdot \frac{T^{return}}{T^{service}} \quad (6)$$

ここで、 C_{ij}^{sen} は点検チーム i が担当する区間の支承 j に取り付けられた変位センサーの供用期間に要する全費用、 T^{return} は点検を要する程度の地震の再現期間、 $T^{service}$ は変位センサーの供用期間である。

例えば、センサーの供用期間中に点検を要する地震が

2 回発生すると想定される場合には、 $T^{return}/T^{service}=1/2$ となり、逆にセンサーが取り替えを経て 2 回設置される期間に点検を要する地震が 1 回発生する場合には、 $T^{return}/T^{service}=2$ となる。

c) 鉄道が運行できないことにより生じる機会損失 C^{ind}

点検に直接発生する費用に加えて、点検のために鉄道が運行できないことにより生じる機会損失 C^{ind} についても定量化することとした。定量化の前提として、鉄道構造物本体には被害が生じない程度の地震を想定している。算出式を下式に示す。

$$C^{ind} = (M_{pas} \cdot C^{incpp}) \cdot T \quad (7)$$

ここで、 M_{pas} は単位時間当たりの利用者数（平均通過数量）、 C^{incpp} は利用者 1 人当たりの損失額である。

d) 総コスト C

a) の直接点検に要する費用 C^{dir} 、b) のセンサー点検に要する費用 C^{sen} 、c) の鉄道が運行できないことによる生じる機会損失 C^{ind} の総和の形で、総コスト C を下式の通り定義する。

$$C = C^{dir} + C^{sen} + C^{ind} \quad (8)$$

3. 総点検時間を最小とするためのセンサーの設置方法

本章では、センサーを仮想鉄道路線に配置する際、配置による総点検時間の削減効果が最大となる箇所にセンサーを配置することを考える。ここでは、図4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した。また、その時の点検時間、コストを算出することとした。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。
 - Step2: 総点検時間 T は各チームの直接点検時間 T_i^{dir} の最大値で規定される。 T_i^{dir} 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、最も直接点検時間 T_i^{dir} 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で、最も直接点検時間 T_i^{dir} 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) 受け持ち区間内で現地点検時間が最大となる支承 (D_j が最大の支承)
 - (ii) 移動時間が最大となる支承 (T^{mov} が最大となる支承)
- 上記の(i), (ii)の両方について直接点検時間 T_i^{dir} を算出し、よりチーム内における T_i^{dir} の短縮効果が大きい箇所にセンサーを設置することとする。

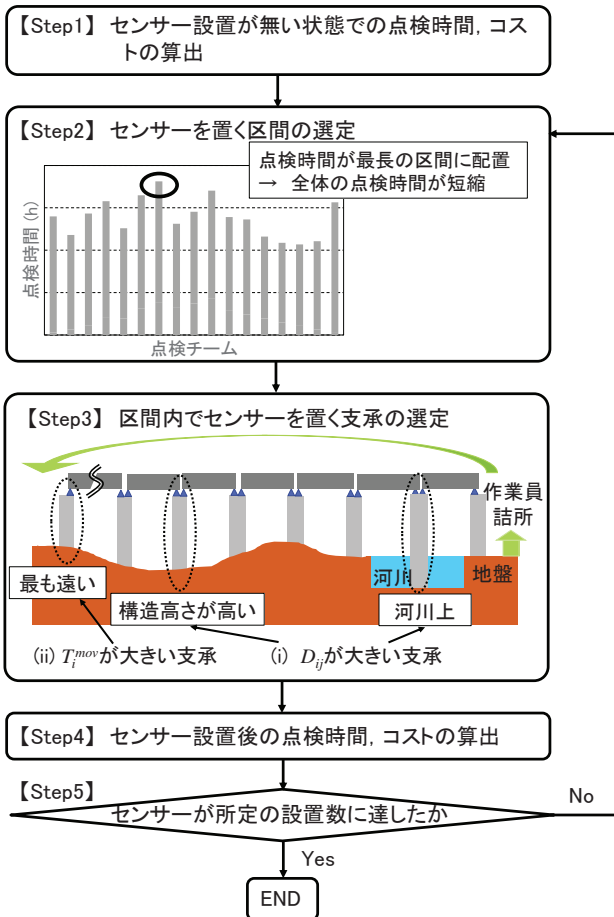


図4 センサーを置く箇所の選定フロー

- Step4 : センサーの設置後の点検時間, コストを算出する.
- Step5 : 所定のセンサーの設置数に達するまで Step2~Step4 の手順を繰り返す.
上記手順を踏んだ後, 所定の設置数に達した段階で算出を終了する.

4. 仮想鉄道路線を対象とした提案法の有効性検証

(1) 検討条件

a) 検討対象路線と点検チームの分割

本章では, 3章に示した手法(以下, 提案法と呼ぶ)を用いて, 仮想鉄道路線を対象としてセンサーを設置する場合について, 総点検時間, および総コストを算出する. 仮想鉄道路線は新幹線のような数百 km に及ぶものを想定し, 全長のうち 50.3km が点検対象区間となり, 運行停止となったことを仮定している. 点検対象区間内には 2,301 箇所の支承が存在し, これらすべての点検が完了した段階で運行が再開できるものとした. 支承の点検に要する時間は周辺環境に依存するため, 本検討では

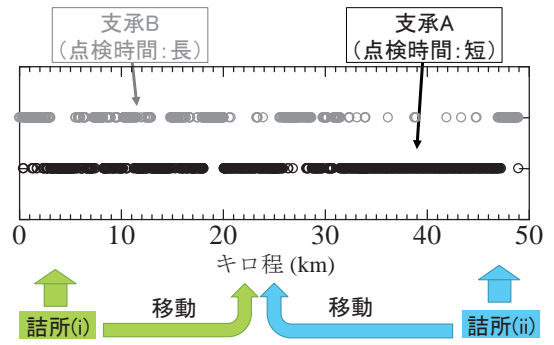


図5 支承Aと支承Bの分布

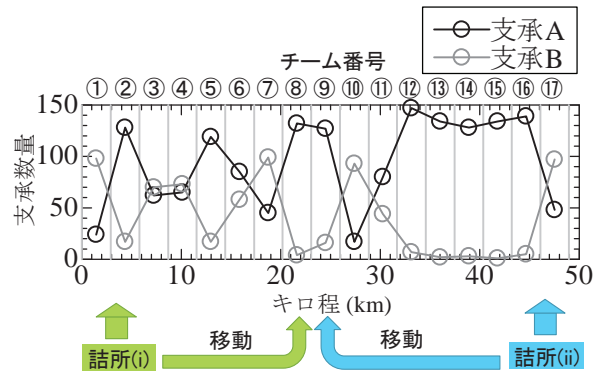


図6 チーム割と支承の数量

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に区分した. 点検対象区間内における支承Aと支承Bの分布は, 図5の通りに設定した. 区間全体では, 支承Aが 69.9%, 支承Bが 30.1% の割合で存在している.

次に, 点検対象区間を分割して点検チームごとの受け持ち区間として設定する. 1チーム当たりの受け持ち区間は, 熊本地震時に全長 54.5km の路線延長に対して最大 14 チームが投入された事例も参考に, 支承部が約 1,300 箇所であった点も考慮して, 当該路線には 17 チームを投入するものと仮定した. 最終的には各チームの受け持ち区間の長さが概ね等しくなるように調整した上で設定した各点検チームの受け持ち区間と, 区間内にある支承数量を図6に整理する. 図からは, 区間によって支承分布に差異があることが読み取れる.

b) 各パラメータの設定

点検時間, コストの算出に際しては, 図2に示す手順に従って実施する. これに際して, 各パラメータに具体的な値を設定する必要がある, 表-1に示すように設定した. 以下, 各パラメータの設定根拠について簡潔に述べる.

最初に直接点検に要する時間に係るパラメータ(A-1)

表-1 各パラメータの設定値

(a) 直接点検に要する時間に係るパラメータ A-1

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

(b) 直接点検に要する費用に係るパラメータ A-2

作業員に要する人件費 C^{lab}	24,700 円/日・人
1 チーム当たりの作業員人数 N_i	7 人
点検機材費 C^{exp}	40,000 円/日

(c) センサー点検に要する費用に係るパラメータ B-2

センサー1 基あたりの 供用期間に要する全費用 C_{ij}^{sen}	650,000 円
点検を要するレベルの 地震の発生頻度 T^{reum}	$T^{reum} = T^{service}$

(d) 鉄道が運行できないことにより生じる機会損失に係るパラメータ C-2

単位時間当たりの利用者数 M_{pas}	250,000 人/日
利用者 1 人当たりの損失額 C^{incpp}	2,000 円

として、点検時の移動速度 V_i は、移動に際して線路沿いの距離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。支承の点検難易度指標 D_{ij} および支承 1 基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。

一方で、センサー点検に要する時間(B-1)は、直接点検に要する時間(A-1)と比較して小さくなると考えられる。総点検時間(C-1)は式(4)のように直接点検に要する時間 T^{ps} とセンサー確認に要する時間 T^{sm} の最大値で定義されることから、 T^{sm} について定義する必要はない。

直接点検に要する費用に係るパラメータ(A-2)については、各パラメータともにカタログなどから一般的な値を設定した^{8)など}。

センサー点検に要する費用に係るパラメータ(B-2)について、センサー1 基あたりの供用期間に要する全費用はセンサーの機材費、設置費、維持管理費用から概算した。センサーは支承部 1 箇所に対して 1 基設置することを想定しているため、これに応じた費用が発生する。点検を要するレベルの地震の発生頻度としては、変位センサーの供用期間の間に 1 回発生することを仮定し、 $T^{reum} = T^{service}$ とする。

鉄道が運行できないことにより生じる機会損失に係るパラメータ(C-2)について、単位時間当たりの利用者数 M_{pas} は、实在路線の輸送密度(人km・日)を参考に設定した。利用者 1 人当たりの損失額 C^{incpp} は、实在路線の営業係数 R^{op} などと運賃 F を参考に設定した。このとき、 C^{incpp} は下式に基づいて定義した。

$$C^{incpp} = \left(1 - \frac{R}{100}\right) \cdot F \quad (9)$$

(2) 算出結果

本節では 2 章に示す計算手順に従い、提案法を用いて点検時間およびコストを算出した結果を示す。これと合わせて、比較のためにセンサーの配置位置を無作為に選定した場合についても点検時間、コストを算出した結果も示し、提案法の優位性を確認する。

まず、点検チーム毎の直接点検時間 T^{dir} を確認する。これにより、どの点検チームの T^{dir} が最大値として規定される総点検時間 T に寄与するかをみる。

各チームの直接点検時間 T^{dir} の分布について、提案法にてセンサーを配置した場合を図-7 に、無作為に配置した場合を図-8 に示す。図中には、センサー設置前に加えて、10 基、100 基、1,000 基を設置した場合の 4 ケースについて示している。

例えば図-7 において、センサー設置前はチーム 7 の直接点検時間 T^{dir} が最大となっている。このことから、総点検時間 T はチーム 7 によって規定されるとともに、1 基目に設置するセンサーはチーム 7 の受け持ち区間に配置されることとなる。

図-7 における全体的な傾向としては、センサーの設置数が少ない場合には、各チームの直接点検時間 T^{dir} が不均等で、点検に時間がかかるチームの T^{dir} によって総点検時間 T が左右されることが分かる。一方で、センサーの設置数が多い場合には、既に提案法の最適配置に応じてより効果的に直接点検時間 T^{dir} が減少できるチームにセンサーが配置された結果として、各チームの T^{dir} が均等にならされていることが確認できる。

一方で、無作為の設置を想定した図-8 の結果では、センサー設置数が 1,000 基の場合でもチームの T^{dir} が不均等であることが分かる。無作為に設置する場合には、 T^{dir} が最大となるチームにセンサーが配置されないことも多く、効率的に総点検時間 T を削減することができない。

したがって、提案法の優位性が確認される結果となった。

続いて、センサーの設置数を多様に変更して提案法を用いた計算を行い、センサーの設置数と総点検時間、あるいは総コストの関係を算出した。この結果を図-9、図-10 に示す。両図には、センサーを無作為に設置した場合の点検時間、総コスト 2,000 ケース分も併せて示している。

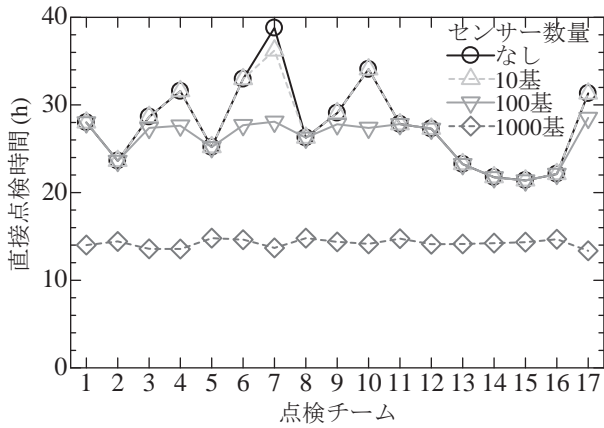


図-7 各チームの直接点検時間 (提案法)

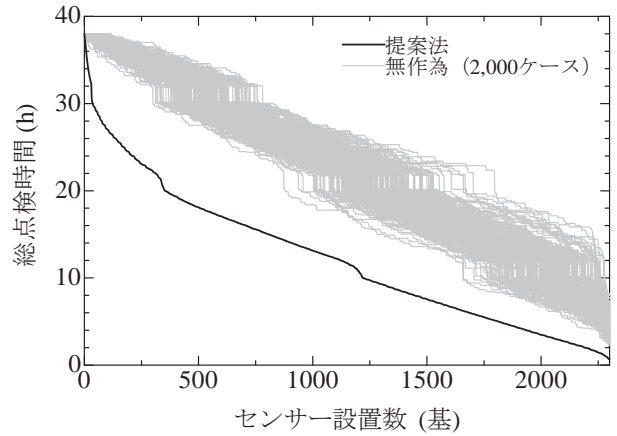


図-9 センサー設置数と総点検時間の関係

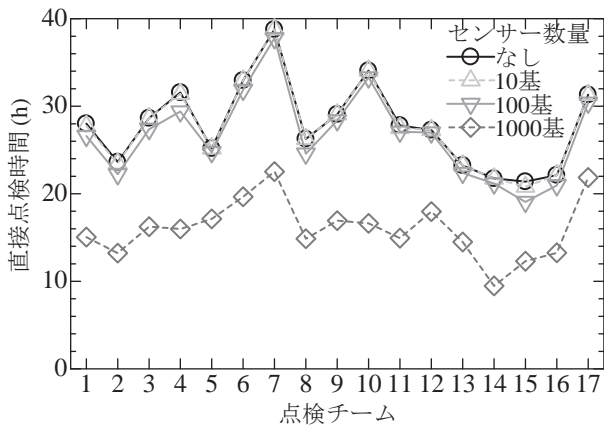


図-8 各チームの直接点検時間 (無作為配置)

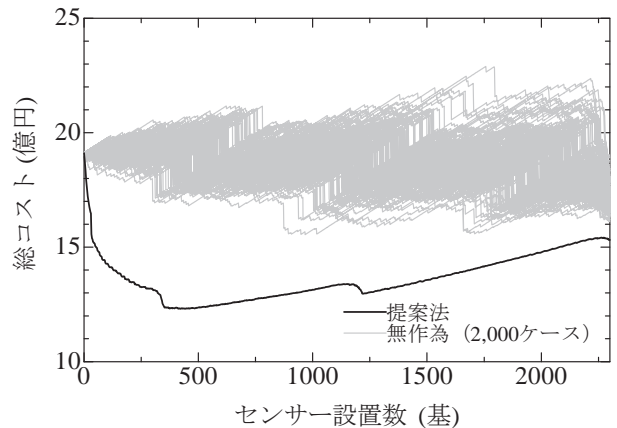


図-10 センサー設置数と総コストの関係

両図からは、センサーを最適位置に設置した場合、無作為に設置したいずれの場合よりも、総点検時間、総コスト共に小さくなる事が確認できる。特に、センサーの設置数が概ね 200 基未満の領域において、総点検時間と総コストの減少が顕著である。

なお、センサー設置数と総点検時間の関係 (図-9) において、階段状に総点検時間 T が急減する箇所があるが、ここが点検日数が切り替わる点である。今回の算出の仮定条件として、1日当たり 10時間の点検を実施し、毎日点検が終了した後に詰所に戻るものとしているため、点検日数が減少すると往復分の移動時間が減少することにより、前記のような総点検時間 T の急減が発生すると考えられる。

また、センサー設置数と総コストの関係 (図-10) においても上記と同様に階段状に総コスト C が急減する箇所が見られ、この場合のセンサー設置数は図-9における急減の箇所と対応している。この結果、鉄道路線の運休時間も急減し、最終的に機会損失の低減につながったものと考えられる。

最終的に、本稿における算出条件においては、総コストは下に凸のグラフを描く。この場合、総コストが最小となる条件でセンサーの設置数を同定することが可能である。図-9においては、センサー設置数が 422 基の場合に総コストが最小となり、12.3 億円となる。このように、コストメリットの観点からは、必ずしもセンサー設置数を増やした場合に最適解が得られるとは限らないことが分かる。ただし、当然ながら設置数と総コストの関係は算出条件に応じて大きく変化する。例えば、上記の検討では仮想鉄道路線として新幹線を想定しているため収支状況が良好な場合の条件下での結果となっているが、経営環境が厳しい路線を想定した場合には当然のように評価結果も変わる点に注意を要する。

5. 支承の分布条件が異なる場合の検証

4章における算出結果は、支承の分布の条件が異なる場合には変動する可能性がある。そこで、本章では支承の分布条件を変更させた場合の算出を複数実施し、その

表-2 支承の分布条件が異なる場合の検討ケース

ケース	条件
Case1	標準ケースの全ての支承を支承Bに変更
Case2	標準ケースの支承Bを20%増加
Case3	標準ケース (4章の条件)
Case4	標準ケースの支承Bを20%減少
Case5	標準ケースの全ての支承を支承Aに変更

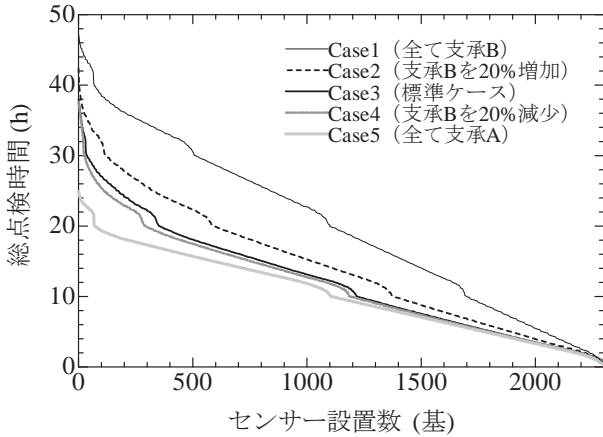


図-11 センサー設置数と総点検時間の関係(Case1~5)

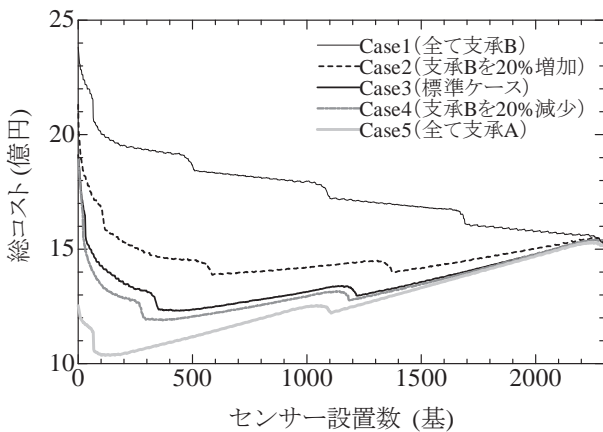


図-12 センサー設置数と総コストの関係(Case1~5)

結果を確認する. 具体的には, 支承1箇所当たりの点検時間が比較的長くなる支承Bの割合が異なる条件において, 総点検時間, 総コストの算出を行うとどのような結果が得られるかについて確認する.

具体的な支承数量の設定方法としては, 支承の全数は4章の条件と同じとしたうえで, 4章の条件を標準ケースとして, 一定の基準に従って増減させた表-2に示す5ケース(Case1~5)とする.

各ケースの条件で, 提案法によってセンサーを最適箇所に設置した場合の点検時間, コストを算出した. センサー設置数と総点検時間の関係を図-11に, 総コストの

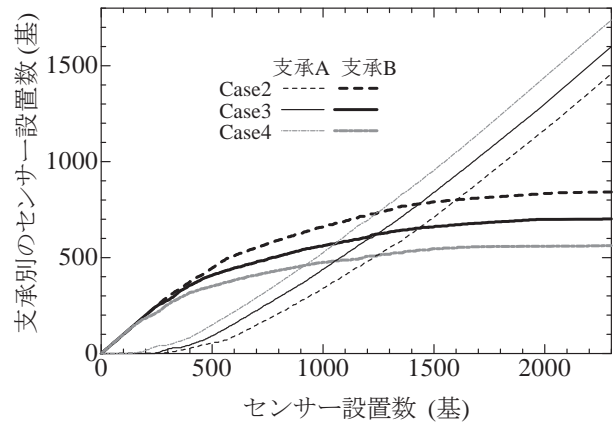


図-13 支承別のセンサー設置数(Case2~4)

関係を図-12に, それぞれ示す.

両図から, 支承Bが多いほど, センサーなしの場合の総点検時間 T が長い, センサー設置時の総点検時間の減少が大きいことが確認できる. また, 全て支承AであるCase5以外の条件では, センサー設置数が概ね200基未満の場合に, 総点検時間, 総コストが急激に減少することも確認できる. この理由は, 本稿における仮想路線の場合には支承Bに要する現地点検時間 $D_{ij} \cdot T^{mov}$ が長い, ため, 支承Bが多いほどセンサーを配置する箇所に支承Bが選ばれる可能性が高くなるためである. ここで, Case2,3,4について支承種類別の累積のセンサー設置数を整理した結果を図-13に示す. 図-13からも, センサー設置数が概ね200基未満の領域ではほぼすべてのセンサーが支承Bに配置されていることが分かる. センサー設置数が300基程度となると移動時間 T^{mov} の短縮効果が相対的に大きい場合に支承Aへ配置されるようになり, 概ね1,000基前後では多くのセンサーが支承Aに配置されるようになる. また, センサーの配分が支承Aに遷移するタイミングは, 支承Bの比率が小さいほど早いことも読み取れる.

以上より, 点検区間の長さや支承の分布が同じである場合でも点検に時間を要する支承の大小が異なる場合には, 優先的にセンサーが配置される支承の条件が変わることにより, 総点検時間および総コストに差異が生じることが確認された.

6. まとめ

本稿の内容を要約すると以下のとおりである.

- ・仮想鉄道路線にセンサーを設置することにより点検を代行する場合に, 総点検時間, 総コストを算出する手法を提案した.
- ・限られたセンサーの設置数量で最大の効果を得るために, センサー設置箇所の選定方法を提案した.

- ・仮想鉄道路線に提案法を適用してセンサーを設置して算出した結果, 設置前と比較して総点検時間, 総コストが削減できることが確認された. 特にセンサーが全支承の1割程度に設置されている場合でも, 総点検時間, 総コストの大きな削減効果が示された.
- ・支承の分布を変えて検討した結果, 現地点検時間に長い時間を要する支承の数量が多い場合に, センサー設置による総点検時間, 総コストの削減効果が大きいことが確認された.

一方で, 本検討では特定の条件の下でセンサーを設置した場合の点検時間, 費用を算出したものに留まっている. 今後は様々な条件について同様の検討を行いたい. 具体的には, チーム間の支承の分布が本検討の条件と異なる場合, 地震の発生頻度が本検討の条件と異なる場合, センサー配置前の状態で各チームの直接点検時間が等分となるように調整した場合, 等については今後の検討課題であるといえる.

REFERENCES

- 1) 中島英明: 「平成28年熊本地震」における九州新幹線の土木構造物の被災状況, *JREA*, Vol.59, No.11, 2016. [Nakashima, H.: Damage of Kyushu Shinkansen Structures at The 2016 Kumamoto Earthquake, *JREA*, Vol.59, No.11, 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. [Onodera, M., Yoshida, Y., Toyooka, A., Hayashi, G. and Takahashi, H.: Estimation Method of Seismic Damage of Bearings at Railway Structure by Displacement Sensor, *RTRI report*, Vol.35, No.5, pp.47-52, 2021.]
- 3) Sidorov, M., Nhut, P.V., Okubo, A., Matsumoto, Y. and Ohmura, R.: TenSense: IIoT Enabled Sensor Node for Remote Measurement of a Bolted Joint Tension, *Proc. of the IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications*, 2019.
- 4) 竹中工務店: 新しい防災ツール「免震総合モニタリングシステム」を開発, <https://www.takenaka.co.jp/news/2022/01/02/>, 2022年3月1日閲覧. [Takenaka Corp.: Development of New Disaster Tool “The Seismic Isolation General Monitoring Tool”, <https://www.takenaka.co.jp/news/2022/01/02/>, Accessed on 2022.3.1.]
- 5) 大峯秀人, 吉川弘道, 矢代晴美, 大滝健: リスクファイナンスのための線状施設の地震リスク評価, 土木学会論文集, 2011. [Omine, H., Yoshikawa, H., Yashiro, H. and Ohtaki, K.: Seismic Risk Evaluation of Linear Facility, for Risk Finance, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, 2011.]
- 6) Kilanitis, I. and Sextos, A.: Integrated seismic risk and resilience assessment of roadway networks in earthquake prone areas, *Earthquake Engineering*, 2019.
- 7) 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橋の被害報告, 橋梁と基礎, pp.40-42, 2016. [Ryu, Y., Ebihara, T., Nakashima, H. and Maekawa, T.: Report on Damage of Railway Bridges Caused by The 2016 Kumamoto Earthquake, *Bridges and Foundations*, pp.40-42, 2016.]
- 8) 国土交通省: 令和3年度公共工事設計労務単価表, <https://www.mlit.go.jp/common/001387434.pdf>, 2022年3月1日閲覧. [Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: *The Table of Price of Labor Unit in Public Works in FY 2021*, <https://www.mlit.go.jp/common/001387434.pdf>, Accessed on, 2022.3.1.]
- 9) 大阪市営バス: 平成29年度系統別収支, https://www.city.osaka.lg.jp/toshikotsu/cmsfiles/contents/0000463/463155/h29_2kessangaiyou.pdf, 2022年3月1日閲覧. [Osaka City Bus: *Annual Income and Expenditure in FY 2017*, https://www.city.osaka.lg.jp/toshikotsu/cmsfiles/contents/0000463/463155/h29_2kessangaiyou.pdf, Accessed on 2022.3.1.]

(Received April 1, 2022)

(Accepted June 3, 2022)

METHODOLOGY FOR OPTIMAL INSTALLATION OF SENSORS ASSISTING THE RAPID INSPECTION OF BRIDGE BEARINGS AFTER EARTHQUAKE

Kengo NANAMI, Kazunori WADA, Akihiro TOYOOKA and Meguru ONODERA

Recently, even after the moderate earthquake such as Northern Osaka Earthquake(2018), railway operation was suspended until the inspection of structure had been completed. It might take several days even though the damage of the railway structures was limited to a small extent. The use of the displacement sensor assisting the inspection of bridge bearings remotely would be one of the promising method to shorten the inspection time. In this paper, a methodology for optimal positing of sensor was suggested, taken into consideration both inspection time and its cost including direct and indirect losses. It was verified through numerical simulation for a virtual railway line that the optimal location of sensors by proposed method would successfully reduce both inspection time and cost compared to the case where sensors were located at random.