

変位センサーによる高所・狭あいなゴム支承の 地震後損傷検知手法

小野寺 周¹・豊岡 亮洋²・林 吾介³・高橋 宏寿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）

²正会員 工博 （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）

³非会員 株式会社ミライト フロンティアサービス推進本部
（〒135-8112 東京都江東区豊洲5-6-36 ヒューリック豊洲プライムスクエア）

1. はじめに

地震が発生して列車の運行が停止し、地震動強度が各鉄道事業者の定める規制値を超過した場合、運転再開を行うためには、基本的には目視点検によって軌道や設備等の損傷の有無を把握し、列車が走行可能な状態であることを確認する必要がある¹⁾。しかしながら、多数の設備等の目視点検には時間と労力を必要とし、その結果、運転再開までに時間を要することがある^{2)~4)}。そのため、早期運転再開のために設備点検の効率化が求められている³⁾。

一方、設備等の要点検箇所の中でも、図1に示すような高所・狭あいかつ路線内に多数存在する支承部の目視点検には、特に多大な時間と労力を要する。2016年熊本地震では、九州新幹線において約2100箇所もの支承部の点検が必要であったことが報告されている²⁾。この事例では4日間で全支承部の点検を完了させることができたが、これは、排水樋の損傷やストッパー前面のひび割れ、桁衝突による桁端部の剥離等、桁移動が大きい痕跡を一次点検により調査したことで、高所作業車等を用いた詳細な二次点検を行う箇所を予め絞り込むことができたためである²⁾。その結果、地震発生後13日で九州新幹線全線の運転を再開しており、支承部の迅速な被害把握が早期運転再開の重要な要因であったことを示していると考えられる。

このような支承部を含めた難視認箇所の地震後点検を支援するには、センサー等を事前に設置して設備の状態や挙動をモニタリングし、地震後の被災状

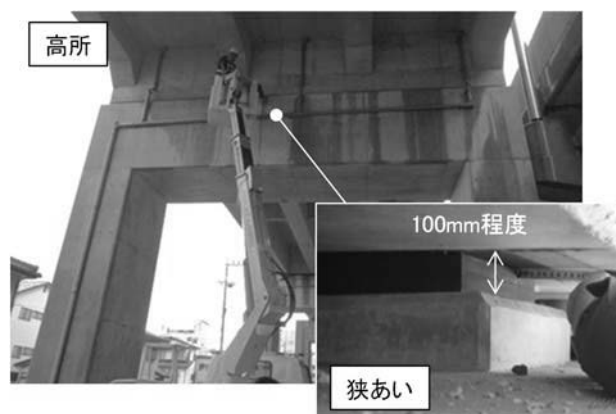


図1 支承部の目視点検の例

況を集約・把握可能なシステムを構築することが有効である。設備等のモニタリング技術に関しては、加速度センサによる橋脚や支承部の健全度評価^{5),6)}が提案されている他、道路ネットワークに設置された多数の地震計の観測記録を集約し、地震発生直後に観測記録を確認可能なシステムの導入事例もある⁷⁾。しかしながら、支承部の地震時挙動に着目し、点検支援を目的としたセンシング技術に関する研究はほとんど行われていない。

以上の背景を踏まえ、本研究では、支承部の地震後点検ならびに早期の運転再開を支援することを目的として、支承部の地震後の損傷を早期検知する変位センサーの開発を行った。また、損傷状態に基づき運転再開の可否を判断するための評価法も提案した。

2. 開発する変位センサーの概要

まず、本研究で対象とする支承部の地震時挙動と開発する変位センサーの概要について述べる。支承部には下部構造や上部構造に応じて様々な形式があり、それらの地震時の損傷形態は支承形式によって異なる。一方で、これまでの被害事例^{2),8),9)}を踏まえると、支承部の損傷は構成部材のズレや破損等、変状が残留変位として確認されることが多い。そのため、本研究では既往検討のように振動特性の変化に着目するのではなく、変状後の残留変位を直接計測するためのセンサーを開発することとした。このとき、点検や補修が必要となる損傷形態を支承形式ごとにあらかじめ特定しておくとともに、点検実施や供用可否を判断するための変状の限界値を定める必要がある。

また、鉄道構造物においては、地震後の支承部の点検は近接目視による方法が一般的であるが、路線広域を点検しなければならない場合には多大な労力と時間を要することとなる。そのため、支承部の地震後点検を省力化し迅速な状態把握を可能とするためには、センサーで計測した情報を無線通信によって地上や軌道上、遠隔のサーバー等に逐次伝送するシステムを構築することが有効と考えられる。

以上を踏まえて、本研究では以下の3点について検討を行う。

- ・ モニタリングする支承部の損傷形態の整理
- ・ 支承部の復旧要否や列車の走行可否を判定可能な損傷の限界状態の提案
- ・ 支承部の損傷を検知し、無線通信によって状態把握が可能な変位センサーの開発

これらを組み合わせることで、迅速な地震後点検を支援する支承部の損傷検知手法の構築を目指す。

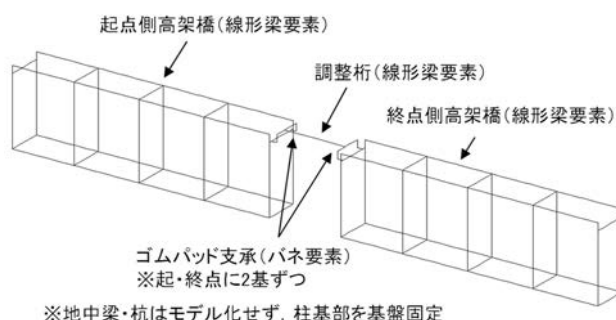
3. 支承部の損傷形態および限界状態の提案

(1) 対象とする支承形式と損傷形態の整理

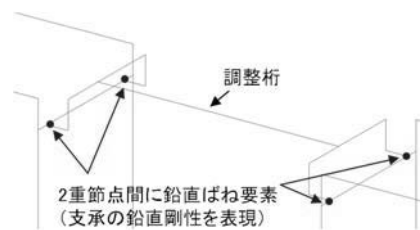
2016年熊本地震においては、一般的な鉄道ラーメン高架橋の調整桁を支持する多数のゴム支承において、図2に示すようなゴムの抜け出しが生じていたことが確認されている²⁾。ゴムの抜け出しによって桁を支持する支圧面積が減少するため、鉛直支持剛性の低下に伴う支承本体の損傷や、軌道の見違い等による列車の走行安全性の低下等が生じる可能性がある。実際、2016年熊本地震では、支圧面積の25%以上に及ぶ大きな抜け出しが生じた事例が12箇所確



図2 ゴム支承におけるゴムの抜け出し²⁾
(文献2)に加筆)

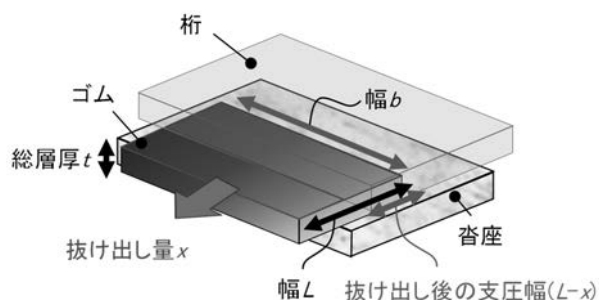


(a) 全体

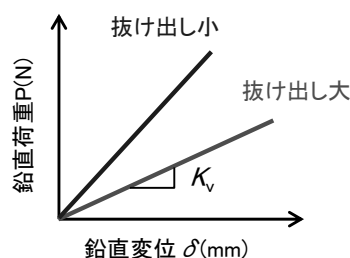


(b) 支承部拡大

図3 解析モデル



(a) ゴム支承の諸元



(b) 抜け出し量と鉛直剛性 K_v の関係図

図4 ゴム支承のモデル化

認され、据え直し等の大規模な補修が行われた²⁾。

以上より、本研究では鉄道ラーメン高架橋の調整桁を支持するゴム支承を対象とし、開発する変位センサーによってモニタリングする損傷形態をゴムの抜け出し挙動とした。

(2) 抜け出し量の限界値の算定

a) 解析モデル

まず、評価対象とした鉄道ラーメン高架橋の調整桁を支持するゴム支承について、点検実施や供用可否を判断するための抜け出しの限界値を提案する。そこで、ゴムの抜け出しを考慮した数値解析を実施し、その応答値を用いて鉄道の設計標準^{10), 11)}で定める支承部の復旧性および列車の走行安全性を照査することとした。

応答値を算定するために、一般的な鉄道高架橋の調整桁とゴム支承、起終点側の高架橋からなる3次元の連続高架橋モデルを梁ばね要素で構築した。モデルの概要を図3に示す。調整桁はスパンが約10mであり、起終点それぞれでゴム支承2基により支持される条件とした。本検討では、支承部の復旧性、走行安全性の項目となる常時の支承部の応力および桁の鉛直変位を算定することが目的のため、それらへの影響が小さい地中梁および杭はモデル化せず、柱基部は基盤固定とした。また、地震時の柱や梁の損傷は考慮しないため、構造部材はすべて線形とした。ゴム支承はコンクリート標準¹⁰⁾に従い、鉛直剛性 K_{V0} を算定した。ここで、 K_{V0} はゴムの抜け出しが生じていない状態での鉛直剛性で、次式(1)で表される。

$$K_{V0} = \frac{EbL}{t} \quad (1)$$

ここに、 E ：ゴムの縦弾性係数 (N/mm²)、 b ：抜け出し直角方向のゴム幅 (mm)、 L ：抜け出し方向のゴム幅 (mm)、 t ：ゴムの総層厚 (mm) である (図4(a))。

さらに、ゴムの抜け出し量 x を抜け出し方向のゴムの幅 L で正規化した、抜け出し率 α を定義した。本解析では抜け出し率 α を指標として、抜け出し後の鉛直剛性 K_V を次式(2)によって算定することで、抜け出し後の鉛直支持状態を表現した (図4(b))。

$$K_V = \frac{Eb(L-x)}{t} \\ = (1-\alpha) \frac{EbL}{t}$$

表1 解析ケース

パラメータ	ケース詳細
抜け出し率 α	0%～45%まで 5%刻み
列車速度 V	80km/h, 130km/h, 160km/h, 260km/h, 300km/h

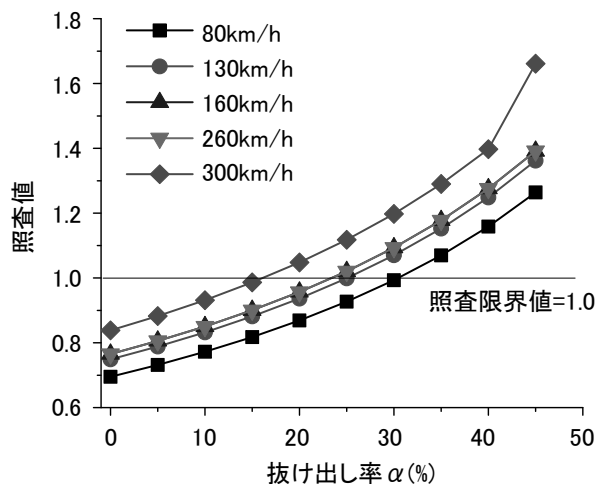


図5 抜け出し率 α と照査値の関係

$$= (1-\alpha)K_{V0} \quad (2)$$

b) 解析条件

解析ケースとして、抜け出し率 α を0%～45%まで5%刻みで10ケース設定した (表1)。また、列車速度 V を80, 130, 160, 260, 300km/hの5ケース設定し、列車荷重をH-22 (350%乗車) としたときの衝撃係数をそれぞれ算定することで走行速度の影響を考慮した。

以上の計50ケースに対して、自重状態で列車荷重を連行載荷し、支承部の圧縮応力度および圧縮変形量、桁のたわみと鉛直目違いを算定した。これらの応答値を用い、支承本体の損傷に関する復旧性の照査¹⁰⁾、走行安全性¹¹⁾、乗り心地、軌道の復旧性の照査を行った。

c) 算定結果

照査項目の中で、支承の最大圧縮応力度に対する照査¹⁰⁾が最も厳しい項目となった。そこで、列車速度 V に応じた抜け出し率 α と最大圧縮応力度に対する照査値の関係を図5に示す。図中の縦軸が1.0となる状態をここでは照査限界値と呼び、照査限界値を超えた場合には照査を満足しないことを意味する。

図5より、列車速度 V が大きい程、照査値が大きい傾向にあることが分かる。これは列車速度に応じて列車荷重が変化するためである。また、当然ながら抜け出し率 α が大きい程、鉛直支持剛性がより低下するため照査値も大きいことが確認できる。

例として、抜け出し率 α が15%以上の場合には、

列車速度が300km/hのときに照査限界値に達する。また、抜け出し率 α が30%以上の場合は、列車速度が80km/h以上のときに照査限界値となる。得られた抜け出し率 α と列車速度の関係をを用いることで、ゴム支承の諸元に応じた抜け出し量 x の限界値を設定することが可能となる。

なお、本検討で提示した抜け出しの限界値は、ゴム支承本体の損傷に関する照査値をもとにしたものであり、この限界値に達したとしても直ちに走行安全性を脅かすものではない。

4. 変位センサーシステムの開発

(1) 目標性能の設定

次に、3章で整理したゴムの抜け出しを実際に検知し、遠隔地から検知した情報を把握するための変位センサーシステムを開発する。そこで、システムの目標性能を表2のように整理した。

損傷の検知方法について、ゴムの抜け出し量は非接触で変位を計測する「測距センサー」によって検知する。この測距センサーは、抜け出しに伴う桁の沈下量も測定できるように、水平・鉛直の3成分変位を同時に測定できるものとする。計測精度は水平・鉛直のいずれも誤差1mm以下となることを目標とした。

また、3章の結果を踏まえてゴムの抜け出し量が限界値を超過したかどうかのみ判定すればよい状況も多いと考えられる。例えば、熊本地震の際は支承幅の25%以上の抜け出しが生じたかどうかで、詳細な二次点検を実施するかを判断している²⁾。そこで、センサー感知部に物体が接触したときに検知スイッチが投入される「リミットセンサー」によって、所定以上の抜け出しを検知する方法も検討した。

センサーで取得したデータの確認手段について、地震後に現地での目視点検をせずに支承部の損傷状況を把握できるように、センサーで計測したデータを無線通信によってサーバーに蓄積し、遠隔で取得

可能なシステムであることを目標として設定した。

電源について、長寿命な一次電池を使用し、構造物の検査周期¹⁾に合わせた電池交換が可能となるように、5年以上の電池寿命を目標とした。この電池寿命を確保するため、インターバル計測方式を採用することとした。インターバル計測方式とは、データの取得・通信を数分～数十分程度の間隔で行うものである。これは、地震後の抜け出し量を把握する目的では、地震時の動的な記録は必ずしも必要ないと考えたためである。これにより、計測精度を確保しつつ長期間の連続モニタリングが可能なシステムとすることを指す。

最後に、センサーの寸法について、ゴム支承が多く設置される鉄道高架橋の支承部は、最も狭い箇所でも幅70mm程度、高さ100mm程度しかスペースがない場合もある。こうした狭い空間にも設置できるように小型化を図る。

(2) 構成と特徴

a) システム構成

設定した目標性能に基づき、変位センサーシステムのプロトタイプを開発した。変位センサーシステムの構成と各要素の性能を図6および表3に示す。

システム構成は図6に示すように、センサーノードとネットワークに大きく分類される。センサーノードは、ゴムの抜け出しを検知・取得するセンサー部と、取得データを無線通信する通信制御部から構成される。ネットワークは、通信制御部と形態基地局を中継するゲートウェイ（GW）、データを蓄積するクラウドサーバー、クラウドサーバー上のデータを閲覧・取得するパソコン、スマートフォン等で構成される。

なお、本研究では、図6のセンサーノード、GW、クラウドサーバー上のデータを閲覧・取得するためのユーザーインターフェースを開発し、その他のネットワーク等は既存のサービスを利用している。

b) センサーノード

センサーノードは図7に示すように、通信とデー

表2 変位センサーの目標性能

項目	目標性能
計測対象	・ ゴムパッドの抜け出し ・ 桁の沈下
寸法	・ 支承部周辺に設置可能
精度	・ ゴムパッドの抜け出し、桁の鉛直変位を誤差 1mm 程度以下で計測可能 ・ ゴムパッドの抜け出しを検知可能
電源	・ バッテリーで5年以上の連続駆動が可能
データ取得方法	・ 計測データを無線通信によって遠隔地から取得可能
耐久性	・ 実環境において長期にわたり安定駆動可能

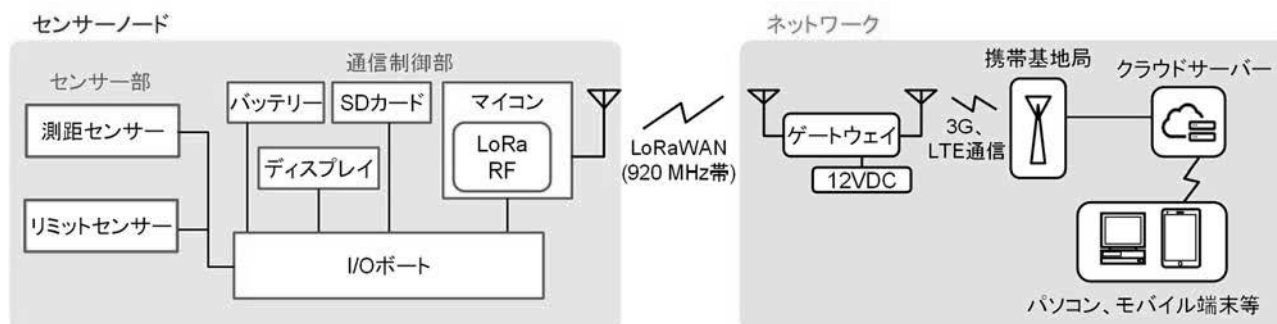


図6 変位センサーシステムの構成

表3 性能一覧

項目	性能
使用温度	-30℃～50℃
計測方式	測距／リミット，インターバル計測
測定範囲	40mm～150mm
測定精度	1mm
電池寿命	一次電池で約7年（10分間隔で計測・通信した場合の理論値）
防塵・防水性	IP44
通信方式	センサーノード～ゲートウェイ間：LoRaWAN ゲートウェイ～携帯基地局間：3G，LTE
価格帯	約5万円/基（プロトタイプ時点）※通信にかかる費用は除く

タ処理を行うバッテリー，マイクロコンピュータ，I/Oボードと，計測を行う測距センサー，リミットセンサーで構成されている．センサーノード1台に対して，最大で測距センサー1個，リミットセンサー3個を同時に接続することが可能である．

測距センサーは，3つの同一型番の小型赤外線センサーを3軸方向に集約させたものである．水平2成分はゴムの抜け出しを，鉛直1成分は桁の沈下を計測することを想定している．

リミットセンサーは，通常時は常にHIGH(1)の値を返し，ピンに物体が接触して曲げ変形を受けるとLOW(0)の値を返す．そのため，ゴムがピン位置まで抜け出した状態かどうかを検知することができる．なお，リミットセンサーが作動するための閾値は2mm程度である．また，基部には復元バネが埋め込まれているため，鳥や飛来物の接触等による一時的な誤検知に対してもある程度自動的に復旧可能と考えられる．

電源には耐久性に優れた塩化チオニルリチウム1次電池（3.6V 19Ah）を採用した．10分間隔で計測・通信を行う場合，理論上の電池寿命は7年と推定される．計測・通信間隔はサーバーとの通信によって設置後も変更可能であり，通常は1日程度のインターバル間隔とし，地震後は迅速な被害把握のために計測頻度を高める等によって電池寿命をより延ばすことができる．

開発したセンサーノードの高架橋上への設置イメ

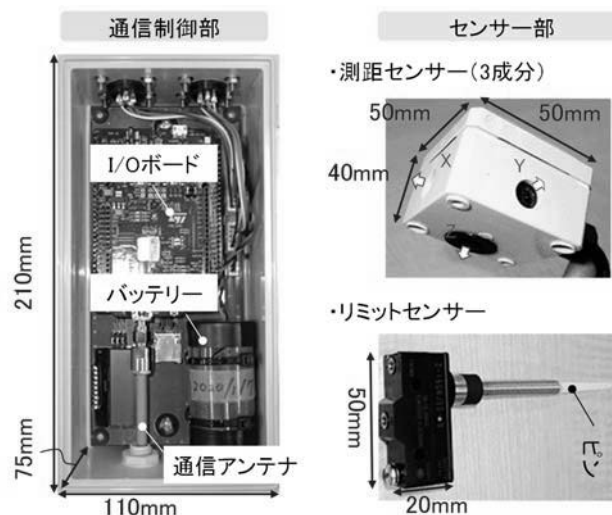


図7 センサーノード

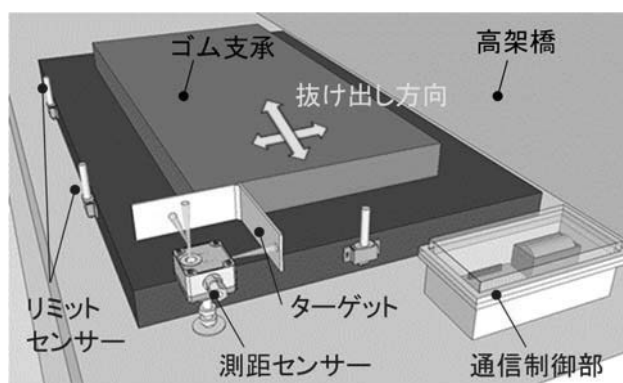


図8 ゴム支承への変位センサーの設置イメージ

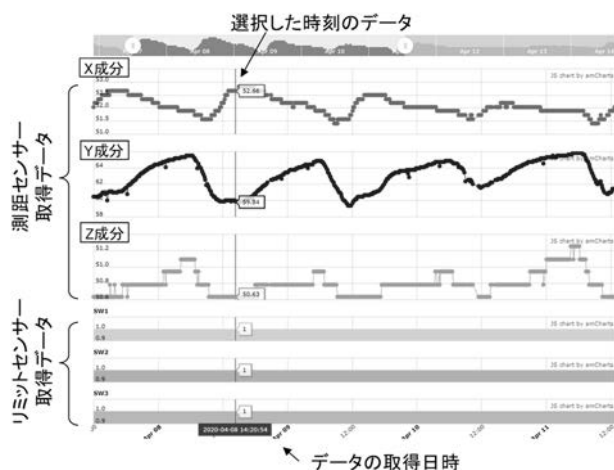


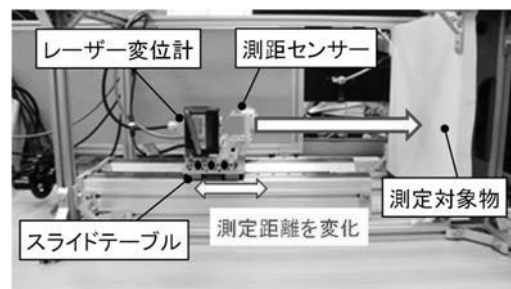
図9 ウェブブラウザによるデータの取得状況

ページを図8に示す。センサーノードとリミットセンサーおよび測距センサーはケーブルによって接続し、いずれも支承部の近傍に設置する。そして、ゴムの2方向の抜け出しを計測するために、ゴムにターゲットを接着し、ターゲットの変位を測距センサーにより計測する。このとき、桁の鉛直変位も同時に計測可能である。また、図8にはリミットセンサーを用いた設置イメージも示している。検知する抜け出し量の限界値を事前に設定し、その位置にリミットセンサーを設置しておくことで、抜け出し量が限界値を超過したかどうかを把握できる。

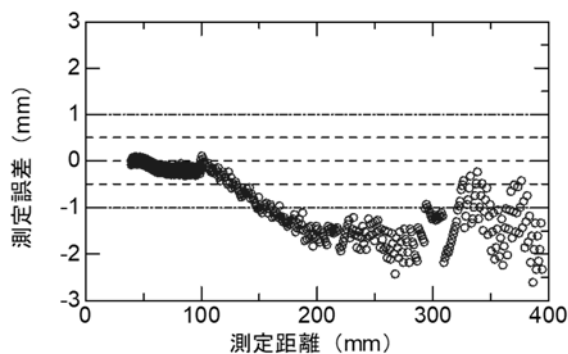
c) ネットワーク

センサーノードが取得したデータはゲートウェイ (GW)、携帯基地局を介してクラウドサーバーへ送信される。センサーノードとGW間の通信は、低消費電力広域通信 (Low Power Wide Area, LPWA) 規格の1つであるLoRaWAN方式 (920MHz帯) を使用した。GWと携帯基地局間は既存の通信キャリアネットワーク (3G回線またはLTE回線) を使用する。なお、GWには12V直流電源が必要であるが、1台のGWで100台以上のセンサーノードと同時接続可能であり、LoRaWAN通信方式によるセンサーノードとの通信範囲は理論上半径2km程度確保されている。そのため、駅部等の固定施設に必要な分だけGWを設置することを想定している。

取得データはクラウドサーバー上に蓄積され、PC、モバイル端末等からウェブブラウザを利用して閲覧、取得できる (図9)。そのため、現地に行って近接目視することなく、地震後すみやかにリモートでゴム支承の損傷状況を把握することが可能である。なお、通信範囲内にGWを設置する固定設備がない場合、ソーラーパネル給電による電源設置や、モバイルバッテリーによる現地付近でのデータ取得も可能である。



(a) 試験状況



(b) 計測結果

図10 精度検証試験

(3) 性能検証試験

開発した変位センサーシステムについて、精度検証試験ならびに実環境での使用を想定した性能試験を実施した。以下に各試験結果について述べる。

a) 測定精度

精度検証用のレーザー変位計を用いて、開発した測距センサーの精度を確認した。試験状況を図10(a)に示す。レーザー変位計と測距センサーをスライドテーブル上に固定した上で、測定対象物との距離を変化させながら計測を行い、レーザー変位計の測定値を正とした場合の測距センサーの測定誤差を整理した。

測距センサーの測定誤差を図10(b)に示す。測定対象物との距離が長いほど精度が相対的に低下する傾向があるが、測定距離が40mm~150mmであれば誤差が約1mm以下となり、測定精度に関する目標性能を満足できる。実環境での使用を考えると、所定の精度が確保できる測定レンジとなるように、測定方向に応じて設置位置を調整する必要があることが分かった。

b) 温度変化に対する安定性

暴露環境下での気温変化に対する測距センサーの計測精度の安定性を確認するために、恒温装置を用いた試験を実施した。試験では、恒温室内に測距センサーを設置し、測距センサーの測定距離を50mmにセットした後に、温度を-30℃~60℃まで変化させて計測値を記録した。その結果、温度変化に対し、測定値の変動は最大で±0.16mmであり、開発した

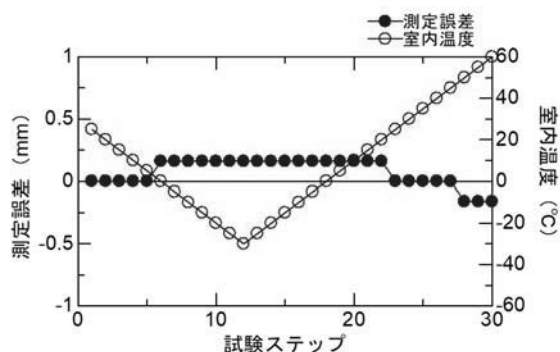
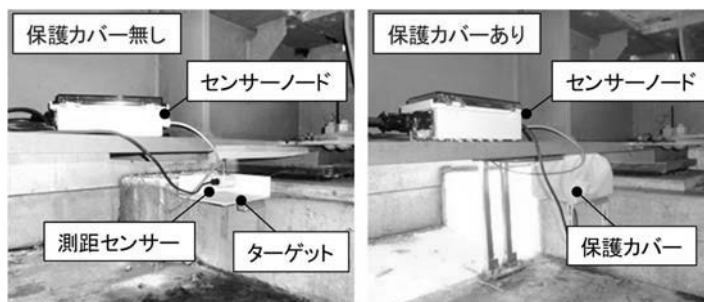


図 11 温度変化に対する安定性の検証結果



(a) センサーの設置状況

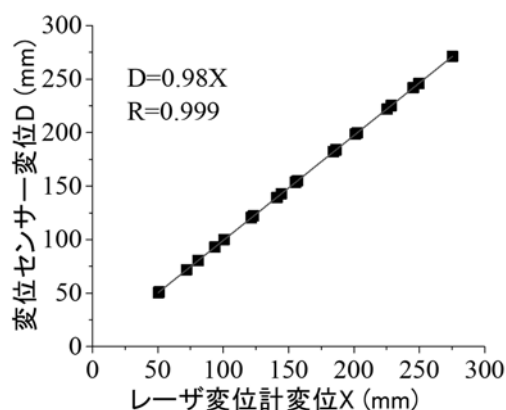
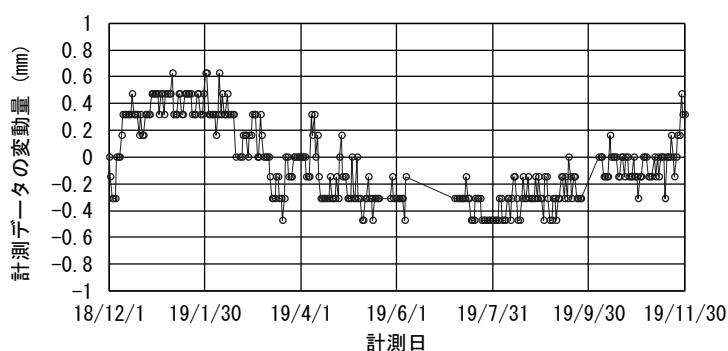


図 12 振動に対する安定性の検証結果



(b) 計測結果（保護カバーあり）

図 13 長期耐久性の検証

センサーは実環境下での温度依存性が小さく、安定的な計測が可能なことを確認した（図11）。

c) 振動に対する安定性

センサーノードは構造物上に設置するため、強震動を受けた後も故障することなく動作することが求められる。この検証のため、センサーノードを振動台上に設置し、地震波加振を繰り返し行った。加振は耐震標準¹²⁾に記載のL2地震動スペクトルI（G3地盤）を100galから100gal刻みで800galまで加振した後、L2地震動スペクトルII（G3地盤）を100galから100gal刻みで1200galまで行った。この一連の加振を4セット行った後、a) の測定精度検証と同様に、計測対象までの位置を変化させた計測を行い、レーザー変位計の値と測距センサーの測定値を比較した。

図12にその結果を示すが、測距センサーはレーザー変位計と同等の測定結果を与えており、強震動下でも故障することなく測定可能であることを確認した。

d) 長期耐久性

開発したセンサーを鉄道総研所内の試験線にある鋼桁支承部に設置し、暴露環境下での長期耐久試験を実施した。設置状況を図13(a)に示す。一部のセンサーは、防水・防塵対策として、ターゲットと測距センサーをビニル製の保護カバーで覆った。なお、試験は2018年12月から開始している。

桁の線路方向変位について、試験開始から1年間（2018年12月1日～2019年11月30日）の計測データの変動量を図13(b)に示す。図13(b)より、1年間にわたり継続して計測・通信が可能であることが確認できた。2019年6月頃から1ヵ月程度データが欠損しているが、これはGWの取り換え作業を行ったためである。以上より、長期間の暴露環境下においても、安定してデータ計測・通信が可能である。なお、図13(b)に示したのは保護カバーを付けた状態での計測結果であり、保護カバー無しの場合は雨天時等にデータ欠測等が生じたため、実運用上は保護カバーの設置が必要になる。

5. おわりに

本研究では、地震後の支承部の点検迅速化、早期運転再開を支援するためのモニタリングシステムの開発を行った。以下に具体的な実施内容と得られた知見を示す。

- 1) 鉄道高架橋に多数設置されるゴム支承を対象として、既往の地震被害や走行安全性等への影響を考慮して、モニタリング対象とする損傷形態をゴムの抜け出し挙動とした。

- 2) 高架橋2ブロックと調整桁，ゴム支承からなる連続高架橋モデルを構築し，ゴムの抜け出しを考慮した状態での自重・列車荷重を作用させた解析を実施した．そして，支承部の復旧性，列車の走行安全性の照査を行い，列車速度に応じた抜け出し量の限界値を提案した．
- 3) 地震後のゴムの抜け出しを検知し，無線通信によって遠隔から状態把握が可能な変位センサーシステムを開発した．開発した変位センサーはゴムの抜け出しを1mm精度で検知可能なほか，小型かつ5年以上のバッテリー寿命を持つことで省メンテナンス性にも優れている．

今後も耐久試験等を継続して実施することで，実用化に向けた改良を行う予定である．

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）コンクリート構造物，2007
- 2) 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
- 3) 大規模地震発生時における首都圏鉄道の運転再開のあり方に関する協議会報告書，2012
- 4) 土木学会 2018 年北海道胆振東部地震・大阪府北部の地震被害調査報告書，地震被害調査シリーズ No. 2, No. 3, 2019
- 5) 関屋英彦，木ノ本剛，田井政行，古東佑介，丸山收，三木千壽：MEMS 加速度センサを用いた二箇所同時変位計測に基づく支承部の健全度評価の試み，土木学会応用力学論文集 Vol.20（特集）No. 73, Vol. 2, pp. I_649-I_660, 2017
- 6) 小林寛，運上茂樹，加納匠：加速度センサを用いた道路橋の地震時被災度判定手法の開発，土木学会地震工学論文集 Vol. 28, 2005
- 7) 篠原聖二，西岡勉：2018 年 6 月に大阪府北部で発生した地震におけるリアルタイム地震被災度推定システムの検証，第9回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム論文集，2019
- 8) 山田金喜，曾田信雄，木水隆夫，広瀬剛，名古屋和史，鈴木基行：東北地方太平洋沖地震により被災した東部高架橋のゴム支承に関する解析的検討，土木学会構造工学論文集 Vol. 59A, pp. 527-539, 2013
- 9) 日本道路協会：道路橋支承便覧，丸善出版，2019.
- 10) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，2004
- 11) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 変位制限，2006
- 12) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，2013