

変位センサーによる支承部の地震後損傷推定手法の開発

小野寺 周* 吉田 善紀** 豊岡 亮洋*
林 吾介*** 高橋 宏寿***

Estimation Method of Seismic Damage of Bearings at Railway Structure by Displacement Sensor

Meguru ONODERA Yoshinori YOSHIDA Akihiro TOYOOKA
Gosuke HAYASHI Hiroju TAKAHASHI

In order to resume the operation after a large quake, it is necessary to investigate the presence or degree of damage at railway structures. The inspection of bearings needs great labors particularly when the bearings are in high and narrow places. This study proposes a method for detecting the seismic damage to bearings using a displacement sensor. The relationship between the degree of damage and running safety is investigated for a pad type rubber bearing and a steel type bearing. In addition, we develop a displacement sensor that detects the seismic damage of bearings and enables remote monitoring by wireless communication.

キーワード：地震後損傷検知，変位センサー，パッド型ゴム支承，鋼製線支承，早期運転再開

1. はじめに

発生した地震の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、運転を停止して当該区間の軌道や構造物等の随時検査を実施する必要がある¹⁾。運転を再開するためには、検査員が目視によって構造物等の被害調査をした上で、列車が走行可能な性能を有していることを確認しなければならない。しかしながら、地震による影響範囲は広いと被害調査の対象箇所も多数におよぶ。その結果、構造物の損傷が軽微な場合であっても運転再開までに時間を要することがある^{2) 3) 4)}。そのため、早期運転再開のために地震後の被害調査の効率化・時間短縮が求められている³⁾。

調査箇所の中でも図1に示す支承部は、一般的に高所・狭あい箇所にあるため地上からの目視が難しい。そのため、調査には高所作業車等が必要となる場合がある上、路線内に多数存在するため特に時間と労力を要する。実際、2016年熊本地震では、九州新幹線において約2,100箇所もの支承部が調査対象となった²⁾。この事例では、はじめに全支承部に対して排水樋の損傷やストッパー前面のひび割れ等を地上から遠方目視し、路線内で特に桁移動が大きいと推定される箇所を概略的に絞り込んだ上で、それらの箇所を高所作業車等によって詳細に調査した。その結果、4日間で全支承部の調査が完了しており²⁾、路線全線の概況把握と詳細な調査箇所の絞り込みによって迅速な対応が可能であったと考えられる。

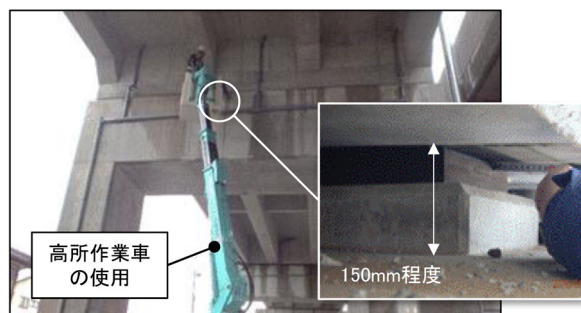


図1 地震後の支承部の被害調査

こうした地震後の被害調査の効率化を支援する有効な方法の一つとして、センサー等を事前に設置して構造物の状態や挙動をモニタリングすることが考えられる。構造物本体に対しては、例えば加速度センサーによる橋脚や桁の常時の健全性評価手法や、地震計による地震時の観測記録の集約・監視システム等、多数のシステムの開発が行われている^{5) 6) 7)}。目視困難な支承部に対しても同様のセンシング技術を活用することによって、より迅速な路線全線の概況把握ならびに詳細な調査箇所の絞り込みが可能となると考えられる。しかしながら、これまで支承部の地震後の損傷検知や被害調査に着目したモニタリング手法やセンシングデバイスの開発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、地震後の支承部の被害調査ならびに早期運転再開を支援することを目的として、センシング技術を活用して支承部の地震後損傷を推定する手法の開発を行った。

* 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室
** 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室
*** 株式会社ミライト

2. 開発した地震後損傷推定手法および対象とする支承形式

2.1 手法の概要

まず、本研究で開発した支承部の地震後損傷推定手法について述べる。本研究では、センシング技術によって地震による支承部の変状を検知し、走行安全性等の指標に基づいた損傷状態を推定するために必要な以下の項目に関して検討する。

- (1) 検知対象の選定：支承部の地震時の変状は支承形式ごとに異なるため、実路線における設置数量や変状による運行への影響程度等の観点から、センシングの検知対象とする支承形式とその代表的な変状を選定する必要がある。
- (2) 損傷状態の評価方法の構築：路線の中から詳細調査等を優先すべきと考えられる箇所を絞り込むために、走行安全性と関連付けて損傷状態を評価する方法を構築する必要がある。
- (3) 検知システムの開発：目視困難な箇所の変状を検知するために、対象とした支承形式とその変状に応じたセンサーを開発する必要がある。

そこで (1) について、これまでの地震被害事例等から検討対象とする支承形式と地震による代表的な変状を 2.2 節で選定する。続いて (2) について、対象とした支承部の損傷状態を走行安全性等の指標に基づいて評価する手法を 3 章で提案する。最後に (3) について、検知対象とした変状をセンサーで検知し、遠隔地から状況把握が可能なシステムの開発について 4 章で述べる。

2.2 検討対象とする支承形式とその変状

まず前節 (1) に関して、既往の地震被害に基づいて、変状による運転再開への影響が大きいと考えられる支承形式とその変状を 2 ケース選定した。

一つは、図 2 に示す調整桁式のラーメン高架橋におけるパッド型ゴム支承の抜け出し挙動である。これは 2016 年熊本地震において多数確認された変状である²⁾。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 12 箇所を確認され、これらの箇所はジャッキアップによる据え直し等の大規模な補修が行われている²⁾。

もう一つは、図 3 に示す鋼製線支承におけるサイドブロックの破断である。鋼製線支承は鋼橋での採用数が多いため、地震時の損傷事例が多く報告されている⁸⁾。内容としてはソールプレートやアンカーボルト、沓座の損傷事例もあるが、サイドブロックの破断が比較的多い損傷事例となる⁹⁾。また、サイドブロックの破断によって桁の線路直角方向に対する移動制限機能が喪失するため、走行安全性への影響が大きいと考えられる変状でもある。

以上より、地震後の被害事例が多く、また走行安全性

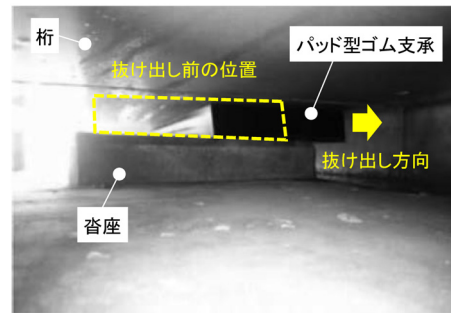


図 2 パッド型ゴム支承の抜け出し（文献 2 に加筆）

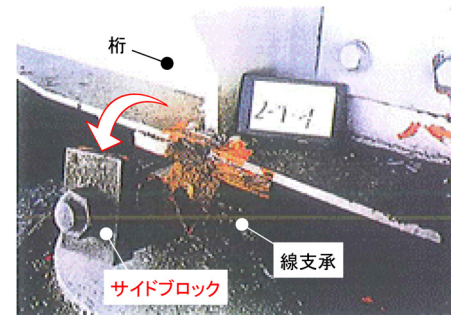


図 3 鋼製線支承のサイドブロックの破断（文献 8 に加筆）

への影響が大きいと考えられるパッド型ゴム支承における抜け出しと、鋼製線支承におけるサイドブロックの破断を検討対象とした。

3. 支承部の損傷状態の評価法提案

ここでは 2.1 節 (2) に関して、検討対象とした 2 支承について、走行安全性等の指標に基づいて損傷状態を評価する方法を提案する。

3.1 パッド型ゴム支承の損傷状態の評価法

パッド型ゴム支承の抜け出しが大きい場合、支承の鉛直支持性能が低下し、ゴム本体の損傷や走行安全性の低下が生じる可能性がある。このような変状箇所は優先的に詳細調査を実施する必要があると考えられる。そこで、抜け出し量と鉛直支持性能の関係を解析的に評価する方法について検討した。なお本節では、鉛直支持性能として設計標準^{10) 11)}で定められた支承本体の復旧性および列車の走行安全性に着目して議論する。

3.1.1 解析モデルおよび解析条件

まず、抜け出し時のパッド型ゴム支承の応力状態や軌道面の不同変位等を算定するために、新幹線における一般的な調整桁形式のラーメン高架橋を想定した構造解析モデルを構築した。対象構造はスパン 10m の調整桁を起終点それぞれ 2 基のパッド型ゴム支承で支持するものである。図 4 に構築した解析モデルを示す。調整桁および構造部材は線形梁要素、パッド型ゴム支承は鉛直方向

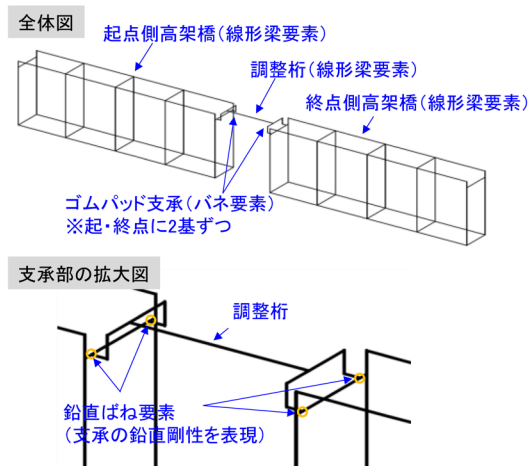


図4 調整桁式高架橋の解析モデル

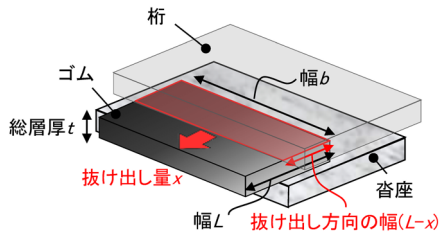


図5 パッド型ゴム支承の抜け出し

表1 解析ケース

パラメータ	ケース数
抜け出し率 α	11 (0%~50%まで5%刻み)
列車速度 V	5 (80,130,160,260,300km/h)

の線形ばね要素でモデル化した。本検討では、地震発生後の支承部の応力および軌道面の不同変位等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、柱基部を基盤固定とした。

パッド型ゴム支承について、抜け出しがない初期剛性 K_{V0} はコンクリート標準¹⁰⁾に従い、式(1)で表現した。

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

ここに、 E :ゴムの縦弾性係数 (N/mm^2)、 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5)。

式(1)より、図5のように x (mm) の抜け出し量が生じたときの剛性 K_V は式(2)のように算定できる。

$$\begin{aligned} K_V &= \frac{Eb(L-x)}{t} \\ &= (1-\alpha) \frac{EbL}{t} \\ &= (1-\alpha)K_{V0} \end{aligned} \quad (2)$$

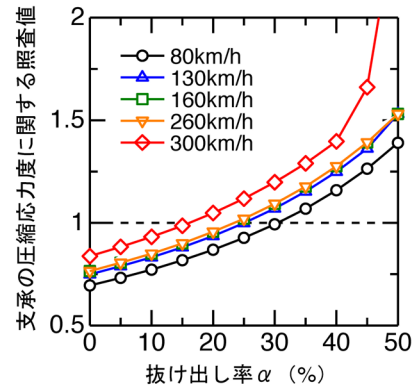


図6 走行速度に応じた抜け出し率と照査値の関係

ここに、 α はゴムの幅 L に対する抜け出し量 x の比率であり、 K_V は初期剛性 K_{V0} に対して α の関数で整理している。そのため、抜け出し率 α に応じて低下した剛性 K_V を解析モデルに反映させることで、抜け出し後の鉛直支持状態を表現できる。

次に、構築したモデルに対して上部工重量および列車荷重を作用させた静的解析を実施した。まず、抜け出し率 α について表1に示す0%~50%まで5%刻みで11ケース設定し、それぞれで支承ばねの鉛直剛性をモデルに反映させた。そして、各抜け出し率のケースに対して、新幹線荷重 H-22 (350% 乗車) および表1に示す5ケースの列車速度 V に応じた衝撃荷重を複線載荷させた。

計55ケースの解析を実施し、ゴム支承の圧縮応力度および圧縮変形量、桁のたわみおよび鉛直目違いを算定した。そして、支承本体の復旧性および走行安全性に関する限界値^{10) 11)}と算定された応答値を比較した。

3.1.2 算定結果

図6には各列車速度における支承の圧縮応力度に関する照査値を示す。今回の検討条件ではこの項目に関する照査値が全てのケースで最大となった。同図において照査値が1.0を超過した領域は、設計計算上ゴム支承本体の復旧性に関する限界値を満足しないことになる。

図6より、当然ながら抜け出し率 α が大きい程、支承の鉛直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、列車速度が80km/hの場合、抜け出し率 α が30%を上回ると照査値が1.0を超過することが読み取れる。

路線の構造物群に適用する場合には、個別構造ごとに同様の解析を実施して照査値が1.0を超過する限界の抜け出し率とその変位量を事前に求める。そして、地震後の目視検査やモニタリング結果と比較することで、路線内で相対的に損傷が大きく詳細調査すべきと推定される箇所を絞り込むことができると考えられる。

3.2 鋼製線支承の損傷状態の評価法

鋼製線支承のサイドブロックに対しても、詳細調査を

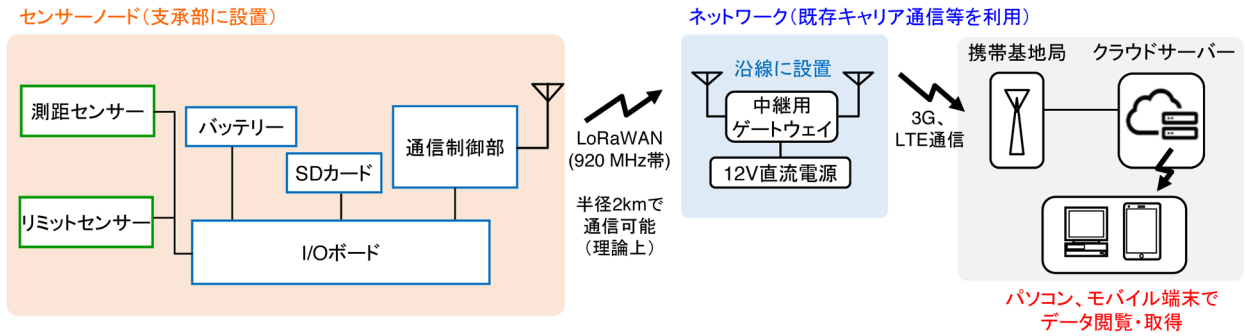


図7 センサーシステムの構成

表2 センサーシステムの実効性能

項目	性能
使用温度	-30℃～50℃
測定方式	測距センサー／リミットセンサー
測定範囲	40mm～150mm
測定精度	1mm
電源	一次電池で約7年（10分間隔で計測・通信）
防水性	IP44
通信方式	センサー～ゲートウェイ：LoRaWAN ゲートウェイ～サーバー：3G、LTE

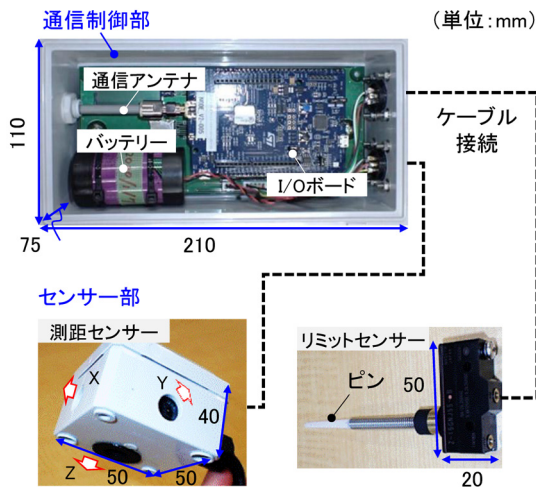


図8 センサーノードの構成

優先的に実施する目安となる損傷状態を設定する。ここで、鋼製線支承における既往の載荷試験¹²⁾によって、サイドブロックの破断後に著しい水平抵抗力の低下が生じることが明らかとなっている。また、破断に達するまでのサイドブロック頂部における変位量は2～3mm程度と小さい¹²⁾。そのため、サイドブロックが破断した時点の詳細調査の目安となる限界損傷状態とした。

以上より、パッド型ゴム支承と鋼製線支承の変状ごとに性能限界となる損傷状態を事前に設定しておけば、地震後の被害調査結果に基づいた復旧対応の優先順位付け等を支援することができると思われる。

4. 損傷を検知する変位センサーの開発

続いて、2.1節(3)に対応して、地震後のパッド型ゴム支承における抜け出しおよび鋼製線支承におけるサイドブロックの破断の有無を検知し、遠隔地から支承部の状況を把握可能なセンサーシステムを開発した。

4.1 センサーシステムの構成と特徴

4.1.1 システム構成

開発したセンサーシステムの構成と各要素の性能を図7および表2に示す。なお、表2に示す性能は4.2節で後述する性能検証試験の結果を踏まえたものである。

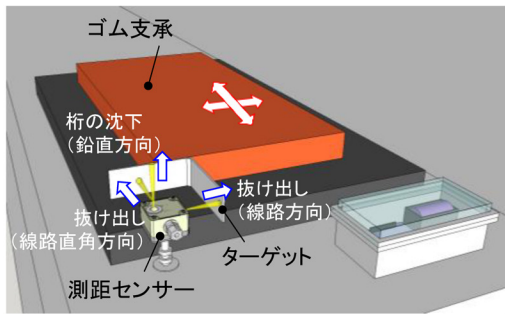
システム構成は図7に示すように、センサーノードとネットワークに大きく分類される。センサーノードは、支承部の損傷を検知・取得するセンサー部と、取得データを無線通信する通信制御部から構成される(図8)。ネットワークは、通信制御部と携帯基地局間の無線通信を中継するゲートウェイ(GW)、データを蓄積するクラウドサーバー、クラウドサーバー上のデータを閲覧・取得するモバイル端末等で構成される。

なお、本研究では図7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、その他の構成は既存のサービス等を利用している。

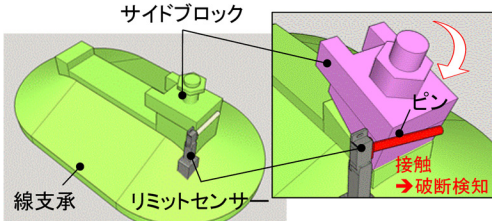
4.1.2 センサーノード

センサーノードは図8に示すように、バッテリー、通信用の制御基盤、パッド型ゴム支承の抜け出し検知用の測距センサーもしくは鋼製線支承のサイドブロック破断検知用のリミットセンサーで構成されており、支承部周辺に設置するため小型化を図った。

このうち、測距センサーは主にパッド型ゴム支承の抜け出しや桁の水平・鉛直変位を0.16mmの分解能で測定するものであり、3基の小型赤外線センサーを集約して3軸方向の測定を可能としている。具体的には図9(a)に示すように、パッド型ゴム支承に接着したターゲットの変位を計測することで、水平2成分のゴムの抜け出しと桁の鉛直沈下を計測する。

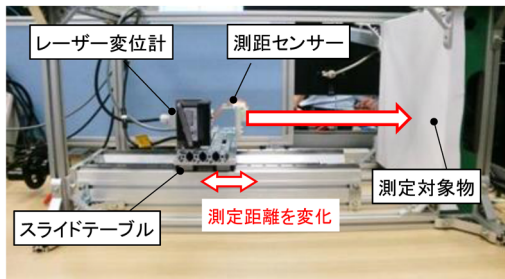


(a) 測距センサー (パッド型ゴム支承)

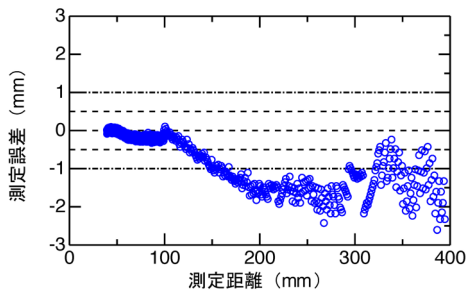


(b) リミットセンサー (鋼製線支承)

図9 センサーの設置イメージ



(a) 試験状況



(b) 測距センサーの計測誤差

図10 精度検証試験

リミットセンサーは、サイドブロック破断を検知する目的で設置する。通常時は常に HIGH の電圧を返し、センサー先端のピンに物体が接触して曲げ変形を生じると LOW の電圧を返すセンサーである。リミットセンサーが作動するための変形閾値は 2mm 程度であり、既往の载荷試験¹²⁾で確認されたサイドブロック破断時の変位量と概ね同等である。具体的には図9(b)に示すように、鋼製線支承のサイドブロック頂部とピンを接続することで、破断に伴い生じる変位を検知する。

センサーによる計測・通信頻度は 10 秒～数時間に 1 回とした。これは、地震後の損傷状況を検知する目的では、

地震時の動的な波形は必ずしも必要ないためである。また、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。これにより、計測・通信間隔を 10 分とした場合の電池寿命は理論上 7 年となり、省メンテナンスを実現している。なお、計測・通信間隔は無線通信によって設置後に変更することが可能である。

4.1.3 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) と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・広域通信規格 LPWA (Low Power Wide Area) の一つである LoRaWAN (920MHz 帯) を使用した。また、GW と携帯基地局間は既存の通信キャリアネットワークを利用する。ここで、GW は 1 台で理論上半径 1km 以内の複数台のセンサーと通信が可能のため、周辺の電波環境にも依存するが駅部や沿線の電源 (DC12V) が確保できる箇所に必要な分だけ設置することを想定している。

構築したネットワークにより、センサーで取得したデータはクラウドサーバー上に蓄積され、モバイル端末等からウェブブラウザを利用して閲覧、取得可能なものとした。

4.2 性能検証試験

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

4.2.1 計測精度

精度検証用のレーザー変位計を用いて、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低下する傾向があるが、測定距離が 40mm ~ 150mm の範囲では誤差 1mm 以下を確保できる。そのため、実際の施工時は精度が確保できる測定レンジとなるように、治具等で設置位置を調整する必要があることが分かった。

4.2.2 長期耐久性

実環境を想定した暴露環境下において安定したデータ取得・通信が可能であることを確認するために、開発したセンサーを鉄道総研所内の試験線にある鋼桁のゴム支承に設置し、長期耐久試験を実施した。設置したゴム支承およびセンサーの設置状況を図11(a)、図11(b)に示す。測距センサーおよびターゲットはビニル製の保護カバーで覆うことで防水・防塵対策を施した。そして、試験期間である 2018 年 12 月から 2019 年 12 月までの 1

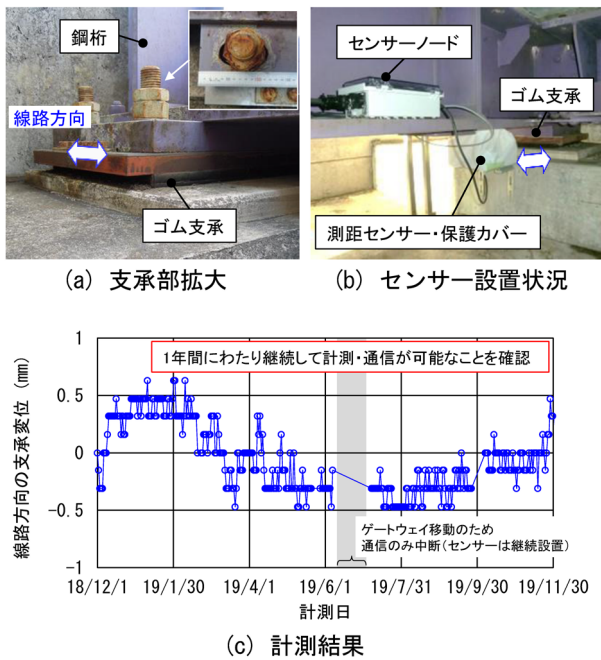


図 11 長期耐久試験

年間にわたり、測距センサーによってゴム支承の線路方向変位を継続的に計測した。なお、測距センサーを設置したゴム支承は図 11(a) に示すように可動構造であったが、可動部の腐食によって可動不良が生じている可能性があった。そのため、本試験では支承変位による計測値の精度検証を行わず、データ取得・通信の安定性を主な確認事項とした。

計測結果を図 11(c) に示す。図より、1 年間継続して安定的にデータ取得・通信が可能であることが確認できた。1 年間での変位変動が ± 0.5mm 程度と小さいのは前述した腐食による可動不良の影響と考えられる。なお、2019 年 6 月頃から 1 ヶ月程度データが欠損しているのは、ゲートウェイ (GW) の取り換え作業を行ったためであり、センサー自体は設置したままである。また、同じ鋼桁の別支承部に保護カバーで覆わない状態のセンサーも設置して計測したが、雨天時等に欠測が生じたため、実運用においては保護カバーの併用が必要になることが分かった。

さらに、本試験とは別に営業線内での長期計測を行っているが、高精度変位計との誤差 1mm で桁の温度伸縮に伴う支承変位を計測可能であることを確認している。

5. おわりに

本研究では、地震後の支承部における被害調査の迅速化ならびに早期運転再開を支援する目的で、変位センサーによる支承部の損傷推定手法の開発を行った。以下に具体的な実施内容と得られた知見を示す。

- 1) センサーによる検知対象として、設置数量や走行安全性への影響を踏まえて、調整桁式ラーメン高架橋におけるパッド型ゴム支承の抜け出し挙動と鋼橋における鋼製線支承のサイドブロックの破断を選定した。
- 2) 対象とした支承変状について、走行安全性等の観点から優先的な詳細検査や復旧対応等の判断目安となる損傷状態を評価する方法を提案した。
- 3) 地震後の支承変状を検知し、無線通信によって遠隔から状態把握が可能なセンサーシステムを開発した。また、長期耐久試験により、1 年間にわたり安定的に計測・通信が可能であることを確認した。
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。

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，丸山収，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) (財) 鉄道総合技術研究所：兵庫県南部地震鉄道被害調査報告書，鉄道総研報告，特別第 4 号，1996
- 9) 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）鋼・合成構造物，2007
- 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) 中原正人，池田学，豊岡亮洋，永井紘作：鋳鉄製支承の地震時耐荷力特性と復元力モデル，鉄道総研報告 Vol. 22, No. 3, 2008