

2016年茨城県北部の地震で被災した 新小山橋とその周辺での現地調査

秦 吉弥¹・矢部 正明²

¹正会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: hata@civil.eng.osaka-u.ac.jp

²正会員 (株)長大 構造事業本部 耐震技術部 (〒305-0812 茨城県つくば市東平塚730)

E-mail: yabe-m@chodai.co.jp

2016年茨城県北部の地震によって、県道22号の新小山橋において地表断層変位を伴う被災が発生した。本稿では、新小山橋の地震被災踏査によって得られた構造的な知見に関して報告する。具体的には、新小山橋とその周辺に位置するKiK-net高萩において常時微動計測を実施し、得られた記録に基づき地盤震動特性に関する評価を行った。さらに、新小山橋の両岸および橋桁中央において微動アレー計測を実施し、得られた記録に基づき新小山橋の振動性状に関する基礎的な検討を行った。

Key Words : ramen bridge, microtremor measurement, the2016 Northern Ibaraki Prefecture Earthquake

1. はじめに

2016年12月28日21時38分に発生した茨城県北部を震源とする気象庁マグニチュード6.3の比較的規模の大きな内陸地殻内地震(以後、2016年茨城県北部の地震もしくは本震と呼ぶ)¹⁾によって震源域では強震動が多く観測された。震源(震央)から概ね北方約10kmの位置にある県道22号の新小山橋(図-1および写真-1参照)では、地表断層変位を伴う被災が佐藤・八反坂²⁾、小俣・杉田³⁾、栗田・吾妻⁴⁾によってそれぞれ報告されている。新小山橋に関しては、これらの報告全てにおいて触れられているが、構造分野にとって重要な情報が報告されている新小山橋に関連する情報に限定してその概要を示す。

小俣・杉田による報告³⁾を、新小山橋付近の記載に着目して以下に要約する。2016年茨城県北部の地震は、東北東-西南西方向に張力軸を持つ正断層型の地震¹⁾であり、InSAR解析⁵⁾では地殻変動が検出されており、27cmの衛星から遠ざかる向きの変動、および6cmの衛星から遠ざかる向きの変動がそれぞれ約2kmの長さにわたって確認されている。新小山橋は、InSAR解析で干渉縞の不連続がある地点に相当し、橋桁と東西両橋台の間に引張の痕跡が確認でき、東側橋台において2~3cmおよび西側橋台において約4cmの開口がそれぞれ確認されている。さらに西側橋台では、橋台側が橋桁に対して約5cmの低下が確認されている。

栗田・吾妻による報告⁴⁾を、新小山橋付近の記載に着目して以下に要約する。前報(2011年3月19日18時56分に

発生した茨城県北部を震源とする深さ5kmおよび気象庁マグニチュード6.1の地震)⁶⁾では、新小山橋の西側の橋



写真-1 新小山橋の外観



図-1 2016年茨城県北部の地震の震源域に位置する新小山橋(県道22号)とその周辺の強震観測点の分布

台付近において橋梁と道路が破損していることを報告しているが、取付け盛土の不同沈下によるものと解釈され、地表断層変位によるものとは認識できていなかったため、地形の傾斜方向と不調和な開口断裂に留意した調査を再度実施している。その結果、新小山橋付近では、橋梁西側において約70mの区間にわたりNNW-SSE走向の開口断裂群が表れており、東西兩岸の橋台付近では水平伸張によって橋梁の伸縮継手が引き伸ばされているのが確認されている。新小山橋付近では、2016年茨城県北部の地震以前にもほぼ同じ箇所が概ね同規模で変位していたことを確認しており、2016年茨城県北部の地震とそれ以前の地震による合算の水平伸張量は県道沿いに29cmに及び、変位が集中している箇所は西側の橋台付近であったことが報告されている。さらに、新小山橋付近のアスファルト舗装路面には、2016年茨城県北部の地震より前にも水平伸張を伴う古い開口断裂が存在していたことが確認されており、道路沿いのガードレールは3~5cmの水平伸張による変形痕跡も確認されている。

本稿では、まず、著者らによって行われた新小山橋の被災踏査によって得られた構造的な知見に関して報告する。次に、新小山橋とその周辺の既存強震観測点(図-1参照)において常時微動計測を実施し、得られた地盤震動特性に関する評価結果を明示する。最後に、新小山橋の兩岸および橋桁中央において微動アレー計測を実施し、新小山橋の振動性状に関する基礎的な検討を行った結果について報告する。なお、本研究は、(公社)土木学会地震工学委員会性能に基づく橋梁等構造物の耐震設計法に関する研究小委員会(委員長:矢部正明(株)長大)の活動の一環として実施したものである。

2. 益城町小谷集落の特徴

前述したように、新小山橋の周辺地盤に生じた変位量に関しては、地震直後に調査に入った断層分野の専門家による報告²⁾³⁾⁴⁾がある。ここでは、新小山橋の現地調査によって確認された情報と栗田・吾妻らによって報告された情報⁹⁾および各種設計資料等⁷⁾¹²⁾を用いて、新小山橋に生じた被害に対して耐震設計的な観点から考察を行う。

新小山橋は、二径間連続PC箱桁・T型ラーメン橋である。現地の地形より、新小山橋は、張出し架設によって建設⁷⁾されたと考えられる。中央の橋脚位置で剛結となっていることから、両端部の橋台位置の支承条件は、温度変化によって生じる桁の変形によって橋台部に断面力が生じないように、可動となるように設計されていると考えられる。現地調査によって、パッド型の可動ゴム支承⁸⁾であることを確認した。また、伸縮装置は、やはり現地調査で、鋼製フェースプレート(フィンガー状)を用いた荷重支持型⁹⁾であることを確認した。

写真-2は、新小山橋での被災箇所である。主な被災箇



(a) 伸縮装置の橋軸方向開き



(b) 橋台位置の桁端部と背面の段差



(c) 右岸側橋台の橋座位置の桁の浮き(橋台沈下)



(d) 右岸側橋台の橋座位置での桁の浮き(橋台沈下)

写真-2 2016年12月28日茨城県北部の地震によって新小山橋に生じた損傷(2017年1月4日撮影)

所は、両端部伸縮装置に常時状態では生じない大きな遊間が生じたことと、右岸側の橋台が沈下した結果、あたかも桁が浮いたような状態となっていることである。何れの被災箇所ともに、前述の断層分野の専門家による調査^{23,24)}によれば、断層変位に起因する地盤や斜面の変状によって生じた被害である。新小山橋の上部構造から作用する慣性力を負担する橋脚躯体には、外観目視の範囲では、有害なひび割れは確認できなかったことから、新小山橋の構造体に影響を与えるような被害は、生じていなかったと推察される。

著者らが実測した構造寸法は幅員や橋台から橋脚位置までの支間長（歩道上での概算測定）および橋脚躯体寸法だけであり、測定器具も巻き尺等の精度が粗いものであるため、全てが概算値であるが、次のような方法で新小山橋の橋軸方向と橋軸直角方向の固有周期の概算値を算出した。二径間連続PC箱桁・T型ラーメン橋である新小山橋の橋軸方向と橋軸直角方向の基本固有周期は、中央に位置する橋脚が地震時に支持する上部構造重量と躯体の剛性と自重およびフーチングの重量と基礎構造—地盤間ばねの剛性によって決まるが、これらを次のように仮定した。地中部にあり確認できないフーチングの重量と基礎構造—地盤間ばねの剛性は無視（＝橋脚躯体基部固定）した。上部構造重量は、栗田・吾妻らの報告⁴⁾より橋長を約85mと仮定し、現地で測定した支間長（右岸橋台から中央部橋脚位置間約30m）を用いて、PCラーメン橋の設計資料⁷⁾から桁高支間比1/12を仮定し、橋面工重量を推定した。それを、即時震害予測システムで採用されている推定式¹⁰⁾に代入して、上部構造重量を推定した。橋脚躯体の剛性と重量は、現地計測した躯体断面寸法（橋軸方向約3m、橋軸直角方向約6m）と撮影した写真から橋脚躯体高さ（土被り無視）を推定して求めた。なお、橋脚が地震時に支持する上部構造重量のうち、橋軸直角方向の支持するべき上部構造重量は、両端部の橋台が死荷重反力¹¹⁾に相当する重量は負担すると仮定して求めた。道路橋示方書（V耐震設計編）の式[6.2.1]および式[解6.2.8]¹²⁾より推定した新小山橋の固有周期の概算値は、橋軸方向が約1.0秒、橋軸直角方向が約0.4秒となった。これらの値は、その算出仮定から、実際の固有周期を短く評価していると考えられることと、後述の推定地震動の加速度応答スペクトル（図-7参照）より、新小山橋周辺地盤上に生じた地震動の強度は、新小山橋に構造的な被害を生じさせるようなものでなかったと推察される。

以上のように、新小山橋に生じた被害は、地震動によって生じたものではなく、断層変位に起因する地盤や斜面の変状によって生じた被害と推察されるが、二径間連続PC箱桁・T型ラーメン橋の橋台が沈下して桁端部の鉛直方向支持機能が失われても片持ち梁状態でも自立していた点や桁端部に生じた段差を修復後に輸送機能を回復できている点は、斜面変状や断層変位等を地震の影響として設計で考慮することが規定される予定¹³⁾の道路橋の

耐震設計にとって、断層変位や斜面変状を伴う場合に、道路橋として望ましい構造を議論する上での重要な情報となると思われる。また、もし、新小山橋が二径間連続PC箱桁・T型ラーメン橋でなく、単純桁の二連形式であった場合、橋台の沈下に追従して桁も変位したと予想される。その場合、今回橋台に生じた約5cm⁴⁾の沈下は路面上では観測されなかった（もっと小さい段差量であった）可能性があり、地震直後は被災として認識されなかった可能性もある。損傷の発見し易さや地震後の輸送機能を評価する上でも、大きな被害ではなかったが、新小山橋の被災情報は、示唆あるものであったと考えられる。



写真3 常時微動の計測状況(新小山橋)



写真4 常時微動の計測状況(KiK-net高萩)



写真5 常時微動の計測状況(SK-net北茨城)

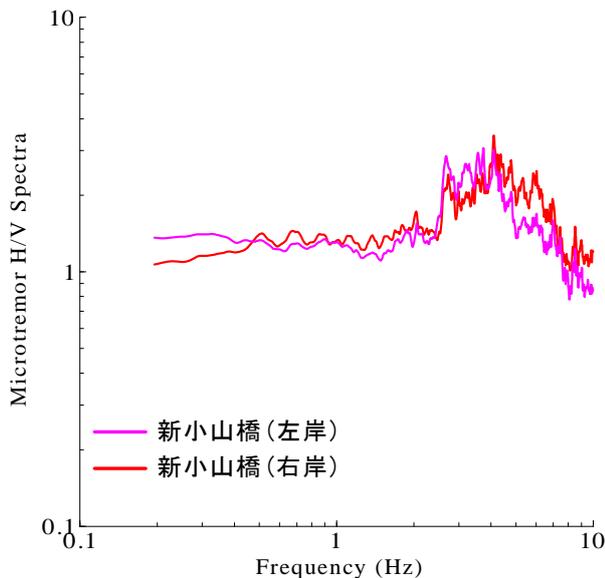


図-2 常時微動H/Vスペクトルの比較(新小山橋)

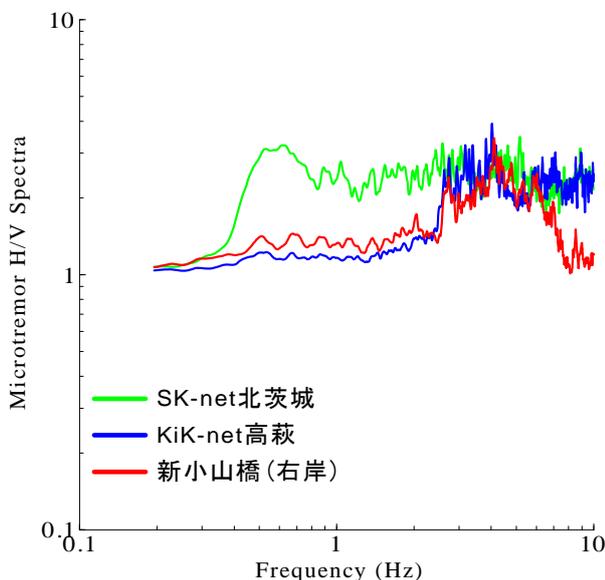


図-3 常時微動H/Vスペクトルの比較(新小山橋とその周辺に位置する既存強震観測点)

3. 微動単点計測

2016年茨城県北部の地震によって新小山橋に作用した強震動として、周辺の強震観測点(図-1参照)で得られた強震記録の転用の工学的な可能性などについて判断するため、新小山橋とその周辺の既存強震観測点において常時微動計測(単点計測)を実施した。写真-3、写真-4、写真-5に新小山橋、KiK-net高萩、SK-net北茨城での常時微動計測状況を示す。

計測機器は、白山工業(株)製の一体型微動探査兼地震計機器¹⁴⁾を採用した。計測機器の詳細については文献14)を参照されたい。計測方向は水平二成分と鉛直成分の計三成分であり、後述する常時微動H/Vスペクトルの計算では、水平二成分の平均をとった。図-2および図-3に常

時微動H/Vスペクトルの比較を示す。ここに、常時微動H/Vスペクトルの計算処理方法としては、微動の加速度時刻歴に対して0.1Hzのハイ・パスフィルターを施し、雑振動が比較的小さい163.84秒の区間を七区間抽出し、フーリエ振幅スペクトルの計算を行い、バンド幅0.05HzのParzen Windowで平滑化したのちに、H/Vスペクトルを算出し、七区間の平均をとった。評価振動数の範囲としては、使用した微動計測器の性能¹⁴⁾などを考慮して0.2~10Hzとした。

図-2は、新小山橋の左岸および右岸における常時微動H/Vスペクトルを比較したものである。図-2に示すように、左岸と右岸のH/Vスペクトルの特徴(ピーク周波数およびスペクトル形状など)が良い一致を示しており、2016年茨城県北部の地震時に新小山橋の左岸と右岸に作用した強震動の特徴が比較的類似していたものと推察される。

図-3は、新小山橋(右岸)、KiK-net高萩、SK-net北茨城における常時微動H/Vスペクトルを比較したものである。図-3に示すように、当該三地点におけるH/Vスペクトルの特徴が全ての評価周波数帯域において良い一致を示しているとは言い難い。しかしながら、新小山橋(右岸)とKiK-net高萩では、7~10Hzの比較的高周波帯域では類似性が低いものの、0.2~7Hzの比較的低周波帯域では類似性が高くなっている。すなわちこの類似性は、両地点におけるごく表層の地盤震動特性の有意な差異を除けば、両地点における地盤震動特性は概ね類似しているものと推察される。さらに、両地点におけるサイト特性の差異(図-3参照)ほかに伝播経路特性の差異(図-1参照)も概観されるものの、2016年茨城県北部の地震によって新小山橋に作用した強震動として、KiK-net高萩で得られた強震観測記録(図-4参照)を工学的に援用できる可能性を示唆するものである。

4. 微動アレー計測

3で得られた知見を踏まえ、新小山橋の右岸と橋中央(桁中央部)の二地点を対象に(図-5参照)、常時微動計測(アレー計測)を実施した。写真-3にアレー計測の状況を示す。計測機器は、3と同様に、白山工業(株)製の一体型微動探査兼地震計機器¹⁴⁾を採用した。計測方向は、橋軸方向(N65°E)、橋軸直交方向(N25°W)、鉛直方向の計三方向であり、後述する伝達関数(橋中央/右岸)の計算では三方向それぞれを対象とした。新小山橋の振動性状を表す伝達関数の計算処理方法としては、微動の加速度時刻歴に対して0.1Hzのハイ・パスフィルターを施し、右岸と橋中央において同時に得られた雑振動が比較的小さい163.84秒の区間を七区間抽出し、フーリエ振幅スペクトルの計算を行い、バンド幅0.05HzのParzen Windowで平滑化を施した。右岸と橋中央でのフーリエスペクトル

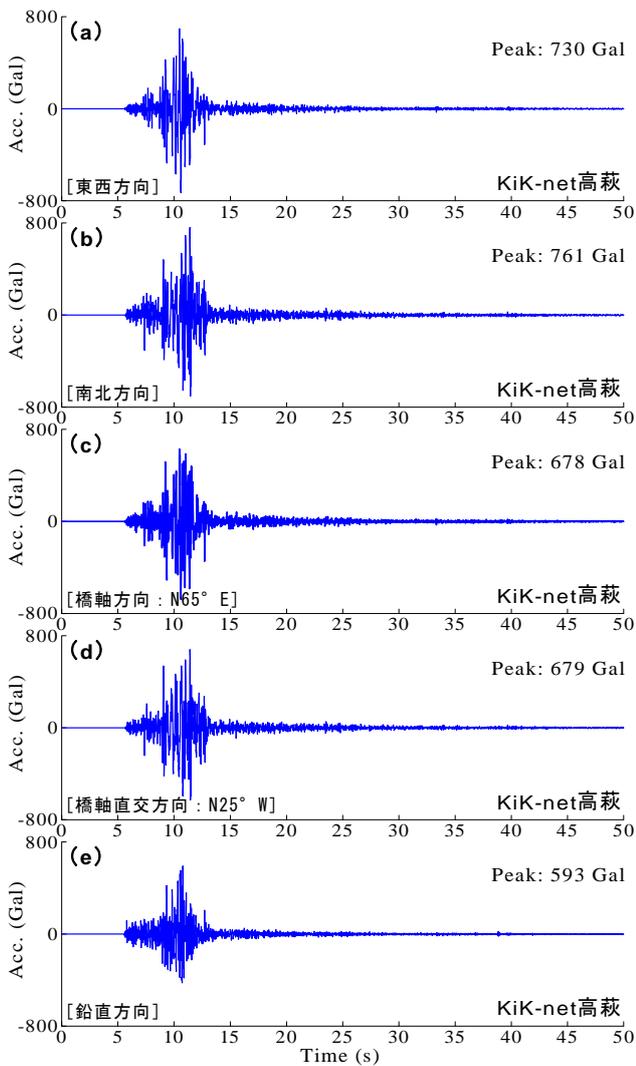


図4 KiK-net高萩における本震観測記録の加速度時刻歴

の比率(橋中央/右岸)で表される伝達関数を算出し、七区間の平均を採用した。評価振動数の範囲としては、3.と同様に、使用した微動計測器の性能¹⁴⁾などを考慮して0.2~10Hzとした。

図-6は、評価した新小山橋の伝達関数(橋中央/右岸)を、橋軸方向・橋軸直角方向・鉛直方向の三方向について比較したものである。図-6に示すとおり、新小山橋は、基本的な振動性状を表す伝達関数が卓越するピーク周波数(最も大きな伝達関数の値を示す周波数)を2.7Hz付近に有する傾向が確認でき、この傾向は、橋軸方向・橋軸直角方向・鉛直方向の三方向において概ね共通であることも読み取れる。

前述したように、2.7Hz(0.37秒)は、新小山橋の橋軸直角方向の固有周期に近く、右岸側橋台が沈下したため、橋軸直角方向の拘束がなくなり、橋軸直角方向の振動が卓越したため、増幅率も高くなったと予想される。2.7Hzでは、鉛直方向の増幅率も大きいですが、PC桁の鉛直たわみの概算値の算定式¹⁵⁾によれば、新小山橋のPC桁の鉛直たわみの固有振動数は約2.3Hzと推定されることから、それに相当する振幅は、図-6の鉛直方向の約2.1Hz



図5 新小山橋に設けた微動計測地点の分布

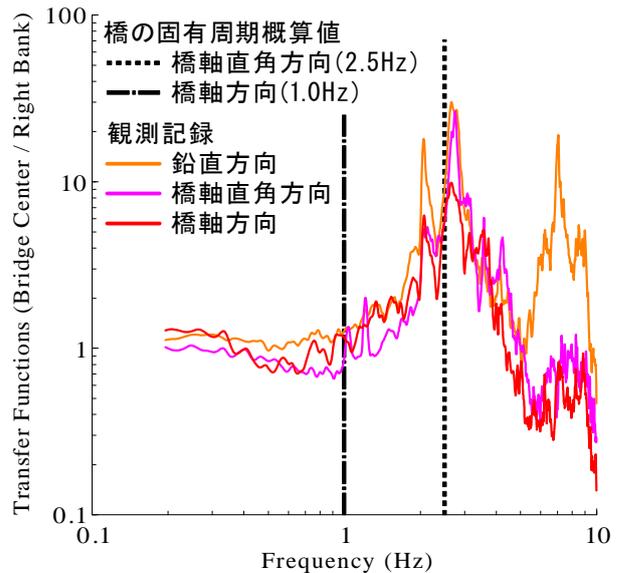


図6 新小山橋の振動性状を表す伝達関数の三方向比較

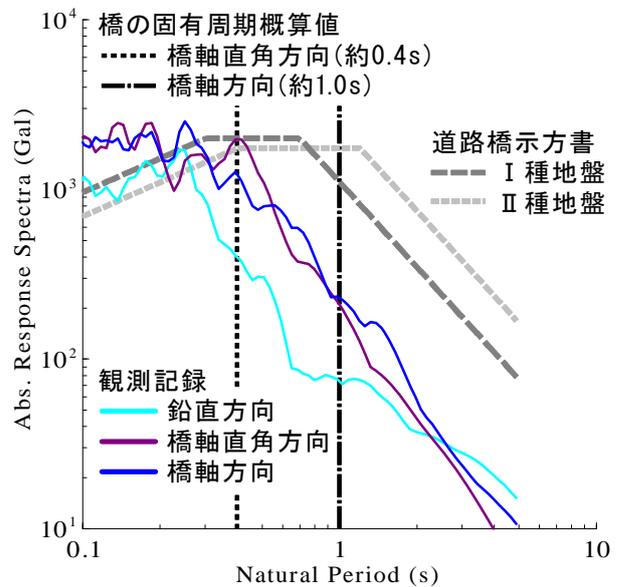


図7 KiK-net高萩での本震観測記録による絶対加速度応答スペクトルと新小山橋における固有周期の関係

の卓越振幅が相当すると考えられる。

図-7は、新小山橋と地盤震動特性が概ね類似しているKiK-net高萩で得られた本震観測記録の橋軸方向(図-4(c))

参照), 橋軸直交方向(図-4(d)参照), 鉛直方向(図-4(e)参照)の加速度応答スペクトル(減衰定数5%)をそれぞれ比較したものである。図-7には, 道路橋示方書(2012)¹²⁾による設計標準スペクトル(I種地盤およびII種地盤)も同時に示す。

新小山橋の橋軸方向固有周期約1.0秒付近の地震応答は約200Galとレベル1地震動程度であるが, 橋軸直角方向の固有周期約0.4秒付近では, 道路橋示方書V耐震設計編に規定されるレベル2地震動タイプII地震相当の応答加速度が生じている。しかし, 前述したように, ここで推定した固有周期は, 実際の固有周期よりも短く評価しているため, 新小山橋の橋軸直角方向に作用した地震動強度は, 図-7の周期0.4秒付近の値(道路橋示方書V耐震設計編に規定されるレベル2地震動)よりも小さかったと予想される。新小山橋の竣工が平成五年十月であることから, その耐震設計は, 道路橋のRC橋脚に地震時保有水平耐力法が規定された平成二年道路橋示方書¹⁶⁾によって行われていると考えられるため, 2016年茨城県北部地震によって新小山橋の周辺地盤上に生じた地震動の強度は, 建設時の耐震設計で考慮した範囲内にあったと予想される。

5. まとめ

本稿では, 2016年茨城県北部の地震によって被災した県道22号沿いの新小山橋において現地踏査を行うとともに, 新小山橋とその周辺の既存強震観測点において常時微動計測(単点計測およびアレー計測)を実施した。以下に, 得られた知見を示す。

- (1) 新小山橋に生じた被害は, 断層変位に起因する地盤や斜面の変状によって生じた被害であるが, その情報は, 道路橋の耐震設計にとって, 断層変位や斜面変状を伴う場合に, 道路橋として望ましい構造を議論する上での重要な情報となると思われる。
- (2) 新小山橋の左岸と右岸では, 常時微動H/Vスペクトルに基づく地盤震動特性が非常に良い一致を示すことから, 2016年茨城県北部の地震時に作用した強震動に大きな差異はない。
- (3) 新小山橋(左岸・右岸)とKiK-net高萩では, ごく表層の地盤特性に有意な差異があると推測されるが, 常時微動H/Vスペクトルに基づく地盤震動特性が0.2~7Hzの周波帯域において概ね類似していることから, KiK-net高萩で得られた本震観測記録を, 新小山橋に作用した強震動として工学的に援用できる可能性が高い。
- (4) 微動アレー計測による伝達関数(橋中央/右岸)に現れた卓越ピークは, 周波数約2.1HzはPC桁の鉛直たわみ振動, 周波数約2.7Hzは新小山橋の橋軸直角方向の振動によるものと考えられる。

- (5) 2016年茨城県北部の地震時に新小山橋に作用した水平二方向(橋軸方向および橋軸直交方向)の強震動の加速度応答値は, 周期0.4秒の短周期域では, 道路橋示方書(2012)に規定されるレベル2地震動タイプIIの設計地震動(標準加速度応答スペクトル)と同等程度であると推察できる。

今後は, 本稿で得られた知見の一つである新小山橋に作用したと推定される地震動の大きさと, 既往の大規模地震によって被災した橋梁地点での推定地震動¹⁷⁾を比較するなどしていきたいと考えている。

謝辞: 本研究では, (国研)防災科学技術研究所KiK-netおよび茨城県(東京大学地震研究所首都圏強震動総合ネットワークSK-net)による地震観測波形データを利用しました。現地調査の際には, 現地住民の皆様などにご支援いただきました。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 気象庁:平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震について(第80報)―平成28年12月28日21時38分頃の茨城県北部の地震―, 2016. <http://www.jma.go.jp/jma/press/1612/28a/201612282345.html> (最終閲覧日:2017年8月29日)
- 2) 佐藤浩, 八反坂剛:平成28年12月の茨城県北部を震源とする地震に伴う表層崩壊と亀裂の現地調査, 2017. http://www.ajg.or.jp/disaster/files/201612_ibaraki001.pdf (最終閲覧日:2017年8月29日)
- 3) 小俣雅志, 杉田律子:2016年茨城県北部の地震に伴う地表変状(速報), 日本活断層学会/地震の情報, 2017. <http://jsaf.info/jishin/> (最終閲覧日:2017年8月29日)
- 4) 栗田泰夫, 吾妻崇:2016年12月28日茨城県北部の地震(Mj6.3)の現地調査報告, (国研)産業技術総合研究所/地震・津波研究情報, 2017. <https://www.gsj.jp/hazards/earthquake/ibaraki2016/report20170105.html> (最終閲覧日:2017年8月29日)
- 5) 国土地理院:茨城県北部の地震に関する情報, 2016. <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H28-ibaraki-earthquake/index.html> (最終閲覧日:2017年8月29日)
- 6) 吾妻崇:海溝型巨大地震に誘発された内陸活断層地震の緊急調査, AFERC NEWS, No.23, pp.1-7, 2011.
- 7) (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会:PC道路橋計画マニュアル, pp.64-68, 1997.
- 8) (社)日本道路協会:道路橋支承便覧, pp.40-41, 2004.
- 9) 日本道路ジョイント協会:橋梁用伸縮装置構造図集第II集, 2014.
- 10) 日下部毅明, 杉田秀樹, 大谷康史, 金子正洋, 濱田禎:即時震害予測システム(SATURN)の開発, 国土技術政策総合研究所資料, No.71, pp.193, 2003.
- 11) (社)日本橋梁建設協会:’01 Design Data Book, pp.226, 2003.
- 12) (公社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説[V耐震設計編], pp.64-67, 2012.
- 13) 国土交通省:第7回道路技術小委員会配布資料, 2017. http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/road01_sg_000342.html (最終閲覧日:2017年8月29日)

- 14) 先名重樹, 安達繁樹, 安藤浩, 荒木恒彦, 飯澤清典, 藤原広行: 微動探査観測システムの開発, 第 115 回 物理探査学会学術講演会講演論文集, pp.227-229, 2006.
- 15) Christian Menn: Prestressed Concrete Bridges, Translated and edited by Paul Gauvreau, pp.207-209, 1990. (2017. 8. 29 受付)
- 16) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 (V 耐震設計編), pp.63-79, 1990.
- 17) 秦吉弥, 野津厚: 被害地震の揺れに迫る—地震波形デジタルデータ CD 付き—, 大阪大学出版会, 2016.

INVESTIGATION OF SHINKOYAMA BRIDGE IN TAKAHAGI CITY, JAPAN DAMAGED BY THE 2016 NORTHERN IBARAKI PREFECTURE EARTHQUAKE

Yoshiya HATA and Masaaki YABE

Shinkoyama Bridge in Takahagi City, Japan was damaged during the 2016 Northern Ibaraki Prefecture Earthquake with $M_J6.3$. In this study, first, single measurements of microtremor were carried out at sites of the bridge and its circumference station. Next, array measurement of microtremor was conducted at sites of center and its both banks in the bridge of interest. Finally, based on the measurement records, the shaking characteristics of the bridge of interest during the 2016 main shock were estimated. The obtained findings are will be useful for future study on seismic resistant of a ramen bridge near an active fault.