



2022年3月の福島沖の地震における盆地の揺れの分析

鈴木崇伸¹⁾

1) 正会員 東洋大学理工学部, 教授 博士 (工学)
E-mail: tsuzuki@toyo.jp

要 約

本報告は2022年3月に起きた福島県沖の地震時に東北新幹線の沿線地震計において震度6強に相当する大きな揺れが観測されたことに注目して、近隣に置かれた強震計のデータと比較している。この地震では宮城県の白石盆地において新幹線が脱線する事故が発生したが、盆地の中でも軟弱な地盤となっており、微動観測による増幅特性に符合していた。しかしながら別の地震では増幅特性にしたがった揺れにはなっていなかった。また福島県側では盆地内の川沿いでは揺れが小さかったが阿武隈川にかかる橋梁に被害があった。一方山際では大きな揺れとなったが構造被害は少なくその要因を特定できなかった。

キーワード： 2022年3月福島県沖の地震, 強震動, H/Vスペクトル比, 微動計測

1. はじめに

2022年3月16日の夜に発生した福島県沖の地震では最大震度6強が観測され、構造被害は比較的軽微であったが、新幹線の脱線や水道の断水などライフラインの被害が注目された。この地域では2021年2月の地震や2011年3月の東北地方太平洋沖地震でも大きな揺れが観測されている。新幹線が脱線したことにとともに、国土交通省鉄道局から「新幹線脱線対策協議会」の資料として沿線地震計の観測記録が公開された。その資料によれば宮城県内の新白石SPと福島県内の新藤田SSPではSI値で100kine近い揺れとなっており、兵庫県南部地震の被害集中地域の揺れに相当している。

地震活動が活発化している地域とはいえ、震央距離が約100kmである海洋型地震において繰り返し大きな揺れが発生する原因を明確にする必要がある。地動の100kineは多くの設計指針において直下地震であった兵庫県南部地震の強震記録を元にレベル2地震動としている揺れの強さであり、海洋型の地震により短期間に繰り返し発生する想定にはなっていない。本報告は沿線地震計の近くに置かれた防災科学技術研究所の強震観測データを参考に揺れの増幅要因を分析した結果をまとめている。手がかりとして微動計測を行い地点ごとの増幅特性を比較したが、地表近くの増幅特性だけでは大きな揺れになることは説明できなかった。

2. 地震記録の概要

2022年3月16日に起きた福島県沖地震により東北新幹線が新白石駅近くで脱線した。その事故を受けて国土交通省鉄道局は継続中の「新幹線脱線対策協議会」において沿線地震計の観測記録を公開してい

る。表-1に公表データを示す。3回の地震のデータが公開され、2022年3月の地震では福島県北部と宮城県南部においてSI値が100kineに迫る揺れとなっている。稀に発生する極めて大きな地震動のレベルであるが、近傍の構造物被害は阿武隈川にかかる橋梁の支承部の被害など比較的軽微であり、また住宅被害も屋根が損傷する程度であった。特に福島県の新藤田SSPでは震度6強に相当するSI値100kine程度の揺れが3回起きており、その要因を解明する必要がある。

表-2はJR東の観測点の近くにある防災科学技術研究所のK-NET観測点のデータから地震動の代表値を計算した結果である。JRの計算法がわからなかったので、SI値は水平2方向の加速度を使った速度応答のベクトル合成の最大値とし、最大加速度は水平2成分のベクトル合成の最大値としている。発表データのgal値の定義は不明であるが誤差の範囲内で両者を比べてみる。新白石SPではK-NET白石に比べて約2倍のSI値が観測されている。過去の地震データでは2倍にはなっていないがK-NET白石よりも大きなSI値になっている。最大加速度は同等かやや大きい程度となっている。新藤田SSPはK-NET梁川に比べて2～3倍のSI値が観測されている。新藤田SSPでは3回の地震において100kine程度の揺れになっているのに対してK-NET梁川では30～40kineとなっている。最大加速度で比べると1倍から1.5倍程度となっており、2022年の地震では同程度となっている。

計測位置もある程度距離があるため単純比較はできないが、震源距離を考えれば同程度の揺れが予想されるのに揺れの大きさが異なる要因を明確にしておく必要がある。またSI値で100kine程度の揺れになった場合、過去の経験では相当の構造被害が生じていたが、2022年の揺れでは大きな構造被害が無かった点を分析しておく必要がある。

表-1 新幹線の沿線地震計の公表データ

| | | 2022/3/16 | 2021/2/13 | 2011/3/11 |
|--------|------|-----------|-----------|-----------|
| 地震の規模 | | M7.4 | M7.3 | M9.1 |
| 新白石SP | SI値 | 89.4kine | 48.2kine | 67.6kine |
| | gal値 | 582.7Gal | 351.7Gal | 514.0Gal |
| 新藤田SSP | SI値 | 91.3kine | 86.1kine | 107.7kine |
| | gal値 | 811.0Gal | 866.9Gal | 898.7Gal |

表-2 K-NETのデータ

| | | 2022/3/16 | 2021/2/13 | 2011/3/11 |
|---------------------|-------|-----------|-----------|-----------|
| K-NET白石 (MYG016) | SI値 | 40.2kine | 37.4kine | 50.4kine |
| | 最大加速度 | 375Gal | 351Gal | 426Gal |
| K-NET梁川 (FKS002) | SI値 | 38.4kine | 31.3kine | 35.1kine |
| | 最大加速度 | 778Gal | 573Gal | 611Gal |

3. 白石盆地の増幅特性の分析

(1)K-NET白石の揺れの特徴

K-NET白石 (MYG016) は白石川沿いの平野部に位置しており標高は49mである。公開されているボーリングデータによれば薄い表土層の下は礫質土が厚く堆積しており、ところどころにN値の小さい砂質土が存在する。少し離れた場所にあるKiK-net白石 (MYGH10) のボーリングデータによればこの地域は蔵王の溶岩が固まった凝灰岩が厚く堆積しており、白石盆地の礫層の下は凝灰岩になっていると考えられる。

K-NET白石では2000年以降に最大加速度100Gal以上の揺れが9回計測されており、震度5.0以上であったのは3回である。最大の揺れは2011年の東北地方太平洋沖地震の本震であり、2番目は2022年3月の地震、3番目は2021年2月の地震となっている。2021年の地震と2022年の地震はマグニチュードも発生した位置もよく似た地震となっている。図-1に2022年の地震と2021年の地震記録のフーリエスペクトルを

示す。3成分ともに1Hz前後の成分が卓越しており、盆地構造に起因する表面波成分と考えられる。水平動が大きくなるのは4Hz前後となっている。

観測点の増幅特性をH/Vスペクトル比を使って分析する。図-2は最大加速度が80Gal以上であった14個の地震記録を使ってH/Vスペクトル比を計算した結果である。水平2成分と上下動のスペクトル比を計算してその平均を赤線でプロットし、さらに14個の地震の平均を黒線でプロットしている。水平動が大きくなりやすい振動数は、0.4Hz、4Hz、9Hz、12Hzとなっている。フーリエ振幅が大きくなった1Hz前後は相殺されて小さな値となっている。これらの増幅は基本的に礫層に挟まれた介在砂層の影響と考えられるが、0.4Hzは凝灰岩の境界が影響している可能性がある。

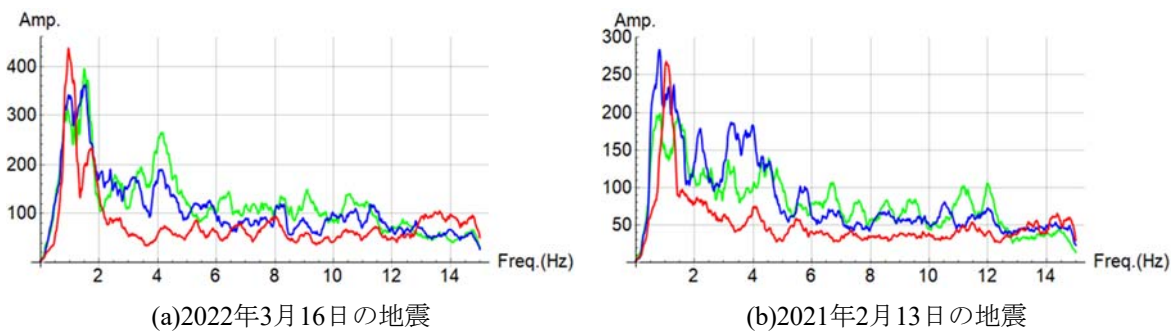


図-1 MYG016の観測記録のフーリエスペクトル (緑：EW，青：NS，赤：UD)

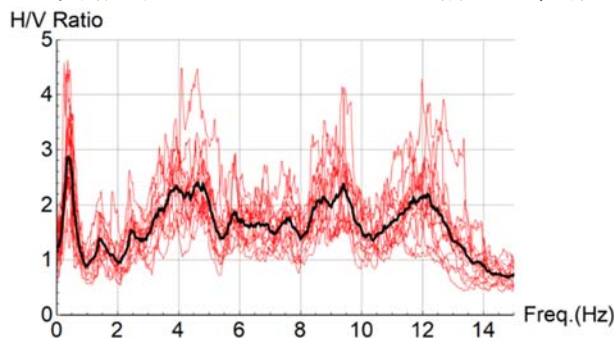


図-2 MYG016の強震記録のH/Vスペクトル比

(2)微動の比較

JR東日本の新白石SPの波形データは公開されていないので微動計測を使って増幅特性を比較する。今回の微動計測にはシステムアンドデータリサーチ社の速度型の微動計であるNewPICを用いて40.96秒の3成分計測を複数回行ってそれらのH/Vスペクトル比を計算する³⁾。図-3はK-NET白石において計測した微動のフーリエスペクトルの一例と複数回の計測から求めた平均H/Vスペクトル比の計算結果を示している。微動成分は10Hzから20Hz成分の振幅が大きくなっているが、水平と上下の比を計算して平均化するとこの範囲はなだらかな変化になる。フーリエ振幅は小さいものの0.4Hzのピークがわずかに見えている。

新白石SPは白石盆地の南西部に位置しており標高は54mである。周囲は水田地帯となっており新幹線は高架橋を通過している。強い揺れを何度も受けているために高架橋のコンクリート表面には亀裂補修をした箇所が多くみられる。新白石SPは水田地帯の中に盛土をしてつくられているが、近くの公道において微動計測を行った。図-4に微動のフーリエスペクトルの例とH/Vスペクトル比の計算結果を示している。微動は上下水平とも5Hz前後の振幅が大きくなっていて振動源によって変化が大きくなっている。複数回の計測結果の水平動と上下動のスペクトル比を計算して平均すると3Hz以下で3倍程度、4Hz以上では1倍程度となる。3Hz以下の増幅は地表の軟弱層の影響と考えられる。K-NET白石に比べて標高は高いが、盆地の端部に近く山からの水が集まりやすいために軟弱な表層が形成され、低振動数領域において増幅が大きくなっているのが確認された。

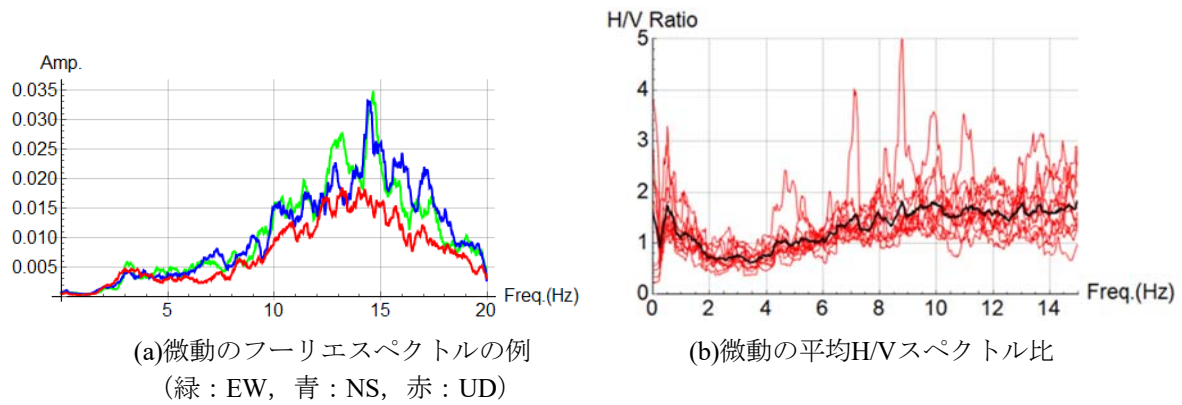


図-3 MYG016の微動の分析

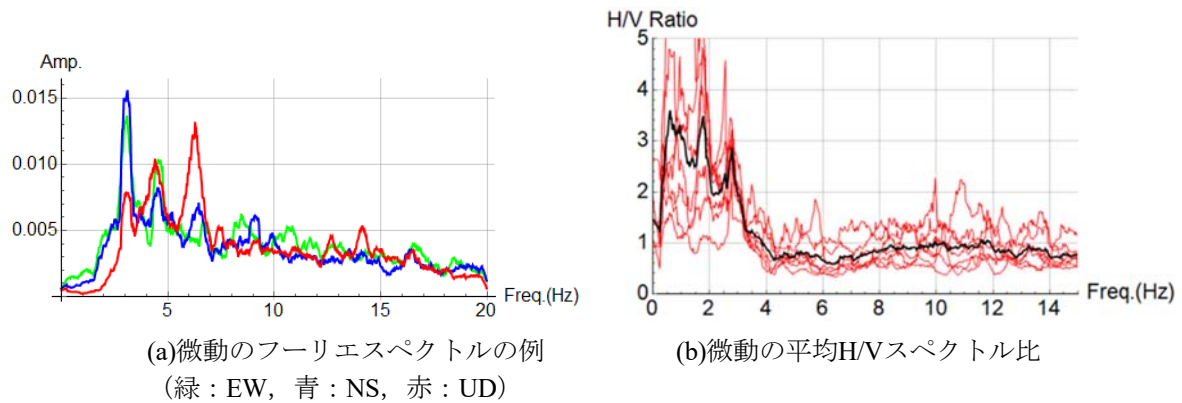


図-4 新白石SPの微動の分析

(3)新白石SPの揺れの推定

微動により得られた増幅特性の違いが強震時にも当てはまると仮定して波形推定を行ってみる。地震動の補正計算には丸山ら⁴⁾の提案した地震動推定法を用いる。丸山らは常時微動と地震動の水平鉛直スペクトル比が良く似た振幅形状を示すことを利用して、常時微動データによる地震動波形の推定法を提案している。2点の常時微動によるH/Vスペクトル比を R_1 、 R_2 とし、地点1の地震動のフーリエスペクトル F_1 が既知ならば、近傍にある地点2のフーリエスペクトル F_2 は位相の変化がないという前提で以下の計算により近似することができる。

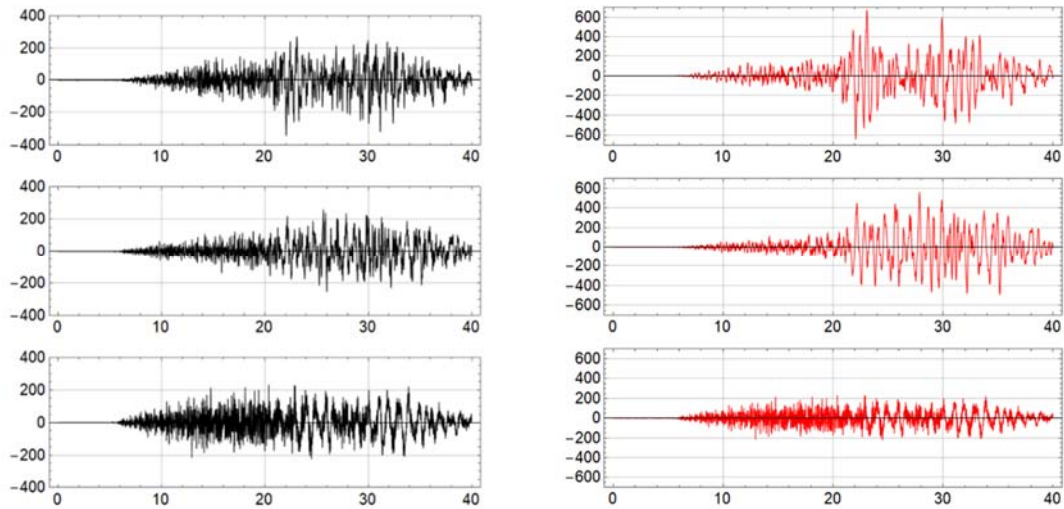
$$F_2 = \frac{R_2}{R_1} F_1$$

すなわち、微動のH/Vスペクトル比の比率を使い地震動のフーリエ振幅を補正して、フーリエ逆変換を行えば地震記録のない地点の波形を推定することができる。

2022年のK-NET白石の地震データを使って新白石SPの波形を推定した結果を図-5に示す。図-1(a)に示したスペクトルを F_1 、図-3(b)に示したH/Vスペクトル比を R_1 、図-4(b)に示したH/Vスペクトル比を R_2 として水平動のスペクトル F_2 を計算して逆フーリエ変換した結果であり、位相の変化はない。また上下動は同じとしている。 F_1 の低振動数成分が R_2 によって増幅されるため、加速度振幅が大きくなっているのがわかる。

表-3は地震動の代表値に関してK-NET白石の値、それを元に推定した値、JRの観測値を整理している。2022年の地震とともに2021年の地震についても同様の計算をした結果を示している。図-1に示したように元となるフーリエスペクトルはよく似た特性となっているが、振幅補正した計算結果は大きく異なっている。2022年の地震では最大加速度は約2倍、SI値は約2.5倍、計測震度は約1だけ大きくなっている。JRの観測値よりもやや大きいがおよそ一致する結果となっている。一方2021年の地震においても同様の倍率で大きな揺れが予測されるが、JRの観測データはK-NET白石と同等かやや大きい程度であり、表層地盤による地震動の増幅はなかったことになる。フーリエ振幅を補正しているだけで位相情報は変えて

いない計算であり、増幅度がばらつく原因を分析する必要がある。



(a)MYG016の観測記録 (b)観測記録を補正した推定波形

図-5 振幅を補正した計算結果

表-3 推定値と観測値の比較

| | 2022年3月16日の地震 | | | 2021年2月13日の地震 | | |
|-------|---------------|---------|----------|---------------|----------|----------|
| | K-NET | 推定値 | JR 観測値 | K-NET | 推定値 | JR 観測値 |
| 最大加速度 | 375Gal | 675Gal | 583Gal | 351Gal | 746Gal | 352Gal |
| SI 値 | 40.2kine | 101kine | 89.4kine | 37.4kine | 90.6kine | 48.2kine |
| 計測震度 | 5.4 | 6.3 | — | 5.3 | 6.1 | — |

4. 福島県北部地区の増幅特性の分析

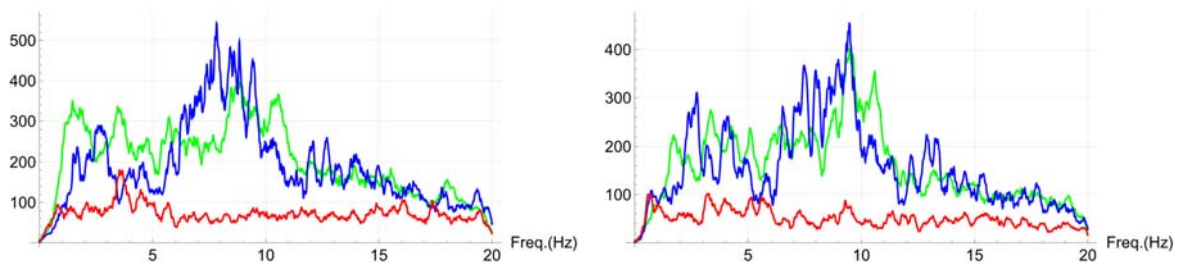
(1)K-NET梁川の揺れの特徴

福島盆地の北部に位置する新藤田SSPでは2011年東北地方太平洋沖地震以降3回、SI値100kine程度の非常に大きな揺れが観測されている。分析の手がかりとしてK-NET梁川（FKS002）の観測データを分析して両者を対比する。K-NET梁川の観測点は阿武隈川沿いの旧梁川町役場に置かれており標高は43mで盆地内では低地になっている。ボーリングデータによれば岩盤の上に礫層が3m程度堆積しており非常によく締まった地盤となっている。

2000年以降梁川では100Gal以上の揺れが21回観測されている。200Gal以上の記録も7回ある。最大は22年3月の福島沖の地震、2番目は11年3月の東日本太平洋沖、3番目は21年2月の福島県沖の地震でこの3回が500Gal以上となっている。日本でも有数の強震記録の数が得られている観測点である。

図-6に2022年と2021年の観測記録のフーリエスペクトルを示している。震源も地震規模もよく似た地震の記録であり、水平動において2~4Hzならびに8~10Hzの振幅が大きいのが特徴である。地表付近のボーリングデータではこの帯域の増幅は説明できないが、介在層あるいは盆地の地形が影響していると考えられる。最大加速度が100Gal以上であった21個の地震データを使ってH/Vスペクトル比を計算した結果を図-7に示している。黒線が全体の平均となっている。低振動数ではピークが消えているが、8Hz付近ならびに14Hz付近をピークとした盛り上がりを確認できる。低振動数域でH/Vスペクトル比が見えないのは白石盆地と同様に盆地地形に起因する表面波の影響と考えられる。観測された2~4Hzの成分は橋梁の固有振動数に相当するため、阿武隈川に架けられた橋は相当大きく振動したと思われる。一

方、この観測点周辺では屋根瓦が壊れてブルーシートがかけられた家が散見されたが、ひどく壊れた住宅は見られなかった。



(a)2022年3月16日の地震 (b)2021年2月13日の地震

図-6 FKS002のフーリエスペクトル (緑：EW, 青：NS, 赤：UD)

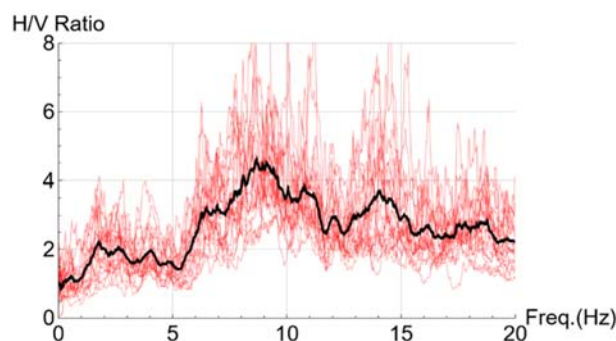
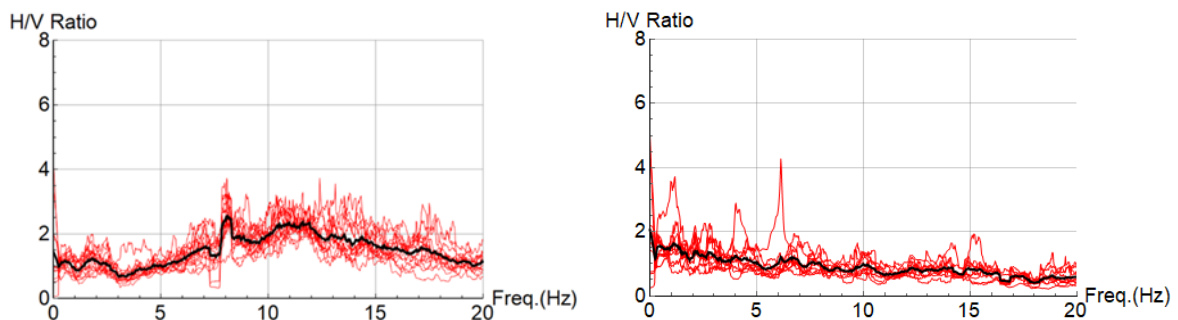


図-7 FKS002の強震記録のH/Vスペクトル比

(2)微動の比較

JR東日本の新藤田SSPは福島盆地北西端の山際に設置されており標高は91mとなっている。この付近の住宅はほぼ無被害であり、100kine近い揺れが襲ったとは思えない様子であった。山際であり良好な地盤と想定されたが、微動観測を新藤田SSP近くの公道で行った。図-8にK-NET梁川と新藤田SSPにおける微動データのH/Vスペクトル比の計算結果を示している。K-NET梁川では10Hz付近に高まりがみられるが2倍程度であり良好な地盤であることがわかる。新藤田SSPは全体域において1倍程度のフラットな形状となっており岩盤そのものとなっている。

白石盆地と同様に波形の補正計算を行うことはできるが新藤田SSPの揺れはK-NET梁川よりも小さくなるのが明らかなので省略する。公表された観測データによれば新藤田SSPのSI値はK-NET梁川よりも2倍から3倍の大きさになっているがこの原因は表層地盤の影響では説明できない。加速度が同程度であるにもかかわらず速度が大きく増幅される要因を明らかにするとともに、その揺れによる構造被害がないことを分析する必要がある。強震データの公開が望まれる。



(a)FKS002の微動のH/Vスペクトル比

(b)新藤田SSPの微動のH/Vスペクトル比

図-8 微動のH/Vスペクトル比の比較

(3)阿武隈川の橋梁被害

福島県盆地を流下して太平洋に流れている阿武隈川には多くの橋梁が架けられているが老朽化した橋に被害が見られた。写真-1は伊達橋の支承部の拡大写真であるがトラス橋を支持する支承が損傷している。伊達橋は橋長288mの連続トラス橋であり、建設は1966年となっている。写真からもわかるように鋼材の錆びが浮き出している状態であり、ある程度は橋梁の主構の各部位の強度低下が進行していたと考えられる。この橋には通信管路が添架されていたが、支承が破損して桁が橋軸方向に移動したことにより塩ビ管が折れ曲がっていた(写真-2)。横桁を貫通する構造となっていることから、橋と同時に建設されたと考えられる。

半世紀以上前に作られた橋であり、設計外力を超える大きな揺れにより壊れるのは設計通りともいえるが、どの程度の慣性力が作用したかを計算してみたのが図-9である。加速度応答スペクトルを計算すると東西方向の応答が大きくなり、伊達橋のおよそ橋軸方向に相当している。橋の固有周期は計測できなかったが、橋梁の固有周期を0.5s-1.0s程度と考えると橋軸方向には0.5G~1.0Gの水平力が作用していたことになる。1966年に設計された橋の耐力は許容応力度設計の時代であり明確ではないが、設計の老朽化と材料の老朽化が複合していると考えられる。

阿武隈川沿いの揺れの大きさは震度5強から震度6弱程度と推定され、K-NET002(梁川)の観測データからSI値で40kine程度の揺れであったと考えられるが、個別の橋において耐震補強等による耐力を明確にし、損傷が予想される場合にはその対処法を明確にしておく必要があると考える。



写真-1 伊達橋の被害状況



写真-2 伊達橋の添架管路被害

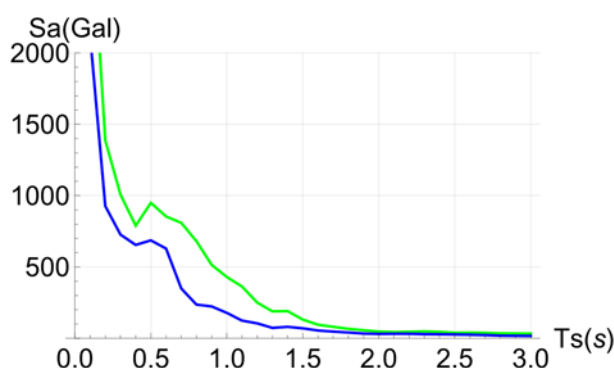


図-9 2022年3月16日のK-NET梁川の応答スペクトル ($h=0.05$, 緑: EW, 青: NS)

5. まとめ

2022年3月の福島県沖の地震において東北新幹線沿線の観測点において大きな揺れが観測されたこと

から現地調査と解析を行った。新幹線沿いで観測されたSI値約100カインは震度6強に相当し直下型地震を想定した地震外力として多くの指針で採用しているレベルであるが、構造被害は軽微でありそのメカニズムを分析しておく必要がある。宮城県側の白石盆地では軟弱な表層地盤が影響した可能性があるが、今回の地震だけ揺れが増幅した原因は見つからなかった。また福島県側では2011年以降3回、震度6強の揺れを観測しているが構造被害は軽微であり、現地調査の結果から山際の観測点が大きく増幅される原因は見つけられなかった。

1995年兵庫県南部地震以降に強震観測装置が多く配備されるようになり、また日本が地震活動期に入ったことから震度6強あるいは震度7の揺れが頻繁に観測されている。構造物被害が多く発生するケースもあり、また皆無であるケースもあることから事例分析を進め、揺れを増幅と構造被害の原因を解明していく必要がある。

謝辞

今回の調査にあたって元日本電信電話株式会社の澤口明氏に協力してもらいました。また防災科学技術研究所の強震観測網の公開データを使用しました。

参考文献

- 1) 国土交通省鉄道局技術企画課：第15回新幹線脱線対策協議会資料，2022.3.
- 2) 防災科学技術研究所：強震観測網（K-NET, KiK-net）の情報公開サイト。
- 3) 中村豊：常時微動に基づく地震動特性の推定，鉄道総研報告，Vol.2，pp.18-27，1988.
- 4) 丸山喜久，山崎文雄，木村均，浜田達也：常時微動の常時微動のH/Vスペクトル比を用いた地震動推定法の提案，土木学会論文集 No. 675/I-54，pp.261-272，2001.4.