

# 東北地方太平洋沖地震と三陸南地震の比較検証

仲秋 秀祐<sup>1</sup>・坂井 公俊<sup>2</sup>・室野 剛隆<sup>3</sup>

<sup>1</sup> (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部  
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38) E-mail: nakaaki@rtri.or.jp

<sup>2</sup> (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部  
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38) E-mail: ksakai@rtri.or.jp

<sup>3</sup> (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部  
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38) E-mail: murono@rtri.or.jp

東北地方太平洋沖地震における津波被害は甚大ではあったが、震動に伴う鉄道構造物への被害は限定的であった。この要因を分析するための検討として、東北地方太平洋沖地震と2003年5月に発生した三陸南地震という2つの大規模な地震を対象として、鉄道構造物位置の地震動を推定することで、地震動特性と高架橋被害との関係性、ならびに両地震の大小関係と被害の大小関係について考察を行った。その結果、今回対象とした2つの地震が鉄道構造の応答に及ぼした影響はそれほど大きな相違が無いこと、高架橋の損傷に相違が生じた地点では、対象地点の構造物応答が東北地方太平洋沖地震で1.1～1.5倍程度大きな値を示したためであることを明らかにした。

**Key Words :** seismic damage, local site effect, 2011 Tohoku-Pacific Ocean Earthquake, 2003 Sanriku minami Earthquake

## 1. はじめに

2011年3月11日に三陸沖を震源とするマグニチュード9.0の東北地方太平洋沖地震が発生した。これは、1900年以降にわが国で観測された地震としては最大規模で、この地震によって引き起こされた津波は甚大な被害を及ぼした。一方で東北新幹線高架橋の損傷に着目すると、倒壊に繋がる様な大きな損傷はなく<sup>1)</sup>、2003年5月26日に宮城県沖を震源として発生したマグニチュード7.1の三陸南地震と、個々の高架橋の被害程度としてはそれほど変わらない損傷度であったと言える。

今回の地震において倒壊などの甚大な被害がなかった背景には、順次耐震補強が進められたことが功を奏したことは間違いない。しかし、これらの地震における構造物被害要因を検討する際には、構造物の耐震補強による耐力上昇の効果を評価するだけでなく、両地震における地震観測記録に基づいて、構造物位置の地震動を推定し、地震動と構造物応答の関係について検討、考察することも重要であると考えられる。そこで本研究では、東北地方太平洋沖地震と三陸南地震の2地震を対象として、東北新幹線高架橋において被害が発生した4箇所の高架橋地点で地震地表面地震動の推定を行い、構造物の応答という観点からそれぞれの地震の特徴を比較検討した。

## 2. 検討対象箇所

今回対象とする構造物は、2つの地震、またはどちらか一方の地震において鉄道構造物で損傷が発生した箇所である。本検討では、表-1に示す4地点を検討対象箇所とした。

2地震時の各地点での損傷状況<sup>1)・2)</sup>としては、A地点では、三陸南地震後に一部耐震補強を施工していたが、東北地方太平洋沖地震時に、無補強柱に三陸南地震時と同程度の損傷が生じた。B地点は、東北地方太平洋沖地震による被害の方が大きく生じた。C地点は、A地点と同様に三陸南地震後に耐震補強を施工した箇所であり、東北地方太平洋沖地震時に殆ど損傷が生じていない。D地点は、三陸南地震時に損傷が確認されたが、東北地方太平洋沖地震時の損傷状況は不明である。

また、各地点の地震動を推定する際には、近傍のKiK-net観測点における観測記録を使用することとした。近傍のKiK-net観測地点名称<sup>3)</sup>と、対象構造物からの距離を表-1に、検討箇所の位置と2地震の震源位置を図-1に示す。

検討箇所の地盤は、4地点ともに比較的良質な地盤であり、特にB地点については、厚さ6mの表土の下に、N値50以上の砂礫層が堆積しているため、表

層地盤の固有周期が非常に短くなっている。また、C地点を除く他地点では、表層地盤下にせん断波速度300～600(m/s)の層が堆積しているのに対して、C地点では、せん断波速度700(m/s)以上の堅固な層が連続的に堆積している。

### 3. 地震動の推定

構造物位置の地震動を推定する流れとしてはまず、近傍のKiK-net観測地点における地表面観測記録を引き戻すことで工学的基盤位置での地震動を算定する。続いて、これをそのまま対象地点の工学的基盤位置での地震動として扱い、地盤の逐次非線形解析を行うことで対象地点の地表面地震動を推定した。地震動を推定する際の手法として、両地点間の地震動特性の差異や震源からの伝播距離の差を補正して推定する方法<sup>例えぼ4)</sup>も存在するが、今回はこれを実施していない。

#### (1) 基盤地震動の推定

地表面でのKiK-net観測地震動を工学的基盤まで引戻す手法としては、周波数領域での等価線形解析(FDEL)<sup>5)</sup>を用いる。なお、表層地盤の影響を排除するため、基盤波は2E波として求めた。

まず先行して、4箇所のKiK-net観測地点のうち、表層が4mと最も厚く、引戻しの影響が大きいと予想されたC地点での引戻し作業を行った。図-2にKiK-net地表面位置での観測地震動と推定した工学的基盤位置での地震動の比較を示す。この図より、地震波形とフーリエ振幅スペクトルは、2地震波ともに地表面と基盤で大きな差異は確認できなかった。よって、対象高架橋地点の地表面を求める際に入力する基盤波として、地表面でのKiK-net観測地震動をそのまま用いることとした。

#### (2) 地表面地震動の推定

前節で設定した工学的基盤位置での地震動と対象地点付近でのボーリング調査結果を用いて、対象地点の地表面波を逐次非線形地震応答解析により推定する。解析条件、解析パラメータ設定方法を以下に示す。

- ・地盤の非線形構成則は修正Ramberg-Osgoodモデル<sup>6)</sup>を使用する。
- ・地盤の速度構成は、ボーリング調査結果に基づいて設定する。
- ・土の動的変形特性は、多数の試験結果に基づいて提案されている推定式<sup>7)</sup>を採用し、 $G/G_0=0.5$ のひずみを規準ひずみとする。

表-1 検討対象地点

| 検討箇所 | 堆積層厚さ(m) | 表層地盤固有周期(sec) | 基準とするKiK-net観測点 | KiK-net観測点と検討箇所距離(km) |
|------|----------|---------------|-----------------|-----------------------|
| A地点  | 25.3     | 0.35          | 金ヶ崎             | 15.9                  |
| B地点  | 6.0      | 0.08          | 花巻南             | 8.4                   |
| C地点  | 16.3     | 0.26          | 花巻北             | 14.9                  |
| D地点  | 20.0     | 0.27          | 矢巾              | 10.7                  |

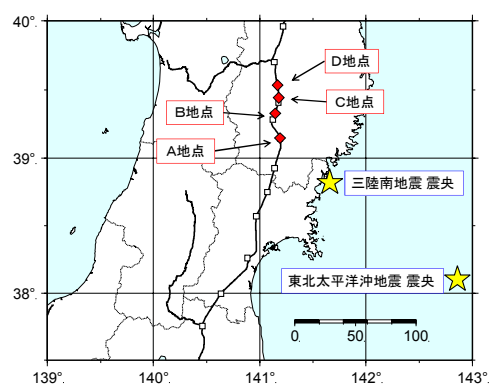
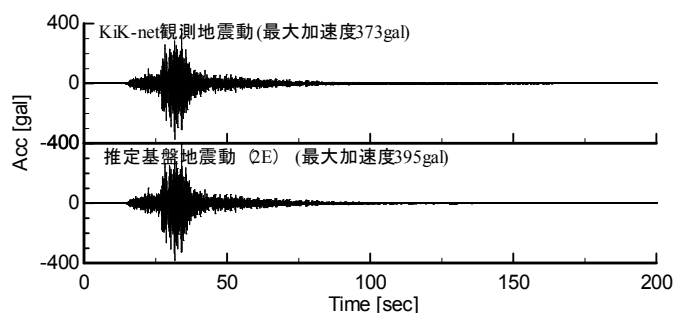
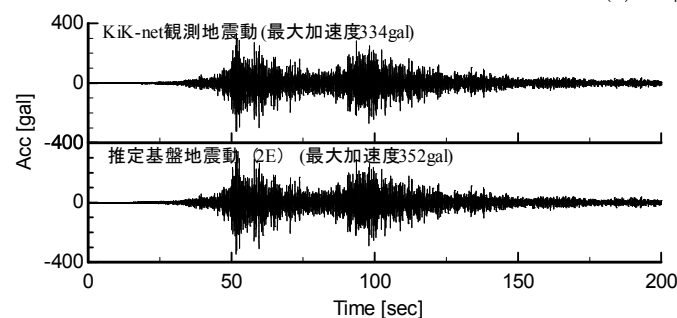


図-1 検討箇所位置



(a) 三陸南地震



(b) 東北地方太平洋沖地震

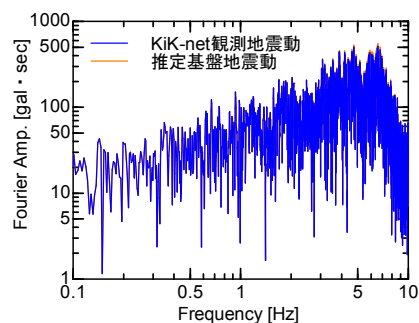
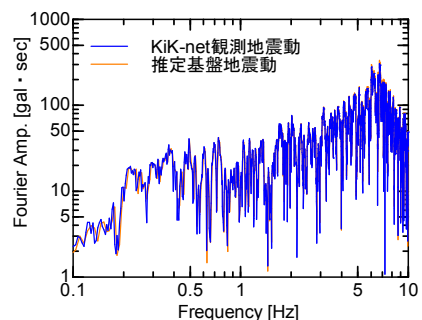


図-2 地表面でのKiK-net観測地震動と工学的基盤での推定地震動の比較

- ・地下水位は地表面とする。
- ・最大減衰定数 $h_{\max}$ は下記の値を採用する。  
粘性土・泥岩20%，砂礫・砂岩・礫岩35%
- ・粘性減衰定数は3%，要素剛性比例減衰とする。

対象地点における基盤位置での地震動波形（=近傍のKiK-net地表面での地震動），応答解析で算出した地表面地震動波形，および2波のフーリエ振幅スペクトルを図-3～図-6に示す。

まず，三陸南地震と東北地方太平洋沖地震とを比較すると，両地震の継続時間が大きく異なっていることは明白である。しかしながら，最大加速度で見ると，両地震における差はそれほど見られない。特にA地点やD地点等では，三陸南地震の方が最大加速度は若干大きくなっている。また，フーリエ振幅

スペクトルを見ると，両地震におけるスペクトル形状は酷似していることが分かる。これは，対象地点のサイト増幅特性の影響を強く受けていることを表しており，地点毎にサイト特性を適切に評価することの重要性を示唆している。

次に基盤位置への入力地震動波形と地表面での応答波形を比較する。A，C，およびD地点では，両地震においても最大加速度は若干減少し，B地点では若干増幅する挙動が確認された。これはB地点のみ表層地盤の固有周期が非常に短いことに起因したものであると考えられるが，フーリエ振幅スペクトルを見ると，5Hz以上の高振動数成分を除けば，ほとんど差は見られない。

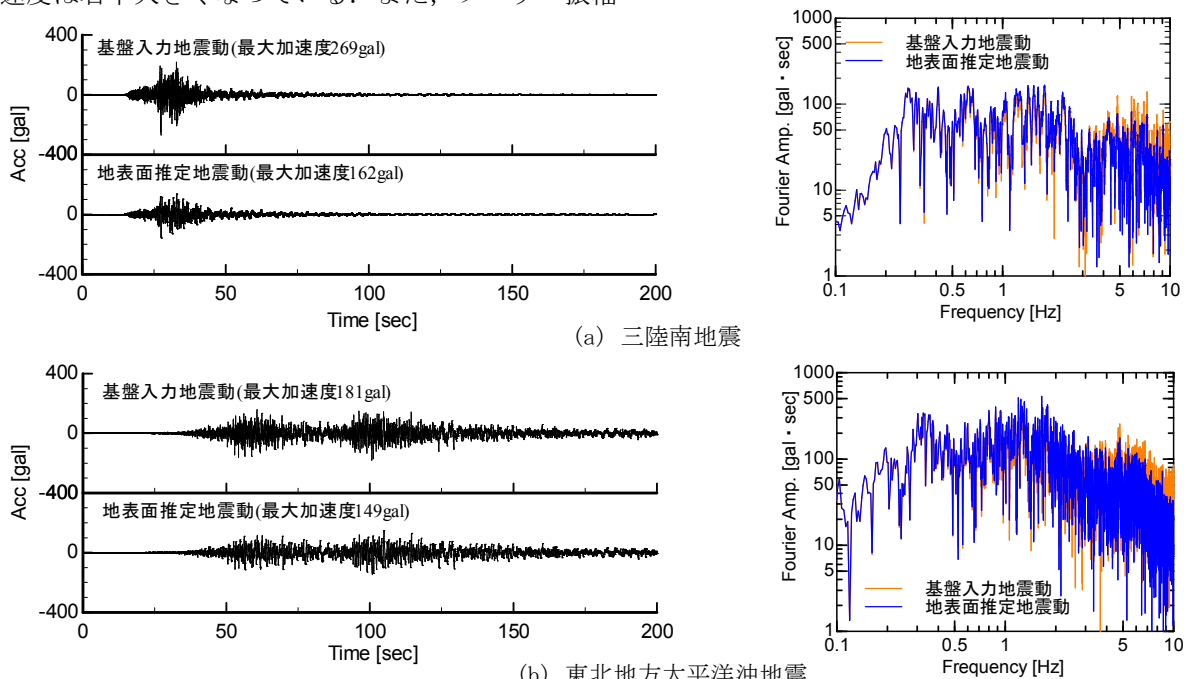


図-3 A地点 時刻歴波形およびフーリエ振幅スペクトル

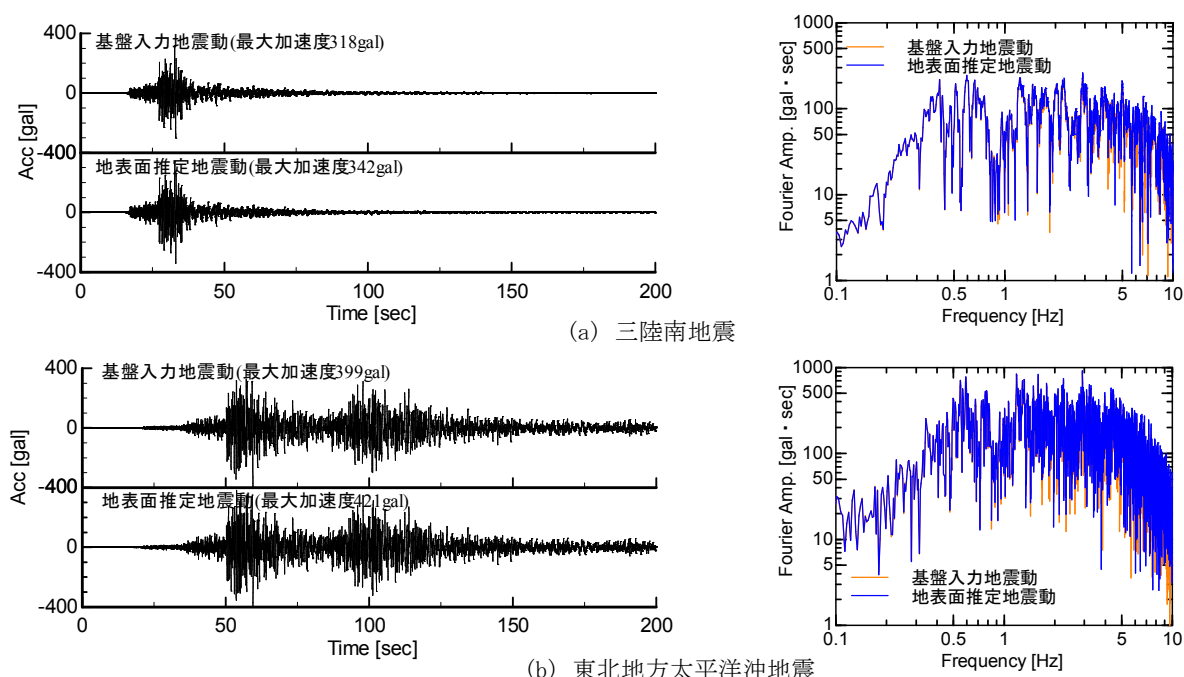
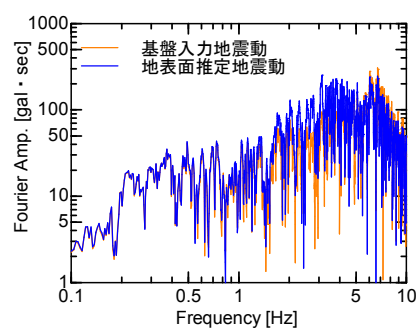
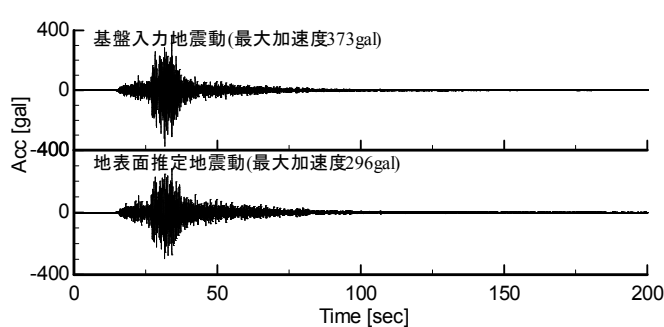
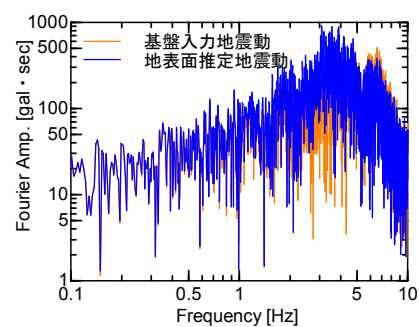
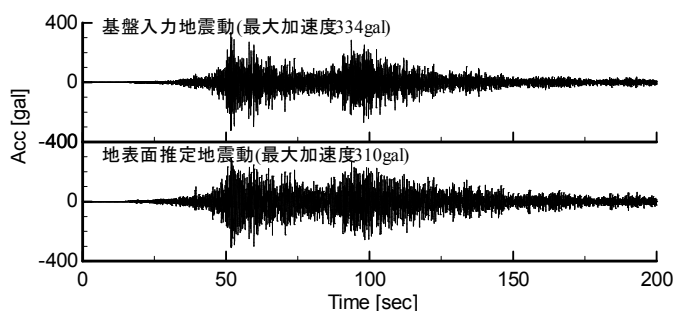


図-4 B地点 時刻歴波形およびフーリエ振幅スペクトル

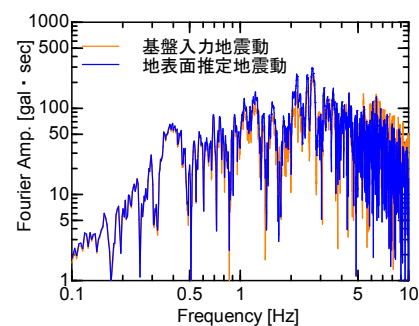
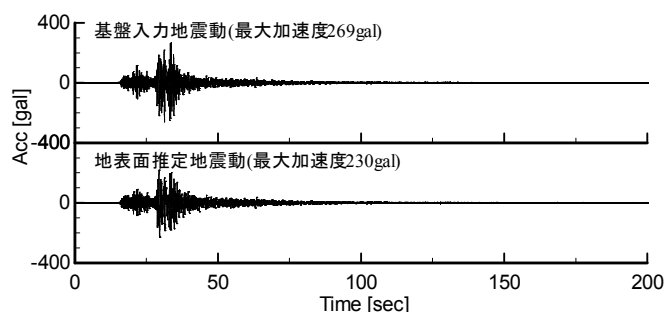


(a) 三陸南地震

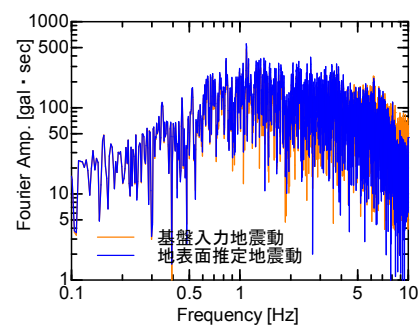
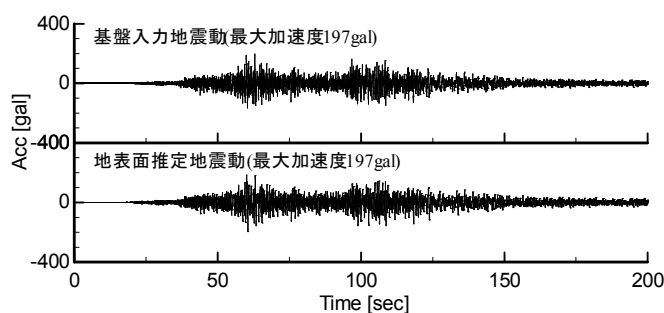


(b) 東北地方太平洋沖地震

図-5 C地点 時刻歴波形およびフーリエ振幅スペクトル



(a) 三陸南地震



(b) 東北地方太平洋沖地震

図-6 D地点 時刻歴波形およびフーリエ振幅スペクトル

#### 4. 構造物応答の推定・考察

各地点において得られた地表面位置での地震動の加速度応答スペクトルから、東北地方太平洋沖地震と三陸南地震時の構造物の応答を推定し、両地震における構造物応答の比較と被害との関係について考察する。なお、2地震における被害状況は、参考文献1) および2) で公表された内容に基づいている。図-7には対象地点4箇所推定された両地震のフーリエ振幅スペクトルの比（東北地方太平洋沖地震/三陸南地震）、ならびに加速度応答スペクトル（ $h=0.05$ ）と両地震の比を示す。

##### (1) A地点

全地点に共通して言えるが、概ね全周期において、東北地方太平洋沖地震の方が三陸南地震と比較し、フーリエ振幅スペクトルは大きく、その差は1~5倍程度である。これは、両地震の地震規模の差に起因したものであると考えられる。

また、この地点における加速度応答スペクトルは、東北地方太平洋沖地震の方が全周期にわたり若干大きく、特に長周期領域においてその差が顕著に見られるが、一般的な高架橋の固有周期が0.3~1.0秒程度であることを考慮すると、この相違が高架橋の損傷度に及ぼした影響は小さいと言える。

##### (2) B地点

加速度応答スペクトルは、A地点と同様に東北地方太平洋沖地震の方が全周期にわたり若干大きい値を示した。構造物の固有周期付近に着目すると、東北地方太平洋沖地震では、4箇所の中で最も大きな値を示し、また三陸南地震との差が1.1~1.5倍程度と比較的大きいため、両地震動で損傷に差が生じたと考えられる。

##### (3) C地点

C地点は、サイト増幅特性の影響により、他地点と比較して、地震波が高振動数領域において卓越している特徴がある。2地震の加速度応答スペクトルの比較では、A地点やB地点と同様にほぼ全周期にわたり、東北地方太平洋沖地震の方が大きな値を示した。先述したが、C地点は、三陸南地震後、重点的に耐震補強が施されていたため、東北地方太平洋沖地震時は、殆ど損傷は生じていない。

##### (4) D地点

他の地点では、加速度応答スペクトルが概ね全周期において、東北地方太平洋沖地震の方が大きい値を示したが、D地点は、周期0.6秒付近を境に、東北地方太平洋沖地震と三陸南地震の加速度応答スペクトルの大小が逆転する結果となった。

以上のように、東北地方太平洋沖地震はマグニチュード9.0と非常に大きな地震規模であったために、各地点での地震動エネルギー（フーリエ振幅スペク

トル）は三陸南地震と比較して非常に大きなものであった。しかしながら、東北地方太平洋沖地震では、震源の破壊継続時間が数百秒にも及んでおり、その結果として地震動の継続時間も三陸南地震と比較して数倍の長さを有していることが見て取れる。そのため地震動のエネルギーが長時間にわたって分散され、結果として構造物の最大応答としてはそれほど大きくならなかったものと考えられる。

#### 5. おわりに

本検討では、東北地方太平洋沖地震における鉄道構造物の被害発生要因を考察するための基礎的な検討として、三陸南地震との地震動特性の比較を行った。具体的には、両地震もしくはいずれか一方の地震において被害が発生した4箇所を対象として、地表面位置での地震動を推定、両地震の比較と構造物応答の関連について考察した。その結果、以下の事項が確認された。

- ①対象とした2地震の地震規模が大きく異なる影響で、地震動の経時特性に相違はあるものの、高架橋損傷地点の地表予測波の周波数特性および高架橋に及ぼす影響度（最大応答）に大きな相違は見られず、非常に酷似した結果となった。
- ②2地震時の個々の高架橋の損傷度と各加速度応答スペクトルの特性に、明瞭な関係が見られた。

**謝辞：**（独）防災科学技術研究所のKiK-netの観測記録を利用させて頂きました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会地震工学委員会：土木学会東日本大震災被害調査団 緊急地震被害調査報告書，2011。
- 2) 土木学会：コンクリートライブラリー114号 2003年に発生した地震によるコンクリート構造物の被害分析，2004。
- 3) 独立行政法人 防災科学技術研究所：  
<http://www.bosai.go.jp/>
- 4) 秦吉弥，一井康二，加納誠二，土田孝，柴尾享，今村孝志，常時微動計測に基づく高速道路盛土の入力地震動設定法の検討，土木学会論文集F，Vol. 65，No. 4，pp.529-541，2009。
- 5) 杉戸真太，合田尚義，増田民夫：周波数依存性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察，土木学会論文集，No.493/II-27，pp.49-58，1994。
- 6) 足立紀尚，龍岡文夫：新体系土工学18，土の力学（Ⅲ），技報堂出版，1981。
- 7) 安田進，山口勇：種々の不攪乱土における動的変形特性，第20回土質工学研究発表会，pp.539-542，1985。

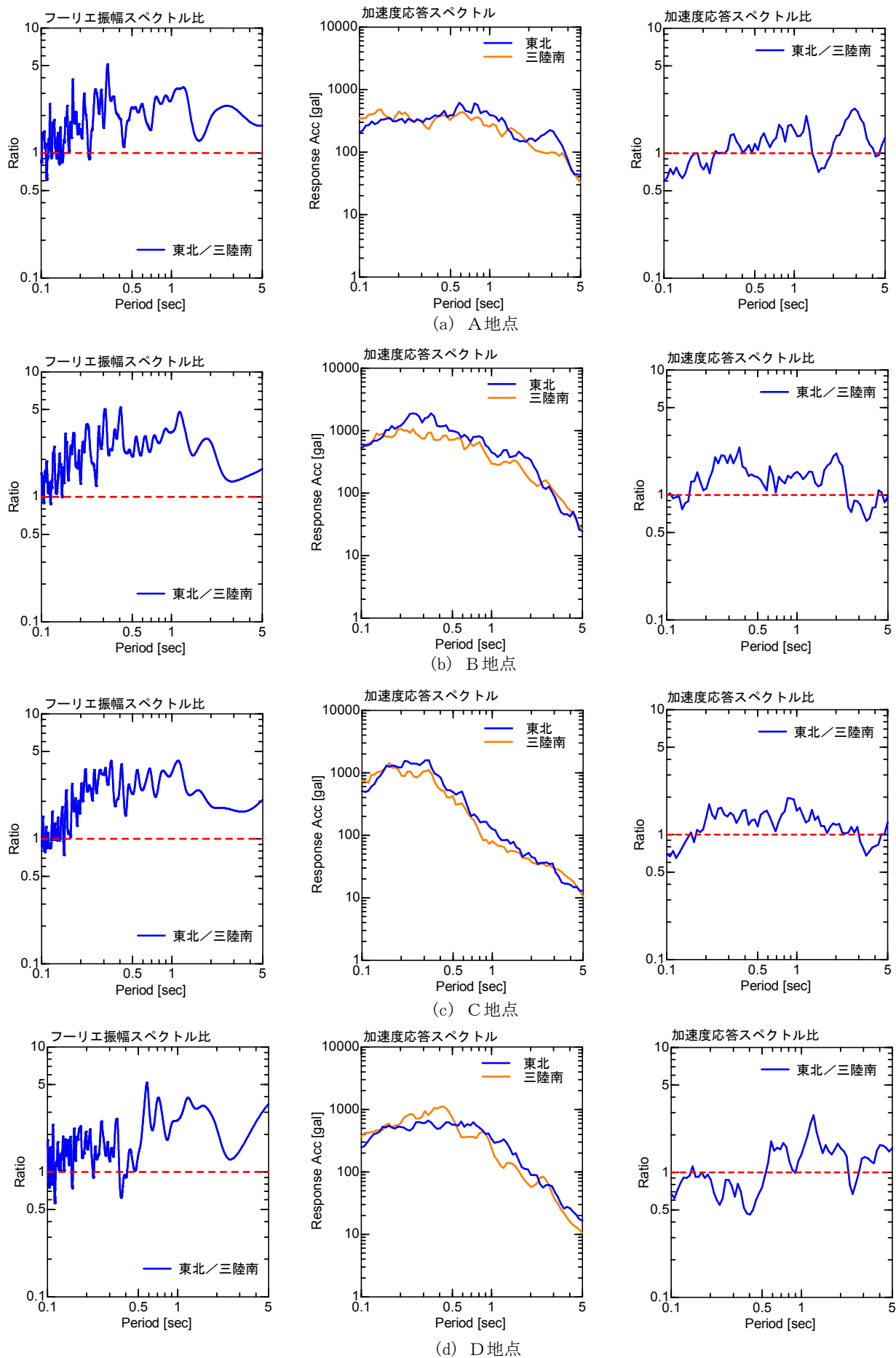


図-7 フーリエ振幅スペクトル比，弾性加速度スペクトルおよび比 ( $h=0.05$ )