論文　臨時地震観測に基づく 2016年熊本地震におけるJR豊肥本線 列車脱線地点での強震動の評価

秦　吉弥[1]・池田　隆明[2]・秋山　充良[3]

[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　長岡技術科学大学　大学院工学研究科（〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1）
E-mail: ikeda@vos.nagaokaut.ac.jp
[3] 正会員　早稲田大学　創造理工学部（〒160-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）
E-mail: akiyama617@waseda.jp

2016年熊本地震（本震）の強震動の作用により，JR豊肥線の列車が赤水駅の構内において脱線する鉄道事故が発生した．運輸安全委員会（2016年11月）ではこの鉄道事故の分析に立野駅で観測された本震記録を採用しているが，本震時に脱線地点（赤水駅）に作用した地震動については明らかにされていない．そこで本稿では，赤水駅などにおいて臨時地震観測を行い，得られた記録に基づいて本震時における脱線地点での地震動を評価した．その結果，サイト増幅・位相特性の類似性などを踏まえれば，立野駅での本震記録を脱線地点に作用した本震時の地震動として工学的な転用が可能と見なせることが明らかとなった．

Key Words : *strong motion, derailment, aftershock observation, site amplification and phase effects*

1. はじめに

2016年熊本地震の一連の地震活動により，震源域では数多くの強震動が観測された．これらの強震動の作用により，震源域に位置する鉄道施設の深刻な被害が報告[1),2)]されており，その中でも脱線による鉄道事故が二件発生したことが特徴的である．一つは，4月14日21時26分に発生した熊本県熊本地方を震源とする気象庁マグニチュード6.5の地震（以後，前震と呼ぶ）の強震動の作用によって九州新幹線の車両が脱線した鉄道事故[3)]である．もう一方は，前震から約28時間後の4月16日1時25分に発生した熊本県熊本地方を震源とする気象庁マグニチュード7.3の地震（以後，本震と呼ぶ）の強震動の作用によってJR豊肥線（在来線）の車両が赤水駅の構内において脱線した鉄道事故[4)]である（**図-1**内の枠内写真[5)]参照）．

この点に関して秦ほか[6)]は，前者の新幹線脱線の鉄道事故地点に作用した前震時の地震動を推定している．しかしながら，後者の在来線脱線の鉄道事故地点（以後，脱線地点と呼ぶ：**図-1**参照）に作用した本震時の地震動を評価するには至っていない．運輸安全委員会[4)]では後者の鉄道事故の分析に赤水駅近くの立野駅で観測された本震記録を採用しているが，本震時に脱線地点に作用した地震動については現在のところ明らかにされていない．

上述した背景を踏まえ本稿では，2016年熊本地震の本震時に脱線地点に作用した地震動を，臨時地震観測に基づいて評価した結果について報告する．具体的には，赤水駅と立野駅（ともに駅近く）において臨時地震観測を実施し，得られた記録に基づいてサイト増幅特性ならびにサイト位相特性の類似性に関する検討[7)]を行った．

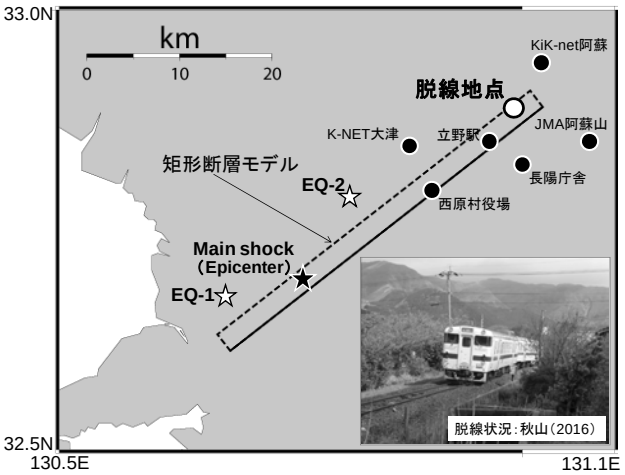

図-1　2016年熊本地震の本震の震源域における脱線地点

2. 本震観測記録の整理

脱線地点周辺の既存観測点において得られた本震記録について整理を行う．**図-2**は，本震時に脱線地点周辺で観測された本震記録の地震動指標値（最大加速度PGA，最大速度PGV，気象庁計測震度[8]）を位置情報とともに示したものである．なお，脱線地点（赤水駅）では後述するとおり，本震後に観測点を臨時設置したため本震記録は存在しない．また，KiK-net阿蘇[9]においても本震記録は残されていない．一方で立野駅[10]では，**図-3**に示すような本震記録の加速度時刻歴の図面が運輸安全委員会[7]より公開されているが，波形データに関しては未公開である（2017年3月現在）．**図-2**に示すとおり，脱線地点の近くには，K-NET大津[9]，西原村役場，南阿蘇村長陽庁舎，JMA阿蘇山[8]の四つの強震観測点が存在するが，比較的近い距離関係にあるにも関わらず地震動指標値が大きく異なっていることが読み取れる．さらに，**図-4**には，脱線地点とその周辺に着目した（国研）産業技術総合研究所による地質図[11]を，**図-2**の図郭と合わせて示す．**図-4**に示すように，脱線地点とその周辺の既存観測点では，地質区分の特徴が類似していないことが読み取れる．

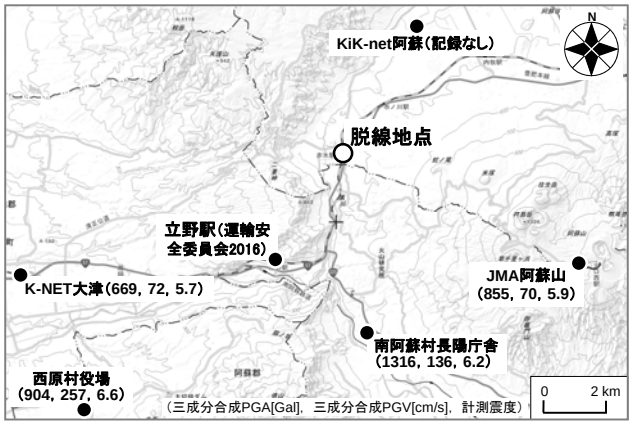

図-2 脱線地点周辺で得られた本震記録の地震動指標値の分布

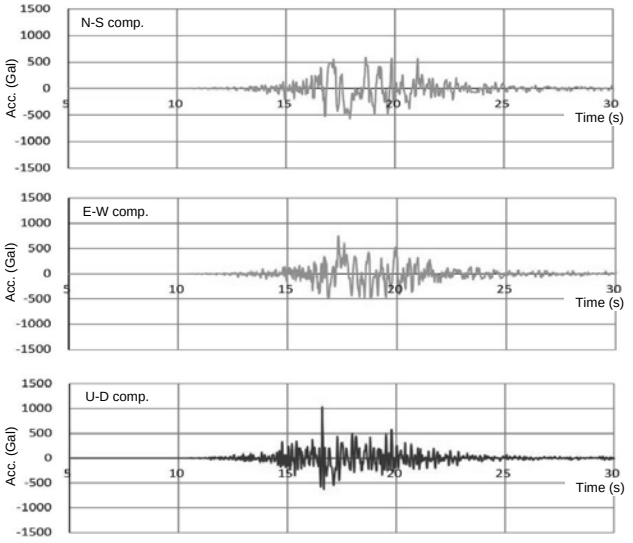

図-3 立野駅での本震記録の加速度時刻歴（文献4)に一部加筆）

よって，脱線地点周辺における本震観測記録の有意な差異（**図-2**参照）および複雑な地質（**図-4**参照）を考慮すれば，本震時における脱線地点での地震動を評価するにあたっては，上述したような机上の検討だけでは評価できず，現地での調査結果などに基づいたより詳細な検討が必要であることが示唆される．

3. サイト増幅特性の評価

本研究では，赤水駅および立野駅（ともに駅近く）に地震計を臨時設置した．地震観測は，一体型微動探査兼地震計機器[12]を地盤地表面に設置することで実施した．観測期間は，2016年11月20日～12月4日である．観測条件として，サンプリング周波数は100Hz，および観測方向はNS, EW, UDの三成分とし，トリガー加速度レベルは設定せずに，常時観測を継続するシステムとした．その結果，以下に示すような二つの余震観測記録（**図-1**参照）がK-NET大津（**図-2**参照）と同時に得ることができた．

・EQ-1：2016/11/23 20:10 13km 熊本県熊本地方（M_J3.6）
・EQ-2：2016/12/02 06:19 8km 熊本県熊本地方（M_J3.6）

図-5は，脱線地点（赤水駅）におけるサイト増幅特性，立野駅におけるサイト増幅特性，既存強震観測点におけるサイト増幅特性[13]を重ね合せたものである．なお，本稿では全て地震基盤～地表相当のサイト増幅特性となっている．赤水駅および立野駅におけるサイト増幅特性の評価手順は以下のとおりである．まず，K-NET大津と赤水駅・立野駅で同時に得られた地震観測記録（EQ-1およびEQ-2）を対象に，両地点の震源からの距離の違いによる補正[14,15]を考慮したフーリエスペクトルの比率（赤水駅もしくは立野駅／K-NET大津：**図-6**参照）を計算した．次に，この比率をK-NET大津における既存のサイト増幅特性[16]に掛け合わせることで，赤水駅および立野駅（ともに臨時観測点）におけるサイト増幅特性を評価[17,18]した．

図-5に示すように，赤水駅と立野駅では，サイト増幅特性の特徴（ピーク周波数やスペクトル形状等）が比較的類似している傾向が読み取れる．この傾向は，立野駅で

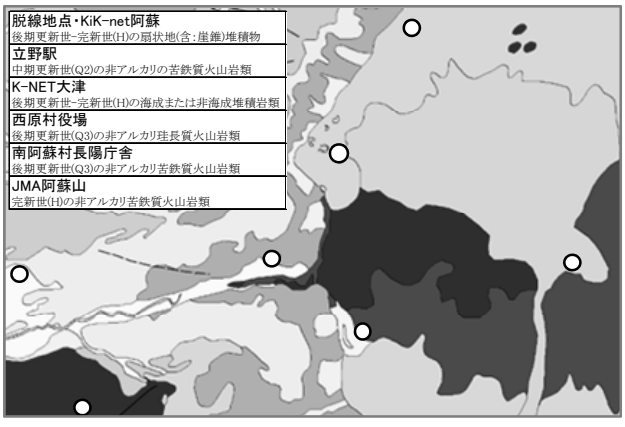

図-4 産総研地質図[11]による脱線地点周辺の地質

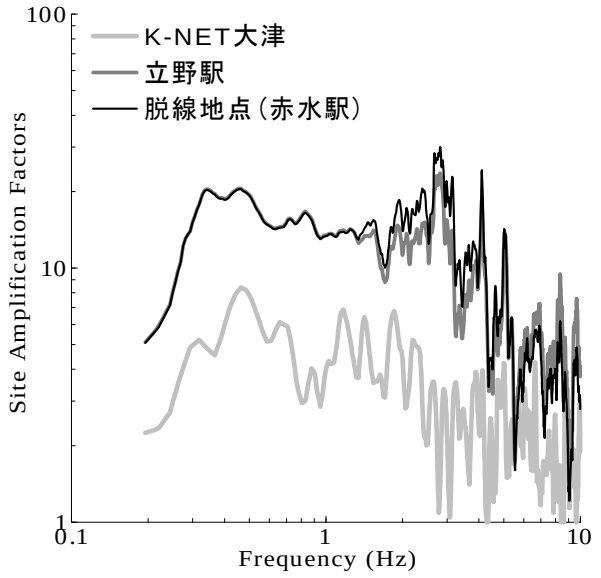

図-5　サイト増幅特性（地震基盤～地表）の比較

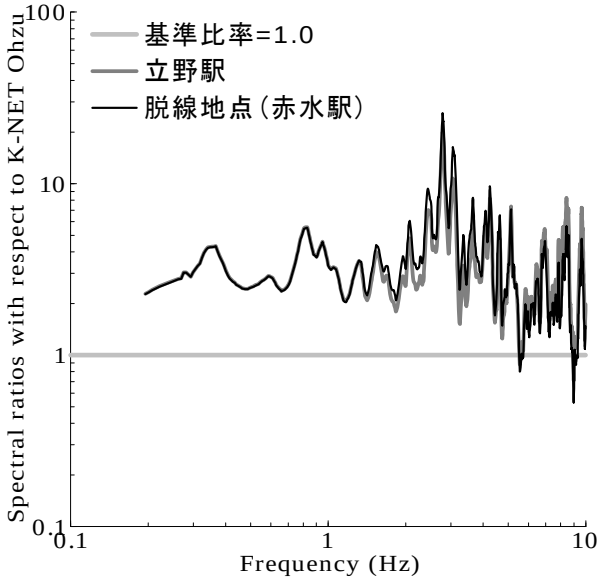

図-6　K-NET大津に対するスペクトル比の比較

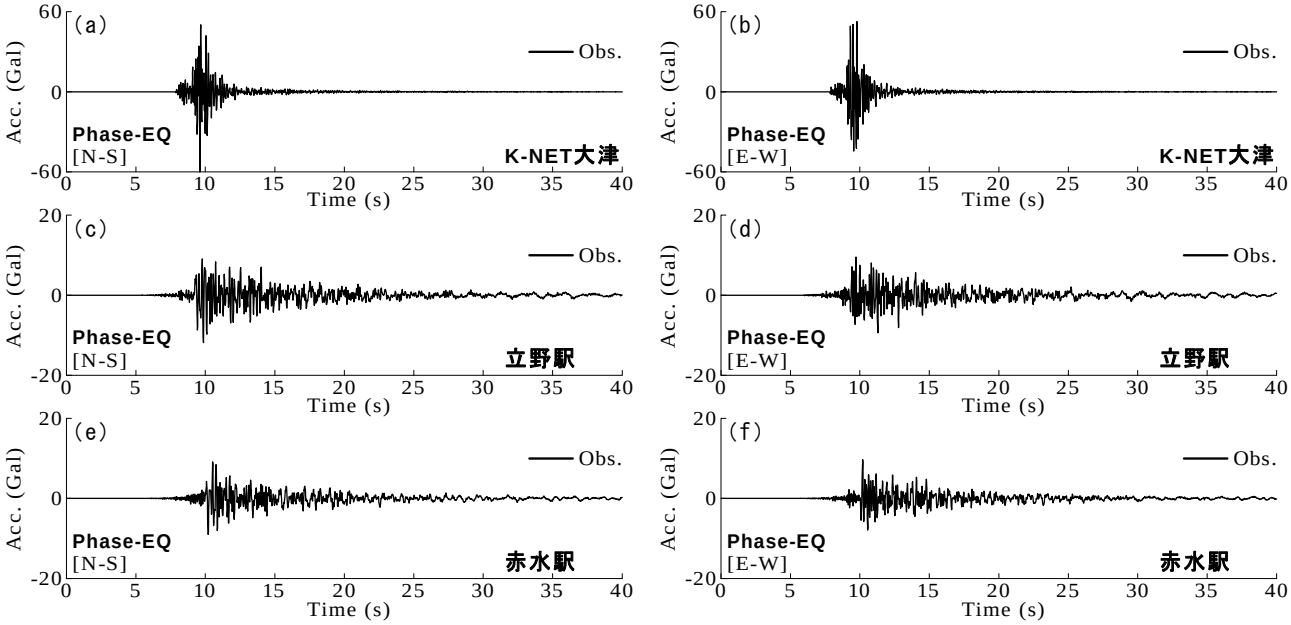

図-7　熊本県熊本地方を震源とする余震（2016年12月2日6時19分 深さ8km M_J3.6）によって同時観測された地震動の加速度時刻歴

得られた本震観測記録（**図-3**参照）のフーリエ振幅特性が，本震時に脱線地点（赤水駅）に作用した地震動のフーリエ振幅特性と類似していた可能性を示唆するものである．

4.　サイト位相特性の評価

3.で得られた知見を踏まえ，サイト位相特性の類似性に関する検討を行う．**図-1**に示すように，EQ-2は，本震の矩形断層モデル内[19]のアスペリティ近くで発生した余震であるため，経験的グリーン関数法・統計的グリーン関数法などの断層モデルに基づく手法[20]の要素地震（種地震）として，もしくはサイト特性置換手法[21]における位相特性（波形形状）を規定する地震波として採用が期待できる地震である．**図-7**にEQ-2によるK-NET大津，立野駅，赤水駅での観測地震動の加速度時刻歴を水平二成分について示す．

図-8は，K-NET大津における本震観測記録の速度波形（観測波）と，観測波のフーリエ振幅特性を用いてフーリエ位相特性のみK-NET大津におけるEQ-2による観測記録のフーリエ位相特性に置き換えた合成速度波形（置換波）を，水平二成分について比較したものである．**図-8**に示すとおり，観測波と置換波が非常に良い一致を示していることがわかる．すなわちこれは，EQ-2は，脱線地点周辺の本震時の地震動の波形形状（サイト位相特性）を評価する上で非常に有効な余震であることを示唆するものである．

この有効性を踏まえて，立野駅と赤水駅（脱線地点）に対して同様の検討を行う．**図-9**は，立野駅におけるEQ-2による観測記録の速度波形（観測波）と，観測波のフー

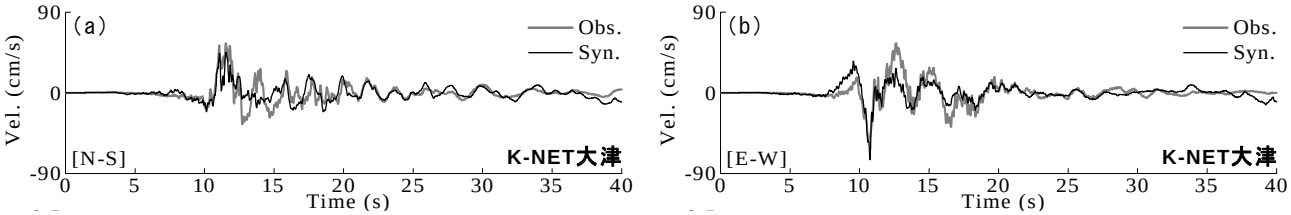

図-8 本震と余震(EQ-2)による観測地震動を用いたK-NET大津でのサイト位相特性の類似性に関する検討

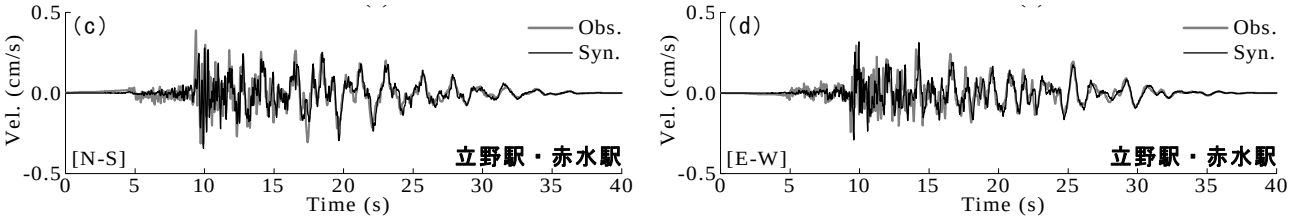

図-9 余震(EQ-2)による立野駅と赤水駅での同時観測記録(**図-7**(c)～(f))に基づくサイト位相特性の類似性に関する検討

リエ振幅特性を用いてフーリエ位相特性のみ赤水駅におけるEQ-2による観測記録のフーリエ位相特性に置き換えた合成速度波形(置換波)を，水平二成分について比較したものである．**図-9**に示すとおり，観測波と置換波が非常に良い一致を示していることから，立野駅と赤水駅(脱線地点)では，本震時に作用した強震動の波形形状(サイト位相特性)の特徴が比較的類似していたことが示唆される．

上述したように，サイト増幅特性のみならずサイト位相特性の観点からも(フーリエ振幅特性のみならずフーリエ位相特性の観点からも)，立野駅と赤水駅(脱線地点)のサイト特性には共通性が見られる．さらに，両駅に対する本震の断層モデル面内[19]のからの距離(等価震源距離など)もそれほど大きな差異はないことを考慮すると(**図-1**参照)，立野駅で観測されている本震時の地震動(**図-3**参照)を，赤水駅(脱線地点)に作用した本震時の地震動と見なすことが可能であると考えられる．また，立野駅の本震観測記録は，地盤地表面で得られたものであると推測でき，地盤非線形の影響が含まれており，地表面相当では立野駅と赤水駅(脱線地点)では地盤挙動が異なっていた可能性が高いため，立野駅の本震観測記録に対して等価線形解析などを適用することで工学的基盤相当の地震動を計算し，これを赤水駅(脱線地点)に作用した地震動として評価することが望ましい．なお，本稿において得られた「立野駅での本震記録を脱線地点に作用した本震時の地震動として転用が可能と見なせるという工学的な知見」は，上述した運輸安全委員会[7]による脱線事故の分析結果を支持するものである．

5. まとめ

本研究では，2016年熊本地震の本震におけるJR赤水駅構内の車両脱線地点での地震動を推定するため，赤水駅などにおいて余震観測を行い，得られた記録についてフーリエ振幅・位相特性に着目した解析を行った．その結果，脱線地点から4kmほど南西方向にある立野駅での本震観測記録を脱線地点に作用した地震動と見なすことが工学的に可能であるとの知見を得た．この知見は，運輸安全委員会により先行的に実施された脱線事故の分析結果を支持するものである．

なお，立野駅の本震観測記録は，地盤地表面で得られたものであるため，脱線地点における動的解析などの入力地震動として今後利用する場合には，適切な地盤モデル・解析手法[22),23),24)]により工学的基盤の地震動を別途計算する必要があることを付記しておく．

謝辞：臨時余震観測の実施にあたっては，現地の住民の皆様などに大変お世話になりました．(国研)防災科学技術研究所K-NET/KiK-net，気象庁JMA，熊本県による地震観測波形データを利用させていただきました．本研究の遂行にあたっては，科学研究費補助金・若手研究A「超高密度地震観測に基づく宅地造成斜面におけるダイナミック地すべり挙動の広域的評価[JP15H05532]」の一部を使用しました．本研究は，(公社)土木学会地震工学委員会2016年熊本地震による被害調査・分析小委員会(委員長：池田隆明(長岡技術科学大学教授))の活動の一環として実施しました．ここに記して謝意を表します．

参考文献

1) 海老原毅：鉄道施設の被害(在来線)，土木学会西部支部「2016 年熊本地震」地震被害調査報告会～緊急災害調査と応急復旧の取組み～，土木学会社会支援部門ホームページ，2016. http://committees.jsce.or.jp/report/node/117 (last accessed: 2017/03/15)
2) 中島英明：鉄道施設の被害(新幹線)，土木学会西部支部「2016 年熊本地震」地震被害調査報告会～緊急災害調査と応急復旧の取組み～，土木学会社会支援部門ホームページ，2016. http://committees.jsce.or.jp/report/node/117 (last accessed: 2017/03/15)
3) 国土交通省：第 13 回「新幹線脱線対策協議会」の結果について(平成 28 年 5 月 27 日)，鉄道局ホームペ

ージ，2016. http://www.mlit.go.jp/report/press/tetsudo07_hh_000101.html（last accessed: 2017/03/15）
4) 運輸安全委員会：鉄道事故調査報告書―III 九州旅客鉄道株式会社豊肥線赤水駅構内列車脱線事故―，平成 28 年 11 月 24 日公表，国土交通省ホームページ，34p., 2016. http://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/rep-acci/RA2016-8-3.pdf（last accessed: 2017/03/15）
5) 秋山充良：構造物調査報告(2)，平成 28 年(2016 年)熊本地震地震被害調査結果速報会資料，土木学会地震工学委員会ホームページ，2016. http://committees.jsce.or.jp/eec2/node/76（last accessed: 2017/03/15）
6) Hata, Y., Yabe, M., Kasai, A., Matsuzaki, H., Takahashi, Y. and Akiyama, M.: Ground motion estimation for the elevated bridges of the Kyushu Shinkansen derailment caused by the foreshock of the 2016 Kumamoto earthquake based on the site-effect substitution method, *Earth, Planets and Space*, Springer, Vol.68:199, 2016.
7) 例えば，秦吉弥，山内政輝，釜井俊孝，王功輝：常時微動計測および臨時地震観測に基づく 2016 年熊本地震の前震・本震における御船町営中原団地での強震動の推定，第 36 回地震工学研究発表会講演論文集，土木学会，Paper No.919, 2016.
8) Nishimae, Y.: Observation of seismic intensity and strong ground motion by Japan Meteorological Agency and local governments in Japan, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.75-78, 2004.
9) Aoi, S., Kunugi, T., and Fujiwara, H.: Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.65-74, 2004.
10) Ashiya, K.: Earthquake alarm systems in Japan Railways, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.112-117, 2004.
11) (国研)産業技術総合研究所：地質図表示システム(地質図 Navi)，地質調査総合センターホームページ，2013. https://gbank.gsj.jp/geonavi/（last accessed: 2017/03/15）
12) 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.
13) 秦吉弥，矢部正明，葛西昭，松崎裕，高橋良和，秋山充良：臨時地震観測に基づく 2016 年熊本地震の強震動の作用によって被災した橋梁地点でのサイト増幅特性の評価，第 19 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp. 127-134, 2016.
14) Boore, D. M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, No.6A, pp.1865-1894, 1983.
15) 加藤研一：K-NET 強震記録に基づく 1997 年鹿児島県北西部地震群の震源・伝播経路・地盤増幅特性評価，日本建築学会構造系論文集，No.543, pp.61-68, 2001.
16) 野津厚，長尾毅，山田雅行：スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性とこれを利用した強震動評価事例，日本地震工学会論文集，Vol.7, No.2, pp.215-234, 2007.
17) (公社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説[上巻]，国土交通省港湾局監修，pp.336-341, 2007.
18) Hata, Y., Nozu, A. and Ichii, K.: Variation of earthquake ground motions within very small distance, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.66, pp.429-442, 2014.
19) 秦吉弥，矢部正明，野津厚，葛西昭，高橋良和，松崎裕，秋山充良：臨時余震観測に基づく 2016 年熊本地震における西原村および南阿蘇村の被災橋梁に作用した地震動の評価，構造工学論文集，土木学会，Vol.63A, 2017.
20) 野津厚，長尾毅，山田雅行：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良－因果性を満足する地震波の生成－，土木学会論文集 A，Vol.65, No.3, pp.808-813, 2009.
21) Hata, Y., Nozu, A. and Ichii, K.: A practical method to estimate strong ground motions after an earthquake based on site amplification and phase characteristics, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.101, No.2, pp. 688-700, 2011.
22) 秦吉弥，片岡正次郎，野津厚：2011 年東北地方太平洋沖地震による観測記録を用いた他地点での地震動推定に関する精度評価，日本地震工学会論文集，Vol. 16, No.4, pp.195-214, 2016.
23) 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，ISBN: 978-4-87259-565-9, 2016.
24) 秦吉弥，釜井俊孝，王功輝：2016 年熊本地震で被災した南阿蘇村の造成宅地における地震動の評価，日本地震工学会論文集，Vol.17, No.2, pp.196-200, 2017.

(2017.4.7 受付)

GROUND MOTION ESTIMATION AT DERAILMENT SITE ALONG HOUHI LINE DURING THE MAIN SHOCK OF THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE BASED ON TEMPORARY AFTERSHOCK OBSERVATIONS

Yoshiya HATA, Takaaki IKEDA and Mitsuyoshi AKIYAMA

A derailment in Akamizu Station along JR Houhi Line was caused by the main shock of the 2016 Kumamoto Earthquake. To better understand the mechanism of the derailment, it is necessary to have a better understanding on the seismic response of the railway vehicle on the railroad during the main shock with high accuracy by taking into account site effects. In this study, we evaluated the similarity of the empirical site amplification and phase effects between Tateno Station and Akamizu Station based on results of temporary aftershock observations.