

2016年熊本地震の激震地における相対変位と埋設管被害の分析

鈴木 崇伸¹

¹正会員 東洋大学教授 理工学部都市環境デザイン学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100)
E-mail:tsuzuki@toyo.ac.jp

この研究は 2 地点間の固有周期差が地震時に相対変位を大きくすることに注目して、益城町の通信管路被害の分析を行っている。微動計測によりマンホール位置の揺れ特性を明確にし、地震観測データに基づいて各地点の相対変位を計算する方法を提案している。相対変位が生じる原因は各地点の表層地盤の増幅特性の違いであると考え、微動計測によりマンホール位置の卓越周期を計測し、基盤波を入力することにより揺れの大きさを再現した。益城町内の注目した地区の微動計測の結果は概ね一様な振動特性であり、0.3s から 0.5s 程度の周期となっていた。地盤条件のわかっている KiK-net 観測点の揺れに基づき、各地点の相対変位の評価を行った結果を報告している。

Key Words: 2016 Kumamoto Earthquake, Relative Displacement, Damage of Conduits, micro tremor

1. はじめに

2016年4月に発生した熊本地震では震源地において極めて大きな地震動が観測され、多くの構造物が被害になった。益城町役場に置かれた熊本県の震度計は前震と本震において震度7を計測し、西原村役場の震度計も本震では震度7を記録した。益城町内には防災科学技術研究所の KiK-net (KMMH016) の観測点が置かれ、地表と地中の記録が得られている。これらの記録は今後の耐震設計の高度化に向けた活用が期待される。

激震地での埋設管被害は揺れの大きさによって被害率が大きくなることが知られている。揺れの大きさに関する尺度と被害率を対比させて近似関数を作成する研究が多くの研究者によって行われており、既設設備の被害予測あるいは性能評価に活用されている。一方で埋設管の耐震設計では、管に作用する地震力を変位振幅と波長をパラメータとして表現する応答変位法が主流であり、極めて大きな揺れが作用するときの被災メカニズムが反映されているとはいえない。埋設管の耐震設計の性能設計化に向けて、被災のメカニズムを表現した設計モデルが望まれる。

本研究は益城町内で得られた地震記録を分析し、その特徴を明確にし、埋設管に作用する相対変位の分析を行っている。振幅が異なる主な要因は地表の火山性の沖積層の揺れ特性が大きいことによると考え、微動計測により揺れ特性評価を行った。ボーリングデータのある位置で微動計測を行い、HV スペクトルの卓越振動数が地盤

情報から計算される伝達関数に凡そ一致することを確認し、NTT のマンホール位置周辺に微動計を置き益城町内の主要道路に沿った卓越振動数を計測した。

KiK-net の記録を用いて剥ぎ取り計算により基盤入力波を作成し、沖積層の振動を 1 自由度系で近似して、マンホール位置の最大速度とマンホール間の相対変位を計算した。その結果、益城の市街地では最大速度が 150cm/s から 200cm/s であり、相対変位は固有周期によってばらつく結果となった。これらの地震動の条件と管路被害の関連について分析した結果を報告している。

2. 益城の強震動の特徴

(1) 益城の揺れの概要

2016年熊本地震では益城町から西原村を経て南阿蘇村にかけて大きな断層の動きが確認され、断層に沿って非常に大きな揺れが発生した。表-1 に益城町内において観測された前震と本震の数値を示している。同表に振幅の情報として PGA (3成分の合成加速度の最大値)、SI 値 (水平 2 成分を合成した応答速度の平均値の最大値) を示している。本震の数値は現在の構造物の設計の基準とされる兵庫県南部地震の観測地震動を上回っている。地震計の仕様が 1995 年当時は 1G までの計測レンジとなっており単純比較はできないが、稀に起きる揺れであることは間違いない。

また図-1 に強震観測点の案内図を示す。同図は国土

地理院の標高図に追記している。秋津川に沿った台地に市街地が広がっているのが確認できる。公開されている地盤情報によれば、台地の地表付近は溶岩の固まった凝灰岩の上に火山性の粘土や砂が堆積した沖積層となっている。堆積状況の違いが揺れの増幅に影響していると考えられる。

ここで自治体震度計のデータを分析する。自治体震度計は益城町役場の1階建屋内に設置されており、前震時ならびに本震時に水平方向に約1Hzの応答をしている。図-2(a)に前震と本震の観測記録のフーリエスペクトルを示す。点線が前震、実線が本震である。同図(b)にKiK-net 益城のフーリエスペクトルを示している。前震時には2Hzの成分が卓越し、本震時には1Hzの成分が卓越し、また1Hzから5Hzにかけて振動成分が含まれている。

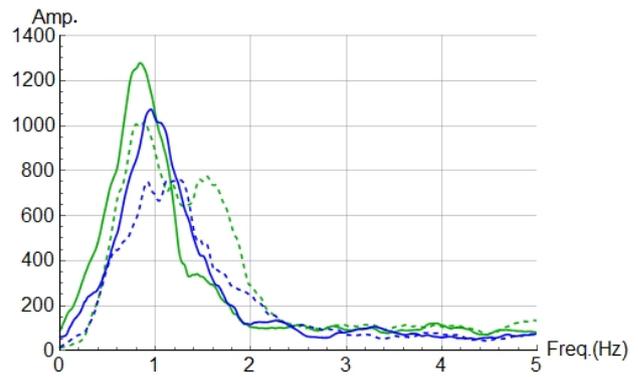
同じ地形に設置されているのに自治体震度計は1Hz前後の振動成分だけがあることからRC造の建屋の応答が支配的であると考えられる。地震計の脇で後述する微動計測も行ったが2Hz前後の成分だけが卓越する挙動を示している。この結果も建屋の影響を示すものであり、地盤振動に構造物の影響が混ざっていることから、以降の検討ではKiK-netの記録は用いるとする。

表-1 益城において観測された強震動

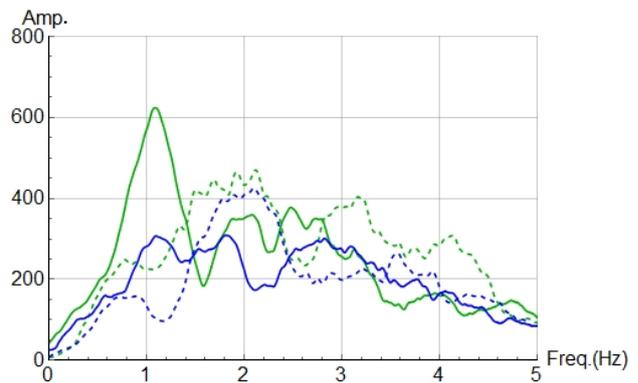
地震	地点	震度相当値	PGA [Gal]	SI値 [kine]
前震	KiK-net	6.47	1586	129.2
	町役場	6.61	817	172.8
本震	KiK-net	6.49	1363	139.0
	町役場	6.76	899	209.7



図-1 分析した地区の案内図



(a) 益城町役場



(b) KiK-net 益城

図-2 前震と本震のフーリエスペクトル

(緑; EW, 青; NS, 点線: 前震, 実線: 本震)

(2) 益城の揺れの特徴の分析

益城町内に置かれたKiK-net観測点のデータから本震時の揺れを分析する。加速度波形のフーリエスペクトルを計算して卓越成分を分析する。KiK-net観測点には地下約250mの位置に地中地震計が埋設されている。表層の増幅を考える上で貴重な情報となる。

図-3は3方向に分けてフーリエスペクトルを計算した結果である。緑は地表、青は地下のスペクトルを示している。同図(a)と(b)の水平動は0.3Hz以下の低振動数の領域と6Hz以上の高振動数の領域でおよそ一致している。その間の領域では地下に比べて数倍から10倍程度のフーリエ振幅になっている。この領域では観測点間の地盤の特性により増幅度が変化している。地表においてEW方向、NS方向ともに1Hz前後のフーリエ振幅が大きく、地下においてもこの辺りの振幅が大きい。断層変位の動的影響と考えられる。

図-3(c)は上下動のフーリエスペクトルを比較している。地中の記録では0.3Hzから1Hzの成分が優勢であるが、地表では4Hz前後の振幅が卓越している。益城町の直下近くから来た衝撃による波が層境界で反射・屈折して特定の振動数が増幅されたと考えられる。

フーリエスペクトルを用いた分析により、益城の揺れ

は 1Hz 前後の成分が優勢であったことを確認したが、次に加速度波形を速度波形に変換して比べてみる。加速度記録には断層変位成分が含まれているために 0.3Hz でゲインが 1/2 になるローカットフィルターを用いて積分計算を行った。水平動の計算結果を図-4(a), (b)に示す。主要動部分の 20 秒間を抜き出し、地上と地下の速度波形を重ねて書いている。地下の記録は長周期成分が優勢であり、地表の記録は地中の速度波形に 1Hz 以上の成分が重なった波形となっている。同図(c)は上下動を示しているが、長周期の地下の速度変化に 4Hz の振動が重なった波形となっている。水平動を大きくする主な要因はせん断波速度が小さくなる沖積層と考えられる。

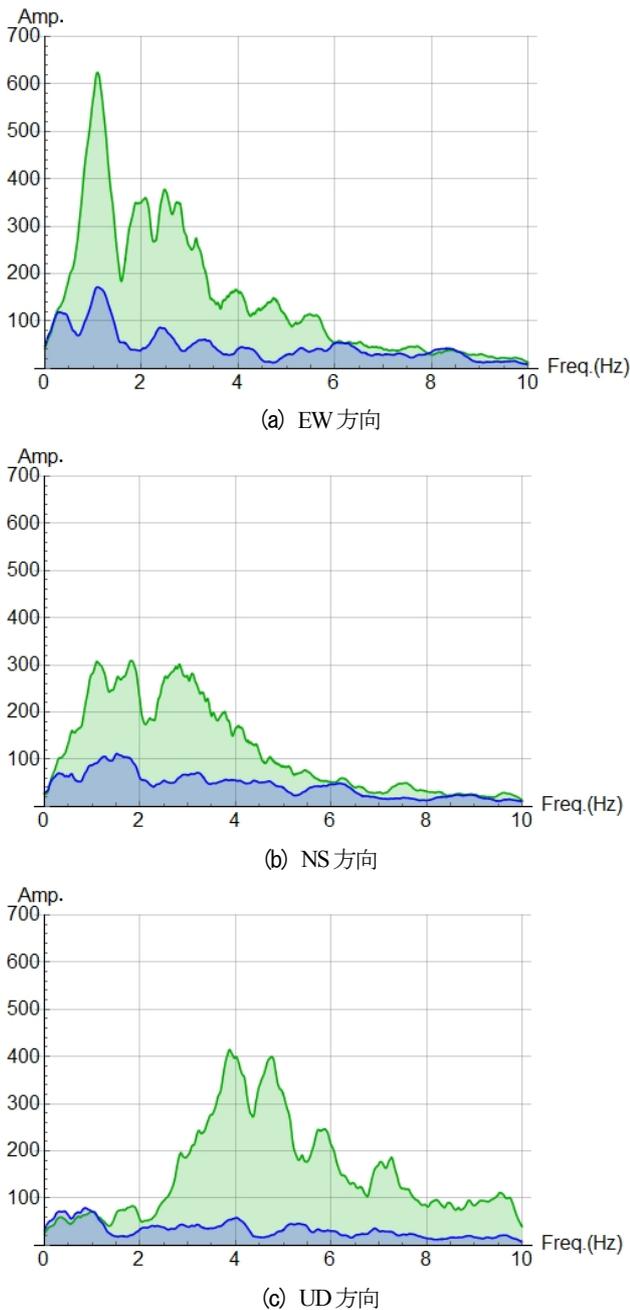


図-3 加速度フーリエスペクトルの比較
(緑：KiK-net 地上，青：KiK-net 地下)

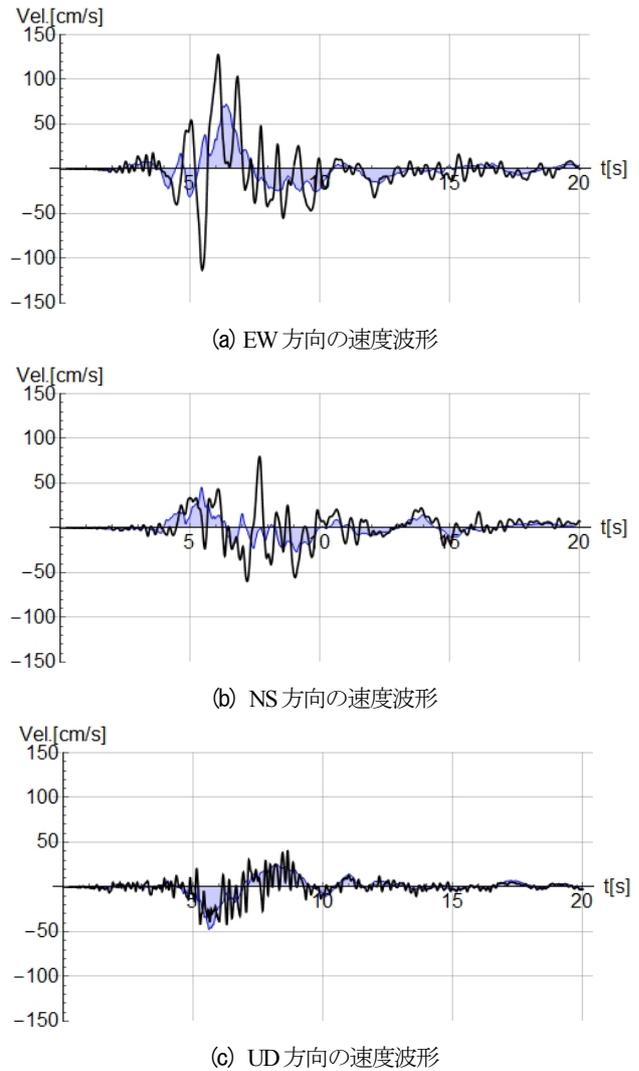


図-4 速度波形の比較 (黒：KiK-net 地上，青：KiK-net 地下)

3. 相対変位を評価する計算法

(1) 相対変位の発生原因

異なる振幅、振動数、位相で振動する 2 つの振り子を考える。それぞれを添え字 1, 2 で表せば相対変位は式(1)で計算できる。地中構造物の耐震設計では入力地震動に対し、地盤条件から振動数と変位振幅を決め、さらに進行波あるいは定常波の波長を仮定して 2 点の相対変位を与える計算を行っている。1/4 波長だけ離れた位置で位相差が $\pi/2$ となる計算となるが、振り子の問題として考えれば位相差のある相対変位を計算していることになる。

$$\Delta u = A_1 \sin(\omega_1 t + \theta_1) - A_2 \sin(\omega_2 t + \theta_2) \quad (1)$$

振り子の強制振動では入力振動数と固有振動数により振幅が変化する。地盤振動においても表層地盤の基本振

動モードに注目すれば1自由度の単振動であり、直下型の地震では振幅差による相対変位が地中構造物などの線状の構造物に作用すると考えられる。各地点の地盤条件に応じて固有周期と変位振幅を推定して相対変位が評価できれば、直下地震のような稀に発生する強い揺れに対する設計法の確立に役立てられる。

(2) 相対変位を評価する方法

一般式として示した式(1)を定式化する。地盤の振動は連続体の波動方程式により定式化できる。非線形化による剛性の変化も等価線形法により近似すれば線型方程式の解が利用できる。表層地盤をモデル化した波動方程式はモード解析により簡単化できる。これまでの研究では表層地盤の応答は高次モードが減衰の影響により目立たなくなるために、1次モードが支配的になることが知られている。1次モードの刺激係数を用いて入力地震動を設定し、単振動の振動方程式を計算すれば地表の応答を近似的に計算することができる。

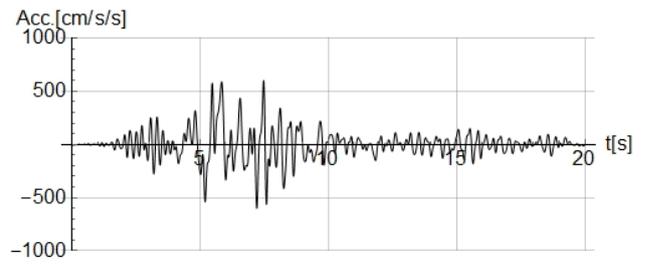
相対変位を計算する2地点の固有周期を T_1 , T_2 とする。1次モードの基準変位を q_1 , q_2 とすれば入力地震動 a に対する応答は減衰定数を h として

$$\ddot{q}_i + \frac{4\pi h}{T_i} \dot{q}_i + \left(\frac{2\pi}{T_i}\right)^2 q_i = -\beta a \quad (i=1,2) \quad (2)$$

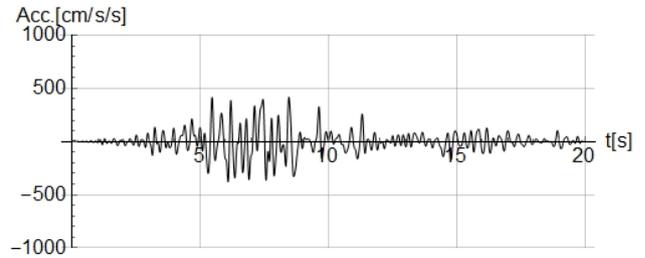
により計算できる。高次モードを無視する場合 q_i がそのまま変位応答となり、式(1)の単振動となる。2点の相対変位は変位応答の引き算により計算できる。ただし入力地震動 a は狭い範囲で一定とする必要がある。

益城に適用する場合、地盤条件のわかっている KiK-net の地表記録から凝灰岩層を基盤とする入力波が計算できる。この入力波に対する1自由度系の計算を2地点において行ってその差を計算すれば相対変位が計算できる。2章で述べた1Hzの振動成分は基盤入力波に含まれることになる。波形の最大値に注目するならば、基盤入力に対する応答スペクトルを用いて対象地点の速度応答を推定することができる。

図-5にKiK-net益城の表層剥ぎ取り計算をした入力地震動の加速度波形を示す。防災科学技術研究所が公開している地盤情報をもとにGL-15mの凝灰岩を基盤層とし、高圧ガス導管設計指針の資料に基づき、表層のせん断波速度の低下度を半分程度として剥ぎ取り計算を行った結果である。また減衰定数 $h=0.2$ とした速度応答スペクトルを図-6に示す。1質点系の速度応答を計算した結果に基盤速度を加えて絶対座標系に変換して最大値を計算している。短周期側では基盤入力波の速度に漸近し一定となっている。EW方向では1Hz付近で応答スペクトルが大きくなっている。



(a)EW方向の加速度



(b)NS方向の加速度

図-5 凝灰岩上面を基盤面とした入力波

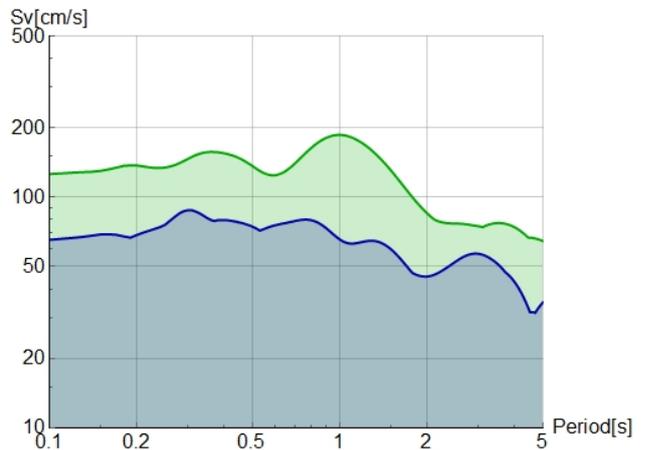


図-6 益城の地盤応答を評価する速度応答スペクトル
(緑:EW, 青:NS, $h=0.2$)

4. 微動計測による地盤評価

(1) 微動計測の検証

相対変位を推定するためには各地点の地盤情報が必要とされる。ボーリングデータが入手できれば最も効率がいいが、入手が困難な場合には微動計測によっても沖積層の振動特性を推定することができる。今回の研究の評価の対象はNTTの管路被害であり、マンホール区間で集計された被害データと対比する。そのために約100m間隔で地盤の固有周期が必要とされる。NTTのマンホール位置を基準としてその近辺で微動計測をすることとする。

今回使用した微動計はNewPIC(システムアンドデータリサーチ社製)であり、速度型の計測装置である。水

平 2 成分と鉛直成分の同時測定が可能であり、分解能 22Bit、サンプリングレート 100Hz の仕様となっている。1 回当たり 40.96 秒の計測を繰り返し行い、安定した波形を選別して H/V スペクトルを計算する。H/V スペクトルは水平 2 成分を別々に計算しさらにその平均を計算し 1 回分のデータとする。

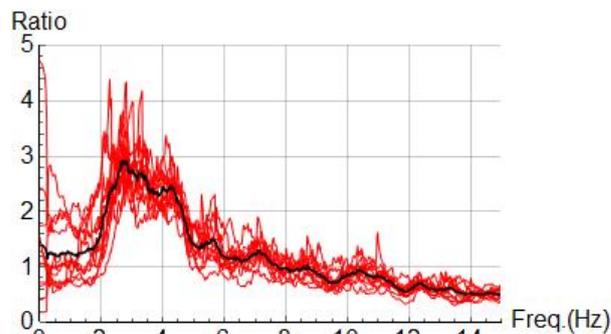
地盤条件がわかっている KiK-net 観測点付近において計測した結果を図-7(a)に示す。赤線が各ケースの H/V スペクトルであり、黒線が各ケースの平均である。スペクトルがピークとなるのは 2.7Hz であり、2Hz から 4Hz で比率が大きくなっている。一方、KiK-net 益城の公開された地盤データを用いて沖積層の周波数応答関数を計算したのが同図(b)である。地下 15m にある凝灰岩層よりも上の粘土層と砂層をモデル化し減衰定数は $h=0.2$ としている。図の黒線は GL-15m の凝灰岩の上面を基準にした場合であり、点線は粘土層と砂層の境界を基準にした場合である。2 つの結果を比べると沖積層の振動特性をよく表しているといえるが、砂層がかなり硬いために、軟弱な粘土層の応答もかなり含まれているのがわかる。

産業総合研究所では熊本地震後に益城町内の 3 箇所ボーリング調査を実施している。今回の分析に用いたボーリング箇所を図-1 に示している。データの提供を受けて、MSK1 と MSK3 の周辺でも同様に微動計測を行った。図-8 に 2 地点の微動の H/V スペクトルと地盤情報から計算した伝達関数を示している。計算は図-7 と同様に $h=0.2$ としている。MSK1 は家屋被害が大きかった宮園地区であり、2Hz の振動数が卓越している。伝達関数の計算は PS 検層の結果に基づいているが、よく一致している。また MSK3 は馬水川に近い場所でピークはやや不明瞭であるが、沖積層のピーク振動数に近い形状となっている。この地点もピークとなる振動数は凡そ一致している。

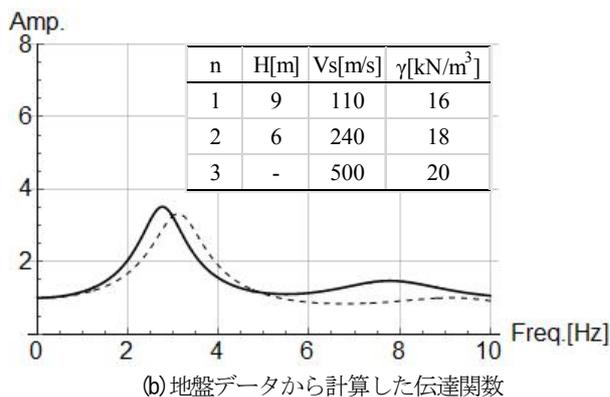
3 カ所の地盤情報と微動の H/V スペクトルの比較により、微動による H/V スペクトルから求められる卓越振動数は、凝灰岩から上の沖積層の固有振動数に近いものであると判断できる。

(2) 益城町内の微動計測結果

益城町内で 2 つの測線を設定して微動計測を行った。図-1 に案内図を示している。一つは県道 28 号線に沿った A ルートであり、馬水橋から下寺中までの区間を測定した。標高は 20m 程度で高低差は小さいが、寺迫交差点付近では谷超えとなっており、下寺中に近づく丘陵から平野に下がる地形である。もう一つは宮園から赤井にいたる B ルートであり、標高 30m 程度から徐々に下がり、川を 2 箇所横断して平野部を通過している。

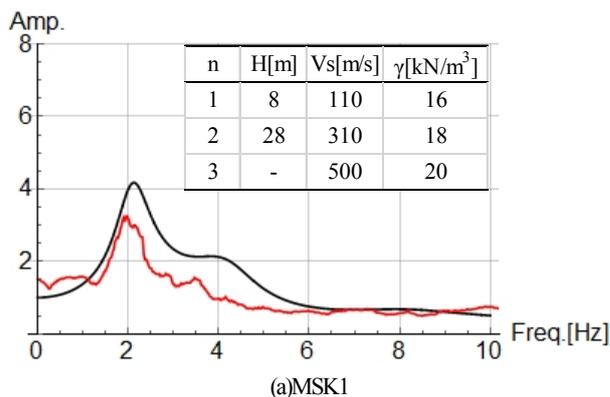


(a) H/V スペクトル

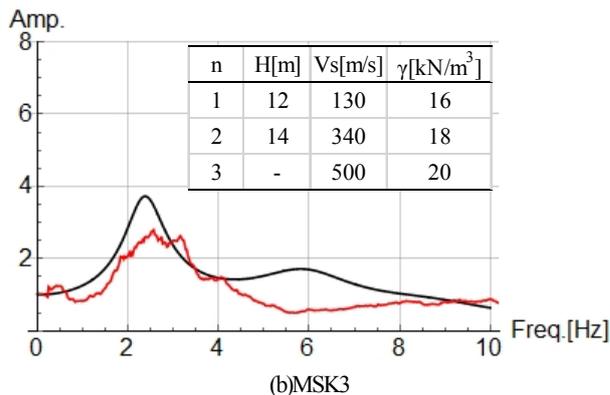


(b) 地盤データから計算した伝達関数

図-7 KiK-net 観測点の H/V スペクトルと伝達関数の比較



(a)MSK1



(b)MSK3

図-8 ボーリング地点の伝達関数と微動の H/V スペクトル

図-9(a)に A ルートの計測結果を示している。振動数を周期に変換した計測結果を示している。馬水橋付近では 0.6s であるが川から離れると 0.2s から 0.5s で変化している。木山から寺迫にかけては 0.4s から 0.5s となり、丘

陵の尾根を通過するあたりで周期が小さくなっている。下寺中では県道に沿った農地のあぜ道で計測した影響もあり1秒以上の周期となっている。

Bルートでの計測結果を同図(b)に示す。県道28号線よりも北側では0.4s以下で一定であるが、県道28号線あたりから低地側にかけて0.5sを超えるように変化している。低地を横断するあたりは0.3から0.4sであり、南側にある山に近づくにつれて周期が低下している。周期が大きくなるB5、B6は家屋被害の大きかった地区に相当している。

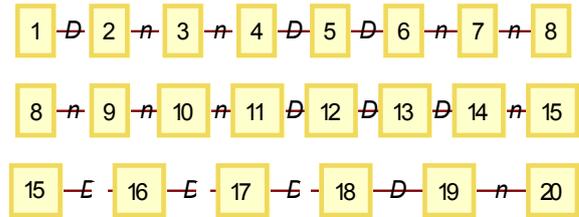
同図に示したのは微動計測によるピークとなった周期であり、地震時には非線形化の影響で長周期化することを考慮して地盤の相対変位を評価する。

5. 相対変位と管路被害の比較

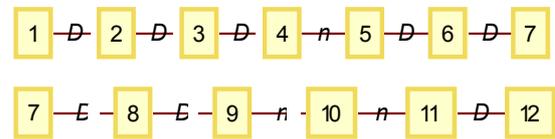
(1) NTTの管路被害

NTTでは熊本地震の発生後、橋梁区間に対しては第三者加害の未然防止と被害状況の把握を目的として強震エリアの全設備の目視点検を実施している。地下管路区間に対しては、被害状況の把握を目的として述べ700km以上に及び、テストピースによる管内空間の正常性確認試験と管内検査カメラによる点検が実施されている。被害調査結果の傾向分析によれば、震度6.3以上で被害率が急激に高くなること、後背湿地だけでなく、火山山麓地や扇状地、自然堤防でも被害率が大きかったこと、旧仕様の継ぎ手管の被害率が高いことが報告されている。益城町では多数の構造物に被害が発生しており、通信用地下管路においても多くの被害が発生している。県道28号や国道443号、県道57号付近に管路ルートが存在

しているが、県道28号と国道443号が交差する寺迫交差点から南側の被害が顕著であった。4章で述べた微動計測は被害の多く発生した地域を対象にした調査であり、NTTのマンホールの近くで計測を行っている。図-10に測点番号とその区間の被害の有無を整理している。記号“D”は被害あり、記号“n”は被害なしである。合計32点、30区間において約半数が被害ありとなっていて、極めて大きな揺れのときに被害とならない設備も存在したことが確認できる。



(a) Aルートの被害

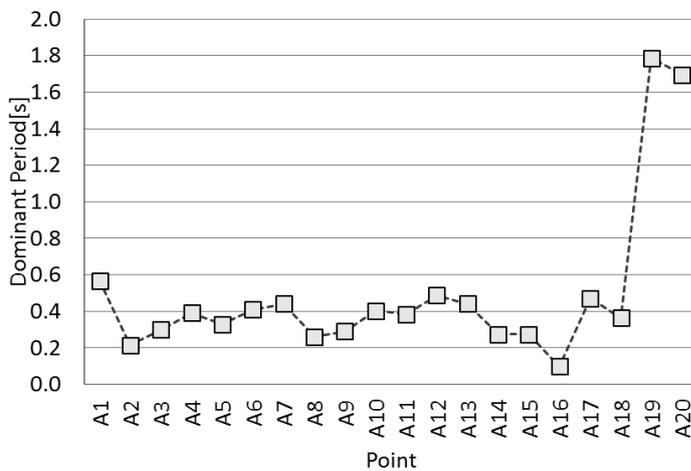


(b) Bルートの被害

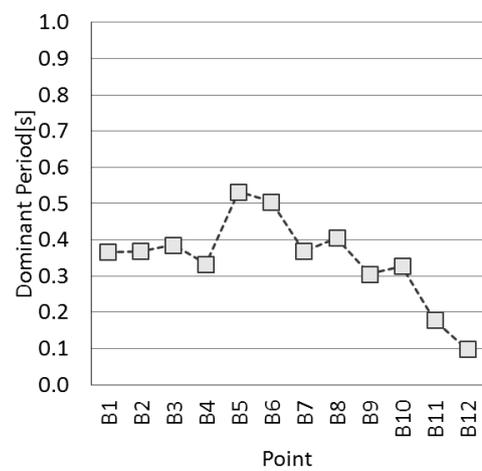
図-10 注目するルートの被災状況

(2) 管路被害と相対変位量の分析

微動の計測結果をもとにマンホール位置での揺れの大きさとマンホール間の相対変位を計算し、被害調査結果と対比する。マンホール位置での揺れの大きさは図-6に示した応答スペクトルにより計算する。強震時の表層地盤の非線形化の影響として周期を微動計測結果の2倍して2方向の振幅を決め、さらに水平2方向の速度振幅



Aルート



(b) Bルート

図-9 益城町内の微動の計測結果

をベクトル合成して当該地点の応答速度を計算する。

図-11 は応答計算の一例として B5 点の応答速度を示している。このポイントの常時微動による卓越周期は 0.53s であり、強震時には 2 倍になると仮定して 1.06s の固有周期をもつ 1 自由度系で近似して地表の応答を計算している。図中の赤線は入力地震動を速度に変換した波形であり、入力にやや遅れて地表が約 1s の周期で運動しているのが確認できる。同時刻に最大値にならないが、マンホールごとの揺れの大きさの尺度として 2 方向の応答速度の最大値のベクトル合成値を最大速度とする。

図-12 に最大速度の計算結果を示す。入力地震動が 1Hz の成分を多く含むため、地盤の卓越周期が 1s に近づくほど応答速度の振幅が増大する。馬水川に近い A1 や住宅被害が大きかった B5, B6 付近では卓越周期が長いために 200cm/s 程度の大きな速度であったと評価される。益城町役場は B2, B3 に相当するが 170cm/s 程度の評価結果となる。

次に式(2)を用いて 2 点間の相対変位を計算する。基盤入力波に対する 2 点の応答変位を計算しその差の最大値をベクトル合成した最大値を相対変位量としている。図-13 に計算結果を示している。この図は計算された 2 点間の相対変位と当該区間の推定速度と地盤固有周期差の積との関係をプロットしている。山崎他は地中構造物の耐震判定において速度振幅と固有周期差を利用する方法を提案しているが、両者は比例関係にあり、地表の速度振幅と地盤固有周期差が相対変位に影響していることが確認できる。

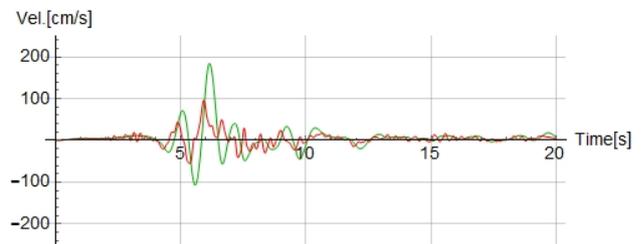
図-14 は横軸を 2 点の平均速度振幅、縦軸を相対変位とし、被害無しを○、被害ありを×としてプロットしている。2 点の相対変位が 10cm 以上になると被害となる傾向が高く、また応答速度の大きい領域では被害となる

割合が高い。特に Sv=150~180 cm/s のあたりの 10cm 以下の領域では○と×が混在しており、両者の見分けがつかなくなっている。

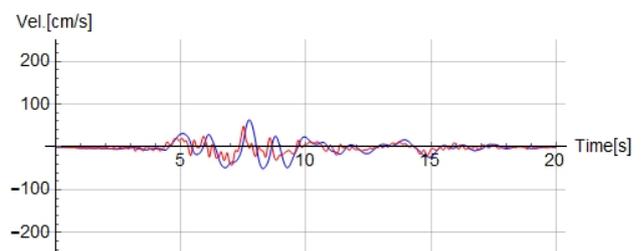
今回対象とした地区は火山性の丘陵地であり、微動の計測結果からも氾濫平野のように沖積層が厚く堆積した地盤ではない。0.3s から 0.5s 程度の卓越周期の違い以外の被災要因が大きかったことが示唆される。断層運動に伴う地表の変状も確認されている地域であり、また 1G を超える慣性力の影響も考えられる。

6. おわりに

2016 年熊本地震では非常に大きな地震動が観測され、住宅やインフラ設備が被害となった。地下に埋設された

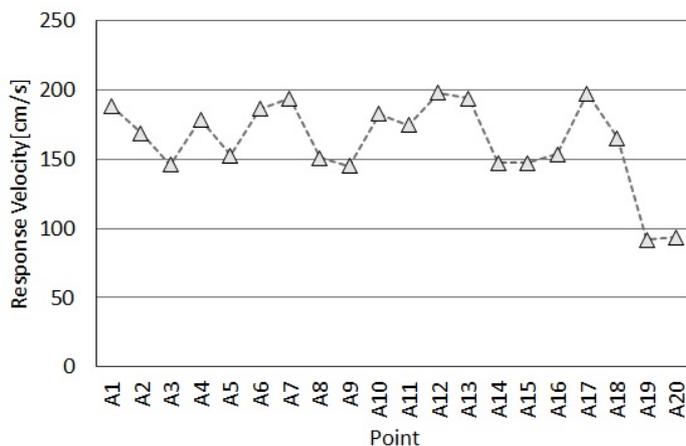


(a)EW 方向 (赤線：基盤面，緑：地表)

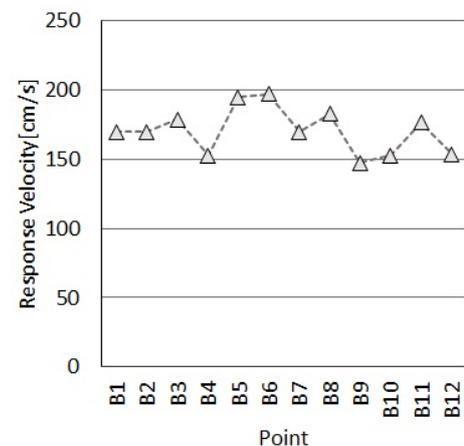


(b)EW 方向 (赤線：基盤面，青：地表)

図-11 応答波形の計算例 (B6 点, Tg=1.06s)



A ルート



(b) B ルート

図-12 注目するルートの最大速度の分布

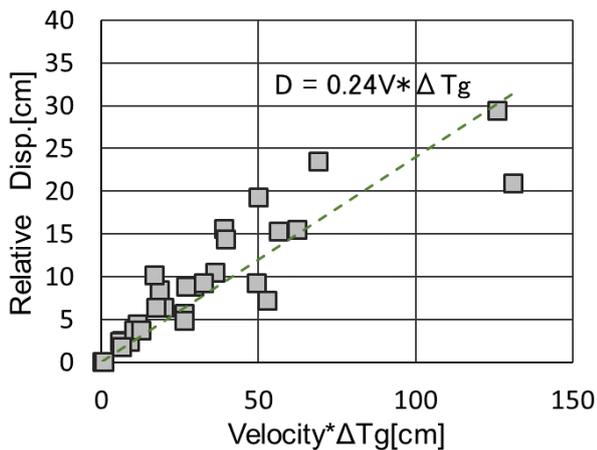


図-13 相対変位の計算結果

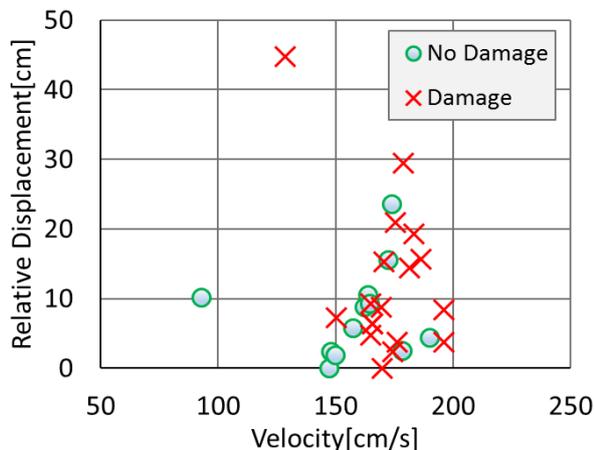


図-14 管路被害と相対変位の分析結果

ライフライン施設にも多くの被害が発生した。益城町においては通信地下施設に大きな被害が生じており、被災メカニズムの解明が望まれている。今回の研究は2地点間の固有周期差が地震時に相対変位を大きくすることに注目して、益城町の通信管路被害の分析を行っている。

ANALYSIS OF RELATIONSHIP BETWEEN RELATIVE DISPLACEMENT AND CONDUITS DAMAGE IN THE SEVERE DAMAGED AREA OF THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE

Takanobu SUZUKI

This paper presents the result on estimation of ground motion at Mashiki Town in Kumamoto prefecture where the strong ground motion hit and many infrastructures were damaged at the time of the 2016 Kumamoto Earthquake. Focusing on relative displacement and conduits damage, the relationship of them are analyzed. Using the SDOF model of surface layer based on the data from microtremor measurement, strong ground motions are simulated so as to evaluate relative displacement.

微動計測によりマンホール位置の揺れ特性を明確にし、地震観測データに基づいて各地点の相対変位を計算する方法を提案している。益城町内の注目した地区の微動計測の結果は概ね一様な振動特性であり、0.3s から 0.5s 程度の周期となっていた。地盤条件のわかっている KiK-net 観測点の揺れに基づき、各地点の相対変位の評価を行い、相対変位の大きい場合には被害となる割合が高くなることを確認した。しかし相対変位が小さい場合にもある程度の被害があることが判明し、相対変位以外の被害要因についても検討していく必要がある。

謝辞

この研究では防災科学技術研究所 KiK-net, 熊本県震度計の記録を利用しました。また産業技術総合研究所の地盤データを利用しました。関係各位に感謝します。

参考文献

- 1) 土木学会：2016年熊本地震被害調査報告書
- 2) 国土地理院：地理院地図（電子国土 Web）の色別標高図
- 3) 吉見雅行，秦吉弥，後藤浩之，細矢卓志，森田祥子，徳丸哲義：熊本県益城町の2016年熊本地震被害集中域におけるボーリング調査結果(速報)，日本活断層学会2016年度秋季学術大会予稿集，Paper No.P17, 2016.
- 4) 日本ガス協会：高圧ガス導管設計指針 資料5 レベル2地震動による非線形地盤応答の影響を受けたせん断弾性波速度 V_s の検討，pp.76-83, 2013.
- 5) 山崎 泰司，田中 宏司，岩田 克司，鈴木 崇伸：シールドとう道立坑接続部における突出現象の簡易判定手法に関する研究，構造工学論文集 A Vol.62A, pp.280-290, 2016.