

# 震源地域における強震動と地表変状の関係

鈴木 崇伸<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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 2016 年熊本地震の益城町の地表変状に注目して、地盤固有周期と推定地震動との関係を分析している。地震前後の通信マンホールの鉄蓋の移動量を計算した結果、剛体的な変位とともに場所による変位成分があることが判明した。場所に依存する変位成分を地盤固有周期あるいはそれに基づく推定地震動との関係を分析した結果、地盤固有周期が長く、堆積層が厚いと想定される地点の方が変位が大きくなる傾向が確認された。およそ 100m 間隔の平均ひずみを計算すると場所に依存する水平変位により高々 0.5% 程度の変状が発生したことが確認された。

**Key Words:** 2016 Kumamoto Earthquake, relative displacement, damage of conduits, micro tremor

## 1. はじめに

内陸型地震の震央付近では極めて大きな揺れが起こるとともに、断層変位に伴う地表の変状や表層地盤に生じる大きなせん断ひずみによる変状が起こることが知られている。地上構造物では揺れの大きさが被害の支配要因となり、基礎を含めた地下構造物では揺れに加えて地表付近の地盤の変状が被害の要因となる。地中に構築したネットワークを用いてサービスを提供する都市ライフライン施設では、重要度に応じて地震時においてもサービスの継続が望まれる。震央付近で起こる地表付近の変状を定量化して、地下構造物に影響する作用を明確にする必要がある。

2016 年熊本地震では日奈久・布田川断層帯に沿って大きな揺れが観測されるとともに、断層変位が確認され、震央付近にある益城町ではいたるところで地表の変状が現れた。阿蘇山の噴火に伴う溶岩台地に沖積層が堆積した地形において発生した現象を明らかにするデータを集積し、分析していく必要がある。久保寺他は地震前後の航空写真を用いて NTT のマンホール蓋の座標計算を行い、益城中心部の永久変位を定量化し、通信管路被害の分析を行っている。また鈴木他は久保寺他と同じマンホールに着目して微動計測を行い、推定した地盤固有周期を用いてマンホール位置の地震動推定を行っている。今回の報告は通信マンホール位置の永久変位ならびに強震動の分析結果に基づき、地表付近に起きた変状の傾向分析を行っている。計測された地盤の永久変位を基盤の剛体的な変位と地表付近の偏差成分に分解して、地盤固有周期、推定地震動と比較することにより、地表の変状

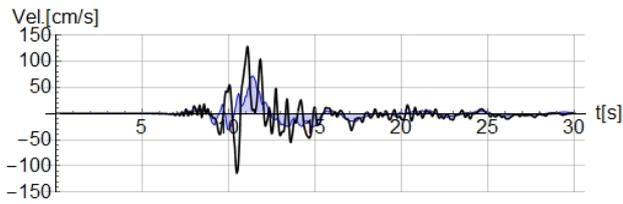
の発生傾向を分析している。

## 2. 益城の強震動の特徴

2016 年の地震発生時に益城町内には防災科学技術研究所の KiK-net 観測点 (KMMH016) と益城町役場内に自治体震度計が置かれていた。KiK-net 観測点には地中地震計も設置されており、地表とともに地下の岩盤の動きが計測されている。自治体震度計は建屋の 1 階に設置されており、建物の振動の影響も含んだデータとなっているが、震度 7 の貴重な記録となっている。

公開されたデータを用いて益城の強震動の分析を行う。図 1 に KiK-net の本震データから速度波形、変位波形を計算した結果を示す。ハッチを付けた波形は地中の記録、黒線は地表の記録となっている。永久変位成分を含む変位波形の計算は、最終変位が一定値に収束するように誤差配分をして計算している。地中の速度波形は低周波成分が主体であり、地表の速度波形は地中の低周波成分に水平方向は 1Hz 程度の成分が重なった形状であり、上下方向は 5Hz 程度の高周波成分が重なった形状となっている。変位波形を見ると積分誤差はあるものの、北西向きの水平永久変位と地盤沈下があったことが確認できる。EW 方向の変位は地表と地下でおよそ一致するが、NS 方向は地下の変位に地表の変位が追随していない結果となっている。ただし上下方向は沈下し始める 10 秒付近の誤差が大きくなっている。

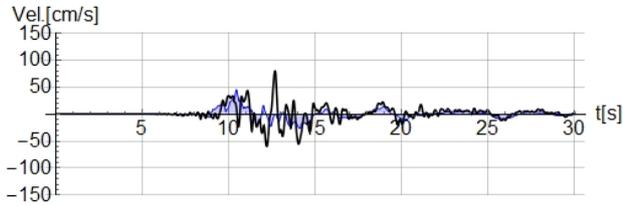
図 2 は自治体震度計のデータを用いて同じ計算を行った結果である。上下の位置はずれているが参考までに時



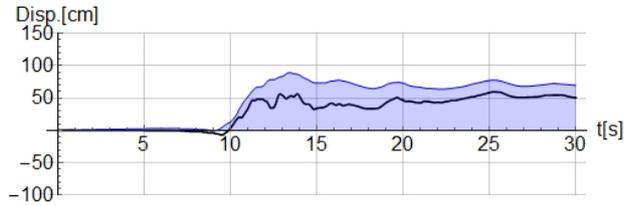
(a) EW 成分の速度波形



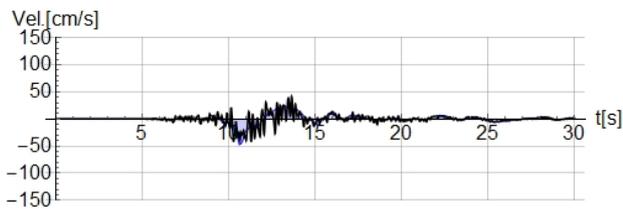
(d) EW 成分の変位波形



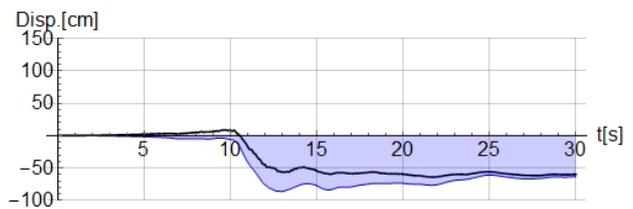
(b) NS 成分の速度波形



(e) NS 成分の変位波形

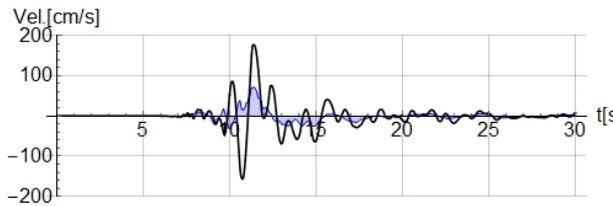


(c) UD 成分の速度波形

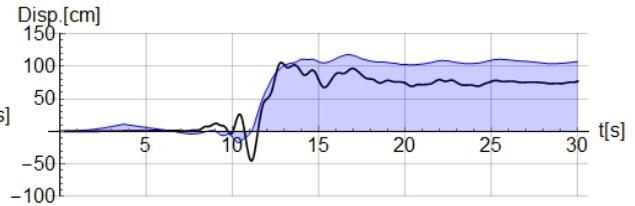


(f) UD 成分の変位波形

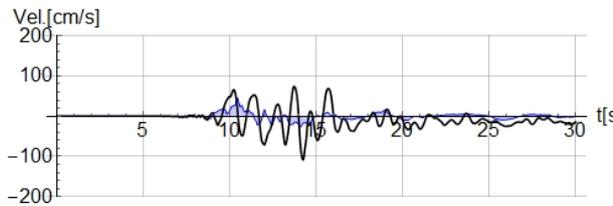
図 1 KiK-net 益城の記録



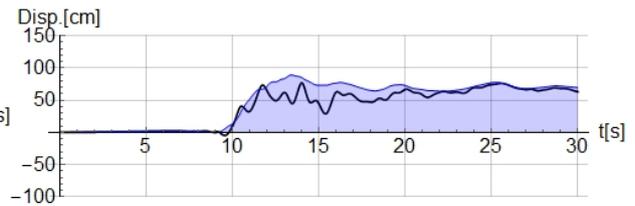
(a) EW 成分の速度波形



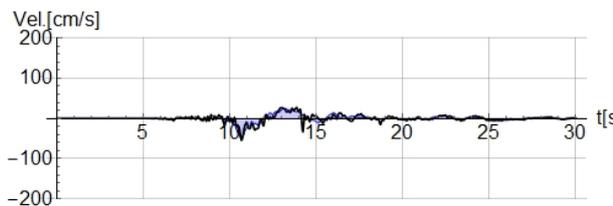
(d) EW 成分の変位波形



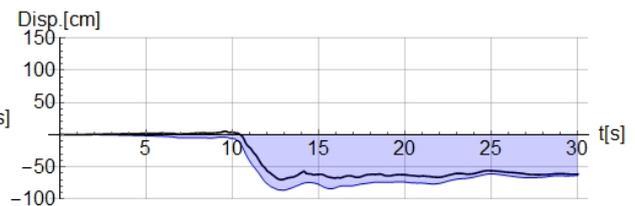
(b) NS 成分の速度波形



(e) NS 成分の変位波形



(c) UD 成分の速度波形



(f) UD 成分の変位波形

図 2 益城町役場の記録

刻を合わせて KiK-net 益城の地中の波形もハッチを付けて表示している。町役場の方が揺れが大きく EW 方向で

2m/s 近い速度となっているが、地中の低周波の成分に 1Hz 程度の振動が重なった特徴はよく似ている。UD 方

向は地中の記録とほぼ重なった波形となっている。建屋の振動の影響が大きいと考えられるが、断層変位の影響を含んだ波形となっている。変位波形を見るとEW方向は地下の動きに追随しておらず、NS方向は同じ変位に収束している。UD方向では誤差はあるものの、ほぼ同じ波形となっている。

以上の分析により、震央域の強い揺れは基盤の動きに地表付近の共振あるいは建物の共振の影響が重なっており、地下の2倍から3倍程度の振幅になっていることが確認された。地下の動きに永久変位成分がある場合には地表も同じように動くものの、まったく同じではなく、地下に追随しない動きをすることも確認された。その原因として表層地盤に大きなひずみが生じて塑性化して残留変位が生じることが考えられる。

### 3. 益城の地表変状と地震動

#### (1) 益城の地表変状の分析

久保寺他は、震災前後の航空写真において直径 1m 程度の NTT のマンホール蓋が判読できることに注目して、画像解析によりマンホール蓋の 3次元座標を計算して管路被害の分析を行っている。図3は久保寺他の水平変位の推定結果を地図上に表している。図には示さないが上下方向の変位も計算されている。

全体的に北西向きに移動をしており、最大水平変位はN8の1.5mであり、最小水平変位はT2の0.5mとなっている。水平変位が小さいT2、T3、T4は秋津川に沿った低地であり、台地部とは動き方が違うのが確認できる。移動量の推定精度は0.1m程度と考えられるが、台地部においても数10cmの変位の差が生じていることがわかる。

ここで基盤の動きを推定してみる。計測した3方向の変位の平均をこの地区の基盤の変位量と考える。表1に結果を示す。水平変位量はEW方向0.96m、NS方向0.47m、沈下量は0.83mとなり図1、図2で示した変位の計算結果とおおよそ整合する。

この基盤の動きと地表の計測結果の差を計算し、偏差変位量とする。図4に水平方向の偏差変位量の計算結果を示す。EW方向に大きく、NS方向に小さい結果となり、基盤の変位の方向に散らばっている。NS方向で約0.5mとなっているのはT3ポイントであり、秋津川沿いの点である。このデータを除けば、基盤変位の半分以下の変位量となっている。計測ポイントであるマンホールはおおよそ100m間隔であり、地表の変状により約0.5%のひずみが地中構造物作用することが確認された。

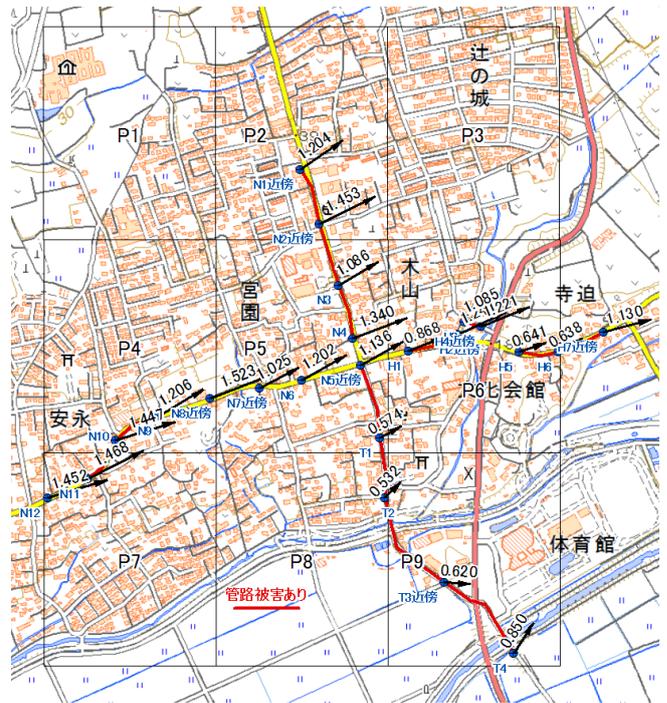


図3 マンホール移動量の計算結果

表1 マンホール移動量の平均

NS方向の変位量の平均	0.467m
EW方向の変位量の平均	0.956m
水平変位量の平均	1.064m
UD方向の変位量の平均	-0.827m

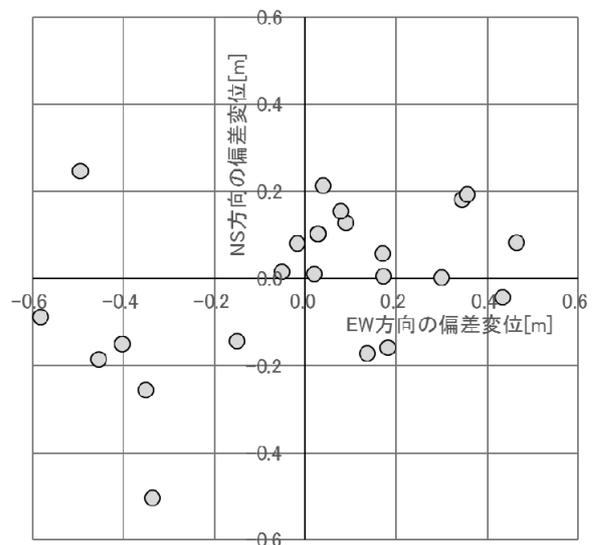


図4 水平方向移動量の偏差

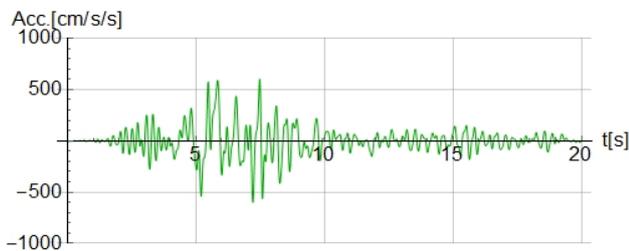
#### (2) 地震動の推定

鈴木他は前述の久保寺他の計測したマンホール付近で微動計測を行い、微動のHVスペクトルの卓越振動数から地盤固有周期を推定している。強震時に長周期化することを考慮して地盤応答解析を行い、マンホール位置

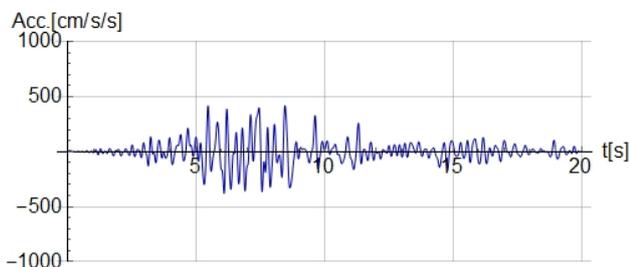
の地震動推定を行っている。入力地震動は KiK-net 益城の表層地盤のボーリングデータを用いて GL-15m の凝灰岩面の波形を計算している。この凝灰岩面の推定地震動を図 5 に示す。KiK-net の記録から表層の影響を取り除いた波形となっている。

この波形を入力波として地盤固有周期を変化させて応答スペクトルを計算する。絶対加速度の振幅の最大値を計算したのが図 6(a)、絶対速度の振幅の最大値を計算したのが図 6(b)、応答変位の最大値を計算したのが図 6(c)である。大振幅の入力であり、減衰定数  $h=0.2$  とした結果である。EW 方向のスペクトルを緑、NS 方向のスペクトルを青で表示している。

同図(a)の加速度応答スペクトルは入力波の 2~3 倍程度になっており、地盤固有周期によらず、大きな加速度であったことが想定される。同図(b)の速度応答スペクトルには周期特性があり、特に EW 方向の周期 1 秒付近にピークがある。2m/s 程度の速度振幅となり表層地盤の影響により大きく増幅されることになる。同図(c)の応答変位スペクトルは単調な右上がりの曲線となる。地盤固有周期が大きいほど変位振幅が大きくなる。応答変位は基盤面と地表の相対変位であり、層厚で割れば平均せん断ひずみとなる。周期 1 秒のとき応答変位は約 0.2m であり、表層厚を 20m とすればせん断ひずみは 1% 程度となる。地盤が塑性化して残留変位を生じるレベルの変形といえる。

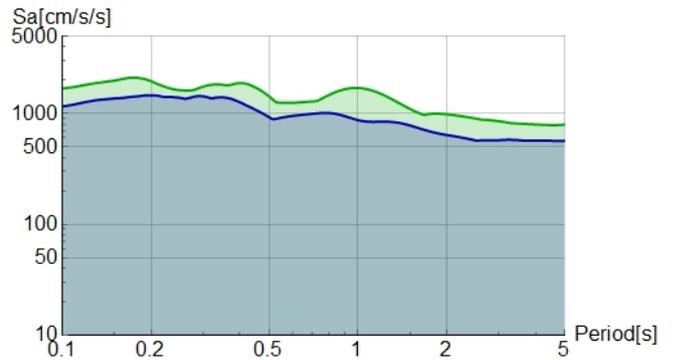


(a) EW 方向の入力波

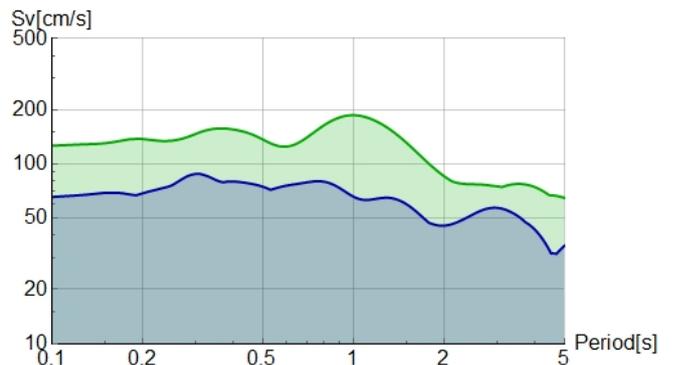


(b) NS 方向の入力波

図 5 KiK-net から計算した基盤入力



(a) 絶対加速度



(b) 絶対速度



(c) 応答変位

図 6 応答スペクトルの計算結果

#### 4. 推定地震動と地表変状の比較

##### (1) 個別の点の動き

地表の変状を剛体的な変位成分を取り除いた偏差変位量で定量化してその特徴を分析する。図 4 に示した水平 2 成分の偏差変位量と上下方向の偏差変位量を用いる。表 1 にマンホール毎の地盤固有周期  $T_g$ 、偏差水平変位量  $D_{ph}$  と偏差上下変位量  $D_{pv}$ 、図 6(c) を用いて水平 2 成分をベクトル合成した応答変位  $D_s$  を示している。

図 7 に応答変位  $D_s$  と偏差水平変位量の関係をプロットしている。明確な相関は見られないが、沖積低地に該当する T2, T3, T4 の 3 点を除けば水平偏差量に関しては右上がりの傾向がある。また上下方向の偏差変位量に関し

表2 観測点毎の計算結果

POINT	地盤固有周期 Tg[s]	水平偏差変位 Dph[m]	鉛直偏差変位 Dpv[m]	応答変位 Ds[m]
N1	0.366	0.217	-0.136	0.126
N2	0.369	0.389	0.255	0.126
N3	0.386	0.084	0.151	0.142
N4	0.333	0.299	0.594	0.099
N5	0.532	0.107	-0.079	0.294
N6	0.291	0.156	-0.248	0.082
N7	0.260	0.055	-0.264	0.077
N8	0.441	0.471	0.087	0.196
N9	0.410	0.174	-0.945	0.16
N10	0.330	0.240	-0.598	0.099
N11	0.391	0.405	0.224	0.142
N12	0.299	0.435	-0.117	0.086
H1	0.383	0.208	0.387	0.134
H2	0.488	0.179	-0.086	0.254
H3	0.441	0.021	0.401	0.196
H4	0.275	0.170	0.428	0.077
H5	0.273	0.434	0.309	0.077
H7	0.098	0.218	0.247	0.017
T1	0.505	0.492	-0.180	0.275
T2	0.369	0.590	0.102	0.126
T3	0.405	0.606	-0.777	0.151
T4	0.306	0.553	-0.015	0.09

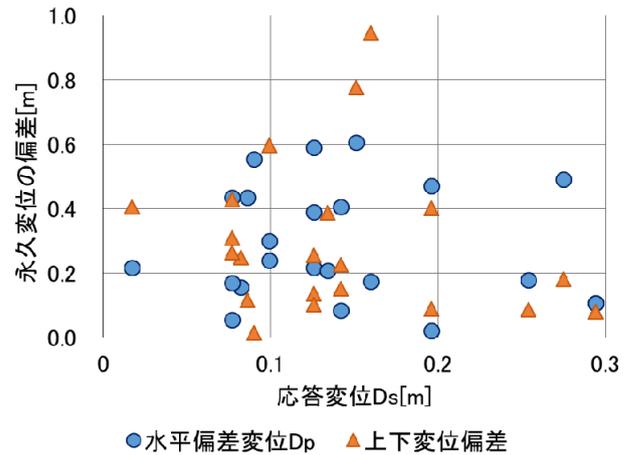


図7 応答変位と変状変位の関係

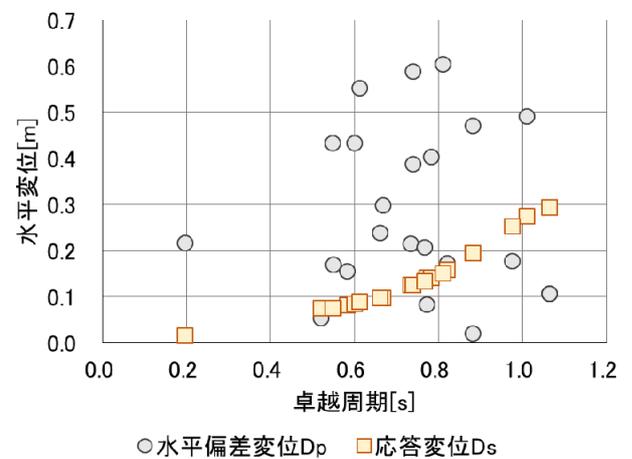


図8 卓越周期と水平変位の関係

て応答変位との相関は見られない。

図8に地盤固有周期と水平偏差変位  $D_p$ 、応答変位  $D_s$  の関係をプロットしている。応答変位スペクトルは周期に対して単調増加のグラフであり、応答変位の計算結果も固有周期に対して単調増加となっている。水平偏差量が  $0.5\text{m}$  以上の3点は台地部と異なる動き方をした  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  であり、この3点を除けば、水平偏差量もばらつきは大きいものの右上がりの傾向がある。地盤固有周期が長いほど応答変位が大きくなり、また地表の変状の代表値とした水平偏差量も大きくなる事が確認された。大きな応答変位によって生じた地表付近のひずみが残留変位に関係していると考えられる。

## (2) 隣接する2点間の動き

地盤変状が地中構造物に及ぼす影響を考えると2点間の相対変位が重要になる。特定の点が大きく移動しても周辺も同じように移動すれば地中構造物は平行移動するだけで変形は小さくなる。一方2点間の相対変位が大きい場合には、地中構造物に大きな力が作用すること

になり、被害が起こりやすくなる。

表3は隣接するマンホール間の相対変位の計算結果を示している。MH間の水平永久変位は地震前のMH間距離と地震後のMH間距離を航空写真から求めた座標値から計算し引き算をした結果である。プラスは伸びたことを、マイナスは縮んだことを示している。MH間の鉛直永久変位は地震前の2点の高低差と地震後の高低差を引き算した絶対値である。2点間で見た場合に  $1\text{m}$  近い水平変位あるいは鉛直変位が生じているのがわかる。

MH間の最大変位は2点のMH位置で推定した最大変位の平均値としている。地盤固有周期におよそ対応した値となる。MH間の相対変位は2点のMH位置で計算した2方向の変位波形から相対変位を計算し、そのベクトル合成した最大値を示している。2点の固有周期が同じであるならば波形は同一になり、相対変位は0になる計算となる。MH間の最大変位を除いて2点間の相対変位となり、2点間の距離によって影響も変化すると考えられるので2点間の距離で割って無次元量として分析を進める。それぞれ永久水平ひずみ、永久鉛直ひずみ、動的

表3 隣接2点間の計算結果

区間	MH間の水平永久変位	MH間の鉛直永久変位	MH間の最大変位 [m]	MH間の相対変位 [m]
N1-N2	0.132	0.391	0.126	0
N2-N3	-0.009	0.104	0.134	0.024
N3-N4	0.163	0.443	0.121	0.064
N4-N5	-0.172	0.673	0.197	0.235
N5-N6	-0.066	0.169	0.188	0.105
N6-N7	0.159	0.016	0.080	0.024
N7-N8	-0.519	0.351	0.137	0.155
N8-N9	0.343	1.032	0.178	0.044
N9-N10	0.064	0.347	0.130	0.088
N10-N11	-0.387	0.822	0.121	0.064
N11-N12	0.033	0.341	0.114	0.088
N5-H1	-0.242	0.466	0.214	0.025
H1-H2	0.368	0.473	0.194	0.156
H2-H3	-0.111	0.487	0.225	0.084
H3-H4	0.147	0.027	0.137	0.153
H4-H5	-0.291	0.119	0.077	0
H5-H7	0.485	0.097	0.047	0.072
N5-T1	0.162	0.101	0.285	0.037
T1-T2	-0.107	0.282	0.201	0.193
T2-T3	0.482	0.879	0.139	0.037
T3-T4	-0.650	0.762	0.121	0.092

水平ひずみとする。

図9に最大変位と永久ひずみの関係を示す。表層厚が不明であるためひずみに換算できないが、鉛直軸に沿ったせん断ひずみと水平な2点間のひずみの関係を表している。MH間の最大変位が大きいほど永久ひずみも大きくなっており、強い揺れにより地盤が塑性化して2点間が水平、鉛直両方向にずれたと考える。特に上下方向は距離の短いデータの影響もあり、ひずみが大きく計算されている。

図10は地盤固有周期との関係調べた結果である。同図(a)は地盤固有周期と対応させた結果である。地盤固有周期は2点の平均値とし、強震時を想定して表2の周期の計測結果を2倍して表記している。動的ひずみは地盤固有周期と相関があり、固有周期が長いほど応答変位も大きくなり、相対変位も大きくなるためひずみが大きく計算される。一方永久ひずみは0.4%以上の2点を除けば相関がみられるがもう少し詳細な検討が必要とされる。同図(b)は2点間の地盤固有周期差と対応させた結果である。動的相対ひずみは地盤固有周期差と相関が高く、ほぼ比例関係にある。一方永久水平ひずみは地盤固有周

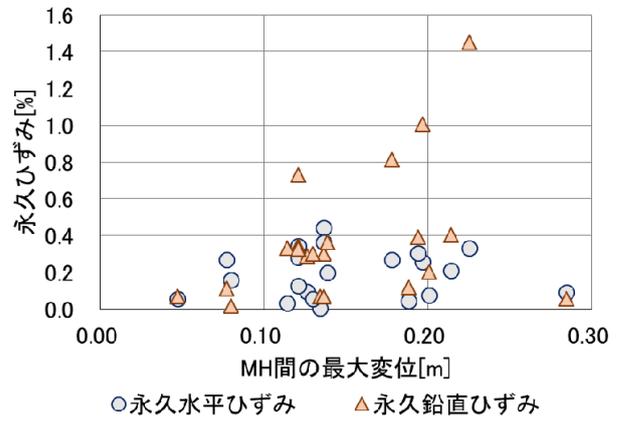
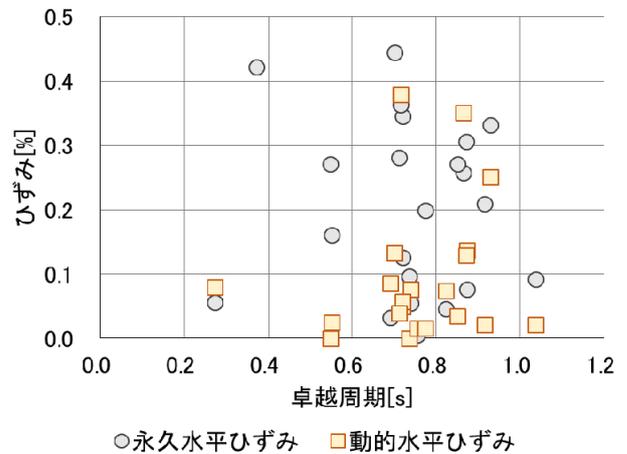
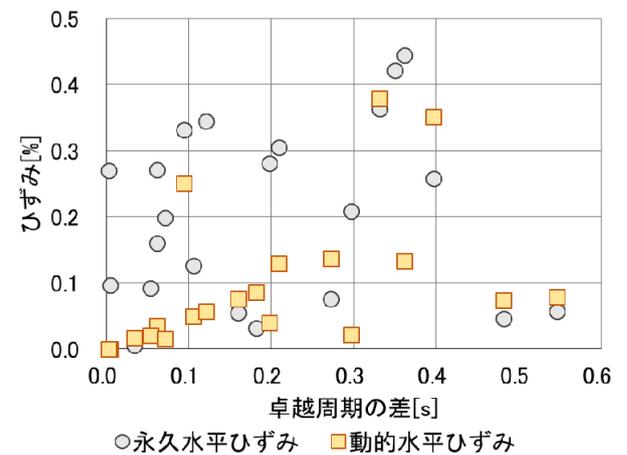


図9 最大変位と永久ひずみの関係



(a) 卓越周期



(b) 卓越周期の差

図10 卓越周期と地盤ひずみの関係

期差との相関は低いといえる。

隣接する2点間の相対変位に関しても、地盤固有周期が長く最大変位が大きくなるほど永久変位が大きくなることを確認された。ただし地盤固有周期差に関しては明確な相関は見られなかった。NTTでは管路マンホールの復旧工事を進めており、今回の分析結果と合わせて震源地域の強震動と地表変状が管路マンホールに及ぼす作

用の定量化を行う予定である。

## 6. おわりに

内陸地震の震源地域でみられる地盤変状に関して、2016年熊本地震の益城町の計測結果ならびに推定計算の結果に基づいて分析を行った。益城町では熊本地震の本震において断層変位により北西方向への移動と沈下が発生し、また場所によって震度Ⅶの揺れであったことが観測されている。本報告ではNTTのマンホール位置の地震前後の移動量を航空写真から計算し、また同じマンホール位置において行った微動計測による地盤固有周期の計算結果に基づき、地表付近の変状に関する傾向分析を行っている。地表付近の変状としてある程度広い範囲で同じように移動する成分を取り除いて、100m程度の分解能で変位とひずみを計算している。

個別の点の変位量の分析結果は剛体的に動いた量の半分程度の移動があることがわかり、水平の移動量は地盤固有周期が長いほど大きくなる傾向が確認できた。上下方向は周期との関連は低い。また隣接点間のひずみの分析結果も地盤固有周期が長いほどひずみが大きくなることが確認できた。この原因として応答変位が大きくなることが考えられ、表層付近に発生する大きなひずみが残留変位として残るために地表の変状を引き起こしている

と考えられる。NTTの復旧工事が進んでいる最中であり、被害との対応までは今回の研究では扱っていないが、被害状況が最終的にまとめられた段階で地表変状との関連の分析を行う予定である。

## 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。貴重な記録を公開した関係各位に感謝します。

## 参考文献

- 1) 気象庁ホームページ：主な地震の強震観測データ，熊本県熊本地方の地震
- 2) 防災科学技術研究所ホームページ：強震観測網（K-NET, KiK-net）
- 3) 久保寺貴彦，鈴木崇伸，田中宏司，奥津大：2016年熊本地震の震源地におけるマンホール変動量の推定と管路被害の分析，土木学会論文集 A1(構造・地震工学) Vol. 74, 2018.
- 4) 鈴木崇伸，田中宏司，奥津大：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，土木学会論文集 A1(構造・地震工学) Vol. 74, 2018.

## ANALYSIS OF RELATIONSHIP BETWEEN STRONG GROUND MOTION AND GROUND DEFORMATION IN THE AREA NEAR EPICENTER

Takanobu SUZUKI

This paper presents the result of analysis of ground deformation which occurs in the area near epicenter. The ground deformation has two components, one is rigid body displacement by the fault movement, the other is random deformation by failure of surface layers. The ground deformation in Mashiki Town measured by aerial photogrammetry is compared with natural period of ground or amplitude of ground displacement. It becomes clear that permanent ground deformation is larger in the area with thick soft layers.