

# 2016年熊本地震において益城町中心部の地盤特性が 強震動に与えた影響

構造研究グループ 主任研究員 新井 洋

## 目 次

- I はじめに
- II 益城町中心部の地盤特性
  - 1) 微動のアレイ観測とボーリング調査
  - 2) 微動の分散特性と H/V スペクトル
  - 3) 分散特性と H/V スペクトルの同時逆解析から推定した地盤の S 波速度構造
  - 4) 土の動的変形特性
- III 益城町中心部の地盤の地震動増幅特性
  - 1) 1次元等価線形解析による試算
  - 2) 土の動的変形特性の違いが地盤応答に与える影響
- IV 益城町役場の地震応答と動的相互作用効果
  - 1) 上部構造－杭基礎－地盤連成系の地震応答解析モデル
  - 2) 入力地震動および解析結果
- V まとめ
  - 謝辞
  - 参考文献

## I はじめに

2016年熊本地震による益城町中心部の甚大な建物被害のメカニズムを解明する上で、この地域の地盤特性の正確な把握が不可欠である。しかし、この地域の地盤特性に関する信頼性の高い情報は限られている。そこで、益城町中心部の5地点において、微動アレイ探査を行って深さ80m程度までの地盤のS波速度構造を推定した。また、ボーリング調査を行って土の非線形性状を把握した。これらの結果に基づく各地点の地盤および益城町役場の杭基礎建物－地盤連成系の地震応答解析を行って、この地域の地盤特性が熊本地震の強震動に与えた影響と建物と地盤の動的相互作用が役場の強震記録に与えた影響を検討した。なお、本稿は、文献1-3を改変して再構成したものである。

## II 益城町中心部の地盤特性

### 1) 微動のアレイ観測とボーリング調査

微動のアレイ観測は、図1に●印で示すSite K、Z、O、M、Aの5地点で、2017年1月20-23日、2月11日、6月13日の日中に行った。この図は、日本建築学会九州支部が行った悉皆調査のうち倉庫や神社等を除く2340棟の建築物の大破率の分布<sup>4)</sup>に、アレイ観測を行った5地点の位置を加筆したものである。アレイ観測を行った5地点は、建築物の大破率が0%から75%以上の地域まで、全体的にカバーするよう選ばれている。ここで、Site Kは防災科学技術研究所の強震観測網KiK-net 益城観測点<sup>5)</sup>の近傍（辻の城公園）、Site Oは益城町役場<sup>6)</sup>の敷地内、Site M、Aは吉見ら<sup>7)</sup>がボーリング調査を行った地点の近傍である。

表1 微動観測アレイの形状と等価半径

Site	アレイの形状	アレイの等価半径 (m)
K	五角形+中心1点	2、5、10、20、40
Z	五角形+中心1点	2、5、10
O	五角形+中心1点	2、5、10、20、40、65
M	五角形+中心1点	2、5、10、20
	4角形+中心1点	35、65
A	五角形+中心1点	2、5、10、20
	3角形+中心1点	85、160

各地点における微動観測アレイの形状と等価半径を表1に示す。このうち、Site K、O、M、Aにおける最大アレイのセンサ配置を図2に○印で示す。各アレイとも、センサには見かけ固有周期1sの鉛直動速度計を用い、アレイごとに微動を同時観測した。また、各地点とも、周期0.1s程度以下の短周期領域では微動のパワーが不足するため、地表面の人力加振により生じる鉛直動をセンサ間隔0.5m×6台の直線アレイにより同時観測した。観測波形は増幅後、ローパスフィルタ(遮断周波数25Hzまたは100Hz、-12dB/Oct)を通し、サンプリング周波数100-500HzでA/D変換(24bit)した。記録波形が定常性を保っている区間を選び、1024ポイントのデータを20-60セット程度作成して、以後の解析に用いた。

ボーリング調査は、2017年1月26-28日、1月30日-2月8日、11-12日、16-17日の日中に行った。Site Kでは深さ60mまでのボーリングと標準貫入試験、PS検層(深さ14m以深はサスペンション法、それ以浅はダウンホール法)、乱さない試料採取(粘性土×2、砂質土×1)を、Site Zでは深さ15mまでのボーリングと乱さない試料採取(粘性土×1、砂質土×1)を、Site Oでは深さ19mまでのボーリングと乱さない試料採取(粘性土×2、砂質土×1)を、Site Mでは深さ13mまでのボーリングと乱さない試料採取(粘性土×1、砂質土×1)を、Site Aでは深さ15mまでのボーリングと乱さない試料採取(粘性土×1、砂質土×1)を、それぞれ行った。図2に、Site K、O、M、Aのボーリング調査位置を■印で示す。なお、Site K、Z、M、Aでは無水掘りボーリングの孔内水位を計測しており、その深さは14、3.0、1.6、0.0(m)であった。

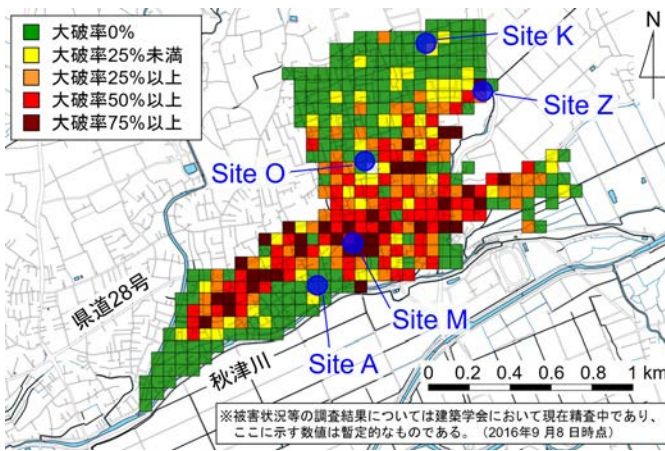


図1 益城町中心部における建築物の大破率<sup>4)</sup>と微動アレイ観測地点(Site K、Z、O、M、A)

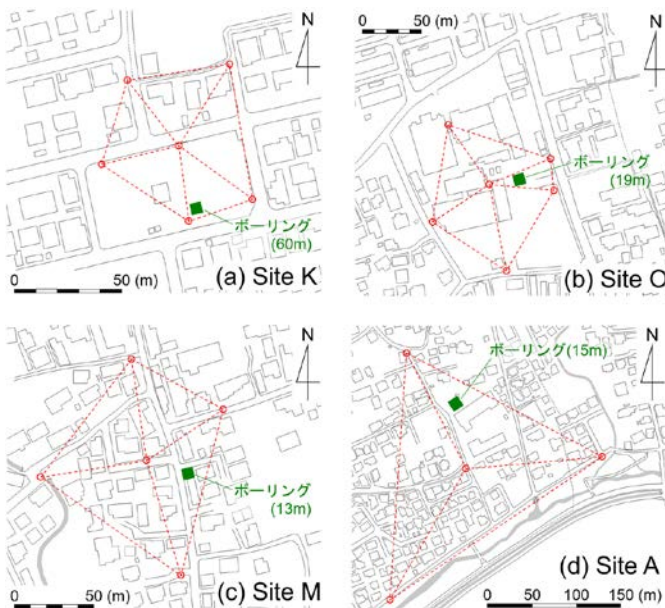


図2 Site K、O、M、Aにおける最大アレイのセンサ配置とボーリング調査位置

## 2) 微動の分散特性とH/Vスペクトル

得られた鉛直動データセットに対して最尤法によるF-kスペクトル解析<sup>8)</sup>を行った。この際、クロススペクトルの算定にはFFT(高速フーリエ変換)およびブロック平均法<sup>9)</sup>を用い、クロススペクトル逆行列の計算はGauss-Jordan法(対角項の人為的減衰1%)によった。Site Kで得られた鉛直動のF-kスペクトルの例を図3に示す。F-kスペクトルには、比較的明瞭な単一ピークが卓越する場合が多く、複数ピークが見られる場合でも、それらの波数ベクトルの大きさ(即ち位相速度)は同程度であった。他の4地点でも同様の傾向が確認された。なお、F-kスペクトルは、その最大ピークに対応する波長(=周期×位相速度)が観測アレイの最小センサ間隔の2倍から最大センサ間隔の3倍までの範囲<sup>9)</sup>にある場合を有効とした。

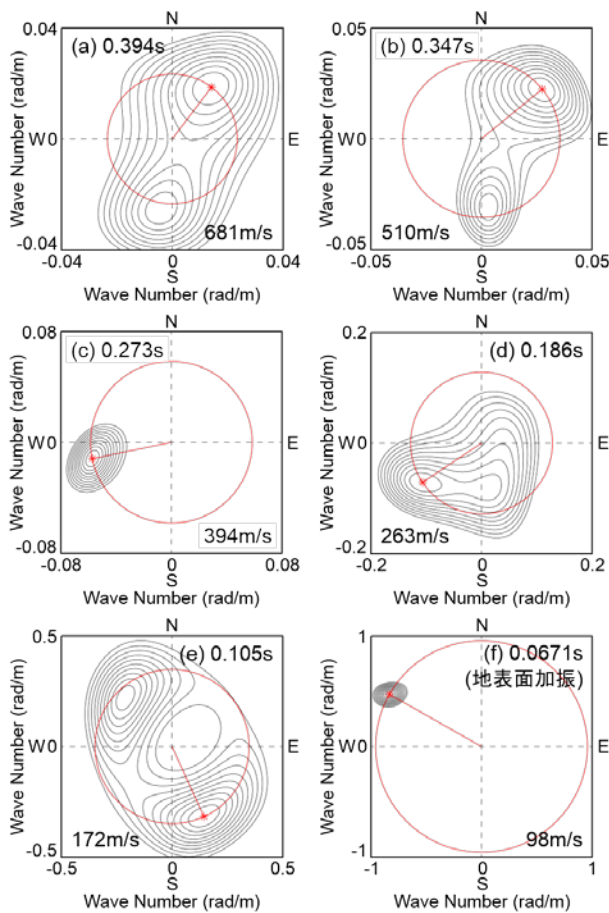


図3 鉛直動のF-k スペクトルの例 (Site K)

Site K、O、M、A の F-k スペクトルの最大ピークから求めた鉛直動の周期一位相速度の関係 (分散曲線) を図 4 に○印で示す。いずれの地点でも表面波特有の分散性 (周期によって位相速度が変わる性質) が確認される。Site K、Z、O、M、A で得られた位相速度の最大値は 680、470、730、790、920 (m/s)、波長の最大値は 270、110、250、400、640 (m) である。図 4 の下部には、Site K、O、M、A のアレイ中心で得られた微動の H/V スペクトル (水平動スペクトルは直交 2 成分の 2 乗和平方根) を○印で示す。図では、観測に用いた微動計の性能から有効と判断される周期範囲のデータを示している。いずれの地点でも H/V スペクトルには比較的明瞭な周期特性が認められ、スペクトルのピークとなる周期は、Site K、O で 0.4-0.5s、Site M、A で 0.8-0.9s となっており、県道 28 号線の北側と南側の地点で大きく異なっている。なお、Site Z での観測結果は、紙面の都合から省略するが、分散曲線・H/V スペクトルともに、Site K でのそれらと、よく似ている。

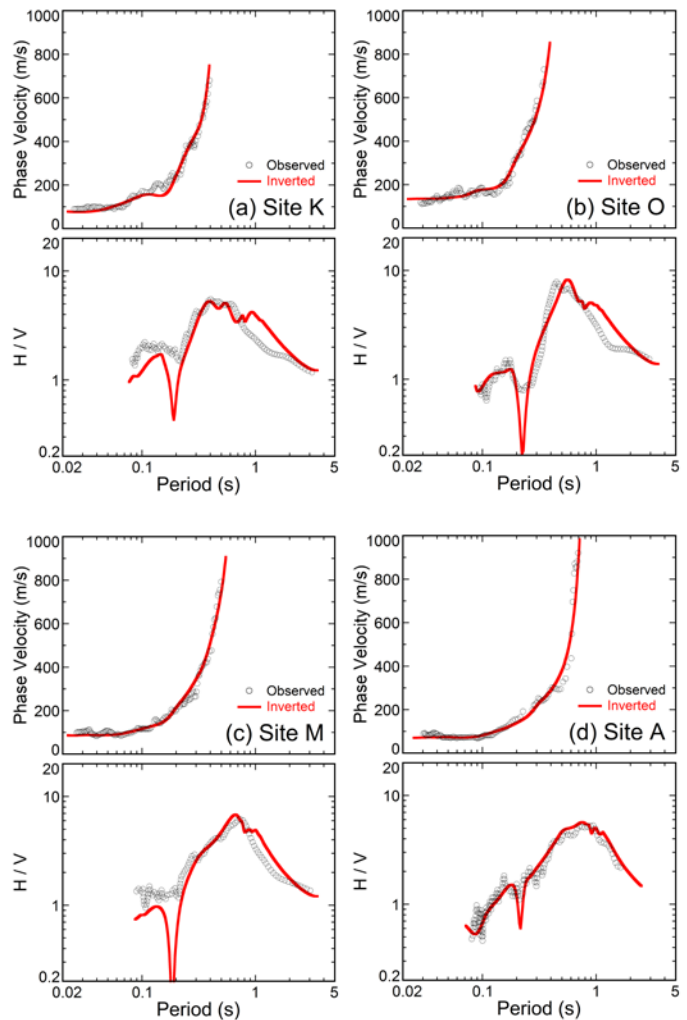


図4 分散曲線と H/V スペクトルの観測値および逆解析による理論値の比較 (Site K、O、M、A)

### 3) 分散特性と H/V スペクトルの同時逆解析から推定した地盤の S 波速度構造

図 4 の観測された分散曲線および H/V スペクトルがレイリー波および表面波 (レイリー波とラブ波) によるものと考え<sup>10)11)</sup>、高次モードの影響を考慮した同時逆解析<sup>12)</sup>を行った。この際、本研究で実施した各地点のボーリング調査結果に加えて、Site K、Z では防災科研<sup>5)</sup>のボーリング調査結果を、Site O では町役場建設時<sup>6)</sup>のボーリング調査結果などを、Site M、A では吉見ら<sup>7)</sup>のボーリング調査結果を、それぞれ参考に、深さ 60-70m 程度までの地盤構造を 5-7 層にモデル化した。また、各層の厚さ・密度・P 波速度は各地点のボーリング調査結果から仮定し、S 波速度のみを同定した。各地点とも、深さ 60-70m 程度以深の地盤構造は Site K の防災科研の PS 検層結果<sup>5)</sup>を用い、表面波の H/V スペク

トル<sup>11)</sup>のピークを有限にするため等に必要な地殻構造は文献 13 を参考に仮定した(表2)。表面波のH/Vスペクトル<sup>11)</sup>の算定に用いる水平動のレイリー波/ラブ波振幅比の値は、H/Vスペクトルの理論値が長周期側で観測値と適合するよう、Site Z、Oでは0.8、Site K、M、Aでは1とした。なお、逆解析で考慮するモード次数は、レイリー波の見かけ分散曲線<sup>10)</sup>については4次モードまで、表面波のH/Vスペクトル<sup>11)</sup>については7次モードまでとし、分散曲線とH/Vスペクトルの重みは1:0.5とした<sup>12)</sup>。

表2 仮定した深部地盤および地殻構造

深さ (km)	密度 (t/m <sup>3</sup> )	V <sub>P</sub> (km/s)	V <sub>S</sub> (km/s)
-0.10	2.10	2.30	0.82
-0.23	2.25	2.53	1.15
-3.0	2.40	4.50	2.40
-17	2.70	5.90	3.50
-33	3.00	6.60	3.80
∞	3.30	7.60	4.30

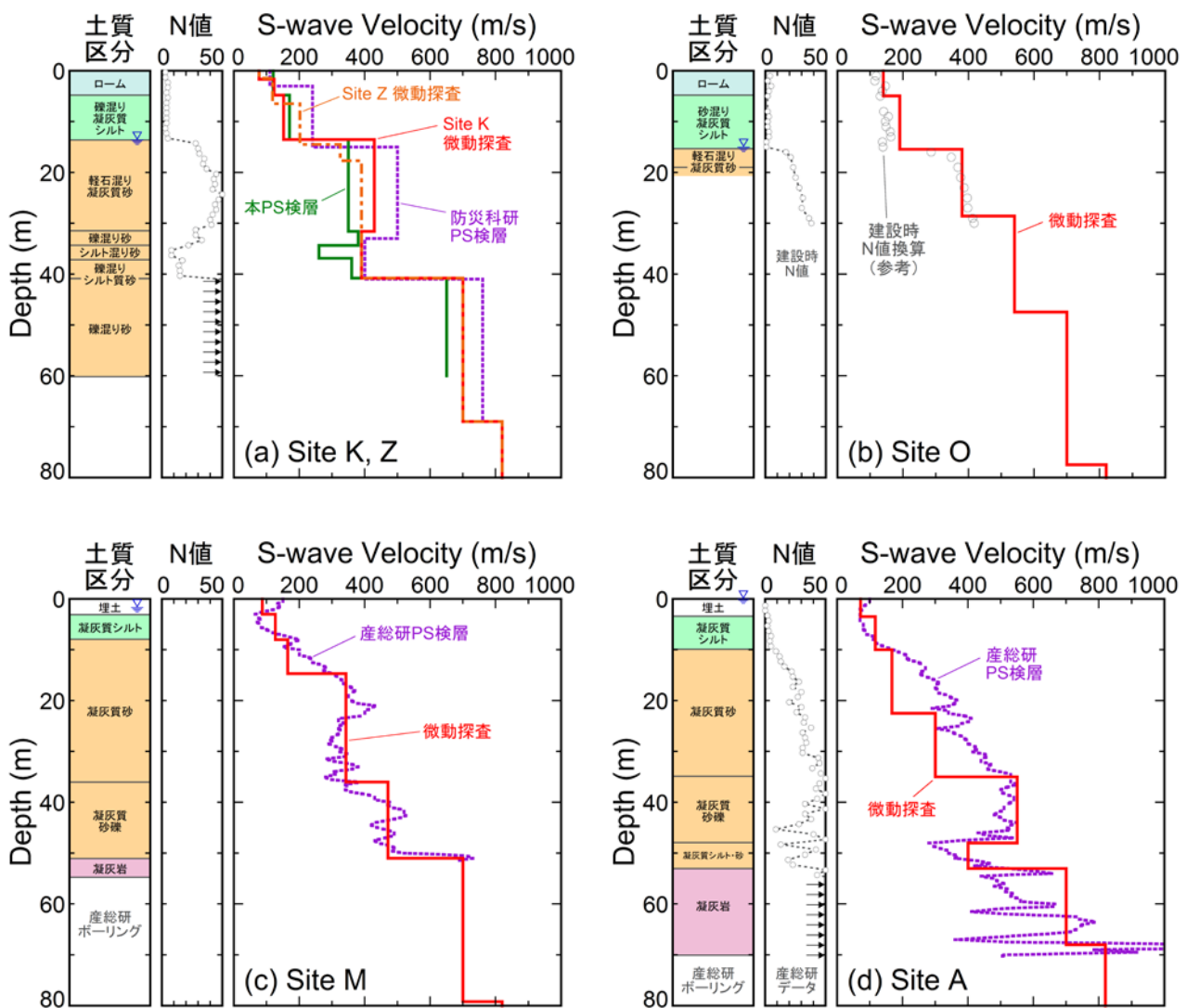


図5 微動から推定された益城町中心部の地盤のS波速度構造とボーリング調査結果の比較

逆解析から推定された各地点の地盤のS波速度構造を図5に赤実線および橙鎖線で示す。図には比較のため、各地点の既往の地盤情報(Site Kでは本研究および防災科研<sup>5)</sup>のPS検層結果、

Site Oでは町役場建設時の標準貫入試験N値<sup>6)</sup>から経験式<sup>14)</sup>により換算したS波速度、Site M、Aでは吉見ら<sup>7)</sup>のPS検層結果)を示している。Site Kでは、推定された各層のS波速度は、深さ

14m以深では両PS検層結果の中間的な値であるが、それ以浅では地表から深さ1.7mまでを除いて本研究のPS検層結果に近い値となっている。Site Zの推定S波速度構造は、Site Kのそれと大差ないように見える。Site Oでは、推定された各層のS波速度は、標準貫入試験N値から経験的に換算した値と概ね整合している。Site M、Aでは、推定された各層のS波速度は、Site Aの深さ10-35mの砂質土層を除いて、吉見ら<sup>7)</sup>のPS検層結果と概ね対応している。ここで、図4の赤太線は、逆解析で得られたSite K、O、M、Aの推定地盤構造に対応するレイリー波の見かけの分散曲線<sup>10)</sup>と表面波のH/Vスペクトル<sup>11)</sup>である。図4から、いずれの理論値も観測値の周期特性・絶対値とも概ね説明できている。以上の結果は、本研究で推定されたS波速度構造の妥当性を示唆している。

なお、Site Kの推定S波速度構造については、文献15において、防災科研KiK-net益城の鉛直アレイ弱震記録<sup>5)</sup>を用いた1次元重複反射理論に基づく弾性波動伝播解析<sup>16)</sup>から、その妥当性がさらに検証されている。また、地震により大ひずみ履歴を受けた地盤の剛性が低下・回復する場合<sup>(例えば17)18)</sup>もあるが、本研究の調査を行った時期の地盤状況は熊本地震前のそれに近い可能性が指摘されている。

#### 4) 土の動的変形特性

各地点のボーリング調査で採取された乱さない土試料に対して、動的変形特性を求めるための室内繰返し三軸試験を行った。トリミング法により供試体(直径50mm、高さ100mmの密実円柱)を成形後、三軸セルにセットして、飽和・等方圧密させた。圧密応力には、原位置の有効上載圧の仮定値を用いた。圧密完了の後、バンダーエレメント法によりP波速度とS波速度を測定し、繰返し载荷を実施した。なお、室内で測定されたS波速度の値は、前述の速度検層値および微動アレイ探査から推定された値と、概ね整合することを確認している。

繰返し三軸試験で得られる応力とひずみは「軸応力」と「軸ひずみ」であり、両者の定数として変形係数(ヤング率)が算定される。このため、ポアソン比を介して「せん断応力」と「せん断ひずみ」さらに「せん断剛性比」に変換する。この際、ポアソン比は、地下水位以浅で0.5、それ以深で0.3と仮定した。

繰返し三軸試験から得られた粘性土と砂質土の動的変形特性(せん断剛性比および減衰定数のせん断ひずみ依存性: いわゆる $G/G_0-\gamma$ 関係および $h-\gamma$ 関係)を図6に色付き●印で示す。図には、比較のため、主として東京・神奈川および大阪など国

内の首都圏で得られた多数の粘性土と砂質土に対する室内試験データの範囲(古山田ら、2003)<sup>19)</sup>を破線で示している。図から、益城町中心部の土の動的変形特性に、粘性土と砂質土で大きな差異は認められない。 $G/G_0-\gamma$ 関係については、粘性土・砂質土ともに、益城町中心部のデータは既往の首都圏のデータよりも非線形化しやすい。一方、 $h-\gamma$ 関係については、粘性土ではせん断ひずみ2%程度以上、砂質土では0.1%程度以上の範囲で、益城町中心部のデータは既往の首都圏のデータを大きく下回る。このように、益城町中心部の土の動的変形特性は、知られている首都圏のそれとは、かなり異なる性状を示す。

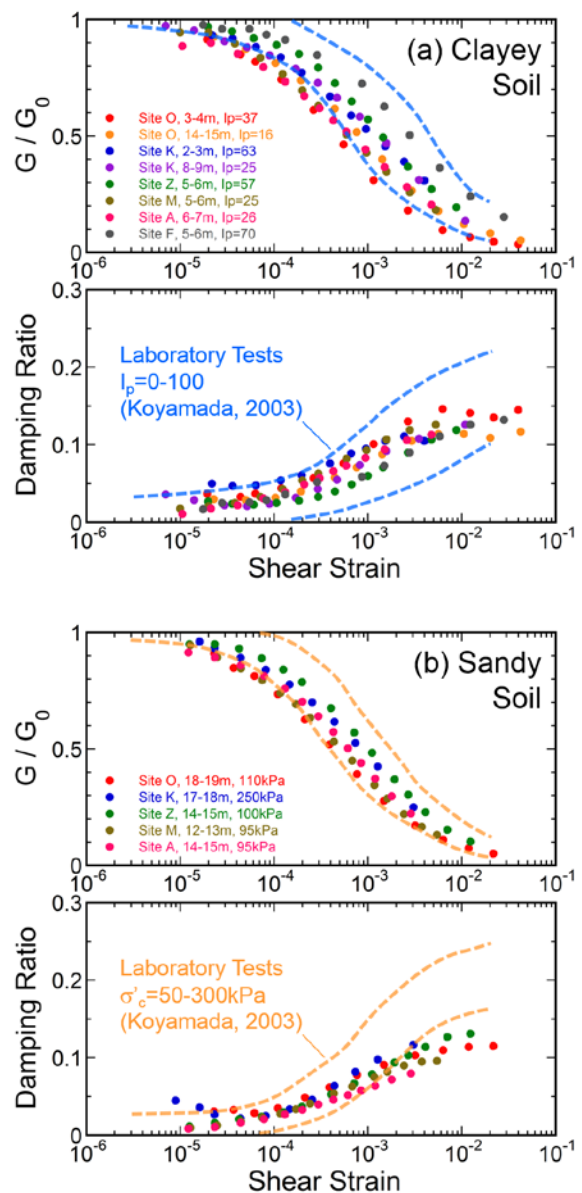


図6 益城町中心部の粘性土と砂質土の動的変形特性

### III 益城町中心部の地盤の地震動増幅特性

#### 1) 1次元等価線形解析による試算

各地点の地盤調査から得られたS波速度構造(図5)と動的変形特性(図6)に基づいて、2016年熊本地震における益城町中心部の強震動評価を試みる。本稿では、その第一次的検討として、防災科研KiK-net益城観測点(Site K)で得られた4月16日の $M_J=7.3$ の地震の鉛直アレイ強震記録<sup>9)</sup>(EW成分)を用いて、図7に概要を示す1次元地震応答解析を行った。すなわち、まず、Site Kの深さ252mで得られた地中記録をE+F入力して、周波数ひずみ依存型の減衰を持つ1次元重複反射理論に基づく等価線形解析<sup>20)</sup>(以下、1次元等価線形解析)を行い、地表記録の再現性を確認した上で、S波速度( $V_s$ )2.4km/sの地震基盤上面の露頭波を推定した。次に、この基盤露頭波をSite Mの地盤構造の同じ地震基盤上面に2E入力して、同様の1次元等価線形解析を行い、地表の強震動を推定した。なお、1次元等価線形解析においては便宜上、図6の土の動的変形特性を数式モデルにより近似して用いるが、現時点では十分な近似となっていない。選択した数式モデルが適切でなかった可能性もあり、今後の課題としたい。

Site Kの解析で得られた地表の推定地震動を観測記録と比較して図8に示す。推定地震動(赤実線)は、観測記録(灰実線)と振幅・位相とも概ね整合している。図の紫実線は、解析で得られた $V_s=2.4\text{km/s}$ の地震基盤上面の露頭波である。推定された地震動には、地表・地震基盤とも、周期1秒程度の成分が卓越している。このことは、この地震の周期1秒程度の成分には、深さ250m程度以浅の地盤の地震応答特性だけではなく、それ以深の地盤の影響あるいは震源の影響が含まれている可能性を示唆している。一方で、図の緑点線は、参考のため、1次元等価線形解析に用いる土の動的変形特性を、図6の益城町中心部のデータの代わりに、既往の首都圏のデータの平均値(古山田ら、2003)<sup>19)</sup>に置換した場合に得られた地表の推定地震動を示している。図から、土の動的変形特性を適切でないデータに変更することで、地表観測記録の1次元等価線形解析による再現度合いの低下することが確認される。

Site Mの解析で得られた地表の推定地震動を、図8と同じ線種を用いて図9に示す。また、推定地震動の地盤中の最大加速度・最大せん断ひずみの深さ方向分布と加速度速度応答スペクトル(減衰定数5%)および地盤による増幅率を図10に示す。図では、Site Kの地表記録も示されているが、推定地震動と直接に対比する意味でなく、あくまで参考とご理解されたい。

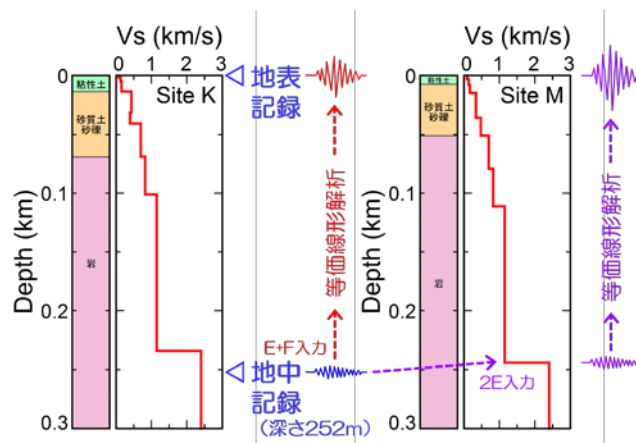


図7 Site Kの鉛直アレイ強震記録を用いたSite Mの地震動の地盤調査結果に基づく再現解析(1次元等価線形解析による試算)の概要

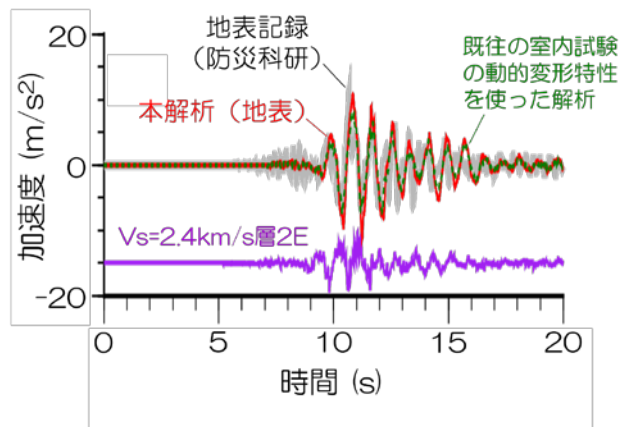


図8 Site Kの1次元等価線形解析から推定された2016年熊本地震の地表および地震基盤上の再現強震動と地表記録の比較(4月16日の地震のEW成分)

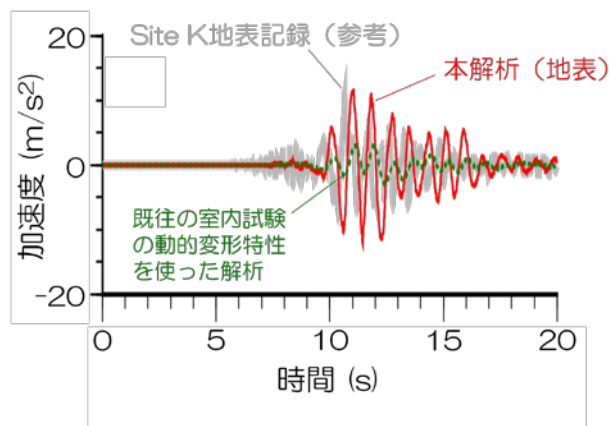


図9 Site Mの1次元等価線形解析から推定された2016年熊本地震の地表の再現強震動(4月16日の地震のEW成分)

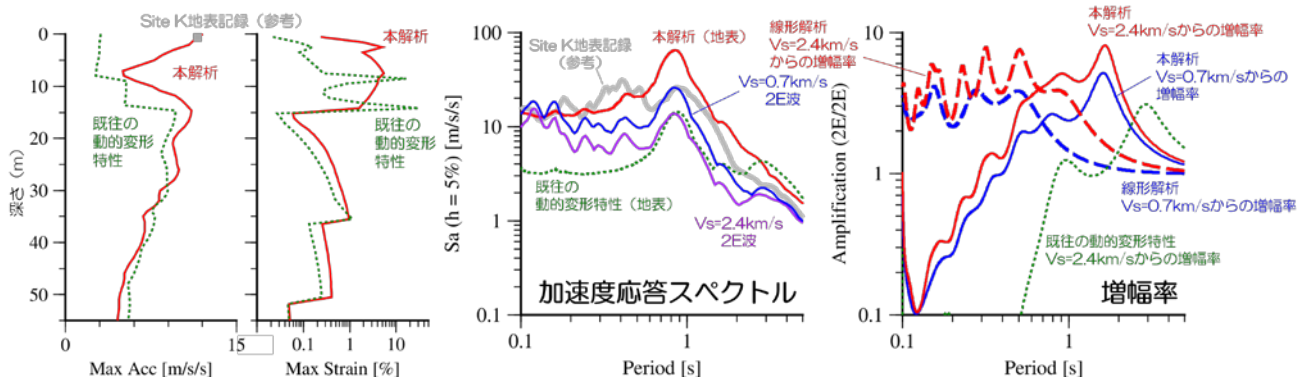


図10 Site M の1次元等価線形解析から推定された2016年熊本地震の再現強震動の地盤中の最大加速度・最大せん断ひずみの深さ方向分布と加速度応答スペクトル（減衰定数5%）および地盤による増幅率（4月16日の地震のEW成分）

図9-10から、本解析で得られたSite Mの地表の推定地震動は、最大加速度ではSite Kの地表記録と同程度であるが、応答スペクトルではSite Kのそれを周期0.6-0.7秒程度以上で大きく上回っている。また、地盤の増幅率では、地盤が非線形化することで等価周期が1-2秒程度まで延びて、この周期範囲の増幅率が卓越している。図には、 $V_s=0.7\text{km/s}$ の地層上面からの増幅率も計算して示されているが、同様の周期範囲で増幅率が卓越している。これらの結果は、この地点の地表の地震動には、 $V_s=0.7\text{km/s}$ の地層上面で浅い地盤の非線形応答特性が強く影響している可能性を示唆している。

## 2) 土の動的変形特性の違いが地盤応答に与える影響

図9-10の緑点線は、図8のそれと同様、参考のため、Site Mの1次元等価線形解析に用いる土の動的変形特性を、図6の益城町中心部のデータの代わりに、既往の首都圏のデータの平均値（古山田ら、2003）<sup>19)</sup>に置換した場合に得られた結果を示している。図から、地表の推定地震動や最大地盤応答が、土の動的変形特性を適切に設定した場合の解析結果から、大きく変わっている。地表の推定地震動は、加速度時刻歴・応答スペクトルともに、Site Kの地表観測記録のそれに比べて格段に小さく、周辺の甚大な建物被害の様相と対比して、2016年熊本地震の強震動の再現解析として適切に評価されているとは、とても考えられない。また、地盤の最大せん断ひずみが20%に達しており、これは、当該地層がヒンジのような状況となっていることを意味し、現実的な地盤応答を再現しているのは、とても考えられない。このことは、当然ではあるが、地盤の地震応答解析において、土の動的変形特性を現実に対応させて適切に設定しなけれ

ば、十分な再現解析など困難であることを示唆している。

ただし、図10の最大せん断ひずみの値が、いずれの解析でも5%以上となっており、これは本稿で用いた1次元等価線形解析の適用範囲を大きく超えている。このため、上記の指摘は、定性的な可能性の推論に止まっており、定量的な結論には至らない。今後の課題としたい。

## IV 益城町役場の地震応答と動的相互作用効果

Site KとSite Oの地盤調査から得られたS波速度構造（図5）と動的変形特性（図6）ならびに庁舎の設計図書<sup>20)</sup>に基づいて、益城町役場の2016年熊本地震に対する応答の再現解析を試みる。庁舎内の1階床に震度計が設置されており、2016年熊本地震では、4月14日の $M_J=6.5$ の地震と4月16日の $M_J=7.3$ の地震の両方の記録が得られ、公開されている<sup>22)</sup>。本稿では、これらの記録を、再現解析の妥当性を検証するために参照する。



写真1 益城町役場（2016年5月20日：柏尚稔氏撮影）

益城町役場の庁舎は、1980年竣工の地上3階のRC造建物で、その平面規模は60m×24m、軒高は約12m、基礎は先端支持による杭基礎である。庁舎の南側面にはプレキャスト外フレームによる耐震補強が施され、1階の東側面には耐震壁が増設されている。益城町役場の南東側の外観を写真1に、杭伏図と基礎の詳細を図11に示す。

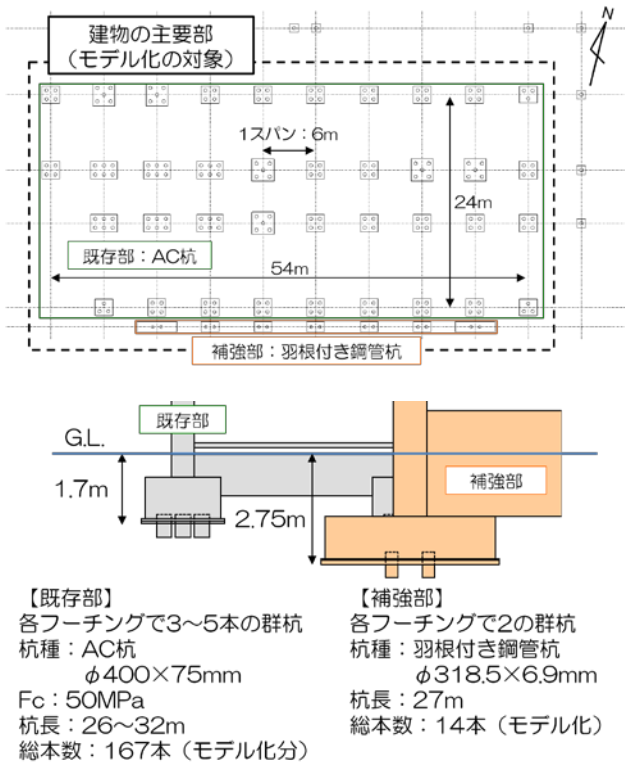


図11 益城町役場の杭伏図と基礎の詳細

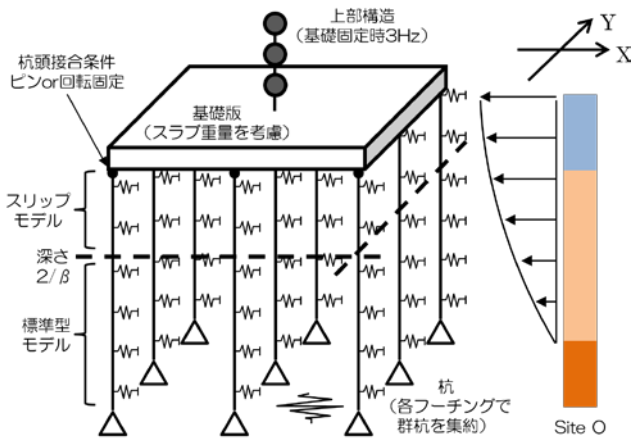


図12 上部構造—杭基礎—地盤連成系の地震応答解析モデル（修正Penzien型モデル）の概要

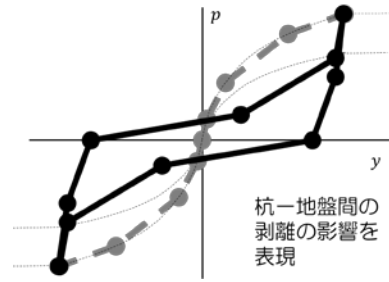


図13 杭周水平地盤ばねに適用する標準形（Normal：灰点線）とスリップ形（Slip：黒実線）の履歴特性の模式図

### 1) 上部構造—杭基礎—地盤連成系の地震応答解析モデル

図12に、益城町役場を模擬した上部構造—杭基礎—地盤連成系の地震応答解析モデル（建物と地盤の動的相互作用：SSIを考慮できる修正Penzien型モデル）の概要を示す。この解析モデルでは、次のa)およびb)の仮定を考慮する。

#### a) 杭—地盤間の剥離による履歴減衰の低下

杭頭に過大な慣性力が作用した場合、敷地地盤の表層部分では杭—地盤間に剥離が生じる可能性がある。そこで、杭周に付与する水平地盤ばねの履歴特性として、図13に示す標準形（Normal）とスリップ形（Slip）の2種類を設定し、杭—地盤間の剥離の影響を考慮する。両者の地盤ばねは、図12に示すように、杭の特性値 $\beta$ （例えば、建築基礎構造設計指針<sup>23)</sup>の式6.6.2)により深さ $2/\beta$ を境にして使い分ける。

#### b) 杭頭固定度の著しい低下

当該建物の杭のほとんどはPC杭ないしAC杭であり、変形性能に乏しく脆性的に破壊する。杭頭が破壊した場合、杭の曲げ抵抗が消失して杭頭固定度が著しく低下するため、杭頭がピン接合状態に近づくと考えられる。解析では杭部材の非線形性は考慮できるが、杭頭固定度の著しい低下は考慮できない。そこで、杭頭接合条件として固定条件（Fix）とピン条件（Pin）の2種類を設定し、杭頭固定度の低下の影響を分析する。

建物の上部構造は弾性としてモデル化し、各階の重量と剛性は文献21を参考に表3のとおり設定した。この際、土間スラブの重量を1階床の質点重量に加算している。また、各層の剛性の評価では、上部構造の1次モード形を直線分布と仮定して、1次固有振動数が3Hzとなるように設定した。

当該建物の杭は、フーチングごとに2-6本の群杭となっている。解析では、杭体をファイバーモデルとし、各フーチングで1本の集約杭（合計45本）にモデル化した。ファイバー要素の骨格曲線はコンクリート（Fc50）・PC鋼棒（ $\sigma_y = 1250\text{MPa}$ ）・鋼管（ $\sigma_y$



= 325MPa) のいずれについてもバイリニアとした。杭体の非線形性のモデル化の詳細は、図 14 を参照されたい。

杭周に付与する水平地盤ばねの初期剛性を規定する基準地盤反力係数は鉄道構造物等設計標準<sup>24)</sup>によるものとし、建築基礎構造設計指針<sup>23)</sup>の群杭効率を剛性に乗じる。また、地盤ばねの骨格曲線の非線形性状は、建築基礎構造設計指針<sup>23)</sup>に基づくものとする。なお、本検討で用いたスリップ地盤ばねモデルの有効性は、文献<sup>25)</sup>で検証されている。

表 3 仮定した益城町役場の上部構造モデル

Floor	Height (m)	Weight (kN)	Story	Mode $u_i$	Stiffness (kN/mm)	$T_i$ (s)
RF	12.4	15900	3F	3	1730	0.333
3F	8.6	16000	2F	2	2890	
2F	4.8	18900	1F	1	3570	
1F	0.3	17200				

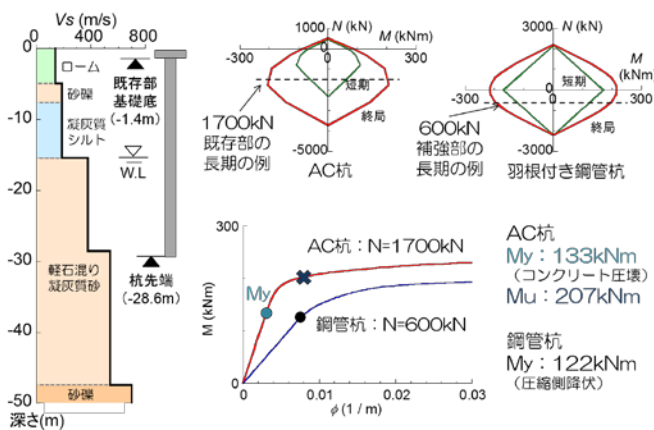


図 14 益城町役場の杭体の非線形性のモデル化

## 2) 入力地震動および解析結果

設定した益城町役場の上部構造—杭基礎—地盤連成系 SSI モデルの地震応答解析に先立ち、これに inputs する地震動を、Site K と Site O の地盤調査から得られた S 波速度構造 (図 5) と動的変形特性 (図 6) に基づいて、図 15 に概要を示す 1 次元地盤応答解析により評価した。すなわち、防災科研 KiK-net 益城観測点 (Site K) で得られた 4 月 14 日の  $M_j=6.5$  の地震と 4 月 16 日の  $M_j=7.3$  の地震の地表記録 (それぞれ EW 成分) を説明できる S 波速度 ( $V_s$ ) 0.7km/s の工学的基盤上面の露頭波を、1 次元等価線形解析 (逆増幅解析) と 1 次元時刻歴非線形解析 (増幅解析) の繰返し計算により求め、この基盤露頭波を Site O の地盤構造の同じ工学的基盤上面に 2E 入力して、同様の 1 次元時刻歴非線形解析を行い、地表の強震動を推定した。なお、これらの解析では便宜上、図 6 の土の動的変形特性を数式モデルにより近似して用いるが、前述した Site M の解析とは異なる数式モデルを用いており、近似の精度は比較的良好である。

図 16 は、4 月 16 日の地震について、Site K の解析で得られた地表の推定強震動と観測記録を比較して示している。逆増幅解析と増幅解析の方法が異なるため、推定強震動を観測記録に完全に一致させることはできないが、図から、加速度時刻歴・擬似速度応答スペクトルともに、推定強震動は観測記録をある程度の精度で再現できている。

図 17 は、4 月 16 日の地震について、Site O と Site K の解析で得られた地表の推定強震動を比較して示している。ここで、比較対象として、益城町役場庁舎内の 1 階床に設置された震度計で得られた観測記録<sup>22)</sup>を用いないのは、後述するように、この記録には、建物と地盤の動的相互作用が強く影響していると考えられるためである。図 17 から、同一の基盤露頭波を用いる限り、Site O と Site K の地表の推定地震動は、ほぼ一致することがわかる。しかし、図 1 に示したように、2016 年熊本地震における木造建物の大破率は、Site K 周辺よりも Site O 周辺の方が大きく、ここで推定された Site O の地表地震動は適切でない可能性も示唆される。すなわち、両地点の工学的基盤上面の地震動が異なっていた可能性も考えられる。

なお、解析から得られた地盤の最大せん断ひずみは、Site K では 1-2% 程度、Site O では 4% 程度であり、用いた 1 次元時刻歴非線形解析の適用範囲に概ね収まっていると判断される。ただし、最大せん断ひずみの発生した深さと地層は、両地点で異なり、Site K では深さ 10m 程度のシルト層、Site O では深さ 5m 程度のローム層となっている。

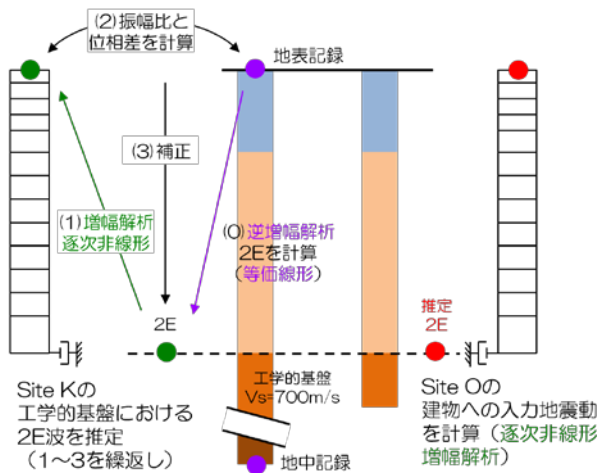


図 15 益城町役場の入力地震動の再現解析の概要

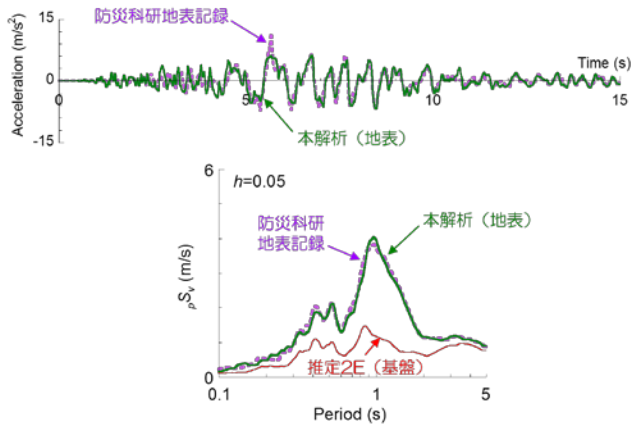


図16 図15の再現解析から得られた Site K の2016年熊本地震 (4月16日の地震のEW成分) の地表の推定強震動と観測記録の比較

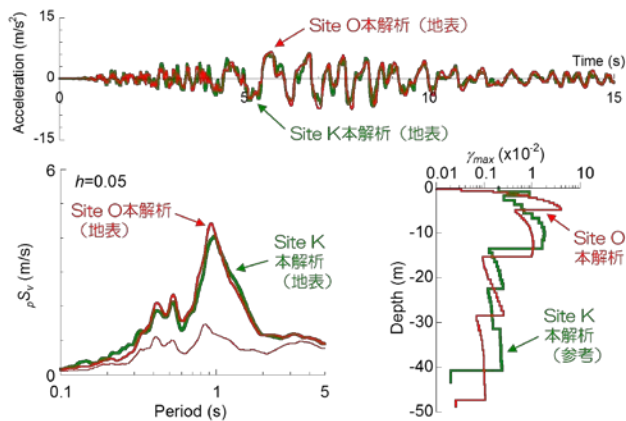


図17 図15の再現解析から得られた Site O と Site K の2016年熊本地震 (4月16日の地震のEW成分) の推定強震動および地盤応答の比較

Site O の推定地盤応答を入力地震動として、益城町役場の上部構造—杭基礎—地盤連成系 SSI モデルの地震応答解析を行った。結果を図18-21に示す。

図18は、4月16日の地震について観測および解析で得られた Site O の地表と建物1F床の応答の加速度時刻歴を示している。ただし、Site O の地表観測記録がないため、以降の図では全て、図17を参考に、Site K の地表観測記録で代用している。図18から、観測結果において、建物1F床の応答時刻歴は地表のそれと比べて長周期化している。一方、解析結果においては、観測結果ほど顕著ではないが、地盤ばねにスリップ特性を考慮し、杭

頭固定度の著しい低下を考慮した Slip+Pin モデルを用いた場合に、建物1F床の応答時刻歴が地表のそれと比べて長周期化している。なお、図は省略するが、地盤ばねにスリップ特性を考慮せず、杭頭固定度の著しい低下のみを考慮した Normal+Pin モデルを用いた場合でも、Slip+Pin モデルを用いた場合と同様の解析結果が得られることを確認している。このことは、杭—地盤間の剥離よりも、杭頭固定度の著しい低下の方が、建物1F床の応答時刻歴に大きな影響を与えた可能性を示唆している。

図19では、図18の加速度時刻歴から求めた擬似速度応答スペクトル (減衰定数5%) について、図18と同様の表示をしている。図19から、上記の傾向は、周期1秒程度以上の地震動成分によって生じていることが確認される。

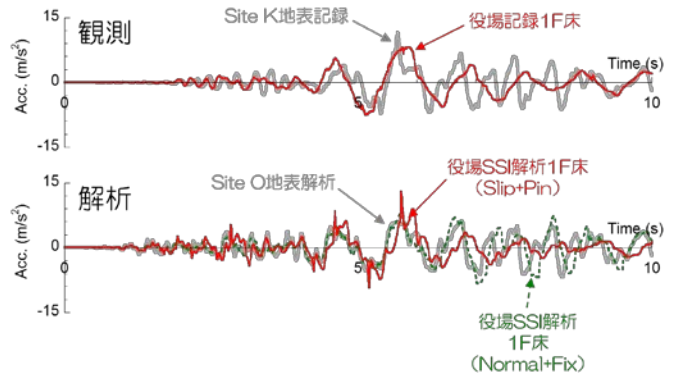


図18 4月16日の地震のEW成分について観測および解析で得られた Site O の地表と建物1F床の応答の加速度時刻歴 (地表観測記録は Site K のそれと代用)

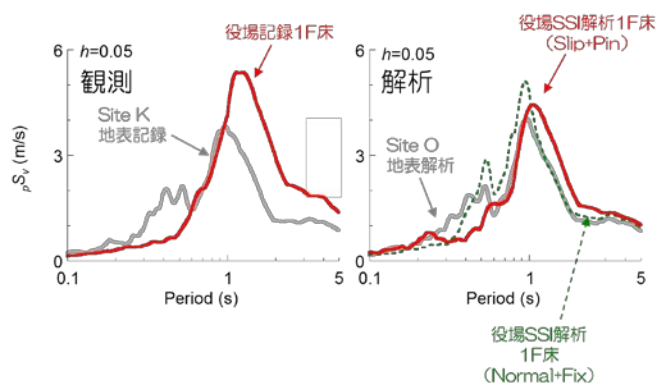


図19 4月16日の地震のEW成分について観測および解析で得られた Site O の地表と建物1F床の応答の擬似速度応答スペクトル (減衰定数5%) (地表観測記録は Site K のそれと代用)

図 20 は、4 月 14 日と 4 月 16 日の地震に対して観測および解析で得られた建物 1F 床/地表の加速度応答スペクトル比（減衰定数 5%）を示している。図から、改めて前述の傾向が確認される。すなわち、地盤ばねのスリップ特性に加えて杭頭固定度の著しい低下を考慮することで、周期 1 秒程度以上の加速度応答比の値が増大し、解析結果が観測結果に近づく傾向が見られる。とくに、4 月 14 日の地震について、この傾向は比較的良好に再現されている。ただし、いずれの地震についても、解析で得られた応答比の増大率は観測結果に比べて小さく、地盤ばねの履歴特性や杭頭固定度とは異なる何かの要因が影響している可能性も考えられる。今後の課題としたい。

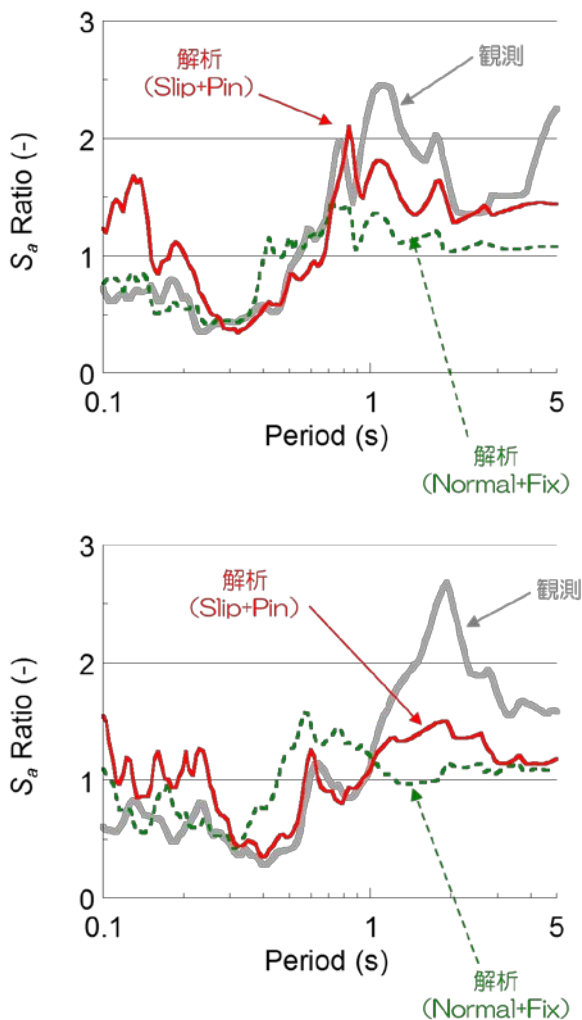


図 20 4 月 14 日（上）と 4 月 16 日（下）の地震の EW 成分について観測および解析で得られた建物 1F 床/地表の加速度応答スペクトル比（減衰定数 5%）（地表観測記録は Site K のそれで代用）

## V まとめ

2016 年熊本地震による益城町中心部の甚大な建物被害のメカニズムを解明するため、この地域の 5 地点で地盤調査を行い、その結果に基づく地盤および益城町役場の杭基礎建物—地盤連成系の地震応答解析を行って、地盤特性が熊本地震の強震動に与えた影響と建物と地盤の動的相互作用が役場の強震記録に与えた影響を検討した。得られた知見は以下のとおり。

- 1) 微動アレイ探査とボーリング調査から得られた 5 地点の深さ 60-80m 以浅の地盤の S 波速度構造は、他の信頼できる掘削調査の結果や弱震記録と整合した。また、採取した土試料の室内試験結果から、この地域の土の動的変形特性は、粘性土と砂質土で大きな差異はなく、首都圏の土に比べて非線形化しやすく、減衰が小さいことを示した。
- 2) 1 次元等価線形解析による試算から、建物被害が甚大な地域では、KiK-net 益城を超える強震動の可能性、地盤の非線形性により周期が 1-2 秒まで延びたことが強震動を増大させた可能性、現地の土の動的変形特性を適切に評価することの重要性が示唆された。ただし、いずれも定性的な指摘に止まるため、今後より高度な解析を行って、定量的な強震動評価と木造建物応答評価に繋げる必要がある。
- 3) 益城町役場の建物 1F 床で得られた強震記録のピーク周期は KiK-net 益城の地表記録のそれに比べて長く、ピーク値も大きい。この傾向は、杭—地盤間の剥離と杭頭固定度の著しい低下を考慮した動的相互作用解析で概ね再現できる。ただし、周期 1 秒以上の地震動成分について、再現解析の結果は未だ不十分であり、他の要因が動的相互作用に影響を与えた可能性も考えられる。今後の課題としたい。

## 謝辞

本稿の原著である文献 1-3 は、国土技術政策総合研究所の柏尚稔主任研究官および建築研究所の中川博人主任研究員との共同研究による成果である。微動アレイ観測では、国土技術政策総合研究所の中川貴文主任研究官および建築研究所の荒木康弘主任研究員の協力を得た。益城町から、庁舎の耐震診断改修計画報告書の情報を提供いただいた。記して謝意を示す。

## 参考文献

- 1) 新井洋、柏尚稔：微動アレイ観測から推定した益城町中心部の地盤 S 波速度構造、日本地震工学会大会—2017 梗概集、P4-3

- 2) 柏尚稔、新井洋、中川博人：2016 年熊本地震における益城町役場の地震応答の動的相互作用効果、日本地震工学会大会—2017 梗概集、P3-15
- 3) 中川博人、柏尚稔、新井洋：益城町中心部における表層地盤の動的変形特性と地震動増幅特性、日本地震工学会大会—2017 梗概集、P4-7
- 4) 国土交通省住宅局建築指導課、国土技術政策総合研究所、建築研究所：熊本地震における建築物被害の原因分析を行う委員会 報告書、2016 年、p. 30
- 5) 防災科学技術研究所 強震観測網 (K-NET, KiK-net) <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 6) 益城町庁舎建設地質調査 地質調査報告書、1979 年
- 7) 吉見雅行、後藤浩之、秦吉弥、吉田望：益城町市街地の 2016 年熊本地震被害集中域における非線形地盤応答特性、京都大学防災研究所 研究発表講演会、2017 年、A05
- 8) Capon, J. : High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis, Proc. IEEE, Vol.57, Issue 8, 1969, pp. 1408-1418
- 9) Asten, M. W., and J. D. Henstridge : Array Estimators and the Use of Microseisms for Reconnaissance of Sedimentary Basins, Geophysics, Vol. 49, 1984, pp. 1828-1837
- 10) Tokimatsu, K., Shinzawa, K., and Kuwayama, S. : Use of Short-Period Microtremors for  $V_s$  Profiling, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.118, No.10, 1992, pp. 1544-1558
- 11) Arai, H., and Tokimatsu, K. : S-Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V Spectrum, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.94, No.1, 2004, pp. 53-63
- 12) Arai, H., and Tokimatsu, K. : S-Wave Velocity Profiling by Joint Inversion of Microtremor Dispersion Curve and Horizontal-to-Vertical (H/V) Spectrum, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.95, No.5, 2005, pp. 1766-1778
- 13) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会：布田川・日奈久断層帯の地震を想定した強震動評価、平成 15 年 7 月 31 日、p.12
- 14) 加藤巧祐、田守伸一郎：各種土質データに基づく S 波速度推定式の提案、日本建築学会技術報告集、Vol.17、No.36、2011 年、pp. 467-471
- 15) 新井洋、柏尚稔：KiK-net 益城の地盤ボーリング調査と微動アレイ探査、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 II、2017 年、pp. 253-254
- 16) Schnabel P. B., Lysmer, J., and Seed, H. B : SHAKE : A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report No. EERC 72-12, University of California, Berkeley, 1972
- 17) Tokimatsu, K., and Hosaka, Y. : Effects of Sample Disturbance on Dynamic Properties of Sand, Soils and Foundations, Vol.26, No.1, 1986, pp. 53-64
- 18) 新井洋、関口徹、時松孝次：2004 年新潟県中越地震後の K-NET・JMA 小千谷における表層 S 波速度の回復過程、第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集、2006 年、pp. 1414-1417
- 19) 古山田耕司、宮本裕司、三浦賢治：多地点での原位置採取試料から評価した表層地盤の非線形特性、第 38 回地盤工学研究発表会、2003 年、pp. 2077-2078
- 20) 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/III-27、1994 年、pp. 49-58
- 21) 益城町庁舎 耐震診断改修計画 報告書、2012 年
- 22) 熊本県 地方公共団体震度計の波形データ・益城町宮園 [http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/160414212\\_6\\_kumamoto/index2.html](http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/160414212_6_kumamoto/index2.html)  
[http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/160416012\\_5\\_kumamoto/index2.html](http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/160416012_5_kumamoto/index2.html)
- 23) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針、2001 年
- 24) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物、2012 年
- 25) 柏尚稔、小林俊夫、宮本裕司：繰返し水平載荷実験における羽根付き鋼管杭の水平地盤抵抗のモデル化手法、日本地震工学会・大会—2017 梗概集、P2-16