

動的解析による2016年熊本地震における 益城町の地震動評価

長尾 毅¹・柴田 大介²

¹正会員 神戸大学教授 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: nagao@people.kobe-u.ac.jp

²正会員 (株) 日本港湾コンサルタント (〒141-0031 東京都品川区西五反田8-3-6)

E-mail: daisuke_shibata@jportc.co.jp

2016年熊本地震は各地に大きな被害をもたらしたが、特に熊本県益城町においては甚大な住宅被害が生じた。現地における特に甚大な住宅被害は県道28号と秋津川の間に挟まれたエリアに局在しており、局所的な地盤条件によって住宅被害の甚大なスポットが生じたことが示唆された。本研究では、既往の常時微動観測記録より住宅被害の激しかったエリアを中心に表層地盤構造を推定し、2次元地震応答解析等を行って最大前震及び本震時の地震動を評価した。

Key Words : the 2016 Kumamoto Earthquake, microtremor, earthquake response analysis

1. はじめに

2016年熊本地震は布田川・日奈久断層帯を震源断層とする一連の地震である。地震活動は非常に活発であり、長期間にわたり余震活動が続いている。これまで発生した特に規模の大きな地震は2016年4月14日21:26に発生した最大前震(Mj 6.5)と同4月16日01:25に発生した本震(Mj 7.3)である。これらの地震により、熊本県益城町では住宅等に大きな被害が発生するとともに、益城町役場に設置された震度計が最大前震(以降前震と称する)・本震ともに震度7を記録した。

益城町における特に甚大な住宅被害は益城町役場より南の方角の県道28号線と秋津川の間に挟まれたエリアに局在しており、甚大な住宅被害の生じた地点では古い住宅と比較して耐震性が高いと考えられる比較的新しい住宅も倒壊する現象が見られた。このことから、局所的な地盤条件によって住宅被害の程度に差が生じたことが示唆された。熊本地震による益城町の被害を対象とした数多くの研究が実施されており、長尾ら¹⁾は益城町において常時微動観測を実施し、常時微動H/Vスペクトルの卓越周波数やアレイ観測結果をもとに位相速度を求めている。

本研究では、特に被害の激しかったエリアを含んだ断面に対して行った常時微動観測結果をもとに工学的基盤相当に至る表層の地盤構造を評価し、2次元の非線形地

震応答解析によって前震及び本震の地震動を評価した。

2. 基盤入力地震動の評価

(1) KiK-net益城地点のS波速度構造

本研究では、KiK-net²⁾の益城強震観測点(KMMH16)により観測された地表の地震動を工学的基盤に引き戻した波形を用いる。KiK-net益城地点は鉛直アレイ観測地点であり、 $V_s=2700\text{m/s}$ に至るPS検層データが公開されている³⁾。

PS検層データの精度を確認するため、長尾ら¹⁾による常時微動観測結果との比較を行う。当該地点は、一連の地震による地盤の非線形性の影響が指摘されており¹⁾、以下では非線形性の影響を無視できると考えられる2016年7月の観測結果をもとにしている。

長尾ら¹⁾による常時微動観測結果による常時微動H/Vスペクトル(microtremor)とPS検層データによる基本モードレイリー波H/Vスペクトル(NIED)の比較を図-1に示す。

常時微動アレイ観測結果に空間自己相関法⁴⁾を適用して求めた観測位相速度(microtremor)とPS検層データによるS波速度構造からHaskell⁵⁾の方法を用いて特性方程式を解くことにより求めた理論位相速度(基本モード(NIED)の比較を図-2に示す。

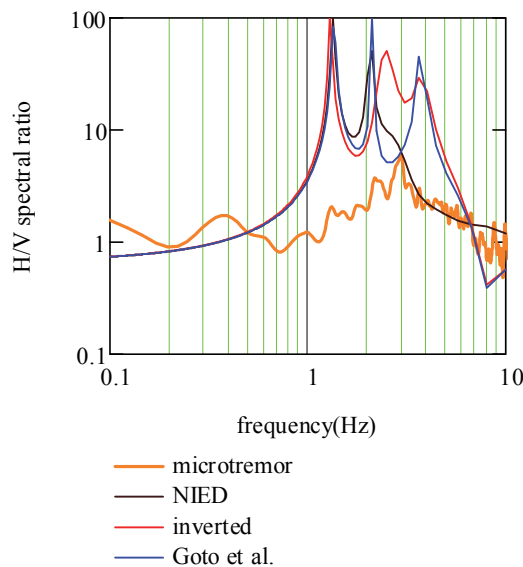


図-1 H/Vスペクトルの比較

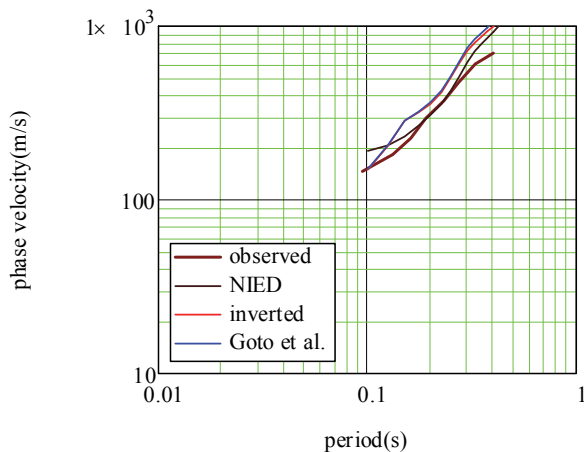


図-2 位相速度の比較

表-1 KiK-net益城地点S波速度構造

		NIED ³⁾	Goto et al.	本研究
土質区分	h(m)	V_s (m/s)		
粘性土	3	110	110	110
粘性土	6	240	160	160
砂質土	6		370	370
凝灰岩	18	500	600	500
粘性土	8	400	425	400
砂・砂礫	28	760		
岩盤	32	820		
岩盤	32	1470		
岩盤	10	700		
岩盤	26	1380		
岩盤	32	840		
岩盤	33	1470		
岩盤	-	2700		

位相速度の違いはわずかなものであるが、H/Vスペクトルについては常時微動H/Vスペクトルとレイリー波

H/Vスペクトルにピーク周波数の違いが認められる。すなわち、常時微動H/Vスペクトルは3Hzにピークを有するが、レイリー波H/Vスペクトルのピーク周波数は1.3Hzおよび2.1Hzであり、3Hz付近にピークは存在しない。このため、PS検層データは精度に問題がある可能性があり、Goto et al.⁶⁾は表層を含む地盤のS波速度を修正することで強震観測結果を説明できると指摘している。本研究では、常時微動観測結果との整合性の観点から、KiK-net益城地点のS波速度構造を評価した。

検討結果として、表-1に示すように表層のS波速度構造をPS検層データより変更して解析を行うこととした。第2、3層はGoto et al.⁶⁾の結果に準拠し、第4層以深は防災科研公開データに準拠した。図-1及び図-2に示すinvertedが本研究、Goto et al.は表層地盤のうち、 $V_s=760$ m/sより上層の値として提案された値を用いた結果である。なおGoto et al.⁶⁾は深部地盤構造を含めてS波速度をPS検層データから変更しているため、正確にはGoto et al.⁶⁾によるS波速度構造とは言えないことに注意を要する。

Goto et al.⁶⁾による地盤構造を用いたH/Vスペクトルは1.3、2.1および3.6Hzにピークを有する。本研究による値では1.3、2.5および3.6Hzにピークを有する。3者いずれにも共通する1.3Hzのピークは深い地盤構造によるものと考えられ、PS検層による深層地盤構造にも誤差が含まれている可能性は否定できない。しかしながら本研究では後述するように $V_s=760$ m/sの層を基盤と考えた地震応答解析を行うため、それ以深のS波速度構造の誤差は無視し得るものと考えた。本研究によるレイリー波H/Vスペクトルの2次のピークは2.5Hzであり常時微動H/Vスペクトルの3Hzとは一致しないが、常時微動観測値に近い値を取ることから、本研究ではこのS波速度構造を採用した。なお位相速度については、3者の違いは僅かであった。

(2) 基盤入力地震動の評価

$V_s=760$ m/sの層を基盤と考え、KiK-net益城における地表の観測記録を等価線形解析によって引き戻すことで基盤入射波形を算出した。その際、Goto et al.⁶⁾は $V_s>300$ m/sの層についても非線形性を考慮しているが、本研究では $V_s=370$ m/sの層以深は非線形性の影響を無視できると考え、地表の $V_s=110$ m/sおよびその下の $V_s=160$ m/sの層についてのみ非線形性を考慮した。なお、ボアホール設置の地震計の観測記録を用いて基盤入射波形を求めることも考えられるが、深度-200m程度の $V_s=2700$ m/sの層から $V_s=760$ m/sの基盤に至る地震動の伝播を1次元の地震応答解析で評価することには限界があると考えられるため、地表の観測波形を用いて引き戻しを行っている。

地盤非線形特性は、安田・山口⁷⁾を基本としたが、後述する2次元有限要素解析において用いた解析コードFLIP⁸⁾においては地盤の非線形モデルとしてH-Dモデル⁹⁾

を用いるとともに、地盤剛性の拘束圧依存性を式(1)のとおりモデル化¹⁰⁾していることから、本研究では安田・山口⁷⁾をもとにして基準ひずみを求めるとともに、拘束圧依存性を考慮して初期剛性を求め、これらよりH-Dモデルをもとにした非線形モデルを作成している。有効拘束圧算出時に必要となる地下水位面は、PS検層公開データにおいて $V_s=240\text{m/s}$ の層で $V_P=380\text{m/s}$ 、 $V_s=500\text{m/s}$ の層で $V_P=1180\text{m/s}$ であることから $V_s=500\text{m/s}$ の層上面と扱った。また、減衰定数は2次元有限要素解析と同様に式(2)のように設定した。

$$G_{m0} = G_{ma} \left(\frac{\sigma_m'}{\sigma_{ma}'} \right)^{0.5} \quad (1)$$

$$h = h_{\max} \left(1 - \frac{G_m}{G_{m0}} \right) \quad (2)$$

ここに、 G_{m0} ：せん断弾性係数、 G_{ma} ：層中央深さにおけるせん断弾性係数、 σ_m' ：有効拘束圧、 σ_{ma}' ：層中央深さにおける有効拘束圧、 h ：減衰定数、 $h_{\max}$ ：減衰定数最大値（砂質土で0.24、粘性土で0.20）、 G_m ：せん断弾性係数（非線形時の値）である。

前震および本震の基盤入力波形（2E）の主要動部分の時刻歴波形を図-3および図-4に、フーリエスペクトルを図-5および図-6に示す。非線形性を考慮する土層の収束有効ひずみの最大値は前震、本震いずれも、NS方向で0.2%、EW方向で0.4%程度であった。このひずみレベルは、Goto et al.⁶⁾と概ね調和的なものといえる。

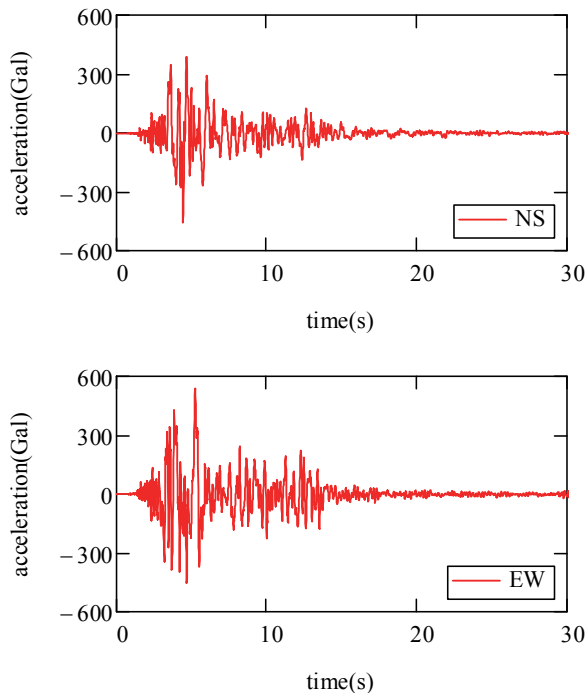


図-3 基盤入射波形（前震，NS，EWは方向を示す）

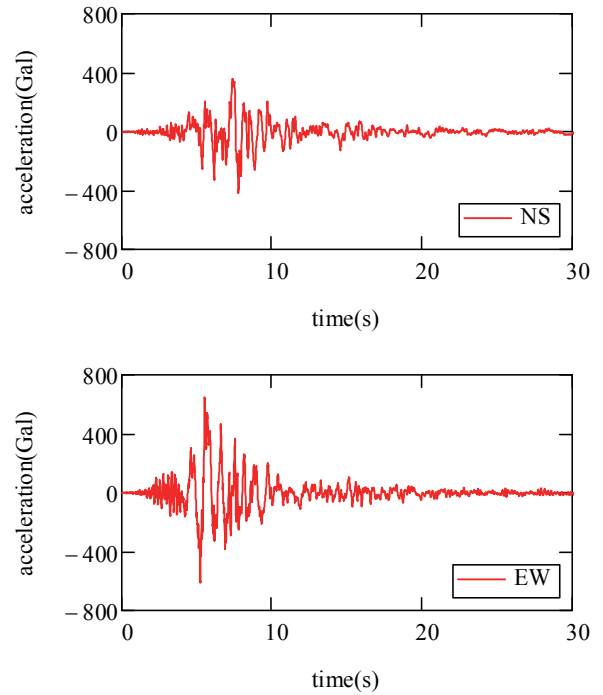


図-4 基盤入射波形（本震，NS，EWは方向を示す）

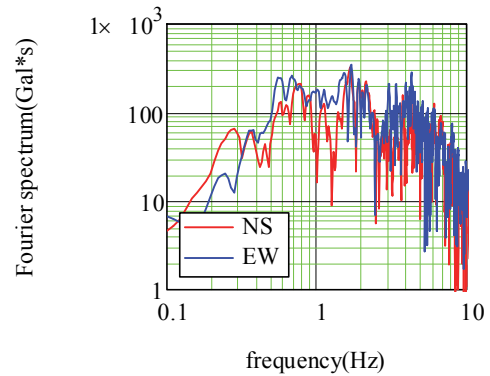


図-5 フーリエ振幅スペクトル（前震，NS，EWは方向）

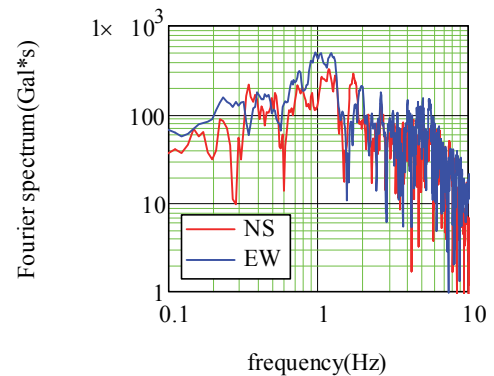


図-6 フーリエ振幅スペクトル（本震，NS，EWは方向）

地表／基盤のフーリエスペクトル比を線形時（initial）と比較して図-7に示す。前震、本震による違いは大きいために、本震の結果のみを示している。

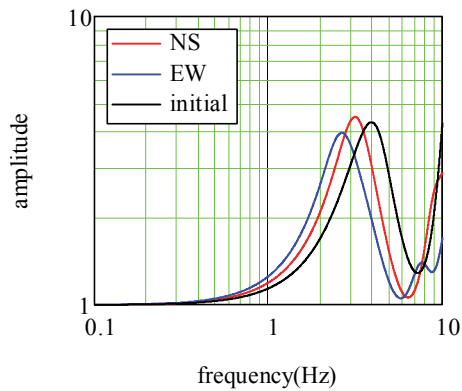


図-7 スペクトル比（本震，NS，EWは方向）

地表の記録は，前震の地表の加速度最大値は760Gal（NS）及び925Gal（EW）であり，本震の加速度最大値は653Gal（NS）及び1157Gal（EW）であった．周波数特性としては，前震が2-3Hzの成分が卓越するのに対して，本震では卓越周波数は1Hz程度であった．前震・本震の地表の地震動の周波数特性の違いは基盤波形にも現れているといえる．

3. 対象地点と地盤構造の推定

長尾ら¹⁾による常時微動観測のうち，2016年7月および9月の観測結果をもとにS波速度構造の推定を行う．

図-8に検討対象地点を示す．長尾ら¹⁾によるJA9地点を中心に，東西（幅800m）・南北（幅900m）の測線で断面を設定した．交点となるJA9地点は最も被害の激しかったと考えられる地点である．

検討対象地点の近傍では，吉見ら¹²⁾による工学的基盤相当までのボーリング調査が行われており，JA9地点の近傍のボーリング地点としてMSK-1地点のPS検層データが公開されている．

断面設定は以下の方針によった．

- (i) JA9地点および各測線に近い他の常時微動アレイ観測地点（図中○）を対象に，吉見ら¹¹⁾によるMSK-1地点のPS検層データを参照するとともに，観測された位相速度および常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数の整合性の観点からS波速度構造を推定する．その際，土層のS波速度は固定して層厚を変化させる．
- (ii) 各測線について，逆距離加重法¹³⁾によって近傍の常時微動観測地点の値をもとに30mピッチでピーク周波数を推定する．図-8のNS1-NS37，EW1-W26がピーク周波数を推定した点である．
- (iii) アレイ観測地点のS波速度構造と常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数を参照して，測線上の推定された常時微動H/Vスペクトルの値をもとに，層厚を変化させてピーク周波数の整合性の観点からS波速度構造を設定する．

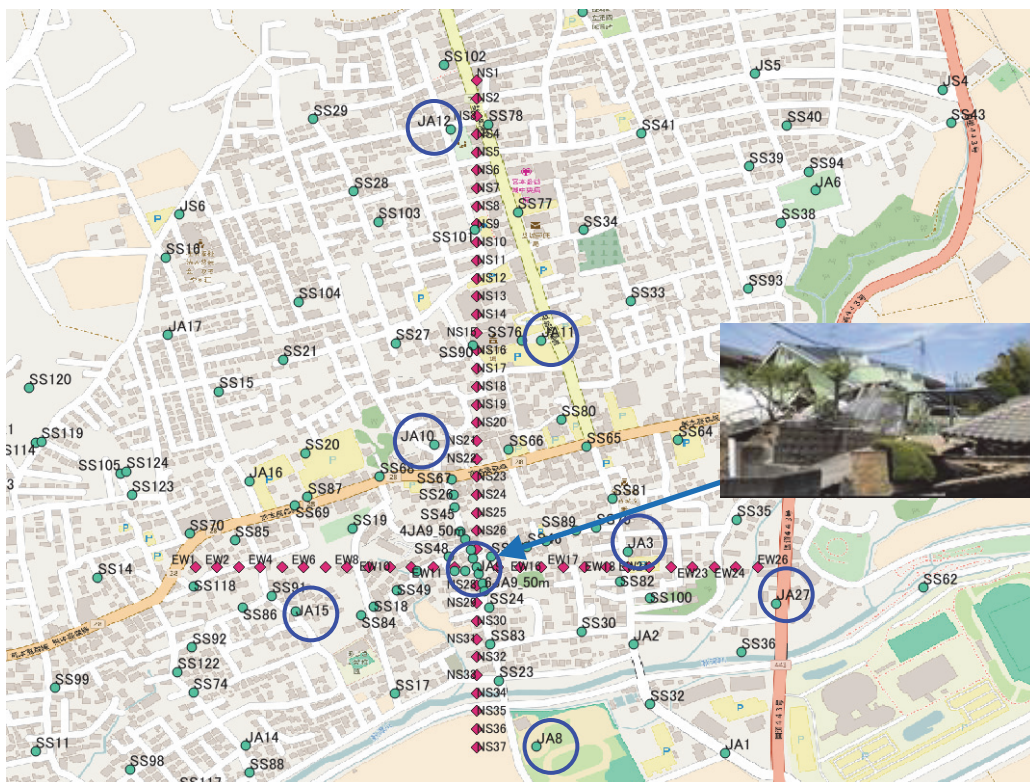


図-8 検討対象地点（長尾ら¹⁾に加筆，○は測線近傍のアレイ観測地点，写真はJA9地点の被災状況）

表-2 JA9地点S波速度構造

土質区分	$h(m)$	$\rho(t/m^3)$	$V_s(m/s)$
粘性土	2	1.8	136
粘性土	4	1.6	80
粘性土	3.5	1.8	140
砂質土	5	1.9	200
砂質土	4	2.0	300
砂質土	4.5	2.0	380
砂質土	8	2.0	316
砂質土	8.5	2.0	320
砂礫	8	2.0	385
砂礫	15.5	2.1	478
砂礫	28	2.1	706

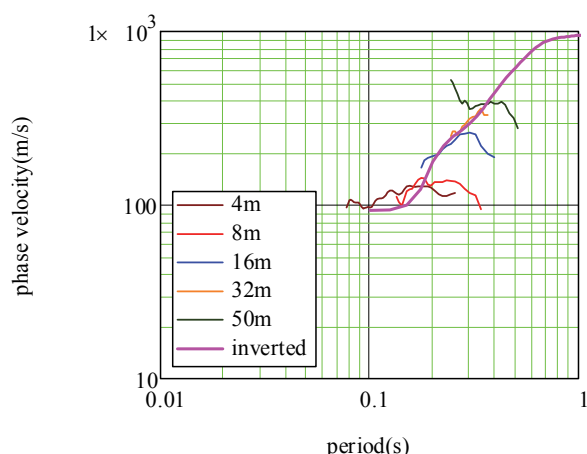


図-9 位相速度 (JA9)

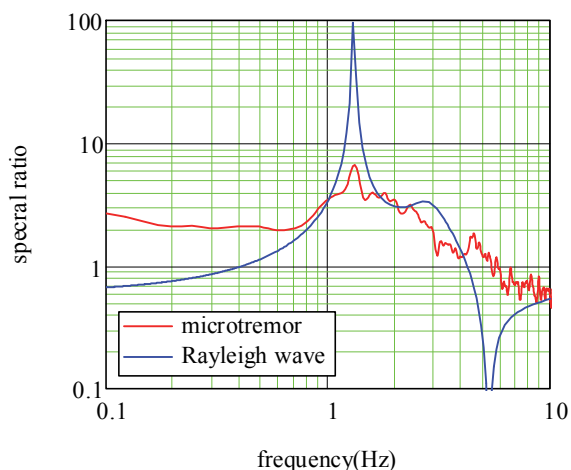


図-10 H/Vスペクトル (JA9)

JA9地点の推定されたS波速度構造を表-2に示す。位相速度の観測値と表に示したS波速度構造による理論値の比較を図-9に、H/Vスペクトルの常時微動観測値とレイリー波基本モードの値の比較を図-10に示す。東西、南北測線のピーク周波数の推定分布を図-11に示す。距離はNS方向は北から、EW方向は西からの距離である。

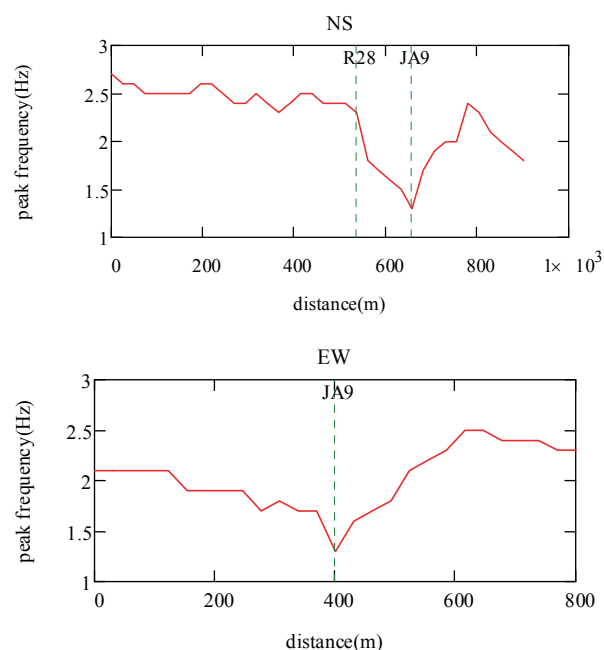


図-11 ピーク周波数分布

南北測線では県道28号 (R28) よりも北側では概ね一定であり、県道28号よりも南側で急激に減少し、JA9地点で最も低い値となり、いったん増加した後再度減少する。東西測線では全体的に西側が東側と比較して若干低い値であるが、JA9地点が最小の地点である点では共通している。

東西・南北各断面の有限要素モデルは図-12に示すとおりである。標高については文献13) をもとに設定した。地下水位面については、文献14)に掲載されていたボーリングデータを参照して設定することとし、南北断面では最北部で地表以下-15m、県道28号部で-2mとし、両者の間は直線で地下水位面を設定した。県道28号より南側は地表以下-2mで一定とした。東西断面は地表以下-2mで一定とした。

4. 地震応答解析による各地点の地震動評価

(1) 解析手法

2次元有限要素法による有効応力解析によって地表の地震動を評価した。用いた解析コードはFLIP[®]である。地盤物性は同手法の標準的な方法¹⁰⁾により設定している。なお、 $V_s=200m/s$ の砂層は液状化対象層と扱い、液状化パラメータを設定した。解析は上述した東西・南北断面に対して図-3および図-4に示したKiK-net 益城の $V_s=760m/s$ の入射地震動のそれぞれEW成分、NS成分を底面粘性境界に入力した。解析には各図に示した30秒間に後続波形を含めた55秒間の波形を用いている。JA9地点については多次元効果を検討するため、1次元モデルも

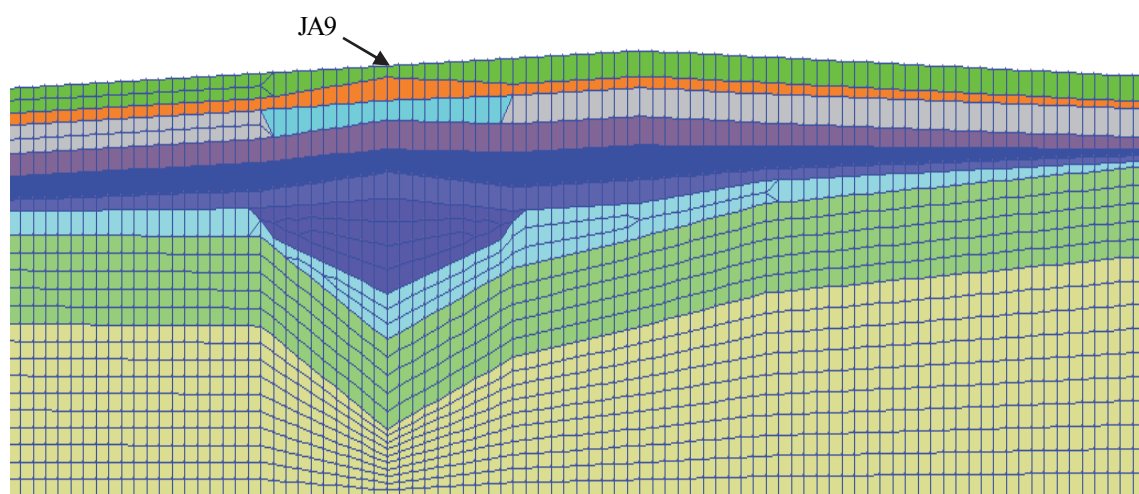
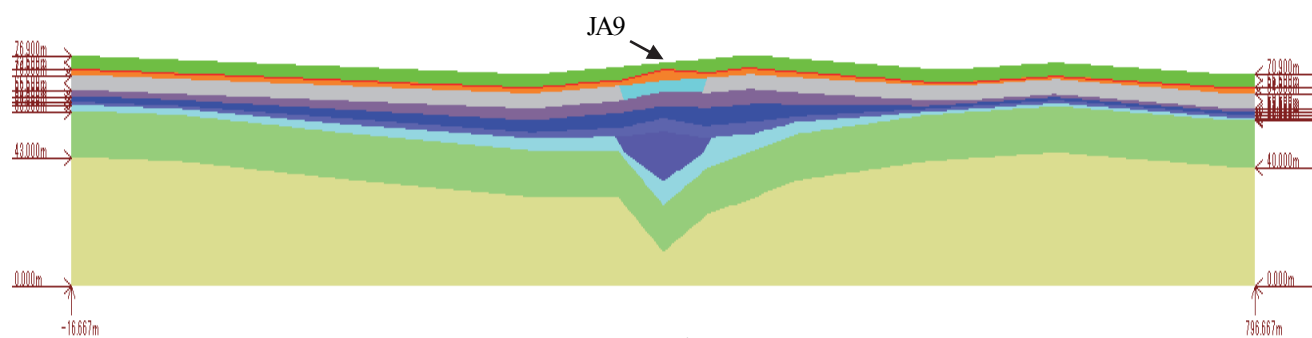
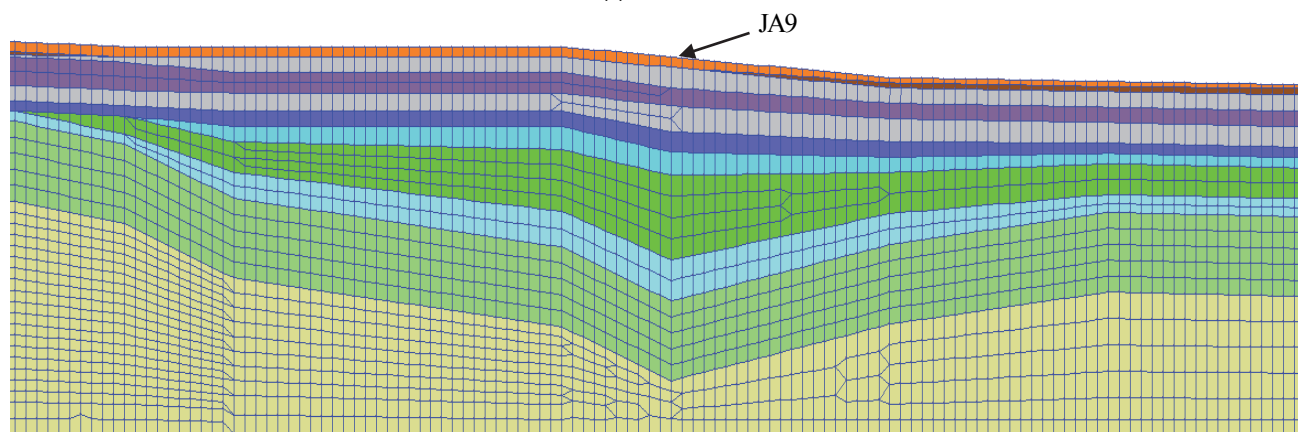
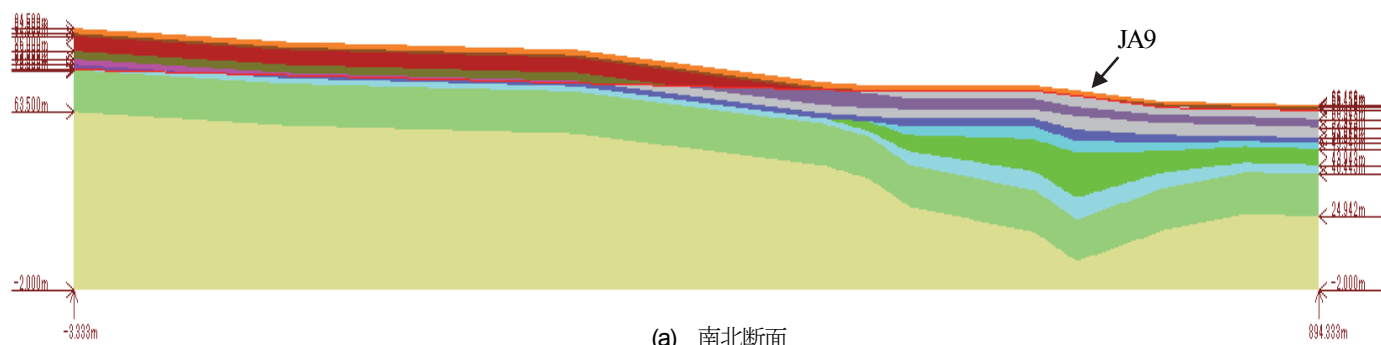


図-12 有限要素断面（2次元断面）

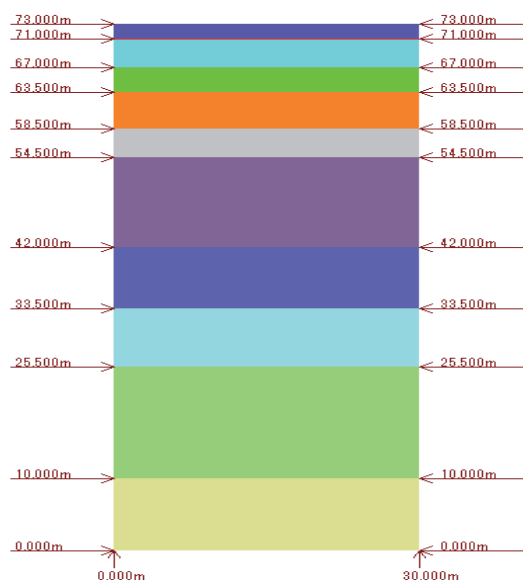


図-13 1次元断面 (JA9)

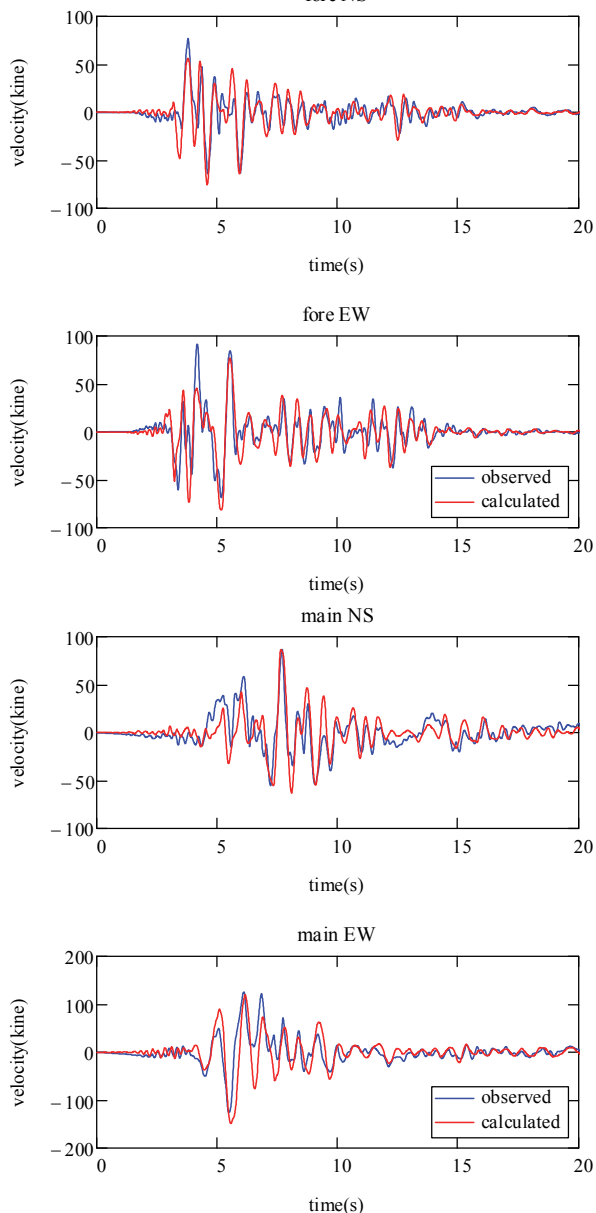


図-14 KiK-net益城地点の地震動

作成して検討を行った(図-13)。KiK-net益城地点でも1次元モデルを作成して検討を行った。なおKiK-net益城地点においては液状化対象層は設定していない。

(2) 解析結果

まずKiK-net益城地点の1次元モデルによる解析結果について、速度応答の比較を図-14に示す。速度波形は、0.1Hzのハイパスフィルターを乗じることで求めている。前震(fore)、本震(main)ともに、概ね観測波形を再現できているといえる。

JA9地点は上述の通り検討対象範囲では最も住宅被害の激しかったと考えられる地点である。本震による地表の応答として、図-15に1次元モデルによる結果を、図-16に2次元モデルによる結果を示す。

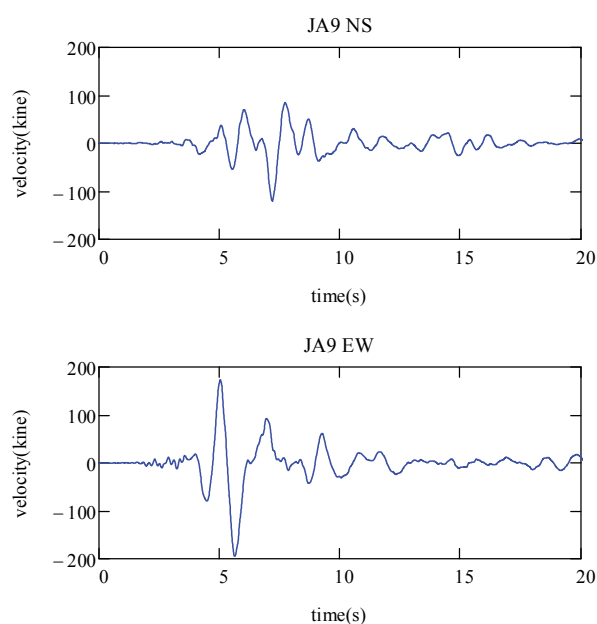


図-15 JA9地点の地震動 (1次元解析)

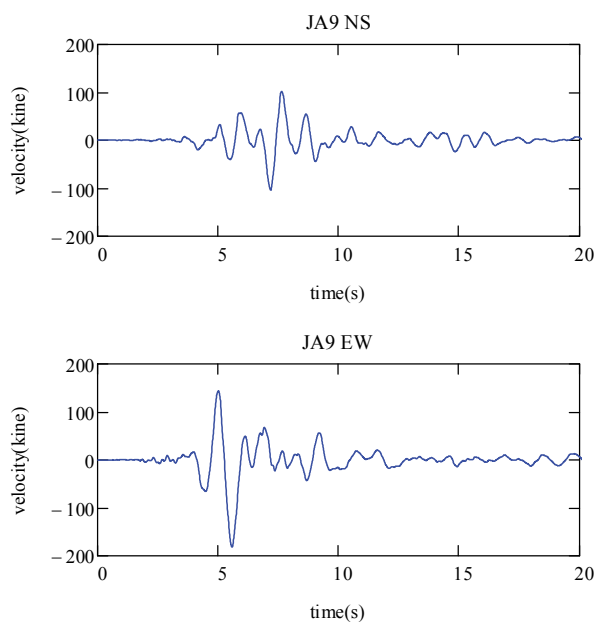


図-16 JA9地点の地震動 (2次元解析)

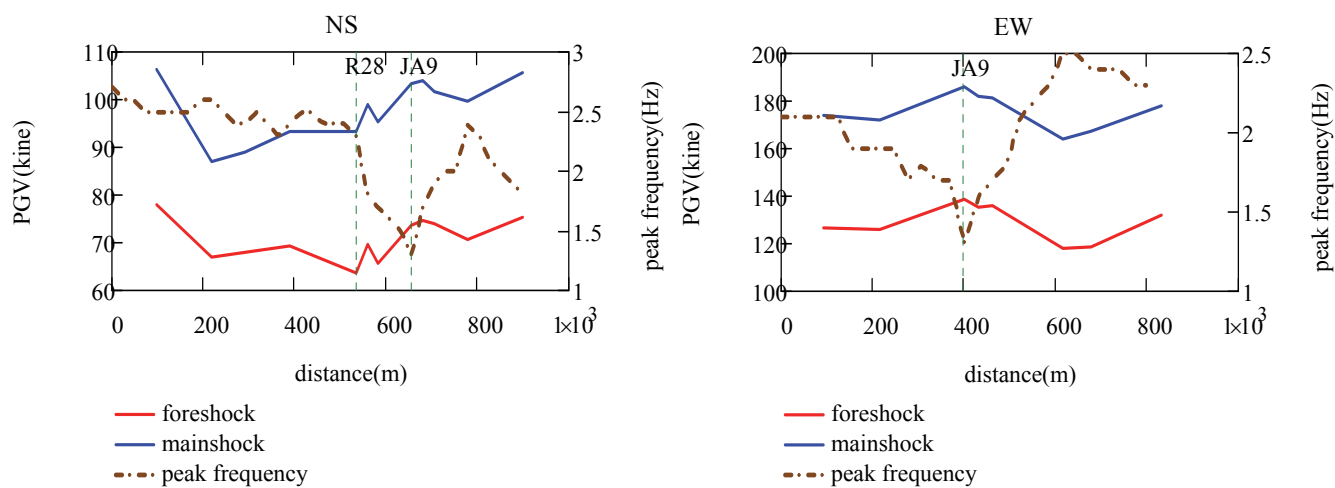


図-17 PGV分布 (2次元断面)

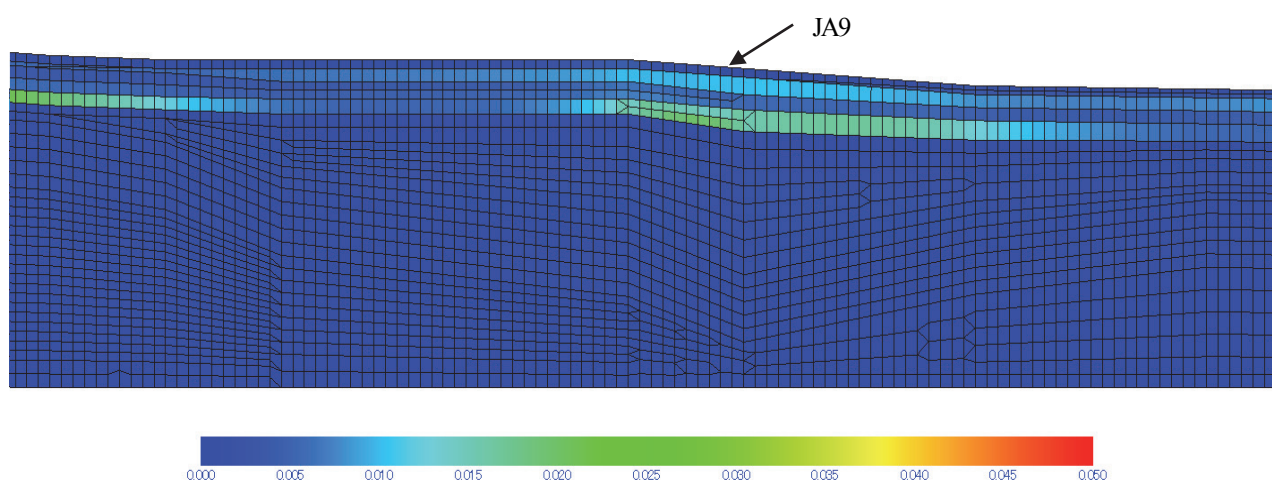


図-18 最大せん断ひずみ分布 (南北断面, 本震, JA9近傍)

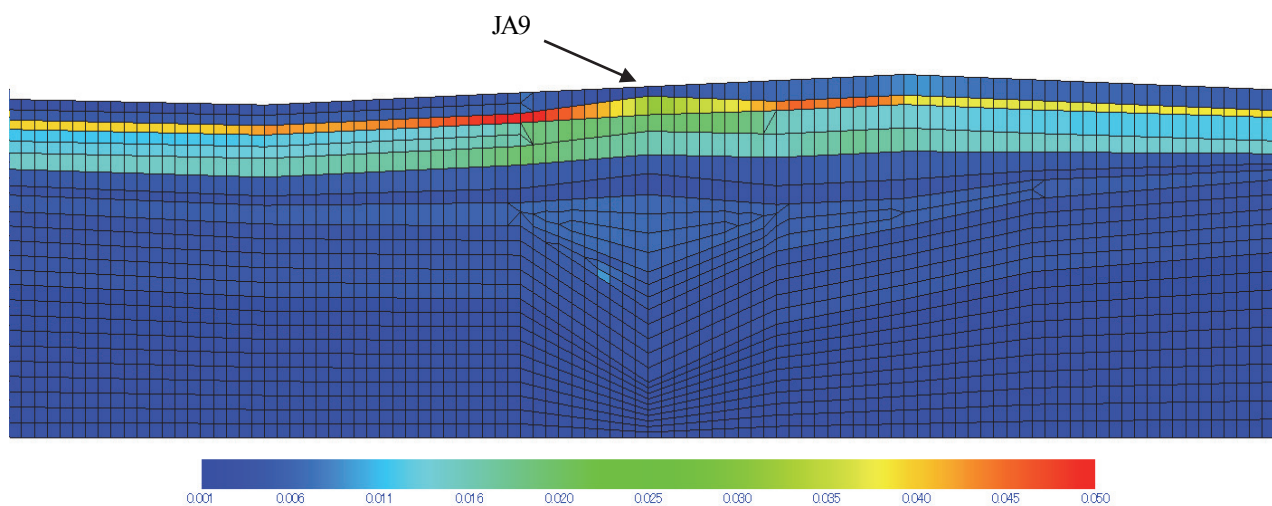


図-19 最大せん断ひずみ分布 (東西断面, 本震, JA9近傍)

図より、JA9地点では190cm/s程度以上の最大速度振幅となった。また、1次元解析と2次元解析では地震応答に差は少なく、速度応答の最大値としてはむしろ1次元解析のほうが大きな値となった。JA9地点のS波速度構造における近傍地点との違いは、図-12に示したように、主に $V_s=300\text{m/s}$ 以上の層厚によるものであり、地震動増幅の観点からの近傍地点との違いは大きくなかったことや、2次元解析では標高の違いなどを表現しているため、1次元解析との間に若干の違いが生じたものと考えられる。

図-17に2次元解析によるPGVの分布を示す。図中のピーク周波数は図-11に示したものと同一である。JA9地点の近傍が速度応答が大きくなっている傾向が確認できる。ただし、検討断面のなかでの応答値の違いはそれほど大きなものではない。図-18及び図-19に、本震を対象に、JA9地点近傍の最大せん断ひずみの分布を示す。JA9地点で他の地点と違いが大きい $V_s=300\text{m/s}$ 以上の層については、せん断ひずみの値に他地点と比較して大きな違いは認められない。東西断面の $V_s=80\text{m/s}$ の第2層について、JA9地点よりもその近傍地点の方が大きな値となっている。これは地盤構造が均質でないためであると考えられ、多次元効果はむしろJA9地点よりもその近傍の地点で影響が大きかったといえる。なお、液状化対象層と設定した $V_s=200\text{m/s}$ の砂層は、前震・本震いずれにおいても液状化の状態であった。

5. まとめ

本研究では、2016年熊本地震により甚大な住宅被害の生じた熊本県益城町について、特に被害の激しかった地点を中心にした東西・南北測線について工学的基盤に至る地盤構造を常時微動観測結果より推定し、1次元及び2次元非線形地震応答解析によって各地点の地震動を評価した。本研究により得られた主要な結論は以下の通りである。

- (1)被害の非常に激しかった地点（文献1のJA9）の地表の最大速度は190cm/s程度以上となる結果が得られた。
 - (2)JA9地点について2次元モデルと1次元モデルを比較した結果、本研究の範囲では両者の違いは僅かなものであった。これは、JA9地点のS波速度構造における近傍地点との違いが、主に $V_s=300\text{m/s}$ 以上の層厚によることなどのためであると考えられる。
 - (3)検討した範囲では、解析中心点（JA9地点）近傍がPGV最大の地点であり、被害の大小と整合する。ただし、2次元解析断面における地点ごとのPGVの差は僅かなものであった。
- 今後は、他の常時微動観測地点についても同様の解析

を実施し、被害の大きかったエリア全体の地震動を評価する予定である。

謝辞：K-NETおよびKiK-netの強震観測記録については独立行政法人防災科学技術研究所のホームページ(<http://www.kik.bosai.go.jp>)より入手しました。益城町の臨時強震観測記録はHata et al.によるものを使用しました。解析の実施にあたり、2次元解析モデルの作成等について神戸大学工学部市民工学科（当時）・梅田遥河氏に協力いただきました。ここに感謝します。

参考文献

- 1) 長尾 毅, Tara Nidhi Lohani, 福島康宏, 伊藤佳洋, 北後明彦, 尾茂淳平: 2016 年熊本地震による益城町の地震被害と地盤震動特性の相関に関する研究, 第35回地震工学研究発表会, 2016.
- 2) Aoi, S., Obara, K., Hori, S., Kasahara, K. and Okada, Y.: New strong-motion observation network: KiK-net, *Eos Trans. Am. Geophys. Union*, Vol. 81, 329, 2000.
- 3) <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>, 平成 29 年 8 月 15 日閲覧
- 4) Aki, K.: Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, *Bull. Earthq. Res. Inst., University of Tokyo*, Vol. 35, pp. 415-456, 1957.
- 5) Haskell, N. A.: The dispersion of surface waves on multi-layered media, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 43, No. 1, pp. 17-34, 1953.
- 6) Goto H., Hata Y., Yoshimi M. and Yoshida N.: Nonlinear Site Response at KiK-net KMMH16 (Mashiki) and Heavily Damaged Sites during the 2016 Mw 7.1 Kumamoto Earthquake, Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Volume 107, Number 3
- 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講演集, pp.539-542, 1985.
- 8) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, 1-15, 1992.
- 9) Hardin, B. O. and Drnevich, V. P. (1972): Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves, *J. SMFD, Proc., ASCE*, Vol.98, No.SM7, pp.667-692
- 10) 森田年一, 井合進, Hanlong Liu, 一井康二, 佐藤幸博: 液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメータの簡易設定法, 港湾技研資料 No.869, 1997.
- 11) Yoshimi, M., Y. Hata, H. Goto, T. Hosoya, S. Morita, and T. Tokumaru: Boring exploration result in Kumamoto-ken Mashiki-machi, *Proc. of Fall meeting, Japanese Society for Active Fault Studies*, 2016. (in Japanese)
- 12) Philip, G. M. and Watson, D. F.: A Precise Method for Determining Contoured Surfaces, *Australian Petroleum Exploration Association Journal*, Vol. 22, pp. 205-212, 1982.
- 13) <http://lab.its-mo.com/glid-addr/>, 平成 29 年 8 月 22 日閲覧
- 14) (一社) 全国地質調査業協会連合会: 平成 28 年(2016

EVALUATION OF STRONG-MOTION AT MASHIKI TOWN DURING THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE BY EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSIS

Takashi NAGAO and Daisuke SHIBATA

The 2016 Kumamoto Earthquake caused severe damage on houses at Mashiki Town in Kumamoto Prefecture. Microtremor measurement was conducted at various sites in Mashiki Town in the previous study. In this study, S-wave velocity profiles at various sites including the most severely damaged site were estimated. Incident seismic motions at engineering bedrock of the KiK-net observation site during the Kumamoto earthquake were evaluated by the equivalent linear analysis. Both two-dimensional and one-dimensional nonlinear earthquake response analysis were conducted in order to evaluate the strong-motion during the largest foreshock and mainshock of the Kumamoto Earthquake.