2016年熊本地震におけるKik-net益城観測点の地震時挙動について

末冨　岩雄[1]・福島　康宏[1]・尾茂　淳平[1]

[1]正会員　株式会社エイト日本技術開発　災害リスク研究センター　地震防災グループ
（〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11）
E-mail: suetomi-i@ej-hds.co.jp, fukushima-ya@ej-hds.co.jp, oshige-ju@ej-hds.co.jp

2016年熊本地震では，益城町役場の震度計で4月14日(M6.5)と4月16日(M7.3)の2度の地震で震度7を観測した．この500m程度北の辻の城公園に設置されているKiK-net益城では鉛直アレーでの強震観測記録が得られている．益城町役場から南の秋津川までのエリアでは甚大な建物被害や地盤変状が見られた．この要因を検討する上では，入力地震動の大きさが重要となる．本論文では，KiK-net益城での観測記録を用いた地震応答解析を行い，工学的基盤上の地震動を推定した． 得られた地震動は，周期0.6秒以下では設計スペクトルと同程度までに収まっているが，周期0.7～1.3秒では上回るものとなった．

Key Words : *2016 Kumamoto earthquake, equivalent-linear analysis, array observation record, input ground motion for aseismic design*

１．はじめに

2016年4月14日21時26分頃，熊本県熊本地方でM6.5の地震が発生し，最大震度７が熊本県益城町で観測された．さらに，約28時間後の4月16日1時25分頃，M7.3の地震が発生し，最大震度７が熊本県益城町と西原村で観測され，震度6強も多くの地点で観測された[1)]．特に益城町では，2度の震度7を観測し，その記録が得られた益城町役場より南側で甚大なる建物被害が生じた．

建物被害あるいは水道管等のライフライン施設被害と地震動の大きさの関係等を論ずる上では，表層地盤特性の差異の把握（地盤特性の分布）と工学的基盤上の地震動の評価が重要となる．秦ら[2)]は数点で臨時観測により4/16の地震を観測しており，また複数の研究グループにより微動観測も密に行われている．益城町役場より，やや北に位置し，甚大な建物被害が生じた地域よりは硬質地盤となるKiK-net益城(KMMH13)において，余震等も含めた鉛直アレー観測記録が得られている[3)]．

本論文では，KiK-net益城での観測記録を用いて，工学的基盤上の地震動について検討する．KiK-net益城の地中記録はGL-252mと通常の工学的基盤よりも深く硬いので，深さ20～50m程度の工学的基盤での地震動を地中入力の増幅解析と地表入力の逆増幅解析により算定し，応答スペクトルの大きさについて検討する．

２．解析条件の検討

⑴ 地震応答解析手法

末冨・吉田 [4)]の検討に基づき，増幅解析，逆増幅解析の双方で安定性が高い拡張 FDEL 法を用いる．これは，杉戸ら [5)]による FDEL 法で有効ひずみを決めると，周波数の高いところで剛性を小さく減衰を大きく評価するので，式(1)のようにパラメータを加えて強震記録での適合性を改善したものである．

$$\gamma_{eff} = C \cdot \left(\frac{F_{\gamma}(f)}{F_{\gamma_{max}}} \right)^{p} \cdot \gamma_{max} \qquad (1)$$

ここで，$F\gamma(f)$はひずみ波形のフーリエスペクトル，$F\gamma_{max}$はその最大値である．この場合，剛性，減衰とも周波数の関数となる．ここで，$F\gamma(f)$は一般にかなり起伏が大きい関数形状をしているので，三角形ウインドウによる平滑化を行っている．C=0.65，p=1.0 で杉戸らが提案する FDEL に一致する．末冨・吉田 [4)]に基づき，p=0.5，C=0.8 を用いる．

⑵ 表層地盤モデル

Kik-net 益城は，辻の城公園内に設置されている．公園周囲では，応急危険度判定で 1 棟「赤」となっているなど被害は見られるものの，南の県道 28 号周辺ほどではない．PS 検層結果 [3)]に基づき，**表−1** のようにモデル化する． GL-41m より上で非線形化するものとして，安田・山口 [6)]の式により動的変形

特性を設定した．

表−1　表層地盤モデル [3)]

No.	土質・岩種	層厚(m)	Vs(m/s)
1	火山灰質粘土	3	110
2	砂	12	240
3	軽石凝灰岩	18	500
4	火山灰質粘土	8	400
5	砂礫	28	760
6	凝灰角礫岩	32	820
7	安山岩	32	1470
8	凝灰角礫岩	10	700
9	安山岩	26	1380
10	凝灰岩	32	840
11	安山岩	33	1470
12	安山岩	―	2700

(3) 地震観測記録の概要

気象庁が公表する震度において，**表−2** に示す 7 地震で最大震度 6 弱以上を記録している [1)]．

表−2　最大震度 6 弱以上を観測した地震 [1)]

発生時刻	震央地名	M	最大震度
4 月 14 日 21 時 26 分	熊本県熊本地方	6.5	7
4 月 14 日 22 時 07 分	熊本県熊本地方	5.8	6 弱
4 月 15 日 00 時 03 分	熊本県熊本地方	6.4	6 強
4 月 16 日 01 時 25 分	熊本県熊本地方	7.3	7
4 月 16 日 01 時 45 分	熊本県熊本地方	5.9	6 弱
4 月 16 日 03 時 55 分	熊本県熊本地方	5.8	6 強
4 月 16 日 09 時 48 分	熊本県熊本地方	5.4	6 弱

地表と地中における観測加速度波形を 4/14(M6.5)の地震について**図−1** に，4/16(M7.3)の地震について**図−2** に示す．加速度振幅は 2 つの地震で同程度であるが，M7.3 の地震の方がやや長い周期の成分が見られる．また，いずれの地震，成分でも，地中(GL-252m)での観測波に比べ地表では大きく増幅されていることがわかる．

(4) 鉛直アレー観測記録のスペクトル比

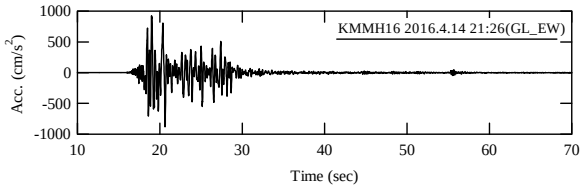
KMMH16（ KiK-net 益城 ）で一連の熊本地震の際に観測された記録から算出したフーリエ・スペクトル比を**図−3** に示す．ここでは，水平 2 成分を合成してスペクトル比を算出している．2 地震を除いて算出した平均スペクトル比とその標準偏差を**図−4** に示す．赤色と橙色で示した 2 つの地震のスペクトル比の形状は似ており，5Hz 弱で卓越している平均スペクトル比よりはピークが低周波数側に移り，3Hz 以上では比の値も小さくなっていることから，表層地盤が非線形挙動を示したと推察される．

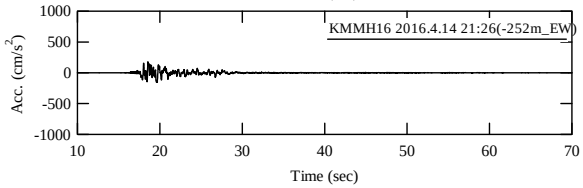
３．地震応答解析結果

表層地盤の等価線形地震応答解析（拡張 FDEL 法）を，4/14(M6.5)と 4/16(M7.3)の 2 地震について，GL-252m 位置の観測波を入力する増幅解析と地表位置に観測波を入力する逆増幅解析を行った．解析には，各種の一次元等価線形解析を扱える DYNEQ[7)]を用いた．工学的基盤として Vs=350～400m/s 程度を考えるなら GL-15m，それより硬い Vs=700m/s 程度を考えるなら GL-41m の位置がそれぞれ工学的基盤上面に相当する．地中の GL-252m から推定するには工学的基盤が浅く，また地表から推定するには表層の非線形挙動をどの程度再現できるか，という課題があるので，地中入力の増幅解析と地表入力の逆増幅解析の両者で行って結果を比較するものである．

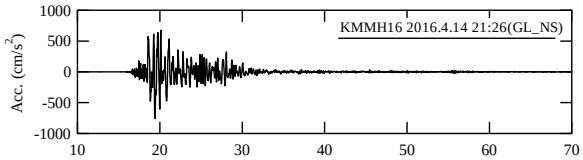
解析により得られた加速度波形を**図−5** と**図−6** に，最大加速度等の鉛直分布を**図−7** と**図−8** に，伝達関数を**図−9** に示す．4/16(M7.3)の地震の EW 成分は，比較的よく観測波を再現できている．一方で，4/14(M6.5)の地震では，解析ではやや周期の長い成分が観測より大きくなっている．最大加速度の鉛直分布では，増幅解析と逆増幅解析の差は大きくない．観測値（増幅解析での地中位置，逆増幅解析での地表位置）とも概ね対応しているので，また最大せん断ひずみも増幅解析の EW 成分で 3%程度に達するものの他は 1%以内に収まっているので，初期段階の解析としては妥当な結果が得られていると考えられる．しかしながら，最大相対変位の分布では，GL-15m より浅いところで差が大きくなる．最大せん断ひずみも GL-10m～15m で差が大きい．4/14(M6.5)の地震では，EW 成分で深い部分でも差が生じている．線形条件の伝達関数と**図−4** の平均スペクトル比の差は小さくなく，まだ**表−1** の地盤モデルについては改善の余地が大きいと考えられる．少なくとも，土質の変化と S 波速度の変化が対応するように見直すことは必須と考えられる．

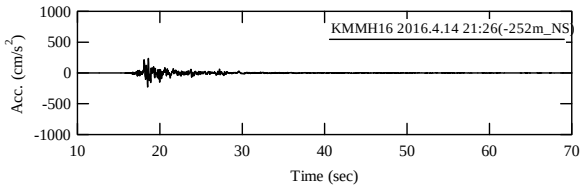
地中入力の増幅解析により得られた GL-15m と Gl-41m での解放基盤波の加速度応答スペクトル（減衰 5%）を**図−10** に示す．水平 2 成分を合成した値を示している．合わせて，「鉄道構造物等設計標準・同解説」[8)]（以下，鉄道標準）では，工学的基盤上のスペクトルを記しているので，その内陸型地震に対応するスペクトルⅡを示している．　また「道路橋示方書・同解説　Ⅰ～Ⅴ」[9)]では，工学的基盤上のスペクトルは示されていないので，ここではⅠ種地盤のタイプⅡ（内陸型）のスペクトルを示している．地震応答解析により得られたスペクトルと比較すると，周期 0.6 秒以下では設計スペクトルと同程度までに収まっている．周期 0.7～1.3 秒において，4/14(M6.5)の地震では同程度の大きさであるが，4/16(M7.3)の地震では明らかに上回るものとなっている．益城町役場では，KiK-net 益城でのピーク周期 0.8 秒付近より長い周期 1.2 秒付近が卓越している．表層での観測波に比べ，解析ではややその成分が小さいので，最初に述べた益城町中心部での被害を論じる上では，より精度を高める必要はあるものの周期 1 秒前後の成分が工学的基盤で大きなものであったと考えられる．



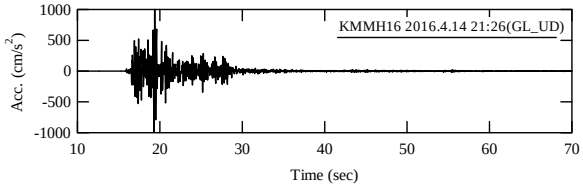


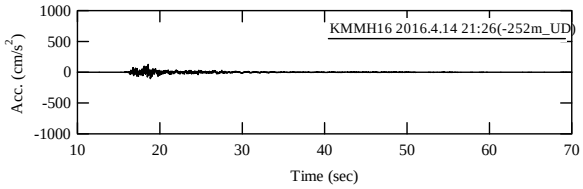
(a)EW 成分





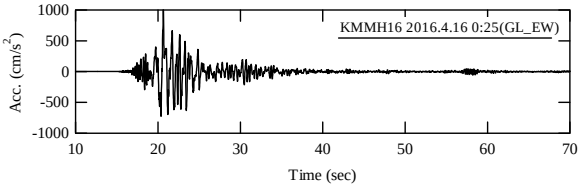
(b)NS 成分

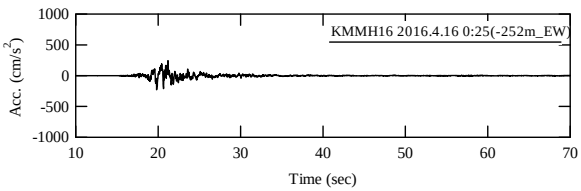




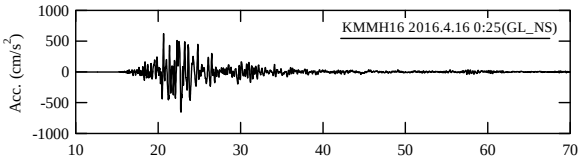
(c)UD 成分

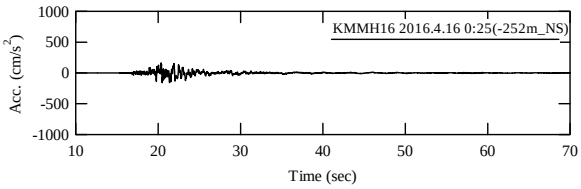
図-1　観測加速度波形（4/14　M6.5）
（各成分とも上段が地表，下段が GL-252m）



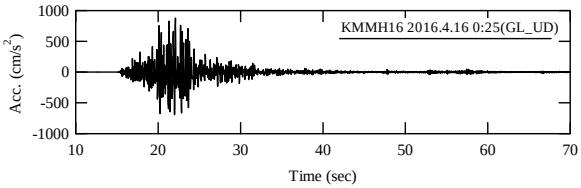


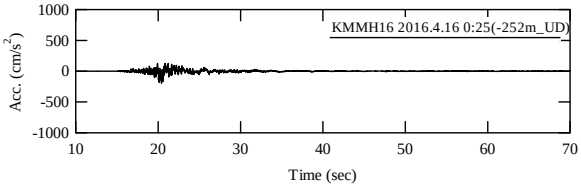
(a)EW 成分





(b)NS 成分





(c)UD 成分

図-2　観測加速度波形（4/16　M6.3）
（各成分とも上段が地表，下段が GL-252m）

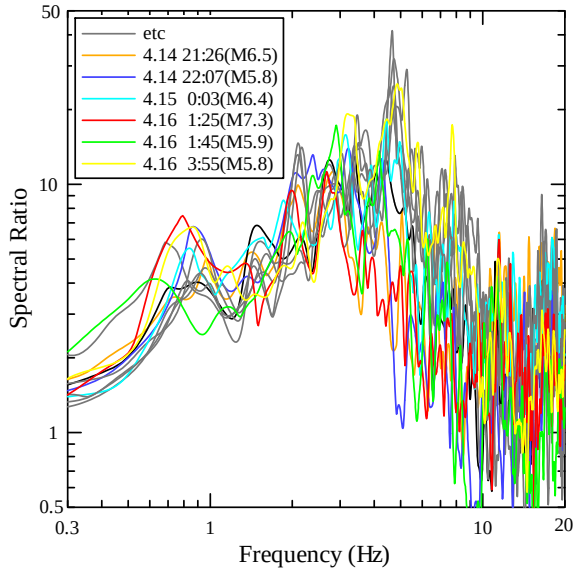


図-3　観測地震におけるスペクトル比（地表/GL-252m）

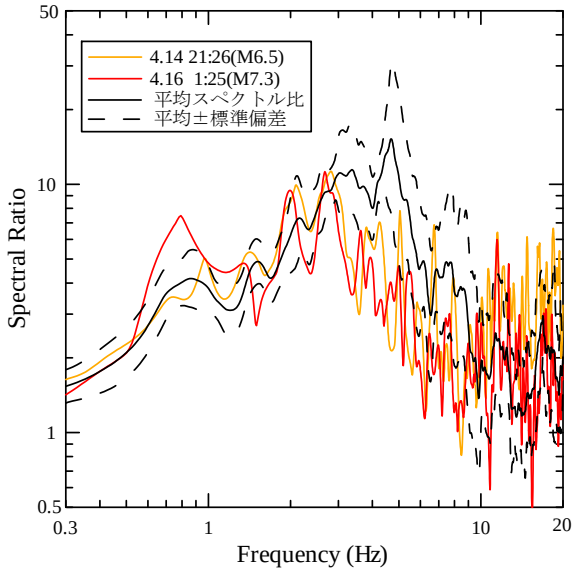
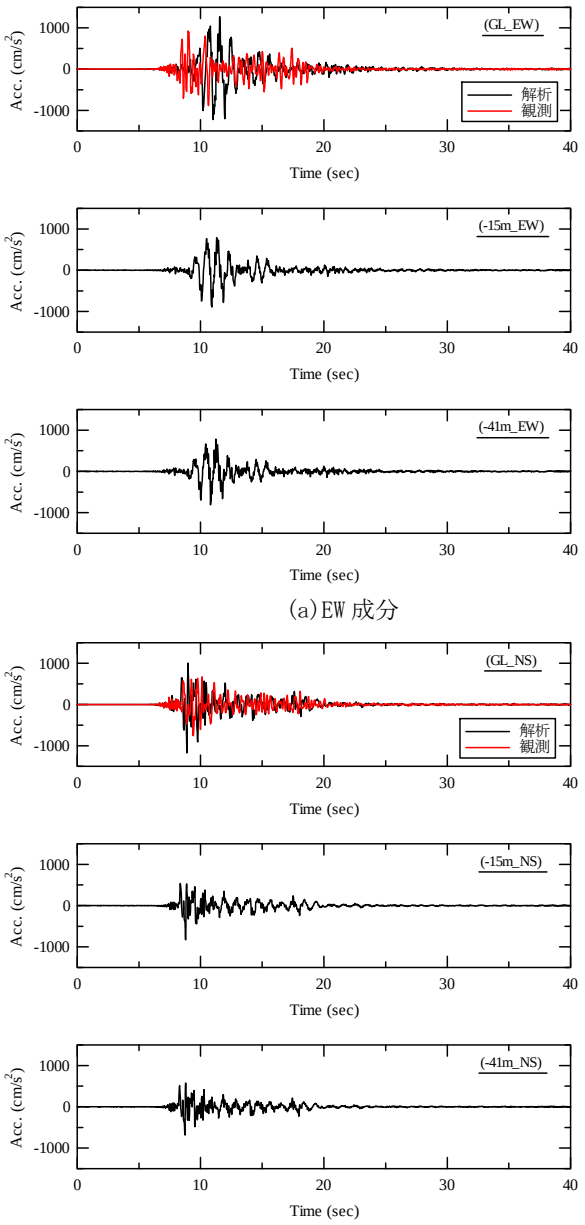


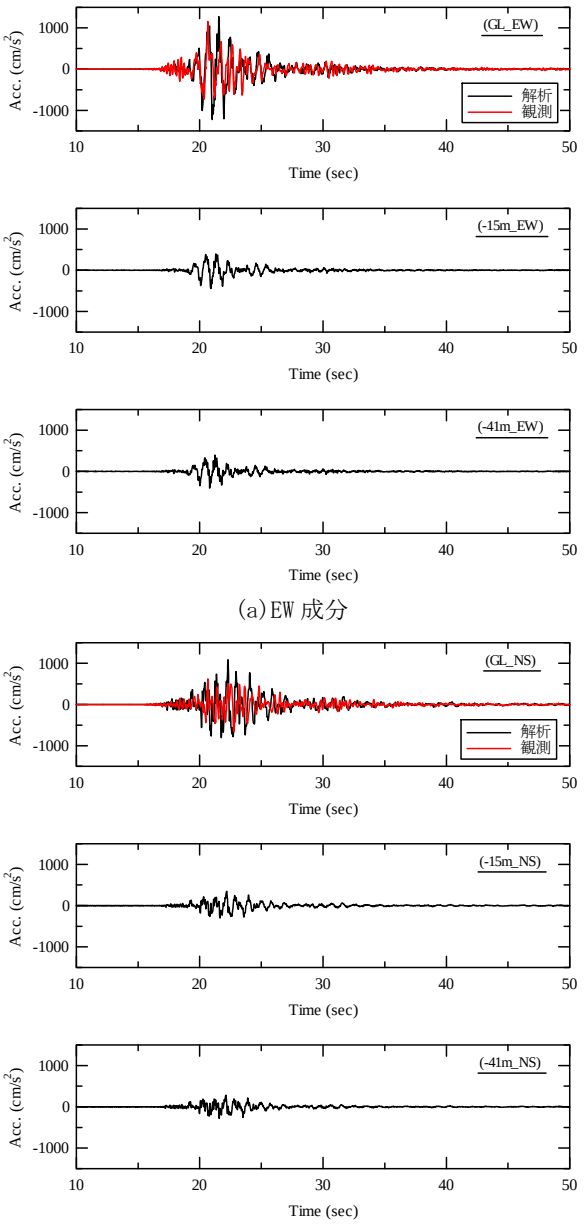
図-4　観測地震の平均スペクトル比（地表/GL-252m）



(a)EW 成分

(b)NS 成分

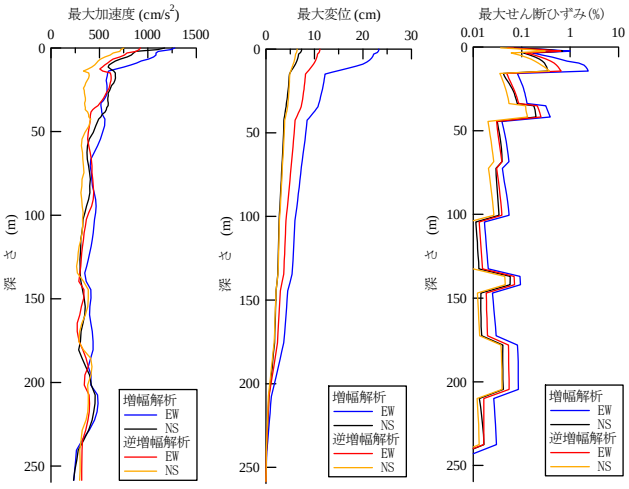
図-5　地震応答解析による加速度波形(4/14)



(a)EW 成分

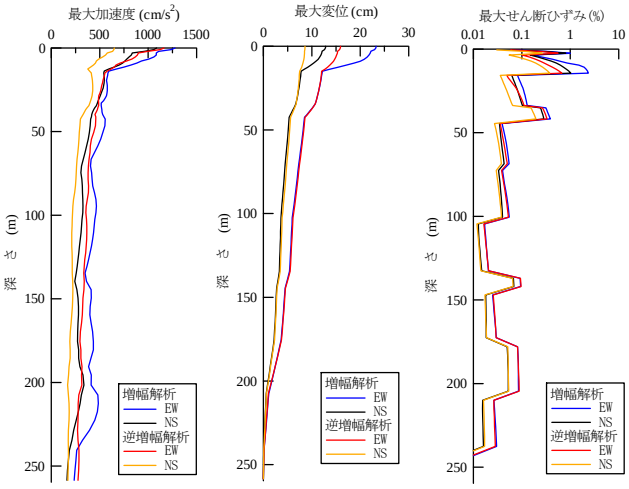
(b)NS 成分

図-6　地震応答解析による加速度波形(4/16)



(a)加速度　(b)相対変位　(c)せん断ひずみ

図-7　最大加速度等の鉛直分布(4/14)



(a)加速度　(b)相対変位　(c)せん断ひずみ

図-8　最大加速度等の鉛直分布(4/16)

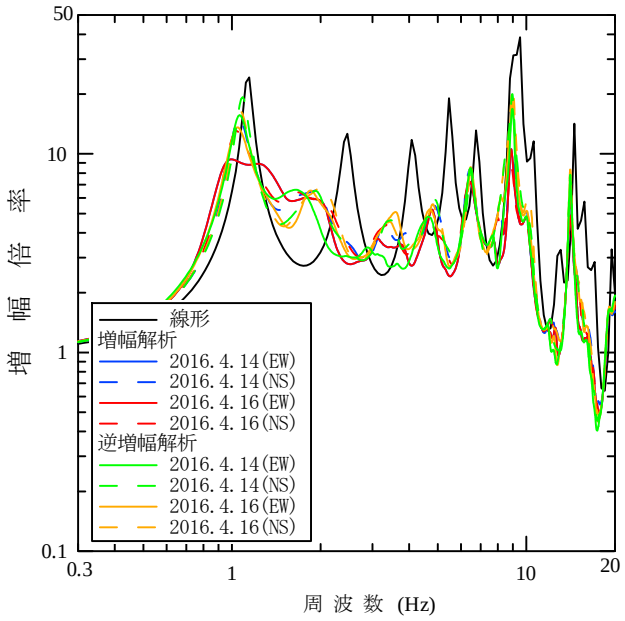


図-9　地震応答解析による伝達関数

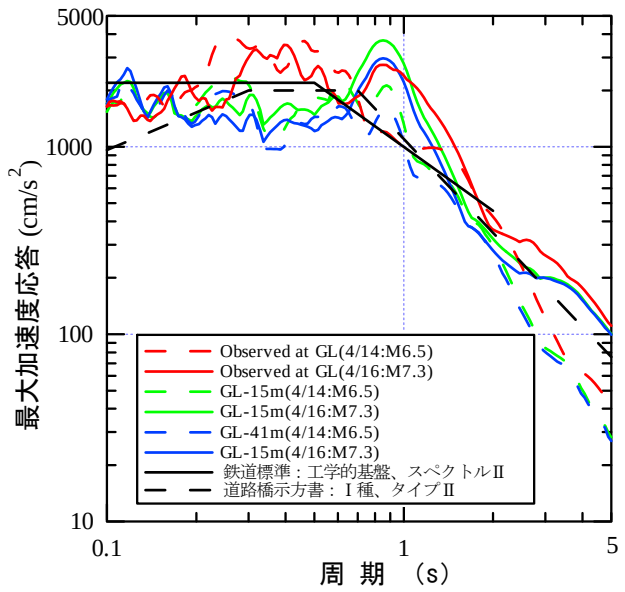


図-10　工学的基盤上の加速度応答スペクトル（減衰5%）

4．まとめ

本論文では，2016 年熊本地震の際に KiK-net 益城で観測された強震記録を用いて，表層地盤の地震応答解析を行い工学的基盤上の地震動を推定した．この検討により，以下の知見が得られた．

1) 観測記録の地表と地中のフーリエ・スペクトル比では 4.5Hz 付近が卓越している．これに対応すると考えられるピークは 4/14(M6.5)と 4/16(M7.3)の強震時には，2.8Hz 付近に低下しており，地盤の非線形が生じたものと考えられる．
2) 拡張 FDEL 法による地震応答解析を行い，地中 GL-252m で入力する増幅解析，地表で入力する逆増幅解析の結果は概ね整合し，観測記録とも大きな矛盾はない結果が得られた．
3) 得られた工学的基盤上の地震動は，周期 0.6 秒以下では設計スペクトルと同程度までに収まっているが，周期 0.7～1.3 秒では上回るものとなった．

今回は PS 検層による S 波速度等を用いて地盤モデルを構築したが，観測記録のスペクトル比と線形での伝達関数の差異は小さくない．今後，地盤モデルを観測記録に適合するように修正して，解析の精度を高める予定である．

謝辞：本論文では，国立研究開発法人 防災科学技術研究所による地震観測データを使用させて頂きました．関係各位に感謝の意を表します．

参考文献

1) 気象庁: 平成 28 年 4 月 14 日 21 時 26 分頃の熊本県熊本地方の地震について，報道発表資料，http://www.jma.go.jp/jma/press/1604/
2) HATA, Y., GOTO, H. and YOSHIMI, M.: Preliminary Analysis of Strong Ground Motions in the Heavily Damaged Zone in Mashiki Town, Kumamoto, Japan, during the Main Shock of the 2016 Kumamoto Earthquake (Mw7.0) Observed by a Dense Seismic Array, Seismological Research Letters, 2016, in printing.
3) 防災科学技術研究所 強震観測網 web サイト：http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/
4) 末冨岩雄，吉田望：周波数依存型地盤応答解析におけるパラメータの最適化のための一検討，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 72，No. 4，pp.177-187, 2016.
5) 杉戸真太，会田尚義，増田民夫：周波数特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，pp.49-58, 1994.
6) 安田進，山口勇：種々の不撹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.
7) 吉田望：DYNEQ(V3.35), http://www.civil.tohoku- gakuin.ac.jp/yoshida/computercodes/index.html, 2010(2015 年 6 月 1 日閲覧).
8) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，2012.
9) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2012.

AMPLIFICATION AT KIK-NET MASHIKI DURING THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE BASED ON THE DYNAMIC ANALYSIS

Iwao SUETOMI, Yasuhiro FUKUSHIMA and Junpei OSHIGE

Strong ground motions with the seismic intensity scale of 7 were observed twice at Mashiki town office during the 4/14 earthquake (M6.5) and the 4/16 earthquake (M7.3). Strong ground motion resords were also observed at vertical array of KiK-net Mashiki where is in the 500m north more than the town office. Buildings which were from Mashiki town office to the Akiba river were heavily damaged. In order to investigate the causes of the building damages, input ground motion is important. Improved FDEL, equivalent linear methods developed to improve the disadvantage of SHAKE by considering frequency dependency of material property, are used for the dynamic analysis of observed records at KiK-net Mashiki. The estimated response spectra at engineering basement by the analyses are larger than the design spectra in the period from 0.7 to 1.3 second.