

熊本地震による長崎県での地震動データの応答解析

内田美寿々*・中原浩之**

Analytical Study on Response Spectra of Vibration Data at Nagasaki Prefecture by Kumamoto Earthquakes

by

Misuzu UCHIDA* and Hiroyuki NAKAHARA**

The 2016 Kumamoto Earthquake which occurred on and after April 14th caused tremendous damage to many buildings. The M6.5 and M7.3 earthquakes occurred on April 14th and 16th continuously by moving the Futagawa fault and Hinagu fault in Kumamoto prefecture. Seismic intensity 5 was observed in Minami-shimabara in Nagasaki prefecture which was known as the area with low seismic hazard level. This report summarizes the results of the response analysis based on the recorded strong motions at 14 seismographs in Nagasaki. The filed survey of damaged buildings was compared to the earthquake spectra.

Key words : strong motion waveform, design codes for seismic force in Japan, average acceleration method, Level-1 earthquake, Level-2 earthquake

1. 序

平成 28 年 (2016 年) に熊本県上益群益城町を震源とした震度 7 (気象庁震度階級では最大) を観測する地震が、4 月 14 日と 4 月 16 日に連続して発生した。布田川断層帯と日奈久断層帯を要因としたこれらを含む一連の地震活動を、熊本地震と呼んでいる。

この熊本地震によって長崎県内では南島原市で震度 5 強が観測されている。長崎県内には主要な断層帯として雲仙断層群が存在しており、過去には島原半島を震源とした地震活動が起こった記録がある。

本研究では、防災科学技術研究所の強震観測網¹⁾(以下、K-NET と称す) の強震記録を使用して、主に、長崎地区の地震動特性を地震応答解析により調べる。K-NET とは、全国 1000 箇所以上に強震常時観測施設をもち、長崎県内には 23 箇所の観測設置点が存在している。

著者らの既往研究である文献²⁾の地震ハザードマップによると、長崎県内は全国で最も揺れにくい地域に区分されており、法律上の地震地域係数は 0.8 と沖縄を除く最小の値となっている。このような地域において、記録された強震は非常に貴重なデータとなり、本論のスペクトル解析が、今後の長崎の地震防災に寄

すると考えられる。また、この熊本地震は、気象庁震度 7 を 2 度連続で観測されるという特徴を有している。2 度の強震記録を用いて、より詳細に長崎での地震動特性を考察することができる。また、これらの地震動の特徴と、長崎県内の建物被害や地盤調査とを合わせて考察している。

2. 研究目的

ある地震波が建物に作用した際、その卓越周期と建物の固有周期が接近すると、建物の応答量は増す。各地で記録された地震波の卓越周期を調べることで、当該地区の応答増幅特性が得られ、震災被害を推定することができる。

本研究では熊本地震が起こった 4 月 14 日と 4 月 16 日の地動加速度記録から、多数回の応答解析を行い、建物の応答スペクトルを求め、当該地区の振動性状を調べる。また、加速度応答スペクトルに関しては、現行の設計基準との比較を行い、熊本地震の地震動レベルについて考察する。本研究の解析で使用する地動加速度の記録地点を図 1 に、長崎県内 14 地点の震源距離と観測された地動の最大加速度を表 1 に示す。これらのデータは K-NET¹⁾を使用している。

Table1 長崎県内の観測点の地動データ

	観測点	位置	本震(4月16日)			前震(4月14日)		
			震央距離 (km)	計測震度	最大加速度 (Gal)	震央距離 (km)	計測震度	最大加速度 (Gal)
1	島原	32.79N 130.35E	39	4	79	44	3.5	41
2	千々石	32.7839N 130.2024E	53	3.7	61	57	3.1	27.1
3	口之津	32.61N 130.18E	56	4.6	180.5	60	3.7	66.2
4	小長井	32.75N 130.76W	57	3.5	68.4	62	2.7	29.2
5	諫早	32.85N 130.02E	70	4.3	108.3	75	3.1	31.4
6	大村	32.90N 129.96E	77	4.4	118.5	81	3.4	41.9
7	長崎	32.7353N 129.83763E	83	3.7	114	87	2.9	52.7
8	東彼杵	33.04N 129.92E	85	3.5	48.7	90	2.6	17.3
9	琴海	32.9061N 129.7802E	93	2.7	32.8	97	2.6	16.4
10	野母崎	32.58N 129.76E	96	2.6	17.1	100	1.9	7.7
11	大瀬戸	32.75N 130.76E	107	2.8	20.9	111	2	9.9
12	佐世保	33.18N 129.72E	108	2.9	30.9	113	2.2	11.7
13	松浦	33.344N 129.7054E	118	4	52.3	123	3.3	30.6
14	平戸	33.36N 129.54E	133	3.5	37.3	137	2.8	24.9



Fig.1 地動加速度の記録地点



Fig.2 気象庁の震度分布図

3. 地震動の応答スペクトル

地震動の応答スペクトル解析は, Newmark の 法を用いて, 固有周期を 0.01 刻みで 0 秒から 4 秒まで変化させ, NS 方向と EW 方向について解析を行った. 以下に 法の算定式を示す.

$$\ddot{Y}_{N+1} = -\frac{\ddot{Y}_{GN+1} + 2h\omega(\dot{Y}_N + \frac{1}{2}\ddot{Y}_N\Delta t) + \omega^2(Y_N + \dot{Y}_N\Delta t + (0.5 - \beta)\ddot{Y}_N\Delta t^2)}{1 + h\omega\Delta t + \beta\omega^2\Delta t^2}$$

$$\dot{Y}_{N+1} = \dot{Y}_N + (\ddot{Y}_{N+1} + \ddot{Y}_N)\frac{\Delta t}{2}$$

$$Y_{N+1} = \dot{Y}_N\Delta t + (0.5 - \beta)\ddot{Y}_N\Delta t + \beta\ddot{Y}_{N+1}\Delta t^2$$

ここに,

\ddot{Y}_G ; 地動加速度 (地震動の加速度)

\ddot{Y} ; 応答加速度 (建物の応答)

\dot{Y} ; 応答速度 (建物の応答)

Y ; 応答変位 (建物の応答)

; 1/4 (平均加速度法)

h ; 減衰定数

; 円振動数 ($T=2 /$; 固有周期)

t ; 時間刻み (0.01s)

本論では、加速度応答スペクトルと Sa - Sd スペクトルを用いて、振動性状を考察する。減衰定数 h は、特に断りがない場合 2% に固定している。

最大せん断力 Q_{max} は、建物の質量 m に Sa を乗じて、以下のように表される。また、建物の水平剛性 k を用いても最大せん断力を算定することができる。

$$Q_{max} = mSa = kSd$$

即ち、 Sa - Sd スペクトルは、等価固有周期 T を有する建物荷重 - 変形関係上の応答点を予測していることになり、限界耐力計算³⁾に使用される。

4. 設計基準に準じた加速度応答スペクトル

観測された地震動による入力せん断力レベルを評価するために、設計基準（限界耐力計算³⁾）に準じた加速度応答スペクトルを求めた。本研究では、長崎県での観測記録においては、中小地震に対する荷重レベル（ $Co=0.2$ 相当）で、熊本県での観測記録においては、大地震に対する荷重レベル（ $Co=1.0$ 相当）と比較した。これらの算定表を Table. 2 と Table.3 に示す。

設計基準の設定に、地震地域係数と地盤増幅係数を乗ずる必要がある。地震地域係数とは、地域ごとに想定される地震の大きさによる低減率のことで、熊本は 0.9、長崎は 0.8 と制定されており、この値を使用する。

地盤増幅係数は、第一種地盤を仮定して Table.4 の通りに設定した。

Table2 限界耐力計算式(大地震)

周期	加速度応答スペクトル
$T < 0.16$	$320 + 3000T$
$0.16 \leq T < 0.64$	800
$0.64 \leq T$	$5.12/T$

Table3 限界耐力計算式(中小地震)

周期	加速度応答スペクトル
$T < 0.16$	$64 + 600T$
$0.16 \leq T < 0.64$	160
$0.64 \leq T$	$1.024/T$

Table4 地盤増幅係数

周期	地盤増幅係数
$T < 0.576$	1.5
$0.576 \leq T < 0.64$	$0.864/T$
$0.64 \leq T$	1.35

5. 解析結果と考察

5.1 熊本の解析結果

Fig.3 に 14 日と 16 日の震源近くの地動加速度記録の時刻歴波形を NS 方向と EW 方向成分について示す。

14 日のデータを示した Fig.3(a),(b)の縦軸の最大値は 600Gal であり、16 日のデータを示した Fig.3(c),(d)の縦軸の最大値は 900Gal である。16 日の NS 方向成分の加速度が最も大きいことが分かる。

Fig.4 に Fig.3 の地動記録を用いた加速度応答スペクトルを示す。Fig.4 では、観測された加速度応答スペクトルと限界耐力計算の設計用スペクトルを比較している。設計用スペクトルは、建物に 2 倍の余力があるものと仮定してこれを 2 倍したものも合わせて載せている。

Fig. 4 の 14 日と 16 日の結果を比較すると、16 日の応答加速度は、ほぼ全周期において 14 日のそれを上回っている。また、NS 方向と EW 方向を比較すると、NS 方向が大きい傾向がみられる。Fig.4 に NS 方向成分を用いて求めた Sa - Sd スペクトルを 14 日と 16 日で比較する。加速度、変位ともに 16 日が大きく、建物への影響は、16 日の NS 方向が最も大きかったものと推定できる。Fig. 4 をみると、震源近くの熊本で得られた強震記録からは、現行基準の 2 倍を超える応答も得られている。Fig. 4 では、減衰定数 h を 2% に固定しており、このような大きな応答が出ている。建物は降伏を許容したのちには部材の履歴減衰が期待できるため、減衰定数を 2%・5%・10%・20%と変化させて加速度応答スペクトルを描き、これらを Fig.6 に示す。Fig.6 は、16 日の強震記録を使用している。NS 方向成分では、 $h=10\%$ となると、応答は設計用スペクトルの 2 倍の範囲に収まる結果となっている。一方で、EW 方向成分では、 $h=5\%$ で、応答が設計用スペクトルの 2 倍の範囲にほぼ収まる結果となっている。

また、 Sa - Sd スペクトルにおける h の変化を見たものを Fig.7 に示す。減衰が大きくなると加速度だけでなく変位応答も小さくなってゆくことが読み取れる。

Sa - Sd スペクトルの NS 方向と EW 方向を比較してみると、NS 方向は EW 方向よりも応答加速度の値が大きい、変位は小さくなっている。この理由として、Fig.5 の加速度応答スペクトルより、NS 方向よりも EW 方向は周期 1 秒以上の長い周期帯にも応答加速度が算出されていることが挙げられる。短い周期帯に大きな応答加速度が発生しても作用時間が短いため、建物に大きな変位を与えることにならない。逆に、長い周期帯の波は建物に変位を与える。

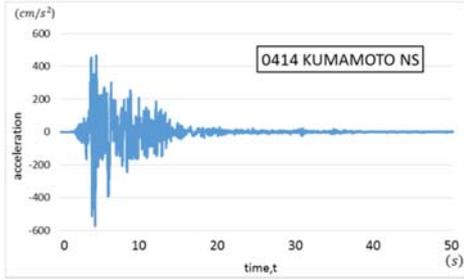


Fig. 3 (a) 地震加速度の時刻歴波形 (14日 NS)

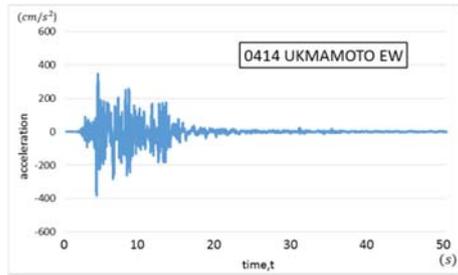


Fig. 3 (b) 地震加速度の時刻歴波形 (14日 EW)

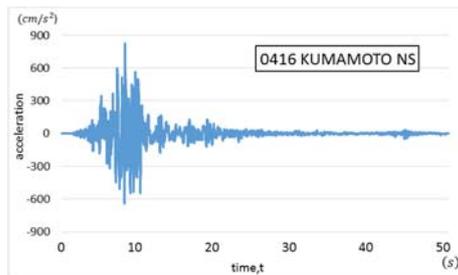


Fig. 3 (c) 地震加速度の時刻歴波形 (16日 EW)

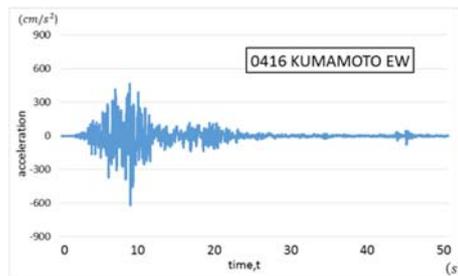


Fig. 3 (d) 地震加速度の時刻歴波形 (16日 EW)

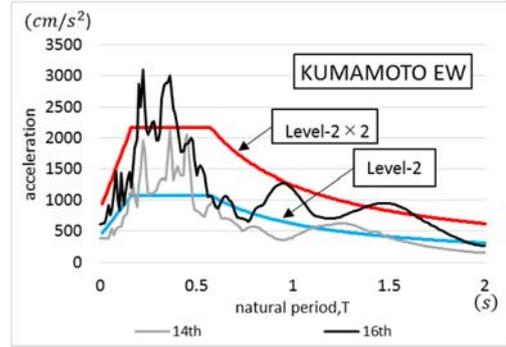


Fig. 4 加速度応答スペクトル(熊本 EW)

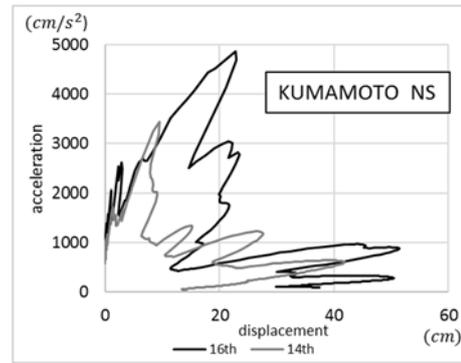


Fig. 5 Sa-Sd スペクトル(熊本)

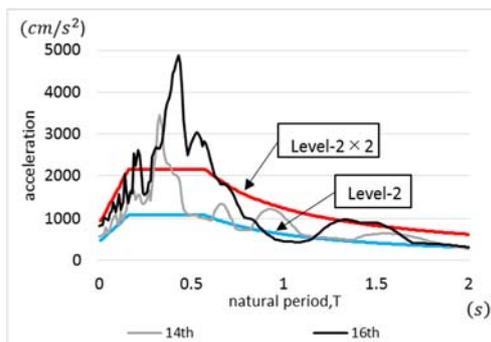


Fig. 4 加速度応答スペクトル(熊本 NS)

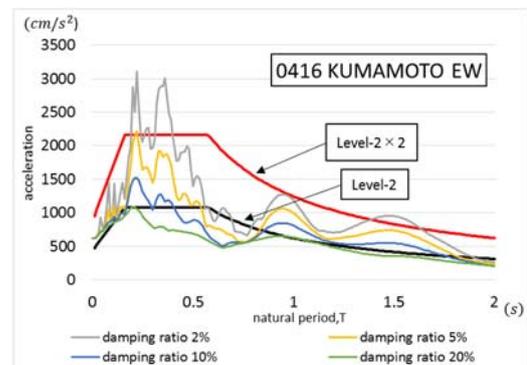
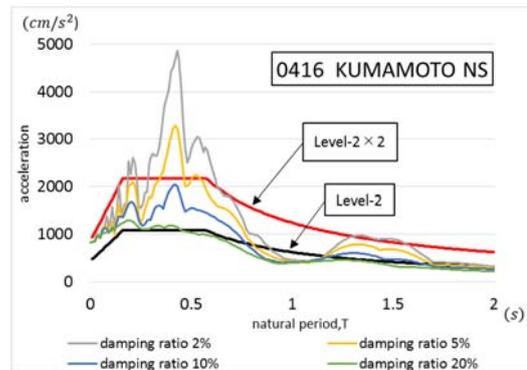


Fig. 6 減衰定数比較 (加速度応答スペクトル)

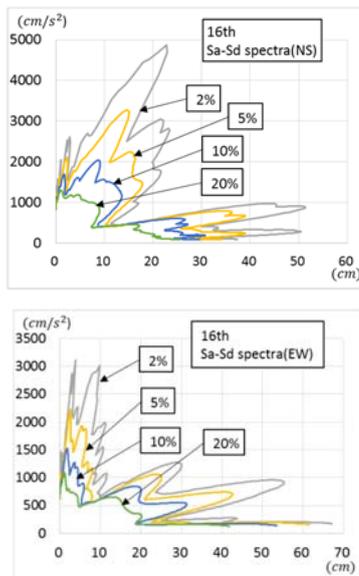


Fig.7 減衰定数比較 (Sa-Sd スペクトル)

5.2 熊本における考察

Fig.4 では、大地震における設計基準 ($C_0=1.0$ 相当) の加速度応答スペクトルと、その荷重レベルの 2 倍の増幅を仮定したスペクトルも載せている。観測記録から算定された応答スペクトルは、両日ともこれらの基準を大幅に超えている。熊本地震建築物被害調査報告 (速報)⁴⁾ による益城地区の悉皆調査の結果から、木造建物の倒壊は 297 棟に上り、大きな被害を出している。

木造建物は一概にその水平耐力を予想することが難しいとされているため、本研究では RC 造建物に注目して被害を調べた。

Fig.4 より、特に周期 0.3~0.5 秒の範囲で非常に大きなスペクトルが得られている。RC 造における建物の固有周期は建物高さ(m) \times 0.02 で計算され、これよりおよそ 15~25m 程度の RC 造建物について特に甚大な被害が予想される。熊本地震後の熊本市内にある旧耐震と新耐震による RC 造建物の被害を、写真に示す (Photo.1 と Photo.2)。この 2 つの建物は、15~25m 程度の範囲になるようなものを選択し、比較した。

Photo.1 は熊本市内にある 1981 年以前 (旧基準) の設計で建てられた 7 階建て RC 造である。このマンションはピロティ部分が落階し、倒壊と判断された。Photo.2 も同様に熊本市内にある 10 階建て RC 造の建物である。これは、1981 年以降 (新耐震) の設計である。この建物では 2 次壁のせん断ひび割れは観測されるが、柱等の主要部分の損傷はなく、Photo.1 と比べ軽微な被害に留まったといえる。

Fig.4 の加速度応答スペクトルの状況からは、大幅に設計基準を超えており、新耐震設計による建物であっ

ても倒壊が予想されたが、熊本地震建築物被害調査報告 (速報)⁴⁾ より、新耐震による RC 造建物で倒壊に至った建物はなかった。一方、旧耐震設計の建物は 2 棟が倒壊と報告されており、耐震規定の強化が地震防災に効果があったものと推定される。

RC 造の減衰定数は通常 5% 程度の値が用いられるが、Fig.6 より、今回の熊本地震においては減衰定数 5% では設計基準の 2 倍の加速度を超えていることが分かる。

建物の使用材料の塑性化によるエネルギー吸収性能が確保されていれば、即ち靱性脳が確保されていれば、履歴減衰によって、見かけ上の減衰定数が増加し、応答が小さくなったものと推定される。これが、熊本での新耐震設計による RC 造建物の倒壊がなかった理由と考えられる。



Photo.1 旧基準による設計



Photo.2 新耐震による設計

5.3 長崎の解析結果

長崎県の各地区で記録された地動を用いて算出した建物の加速度応答スペクトルと限界耐力計算の設計用スペクトルを Fig.8 に示す。長崎県内には 31m を超える高層建物はほとんどないため、図の周期は 0~2 秒の間のみ示している。また、Fig.9 に Sa-Sd スペクトルを示す。

本研究では、長崎県内 14 地点の地動データを解析した。本報では、比較対象として以下の観測点を選択し、考察した。Table.1 より、長崎県内で最大の地動加速度 180(gal) を記録しているのは口之津である。また、本震

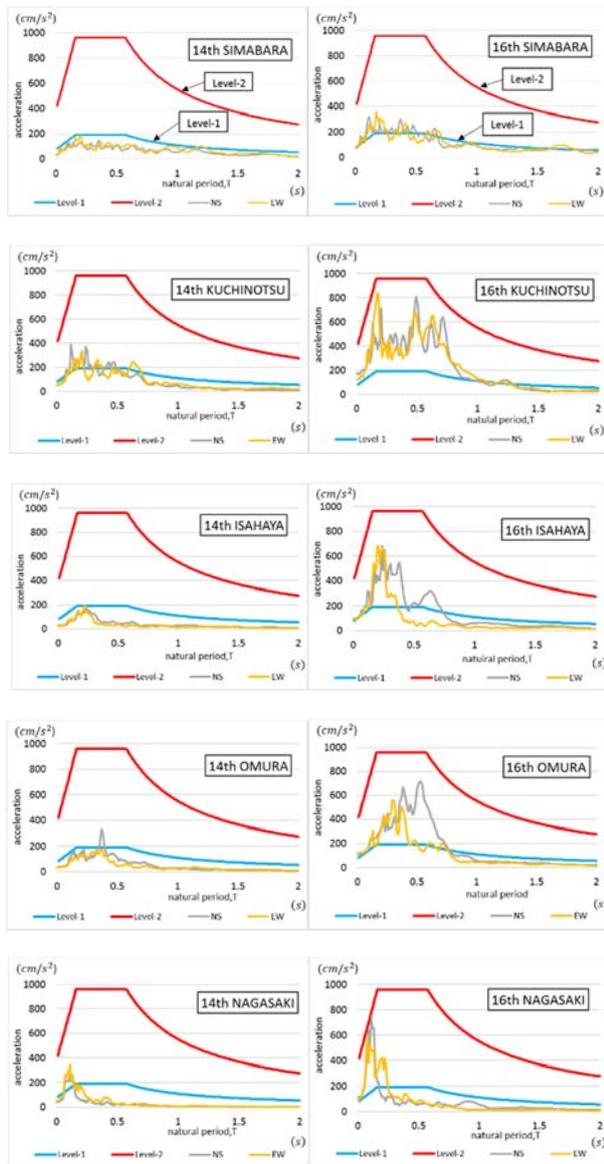


Fig.8 加速度応答スペクトル(長崎)

における地動データが 100(gal)以上の揺れを観測している諫早, 大村, 長崎の 3 地点である。これらは長崎

県内において比較的人口密度の高い地域となっている。これらに、震源からの距離が最も近い島原を加え、5 地点の結果を示す。

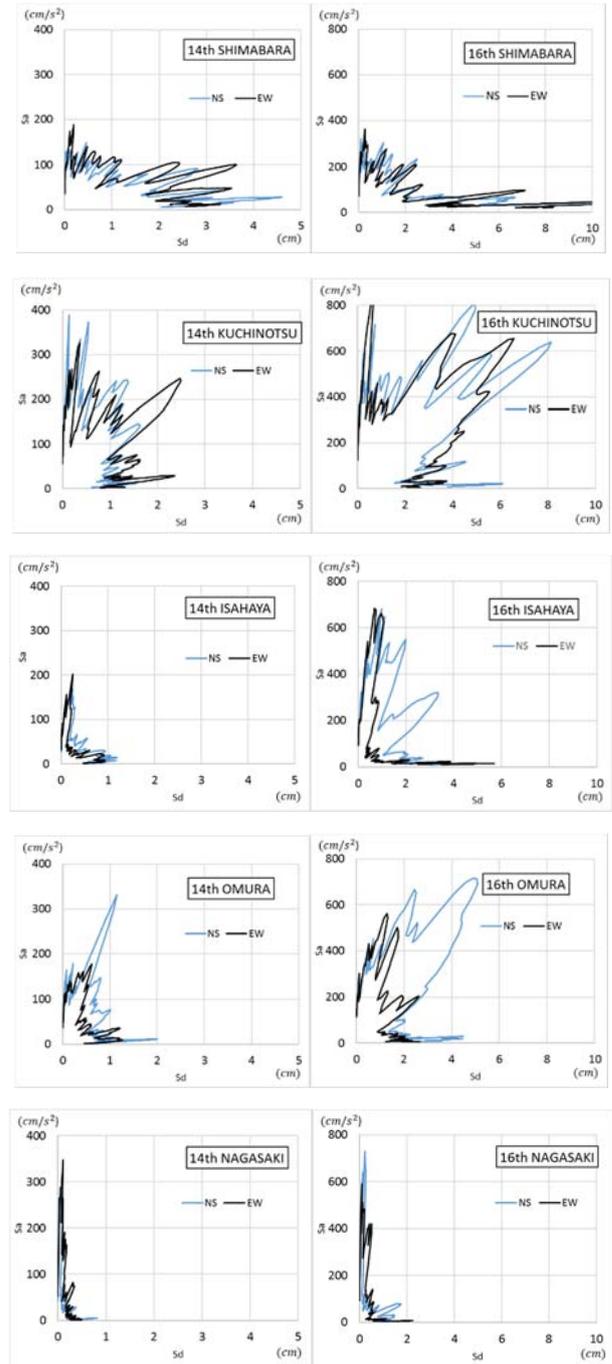


Fig.9 Sa-Sd スペクトル(長崎)

5.4 長崎の考察

長崎の揺れに関しては、Fig.8 で中小地震 (Co=0.2 相当) と大地震を考慮した荷重レベル (Co=1.0 相当) の 2 つの設計基準に準じたスペクトルを解析より得られた加速度応答スペクトルと比較した。まず、スペクトル形状に関しては、各観測点は 14 日も 16 日もほぼ

同じような形状となった。このことは、各観測点で異なる二つの地震から同様の波を観測していることを示している。従って、落石や土台の移動などの設置点の異常はないといえる。また、これらの結果から各観測点の地盤特性を読み取ることが可能と考えられる。

14日と16日の加速度応答スペクトルについての比較を行う。熊本の解析から16日の方の最大応答加速度が大きかったことから、長崎県内でも同様に16日の方が、最大応答加速度が大きくなっている。14日に関しては、中小地震の設計基準を少し超える程度で、大地震における設計基準は超えていない。一方16日は、中小地震における設計基準を大幅に超えているが、大地震における設計基準は超えていない。これより、熊本地震後長崎県内では、建物の損傷はあるものの倒壊に至るような甚大な被害はなかったと推測できる。実際、長崎県内ではそのような被害は報告されていない⁵⁾。

また、長崎市においてはおよそ周期0.1~0.3秒にスペクトルのピークが集中しており、設計基準の加速度スペクトルとは最も異なるスペクトル形状となっている。震源地からの距離が長崎市と同程度の諫早市と大村市の加速度応答スペクトルは、長崎市よりも広がりをもっていて、設計基準のスペクトル形状に近いといえる。

Fig.9には、加速度と変位の関係が示されている。このグラフの表示において、16日は14日の縦軸と横軸を2倍の大きさにしている。今回の比較対象5地点は、3つのスペクトル形状のパターンに分類できる。一つ目は、島原のように変位が大きく横に広がるような形状、もう一つは長崎のように加速度が大きく縦に広がるような形状である。口之津・諫早・大村は、これらの中間的な形状となっている。

この要因として、島原は他4地点と比べて周期1秒以上の加速度が大きいことが挙げられる。島原は長崎県内で震源に最も近く、Fig.4の熊本と類似のスペクトルが予測されたが、何らかの理由で、熊本における卓越周期成分が伝播してきていない。この点について今後の検討課題とする。

上記のスペクトル形状の違いは、その地域の地盤特性に関係があると推測し、次に各観測設置点の地盤と長崎県の広域の地形図について調査した。

5.5 長崎の地盤調査

Fig.10に各観測設置点の土質図を示し、Fig.11に長崎県内の広域地形図を示す。

Fig.10より長崎県内でも人口が多いとされる諫早・大村・長崎の3地点に注目して比較してみると、諫早と大村に比べて長崎は、地盤のほとんどが岩盤から

なっているため、周期0.1~0.3秒あたりのみに応答が集中したと考えられる。Fig.8とFig.9の考察とあわせてみると、地盤状況がこれら3地点のスペクトルの違いを説明できる。大村と諫早ではおよそ周期0.5秒前後での応答が大きくなっている。これは、RC造建物のひび割れ発生以降の周期に近いので、RC造の学校建物などの損傷被害が予想できる。一方、長崎では、加速度応答スペクトルのピークが周期0.1~0.3秒と非常に短周期帯に集中していたため、建物被害はないものと予想できる。現地調査の結果によると、大村市と諫早市の地域の学校では、倒壊には至らないものの、これらに建物の主要構造部に損傷が見られたことが報告されている。Photo.3, Photo.4, Photo.5に諫早市と大村市のRC造学校建物の被害写真を載せる。一方で、長崎市では、RC造建物は、一例を除き顕著な損傷建物はなかった。この例外は、老朽化によるものと判断され、地震のゆれのみの影響ではないと考えられる⁵⁾。

島原市と長崎市はどちらも地盤状況が岩盤となっているが、島原よりも震源からの距離がある長崎の方が最大応答加速度の値が大きい。今回島原が、対象5地点の中で最大加速度が小さくなった要因は明らかにならず、今後の課題としたい。

Fig.11の広域地形図より、島原や諫早、大村は広域地形図と照らし合わせてみて、観測設置点と広域地形図が比較的一致しているため、観測点で観測される強震データが広範囲で適用できるといえる。一方で、口之津や長崎は広域地形図より、主に山地からなっているが、場所によっては埋立地や干拓地も見られる。このような地域では、観測された強震特性と大きく異なる揺れとなることが十分に考えられる。従って、広域の防災において、本検討を適用するためには、注意が必要である。ただし、全体的に見てみると、サイト特性と広域地盤特性はほぼ一致しており、長崎市、諫早市、大村市のスペクトル解析結果からは、およそその地震被害予測が可能であるといえる。

また、Fig.12やFig.13のように、長崎県での主要断層や表面地盤増幅率等が発表されている。長崎市に近い千々石断層(Photo.6)などが動くと、今回の熊本地震よりも大きな地震動が、長崎の市街地に被害をもたらすものと推測される。Fig.13の地盤の増幅率は、Fig.11の長崎県の広域地形と類似しており、大きな増幅が予測される軟弱地盤上に位置する諫早市や大村市の早急な地震対策が求められる。その際は、観測設置点の地盤状況と広域地形図の当該地区の状況とを照らし合わせて、本研究のスペクトル解析を利用することが重要である。

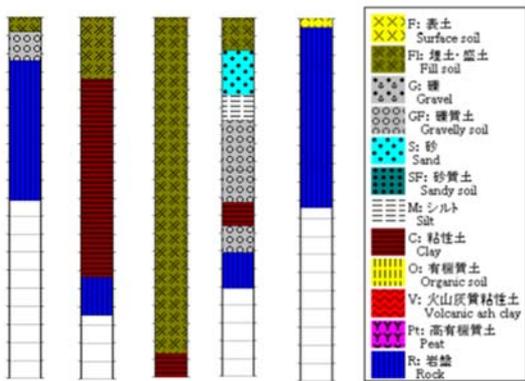


Fig.10 観測設置点地盤状況



Photo.3 (b) 諫早商業高校

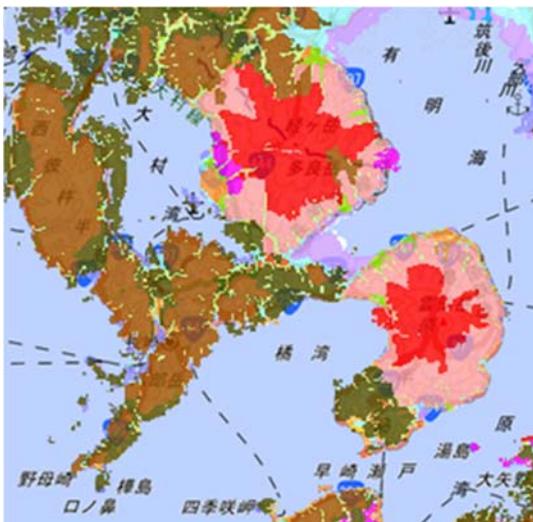


Fig.11 長崎県広域地形図



Photo.4 大村市竹松小学校



Photo.5 大村市立玖島中学校



Photo.3 (a) 諫早商業高校



Photo.6 千々石断層

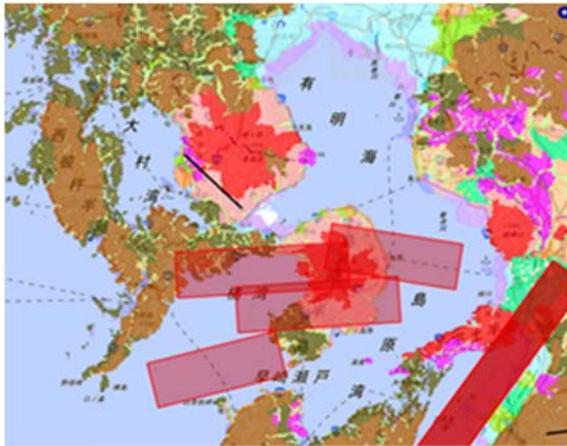


Fig.12 長崎県の主要断層

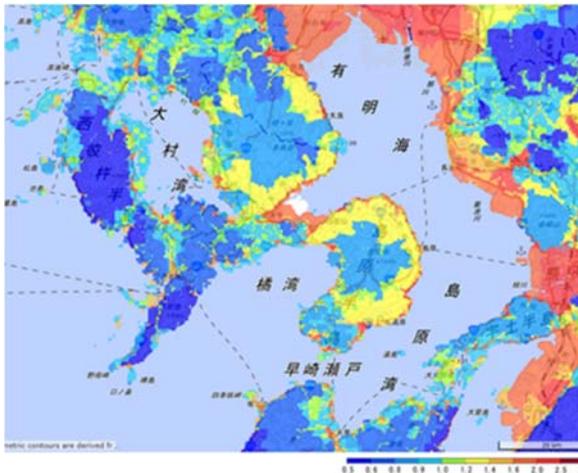


Fig.13 長崎県の表面地盤増幅率

6. まとめ

本研究では、平成 28 年 4 月 14 日以降に熊本県上益群益城町を震源とした地震動を用いて、主に長崎県内の各地区における揺れの大きさと特性を調べた。本報では、4 月 14 日と 4 月 16 日に発生した 2 つの地震から得られた、地動加速度データを用いて、多数回の応答計算を実行することで、当該地区の応答スペクトルを算出し、長崎県内における地震動の特性について調べた。得られた結果を以下に列挙する。

1. 震源近くの熊本の地動記録を用いた加速度応答スペクトルは特に周期 0.3 ~ 0.5 秒の間で設計基準の 3 倍を超える応答解析結果となった。上記の周期帯に含まれる旧耐震設計による RC 造建物は、実際に大破という被害が出ている。しかしながら、新耐震設計による RC 造建物は、大破等の甚大な被害は報告されていない。
2. 震源近くの強震動記録による加速度スペクトル

は、減衰定数 20% として計算すると、設計基準の大きさに収まることがわかった。

3. 熊本における S_a-S_d スペクトルより、加速度・変位ともに NS 成分が EW 成分より大きい。
4. 長崎県内では、14 日の前震では、中小地震の設計基準に収まる程度の揺れであり、16 日の本震においても中小地震は超えるが大地震の設計基準は超えない程度であった。これより、長崎県内では建物の損傷はあっても、甚大な被害はないと推定され、実際に長崎県内で危険な崩壊に至るような建物はなかったという報告と一致した。
5. 長崎県内の S_a-S_d スペクトルでは、島原市は変位応答が大きい横に広がるようなスペクトル形状であった。一方で、長崎市は加速度応答が大きい縦に広がる形状となり、他の 3 地点は、これらの中間的な形状となった。
6. 諫早や大村では建物に被害をもたらすことが懸念される 0.5 秒前後の卓越周期が観察される解析結果となり、この地域での建物の損傷報告に合致している。
7. 今回の対象とした 5 地点については、島原・諫早・大村は観測設置点の地盤と広域地形図がほぼ一致しており、強震データの解析結果が広範囲で適用できる。一方で、口之津と長崎はおおむね山地ではあるが、埋立地や干拓地も見られるため、地域によっては、強震データから得られる被害予測が適用できないところもある。
8. 全体的に見てみると、サイト特性と広域地盤特性はほぼ一致しており、スペクトル解析から当該地区のおおよその地震被害予測が可能であるといえる。

謝辞

本研究にあたって、国立研究開発法人防災科学技術研究所が公開している K-NET, Kik-net の強震データ、土質図、地形図を使用させていただきました。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人防災科学技術研究所
- 2) 中原浩之, 松村和雄: 地震による建築物被害量を低減するための都市係数 第 11 回日本地震工学シンポジウム, paper No.415, CD-ROM, 2002 年 11 月
- 3) 建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会: 2007 版 建築物の構造関係技術基準解説書, 2007 年 8 月
- 4) 国土技術政策総合研究所, 建築研究所: 平成 28 年(2016 年)熊本地震建築物被害調査報告(速報), 2016 年 9 月
- 5) 日本建築学会: 2016 年熊本地震災害調査報告, 2017 年出版予定