

# 1 2005年福岡県西方沖の地震の余震観測に基づく 警固断層周辺における地震動特性

元木健太郎\*・山中浩明\*・瀬尾和大\*

## 1. はじめに

2005年福岡県西方沖の地震では、震源近傍の玄界島に被害が集中したが、震源域から約20km離れた福岡市の中心部においても、警固断層周辺に被害が見られた(瀬尾, 2005)。その要因として、警固断層周辺の不整形地盤による地震波の増幅効果が指摘されており(大塚, 2005)、著者らはそれを実証的に明らかにするために、余震観測を行った(元木他, 2005)。ここでは、余震観測で明らかにした地盤増幅特性が構造物にどれだけ影響したのかを検討するために、推定した本震地震動を用いて非線形応答解析を行い、被害分布との関係を考察した。

## 2. 余震観測と本震地震動推定

図1に余震観測点配置と、非木造の被災建物分布(河野・井上, 2005)を示す。被災度は岡田・高井(2001)の判定基準に従っている。余震記録から、警固断層付近では、直下の地盤増幅のみならず不整形地盤の2次元的な増幅効果を受けていることを明らかにしている(元木他, 2005)。この地盤増幅が本震時にどれだけ構造物に影響したのかをみるために、K-NETに対するスペクトル比から、各余震観測点での本震地震動を推定した。推定した地震動の成分は本震の強軸方向であるN20E方向の水平動である。スペクトル比を算出する際に、1秒以下の周期帯域ではS波初動から10.24秒間の、1秒から2秒までの周期帯域は20.48秒間のフリースペクトルを用いている。K-NETと同じ地震の記録がない観測点では、最も近い観測点のスペクトル比をさらに掛けることにより、K-NETとのスペクトル比を算出した。この余震観測網は、K-NETから1km程度しか離れてなく、図1のCTIビルの本震波形とK-NETの本震波形の位相は類似している(川瀬2005)ことから、本震推定する際の位相スペクトルは、K-NET本震位相スペクトルを適用した。図1のFA03の推定した地震動の応答スペクトルとCTIビルの応答スペクトル(川瀬, 2005)との比較を図2に示す。FA03とCTIビルは100mも離れてなく、本震時の地震動特性はかなり類似しているものと思われる。両者の応答スペクトルの一致から、推定した本震地震動はかなり再現性が高いことが確認できる。

## 3. 非線形応答解析

推定した本震地震動の構造物に対する地震動強さを評価するために、1質点非線形応答解析を行った。復元力特性はトリリニア型のスケルトンカーブを有するTakedaモデルを用いた。減衰は剛性比例形の5%とした。降伏せん断力係数は、吸収エネルギーが等価になるように、固有周期に反比例する値とした。等価高さが固有周期に比例する場合は、降伏時の変形角は一定となる。被害の大きさは最大塑性率で表現できるものとし、図3に、警固断層からの距離で分類した被災建物頻度と、初期固有周期0.3、0.5、0.8秒の時の各余震観測点での最大塑性率を示す。降伏せん断力係数0.2/Tで、短周期0.3、0.5秒の時、最大塑性率は警固断層周辺で大きく、不整形地盤増幅の影響が顕著に現れている。周期0.8秒の場合、その差が小さくなるものの、警固断層周辺で塑性率は大きくなっており、不整形地盤増幅の影響が出ているものと思われる。さらに、降伏せん断力係数が0.16/Tの時も、最大塑性率分布は0.2/Tの場合と同様な結果が得られた。しかし、両者の結果には周期0.5秒の分布に差が見られ、耐力が小さい場合は周期0.8秒の時の分布形状に近づいてくるような傾向を示した。これは、最大耐力が小さい場合には、構造物が塑性化が進み長周期化することにより、地震応答が長周期の分布と似てくるものであると思われる。最大塑性率分布は建物被災度分布と類似した傾向がみられ、余震観測で求めた地盤増幅特性によって概ね建物被害分布を説明できる。

\* 東京工業大学大学院総合理工学研究科

#### 4. まとめ

福岡市中心部の建物被害分布に着目して、余震観測から求めた増幅特性より本震地震動を推定し、非線形応答解析を行った。最大塑性率分布は警固断層周辺で大きくなる傾向を示し、余震観測から求めた地震動特性によって、建物被害分布は概ね説明できる。

謝辞) 余震観測に関しては、多くの方々にご協力頂きました。本研究の一部は、文部省科学研究費補助金により実施されたものです。K-NETの記録を使用させて頂きました。記して謝意を表します。

#### 参考文献

大塚久哲：福岡県西方沖地震調査速報、土木学会誌、90、No. 5、35-38、2005

岡田成幸、高井伸雄：地震被害調査のための鉄筋コンクリート造建物の破壊パターン、日本建築学会構造系論文集、第549号、65-72、2001

川瀬博：福岡市内の強震記録、福岡県西方沖地震調査報告書、2.4節、2005、印刷中

河野昭彦、井上一朗：非本震建物の被害、福岡県西方沖地震災害調査報告書、4.3節、2005、印刷中

瀬尾和大：2005年3月20日福岡県西方沖地震の被害について、震災予防、No. 203、30-34、2005

元木健太郎、山中浩明、瀬尾和大、川瀬博：2005年福岡県西方沖の地震の余震観測に基づく警固断層周辺の不整形地盤による地盤増幅特性の評価、日本建築学会論文集に投稿中



図1 余震観測点と被災建物分布(河野・井上 2005)

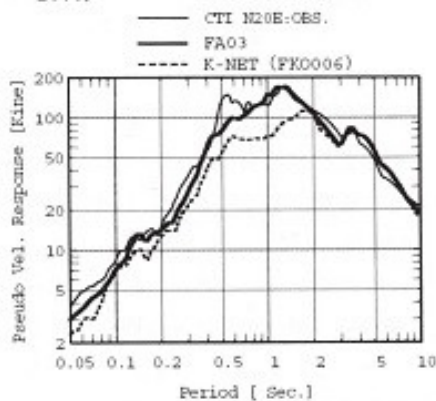
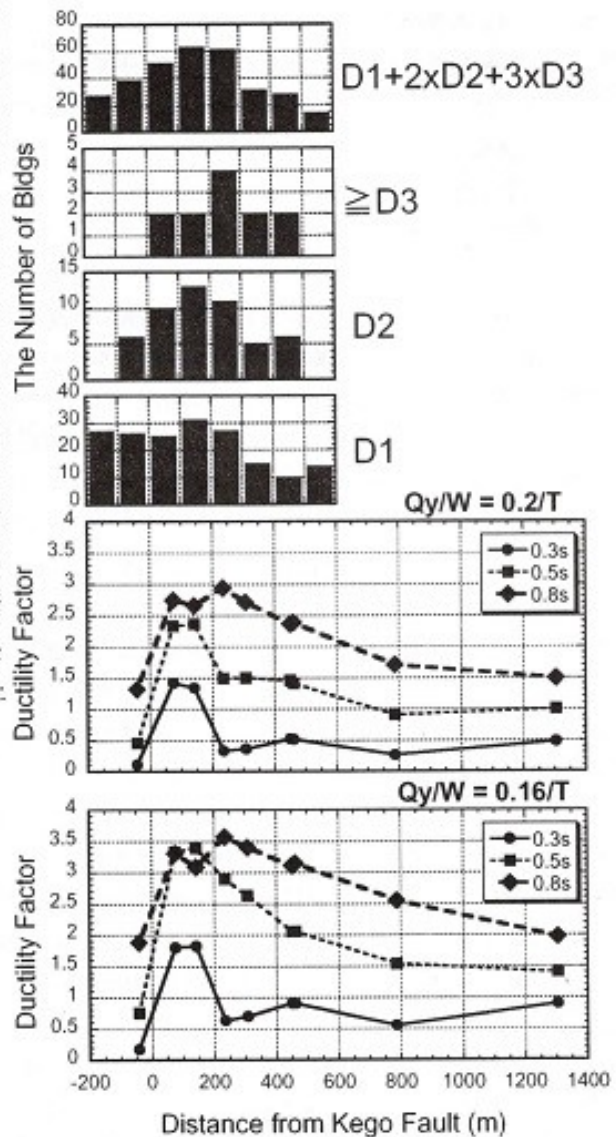


図2 推定した本震地震動と観測地震動の疑似図3 速度応答スペクトル(川瀬(2005)に加筆)



警固断層からの距離で分類した被災建物頻度(上)と最大塑性率(下)

2005年福岡県西方沖の地震の余震観測に基づく  
警固断層周辺の不整形地盤による地盤増幅特性の評価  
An Estimation of Site Effect Affected by Irregular Subsurface Structure near Kego Fault  
from Aftershock Records of the 2005 Fukuoka Far West Earthquake

元木健太郎\*, 山中浩明\*\*, 瀬尾和大\*\*\*, 川瀬博\*\*\*\*

Kentaro MOTOKI, Hiroaki YAMANAKA, Kazuoh SEO and Hiroshi KAWASE

We conducted an aftershock observation in Chuo Ward, Fukuoka city to make clear reasons why building damage had been concentrated near Kego Fault during the 2005 Fukuoka far west earthquake. We found significantly large site amplification in the area limited within a distance of about 200 meters from Kego Fault to the northeast direction. Amplification factors in this area are evaluated to be about 3 times in PGA and PGV, and it corresponds to the difference of about 1 in seismic intensity. It can be interpreted that the amplification is affected by irregularity of shallow subsurface structure like basin edge effect.

**Keywords:** the 2005 Fukuoka Far West Earthquake, Kego Fault, Irregular Subsurface Structure, Site Effect, Aftershock Observation, Microtremor Measurements

2005年福岡県西方沖の地震、警固断層、不整形地盤、地盤増幅特性、余震観測、常時微動測定

## 1. はじめに

2005年3月20日に発生した福岡県西方沖の地震 ( $M_{max}$  7.0) では、震源断層近傍の玄界島において、階段状の造成法面の崩壊に起因する被害が多く見られた<sup>\*)</sup>。被害は玄界島に限らず、震源から約20km離れた福岡市の中心部でも建築物の被害が報告されており、高層RC造集合住宅にも被害が確認されている<sup>\*)</sup>。その被害は中央区大名・今泉を中心とする狭い地域に集中したと報告されており<sup>\*)</sup>、この地域の南西側に存在する警固断層周辺の表層の地盤構造の急変が影響したとの指摘がある<sup>\*)</sup>。地震が発生する以前に評価された警固断層を想定地震とした地震動予測<sup>\*)</sup>においても、この地域の地震動は上記の地盤の影響によって大きく評価されている。被害が集中した要因を考察するためには、入力地震動を把握することが重要であると考える。

過去の事例では、1995年兵庫県南部地震で神戸・阪神地域における被害は、幅約1km、長さ約20kmの震災の帯と呼ばれる狭い地域に集中した。その被害が集中した主要な要因として、単積平野端部の基盤の段差構造による二次元的に異なる方向から伝播する地震波の干渉が地震動増幅に影響したことが認識されている<sup>\*)</sup>。また2000年鳥取県西部地震においても、同様に急峻な基盤形状が地震動増幅に作用したとの指摘もある<sup>\*)</sup>。このような不整形地盤による地震動増幅は、工学的に無視できない幅幅のため、近年重要視されるようになってきた<sup>\*)</sup>。

てきた<sup>\*)</sup>。

本震時に得られた強震動はK-NETや福岡市や気象庁等によって、福岡市内で数点観測され、その記録の一部は公開されている。しかし、上述した警固断層付近の被害が集中している地域は強震観測点の間隔よりも十分に狭く、強震動記録だけで被害分布を説明することは困難である。被害分布を説明するためには定量的評価が求められ、複雑な波動場においては、理論的にモデル化された数値計算のみならず、観測による実証が必要とされる。

本研究では、警固断層付近の不整形地盤構造が地震動増幅に及ぼす影響を実証的に明らかにするために、約100m間隔で余震観測を実施した。さらに、余震観測点での地盤探査と、本震記録が得られた福岡市中央区の震度計と被害の大きかった中央区大名付近で、段差構造の位置を同定するために常時微動を測定した。本研究で得られる結果は、建築物被害を考察するための基礎的な一資料を提供するものである。

## 2. 余震観測と余震記録の概要

### 2.1 余震観測概要

余震観測は図1に示すごとく、警固断層に直交し、FK006 (K-NET福岡) につながるように8点で実施した。この余震観測線は福岡市中央区の震度計から約500m離れた地点に位置している。観測点の緯

\* 東京工業大学大学院総合理工学研究科 助手・博士 (工学)  
\*\* 東京工業大学大学院総合理工学研究科 助教授・工博  
\*\*\* 東京工業大学大学院総合理工学研究科 教授・工博  
\*\*\*\* 九州大学大学院人間環境学研究院 教授・工博

Research Assoc., Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.  
Assoc. Prof., Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.  
Prof., Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.  
Prof., Faculty of Human-Environment Studies, Kyushu Univ., Dr. Eng.

度程度、設置面、観測期間は表1に示すとおりである。余震観測には6組の機材を用いた。地震計の設置面はPOS.に示し、GLは地表に、1Fは地表と同レベルの建物基礎上に設置したことを表している。図1に示す等高線は福岡地盤図<sup>8)</sup>による第三紀層(以降、基盤と記す)上面の深度を表しており、これより上部の堆積層は完新統および更新世の地層から構成されている<sup>9)</sup>。推定されている警固断層は北西-南東方向に走向を持ち、その北東側で堆積層が急激に厚くなっている。この段差構造は警固断層の活動によって形成されたと推定されている<sup>9)</sup>。断層の西側に位置する観測点FA01における表層地盤の厚さは図1から2~3メートルと薄いと判断される。薄い表層地盤から、建築物に影響する周期帯域では地震動増幅への寄与は非常に小さいので、本研究ではFA01を、地盤増幅特性を求めるための基準点とした。余震観測当初は、約150~200m程度の間隔で観測していたが、警固断層付近の堆積層端部の影響をより詳細に観測するために、FA07とFA08に設置していた観測機材を、FA02とFA04に移設した。幸左他<sup>10)</sup>の調査結果<sup>9)</sup>によると、基盤が傾斜している地域に特に被害が集中しており、FA02とFA03がその地域に位置する。

観測には、Akashi製の加速度計GPL-6A3を用い、白山工業製のLS-8000SHに2GBのハードディスクを接続して、余震の同時記録を得るように連続的に地動を記録した。時刻校正はGPSによって、4時間毎に行った。観測機器のAD変換の分解能が14bitであるため、余震の弱震動を十分な精度を得るために、約70cm/s<sup>2</sup>を最大とするような振幅レンジに機器をセットした。観測期間中に発生した4月20日に発生した最大余震( $M_{max}$ 5.8)は振幅が飽和しているために、以下の検討には用いていない。

## 2.2 余震記録

本観測では連続観測しているため、多数の地震記録が得られているが、地震動の振幅が小さいと、低分解能ではS/N比が悪くなるため、解析に用いる地震は図1(左)に震央を表している $M_{max}$ 2.8~5.1の38地震に絞った。図1に示す震源に関する位置は気象庁1元化震源として推定されたものである。

図2に余震観測例として、4月10日に発生した深さ5km、 $M_{max}$ 5.0の地震(以降、地震A)と4月28日に発生した深さ13km、 $M_{max}$ 3.8の地震(以降、地震B)の速度波形を示す。速度波形は観測された加速度記録を基線補正した後、0.1Hzのハイパスフィルターをかけて、周波数領域で積分して求めた。図2の時間軸の原点は発震時刻に合わせ、地震AについてはFKO006での記録も示した。NS成分では、地震AではFA01とFA03に、地震BではFA01とFA02に主要動の振幅差が目立っている。FA01からFA02、FA03は、距離が100~200mと、近接しているが、短周期成分の波形の様相が異なっている。FA04よりも北東側の観測波形と比較しても、FA02とFA03の波形には、主要動以降に短周期の位相に違いが認められ、継続時間がやや長くなっている。同様に、FA02とFA03の上下動成分の波形では、直達S波より後に現れる短周期成分の位相が目立っている。特に地震Bの波形にはその特徴は明確に現れており、警固断層の近傍の観測点にのみ現れた局所的な地震波動であると推察される。

各観測点での地震動強さを比較するために、基準点(FA01)に対するPGAとPGVの比を求め、図3(A),(B)に平均と標準偏差を示す。さらに記録から算出した計測震度相当値を算出し基準点からの差の平均値と標準偏差を、図3(C)に示す。PGAとPGVを算出する



図1 余震観測点配置図(右、文献8)に加筆)と解析に用いた余震の震央分布(左)

表1 余震観測点の緯度経度、設置面状況、観測期間

| NAME | LAT.     | LON.      | POS. | OBS. TERM |   |    |    |
|------|----------|-----------|------|-----------|---|----|----|
|      |          |           |      | 4/6       | 7 | 23 | 28 |
| FA01 | 33.58773 | 130.38988 | GL   | ■         | ■ | ■  | ■  |
| FA02 | 33.58822 | 130.39108 | GL   | ■         | ■ | ■  | ■  |
| FA03 | 33.58838 | 130.39175 | 1F   | ■         | ■ | ■  | ■  |
| FA04 | 33.58922 | 130.39243 | GL   | ■         | ■ | ■  | ■  |
| FA05 | 33.58958 | 130.39322 | GL   | ■         | ■ | ■  | ■  |
| FA06 | 33.58992 | 130.39533 | GL   | ■         | ■ | ■  | ■  |
| FA07 | 33.59153 | 130.39288 | GL   | ■         | ■ | ■  | ■  |
| FA08 | 33.59322 | 130.39633 | 1F   | ■         | ■ | ■  | ■  |

際には、それぞれ観測記録に0.1Hzのハイパスフィルターをかけて、水平動成分の合成した。横軸に示している警固断層からの距離について、後述する断層位置から観測点までの距離を表している。基準点のFA01は断層よりも西側に位置し、他の観測点とは反対側であるため、負の領域に示した。以降、同様に西側の観測点は負の領域で表現する。この図から地盤増幅だけを考察する場合、厳密には距離減衰も考慮する必要があるが、観測点間隔は震源距離に比べて十分に短いので、距離減衰による差は無視できる微小な量と考えられる。基準点FA01の地盤は上述したとおり、表層地盤が非常に薄く、増幅効果は小さいと考えられるので、図3は第三紀層より上部の地盤の増幅効果に近似できる。断層に近いFA02とFA03ではPGA比、PGV比ともに3倍以上を、計測震度差では1以上の値を示している。表層地盤と断層近傍の基盤が傾斜する地域で大きく増幅されている。断層から離れると、その振幅比は減少していく。断層から200~300mに位置するFA04とFA05では、振幅比が小さくなっている。FA04とFA05は中央区役所の敷地内に設置したもので、その地階には駐車スペースがある。振幅が小さくなった理由として、中央区役所の建物と基礎を含む地階部分と地盤との相互作用により、短周期成分が散逸された可能性が考えられる。図3の最も右にある点はFKO006の値を表している。図1に示すように、基盤深度は北東に向かうにつれて浅くなっているが、FKO006の増幅値は断層近くのFA02とFA03を除く他の観測点よりも大きい。それは完新統の地層が、断層から北東に行くにしたがって、厚くなっているため、その地層による増幅効果が他の観測点よりも大きくなったためと考えられる。図2の上下動成分に見られた特徴を見るために、上下動成分のPGV比も求め、図3(D)に示す。上下動成分は、水平動成分の振幅比よりも小さいが、傾向は類似しており、不整形地盤の影響が上下動にも現れていると考えられる。