

2005年福岡県西方沖地震における福岡市中央区舞鶴での地表面地震動の推定

丸山 喜久¹・福島 康宏²・石田 栄介²・末富 岩雄²・磯山 龍二²・山崎 文雄³

¹千葉大学助教 大学院工学研究科建築・都市科学専攻 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

E-mail: ymaruyam@tu.chiba-u.ac.jp

²日本技術開発株式会社 リサーチ・エンジニアリング事業部 (〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)

E-mail: fukusimaya@jecc.co.jp, isidae@jecc.co.jp, suetomi-i@jecc.co.jp, isoyama-ryo@jecc.co.jp

³千葉大学教授 大学院工学研究科建築・都市科学専攻 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

E-mail: yamazaki@tu.chiba-u.ac.jp

2005年福岡県西方沖の地震の強震域にあたる福岡市中央区舞鶴の建物地下1階の観測点と地表の観測点において、福岡県西方沖の地震本震の地震動を、その地点の余震記録と近傍観測点での本震・余震記録を用いて複数の方法で推定し、本震観測記録との比較を行った。

Key Words : *The west off Fukuoka prefecture earthquake in 2005, Spectral Ratio, Spectral Intensity*

1. はじめに

現在、多くの機関で強震観測が行われており、大地震時には、計測震度やSI値といった観測地震動指標は道路の通行規制や都市ガスの供給停止などに役立てられている。しかしながら、1995年兵庫県南部発生時と比べれば急速に増加したとはいえ、数km～20km程度に1箇所という密度を考えれば、地震計の数が十分とはいえないケースがあることに加え、2004年新潟県中越地震における自治体震度計など停電等により欠測するケースも見られる。本震未観測点を再現するニーズは以前よりあり、余震記録や常時微動記録を近傍の本震観測点と組み合わせ、2地点間のサイト特性の相違を補正し、未観測点での本震地震動を簡便に推定する試みはこれまでもなされてきている¹⁾²⁾。また、地震動のサイト特性の解明のため、大地震の発生後には余震観測や常時微動観測がよく行われている。本震記録の再現への有効性が確認できれば、地震動と被害の関係など広い用途に活用することができる。

2005年3月20日10時53分頃発生した福岡県西方沖の地震(Mj7.0)において、福岡市内中心部で各機関によって多数の強震記録が得られているが、建物被害や道路被害の大きかった中央区の警固断層付近では、比較的地点間距離の小さい複数の強震観測点が存在する。断層付近では、地下構造が急激に変化しているため、地震動も急激

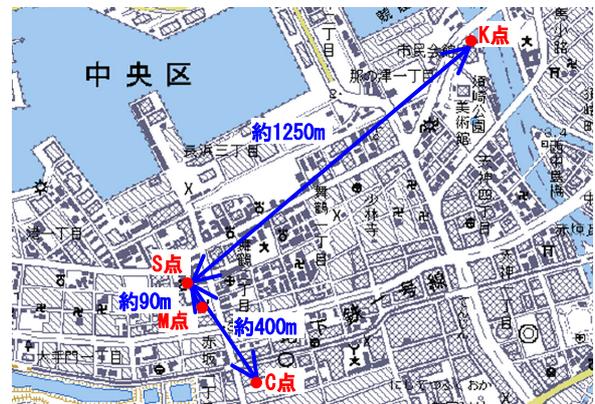


図-1 福岡市中央区の強震観測点

に変化している可能性が高い。本検討では、中央区舞鶴の強震観測点に着目し、この地点での余震記録や近傍観測点での本震・余震記録から本震地震動を複数の方法により推定する。なお、本検討で扱う地震動指標は、地震時の都市ガスの供給停止判断や土木構造物の被害推定に用いられているSI値とする。

2. 福岡市中央区の強震観測点

福岡市中央区の警固断層周辺の強震観測点位置を図-1

に示す。

中央区赤坂に位置する(株)建設技術研究所CTI福岡ビル(以降、C点と称する)は、免震ビルの基礎部および地下65m、免震基盤部、1階、7階の4箇所に地震計が設置されている。免震基礎部では、福岡県西方沖の地震本震85.4cm/s、最大余震(2005年4月20日6時11分、Mj5.8)で44.9cm/sのSI値を観測しており、各機関の観測点の中では最も揺れた地点である。なお、SI値は、減衰20%の速度応答スペクトル $S_v(T)$ より下式で求められるが、各方向で合成した時刻歴波形について式(1)を計算し、最大となる方向(主方向)のものを採用している。

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} S_v(T) dT \quad (1)$$

C点から北西方向に約400mの福岡市消防本部に、福岡県の観測点(福岡中央区舞鶴、以降、M点と称する)がある。計測震度計は、消防本部建物の地下1階に設置されている。M点では、本震58.1cm/s、最大余震32.7cm/sのSI値が得られている。

M点の北側すぐ近くに、(株)西部ガスの観測点(以降、S点と称する)が存在する。地震計は地表面に設置されている。S点では、本震は観測されていないが、最大余震は42.0cm/sのSI値を記録している。

この他、これら3地点からは北東方向に1.2km以上離れているが、福岡市民会館の敷地内の那の津大橋そばに(独)防災科学技術研究所のK-NET福岡観測点(FK0006、以降、K点と称する)がある。K点では、本震50.4cm/s、最大余震21.4cm/sのSI値を記録している。

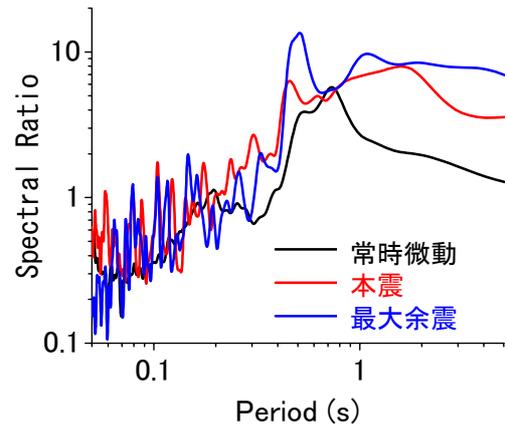
次の3. では、3通りの方法で本震地震動の推定を行うが、各方法とも、まず、M点を未知観測点として近傍観測点より本震地震動を推定し、観測されている本震記録との比較を行う。前述のように、M点は地震計が建物の地下1階に設置されており、地表面に設置されている場合に比べて揺れにくいと考えられることから、最大余震記録が得られているすぐ近くのS点について、M点を推定した同じ方法で本震地震動を推定することとする。

3. 未知観測点での本震SI値推定

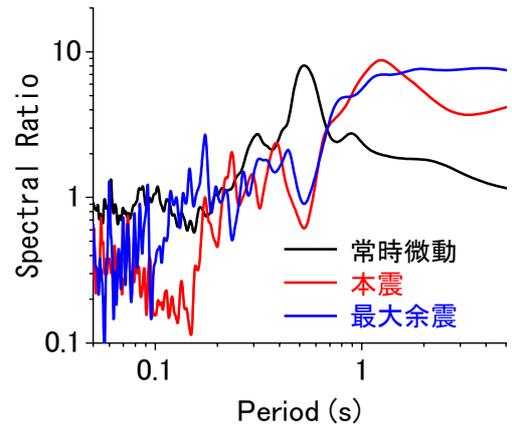
(1) 地点間応答スペクトル比に基づく応答スペクトル推定によるSI値推定

丸山ほか³⁾は、常時微動のH/Vスペクトル比の地点間比を用いた簡便な応答スペクトル推定法を提案している。ここではまず、同様の推定が行えるか否か検討した。

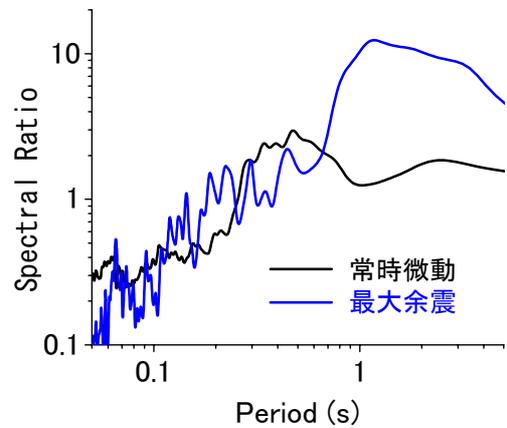
図-2に、C点、M点、S点における常時微動³⁾と地震動(本震および最大余震)のH/Vスペクトル比を比較して



(1) C点



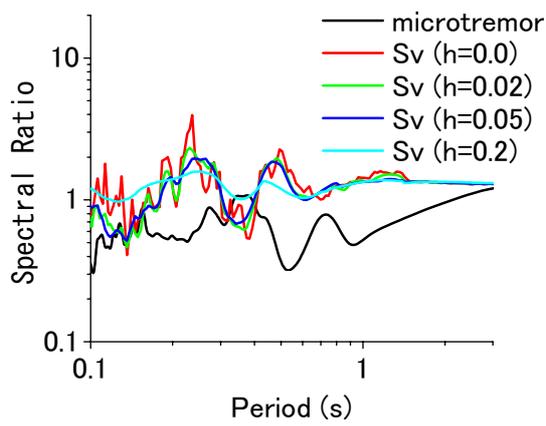
(2) M点



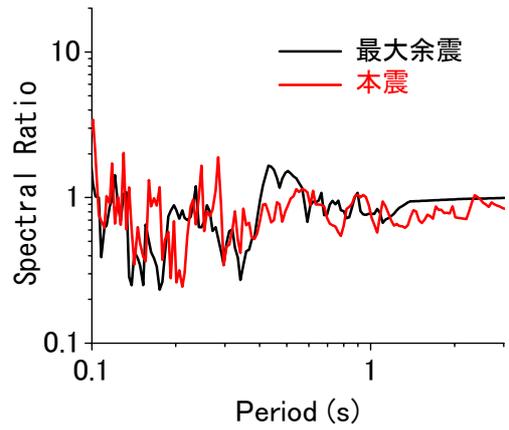
(3) S点

図-2 常時微動と地震動のH/Vスペクトル比の比較 (NS成分/UD成分)

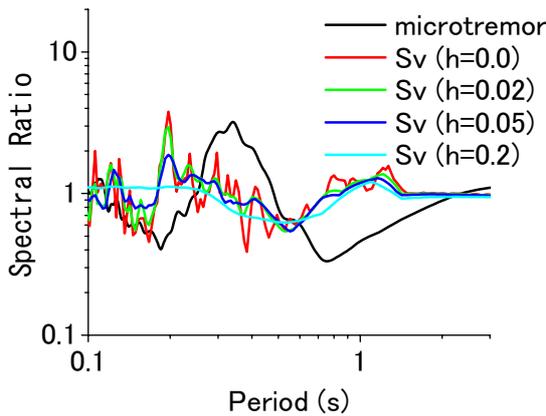
示す。S点では本震記録が得られていないので、最大余震のH/Vスペクトル比のみを示す。これら3地点は互いに近くに位置しており、H/Vスペクトル比の形状はよく似ている。常時微動のH/Vスペクトル比の卓越周期は、地震動のものに比べて小さくなっていることが分かる。これら3地点のうち特にS点とM点では、常時微動と地震動のH/Vスペクトル比の卓越周期がかなり異なっているため、常時微動のH/Vスペクトル比の2地点間比から本震の応答スペクトルを推定するのは困難なも



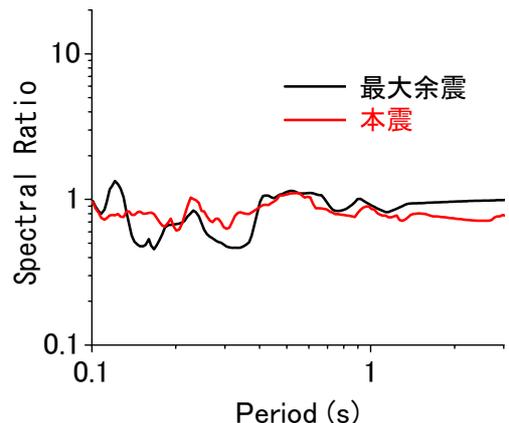
(1) S点/M点



(1) 無減衰



(2) S点/C点



(2) 減衰 5%

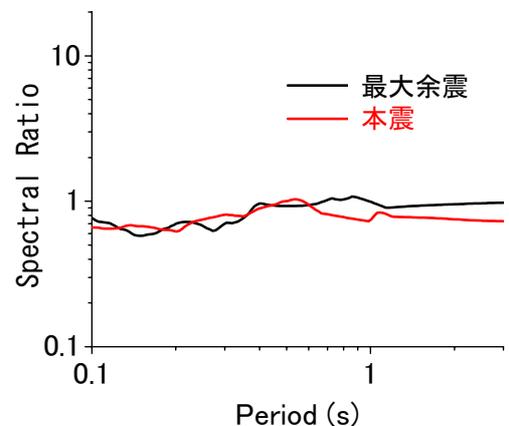
図-3 常時微動のH/Vスペクトル比と速度応答スペクトルの2地点間の比(NS成分)

のと推測される。

次に、近傍観測点間のスペクトル比を算出した。算出したスペクトル比は、常時微動のH/Vスペクトル比の比と様々な減衰定数の速度応答スペクトル比である。図-3に余震の速度応答スペクトル比と常時微動のH/Vスペクトル比の2地点間比を示す。

前述した理由により、常時微動のH/Vスペクトル比の比から推定される近隣地震観測点に対するS点の増幅特性は、速度応答スペクトル比から推定される増幅特性と異なっている。速度応答スペクトル比の減衰定数が大きくなるにつれて、曲線が滑らかになっていく傾向が見られる。

C点とM点では、本震記録が得られている。地震動の振幅レベルと速度応答スペクトル比の安定性について検討するために、本震から得られる速度応答スペクトル比と余震のものを比較した。これを図-4に示す。フーリエスペクトルと近似関係にある無減衰の速度応答スペクトルの比は、振幅レベルの大きな本震のスペクトル比の方が余震のものに比べてやや長周期なところにピークが見られる。速度応答スペクトルの減衰定数が大きくなるにつれて、本震のスペクトル比と余震のスペクトル比の差異



(3) 減衰 20%

図-4 本震と余震の2地点間速度応答スペクトル比(M点/C点, EW成分)

が小さくなる傾向がある。特に、減衰20%の速度応答スペクトル比は本震のものと余震のものの差異が小さい。この現象がどの程度の一般性を有するかは今後検討が必要であるが、以降の検討では、減衰20%の速度応答スペクトル比を用いることとする。また、M点のほうが短周期成分で小さいのは、建物の影響を受けているためと考えられる。

以上の検討をもとに、M点の最大余震記録およびC点の本震・最大余震記録よりM点における本震地震動を推

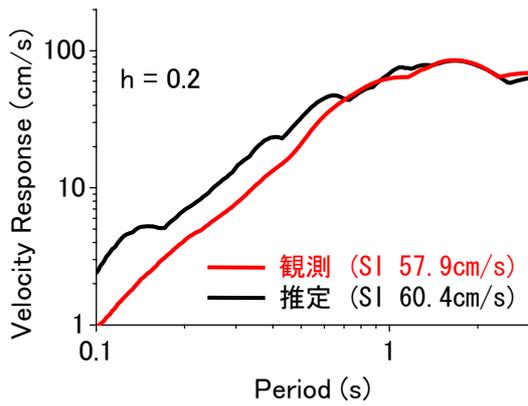


図-5 地点間応答スペクトル比に基づくM地点での本震推定地震動と観測記録の速度応答スペクトル(NS成分)

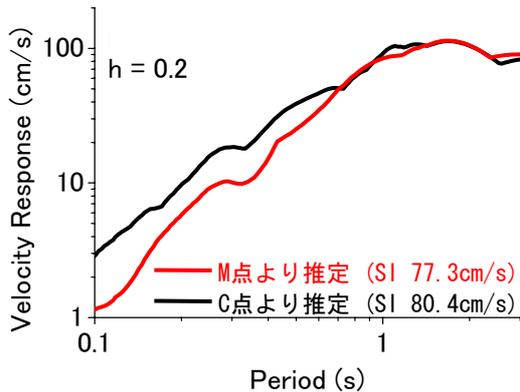


図-6 地点間応答スペクトル比に基づくS地点での本震推定地震動の速度応答スペクトル(NS成分)

定する。C 地点での本震記録の減衰 20%速度応答スペクトルを $Sv^C(T)$ 、最大余震記録の減衰 20%応答スペクトルのC点に対するM点の比を $r^{h=0.2}(T)$ とすると、M地点での本震地震動の減衰 20%応答スペクトル $Sv^M(T)$ は、下式で推定できる。

$$Sv^M(T) = r^{h=0.2}(T) \cdot Sv^C(T) \quad (1)$$

推定されたM点での本震地震動と本震観測記録の水平成分で大きなNS成分について減衰 20%応答スペクトルを図-5に示す。NS成分のSI値を比較すると、観測値 57.9cm/s に対し推定値 60.4cm/s となり、若干の過大評価となっているが、図-4(3)から示唆されるように、実測値と比較して推定精度は比較的高いと判断される。

これと全く同じ手続きで、記録が得られなかったS点での本震地震動を、M点やC点から求めると、推定されるNS成分の減衰 20%応答スペクトルは図-6のようになる。これより、NS成分のSI値は、M点から推定した場合は 77.3cm/s、C点から推定した場合は 80.4cm/s となる。

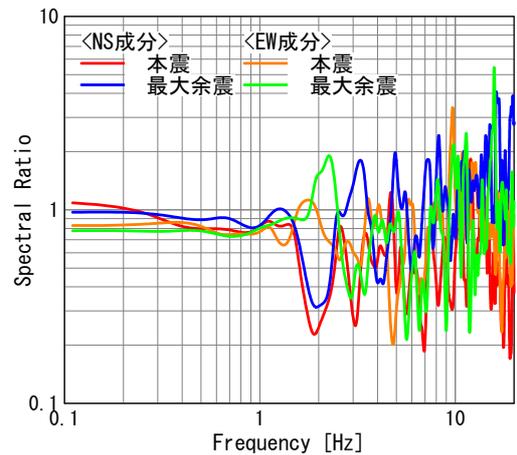


図-7 本震と余震の2地点間速度応答スペクトル比

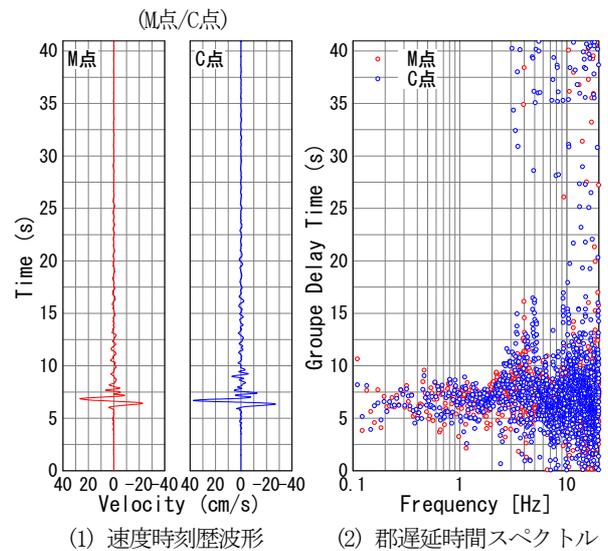


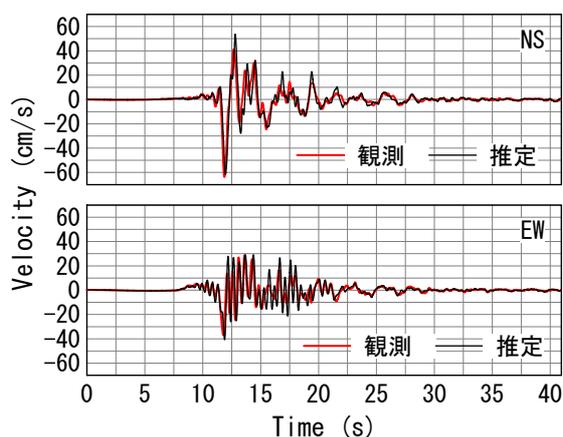
図-8 M点とC点の最大余震記録

(2) 地点間フーリエスペクトル比に基づく波形合成によるSI値推定

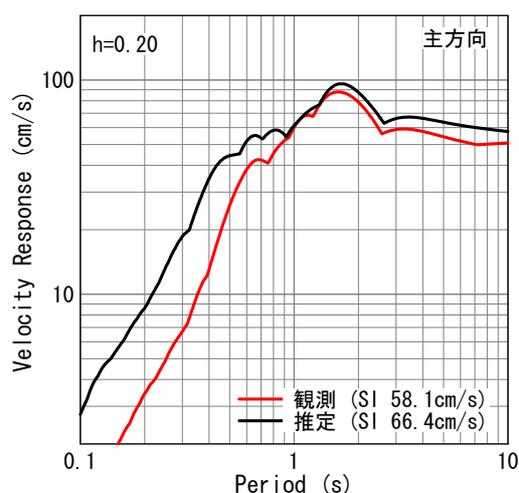
前項(1)と同様に、M点の最大余震記録およびC点の本震・最大余震記録よりMに点おけるSI値を推定する。ここでは、フーリエスペクトルを用いる。すなわち、C地点での本震記録のフーリエスペクトルを $F^C(\omega)$ 、最大余震記録のフーリエスペクトルのC点に対するM点の比を $r^F(\omega)$ とすると、M点での本震地震動のフーリエスペクトル $F^M(\omega)$ は、下式で推定できる。

$$F^M(\omega) = r^F(\omega) \cdot F^C(\omega) \quad (3)$$

図-7に、C地点に対するM地点のフーリエスペクトル比を示す。今回は、M点とC点とで共通して記録されている地震が最大余震のみであるが、本来、式(3)の $r^F(\omega)$ は、複数の地震のサンプルで平均をとるべきであると考えられる。このような課題はあるが、式(3)でフーリエスペクトルが得られたとすると、位相特性を与えることにより時刻歴波形が推定できる。図-8に示すように、M点とC



(1) 速度時刻歴波形



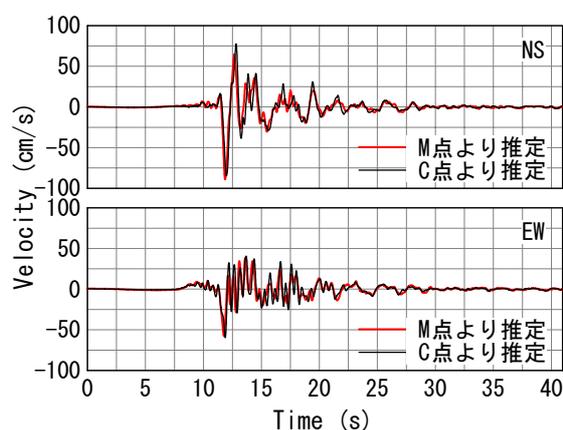
(2) 減衰20%速度応答スペクトル

図-9 地点間フーリエスペクトル比に基づくM地点での本震推定地震動と観測記録の速度時刻歴波形と速度応答スペクトル

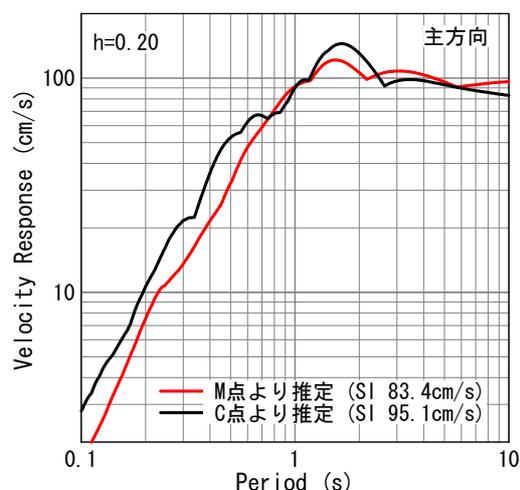
点とでは最大余震の時刻歴波形の形状や群遅延時間スペクトルがよく似ていることから、本震時の両地点の位相スペクトルの相違を無視し、式(3)で推定される振幅フーリエスペクトルとC点での本震記録の位相スペクトルを用いて逆フーリエ変換を行うことにより、M点での本震の推定時刻歴波形が得られる。

M点で推定された本震地震動および本震観測記録について、速度時刻歴波形と主方向の減衰20%応答スペクトルを図-9に示す。SI値は、観測値58.1cm/sに対し推定値66.4cm/sとなり、やや過大評価となっている。図-7を見ると、M点のC点に対する最大余震のフーリエスペクトル比は本震のそれより、ほぼ全周波数帯にわたって大きくなっており、これが原因である。

M点での推定と全く同じ手続きで、記録が得られなかったS点での本震地震動を、M点やC点から求めると、推定される速度時刻歴波形と主方向の減衰20%応答スペクトルは図-10のようになる。これより、SI値は、M点から推定した場合は83.4cm/s、C点から推定した場合は



(1) 速度時刻歴波形



(2) 減衰20%速度応答スペクトル

図-10 地点間フーリエスペクトル比に基づくS地点での本震推定地震動の速度時刻歴波形と速度応答スペクトル

表-1 強震動生成域のパラメータ(Suzuki and Iwataより)

長さ	4.1km
幅	10.2km
ライズタイム	0.6s
破壊伝播速度	3.15km/s
応力降下量	10.7MPa

95.1cm/sとなった。

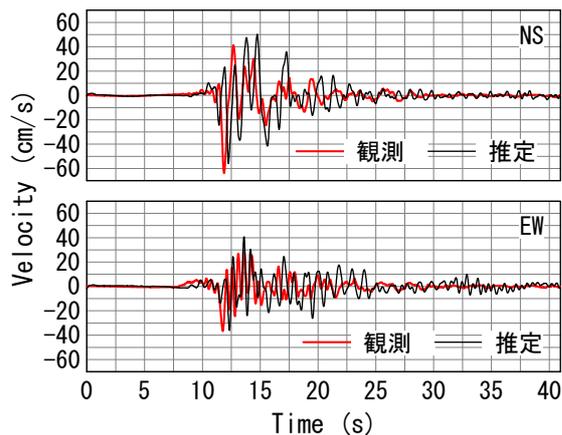
(3) 経験的グリーン関数法を用いた波形合成によるSI値推定

前項(1)(2)では、地点間スペクトル比に基づく地震動推定を行ったが、ここでは、震源断層の破壊過程を考慮した推定を行う。

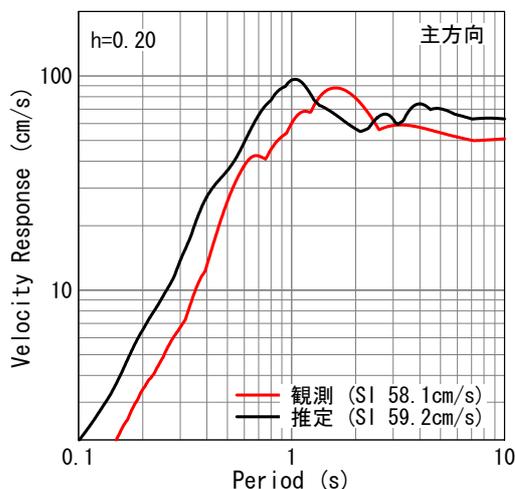
福岡県西方沖の地震本震の震源過程については、複数のモデルが提案されているが、本検討では、Asano and Iwata⁴⁾による震源インバージョンにより推定された最終すべり分布から強震動生成領域を抽出しているSuzuki and Iwata³⁾のモデルを用いる。表-1に、強震動生成域のパラメータを示すが、波形合成においては、強震動生成

表-2 本震およびグリーン関数として記録を用いる地震の震源パラメータ

パラメータ	本震	経験的グリーン関数として記録を用いる地震
発震時間	2005/03/20 10:53	2005/04/10 20:34
震源位置	緯度	33.75° N
	経度	130.16° E
	深さ	14.0km
メカニズム	走向	122°
	傾斜角	87°
	すべり角	-11°
	気象庁マグニチュード	7.0
モーメントマグニチュード	6.6	
地震モーメント	7.80E18 Nm	



(1) 速度時刻歴波形

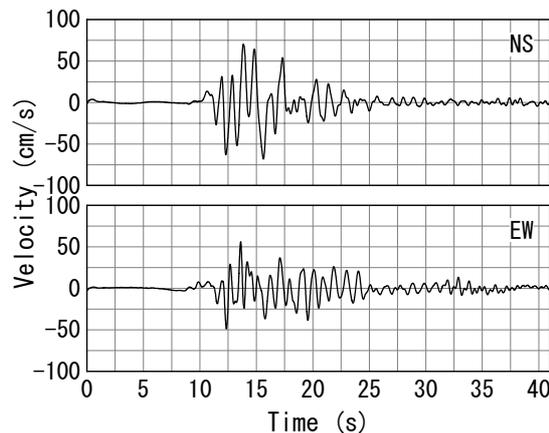


(2) 減衰20%速度応答スペクトル

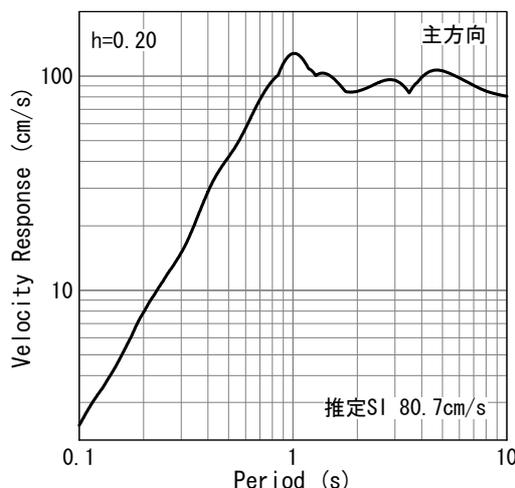
図-11 経験的グリーン関数法によるM地点での本震推定地震動と観測記録の速度時刻歴波形と速度応答スペクトル

領域をアスペリティと見なし、背景領域の寄与は考慮しない。

Suzuki and Iwata⁹⁾は、2005年4月10日に発生した余震記録を経験的グリーン関数として用いているが、M点では最大余震記録以外に波形が保存されていないことから、本検討では、前項(2)同様の手続きで、K点で得られている4月10日の観測記録を、最大余震のフーリエスペクトル比(M点/K点)で補正して得られる時刻歴波形を、S点で



(1) 速度時刻歴波形



(2) 減衰20%速度応答スペクトル

図-12 経験的グリーン関数法によるS地点での本震推定地震動と観測記録の速度時刻歴波形と速度応答スペクトル

のグリーン関数と見なし、本震およびグリーン関数として記録を用いる地震の震源パラメータを表-2に示す。

波形合成は、入倉ほか⁹⁾の式に従って行う。合成されたM点での地表面地震動は、大地震時の地盤の非線形応答が考慮されていないため、線形応答を仮定して基盤面まで一旦引き戻し、等価線形化法⁷⁾で再び地表面に立ち上げている。M点付近ではボーリングデータが得られていないため、C点でのボーリングデータから一次元地盤モデルを作成した。

以上の方法で合成したM点での本震の推定地震動と観測記録の速度時刻歴波形および減衰20%の応答スペクトルを図-11に示す。SI値は、観測値58.1cm/sに対し推定値59.2cm/sとなりよく合っているが、前項(2)と比べると波形の一致度は低い。これは、M点とK点とで1km以上離れているが、位相特性の相違を無視していることが原因と考えられる。

M点と同様に合成したS点での本震推定地震動を図-12に示す。これより、SI値は80.7cm/sと推定される。

4. おわりに

2005年福岡県西方沖の地震について、福岡市中央区舞鶴の強震観測点における本震地震動を、その地点の余震記録と近傍観測点での本震・余震記録を用いて推定した。

建物地下1階の観測点での本震推定地震動と本震観測記録とをSI値で比較すると、概ね良く推定されていた。

地表観測点での本震地震動推定の結果、3通りの方法いずれでも舞鶴地区では、80cm/s前後の地表面SI値であったと考えられる。

今回の検討で使用できた強震記録に限りがあり、地点間スペクトル比の評価に課題が残るが、今後の記録の蓄積による改善が期待される。

謝辞：防災科学技術研究所K-NET、福岡県、西部ガス株式会社、株式会社建設技術研究所の強震記録を使用させていただきました。また、株式会社建設技術研究所にはボーリングデータも併せて提供いただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 丸山喜久, 山崎文雄, 本村均, 浜田達也: 常時微動のH/Vスペクトル比を用いた地震動推定法の提案, 土木学会論文集, No. 675/I-55, pp. 261-272, 2001.
- 2) 村岡七重, 丸山喜久, 山崎文雄: 余震および常時微動のフリーエ振幅比を用いた本震の応答スペクトルと計測震度の

推定, 日本建築学会構造系論文集, No. 603, pp. 179-186, 2006.

- 3) 丸山喜久, 山崎文雄, 戸ノ崎聡一: 福岡県西方沖地震での強震域における常時微動観測, 日本地震工学会大会-2005梗概集, pp. 462-463, 2005.
- 4) Kimiyuki Asano and Tomotaka Iwata: Source process and near-source ground motions of the 2005 West Off Fukuoka Prefecture earthquake, Earth Planets Space, Vol. 58, No. 1, pp. 93-98., 2006.
- 5) Wataru Suzuki and Tomotaka Iwata: Source model of the 2005 west off Fukuoka prefecture earthquake estimated from the empirical Green's function simulation of broadband strong motions, Earth, Planets and Space, Vol. 58, No. 1, pp. 99-104, 2006.
- 6) 入倉孝次郎, 香川敬生, 関口春子: 経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良, 日本地震学会講演予稿集, No. 2, B25, 1997.
- 7) 吉田望, 末富岩雄: DYNEQ:等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム, 佐藤工業(株)技術研究所年報, pp61-70, 1996.

(2007.06.29 受付)