

経験的グリーン関数法を用いた震源のモデル化と
地盤の非線形性を考慮した地震動評価

2005年福岡県西方沖の地震と2007年能登半島地震への適用

SOURCE MODELING USING THE EMPIRICAL GREEN'S FUNCTION METHOD AND
STRONG GROUND MOTION ESTIMATION CONSIDERING NONLINEAR SITE EFFECT

An application to the 2005 West off Fukuoka prefecture earthquake
and the 2007 Noto Hanto earthquake

池田隆明*, 釜江克宏**, 入倉孝次郎***

Takaaki IKEDA, Katsuhiko KAMAE and Kojiro IRIKURA

For mitigating seismic damage of structures during disastrous earthquakes, we have to improve both the procedure for constructing source models for future earthquakes and the method for estimating strong ground motions. The empirical Green's function method (EGFM) is one of the most appropriate methods for estimating strong ground motions near source faults. We constructed the best-fit source models for observed data from the two inland earthquakes, the 2005 West-off Fukuoka earthquake and the 2007 Noto Hanto earthquake using the EGFM. We extended the EGFM to ground motion simulation at soft-layers sites, combining it with the nonlinear analysis in soft soil layers. As a result, the calculated motions on the ground surface underlain by soft layers agree reasonably well with the observed ones. It means that the EGFM is one of the most effective methods for predicting the strong ground motions at both soft-soil sites as well as hard-rock sites.

Keywords: 2005 West-off Fukuoka prefecture earthquake, 2007 Noto Hanto earthquake, Source model,

Soft-layers, nonlinearity, Empirical Green's function method

2005年福岡県西方沖の地震, 2007年能登半島地震, 震源モデル,

軟弱地盤, 非線形性, 経験的グリーン関数法

1. はじめに

内陸地殻内地震は震源断層が浅いため、震源域周辺では極めて大きい振幅の地震動が生成される場合が多い。さらに震源破壊の不均質性や震源放射特性、断層破壊伝播による指向性効果の影響により、特徴的な地震動が生成されることが観測記録などから明らかにされている。そのため、地震被害の軽減のためには、将来発生する地震に対し震源近傍域での地震動を精度よく予測することが重要であり、震源のモデル化や強震動評価手法の高精度化や適用範囲の拡大が特に求められる。

震源のモデル化についての研究は精力的に進められており、その成果の一つに、地震調査研究推進本部が取りまとめた、「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシビ」）」（以下、レシビと言う）がある¹⁾。最新の知見や研究成果に基づき取りまとめられているため、震源のモデル化に対しては有用な資料であるが、既に発生した地震を対象とした経験則に基づいているため、将来発生する地震に広く適用するためには、今後も継続的な検討を行い、見直しが必要

とされている。

実地震の震源モデルを評価する手法として、釜江・入倉に代表される経験的グリーン関数法²⁾を用いたフォワードモデリングによる方法がある³⁾。この方法は、波形インバージョン結果を参考に断層面上のすべりの大きい場所に強震動生成域（以後、アスペリティと言う）を配置し、アスペリティのサイズ、地震モーメント、応力降下量などのパラメータを定量化するものである。アスペリティの形状を矩形とし、アスペリティ内のすべり量も均一にした単純なモデル化ながら、その後国内外で発生した複数の地震に適用され、その有効性が確認されている⁴⁾⁵⁾⁶⁾。

経験的グリーン関数法は、適切な余震記録を経験的グリーン関数に用いることにより、地震動評価に必要なサイト特性、伝播経路特性、震源特性の3つの特性のうち、伝播経路特性とサイト特性が自動的に評価できるという特徴を有する。しかし、この方法では評価対象の地震動が、本震と余震の地震の相似則と震源スペクトルの相似則に基づき経験的グリーン関数の線形な重ね合わせで表現される

* 飛鳥建設技術研究所 第二研究室長・工修

** 京都大学原子炉実験所 教授・工博

*** 愛知工業大学地域防災研究センター 客員教授・理博

Division Chief, Research Institute of Technology, Tobishima Corporation, M. Eng.

Prof., Research Reactor Institute, Kyoto University, Dr. Eng.

Adjunct Prof., Disaster Prevention Research Center, Aichi Institute of Technology, Dr. Sci.

ため、本震時において地盤の強い非線形性が生じる軟弱なサイトでは合成波形が過大評価となり⁹⁾、直接的な適用には限界がある。

経験的グリーン関数法の適用において地盤の非線形性を導入した方法はいくつか提案されている。野津¹⁰⁾は地震動が地表に到達するまでに下方から直接伝播する地震動の他に、堆積層を何度も横切って伝播する地震動があると考え、多重非線形効果を考慮した経験的グリーン関数法を提案し、堆積層のS波速度の低下率と減衰定数の増分を表現するパラメータを適切に設定できれば、非線形挙動を示した地震動を適切に表現できるとしている。しかし、現時点では最適な非線形パラメータをフォワードで設定することは容易ではないため強震動予測への適用は困難であるとしている。Kamae et al.⁹⁾は、新潟県中越地震の強震動シミュレーションにおいて、地盤が軟弱な地点にする経験的グリーン関数法の適用に際し、まず地表で合成した地震動を一旦工学的基盤まで引き戻し、地盤の非線形性を考慮した地震応答解析により地表の地震動を再度評価することにより、経験的グリーン関数法による表層地盤の非線形性を考慮した強震動評価の可能性を示している。この方法については適用事例が少ないため、その他の地震に適用し有効性の検証が急務である。

本論文では、強震動予測手法の高精度化を目的に、内陸地殻内地震の強震動予測のためのレシピにおける震源のモデル化手法の検証と、強震動予測手法としての経験的グリーン関数法の軟弱地盤への適用性について検討する。具体的には、2007年能登半島地震および2005年福岡県西方沖の地震を対象に、経験的グリーン関数法¹¹⁾を用いたフォワードモデリングにより震源のモデル化を行い、既往の震源パラメータのスケージング則との比較検討を行う。次に地盤が軟弱な地点を対象に、地震被害と相関が高いS波主要動の再現性に焦点を絞り、地盤の非線形性の考慮が必要なサイトでの経験的グリーン関数法の適用性について検討する。

2. 経験的グリーン関数法を用いたフォワードモデリングによる震源のモデル化

2.1 2007年能登半島地震

(1) 地震の概要と震源破壊過程

2007年3月25日に発生した能登半島沖地震(Mj6.9)では、輪島市、七尾市、穴水町で震度6強の強い揺れを観測し、死者1名、家屋の全・半壊2,426棟という大きな被害が発生した⁷⁾。震源近傍のK-NET¹²⁾のISK006の最大加速度は900cm/s²を超え、1995年兵庫県南部地震の観測記録を上回るものであった。被害は震源直上と推定される輪島市門前町から北東の輪島市中心部にかけて広がっており、震源近傍地域での地震動が大きかったことが推測される。図1に震央位置⁹⁾とメカニズム解¹⁰⁾を、表1に地震の諸元を示す。

震源過程が波形インバージョン解析によって評価されており^{10),12),13),14),15)}、断層面での不均質なすべり分布等が公表されている。解析に用いたデータや拘束条件が異なるため、結果に差異は見られるが、震源近傍にすべり量の大きい領域が見られること、震源北東にややすべりの大きい領域が見られること等の共通な特徴がある。

(2) 震源のモデル化

震源の不均質性は、釜江・入倉のモデル化手法³⁾に従い、均質な矩形のアスペリティを断層面上に複数配置することにより考慮した。合成地震動との比較には、K-NETのISK001, ISK003, ISK006,

ISK010, KiK-net¹⁶⁾のISKH01での観測地震動(KiK-netは地中地震動)を使用した。これらのK-NET地点は本震時に地盤の非線形性による影響が少ない硬質地盤上の観測点である。ISK004, ISK005は軟弱地盤上の観測点のため対象から除外した。なお、このような軟弱地盤上の観測点に対する経験的グリーン関数法の適用手法や結果については4章で述べる。図1に各観測点の位置を示す。

経験的グリーン関数には、2007年3月25日15時43分に発生した余震(Mj4.5)の観測記録を使用した。図1に余震の震央位置を、表1に震源パラメータを示す。面積および応力降下量は、震源周辺のKiK-netのISKH01, ISKH03, ISKH04, ISKH06の4地点の地中観測記録から震源変位スペクトルを算出し、Andrewsの方法¹⁷⁾により求めたコーナー周波数($f_c=2.0\text{Hz}$; 4地点の平均値)から、Bruneの式^{18),19)}と円形クラックの式²⁰⁾からそれぞれ評価した。地震モーメントはF-netに従った。この値は、震源変位スペクトルの低振動数領域の一定値からの算定値($1.32 \times 10^{15}\text{Nm}$)とほぼ一致している。複数の地点での記録から震源パラメータを評価したのは、それぞれの観測記録に含まれるディレクティブティヤラディエーションパターンの影響を可能な限り小さくするためである。震源変位スペクトルの算定においては、幾何減衰と媒質のQ値($Q=30f^{1.2}$)²¹⁾による減衰の補正を行った。地震動には長周期側有効周期を考慮して0.2~10.0Hzのバンドパスフィルターを適用した。破壊速度は2.5km/s、せん断波速度は3.5km/sと仮定した。

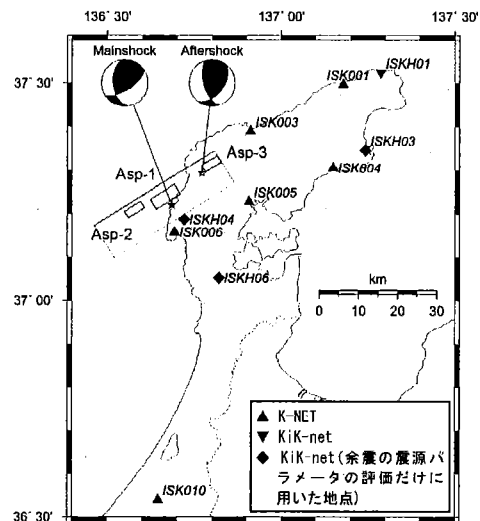


図1 2007年能登半島地震の本震および経験的グリーン関数に用いる余震の震央位置と地震観測点

表1 2007年能登半島地震と余震の諸元

	本震	余震
発生日時 ⁹⁾	2007/03/25 09:41:57.9	2007/03/25 15:43:30.5
震央位置 ⁹⁾	37.2200N 136.6850E	37.2933N 136.7717E
震源深さ ⁹⁾ (km)	11	9
マグニチュード(Mj) ⁹⁾	6.9	4.5
地震モーメント(Mo) ¹⁰⁾ (Nm)	1.36×10^{15}	1.25×10^{15}
Strike/Dip/Slip ¹⁰⁾ (deg.)	173/48/34	161/60/51
応力降下量 (MPa)	-	2.0
面積 (km ²)	-	1.44

震源のモデル化では、波形インバージョンの結果を参考に、すべ

り量の大きい場所にアスペリティを配置した初期モデルを作成し、合成波形と観測波形の一致度を式(1)に示す残差(以後、残差 R という)で評価し、残差 R が総合的に最小となるようなアスペリティの数、位置、大きさ、応力降下量等から構成される最適震源モデルを評価した。本検討では残差 R を、短周期領域 (R_s) と中・長周期領域 (R_L) に分け、 R_s の評価には加速度波形のエンベロープ(包絡形)を用い、 R_L の評価には 1.0Hz のローパスフィルターを作用させた変位波形を用いる。なお、エンベロープは加速度波形の絶対値をバンド幅 0.4 秒の移動平均により平滑化を行い算出した。具体的な手順としては、波形の位相の一致度を R_L に基づき照査し、その後 R_s による波形の最大値や継続時間の一致度を照査し、アスペリティの各震源パラメータを評価した。

$$R = \frac{\sum_i (Obs - Syn)^2}{\left\{ \left(\sum_i Obs^2 \right) \left(\sum_i Syn^2 \right) \right\}^{1/2}} \quad (1)$$

その結果、震源近傍の浅い部分 (Asp-1) とその西側 (Asp-2) および東側 (Asp-3) の 3 か所にアスペリティを配置したモデルを構築した(以下、最適震源モデルと言う)。図 2 に最適震源モデルを示す。Asp-1 と Asp-3 は走行方向に位置する ISK001 と ISK003、Asp-2 は ISK006 の観測波形との一致度から定量化した。破壊は Asp-1 の中央最深部から円状に広がり、Asp-2、Asp-3 にそれぞれ破壊が到達した後、再びそれぞれが円状に破壊が伝播すると仮定した。アスペリティから生成される地震動が支配的と考え、背景領域は考慮していない。震源モデルのパラメータを表 2 に示す。

Kurahashi et al.²²⁾, Yoshimi and Yoshida²³⁾, Maeda et al.²⁴⁾ は本検討と同様に経験的グリーン関数法を用いた震源のモデル化を行っている。詳細は原著に譲り、簡単に結果を紹介する。いずれも本モデルと同様に震源付近の浅い部分を含む 2~3 箇所にアスペリティを配置しているが、Asp-2 のような震源よりも西側にアスペリティを配置したモデルはない。Kurahashi et al. は二番目のアスペリティを Asp-3 に近い場所に配置し、走向方向の観測点での再現精度

を向上させているが、震源近傍の ISK006 では加速度波形の継続時間等の再現性は十分ではない。震源付近のアスペリティの応力降下量は 25.8MPa と本モデルの Asp-1 よりやや大きい。Yoshimi and Yoshida は震源付近とその東側に比較的大きめのアスペリティを配置している。震源付近のアスペリティの応力降下量は 9.44MPa で Asp-1 の半分程度である。このモデルにおいても ISK006 での再現性は低い。Maeda et al. は震源から東側に 3 つのアスペリティを配置している。アスペリティの応力降下量は最も大きく、震源付近のアスペリティは 46.9MPa と Asp-1 の 2 倍以上である。ISK006 では検討されていない。

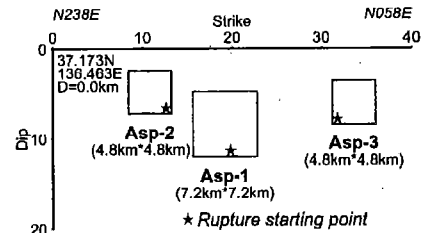


図 2 2007 年能登半島地震の最適震源モデル

表 2 震源モデルのパラメータ

	Asp-1	Asp-2	Asp-3
地震モーメント (Nm)	2.7×10^{18}	8.0×10^{17}	4.0×10^{17}
面積 (km ²)	51.84 (7.2 × 7.2)	23.04 (4.8 × 4.8)	23.04 (4.8 × 4.8)
応力降下量 (MPa)	20.0	20.0	10.0
ライズタイム (sec)	0.6	0.5	0.5

図 3 に ISK001, ISK003, ISK006 の 3 地点における観測波形と合成波形との比較を、図 4 に擬似速度応答スペクトルの比較を示す。論文中の擬似速度応答スペクトルは全て減衰定数 5% の場合の結果である。走向方向に位置する ISK001 と ISK003 では観測波形の主要動に見られる断層破壊の指向性効果によるパルス状の波形が再現できている。ISK003 の EW 成分では、観測波形の主要動の後に見られる表面波と考えられる振幅の大きい波群が再現できていない。

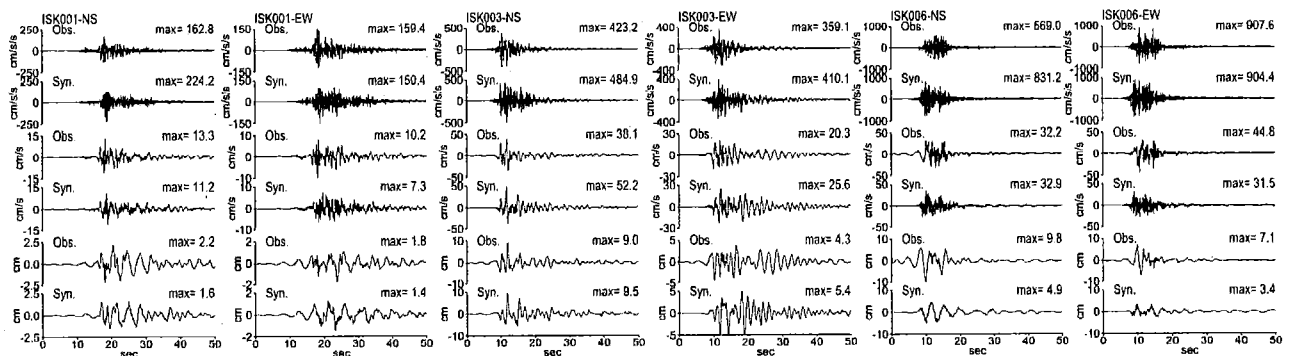


図 3 ISK001, ISK003, ISK006 における観測地震動と合成地震動の時刻歴波形の比較

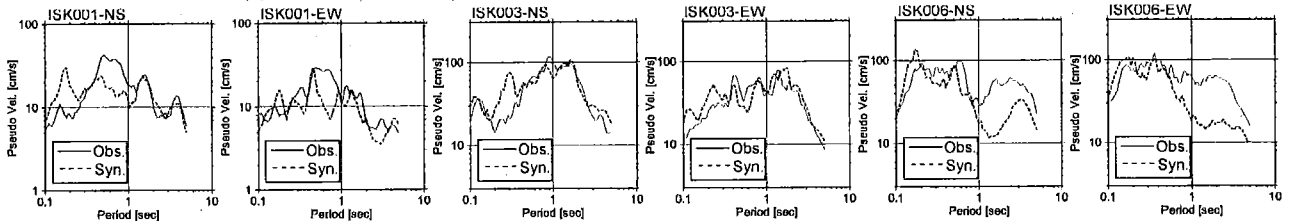


図 4 ISK001, ISK003, ISK006 における観測地震動と合成地震動の擬似速度応答スペクトル(h=5%)の比較

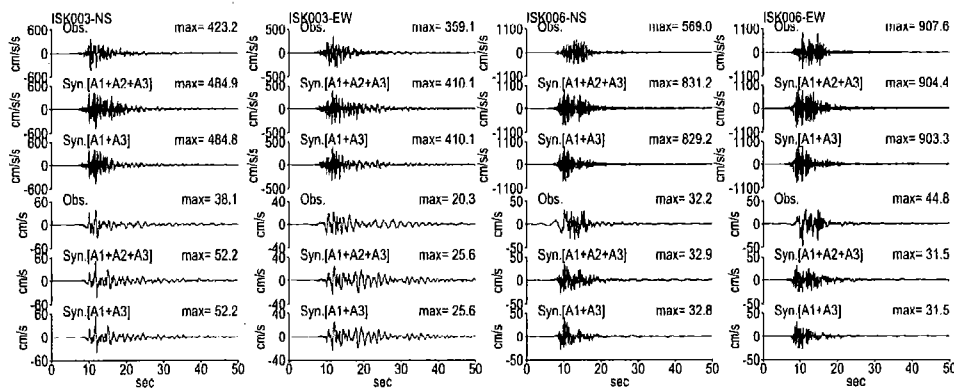


図5 ISK003とISK006における3つのアスペリティを考慮した場合とAsp-2を考慮しない場合との観測波形と合成波形の比較 (A1:Asp-1, A2:Asp-2, A3:Asp-3)

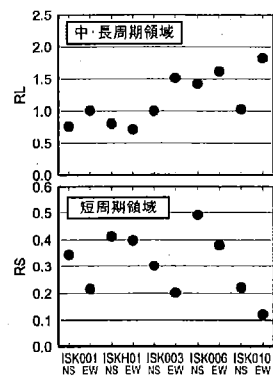


図6 残差Rによる観測地震動と合成地震動の一致度の評価

周期特性については、ISK003では広帯域にわたって再現できているが、ISK001では0.5~1.0秒の周期帯において再現性が悪くなっている。このような周期帯での部分的な不一致の原因を明らかにすることは困難であるが、用いた余震記録によるパラツキではないかと考えられる。今後別な余震記録を使うなどの検討が必要である。

震源に最も近いISK006では、加速度波形の継続時間や1秒以下の擬似速度応答スペクトルは再現できているが、ISK001やISK003に比べると一致度はやや劣る。特に、1秒以上の長周期帯域での一致度が悪く、この原因として波形合成では震源放射特性の影響を考慮していないことが考えられるため、余震と本震（アスペリティ）のラディエーションパターン係数（以下、 $R_{\theta, \phi}$ と云う）を比較した。表3にISK001, ISK003, ISK006の余震と本震の $R_{\theta, \phi}$ を示す。本震の $R_{\theta, \phi}$ は分割した要素断層ごとに $R_{\theta, \phi}$ を求め、それぞれのアスペリティ内の最大値と平均値として示した。波形の一致度が高かったISK001とISK003は、余震の $R_{\theta, \phi}$ と各アスペリティの $R_{\theta, \phi}$ はほぼ同じであり、この地点に対してはラディエーションパターンの影響が小さいことがわかる。一方、ISK006は、余震の $R_{\theta, \phi}$ が0.08 (NS成分)と0.33 (EW成分)であるのに対して、当該地点の地震動への影響が大きいAsp-1とAsp-2の $R_{\theta, \phi}$ (最大値, 平均値)は、NS成分でAsp-1が(0.24, 0.12), Asp-2が(0.33, 0.20), EW成分でAsp-1が(0.88, 0.67), Asp-2が(0.55, 0.29)であり、向成分とも本震の $R_{\theta, \phi}$ は余震の $R_{\theta, \phi}$ よりも有意に大きい。結果として、合成波形の長周期帯域が過小評価になったものと考えられる。

表3 余震と本震のラディエーションパターン係数

地点	成分	余震	Asp-1		Asp-2		Asp3	
			平均	最大	平均	最大	平均	最大
ISK001	NS	0.51	0.55	0.53	0.56	0.54	0.58	0.56
	EW	0.28	0.30	0.29	0.31	0.31	0.28	0.27
ISK003	NS	0.32	0.50	0.44	0.53	0.51	0.53	0.45
	EW	0.35	0.29	0.27	0.32	0.31	0.27	0.26
ISK006	NS	0.08	0.24	0.12	0.33	0.20	0.11	0.07
	EW	0.33	0.88	0.68	0.55	0.29	0.22	0.10

震源インバージョンでは、Asano and Iwata¹¹⁾以外には、震源の西側にはすべり量の大きいエリアは見られないが、本モデルではISK006の観測波形の再現性を高めるためにAsp-2を設置した。図5にAsp-1とAsp-3だけを考慮した場合のISK003とISK006の合成波形を、観測波形および3つのアスペリティを考慮した場合の合成波形と比較して示す。ISK003はAsp-2を無視してもほとんど結

果には変化が見られないが、ISK006では加速度波形の継続時間が観測記録に比べて短くなり、波形の一致度は低下する。これは、Asp-2はISK003に対してはバックワード側にあるため寄与は小さいが、ISK006に対してはAsp-2が必要な強震動生成域であることを示唆するものと考えられる。

図6に R_L と R_S を示す。 R_L は2.0以下であり、特に目視における時刻歴波形の一致度が高かったISK001やISHK01では1.0以下である。 R_S は全地点で0.5以下となる。検討した5地点の中ではISK010が最も低く0.22以下である。

2.2 2005年福岡県西方沖の地震

(1) 地震の概要と震源破壊過程

福岡県西方沖の地震は2005年3月20日に福岡市の北西約25kmの玄界灘を震源とするM_L7.0の地震である。震源に近い福岡県福岡市、糸島市、佐賀県みやき町で震度6弱を観測したほか、九州北部の広い範囲で強い揺れを観測し、死者1名、家屋の全・半壊496棟という大きな被害が発生した²⁵⁾。

図7に震央位置とF-netによるメカニズム解を示す。震源断層は北西-南東方向のほぼ鉛直な断層面を持つ左横ずれ断層と推定されている。表4に地震の諸元を示す。この地震の震源過程が波形インバージョン解析によって評価されている^{26), 27), 28)}。用いたデータや拘束条件が異なるため震源課程には差異が見られるが、震源の南東側にすべり量の大きい領域が見られる等の共通点はある。

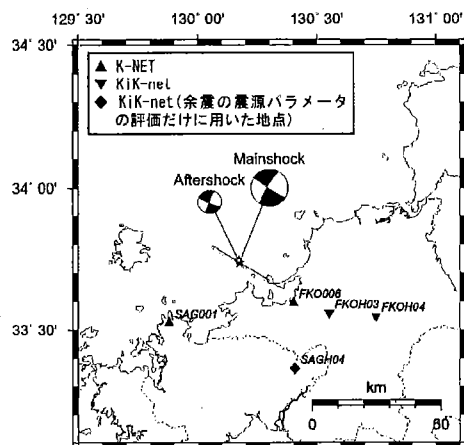


図7 2005年福岡県西方沖の地震の本震および経験的グリーン関数に用いる余震の震央位置と地震観測点

表 4 2005 年福岡県西方沖の地震の諸元と
経験的グリーン関数に用いる余震の諸元

	本震	余震
発生日時 ¹⁰⁾	2005/03/20 10:53:40.3	2005/03/20 20:38:16.4
震央位置 ¹⁰⁾	37.73833N 130.1750E	37.7450N 130.1700E
震源深さ ¹⁰⁾ (km)	9	11
マグニチュード(Mj) ¹⁰⁾	7.0	4.5
地震モーメント(Mo) (Nm)	7.80×10 ¹⁸ ¹¹⁾	5.6×10 ¹⁵
Strike/Dip/Slip ¹¹⁾ (deg.)	122/87/-11	111/83/-5
応力降下量 (MPa)	-	1.66
面積 (km ²)	-	4.00

(2) 震源のモデル化

K-NETのSAG001およびKiK-net(地中)のFKOH03とFKOH04の地震動波形との一致度を拘束条件として震源のモデル化を行う。軟弱な地盤上のFKO06は対象から除外し、4章における地盤の非線形性を考慮した経験的グリーン関数法の適用性の検討対象とする。図7に観測地点の位置を示す。

経験的グリーン関数には本震直後の同日20時38分に発生したMj4.5の余震記録を使用した。図7に余震の震央とF-netによるメカニズム解を示す。面積と応力降下量は、能登半島地震と同様に震源周辺のKiK-netのFKOH03,FKOH04,SAG004の3地点の地中観測記録から震源変位スペクトルを算出し、それぞれのコーナー周波数の平均値($f_c=1.15\text{Hz}$)から評価した。震源変位スペクトルの算定においては、幾何減衰と媒質のQ値($Q=56f^{1.7}$)²⁰⁾による減衰の補正を行った。地震モーメントは、震源変位スペクトルの低振動数領域の一定値から求めた値($5.6\times 10^{15}\text{Nm}$)とF-netの値($2.17\times 10^{18}\text{Nm}$)が異なるため、ここでは前者を使用した。余震記録には0.2~10.0Hzのバンドパスフィルターを適用した。S波速度と破壊伝播速度はそれぞれ3.5km/sと2.5km/sとした。

観測波形との一致度から震源の南東側にアスペリティを1個配置した最適震源モデルを構築した。図8に最適震源モデルを、表5に震源パラメータを示す。

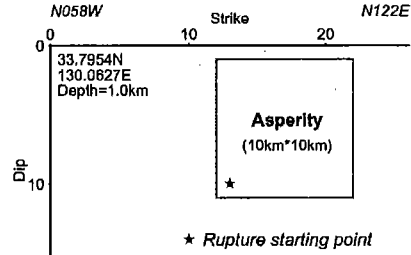


図 8 2005 年福岡県西方沖の地震の最適震源モデル

表 5 2005 年福岡県西方沖の地震の震源モデルのパラメータ

Asperity	
地震モーメント (Nm)	2.17×10 ¹⁸
面積 (km ²)	100.0 (10.0×10.0)
応力降下量 (MPa)	13.3
ライスタイム (sec)	0.6

図9および図10に3地点における観測地震動の時刻歴波形と擬似速度応答スペクトルを合成地震動と比較して示す。走向方向に位置するFKOH03とFKOH04の速度波形には、断層破壊の指向性効果によると考えられるパルス状の波形が再現できている。擬似速度応答スペクトルも広帯域で再現できている。SAG001では加速度波形の包絡形状が再現できている。

図11に残差Rを示す。FKOH03とFKOH04のNS成分のR_iは0.47と0.25であり2007年能登半島地震でISK001やISKH01の一致度を上回る。一方、R_sの範囲は0.35~0.45であり、2007年能登半島地震よりも一致度は若干下回る。

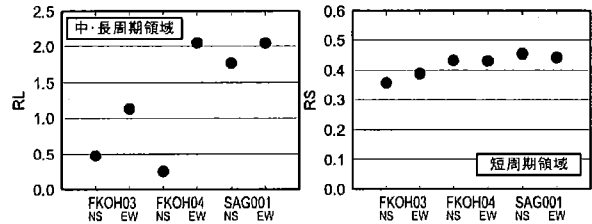


図 11 残差 R による観測地震動と合成地震動の一致度の評価

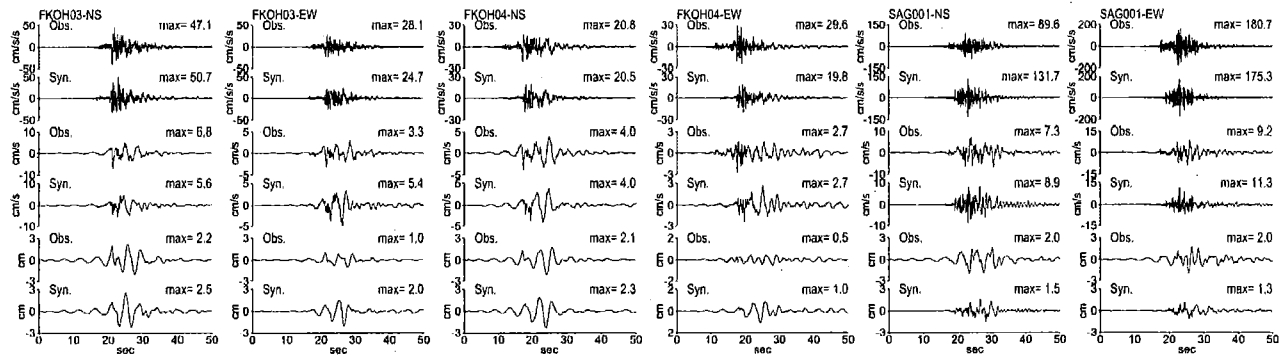


図 9 FKO03, FKO04, SAG001 における観測地震動と合成地震動の時刻歴波形の比較

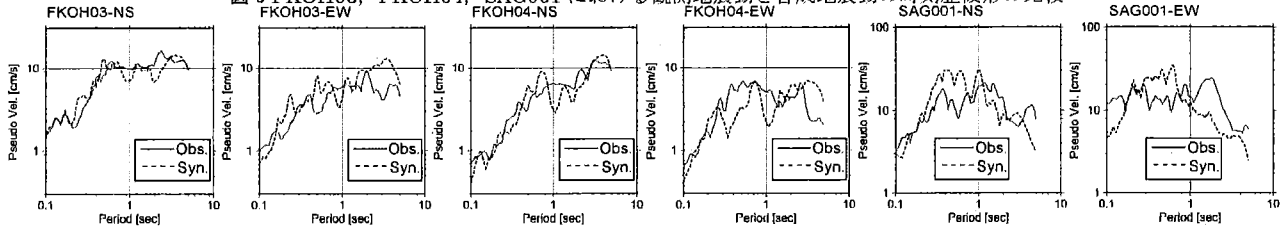


図 10 FKO03, FKO04, SAG001 における観測地震動と合成地震動の擬似速度応答スペクトル(h=5%)の比較

2.3 既往の短周期レベルのスケーリング則との比較

図 12 に対象とした二つの地震の最適震源モデルの地震モーメントと加速度震源スペクトルの短周期レベル（以後、短周期レベルと言う）の関係を、他のスケーリング則³⁰⁾と比較して示す。細い破線はスケーリング則の 0.5 倍と 2.0 倍を示す。図には、他の内陸地震のフォワードモデリングによる結果^{4), 3), 31), 32)}を併せて示す。図からわかるように、今回対象とした二つの地震の最適震源モデルの地震モーメントと短周期レベルの関係は既往のスケーリング則で表現できている。

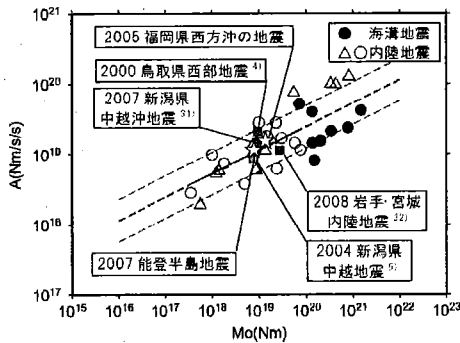


図 12 地震モーメント(Mo:Nm)と短周期レベル(A:Nm/s²)との関係

3. 軟弱な地盤に対する経験的グリーン関数法の適用性の検討

3.1 検討方法

最適震源モデルを使用し、地盤が軟弱で地震時に地盤が強い非線形性を示す地点に対する経験的グリーン関数法の適用性に関する検討を実施する。地震観測点が増え、経験的グリーン関数法による地震動予測の機会が増えることを想定した場合、地盤の非線形性が考慮できる手法への拡張は重要である。

ここでは前述した二つの地震時に地盤の非線形化が生じたであろう観測点を対象とする。対象地点は 2007 年能登半島地震時の ISK005 (K-NET)、2005 年福岡県西方沖の地震時が FKO006 (K-NET) の 2 地点とする。K-NET の地盤調査結果によると、ISK005 は G.L.-15m 程度まで N 値が極めて低い高有機質土やシルト、FKO006 は G.L.-3.2m~11.5m までは N 値が低い砂質土から構成されており、いずれも震源近傍域に位置するため、本震時には地盤は強い非線形性を示したと想定される。

地盤の非線形性の考慮は以下の手順で実施する。まず、対象地点の地盤モデルを作成し、地表で観測された余震記録をせん断波速度が 400m/s 以上の工学的基盤に引き戻す。本検討では、比較規模が大きい余震 (Mj4.3, Mj4.5) の観測地震動を使用しており、この観測地震動にも地盤の非線形性の影響が含まれている可能性も否定できないため、ここでは地盤の非線形性を考慮して引き戻し計算³³⁾を実施した。工学的基盤に引き戻された地震動を用いて波形合成を行い、地盤の非線形性を考慮した地震応答解析により地表の地震動を評価する。地盤の地震応答解析には、地盤の応力~ひずみの非線形特性に修正 RO モデル³⁴⁾を用いた全応力非線形解析を使用した。この方法では、野津が指摘する多重非線形効果を考慮することはできないが、被害との相関が高い S 波主要動の地盤の非線形効果については考慮できると考えられる。

3.2 ISK005 における検討

(1) 地盤のモデル化

K-NET の地盤調査結果を基本として初期地盤モデルを構築し、当該地点で計測した微動の水平方向と鉛直方向のスペクトル比（以下、微動 H/V スペクトル比と言う）と地盤モデルから算出した Rayleigh 波の基本モードの水平方向と鉛直方向の振幅比（以下、理論 H/V スペクトル比と言う）が一致するように地盤モデルを調整し、地盤モデルの高精度化をはかった。

表 6 に初期地盤モデルを示す。工学的基盤は G.L.-19.0m とし密度は 2.1t/m³、せん断波速度は 400m/s とした。それ以外の層の物性値は地盤調査結果に基づき設定した。図 13 に ISK005 で観測した微動 H/V スペクトル比と、初期地盤モデルから算出された理論 H/V スペクトル比を重ねて示す。微動 H/V スペクトル比はバンド幅 0.2Hz の Parzen ウィンドウで平滑化している。微動 H/V スペクトル比と理論 H/V スペクトル比との一致度は高く、地盤の 1 次固有周期と考えられる 1.4Hz 付近の卓越も再現されている。そのため、以下の検討ではこの初期地盤モデルを使用した。

鈴木他³⁵⁾、浅野他³⁶⁾は、地震時に G.L.-2m~9m にかけて存在する高有機質土で顕著な非線形性を示したとしており、当該層の非線形特性の設定が重要である。当該層については文献 35) に掲載されている繰り返し三軸試験に基づく動的変形特性を、その他の土層については、粘性土層と砂質土層に区分し、文献 37) に示された非線形特性に基づき非線形パラメータを設定した。表 6 に非線形パラメータを示す。

表 6 ISK005 の地盤モデル

No.	土質	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	Vs (m/s)	修正 RO モデル	
					$\gamma_{0.5}$	h_{max}
1	表土・粘性土	2.0	1.45	120	1.00E-3	0.20
2	高有機質土	7.0	1.50	60	4.59E-3	0.21
3	シルト	3.0	1.50	130	4.59E-3	0.21
4	砂質土	4.0	1.75	130	1.00E-3	0.20
5	岩盤	3.0	1.90	290	1.00E-3	0.20
基盤	岩盤	-	2.10	400	-	-

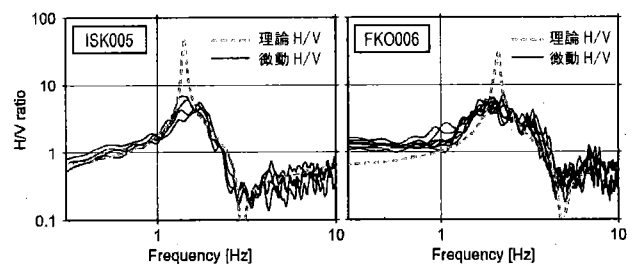


図 13 微動の H/V スペクトル比と地盤モデルから算出した Rayleigh 波の基本モードの理論 H/V スペクトル比との比較

(2) 地盤の非線形性を考慮した地震動評価

表 6 の地盤モデルを用いて地表での観測地震動を G.L.-19m の工学的基盤に引き戻し、波形合成を実施し、地盤の非線形性を考慮した地震応答解析により地表面での地震動を評価した。

図 14 に地盤の最大加速度、最大せん断ひずみ、せん断剛性の最大低下率を示す。全層にわたって大きなせん断ひずみが生じており、G.L.-2m~9m の高有機質土層では 1% を超える。それに伴い、地盤のせん断剛性も低下しており、前述の高有機質土層と G.L.-12m

～16mの砂質土層では初期状態の0.3倍程度まで低下している。

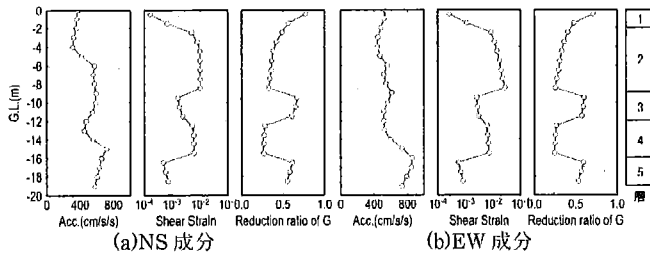
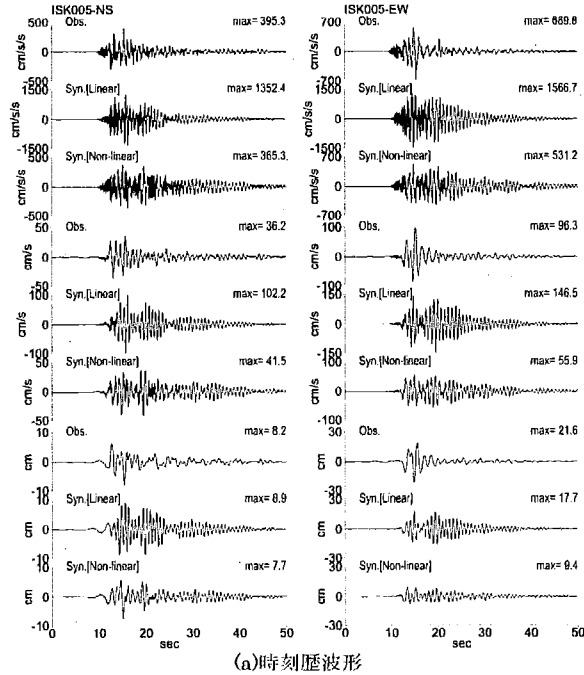


図 14 ISK005 の地盤の地震時挙動 (最大値の深度分布)



(a)時刻歴波形
(b)擬似速度応答スペクトル(h=5%)

図 15 ISK005 における観測地震動と合成地震動 (地盤の非線形性を考慮しない場合と考慮した場合) の比較

図 15(a)に観測波形と合成波形の比較を、図 15(b)に擬似速度応答スペクトルの比較を示す。両図には地盤の非線形性の影響を評価するため、地盤の非線形性を考慮しない合成地震動もあわせて示す。地盤の非線形性を考慮することにより、過大に評価していた加速度および速度波形は大幅に改善され、最大振幅は観測地震動と同程度となっている。周期特性にも改善が見られ、擬似速度応答スペクトルは広帯域で両者はほぼ一致している。

図 16 に残差 R を示す。△印が非線形性を考慮した場合、●印が考慮しない場合である。ISK005 の EW 成分の R_1 を除き、非線形性を考慮することにより一致度は改善され、最適震源モデルの拘束に

用いた 5 地点と同程度となっている。特に地盤の非線形性の影響を受けやすい短周期領域の一致度が大幅に改善されている。

一方、主要動以後の波形については地盤の非線形性を考慮しても観測波形に比べて振幅を大きめに評価している。筆頭著者らが地震直後に実施した地震被害調査では ISK005 地点の周辺では噴砂などの液状化の痕跡は確認されていないが³⁶⁾、鈴木他³⁵⁾は観測地震動による検討から粘性土層の過剰間隙水圧が上昇したことを指摘している。地盤に生じる非線形性は、せん断ひずみに依存するものと、間隙水圧に依存するものの二種類があり、本検討では後者の間隙水圧に依存する非線形性は考慮していないことが、主要動以降の波形を大きめに評価した原因と考えられる。

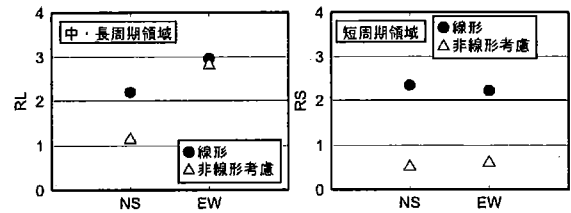


図 16 残差 R による一致度の評価 (ISK005)

3.3 FKO006 における検討

(1) 地盤のモデル化

地盤モデルは、K-NET の地盤調査結果、Sato and Kawase³⁹⁾、山田他⁴⁰⁾の知見を参考に初期モデルを作成し、FKO006 の H/V スペクトル比と地盤モデルから計算される理論 H/V スペクトル比が一致するように調整した (図 13)。FKO006 では地盤の非線形特性が得られていないため、修正 RO モデルのパラメータは文献³⁷⁾に基づき設定した。表 7 に FKO006 の地盤モデルを示す。

表 7 FKO006 の地盤モデル

No.	土質	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	Vs (m/s)	修正 RO モデル	
					$\gamma_{0.5}$	h_{max}
1	表土・粘性土	2.0	1.75	110	4.34E-4	0.28
2	表土・粘性土	1.2	1.75	130	4.34E-4	0.28
3	シルト	1.0	1.70	130	1.06E-3	0.25
4	砂質土	2.3	1.85	130	4.34E-4	0.28
5	砂質土	2.0	1.80	130	4.34E-4	0.28
6	シルト	3.0	1.70	150	1.06E-3	0.25
7	砂質土	3.5	1.95	180	4.34E-4	0.28
8	砂礫	10.0	1.95	320	4.34E-4	0.28
基盤	岩盤	-	2.20	1,000	-	-

(2) 地盤の非線形性を考慮した地震動評価

表 7 の地盤モデルを用いて地盤の非線形性を考慮した地震動評価を実施した。図 17 に地盤の最大加速度、最大せん断ひずみ、せん断剛性の最大低下率を示す。ほぼ全層にわたって 0.1% 以上のせん断ひずみが生じており、中でも G.L.-4m～15m の地盤は顕著である。せん断ひずみの発生に伴い、せん断剛性も低下しており、特に G.L.-4.2m～8.5m、G.L.-11.5m～16.0m の砂質土層では初期状態の 0.2 倍程度まで低下している。

図 18(a)に観測波形と合成波形の比較を、図 18(b)に擬似速度応答スペクトルの比較を示す。両図には地盤の非線形性の影響を評価するため、地表面の記録をそのまま使った合成地震動も併せて示す。

地盤の非線形特性を考慮することにより、観測地震動の再現性は向上している。特に短周期領域は大幅に改善され、短周期成分が卓越する加速度は振幅・包絡形状ともに観測地震動を再現できている。擬似速度応答スペクトルでも、1秒以下の周期領域が改善され広帯域にわたって観測地震動の周期特性が再現できている。

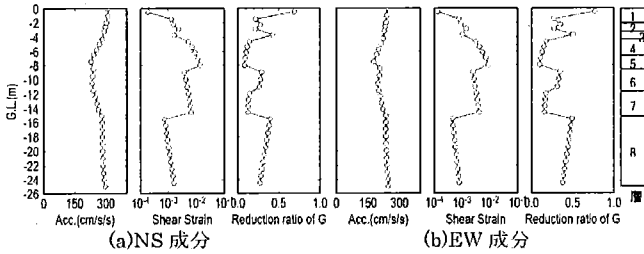
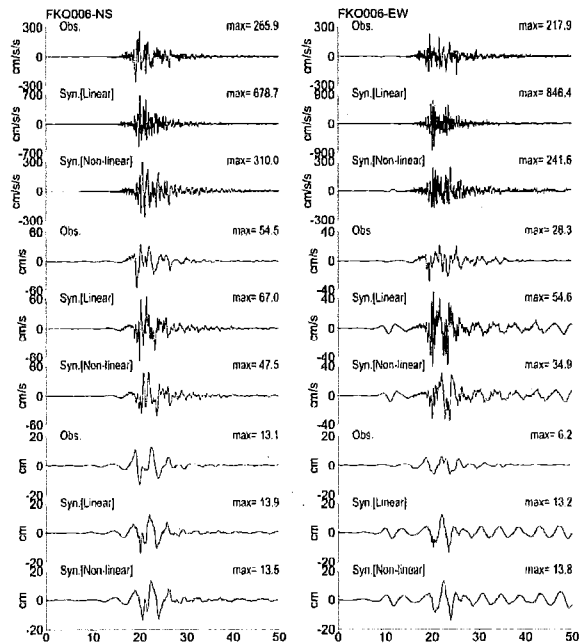
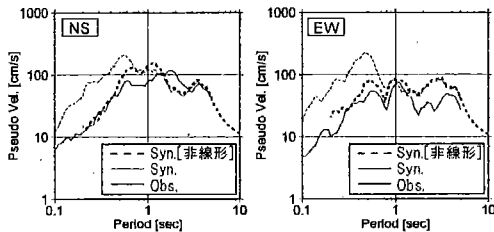


図 17 FKO006 の地盤の地震時挙動 (最大値の深度分布)



(a)時刻歴波形



(b)擬似速度応答スペクトル(h=5%)

図 18 FKO006 における観測地震動と合成地震動(地盤の非線形性を考慮しない場合と考慮した場合)の比較

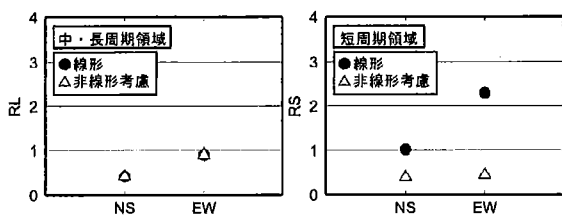


図 19 残差 R による一致度の評価 (FKO006)

図 19 に残差 R による一致度を示す。地盤の非線形性を考慮しなくとも長周期成分が卓越する変位波形の再現性が高かったため、中・長周期領域の指標である R_L に大きな変化は見られないが、地盤の非線形性の影響を大きく受ける短周期領域の指標である R_S は 0.5 以下と最適震源モデルの拘束に用いた 3 地点と同程度にまで改善されている。

4. 結論

2007 年能登半島地震と 2005 年福岡県西方沖の地震の最適震源モデルを経験的グリーン関数法によるフォワードモデリングにより構築した。経験的グリーン関数法は、地震波の伝播特性やローカルなサイト特性が自ずと考慮できる地震動評価手法として定着し各方面で利用されているが、地盤が軟弱な地点に対しては直接的には適用できないという問題を有する。この問題については、以前から地震動予測の観点からは本検討と同様な手法が用いられ、表層地盤の非線形性が考慮されてきたが、観測記録を使った手法の検証についてはまだ十分とは言えない。そこで、前述した二つの地震時に地盤の非線形化が生じたであろう観測点を対象に、軟弱地盤に対する経験的グリーン関数法の適用手法の検証を行った。以下、本検討で得られた結論を示す。

- (1) 2007 年能登半島地震の震源近傍の強震動は、震源よりもやや浅い付近(Asp-1)、Asp-1 の西側(Asp-2)と東側(Asp-3)の 3 箇所に配置したアスペリティから生成される強震動によりほぼ説明できた。また、震源近傍の ISK006 の強震動を再現するためには、震源の西側のアスペリティ(Asp-2)の必要性が示唆された。
- (2) 2005 年福岡県西方沖の地震の震源近傍の強震動は、震源の南東側に配置した 1 個のアスペリティから生成される強震動によりほぼ説明できた。
- (3) 二つの地震の最適震源モデルの地震モーメントと短周期レベルの関係は、壇・他³⁰⁾のスケリング則に従うことが確認された。
- (4) 経験的グリーン関数法の直接的な適用が困難な地盤が軟弱な地点に対して、地震被害との関連性が高い S 波主要動部を対象に、地盤の非線形性を考慮した経験的グリーン関数法による地震動評価を行った。その結果、観測地震動の再現性が向上し、手法の有効性が検証できた。

本論文で示した地盤が軟弱な地点に対する経験的グリーン関数法の適用手法の有効性については、今後検討事例を増やし、検証を行うとともに、当該手法が必要な地点の判定基準の定量化に関する研究を進めていきたい。

謝辞

本検討では、防災科学技術研究所の K-NET および KiK-net の観測波形および地盤調査結果、F-net のメカニズム解を使用させていただきました。また、本研究の一部は科研費基盤研究(C)21560513 (研究代表者: 池田隆明)、科研費基盤研究(C)20560518 (研究代表者: 釜江克宏) の助成を受けて実施しました。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部: 震源断層を特定した地震の強震動予測手法 (「レシビ」), http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka.htm (2011.2.2 参照)
- 2) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motions using empirical

- Green's function, Proceedings of the 7th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp. 151-156, 1986.
- 3) 釜江克宏, 入倉孝次郎: 1995年兵庫県南部地震の断層モデルと震源近傍における強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 第500号, pp.29-36, 1997.10
 - 4) 池田隆明, 釜江克宏, 三輪 滋, 入倉孝次郎: 経験的グリーン関数法を用いた2000年鳥取県西部地震の震源のモデル化と強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 第561号, pp.37-45, 2002.11
 - 5) Kamae, K., T. Ikeda, and S. Miwa: Source model composed of asperities for the 2004 Mid Niigata Prefecture, Japan, earthquake (MJMA=6.8) by the forward modeling using the empirical Green's function method, Earth Planets Space, Vol.57, pp.533-538, 2005.
 - 6) 野津厚: 非線形パラメタと有効応力解析を併用した強震動評価手法, 土木学会地震工学論文集, pp.114-122, 2007.
 - 7) 総務省消防庁: 平成19年(2007年)能登半島地震(第49報), <http://www.fdma.go.jp/bn/2009/detail/537.html>(2010.10.10参照)
 - 8) 防災科学技術研究所: 強震ネットワーク K-NET, <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>(2011.2.2参照)
 - 9) 気象庁: 震度データベース検索, http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/shindo_db/shindo_index.html(2011.2.2参照)
 - 10) 防災科学技術研究所: 広帯域地震観測網 (F-net), <http://www.fnet.bosai.go.jp/>(2011.2.2参照)
 - 11) Asano K. and T. Iwata: Source modeling of recent large inland crustal earthquakes in Japan and source characterization for strong motion prediction. Proceedings of 14th World Conference on Earthquake Engineering, No. 03-01-0025, 2008.
 - 12) Nozu A.: Rupture process of the 2007 Noto Hanto earthquake: waveform inversion using empirical Green's function, Earth Planets Space, 60, pp.1029-1034, 2008.
 - 13) 青井真, 関口春子, 森川信之, 先名重樹, 功刀卓: K-NET, KiK-net による2007年3月25日能登半島地震の地震動・震源過程, 日本地球惑星科学連合2007年大会, Z255-P006, 2007.
 - 14) 堀川晴央: 2007年能登半島地震の破壊過程(第一報), 地震予知連絡会会報, 78, pp.389-391, 2007.
 - 15) 山中佳子: 2007年3月25日能登半島地震(MJMA6.9)について, 地震予知連絡会会報, 78, pp.407-410, 2007.
 - 16) 防災科学技術研究所: 基盤強震観測網 KiK-net, <http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>(2010.10.10参照)
 - 17) Andrews, D. J.: Rupture velocity of plane strain shear cracks, Journal of Geophysical Research, Vol. 81, pp.5679-5687, 1976.
 - 18) Brune, J. N.: Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, Journal of Geophysical Research, Vol.75, pp.4997-5009, 1970.
 - 19) Brune, J. N.: Correction, Journal of geophysical research, Vol.76, p.5002, 1971.
 - 20) Eshelby, J.D.: The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Volume 241, Issue 1226, pp. 376-396, 1957.
 - 21) 加藤研一, 池浦友則: 2007年能登半島地震が励起した大振幅地震動の発生要因: 震源・伝播・地盤増幅率の観点からみた検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.761-762, 2008.
 - 22) Kurahashi S., K. Masaki and K. Irikura: Source model of the 2007 Noto-Hanto earthquake (Mw 6.7) for estimating broad-band strong ground motion, Earth Planets Space, 60, pp.89-94, 2008.
 - 23) Yoshimi M. and K. Yoshida: Site amplification and strong ground motion of the 2007 Noto Hanto, Japan, earthquake estimated from aftershock observation, Earth Planets Space, 60, pp.161-167, 2008.
 - 24) Maeda T., M. Ichiyonagi, H. Takahashi, R. Honda, T. Yamaguchi, M. Kasahara and T. Sasatani: Source parameters of the 2007 Noto Hanto earthquake sequence derived from strong motion records at temporary and permanent stations, Earth Planets Space, 60, pp.1011-1016, 2008.
 - 25) 総務省消防庁: 福岡県西方沖を震源とする地震(確定報), <http://www.fdma.go.jp/bn/2009/detail/554.html>(2010.10.10参照)
 - 26) Asano, K. and T. Iwata: Source process and near-source ground motions of the 2005 West Off Fukuoka Prefecture earthquake, Earth Planets Space, 58, pp.93-98, 2006.
 - 27) Sekiguchi, H., S. Aoi, R. Honda, N. Morikawa, T. Kunugi, and H. Fujiwara: Rupture process of the 2005 West Off Fukuoka Prefecture earthquake obtained from strong motion data of K-NET and KiK-net, Earth Planets Space, 58, pp.37-43, 2006.
 - 28) 東京大学地震研究所: 2005年福岡県西方沖の地震-震源過程・強震動・被害-, <http://taro.eri.u-tokyo.ac.jp/saigai/fukuoka/>(2011.2.2参照)
 - 29) 佐藤智美, 川瀬博: 福岡県西方沖の地震と余震の強震記録のスペクトルインバージョン解析, 福岡県西方沖の地震の強震動と構造物被害の関係に関する調査研究, 平成17年度科学研究費補助金研究成果, pp.76-87, 2006.
 - 30) 壇一男, 渡辺基史, 佐藤俊明, 石井透: 断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, No.545, pp.51-62, 2001.7
 - 31) 釜江克宏, 川辺秀憲: 2007年新潟県中越沖地震(Mj6.8)の震源のモデル化と強震動シミュレーション, <http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/jishin/kenkyunaiyou.html>(2011.2.2参照)
 - 32) 釜江克宏: 2008年岩手・宮城内陸地震(Mj7.2)の震源のモデル化(暫定版), <http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/jishin/kenkyunaiyou.html>(2011.2.2参照)
 - 33) 杉戸真太, 合田尚義, 増田民夫: 周波数依存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/II-27, pp.49-58, 1994.
 - 34) 龍岡文夫, 福島伸二: 砂のランダム繰返し入力に対する応力~歪関係のモデル化について(1), 生産研究, 30巻, 9号, pp. 56-359, 1978.
 - 35) 鈴木比呂子, 時松孝次, 新井洋, 粟川三郎: 2007年能登半島地震におけるK-NET穴水・JMA輪島の強震記録から推定した粘性土地盤の非線形性状, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 74, No. 645, pp. 2003-2010, 2009.11
 - 36) 浅野公之, 岩田知孝, 岩城麻子, 栗山雅之, 鈴木亘: 地震および微動観測による石川県鳳珠郡穴水町における地盤振動特性, 地震, 第2輯, No.62, pp.121-135, 2009.
 - 37) 日本建築学会: 建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計, pp.442-444, 2006.
 - 38) 沼田淳紀, 上明戸昇, 三輪滋, 池田隆明: 2007年能登半島地震における液状化, 土木学会地震工学論文集, Vol.29, No.1486, pp.20-29, 2007.
 - 39) Satoh, T. and K. Kawase: Simulation of strong motions in Fukuoka City during the 2005 West Off Fukuoka Prefecture Earthquake with special reference to thick Quaternary sediment, Earth, Planets and Space, 58, pp.105-110, 2006.
 - 40) 山田伸之, 山中浩明, 元木健太郎: 福岡市中心区天神地区の表層地盤のS波速度構造, 地震, 第2輯, No.62, pp.109-120, 2009.

(2010年11月9日原稿受理, 2011年3月29日採用決定)