

経験的グリーン関数法の要素地震選定における一考察

大角恒雄¹・原田隆典²

¹正会員 博士(工学) 日本工営株式会社中央研究所開発研究部耐震解析グループ
(〒300-1259 茨城県稲敷郡基崎町稲荷原 2304)

²正会員 工博 宮崎大学教授 工学部土木環境工学科(〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1)

兵庫県南部地震以降、土木学会の第2次提言により活断層を考慮した地震動を設定し、耐震設計に反映させることが一部の自治体の被害想定等に盛り込まれ、グリーン関数を用いた地震動の設定が用いられてきた。また、防災科学技術研究所の地震観測ネット(K-net)が一般に広く公開され、観測波形を用いる経験的グリーン関数法では、貴重なデータの蓄積となっている。本論文では、K-netの余震観測波形を用い、鹿児島県北西部地震(M6.3,1997.3.26)による地震動を再現した。しかし、経験的グリーン関数法において用いる適切な小地震の記録選定にあたっては注意を要することがわかった。

Key Words: empirical Green's function, K-net, the Hyogo-ken-hokueibu earthquake

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震(M7.2)(阪神・淡路大震災)後、土木学会の第2次提言(1996)では、構造物の耐用期間中に1,2回発生する程度の地震による地震動(レベル1地震動)に加え、極めて発生頻度が少ない阪神・淡路大震災のような内陸直下型地震による地震動(レベル2地震動)に対する耐震性確保の検討が必要であると述べられたことも手伝って、震源断層を考慮した入力地震動の評価が一般構造物の耐震設計用入力地震動にも求められつつある。

本論文では、震源断層を考慮した地震動評価法の1つとして考えられる、いわゆる経験的グリーン関数法に着目し、その工学的適用性を以下のような視点から検討する。

経験的グリーン関数法の長所は、小地震による観測波形をグリーン関数として用いるところにあり、適切な小地震の記録があれば、高い予測精度が期待できる^{1), 2), 3), 4)}。しかしこれまでの研究では、適切な小地震の記録とはどのような基準であるのかという点についてはあまり明確にされていない。また、工学的適用を考えるにあたっては、必ずしも建設地点において適切な小地震の記録が観測されない場合も多い。そこで本論文では、鹿児島県北西部地震(M6.3,1997.3.26)の、防災科学技術研究所の地震観測ネット(K-net)で観測された串木野地点(N31.71°、

E130.26°)において観測された本震記録を多数の余震記録を用いた経験的グリーン関数によって再現し、当該手法において適切な小地震の記録とは何かについて検討した。

2. 経験的グリーン関数法による強震動のモデルの概要

手法の詳細は原田・他(1995)⁵⁾に譲るが、ここでは、計算式と必要なパラメータのみを示す。Fig.1に示したように、震源から遠方の観測点 $x = (x, y, z)^T$ における小地震動の振動数 ω における周波数領域の変位成分 $u_0(x, \omega)$ から近似的に大地震の変位成分 $u(x, \omega)$ を求める経験的グリーン関数法の計算式は式(1)で与えられる。

$$u(x, \omega) = \sum_{m=1}^{N_L} \sum_{n=1}^{N_w} \frac{R_0}{R_{mn}} T_{mn}(\omega) e^{-i\omega(\tau_{mn} + t_{mn})} u_0(x, \omega) \quad (1)$$

$$\tau_{mn} = \frac{\xi_{mn}}{V_R}, t_{mn} = \frac{R_{mn} - R_0}{C_S} \quad (2)$$

ここに、 V_R は断層の破壊速度、 C_S は S 波の伝播速度を表わす。 τ_{mn} は断層の破壊面が震源から小断層(m,n)に到達するまでの時間遅れを表わす。破壊開始点から観測点の距離 R_0 および震源との距離を R_{mn} と

する。また、 t_{mn} は震源と小断層(m,n)から発生した S 波が観測点に到達する時間差を表わす。

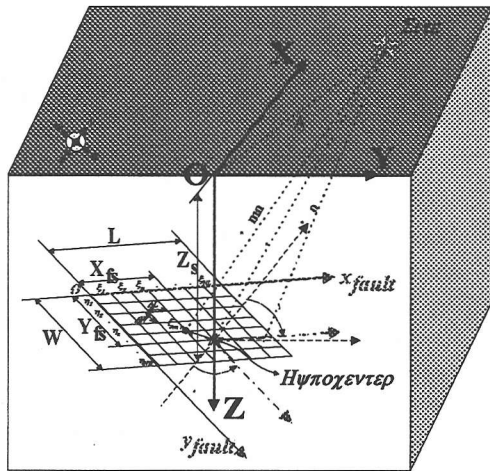


Fig.1 Schematic diagram of the Green's function method and its notation.

Table 1 The fault parameters

Seismic Moment [M_0 -dyne-cm]	1.60×10^{25}
Magnitude [M]	6.3
Fault Length [L-km]	12
Fault Width [W-km]	11
Disp. [U-cm]	50
Strike [θ ($^{\circ}$ E)]	275
Dip [δ ($^{\circ}$)]	81
Rake [λ ($^{\circ}$)]	-19
Depth [d-km]	4
Rise Time [τ -sec.]	1.0
Rupture Velocity [V_r -km/sec]	2.5
S-wave Velocity [V_s -km/sec]	3.7
Density [ρ - m^3]	2.7
Site	
N ($^{\circ}$)	35.88
E ($^{\circ}$)	136.39
Hypocenter	
N ($^{\circ}$)	35.88
E ($^{\circ}$)	136.39

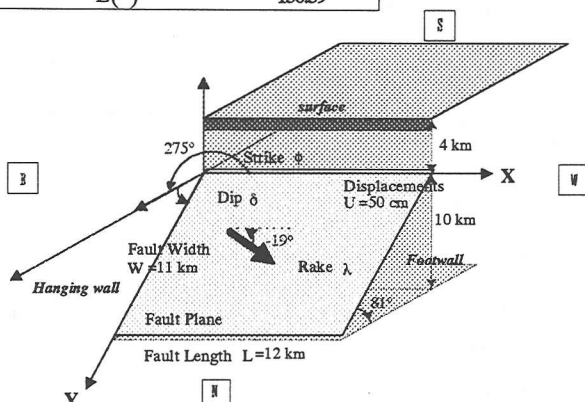


Fig.2 The fault model proposed by Tanaka, 1997.⁹

3. 観測記録による検証例

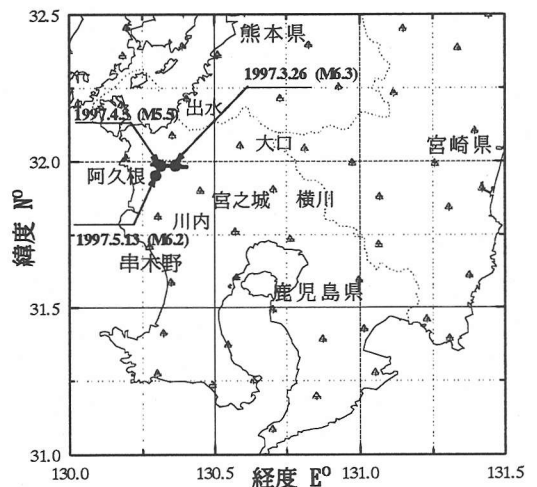
本方法の検証のために K -net を利用し、鹿児島県北西部地震 ($M6.3, 1997.3.26$) と、その5つの余震記録を用いた。解析に用いた断層モデルは田中・他⁹の地殻変動から求めた断層パラメータを用いた (Table 1, Fig. 2)。また、震源からの破壊伝播は、震源 ($N31.98^{\circ}, E130.41^{\circ}$) を破壊開始点とし、角田・他⁹によると bilateral に広がったとされているが、ここでは、 $V_R=2.5\text{km/s}$ で放射状に破壊伝播するものとした。

経験的グリーン関数として用いた余震記録は、 $M3.7, M3.9, M4.1, M4.1, M4.7$ (1997.3.26, 28) の5つの余震を用いて串木野地点の本震記録の再現を試みた (Table 2, Fig. 3)。

Table 2 に示す5つの余震のメカニズムを Fig. 4 に示す。余震は、ほとんど本震と同じ左横ずれで断層面はほぼ垂直である。Table 2 および Fig. 4 の震央位置からわかるように、 $M3.7, M4.1$ は本震の東側で発生した余震であるのに対して、 $M3.9, M4.7$ は本震の西側で発生した余震である。

Table 2 Comparison of the 5 aftershocks at Kushikino site with main shock. ($M6.3, M3.7, M3.9, M4.1, M4.1, M4.7, 1997.3.26, 28$) .

	M6.3	M3.7	M3.9
Origin Time	1997/03/26 17:31	1997/03/26 19:45	1997/03/28 02:51
Latitude	$31^{\circ} 58.1' N$	$31^{\circ} 59.0' N$	$31^{\circ} 58.6' N$
Longitude	$130^{\circ} 22.7' E$	$130^{\circ} 25.3' E$	$130^{\circ} 21.8' E$
Depth.(km)	7	7	0.9
Max. Acc.(gal)	727	6	5
	M4.1	M4.1	M4.7
Origin Time	1997/03/26 18.05	1997/03/26 22:24	1997/03/26 17:39
Latitude	$31^{\circ} 58.1' N$	$31^{\circ} 57.8' N$	$31^{\circ} 57.8' N$
Longitude	$130^{\circ} 25.3' E$	$130^{\circ} 27.5' E$	$130^{\circ} 22.3' E$
Depth.(km)	7	7	9
Max. Acc.(gal)	8	20	20



Δ : K -net station

Fig.3 Location of the fault and observation points.

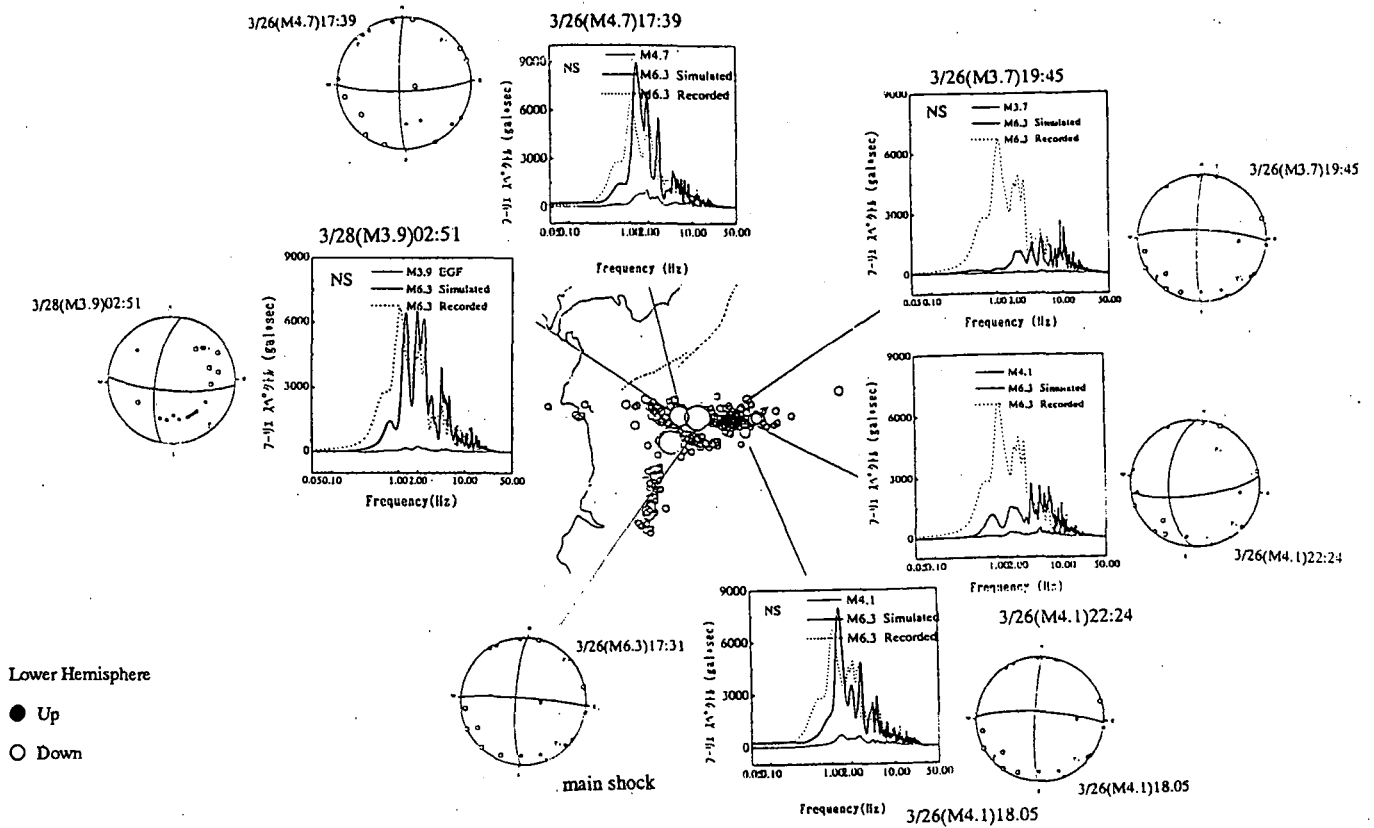


Fig.4 Distribution of the simulated Fourier spectra by the empirical Green's function methods(EGF) by using the 5 aftershocks at Kushikino site with main shock(*M6.3, M3.7, M3.9, M4.1, M4.1, M4.7, 1997.3.26, 28*) on the figure of ground motions aftershocks(circle) during a period from March, 1997 to March, 1998 with 5 aftershocks focal mechanism solutions, which estimated from *P*-wave polarities observed by a local network with short-period seismometers

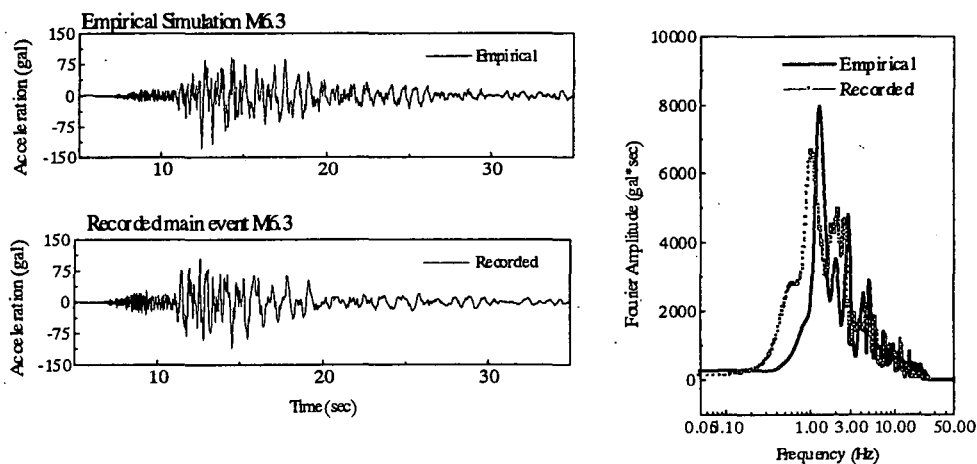


Fig.5 Comparison of the simulated wave forms and Fourier spectra by the empirical Green's function methods with the *K*-net recorded ground motions.

本震の東側で発生した余震 M4.1(3/26 22:24)の記録では比較的短周期が卓越するのに対し、本震の西側の余震 M3.9、M4.7 の記録は比較的長周期の地震動が卓越しているのが読み取れる (Fig.6)。ただし、M3.7 と M4.1(3/26 18:05)は、ほぼ同じ震源位置で、周波数特性が異なる。いずれの余震も本震の震源断層域で発生したものであり、震源メカニズムはほとんど同じであるにもかかわらず、加速度波形の特徴は前述のように振動数が短周期成分と長周期成分を有するものと短周期成分のみ含むものが存在する。また、Fig.4 より、マグニチュードの規模が小さい余震 (M4.1) においても本震にみられるような長周期成分が再現可能なこともある。したがって、適切な小地震としては、Fig.4 に示したメカニズム解の本震の震源域で発生した震源メカニズム(P 波初動分布)の同じ小地震という判定のみでは不十分であることになる。さらに当該手法にはパラメータ設定の精度が不可欠であるので、本震および余震の静的、動的断層パラメータに関する資料が必要と思われるが、現時点で、この地点に対する断層パラメータの推定はなされていない。

なお、神奈川県西部地域の地震活動^{7,8)}では、群発地震域(swarm)での地震動では、短周期成分が卓越し、1990 年の神奈川県西部地域の地震(M5.1)の余震では、長周期成分が含まれていた事例も存在する。現段階での鹿児島県北西部地震の余震記録において上記のような特徴は、基本的には断層の不均質性からくるものと思われるが、本震の破壊開始点から西側に破壊が伝播し、本震で破壊した西側の領域での余震では長周期を含み、破壊しない東側領域では短周期が卓越している。さらに断層の端部では、不安定であり、異なる周波数特性の地震動が生じると考えられる。

このような現状で、本震の震源域とほぼ同じ所で発生した余震 (M4.7) の記録に着目したが、この余震記録には 2 つの地震波が含まれており、記録が中断しているため、2 番目に適合している M4.1(3/26 18:05)の余震記録を経験的グリーン関数法に用いる余震記録とし、本震記録を再現した(Fig.5)。

4. まとめ

本研究論文は以下のようにまとめられる。

- (1) 経験的グリーン関数法を用いた地震動加速度記録の再現では、本震(199 年鹿児島県北西部地震、M6.3)の震源域で発生し、かつ本震と同じ震源メカニズム(左横ずれ断層)を持つ 5 つの余震による記録を経験的グリーン関数として用いた。その結果、比較的良い結果が得られる余震記録(経験的グリーン関数)もあれば、そうでない結果となる余震記録があることがわかった。

- (2) したがって、経験的グリーン関数法において用いる適切な小地震の記録(経験的グリーン関数)の選定にあたっては、単に本震の震源域で発生し、かつ本震と同じ震源メカニズムを持つ小地震の記録ということではなく、断層の静的、動的パラメータなどが同じという条件が必要と思われる。
- (3) これらの静的、動的パラメータなどが経験的グリーン関数として用いることのできる小地震に対してわからないのが一般的であるので、経験的グリーン関数法における適切な小地震の記録の選定には注意を要する。

謝辞:

最後に、鹿児島大学角田寿喜教授には、鹿児島県北西部地震の余震の分布図および震源メカニズム等、断層に関する地震学的資料をはじめ、数多くのご助言をいただきました。また、科学技術庁防災科学技術研究所には、K-net の記録をご提供いただき、石田瑞穂総括研究官には、群発地震域と余震との違い等、長時間の議論に参加いただいたことに感謝いたします。

参考文献

- 1) Irikura, K., Prediction of Strong Accelerations Motions using Empirical Green's Function, *Proc. of 7th Japan Earthquake Engineering Symposium*, pp.151-156, 1986.
- 2) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長: 地震のスケーリング則に基づいた大地震時の強震動予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 430 号, pp.1-9, 1991.
- 3) 佐藤智美, 川瀬博, 佐藤俊明: 観測記録から同定した地震動の統計的特性と地盤の非線形性を考慮した強震動予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 463 号, pp.27-37, 1994.
- 4) 大角恒雄, 原田隆典, 泉谷恭男: 確率論的グリーン関数を用いた強震動の波形合成法とその検証例による震源パラメータの考察, 土木学会・応用力学論文集, Vol.1, 1998.8
- 5) 原田隆典, 田中剛, 田村好文: 震源特性を考慮した地震動のシミュレーション手法, 土木学会論文報告集, 第 507 号/I-30, pp.209-217, 1995.
- 6) 平成 9 年度建設技術講演会「鹿児島県北西部地震について」(財)鹿児島県建設技術センター (1997.11.17)
- 7) Ishida, M. and Kikuchi, M., A Possible Foreshock of a Future Large Earthquake near Odawara, Center Japan, *Geophysical Research Letters*, Vol.19, No.16, pp.1695-1698, August 21, 1992.
- 8) 石田瑞穂: 神奈川県西部地域の地震活動, 地学雑誌, 東京地学協会, Vol.102, No.4, pp.381-392, 1993.