

震源特性推定に基づいた 2003年十勝沖地震の地震動算定

久世益充¹・杉戸真太²・古本吉倫³・川出真嗣⁴・田口孝則⁵

¹岐阜大学 流域圏科学研究センター 助教 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

E-mail: kuse@gifu-u.ac.jp

²岐阜大学 流域圏科学研究センター 教授 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

E-mail: sugito@gifu-u.ac.jp

³長野工業高等専門学校 環境都市工学科 准教授 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

E-mail: furumoto@y.email.ne.jp

⁴岐阜大学大学院 博士前期課程 社会基盤工学専攻 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

E-mail: m3121008@edu.gifu-u.ac.jp

⁵岐阜大学工学部 社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

E-mail: k3021041@edu.gifu-u.ac.jp

観測記録より推定した震源特性に基づいた、任意の着目地点に対する地震動算定を目的に、2003年十勝沖地震を対象に、著者らの震源スペクトル推定法、アスペリティ分布推定法を用いた震源特性の推定を行った。推定結果に基づき地震動予測法EMPRのモデルパラメータを補正し、任意の着目地点における地震動算定を行い、その再現性について考察を行った。その結果、両推定法に基づいた補正が、地震動記録を再現できる傾向を確認でき、本手法の有効性を示すことができた。

Key Words : 2003 Tokachi-oki earthquake, Source property, Strong motion prediction

1. はじめに

地震被害の分析には、被災地域の地質・地盤条件、地域の構造物に関する情報や、当該地震による各地の地震動特性を把握することが重要である。近年、全国規模の地震動観測体制の整備¹⁾により、被災地域や震源域周辺での観測記録が得られるようになった。しかしながら、被災した特定構造物の入力地震動や被害集中地域での地震動強度を知りたい場合に、偶然当該地点・地域内で地震記録が得られるほどには観測が密に行われるには至っていない。そこで、震源域周辺の観測記録より当該地震特有の工学的特性を推定し、その情報を活かして任意の着目地点での地震動を精度良く推定できることが有効な手法の一つとして考えられる。本研究では、2003年十勝沖地震を対象に、著者らの手法^{2,3)}を用いて震源特性を推定した。その結果を地震動予測法(EMPR)⁴⁾に取り入れることにより、当該地震による任意地点での地震動を推定する事を試みた。

2. 地震動予測法の概要⁴⁾

本研究で用いる地震動予測法(EMPR)について、以下に概説する。

非定常性を有する地震動は、次式で表現できる。

$$x(t) = \sum_{k=1}^m \sqrt{4\pi \cdot G_x(t, 2\pi f_k) \cdot \Delta f} \cdot \cos(2\pi f_k t + \phi_k) \quad (1)$$

ここに、 $\sqrt{G_x(t, 2\pi f_k)}$ は時刻 t 、周波数 f_k における非定常パワースペクトル⁵⁾ (gal/ $\sqrt{\text{rad/sec}}$)、 Δf は振動数の刻み幅、 ϕ_k は $t=0$ における初期位相角($0 \sim 2\pi$ の一樣乱数)である。

$\sqrt{G_x(t, 2\pi f_k)}$ は、図-1、式(2)に示すように、強度(α_m)、立ち上がり時刻(t_p)、継続時間(t_s)のパラメータでモデル化できる。

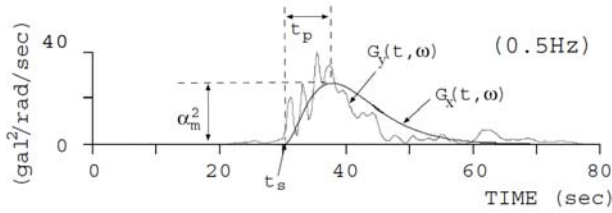


図-1 非定常パワースペクトルのモデル化

$$\sqrt{G_x(t, 2\pi f)} = \alpha_m(f) \frac{t - t_s(f)}{t_p(f)} \exp\left\{1 - \frac{t - t_s(f)}{t_p(f)}\right\} \quad (2)$$

Sugito et al. ⁴⁾は、1995年兵庫県南部地震を含む国内の地震動記録118成分(水平成分)を解放基盤相当波形に変換し、これを基に、マグニチュードMと震源距離Rに対する、非定常パワースペクトルをモデル化した。

さらに、断層の広がりや破壊伝播方向を考慮した大規模断層による非定常パワースペクトルを、図-2に示すように小規模断層破壊の重ね合わせとしてとらえて次式のように表現した。

$$\begin{aligned} & \sqrt{G_x(t, 2\pi f_k)} \\ &= \frac{\beta(f, M_0) \cdot N_G(M_0)}{N_x \cdot N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \sqrt{G_{ij}(t, 2\pi f_k)} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 $\sqrt{G_{ij}(t, 2\pi f_k)}$ はM=6相当の非定常パワースペクトル、 N_x, N_y は断層の長さ方向、幅方向の分割数、 $N_G(M_0)$ は地震モーメント M_0 に対する全周波数帯(EMPRでは0.13~10.03Hzの範囲)の平均的な非定常パワースペクトルの重ね合わせ数、 $\beta(f, M_0)$ は周波数ごとに異なる重ね合わせ数を補正するための係数である。

3. 震源特性推定法の概要

1章で述べたように、本研究では、EMPRにおける、①震源スペクトル特性に相当する、非定常パワースペクトルの重ね合わせ数推定法²⁾、②アスペリティに相当する地震動パワーの相対比率推定法³⁾の2種類の推定法を用いることとした。これらの推定法を用いて地震動を算定した結果について、概念図を図-3に示す。各算定法を区分するため、本文では図に示すように、EMPRに対して、EMPR-S(重ね合わせ数を補正したEMPR)、EMPR-A(相対比率を補正したEMPR)とした。図に示すように、EMPR-Sでは算出した地震動のスペクトル特性、EMPR-Aでは地震動の時間変化が補正され、EMPRよりも観測波形の再現性を高めることが期待できる。以下に両推定法を概説する。

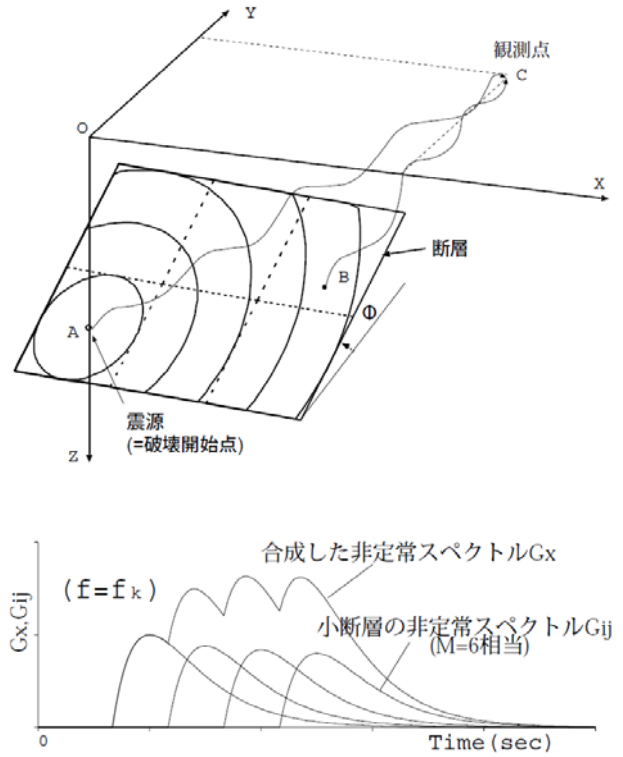


図-2 大規模断層破壊による非定常パワースペクトルの合成

(1) 非定常パワースペクトルの重ね合わせ数推定²⁾

式(3)において、震源のスペクトル特性は $\beta(f, M_0)$ 、 $N_G(M_0)$ で表される。古本ら²⁾は、EMPRの重ね合わせ数に対する、当該地震の重ね合わせ数の比 $A_p(f)$ を次式により求め、観測記録に基づいた重ね合わせ数を補正した。

$$A_p(f) = \frac{\alpha'_m(f) \cdot t'_p(f)}{\bar{\alpha}_m(f) \cdot \bar{t}_p(f)} \quad (4)$$

ここに、 $\bar{\alpha}_m(f) \cdot \bar{t}_p(f)$ はEMPRより推定される、等しい震源距離における、M=6相当の小規模断層破壊による非定常パワースペクトルのモデルパラメータの期待値、 $\alpha'_m(f) \cdot t'_p(f)$ は観測記録より得られた非定常パワースペクトルよりモデル化したパラメータである。

(2) 地震動パワーの相対比率の推定³⁾

図-4に、推定法の概要を示す。与えられた断層パラメータと観測波形を用いて、図に示すように、①地震モーメント M_0 、断層の破壊伝播速度 v_r 、②断層面上の地震動パワーの相対比率、を推定する。

地震モーメント M_0 、断層の破壊伝播速度 v_r の推定では、 M_0 の大小、 v_r の遅速の影響が地震動記録より算出される地震動トータルパワー P_T 、地震動継続時間 t_{90} に現れると考え、断層面上の地震動パワー放出が一様と仮定して算出したシミュレーション波形と観測波形それぞれの P_T 、 t_{90} に対して、両者の差が

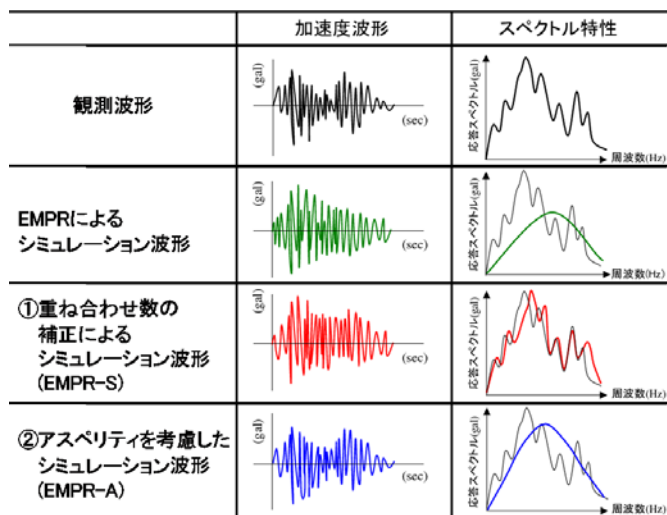


図-3 震源特性を考慮した地震動補正効果の概念図

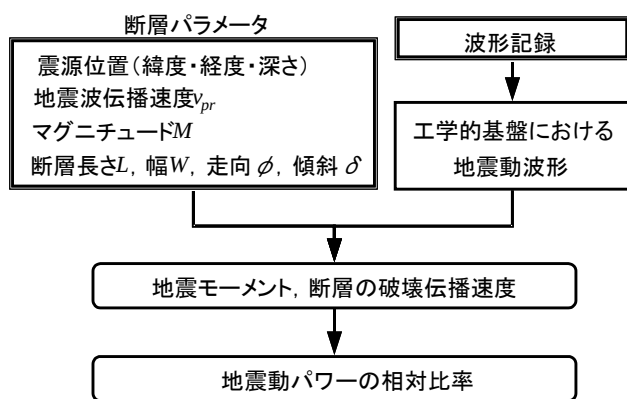


図-4 地震動パワーの相対比率推定の概要

最小となる M_0 , v_r を推定する. なお, P_T は次式に示す加速度記録の二乗和, t_{90} は $\{x(t)\}^2$ の累積が5%~95%の時間でそれぞれ定義される.

$$P_T = \int_0^T \{x(t)\}^2 dt \quad (4)$$

ここに, P_T は地震動トータルパワー(cm^2/sec^3), $x(t)$ は加速度時刻歴(cm/sec^2), t は時刻(sec), T は記録が観測された時間(sec)である.

断層面上の地震動パワーの相対比率の推定では, 断層面内を等間隔に区分した小規模断層の破壊による加速度波形をEMPRを用いて算出した後に, 断層の広がりや破壊伝播を考慮して波形を合成する. この合成波形と観測波形の差が最小となるように, 非負条件の線形最小二乗法⁹⁾により各小断層の寄与率, すなわち断層面上の地震動パワーの想定比率を算出する.

4. 2003年十勝沖地震における震源特性推定と地震動算定結果の比較

(1) 工学的基盤波形の変換

図-5に, 解析に用いた観測点と断層面の地表投影図を示す. 図中の黒丸と青丸は観測地点を示すが, 後述の重ね合わせ数推定では黒丸・青丸の計42地点, 地震動パワーの相対比率推定では青丸の20地点の水平2成分の波形記録を用いることとした. 解析には防災科学技術研究所のKiK-net⁷⁾の観測記録を使用し,

地中記録より工学的基盤(解放基盤相当)に変換して解析に用いた. 具体的には, 解析対象地点のボーリング柱状図より地盤モデルを作成し, せん断波速度 $v_s=500(\text{m}/\text{sec})$ に近い層の上昇波を, 地盤震動解析法FDEL⁸⁾を用いて算出した. さらに, これを $v_s=500(\text{m}/\text{sec})$ 相当波形に変換するため, 翠川⁹⁾による, 最大速度の増幅倍率を参考に, 次式を用いて振幅調整を行った.

$$A = \left(\frac{500}{v_s} \right)^{0.6} \quad (5)$$

ここに, A は振幅調整倍率, v_s はFDELを用いて上昇波を算出した層のせん断波速度 (m/sec)である.

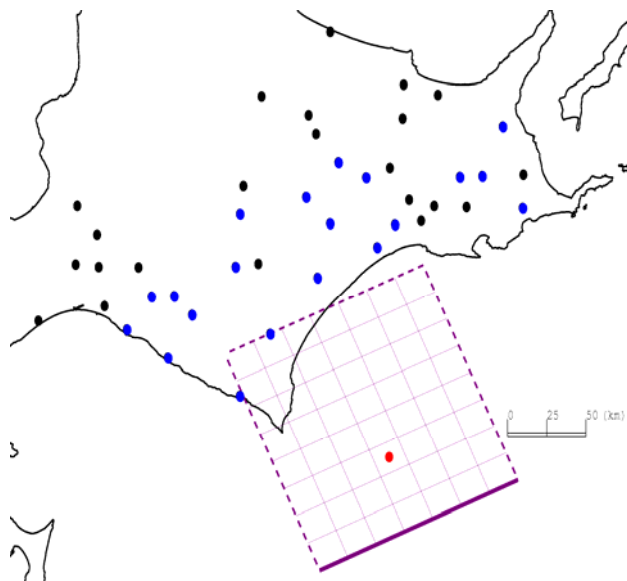


図-5 断層位置と着目地点(赤丸は震源位置, 黒丸, 青丸は推定に用いた観測地点を示す)

(2) 重ね合わせ数の推定結果

4.(1)で前述した工学的基盤波形データを用いて, EMPRにおける震源スペクトル特性である, 非定常パワースペクトルの重ね合わせ数の推定結果を図-6に示す. 図中の緑線は観測波形より得られた重ね合わせ数を示す. 断層モデルは, 図-5に示す断層面を与え, 久世ら¹⁰⁾の解析結果を参考に, $M_0=3.26 \times 10^{28}$

(dyne・cm)，破壊伝播速度 $v_r=1.89(\text{km/sec})$ ，地震波伝播速度 $3.0(\text{km/sec})$ を与えた。

図-6に示すように、観測波形より得られた重ね合わせ数がばらついているが、これは震源特性に加えて伝播経路特性が含まれているためと考えられる。伝播経路の影響を除外するため、観測値の平均値を求め、これを当該地震の重ね合わせ数とした。なお、図中にはEW・NS成分別の平均値も示したが、大きな差は見られなかった。

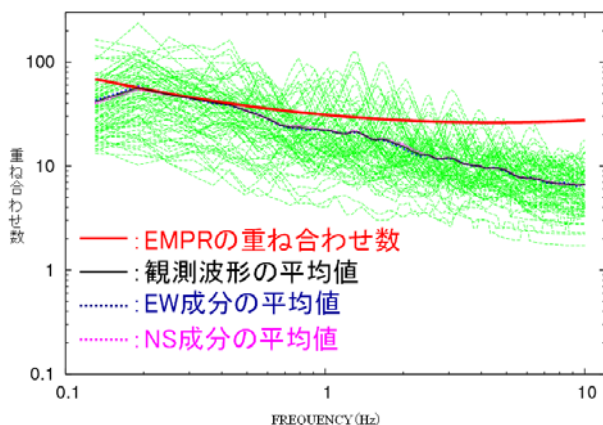


図-6 重ね合わせ数の比較

(3) 地震動パワーの相対比率推定結果

図-5の青丸で示した20地点、水平2成分の40波形を用いて、地震動パワーの相対比率を推定する。図-4に従って地震モーメント M_0 、断層の破壊伝播速度 v_r を推定した結果、 $M_0=0.64 \times 10^{28}$ (dyne・cm)， $v_r=2.0(\text{km/sec})$ であった。

図-6に、推定した地震動パワーの相対比率を示す。図に示すように、震源付近と断層の北側に比較的大きなパワーが確認できた。

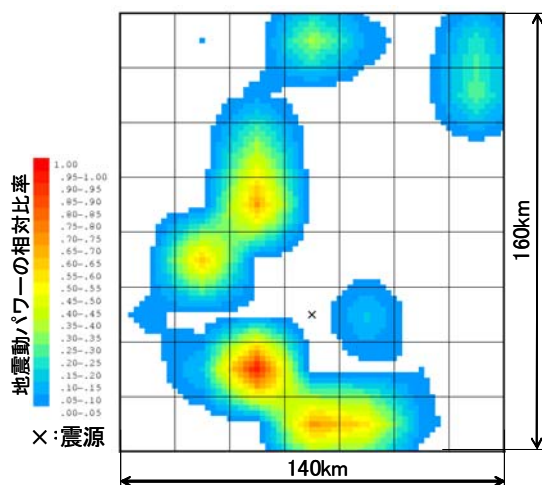


図-7 地震動パワーの相対比率推定結果

(4) 地震動算定結果の比較

以上の推定結果を基にEMPRを補正した結果を図-7に示す。図中のEMPR-S，EMPR-Aは3章で述べた

ように、それぞれ重ね合わせ数を補正したEMPR，地震動パワーの相対比率を与えたEMPRである。図-3に示したように、EMPRと比較して、地震動波形のスペクトル特性と振幅の時間変化がそれぞれ補正されている傾向が確認できる。

5. おわりに

本研究では、2003年十勝沖地震を対象に、2種類の震源特性推定法を適用し、この結果に基づいた既往地震における地震動予測法を提案した。両手法共に観測波形を再現する傾向が確認できた。本報告では、両推定法による再現性の考察のみであったが、今後両パラメータに基づいた補正による再現性の検討や、他の既往地震への適用性の検討などが必要と思われる。

謝辞：本研究では、防災科学技術研究所KiK-netの観測記録と地盤データを利用した。記して謝意を表する。

参考文献

- 例えば、防災科学技術研究所：強震観測網ポータルサイト、<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/>
- 古本吉倫・杉戸真太・梅原秀哲：非定常スペクトル合成法による1995年兵庫県南部地震における強震動の推定，第11回日本地震工学シンポジウム，pp.573-578，2002。
- Kuse, M., Sugito, M., and Nojima, N.: Inversion of Source Process in Consideration of Filtered-Acceleration Envelope, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, BC Canada, Paper No.665 (CD-ROM), 2004.
- Sugito, M., Furumoto, Y., and Sugiyama, T.: Strong Motion Prediction on Rock Surface by Superposed Evolutionary Spectra. *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No.2111 (CD-ROM), 2000.
- 亀田弘行：強震地震動の非定常パワースペクトルの算出法に関する一考察，土木学会論文報告集，第235号，pp.55-62，1977。
- 柳谷俊・塚田和彦：離散インバース理論，古今書院，pp.109-132，1997。
- 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/>
- 杉戸真太・合田尚義・増田民夫：周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤地震動解析法に関する一考察土木学会論文集，No.493/III-27，pp.49-58，1994。
- 翠川三郎：関東平野を対象とした震度分布予測，構造工学論文集，Vol.33B，pp.43-48，1987。
- 久世益充・杉戸真太・能島暢呂：2003年十勝沖地震におけるアスペリティ分布の推定，第28回地震工学研究発表会，土木学会，論文番号104(論文) (CD-ROM)，2005。

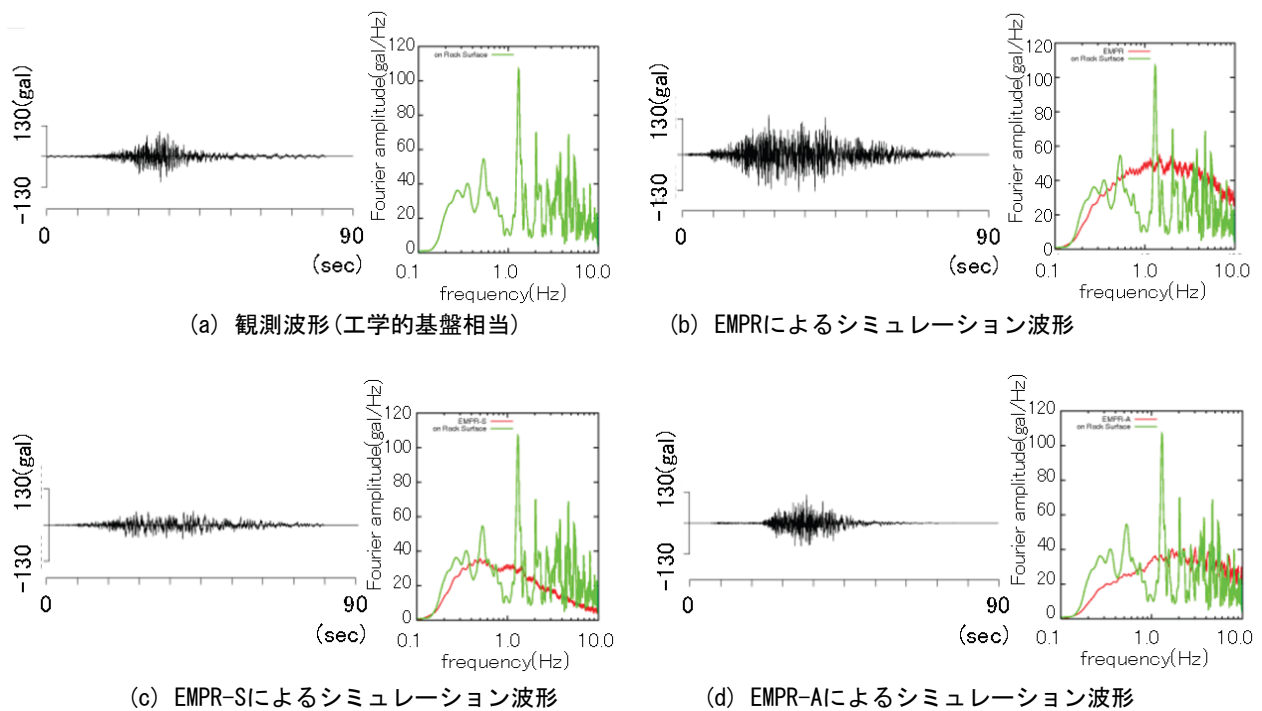


図-7 加速度波形とフーリエスペクトルの比較 (NMRH05: 別海西地点, EW成分)
(緑線のフーリエスペクトルは観測波形, 赤線はシミュレーション波形を示す)

SIMULATION OF EARTHQUAKE MOTION DURING THE 2003 TOKACHI-OKI EARTHQUAKE BASED ON ITS STRONG MOTION RECORDS

Masumitsu KUSE, River Basin Research Center, Gifu University

Masata SUGITO, River Basin Research Center, Gifu University

Yoshinori FURUMOTO, Department of Civil Engineering, Nagano National College of Technology

Shinji KAWADE, Graduate Student, Gifu University

Takanori TAGUCHI, Department of Civil Engineering, Gifu University

Two techniques for simulation of strong ground motion at arbitrary sites during past specific earthquake are demonstrated. The 2003 Tokachi-oki Earthquake is selected for the case study of the technique. The strong motion records at 20 KiK-net stations were used for estimation of (1)the general spectral characteristic, and (2)the source proces of this earthquake. These two specific information derived from seismic source are incorporated into the strong motion prediction model, EMPR, developed by the authors. The availability of two techniques are examined regarding the ground motion intensity, spectral characteristic, and the envelope pattern of acceleration time histories.