

2. 四国地方の基盤加速度波の予測

四国地方の地震動に関する昨年度の報告では、四国各地の地震動強度の予測および地震動波形の予測を行った。地震動波形の予測では、既往の震源モデルによる模擬地震動作成法を用いて、想定地震による基盤での加速度波形を作成した。そして、この基盤加速度波を入力として地盤応答解析を行い、地表での加速度波形を求めた。しかし、既往の研究による基盤加速度波では、短周期成分が過大に、また長周期成分が過小に評価される結果となった。本年度は、この問題を解決するために、基盤加速度波の新しいシミュレーション法を開発し、四国地方の基盤における加速度波の作成を行った。

2. 1 基盤加速度波の作成方法の概要

(1) 概説

地震動特性は、強度特性、周波数特性および非定常特性に大別される。このうち強度特性は最大加速度や速度で、周波数特性はフーリエスペクトルや応答スペクトルで、また非定常特性は波形包絡線等で表される。一般に、周波数特性と非定常特性が与えられると地震動波形を作成することはできるが、そのようにして作成された波形は必ずしも強度特性を満足するものではない。

ここでは、周波数特性と非定常特性を与えて作成した工学的基盤面での地震動が、強度特性をも満足するようにパラメータを調整する一手法について説明する。具体的には、フーリエ振幅スペクトルと波形包絡線を与えて作成した工学的基盤面での加速度波形と、それを積分して得られる速度波形および変位波形の最大値 (a_{max} , v_{max} , d_{max}) が、距離減衰式より求められる最大加速度 (A_{max})、最大速度 (V_{max}) および最大変位 (D_{max}) に適合するように、フーリエ振幅スペクトルを規定する5つのパラメータを修正する一手法を開発した。

(2) 地震動特性の表現

前述のように、地震動特性は強度特性、周波数特性および非定常特性に分類できる。地震動のシミュレーションでは、これらの特性を的確に反映するモデルを用いなければならない。工学的基盤面での加速度波のシミュレーションでは、以下のようなモデルを用いて強度特性、周波数特性および非定常特性を表現する。

まず、最大加速度で代表される強度特性は、地震動特性を表す基礎的パラメータであり、これを精度よく推定することは耐震工学上重要である。しかし、地震動は非常に複雑な現象であり、これを理論的に精度よく予測することは困難であるため、経験的な予測式により評価することが多い。この予測式は一般に距離減衰式と呼ばれ、現在までに多くの研究者により種々の回帰式が提案されてきた。これらのうち、福島ら¹⁾および安中ら²⁾による距離減衰式は、地震マグニチュード (M) と断層距離 (当該地点から断層面までの最短距離, R) の間に相関がある場合や、断層距離の小さい震源域にも適用可能であるという特徴があり、最近注目されている。ここでは、このうち安中らによる距離減衰式²⁾を用いて、工学的基盤面での地震動強度を表す。

安中らは、種々のマグニチュード (M) および断層距離 (R) に対する工学的基盤面での最大地動 (最大加速度, 最大速度および最大変位) を次のような距離減衰式を用いて表した。

$$\log A_{max} = 0.606M + 0.00459H - 2.136 \log \{R + 0.334 e^{0.653M}\} + 1.730 \quad (2.2.1)$$

$$\log V_{max} = 0.725M + 0.00318H - 1.918 \log \{R + 0.334 e^{0.653M}\} - 0.519 \quad (2.2.2)$$

$$\log D_{max} = 0.935M + 0.00091H - 1.635 \log \{R + 0.334 e^{0.653M}\} - 2.992 \quad (2.2.3)$$

ここで、 A_{max} =最大加速度 (cm/sec²)、 V_{max} =最大速度 (cm/sec)、 D_{max} =最大変位(cm)、 M =マグニチュード、 H =震源深さ(km)、 R =断層距離 (km) である。ただし、上式はS波速度が 300~600m/sec 程度の工学的基盤面における最大地動の距離減衰式であり、地点補正項と誤差項は省略されている。また、次節以降の基盤加速度波のシミュレーションでは、震源深さは $H=10$ km に固定する。ここで注意すべきは、上式右辺の第3項の $\{ \cdot \}$ 内がすべて同形になっていることである。また、 A_{max} 、 V_{max} 、 D_{max} がそれぞれ短周期、中周期および長周期を代表する強度パラメータであることを考えると、これらを満足するように作成した地震動波形は、ある程度周波数特性をも反映したものとなる。式(2.2.1)~(2.2.3)より求められる任意の M および R に対する最大地動は、基盤加速度波をシミュレートする際の目標値となる。

次に、周波数特性について説明する。周波数特性は、地震動がどのような周波数成分より構成されているかを表すものであり、フーリエスペクトルや応答スペクトルにより表現される。ここでは、工学的基盤面での加速度波の周波数特性を、次のようなフーリエ振幅スペクトル $S(f)$ により表す。

$$S(f) = \frac{S_0 \cdot (f/f_0)^2}{\left[\left\{ 1 - (f/f_0)^2 \right\}^2 + 4h^2 (f/f)^2 \right]^{1/2}} \cdot \{ R + 0.334 e^{0.653M} \}^{-(a+b \log f)} \quad (2.2.4)$$

ここで、 S_0 =スペクトル振幅を規定する係数、 f_0 および h =スペクトル形状を規定する係数、 a および b =スペクトル振幅の距離減衰を規定する係数、 f =振動数である。上式の右辺第1項はスペクトル形状を表し、第2項は各周波数成分の距離減衰を表す項である。一般に、地震基盤 (S波速度が 3km/sec 程度の岩盤) での加速度波のフーリエスペクトルはほぼフラットであり、ホワイトノイズ的の性質をもつと考えられるが、ここでは工学的基盤面 (S波速度が 300~600m/sec 程度の基盤) を対象とするため、式(2.2.4)のような周波数特性をもたせた。また、右辺第2項の距離減衰項は安中による距離減衰式と同様な形とした。すなわち、第2項の $\{ \cdot \}$ 内は式(2.2.1)~(2.2.3)と同一であり、指数項は短周期になるほど距離減衰が大きくなるように配慮した。式(2.2.4)のフーリエ振幅スペクトルを規定するパラメータは5つ (S_0, f_0, h, a, b) であり、これらが適切に与えられると、任意のマグニチュード (M) および断層距離 (R) に対する基盤加速度波のフーリエ振幅スペクトルが作成できる。

最後に、地震動の非定常特性について説明する。地震動の非定常特性は、波形包絡線や非定常スペクトル⁴⁾等により表される。ここでは、大崎らによる³⁾以下のような波形包絡線を用いて基盤加速度波の非定常特性を表現する。まず、地震動継続時間を次式のようなマグニチュード M の関数として求める。

$$T_d = 10^{0.31M - 0.774} \quad (2.2.5)$$

このとき、波形包絡線 $e(t)$ は、時刻 t の関数として以下のように与えられる。

$$\begin{aligned} e(t) &= (t/T_b)^2 && ; 0 \leq t \leq T_b \\ e(t) &= 1 && ; T_b \leq t \leq T_c \\ e(t) &= e^{-a(t-T_c)} && ; T_c \leq t \end{aligned} \quad (2.2.6)$$

ここで、 T_b, T_c および a は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} T_b &= (0.40 - 0.04M)T_d \\ T_c &= (0.78 - 0.04M)T_d \\ a &= -\ln 0.1(T_d - T_c) \end{aligned} \quad (2.2.7)$$

(3) シミュレーションモデルの決定法

地震動のシミュレーションでは、一般に周波数特性と非定常特性を与えて波形を作成する。しかし、このようにして作成された模擬地震動は必ずしも強度特性を満足するものではない。ここでは、シミュレーション手法の概要と、それを用いて得られる基盤加速度波を、最大地動の距離減衰に適合するように修正する方法について述べる。加速度波形は、式(2.2.4)のフーリエ振幅スペクトルと式(2.2.6)の波形包絡線を用いて、以下の手順で作成される。

① 式(2.2.4)を規定する5つのパラメータ (S_0, f_0, h, a, b) を適切に設定して、任意のマグニチュード (M) および断層距離 (R) に対するフーリエ振幅スペクトル $S_k = S(f_k)$, $k=0, 1, \dots, N_f$ を計算する。ここで、 $f_k = k$ 次の振動数、 $N_f =$ 振動数点の数である。

② $0 \sim 2\pi$ の一様乱数を作成し、 k 次振動数に対するフーリエ位相角 ϕ_k , $k=0, 1, \dots, N_f$ を求める。

③ 複素フーリエ係数 C_k を次式より求める。

$$C_k = S_k \cdot e^{i\phi_k} / T, \quad k = 0, 1, \dots, N_f \quad (2.2.8)$$

ここで、 $T =$ 地震動継続時間である。この T は、一般には式(2.2.5)の T_d とは異なるものであり、 T_d の後に後続の 0 を付加して、時間点の数を2の累乗にしたものである

④ 式(2.2.8)をフーリエ逆変換して定常な加速度時刻歴 $a_s(t)$ を求める。

⑤ 上の $a_s(t)$ に、式(2.2.6)の包絡線 $e(t)$ を乗じて、非定常な加速度時刻歴 $a(t)$ を求める。

$$a(t) = e(t) \cdot a_s(t) \quad (2.2.9)$$

⑥ $a(t)$ を積分することにより、速度時刻歴 $v(t)$ および変位時刻歴 $d(t)$ と、それらの絶対最大値 a_{max} , v_{max} , d_{max} を求める。

以上の手順より作成した地震波形の最大値 (a_{max} , v_{max} および d_{max}) は、一般に距離減衰式から得られる最大地動 (A_{max} , V_{max} および D_{max}) と整合しない。両者を整合させるためには、フーリエ振幅スペクトルを規定する5つのパラメータ (式(2.2.4)の S_0, f_0, h, a, b) を適切に設定しなければならない。

以下では、上述の手順より求めたシミュレーション波の最大値を、距離減衰式より得られるそれらと整合させる方法について述べる。シミュレーションでは、フーリエ振幅スペクトルと波形包絡線を用いるが、後者は任意のマグニチュードが与えられると式(2.2.6)より一義的に決定される。残る問題は、フーリエ振幅スペクトルを規定する5つのパラメータ (式(2.2.4)の S_0, f_0, h, a, b) を、シミュレーション波の最大値と距離減衰式より得られるそれらが整合するように修正することである。

以下、記述を簡単にするために、5つのパラメータを次のように置く。

$$\alpha = \{S_0, f_0, h, a, b\}^T \quad (2.2.10)$$

シミュレーション波の最大値は、 M, R および α の関数であるから、次のように表される。ただし、重複を避けるため、以下では主に a_{max} についてのみ記す。

$$a_{max} = a_{max}(M, R; \alpha) \quad (2.2.11)$$

一般に、シミュレーション波の最大値はサンプルごとに異なるから、いくつかのサンプル波の最大値の平均を求める。

$$\bar{a}_{\max}(M, R; \alpha) = \sum_{i=1}^N a_{\max,i}(M, R; \alpha) / N \quad (2.2.12)$$

ここで、N=サンプル波の数である。以上のシミュレーション波の最大値と、距離減衰式によるそれらが整合するようにパラメータ α を修正する評価基準として次式を設定する。

$$S_c(\alpha) = \sum_M \sum_R \{r_a^2(M, R; \alpha) + r_v^2(M, R; \alpha) + r_d^2(M, R; \alpha)\} \longrightarrow \min \quad (2.2.13)$$

ここで、 r_a, r_v, r_d は次のようになる。

$$\begin{aligned} r_a(M, R; \alpha) &= \log \{ \bar{a}_{\max}(M, R; \alpha) / A_{\max}(M, R) \} \\ r_v(M, R; \alpha) &= \log \{ \bar{v}_{\max}(M, R; \alpha) / V_{\max}(M, R) \} \\ r_d(M, R; \alpha) &= \log \{ \bar{d}_{\max}(M, R; \alpha) / D_{\max}(M, R) \} \end{aligned} \quad (2.2.14)$$

式(2.2.13)は、シミュレーション波と距離減衰による最大値の対数の残差平方和が最小となるように、パラメータ α を逐次修正するための評価基準である。ここでは、式(2.2.13)の最小化問題をMSLP法(修正反復線形計画法)を用いて解いた。また、その際に必要となるパラメータ α に関する偏微分係数は数値微分より求めた。

2.2 想定地震

昨年度のおんぜん四国検討委員会、地質部会の報告を参考にして、将来四国地方に大きな被害をもたらすと思われる地震を次のように想定した(表-2.2.1)。

表 2.2.1 想定地震⁵⁾

想定地震 1	中央構造線の鳴門～井口断層(延長 54km)で発生する M=7.7 の地震
想定地震 2	中央構造線の三野・池田断層(延長 52km)で発生する M=7.7 の地震
想定地震 3	中央構造線の石鎚～畑野断層(延長 27km)で発生する M=7.2 の地震
想定地震 4	中央構造線の岡村・小松断層(延長 20km)で発生する M=7.0 の地震
想定地震 5	中央構造線の川上・北方断層(延長 20km)で発生する M=7.0 の地震
想定地震 6	中央構造線の伊予断層(15km)で発生する M=6.8 の地震
想定地震 7	長尾断層(23km)で発生する M=7.1 の地震
想定地震 8	鮎喰川断層系の宮前断層(7km)で発生する M=6.2 の地震
想定地震 9	南海トラフで発生する M=8.4 の地震

これらのうち、中央構造線活断層系で発生が予想される地震については、岡田のセグメント試案から中央構造線を6つに分割しそれぞれを別の地震として想定した。また、長尾断層、鮎喰川断層系で発生する地震については、松田により想定されたものを用いた。なお、想定地震の規模については、地震のマグニチュード(M)と想定断層の長さ $L(\text{km})$ および変位量 $D(\text{m})$ との関係から以下のように推定した。

$$\log L = 0.6M_L - 2.9 \quad (2.2.15)$$

$$\log D = 0.6M_D - 4.0 \quad (2.2.16)$$

南海トラフで発生する地震については、文献⁶⁾に記載されている 1854 年の安政南海地震に関するモデルパラメーターをそのまま採用することにした。

2. 3 四国各地の基盤加速度波と応答スペクトルの予測

前項の想定地震に対する四国地方の各地点での基盤加速度波を、2. 1で述べた手法により予測した。これらの予測結果は、地理情報システム(GIS)上にデータベース化され、Visual Basicにより視覚化される。この地震動予測データベースでは、数値地図上の特定の点(四国地方に存在する30都市)をクリックすることにより、その地点での基盤加速度波、速度波および変位波と加速度応答スペクトルが検索できるようになっている。以下では、代表的な想定地震に対する県庁所在地での基盤加速度、速度および変位波形と加速度応答スペクトルの検索例を示す。

図 2.2.1~図 2.2.4 は、想定地震 1(中央構造線の鳴門~井口断層で発生する M=7.7 の地震)が発生したときの徳島市、高松市、松山市および高知市の基盤での予測波形と加速度応答スペクトルである。また、図 2.2.5~図 2.2.8 には、想定地震 9(南海トラフで発生する M=8.4 の地震)による予測結果を示す。これらの図より、以下のことがわかる。

(1) 想定地震 1による基盤加速度波の最大値は、徳島市で 470gal、高松市で 250gal、松山市で 40gal、高知市で 80gal となる。ところで、昨年の報告では、想定地震 1に対する岩盤~I・II種地盤での最大加速度は次のようであった。

徳島市 : 360~600gal
高松市 : 160~270gal
松山市 : 40~70gal
高知市 : 70~120gal

本報告では、基盤面として工学的基盤(S波速度が 300~600m/sec)を考えており、これは昨年の報告書における岩盤とI種地盤の中間的性質をもつ。したがって、上述の基盤加速度波の最大値はこれに整合するものである。同様に、想定地震 9による基盤加速度波の最大値は、徳島市で 170gal、高松市 110gal、松山市で 120gal、高知市で 220gal である。これらも、昨年の報告書に掲載された次の最大加速度とほぼ対応するものである。

徳島市 : 120~200gal
高松市 : 80~130gal
松山市 : 90~150gal
高知市 : 210~350gal

(2) 想定地震 1および9に対する各地点の加速度応答スペクトルは昨年のもものと比べて、短周期成分が小さく、長周期成分が大きくなっている。これは、距離減衰式より得られる最大加速度、速度および変位をターゲットにして模擬地震動を作成する本手法が、適正な周波数成分を発現することを示している。

以上のことより、提案した手法により作成した基盤加速度波は、ほぼ妥当であると思われる。

2. 4 おわりに

本報告では、周波数特性と非定常特性を与えて作成した工学的基盤面での地震動が、強度特性をも満足するようにパラメータを調整する一手法について説明した。具体的には、フーリエ振幅スペクトルと波形包絡線を与えて作成した工学的基盤面での加速度波形と、それを積分して得られる速度波形および変位波形の最大値(amax, vmax, dmax)が、距離減衰式より求められる最大加速度(Amax)、最大速度(Vmax)および最大変位(Dmax)に適合するように、フーリエ振幅スペクトルを規定する5つのパラメータを修正する一手法を開発した。

この手法を用いて、9つの想定地震に対する四国の各都市での基盤における加速度、速度および変位波形と加

速度応答スペクトルの予測を行った。これらの予測結果を昨年の報告書に記載されたものと比較したところ、加速度波を構成する周波数成分が適正であり、応答スペクトルもかなり改善されることがわかった。今後は、このようにして作成された基盤加速度波を入力とした地盤応答解析を行い、地表での地震動波形を作成するとともに、これらを各種構造物の地震被害予測へと応用していきたい。

参考文献

- (1) 福島美光：地震波の発生・伝播の理論を背景とした入力地震動の経験的予測，東京工業大学学位論文，1995年
- (2) 安中正・山崎文雄・片平冬樹：気象庁87型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案，第24回地震工学研究発表会講演論文集，pp.161-164，1997年・
- (3) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1996年。
- (4) 後藤尚男・亀田弘行・杉戸真太：非常常強震地震動の統計的予測モデル，土木学会論文報告集，第286号，pp.37-51，1979年。
- (5) 土木学会四国支部あんぜん四国検討委員会：四国の地震防災に関する調査研究平成8年度業務委託報告書，1997年。
- (6) 佐藤良輔：日本の地震断層パラメータハンドブック，鹿島出版会，1995年。

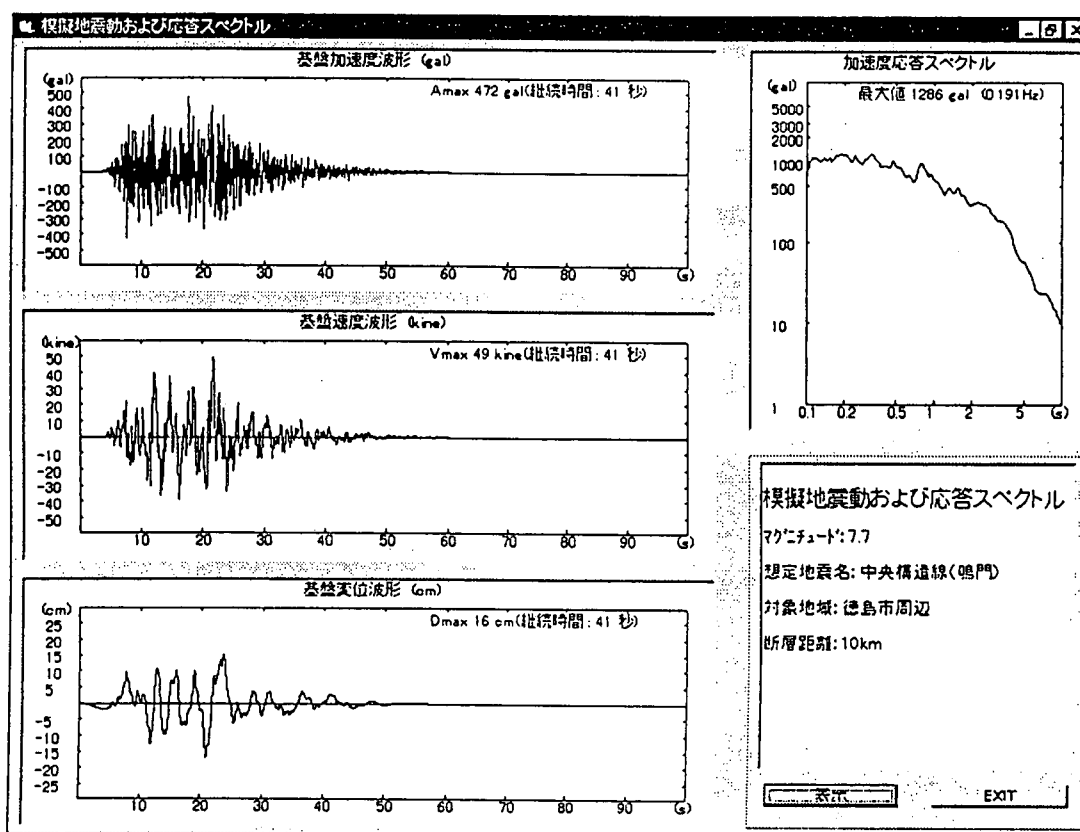


図 2.2.1 想定地震 1 による徳島市の基盤波形および加速度応答スペクトル

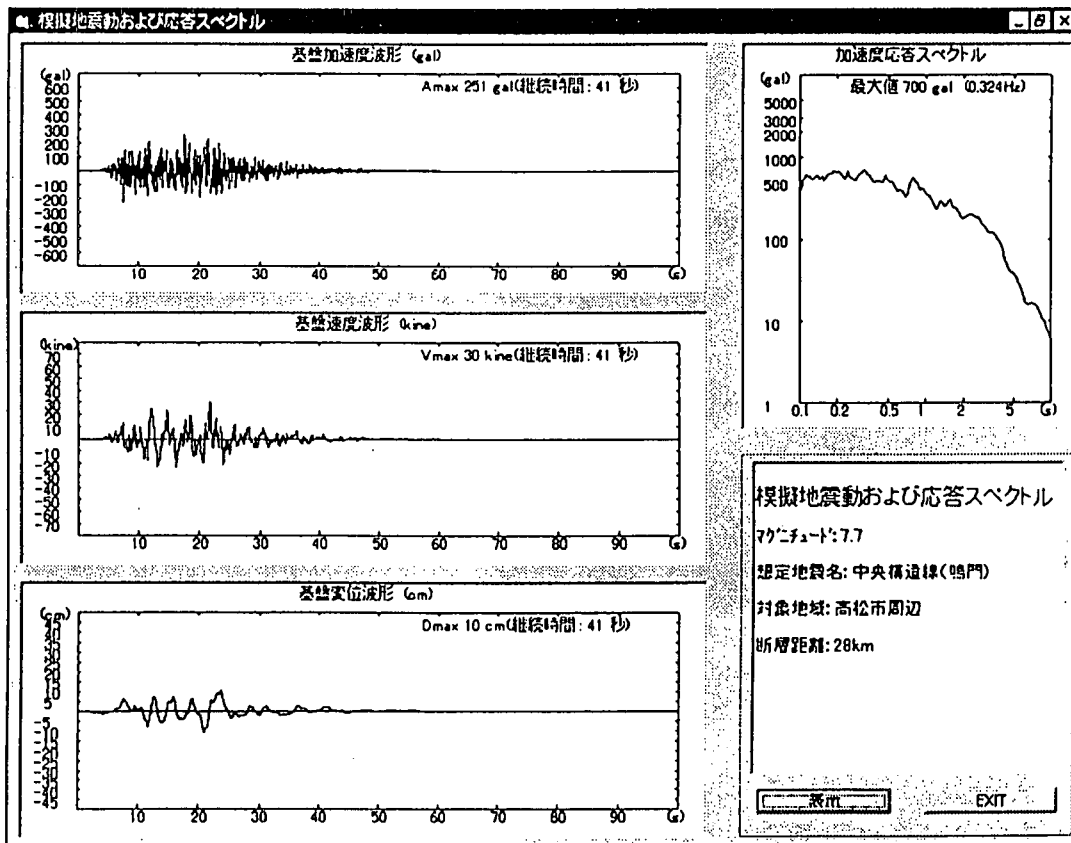


図 2.2.2 想定地震 1 による高松市の基盤波形および加速度応答スペクトル

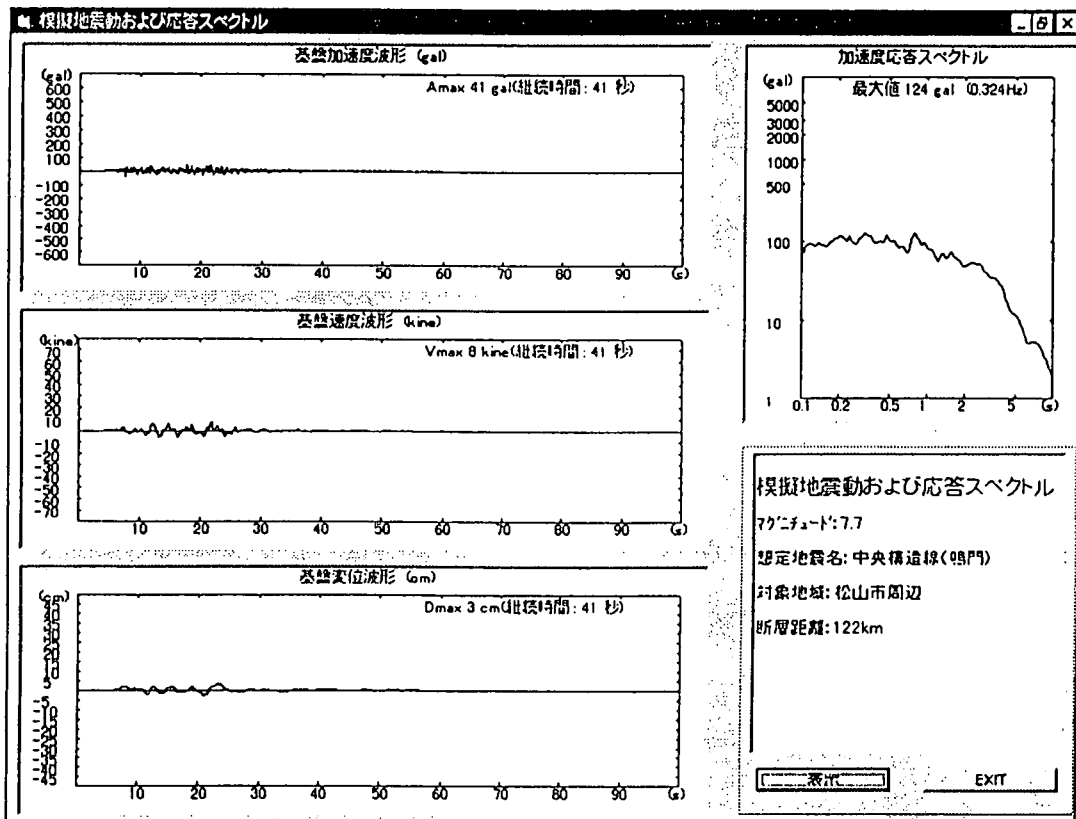


図 2.2.3 想定地震 1 による松山市の基盤波形および加速度応答スペクトル

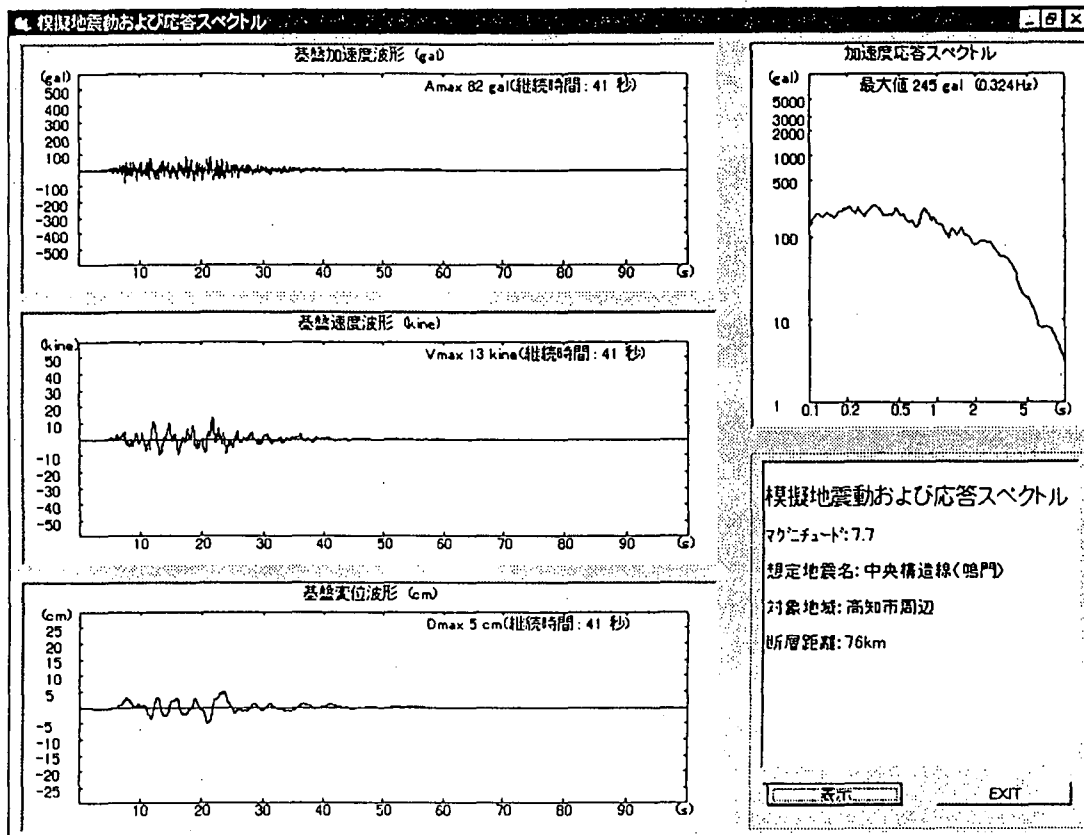


図 2. 2. 4 想定地震 1 による高知市の基盤波形および加速度応答スペクトル

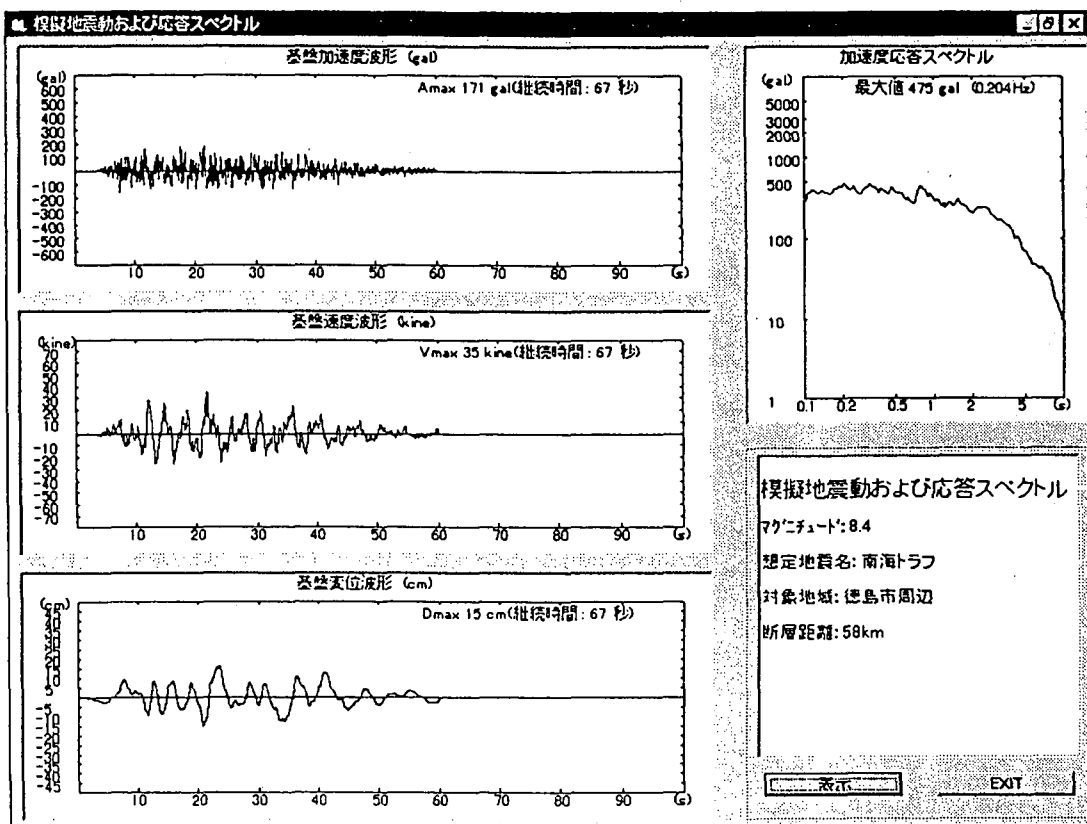


図 2. 2. 5 想定地震 9 による徳島市の基盤波形および加速度応答スペクトル

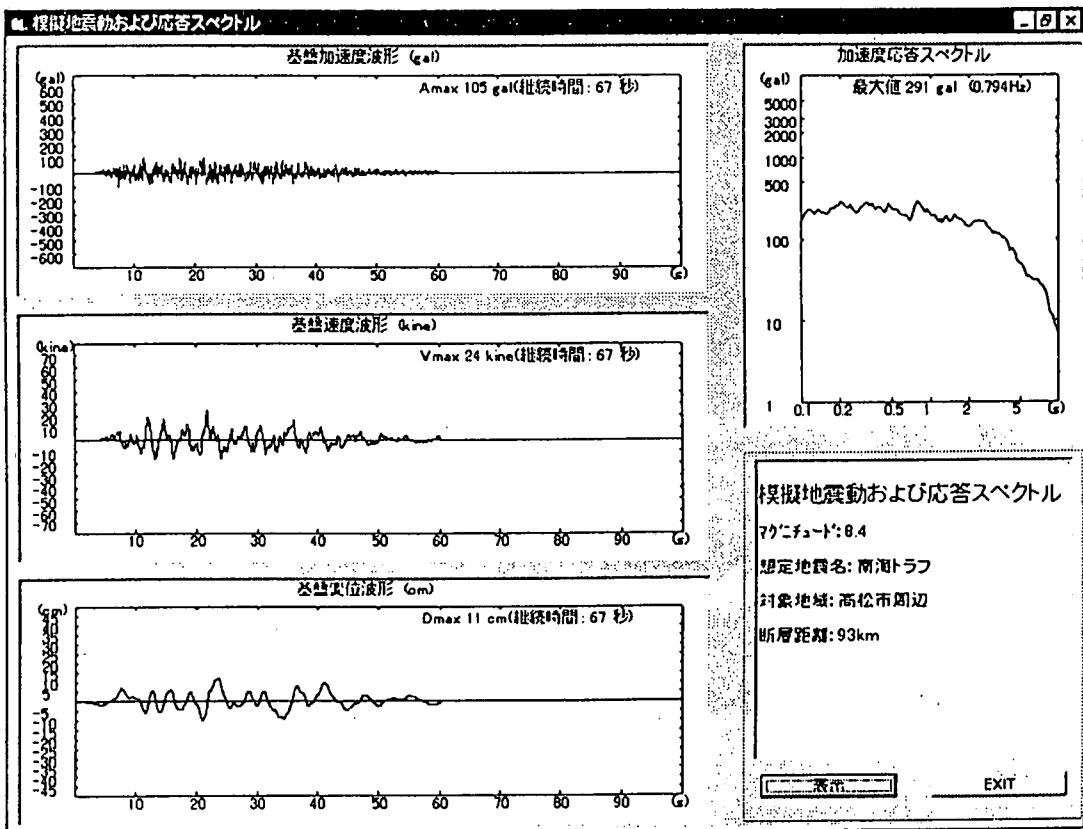


図 2. 2. 6 想定地震 9 による高松市の基盤波形および加速度応答スペクトル

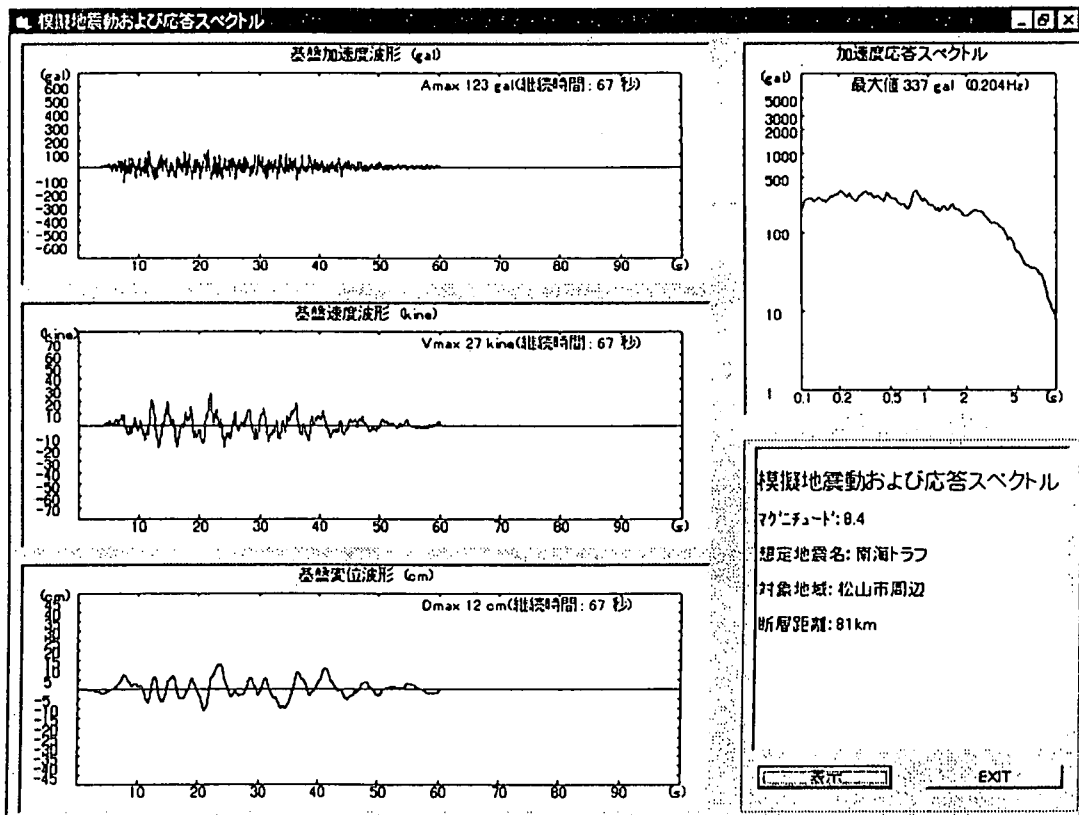


図 2. 2. 7 想定地震 9 による松山市の基盤波形および加速度応答スペクトル

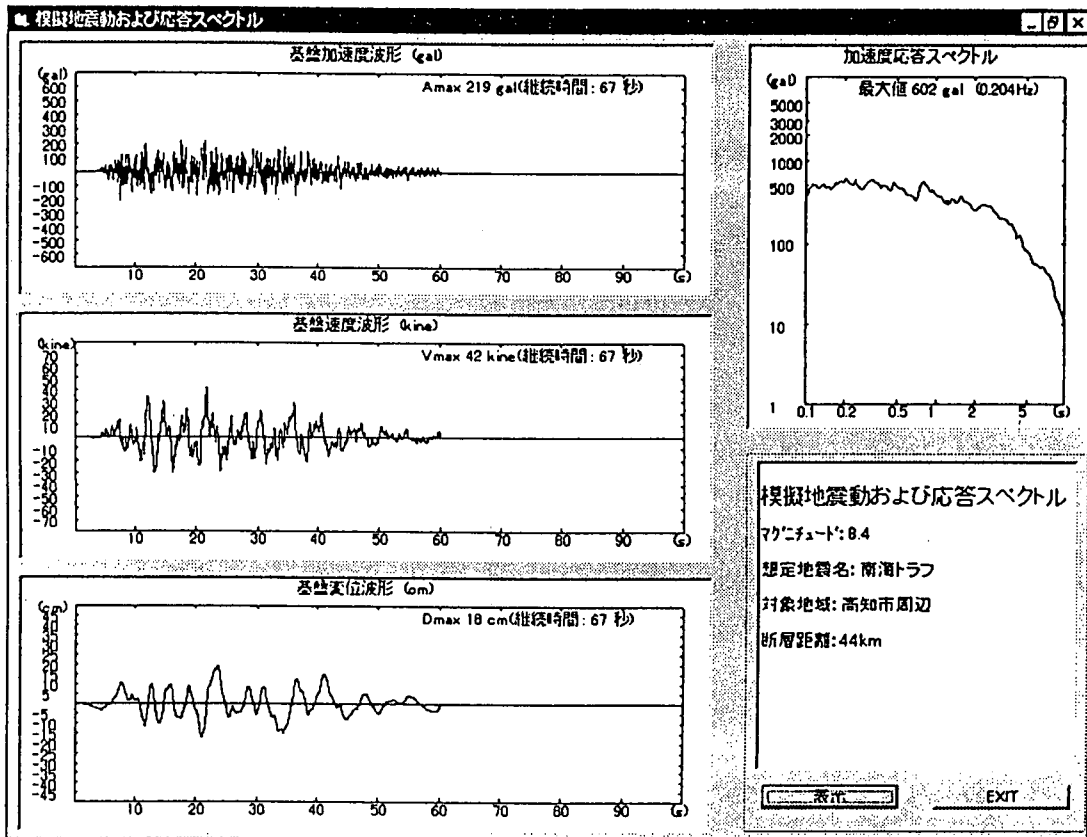


図 2.2.8 想定地震 9 による高知市の基盤波形および加速度応答スペクトル