

鳥取県西部地震および芸予地震における 地震動シミュレーションと考察

澤田 勉¹・三神 厚²・辻原 治³

¹正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

²正会員 博(工) 徳島大学助手 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

³正会員 博(工) 和歌山工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒644-0023 御坊市名田町野島 77)

本研究は、工学的基盤での最大地動(最大加速度、最大速度および最大変位)の距離減衰に適合するような模擬地震動作成法を用いて、2000年鳥取県西部地震および2001年芸予地震の際に四国の県庁所在地のK-netで得られた地震記録を対象にシミュレーションを行い、実地震動と模擬地震動の比較より若干の考察を加えたものである。

Key Words : Simulation, earthquake ground motion, 2000-Tottori-ken-seibu earthquake, 2001-Geiyo earthquake, Response spectrum

1. はじめに

模擬地震動作成法は現在までに多数提案されており、それらを大別すると、断層モデルによる理論的方法¹⁾、小地震の記録を経験的グリーン関数として大地震の記録を合成する半経験的手法²⁾、および距離減衰式等の経験式に立脚した経験的手法^{3),4)}になる。これらのうち、経験的手法は実地震動の平均的な特性を直接反映できるという長所をもっており、実用的な方法となっている。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、これらの特性については、多くの経験式(距離減衰式)が提案されている^{5),6)}。経験的手法は、以上のような距離減衰式に基づいて模擬地震動を作成する方法である。本研究では、著者らが提案した模擬地震動作成法を用いて⁷⁾、2000年鳥取県西部地震および2001年芸予地震の際に四国の県庁所在地で得られた地震記録を対象にシミュレーションを行い、実地震動と模擬地震動の比較より若干の考察を加える。

2. シミュレーション手法の概要

本研究の地震動シミュレーションでは、まず工学的基盤加速度波をシミュレートした後、それを入力とする地盤応答解析を行い、地表地震動を求めるという手順をとる。地震動特性は強度特性、周波数特性および非定常特

性に大別されるが、これらのうち周波数特性(たとえばフーリエスペクトル)と非定常特性(たとえば波形包絡線)が与えられると模擬地震動を作成することができる。工学的基盤加速度波の周波数特性と非定常特性は以下のようなモデルを用いて表される。

(1) 周波数特性⁸⁾

工学的基盤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 $F(f)$ で表す。

$$F(f) = C \cdot S(f) \cdot U(f) \cdot Z(f) \quad (1)$$

ここで、 C =定数、 $S(f)$ =震源特性を表す関数、 $U(f)$ =伝播経路における減衰を表す関数、 $Z(f)$ =地震基盤から工学的基盤までの増幅率である。地震基盤はS波速度が3.5km/sec程度の硬い岩盤、工学的基盤はS波速度が数100m/sec程度の洪積層上面として定義される。上式の各関数の具体的な形は次式のように与えられる。

$$F(f) = C \cdot \frac{M_0 \cdot (2\pi f)^2}{1 + (f/f_c)^2} \cdot \{R + 0.334 \cdot e^{0.653M}\}^{-(c+d \log(f/f_c))} \cdot \frac{1 + \alpha \cdot (f/f_0)^2}{[1 - (f/f_0)^2]^2 + 4h^2(f/f_0)^2]^{1/2}} \quad (2)$$

ここで、 M_0 =地震モーメント、 f_c =コーナー周波数、 c および d =距離減衰を規定する係数、 f_0 、 h および α =工学的基盤の増幅率を規定する係数である。上式において、

定数以外の係数、すなわち、 M_0 , f_c , c , d , f_0 , h および α の 7 個の係数が与えられると、フーリエ振幅スペクトルを決定することができる。これら係数のうち M_0 , f_c , c および d は、マグニチュード M および震源深さ H の関数として次式のように決定した⁷⁾。

$$\begin{cases} \log M_0 = 13.243 + 1.3124M + 0.000234H \\ \log f_c = 2.6410 - 0.4013M + 0.001213H \\ \log c = 0.4219 - 0.02258M \\ \log d = 0.3718 - 0.09697M - 0.000957H \end{cases} \quad (3)$$

また、工学的基盤の増幅率を規定する係数の f_0 , h および α は次のように与えた⁷⁾。

$$f_0 = 1.8226, \quad h = 0.4459, \quad \alpha = 2.1140 \quad (4)$$

(2) 非定常特性⁴⁾

地震動の非定常特性は、波形包絡線、位相差分、非定常スペクトル等により表される。本研究では、大崎らによる以下のような波形包絡線 $E(t)$ を用いて基盤加速度波の非定常特性を表現する⁴⁾。

$$\begin{cases} E(t) = (t/T_b)^2 & ; \quad 0 \leq t \leq T_b \\ E(t) = 1 & ; \quad T_b \leq t \leq T_c \\ E(t) = e^{-a(t-T_c)} & ; \quad T_c \leq t \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 T_b , T_c および a はマグニチュード M の関数として次式で与えられる。

$$\begin{cases} T_b = (0.40 - 0.04M)T_d \\ T_c = (0.78 - 0.04M)T_d \\ a = -\ln 0.1/(T_d - T_c) \end{cases} \quad (6)$$

上式中の T_d は継続時間であり、次式より求められる。

$$T_d = 10^{0.31M - 0.774} \quad (7)$$

以上のモデルを用いると、任意の M および H に対する工学的基盤での加速度波をシミュレートできる。具体的手順は、式(3)および(4)の各パラメータを式(2)に代入して得られるフーリエ振幅スペクトルおよび $0 \sim 2\pi$ のランダムな位相を与えて求められる複素フーリエスペクトルのフーリエ逆変換から、定常な加速度波を作成する。次に、この定常加速度波に式(5)の包絡線を乗じると工学的基盤での加速度波が得られる。式(3)および(4)の係数は、上述の加速度波とそれを積分して得られる速度波および変位波の最大値が、安中らによる最大地動(最大加速度、最大速度および最大変位)の距離減衰式⁹⁾と適合するように決定したものである。地表面での加速度波は、工学的基盤加速度波を入力とする地盤応答解析より得られる。地盤応答解析では、地盤を線形とした重複反射法⁹⁾を用いた。

3. 実地震動と模擬地震動の比較

前項で述べた方法を用いて 2000 年鳥取県西部地震および 2001 年芸予地震の波形シミュレーションを行い、実地震動記録と比較する。対象とした地震記録は、四国の県庁所在地(徳島、高松、松山、高知)で観測された K-net による加速度記録である¹⁰⁾。これら 4 地点の地盤条件(地盤各層の層厚、密度、S 波速度)を表-1 に示す。ただし、K-net では最大 20m の深さまでのデータしかないので、それ以深の地盤条件は概略値である。なお、地盤の減衰を表す Q 値はすべて $Q=5$ とした。鳥取県西部地震のマグニチュード(M)と震源深さ(H)は $M=7.3$, $H=11\text{km}$ 、芸予地震のそれらは $M=6.7$, $H=51\text{km}$ とした¹⁰⁾。また、両地震に対する各地点の断層距離(断層面までの最短距離、 R)は表-2 の値を用いた。

表-1 地盤条件

徳島市津田町			
層番号	層厚(m)	密度(g/cm ³)	S 波速度(m/s)
1	11	1.81	150
2	9	1.72	200
3	10	1.80	250
4	—	2.00	400
高松市番町			
層番号	層厚(m)	密度(g/cm ³)	S 波速度(m/s)
1	1	1.51	260
2	9	1.60	180
3	2	1.66	280
4	—	2.00	400
松山市富久町			
層番号	層厚(m)	密度(g/cm ³)	S 波速度(m/s)
1	4	1.88	160
2	4	1.85	270
3	6	1.81	220
4	—	2.00	460
高知市丸ノ内			
層番号	層厚(m)	密度(g/cm ³)	S 波速度(m/s)
1	6	1.52	200
2	3	1.67	140
3	6	1.57	180
4	5	1.60	130
5	—	1.80	300

表-2 各地点の断層距離(km)

	徳島	高松	松山	高知
鳥取県西部地震	174	122	170	194
芸予地震	171	132	41	91

以上の諸量と前項までに説明した方法を用いて、各地点の工学的基盤および地表における加速度波形を求めた。図-1 は、芸予地震の観測記録と以上のようにして得られた模擬地震動を比較して示したものである。各図の上段は観測記録の東西成分、下段は模擬地震動の加速度波形

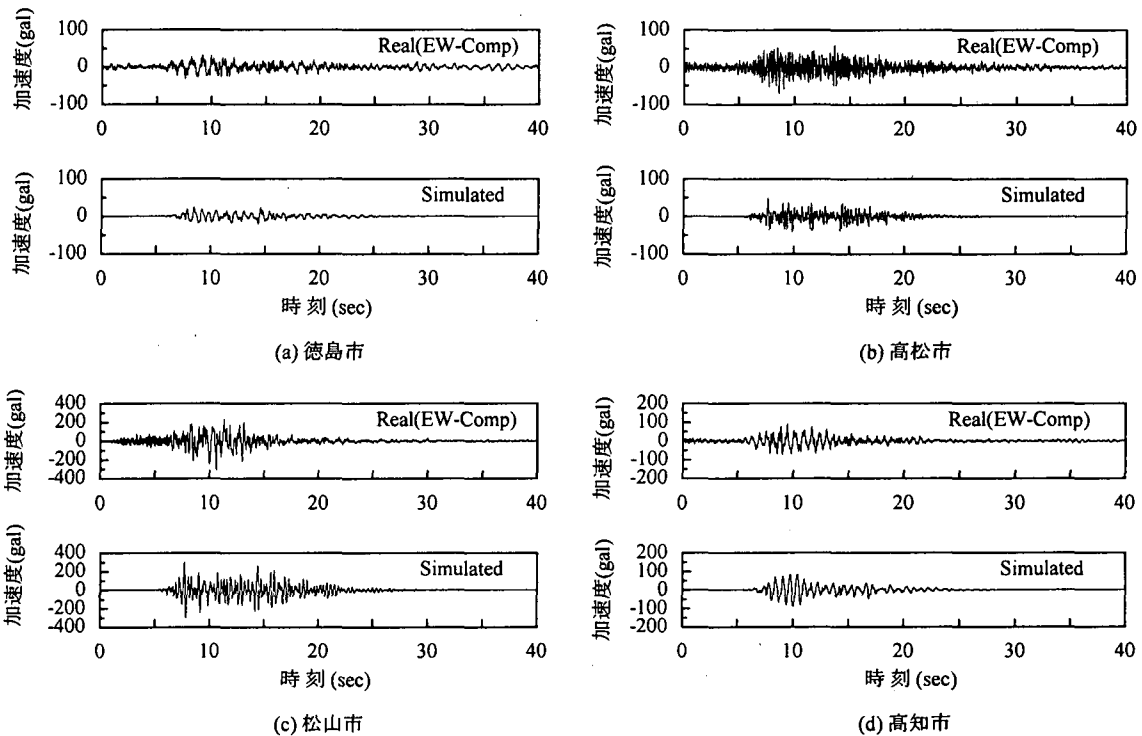


図-1 実地震動と模擬地震動の加速度波形の比較 (2001年芸予地震)

である。これらの図より、模擬地震動の最大値や継続時間は実地震動のそれらとほぼ整合することがわかる。図-2および図-3はそれぞれ、鳥取県西部地震および芸予地震について、実地震動の加速度応答スペクトルを模擬地震動のそれらと比較したものである。図の横軸は固有周期、縦軸は加速度応答の最大値である。図中の細い実線は実地震動の水平2成分に、太い実線および破線はそれぞれ地表および基盤における模擬地震動に対応する。これら図より、模擬地震動の応答スペクトルは実地震動のそれとよく対応すること、また工学的基盤に対する地表面の増幅率が短周期部で大きいことなどがわかる。

4. おわりに

2000年鳥取県西部地震および2001年芸予地震の地震動シミュレーションを行い、K-netによる観測記録と比較した。本手法による模擬地震動は両地震の観測記録とよく対応する。前述のように、本手法は最大地動の距離減衰式に基づくものであり、地震動の平均的な特性を反映したものである。このことより、鳥取県西部地震および芸予地震は特殊な地震ではなく、平均的な特性を有する一般的な地震であったと結論づけられる。

謝辞：本研究で使用した地震記録は、防災科学技術研究所のK-netで得られたものである。記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) Haskell, N.A. : Elastic displacement in the near-field of a propagating fault, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 59, pp.865-908, 1969.
- 2) Irikura, K. : Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, *Proc. of 7th Japan Earthq. Eng. Symp.*, pp. 151-156, 1986.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，丸善株式会社，pp.146-161, 1991.
- 4) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，pp.199-214, 1994.
- 5) 安中正，山崎文雄，片平冬樹：気象庁87型強震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.
- 6) Fukushima, Y. and Tanaka, T. : A new attenuation relation of peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol. 80, pp.757-783, 1990.
- 7) 澤田勉，平尾潔，辻原治，三神厚：最大地動の距離減衰式に基づく工学的基盤地震動のシミュレーション手法，土木学会論文集(投稿中).
- 8) 佐藤智美，川瀬博，佐藤俊明：表層地盤の影響を取り除いた工学的基盤波の統計的スペクトル特性，日本建築学会構造系論文集，第462号，pp.79-89, 1994.
- 9) 土岐憲三：構造物の耐震解析，技報堂出版，pp.82-90, 1981.
- 10) 防災科学技術研究所：広帯域地震観測網による地震情報。

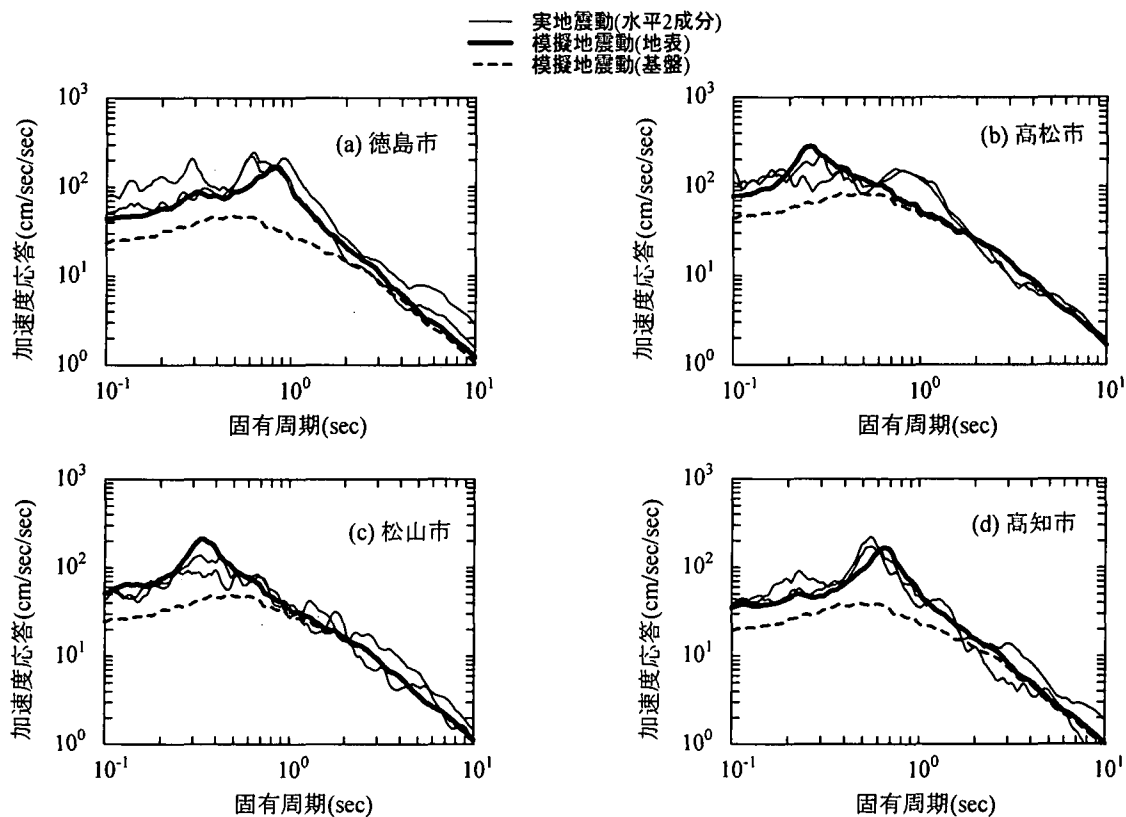


図-2 実地震動と模擬地震動の加速度応答スペクトルの比較 (2000年鳥取県西部地震)

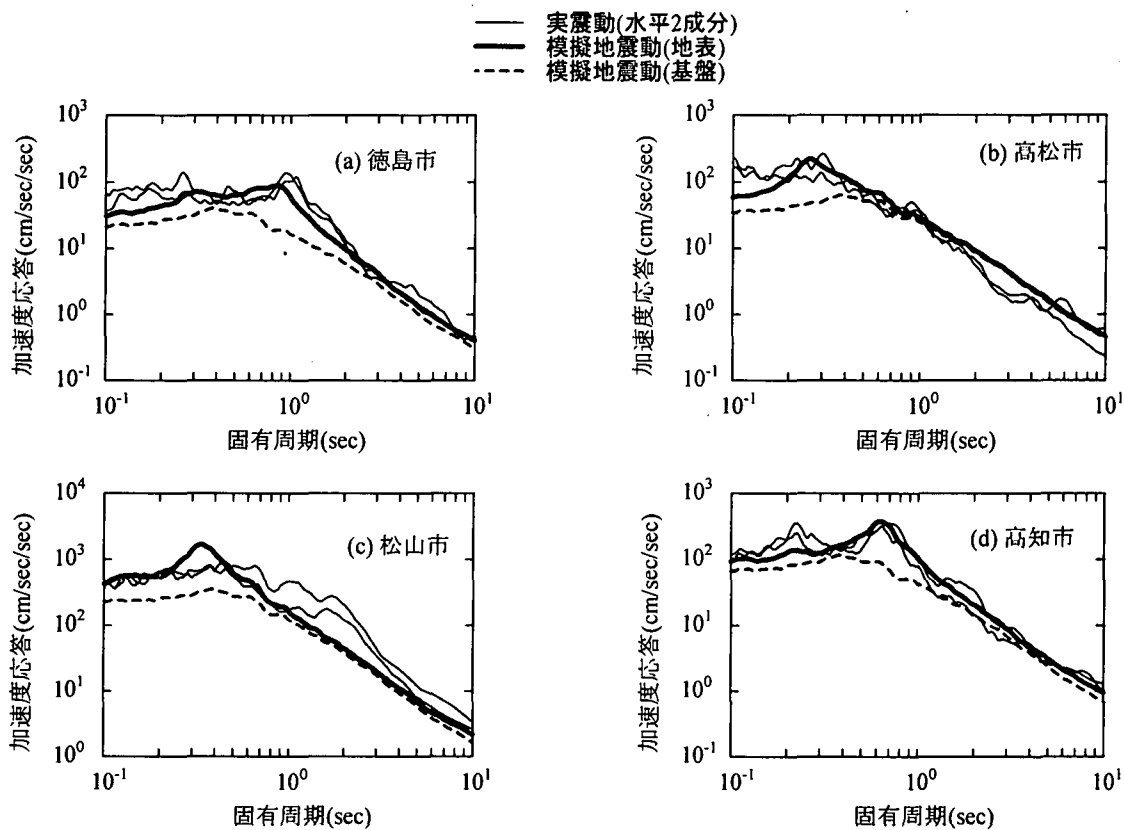


図-3 実地震動と模擬地震動の加速度応答スペクトルの比較 (2001年岩手地震)