

米子市における 2000 年鳥取県西部地震の 強震動シミュレーション

新井 洋¹・日比野 浩²・Nelson PULIDO³・久保 哲夫⁴

¹正会員 工博 防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センター (〒673-0433 三木市福井三木山2465-1)

²大成建設技術センター 建築技術研究所 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

³理博 防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センター (〒673-0433 三木市福井三木山2465-1)

⁴工博 防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センター (〒673-0433 三木市福井三木山2465-1)

2000年鳥取県西部地震では、米子市内の僅か1.3km離れた2観測点において最大加速度・速度の2倍異なる強震記録が得られた。この原因を解明するため、岩盤記録の逆解析から求めた不均質断層モデルおよび微動観測結果等に基づく地下構造モデルを用いて、震源断層の破壊過程から岩盤内の地震波動伝播、堆積地盤の非線形応答を考慮した強震動シミュレーション解析を行った。解析結果と本震記録との比較から、両観測点での最大加速度・速度の差異は、断層距離により1.3倍に、さらに堆積地盤の応答により2倍になったことを示した。

Key Words : *the 2000 Tottori-ken Seibu earthquake, strong ground motion, S-wave velocity structure, site effect, fault distance*

1. はじめに

2000年鳥取県西部地震では、米子市内の僅か1.3km離れた2観測点(K-net 米子および米子測候所、以下K-net, JMA)において最大加速度・速度の2倍異なる強震記録が得られた。この原因として地盤特性の他に震源断層距離の影響が考えられる。そこで本報では、K-net, JMA 両地点を通る測線上で微動観測を行い、そのH/Vスペクトルから地盤のS波速度構造を推定する。さらに、岩盤記録の逆解析から求めた不均質震源断層(アスペリティ)モデルおよび岩盤内の地震波動伝播を考慮したK-net, JMA直下の基盤岩露頭波を推定し、これを入力として推定地盤構造に対する地震応答解析を行い、本震記録と比較することで、地盤特性および断層距離がK-net, JMA 両地点での地震動特性に与えた影響について検討する。

2. 微動観測に基づく地盤S波速度構造の推定

観測は、K-net, JMAを通り推定震源断層¹⁾にはほぼ直交する測線上の26地点(A01-A26)で行った(図-1)。微動計は固有周期2秒の3成分(鉛直および水平直交2成分)速度計を用いた。各地点で観測された微動波形データから時松・新井²⁾と同様の方法でH/Vスペクトルを求めた。図-2に6地点で得られた微動のH/Vスペクトルを示す。図から、微動H/Vスペクトルの形状および周期

特性は位置により大きく変化していることがわかる。この傾向を確認するため、微動H/Vスペクトルの位置的变化を図-3に濃淡で示す。図から、観測点A05より南西側の観測点ではH/Vスペクトルに明瞭なピークは認められない。一方、それ以外の観測点ではH/Vスペクトルに比較的明瞭なピークが認められ、そのピーク周期は位置により変化している。とくに、観測点A06-A08-A10-A16-A18の範囲で、ピーク周期は0.3-0.9-1.2-0.6-0.4秒と大きく変化している。このことは、観測点A05-A18の間で表層地盤構造が大きく変化していることを示唆している。

観測されたH/Vスペクトルが表面波によるものと考え、高次モードまで考慮した逆解析³⁾を行い、K-net (A08)およびJMA (A16)直下深度60mまでのS波速度構造を推定した。この際、深度60mまでの地盤は既往の地盤調査資料⁴⁾などを参考に5層の水平成層構造にモデル化し、それ以深は表-1に示す地下構造⁵⁾を仮定した。また逆解析では、各層のS波速度は近傍のボーリングデータ⁶⁾などを参考に固定し、層厚のみを変数とした。図-4にK-net, JMA 両地点で推定された地盤S波速度構造を示す。図-2(b), (d)の破線は、K-net, JMAの推定地盤構造に対応する理論H/Vスペクトル²⁾である。図-2から、K-net, JMA 両地点とも理論値は観測値と良く対応しており、逆解析が適切に行われたことが示唆される。

K-net, JMA 両地点の推定S波速度構造(図-4)にお

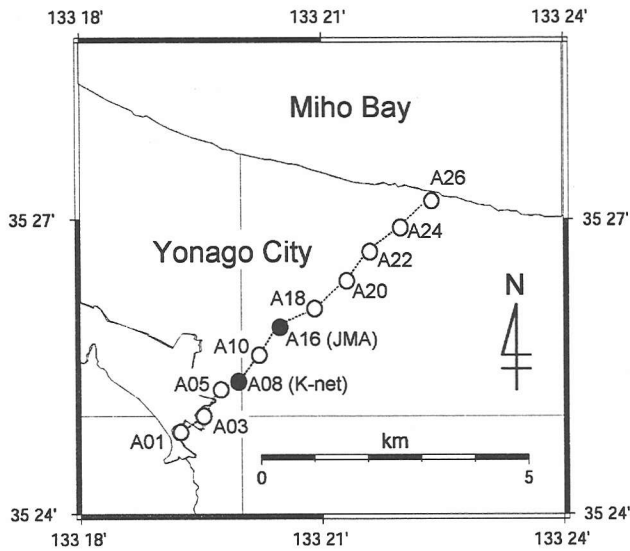


図-1 微動および強震観測地点

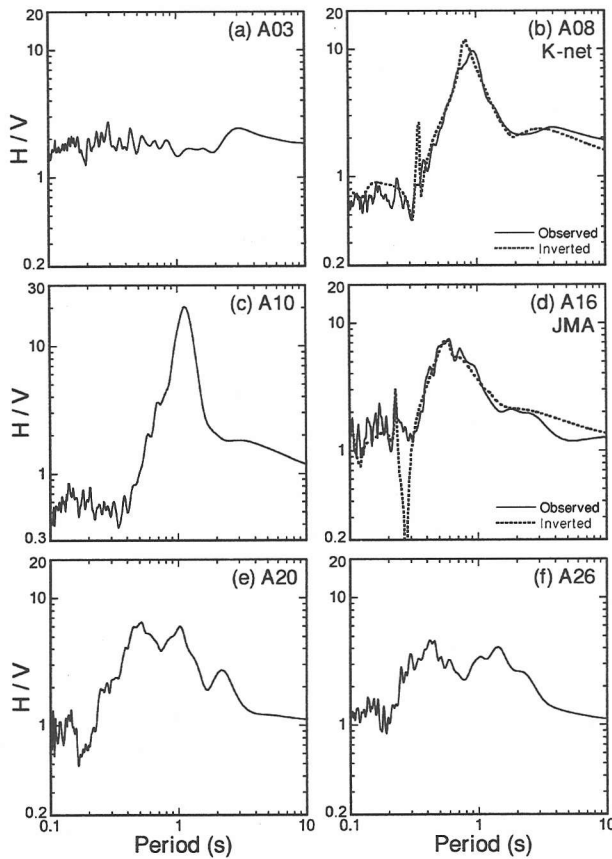


図-2 観測および理論H/Vスペクトル

けるS波速度 1km/s 程度以上の層の出現深度 D は 52, 24m で、微動 H/V スペクトルのピーク周期 T_p (0.9, 0.6s : 図-2) と正の相関がありそうである。そこで、本報では、既往の地盤調査資料^{4),6)} との比較から S 波速度 1km/s 程度以上の層を基盤岩と考え、微動 H/V スペクトルに比較的明瞭な単一ピークが見られた観測点 A06-A18 での基盤岩深度 D を次式により推定した。

$$D = 50T_p \quad (1)$$

表-1 深部地下構造モデル⁵⁾

Depth (km)	ρ (t/m ³)	V_S (km/s)	V_P (km/s)
- 0.2	2.0	1.0	2.5
0.2 - 3.0	2.6	3.2	5.5
3.0 - 16	2.7	3.5	6.1
16 - 38	2.9	3.9	6.6
38 -	3.0	4.0	6.8

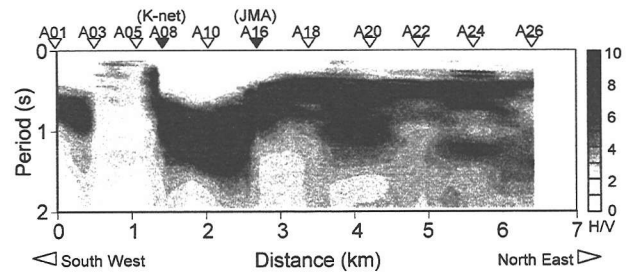


図-3 微動H/Vスペクトルの位置的变化

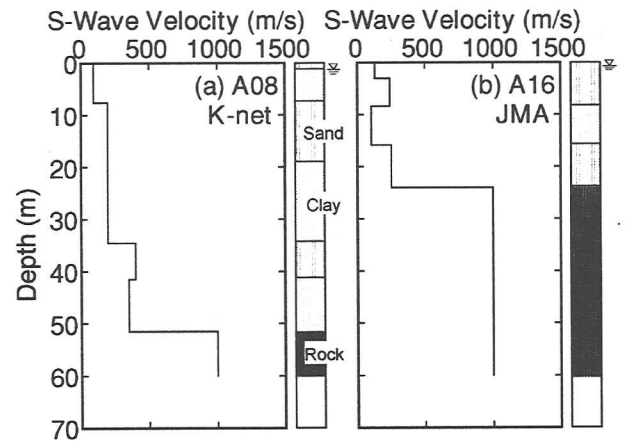


図-4 K-net, JMAの推定S波速度構造

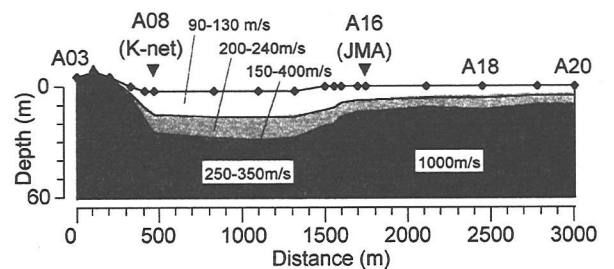


図-5 測線に沿う推定S波速度構造断面

(1)式から得られた観測点 A06-A18 の基盤岩深度、K-net, JMA 両地点の S 波速度構造 (図-4) および既往の地盤調査資料^{4),6)} に基づいて推定された、観測点 A03-A20 間の S 波速度構造断面を図-5 に示す。

3. 震源断層を考慮した基盤岩地震動の推定

図-5 の地盤構造モデルに対する基盤岩入力地震動を、不均質断層 (アスペリティ) モデルおよび統計的グリーン

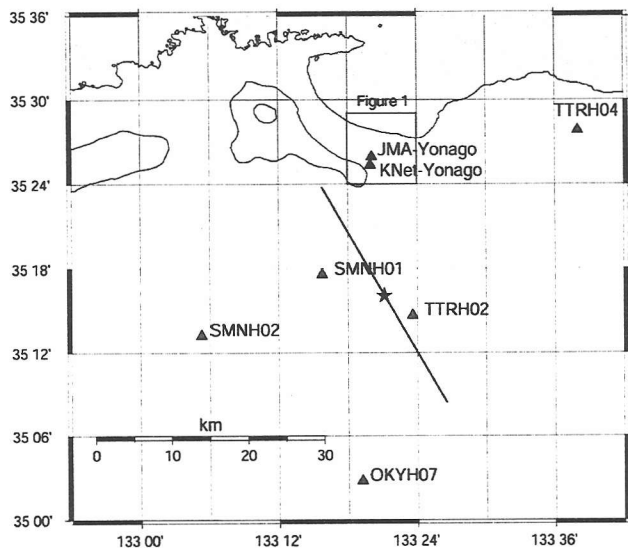


図-6 震源断層の位置と強震観測地点

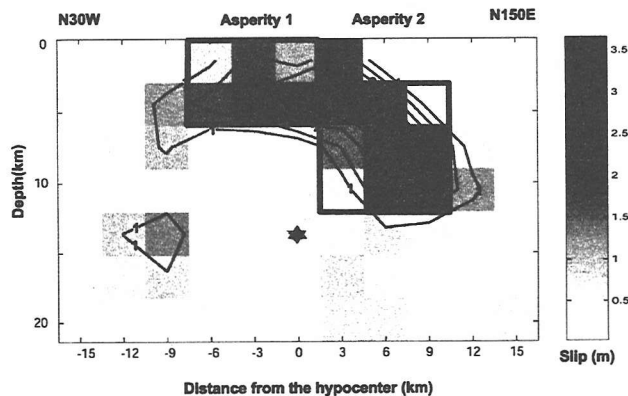


図-7 不均質震源断層（アスペリティ）モデル

関数法に基づく広帯域強震動シミュレーション^{7,8)}により推定する。本報では、1Hz以下の低周波は理論グリーン関数により、それ以上の高周波は統計的グリーン関数法により、それぞれアスペリティ全体にわたって総和を求め、最後に両者を合成する方法⁸⁾を用いる。

仮定した震源断層の位置を図-6に示す。アスペリティモデルは、岩田ら¹⁾の滑り量分布を参考に、Somerville *et al.*⁹⁾の方法を用いて図-7のように設定した。震源パラメータを表-2に示す。ここで地震モーメントは菊池・山中の結果¹⁰⁾を用い、これとアスペリティサイズから応力降下量を求めた。また、破壊伝播速度および立ち上がり時間は、図-6に示すKiK-net地中観測点におけるシミュレーション速度波形が観測波形に適合するよう、試行錯誤により設定した。シミュレーションに用いた地下構造は、各地点でのPS検層結果の下部に表-1の深部構造を付加したものである。図-8に、シミュレーション波形と観測波形を比較して示す。図から、シミュレーション波形は観測波形と概ね適合しており、設定したアスペリティモデルの妥当性をある程度示している。K-net, JMAの直下

表-2 震源断層パラメータ

M_{JMA}	7.3	
Strike, Dip, Slip Angle	150, 90, 0 deg.	
Seismic Moment	9.6×10^{18} N · m	
	Asperity 1	Asperity 2
Seismic Moment (N · m)	3.098×10^{18}	5.438×10^{18}
Stress Drop (bar)	190	180
Rupture Velocity (km/s)	2.2	2.2
Rise Time (s)	1.0	1.0

表-3 基盤岩露頭波の最大加速度・速度

	K-net		JMA	
	EW	NS	EW	NS
Max. Acc. (cm/s ²)	140	180	148	147
Max. Vel. (cm/s)	38	28	28	21

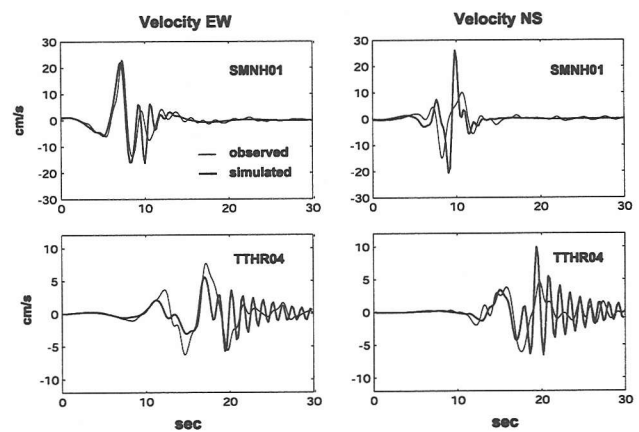


図-8 解析波形と観測波形の比較 (KiK-net)

深度60mにおけるシミュレーション波（基盤露頭波）の最大加速度・速度を表-3に示す。最大加速度・速度ともK-netの方がJMAよりも1.3倍程度大きく、これは断層距離の差異を反映したものと考えられる。

4. 堆積地盤の地震応答解析

3章で得られたK-net, JMA直下深度60mでの推定基盤露頭波を用い、2章で推定された地盤構造モデルに対して2次元有限要素法による全応力等価線形解析¹¹⁾を行った。モデルの底面は粘性境界、側面は伝達境界とした。K-net, JMA地表における応答は、各地点直下の基盤露頭波をそれぞれ鉛直入射した2ケースの解析結果より個別に求めた。この際、入力波形は地盤構造断面方向(N047E)に回転し、面内波動場の解析を行った。

解析から得られた地表速度波形を観測波と比較して図-9に、それらの速度応答スペクトルを図-10に示す。解析から得られた地表波形は、K-net, JMAの最大速度の差異(2倍程度)を概ね再現している(図-9)。最大加速度についても同様の再現度合いが確認された。このこ

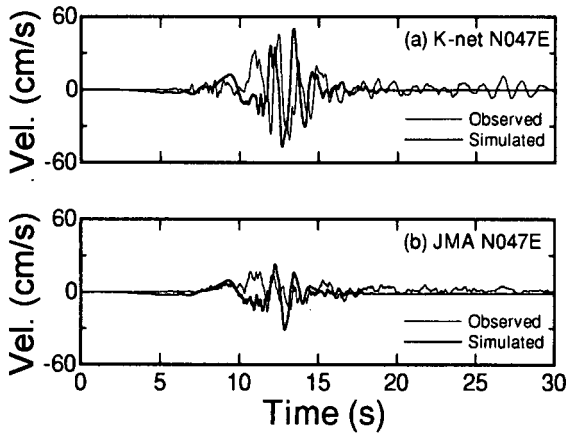


図-9 解析波形と観測波形の比較 (K-net, JMA)

とから、K-net, JMA の最大加速度・速度の差異は、断層距離により 1.3 倍程度に、さらに堆積地盤の応答により 2 倍程度になったと考えることができる。ただし、同様の指摘は、K-net, JMA を対象とした鳥取県西部地震の 1 次元液状化シミュレーション解析¹²⁾によってもなされている。このことは、堆積地盤の応答は 1 次元の非線形応答で概ね再現できることを示唆している。なお、図-9 において、K-net, JMA とも解析波と観測波の位相の一致度合いは不十分である。とくに K-net では、解析波は観測波の時刻 15 秒以降に見られる後続位相を再現できていない。また、速度応答スペクトル (図-10) で見ると、K-net では解析波と観測波のそれは合っているように見えるが、JMA では解析波の周期 1.3 秒程度の成分が卓越し、観測波との適合度は悪い。この原因として、入力基盤露頭波に既に卓越する 1.3 秒の成分波の振幅が過大であること (図-10 鎖線)、図-5 の 2 次元地盤構造モデルを構築する際、構造を単純化し過ぎたことなどが考えられる。今後の課題としたい。

5. まとめ

2000 年鳥取県西部地震における 2 強震観測点 (K-net 米子と米子測候所) を通る測線に沿って微動観測を行い、その H/V スペクトルから地盤の 2 次元 S 波速度構造を推定した。さらに、岩盤記録の逆解析から求めた不均質震源断層 (アスペリティ) モデルおよび岩盤内の地震波動伝播を考慮した K-net, JMA 直下深度 60m での基盤岩露頭波を推定し、これを入力として推定地盤構造に対する地震応答解析を行った。解析結果と本震記録との比較から、両観測点での最大加速度・速度の差異は、断層距離により 1.3 倍程度に、さらに堆積地盤の応答により 2 倍になったことを示した。

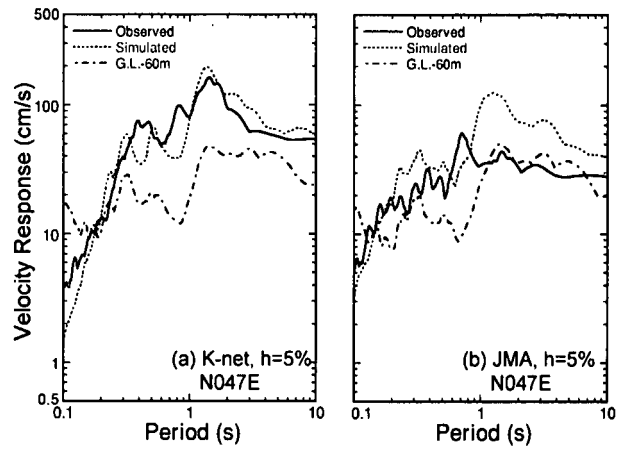


図-10 速度応答スペクトルの比較 (K-net, JMA)

謝辞:本報で用いた強震記録は防災科学技術研究所 K-net, KiK-net および気象庁により記録・公開されたものである。記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 岩田知孝ほか: 2000年鳥取県西部地震の震源過程と震源近傍強震動, 日本地震学会秋季大会「2000年鳥取県西部地震」速報ポスターセッション, 2000.
- 2) 時松孝次, 新井 洋: レイリー波とラブ波の振幅比が微動の水平鉛直スペクトル比に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 511, 69-75, 1998.
- 3) 新井 洋, 時松孝次: 微動H/Vスペクトルの逆解析による地盤のS波速度構造推定, 日本建築学会大会梗概集, 構造Ⅱ, 243-244, 1998.
- 4) 建設省計画局, 島根県, 鳥取県編: 中海臨海地帯の地盤, 都市地盤調査報告書, 第15巻, 1967.
- 5) 京都大学防災研究所 地震予知研究センターホームページ: http://www2.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/TOTTORI/index_j.html
- 6) 中国地方基礎地盤研究会編: 山陰臨海平野地盤図, 1995.
- 7) Kamae, K. and Irikura, K.: A technique for simulating strong ground motion using hybrid Green's function, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88(2), 357-367, 1998.
- 8) Pulido, N. et al.: Broadband ground motion simulation and damage estimation of the 1999 Kocaeli (Turkey) earthquake, *Proc. the 8th Intl. Conf. on Struct. Safety and Reliability, ICOSSAR*, 2001.
- 9) Somerville, P. G. et al.: Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seismological Research Letters*, 70(1), 59-80, 1999.
- 10) 菊池正幸, 山中佳子: 遠地実体波解析, 10月6日鳥取県西部の地震(M7.3), EIC地震学ノート, 93, 2000.
- 11) Lysmer, J. et al.: FLUSH: A computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problems, *Research Report, UCB/EERC-75/30, Earthquake Engineering Research Center, University of California*, 139 pages, 1975.
- 12) 新井 洋ほか: 鳥取県西部地震におけるK-net米子と米子測候所の地盤応答特性(その1), 第36回地盤工学研究発表会講演集, 2001.