

アレー観測記録に基づく仙台市圏の サイスミックゾーニング

莊司雄一¹・神山 眞²

¹正会員 ドーピー建設工業株式会社 東北支店 (〒980-0014 宮城県仙台市青葉区本町1-1-8)

²正会員 工博 東北工業大学 土木工学科 (〒982-8577 宮城県仙台市太白区八木山香澄町35-1)

仙台市圏で展開しているアレー観測システムSmall-Titanの観測記録を用いてローカルサイト特性を評価し、それに基づくサイスミックゾーニングを試みる。従来用いられてきた気象庁計測震度によるサイスミックゾーニングとの比較が述べられる。地震動パラメーターとしてのローカルサイト増幅強度、フーリエスペクトル強度について気象庁計測震度との関連が考察される。

Key Words : array observation system, J.M.A. instrumental seismic intensity, local site effects, seismic zoning, ground motion parameter,

1. はじめに

地震動は震源特性、伝播経路、ローカルサイトの影響によって決まることが知られている。阪神淡路大震災後、「観測による事実」の積み重ねの重要性が再認識させられ、日本においても各地で地震観測システムが構築されてきている。筆者らは仙台市圏で、震源、伝播経路、ローカルサイトの影響が多面的に、かつ多様に取りこめるリアルタイム・オンライン・高密度アレー強震観測システム Small-Titan¹⁾を構築し、地震観測および研究を継続してきた。観測で得られた地震動情報を、地震災害軽減に資する形で如何に有効利用するかが重要であることは論をまたない。

アレー観測で得られた地震動情報を有効利用するためには、点としての地震動情報を面として展開することが必要となる。その際、次のことが留意点として挙げられる。第一に、見て理解し易い視覚化である。このためには、地図上にゾーニングマップの形でマッピングし、直感的なイメージ処理が望ましい。第二に、ゾーニングマップの地震動パラメーターの選定である。これまでに、最大加速度、最大速度、気象庁計測震度(計測震度)、Spectral Intensity (SI 値)などを用いたゾーニングマップの作成が試みられている。その中で計測震度は、振幅、周期特性、継続時間などを総合して算定されるパラメーターで、地震被害分布との相関に優れているとの意見も多い。しかし、地震被害分布が、震源、伝播経路、ローカルサイトの3要因の中で、どの要因によって強く支配されているかを理解することも重要であろう。アレー観測、とりわけ Small-Titan のような高

密度アレー観測で得られた地震動情報を有効利用しようとするならば、ローカルサイトの影響を定量的に評価し、それをパラメーターに用いることが有意義であると考ええる。加えて、ローカルサイト特性の定量的評価は Small-Titan の大きな目的のひとつであることから、本研究では、ローカルサイトの増幅特性を考慮したサイスミックゾーニングを試み、計測震度との関連について考察する。

2. 地震動パラメーターの比較

(1) ローカルサイト増幅強度と計測震度

一般に観測される地震動 $O_{ij}(f)$ は、次式によって表される。

$$O_{ij}(f) = S_i(f) G_j(f) P_{ij}(f) \quad (1)$$

ここに、 $S_i(f)$ は震源特性、 $G_j(f)$ はローカルサイト増幅特性、 $P_{ij}(f)$ は伝播経路特性を示す。

これまでに、Small-Titan で得られた観測記録を用いて、S波の観測スペクトルを対数変換により線形化した式に適当な拘束条件を与えた最小二乗法による逆解析を行い、震源特性、伝播経路特性、ローカルサイトの増幅特性の分離を試み、仙台市圏のローカルサイトの増幅特性を推定してきた²⁾。図-1に逆解析から得られたローカルサイトの増幅特性と、それに基づくパラメーターの算定手法を示す。ここでは、任意の周波数帯域の積分値をもってローカルサイトの増幅強度とも言うべき LSE 値 (Local Site Effects) を算定し、それに基づきマッピング処理を

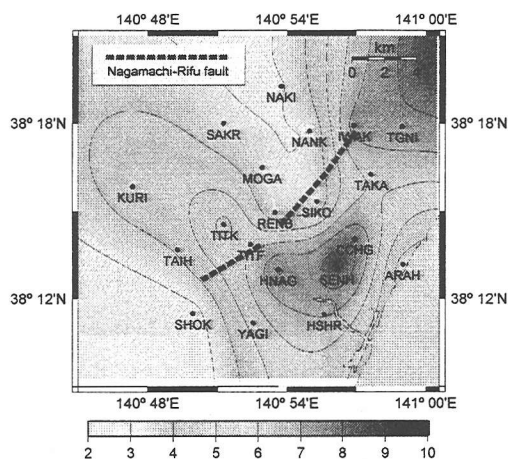


図-2 ローカルサイト増幅特性のゾーニングマップ 周波数帯域(1.5Hz-4.0Hz)

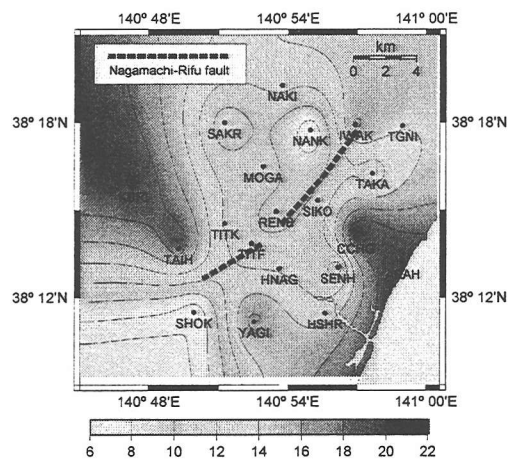


図-3 ローカルサイト増幅特性のゾーニングマップ 周波数帯域(4.0Hz-10.0Hz)

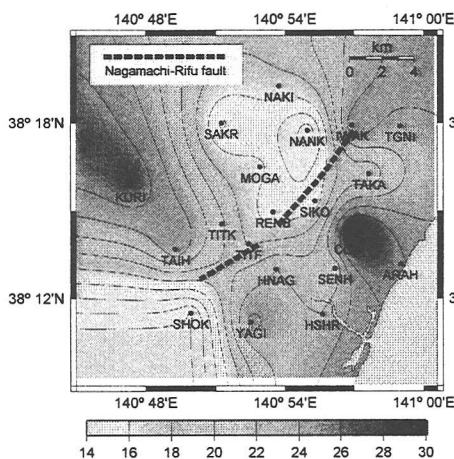


図-4 ローカルサイト増幅特性のゾーニングマップ 周波数帯域(0.4Hz-10.0Hz)

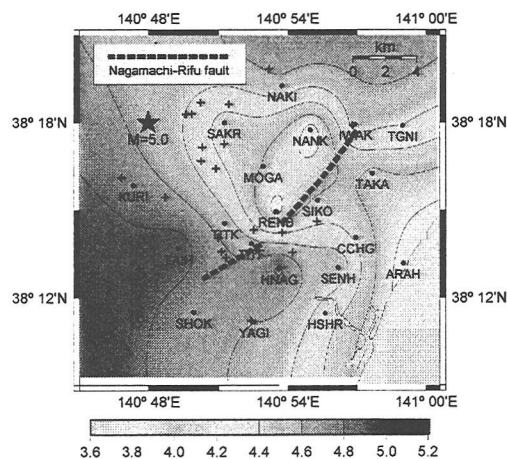


図-5 気象庁計測震度のゾーニングマップ (1998年9月15日, M=5.0)

試みた。図-2、図-3 に、着目する周波数帯域を変えたときのゾーニングマップの例を示す。明らかに LSE 値が異なり周波数に依存して分布する様相が見られる。構造物の固有周期との関連から有益な情報を示すゾーニングマップであることが示唆される。図-4 は 0.4Hz から 10.0Hz の周波数帯域のゾーニングマップである。軟弱な地盤が分布すると考えられる YAGI, CCHG, TAIH, KURI で大きな増幅強度が観察される。図-5 は、1998 年 9 月 15 日の宮城県南部を震源とする直下型地震 (M=5.0) の計測震度をパラメータとしたゾーニングマップである。図-4 と図-5 を比較すると、二つのパラメータは対象としている周波数帯域が近似していることから、図-4 に震源の影響を加算してみると図-5 は説明できることが示唆される。つまり、震源の影響を強く受けたと考えられる NAKI, TITK, TITF, SHOK では、計測震度が大きくなっていることがわかる。一方、RENB や NANK ではそれほど影響を受けていない。このことは、ローカルサイトの増幅強度は、ある周波数帯域におけるローカルサイトの影響だけを抽出していることと、計測震度が震源、伝播経路、ローカルサイトの 3 要因によって総合的に決定されていることを考え合わせれば当然の結果であると言

える。さらに、震源の影響が単に震源との位置関係からだけ決定されるものではないことが観察され興味深い。図-5 の+印は、小中学校の被害分布³⁾を示している。これを見ると計測震度の分布と地震被害の分布は、比較的よく合っていることがわかる。

このように、逆解析から得られたローカルサイトの増幅強度は、サイスミックゾーニングにおける有力なパラメータであることが示唆される。

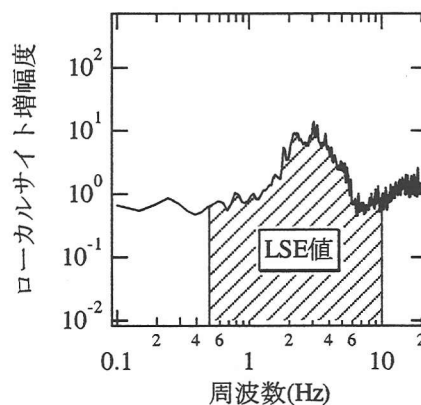


図-1 LSE 値算定の模式図

(2) フーリエスペクトル強度と計測震度

筆者らは先に述べたように、Small-Titan の観測記録を用いて逆解析を実施してきた。その際の観測記録の処理は、S波部分の初動を目視で読み取り、その初動から 10 秒間のウィンドウを対象とし、波形の切り出しは、前後にウィンドウ長さの 10% のコサインテーパをつけた。EW 成分、NS 成分のフーリエスペクトルを求め、得られた水平 2 成分をベクトル合成した水平動スペクトルを逆解析の対象として解析を行った。つまり、図-6 に示すような水平動スペクトルに対して逆解析を実施して震源特性、伝播経路特性、ローカルサイトの増幅特性を分離した。

そこで、逆解析から得られたモデルパラメーターを用いた順解析を視野に入れ、次に示す地震動パラメーターを定義する。図-6 に示すように、逆解析で用いたフーリエスペクトル強度 (FSI 値, Fourier Spectral Intensity) の 0.5Hz から 10.0Hz までの積分値で定義する。

$$FSI = \int_{0.5}^{10.0} F(f) df \quad (2)$$

計測震度と地震被害分布との相関が比較的によいことから、計測震度は有望な地震動パラメーターであると考えられる。そこで、この FSI 値と計測震度との相関について考察する。図-7 に Small-Titan の観測記録から得られた FSI 値と計測震度との関係を示す。この図からわかるように、FSI 値と計測震度には高い相関関係にあることが認められる。このときの回帰式を以下に示す。

$$I_{INSTR} = -0.224 + 1.873 \log(FSI) \quad (3)$$

同様のことを鳥取県西部地震、芸予地震の観測記録に対して適用してみた。図-8 に Small-Titan の観測記録に加え鳥取県西部地震、芸予地震の FSI 値と計測震度の関係を示す。Small-Titan の観測記録と同様

の傾向を示し、FSI 値と計測震度は高い相関関係にあることがわかる。

これらのことから、FSI 値を適切に推定できれば計測震度の予測が可能であることが示唆される。

2. H/V から近似したローカルサイト増幅強度

筆者らは逆解析から評価したローカルサイト特性と Small-Titan 観測点のジャストポイントで観測した常時微動の水平成分に対する上下成分のスペクトル比 (H/V) の関係に着目してきた。H/V は、地盤の卓越周期を推定する上では有効ではあるが、ピークレベルは符合しないことが指摘されているが、筆者らの研究では、卓越周期のみならずピークレベルに関しても一定の相関が認められる。地震計による観測には当然限界があり、また、極め細かな計測震度分布の予測を考えると、H/V には非常に魅力がある。

本研究では、H/V がローカルサイトの増幅度を近似するという考え方に立脚して、H/V を用いた計測震度の予測が可能かどうか検討してみる。

まず、逆解析から得られたローカルサイト増幅特性と H/V スペクトルから算出したローカルサイト増幅特性の比較を行う。ここでの LSE 値は、FSI 値との整合を考慮して 0.5Hz から 10.0Hz までの積分した値を比較する。

図-9 にその関係を示す。図-9 を見てわかるように、一定の正の相関が観察できるが、バラツキが大きいことも否定できない。比較しているデータ数が少ないこともあるが、ここでは H/V がどの程度計測震度の予測に対して有効であるか、また H/V から計測震度の概略予測が可能であるか、に主眼を置くことにする。

バラツキはあるが逆解析と H/V の関係は次のようになる。

$$INV = 7.959 + 0.786 \times H/V \quad (4)$$

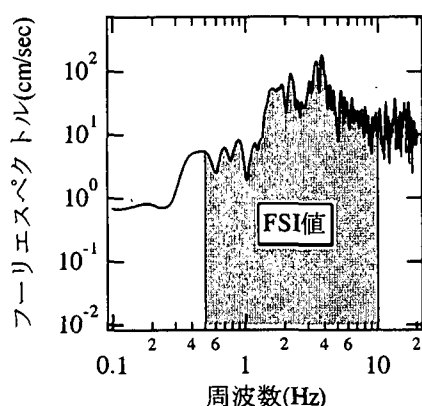


図-6 FSI 値算定の模式図

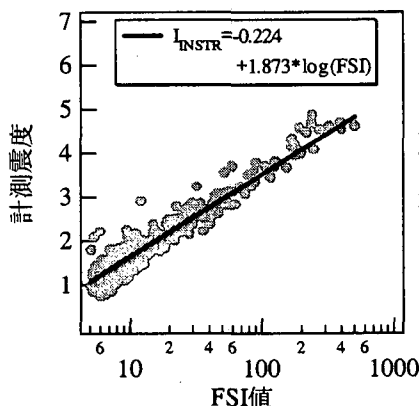


図-7 FSI 値と計測震度の関係
Small-Titan の観測記録

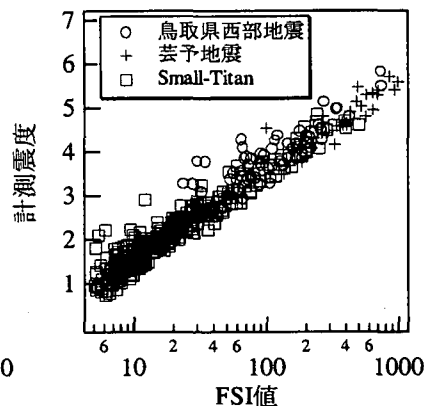


図-8 FSI 値と計測震度の関係
鳥取西部、芸予地震追加

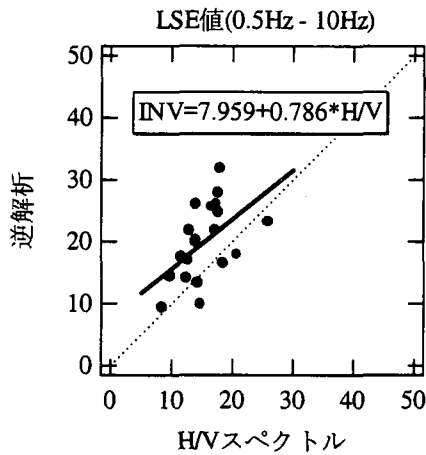


図-9 H/Vと逆解析の関係

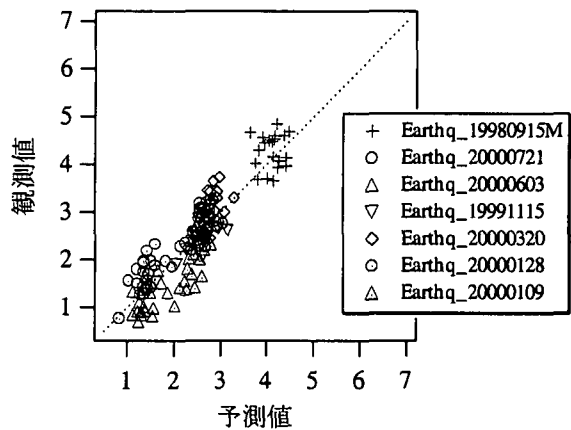


図-10 予測値と観測値の関係

3. H/Vを用いた計測震度の予測

H/Vを用いた計測震度の予測の基本的な考え方を次に示す。

- ①震源特性 $S_i(f)$ は、Boore⁴⁾ に従い、 ω^{-2} モデルに f_{max} を考慮しモデル化する。伝播経路特性 $P_{ij}(f)$ は逆解析から得られたパラメータを用いる。
- ② (1) 式のローカルサイト増幅度 $G_j(f)$ を (4) 式の関係からH/Vで置換する。
- ③ (1) 式を順解析し、 $O_{ij}(f)$ を計算し、FSI値を算出する。
- ④ (3) 式から計測震度を求める。

上記の手法で求めた予測値と観測記録から計算した観測値を比較したのが、図-10である。予測値と観測値は比較的合っており、それぞれの地震でバラツキはあるが、概ね ± 0.5 の範囲内で推定できることがわかる。

このような単純な手法ではあるが、計測震度に基づくサイスミックゾーニングを行う際には、H/Vの利用は有効かつ可能であると考えられる。とりわけ、地震計による観測記録を補間し、極め細かなゾーニングマップを作成する上で有効であることが示唆される。

4. まとめ

Small-Titanの観測記録を用いて計測震度と関連させ仙台市圏のサイスミックゾーニングを試みた。まとめると、次のようになる。

- ①計測震度に基づくゾーニングマップと地震被害分布は、ほぼ対応していて、計測震度と地震被害との相関性は高いことが示唆された。

- ②計測震度は、震源の影響を強く受ける直下型地震を除き、ローカルサイト増幅度 (LSE値) でほぼ説明できることがわかった。それゆえ、LSE値はサイスミックゾーニングに際し、有効な地震動パラメータであると考えられる。

- ③フーリエスペクトル強度 (Fourier Spectral Intensity) と計測震度は、高い相関関係にあることが知れた。

- ④逆解析から得られたパラメータとH/Vスペクトルを用いることで計測震度の予測が可能であることが示唆された。

謝辞：本研究を行うにあたり、防災科学技術研究所強震ネット (K-NET) の鳥取県西部地震と芸予地震の記録を使用させていただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 神山 眞, 莊司雄一, 松川忠司, 浅田秋江, 中居尚彦：オンラインアレー地震観測システムの構築とその記録の若干の考察, 土木学会論文集, No.688/I-54, pp. 283-298, 2001.
- 2) 莊司雄一, 神山 眞：Small-Titanの観測記録のインバージョンによるサイト特性の推定, 土木学会第55回年次学術講演会CD-ROM版概要集, 2000.
- 3) 日本建築学会東北支部：1998年9月15日仙台市近郊の直下型地震調査報告, pp. 26-33, 1999.
- 4) Boore, D.M., : Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, Bull. Seism. Soc. Am., 73, pp.1865-1894, 1983.