釧路地方気象台における強震動と弱震動に 対するサイト特性の評価

京都大学防災研究所* 山本みどり・岩田知孝・入倉孝次郎

Estimation of Site Effects for Strong and Weak Ground Motions at Kushiro Local Meteorological Observatory

Midori YAMAMOTO, Tomotaka IWATA and Kojiro IRIKURA

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University Gokasho, Uji, Kyoto 611, Japan

(Received May 24, 1995; Accepted September 12, 1995)

We propose a new method to estimate site amplification effects at specific sites, separating source and propagation-path effects. First, we calculate "specified spectra" from a given source and propagation-path effects, with a fixed site effect of 2.0. Then, we include effects of rupture process into the "specified spectra" using the empirical Green's function method. Site effects can be defined as a ratio of observed seismic spectra to the "specified spectra". We applied this method to the ground motion data during the 1993 Kushiro-oki earthquake as strong motions and those of other small earthquakes as weak motions in the south-east area of Hokkaido. We found nonlinear site effects at the station KSR, in Kushiro city, where the maximum of horizontal amplitude was 711.4cm/s^2 during the 1993 Kushiro-oki earthquake. The predominant frequency of the site effects became smaller and the amplification level of those at high frequencies became lower than those for the weak motions.

Key words: Site effect, Specified spectra, Stochastic simulation, Nonlinearity, Empirical Green's function method.

§ 1. はじめに

地震動が表層地盤によってどのような影響をうけるのかを検討することは強震動を予測するうえで大変重要である。場所毎に表層地盤による地震動の増幅度（以下ではサイト特性）を正確に求めることは、地震時の被害の軽減と直接結びつけることが出来、地震工学的見地からも意味のあることである。このサイト特性は、表層地盤の物理的特性の違いだけではなく、表層地盤に入射する地震動の強さによっても異なることが知られている [例えば、井合 (1993)]。つまり、サイト特性は地震動強さに対して非線形性を持っているのである。サイト特性を見積るには、表層地盤入射前と通過後の地震動を比較すればよい。それには鉛直アレー地震観測記録を用いて、地中と地表での記録を比較するのが直接的である [例えば、佐藤・他 (1993)]。しかし、鉛直アレーで観測している点は少なく、一般性を欠くので任意の場所でのサイト

特性を見積る際に適用することは出来ない。そこで、地表のみで得られた記録からサイト特性を抽出する方法が必要である。

今までに、地表の強震動記録からサイト特性を求めた研究例はいくつかある。コーダ波のスペクトル振幅を用いて、全観測点の平均値に対する各観測点での増幅度を見積り、それをサイト特性とみなす方法 [PHILLIPS and AKI (1986)] や、複数の地震における複数の観測点での観測スペクトルから震源特性及び Q 値と同時にサイト特性を分離する方法 [岩田・入倉 (1986)] 等があげられる。

一方、実際のデータから地盤の非線形性を指摘した研究例もあり、最近では翠川 (1993) によってまとめられている。例えば、時松・翠川 (1988) は、塩釜港での強震記録が振幅の増大とともにその卓越周期がのびる傾向があることから、地盤の非線形性の影響を示唆している。DARRAGH and SHAKAL (1991) は、Loma Prieta 地震や Coyote Lake 地震等のデータの岩盤の観測点と 2 種類

* 〒611 宇治市五ヶ庄

の堆積層上の観測点とのスペクトル比が、大きい地震動が入射した場合と小さい地震動が入射した場合とで異なること、その非線形性の有無が地盤の性質によることを指摘している。また、CHIN and AKI (1991) では、線形領域でのサイト特性、震源特性をそれぞれ見積り、距離減衰及び Q 値を考慮して、サイト特性が線形挙動を示した場合における地震動を推定し、それと観測記録とを比較して、Loma Prieta 地震において堆積層上にある観測点の地盤が非線形挙動をしたことを指摘している。この論文では、強震動の場合において、弱震動の場合よりも最大加速度値が減少することと卓越周波数が低周波数側へ移行することが地盤の非線形性の根拠として挙げられている。

強震動から解析的にサイト特性を抽出して地盤の非線形性を議論するだけではなく、理論的に非線形挙動を示す地盤を伝播する波形の計算手法についても数多くの研究がなされている。地盤の非線形性は応力-ひずみ関係が比例関係でなくなることによって起こる。その履歴曲線の非線形性を考慮して表層地盤のモデルを作り地表面での記録を計算する [例えば、SCHNABEL *et al.* (1972)]。このような計算を用いて地盤の非線形性が地震動に与える影響について議論している論文もある。それによると非線形性を考慮した場合の方が、しない場合よりも最大加速度値が減少すること及び卓越周波数が低下することが挙げられており、理論計算でも観測記録の解析で示されたものと同じ特徴が見えることが指摘されている [Yu *et al.* (1992)]。

1993 年 1 月 15 日、釧路沖地震 (マグニチュード 7.8) が起き、震央に近い釧路市では震度 6 を記録した。この地震で釧路気象台建物内に設置された気象庁 87 型強震計では最大水平加速度が N90E 成分で 922.2 cm/s^2 、同構内の地表に設置された建設省建築研究所の観測点では N63E 成分で 711.4 cm/s^2 という非常に大きな振幅が記録された。サイト特性の入射地震動強さ依存性を調べるため、強震動と弱震動それぞれのサイト特性を求めて比較する必要がある。従来の観測スペクトルからサイト特性を抽出する方法では、全ての観測点において震源特性が同一であるとみなせることを仮定しており、かつ、サイト特性はある基準観測点との比として求まる。しかしながら、釧路沖地震の断層の大きさは、約 $40 \text{ km} \times 60 \text{ km}$ [TAKEO *et al.* (1993)] であり、点震源とみなすことは出来ない。また、震源も 107 km と深いものの、釧路は震央のすぐ北であり、断層の真上に位置している。釧路に近い気象庁の観測点だけをみても、根室は断層のほぼ真東、網走はほぼ真北、浦河はほぼ真西にあり、ディレクティブティ等の震源の破壊過程の影響が全ての観測

点において異なると考えられる。また、観測点根室は先新第三紀の堆積岩上にあり (験震時報第 37 巻第 3 号、地質調査所地質図) 比較的硬質な地盤上にあると考えられる。しかし、釧路沖地震の場合では、根室でも 200 cm/s^2 以上の振幅を記録しており、根室のサイト特性が非線形挙動することが十分考えられる。強震動と弱震動のサイト特性を基準点との比をとって比較する場合に基準点となりえるのは、その観測点の両サイト特性とも線形挙動をしている場合である。よって、この釧路沖地震の場合では根室を基準点とすることは出来ない。

以上のようなことから、本研究では各観測点に対して震源特性と伝播経路特性を独立に定めた後、それらを観測記録から分離してサイト特性を決定する方法を提案する。更に断層が大きい地震の場合は震源の破壊過程の各観測点での影響を考慮した震源特性を評価した後サイト特性を求める。釧路沖地震において、非常に大きな振幅を記録した釧路気象台のサイト特性を求めるため、この方法を釧路沖地震とそれ以外の中小地震の記録に別々に適用し、強震時と弱震時のサイト特性の違いについて比較検討した。さらに比較のために北海道南東部に位置する 3 つの観測点についても同様の解析をおこなった。

§2. 方 法

本研究ではサイト特性を求める時の基準として、対象とする地震について、観測点が自由表面 (サイト特性が 2.0 である面) にあると仮定した場合に地表で得られると考えられる '基準スペクトル' というものを導入する。その基準スペクトルと観測スペクトルとの比をサイト特性と定義する。

ここでいう基準スペクトルとは、対象とする地震の地震モーメント、 $f_{\max}$ 、コーナー周波数を持ち、 ω^{-2} モデルに基づくスペクトル特性にサイト特性として 2.0、更に距離減衰と Q 値による減衰を考慮したものである。

はじめに、基準スペクトルの求め方を述べる。S 波主要部分の観測スペクトル $A(f)$ は周波数領域において

$$A(f) = CM_0 S(f) P(f) R^{-1} \exp\left(\frac{-\pi f R}{Q_\beta(f) \beta}\right) \quad (1)$$

と表現される [BOORE (1983)]。ここで f は周波数、 β は S 波速度、 R は震源距離、 M_0 は地震モーメントである。また、 $S(f)$ は ω^{-2} モデルに従う震源特性で、 f_c をコーナー周波数とすると、

$$S(f) = \frac{(2\pi f)^2}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \quad (2)$$

となる。更に高域遮断フィルター $P(f)$ は、

Fig. 1. (a) Schematic illustration of the Green's function method. The fault areas of the mainshock and a small event are defined to be $L \times W$ and $l \times w$, respectively. (b) $F_{ij}(t)$, a filtering function to adjust a difference in slip time function between the mainshock and the small event (after IRIKURA, 1986).

$$P(f) = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_{\max}}\right)^n} \quad (3)$$

と表され, BOORE (1983) に従い, $n=1$ としている. その他の係数である C は,

$$C = \frac{R_{\theta\theta} F_s P_R}{4\pi\rho\beta^3} \quad (4)$$

となり, $R_{\theta\theta}$ はラディエーションパターンの係数, F_s はサイト特性を表す係数, P_R はエネルギー分配の係数, ρ は密度である.

そして, この式に対象とする地震の地震モーメント, コーナー周波数, $f_{\max}$ を代入し, 別に求めた Q 値を考慮する. 更に,

$$F_s = 2.0$$

とすると, $A(f)$ は, 観測点が自由表面にある場合に得られると期待されるスペクトルである. このスペクトルを基準スペクトルとする. 対象とする地震の断層が小さく点震源とみなせる場合はディレクティビティなどの震源の破壊過程の影響は観測点毎に違いが小さいといえるので, この基準スペクトルと観測スペクトルとの比をそのままサイト特性とする.

次に, 対象とする地震の断層が大きく点震源とはみなせない場合を考える. この場合は, 経験的グリーン関数法 [IRIKURA (1986)] を用いることにより震源の破壊過程の各観測点における影響を考慮した基準スペクトルを求め, それと観測スペクトルとの比をサイト特性とする. 経験的グリーン関数法とは, 地震の相似則に基づいて, 小さい地震の地震波形を足し合わせて, 大きい地震の地震波形を合成する方法である. この合成法は大きい地震と小さい地震の間に (5), (6) 式のような相似則が成立することに基いている.

$$\frac{U_L}{U_S} = \frac{M_L}{M_S} = cN^3 \quad (5)$$

$$\frac{A_L}{A_S} = \left(\frac{M_L}{M_S}\right)^{1/3} = cN \quad (6)$$

ここに, U_L, U_S は大きい地震と小さい地震それぞれの低周波振幅スペクトルレベル, A_L, A_S はそれぞれの高周波振幅スペクトルレベル, M_L, M_S はそれぞれの地震モーメント, c は大きい地震と小さい地震のストレスドロップの比を表す.

このような関係が成り立つ2つの地震の断層の大きさの空間的關係は, Fig. 1(a) のようになる. はじめに時間的に小さい地震を大きい地震のライズタイムに合わせ足し合わせる. この時, 小地震に関して時間的に重みを一様に足すのではなく, Fig. 1(b) のような重みを付けられれば, 合成された波形も ω^{-2} モデルに基づくような波形が得られる. 次に断層面全体からの地震動の計算を行なう. KAKEHI and IRIKURA (1994) ではこの足し合わせをする時, それぞれの小断層について破壊開始時刻 (s_{ij}) と高周波発生重み (w_{ij}) をエンベロープインバージョンにより求めている. また, 断層の分割のしかたは, 大きい地震のストライク方向に NX 個, ディップ方向に NW 個, スリップ量の比として NT を考えると,

$$A(t) = c \sum_{i=1}^{NX} \sum_{j=1}^{NW} w_{ij} \frac{r}{r_{ij}} F_{ij}(t) * a(t) \quad (7)$$

$$F_{ij}(t) = \delta(t - t_{ij}) + \frac{1}{n'} \sum_{k=1}^{(NT-1)n'} \delta\left(t - t_{ij} - \frac{(k-1)\tau_L}{(NT-1)n'}\right) \quad (8)$$

$$t_{ij} = \frac{(r_{ij} - r_0)}{\beta} + s_{ij} \quad (9)$$

という式が成り立つ. ここで, $A(t), a(t)$ はそれぞれ大きい

い地震と小さい地震の波形， r は観測点における小さい地震の震源距離， r_{ij} は小断層 i と観測点 j までの距離， β はS波速度， τ_L は大きい地震のライズタイムを表す。尚， n' を導入するのは時間的に足し合わせることによって発生する周期性を解析対象周波数範囲外にするためである。

経験的グリーン関数法を用いて足し合わせをするには，小地震からの波形が必要である。そこで小地震を想定した基準スペクトルを持つ波形を確率的波形作成法[BOORE (1983)]を用いて求める。この方法はランダムノイズから任意のスペクトル振幅と継続時間をもつような波形を作り出すものである。まず，ランダムノイズに時間領域でウィンドウをかける。その結果得られるスペクトル振幅が基準スペクトルに平均的に一致するように周波数領域で変形し，それを逆フーリエ変換することによって時間領域での波形を求めている。逆フーリエ変換

した後，継続時間は初めに仮定したものと大きく変わらないことを目で確認した。

ランダムノイズにかけるウィンドウ $w(t)$ は，BOORE (1983) より，

$$w(t)=a\tau^b\exp(-ct)H(t) \tag{10}$$

$$a=\left\{\frac{(2c)^{2b}+1}{\Gamma(2b+1)}\right\}^{1/2} \tag{11}$$

$$b=\frac{-\varepsilon\ln(\eta)}{1+\varepsilon(\ln(\varepsilon)-1)} \tag{12}$$

$$c=\frac{b}{\varepsilon}T_d \tag{13}$$

という式で求めている。ここで， $H(t)$ はステップ関数， $\Gamma(t)$ はガンマ関数をそれぞれ表し， $\eta=0.05$ ， $\varepsilon=0.2$ としている。

また， T_d は継続時間であり，これもBOORE (1983)に従い，

$$T_d=\frac{2}{f_c} \tag{14}$$

を用いている。

このようにして確率的に求めた波形を小断層からの波とする。これらを大きい地震の破壊過程に合わせて経験的グリーン関数法を用いて足し合わせると，サイト特性が2.0であるような大地震の波形が求められる。このようにして合成された波形のスペクトルを大きい地震の基準スペクトルとする。

§3. 解 析

強震動のサイト特性を求めるのに釧路沖地震を用いるため，弱震動のサイト特性を求めるのには，釧路沖地震と震央が比較的近いマグニチュード5～6の4個の中小地震を用いることにした (Table 1 の no. 1～4)。深さに関しても，釧路沖地震が107 kmと深発であったので，

Fig. 2. Locations of observation stations (▲) and epicenters (■) analysed in this study.

Table 1. List of magnitude, depth and values of maximum horizontal acceleration at each site of all earthquakes used in this study.

no.	event	magnitude <JMA>	depth (km)	max. of acc. (cm/s/s)				
				KSR	URA	NEM	ABJ	KUS
1	91/10/18	5.3	59.7	44.3	1.47	21.4	2.93	41.8
2	91/10/25	6.1	104.9	103.1	11.7	5.14	1.59	105.7
3	91/11/27	6.4	63.7	25.4	194.7	2.57	3.14	21.1
4	92/03/31	5.3	45.5	13.3	2.96	33.1	1.85	18.7
5	93/01/15	7.8	107.9	726.0	265.6	216.4	21.3	922.2
6	93/02/04	4.9	95.0	77.0	2.85	1.47		95.8

Fig. 3. Seismograms and acceleration spectra observed at the KSR station for all events, (a) N63 E-component and (b) N153E-component, respectively. Each line under seismograms indicates a part of the record used for the Fourier amplitude spectrum.

中小地震についても深さ 50~100 km の比較的深いものを選んだ。観測点は鉾路 (KSR), 根室 (NEM), 浦河 (URA), 網走 (ABJ) の 4 点で, KSR では, 鉾路地方気象台構内の地表に設置されている建設省建築研究所鉾路観測点 (SMAC-MD 型) の記録を用い, その他の点では, JMA 87 型の記録を用いた。観測点と震央の位置を Fig. 2 に示し, 用いた地震のリストを Table 1 に記す。観測スペクトルは加速度記録の S 波主要部分の水平 2 成分の二乗和の平方根とした。S 波主要部分全体を解析するため, 鉾路沖地震では S 波到達時刻より 20 秒間, その他の中小地震では 10 秒間を解析区間とした。この解析区間をとる時, 全てのデータに前後 1 秒ずつのサイン型のウィンドウをかけた。また, 全ての地震で SN 比が十分ある 1.0~10.0 Hz の周波数帯を解析の対象とした。それぞれの地震の KSR における波形と解析区間およびスペクトルを Fig. 3 に示す。

はじめに上記の 4 個の中小地震の観測スペクトルからこの地域における Q 値を分離する。その方法は岩田・入倉 (1986) に基づいて次に示される。S 波主要部分の

観測スペクトル O_j^i は

$$O_j^i(f) = S^i(f) G_j(f) (R_j^i)^{-1} \exp\left(-\frac{\pi f R_j^i}{\beta Q_\beta(f)}\right) \quad (15)$$

と表現される。ここで, O_j^i は観測点 j における地震 i での S 波主要部分の観測スペクトル特性, S^i は地震 i での震源スペクトル特性, G_j は観測点 j の観測点近傍のスペクトル特性, R_j^i は観測点 j における地震 i での震源距離, β は S 波速度である。

この $i \times j$ 個の式の両辺の対数をとって線形化すると

$$\log O_j^i = \log S^i + \log G_j - \log R_j^i - \left(\frac{\pi f R_j^i}{\beta Q_\beta}\right) \log e \quad (16)$$

になる。これらの式に対して, 最小二乗法を用いて, S^i, G_j, Q_β を分離する。この時, 拘束条件として, 比較的硬質な地盤上にある観測点 NEM のサイト特性を 2.0 と仮定して計算している。ここで得られる他の地点のサイト特性は相対的な値となる。 Q 値を分離した結果, 2.0~10.0 Hz で安定な解が得られたので, 解析区間を 1.0 Hz まで広げるため, 2.0~10.0 Hz で得られた解を直線近似し, 1.0 Hz までその直線をのばして, 1.0~10.0 Hz における Q 値を求めた。その直線の式は

$$Q_\beta(f) = 83.3 \times f^{1.0} \quad (17)$$

である。本研究で求められた Q 値を Fig. 4 に示す。次に, 基準スペクトルの求め方を記す。まず, 各地震におけるパラメーターの決め方を述べる。コーナー周波数は観測記録の変位スペクトルから直接目を読み取った。地震モーメントは, P.D.E に記載されていた 1991 年 11 月 27 日の地震のモーメント値を基準とし, 他の地震については, 基準の地震との変位スペクトルのフラットレベルの比から推定した。 $f_{\max}$ は, FACCIOLO (1986) に基づき,

$$f_{\max} = 7.31 \times 10^3 \times M_0^{-0.12} \quad (18)$$

という式より求めている。その他の係数についてであるが, ラディエーションパターンの係数として 0.64 [(BOORE and BOATWRIGHT (1984)], エネルギー分配の係数としては 1.0, 密度は 2.7 g/cm³, S 波速度は 4.28 km/s を用いた。

Fig. 4. Q^{-1} -values for S-wave determined by the inversion in this study. Vertical bars are standard deviation, and solid line is the best fitting line.

Table 2. List of seismic moment, corner frequency and $f_{\max}$ of each event determined in this study.

no.	event	seismic moment (10^{17} Nm)	corner frequency (Hz)	fmax (Hz)
2	91/10/25	4.38	1.05	8.07
3	91/11/27	71.0	0.41	5.78
4	92/03/31	2.20	0.92	8.77
6	93/02/04	0.51	2.0	10.44

Fig. 5. (a) Location of fault plane of the 1993 Kushiro-oki earthquake. (b) The meshes of the acceleration intensity and the rupture time (Solid line). The size of each subfault used in the empirical Green's function method (Dotted line). Starting point of the rupture (★) (after KAKEHI & IRIKURA, 1994).

Fig. 6. Distribution of acceleration intensity (a) and rupture times (sec) (b) obtained by KAKEHI and IRIKURA (1994).

Q 値を分離した 4 個の中小地震のうち、1991 年 10 月 18 日の地震に関しては、コーナー周波数と変位スペクトルのフラットレベルを読むことが出来なかったため、弱震動のサイト特性を求めるのには使用しなかった。よって、3 個の地震に関して、基準スペクトルと観測スペクトルとの比を求め、その相乗平均を弱震動のサイト特性とし、3 個の地震に関する標準偏差を弱震動のサイト特性のそれらとした。Table 2 に読み取ったパラメーターを記す。

次に、釧路沖地震のサイト特性の求め方について述べる。釧路沖地震の断層モデルは、KAKEHI and IRIKURA (1994) に従った。ストライクは 157 度、ディップは 11 度であり、大きさはストライクの方に 37 km、ディップの方に 58 km である。その他のパラメーターは、 $NX=8$, $NW=12$, $NT=8$, $c=12$, $\tau_L=4.8s$, $n'=80$ と求められており、本研究でもこの値を用いている。断層の

位置を Fig. 5(a) に、小断層への分割のしかたとエンベロープインバージョンでのメッシュの切り方を Fig. 5 (b) にそれぞれ示す。Fig. 6 は高周波発生の重みと破壊開始時刻である。また、小断層からの波形として KAKEHI and IRIKURA (1994) では釧路沖地震の最大余震である 1993 年 2 月 4 日の記録を用いている。本研究では、この地震を想定した基準スペクトルと平均的に一致するスペクトルを持つような波形を確率的波形作成法 [BOORE (1983)] で作り、これを経験的グリーン関数としている。この地震の基準スペクトルは弱震動の場合と全く同様に求めている。確率的波形作成法でランダムノイズを発生させる時に用いたランダム変数によって波形が異なり、一意には決まらない。そこで、ランダム変数を変えたランダムノイズを 20 個作り、そのうち基準スペクトルによく一致しているものを目視で判断し、5 個の波形を選んだ。選ばれた 5 個の波形それぞれを経験的グ

Fig. 7. Site effects for the 1993 Kushiro-oki earthquake (○) and other earthquakes (●) at the stations (a) KSR, (b) URA, (c) NEM and (d) ABJ.

リー関数として足し合わせ、釧路沖地震時のサイト特性が2.0であるような波形を5波作った。それらの5個の波形のスペクトルの相乗平均を釧路沖地震における基準スペクトルとし、観測スペクトルとの比を強震動のサイト特性とした。その5個の波形の標準偏差を強震動のサイト特性のそれらとした。

§4. 結 果

釧路沖地震による強震動時と中小地震による弱震動時のサイト特性とそれぞれの標準偏差をFig.7に示す。解

析区間を1.0~10.0 Hzとしていたが、1.0~2.0 Hzにおいて信頼できる結果が得られなかったので、2.0~10.0 Hzでの結果を示す。釧路沖地震時に21.0 cm/s²の最大水平加速度振幅を記録したABJ (Fig. 7(d))では、弱震動のサイト特性のばらつきが大きく、強震動のサイト特性はそれらの標準偏差内であり、両サイト特性の間に有為な差は見られない。この弱震動のサイト特性のばらつきが大きいのは、地震数が少ないことと、コーナー周波数とQ値の見積りが不正確であったことが理由だと考えられる。また216.4 cm/s²を記録したNEM (Fig. 7(c))

Fig. 8. Comparison between site effects using weak motions (○) and those determined by the inversion at the KSR station (●). The latter is obtained as the ratio to the NEM station. Vertical bars show standard deviations of the site effects by the inversion.

でも、 265.6 cm/s^2 を記録した URA (Fig. 7(b)) でも同様に標準偏差を越えるほどの大きな差は見られなかった。一方、 711.4 cm/s^2 を記録した KSR (Fig. 7(a)) では低周波数側では標準偏差内にあるが、高周波数側で両サイト特性の間に有為な差が見られ、地盤が次のような非線型挙動を示したことがわかった。KSR では、強震動のサイト特性が弱震動のサイト特性より、4.0 Hz 以上の高周波で有意に小さい。また、弱震動のサイト特性のピークが 4.5 Hz、強震動では 2.5 Hz と低周波数側にずれている。Fig. 8 では、KSR に関して弱震動のサイト特性と Q 値と同時に分離されたサイト特性を比較している。 Q 値と同時に分離されたサイト特性が NEM のサイト特性を 2.0 と固定した相対値であることを考慮し、両サイト特性を正確に比較するため、 Q 値と同時に分離されたものを NEM のサイト特性で補正している。両サイト特性の間に有意な差はなく、点震源の場合では従来の方法と整合性があるといえる。飛田・杉村 (1994) は一次元地盤非線形モデルで釧路気象台における釧路沖地震時の波形を計算している。釧路気象台敷地内のボーリング調査の結果をもとに、地下 17.24 m に S 波速度 650 m/s の基盤層（浦幌層群）があるとして、その上を 3 層の堆積層に分けた非線形モデルを作り、釧路沖地震を想定した入射波を入れた時と、小振幅の入射波を入れて線形応答

Fig. 9. Site effects for the 1993 Kushiro-oki earthquake (○) and other earthquakes (●) at the KUS station. Bar lines indicate standard deviations.

した時と両方において地表面での波形とそれぞれの層での波形を計算している。その両方の入射波に対して基盤層での波形と地表面での波形の加速度スペクトルの比をとり、比較している。それによると固有周期が小振幅の波を入力した時に比べて 0.25 秒から 0.35 秒にずれることが指摘されており、更に、0.25 秒以下で概ね小振幅の波を入力した時の応答より釧路沖地震時の応答の方が小さくなっている。これも本研究の結果と整合性があるといえる。

§ 5. JMA87 型の記録との比較

今まで釧路の記録として建設省建築研究所の記録 (KSR) を用いてきた。ここで、この KSR と同じ釧路地方気象台構内の建物 1 階に設置された JMA87 型の記録 (KUS) に同じ解析を試みて、結果を比較した。両観測点は 20 m 程しか離れていないので KUS でも KSR の場合と同じ基準スペクトルを用いた。

Fig. 9 に KUS における釧路沖地震時のサイト特性と弱震動のサイト特性を示す。KSR では 4.0 Hz 以上の高周波において強震動のサイト特性のほうが小さくなるという差がみられたが、KUS ではみられない。卓越周波数も弱震動で 3.5 Hz、強震動で 2.5 Hz と低下している。川瀬 (1994) は北海道内 10 点の気象台のサイト特性を地震毎の震源特性、幾何減衰を考慮し、全観測点の平均的なサイト特性を持つスペクトル特性と観測スペクトルとの比として求めている。これによると KUS では釧路沖地震以外でのサイト特性の卓越周波数が 3.6 Hz、釧路沖地震では 2.8 Hz と低下していることを示し、地盤や

Fig. 10. Site effects at the KSR station (□) and the KUS station (■) for the 1993 Kushiro-oki earthquake (a) and for other earthquakes (b). Bar lines indicate standard deviations.

建屋応答の非線形化の可能性を指摘している。

また、Fig. 10(a) と Fig. 10(b) がそれぞれ KSR と KUS の弱震動のサイト特性と、釧路沖地震時のサイト特性である。これらの図から弱震動では、5.0 Hz 以上の高周波側で KSR のほうが大きく、強震動では、2.0~3.0 Hz で KUS のほうが大きくなっていることがわかる。KSR と KUS の違いがそのまま建物によるものとは言えないが、この違いを地盤建物系の相互作用計算によって説明を試みている研究がある。壇 (1994) は、釧路地方気象台地下 20 m での基盤波を求め、地盤の非線形応答解析により地表での波形を計算し、相互作用モデルの入力として、中小地震と釧路沖地震における KUS と KSR での波形を求めて比較している。中小地震時と釧路沖地震時の KSR と KUS の差は本研究とほぼ同じである。壇 (1994) によると中小地震に関しては、KSR と KUS の差はこの計算で説明出来ると結論している。また、釧路沖地震に関してはスペクトル振幅は計算と観測とで一致していないが、卓越周期のずれは再現出来たとしている。従って本研究で推定した KSR におけるサイト特性は主として表層地盤の地震動応答であるのに対し、KUS におけるサイト特性は表層地盤のみでなく構造物の影響も強く受けていると考えられる。

§ 6. 結 論

サイト特性の入射地震動強さ依存性を求めることを目

的として、サイト特性の絶対値を観測点毎に見積る方法を提案した。その方法とは、地震毎に独立の方法で評価した震源特性と伝播経路特性に加えて各観測点のサイト特性が 2.0 として得られる基準スペクトルと観測スペクトルとの比をサイト特性と定義する。更に、断層を点震源とみなせない場合は経験的グリーン関数法を用いて震源の破壊過程を考慮して基準スペクトルを求め、同様の方法でサイト特性を想定する。この方法を、断層が大きくかつ強震動を与えた場合として 1993 年釧路沖地震に、断層が小さく弱震動を与えた場合として北海道南部で起こった 3 個の中小地震にそれぞれ適用し、釧路気象台を含む北海道南東部の観測点における弱震動時と強震動時でのサイト特性をそれぞれ求めた。

その結果、釧路沖地震の際に 711.4 cm/s^2 の最大水平加速度を記録した KSR では、両サイト特性の間に次のような違いがあることがわかった。

1. 高周波側で強震動時のサイト特性の方が小さくなる。
2. サイト特性のピークが強震動時の方が低周波数側にずれる。

一方、NEM, ABJ, URA (釧路沖地震時の最大水平加速度がそれぞれ $216.4, 21.0, 265.6 \text{ cm/s}^2$) では両サイト特性の間に明確な違いは見られなかった。また、釧路沖地震の際に 922.2 cm/s^2 記録した KUS のサイト特性の間にも有意な差が見られた。この KUS の非線形性には、

建物の影響があらわれている可能性がある。

謝 辞

気象庁 87 型電磁式強震計データ及び建設省建築研究所釧路観測点のデータを使わせて頂きました。記して感謝致します。

本研究を進めるにあたって、清水建設の川瀬博氏には非常に有益な助言を頂き、京都大学原子炉実験所の釜江克宏氏には、確率的波形作成法及び経験的グリーン関数法に関して議論して頂きました。心より感謝を申し上げます。

文 献

- BOORE, D. M., 1983, Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **73**, 1865-1894.
- BOORE, D. M. and J. BOATWRIGHT, 1984, Average body-wave radiation coefficients, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **74**, 1615-1621.
- CHIN, B.-H. and K. AKI, 1991, Simultaneous study of the source, path, and site effects on strong ground motion during the 1989 Loma Prieta earthquake: A preliminary result on pervasive nonlinear site effects, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **81**, 1859-1884.
- 壇 一男, 1994, 釧路地方気象台建物の非線形相互作用解析, 1993 年釧路沖地震に関する総合シンポジウム, 85-92.
- DARRGH, R. B. and A. F. SHAKAL, 1991, The site response of two rock and soil station pairs to strong and weak ground motion, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **81**, 1885-1899.
- FACCIOLI, E., 1986, A study of strong motions from Italy and Yugoslavia in terms of gross source properties, *Geophys. Monograph*, 37, Maurice Ewing, AGU, **6**, 297-309.
- 井合 進, 1993, 表層地質の非線形性について—最近の研究から—, 平成 4 年度文部省科学研究費補助金総合研究 (A) 研究成果報告書—地震動に与える表層地質の影響に関する総合的研究, 254-267.
- IRIKURA, K., 1986, Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, *Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp.*, 151-156.
- 岩田知孝・入倉孝次郎, 1986, 観測された地震波から、震源特性・伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み, *地震 2*, **39**, 579-593.
- KAKEHI, Y. and K. IRIKURA, 1994, Estimation of high frequency wave radiation areas on the fault plane by the envelope inversion of acceleration seismograms, submitted to *Geophysical Journal International*.
- 川瀬 博, 1994, 北海道内の各地気象台における強震動特性—1993 年釧路沖地震での釧路気象台の記録に着目して, *日本建築学会構造系論文集*, **459**, 125-132.
- 気象庁地震課, 1972, 気象庁地震観測官署の地盤調査, *験震時報*, 第 37 巻第 3 号, 113-115.
- 翠川三郎, 1993, 強震時にみられる地盤特性の非線形性, *地震 2*, **46**, 207-216.
- PHILLIPS, W. S. and K. AKI, 1986, Site amplification of coda waves from local earthquakes in central California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **76**, 627-648.
- 佐藤智美・佐藤俊明・川瀬 博, 1993, 堆積盆地における S 波伝播の識別と土の非線形性の同定—足柄平野久野地区の鉛直アレーで観測された弱震動と強震動の分析—, *日本建築学会構造系論文報告集*, **449**, 55-68.
- SCHNABEL, P. B., J. LYSMER and H. B. SEED, 1972, A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, College of Engineering University of California.
- TAKEO, M., S. IDE and Y. YOSHIDA, 1993, The 1993 Kushiro-oki, Japan, earthquake: A high stress-drop event in a subductive slab, *Geophys. Res. Lett.*, **20**, 2607-2610.
- 地質調査所, 1:500000 活構造図釧路昭和 60 年 3 月 20 日発行.
- 飛田 潤・杉村義広, 1994, 釧路地方気象台および釧路市内の地震動特性における表層地盤の影響, 1993 年釧路沖地震に関する総合シンポジウム, 59-64.
- 時松孝次・翠川三郎, 1988, 地表で観測された強震記録から推定した表層地盤の非線形性状, *日本建築学会論文報告集*, **388**, 131-137.
- U.S.G.S., 1991, Preliminary Determination of Epicenters, no. 48-91, Dec. 19.
- YU, G., J. G. ANDERSON and R. SIDDHARTHAN, 1992, On the characteristics of nonlinear soil response, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **83**, 218-244.