

# サイト増幅スペクトルに基づく 震度増加量の推定法

鶴来雅人<sup>1</sup>・澤田純男<sup>2</sup>・宮島昌克<sup>3</sup>・北浦 勝<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 正会員 博(工) 財団法人 地域 地盤 環境 研究所 (〒550-0012 大阪市西区立売堀 4-3-2)  
E-Mail:turugi@geor.or.jp

<sup>2</sup> 正会員 博(工) 京都大学助教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

<sup>3</sup> 正会員 工博 金沢大学教授 工学部 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

<sup>4</sup> フェロー 工博 金沢大学教授 工学部 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

震度予測を合理的に行なうためには、地震動の構成要素である震源特性・伝播経路特性・サイト特性が震度を与える影響を把握する必要がある。そこで本研究では、サイト増幅スペクトルに基づく震度の増加量を推定する手法の開発を目的に、数値解析的検討、観測記録を用いた経験的検討およびアンケート震度調査結果に基づく検討を行った。これらの検討結果を踏まえ総合的に判断した結果、サイト増幅スペクトルの0.4~7.5Hzの範囲の平均値と震度増加量の相関が良いことが明らかとなった。さらに、この結果に基づいて、この平均値から震度増加量を推定する式を提案した。得られた成果は将来の合理的な震度予測手法の開発に繋がるものである。

**Key Words :** seismic intensity, site amplification spectrum, earthquake ground response, attenuation equation, questionnaire survey

## 1. はじめに

地震動が震源特性・伝播経路特性・サイト特性で構成されていることは良く知られている。強震動予測にあたっては、これらの総合特性として観測された地震動の統計的な解析からその大きさを経験的に得ようとする方法と、各特性を個別に評価して行なう方法(その主たるものに断層モデルに基づく強震動予測手法)がある。これらの強震動予測手法の現状と将来展望については香川ら<sup>1)</sup>に詳細にまとめられている。前者の方法としては最大加速度あるいは最大速度の距離減衰式<sup>(例えば2)~4)</sup>や応答スペクトルの距離減衰式<sup>(例えば5)</sup>による方法がある。この方法は既往地震による平均的な地震動強度を見るには便利な方法である。しかし、固有の震源特性・伝播経路特性・サイト特性が反映されないため、兵庫県南部地震における「震災の帯」のような現象を説明することはできない。これに対して後者の方法は多くのパラメータを必要とし、またそれを適切に設定するのはやや困難であるが、固有の震源特性・伝播経路特

性・サイト特性を考慮した合理的な方法である。昨今ではこの方法の工学的適用を試みる研究が行われるようになり<sup>(例えば6)</sup>、特に兵庫県南部地震以降は実務にも適用されるようになってきた<sup>7), 8)</sup>。また、社団法人土木学会の土木構造物の耐震基準等に関する第二次提言<sup>9)</sup>では、「内陸活断層によるレベル2地震動は、活断層を同定するとともに、その震源メカニズムを想定することにより定めることを基本とする。」とされており、今後、特に重要構造物の耐震設計用入力地震動の作成などに際しては、断層モデルに基づく方法を用いることが主流となるものと思われる。

重要構造物の耐震設計用入力地震動を作成することのほか、行政の被害想定や地域防災計画の立案などに対しては、震度を予測することも重要なテーマである。従来行われてきた震度予測においては距離減衰式を基本とするものが多い。震度の距離減衰式については、Kawasumiによる先駆的な研究<sup>10)</sup>やこれにサイト特性に関わる補正項を加えた式<sup>11), 12)</sup>などがある。松岡・翠川<sup>13)</sup>は第三紀ないしそれ以前の

地盤の丘陵地(せん断波速度が640m/s程度)を対象とした最大速度の距離減衰式に、深さ30mまでの地盤の平均せん断波速度から得られる最大速度の増幅度を考慮し、さらに最大速度と震度の関係を用いて震度分布を求めている。

これらの距離減衰式は統計解析に基づいており、固有の震源特性・固有の伝播経路特性・固有のサイト特性を考慮したものではない。一方、大阪府では地震被害想定にあたり、府域に影響を及ぼす危険性がある断層として5つの断層を抽出し、断層モデルに基づく強震動予測手法を用いて地震動シミュレーションを行ない、得られた波形より震度を算出しその分布を求めている<sup>14)</sup>。この大阪府の検討は固有の各特性を考慮したものであるが、多大な労力を要すること、対象地域によっては各特性を設定することが困難な場合があること、といった短所がある。

そこで、固有の震源特性・伝播経路特性・サイト特性を考慮して合理的かつ比較的簡便に震度を予測する手法の開発が望まれる。この手法を開発するためには、

- ・地震規模や断層破壊伝播の指向性(Directivity)といった震源特性および伝播経路特性から地震基盤(せん断波速度が3.5km/s程度以上)での震度を予測する手法
- ・サイト増幅特性による震度の増加量を予測する手法

を開発する必要がある。

本研究では後者のサイト増幅特性による震度の増加量を予測する手法の開発を目的とした検討を行なう。サイト増幅特性と震度増加量の関係を検討した事例としては、アンケート震度調査結果に基づくもの<sup>12)、15)</sup>や国土数値情報を利用したもの<sup>16)</sup>がある。これらの研究では表層地質に着目し、表層地質毎の平均的な震度増加量を検討している。本研究では、サイトの増幅スペクトルと震度増加量の関係に着目し、地震基盤に対する震度増加量を推定する手法について検討する。

まず、検討対象地点において観測記録から得られた各サイトの増幅スペクトルを示す。続いて、サイト増幅スペクトルと震度増加量の関係を数値解析的手法および観測記録を用いた経験的な手法を用いて検討する。さらに、アンケート震度調査により得られたサイト増幅特性を示す指標とサイト増幅スペクトルの関係について検討を行なう。最後にこれらの検討結果を踏まえ、サイト増幅特性による震度の増加量の推定手法を提案する。

## 2. 大阪府域のサイト増幅スペクトル

鶴来ら<sup>17)</sup>は、関西地域の地震観測点を対象に観測記録から震源特性および伝播経路特性を取り除く方法<sup>18)</sup>を用いて、地震基盤(せん断波速度が3.5km/s程度以上)に対するサイトの増幅スペクトルを求めている。解析対象とした地震観測点は関西地震観測研究協議会(以下「関震協ネット」と称す)および独立行政法人・防災科学技術研究所による強震ネット<sup>19)</sup>(以下、「K-Net」と称す)の観測点である。このうち本研究に用いる大阪府域の19観測点(関震協ネットが10観測点、K-Netが9観測点)の位置を図-1に示す。なお、OSK006(K-Net)では解析可能な地震数が1地震しかないため除外されている。

得られた地震基盤に対する増幅スペクトルを図-2に示す。図中、太線が平均値、細線が平均値±標準偏差である。各図左上には観測点名を、その右隣には解析に用いた地震数を示した。観測記録のSN比から、結果の有効周波数範囲は関震協ネットでは0.1ないし0.2~10Hz、K-Netではほぼ0.4~10Hzであり、この周波数範囲のみを示した。得られた結果は対象地点の地盤状況と整合し、また1次元重複反射理論による増幅特性とも概ね調和的であった<sup>17)</sup>。

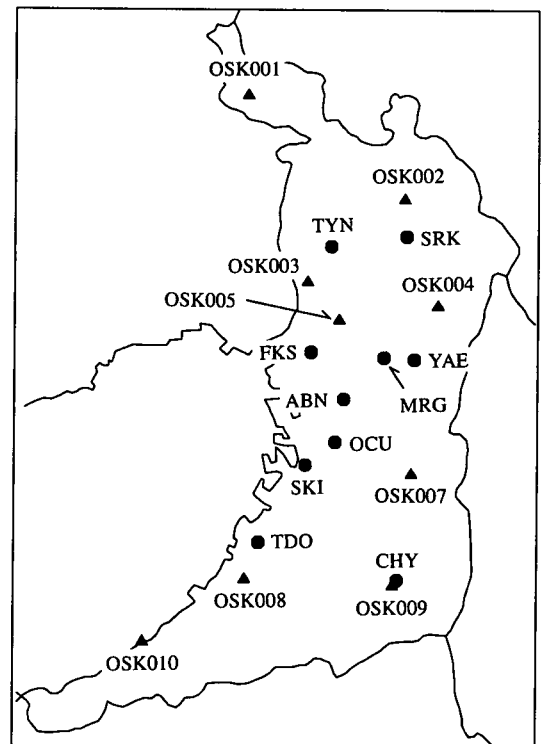


図-1 検討対象地点の位置

(●: 関震協ネット, ▲: K-Net)

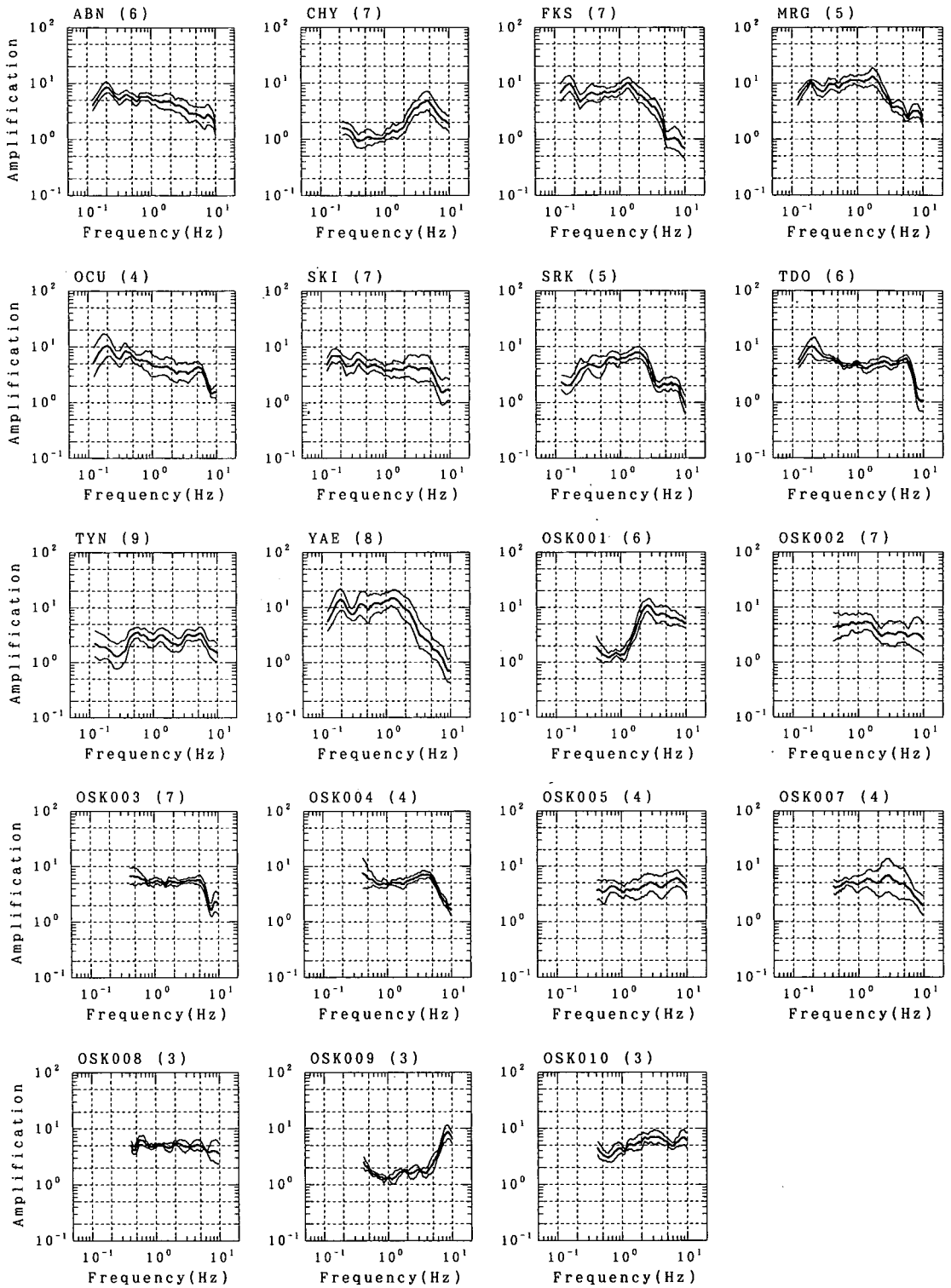


図-2 検討対象地点のサイト増幅スペクトル (太線: 平均値, 細線: 平均値±標準偏差)

### 3. 震度増加量推定式

計測震度  $I$  は、加速度観測波形にフィルター処理やベクトル合成処理を施した後、最終的に Kawasumi の考え方<sup>10)</sup>に基づいて次式より算出される<sup>20)</sup>。

$$I = 2\log(\text{Max}_{0.3}[a_0(t)]) + 0.94 \quad (1)$$

ここに、 $a_0(t)$ はフィルター処理やベクトル合成を施した後の加速度時刻歴、 $\text{Max}_{0.3}[\cdot]$ は継続時間0.3秒を考慮した最大振幅<sup>20)</sup>を表す。つまり、計測震度は基本的に「波形の振幅が10倍大きくなると震度が2大きくなる」性質を持つ。

ここでサイト増幅特性による震度の増加量を考える。サイトに入射する地震動の複素フーリエスペクトルを  $S(f)$ 、サイトの複素増幅スペクトルを  $G(f)$  とすると、入射波による計測震度  $I_0$  および地表面における計測震度  $I_1$  はそれぞれ、

$$I_0 = 2\log\left(\text{Max}_{0.3}\left[\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} H(f)S(f)e^{2\pi ift} df\right]\right) + 0.94 \quad (2)$$

$$I_1 = 2\log\left(\text{Max}_{0.3}\left[\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} H(f)G(f)S(f)e^{2\pi ift} df\right]\right) + 0.94 \quad (3)$$

となる。ここに、 $H(f)$ は計測震度を求める際に用いられるフィルター、 $i$ は虚数単位を表す。ただし、ベクトル合成は考慮していない。 $I_1$ を  $G(f)$ から求められるスカラー量  $G_A$ を用いて近似する。すなわち、

$$I_1 \approx 2\log\left(\text{Max}_{0.3}\left[G_A \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} H(f)S(f)e^{2\pi ift} df\right]\right) + 0.94 \quad (4)$$

と考える。演算  $\text{Max}_{0.3}[\cdot]$ の非線形性が強くないと仮定すれば、サイト増幅特性による震度増加量  $dl$  とスカラー量  $G_A$ の間には

$$dl = I_1 - I_0 \approx 2\log G_A \quad (5)$$

なる関係が成立することが期待される。ここで、 $G_A$ として、 $G(f)$ のある周波数範囲 ( $f_1 \leq f \leq f_2$ ) における絶対値の平均を用いる [式(6)]。

$$G_A = \frac{1}{f_2 - f_1} \int_{f_1}^{f_2} |G(f)| df \quad (6)$$

本研究では、数値解析的検討、観測記録を用いた経験的検討、アンケート震度調査に基づく検討により式(5)の震度増加量  $dl$  を評価する。一方、 $G_A$ については着目する周波数範囲により数多くの値が得られるが、このうち式(5)の関係を最もよく説明する周波数範囲を決定する。

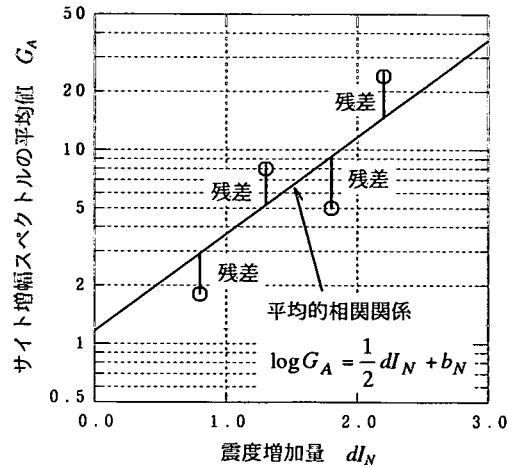


図-3 サイト増幅スペクトルの平均値と震度増加量の関係の一例

### 4. 数値解析的検討

#### (1) 解析概要

本章では、数値解析を行うことにより式(4)のような近似が可能かどうかについて検討し、増幅スペクトルの平均を求める際の最適な周波数範囲を検討する。

サイト増幅特性による震度増加量を  $dl_N$  とすれば、式(5)より

$$\log G_A = \frac{1}{2} dl_N + b_N \quad (7)$$

なる関係が得られることが期待できる。ここに、 $b_N$ は本来ゼロであるべきであるが、近似精度の指標の一つとして、ここでは未知数として扱う。 $dl_N$ は地表面における計測震度  $I_1$  と地震基盤への入射波の計測震度  $I_0$  の差であり、 $I_1$ は入射波のフーリエスペクトルに増幅スペクトル  $|G(f)|$  を乗じ、これを逆変換して得られる地表面波から求める。

式(6)の着目周波数範囲  $f_1, f_2$  を仮定すれば、検討対象地点  $k$  に対して  $G_A(k)$  と  $dl_N(k)$  の組が得られるので、次式に示す残差の平方和；

$$D_N = \sum_{k=1}^n \left[ \log G_A(k) - \left\{ \frac{1}{2} dl_N(k) + b_N \right\} \right]^2 \quad (8)$$

を最小にする係数  $b_N$  が求まり、この時の  $D_N$  の値が得られる (図-3)。ここに、

$n$  : 検討対象地点数

$G_A(k)$  : 地点  $k$  のサイト増幅スペクトルのある周波数範囲における平均値 [式(6)]

$dl_N(k)$  : 地点  $k$  における震度増加量

である。式(6)の着目周波数範囲  $f_1, f_2$  を変化させて

上述の演算を行ない、 $D_N$ が最も小さくなる周波数範囲を求める。

検討対象地点は図-1に示した19観測点であり、そのサイト増幅スペクトルは図-2に示す特性である。本研究ではサイト増幅スペクトルと震度増加量の平均的な関係を求めることを主眼としており、 $|G(f)|$ としてその平均値(図-2中太線)を用いた。

サイト増幅スペクトルの着目周波数範囲 $f_1$ は0.4Hz~9.9Hzの範囲を、 $f_2$ は0.5Hz~10Hzの範囲をともに0.1Hz刻みで設定した。その組み合わせは4,656通りとなる。ここで、下限値の0.4Hzおよび上限値の10Hzはサイト増幅スペクトルのSN比から判断した有効周波数範囲の下限値および上限値に対応している。

入射波として岩盤相当サイトにおける観測波および人工地震波を用いた。観測波は、1998年4月22日20時32分に滋賀・岐阜県境を震央として発生した震源深さ10km、気象庁マグニチュード5.4の地震のDIGにおける水平方向2成分の観測記録であり、解析には最大振幅を100cm/sに標準化した波形を用いた。(以下、「入射波1」、「入射波2」と称す)。ここで、DIGは京都大学により設置された、京都府南部の風化岩上の観測点である。人工地震波は統計的グリーン関数重ね合わせ法<sup>6)</sup>により作成した。対象とした断層は長さ・幅ともに20kmの横ずれ断層とした。断層面積との関係式<sup>21)</sup>から得られる地震モーメントは $7.6 \times 10^{18} \text{N} \cdot \text{m}$ であり、これはモーメントマグニチュード6.5に相当する。応力降下量は10MPa、アスペリティは考慮せず一様破壊とした。また、高域遮断周波数 $f_{\text{max}}^{22)}$ を10Hzとし、Booreによる高域遮断フィルタ<sup>23)</sup> [式(9)]を用いた。

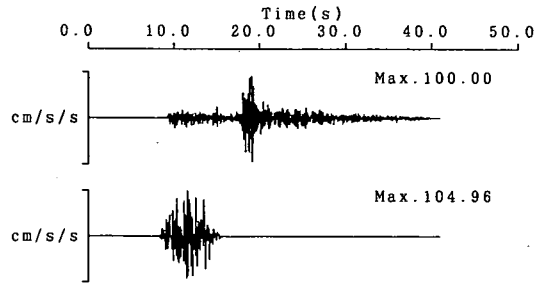
$$P(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{\text{max}}}\right)^{2s}}} \quad (9)$$

ここで、 $s=4$ である。地震動の計算地点は断層中央から断層直交方向に20kmの地点である。乱数の初期値を変え、10波作成した(以下、「入射波3」~「入射波12」と称す)。入射波の一例を図-4に示す。

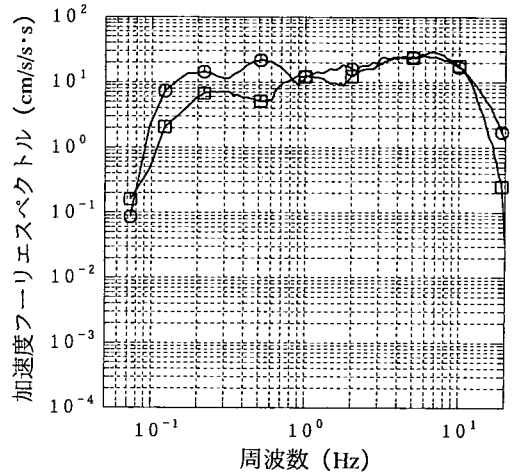
最適周波数範囲の決定にあたっては、各入射波の残差平方和 $D_N$ の平均値 $\overline{D_N}$  [式(10)]を着目周波数範囲毎に求め、これが最小となる周波数範囲を最適解とした。

$$\overline{D_N} = \frac{1}{N_1} \sum_{j=1}^{N_1} D_N(j) \quad (10)$$

ここで、 $N_1$ は入射波の数(12波)、 $D_N(j)$ は $j$ 番目の



(1) 加速度波形(上:入射波2,下:入射波4)



(2) 加速度フーリエスペクトル

(□:入射波2,○:入射波4)

図-4 解析に用いた入射波の一例

入射波に対する残差平方和である。また、式(7)の $b_N$ についても式(11)によりその平均値 $\overline{b_N}$ を求めた。

$$\overline{b_N} = \frac{1}{N_1} \sum_{j=1}^{N_1} b_N(j) \quad (11)$$

ここで、 $b_N(j)$ は $j$ 番目の入射波に対する $b_N$ である。

## (2) 最適周波数範囲の平均的な値

4,656通りの周波数範囲に対して残差平方和の平均値 $\overline{D_N}$ を求め、その小さいものから順に並べた。その結果を表-1に示す。解析では0.1Hz刻みで着目周波数 $f_1$ 、 $f_2$ を設定したが、細かい周波数刻みで検討することの必然性・優位性が認められなかったため、表-1では1Hz以下については0.1Hz刻みで、1Hz以上については0.5Hz刻みで抽出し、上位にランクされた周波数範囲のみを示した。なお、第1位についてはこの基準にとらわれず抽出した。また同表では、

表-1 残差平方和の平均値  $\overline{D_N}$  が  
小さい周波数範囲

順位	上位 X %	周波数範囲 (Hz)		$\overline{D_N}$	$\overline{b_N}$
		下限 $f_1$	上限 $f_2$		
1	0.02	0.4	7.2	0.1159	-0.045
4	0.09	0.4	7.0	0.1163	-0.042
7	0.15	0.4	7.5	0.1175	-0.048
14	0.30	0.5	7.0	0.1197	-0.043
19	0.41	0.4	6.5	0.1207	-0.033
22	0.47	0.5	7.5	0.1217	-0.049
27	0.58	0.6	7.0	0.1227	-0.043
33	0.71	0.5	6.5	0.1234	-0.034
42	0.90	0.6	6.5	0.1256	-0.035
44	0.95	0.6	7.5	0.1257	-0.050
47	1.01	0.7	7.0	0.1268	-0.044
49	1.05	0.4	8.0	0.1269	-0.056
55	1.18	0.4	6.0	0.1273	-0.027
63	1.35	0.7	6.5	0.1287	-0.036
68	1.46	0.5	6.0	0.1294	-0.027

表-2 着目周波数範囲 0.4~7.0Hz の  
各入射波での順位

入射波 No.	順位	上位 X %	$D_N$	$b_N$
1	404	8.68	0.2708	-0.010
2	593	12.74	0.2729	-0.015
3	378	8.12	0.1496	-0.065
4	5	0.11	0.0969	-0.056
5	270	5.80	0.0526	-0.049
6	7	0.15	0.0777	-0.043
7	141	3.03	0.0816	-0.051
8	173	3.72	0.0833	-0.048
9	5	0.11	0.0782	-0.055
10	5	0.11	0.0982	-0.041
11	15	0.32	0.0456	-0.029
12	237	5.09	0.0884	-0.039

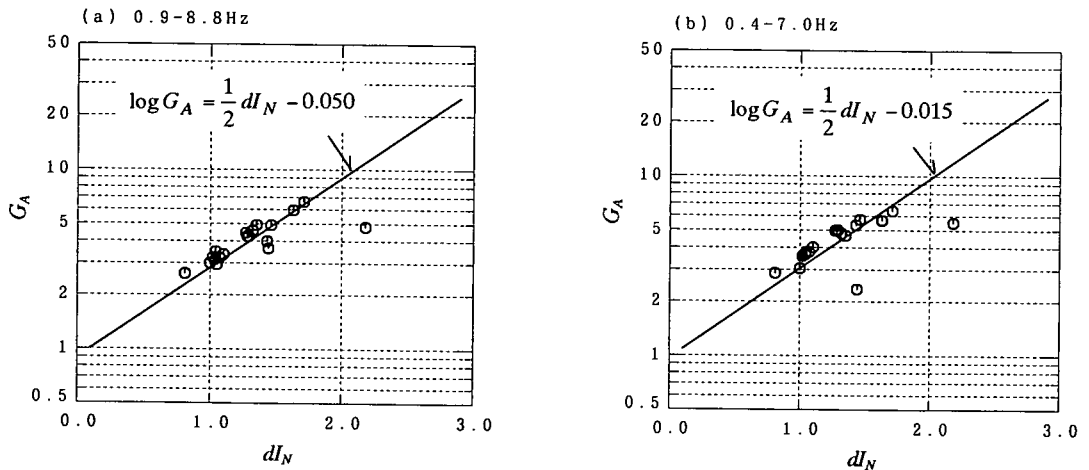


図-5 サイト増幅スペクトルの平均値 ( $G_A$ ) と数値解析的検討による震度増加量 ( $dI_N$ ) の関係 (入射波 2)

- ・ 4,656 通りの組み合わせのうち、 $\overline{D_N}$  の小ささが上位何位および上位何%にあたるのか
- ・ 着目周波数範囲  $f_1, f_2$
- ・ 残差平方和の平均値  $\overline{D_N}$
- ・  $b_N$  の平均値  $\overline{b_N}$

を示した。これより、上位にランクされる周波数範囲は下限値  $f_1$  が 0.4~0.7Hz、上限値  $f_2$  が 6.0~8.0Hz 程度であることがわかる。また、 $\overline{D_N}$  が最小となる最適周波数範囲は 0.4~7.2Hz であるが、上位 4 位に相当する 0.4~7.0Hz に対する  $\overline{D_N}$  は 0.4~7.2Hz に対するそれとほぼ同等であることがわかる。

周波数範囲 0.4~7.0Hz が各入射波で残差平方和の小ささの何位に相当するかを表-2 に示す。ここで、各入射波の最適周波数範囲と 0.4~7.0Hz の 2 つの周波数範囲で震度増加量  $dI_N$  とサイト増幅スペクトルの平均値  $G_A$  の関係に有意な差があるかどうかを検討する。図-5 はその一例として入射波 2 について  $dI_N$  と  $G_A$  の関係を示したものである。 $\overline{b_N}$  が最小となる周波数範囲 (0.4~7.0Hz) は入射波 2 に対しては 593 位 (上位 12.74% に相当) であるが、この入射波の最適周波数範囲 (0.9~8.8Hz) における  $dI_N$  と  $G_A$  の関係と 1 地点を除けば有意な差が認められない

表-3 検討に用いた地震

No.	発震時	震源位置	D	M <sub>J</sub>
1	1998.04.22 20:32	滋賀・岐阜県境	10	5.4
2	1998.06.23 22:54	三重県北部	44	4.2
3	1999.02.12 03:16	京都府中部	15	4.0
4	1999.08.21 05:33	和歌山県中部	70	5.4
5	2000.10.06 13:30	鳥取県西部	11	7.3
6	2001.08.25 22:21	京都府中部	10	5.3

D : 震源深さ (km), M<sub>J</sub> : 気象庁マグニチュード

ことがわかる。入射波 2 以外の入射波についても 0.4 ~ 7.0Hz の周波数範囲は上位 10% 以内に入っており、各入射波の最適周波数範囲における  $dI_N$  と  $G_A$  の関係と遜色なく評価できることが表-2 からわかる。

以上の数値解析的検討の結果、サイト増幅スペクトルの 0.4Hz ~ 7.0Hz に着目すると、この平均値と震度増加量との相関が最も良いことが明らかとなった。

## 5. 観測記録を用いた経験的検討

### (1) 解析概要

本章では観測記録を用いた経験的な手法により、サイト増幅特性と震度増加量の関係について検討を行なう。

検討の対象地点は図-1 に示した 19 観測点であり、対象地震は表-3 に示した 6 地震である。このうち 3 地震は近畿地方で発生した近距離地殻内地震 (No.1, No.3, No.6), 2 地震は近畿地方で発生したスラブ内地震 (No.2, No.4), 1 地震は遠距離地殻内地震 (No.5, 2000 年鳥取県西部地震) である。同一の地震でも各観測点までの震源距離はそれぞれ違うので、伝播経路特性が異なる。そこで、以下に示す 2 つの方法を用いて伝播経路特性の補正を行なった上で、その震度増加量を算出した。

#### <Method1>

①震度  $I$  の距離減衰特性が式 (12) で近似できるものとして、最小 2 乗法を用いてその係数  $a, b$  を地震毎に求める。

$$I = a \log(X) + b \quad (12)$$

ここで、 $X$  は震源距離 (km) である。係数  $a, b$  を求めるにあたり、No.5 の地震を除く 5 地震については検討対象地点のみを用いた。一方、No.5 の地震の検討対象地点における震源距離は 200 ~ 220km に集中している。係数  $a, b$  の値を適切に決定するためには、震源距離が短い地点でのデータを加えて距離の幅広い分布に対して減衰特性を求める必要がある。そこで、震源距離が数 km ~ 200km のデータを補充するために K-Net の観測点を加え、計 292 地点のデータを用いて係数  $a, b$  を求めた。

②観測点のうち岩盤相当の観測点を基準点とし、各観測点における震度  $I_{tar}$  よりこの基準点距離  $X_{ref}$  における震度  $I_{ref}$  を求める (図-6 参照)。

$$I_{tar} = a \log(X_{ref}) + b \quad (13)$$

ここで、 $b$  は式 (12) に示した平均的な震度の距離減衰特性と同じ傾き  $a$  を持ち、対象観測点での震度  $I_{tar}$  を通る直線の  $I$  切片である。

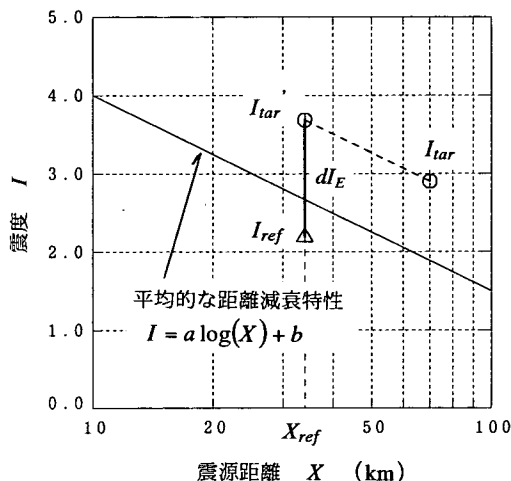


図-6 震度の補正方法 (Method1)

③震度  $I_{tar}$  と基準点における震度  $I_{ref}$  の差を取る。これが震度増加量  $dI_E$  である。

$$dI_E = I_{tar} - I_{ref} \quad (14)$$

#### <Method2>

①観測点のうち岩盤相当の観測点を基準点とし、この地点での伝播経路特性  $T(f)_{ref}$  と各観測点での伝播経路特性  $T(f)_{tar}$  を求める。なお、 $T(f)$  は内部減衰や散乱減衰を示す  $Q$  値による減衰と幾何減衰を考慮して得られる [式 (15)]。

$$T(f) = \frac{1}{X} \exp \frac{-\pi f X}{Q(f) \beta} \quad (15)$$

ここで、 $f$ : 周波数 (Hz)

$X$ : 震源距離 (cm)

$Q(f)$ : みかけ減衰を示す  $Q$  値

$\beta$ : 地震基盤のせん断波速度 (cm/s)

である。 $Q$  値は、No.5 の地震については式 (16) に示す特性<sup>24)</sup>を、これ以外の地震については式 (17) に示す特性<sup>17)</sup>を用いた。それぞれの特性は順に、近畿地方で発生した遠距離地震、近畿地方で発生

した近距離地震の観測記録から求めた特性であり、今回の検討対象地震の震源距離と概ね対応している。また、 $\beta$ は通常3.5~4.5km/sであり<sup>25)</sup>、ここでは3.6km/sを用いた。

$$Q(f) = 181.9f^{0.78} \quad (16)$$

$$Q(f) = 63.8f^{1.00} \quad (17)$$

②伝播経路特性の比 $\alpha$ を次式により求める。

$$\alpha = \frac{T(f)_{ref}}{T(f)_{tar}} \quad (18)$$

③各観測点での観測波形のフーリエ変換値に②より得られた伝播経路特性の比 $\alpha$ を乗じ、これを逆変換することにより伝播経路特性を補正した波形を得て、この震度 $I_{tar}$ を求める。

④震度 $I_{tar}$ と基準点における観測記録の震度 $I_{ref}$ の差を取る。これが震度増加量 $dI_E$ である。

$$dI_E = I_{tar} - I_{ref} \quad (19)$$

Method1は地震毎に伝播経路特性を求めそれを用いて補正しているのに対して、Method2では近畿地方の平均的な伝播経路特性を用いて補正しているという違いがある。なお、基準点はいずれの手法ともにNo.1~No.5の地震についてはDIG、No.6の地震についてはSMYとした。これらはいずれも京都大学により設置された、京都府南部の風化岩上の観測点である。

式(14)あるいは式(19)より得られた震度増加量 $dI_E$ とサイト増幅スペクトルのある周波数範囲( $f_1 \leq f \leq f_2$ )における平均値 $G_A$ との間には、第4章と同様、

$$\log G_A = \frac{1}{2}dI_E + b_E \quad (20)$$

なる関係が成立することが期待される。地震毎に検討対象地点の $G_A$ と $dI_E$ のデータの組が得られるので、これによって残差平方和 $D_E$ 〔式(21)〕を得ることが可能である。

$$D_E = \sum_{i=1}^n \left[ \log G_A(i) - \left\{ \frac{1}{2}dI_E(i) + b_E \right\} \right]^2 \quad (21)$$

ここで、

$n$  : 検討対象地点数

$G_A(k)$  : 地点 $k$ のサイト増幅スペクトルのある周波数範囲における平均値

$dI_E(k)$  : 地点 $k$ における震度増加量

である。

着目周波数を仮定すれば $D_E$ を最小にする $b_E$ を求めることができる。着目周波数範囲 $f_1, f_2$ は第4章の検討と同様4,656通りの組み合わせで検討した。

最適周波数範囲の決定にあたっては、各地震の残差平方和 $D_E$ の平均値 $\overline{D_E}$ 〔式(22)〕を着目周波数範囲毎に求め、これが最小となる周波数範囲を最適解とした。

$$\overline{D_E} = \frac{1}{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} D_E(j) \quad (22)$$

ここで、 $N_2$ は対象地震数(6地震)、 $D_E(j)$ は $j$ 番目の地震に対する残差平方和である。また、式(20)の $b_E$ についても式(23)によりその平均値 $\overline{b_E}$ を求めた。

$$\overline{b_E} = \frac{1}{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} b_E(j) \quad (23)$$

ここで、 $b_E(j)$ は $j$ 番目の地震に対する $b_E$ である。

## (2) 最適周波数範囲の平均的な値

4,656通りの周波数範囲に対して残差平方和の平均値 $\overline{D_E}$ を求め、これが小さいものから順に並べた。その結果を表-4および表-5に示す。その際、細かい周波数刻みで検討することの必然性・優位性が認められなかったため、第4章と同様の基準で抽出し、上位にランクされた周波数範囲のみを示した。なお、第1位についてはこの基準にとらわれず抽出した。また同表では、

- ・4,656通りの組み合わせのうち、 $\overline{D_E}$ の小ささが上位何位および上位何%にあたるのか
- ・着目周波数範囲 $f_1, f_2$
- ・残差平方和の平均値 $\overline{D_E}$
- ・ $b_E$ の平均値 $\overline{b_E}$

を示した。 $\overline{D_E}$ が最小となる最適周波数範囲は、Method1: 0.4~7.5Hz, Method2: 0.4~8.0Hz (0.4~7.9Hz)が上位1位であるが、 $\overline{D_E}$ がほぼ同等であるので上位3位の0.4~8.0Hzを採用)となり、ほぼ同じ周波数範囲であった。また、上位にランクされる周波数範囲は両手法ともに、下限値 $f_1$ が0.4~0.8Hz程度、上限値 $f_2$ が7.0~8.5Hz程度となっている。

この2つの最適周波数範囲が各地震で残差平方和の小ささの何位に相当するかを表-6および表-7に示す。これよりNo.1, No.2, No.4の3地震についてはいずれの手法を用いても上位5%以内に相当しており、かつ順位の違いはあまりなく、補正方法による差異はさほど見られない。また、No.3とNo.5の地震についてはいずれの補正手法を用いても、この周波数範囲は適切ではないことがわかる。この原因については第7章で検討する。No.6の地震についてはMethod1では152位(上位3.26%に相当)であるのに対して、Method2では580位(上位12.46%に相当)であり、補正方法による差異がやや顕著である。



表-4 残差平方和の平均値  $\overline{D_E}$  が小さい  
周波数範囲 (Method1)

順位	上位 X %	周波数範囲 (Hz)		$\overline{D_E}$	$\overline{b_E}$
		下限 $f_1$	上限 $f_2$		
1	0.02	0.4	7.5	0.4753	0.056
7	0.15	0.5	7.5	0.4765	0.055
19	0.41	0.6	7.5	0.4784	0.054
23	0.49	0.4	7.0	0.4793	0.064
26	0.56	0.4	8.0	0.4796	0.048
27	0.58	0.5	7.0	0.4797	0.063
32	0.69	0.7	7.5	0.4802	0.053
34	0.73	0.6	7.0	0.4807	0.062
42	0.90	0.7	7.0	0.4815	0.061
45	0.97	0.5	8.0	0.4816	0.047
47	1.01	0.8	7.5	0.4821	0.052
49	1.05	0.8	7.0	0.4823	0.060
62	1.33	0.9	7.0	0.4835	0.059
67	1.44	0.9	7.5	0.48436	0.051
68	1.46	0.6	8.0	0.48440	0.046

表-5 残差平方和の平均値  $\overline{D_E}$  が小さい  
周波数範囲 (Method2)

順位	上位 X %	周波数範囲 (Hz)		$\overline{D_E}$	$\overline{b_E}$
		下限 $f_1$	上限 $f_2$		
1	0.02	0.4	7.9	0.5036	0.061
3	0.06	0.4	8.0	0.5038	0.059
9	0.19	0.5	8.0	0.5045	0.058
19	0.41	0.5	7.5	0.5058	0.067
21	0.45	0.6	8.0	0.50596	0.057
22	0.47	0.4	7.5	0.50596	0.068
26	0.56	0.6	7.5	0.5064	0.066
31	0.67	0.7	7.5	0.5068	0.064
34	0.73	0.8	7.5	0.5071	0.063
36	0.77	0.7	8.0	0.5073	0.056
45	0.97	0.9	7.5	0.5078	0.062
51	1.10	0.8	8.0	0.5087	0.054
54	1.16	0.4	8.5	0.5088	0.052
62	1.33	1.0	7.5	0.5095	0.061
68	1.46	0.9	8.0	0.5104	0.053

これは No.6 の地震は式 (15) および式 (17) で表現される伝播経路特性とは異なる特性を有する地震であったことを示唆するものである。このことから、以下の検討では Method1 による結果を用いる。

(3) 地震毎の最適周波数範囲

Method1 による地震毎の最適周波数範囲を以下に示す。

- No.1 : 0.4~7.2Hz      • No.2 : 0.4~9.2Hz
- No.3 : 1.9~8.7Hz      • No.4 : 0.9~7.6Hz
- No.5 : 0.5~2.5Hz      • No.6 : 1.2~7.5Hz

これより、No.1 の地震については、残差平方和の平均値  $\overline{D_E}$  が最小となる周波数範囲 (0.4~7.5Hz) とほぼ同じ周波数範囲が最適範囲であることがわかる。No.2 の地震については上限値がやや高周波数側に、No.4 および No.6 の地震については下限値がやや高周波数側にずれていることがわかる。ここで、各地震の最適周波数範囲と 0.4~7.5Hz の 2 つの周波数範囲で震度増加量  $dI_E$  とサイト増幅スペクトルの平均値  $G_A$  の関係に有意な差があるかどうか検討する。図-7 はその一例として No.2 の地震について  $dI_E$  と  $G_A$  の関係を示したものである。 $\overline{D_E}$  が最小となる周波数範囲 (0.4~7.5Hz) は No.2 の地震に対しては 169 位 (上位 3.63% に相当) であるが、この地震の最適周波数範囲 (0.4~9.2Hz) における  $dI_E$  と  $G_A$  の関係と有意な差が認められないことがわかる。No.1, No.4, No.6 の地震についても同様に、0.4~7.5Hz の周波数

表-6 着目周波数範囲0.4~7.5Hzの  
各地震での順位 (Method1)

地震 No.	順位	上位 X %	$D_E$	$b_E$
1	8	0.17	0.1348	-0.197
2	169	3.63	0.2910	0.204
3	1641	35.24	0.5285	0.218
4	94	2.02	0.4632	0.184
5	864	18.56	1.0608	-0.040
6	152	3.26	0.3737	-0.030

表-7 着目周波数範囲0.4~8.0Hzの  
各地震での順位 (Method2)

地震 No.	順位	上位 X %	$D_E$	$b_E$
1	6	0.13	0.1007	-0.155
2	11	0.24	0.2989	0.222
3	1628	34.97	0.5374	0.190
4	113	2.43	0.5627	0.222
5	944	20.27	1.0126	0.016
6	580	12.46	0.5106	-0.141

範囲は上位 5% 以内に入っており、各地震の最適周波数範囲における  $dI_E$  と  $G_A$  の関係と遜色なく評価できることが表-6 からわかる。

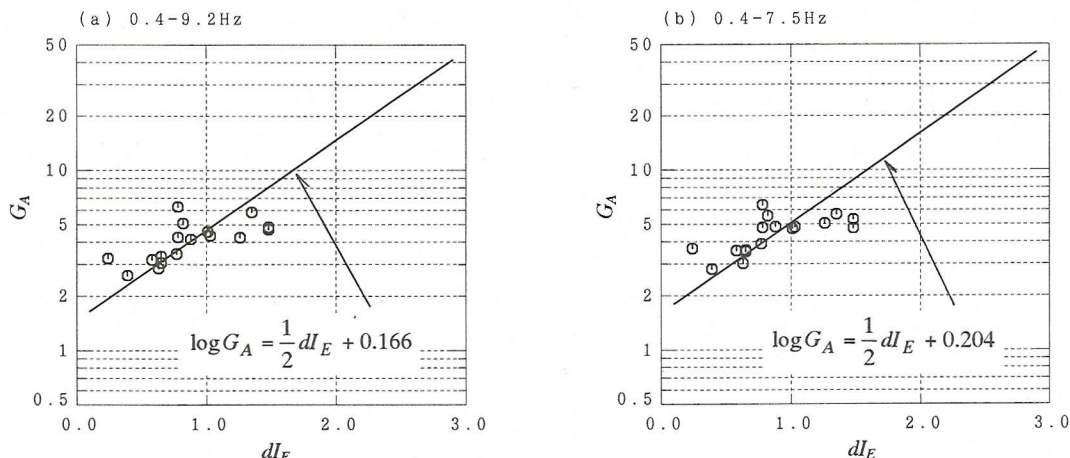


図-7 サイト増幅スペクトルの平均値 ( $G_A$ ) と経験的検討による震度増加量 ( $dI_E$ ) の関係 (No.2 の地震)

以上の経験的検討の結果、「サイト増幅スペクトルの0.4Hz～7.5Hzに着目すると、その平均値と震度増加量との相関が良い。」と言える。なお、No.3 および No.5 の地震については、残差平方和の平均値  $\overline{D_E}$  が最小となる周波数範囲 (0.4～7.5Hz) と大きく異なる周波数範囲が最適解となったが、これについては第7章で検討する。

## 6. アンケート震度調査結果に基づく検討

### (1) 解析概要

鶴来ら<sup>26)</sup>は1995年兵庫県南部地震の大阪府域を対象としてアンケート震度調査<sup>27)</sup>を実施し、詳細な震度分布および見かけのサイト増幅特性を評価している。アンケート震度は約1.1km×約0.9kmのメッシュ毎に整理されており、各メッシュにおけるサイト増幅特性を示す指標  $\Delta I_Q$  はアンケート震度と「標準震度」との差で表現される。「標準震度」とは、断層破壊伝播による指向性 (Directivity) の影響を含んだ震源特性と府内全域の平均的な伝播経路特性を考慮した、各メッシュで想定される標準的な震度である。得られたサイト増幅特性指標  $\Delta I_Q$  を図-8に示す。「標準震度」より大きい、すなわちサイト増幅特性が大きい地域が沖積層や埋立地に広がっており、洪積層や山地部で「標準震度」より小さい、すなわちサイト増幅特性が小さいという結果であった。

本章では、第2章で示したサイト増幅スペクトルとアンケート震度調査に基づくサイト増幅特性指標  $\Delta I_Q$  との相関性の検討を行なう。第4章と同様、サイト増幅スペクトルのある周波数範囲 ( $f_1 \leq f \leq f_2$ ) における平均値  $G_A$  とアンケート震度調査によるサ

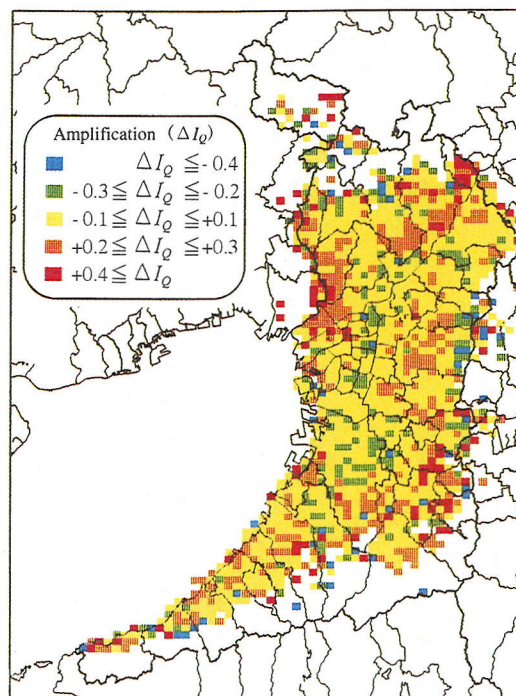


図-8 アンケート震度調査から得られたサイト増幅特性指標 ( $\Delta I_Q$ )

イト増幅特性指標  $\Delta I_Q$  の間には、

$$\log G_A = \frac{1}{2} \Delta I_Q + b_Q \quad (24)$$

なる関係が成立することが期待される。検討対象地点の  $G_A$  と  $\Delta I_Q$  のデータを基に式 (24) 中の係数  $b_Q$  や平均的相関関係との残差平方和  $D_Q$  [式 (25)] を得ることが可能である。

表-8 残差平方和 $D_Q$ が小さい周波数範囲

$$D_Q = \sum_{i=1}^n \left[ \log G_A(i) - \left\{ \frac{1}{2} \Delta I_Q(i) + b_Q \right\} \right]^2 \quad (25)$$

ここで、

$n$  : 検討対象地点数

$G_A(k)$  : 地点  $k$  のサイト増幅スペクトルのある周波数範囲における平均値

$\Delta I_Q(k)$  : 地点  $k$  が含まれるメッシュにおけるアンケート震度調査によるサイト増幅特性指標

である。

検討対象地点は図-1に示した19観測点のうちCHY(関震協ネット)を除いた18観測点である。CHYが含まれるメッシュではアンケート調査の有効調査票数が3枚未満であったために、アンケート震度の集計がなされておらず、検討対象から除外した。サイト増幅スペクトルの着目周波数範囲 $f_1, f_2$ は第4章の検討と同様に4,656通りの組み合わせで検討した。

## (2) 解析結果

4,656通りの周波数範囲に対して式(24)中の係数 $b_Q$ および平均的相関関係との残差平方和 $D_Q$ を算出し、その小さいものから順に並べた。この結果を表-8に示す。その際、細かい周波数範囲で検討することの必然性・優位性が認められなかったため、第4章と同様の基準で抽出し、上位にランクされた周波数範囲のみを示した。なお、第1位についてはこの基準にとらわれず抽出した。また同表では、

- ・4,656通りの組み合わせのうち、 $D_Q$ の小ささが上位何位および上位何%にあたるのか。
- ・着目周波数範囲 $f_1, f_2$
- ・残差平方和 $D_Q$
- ・式(24)中の係数 $b_Q$

を示した。着目周波数範囲を

- (a) 0.4~9.1Hz (第1位, 上位0.02%)
- (b) 0.4~9.0Hz (第3位, 上位0.06%)
- (c) 0.6~8.5Hz (第46位, 上位0.99%)
- (d) 0.9~8.0Hz (第140位, 上位3.01%)
- (e) 1.0~7.5Hz (第235位, 上位5.05%)
- (f) 1.5~7.0Hz (第446位, 上位9.58%)

とした場合のサイト増幅スペクトルの平均値 $G_A$ とサイト増幅特性指標 $\Delta I_Q$ の関係を図-9に示す。(a)および(b)は最適周波数範囲およびそれに準ずるものとして、(c)~(f)は $D_Q$ が小さい方から概ね1%, 3%, 5%, 10%程度にランクされる周波数範囲として選んだ。これより、

- ・上位5%程度に相当する周波数範囲 [(e) 1.0~7.5

順位	上位 X%	周波数範囲(Hz)		$D_Q$	$b_Q$
		下限 $f_1$	上限 $f_2$		
1	0.02	0.4	9.1	0.1106	0.554
3	0.06	0.4	9.0	0.1107	0.555
8	0.17	0.4	9.5	0.1119	0.547
10	0.21	0.5	9.0	0.1120	0.554
20	0.43	0.5	9.5	0.1139	0.546
23	0.49	0.6	9.0	0.1146	0.552
33	0.71	0.4	8.5	0.1157	0.564
35	0.75	0.4	10.0	0.1160	0.538
36	0.77	0.5	8.5	0.1162	0.562
40	0.86	0.6	9.5	0.1173	0.544
44	0.95	0.7	9.0	0.1178	0.551
46	0.99	0.6	8.5	0.1180	0.561
52	1.12	0.5	10.0	0.1187	0.536
58	1.25	0.7	8.5	0.1202	0.559
64	1.37	0.7	9.5	0.1212	0.542

Hz : 235位, 上位5.05%に相当]では平均的相関関係との差がさほど大きくなく、最適周波数範囲 [(a) 0.4~9.1Hz]と比較しても遜色がないこと。特に、第3位にランクされる(b) 0.4~9.0Hzでは最適周波数範囲とほぼ同等であること。

・上位10%程度に相当する周波数範囲 [(e) 1.5~7.0 Hz : 446位, 上位9.58%に相当]では、平均的相関関係との差がやや大きいことが判る。

以上より、

- ・サイト増幅スペクトルの0.4Hz~9.0Hzに着目すると、その平均値と震度増加量の相関が良いこと。
- ・ $D_Q$ が小さい上位5%程度以内の周波数範囲であれば、その周波数範囲におけるサイト増幅スペクトルの平均値と震度増加量は比較的相関が良いことが明らかとなった。

## 7. サイト増幅特性に基づく震度増加量推定手法の提案

### (1) 総合的な最適周波数範囲の抽出と震度増加量推定式

本章では第4章から第6章の結果を踏まえ、サイト増幅特性から震度増加量を推定する手法を提案する。

数値解析的検討・経験的検討(Method1による結果を採用)・アンケート調査結果に基づく検討の結果、最適周波数範囲としてそれぞれ以下の周波数範囲を

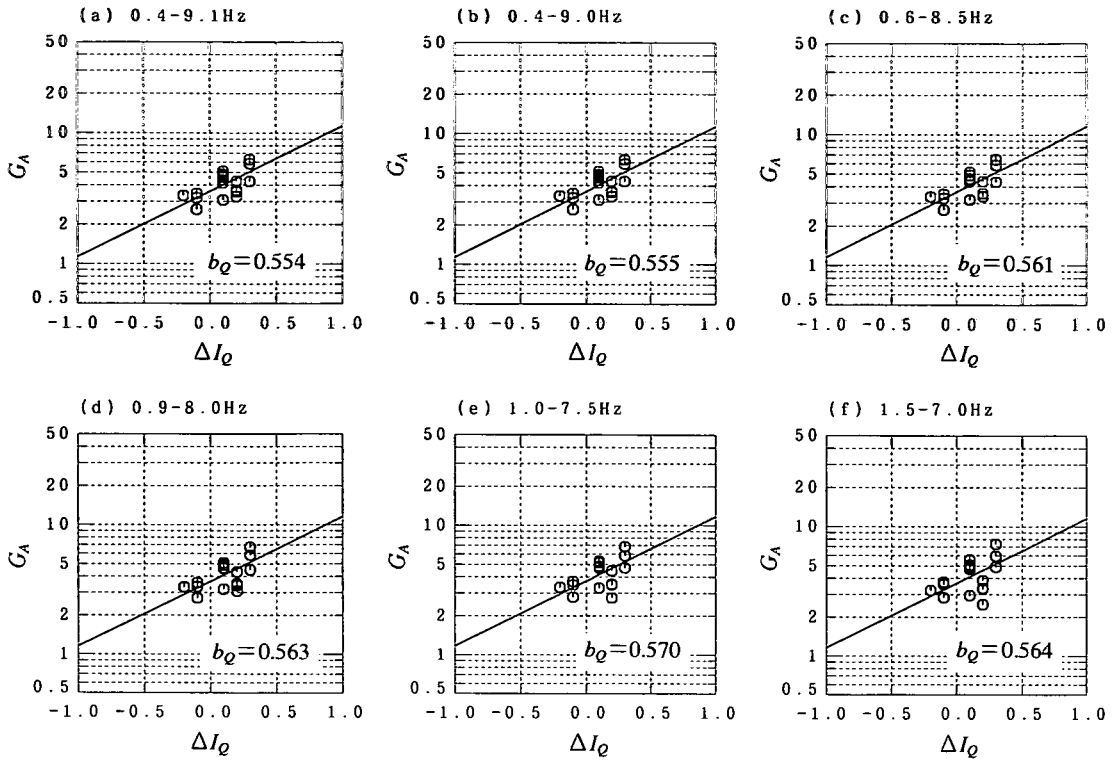


図-9 サイト増幅スペクトルの平均値 ( $G_A$ ) とアンケート震度調査から得られる  
 サイト増幅特性指標 ( $\Delta I_Q$ ) の関係 ( $\log G_A = \frac{1}{2} \Delta I_Q + b_Q$ )

表-9 各検討による最適周波数範囲の順位

着目周波数範囲	0.4~7.0Hz			0.4~7.5Hz			0.4~9.0Hz		
	順位	上位X%	$b^*$	順位	上位X%	$b^*$	順位	上位X%	$b^*$
数値解析的検討	4	0.09	-0.042	7	0.15	-0.048	409	8.78	-0.072
経験的検討	23	0.49	0.064	1	0.02	0.056	236	5.07	0.032
アンケート震度調査 結果に基づく検討	348	7.47	0.585	224	4.81	0.579	3	0.06	0.555

$b^*$ : 式(7)における $b_N$ , 式(20)の $b_E$ , 式(24)の $b_Q$ の値

得た。

- ・数値解析的検討: 0.4~7.0Hz
- ・経験的検討: 0.4~7.5Hz
- ・アンケート調査結果に基づく検討: 0.4~9.0Hz

着目周波数範囲の下限を示す $f_1$ は、これらの検討ですべて0.4Hzとなっている。一方、上限を示す $f_2$ は、3つの検討結果で若干の違いがある。数値解析的検討の結果を示した表-1を見ると、上位に6.0~8.0Hzがなり、7.5Hzまで上げて結果に大差がないことがわかる。経験的検討の結果を示した表-4では、

上位は7.0, 7.5, 8.0Hzで占められている。アンケート調査結果に基づく検討結果を示した表-8では上位を8.5~10.0Hzが占め、明らかに他の検討結果より高周波数の影響が強いことがわかる。この原因は、震度の定義の違いである可能性がある。すなわち、アンケート震度は計測震度に較べて高周波数領域の成分に敏感であることを示唆するものであると考えられる。

これらの周波数範囲が各検討において何位にランクされているかを表-9に示す。これより、

表-10 検討対象地点における震度増加量 ( $dI$ )

Site	$dI$	Site	$dI$
ABN	1.09	CHY	0.87
FKS	1.11	MRG	1.53
OCU	1.24	SKI	1.10
SRK	1.13	TDO	1.31
TYN	0.81	YAE	1.41
OSK001	1.61	OSK002	1.19
OSK003	1.36	OSK004	1.45
OSK005	1.35	OSK007	1.36
OSK008	1.35	OSK009	0.85
OSK010	1.51		

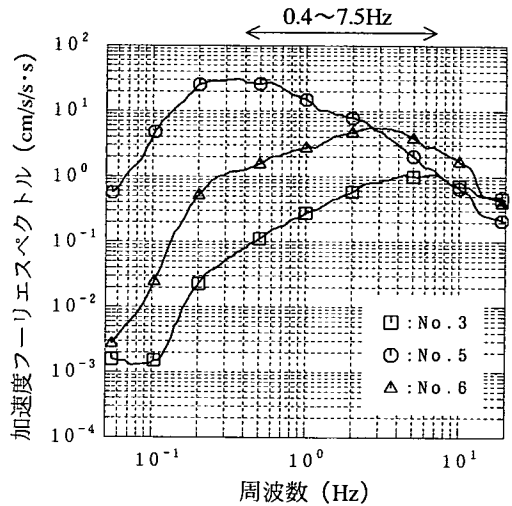


図-10 加速度フーリエスペクトルの比較

- ・0.4~7.0Hz の周波数範囲はアンケート調査結果に基づく検討による順位が上位 5% を越え、比較的良くない。
- ・0.4~9.0Hz の周波数範囲は数値解析的検討による順位が上位 5% を越え、比較的良くない。
- ・0.4~7.5Hz は数値解析的検討・経験的検討のいずれも上位 1% 以内であり、アンケート震度調査結果に基づく検討でも上位 5% 以内に入っている。ことがわかる。以上の理由により、本論文では最適な着目周波数範囲として 0.4~7.5Hz を採用する。この周波数範囲におけるサイト増幅スペクトルの平均値を  $G_A^{0.4-7.5}$  とすれば、この平均値と震度増加量の関係はそれぞれの検討毎に以下の式で示される。  
数値解析的検討：

$$\log G_A^{0.4-7.5} = \frac{1}{2} dI_N - 0.048 \quad (26)$$

すなわち、

$$dI_N = 2 \log G_A^{0.4-7.5} + 0.096 \quad (27)$$

経験的検討：

$$\log G_A^{0.4-7.5} = \frac{1}{2} dI_E + 0.056 \quad (28)$$

すなわち、

$$dI_E = 2 \log G_A^{0.4-7.5} - 0.112 \quad (29)$$

アンケート震度調査結果に基づく検討：

$$\log G_A^{0.4-7.5} = \frac{1}{2} dI_Q + 0.579 \quad (30)$$

すなわち、

$$dI_Q = 2 \log G_A^{0.4-7.5} - 1.158 \quad (31)$$

数値解析的検討による震度増加量推定式[式(27)]と経験的検討によるそれ[式(29)]を比較すると、数値解析的検討による震度増加量が0.21程度大きく推定されることがわかる。これは、数値解析的検討ではせん断波速度が 3.5km/s 程度以上の地震基盤に対する震度増加量であるのに対して、経験的検討で

は DIG や SMY といった風化岩上の地震観測点に対する震度増加量であることに起因すると考えられる。DIG における地震基盤に対する震度増加量を式(27)より算出すると 0.22 となり、先の数値解析的検討による震度増加量推定式と経験的検討によるその差(0.21)とほぼ対応している。なお、アンケート震度調査ではアンケート震度の平均的距離減衰傾向とアンケート震度との差を震度増加量と定義しており、数値解析的検討や経験的検討による式との比較はできない。

さらに、増幅の無い地点では震度の増加はないことを考えると、 $b_N$  はゼロであるはずである。したがって式(27)は本来

$$dI_N = 2 \log G_A^{0.4-7.5} \quad (32)$$

であるべきと考えられる。たとえば表-6からもわかるように、本検討の精度から考えて震度 0.1 の差は地震毎の誤差に十分包含される。

以上のことから、「サイト増幅スペクトルの 0.4~7.5Hz の範囲の平均値と震度増加量の相関が良く、震度増加量は式(32)により推定できる」と結論づけられる。なお、参考までに式(32)より得られる検討対象地点における震度増加量を表-10 に示す。

## (2) 震度増加量推定式の適用限界

経験的検討(第5章)において、No.3 および No.5 の2地震に対しては 0.4~7.5Hz という周波数範囲では震度増加量を良く表現できないことが明らかとなっている。最後にこの原因について検討する。図-10 に No.3 および No.5 の地震の ABN における観測記録のフーリエスペクトルを示す。比較のため、No.6

の地震のスペクトルも示した。No.6の地震はこの周波数範囲で震度増加量を良く表現できた地震である。No.6の地震については、この周波数範囲内(0.4~7.5Hz)にピークを持つことがわかる。これに対して、No.3の地震のスペクトルは7Hz程度にピークを持ち、0.4~7.5Hzの周波数領域ではNo.6の地震のスペクトルに対して約10分の1程度の大きさであることがわかる。これはこの地震が比較的小規模( $M_J=4.0$ )であり、低周波数成分が震源から射出されないためである。一方、No.5の地震(2000年鳥取県西部地震)は遠距離地震であり、その伝播経路の過程で高周波数成分が大きく減衰しているため、着目周波数範囲より低周波数側にピークを有していることがわかる。これらの傾向はABN以外の観測点についても同様に見られる。

以上のことから、0.4~7.5Hzの範囲に地震動のスペクトルがピークを持たないような遠距離地震や近距離小規模地震に対しては、提案する震度増加量推定式は適用が困難であると言える。しかし、このような地震では震度が小さいので、防災的な利用を考えると実用上問題は無いと考えられる。

## 8. おわりに

本研究ではサイト増幅スペクトルと震度増加量の関係について数値解析的な検討、観測記録を用いた経験的な検討およびアンケート震度調査結果に基づく検討を行った。これらの検討結果を踏まえ、総合的に判断した結果、「サイト増幅スペクトルの0.4~7.5Hzに着目した場合、その平均値と震度増加量の相関が良いこと」が明らかとなり、この平均値からサイトにおける震度増加量  $dI$  を推定する以下の式を提案した。

$$dI = 2 \log G_A^{0.4-7.5}$$

$$G_A^{0.4-7.5} = \frac{1}{7.5-0.4} \int_{0.4}^{7.5} |G(f)| df$$

ここで、 $G(f)$ は対象地点のサイト増幅スペクトルである。この提案式は工学上重要となる近距離の比較的大きな地震に対しては十分適用可能である。遠距離地震や近距離小規模地震に対して適用するのは困難であるが、このような地震では震度が小さく、防災的な利用を考えると実用上問題は無いと考えられる。

得られた成果は将来の合理的な震度予測手法の開発に繋がるものであると考えられる。なお、地震基盤における合理的な震度予測手法の開発は今後の課題である。

謝辞：本研究に用いたDIGおよびSMYにおける地震観測記録は京都大学名誉教授土岐憲三博士より提供頂いたものです。また、独立行政法人防災科学技術研究所、大阪市、関西地震観測研究協議会の観測記録を使用させて頂きました。記して感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 香川敬生, 入倉孝次郎, 武村雅之: 地震動予測の現状と将来の展望, 地震第2輯, Vol.51, pp.339-354, 1998.
- 2) Kanai, K.: Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground, *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, Vol.35, pp.309-325, 1957.
- 3) Joyner, W.B. and Boore, D.M.: Peak horizontal acceleration and velocity from strong motion records from the 1979 Imperial Valley -California- Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.71, pp.2011-2038, 1981.
- 4) Fukushima, Y. and Tanaka, T.: A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.80, pp.757-783, 1990.
- 5) 社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, pp.142-143, 1990.
- 6) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長: 地震のスケールリング則に基づいた大地震時の強震動予測 統計的波形合成法による予測, 日本建築学会構造系論文集, No.430, pp.1-9, 1991.
- 7) 入倉孝次郎: 大阪およびその周辺地域の地震防災のための想定地震と強震動の予測, 第24回地盤震動シンポジウム, pp.91-100, 1996.
- 8) 大阪府土木部: 大阪府土木構造物耐震対策検討委員会報告書, pp.4-103, 1997.
- 9) 社団法人土木学会: 土木構造物の耐震基準等に関する第二次提言, 1996.
- 10) Kawasumi, H.: Intensity and magnitude of shallow earthquakes, *Travaux Scientifique, BCSI, Series A*, Vol.19, pp.99-114, 1954.
- 11) 太田 裕, 鏡味洋史: 震度分布の簡易予測法 -アンケート調査からの成果を利用して-, 第15回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集, pp.281-282, 1978.
- 12) 岡田成幸, 宮川忠芳, 太田 裕: 高密度震度調査に基づく地域内震度予測式の構成 -札幌市を例として-, 日本建築学会構造系論文報告集, No.348, pp.11-17, 1985.
- 13) 松岡昌志, 翠川三郎: 国土数値情報を利用した広域震度予測, 日本建築学会構造系論文報告集, No.447, pp.51-56, 1993.
- 14) 大阪府: 大阪府地震被害想定調査報告書, pp.13-31, 1997.

- 15) 宮崎雅徳, 秋吉 卓: アンケート震度調査による表層地質特性の抽出と Seismic Microzonation への適用性, 土木学会論文集, No.495, pp.119-126, 1994.
- 16) 大西淳一, 山崎文雄, 若松加寿江: 気象庁地震記録の距離減衰式に基づく地点増幅特性と地形分類との関係, 土木学会論文集, No.626, pp.79-91, 1999.
- 17) 鶴来雅人, 澤田純男, 宮島昌克, 北浦 勝: 関西地域におけるサイト増幅特性の再評価, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.577-586, 2002.
- 18) 鶴来雅人, 田居 優, 入倉孝次郎, 古和田明: 経験的サイト増幅特性評価手法に関する検討, 地震第 2 輯, Vol.50, pp.215-227, 1997.
- 19) 独立行政法人防災科学技術研究所: 強震ネットホームページ (<http://www.k-net.bosai.go.jp/>)
- 20) 気象庁監修: 震度を知る 基礎知識とその活用, ぎょうせい, 1996.
- 21) Somerville, P. G., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D. J., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N., and Kowada, A.: Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seismological Research Letters*, Vol.70, pp.59-80, 1999.
- 22) Hanks, T. C.:  $f_{max}$ , *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.72, pp.1867-1879, 1982.
- 23) Boore, D. M.: Stochastic simulation of high - frequency ground motion based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, pp.1865- 1894, 1983.
- 24) 田居 優, 岩崎好規, 入倉孝次郎, 岡崎 敦: JMA87型記録による震源, 伝播, サイトの地域特性の検討, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.751-756, 1994.
- 25) 金森博雄: 地震の物理, 岩波地球科学選書, p.120, 1991.
- 26) 鶴来雅人, 澤田純男, 入倉孝次郎, 土岐憲三: アンケート調査による兵庫県南部地震の大阪府域の震度分布, 土木学会論文集, No.612, pp.165-179, 1999.
- 27) 太田 裕, 後藤典俊, 大橋ひとみ: アンケートによる地震時の震度の推定, 北海道大学工学部研究報告, No.92, pp.241-252, 1979.

(2002. 8. 30 受付)

## A METHOD TO ESTIMATE SITE EFFECTS ON SEISMIC INTENSITY BASED ON AMPLIFICATION SPECTRA

Masato TSURUGI, Sumio SAWADA, Masakatsu MIYAJIMA,  
and Masaru KITAURA

It is well known that seismic ground motions are characterized by source, path and site effects. In order to estimate seismic intensity taking into account those effects, we propose a method to estimate site effects on seismic intensity based on site amplification spectra. Numerical and empirical analyses are performed to examine the relationship between site amplification spectra and increments of seismic intensity which is obtained from simulated motions, observed motions and questionnaire survey. It is clarified that the increments of seismic intensities can be evaluated by average values of site amplification spectra from 0.4Hz to 7.5Hz.