

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1149

March 2007

スペクトルインバージョンに基づく南西諸島の強震観測地点におけるサイト増幅特性

野津 厚

菅野 高弘

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. スペクトルインバージョン適用上の問題点と本研究で用いる方法	4
2.1 問題点	4
2.2 本研究で用いる方法	5
3. 震源スペクトルの評価	6
4. スペクトルインバージョン	10
4.1 解析条件	10
4.2 解析結果	12
5. 拘束条件の数とサイト増幅特性のばらつきの幅について	16
6. まとめ	16
謝辞	18
参考文献	18

SITE AMPLIFICATION FACTORS FOR STRONG-MOTION SITES IN NANSEI ISLANDS IN JAPAN BASED ON SPECTRAL INVERSION TECHNIQUE

Atsushi NOZU*

Takahiro SUGANO**

Synopsis

Although spectral inversion technique (Iwata and Irikura, 1986) is a useful method to evaluate site amplification factors at strong motion sites, its applicability to remote islands such as Nansei Islands in Japan is limited because it usually requires a reference site for which site amplification factor is assumed to be unity and it is difficult to find an ideal reference site at remote islands.

In this study, a modified version of spectral inversion technique (Moya and Irikura, 2003), which does not require a reference site, is applied to strong motion records in Nansei Islands and site amplification factors at strong motion sites are evaluated. In this method, instead of prescribing site amplification factor at the reference site, source spectra of some of the earthquakes analyzed are prescribed. The source spectra are assumed to follow ω^{-2} source model. The seismic moment of the F-net CMT solution is used. Corner frequencies are estimated from the ratio of observed Fourier spectra from pairs of earthquakes for which hypocenters are located close to each other.

As a result of the inversion analysis, source spectra of 38 earthquakes, Q value and site amplification factors at 17 strong motion sites are evaluated. The amplification factors thus obtained can be used to evaluate strong ground motions from future large earthquakes in conjunction with the stochastic Green's function method (e.g., Nozu and Sugano, 2006).

Key Words: strong ground motion, site amplification factor, spectral inversion,
Nansei Islands, ω^{-2} model

* Senior Researcher, Geotechnical and Structural Engineering Department

** Head, Structural Dynamics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

3-1-1 Nagase Yokosuka 239-0826, Japan

Phone: +81-46-844-5058 Fax: +81-46-844-0839 E-mail: nozu@pari.go.jp

スペクトルインバージョンに基づく 南西諸島の強震観測地点におけるサイト増幅特性

野津 厚*
菅野 高弘**

要 旨

スペクトルインバージョン(岩田・入倉, 1986)は, 強震記録の得られている地点でのサイト増幅特性を評価するための手法として有用である。しかし, 沖縄・奄美地域では, 基準観測点に関する不確実性が大きい。通常, 通常のスペクトルインバージョンを適用しただけでは, サイト増幅特性に不確実性が残ることが懸念される。野津・長尾(2005)は本土における強震記録に対してスペクトルインバージョンを適用し, サイト増幅特性の評価を行っているが, 上で述べた理由により, 沖縄・奄美地域は解析対象外となっている。

そこで, 本研究では, 基準観測点を設定する必要のないスペクトルインバージョン手法(Moya and Irikura, 2003)を沖縄・奄美地域に適用することにより, 強震観測点におけるサイト増幅特性の評価を行った。通常, スペクトルインバージョンでは, 特定の観測点におけるサイト増幅特性を既知として与える。これに対し, 本研究の方法では, 解析対象とする複数の地震に対してあらかじめ震源スペクトルを求めておき, これを拘束条件として与える。その際, 震源スペクトルは ω スクエアモデルに従うと仮定した。 ω スクエアモデルを規定する二つのパラメタのうち, 地震モーメントはF-netによる推定値を用い, コーナ一周波数は, 互いに震源が近接している大小二つの地震の観測スペクトルの比から推定した。

本研究の成果として, 解析対象とした38地震の震源スペクトルと伝播経路の減衰特性を示す Q 値, それに17地点におけるサイト増幅特性を評価することができた。ここで算定されたサイト増幅特性は, 統計的グリーン関数法により各地の港湾等における強震動を評価しようとする際に活用でき, 対象地域における地震災害対策の高度化に資することが期待される。

キーワード: 地震動, サイト増幅特性, スペクトルインバージョン, 南西諸島, ω スクエアモデル

* 地盤・構造部 主任研究官

** 地盤・構造部 構造振動研究室長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所

Phone:046-844-5058 Fax:046-844-0839 E-mail: nozu@pari.go.jp

1. はじめに

一般に、地震による地盤の揺れ（地震動）は震源断層の破壊過程の影響（震源特性）と震源から地震基盤に至る伝播経路の影響（伝播経路特性）、それに地震基盤から地表に至る堆積層の影響（サイト特性）の三者によって決まると考えられている（図-1.1）。ここに地震基盤とは一般に花崗岩でS波速度が3km/s以上の地層を言う。堆積層が地震動に及ぼす影響は非常に大きい（例えば野津・長尾, 2005）、将来の地震による揺れの推定を行う場合、堆積層の影響すなわちサイト特性を適切に考慮することが重要である。なお、ここで言うサイト特性とは、工学的基盤面より上方の表層地盤と、工学的基盤面より下方の深層地盤の双方の影響を含むものである。

地震動のフーリエ振幅スペクトル $O(f)$ は、式(1.1)に示すように、震源特性・伝播経路特性・サイト特性の積で表される。

$$O(f) = S(f) P(f) G(f) \quad (1.1)$$

ここに、 $S(f)$ は震源特性、 $P(f)$ は伝播経路特性、 $G(f)$ はサイト特性である。以下においては、前報（野津・長尾, 2005）と同様、堆積層が地震動のフーリエ振幅スペクトルに及ぼす影響（すなわち $G(f)$ ）を指す用語として「サイト増幅特性」を、堆積層が地震動に及ぼす影響を一般的に指す用語として「サイト特性」をそれぞれ用いることとする。

強震記録の得られている地点でのサイト増幅特性を評価するための手法の一つとしてスペクトルインバージョン（岩田・入倉, 1986）がある。この方法は、複数の地点で得られた強震記録のフーリエ振幅スペクトルに対して一種の回帰分析を適用する方法である。この方法によれば、地下構造の情報が十分でない地域においても、深層地盤の影響を含む形でサイト増幅特性を評価することができる。野津・長尾（2005）は北海道から九州にかけての強震記録に対してスペクトルインバージョンを適用し、強震観測地点におけるサイト増幅特性の評価を行っている。しかしながら、沖縄・奄美地域では、2.で述べるように、基準観測点の不確実性の問題が未解決であったため、通常のスぺクトルインバージョンを適用しただけでは、サイト増幅特性に不確実性が残ることが懸念された。そのため、野津・長尾（2005）では沖縄・奄美地域は解析対象外となっている。

松島他（2005）は沖縄・奄美のK-NET（Kinoshita, 1998）の観測点におけるサイト増幅特性を、観測スペクトルを震源特性と伝播経路特性で割る方法（鶴来他, 1997）で求めている。ただし、用いている地震は1地震のみであり、また、コーナー周波数（後述）を特定の観測点における観測スペクトルから推定しているため、サイト増幅特性には不

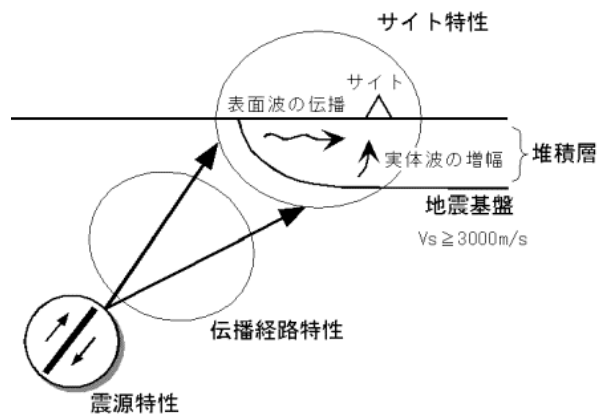


図-1.1 震源特性・伝播経路特性・サイト特性

確実性が残されていると考えられる。

そこで、本研究では、基準観測点を設定する必要のないスペクトルインバージョン手法（Moya and Irikura, 2003）を沖縄・奄美地域に適用することにより、強震観測地点におけるサイト増幅特性の評価を実施した。本研究で用いる方法は、基準観測点におけるサイト増幅特性を拘束条件とする代わりに、あらかじめ複数の地震の震源特性（震源スペクトル）を求めておき、これを拘束条件とする方法である。以下、2.においては、既存のスぺクトルインバージョン手法を沖縄・奄美地域に適用しようとする場合の問題点と本研究で用いる方法について述べる。3.では複数の対象地震に対する震源スペクトルの評価について述べ、4.ではこれを拘束条件とするスペクトルインバージョンとその結果について述べる。5.では全体のまとめを行う。

2. スペクトルインバージョン適用上の問題点と本研究で用いる方法

2.1 問題点

ここでは、通常のスぺクトルインバージョンを沖縄・奄美地域に適用しようとする場合の問題点について述べる。

いま M 個の地震 ($i=1,2,\dots,M$) の記録が N 個の観測点 ($i=1,2,\dots,N$) で得られているものとする。そのとき、観測記録のフーリエ振幅スペクトルは次式で与えられる（例えば岩田・入倉, 1986）。

$$O_{ij}(f) = S_i(f) P_{ij}(f) G_j(f) \quad (2.1)$$

ここに $S_i(f)$ は第 i 地震の震源特性（震源スペクトル）、 $P_{ij}(f)$ は第 i 地震の震源から第 j 地点の地震基盤までの伝播経路特性、 $G_j(f)$ は第 j 地点のサイト増幅特性である。伝播経路特性 $P_{ij}(f)$ は、震源から球面状に広がる実体波の幾何減衰 ($1/r$) と非弾性減衰を考慮すると、次式で表すことができ

る。

$$P_{ij}(f) = \frac{1}{r_{ij}} \exp\left(-\pi f r_{ij} / Q V_s\right) \quad (2.2)$$

式 (2.2) の r_{ij} は震源距離、 V_s は伝播経路における平均的な S 波速度である。また、式 (2.2) の Q は Q 値と呼ばれるもので、この値が小さいほど伝播経路での非弾性減衰が大ききことを意味する。

式 (2.2) を式 (2.1) に代入して両辺の常用対数をとると次式を得る。

$$\log O_{ij} = -\log r_{ij} + \log S_i + \log G_j - (\log e)\pi f r_{ij} / Q / V_s \quad (2.3)$$

ここでは表現を簡単にするため、周波数への依存を示す f を省略した。式 (2.3) には震源特性 S_i と伝播経路の Q 値、それにサイト増幅特性 G_j の併せて $M+1+N$ 個の未知数が含まれていることになる (Q 値を未知とする場合)。一方、式の本数は使用可能な記録の数に等しい。そこで、使用可能な記録の数が $M+1+N$ よりも多ければ、最小自乗法により式 (2.3) の残差を最小とするような未知数の組み合わせを周波数 f 毎に求めることができる。以上がスペクトルインバージョンの基本的考え方である。

さて、式 (2.3) を解こうとするとき、震源特性 S_i とサイト増幅特性 G_j の間にはトレードオフの関係がある。例えば、ある S_i と G_j の組み合わせが解であるとする、 $S_i/2$ と $2G_j$ の組み合わせも解となってしまう。このことを避けるための方法として、あらかじめ選定した岩盤観測点（基準観測点という）において、サイト増幅特性は 1 であるとする方法がある。基準観測点の選定は結果に対して重要な影響を及ぼすので、選定は慎重に行う必要がある。野津・長尾 (2005) では、基本的には、地域ブロック毎かつ周波数毎に、最もサイト増幅特性の小さい地点を基準観測点として選定している（選定条件の詳細は野津・長尾 (2005) を参照していただきたい）。本土を対象とする場合、ある程度広域を対象とすれば、基準観測点とするのに相応しい非常に堅固な観測点が対象観測点に含まれることが期待でき、上述の方法により適切な基準観測点を選定できることが期待できる。実際、この方法で選定された基準観測点が適切であることは、インバージョンの結果得られた震源スペクトル S_i の低周波部分が CMT 解（ここでは防災科学技術研究所の F-net によるもの）と良く整合することからも確認できる。しかし、沖縄・奄美は離島であるため、基準観測点として採用できるような非常に堅固な観測点が対象に含まれることは必ずしも期待できない。もしも、本来サイト増幅特性が 1 より大きい観測点を基準観測点として設定してしまったならば、他の地点におけるサイト増幅特性も過小

評価してしまうことになる。この点が未解決であったため、野津・長尾 (2005) では沖縄・奄美地域を解析対象外としていた。

2.2 本研究で用いる方法

以上の問題点を回避するため、本研究では以下の方法 (Moya and Irikura, 2003) を用いる。

通常のスペクトルインバージョンでは基準観測点におけるサイト増幅特性を拘束条件として与えるが、ここでは複数の解析対象地震に対してあらかじめ震源スペクトルを求めておき、これを拘束条件として与える。すなわち、第 k 地震に対してあらかじめ評価された震源スペクトルを S'_k とするとき、

$$\log S'_k = \log S'_k \quad (2.4)$$

を拘束条件とし、これを (2.3) と連立させることにより、震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性を評価する。

震源スペクトルは ω^{-2} モデル (Aki, 1967) に従うものと仮定する。 ω^{-2} モデルに従う加速度震源スペクトルは次式で与えられる。

$$S(f) = C M_0 \cdot \frac{(2\pi f)^2}{1 + (f/f_c)^2} \quad (2.5)$$

ここに、 M_0 は地震モーメント、 f_c はコーナー周波数、 C は定数（後述）である。図-2.1 は、大小二つの地震に対して、 ω^{-2} モデルに従う加速度震源スペクトルを模式的に描いたものである。この図からわかるように、加速度震源スペクトルは、低周波側では周波数の自乗に比例し（両対数軸上では傾き 2 の直線となり）、コーナー周波数より高周波側ではフラットとなる。コーナー周波数は、規模の大きい地震ほど低周波側にあり、そのため、大小二つの地震の震源スペクトルの差は、低周波側でより顕著となる。

式 (2.5) より、 ω^{-2} モデルに従う大小二つの地震の震源スペクトルの比は次式で与えられる。

$$\frac{S_1(f)}{S_2(f)} = \frac{M_{01}}{M_{02}} \cdot \frac{1 + (f/f_{c2})^2}{1 + (f/f_{c1})^2} \quad (2.6)$$

ここに、下付文字の 1 は大きい方の地震を、下付文字の 2 は小さい方の地震を表す。これを模式的に描いたものが図-2.2 である。図-2.2 からわかるように、規模の異なる二つの地震の震源スペクトルの比は、低周波側でフラット、高周波側でもフラットとなり、途中、二箇所折れ曲がる。なお、低周波側のフラットレベルの比は地震モーメントの比となる。

さて、解析対象地震の震源スペクトルを評価するためには、二つのパラメタ、すなわち地震モーメントとコーナー周波数を求める必要がある。このうち、地震モーメントに

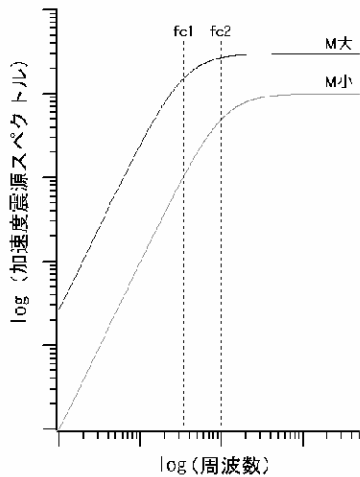


図-2.1 大小二つの地震の加速度震源スペクトルの模式図

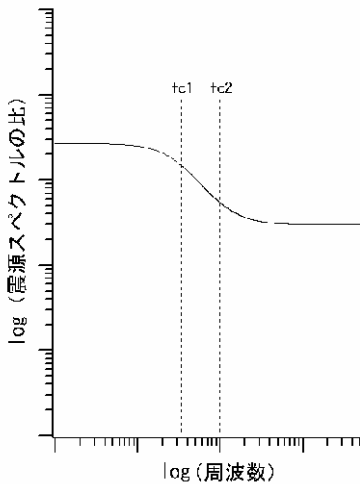


図-2.2 大小二つの地震の震源スペクトル比の模式図

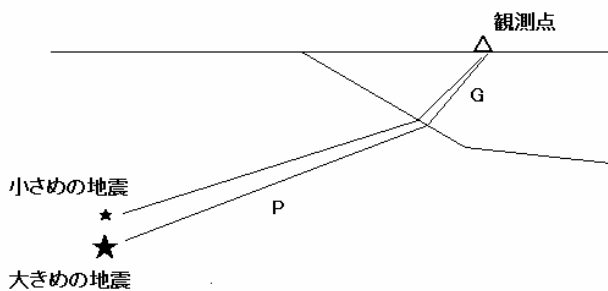


図-2.3 互いに震源の近接した大小二つの地震

については、防災科学技術研究所の F-net の CMT 解 (www.fnet.bosai.go.jp/freesia/index-j.html) を用いる。なお、CMT 解とは、サイト特性の影響を受けないような非常に長周期の地震観測記録を用いて、観測波形を最もよく説明

する地震の位置・規模・発震機構を同時に求めたものである。

コーナー周波数は、互いに震源が近接している大小二つの地震の観測スペクトルの比から推定する。図-2.3 に示すように、大小二つの地震の震源が互いに近接している場合、伝播経路特性 (P) とサイト増幅特性 (G) は共通と見なすことができる。従って、両地震の観測スペクトルの比をとることにより、震源スペクトルの比を求めることができる。こうして得られる震源スペクトルの比に対して式 (2.6) をフィッティングさせることにより、大小二つの地震のコーナー周波数を求める。

3. 震源スペクトルの評価

沖縄・奄美地域に対してスペクトルインバージョンを適用するための準備として、2. で述べた方法により、複数の地震に対する震源スペクトルの評価を行った。

まず、F-net による CMT 解の公開が始まった 1997 年以降に限定し、以下の条件を満たすような地震を選定した。

- ①沖縄・奄美地域に発生した地震であること。
- ②F-net の CMT 解が公開されていること。
- ③K-NET (Kinoshita, 1998) による強震記録が 1 箇所でも得られていること。

そして、選定した地震のうち、互いに震源の近いものをグループ化した。表-3.1 にグルーピングの状況を示す。また図-3.1 に各グループの位置を示す。表-3.1 には各地震の北緯・東経・深さ・気象庁マグニチュード (M_j) を示しているが、これらの数字は気象庁による速報値 (F-net のウェブ・サイトに掲載された数字) であり、 M_0 は F-net による CMT 解の地震モーメントである。また、地点数は K-NET による観測点数である。表-3.1 に示すように、計 48 の地震が 1~13 のグループに分類された。形成されたグループは、奄美大島近海に 6 つ (グループ 1~6)、沖縄本島近海に 2 つ (グループ 7 と 8)、宮古島近海に 2 つ (グループ 9 と 10)、西表島近海に 2 つ (グループ 11 と 12) および与那国島近海に 1 つ (グループ 13) である。なお、表-3.1 において各グループ内の地震は地震モーメントに関する降順で掲載されている。

次に、各グループにおいて、大きい地震と小さい地震のペアを作成した。図-2.2 に示すような、コーナー周波数が明瞭に表れた震源スペクトル比を得るためには、大地震と小地震の規模に、ある程度差があることが必要である。ここでは、このことに配慮し、各グループにおいて最大の地震モーメントを有する地震を大きい方の地震として選定し

表-3.1 震源スペクトルの評価のためにグルーピングを行った地震

地震	年月日	時間	北緯 (deg.)	東経 (deg.)	深さ (km)	M _J	M ₀ (Nm)	震源地	地点数*	group	選択 結果	fc (Hz)
1	2000/10/2	16:44	29.4	129.5	8	5.7	2.38E+17	奄美大島近海	2	1	L	0.7
2	2000/10/2	16:29	29.4	129.3	5	5.4	1.64E+17	奄美大島近海	2	1		
3	2000/10/2	14:21	29.4	129.4	8	5.0	7.54E+16	奄美大島近海	2	1		
4	2000/10/2	17:04	29.5	129.4	5	4.4	2.55E+16	奄美大島近海	1	1		
5	2001/1/26	17:42	29.4	129.4	5	4.2	2.36E+16	奄美大島近海	2	1	S	(2.4)
6	2000/10/3	12:09	29.4	129.5	8	4.1	1.08E+16	奄美大島近海	1	1		
7	2004/9/1	20:07	28.8	129.8	20	5.2	5.50E+16	奄美大島近海	3	2	L	(0.5)
8	2004/9/1	23:10	28.9	129.9	29	4.7	9.65E+15	奄美大島近海	1	2	S	(1.8)
9	2002/12/29	3:38	28.8	129.4	5	4.5	5.80E+15	奄美大島近海	4	3		
10	2002/12/26	9:43	28.8	129.4	5	4.3	3.11E+15	奄美大島近海	4	3		
11	2002/12/7	8:50	28.4	130.3	17	4.7	1.99E+16	奄美大島近海	2	4	L	(0.8)
12	2003/11/14	2:25	28.5	130.2	14	4.7	9.12E+15	奄美大島近海	2	4		
13	2003/11/14	2:16	28.5	130.1	14	4.6	6.36E+15	奄美大島近海	1	4		
14	2003/11/14	3:6	28.5	130.2	17	4.4	3.88E+15	奄美大島近海	1	4		
15	2002/12/9	19:26	28.4	130.3	17	4.1	2.45E+15	奄美大島近海	1	4		
16	2003/11/14	11:14	28.5	130.1	14	3.8	1.04E+15	奄美大島近海	1	4	S	(2.7)
17	1998/1/8	11:11	28.1	130.3	32	4.1	2.32E+16	奄美大島近海	1	5		
18	2003/6/5	15:06	28.1	130.3	23	4.7	1.90E+16	奄美大島近海	2	5		
19	2001/12/9	5:29	28.2	129.5	41	5.8	1.70E+18	奄美大島近海	9	6	L	(0.5)
20	1998/6/22	16:07	28.2	129.5	41	5.1	1.77E+17	奄美大島近海	5	6		
21	2001/12/20	9:32	28.3	129.5	41	4.3	2.22E+16	奄美大島近海	4	6	S	1.5
22	2001/12/9	5:8	28.3	129.4	44	4.0	4.22E+15	奄美大島近海	2	6		
23	2003/11/18	10:36	28.2	129.5	41	4.1	3.21E+15	奄美大島近海	1	6		
24	2003/7/26	4:5	28.1	129.5	35	4.1	2.51E+15	奄美大島近海	2	6		
25	2002/3/1	2:7	28.3	129.5	41	3.9	2.15E+15	奄美大島近海	2	6		
26	2001/5/7	23:33	27.4	128.4	47	4.7	4.31E+16	沖縄本島近海	7	7	L	2.7
27	2004/5/20	6:4	27.4	128.4	47	5.2	2.17E+16	沖縄本島近海	7	7		
28	2000/12/4	10:22	27.4	128.3	35	4.6	1.78E+16	沖縄本島近海	5	7		
29	2002/8/24	21:4	27.4	128.6	47	4.3	2.33E+15	奄美大島近海	2	7	S	(9.9)
30	2002/8/26	0:26	27.5	128.6	44	4.0	6.57E+14	奄美大島近海	1	7		
31	2001/8/18	7:26	25.9	126.2	11	6.3	7.04E+17	沖縄本島近海	6	8	L	(0.06)
32	2001/8/20	13:12	25.8	126.2	11	5.8	7.67E+16	沖縄本島近海	6	8	S	(0.12)
33	2002/6/5	2:20	24.8	125.4	50	4.7	3.41E+16	宮古島近海	3	9	L	2.5
34	2004/10/6	7:10	24.9	125.4	41	4.4	4.01E+15	宮古島近海	2	9		
35	2002/7/5	18:23	24.9	125.4	44	4.3	3.58E+15	宮古島近海	2	9		
36	2002/12/20	1:23	24.8	125.4	56	3.9	3.41E+15	宮古島近海	2	9		
37	2002/6/7	0:40	24.8	125.4	50	3.9	2.83E+15	宮古島近海	2	9		
38	2005/3/1	12:21	24.9	125.4	41	4.2	2.14E+15	宮古島近海	2	9		
39	2004/4/13	17:50	24.8	125.4	47	3.7	1.35E+15	宮古島付近	2	9	S	(9.1)
40	2001/2/8	14:41	24.2	125.4	35	5.9	6.10E+17	宮古島近海	5	10	L	(0.2)
41	2001/2/8	19:01	24.2	125.3	29	5.2	2.22E+16	宮古島近海	1	10	S	0.9
42	2003/9/23	4:32	24.1	123.6	8	4.4	3.36E+15	西表島付近	1	11		
43	2002/12/4	23:37	24.2	123.6	8	4.1	3.08E+15	西表島付近	1	11		
44	2003/10/27	11:15	24.2	123.6	29	4.7	3.00E+15	西表島付近	1	12		
45	2004/2/29	13:32	24.0	123.6	23	4.3	2.74E+15	西表島付近	1	12		
46	2002/4/7	9:6	24.2	123.7	20	3.7	3.86E+14	西表島付近	1	12		
47	2001/12/18	13:02	23.9	122.8	8	7.3	1.87E+19	与那国島近海	3	13		
48	2002/4/28	22:23	24.1	122.8	5	5.6	3.78E+16	与那国島近海	2	13		

*地点数はK-NETによる観測点数

た(表-3.1の"L")。一方、小さい方の地震に関しては、大きい方の地震と地震モーメントに十分な開きがあること、他、できる限り複数の地点で記録が得られていること、SN

比の良好な記録が得られていることなどの条件を考慮して選定した(表-3.1の"S")。グループ3、グループ5、グループ11に関しては、グループ内の地震の地震モーメントが互

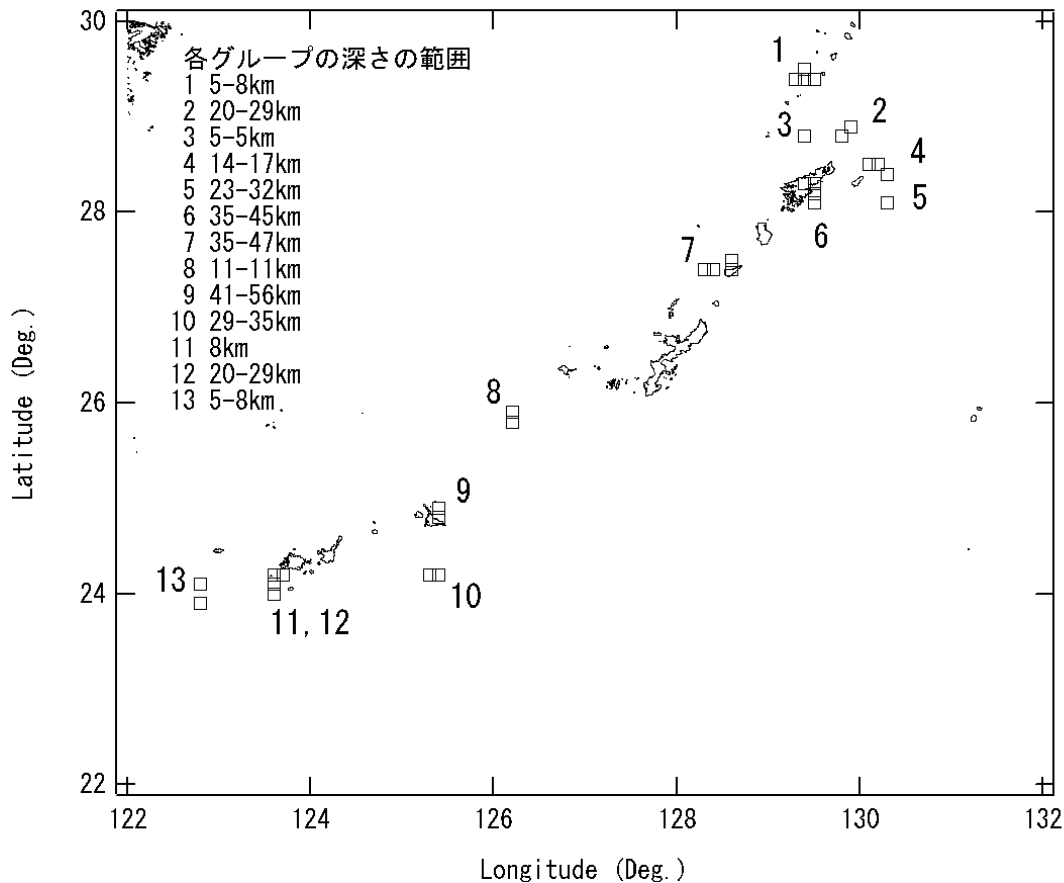


図-3.1 震源スペクトルの評価のための地震のグルーピング結果

いに近接しているため、ペアを作成できなかった。グループ13に関しては、グループに含まれる二つの地震の一方がM7.3とかなり規模の大きい地震であり、地震動に及ぼす破壊伝播の影響が顕著である可能性があるため、解析対象としなかった。

次に、各々のペアに対して、震源スペクトル比の計算を行った。大きい方と小さい方の両方の地震の記録が得られている観測点に着目し、加速度波形のフーリエスペクトル（水平2成分のベクトル和で、バンド幅0.05HzのParzenウィンドウを作用させたもの）を計算し、（小さい方を分母として）その比を計算した。両地震の記録が複数地点で得られている場合には、各地点で得られたスペクトル比の対数平均を求めた。こうして得られた震源スペクトル比に対して、式(2.6)のフィッティングを行った。その際、大地震と小地震の地震モーメント比はF-netの値に固定し、大地震と小地震のコーナー周波数 f_{c1} と f_{c2} を0.1Hz刻みで変化させ、グリッドサーチにより最適な f_{c1} と f_{c2} を求めた。

一例として、グループ9に属する地震ペアに対し、上記の作業を実施した結果を図-3.2以降に示す。グループ9では、大きい方の地震として2002年6月5日の地震(M_J4.7)、

小さい方の地震として2004年4月13日の地震(M_J3.7)が選択されている。宮古島の二箇所のK-NET観測点、OKN007（狩俣）とOKN008（城辺）では、二つの地震の記録がともに得られている。両地点における加速度波形のフーリエスペクトル（水平2成分のベクトル和で、バンド幅0.05HzのParzenウィンドウを作用させたもの）を図-3.2と図-3.3に示す。これらのスペクトルから、いずれの地点に対しても、大きい方の地震に対して、より大きいスペクトルが与えられていることがわかる。また、大小二つの地震によるスペクトルの差は低周波側でより顕著となっていることもわかるが、この傾向は、図-2.1に示す震源スペクトルの模式図からも理解できることである。図-3.2と図-3.3のスペクトルから、M_J3.7の地震に対しては、OKN007ではおよそ0.3Hz以下、OKN008ではおよそ1Hz以下で記録の精度が悪くなっていることがわかる。そこで、以下においてスペクトル比を計算する際には、OKN007の記録に関しては0.3Hz以上、OKN008の記録に関しては1Hz以上だけに着目する。

図-3.4は、OKN007とOKN008において、大小二つの地震のスペクトル比を計算し（薄い線）、その対数平均をとつ

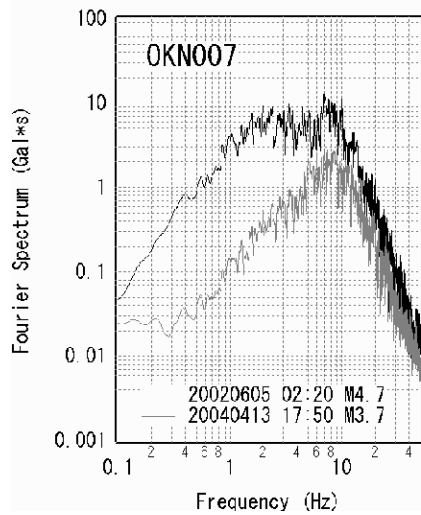


図-3.2 グループ9の地震ペアに対するOKN007における加速度フーリエスペクトル

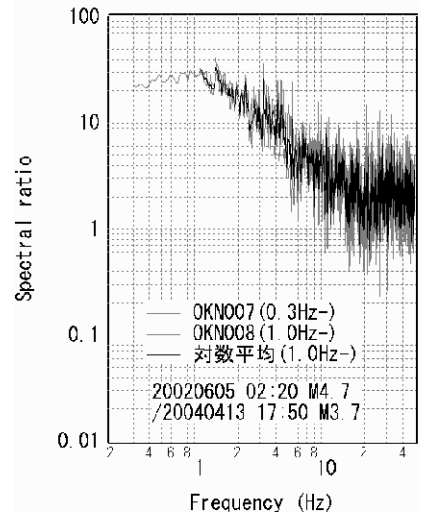


図-3.4 グループ9の地震ペアに対する震源スペクトル比 (2地点におけるスペクトル比と対数平均)

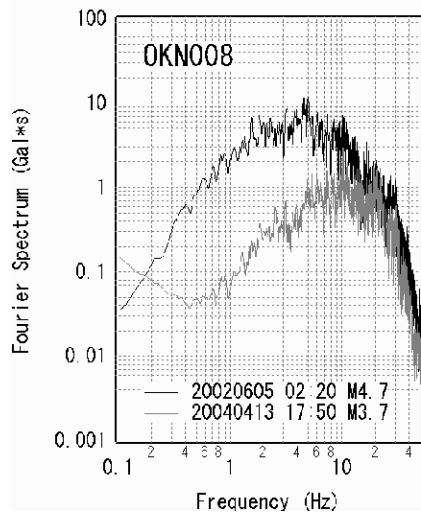


図-3.3 グループ9の地震ペアに対するOKN008における加速度フーリエスペクトル

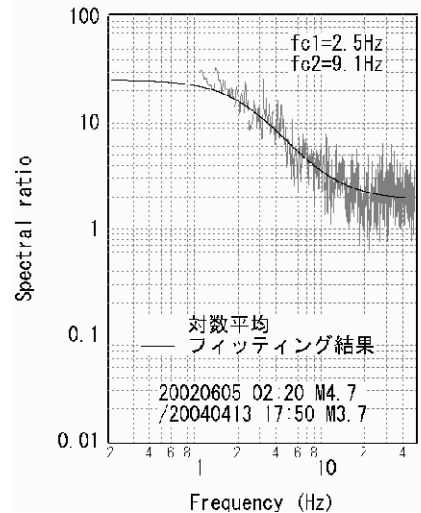


図-3.5 グループ9の地震ペアに対する震源スペクトル比 (対数平均) とフィッティング結果

たものである。対数平均は、両地点で精度の確保されている1Hz以上の帯域で計算した。図-3.5は、得られたスペクトル比(対数平均)に対して、式(2.6)をフィッティングさせた結果である。大きい方の地震のコーナー周波数は2.5Hz、小さい方の地震のコーナー周波数は9.1Hzと計算された。他のペアに対しても同様の方法で大小二つの地震のコーナー周波数を求めた結果を表-3.1に示している。

図-3.6は、以上の方法で求めたコーナー周波数を地震モーメント(F-net)に対してプロットしたものである。地震モーメントが大きくなるに従い、コーナー周波数が小さくなる傾向が認められる。図中には傾き-1/3の直線を記入しているが、これは各地震の応力降下量が一定であるとした

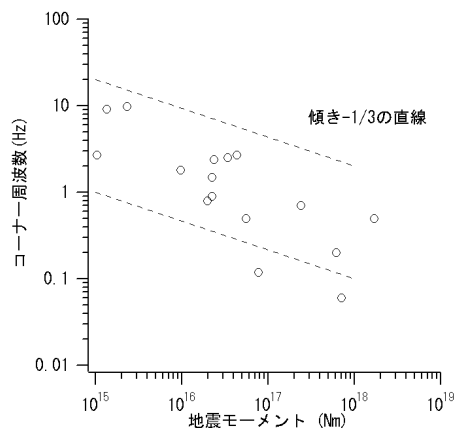


図-3.6 地震モーメントとコーナー周波数の関係

表-4.1 スペクトルインバージョンの対象地震

	発震年月日	時間	北緯	東経	深さ (km)	M _J	震央地名	M ₀ (Nm)	f _c (Hz)
1	1996/6/2	18:37	27.542	128.453	49	5.7	沖繩本島近海		
2	1997/1/18	0:37	28.793	129.912	38	5.2	奄美大島近海		
3	1997/6/19	19:05	24.925	125.35	53	5.1	宮古島近海		
4	1997/11/3	18:24	24.058	123.652	45	4.6	西表島付近		
5	1998/6/22	16:07	28.268	129.478	57	5.2	奄美大島近海		
6	1998/9/13	14:34	24.367	122.968	63	5.5	与那国島近海		
7	1998/11/7	20:13	28.292	129.325	15	4.8	奄美大島近海		
8	1999/3/1	15:03	28.267	129.482	34	4.8	奄美大島近海		
9	2000/1/29	1:39	26.13	124.56	164	5.9	東シナ海		
10	2000/2/25	15:13	25.222	123.957	129	5.2	石垣島近海		
11	2000/5/9	22:50	24.903	125.355	48	4.7	宮古島近海		
12	2000/8/7	14:23	29.03	131.113	90	5.3	奄美大島近海		
13	2000/10/2	16:29	29.395	129.34	22	5.3	奄美大島近海		
14	2000/10/2	16:44	29.412	129.458	25	5.9	奄美大島近海	2.38E+17	0.7
15	2000/12/4	10:22	27.313	128.438	46	4.7	沖繩本島近海		
16	2001/2/8	19:01	24.215	125.213	20	5.2	宮古島近海	2.22E+16	0.9
17	2001/5/7	23:32	27.312	128.44	45	5.1	沖繩本島近海	4.31E+16	2.7
18	2001/6/17	2:31	25.263	123.79	142	5.1	石垣島近海		
19	2001/8/20	13:12	25.653	126.365	0	5.9	沖繩本島近海		
20	2001/9/9	4:45	24.562	124.75	53	4.8	宮古島近海		
21	2001/10/31	6:04	28.523	128.323	122	5.3	奄美大島近海		
22	2001/11/24	11:56	25.177	125.263	70	5.3	宮古島近海		
23	2001/12/20	9:32	28.292	129.493	35	4.6	奄美大島近海	2.22E+16	1.5
24	2001/12/28	9:41	24.017	122.772	21	5.7	与那国島近海		
25	2002/1/12	9:18	25.747	125.228	9	5.4	東シナ海		
26	2002/1/16	22:33	23.838	125.332	55	5.8	宮古島近海		
27	2002/4/28	22:23	24.123	122.822	16	5.7	与那国島近海		
28	2002/6/5	2:20	24.845	125.405	50	5.2	宮古島近海	3.41E+16	2.5
29	2002/7/15	17:24	28.088	129.627	54	5.4	奄美大島近海		
30	2002/12/29	3:38	28.788	129.392	4	4.8	奄美大島近海		
31	2003/3/13	3:04	27.332	127.117	127	5.4	沖繩本島近海		
32	2003/7/10	2:15	29.767	130.103	59	5.3	奄美大島近海		
33	2004/2/26	13:33	24.108	123.135	69	5.5	与那国島近海		
34	2004/5/20	6:04	27.297	128.44	45	5.1	沖繩本島近海		
35	2004/7/25	3:54	26.467	128.912	33	5.9	沖繩本島近海		
36	2004/8/21	2:37	23.88	123.367	30	5.6	与那国島近海		
37	2004/10/6	7:10	24.795	125.378	50	4.5	宮古島近海		
38	2005/3/1	12:20	24.813	125.397	50	4.5	宮古島近海		

場合に期待される関係を示している。計算されたコーナー周波数が傾き-1/3の直線に対してばらついていることは、応力降下量が一定ではないことを示している。

コーナー周波数の評価された地震に対し、式(2.5)により、震源スペクトルの評価を行った。その際、地震モーメントはF-netのものを用いた。なお、式(2.5)の定数Cは

$$C = \frac{R_{\theta\phi} \cdot FS \cdot PRITN}{4\pi\rho V_s^3} \quad (3.1)$$

で与えられる(Boore, 1983)。ここに ρ と V_s は震源付近の媒質の物性である。ここでは、地震モーメントとしてF-netのものを利用するため、福山他(1998)の地下構造モデル

から当該地震の深さに対応する媒質を選び、その物性を式用いた。 $R_{\theta\phi}$ はラディエーション係数であり、ここでは全方位の平均値0.63とした。FSは自由地表面による増幅を示す係数(=2)である。PRITNは地震波のエネルギーの水平2成分への分配を示す係数であるが、後のスペクトルインバージョンで水平2成分のベクトル和を対象とするため、ここではPRITN=1とした。

4. スペクトルインバージョン

4.1 解析条件

3.で評価された震源スペクトルを拘束条件として利用し、

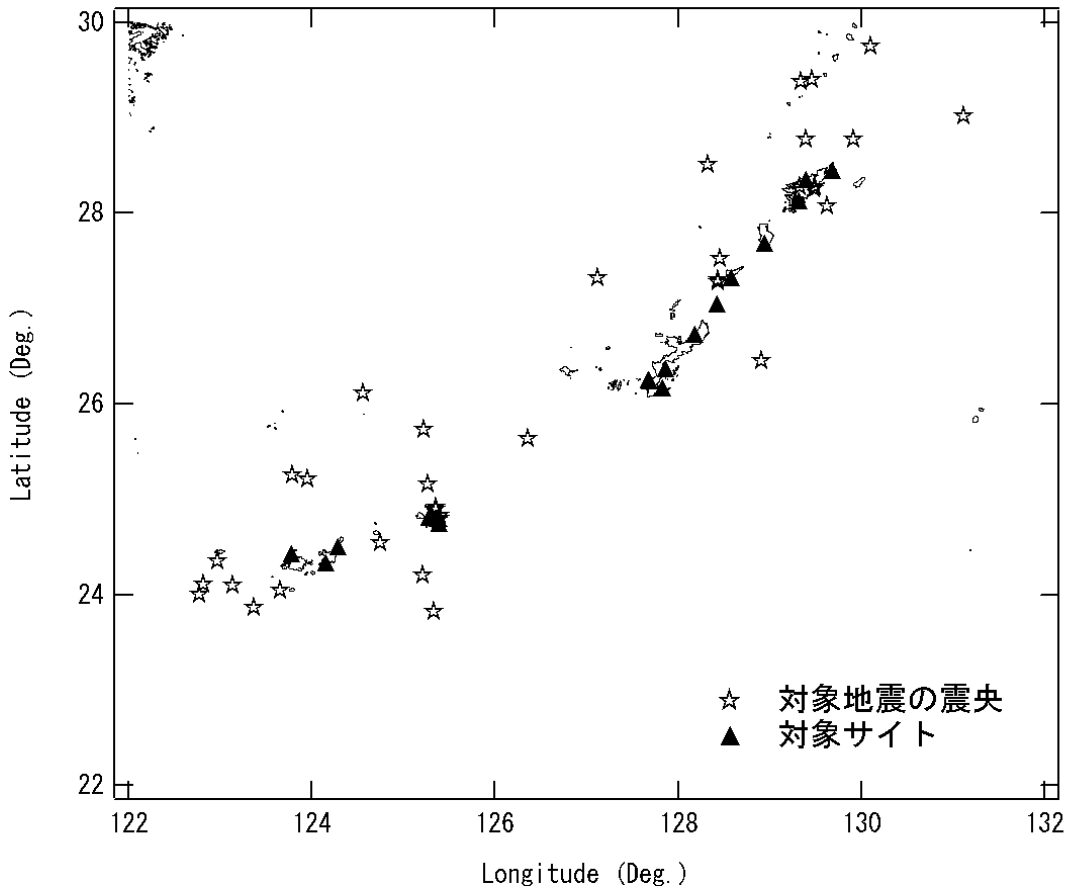


図-4.1 スペクトルインバージョンの対象地震と対象サイト

表-4.2 スペクトルインバージョンの対象サイト

番号	地点名	北緯	東経
1	KGS030	28.447	129.681
2	KGS031	28.356	129.393
3	KGS032	28.135	129.323
4	KGS033	27.684	128.945
5	KGS034	27.330	128.576
6	KGS035	27.048	128.426
7	OKN001	26.736	128.176
8	OKN003	26.376	127.859
9	OKN004	26.246	127.681
10	OKN005	26.165	127.829
11	OKN007	24.849	125.298
12	OKN008	24.752	125.388
13	OKN009	24.336	124.152
14	OKN010	24.503	124.282
15	OKN011	24.428	123.781
16	那覇-G	26.250	127.674
17	平良-G	24.808	125.278

沖縄・奄美地域を対象としたスペクトルインバージョンを実施した。解析対象周波数は、一般的な港湾構造物の振動特性や強震記録の精度を考慮し、0.2-10Hzとした。

解析対象とする地震の規模は次の考え方で定めた。まず、規模の小さい地震の記録は低周波側でS/N比の良好でない場合が多い。ここでは、低周波側は0.2Hzまで精度を確保することを意図しているため、M4.5以上の記録を用いることとした。一方、規模の大きい地震の記録は、震源断層の破壊過程の影響を受けるため、方位に関係なく一つの震源特性 S_i を考慮することが適切でなくなる。従って、M6.0以上の記録は避けることが望ましい。以上のことから、M4.5以上 M6.0未満の地震の記録を解析に用いることとした。解析対象地震の規模に関する以上の考え方は野津・長尾(2005)と同様である。

ここでは合計38の地震を解析対象とした。解析対象地震の一覧を表-4.1に示す。対象地震の震央を図-4.1に示す。なお、表-4.1に示す各地震の北緯・東経・深さ・気象庁マグニチュード(M_j)は気象庁による確定値であり、表-3.1に示す速報値とは異なっている場合もある。

解析対象観測点は、沖縄・奄美地域の17の観測点とした。解析対象観測点の一覧を表-4.2に示す。解析対象観測点の位置を図-4.1に示す。

解析対象とする記録は、震央距離200km未満の記録とし

た. これは, L_g 波 (例えば Street et al., 1975) など, 震源に由来する表面波の影響を可能な限り避けるためである. 野津・長尾 (2005) では, 同じ目的で, 震央距離 150km 未満の記録を解析対象としているが, 沖縄・奄美を対象とする場合, 観測点の分布が粗であるため, 震央距離に関する条件を少し緩めた. その結果, 解析対象とする記録の数は 128 となった.

解析に用いる各々の記録について, 低周波側でのスペクトルの傾きに基づいて S/N 比の確認を行い, 解析可能な周波数の下限値を記録毎に設定した (野津他, 2003). そして, 周波数毎に, SN 比の確保されている記録だけを解析に用いることにした. そのため, 実際の解析に用いられる記録の数は, 高周波側ほど多いことになる.

表-4.1 の対象地震のうち, 3. で震源スペクトルが評価されている地震は 5 地震存在した. それらの地震の地震モーメント (F-net による) および 3. で評価されたコーナー周波数を表-4.1 に示している. 式 (2.4) に示すように, これら 5 地震の震源スペクトルを拘束条件として与えた.

4.2 解析結果

(1) 震源特性

スペクトルインバージョンで推定された対象 38 地震の震源スペクトルを図-4.2 に示す. 図-4.2 において, 黒実線は拘束条件として震源スペクトルを与えた 5 つの地震を示す. 38 地震に対して推定された震源スペクトルは低周波側ではほぼ周波数の自乗に比例するものとなっており, 適切な震源スペクトルが得られていると考えられる. なお, 解析では, 式 (2.3) と式 (2.4) を連立させた後, 最小自乗法で未知数を推定しているため, 拘束条件として震源スペクトルを与えた地震に対しても, 完全に ω^{-2} モデルに従うような震源スペクトルが得られるわけではない.

(2) 伝播経路特性

スペクトルインバージョンで推定された伝播経路の Q 値を図-4.3 に示す. 図中の直線は, データに対してあてはめを行ったものである. 本研究により, 沖縄・奄美地域における伝播経路の Q 値は $Q=130f^{0.7}$ と推定された. この数字は, 例えば加藤 (2001) が鹿児島県・熊本県に対して推定している $Q=104f^{0.63}$ など, 他の地域に対して既往の研究で推定されている値に比較的近いものとなっている. なお, 松島他 (2005) は沖縄・奄美地域における観測記録の統計処理により $Q=320f^{0.66}$ を得ているが, 本研究の結果はこれとはやや異なる結果となっている.

(3) サイト増幅特性

スペクトルインバージョンで推定された対象地点のサイ

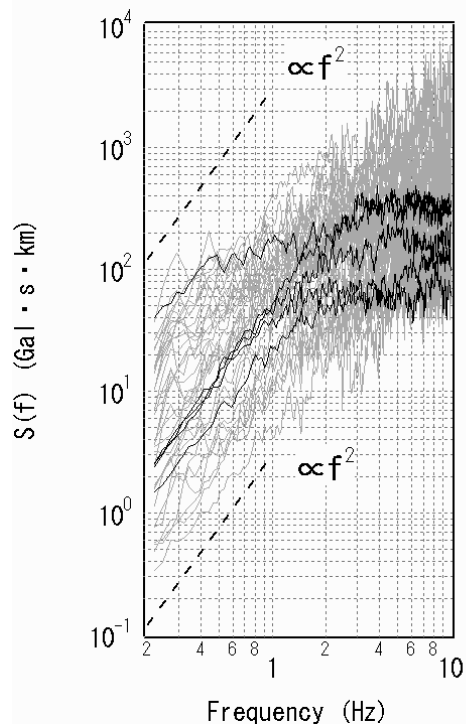


図-4.2 スペクトルインバージョンで推定された対象 38 地震の震源スペクトル (黒実線は拘束条件として震源スペクトルを与えた 5 つの地震)

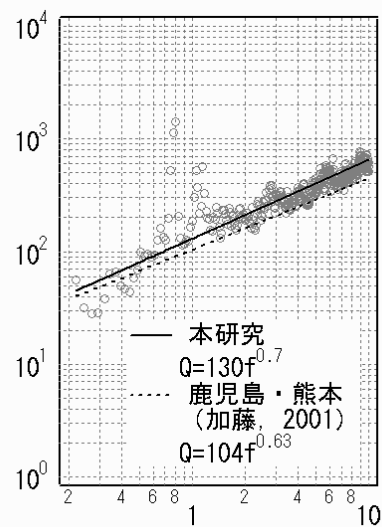


図-4.3 スペクトルインバージョンで推定された伝播経路の Q 値

ト増幅特性を図-4.4~図-4.20 に示す. なお, 本稿に示すサイト増幅特性の図ではすべて基準観測点におけるサイト増幅特性を 1 としている. 基準観測点のサイト増幅特性を 2 としている論文もあるので, 比較する場合には注意が必要である.

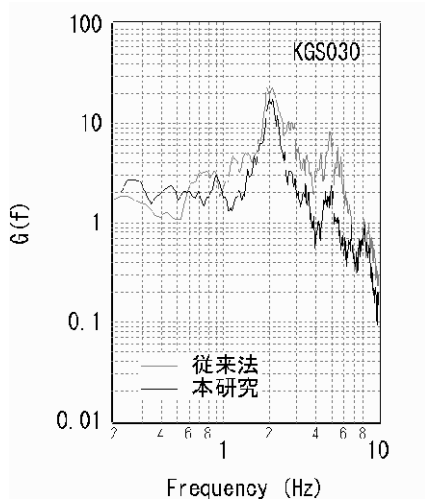


図-4.4 KGS030 地点のサイト増幅特性

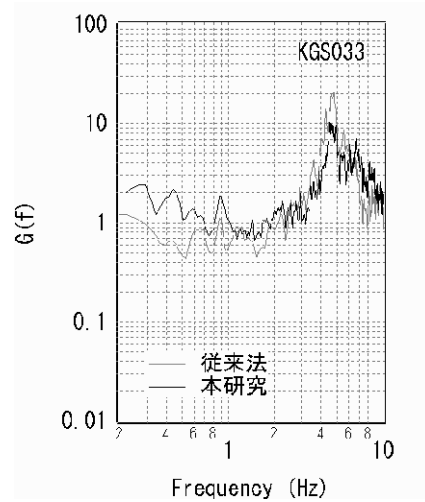


図-4.7 KGS033 地点のサイト増幅特性

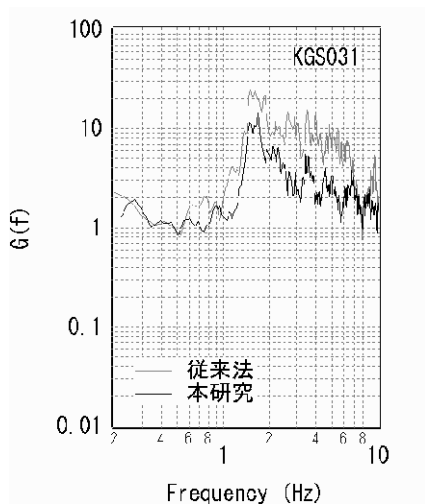


図-4.5 KGS031 地点のサイト増幅特性

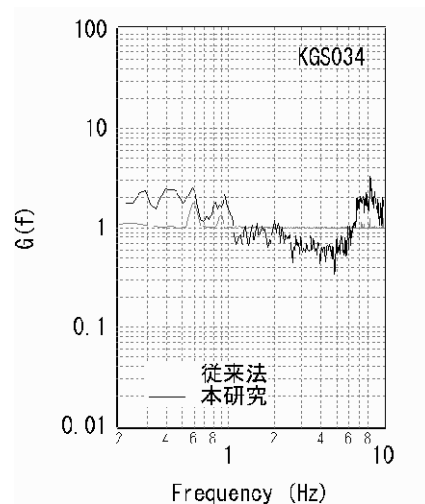


図-4.8 KGS034 地点のサイト増幅特性

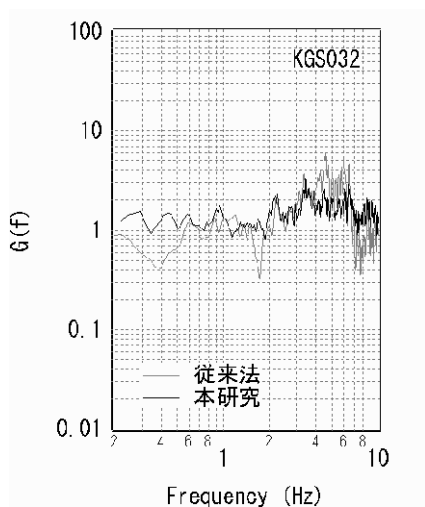


図-4.6 KGS032 地点のサイト増幅特性

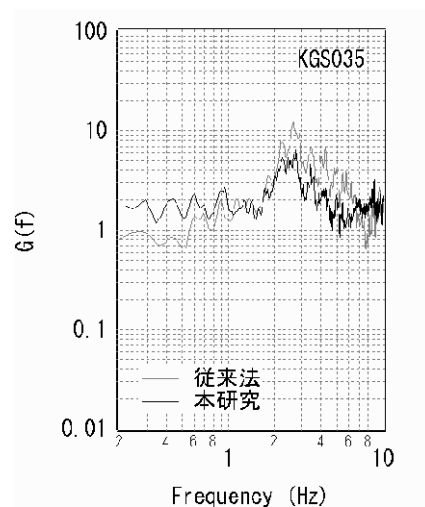


図-4.9 KGS035 地点のサイト増幅特性

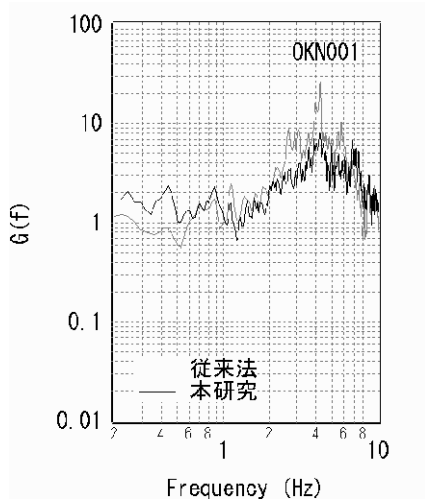


図-4.10 OKN001 地点のサイト増幅特性

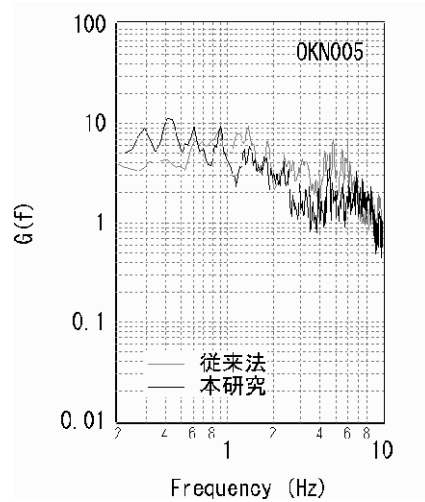


図-4.13 OKN005 地点のサイト増幅特性

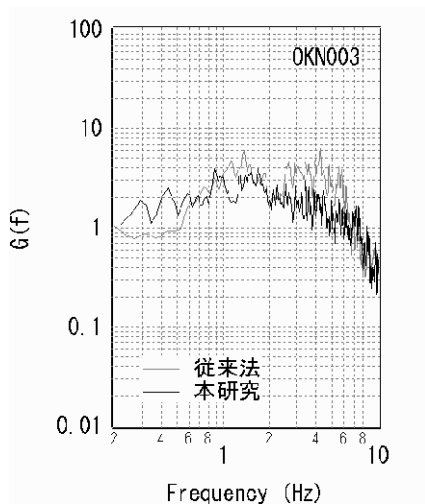


図-4.11 OKN003 地点のサイト増幅特性

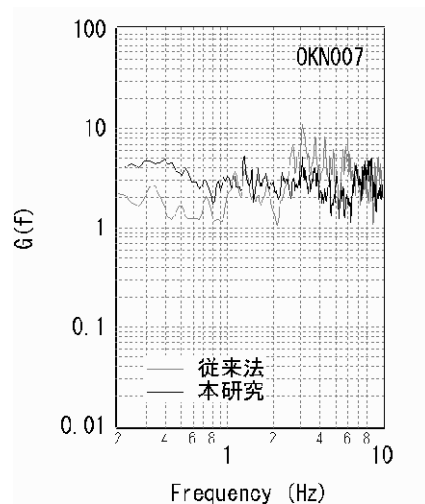


図-4.14 OKN007 地点のサイト増幅特性

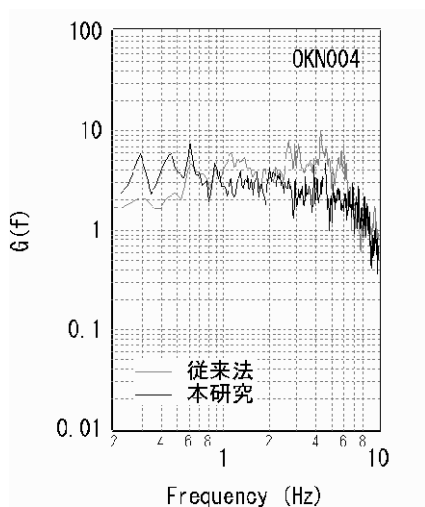


図-4.12 OKN004 地点のサイト増幅特性

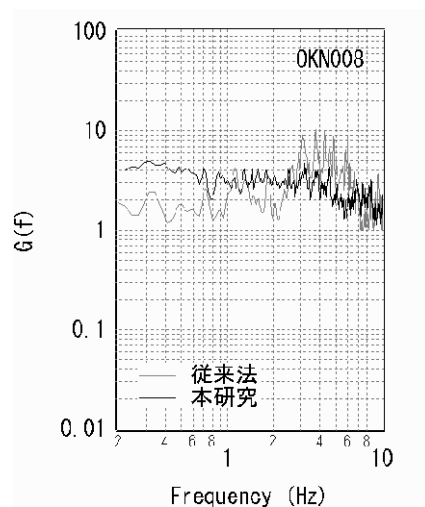


図-4.15 OKN008 地点のサイト増幅特性

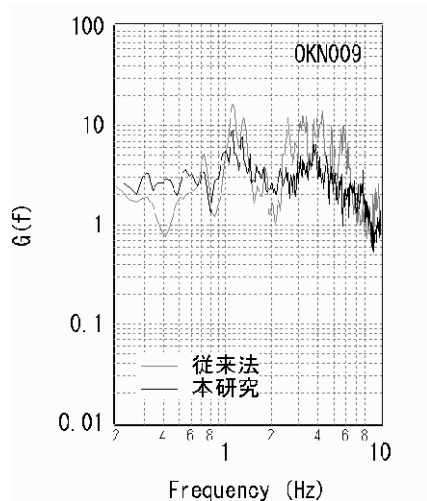


図-4.16 OKN009 地点のサイト増幅特性

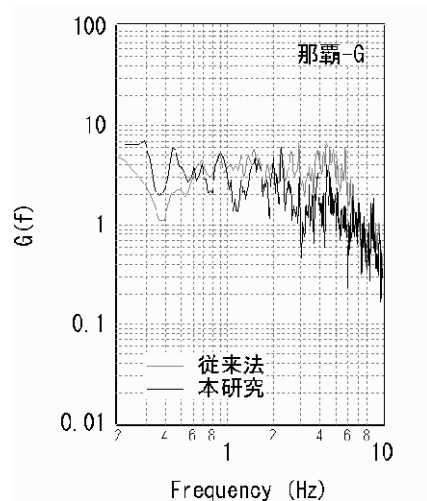


図-4.19 那覇-G 地点のサイト増幅特性

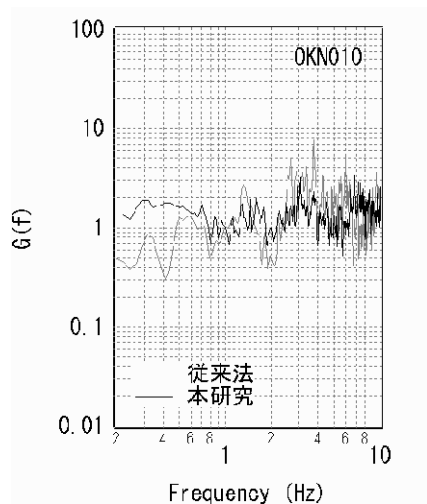


図-4.17 OKN010 地点のサイト増幅特性

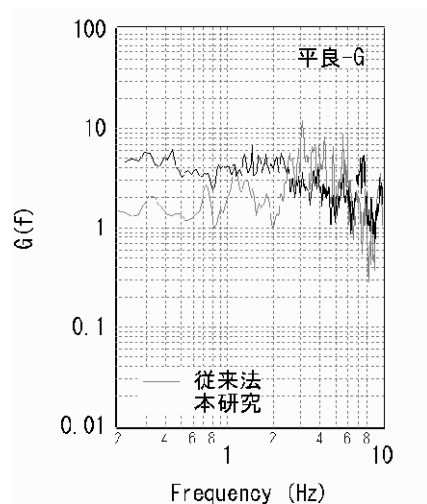


図-4.20 平良-G 地点のサイト増幅特性

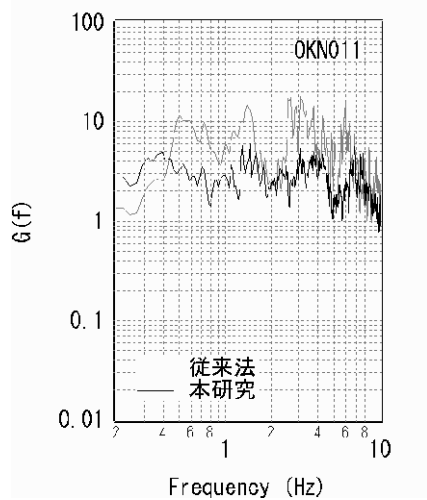


図-4.18 OKN011 地点のサイト増幅特性

図-4.4～図-4.20 には、本研究による解析結果を黒線で示す他、国土技術政策総合研究所より、従来のスペクトルインバージョン手法を試験的に沖縄・奄美地域に適用した結果の提供を受けたので、これを灰色の線で示している。なお、従来法による解析では、解析条件は野津・長尾（2005）に準じているが、震央距離の上限は本研究と同様 200km とし、基準観測点は、表層 10m の平均 S 波速度が 320m/s 以上で、2 つ以上の地震が観測されている地点から選定している。

全般的に、本研究の結果と従来法による結果の傾向は類似しており、特に奄美（KGS030-035）では両者は良く一致している。しかし、従来法による結果は、八重山諸島（OKN007-011、平良-G）では地点に関係なく 3Hz にピークの出る傾向があり、やや不自然な結果となっている。ま

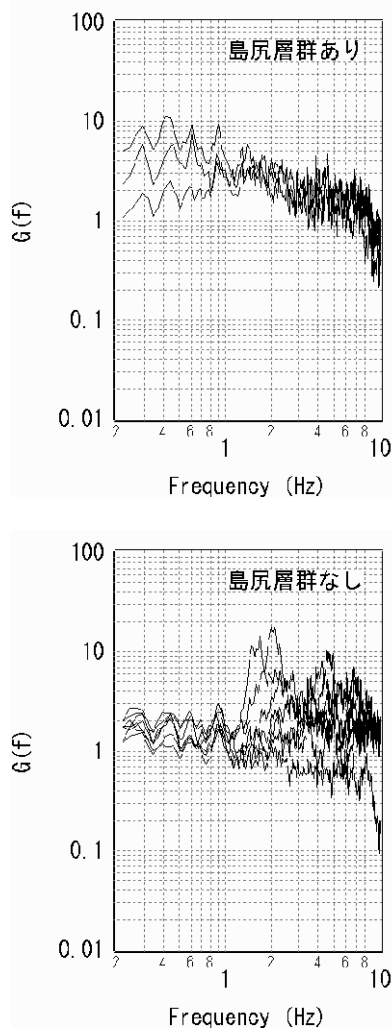


図-4.21 島尻層群のある地域 (OKN003~OKN005, 上) とそうでない地域 (KGS030~KGS035 と OKN001, 下) におけるサイト増幅特性の比較

た、従来法による結果では、低周波側でサイト増幅特性が1を下まわっている地点が複数存在しており (KGS032, KGS033, OKN010), 基準観測点の不確実性が影響している可能性がある。以上のことから、沖縄・奄美地域を対象とした場合には、基準観測点の不確実性の問題を回避できる本研究の方法で得られたサイト増幅特性の方が、より信頼性が高いと考えている。

図-4.4~図-4.20 を見る限り、沖縄・奄美地域においては、本土における堆積平野やカルデラ (野津・長尾, 2005) のような、サイト増幅特性の非常に大きい箇所は見受けられないようである。松島他 (2005) は沖縄・奄美の K-NET 観測点を島尻層群の有無で分類し、島尻層群のある地域とそうでない地域ではサイト増幅特性が異なることを指摘している。そこで、今回の解析結果を、島尻層群のある地域

(OKN003-OKN005) とそうでない地域 (KGS030-KGS035, OKN001) に分類し、図-4.21 に示した。前者は後者と比較して 1Hz 以下でサイト増幅特性が大きくなっており、松島 (2005) の指摘と調和的な結果が得られている。

5. 拘束条件の数とサイト増幅特性のばらつきの幅について

ここで用いた手法では、拘束条件として与える個々の地震の震源スペクトルが ω^{-2} モデル (Aki, 1967) に従うことを仮定している。 ω^{-2} モデルは、数多くの地震の平均的な震源スペクトルに関するモデルとしては確立されている感があるが、個々の地震の震源スペクトルが必ずしも ω^{-2} モデルに従うとは限らない。従って、拘束条件として与える地震の数が少ない場合には、計算されるサイト増幅特性の信頼性は極めて低い場合もあるので、本手法の適用にあたっては十分な注意が必要である。

拘束条件の数と、サイト増幅特性のばらつきの幅との関係を調べるため、拘束条件の数を少なくした場合についても検討を行った。図-5.1~図-5.4 には、それぞれ、拘束条件として与える地震の数を1つ、2つ、3つ、4つとした場合の KGS030 でのサイト増幅特性を示している。拘束条件の組み合わせは、拘束条件が1つの場合には5通り、2つの場合には10通り、3つの場合には10通り、4つの場合には5通りの組み合わせが可能であり、その総てを試みた。従って図-5.1~図-5.4 にはそれぞれ5通り、10通り、10通り、5通りの計算結果が灰色の線で示されている。また、拘束条件を5つとした場合の計算結果 (つまり4.で示した計算結果) を黒い線で示している。この結果から、拘束条件が1つの場合には計算されるサイト増幅特性のばらつきは非常に大きく信頼性が低いこと、拘束条件の数を増やすに従って結果のばらつきは小さくなっていくことがわかる。なお、ここでは KGS030 における結果のみを示したが、他の地点でも同様の傾向であった。

6. まとめ

スペクトルインバージョン (岩田・入倉, 1986) は、強震記録の得られている地点でのサイト増幅特性を評価するための手法として有用であるが、沖縄・奄美地域を対象とする場合、基準観測点に関する不確実性が大きいため、通常のスペクトルインバージョンを適用しただけでは、サイト増幅特性に不確実性が残ることが懸念された。全国の港湾等の強震記録にスペクトルインバージョンを適用し、サ

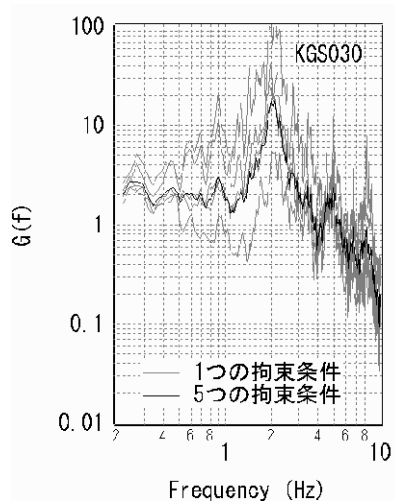


図-5.1 KGS030 に関して、拘束条件を1つとした場合と5つとした場合のサイト増幅特性の比較

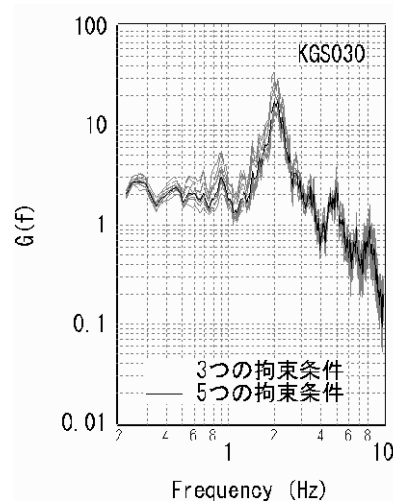


図-5.3 KGS030 に関して、拘束条件を3つとした場合と5つとした場合のサイト増幅特性の比較

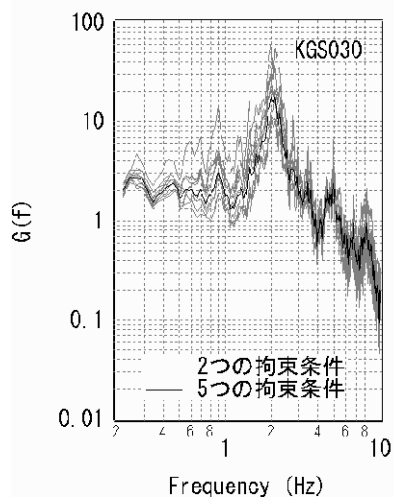


図-5.2 KGS030 に関して、拘束条件を2つとした場合と5つとした場合のサイト増幅特性の比較

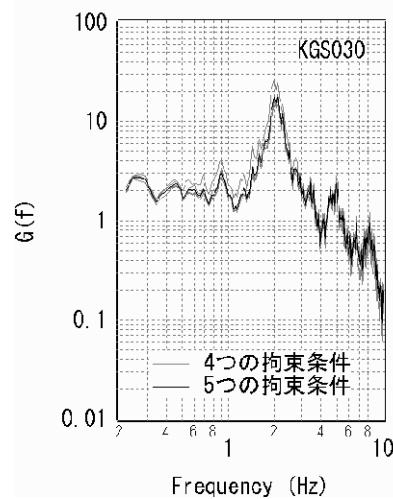


図-5.4 KGS030 に関して、拘束条件を4つとした場合と5つとした場合のサイト増幅特性の比較

イト増幅特性の評価を行った研究(野津・長尾, 2005)でも沖縄・奄美地域は解析対象外となっていた。

そこで、本研究では、基準観測点を設定する必要のないスペクトルインバージョン手法(Moya and Irikura, 2003)を沖縄・奄美地域に適用し、強震観測点におけるサイト増幅特性の評価を行った。通常のスペクトルインバージョンでは、特定の観測点におけるサイト増幅特性を既知として与えるのに対し、本研究の方法では、解析対象とする複数の地震に対してあらかじめ震源スペクトルを求めておき、これを拘束条件として与える。その際、震源スペクトルは ω^{-2} モデルに従うと仮定した。 ω^{-2} モデルを規定する二つのパラメタのうち、地震モーメントはF-netによる推定値を用い、コーナー周波数は、互いに震源が近接している大小二

つの地震の観測スペクトルの比から推定した。

本研究の成果として、解析対象とした38地震の震源スペクトルと伝播経路の減衰特性を示す Q 値、それに17地点におけるサイト増幅特性を評価することができた。ここで算定されたサイト増幅特性は、経験的サイト増幅・位相特性を利用した強震動評価手法(古和田他, 1998; 野津・菅野, 2006)により各地の港湾等における強震動を評価することにも応用でき、対象地域における地震災害対策の高度化に資することが期待される。

なお、ここで用いた解析手法は、拘束条件として与える個々の地震の震源スペクトルが ω^{-2} モデルに従うことを仮定している。 ω^{-2} モデルは、数多くの地震の平均的な震源スペクトルに関するモデルとしては確立されている感があ

るが、個々の地震の震源スペクトルが必ずしも ω^{-2} モデルに従うとは限らない。従って、拘束条件として与える地震の数が少ない場合には、計算されるサイト増幅特性の信頼性は極めて低い場合もあるので、本手法の適用にあたっては十分な注意が必要である。また、震源スペクトルと ω^{-2} モデルとの差が大きくなると考えられる高周波遮断振動数 (f_{max} ; 6Hz 程度とされることが多い) より高周波側の帯域では、本手法により計算されたサイト増幅特性は過小評価となっている可能性がある。一般的な港湾構造物の耐震性を検討する上ではこのことは重要でないが、対象とする構造物の種類によってはこの点にも注意する必要がある。

(2006年11月10日受付)

謝辞

国土技術政策総合研究所 港湾研究部 港湾施設研究室および(株)ニュージェックの山田雅行氏より、既往のスペクトルインバージョン手法を試験的に沖縄・奄美地域に適用した場合のサイト増幅特性の評価結果を提供していただきました。防災科学技術研究所のK-NETの強震記録、F-netのCMT解を利用しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 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, 第39巻, pp.579-593.
- 加藤研一 (2001) : K-NET 強震記録に基づく1997年鹿児島県北西部地震群の震源・伝播経路・地盤増幅特性評価, 日本建築学会構造系論文集, 第543号, pp.61-68.
- 古和田明・田居優・岩崎好規・入倉孝次郎 (1998) : 経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 第514号, pp.97-104.
- 鶴来雅人・田居優・入倉孝次郎・古和田明 (1997) : 経験的サイト増幅特性評価手法に関する検討, 地震2, 第50巻, pp.215-227.
- 野津厚・佐藤陽子・菅野高弘 (2003) : 羽田空港の地震動特性に関する研究 (第2報) スペクトルインバージョンによるサイト特性, 港湾技術研究所報告, 第42巻, 第2号, pp.251-283.
- 野津厚・長尾毅 (2005) : スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測地点におけるサイト増幅特性, 港湾空港技術研究所資料, No.1112.
- 野津厚・菅野高弘 (2006) : 経験的サイト増幅・位相特性

を考慮した強震動評価手法—内陸活断層地震および海溝型地震への適用性の検討—, 港湾空港技術研究所資料, No.1120.

- 福山英一・石田瑞穂・Douglas S. Dreger・川井啓廉 (1998) : オンライン広帯域地震データを用いた完全自動メカニズム決定, 地震2, 第51巻, pp.149-156.
- 松島良成・矢吹哲哉・有住康則 (2005) : 南西諸島における地質構成と地震動特性について, 土木学会論文集, No.794/I-72, pp.301-306.
- Aki, K. (1967): Scaling law of seismic spectrum, *J. Geophys. Res.*, Vol.72, pp.1217-1231.
- Boore, D.M. (1983): Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, pp.1865-1894.
- Kinoshita, S. (1998): Kyoshin Net (K-net), *Seim. Res. Lett.*, Vol. 69, pp.309-332.
- Moya, A. and K. Irikura (2003): Estimation of site effects and Q factor using a reference event, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.93, pp.1730-1745.
- Street, R., R. Herrmann and O. Nuttli (1975), Spectral characteristics of the Lg wave generated by central United States earthquakes, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, Vol.41, pp.51-63.

港湾空港技術研究所資料 No. 1149

2007. 3

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 昭和情報プロセス株式会社

Copyright © (2007) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。