

日本海中部地震時のやや長周期の速度応答スペクトルの統計解析モデル

STATISTICAL MODEL FOR ESTIMATING VELOCITY RESPONSE SPECTRA
OF LONG-PERIOD STRUCTURES FROM THE 1983 NIHONKAI-CHUBU EARTHQUAKE

山田善一* 野田 茂** 広瀬鉄夫***

By Yoshikazu YAMADA, Shigeru NODA and Tetsuo HIROSE

This paper presents the result from a multiple regression analysis of JMA's low-magnification seismograph records observed during the Nihonkai-chubu earthquake of 1983. In the first part of this paper, the effects of earthquake factors and local soil conditions on velocity response spectra (2 to 20 sec) are clarified. For regression coefficients, dummy variables representing the component of record and soil conditions at each observation site are introduced in addition to the epicentral distance and azimuthal angle. It is found that the multiple correlation coefficients between predicted and observed values of spectral amplitude at each period are very high. The statistical model presented here was confirmed to be an effective tool for predicting the velocity response spectra. In the second part, a statistical model is examined for estimating the velocity response spectra of arbitrary damping ratio from those of 5 % damping and peak ground velocity. It must be emphasized that regression coefficients for damping reduction factor are remarkably dependent on the natural period, with predominant period of around 10 sec; and that the velocity response spectra cannot be estimated by the existing method without serious errors.

1. 序論

1985年9月19日、メキシコ市は、震央距離の遠い(約390km)巨大地震(Ms= 8.1)の洗礼を受けた初の近代都市となった。地震波が軟弱な地盤に入り、従来の耐震工学では盲点となっていた長周期波により引き起こされたものである。最近のビルの高層化、橋の長大化やタンクの大型化とともに、長周期波による構造物の性状の考察が重要になっている。

従来は、加速度型強震計記録に基づく短周期波(数秒より短い)の研究が日米を中心に極めて盛んであった。しかし、数秒より長い周期成分の工学的重要性が認識されだしたのは比較的最近であり、その研究の歴史は浅い。従って、長周期波の揺れについて合理的でかつ十分な耐震対策が施されているとは言えないのが現状である。メキシコ地震のように、地盤などの悪い条件がそろえば、遠くから伝播してきた地震波でも中高層ビルを破壊するのであるから、長周期波は今後の耐震工学の新しい問題点と言える。

こうしたことから、長周期(約2~20秒)地震動の工学的特性を総合的に研究しようとした試みがこれまでいくつかなされてきた。^{1)~3)} これらの研究はその時点における研究としてはかなりまとまったものとなっている。従来は地震学的研究を主体としていたのに対し、これらの研究成果では、断層モデルを用いた強震動のシミュレーションやSMAC型の加速度記録を用いることを脱皮して、気象庁1倍強震計記録のようなやや長周期成分の工学的特性を見直そうとする試みがいくつかなされている。従来の研究に見られる短周期の加速度強震計記録を中心にした成果のように、耐震設計に直接役立つほどの知見はデータの量・質や解析結果の勘点から言えば不足しているが、これらのプロジェクト研究の成果は将来の研究の方向を着実に見定めたものとなっている。このようなやや長周期領域の研究は工学と地震学の橋渡しをする領域であり、

* 工博 京 都 大 学 教 授 工 学 部 土 木 工 学 科 (〒606 京 都 市 左 京 区 吉 田 本 町)
 ** 工 修 京 都 大 学 助 手 工 学 部 土 木 工 学 科 (同 上)
 *** 京 都 大 学 大 学 院 生 工 学 研 究 科 土 木 工 学 専 攻 (同 上)

工学的な目的に直接適用できる可能性が高い。この点を補うために、サイスマックマイクロゾーネーションに注目してやや長周期領域での各地の採れ易さの度合いを求めた岡田ら⁴⁾・北川ら⁵⁾やMamuraら⁶⁾の研究は大いに意義深い。また、特定の地点についてやや長周期地動のアテニュエーション特性などを吟味した研究⁷⁾は、この方面の研究を行う際のバイブルと言っても大過ないであろう。いずれにしても、これらの研究はやや長周期の設計用入力地震動を評価する際の古典的な模範となっている。

著者ら⁸⁾は、昭和58年の日本海中部地震時における気象庁1倍強震計の記録を数値化し、周期10秒前後のやや長周期地震波について各種の解析を試みてきた。その結果、1)周期2～20秒の範囲における変位型強震計記録の精度が高いのに比べて、SMAC型加速度計による応答は周期6～7秒以上においてかなり過大な評価を与えることが多いこと、2)強震計のアーム長の変化が最大地動に与える影響は大きいこと、3)地動の最大変位の距離減衰は既往の経験式のものと同調和することがあること、4)非定常パワースペクトルの検討から表面波の分散性が見られたこと、5)周期10秒前後の波が卓越しており、計算した応答スペクトルは設計基準値を超過することなどがわかった。

さらに、本論文では、各観測点で計算した速度応答スペクトル S_v を用いて、日本海中部地震の地震像(特徴)を明らかにしようとするものである。具体的には、1)重回帰分析の回帰係数から、各観測点の地盤条件や各種の震源パラメーターなどの影響を定量的に検討し、2)減衰定数 $h = 5\%$ の S_v を基準にして、 $h = 0.1$ と 2% の S_v を求める手法を吟味する。

2. 1983年日本海中部地震

(1)概説

気象庁震源速報によると、本震(5月26日11時59分57.5秒、 $M_J = 7.7$)後における余震の震源分布はFig.1のようになる。同図には、6月9日の21時49分1秒の余震($M_J = 6.1$)と6月21日の15時25分25秒の最大余震($M_J = 7.1$)の位置を●印で、本震の震央を■印でプロットしている。余震域は日本海盆の東縁に位置し、その形状は南北に長い逆「く」の字形を呈している。

著者らは、本震発生後の7月上旬から、北海道・東北・関東・中部地域における気象庁管轄の各管区・地方気象台および測候所(43観測地点)から、機械式の変位型地震計である1倍強震計と100倍の電磁式地震計の自記紙(本震 $M_J = 7.7$, 6月9日の2つの余震 $M_J = 6.1$ と 6.0 , 最大余震 $M_J = 7.1$)のコピーを入手した。このうち、今回1倍強震計の数値化を実施した観測点はFig.2に示す26地点である。

本解析で用いた記録をTable 1に示す。本研究では、本震と最大余震時の速度応答スペクトルを統計解析するため、重回帰モデルを採用している。ここで、対象としたのは本震と最大余震である。表中には観測所名とともにGS Code(合衆国地質調査所(USGS)が全世界に設けている観測所名のコード)も示している。本震時の振り切れた記録(秋田・酒田・新潟の水平成分)や最大振幅の小さい記録などは、数値化の対象としていない。重回帰モデルを適用するにはバラエティに富んだできるだけ多くの観測点を含むことが望ましい。そこで、震源のradiation patternを考えて、震源をできるだけ囲むような方位にある観測点を対象に記録を選んだ。

本研究では、各官署における記録を収集するとともに、強震計の計器特性に関する詳細なアンケート調査を実施した。記録の各種補正に当たっては、各観測所での計器の整備状態や定数に経年変化が生ずるため、地震発生日に最も近い日に検定されたデータを採用した。具体的には、1倍強震計の固有周期、制振度、振子部のアーム長、摩擦値、ならびに3つの成分(NS, EW, UD)間の時間の同時性を確保するために、基準時刻(NSあるいはEW成分にタイムマークが付いている)からの各ベンの起動の遅れを調整する時刻量を調べた。最後の量を調べたのは、記録ベンの支持位置が3成分間で同じではないので、原記録において時間の同時性ははっきりしないことによる。

(2)数値化および各種補正

記録の数値化は、京都大学工学部土木工学教室計算機室所有のディジタイザーを用いて行った。ディジタ

Aftershock activity of the Nihonkai-chubu earthquake, 1983

- 1) Mainshock (M=7.7)
May 26, 11h59m57.5s
- 2) Aftershock (M=6.1)
June 9, 21h49m1s
- 3) Aftershock (M=7.1)
June 21, 15h25m25s

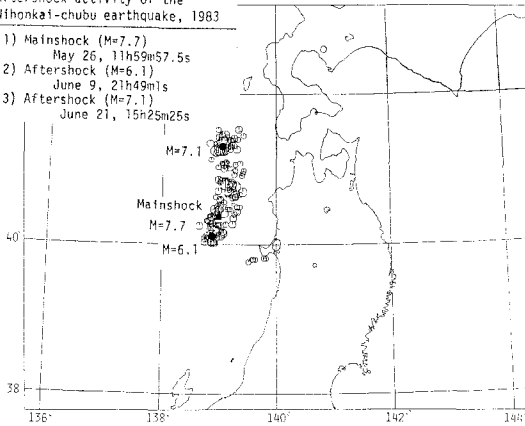


Fig.1 Epicenters of the Nihonkai-chubu earthquake of 1983 and some aftershocks.

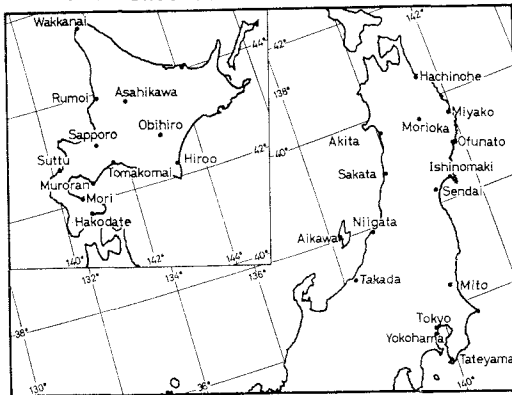


Fig.2 Observation stations of Japan Meteorological Agency used in this study.

Table 1 Low-magnification seismograph records used in this study.

| Observation Stations | | Mainshock (M=7.7) 11h59m57.5s | Largest Aftershock (M=7.1) 15h25m25s |
|----------------------|------------|----------------------------------|---|
| GS Code | Name | | |
| WAK | Wakkanai | NS EW | NS EW |
| RMJ | Rumoi | UD NS EW | |
| ASA | Asahikawa | UD NS EW | |
| OBI | Obihiro | UD NS EW | NS EW |
| HOO | Hiroo | UD NS EW | |
| SAP | Sapporo | UD NS EW | UD NS EW |
| TMR | Tomakomai | UD NS EW | UD NS EW |
| MRR | Muroran | UD NS EW | UD NS EW |
| SUT | Suttsu | UD NS EW | UD NS EW |
| MOR | Mori | UD NS EW | UD NS EW |
| HAK | Hakodate | UD NS EW | UD NS EW |
| HAC | Hachinohe | UD NS EW | UD NS EW |
| AKI | Akita | UD | UD NS EW |
| MRK | Morioka | NS EW | |
| MIY | Miyako | UD NS EW | UD NS EW |
| SAK | Sakata | UD | UD NS EW |
| OFU | Ofunato | UD NS EW | |
| ISN | Ishinomaki | UD NS EW | |
| SEN | Sendai | UD NS EW | NS EW |
| NII | Niigata | UD | UD NS EW |
| AIK | Aikawa | UD NS EW | UD NS EW |
| TKD | Takada | NS EW | |
| MIT | Mito | UD NS EW | |
| TOK | Tokyo | UD NS EW | UD NS EW |
| YOK | Yokohama | UD NS EW | NS EW |
| TAT | Tateyama | UD NS EW | |

NS,EW; Horizontal Components
UD ; Vertical Component

イザーは関東電子(株)のModel K510で、読取りの最小分解能(公称値)は0.1 mmである。まず、原記録は読み取り可能な程度に拡大した。次に、ディジタイザーにより波形をトレースするために、x,y座標を読み、これをフロッピーディスクに入力した後、大型計算機に転送した。また、確認のためプロッターにより記録波形を再生し、再生波形と実測波形を重ね合わせることで、目視で両者の一致度を調べた。なお、不正確な部分については、原則として、数値化をし直すことにした。ただし、記録を読み取る際に、波形が途切れていたり、不明瞭な箇所があるときには、前後の波の形状から推測した。

機械式地震計の記録には、零線、紙送りむら、円弧、波形のゆがみ、成分間の時間の同時性、等時間間隔(0.1秒)、摩擦や計器特性などに関する各種の補正を施した。まず、ペンの摩擦力を含めた非線形な運動方程式を解くことにより、記録波形から計器補正を考慮し、かつ摩擦の影響を除いた地動の加速度が得られる。加速度から速度・変位を計算するには線形加速度法を用いた。求めた波形は、チェビシェフ型の等リップル漸化式フィルターのうち、特にバンドパスフィルター⁹⁾(2~20秒の範囲)を通した。

漸化式フィルターは、ある時刻における出力をその時刻以前の入力と出力から計算しているため、因果律を満たすが、位相は一般に零でない。一方、一度フィルターを施して得られた出力にもう一度時間軸上で後ろから前へむかって同じフィルターを施せば、総合位相は零となるが、因果律は満たされない。そこで、位相が零となるように時間軸上で前後2回のフィルターを施し、かつ記録波形の端部においてはできる限り因果律を満たすようにフィルターのパラメーターを決めた。

(3)速度応答スペクトル

Fig.3 は本震時の速度応答スペクトルの一例を示したものである。応答の計算はNigam とJenningsの方法を修正した漸化式によった。超高層ビル・吊橋の上部構造物などの減衰定数 h は約2%、石油タンクではスロッシングに対して $h = 0.1\%$ 程度といわれている。ここでは減衰定数として0.1と2%を採用した。水平成分の応答計算をした観測点は、札幌・八戸・函館・帯広・稚内・森・寿都・苫小牧・留萌・東京・横浜である。一方、上下動に対しては、秋田・新潟・酒田・八戸・函館・森・寿都を計算の対象とした。

長周期構造物の代表例として、本州四国連絡橋公団で規定されている耐震設計基準（いわゆる本四スペクトル）は40kineを、高層建築技術指針としては47kine（上限）を、自治省告示（石油タンクのスロッシング）によると110kine ほどを定めている。現行の耐震基準において対象とする周期帯域は、大型石油タンクではスロッシングの1次固有周期が数秒～15秒程度、高層ビルにおいては固有周期が2～6秒程度、また長大吊橋においては固有周期が2～10秒程度である。Fig.3より、周期10秒前後で100kineにも及ぶ応答を示す例は苫小牧である。また、苫小牧は長大橋梁の基準値に近い値を示している。新潟・青森・酒田・秋田のように、記象上で針が振り切れてしまっていて数値化できなかった記録のことを考え合わせると、現行の各種の大型構造物の耐震基準を再検討する必要があるかもしれない。この点については文献8)でも指摘されている。

周期約8秒以下の応答値には各観測点によりかなりのばらつきが見られる。例えば、留萌の地域のように、周期帯によれば、ここで示したスペクトルの平均値よりも揺れやすいこともあり、逆に揺れにくくなることもある。かなりの数の地域で周期によって著しく速度応答が変化している。また、森のように、周期によらず、ほぼ一定の速度応答スペクトル振幅を示す例もある。Fig.3の速度応答スペクトルの固有周期10秒前後に注目するとわかるように、一般に、観測点の差によって構造物が揺れやすくなったり揺れにくくなったりする度合いは、短周期に比べて長周期(10秒前後)の地震動成分ほど小さくなっている。この周期帯では、長周期地震動が各観測点の地下構造の差にあまり依存しないということである。

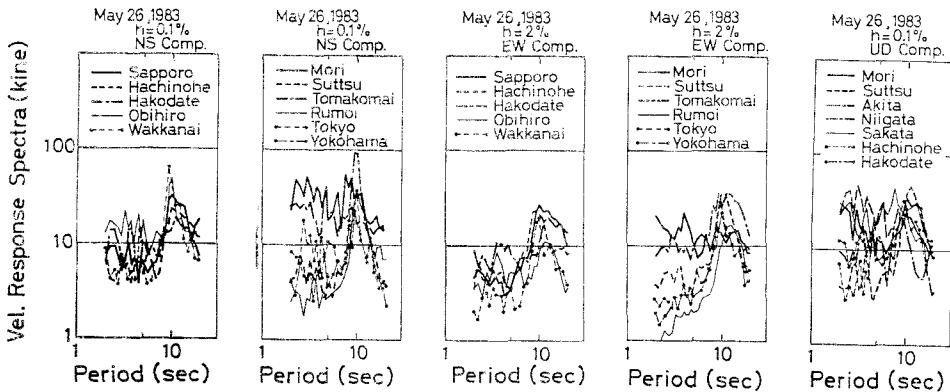


Fig.3 Velocity response spectra of mainshock with damping ratios of 0.1% and 2% obtained for representative observation sites.

3. 重回帰分析を用いた速度応答スペクトルの推定

(1) 速度応答スペクトルの統計解析のための重回帰モデル

本章では、速度応答スペクトルの統計解析とその予測結果について考察している。特に、速度応答スペクトルに影響を及ぼす因子のうち、震央距離、方位角、記録の成分などの諸元や各観測点の地盤条件を説明変数として応答スペクトルの重回帰分析を行った。観測点や成分の差は一種の分類区分なので、ダミー変数を用いてそれらの影響を導入した。なお、説明変数が多いほど統計解析の信頼度は向上するが、実用的観点から有効なパラメーターを用いた。ただし、特定の地震のデータに注目しているため、マグニチュードや震源深さなどの地震の諸元は説明変数に含めなかった。観測点ごとに地盤の増幅スペクトルを求めて統計解析をする手順は、1)我が国でこれまで得られた加速度強震記録を可能な限り用いて、2)比較的短周期(5秒以下)の地震動に注目している神山ら¹⁰⁾の研究と異なるが、彼らが実施した重回帰分析の方法と同じである。重回帰分析の具体的な計算法は文献11)によった。

気象庁の全国観測ネットワークの地点 i (観測点の総数 = N) の速度応答スペクトル $S_{\downarrow}^i(kine)$ (固有周期 T 、減衰定数 h) は、以下の式によって回帰することを試みた。

$$\log S_{\downarrow}^i(T, h) = a(T, h) \log \Delta^i + b(T, h) \Psi^i + \sum_{j=1}^N A_j(T, h) X_j + \sum_{k=1}^3 B_k(T, h) Y_k + c(T, h) \cdots \quad (1)$$

ここで、説明変数としては、震央距離 Δ (km)、震央から観測点への方位角 (北から時計回りに計った角度) Ψ (度)、観測点の差違を表すダミー変数 X 、水平と上下の成分 (NS, EW, UD) の違いを表すダミー変数 Y を考えた。ダミー変数は、例えば、 X_j について、応答スペクトルが観測点 n で得られたとき、 $X_j = \delta_{jn}$ (クロネッカーのデルタ数) で与えられることを意味する。

式(1)の回帰式は、一般によく用いられている震源を点とみなす点震源モデルに基づいている。従って、このモデルでは、日本海中部地震の本震のように、震源域が大きい地震の比較的震源近傍の観測点を取り扱う場合、 Δ や Ψ を決める際に問題が残る。このような場合には断層震源モデルを理論的に導入していかなければならない。この点をいかに改良するかに関しては今後の大きな課題の1つと言えるだろう。

(2) 重回帰分析による回帰係数の考察

上記の手法を用いて、速度応答スペクトルの重回帰分析を行った。これらの解析は、日本海中部地震のときの本震26地点、最大余震17地点を対象にして、本震と最大余震別に周期2～20秒で3つの減衰定数 ($h=0.1, 2, 5\%$) について実施した。前述の如く、取り扱った記録の一覧はTable 1の通りである。

最小自乗法により重回帰分析を行った結果の代表的なケース ($h=2\%$ の速度応答スペクトル) がTable 2 (本震) とTable 3 (最大余震) である。表中には、各説明変数について求められた回帰係数の a 、 b 、 A 、 B と c が固有周期ごとに示されている。Table 2 は館山・石巻・大船渡・室蘭・寿都・苫小牧、Table 3 は相川・酒田・秋田・新潟・東京の地点の結果である。Table 4 は、本震と最大余震に対する重回帰分析の重相関係数を減衰定数別に示したものである。この表からわかるように、固有周期や減衰定数ごとに重相関係数は変動しているが、0.844～0.968 の範囲にあり、実データとモデルに比較的高い相関のあることがわかる。重相関係数は神山らが求めた結果 (0.65～0.85) よりも高い値となっている。

以下、本震時の重回帰分析の結果について述べる。Fig. 4 の (a)～(e) は、回帰係数の $a(T, h)$ 、 $b(T, h)$ 、 $c(T, h)$ 、 $B(T, h)$ と $A(T, h)$ の周期的変動をプロットしたものである。図の (a)、(b) と (c) には減衰定数別に、図の (d) には $h=0.1\%$ と $h=5\%$ に対して成分別に示されている。図の (e) では、 $h=0.1\%$ に対しては26の全観測点の係数の比較が、秋田・札幌・酒田・新潟・東京・横浜・相川の地点に対しては減衰定数別 ($h=0.1, 2, 5\%$) の比較ができる。

震央距離の係数の $a(T, h)$ は、図の (a) に見られるように、複雑な周期的変動を示す。特に減衰定数が小さいほど顕著で、周期10秒前後の卓越した波の影響を強く受けている。この係数は物理的には負でなければならないが、もともと速度応答の距離減衰が小さいことや、不規則地盤、波の伝播機構、波動の複雑な増幅・減衰作用などの影響が考えられるため、正の値を有している。しかし、一般に、長周期になるに従って、係数値は減ってくる傾向にある。武村ら¹²⁾ は、断層モデルの理論に基づく物理的考察から、幾何学的な波面の広がりやの影響だけでなく、伝播経路における媒質の内部減衰の影響を考慮して、 $a(T, h) \log \Delta$ の回帰式ではなく、 $a(T, h) \Delta + p \log \Delta$ (理論的には、実体波に対し $p=-1$ 、表面波に対し $p=-0.5$ となる) とすべきことを説いている。本研究でもこのような議論をすれば、物理的に正しいモデルが得られたかもしれない。

$b(T, h)$ は表面波の radiation pattern と密接な関係があると考えられる。radiation pattern は、本来、方位角 Ψ の調和関数すなわち非線形関数である。平行成層構造中のダブル・カップル点震源による表面波の radiation pattern は、 h (震源深さ)、 θ (走向から測った観測点の方位角)、 λ (すべり角)、 δ (傾斜角) の関数である。しかも、前述のように、本震の場合震源域が広いので、この Ψ が radiation pattern を代表する変数とは考えられない。しかしながら、観測結果が理論通りに振舞うことはむずかしいので、ここでは工学的な利用の立場から、説明変数 Ψ として式(1)のようにした。本震時の観測点は方位角 Ψ が $19^\circ \sim 196^\circ$ の、最大余震のときには Ψ が $24^\circ \sim 191^\circ$ の範囲に分布していた。Fig. 4(b) から、 $b(T, 0.001)$ は極めて特徴的な周期的変動をしている。これは、 $a(T, h)$ や $c(T, h)$ と連動した結果であるかもしれない。 $h=2\%$ や 5% に対しては、対象とした地点の方位角の範囲からして、方位角が速度応答スペクトルに及ぼす影響はそれ

Table 2 Multiple regression analysis results for velocity response spectra of mainshock with damping ratio of $h=2\%$.

| Period T (sec) | a(T, 0.02) | b(T,0.02) | A(T,0.02) | | | | | | B(T,0.02) | | | c(T,0.02) |
|-------------------|---------------|------------|-----------|--------|--------|--------|-------|-------|-----------|-------|-------|-----------|
| | | | TAT | ISN | OFU | MRR | SUT | TMR | EW | NS | UD | |
| 2.00 | 0.058 | 0.590E-03 | -0.463 | -0.213 | -0.353 | -0.147 | 0.147 | 0.515 | 0.353 | 0.369 | 0.154 | -0.070 |
| 2.25 | 0.071 | 0.123E-02 | -0.603 | -0.443 | -0.321 | -0.079 | 0.103 | 0.554 | 0.377 | 0.394 | 0.184 | -0.085 |
| 2.50 | 0.067 | 0.129E-02 | -0.453 | -0.483 | -0.275 | -0.045 | 0.230 | 0.497 | 0.363 | 0.382 | 0.107 | -0.065 |
| 2.75 | 0.047 | 0.522E-03 | -0.284 | -0.194 | -0.187 | 0.076 | 0.311 | 0.623 | 0.320 | 0.374 | 0.100 | -0.049 |
| 3.00 | 0.081 | 0.138E-02 | -0.502 | -0.297 | -0.325 | -0.050 | 0.170 | 0.552 | 0.346 | 0.404 | 0.155 | -0.077 |
| 3.25 | 0.045 | 0.550E-03 | -0.228 | -0.208 | -0.201 | 0.107 | 0.201 | 0.591 | 0.447 | 0.459 | 0.209 | -0.074 |
| 3.50 | 0.071 | 0.859E-03 | -0.321 | -0.409 | -0.258 | -0.044 | 0.157 | 0.365 | 0.422 | 0.444 | 0.226 | -0.070 |
| 3.75 | 0.055 | 0.545E-03 | -0.329 | -0.438 | -0.253 | -0.178 | 0.164 | 0.486 | 0.491 | 0.477 | 0.267 | -0.071 |
| 4.00 | 0.070 | 0.135E-02 | -0.450 | -0.529 | -0.331 | -0.119 | 0.106 | 0.364 | 0.423 | 0.420 | 0.214 | -0.072 |
| 4.25 | 0.070 | 0.113E-02 | -0.332 | -0.413 | -0.203 | 0.068 | 0.102 | 0.535 | 0.316 | 0.363 | 0.145 | -0.084 |
| 4.50 | 0.061 | 0.851E-03 | -0.308 | -0.294 | -0.042 | 0.098 | 0.014 | 0.580 | 0.369 | 0.418 | 0.196 | -0.110 |
| 4.75 | 0.055 | 0.106E-02 | -0.317 | -0.338 | -0.141 | 0.014 | 0.056 | 0.598 | 0.429 | 0.478 | 0.268 | -0.115 |
| 5.00 | 0.078 | 0.121E-02 | -0.294 | -0.394 | -0.287 | -0.020 | 0.047 | 0.547 | 0.370 | 0.390 | 0.178 | -0.085 |
| 5.63 | 0.077 | 0.156E-02 | -0.194 | -0.323 | -0.329 | 0.090 | 0.239 | 0.555 | 0.316 | 0.316 | 0.110 | -0.090 |
| 6.25 | 0.047 | 0.164E-02 | -0.357 | -0.269 | -0.407 | 0.119 | 0.219 | 0.538 | 0.477 | 0.477 | 0.271 | -0.096 |
| 6.88 | 0.066 | 0.103E-02 | -0.239 | -0.161 | -0.302 | 0.079 | 0.183 | 0.512 | 0.498 | 0.490 | 0.307 | -0.094 |
| 7.50 | 0.055 | 0.608E-03 | -0.055 | 0.055 | 0.0 | 0.183 | 0.280 | 0.604 | 0.440 | 0.520 | 0.251 | -0.106 |
| 8.13 | 0.074 | 0.480E-03 | 0.083 | 0.070 | 0.108 | 0.414 | 0.535 | 0.829 | 0.331 | 0.397 | 0.103 | -0.113 |
| 8.75 | 0.076 | 0.241E-03 | 0.133 | 0.093 | 0.093 | 0.554 | 0.714 | 0.868 | 0.381 | 0.462 | 0.190 | -0.163 |
| 9.38 | 0.133 | -0.157E-02 | 0.733 | 0.501 | 0.329 | 0.696 | 0.965 | 1.189 | 0.262 | 0.359 | 0.098 | -0.224 |
| 10.00 | 0.105 | -0.117E-02 | 0.639 | 0.319 | 0.106 | 0.570 | 0.958 | 1.080 | 0.494 | 0.553 | 0.329 | -0.230 |
| 11.25 | 0.039 | 0.682E-03 | 0.471 | 0.513 | 0.353 | 1.049 | 1.273 | 1.222 | 0.296 | 0.252 | 0.143 | -0.177 |
| 12.50 | 0.087 | -0.222E-02 | 0.519 | 0.473 | 0.395 | 0.713 | 0.823 | 0.791 | 0.620 | 0.533 | 0.425 | -0.169 |
| 13.75 | 0.041 | 0.783E-03 | 0.442 | 0.346 | 0.430 | 0.884 | 1.003 | 1.009 | 0.295 | 0.258 | 0.081 | -0.114 |
| 15.00 | 0.095 | 0.186E-03 | 0.193 | 0.119 | 0.051 | 0.493 | 0.550 | 0.618 | 0.550 | 0.486 | 0.251 | -0.126 |
| 16.25 | 0.054 | 0.107E-02 | -0.035 | 0.052 | -0.052 | 0.454 | 0.472 | 0.615 | 0.602 | 0.552 | 0.322 | -0.131 |
| 17.50 | 0.030 | 0.275E-03 | 0.0 | 0.180 | 0.060 | 0.438 | 0.438 | 0.647 | 0.615 | 0.586 | 0.320 | -0.110 |
| 18.75 | -0.030 | 0.230E-02 | 0.048 | 0.246 | 0.216 | 0.661 | 0.715 | 0.919 | 0.382 | 0.372 | 0.124 | -0.126 |
| 20.00 | -0.002 | 0.218E-02 | -0.219 | -0.017 | -0.017 | 0.346 | 0.491 | 0.647 | 0.547 | 0.532 | 0.296 | -0.130 |

Table 3 Multiple regression analysis results for velocity response spectra for largest aftershock with damping ratio of $h=2\%$.

| Period T (sec) | a(T, 0.02) | b(T,0.02) | A(T,0.02) | | | | | B(T,0.02) | | | c(T,0.02) |
|-------------------|---------------|------------|-----------|--------|--------|--------|--------|-----------|--------|--------|-----------|
| | | | AIK | SAK | AKI | NII | TOK | EW | NS | UD | |
| 2.00 | 0.065 | -0.176E-02 | -0.500 | 0.684 | 0.544 | 0.404 | -0.457 | 0.379 | 0.397 | -0.020 | -0.098 |
| 2.25 | 0.119 | 0.188E-02 | -0.904 | 0.452 | 0.304 | 0.070 | -0.716 | -0.027 | -0.022 | -0.370 | -0.117 |
| 2.50 | 0.126 | 0.555E-02 | -1.206 | 0.132 | 0.141 | -0.194 | -1.141 | -0.331 | -0.318 | -0.666 | -0.234 |
| 2.75 | 0.237 | 0.513E-02 | -1.419 | -0.026 | -0.147 | -0.511 | -1.205 | -0.273 | -0.273 | -0.704 | -0.234 |
| 3.00 | 0.217 | 0.515E-02 | -1.310 | -0.079 | -0.016 | -0.357 | -1.222 | -0.396 | -0.335 | -0.761 | -0.100 |
| 3.25 | 0.213 | 0.567E-02 | -1.280 | -0.093 | -0.200 | -0.379 | -1.091 | -0.408 | -0.415 | -0.798 | -0.106 |
| 3.50 | 0.163 | 0.380E-02 | -1.059 | 0.248 | -0.015 | -0.146 | -0.955 | -0.212 | -0.230 | -0.602 | -0.041 |
| 3.75 | 0.209 | 0.425E-02 | -1.055 | 0.073 | -0.158 | -0.350 | -1.030 | -0.235 | -0.245 | -0.629 | -0.036 |
| 4.00 | 0.174 | 0.233E-02 | -0.852 | 0.261 | 0.045 | 0.0 | -0.678 | -0.084 | -0.061 | -0.410 | -0.041 |
| 4.25 | 0.126 | 0.809E-03 | -0.685 | 0.434 | 0.332 | 0.366 | -0.394 | 0.024 | 0.069 | -0.247 | -0.027 |
| 4.50 | 0.113 | 0.313E-03 | -0.737 | 0.533 | 0.421 | 0.288 | -0.425 | 0.111 | 0.189 | -0.138 | -0.052 |
| 4.75 | 0.110 | 0.162E-02 | -0.780 | 0.495 | 0.285 | 0.210 | -0.501 | -0.014 | 0.010 | -0.350 | -0.074 |
| 5.00 | 0.191 | 0.314E-02 | -1.162 | 0.168 | 0.070 | -0.042 | -0.737 | -0.196 | -0.185 | -0.510 | -0.100 |
| 5.63 | 0.144 | 0.587E-02 | -1.323 | 0.058 | 0.058 | -0.194 | -0.844 | -0.413 | -0.417 | -0.705 | -0.180 |
| 6.25 | 0.204 | 0.495E-02 | -1.348 | -0.015 | -0.053 | -0.339 | -1.004 | -0.211 | -0.222 | -0.583 | -0.209 |
| 6.88 | 0.327 | 0.989E-02 | -1.878 | -0.645 | -0.490 | -0.946 | -1.443 | -0.781 | -0.727 | -1.104 | -0.144 |
| 7.50 | 0.229 | 0.523E-02 | -1.225 | -0.104 | -0.097 | -0.318 | -0.958 | -0.267 | -0.241 | -0.501 | -0.051 |
| 8.13 | 0.193 | 0.455E-02 | -0.986 | -0.158 | -0.164 | -0.152 | -0.877 | -0.146 | -0.105 | -0.320 | -0.016 |
| 8.75 | 0.261 | 0.497E-02 | -1.278 | -0.237 | -0.304 | -0.408 | -0.995 | -0.226 | -0.211 | -0.461 | -0.017 |
| 9.38 | 0.181 | 0.365E-02 | -1.066 | 0.050 | -0.118 | -0.211 | -0.751 | 0.069 | 0.057 | -0.212 | -0.063 |
| 10.00 | 0.204 | 0.478E-02 | -1.139 | -0.161 | -0.223 | -0.254 | -0.847 | -0.016 | -0.006 | -0.347 | -0.132 |
| 11.25 | 0.240 | 0.649E-02 | -1.372 | -0.354 | -0.316 | -0.419 | -1.092 | -0.259 | -0.246 | -0.603 | -0.110 |
| 12.50 | 0.256 | 0.807E-02 | -1.615 | -0.346 | -0.248 | -0.614 | -1.378 | -0.479 | -0.466 | -0.913 | -0.119 |
| 13.75 | 0.261 | 0.706E-02 | -1.408 | -0.401 | -0.275 | -0.538 | -1.334 | -0.424 | -0.398 | -0.905 | -0.115 |
| 15.00 | 0.235 | 0.859E-02 | -1.510 | -0.455 | -0.312 | -0.599 | -1.408 | -0.613 | -0.640 | -1.031 | -0.124 |
| 16.25 | 0.207 | 0.675E-02 | -1.356 | -0.260 | -0.182 | -0.514 | -1.231 | -0.440 | -0.480 | -0.838 | -0.113 |
| 17.50 | 0.268 | 0.706E-02 | -1.450 | -0.370 | -0.271 | -0.598 | -1.345 | -0.574 | -0.621 | -0.968 | -0.147 |
| 18.75 | 0.224 | 0.687E-02 | -1.418 | -0.317 | -0.236 | -0.497 | -1.288 | -0.582 | -0.617 | -0.927 | -0.110 |
| 20.00 | 0.123 | 0.334E-02 | -0.849 | 0.118 | 0.105 | -0.068 | -0.818 | -0.199 | -0.218 | -0.504 | -0.115 |

ほど大きくない。

Fig.4(c)から、 $c(T,h)$ の周期的変動は減衰定数にあまり左右されないことがわかる。 $c(T,h)$ の絶対値は全般に周期の増大(2~10秒)とともに大きくなり、さらに減少し(10~15秒)、15秒以上の周期帯でほぼ一定となっている。 $c(T,h)$ は帰係数なので、ここで扱っている説明変数で説明できない複雑な要因が多く含まれてると考えられる。前述したように、方位角の影響は減衰定数が小さいほど大きい。逆に、減衰定数が大きくなると、周期に対する変動は一般に強くなかったが、このような傾向は定数項の $c(T,h)$ には見られない。

図の(d)からわかるように、成分の違いによる周期的変動は、各成分についておおむね相似形である。周

Table 4 Multiple correlation coefficients obtained from statistical analysis for velocity response spectra (h=0.1,2,5%).

| (a) Mainshock | | | | (b) Largest aftershock | | | |
|-------------------|----------------------------------|-------|-------|------------------------|----------------------------------|-------|-------|
| Period T (sec) | Multiple Correlation Coefficient | | | Period T (sec) | Multiple Correlation Coefficient | | |
| | h=0.1% | h=2% | h=5% | | h=0.1% | h=2% | h=5% |
| 2.00 | 0.929 | 0.962 | 0.955 | 2.00 | 0.893 | 0.913 | 0.917 |
| 2.25 | 0.933 | 0.931 | 0.940 | 2.25 | 0.946 | 0.923 | 0.923 |
| 2.50 | 0.933 | 0.950 | 0.957 | 2.50 | 0.934 | 0.930 | 0.929 |
| 2.75 | 0.960 | 0.968 | 0.959 | 2.75 | 0.924 | 0.928 | 0.941 |
| 3.00 | 0.936 | 0.929 | 0.930 | 3.00 | 0.936 | 0.951 | 0.945 |
| 3.25 | 0.940 | 0.943 | 0.947 | 3.25 | 0.923 | 0.943 | 0.946 |
| 3.50 | 0.963 | 0.961 | 0.953 | 3.50 | 0.942 | 0.950 | 0.946 |
| 3.75 | 0.944 | 0.961 | 0.963 | 3.75 | 0.942 | 0.944 | 0.938 |
| 4.00 | 0.944 | 0.957 | 0.957 | 4.00 | 0.928 | 0.948 | 0.943 |
| 4.25 | 0.917 | 0.935 | 0.934 | 4.25 | 0.930 | 0.945 | 0.941 |
| 4.50 | 0.918 | 0.914 | 0.917 | 4.50 | 0.937 | 0.946 | 0.944 |
| 4.75 | 0.861 | 0.897 | 0.910 | 4.75 | 0.923 | 0.948 | 0.944 |
| 5.00 | 0.928 | 0.931 | 0.922 | 5.00 | 0.896 | 0.931 | 0.942 |
| 5.63 | 0.930 | 0.920 | 0.923 | 5.63 | 0.920 | 0.922 | 0.931 |
| 6.25 | 0.919 | 0.922 | 0.925 | 6.25 | 0.886 | 0.914 | 0.916 |
| 6.88 | 0.921 | 0.933 | 0.924 | 6.88 | 0.926 | 0.922 | 0.923 |
| 7.50 | 0.901 | 0.904 | 0.911 | 7.50 | 0.905 | 0.911 | 0.918 |
| 8.13 | 0.908 | 0.900 | 0.888 | 8.13 | 0.894 | 0.909 | 0.910 |
| 8.75 | 0.892 | 0.886 | 0.870 | 8.75 | 0.917 | 0.915 | 0.919 |
| 9.38 | 0.871 | 0.846 | 0.844 | 9.38 | 0.916 | 0.911 | 0.919 |
| 10.00 | 0.845 | 0.851 | 0.856 | 10.00 | 0.855 | 0.889 | 0.903 |
| 11.25 | 0.886 | 0.884 | 0.886 | 11.25 | 0.880 | 0.875 | 0.879 |
| 12.50 | 0.884 | 0.887 | 0.900 | 12.50 | 0.911 | 0.906 | 0.900 |
| 13.75 | 0.901 | 0.916 | 0.915 | 13.75 | 0.910 | 0.905 | 0.904 |
| 15.00 | 0.917 | 0.917 | 0.920 | 15.00 | 0.878 | 0.884 | 0.884 |
| 16.25 | 0.898 | 0.901 | 0.868 | 16.25 | 0.873 | 0.869 | 0.876 |
| 17.50 | 0.914 | 0.915 | 0.909 | 17.50 | 0.864 | 0.871 | 0.879 |
| 18.75 | 0.875 | 0.892 | 0.875 | 18.75 | 0.851 | 0.874 | 0.870 |
| 20.00 | 0.868 | 0.890 | 0.902 | 20.00 | 0.868 | 0.865 | 0.874 |

期帯域ごとに係数値が異なるのは表面波の影響であろう。減衰定数が大きくなると、長周期になるほど係数値のB(T,h)は次第に大きくなっている。

各観測点での統計的増幅スペクトルに相当する係数の $A_j(T,h)$ は異なった減衰定数別に求めることができる。図の(e)より、観測点の地盤条件の違いを反映して、観測点ごとに異なった $A_j(T,h)$ の値が得られている。卓越周期や固有周期ごとの揺れ易さの度合いに注目すると、各観測点特有の増幅作用が生じていることがわかる。しかし、この係数の周期的変動は実測の速度応答スペクトル(例えばFig.3参照)のそれとよく似ており、むしろ日本海中部地震時の地震像がそのまま反映したものと考えられる。

式(1)中には source effectを表す項が無い場合、必然的に $A_j(T,h)$ には、source effectとsite effectが混在して入ってしまう。従って、本質的にはこの点で好ましいことではない。その解決策としては、①多くの地震の記録について、震源項を入れた式で回帰し、 $A_j(T,h)$ が site effectのみを表すようにする、②GDSN(Global Digital Seismograph Network)より求めた同地震の震源スペクトルを参考に、site effectと source effectとを分離する、などの方法が考えられる。これらの点に関しては将来の研究にまかせたい。

(3)データ取得点での速度応答スペクトルの予測

ここでは、式(1)の回帰モデルを適用して求めた速度応答スペクトルを実測スペクトルと比較し、本手法の妥当性を検証する。Fig.5は本震時の速度応答スペクトルの一例を比較したものである。図中には、h=0.1%に対する大船渡と室蘭のNS成分・寿都と苫小牧のEW成分、h=2%のときの大船渡と室蘭のUD成分が示されている。Fig.6には、最大余震のときのh=0.1%に対する秋田・新潟・相川・酒田のNS成分と函館のEW成分の、h=2%に対する八戸のNS成分・秋田と新潟のUD成分の速度応答スペクトルの予測値(---)と実測値(—)を比較している。

両図からわかるように、卓越周期や応答のピーク値が若干ずれているものもあるが、実測と予測のスペクトルはよく一致している。全般的に、応答スペクトルの形状や振幅は周期2~20秒の範囲において実によく対応している。これは、重相関係数が90%前後の値を示していたことから、当然予想されたことである。ここで提示した応答スペクトルの解析法は簡単な方法の割には、実測スペクトルを比較的良好に再現しているといえる。これらの例から、式(1)で与えられた速度応答スペクトルの予測法の妥当性が確認できた。

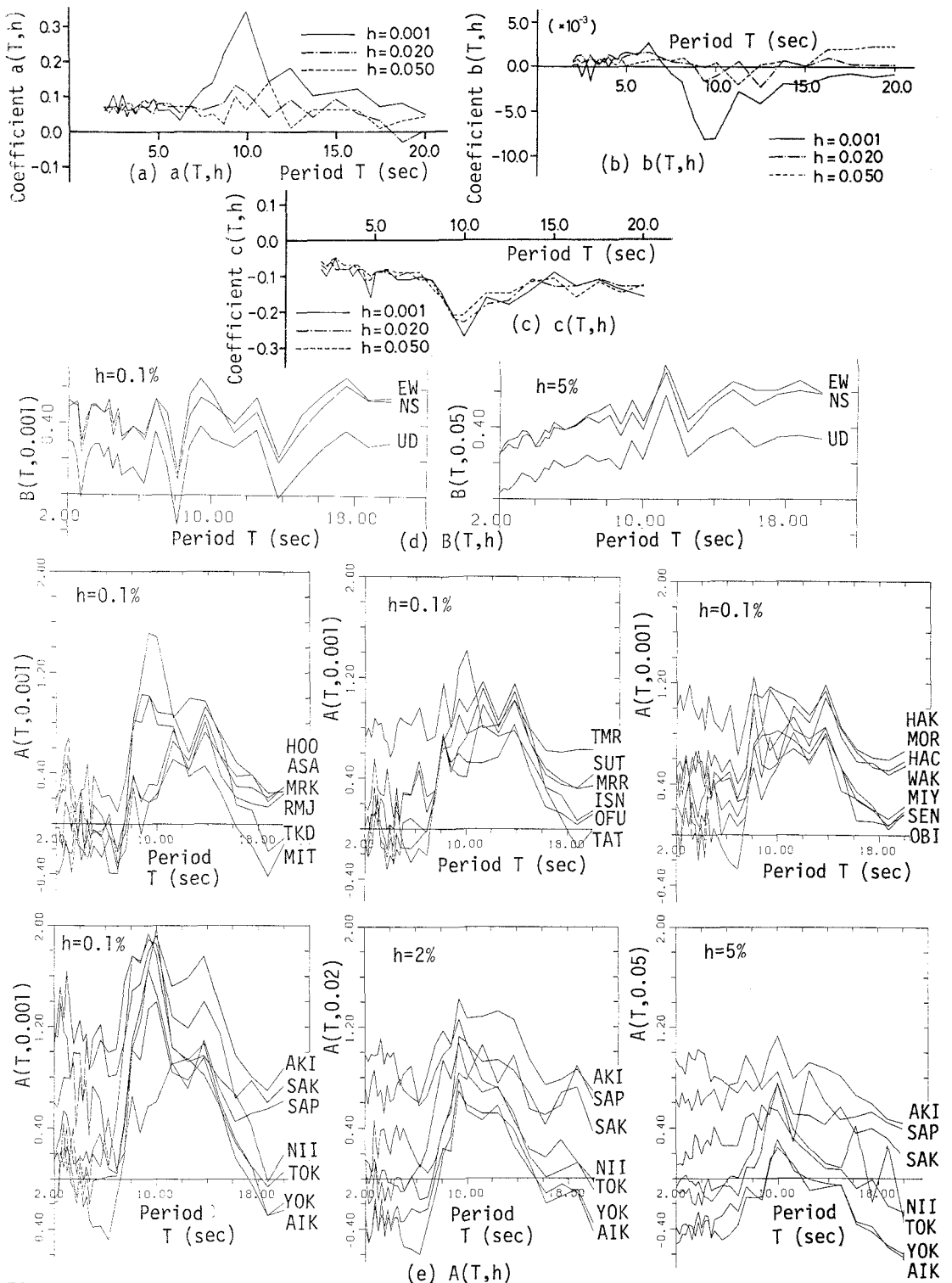


Fig.4 Period variations of regression coefficients $a(T,h)$, $b(T,h)$, $c(T,h)$, $B(T,h)$ and $A(T,h)$ obtained from statistical analysis of velocity response spectra with damping ratios of $h=0.1, 2$ and 5% , where mainshock records were used.

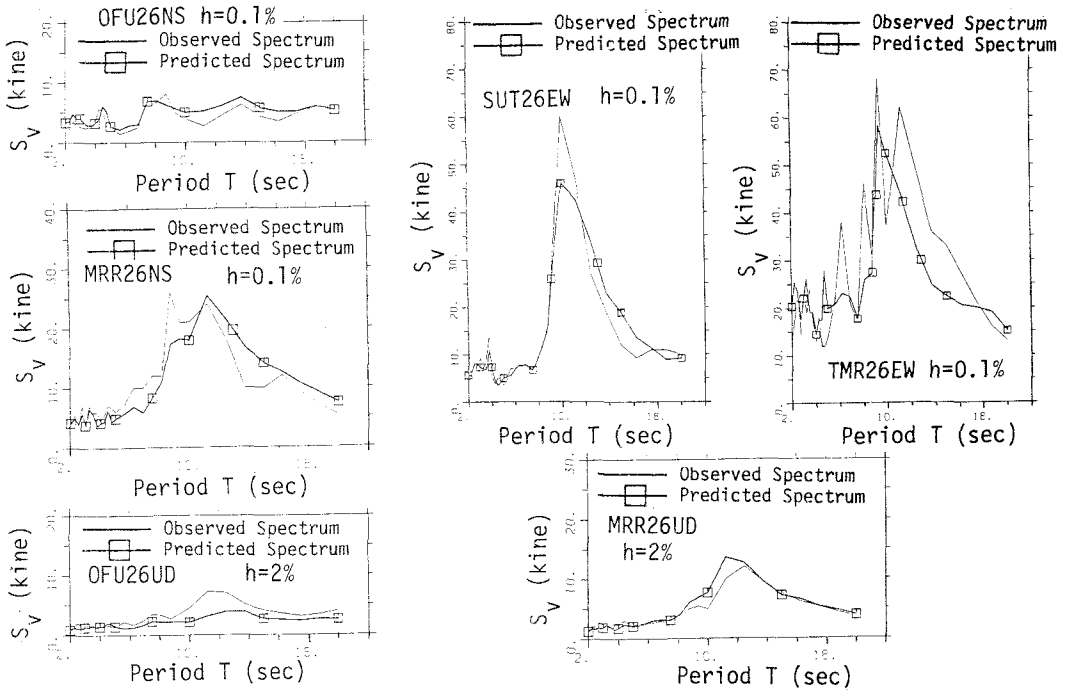


Fig.5 Comparison between velocity response spectra estimated by multiple regression analysis and ones observed for mainshock.

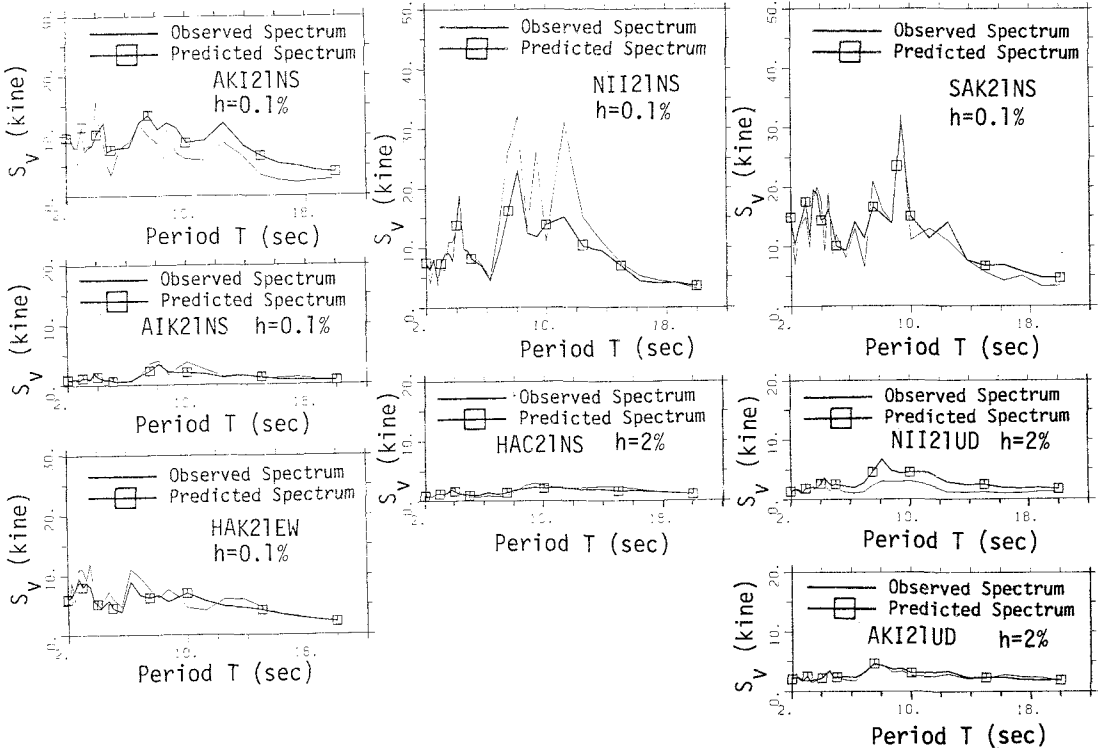


Fig.6 Comparison between velocity response spectra estimated by multiple regression analysis and ones observed for largest aftershock.

4. 減衰定数に対する速度応答スペクトルの補正法

(1) 特定の減衰定数の速度応答スペクトルから任意の減衰定数の速度応答スペクトルを推定する方法

一般に、構造物の動的解析を行うために、特定の減衰定数に対する地震応答スペクトルが与えられていれば、任意の減衰定数に対するスペクトル値は必要とされる減衰定数に近いスペクトルを内外挿して設定することが考えられる。このようなことから、川島ら¹³⁾は、地震応答加速度スペクトルに及ぼす減衰定数の影響を我が国で得られた水平206成分の加速度地震記録に基づいて検討し、減衰定数5%の加速度応答スペクトル(絶対加速度応答スペクトル)をもとに任意の減衰定数の加速度応答スペクトル(絶対加速度応答スペクトル)を推定する手法を提案している。

すなわち、加速度応答スペクトル倍率 $\beta(T, 0.05)$ (減衰定数 $h=5\%$) が与えられれば、応答スペクトル比 $\xi_{SA}(T, h)$ は次式により求められるとしている。

$$\xi_{SA}(T, h) = \left\{ \frac{1.5}{40h+1} + 0.5 \right\} \beta(T, 0.05) \left\{ \frac{1}{300h+6} - 0.8h \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

$$\xi_{SA}(T, h) = \frac{S_A(T, h)}{S_A(T, 0.05)} = \frac{\beta(T, h)}{\beta(T, 0.05)} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $S_A(T, h)$ 、 $\beta(T, h)$ は、それぞれ、固有周期 T (秒) と減衰定数 h の絶対加速度応答スペクトル (gal)、およびこれを入力地震動の最大加速度 a_{max} (gal) で割った加速度応答スペクトル倍率である。

式(2)の性格としては、① $\xi_{SA}(T, h)$ と $\beta(T, 0.05)$ を結びつける係数が固有周期 T に依存していないこと、② 式の適用範囲が主に $0 \leq h \leq 0.5$ と $T \leq 3$ 秒に限られることなどが挙げられる。式(2)はより一般的な減衰定数による地震応答スペクトルの補正法として検討されたものであり、設計スペクトルとして実に簡便な表示式となっている。しかしながら、① 強震記録から実際に直接計算で求めた $S_A(T, h)$ スペクトルと式(2)および(3)から推定したスペクトルがどの程度の精度で合致するのか、② 周期数秒以上の長周期地震動に対しても、式(2)のような応答スペクトル比の簡易推定法が成り立つのか、などの疑問点が残る。

日本海中部地震時の記録(主として1倍強震計)の最大変位の生じた周期は、観測点の位置によらず、ほぼ5~15秒の範囲に集中しており、平均的に10秒ほどの地動を励起していた。このような地震像に対して、式(2)のような回帰式はどのような特徴をもつのであろうか。そこで、本研究では、Table 1 に示したように本震と最大余震の合計114成分の速度応答スペクトルを減衰定数別に求め、川島ら¹³⁾による方法を踏襲して、補正法の特徴を探ることにした。

速度応答スペクトル $S_v(T, h)$ に及ぼす減衰定数 h の影響を表すため、減衰定数 $h=5\%$ の S_v を基準として、次式により速度応答スペクトル比 ξ_{sv} を定義した。

$$\xi_{sv}(T, h) = \frac{S_v(T, h)}{S_v(T, 0.05)} = \frac{\beta(T, h)}{\beta(T, 0.05)} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 β は速度応答スペクトルを地動の最大速度 V_{max} で割った値、すなわち $\beta(T, h) = S_v(T, h) / V_{max}$ である。ただし、地動や応答スペクトルは、気象庁1倍強震計記録から得たもので、2~20秒の周期を対象に求めている。

Fig. 7 は、Table 1 に示す本震と最大余震の全記録を用いて、主要な減衰定数の $h = 0.1$ と 2% に対し、 $\xi_{sv}(T, h)$ と $\beta(T, 0.05)$ の関係をプロットしたものである。ただし、速度応答スペクトルは、Table 2 ~ 5 に示すように、2~20秒の範囲の固有周期29個について計算されている。 $\log \xi_{sv}$ と $\log \beta$ の間の関係は、減衰定数が小さい $h = 0.1\%$ ではばらつきが大きい、 $h = 2\%$ に対してはよい相関があると言える。前述したように、文献13)では、 $\log \xi_{SA}(T, h)$ と $\log \beta(T, 0.05)$ の関係について、Fig. 7 と同じ図を作成し

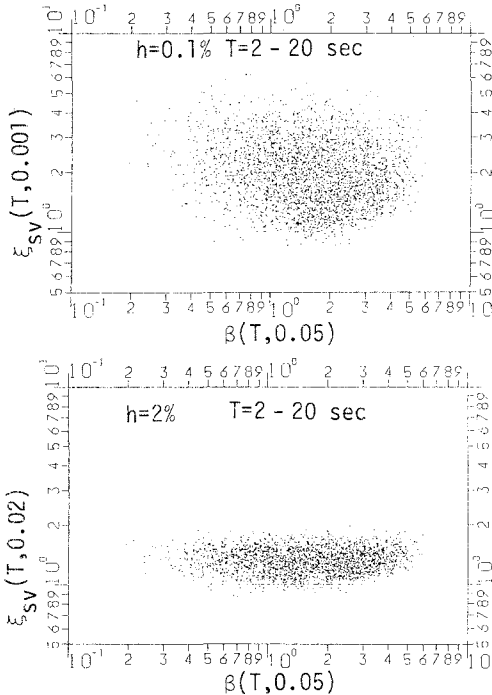


Fig.7 Relation between velocity response spectral ratio (damping reduction factor) $\xi_{sv}(T, h)$ with arbitrary damping ratio h and peak velocity response factor $\beta(T, 0.05)$ of 5% damping.

ている。それによれば、① $\beta(T, 0.05)$ は 0.02 ~ 5 の範囲にあり、② $\xi_{sv}(T, h)$ の分布範囲は主に $0.9 < \xi_{sv}(T, 0.001) < 9$ と $0.9 < \xi_{sv}(T, 0.02) < 2$ であり、③ h が小さいほど、全般的に任意の β に対して ξ_{sv} のばらつきが極めて大きくなっている。Fig.7 の結果は文献13) と同一の特徴を示している。

そこで、ここでは、Fig.7 の関係を固有周期 T と減衰定数 h について、次式で回帰することを試みた。

$$\log \xi_{sv}(T, h) = \log a(T, h) + b(T, h) \log \beta(T, 0.05) \quad \dots\dots\dots (5)$$

(2) 補正法の妥当性の確認

最小自乗法により求めた係数の $a(T, h)$ と $b(T, h)$ は、 $h = 0.1\%$ と 2% に対して、Fig.8 の実線のようにになる。Table 5 はその係数値を具体的に示したものである。図中の破線は、周期 5 ~ 15 秒の実係数値 (実線) を基準にして、次式のガウス分布形で、 $a(T, h)$ と $b(T, h)$ の値を近似したものである。

$$\left. \begin{aligned} \bar{a}(T, h) &= 10^{X_1(h) \exp \left[X_2(h) \left\{ T - X_3(h) \right\}^2 \right]} \\ \bar{b}(T, h) &= -Y_1(h) \exp \left[-Y_2(h) \left\{ T - Y_3(h) \right\}^2 \right] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

図からわかるように、回帰係数は固有周期にかなり従属しており、しかも周期 10 秒前後でピークをもつような形状となっている。式 (6) による近似法はおおむね妥当であるが、周期 10 秒前後における $a(T, h)$ の推定

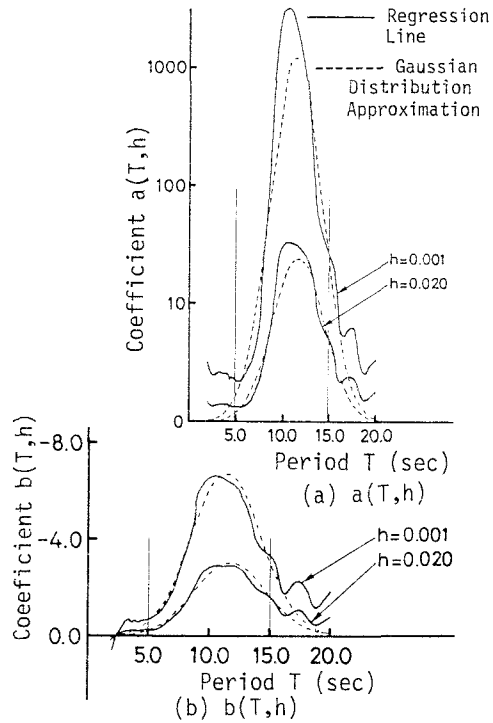


Fig.8 Dependence of regression coefficients $a(T, h)$ and $b(T, h)$ for damping reduction factor on natural period T and damping ratio h .

Table 5 Tabular presentation of regression coefficients $a(T,h)$, $b(T,h)$ for period-dependent reduction factor converting a 5% damping velocity response spectrum into an velocity response spectrum for desired damping.

| Period T (sec) | Regression Coefficients for Damping Reduction Factor | | | |
|-------------------|--|--------|--------|--------|
| | h=0.1% | | h=2% | |
| | a(T,h) | b(t,h) | a(T,h) | b(T,h) |
| 2.00 | 3.13 | 0.55 | 1.49 | 0.19 |
| 2.25 | 2.59 | 0.06 | 1.39 | 0.02 |
| 2.50 | 2.48 | -0.12 | 1.35 | -0.04 |
| 2.75 | 2.49 | -0.29 | 1.39 | -0.11 |
| 3.00 | 2.59 | -0.51 | 1.40 | -0.18 |
| 3.25 | 2.64 | -0.66 | 1.41 | -0.23 |
| 3.50 | 2.53 | -0.61 | 1.40 | -0.23 |
| 3.75 | 2.51 | -0.56 | 1.39 | -0.21 |
| 4.00 | 2.55 | -0.62 | 1.40 | -0.22 |
| 4.25 | 2.29 | -0.54 | 1.35 | -0.19 |
| 4.50 | 2.34 | -0.61 | 1.35 | -0.22 |
| 4.75 | 2.39 | -0.66 | 1.36 | -0.23 |
| 5.00 | 2.22 | -0.67 | 1.34 | -0.24 |
| 5.63 | 2.22 | -0.80 | 1.33 | -0.28 |
| 6.25 | 2.88 | -1.34 | 1.44 | -0.46 |
| 6.88 | 3.95 | -1.70 | 1.70 | -0.65 |
| 7.50 | 8.00 | -2.49 | 2.25 | -0.97 |
| 8.13 | 25.80 | -3.48 | 3.77 | -1.42 |
| 8.75 | 120.48 | -4.70 | 6.79 | -1.88 |
| 9.38 | 1206.71 | -6.20 | 16.37 | -2.44 |
| 10.00 | 2726.63 | -6.56 | 30.48 | -2.83 |
| 11.25 | 2550.46 | -6.49 | 31.49 | -2.85 |
| 12.50 | 819.38 | -6.00 | 24.56 | -2.86 |
| 13.75 | 79.48 | -4.17 | 8.61 | -2.05 |
| 15.00 | 27.00 | -3.37 | 5.03 | -1.65 |
| 16.25 | 5.55 | -1.79 | 2.19 | -0.82 |
| 17.50 | 6.23 | -2.26 | 2.41 | -1.09 |
| 18.75 | 2.55 | -1.14 | 1.53 | -0.52 |
| 20.00 | 3.33 | -1.74 | 1.75 | -0.81 |

精度は若干悪い。川島らが求めた結果によれば、 $\log \xi_{sA}(T,h)$ と $\log \beta(T,0.05)$ の関係は固有周期Tごとに若干変化しているが、全体として固有周期に依存しないことを報告している。個々の地震記録における ξ_{sA} は特に無減衰 $h=0$ のとき、Tによる変化が大きかったようである。多数の記録(206成分)を平均化した場合、 $h=0$ のときおよび $T > 約 1.5$ 秒でかつ h が大きい($h=0.4$)ときを除けば、 ξ_{sA} はTによらずほぼ一定となっている。従って、 $a(T,h)$ と $b(T,h)$ は周期の関数にはならず、 $a(h)$ と $b(h)$ で表せるとしている。一方、2.(3)で述べたように、Tによる速度応答スペクトル $S_v(T,h)$ の変化は観測点ごとに大きく、しかも周期10秒前後で応答はピークになりやすいことがわかっている。このようなことから、 $\log \xi_{sv}(T,h)$ は固有周期Tによって敏感に反応し、文献13)のようにTと独立な曲線群を形成しないことになる。おそらく、日本海中部地震の震源特性の特徴が反映された結果と考えられる。

$a(T,h)$ と $b(T,h)$ の係数値と $h=5\%$ における実測の速度応答スペクトル倍率 $\beta(T,0.05)$ を用いて、式(5)から速度応答スペクトル比 $\xi_{sv}(T,h)$ を求め、それを式(4)に代入して、任意の観測点における速度応答スペクトル $S_v(T,h)$ を予測してみた。このようにして推定した速度応答スペクトルを実測記録から直接計算して求めたスペクトルと比較したのがFig.9である。図の(a)は本震、(b)は最大余震のときの試算例である。図の(a)では $h=0.1\%$ に対する寿都のEW成分、苫小牧のEW成分、大船渡のUD成分、室蘭のUD成分と $h=2\%$ に対する大船渡のNS成分、室蘭のNS成分のスペクトルを、図の(b)では $h=0.1\%$ に対する新潟のNS成分、東京のNS成分のスペクトルを示している。ただし、図中には、最小自乗法による係数 $a(T,h)$ と $b(T,h)$ から求めた予測スペクトル(——)および式(6)による近似値 $\bar{a}(T,h)$ と $\bar{b}(T,h)$ からのスペクトル(-----)も比較している。

Fig.9からわかるように、式(5)による予測手法では、5%減衰の速度応答スペクトルをもとに任意の減衰定数の速度応答スペクトルを精度よく推定することができない。特に、この傾向は固有周期が8~16秒の帯

域で顕著である。観測点によれば、実測スペクトルは予測スペクトルよりもかなり大きめの値を与えたり、小さかったりしている。一つの原因としては、 $h=0.1\%$ の場合、 $\log \xi_{sv}(T, h)$ と $\log \beta(T, 0.05)$ の間の相関性が低くかつばらつきが大きいことが考えられる。そのための解決法の一つとしては $\log \xi_{sv}(T, h)$ と $\log \beta(T, 0.05)$ を線形回帰するのではなく、周期帯域別の多項回帰をすることが考えられる。しかしながら、本質的には、 $\xi_{sv}(T, h)$ と $\beta(T, 0.05)$ の関係が3.で述べたように各種のパラメーターに依存しているのだから、少ないパラメーター値で特徴のある地震像を表現することに無理があることに起因している。一方、ガウス分布形で近似した係数値(式(6))を用いて決定された予測スペクトルは、周期10秒前後で $\bar{a}(T, h)$ と $a(T, h)$ に差があることから、応答のピークの付近で違いが見られるケースもある。しかしながら、全般的には $\bar{a}(T, h)$ 、 $\bar{b}(T, h)$ と $a(T, h)$ 、 $b(T, h)$ より求めた速度応答スペクトルはよく対応している。

以上の例から、式(5)による方法は、特定の地点と減衰定数に対して計算された応答スペクトルから任意の減衰定数の応答スペクトルを予測するための汎用的な手法とは言えないことがわかる。もちろん、ここで示したような統計的方法による結果は地震データの量と質とりもなおさず地震像によって規制されることは言うまでもないことである。また、統計的誤差も存在する。ここで与えた減衰定数による速度応答スペクトルの補正式は日本海中部地震に限定された結果であり、予測の精度も悪く、他に適用できるとはいいがたい。

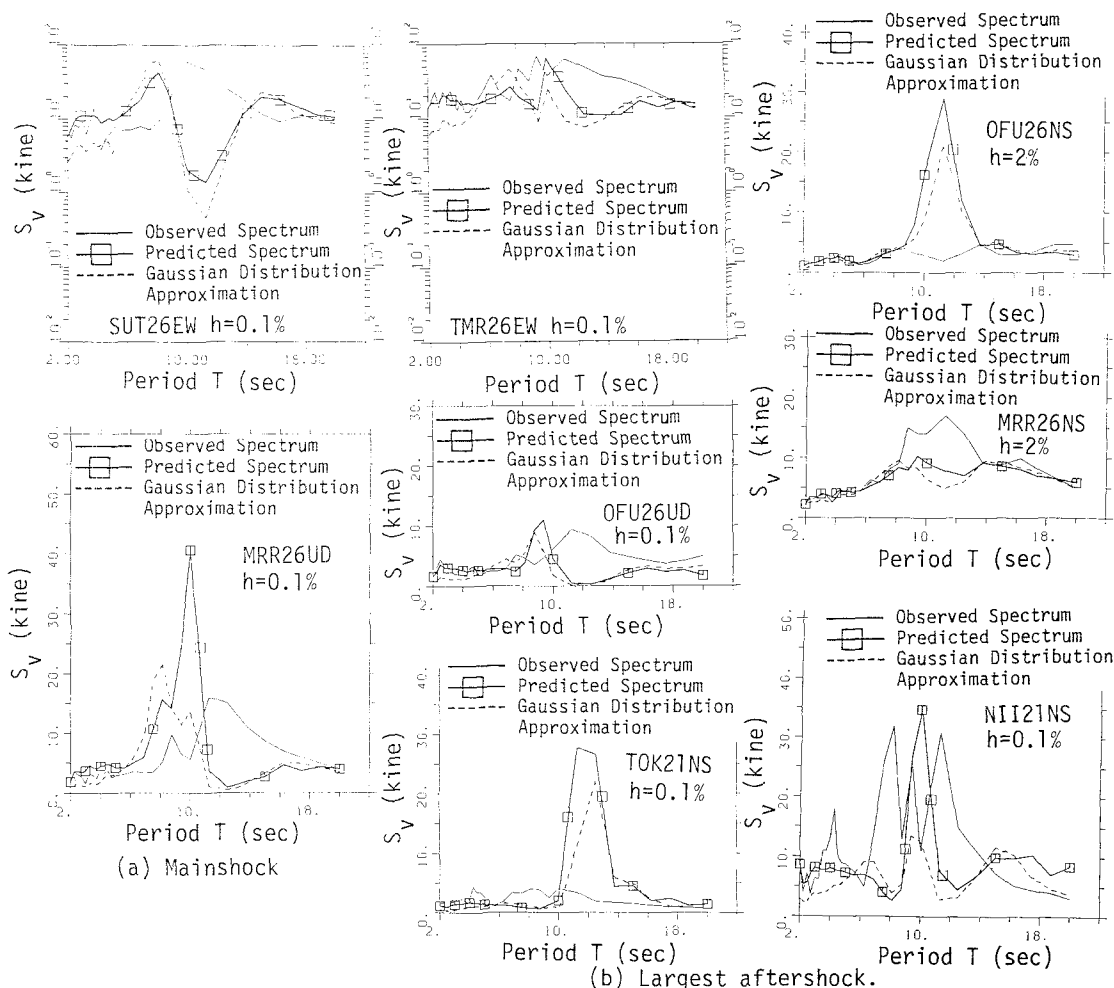


Fig.9 Comparison between velocity response spectral amplitude of arbitrary damping ratio h estimated from one of $h=5\%$ and observed one.

5. 結論

本論文で得られた主な成果をまとめると、次のようになる。

- (1) 日本海中部地震のときの本震と最大余震に注目し、震央距離・方位角やダミー変数としての観測点別の地盤条件や記録の成分別を説明変数として、速度応答スペクトルの重回帰分析(式(1)の回帰式)を実施した。地震記録としては気象庁1倍強震計から求めたやや長周期(2~20秒)の地震動を対象にした。重相関係数は固有周期・減衰定数や地震像に係わらず、90%前後の値を示していた。こうしたことから、式(1)によって予測された速度応答スペクトルは実測のスペクトルとよく一致しており、本手法の妥当性が確認できた。
- (2) 建設省土木研究所の方法を踏襲し、特定の減衰定数に対して計算された速度応答スペクトルを用いて、任意の減衰定数の速度応答スペクトルを求める手法について吟味した。ただし、ここでは長周期の地震動でしかも特定の地震像(日本海中部地震)を対象にしており、この点が新しい試みと言える。回帰式としては式(5)を採用した。特徴的なことは、1)回帰係数が固有周期にかなり従属していること、および2)予測の精度があまりよくないことである。

最後に、記録の数値化や応答スペクトルの計算に当たっては、富本信氏(春本鐵工所)と四方敏明技官(京都大学大型計算機センターのシステム運用掛)に大変お世話になった。ここに記してお礼を申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) 小林啓美(研究代表者):長大構造物の地震動災害とその防止に関する研究、文部省科学研究費自然災害特別研究成果、No.A-53-1,昭和53年5月。
- 2) (社)土木学会:屋外貯蔵タンクの耐震安全性検討のための入力地震波の変位特性に関する調査報告書、昭和57年12月。
- 3) 片山恒雄(研究代表者):長周期(約2~20秒)地震動の工学的特性に関する総合研究、昭和59年度科学研究費補助金(総合研究(A))研究成果報告書、昭和60年3月。
- 4) 岡田成幸・鏡味洋史:日本各地におけるやや長周期の地盤特性の定量評価の試み、日本建築学会論文報告集、第267号、pp.29~38、昭和53年5月。
- 5) 北川良和・尾崎昌凡:地震動の地域特性に関する研究(その2)やや長い周期領域(2~数秒)での地盤特性を考慮した地震動期待値、日本建築学会論文報告集、第227号、pp.33~43、昭和54年3月。
- 6) Mamula, L., Kudo, K., and Shima, E.: Distribution of ground-motion amplification factors as a function of period (3-15 sec), in Japan, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. of Tokyo, Vol. 59, pp. 467~500, 1984.
- 7) 田中貞二・吉沢静代・大沢胖:やや長周期帯域における強震動の特性——長周期低倍率地震計記録の解析——, 地震研究所彙報、Vol. 54, pp. 629~655, 1979.
- 8) 山田善一・野田 茂・富本 信:日本海中部地震時の気象庁1倍強震計記録に基づく周期10秒前後の地震動特性、京都大学防災研究所年報、第28号B-2, pp. 33~61, 昭和60年4月。
- 9) 斎藤正徳:漸化式デジタル・フィルターの自動設計(技術報告)、物理探鉱、第31巻、第4号、pp. 112~135, 昭和53年8月。
- 10) Kamiyama, M., and Yanagisawa, E.: A statistical model for estimating response spectra of strong earthquake ground motions with emphasis on local soil conditions, Soil and Foundations, Vol. 26, No. 2, pp. 16~32, June 1986.
- 11) 奥野忠一・久米 均・芳賀敏郎・吉沢 正:多変量解析法(改訂版), 日科技連, 1984年9月。
- 12) 武村雅之・稗園成人・太田外氣晴:地震動強さに関する経験式の物理的解釈とその適用例、土木学会第41回年次学術講演会講演概要集第1部、pp. 795~796, 昭和61年11月。
- 13) 川島一彦・相沢 興:減衰定数に対する地震応答スペクトルの補正法、土木学会論文集、第344号/I-1, pp. 351~355, 1984年4月。

(1986年10月17日受付)