

観測波に基づく地震動の位相スペクトルのモデル化

佐藤 忠信¹・室野 剛隆²・西村 昭彦³

¹正会員 工博 京都大学防災研究所教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

²正会員 博(工) (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

³正会員 工博 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

構造物の耐震設計を行う上で、地震動の設定は基本的かつ重要な課題である。耐震設計用の入力地震動としての時刻歴波形を作成するためには、振幅特性の他に位相特性を規定する必要がある。そこで、本研究では、これまでに観測された地震記録に基づいて位相特性をモデル化するものである。ただし、位相スペクトルを直接モデル化するのではなく、位相スペクトルを角振動数で微分した群遅延時間をモデル化した。まず、ウェーブレット変換により地震波を各サポート区間ごとに分離し、各サポート区間ごとに群遅延時間の平均値と分散を算定した。これを各地震記録に対して行い、平均群遅延時間と分散群遅延時間をマグニチュード M と震央距離 Δ の関数として回帰分析を行い、設計に用いることができる位相のモデル化を行った。

Key Words: group delay time, wavelet transform, seismic ground motion, attenuation

1. はじめに

鉄道橋や道路橋などの土木構造物の耐震設計規定では、地震動の特性は設計応答スペクトルの形で表現されていることが多い。例えば、鉄道の耐震設計基準では海溝型地震動を想定したスペクトルⅠ地震動と断層近傍地震動を想定したスペクトルⅡ地震動の二つがレベル 2 地震動として用意されている¹⁾。しかし、地盤や構造物の動的解析を行う場合には、具体的な地震動波形が必要となる。その場合には、設計応答スペクトルに準拠したような波形とする必要があり、そのためには振幅スペクトルと位相スペクトルのモデル化が必要となる。

従来は、振幅特性に重点がおかれ、位相スペクトルについてはあまり研究されてこなかった。設計用の入力地震動の時刻歴波形を作成する方法として、地震動の継続時間を与えて包絡形状を決定し^{2)など}、位相ランダム仮定を用いて波形を合成することが多い^{例えは3)}。また、特定の実地震観測波の位相をそのまま用いる場合もある⁴⁾。しかし、前者の方法では、震源特性・伝播経路特性および地盤増幅特性といった情報が位相特性に必ずしも反映されているとは言えず、位相の持つ意味が不明瞭である。また後者の方法は、観測波の固有性から逃れられず、建設地点で考慮すべき地震動の条件と似たような震源特性や伝播特性を持つ地震波が観測されている場合には有効であるが、必要とされ

る地震波を得ることは困難な場合が多い。

ただし、これらの方法では、位相の持つ情報が不明瞭である。

しかし、近年、地震動のフーリエ位相の情報により地震波の非正常性を明らかにしようとする研究がされるようになった。大崎ら⁵⁾はフーリエ位相差分布と時刻歴包絡形との類似性を指摘している。また、和泉・勝倉は⁶⁾フーリエ位相の角振動数軸上での傾き、すなわち群遅延時間に注目して、その平均値と標準偏差により地震波の重心位置と広がり表現できることを示した。また、木村⁷⁾は群遅延時間を制御することにより波形を合成できることを示しているが、そのパラメータは観測や理論に基づくものではなかった。

著者ら⁸⁾は、断層の面的な破壊過程を考慮した位相のモデル化の手法を検討した。この方法では、まず断層の破壊過程をインパルス列で表現し、その群遅延時間を定式化している。また、地点増幅特性の影響は、増幅関数の位相特性が最小位相推移関数で表せると仮定することによって、ヒルベルト変換を利用して群遅延時間を定式化している。さらに、両者の和により地震動の群遅延時間を算定している。兵庫県南部地震をシミュレーションすることによりモデル化の妥当性を検証している。ただし、最小位相を仮定していることから、直達 S 波を対象としたモデル化になっている。表面波等の後続波の影響がある場合には適用が困難であることも明らかにしている⁹⁾。また、著者らは⁹⁾このモ

表-1 解析に用いた地震記録

地震	マグニチュード M	解析に用いた地震記録数
北海道南西沖地震 1993	7.8	水平 10 成分 気象庁 87 型
北海道東方沖地震 1994	8.1	水平 42 成分 気象庁 87 型
三陸はるか沖地震 1994	7.5	水平 26 成分 気象庁 87 型
兵庫県南部地震 1995	7.2	水平 28 成分 気象庁 87 型 関震協
鹿児島県北西部地震 1997	6.3	水平 26 成分 K-net

注)関震協：関西地震連絡協議会

デル化の手法を用いて、アスペリティー分布や破壊開始点をパラメトリックに変化させたケーススタディーにより、設計地震動をシミュレーションしている。

この方法では、断層の破壊過程を有効に取り入れられる反面、考慮する断層情報や地盤条件が必要となるが、そのような情報が必ずしも揃っているとは限らない。そこで、本研究では、より簡便に設計地震動の位相特性が決めることができること、また表面波等の影響も表現できることを目的に、観測波から群遅延時間特性を抽出して、その特性をマグニチュード M や震央距離 Δ などの物理パラメータでモデル化することで、耐震設計に用いる標準的な位相特性（群遅延時間）の回帰モデルを作成することを考えた。

位相差分や群遅延時間の特性と上記の物理パラメータとの関係を検討した研究には、沢田・永江ら¹⁰⁾、石井・渡辺¹¹⁾、佐藤・植竹ら¹²⁾の研究がある。前者 2 つの研究では、地震動の継続時間を定義するために、位相差分や群遅延時間の標準偏差に着目しているが、周波数依存性は考慮していない。後者の研究は、1 秒～10 秒の周期領域を対象に、群遅延時間の平均値および分散を狭帯域波形（幅 0.02Hz）に適用し、やや長周期地震動の経時特性をモデル化している。

本研究では、一般的な土木構造物の耐震設計に用いる設計地震動の位相のモデル化が目的なので周期帯域は 0.1～5 秒程度までを検討対象とする。群遅延時間の特性が、その平均値と標準偏差でモデル化できるものとし、これらの値を求めるのにウェーブレット変換・逆変換を用いた。これにより、サポート区間ごとの群遅延時間の平均値と標準偏差を算定した。さらに、これらの値とマグニチュード M と震央距離 Δ を説明変数とした重回帰分析により、これらの距離減衰式を求め、耐震設計用の位相のモデル化が可能であることを

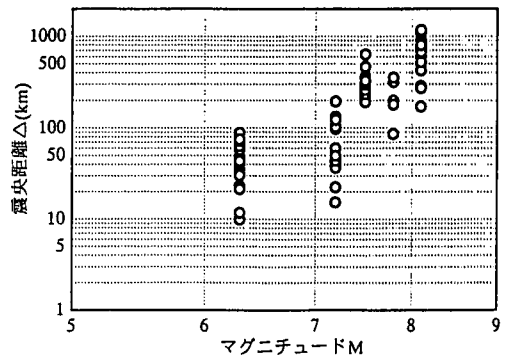


図-1 解析に用いたマグニチュードと震央距離の関係

示す。また、一例として、三陸はるか沖地震に適用しモデル化の精度の検証を行なう。最後に、鉄道の設計加速度応答スペクトルに準拠した波形の合成例を示し、耐震設計への適用性を示す。

2. 解析に用いるデータ

気象庁 87 型の記録を中心に解析を行った。ただし、一部関西地震連絡協議会および科学技術庁 K-net の記録も用いた。これらの記録の中から以下の条件に当てはまる地震を選定した。

- 1) マグニチュード $M > 6$
- 2) 多数の観測点で波形が得られていること。
- 3) 震源深さ $h < 50\text{km}$ とする。
- 4) 最大加速度は $30(\text{Gal})$ 以上であること。
- 5) 記録の継続時間が十分長いこと。

条件 1) は、レベル 2 地震動の位相特性のモデル化を念頭にしているのが設けた条件である。条件 2) は、回帰分析を行うにあたって精度の高い解を得るためである。条件 3) は、震源深さが深いと表面波が卓越しないためである。条件 4) は、最大加速度が $30(\text{Gal})$ 以下の記録では、SN 比が小さく、事前に行った検討では、群遅延時間の特性が明らかに他の記録と異なっていたのが設けた条件である。条件 5) は、対象とする周期帯域の群速度を持った波形が到達するまでの時間を十分包含する必要があるためである。上記の条件を満足する地震を近年の地震から選定し、表-1 に示す 5 地震を解析の対象とした。解析に用いたデータセットのマグニチュード M と震央距離 Δ の関係を図-1 に示す。震央距離が大きいものはマグニチュードが大きいものに限られてしまい、震央距離が小さいものは兵庫県南部地震と鹿児島県北西部地震に限られている。

北海道南西沖地震(1993, M7.8), 北海道東方沖地震

(1994, M8.1), 三陸はるか沖地震(1994, M7.5)については用いたデータは気象庁 87 型の記録のみである。兵庫県南部地震(1995, M7.2)については, 気象庁 87 型と関西地震連絡協議会で観測された波形も含んでいる。鹿児島県北西部地震(1997, M6.3)は, すべて科学技術庁 K-net の記録である。本来, 地震計による差をなくするためには同一の地震計で観測された波形のみを対象とするのが望ましいが, 震央距離の広い範囲にわたる記録が必要であったので, 複数の地震計の記録を対象とした。

3. 方法

本論文では, 設計加速度応答スペクトルが与えられていることを前提に, スペクトル準拠の波形を作成するための位相をモデル化する。また, 対象とするのは水平成分のみとする。

(1) 群遅延時間

群遅延時間とは, フーリエ位相スペクトル $\phi(\omega)$ を角振動数 ω 軸上で微分したものであり,

$$t_g(\omega) = \frac{d\phi(\omega)}{d\omega} \quad (1)$$

で表される¹³⁾。群遅延時間 $t_g(\omega)$ の平均値は, 振動数 ω の成分波の重心位置と大きく関係しており, そのばらつきは, 成分波の継続時間と密接に関係している。位相そのものよりも, 群遅延時間の方が波形の特性を把握しやすいので, 本研究では群遅延時間に着目して議論を進めることにした。

位相 $\phi(\omega)$ は $-\pi$ と π を主値とするので, 2π の不確定性が生じる。よって, 適宜アンラップ操作を行う必要がある。和泉・勝倉⁹⁾は常に $t_g \geq 0$ となるように操作を行っている。しかし, この方法ではリンク効果の影響で, 地震波の終了時刻付近に t_g の分布が集中してしまい, それを防ぐために後続の 0 を付けることも行われている¹²⁾。しかし, この場合 t_g の値がデータ数に依存してしまう。ここでは澤田・盛川¹⁴⁾の提案している手法により位相のアンラップ操作を施した。これは, 一度 $t_g(\omega)$ を算定し, そのヒストグラムを作成し, 最頻値を中心に, $-T/2 \sim T/2$ (T : 地震動の継続時間) の範囲にデータが収まるように展開するものである。この方法では, データ数 N による依存が少ないことが示されている。

(2) 群遅延時間の平均値および標準偏差の算定方法

時々刻々周期特性が変化する時系列 $f(t)$ の特性を捉えるのに, あるウィンドウをかけてフーリエ変換 $F(\omega)$ を行う方法が考えられる。しかし, ウィンドウの幅を

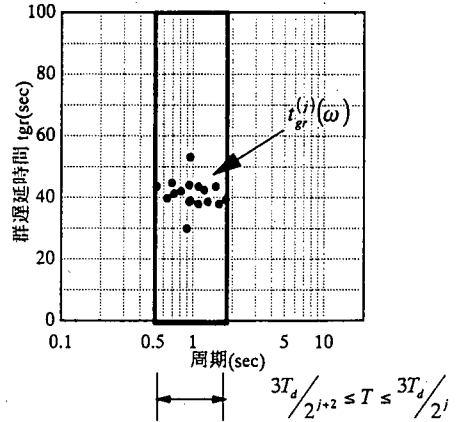


図-2 群遅延時間の平均値と標準偏差の算定方法

狭くして時刻についての分解能を上げると周波数の分解能が落ちてしまい, ウィンドウの設定方法に問題が残る。ウェーブレット変換は, 時間領域と周波数領域で局在化の程度がよい関数を積分核としており, 現象が生じた時刻に関する情報を刻一刻捉えることが可能である^{15), 16)}。また, 周波数に応じて時間分解と周波数分解能とが適切に変化するため, 時系列の急峻な変化から緩慢な変化までを的確に表現できる。そこで, 本研究でも, ウェーブレット変換(離散ウェーブレット変換)を用いることにした。

関数 $x(t)$ の離散ウェーブレット変換・逆変換は次式で得られる。

$$a_{jk} = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{jk}^* \cdot x(t) dt \quad (2)$$

$$x(t) = \sum_j x_j(t) = \sum_j \sum_k a_{jk} \cdot \varphi_{jk}(t) \quad (3)$$

ただし,

$$\varphi_{jk}(t) = 2^{j/2} \cdot \varphi(2^j t - k) \quad j, k \text{ は整数} \quad (4)$$

で定義される¹⁶⁾。*は複素共役を示す。このとき, 式(4)からも分かるように, j はスケールを表すファクター, k は位置(時刻)を表すファクターとなっている。 j が大きいほど高振動数成分を対象とすることになる。ウェーブレット変換の逆変換が存在するとき $\varphi(t)$ をアナライジング・ウェーブレットと呼ぶ。 $\varphi(t)$ を定義する方法は様々なものが提案されているが, 本論文では Y. Meyer¹⁷⁾による構成法を適用した。この時 $\varphi(t)$ のフーリエ変換 $\Psi(\omega)$ は, 振動数領域でコンパクトサポートになっており, 区間は,

$$\left\{ \frac{j}{3T_d} \leq f \leq 2^{j+2}/3T_d \right\} \quad (5)$$

となる。ここに, T_d は地震波の全継続時間(= $N\Delta t$, N : データ数, Δt : 時間刻み)である。

観測波形 $y(t)$ を全て, 時間刻み $\Delta t = 0.01$ (sec) とし, 後続の 0 を付けデータ個数を $N = 131071 (= 2^{17})$ 個に揃える。

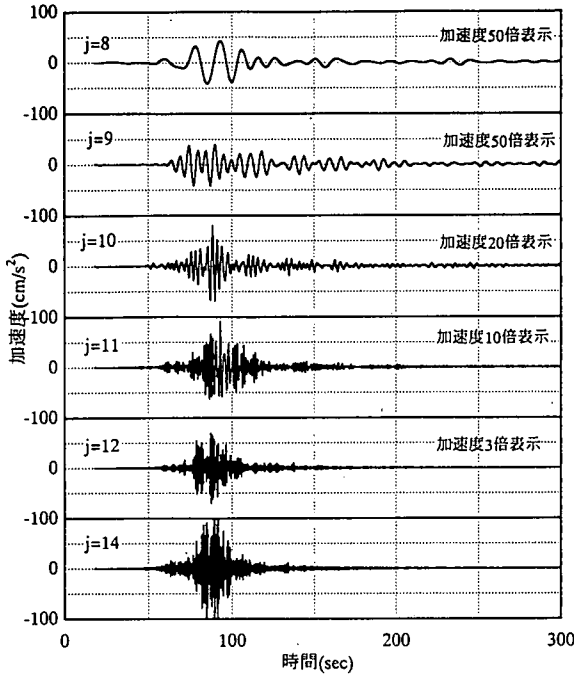


図-3 ウェーブレット変換によって分解された成分波

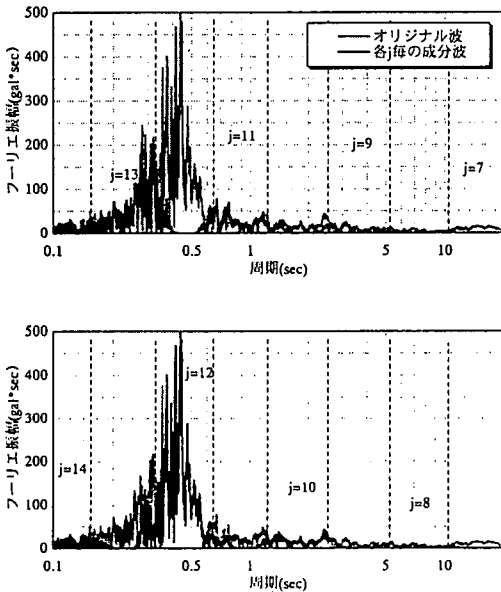


図-4 各コンパクトサポート区間のフーリエ振幅スペクトル $A^{(j)}(\omega)$

この波形 $y(t)$ をウェーブレット変換によって各スケールファクター j ($j=1 \dots 17$) ごとの成分波 $x^{(j)}(t)$ に分解する (以下, “ j 次” と呼ぶことにする)。この j 次の成分波 $x^{(j)}(t)$ について, 群遅延時間 $t_{gr}^{(j)}(\omega)$ を算定し, j ごとの平均値 $\mu_{igr}^{(j)}$ および標準偏差 $\sigma_{igr}^{(j)}$ を式(6), (7)に従つ

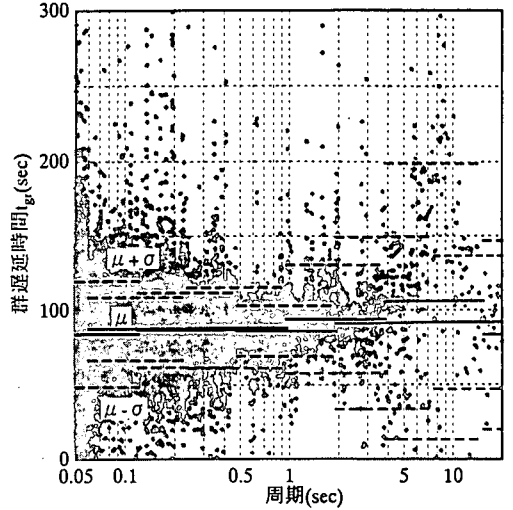


図-5 各サポート区間毎の群遅延時間の平均値と標準偏差で算定する。

$$\mu_{igr}^{(j)} = \sum_{i=1}^{N^{(j)}} \frac{t_{gr}^{(j)}(\omega_i)}{N^{(j)}} \quad (6)$$

$$\sigma_{igr}^{(j)} = \sqrt{\frac{1}{N^{(j)}} \sum_{i=1}^{N^{(j)}} (t_{gr}^{(j)}(\omega_i) - \mu_{igr}^{(j)})^2} \quad (7)$$

ただし, $j=1, 2, \dots, 17$

ここに, $N^{(j)}$ はスケールファクター j におけるデータ数で, $N^{(j)}=2^j$ で定義される。また, $t_{gr}^{(j)}(\omega_i)$ は j 次成分波の振動数 ω_i における群遅延時間であり, 式(8)で定義される。

$$t_{gr}^{(j)}(\omega_i) = \frac{d\phi}{d\omega} = -\frac{\phi(\omega_i) - \phi(\omega_{i+1})}{\Delta\omega} \quad (8)$$

これらの手順の概念図を図-2 に示す。

4. 試算例

一例として, 三陸はるか沖地震(1993)で盛岡で観測された波形に対して, 上記の考え方を適用する。

まず, ウェーブレット変換, 逆変換によって観測波を各成分波 $x^{(j)}(t)$ に分解した。その例を図-3 に示す。次数 j が小さくなるに従い, 波群の重心位置が遅れていることが確認できる。また, 継続時間も長くなる傾向にある。レベル2地震動の設計地震動を設定するには, 構造物や土の応答が非線形領域に及ぶことを念頭におくと, このような地震波の非定常性をモデル化することは重要である。次に, 各成分波のフーリエ振幅スペクトル $A^{(j)}(\omega)$ を図-4 に示す。ウェーブレット変換では,

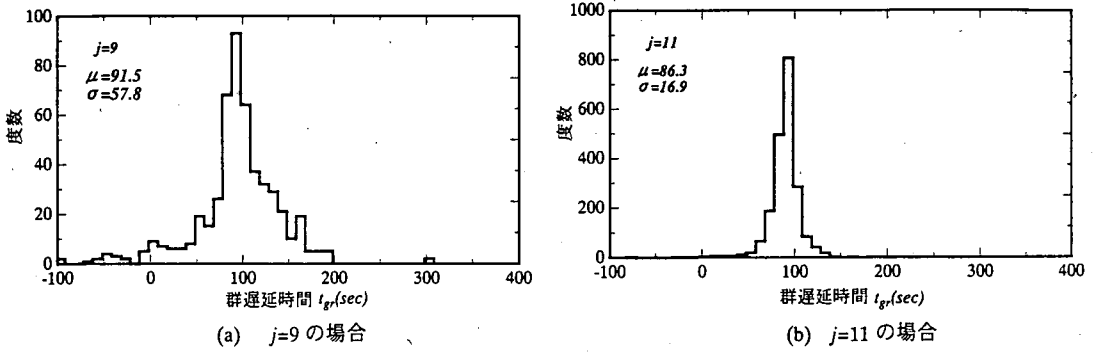
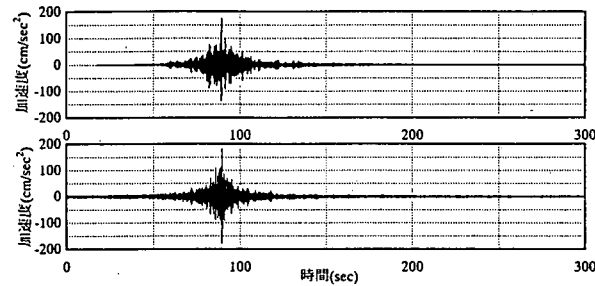
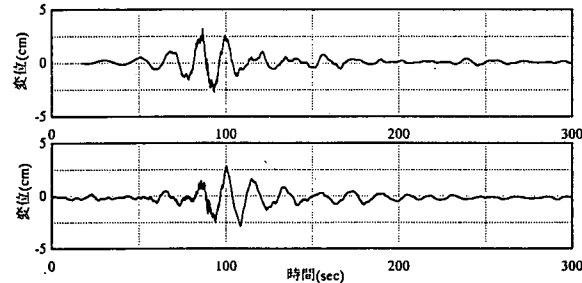


図-6 各サポート区間における $t_{gr}(\omega)$ の分布特性

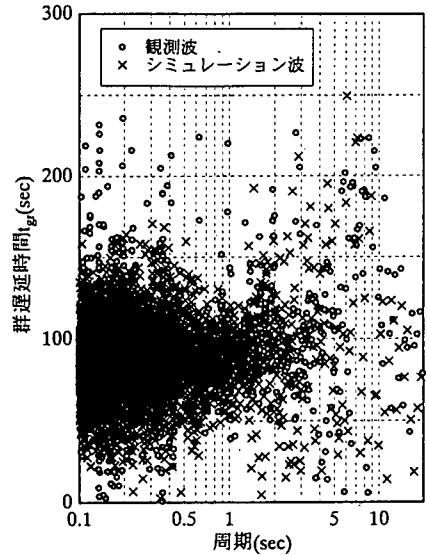


(a) 加速度波形の比較 (上: 観測波, 下: シミュレーション波)



(b) 変位波形の比較 (上: 観測波, 下: シミュレーション波)

図-7 時刻歴波形と群遅延時間の比較 (シミュレーション結果と観測波)



(c) 群遅延時間の比較

j 次のサポート区間は式(5)の範囲となる。よって、1つの振動数 f には両端以外では2つの j が対応し、フーリエ振幅スペクトルも多く範囲で互いのサポートが重なっている。しかし、各レベルが分担する範囲は概ね

$$\left\{ 2^{j-1}/T_d \leq f \leq 2^j/T_d \right\} \quad (9)$$

となっていることが図-4より分かる。なお、図中の点線が式(9)の範囲を示したものである。

各成分波 $x^{(j)}(t)$ の平均値 $\mu^{(j)}_{igr}$ および標準偏差 $\sigma^{(j)}_{igr}$ を式(6)と(7)により算定した結果を図-5に示す。観測波の群遅延時間 $t_{gr}(\omega)$ を算定した結果も図中に示している。式(6)、(7)で求めた $\mu^{(j)}_{igr}$ 、 $\sigma^{(j)}_{igr}$ が、観測波の $t_{gr}(\omega)$ の変化特性と対応していることが確認できる。また、図-3と図-5を比較すると、ウェーブレット変換によ

て分離された成分波の重心的位置 (変動の中心位置) が $\mu^{(j)}_{igr}$ に、波群の広がり $\sigma^{(j)}_{igr}$ に概ね対応していることが分かる⁹⁾。

各サポート区間における群遅延時間がどのように分布しているかを検討したのが図-6である。例として $j=9$ と 11 の場合を示している。概ね正規分布に近い分布を示している。ただし、 $j=9$ のように j が小さい (低振動数側) と正規分布よりも重心が後ろに寄った分布形状に近いと言える。このことは図-3で $j=8,9$ の波形の包絡形が対数正規分布に近いことから言える。しかし、各 j ごとに分布特性を使い分けることはせず、全 j について t_{gr} は正規分布に従うと仮定した。

次に図-5に示した群遅延時間の平均値 $\mu^{(j)}_{igr}$ および標準偏差 $\sigma^{(j)}_{igr}$ を用いて、元の波形を再合成することを考える。まず j 次の成分波を考え、振動数 $\{2^{j-1}/T_d \leq f \leq$

表-2 回帰分析の結果

j	$\alpha_1^{(j)}$	$\alpha_2^{(j)}$	$\beta_1^{(j)}$	$\beta_2^{(j)}$	$\gamma_1^{(j)}$	$\gamma_2^{(j)}$	相関係数	
							$\mu_{igr}^{(j)}$	$\sigma_{igr}^{(j)}$
7	1.011	27.708	0.0	0.0	0.864	0.203	0.86	0.41
8	0.830	14.584	0.040	0.0	0.790	0.337	0.94	0.71
9	0.543	17.968	0.086	-0.030	0.700	0.344	0.85	0.75
10	0.806	8.451	0.060	-0.005	0.686	0.321	0.97	0.73
11	0.850	2.970	0.026	0.016	0.764	0.366	0.98	0.77
12	0.511	0.392	0.058	0.143	0.744	0.295	0.99	0.83
13	0.367	0.0790	0.077	0.267	0.739	0.201	0.99	0.87
14	0.330	0.0572	0.081	0.287	0.742	0.239	0.99	0.81

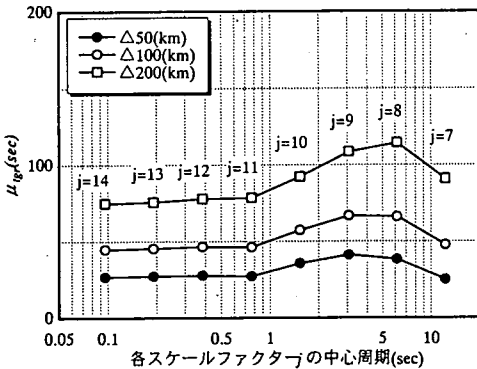


図-8 各 j 毎の群遅延時間の平均値 $\mu_{igr}^{(j)}$

$2^{j+2}/3T_d$ 範囲の $t_{gr}^{(j)}(\omega)$ を正規分布 $N(\mu_{igr}^{(j)}, \sigma_{igr}^{(j)})$ に従うものとして乱数を発生させて決めた。これを積分し、j 次成分波 $x^{(j)}(t)$ の位相スペクトル $\phi^{(j)}(\omega)$ とした。なお、本論文では位相スペクトルのモデル化が目的であるので、j 次のコンパクトサポート内のフーリエ振幅 $A^{(j)}(\omega)$ は、観測波のフーリエ振幅 $A(\omega)$ の振動数範囲 $\{2^{j-1}/T_d \leq f \leq 2^j/T_d\}$ が j 次の分担範囲と考えて、観測値の $A(\omega)$ から各次の $A^{(j)}(\omega)$ を決めた (図-4 参照)。従って、モデル化された $A^{(j)}(\omega)$ は、振動数範囲 $\{2^{j-1}/T_d \leq f \leq 2^j/T_d\}$ では、 $A(\omega)$ に完全に一致し、振動数範囲 $\{2^j/3T_d \leq f < 2^{j+1}/T_d\}$ と $\{2^j/T_d < f \leq 2^{j+2}/3T_d\}$ では完全に 0 となっている。本来は、各次数の成分波のフーリエスペクトルそのものを用いるべきであるが、本研究は耐震設計に用いるべきスペクトル準拠の波形を作ることが目的であり、各サポート区間ごとのフーリエスペクトルをモデル化することを前提としていないので、上記のようなモデル化を行った。この $\phi^{(j)}(\omega)$ とモデル化された $A^{(j)}(\omega)$ から $j=1 \sim 17$ までの各成分波を算定し、それを合成して、波形をシミュレーションした。シミュレートした群遅延時間 t_{gr} と波形を図-7 に示す。実観測波の t_{gr} に比べると、定性的な特性はよく表現できているが、シミュレートした t_{gr} は短周期側ではあまりすぎ、周期

3~10 秒付近では観測波のそれよりも前に漏れる傾向があることが分かる。これは、前述したように群遅延時間 t_{gr} を正規分布でモデル化した特性が現れたものと思われる。ただし、加速度および変位波形で見ると分かるように、地震波形の非正常性 (経時特性) については概ねよく再現していることが分かる。ウェーブレット変換により「j 次の平均群遅延時間 $\mu_{igr}^{(j)}$ 」, 「j 次の標準偏差群遅延時間 $\sigma_{igr}^{(j)}$ 」をモデル化できれば、非正常性を有する波形を再現できることが確認できた。そこで、 $\mu_{igr}^{(j)}$, $\sigma_{igr}^{(j)}$ のモデル化の方法を次章に示す。

5. 群遅延時間特性のモデル化

表-1 に示した全観測記録について、3. で示した方法により $\mu_{igr}^{(j)}$ と $\sigma_{igr}^{(j)}$ を算定した。ただし、耐震設計上重要な振動数は 0.1~5(s) であることを考えて、この周期範囲が十分含まれるように、 $j=7 \sim 14$ についてモデル化することにした。

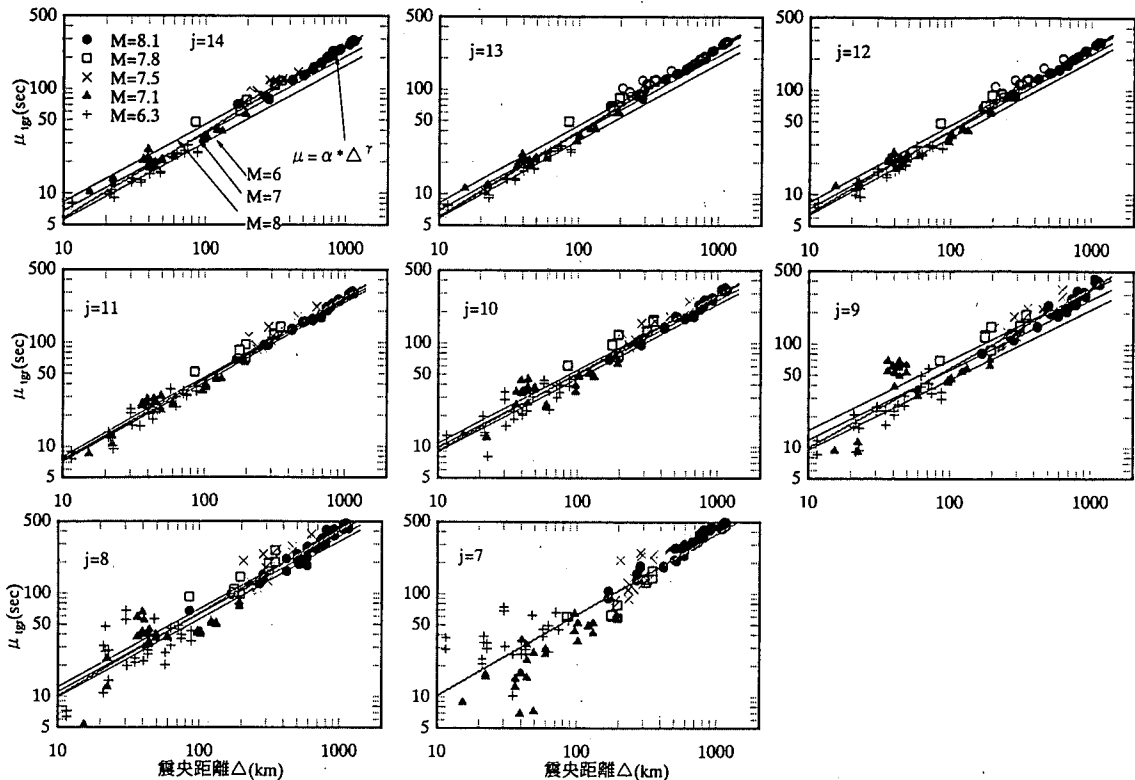
今回用いた気象庁記録、K-net 記録および関西地震観測連絡協議会の記録にはトリガータイムも記録されているので、発震時間を原点として絶対時間で表すものとする。

群遅延時間の平均値 $\mu_{igr}^{(j)}$ と標準偏差 $\sigma_{igr}^{(j)}$ をマグニチュード M と震央距離 Δ を説明変数として重回帰分析を行った。

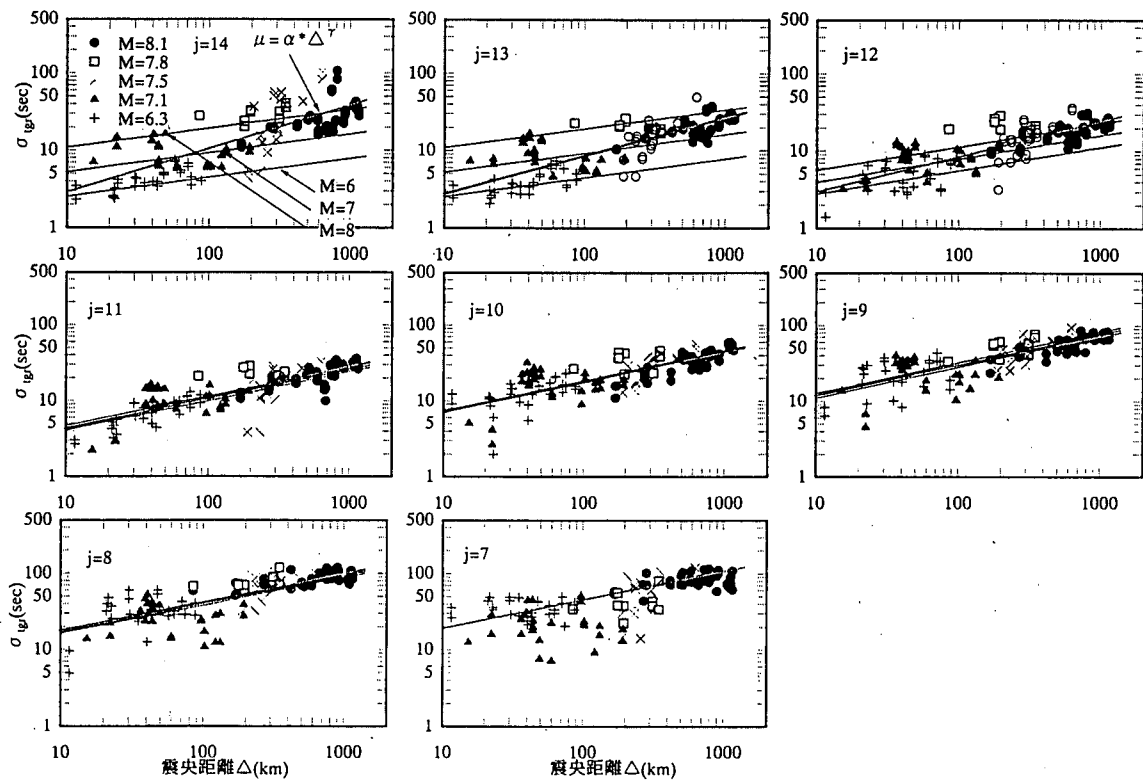
$$\mu_{igr}^{(j)} = \alpha_1^{(j)} \times 10^{0.1M} \times \Delta^{r^{(j)}} \quad (10)$$

$$\sigma_{igr}^{(j)} = \alpha_2^{(j)} \times 10^{0.1M} \times \Delta^{r^{(j)}} \quad (11)$$

ここに、M はマグニチュード、 Δ は震央距離(km)、 $\alpha^{(j)}$, $\beta^{(j)}$ は j 次の回帰係数である。回帰分析の結果を表-2、図-8 および図-9 に示す。ただし、 $j=7 \sim 8$ では、 $\beta < 0$ となっていたものを $\beta=0$ とした。なぜなら、 β が負になるというのは、M が小さいほど、到達時間が



(a) 群遅延時間の平均値 μ_{igr}



(b) 群遅延時間の標準偏差 σ_{igr}

図-9 群遅延時間の平均値、標準偏差の特性と回帰分析の結果

早く、また、継続時間が長くなることを意味しているものの、このような傾向は物理的な意味を持っているというよりも、むしろデータのばらつきによるものと考えられるからである。つまりサポート区間に入ってくるデータ数が、

$$N^{(j)} = 2^j \quad (12)$$

となるので、次数 $j=7\sim 8$ ではサポート区間に入ってくるデータ数が少なくなり、ばらつきが大きくなったと考えられるからである。また、本研究では3種類の地震計を用いているが、長周期側ではこの影響が生じた可能性もある。このとき、相関係数は、 $\mu_{igr}^{(j)}$ については0.9以上の高い相関が得られた。また、 $\sigma_{igr}^{(j)}$ についてはそれよりも低く、0.71~0.87 ($j=7$ については0.41) となった。

平均値 $\mu_{igr}^{(j)}$ は震央距離 Δ とともに大きくなっており、回帰係数 γ_1 は次数 j によらずほぼ一定で、概ね0.7以上となっている。これは、伝播距離が長くなるほど、波群の到達時間が遅れることを表している。一方、回帰係数 β_1 は全次数 j について0.1以下となっており、マグニチュード M より震央距離 Δ の影響が相対的に大きいことが分かる。また、 j により $\mu_{igr}^{(j)}$ そのものの値が異なり、地震波の伝播速度が周波数依存性を有していることが分かる(図-8)。

標準偏差 $\sigma_{igr}^{(j)}$ は、次数 j が大きくなるに従い、 γ_2 は小さくなり、 β_2 は大きくなる傾向にある。表面波は主に1Hz以下の低振動数で卓越するのに対し、実体波は1~数Hzの比較的高振動数でも成分を持つ。よって、実体波の影響が大きい振動数帯域($j>12$)では、マグニチュード M の影響を受け、 M が大きい分だけ断層面が大きくなり、継続時間が長くなることを表していると考えられる。一方、表面波の影響が現れる低振動数域($j<11$)では、 M の効果よりも Δ の効果の方が卓越するようになる。つまり、表面波は分散性を有するため Δ が長くなればなるほど、各振動数成分の波群の到着時刻の差が大きくなるためと解釈できる。

なお、佐藤・植竹ら¹²⁾の研究では $\mu_{igr}^{(j)}$ 、 $\sigma_{igr}^{(j)}$ とも、 M による影響はないと指摘している。これは μ については、本論文では β_1 が0.1以下であることから概ね同様の結論であると思われる。 σ については、佐藤・植竹ら¹²⁾の研究が1秒以上のやや長周期成分を対象としているのに対して、本論文ではそれよりも短周期側も対象としており、その相違が生じたものと思われる。ただし、 j が10以下の次数(周期1.04秒以上)では、 β_2 が0に近き両者とも整合した結果を示している。

さらに、図-1で示したように、今回の解析対象としたデータセットが偏っていること等を考慮して、式(13)(14)に示すように震央距離 Δ のみを説明変数とし

表-3 回帰分析の結果

j	$\alpha_1^{(j)}$	$\alpha_2^{(j)}$	$\gamma_1^{(j)}$	$\gamma_2^{(j)}$
7	1.011	27.71	0.864	0.203
8	1.338	14.58	0.831	0.337
9	1.517	12.53	0.786	0.314
10	1.644	7.988	0.746	0.317
11	1.155	3.597	0.790	0.382
12	1.026	2.138	0.802	0.438
13	0.915	1.891	0.816	0.468
14	0.866	1.743	0.823	0.526

た回帰分析も行った。その結果を表-3に示す。

$$\mu_{igr}^{(j)} = \alpha_1^{(j)} \times \Delta^{\gamma_1^{(j)}} \quad (13)$$

$$\sigma_{igr}^{(j)} = \alpha_2^{(j)} \times \Delta^{\gamma_2^{(j)}} \quad (14)$$

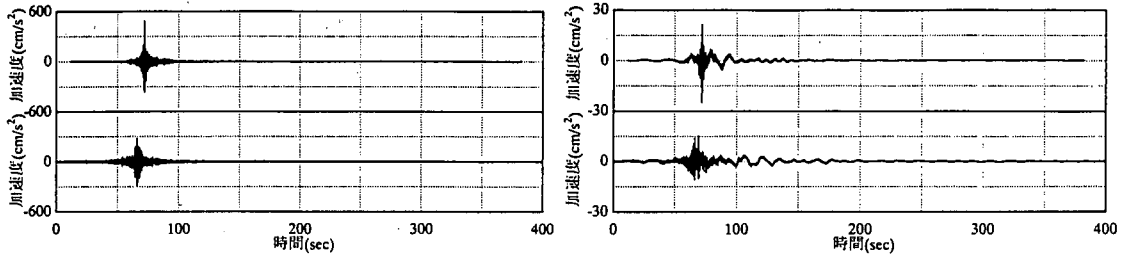
また、その結果は図-9にも太実線で示してある。

6. モデル化の検証(三陸はるか沖地震への適用)

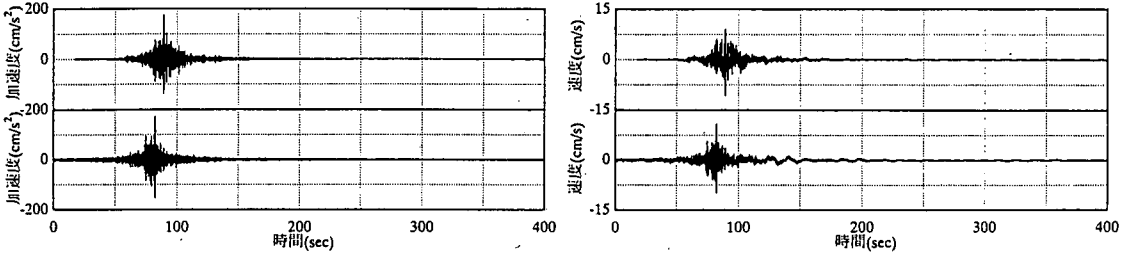
実観測波をシミュレーションすることにより、提案モデルの妥当性を検証する。対象にした地震波は、三陸はるか沖地震(1994)で八戸 ($\Delta=186\text{km}$)、盛岡 ($\Delta=236\text{km}$)、石巻 ($\Delta=307\text{km}$)、小名浜 ($\Delta=459\text{km}$) において観測された4波である。いずれもEW成分である。なお、位相のモデル化に重点を置き、フーリエ振幅スペクトルは実観測波のものを用い、4で示したのと同様の考え方により観測値の $A(\omega)$ から各次の $A^{(j)}(\omega)$ を決めている。まずマグニチュード M と震央距離 Δ より $\mu_{igr}^{(j)}$ と $\sigma_{igr}^{(j)}$ を決定する。次に、 $N(\mu_{igr}^{(j)}, \sigma_{igr}^{(j)})$ に従う正規乱数を発生させて群遅延時間 $t_{gr}^{(j)}(\omega)$ を算定し、それを積分して位相 $\phi^{(j)}(\omega)$ を求めた。この位相 $\phi^{(j)}(\omega)$ と振幅 $A^{(j)}(\omega)$ から加速度波形を合成した結果を図-10に示す。積分して求めた速度波形も示している。波群の重心位置や継続時間など全体的な傾向は観測値と似ており、工学的には十分有効であると思われる。また、速度波形で比較しても、地震動の経時特性(非定常性)は比較的良好にモデル化できていると言える。

7. 耐震設計における取り扱い

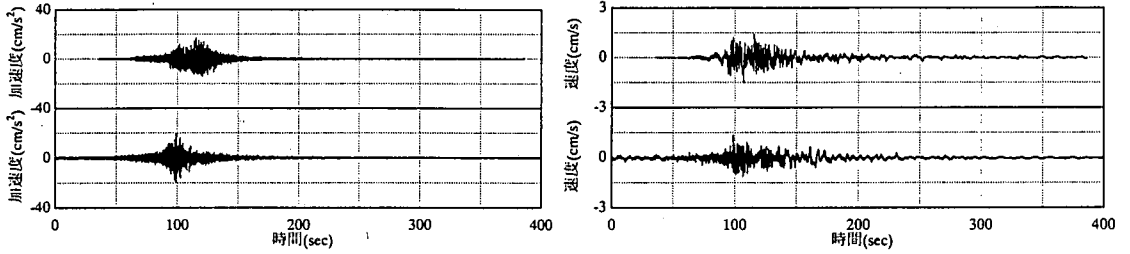
本論文でモデル化した群遅延時間の平均値 $\mu_{igr}^{(j)}$ および標準偏差 $\sigma_{igr}^{(j)}$ のアテニュエーション式を用いて、



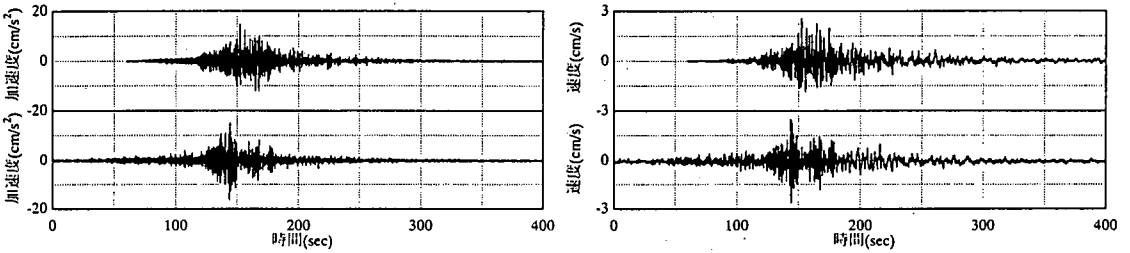
(a)八戸(Δ=186km)



(b)盛岡(Δ=236km)



(c)石巻(Δ=307km)



(d)小名浜(Δ=459km)

図-10 観測波と提案法によるシミュレーション波の時刻歴波形の比較
(上:観測波,下:シミュレーション波)

図-11 に示す鉄道の耐震設計で用いられている加速度応答スペクトルに適合した波形をシミュレーションした。加速度応答スペクトルのフィッティング方法は振動数領域で行い、フーリエ振幅スペクトルのみ修正している。図-12 にその波形の合成フローを示す。マグニチュードは 8、震央距離 Δ は 10, 100, 300(km) の 3 ケースとした。図-11 のスペクトルは海溝型地震を想定したもの¹⁸⁾であり、もともと M 8、震央距離は 50~

100(km)程度を想定したものであるが、参考までに Δ 10(km)と 300(km)の場合も算定した。算定例を図-13 に示す。 $\Delta=10$ (km)では継続時間が極端に短く、断層近傍の地震の傾向を表している。震央距離が長くなるに従い、継続時間が伸びている様子が伺え、それに伴いエネルギーが分散され最大加速度も低下する。 $\Delta=100$ (km)以上では、波形の繰り返し回数も多く、また、波形の周期特性の時間変化が特に顕著になっているこ

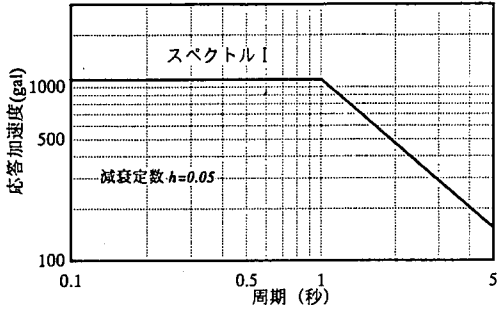


図-11 鉄道の耐震設計で用いるレベル2地震動・スペクトル I (海溝型) の加速度応答スペクトル

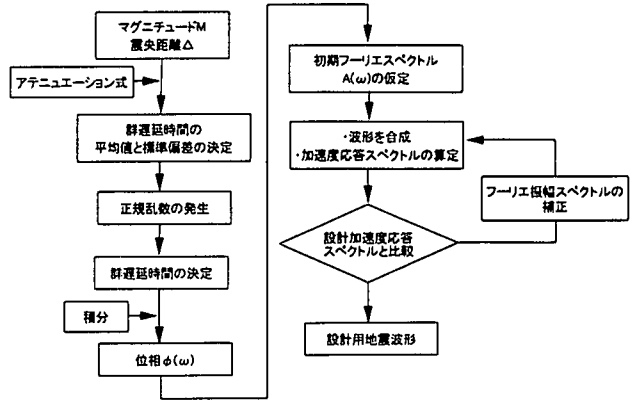


図-12 時刻歴波形の合成フロー

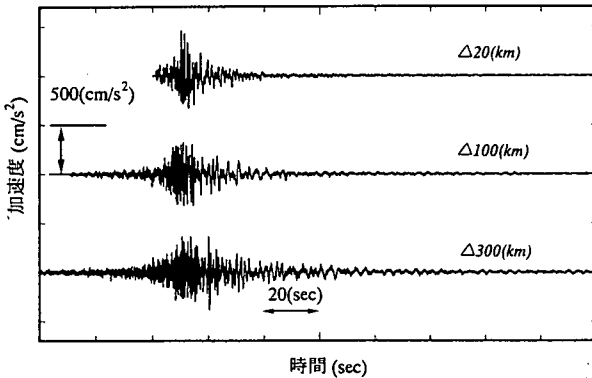
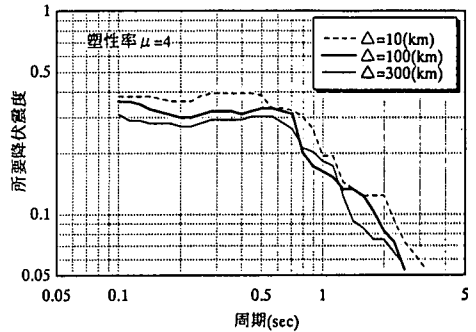
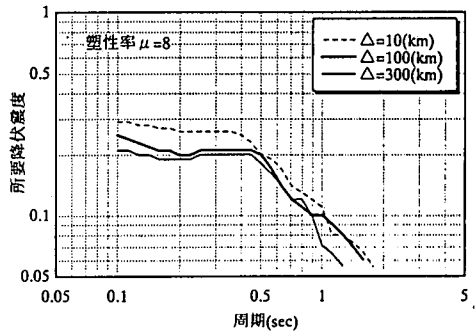


図-13 設計加速度応答スペクトルに適合させた波形



(a) 塑性率 $\mu=4$ に対する所要降伏震度スペクトル



(b) 塑性率 $\mu=8$ に対する所要降伏震度スペクトル

図-14 $\Delta=10, 100, 300(\text{km})$ とした場合の位相特性を用いたスペクトル適合波の所要降伏震度スペクトルの比較

とが分かる。

なお、本論文では鉄道標準で示された設計加速度応答スペクトルを用いてスペクトル準拠の波形を合成した。しかし、応答スペクトルについてはこれまで多くの研究者により研究されており、その距離減衰モデルが構築されている^{19),20)}。そのようなモデルと組み合わせることも可能であり、これにより M と Δ を満足するような波形が合成できる。

次に、図-13 で示したスペクトル適合波について、所要降伏震度スペクトルを求めたのが図-14 である。所要降伏震度スペクトルとは、復元力特性を有する1自由度系システムの時刻歴非線形解析を行い、応答塑性率があらかじめ設定した目標塑性率に一致するまで降伏震度を変化させて応答解析を行い、固有周期と降伏震度との関係を表したものである²¹⁾。解析に用いた履歴モデルは RC 構造物を想定し、Clough モデル²¹⁾とし、第2勾配は第1勾配の5%とした。また減衰定数は $h=5\%$ とした。3つの波形は、弾性応答スペクトルは一致させているにもかかわらず、弾塑性応答ではかなりの差が生じていることが確認できる。震央距離 $\Delta 10(\text{km})$ の場合には、エネルギーが短時間に集中し、構造物の最大応答(塑性率)には非常に厳しく、震央距

離が長い場合には、エネルギーが分散され、塑性率が小さくなることが分かる。

8. まとめ

本論文では、観測波から群遅延時間特性を抽出し、

耐震設計用の地震波に用いるための位相特性のモデル化を行った。得られた結果を示す。

- 1) ウェーブレット変換を用いて観測波から各サポート区間毎の群遅延時間の平均値と標準偏差を算定し、これらを震央距離とマグニチュードの関数または震央距離だけの関数としてモデル化できることを示した。
- 2) 得られたアテニュエーション式を用いて、三陸はるか沖地震で観測された波形のシミュレーションを行い、モデル化の妥当性を検証した。
- 3) 対象とする設計地震波のマグニチュードと震央距離を設定できれば位相特性が決定できることになり、スペクトル準拠の設計地震波が作成できることを示した。

本論文では、各サポート区間における群遅延時間の分布を正規分布と仮定したが、まだ検討の余地があると思われる。また、今回解析に用いてデータセットでは多少かたよりもあり、今後、データの蓄積を増やすことによりモデル化の精度は向上するものと思われる。

謝辞:最後に、本研究に用いたウェーブレット変換のプログラムをご提供いただいた、東京大学・山田道夫教授に謝意を表します。また、本研究では、気象庁 87 型加速度記録、関西地震連絡協議会の記録、K-net の記録を使用させて頂きました。関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) (財)鉄道総合技術研究所編:鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計(案), 1999.
- 2) Jennings, P. C., Housner, G. W. and Tsai, N. C.: Simulated earthquake motions, *E.E.R.L.*, Pasadena, 1968.
- 3) 大崎順彦:原子力発電所設計用の基準地震動評価に関するガイドライン, 主として大崎スペクトルについて, ORI 研究報告 84-01, 1984.
- 4) 荒川直士, 川島一彦, 相沢興:応答スペクトル特性を調整した時刻歴地震応答解析用入力地震動波形, 土木技術資料, 第 26 巻, 第 7 号, 1984.
- 5) 大崎順彦, 岩崎良二, 大川出, 雅尾享:地震波の位相特性とその応用に関する研究, 第 5 回日本地震工学シンポジウム, pp.201-208, 1978.
- 6) 和泉正哲, 勝倉裕:地震動の位相情報に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 327 号, pp.20-26, 1983.
- 7) 木村正彦:模擬地震動作成における波形制御について, 日本建築学会構造系論文集, 第 367 号, pp.30-37, 1986.
- 8) 佐藤忠信, 室野剛隆, 西村昭彦:震源・伝播・地点特性を考慮した地震動の位相スペクトルのモデル化, 土木学会論文集, No.612/I-46, pp.201-213, 1999.
- 9) Sato, T., Muroho, Y., and Nishimura, A.: Earthquake Intensity in Design Standard of Railway Facilities, International Workshop on Mitigation of Seismic Effects on Transportation Structures, pp.118-129, 1999.
- 10) 沢田 勉, 永江正広, 平尾 潔:位相差分による地震動継続時間の定義とその統計解析, 土木学会論文報告集 第 368 号/I-5, pp.373-382, 1986.
- 11) 石井 透, 渡辺孝英:地震動の位相特性と地震のマグニチュード・震源距離・深さの関係, 日本建築学会学術講演会梗概集, pp.385-386, 1987.
- 12) 佐藤智美, 植竹富一, 菅原良次:群遅延時間を用いた長周期地震動の経験的経時特性モデルに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 493 号, pp.31-39, 1997.
- 13) パポリス:工学のための応用フーリエ積分, オーム社, pp.243-255, 1972.
- 14) 澤田純男, 盛川仁, 土岐憲三, 横山圭樹:地震動の位相スペクトルにおける伝播特性・サイト特性の分離, 第 10 回日本地震工学シンポジウム, pp.915-921, 1998.
- 15) 山口昌哉, 山田道夫:ウェーブレット解析, 科学, Vol.60 No.6, pp.398-405, 1990.
- 16) 佐々木文夫, 前田達哉, 山田道夫:ウェーブレット変換を用いた時系列データの解析, 構造工学論文集 Vol.38B, 1992.
- 17) Meyer, Y.: Orthonormal Wavelets, in Wavelets, Springer, pp.21-27, 1989.
- 18) 王海波, 西村昭彦, 長縄卓夫:基盤入力地震の考え方と応答スペクトルの設定, 鉄道総研報告, 第 13 巻 第 2 号, 1999.
- 19) 小林啓美, 長橋純男:地表で観測された地動の周期特性から求めた地盤の増幅特性と地震基盤における地震動, 日本建築学会論文報告集, Vol.240, pp.79-91, 1976.
- 20) 川島一彦, 相沢興, 高橋和之:最大地震動および地震応答スペクトルの距離減衰式, 土木研究所報告, 第 166 号, 1985.
- 21) Clough, R. W. and Johnston, S. W.: Effect of Stiffness Degradation on Earthquake Ductility Requirements, 第 2 回日本地震工学シンポジウム, pp.227-232, 1966.
- 22) 西村昭彦, 室野剛隆:所要降伏震度スペクトルによる応答値の算定, 鉄道総研報告, 第 13 巻 第 2 号, 1999.

(1999.3.10 受付)

EMPIRICAL MODELING OF PHASE SPECTRUM OF EARTHQUAKE MOTION

Tadanobu SATO, Yoshitaka MURONO and Akihiko NISIMURA

Modeling phase characteristics of earthquake motion is important to synthesis a design earthquake motion compatible with the given response spectra. We used the concept of group delay time to develop a model of phase spectrum. Applying wavelet deconvolution to an earthquake motion we calculate the average value of group delay time and its standard deviation in each compact support. Collecting earthquake motions from recent earthquake data sets a regression analysis was performed to obtain an attenuation relation of average group delay time and its standard deviation in each compact support. Assuming the normal distribution characteristic of group delay time we simulated a group delay time and then the phase spectrum by integrating it inside of each compact support.