ウエブレット変換による耐震設計用の模擬地震波に関する研究

ウエブレット変換による耐震設計用の模擬地震波に関する研究

宮 脇 幸 治 郎*

Study on Pseudo-seismic Waves for a Seismic Resistant Design by the Wavelet Transform

Kojiro MIYAWAKI *

ABSTRACT

This paper deals with the numerical calculation method with pseudo-waves for a seismic resistant design. The arithmetic operation is characterized by the wavelet Fourier spectrum (WFS) of the individual scale factor for a seismic wave and by the reconstracting method of an original wave from the WFS. In addition, the earthquake response spectrum (ERS) is estimated by the magnitude, epicentral distance, ground condition and exceeding probability. Then, the pseudo-waves are made the keeping phase from within the amplitude and phase properties of the original wave, and the identifing with the properties of the ERS.

The main results obtained are as follows.

(1)The ERS for the band-frequencies correspond to the scale factor of wavelet transform operates very powerfully on the pseudo-seismic wave. That is , the correction of the ERS moves up setwise from the long natural period part downward.

(2)The ERS of the pseudo-wave converges to the ERS of the design at a repetition of several times.

(3)The characteristic of the wave has a little tendency to contain heigh frequencies due to the method of the wavelet transform.

Key Word : Wavelet Fourier Spectum, Earthquake Response Spectrum, Pseudo-Seismic Wave

1. はしがき

構造物に対する地震動の動的解析には，スペクトル解析と時刻歴解析とがある．そのうち，時刻歴応答解析は，系の運動方程式を逐次数値計算によって解く方法である．したがって，線形・非線形の別を問わず用いられ，この場合，運動方程式の外力項の入力地震動に解析の対象とすべき地震動の特性が反映されることになる．一方，構造物の建設地点における地震動の特性に影響を与える因子から，構造物と地盤のパラメータを特定の値に設定し，入力地震動は，①建設地点での観測波形，②時刻歴解析において標準とされる波形，③模擬波形について適宜変えて用いられている．しかしながら，多くの場合，所定入力強度を持った当該地点での波形が現れていることは稀であるため模擬波形の工学的意義がある．

1993年4月9日受理

* 建設工学科
* Department of Civil Engineering

模擬地震波の作成は，1947年G.W.Housnerの定常ホワイトノイズで時間に関してランダムなインパルスのシリーズとモデル化した文献1）が最初であるといわれている．その後の古典的な模擬波形作成法において，Bolotinは，定常ランダム過程の自己相関関数に地動の卓越振動数のパラメータを導入してモデル化した[2]．多治見は，表層の影響を考慮した定常ランダム過程のパワースペクトル[3]を，後藤・亀田は，地動の卓越振動数をパラメータに持ったパワースペクトルの関数[4]を与えた．地動加速度の定常部分に対して，後藤・土岐・秋吉は，振動数および位相に対してランダム変数をとった余弦波の和で作成した[5]．

さらに，非定常なランダム過程モデルとして，Goldberg，Bogdanolf，Sharpeは，一様なランダム位相を持つ余弦波に時間に関する確定関数を合積した形式で模擬波形を与えた[6]．時間に関する確定関数の形は，Jennings，Housner，Tsai[7]が与えた関数が有名であるが，その他にも種々提案されている．

現在，動的な解析用地震波の作成は，将来の地震

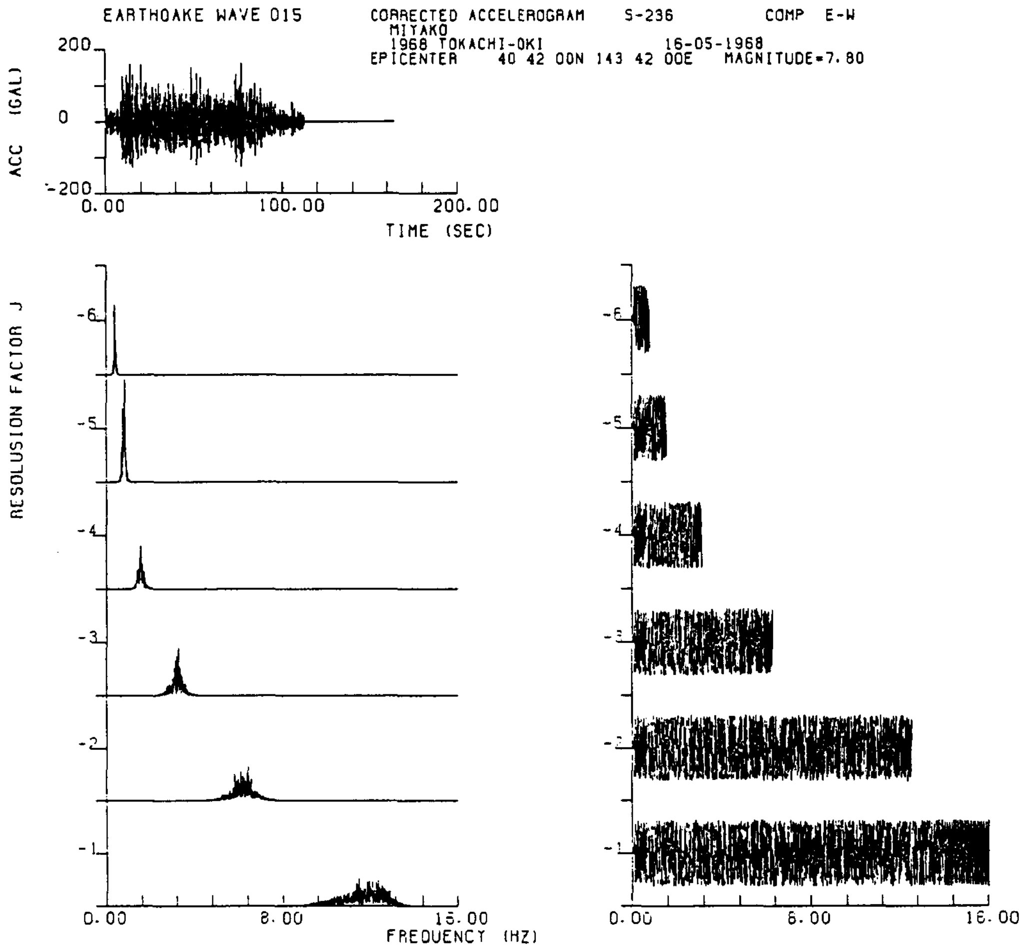


図1．1　ウエブレットフーリエスペクトル

活動や地震動の不確定性を考慮し，発生可能性を表すリスク指標を介した形で作成されるようになってきている[8]．すなわち，1）最大地動のハザード曲線を用いた方法，2）一様リスクペクトルを用いる方法，3）危険度解析による地震波パラメータを用いる方法などがあげられる．1）の方法は，地震動の特性のうち強度の決定のみ地震危険度解析を用いる方法であり，古典的な模擬波形作成の範疇に入る．2）の方法の代表的なものとしては，荒川・川島・相沢の提案したものがある[9]．これは，地震危険度解析により一様リスクペクトルを求め，これに等しい応答スペクトルを持つ地震波形を作成する方法である．3）は，亀田・野島が提案した方法[10]であり，決定すべき地震動パラメータを地震動強度の年超過確率を用いて定め，このパラメータを非定常確率過程の地震動モデルとして作成している．

本研究は，地震波の模擬波形作成に関する研究の流れのひとつであるリスクスペクトルによる方法を踏襲してつぎのように取り扱った．本研究では，文献11）で示したように地震波の波動をウエブッレト解析によりその特性を調べたので，そこで得られた性質を用いて，耐震設計用の模擬地震波形を作成した．すなわち，まず危険度解析によって耐震設計用の応答スペクトルは求めた．つぎにこの応答スペクトルをもつような模擬地震波はウエブレット変換における分解係数よる中心振動数間のバンド帯域ごとの修正を施して作成した．この場合，ウエブレット変換による地震波の分解係数ごとのウエブレットフーリエスペクトルは一般に図1．1のような結果を示すが，元になる地震波の強度特性と位相特性のうち位相特性は，元の地震

波のものを保持した形で応答スペクトルが合同なものを作成した．なお，本研究においてはウエブッレト変換の性質が解析の本質となるので，その数値的なアルゴリズムを重点的に示し，模擬波形は具体的なモデルとして和歌山県御坊市の火力発電所での位置でのリスクスペクトルをもとにした簡単な数値シミュレーションを示した．その結果本模擬波形作成法は簡便で有効な手法であることが示された．

2．数値計算におけるウェブレット変換の基本特性

2．1　ウェブレット変換のための計算アルゴリズム

ウェブレット変換についての基本式は，文献１１）に示している．ここでは，模擬地震波作成のために必要な数値演算を詳述する．

まず，与えられた離散データ $f(x)$ に対して，ウェブレット関数 $\phi(x)$ から定義されるウェブレット変換は，

$$D_{2^j}^{m} f = \langle f(u), \phi_{2^j}(u-2^{-j}m)\rangle \tag{2.1}$$

ここに，$\phi_{2^j}(x) = 2^{j/2}\phi(2^j x)$　(2.2)

となる．ただし，演算＜　＞は合積を意味する．数値的に式(2.1)を計算するためには，式(2.1)を直接計算するのではなく，次のようなフーリエ変換された関係式を用いて行う．すなわち，

$$F(Y)\Psi_{2^j}(Y) = F(Y)\Phi_{2^{j+1}}(Y)G(2^{-j-1}Y) \tag{2.3}$$

ここに，$F(Y)$，$\Psi_{2j}(Y)$ は，それぞれ $f(x)$，$\phi_{2j}(x)$ に関するフーリエ変換されたものである．$\Phi_{2j+1}(Y)$ は，スケール関数 $\phi(x)$ から次のように定義される．

$$\phi_{2^j}(x) = 2^{j/2}\phi(2^j x) \tag{2.4}$$

に関するフーリエ変換されたものである．また，$G(Y)$ は，次の関数のフーリエ変換されたものである．すなわち，

$$g(m) = \langle \phi_{2^{-1}}(u), \phi(m-u)\rangle \tag{2.5}$$

また，$\Phi_{2j+1}(Y)$ に対しては，次のような漸化式が成立している．

$$\Phi_{2^j}(Y) = \Phi_{2^{j+1}}(Y)H(2^{-j-1}Y) \tag{2.6}$$

ここに，$H(Y)$ は，

$$h(m) = \langle \phi_{2^{-1}}(u), \phi(m-u)\rangle \tag{2.7}$$

に関するフーリエ変換されたものである．

式(2.3)の左辺が，式(2.1)をフーリエ変換されたものに相当している．式(2.3)の漸化式を計算するためには，式(2.6)の漸化式を最初に計算する必要がある．まず，分解係数ｊ＝－１の場合，式(2.6)の右辺の $\Phi_{2j+1}=\Phi_{20}$ で，$H(2^{-j-1}Y) = H(Y)$ となる．スケール関数 $\phi(x)$ は実数関数であるので，離散データ数が２Ｎ（＝2^n）個なら，その引数が Y_1～Y_{2N} の２Ｎ個となり，$\Phi_{20}(Y)$ が（Ｎ＋１）個の独立した値が求められる．同様に，$H(Y)$ についても（Ｎ＋１）番目の引数で対称となる関数で，（Ｎ＋１）個の独立した値が求まり，これを $\Phi_{20}(Y)$ に乗じることにより式(2.6)の左辺の離散量 $\Phi_{21}(Y)$ が求められる．

つぎに，ｊ＝－２の場合，式(2.6)の右辺は，Φ_{21} の引数が Y で，H の引数が $2Y$ となるので，Y_1～$Y_{N/2}$ が独立の引数に対応し，左辺の離散量 $\Phi_{22}(Y)$ が求められる．したがって，関数 H と合積する関数 Φ_{2j+1} の場合，Φ_{2j+1} の引数が H の引数の１／２のものを乗じることを意味している．以上の過程をｊ＝－ｎまで繰り返すことにより，式(2.6)の漸化式が順次決まっていく．

一方，式(2.3)のｊ＝－１における右辺は，$\Phi_{20}(Y)$ に離散データのフーリエ変換された関数 $F(Y)$ と矩形鏡像関数 $G(Y)$ を乗じて左辺の離散量 $F(Y)\Psi_{2j}(Y)$ が求められる．さらに，ｊ＝－２に対しては，上述したように F と Φ_{2j+1} の引数が G の引き数の１／２のものを乗じることにより $F(Y)\Psi_{2j}(Y)$ が求められる．そして，式(2.1)は，各次数に対して逆フーリエ変換することにより求められる．

以上の式(2.6)及び(2.3)の２つの漸化式を離散的な表示をすると，ｊ＝－１～－ｎで次式のようになる．

$$\Phi_k^{[j]} = \Phi_k^{[j+1]} H_{2^{-j-1}k}, \quad (k=1,2,\cdots,2^{n+j-1}) \quad \cdots\cdots \tag{2.8}$$

$$F_k\Psi_k^{[j]} = F_k\Phi_k^{[j+1]} G_{2^{-j-1}k}, \quad (k=1,2,\cdots,2^{n+j-1}) \quad \cdots\cdots \tag{2.9}$$

図2．1　ウエブレット変換の演算フローチャート
（データ要素の演算関係）

ここに，　　上添字［　］は分解係数の次数を意味し，下添字は分解された離散データで引数を意味し，換言すれば，振動数成分を意味する．

次に，離散的にフーリエウェブレット変換された特性は，具体的なデータ処理の流れを示すことにより説明する．いま，$f(x)$の離散データ数を16（N＝8，n＝4）の場合についてデータの流れを図示すると図2．1のようになる．

図2．1に示すように分解係数がｊ＝－１から順次分解されていくことにより，データ数は１／２ずつ減っていく．そして，負の次数が増すごとに低振動数の変動特性を示している．また，図中の陰影を施したデータを見ればわかるように，各次数における分解されたデータは，１つ前の負の次数によって低振動数の特性が順次定義された形となっている．したがって，ウェブレット変換によって分解された係数により逆に元の波形を構築する場合，各次数の陰影を施したデータ特性がわかれば可能となる．

２．２逆ウェブレット変換のための計算アルゴリズム

次に，分解されたウェブレットフーリエスペクトルから逆に元の波形データを構築する数値計算手法につ

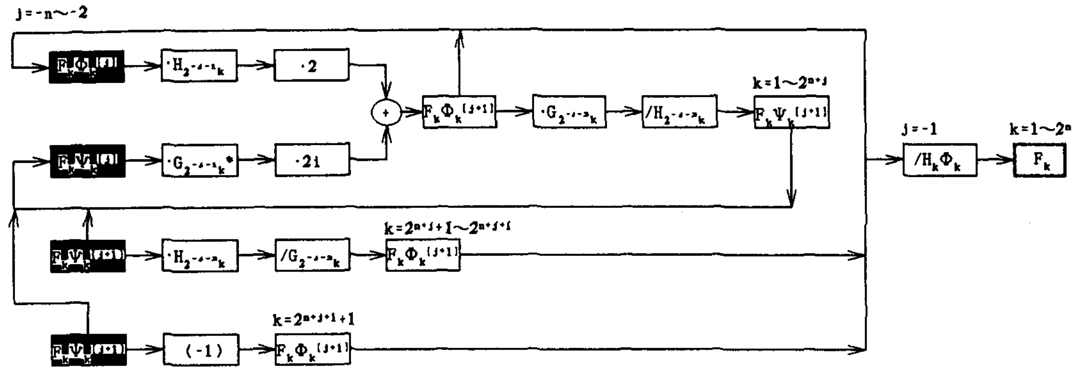


図2．2　逆ウエブレット変換の演算フローチャート

いて述べる．

まず，式(2.3)における右辺の$F(Y)\Phi_{2j+1}(Y)$の項は，次式のような漸化式による展開ができる．すなわち，

$$F(Y)\Phi_{2j+1}(Y)=2F(Y)H(2^{-j-1}Y)\Phi_{2j}(Y)+2F(Y)G(2^{-j-1}Y)\Psi_{2j}(Y) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (2.10)$$

式(2.10)の数値計算は，j＝－nの分解係数から逆に計算していく．この場合，右辺の$\Phi_{2j}(Y)$，$\Psi_{2j}(Y)$，$F(Y)$の引き数Y_Iに対して，$H(2^{n-1}Y)$，$G(2^{n-1}Y)$の引き数$2^{n-1}Y_I$は，Y_Mに対応している．したがって，式(2.10)の関係式により$\Phi_{2j+1}(Y)F(Y)$が定まるのは，1個である．これは，図2．1に示した計算アルゴリズムからわかるように，分解ステップが1段階進むごとにもとのデータ情報が1／2に減っていっているので，逆演算を行う場合，式(2.10)のみから復元できない．そこで，本研究においては，逆ウェブレット変換のための計算アルゴリズムは，j＝－n〜－2に対して次式のような漸化式によって行う．

$$F_k\Phi_k^{[j+1]}=2H_{2^{-j-1}k}F_k\Phi_k^{[j]}+2i(G_{2^{-j-1}k})^*F_k\Psi_k^{[j]},$$
$$(k=1\sim2^{n+j}) \qquad \cdots\cdots\cdots (2.11)$$

$$F_k\Psi_k^{[j+1]}=F_k\Phi_k^{[j+1]}G_{2^{-j-1}k}/H_{2^{-j-1}k},$$
$$(k=1\sim2^{n+j}) \qquad \cdots\cdots\cdots (2.12)$$

$$F_k\Phi_k^{[j+1]}=F_k\Psi_k^{[j+1]}H_{2^{-j-2}k}/G_{2^{-j-1}k}$$
$$(k=2^{n+j}+1\sim2^{n+j+1}) \qquad \cdots\cdots\cdots (2.13)$$

$$F_k\Phi_k^{[j+1]}=-F_k\Psi_k^{[j+1]},$$
$$(k=2^{n+j+1}+1) \qquad \cdots\cdots\cdots (2.14)$$

そして，元のデータは，

$$F_k=F_k\Phi_k^{[1]}/\Phi_kH_k,\ (k=1\sim2^{n-1}) \qquad (2.15)$$

と求められる．

以上の計算アルゴリズムの流れは，図2．2に示すようになる．図中の陰影を施した要素は，各計算ステップの始めに既知に値である．

3．模擬地震波作成法の基本アルゴリズムの誘導

3．1　波形作成基本アルゴリズム

本研究における模擬地震波作成法の基本アルゴリズムは，一様リスクスペクトルを用いる方法に属する．すなわち，地震危険度解析により一様リスクスペクトルを求め，これに等しい応答スペクトルを持つ地震波形を作成する．この際，ウェブレットフーリエスペクトルを用いて簡易的に地震応答スペクトルを等しくなるように作成する．

ここでは，ウェブレットスペクトルをどのように構築して模擬波形を作成するかを述べる．まず，分解係数jごとにウェブレットスペクトルが定まっている．この方法は離散データの時間刻みをΔtとすれば，中心振動数$f_j=2^{j-1}/\Delta t\ (j=-1\sim-n)$でバンド幅$\Delta f_j=2^{j-1}\pi$のバンドパスフィルターを作用さ

せたときのスペクトルとなっている．しかも，ウェブレットスペクトルによって構成される波は，低振動数域から順次構築されたものとなる．したがって，いま任意の代表的な地震動波形に対して，その位相特性は原波形のものを保持しつつ，地震応答スペクトルに一致するようウェブレットスペクトルを補正して波形を構築する．以下にその手順を示す．

まず，代表とする地震に対する加速度波形$a(t)$が次式のようなウエブレット展開した形で示されている．

$$a^{(0)}(t)=\sum_{j}\sum_{m}{}^{(0)}D_{2^j m}\,\phi(t-2^{-j}m) \qquad (3.1)$$

また，時刻歴波形$a^{(0)}(t)$に対して，減衰定数hを一定にしたときの地震応答スペクトルが$S_a^{(0)}(T)$と求められる．

一方，減衰定数hにおける設定地震応答スペクトルが$S_a(T)$と与えられているとする．このとき，$S_a(T)$と$S_a^{(0)}(T)$との差を補正するためウェブレット変換での分解係数ｊごとに次式のような補正係数を求める．

$$\zeta_j^{(0)}=\frac{S_a(T_j)}{S_a^{(0)}(T_j)} \qquad (3.2)$$

この補正係数$\zeta_j^{(0)}$を用いて，ウェブレット係数${}^{(0)}D_{2^j m}$は次式のように補正する．

$${}^{(1)}D_{2^j m}=\zeta_j^{(0)}\,{}^{(0)}D_{2^j m} \qquad (3.3)$$

そして，補正された係数を用いて新たな波形

$$a^{(1)}(t)=\sum_{j}\sum_{m}{}^{(1)}D_{2^j m}\,\phi(t-2^{-j}m) \qquad (3.4)$$

が求められる．　このように修正された波形$a^{(1)}(t)$による応答スペクトルが設定応答スペクトルに十分近似されるまで同様の手順を繰り返す．

本波形作成アルゴリズムの特徴は，式(3.1)あるいは(3.4)のようにウェブレット展開した形式で波形を表現した場合，分解係数ごとに表現されたウェブレット係数$D_{2^j m}$が各固有周期に対応する応答スペクトルを与える波形に相当している特性を用いていることである．したがって，位相特性を原波形に一致させた模擬波形の作成には，本手法は有効な方法の一つとなる．

３．２　本模擬波形作成の基本構成

前節で述べたように本模擬波形作成の基本構成は，地震危険度解析による一様リスクスペクトルによる地震波作成法に属し，各作成要素が構成されている．

一様リスクスペクトルは，例えば片山が定義したもの[12)]が一般的であるが，本研究では，次のような簡易的な方法によって作成する．

まず，設定位置における最大加速度は過去の地震来襲歴より時系列的にアテニュエーション式より求められる．このときハザード曲線がデータの時系列期間t（年）におけるランクごとの年間累積頻度より求められる．ここで地震発生過程がポアソン過程と見なせるならその再現期間T_Rは平均年間発生率νの逆数で与えられ，T_R年間確率最大加速度以上の地震動が発生する確率は，０．６３２であることはよく知られている．そこで，地震動の発生確率が０．６３２における最大加速度a_Rが定まる．

つぎに，最大加速度a_Rと応答スペクトルSaとの対応で，応答スペクトル倍率β[13)]は，マグニチュード，震央距離，地盤種別のそれぞれの重み係数$C(M)$，$C(\Delta)$，$C(G)$の積で求められる．さらに，応答スペクトル倍率の実測値のばらつきが対数正規分布と見なせる[14)]なら，応答スペクトル倍率値の超過確率に対応する値は，測定値と予測値の比α_pにより求められる．したがって，求めようとする応答スペクトルS_aは次式のように与えられる．

$$S_a(T)=\beta_p\cdot a_R \qquad (3.5)$$

ここに，

$$\beta_p=\alpha_p\cdot C(M)\cdot C(\Delta)\cdot C(G) \qquad (3.6)$$

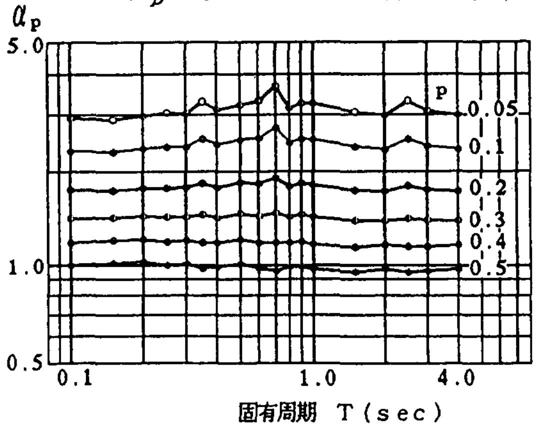


図３．１　αp －T関係

上式でのa_dは，マグニチュード，震央距離，地盤種別のアテニュエーション式により推定された時系列から求められた地動最大加速度であり，α_pは，固有周期ごとの応答スペクトルの超過確率より求められる係数である(図3．1参照)．a_Rの時系列のデータのばらつきとα_pのデータのばらつきはその対象期間が異なるが，ここでは両者のばらつきを応答スペクトルによるばらつきで評価していることになる．

このように求められた応答スペクトル$S_a(T)$が，本模擬波形作成においての基準スペクトルになる．そして，次のステップは，ウェブレット解析における分解係数ｊによって定まる周期を応答スペクトルの固有周期T_jとみなして前節で説明したような修正方法により模擬波形を作成する．このとき，分解係数ｊによって定まる周期は応答スペクトルの周期に比べて疎であるので，本研究ではｊに対応する中心振動数以外にバンドパスフィルターの帯域の中間点での振動数も補間的に用いて繰り返す．

4．　数値シミュレーションによる検討

4．1設定諸元および数値計算

本研究で提案した簡易的な波形作成法が，模擬地震波形としてどの程度有効であるか検討するために数値シミュレーションを行った．本数値シミュレーションにおいて用いた設定諸元はつぎのようになっている．

まず，模擬波形作成位置は，和歌山県御坊市火力発電所（E135.2°N33.9°）で地盤種別は第4種であるとした．また，再現期間$T_R=75$年での超過確率が0.632であるような地震動の最大加速度a_{max}を用いることにした．すなわち，当該地点のハザード曲線は図4．1に示すようになり，a_{max}=160 Galと地動最

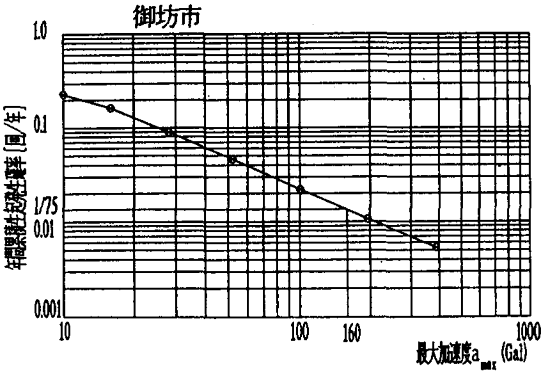


図4．1ハザード曲線

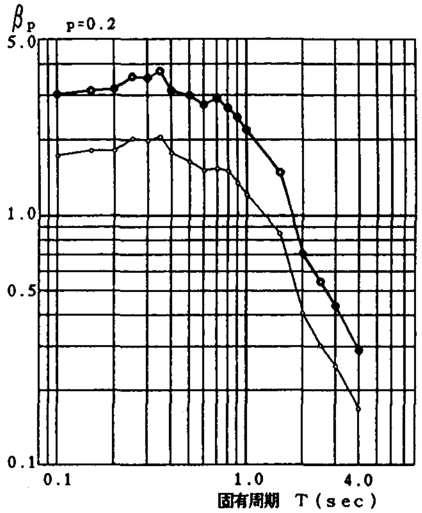


図4．2　リスク応答倍率βp

大加速度が推定された．

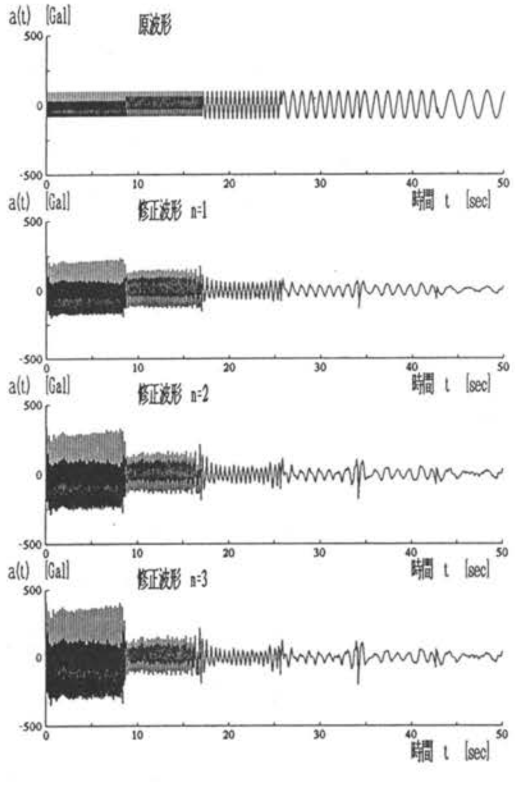
さらに，作成模擬波形は，1944年の東南海地震（$M=8.0$，$\Delta=95Km$），1946年の南海地震（$M=8.1$，$\Delta=106Km$）クラスの地震を対象にし，マグニチュード$M=7.5$～7.9，震央距離$\Delta=60$～$119Km$に対し，超過確率が0．2のリスク応答倍率β_pを図4．2の実線ように作成した．

位相特性を規定する原波形は，3ケースの区間定常正弦波と後藤・亀田が提案したパワースペクトル[15]をもつ定常不規則波の1ケースと1ケースの実地震記録波を採用した．区間定常での正弦波の振動数は，分解係数ｊに因る中心振動数を採った．

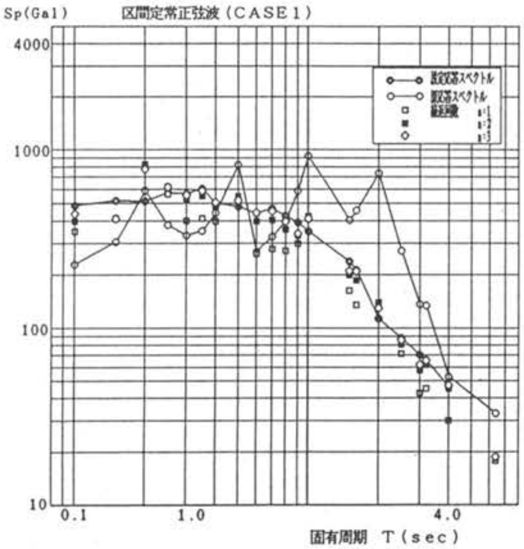
原波形が定常波に対する計算結果を図4．3～4．6に示し，地震波に対するものを図4．7に示す．図は修正に対する繰返ごとの時刻歴と応答スペクトルの結果を示している．

4．2模擬地震波形の特性

図4．3～4．5の結果から，定常な正弦波の結合からなる原波形に対しては，模擬波形は繰り返し回数が3回程度でほぼ設定した応答スペクトルと等しい波形が作成されているのがわかる．なお，時刻歴の結果から，振動数の異なる各定常部分との結合部において不連続が生じ，この時刻においてこれが顕在化した波となっている．これは，ウエブレット変換による時刻歴のデータの情報量が顕在化する性質によるものと考えられる．換言すれば，データのギャップ現象の生じている時刻において，これを高振動数の波が集中している時刻と解釈できる．

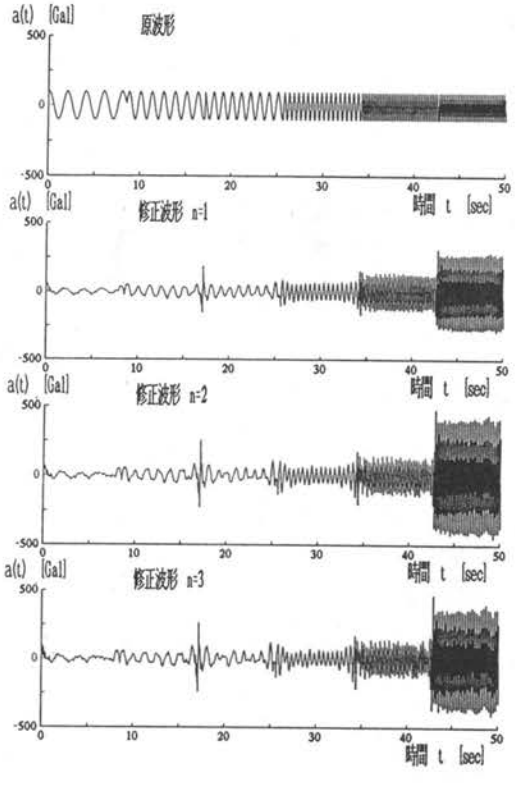


（a）時刻歴

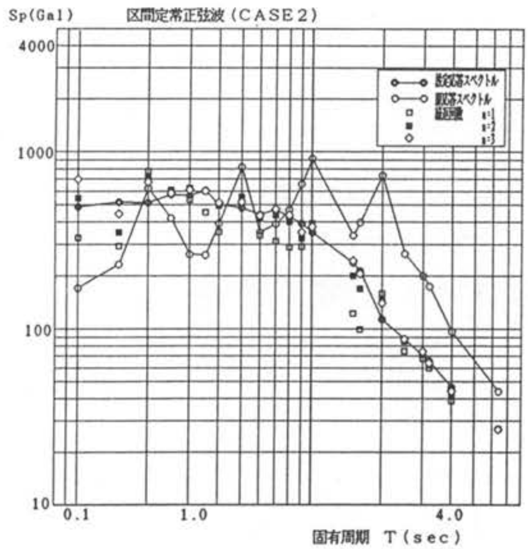


（b）応答スペクトル

図4．3　区間定常正弦波を原波形とした結果

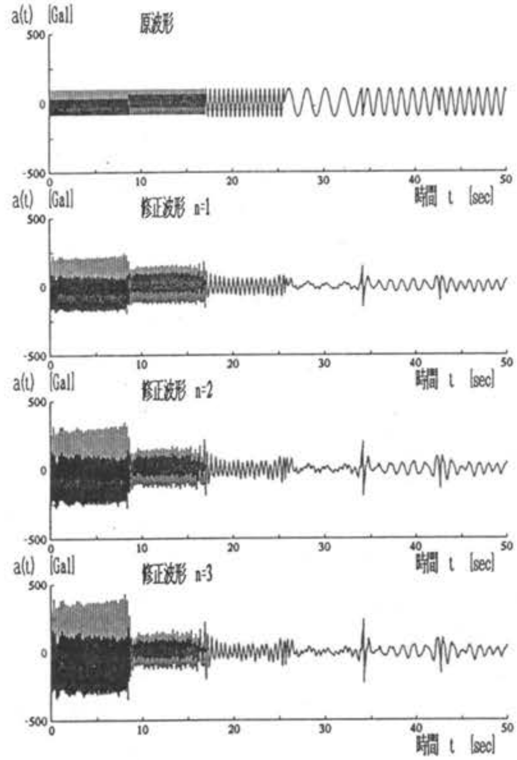


（a）時刻歴

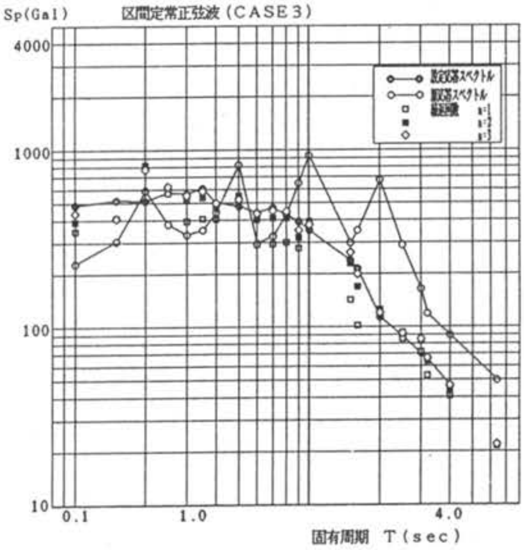


（b）応答スペクトル

図4．4　区間定常正弦波を原波形とした結果

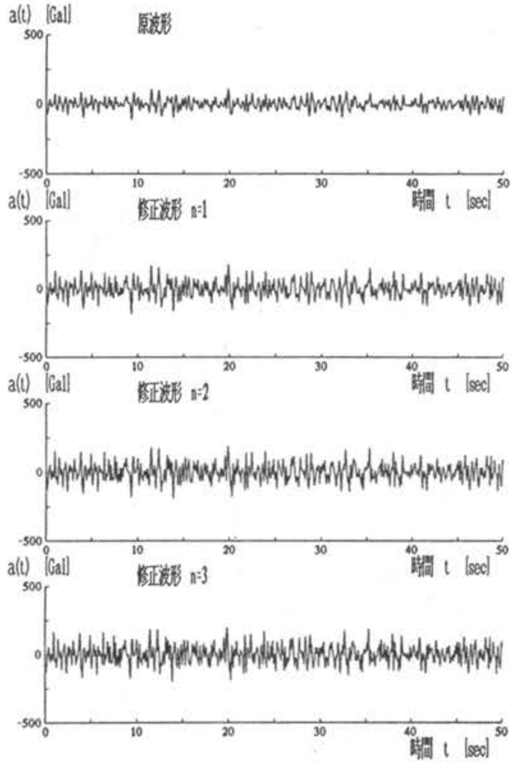


（a）時刻歴

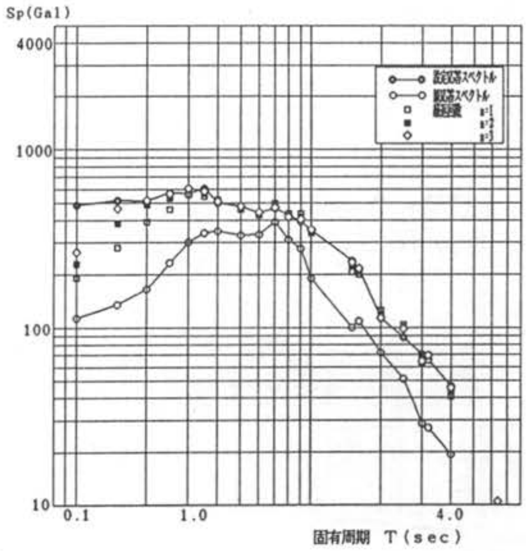


（b）応答スペクトル

図4．5　区間定常正弦波を原波形とした結果

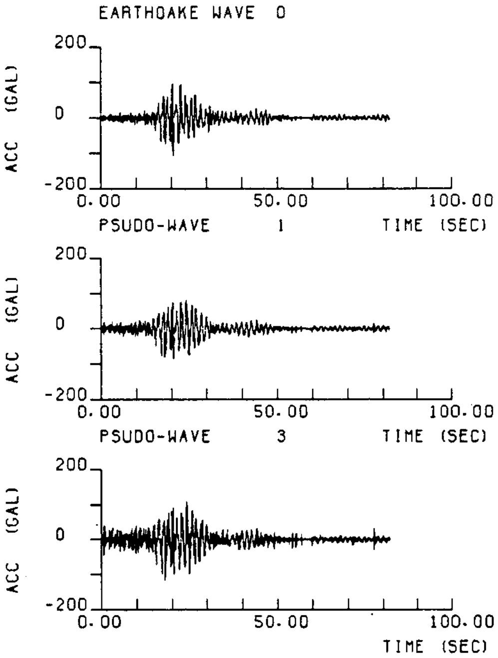


（a）時刻歴

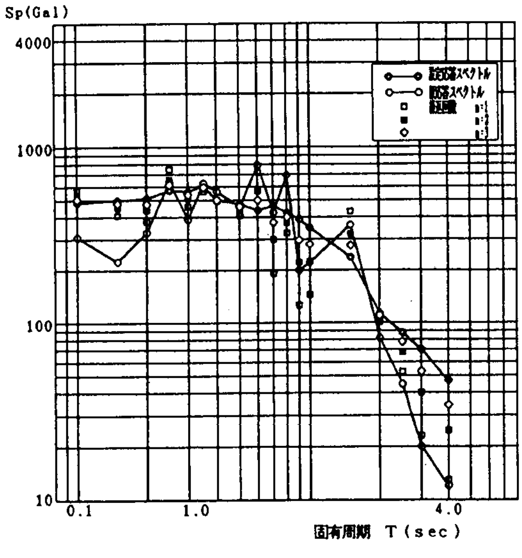


（b）応答スペクトル

図4．6　定常不規則正弦波を原波形とした結果



（a）時刻歴



（b）応答スペクトル

図4．7　地震波を原波形とした結果

図4．6の結果から，定常な不規則波形が原波形の場合も，設定応答スペクトルに収束させるための繰返回数はほぼ3回程度である．なお，周期の短い部分で若干収束が悪いが，その他の部分では収束性がよい．

図4．7の応答スペクトルの結果から，地震波が原波形の場合においても定常な波形の結果と似た傾向を示している．ただし，時刻歴に関する結果から，高振動数の成分が若干顕著に現れている．すなわち，データの時間刻み$\Delta t=0.02$秒の場合，周期の0．04秒から0．1秒に対する成分の影響が設定応答スペクトルの固有周期成分から修正できないためと考えられる．このことは，ウエブレット変換における分解係数の小さい成分が多く含んだ波形になって現れている．すなわち，分解係数の小さい成分では分解される中心振動数が高く，そのバンド帯域が広いためと考えられる．

5．あとがき

本研究は，ウエブレット変換によって耐震設計用模擬地震波形の作成に関する数値計算法を扱った．その特徴は，地震によるウエブレット変換の特性を分解係数ごとにウエブレットフーリエスペクトル（WFS）として求め，得られたWFSを逆変換することにより原波形復元するための基本アルゴリズムが用いられていることであった．また，リスクスペクトル法にしたがって設定地震応答スペクトル（ERS）は，地震規模，震央距離，地盤種別および超過確率の値により推定した．模擬波形は，任意の地震波の強度特性と位相特性のうち位相特性が元の地震波のものを保持し，ERSが合同なものを作成した．

そして本模擬波形作成の数値シミュレーション結果は，次のような特性をもっている．

（1）本模擬波形作成法は分解係数ごとに定まる振動数帯域の応答スペクトルの修正を行っている．すなわち，長周期成分に対する応答スペクトルから順次短周期成分の波形を構築している．

（2）定常な原波形に対しては，模擬波形は繰り返し回数が3回程度でほぼ設定した応答スペクトルと等しい波形が作成されている．

（3）地震波が原波形の場合においても定常な波形の

結果と似た傾向を示しているが，収束のための繰返回数は数回程度で設定スペクトルに等しくなる．また，時刻歴に関する結果は，高振動数の成分が若干顕著に現れてた波形となっている．

最後に、本研究に際して数値計算を行っていただいた本校卒業生大塚伸一郎君（東洋建設）に感謝の意を表わします。

参考文献

1)G.W.Housner: "Characteristic of Strong-motion Earthquakes", BSSA, Vol.37, No.1, 1947.

2)V.V.Bolotin:"Statistical Theory of the Aseismic Design of Structures", WCEE, 1960.

3)H.Tajimi:"Statistical Method of Determining the Maximum Responses of Building During an Earthquake", 2WCEE, 1960.

4)H.Goto and H.Kameda:"Statistical Inference of the Futere Earthquake Ground Motion", 4WCEE, 1969.

5)後藤尚男・土岐憲三・秋吉卓：" 電子計算機による耐震設計用の人工地震波に関する研究"，第２回日本地震工学シンポジウム，1966.

6)J.E.Goldberg, J.L.Bogdanolf and D.R.Sharpe:"The Response of Simple Non-linear Systems to a Random Disturbance of the Earthquake Type", BSSA, Vol.54, No.1, Feb., 1964.

7)P.C.Jennings, G.W.Housner and N.C.Tsai: "Simulated Earhquake Motions for Design Purposes", ４WCEE, Vol.1, 1969.

8)土木学会編：" 動的解析と耐震設計第１巻地震動・動的特性"，技報堂出版，pp.47～50, 1989.

9)荒川・川島・相沢：" 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，２６巻，７号，pp.46～51, 1984.7.

10)H.kameda and N.Nojima: "Simulation of risk-consistent Structural Dynamics", Vol.16, pp.1007～1019, 1988.

11)宮脇幸治郎：" 地震波に関するウエブレット解析"，大阪府立工業高等専門学校研究紀要，２６巻，pp.53～61, 1992.10.

12)T.KATAYAMA: "An engineering prediction model of acceleration response spectra and its application to seismic hazard mapping", EESD, Vol.19, pp.149-163, 1982.

13)日本道路協会編：" 道路橋示法書・同解説Ｖ耐震設計編"，日本道路協会，pp.111-125, 1979.5.

14)片山・岩崎・佐伯：" 地震動加速度応答スペクトルの統計解析"，土木学会論文集，第２７５号，pp.29～40, 1978-7.

15)前掲４），pp.1～12.