

ウェレット変換による履歴復元力系の 動特性評価に関する基礎的研究

宮脇幸治郎¹・土岐憲三²

¹正会員 工修 大阪府立工業高等専門学校教授 建設工学科 (〒572 寝屋川市幸町 26-12)

²フェロー会員 工博 京都大学教授 大学院工学研究科 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

本研究は、最初に履歴復元力を有する1自由度系の非パラメトリック面をウェレット変換により表している。ここでは、履歴復元力による応答特性が、ウェレット変換された特性面と、等価な固有振動数および減衰定数の同定により考察されている。次に、履歴復元力系を評価するため線形系において、応答あるいは入力のパワー(分散)一定という条件下での応答量が、等応答スペクトルとして定義されている。この等応答スペクトルは、非パラメトリック面を変動させて極値化したものを意味し、その誘導は、ウェレット関数を用いて行われている。等応答スペクトルは、若干の地震データに対して履歴系の応答スペクトルとの比較により検討している。

Key Words : wavelet transformation, hysteretic restoring forces, equi-response spectra, non-parametric planes

1. 緒言

まず、非線形振動系の同定方法は、数多く提案されているが、分類する¹⁾とパラメータの領域内を検討するパラメトリック法(構成的モデル)と関数領域を検討する非パラメトリック法(非構成的モデル)とがある。

先験的な構造的モデルでモデルに誤差を含まない場合のパラメータ同定の各方法について、HartとYao²⁾を中心にして研究がされている。また、土岐・佐藤³⁾は、不確定なランダム外力が作用している構造物の応答観測値を用いて、その系の固有振動数や減衰定数を決定する方法論を考察している。このときの手法は、統計的手法に属する自己回帰移動平均 (ARMA)法である。同様の手法に属するものにShinozuka, YunとImaiら⁴⁾の研究やLiuとChungら⁵⁾の研究がある。さらに、拡張カルマンフィルターによる星谷ら^{6),7)}を中心にした研究が、多数ある。

先験的な構造的モデルを有しない場合の系のパラメータ同定として、MasriとCaughey⁸⁾の非パラメトリック的な手法は、非線形1自由度系のパラメータを同定し、良い結果を得ている。このときの手法は、Tchebycheff多項式近似でパラメータを推定してい

る。同様に、宮脇・武市⁹⁾は、非パラメトリック面を2次元のウェレット変換による近似で評価している。また、多自由度系へ拡張したものにはMasri, SassiとCaughey¹⁰⁾の研究がある。

次にウェレット解析は、すでにいくつかまとまった文献^{11),12),13)}として著され、体系化されてきている。ウェレット解析による最近の応用例については、伊藤・杵築・北川・堀畑・石光¹⁴⁾による信号解析、鄭・相澤・斉藤・鳥羽¹⁵⁾による信号処理、桧山・花田・今井¹⁶⁾によるデータの圧縮などのデータ処理への応用がある。さらに、佐々木・前田¹⁷⁾、佐々木・山田¹⁸⁾による方程式の数値解法への適用、曾根・山本・増田・中岡・芦野^{19),20)}らによる強震動記録を含めた波動への解析例がある。

ところで、ウェレット解析における多次元への拡張の最も簡単なものとして2次元ウェレット変換がある。Mallat²¹⁾は、画像をこの2次元ウェレット変換し、その基礎的な表現法について述べている。ウェレット変換の多次元への拡張は、ここに述べられている議論により容易に行える。

以上のような系の同定ならびにウェレット解析による手法を基に、本研究では、履歴復元力特性をもつ系の特性ならびに評価法を試みた。

まず、1質点系でモデル化される地盤上の構造物

が地動を受けた場合、構造物に作用する単位質量当たりの慣性力は、変位および速度による非パラメトリックの特性面に表示される。この非パラメトリック特性面は、系が非線形応答することにより変形し、ひずむことになる。一方、ウエブレット変換でのデータ処理は、分解次数の小さいところでデータの不連続性を顕在化して表現できる。したがって、本研究では、この特性を用いてひずんだ非パラメトリック特性面を2次元ウエブレット変換により調べた。

次に、等価な固有周期ならびに減衰定数を、構造物の動特性を支配する量として特性面より評価した。この場合、同定された量には、初期剛性による固有周期と明確な相関関係が認められなかった。さらに、応答スペクトルは、地震波による構造物への影響を評価しているが、履歴復元力特性をもつ系の応答スペクトルは、その復元力モデルにより大きく変化する。

そこで、著者らは、このような履歴復元力特性をもつ系の応答量を評価するために、初期剛性をもった線形系における慣性力項、減衰力項、復元力項および入力項を評価する要因として採用した。すなわち、本研究は、応答加速度あるいは入力加速度のパワー(分散)が一定という条件において応答量を極値化して評価し、これを等応答スペクトルとして取り扱った。ここで、評価式の誘導は、変数をウエブレット分解し、このときのウエブレット係数を変化させることにより行った。最後に、等応答スペクトルは、若干の地震データに対して、履歴復元力系の応答スペクトルと比較することにより考察された。

2. 基礎式

(1) 非パラメトリック面表示

いま、地動変位を受ける1自由度非線形系の運動方程式は、応答変位を x 、応答速度を y と表すと、

$$f(x, y) = -(\ddot{x} + \ddot{z}) = 2\beta_0 \omega_0 y + \bar{F}(x) \quad (1)$$

ここに、

$\bar{F}(x)$: 復元力特性を表す関数

ω_0 : 構造系の初期剛性による固有円振動数

β_0 : 減衰定数

\ddot{z} : 地動加速度

と表現できる。構造系に作用する単位質量当たりの慣性力 $f(x, y)$ が、式(1)のように速度と変位とによって与えられる。ここで、速度 y は、線形(一般的には非線形も可)と仮定し、復元力特性に対しては、変位 x によってモデル化されるとする。このような部材構造

系は、慣性力、変位、速度の3成分によりその動的な挙動を非パラメトリック的に表現できる。すなわち、これらの成分が時刻歴データとして何らかの方法で観測されるならば、この系の構造特性が同定できる。

なお、Masri-Caugheyは、この特性曲面を表示するためにTchebycheff多項式表示を提案した²²⁾。すなわち、

$$f(x, y) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n C_{ij} T_i(x) T_j(y) \quad (2)$$

ここに、 $T_i(\xi)$: Tchebycheff多項式

$$C_{ij} = \begin{cases} \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 v & i, j \neq 0 \\ \left(\frac{2}{\pi^2}\right) v & i \text{ or } j = 0 \\ \left(\frac{1}{\pi^2}\right) v & i = j = 0 \end{cases}$$

$$v = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f(x, y) T_i(x) T_j(y) w(x) w(y) dx dy$$

$$w(\xi) = \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}}$$

式(2)によって表現された慣性力 $f(x, y)$ は、 x と y 方向にTchebycheff多項式関数の直交展開となっている。さらに、ここでの式の表現は、 x と y のデータを最大値で標準化して $[-1, 1]$ 領域の表現に変換され、これを展開表示する際、重み関数 $w(\xi)$ を乗じることにより対象とする領域で等誤差の近似となっている。また、Tchebycheff多項式関数の各展開次数より、このときの係数 C_{10} が等価な固有円振動数、 C_{01} が等価な減衰定数に比例した量を与えている。ただし、第1添字は、 x 方向の次数、第2添字は、 y 方向の次数を意味している。

(2) 2次元ウエブレット変換表示

非パラメトリック面によって表示された慣性力は、変位と速度によって与えられている。したがって、慣性力は、変位と速度の2成分による2次元ウエブレット変換で表現可能であり、その特性も抽出できる。なお、ここで取り扱う2次元ウエブレット変換は、有限離散な変換を対象にして扱い、2次元の場合、広い意味でウエブレット関数 $\Psi_j^{[m]}$ は、形式上4種類で構成される。すなわち、1次元ウエブレット変換におけるウエブレット関数 $\psi(\xi)$ とスケール関数 $\phi(\xi)$ の組み合わせにより、

$$f(x,y) = \sum_j \left\{ \sum_{pq} \sum_m \sum_n D_j^{[pq]} \psi_j^{[pq]}(x-2^{-j}m, y-2^{-j}n) \right\} \quad (3)$$

と表示できる。ここに、右辺のウエブレット係数の上添字 [pq] は、スケール関数によるものをA、ウエブレット関数によるものをDという記号で表し、 $D_j^{[m]}f$ は次式のようにになっている。

$$\left. \begin{aligned} D_j^{[AA]}f &= \langle f(u,v), \phi_j(u-2^{-j}m)\phi_j(v-2^{-j}n) \rangle \\ D_j^{[AD]}f &= \langle f(u,v), \phi_j(u-2^{-j}m)\psi_j(v-2^{-j}n) \rangle \\ D_j^{[DA]}f &= \langle f(u,v), \psi_j(u-2^{-j}m)\phi_j(v-2^{-j}n) \rangle \\ D_j^{[DD]}f &= \langle f(u,v), \psi_j(u-2^{-j}m)\psi_j(v-2^{-j}n) \rangle \end{aligned} \right\}$$

(4a,b,c,d)

ここに、 $\langle \quad \rangle$ は、内積 (合積) を意味する。上式の意味は、式(4a)がx, y方向の両成分ともローパスフィルターを掛けた場合の係数を与える。さらに、式(4b)が、x方向の成分はローパスフィルターを、y方向の成分はバンドパスフィルターを掛けた場合の係数を与える。式(4c)が、逆にx方向の成分はバンドパスフィルターを、y方向の成分はローパスフィルターを掛けた場合の係数を与える。最後の式(4d)が、x, y方向の両成分ともバンドパスフィルターを掛けた場合の係数を与える。さらに、ここで用いている関数 $\phi_j(\xi), \psi_j(\xi)$ は、それぞれ関数 $\phi(\xi)$ と $\psi(\xi)$ によって定義される2進表示による離散的な直交関数²³⁾である。したがって、式(4a)~(4d)のフーリエ変換したものは、それぞれの係数の2次元のスペクトルを与える。これらは、各記号の上に^を付けることによって示すことにする。以上のように非パラメトリック面が表示されることにより、非線形の構造系の動特性は、ウエブレット係数 $D_j^{[m]}f$ 、あるいは、ウエブレットフーリエスペクトル $D_j^{[pq]}f$ によって把握できることになる。

(3) 等価固有振動数および等価減衰定数

式(2)の直交関数で展開された平面 (線形系なら傾き一定の平面となる) の場合、変位方向の傾きが、固有円振動数を意味し、その係数 C_{10} で表されている。一方、速度方向の傾きが、減衰定数に比例した値を意味して、係数 C_{01} で表されている。これと同様にウエブレットの直交関数での展開形式の表現にも成立する。ただし、2次元のウエブレット展開表示の場合、直交基底を形成しているウエブレット関数とスケール関数の特性より、データの抽出特性が、異なる。本研究においては、非パラメトリック面に現れる非線形応答特

性の違いの抽出を主眼において評価するので、等価な固有円振動数を評価する場合は、曲面の変位方向のひずみをより顕在化させるウエブレット関数による展開で、逆に、曲面の速度方向のひずみをスケール関数による展開で評価する。一方、等価減衰定数を評価する場合は、曲面の速度方向のひずみをウエブレット関数により展開した値で評価することを考える。

すなわち、非パラメトリック面を有限離散の2次元ウエブレット変換処理された場合、等価剛性 (固有振動数) および減衰定数の特性は、 $D_j^{[m]}f, D_j^{[n]}f$ に対してそれぞれ速度、変位が0に対する特性より評価できる。分解係数jに対して、等価固有振動数 ω_{eq} および等価減衰定数 β_{eq} は、次式のように評価できる²⁴⁾。

$$\left(\frac{\omega_{eq}}{\omega_o} \right)^2 = \left[\frac{D_j^{[DA]} \tilde{f}(u,0)}{D_j^{[DA]} f(u,0)} \right]_{m=n_{max}} \quad (5)$$

および、

$$\frac{\beta_{eq}}{\beta_o} = \left[\frac{D_j^{[AD]} \tilde{f}(0,v)}{D_j^{[AD]} f(0,v)} \right]_{n=n_{max}} \left/ \left(\frac{\omega_{eq}}{\omega_o} \right) \right. \quad (6)$$

ここに、 $f(u,v), \tilde{f}(u,v)$ は、それぞれ線形、非線形系に対する関数系を意味する。式(5)および(6)の表記は、式(4)のウエブレット係数を示しているが、()内の引数の意味は、第1引数が変位成分であり、第2引数が速度成分である。したがって、()内のウエブレット係数は、0でない方向の内積の結果を意味している。さらに、[]外の添字m, nは、それぞれ変位、速度を意味し、それぞれの最大での値である。すなわち、非パラメトリック面の変位あるいは速度方向の境界点で等価構造特性値が評価されている。

(4) 等応答スペクトル

一般に加速度に関する地震応答スペクトルは、式(1)における応答において、

$$S_a(T_o, \beta_o) = \max |\dot{x} + z| \quad (7)$$

と定義されている。ここに、 T_o は、系の固有周期である。そこで、本研究においては、PhilippacopoulosとWang²⁵⁾による評価と同じように、非線形系の応答スペクトルを以下の手順にしたがって算定する。

まず、式(1)の非線形系に対しては、式(5)、(6)のように非パラメトリック面の2次元ウエブレット変換により、等価固有円振動数および減衰定数が求められる。ところが特性面の等価なこれらの評価量は、

系の初期剛性と一定の相関を一般に示さない。そこで式(1)の非線形系を次の固有円振動数 ω_0 (初期剛性により定義されたもの)の線形系との関係において考える。

$$\ddot{\bar{x}} + 2\beta_0\omega_0\dot{\bar{x}} + \omega_0^2\bar{x} = -\ddot{z} \quad (8)$$

いま、式(1)の復元力項の $F(x)$ が降伏点を超えた領域で塑性の強い特性を持った履歴を扱う場合、慣性力項が一定レベルに押さえられる傾向を持つので、その影響量を次のように評価してみる。

式(8)の単位質量当たりの慣性力は、ウエブレット分解により次式のように表示される。

$$\alpha(t) = \ddot{x}(t) + \ddot{z}(t) = \sum_j \sum_m D_{jm} \psi_{jm}(t) \quad (9)$$

そうすると、このパワー(分散)に相当する量を算定すると次式のようになる。

$$\begin{aligned} \int \alpha^2(t) dt &= \sum_j \sum_m D_{jm}^2 \\ &= \sum_j E_j^2 \end{aligned} \quad (10)$$

また、

$$\ddot{z}(t) = \sum_j \sum_m D_{jm} \theta_{jm}(t) \quad (11)$$

とおくと、式(9)より、

$$\begin{aligned} \ddot{\bar{x}} &= \alpha(t) - \ddot{z} \\ &= \sum_j \sum_m D_{jm} (\psi_{jm} - \theta_{jm}) \end{aligned} \quad (12)$$

となる。

式(8)に式(9)、(11)、(12)の関係をを用い、両辺にフーリエ変換を施せば、

$$\theta_{jm} = \frac{\{\omega_0^4 - (1 - 4\beta_0^2)\omega_0^2\omega^2\} - i2\beta_0\omega_0\omega^3}{\omega_0^4 + 4\beta_0^2\omega_0^2\omega^2} \Psi_{jm} \quad (13)$$

ここに、

$$\Psi_{jm}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\alpha t} \psi_{jm}(t) dt \quad (14)$$

と表現できる。

次に応答加速度 $\alpha(t)$ のパワーを一定にして、入力加速度が最大になるように特性面を変動させるには、次式の D_{jm} を解けばよい。

$$\max_{D_{jm}} \left| \sum_j \sum_m D_{jm} \theta_{jm} \right|; \sum_j \sum_m D_{jm}^2 \leq \sum_j E_j^2 \quad (15)$$

すなわち、

$$\frac{\partial}{\partial D_{jm}} \left(\sum_j \sum_m D_{jm} \theta_{jm} - \lambda \sum_j \sum_m D_{jm}^2 \right) = 0 \quad (16)$$

ここに、 λ はLagrangeの乗数を算定すると次式のようになる。

$$D_{jm} = -E_j \frac{\theta_{jm}}{\sqrt{\sum_m \theta_{jm}^2}} \quad (17)$$

したがって、分解係数 j において応答加速度のパワーが等しいという意味においての等応答スペクトルは、次式のように定義できる。

$$\begin{aligned} S_a(T_0, \beta_0) &= \max_t |\alpha(t)| \\ &= \max_t \left| \sum_j E_j \sum_m \frac{\theta_{jm} \psi_{jm}}{\sqrt{\sum_m \theta_{jm}^2}} \right| \end{aligned} \quad (18)$$

ここに、

$$\theta_{jm}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\theta}_{jm}(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (19)$$

同様の手順により、入力加速度のパワーが一定という意味での等応答スペクトルは、

$$S_a(T_0, \beta_0) = \max_t \left| \sum_j \tilde{E}_j \sqrt{\sum_m \tilde{\theta}_{jm}^2} \right| \quad (20)$$

ここに、

$$\tilde{\theta}_{jm} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\Theta}_{jm}(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (21)$$

$$\tilde{\Theta}_{jm} = \frac{\{\omega_0^4 - (1 - 4\beta_0^2)\omega_0^2\omega^2\} + i2\beta_0\omega_0\omega^3}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta_0^2\omega_0^2\omega^2} \Psi_{jm} \quad (22)$$

$$\sum_j \tilde{E}_j^2 = \int \dot{z}^2(t) dt \quad (23)$$

となる。

以上のような基礎式の誘導において式(18)は、 S_a が絶対応答加速度のウエブレット分解されたパワーと線形系の応答倍率とに分離して評価できることを示している。ただし、ここでの線形系の応答倍率は、式(13)からわかるようにウエブレット関数から定義される基底のフーリエ変換された Ψ_{jm} を含めて表現されている。さらに、式の誘導過程からわかるように、式(10)で示される分解係数ごとの応答のパワーが、同じ応答であっても、その応答スペクトルが極値化することによって式(18)のように表現されている。換言すると、応答のパワーが同じであっても系の剛性と減衰の違いにより、応答の最大値がウエブレット係数を変動させて極大の状態または極小の状態となる。すなわち、こ

の S_u は、分解係数ごとの慣性力(単位質量当たり)のパワーを一定として、特性面の極値により評価した量を意味する。

なお、式(20)は、入力加速度のパワーを分解係数ごと同じにして、その応答が極値をとるように評価されている。

上述の誘導は、線形系での議論であるので、非線形系への評価には、直接適用できない。履歴系の応答については、入力の違いによって剛性劣化や履歴減衰の効果が異なり、さらに、その系の履歴復元力モデルの違いによってもこれらの効果が大きく異なってくる。ところで、これらの非線形系での慣性力項および入力項のパワーは、線形系の場合と同じであるので、非線形の効果は、剛性劣化および履歴減衰の項となる。そこで、著者らは、非線形性の応答特性を応答スペクトルで評価する場合、ここで定義した線形系での等応答スペクトルを評価量として採用してみる。なお、ここでの評価量とは、線形系で非線形系の応答スペクトルの変動する部分を押さえる量という意味である。この場合、どの程度の非線形性まで評価できるかが問題となる。ここで、構造部材が完全に破壊に至っていない程度の非線形性を対象にして議論しても、工学的には、意義があると考えられる。たとえば、塑性率が10以下であり、耐力劣化後の勾配が大きく負とならないような履歴復元力特性をもつ系に対しては、一定パワー内の極値で評価する。

3. 計算アルゴリズム

(1) 非パラメトリック面の処理

まず、変位・速度の時刻歴データは、全データの継続時間中の絶対最大値を用いて、基準化した量に変換する。このように基準化すると変位、速度の値は、[-1, +1]の範囲で表せる。次に単位質量あたりの慣性力を変位、速度による曲面で表示させるためには、等間隔の網目状の節点に対する値に変換する。ここでは、網目の4節点で構成される部分の曲面は、最小自乗法で平面として値を決定する。また、系の応答は、平均値近傍から曲面の形状を螺旋状に決めるアルゴリズムを作成する。さらに、初期値は系の平均軸からシフトした状態で応答していることを考慮して処理する。

なお、網目の数は、x, yの両方向とも同じ数で、しかも、2のべき乗の個数に分割している。これは、非パラメトリック面の特性把握のため離散有限元エブレット変換の方法を用いるためである。

Table 1 Earthquake records used in the numerical calculations

Member name	Earthquake	Magnitude	Max. Acc. (cms/s ²)
ELC-NS	1940ImperialValley	7.1	341
TFT-EW	1952KernKounty	7.7	176
HCH-EW	1968Tokachi-oki	8.0	180
A0010		8.0	245
A0012		8.0	192
A0015		8.0	160
A0022	1968Tokachi-oki after shock	7.4	99
A0030		5.1	61
A0006	1969Hyuganada	7.5	104
COR-NS	1989LomaPrieta	7.1	617
KSR-EW	1993Kushiro-oki	7.8	922
TRZ-EW	1994Northridge	6.7	1745
KBU-EW	1995Hyogoken-nanbu	7.2	305
KSH-EW		7.2	818

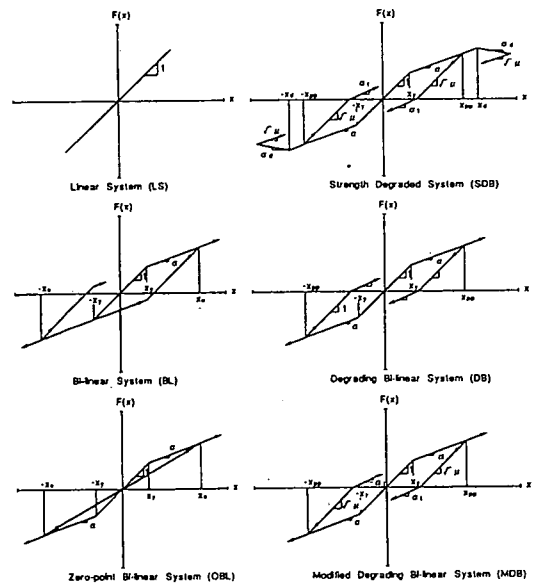


Fig.1 Using restoring force models

(2) 履歴復元力応答計算

時刻歴応答解析を行う場合、復元力-変位曲線の復元力モデルが用いられる。復元力モデルは、Fig.1に示すようなモデルを用いて、応答の数値シミュレー

ションを行う。復元力モデルは、応答解析をする対象物によって与えられるが、ここでは基本的な量を与える線形モデル(LS)、鋼材の部材特性を与える双線形モデル(BL)、RC部材の特性を与える原点復帰型(OBL)、剛性劣化型(DB)、修正剛性劣化型(MDB)、耐力劣化型モデル(SDB)と呼ぶものを用いる。後の3モデルは、RC構造での載荷を説明するモデルである。

計算アルゴリズムは、運動方程式を4次のRunge-Kutta法により、時々刻々直接数値計算して求める。入力地震波の時間刻みは一定に与えられている。ただし、応答計算における剛性の変化点、あるいは、速度の反転点などの各モデルの特異点近傍の収束計算は時間刻みを入力波の時間刻みの1/10に採り、最大収束繰り返し回数を200回で打ち切って求めている。

(3) 等応答スペクトル計算

等応答スペクトルの計算アルゴリズムは、最初にウェレット変換における分解係数 j ごとの一定条件にするパワーおよびウェレット関数を含んだ応答倍率の量をフーリエ変換する。そして、求めようとする諸量は、フーリエ逆変換により算定している。

4. 数値計算

(1) 設定諸元

本研究では、時刻歴応答解析の地震動には、1968年の十勝沖地震(M8.0)の室蘭の記録A0010(第2種地盤上の最大加速度245Gal, 時間刻0.02秒)を主に用い、等応答スペクトルの評価の地震動には、Table 1に示したものをを用いた。入力レベルとの違いによる応答特性を検討する場合は、元になる波形を0.25~3.0倍(0.25刻み)して用い、標準値としては、 $\zeta=2.0$ を用いた。ここに、 ζ は、記録された波形の最大値を基準にし、その比率で定義している。一方、履歴復元力モデルは、Fig.1に示すようなものを用いているが、その構造特性のパラメータには、次のような値を用いた。まず、微小変形振動時の固有周期 T_0 は、一般のRCおよび鋼橋脚の固有周期が1秒前後であるので標準値として $T_0=1$ 秒とし、固有周期の応答特性の検討には $T_0=0.1\sim 5.0$ 秒を用いた。また、微小変形時の減衰定数 β_0 は、一般に鋼構造の上部構造で0.02~0.03、下部構造では0.03~0.05であり、RC構造の上部構造で0.03~0.05、下部構造では0.05~0.1である。したがって、減衰による応答特性を検討する場合は、 $\beta_0=0.02\sim 0.2$ の値を用い、標

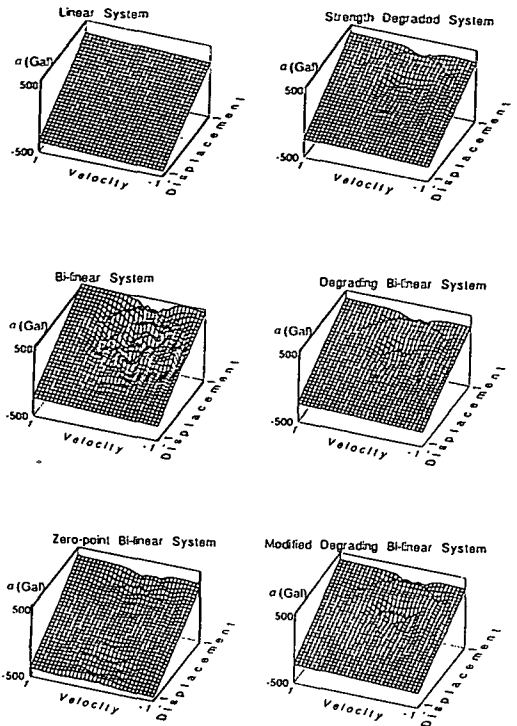


Fig.2 Non-parametric planes due to restoring force models ($A0010, T_0=1.0$ sec, $\beta_0=0.05$, $\zeta=2.0$)

準値としては、 $\beta_0=0.05$ を用いた。

次に剛性比 α は、各モデルともRC部材の荷重-変形曲線を参考にして0.024または0.048と定めた。降伏変位 x_y は、入力外乱の大きさと応答の塑性率との関係を考えて5cmとした。さらに、耐力劣化型モデルの最大耐力時の変位 x_u は、降伏時の2倍の値とし、耐力劣化後剛性比 $\alpha_u=-0.024$ を用いた。

(2) 結果および考察

a) 非パラメトリック面の特徴

まず、同じ入力波形による履歴復元力モデルの違いによる非パラメトリック面の違いは、Fig.2に示すようになる。ただし、この結果は、時間区間が40~50秒に対するものである。図よりOBLモデルは、変位および速度軸に対してほぼ対称ひずみを呈しているが、その他の履歴復元力を持つモデルは平面のひずみ中心の移動がある。なお、BLモデルは、非常に大きな平面のひずみが生じている。他のモデルに対する特徴は、比較的好く似た非パラメトリック面を形成している。

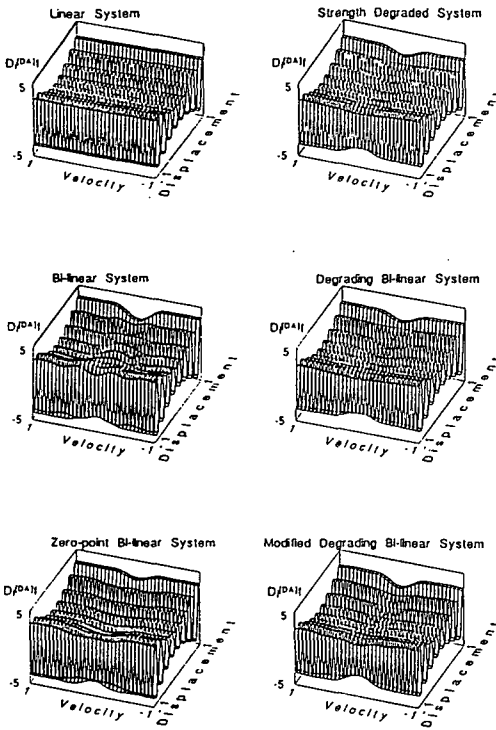


Fig.3 Characteristic planes $D_j^{[DA]}f$ due to restoring force models(A0010, $T_0=1.0\text{sec}$, $\beta_0=0.05$, $\zeta=2.0$)

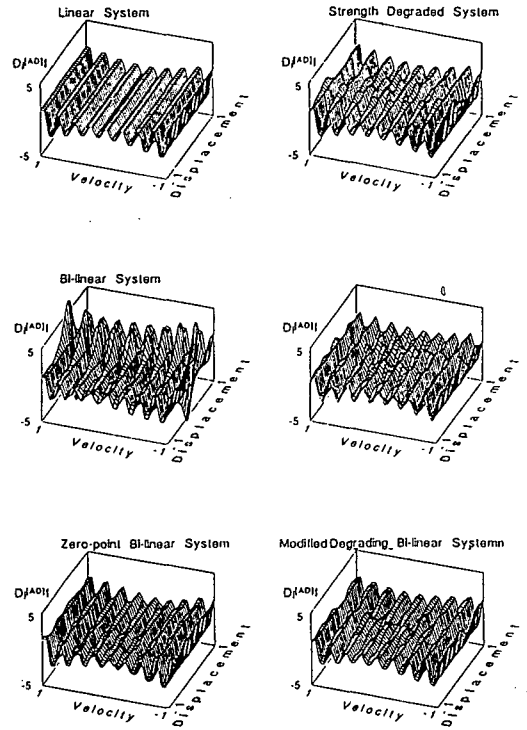


Fig.4 Characteristic planes $D_j^{[AD]}f$ due to restoring force models(A0010, $T_0=1.0\text{sec}$, $\beta_0=0.05$, $\zeta=2.0$)

b) 2次元ウェレット係数と復元力モデル

復元力モデルの特性は、Fig.2に視覚的に表示されているが、ここでは2次元ウェレット係数によってこの非パラメトリック面を顕在化して把握するため、Fig.3および4に示す。

まず、Fig.3は、 $D_j^{[DA]}f$ を図示したものであり、基準化された変位成分のひずみにバンドパスフィルターを掛け、基準化された速度成分のひずみにローパスフィルターを掛けた結果に相当している。このような非パラメトリック面へのウェレット処理は、ある速度レベルに対する変位方向の復元力の変動（ひずみ）の特性の抽出に相当する。図からわかるように速度一定で変位軸に平行な特性が、各復元力モデルによって特徴づけられている。すなわち、この場合、履歴復元力モデルの剛性劣化効果は、各モデルによって大きく異なる様子がわかる。たとえば、2種類の剛性をもつBLモデルが、地震波外乱に対して応答した場合をみている。このとき、系は、復元力の第1剛性と第2剛性の折れ曲がり部分の応答を非パラメトリック面のひずみが表す。この非パラメトリック

面のウェレット係数表示は、変位変化分布の偏りを持ち、速度変化のレベルからの凹凸が、明瞭に現れた図となっている。この図の結果より、変位のレベルが大きき部分では、フラットの形状を経て、凹の形状を呈している。この速度が0で変位が最大位置での値は、平均的な剛性劣化の応答結果が現れている。一方、速度が0の近傍で、かつ、変位のレベルの小さい部分では、凸の形状を呈している。BLモデルの復元力は、第1勾配での応答が第2勾配で挟まれる領域の応答となり、応答の軌跡から求まる $D_j^{[DA]}f$ は、第1勾配と第2勾配との変化する応答を抽出する結果となっている。

OBLとMDBモデルの場合、第2剛性から反転して除荷状態になるとその勾配は、第1勾配より小さくなるルールをもつ復元力特性をもっているため、速度および変位のレベルが小さい部分で小さくなり、凹の形状を呈している。DBおよびSDBモデルは、BLモデルと同様に変位・速度が小さい部分で凸の形状を呈して、剛性劣化の小さい特性が現れている。すなわち、 $D_j^{[DA]}f$ の変位・速度軸に対して原点近傍で凸にな

るのは、第2剛性から反転して除荷状態のときの勾配があまり劣化しない場合、第1剛性と第2剛性との変化する点の特性が原点近傍で現れている。このように、復元力モデルの除荷時の勾配の違いによる非パラメトリック面の特性が変化している。RC材のような材質の場合、除荷時の勾配は、そのモデル化に大きく左右し、重要な要因となることを意味している。

一方、Fig.4は、 $D_j^{AD}f$ を図示したものであり、Fig.3とは逆のフィルターを掛けたものであり、速度一定で変位軸に平行な特性が各復元力モデルによって特徴づけられている。この場合の特徴は、履歴復元力モデルの履歴減衰効果を抽出して、各モデルによって異なる様子がわかる。すなわち、BLモデルは、剛性を2種類持ち、応答レベルにより、各剛性の劣化は生じない。その特性により、初期剛性のレベルの結果と第2剛性の傾きの結果とによる減衰効果は図中に示すようになる。ここで、図中において、速度一定レベルに対する変位方向の勾配は、LSモデルと似た勾配のものと、非常に大きな勾配のものとの2種類が認められる。これらのそれぞれの変位一定レベルに対する速度方向の勾配が系の減衰効果を意味している。したがって、第2剛性に伴うものと思われる減衰効果が、非常に大きく現れている。

一方、他の履歴復元力モデルの場合、応答レベルにより、除荷時の第1剛性の勾配が変化し、速度変化分布の偏りが小さくなり、凹凸が小さくなっている。この結果は、モデルの履歴に伴う減衰効果があり大きくなく、その効果は、変位のレベルによって変わるが、粘性減衰の効果に比べて小さい。このように、復元力特性が、第2剛性から反転して除荷されるときその剛性が、応答レベルによって変化しない場合、履歴に伴う減衰効果が、大きく期待できる。一方、除荷時に剛性が応答レベルにより変化する場合には、履歴の減衰効果が小さいことを意味している。すなわち、構造系として持つ剛性が平均化した応答結果となっている。

c) 等価固有振動数および等価減衰定数

上述の特性は、非パラメトリック面を平面近似したときの等価固有円振動数 ω_{eq} および減衰定数 β_{eq} で示すとFig.5(a)のようになる。図は、横軸に時間100秒間の10秒刻みの時刻を、縦軸にそれぞれの初期微小変形時の値で無次元化した等価値を示している。この図からもBLモデルの非線形応答は、剛性劣化の効果より履歴減衰の効果が非常に大きな結果を示している。

さらにTchebycheff多項式による係数 C_{10} と C_{01} よ

り評価した等価固有円振動数 ω_{eq} 、等価減衰定数 β_{eq} の結果は、Fig.5(b)に示すような結果となっている。等価減衰の結果は、非パラメトリック面の水平面軸が継続時間中の最大値で基準化されているので、物理的な中立軸からの移動量に相当した効果が現れている。すなわち、平面が原点を通過しないなら、速度方向成分は、 $ay + b$ (y :速度, a, b :定数)となるので、 C_{01} を具体的に算定する $T_1(y) = y$ であるので、その切片 b に相当する量が定数となって現れてくる。したがって、中立軸からの移動量を除くとFig.5(a)と同じ傾向を示している。

また、時刻歴における確率過程的な取り扱いとの関係において ω_{eq} 、 β_{eq} なる構造特性の定数は、次式のような関係となっている²⁶⁾。ただし、適用条件として、非線形の構造系に定常なホワイトノイズの入力が作用した場合である。

$$\omega_{eq} = \frac{\sigma_z}{\sigma_x} \quad (24)$$

および

$$\beta_{eq} = \frac{1}{2\omega_{eq}^2} \sqrt{\left(\frac{\sigma_z}{\sigma_x}\right)^2 - \omega_{eq}^2} \quad (25)$$

ここに、

$$\begin{aligned} \sigma_x^2, \sigma_z^2 &: \text{変位, 速度応答の分散} \\ \sigma_z^2 &: \text{入力加速度の分散} \end{aligned}$$

なお、式(24),(25)により評価された ω_{eq} 、 β_{eq} は、ホワイトノイズのスペクトル密度を次式のような値をもつ入力波によって推定されたものとなっている。

$$S_0 = \frac{2\sigma_z^2 \beta_{eq}}{\pi \omega_{eq} (1 + 4\beta_{eq}^2)} \quad (26)$$

地震波は、有限で非定常な不規則波である。しかし、10秒間隔の区間を定常波とみなし、このように近似して推定された ω_{eq} 、 β_{eq} は、Fig.5(c)のような結果となっている。図の結果から剛性劣化の効果が40秒以降に大きく現れ、減衰効果も40秒以降大きくなるモデルと小さくなるモデルの2タイプが現れている。さらに、得られた結果は、ばらつきが大きくなっている。これは、データの取扱に問題があるからである。たとえば、線形系の減衰評価が、最初の10秒において大きな値を示しているのは、線形系の過渡応答の部分のデータを定常な波形データとして扱ったためと考えられる。さらに、40秒を超えた時間においても線形系の場合、減衰効果が低下した結果になっている。このような結果に対する原因は、定常確率過程として評価するにはデータ数が少なすぎるも

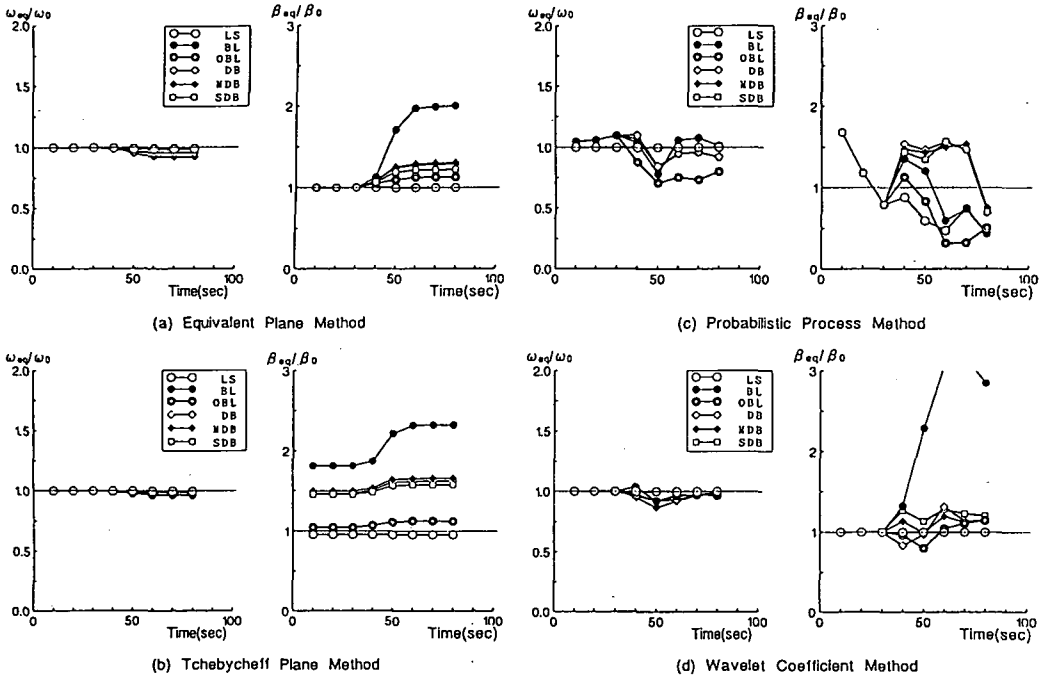


Fig.5 Features of equivalent circular frequencies and damping ratios by some methods
(A0010, $T_0=1.0$ sec, $\beta_0=0.05$, $\zeta=2.0$)

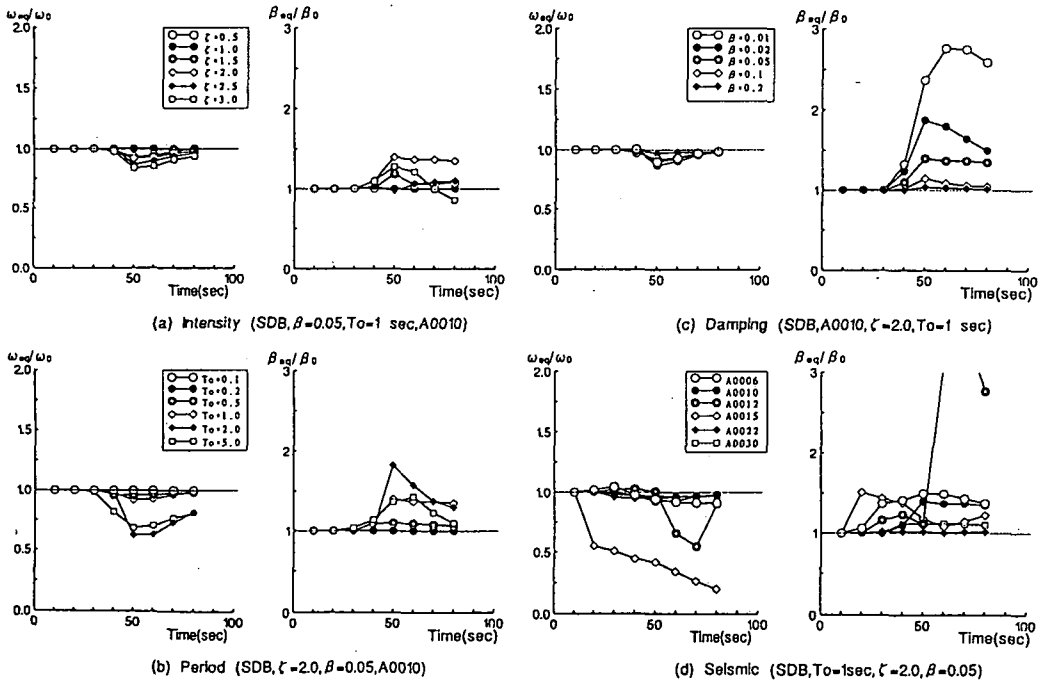


Fig.6 Features of equivalent circular frequencies and damping ratios by wavelet coefficient method (SDB)

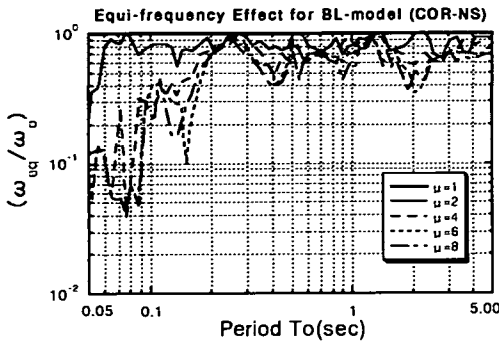


Fig.7 Equivalent circular frequencies to the natural period

のと考えられる。しかし、固有振動数に対する結果は、50秒付近において剛性の劣化によると思われる低下が認められる。

次に、式(5),(6)に示した2次元ウエブレット変換処理による ω_{eq} , β_{eq} の特性は、Fig.5(d)に示すような結果になっている。等価固有振動数は、どのモデルも50秒前後で下がっているのがわかる。一方、等価減衰定数は、BLモデルのみ50秒付近から非常に大きくなっているが、他のモデルは、BLモデルに比べて小さい変化をしている。

評価方法を較べると、等価減衰定数の結果は、Fig.5の(a),(b)の特徴とよく似ている。一方、等価固有振動数の結果は、Fig.5の(c)の特徴と似ている。このウエブレット係数の方法は、時間的な特性面の特徴を速度方向と変位方向の特性面のひずみを顕在化させ、明瞭にしている。このように履歴減衰効果と剛性劣化効果の時間的な特徴が、この方法で把握されている。

次に、非パラメトリック面のウエブレット変換による評価は、入力強度 ξ 、固有周期 T_0 、減衰定数 β 、地震波入力Aの違いによってFig.6ようになる。ただし、履歴復元力モデルは、SDBモデルである。

まず、Fig.6(a)は、入力波の原波形を ξ 倍させた結果を示している。この場合、50秒付近において、入力強度の増加による固有振動数の減少と履歴減衰の増加が認められる。入力強度 $\xi=3$ (最大加速度735galに相当)の場合には、等価減衰定数が、60秒を過ぎると減少し、履歴による減衰効果が期待できない応答となっている。

Fig.6(b)は、初期剛性の違いを初期剛性で定義された固有周期の違いとして示している。図より、 $T_0=2.0, 5.0$ 秒と比較的固有周期の長いものに対して、剛性劣化と履歴減衰が大きく現れている。50秒を経過した時刻において等価固有振動数が約70%低下し、剛性劣化が約84%と最も大きくなっている。一方、等

価減衰定数は、5%の1.5から2倍となっている。このように、初期剛性の違いによる履歴復元力系の動特性は、大きく変化している。

Fig.6(c)は、粘性減衰の違いによる結果を示している。得られた結果より、粘性減衰が大きいほど履歴復元力の剛性劣化と履歴減衰が小さくなっている。ここで、等価減衰定数は、粘性減衰が小さいほど非常に大きいようにみえる。これは、粘性減衰が小さい場合、同じ入力強度であっても応答が大きくなり、降伏レベルを超えて生じる履歴減衰が大きくなるためと考えられる。

Fig.6(d)は、6種類の地震波の違いによる結果を示している。この数値計算例では、A0030の地震波による影響が非常に大きく、剛性劣化および履歴減衰が大きく現れている。このように地震の種類によりその剛性劣化、履歴減衰の効果は大きく異なる。このことは、地震波に対する特性と、履歴を描く復元力の特性との相関が非常に複雑であることを示している。

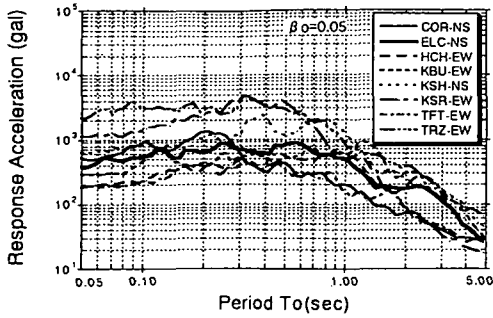
ただし、ここに示した計算例は、履歴復元力特性の剛性比 α が0.024とかなり小さい場合であるが、Fig.5とFig.6との結果より、用いた履歴復元力モデルは、剛性劣化特性より履歴減衰特性が卓越した応答となっているようにみえる。

次に、剛性劣化の効果を初期剛性との関係で検討してみる。Fig.7は、BLモデルにおいて横軸に固有周期 T_0 をとり、縦軸に等価固有振動数 ω_{eq}/ω_0 の結果を示している。なお、BLモデルの最大変位 x_{u0} は、完全弾塑性ではないが、図中の塑性率 μ とLSモデルの最大値変位 x_{u0} を用いて、 $x_{u0}/\sqrt{2\mu-1}$ と設定している。図の結果より、等価固有振動数 ω_{eq}/ω_0 は、 T_0 が0.05~0.3秒の間、約1/10~8/10に増加の傾向を現している。しかし、塑性率の違いによる固有周期に対する結果が大きく異なっている。

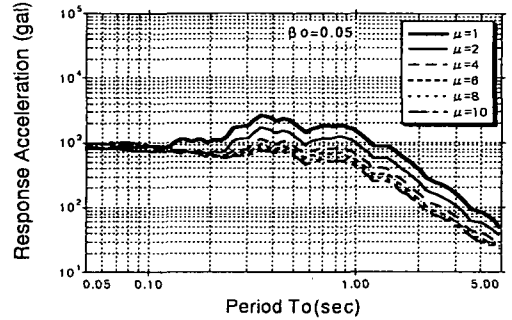
d) 等応答スペクトル

Fig.8(a)は、対象とした地震の線形系の応答スペクトルである。このうちKSH-EWの地震に対し、BLモデルの降伏変位を塑性率により $\mu=1\sim 10$ まで変化した場合、非線形系の応答スペクトルの変動の状態は、Fig.8(b)に示したようになっている。図の結果より、固有周期の長い領域の応答スペクトルの低下が大きい傾向を示している。また、固有周期が0.15~1.5秒で上に凸の応答スペクトルが塑性率が大きくなるほど平坦になっている。これは、この区間における履歴減衰効果が大きく現れていると思われる。

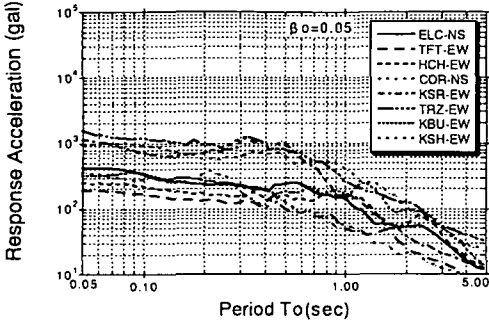
Fig.8(c)は、BLモデルで塑性率 $\mu=10$ の場合の応答スペクトルを示し、固有周期約0.3秒付近で勾配が変化している。固有周期0.3秒より長い区間での応答



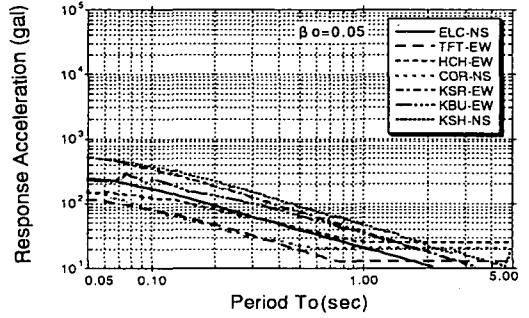
(a) Response Spectra



(b) Nonlinear Resp. Abs. Acc. for BL(KSH-EW)



(c) Nonlinear Resp. Abs. Acc. for BL-model



(d) Nonlinear Resp. Abs. Acc. for SDB-model

Fig.8 Features of response spectra due to restoring force models

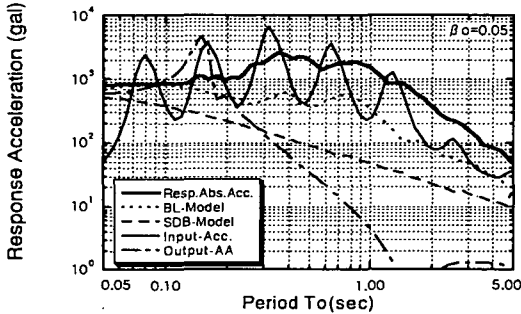


Fig.9 Features of equi-response spectra(KSH-EW)

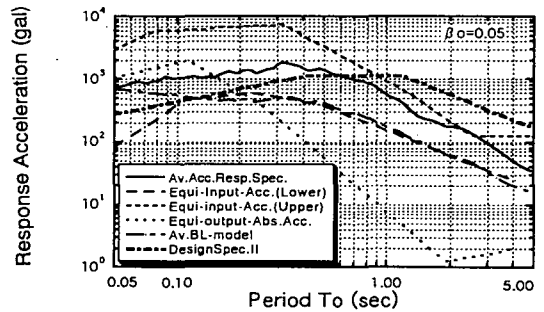


Fig.10 Features of average equi-response spectra

スペクトルは、短い区間より負の勾配が大となっている。

一方、Fig.8(d)に示すSDBモデルに対する結果は、対象とする固有周期の区間で応答スペクトルの大幅な低下が認められ、同じような勾配を呈している。

式(18)あるいは(20)で定義された等応答スペクトルをKSH-EWの地震記録に対して算定した結果が、Fig.9である。図中太い実線が、線形系の応答スペクトルであり、細い実線が、式(20)の等応答スペクトルであり、一点鎖線が、式(18)の等応答スペクトルである。なお、図には、塑性率 $\mu=10$ でのBLモデルおよびSDBモデルの応答スペクトルも合わせて表示し

ている。パワーを一定の条件にして特性面の極大化あるいは極小化により誘導した等応答スペクトルは、式(13)あるいは(22)の関数の特性に依存している。すなわち、これらの式より、構造系の応答倍率とウェブレット関数の特性が等応答スペクトルに関係している。ここに、ウェブレット変換によるデータ処理では、分解係数 j により中心周波数と周波数帯域が定義される。もう少し具体的に記述すれば、中心固有周期 T_j が時間刻み0.02秒の 2^j ($j=1,2,\dots$)ごとになり、この中心周期においてバンドパスフィルターのかかった応答倍率が、データに作用することになり、等応答スペクトルが求められる。したがって、入力のパワーを一

定に設定した場合、等応答スペクトルは、中心固有周期ごとに変動している。一方、応答一定での結果も、分解係数に関係する固有周期に対応して変動しているが、入力一定の場合とは異なっている。

これらのスペクトルと履歴復元力をもつ系のスペクトルとの比較をすれば、BLモデルの結果は、入力一定の場合の下限値にほぼ等しくなっている。ところが、SDBモデルの場合、耐力劣化後の剛性比が負となっているため、その応答スペクトルは長周期領域においてかなり低い値となっている。しかし、SDBモデルの結果は、入力一定の場合と応答一定の場合との間の値となっている。

いま、Fig.8において用いた対象地震は、数が少なく、地震の規模、観測サイトの地盤条件等が同程度・同質でない。実際の設計等の評価には、数多くの地震データによる検討が必要となるが、これの地震の種類やサイトの条件を考慮せずに平均化して等応答スペクトルとの関係をみとめる。その結果は、Fig.10のようになる。なお、図中には、太い一点鎖線で、兵庫県南部地震の道路橋復旧に関する資料²⁷⁾に表された設計震度(地盤種別Ⅱ)を本数値計算で用いた地震の平均値に換算して表示している。Fig.10の結果は、当然ながら、Fig.9の個別の地震の場合と同様の対応した結果となっている。この結果をみると、固有周期が0.128秒より長い領域で、BLモデルの場合、入力一定条件での等応答の下限値評価が塑性率10での結果とほぼ対応している。一方、復旧に関する設計用のスペクトルは、0.9秒を超える固有周期の範囲で約3倍近い値となっている。数値計算に用いた地震の多くは、HCH-EWを除いてその震央距離が50km未満の近地震であるが、Fig.9の兵庫県南部地震の特性が、平均化することによってかなり小さくなっていると考えられる。すなわち、復旧仕様に表されたスペクトル(設計震度)は、約1秒を超える周期において従来の地震特性と大きく異なっていることを示している。

なお、本研究で用いている他の履歴モデルの特性は、SDBモデルを除いてBLモデルとほぼ似た結果となっていた。

入力一定条件での等応答スペクトルの上限値評価は、固有周期が0.05～0.5秒の短い領域で線形系の応答スペクトルの約2～6倍の値を示している。すなわち、地震の入力パワーが、同じであっても固有周期の短い領域でその地震応答スペクトルは2倍を超える可能性を示している。このように0.05～0.5秒の短周期において上限値が大きく現れているのは、解析した地震波の式(23)で示されるパワーが対応する分解係数 j で大きいためと考えられる。次に、等応答スペクトルの下限値は、初期剛性による固有周期が0.5秒よ

り大きい周期でBLモデルの塑性率10に対する応答スペクトルの値に近い評価となっている。

一方、応答一定条件での等応答スペクトルは、上下限値に分離して評価していないが、平均値の評価によれば固有周期が0.128秒で上に凸のピークを持ち、1.92秒で下に凹のピークの特性的をもっている。そして、固有周期が約0.15秒までほぼ応答スペクトルに近い値を示し、約0.15秒より長い領域で応答スペクトルより低い値を呈している。いま、SDBモデルのスペクトルは、負の勾配を有する非線形応答スペクトルとなる。このとき、この等応答スペクトルの特性は、Fig.9からもわかるように固有周期0.3秒を挟む形で等応答スペクトルが過大から過小の評価に変化し、その差がかなり大きくなっている。しかし、SDBモデルの応答スペクトルが、この等応答スペクトルで大体の評価範囲を押さえているように見える。

5. 結言

本研究は、まず、種々の履歴復元力系が非線形動的応答を呈した場合、変位、速度および慣性力の応答量からなる非パラメトリック面は、その構造系の動特性を示すので、これを調べた。非パラメトリック面は、2次元のウエブレット変換の方法によりに把握した。すなわち、特性把握には、非線形応答による非パラメトリック面のひずみを顕在化させた2次元ウエブレット係数で行った。さらに、構造系の特性値は、等価固有円振動数および等価減衰定数によって評価した。次に、構造物の耐震設計においてよく用いられる地震応答スペクトルを非線形系に対して評価する場合、ウエブレット分解による等応答スペクトルが比較的容易に定義でき、このスペクトルの有用性を示した。

得られた主な結果は、次のようになる。

- (1) 2次元ウエブレット係数のうち、 $D_{i,0}^{(a)} f$ は、その系の履歴減衰効果の特徴を示し、 $D_{i,0}^{(a)} f$ は、剛性劣化効果の特徴を示しており、これを視覚的に把握できる。
- (2) 非パラメトリック面の平面特性から求められる系の等価固有振動数および等価減衰定数は、剛性劣化および履歴減衰の特性を示し、Tchebyscheff多項式近似などの特性とよい対応を示す。
- (3) 第2剛性が小さい復元力をもつ場合、用いた履歴復元力モデルは、剛性劣化効果より履歴減衰効果が卓越した応答となる。
- (4) 入力一定の等応答スペクトルでの下限値は、塑性率10程度のBL型履歴復元力系に対する非線形応答スペクトルに対応している。

(5) 入力一定の等応答スペクトルの上限値より、地震の入力パワーが同じであっても、応答スペクトルが、2倍を超える可能性を示している。ただし、用いた地震波の数が少ないため、さらに多くの地震波による検討が必要である。

謝辞: 最後に、本研究において履歴復元力応答の数値計算においては大阪府立工業高等専門学校武市康裕助教授、地震波データに関しては京都大学防災研究所亀田弘行教授、ウェーブレット解析に関しては大阪府立工業高等専門学校片山登揚助教授にお世話になった。ここに、謝辞を申し上げます。

参考文献

- 1) Masri,S.F. and Caughey,T.K.: A Nonparametric Identification Technique for Nonlinear Dynamic Problems,ASME,Vol.46,pp.433-447,1979.
- 2) Hart,G.C. and Yao,T.P.:System Identification in Structural Dynamics, ASCE, Vol.103, No.EM5, pp.1089-1091,1977.
- 3) 土岐憲三, 佐藤忠信: 時系列理論による構造物特性の推定, 京都大学防災研究所年報, 22号B, pp.1009-1016,1979.
- 4) Sinozuka,M., Yun,C-B and Imai,H.:Identification of Linear Structural Dynamic Systems, ASCE,Vol.108, No.EM6, pp.1371-1396,1983.
- 5) Liu,C-H and Chung,S-T:A Three-stage Identification Approach for Hysteric Systems, EESD, Vol.22,pp.129-150,1993.
- 6) 星谷勝, 斉藤悦郎: 拡張カルマンフィルターを用いた各種振系への応用, 土木学会論文報告集, 第339号, 1983.
- 7) Hoshiya,M. and Saito,E.:Structural Identification by Extended Kalman Filter, ASCE, Vol.110, No. EM12, 1984.
- 8) 前出1).
- 9) 宮脇幸治郎, 武市康裕: 履歴復元力応答の非パラメトリック面のウェーブレット解析に関する研究, 大阪府立工業高等専門学校研究紀要, Vol.30,pp.65-76,1996.
- 10) Masri,S.F.,Sassi,H. and Caughey,T.K.: Nonparametric Identification of Nearly Arbitrary Nonlinear Systems, ASCE,Vol.49,pp.619-628,1982.
- 11) Combes,J.M.Ed.:Wavelets,Springer,1989.
- 12) Mayer,Y.:ondelettes et operateurs I,II ,Hermann, 1990.
- 13) ベネデット, J.J., M.W. フレージャー編/山田昌哉, 山田道夫鑑訳: ウェーブレット理論と応用, シュプリンガーフェアラーク東京, 1995.
- 14) 伊藤忠宏, 杵築兼史, 北川孟, 堀畑聡, 石光俊介: 振動・音響信号の時間一周波数2次元解析(代表的解析法の相互比較), 日本応用数理学会論文誌, Vol.4, No.1,pp.41-52,1994.
- 15) 鄭且根, 相澤清晴, 斉藤隆弘, 鳥羽光俊: ウェーブレット変換のゼロ交差表現に基づく非線形雑音除去, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J77-A,No.11,pp.1546-1554,1994.
- 16) 松山澄子, 花田孝郎, 今井仁司: Wavelet 変換による海岸線データの間引き, 日本応用数理学会論文誌, Vol.6,No.1,pp.83-99,1996.
- 17) 佐々木文夫, 前田達哉: データ解析におけるウェーブレット変換の基礎的性状の検討, 日本建築学会構造系論文報告集, 第53号, pp.197-206,1993.
- 18) 佐々木文夫, 山田道夫: 双直交ウェーブレットを用いた方程式の数値解法, 日本シミュレーション学会第15回計算電気・電子工学シンポジウム, pp.137-142, 1995.
- 19) 曾根彰, 山本鎮男, 増田新, 中岡明, 芦野隆一: 出力のウェーブレット変換と印加入力および物理系間の正則性 (Daubechies の正規直交ウェーブレットについて), 日本機械学会論文集 (C編), 61巻, 589号, pp.108-114,1995.
- 20) 曾根彰, 山本鎮男, 増田新, 中岡明, 芦野隆一: 強震記録のウェーブレット解析による履歴復元力特性を有する建築物の累積損傷の推定, 日本建築学会構造系論文誌, 第76号, pp.67-74,1995.
- 21) Mallat,S.G.:A Theory for Multiresolution Signal Decomposition:The Wavelet Representation,IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.11,No.7,pp.674-693,1989.
- 22) 前出1).
- 23) 宮脇幸治郎, 土岐憲三: ウェーブレット解析の地震波特性に関する一考察, 土木学会論文集No.525/1 ,33, pp.261-274,1995.
- 24) 前出9).
- 25) Philippacopoulos,A.J. and Wang,P.C.: Seismic Inputs For Nonlinear Structures, ASCE, Vol.110, No.EM5, pp.828-836,1984.
- 26) Crandall,S.H. and Mark,W.D.:Radom Vibration in Mechanical Systems,Academic Press,pp.84-85, 1963.
- 27) (社団) 日本道路協会: 「兵庫県南部地震による被災した道路橋の復旧に係わる仕様」の準用に関する参考資料 (案), p. II -1, 1995.

(1996.7.8 受付)

BASIC STUDY ON THE EVALUATION TO RESPONSES WITH HYSTERETIC RESTORING FORCES BY WAVELET TRANSFORMATIONS

Kojiro MIYAWAKI and Kenzo TOKI

This paper deals with the characteristic of non-parametric planes caused by the dynamic responses with the hysteretic restoring forces (HRF). In the first place, this method evaluates the plane represented by the 2D wavelet coefficient. In addition, the plane is investigated by the equivalent values (ω_{eq} , β_{eq}) on the dynamic properties of the HRF system. This 2D wavelet transformations is very effective to understand the characteristic of the non-parametric plane. In the second place, the equi-response spectrum is the absolute accelerations with a linear system under the uniformity power of response or input. The equi-response spectrum is defined by the wavelet function and is considered the property by the comparison with the response spectrum of hysteretic systems.