

EQWAVE

A computer program
for dealing with
earthquake waves

2021
September, 1997 (Original version)

吉田 望

目 次

1	はじめに.....	3
2	理論.....	4
2.1	フーリエ (Fourier) 級数展開	5
2.2	平滑化.....	5
2.3	増幅スペクトル.....	7
2.4	応答スペクトル.....	7
2.5	三重応答スペクトル (tripartite response spectrum)	9
2.6	基線補正.....	10
2.6.1	大崎の方法.....	10
2.6.2	平均値で制御.....	10
2.6.3	誤差最小法.....	10
2.7	計測震度.....	13
2.8	地震の継続時間.....	15
2.9	地震動指標.....	15
2.10	微分と積分.....	18
2.10.1	Fourier 級数展開による方法	18
2.10.2	台形積分.....	18
2.10.3	Newmark の β 法.....	18
2.11	プログラムの特色.....	20
3	データ入力.....	22
3.1	データ入力の基本的な考え方	22
3.2	タイトル：TITLE.....	24
3.3	地震波の入力：EQWAVE.....	24
3.3.1	入力-1.....	24
3.3.2	入力-2.....	24
3.4	基線補正：BASE.....	25
3.5	フィルター：FILTER	25
3.6	線形結合：LINEAR	25
3.7	最大値の出力：MAXVAL	26
3.8	地震動指標の算出：EQINDEX	26
3.9	計測震度の出力：SHINDO, SHINDO-A.....	27
3.10	J 値の出力：JVAL.....	27
3.11	時刻歴の積分：INTEG.....	27
3.12	時刻歴の微分：DIFFER	28
3.13	時刻歴の出力：TIME	28
3.13.1	出力に関する指示.....	28
3.13.2	時刻歴データの番号.....	28
3.14	増幅スペクトルの出力：AMPRATIO	29
3.15	応答スペクトルの計算：RESPSPEC	29
3.15.1	出力に関する指示.....	29
3.15.2	減衰の指定.....	30
3.16	三重応答スペクトルの計算：TRIPARTITE	30
3.16.1	出力に関する指示.....	30
3.16.2	減衰の指定.....	31

3.16.3	プロッター関係の入力	31
3.16.4	応答スペクトルの入力	32
3.17	フーリエスペクトルの出力：FOURIER	32
4	出力	34
4.1	各種出力	34
5	使用例	35
6	プログラムの構成	36
6.1	ツリー構造	36
6.2	主要変数	37
7	バージョン情報	38

1 はじめに

このプログラムは、地震波の処理をするために作成した。

それぞれの機能は、私も普段使っているので、大丈夫と思います。ただし、複雑な処理、例えば加速度を積分して、微分して、積分してなど（本来はできるように設計したつもりですが）色々な処理を次々行くと、出力がおかしいときがあります。一つの処理を行って出力して、次の別の処理をする様にしていなければ大丈夫と思います。

また、理論についても、十分に書けていないところがあります。

2 理論

2.1 フーリエ (Fourier) 級数展開

時間間隔 Δt で、 N 個のデータが与えられたとき、これを周期 $T = N\Delta t$ の周期関数とすれば、有限フーリエ級数により元の関数を次のような有限フーリエ近似 $\tilde{u}(t)$ で表すことが出来る。

$$\tilde{u}(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{m=1}^{N/2-1} (A_m \cos \omega_m t + B_m \sin \omega_m t) + \frac{A_{N/2}}{2} \cos(\frac{N}{2} \omega_{N/2} t) \quad (2.1.1)$$

ここで、各周波数成分に対応する円振動数は次式で定義できる。

$$\omega_m = \frac{2\pi}{N\Delta t} m \quad (2.1.2)$$

有限フーリエ級数の各成分は互いに直交している。この性質を利用すれば、各係数は次のように求めることができる。

$$A_m = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^{N-1} u_k \cos(\omega_m k \Delta t) \quad k=0, 1, 2, \dots, N/2 \quad (2.1.3)$$

$$B_m = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^{N-1} u_k \sin(\omega_m k \Delta t) \quad k=1, 2, \dots, N/2-1 \quad (2.1.4)$$

一方、複素フーリエ級数では式(2.1.1)に対応する式を次のように表す。

$$\tilde{u}^*(t) = \frac{1}{2} \sum_{m=0}^{N-1} (A_m - iB_m) e^{i\omega t} = \frac{1}{2} \sum_{m=0}^{N-1} C_m e^{i\omega t} \quad (2.1.5)$$

ここで、 C_m が複素振幅である。有限フーリエ級数の係数との関係は次のようになる。

$$C_m = \frac{A_m - iB_m}{2} \quad (2.1.6)$$

複素フーリエ変換では、 N 個の複素数の和として関数が定義されているので合計 $2N$ 値の自由度があるが、元の関数が実数である場合には

$$\begin{aligned} A_m - iB_m &= A_{N-m} + iB_{N-m} \quad m=1, 2, \dots, N/2 \\ B_0 &= B_{N/2} = 0 \end{aligned} \quad (2.1.7)$$

という関係があるので、最初の $N/2+1$ 項 ($m=0, 1, 2, \dots, N/2$) を計算すれば残りの部分は計算する必要がない。

EQWAVEでは、複素フーリエ級数を用いて計算を行っている。ただし、フーリエスペクトルとしてはフーリエ級数展開の係数に $T/2$ (T は高速フーリエ変換をする際の周期) を掛けたものを出力することが多い¹⁾。これは、フーリエ変換との整合性をとった処置である。しかし、EQWAVEでは、 $T/2$ を乗えず、振幅そのものを出力している。なお、2.3節で示す増幅関数などは互いの係数の比を用いているだけなので、この処置は結果には影響を与えない。

2.2 平滑化

Fourier スペクトルはぎざぎざしているのが一般的である。図を見やすくするためにウィンドウ処理をしてスムーズな図にする。EQWAVEではいくつかの方法を用意している。

(1)三角ウィンドウ (Bartlett ウィンドウ)

バンド幅を k とすると、平滑化バンド幅 f_w (Hz) は次式となる。

$$f_w = \frac{2k-1}{N \cdot \Delta t}$$

ここで、 N は解析データ数 (2のべき乗)、 Δt は時間増分である。ここで、 f_w は1Hz程度にとるのが一般的である。対応する k は次式となる。

$$k = (N \cdot \Delta t + 1) / 2$$

たとえば, $N=3000$, $\Delta t=0.01$ とすれば, $k=15.5 \rightarrow 16$ となる。

(2)Parzen ウィンドウ

一般に f_w として $0.2 \sim 0.3 \text{Hz}$ が用いられる。

(3)Hanning ウィンドウ

基礎式は以下である。

$$\bar{u}_i = (u_{i-1} + 2u_i + u_{i+1}) / 4 \quad (2.2.1)$$

ただし, これを複数回繰り返す。10回以上であれば, Parzen ウィンドウとほとんど同じになる。

繰り返し数 n とバンド幅 f_w の間には次の関係式がある。

$$f_w = \frac{8}{3} \sqrt{n} \Delta f \quad (2.2.2)$$

ここで, Δf はスペクトルの振動数間隔で $\Delta f = 1/(N\Delta t)$ である。これより, 所定のバンド幅を達成する繰り返し数は次のようになる。

$$n = \left(f_w \frac{3}{8\Delta f} \right)^2 = \left(f_w \frac{3}{8} N\Delta t \right)^2 \quad (2.2.3)$$

$N=3000$, $\Delta t=0.01$ とすれば, $\Delta f=0.21 \text{Hz}$ であり, $f_w=0.2 \text{Hz}$ となる繰り返し数は5となる。

(4)Hamming ウィンドウ

Hanning ウィンドウとほとんど同じであるが, 基礎式が少しだけ異なる。

$$\bar{u}_i = 0.23u_{i-1} + 0.54u_i + 0.23u_{i+1} \quad (2.2.4)$$

2.3 増幅スペクトル

選ばれた二つの層の振幅の比は周波数応答関数と呼ばれ、その絶対値は増幅率と呼ばれる。EQWAVE では絶対変位に対する増幅率を周波数の関数として出力する。これは、絶対加速度に対する増幅率と同じである。増幅率は下方の層（基準層：reference layer）と上方の層（対象層：objective layer）の間における地震動の増幅の程度を表すもので、周波数の関数である。

プログラムではさらにユーザーの指示により増幅スペクトルの極大値となる周波数と周期を求めている。なお、等価線形解析法のような周波数領域の解法を用いた地震応答解析を行った場合の増幅関数は滑らかであるのでこの処置により卓越周期や振動数を精度よく求めることができる。

DYNEQ ではより正確を期するために、単にスペクトル値の極大値に対する周期を求めるだけでなく、周辺の3つのスペクトル値を用い、増幅率－振動数関係を2次式で表現し、その極大値を与える振動数とその逆数である周期を出力している。

しかし、逐次積分に基づく数値積分を行った結果、地震観測で得られた記録などでは増幅関数は多くのピークを持つ乱れた波形となっているので、この方法で正しく卓越周期などを求められるとは限らない。平滑化などの処置をしていれば求められることもあるが、いずれにしろ増幅関数の作図をするなどして確認しておくことが重要である。

2.4 応答スペクトル

応答スペクトルは波動が振動系に入射したときの最大応答を振動系の振動数の関数として表したものである。

振動データが離散点でしか与えられていないことから、系の応答の計算には数値積分を用いる必要がある。ここでは、Nigam の方法¹³⁾による数値積分を行っている。この方法は、入力として与えられた離散点における加速度値を用い、加速度時刻歴を部分線形関数として表すほかは一質点系の運動方程式を厳密に解くものであり、常に安定した、かつ最も精度の高い解を得ることが出来る。

一質点系の運動方程式を次のように表す。

$$\ddot{u} + 2h\omega_0 \dot{u} + \omega_0^2 u = -\ddot{y} \quad (2.4.1)$$

式の展開の簡易さのため、時間軸の始点を増分計算の最初にとり、時刻 $t=0$ から $t=\Delta t$ までの増分を計算する。仮定により地震動は次式のように表せる。

$$\ddot{y} = \frac{\ddot{y}_{\Delta t} - \ddot{y}_0}{\Delta t} t + \ddot{y}_0 \quad (2.4.2)$$

また、時刻 $t=0$ における応答値は既知である。これらを考慮すれば、式(2.4.1)の解は次式のように表される。

$$\begin{Bmatrix} u_{\Delta t} \\ \dot{u}_{\Delta t} \end{Bmatrix} = [K_{ij}] \begin{Bmatrix} u_0 \\ \dot{u}_0 \\ \ddot{y}_0 \\ \ddot{y}_{\Delta t} \end{Bmatrix} \quad (2.4.3)$$

ここで、

$$\begin{aligned} K_{11} &= e^{-h\omega_0 \Delta t} \left(\cos \omega_0 \Delta t + \frac{h\omega_0}{\omega_0} \sin \omega_0 \Delta t \right) \\ K_{12} &= e^{-h\omega_0 \Delta t} \cdot \frac{1}{\omega_0} \sin \omega_0 \Delta t \\ K_{13} &= e^{-h\omega_0 \Delta t} \left[\left(\frac{1}{\omega^2} + \frac{2h}{\omega^3 \Delta t} \right) \cos \omega_0 \Delta t + \left(\frac{h}{\omega \omega_0} - \frac{1-h^2}{\omega^2 \omega_0 \Delta t} \right) \sin \omega_0 \Delta t \right] - \frac{2h}{\omega^3 \Delta t} \end{aligned}$$

$$K_{14} = e^{-h\omega\Delta t} \left[-\frac{2h}{\omega^3\Delta t} \cos \omega_o\Delta t + \frac{1-h^2}{\omega^2\omega_o\Delta t} \sin \omega_o\Delta t \right] - \frac{1}{\omega^2} + \frac{2h}{\omega^3\Delta t}$$

$$K_{21} = -e^{-h\omega\Delta t} \cdot \frac{\omega^2}{\omega_o} \sin \omega_o\Delta t$$

$$K_{22} = e^{-h\omega\Delta t} \left(\cos \omega_o\Delta t - \frac{h\omega}{\omega_o} \sin \omega_o\Delta t \right)$$

$$K_{23} = e^{-h\omega\Delta t} \left[\frac{-1}{\omega^2\Delta t} \cos \omega_o\Delta t - \left(\frac{h}{\omega\omega_o\Delta t} + \frac{1}{\omega_o} \right) \sin \omega_o\Delta t \right] + \frac{1}{\omega^2\Delta t}$$

$$K_{24} = e^{-h\omega\Delta t} \left[\frac{1}{\omega^2\Delta t} \cos \omega_o\Delta t + \frac{h}{\omega\omega_o\Delta t} \sin \omega_o\Delta t \right] - \frac{1}{\omega^2\Delta t}$$

式2.6.3により相対変位と相対速度が求められるので、式(2.4.1)より絶対加速度は次のように求められる。

$$(\ddot{u} + \ddot{y})_{\Delta t} = -(2h\omega\dot{u} + \omega^2 u) \quad (2.4.4)$$

2.5 三重応答スペクトル (tripartite response spectrum)

一自由度系の最大絶対応答加速度，最大相対応答加速度，最大相対変位に付いては，近似的に次の関係が成立する。

$$S_V(T, h) \approx \omega S_D(T, h) \quad (2.5.1)$$

$$S_A(T, h) \approx \omega S_V(T, h) \approx \omega^2 S_D(T, h)$$

SD：変位応答スペクトル，SV：疑似速度応答スペクトル，SA：疑似加速度応答スペクトル
これを三重応答スペクトルに書くには次のようにする。

S_V ， T を両対数グラフに表したとする。すなわち，速度応答スペクトルは

$$\log S_V = f(\log T) \quad (2.5.2)$$

と表されている。ここで， S_D =一定に対応する関係を書くことを考える。

$$S_D = S_V / \omega = S_V \cdot T / 2\pi \quad (2.5.3)$$

したがって，両辺の対数を取ると次のようになる。

$$\log S_D = \log(S_V \cdot T / 2\pi) = \log S_V + \log T - \log(2\pi) \quad (2.5.4)$$

これを書き直して

$$\log S_V = -\log T + \log(2\pi) + \log S_D$$

この関係は， $\log S_V$ - $\log T$ 平面上で，傾きが-1の直線である。同様に， S_A 一定の線は次のように書ける。

$$S_A = \omega S_V = S_V \cdot 2\pi / T \quad (2.5.5)$$

$$\log S_V = \log T - \log(2\pi) + \log S_A \quad (2.5.6)$$

となり，傾きが1の直線となる。

2.6 基線補正

2.6.1 大崎の方法

大崎は、次の方法を提案している。

観測値の加速度時刻歴を $\ddot{y}(t)$ とし、これを (Newmark の β 法を用いて) 積分して速度 $\dot{y}(t)$ と変位 $y(t)$ を求める。ここで、元の加速度波形に直線的なずれがあると考ええると、変位、速度、加速度の修正値は次のようになる。

$$\begin{aligned}\hat{y}(t) &= y(t) - \left(\frac{1}{2} a_o t^2 + \frac{1}{6} a_1 t^3 \right) \\ \hat{\dot{y}}(t) &= \dot{y}(t) - \left(a_o t + \frac{1}{2} a_1 t^2 \right) \\ \hat{\ddot{y}}(t) &= \ddot{y}(t) - (a_o + a_1 t)\end{aligned}\tag{2.6.1}$$

ここで、未知数は二つである。これを次のようにして決める。

一つ目は、変位に対する誤差が最小になる。誤差 ε は、次のようにして表される。

$$\varepsilon = \int_0^T \left[y(t) - \left(\frac{1}{2} a_o t^2 + \frac{1}{6} a_1 t^3 \right) \right]^2 dt\tag{2.6.2}$$

もう一つは、地震終了後に速度が0、すなわち、

$$\hat{\dot{y}}(T) = 0\tag{2.6.3}$$

となる条件である。この条件は次のようになる。

$$a_o = \frac{\dot{y}(T)}{T} - \frac{a_1 T}{2}\tag{2.6.4}$$

これを先の式に代入し、 a_1 に関して変分を取り、これを解くことにより、 a_1 は次のように表される。

$$a_1 = \frac{28}{13} \frac{1}{T^2} \left[2\dot{y}(T) - \frac{15}{T^5} \int_0^T y(t) (3Tt^2 - 2t^3) dt \right]\tag{2.6.5}$$

しかし、この補正を行うと、最大加速度が変化する。そこで、最大加速度が変わらないように、全体に補正前後の最大加速度の比をかける。

2.6.2 平均値で制御

波形全体の平均値が0となるように全体の値を制御。すなわち、

$$y_{new} = y - \sum y_i / N\tag{2.6.6}$$

ここで、 N はデータ数である。

2.6.3 誤差最小法

海一自然と文化」東海大学紀要海洋学部第5巻第2号 巻12頁 (2007) Journal of The School of Marine Science and Technology, Tokai University, Vol.5, No.2, pp.1-12, 2007

加速度から変位を求める積分手法と実地震記録への適用 太田良巳・齋・アイダン・オメル 齋 An integration technique for ground displacement from acceleration records and its application to actual earthquake records Yoshimi OHTA and Omer AYDAN

わかりやすいように加速度を $a(t)$ と表現し、これを積分すると、次の様になる。

$$\begin{aligned} v(t) &= \int a(t)dt + C_1 \\ u(t) &= \int v(t)dt + C_1 t + C_2 \end{aligned} \quad (2.6.7)$$

ここで、増分区間では加速度の変化は線形とすると

$$\begin{aligned} v_{n+1} &= v_n + \frac{dt}{2}(a_n + a_{n+1}) \\ u_{n+1} &= u_n + v_n dt + \frac{dt^2}{3}(a_n + \frac{1}{2}a_{n+1}) \end{aligned} \quad (2.6.8)$$

ここで、 $t=0$ では

$$v_0 = a_0 dt, \quad u_0 = \frac{1}{2}a_0 dt^2 = 0 \quad (2.6.9)$$

ここで、基線補正を行うが、基本形状としてずれを

$$\bar{v}(t) = D_1 + D_2 t \quad (2.6.10)$$

と置く。そこで、誤差関数として

$$E = (\int v(t)dt - \int \bar{v}(t)dt)^2 \quad (2.6.11)$$

を定義すると、最小自乗法を用いることにより、 D_1 、 D_2 は次の様に求めることができる。

$$D_1 = \frac{\int t^2 dt \int a(t)dt - \int t dt \int a(t)t dt}{\int t^2 dt \int t dt - (\int t dt)^2}, \quad D_2 = \frac{\int dt \int a(t)t dt - \int t dt \int a(t)t dt}{\int t^2 dt \int t dt - (\int t dt)^2} \quad (2.6.12)$$

従って、速度の変換式は次の様になる。

$$v(t)_{new} = v(t) - D_1 - D_2 t \quad (2.6.13)$$

また、加速度はこれの微分であるので、

$$a(t)_{new} = a(t) - D_2 \quad (2.6.14)$$

また、方法1では、次の様にしている。

ここで、増分区間では加速度の変化は中点加速度法とすると

$$\begin{aligned} v_{n+1} &= v_n + \frac{dt}{2}(a_n + a_{n+1}) \\ u_{n+1} &= u_n + v_n dt \end{aligned} \quad (2.6.15)$$

ここで、 $t=0$ では

$$v_0 = a_0 dt, \quad u_0 = \frac{1}{2}a_0 dt^2 = 0 \quad (2.6.16)$$

ここで、基線補正を行うが、基本形状としてずれを

$$\bar{v}(t) = D_1 + D_2 t \quad (2.6.17)$$

と置く。そこで、誤差関数として

$$E = (\int v(t)dt - \int \bar{v}(t)dt)^2 \quad (2.6.18)$$

を定義すると、最小自乗法を用いることにより、 D_1 、 D_2 は次の様に求めることができる。

$$D_1 = \frac{\int t^2 dt \int a(t)dt - \int t dt \int a(t)t dt}{\int t^2 dt \int t dt - (\int t dt)^2}, \quad D_2 = \frac{\int dt \int a(t)t dt - \int t dt \int a(t)t dt}{\int t^2 dt \int t dt - (\int t dt)^2} \quad (2.6.19)$$

従って、速度の変換式は次の様になる。

$$v(t)_{new} = v(t) - D_1 - D_2 t \quad (2.6.20)$$

また, 加速度はこれの微分であるので,

$$a(t)_{new} = a(t) - D_2 \quad (2.6.21)$$

2.7 計測震度

気象庁は、1985年3月に震度観測検討委員会を発足させ、震度を計測化する算出式を提案している²⁾。計測震度は、式(2.7.1)に示す河角による震度と最大加速度の関係式

$$I = a \log a_m + 0.7 \quad (2.7.1)$$

に、体感による震度とより一致するように周期の影響を考慮した項を加えた式(2.7.1)を基本として、さらに、継続時間の影響も考慮したものである。

$$I = 2 \log a_m + 0.7 + \log(kt) \quad (2.7.2)$$

I ：震度（四捨五入して整数値とする。震度7の判定は被害状況の調査）

a_m ：最大加速度（ cm/s^2 ）

t ：周期（秒）（ $0.1 \leq t \leq 1.0$ の範囲に限る）

k ：係数

兵庫県南部地震以後、この震度階の見直しを行った。主な改正点は次の通りである。

- ・震度は全て計測震度とする。
- ・震度5, 6に付いては、弱と強に区分する。

この震度は、官報1831号（1996年2月15日）により制定され、1996年4月より新しい震度観測が行われている。また、計算のルーチンは公開されている。

計測震度算出の流れは、次の通りである。ここで、フィルター処理とは、表 2.7.1に示す3つのフィルターを周波数領域でかけることである。三つのフィルターおよびそれらを合成した関数を図 2.7.2に示す。

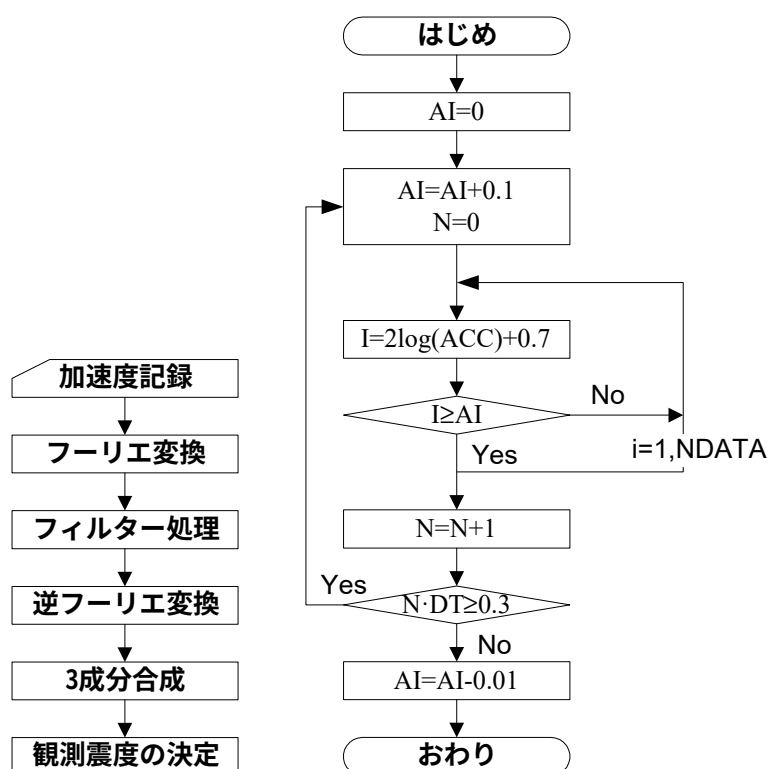


図 2.7.1 計測震度算出の流れ

表 2.7.1 計測震度算出のフィルター関数

フィルター	式
周期の効果を表す	$(1.75/f)^{0.5}$
ハイカット	$(1 + 0.694y^2 + 0.241y^4 + 0.0557y^6 + 0.009664y^8 + 0.0134y^{10} + 0.000155y^{12})^{-0.5}$
ローカット	$(1 - e^{-(2f)^3})^{0.5}$

f : 地震動の周波数 (Hz) , $y=f/10$

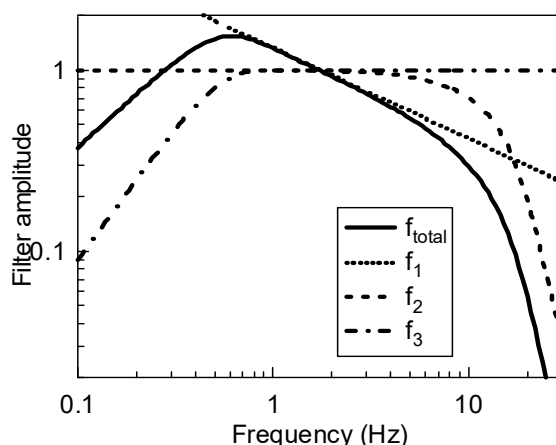


図 2.7.2 計測震度の計算に用いる震度

次に、震度の計算では、原則的に3成分を合成した値を使うこととなっている。しかし、プログラムでは、1, 2成分でも計算が出来るようになっている。

なお、前述の官報の記述によれば、計測震度は次の式により算出する。

$$I = 2 \log a_0 + 0.94 \quad (2.7.3)$$

I : 計測震度

a_0 は $\int w(t,a)dt \geq 0.3$ を満たす a の最大値。積分範囲は地震動の継続時間。

t は時間 (秒)

a は地震動の加速度の大きさに係わるパラメータ (cm/s²)

$w(t,a)$ は $v(t)<a$ のとき、 $w(t,a)=0$ 、 $v(t)\geq a$ のとき $w(t,a)=1$ の値を取る関数

計測震度の計算法は大きく二つある。

一つは、適当な a_0 を与え、これを超える時間が0.3秒になる値を求めることである。この場合、計算された I の小数第3位を四捨五入し、小数第2位を切り捨てたものを計測震度とする。EQWAVEではコマンド「SHINDO」を用いる際にはこの方法を用いているが、統計処理のことなども考え、出力は少数以下3位までを出力している。EQWAVEでこの方法を用いる場合には、3方向の成分が必要である。

もう一つの方法は、式(2.7.3)を逆に解く方法である。すると、

$$a_0 = 10^{(I-0.94)/2} \quad (2.7.4)$$

が得られる。ここで、計測震度が少数以下1桁で表示されることを考え、計測震度を0（他の値でも可能）から0.1ずつ増やして a_0 を求め、0.3秒を超える値を求めることである。従って、出力は少数以下0.1までしか計算することができない。EQWAVEではコマンド「SHINDO-A」を用いる場合にはこの方法を用いている。この方法を用いる場合には、必ずしも3方向成分が必要ではなく、1方向、2方向の成分でも計算を実行することができる。

2.8 地震の継続時間

地震動では、あまりに小さい揺れは被害には影響を与えないので、適当な方法で継続時間を設定する必要がある。継続時間を決める方法には、bracketed duration³⁾と、パワーの累積時間⁴⁾に基づくものがある。前者は、地震記録の振幅が設定された値を最初と最後に横切った時間を用いるものである。後者は全地震動に対しパワーが5%および95%となる値として用いられる。パワーは加速度の二乗和で得られることから次のように定義できる。

$$f_{sq} = \int_{t_1}^{t_2} f^2(t) dt \quad (2.8.1)$$

そこで、加速度の時刻歴を用い、式(2.8.1)で全時刻歴について行った積分の値の5%と95%となる時間を t_1 と t_2 としたとき、地震動の継続時間 T を

$$T = t_2 - t_1 \quad (2.8.2)$$

と定義する。

2.9 地震動指標

地震動指標には多くのものがある(たとえば文献5))。EQWAVE では代表的なものを用意する。

(1) 最大応答値

最大加速度、最大速度、最大変位がある。なお、数値積分をする前に、基線補正を行うか、Fourier 積分による方法を用いることが推奨される。

(2) パワーに関する指標

パワーの一般的な方法は加速度時刻歴 $a(t)$ より次のように計算できる。

$$P_a = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a^2(t) dt \quad (2.9.1)$$

また、同じ様な表現であるが、

$$I_A = \frac{\pi}{2G} \int_0^{t_d} a^2(t) dt \quad (2.9.2)$$

は Arias の地震動強度⁶⁾と呼ばれ、よく用いられてきた。さらに、これを用いた指標として、potential destructiveness P_D も使われている⁷⁾⁸⁾。

$$P_D = \frac{I_A}{v_0^2} \quad (2.9.3)$$

ここで、 v_0 は intensity of zero crossing と表現されているが、単位時間に加速度時刻歴がゼロ軸を横切る回数である。これにより、周波数特性が少し考慮されたことになる。

同様に、式(2.8.1)は

$$\text{二乗和: } a_{sq} = \int_{t_1}^{t_2} a^2(t) dt \quad (2.9.4)$$

とかけ、を用いた指標

$$a_{rms} = \sqrt{P_a} \quad (2.9.5)$$

$$a_{rs} = \sqrt{a_{sq}} \quad (2.9.6)$$

も提案されている⁹⁾¹⁰⁾。

この他、Park は characteristic intensity I_c として

$$I_c = a_{RMS}^{1.5} t_d^{0.5} \quad (2.9.7)$$

を提案している。ここで、 $t_d = t_2 - t_1$ （地震の継続時間）である。

(3) 計測震度

すでに説明した。なお、計測震度が速度と加速度の中間的な値であるのに対して、直接両者から指標を求める方法もある。例えば、

$$DI = \log(|\sum \mathbf{a} \cdot \mathbf{v}|) \quad (2.9.8)$$

は DI 値と呼ばれている¹¹⁾。

(4) SI 値

Spectral Intensity (SI 値) は速度応答スペクトルを用いた指標であり、次式で表される¹²⁾。

$$SI_n = \int_{0.1}^{2.5} S_{v,n}(T) dT \quad (2.9.9)$$

ここで $S_{v,n}(T)$ は減衰定数が $n\%$ の速度応答スペクトルである。なお、実務では速度応答スペクトルの代わりに疑似速度応答スペクトルも用いられる¹³⁾。なお、式(2.9.9)は速度を積分しているので、変位の次元となる。日本では、これを速度の次元にするために、積分範囲である0.1～2.5秒で除した値、

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} S_{v,20}(T) dT \quad (2.9.10)$$

を一般に SI 値と読んでいる¹⁴⁾¹⁵⁾。文献14)によると、当時のコンピュータでは速度応答スペクトルを求めるのは大変な作業らしく、簡単に求めようとして試行錯誤した結果、20%の減衰を設定すれば速度応答スペクトルはなめらかになり、その面積は周期1.5秒の系の最大速度より小さい周期は線型、大きい周期は一定値とする台形の面積で近似できる事を示しており、これが減衰定数が20%の速度応答スペクトルを使う理由のようである。また、2.4で割事については、文献14)では SI そもその定義を平均値として扱っている。そこでしている論文では Housner (1961) を引用しており、文献16)と考えられるが、ここでも2.4では割っていない(平均値では無く、全積分値)ので、著者らの勘違いとも考えられる。

このような経緯から、海外では式(2.9.9)を、日本では式(2.9.10)用いているようである。EQWAVE では式(2.9.10)を用いている。同様な指標で興味の対象としている時間が異なる定義もある。たとえば、

$$VSI = \int_{0.1}^{0.5} S_{v,5}(T) dT \quad (2.9.11)$$

$$VSI = \int_{0.6}^{2.0} S_{v,5}(T) dT \quad (2.9.12)$$

などがある。また、上の式を有効値に直した、または加速度応答スペクトルを用いた指標

$$EPA = \int_{0.1}^{0.5} S_{a,5}(T) dT, \quad EPV = \int_{0.1}^{0.5} S_{v,5}(T) dT \quad (2.9.13)$$

は、ATC3¹⁹⁾で用いられている。

速度時刻歴を用いた指標として、 PSI (Power spectral Intensity)

$$PSI = \sqrt{\int_0^{t_f} v^2(t) dt} \quad (2.9.14)$$

が提案され²⁰⁾、港湾の岸壁の変位との相関が良いとされている。なお、原論文ではこの速度が絶対速度か相対速度か記述されていない。著者に確認した結果、周期10秒以上の成分を無視して、Fourier 級数展開から積分したと言うことであった。また、 PSI は加速度を積分しても得られる(式(2.9.6)) が、速度を用いた方が現象との整合が良いということで、単に PSI と言う時には速度を用いた定義を指しているようである。

なお、原論文では単位は $\text{cm/s}^{0.5}$ で表現されている。

2.10 微分と積分

2.10.1 Fourier 級数展開による方法

簡単のため、複素表示で考え、次の式とする。

$$\tilde{u}^*(t) = \sum_{m=0}^{N-1} C_m e^{i\omega t} \quad (2.10.1)$$

この式を微分すると、次式が得られる。

$$\frac{d\tilde{u}^*(t)}{dt} = \sum_{m=0}^{N-1} i\omega C_m e^{i\omega t} \quad (2.10.2)$$

すなわち、微分は Fourier 変換した各係数に $i\omega$ を乗じたものを係数として逆変換すればよい。

次に、式(2.10.1)を積分すると、次式が得られる。

$$v(t) = \int \tilde{u}^*(t) dt = \int \sum_{m=0}^{N-1} C_m e^{i\omega t} dt + A = \sum_{m=0}^{N-1} \frac{C_m}{i\omega} e^{i\omega t} + A \quad (2.10.3)$$

ここで、A は積分定数である。t=0 で $v(0)=0$ と置くと、次式となる。

$$0 = \sum_{m=0}^{N-1} \frac{C_m}{i\omega} + A \rightarrow A = -\sum_{m=0}^{N-1} \frac{C_m}{i\omega} \quad (2.10.4)$$

従って、

$$\tilde{u}^*(t) = \sum_{m=0}^{N-1} \frac{C_m}{i\omega} e^{i\omega t} - \sum_{m=0}^{N-1} \frac{C_m}{i\omega} \quad (2.10.5)$$

2.10.2 台形積分

次に述べる Newmark の β 法の $\beta=1/6$ 、または線形化速度法と原理的に同じになる。

2.10.3 Newmark の β 法

まず、線形加速度法を考える。加速度の変化が区間 t と $t+\Delta t$ の間で設計に変化するとすれば、

$$\ddot{u}(\tau) = \frac{\ddot{u}_{t+\Delta t} - \ddot{u}_t}{\Delta t} \tau + \ddot{u}_t \quad (0 \leq \tau \leq \Delta t) \quad (2.10.6)$$

これを、初期条件 $t=0$ で、 $\dot{u}(0)=\dot{u}_t$ 、 $u(0)=u_t$ の基で、積分すると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} \dot{u}_{t+\Delta t} &= \dot{u}_t + (\ddot{u}_t + \ddot{u}_{t+\Delta t})\Delta t / 2 = \dot{u}_t + (1-0.5)\ddot{u}_t\Delta t + 0.5\ddot{u}_{t+\Delta t}\Delta t \\ u_{t+\Delta t} &= u_t + \dot{u}_t\Delta t + \left(\frac{\ddot{u}_t}{3} + \frac{\ddot{u}_{t+\Delta t}}{6}\right)(\Delta t)^2 = u_t + \Delta t\dot{u}_t + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{6}\right)(\Delta t)^2\ddot{u}_t + \frac{1}{6}(\Delta t)^2\ddot{u}_{t+\Delta t} \end{aligned} \quad (2.10.7)$$

拡張された Newmark の β 法では、この 0.5 を γ に 1/6 を β に置き換える。すなわち、

$$\begin{aligned} \dot{u}_{t+\Delta t} &= \dot{u}_t + (1-\gamma)\Delta t\ddot{u}_t + \gamma\Delta t\ddot{u}_{t+\Delta t} \\ u_{t+\Delta t} &= u_t + \Delta t\dot{u}_t + \left(\frac{1}{2} - \beta\right)(\Delta t)^2\ddot{u}_t + \beta(\Delta t)^2\ddot{u}_{t+\Delta t} \end{aligned} \quad (2.10.8)$$

の様に表している。

2.11 プログラムの特色

EQWAVE では、前述した高速フーリエ変換以外にも周波数増幅関数のピークから地盤の固有周期を求める方法や応答スペクトルを求める方法について、大崎の本¹⁾のコーディングを参考にプログラムを作成している。また、この章に示した理論的な背景についても、多くを大崎の本¹⁾に依っている。

参考文献

16) 田治見宏（1965）：建築振動学（7.4 地震応答を求める統計的方法），コロナ社

参考文献

- 1) 大崎順彦（1994）：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会
- 2) 斎藤祥司（1996.5）：新しい震度観測について，土木学会誌，Vol. 81, pp. 44-45
- 3) Bolt, B. A.: Duration of strong motion, Proc. 5WCEE, pp. 1304-1313, 1973
- 4) Trifunac, M. S. and Bray, A. G. :A study on the duration of strong earthquake ground motion, Bulletin Seismological Society of America, Vol. 65, No. 3, 581-626, 1975
- 5) 吉田望（2013）：地震応答解析の精度評価の方法，????
- 6) Arias A. : A Measure of Earthquake Intensity, Seismic Design for Nuclear Power Plants, Mass. Inst. Tec. Press., pp.438-483, 1970.
- 7) Araya, R. and Saragoni, G. R. (1984): Earthquake accelerogram destructiveness potential factor. 8WCEE, San Francisco, pp. 835-842
- 8) Saragoni, G. R., Astroza, M. and Ruiz, S. (2008): Study of the accelerogram destructiveness of Nazca Plate subduction earthquakes, Proc. 14WCEE, Paper No. 02-0055
- 9) Housner, G. W. and Jennings, P. C. (1964): Generation of artificial earthquakes, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 90, Proceedings paper 3806
- 10) Housner, G. W. (1970): Strong ground motion, Earthquake engineering, Wiegel, R. L. ed., Prentice Hall Inc.
- 11) 中村豊（2003）：合理的な地震動強度指標値の検討－DI 値を中心にした地震動指標値間の関係－，第27回土木学会地震工学論文集，論文番号290
- 12) Housner, G. W.: Intensity of earthquake ground shaking near the causative fault, Proc., 3WCEE, Vol. I, pp. III-94-III-115, 1965
- 13) Brun, M., Reynard, J. M., Jezequela, L. and Ile, N.: Damaging potential of low-magnitude near-field earthquakes on low-rise shear walls, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 24, No. 5, pp. 587-603, 2004
- 14) Katayama, T., Sato, N., Ohbo, N., Kawasaki, M. and Saito, K. (1986): Ground shaking severity detector by use of spectrum intensity (SI), 第7回日本地震工学シンポジウム，pp. 373-378
- 15) 佐藤暢彦，片山恒雄，大保直人，川崎勝幸（1985）：新しい制御用地震センサーの開発と試作，第18回地震工学研究発表会，土木学会，pp. 105-108
- 16) Housner, G. W. (1961): Vibration of structures induced by seismic waves, in Harris, C. M. and Crede, C. E. ed. "Shock and Vibration Handbook", Vol. 3, Chapter 50, McGraw-hill Book Company, Inc., New York, pp. 50-1~50-53
- 17) von Thun, J.L., Rochim, L.H., Scottand G.A. and Wilson J.A. (1988): Earthquake ground motion for designed analysis of dams, in Earthquake Engineering and Soil Dynamics II – Recent Advance in Ground-Motion Evaluation, Geotechnical Special Publication 20, ASCE, pp. 463-481.
- 18) Makdisi, F. and Seed, H. (1978): Simplified procedure for estimating demand embankment earthquake-induced deformations, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 104, No. 7, pp.849-867

- ¹⁹⁾ ATC, Applied Technology Council (1978). Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings, Publication ATC 3-06, June 1978.
- ²⁰⁾ 野津厚，井合進：岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標に関する一考察，第28回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，pp.18-19，2001.

3 データ入力

3.1 データ入力の基本的な考え方

EQWAVE で用いているデータ入力の方法は、次のようなものである。

①作業内容を指定する

②処理を行う

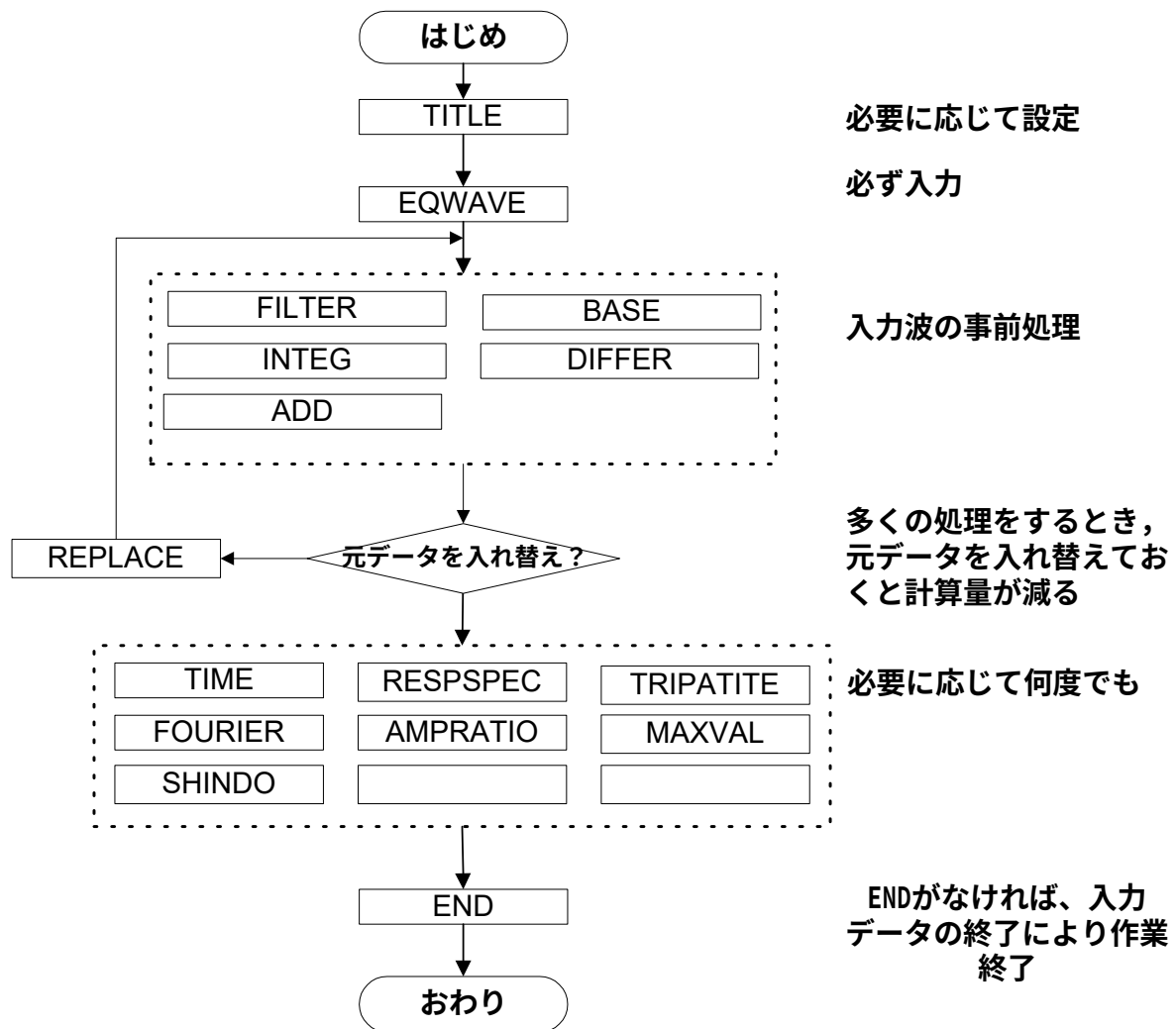
最初のデータは、一行のデータであり、作業の内容を指示する英語が書かれている。入力に際しては行の最初から表3.1.1に制御文字として示す文字（大文字）を入力する。現在用意している作業内容は、次のようなものである。

表3.1.1 制御文字と作業内容

制御文字	節	作業内容
TITLE	3.2	タイトル
EQWAVE	3.3	地震波の入力
BASE	3.4	基線補正
FILTER	3.5	フィルターを掛ける
LINEAR	3.6	波形の合成
MAXVAL	3.7	最大値、SI の出力
EQINDEX	0	各種の地震動指標の算出
SHINDO	3.8	計測震度の出力
JVAL	3.9	J 値の算出
INTEG	3.10	時刻歴の積分
DIFFER	3.11	時刻歴の微分
TIME	3.12	時刻歴の出力
AMPRATIO	3.13	増幅スペクトルの出力
RESPSPEC	3.14	応答スペクトルの出力
TRIPARTITE	3.15	三重応答スペクトル
FOURIER	3.16	フーリエスペクトルの出力
END	—	プログラム実行の終了

データ（作業）の流れのフローを次ページに示す。

プログラムは、常に入力した地震波およびそのフーリエスペクトル、一次処理した地震波とフーリエスペクトルを内部変数として持っている。出力は全て一次処理したデータに対して行われる。処理を数度にわたって行う場合、そのうち共通項までは、元データを修正することによって処理の数を減らせる。



データ入力の流れ図

3.2 タイトル：TITLE

この節では、作業識別文字「TITLE」に対する入力方法を説明する。TITLE は問題の題目を指示するために用いる。入力された TITLE は出力の際に用いられる。指示がなければ題目として空白が割り当てられる。

TITLE	(A80)
1～ 80 TITLE	問題の題目

3.3 地震波の入力：EQWAVE

この節では、作業識別文字「EQWAVE」に対する入力方法を説明する。

3.3.1 入力-1

NWAVE, NACC0, NT1, DT	(3I5, 5X, F10.0)
1～ 5 NWAVE	同時に処理する地震波の数。
6～ 10 NACC0	一つの地震波のデータ数。
11～ 15 NT1	計算に用いる時間増分の数。NT1 は NACC0 より大きく、かつ 2 のべき乗である。この条件を満たさないときは、プログラムが適当な数を見つける。NACC0+1 から NT1 の間の入力は 0 と設定される。
21～ 30 DT	時間増分。

3.3.2 入力-2

この項の入力は、NWAVE 回（同時に処理する地震波の数）繰り返す。なお、読み込みのためのファイルは一つのデータを読み込んだ後、常に巻き戻しされるので、常に最初から読み込まれることになる。

NSKP, EQMAX, EQMULT, EQFIL, EQFMT	(I5, 5X, 2F10.0, A20, A30)
1～ 5 NSKP	地震波を読み込む際、ファイルから地震波を読み込むまでに読み飛ばす行またはレコード数。一般に地震はファイルの最初には地震波に関するコメントなどが書いてあるので、これを読み飛ばすために用いる。
11～ 20 EQMAX	地震波の最大値。ここに値が入力されていればプログラムは入力された加速度波の最大値が EQMAX となるように大きさを変更する。EQMAX<0 が入力されたときには、加速度波の符号も反転させる。
21～ 30 EQMULT	地震波用の乗数。ここに値が入力されていれば、入力した加速度を EQMULT 倍したものを入力として用いる。
31～ 50 EQFIL	地震波を読み込むファイル名。ブランクであればユニット番号 11(fort.11) が用いられる。
51～ 80 EQFMT	地震波を読み込むためのフォーマット。両端を括弧で括っておく必要がある。(例：(8F9.3))。ブランクが入力されると書式なしファイルとして読み込みにいく。

注) EQMAX と EQMULT はどちらか一方だけを指定する。EQMAX が0以外の値であればプログラムは最大値を EQMAX とし、EQMULT の値はたとえ入力されていたとしても用いられない。EQMAX が0で EQMULT が0以外の値であれば、入力波を RQMULT 倍したものが計算に用いられる。両方とも0であれば入力した値そのものを計算に用いる。

注) A を地震波のための配列とすると、プログラムは、

READ(11,EQFMT) (A(I),I=1,NACC) または READ(11) (A(I),I=1,NACC)

として地震波データを読みとる。入力データはこの書式で読めるようになっている必要がある。

3.4 基線補正：BASE

この節では、作業識別文字「BASE」に対する入力方法を説明する。

IEQ1, IEQ2, IMETOD, PARAM1, PARAM2		(3I5, 5X, 4F10.0)
1～ 5	IEQ1	処理する地震波の番号は、IEQ1～IEQ2 番である。
6～ 10	IEQ2	処理する地震波の番号の終わり
11～ 15	IMETOD	補正方法 =1：大崎の方法 =2：平均値を 0 にする =3：方法 1（標準） =4：方法 2
21～ 30	PARAM1	パラメータ（現在は用いられていない）
31～ 40	PARAM2	パラメータ（現在は用いられていない）

3.5 フィルター：FILTER

この節では、作業識別文字「FILTER」に対する入力方法を説明する。FILTER では、入力された地震波に対して、フィルターを掛ける処理を行う。

IEQ1, IEQ2, FREQ1, FREQ2, FREQ3, FREQ4		(2I5, 4F10.0)
1～ 5	IEQ1	処理する地震波の番号は、IEQ1～IEQ2 番である。 処理する地震波の番号の終わり
6～ 10	IEQ2	
11～ 20	FREQ1	第 1 周波数
21～ 30	FREQ2	第 2 周波数
31～ 40	FREQ3	第 3 周波数
41～ 50	FREQ4	第 4 周波数

（注）FREQ3=0であれば、高周波数成分はいじらない。

3.6 線形結合：LINEAR

この節では、作業識別文字「LINEAR」に対する入力方法を説明する。LINEAR では、二つの地震波の線形結合をする。

IEQ1, IEQ2, PARAM1, PARAM2		(2I5, 4F10.0)
1～ 5	IEQ1	処理する地震波の番号は、IEQ1～IEQ2 番である。
6～ 10	IEQ2	処理する地震波の番号の終わり
11～ 20	PARAM1	第 1 周波数
21～ 30	PARAM2	第 2 周波数

（注） $W(IEQ1) = W(IEQ1) \times PARAM1 + W(IEQ2) \times PARAM2$

3.7 最大値の出力：MAXVAL

この節では、作業識別文字「MAXVAL」に対する入力方法を説明する。加速度データから SI 値、最大加速度、速度、変位を計算する。データは変更されない。

IEQ1, IEQ2, IMETOD, PARAM1, PARAM2		(3I5, 5X, 4F10.0)
1～ 5	IEQ1	処理する地震波の番号は、IEQ1～IEQ2 番である。
6～ 10	IEQ2	処理する地震波の番号の終わり
11～ 15	IMETOD	数値積分の方法 =1：フーリエ級数（ただし 0 次は 0 とする） =2：台形則 =3：Newmark のβ法による
21～ 30	PARAM1	IMETHOD=1 のとき、これより小さい周波数は無視する。0 の時は、0.1Hz が用いられるので、Low path の処理をしないときには負の値を入力する。 IMETHOD=3 のとき、Newmark のβ法のβ（標準 1/6=0.166666）
31～ 40	PARAM2	IMETHOD=1 のとき、これより大きい周波数は無視する。0 の時は処理しない。 IMETHOD=3 のとき、Newmark のβ法のγ（標準 0.5）

地震動指標の算出：EQINDEX

この節を使う時は、地震動は加速度で、単位を cm/s^2 と設定しておくこと。

IEQ1, IEQ2, IMETOD, IDUR, PARAM1, PARAM2, TGVAL ACCG		(4I5, 3F10.0)
1～ 5	IEQ1	処理する地震波の番号は、IEQ1～IEQ2 番である。
6～ 10	IEQ2	処理する地震波の番号の終わり
11～ 15	IMETOD	数値積分の方法 =1：フーリエ級数（ただし 0 次は 0 とする） =2：台形則 =3：Newmark のβ法による
16～ 20	IDUR	継続時間（周期）の計測方法 =1：Bracketed duration =2：Cumulated power
21～ 30	PARAM1	IMETHOD=1 のとき、これより小さい周波数は無視する。0 の時は 0.1 に修正される。もし、本当に Lowpath フィルターが不要の時は負の値を代入する。 IMETHOD=3 のとき、Newmark のβ法のβ（標準 1/6=0.166666）
31～ 40	PARAM2	IMETHOD=1 のとき、これより大きい周波数は無視する。0 の時は処理しない。 IMETHOD=3 のとき、Newmark のβ法のγ（標準 0.5）
41～ 50	TGVAL	IDUR=1 のとき、地震動の始まりと終わりを表す加速度（0→1Gal）
51～ 60	ACCG	重力加速度の値（Arias intensity を出力するとき必要）、0 のとき、980.65

以下の指標を算出する。

- 1) 地震の継続時間
- 2) Arias intensity, I_A
- 3) Power, P_a
- 4) Power spectral Intensity, PSI
- 5) Spectral Intensity, SI

6) PGA, PGV, PGD

7) 計測震度 Instrumental seismic intensity, I_{JMA} (1方向成分についてのみ)

注) 計測震度は本来3方向成分について行うべきであるが、ここでは1方向成分のみについて行っている。本来の求め方は、次の3.8節で行う。

PSI は港湾では、工学的基盤の2E 波で、10秒より長周期を無視して（ハイパスフィルター）周波数領域で積分している。（2013.06.03野津さんに確認）

3.8 計測震度の出力：SHINDO, SHINDO-A

この節では、作業識別文字「SHINDO」「SHINDO-A」に対する入力方法を説明する。3つの加速度データから計測震度を計算する。データは変更されない。3つの加速度データとは、一地点の水平二方向、鉛直の3方向である。なお、原則はこの3つのデータが必要であるが、データが無くても計算はする。「SHINDO」「SHINDO-A」の違いは、理論編を参照されたい。計算方法が異なるので、最大0.1の差が出ることがある。また、「SHINDO」では3方向成分が必要であるのに対して、「SHINDO-A」では1方向成分でも計算が可能である。もちろん、「SHINDO」でも、2方向成分を0とする入力を作れば1方向の計算は可能である。

IEQ1, IEQ2, IEQ3, PARAM		(3I5, 5X, F10.0)
1～ 5	IEQ1	地震波の一つ目の成分。0 の時、計算には用いない。「SHINDO」では 0 以外が必要である。
6～ 10	IEQ2	地震波の二つ目の成分。0 の時、計算には用いない。「SHINDO」では 0 以外が必要である。
11～ 15	IEQ3	地震波の三つ目の成分。0 の時、計算には用いない。「SHINDO」では 0 以外が必要である。
21～ 30	PARAM3	現在の単位系から加速度の単位を cm/s^2 (Gal) に変換するために掛ける定数。例えば現在の単位系が m/s^2 であれば 100.を入力する。この係数は、計測震度にのみ適用される。

3.9 J 値の出力：JVAL

この節では、作業識別文字「JVAL」に対する入力方法を説明する。加速度データから J 値を計算する。なお、J 値は次式で定義される。

$$J = \sqrt{\frac{\int (x(t) - x_0(t))^2 dt}{\int x_0(t)^2 dt}}$$

IEQ1, IEQ2, NINTEG, MAXDFS, MAXDFE		(5I5)
1～ 5	IEQ1	基準となる地震波の番号（通常観測値など）。
6～ 10	IEQ2	比較する地震波の番号（通常計算値など）。
11～ 15	NINTEG	積分するステップ
15～ 20	MAXDFS	最小値を求めるために検討するステップの負側（負の値を入力）。0 であれば-10 と置き換えられる。
21～ 25	MAXDFE	最小値を求めるために検討するステップの正側（正の値を入力）。0 であれば 10 と置き換えられる。

3.10 時刻歴の積分：INTEG

この節では、作業識別文字「INTEG」に対する入力方法を説明する。与えられた時刻歴を積分し、その時刻歴とスペクトルを計算する。

IEQ1, IEQ2, IMETOD, PARAM1, PARAM2		(3I5, 5X, 2F10.0)
1～ 5	IEQ1	処理する地震波の番号は、IEQ1～IEQ2 番である。
6～ 10	IEQ2	処理する地震波の番号の終わり

- 11～ 15 IMETOD 数値積分の方法
 =1：フーリエ級数（ただし 0 次は 0 とする）
 =2：台形則
 =3：Newmark の β 法による（この場合、加速度から直接変位を求める）
- 21～ 30 PARAM1
 IMETHOD=1 のとき、これより小さい周波数は無視する。0 の時は 0.1 に修正される。もし、本当に Lowpath フィルターが不要の時は負の値を代入する。
 IMETHOD=3 のとき、Newmark の β 法の β （標準 $1/6=0.166666$ ）
- 31～ 40 PARAM2
 IMETHOD=1 のとき、これより大きい周波数は無視する。0 の時は処理しない。
 IMETHOD=3 のとき、Newmark の β 法の γ （標準 0.5）

3.11 時刻歴の微分：DIFFER

この節では、作業識別文字「DIFFER」に対する入力方法を説明する。与えられた時刻歴を一回微分し、その時刻歴とスペクトルを計算する。

IEQ1, IEQ2, IMETOD, PARAM1, PARAM2		(3I5, 5X, 2F10.0)
1～ 5 IEQ1	処理する地震波の番号は、IEQ1～IEQ2 番である。	
6～ 10 IEQ2	処理する地震波の番号の終わり	
11～ 20 IMETOD	数値微分の方法 =1：フーリエ級数（ただし 0 次は 0 とする） =2：区分線形	
21～ 30 PARAM1	パラメータ	
31～ 40 PARAM2	パラメータ	

3.12 時刻歴の出力：TIME

この節では、作業識別文字「TIME」に対する入力方法を説明する。

3.12.1 出力に関する指示

IOUT, NACC, NEQ, OUTFIL		(3I5, 5X, A20)
1～ 5 IOUT	出力の方法 =1：各時刻歴成分ごと =2：指定した全てをベクトル方式で	
6～ 10 NACC	出力する時間増分の数。0 であれば、入力した時刻歴と同じ（NACC0）が用いられる。	
11～ 15 NEQ	時刻歴の数（0 は 1 と見なされる。また、次のカードは不要で、常に、最初に入力した地震波がターゲットになる）。NEQ $\leq$ 10	
21～ 30 OUTFIL	出力するファイル名。空白であれば、前回出力に用いたのと同じファイルが使われる。一番最初で空白の時は「fort.12」が割り当てられる。ファイル名の左側には空白を作らず、21 コラム目からファイル名を入力すること。前に指定したのと同じ名前を入力すると、前のデータが消されてしまうので注意が必要である。同じファイルに次々出力したいのであればファイル名は最初の一回目だけ指定し、二回目以降は空白とする必要がある。	

3.12.2 時刻歴データの番号

NEQ=0 の時、この項のデータは不要である。

(IEQ(I), I=1, NEQ)	(10I5)
IEQ(I)	データの番号。最初に入力したデータから 1,2,...と数える。

3.13 増幅スペクトルの出力：AMPRATIO

この節では、作業識別文字「AMPRATIO」に対する入力方法を説明する。AMPRATIO は周波数増幅スペクトルを求める。

IEQ1, IEQ2, ISMOTH, BAND, IOUT, IEIGEN, CUTFQ, OUTFIL	(3I5, F5.0, 2I5, F10.0, A20)
1～ 5 IEQ1	増幅比の分子となる地震波の番号
6～ 10 IEQ2	増幅比の分母となる地震波の番号
11～ 15 ISMOTH	平滑化の手法 0 のときは平滑化しない。ISMOTH の絶対値は以下に示すウィンドウ処理の種類であり、正の時はフーリエスペクトルの比に対してウィンドウ処理を行うのに対して、負の時は各成分を平滑した後比を求める。 =1： 三角ウィンドウ =2： Parzen ウィンドウ =3： Hanning ウィンドウ =4： Hamming ウィンドウ
16～ 20 BAND	ウィンドウによる平滑化を行うときの平滑化周波数。三角ウィンドウでは 1Hz 程度、Parzen ウィンドウでは 0.2Hz 程度が普通。Hanning, Hamming ウィンドウでは 2.2 節を参照されたい。
21～ 25 IOUT	出力の方法 =1：各成分ごと =2：指定した全てをベクトル方式で
26～ 30 IEIGEN	増幅スペクトルのピーク値を振動数を小さい方から IEIGEN 個求め、印刷する。
31～ 40 FREQ	FREQ より小さい周波数のみを出力する。
41～ 60 OUTFIL	出力するファイル名。ブランクであれば、前回出力に用いたのと同じファイルが使われる。一番最初でブランクの時は「fort.12」が割り当てられる。ファイル名の左側にはブランクを作らず、11 コラム目からファイル名を入力すること。前に指定したのと同じ名前を入力すると、前のデータが消されてしまうので注意が必要である。同じファイルに次々出力したいのであればファイル名は最初の一回目だけ指定し、二回目以降はブランクとする必要がある。

3.14 応答スペクトルの計算：RESPSPEC

この節では、作業識別文字「RESPSPEC」に対する入力方法を説明する。この処理は、現在の波形が加速度であるという仮定で行われる。

3.14.1 出力に関する指示

IEQ, IFQ, IFGACC, IFGVEL, IFGDIS, IOUT, NDMP, NT, CUTFQ, CUTFQS, OUTFIL	(I5, 5I1, 2I5, 2F10.0, A20)
1～ 5 IEQ	処理する地震波の番号
6～ 6 IFQ	横軸の出力方法 =0：周期 =1：周波数 =2：周波数で、地震波を処理したのと同じ条件。FQE で入力される周波数までが計算される。
7～ 7 IFGACC	絶対加速度応答スペクトルの作図 =0：作図しない =1：作図する

8～ 8	IFGVEL	相対速度応答スペクトルの作図 =0：作図しない =1：作図する
9～ 9	IFGDIS	相対変位応答スペクトルの作図 =0：作図しない =1：作図する
10～ 10	IOUT	出力の方法 =1：各スペクトルごと =2：指定した全てをベクトル方式で
11～ 15	NDMP	出力する減衰定数の数（3 以下）
16～ 20	NT	FQS～FQE の間を NT 等分し NT +1 個の周波数（または周期）について出力する。IFQ=2 の時は意味がない。NT=0 が入力されると、100 に変更する。 >0：実軸で分割 <0：対数軸で分割
21～ 30	FQS	開始する周波数または周期。FQS～FQE の間を NT 等分する。IFQ=2 の時は意味がない。対数軸の時、0 が入力されると 0.1 に変更する。
31～ 40	FQE	終了する周波数または周期
41～ 60	OUTFIL	出力するファイル名。ブランクであれば、前回出力に用いたのと同じファイルが使われる。一番最初でブランクの時は「fort.12」が割り当てられる。ファイル名の左側にはブランクを作らず、11 コラム目からファイル名を入力すること。前に指定したのと同じ名前を入力すると、前のデータが消されてしまうので注意が必要である。同じファイルに次々出力したいのであればファイル名は最初の一回目だけ指定し、二回目以降はブランクとする必要がある。

3.14.2 減衰の指定

ここでは、応答スペクトルを出力する減衰定数を指定する。

(DMP(I), I=1,NDMP)	(3F10.0)
1～ DMP(I)	減衰定数 (%)。

3.15 三重応答スペクトルの計算：TRIPARTITE

この節では、作業識別文字「TRIPARTITE」に対する入力方法を説明する。この処理は、現在の波形が加速度であるという仮定で行われる。また、作図した場合、実際の波形の単位にかかわらず座標軸の長さの単位は自動的に cm を用いる。

3.15.1 出力に関する指示

IEQ, IFQ, IFGACC, IFGVEL, IFGDIS, IOUT, NDMP, NT, CUTFQ, CUTFQS, OUTFIL	(I5, 5I1, 2I5, 2F10.0, A20)
1～ 5 IEQ	処理する地震波の番号 ただし、IEQ<0 は特別な意味で、応答スペクトルを与えて作図する。この時、この行の入力の他の部分は用いられない。
6～ 6 IFQ	ファイル出力時の時間軸の出力方法（図では常に周期）。ただし、後に入力する NT=0 の時は、自動的に 1 にセットされる） =0：周波数 =1：周期
7～ 7 IFG	応答スペクトルの作図 =0：作図しない =1：作図する
8～ 10 IOUT	ファイル出力の方法 =1：各スペクトルごと

11～ 15 NDMP =2：指定した全てをベクトル方式で
 出力する減衰定数の数（3 以下）
 16～ 20 NT FQS～FQE の間を|NT|等分し|NT|+1 個の周波数（または周期）について出力する。ただし，NT=0 は特別な意味がある。
 >0：実軸で分割
 <0：対数軸で分割
 =0：標準値（0.04～15 秒を 90 分割）で計算。
 21～ 30 FQS 開始する周波数または周期。FQS～FQE の間を|NT|等分する。IFQ=2，または NT=0 の時は意味がない。対数軸の時，0 が入力されると 0.1 に変更する。
 31～ 40 FQE 終了する周波数または周期。NT=0 の時は意味がない。
 41～ 60 OUTFIL 出力するファイル名。ブランクであれば，前回出力に用いたのと同じファイルが使われる。一番最初でブランクの時は「fort.12」が割り当てられる。ファイル名の左側にはブランクを作らず，11 コラム目からファイル名を入力すること。前に指定したのと同じ名前を入力すると，前のデータが消されてしまうので注意が必要である。同じファイルに次々出力したいのであればファイル名は最初の一回目だけ指定し，二回目以降はブランクとする必要がある。

3.15.2 減衰の指定

ここでは，応答スペクトルを出力する減衰定数を指定する。ただし，IEQ<0（応答スペクトルを与えて作図する）の際にはこの項の入力は不要である。

(DMP(I), I=1,NDMP)	(3F10.0)
1～ DMP(I) 減衰定数（%）。	

3.15.3 プロッター関係の入力

作図の性質上，必ず両対数軸で作図される。IFQ に関わらず，作図は周期に対して行われる。すなわち，計算を周波数で行ったとすれば，その逆数を取り，周期を計算し，作図に用いる。なお，以下の最大値，最小値は作図の座標軸のことである。計算は前項で設定した，FQS，FQE の間で行われるので，両者に対応していないと，図が枠をはみ出たり，枠の途中で欠けたりするので，注意が必要である。特に，FQS，FQE を周波数で指定したとき，作図が周期で行われるので，変換をきちんとしておくこと。

XMIN, XMAX, YMIN, YMAX, XLEN, YLEN	(6F10.0)
1～ 10 XMIN x 軸（周期：秒）の最小値	
11～ 20 XMAX x 軸（周期：秒）の最大値	
21～ 30 YMIN y 軸（速度）の最小値	
31～ 40 YMAX y 軸（速度）の最大値	
41～ 50 XLEN x 軸の長さ（cm）	
51～ 60 YLEN y 軸の長さ（cm）	

(NPEN(I), I=1, NDMP)	(10I5)
----------------------	--------

作図に用いる線の種類 （11～23の間の数字）

作図に用いる線の種類

NPEN	線の種類	ピッチ(cm)	備考
------	------	---------	----

IEQ1, IEQ2, ISMOTH, BAND, IOUT, CUTFQ, OUTFIL		(3I5, F5.0, I5, 5X, F10.0, A20)
1～ 5	IEQ1	処理する地震波の番号は、IEQ1～IEQ2 番である。
6～ 10	IEQ2	処理する地震波の番号の終わり。一度に処理できるのは 10 個まで
11～ 15	ISMOTH	平滑化の手法 0 のとき、平滑化はしない。 =1：三角ウインドウ =2：Parzen ウインドウ =3：Hanning ウインドウ =4：Hamming ウインドウ
16～ 20	BAND	ウインドウによる平滑化を行うときの平滑化周波数。三角ウインドウでは 1Hz 程度, Parzen ウインドウでは 0.2Hz 程度が普通。Hanning, Hamming ウインドウでは 2.2 節を参照されたい。
21～ 25	IOUT	出力の方法 =1：スペクトルごと =2：指定した全てをベクトル方式で
31～ 40	CUTFQ	CUTFQ より小さい周波数のみを出力する。
41～ 60	OUTFIL	出力するファイル名。ブランクであれば、前回出力に用いたのと同じファイルが使われる。一番最初でブランクの時は「fort.12」が割り当てられる。ファイル名の左側にはブランクを作らず、11 コラム目からファイル名を入力すること。前に指定したのと同じ名前を入力すると、前のデータが消されてしまうので注意が必要である。同じファイルに次々出力したいのであればファイル名は最初の一回目だけ指定し、二回目以降はブランクとする必要がある。

4 出力

4.1 各種出力

5 使用例

6 プログラムの構成

6.1 ツリー構造

EQWAVE	main プログラム。コントロールと dynamic allocation
ERRP01	エラーの印刷とジョブの終了
ERRP02	警告の印刷
ALLOC	配列サイズのチェック
INPUT1	材料に関する入力

6.2 主要変数

記号に*のついているものは複素数で, dynamic allocation 時には2words を用いて必要なサイズを確保している。

MXARE0 dynamic allocation の容量の最大値。パラメータ文でサイズを変更できる。

MXAREA =MXARE0。プログラム中で用いられる。

NT0 計算に用いる時刻歴数。2のべき乗

NTOTALdynamic allocation で現在までに使っているサイズ

NACC0 地震動のデータ数

TITLE タイトル

DW0 最小の周波数増分

DT 時間増分

NWAVE データ数

EQIPT(NT0,NWAVE) 入力データ

EQOUT(NT0,NWAVE) 出力用データ

FOUOUT(NT0,NWAVE)* フーリエ

FREQ(NT0) 出力用周波数

WRK(NT0) 差両領域

WRKC(NT0)* 作業領域

WRKOUT(NT0,11) 作業領域 (スペクトルの出力用)

WRKPAR(100) 作業領域 (意図不明, 未使用)

DW0 最小の周波数増分

7 バージョン情報

- 1.0 1997.09 吉田望
- 1.1 1998.09 吉田望 SI, 計測震度の追加等
- 1.2 1998.09 吉田望 トリパタイト応答スペクトル, 基線補正など
- 1.22 2001.10 吉田望 トリパタイトの線の種類の変更
- 1.24 2002.11 吉田望 スペクトルを与えトリパタイトを描く機能の追加
- 1.25 2003.11 吉田望 J 値を計算するようにした
- 1.26 2005.06 吉田望 低周波数のみのフィルターをかけた後, その値を保存しなかったバグ修正
- 1.27 2005.09 吉田望
- 1.28 2010.12 吉田望
- 1.29 2012.8 吉田望 計測震度の計算方法を二つ用意した。
- 1.31 2017.6 吉田望 応答スペクトルの標準出力を周期にした。各種平滑化を用意した。
- 1.32 2021.2 吉田望 Arias 強度では重力加速度で除すが, これを980.65の一定値にしていたのを重力加速度を入力するようにした。