

JAERI-Data/Code
2002-012



JP0250264



耐震計算プログラム群 : SSAP

2002年5月

内田 正明

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布を行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2002

編集兼発行 日本原子力研究所

耐震計算プログラム群：SSAP

日本原子力研究所国際原子力総合技術センター

内田 正明

(2002年3月13日受理)

単純な1質点系モデルおよび多質点系モデルを用いた耐震プログラム群SSAPを開発した。S波による横揺れ解析用のプログラムは、大崎スペクトルのモデルに基づく模擬地震動作成プログラム、1質点応答スペクトル計算プログラム、1次元多質点モデルによる振動計算プログラムの3つから成る。これらによる計算結果を次の計算の入力データとして用いることにより、見通しの良い逐次計算を行うことができる。

この他に、直下型地震において「石が跳ぶ」現象の解析を主目的に、垂直方向のP波に対する応答を計算する1次元多質点系解析プログラムを加えた。

これらのプログラムを用いた応用計算において、多質点系を1質点系モデル計算の重畳で近似できる条件について、また跳び石現象が起こる条件やそれによる応力についていくつかの知見を得た。

Seismic Analysis Program Group: SSAP

Masaaki UCHIDA

Nuclear Technology and Education Center
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 13, 2002)

A group of programs SSAP has been developed, each member of which performs seismic calculation using simple single-mass system model or multi-mass system model. For response of structures to a transverse s-wave, a single-mass model program calculating response spectrum and a multi-mass model program are available. They perform calculation using the output of another program, which produces simulated earthquakes having the so-called Ohsaki-spectrum characteristic.

Another program has been added, which calculates the response of one-dimensional multi-mass systems to vertical p-wave input. It places particular emphasis on the analysis of the phenomena observed at some shallow earthquakes in which stones jump off the ground.

Through a series of test calculations using these programs, some interesting information has been derived concerning the validity of superimposing single-mass model calculation, and also the condition for stones to jump.

Keywords:

Seismic Analysis, Program, Code, Ohsaki Spectrum, Response Spectrum
Single-mass System, Multi-mass System, Jumping Stone

目 次

1. はじめに	1
2. 計算モデル	2
2.1 1 質点系の振動	2
2.2 多質点系の振動	4
2.3 模擬地震動（大崎スペクトル）の作成	5
2.4 パルス状粗密波に対する応答	8
3. プログラム構成と入出力	12
3.1 模擬地震動作成プログラム MOGIJIS	12
3.1.1 計算の流れ	12
3.1.2 入出力データ	14
3.2 1 質点系応答計算プログラム RESPONSE	15
3.2.1 計算の流れ	15
3.2.2 入出力データ	15
3.3 多質点系応答計算プログラム SWAY	16
3.4 粗密波応答計算プログラム JUMP	18
3.4.1 計算の流れ	18
3.4.2 入出力データ	18
4. 計算例	20
4.1 多質点計算結果と逐次1 質点計算結果の比較	20
4.2 石柱の跳び上がり量の計算	26
5. おわりに	30
参考文献	31
付録A 1 模擬地震動作成に使われる経験式	32
付録A 2 MOGIJIS のサブルーチン構成	33
付録A 3 SWAY のサブルーチン構成	34
付録A 4 入力データの例	35

Contents

1. Introduction	1
2. Models	2
2.1 Single-mass System Model	2
2.2 Multi-mass System Model	4
2.3 Simulated Earthquake (Ohsaki Spectrum)	5
2.4 Response to P-wave Input as a Pulse	8
3. Construction of Programs and Input/Output Data	12
3.1 MOGIJIS for Production of Simulated Earthquake	12
3.1.1 Flow of Calculation	12
3.1.2 Input and Output Data	14
3.2 RESPONSE for Response of Single-mass System	15
3.2.1 Flow of Calculation	15
3.2.2 Input and Output Data	15
3.3 SWAY for Response of Multi-mass System	16
3.4 JUMP for Response to P-wave Input as a Pulse	18
3.4.1 Flow of Calculation	18
3.4.2 Input and Output Data	18
4. Sample Calculations	20
4.1 Comparison of Multi-mass Model Calculation and Superposition of Single-mass Model Calculation	20
4.2 Calculation of Jump Height of a Stone Column	26
5. Conclusion	30
References	31
Appendix A1 Formulae Used for Production of Simulated Earthquake	32
Appendix A2 Subroutines of MOGIJIS	33
Appendix A3 Subroutines of SWAY	34
Appendix A4 Sample Input Data	35

1. はじめに

今日、構造物の強度計算は大型の計算コードを使用して行われる。耐震計算は構造解析のなかでも動的なものである分だけ複雑であり、コンピュータの使用は必至である。また、地震によるゆれは単純なものではなく、上下、水平方向のゆれにねじれ変形も加わるので、詳細な解析には大型のコードが必要になる。

しかし、計算結果を評価する作業は常に必要である。特にパラメータ解析の結果の傾向を理解しようとする作業は、いわば計算結果を暗算による計算結果と照合しているようなものである。大型計算コードによる計算と暗算の間には非常に大きなギャップがある。地震動は振動のスペクトル特性という規則的な性質と、ランダム性をあわせもつものであるから、暗算も実は容易ではない。

地震動に対する構造物の応答には、複雑な面と1質点モデル(単振り子モデル)でおおよそ記述できる面とがある。したがって大型コードを常用する環境においても、簡単な計算コードを併用することは非常に有用であろう。

本報で述べる耐震解析コード群は、もともと応答スペクトルの概念を理解させるための初歩的な教育用プログラムをベースとしている。しかし上のような観点から、簡単で使い勝手のよいプログラムには、教育以外にもそれなりの実用的な価値があると考え、これを拡充したものである。次の4つのコードでコード群とし、これをSSAP(Simple Seismic Analysis Program Group)という名前を付けた。

- ① いわゆる大崎スペクトルによる模擬地震動を作成するプログラム **MOGIJIS**
- ② 1質点モデルにより応答スペクトルを計算するプログラム **RESPONSE**
- ③ 1次元多質点系の振動を計算するプログラム **SWAY**
- ④ パルス的なP波入力に対する応答を計算するプログラム **JUMP**

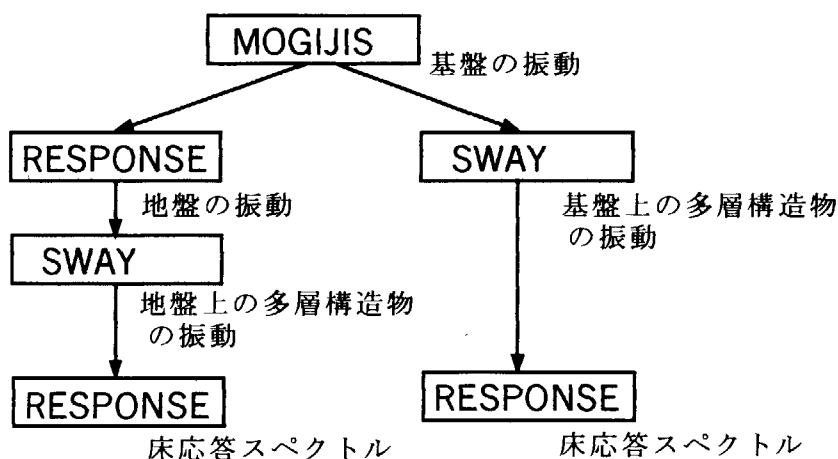


Fig. 1 MOGIJIS, RESPONSE, SWAY の組み合わせの例

これら4つのうち、①、②、③の3つは、横揺れの解析用である。これらはFig. 1のように相互に関連しており、あるコードの計算結果のファイルをそのまま別のコードの入力データとして使用できるよう設計されている。これらは単一のコードにまとめることも可能なのであるが、上記のような目的から、あえて独立したコード群としたものである。これに対して、④の JUMP は他の3つとは全く異質のコードであり、上下動の影響を解析するコードである。これはあとで述べるように、直下型地震において衝撃波的な加速が重要であるらしいということから、その影響を解析することを意図したものである。大崎スペクトルとは関係はないが、便宜上本コード群のひとつとした。

2. 計算モデル

2.1 1質点系の振動

建造物を単振り子で模擬する、1質点系の振動の方程式は種々の成書に記述されているが、この後の記述のために簡単に紹介する。

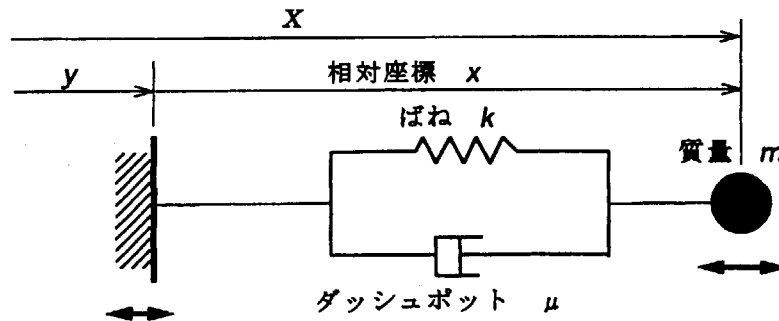


Fig. 2 1質点振動モデルの概念

建造物の横揺れ（S波による振動）の特性を、Fig. 2のような単振り子の運動によって模擬する。この振り子は固有の振動数を持ち、ばねを介して地盤の振動を受けて振動する。また、ダッシュポットであらわされる、摩擦によるエネルギーの減衰機構をもっているものとする。

振り子の絶対座標を X とし、地表の絶対座標を y とする。地表に対する振り子の相対座標を x とすると、 x は

$$x = X - y \tag{1}$$

であたえられる。振り子の運動方程式は、

$$m \ddot{X} = F = -kx - \mu \dot{x} \tag{2}$$

となる。ここで m は質量、 k はばね定数、 μ は粘性係数である。ここでは摩擦の効果は流体の粘性と同じであるとし、流体の粘性法則が使われている。(1) を用いて X を消去すると、振り子の相対運動に関する方程式、

$$m \ddot{x} + \mu \dot{x} + kx = -m \ddot{y} \quad (3)$$

が得られる。これをさらに次の形に変形する。

$$\ddot{x} + 2h\omega \dot{x} + \omega^2 x = -\ddot{y} \quad (4)$$

ここで ω は自由振動の円振動数 (1/s) であり、

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

である。振り子の固有周期を T (1/s) とすれば、

$$\omega = 2\pi / T \quad (6)$$

となる。 h は減衰定数 (無次元) であり、 $h = \mu / (2m\omega)$ である。

1質点モデルによる計算では、まず地盤の地震動について加速度の時間履歴が(4)式右辺の \ddot{y} としてあたえられる。また建造物内に設置された機器の解析では、床面の運動が \ddot{y} としてあたえられ、機器の振動が \ddot{x} となる。これを用いて(4)式を左辺の相対運動の加速度 \ddot{x} 、速度 \dot{x} 、変位 x の時刻歴について解く。

本コード群で採用している数値解法は、Newmarkの β 法と総称される、時間に関する差分法方法のうち、線形加速度法($\beta=1/6$)である。

時刻 t における振り子の加速度、速度、変位(相対座標)をそれぞれ、 $\ddot{x}_n, \dot{x}_n, x_n$ とし、時刻 $t+\Delta t$ における値をそれぞれ $\ddot{x}_{n+1}, \dot{x}_{n+1}, x_{n+1}$ とする。 $\ddot{x}_n, \dot{x}_n, x_n$ と地盤の振動 \ddot{y}_{n+1} etc. は既知であり、これらから Δt 後の振り子の加速度は、

$$\ddot{x}_{n+1} = - \frac{\ddot{y}_{n+1} + \frac{\mu}{m} \left(\dot{x}_n + \frac{1}{2} \ddot{x}_n \Delta t \right) + \frac{k}{m} \left(x_n + \dot{x}_n \Delta t + \frac{1}{4} \ddot{x}_n \Delta t^2 \right)}{1 + \frac{1}{2} \frac{\mu}{m} \Delta t + \frac{1}{4} \frac{k}{m} \Delta t^2} \quad (7)$$

と求められる。これを用いて、速度と変位は、

$$\dot{x}_{n+1} = \dot{x}_n + \frac{1}{2} (\ddot{x}_n + \ddot{x}_{n+1}) \Delta t \quad (8)$$

$$x_{n+1} = x_n + \dot{x}_n \Delta t + \frac{1}{4} (\ddot{x}_n + \ddot{x}_{n+1}) \Delta t^2 \quad (9)$$

のように計算される。計算される加速度、速度、変位は地盤に対する相対値であるが、絶対的な振動が必要な場合には、(1)を用いて簡単に変換できる。

2.2 多質点系の振動

ここでいう多自由度系（多質点系）とは、1次元の多質点系である。従ってその振動は、2.1の単振り子が連成したものとして扱うことができる。加速度や速度はベクトルとなるが、これらを $\{\ddot{x}\}$, $\{\dot{x}\}$ のように表す。質量、粘性、バネ定数はマトリックスとし、それぞれ $[\mathbf{M}]$, $[\mathbf{C}]$, $[\mathbf{R}]$ と表すと、振動の方程式は次のようになる。

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{x}\} + [\mathbf{C}]\{\dot{x}\} + [\mathbf{R}]\{x\} = -[\mathbf{M}]\{\ddot{y}\} \quad (10)$$

ここで $[\mathbf{M}]$ は対角行列である。 $[\mathbf{C}]$, $[\mathbf{R}]$ は幅が3の帯状行列であり、その成分は次のとおりである。

$$c_{i,i-1} = -\mu_i, \quad c_{i,i} = \mu_i + \mu_{i+1}, \quad c_{i,i+1} = -\mu_{i+1}, \quad (11)$$

$$r_{i,i-1} = -k_i, \quad r_{i,i} = k_i + k_{i+1}, \quad r_{i,i+1} = -k_{i+1}, \quad (12)$$

ここで前節と同様に添え字 $n+1$ は現ステップの未知量を、 n は前ステップの既知量を表すものとする。線形加速度法による解法は、次の連立方程式を解くことに相当する。

$$\{x_{n+1}\} = \{x_n\} + \{\dot{x}_n\} \Delta t + \frac{1}{3} \{\ddot{x}_n\} \Delta t^2 + \frac{1}{6} \{\ddot{x}_{n+1}\} \Delta t^2 \quad (13)$$

$$\{\dot{x}_{n+1}\} = \{\dot{x}_n\} + \frac{1}{2} (\{\ddot{x}_n\} + \{\ddot{x}_{n+1}\}) \Delta t \quad (14)$$

$$\{\ddot{x}_{n+1}\} = -[\mathbf{M}]^{-1} [\mathbf{C}]\{\dot{x}_{n+1}\} - [\mathbf{M}]^{-1} [\mathbf{R}]\{x_{n+1}\} - \{\ddot{y}_{n+1}\} \quad (15)$$

この連立方程式は、加速度について次のように解かれる。

$$\{\ddot{x}_{n+1}\} = [\overline{\mathbf{M}}]^{-1} \{F\} \quad (16)$$

ここで $[\overline{\mathbf{M}}]^{-1}$ は次のように定義されるマトリックス $[\overline{\mathbf{M}}]$ の逆行列である。

$$[\overline{\mathbf{M}}] = [\mathbf{M}] + \frac{\Delta t}{2} [\mathbf{C}] + \frac{1}{6} \Delta t^2 [\mathbf{R}] \quad (17)$$

またベクトル $\{F\}$ は次のように与えられる。

$$\begin{aligned} \{F\} = & -[\mathbf{M}]\{\ddot{y}_{n+1}\} - [\mathbf{C}]\left(\{\dot{x}_n\} + \frac{\Delta t}{2} \{\ddot{x}_n\}\right) \\ & - [\mathbf{R}]\left(\{x\} + \{\dot{x}_n\} \Delta t + \frac{1}{3} \{\ddot{x}_n\} \Delta t^2\right) \end{aligned} \quad (18)$$

(17) によって、現ステップの加速度が求められれば、これを (14)、(13) に順次代入して、速度と変位を求めることができる。これらは地盤に対する相対値であるが、1質点系の場合と同様に、(1) によって加速度や変位の絶対値に簡単に変換できる。

2.3 模擬地震動（大崎スペクトル）の作成

コンピューターで模擬地震動を作る方法はいろいろ提案されているが、原子炉施設の耐震計算においては、大崎順彦により考案された大崎スペクトルとよばれる特性をもった模擬地震動がよく使われる。大崎スペクトルの基本的な考え方は、大崎の著書⁽¹⁾に詳細に述べられているので、ここでは概略を簡単に述べるにとどめる。

実際に記録される地震動は条件により種々様々である。大崎スペクトルでは、これは基盤（ほぼ岩盤と同じと考えて良い）の上に様々な特性をもった層が重なり、その上で地震が観測されるためであって、基盤の振動そのものは、かなり規則性をもったものであると考える。多くの地震動を解析した結果に基づいて、基盤の振動に関する次のような規則性が仮定される。

- 次の量が地震の規模（マグニチュード）だけで決定される。
 - ① 震源の深さ
 - ② 地震の継続時間、および立ち上がり、主要動、収束の各期間の長さ。
- 次の量がマグニチュードと震源距離（震央距離と深さの平方和）だけで決定される。
 - ③ 地震の最大速度（修正金井式を用いる）
 - ④ 周期 0.02 秒と 2 秒の間での周波数特性（速度応答スペクトル）

模擬地震は一般的に次のように、正弦関数の重ね合わせとして表現される。加速度をベースにすると、

$$\ddot{y}(t) = \sum_i A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (19)$$

ここで ω_i は i 番目の成分の円振動数であり、 A_i はこの成分の（加速度についての）振幅である。 A_i と ω_i のセットが、上の④で述べた周波数特性を与える。 φ_i は上の波にランダム性をあたえるための位相であり、乱数によって決定される。

(19) 式のような地震を、固有周期 T 、減衰定数 h の単振り子に入力すると、その時刻歴から最大加速度、最大速度、最大変位が決定される。さらに周期 T を変えてこのような計算を繰り返すと、最大加速度、最大速度、最大変位が T の関数として求められる。これらを、加速度応答スペクトル、速度応答スペクトル、変位応答スペクトルといい、それぞれ $S_a(T)$ 、 $S_v(T)$ 、 $S_d(T)$ と表記する。

大崎スペクトルの本質的な部分は、地震動の特性を速度応答スペクトル $S_v(T)$ として与えるものである。いいかえれば、大崎スペクトルは基盤の振動特性をあたえるものであるが、基盤の振動を直接記述するのではなく、基盤の上に様々な固有周期をもった地層が乗った場合の速度応答スペクトルという形で提示するものである。

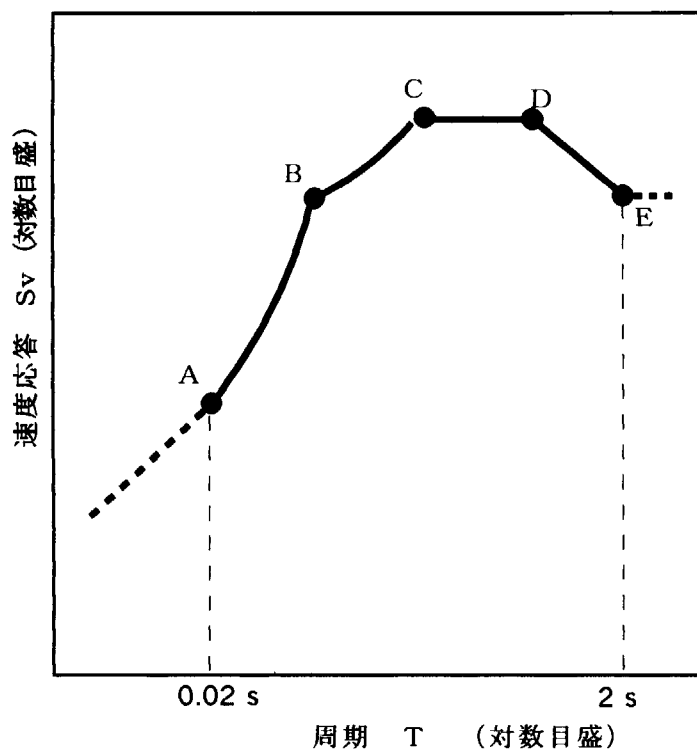


Fig. 3 大崎スペクトルのコントロールポイント

Table 1 大崎スペクトルのコントロールポイントの座標

(a) 1978年版 (原子力発電所用) ⁽²⁾

マグニ チュード M	震央 距離 (km)	コントロールポイントの座標									
		A		B		C		D		E	
		T	S _v	T	S _v	T	S _v	T	S _v	T	S _v
6	5	0.02	1.2	0.10	17	0.13	21	0.35	21	2.0	3
	15		0.6	0.10	10	0.25	24	0.60	24		12
	60		0.5	0.10	10	0.33	33	0.70	33		20
7	10		0.7	0.10	11	0.23	24	0.45	24		7
	45		0.5	0.13	11	0.33	28	0.80	28		19
	150		0.5	0.14	15	0.35	38	0.90	38		32
8	25		0.6	0.10	10	0.30	30	0.50	30		12
	120		0.5	0.20	18	0.35	32	1.00	32		26
	350		0.5	0.22	26	0.37	44	1.20	44		42

(b) 1994年版 (一般建築物用) ⁽¹⁾

マグニ チュード M	震央 距離 (km)	コントロールポイントの座標									
		A		B		C		D		E	
		T	S _v	T	S _v	T	S _v	T	S _v	T	S _v
6	5	0.02	1.22	0.10	15	0.14	21	0.80	21	2.0	9
	15		0.76	0.12	9	0.25	25	0.65	25		12
	60		0.62	0.14	8	0.32	27	0.60	27		15
7	10		0.52	0.20	12	0.40	25	1.20	25		20
	45		0.42	0.28	10	0.45	27	0.90	27		24
	150		0.46	0.28	11	0.50	32	0.80	32		27
8	25		0.28	0.35	4	0.60	30	1.50	30		28
	120		0.30	0.45	10	0.70	33	1.20	33		32
	350		0.36	0.50	18	0.70	38	1.00	38		37

Fig. 3のように、A, B, C, D, Eの5つの固定点について、地震の規模と震央距離に応じて、代表点の周期と応答スペクトルが Table 1 のようにあたえられている。「大崎スペクトル」と称されるものには、原子力施設用のものと一般建造物用のものがあり、それらは Table 1 (a)と Table 1(b) のように若干異なる。計算対象となる地震のマグニチュードと震央距離に対して、Table 1 のデータを内挿して速度応答スペクトルの5つの固定点が求められる。

MOGLJIS コードでは、時系列データの数を 2048 個としている。この場合、1024 個の離散周期値を次のように決める。

$$T_n = \frac{T_d}{n} \quad (n = 1, 2, \dots, 1024) \quad (20)$$

ここで T_d は地震の継続時間である。それぞれ周期の値について上の5つの固定点データを対数内挿して速度応答スペクトル $S_v(n)$ が決定される。

模擬地震動を作成する作業とは、このような応答スペクトル $S_v(T)$ を (19) 式のような時系列データに変換することである。しかし、振動の時系列データと応答スペクトルの間には1対1の対応関係はない。それは (19) にはランダムな位相 ϕ_j という規則的でない要素が含まれているからである。従って計算は上の条件②(地動自体の最大速度)が満足されるように、試行錯誤的に進めなければならない。

具体的には、条件②が満足されるように乱数を変更しながら、次の計算を繰り返すことになる。

(時系列からスペクトルへ) 2.1 で述べた1質点応答計算

(スペクトルから時系列へ) フーリエ逆変換

フーリエ逆変換には、次のような経験則が利用される。すなわち、ある関数 $x(t)$ のフーリエ変換を $F(x(t))$ であらわすと、加速度履歴のフーリエ変換と速度応答スペクトルの間には

$$F(\ddot{x}(t)) \approx S_v(\omega) \quad (21)$$

という関係がほぼ成り立つ。ここで ω は円振動数 ($\omega = 2\pi / T$) である。この関係を逆に用いれば、フーリエ逆変換により速度応答スペクトルから加速度時刻歴が得られる。

2.4 パルス状粗密波に対する応答

従来、耐震計算は比較的遠距離で起こる巨大地震に対する応答に主眼がおかれてきた。その場合には、地震とは震動の繰り返しであり、P波よりもS波が重要であり、上下動よりも横揺れの方が重要であった。しかし、阪神大震災などの経験から、直下型地震の重要性も強調されるようになった。

直下型地震は巨大地震に比べていくつかの異なる特性があるが、そのうちのひとつとして、正弦波的なゆれに対して、衝撃波的な波の重みが大いであるということがある。

パルスの地震波は地震計では測定できないが、ある種の地震に際して「石が跳ぶ」現象がそ

の存在を示している。この現象は古く、19世紀から知られており、1984 長野県西部地震、1990 フィリピン地震、1995 兵庫県南部地震（いわゆる阪神大震災）などでも観察されている⁽³⁾。阪神大震災では、「寝ていたらベッドから体が跳び上がった」、「駐車中の車が宙に浮いて移動した」などといった多数の証言、観察事実があり、同じようなメカニズムを示すものと考えられるが、とりわけ重視されるのは、神戸市須磨区にある敦盛塚という石積みの塚の上部だけが20 cm以上跳び上がったと考えられる確実な根拠が存在することである⁽⁴⁾。従来、この現象はパルス的なS波の作用と解釈されてきたようであるが、敦盛塚の例はむしろP波の作用を示すものではないかと考えられる。それは、

- 上部だけがほぼ垂直に跳び上がっており、下部には変化がみられない。
- この現象が震源断層のごく近傍に限られる。
- これまでの観察例は山の尾根などに多くみられたが、神戸の例は平地である。

等の理由からである。

ある高さの飛び上がりが、どれだけの大きさの運動量がどれだけ短時間に入力した場合に起こるか解析することは、逆に観察された飛び上がり量から衝撃波の性質を推定し、建造物の部材に生ずる最大応力を見積もるのに役に立つであろう。そのような目的から、上下方向の粗密波（P波）の入力に対する応答を計算する簡単なプログラム JUMP を作成した。

JUMP が対象とするのは多層の構造物であるが、上のような目的から、特定の層 i と層 $i+1$ の間が接合されていない切断面となっている場合を考慮している。すなわち、これらの間には圧縮力は働くが引張力は働かないような場合を扱えるようにしている。

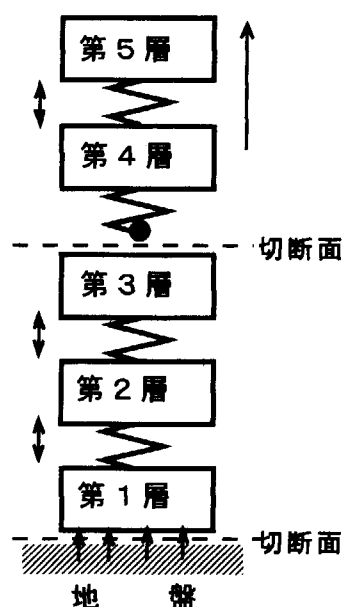


Fig. 4 垂直方向P波解析プログラム JUMP のモデル

Fig. 4 のような多層の構造物を考え、質点番号を下から順に 1, 2, 3, … とする。質点 i について、質量を m_i とし、垂直方向の位置座標（絶対座標）を z_i とする。質点 i と $i-1$ の間のばね定数を k_i とする。このばねは、切断面と隣接しない 2 つの質点間では、距離の変化に従って次のような力を発生させるものとする。

$$F_i = -k_i \{ (z_i - z_{i-1}) - L_0 \} \quad (22)$$

ここで、 F_i は質点 i にはたらく上向きの力(dyne)、 L_0 は歪みのない状態の質点間距離(cm)である。同じ力は質点 $i-1$ に対しても、下向きに働く。

ここで体系中に切断面がある場合を考える。切れ目の上側の質点を k とする。すなわち、 k より上の部分は、 $k-1$ の部分の上に単に乗っているだけとする。質点 1 と地盤の間は常に切断面であるものとする。切断面の上下の質点には隣接する質点からの弾性力が働かない場合がある。これを考慮して計算式を作るために、2 つの量 δ_{ui} 、 δ_{di} を導入する。

$\delta_{ui}=1$: 質点 i の上側に切断面がない場合、または上側に切断面があるが、圧縮状態にある場合。上からの力が i に伝わる。

$=0$: 上側に切断面があり、かつ、質点間距離が中立状態より大きい場合。

$\delta_{di}=1$: 質点 i の下側に切断面がない場合、または下側に切断面があるが、圧縮状態にある場合。下からの力が i に伝わる。

$=0$: 下側に切断面があり、かつ、質点間距離が中立状態より大きい場合。

これらの δ を用い、また各質点の下側の粘性係数を η_i とすると、質点 i の上下方向の運動方程式は次のように書ける。

$$\begin{aligned} m_i \ddot{z}_i - \delta_{ui} k_{i+1} \{ (z_{i+1} - z_i) - L_0 \} + \delta_{di} k_i \{ (z_i - z_{i-1}) - L_0 \} \\ - \delta_{ui} \eta_{i+1} (\dot{z}_{i+1} - \dot{z}_i) + \delta_{di} \eta_i (\dot{z}_i - \dot{z}_{i-1}) - m_i \ddot{y}_i = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

ここで \ddot{y}_i は外部から加えられる加速度(gal)であり、

$$\ddot{y}_1 = -g + F/m_1, \quad \ddot{y}_i (i \neq 1) = -g \quad (24)$$

とする。すなわち、一般の質点に対しては働く外力の加速度は重力の加速度 $-g$ のみであり、最下端の質点に対しては重力の他に、地盤からの上向きの力を質点 1 の質量で割った加速度が加わるものとする。

最上端の質点 (N) に対しては、

$$m_N \ddot{z}_N + \delta_{dN} k_N \{ (z_N - z_{N-1}) - L_0 \} + \eta_N (\dot{z}_N - \dot{z}_{N-1}) - m_N \ddot{y}_N = 0 \quad (25)$$

となる。これらの関係は、ベクトル、行列を用いて次のように書ける。

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{z}\} + [\mathbf{R}]\{\dot{z}\} + [\mathbf{C}]\{z\} + \{L\} - [\mathbf{M}]\{\ddot{y}\} = 0 \quad (26)$$

ここで $[\mathbf{M}]$ は各質点の質量 m_i を成分とする対角行列である。 $[\mathbf{R}]$ は剛性マトリックス、 $[\mathbf{C}]$ は粘性マトリックスで、S波の場合の(11)、(12)とほぼ同じであるが、切断面の存在のために若干定義が異なる。上下端以外の質点に関する成分は

$$r_{i,i-1} = -\delta_{di} k_i, \quad r_{i,i} = \delta_{di} k_i + \delta_{ui} k_{i+1}, \quad r_{i,i+1} = -\delta_{ui} k_{i+1}, \quad (27)$$

$$c_{i,i-1} = -\delta_{di} \eta_i, \quad c_{i,i} = \delta_{di} \eta_i + \delta_{ui} \eta_{i+1}, \quad c_{i,i+1} = -\delta_{ui} \eta_{i+1}, \quad (28)$$

である。また、 $\{L\}$ は中立距離に関するベクトルで、その成分は、

$$L_i = -(\delta_{di} k_i - \delta_{ui} k_{i+1}) L_0 \quad (29)$$

である。ただし、最上端では $L_N = -\delta_{dN} k_N L_0$ となる。

方程式(26)はS波の場合の(12)式とほぼ同じであるが、外部から加えられる加速度の符号が逆になっている。これは、ここでは絶対座標を用いているためである。S波の場合と同様に、加速度表現の差分法(線形加速度法、 $\beta=1/6$)によって解く。

前ステップの座標を $\{z_n\}$ 、現ステップの座標を $\{z_{n+1}\}$ とすると、現ステップの加速度、速度、変位の間に次の連立方程式が成立する。

$$\{z_{n+1}\} = \{z_n\} + \{\dot{z}_n\} \Delta t + \frac{1}{3} \{\ddot{z}_n\} \Delta t^2 + \frac{1}{6} \{\ddot{z}_{n+1}\} \Delta t^2 \quad (30)$$

$$\{\dot{z}_{n+1}\} = \{\dot{z}_n\} + \frac{1}{2} (\{\ddot{z}_n\} + \{\ddot{z}_{n+1}\}) \Delta t \quad (31)$$

$$\{\ddot{z}_{n+1}\} = -[\mathbf{M}]^{-1} [\mathbf{C}] \{\dot{z}_{n+1}\} - [\mathbf{M}]^{-1} [\mathbf{R}] \{z_{n+1}\} - [\mathbf{M}]^{-1} \{L\} + \{\ddot{y}_{n+1}\} \quad (32)$$

現ステップの加速度ベクトルは次のように、S波に対する多質点系の応答の場合とほぼ同様に決定される。

$$\{\ddot{z}_{n+1}\} = [\mathbf{M}']^{-1} \{F'\} \quad (33)$$

ここで $[\mathbf{M}']^{-1}$ は次式で定義されるマトリックス $[\mathbf{M}']$ の逆行列である。

$$[\mathbf{M}'] = [\mathbf{M}] + \frac{\Delta t}{2} [\mathbf{C}] + \frac{\Delta t^2}{6} [\mathbf{R}] \quad (34)$$

また、ベクトル $\{F'\}$ は次のように定義される。

$$\begin{aligned} \{F'\} = & [\mathbf{M}] \{\ddot{y}_{n+1}\} - \{L\} - [\mathbf{C}] \left(\{\dot{z}_n\} + \frac{\Delta t}{2} \{\ddot{z}_n\} \right) \\ & - [\mathbf{R}] \left(\{z_n\} + \{\dot{z}_n\} \Delta t + \frac{1}{3} \{\ddot{z}_n\} \Delta t^2 \right) \end{aligned} \quad (35)$$

(33)により、現ステップの加速度が決定され、これを(30)、(31)に代入して現ステップの速度、変位が計算される。

最下端の質点に対しては、(2.4)により地盤からの力だけが一種の境界条件となっているが、位置に関する境界条件は規定されていない。これに

$$z_1 \geq 0 \tag{3.6}$$

という境界条件を課すことにする。これは、建造物が全体として飛び上がることはあっても地盤にめり込むことはない、ということの意味する。

3. プログラム構成と入出力

3.1 模擬地震動作成プログラム MOGIJIS

3.1.1 計算の流れ

大崎の著書⁽¹⁾には、大崎スペクトルを用いて模擬地震動を作る具体的な方法が示されている。また、FORTRAN ソースリストも公開されている。MOGIJIS は、このアルゴリズムにほぼ忠実に従って模擬地震動を作成するものであるが、プログラムそのものは全く独立である。Visual FORTRAN を用いてプログラミングを行い、PC上で実行されるが、使用している FORTRAN 言語はごく一般的なもののばかりである。

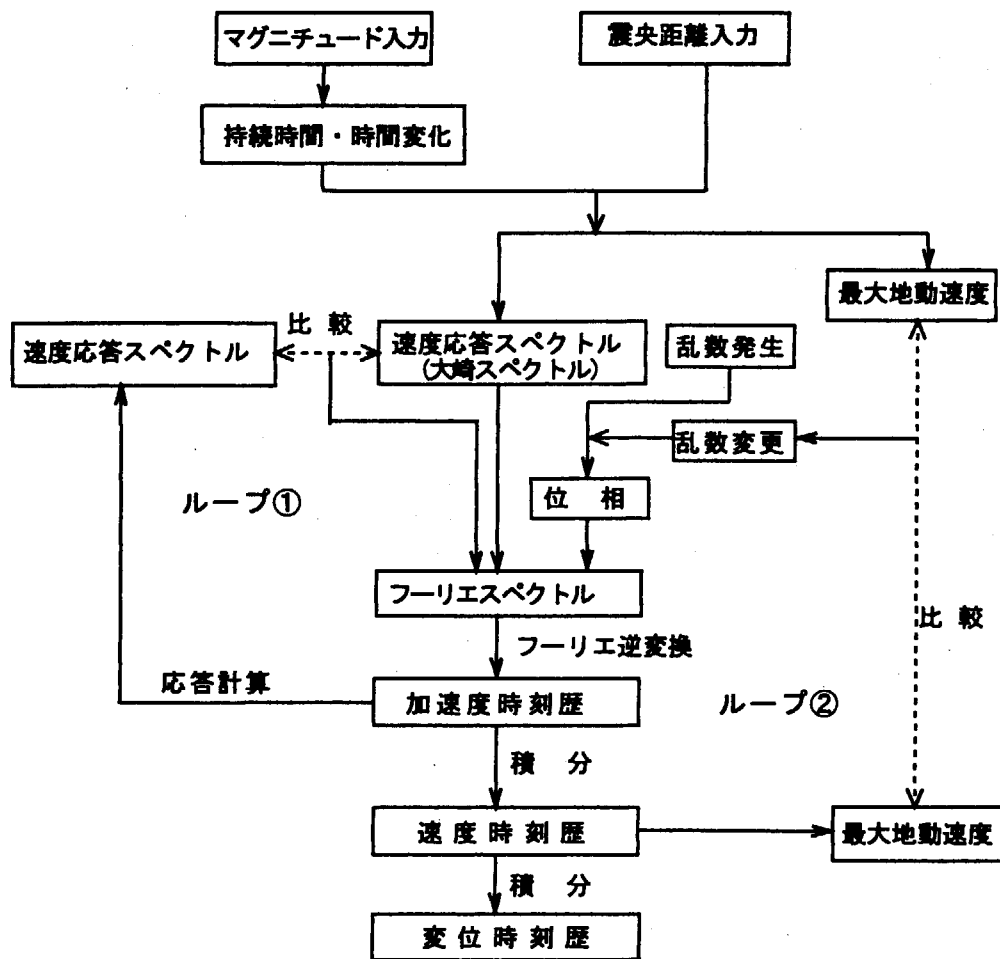


Fig. 5 模擬地震動作成プログラム MOGIJIS の計算の流れ

MOGIJIS の計算の流れを Fig. 5 に示す。またプログラムのサブルーチン構成を付録A 2 に示す。計算の手順は以下のとおりである。

- ① マグニチュードと震源からの水平距離（震央距離）を入力する。
- ② 地震の継続時間が久田の式で計算され、また主要動の継続時間等が計算される。
- ③ 基盤の振動速度の最大値が修正金井の式により計算される。
- ④ 時刻歴を計算するポイント数を 2048 とする。これにより、応答スペクトルとフーリエ変換における周期ポイント数は 1012 となる。
- ⑤ プログラムには Table 1 が格納されている。原子力発電所用と一般建造物用のいずれかを入力で選ぶ。これをマグニチュードと距離を用いて内挿する。これによって5つの周期点A, B, C, D, Eの周期と速度応答値が決められる。(サブルーチン OHSAKI)
- ⑥ 1012 個の離散周期を、(20) 式によって決める。この 1012 個の離散周期値について、速度応答スペクトルを、Fig. 3 の周期点A, B, C, D, Eに対応するスペクトルの内挿によって求める。その際、区間C-D, D-Eについては単純に対数直線内挿する。区間A-B, B-Cは曲線であり、 S_v/T について算術直線内挿を行う。これは加速度について内挿することに相当する。区間 $T < T_A$ については、 S_v/T について直線外挿し、 $T > T_B$ については、 $S_v = S_v(T_E)$ とする。

(サブルーチン TIMSET2)

- ⑥ 1012 個の周期（高調波）それぞれについて、ランダムな位相角を、乱数を用いて決める。(サブルーチン ISOU)
- ⑦ ここまでの計算で、地震の速度時刻歴を

$$\dot{x}(t) = \sum_i A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (37)$$

と表した場合の、円周波数 ω_i が(20)式の周期から、また振幅 A_i が大崎スペクトルから、さらに位相角 φ_i ($0 < \varphi_i < 2\pi$)が乱数によって決定されたことになる。これにそのまま離散時刻を次々に代入すれば、速度時刻歴は計算できる。

しかし、この方法では、2048x1012 という大きな数の回数だけ、三角関数の計算が必要になり、現代の高速PCでも時間がかかる。このため、 ω_i 、 A_i 、 φ_i に対してフーリエ逆変換を行って、地震の加速度時刻歴を計算する。

(サブルーチン FTOR2、 詳細は文献(1)参照)

- ⑧ ここで得られた時刻歴は、基盤の振動の加速度時刻歴である。これを1回積分すれば速度の時刻歴が、さらにもう一度積分すれば変位の時刻歴が得られる。
- ⑨ この積分を単純に実行すると、基準点のわずかな誤差が蓄積して、変位で見た場合に振動がまったくなくなってしまう場合が多い。このために基線補正を行って、⑨の計算を

繰り返す。(ただし、基盤上の地盤または建造物の応答を計算する場合には、⑨の計算は必要ない。⑨と⑩は、基盤の振動そのものを表示するためのものである。)

- ⑩ 1012 個の異なる周期をもった (減衰定数は 0.05 で固定) 地盤、または建造物について、(4) 式を積分して応答を計算する。この場合には、(4) 式の \ddot{y} が⑧で計算された基盤の加速度時刻歴であり、これに従って上部構造の加速度 $\ddot{x}(t)$ 、速度 $\dot{x}(t)$ 、変位 $x(t)$ が (4) 式の数値積分によって計算される (サブルーチン RESP2)。
- ⑪ 1012 個の異なる周期について、速度の最大値をそれぞれ求めれば、その全体が速度応答スペクトルになり、⑥で計算した大崎スペクトルと一致するはずである。しかし両者は、完全には一致しない。これは、地震の加速度時刻歴を、(21) 式の近似的な関係を用いて求めたためである。そこで、フーリエ逆変換に用いる A_i の値を、不一致の程度に応じて修正し、⑧から⑪までの計算を繰り返す。通常 4 回程度で収束する。
- ⑫ 応答計算による速度応答スペクトルが大崎スペクトルに一致しても、もうひとつの条件である、最大地動速度が修正金井式に一致するとは限らない。これは、位相角を乱数によって与えているので、そのランダム性により、たまたま最大地動速度が大きくなったり小さくなったりすることがあるからである。このため、不一致が大きい場合には、新たに乱数を発生させて、⑦から⑪までの計算を繰り返す。
- ⑬ 応答スペクトルと最大地動速度が目標に一致すれば、応答計算で $\ddot{x}(t)$ 、 $\dot{x}(t)$ 、 $x(t)$ が求まっているので、計算は終了である。これらをファイルに書き出す。

3.1.2 入出力データ

MOGIJIS は入力データが少ないので、会話型で実行するようになっている。入力データは次の 5 つであり、画面の指示 (英語) に従って固定 FORMAT で入力する。

- 地震のマグニチュードと震央距離 (km)
- 原子力発電所用と一般用の、いずれのスペクトルを使用するか。
- (一連の計算の収束後) 画面に表示された修正金井式による最大地動速度と、計算された最大地動速度の一致は十分かどうかの判断。
- (不十分な場合) 新しい乱数発生シード数。
- 計算結果をファイル出力するかどうか指示する。

乱数発生シードは正の整数であり、十分大きければ任意の数でよい。乱数発生は、2 つの地動速度が十分一致するまで繰り返す。

ファイル出力を選択した場合には、**fout.dat** という名前の時刻歴のデータ・ファイルが実行ファイルを格納したフォルダー内に作成される。このファイルには、加速度、速度、変位の時刻歴データとそれぞれの応答スペクトル (減衰定数 0.05 の場合) が Fig. 6 のような形で格納される。

タイトル							
規模・距離							
時刻 (s)	加速度 (gal)	速度 (kine)	変位 (cm)	周期 (s)	加速度応答 (gal)	速度応答 (kine)	変位応答 (cm)
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
2048	2048	2048	2048	1012	1012	1012	1012

Fig. 6 MOGLJIS, RESPONSE の時系列データ出力ファイルの配列
(このままの形で次の計算の入力ファイルとして使用できる。)

MOGLJIS は独自のプロット機能はもっておらず、上記のファイルを EXCEL のような表計算ソフトに読み込んで、ユーザーが自分の好みの作図を行うことになっている。データの移送にあたってデータの区切り位置に狂いが生ずることがあるが、これは修正できる。

3.2 1 質点系応答計算プログラム RESPONSE

3.2.1 計算の流れ

RESPONSE は 1 質点系応答計算プログラムであり、の計算のうち、①の部分で独立させたものに過ぎない。また、減衰定数が 0.05 の建造物または地盤の応答については、MOGLJIS 自身が応答スペクトルを計算し、出力している。従って RESPONSE の計算が必要になるのは、

- 減衰定数が 0.05 以外の応答スペクトルが必要な場合、
- 基盤に乗った建造物または地盤の振動時刻歴データが必要な場合、

に限られる。入力データは MOGLJIS で計算された基盤の振動の加速度時刻歴であり、ファイルからデータが転送される。これに基づいて、すべての固有周期について応答（加速度、速度、変位）の時刻歴が計算される。

1 質点系の振動の時刻歴は、すべての固有周期について計算されるが、これらをすべて出力データとすると、データの量が過大になる。このため、出力データとして記録される時刻歴は、RESPONSE で入力指定した特定の固有周期と減衰定数の組み合わせの場合に限定している。

3.2.2 入出力データ

RESPONSE は、MOGLJIS による基盤の振動時刻歴データに基づいて応答計算を行うものであるから、MOGLJIS の出力ファイルを入力データとして与えなければならない。Fig. 6 のような配列をもった MOGLJIS の出力ファイル (fout.dat) はそのままの形式で RESPONSE の入力データとすることができる。これを、実行ファイルを格納したフォルダー中に、rfin.dat という名前で格納する。

これ以外に必要な入力データは、応答スペクトルを計算するための減衰定数と、出力すべき時刻歴データに対応する固有周期 (s) である。これらは会話型で、画面の指示する FORMAT に従

って入力する。

計算結果は **rfout.dat** という名前のファイルの形で出力される。データの配列は Fig. 6 と全く同じであり、加速度、速度、変位の応答スペクトルと、入力で指定した特定の周期についての応答時刻歴データである。**rfout.dat** はファイル名を変えるだけでそのまま次の **RESPONSE** 計算の入力データとして用いることができる。このように **RESPONSE** は、形式的にはあるステップの出力データを次の入力データとした、逐次重畳計算が可能である。

3.3 多質点系応答計算プログラム SWAY

SWAY のサブルーチン構成を付録 A 3 に示す。計算モデルは 2.2 で述べたとおりであり、振動の時刻歴がベクトルになること以外は、**RESPONSE** と異なることはない。ただし、タイムステップの刻み方は **RESPONSE** の場合とはかなり異なっている。**RESPONSE** では、各タイムステップは入力データとして用いた **MOGLJIS** における 2048 点のステップをそのまま用いている。**SWAY** では、多質点のためにこれより細かいステップが必要な場合があり、そのために入力でステップ幅を指定するようになっている。

また、細かいタイムステップ刻みのデータをすべて出力するとデータの量が過大になるため、計算のためのステップ幅と記録のためのステップ幅は区別して入力指定するようになっている。また、出力すべき質点番号とデータの種別（加速度、速度、等）も入力データで指定するようにしている。

入力データは入力ファイルの形で与える。実行ファイルが格納されているフォルダー内に、次の名前のファイルを用意する。

rfin.dat : **MOGLJIS** または **RESPONSE** の出力ファイル

cond.dat : 計算条件を入力するファイル

cond.dat には、次の 2 つの Namelist 入力データを、この順に書き込む。

Namelist /SINGLE/

Namelist /ARRAY/

これらの Namelist のデータ内容は Table 2 に示すとおりである。この他にデバッグランの場合を考慮した画面会話がひとつだけあるが、これは単純にリターンすればよい。

Table 2 SWAY の入力ファイル cond.dat の内容

(1) Namelist /SINGLE/

変数名	最大値	内 容
TITCAL		計算の表題 (A60)
IMAX	30	節点 (質点) の数
NST	30	タイムステップ幅を指定する表の大きさ
HGT		多質点系の全体高さ (cm)
NTREC	30	計算結果をファイル出力する時間幅を指定する表の大きさ
IABS		オプション =0: 振動を地盤に対する相対座標系で表示 =1: 振動を絶対座標系で表示
IDEBUG		通常は =0 とする。=1 とするとファイル出力しない。

(2) Namelist /ARRAY/

配列名	大きさ	内 容
AMV(I), I=1,IMAX	30	質点 I の質量 (g)
SCON(I), I=1,IMAX	30	質点 I の下側のばね定数 (dyne/cm)
ATTEN(I), I=1,IMAX	30	質点 I の下側の減衰定数
TST(2,N), N=1,NST	2,30	タイムステップ幅を指定する表 TST(1,N): 時刻 (s) TST(2,N): タイムステップ幅 (s) タイムステップ幅はこの表を内挿して決定される。
TIREC(2,N), N=1,NTREC	2,30	ファイル出力を行う時間間隔を指定する表。全体のデータ ポイント数が 1000 個以下になるように、設定する。たと えば、地震の継続時間が 30 秒であるとすれば、平均して 0.03 秒以上に設定しなければならない。 TIREC(1,N): 時刻 (s) TIREC(2,N): 記録を行う時間間隔 (s) 実際の間隔はこの表を内挿して決定される。
NREC(K)	30	ファイル出力を行うデータの種別と質点を指定する配列。 $NREC(K)=100*L + I$ で決定される 3 桁または 4 桁の整数を入力する。 ここで I は質点の番号である。 L はデータの種別で L=1: 加速度 =2: 速度 =3: 変位 =4: 局所相対変位 (質点 I と I-1 の相対変位) である。 必要数だけ続けて入力し、その後にゼロを入力して終わ りを指定する。

計算結果は、次の2つのファイルに出力される。

rfprint.dat : 入力データと計算結果の概要(最大ゆれ等)のプリントアウト

rfout.dat : NRECで指定した時刻歴データ

rfout.datのデータは

時刻、NREC(1)のデータ、NREC(2)のデータ、...

の順に配列されており、EXCELのような表計算ソフトで表示し、グラフ化できるようになっている。

3.4 粗密波応答計算プログラム JUMP

3.4.1 計算の流れ

JUMPは垂直方向の粗密波用であるが、多質点応答解析プログラムであるから、構成はSWAYとほぼ同じである。ただし、構造物の途中で切れ目がある場合を扱うので、毎ステップそこで分離が起こっているかどうかチェックし、それによって(23)式に用いる δ の値を決定している。

本プログラムは、振動入力に対する応答も扱えるが、最下端の質点に与えられる衝撃に対する応答の計算を重視している。従って外部からの入力は、加速度という形ではなく、力積すなわち運動量としている。具体的には、最下端に入力する運動量の時間割合すなわち力 F を時刻歴データ $F(t)$ として与える。一定量の力 F が時間幅 Δt の間だけ投入されたとすれば、下端から投入される上向きの運動量の総量は $F \Delta t$ となる。この力を次のように最下端の上向き加速度に変換して、多質点計算を行う。

$$a_1 = \frac{F}{m_1} - g \quad (38)$$

ここで m_1 は最下端の質点の質量、 g は重力の加速度である。

計算結果は、通常の耐震計算の場合と同じく、加速度、速度、変位を出力できるようにしてあるが、特に重視しているのは隣接質点間の距離の変化である。次のように定義される変形量を、変数EPS(i)として出力する。

$$\varepsilon = z(i) - z(i-1) - L_0 \quad (39)$$

ここで L_0 は中立状態での質点間の距離である。一般の質点に対しては、 ε / L_0 が歪みに相当する。質点 i が切断面の上側である場合には、 ε の正の値は局所的なジャンプ量を与える。負の場合には、一般の質点と同様に ε / L_0 が圧縮歪みを与える。

3.4.2 入出力データ

JUMPの入力データは、SWAYと同様にNamelistデータを格納したファイルによって行う。

(デバッグの場合を考慮した会話が1つだけあるが、これは単純にリターンすればよい。)

実行ファイルを格納したフォルダーに、shock.datという名前の入力ファイルを作る。

shock.dat の内容は、Table 3 に示すような2つの Namelist データから成る。内容はほぼ SWAY の cond.dat と同様であるが、若干の相違がある。

Table 3 JUMP の入力ファイル shock.dat の内容

(1) Namelist /SINGLE/

変数名	最大値	内 容
TITCAL		計算の表題 (A60)
IMAX	30	節点 (質点) の数
NST	30	タイムステップ幅を指定する表の大きさ
NGF	20	運動量入力履歴表の大きさ
HGT		多質点系の全体高さ (cm)
NTREC	30	計算結果をファイル出力する時間幅を指定する表の大きさ
KCUT		切断面の上側の節点番号
IDEBUG		通常は =0 とする。=1 とするとファイル出力しない。

(2) Namelist /ARRAY/

配 列 名	大きさ	内 容
AMV(I), I=1,IMAX	30	質点 I の質量 (g)
SCON(I), I=1,IMAX	30	質点 I の下側のばね定数 (dyne/cm)
ATTEN(I), I=1,IMAX	30	質点 I の下側の減衰定数
TST(2,N), N=1,NST	2,30	タイムステップ幅を指定する表 TST(1,N): 時刻 (s) TST(2,N): タイムステップ幅 (s) タイムステップ幅はこの表を内挿して決定される。
TIREC(2,N), N=1,NTREC	2,30	ファイル出力を行う時間間隔を指定する表。全体のデータポイント数が 1000 個以下になるように、設定する。たとえば、地震の継続時間が 30 秒であるとすれば、平均して 0.03 秒以上に設定しなければならない。 TIREC(1,N): 時刻 (s) TIREC(2,N): 記録を行う時間間隔 (s) 実際の間隔はこの表を内挿して決定される。
NREC(K)	30	ファイル出力を行うデータの種別と質点を指定する配列。 $NREC(K)=100*L + I$ で決定される 3 桁または 4 桁の整数を入力する。 ここで I は質点の番号である。 L はデータの種別で L=1: 加速度 =2: 速度 =3: 変位 =4: 局所相対変位 (質点 I と I-1 の相対変位) 必要数だけ続けて入力し、その後にゼロを入力して終わりを指定する。
GF(2,N), N=1,NGF	2,30	最下端からの運動量入力の表。 GF(1,N): 時刻 (s) GF(2,N): 運動量の投入率すなわち力 (dyne)

JUMP の入力データで注意を要するのはタイムステップの刻み幅である。多質点の粗密波解析では、ステップ幅を十分小さくとらないと計算が発散してしまう。タイムステップ幅のめやすは次のとおりである。

- 各質点の質量とばね定数から (6) 式によって計算される固有周期の $1/10 \sim 1/100$ 。
- P波が下端から上端まで到達する時間の $1/10$ 以下。
- 下端から力積が加えられている期間については、この期間の $1/10$ 以下。

計算が終了すると、実行ファイルの存在するフォルダーに次の2つのファイルが作成される。

zprint.dat : 計算結果の要約 (テキスト形式)

zjfile.dat : プロット用時系列データ・ファイル

どちらのファイルにも切断面より上の部分の相対的、局所的な飛び上がり量と、その部分の地表からの絶対的な飛び上がり量の最大値が表示される。時系列データ・ファイルに収録すべき質点とデータの種類の、入力データの配列 NREC で指定する。

4. 計算例

4.1 多質点計算結果と逐次1質点計算結果の比較

これらのコード群については、実測データとの比較による検証は行っていない。ここで紹介する計算例は、「検算」ともいべきチェック計算例、およびいくつかの応用例である。これらのコードには、一般的な質点系モデル以外に経験的なモデルは一切使っていない。したがって、常識的に正常と判断される解が得られれば、離散的な質点系モデルの限界内で検証されたと考えられるからである。

マグニチュードが 7.5 の地震による、震央距離が 20 km での基盤の振動 (大崎スペクトルによる模擬地震) の加速度、速度、変位時刻歴の計算例を Fig. 7 に示す。

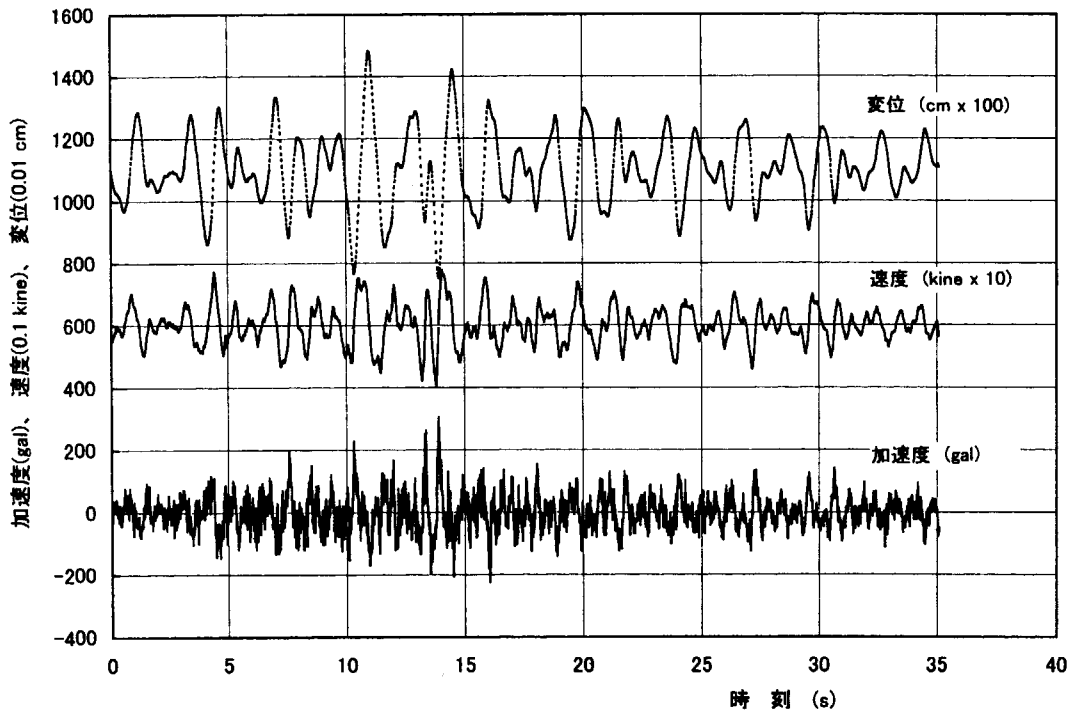


Fig. 7 M7.5, 距離 20 km での大崎スペクトル地震の波形例

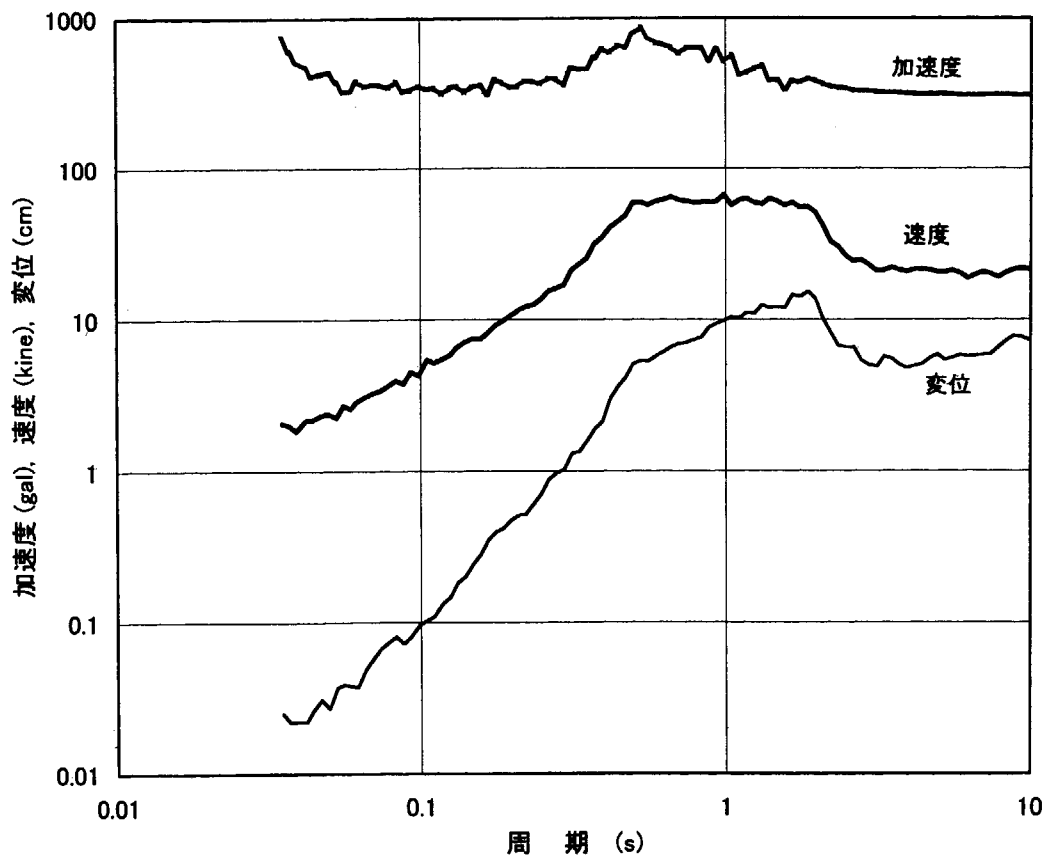


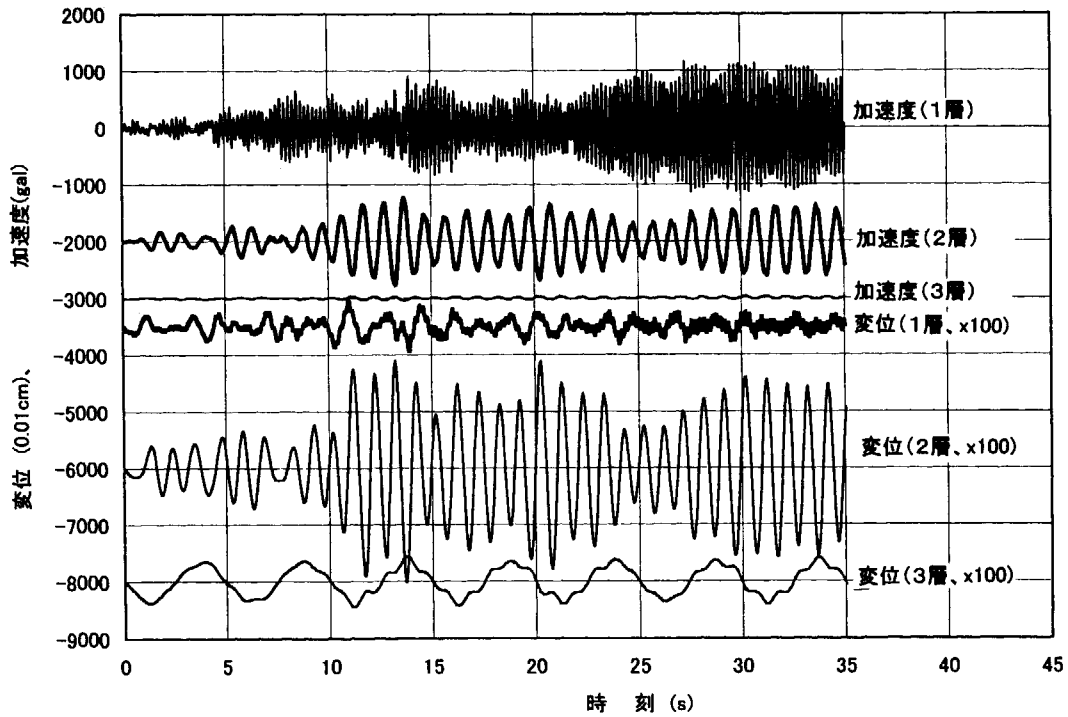
Fig. 8 M7.5, 距離 20 km での大崎スペクトル地震による応答スペクトル

また、これによる応答スペクトル計算結果を Fig. 8 に示す。これは、基盤の上に乗った地盤、または基盤上に直接設置された建造物の振動のスペクトルである。

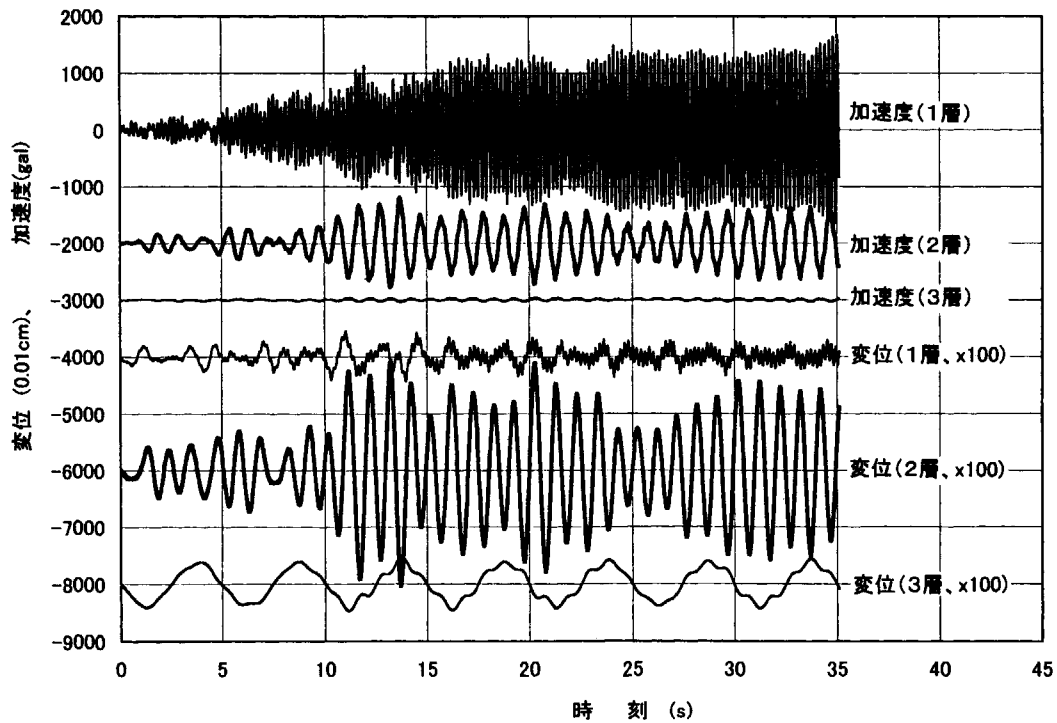
この振動を入力データとして、1 質点応答計算プログラム **RESPONSE** と多質点プログラム **SWAY** の妥当性の同時チェックを次の方法で行った。

基盤上に3層の構造物が設置されたとする。各層の振動は、単純に下から順に決定されるものではなく、連成の効果があるから、これを1 質点計算の積み重ねで扱うことはできない。これは多質点応答解析プログラム **SWAY** で扱うべき問題である。しかし、もし第1層、第2層、第3層の固有周期がかなり大きく相違し、かつ上の層の質量が下の層に比べて桁違いに小さければ、連成の効果は小さいと考えられる。すなわち、上の層は下の層から一方的に影響されるが、下の層に返す影響は無視できるほど小さくなるであろう。このような条件下では、まず1 質点プログラムで第1層の振動を計算し、これを入力データとして第2層の振動を計算し、ということを繰り返しても同じような結果が得られることが期待される。

このような条件で **SWAY** の計算結果と **RESPONSE** の逐次計算結果を比較した。入力用の地震としては、Fig. 7 の M7.5、震央距離 20 km の基盤振動を使用した。3つの層の固有周期は上の層ほど長周期になるように設定した。



(a) 多質点プログラム SWAY による計算結果



(b) 下から順に1質点プログラム RESPONSE 計算を積み重ねた結果

Fig. 9 3層構造物の振動に関する、3質点計算結果と1質点逐次計算の比較
(その1: 各層の固有周期を下から順に 0.2 s, 1 s, 5 s とした場合。)

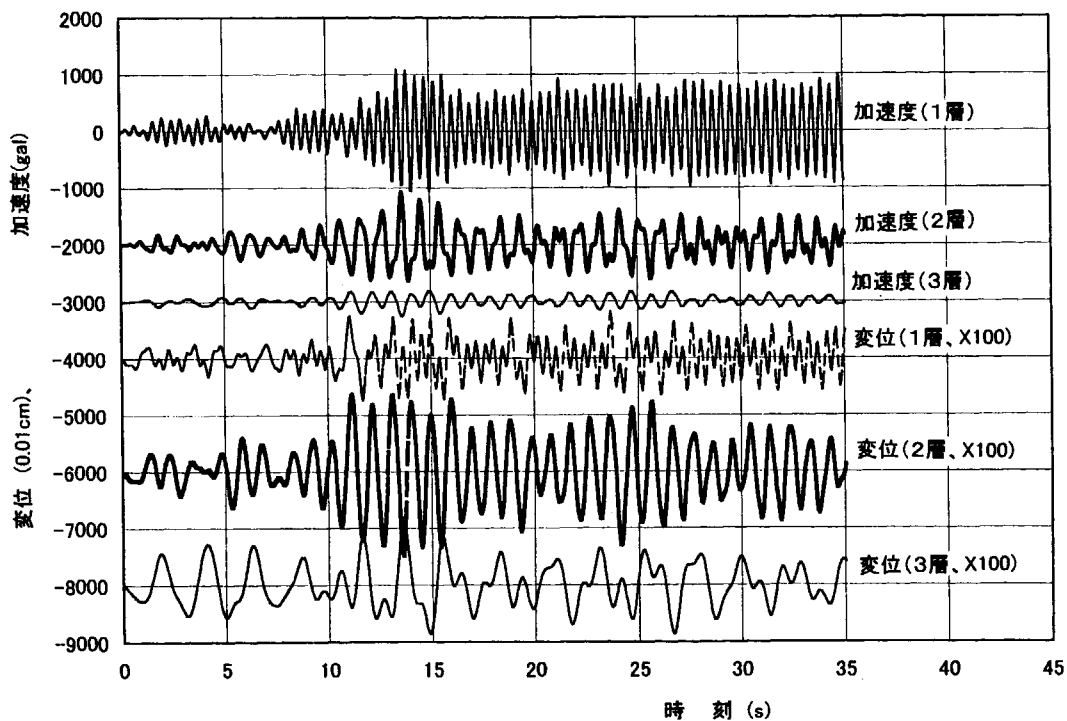
Fig. 9 は第1層、2層、3層の固有周期を 0.2 s、1 s、5 s と大きく変えた場合の結果である。各層の質量は 10^5 g で一定とした。すなわち固有周期の相違は各層のばね定数を変えることで実現させた。簡単のために減衰定数はゼロとした。また、表示された振動は絶対座標系における振動である。これは RESPONSE による逐次計算との比較のためである。

Fig. 9(a) は SWAY の結果を、Fig. 9(b) は RESPONSE による逐次計算の結果を示している。ただし大崎スペクトルのベースである速度応答は省略し、加速度と変位の時刻歴を表示した。

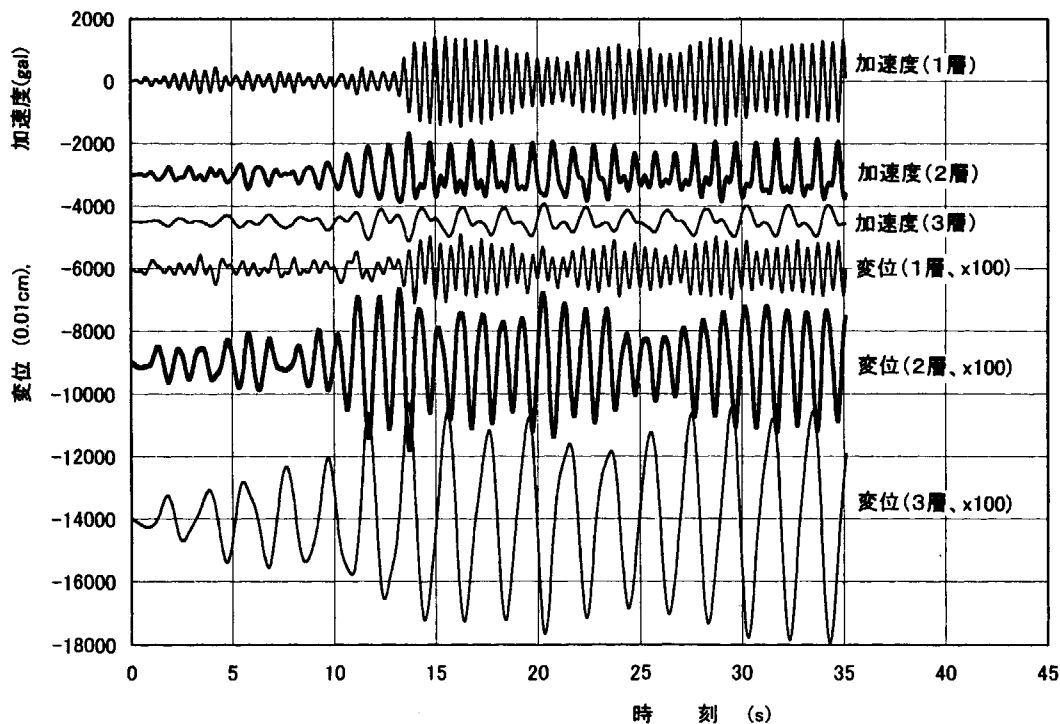
加速度、変位のいずれについても、SWAY の計算結果と RESPONSE の逐次計算結果はよく一致している。すなわち、各層の固有周期が5倍ずつも違う条件では、各層の質量が同じであっても各層の独立性は非常に大きいのである。

一方、Fig. 10 では、3層の固有周期を下から順に 0.5 s、1 s、2 s と2倍ずつ変えた。さらにこの場合は、各層の質量を下から順に 10^7 g、 10^5 g、 10^3 g とした。このように上層から下層への影響が小さくなるようにしたにもかかわらず、Fig. 10 の (a) と (b) を比較すると、第3層の変位が RESPONSE の逐次計算では非常に拡大していることがわかる。すなわち、この場合には1質点計算の重ね合わせでは正しい結果は得られないのである。これらの結果から、連成の効果の有無は質量の大小よりも固有周期が接近しているかどうかで決定されることがわかる。

これらの結果は合理的に理解できるものであり、SWAY および RESPONSE の計算の妥当性を示すものと解釈される。



(a) 多質点プログラム SWAY による計算結果



(b) 下から順に1質点プログラム RESPONSE 計算を積み重ねた結果

Fig. 10 3層構造物の揺れについて、3質点計算結果と1質点逐次計算の比較
(その2:各層の固有周期を下から順に 0.5 s, 1 s, 2 s とした場合。)

4.2 石柱の跳び上がり量の計算

垂直方向の粗密波応答計算プログラム JUMP については、Fig. 11 のように、高さ 1 m、縦、横が 40 cm ずつの花崗岩の石柱を想定し、これに下からパルス状の力が作用した場合の応答を計算した。

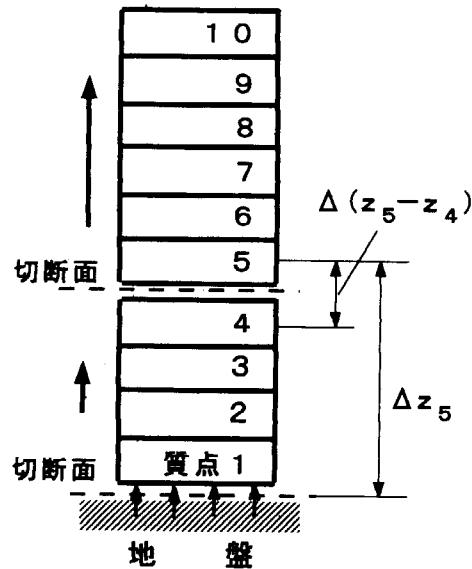


Fig. 11 JUMP の計算例の条件

石柱を 10 の質点に分け、質点 4 と質点 5 の間に切断面があるとした。すなわち、高さ 40 cm の上に 60 cm の石柱を単純に乗せた場合の応答である。

力積（運動量）の全投入量を一定に保っても、力が加わる時間幅によって飛び上がり量は変化する。花崗岩中の平面粗密波の位相速度は 5010 m/s、密度は 2705 kg/m³である⁽⁵⁾。これから、大きな変化が期待されるのは、粗密波が 1 m の石柱の下から上まで伝わるのに必要な時間 0.2 ms 前後でパルス幅を変化させた場合である。

石柱内の伝搬であるから、P 波は単純に平面波であると考えることができる。上の位相速度と密度からヤング率が 6.79×10^{10} Pa となり、これをばね定数に変換して入力データとした。

Fig. 12 は力積 5.8×10^7 dyne · s を時間幅 1×10^{-5} s で与えた場合の石柱の応答である。

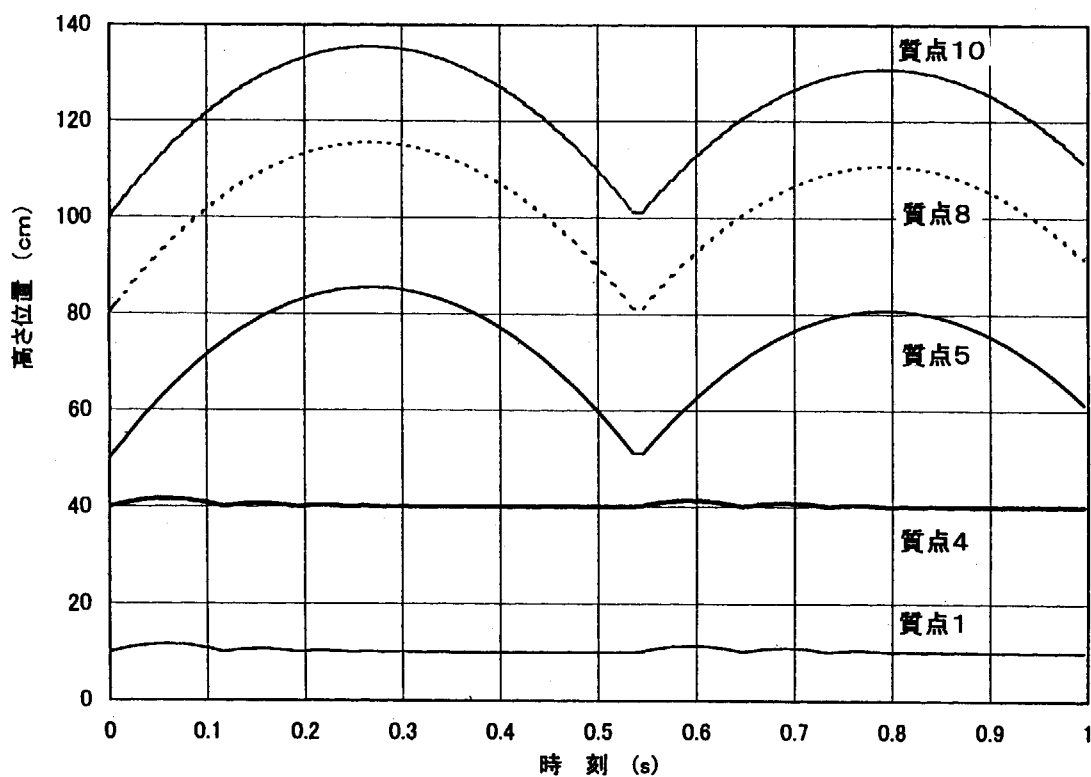


Fig. 12 石積み構造物の各部の高さの変化

(力積 5.8×10^7 dyne s を 時間幅 0.01 ms のパルスとしてあたえた場合。)

縦軸には各節点の高さ位置をとっている。節点5以上すなわち上部の石柱は 30 cm 以上飛び上がり、落下してまた弾んで飛び上がっている。次第に高さが減少するのは、エネルギーの一部が下部石柱を通して地中に戻るためである。この飛び上がり量は、実は上の力積 5.8×10^7 dyne · s が単純に上側の石柱のみに加えられた場合の飛び上がり量より大きい。これは、上下の部分が離れる際に、下側の石柱には下向きの運動量が生じ、正負の運動量の合計に対して保存則が成り立つためである。

石柱各部の応答の、パルス状力積の投入直後の変化を拡大して Fig. 13 に示す。

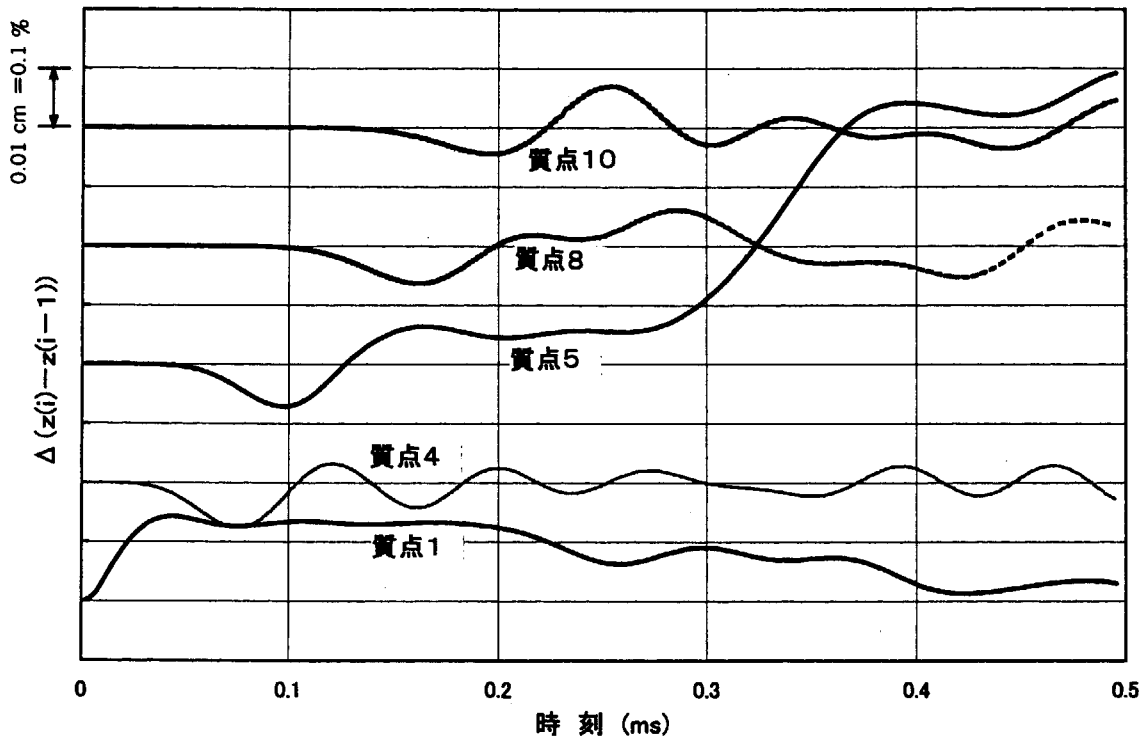


Fig. 13 パルス力積入力直後の質点間距離の変化
(質点5のプラス方向の変化はジャンプ高さとなる。)

この場合は、各質点間距離の増分を縦軸にとっている。従って、切断面のない節点については縦軸の変数は引張方向の歪みとなり、切断面上側の節点についてはジャンプ高さとなる。すべての質点について表示はしていないが、運動量が増えらると下部の質点から順に圧縮状態になること、いったん圧縮状態が最上部に到達した後に上部の石柱が飛び上がることがわかる。

投入された総運動量が一定でも、パルス幅が大きくなると、すなわちゆっくりと投入されると、地中に戻るエネルギーが大きくなってジャンプ高さは減少する。総投入運動量を $5.8 \times 10^7 \text{ dyne} \cdot \text{s}$ とした場合、またその半分の $3.0 \times 10^7 \text{ dyne} \cdot \text{s}$ に固定した場合それぞれについて、パルス幅を段階的に増大させる（すなわち力を減少させる）パラメータ計算を行った。これによるジャンプ高さの変化を Fig. 14 に示す。

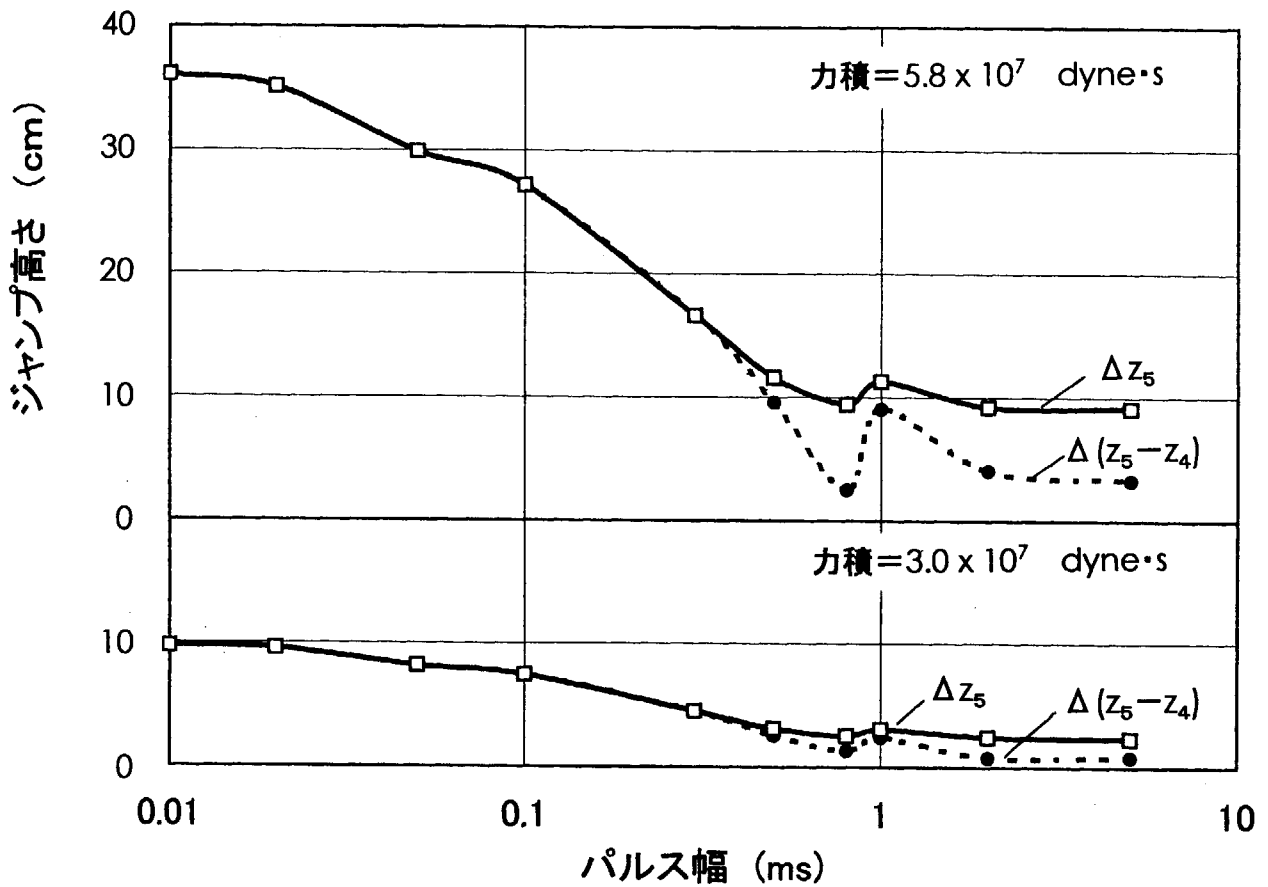


Fig. 14 力積を固定し、パルス幅を変えた場合のジャンプ高さの変化
 (Δz₅と表示したのは、上部の地表からのジャンプ高さ、
 Δ(z₅-z₄)と表示したのは切断面の上下の相対的変位である。)

ここでΔz₅と表示したのは、上部石柱の地表からの絶対的なジャンプ高さであり、Δ(z₅-z₄)と表示したのは上部石柱の、下部石柱に対する相対的なジャンプ高さである。運動量が約 0.3 ms 以下の時間でパルスの投入されると、両者は同じ値になる。これは下部の石柱は跳び上がらず、上部のみが跳び上がることを意味する。0.3 ms 以上の時間をかけて運動量がゆっくりと投入されると、石柱全体としての跳び上がりも起こるようになり、上部のみの分離した跳び上がりはこれに重畳した形になることがわかる。パルス幅が 0.01 ms 程度の短時間になると、飛び上がり量はほぼ一定になる。この関係は運動量の総量の大きさにはよらないことがわかる。

今回の計算は敦盛塚の正確な寸法を模擬したものではないが、おおよその傾向として、阪神大震災において 0.1 ms 程度のきわめて短時間のパルスの加振があったらしいことを示唆して

いる。

石柱等の飛び上がり現象それ自体は、単に面白い現象というに過ぎない。しかし、この現象は直下型地震において、P波が破壊に寄与している可能性につながっている。

最近の電磁式地震計（加速度計）は、固有周期が10 ms程度まで短縮され、100 Hz程度のパルス的な加速度は測定可能になっている⁽³⁾が、実際にはデータ量が膨大になることから、そのような短時間の測定を常時行っているわけではない。つまり、発表される「上下動の最大加速度」とは、これより長い時間にわたって平均化された加速度である。実際の瞬間的な加速度は、パルス幅に反比例して大きくなり、1gより桁違いに大きくなる。

石柱の上部が30 cm程度分離して飛び上がったとして、そのような結果を引き起こすパルス的な加速による圧縮応力を計算結果から求めると、60MPa程度となる。この応力はたいていの材料の破壊強度よりはるかに小さい。従ってそれ自体は問題ではない。しかし剛性の大きい土台の上に柱が立っているような場合、10倍以上の応力の集中が起こることは容易に考えられる。そうすると、柱の破壊強度を超えてしまうことになる。実際、阪神大震災においては、鉄骨の柱がほとんど曲がりも塑性変形もなしに破断した例が報告されている。また、岩盤の上に直接柱を立てた場合には、人工の土台の場合にも増して、そのような効果が起こることが考えられる。

そのような意味でパルス的な加重は重要であるが、これをさらに検討するには、本コードのような単純な1次元コードでなく、少なくとも2次元の解析が必要になろう。

5. おわりに

本報は基本的に計算コード作成の記録であり、なにかの課題についての研究の報告ではない。はじめに述べたように、本コード群は教育目的に加えて、耐震計算用の大型コードを補完できる、簡便な計算ツールを提供することを目的としたものである。開発者の立場からすれば当然のことであるが、使い勝手の良さという目的はかなり達成されたように感じている。あとは使っていただく方々が同じように感じていただくことを願うのみである。

コードの応用例からは、パルス的な強振の効果に関して興味ある結果が得られた。すなわち、定性的な考察から予想されたことではあるが、石積みの構造物において上部の石だけが跳ぶ現象は、粗密波が下端から上端まで伝搬するのに要する時間以下の時間幅でパルスが加えられたときに起こり、加えられた運動量の大きさにはほとんど依存しない、ということが計算で確かめられた。

このような現象は、実用的には柱などに応力集中がおこる条件下で重要な意味をもつと考えられる。そこで今後の展開としては、コードの3次元化、または少なくとも2次元化が必要であると考えられる。

参考文献

- (1) 大崎順彦、「新・地震動のスペクトル解析入門」、1994、鹿島出版会
- (2) 矢川元基、一宮正和、「原子炉構造設計」、1988、培風館
- (3) 防災科学技術研究所ウェブテキスト、「強振動の基礎」、2000、
<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/gk/publication>
- (4) 松田時彦、「活断層」、岩波新書
- (5) Landolt-Boernstein Data Book, NS, Vol. 1b, 1982, Springer-Verlag

付録A1 模擬地震動作成に使われる経験式

(1) 震源の深さ

震源の深さはマグニチュードによって決まっていると考える。すなわち、深いところで起こる地震ほど大地震であるとするものである。震源深さは次式で与えられるとする。

$$d = 10^{0.353M - 1.435} \quad (\text{A1})$$

ここで d は震源深さ (km)、 M はマグニチュードである。震央距離を R (km) とすれば、震源距離は

$$D = \sqrt{d^2 + R^2} \quad (\text{A2})$$

で与えられる。

(2) 地震の継続時間

地震の継続時間 (始まりから、震幅が主要動の震幅の $1/10$ 程度まで減衰するまでの時間) T_d は、久田式により与えられる。

$$T_d = 10^{0.31M - 0.774} \quad (\text{A3})$$

継続時間は、立ち上がり時間、主要動部分、減衰部分から成り、それぞれの部分の時間比は表に与えられている。

(3) 解放基盤上の最大速度

最大速度 v_{\max} (cm/s) は、修正金井式とよばれる次式によって計算される。

$$v_{\max} = 10^{0.61M - P \log D - Q} \quad (\text{A4})$$

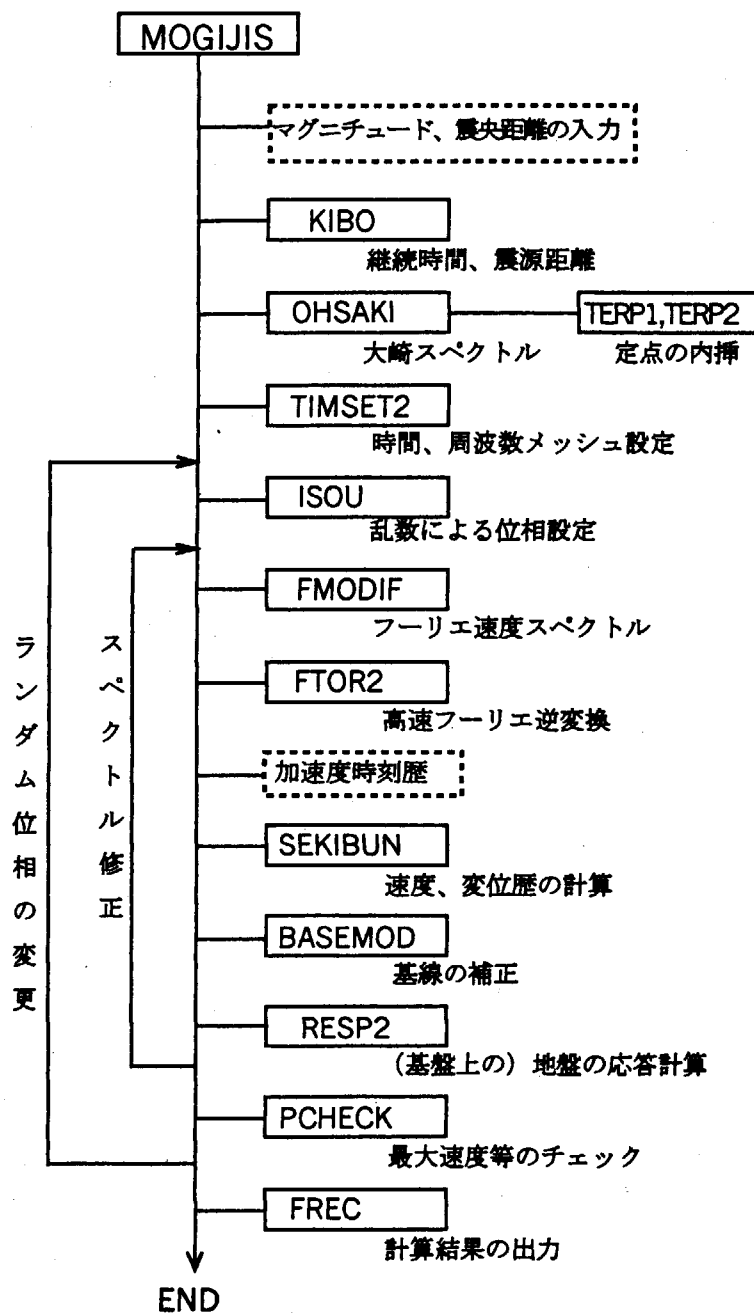
ここで M はマグニチュード、 D は震源距離(km)であり、

$$P = 1.66 + 3.60/D$$

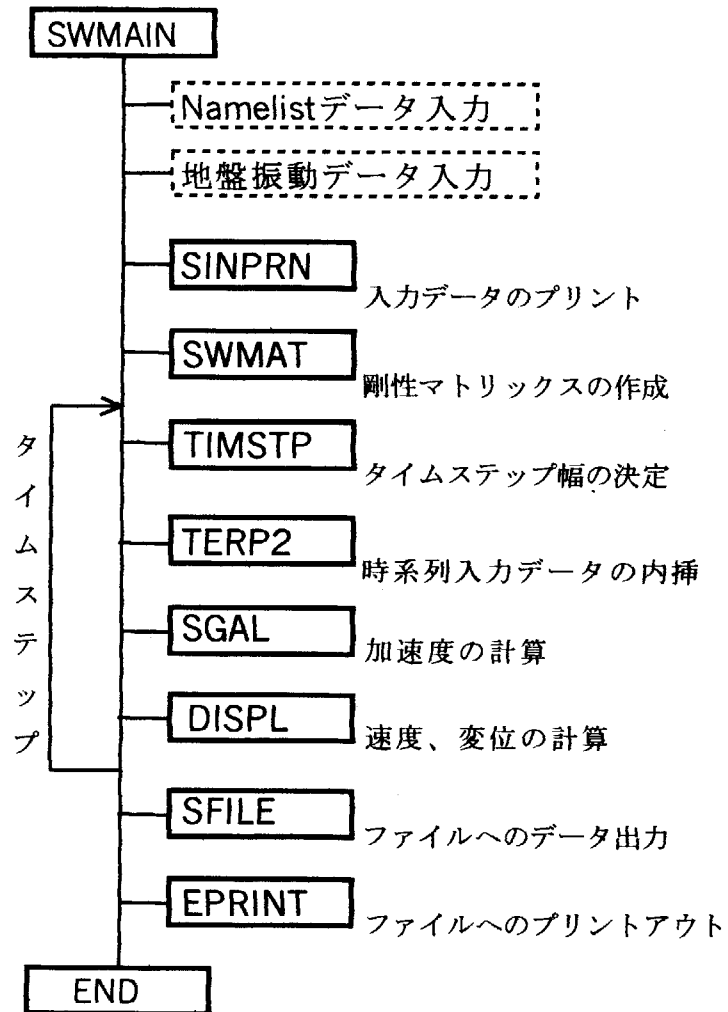
$$Q = 0.631 + 1.83/D$$

である。

付録A2 MOGIJIS のサブルーチン構成



付録 A3 SWAY のサブルーチン構成



付録A4 入力データの例

(1) SWAY の入力データ

バッチファイル (バッチで実行する場合) の例

基盤の模擬地震動が **Os7522.dat** というファイルに格納されており、これを **rfin.dat** という入力ファイルに書きかえている。また、出力ファイルを **rcf500.dat**、**rc500.dat** というファイルに書き換えている。

```
echo 耐震計算 (多質点) 開始
copy Os7522.dat rfin.dat
sway.exe
copy rfout RCF500.DAT
copy rfprint.dat RC500.dat
del rfout
del rfprint.dat
del rfin.dat
echo 耐震計算終了
```

入力データファイル cond.dat の例

```
$SINGLE IMAX=3, NST=2, NTREC=2, IABS=1,
        TITCAL=' Sway Osaki 7.5 (RC500, absolute )' , $END
$ARRAY AMV=3*1.0E5, SCON=3*3.95E6,
        TST=0., 1.0E-3, 1.0, 1.E-3, TIREC=0., 0.05, 1.0, 0.05, 16*0.,
        NREC=101, 102, 103, 301, 302, 303, 0, ATTEN=10*0., $END
```

(2) JUMP の入力データ

入力データファイル shock.dat の例

```
$SINGLE IMAX=10, KCUT=5, NGF=4, TMAX=0.2,
        HGT=100., NST=4, NTREC=4,
        TITCAL=' JUMP Run E410 (ATTEN=0.5)' , $END
$ARRAY AMV=10*4.33E4, SCON=10*1.09E14, ATTEN=10*0.5,
        GF=0., 6.0E9, 5.E-3, 6.0E9, 5.01E-3, 0.0, 2.00, 0.0, 16*0.,
        TST=0., 1.0E-7, 1.5E-5, 1.0E-7, 0.001, 1.E-6, 0.01, 1.E-6, 1.0, 1.E-6,
        TIREC=1.E-5, 1.E-6, 1.E-4, 1.E-6, 0.001, 1.E-5, 0.01, 0.01, 16*0.,
        NREC=101, 201, 301, 304, 305, 308, 310, 401, 404, 405, 408, 410, $END
```

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 bar = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s(N·s/m²) = 10 P(ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁶ St(ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

1 cal = 4.18605 J(計量法)
= 4.184 J(熱化学)
= 4.1855 J(15 °C)
= 4.1868 J(国際蒸気表)
仕事率 1 PS(仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

耐震計算プログラム群…SSAP

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています