

成層地盤の地震応答計算プログラム（エクセルマクロ）について

日中構造研究所 松原勝己

同 上 梁 生鈿

1. はじめに

地上構造物の耐震解析に使用する入力地震動を地盤の影響を考慮して設定する場合や、地下構造物の耐震解析において地盤変位、周面せん断力および躯体慣性力など地震時外力の設定を行う場合に、当該地盤を成層構造と仮定し一次元地盤応答解析によって地盤の地震応答を算出することがあります。この計算には、「SHAKE」などの解析ソフトや他の市販ソフトが使用されるのが一般的です。ここでは、使用性の容易さや出力結果の加工し易さを考慮し、一次元地盤応答解析のプログラムをエクセルのマクロ（VBA）を用いて作成しました。通例の一次元地盤応答解析では複素応答解析手法が多用され、本マクロでもそれに依っていますが、エクセルマクロでは複素数計算が簡単に実施しにくいこともあり、ここでは複素数計算処理を実数計算処理に置き換えて計算を実行しています。

成層地盤の地震応答解析の計算手法に関しては、後述の「参考資料：成層地盤の地震応答計算」を参照してください。エクセルシートを添付しているので、自由に使っていただいて結構ですが、計算結果の妥当性判断については使用者に帰するものとします。また、プログラムソースについても公開しています。

2. エクセルの内容

(1)地盤を水平成層構造と仮定し、せん断波（水平動）が鉛直方向に伝播する際の地震時地盤応答を算出するエクセルマクロです。解析手法は、SHAKE などと同様の複素応答解析を用いています。

(2)入力地震波の定義は基盤層上面あるいは各地層の境界面にて行います。基盤層上面以外で定義した場合には、地震波の引き戻し解析が可能です。地中波(E+F 波)と露頭波(2E 波)の両者の入力が可能です。また、入力地震波データの数は、最大 8192 個までとなっています。この制限を変更したい場合には、ソースコードにおいて配列要素数の宣言を変更する必要があります。

(3)地盤のひずみ依存性は、等価線形化手法で考慮しています。せん断剛性および減衰定数のひずみ依存曲線は、「土研モデル」（土研資料 No.1778）を用いています。「土研モデル」では、3 種の土質種類（沖積粘性土、洪積粘性土および砂質土）に応じ、拘束圧依存性を考慮した $G/G_0 \sim \gamma$ および $h \sim \gamma$ 曲線が規定されています。また、ユーザが設定するひずみ依存特性を定義することも可能です。本エクセルマクロでは、地層の数に制限があり、最大 150 層までとなっています。

(4)応答値の出力情報は、加速度、変位、せん断応力およびせん断ひずみの最大値深度分布、地層境界面 2 点間の相対変位最大時における加速度、変位、せん断応力およびせん断ひずみの深度分布、地層境界面における加速度および変位の時刻歴、および地層中央位置におけるせん断応力およびせん断ひずみの時刻歴です。

(5)道路橋示方書・耐震設計編に示される方法により、簡易液状化判定が可能です。液状化強度比は、地盤の N 値、細粒分含有率および有効上載圧などから計算されます。また、作用応力比については、一次元地盤応答解析に基づきせん断応力の時刻歴最大値から計算しています。さらに、地盤の N 値については、入力データで直接に指定せず、道示の N 値とせん断波速度の関係式をもとに初期せん断波速度から換算しています。「地盤データ」に細粒分含有率を入力した地下水位以下の地層に関して液状化判定を実施します。

3. 入力データおよび出力データ

(1) エクセルシートは、「入力地震波」、「解析条件」、「地盤データ」、「ひずみ依存特性(ユーザ指定)」、「ひずみ依存特性(出力)」、「収束剛性」、「最大値深度分布」、「相対変位最大時深度分布」、「伝達関数(E+F 入力)」、「伝達関数(2E 入力)」、「加速度時刻歴(E+F 出力)」、「加速度時刻歴(2E 出力)」、「変位時刻歴」、「せん断応力時刻歴」および「せん断ひずみ時刻歴」の 15 個あります。このうち、最初の 4 つが入力データでその他が出力データとなります。

(2) 「入力地震波」のシートには、基盤あるいは地層境界に規定する入力地震動データを貼り付けます。地震動データのフォーマット(データ個数や時間刻み等)は、「解析条件」シートで指定します。また、地震波の入力形態(E+F あるいは 2E)についても、「解析条件」シートで指定します。

(3) 「解析条件」のシートには、入力地震波フォーマットやその他の解析条件および出力位置を入力します。入力するデータは、「地震波読み飛ばし行数」、「地震波データ数」、「地震波時間刻み」、「地震波 1 行当たりデータ数」、「入力地震波種類」、「地震波入力位置」、「歪依存計算最大繰返し数」、「歪依存計算収束判定誤差」、「計算最大振動数」、「伝達関数出力」、「加速度波形出力」、「変位波形出力」、「せん断応力波形出力」および「せん断ひずみ波形出力」です。このうち「入力地震波種類」は、露頭波あるいは地中波の区別を「2E」あるいは「E+F」で入力します。また、タイプ I あるいは II の区別を入力します。このデータは液状化判定時において液状化強度比の補正係数の算出に使用します。「地震波入力位置」は、地震波を定義する位置を、地表面から数えた地層境界上面位置の数で入力します。出力情報は、出力する場合には「ON」を、出力しない場合には「OFF」を入力し、続いて出力点数と出力位置を入力します。出力位置については、伝達関数、加速度波形および変位波形は、地表面から数えた地層境界面の数で、せん断応力波形とせん断ひずみ波形は、地表面から数えた地層の数で入力します。なお、せん断応力およびせん断ひずみは、各地層中央の値を求めています。出力情報で「ALL」を入力すると、全ての地層境界面、全ての地層について応答波形が出力されます。

(4) 「地盤データ」のシートには、地盤の剛性や減衰などの諸元を入力します。具体的には、「層数」、「単位体積重量」、「層厚」、「初期せん断波速度」、「減衰定数」、「ひずみ依存曲線(土質)」、「静止土圧係数」、「地下水位位置」および「相対変位最大時の層境界」を入力します。ここに、単位体積重量は湿潤単位体積重量を想定しています。地震応答計算時の土の単位体積重量にこの値を用い、地下水位以深における有効上載圧の計算で有効単位体積重量を、この値から 10kN/m^3 を引いて求めています。初期せん断波速度は、微小ひずみ時 (10^{-6} 程度) のせん断波速度を入力します。PS 検層で求められたせん断波速度に対応し、微小ひずみ時のせん断剛性 G_0 と $G_0 = \rho V_{s0}^2$ (ρ : 地盤の密度) の関係があります。また、減衰定数には最初のイタレーション計算で用いる減衰定数を入力します。

「ひずみ依存曲線(土質)」の欄には、ひずみ依存曲線の種類を指定します。土研モデルを用いる場合には、土質に応じて「沖積粘性土」、「洪積粘性土」あるいは「砂質土」のいずれかを入力します。また、ユーザが別途指定したい場合には、「ひずみ依存曲線(ユーザ指定)」で指定する「ひずみ依存曲線の名前」を入力します。静止土圧係数は、せん断剛性および減衰の拘束圧依存性を考慮するため、有効上載圧から平均有効応力に換算する際に用いています。さらに、地下水位位置を地表面から数えた地層境界面の数で入力します。「相対変位最大時出力の層境界」のデータは、応答値の深度分布を出力する場合に地層境界の 2 点を指定することにより、地層境界の 2 点間の相対変位が最大となる時刻における応答値を出力します。

液状化判定を行う場合には、対象とする砂層に「細粒分含有率(%)」を入力します。また、礫質土については「平均粒径 $D_{50}(\text{mm})$ 」を入力します。

(5)「ひずみ依存曲線(ユーザ指定)」のシートには、ひずみ依存曲線として土研モデル以外にユーザが指定する場合に使用します。土研モデルのみを用いる場合には、入力する必要はありません。「ひずみ依存曲線の数」、「ひずみ依存曲線の名前」、「ひずみの数」、「せん断ひずみ」、「剛性低下率 G/G_0 」および「減衰」を入力します。ひずみ依存曲線の数は、最大 10 個までです。

(6)「ひずみ依存曲線(出力)」のシートは、各地層に指定したひずみ依存曲線をアウトプットしたものです。「土研モデル」およびユーザ指定のひずみ依存曲線の両方をアウトプットしています。

(7)「収束剛性」のシートは、イタレーションごとに更新前と更新後のせん断波速度、減衰定数、せん断剛性および収束誤差をアウトプットしています。

(8)「最大値深度分布」のシートは、加速度、変位（基盤上面の地中波に対する相対変位）、せん断応力およびせん断ひずみの時刻歴最大値の深さ方向分布およびその発生時刻をアウトプットしています。それぞれの位置での時刻歴最大値を示しており、同時刻性はありません。さらに、液状化判定に用いるせん断応力比 L 、液状化強度比 R および液状化安全率 FL を出力しています。

(9)「相対変位最大時深度分布」のシートは、「地盤データ」シートで指定した層境界 2 点間の相対変位が最大となる時刻における応答値の深さ方向分布を示しています。したがって、これらの応答値については、同時刻性があります。

(10)「伝達関数(E+F 入力)」のシートは、最終イタレーションにおける地層境界位置での加速度の伝達関数をアウトプットしています。この伝達関数(E+F 入力)は、入力地震波を E+F 入力とした場合に、地層境界位置の E+F 応答の入力地震波に対する比を表しています。

(11)「伝達関数(2E 入力)」のシート最終イタレーションにおける地層境界位置での加速度の伝達関数をアウトプットしています。この伝達関数(2E 入力)は、入力地震波を 2E 入力とした場合に、地層境界位置の E+F 応答の入力地震波に対する比を表しています。

(12)「加速度時刻歴(E+F 出力)」のシートは、最終イタレーションにおける地層境界位置の加速度時刻歴波形を出力しています。ただし、地中波(E+F 波)の応答値です。

(13)「加速度時刻歴(2E 出力)」のシートは、最終イタレーションにおける地層境界位置の加速度時刻歴波形を出力しています。ただし、露頭波(2E 波)の応答値です。

(14)「変位時刻歴」のシートは、最終イタレーションにおける地層境界位置の変位時刻歴波形を出力しています。ただし、地中波(E+F 波)の応答値です。また、変位値は基盤上面の変位に対する相対変位です。

(15)「せん断応力時刻歴」のシートは、最終イタレーションにおける地層中央のせん断応力時刻歴波形を出力しています。

(16)「せん断ひずみ時刻歴」のシートは、最終イタレーションにおける地層中央のせん断ひずみ時刻歴波形を出力しています。

4. 計算例

計算例では、図 1 に示す地盤モデルに対する一次元地盤応答解析を実施しています。地表面から基盤までを 30 分割しています。

また、入力地震波としては、道路橋示方書・耐震設計編に提示される I 種地盤の L1 地震動を使用し、モデル基盤に 2E 波として定義しています。

以下では、本マクロによる計算結果と市販ソフトによる計算結果を比較しています。一次元地盤応答解析に用いた市販ソフトは、「ARKQUAKE」(アーク情報システム) です。

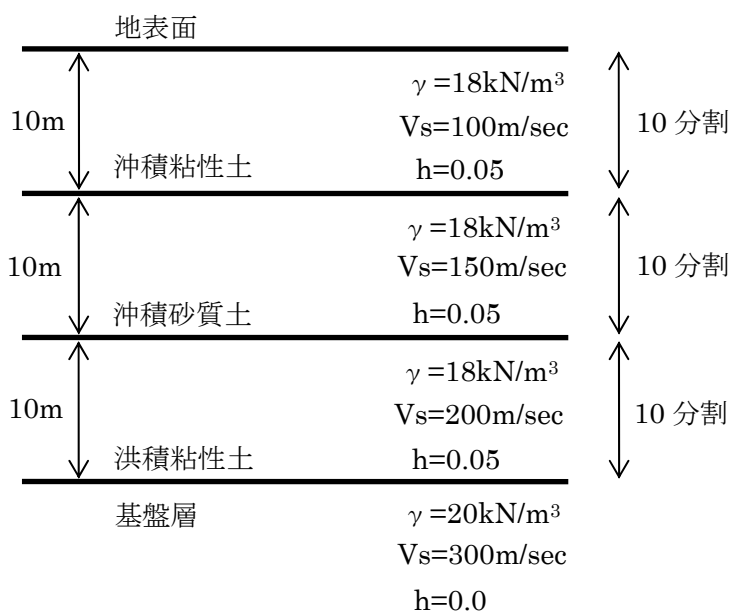


図 1 計算例の地層構成

図 2 に、加速度、相対変位、せん断応力およびせん断ひずみの最大応答値の深度分布を示します。また、図 3 に、地表面における加速度および相対変位波形と最下層におけるせん断応力およびせん断ひずみ波形を示します。市販ソフトとの比較では、本エクセルマクロと数%程度の差異で一致していることがわかります。

図 3 に、本マクロを用いて液状化強度比 R を算出した例を示します。なお、この計算例は先の一次元地盤応答解析で用いた地盤モデルとは異なり、表 1 に示すモデルを用いました。図 3 に示す市販ソフトは FORUM8 によるものを参照しました (www.forum8.co.jp/product/uc1/kiso/kui_c/eki.pdf)。

図 3 によれば、本マクロと市販ソフトの結果が良い一致を示すことがわかります。

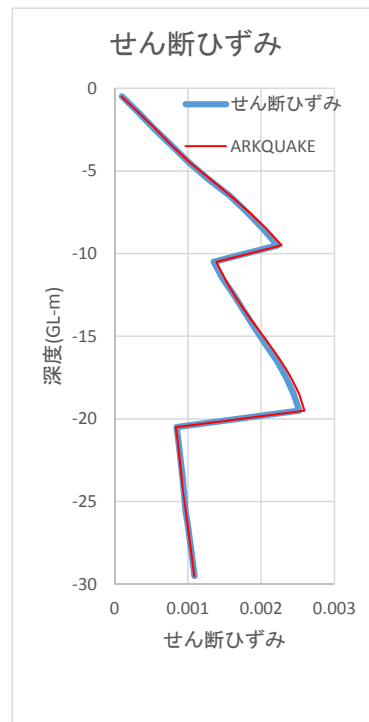
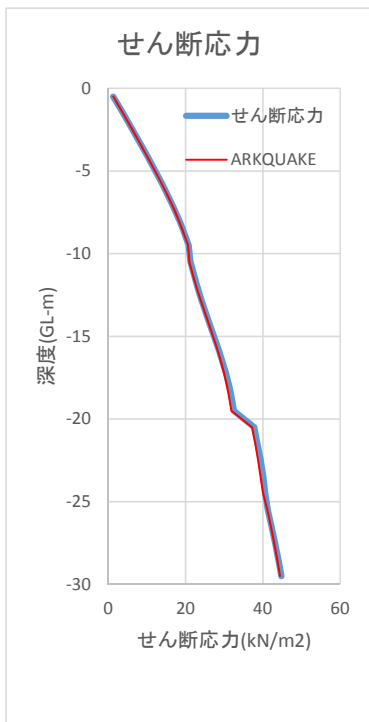
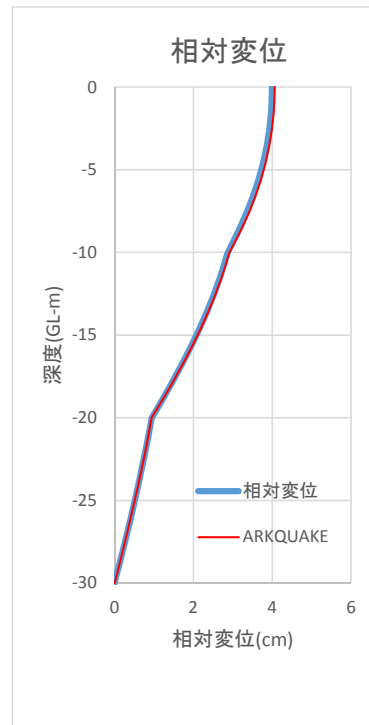
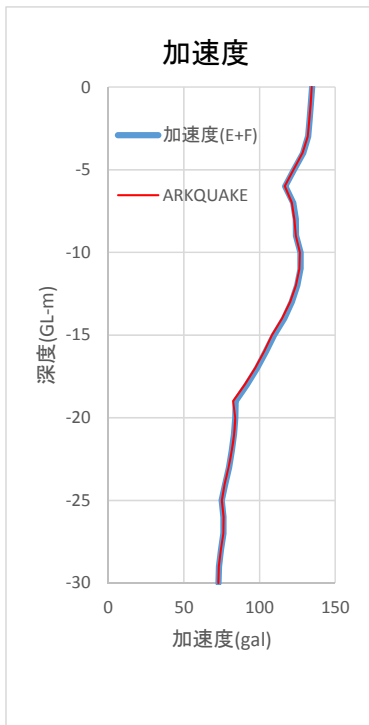


図 2 最大応答値の深度分布

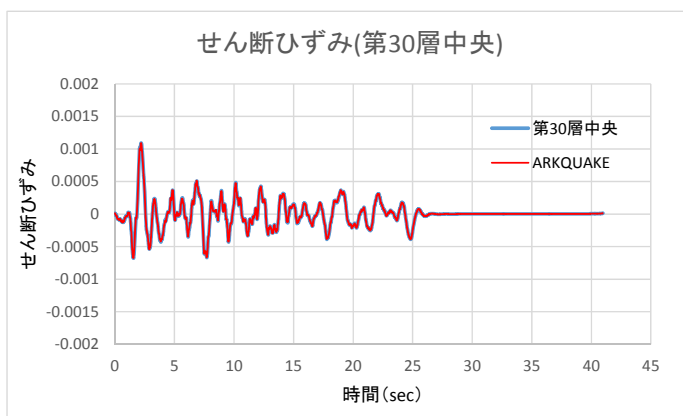
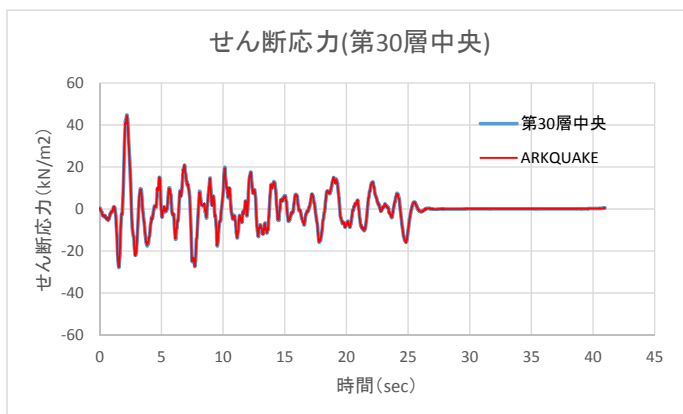
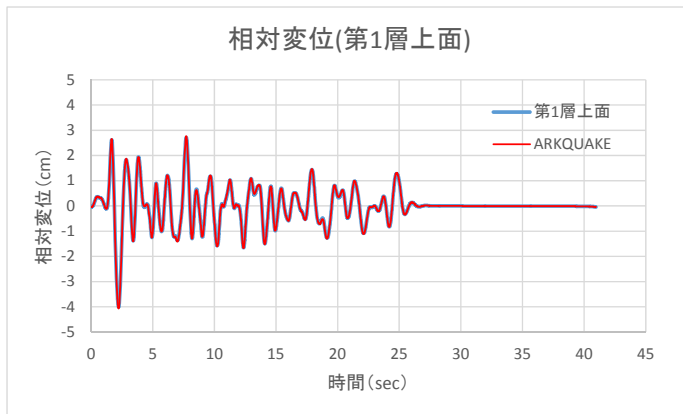
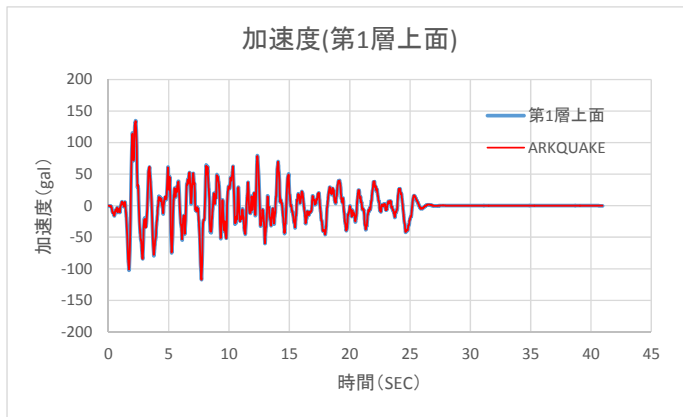


図 3 時刻歴応答波形

表 1 液状化強度比の算出に用いた地盤モデル

番号	層厚 (m)	N 値	土質	Vs (m/s)	γ_t (kN/m ³)	細粒分含有率 (%)
1	0.5	2	砂質土	100.8	19	35
2	0.5	2	砂質土	100.8	19	35
3	0.5	2	沖積粘性土	126.0	18	—
4	1.0	3	沖積粘性土	144.2	18	—
5	1.0	2	砂質土	100.8	17	45
6	1.0	5	砂質土	136.8	17	45
7	1.0	10	砂質土	172.4	17	45
8	1.0	2	砂質土	100.8	17	45
9	1.0	1	砂質土	80.0	17	45
10	1.0	3	砂質土	115.4	18	60
11	1.0	4	砂質土	127.0	18	60
12	1.0	8	砂質土	160.0	19	80
13	1.0	7	砂質土	153.0	19	80
14	1.0	8	砂質土	160.0	19	80
15	1.0	9	砂質土	166.4	19	80
16	1.0	10	砂質土	172.4	19	80
17	1.0	12	砂質土	183.2	19	80
18	1.0	8	砂質土	160.0	19	80
19	1.0	9	砂質土	166.4	19	80
20	1.0	10	砂質土	172.4	19	80
21	1.0	10	砂質土	172.4	19	80
22	1.0	10	砂質土	172.4	19	80
基盤		50		300.0	19	

(注) 地下水位は GL-1.5m

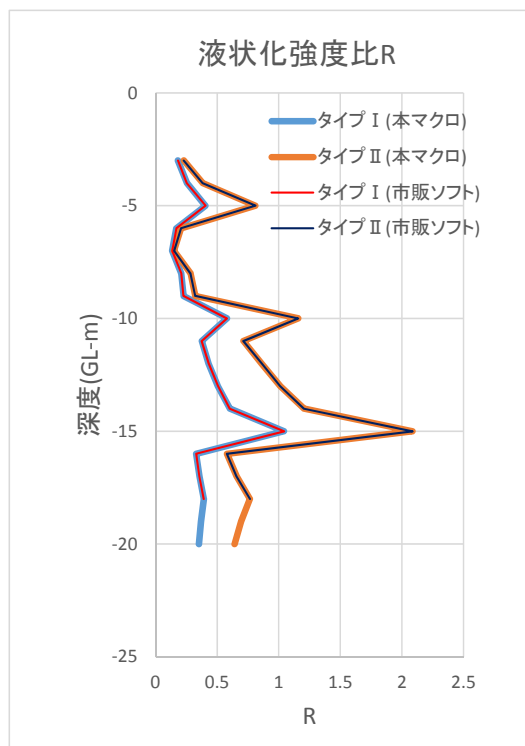


図 4 液状化強度比の比較

1. 基本方程式の誘導

図 1 に示すような成層地盤を考える。座標系は、各地層上面から下向きにとり、地表面に近い地層から、 x_1, x_2, \dots, x_n とする。

地層の変位は、右向きを正とし、地表面に近いほうから、各地層の上面側の変位を u_1, u_2, \dots, u_n とする。

また、各地層の厚さは、地表面に近い地層から、 H_1, H_2, \dots, H_n とする。さらに、地盤物性値については、各地層でせん断弾性係数、減衰定数および密度が必要であり、それぞれ地表面に近い地層から $G_1, \beta_1, \rho_1, G_2, \beta_2, \rho_2, \dots, G_n, \beta_n, \rho_n$ とする。

なお、以上において第 n 層は最下層の基盤層（半無限地盤）を表すものとする。

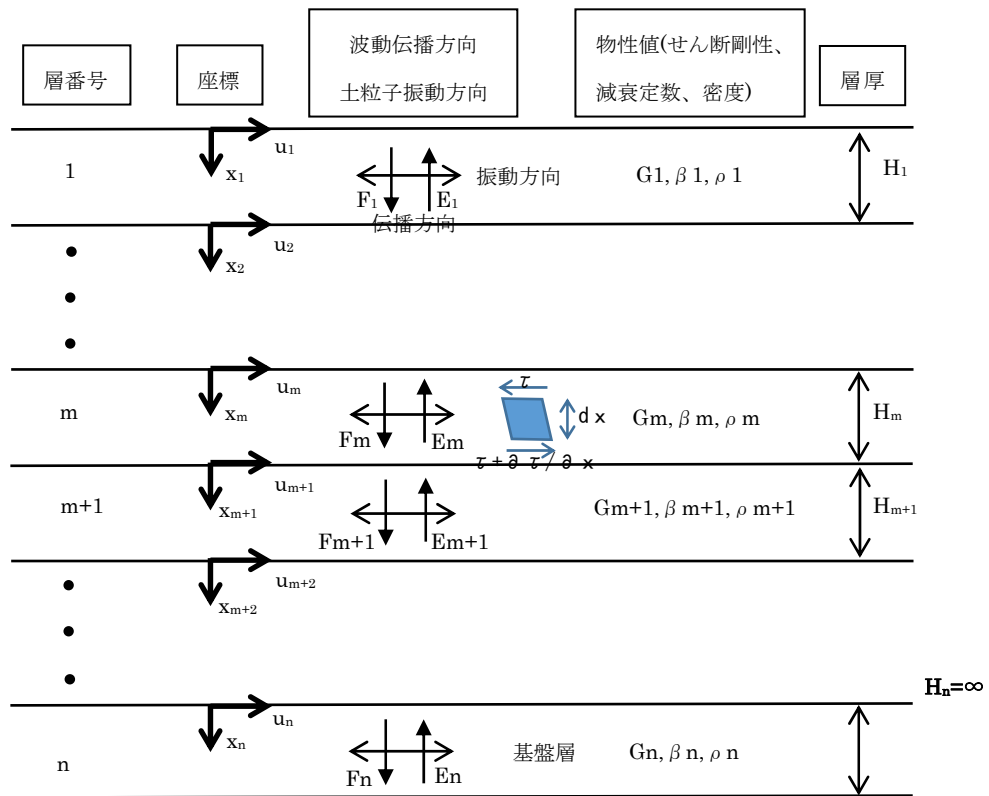


図 1 一次元地盤応答解析における成層地盤モデル

第 m 層において、微小地盤要素に対する力の釣り合いを考慮する。図 1 に示す高さ dz の微小要素に作用する力は、微小要素の慣性力、微小要素上面および下面のせん断応力であり、それらは次式で表される。

$$\text{慣性力} : \rho_m dx_m \frac{\partial^2 u_m(x_m, t)}{\partial t^2} \quad (1a)$$

$$\text{要素上面のせん断応力} : \tau_m = G_m \gamma_m + \eta_m \frac{\partial \gamma_m}{\partial t} = G_m \frac{\partial u_m(x_m, t)}{\partial x_m} + \eta_m \frac{\partial^2 u_m(x_m, t)}{\partial t \partial x_m} \quad (1b)$$

$$\text{要素下面のせん断応力} : \begin{cases} \tau_m + d\tau_m = \tau_m + \frac{\partial \tau_m}{\partial x_m} dz \\ = G_m \frac{\partial u_m(x_m, t)}{\partial x_m} + \eta_m \frac{\partial^2 u_m(x_m, t)}{\partial t \partial x_m} + \frac{\partial}{\partial x_m} \left\{ G_m \frac{\partial u_m(x_m, t)}{\partial x_m} + \eta_m \frac{\partial^2 u_m(x_m, t)}{\partial t \partial x_m} \right\} dx_m \end{cases} \quad (1c)$$

ここに、 ρ_m : 第 m 層の土の密度

G_m : 第 m 層の土のせん断弾性係数

η_m : 第 m 層の減衰係数

$u_m(x_m, t)$: 時刻 t における第 m 層の上面から x_m の位置の変位

式(1)の 3 式で表される力の釣り合いにより、次式が成立する。

$$\rho_m dx_m \frac{\partial^2 u_m(x_m, t)}{\partial t^2} + \tau_m - (\tau_m + d\tau_m) = 0 \quad (2)$$

すなわち、

$$\rho_m dx_m \frac{\partial^2 u_m(x_m, t)}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x_m} \left\{ G_m \frac{\partial u_m(x_m, t)}{\partial x_m} + \eta_m \frac{\partial^2 u_m(x_m, t)}{\partial t \partial x_m} \right\} dx_m \quad (3)$$

ここで、第 m 層内において、地盤物性値 G_m および η_m が一定であると仮定すれば、

$$\rho_m \frac{\partial^2 u_m(x_m, t)}{\partial t^2} = G_m \frac{\partial^2 u_m(x_m, t)}{\partial x_m^2} + \eta_m \frac{\partial^3 u_m(x_m, t)}{\partial t \partial x_m^2} \quad (4)$$

式(4)が、第 m 層の変位 $u_m(x_m, t)$ を支配する基本方程式となる。

なお、以下の記述においては、 u_m の引数 (x_m, t) と x_m の添字 m を省略するものとする。

2. 伝達関数

2.1 一般解の誘導

地盤が円振動数 ω の調和振動（正弦波状の振動）をしているとすれば、変位 $u_m(x_m, t)$ は、以下のよう
に書ける。

$$u_m(x_m, t) = U_m(x_m) \cdot e^{i\omega t} \quad (5)$$

ここに、 $U_m(x_m)$: 第 m 層上面から x_m の位置における周波数領域における変位（「Fourier（フーリエ）
変位振幅」あるいは「複素変位振幅」と呼ばれる）であり、 i は虚数単位 ($i^2 = -1$) である。

式(5)より、

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 u_m}{\partial t^2} &= -\omega^2 U_m e^{i\omega t} \\ \frac{\partial^2 u_m}{\partial x^2} &= \frac{d^2 U_m}{dx^2} e^{i\omega t} \\ \frac{\partial^3 u_m}{\partial t \partial x^2} &= i\omega \frac{d^2 U_m}{dx^2} e^{i\omega t}\end{aligned}\tag{6}$$

式(6)を式(4)に代入すれば、

$$-\rho_m \omega^2 U_m e^{i\omega t} = G_m \frac{d^2 U_m}{dx^2} e^{i\omega t} + i\eta_m \omega \frac{d^2 U_m}{dx^2} e^{i\omega t}$$

すなわち、

$$(G_m + i\eta_m \omega) \frac{d^2 U_m}{dx^2} = -\rho_m \omega^2 U_m\tag{7}$$

ここで、

$$G_m^* = G_m + i\eta_m \omega \quad (\text{「複素せん断剛性」 と呼ばれる})\tag{8}$$

と置けば、式(7)より、

$$\frac{d^2 U_m}{dx^2} = -\frac{\rho_m \omega^2}{G_m^*} U_m\tag{9}$$

ここで、

$$k_m^2 = \frac{\rho_m \omega^2}{G_m^*} \quad (\text{「複素波数」 と呼ばれる})\tag{10}$$

と置けば、式(9)より、

$$\frac{d^2 U_m}{dx^2} = -k_m^2 U_m\tag{11}$$

式(11)が、周波数領域における変位 U_m に対する支配方程式となる。

さらに、減衰係数 η_m と減衰定数 β_m の関係式

$$\eta_m = \frac{2G_m \beta_m}{\omega}\tag{12}$$

を用いれば、複素せん断剛性は式(8)より、次式で書ける。

$$G_m^* = G_m + i \frac{2G_m \beta_m}{\omega} \omega = G_m (1 + 2i\beta_m)\tag{13}$$

式(13)のように書けるのは、式(13)の形で定義することで、減衰が振動数に依存しなくなり、このことが室内実験等で確認されていることによる。

なお、式(13)の形は、一次元地盤応答解析ソフト「SHAKE」で使用されているものであり、二次元地盤応答解析ソフト「FLUSH」では、

$$G_m^* = G_m (1 - 2\beta_m^2 + 2i\beta_m \sqrt{1 - \beta_m^2})\tag{14}$$

の形が用いられている。式(14)の形は、一自由度系の振動論で使用される Voigt (フォークト) 型の減衰を用いた場合と応答振幅が同一になるように考慮されたものである。以下の定式では、SHAKE タイ

ブの減衰を用いることとする。

式(11)の一般解は、次式となる。

$$U_m = E_m e^{ik_m x} + F_m e^{-ik_m x} \quad (15)$$

式(15)が解であることは、式(15)を式(11)に代入することで確認できる。なお、式(15)の E_m および F_m は、境界条件より決まる積分定数である。

式(5)と式(15)より、変位 u_m は、次式で表すことができる。

$$u_m(x, t) = E_m e^{i(k_m x + \omega t)} + F_m e^{-i(k_m x - \omega t)} \quad (16)$$

一般に、周波数領域の変位を式(5)で定義したとき ($e^{i\omega t}$ を調和振動解としたとき)、波数項 $ik_m x$ の符号が負のときに x の正方向に進行する波動成分を表すことになる。したがって、式(16)の第1項は x の負方向（上昇する向き）、第2項は x の正方向（下降する向き）に進行する波動成分となる。すなわち、式(16)の E_m は上昇波の振幅（複素振幅）を、 F_m は下降波の振幅（複素振幅）を表すことになる。

2.2 伝達関数の誘導

式(16)より、第 m 層上面と下面における変位は、次式のように書ける。

$$u_m(x=0) = (E_m + F_m) e^{i\omega t} \quad (17a)$$

$$u_m(x_m = H_m) = (E_m e^{ik_m H_m} + F_m e^{-ik_m H_m}) e^{i\omega t} \quad (17b)$$

ここに、 H_m : 第 m 層の層厚

せん断応力 τ は、式(1b)より、

$$\tau_m(x, t) = G_m \frac{\partial u_m}{\partial x} + \eta_m \frac{\partial^2 u_m}{\partial t \partial x} = G_m \frac{\partial u_m}{\partial x} + i\eta_m \omega \frac{\partial u_m}{\partial x} = (G_m + i\eta_m \omega) \frac{\partial u_m}{\partial x} = G_m^* \frac{\partial u_m}{\partial x} \quad (18)$$

式(16)より、

$$\frac{\partial u_m}{\partial x} = ik_m (E_m e^{ik_m x} - F_m e^{-ik_m x}) e^{i\omega t} \quad (19)$$

式(18)および(19)より、

$$\tau_m(x, t) = ik_m G_m^* (E_m e^{ik_m x} - F_m e^{-ik_m x}) e^{i\omega t} \quad (20)$$

式(20)より、第 m 層上面および下面でのせん断応力は、次式のように書ける。

$$\tau_m(x=0) = ik_m G_m^* (E_m - F_m) e^{i\omega t} \quad (21a)$$

$$\tau_m(x=H_m) = ik_m G_m^* (E_m e^{ik_m H_m} - F_m e^{-ik_m H_m}) e^{i\omega t} \quad (21b)$$

各地層境界において、変位およびせん断応力が等しくなる条件から、以下の式が成立しなければならない。

$$u_{m+1}(x=0) = u_m(x=H_m) \quad (22a)$$

$$\tau_{m+1}(x=0) = \tau_m(x=H_m) \quad (22b)$$

式(17)、式(21)および式(22)より、次式が成立する。

$$E_{m+1} + F_{m+1} = E_m e^{ik_m H_m} + F_m e^{-ik_m H_m} \quad (23a)$$

$$E_{m+1} - F_{m+1} = \frac{k_m G_m^*}{k_{m+1} G_{m+1}^*} (E_m e^{ik_m H_m} - F_m e^{-ik_m H_m}) = \alpha_m (E_m e^{ik_m H_m} - F_m e^{-ik_m H_m}) \quad (23b)$$

ここに、

$$\alpha_m = \frac{k_m G_m^*}{k_{m+1} G_{m+1}^*} = \sqrt{\frac{\rho_m G_m^*}{\rho_{m+1} G_{m+1}^*}} \quad (\text{「複素インピーダンス比」と呼ばれる}) \quad (24)$$

式(23)より、

$$E_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 + \alpha_m) e^{ik_m H_m} + \frac{1}{2} F_m (1 - \alpha_m) e^{-ik_m H_m} \quad (25a)$$

$$F_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 - \alpha_m) e^{ik_m H_m} + \frac{1}{2} F_m (1 + \alpha_m) e^{-ik_m H_m} \quad (25b)$$

式(25)によれば、第 $m+1$ 層の振幅に関する情報が、第 m 層の物性値と振幅に関する情報で全て表すことができることを示している。

地表面においては、せん断応力は作用しないため、式(21a)より $E_1 = F_1$ が成立し、このことは地表面位置では入射波と反射波の振幅が等しいことを意味している。

第 1 層から順に式(25)を適用することにより、第 m 層の振幅 E_m および F_m は、次式で表すことができる。

$$E_m = e_m(\omega) E_1 \quad (26a)$$

$$F_m = f_m(\omega) E_1 \quad (26b)$$

ここに、 $e_m(\omega)$ および $f_m(\omega)$ は、 $E_1 = F_1 = 1$ として、式(25)を用い地表面から順次、 E_2, F_2, E_3, F_3 等を求めてゆけば計算することができる。

ここで、 n 層（基盤層）上面に対する m 層上面の変位の伝達関数を、次式で定義する。

$$A_{n,m}(\omega) = \frac{u_m}{u_n} \quad (27)$$

式(17a)、式(26)および式(27)から、次式を得る。

$$A_{n,m}(\omega) = \frac{u_m(x=0)}{u_n(x=0)} = \frac{(E_m + F_m) e^{i\omega x}}{(E_n + F_n) e^{i\omega x}} = \frac{E_m + F_m}{E_n + F_n} = \frac{e_m(\omega) + f_m(\omega)}{e_n(\omega) + f_n(\omega)} \quad (28)$$

伝達関数 $A_{n,m}(\omega)$ は周波数領域で扱われ、解析対象の地盤構成や物性値が与えられると、周波数ごとに計算できる。したがって、基盤における地震動が与えられると、そのフーリエ変換に各層の伝達関数を乗じて周波数領域での振幅を求めた後、フーリエ逆変換することで各層の応答時刻歴波形を計算することも可能である。

なお、式(28)は基盤地震動の地中波($E+F$ 波)に対する伝達関数を表しているが、基盤地震動の露頭波($2E$ 波)に対する応答を求めたい場合がある。その場合は、伝達関数の分母の値を $2E_n$ 、すなわち $2e_n(\omega)$ とすることで算出可能である。

以上より、基盤地震動の $E+F$ 波および $2E$ 波に対する m 層上面の伝達関数は、次式で表すことができる。

E+F 基盤波に対する m 層上面の伝達関数 $H_m^{EF}(\omega)$:

$$H_m^{EF}(\omega) = \frac{e_m(\omega) + f_m(\omega)}{e_n(\omega) + f_n(\omega)} \quad (29a)$$

2E 基盤波に対する m 層上面の伝達関数 $H_m^{2E}(\omega)$:

$$H_m^{2E}(\omega) = \frac{e_m(\omega) + f_m(\omega)}{2e_n(\omega)} \quad (29b)$$

2.3 実数計算への変換

前述した式(29)を用いることで、各層境界位置での伝達関数を求めることができるが、エクセルマクロに実装する場合には、実数計算が可能な形に変換しておくのが便利である。以下では、複素数表示の伝達関数を、実数表示に変換する。

まず、式(25)を実数表示することを考える。

式(24)および(13)より、 α_m が以下のように書ける。

$$\alpha_m = \sqrt{\frac{\rho_m G_m}{\rho_{m+1} G_{m+1}}} \sqrt{\frac{1 + 2i\beta_m}{1 + 2i\beta_{m+1}}} \quad (30)$$

式(30)において前半部の平方根は実数値なので、後半部の平方根を実部および虚部に分解すると、以下のようなになる。

$$R(\alpha_m) = \sqrt{\frac{\rho_m G_m}{\rho_{m+1} G_{m+1}}} \frac{1}{2\sqrt{1 + 4\beta_{m+1}^2}} \left(\frac{\sqrt{\sqrt{1 + 4\beta_m^2} + 1} \sqrt{\sqrt{1 + 4\beta_{m+1}^2} + 1}}{+ \sqrt{\sqrt{1 + 4\beta_m^2} - 1} \sqrt{\sqrt{1 + 4\beta_{m+1}^2} - 1}} \right) = a_m \quad (31a)$$

$$I(\alpha_m) = \sqrt{\frac{\rho_m G_m}{\rho_{m+1} G_{m+1}}} \frac{1}{2\sqrt{1 + 4\beta_{m+1}^2}} \left(\frac{\sqrt{\sqrt{1 + 4\beta_m^2} - 1} \sqrt{\sqrt{1 + 4\beta_{m+1}^2} + 1}}{- \sqrt{\sqrt{1 + 4\beta_m^2} + 1} \sqrt{\sqrt{1 + 4\beta_{m+1}^2} - 1}} \right) = b_m \quad (31b)$$

ここに、記号 $R(\cdot)$ および $I(\cdot)$ は、それぞれ括弧内の複素数の実部および虚部を示す。なお、後の式展開のために、式(31a)および(31b)をそれぞれ a_m および b_m と置いた。

同様に、式(25)に含まれる指数関数を実部および虚部に分解すれば、以下のようなになる。

$$R(e^{ik_m H_m}) = \exp(d_m) \cos(c_m) \quad (32a)$$

$$I(e^{ik_m H_m}) = \exp(d_m) \sin(c_m) \quad (32b)$$

ここに、

$$d_m = \sqrt{\frac{\rho_m}{G_m}} \frac{\omega H_m}{\sqrt{2(1 + 4\beta_m^2)}} \sqrt{\sqrt{1 + 4\beta_m^2} - 1} \quad (33a)$$

$$c_m = \sqrt{\frac{\rho_m}{G_m}} \frac{\omega H_m}{\sqrt{2(1+4\beta_m^2)}} \sqrt{\sqrt{1+4\beta_m^2} + 1} \quad (33b)$$

また、

$$R(e^{-ik_m H_m}) = \exp(-d_m) \cos(c_m) \quad (34a)$$

$$I(e^{-ik_m H_m}) = -\exp(-d_m) \sin(c_m) \quad (34b)$$

式(25)をマトリックス表示にすると、

$$\begin{Bmatrix} E_{m+1} \\ F_{m+1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(1+\alpha_m)e^{ik_m H_m} & \frac{1}{2}(1-\alpha_m)e^{-ik_m H_m} \\ \frac{1}{2}(1-\alpha_m)e^{ik_m H_m} & \frac{1}{2}(1+\alpha_m)e^{-ik_m H_m} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_m \\ F_m \end{Bmatrix} \quad (35)$$

式(35)の 2×2 の係数マトリックスの4つの要素を a_{11} 、 a_{12} 、 a_{21} および a_{22} と置き、それらの要素について、式(31)~(34)を用いて実部と虚部に分解すると次式を得る。

$$\begin{aligned} R(a_{11}) &= \frac{1}{2} \exp(d_m) \{(1+a_m) \cos(c_m) - b_m \sin(c_m)\} \\ I(a_{11}) &= \frac{1}{2} \exp(d_m) \{b_m \cos(c_m) + (1+a_m) \sin(c_m)\} \\ R(a_{12}) &= \frac{1}{2} \exp(-d_m) \{(1-a_m) \cos(c_m) - b_m \sin(c_m)\} \\ I(a_{12}) &= \frac{1}{2} \exp(-d_m) \{-b_m \cos(c_m) - (1-a_m) \sin(c_m)\} \\ R(a_{21}) &= \frac{1}{2} \exp(d_m) \{(1-a_m) \cos(c_m) + b_m \sin(c_m)\} \\ I(a_{21}) &= \frac{1}{2} \exp(d_m) \{-b_m \cos(c_m) + (1-a_m) \sin(c_m)\} \\ R(a_{22}) &= \frac{1}{2} \exp(-d_m) \{(1+a_m) \cos(c_m) + b_m \sin(c_m)\} \\ I(a_{22}) &= \frac{1}{2} \exp(-d_m) \{b_m \cos(c_m) - (1+a_m) \sin(c_m)\} \end{aligned} \quad (36)$$

さらに、式(35)を用い、複素振幅 E_m および F_m の実部と虚部を用いる形式に書き換えると、次式を得る。

$$\begin{Bmatrix} R(E_{m+1}) \\ I(E_{m+1}) \\ R(F_{m+1}) \\ I(F_{m+1}) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} R(a_{11}) & -I(a_{11}) & R(a_{12}) & -I(a_{12}) \\ I(a_{11}) & R(a_{11}) & I(a_{12}) & R(a_{12}) \\ R(a_{21}) & -I(a_{21}) & R(a_{22}) & -I(a_{22}) \\ I(a_{21}) & R(a_{21}) & I(a_{22}) & R(a_{22}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} R(E_m) \\ I(E_m) \\ R(F_m) \\ I(F_m) \end{Bmatrix} \quad (37)$$

式(37)を用い、 $R(E_1)=R(F_1)=1.0$ および $I(E_1)=I(F_1)=0.0$ を指定し、順次下層の振幅値を求めることで、全ての層境界での複素振幅を算出できる。全ての層境界での複素振幅が求めれば、式(29)により伝達関数を算出できる。

基盤上面位置の E+F 波および 2E 波に対する m 層上面の伝達関数は、次式で表わすことができる。

$$\text{E+F : } H_m^{EF}(\omega) = \frac{\sqrt{\{R(E_m) + R(F_m)\}^2 + \{I(E_m) + I(F_m)\}^2}}{\sqrt{\{R(E_n) + R(F_n)\}^2 + \{I(E_n) + I(F_n)\}^2}} \quad (38a)$$

$$\text{2E : } H_m^{2E}(\omega) = \frac{\sqrt{\{R(E_m) + R(F_m)\}^2 + \{I(E_m) + I(F_m)\}^2}}{2\sqrt{\{R(E_n)\}^2 + \{I(E_n)\}^2}} \quad (38b)$$

以上まとめると、伝達関数を算出する手順は以下の通りである。

- ① 各層の物性値(層厚、単位体積重量、せん断波速度(せん断弾性係数)および減衰定数)を入力する。
- ② ある振動数を指定する。
- ③ 地表面での振幅値 $R(E_1)=R(F_1)=1.0$ および $I(E_1)=I(F_1)=0.0$ を指定する。
- ④ 式(31)~(33)により、諸定数 a_m, b_m, c_m および d_m を算出する。
- ⑤ 式(36)により、m 層の振幅から m+1 層の振幅を求める係数マトリクスを計算する。
- ⑥ 式(37)により、m 層の振幅から m+1 層の振幅を算出し、順次全ての層上面における複素振幅を求める。
- ⑦ 式(38)により、伝達関数を算出する。
- ⑧ 振動数を変更し、③からの手順を繰り返す。

3. せん断応力およびせん断ひずみ

せん断応力およびせん断ひずみについては、各地層の中央位置における応答を算出する。

第 m 層中央におけるせん断応力は、式(20)より次式で表される。

$$\tau_m(x = H_m/2) = ik_m G_m^* (E_m e^{ik_m H_m/2} - F_m e^{-ik_m H_m/2}) e^{i\omega t} \quad (39)$$

以下では、式(39)の $e^{i\omega t}$ の記述を省略する。

$k_m = \sqrt{\frac{\rho_m}{G_m^*}} \omega$ および $G_m^* = G_m(1 + 2i\beta_m)$ を考慮すれば、

$$ik_m G_m^* = i\sqrt{\rho_m G_m} \omega \sqrt{1 + 2i\beta_m} \quad (40)$$

さらに、 $G_m = \rho_m V_{sm}^2$ を考慮すれば、次式を得る。

$$ik_m G_m^* = -\rho_m V_{sm} \omega \sqrt{\frac{\sqrt{1 + 4\beta_m^2} - 1}{2}} + i\rho_m V_{sm} \omega \sqrt{\frac{\sqrt{1 + 4\beta_m^2} + 1}{2}} \quad (41)$$

式(32)~(34)を用い、 $E_m = e_m E_1$, $F_m = f_m E_1$ を考慮すれば、次式を得る。

$$E_m e^{ik_m H_m/2} = \{\exp(d_m/2) \cos(c_m/2) + i \exp(d_m/2) \sin(c_m/2)\} e_m E_1 \quad (42a)$$

$$F_m e^{-ik_m H_m/2} = \{\exp(-d_m/2) \cos(c_m/2) - i \exp(-d_m/2) \sin(c_m/2)\} f_m E_1 \quad (42b)$$

ここに、 c_m および d_m は式(33)で表される。

また、 E_1 は、式(29)を用いれば、基盤入力加速度の複素フーリエ振幅を $I(\omega)$ として、次式で表される。

$$\text{E+F 入力} : E_1 = \frac{1}{e_n + f_n} \left(-\frac{1}{\omega^2} \right) \cdot I(\omega) \quad (43a)$$

$$\text{2E 入力} : E_1 = \frac{1}{2e_n} \left(-\frac{1}{\omega^2} \right) \cdot I(\omega) \quad (43b)$$

以上より、式(41)~(43)を用いて、第 m 層中央のせん断応力（複素フーリエ振幅）は、次式のように書くことができる。

$$\tau_m(x = H_m/2) = P^* \times (Q^* - R^*) \times S^* \quad (44a)$$

$$\text{ここに、} P^* = \frac{\rho_m V_{sm}}{\omega} \sqrt{\frac{\sqrt{1+4\beta_m^2}-1}{2}} - i \frac{\rho_m V_{sm}}{\omega} \sqrt{\frac{\sqrt{1+4\beta_m^2}+1}{2}} \quad (44b)$$

$$Q^* = \{ \exp(d_m/2) \cos(c_m/2) + i \exp(d_m/2) \sin(c_m/2) \} e_m \quad (44c)$$

$$R^* = \{ \exp(-d_m/2) \cos(c_m/2) - i \exp(-d_m/2) \sin(c_m/2) \} f_m \quad (44d)$$

$$S^* = \frac{1}{e_n + f_n} I(\omega) \quad : \text{E+F入力} \\ = \frac{1}{2e_n} I(\omega) \quad : \text{2E入力} \quad (I(\omega) : \text{基盤入力加速度の複素フーリエ振幅}) \quad (44e)$$

$$d_m = \frac{\omega H_m}{V_{sm}} \sqrt{\frac{\sqrt{1+4\beta_m^2}-1}{2(1+4\beta_m^2)}}, \quad c_m = \frac{\omega H_m}{V_{sm}} \sqrt{\frac{\sqrt{1+4\beta_m^2}+1}{2(1+4\beta_m^2)}} \quad (44f)$$

なお、式(44)において、複素数値をとる変数は、 P^* 、 Q^* 、 R^* 、 S^* 、 e_m 、 f_m および $I(\omega)$ である。

次に、第 m 層中央におけるせん断ひずみを算出する。

$$\gamma_m(x = H_m/2) = ik_m (E_m e^{ik_m H_m/2} - F_m e^{-ik_m H_m/2}) e^{i\omega t} \quad (45)$$

$$ik_m = i \sqrt{\frac{\rho_m}{G_m^*}} \omega = i \frac{\omega}{V_{sm}} \sqrt{\frac{1}{1+2i\beta_m}} = \frac{\omega}{V_{sm}} \sqrt{\frac{\sqrt{1+4\beta_m^2}-1}{2(1+4\beta_m^2)}} + i \frac{\omega}{V_{sm}} \sqrt{\frac{\sqrt{1+4\beta_m^2}+1}{2(1+4\beta_m^2)}} \quad \text{を考慮し、せん断}$$

応力と同様に計算すれば、次式を得る。すなわち、第 m 層中央のせん断ひずみ（複素フーリエ振幅）は、次式のように書くことができる。

$$\gamma_m(x = H_m/2) = T^* \times (Q^* - R^*) \times S^* \quad (46a)$$

$$\text{ここに、} T^* = -\frac{1}{V_{sm} \omega} \sqrt{\frac{\sqrt{1+4\beta_m^2}-1}{2(1+4\beta_m^2)}} - i \frac{1}{V_{sm} \omega} \sqrt{\frac{\sqrt{1+4\beta_m^2}+1}{2(1+4\beta_m^2)}} \quad (46b)$$

4. ひずみ依存性の考慮

せん断ひずみの増大に伴うせん断剛性の低下および減衰の増大の影響は、等価線形化手法により考慮した。等価線形化手法は、線形解析の繰り返し計算により、予め設定されたせん断剛性と減衰のひずみ依存特性に従い、せん断剛性および減衰を地盤の発生ひずみに適合させる方法である。

更新させる剛性および減衰の決定に用いるせん断ひずみは、各地層中央位置におけるせん断ひずみの時刻歴最大値 γ_{\max} を算出し、その値の 0.65 倍（有効ひずみ）として定めた。

また、ひずみ適合の収束判定は、全ての地層のせん断波速度、減衰定数およびせん断剛性に関し、更新後と更新前の差の更新後に対する比が、収束判定誤差以内に収まることを条件とした。すなわち、全ての地層で次式が成立することを収束判定条件とした。

$$Abs((V_{sm} - V_{sm1})/V_{sm}) < \varepsilon \quad (47a)$$

$$Abs((\beta_{sm} - \beta_{sm1})/\beta_{sm}) < \varepsilon \quad (47b)$$

$$Abs((G_{sm} - G_{sm1})/G_{sm}) < \varepsilon \quad (47c)$$

ここに、 V_{sm} ：第 m 層の更新後のせん断波速度、 β_{sm} ：第 m 層の更新後の減衰定数

G_{sm} ：第 m 層の更新後のせん断剛性、

V_{sm1} ：第 m 層の更新前のせん断波速度、 β_{sm1} ：第 m 層の更新後の減衰定数

G_{sm1} ：第 m 層の更新前のせん断剛性、

ε ：収束判定誤差

せん断剛性および減衰定数のひずみ依存曲線としては、「土研モデル」（建設省土木研究所(1982)：地盤の地震時応答特性の数値解析法、建設省土木研究所資料 No.1778）を用いた。「土研モデル」では、「沖積粘性土」、「洪積粘性土」および「砂質土」の 3 種の土質に対してひずみ依存曲線が定められている。それらのひずみ依存曲線を以下に示す。以下の具体的数値は、吉田(1998)の報告を参照した。

(1) 沖積粘性土

沖積粘性土のせん断剛性に対するひずみ依存曲線 G/G_0 は、次式で与えられる。

$$\frac{G}{G_0} = [A \cdot \sigma_m'^B]_{\gamma=\gamma_i} \quad (10^{-6} \leq \gamma \leq 5 \times 10^{-4}) \quad (48)$$

$$\frac{G}{G_0} = [A \cdot \sigma_m'^B]_{\gamma=5 \times 10^{-4}} \cdot [K]_{\gamma=\gamma_i} \quad (5 \times 10^{-4} \leq \gamma \leq 10^{-2})$$

ここに、 G_0 ：初期せん断剛性、 σ'_m ：平均有効応力(kgf/cm²) ($= (1+2K_0)/3 \cdot \sigma'_v$)、 K_0 ：静止土圧係数、 σ'_v ：有効上載圧(kgf/cm²)、 A, B, K ：表 1(a)および(b)に示される定数

減衰定数については、表 1(c)に示す通りである。

(2) 洪積粘性土

洪積粘性土のせん断剛性および減衰定数に対するひずみ依存曲線は、表 2 に示すように与えられる。

(3) 砂質土

砂質土のせん断剛性および減衰定数 h に対するひずみ依存曲線は、次式で与えられる。平均有効応力 1kgf/cm² における G/G_0 の値および $m(\gamma)$ の値を、表 3 に示す。

$$\frac{G}{G_0} = \left[\frac{G}{G_0} \right]_{\sigma'_m = 1 \text{ kgf/cm}^2} \sigma'_m{}^{m(\gamma) - m(\gamma=10^{-6})} \quad (49a)$$

$$h = 0.3 \cdot (1 - G/G_0) \quad (49b)$$

表 1(a) 定数 A および B (沖積粘性土)

γ	A	B
2×10^{-6}	0.991	0.00258
5×10^{-6}	0.965	0.0160
1×10^{-5}	0.938	0.0275
2×10^{-5}	0.908	0.0443
5×10^{-5}	0.863	0.0727
1×10^{-4}	0.820	0.101
2×10^{-4}	0.780	0.129
5×10^{-4}	0.705	0.185

表 1(b) 定数 K (沖積粘性土)

γ	K
5×10^{-4}	1.000
1×10^{-3}	0.831
2×10^{-3}	0.655
5×10^{-3}	0.431
1×10^{-2}	0.282
2×10^{-2}	0.170
5×10^{-2}	0.06
1×10^{-1}	0.03

表 1(c) 減衰定数のひずみ依存性 (沖積粘性土)

γ	h (減衰)	γ	h (減衰)
1×10^{-6}	0.02	5×10^{-4}	0.073
2×10^{-6}	0.023	1×10^{-3}	0.092
5×10^{-6}	0.028	2×10^{-3}	0.110
1×10^{-5}	0.032	5×10^{-3}	0.140
2×10^{-5}	0.036	1×10^{-2}	0.161
5×10^{-5}	0.044	2×10^{-2}	0.176
1×10^{-4}	0.051	5×10^{-2}	0.192
2×10^{-4}	0.057	1×10^{-1}	0.200

表2 セン断剛性および減衰定数のひずみ依存性 (洪積粘性土)

γ	G/G ₀	h (減衰)	γ	G/G ₀	h (減衰)
1×10 ⁻⁶	1.000	0.007	5×10 ⁻⁴	0.627	0.084
2×10 ⁻⁶	0.990	0.009	7×10 ⁻⁴	0.563	0.099
5×10 ⁻⁶	0.970	0.013	1×10 ⁻³	0.491	0.119
1×10 ⁻⁵	0.950	0.016	1.5×10 ⁻³	0.415	0.142
2×10 ⁻⁵	0.928	0.019	2×10 ⁻³	0.362	0.158
3×10 ⁻⁵	0.908	0.023	3×10 ⁻³	0.288	0.183
5×10 ⁻⁵	0.880	0.028	5×10 ⁻³	0.200	0.217
1×10 ⁻⁴	0.834	0.037	7×10 ⁻³	0.145	0.233
2×10 ⁻⁴	0.769	0.050	1×10 ⁻²	0.085	0.264
3×10 ⁻⁴	0.715	0.063			

表3 セン断剛性のひずみ依存性 (砂質土)

γ	G/G ₀	m(γ)-m($\gamma=10^{-6}$)	γ	G/G ₀	m(γ)-m($\gamma=10^{-6}$)
1×10 ⁻⁶	1.000	0.000	2×10 ⁻⁴	0.689	0.156
2×10 ⁻⁶	0.989	0.018	3×10 ⁻⁴	0.606	0.190
5×10 ⁻⁶	0.978	0.028	5×10 ⁻⁴	0.500	0.260
1×10 ⁻⁵	0.959	0.040	1×10 ⁻³	0.356	0.350
2×10 ⁻⁵	0.928	0.058	2×10 ⁻³	0.228	0.422
3×10 ⁻⁵	0.905	0.064	3×10 ⁻³	0.170	0.448
5×10 ⁻⁵	0.867	0.080	5×10 ⁻³	0.108	0.476
1×10 ⁻⁴	0.789	0.116	1×10 ⁻²	0.058	0.480

(注) G/G₀は平均有効応力 1kgf/cm²に対する値

5. 計算の流れ

図2に、成層地盤の地震応答計算のフローを示す。

解析手法として複素応答解析を用いているため、地盤の伝達関数を算出しそれに入力地震波のフーリエスペクトルを乗じて応答値のフーリエスペクトルを求め、それをフーリエ逆変換して時刻歴応答を計算することになる。

また、フーリエ変換処理のルーチンが必要になるが、大崎(1994)が作成したFFT(高速フーリエ変換)のプログラムを実数計算処理に修正することで、フーリエ変換および逆変換の計算を実施した。

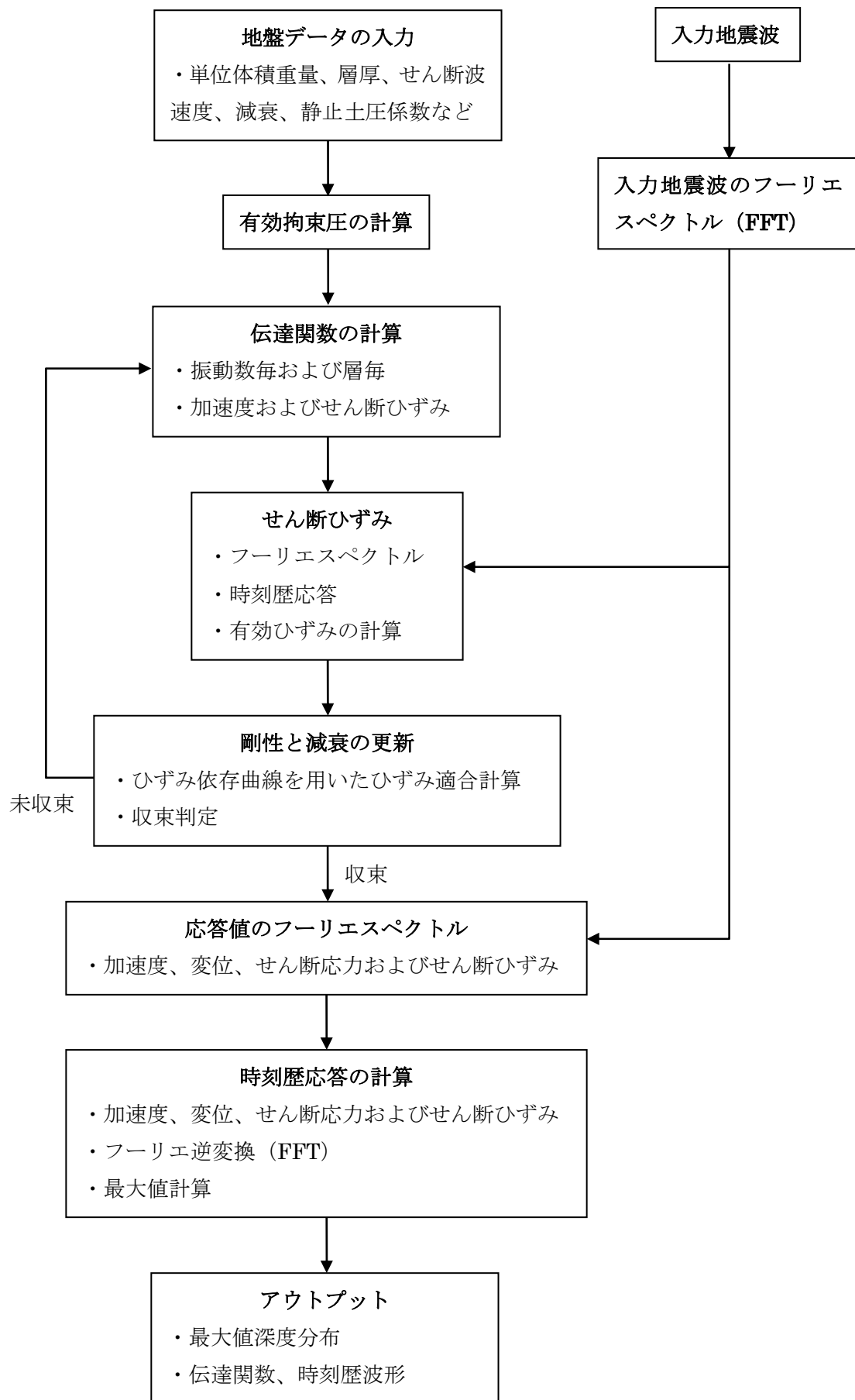


図2 成層地盤の地震応答計算のフロー

液状化判定の方法としては、道路橋示方書・耐震設計編に示される方法を用いた。すなわち、N 値等から求められる液状化強度比 R と作用応力比 L の比 $FL=R/L$ を液状化安全率として算出し、 $FL<1.0$ のときに「液状化する」と判定するものである。なお、本マクロでは作用応力比 L は、一次元地盤応答解析によるせん断応力の時刻歴最大値 τ_{max} をもとに計算した。

液状化安全率 FL は、次式により算出した。

$$FL = \frac{R}{L}$$

ここに、

$$R = c_w \cdot RL \quad (R: \text{液状化強度比})$$

c_w : 地震動タイプによる補正係数

タイプ I 地震動: $c_w = 1.0$

タイプ II 地震動: $c_w = 1.0 \quad (RL \leq 0.1)$

$$c_w = 3.3 \cdot RL + 0.67 \quad (0.1 < RL \leq 0.4)$$

$$c_w = 2.0 \quad (0.4 < RL)$$

RL: 繰返し三軸強度比

$$RL = 0.0882 \cdot \sqrt{N_a / 1.7} \quad (N_a < 14)$$

$$RL = 0.0882 \cdot \sqrt{N_a / 1.7} + 1.6 \times 10^{-6} \cdot (N_a - 14)^{4.5} \quad (14 \leq N_a)$$

N_a : 粒度の影響を考慮した補正 N 値

砂質土の場合: $N_a = c_1 \cdot N_1 + c_2$

N_1 : 有効上載圧 100(kN/m²)相当に換算した N 値

c_1, c_2 : 細粒分含有率による N 値の補正係数

$$N_1 = 170 \cdot N / (\sigma'_v + 70)$$

N: N 値

σ'_v : 有効上載圧(kN/m²)

$$c_1 = 1 \quad (0\% \leq FC < 10\%)$$

$$c_1 = (FC + 40) / 50 \quad (10\% \leq FC < 60\%)$$

$$c_1 = FC / 20 - 1 \quad (60\% \leq FC)$$

$$c_2 = 0 \quad (0\% \leq FC < 10\%)$$

$$c_2 = (FC - 10) / 18 \quad (10\% \leq FC)$$

FC: 細粒分含有率 (%)

$$\text{礫質土の場合: } N_a = \{1 - 0.36 \cdot \log_{10}(D_{50} / 2)\} \cdot N_1$$

D_{50} : 平均粒径 (mm)

$$L = \tau_{max} / \sigma'_v \quad (L: \text{作用応力比})$$

τ_{max} : 一次元地盤応答解析によるせん断応力の時刻歴最大値

【参考文献】

- 1) 松原勝己(2000)：一次元地盤応答解析における波動的手法に関する一考察、第 27 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集
- 2) 吉田望(1998)：地震応答解析に用いる地盤物性をどう評価するか、液状化地盤における基礎設計の考え方、日本建築基礎構造運営委員会編、日本建築学会
- 3) 大崎順彦(1994)：新・地震動のスペクトル解析入門、鹿島出版会
- 4) アーク情報システム(2014)：ArkQuake Ver3.06（成層地盤地震応答解析）利用説明書、2014年4月
- 5) 社団法人日本道路協会(2012)：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、平成 24年3月