

Y U S A Y U S A - 2 S I M M D L - 2

理論と使用法

(改訂版 Version 2.10)

平成 17 年 7 月

東北学院大学
東京大学工学部

吉田 望
東畑郁生

目 次

1	はじめに	2
2	理論	3
2.1	せん断応力-せん断ひずみ関係	4
2.2	運動方程式	7
2.3	間隙水圧モデル	8
2.4	透水方程式	10
3	土質定数の決め方	12
4	YUSAYUSA の使い方	18
4.1	入力データ	18
4.1.1	タイトル	18
4.1.2	基本データ	18
4.1.3	地震波データ	19
4.1.4	各層の定数	20
4.1.5	基盤定数	22
4.2	ファイル出力	23
4.2.1	ファイル 2 4 への出力。(書式なし)	23
4.2.2	ファイル 25 への出力(書式つき)	23
4.3	解析例	25
4.4	プログラムの構成	30
4.5	参考文献	32
5	S I M M D L の使い方	33
5.1	入力データの作成	33
5.1.1	基本データ	33
5.1.2	応力-ひずみ関係に関する入力	33
5.1.3	過剰間隙水圧発生モデルに関する入力	34
5.1.4	せん断弾性係数モデルに関する入力	34
5.1.5	载荷履歴に関する入力	34
5.2	出力	36
5.3	使用例	36
6	パラメータの早見表	38

1 はじめに

YUSAYUSA は、東京大学・土木工学科・土質研究室（石原研而（現東京理科大学），東畑郁生）により開発された，1次元有効応力地震応答解析プログラム¹⁾である。その後，石原と佐藤工業（株）・吉田望（現在，東北学院大学）により，新しい応力ひずみ関係をつけ加えたり，dynamic allocation 方式を採用する等の改良が行われた。このマニュアルは，改良された YUSAYUSA の理論，使用法を示すと共に，データ作成に必要なとなる，要素試験シミュレーションプログラム SIMMDL の使用法を示すものである。なお，SIMMDL は，吉田が開発したプログラムのうち，YUSAYUSA の解析に必要な部分のみを抜き出したものである。このような意味で，どちらのプログラムも，当初開発された時から，その姿が変わっているのので，このマニュアルのではプログラム名として，YUSAYUSA-2，SIMMDL-2 を用いている

これらプログラムの使用は自由であるが，その結果の妥当性の判断は使用者自身で行うべきものであり，開発者は使用によって生じたどのような問題に関しても責任はとらない。

プログラムのバグ等を発見された方は，下記まで知らせて下さい。期間は約束出来ませんが，検討し，結果をお知らせします。

連絡先：〒985-8537 多賀城市中央 1-13-1

Tel. 022-368-7193 Fax. 022-368-7324

E-mail: yoshidan@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

URL: <http://www.civil.tohoku-gakuin.ac.jp/yoshida-j.html>

URL: <http://boh0709.ld.infoseek.co.jp/>

（このマニュアルは，平成 3 年 10 月のオリジナル版を改訂したものです。なお，この間，プログラムについては，内容は変わっていません。平成 15 年版とは，吉田の所属が変わった以外全く同じです。）

Version 2.01：地震波をファイルで読み込めるように修正 1998.6

Version 2.02：質量密度の入力から単位体積重量の入力に変更
低拘束圧下の内部摩擦角を使わないオプションを用意 1999.1

Version 2.03：引数が(1)や(N)になっているのを(*)に修正 2002.4

Version 2.04：印刷の書式を修正。整合配列数を修正。24 と 25 のファイル番号に対応するファイル名として YUSAYUSA.tim, YUSAYUSA.max を設定。マニュアルの形式を変更 2002.8

Version 2.05：体積圧縮係数は排水時には必要であるが，入力されていなかったとき適当な値を使うとともに，警告を印刷することにした 2002.8

Version 2.10：積分時間間隔を細分化したときのバグを修正 2003.2

2 理論

YUSAYUSA-2 は、水平成層地盤の地震時挙動を求めるためのプログラムで、その特徴は次の通りである。

- ① 全応力解析と有効応力解析の両方を扱うことができる。
- ② ひずみに依存する非線形性を考慮することができる。
- ③ 繰り返しせん断を受けることによる過剰間隙水圧の発生を考慮することができる。
- ④ 過剰間隙水圧の消散，その過程における地下水の流れ，地下水位の変化などを考慮することができる。
- ⑤ 弾性基盤，すなわち，地下逸散減衰を考慮することができる。

YUSAYUSA では、水と土の2つの材料からなる成層地盤を、全応力解析、または Biot の式に基づく基礎式（有効応力解析）を用い、1次元有限要素法にて解析している。これら基礎式の誘導は、文献1に詳しく示されているが、透水の部分についてはその後東畑により改良が行われている。ここでは、特にこのプログラムを使用する上で必要と考えられる事項について説明する。

1次元解析の場合、Biot の式は、水平方向の運動方程式と、鉛直方向の水の移動を表す方程式に分けられる。YUSAYUSA-2 では、これらを別々に解いており、その大まかな手順を図2.1に示す。図から分かるように、YUSAYUSA では、運動方程式と、圧密方程式を別々に解いているが、それぞれの計算結果はもう一方の方程式を解くために必要なので、各積分ステップごとに結果のやりとりをしているのが特徴である。

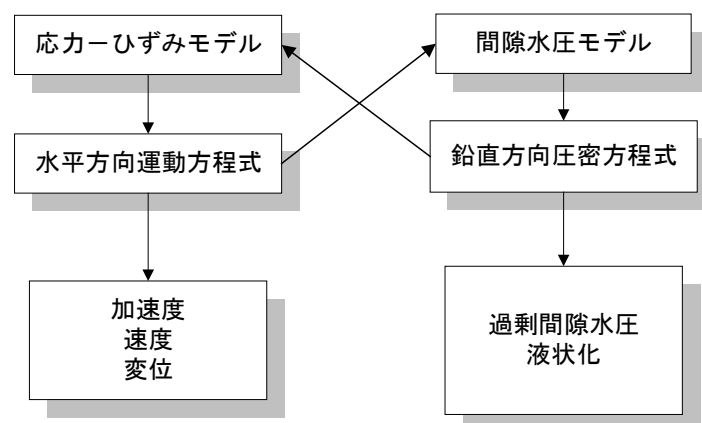


図2.1 YUSAYUSA-2 による解析の流れ図

2.1 セン断応力-せん断ひずみ関係

有効応力解析で用いる応力-ひずみ関係モデルは、有効応力の変化に伴う材料特性の変化を考慮できるものでなければならない。YUSAYUSA-2 では双曲線モデル（Hardin-Drnevich モデルと呼ばれることもある。また、その前に改良とか履歴型とかが加えられることもある）と Ramberg-Osgood モデル（修正 R-O モデルと呼ばれることもある）を採用している。それぞれのモデルの骨格曲線は、式(2.1), (2.2)で表される。

$$(2.1) \quad \text{双曲線モデル} \quad \tau = \frac{G_o \gamma}{1 + \frac{G_o \gamma}{\tau_f}}$$

$$(2.2) \quad \text{Ramberg-Osgoodモデル} \quad \tau = \frac{G_o \gamma}{1 + \alpha \left(\frac{\tau}{\tau_f} \right)^{r-1}}$$

また、本プログラムでは、Ramberg-Osgood モデルでは、式(2.2)の代わりに、プログラムを若干修正するだけで、次の式も使える様にしている（別添のインストールメモ参照）。

$$(2.3) \quad \gamma = \frac{\tau}{G_o} \left\{ 1 + \left(\frac{\gamma_f}{\gamma_r} - 1 \right) \left| \frac{\tau}{\tau_f} \right|^{r-1} \right\}$$

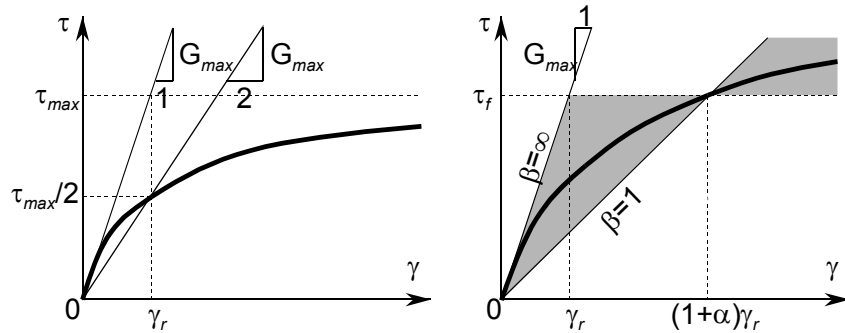


図2.2 モデルの骨格曲線の物理的性質

ここで、 $\gamma_r = \tau_f / G_o$ は基準ひずみ、 γ_f は破壊ひずみである。式(2.3)は、原の修正式と言われる表現方法である。形式的には二つの式(2.2)と(2.3)は、 α を $\gamma_f/\gamma_r - 1$ に置き換えただけの式であるが、その物理的な意味は若干異なる。すなわち、原の修正式では、破壊ひずみを定義することで、これまで Ramberg-Osgood モデルの欠点と言われていた、ひずみが無限大になると応力も無限大にあるので、実際の土の現象と合わないという欠点を（形式的に）除くことができるようになり、さらに、その他のパラメータについても物理的な意味が明瞭となっている。もちろんひずみが破壊ひずみを越えることになれば応力もせん断強度を越えて増加するわけであるが、実際の土に対応した破壊ひずみを適切に選択することによってこのような現象の起こることをコントロールすることができる。

図 2.2に、モデルのパラメータの意味が分かりやすいように、模式図を示す。このモデルでは骨格曲線は原点より接線剛性 G_o で立ち上がり、点 (γ_r, τ_f) を通り、その曲率はパラメータ r の値で制御する。 $r=1$ の時には、骨格曲線は直線、 $r=\infty$ の時には、骨格曲線は完全弾塑性モデルとなる。

Ramberg-Osgood モデルでは、独立なパラメータは、式(2.2)の表現では G , r , (α/τ_f^{r-1}) の三つ、式 2.3 の表現では G_o , r , (α/τ_f^{r-1}) または $((\gamma_f/\gamma_r - 1)/\tau_f^{r-1})$ の三つであるが、最後のパラメータについては、二つに分けて、計 4 つのパラメータとして扱う方が物理的な意味が明瞭となるので、本プログラムではその方法を用いている。すなわち、モデルパラメータは、 G_o , r , α （または γ_f ）,

τ_f の4つである。このうち τ_f は内部摩擦角として入力する。

YUSAYUSA-2 で用いている双曲線モデルと Ramberg-Osgood モデルは、モデルパラメータの一部である、微小ひずみ時のせん断弾性係数 (G_0) とせん断強度 (τ_f) が、有効応力 (σ'_v) の関数として次のように表されているので、有効応力の変化に伴い骨格曲線は変化する。

$$(2.4) \quad G_0 = A \frac{(B-e)^2}{1+e} \left(\frac{1+2K_0}{3} \sigma'_v \right)^C$$

$$(2.5) \quad \tau_f = c + \sigma'_v \tan \phi$$

ここで、 e : 間隙率

K_0 : 静止土圧係数

c : 粘着力

ϕ : 内部摩擦角

A, B, C : 材料に固有のパラメータ

なお、砂質土では常に $c=0$ が仮定されている。

これまでは、ひずみが単調に増加する場合のモデル化を述べた。ここで、式(2.1)～(2.3)で示されるような曲線を骨格曲線と呼ぶ。地震時のような繰返し载荷を受ける材料の挙動を扱う場合には、骨格曲線を定義しただけでは材料の挙動を表現することはできず、除荷、再载荷が起こった場合の挙動も併せて記述する必要がある。このような挙動を表す法則を履歴法則といい、それにより定義されるモデルを履歴曲線と呼ぶ。

YUSAYUSA-2 では Masing 則を用いて履歴法則を表している。この方法によれば、履歴曲線は次のようにして作ることができる。

- ①履歴曲線の形状は骨格曲線と相似であり、その大きさは2倍である。履歴曲線の原点は除荷、再载荷した点の合わせる。すなわち、骨格曲線を一般的な表現で、

$$\tau = f(\gamma)$$

と表したとき、履歴曲線は、除荷点の応力とひずみをそれぞれ τ_R と γ_R で表すとすれば、

$$\frac{\tau - \tau_R}{2} = f\left(\frac{\gamma - \gamma_R}{2}\right)$$

と表される。

- ②ひずみが過去の除荷、再载荷点に至った後は、以前の履歴曲線の延長を動く。

全応力解析の基では、この条件だけで履歴挙動を完全に記述することができる。それは、図2.3(a)に示されるように、再载荷した履歴曲線は必ず前の除荷点を通るので、以前の履歴曲線に簡単に乗り移ることができるからである。しかし、有効応力解析ではこの条件だけでは不十分である。

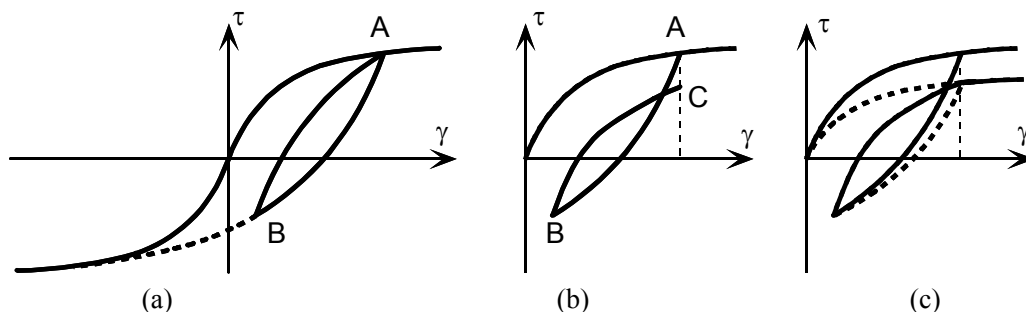


図2.3 有効応力解析における Masing 則の適用

図2.3(b)において、A点で除荷が起こり、B点で再载荷したとする。B→Cの区間で過剰間隙水圧が発生したとすると、A→Bの間の応力の変化量に比べ B→Cの応力変化は小さいから、以前の除荷点と同じひずみに至ったとき応力は以前の除荷点Aには至らず、それより小さいC点であ

る。従って、従来の通り除荷前の履歴曲線（この場合は骨格曲線）に移行しようとするれば応力が不連続に変化することになり、不都合である。これを改善するためにはいくつかの方法がある。もっとも一般的なのは、応力－ひずみ関係を無次元化し、式の中に有効拘束圧を陽に含まないようにする方法であるが、YUSAYUSA-2では異なる方法を用いている。

以前の除荷点ひずみ C 点に至ったとき、その時点の有効応力状態を一定と保ったままこれまでと同じひずみ履歴を受けたとする。すると、図 2.3(c)の様に仮想の骨格曲線と履歴曲線が得られ、C 点では応力の値は、この仮想の履歴曲線（この図では骨格曲線）と同じになる。従って、C 点を超えて以降は仮想の履歴曲線の延長上を動くとするれば応力に不連続が起こる事なく履歴曲線を描くことができる。

2.2 運動方程式

水平方向の波動方程式は、式(2.6)で与えられる。

$$(2.6) \quad \frac{\gamma}{g} \cdot \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau}{\partial z}$$

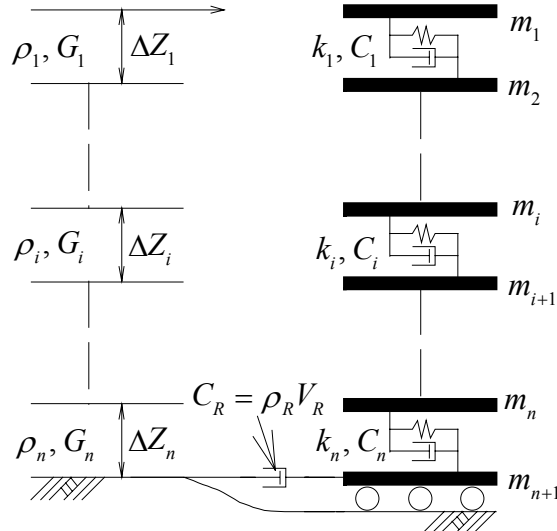


図2.4 水平地盤のモデル化

ここで、 u_x : 水平方向変位
 γ : 単位体積重量
 g : 重力加速度
 z : 深さ

応答計算を行う際には、地盤を図 2.4に示すような、せん断ばね—集中質点系に離散化する。地盤の逸散減衰を考慮する時は、さらに基盤に弾性境界を設ける。すなわち、解析範囲下端と解放基盤の間をダッシュポットで繋ぐ。

数値積分は、Newmark の β 法によって行なう。すなわち、時刻 t の変位、速度、加速度の値を基に、時刻 $t+dt$ の速度、変位は次のように表される。

$$(2.7) \quad \dot{u}(t+dt) = \dot{u}(t) + (1-\gamma)dt\ddot{u}(t) + \gamma dt\ddot{u}(t+dt)$$

$$(2.8) \quad u(t+dt) = u(t) + dt\dot{u}(t) + \left(\frac{1}{2} - \beta\right)dt^2\ddot{u}(t) + \beta dt^2\ddot{u}(t+dt)$$

ここで、 γ , β の値は、それぞれ 1/2, 1/4 と固定されているので、データとして入力する必要はないが、プログラムでは、 γ , β の値とも、変数として扱われているので、プログラマーに相談すれば異なる値を用いることも可能である。

2.3 間隙水圧モデル

間隙水圧の上昇は、有効応力径路法で求める。この方法は、せん断応力の変化に対する過剰間隙水圧の発生量を、 τ - σ_v' 曲線上であらかじめ決めた径路にそって応力点が動くと考えることにより予測するものである。応力径路は、次のように決められている。図 2.5 に応力経路を模式的に示す。

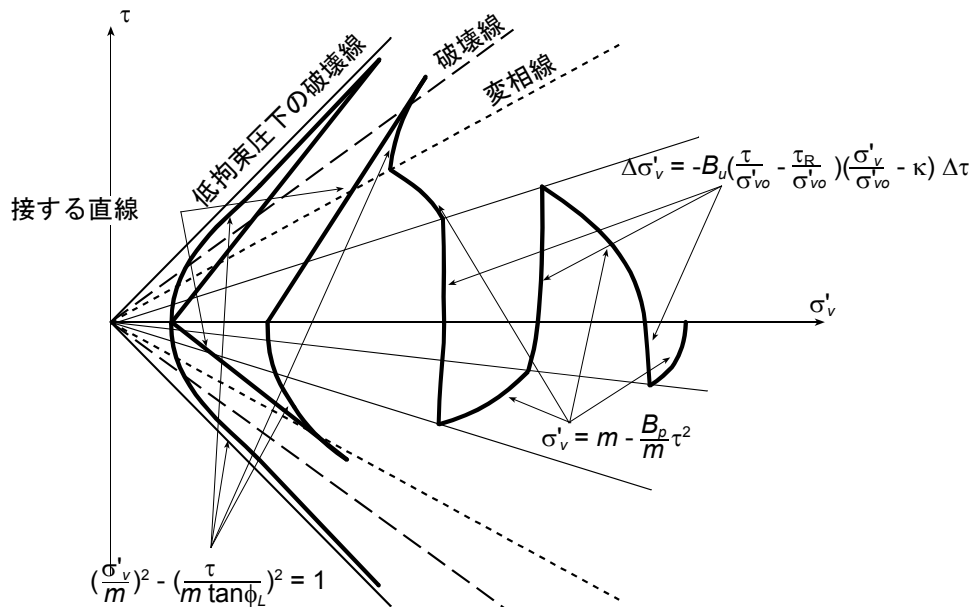


図2.5 有効応力経路の模式図

- ①水平面上のせん断応力 τ と、鉛直有効応力 σ'_v との比 τ/σ'_v ＝一定なる降伏条件を仮定する。降伏曲面は、正負の τ に関し独立とする。
- ②降伏時の σ'_v - τ 平面上の応力径路を、次のような放物線で表す。

$$(2.9) \quad \sigma'_v = m - \frac{B_p}{m} \tau^2$$

ここで, B_p : 水圧のあがりやすさを表すパラメータ
 m : τ - σ'_v 平面上で放物線の位置を決めるパラメータ

なお、 σ'_v の減少量は、非排水条件での過剰間隙水圧発生量に等しい。

- ③除荷時でも、水圧はわずかに上昇する。このときの応力径路は、式(2.10)で表す。

$\sigma'_v \geq K\sigma'_{v0}$ のとき

$$(2.10) \quad \Delta \sigma'_v = -B_u \left(\frac{\tau}{\sigma'_{v0}} - \frac{\tau_R}{\sigma'_{v0}} \right) \left(\frac{\sigma'_v}{\sigma'_{v0}} - \kappa \right) \Delta \tau$$

$\sigma'_v < K\sigma'_{v0}$ のとき

$$(2.11) \quad \frac{d\sigma'_v}{d\tau} = 0$$

ここで、 B_u : 水圧の上がり易さをコントロールするパラメータ
 σ'_{vo} : 初期有効応力
 κ : 水圧の発生量をコントロールするパラメータ

④変相角 (θ_s) が存在し、一旦 τ/σ'_v が $\tan\theta_s$ を越えると次のような応力経路をたどる。

i) τ が増加するとき、応力経路は双曲線で表され、過剰間隙水圧 u_g は減少する。

$$(2.12) \quad \left(\frac{\sigma'_v}{m}\right)^2 - \left(\frac{\tau}{m \tan \phi_L}\right)^2 = 1$$

ここで、 θ_L : 有効応力が小さいときの内部摩擦角¹で、次のように与えられている。

$$(2.13) \quad \tan \theta_L = 1.4 \tan \theta$$

ii) 一方、 τ が減少するとき、それまでたどってきた、双曲線の接線上を動く。このとき過剰間隙水圧は上昇する。

⑤ σ'_v が初期応力に比べて充分小さくなった場合に完全液状化と見なし、以後 τ が増えるときも、減るときも、応力経路は双曲線上を動く。

¹ 砂の破壊条件が、特に低拘束圧下でモールクーロンの破壊条件のように直線では無いことは事実かもしれないが、変相線を越えて以降、低拘束圧下の破壊条件を用いてせん断強度を決めることは、今日の目から見ると問題がないわけではない。このことは、図 2-5 を見れば明らかで、応力経路が変相線を横切るのはなにも拘束圧が低いときに限ったことではない。しかし、この仕様はプログラム開発時のものであり、ここでは変更していない。なお、SIMMDL では低拘束圧下の破壊条件は用いていないので、変相以降の挙動は SIMMDL と YUSAYUSA で異なる。このことは液状化判定などで問題があるかもしれないが、これまでの経験によれば、YUSAYUSA では変相後 1~2 サイクルで液状化に至ることがふつうであり、実用的には問題にはならないと考えている。

2.4 透水方程式

Biot の理論に従えば、鉛直方向に関して土粒子、水の鉛直方向の移動を扱う式が得られる。これは、次のように表される。

$$(2.14) \quad \frac{\gamma_t}{g} \cdot \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\gamma_w}{g} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} = -\frac{\partial \sigma}{\partial z} + \gamma_t$$

$$(2.15) \quad \frac{n\gamma_w}{g} \cdot \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\gamma_w}{g} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{b}{n} Q + n \frac{\partial u}{\partial z} - n\gamma_w = 0$$

$$(2.16) \quad \frac{\partial W}{\partial z} + \frac{\partial Q}{\partial z} = 0$$

$$(2.17) \quad \frac{\partial W}{\partial z} = m_v \left(-\frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u_g}{\partial t} \right)$$

ここで、 W : 土粒子の下向き速度 ($=\partial u/\partial t$)
 Q : 間隙水の土粒子に相対的な流速 ($=\mathbf{n} \cdot \partial/\partial t(\mathbf{v}_s - \mathbf{u}_s)$)
 σ : 全応力
 u : 間隙水圧
 γ_t : 土の単位体積重量
 γ_w : 水の単位体積重量
 n : 間隙率
 u_g : 発生する過剰間隙水圧
 $b = n^2 \gamma_w / k$
 k : 透水係数
 z : 深さ
 t : 時間
 m_v : 体積圧縮係数

上式より Q , u , σ を消去すれば W に関する 2 階の微分方程式が得られる^{脚注}。

$$(2.18) \quad \frac{m^2 k}{ng} \left(n \frac{\gamma_t}{\gamma_w} + 1 - n \right) \frac{\partial W}{\partial t} + m_v^2 \frac{\partial W}{\partial t} - \frac{km_v}{\gamma_w} \frac{\partial W}{\partial z} + \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial m_v}{\partial z} \frac{\partial W}{\partial z} - \frac{km_v^2}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_g}{\partial z \partial t} = 0$$

境界条件は次のようになる。

$$\text{基盤 } W|_{z=H} = 0 \quad (\text{不透水})$$

$$\text{地下水位面 } W|_{z=0} = 0 \quad (\text{不透水})$$

$$(2.19) \quad M_t \frac{\partial W}{\partial t} - \frac{1}{m_v} \frac{\partial W}{\partial z} - \frac{\partial u_g}{\partial t} = 0 \quad (\text{自由水面})$$

YUSAYUSA-2 では、空間方向に Galerkin 法で解く。この際の変位関数は次のように選ぶ。

^{脚注} 式の誘導

式(2.16)を z に関し積分すると、次式が得られる。

$$W + Q = f(t)$$

ここで、 $f(t)$ は時間にのみ依存し、 z に依存しない関数である。ところで、基盤では水は通さず、上下動もない。したがって、 $W=Q=0$ 。これより、 $f(t)=0$ が得られる。これは、 $W+Q=0$ が常に成立しているということである。

式(2.17)を z で微分し、その式に式(2.17)を代入し時間に関する 1 階微分の項を消去する。

式(2.14), (2.15)を t で微分し、 $\frac{\partial^2 \sigma}{\partial t \partial z}$, $\frac{\partial^2 u}{\partial t \partial z}$ について解き、さらに、 Q を消去し、 W に関する式とする。これを、上の式に代入すれば、求める式が得られる。

$$W = \sum_{i=1}^{n+1} W_i w_i$$

ここで,

$$w_i = \begin{cases} 0 & z \leq z_{i-1}, z \geq z_{i+1} \\ \frac{z - z_{i-1}}{\Delta z_{i-1}} & z_{i-1} \leq z \leq z_i \\ \frac{z_{i+1} - z}{\Delta z_i} & z_i < z < z_{i+1} \end{cases}$$

この際、各層をさらに4つに分割している。

Galerkin 法で解く場合、上式は部分線形関数であり、その1階微分が無限大となる問題点がある。これについては、 δ 関数を導入することで解決をはかっている。

3 土質定数の決め方

この節では、解析に用いる土の定数の決め方について、その関係を整理する。

①変相角 θ_s 、低拘束圧下での内部摩擦角 θ_L

三軸試験、単純せん断試験結果より、変相角と低拘束圧下での内部摩擦角との関係は、次のようになることが知られている。

$$(3.1) \quad \tan \theta_s = \frac{5}{8} \tan \phi_L$$

また、低拘束圧下での内部摩擦角は、通常定義される拘束圧 $100\text{kN/m}^2 \sim 300\text{kN/m}^2$ での内部摩擦角 ϕ よりは大きくなる。およそ次の関係が成立する。

$$(3.2) \quad \tan \phi_L = 1.4 \tan \phi$$

したがって、内部摩擦角 ϕ と変相角 θ_s との関係は次のように表される。

$$(3.3) \quad \tan \theta_s = 0.875 \tan \phi$$

ただし、内部摩擦角が突然変化することによって数値的な問題が起きる可能性も考えられる。そこで、プログラムでは低拘束圧下の内部摩擦角を使わないオプションも用意している⁶⁾。

② κ

κ は、繰返し数が多くなっても液状化しない応力比を示すパラメータである。図 3.1 の液状化強度曲線においてせん断応力振幅 τ_a （応力比 R_∞ ）より小さい応力振幅では液状化が発生しないとすると、 κ と τ_a は次のような関係がある。

$$(3.4) \quad R_\infty = \frac{\tau_a}{\sigma'_{v0}} = \frac{\kappa \sigma'_{v0} \tan \phi}{\sigma'_{v0}}, \quad \kappa = \frac{\tau_a}{\sigma'_{v0} \tan \phi}$$

κ は、通常、0.06～0.1 の範囲の値となる。

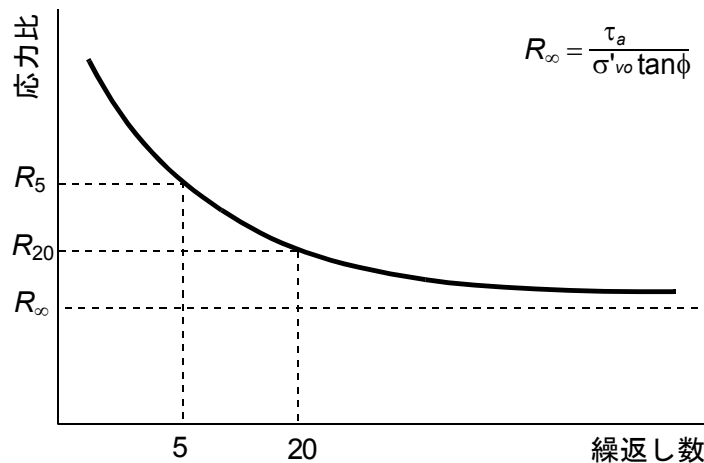


図3.1 液状化強度曲線の模式図

③ B_p , B_u

載荷時および除荷時の間隙水圧の上昇の程度を表すパラメータ B_p , B_u は、実際の液状化現象をシミュレーションできるように決めるのが原則である。ところで、実際の現象をシミュレーションするといっても、合わせるべき要因は、有効応力経路、応力一ひずみ関係、液状化強度曲線等多数あり、これらを全て同時に合わせることは一般的には不可能である。これらのうち、応力一ひずみ関係については、次項でその値の決め方を示しており、ここで問題としている B_p , B_u の役割ではないと考えられる。また、有効応力経路の詳細まで合わせようとする事は、困難でもあり、また、実用的にはそれほど意味のあることではない。実用的な観点からいえば、液状化強度曲線

と過剰間隙水圧の発生量—繰り返し数関係がシミュレーションできればほぼ完璧といえよう。実際には、それだけを完全に合わせることも難しいし、また、実際の適用ではそこまでデータが与えられることも少ない。

これらの値は振動三軸試験結果を基に決めることができる。ここではまずこの方法を説明する。水平成層地盤の解析に用いるためにはさらに静止土圧係数 K_0 を考慮して修正する必要があるが、これについては、後で説明する。両者を区別するために、以下では振動三軸試験の結果に基づく B_p 、 B_u の値はそれぞれ B'_p 、 B'_u と、「'」をつけて表すことにする。

まず、 B'_p の値は、第1サイクル目の過剰間隙水圧の発生量を元にして決める。すなわち、図3.2に示すように、第1サイクル目の引っ張り、圧縮両側での载荷時の過剰間隙水圧の発生量、 Δu_c と Δu_e の平均値より決めることができる。式(2.9)でせん断応力振幅を τ_d とし、さらに $m = \sigma'_{vo}$ を代入し、 B_p について解くと、次式が得られる。

$$(3.5) \quad B'_p = \frac{u_g \sigma'_{vo}}{\tau_d^2}$$

ここで、 u_g は Δu_c と Δu_e の平均値である。

次に、 B'_u の値は20サイクルの繰り返し载荷により液状化（両振幅5%）するときの液状化応力比 R_{20} をもとに決める。そのために、あらかじめ、特定の B'_p の値と変相角の値に対して B'_p と R'_{20} の関係を示す実験式を決めておく必要がある。図3.3はそのような一例であり、変相角 $\theta_s = 26.6^\circ$ ($\tan \theta_s = 0.5$) に対する実験式である。この図は今後の基準となるため、その値をここでは*をつけて示すことにする。図3.3より、 B_p^* と R_{20}^* の値より B_u^* の値を求めることができる。この図を使うためには、振動3軸試験結果より得られた B'_p と R'_{20} より B_p^* と R_{20}^* を求める必要がある。この変換は次のように行う。

$$(3.6) \quad B_p^* = \left(\frac{\tan \theta'_s}{\tan \theta_s^*} \right)^2 B'_p = 4 \tan^2 \theta'_s \cdot B'_p$$

$$R_{20}^* = \frac{\tan \theta_s^*}{\tan \theta'_s} R'_{20} = \frac{1}{2 \tan \theta'_s} R'_{20}$$

なお、図3.3は、原論文を写したものである。ところで、図3.3は特定の条件に対する値を求めたわけであるが、任意の条件下に対してはこの値を補正する必要がある。このうち、変相角に関しては、式(3.7)のようになる。

$$(3.7) \quad B'_p = \frac{B_p^*}{(2 \tan \theta'_s)^2}$$

$$R'_{20} = 2 \tan \theta'_s R_{20}^*$$

$$B'_u = \frac{B_u^*}{(2 \tan \theta'_s)^2}$$

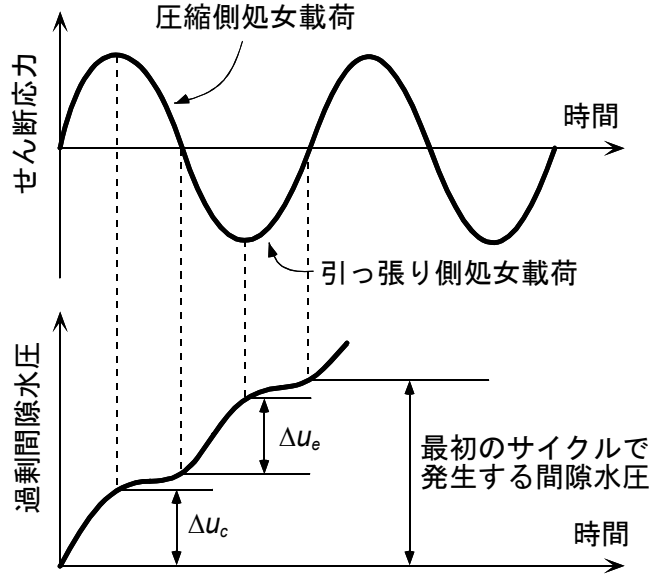


図3.2 B_p の決定

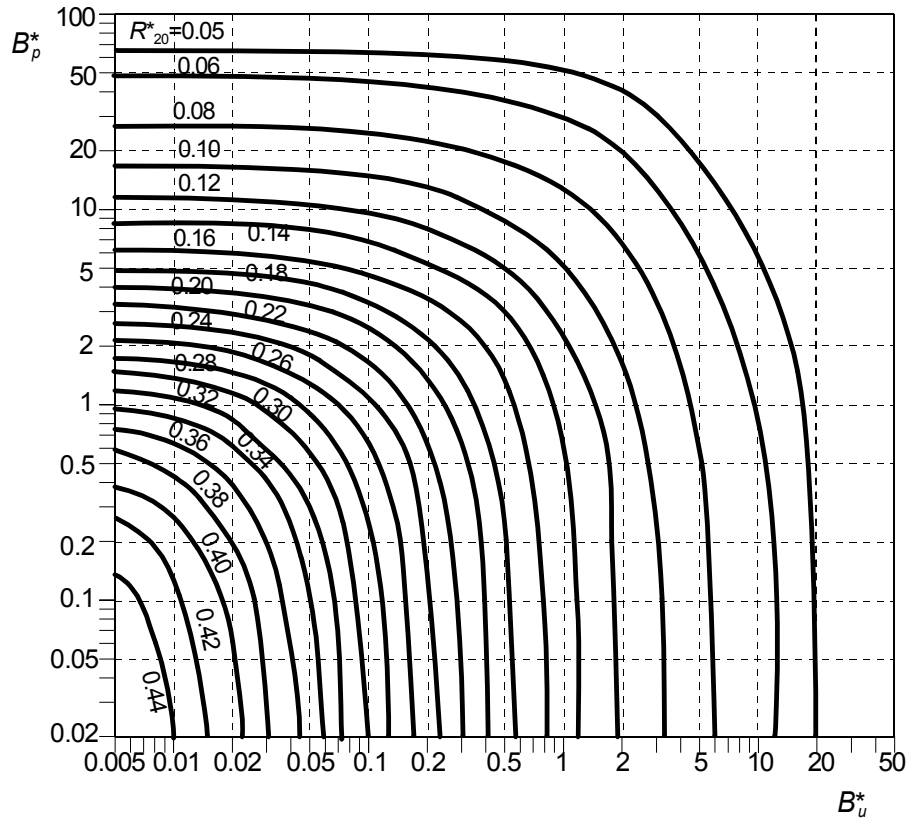


図3.3 B_u を決めるための計算図表

なお、式(3.7)の上の二つの式は使うここで挙げた手順に従えば、既に求めているので、使う必要はない。

次に、静止土圧係数 K_0 に対する補正は次のようになる。

$$\tan \theta_s = \frac{1 + 2K_o}{3} \tan \theta'_s$$

$$(3.8) \quad B_p = \left(\frac{1 + 2K_o}{3} \right)^2 B'_p = \frac{B_p^*}{(2 \tan \theta'_s)^2}$$

$$B_u = \left(\frac{1 + 2K_o}{3} \right)^2 B'_u = \frac{B_u^*}{(2 \tan \theta'_s)^2}$$

以上をまとめて、パラメータの求め方を図 3.4 に示す。

なお、巻末に、もう少し使いやすい早見表を示した。

ここで示したのは、パラメータを決める一つの方法であるが、誘導に際しいくつかの仮定を行っているため、実際の解析時にはこの方法で得られた値がベストとはいえない。確かに、一定応力振幅の载荷を受ける場合であれば、この方法はベストな選択の一つといえるが、地震時には载荷はランダムであり、すべての応力振幅の载荷に対しこの方法で求めたパラメータの値がベストとはいえないからである。従って、実用的には実際の地盤条件に基づき材料のシミュレーションを行い、パラメータの値を決めるほうが合理的である。ここでは、このために SIMMDL-2 というプログラムを用意している。SIMMDL-2 では特定のパラメータのもとで要素試験をシミュレーション出来るようになっているので、ここで求めたパラメータを初期値として与え、これを改訂しながら、最も実験にあうパラメータの値を求めることが出来る。

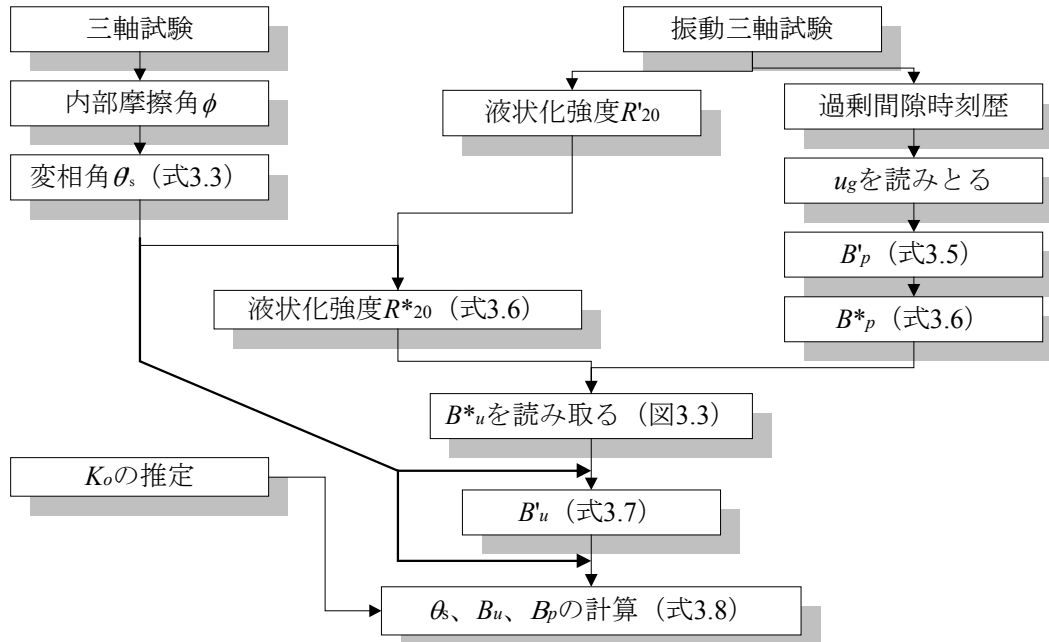


図3.4 パラメータを求めるための流れ

ところで、液状化の判定方法にはいくつかの方法がある。実験では初期液状化（過剰間隙水圧が拘束圧と最初に等しくなったとき）、両振幅ひずみ 5%、10%などが良く用いられる。YUSAYUSA-2 で用いているモデルを使う場合には初期液状化に基づいて行うのが好ましい。ただし、解析で言う初期液状化は応力経路が変相線を横切る時を言い、実験で用いている判定方法とは異なるので注意が必要である。液状化判定に初期液状化を選ぶ理由は、このモデルでは応力経路を指定するものであり、せん断応力の経路が指定されれば、応力-ひずみ関係のモデルによらず経路が一定になると言う特徴を有しているからである。すなわち、ひずみの値に基づく液状化の判定方法を用いた場合には、用いる応力-ひずみ関係によって B_p 、 B_u といったパラメータの値を変更する必要があるが、応力経路上の一点を指定する初期液状化により液状化を判定すれば、応力-ひずみ関係モデルによらず同じ値を使えるという利点がある。

応力経路による方法としては、初期液状化以外に完全液状化（有効応力がデータで指定した最小値になるとき）もある。しかし、これを使うことは勧められない。これは、このモデルでは応力経路が変相線を越えて以降の挙動を制御するパラメータは何もなく、変相線をよぎる位置が決まればその後の挙動はパラメータ（ B_p 、 B_u ）の値にかかわらず同じものとなる。これは実験事実と合わせてみると余りよい近似とは言えない。このことは、YUSAYUSA-2 ではサイクリックモビリティは考慮されているとはいえないものの、予測としての精度はあまりよいとは言えないことを意味している。

実験で通常行うようなひずみにより液状化を判定する方法と同じく、ひずみに基づき液状化を判定する方法をシミュレートしてパラメータの方法を決めることは悪い訳ではない。ただ、先にも述べたように、この場合には用いる応力-ひずみ関係モデルにより液状化パラメータの値を変える必要があり、その点が便利と言えないだけのことである。しかし実状に合わせるにはこの方法の方が好ましいこともある。

ところで、SIMMDL-2 を用いて液状化強度のシミュレーションを行う場合に、次の事に注意されたい。

- イ) 一般に液状化強度を求める実験としては 3 軸試験を行うのが普通である。しかしながら、水平成層では単純せん断条件で載荷が行われる。したがって、SIMMDL-2 では単純せん断試験をシミュレートするようになっている。すなわち、SIMMSDL-2 により要素試験をシミュレートす

るときには三軸試験の結果を単純せん断の試験結果に変換し直す必要がある。これは、次のような実験事実を参照にする。すなわち、液状化強度曲線（せん断応力振幅－液状化にいたる繰り返し数関係）は、縦軸（せん断応力振幅）を初期有効拘束圧で無次元化すれば、拘束圧によらず一定となるということである。式(3.7)では既にこの関係が使われている。すなわち、三軸試験の液状化強度曲線を単純せん断試験の結果に直すには、縦軸に $(1+2K_0)/3$ を掛ければよい。 K_0 の値は0.5がよく用いられるが、そのときには、 $2/3$ を掛ければよいわけである。

- ロ) YUSAYUSA-2 では、応力経路が変相線を横切った前後で内部摩擦角の値を変えている。すなわち、一般に言われている内部摩擦角から低拘束圧化の内部摩擦角へ変更しているわけである。しかし、このような不連続な材料特性の変化はせん断応力の不連続を誘発するので、この不連続をなくすため、応力－ひずみ関係の原点を変化させている。一方、SIMMDL-2 では応力制御の場合については同じ扱いをしているが、変位制御の場合についてはこの部分は用いられていない。したがって、ひずみ制御で行う場合には変相線を越えて以降の挙動は SIMMDL-2 と YUSAYUSA-2 では完全には同じにならない。もちろん、実際には応力制御でシミュレーションするのが普通であるから、このことは気にする必要はない。
- ハ) YUSAYUSA-2 では、最小の有効上載圧の大きさを SIGV99 という変数で入力することになっている。ところが SIMMDL ではこの値として初期有効上載圧の 1%を固定値として用いている。したがって、SIGV99 は 0.01 とする必要がある。SIMMDL の設定値を変えたいときには、サブルーチン ISHTOW のデータ文の SVMIN の値を修正すればよい。

④復元力モデルのパラメータ

解析に用いる双曲線モデル、Ramberg－Osgood モデルのパラメータを実地盤の定数および、材料曲線（せん断弾性定数比、減衰定数のひずみ依存性）をもとに決定する方法⁵⁾を示す。

双曲線モデルでは、可変パラメータは G_0 とせん断強度 (τ_f) である。このうち、 G_0 は別に決められるので、骨格曲線形状の形状を決めるためのパラメータは τ_f のみであり、これを決める方法として、次の 2 つが知られている。

a) 土のせん断強度から決める

$\gamma \rightarrow \infty$ のとき $\tau \rightarrow \tau_f = G_0 \gamma_r$ となるので、これをそのまま用いる。この時には、データの入力の際には、内部摩擦角で入力するとよい。

b) 材料曲線から決める

$\gamma = \gamma_f$ のとき、割線係数が初期剛性の $1/2$ になることから、実験で得られた $\Gamma/\Gamma_0 - \gamma$ 曲線より、 $\Gamma/\Gamma_0 = 0.5$ に対するひずみを基準ひずみとし、これに Γ_0 を乗じ τ_f とする。このように、内部摩擦角以外の方法で τ_f を与える場合に備え、データ入力の際、 τ_f の値を与える入力もできるようになっている。

Ramberg-Osgood モデルでは、式の表現方法によってパラメータの表現方法が異なるが、本プログラムでは、 G_0 、 τ_f 、 α （または γ_f ）、 r の 4 つのパラメータを入力する。 G_0 は別に決められるので、骨格曲線形状の形状を決めるためのパラメータは τ_f 、 α （または γ_f ）、 r の 3 つである。このモデルのパラメータの決め方はいくつかの文献に示されているが、いずれも最終的には視覚で決める方法である。ここでは、一意的に決まり、一致ども比較的良好の方法を示す。

まず、 r の値は、減衰特性を一致させるように決める。R-O モデルでは等価減衰定数 D は次式で表される。

$$(3.9) \quad D = D_{\max} \left(1 - \frac{G}{G_o} \right)$$

ここで、 D_{\max} は最大等価減衰定数で、次式で表される。

$$(3.10) \quad D_{\max} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{r-1}{r+1}$$

したがって、 r は次のようにして、減衰特性のみから求められる。

$$(3.11) \quad r = \frac{2 + \pi D_{max}}{2 - \pi D_{max}}$$

経験的に、なるべくひずみの大きいところで減衰特性を実験値と一致させれば、全体の一致がよくなることが分かっている。そこで、実験で得られた最大のひずみに対し式(3.9)より D_{max} をもとめ、式(3.11)に代入し r の値を決めるとよい。

次に、 τ_f の値であるが、双曲線モデル同様二つの決め方があり、それぞれに応じて α の値の決め方が異なっている。

a) 土のせん断強度から決める

$\gamma \rightarrow \infty$ のとき $\tau \rightarrow \tau_f = G_0 \gamma_r$ となるので、これをそのまま用いる。この時には、データの入力の際には、内部摩擦角で入力するとよい。 α の値は原の修正式の考えを用いれば自動的に決まる。すなわち、 $\gamma_r = \tau_f / G_0$ は計算可能であるので、終局ひずみ γ_f として適当な値 (0.05~0.1 程度) を想定すれば、次のように求まる。

$$\alpha = \frac{\gamma_f}{\gamma_r} - 1$$

b) 材料曲線から決める

実験で得られた $G/G_0 - \gamma$ 曲線より、 $G/G_0 = 0.5$ に対するひずみを基準ひずみとし、これに G_0 を乗じ τ_f とする。このように、内部摩擦角以外の方法で τ_f を与える場合に備え、データ入力の際、 τ_f の値を与える入力もできるようになっている。この場合には、 α の値は、次式による

$$\alpha = 2^{r-1}$$

そのほかの方法については、例えば文献 5) を参照されたい。

原の修正式を用いた場合には、上で求めた α から、次式に基づき決めればよい。

$$\gamma_f = \gamma_r (\alpha + 1)$$

⑤ 体積圧縮係数 m_v

排水を考慮するケースのみ必要で、たとえば次の実験式を用いるのことができる。

$$m_v = 0.00297 \sigma_{vo}^{r-0.38} \quad (\text{cm}^2/\text{kgf})$$

なお、この式は、単位系が指定されているので、そのほかの単位系を用いる場合には適当に係数を変換する必要がある。しかし、これにこだわる必要はない。一次元の体積圧縮係数は $1/(K+4G/3)$ で求めることができる。

4 YUSAYUSA の使い方

4.1 入力データ

ここでは、データの入力方法を示す。データはユニット番号 5 から読み込まれる。プログラムでは「FORT.5」というファイル名が割り当てられている。ここでは、その 1 行をカードとして説明する。

なお、本プログラムはどのような単位系に対しても用いることができるが、それぞれの単位は統一のとれたものでなければならない。一部の default 値の中には kN と m を暗黙の単位系と仮定しているものがある。また、実験式を使うものについては、特定の単位系でしか成立しないものがあるので、単位系によって例えば係数の値を修正しなければいけないものもあるので注意が必要である。

4.1.1 タイトル

TITLE, IRCAL, IPHI, IRNM, IRVMAX, IWRMAX, IGRAAL	(A60, 2I1, I3, 3I5)
--	---------------------

1～	60	TITLE	構造物名等のタイトル
	61	IRCAL	動的平行に関するフラグ =0 : 非線形性を考慮し動的平衡をとる。また、tangent modulusが急変する場合に積分間隔を小さくする等の精密化をする。 =1 : 動的平衡をとらない。
	62	IPHI	低拘束圧化の内部摩擦角に関するフラグ。元のYUSAYUSAでは変相角の1.6倍を用いていた（式3.1参照）。 =0 : 元のYUSAYUSAの設定をそのまま使う。 =1 : 低拘束圧化の内部摩擦角を通常の内部摩擦角と同じに設定する ⁶⁾ 。従って、元のYUSAYUSAと同じ解は得られなくなる。
63～	65	IRNM	有効応力解析のとき、水の流れ等が生じれば、質量分布が変わるので、IRNMステップごとに質量マトリックスを作り直す。（default:1）
66～	70	IRVMAX	有効応力解析時、応力-ひずみ履歴をIRVMAXステップごとに改める。（default : 各ステップで行う）
71～	75	IWRMAX	IWRMAXステップごとに、応答結果をプリントする。（default : 印刷しない）
76～	80	IGRAAL	IGRAAL積分ステップごとに、この区間の計算過程の最大値をプリントする。（default : 印刷しない）

注) 通常、IRCAL=0, IPHI=0, IRNM=1, IRVMAX=1 とする。

4.1.2 基本データ

ISTP, KUBC, INDELA, IDAMP, N, NW NREV, ACG, RHOW, MS, ALPHA, BETA	(4I1, 1X, 3I5, 5F10.0)
---	------------------------

1	ISTP	解析の応力の取り扱いの種類に関するフラグ =0 : 全応力解析 =1 : 有効応力解析
2	KUBC	透水の影響に関するフラグ =0 : 過剰間隙水圧の発生量だけが計算され、透水による逸散は無視される。

			=1：透水考慮。地下水面で流速=0 （地下水面一定） =2：透水考慮。地下水面で水圧=0 （自由水面が移動）
3	INDELA	基盤の種類	=0：剛基盤 =1：弾性基盤（このとき，地震波を入射波とする。）
4	IDAMP	減衰マトリックスの作り方に関するフラグ	0：1とおなじ 1：粘性減衰なし 2：Rayleigh減衰 ($[C]=\alpha[M]+\beta[K]$ ， α ， β は51～70カラムで与える) 3：各層ごとに減衰を与える。
6～	10	N	層数
11～	15	NW	地下水以下の層数。全応力解析でも必要である。
16～	20	NREV	応力－ひずみ関係の最大記憶ひずみ反転点の数。(default: 40)
21～	30	ACG	重力加速度 (default: 9.81 m/sec ²)
31～	40	RHOW	水の単位体積重量 (default: 1.0 tf/m ³)
41～	50	MS	地表の上載荷重（単位面積当たりの重量）
51～	60	ALPHA	IDAMP=2（Rayleigh減衰）の比例係数。ALPHAは質量に比例する係数
61～	70	BETA	BETAは剛性マトリックスに比例する係数。

4.1.3 地震波データ

この説では地震波を入力する。INDELA=0（剛基盤）の時には基盤の振動波，INDELA=1（弾性基盤）の時には基盤に入射する地震波を入力する。なお，本プログラムでは，時刻 $t=0$ の時の初期条件は変位，速度，加速度とも 0，また，地震波の初期値も 0 としている。したがって，入力する地震波の最初のデータは最初の時間ステップの時の値である。これは，例えば SHAKE とは異なるので，注意が必要である。

入力の 1 枚目は地震波に関する情報を与えるためのカード，2 枚目以降は地震波の数値を示したカードである。

(1)地震波に関する情報（カード 1 枚）

KIND, IFGPRT, IWDIV, NDATA, DT, TEND, PMUL, (2I1, I3, I5, 2F5.0, 2F10.0, A16, I4, A20) PMUL, PMAX, FORMT, NSKP, LD TTL

	1	KIND	入力波の種類 =1：加速度 =2：速度 =3：変位 =4：加速度を正弦波で与える。
	2	IFGPRT	IFGPRT=1のとき、計算に用いる加速度（入力波を最大値補正したもの）を印刷する。
3～	5	IWDIV	IWDIV ≥ 2 のとき、与えられた地震波をIWDIV分割し、数値積分を行う。
6～	10	NDATA	入力地震波のデータ数
11～	15	DT	入力地震波の時間間隔（秒）
16～	20	TEND	計算終了時間（default: DT \times NDATA）（秒）。TENDが地震波データの入力時間より小さければ、そこで計算を打ち切る。大きければ入

			力波のあとに必要なだけ0をつけ加えて計算に使用。
21～	30	PMUL	KIND=1～3のとき、入力地震波をPMUL倍して計算に使用。KIND=4のとき、正弦波の加速度振幅。
31～	40	PMAX	KIND=1～3のとき、入力地震波の最大値をPMAXとして計算に使用。KIND=4のとき、正弦波の周期。
41～	56	FORMT	KIND=1～3 のとき、入力波のフォーマット。
57～	60	NSKP	地震波ファイルを読む際、最初に読み飛ばす行数
61～	80	LD TTL	地震波の入っているファイル名。もしLD TTLがブランクであれば、このデータの後に地震波を付け加える

注) KIND=1～3 のとき、PMUL, PMAX の一方は零であること。

4.1.4 各層の定数

各層の定数を地表より基盤に向けて順番に入力する。各層ごとに、地下水位より上の層では2枚、下の層では3枚のカードが必要である。。

(1)定数カード1枚目

LRFTYP, IFGLY, IFGEF, IFGST, IFGGT, DZ, RHO, COHE, PHAI, KO, CA (2I5, 3I1, 7X, 6F10.0)

1～	5	LRFTYP	復元力特性の種類 =1 : Hardin-Drnevich モデル =2 : Ramberg-Osgood モデル
6～	10	IFGLY	他の層と同じ定数を使うためのフラグ。すなわち、以下のデータで、0以外の数値が必要なデータの入力が0またはブランクになっていたとき、入力されない値としてIFGLY層の値を用いる。IFGLY層は現在データを与えようとしている層より上にあること。なお、IFGLY=0のとき、表層はdefault値を、他は直上の層の値を用いる。
11		IFGEF	土質を表すフラグ。全応力解析ではIFGEFは意味が無い。地下水以下の層で間隙水圧の発生を考慮しない層（透水による間隙水圧の上昇は考慮）はIFGEF=1とする。 =0 : 砂 =1 : 粘土
12		IFGST	せん断耐力の与え方を指示するフラグ =0 : τ_f の値をPHAIで与える。 =1 : PHAIは内部摩擦角 ($\tau_f = c + \sigma'_v \tan \phi$) である。
13		IFGGT	小ひずみ時のせん断弾性係数 G_0 の与えかた。 =0 : G_0 の値をCAで与える。 =1 : CAでは式2.4 (次式) の A の値を与える。 $G_o = A \frac{(B - e)^2}{1 + e} \left(\frac{1 + 2K_o}{3} \sigma'_v \right)^C$
21～	30	DZ	層厚
31～	40	RHO	単位体積重量
41～	50	COHE	粘着力。ただし、有効応力解析で地下水位以下の砂層は、COHE=0とする必要がある。
51～	60	PHAI	IFGST=0のとき、終局せん断強度 τ_f

61～	70	KO	=1のとき、内部摩擦角 ϕ (度)
71～	80	CA	静止土圧係数。
			IFGGT=0のとき、微小ひずみ時のせん断弾性係数 G_0
			=1のとき、式2.4 (G_0 を与える式) の A (下式)

$$G_o = A \frac{(B-e)^2}{1+e} \left(\frac{1+2K_o}{3} \sigma'_v \right)^C$$

(2)定数カード 2 枚目

CB, CC, ROBETA, ROSTRN, PR, SEP, SIGV99, VIS (8F10.0)

1～	10	CB	式2.4 (G_0 を与える式：下式) の係数 B と C 。
----	----	----	--

$$G_o = A \frac{(B-e)^2}{1+e} \left(\frac{1+2K_o}{3} \sigma'_v \right)^C$$

11～	20	CC	(default : CB=2.17, CC=0.4)
21～	30	ROBETA	Ramberg-Osgoodモデルの係数 r , α (原の修正式のとき γ_f)
31～	40	ROSTRN	Ramberg-Osgoodモデルのパラメータは G_0 , τ_f , α (または γ_f) , r の4つである ($\gamma_f = \tau_f / G_0$ は、他のパラメータの値より自動的に計算される)。このうち、 G_0 , τ_f は、他のモデルでも必要とされるパラメータであり、既に入力している。ここでは残りの二つのRamberg-Osgoodモデルに特有なパラメータの値を入力する。 双曲線モデルを使う場合には、この二つの変数のところにはブランクを入れる。
41～	50	PR	間隙率
51～	60	SEP	透水係数
61～	70	SIGV99	有効応力解析時の有効鉛直応力 σ'_v の最小値の初期値に対する比。完全液状化の判断に用いる。標準値は0.03～0.01
71～	80	VIS	IDAMP=3 の場合にのみ必要で、各層の減衰係数。

注) PR, SEP, SIGV99 の3つの変数に対する値の入力は、全応力解析では不要。

(3)定数カード 3 枚目

このカードは、有効応力解析の地下水位以下の層のみ必要であり、全応力解析や、有効応力解析で地下水より上の層ではこのカードは不要である。また、有効応力解析で間隙水圧の発生を考慮しない層 (IFGEF=1) はこのカードはブランクとし、値を入れてはいけない。

BP, MV, PHT, BU, AKAP (5F10.0)

1～	10	BP	載荷時の間隙水圧の上がり易さをコントロールする定数 B_p 。1次元解析すなわち単純せん断状態における値で、 K_0 に対する補正を済ませたもの。
11～	20	MV	体積圧縮係数 m_v
21～	30	PHT	変相角 (度)
31～	40	BU	除荷時の間隙水圧の上がり易さをコントロールする定数 B_u 。1次元解析すなわち単純せん断状態における値で、 K_0 に対する補正を済ませたもの。
41～	50	AKAP	κ (標準値0.06～0.1)

4.1.5 基盤定数

この節の入力は，弾性基盤のとき（INDELA＝1）のみ必要で，剛基盤の時には不要である。

HOBAS, GBAS (2F10.0)

1～	10	RHOBAS	基盤の単位体積重量
11～	20	GBAS	基盤のせん断弾性係数

4.2 ファイル出力

YUSAYUSA-2 では、ファイル番号 6, 23, 24, 25 の 4 つのファイルを出力用に用いている。それぞれのファイル番号は、OPEN 文により特定のファイルに割り当てられている。その対応および各ファイルの内容を、次の表に示す。

表 ファイル出力の内容

番号	ファイル名	内 容
6	*1	印刷結果
23	YUSAYUSA.tmp	地震波の一時記憶用。ユーザーには意味がない。
24	YUSAYUSA.tim	応答時刻歴（書式なしファイル）
25	YUSAYUSA.max	入力データ，最大応答値等（POSTEQ ^{*2} 用の出力）

*1：プログラムでは特に指定していないので、コンパイラに依存する。

*2：開発者が作成した最大値作図用のプログラム名

4.2.1 ファイル 24 への出力。（書式なし）

- ① タイトル （60word）
- ② 地震波名 （20word）
- ③ 層数，地下水位以下の層数，計算ステップ数，時刻歴計算刻み
- ④ 層厚
- ⑤ 地表重量，初期有効上載圧
- ⑥ このレコード以後，時刻歴応答結果が出力される。計算の 1 ステップで 1 レコードとなっており，その並び方を次に示す。なお，出力は，標準時間間隔の値のみであり，途中で数値積分間隔を細分した時の結果等は出力しない。
時刻，加速度（N+1 個），速度（N+1 個），変位（N+1 個），せん断力（N 個），せん断ひずみ（N 個），有効鉛直圧（N 個），過剰間隙水圧（N 個）
なお，速度，変位の出力は基盤に対する相対値であるが，基盤値のみは絶対変位と絶対速度である。
- ⑦ 最大値応答値
 - a) 1 レコード目
加速度（N 個），変位（N 個），せん断応力（N 個），せん断ひずみ（N 個），過剰間隙水圧（N+1 個）
 - b) 2 レコード目
基盤の絶対加速度，絶対変位。

4.2.2 ファイル 25 への出力 （書式つき）

- ① タイトル （A60）
- ② 基本データ （2I10, 2E15.8）
層数，地下水位以下層数，地表重量，重力加速度
- ③ 各層の定数（層数ケース） （5E15.8, /, 2E15.8, I15, 2E15.8, /5E15.8）
各層につき 3 枚のカード出力があり，有効応力解析で地下水位以下ではさらに 4 枚目の出力がある。

1 枚目 層厚，質量密度，間隙率，透水係数，内部摩擦角

2 枚目 γ_p , G_0 , 復元力の種類, r , a (または γ_p)

3 枚目 粘性係数, K_0 , CA, CB, CC

有効応力解析で地下水位以下の層ではさらに, (5E15.8)

4 枚目 B_p , m_v , 変相角, B_u , k

④ 基盤の定数 (2E15.8)

質量密度, せん断弾性係数

⑤ 最大応答値 (層数行の出力) (5E15.8)

加速度, 変位, せん断応力, せん断ひずみ, 過剰間隙水圧

⑥ 基盤の応答値 (2E15.8)

基盤加速度, 絶対変位

4.3 解析例

YUSAYUSA-2 による有効応力解析例を以下に示す。なお、この計算例は、YUSAYUSA-2 の初期バージョンに基づいて作成しているので、現在 (Version 2.01 以降) の入力方法とは少し異なっている (質量密度入力から単位体積重量入力となっている。地震波のファイル入力は出来ない)。

地盤材料の諸定数

層番号	層厚	質量	粘着力	τ_f	K_0	G_0	CC	n	κ	B_p	m_v	ϕ_s	B_u	κ
1	1.0	1.8	0.	9.54	0.5	18000	0.5	0.46	$5. \times 10^{-4}$					
2	2.9	1.8	0.	10.5	0.5	34300	0.5	0.46	$5. \times 10^{-4}$	2.92	1.97×10^{-3}	17.5	0.28	0.06
3	2.0	1.8	0.	15.7	0.5	21800	0.5	0.46	$5. \times 10^{-4}$	0.25	1.62×10^{-3}	15.8	0.50	0.06
4	2.1	1.8	0.	19.9	0.5	18000	0.5	0.45	$1. \times 10^{-5}$	6.46	1.45×10^{-3}	15.1	0.23	0.06
5	1.8	1.8	0.	32.6	0.5	60700	0.5	0.44	$2. \times 10^{-4}$	2.50	1.34×10^{-3}	19.6	0.32	0.06
6	1.6	1.8	0.	30.2	0.5	18000	0.5	0.44	2.5×10^{-5}	1.25	1.27×10^{-3}	15.8	0.14	0.06
7	2.3	1.8	0.	45.7	0.6	19600	0.5	0.44	5.0×10^{-6}	1.25	1.20×10^{-3}	20.2	0.14	0.06
8	2.3	1.8	0.	53.3	0.6	19600	0.5	0.44	5.0×10^{-6}	1.25	1.13×10^{-3}	20.2	0.14	0.06
9	5.0	1.8	0.	68.3	0.6	55500	0.5	0.43	2.0×10^{-5}	1.30	1.04×10^{-3}	21.0	0.17	0.06
10	4.0	1.85	0.	84.2	0.6	55500	0.5	0.45	1.0×10^{-3}	1.50	0.963×10^{-3}	21.0	0.20	0.06
11	3.5	1.65	0.	123.	0.7	103000	0.5	0.42	1.0×10^{-6}	0.80	0.914×10^{-3}	25.9	0.10	0.06
12	3.5	1.65	0.	135.	0.7	103000	0.5	0.42	1.0×10^{-6}	0.80	0.881×10^{-3}	25.9	0.10	0.06
13	3.5	1.65	0.	148.	0.7	103000	0.5	0.42	1.0×10^{-6}	0.70	0.851×10^{-3}	25.9	0.08	0.06
14	3.5	1.65	0.	187.	0.8	103000	0.5	0.41	1.0×10^{-6}	0.50	0.826×10^{-3}	29.6	0.07	0.06
15	3.5	1.65	0.	201.	0.8	103000	0.5	0.41	1.0×10^{-6}	0.50	0.803×10^{-3}	29.6	0.07	0.06
16	3.5	1.65	0.	216.	0.8	103000	0.5	0.41	1.0×10^{-6}	0.50	0.781×10^{-3}	29.6	0.07	0.06
17	3.5	1.65	0.	231.	0.8	103000	0.5	0.41	1.0×10^{-6}	0.50	0.762×10^{-3}	29.6	0.07	0.06
18	2.5	1.85	0.	292.	0.8	204000	0.5	0.42	1.0×10^{-3}	0.90	0.745×10^{-3}	34.1	0.13	0.06

注) データでは、CB=2.17, SIGV99=0.03。全て双曲線モデル。

弾性基盤 : RHOBAS=2.0, GBAS=7.2D5。

単位は、kN, m

入射波 (加速度入力)

最大値 143.4Gal

時間間隔 0.02 秒

継続時間 20 秒 (データ数は 1948 あるが、そのうち最初の 20 秒分を計算)

入力データ

```

-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
80091701 ISHINOMAKI, BN2                                0 1 1
1212 18 17 409.81 1.0 0.0 0.0 0.001
11 1948 0.02 20.0 1.434(8F9.0) KAIHOKU-TR
-11.143 -8.994 -6.845 -4.696 -5.462 -9.142 -12.822 -10.396
-7.969 -8.321 -11.452 -14.583 -9.450 -8.822 -12.698 -16.574
----- 途中省略 -----
8.586 2.715 -3.156 -5.752 -2.536 -1.546 -4.521 -7.497
-3.764 1.078 2.442 1.604 2.386 6.104 5.250 3.620
2.526 2.412 4.395 6.741
1 000 1.0 1.8 0. 9.54 0.5 1.8D4
2.17 .5 0. 0. .46 5.D-4.03
1 000 2.9 1.8 0. 10.5 0.5 3.43D4
2.17 .5 0. 0. .46 5.D-4.03
2.92 1.97D-317.5 .28 .06
1 000 2.0 1.8 0. 15.7 0.5 2.18D4
2.17 .5 0. 0. .46 5.D-4.03
.250 1.62D-315.8 .50 .06
1 000 2.1 1.8 0. 19.9 0.5 1.80D4
2.17 .5 0. 0. .45 1.D-5.03
6.46 1.45D-315.1 .23 .06
1 000 1.8 1.8 0. 32.6 0.5 6.07D4
2.17 .5 0. 0. .44 2.D-4.03
2.50 1.34D-319.6 .32 .06
1 000 1.6 1.8 0. 30.2 0.5 1.80D4
2.17 .5 0. 0. .44 2.5D-5.03
1.25 1.27D-315.8 .14 .06
1 000 2.3 1.8 0. 45.7 0.6 1.96D4
2.17 .5 0. 0. .44 5.0D-6.03
1.25 1.20D-320.2 .14 .06
1 000 2.3 1.8 0. 53.3 0.6 1.96D4
2.17 .5 0. 0. .44 5.0D-6.03
1.25 1.13D-320.2 .14 .06
1 000 5.0 1.8 0. 68.3 0.6 5.55D4
2.17 .5 0. 0. .43 2.0D-5.03
1.30 1.04D-321.0 .17 .06
1 000 4.0 1.85 0. 84.2 0.6 5.55D4
2.17 .5 0. 0. .45 1.0D-3.03
1.50 .963D-321.0 .20 .06
1 000 3.5 1.65 0. 123. 0.7 1.03D5
2.17 .5 0. 0. .42 1.0D-6.03
0.80 .914D-325.9 .10 .06
1 000 3.5 1.65 0. 135. 0.7 1.03D5
2.17 .5 0. 0. .42 1.0D-6.03
0.80 .881D-325.9 .10 .06
1 000 3.5 1.65 0. 148. 0.7 1.03D5
2.17 .5 0. 0. .42 1.0D-6.03
0.70 .851D-325.9 .08 .06
1 000 3.5 1.65 0. 187. 0.8 1.03D5
2.17 .5 0. 0. .41 1.0D-6.03
0.50 .826D-329.6 .07 .06
1 000 3.5 1.65 0. 201. 0.8 1.03D5

```

2.17	.5	0.	0.	.41	1.0D-6.03	
0.50	.803D-329.6	.07	.06			
1	000	3.5	1.65	0.	216.	0.8 1.03D5
2.17	.5	0.	0.	.41	1.0D-6.03	
0.50	.781D-329.6	.07	.06			
1	000	3.5	1.65	0.	231.	0.8 1.03D5
2.17	.5	0.	0.	.41	1.0D-6.03	
0.50	.762D-329.6	.07	.06			
1	000	2.5	1.85	0.	292.	0.8 2.04D5
2.17	.5	0.	0.	.42	1.0D-3.03	
0.90	.745D-334.1	.13	.06			
2.0	7.2D5					

出力（ユニット 6 への印刷）

***** YUSAYUSA-2 Version 2.04 August 2002 *****

```

Number of layer ----- 18
Number of layer under water table ----- 17
Max. number of strain reversals ----- 40
Types of analysis ----- Effective stress
Types of damping ----- Rayleigh damping
                        (C) = 0.00000e+00 * (M) + 0.10000e-02 * (K)
Flag on water ----- Zero surface pressure
Dynamic equilibrium ----- Perform

Renew of mass matrix ----- 1 times Renew of stress history ----- 1 times

```

Max area used for calculation = 9901

----- Baserock excitation -----

```

Name -----
Time interval ----- 0.0200 Seconds
Wave type ----- Acceleration
Number of wave data ----- 1948
Maximum value -----
      Input wave      0.27027e+03      at time = 11.820 Seconds
      for calculation 0.14340e+01      (Cal./Input = 0.00531)
Duration ----- 20.0000 Second
      ( 1000 Data from the beginning are used)

```

Waveform for calculation Number of data = 1000

0	-0.05912	-0.04772	-0.03632	-0.02492	-0.02898	-0.04850	-0.06803	-0.05516	-0.04228	-0.04415
1	-0.06076	-0.07737	-0.05014	-0.04681	-0.06737	-0.08794	-0.05757	-0.02721	-0.04128	-0.05537
2	-0.05884	-0.06231	-0.07574	-0.07232	-0.05204	-0.03177	-0.02838	-0.02498	-0.02159	-0.06368
3	-0.10578	-0.11270	-0.08445	-0.05619	-0.07273	-0.06449	-0.03147	0.00154	0.03456	0.00236
4	-0.02985	-0.06206	-0.04684	-0.03162	-0.02612	-0.03035	-0.03458	-0.03881	-0.04303	-0.04726
5	-0.05149	-0.06359	-0.07569	-0.05574	-0.00374	0.00136	-0.01730	-0.06229	-0.10728	-0.07753
6	0.02705	-0.00273	-0.03256	-0.06239	-0.09222	-0.04775	-0.00326	0.04123	-0.01876	-0.07879

途中省略

93	0.27407	-0.05599	-0.47078	-0.31541	-0.10211	0.11119	0.18517	0.05606	0.08909	0.29388
94	0.40275	0.32916	-0.01295	-0.21902	-0.41060	-0.60219	-0.46850	-0.29958	0.01252	0.10684
95	0.15922	0.23774	0.39180	0.54586	0.26773	0.10901	0.04048	0.07990	0.11933	0.15875
96	0.06256	-0.04960	-0.16176	-0.31886	-0.48139	-0.54528	-0.45594	-0.36659	-0.18789	-0.04907
97	-0.19267	-0.33628	-0.06889	0.06952	0.18489	0.30027	0.19557	0.13280	0.18261	0.15952
98	0.23843	0.33209	0.09383	-0.23345	-0.50053	-0.29626	-0.02827	0.17699	0.37365	0.25420
99	0.09109	-0.12604	-0.18657	0.02500	0.16754	0.30027	0.18302	0.05087	-0.04635	-0.14356

Max. area required for earthquake wave = 4410

----- Constants -----

Acceleration of gravity ----- 9.810

Weight at ground surface ----- 0.000
Unit weight of water ----- 9.810

	1	2	3	4	5	6	7	8
R. F. Charact.	H. D.	H. D.	H. D.	H. D.	H. D.	H. D.	H. D.	H. D.
Thickness	1.000	2.900	2.000	2.100	1.800	1.600	2.300	2.300
Unit weight	17.658	17.658	17.658	17.658	17.658	17.658	17.658	17.658
Ulti. strength	9.5400	10.500	15.700	19.900	32.600	30.200	45.700	53.300
Initial modulus	18000.	34300.	21800.	18000.	60700.	18000.	19600.	19600.
Cohesion								
Friction angle	47.217	19.880	18.019	17.183	22.257	17.990	22.878	22.872
Co. earth pre.	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.600	0.600
Coef. CA	7907.5	8308.8	4096.0	2734.2	7762.2	2130.3	2049.5	1897.5
Coef. CB	2.1700	2.1700	2.1700	2.1700	2.1700	2.1700	2.1700	2.1700
Coef. CC	0.50000	0.50000	0.50000	0.50000	0.50000	0.50000	0.50000	0.50000
Elastic modulus	18000.	34300.	21800.	18000.	60700.	18000.	19600.	19600.
Wave velocity	100.00	138.04	110.05	100.00	183.64	100.00	104.35	104.35
Soil type	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand
Porosity	0.460	0.460	0.460	0.450	0.440	0.440	0.440	0.440
Permeability	5.00000e-04	5.00000e-04	5.00000e-04	1.00000e-05	2.00000e-04	2.50000e-05	5.00000e-06	5.00000e-06
Min. nor. pre.	0.26487	0.87113	1.4480	1.9306	2.3897	2.7900	3.2491	3.7906
Bp		2.9200	0.25000	6.4600	2.5000	1.2500	1.2500	1.2500
Volume comp.		1.97000e-03	1.62000e-03	1.45000e-03	1.34000e-03	1.27000e-03	1.20000e-03	1.13000e-03
Phase tran. ang		17.500	15.800	15.100	19.600	15.800	20.200	20.200
Bu		0.28000	0.50000	0.23000	0.32000	0.14000	0.14000	0.14000
Kappa		6.00000e-02	6.00000e-02	6.00000e-02	6.00000e-02	6.00000e-02	6.00000e-02	6.00000e-02

	9	10	11	12	13	14	15	16
R. F. Charact.	H. D.	H. D.	H. D.	H. D.	H. D.	H. D.	H. D.	H. D.
Thickness	5.000	4.000	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500
Unit weight	17.658	18.148	16.186	16.186	16.186	16.186	16.186	16.186
Ulti. strength	68.300	84.200	123.00	135.00	148.00	187.00	201.00	216.00
Initial modulus	55500.	55500.	1.03000e+05	1.03000e+05	1.03000e+05	1.03000e+05	1.03000e+05	1.03000e+05
Cohesion								
Friction angle	23.781	23.757	29.306	29.211	29.297	33.171	33.094	33.149
Co. earth pre.	0.600	0.600	0.700	0.700	0.700	0.800	0.800	0.800
Coef. CA	4557.4	4662.2	6415.9	6112.2	5847.9	5095.4	4907.6	4739.1
Coef. CB	2.1700	2.1700	2.1700	2.1700	2.1700	2.1700	2.1700	2.1700
Coef. CC	0.50000	0.50000	0.50000	0.50000	0.50000	0.50000	0.50000	0.50000
Elastic modulus	55500.	55500.	1.03000e+05	1.03000e+05	1.03000e+05	1.03000e+05	1.03000e+05	1.03000e+05
Wave velocity	175.59	173.21	249.85	249.85	249.85	249.85	249.85	249.85
Soil type	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand
Porosity	0.430	0.450	0.420	0.420	0.420	0.410	0.410	0.410
Permeability	2.00000e-05	1.00000e-03	1.00000e-06	1.00000e-06	1.00000e-06	1.00000e-06	1.00000e-06	1.00000e-06
Min. nor. pre.	4.6499	5.7389	6.5739	7.2435	7.9130	8.5825	9.2521	9.9216
Bp	1.3000	1.5000	0.80000	0.80000	0.70000	0.50000	0.50000	0.50000
Volume comp.	1.04000e-03	9.63000e-04	9.14000e-04	8.81000e-04	8.51000e-04	8.26000e-04	8.03000e-04	7.81000e-04
Phase tran. ang	21.000	21.000	25.900	25.900	25.900	29.600	29.600	29.600
Bu	0.17000	0.20000	0.10000	0.10000	8.00000e-02	7.00000e-02	7.00000e-02	7.00000e-02
Kappa	6.00000e-02	6.00000e-02	6.00000e-02	6.00000e-02	6.00000e-02	6.00000e-02	6.00000e-02	6.00000e-02

	17	18
R. F. Charact.	H. D.	H. D.
Thickness	3.500	2.500
Unit weight	16.186	18.148
Ulti. strength	231.00	292.00
Initial modulus	1.03000e+05	2.04000e+05
Cohesion		
Friction angle	33.198	37.935
Co. earth pre.	0.800	0.800
Coef. CA	4586.9	9337.4
Coef. CB	2.1700	2.1700
Coef. CC	0.50000	0.50000
Elastic modulus	1.03000e+05	2.04000e+05
Wave velocity	249.85	332.07
Soil type	Sand	Sand
Porosity	0.410	0.420
Permeability	1.00000e-06	1.00000e-03
Min. nor. pre.	10.591	11.239
Bp	0.50000	0.90000
Volume comp.	7.62000e-04	7.45000e-04
Phase tran. ang	29.600	34.100
Bu	7.00000e-02	0.13000
Kappa	6.00000e-02	6.00000e-02

Elastic baserock Unit weight = 19.620 Shear modulus = 0.72000d+06

Maximum response values

TITLE 80091701 ISHINOMAKI, BN2
Earthquake

Duration = 20.000 Second
time increment = 0.020 Second

Max = 0.1434e+01

Nodal Point	Depth	Absolute Accel.	Time	Relative Velocity	Time	Relative Displ.	Time
1	0.000	0.1237e+01	9.400	-0.2878e+00	9.080	-0.1016e+00	13.360
2	1.000	0.1218e+01	9.400	-0.2880e+00	9.080	-0.1016e+00	13.360
3	3.900	0.1259e+01	9.460	-0.2891e+00	9.080	-0.1018e+00	13.360
4	5.900	0.1269e+01	9.420	-0.2823e+00	9.080	-0.1024e+00	13.360
5	8.000	0.1816e+01	12.200	-0.2493e+00	11.880	-0.5157e-01	9.440
6	9.800	0.1867e+01	12.180	-0.2432e+00	11.880	-0.4945e-01	9.440
7	11.400	0.2071e+01	9.120	-0.2184e+00	11.860	-0.4151e-01	9.440
8	13.700	-0.1929e+01	9.040	-0.2348e+00	8.780	-0.3513e-01	9.420
9	16.000	0.2233e+01	12.060	-0.2534e+00	8.780	-0.2779e-01	9.400
10	21.000	-0.1736e+01	8.980	-0.2347e+00	8.760	0.2249e-01	8.640
11	25.000	0.2220e+01	11.960	-0.1919e+00	8.740	0.1889e-01	8.620
12	28.500	0.2028e+01	11.920	-0.1746e+00	8.740	0.1713e-01	8.620
13	32.000	0.2002e+01	11.920	-0.1538e+00	8.740	0.1499e-01	8.620
14	35.500	0.1969e+01	11.900	-0.1313e+00	11.860	0.1247e-01	8.620
15	39.000	0.1930e+01	11.880	-0.1100e+00	11.840	0.9910e-02	8.600
16	42.500	0.2066e+01	11.860	-0.8520e-01	11.840	0.7149e-02	8.600
17	46.000	0.2162e+01	11.840	-0.5170e-01	11.820	0.4141e-02	8.600
18	49.500	0.2172e+01	11.820	-0.1371e-01	11.820	0.1078e-02	8.580
19	52.000	0.2398e+01	11.800	-0.8836e+00	8.580	-0.1027e+02	20.000

(Absolute value)

Maximum response values

TITLE 80091701 ISHINOMAKI, BN2
Earthquake

Duration = 20.000 Second
time increment = 0.020 Second

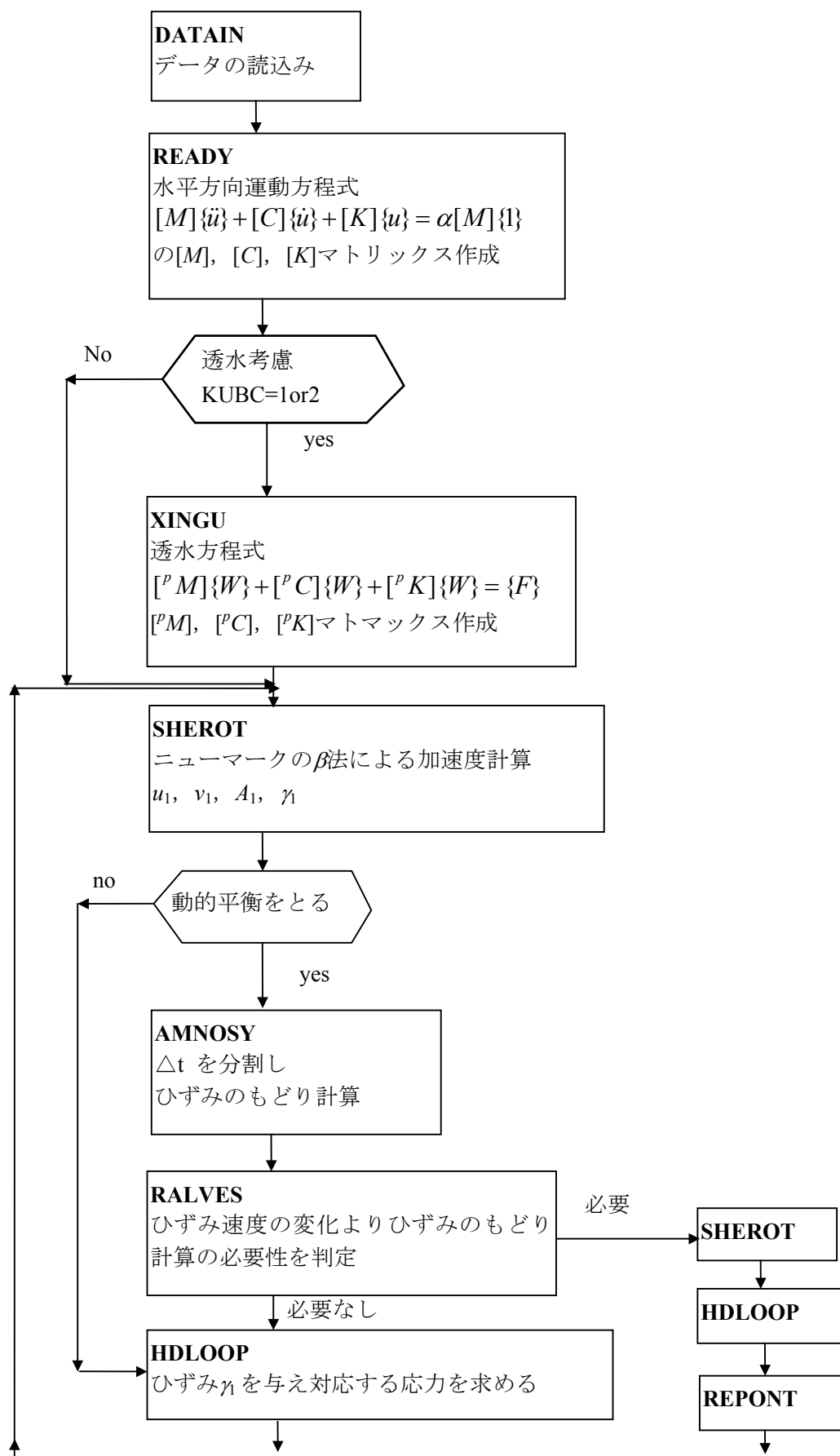
Max = 0.1434e+01

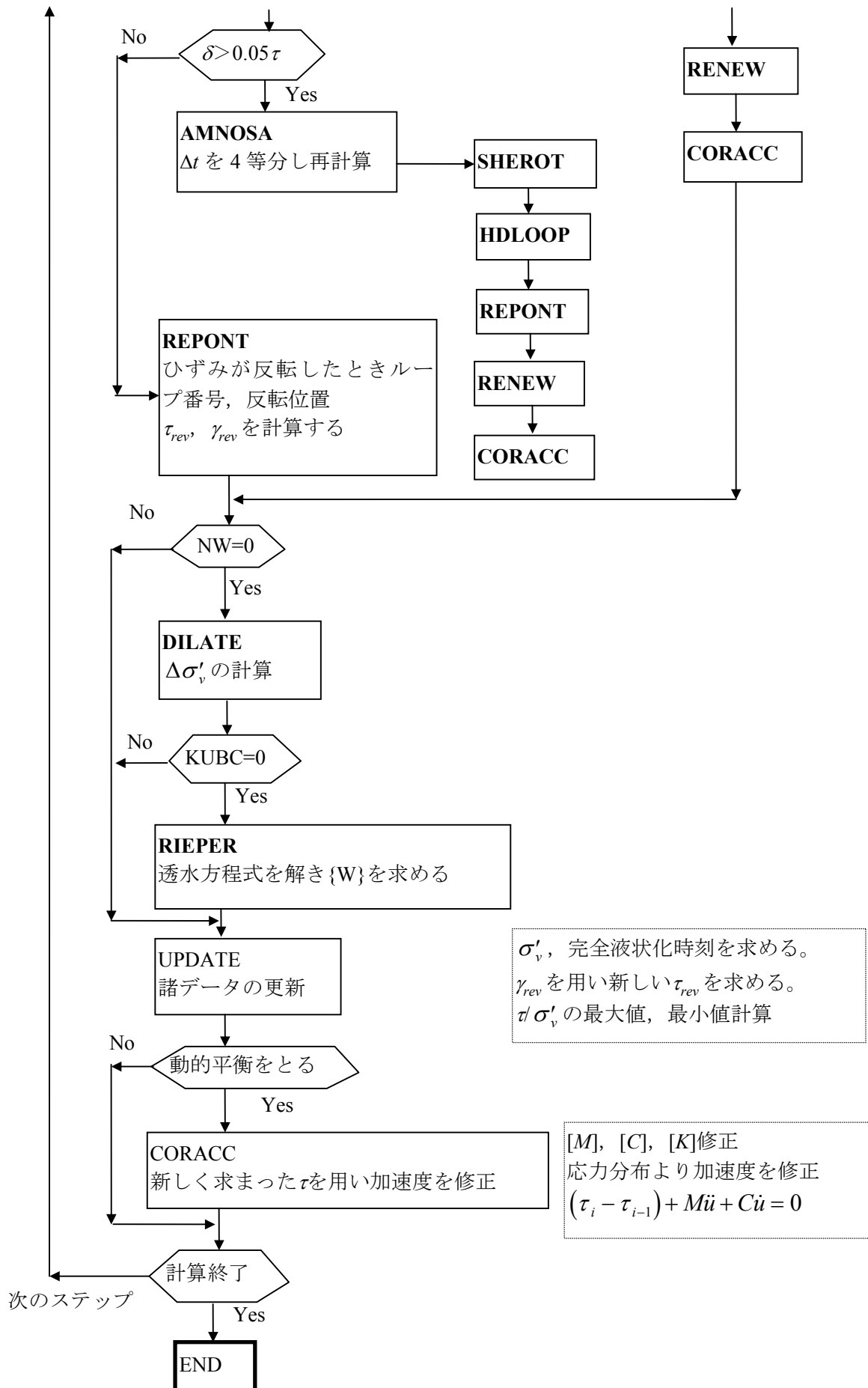
Layer No.	Thick- ness	Shear Stress	Time	Shear Strain	Time	Excess Ppre P.	Time	Minimum Gmax	Time	Phase Transf.	Compl. Liqu.
1	1.000	0.1113e+01	9.400	0.6997e-04	9.400	0.9317e-02	9.020	0.1405e+05	9.420		
2	2.900	0.5348e+01	9.400	0.5154e-03	9.420	0.8497e+01	12.180	0.3286e+04	10.320		
3	2.000	0.1039e+02	9.380	0.1757e-02	9.380	0.1101e+02	20.000	0.1673e+04	9.400		
4	2.100	0.1412e+02	9.320	0.4576e-01	13.600	0.6242e+02	13.040	0.3802e+00	13.560	9.200	12.000
5	1.800	0.1718e+02	9.460	0.1212e-02	9.460	0.2701e+02	20.000	0.3878e+04	9.480		
6	1.600	-0.2053e+02	8.840	0.5014e-02	9.480	0.1669e+02	20.000	0.9473e+03	9.500		
7	2.300	-0.2402e+02	8.820	0.3103e-02	9.480	0.2074e+02	20.000	0.3110e+04	9.480		
8	2.300	-0.2668e+02	8.780	0.3294e-02	9.420	0.2230e+02	20.000	0.3494e+04	9.440		
9	5.000	-0.3132e+02	8.760	0.1266e-02	12.080	0.2676e+02	20.000	0.1163e+05	12.100		
10	4.000	0.4009e+02	12.040	0.1777e-02	12.040	0.3585e+02	20.000	0.9831e+04	12.060		
11	3.500	-0.4268e+02	8.680	0.6796e-03	12.000	0.1887e+02	20.000	0.3919e+05	12.020		
12	3.500	0.4783e+02	11.980	0.7813e-03	11.980	0.2235e+02	20.000	0.3769e+05	12.000		
13	3.500	-0.5224e+02	8.660	0.8194e-03	11.960	0.2018e+02	20.000	0.3941e+05	11.980		
14	3.500	-0.5635e+02	8.640	-0.7973e-03	8.640	0.1586e+02	20.000	0.4838e+05	11.960		
15	3.500	-0.5980e+02	8.620	-0.8404e-03	8.620	0.1599e+02	20.000	0.4942e+05	11.960		
16	3.500	-0.6215e+02	8.620	-0.8681e-03	8.620	0.1577e+02	20.000	0.5108e+05	8.620		
17	3.500	-0.6489e+02	8.600	-0.8907e-03	8.600	0.1494e+02	20.000	0.5291e+05	8.600		
18	2.500	-0.6645e+02	8.580	-0.4311e-03	8.580	0.2521e+02	19.980	0.1179e+06	8.600		

Relative error in stress 0.4933e+00 at 16.382 Second

Maximum number of strain reversals = 15
1 Layers are completely liquefied

4.4 プログラムの構成





4.5 参考文献

- 1) Ishihara, K. and Towhata, I. (1980): One-dimensional Soil Response Analysis during Earthquake Based on Effective Stress Method, Journal of the Faculty of Engineering, Vol. XXXV, No. 4, The University of Tokyo, pp. 656-700
- 2) 田中勉, 有沢裕, 吉田望, 石原研而 (1983) : 地盤の非線形地震応答解析に与える応力-ひずみモデルの影響, 第 18 回土質工学研究発表会, pp. 631~634
- 3) Ishihara, K., Yoshida, N. and Tsujino, S., Modelling of Stress-strain Relations of Soils in Cyclic Loading, Proc. 5th International Conference for Numerical Method in Geomechanics, Nagoya, Vol. 1, pp. 373-380, 1985
- 4) Ishihara, K. and Towhata, I. (1980): Effective stress method in one-dimensional soil response analysis, Proceedings of the Seventh World Conference of Earthquake Engineering, Vol. 3, pp. 73-80
- 5) 田中勉, 吉田望, 清水全生, 有沢裕, 辻野修一, 土田義三 (1982) : 地盤の非線形地震応答解析に関する研究 その 1. セン断応力-せん断ひずみモデルの比較, 佐藤工業 (株) 技術研究所報, No. 9, pp. 11-18
- 6) 吉田望, 規矩大義, 東畑郁生 (1999) : 有効応力解析プログラム YUSAYUSA の改良, 第 34 回地盤工学研究発表会講演集, pp. 2105-2106

5 SIMMDLの使い方

5.1 入力データの作成

ここでは、カードデータの入力法を示す。なお、カードデータはユニット番号5から読み込まれ、「FORT.5」というファイル名が割り当てられている。

5.1.1 基本データ

1) タイトル

TITLE (20A4)

1～ 80 TITLE タイトル

2) コントロールデータ

ITYP, IPRNT, IFILE, NMAX, IPHI (5I5)

1～ 5	ITYP	応力-ひずみ関係モデル（3章参照） =1：双曲線モデル =2：Ramberg-Osgoodモデル =3：Ramberg-Osgoodモデル（原の修正式）
6～ 10	IPRNT	結果の印刷に対するフラグ =0：最小の情報（入力データのエコーと最終結果） =1：ひずみまたは応力を指定した位置の結果のみ =2：全ての計算結果
11～ 15	IFILE	結果のファイル出力に対するフラグ =0：出力はしない。 =1：ひずみまたは応力を指定した位置の結果のみ =2：全ての計算結果
16～ 20	NMAX	Masing ruleを使う場合に記憶する除荷点の数（default 40）
21～ 25	IPHI	低拘束圧化の内部摩擦角に関するフラグ =0：元のYUSAYUSAと同じく、低拘束圧下の内部摩擦角を用いる。 =1：低拘束圧化の内部摩擦角は用いない。

5.1.2 応力-ひずみ関係に関する入力

ITYP=1～3に従い、1)～3)項の入力を行う。

1) 双曲線モデル（ITYP=1）

これまでに入力したデータのみを使うので、この項の入力は不要である。

$$\text{骨格曲線} \quad \tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + \frac{G_0 \gamma}{\tau_{\max}}} \quad \text{履歴法則：Masing rule}$$

G_0 , τ_{\max} が、有効応力により変化。

2) Ramberg-Osgood モデル (ITYP=2)

ALPHA, R, TAUR (3F10.0)

1～	10	ALPHA	α
11～	20	R	r
21～	30	TAUR	τ_r

骨格曲線 $\gamma = \frac{\tau}{G_o} \left(1 + \alpha \left(\frac{\tau}{\tau_f} \right)^{r-1} \right)$ 履歴法則：Masing rule

α , r , τ_r は常に一定値。 G_o のみ有効応力により変化。

3) Ramberg-Osgood モデル (原の修正式) (ITYP=3)

GAMMF, R (2F10.0)

1～	10	GAMMF	破壊ひずみ γ_f (%)
11～	20	R	r

骨格曲線 $\gamma = \frac{\tau}{G_o} \left(1 + \left(\frac{\gamma_f}{\gamma_r} - 1 \right) \left(\frac{\tau}{\tau_{max}} \right)^{r-1} \right)$ 履歴法則：Masing rule

$\gamma_r = \tau_{max}/G_o$: 基準ひずみ。 G_o , τ_{max} は有効応力により変化。

5.1.3 過剰間隙水圧発生モデルに関する入力

BP, BU, AKAPPA, THETA, PHI (5F10.0)

1～	10	BP	パラメータ B_p
11～	20	BU	パラメータ B_u
21～	30	AKAPPA	パラメータ κ
31～	40	THETA	変相角 (度)
41～	50	PAI	内部摩擦角 (度)

5.1.4 せん断弾性係数モデルに関する入力

GMAX0, GPARAM (8F10.0)

1～	10	GMAX0	基準となる微小ひずみ時のせん断弾性係数 (下の式の G^*)。 KGTYP=1,2の時のみ使用。
11～		GPARAM	拘束圧のべき乗 微小ひずみ時のせん断弾性係数 G_o は、次の式により計算される。

$$G_o = G^* \left(\frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vo}} \right)^m$$

ここで、GMAX0で G^* を、GPARAMで m を入力する。

5.1.5 載荷履歴に関する入力

前節までの条件が同じであれば、異なるいくつかの载荷履歴の計算を行える。この項の1)～3)のデータ1組が、一つの载荷履歴を与えることになるので、計算したい载荷ケースだけ、以下の1)～3)を繰り返す。データカードが終われば(次のジョブカードが現れれば)計算は終了する。また、SIGV0=0を入力しても計算は終了する。

1) 基本データ

SIGV0, NSUB, NUNI, NSIG, ILIQ, GAMLIQ, FACT (F10.0,4I2,2X,2F10.0)

1～	10	SIGV0	有効上載圧。
11～	12	NSUB	载荷条件 =0: 排水条件 (体積ひずみは計算。過剰間隙水圧は計算しない) =1: 非排水条件 (過剰間隙水圧を計算する)
12～	14	NUNI	繰り返しの方法 =1: 一定振幅载荷 =2: ランダム载荷
14～	16	NSIG	制御方法 =1: 応力制御 (せん断応力比で与える) =2: ひずみ制御 =3: 応力制御 (せん断応力で与える) 注) 石原・東畑モデルは、応力制御は問題がないが、ひずみ制御の時は、YUSAYUSAとは同じにならないこともある。
16～	18	ILIQ	液状化の判定方法 =0: 完全液状化 (σ'_v が0 (または最小値) になったときに液状化) =1: ひずみ指定 (せん断ひずみがGAMLIQで入力された値を越えたときに液状化) =2: 初期液状化 (応力経路が変相線を横切ったときに液状化)
21～	30	GAMLIQ	液状化の判定をひずみで行う場合の判定値 (%) (default 5%)
31～	40	FACT	以下で入力する応力またはひずみに掛ける係数。 (default 1.0)

2) 一定振幅载荷

NUNI=1 の時のみこの項の入力が必要である。

NEND, AMP, TAUINC (I5,2F10.0)

1～	5	NEND	繰り返し数 (半サイクル数)
6～	15	AMP	振幅
16～	25	TAUINC	計算に用いる応力比増分, ひずみ増分, または応力増分 (NSIGの値による) を指定する。折り返し点の値のみがほしいのであれば TAUINC=0. とする。 >0: 応力またはひずみ増分 =0: 自動的に AMP→0→-AMP→0→AMP→0……と計算する。 <0: 折り返し点の間を TAUINC 等分したものを増分量とする。

3) ランダム载荷

NUNI=2 の時のみこの項の入力が必要である。

NEND, FORMAT (I5,A32)

- 1～ 5 NEND 与える点の数。
6～ 37 FORMAT 折り返し点を読むFORMAT。両端は括弧でくくられていること。

TAURET(I), I=1, NEND

TAURET 計算を行う応力比，ひずみまたは応力の値（NSIGの値による）

5.2 出力

出力は，6番および10番のファイルに行われる。6番のファイルには出力項目の説明があるので，特に見るのに不都合なことはないと考えられるので，ここでは，10番のファイルの内容のみを示す。

10番のファイルは「FORT.10」というファイル名で割り当てられている。

NCYC, NCALL, γ , τ , σ'_v , ε_{vd} , p , p/σ'_{v0} (2I10,1P6E10.3)

NCYC 現在の半サイクル数
NCALL 計算したステップの数
 γ せん断ひずみ (%)
 τ せん断応力
 σ'_v 有効上載圧
 ε_{vd} 発生した体積ひずみ (%)
 p 発生した過剰間隙水圧
 p/σ'_{v0} 過剰間隙水圧の初期有効上載圧に対する比

5.3 使用例

ここでは，完全液状化を判定規準とし，除荷点のみの計算を行う。ただし，結果は最終結果のみの印刷とし，そのかわり，ユニット番号10に全ての計算結果を出力する。

①入力データ

Example problem for SIMMDL

```
1 0 2 40
11.0 1.4 0.06 32. 45.
100000. 0.5
200. 1 1 3 0
045 15.0 0.0
```

②出力

SIMMDL-2 SATO KOGYO CO., LTD.

=====

Example problem for SIMMDL

=====

ITYP	IPRNT	IFILE	NMAX
1	0	2	40

=====

Stress-strain model
hyperbolic model

=====

Excess porewater pressure generation model
Ishihara-Towhata model

Bp	Bu	Kappa	Phase t	Failure
			Ang(deg)	Ang(deg)
11.0000	1.4000	.0600	32.0000	45.0000

Shear modulus

Go	m
100000.00	.5000

=====

SIGVO	NSUB	NUNI	NSIG	ILIQ	GAMLIQ	TAUMAX	T/SIGV
200.000	1	1	3	0	.000	15.000	.07500

End of loading

46 half cycles	91 loading steps
max. strain= 7.7954 %	max. stress 15.0000

=====

Stop - Program terminated.

この例では、予定した 45 半サイクルの载荷で完全液状化には至らず、したがって、End of loading の表示が印刷され計算が終了している。完全液状化すれば、Sample liquefy Completely の表示が印刷される。

6 パラメータの早見表

YUSAYUSA の使い方、もっとも重要なのが、 B_p 、 B_u という過剰間隙水圧の発生量を決めるパラメータを決めることである。その方法は本文に示しているが、必ずしも使いやすいとはいえない。そこで、単純せん断試験の R_5 と R_{20} よりパラメータを決める早見表を作った。この早見表を作るには内部摩擦角も必要であるが、すべての角度について示すことができなかったため、代表的な角度についてのみ示している。この表から数値の概略を求め、SIMMDL を使ってさらに詳細なシミュレーションをすることで、非常に早くパラメータの値を決めることができる。

なお、ここで示している R_5 と R_{20} は単純せん断状態の応力比、すなわち、せん断応力振幅を初期有効上載圧で除したものである。これに対して、通常液状化強度曲線は初期有効拘束圧で除して無次元化されている。これを補正して使う必要がある。初期有効拘束圧で無次元化された液状化強度比を初期有効上載圧で無次元化された液状化強度比に直すには、 $(1+2K_0)/3$ をかける必要がある。静止土圧係数を 0.5 とすれば、 $2/3=67\%$ となる。すなわち、通常の液状化強度の 67% の液状化強度にしてシミュレーションする必要がある。

