

# **DYNEQ**

**A computer program  
for  
DYNamic response analysis of level ground  
by  
EQivalent linear method**

**Version 4.01  
(April, 2020)  
Revised from Original version (May 1995)**

**吉田 望**



# 目 次

1	はじめに.....	1
1.1	使用条件など.....	1
1.2	DYNEQに関する文献.....	2
1.3	謝辞.....	2
2	理論.....	3
2.1	減衰モデルと応力ひずみ関係.....	3
2.1.1	Sorokinモデルによる複素剛性.....	3
2.1.2	Maxwellモデル.....	5
2.1.3	YASモデル.....	6
2.1.4	Lysmerモデル.....	8
2.2	運動方程式と重複反射理論.....	11
2.2.1	SHAKEとSorokinモデル.....	11
2.2.2	重複反射理論.....	11
2.3	フーリエ級数展開.....	14
2.4	材料非線形.....	15
2.4.1	弾性定数.....	16
2.4.2	表形式の動的変形特性.....	18
2.4.3	Hardin-Drnevichモデル.....	18
2.4.4	数式モデル.....	19
2.4.5	拘束圧依存性を考慮した表形式（吉田らの方法）.....	20
2.4.6	港湾の施設の技術上の基準に基づく方法 <sup>1)</sup> .....	20
2.4.7	安田らの方法 <sup>1)</sup> .....	21
2.4.8	土木研究所の式 <sup>1)</sup> .....	22
2.4.9	旧・建築基準法告示1457号.....	24
2.4.10	鉄道構造物等設計標準 <sup>1)</sup> .....	25
2.4.11	堆積軟岩に対する式 <sup>1)</sup> .....	26
2.4.12	地質年代・堆積環境を考慮した繰返しせん断特性 <sup>1)</sup> .....	27
2.5	散乱減衰.....	31
2.6	等価線形法.....	34
2.6.1	SHAKEによる方法.....	34
2.6.2	FDELによる方法.....	34
2.6.3	既往の等価線形手法の欠点.....	35
2.6.4	DYNEQによる方法.....	37
2.6.5	佐藤らによる方法.....	40
2.6.6	その他の注意.....	41
2.7	スペクトル.....	41
2.7.1	フーリエスペクトル.....	41
2.7.2	増幅スペクトル.....	41
2.7.3	応答スペクトル.....	42
2.8	多方向入力.....	44
2.8.1	最大ひずみ.....	44
2.8.2	周波数依存の有効ひずみ.....	44
2.9	動的変形特性の補間.....	45
2.10	プログラムの特色.....	48
2.11	澤田の方法.....	49

3	データ入力.....	53
3.1	データ入力の基本的な考え方.....	53
3.2	基本制御データ.....	55
3.3	タイトル.....	56
3.4	材料特性.....	57
3.4.1	材料の数.....	57
3.4.2	基本データ.....	57
3.4.3	散乱の減衰に関するデータ.....	59
3.4.4	材料非線形特性データ.....	60
3.5	地盤データ.....	64
3.5.1	層数.....	64
3.5.2	地盤特性.....	64
3.6	地震波の定義.....	66
3.6.1	入力-1.....	66
3.6.2	入力-2.....	66
3.6.3	入力-3.....	66
3.6.4	入力-4.....	67
3.7	地震応答解析の実行.....	68
3.7.1	基本データ.....	68
3.7.2	散乱の減衰に関するデータ.....	69
3.8	時刻歴の出力.....	71
3.8.1	出力に関する指示.....	71
3.8.2	層と成分の指定.....	71
3.9	増幅スペクトルの出力.....	72
3.9.1	出力に関する指示.....	72
3.9.2	層と成分の指定.....	72
3.10	応答スペクトルの計算.....	73
3.10.1	出力に関する指示.....	73
3.10.2	層と減衰の指定.....	73
3.11	フーリエスペクトルの出力.....	74
3.11.1	出力に関する指示.....	74
3.11.2	層と成分の指定.....	74
3.12	周波数依存材料特性の出力.....	76
3.12.1	出力に関する指示.....	76
3.12.2	層の指定.....	76
3.13	弾性定数の出力.....	77
3.14	沢田らの略算法による計算.....	78
3.15	DYNEQの特殊な設定.....	80
4	出力.....	81
4.1	各種出力.....	81
4.2	等価材料特性出力に対する注意.....	83
5	使用例.....	85
5.1	入力データ.....	85
5.2	出力.....	85
6	ポストプロセッサー.....	89

6.1	VECTOR.....	89
6.1.1	データの入力方法.....	89
6.1.2	出力.....	89
6.1.3	出力例.....	90
6.2	PROPCK.....	91
6.2.1	入力データ.....	91
6.2.2	出力.....	92
6.2.3	例題.....	92
7	DYNEQおよび他の等価線形手法の適用性.....	94
7.1	東大生研・千葉県東方沖地震.....	94
7.2	新富士変電所.....	96
7.3	ポートアイランド・兵庫県南部地震.....	99
7.4	まとめ.....	102
8	参考文献.....	103
9	バージョン情報.....	107
10	プログラムの構成.....	110
10.1	ツリー構造.....	110
10.2	主要変数.....	111
10.3	ファイル.....	114
11	各種のメモ.....	115
11.1	隠しオプション.....	115
11.1.1	解析の種類.....	115
11.1.2	吉田らの方法のオプション.....	115
11.2	吉田らの方法の計算.....	116
11.2.1	ゼロクロス.....	116
11.3	除荷点の判定.....	116
11.4	最小自乗法の計算.....	116
11.4.1	最小自乗法によらない方法.....	117
11.5	応力-ひずみ関係に対する補間.....	118
11.5.1	小さいひずみに対する補間.....	118
11.5.2	大きいひずみに対する補間.....	119

## 1 はじめに

DYNEQ は等価線形化手法に基づく一次元地盤の地震応答解析プログラムである。

等価線形化手法を用いたプログラムとしては Schnabel らにより開発された SHAKE<sup>1)</sup>が著名であり、非常に多くの実績がある。しかしながら一方では、等価線形化法という手法を用いているための限界のための欠点も示されている<sup>2)</sup>。すなわち、非線形挙動が卓越する場合や、材料特性の時間的变化が著しい場合には精度が落ちる、大地震に対する deconvolution がうまく行えないなどである。この点は事実ではあるが、一方では、線形化したことにより周波数領域で問題を解くことが出来、その結果任意の層の波動（入射波、反射波、複合波）を与え、任意の層の波動が取り出せる等、逐次積分型の解法では不可能で、かつ実用性の高い作業を行うことが出来るため、今後逐次積分型の非線形法に基づく手法が一般化されても完全に衰退してしまうことは考えられない。

最近では、SHAKE の欠点を改良しようとする研究も行われている。代表的なものは、杉戸ら<sup>3)</sup>や吉田ら<sup>4)</sup>によって提案されているような周波数ごとに材料特性を変化させようという手法である。また、地盤の散乱減衰のように周波数に依存した減衰もあることが分かってきた<sup>5)</sup>。その他、いくつかの方法が提案されている。このような事項を考慮しようとする、周波数領域での解析が必須のものとなる。

DYNEQ は文献4)に示される考えに基づく新しい等価線形解析プログラムである。また、SHAKE の様な既往の等価線形法の解析も出来るようになっている。さらに、今後現れる可能性のある周波数に依存した特性に対しても容易に取り込めるように、コーディングの明快化を計っている。

さらに、DYNEQ は dynamic allocation 方式という方法を採用することにより、解析時のサイズに関する制限を撤廃している。層数、解析ステップ数などは、使っているコンピュータが許す限りいくらでも制限がない。プログラム自身には一応の制限をつけているが、プログラム最初の PARAMETER 文を修正することにより制限を変化させることが出来る。また、FORTRAN もコンパイラに依存するような特殊な機能は用いず、簡単な命令のみで作られているので、FORTRAN が動くどのようなコンピュータでも移植することが出来る。

### 1.1 使用条件など

DYNEQ の使用に関する条件のうち、重要なものは以下のものである。

- ①本プログラムは、ソースとも公開しているが、著作権等の権利を放棄したものではない。プログラムを使用することを承認しているだけである。
- ②本プログラムの妥当性や結果に関する判断は、使用者が行うべきであり、開発者はその結果に関してどのような形でも責任をとることはしない。
- ③プログラムの使用等に関する、または内容に関する質問は受け付けない。
- ④本プログラムは、入手した機関内でのみ使用することとし、他の機関に出すことは禁止する。
- ⑤本プログラムを用いた結果を発表する際には、必ず、本プログラムを用いたことを引用する。引用は、このマニュアルとする。

吉田望：DYNEQ A computer program for DYNAmic response analysis of level ground by EQUIvalent linear method, Version 4.00, 2020, 関東学院大学

- ⑥本プログラムの一部、または全部を使って別のプログラムを作ることを禁止する。また、コードを他のプログラムのために使用することも禁止する。プログラムの改良は許容するが、その結果を紹介する際には必ず、本プログラムを修正したプログラムで計算したことを、DYNEQ の引用文献と共に明記する。また、プログラムの名称を変える場合には、たとえば DYNEQ-MOD というように、DYNEQ の名前が分かるような名称を付ける。

このうち、③は厳しい条件かもしれませんがこれには理由があります。私がプログラムを公開しているのは、技術の発展を祈ってのボランティアです。ソースも公開しておりますので、不明な点は自分で解決できるはずです。

これまでの経験から、プログラムが動かないなどの問題はそのほとんどがユーザーのミスによるものであり、そこまで私たちがサービスする必要は無いというのがこの条項の主要な理由です。

したがって、商業ベースにのる形での依頼を断るつもりはありません。研究者として研究費はいつも不足ですので、寄付等は大歓迎です。

プログラムを見ておかしいと思われるところ、どうしても分からないところなどに関する質問まで断っている訳ではありません。しかし、質問に対する返事をする、しないを含めて、その後の判断は私が行います。質問、問い合わせ等は、電話ではなく、文書や E-mail お願いします。質問内容は具体的に書いてください。プログラムに動作に関する質問では、必ず、入力データと結果の両方を送ってください。

## 1.2 DYNEQ に関する文献

DYNEQ の手法、適用性に関して発表してきた論文には以下の様なものがあります。手法によっては適当に引用してください。

- 1) Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I. and Miura, K. (2002): Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 22, No. 3, pp. 205-222
- 2) 末富岩雄, 吉田望 (1996) : 次元等価線形解析における減衰の周波数依存性の考慮に関する一検討, 第31回地盤工学研究発表会講演集, pp. 1119-1120
- 3) 中村晋, 吉田望(2004) : 周波数領域での地盤の非線形地震応答解析の精度と課題, 応用力学論文集, Vol.7, pp.823-831
- 4) 末富岩雄, 吉田望 : 周波数依存型地盤応答解析におけるパラメータの最適化のための一検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) , Vol. 72, No. 4, pp. 1\_177-1\_187, 2016

## 1.3 謝辞

DYNEQ は、筆者一人の成果ではなく、協力者のサポートに負っている部分もある。プログラムの初期のアイデアやコーディングなどについては、末富岩雄さん（日本技術開発）の協力によるところが大きい。また、新しい計算手法などについては、説明の際に文献として引用している。これら、協力者に感謝いたします。

## 2 理論

### 2.1 減衰モデルと応力-ひずみ関係

本論では実数と複素数を区別した方が良いと考え、後者にはアップバーを付けて表す。例えば、 $\bar{\gamma}$  を複素数とすると、 $\gamma$  はその実部、すなわち  $\gamma = \text{Re}(\bar{\gamma})$  を表すとする。

SHAKE の解説書<sup>1)</sup>には明確には書かれていないが、用いられているモデルは Voigt モデルを複素表現した Sorokin モデルである。そこで、まずこのモデルを用いた複素剛性法を説明する。

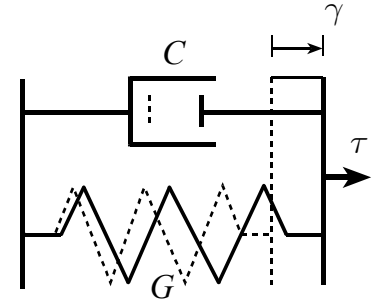


図2.1 Voigt モデル

#### 2.1.1 Sorokin モデルによる複素剛性

Voigt モデルは、図2.1ばね定数  $G$  のばねと粘性係数  $C$  のダッシュポットを並列につないだモデルである。モデルの応力を  $\tau$ 、ひずみを  $\gamma$  とすると、モデルの応力-ひずみ関係は次式となる。

$$\tau = G\gamma + C\dot{\gamma} \quad (2.1.1)$$

ここで、ドットは時間に関する微分である。

定常振動（調和振動）を考え、ひずみを次のように設定する。

$$\gamma = \gamma_0 \cos \omega t \quad \text{または} \quad \cos \omega t = \gamma / \gamma_0 \quad (2.1.2)$$

ここで、 $\omega$  は円振動数である。これを式(2.1.1)に代入し、 $\sin \omega t = \pm \sqrt{1 - \cos^2 \omega t}$  の関係を用いると次式が得られる。

$$\begin{aligned} \tau &= G\gamma_0 \cos \omega t - C\gamma_0 \omega \sin \omega t \\ &= G\gamma \pm C\omega \sqrt{\gamma_0^2 - \gamma^2} \end{aligned} \quad (2.1.3)$$

式(2.1.3)には  $\omega$  が含まれているので、応力-ひずみ関係は周波数（振動数）に依存している。そこで、周波数に依存しない新たな減衰パラメータを設定する。

$$C = \frac{2\beta G}{\omega} \quad \text{または} \quad \beta = \frac{\omega C}{2G} \quad (2.1.4)$$

ここで、 $\beta$  はパラメータであるが、後に式(2.1.7c)示すように、このモデルでは  $\beta$  は減衰定数  $h$  と等価である。ただし、後に2.1.3, 2.1.4項で述べるモデルでは同じではないので、本論では  $\beta$  と  $h$  を減衰パラメータ、減衰定数と呼び、区別する。すなわち、 $\beta$  は式(2.1.4)で定義されるとし、一方、減衰定数は応力-ひずみ関係が履歴を描くことにより吸収されるエネルギー  $\Delta W$  をひずみエネルギー  $W$  を用いて、次式で定義するものとする。

$$h = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (2.1.5)$$

次に、式(2.1.4)を式(2.1.3)に代入すると次式が得られる。

$$\tau = G \left( \gamma \pm 2\beta \sqrt{\gamma_0^2 - \gamma^2} \right) \quad (2.1.6)$$

これが Voigt モデルを周波数に依存しない減衰に置き換えたときの応力-ひずみ関係である。この式の右辺の括弧内の第1項は線形であり、第2項は非線形で楕円形である。図2.2に得られる図形の例を示す。



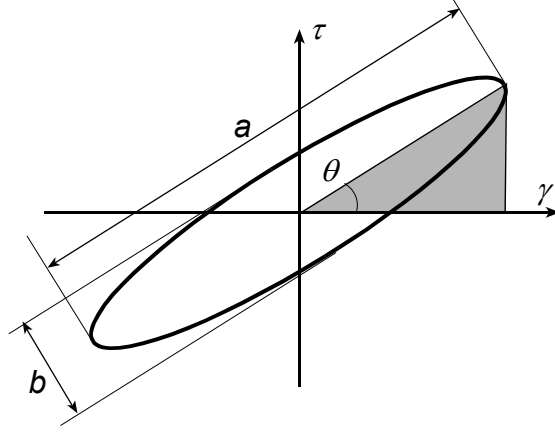


図2.2 定常振動時の応力－ひずみ関係

ここで、複号は楕円の上半分と下半分を表している。この応力－ひずみ関係は周波数に依存しない。これより履歴吸収エネルギー $\Delta W$ 、ひずみエネルギー $W$ および減衰定数 $h$ は次のように計算できる。

$$\begin{aligned}\Delta W &= \int_{-\gamma_0}^{\gamma_0} \left\{ G \left( \gamma + 2\beta \sqrt{\gamma_0^2 - \gamma^2} \right) - G \left( \gamma - 2\beta \sqrt{\gamma_0^2 - \gamma^2} \right) \right\} d\gamma = 2\beta G \pi \gamma_0^2 \\ W &= \frac{1}{2} G \gamma_0^2 \\ h &= \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} = \beta\end{aligned}\tag{2.1.7a,b,c}$$

Sorokin は式(2.1.2)のひずみを式(2.1.8)の複素数で与え、応力～ひずみ関係を式(2.1.9)で表した<sup>6)</sup>。

$$\bar{\gamma} = \gamma_0 e^{i\omega t} \tag{2.1.8}$$

$$\bar{\tau} = G\bar{\gamma} + C\dot{\bar{\gamma}} \tag{2.1.9}$$

式(2.1.8)を式(2.1.9)に代入し式(2.1.4)の関係を用いれば、次の応力－ひずみ関係が得られる。

$$\bar{\tau} = G(1 + 2i\beta)\gamma_0 e^{i\omega t} = \bar{G}_S^* \bar{\gamma} \tag{2.1.10}$$

ここで、

$$\bar{G}_S^* = G(1 + 2i\beta) \tag{2.1.11}$$

が複素剛性である。なお、 $\text{Re}(\bar{G}_S^*) = G$  であるので、最初に述べた記号の原則からすれば\*は不要であるが、多くの論文で複素剛性を\*を付けて表していること、後に2.1.3, 2.1.4項で示すモデルでは複素剛性の実部が  $G$  にならないことから、記号を統一するために複素剛性には\*を付けることにする。

式(2.1.4)を導入し式(2.1.11)のように周波数に依存しない複素剛性を用いる方法は Sorokin の仮説とか Sorokin の減衰と呼ばれている（例えば、小西ら<sup>7)</sup>, Hricko<sup>8)</sup>）。そこで、本論文ではこの複素剛性を Sorokin モデルと呼ぶことにする。式(2.1.10)、式(2.1.11)で複素剛性に下添え字  $S$  を付けているのは、Sorokin に対応し、以下で示す他のモデルと区別するためである。

式(2.1.10)の実部を取り出すと、式(2.1.3)の応力－ひずみ関係が導ける。これを式(2.1.4)の減衰パラメータを用いた表現にすると、次式となる。

$$\begin{aligned}\tau &= G\gamma_0 (\cos \omega t - 2\beta \sin \omega t) = G\gamma_0 \sqrt{1 + 4h^2} \cos(\omega t + \phi) \\ \tan \phi &= 2\beta\end{aligned}\tag{2.1.12a,b,)$$

### 2.1.2 Maxwell モデル

図2.3に示すようなマックスウェル (Maxwell model) を考える。このモデルでは、ばねとダッシュポットは直列につながれている。ひずみ $\gamma$ は二つの要素に生じるひずみの和として、次式で表される。

$$\gamma = \frac{\tau}{G} + \int \frac{\tau}{C} dt \quad (2.1.13)$$

ここで、 $\tau$ はせん断応力、 $G$ はばね定数、 $C$ は粘性係数である。式(2.1.13)を微分すると次式が得られる。

$$\dot{\tau} + \frac{G}{C} \tau = G \dot{\gamma} \quad (2.1.14)$$

式(2.1.14)が以後用いる応力－ひずみ関係である。

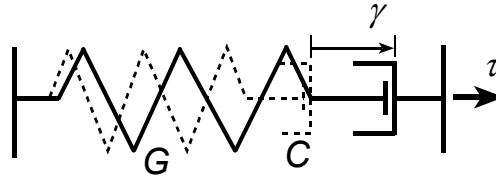


図2.3 Maxwell 型のモデル

図2.3の系が、円振動数 $\omega$ の調和振動をしているとし、応力を次式で与える。

$$\tau = G \gamma_o \sin \omega t \quad (2.1.15)$$

式(2.1.14)に代入すれば、ひずみとして次式を得る。

$$\gamma = \gamma_o \sin \omega t - \frac{G \gamma_o}{C \omega} \cos \omega t \quad (2.1.16)$$

ここでも応力とひずみには位相差があり、その軌跡は楕円形となる。式(2.1.15)と(2.1.16)より $\omega t$ を消去するとループの形状が得られる。

$$\left[ 1 + \left( \frac{G}{C \omega} \right)^2 \right] \left( \frac{\tau}{G \gamma_o} \right)^2 - 2 \left( \frac{\tau}{G \gamma_o} \right) \left( \frac{\gamma}{\gamma_o} \right) + \left( \frac{\gamma}{\gamma_o} \right)^2 = \left( \frac{G}{C \omega} \right)^2 \quad (2.1.17)$$

ループは図2.2に示すように楕円形をしており、位相角 $\theta$ と長軸、短軸の長さ $a$ 、 $b$ はそれぞれ次のようになる。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{1}{2} \left[ - \left( \frac{G}{C \omega} \right) + \sqrt{4 + \left( \frac{G}{C \omega} \right)^2} \right]$$

$$a = \sqrt{\frac{2 \left( \frac{G}{C \omega} \right)^2}{2 + \left( \frac{G}{C \omega} \right)^2 - \sqrt{4 + \left( \frac{G}{C \omega} \right)^2}}} \quad b = \sqrt{\frac{2 \left( \frac{G}{C \omega} \right)^2}{2 + \left( \frac{G}{C \omega} \right)^2 + \sqrt{4 + \left( \frac{G}{C \omega} \right)^2}}}$$

この応力－ひずみ関係の、ループの面積は次の式で求められる。

$$\Delta W = \pi \cdot \frac{G^2 \gamma_o^2}{C \omega} \quad (2.1.18)$$

したがって、履歴減衰による減衰定数  $h$  の大きさは次のようになる。

$$h = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\pi \cdot \frac{G^2 \gamma_o^2}{C\omega}}{\frac{1}{2} G \gamma_o^2} = \frac{1}{2} \left( \frac{G}{C\omega} \right) \quad (2.1.19)$$

ここでも、減衰は  $\omega$  を含んでいることから、周波数に依存しているので、前と同様

$$C = \frac{G}{2\beta'\omega} \quad (2.1.20)$$

とおく事で周波数に依存しない減衰を得ることが出来る。なお、この  $\beta'$  は Voigt モデルの  $\beta$  とは定義が異なる。減衰特性は Voigt モデルのケースと比べて円振動数や  $h$  が分母と分子で入れ替わった式となっている。すなわち、粘性係数が周波数に依存すると考えるわけである。したがって、 $h = \beta'$  は成立している。

これまでは、実数の範囲で式を展開してきた。しかし、次節では運動方程式を複素フーリエ変換で解くことから、応力-ひずみ関係の複素表示を示しておく。

調和振動を考え、応力とひずみをそれぞれ次のようにおく。

$$\bar{\tau} = \tau_o e^{i\omega t}, \quad \bar{\gamma} = \gamma_o e^{i\omega t} \quad (2.1.21)$$

ここで、係数は複素数であることに注意。式(2.1.21)を式(2.1.14)に代入すると、次式を得る。

$$\bar{\tau}_0 = \frac{G}{1-2ih} \bar{\gamma}_0 = \bar{G}_M^* \cdot \bar{\gamma}_0 \quad (2.1.22)$$

ここで、

$$\bar{G}_M^* = \frac{G}{1-2ih} = \frac{1+2ih}{1+4h^2} G \approx (1+2ih)G \quad (2.1.23)$$

が複素剛性である。なお、式(2.1.23)の最後の変形は  $4h^2$  が1に比べて充分小さいとして無視したものである。分母を無視すれば、Maxwell モデルと Voigt モデルは同じ複素剛性を与える。

### 2.1.3 YAS モデル

繰返しせん断試験で得られる、 $G$ - $\gamma$ 、 $h$ - $\gamma$  関係の応力-ひずみ関係は、例えば図2.4(a)の様な形状をしている。すなわち、ひずみ振幅  $\gamma_o$  のとき、最大応力  $\tau_o = G\gamma_o$  が発生する。一方、Sorokin モデルによる応力-ひずみ関係は式(2.1.12a)で表されているが、このモデルでは、最大応力  $\tau_{max}$  は

$$\tau_{max} = G\gamma_o \sqrt{1+4\beta^2} = \tau_o \sqrt{1+4\beta^2} \quad (2.1.24)$$

で、実験値より  $\sqrt{1+4\beta^2}$  倍大きく評価されている。最大応力を大きくすることは、地震応答解析では加速度の過大評価にもつながる。そこで、最大応力が  $\tau_o$  となる方法を検討する。

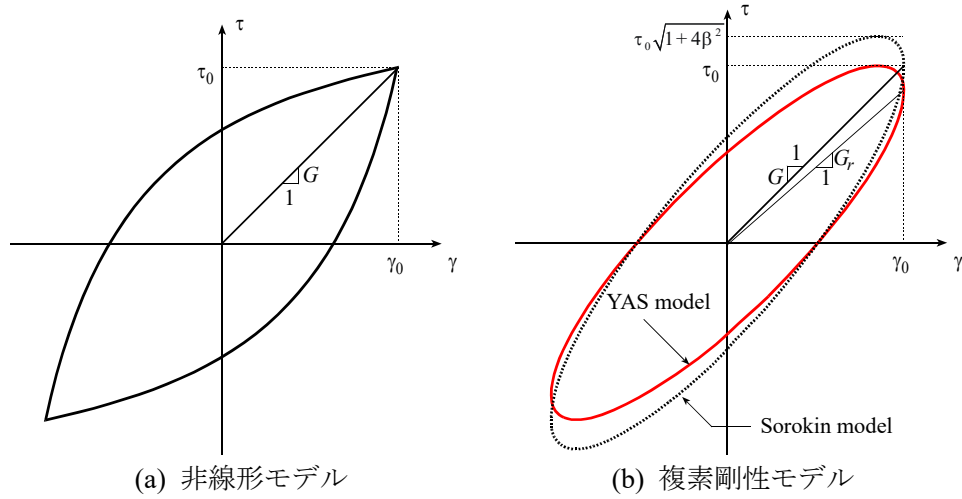


図2.4 応力-ひずみ関係の比較

Sorokin モデルでは、割線剛性  $G$  が線形部分の剛性であったが、図2.4(b)に示すように、最大応力を  $\tau_0$  とすると、線形部分の剛性は  $G$  より小さくなる。この剛性を  $G_r$  とする。すると、2.1.1項で示した Sorokin モデルに関する式は  $G$  を  $G_r$  と置き換えればそのまま成立する。すなわち、式(2.1.11)をこの考え方に適用すると、複素剛性は次の様に書ける。

$$\bar{G}_y^* = G_r(1 + 2i\beta) = G_r + iG_i \quad (2.1.25)$$

このモデルを、YAS (Yoshida-Adachi-Sorokin) モデルと呼ぶことにする。複素剛性の下添え字 Y は他のモデルと区別するためであり、 $G_i$  はこの複素剛性の虚数部である。

式(2.1.7a)の  $G$  を  $G_r$  に置き換えるとこのモデルの履歴吸収エネルギーは次式となる。

$$\Delta W = 2\beta G_r \pi \gamma_0^2 \quad (2.1.26)$$

Sorokin モデルでは減衰定数を計算する際、式(2.1.7c)では割線剛性  $G$  を用いてひずみエネルギー  $W$  を計算したが、ここでもこれを用いる。履歴吸収エネルギーは減衰定数で議論されることも多いが、実際に重要なのはエネルギーそのものである。従って、減衰定数で比較するためには、減衰定数を計算した分母であるひずみエネルギー（式(2.1.7b)の  $W$ ）を同じにする必要があるからである。式(2.1.7c)と(2.1.26)より減衰定数  $h$  は次の様になる。

$$h = \frac{1}{4\pi} \frac{2\beta G_r \pi \gamma_0^2}{G \gamma_0^2 / 2} = \frac{\beta}{\sqrt{1 + 4\beta^2}} \quad (2.1.27)$$

これを  $\beta$  に付いて解くと、次式が得られる。

$$\beta = \frac{h}{\sqrt{1 - 4h^2}} \quad (2.1.28)$$

一方、 $G_r$  の定義より、 $G_r$  は以下の様に表される。

$$G_r = \frac{G}{\sqrt{1 + 4\beta^2}} \quad (2.1.29)$$

式(2.1.28)を式(2.1.29)に代入すると  $G_r$  は次の様に求められる。

$$G_r = G \sqrt{1 - 4h^2} \quad (2.1.30)$$

これを式(2.1.25)に代入すると複素剛性の虚部  $G_i$  が求まり、結局、複素剛性  $\bar{G}_y^*$  は次の様になる。

$$\bar{G}_y^* = G(\sqrt{1-4h^2} + 2ih) \quad (2.1.31)$$

図2.5にこの複素剛性を用いて得られる応力-ひずみ関係を減衰定数  $h$  をパラメータとして示す。式(2.1.31)から、このモデルでは  $h=0.5$  (50%) で実部が0になる。このとき、図2.5に見られるように履歴曲線は円となる。これは、最大応力と減衰定数を実験値と合わせるモデル化は  $h=0.5$  までしかできないということを意味している。

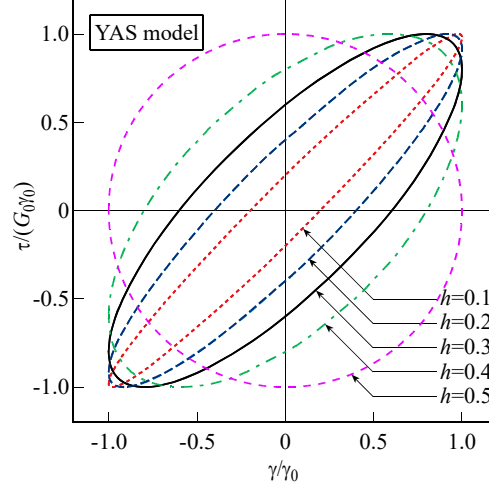


図2.5 YAS モデルの応力-ひずみ関係の減衰定数依存性

#### 2.1.4 Lysmer モデル

Lysmer は、1自由度系の強制加振問題に着目し、新しい複素剛性を示した<sup>9)</sup>。本論ではこれを Lysmer モデルと呼ぶ。はじめにで述べた様に、現在の複素応答法に基づく地震応答解析プログラムではこの複素剛性が用いられていると考えられる。現在ではプログラム SHAKE でもこの節で示す複素剛性を用いている (例えば SHAKE91<sup>10)</sup>)。ここでは、まず、Lysmer の提案に従い、1自由度系の挙動を比較し、次に、その力学特性を検討する。

##### 2.1.4.1 1自由度系の応答と Lysmer モデル

まず、Lysmer が行った1自由度系の問題を Lysmer の方法に従って検討する。

単位振幅の調和外力を受ける1自由度系の釣合式は、 $m$  と  $G$  を系の質量とばね定数、 $u$  を応答変位とすると、次式で表される。

$$\begin{aligned} m\ddot{u} + C\dot{u} + G\bar{u} &= e^{i\omega t} \\ \ddot{u} + 2\beta\omega_0\dot{u} + \omega_0^2\bar{u} &= e^{i\omega t} / m \end{aligned} \quad (2.1.32a,b)$$

ここで、 $\omega_0 = \sqrt{G/m}$  は系の固有円振動数である。このモデルの定常解は次のようになる。

$$\bar{u} = \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\beta\omega\omega_0} \frac{e^{i\omega t}}{m} = \frac{1}{1 - \alpha^2 + 2i\beta\alpha} \frac{e^{i\omega t}}{G} \quad (2.1.33)$$

ここで、 $\alpha = \omega / \omega_0$  は tuning ratio である。この実部より、変位応答は次のようになる。

$$u = \frac{\cos(\omega t - \phi)}{G\sqrt{(1 - \alpha^2)^2 + (2\alpha\beta)^2}}, \quad \tan \phi = \frac{2\alpha\beta}{1 - \alpha^2} \quad (2.1.34a,b)$$

ここで、 $\phi$  は位相遅れ角である。以下ではこの方法を Voigt モデルと呼ぶ。

同じ問題を複素剛性を用いて解く。運動方程式は次式である。

$$m\ddot{\bar{u}} + \bar{G}^* \bar{u} = e^{i\omega t} \quad (2.1.35)$$

この運動方程式の定常解は次のようになる。

$$\bar{u} = \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\beta\omega_0^2} e^{i\omega t} \quad (2.1.36)$$

これより、実部を求めると

$$u = \frac{1}{G\sqrt{(1-\alpha^2)^2 + (2\beta)^2}} \cos(\omega t - \phi), \quad \tan \phi = \frac{2\beta}{1-\alpha^2} \quad (2.1.37a,b)$$

この解は式(2.1.34)と異なる。Lysmer はこれに対して次の複素剛性を提案した<sup>9)</sup>。

$$\bar{G}_L^* = G(1 - 2\beta^2 + 2i\beta\sqrt{1-\beta^2}) \quad (2.1.38)$$

これを用いて運動方程式を解くと、変位は次の様になる。

$$u = \frac{\cos(\omega t - \phi)}{G\sqrt{(1-\alpha^2)^2 + (2\alpha\beta)^2}}, \quad \tan \phi = \frac{2\beta\sqrt{1-\beta^2}}{1-\alpha^2 - 2\beta^2} \quad (2.1.39a,b)$$

式(2.1.34a)と式(2.1.39a)より振幅が同じであることがわかる。ただし、式(2.1.34b)と式(2.1.39b)の位相遅れ角は異なるので、質点の力  $\cos \omega t$  と変位  $u$  の関係（以後、復元力特性と表現）は異なる。なお、同じ解は、宇高ら<sup>11)</sup>によっても導かれているが、以下で示すような考察は行われていない。

比較のために、YAS モデルの応答を求めると以下の様になる。

$$u = \frac{\cos(\omega t - \phi)}{G\left(\sqrt{(\sqrt{1-4h^2} - \alpha^2)^2 + (2h)^2}\right)}, \quad \tan \phi = \frac{2h}{\sqrt{1-4h^2} - \alpha^2} \quad (2.1.40a,b)$$

図2.6に4つのモデルの1周期の時刻歴と復元力特性を比較して示す。なお、変位はばね定数  $G$  で正規化して  $u/G$  として示している。先に述べたように、Lysmer モデルと Sorokin モデルは変位が同じであるが、位相遅れ角が異なるので、復元力特性は同じではない。その意味で、Lysmer の提案している変位が Sorokin モデルと同じになるというのは、力学的に重要な条件とは見えない。

#### 2.1.4.2 Lysmer モデルの力学特性

Lysmer モデルの提案した複素剛性は式(2.1.38)で表され、文献9)ではこの  $\beta$  が Sorokin モデルの  $\beta$  と同じとして扱われている。すなわち、 $\beta$  を減衰定数としている。式(2.1.38)より複素数、およびその実部である応力-ひずみ関係は次のようになる。

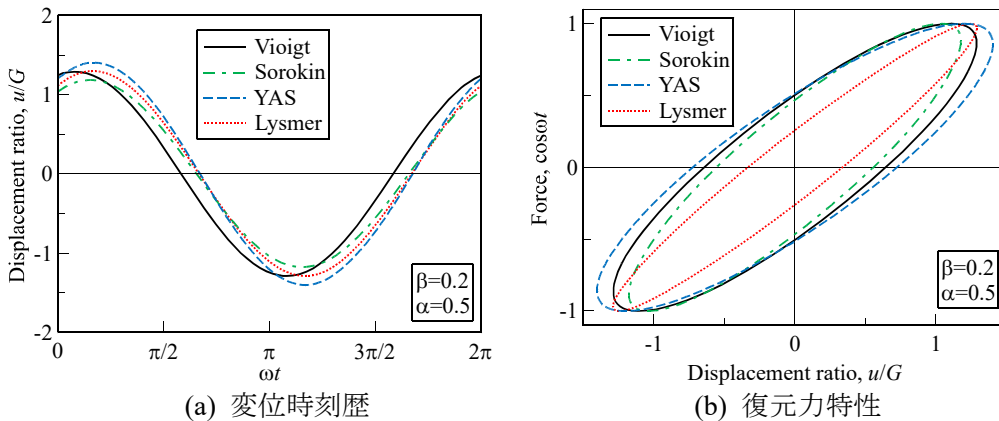


図2.6 1質点系の挙動の比較

$$\begin{aligned}
\bar{\tau} &= \bar{G}_L^* \bar{\gamma} = G\gamma_0(1 - 2\beta^2 + 2i\beta\sqrt{1 - \beta^2})(\cos \omega t + i \sin \omega t) \\
\tau &= G \left\{ (1 - 2\beta^2)\gamma \pm 2\beta\sqrt{1 - \beta^2}\sqrt{\gamma_0^2 - \gamma^2} \right\} = G\gamma_0 \cos(\omega t + \phi) \\
\tan \phi &= \frac{2\beta\sqrt{1 - \beta^2}}{1 - 2\beta^2}
\end{aligned} \tag{2.1.41a,b,c}$$

Lysmer の提案には述べられていないが、式(2.1.41b)よりこのモデルの最大せん断応力は YAS モデルと同様  $G\gamma_0$  である。これは、Lysmer モデルの重要な力学的性質である。

式(2.1.41b)よりより履歴吸収エネルギーと減衰定数は次の様に計算できる。

$$\begin{aligned}
\Delta W &= 2\beta G\gamma_0^2 \pi \sqrt{1 - \beta^2} \\
h &= \frac{1}{4\pi} \frac{2\beta G\gamma_0^2 \pi \sqrt{1 - \beta^2}}{G\gamma_0^2 / 2} = \beta \sqrt{1 - \beta^2}
\end{aligned} \tag{2.1.42a,b}$$

すなわち、減衰パラメータ  $\beta$  と  $h$  は同じではない。Sorokin モデルでは  $\beta=h$  であり、先にも述べたように、Lysmer の提案では式(2.1.38)の  $\beta$  は Sorokin モデルと同様に扱われているので、減衰定数である。しかし、これは間違いであることがわかる。式(2.1.42a,b)を  $\beta$  について解くと

$$\beta = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{1 - 4h^2}}{2}} \tag{2.1.43}$$

これらの関係を図2.7に示す。式(2.1.43)からわかるように、右辺のルートの中が  $h > 0.5$  では負になるので、この変換が成立するのは  $h \leq 0.5$ 、 $\beta \leq 1/\sqrt{2}$  の範囲である。

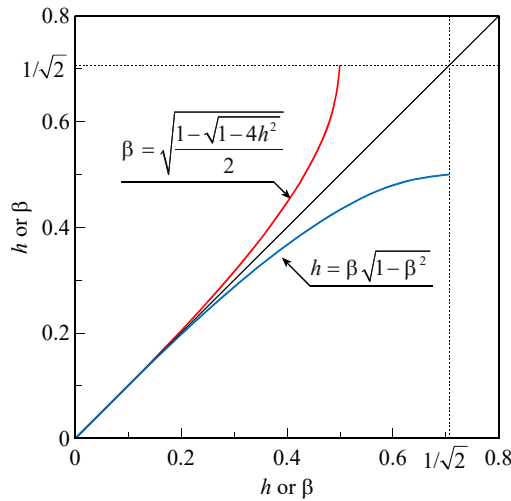


図2.7 Lysmer モデルの減衰パラメータと減衰定数の関係

### 2.1.4.3 Lysmer モデルの適用性

Christian ら<sup>12)</sup>は Lysmer モデルを紹介するとき、 $\beta < 0.3$ では Sorokin モデルと Lysmer モデルによる複素剛性の差は小さく、したがって SHAKE の複素剛性 (Sorokin モデル) を用いることを勧めている。また、 $\beta$ が0.3より大きいところでは実験値がないとして適用性ははっきりしないことから、複素剛性を用いて線形の微分方程式を得る方法に疑問を投げかけている。さらに、複素剛性の  $\beta$ 依存性について、SHAKE の複素剛性の虚数部は単調に増加するのに対し、Lysmer の修正では実部が負になることもあるし、 $\beta=1$ では複素剛性  $\bar{G}^* = -G$  となる問題点を指摘している。式から分かるように、Lysmer の修正では、 $\beta=1/\sqrt{2}$  のとき実部が0、虚部は極値1となる。ただし、土ではおおむね  $\beta < 0.3$ は成立していると考えられるので (例えば、若松ら<sup>13)</sup>)、 $\beta > 0.3$ のケースは実務では

問題にならない。

なお、Lysmer モデルでは、前項で示したように、減衰定数として設定されているものと実際の減衰定数で違うことも注意が必要である。

## 2.2 運動方程式と重複反射理論

### 2.2.1 SHAKE と Sorokin モデル

SHAKE<sup>1)</sup>では一次元の地盤の解析を行っており、変位を  $\bar{u} = \bar{u}(z, t)$  とし、質量を  $\rho$ 、粘性係数を  $C$  とすれば、運動方程式は、次のように書けるとしている。

$$\rho \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} + C \frac{\partial^3 \bar{u}}{\partial t \partial z^2} \quad (2.2.1)$$

ここで、 $z$  は鉛直下方を向く座標である。変位を変数分離し

$$\bar{u}(z, t) = \bar{U}(z) e^{i\omega t} \quad (2.2.2)$$

と置くと、式(2.2.1)は次のようになる<sup>脚注a</sup>。

$$(G + i\omega C) \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial z^2} = -\rho \omega^2 \bar{U}(z) \quad (2.2.3)$$

ここで式(2.1.4)の係数を用いて、複素剛性  $\bar{G}^*$  を式(2.1.11)のように置けば、周波数に依存しない式が得られる。

なお、式(2.2.1)は次のように導ける。まず、応力-ひずみ関係は式(2.1.1)示されており、これに式(2.1.4)の係数とひずみ-変位関係式  $\gamma = \partial u / \partial z$  に代入すれば

$$\tau = G \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{2\beta G}{\omega} \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial z} \quad (2.2.4)$$

が得られる。一方、一次元地盤の微小要素に水平方向に作用する力の釣合式は次のようである。

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.2.5)$$

式(2.2.5)を式(2.2.4)に代入すれば、式(2.2.1)が得られる。式(2.2.4)では Sorokin モデルによる応力-ひずみ関係を用いている。すなわち、SHAKE が用いているのは Sorokin モデルに対応した波動方程式である。ただし、最初に  $G$  をばね定数と定義したが、地盤の非線形挙動を考える際には、 $G$  は割線剛性である。

### 2.2.2 重複反射理論

図2.8に示すような地盤の中の角柱を考えると、複素数で表した運動方程式（釣合式）は次のようになる。

$$\frac{\partial \bar{\tau}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2} \quad (2.2.6)$$

<sup>脚注a</sup> SHAKE<sup>1)</sup>では式(2.2.3)の右辺の負号はないが、これは間違いである。なお、SHAKE ではもう一度虚数単位  $i$  の二乗が-1になる所を間違えていて、最終的な支配方程式は正しい。



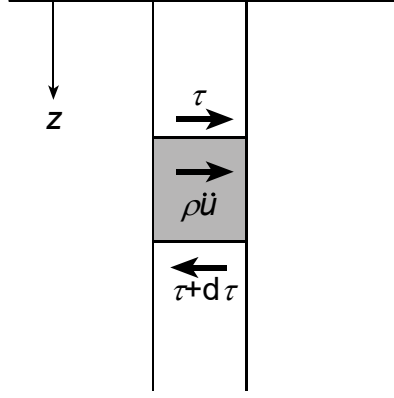


図2.8 地盤の中の角柱に作用する応力

応力－ひずみ関係  $\bar{\tau} = \bar{G}^* \bar{\gamma}$  の微分  $\partial \bar{\tau} / \partial z = \bar{G}^* \partial \bar{\gamma} / \partial z$  を代入すると、釣合式は次の様になる。

$$\bar{G}^* \frac{\partial \bar{\gamma}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2} \quad (2.2.7)$$

これに、ひずみ－変位関係式

$$\bar{\gamma} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \quad (2.2.8)$$

を代入すると、最終的な釣合式は次の様になる。

$$\bar{G}^* \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} = \rho \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2} \quad (2.2.9)$$

式(2.2.9)が変位で表した波動方程式である。

式(2.2.9)を一般的に解くことは困難である。そこで、まず、地盤はいくつかの均質な層の集合で構成されていると考える。また、材料性状は時間には依存しないとする。ある均質な層を取り上げ、 $z$  軸の原点をその層の上部にとる。また、後の述べるフーリエ級数展開された各周波数成分のみを扱うことにする。すなわち、変位  $u$  を次式のように空間と時間に関し変数分離する。

$$\bar{u} = \bar{U}(z)e^{i\omega t}, \quad \ddot{\bar{u}} = -\omega^2 \bar{U}(z)e^{i\omega t} \quad (2.2.10)$$

式(2.2.10)式(2.2.9)に代入し、 $\omega$ および  $e^{i\omega t}$  は0ではないという性質を利用すれば、次式が得られる。

$$\bar{G}^* \frac{\partial^2 \bar{U}(z)}{\partial z^2} + \rho \omega^2 \bar{U}(z) = 0 \quad (2.2.11)$$

または、書き直して、

$$\frac{\partial^2 \bar{U}(z)}{\partial z^2} + \frac{\rho \omega^2}{\bar{G}^*} \bar{U}(z) = 0 \quad (2.2.12)$$

また、複素波数 (complex wave number または伝播定数 propagation constant)  $k$  を

$$\bar{k} = \omega \sqrt{\frac{\rho}{\bar{G}^*}} \quad (2.2.13)$$

用いれば、次のように表すことも出来る。

$$\frac{d^2 \bar{U}}{dz^2} + \bar{k}^2 \bar{U} = 0 \quad (2.2.14)$$

式(2.2.14)一般解は次のように表される。

$$\bar{U}(z) = \bar{E}e^{ikz} + \bar{F}e^{-ikz} \quad (2.2.15)$$

式(2.2.10)に代入し、次式を得る。

$$\bar{u}(z, t) = \bar{E}e^{i(\bar{k}z + \omega t)} + \bar{F}e^{-i(\bar{k}z - \omega t)} \quad (2.2.16)$$

この式の右辺第1項は  $z$  軸の負（すなわち上方）に進む波動、第2項は  $z$  軸の正（すなわち下方）に伝播する波動を表し、 $E, F$  はそれぞれの波の振幅を表している。これらの値は解析範囲の両端における境界条件および異なる媒質の境における連続条件より求めることが出来る。

式(2.2.16)により変位が得られれば、せん断ひずみおよびせん断応力は式(2.2.8)および(2.1.22)より求めることが出来、次のようになる。

$$\bar{\gamma} = ik(\bar{E}e^{ikz} - \bar{F}e^{-ikz})e^{i\omega t} \quad (2.2.17)$$

$$\bar{\tau} = i\bar{G}^* \bar{k}(\bar{E}e^{ikz} - \bar{F}e^{-ikz})e^{i\omega t} \quad (2.2.18)$$

これらを用いて、成層地盤を解く。図2.8に示した地盤を均質な地盤の集合で表し、その上から  $m$  番目の層と  $m+1$  番目の層を図2.9に示す。 $m$  番目の層と  $m+1$  番目の層の境界では変位およびせん断応力は連続している必要がある。

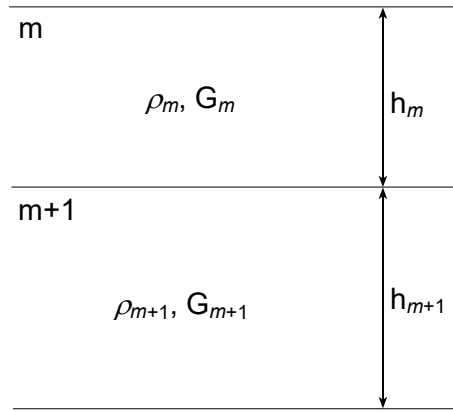


図2.9 成層地盤のモデル化

変位の連続条件は次のように表される。

$$\bar{u}_m(z = h_m, t) = \bar{u}_{m+1}(z = 0, t)$$

式(2.2.16)を代入して、次式を得る。

$$\bar{E}_m e^{ikh_m} + \bar{F}_m e^{-ikh_m} = \bar{E}_{m+1} + \bar{F}_{m+1} \quad (2.2.19)$$

同様に、せん断応力の連続条件は次のように表される。

$$\bar{G}_m^* \bar{k}_m (\bar{E}_m e^{ikh_m} - \bar{F}_m e^{-ikh_m}) = \bar{G}_{m+1}^* \bar{k}_{m+1} (\bar{E}_{m+1} - \bar{F}_{m+1}) \quad (2.2.20)$$

式(2.2.19)と(2.2.20)より、次式が得られる。

$$\begin{aligned} E_{m+1} &= \frac{1}{2} E_m (1 + \alpha_m) e^{ikh_m} + \frac{1}{2} F_m (1 - \alpha_m) e^{-ikh_m} \\ \bar{F}_{m+1} &= \frac{1}{2} \bar{E}_m (1 - \bar{\alpha}_m) e^{ikh_m} + \frac{1}{2} \bar{F}_m (1 + \bar{\alpha}_m) e^{-ikh_m} \end{aligned} \quad (2.2.21)$$

ここで、

$$\bar{\alpha}_m = \frac{\bar{k}_m \bar{G}_m^*}{\bar{k}_{m+1} \bar{G}_{m+1}^*} \quad (2.2.22)$$

は二つの層のインピーダンス比の複素表現である。

次に地表における応答を考える。地表では式(2.2.18)より

$$\bar{E}_1 = \bar{F}_1 \quad (2.2.23)$$

がえられる。式(2.2.21), (2.2.22)は漸化式となっており初期条件として式(2.2.23)を与えれば, 各層の入射波, 反射波の振幅比を得ることが出来る。したがって, もう一つの境界条件として, 地震波の大きさを与えれば, 全地盤の応答を求めることが出来る。

地震波として与えるのは, 入射波 ( $E$ ) でも反射波 ( $F$ ) でも, また, 複合波 ( $E+F$ ) でも構わない。実務的に用いられるのは, 入射波 ( $E$ ) または複合波 ( $E+F$ ) であるが, これ以外に解放基盤複合波が用いられることがある。解放基盤とは, 表層地盤が無く, 基盤が丁度地表面となっているような条件のことである。式(2.2.23)よりこのような面では入射波と反射波の大きさは等しいので, 波動の大きさは  $2E$  と書くことが出来る。

ここで示したのは, 波動を入射波と反射波に分け, 連続条件を用いることで, 隣接する層の波動が漸化式として与えられる事を巧みに利用して偏微分方程式を厳密に解く方法である。このような解法を重複反射理論という。

### 2.3 フーリエ級数展開

重複反射理論では, 各振動数成分ごとに解を求めている。ここでは, 振動数成分に分割する方法である, 有限フーリエ級数と DYNEQ で用いている複素フーリエ級数を示す。

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

$$\tilde{u}(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{m=1}^{N/2-1} (A_m \cos \omega_m t + B_m \sin \omega_m t) + \frac{A_{N/2}}{2} \cos\left(\frac{N}{2} \omega_{N/2} t\right) \quad (2.3.1)$$

ここで,

$$\omega_m = \frac{2\pi}{N\Delta t} m \quad (2.3.2)$$

は各周波数成分に対応する円振動数である。有限フーリエ級数の各成分は互いに直交している。

$$A_m = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^{N-1} u_k \cos(\omega_m k \Delta t) \quad k = 0, 1, 2, \dots, N/2 \quad (2.3.3)$$

$$B_m = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^{N-1} u_k \sin(\omega_m k \Delta t) \quad k = 1, 2, \dots, N/2 - 1 \quad (2.3.4)$$

一方, 複素フーリエ級数では式(2.3.1)に対応する式を次のように表す。

$$\tilde{u}^*(t) = \frac{1}{2} \sum_{m=0}^{N-1} (A_m - iB_m) e^{i\omega_m t} = \frac{1}{2} \sum_{m=0}^{N-1} C_m e^{i\omega_m t} \quad (2.3.5)$$

ここで,

$$C_m = \frac{A_m - iB_m}{2} \quad (2.3.6)$$

は複素振幅である。

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

$$A_m - iB_m = A_{N-m} + iB_{N-m} \quad m=1,2,\dots,N/2 \quad (2.3.7)$$

$$B_0 = B_{N/2} = 0 \quad (2.3.8)$$

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

DYNEQ では、複素フーリエ級数を用いた式の展開をしている。この場合、増幅関数などは互いの比を用いているだけなので、フーリエ係数を使った計算と複素フーリエ級数を使った計算で特に扱いを変える必要はない。ただし、フーリエスペクトルではフーリエ級数展開の係数に  $T/2$  ( $T$  は高速フーリエ変換をする際の周期) を掛けたものを出力している<sup>14)</sup>。

## 2.4 材料非線形

2.2節では地盤は弾性体であるとして式を展開した。しかし、実際の地盤は大地震時には非線形挙動をする。図2.10は地盤材料の非線形性の程度を表したものであるが、ひずみの小さい間から材料は非線形性を示すので、地盤の地震応答解析では非線形性の考慮は必須である。

地盤材料の非線形性は、動的変形特性とも呼ばれることが多い。ここで動的とは、外力の作用が急速であるという意味ではなく、繰返し外力が作用するという意味でとらえられている。動的変形特性を求める試験に、動的変形特性試験がある。動的変形特性試験では、三軸試験機や中空ねじり試験機を用い、試料に繰返しせん断応力を加え、得られた応力-ひずみ関係の形状よりひずみに応じたせん断定数  $G$  と減衰定数  $h$  を求める。この試験の方法を模式的に図2.11に示す。結果は  $G$ - $\gamma$  関係と  $h$ - $\gamma$  関係で整理される。この関係が材料の非線形特性を完全に表しているわけではないが、扱いが容易なこと、多くの実績があることから、この関係が材料の非線形性を表しているとして解析が行われる。

動的変形特性は、解析の際には対象材料に対する動的変形特性試験を行って決めるのが好ましい。しかし、実験には動的変形特性試験を行うには費用も掛かり、行われないことも多い。この場合には実験式を用いることになる。以下では、DYNEQ に用いられる動的変形特性について示す。

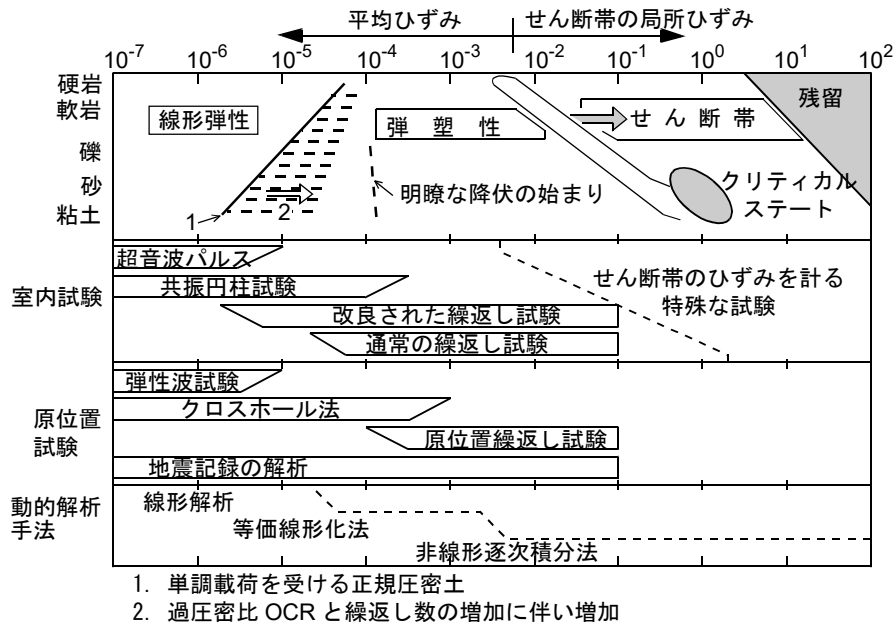


図2.10地盤材料のひずみ依存性とその試験法、解析法（文献<sup>15</sup>、<sup>16</sup>より編集）

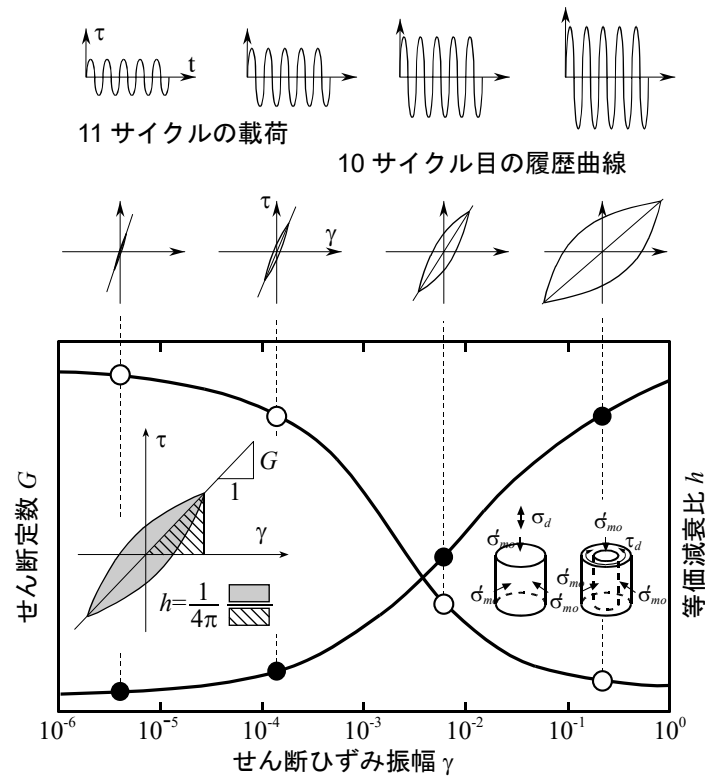


図2.11動的変形特性試験の模式図

#### 2.4.1 弾性定数

土は非常に小さいひずみ領域から非線形性を示すので、弾性定数というものがあるのかは不明である。そこで、実験ではひずみが小さいときのせん断定数をもって弾性定数のように扱うが、厳密に定義するために、「微小ひずみ時のせん断定数」と言うことも多い。微小ひずみ時のせん断定数を弾性定数と呼ぶことも多い。なお、微小ひずみ時のせん断定数として  $G_{max}$  の記号がよく用いられるが、添え字の  $max$  は最大のせん断定数という意味である。これに対し、 $G_o$  の記号を用いるケースもある。

せん断弾性定数は、PS 検層で直接求められる他、色々な実験式からも求められる。しかしながら、実験式ではデータのばらつきが大きいことに注意すべきである。たとえば、図2.12は後に2.4.1.6項で示す実験式の基となったデータであるが、おおよそ倍一半分の間にデータがばらついている。

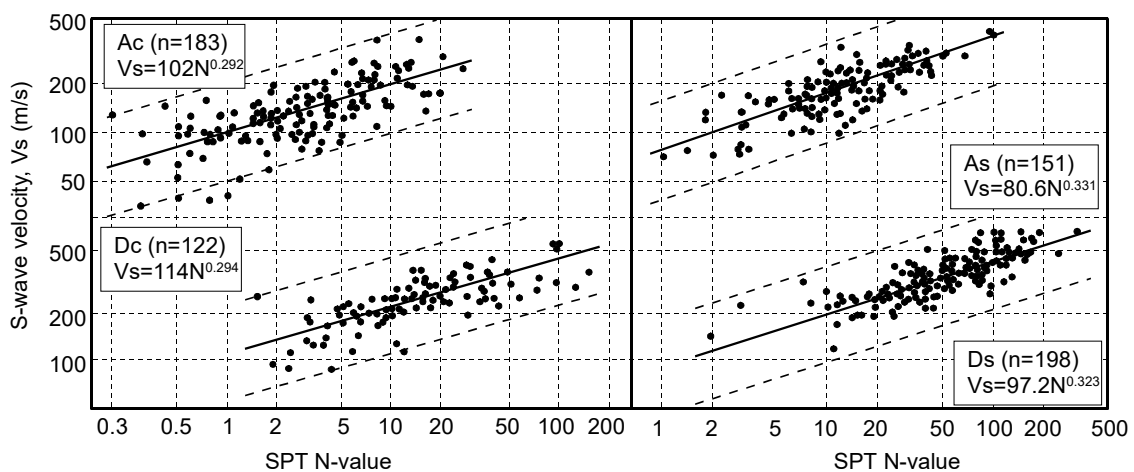


図2.12  $V_s$ - $N$  値関係（計測値と経験式）の例

#### 2.4.1.1 PS 検層

PS 検層結果からの弾性定数の求め方は次のとおりである。

$$G_{\max} = \rho V_s^2 : \rho = \gamma'_t / g \text{ は質量密度}$$

#### 2.4.1.2 道路橋示方書

$$\begin{array}{ll} \text{粘性土} & V_s = 100N^{1/3} \quad (1 \leq N \leq 25) \\ \text{砂質土} & V_s = 80N^{1/3} \quad (1 \leq N \leq 50) \end{array}$$

#### 2.4.1.3 港湾関係でよく使われる式<sup>17)</sup>

##### ①粘性土

- ・一軸圧縮強度  $q_u$  との関係

$$G_{\max} = 170q_u \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

- ・塑性指数  $I_p$  と間隙比  $e$  との関係

$$G_{\max} = (285 - 2I_p)\sigma'_m \quad (I_p \geq 30)$$

$$G_{\max} = (1.6I_p + 185) \frac{(2.973 - e)}{1 + e} \sigma_m'^{0.5} \quad (I_p < 30)$$

##### ②砂質土

- ・ $N$  値との関係

$$G_{\max} = 144N^{0.88}$$

- ・間隙比  $e$  との関係

$$G_{\max} = 700 \frac{(2.17 - e)}{1 + e} \sigma_m'^{0.5} \quad (\text{丸い砂粒子})$$

$$G_{\max} = 330 \frac{(2.973 - e)}{1 + e} \sigma_m'^{0.5} \quad (\text{角張った粒子})$$

#### 2.4.1.4 ガス導管耐震設計指針

$$\begin{array}{ll} \text{沖積砂質土 (As)} & V_s = 103N^{0.211} \\ \text{沖積粘性土 (Ac)} & V_s = 143N^{0.0777} \\ \text{洪積砂質土 (Ds)} & V_s = 205N^{0.125} \\ \text{洪積粘性土 (Dc)} & V_s = 172N^{0.185} \end{array}$$

#### 2.4.1.5 変電所等における電気設備の耐震対策指針

$$V_s = 89.8^{0.341} \quad (\text{土によらない})$$

#### 2.4.1.6 新体系土木工学18 土の力学 III

$$\text{沖積砂質土 (As)} \quad V_s = 80.6N^{0.331}$$

沖積粘性土 (Ac)	$V_s = 102N^{0.292}$
洪積砂質土 (Ds)	$V_s = 97.2N^{0.323}$
洪積粘性土 (Dc)	$V_s = 114N^{0.292}$

#### 2.4.1.7 鉄道構造物等設計標準・同解説

盛土材料に対して実験結果に基づきせん断弾性定数の拘束圧依存性が示されている。粒度調整砕石については拘束圧の0.52乗，豊浦砂と稲城砂について0.56乗，岩手ロームに対して0.46乗が示されている。材料については，次項の動的変形特性の対応する部分を参照されたい。

#### 2.4.2 表形式の動的変形特性

室内試験で動的変形特性を求めた場合には，せん断ひずみ振幅 $\gamma$ の関数としてせん断定数と減衰定数が与えられる。ここで，室内試験で得られた微小ひずみ時のせん断定数は，原位置試験で求めた値と大きく異なることが普通である。図2.13は室内試験と原位置試験の微小ひずみ時のせん断剛性を比較したものであるが，地盤が剛になるにしたがって室内試験の剛性が小さくなっているという一般的な傾向が伺え，これは試料採取時の乱れの影響であると言われている。したがって，実験で得られたせん断定数は，最大のせん断定数で割り，これに原位置で計測したせん断弾性定数を掛け求めるという手順が普通に行われる。これに対応し，表形式の入力では，せん断ひずみに対応したせん断定数比と減衰定数比が入力として要求される。

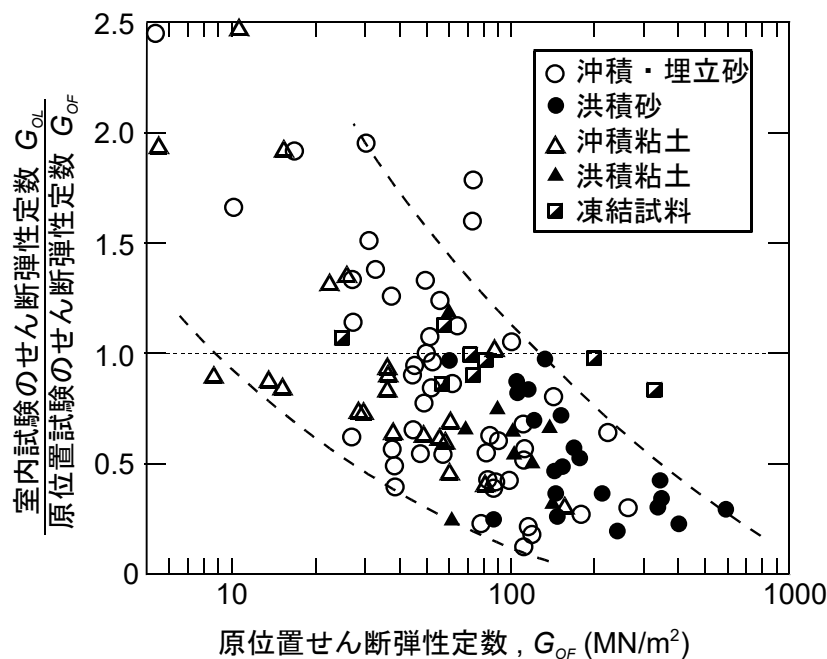


図2.13 原位置調査によるせん断波速度と室内試験によるせん断波速度の差<sup>18),19)</sup>。原位置のせん断波速度が大きいほど室内試験より求めたせん断波速度の低下の割合は大きくなる。逆に原位置のせん断波速度が小さければ室内試験より求めたせん断波速度の方が大きくなる事もある。また，データごとのばらつきも大きく一意的な線を引くことも出来ない。

#### 2.4.3 Hardin-Drnevich モデル

実験式で最も代表的なものは Hardin と Drnevich により提案されたもの<sup>20)</sup>で，次のような式で表される。

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (2.4.1)$$

$$h = h_{\max} \left( 1 - \frac{G}{G_{\max}} \right) \quad (2.4.2)$$

ここで、 $\gamma_r$ は規準ひずみと呼ばれている。また、 $h_{\max}$ は最大減衰定数である。ここで、式(2.4.2)ではひずみが小さくなると減衰定数が0に近づくが、実験ではある程度の減衰があることが多い<sup>b</sup>ので、プログラムでは減衰定数の最小値も入力できるようになっている。この場合、次の二つの式が考えられる。

$$h = \max \left( h_{\max} \left( 1 - \frac{G}{G_{\max}} \right), h_{\min} \right) \quad (2.4.3)$$

$$h = (h_{\max} - h_{\min}) \left( 1 - \frac{G}{G_{\max}} \right) + h_{\min} \quad (2.4.4)$$

実験結果は式(2.4.3)により近いと考えられるので、プログラムではこれを用いている。

なお、日本で一般に Hardin-Drnevich モデルと言った場合、式(2.4.1)を骨格曲線としてメージング則を用いて履歴曲線を表すモデルを言うことも多いが、これは、ここでは、双曲線モデルとして2.4.4項に示されている。

#### 2.4.4 数式モデル

非線形に解析プログラムでは、力学モデルや数学モデルが用いられる。よく用いられるのは、双曲線モデルと、Ramberg-Osgood モデルであり、骨格曲線は次のように表される。

$$\text{双曲線モデル：} \frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \gamma / \gamma_r}$$

$$\text{Ramberg-Osgood モデル：} \gamma = \frac{\tau}{G_{\max}} \left( 1 + \alpha \left( \frac{\tau}{\tau_f} \right)^{\beta-1} \right)$$

ここで、 $\gamma_r$ は基準ひずみ ( $=\tau_{\max}/G_{\max}$ ： $\tau_{\max}$ はせん断強度)， $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\tau_f$ はパラメータである。なお、Ramberg-Osgood モデルでは、ひずみがせん断応力の関数として表されているため、せん断定数比の陽な関数として書き表すことは出来ない。 $\gamma_r = \tau_f / G_{\max}$ と置き、書き直せば、次式となる。

$$1 = \frac{G}{G_{\max}} \left( 1 + \alpha \left( \frac{G}{G_{\max}} \cdot \frac{\gamma_r}{\gamma} \right)^{\beta-1} \right)$$

繰返し载荷時の履歴法則に Masing 則を使うとすれば、減衰定数のひずみ依存性は次のように表される。

$$\text{双曲線モデル：} h = \frac{2}{\pi} \left\{ 2 \left( 1 + \frac{\gamma_r}{\gamma} \right) \left[ 1 - \frac{\gamma_r}{\gamma} \ln \left( 1 + \frac{\gamma}{\gamma_r} \right) \right] - 1 \right\}$$

$$\text{Ramberg-Osgood モデル：} h = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\beta-1}{\beta+1} \left( 1 - \frac{G}{G_{\max}} \right)$$

なお、双曲線モデルに対する減衰定数は、コンピュータの丸目の誤差のため、ひずみの小さいところでは上式ではうまく計算できないので、実計算では右辺の[ ]内の第2項を Taylor 展開した式を用いている。

<sup>b</sup> これは、試験装置の摩擦、計測時の変位と応力の位相差、ベッディングエラーなど、色々な要因によって起こされる。



#### 2.4.5 拘束圧依存性を考慮した表形式（吉田らの方法<sup>21)</sup>）

2.4.2項で示した実験値に基づくデータを入力する方法は、正確ではあるが、実験を行った一点のみの結果である。実際の地盤では、たとえば材料が同じでも、深さが異なれば拘束圧も異なるので、非線形特性も異なる。これを考慮するために、与えられた拘束圧下の実験値から、拘束圧を考慮して非線形性を修正する必要がある。吉田らは、ひずみ依存性の双曲線モデルとの近似性に基づき、拘束圧の異なる材料非線形の修正方法を示している。これを少し拡張すると、式(2.4.5)が得られる。

$$\frac{G}{G_{max}} = \left( \frac{G}{G_{max}} \right)_o \frac{B + \gamma A \sigma_v^{m-n}}{B + \gamma A \sigma_v'^{m-n}}, \quad h = h_o \frac{1 - \frac{G}{G_{max}}}{1 - \left( \frac{G}{G_{max}} \right)_o} \quad (2.4.5)$$

ここで、 $A$ 、 $B$ 、 $m$ 、 $n$  は定数であり、せん断弾性定数および内部摩擦角を決めたときに決まる。すなわち、これらは(2.4.6)で表されてる。

$$\begin{aligned} G_{max} &= A \sigma_v'^m \\ \tau_{max} &= B \sigma_v'^n \end{aligned} \quad (2.4.6)$$

なお、吉田らの原論文では式は有効拘束圧依存として表されているが、一次元の問題に適用することから、ここでは有効上載圧に変更している。

#### 2.4.6 港湾の施設の技術上の基準に基づく方法<sup>22)</sup>

$G$ - $\gamma$ 関係を、せん断ひずみ振幅 $\gamma$ と塑性指数 $I_p$ の関数として、次のように表している。

$$\frac{G}{G_{max}} = \bar{A}(I_p, \gamma) \sigma_m'^{n(I_p, \gamma)} \quad (\text{kgf/cm}) \quad (2.4.7)$$

ここで、 $\bar{A}(I_p, \gamma)$  および指数部 $n(I_p, \gamma)$  の値は表2.1、表2.2で与えられている。

一方、減衰特性は表2.2の様に与えられている。この指針では、減衰特性については、影響が明瞭でないとして、拘束圧の影響は考慮されていない。なお、プログラムでは表2.2の平均を用いている。

表2.1  $\bar{A}(I_p, \gamma)$  および $n(I_p, \gamma)$  の値

せん断ひずみ振幅 $\gamma$	塑性指数 $I_p$					
	NP~9.4未満		9.4~30未満		30以上	
	$\bar{A}(I_p, \gamma)$	$n(I_p, \gamma)$	$\bar{A}(I_p, \gamma)$	$n(I_p, \gamma)$	$\bar{A}(I_p, \gamma)$	$n(I_p, \gamma)$
$10^{-6}$	1.	0.	1.	0.	1.	0.
$10^{-5}$	0.93	0.01	0.96	0.	0.97	0.
$5 \times 10^{-5}$	0.83	0.03	0.91	0.01	0.93	0.
$10^{-4}$	0.75	0.05	0.84	0.02	0.89	0.
$2.5 \times 10^{-4}$	0.56	0.10	0.74	0.05	0.82	0.
$5 \times 10^{-4}$	0.43	0.16	0.59	0.09	0.70	0.
$10^{-3}$	0.30	0.22	0.45	0.16	0.58	0.
$2.5 \times 10^{-3}$	0.15	0.30	0.26	0.22	0.40	0.
$5 \times 10^{-3}$	-	-	0.12	0.26	0.25	0.
$10^{-2}$	-	-	-	-	0.18	0.

表2.2 減衰定数の値

せん断ひずみ振幅 $\gamma$	塑性指数 $I_p < 30$			塑性指数 $I_p \geq 30$		
	平均	最大	最小	平均	最大	最小
$10^{-6}$	0.026	0.040	0.015	0.025	0.050	0.010

$10^{-5}$	0.030	0.040	0.018	0.030	0.054	0.010
$5 \times 10^{-5}$	0.033	0.042	0.020	0.034	0.062	0.014
$10^{-4}$	0.037	0.048	0.026	0.038	0.070	0.018
$2.5 \times 10^{-4}$	0.055	0.068	0.040	0.050	0.088	0.030
$5 \times 10^{-4}$	0.080	0.098	0.060	0.066	0.108	0.042
$10^{-3}$	0.120	0.145	0.092	0.086	0.133	0.056
$2.5 \times 10^{-3}$	0.174	0.200	0.148	0.118	0.174	0.080
$5 \times 10^{-3}$	0.200	0.222	0.178	0.144	0.208	0.100
$10^{-2}$	0.220	0.240	0.200	0.175	-	0.125

#### 2.4.7 安田らの方法<sup>23)</sup>

安田らは不攪乱試料に関する動的変形特性試験を基に、次の式を提案している。

$$\frac{G}{G_{max}} = (A_1 + A_2 \log D_{50}) \sigma_m'^{(B_1 + B_2 \log D_{50})}$$

$$h = (C_1 + C_2 \log D_{50}) \sigma_m'^{(D_1 + D_2 \log D_{50})} \quad (2.4.8)$$

$$(0.2 \leq \sigma_m' \leq 3 \text{ kgf/cm}^2, \quad 0.02 \leq D_{50} \leq 1 \text{ mm})$$

指数部を決めるための係数は、表2.3に示されている。

なお、このモデルでは減衰のデータ数は剛性のデータ数より小さい。そこで、プログラムの内部では内挿できるときにはひずみを対数軸とする片対数軸で線形補間し、出来ないとき ( $\gamma \neq 3 \times 10^{-2}$ ) には  $\gamma = 10^{-2}$  の点を通るような Hardin-Drnevich モデルを考え仮定の最大減衰を求め、 $\gamma = 3 \times 10^{-2}$  に対する減衰を計算している。

表2.3 指数部を決めるための係数

$\gamma$	$A_1$	$A_2$	$B_1$	$B_2$
$10^{-4}$	0.827	-0.044	0.056	0.026
$3 \times 10^{-4}$	0.670	-0.068	0.184	0.086
$10^{-3}$	0.387	-0.099	0.277	0.130
$3 \times 10^{-3}$	0.189	-0.089	0.315	0.147
$10^{-2}$	0.061	-0.054	0.365	0.167
$3 \times 10^{-2}$	0.041	-0.019	0.403	0.183

$\gamma$	$C_1$	$C_2$	$D_1$	$D_2$
$10^{-4}$	0.035	0.005	-0.559	-0.258
$10^{-3}$	0.136	0.036	-0.375	-0.173
$10^{-2}$	0.234	0.037	0.0	0.

ただし、 $B_1=B_2=D_1=D_2=0$  ( $D_{50} \leq 0.007 \text{ mm}$ )

ここでは、 $D_{50}$ が必要である。概略値として、次の表が参考になろう。

表2.4  $D_{50}$ ,  $F_c$ , 単位堆積重量の概略値 (文献24, 25より補正)

土質	$D_{50}$ (mm)	$F_c$ (%)	$\gamma_2$ (t/m <sup>3</sup> )	$\gamma_1$ (t/m <sup>3</sup> )
粘土	(0.004)	100	1.5	1.4
表土	0.02	100~80	1.7	1.5
シルト	0.025	90~75	1.75	1.55
砂質シルト, ローム	0.04	70~65	1.8	1.6
シルト質細砂	0.07	50	1.8	1.6
細砂	0.1	20~40	1.85	1.65
微細砂	0.15	10~30	1.95	1.75
中砂	0.35	5~10	2.0	1.8
粗砂	0.6	0	2.0	1.8
砂礫	2.0	0	2.1	1.8

$D_{50}$  : 平均粒径,  $F_c$  : 細粒分含有率,  $\gamma_2$  : 飽和单位体積質量,  $\gamma_1$  : 地下水単位体積質量

## 2.4.8 土木研究所の式<sup>26)</sup>

建設省土木研究所で行われた動的変形特性試験で、沖積粘性土<sup>27)</sup>、洪積粘性土<sup>28)</sup>、砂質土<sup>29)</sup>に関し、次のようにまとめられている。

### ①沖積粘性土

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

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

ここで、 $\sigma'_m$  は平均有効主応力 (kgf/cm<sup>2</sup>)、 $A$ 、 $B$ 、 $K$  は表2.5<sup>26)</sup>に示される。また、これを図示すると、図2.3の様になる。

一方、減衰定数については、拘束圧依存にデータが整理できなかったとして、図2.3に示す一つの曲線を与えており、これを表にすると、表2.5<sup>26)</sup>の右側となる。

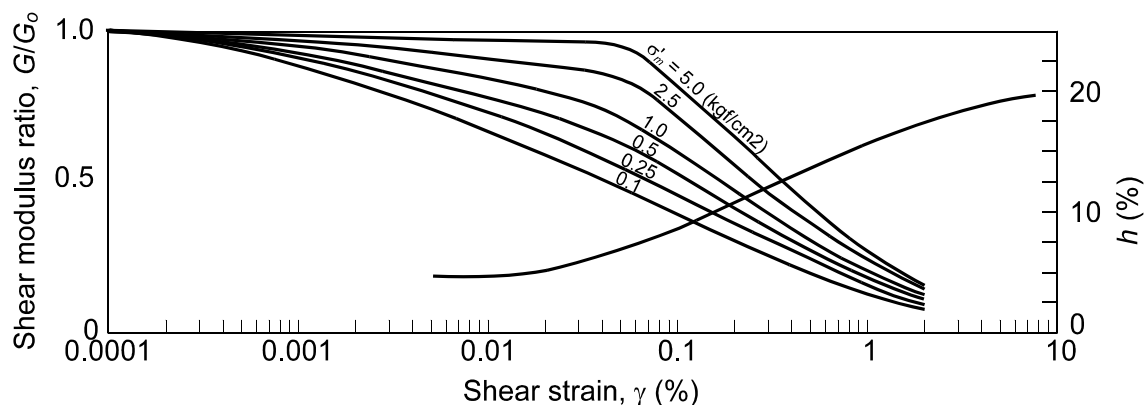


図2.14 沖積粘土に対するひずみ依存性

表2.5 動的変形特性を決めるための係数

$\gamma$	$A$	$B$	$\gamma$	$K$	$\gamma$	$h$	$\gamma$	$h$
$2 \times 10^{-6}$	0.991	0.00258	$5 \times 10^{-4}$	1.000	$10^{-6}$	(0.02)	$5 \times 10^{-4}$	0.073
$5 \times 10^{-6}$	0.965	0.0160	$10^{-3}$	0.831	$2 \times 10^{-6}$	(0.023)	$10^{-3}$	0.092
$10^{-5}$	0.938	0.0275	$2 \times 10^{-3}$	0.655	$5 \times 10^{-6}$	(0.028)	$2 \times 10^{-3}$	0.110
$2 \times 10^{-5}$	0.908	0.0443	$5 \times 10^{-3}$	0.431	$10^{-5}$	(0.032)	$5 \times 10^{-3}$	0.140
$5 \times 10^{-5}$	0.863	0.0727	$10^{-2}$	0.282	$2 \times 10^{-5}$	(0.036)	$10^{-2}$	0.161
$10^{-4}$	0.820	0.101	$2 \times 10^{-2}$	0.170	$5 \times 10^{-5}$	0.044	$2 \times 10^{-2}$	0.176
$2 \times 10^{-4}$	0.780	0.129	$5 \times 10^{-2}$	(0.06)	$10^{-4}$	0.051	$5 \times 10^{-2}$	0.192
$5 \times 10^{-4}$	0.705	0.185	$10^{-1}$	(0.03)	$2 \times 10^{-4}$	0.057	$10^{-1}$	0.200

括弧は推定値。文献26の  $B$  の値には間違いがあるので修正している。

### ②洪積粘性土

横田・龍岡<sup>28)</sup>の報告 ( $N$  値15~30,  $V_s \approx 300$ m/s) (図2.15) を読みとると<sup>26)</sup>、表2.6の様になる。

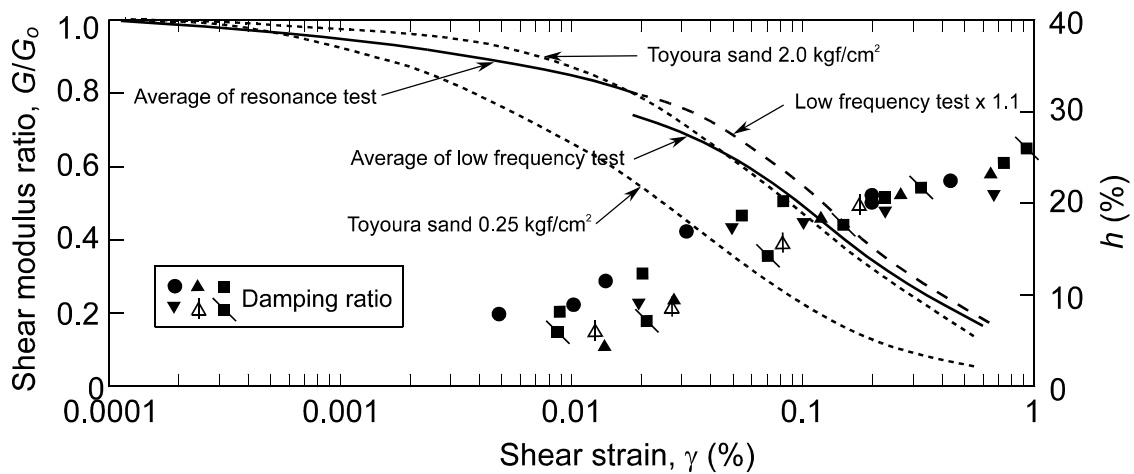


図2.15 洪積粘性土の動的変形特性

表2.6 洪積粘性土の動的変形特性

$\gamma$	$G/G_0$	$h$ (%)
$10^{-6}$	1.000	0.7
$2 \times 10^{-6}$	0.990	0.9
$5 \times 10^{-6}$	0.970	1.3
$10^{-5}$	0.950	1.6
$2 \times 10^{-5}$	0.928	1.9
$3 \times 10^{-5}$	0.908	2.3
$5 \times 10^{-5}$	0.880	2.8
$10^{-4}$	0.834	3.7
$2 \times 10^{-4}$	0.769	5.0
$3 \times 10^{-4}$	0.715	6.3

$\gamma$	$G/G_0$	$h$ (%)
$5 \times 10^{-4}$	0.627	8.4
$7 \times 10^{-4}$	0.563	9.9
$10^{-3}$	0.491	11.9
$1.5 \times 10^{-3}$	0.415	14.2
$2 \times 10^{-3}$	0.362	15.8
$3 \times 10^{-3}$	0.288	18.3
$5 \times 10^{-3}$	0.200	21.7
$7 \times 10^{-3}$	0.145	23.3
$10^{-2}$	0.085	26.4

### ③沖積砂質土

次の式が提案されている。

$$\frac{G}{G_{\gamma=10^{-6}}} = \left( \frac{G}{G_{\gamma=10^{-6}}} \right)_{p=1\text{kgf/cm}^2} p^{m(\gamma)-m(\gamma=10^{-6})}, \quad h = h_{\max}(1 - G/G_0)$$

ここで、 $p$  は平均有効主応力である。最大減衰定数  $h_{\max}$  は0.3が使われているが、より一般性を持たせるために、DYNEQ では  $h_{\max}$  を指定するようになっている。計算に必要な二つの基本量は、表 2.7にまとめられている。

表2.7 沖積砂質土の動的変形特性

$\gamma$	$G/G_0$	$m(\gamma) - m(\gamma = 10^{-6})$
$10^{-6}$	1.000	0.000
$2 \times 10^{-6}$	0.989	0.018
$5 \times 10^{-6}$	0.978	0.028
$10^{-5}$	0.959	0.040
$2 \times 10^{-5}$	0.928	0.058
$3 \times 10^{-5}$	0.905	0.064
$5 \times 10^{-5}$	0.867	0.080
$10^{-4}$	0.789	0.116

$\gamma$	$G/G_0$	$m(\gamma) - m(\gamma = 10^{-6})$
$2 \times 10^{-4}$	0.689	0.156
$3 \times 10^{-4}$	0.606	0.190
$5 \times 10^{-4}$	0.500	0.260
$10^{-3}$	0.356	0.350
$2 \times 10^{-3}$	0.228	0.422
$3 \times 10^{-3}$	0.170	0.448
$5 \times 10^{-3}$	0.108	0.476
$10^{-2}$	0.058	0.480

$G/G_0$  は、平均有効主応力1kgf/cm<sup>2</sup>における値

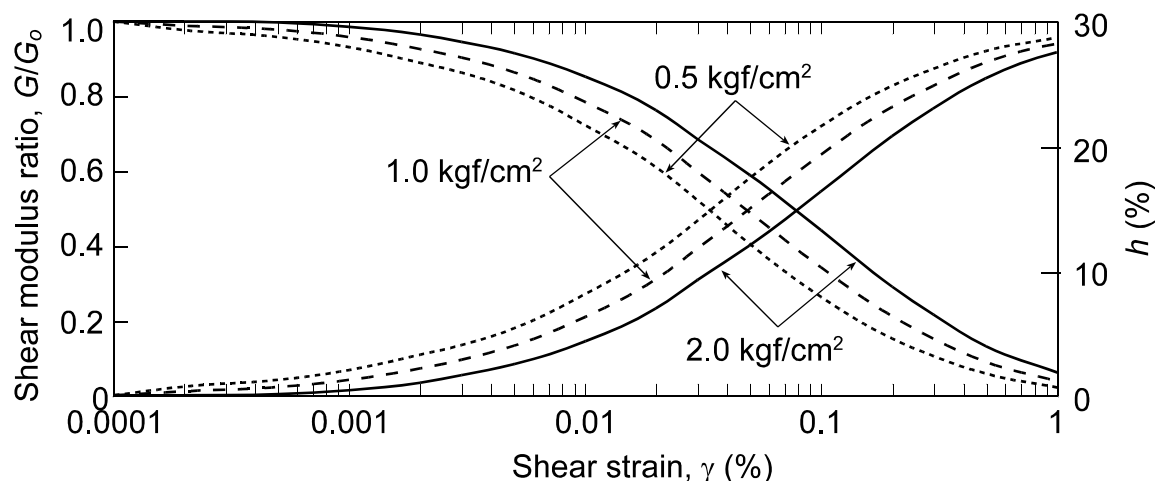


図2.16 砂質土に対する動的変形特性

#### ④洪積砂質土・礫質土

文献26では洪積砂質土については、国生・佐々木の報告<sup>30)</sup>を引用しつつも、その結果が豊浦砂に類似しているとの理由から、沖積砂質土の関係を適用しても良いとしている。また、礫質土については、適当な実験データが無いので、文献26の発行時点（1982年）では、洪積砂質土のデータを用いることを勧めている。したがって、砂質土については、全てについて前項の関係をを用いる。

#### 2.4.9 旧・建築基準法告示1457号

砂と粘土に関し、表2.8が示されている。これを図示すると図2.17のようになる。なお、現在はこの式は告示から削除されている。

表2.8 砂と粘土の動的変形特性

$\gamma$	砂		粘土	
	$G/G_{max}$	$h$	$G/G_{max}$	$h$
0.00001	1	0.02	1	0.02
0.00002	0.979	0.02	0.99	0.02
0.00003	0.962	0.02	0.983	0.02
0.00004	0.942	0.02	0.975	0.02
0.00005	0.922	0.022	0.966	0.02
0.00006	0.901	0.028	0.957	0.02
0.00007	0.881	0.034	0.948	0.02
0.00008	0.861	0.039	0.939	0.02
0.00009	0.842	0.045	0.93	0.02
0.0001	0.823	0.05	0.92	0.021
0.0002	0.678	0.091	0.834	0.044
0.0003	0.583	0.118	0.763	0.062
0.0004	0.517	0.137	0.706	0.077
0.0005	0.468	0.151	0.659	0.089
0.0006	0.429	0.162	0.62	0.1
0.0007	0.398	0.17	0.587	0.108
0.0008	0.373	0.177	0.558	0.116
0.0009	0.351	0.184	0.533	0.122
0.001	0.333	0.189	0.511	0.128

$\gamma$	砂		粘土	
	$G/G_{max}$	$h$	$G/G_{max}$	$h$
0.002	0.23	0.218	0.377	0.163
0.003	0.183	0.231	0.311	0.181
0.004	0.155	0.239	0.269	0.192
0.005	0.137	0.244	0.24	0.199
0.006	0.123	0.248	0.219	0.205
0.007	0.112	0.251	0.202	0.209
0.008	0.104	0.254	0.188	0.213
0.009	0.097	0.256	0.176	0.216
0.01	0.091	0.257	0.167	0.218
0.02	0.06	0.266	0.114	0.232
0.03	0.047	0.27	0.091	0.238
0.04	0.04	0.272	0.077	0.242
0.05	0.035	0.273	0.068	0.244
0.06	0.031	0.274	0.062	0.248
0.07	0.028	0.275	0.056	0.247
0.08	0.026	0.276	0.052	0.248
0.09	0.024	0.276	0.049	0.249
0.1	0.023	0.277	0.046	0.25

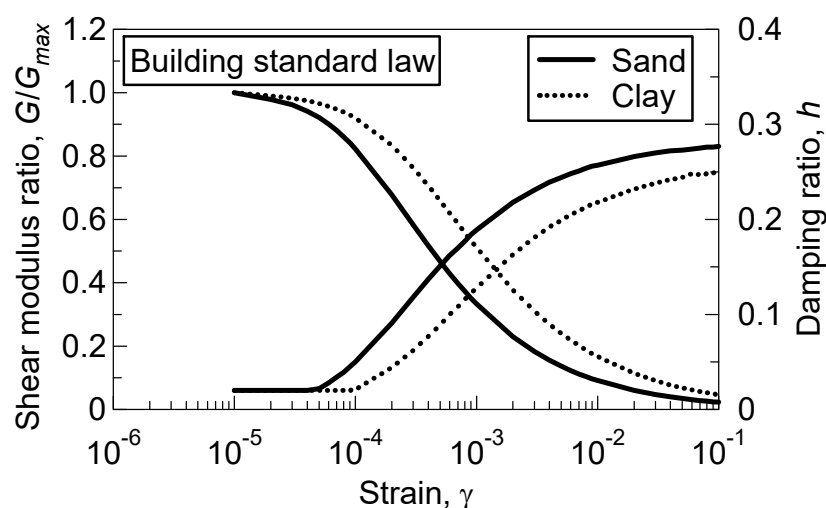


図2.17 動的変形特性

なお、パラメータスタディによれば、Ramberg-Osgood モデルで、粘土については、 $\alpha=2.64$ 、 $\beta=2.4$ （基準ひずみ=0.00106），砂については $\alpha=3.07$ 、 $\beta=2.62$ （基準ひずみ0.000432）とする事で図上では区別できない程度この図を表現することが出来る。

#### 2.4.10 鉄道構造物等設計標準<sup>31)</sup>

盛土材料に対し、実験が行えない時用に代表的な材料の実験値が示されている。ここでは、盛土材料を土質①～④の4つに分けており、次のような分類となっている。これらの材料について、砕石、豊浦砂、稲城砂、岩手ロームがそれぞれを代表する特性として選ばれ、実験に基づき表2.10にその結果が示されている。これを図示すると図2.18のようになる。

表2.9 盛土材料の分類と設計値

材 料	土圧計算				安定，変形計算				
	$\gamma'$	$\phi_{res}$	$\phi_{peak}$	$\phi_1$	$\gamma'$	$c_2$	$\phi_2$	$c_3$	$\phi_3$
土質①：粒度配合の良好な砂，砂礫	20	40	55	40	18	3	40	6	45
土質②：一般の砂，砂礫	20	35	50	35	17	3	35	6	40
土質③：粒度配合の悪い砂	18	30	45	30	16	3	30	6	35
土質④：粘性土	18	30	40	30	16	10	15	20	20

$\phi_{res}$ 、 $\phi_{peak}$ ：修正物部・岡部式用内部摩擦角； $\phi_1$ ：物部・岡部式用内部摩擦角

$c_2$ 、 $\phi_2$ ：表層部の粘着力（kN/m<sup>2</sup>）と内部摩擦角； $c_3$ 、 $\phi_3$ ：深部の粘着力（kN/m<sup>2</sup>）と内部摩擦角

表2.10 盛土材料の動的変形特性

$\gamma$	土質①		土質②		土質③		土質④	
	$G/G_{max}$	$h$	$G/G_{max}$	$h$	$G/G_{max}$	$h$	$G/G_{max}$	$h$
$1 \times 10^{-6}$	1	0.02	1	0.005	1	0.03	1	0.02
$1 \times 10^{-5}$	0.99	0.024	0.99	0.007	0.98	0.032	0.98	0.02
$5 \times 10^{-5}$	0.9	0.045	0.89	0.036	0.9	0.041	0.85	0.02
$1 \times 10^{-4}$	0.82	0.058	0.8	0.064	0.8	0.051	0.77	0.023
$2.5 \times 10^{-4}$	0.64	0.077	0.66	0.114	0.59	0.069	0.65	0.025
$5 \times 10^{-4}$	0.48	0.093	0.5	0.174	0.4	0.09	0.55	0.04
$1 \times 10^{-3}$	0.32	0.111	0.32	0.235	0.27	0.115	0.46	0.071
$2.5 \times 10^{-3}$	0.15	0.126	0.12	0.284	0.16	0.151	0.32	0.12
$5 \times 10^{-3}$	0.08	0.124	0.06	0.29	0.1	0.172	0.2	0.151
$1 \times 10^{-2}$	0.06	0.122	0.05	0.282	0.07	0.18	0.12	0.145

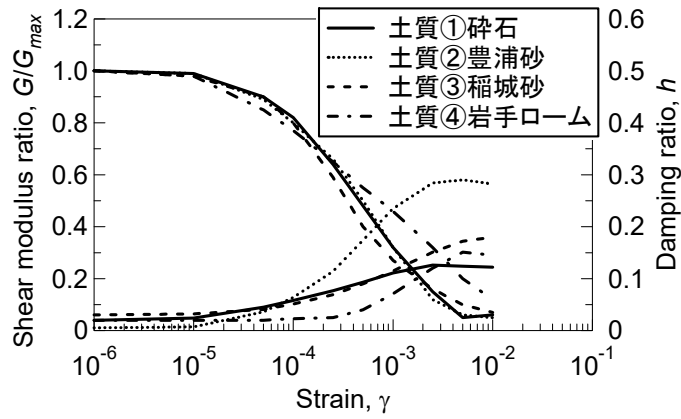


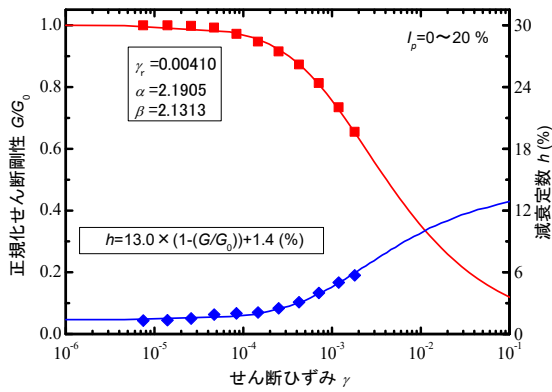
図2.18 動的変形特性

#### 2.4.11 堆積軟岩に対する式<sup>32)</sup>

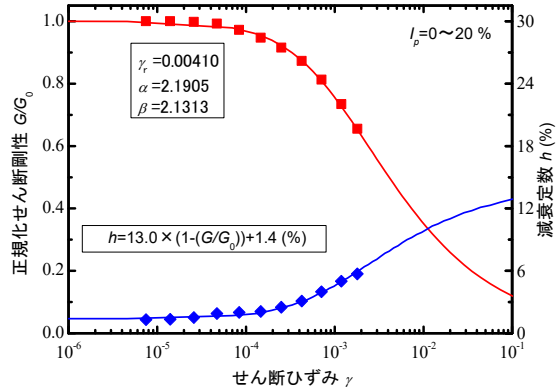
福元，吉田らは堆積軟岩（泥岩）に対する単調載荷，及び繰返し載荷試験の結果から，堆積軟岩ではサンプリング時や応力解放などにより亀裂が入ることが多々あることを指摘し，多くのデータから乱れていないと考えられる繰返しせん断試験の結果を集め，これを次のようにまとめた。

$$1 = \frac{G}{G_0} \left[ 1 + \alpha \left( \frac{G}{G_0} \cdot \frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^{\beta-1} \right]$$

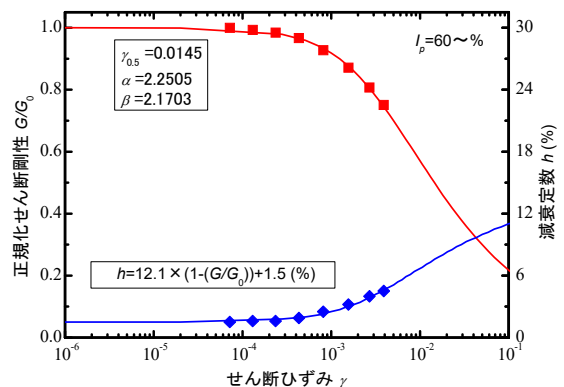
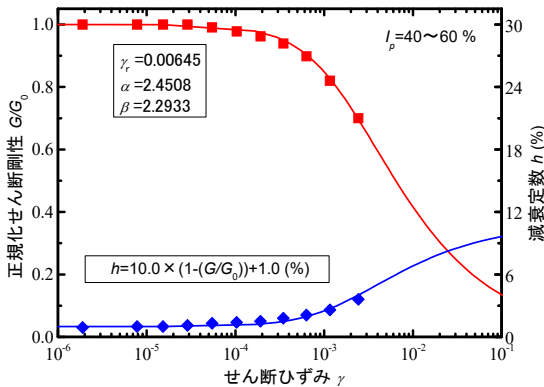
$$h = h_{\max} \left( 1 - \frac{G}{G_0} \right) + h_0$$



(a) 塑性指数  $I_p=0 \sim 20 \%$



(b) 塑性指数  $I_p=20 \sim 40 \%$



(c) 塑性指数  $I_p=40\sim60\%$ (d) 塑性指数  $I_p=60\sim\%$ 図2.19 塑性指数  $I_p=20\%$ 毎に選定した  $G/G_0-\gamma$ ,  $h-\gamma$  曲線の既存骨格曲線へのフィッティング

表2.11 R-O モデルにフィッティングしたパラメータ

関係	パラメータ	塑性指数 $I_p$ (%)			
		0~20	20~40	40~60	60~
$G/G_0-\gamma$ 関係 式(3)	$\alpha$	2.1905	2.2262	2.4508	2.2505
	$\beta$	2.1313	2.1546	2.2933	2.1703
	$\gamma_r$	0.00410	0.00485	0.00645	0.0145
$h-\gamma$ 関係 式(5)	$h_0$	0.014	0.009	0.010	0.015
	$h_{max}$	0.130	0.122	0.100	0.121

ここで、上の式は Ramberg-Osgood モデルである。また、下の式は最小の減衰はあるものの、Hardin-Drnevich の式である。なお、Ramberg-Osgood モデルに Masing 則を適用すると下の式と同じ様な形の式が得られるが、ここではそれと無関係に決めている。

データは、塑性指数で分類され、図2.19の様にフィッティングされている。また、それぞれのフィッティングの結果は表2.11の様に係数が決められている。

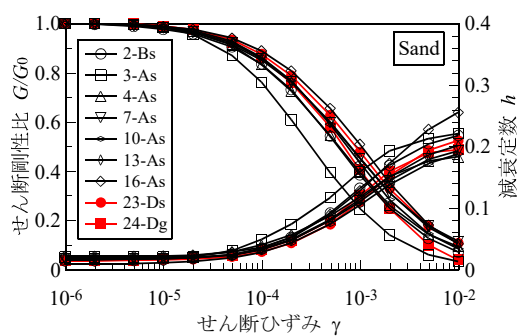
#### 2.4.12 地質年代・堆積環境を考慮した繰返しせん断特性<sup>33)</sup>

若松らは、関東圏の繰返しせん断試験結果を約500集めて、地質・堆積年代などに関して整理した。

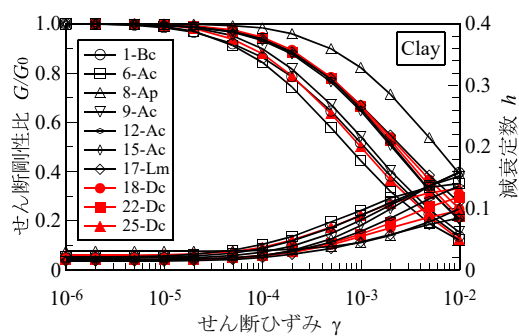
表2.12 繰返しせん断特性データの分類方法

地質年代			関東地方における地層名の例	堆積環境（微地形区分）	土質・岩質	記号	試料数						
造成			埋土・盛土・表土		粘性土 砂質土	1-Bc 2-Bs	10 14						
	完新世	後期	沖積層	砂丘砂	風成（砂丘）	砂質土	3-As	2					
有楽町層上部				海浜・浅海成（砂州など）	砂質土 砂礫・礫	4-As 5-Ag	15 0						
				汽水成（三角州）	粘性土 砂質土	6-Ac 7-As	5 20						
				河成（河床・自然堤防・扇状地・谷底低地）、後背湿地成（後背湿地・沼沢）	腐植土 粘性土 砂質土 砂礫・礫	8-Ap 9-Ac 10-As 11-Ag	5 29 27 0						
				有楽町層下部	海成（一部河成）	粘性土 砂質土 砂礫・礫	12-Ac 13-As 14-Ag	107 32 0					
					七号地層，戸田層，伊刈層，八潮層など	海成	粘性土 砂質土	15-Ac 16-As	18 4				
						更新世	後期	洪積層	関東ローム層，立川ローム層，武蔵野ローム層，下末吉，ローム層，立川礫層，武蔵野礫層，凝灰質粘土層（渋谷粘土層，板橋粘土層，池袋粘土層，大宮層など），火山灰	降下火山灰	関東ローム 粘性土 砂質土 砂礫・礫	17-Lm 18-Dc 19-Ds 20-Dg	14 7 0 0
				中期	多摩ローム層，常総粘土層，茨城粘土層，下末吉層，東京層，東京礫層，相模層群，成田層群，下総層群とその相当層（江戸川層，舎人層，相模層，埼玉層など）				降下火山灰	関東ローム 粘性土 砂質土 砂礫・礫	21-Lm 22-Dc 23-Ds 24-Dg	0 75 93 1	
					前期						上総層群 三浦層群	固結粘性土・泥岩 砂質・礫質岩	25-Dc 26-Dsg
鮮新世									第三紀層				



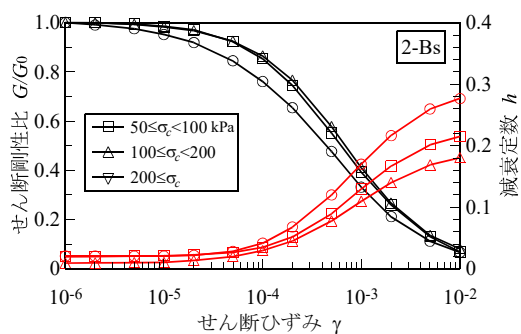


(a) 砂質土

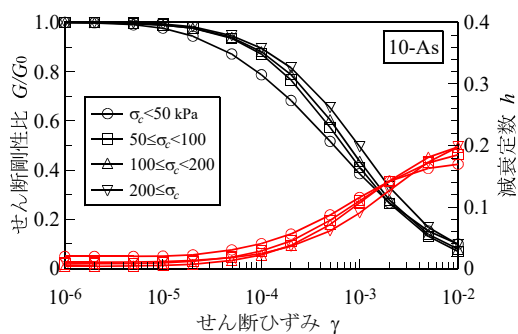


(b) 粘性土

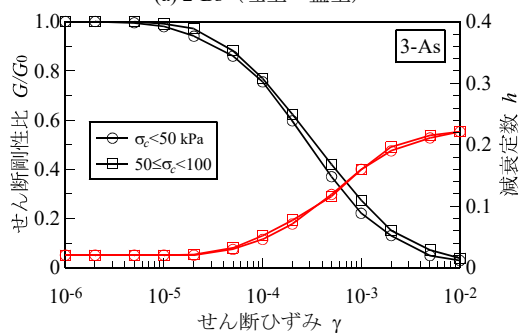
図2.20 地質年代と堆積環境別に見た繰返しせん断特性



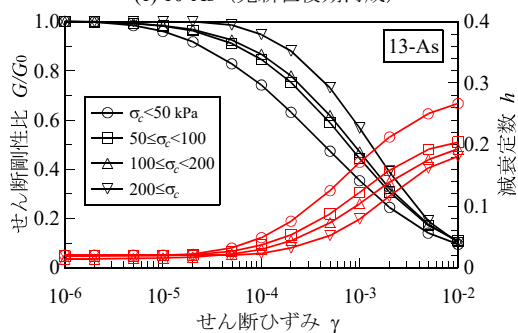
(a) 2-Bs (埋土・盛土)



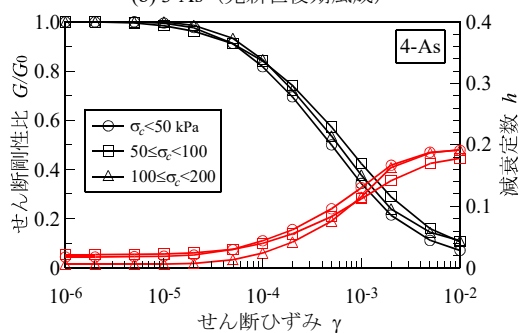
(e) 10-As (完新世後期河成)



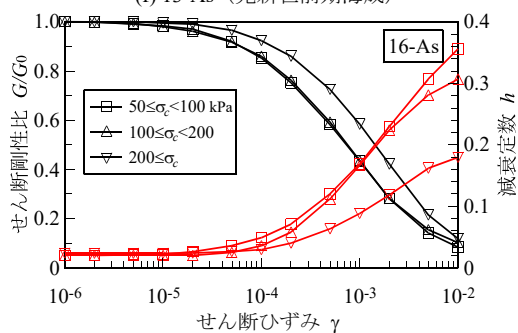
(b) 3-As (完新世後期風成)



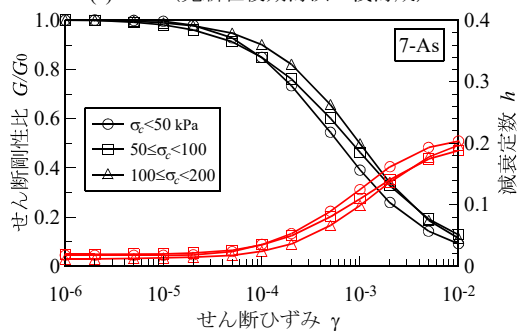
(f) 13-As (完新世前期海成)



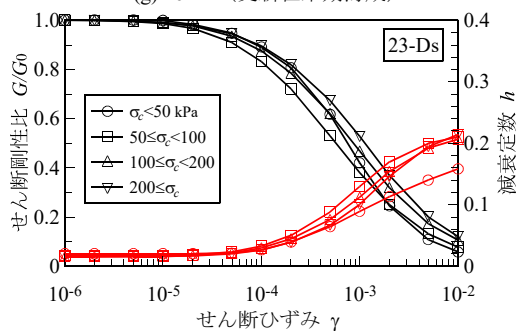
(c) 4-As (完新世後期海浜・浅海成)



(g) 16-As (更新世末期海成)



(d) 7-As



(h) 23-Ds

(d) 7-As (完新世後期汽水成)

(h) 23-Ds (更新世中期砂)

図 2.21 砂質土に対する拘束圧の影響

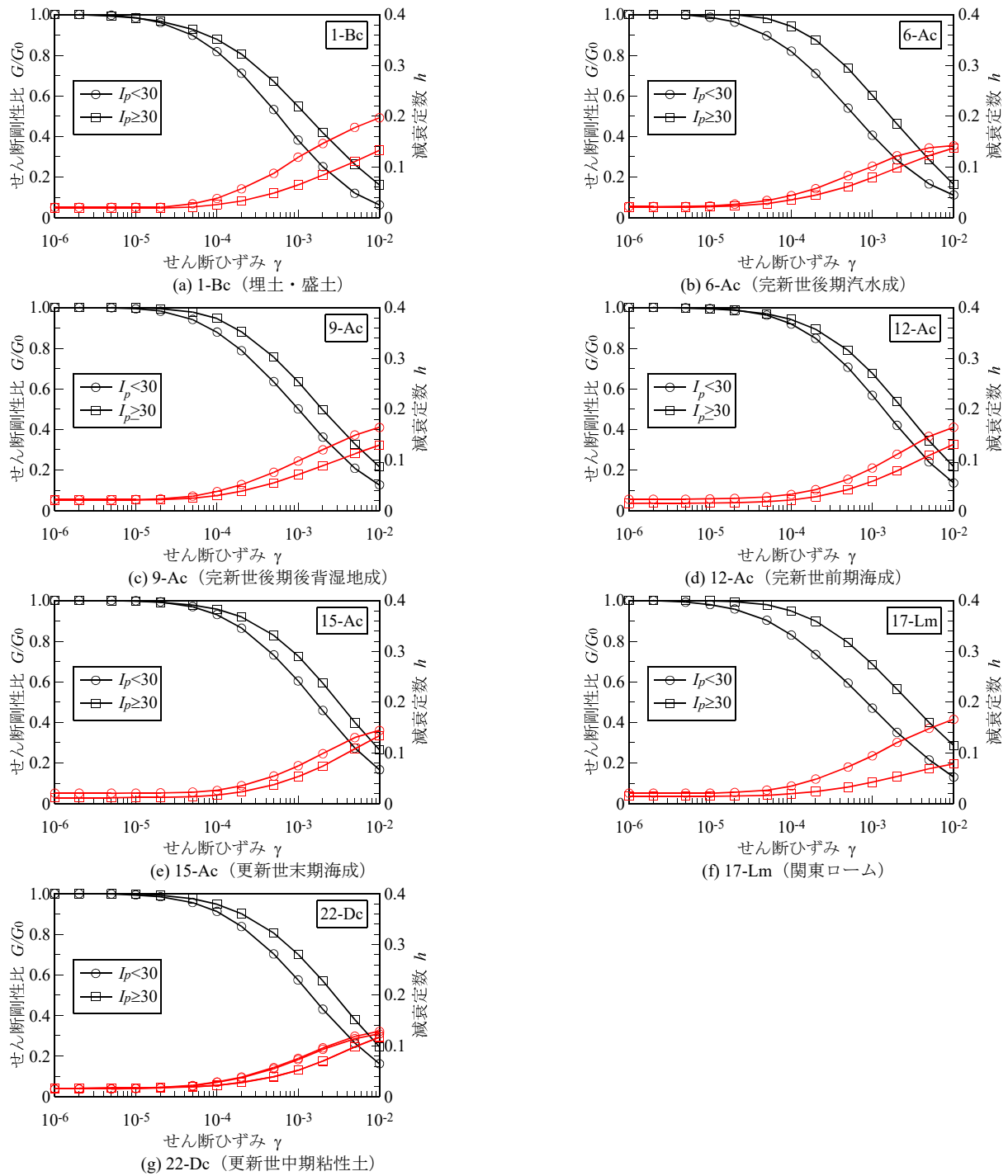


図2.22 粘性土に対する塑性指数の影響

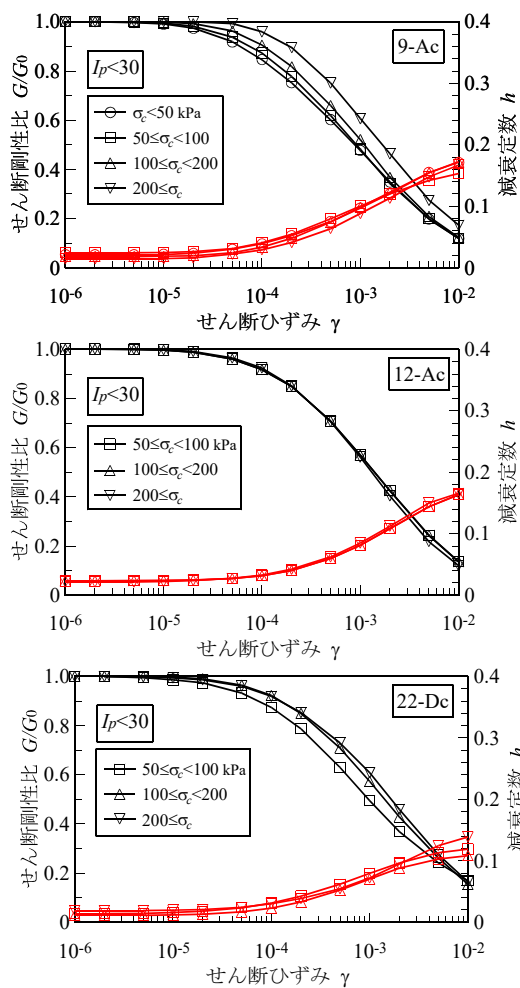


図2.23  $I_p < 30$ の粘性土に対する拘束圧の影響

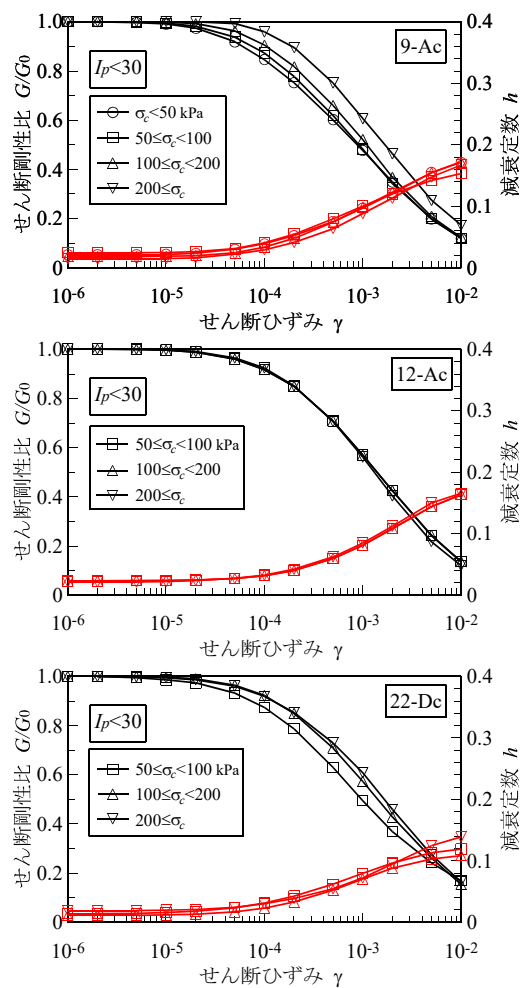


図2.24  $I_p \geq 30$ の粘性土に対する拘束圧の影響

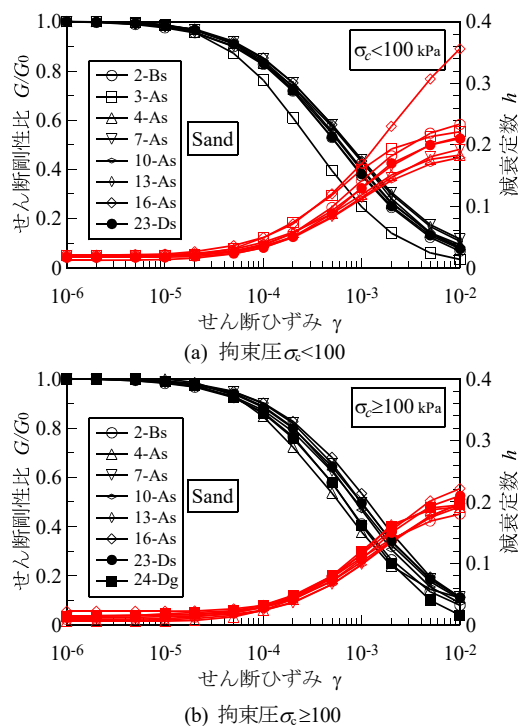


図2.25 拘束圧別に見た砂質土に対する地質年

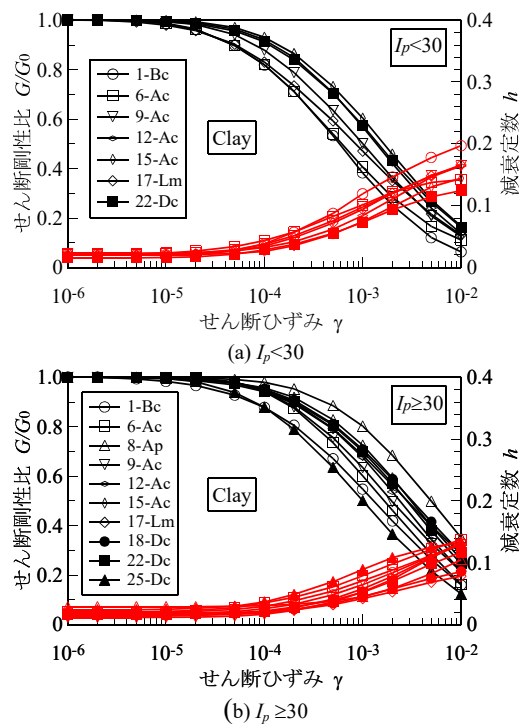


図2.26 塑性指数別に見た粘性土に対する地質年

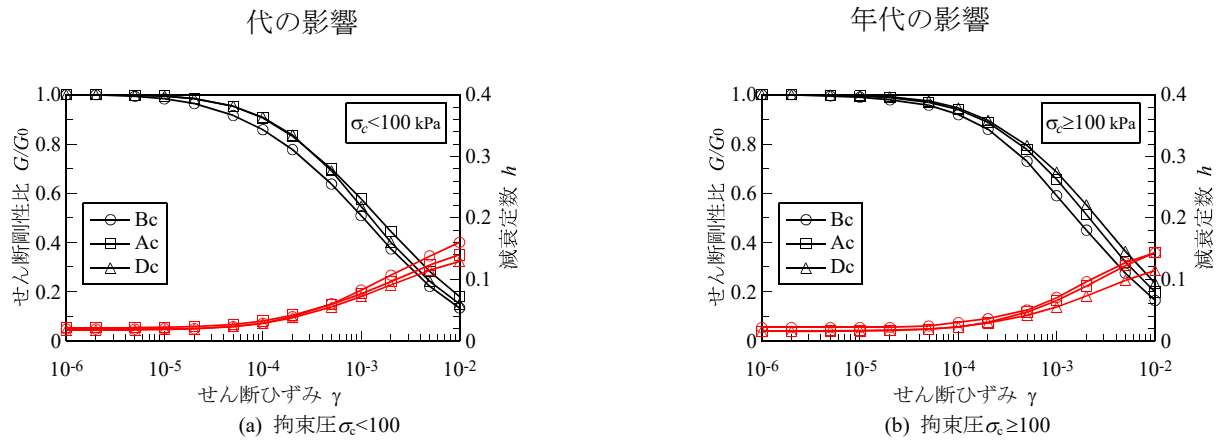


図2.27 拘束圧別に見た粘性土に対する地質年代の影響

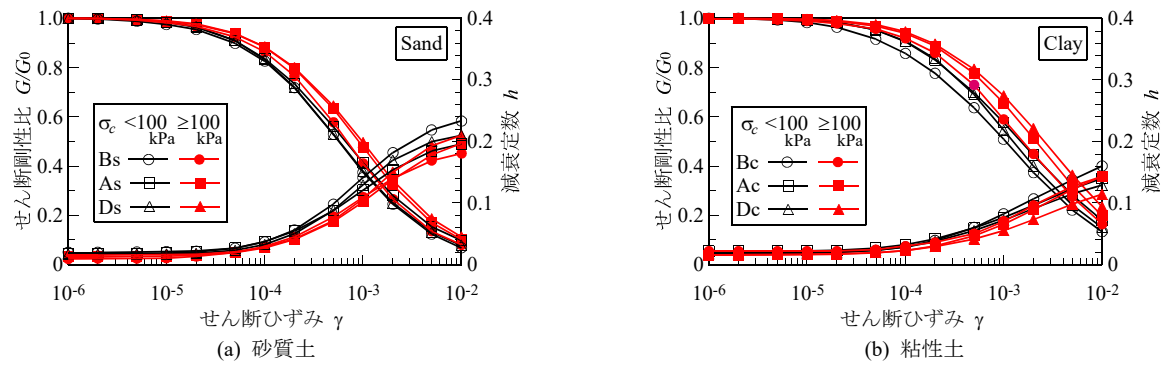


図2.28 繰返し変形特性に対する拘束圧と地質年代の影響

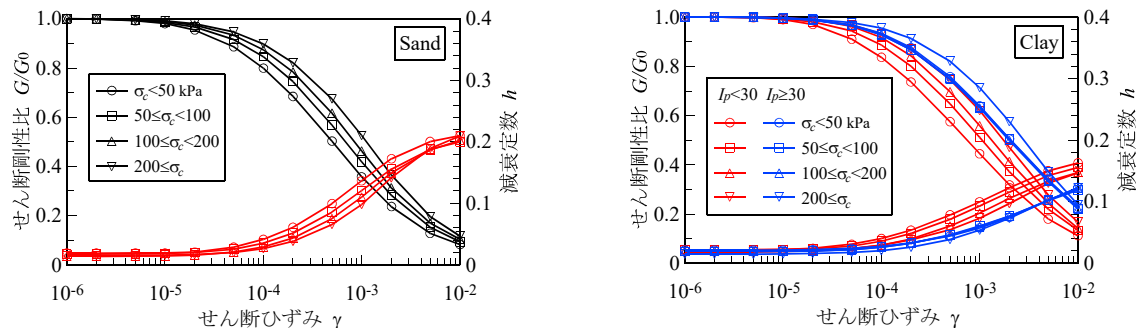


図2.29 拘束圧で類型化した砂質土の繰返し変形特性

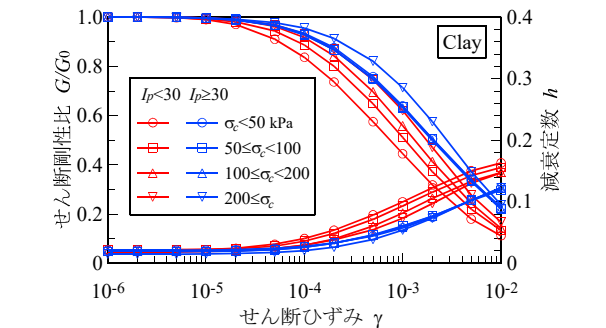


図2.30 拘束圧と塑性指数で類型化した粘性土の繰返し変形特性

## 2.5 散乱減衰

地盤は本質的に不均質な材料である。不均質な媒質に波動が入射すると、波動は直進することができず、散乱する。一方、解析では、地盤は均質な物体として扱っている。このような観点から見ると、散乱しながら伝播する波動はあたかも減衰を生じているように見え、このような減衰を散乱減衰と呼ぶ。

媒質の不均質性による地震波の散乱現象に関する研究は、震源から観測点までの伝播経路の減衰に関して始められており、コード波を使った検討から  $Q$  値の周波数依存性が指摘された。佐藤<sup>34)</sup>は一次散乱理論を用いることで、地盤の不均質性による散乱減衰により  $Q$  値が周波数依存性を有することを示している。

地盤の減衰を評価する方法には、室内試験、S波検層、鉛直アレー観測記録の逆解析の3通りが

ある。表2.13に各手法の特徴を示す。

表2.13 各種減衰評価法の比較

	室内試験	S 波検層	地震記録
測定場所	室内	原位置	原位置
ひずみレベル	小～大	小	中
振動数	低～高	高（数十～百数十 Hz）	中（数～数十 Hz）
測定成分	ひずみ，応力	速度	加速度
波動	－	球面 SH 波	平面 SH 波
周波数依存性	なし	有り	有り

室内試験では、減衰の周波数依存性は見られない<sup>35)</sup>。これは室内試験では履歴減衰が卓越しているためである。一方、S 波検層では、減衰定数は高振動数よりも低振動数側で大きく、周波数依存性が見られる<sup>35)</sup>。1970年代後半に鉛直アレー観測記録が得られるようになり、河村<sup>36)</sup>や横田<sup>37)</sup>により質点系モデルを用いたスペクトル・フィッティングにより、高次になるに従って減衰が減少することが指摘されている。太田<sup>38)</sup>は一次元重複反射理論を用いた S 波速度と減衰定数の最適化手法を提案している。1980年代後半に、鉛直アレー観測が増えた（1983年日本海中部地震、1984年メキシコ地震等の影響か、多くの研究機関が力を入れた）。その影響もあり、多くの研究者により太田の手法に基づき、 $h=1/(2Q)=h_0f^\alpha$ の形で振動数が高くなるにつれ減衰が小さくなるという周波数依存性が指摘されている<sup>39)40)54)</sup>。これは原位置では散乱減衰の影響が大きいためであると言われている。散乱減衰とは、地盤の不均質性や地層境界の不整形構造により、波動が反射・屈折を繰り返すために伝播経路が長くなることにより、均質地盤に比べ減衰が生じるものである。散乱減衰が周波数依存性を示すことは、不均質性の影響については Sato と Kawase<sup>42)</sup>、基盤の不整形構造については Sawada et al.<sup>43)</sup>により明らかにされている。したがって、室内試験で減衰の周波数依存性は見られないにも関わらず、S 波検層や地震観測記録で減衰の周波数依存性が見られることは、計測している減衰の種類が異なっていて、室内試験で卓越する履歴減衰は周波数依存性を示さず、原位置で卓越する散乱減衰は周波数依存性を示すことによるものであると考えられる。

一方、石田ら<sup>39)</sup>や辻原ら<sup>44)</sup>は、伝達関数の同定問題においては解の一意性の保証がなく、また減衰の推定精度はS波速度の推定精度に大きく依存することを指摘している。辻原ら<sup>45)</sup>は伝達関数の平滑化の方法等、この地盤同定問題における様々な課題について検討を行っている。

近年、事前情報をできるだけ有効に活用して逆解析の精度を高める手法が様々な分野で用いられている。吉田ら<sup>46)</sup>は事前情報を利用することにより、解の共線性を避けることができることを示している。Annaka et al.<sup>47)</sup>は、ベイズの定理を用いた同定手法を伝達関数の同定問題に適用している。

木下<sup>48)</sup>、Fukushima et al.<sup>49)</sup>は深度500m～3kmの深井戸記録を用いることで、入射波と反射波を時間軸上で分離し、基盤における入射波と地表面からの反射波の振幅比を用いて減衰を評価している。この深井戸記録における解析結果は、浅層地盤の鉛直アレー記録における伝達関数のフィッティングによる解析結果よりも信頼性が高く、減衰の周波数依存性の貴重な証拠であるが、地下深くから地表までの平均的な減衰しか得られないことと、深井戸観測の数が少ないことが難である。

強震時においても、減衰が周波数依存性を示すか否かは設計上大きな関心事である。1995年兵庫県南部地震の際に、ポートアイランドの鉛直アレーで観測された記録を用いた逆解析では、中小地震と同様に周波数依存性が見られることが報告されている<sup>50)</sup>。Suetomi & Yoshida<sup>51)</sup>は、Sato & Kawase<sup>42)</sup>と同様の不均質地盤を作成し、等価線形解析を実施している。そして、強震時には強度が弱い地盤はさらに弱くなるので不均質の度合いが増し、散乱減衰は増大するものの、せん断ひずみの増加と共に大きくなる履歴減衰よりは小さいことを示している。

DYNEQ では、このような減衰の周波数依存性を考慮した解析も行える。鉛直アレー観測記録の分析においては、その観測記録を用いて逆解析を行ってパラメータを決定すればよい。しかしながら、実務においては、そのような例はむしろ稀であり、何らかの地盤情報に基づき、減衰の周波数依存性に関するパラメータを評価する必要がある。以下に、そのような研究例を紹介する。

Kobayashi et al.<sup>52)</sup>は、仙台市内に展開されている高密度鉛直アレー観測網の記録を用いて、土質毎に S 波速度の関数として以下のように与えている。

$$Q = \frac{V_s}{\alpha} f \quad (2.5.1)$$

$\alpha$ の値は、粘土・シルトで20、砂で60、泥岩で200、砂礫で400、砂岩で400である。

他にも多くの研究例があるが、福島・翠川<sup>53)</sup>は既往の研究を取りまとめて、表2.14のように減衰モデルを提案している（式の適用範囲は0.5～5Hz）。図2.31にこれらをまとめて示す。

表2.14 材料ごとの散乱の減衰（文献53より作成）

材 料	式（原論文）	$h=1/(2Q)=h_0 f^\alpha$		$h$ (%)	
		$h_0$	$\alpha$	0.5Hz	5Hz
粘土	$\log Q^{-1} = -0.57 \log f - 0.83$	0.07396	-0.57	10.98	2.95
シルト	$\log Q^{-1} = -0.53 \log f - 1.02$	0.04775	-0.53	6.89	2.03
砂	$\log Q^{-1} = -0.73 \log f - 0.87$	0.06745	-0.73	11.19	2.08
礫	$\log Q^{-1} = -0.46 \log f - 0.80$	0.07924	-0.46	10.90	3.78
堆積岩(100m 以浅)	$\log Q^{-1} = -0.51 \log f - 0.63$	0.11721	-0.51	16.69	5.16
堆積岩(100m 以深)	$\log Q^{-1} = -0.68 \log f - 1.56$	0.01377	-0.68	2.20	0.46

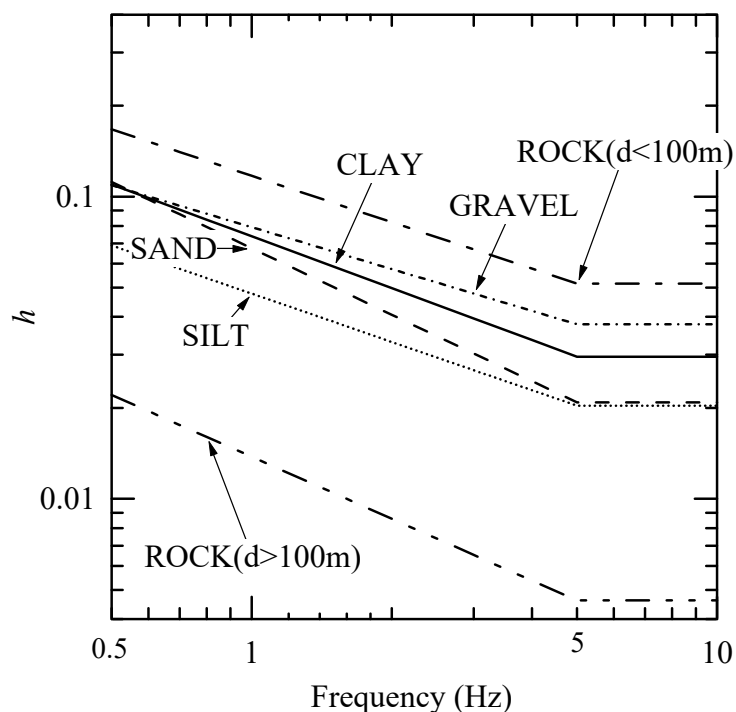


図2.31 福島・翠川<sup>53)</sup>による土質に応じた減衰モデル

ところで、前に述べたように、減衰は  $h=1/(2Q)=h_0 f^\alpha$  の形で表現される。そこで、原論文の式を一般的に

$$\log Q^{-1} = -A \log f - B \quad (2.5.2)$$

と表したとすると、減衰定数は次のように表現される。

$$\log h = -A \log f - B - \log 2. \quad \text{または} \quad h = 10^{-B - \log 2} \cdot f^{-A} \quad (2.5.3)$$

つまり、 $h_0 = 10^{-B - \log 2}$ 、 $\alpha = -A$ となる。表2.14には、この係数および式の適用範囲である0.5Hz と5Hz における減衰定数の値も併せて示している。

## 2.6 等価線形法

2.4節で示した動的変形特性は、一定応力振幅化の挙動、すなわち定常状態の挙動を表していた。この関係を2.2節で述べた周波数領域の手法に持ち込むためには、系を線形の系に置き換える必要がある。等価線形法はそのための手法である。この手法は SHAKE ではじめられたものであるが、最近になってその改良法が提案されてきている。また、本来 SHAKE で扱っていたのとは異なる用い方もある。ここでは、これらについて説明する。

### 2.6.1 SHAKE による方法

ひずみの値は時々刻々変化する。したがって剛性や減衰特性も時々刻々変化する。しかし、2.2節では材料特性は時間によって変わらないとして式を展開している。この点を改良するために、等価線形化法が用いられる。すなわち、解析の全時間を通じ材料特性は変わらないとする。材料特性の値は、

$$\gamma_{\text{eff}} = \alpha \gamma_{\text{max}} \quad (2.6.1)$$

により求められる有効ひずみ $\gamma_{\text{eff}}$ に対する値として定義される。ここで、 $\gamma_{\text{max}}$ は最大ひずみ、 $\alpha$ は等価線形化のための係数である。 $\alpha$ の値としては0.65がよく用いられる。

式(2.6.1)を満たす材料特性は一意的に決まるわけではない。したがって、プログラムではイタレーションを行い式(2.6.1)を満たす材料特性を求めている。イタレーション終了の判定は、せん断剛性と減衰定数を仮定して計算を行い、得られた応答結果より式(2.6.1)に基づき新しいせん断剛性と減衰定数を求め、両者の差が指定された誤差範囲（通常5%）以内に納まることによって行っている。

### 2.6.2 FDEL による方法

杉戸ら<sup>3)</sup>は、式(2.6.1)により有効ひずみを決めると、特に周波数の高いところで減衰を大きめに評価しすぎるとして、次の式を提案している。

$$\gamma_{\text{eff}}(\omega) = \alpha \gamma_{\text{max}} \cdot \frac{F(\omega)}{F_{\text{max}}} \quad (2.6.2)$$

ここで、 $F(\omega)$ はひずみ波形のフーリエスペクトル、 $F_{\text{max}}$ はその最大値である。なお、原論文では $\alpha$ の値は0.65としているが、DYNEQでは可変としている。また、Suetomi et al.の提案<sup>54)</sup>に基づき、次の様な拡張も計算できるようにしている。

$$\gamma_{\text{eff}}(\omega) = \alpha \gamma_{\text{max}} \left( \frac{F(\omega)}{F_{\text{max}}} \right)^a \quad (2.6.3)$$

明らかなように、剛性、減衰とも周波数の関数となる。ここで、 $F(\omega)$ は一般にかなりばらつきの大きい関数形状をしているので、このまま用いたのでは解の安定性が悪くなる。そこで、杉戸らは、三角形ウィンドウによる平滑化を行っている。すなわち、式(2.6.2)、(2.6.3)に用いるひずみ波形のフーリエスペクトル $F^*(\omega)$ を元のフーリエスペクトル $F(\omega)$ より次式で計算する。

$$F^*(\omega_n) = \sum_{i=1}^{2N_b-1} w_i F(\omega_{n-N_b+i}) \quad (2.6.4)$$

ここで、 $w_i$ は重みで、三角形ウインドウを用いていることから、次式で表される。

$$w_i = \begin{cases} \frac{1}{N_b^2} (1 \leq i \leq N_b) \\ \frac{2N_b + 1 - I}{N_b^2} (i > N_b) \end{cases} \quad (2.6.5)$$

また、 $N_b$ は片側のバンド幅である。

杉戸らの方法では、周波数ごとに剛性、減衰が変化する。このうち、剛性が変化するということは、周波数成分ごとに位相速度が変化することを意味しており、せん断波の伝播を扱っている事に対し理論的に矛盾しているということも出来る。

等価線形解析で、周波数ごとに材料特性を変えようとする考えは、ここに挙げたものだけではない。たとえば、萩原、清田<sup>55)</sup>は各振動モードごとにひずみを算出し、それぞれに対して式(2.6.1)により剛性、減衰を求める方法を提案している。この方法は、固有モードへの分解が必要で、フーリエ級数展開を基本としている本プログラムの性格にはなじまないことから、ここでは取り上げていない。

大地震に関しては、FDEL は適用性が低いと考えられる。文献2で指摘されているように、式(2.6.1)を用いた等価線形解析では、 $\alpha$ が1より小さいと、ひずみが大きいところではせん断応力が過大評価され、その結果、最大加速度も過大評価される。FDEL は本質的にはSHAKE より大きい最大加速度を与えようとする手法であるので、過大評価の程度はSHAKE より大きくなってしまふ。

### 2.6.3 既往の等価線形手法の欠点

等価線形解析の基本となるのは式(2.6.1)により有効ひずみを計算する事である。ここで、観測値と良い一致を見るためには、係数 $\alpha$ は定数ではなく、事例に応じて変化することが知られている<sup>56)57)58)</sup>。しかし、 $\alpha=0.65$ が特に考えもなく実務では多用されてきた。これまでの経験では $\alpha$ の値は0.2～1.0の間で変化しているが、その値を決める手法は知られていない。これは、実務にとって非常に不便といわざるを得ない。後に示すように、この方法では広い周波数領域でよい結果を得ることは出来ない。

この結果生じる欠点を最初に指摘したのは、Finn らである<sup>59)</sup>。彼らはSHAKE と双曲線モデルを使ったDESRA, Ramberg-Osgood モデルを用いたCHARSOIL の二つの非線形プログラムで、応力-ひずみ関係をそろえて比較した。図2.32に比較の結果を示すが、SHAKE はせん断応力を大きく評価している。応答スペクトルを見ると、0.3～0.5秒でSHAKE の応答が大きくなっている。彼らは、SHAKE は各計算は線形計算であるので、特定の周波数で共振現象が起こったことが過大評価の原因であるとしている。同じ見解は、他の研究者によっても述べられている<sup>60)61)</sup>が、その証明はされていない。後に示すように、この見解は間違っている。



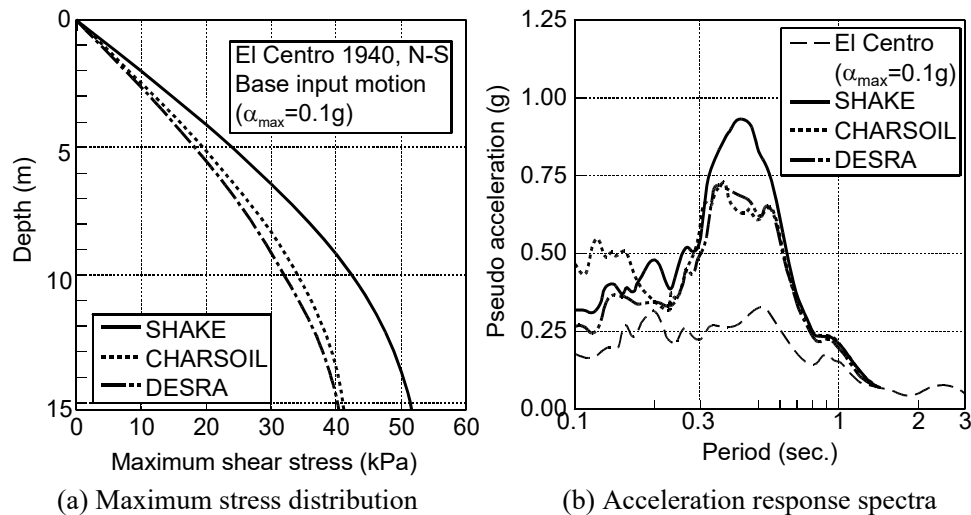


図2.32 等価線形解析と非線形解析の比較

吉田<sup>2)</sup>はこれと異なるメカニズムを示した。図2.33の実線は入力した  $G$ - $\gamma$  関係より求めた応力-ひずみ関係である。今、最大ひずみ  $\gamma_{max}$  に対応する点を B とする。すると、有効ひずみは図の A となり、等価線形解析では、OA を結ぶ直線が応力-ひずみ関係（実際には、複素剛性を考えているので、この直線を長軸とする楕円が応力-ひずみ関係となる）となるので、最大ひずみに対する最大せん断応力は図の C 点となる。つまり、最大せん断応力-最大せん断ひずみ関係は常に入力した応力-ひずみ関係より上になる。 $\alpha=0.65$  を用いれば、その差は応力-ひずみ関係が完全塑性状態の時最大で、 $1/0.65=1.54$  倍の過大評価となる。

ここで問題なのは、この操作によりせん断強度が大きくなることである。せん断強度と最大加速度に関係があることは知られている<sup>62)</sup>ので、これが加速度の過大評価に結びつくわけである。FDEL では次項の欠点を補う手法を用いているので、最大せん断応力と最大加速度は常に SHAKE より大きくなるので、この欠点は最も大きくなる。

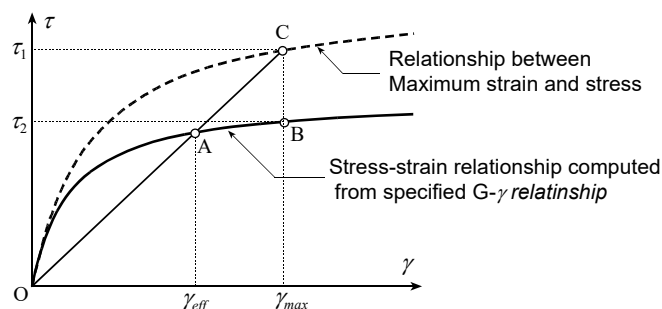


図2.33 入力した応力-ひずみ関係と最大応力-最大ひずみの関係

図2.34は東京湾埋立地における鉛直アレーサイトにおいて得られた地震動の増幅特性を SHAKE による結果を比較したものである。低周波数領域は両者は良い対応をしているが、高周波数領域では SHAKE が過小評価していることがわかる。地震動がそれほど大きくないケースでは高周波成分は最大加速度にかなりの影響を与える。したがって、このような地震動に対しては加速度は過小評価される。この欠点は、目立たないことも多い。しかし、逆増幅解析、すなわち、地表の記録から基盤の応答を求める際に問題になることがある。

図2.35は台湾の羅東サイトにおける観測記録を用い、地表の記録から地下の応答を求めた事例である<sup>63)</sup>。No.11の地震では SHAKE と FDEL はほぼ同じ応答を示しているが、No.16の地震では SHAKE は加速度を過大評価している。前者が0.01%程度の最大ひずみなのに対し、後者は0.1%程

度の最大ひずみとなっており、ひずみが大きくなると **SHAKE** による逆増幅解析は破綻する。これは、高周波成分の増幅が1より小さいということは地下の方が大きい応答になるということで、余りに小さい増幅比では地下で高周波成分が大きくなりすぎるのが原因である。実証については7章に示す。

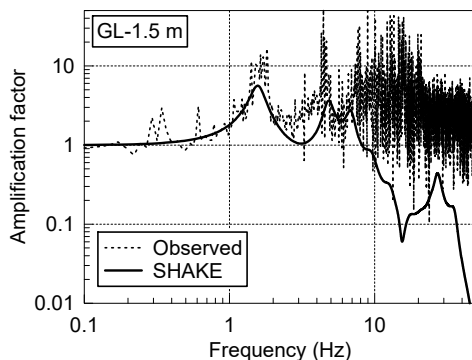


図2.34 地震動の増幅に関する観測値と **SHAKE** による計算値の比較

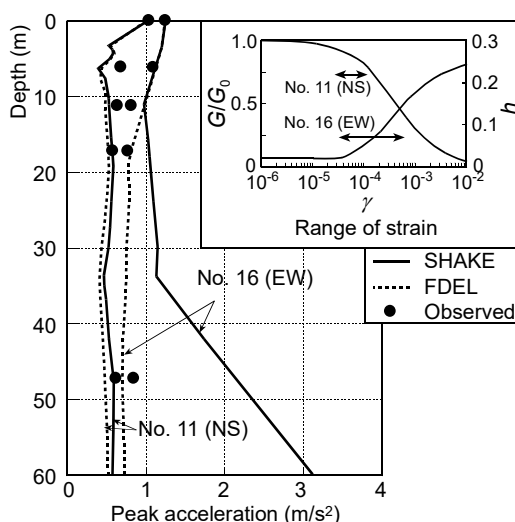


図2.35 **SHAKE** と **FDEL** による逆増幅解析の例

前者を改良するためには $\alpha$ の値は大きい方がよい。一方、後者を改良するためには $\alpha$ は小さい方がよい。したがって、これらを同時に改良する事はできない。また、後者は増幅の過小評価であるので、減衰を小さくすれば良いという考えもあるが、末富らが行ったケーススタディ<sup>54)</sup>から、増幅に大きな影響を与えるのが減衰ではなく剛性であることが明らかになっている。後者の影響は、通常の地震応答解析を行っているときには目立たないことも多いが、地表の加速度から基盤の入射波を求める、いわゆる逆増幅解析 (deconvolution) を行う際には、地下で異常な加速度の波形を求めたり、計算が収束しない事もある。

#### 2.6.4 DYNEQ による方法

前項で述べたように、**SHAKE** はひずみが大きいところではせん断応力が過大評価され、結果として最大加速度も過大評価される。また、**FDEL** では、**SHAKE** の高周波数領域の増幅が小さいことを改良するために高周波領域の増幅を大きくするために提案されているが、その理論的な背景はよくわからない。吉田らは、文献2で指摘された **SHAKE** の欠点をふまえ、等価線形法を改良する方法を示した。以下ではこの手法を **DYNEQ** と呼ぶことにする。

①係数 $\alpha$ をパラメータとしない。

これまでの説明から明らかなように、大ひずみ時の最大加速度を合わせようとするれば、式(2.6.1)で係数 $\alpha$ は変動してはいけない。すなわち、 $\alpha=1$ である必要がある。

②挙動の周波数依存性を周波数領域に落とす

図2.36はせん断応力-せん断ひずみ関係を模式的に示したものである。ここで、Aで示した大きいひずみ振幅を受けるときには見かけの剛性は小さく減衰は大きい。一方、Bで示した小さいひずみ振幅の際には見かけの剛性は大きく減衰は小さい。これらの現象に要する時間は同じではない。地盤材料は、通常地震応答で考える範囲であれば、力学特性に周波数依存性がないことが知られている。しかし、応力-ひずみ関係のこのような性質を見ると、挙動には周波数依存性が現れる。つまりAの様な挙動に対しては周期が長いし、Bの様な挙動に対しては周期が短いわけである。そこで、せん断ひずみの時刻歴から、振幅の周期の関係を求める。ここでは図2.37に示すゼロクロス法を用いて、7章に示す三つの事例について計算した事例を図2.38に示す。ばらつきはあるが、周波数と振幅の間には周波数依存性があり、高周波数ほど振幅が小さいという一般的な傾向があることがわかる。

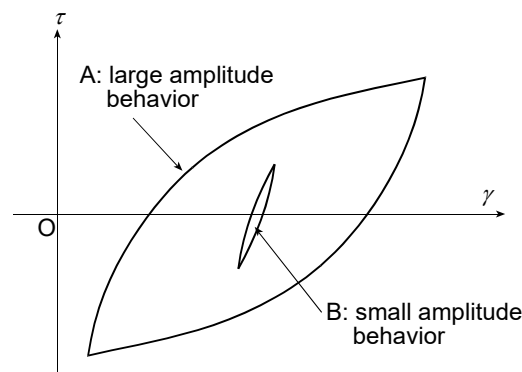


図2.36 応力-ひずみ関係

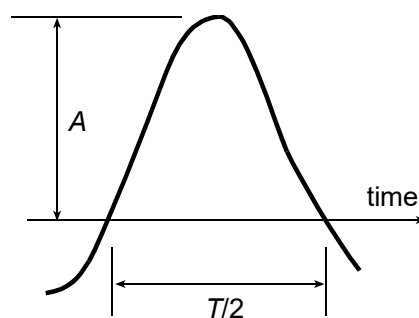


図2.37 振幅と周期の取り方

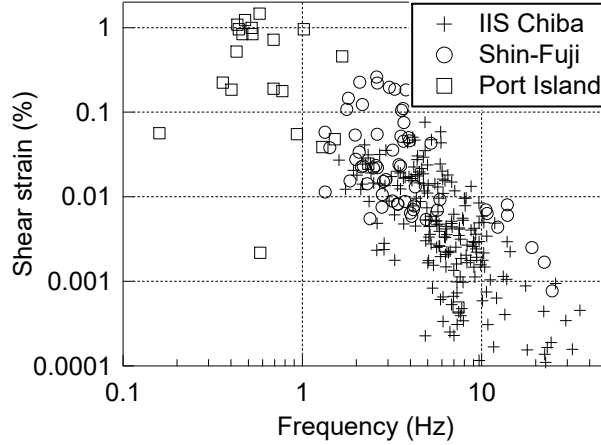


図2.38 ひずみ振幅－周期関係の例

図2.38は時刻歴の挙動から求めた関係である。もし、この関係が周波数領域の挙動と何らかの関係があれば、周波数領域での挙動が可能になる。ところで、図2.38は縦座標が対数軸となっている。これは、ひずみ振幅がいくら小さくても認識できることを意識している。しかし、物理的に考えれば、通常、 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ より小さいひずみに対しては非線形に伴う剛性低下や減衰の変化はほとんどなく、この領域を区別すべき理由もない。そこで $10^{-4}$  (0.01%) について図から、対応する周波数領域を求めると2～10Hzであることが分かる<sup>c</sup>。そこで、有効ひずみを次のようにして求める。なお、FDEL で用いているフーリエスペクトルでは10Hz で弾性域にはいっており、DYNEQ の評価より小さい。後に7章で事例で示すように、この差が大地震事の結果に大きく影響する。

- ①ゼロクロス法で求めた最大振幅とその周波数を  $r_{max}$ ,  $f_p$  とする。これまでの考えから大ひずみに対する適用性を確保するためにはこの値は使う必要がある。
  - ②あるひずみ  $f_e$  より周波数の大きい部分では弾性挙動とする。 $f_e$  は2～10Hz 程度の値である。
  - ③  $f_p$  より小さい周波数に対しては有効ひずみは一定とする。
- $f_p$  と  $f_e$  の間を多項式で表すとすると、有効ひずみとして次の式が得られる。

$$\gamma_{eff} = \begin{cases} \gamma_{max} & f_p > f \\ \gamma_{max} \left\{ 1 - \left( \frac{\log f - \log f_p}{\log f_e - \log f_p} \right)^m \right\} & f_p \leq f \leq f_e \\ 0 & f > f_e \end{cases} \quad (2.6.6)$$

特に指定しない限り、DYNEQ では  $m=2$ ,  $f_e=6\text{Hz}$  を用いる。つまり、式(2.6.6)の形状はひずみの時刻歴が与えられると一意的に決めることが出来る。

さらに、散乱による減衰を加えることにすれば、減衰は次のようにして求めることが出来る。

$$h = h_h + h_s \quad (2.6.7)$$

ここで、 $h_h$  は履歴減衰で、式(2.6.6)の有効ひずみから決められる。これに対して、 $h_s$  は散乱の減衰である。ここで、散乱の減衰を取り込む際には、注意が必要である。文献2で示されるように、多くの動的変形特性試験の結果は低ひずみでも2～4%の減衰がある事例が多いが、これは、試験器の摩擦のようなシステムエラーで<sup>61)</sup>、詳細な実験を行えば減衰はほとんど0である。一方、これま

<sup>c</sup> オリジナルの論文<sup>4)</sup>では15Hz となっているが、これは筆者が縦軸が%表示となっているのに実ひずみと読み間違えたためである。その後の解析の結果、この程度のひずみの方が好ましいことが多いことがわかっている。

での等価線形解析では散乱の減衰は考慮されていない。文献2ではこの二つのエラーがうち消しあったため、従来の等価線形解析でも低ひずみ時の挙動が説明できた可能性を示唆している。このことは、逆に、散乱の減衰を使うのであれば、低ひずみ時の減衰は0になるような入力が必要となるわけである。

一方、大ひずみ時の散乱の減衰は原位置では観測されていないが、末富らの研究<sup>64)</sup>によれば、大ひずみでは散乱の減衰も大きくなるが、履歴減衰と比べればその影響は小さいことが示されている。さらに、文献54で示されるように、大地震時には減衰の値が応答に与える影響は小さい。したがって、大ひずみ時の散乱減衰については厳密な議論は現段階ではそれほど重要ではない。

DYNEQ では、その他にも、関数形として、式(2.6.6)の右辺の周波数依存性を対数ではなく実数を用いる式、文献<sup>65)</sup>による最小自乗法に基づく方法、すなわち、ゼロクロス法で求めた最大せん断ひずみに対する点( $f_0, \gamma_0$ )を通る次の曲線を用いる方法、なども用意している。

$$\log \gamma = A(\log f - \log f_p)^m + \log \gamma_{\max} \quad (2.6.8)$$

ここで、 $m$  は任意の定数であり、通常2である。係数の  $A$  はピーク法で求めたひずみ振幅一周波数の関係から最小自乗法で求める。しかし、これらはすべて研究の過程で作成されたものであり、特別な事情が無い限り用いる必要はない。したがって、これらの使用は表面上は出来ないようになっている。もし、使いたい場合には著者らに連絡されたい。

なお、この方法では周波数 $f_e$ より高振動数側では有効ひずみは0であり、弾性の特性を用いることになる。これがしばしば、高振動数側の増幅の過大評価として現れることがある。この解決として、 $f_e$ を大きくすることも考えられるが、すると、最大ひずみ付近の周波数の応答が悪くなる。そこで、この式を次のように改良することを考えた。

$$\begin{cases} \gamma_{\text{eff}} = \gamma_{\max} & f_p > f \\ \gamma_{\text{eff}} = \gamma_{\max} \left\{ 1 - \left( 1 - \frac{\gamma_{\text{eff}0}}{\gamma_{\max}} \right) \left( \frac{\log f - \log f_p}{\log f_e - \log f_p} \right)^m \right\} & f_p \leq f \leq f_e \\ \gamma_{\text{eff}} = \gamma_{\text{eff}0} e^{-a(f-f_e)} & f > f_e \end{cases} \quad (2.6.9)$$

すなわち、 $f=f_e$  では有効ひずみは設定値 $\gamma_{\text{eff}0}$ となり、これより高振動数側では指数的に減少していく。ここで、 $\gamma_{\text{eff}0}=0$ とすれば従来の式となる。また $a=0$ とすれば、高振動数側の減衰は一定値 $\gamma_{\text{eff}0}$ となる。新しい二つのパラメータの定量評価はこれからの課題であるが、 $\gamma_{\text{eff}0}$ は0.01~0.1%、 $a$ は0~0.5程度の値になると考えられる。現在、このオプションは直接使用はできないが、著者に連絡することによって使用できるようになる。

なお、プログラムでは、このオプションを有効に使うために、次の処理をしている。

- 1)  $\gamma_{\text{eff}0} > \gamma_{\max}$  の時  $\gamma_{\text{eff}0} = \gamma_{\max}$  とする。これにより、 $f_e$  まで $\gamma_{\text{eff}} = \gamma_{\max}$  で一定、以後3番目の式で低減
- 2)  $\gamma_{\text{eff}0} = k\gamma_{\max}$  となるオプションを用意。係数  $k$  は1より小さく、入力時に設定する。

## 2.6.5 佐藤らによる方法

佐藤<sup>66)</sup>らは減衰に関し、次の式を提案している。

$$h = h_0 f^a \quad (2.6.10)$$

ここで、 $h_0$  は式(2.6.1)による等価ひずみに対する減衰で、これまでの解析に用いてきたものと同じである。また、 $f$  は振動数、 $a$  は定数である。なお、この式は等価線形法の改良として提案されたものではなく、散乱の減衰を示している。

式(2.6.10)では、振動数1Hz のところで通常用いられている減衰と値が一致し、それより低周波数領域では減衰を大きく、高振動数領域では減衰を小さく評価することになる。このうち後者の部分については式(2.6.2)に示した杉戸らの考え方と共通するところがある。しかし、低振動数成分

については彼らと反対の傾向を与えている。低周波数成分については、杉戸は低周波数成分では波長が長いことから増幅特性は剛性や減衰の変化に対してそれほど大きくないことを指摘し、式(2.6.2)のモデル化で問題があることを意識しながらも実用的には影響は小さいことを述べている。両者のもう一つの違いは、式(2.6.1)で計算される有効ひずみに対応する減衰との関係である。杉戸らの定式化ではフーリエ振幅が最大となる振動数で SHAKE による減衰が FDEL の減衰と一致するのに対し、佐藤らの方法では1Hz で SHAKE による減衰と一致する。また、佐藤らの方法では低周波数成分では減衰は大きくなるので、卓越振動数が1Hz より小さい地盤では減衰が非常に大きくなる可能性がある。末富はこの点を考慮し、卓越振動数で減衰が一致するように、次式のよう改良した<sup>54)</sup>。

$$h = h_o \left( 1 + f^a - f_{max}^a \right) \quad (2.6.11)$$

ここで、 $f_{max}$  はフーリエ振幅が最大となる振動数である。

### 2.6.6 その他の注意

等価線形化法の採用だけでは2.2節に基づき解を得ることは出来ない。それは、地震前には均質な材料であっても、最大ひずみの大きさは深さによって異なるので、解析をするためには深さごとに異なる材料として扱う必要があるからである。この点を改良するために、プログラムではそれらの層は均質であるとし、その材料特性を層の中央の値で代表させることにしている。プログラムでせん断応力やせん断ひずみとして出力されているのはこの値である。当然ながら、せん断ひずみは層の上下の変位の差を層厚で除したものとは同じにはならない。

2.2節の解法は、地盤が複数の均質な層で出来ているという以外の仮定を用いていなかった。したがって、均質な層であれば層厚がいくら大きくても層をさらに細分化すると言うような処置は不要で、層分割の数によらず同じ結果が得られた。しかし、非線形挙動をする場合には、これに加え、地盤の材料特性を層中央の材料特性で代表させるという仮定を加えたので、地震前に均質な層といえども、この仮定が成立する程度の厚さに細分化する必要がある。ただし、このような層分割に対する考え方は有限要素法系の層分割に対する考え方とは全く異なるものである。

以上に見たように、非線形挙動をする地盤を等価線形化法で解く場合にはいくつかの仮定が用いられている。したがって、ひずみが大きくなると、材料特性の変化が急激なときには適用性が落ちるとされている<sup>2)</sup>。

## 2.7 スペクトル

解析結果が求まれば、それから結果の波動の特性を把握する必要がある。DYNEQ ではその助けとするために、いくつかの出力を用意している。これらはユーザーの指示により出力される。

### 2.7.1 フーリエスペクトル

出力の一つはフーリエスペクトルである。フーリエスペクトルはフーリエ級数の各周波数成分の波動の絶対値を振動数の関係である。しかし、プログラムでは、これに  $T/2$  を掛けたものを出力している<sup>14)</sup>。

### 2.7.2 増幅スペクトル

選ばれた二つの層の振幅の比は周波数応答関数と呼ばれ、その絶対値は増幅率と呼ばれる。ただし、狭義には増幅比という用語は弾性の応答に限るという考えもあり、非線形応答に対してはスペクトル比と呼ぶという考えもある。ここでは、最終的に求まった状態に対して増幅スペクトルという用語を用いている。

DYNEQ では絶対変位に対する増幅率を周波数の関数として出力する。これは、絶対加速度に対する増幅率と同じである。増幅率は下方の層（基準層：reference layer）と上方の層（対象層：objective layer）の間における地震動の増幅の程度を表すもので、周波数の関数である。プログラムではさらにユーザーの指示により増幅スペクトルの極大値となる周波数と周期を求めている。

基準層を基盤に、対象層を地表にとれば、増幅スペクトルが極大となる周期は地盤の固有周期を表している。正確を期すため、単にスペクトル値の極大値に対する周期を求めるだけではなく、周辺の3つのスペクトル値を用い、増幅率－振動数関係を2次式で表現し、その極大値を与える振動数とその逆数である周期を出力している。

DYNEQ では、増幅スペクトルの計算方法として、二つの層のフーリエスペクトルの比を直接計算している。しかし、この方法では、地震応答解析が絶対に必要となる。通常の場合には地震応答解析は必ず行っているため、この方法で計算することに問題はない。しかし、例えば2.11節に示すような、地震応答解析を用いない解析法では、この方法を使うことはできない。そこで、式の原点に立ち返って増幅スペクトルを求める事を考える。

隣接する二つの層の間では変位とせん断応力の連続条件が成立し、その結果、入射波と反射波の間には式(2.2.21)の関係があることは既に示した。この関係を再掲すると次のようである。

$$\begin{aligned} E_{m+1} &= \frac{1}{2} E_m (1 + \alpha_m) e^{ik_m h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 - \alpha_m) e^{-ik_m h_m} \\ F_{m+1} &= \frac{1}{2} E_m (1 - \alpha_m) e^{ik_m h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 + \alpha_m) e^{-ik_m h_m} \end{aligned} \quad (2.2.21)$$

これをまとめると、次のようになる。

$$\begin{Bmatrix} E_{m+1} \\ F_{m+1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(1 + \alpha_m) e^{ik_m h_m} & \frac{1}{2}(1 - \alpha_m) e^{-ik_m h_m} \\ \frac{1}{2}(1 - \alpha_m) e^{ik_m h_m} & \frac{1}{2}(1 + \alpha_m) e^{-ik_m h_m} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_m \\ F_m \end{Bmatrix} = [S_m] \begin{Bmatrix} E_m \\ F_m \end{Bmatrix} \quad (2.7.1)$$

ここで、

$$[S_m] = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(1 + \alpha_m) e^{ik_m h_m} & \frac{1}{2}(1 - \alpha_m) e^{-ik_m h_m} \\ \frac{1}{2}(1 - \alpha_m) e^{ik_m h_m} & \frac{1}{2}(1 + \alpha_m) e^{-ik_m h_m} \end{bmatrix} \quad (2.7.2)$$

は、m 層と m+1層の間の波動の変換係数と考えることができる。式(2.7.1)は漸化式であるので、次のように書くこともできる。

$$\begin{Bmatrix} E_{m+1} \\ F_{m+1} \end{Bmatrix} = [S_m] \begin{Bmatrix} E_m \\ F_m \end{Bmatrix} = [S_m][S_{m-1}] \cdots [S_1] \begin{Bmatrix} E_1 \\ F_1 \end{Bmatrix} \quad (2.7.3)$$

地表では、式(2.2.23)に示したように、入射波と反射波が等しい。ここで、

$$E_1 = F_1 = 1 \quad (2.7.4)$$

と置くことで、地表に対する任意層の振幅比を求めることができる。したがって、各周波数に対する増幅比も求めることができる。

$$\begin{aligned} \text{Re}((E + F)e^{i\omega t}) &= \text{Re}(E + F) \cos \omega t - \text{Im}(E + F) \sin \omega t \\ A &= \sqrt{(\text{Re}(E + F))^2 + (\text{Im}(E + F))^2} \end{aligned} \quad (2.7.5)$$

### 2.7.3 応答スペクトル

フーリエスペクトル、増幅スペクトルが、波動の周波数成分そのものの特性を表しているのに対し、応答スペクトルは波動が振動系に入射したときの最大応答を振動系の振動数の関数として表したものである。

振動データが離散点でしか与えられていないことから、系の応答の計算には数値積分を用いる

必要がある。ここでは、Nigam の方法<sup>14)</sup>による数値積分を行っている。この方法は、入力として与えられた離散点における加速度値を用い、加速度時刻歴を部分線形関数として表すほかは一質点系の運動方程式を厳密に解くものであり、常に安定した、かつ最も精度の高い解を得ることが出来る。

一質点系の運動方程式を次のように表す。

$$\ddot{u} + 2h\omega_0 \dot{u} + \omega^2 u = -\ddot{y} \quad (2.7.6)$$

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

$$\ddot{y} = \frac{\ddot{y}_{\Delta t} - \ddot{y}_0}{\Delta t} t + \ddot{y}_0 \quad (2.7.7)$$

また、時刻  $t=0$  における応答値は既知である。これらを考慮すれば、式(2.7.6)の解は次式のように表される。

$$\begin{Bmatrix} u_{\Delta t} \\ \dot{u}_{\Delta t} \end{Bmatrix} = [K_{ij}] \begin{Bmatrix} u_0 \\ \dot{u}_0 \\ \ddot{y}_0 \\ \ddot{y}_{\Delta t} \end{Bmatrix} \quad (2.7.8)$$

ここで、

$$\begin{aligned} K_{11} &= e^{-h\omega_0 \Delta t} \left( \cos \omega_0 \Delta t + \frac{h\omega}{\omega_0} \sin \omega_0 \Delta t \right) \\ K_{12} &= e^{-h\omega_0 \Delta t} \cdot \frac{1}{\omega_0} \sin \omega_0 \Delta t \\ K_{13} &= e^{-h\omega_0 \Delta t} \left[ \left( \frac{1}{\omega^2} + \frac{2h}{\omega^3 \Delta t} \right) \cos \omega_0 \Delta t + \left( \frac{h}{\omega \omega_0} - \frac{1-h^2}{\omega^2 \omega_0 \Delta t} \right) \sin \omega_0 \Delta t \right] - \frac{2h}{\omega^3 \Delta t} \\ K_{14} &= e^{-h\omega_0 \Delta t} \left[ -\frac{2h}{\omega^3 \Delta t} \cos \omega_0 \Delta t + \frac{1-h^2}{\omega^2 \omega_0 \Delta t} \sin \omega_0 \Delta t \right] - \frac{1}{\omega^2} + \frac{2h}{\omega^3 \Delta t} \\ K_{21} &= -e^{-h\omega_0 \Delta t} \cdot \frac{\omega^2}{\omega_0} \sin \omega_0 \Delta t \\ K_{22} &= e^{-h\omega_0 \Delta t} \left( \cos \omega_0 \Delta t - \frac{h\omega}{\omega_0} \sin \omega_0 \Delta t \right) \\ K_{23} &= e^{-h\omega_0 \Delta t} \left[ \frac{-1}{\omega^2 \Delta t} \cos \omega_0 \Delta t - \left( \frac{h}{\omega \omega_0 \Delta t} + \frac{1}{\omega_0} \right) \sin \omega_0 \Delta t \right] + \frac{1}{\omega^2 \Delta t} \\ K_{24} &= e^{-h\omega_0 \Delta t} \left[ \frac{1}{\omega^2 \Delta t} \cos \omega_0 \Delta t + \frac{h}{\omega \omega_0 \Delta t} \sin \omega_0 \Delta t \right] - \frac{1}{\omega^2 \Delta t} \end{aligned}$$

式(2.7.8)により相対変位と相対速度が求められるので、式(2.7.6)より絶対加速度は次のように求められる。

$$(\ddot{u} + \ddot{y})_{\Delta t} = -(2h\omega_0 \dot{u} + \omega^2 u) \quad (2.7.9)$$



## 2.8 多方向入力

### 2.8.1 最大ひずみ

多方向入力に対しても、等価ひずみ算定の基準となる最大ひずみと周波数方向の分布が必要である。ここでは、最大ひずみの求め方を示す。この最大ひずみは有効ひずみが周波数に依存しない SHAKE タイプの解析ではそのまま用いられる。

#### 1)各方向最大ひずみの平均

$$\gamma_{\max} = \sqrt{\gamma_{x,\max}^2 + \gamma_{y,\max}^2} \quad (2.8.1)$$

この方法は、物理的意味はそれほどないが、計算が簡単である。

#### 2)時刻歴における最大

$$\gamma_{\max} = (\sqrt{\gamma_x^2 + \gamma_y^2})_{\max} \quad (2.8.2)$$

各時刻の最大ひずみの最大を計算している。

#### 3)ベクトルスペクトル

中村<sup>67)</sup>は、粒子軌跡と対応する物理的な意味を持った量としてベクトルスペクトルを提案している。これは次式で表される。

$$F(\omega) = \sqrt{\frac{S(\omega)}{T}} \quad (2.8.3)$$

$$S(\omega) = \frac{1}{2} \left( P_x(\omega) + P_y(\omega) + \sqrt{(P_x(\omega) - P_y(\omega))^2 + 4K_{xy}^2(\omega)} \right) \quad (2.8.4)$$

ここで、 $T$  は地震動の周期、 $P_x$ 、 $P_y$ 、 $K_{xy}$  はそれぞれ二方向のパワースペクトルおよびクロススペクトルである。

最大ひずみとして、スペクトルと自乗平均を用いる。すなわち、

$$\gamma_{\max} = \sqrt{\sum_{\omega} F^2(\omega)} \quad (2.8.5)$$

なお、DYNEQ で用いている高速フーリエ変換サブルーチン FAST の出力の絶対値の自乗および二方向ひずみの積の平方根がそれぞれ  $P_x$ 、 $P_y$ 、 $K_{xy}$  に対応している。

一方向の入力の際には、 $F(\omega)$  はフーリエ振幅であるので、上式の評価は確率的に正しいものとなる（たとえば文献68）。

### 2.8.2 周波数依存の有効ひずみ

DYNEQ、FDEL などのような周波数依存型の有効ひずみを与える手法は、一方向入力に対して提案されているため、多方向入力の場合には厳密にこれらの考えを適用することは困難である。ここで、厳密というのは、例えば座標軸を回転して同じ値が得られるかという意味である。以下で示す方法では厳密には客観性を満たしていないが、実用的にはそれほど大きな問題ではないと考えられる。

#### 1) DYNEQ タイプ

基礎式は次のように表されている。

$$\begin{cases} \gamma_{eff} = \gamma_{max} & f_p > f \\ \gamma_{eff} = \gamma_{max} \left\{ 1 - \left( \frac{\log f - \log f_p}{\log f_e - \log f_p} \right)^m \right\} & f_p \leq f \leq f_e \\ \gamma_{eff} = 0 & f > f_e \end{cases} \quad (2.8.6)$$

ここで、 $f_p$ はゼロクロス法で求められた最大振幅発生時の周波数である。しかし、2次元、三次元の状態ではこれを求めることはできない。そこで、各方向に対して定義した $f_p$ をその方向の解析に用いることにする。

## 2) FDEL タイプ

基礎式は次のように表されている。

$$\gamma_{eff}(\omega) = \alpha \gamma_{max} \left( \frac{F(\omega)}{F_{max}} \right)^a \quad (2.8.7)$$

ここで、 $F_{max}$ と $F(\omega)$ は各方向の成分を用いる。

## 2.9 動的変形特性の補間

動的変形特性データは、実験値を基本にしているために、多くは離散化した点で与えられている。従って、プログラムでは、これを補間して使う必要がある。

### (1) 内挿補間

内挿補間を行う場合には、ひずみを対数軸とする軸上で線形補間することにより剛性と減衰を求めている。この場合に、次のような注意が必要である。

図2.39は、2.4.8項で示した、沖積粘性土に関する動的変形特性と対応する応力-ひずみ関係を示したものである。ここで、○で示したのは元の実験式で示されている点で、実線はこれを基にさらに細かいひずみについて計算したものである。

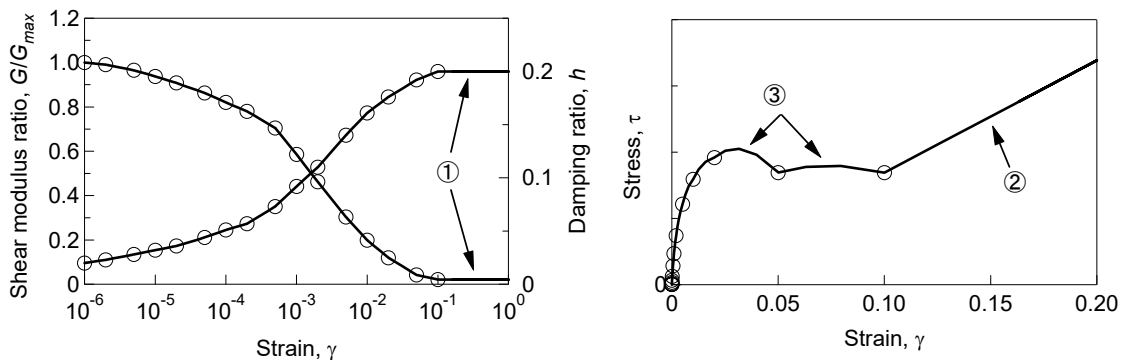


図2.39 動的変形特性と応力-ひずみ関係

さて、③で示した部分に着目すると、二つの奇妙な現象が見える。一つは、せん断応力が減少していること、もう一つは応力-ひずみ関係が上に○の間で上に凸になっていて連続でないことである。動的変形特性試験ではせん断応力振幅を常に増加させていくので、せん断応力が減少するようなことは起こらないはずである。これは、2.4.8項に示したように、せん断定数に関する最後の二つのデータは計測されたものではなく、実験値を外挿するように決められており、その設定法が悪かったために生じた現象である。おそらく、 $G$ - $\gamma$ 関係を単純に延長することで外挿したものと考えられるが、その外挿がおかしいことは、図2.39の左側の $G$ - $\gamma$ 関係を見ているだけでは分からない。従来、SHAKEを使う場合には、応力-ひずみ関係に着目するという考えがなかったた

めに生じた現象と考えられる。

ところで、地震応答解析を行うことを考えれば、このように、せん断応力が減少していると、イタレーションで収束した点が正しい結果とは限らないケースもある。それは、地盤は地震力という慣性力に対して応力が釣り合う様に挙動しているのであるから、逐次積分法により非線形の応力-ひずみ関係を追いかけていけば、異なるひずみに対して同じせん断応力があっても、どちらを使うか間違えることはないが、等価線形法のように仮定した剛性で計算を行う場合には、どちらに行くかは分からないからである。プログラムは、このような入力があった場合には警告を印刷するが、計算はそのまま行う。

もう一つの奇妙な点である、応力-ひずみ関係が上に凸になっている現象は、 $G\text{-}\log\gamma$ 平面上で細分化されたひずみに対してせん断剛性を内挿補間により求めたことによって生じた現象である。一見、応力-ひずみ関係に直して補間すれば、この現象が解決できそうに見える。しかし、その時には、反対に、 $G\text{-}\gamma$ 関係に浪打が見られるようになる。どちらをとるかであるが、通常、動的変形特性は  $G\text{-}\log\gamma$  関係で作図されることを考え、その平面上でおかしくない挙動となるように、現在の方法を用いることにした。従って、このような応力-ひずみ関係が得られることを避けることは出来ない。

## (2) 大きいひずみに対する補間

次に、外挿の場合を考える。外挿が必要なのは、ひずみが極端に小さいときと極端に大きいときである。これらいずれの場合でも、減衰は最も近い、与えられたデータで一定としている。一方、せん断剛性については、色々な考え方がある。

ひずみの大きいところの挙動として、図2.39の①、②に着目されたい。前述の様に、減衰に関しては、データが示された最大ひずみで一定としていることが分かる。剛性についてみると、②は非常に異常に見えるが、これは、①で示したように、データが示された最大ひずみより大きいひずみについてはせん断剛性を一定にした結果である。この方法は、SHAKE で用いられてきた方法である。

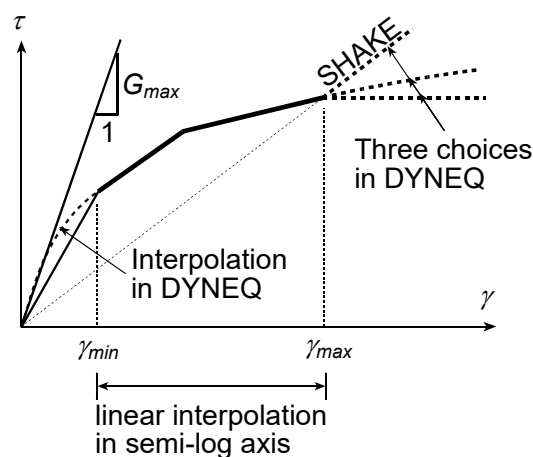


図2.40 DYNEQ における材料特性の補間

これに対して、DYNEQ では次の四つの方法のうちから選べるようにした。

- ①SHAKE と同じ。
- ②最大ひずみを越えると、せん断応力は一定。
- ③最大ひずみを越えると、せん断応力は次第に増加していくが、その際の応力-ひずみ関係は双曲線モデルで近似できる。この際、 $G_{max}$  が一定とする。
- ④上記と同じだが、 $\gamma_{max}$  で勾配が連続している。

このうち、最後の二つのケースについては、少し説明が必要かもしれない。双曲線モデルは次式で表される。

$$G/G_{\max} = 1/(1 + \gamma/\gamma_r) \quad (2.9.1)$$

データが与えられた最後の点の  $G/G_{\max}$  と  $\gamma$  を使えば、仮定の基準ひずみ  $\gamma_r$  を求めることができる。従って、最大ひずみを超えた後の  $G/G_{\max}$  はこの基準ひずみを用いれば計算できる。この代わりに、最大ひずみ時の接線が同じという条件も加えれば、 $G_{\max}$  の値も計算できる。

これら、二つのケースについては、最大せん断応力  $\tau_{\max}$  はそれぞれ次のように計算できる。

- $G_{\max}$  が変わらないとした場合の双曲線補間

$$\tau_{\max} = G_{\max} \gamma_r = G_{\max} \frac{\gamma_n g_n}{1 - g_n} \quad (2.9.2)$$

- 接線剛性が連続とした場合の双曲線補間

$$\tau_{\max} = \frac{\tau_n}{1 - \gamma_n k_n / \tau_n} \quad (2.9.3)$$

ここで、 $g = G/G_{\max}$ 、添え字  $n$  は最大ひずみ位置のデータであることを表す。

なお、減衰に関しては Hardin-Drnevich モデルによる補間を用いる。Hardin-Drnevich モデルを考えると、減衰は次のように表される。

$$h = h_{\max} \left(1 - \frac{G}{G_{\max}}\right) = h_{\max} \left(1 - \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_r}\right) \quad (2.9.4)$$

これより、最後の点を通ることにすれば、最大減衰が求められる。

図2.41に土研砂を例として大ひずみ時の補間の影響を示す。 $G/G_{\max}$  表示で見ると、図では大ひずみ部分をかなり拡大しているが、それでも割線剛性を一定としたケース以外、各補間法で差はほとんどない。応力-ひずみ関係で見ると、もう少し差は明らかであるが、余り大きくない。ただし、この例では最大ひずみ1%までのデータが与えられていることに注意が必要である。多くの動的変形特性試験では、ここまでの大きいひずみに対して実験が行われていないことも多く、その場合には差はもっと大きくなると考えられる。なお、図で実線で示した、接線が連続の条件は連続していないようにみえるが、これは、条件として与えられた  $G$ - $\gamma$  関係以外の点を補間するのに片対数軸を用いているからで、実軸を用いればきちんと連続している。その場合には、ひずみ 0.005と0.01の間はこの二つの点を結ぶ直線となるが、その直線を図に細い実線で示したように引いてみれば接線が連続していることがわかる。

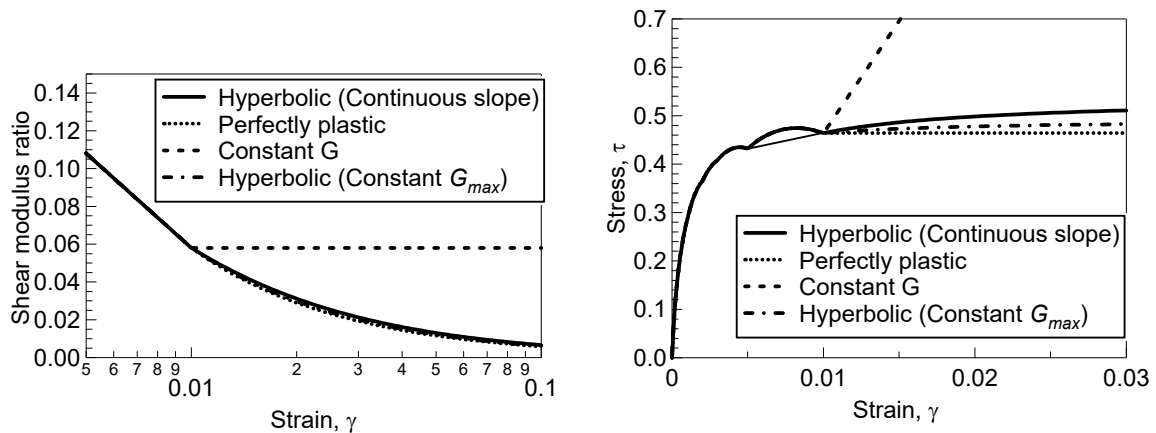


図2.41 補間法による動的変形特性の違い

### (3) 小さいひずみに対する補間

ひずみが小さいときの処理では、ひずみが0の時、せん断定数は弾性定数に等しいという仮定を設ければ外挿ではなく、内挿の問題となる。DYNEQ では、 $G$ - $\gamma$ 平面上で  $G$  を線形補間することにした。

次に、表形式で動変形特性が与えられているとき、最小のひずみでも減衰が大きすぎるときがある。その場合には、ひずみに応じて次第に減衰が小さくなるようにする。片対数軸で双曲線的に小さくなり、最後の点で勾配が連続しているという条件を作ると、式は次のようになる。

$$h - h_{min} = \frac{(\bar{h} - h_{min})^2}{\bar{h}(\log \bar{\gamma} - \log \gamma) + (\bar{h} - h_{min})} \quad (2.9.5)$$

最小減衰の入力が要求される場合にはこれが用いられる。そうでなければ、一定値が用いられる。

## 2.10 プログラムの特色

ここでは、DYNEQ と既往の類似の機能を持つプログラム SHAKE<sup>1)</sup>、FDEL<sup>3)</sup>との違いを示す。DYNEQ は、これらのプログラムと基本的な考え方（等価線形・重複反射理論）は本質的には同じであるが、いくつかの改良点がある。また、非線形特性の補間に対する考え方の違いもある。

まず、大きな違いは、DYNEQ では、著者らの提案する手法以外に、SHAKE と FDEL など、他に提案されている手法による解析も行うことができることである。

もう一つ、大きな特徴として、散乱の減衰と履歴減衰を分離したことがあげられる。従来の SHAKE や FDEL では散乱の減衰という意識がなかったが、実現象では、地震動が小さい間は散乱の減衰が支配的であり、地震動が大きくなってくると非線形挙動に伴う履歴減衰が支配的になってきたが、これを合理的に扱えるようになってきている。この機能は、いわゆるレベル2地震動の解析でも重要になる。すなわち、小地震合成法でレベル2地震動を作ったときには、地盤が弾性的に挙動したときの地表の応答が得られていることになる。したがって、この地表の波形には散乱の減衰による影響が大きく含まれているので、これより基盤の入射波を求める際にはその影響を考慮することが必要である。

複素剛性の用い方にも改良がある。SHAKE では式(2.1.11))、FDEL では式(2.1.23)が複素剛性として用いられているが、DYNEQ では両方共を用いることが出来る。また、減衰定数  $h^2$  が1に比べて小さく無い場合も考慮し、無視しない減衰も選ぶことが出来る。

SHAKE や FDEL に無い機能をつけ加えない場合には、本質的にはこれらプログラムと同じ結果を与える。数値計算上の小さな手法の違い、単精度と倍精度の違いやかけ算の順序の違いなどで結果は100%同じと言うわけには行かないが、同じ条件で SHAKE と比較すれば3~4桁以上の一致を示す。FDEL とは一番最初のイタレーションに用いる剛性と減衰定数の仮定が異なること、収束判定に用いている考え方が異なるため、SHAKE ほどの完全な一致を見ることが出来ないが、誤差判定値内での一致度は保証されている。すなわち、収束判定に用いている誤差（通常5%）を小さくすれば、両者は本質的には同じ結果となる。

なお、SHAKE と比べれば DYNEQ は計算時間が掛かり、欠点となっている。これには二つの理由がある。一つは、高速フーリエ変換に用いている手法が異なる。すなわち、SHAKE では高速フーリエ変換を基にした方法が使われているが、DYNEQ では大崎の方法<sup>14)</sup>（複素高速フーリエ変換）に基づき計算を行っており、後者の方が計算時間が掛かる。もう一つは DYNEQ では複素剛性が周波数の関数も扱えるようにしているのに対し、SHAKE では周波数に依存しないので計算量に差が生じることである。しかし、最近のコンピュータは、パソコンといえども非常に高速で、実際問題として計算時間が問題になることはないと考えられる。

いくつかの点で、DYNEQ は既往のプログラム（SHAKE や FDEL）と異なる結果を出力することがある。これらは次のような点である。

①表形式でひずみ依存性を入力した場合、および基となる材料特性が表形式で与えられている場

合で、計算に必要なひずみがデータとして与えられたひずみより小さいときと大きいときで、この場合には外挿によりひずみより材料特性を求める必要がある。これについては、2.9節を参照されたい。

- ②式(2.3.3), (2.3.5)における0次の項の扱いでは、既往のプログラムと DYNEQ の扱いに差がある。この項は、考えている周期の間一定値をとる事を示している。入力波としては加速度が与えられるので、このことは、速度、変位が時間とともに増加することを意味する。すなわち、速度、変位は周期関数にはならない。これは物理的には不合理である。そこで、既往のプログラムではこの項は無視して計算を行っている。この処理は、現象的に問題にすべき事ではない。ただし、例えば複合波を入力として与え、その位置の応答を出力したとすれば、無視した項の部分だけ結果が異なることになる。DYNEQ ではこれを避けるため、応答計算に際には0次の項は無視して計算を行い、絶対加速度の出力の際にのみこの項を考慮した出力を行っている。これは、物理的には次のように考えたことになる。

0次の加速度項は静的な成分であり、例えば重力による加速度と同様地震の作用前からずっと作用してきたものである。したがって、この加速度による応答は地震前には既に終了しており、地盤は地震前の状態ではこの加速度と釣合状態にある。速度、変位や応力、ひずみなどは、DYNEQ では地震による変化分を求めているのであるから、応答に際してはこの項は考慮しなくて良い。なお、実際にこのような加速度が作用していれば、これと釣り合うため初期せん断応力も作用しているはずであるが、解析で用いている応力-ひずみ関係は対称であり、初期せん断の効果が陽に考慮されているわけではない。

- ③既存のプログラムではせん断応力として出力されるのは、せん断ひずみにせん断剛性を掛けた値である。したがって、応力-ひずみ関係は線形である。ところが、2.1節に示した考察からモデル化を行っているとしたら、応力-ひずみ関係はヒステリシスを描く。この事は、速度比例の減衰項（複素剛性の虚数部分）の意味あいの解釈によるものであるが、物理的には2.1節で考慮したモデルが応力-ひずみ関係と考えた方が自然であろう。

一方では、既存のプログラムとの整合性も重要かもしれない。DYNEQ ではこの点も考慮し、最大値出力の際には既存のプログラムと同様、最大せん断ひずみにその時のせん断剛性を掛けた値を最大値として出力するオプションと、複素剛性を考慮した最大のせん断応力を時刻歴から求めて出力するオプションの両方を用意している。

なお、DYNEQ では、前述した高速フーリエ変換以外にも周波数増幅関数のピークから地盤の固有周期を求める方法や応答スペクトルを求める方法について、大崎の本<sup>14)</sup>のコーディングを参考にプログラムを作成している。また、この章に示した理論的な背景（2.1, 2.2, 2.7節）についても、多くを大崎の本に依っている。

## 2.11 澤田の方法

この方法は、地震応答解析ではないが、同じデータを用いて計算できることから、用意したものである。

沢田ら<sup>69)</sup>は、せん断応力の鉛直方向分布を次式で近似した。

$$\tau(z) = \tau_{max} \sin\left(\frac{\pi}{2H} z\right) \quad (2.11.1)$$

ここで、 $z$  は深さ、 $H$  は基盤までの深さ、 $\tau_{max}$  は基盤におけるせん断応力である。各深さのせん断ひずみは次のように表される。

$$\gamma(z) = \frac{\tau_{max}}{G(z)} \sin\left(\frac{\pi}{2H} z\right) \quad (2.11.2)$$

従って、変位  $u(z)$  は、地表の基盤に対する相対変位  $u_{max}$  を用いて、次のように表される。

$$u(z) = u_{max} + \int_0^z \gamma(z) dz \quad (2.11.3)$$

これまでの式を代入し、整理すると、次の式が得られる。

$$\begin{aligned} u(z) &= u_{max} + \int_0^z \frac{\tau_{max}}{G(\bar{z})} \sin\left(\frac{\pi}{2H} z\right) dz = u_{max} + \sum_{i=1}^N \int_{z_i}^{z_{i+1}} \frac{\tau_{max}}{G(\bar{z}_i)} \sin\left(\frac{\pi}{2H} z\right) dz \\ &= u_{max} + \sum_{i=1}^N \frac{\tau_{max}}{G(\bar{z}_i)} \frac{2H}{\pi} \left[ \cos\left(\frac{\pi}{2H} z_{i+1}\right) - \cos\left(\frac{\pi}{2H} z_i\right) \right] \end{aligned} \quad (2.11.4)$$

ここで、 $\bar{z}_i = (z_{i+1} - z_i)/2$  は層中央の深さで、この深さでその層の非線形特性を代表している。

式(2.11.4)で、 $z=H$  と置くと、基盤では変位は0であることから、次式が得られる。

$$\tau_{max} = \frac{u_{max}}{-\sum_{i=1}^N \frac{1}{G(\bar{z}_i)} \frac{2H}{\pi} \left[ \cos\left(\frac{\pi}{2H} z_{i+1}\right) - \cos\left(\frac{\pi}{2H} z_i\right) \right]} \quad (2.11.5)$$

これは、基盤のせん断応力と地表の変位を結びつける式である。従って、地表面の変位  $u_{max}$  が基盤のせん断応力  $\tau_{max}$  が地震動として与えられれば地盤の応答を求めることができる。

通常的设计では、基盤の応答スペクトル、地表の応答スペクトルなどが地震動として与えられることが多い。今、地表の絶対加速度応答スペクトル  $S_a(T)$  が与えられたとする。すると、地表の相対変位スペクトルは、たとえば次のように表される<sup>70)</sup>。

$$u_{smax}(T) = \frac{h_s T^2}{2\pi^2} S_a(T) \cdot C_N C_A \quad (2.11.6)$$

ここで、 $T$  は周期、 $h_s$  は応答スペクトルを計算したときの減衰定数である。また、 $C_N$  は非定常特性の補正係数で地震動の継続時間中の波数に関係し、マグニチュード7程度の地震に対し  $C_N=2$ 、8程度の地震に対し  $C_N=1$  程度の値となる。 $C_A$  は応答スペクトルを簡潔化したときや応答スペクトルが地盤の特性を反映しないことを補正する係数で、1～2の値をとる。

式(2.11.5)と(2.11.6)を連立させれば問題が解ける。ただし、式(2.11.5)は周期が入っていない。1層系の地盤では周期は厳密解として次のように求めることができる。

$$T = \frac{4H}{V_s} \quad (2.11.7)$$

多層系では、簡便に周期を求めることはできないが、慣用的に次の二つの式がよく用いられる。

$$T = \frac{4H}{\bar{V}_s} = \frac{4H}{\sum_{i=1}^N V_{si} (z_{i+1} - z_i)} \quad \bar{V}_s : \text{平均せん断波速度} \quad (2.11.8)$$

$$T = \sum_i \frac{4H_i}{V_{si}} \quad (2.11.9)$$

式(2.11.8)は層厚で重みをつけてせん断波速度を求めたもので、建築の分野でよく用いられている。これに対して式(2.11.9)は基盤から地表までの波動の伝播速度を同じにするもので、土木の分野でよく用いられている。

沢田らは、これら二つの近似式の精度をチェックし、誤差が相当あるケースが珍しくないことを示し、波動伝播に基づく近似式を示した<sup>71)</sup>。この方法では、各地層で反射・透過を繰り返し地表に到達する波動を無限個集めれば正解になるところを一回だけ集めているもので、次式で与えられる。

$$T = \frac{3 \sum_{i=1}^N S_i t_i^3 + \sqrt{9 \left( \sum_{i=1}^N S_i t_i^3 \right)^2 - 8 \left( \sum_{i=1}^N S_i t_i^2 \right) \left( \sum_{i=1}^N S_i t_i^4 \right)}}{4 \sum_{i=1}^N S_i t_i^2} \quad (2.11.10)$$

$$t_i = \sum_{k=1}^i \frac{4H_k}{V_{sk}} = \sum_{k=1}^i \left( 4H_k \sqrt{\frac{\rho_k}{G_k}} \right), \quad S_i = \frac{\sqrt{\rho_i G_i} - \sqrt{\rho_{i+1} G_{i+1}}}{\sqrt{\rho_i G_i} + \sqrt{\rho_{i+1} G_{i+1}}}$$

なお、式(2.11.10)が虚数になる場合には、層数  $N$  を解が実数になるまで1ずつ減らして計算する。これは比較的浅い位置にインピーダンス比が大きな地層境界がある地盤の場合に、深い地層情報を無視する働きをする。

これら三つの周期の計算法を SHAKE による卓越周期と比較して図2.42に示す。ここで、 $T_v$ 、 $T_w$ 、 $T_r$  はそれぞれ式(2.11.9)、(2.11.8)、(2.11.10)による周期である。また、 $T_r$  の比較で、一つだけ値が約1.8とはずれているが、この周期は重複反射法による応答倍率においても極大値にはなっていない凸状の部分に相当しており、一次固有周期になるかどうかの微妙な場合と考えられる。

DYNEQ では三つの周期を選べるようになっている他、増幅関数の極値から計算する方法も用意している。

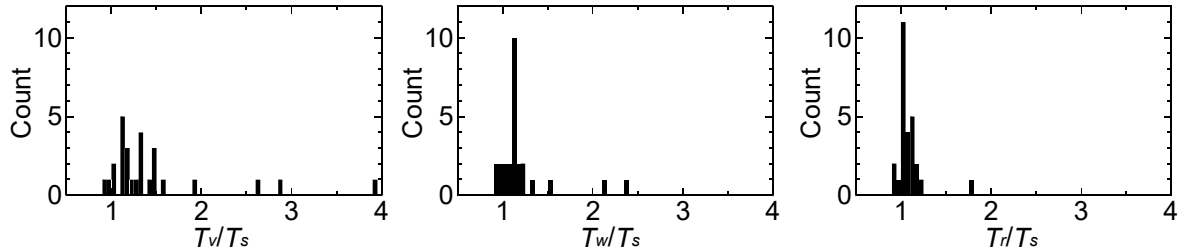


図2.42 SHAKE による周期  $T_s$  と各種近似法の周期の比較

設計指針等で用いられる代表的な応答スペクトルは DYNEQ で用意されている。



①道路橋示方書<sup>72)</sup>

地盤種別	標準スペクトル	レベル2地震動 タイプ1地震	レベル2地震動 タイプ2地震
I 種 $T < 0.2$	$T < 0.1 \quad S = \max(160, 431T^{1/3})$ $0.1 \leq T \leq 1.1 \quad S = 200$ $1.1 < T \quad S = 220/T$	$T < 1.4 \quad S = 700$ $1.4 < T \quad S = 980/T$	$T < 0.3 \quad S = 4463T^{2/3}$ $0.3 \leq T \leq 0.7 \quad S = 2000$ $0.7 < T \quad S = 1104/T^{5/3}$
II 種 $0.2 \leq T < 0.6$	$T < 0.2 \quad S = \max(200, 427T^{1/3})$ $0.2 \leq T \leq 1.3 \quad S = 250$ $1.3 < T \quad S = 325/T$	$T < 0.18 \quad S = \max(700, 1505T^{1/3})$ $0.18 \leq T \leq 1.6 \quad S = 850$ $1.6 < T \quad S = 1360/T$	$T < 0.4 \quad S = 3224T^{2/3}$ $0.4 \leq T \leq 1.2 \quad S = 1750$ $1.2 < T \quad S = 2371/T^{5/3}$
III 種 $0.6 \leq T$	$T < 0.34 \quad S = \max(240, 430T^{1/3})$ $0.34 \leq T \leq 1.5 \quad S = 300$ $1.5 < T \quad S = 450/T$	$T < 0.29 \quad S = \max(170, 1511T^{1/3})$ $0.29 \leq T \leq 2 \quad S = 1000$ $2 < T \quad S = 2000/T$	$T < 0.5 \quad S = 2381T^{2/3}$ $0.5 \leq T \leq 1.5 \quad S = 1500$ $1.5 < T \quad S = 2948/T^{5/3}$

②鉄道構造物等設計標準<sup>73)</sup>

地盤種別	標準スペクトル	レベル2地震動 タイプ1地震	レベル2地震動 タイプ2地震
G0 岩盤	$T < 0.2 \quad S = 406T^{0.44}$ $0.2 \leq T \leq 1.4 \quad S = 200$ $1.4 < T \quad S = 280T^{-1}$	$0.1 \leq T \leq 1.0 \quad S = 880$ $1.0 < T \quad S = 880T^{-1.221}$	$T < 0.2 \quad S = 3737T^{0.628}$ $0.2 \leq T \leq 0.7 \quad S = 1360$ $0.7 < T \quad S = 880T^{-1.221}$
G1 基盤	$T < 0.2 \quad S = 508T^{0.44}$ $0.2 \leq T \leq 1.4 \quad S = 250$ $1.4 < T \quad S = 350T^{-1}$	$0.1 \leq T \leq 1.0 \quad S = 1100$ $1.0 < T \quad S = 1100T^{-1.221}$	$T < 0.2 \quad S = 4671T^{0.628}$ $0.2 \leq T \leq 0.7 \quad S = 1700$ $0.7 < T \quad S = 1100T^{-1.221}$
G2 洪積 ~0.25	$T < 0.15 \quad S = 691T^{0.44}$ $0.15 \leq T \leq 1.4 \quad S = 300$ $1.4 < T \quad S = 420T^{-1}$	$T < 0.2 \quad S = 3727T^{0.44}$ $0.2 \leq T \leq 1.0 \quad S = 1400$ $1.0 < T \quad S = 1400T^{-1.221}$	$T < 0.25 \quad S = 4777T^{0.628}$ $0.25 \leq T \leq 0.8 \quad S = 2000$ $0.8 < T \quad S = 1523T^{-1.221}$
G3 普通 0.25~0.5	$T < 0.18 \quad S = 744T^{0.44}$ $0.18 \leq T \leq 1.4 \quad S = 350$ $1.4 < T \quad S = 490T^{-1}$	$T < 0.35 \quad S = 2840T^{0.44}$ $0.35 \leq T \leq 1.1 \quad S = 1500$ $1.1 < T \quad S = 1686T^{-1.221}$	$T < 0.3 \quad S = 3834T^{0.628}$ $0.3 \leq T \leq 1.0 \quad S = 1800$ $1.0 < T \quad S = 1800T^{-1.221}$
G4 普通~軟弱 0.5~0.75	$T < 0.25 \quad S = 681T^{0.44}$ $0.25 \leq T \leq 1.4 \quad S = 370$ $1.4 < T \quad S = 518T^{-1}$	$T < 0.5 \quad S = 2439T^{0.44}$ $0.5 \leq T \leq 1.2 \quad S = 1600$ $1.2 < T \quad S = 2000T^{-1.221}$	$T < 0.3 \quad S = 3408T^{0.628}$ $0.3 \leq T \leq 1.2 \quad S = 1600$ $1.2 < T \quad S = 1999T^{-1.221}$
G5 軟弱 0.75~1	$T < 0.4 \quad S = 599T^{0.44}$ $0.4 \leq T \leq 1.6 \quad S = 400$ $1.6 < T \quad S = 640T^{-1}$	$T < 0.65 \quad S = 1819T^{0.44}$ $0.65 \leq T \leq 1.5 \quad S = 1400$ $1.5 < T \quad S = 2297T^{-1.221}$	$T < 0.35 \quad S = 2707T^{0.628}$ $0.35 \leq T \leq 1.5 \quad S = 1400$ $1.5 < T \quad S = 2297T^{-1.221}$
G6 軟弱 1~1.5	$T < 0.4 \quad S = 509T^{0.44}$ $0.4 \leq T \leq 2.4 \quad S = 340$ $2.4 < T \quad S = 816T^{-1}$	$T < 0.75 \quad S = 1430T^{0.44}$ $0.75 \leq T \leq 2.0 \quad S = 1200$ $2.0 < T \quad S = 2797T^{-1.221}$	$T < 0.4 \quad S = 2133T^{0.628}$ $0.4 \leq T \leq 2.0 \quad S = 1200$ $2.0 < T \quad S = 2797T^{-1.221}$
G7 超軟弱 1.5~	$T < 0.35 \quad S = 444T^{0.44}$ $0.35 \leq T \leq 3.2 \quad S = 280$ $3.2 < T \quad S = 896T^{-1}$	$T < 0.85 \quad S = 1104T^{0.44}$ $0.85 \leq T \leq 2.5 \quad S = 1000$ $2.5 < T \quad S = 3061T^{-1.221}$	$T < 0.5 \quad S = 1545T^{0.628}$ $0.5 \leq T \leq 2.5 \quad S = 1000$ $2.5 < T \quad S = 3061T^{-1.221}$
液状化地盤	$0.1 < T < 0.4 \quad S = 507T^{0.424}$ $0.4 \leq T \leq 2.25 \quad S = 350$ $2.25 < T < 5.0 \quad S = 1250T^{-1.57}$	$5 < P_L < 20$ $T < 1.5 \quad S = 600$ $1.5 < T \quad S = 1607T^{-1.42}$ $20 < P_L$ $T < 2.5 \quad S = 400$ $2.5 < T \quad S = 1469T^{-1.42}$	$5 < P_L < 20$ $T < 0.2 \quad S = 2035T^{0.58}$ $0.2 \leq T \leq 1.5 \quad S = 800$ $1.5 < T \quad S = 1275T^{-1.15}$ $20 < P_L$ $T < 0.2 \quad S = 1526T^{0.58}$ $0.2 \leq T \leq 2.5 \quad S = 600$ $2.5 < T \quad S = 1721T^{-1.15}$

### 3 データ入力

DYNEQ では2種類のデータを必要とする。一つは、プログラムの流れを制御し、また、材料や地盤の状態などを指示するための入力、もう一つは地震入力である。前者はカード入力として、ユニット番号5番より読み込まれる。後者はユーザーが指定した任意のファイル名から読み込まれる。内部的には後者にはユニット番号11が割り当てられている。

この章では前者の入力方法を説明する。後者については、この章の地震波の入力を説明した部分で簡単に説明する。

#### 3.1 データ入力の基本的な考え方

DYNEQ で用いているデータ入力の方法は、次のようなものである。

- ①作業の内容を指示する。
- ②その作業に必要なデータを入力する。

最初のデータは、一行のデータであり、作業の内容を指示する英語が書かれている。入力に際しては行の最初から表3.1に制御文字として示す文字（大文字）を入力する。現在用意している作業内容は、次のようなものである。

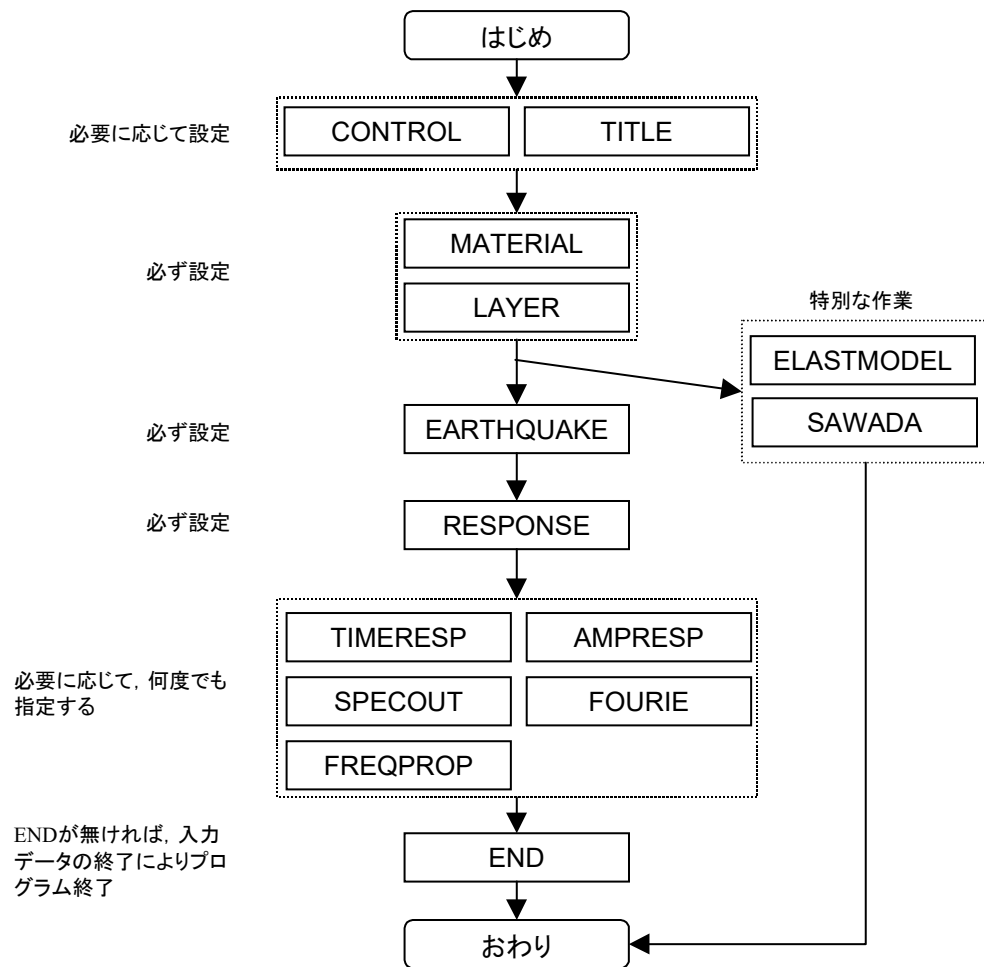
表3.1 制御文字と作業内容

制御文字	必要性	節	作業内容
CONTROL		3.2	基本定数の設定
TITLE		3.3	タイトル
MATERIAL	○	3.4	材料の指定
LAYER	○	3.5	地盤状態の指定
EARTHQUAKE	○	3.6	地震波の定義
RESPONSE	○	3.7	応答解析を始める指示
TIMERESP		3.8	時刻歴の出力
AMPRESP		3.9	増幅スペクトルの出力
SPECOUT		3.10	応答スペクトルの出力
FOURIE		3.11	フーリエスペクトルの出力
FREQPROP		3.12	周波数ごとの材料特性の出力
ELASTMODEL		3.13	非線形データから線形データを作成
SAWADA		3.14	沢田らの略算法
DYNEQ		3.15	DYNEQ の特殊な設定
END		—	プログラム実行の終了

- 注) ①必要性の欄が○のものは必ず必要である。  
②地層データ (LAYER) を読み込む前に材料データ (MATERIAL) を読み込む必要がある。  
③応答解析を行ってからでないと結果の出力は出来ない。

データ（作業）の流れのフローを次ページに示す。

プログラムは指示された作業を指示された順番に行っていく。したがって、たとえば地盤データ (LAYER) を読み込まず地震応答解析 (RESPONSE) を行うことは出来ない。



データ入力の流れ図

### 3.2 基本制御データ

この節では、作業識別文字「CONTROL」に対する入力方法を説明する。CONTROL はプログラムの実行の際に必要な制御をするための指示を与える。ただし、これらの値には、プログラムの実行時に初期値が与えられているので、特に必要でなければこの節の入力を省いても構わない。データを入力する際には、初期値として与えられている（または以前に指定した）値から変更したい部分にのみデータを入力し、そのほかの部分はブランクとしておく。

重力加速度の入力は、ここでは長さの単位として **m**、時間の単位として秒を想定した初期値が用いられている。これ以外の単位系を用いる場合には適当な値を入力する必要がある。

プログラムで、単位系が問題となるのは、重力加速度の入力のみである。その他の単位（たとえば力）は、データ全体として一貫性のあるものであればどのような単位系を用いても構わない。なお、拘束圧に依存した実験値を用いた材料非線形を考慮する場合には、水の単位体積重量なども単位系を揃える必要がある。

NNUM, ITER0, IDMP, IMULT, ACCG, ERR0, ALPHA, MATROW, MXFIL		(4I5, 4F10.0, A20)
1～ 5	NNUM	材料非線形の表を用意するためのひずみデータの数。NNUM は2以上の値でなければならない。初期値として20が割り当てられている。表形式の動的変形特性で20以上のひずみを指定するのでなければ、この数値はいじらない方がよい。
6～10	ITER0	収束のためのイタレーションの最大回数。初期値100
11～15	IDMP	複素剛性の計算方法。初期値=1 =1: $G^* = G(1 + 2ih)$ (Sorokin モデル=オリジナルの SHAKE で用いられたモデル) =2: $G^* = G(1 - 2h^2 + 2ih\sqrt{1 - h^2})$ (Lysmer の修正) =3: $G^* = \frac{G}{1 - 2ih} = \frac{1 + 2ih}{1 + 4h^2} G$ (Maxwell モデル) =4: $G^* = G(\sqrt{1 - 4h^2} - 2ih)$ YAS (Yoshida-Adachi-Sorokin) モデル
16～20	IMULT	多入力入力の指示 =1: 一方向入力 =2: 二方向入力
21～30	ACCG	重力加速度。初期値9.80665
31～40	ERR0	イタレーション終了のための誤差判定値 (%)。初期値5%。
41～50	ALPHA	最大ひずみから有効ひずみを求めるためにかける係数。初期値0.65。材料データで、個々の要素ごとに指定できる。材料データで指定がなかったときにこの値が用いられる。DYNEQ の手法を用いるときにはこの値は用いられない。
51～60	WATROW	水の単位体積重量。初期値1.0。有効拘束圧を用いた実験式などの構成則を使うときには値が必要である。
61～80	MXFIL	地盤定数、最大値などのファイル出力用ファイル名。初期には DYNEQ.max が割り当てられている。入力がブランクであればこのファイル名をそのまま用いる。ファイル名が入力されたときのみそのファイル名のファイルに出力される。内部的にはユニット番号13が割り当てられる。

### 3.3 タイトル

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

TITLE	(A80)	
1～80	TITLE	問題の題目

### 3.4 材料特性

この節では、作業識別文字「MATERIAL」に対する入力方法を説明する。MATERIAL は材料特性を指定するものである。

まず、3.4.1項で、異なる材料の数を入力する。次に、各材料について、まず3.4.2項で各層の基本的な定数を入力する。そして、3.4.2項に指定した散乱減衰のタイプに応じて3.4.3項で減衰に関する定数を入力する。さらに、3.4.2項に指定した材料の力学的特性に応じて3.4.4項で材料特性を入力する。3.4.4項は材料特性に応じて3.4.4.1～3.4.4.4項で入力がある。したがって、各層について、3.4.2、3.4.3、3.4.4項のデータが繰り返し使われる。なお、3.5節で用いない材料が入力されていても構わない。

#### 3.4.1 材料の数

NMAT, MTFLG	(2I5)
-------------	-------

1～ 5 NMAT 異なる材料の数

6～10 MTFLG 材料の剛性の定義があるひずみまでしか行われていなくて、計算でその最大ひずみを超えるひずみが現れたときの処置。2.9節参照  
=0：最後の点から双曲線モデルで延長（接線連続）  
=1：完全塑性  
=2：最大ひずみと同じ（SHAKE タイプ）  
=3：最後の点から双曲線モデルで延長（ $G_{max}$  一定）

#### 3.4.2 基本データ

この項では、二行の入力が必要である。

II, MSCT, MTYP, NTAB, GMAX0, VS, CNAM	(4I5, 2F10.0, A40)
ROW, HDMPF, HMIN, HMAXW, HVOGT, ALPHA, SIGM0, GMXPWR	(8F10.0)

##### 一行目の入力

1～ 5 II 材料番号。1から順番に大きくなっていくように入力する。

6～10 MSCT 散乱の減衰の考慮に関するフラグ。なお、散乱の減衰に関しては3.7節のRESPONSEに関する入力のうち、3.7.1項で入力するISCATとも密接に関連するので、必ず参照のこと。  
=0：散乱の減衰は考慮しない  
=1：散乱の減衰を考慮し、各層ごとに定数を与える。定数は3.4.3項で与える。  
=2：散乱の減衰を考慮するが定数は各層で共通である。この際には、3.7節のRESPONSEに関する入力のところで定数を与える。

11～15 MTYP 材料の種類。

=0：弾性。このあと3.4.4.1項に従い入力する。  
=1：Hardin-Drnevich の提案による非線形特性を用いる。このあと3.4.4.2項に従い入力する。  
=2：双曲線モデル。このあと3.4.4.3項に従い入力する。  
=3：Ramberg-Osgood モデル。このあと3.4.4.4項に従い入力する。  
=10：非線形。表形式で、ひずみの値とそれに対応する剛性比、減衰定数を入力する。このあと3.4.4.5項に従い入力する。  
=11：表形式で、MTYP=1と同じであるが、拘束圧依存性を自動的に考慮する。このあと0項に従い入力する。  
=12：港湾の技術上の指針。このあと3.4.4.6項に従い入力する。  
=13：安田・山口の提案式。このあと3.4.4.8項に従い入力する。  
=14：土木研究所の提案式のうち、沖積粘土。このあと3.4.4.9項に従い入力

する。

=15：土木研究所の提案式のうち、洪積粘土。このあと3.4.4.10項に従い入力する。

=16：土木研究所の提案式のうち、砂。このあと3.4.4.11項に従い入力する。

=17：建築基準法，告示1457号に示される粘土

=18：建築基準法，告示1457号に示される砂

=19：JR 指針に示される盛土のうち土質①（粒度の良好な砂，砂礫；岩砕）

=20：JR 指針に示される盛土のうち土質②（一般の砂，砂礫：豊浦砂）

=21：JR 指針に示される盛土のうち土質③（粒度配合の悪い砂：稲城砂）

=22：JR 指針に示される盛土のうち土質④（粘性土：岩手ローム）

=23：堆積軟岩に対する式

16～20 NTAB MTYP=10, 11の時のみ必要で，異なるひずみの数。3.2節で入力した NNUM より小さい値でなければいけない。NTAB が NNUM より大きくなる時には，3.2節の NNUM の値を NTAB より大きくなるように事前に変更しておく必要がある。

21～30 GMAX 微小ひずみ時のせん断弾性係数  $G_{max}$ 。 $G_{max}$  の値は必ずしもここで入力する必要はなく，次に述べる VS でも入力出来るし，層ごとに3.5節で入力することも出来る。各層ごとの入力の際  $G_{max}$  の値が入力されないときここで入力した値が用いられる。

31～40 VS せん断波速度  $V_s$ 。GMAX が0の時，VS に0でない値が入力されていれば，VS より GMAX を計算する。層ごとに3.5節で入力することも出来る。

41～80 CNAM 材料特性名。印刷時に用いられるだけなので，特に入力不要である。

## 二行目の入力

1～10 ROW 単位体積重量。地下水位以下の層では，地下水を含む湿潤単位体積重量である。単位体積重量の値は必ずしもここで入力する必要はなく，層ごとに3.5節で入力することも出来る。各層ごとの入力の際単位体積重量の値が入力されないときここで入力した値が用いられる。

11～20 HDMPF 周波数依存減衰を考慮するときの各種の設定値。3.7.1項の IANATP=1 (SHAKE) では意味がない。IANATP=2 (DYNEQ) では多項式のべき（式(2.6.6)の  $m$ ），IANATP=3 (FDEL) では  $(F(\gamma)/F_{max})$  に対するべき，IANATP=4 (Satoh) では減衰のべき。もし0が入力されると，3.7.1項の DMPF の値が自動的に用いられる。

21～30 HMIN 周波数依存減衰を考慮するときの，最小の減衰定数（%）

31～40 HMAXW 円振動数の逆数に比例する減衰の係数。

$h = \alpha / \omega$  の  $\alpha$  を入力する。ここで， $h$  は実数で%ではない。

41～50 HVOGT 円振動数に比例する減衰の係数。

$h = \beta \omega$  の  $\beta$  を入力する。ここで， $h$  は実数で%ではない。

51～60 ALPHA 最大ひずみから有効ひずみを求めるための係数。ここで入力することにより，材料ごとの指定が可能となる。ここで入力されなければ，3.2節で入力した値（または初期値）が用いられる。

61～70 SIGM0 せん断弾性定数の拘束圧依存を考えるための拘束圧。これが0であれば，拘束圧依存性は考慮しない。これが正であれば，前に入力した GMAX や VS を定義した有効鉛直上載圧（有効拘束圧では無いので注意）。特別なオプションとして，これが負であれば，その深さ（絶対値が深さ）の有効上載圧を基準拘束圧とする。ここが0以外の値が入っているときには，GMAX か VS のどちらかは定義されていないといけないし，ROW にも値が入っていない

といけない。また、0以外の値が入っているときには、後に3.5節で層ごとに  
入力されるであろう GMAX, VS, ROW の値は無視される。

71～80 GMXPWR 拘束圧依存性を考えるときのべき。

注1) GMAX と VS の両方を指定する必要はない。どちらか一方で充分である。プログラムは他方  
を自動的に計算する。両方とも入力されたときは、GMAX 入力が優先され、VS の入力は無視  
される。

注2) 地盤の弾性定数を VS で入力する場合には、単位体積重量との関係に注意が必要である。例  
えばここで VS と単位体積重量を入力すれば、その値に基づきせん断弾性定数が計算される。  
次に3.5節で層ごとに単位体積重量を入力した場合にはプログラムはせん断弾性定数は変えず、  
単位体積重量のみを変えるため、結果として指定したせん断波速度とはならないことになる。  
これを避けるには、単位体積重量の入力はどちらか一方だけで行うことにする。

注3) 減衰は、 $h = (\text{履歴減衰}) + (\text{散乱減衰}) + \alpha/\omega + \beta\omega$  で計算される。

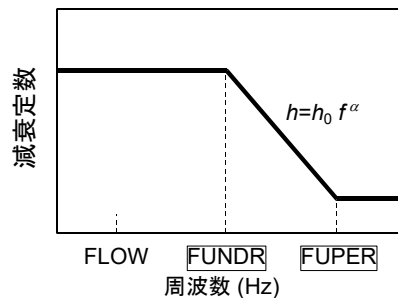
### 3.4.3 散乱の減衰に関するデータ

この項は、MSCT=1, すなわち、散乱の減衰を考慮し、かつ、各層ごとに散乱に関する定数を  
与えるときにのみ必要である。

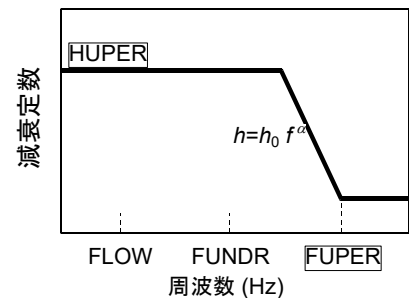
散乱の減衰は、基本部分は  $h = h_0 \cdot f^\alpha$  で表される。これに、上限、下限の制限を設ける。

MHTP, COEFA, COEFB, FLOW, FUNDR, FUPER, HLOW, HUPER (I5, 5X, 7F10.0)

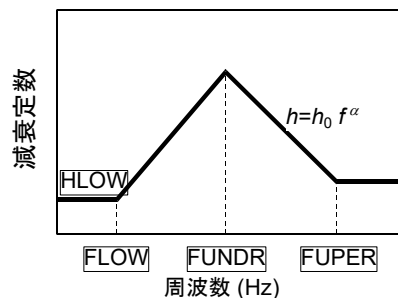
1～ 5 MHTP	周波数依存性のタイプ：1～4（下図参照。 $h_0$ と $\alpha$ 以外に図の四角で囲った変 数の入力が必要。）
11～20 COEFA	係数 $h_0$ （結果が実数表示となるように）
21～30 COEFB	指数 $\alpha$
31～40 FLOW	周波数
41～50 FUNDR	周波数
51～60 FUPER	周波数
61～70 HLOW	最小減衰定数。実数で%ではない。
71～80 HUPER	最大減衰定数。実数で%ではない。



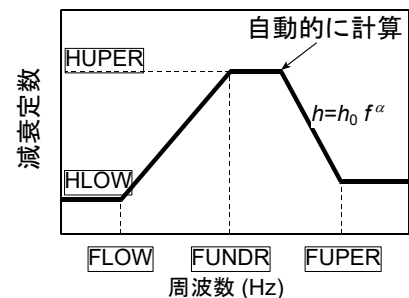
MHTP=1：周波数の上下限值で制御



MHTP=2：減衰に上限値



MHTP=3：極大値。低周波側で減少



MHTP=4：上限値。低周波側で減少



### 3.4.4 材料非線形特性データ

この項では、材料の非線形特性を入力する。非線形特性のタイプは、3.4.2項の MTYP で与えられている。MTYP に応じて、以下の項のどれかで必要なデータを入力する。この項のデータの入力が終われば、次の層の入力を行うので、入力の流れは3.4.2項に移る。

#### 3.4.4.1 MTYP=0 : 弾性の材料特性

**DMP** (F10.0)

1～10 DMP 減衰定数 (%)。なお、基盤は地下逸散減衰のみを考慮するとすれば減衰定数が0と入力する。0以外が入力されてもプログラムはそのまま計算を実行する。0と0以外の値を入力したときには当然結果は異なる。

#### 3.4.4.2 MTYP=1 : Hardin-Drnevich 型の材料特性

**GAMREF, HMAX, HMIN** (3F0.0)

1～10 GAMREF 基準ひずみ。ただし、GAMREF を負の値に設定すると、せん断強度を入力したことになる。このとき、GAMREF の値は3.4.2項で入力した値よりせん断弾性定数を計算してから求められる。DYNEQ では単位体積重量やせん断弾性定数は3.4.2項で入力しなくても層ごとにも指定できるようになっているが、基準ひずみを入力した場合には材料のところで設定し、層ごとに設定をしてはいけない。

11～20 HMAX 最大減衰定数 (%)。

21～30 HMIN 最小減衰定数 (%)。

注) 計算に用いられる減衰定数 =  $\max(h_{min}, h_{max}(1-G/G_{max}))$

#### 3.4.4.3 MTYP=2 : 双曲線モデル

**GRES, HMIN, COHE, PHI** (4F10.0)

1～10 GRES 基準ひずみ

11～20 HMIN 最小の減衰定数 (%)

21～30 COHE GRES=0のときのみ有効。粘着力

31～40 PHI GRES=0のときのみ有効。内部摩擦角 (度)

#### 3.4.4.4 MTYP=3 : Ramberg-Osgood モデル

**TF, ALPHA, BETA, HMIN** (4F10.0)

1～10 TF せん断強度。ただし、TF を負の値に設定すると、基準ひずみを入力したことになる。このとき、TF の値は3.4.2項で入力した値よりせん断弾性定数を計算してから求められる。DYNEQ では単位体積重量やせん断弾性定数は3.4.2項で入力しなくても層ごとにも指定できるようになっているが、基準ひずみを入力した場合には層ごとに指定してはいけない。

11～20 ALPHA 係数

21～30 BETA 係数

31～40 HMIN 最小の減衰定数 (%)

$$\gamma = \frac{\tau}{G_{\max}} \left( 1 + \alpha \left( \frac{\tau}{\tau_f} \right)^{\beta-1} \right)$$

#### 3.4.4.5 MTYP=10 : 表形式ひずみ依存性の材料特性

**(STRN(I), I=1, NTAB)** (8F10.0)

- 1～ STRN(I) ひずみの値。小さい方から順番に入力する。（ひずみは実ひずみであり，％ではない。）

(AMOD(I),I=1, NTAB) (8F10.0)

- 1～ AMOD(I) 剛性比  $G/G_{\max}$  の値。一般に剛性比は1より小さく，かつひずみと共に減少する関数形として入力する。この条件に合わない場合はプログラムは警告を印刷するが，計算は実行する。この場合，収束に関する保証はない。

(DMP(I),I=1, NTAB) (8F10.0)

- 1～ DMP(I) 減衰定数の値（％）。一般に減衰定数はひずみと共に増加する関数形として入力する。この条件に合わない場合はプログラムは警告を印刷するが，計算は実行する。この場合，収束に関する保証はない。

#### 3.4.4.6 MTYP=11：拘束圧依存を考慮した表形式ひずみ依存性の材料特性

(SIGVP, A, B, AM, AN) (5F10.0)

- 1～10 SIGVP 材料非線形を定義する有効上載圧  
 11～20 A せん断定数の定数部（下の説明参照）  
 21～30 B せん断強度の定数部（下の説明参照）  
 31～40 AM せん断定数の指数部（下の説明参照）  
 41～50 AN せん断強度の指数部（下の説明参照）  
 せん断弾性定数とせん断強度が次式で表されていることを仮定している。したがって， $A$  はせん断弾性定数の拘束圧に関する係数， $m$  はその指数部（通常0.5）である。また， $B$  は粘性土では粘着力，砂質土では内部摩擦角の正接（ $\tan\phi$ ）， $n$  は粘性土では0，砂質土では1を用いることが普通である。

$$G_{\max} = A\sigma_v'^m, \tau_{\max} = B\sigma_v'^n$$

(STRN(I),I=1, NTAB) (8F10.0)

- 1～ STRN(I) ひずみの値。小さい方から順番に入力する。（ひずみは実ひずみであり，％ではない。）

(AMOD(I),I=1, NTAB) (8F10.0)

- 1～ AMOD(I) 剛性比  $G/G_{\max}$  の値。一般に剛性比は1より小さく，かつひずみと共に減少する関数形として入力する。この条件に合わない場合はプログラムは警告を印刷するが，計算は実行する。この場合，収束に関する保証はない。

(DMP(I),I=1, NTAB) (8F10.0)

- 1～ DMP(I) 減衰定数の値（％）。一般に減衰定数はひずみと共に増加する関数形として入力する。この条件に合わない場合はプログラムは警告を印刷するが，計算は実行する。この場合，収束に関する保証はない。

#### 3.4.4.7 MTYP=12：港湾の技術上の指針に基づく材料特性

(AIP, AK0, FAC) (3F10.0)

- 1～10 AIP 塑性指数  
 11～20 AK0 静止土圧係数（0を入力すると0.5に変更する）  
 21～30 FAC 拘束圧補正のための係数。提案式は， $\text{kgf/cm}^2$ の単位を用いて定義されている。

したがって、 $1\text{kgf/cm}^2$ を現在の単位系で表した数値を入力する。たとえば、 $\text{tf/m}^2$ であれば、10、 $\text{kPa}$ であれば98を用いる。

#### 3.4.4.8 MTYP=13：安田・山口の実験式に基づく材料特性

D50, AK0, FAC, HMINYS, HMAXYS (5F10.0)

- |       |        |   |
|-------|--------|---|
| 1～10  | D50    | 平均粒径 $D_{50}$ 。単位は mm である。  |
| 11～20 | AK0    | 静止土圧係数 (0を入力すると0.5に変更する)  |
| 21～30 | FAC    | 拘束圧補正のための係数。提案式は、 $\text{kgf/cm}^2$ の単位を用いて定義されている。<br>したがって、 $1\text{kgf/cm}^2$ を現在の単位系で表した数値を入力する。たとえば、 $\text{tf/m}^2$ であれば、10、 $\text{kPa}$ であれば98を用いる。           |
| 31～40 | HMINYS | >0の時のみ意味があり、ひずみの最小値に対する減衰が HMINYS より大きいとき、最小減衰が HMINYS (%) になるように、小さいひずみに対して減衰が次第に小さくなるように設定する。HMINYS=0はこの補正をしないことを意味するので、0を用いたいときには非常に小さい値 (たとえば1.E-20) を用いる。2.9節参照。 |
| 41～50 | HMAXYS | >0の時のみ意味があり、ひずみの最大値に対する減衰が HMAXYS より小さいとき、最大減衰が HMAXYS (%) になるように、大きいひずみに対して減衰が次第に大きくなるように設定する。   |

#### 3.4.4.9 MTYP=14：土木研究所の実験式に基づく材料特性 (沖積粘土)

AK0, FAC (2F10.0)

- |       |     |   |
|-------|-----|---|
| 1～10  | AK0 | 静止土圧係数 (0を入力すると0.5に変更する)  |
| 11～20 | FAC | 拘束圧補正のための係数。提案式は、 $\text{kgf/cm}^2$ の単位を用いて定義されている。<br>したがって、 $1\text{kgf/cm}^2$ を現在の単位系で表した数値を入力する。たとえば、 $\text{tf/m}^2$ であれば、10、 $\text{kPa}$ であれば98を用いる。 |

#### 3.4.4.10 MTYP=15：土木研究所の実験式に基づく材料特性 (洪積粘土)

この節の入力はない。

#### 3.4.4.11 MTYP=16：土木研究所の実験式に基づく材料特性 (砂)

HMAX, AK0, FAC (3F10.0)

- |       |      |   |
|-------|------|---|
| 1～10  | HMAX | 最大減衰定数比 (%)   |
| 11～20 | AK0  | 静止土圧係数 (0を入力すると0.5に変更する)  |
| 21～30 | FAC  | 拘束圧補正のための係数。提案式は、 $\text{kgf/cm}^2$ の単位を用いて定義されている。<br>したがって、 $1\text{kgf/cm}^2$ を現在の単位系で表した数値を入力する。たとえば、 $\text{tf/m}^2$ であれば、10、 $\text{kPa}$ であれば98を用いる。 |

#### 3.4.4.12 建築基準法の告示に基づく方法：MTYP=17, 18

この節の入力はない。

#### 3.4.4.13 JR 指針に示される盛土材料：MTYP=19, 20, 21, 22

この節の入力はない。

#### 3.4.4.14 体積軟岩に対する式：MTYP=23

IP, HMIN (2F10.0)

1～10	IP	塑性指数 $I_p$ (%)
11～20	HMIN	微小ひずみ時の減衰定数 (%)。入力されなかったり0が入力されたりすると、提案式の値を用いるが、0以外の値が入力されると、その値を用いる。

### 3.5 地盤データ

この節では、作業識別文字「LAYER」に対する入力方法を説明する。まず、3.5.1項では解析する層の数を入力する。その後、3.5.2項で各層の特性を入力する。

#### 3.5.1 層数

NLAY, NDRYLY	(2I5)
--------------	-------

1～ 5 NLAY 層数。ここで層数とは下方の半無限地盤の数も含めたものである。

6～10 NDRYLY 動的変形特性が拘束圧依存の時に使われる、地下水位を表すデータ。地表から  $n$  番目の層の上の層境に地下水位があるとき、 $n$  を入力する。例えば、地下水位が地表と一致する時は1と入力する。地下水位の場所は無効上載圧を計算するのにも使われるので、全応力解析でも必要である。全層が乾燥しているときは0を入力する。

#### 3.5.2 地盤特性

地盤の材料特性、層厚などを上の層から順番に入力する。最初の NLAY-1層は表層に関する入力、NLAY 番目の入力は半無限地盤に関する入力となる。半無限地盤の入力の際には、HLAY, GTRY, DTRY の値は意味がない。また、半無限地盤は一般に弾性地盤であるが、指定した材料特性が弾性地盤でないときはプログラムは警告を印刷するのみで計算は実行する。この場合、自動的に剛性は微小ひずみ時のせん断弾性定数が割り当てられる。

条件（層厚、材料特性）の同じ層が続く場合、DYNEQ の持っている補間機能を用いることでデータの入力を省くことが出来る。例えば L 層までのデータの入力が終わっているとし、L+1層から K 層までのデータが層番号を除けば同じとする。このとき、L+1から K-1層目のデータを省略してもよい。プログラムは前に入力の終わっている L 層の次の層から K 層までを K 層で入力された層厚、材料データを持つ層として取り扱う。地表から最初の M 層が同じ特性の時には、M 層のデータのみを入力すればよい。なお、半無限層は必ず必要である。

II, MAT, HLAY, GMAX, VS, ROW, GTRY, DTRY, HMIN	(2I5, 7F10.0)
--	---------------

1～ 5 II 地層番号。地表の層は1、これから下方に順番に大きくなるように入力する。なお、上に書いたように、同じ層が複数個あるときには、最下層の地層番号だけを入力すれば、途中の層の入力を省略することができる。

6～10 MAT 材料番号。3.4節で入力した番号を引用する。

11～20 HLAY 層厚。

21～30 GMAX 微小ひずみ時のせん断弾性係数。（注1、注2参照）

31～40 VS せん断波速度。（注1、注2参照）

41～50 ROW 単位体積重量。ここで入力されないときは、3.4節の材料として入力した値が用いられる。（注2参照）

51～60 GTRY イタレーションの最初に用いるせん断弾性係数。必ずしも入力する必要はない。入力がなければプログラムが適当な値を設定する。（注3参照）

61～70 DTRY イタレーションの最初に用いる減衰定数（%）。必ずしも入力する必要はない。入力がなければプログラムが適当な値を設定する。（注3参照）

71～80 HMIN 周波数依存減衰を考慮する場合の最小減衰定数（%）。この項が0またはブランクの時、3.4.2項で入力した材料に関する値が用いられる。0でなければ、ここで入力した値が用いられる。

注1) 微小ひずみ時の減衰定数とせん断波速度はどちらか一方を指定すればよい。プログラムは必要に応じて他方を計算する。両方とも入力されなかった場合には、3.4節の材料特性の入力の際指定された値が用いられる。両方とも入力された場合には、GMAX の値が採用され、VS の値は無視される。

注2) 3.4節で SIGM0に0以外の値が入力されたとき、すなわち、拘束圧依存性を考慮する際には、ここで与えた値は無視され、3.4節で入力した値が有効となる。

注3) GTRY, DTRY に値を入力し、イタレーションが一回で終了した時は注意が必要である。それは、この場合には、ここで指定した値が計算に用いられるが、これらは材料非線形には対応した値とはなっていないからである。（もちろんその誤差は指定した誤差内にとどまってはいる）

この性質を利用し、データをほとんど変えずに弾性計算を行うことが可能である。すなわち、3.2節の入力の ITER0に1を入力すれば、収束の如何に関わらず計算は一回のイタレーションで収束する。このときの応答はここで指定した値を用いた結果である。ただし、せん断応力に関しては、ひずみに対応した剛性（正しい等価せん断弾性係数）を用いて計算するので、入力値とは合わない可能性がある。

### 3.6 地震波の定義

この節では、作業識別文字「EARTHQUAKE」に対する入力方法を説明する。地震波の定義のために、この節では基本的な条件を入力し、加速度波形そのものは別のファイルから読み込まれる。

#### 3.6.1 入力-1

**NACC, NT1, DT, CUTFQ** (2I5, 2F10.0)

- |       |       |  |
|-------|-------|--|
| 1～ 5  | NACC  | 地震波のデータ数。  |
| 6～10  | NT1   | 計算に用いる時間増分の数。NT1は NACC より大きく、かつ2のべき乗である。この条件を満たさないときは、プログラムが適当な数を見つける。NACC+1から NT1の間の入力は0と設定される。 |
| 11～20 | DT    | 時間増分。  |
| 21～30 | CUTFQ | この周波数より大きい部分の計算は行わない。  |

#### 3.6.2 入力-2

**NSKP, NACC0, LIPT, LTYP, EQMAX, EQMULT, EANUM** (4I5, 2F10.0, A20)

- |       |        |   |
|-------|--------|---|
| 1～ 5  | NSKP   | 地震波を読み込む際、ファイルから地震波を読み込むまでに読み飛ばす行またはレコード数。一般に地震はファイルの最初には地震波に関するコメントなどが書いてあるので、これを読み飛ばすために用いる。                      |
| 6～10  | NACC0  | 時刻歴出力のためのデータの数。入力されない場合、または0の場合には、前項で入力した NACC(地震波のデータの数)が用いられる。また、NACC0=-1が入力されると、前項の NT1 (NACC より大きい2のべき) が用いられる。 |
| 11～15 | LIPT   | 地震波を定義する層番号。上から順番に1, 2, ...と数える。すなわち地表が1, 基盤が NLAY である。   |
| 16～20 | LTYP   | 地震波の種類。<br>=1: 入射波 (E)<br>=2: 複合波 (E+F)<br>=3: 解放基盤波 (2E)<br>=4: 反射波 (F) (物理的には意味はない。)                              |
| 21～30 | EQMAX  | 地震波の最大値。ここに値が入力されていればプログラムは入力された加速度波の最大値が EQMAX となるように大きさを変更する。EQMAX<0が入力されたときには、加速度波の符号も反転させる。                     |
| 31～40 | EQMULT | 地震波用の乗数。ここに値が入力されていれば、入力した加速度を EQMULT 倍したものを入力として用いる。   |
| 41～60 | EQNUM  | 地震波名。印刷の時に用いられる。  |

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

たとえば、ためし計算の時には時間を短く計算し、本計算の時には全部の時刻に対して計算を行うというようなことはよく行われる。このような場合、EQMULT で計算に用いる値の制御を行うことが好ましい。EQMULT で制御していれば常に計算に用いる地震動の大きさは一定になるのに対し、EQMAX で制御した場合には入力波の最大値の場所によって異なる値を与えるケースがある。

#### 3.6.3 入力-3

**EQFIL, EQFMT** (A20, A40)

- |      |       |  |
|------|-------|--|
| 1～20 | EQFIL | 地震波を読み込むファイル名。ブランクであればユニット番号11 (fort.11) |
|------|-------|--|

が用いられる。

21～60 EQFMT 地震波を読み込むためのフォーマット。両端を括弧で括っておく必要がある。  
(例：(8F9.3))。空白が入力されると書式なしファイルとして読み込みにいく。

注) A を地震波のための配列とすると、プログラムは、

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

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

#### 3.6.4 入力-4

この入力 IMULT=2 の時のみ必要である。

NSKP, EQFIL, EQFMT (I5, 5X, A20, A40)

- 1～ 5 NSKP 地震波を読み込む際、ファイルから地震波を読み込むまでに読み飛ばす行またはレコード数。
- 11～30 EQFIL 地震波を読み込むファイル名。空白であれば入力-3の時指定した内容が用いられる。
- 31～70 EQFMT 地震波を読み込むためのフォーマット。空白であれば入力-3の時指定した内容が用いられる。



### 3.7 地震応答解析の実行

この節では、作業識別文字「RESPONSE」に対する入力方法を説明する。RESPONSE の実行の前に最低限「MATERIAL」, 「LAYER」, 「EARTHQUAKE」の作業を行っておく必要がある。RESPONSE ではこれらのデータを基に地震応答解析を実行し、最大値を出力する。

#### 3.7.1 基本データ

IVELOT, ISCAT, IANATP, ISHCON, NBND, LSTES, DMPF, DYNFRW	(I1, I4, 4I5, 5X, 2F10.0)
--	---------------------------

- 1～ 1 IVELOT 最大速度の出力を制御する  
 =0：絶対最大速度を出力する。  
 =1：相対最大速度を出力する。
- 2～ 5 ISCAT 散乱の減衰の考慮に関するフラグ  
 =0：散乱の減衰は考慮しない。このとき、3.4.2項の MSCT に応じて、3.4.3項で入力した値は意味がなくなる。  
 =1：散乱の減衰は要素ごとに与える。この際、3.4.2項の MSCT=1が指定されていれば、3.4.3項で入力した値が有効となり、MSCT=2が指定されていれば次の行で入力する減衰が有効となる。MSCT=0の層では減衰は考慮しない。  
 =2：散乱の減衰は地盤全体で与える。3.4.2項の指定に関わらず、次の行で入力する減衰が有効となる。

- 6～10 IANATP 解析の際の、有効ひずみの周波数依存性の考慮に関する指示。なお、IMULT=2（二方向入力）の時、IANATY≥2は使えない。

- =1：有効ひずみは周波数に依存しない。 $\gamma_{eff} = \alpha \cdot \gamma_{max}$  (SHAKE の方法)  
 =2：有効ひずみは周波数に依存する。（吉田らの方法）

$$\gamma_{eff} = \begin{cases} \gamma_{max} & (f < f_p) \\ \gamma_{max} - \left( \frac{\log f - \log f_p}{\log f_e - \log f_p} \right)^m & (f_p \leq f \leq f_e) \\ 0 & (f > f_e) \end{cases}$$

ここで、べき  $m$  は3.4.2項で入力した HDMPF である。もし、HDMPF=0であれば、この後で入力する DMPF が用いられる。また、 $f_e$  は DYNFRQとしてこの行の最後で入力する。

- =3：有効ひずみは周波数に依存する。（杉戸らの方法）

$$\gamma_{eff} = \alpha \cdot \gamma_{max} (F(\omega)/F_{max})^a$$

ここで、べき  $a$  は3.4.2項で入力した HDMPF である。もし、HDMPF=0であれば、この後で入力する DMPF が用いられる。

- =4：せん断定数に関しては周波数に依存しない（IANATP=1と同じ）が、減衰に関しては周波数のべきに比例する。IANATP=1の際の減衰を  $h_0$  と表したとき、減衰  $h$  は周波数  $f$  の関数として次式で与えられる。（佐藤らの方法）

$$h = h_0 f^a$$

ここで、べき  $a$  は3.4.2項で入力した HDMPF である。もし、HDMPF=0であれば、この後で入力する DMPF が用いられる。

- 11～15 ISHCON 二方向入力の際の、最大ひずみの計算方法

- =1： $\gamma_{max} = \sqrt{\gamma_{x,max}^2 + \gamma_{y,max}^2}$   
 =2： $\gamma_{max} = \left( \sqrt{\gamma_x^2 + \gamma_y^2} \right)_{max}$   
 =3：ベクトルスペクトル

16～20 NBND IANATP=3, 11のとき用いる三角形ウィンドウによる平滑化の片側バンド幅。NBAND に振動数増分と(2NEND-1)を掛けると周波数領域のバンド幅となる。IANATP=4, 12では最大スペクトルの検出に用いられるのみである。NBND=0であれば平滑化は行わない。

NBND と平滑化バンド幅  $f_w$  (Hz) との関係は次の通り。

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

ここで、N は解析データ数 (2のべき乗) ,  $\Delta t$  は時間増分である。NBND の標準値は40程度と考えられる。IANATP=3 (FDEL) を用いる場合には、この値が入っていないと計算が収束しない可能性がある。

21～25 LSTRS 最大せん断応力の出力方法に関するフラグ

=0 : 最大応力は、複素剛性を考慮したせん断応力の時刻歴から求める。

=1 : 最大応力は、最大ひずみ ( $\gamma_{max}$ ) に、有効ひずみ ( $=\alpha \gamma_{max}$ ) に対応するせん断剛性を掛けて求める。

(注) SHAKE では LSTRS=1に対応した出力が行われている。剛性や減衰の周波数依存性を考慮するときには、LSTRS=1では誤差が大きすぎるので、LSTRS=0を用いるべきである。しかし、計算量は増える。

31～40 DMPF 周波数依存減衰を考慮するときの各種の設定値。3.7.1項の IANATP=1 (SHAKE) では意味がない。

IANATP=2 (DYNEQ) : 有効ひずみを周波数依存性の関数として

$$\gamma_{eff} = \gamma_{max} - A(\log f - \log f_p)^m$$

と表したときのべき  $m$  で0のとき2.0が用いられる。

IANATP=3 (FDEL) : 有効ひずみを

$$\gamma_{eff}(\omega) = \alpha \gamma_{max} \left( \frac{F(\omega)}{F_{max}} \right)^m$$

と表したときのべき  $m$  で、原論文では1.0である。(0のとき1.0)

IANATP=4 (Sato) では減衰のべき。(下式の  $\alpha$ )

$$h = h_0 \cdot f^a$$

41～50 DYNFRQ IANATP=2 (DYNEQ) の時のみ意味があり、有効ひずみを0とする周波数 (0のとき6Hz に設定される)。

### 3.7.2 散乱の減衰に関するデータ

この項は、ISCAT=1, 2, すなわち、散乱の減衰を考慮する時にのみ必要である。

ISCAT=1の時には、3.4.2項での入力の際、散乱の減衰を系で定義する (MSCT=2) と定義した材料の散乱の減衰はこの項で入力した値が用いられる。そのような材料がない場合にもこの入力 は省略できないが、ブランク行とすることは可能である。

ISCAT=2の時には、3.4.3項で入力した個々の材料に対する散乱の減衰に関するパラメータは全て無視され、全ての材料についてここで入力した値が有効となる。

散乱の減衰は、基本部分は、 $h = h_0 \cdot f^a$  で表される。これに、上限、下限の制限を設ける。

MHTP, COEFA, COEFB, FLOW, FMDL, FHGH, HLOW, HHGH (I5, 5X, 7F10.0)

1～ 5 MHTP 周波数依存性のタイプ : 1～4 (下図参照)

11～20 COEFA 係数  $h_0$ 。(結果が実数表示となるように)

21～30 COEFB 指数  $a$ 。

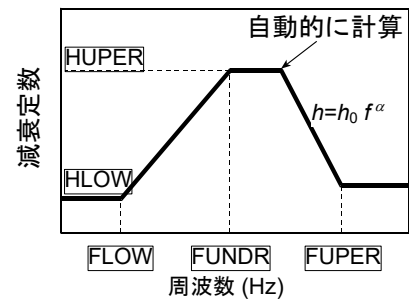
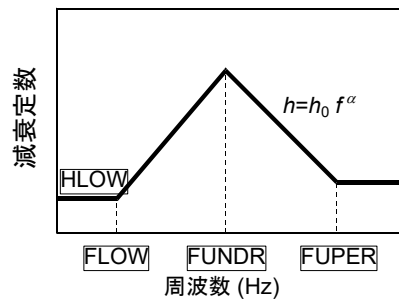
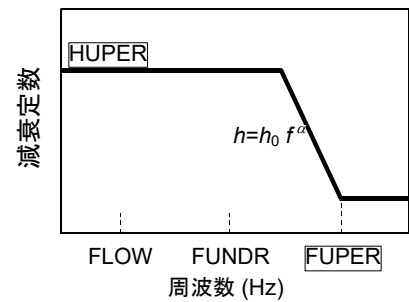
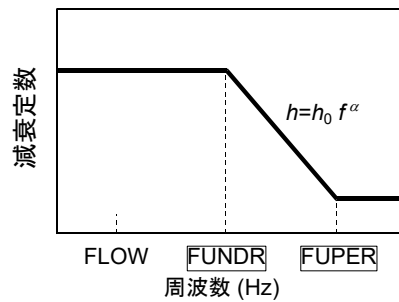
31～40 FLOW 周波数

41～50 FUNDR 周波数

51～60 FHGH 周波数

61～70 HLOW 最小減衰定数。実数で%ではない。

71～80 HHGH 最大減衰定数。実数で%ではない。



この節の作業が実行されると、プログラムは与えられた入力地震動と地盤に関し、地震応答解析を実行し、最大応答加速度、速度、変位、せん断ひずみ、せん断応力とその発生時間を印刷する。

この際、dyneq.tmp というファイルに書式なしで全層の時刻歴を書き込む。従って、この節以降の出力の際、これらの時刻歴を出力することは簡単である。また、書き込まれた方法を知っていれば（4章で説明）、あとで取り出すことも可能である。ここに書き込まれていない応答を求めるには、その成分ごとに計算を行う必要があるの、実行時間が多く掛かることになる。

### 3.8 時刻歴の出力

この節では、作業識別文字「TIMERESP」に対する入力方法を説明する。TIMERESP は必要に応じて何度でも繰り返し使うことが出来る。出力方法については4章参照。

#### 3.8.1 出力に関する指示

NFORM, NWAVE, NSTP, OUTFIL		(I1, I4, I5, A20)
1～ 1	NFORM	=1：書式なしで出力する =0：書式付きで出力する（通常はこちら）
2～ 5	NWAVE	出力する時刻歴の波形の数。ただし，NWAVE<0の時は別の意味を持っている。 =-1：全層の加速度，絶対速度，相対変位（複合波） =-2：全層の加速度，絶対速度，相対変位（入射波） =-3：全層のせん断ひずみ（%）時刻歴 =-4：全層のせん断応力（せん断ひずみ×せん断剛性） =-5：全層のせん断応力（減衰を履歴減衰として考慮）
6～10	NSTP	出力する時刻歴の時間増分数（ステップ数）。ただし，0と-1は特別な意味を持っている。 =0：NACC ステップ。すなわち，入力した地震波と同じステップ数。 =-1：解析を行ったステップ数（2のべき乗）。
11～30	OUTFIL	出力するファイル名。ブランクであれば，前回出力に用いたのと同じファイルが使われる。一番最初でブランクの時はユニット12「fort.12」が割り当てられる。ファイル名の左側にはブランクを作らず，11コラム目からファイル名を入力すること。前に指定したのと同じ名前を入力すると，前のデータが消されてしまうので注意が必要である。同じファイルに次々出力したいのであればファイル名は最初の一回目だけ指定し，二回目以降はブランクとする必要がある。

#### 3.8.2 層と成分の指定

NWAVE<0の時、この項のデータは不要である。

ここでは、時刻歴を出力する層の番号と種類を指定する。層の番号は上から1, 2, ...と数える。

この節の入力は、2行が1組で、10個の時刻歴を指定することが出来る。NWAVE の数が10より多いときは、必要な組数だけデータを用意する。2行のうち、最初の行は層番号を指定し、1行に10個の番号を書く。二行目は出力する時刻歴の種類で、層番号の直下に種類を示す番号を書く。

IMULT=2 (二方向入力) の際には、x 方向, y 方向の順で出力される。

(LAYER(I), I=1,NWAVE)	(10I5)
(LOUT(I), I=1,NWAVE)	(10I5)

LAYER(I) 層番号。地表から1,2,...と数える。

LOUT(I) 時刻歴の種類。

- =1 : 加速度, 絶対速度, 相対変位時刻歴 (複合波 : E+F)
- =2 : 加速度, 絶対速度, 相対変位時刻歴 (入射波 : E)
- =3 : せん断ひずみ (%) 時刻歴
- =4 : せん断応力 (せん断ひずみ×せん断剛性)
- =5 : せん断応力 (減衰を履歴減衰として考慮)

### 3.9 増幅スペクトルの出力

この節では、作業識別文字「AMPRESP」に対する入力方法を説明する。AMPRESP は周波数増幅スペクトルを求める。必要に応じ何回でも出力させることが可能。出力方法については4章参照。

#### 3.9.1 出力に関する指示

**NAMP, IEIGEN, OUTFIL** (2I5, A20)

- 1～ 5 NAMP      出力するスペクトルの数。
- 6～10 IEIGEN    増幅スペクトルのピーク値から地盤の固有振動数を小さい方から IEIGEN 個求める。求めた結果は印刷されるのみである。
- 11～30 OUTFIL   出力するファイル名。ブランクであれば、前回出力に用いたのと同じファイルが使われる。一番最初でブランクの時はユニット12「fort.12」が割り当てられる。ファイル名の左側にはブランクを作らず、11コラム目からファイル名を入力すること。前に指定したのと同じ名前を入力すると、前のデータが消されてしまうので注意が必要である。同じファイルに次々出力したいのであればファイル名は最初の一回目だけ指定し、二回目以降はブランクとする必要がある。

#### 3.9.2 層と成分の指定

NAMP=0の時、この項のデータは不要である。

ここでは、増幅スペクトルを計算する層の番号と計算に用いる波形の種類を指定する。層の番号は上（地表）から1, 2, ...と数える。

周波数増幅スペクトルは二つの層の応答関数の比である。従って、データは二つの層の番号を指定する必要がある。一行に5組の層番号を入力するようになっているので、必要な組数だけデータを続ける。

**(LAYERO(I), LAYERI(I), I=1,NAMP)** (10I5)

LAYERO(I)      絶対値は対象層（objective layer）の層番号。

LAYERI(I)      絶対値は基準層（reference layer）の層番号。

それぞれの層に対し、入力された層番号が正の時は複合波、負の時は入射波を表す。層番号は、地表から1,2,...と数える。

IMULT=2（二方向入力）の際には、x 方向、y 方向の順で出力される。

### 3.10 応答スペクトルの計算

この節では、作業識別文字「SPECOUT」に対する入力方法を説明する。必要に応じ何回でも計算することが出来る。出力方法については4章参照。

#### 3.10.1 出力に関する指示

NRESP, NDMP, OUTFIL
---------------------

 (2I5, A20)

- |       |        |  |
|-------|--------|--|
| 1～ 5  | NRESP  | 出力する応答スペクトルの数  |
| 6～10  | NDMP   | 出力する減衰定数の数 (10以下)  |
| 11～30 | OUTFIL | 出力するファイル名。ブランクであれば、前回出力に用いたのと同じファイルが使われる。一番最初でブランクの時はユニット12「fort.12」が割り当てられる。ファイル名の左側にはブランクを作らず、11コラム目からファイル名を入力すること。前に指定したのと同じ名前を入力すると、前のデータが消されてしまうので注意が必要である。同じファイルに次々出力したいのであればファイル名は最初の一回目だけ指定し、二回目以降はブランクとする必要がある。 |

#### 3.10.2 層と減衰の指定

ここでは、応答スペクトルを出力する層の番号と用いる波形の種類を指定する。層の番号は上(地表) から1, 2, ...と数える。全部で NRESP 行の入力が必要である。

LAYER, ITYP, (DMP(I), I=1,NDMP)
---------------------------------

 (2I5,10F5.0)

- |      |        |  |
|------|--------|--|
| 1～ 5 | LAYER  | 絶対値は層番号。入力された層番号が正の時は複合波、負の時は入射波を用いて計算する。  |
| 6～10 | ITYP   | 出力の種類<br>=1：絶対加速度<br>=2：相対速度 (絶対速度ではない)<br>=3：相対変位   |
| 11～  | DMP(I) | 減衰定数 (%)。もし NDMP 個の減衰が必要なければ、0 (またはブランク) を入力する。この場合、対応する応答は計算しない。従って、無減衰の系の計算は出来ないので、必要であれば非常に小さい値 (たとえば1.e-10) を入力する。 |

IMULT=2 (二方向入力) の際には、x 方向、y 方向の順で出力される。

### 3.11 フーリエスペクトルの出力

この節では、作業識別文字「FOURIE」に対する入力方法を説明する。FOURIE は必要に応じ何度でも繰り返し使うことが出来る。出力方法については4章参照。Fourier スペクトルは Fourier 振幅に  $T/2$  ( $T$ は継続時間) を乗じたものである。

#### 3.11.1 出力に関する指示

NWAVE, NBAND, OUTFIL	(2I5, A20)
----------------------	------------

1～ 5 NWAVE 出力するフーリエスペクトルの数。ただし、NWAVE<0の時は別の意味を持っている。

=1：全層の加速度，絶対速度，相対変位（複合波：E+F）

=2：全層の加速度，絶対速度，相対変位（入射波：E）

=3：全層のせん断ひずみ（%）

=4：全層のせん断応力（せん断ひずみ×せん断剛性）

=5：全層のせん断応力（減衰を履歴減衰として考慮）。

6～10 NBAND 三角形ウインドウによる平滑化を行うときの片側バンド幅。NBAND=0であれば平滑化は行わない。

NBND と平滑化バンド幅  $f_w$  (Hz) との関係は次の通り。

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

ここで、N は解析データ数（2のべき乗）， $\Delta t$  は時間増分である。

11～30 OUTFIL 出力するファイル名。ブランクであれば、前回出力に用いたのと同じファイルが使われる。一番最初でブランクの時はユニット12「fort.12」が割り当てられる。ファイル名の左側にはブランクを作らず、11コラム目からファイル名を入力すること。前に指定したのと同じ名前を入力すると、前のデータが消されてしまうので注意が必要である。同じファイルに次々出力したいのであればファイル名は最初の一回目だけ指定し、二回目以降はブランクとする必要がある。

#### 3.11.2 層と成分の指定

NWAVE<0の時、この項のデータは不要である。

ここでは、フーリエスペクトルを出力する層の番号と種類を指定する。層の番号は上から1, 2, ... と数える。

この節の入力は、2行が一组で、10個のフーリエスペクトルを指定することが出来る。NWAVE の数が10より多いときは、必要な組数だけデータを用意する。2行のうち、最初の行は層番号を指定し、1行に10個の番号を書く。二行目は出力する時刻歴の種類で、層番号の直下に種類を示す番号を書く。

(LAYER(I), I=1,NWAVE)	(10I5)
-----------------------	--------

(LOUT(I), I=1,NWAVE)	(10I5)
----------------------	--------

LAYER(I) 層番号

LOUT(I) フーリエスペクトルの種類。

=1：加速度，絶対速度，相対変位（複合波：E+F）

=2：加速度，絶対速度，相対変位（入射波：E）

=3：せん断ひずみ（%）

=4：せん断応力（せん断ひずみ×せん断剛性）

=5：せん断応力（減衰を履歴減衰として考慮）

IMULT=2（二方向入力）の際には、x 方向、y 方向の順で出力される。



### 3.12 周波数依存材料特性の出力

この節では、作業識別文字「FREQPROP」に対する入力方法を説明する。FREQPROP は必要に応じて何度でも繰り返し使うことが出来る。各周波数ごとに加速度、速度、変位、せん断ひずみ、せん断定数、減衰定数が出力される。

#### 3.12.1 出力に関する指示

**NWAVE, OUTFIL** (I5, 5X, A20)

1～ 5 NWAVE 出力する層の数。ただし、NWAVE<0の時は別の意味を持っている。  
=-1：全層を出力する。

11～30 OUTFIL 出力するファイル名。空白であれば、前回出力に用いたのと同じファイルが使われる。一番最初で空白の時はユニット12「fort.12」が割り当てられる。ファイル名の左側には空白を作らず、11コラム目からファイル名を入力すること。前に指定したのと同じ名前を入力すると、前のデータが消されてしまうので注意が必要である。同じファイルに次々出力したいのであればファイル名は最初の一回目だけ指定し、二回目以降は空白とする必要がある。

#### 3.12.2 層の指定

NWAVE<0の時、この項のデータは不要である。

ここでは、周波数依存材料特性を出力する層の番号を指定する。層の番号は上から1, 2, ...と数える。

この節の入力は、一行で10個の層を指定することが出来る。NWAVE の数が10より多いときは、必要な数だけデータを用意する。

**(LAYER(I), I=1,NWAVE)** (10I5)

LAYER(I) 層番号

IMULT=2（二方向入力）の際には、x 方向、y 方向の順で出力される。

### 3.13 弾性定数の出力

この節では、作業識別文字「ELASTMODEL」に対する入力方法を説明する。ELSTMD は非常に特殊な作業で、実際に計算をするわけではない。与えられた非線形のデータをもとに、弾性の材料特性データを作成するだけの機能である。すなわち、材料特性を与える「MATERIAL」と層に関する特性を与える「LAYER」に相当するデータを出力する。また、卓越周期が印刷される。出力した後、プログラムは実行を終了する。出力では、材料番号と層番号は同じになり、上から順番につけられる。

GAME, OUTFIL
--------------

 (F10.0, A40)

- |       |        |  |
|-------|--------|--|
| 1～10  | GAME   | 剛性と減衰を計算するひずみ。全層に対して同じひずみが適用される。通常は0を入れると弾性の定数となる。また、同じひずみに対する非線形特性が欲しいときには、そのひずみを入力すれば良い。 |
| 11～50 | OUTFIL | 出力するファイル名。空白であれば ELAST.out が割り当てられる。   |

### 3.14 沢田らの略算法による計算

この節では、作業識別文字「SAWADA」に対する入力方法を説明する。この方法は地震応答解析は行わない簡易法である。出力後プログラムは終了する。最大値ファイルへの出力もおこなわれる（当然、加速度と減衰の値は0として）。

#### (1) 基本データ

NSPEC, ISPEC, IPEROD, DMPSP, COEF, FACT (3I5, 5X, 3F10.0)

1～ 5 NSPEC スペクトルデータの数。ただし、負の時には、絶対値に応じて既往のスペクトル（下表）を使うことを意味する。この場合、ISPEC と DMPSP は意味がない。また、FACT を指定する必要がある。

道路橋示方書1996年版	地盤種別		
	I 種	II 種	III 種
標準加速度応答スペクトル (Gal)	-1	-2	-3
タイプ I の標準加速度応答スペクトル (Gal)	-4	-5	-6
タイプ II の標準加速度応答スペクトル (Gal)	-7	-8	-9

鉄道構造物等設計標準 1999年版	地盤種別								
	G0	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	液状化
レベル1地震動 (Gal)	-10	-11	-12	-13	-14	-15	-16	-17	-34
L2地震動スペクトル I (Gal)	-18	-19	-20	-21	-22	-23	-24	-25	-35, -36
L2地震動スペクトル II (Gal)	-26	-27	-28	-29	-30	-31	-32	-33	-37, -38

注) 液状化は、 $5 < P_L < 20$  と  $20 < P_L$  で分かれている。

6～10 ISPEC 入力するスペクトルの種類  
 =0: 地表の基盤に対する相対変位のスペクトル  
 =1: 地表の絶対加速度応答スペクトル

11～15 IPEROD 周期の計算方法  
 =0: 平均  $V_s$  を用いる。  $T = 4H / \bar{V}_s$ ,  $\bar{V}_s = \sum_i V_{si} H_i / H$  (建築方式)  
 =1: 等価伝播時間を用いる。  $T = 4 \sum_i H_i / V_{si}$  (土木方式)。一般に大きめの周期を与える。  
 =2: 増幅函数の極大値より決定する。もっとも正確。  
 =3: 沢田の方法による。建築、土木方式に比べれば精度は相当高い。

21～30 DMPSP ISPEC=1の時のみ意味があり、応答スペクトルを計算したときの減衰定数(%ではなく、実際の値)。

31～40 COEF 補正係数。変位スペクトルと応答スペクトルの関係は下式で表されるが、この際の  $C_N C_A$  の積である。

$$u_{smax}(T) = \frac{h_s T^2}{4\pi^2} S_a(T) \cdot C_N C_A$$

41～50 FACT NSPEC<0の時のみ意味があり、既往のスペクトルで用いている単位系と解析で用いている単位系の変換係数。たとえば、既往のスペクトルが  $\text{cm/s}^2$  (Gal) で定義されており、解析では m を用いているとすれば、0.01を入力する。

#### (2) 周波数読み込みの制御データ

この項と次の項は、NSPEC>0の時のみ必要である。

IDTYP, NSKP1, NSKP2, FILNAM, FORM, AMULT (3I5, 5X, 2A20, F10.0)

1～ 5 IDTYP スペクトルの入力方法を指示する。  
 =0: 周期のデータを先に呼んでからスペクトルの値を読み込む。

- =1：周波数のデータを先に呼んでからスペクトルの値を読み込む。  
 =2：周期とデータを，(PERIOD(I), SPEC(I), I=1, NSPEC)の様に読み込む。  
 =3：周波数とデータを，(FREQ(I), SPEC(I), I=1, NSPEC)の様に読み込む。
- 6～10 NSKP1 ファイルの先頭にある不要な行数。これだけの行を読み飛ばした後データを読みに行く。
- 11～15 NSKP2 IDTYP=0, 1の時のみ意味があり，周期（または周波数）のデータを読み込んだ後，スペクトルのデータを読むまでの間の不要な行数。
- 21～40 FILNAM スペクトルが入っているファイルの名称。ここがブランクになっていると，カードから読み取ることになり，このカードの後にスペクトルのデータをつける。
- 41～60 FORM データを読むときのフォーマットで，必ず括弧でくくられていること。
- 61～70 AMULT スペクトル値に掛ける定数。入力しないと1.0が割り当てられる。

### (3) スペクトル値

周期（周波数）とスペクトル値	FORM
----------------	------

これまでの入力に従い，周期（周波数）とスペクトル値を読み込む。なお，入力はず小さい周期から大きい周期になるように入力しなければならない。反対になっているときはプログラムが並べ替える様にはなっているが，並べ替えたデータが入力されたとして扱われるので，データの番号の印刷が変わる可能性がある。

### 3.15 DYNEQ の特殊な設定

この節では、作業識別文字「DYNEQ」に対する入力方法を説明する。この作業は通常のユーザーにとっては不用で、非常に特殊なことをしたいときに用いるものである。

IDYNEQ, GAMELA, POWER
-----------------------

(I5, 5X, 2F10.0)

1～ 5 IDYNEQ 周波数に対する有効ひずみの決定法（通常は3）

=1：ひずみの Fourier スペクトルから、両対数軸で最小自乗法を用いて以下の式の  $a$  を決定する。

$$\begin{cases} \gamma_{eff} = \gamma_{max} & f \leq f_p \\ \log \gamma_{eff} = a \{ \log f - \log f_p \}^m + \gamma_{max} & f > f_p \end{cases}$$

=2：ひずみの Fourier スペクトルから、実軸で最小自乗法を用いて以下の式の  $a$  を決定する

$$\begin{cases} \gamma_{eff} = \gamma_{max} & f_p > f \\ \gamma_{eff} = a \{ \log f - \log f_p \}^m + \gamma_{max} & f_p \leq f \leq f_e \\ \gamma_{eff} = 0 & f > f_e \end{cases}$$

=3：対数軸で非線形域を設定（現在の方法）

$$\begin{cases} \gamma_{eff} = \gamma_{max} & f_p > f \\ \gamma_{eff} = \gamma_{max} \left\{ 1 - \left( \frac{\log f - \log f_p}{\log f_e - \log f_p} \right)^m \right\} & f_p \leq f \leq f_e \\ \gamma_{eff} = 0 & f > f_e \end{cases}$$

=4：実軸で非線形域を設定

$$\begin{cases} \gamma_{eff} = \gamma_{max} & f_p > f \\ \gamma_{eff} = \gamma_{max} \left\{ 1 - \left( \frac{f - f_p}{f_e - f_p} \right)^m \right\} & f_p \leq f \leq f_e \\ \gamma_{eff} = 0 & f > f_e \end{cases}$$

11～20 GAMELA 従来の非線形域から弾性域に移行する際に、弾性域の有効ひずみは0ではなく、この値とする。なお、GAMELA<0の値を入力すると、最大ひずみの|GAMELA|倍を限界ひずみとする。当然、GAMELA>-1（絶対値が1より小さい）の必要がある。

21～30 POWER 上記の有効ひずみは高振動数になるほど小さくなる。それを制御するために、周波数の POWER 乗で有効ひずみが小さくなる。

## 4 出力

### 4.1 各種出力

DYNEQ で用意している出力は次のようなものがある。

- ①印刷：ユニット番号6に対して行われるもので、入力の情報、最大応答値などが印刷される。
- ②最低限の情報のファイル出力：ポストプロセッサプログラム POSTEQ 用に作成される書式付きのデータで、地層の情報、最大応答値などが出力される。3.2節で指定した MXFIL に出力される。内部的にはユニット13が用いられている。

内容は次の通りである。

#### 1)層数

NLAY (I5)

#### 2)地盤定数。基盤を含む層数行のデータ

ISOIL, THICK, WEI, GSEC, VS (I5, 4E15.8)

ISOIL：層番号で上の層から1, 2・・・と付けられている。

THICK：層厚

WEI：単位体積重量

GSEC：初期せん断弾性定数

VS：せん断波速度

#### 3-1)要素応答値（一方向入力）

DMP, GSEC, GAMMX, TAUMX (4E15.8)

DMP：減衰定数 (%)

GSEC：せん断定数

GAMMX：最大せん断ひずみ (%)

TAUMX：最大せん断応力=GSEC×GAMMX

#### 3-2)要素応答値（二方向入力）

DMP, GSEC, MAXMXX, TAUMXX, GAMMXY, TAUMXY (6E15.8)

DMP：減衰定数 (%)

GSEC：せん断定数

GAMMXX：最大せん断ひずみ (%)

TAUMXX：最大せん断応力=GSEC×GAMMXX

GAMMXY：最大せん断ひずみ (%)

TAUMXY：最大せん断応力=GSEC×GAMMXY

#### 4)加速度と変位。全層数行の出力

ACC, DISP, VEL (3E15.8)

ACC：最大絶対加速度

DISP：最大相対変位

VEL：最大速度（絶対，相対は IVELOT による）

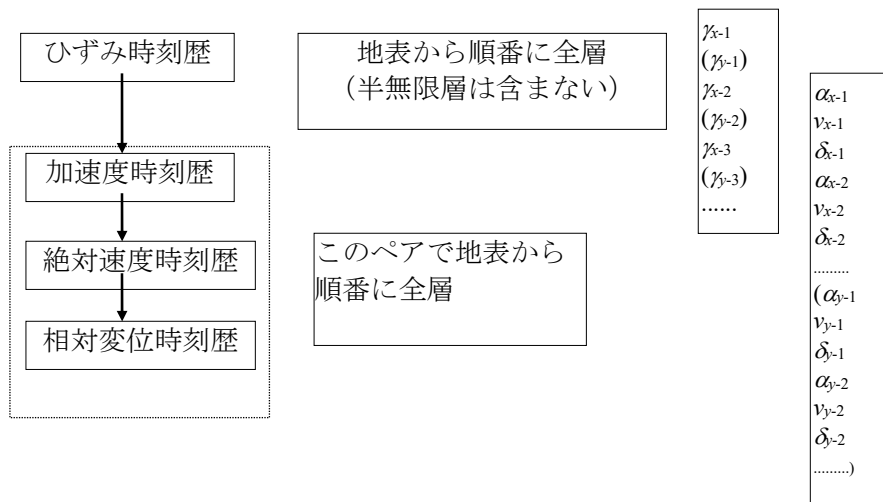
二方向入力の時は，最初に X 方向の全成分が出力された後 Y 方向の成分が出力

注) 周波数依存剛性や減衰を用いた場合，減衰 DMP とせん断定数 GSEC の出力は，通常の等価ひずみに対する値であり，各周波数成分ごとの値は出力されない。

- ③ひずみと加速度・速度・変位の時刻歴：ファイル名は「dyneq.tmp」でユーザーは変えることは出来ない。内部的にはユニット10が用いられている。

プログラムが作業用に用いる書式なしファイルで，ひずみと絶対加速度，絶対速度，相対変位の時刻歴が書き込まれている。一レコードに一つの時刻歴が書き込まれている。時刻歴のデ

ータ数はフーリエ級数展開に用いたデータ数である。書き込まれている順番は次の通りである。



#### ④時刻歴（ユーザー指定）

- 1) タイトル(A80)。ただし、78～80桁目は TIM と印刷され、後に6章で説明する VECTOR に利用される。
- 2) 波形の種類，層番号，データ数，時間増分  
層番号，データ数，時間増分は(27X,I8,7X,I8,5X,F12.5)で読み込むことが出来る。この行のエコーはユニット6に出力される。
- 3) 波形(1P8E10.3)：有効数字4桁で出力する。

#### ⑤周波数増幅関数（ユーザー指定）

- 1) タイトル(A80)。ただし、78～80桁目は AMP と印刷され、後に6章で説明する VECTOR に利用される。
- 2) 出力の種類（出力周波数），周波数の数  
周波数の数は、(55X,I8)で読み込むことが出来る。出力としては、層番号=0の文字も書かれている。この行のエコーはユニット6に出力される。
- 3) 周波数(1P8E10.3)：有効数字4桁で出力する。  
以下増幅関数ごとの繰り返し
- 4) タイトル(A80)。ただし、78～80桁目は AMP と印刷され、後に6章で説明する VECTOR に利用される。
- 5) 出力の種類（出力周波数），対象層・基準層の層番号，用いた波形の種類，スペクトルデータの数。このうち、対象層・基準層の層番号とスペクトルデータの数(31X,I3,10X,I3,8X,I8)で読み込むことが出来る。この行のエコーはユニット6に出力される。
- 6) 増幅関数(1P8E10.3)：有効数字4桁で出力する。

#### ⑥応答スペクトル（ユーザー指定）

- 1) タイトル(A80)。ただし、78～80桁目は RES と印刷され、後に6章で説明する VECTOR に利用される。
- 2) 出力の種類，周波数の数。周波数の数は(66X,I8)で読める。出力としては、層番号=0の文字も書かれている。この行のエコーはユニット6に出力される。
- 3) 周波数(1P8E10.3)：有効数字4桁で出力する。  
以下各減衰ごとの繰り返し
- 4) タイトル(A80)。ただし、78～80桁目は RES と印刷され、後に6章で説明する VECTOR に利用される。

- 5) 出力の種類（出力周波数），用いた波形の種類，周波数の数など。層位置，減衰定数，データ数は(26X,I3,24X,F6.2,7X,I8)で読める。この行のエコーはユニット6に出力される。
- 6) 応答スペクトル(1P8E10.3)：有効数字4桁で出力する。

#### ⑦フーリエスペクトル

- 1) タイトル(A80)。ただし，78～80桁目は FRE と印刷され，後に6章で説明する VECTOR に利用される。
- 2) 出力の種類，周波数の数。層番号，周波数の数は(42X,I8)で読める。出力としては，層番号=0の文字も書かれている。この行のエコーはユニット6に出力される。
- 3) 周波数(1P8E10.3)：有効数字4桁で出力する。  
以下各スペクトルごとの繰り返し
- 4) タイトル(A80)。ただし，78～80桁目は FRE と印刷され，後に6章で説明する VECTOR に利用される。
- 5) 出力の種類（出力周波数），用いた波形の種類，周波数の数など。層位置，データ数は(27X,I8,7X,I8)で読める。この行のエコーはユニット6に出力される。
- 6) 応答スペクトル(1P8E10.3)：有効数字4桁で出力する。

#### ⑧周波数依存材料特性

プログラムが内部記憶用に使っている。ファイル名として「dyneql.tmp」が割り当てられ，内部的には9番を用いている。常に最新のせん断定数と減衰定数が書き込まれている。(NT-1)×NLAY 行のデータがかかっている。一つの行には一組のせん断定数と減衰定数が書き込まれている。まず周波数（0を除く小さい方から），次に層（上から）に関する DO ループでかかっている。

コマンド FREQPROP を実行することにより，各層の全て（加速度，速度，変位，ひずみ，有効ひずみ，せん断定数，減衰）を周波数の関数として書式付きで取り出すことができる。ここで，加速度からひずみまでは Fourier 振幅であり，有効ひずみから減衰までが材料特性の周波数依存性を考慮したときの周波数依存性である。

#### ⑨ELASTMODEL に対する出力

MATERIAL，LAYER に相当する弾性のデータが出力される。

### 4.2 等価材料特性出力に対する注意

等価線形手法を用いた解析の流れは次のようになる。

- ①適当な剛性と減衰を仮定
- ②地震応答解析の実行
- ③最大ひずみの抽出
- ④等価ひずみの計算。
- ⑤剛性と減衰を等価ひずみより計算する。
- ⑥新しく求めた剛性・減衰を地震応答解析で用いた剛性・減衰と比較し，誤差範囲外であれば，②へ移動。誤差範囲内であれば計算終了。

5.2節の出力例に示されるように，②の解析で用いた値（剛性と減衰）は，Used，⑤で求められた値は New として示されている。したがって，New とついているのは，イタレーションが終わった計算に用いられた値ではなく，もう一度計算するとすれば用いるであろう値である。

一方，出力に用いられている最大ひずみは②の計算の結果得られたものである。剛性，減衰などはこの最大ひずみを元にして有効ひずみを算出し，これに対して計算されるので，New に対応した値である。つまり，最終計算に用いた剛性，減衰と最終結果として印刷される（およびその後で出力されるすべての量）剛性，減衰とは異なっている。この差はイタレーションにより誤差



が完全に0になっていけば生じないが、実際には有限の誤差で計算を打ち切っているために生じるものである。

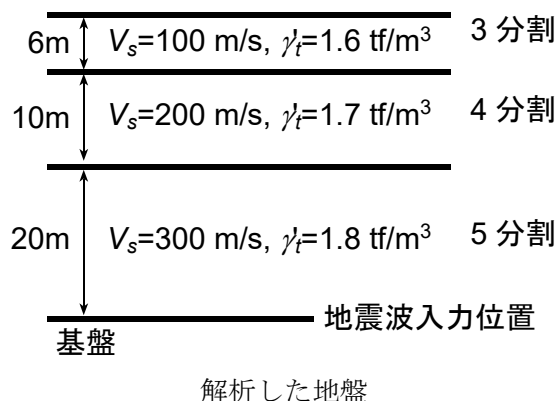
剛性、減衰に実際の計算で用いた値を出力するものも理論上可能ではあるが、その場合にはそれらを計算する根拠となった有効ひずみは最終計算の一つ前の計算により得られたものであり、最終計算で得られたものではないので、最大歪み（有効ひずみ）と出力される剛性、減衰とは対応しなくなる。

この差は、先にも述べたように、イタレーションが完全には終わっていないのが原因である。したがって、完全に矛盾のない出力を行うことは不可能である。DYNEQ では SHAKE に習って、前記のような出力をしている。

この出力の例外となっているのが、周波数依存材料特性の出力 (FREQPROP コマンド) である。ここでは、実際の計算に用いた最新の剛性、減衰が記憶され、出力されている。

## 5 使用例

下図に示すような3層（基盤を入れると4層）地盤を解析する。



### 5.1 入力データ

入力データは次のようである。

CONTROL	2	減衰の種類を SHAKE と同じにした。
TITLE	Example data for DYNEQ	タイトル
MATERIAL	4	材料の数=4
1 0 10 8 100.		最初の材料 表形式
1.E-6 1.E-5 3.16E-5 1.E-4 3.16E-4 1.E-3 3.16E-3 1.E-2		
0.998 0.987 0.962 0.889 0.719 0.444 0.202 0.074		
2. 2. 2. 2.22 5.62 11.1 16.0 19.0		
2 0 10 8 200.		二つ目の材料
1.E-6 1.E-5 3.16E-5 1.E-4 3.16E-4 1.E-3 3.16E-3 1.E-2		
0.999 0.995 0.984 0.952 0.863 0.666 0.387 0.166		
2. 2. 2. 2. 2.47 6.0 11.0 15.		
3 0 1 300.		三つ目の材料=Hardin-Drnevich モデル。ほとんどが層ごとに定義する予定なので、この入力では0が多い。
0.001 20. 2.		
4 0 0 500		四つ目の材料=弾性。減衰=0。基盤に用いる
0.		
LAYER		層数が13層（半無限層を含む）
13		
3 12.0 0. 0. 1.6		1～3層が材料番号1の層。層の補間機能を使っている。層厚は各層が2m
7 22.5 1.7		4～7層が材料番号2の層。
12 34.0 1.8		8～12層が同じ材料の層。
13 4 2.0		13層は半無限層で材料番号4。半無限層なので、層厚の入力は不要である。
EARTHQUAKE		・地震波。1000のデータで2048ステップ計算する。DT=0.01, 10Hz 以下しか考慮しない。
1000 20480.01 10.		・地震波は基盤（13層）に複合波（E+F）として入力。cm/s <sup>2</sup> に1/100をかけたものを m/s 単位として入力。
1 0 13 2 0.01 EL-Centro 1940 N-S		地震応答解析の実行。散乱減衰なし。DYNEQ
EI-NS.wav (8F9.0)		
RESPONSE		時刻歴の出力の指示。全部で4つの出力を time.out というファイルに出力。3行目は層番号で、1, 2, 2, 4層を指示。3行目は出力の種類で、（加速度、速度、変位）、せん断ひずみ、履歴を考慮したせん断応力、（加速度、速度、変位）
0 1		スペクトル比の出力で、1層/13層の結果を出力。また、卓越周期を最初から三つ求める。
TIMERESP		
4 time.out		
1 2 2 4		
1 3 5 1		
AMPRESP		
1 3amp.out		
1 13		
SPECOUT		
1 3resp.out		
1 12. 5. 10.		
FOURIE		
2 fou.out		
1 13		
5 1		
END		作業終了

### 5.2 出力

次の内容が印刷される。（一部省略がある。また、各行の最初の0, 1などは FORTRAN におけ

る印刷用の制御コードである) これ以外に、指定したデータがファイルに出力されるが、これはファイルをみれば明らかなので、ここでは示さない。

DYNEQ Version 3.20      December, 2001	DYNEQ のバージョン
Control input Number of array size for nonlinear ---- 20 Number of max. iterations ----- 100 Flag on damping ----- 2: 1-2h <sup>2</sup> +2ih(1-h <sup>2</sup> ) <sup>0.5</sup> Flag on shake direction ----- 1: 1-directional Acceleration of gravity ----- 9.8067 Error for convergence (%) ----- 5.0000 Coefficient for equivalent strain ----- 0.650000 Unit weight of water ----- 1.000000 File name for peak response ----- DYNEQ.max	COTROL における入力。デフォルトで使われた事項以外にもすべて出力される。
===== Example data for DYNEQ ===== ===== Material property                      Total=    4 MAT Scat   MAT Tabl                      Vs                      Unit Coef. Freq. dependent damping   Min.Dmp.                      Confining stress dep. No. Type size                      weight eqvlt                      Maxwell                      Sorokin                      (%)                      Coef-a                      Sigmp                      Power Soil name 1    0    10    8 0.00000e+00    100.00    0.000   0.650    0.00000e+00   0.00000e+00    0.00    0.00000e+00    0.00000e+00 0.00000e+00 2    0    10    8 0.00000e+00    200.00    0.000   0.650    0.00000e+00   0.00000e+00    0.00    0.00000e+00    0.00000e+00 0.00000e+00 3    0    1    2 0.00000e+00    300.00    0.000   0.650    0.00000e+00   0.00000e+00    0.00    0.00000e+00    0.00000e+00 0.00000e+00 4    0    0    2 0.00000e+00    500.00    0.000   0.650    0.00000e+00   0.00000e+00    0.00    0.00000e+00    0.00000e+00 0.00000e+00	材料特性の印刷。Vs の値は入力されているが、単位体積入力が入力されていないので、せん断弾性定数の値は0になっている。
--- Elastic property --- Mat. No.   Damping ratio (%) 4            0.0000  --- Hardin-Drnevich type --- Mat No.   Ref. strn   H-max.   H-min.   in % 3   1.000e-03    20.000    2.000  --- Property by table --- Mat No.                      Table contents 1    Strain    1.000e-06   1.000e-05   3.160e-05   1.000e-04   3.160e-04   1.000e-03   3.160e-03   1.000e-02 Mod.ratio   0.998000   0.987000   0.962000   0.889000   0.719000   0.444000   0.202000   0.074000 Damp. (%)    2.000       2.000       2.000       2.220       5.620       11.100       16.000       19.000 2    Strain    1.000e-06   1.000e-05   3.160e-05   1.000e-04   3.160e-04   1.000e-03   3.160e-03   1.000e-02 Mod.ratio   0.999000   0.995000   0.984000   0.952000   0.863000   0.666000   0.387000   0.166000 Damp. (%)    2.000       2.000       2.000       2.000       2.470       6.000       11.000       15.000	各材料特性ごとにキーとなるパラメータが印刷される。表形式ではデータの値も印刷される。
===== Ground characteristics                      Total layer=    13    Water table lies layers between    13 and    14  Layer Mat.    Depth    Thickness    Unit                      Shear                      Velocity                      Maxwell                      Sorokin                      Min.Dmp.    Sig-vp No.    No.                      Weight                      Modulus 1    1    2.0000    2.0000    1.6000    1631.5    100.00    0.00000e+00   0.00000e+00    0.00    1.6000 2    1    4.0000    2.0000    1.6000    1631.5    100.00    0.00000e+00   0.00000e+00    0.00    4.8000 3    1    6.0000    2.0000    1.6000    1631.5    100.00    0.00000e+00   0.00000e+00    0.00    8.0000 4    2    8.5000    2.5000    1.7000    6934.1    200.00    0.00000e+00   0.00000e+00    0.00    11.725 5    2    11.000    2.5000    1.7000    6934.1    200.00    0.00000e+00   0.00000e+00    0.00    15.975 6    2    13.500    2.5000    1.7000    6934.1    200.00    0.00000e+00   0.00000e+00    0.00    20.225 7    2    16.000    2.5000    1.7000    6934.1    200.00    0.00000e+00   0.00000e+00    0.00    24.475 8    3    20.000    4.0000    1.8000    16519.    300.00    0.00000e+00   0.00000e+00    0.00    30.200 9    3    24.000    4.0000    1.8000    16519.    300.00    0.00000e+00   0.00000e+00    0.00    37.400 10   3    28.000    4.0000    1.8000    16519.    300.00    0.00000e+00   0.00000e+00    0.00    44.600 11   3    32.000    4.0000    1.8000    16519.    300.00    0.00000e+00   0.00000e+00    0.00    51.800 12   3    36.000    4.0000    1.8000    16519.    300.00    0.00000e+00   0.00000e+00    0.00    59.000 13   4                      2.0000    50986.    500.00	各層の乗数。
===== Earthquakes  Number of acc. data ----- 1000 Number of time increment ----- 2048 Time increment ----- 0.010000 Cut-off frequency ----- 10.00 Fourier term ----- 205 Number of lines skipped ----- 1 Number of time increment for output --- 1000 Location of acceleration input ----- 13 Type of acceleration input ----- 2 :E+F Name of earthquake ----- EL-Centro 1940 N-S Peak acceleration (input) ----- -314.50 time ----- 2.0000 Peak acceleration (used) ----- -3.1450 Peak acceleration (filtered) ----- -3.0944 time ----- 1.9900 Multiplication factor ----- 0.10000e-01 File name ----- EI-NS.wav FORMAT ----- (8F9.0)	地震波の定義。 最大値については、まず、入力値の最大値が (input) として示され、次に、これに入力で示された倍率を掛けた値が (used) として示されている。最後に、フィルター処理された災害地が (filtered) として示されている。この例では、入力が50Hz であるのに対し、10Hz までしか考慮しないことになっているので、その値は異なる。なお、この例では小さくなっているが、常に小さくなるとは限らない。
Earthquake response analysis  Frequency dependency ----- 2 : Dependent (DYNEQ) Half band width of tri. smoothing ----- 0 DYNEQ analysis    Power ----- 2.000                      Higher frequency ---    15.000 Hz Global damping by scattering ----- 0 : Not considered	地震応答解析に対する指示

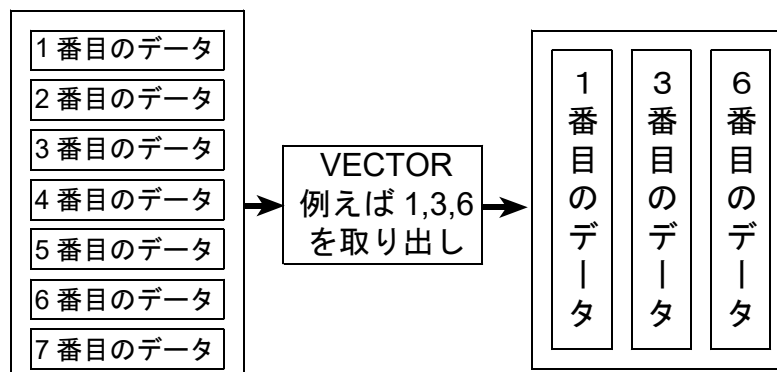
<pre> ===Iteration ==      1  Layer  Eff-strain  ----- Shear modulus ---- Error      Damping (%)      Error No.      (%)              Used      New      (%)      Used      New      (%) 1      0.1398      1610.3      609.35      -164.27      2.00      12.53      84.04 2      0.4065      1610.3      283.93      -467.15      2.00      16.66      87.99 3      0.6560      1610.3      197.16      -716.76      2.00      17.90      88.83 4      0.2109      6899.4      3363.1      -105.15      2.00      9.24      78.36 5      0.2697      6899.4      2950.2      -133.87      2.00      10.31      80.60 6      0.3195      6899.4      2668.8      -158.52      2.00      11.04      81.88 7      0.3586      6899.4      2515.3      -174.30      2.00      11.44      82.52 8      0.1667      16356.      6193.2      -164.09      2.00      12.50      84.00 9      0.1806      16356.      5886.4      -177.86      2.00      12.87      84.46 10     0.1891      16356.      5713.3      -186.28      2.00      13.08      84.71 11     0.1926      16356.      5644.9      -189.74      2.00      13.17      84.81 12     0.1916      16356.      5665.9      -188.67      2.00      13.14      84.78 </pre>										一回目のイタレーションの結果が示されている。ここで、Usedはこの計算で使われた値、Newは次の解析で使われる値である。
<pre> ===Iteration ==      18  Layer  Eff-strain  ----- Shear modulus ---- Error      Damping (%)      Error No.      (%)              Used      New      (%)      Used      New      (%) 1      0.0186      1300.3      1300.6      0.02      4.06      4.06      -0.07 2      0.2174      444.39      457.85      2.94      14.58      14.41      -1.16 3      6.0972      24.352      23.798      -2.33      19.00      19.00      0.00 4      0.0190      6260.4      6256.1      -0.07      2.26      2.26      0.14 5      0.0412      5667.6      5668.6      0.02      3.29      3.29      -0.08 6      0.0717      5010.2      5012.5      0.05      4.99      4.98      -0.12 7      0.1146      4389.5      4388.9      -0.01      6.59      6.59      0.03 8      0.0673      9864.8      9871.2      0.07      8.06      8.05      -0.10 9      0.1140      7698.6      7718.7      0.26      10.68      10.66      -0.23 10     0.1763      5955.3      5978.0      0.38      12.79      12.76      -0.21 11     0.2161      5215.7      5226.8      0.21      13.69      13.67      -0.10 12     0.2838      4358.1      4304.2      -1.25      14.72      14.79      0.44 </pre>										途中を省略し、18回目のイタレーションの結果が示されている。ここで、誤差が5%を切ったので計算が終わる。以下の計算では、New で示された値を用いた計算が行われる。
<pre> ===== Example data for DYNEQ ===== EL-Centro 1940 N-S ===== Peak response Layer  Mat.  Thickness  Depth  Max-strain  Time  Stress      Time  Shear  Damping No.    No.              (%)              Velocity  Modulus  (%) 1      1      2.0000      1.0000      0.0286      5.7800      0.33699      3.0400      1300.6      4.06 2      1      2.0000      3.0000      0.3345      5.7900      0.99140      3.0400      457.85      14.41 3      1      2.0000      5.0000      9.3802      5.7600      1.4586      5.7000      23.798      19.00 4      2      2.5000      7.2500      0.0293      5.4500      1.7904      5.4500      6256.1      2.26 5      2      2.5000      9.7500      0.0634      2.6200      3.5045      2.6200      5668.6      3.29 6      2      2.5000      12.2500      0.1103      2.6200      5.2778      2.6200      5012.5      4.98 7      2      2.5000      14.7500      -0.1763      2.2000      6.6388      2.6100      4388.9      6.59 8      3      4.0000      18.0000      -0.1036      2.2100      -8.4279      2.1900      9871.2      8.05 9      3      4.0000      22.0000      -0.1754      2.2200      -10.409      2.2000      7718.7      10.66 10     3      4.0000      26.0000      -0.2713      2.2300      -11.806      2.2000      5978.0      12.76 11     3      4.0000      30.0000      -0.3324      2.2300      12.638      5.3700      5226.8      13.67 12     3      4.0000      34.0000      0.4366      2.7200      13.462      2.7100      4304.2      14.79  Layer  Depth  Absolute      Time  Absolute      Time  Relative      Time No.              Acceleration  Velocity  Displacement 1      0.0000e+00      2.0558      3.0400      -0.57446      4.8800      -0.17463      5.6700 2      2.0000      2.0163      3.0400      -0.57105      4.8700      -0.17414      5.6800 3      4.0000      1.9332      5.7100      -0.55269      4.8400      -0.16873      5.6700 4      6.0000      4.9828      2.6100      -0.58358      2.3600      0.58788e-01      2.2200 5      8.5000      4.7898      2.6100      -0.57613      2.3600      0.58424e-01      2.2200 6      11.000      -4.4360      2.1900      -0.55744      2.3500      0.57108e-01      2.2200 7      13.500      -4.0022      2.1900      -0.52554      2.3400      0.54571e-01      2.2200 8      16.000      3.4965      1.9400      -0.47828      2.3300      0.50241e-01      2.2200 9      20.000      3.3034      1.9300      -0.47203      2.4400      0.46186e-01      2.2300 10     24.000      3.7503      2.5200      -0.45840      2.4400      -0.39503e-01      5.4200 11     28.000      3.4269      2.5100      -0.41586      2.4300      -0.30009e-01      2.7200 12     32.000      -2.7065      2.3500      -0.37628      4.3900      -0.17416e-01      2.7200 13     36.000      -3.0944      1.9900      -0.41305      2.1200      0.00000e+00      0.0000 </pre>										最大応答値とそのときの時間を示している。最大値は符号付である。  なお、周波数依存型の剛性と減衰を用いている場合、ここで示される剛性と減衰は、有効ひずみ ( $\gamma_{eff} = \alpha \gamma_{max}$ ) が使われている物ではそのひずみに対する値、係数 $\alpha$ を用いていない時には、 $\gamma_{max}$ に対する値である。
<pre> == Time history == Number of waves (NNAVE) ----- 4 Number of time increment ----- 1000 File name for time history ----- time.out Acceleration(E+F) At Layer= 1 Data= 1000 dt= 0.10000e-01 Velocity (E+F) At Layer= 1 Data= 1000 dt= 0.10000e-01 Displacement(E+F) At Layer= 1 Data= 1000 dt= 0.10000e-01 S. strain (%) At Layer= 2 Data= 1000 dt= 0.10000e-01 S. S. (w/d) (w/D) At Layer= 2 Data= 1000 dt= 0.10000e-01 Acceleration(E+F) At Layer= 4 Data= 1000 dt= 0.10000e-01 Velocity (E+F) At Layer= 4 Data= 1000 dt= 0.10000e-01 Displacement(E+F) At Layer= 4 Data= 1000 dt= 0.10000e-01 </pre>										時刻歴の出力。一つのデータの出力に対し、カードのヘッダの部分が印刷されている。1, 4層では、一つの入力で加速度、速度、変位の三つの出力が行われている。
<pre> == Amplification spectrum == Number of spectrum (NAMP) ----- 1 Number of predominant period ----- 3 File name for time history ----- amp.out Amplification ratio Freq. (Layer 0) / (Layer 0) Data= 205 Amplification ratio (Layer 1) / (Layer 13) Data= 205 Mode = 1 Freq. = 0.48198 Period = 2.0748 Mode = 2 Freq. = 1.2117 Period = 0.82526 Mode = 3 Freq. = 2.7804 Period = 0.35967 </pre>										増幅比（スペクトル比）の出力情報。さらに、三つの増幅比が極大となる周期と周波数が印刷されている。また、(Layer 0)/(Layer 0)となっているのは計算した周波数である。
<pre> == Response spectrum == Number of spectrum (NRESP) ----- 1 Number of damping ratios ----- 3 File name for time history ----- resp.out Resp. spec. 0 Frequency Damp= 0.00% Data= 205 Response spectrum Layer= 1 (E+F) Abs. accel. Damp= 2.00% Data= 205 Response spectrum Layer= 1 (E+F) Abs. accel. Damp= 5.00% Data= 205 Response spectrum Layer= 1 (E+F) Abs. accel. Damp= 10.00% Data= 205 </pre>										応答スペクトルの出力情報。

<pre>== Fourier spectrum == Number of spectrum (NFOUR) ----- 2 Half band width for smoothing ----- 0 File name for time history ----- fou.out Frequency      At Layer= 0 Data= 205 Fouri. (sts) (w/D) At Layer= 1 Data= 205 Fouri. (acc) (E+F) At Layer= 13 Data= 205 Fouri. (vel) (E+F) At Layer= 13 Data= 205 Fouri. (dis) (E+F) At Layer= 13 Data= 205</pre>	フーリエスペクトルの出力情報。なお、「At Layer= 0」として示されているカードは計算した周波数である。
Job finished successfully	作業が無事終わったといううれしい知らせ。

## 6 ポストプロセッサ

### 6.1 VECTOR

DYNEQ では、地震応答解析として必要な計算結果のほとんどが出力できる。出力は、ファイルに行われる。このファイルは、前章で見たように、各データブロックごとの出力である。これらのデータは通常数字だけでは意味を持たず、図化する事により意味を持ってくる。自分で FORTRAN の作図プログラムを作成するのであれば、DYNEQ の出力をそのまま利用できるのも、特に問題はない。しかし、最近では Mach や Windows といったパソコンを利用した作図ソフトで作図をすることも多い。この場合、DYNEQ の出力は利用するのに不便で、同じデータが、下図のように縦に並んでいることの方が都合がよい。ここで示す、VECTOR はそのような処理をするプログラムである。



#### 6.1.1 データの入力方法

NC	自由 format
変換するデータの数	
FILIN	(A20)
1~20 NC	入力用ファイル名 (DYNEQ の出力ファイル名)。ブランクの時、ユニット 10番 (fort.10) が割り当てられる。
ILOUT	(A20)
1~20 NC	出力用ファイル名。ブランクの時、ユニット11番 (fort.11) が割り当てられる。

(KC(I), I=1,NC)	(10I5)
1~ KC	出力するデータの番号。最初のデータブロックから1,2,...と数えていく。
注) 現在の NC の制限は100個、また、時刻歴やフーリエ級数の数の制限は4000であるが、プログラムの PARAMETER 文を変えることで簡単に変更することが出来る。	
注) 出力は10個のデータおきに行われる。また、例えば時刻歴とフーリエスペクトルが同じファイルに入っている場合、これらを同じ書式で出力するのは意味がないことから、時刻歴から周波数の関数 (増幅関数、応答スペクトル、フーリエスペクトル) に変わったとき、またこの逆の場合一旦出力される。	

#### 6.1.2 出力

出力は、印刷 (ユニット6番) とファイルである。印刷では、入力ファイルから読み込んだデータブロックのタイトル、2行目の内容が印刷され、さらにそのデータがファイル出力されたか、出力されずスキップしたかが印刷される。

ファイル出力は2行の説明行と、データで構成される。2行のうち一行目には入力ファイルの2行目の出力の最初の8文字がそのまま印刷されるので、以下のコラムの内容が何かを判定する手が

かりとすることが出来る。2行目は以下のコラムの層番号などが出力される。ただし、次のように変換されている。

#### ①時刻歴出力

層の番号

#### ②周波数増幅関数

(対象層の層番号) × 1000 + (基準層の層番号)

すなわち、1000以上の数字が対象層の層番号で、100以下の数字が基準層の層番号

#### ③応答スペクトル

(層番号) × 1000 + (減衰 (%)) の整数部

すなわち、1000以上の数字が層番号、100以下の数字は減衰 (%)

#### ④フーリエスペクトル

層番号

### 6.1.3 出力例

6章で示した例題に関する出力の例は次のようなものである (全てが出力されているわけではない)

#### ①時刻歴

Accelera	Shear st	Shear st	Accelera
1	2	2	2
-2.557E-03	-6.246E-02	1.969E+00	1.300E+00
-2.369E-03	-8.819E-02	2.059E+00	1.201E+00

以下省略

加速度、せん断ひずみ、せん断応力、加速度が出力されている。このうちせん断ひずみとせん断応力はこの情報からは区別できないが、これは仕方がない。  
左から、1, 2, 2, 4層のデータが出力されている。

#### ②周波数増幅関数

Amplific	Amplific
0	1013
0.000E+00	4.883E+00
4.883E-02	4.932E+00

以下省略

層番号が0であるので、周波数の値であることが分かる。  
1013は1層の応答 / 13層の応答であることを意味している。

#### ③応答スペクトル

Response	Response	Response	Response
0	1002	1005	1010
0.000E+00	4.883E+00	9.766E+00	0.000E+00
4.883E-02	4.932E+00	9.814E+00	0.000E+00

層番号が0であるので、周波数の値であることが分かる。  
1002は1層の応答で、減衰が2%を示している。

#### ④フーリエスペクトル

Frequency	Fouri.(s	Fouri.(a	Fouri.(v
0	1	13	13
0.000E+00	4.883E+00	9.766E+00	0.000E+00
4.883E-02	4.932E+00	9.814E+00	0.000E+00

層番号が0であるので、周波数の値であることが分かる。

## 6.2 PROPCK

DYNEQ では、多くの実験式に基づく非線形特性が用意されている。これらは、簡単なパラメータを入力するだけで非線形特性が作成できるため、使用には便利であるが、実際に使っているのがどのような非線形特性であるのかを直接見る事が出来ない。PROPCK は、DYNEQ の材料非線形の部分のみを取り出すことによって、材料非線形の部分のみを直接計算するためのプログラムである。

### 6.2.1 入力データ

#### ①コントロールデータ

LDML, MTFLG, MTYP, NN, NDIV, SMIN, SMAX, GMAX0, SIGVP	(2I1, I3, 2I5, 4F10.0)
---	------------------------

- |       |       |   |
|-------|-------|---|
| 1～ 1  | LDMP  | PROPCK12.DAT へ出力する際の減衰の表示方法<br>=0：実数で出力<br>=1：%で出力  |
| 2～ 2  | MTFLG | 材料の種類 MTYP=1の時に、ひずみが最大ひずみを超えたときの処置<br>=0：最後の点から双曲線モデルで延長<br>=1：完全塑性<br>=2：最大ひずみと同じ (SHAKE タイプ)  |
| 3～ 5  | MTYP  | 材料の種類。3.4.2項に示されているものと同じ<br>=0：弾性。<br>=1：Hardin-Drnevich の提案による非線形特性を用いる。<br>=2：双曲線モデル。<br>=3：Ramberg-Osgood モデル。<br>=10：非線形。表形式で、ひずみの値とそれに対応する剛性比、減衰定数を入力する。<br>=11：表形式で、MTYP=1と同じであるが、拘束圧依存性を自動的に考慮する。<br>=12：港湾の技術上の指針。<br>=13：安田・山口の提案式。<br>=14：土木研究所の提案式のうち、沖積粘土。<br>=15：土木研究所の提案式のうち、洪積粘土。<br>=16：土木研究所の提案式のうち、砂。<br>=17：建築基準法、告示1457号に示される粘土<br>=18：建築基準法、告示1457号に示される砂<br>=19：JR 指針に示される盛土のうち土質①（粒度の良好な砂，砂礫；岩砕）<br>=20：JR 指針に示される盛土のうち土質②（一般の砂，砂礫：豊浦砂）<br>=21：JR 指針に示される盛土のうち土質③（粒度配合の悪い砂：稲城砂）<br>=22：JR 指針に示される盛土のうち土質④（粘性土：岩手ローム） |
| 6～10  | NTAB  | MTYP=10, 11の時のみ必要で、異なるひずみの数。  |
| 11～15 | NDIV  | 以下で与えるひずみの最大値と最小値の間を対数軸上で NDIV 等分して、NDIV+1個のひずみに対して計算する。例外使用として、NDIV を負の値とすると、実験式が与えられたひずみでのみ出力する。この場合、SMIN, SMAX の値には意味がなくなる。当然、MTYP≥12の時のみ有効である。  |
| 16～25 | SMIN  | 計算する最小のひずみ  |
| 26～35 | SMAX  | 計算する最大のひずみ  |
| 36～45 | GMAX0 | せん断弾性定数   |
| 46～55 | SIGVP | 有効上載圧   |



## ②材料特性

この項の入力は、3.4.4.1項以降と同じであり、選んだ MTYP にしたがって入力する。したがって、入力方法はここでは示さない。

### 6.2.2 出力

解析の結果は3つの方法で出力される。一つは、標準の印刷で、入力したデータが確認のため印刷される。後の二つはファイル出力で、それぞれ次のような出力である。

#### ①ファイル「PROPCK11.DAT」

このファイルでは、各ひずみに対する計算結果が1行で出力される。すなわち、次のようである。

せん断ひずみ, せん断定数比, 減衰定数, せん断応力	(4E15.6)
-----------------------------	----------

#### ②ファイル「PROPCK12.DAT」

DYNEQ の表形式の入力と同じ形式の出力が行われる。すなわち、まずひずみを出力した後、せん断定数比が、最後に減衰定数が出力される。なお、一行目には基本定数が出力される。したがって、全体として、次のような出力が行われる。

タイプ番号, データ数, せん断弾性定数	(5X, 2I5, 1PE10.3)
----------------------	--------------------

ひずみ (1P8E10.3)

せん断定数比 (8F10.5)

減衰定数 (8F10.6) (LDMP=0のとき), または, 減衰定数 (%) (8F10.4)(LDMP=1)

なお, PROPCK11.DAT では減衰定数は常に実数で出力されるが, PROPCK12.DAT では LDMP の指示により実数で出力したり, %で出力したりする。

### 6.2.3 例題

#### ①土木研究所の提案式, 洪積粘性土

入力データは次の一行のみである。

材料番号		$G_{max}$		単位補正	
15	1	60	1.E-6	1.	800.

ここでは、 $10^{-6}$ ~1.0間でのひずみを60等分する（すなわち、一桁ごとに10分割）ように様な計算が行われる。初期せん断弾性係数は800, 入力として  $\text{kgf/cm}^2$ の単位系を使用しているので、単位系の補正係数は不要で（ここでは1.0を入力）している。

#### PROPCK11.DAT への出力

0.10000e-05	0.10000e+01	0.70000e-02	0.80000e-03
0.12589e-05	0.99668e+00	0.76644e-02	0.10038e-02
0.15849e-05	0.99336e+00	0.83288e-02	0.12595e-02
0.19953e-05	0.99003e+00	0.89932e-02	0.15803e-02
途中省略			
0.63096e+00	0.85000e-01	0.26400e+00	0.42905e+02
0.79433e+00	0.85000e-01	0.26400e+00	0.54014e+02
0.10000e+01	0.85000e-01	0.26400e+00	0.68000e+02

#### PROPCK12.DAT への出力

7	61	8.000e+02					
1.000e-06	1.259e-06	1.585e-06	1.995e-06	2.512e-06	3.162e-06	3.981e-06	5.012e-06
6.310e-06	7.943e-06	1.000e-05	1.259e-05	1.585e-05	1.995e-05	2.512e-05	3.162e-05
3.981e-05	5.012e-05	6.310e-05	7.943e-05	1.000e-04	1.259e-04	1.585e-04	1.995e-04
2.512e-04	3.162e-04	3.981e-04	5.012e-04	6.310e-04	7.943e-04	1.000e-03	1.259e-03
1.585e-03	1.995e-03	2.512e-03	3.162e-03	3.981e-03	5.012e-03	6.310e-03	7.943e-03
1.000e-02	1.259e-02	1.585e-02	1.995e-02	2.512e-02	3.162e-02	3.981e-02	5.012e-02
6.310e-02	7.943e-02	1.000e-01	1.259e-01	1.585e-01	1.995e-01	2.512e-01	3.162e-01
3.981e-01	5.012e-01	6.310e-01	7.943e-01	1.000e+00			
1.00000	0.99668	0.99336	0.99003	0.98503	0.98000	0.97497	0.96993
0.96329	0.95664	0.95000	0.94269	0.93538	0.92808	0.91676	0.90511
0.89249	0.87984	0.86456	0.84928	0.83400	0.81241	0.79081	0.76922
0.73865	0.70592	0.66626	0.62655	0.58275	0.53748	0.49100	0.44784

0.40486	0.36244	0.32041	0.27892	0.23926	0.19961	0.16197	0.12373
0.08500	0.08500	0.08500	0.08500	0.08500	0.08500	0.08500	0.08500
0.08500	0.08500	0.08500	0.08500	0.08500	0.08500	0.08500	0.08500
0.08500	0.08500	0.08500	0.08500	0.08500			
0.7000	0.7664	0.8329	0.8993	0.9995	1.1000	1.2005	1.3010
1.4007	1.5003	1.6000	1.6997	1.7993	1.8990	2.1248	2.3516
2.5769	2.8031	3.1021	3.4010	3.7000	4.1319	4.5637	4.9956
5.7307	6.5166	7.4632	8.4106	9.4371	10.6089	11.9000	13.2061
14.5062	15.7868	17.2051	18.6506	20.1832	21.7113	22.8062	24.3987
26.4000	26.4000	26.4000	26.4000	26.4000	26.4000	26.4000	26.4000
26.4000	26.4000	26.4000	26.4000	26.4000	26.4000	26.4000	26.4000
26.4000	26.4000	26.4000	26.4000	26.4000			

## ②土木研究所の提案式，沖積粘性土

2行のデータの入力が必要である。ここでは，単位系として  $\text{tf/m}^2$  を用いているので，単位系の補正用の入力として10.0が入力されている。

単位系として $\text{tf/m}^2$ を用いたので， $1\text{kgf/cm}^2=10\text{tf/m}^2$ の変換式に従い，10を入力している。							
14	1	71	$1. \times 10^{-7}$	1.	8000.	10.	
1.0	10.						有効上載圧
静止土圧係数を1.0とした。							

## 7 DYNEQ および他の等価線形手法の適用性

ここでは、鉛直アレー記録のシミュレーションを通じて等価線形手法の適用性を検討する。計算はすべて DYNEQ を使って行われ、もとの手法に応じて、SHAKE, FDEL, DYNEQ の名前で手法を表す。なお、DYNEQ では散乱の減衰も考慮できるが、大地震に対してはその影響が小さいこと<sup>64)</sup>、SHAKE と FDEL のもとの手法はこれらを考慮していないことから、以下の例では散乱の減衰は考慮していない。また、以下では、基盤の地震動を与えて表層の応答を求める解析を増幅解析、地表または地中の地震動を与え基盤の地震動を求める解析を逆増幅解析と呼ぶことにする。

これらの解析事例は主として文献4)に示したものであり、定数等もその際の設定に従っている。

### 7.1 東大生研・千葉県東方沖地震

東大生研の千葉鉛直アレーで、1987年千葉県東方沖地震 ( $M=6.7$ ) の際に得られた記録をシミュレートする。図7.1(a)に地層構成を示す<sup>74)</sup>。動的変形特性も同じ論文によった。

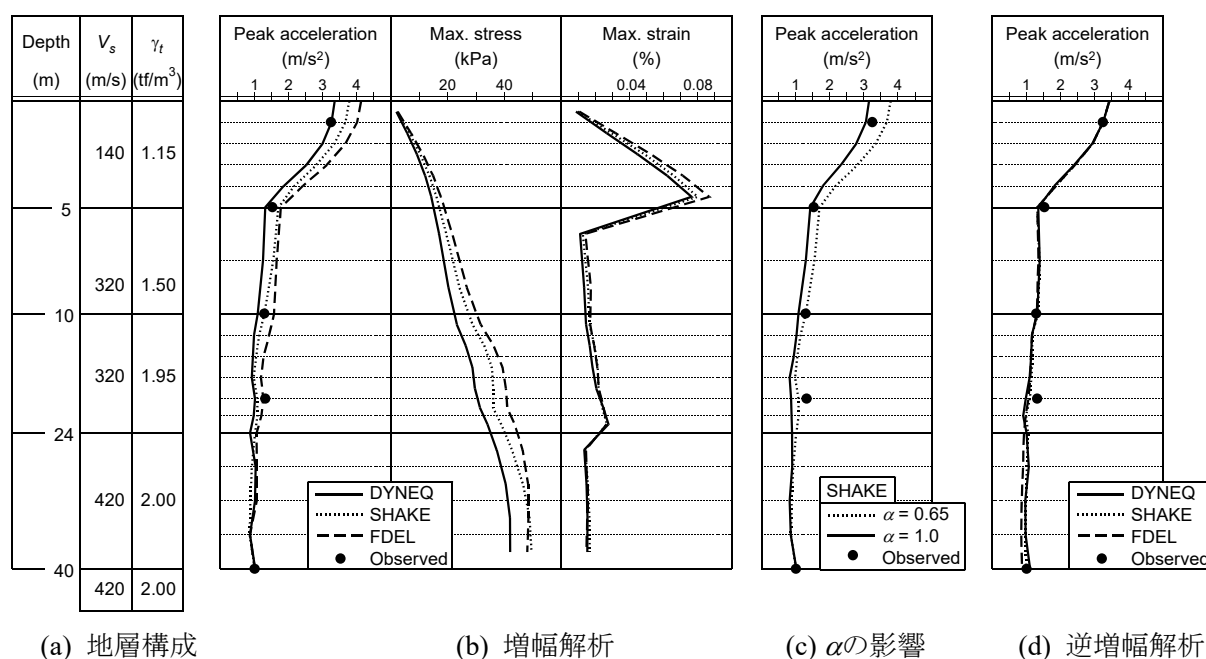


図7.1 地層構成と最大応答値

増幅解析で得られた最大応答値を図7.1(b)に示す。せん断応力は第5層 (GL-4~5m) で最大となり、その値は0.1%より少し小さい。したがって、この事例は等価線形法の適用範囲内<sup>15)</sup>にあるが、それでも、2.6.3項で示した欠点は明瞭に現れる。

地表の加速度では、DYNEQ がほぼ観測値と一致しているのに対し、SHAKE, FDEL は大きめで、特に FDEL は25%も過大評価している。図7.2は地表の加速度時刻歴を比較しており、図に A~E の矢印で示したのは観測値の極大値を矢の先端が指すようにしている。FDEL と SHAKE で最大加速度が大きく評価されているのは極大値付近に限られていることがわかる。したがって、SHAKE による加速度の過大評価の原因は、弾性解析に起因する共振現象<sup>75)76)77)</sup>ではなく、2.6.3項で示したメカニズムであることがわかる。これをさらに実証するために、 $\alpha=1.0$ とした計算も行った。最大応答値を図7.1(c)に示す。最大加速度は小さくなっているが、もし、共振が過大評価の原因であるとすればこのケースでも大きめの評価となるはずであるが、実際には少し小さめの評価となっている。小さめとなっているのは高周波成分の増幅が過小評価されているためと考えられ

る。

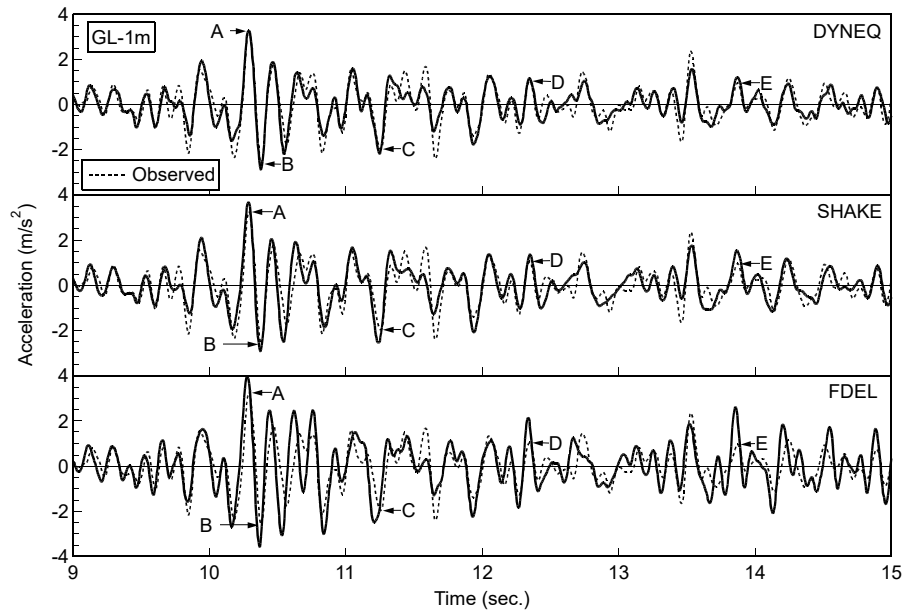


図7.2 地表の応答の比較

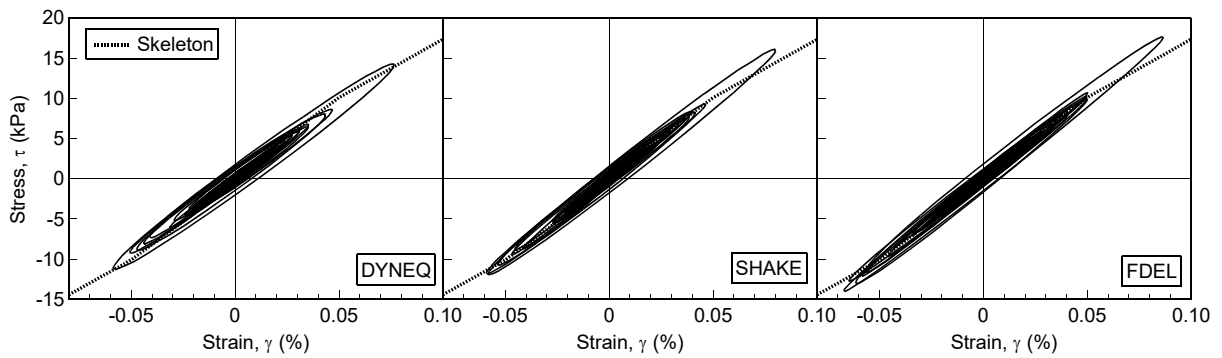


図7.3 第5層 (GL-4~5m) の応力-ひずみ関係

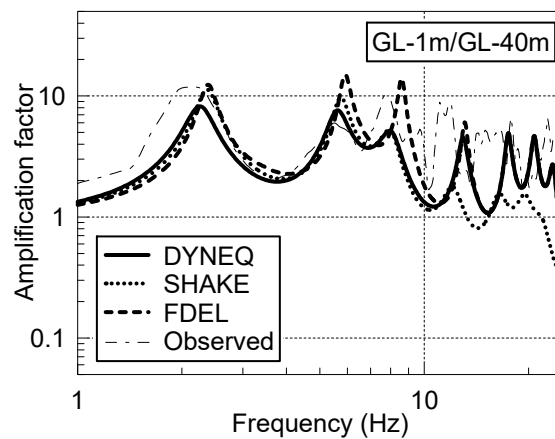


図7.4 増幅比の比較

図7.3には第5層の応力-ひずみ関係を示す。DYNEQ の応力ひずみ関係の最大点は骨格曲線と一致しているが、SHAKE, FDEL は過大評価しており、これが最大加速度の過大評価につながっている。

図7.4には増幅比を比較している。DYNEQ と FDEL は高振動数では観測値と同じ程度の増幅が

得られているが、SHAKE は過小評価している。低周波領域で SHAKE と FDEL が DYNEQ より大きいのは最大加速度の過大評価と対応している。

図7.5は第5層の有効ひずみ、剛性と減衰比の周波数依存性を示している。ここで、DYNEQ の有効ひずみが SHAKE と FDEL より大きいのは、後者では最大ひずみに0.65を掛けて有効ひずみを求めているのに対し、DYNEQ はこのような処理をしていないためで、最大ひずみは図7.1(b)に示すように、DYNEQ の方が小さい。SHAKE と FDEL では低周波領域で剛性を大きく評価している。高周波数領域では FDEL は約10Hz で弾性挙動になっているのに対し、DYNEQ では15Hz が弾性と非線形の境界である。

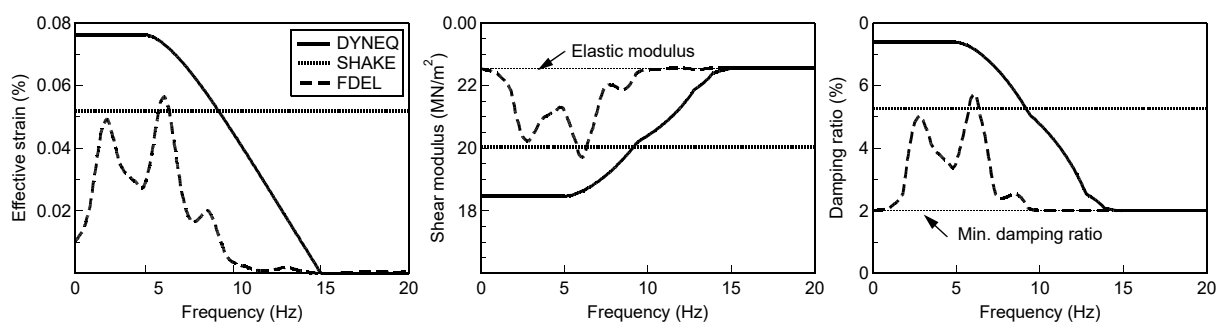


図7.5 第5層の周波数依存性

最後に、図7.1(d)に逆増幅解析で得られた最大加速度分布を示す。どの手法もほぼ同じような応答を示している。また、DYNEQ は増幅解析と逆増幅解析でほぼ同じ応答となっているのに対して、SHAKE と FDEL では異なる応答となっている。

## 7.2 新富士変電所

新富士変電所で1983年神奈川県・山梨県境地震で得られた記録を解析する。図7.6(a)に地層構成を示す。このサイトでは、田蔵ら<sup>78)</sup>、吉田ら<sup>79)</sup>により等価線形解析と非線形解析の比較が行われている。これらの解析に用いられた動的変形特性をこの解析でも用いる。

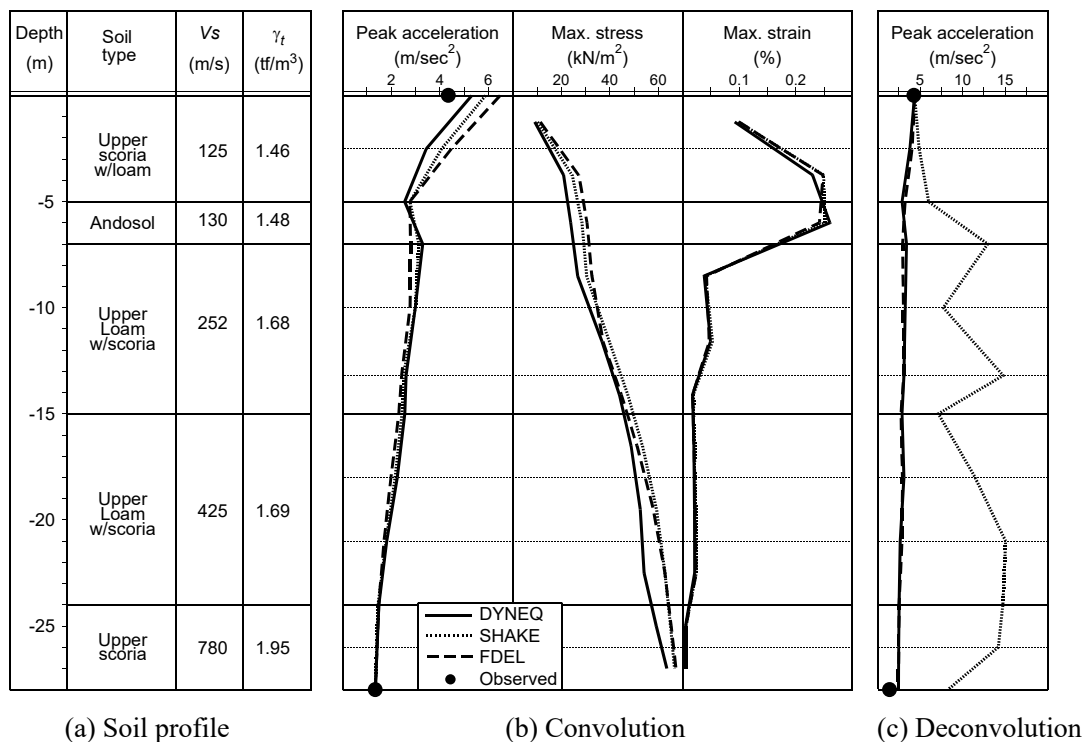


図7.6 地層構成と最大応答値

増幅解析で得られた最大加速度分布を図7.6(b)に示す。地表の加速度では DYNEQ が最も観測値に近い。図7.7には地表の加速度時刻歴を、図7.8には最大ひずみが最も大きかった第3層（GL-5～7m）の応力－ひずみ関係を示す。前項と同様、DYNEQ では最大ひずみ点が骨格曲線上にあるのに対し、SHAKE、FDEL はこの順で大きくなっている。これが最大加速度の過大評価に結びついているのは明らかである。また、加速度の極大値を除けば波形は全体によく似ている。なお、この記録では約4秒付近で加速度計が飽和し<sup>80)</sup>、最大加速度は5m/s<sup>2</sup>を少し越えると考えられている。時刻歴のこの付近に見られる不一致はそのためかもしれない。

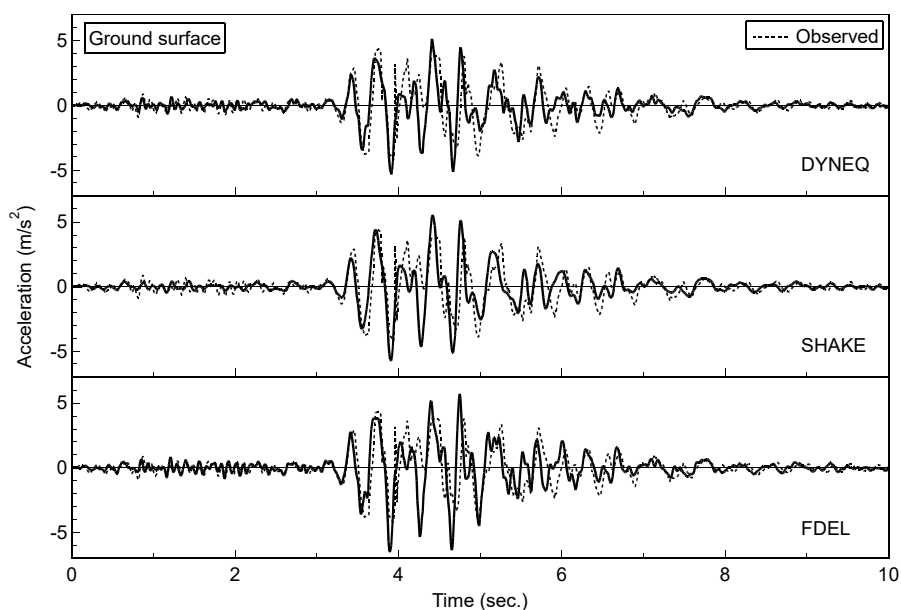


図7.7 地表の加速度時刻歴の比較

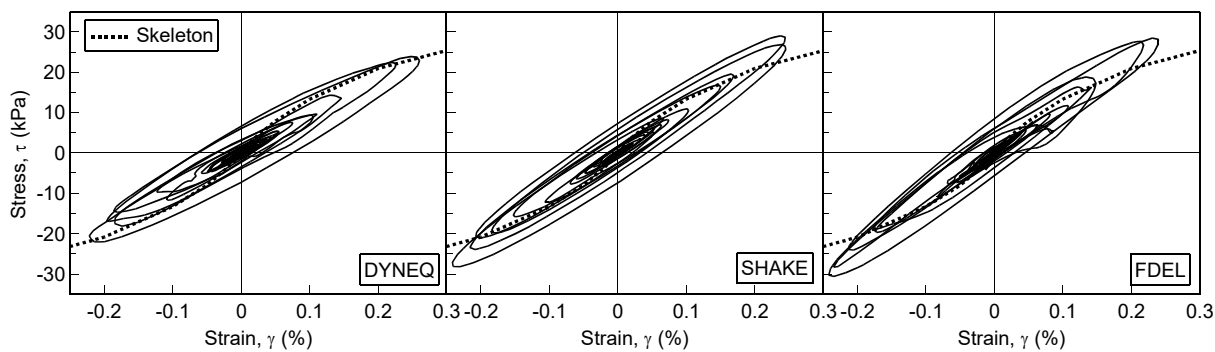


図7.8 第3層の応力-ひずみ関係

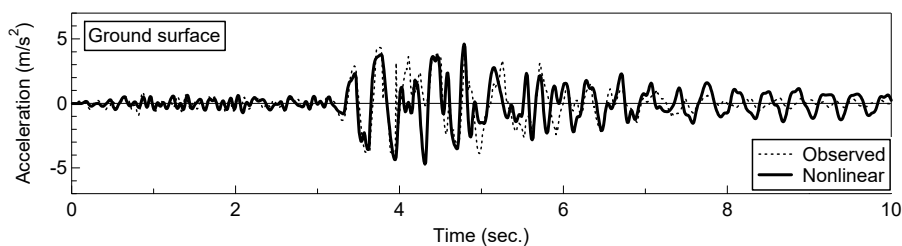


図7.9 非線形法による解析例

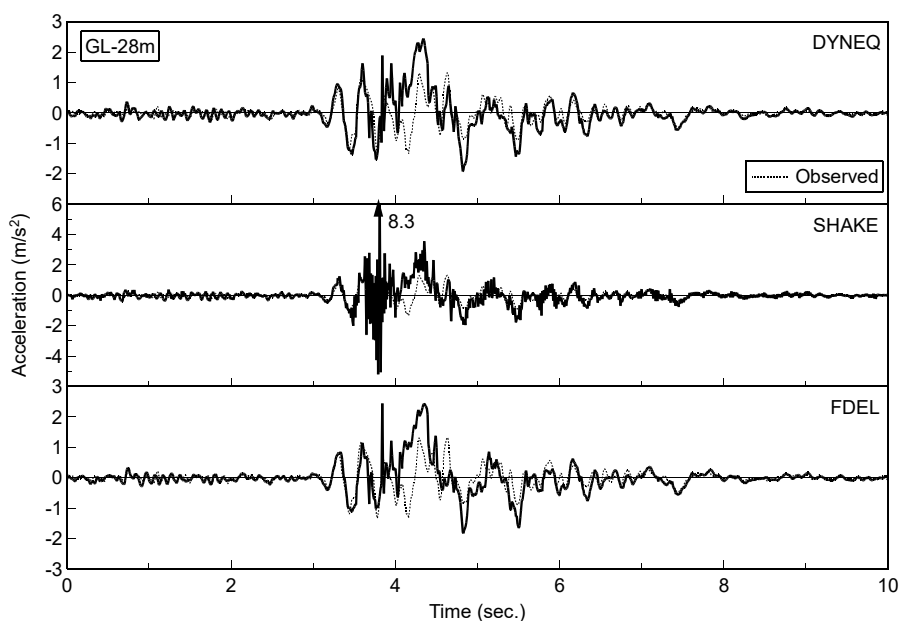


図7.10 逆増幅解析で得られた基盤の加速度

加速度時刻歴でもう一つ着目すべきは、主要動以前（3秒より前）の応答である。SHAKE では過小評価しているが、DYNEQ、FDEL ではよく一致している。この部分では高振動成分が卓越していることから、SHAKE が高周波領域で増幅を過小評価する結果が現れたものと考えられる。

このサイトでは、吉田ら<sup>79)</sup>により等価線形解析と非線形解析の比較が行われているが、そこでは、動的変形特性を完全に再現できるモデル<sup>21)</sup>を用いた非線形解析が最も良い一致をしていた。これを図7.9に示す。DYNEQ の応答と比較すると、両者は非常によく一致していることがわかる。

図7.6(c)には逆増幅解析で得られた最大加速度分布をしめす。DYNEQ と FDEL はほぼ同じ応答となっているが、SHAKE の応答では最大加速度分布は異常に大きくなっている。図7.10には

GL-28m の加速度時刻歴が示されているが、SHAKE では約4秒のところで異常に大きなパルスが見られる他、全体に高周波数成分の波形が見られる。これが SHAKE が高周波領域で増幅を過小評価することから来ていることはこれまでの議論から明らかであろう。また、4～5秒で観測値との差が現れているが、これは、地表の記録の飽和による影響と考えられる。すなわち、逆増幅解析の方が増幅解析より敏感であることがわかる。

### 7.3 ポートアイランド・兵庫県南部地震

1995年兵庫県南部地震の際ポートアイランドで得られた記録を解析する。図7.11(a)には地層構成を示す。ここでは非線形挙動をターゲットにしていることから、GL-32.4m の記録より上を対象とする。このサイトでは地震後いくつかの土質調査が行われている。解析に用いる動的特性は吉田の解析<sup>81)</sup>およびこれらの調査を参照して決める。

図7.11(b)に増幅解析で得られた最大応答分布を示す。SHAKE と DYNEQ の解析では粘土層で加速度が小さくなっており、この層が地表の応答に大きく影響していることがわかる。

図7.12には加速度時刻歴の比較を、図7.13には各層でひずみが最大となった第9層と第23層の応力-ひずみ関係を示す。加速度記録を見ると、SHAKE ではほとんど高振動数成分が見られないが、これは、これまでも述べてきたように、高振動数領域で増幅を過小評価するために、応答に高振動数成分がほとんど含まれないためと考えられる。DYNEQ の結果では、小さい振幅の高振動数成分を少し見ることが出来るが、全体の波形に影響するほどではない。

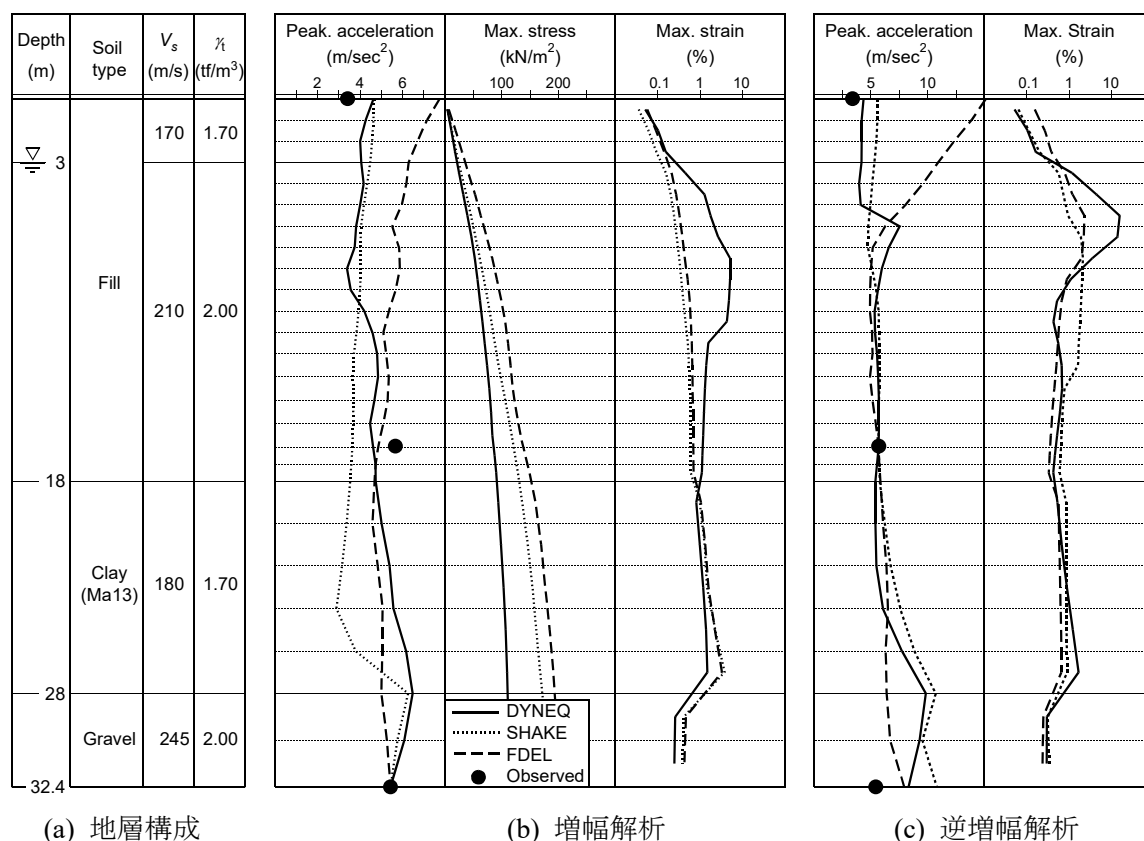
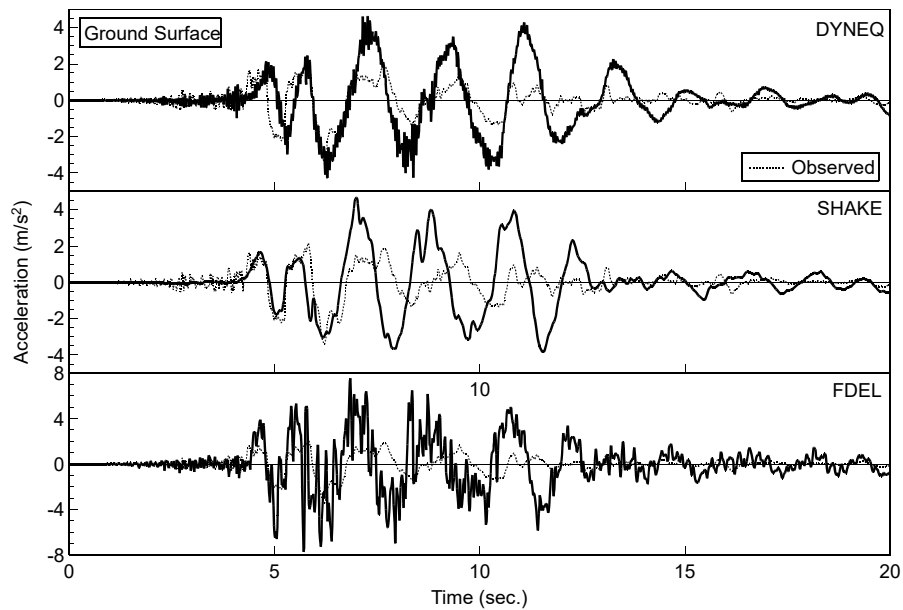
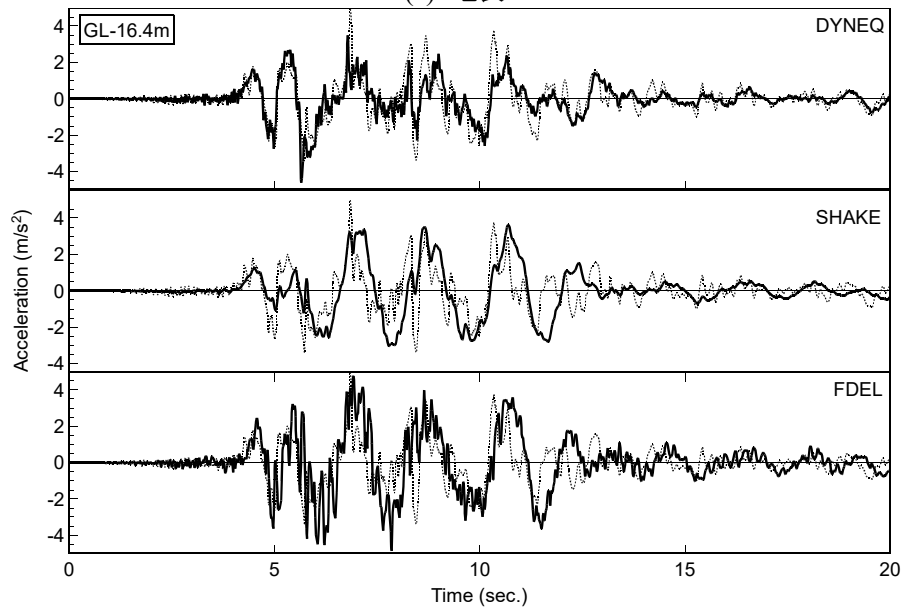


図7.11 地層構成と最大応答値





(a) 地表



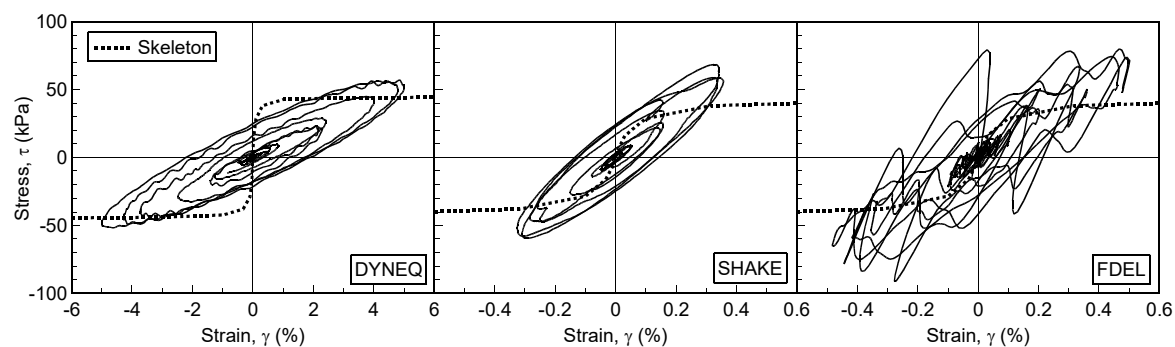
(b) GL-16.4m

図7.12 加速度時刻歴の比較

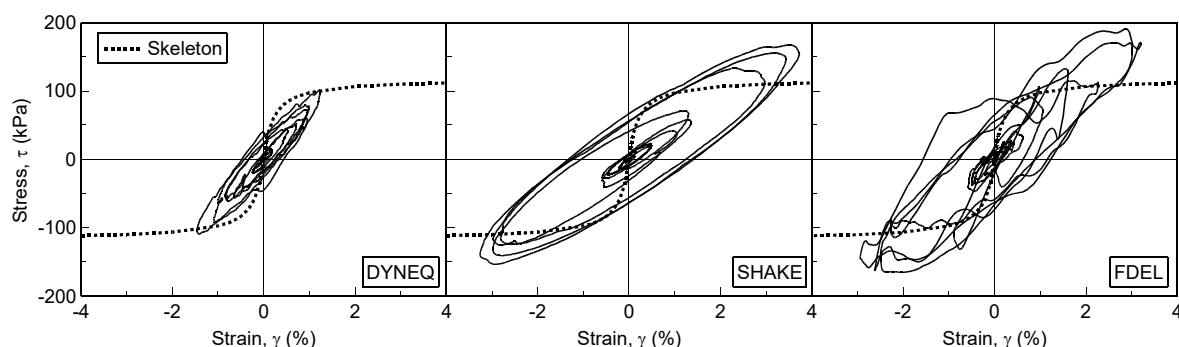
これに対して、FDEL の記録では、数 Hz の波動の振幅が相当に大きく見られ、これが全体の波形に大きく影響している。FDEL の最大加速度分布が他と異なるのはこのためと考えられる。この影響は、図7.13の応力-ひずみ関係にも見ることが出来る。SHAKE による解析では応力-ひずみ関係は楕円形（複素剛性法で一定ひずみの応答を与えたときの形状）である。DYNEQ では小さい乱れは見られるものの、全体としての楕円形はそれほど変わらない。これに対して、FDEL では大きな振幅の乱れが見られ、形状は楕円形からは大きく離れている。応力-ひずみ関係が負の完全塑性域に入っているのに対し、FDEL のせん断応力が SHAKE より大きいのはこの乱れが原因である。

この原因を見るために、材料特性の周波数依存性を示したのが図7.14である。図では、幅広いひずみ域の挙動が見られるように、横軸は対数軸となっている。FDEL ではほぼ2Hz よりも大きいところでは弾性挙動となっている。したがって、数 Hz の成分が大きく増幅される結果となったと考えられる。図7.14の剛性の周波数依存性を見ると、5Hz、8Hz 程度のところで弾性剛性より小さ

くなっている部分があるが、これが増幅された部分である。



(a) 第9層 (GL-8~9m)



(b) 第23層 (GL-26~28m)

図7.13 応力-ひずみ関係の比較

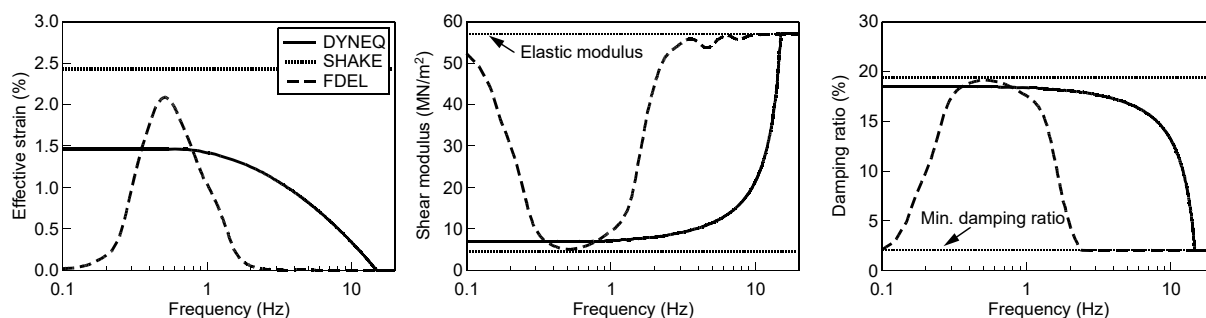


図7.14 第23層のひずみ依存性

図7.12(b)の加速度時刻歴では、DYNEQ は他の手法と比べると、非常によく GL-16.4m の挙動を再現している。特に、7.5秒と8秒のスパイク状の波形もきちんと再現されている。なお、このスパイク状の波形の振幅が少し観測値より小さいが、パラメトリックスタディを行うと、粘土層の強度をもう少し上げれば、この振幅もあわせられることがわかっている。

GL-16.4m の波形がよく再現できているのに対し、図7.12(a)の加速度時刻歴を見ると、地表の加速度時刻歴の再現性は非常にわるい。DYNEQ では位相こそあっているものの振幅は非常に大きい。SHAKE, FDEL では位相も振幅もあわない。これは、等価線形解析では液状化現象を考慮することが出来ないということを表している。

この結果から、地表の加速度時刻歴を与えて逆増幅解析を行うことは意味がないことが分かる。したがって、ここでは、GL-16.4m の記録を与えた逆増幅解析を行うことにした。この際、SHAKE では解析が発散してしまったので、30Hz 以上の高周波成分を無視することで解析を行った。図

7.11(c)に最大応答値の分布を示すが、これまでの解析と同様、DYNEQでは増幅解析と逆増幅解析で似たような形状を与えている。しかし、図7.15に示すGL-32.4mの加速度波形を見ると、どの解析も再現性は非常に悪い。この原因はよくわかっていないが、前の例で見たように、逆増幅解析は乱れに非常に敏感であることが原因かもしれない。すなわち、GL-16.4mの地震計は粘土層に近いとはいえ、液状化層内に設置されており、記録には、等価線形解析で考慮できない液状化の影響が含まれているはずであり、これが逆増幅解析に影響したと考えられるのである。

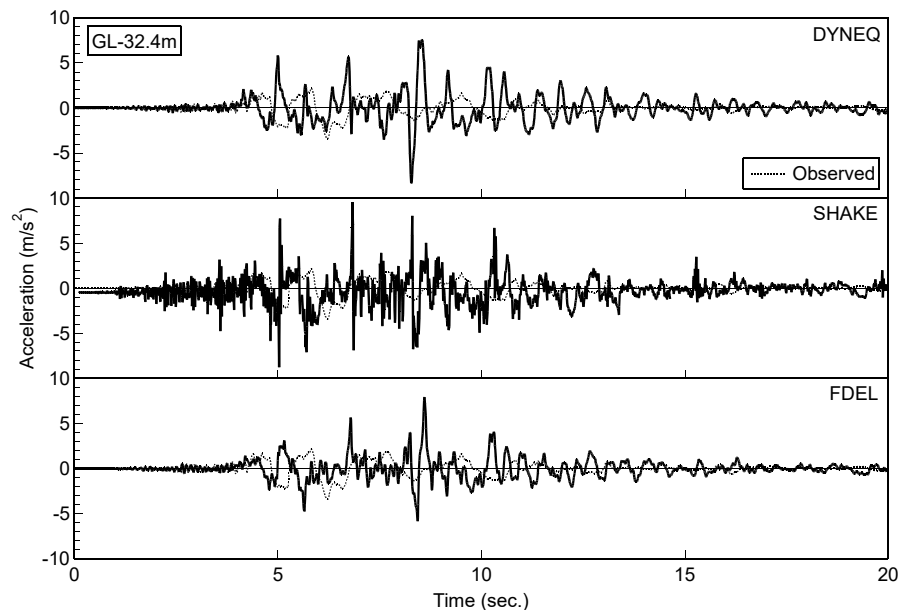


図7.15 逆増幅解析で求められた GL-32.4m の波形

#### 7.4 まとめ

3つの大きい地震動に対するシミュレーションから、等価線形法の適用性について、次のような結論が得られる。

- (1) SHAKE は非線形性が強くなるとせん断応力と最大加速度を過大評価する。一方、高振動数成分の増幅を過小評価する。この影響は最大ひずみが0.1%のオーダーでも明瞭に現れる。
- (2) FDEL は SHAKE より最大加速度を大きく評価するので、強震時の適用性は SHAKE より劣る。また、一般に非線形挙動を考慮する周波数領域の幅が狭く、このため、数 Hz の成分の波動が異常に増幅される事もある。原論文にあるような余り大きくない地震動に対しては、FDEL は SHAKE より精度が良いが、その適用範囲は非常に小さい範囲に限定されている。
- (3) DYNEQ は最大ひずみが1%を越えるような非線形領域でも十分に適用できる精度を有している。これ以上大きいひずみに対する適用性は検証できていないが、これは、それを検証できる鉛直アレーデータが無いためである。
- (4) 等価線形手法は液状化に対しては適用性がない。これは、液状化を考慮した動的変形特性を考慮していないことから、当然の結果である。動的変形特性を変えることで液状化解析にも適用できるようになるか否かということは今後の検討課題となる。
- (5) 逆増幅解析は小さい地震に対しては易しく、どの手法を用いても同じような結果が得られる。しかし、地震動が大きくなり、非線形挙動が現れるようになると、非常に敏感になる。この場合でも、DYNEQ は相当大きいひずみまで適用することが出来る。SHAKE の適用性は、最大でも0.1%程度までである。

## 8 参考文献

- 1) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B. (1972): SHAKE A Computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC72-12, University of California, Berkeley
- 2) 吉田望 (1994) : 実用プログラム SHAKE の適用性, 軟弱地盤の地震動増幅シンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.14-31
- 3) 杉戸真太, 会田尚義, 増田民夫 (1994) : 周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察, 土木学会論文集, No.493/III-27, pp.49-58
- 4) Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I. and Miura, K. (2002): Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 22, No. 3, pp. 205-222
- 5) 小林喜久二, 阿部康彦, 天池文男 (1989) : 地盤の Q 値の振動数依存性とモデルについて, 表層地盤が地震動に及ぼす影響シンポジウム, pp.49-54
- 6) Sorokin, F. (1957), Internal and external friction by vibrations of rigid bodies, CNIISK 162, Moscow (Tesar, A.: Tuned vibration control in aeroelasticity of slender wood bridges, Coupled Systems Mechanics, Vol. 1, No. 3 (2012) 219-234による)
- 7) 小西一郎, 高岡宣喜: 構造動力学, 丸善, 295pp., 1973
- 8) Hricko, J.: Modelling compliant mechanisms –comparison of models in MATLAN/SimMechanics vs. FEM, Proc., 21st International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, pp. 57-62, 2012
- 9) Lysmer, J. (1973): Modal damping and complex stiffness, University of California Lecture note, University of California, Berkeley
- 10) Idriss, I.M. and Sun, J.L.: User's manual for SHAKE91, A computer program for conducting equivalent linear seismic response analysis of horizontally layered soil deposits, University of California, Davis, 1992
- 11) 宇高竹和, 大島怪仁, 渡辺泰介, 仲摩貴史: 全応力時刻歴非線形解析との比較に基づいた等価線形解析の精度に関する一考察—精度向上のための手法の提案—, 地盤工学ジャーナル, Vol. 9, No. 2, pp. 185-202
- 12) Christian, J. T., Roesset, J. M. and Desai, C. S. (1977): Two-and Three-dimensional dynamic analyses (chapter 20), Numerical methods in Geotechnical Engineering, McGraw Hill, pp. 683-718
- 13) 若松加寿江, 吉田望, 三上武子: 地質年代・堆積環境を考慮した土の繰返し変形特性の支配要因の検討, 地盤工学ジャーナル, Vol. 5, No. 3, pp. 463-478, 2010
- 14) 大崎順彦 (1994) : 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会
- 15) Ishihara, K. (1982): Evaluation of soil properties for use in earthquake response analysis, Proc., Int. Symp. on Numerical Models in Geomechanics, Zurich, pp.237-259
- 16) Tatsuoka, F. and Shibuya, S. (1992) Deformation characteristics of soils and rocks from field and laboratory tests, 生産技術研究所報告, 東京大学, 第37巻, 第1号, pp.1-136
- 17) 運輸省港湾局監修 (1993) : 埋立地の液状化対策ハンドブック, 沿岸開発センター
- 18) Kokusho, T (1987): In-situ dynamic soil properties and their evaluation, Proc. 8th Asian Regional Conference of SMFE, Kyoto, Vol. II, pp.215-240
- 19) 時松孝次 (1989) : 室内試験, 原位置試験及び地震記録から求めた土の動的性質, 第2回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム, pp. 11-16
- 20) Hardin, B. O. and Drnevich, V. P. (1972): Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves, J. SMFD, Proc., ASCE, Vol.98, No.SM7, pp.667-692
- 21) 吉田望, 辻野修一, 石原研而 (1990) : 一次元非線形解析における土のせん断応力-せん断ひずみ関係のモデル化, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp.1639-1640
- 22) 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (1989) , 日本港湾協会

- 23) 安田進, 山口勇 (1985) : 種々の不攪乱土における動的変形特性, 第20回土質工学研究発表会講演集, pp.539-542
- 24) 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 (1985) (社)日本道路協会
- 25) 土質工学会 (1993) : 液状化対策の調査・設計から施工まで 第3章 液状化予測
- 26) 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—SHAKE : DESRA—, 土研資料第1778号
- 27) 岩崎敏男, 常田賢一, 吉田清一 (1980) : 沖積粘性土の動的変形特性・強度特性について, 第15回土質工学研究発表会, pp. 625-628
- 28) 横田耕一郎, 龍岡文夫 (1982) : 不攪乱洪積粘土のせん断変形係数について, 土木学会第32回年次学術講演概要集, 第3部, pp.257-258
- 29) 岩崎敏男, 龍岡文夫, 高木義和 (1980) : 地盤の動的変形特性に関する実験的研究 (II), 土木研究所報告153号の2; 足立, 龍岡, 新体系土木工学18, 技法堂出版, 1986
- 30) 国生剛治, 佐々木正美 (1980) : 繰返し三軸試験による不攪乱洪積砂の動的物性試験, 第15回土質工学研究発表会, pp.537-540
- 31) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編 (2012) : 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善
- 32) 福元俊一, 吉田望, 佐原守 (2009) : 堆積軟岩の動的変形特性, 日本地震工学会論文集, 第9巻, 第1号, pp. 46-64
- 33) 若松加寿江, 吉田望, 三上武子 : 地質年代・堆積環境を考慮した土の繰返し変形特性の支配要因の検討, 地盤工学ジャーナル, Vol. 5, No. 3, pp. 463-478, 2010
- 34) 佐藤春夫 : ランダムな不均質による地震波の散乱, 地震, 第2輯, 第44巻特集号, pp.85-97, 1991
- 35) 原昭夫, 清田芳治 (1977) : 地盤震動解析のための土の動的性質の研究—せん断弾性定数, 減衰定数の周波数依存性—, 第14回土質工学研究発表会, pp.533-536
- 36) 河村壮一 (1977) : 各種地盤での地表・地中地震動特性, 第5回地盤震動シンポジウム資料集
- 37) 横田治彦 (1977) : 東京の軟弱地盤における地中地震観測, 第5回地盤震動シンポジウム資料集
- 38) 太田裕 (1975) : 地震工学への最適化法の適用 1.八戸港湾 SMAC 設置点の地下構造推定, 日本建築学会論文報告集, 第229号, pp.35-41
- 39) 石田寛, 太田外気晴, 原昭夫, 高橋克也 (1987) : 室内試験, S 波検層および観測地震動に基づく地盤の減衰評価, 第15回地盤震動シンポジウム, pp.17-26
- 40) 野沢是幸, 大木晴雄, 安中正 (1987) : 減衰の周波数依存性を考慮した1次元波動理論による地盤の増幅特性の解析方法, 第19回地震工学研究発表会, pp.109-112, 1987
- 41) 杉山武, 早川誠, 坪井利弘, 中村晋, 末富岩雄 (1990) : 濃尾平野における地盤の  $Q$  値の周波数依存性について, 第25回土質工学研究発表会, pp.899-902
- 42) Sato,T. and H.Kawase (1992): Finite element simulation of seismic wave propagation in near-surface random media, International Symposium, Proc of the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, ESG1992, Odawara, pp.257-262
- 43) Sawada,S., K.Toki and M.Fukui (1995): Effects of wave scattering on seismic response of ground, Earthquake Geotechnical Engineering, pp.487-492
- 44) 辻原治, 沢田勉, 谷高博 (1990) : 鉛直アレー観測記録による地盤震動特性値の同定, 構造工学論文集, Vol.36A, pp.747-756
- 45) 辻原治, 沢田勉, 平尾潔, 岡本康 (1993) : 地盤の  $S$  波速度と  $Q$  値の同定精度に及ぼすスペクトルの平滑化の影響, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.783-792
- 46) 吉田郁政, 黒瀬浩弘, 福井史朗 (1994) : 確率論に基づく逆解析の基礎研究, 土木学会論文集, 第483号, pp.61-68

- 47) Annaka, T., T.Tsuzuki, K.Etsunaga and M.Shimada (1996): Bayesian estimation of strain dependence of dynamic soil properties from the strong motion accelerograms recorded by a vertical array, 11th WCEE, No. 602
- 48) 木下繁夫 (1983) : 表層地盤の減衰特性に関する考察, 土木学会論文報告集, 第330号, pp.15-25
- 49) Fukushima, Y., S.Kinoshita and H.Sato (1992): Measurement of  $Q^{-1}$  for S waves in mudstone at Chikura, Japan: comparison of incident and reflected phases in borehole seismograms, Bull. Seism. Soc. Am., 82, No.1, pp.148-163
- 50) 佐藤智美, 川瀬博(1996) : ポートアイランドにおける兵庫県南部地震とその余震のボアホール観測記録に基づく地盤の増幅特性と推定地盤モデル, 地球惑星科学関連学会 1996年度合同大会予稿集, Z12-P08
- 51) Suetomi, I. and N.Yoshida (1998): Damping characteristics of soil deposits during strong ground motions, Proceedings of the Second International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, Yokohama, pp.765-772
- 52) Kobayashi, K., Amaike, F. and Abe, Y. (1992): Attenuation characteristics of soil deposits and its formulation, International Symp. Effects of Surface Geology on Seismic Motion, pp.269-274
- 53) 福島美光, 翠川三郎 : 周波数依存性を考慮した表層地盤の平均的な  $Q^{-1}$  値とそれに基づく地盤増幅率の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第460号, pp.37-46, 1994.
- 54) 末富岩雄, 吉田望 (1996) : 一次元等価線形解析における減衰の周波数依存性の考慮に関する一検討, 第31回地盤工学研究発表会講演集, pp. 1119-1120
- 55) 萩原庸嘉, 清田芳治 (1992) : 地盤の歪依存性を追う等価モード別等価線形地震応答解析手法, その1 理論的背景と逆応答の計算; 清田芳治, 萩原庸嘉 (1992) : その2 地震観測結果に対する解析的検討, 日本建築学会学術講演概要集 (北陸), 構造 I, pp.487-490; 清田芳治, 萩原庸嘉, 青柳隆之 (1993) その3 微小加速度レベルにおける地盤の減衰性の検討, 地震観測結果に対する解析的検討, 日本建築学会学術講演概要集 (関東), 構造 I, pp.217-218
- 56) Ohsaki, Y. (1982),: Dynamic nonlinear model and one-dimensional nonlinear response of soil deposits, Research Report 82-02, Dept. of Architectural Faculty of Engineering, University of Tokyo (in Japanese)
- 57) 田蔵隆, 佐藤正義, 畠山昭 (1987) : 強震記録に基づく地盤の非線形地震応答解析, 第19回地震工学研究発表会, 土木学会, pp. 101-104
- 58) Katayama, I., Ozeki, K., Yamaya, A., Seshimo, Y., Jeong, Y. W. and Suzuki, H. (1992): Non-linear free-field soil response analysis of a vertical array data, Proc. 4th Japan-U.S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasure for Soil Liquefaction, Technical Report NCEER-92-0019, NCEER
- 59) Finn, W. D. L., Martin, G. R. and Lee, M. K. W. (1978): Comparison of dynamic analyses for saturated sands, Earthquake Engineering and soil dynamics, GED, ASCE, Vol. 1, pp472-491
- 60) 岩崎敏男, 川島一彦, 龍岡文夫 (1980) : 地盤の地震応答に及ぼす土の非線形性の影響, 土木技術資料22-12, pp. 27-32
- 61) 国生剛治 (1982) : 土の動的変形特性と地盤の非線形振動応答, 電力中央研究所報告 No. 301, pp. 207-240
- 62) 末富岩雄, 沢田純男, 吉田望, 土岐憲三 (2000) : 地震動の上限値と地盤のせん断強度の関係, 土木学会論文集, No. 654/I-52, pp. 195-206
- 63) 上島照幸, 中園直秀 (1996) : 「歪の周波数特性を考慮した等価線形化手法」の羅東地点地震データへの適用, 土木学会第51回年次学術講演会, 第 I 部門, pp. 408-409
- 64) Suetomi, I. and Yoshida, N. (1998): Damping characteristics of soil deposits during strong ground motions, Proc. 2nd International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, Yokosuka, Japan, pp. 765-772

- 65) Kobayashi, S. and Yoshida, N. and Miura, K. (2000): Equivalent linear analysis considering large strains and frequency dependent characteristics, Proc., 12th WCEE, Auckland, New Zealand, Paper No. 1832
- 66) 佐藤智美, 川瀬博, 佐藤俊明 (1994) : 観測記録から同定した地震動の統計的特性と地盤の非線形を考慮した強震動予測, 日本建築学会構造系論文集, 第463号, pp.27-37
- 67) 中村晋 (1995) : ベクトルスペクトルによる地震動の増幅特性評価とその適用, 土木学会論文集, No.519/I-32, pp.161-173
- 68) 田治見宏 (1965) : 建築振動学 (7.4 地震応答を求める統計的方法) , コロナ社
- 69) 沢田純男, 土岐憲三, 中村純二 (1975) : 応答スペクトルを用いた液状化判定法, 第23回自身工学研究発表会, pp. 675-678
- 70) 沢田純男, 土岐憲三, 高田至郎 (1977) : 地表面を基準とした応答変位法の設計スペクトル, 土木学会論文集, No. 570/I-40, pp. 277-286
- 71) 沢田純男, 岸本貴博 (2001) : 反射透過係数法に基づく地盤固有周期の近似式, 第36回地盤工学研究発表会講演集, pp. 2383-2384
- 72) 日本道路協会 (1996) : 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編
- 73) 鉄道総合技術研究所 (1999) : 鉄道構造物等設計標準・同解説, 耐震設計, 丸善
- 74) 鹿林, 山崎文雄, 片山恒雄 (1989) : 千葉実験所における地震動観測ーその5 自由地盤の伝達特性についてー, 第20回地震工学研究発表会講演概要, 土木学会耐震工学委員会, pp. 93-96
- 75) Finn, W. D. L., Martin, G. R. and Lee, M. K. W. (1978): Comparison of dynamic analyses for saturated sands, *Earthquake Engineering and soil dynamics*, GED, ASCE, Vol. 1, pp472-491
- 76) 国生剛治 (1982) : 土の動的変形特性と地盤の非線形振動応答, 電力中央研究所報告 No. 301, pp. 207-240
- 77) 岩崎敏男, 川島一彦, 龍岡文夫 (1980) : 地盤の地震応答に及ぼす土の非線形性の影響, 土木技術資料22-12, pp. 27-32
- 78) 田蔵隆, 佐藤正義, 畠山昭 (1987) : 強震記録に基づく地盤の非線形地震応答解析, 第19回地震工学研究発表会, 土木学会, pp. 101-104
- 79) 吉田望, 田蔵隆, 鈴木英世 (1995) : 地盤の非線形地震応答解析手法の比較, 第23回地震工学研究発表会, 土木学会, pp. 49-52
- 80) 江川顕一郎, 近藤始郎, 片山幾夫, 小瀬木克己, 吉田郁政 (1985) : 1983年8月8日の山梨県東部地震の地表・地下同時強震記録に関する検討, 地震学会講演予稿集昭和60年度秋季大会, p. 139
- 81) 吉田望 (1995) : 1995年兵庫県南部地震におけるポートアイランドの地震応答解析, 土と基礎, Vol. 43, No. 10, pp. 49-54

## 9 バージョン情報

### 1.0 1995.5 吉田 望

### 2.0 1995.8 吉田 望

Version 2.0では、二方向入力を追加した。この結果、入力の方法も若干異なっており、Version 1.0のデータはそのままでは通らない。3.2節の入力で、一方向、二方向の入力の指示をする部分の制御が増えているので、一方向入力を指定すればこれまでのデータはそのまま有効である。もちろん二方向入力を行うにはさらにデータが必要となる。

#### ・ 2.1 1996.2 吉田 望, 末富岩雄

2.1では周波数依存減衰に関し杉戸方式に加え2つの式を追加した。また、材料特性の各周波数成分の値が出力できるようにした (FREQPROP コマンド)。

#### ・ 2.2 1996.2 吉田 望, 末富岩雄

バグ修正。新しい減衰項の追加。三角形ウィンドウによる平滑化の追加

##### ・ 2.21 1996.6 吉田 望

POSTEQ の入力書式の修正に伴う、Unit13への出力方法の改訂

#### ・ 2.3 1997.3 吉田 望

各種の動的変形特性実験式を入れる。フーリエスペクトルの出力で、以前は複素の振幅を出力していたのを、フーリエ振幅に  $T/2$  を掛けたものを出力するようにする。

#### ・ 2.4 1997.8 吉田 望

速度の出力を、相対速度から絶対速度に変更した。弾性要素の減衰の%入力を実数として扱っていたバグを修正

##### ・ 2.41 AMP の引数に PRMMAT がなかったのを修正

##### ・ 2.42 材料特性名を入力するようにした。有効上載圧を印刷。他

##### ・ 2.43 最大値ファイル出力の二方向入力時のバグを修正

##### ・ 2.44 表形式の材料特性の入力で、ひずみが最大ひずみを超えたときの処置をいくつか用意した。

##### ・ 2.45 弾性の材料特性のとき、全ての材料の減衰の第1項を (DMP0(1,IM)) を100で割ってしまっていたバグを修正。一般に0が入るので結果への影響はそれほど無いと考えられる。

#### ・ 2.50 1999.3 吉田 望

最大せん断応力の出力方法を選べるようにした。すなわち、SHAKE のように最大ひずみと剛性の積で出力するか、それとも複素剛性を考慮して時刻歴で出力するかを選択する。後者を選ぶと計算量が多くなる。

### 3.0 1999.5 吉田 望

散乱の減衰と履歴減衰を区別。

#### ・ 3.01 1999.11 吉田 望

せん断弾性定数の拘束圧依存性を考慮。FDEL 等にべきの効果を入れる。

#### ・ 3.10 2000.4.3 吉田 望

FDEL にべきの項。吉田方式に各種オプション (最終が決まるまでの一時的処理)。沢田による簡易法のルーチン、弾性のデータ出力オプションを加える。

#### ・ 3.11 2000.5.3 吉田望

サブルーチン SDEP を DYNES と共通に使えるように変更。

#### ・ 3.12 2000.11.10 吉田望

吉田方式を最小自乗法ではなく、べきによる方法を標準にする。散乱のマニュアルの式に対する記述の誤りを修正 (プログラムは OK)。また、吉田方式で剛性は一定、減衰のみを周波数依存とするオプションを追加。

#### 3.13 2001.7.6 吉田望



沢田式の(2.11.6)の右辺に係数の2が欠けているのを修正。

3.20 2001.12.15

動的変形特性（経験式）に対するコーディングを変更。  
幾つかの実験式を加える。

3.21 2002.10.31

最大速度の印刷に絶対、相対の選択ができるようにした。  
時刻歴出力などで異常な層が入力されたとき無視するようにした。  
建築基準法、JR は動かなかったのを修正

3.22 2002.11.12

RESPFQ の GAM0の型宣言分の二つ目の引数, NNUM が間違っていたので, \*に修正。

3.23 2003.1.8

FRQPRP で周波数依存性の材料特性を出力する際, 層数が少なく, かつ NT が NT0より非常に小さいとき, 周波数の出力がおかしかったのを修正した。この点を除けば結果には影響しない。  
RESPSP で速度応答スペクトルの値の代入間違いを修正

3.24 2003.12

二方向入力 of SHAKE 以外  
三方向入力

3.25 2004.9

港湾の技術上の指針を用いたときにデータの数少なく登録されるバグを修正

3.26 2005.8

IDYNEQ=2の仕様を変更（通常ユーザーには関係なし）

3.27 2006.1

地震波の入力で NT1の入力があり, NACC より小さいとき, NACC に置き換える。

3.30 2008.4

DYNEQ の高振動数成分の有効ひずみを0から, 少し大きい値を設定できるように変更。

3.31 2009.7

小さい修正

3.32 2012.1

Maxwell 減衰（円振動数に逆比例）を用いたとき,  $\omega$ が小さいとき,  $h$  が1以上になることがあり, これを避けるために  $h$  の最大値が0.7より大きくならないように修正。

3.33 2012.7

R-O モデルのバグを修正。通っているケースは問題なし。

3.34 2012.12

二方向入力の際, 増幅比が1つしか出力されなかった事があるのを修正。なお, 二方向入力でも増幅比は二方向で同じなので, 一つ出力されていれば十分である。

3.35 2014.12

Maxwell モデルの複素剛性で  $(1+2ih)/(1+4h^2)$  が正しいのを分母が  $(1+2ih)/(1-4h^2)$  と符号が違っていた。

3.36 2015.9

Fourier 振幅の出力がマニュアルでは  $T/2$  を乗じた値となっていたが, 実際には,  $T$  を乗じた値になっていたのをマニュアル通りに修正した。

3.37 2016.10

式を実装した。ただし, 隠しオプションである。

3.38 2017.10

いくつかの実験式の追加

3.39 2018.6

収束判定に用いる  $\gamma_{ref}$  を  $\gamma_{ref} = \alpha \gamma_{max}$  で常に計算していたのを、IDYNEQ=3の時には  $\gamma_{ref} = \gamma_{max}$  とした (プログラムのバグ)。ただし、イタレーションの回数が同じであれば、結果は同じ。

#### 4.0 2020.4 吉田 望

YAS モデルの追加。

4.01 YAS モデルの定義を変える。

## 10 プログラムの構成

### 10.1 ツリー構造

DYNEQ	main プログラム。コントロールと dynamic allocation
ERRP01	エラーの印刷とジョブの終了
ERRP02	警告の印刷
CHRCON	文字入力で最初のブランクがあるとき、左詰にする
ALLOC	配列サイズのチェック
INPUT1	材料に関する入力
INPUT2	地盤に関する入力
INPUT3	地震に関する入力
INPUT4	散乱の減衰に関する入力
FDMAX	時刻歴の最大値を求める。
FAST	複素フーリエ変換と逆変換
SHAKE	地震応答解析のコントロール
SDEP	材料非線形に伴う剛性と減衰の計算
FAST	
RESPFQ	応答解析
....	
TMHST	各種の時刻歴応答を求める。
FAST	フーリエ逆変換
FDMAX	
PRTMAX	計算終了時の最大値の計算と印刷
SDEP	
TMHST	
FDMAX	
RESPFQ	
TMOUT	時刻歴のファイル出力
RESPFQ	
....	
TMHST	
SDEP	
AMP	周波数応答関数のファイル出力
RESPFQ	
....	
RESPSP	応答スペクトルのファイル出力
RESPFQ	
....	
TMHST	
FOURIE	フーリエスペクトルのファイル出力
RESPFQ	
....	
SDEP	
SMOOTH	平滑化
....	

RESPFQ	応答解析や各種の処理をするマスタールーチン
FAST	フーリエ変換と逆変換
SMOOTH	平滑化のためのマスタールーチン
TRISMT	三角形ウィンドウによる平滑化
SDEP	材料非線形に伴う剛性と減衰の計算
SMOOTH	平滑化のためのマスタールーチン
TRISMT	三角形ウィンドウによる平滑化
ELSTMD	弾性のデータを出力するためのルーチン
SAWADA	沢田の略算法を計算するためのメインルーチン
SAWAD1	与えた最大せん断応力に対して地表の変位を求める
SDEPMD	せん断応力に対し、せん断ひずみと割線剛性を求める。
SAWAD2	変位スペクトルより与えた周期に対するスペクトル値を求める。
SDEPMD	せん断応力に対し、せん断ひずみと割線剛性を求める。

## 10.2 主要変数

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

MXARE0	dynamic allocation の容量の最大値。パラメータ文でサイズを変更できる。
MXAREA	=MXARE0。プログラム中で用いられる。
NT0	計算に用いる時刻歴数。2のべき乗
NMAT	材料数。
NNUM	表型のひずみ依存性のひずみの数の最大値。CONTROL の入力により変更可能。
NLAY	層数。
ITER0	イタレーション回数の最大値。CONTROL の入力により変更可能。
IDMP	減衰タイプ。CONTROL で入力する。
ERR0	誤差判定に用いる収束値。CONTROL の入力により変更可能。
NTOTAL	dynamic allocation で現在までに使っているサイズ
INPTM	材料に関する入力があったことに関するフラグ
INPTL	地盤に関する入力があったことに関するフラグ
INPTE	地震に関する入力があったことに関するフラグ
IEQK	地震応答解析を行ったことに関するフラグ
IMULT	二方向入力に対するフラグ
ISHCON	二方向入力の際、最大ひずみの計算方法に関するフラグ
TITLE	問題のタイトル
MXFIL	最大値等出力用のファイル名
ACCG	重力加速度

### 材料ごとに指定するパラメータ

MTFLG	材料の剛性の定義があるひずみまでしか行われていなくて、計算でその最大ひずみを超えるひずみが現れたときの処置 =0：最後の点から双曲線モデルで延長
-------	---

	=1 : 完全塑性
	=2 : 最大ひずみと同じ (SHAKE タイプ)
MTYP(NMAT)	材料タイプ番号
NTAB(NMAT)	材料のひずみ依存性のひずみの数
GMAX0(NMAT)	各材料のせん断弾性定数
ALPHA(NMAT)	各材料の有効ひずみ計算用の定数
GAM0(NNUM,NMAT)	各材料のひずみ依存性のひずみ
GSEC0(NNUM,NMAT)	各材料の G/Gmax
DMP0(NNUM,NMAT)	各材料の減衰
ROW0(NMAT)	各材料の質量密度 (入力は単位体積重量。これを変換)
HMAXW0(NMAT)	各材料の円振動数に逆比例する減衰の係数
HVOGT0(NMAT)	各材料の円振動数に比例する減衰の係数
HMMIN(NMAT)	周波数依存減衰を用いる場合の最小減衰定数
PRMMAT(10,NMAT)	材料特性を計算するのに必要なパラメータで、材料タイプごとに異なる。
	=0 :
	=1 :
	=2 : (1)= $\gamma_r$ , (2)= $h_{min}$
	=3 : (1)= $\tau_f$ , (2)= $\alpha$ , (3)= $\beta$ , (4)= $h_{min}$
	=10 :
	=11 : (1)=基準上載圧, (2)=A, (3)=B, (4)=m, (5)=n
	=12 : (1)= $h_{max}$ , (2)= $h_{min}$
	=13 : (1)= $D_{50}$ , (2)= $K_0$ , (3)=単位変換用
	=14 : (1)= $K_0$ , (2)=単位変換用
	=15 :
	=16 : (1)= $h_{max}$ , (2)= $K_0$ , (3)=単位変換用
	=17~18 :
	=19~22 :
	=23 : (1)= $I_p$ , (2)= $h_{min}$ (入力時%, 後で実数に)
MSCT(NMAT)	散乱減衰の種類。0~4。ただし, SHAKE で 1 ~5に変更する。
HDMPF0(NMAT)	周波数依存減衰を考慮するときの各種のべき。IANATP=1 (SHAKE) では意味がない。IANATP=2 (DYNEQ) では最小自乗を適用するべき, IANATP=3 (FDEL) では $(F(\gamma)/F_{max})$ に対するべき, IANATP=4 (Sato) では減衰のべき。もし0が入力されると, 3.7.1項の DMPF の値が自動的に用いられる。
SCAT(10, NMAT)	散乱の減衰用のパラメータ
	(1)= $h=\alpha f^\beta$ の $\alpha \rightarrow \alpha (\omega/2\pi)^\beta$ の $\alpha (1/2\pi)^\beta$ (円振動数の函数)
	(2)= $h=\alpha f^\beta$ の $\beta$
	(3)=FLOW $\rightarrow 2\pi$ *FLOW (円振動数に変換)
	(4)=FUNDR $\rightarrow 2\pi$ *UNDR (円振動数に変換)
	(5)=FUPER $\rightarrow 2\pi$ *UPER (円振動数に変換)
	(6)=HLOW
	(7)=HUPER
	(8)=函数に FUPER の値を入れたときの減衰
	(9)=函数に FUNDER の値を入れたときの減衰

## 層ごとに定義する定数

MAT(NLAY)	各層の材料番号
HLAY(NLAY)	各層の層厚
GMAX(NLAY)	各層のせん断弾性定数
ROW(NLAY)	各層の質量密度（入力は単位体積重量。これを変換）
GSEC(NLAY)	各層の現在の G/Gmax の値
DMP(NLAY)	各層の現在の減衰定数
AG*(NLAY)	各層の複素剛性
AK*(NLAY)	各層の複素波数
XWK1*(NLAY)	各層の作業領域
XWK2*(NLAY)	各層の作業領域
STRNMX(NLAY,2,3)	各層のひずみの最大値と時刻。（1,*,3）は二方向入力の際の最大ひずみ（ISHCON により値は異なる）
HMAXW(NLAY)	各層の円振動数の逆数に比例する減衰の係数
HVOGT(NLAY)	各層の円振動数に比例する減衰の係数
HMIN(NLAY)	周波数依存減衰を用いる場合の最小減衰定数
SIGVP(NLAY)	有効上載圧
COEFLY(5,NLAY)	解法の種類に応じて使われる作業領域 SHAKE タイプ：使用しない FDEL タイプ：(1)=フーリエ振幅が最大となる時のスペクトル値, (2)=そのときの周波数 YOSHIDA タイプ：(1)= 最大ひずみ時の周波数（注：時刻歴のゼロクロス～ゼロクロスで求めた）, (2)= 時刻歴の最大ひずみ, (3)=係数（最小自乗法用） 佐藤タイプ：FDEL タイプと同じ

## 地震応答に関するパラメータ

DT	時間間隔
CUTFQ	cut off frequency
DW0	最小の周波数増分
NT	計算に用いる cut off frequency を考慮した周波数の数。
X0(NT0,IMULT)	計算に用いる入力加速度
XWK(NT0)	時刻歴の出力に用いられる作業領域
CDIS*(NT,IMULT)	入力速度の複素フーリエ係数
XDIS*(NT,NLAY,IMULT)	各層の絶対変位の複素フーリエ級数
XSTRN*(NT,NLAY,IMULT)	各層のせん断ひずみの複素フーリエ級数
FOUAMP(NY,NLAY)	フーリエ振幅（平滑後）
XWKC*(NT0)	逆フーリエ変換のための作業領域
RESPWV*(NT)	応答値の複素フーリエ級数

沢田の略算法に対するパラメータ

DEPTH(NLAY)	最初は層境界の深さ。その後、 $\left[ \cos\left(\frac{\pi}{2H} z_{i+1}\right) - \cos\left(\frac{\pi}{2H} z_i\right) \right]$ を記憶。
SINU(NLAY)	最初は層中央の深さ、その後、 $\sin\left(\frac{\pi}{2H} z\right)$
SPEC(NSPEC)	スペクトルの値
TSPEC(NSPEC)	周期

注) HLAY は一番最後の出力の際に、相対変位を入れる場所として使われる。

### 10.3 ファイル

各種の計算に用いられるファイルは以下の通りである。

番号	内 容
5	一般的な入力でカードと呼ばれる
6	一般的な印刷
9	dyneq1.tmp 用：周波数依存材料特性
10	dyneq.tmp 用：ひずみ，加速度，速度，変位の時刻歴
11	地震波の入力
12	時刻歴，スペクトルなど，地震応答解析終了後の各種出力。ELSTMD，SAWADA も。
13	POSTEQ 用の最大応答値ファイル。通常 DYNEQ.max

## 11 各種のメモ

### 11.1 隠しオプション

#### 11.1.1 解析の種類

DYNEQ は、周波数依存に関し、標準的には4つのオプションを持っている（3.7.1項参照）。しかし、実際には、各種のトライアルの際に用いた、他の解析方法もある。通常は使えないが、オプションとして「YAMII」を指定すると、使えるようになる。「YAMII」は、「RESPONSE」を使う前に指定しておく。すると、3.7.1項の入力の際に、次のケースが使用できるようになる。

6～10 IANATP 解析の際の、有効ひずみの周波数依存性の考慮に関する指示。なお、IMULT=2（二方向入力）の時、IANATY≥2は使えない。

=11：せん断定数に関しては周波数に依存しない（IANATP=1と同じ）が、減衰に関しては周波数に依存する（IANATP=3と同じ）。

=12：IANATP=4と原則的に同じだが、減衰は次式で与えられる。

$$h = h_o \left( 1 + f^a - f_{max}^a \right)$$

ここで、 $a$ はこの後で入力する DMPF である。

=13：せん断定数に関しては周波数に依存しない（IANATP=1と同じ）が、減衰に関しては周波数に依存する（IANATP=2と同じ）。IANATP=2の際は、例えば3.2節の ALPHA は用いないが、IANATP=13では IANATP=1の手法に基づき有効剛性を計算するので、ALPHA の入力も必要となる。

#### 11.1.2 吉田らの方法のオプション

有効ひずみの計算法を変更する。このオプションは、事前に YAMII の指示が必要である。

「DYNEQ」が識別文字で、計算の実行「RESPONSE」の前に指定する。なお、このオプションが無いときには IDYNEQ=3に設定されている。

IDYNEQ, GEFFMN, GEFFPW
------------------------

(I5, 5X, 2F10.0)

1～ 5 IDYNEQ 計算法に関する指示。0であれば、標準値（これまでに設定された値）

=1：文献65の方法。最小自乗法により計算する。ひずみ、周波数の両方とも対数軸。初期値。

=2：最小自乗法で計算するが、ひずみ軸は対数軸ではなく実軸。

=3：標準的な方法。最小自乗法は用いず、周波数 DYNFRQ で有効ひずみ0とする。ここで、周波数軸は対数軸。ひずみ軸は実軸。

=4：最小自乗法は用いず、周波数 DYNFRQ で有効ひずみ0とする。ここで、周波数軸、ひずみ軸とも実軸。

11～20 GEFFMN IANATP=3では、周波数 $f_e$ の時のひずみ（生の値で%ではない。）。DYNEQの原論文では0になっている。正の数字を入力すれば有効になる。以下の式により決定する。 $\gamma_{eff0}$ を入力する。このオプションは、IDYNEQ=3の時のみ使用可能である。

$$\gamma_{eff} = \begin{cases} \gamma_{max} & f_p > f \\ \gamma_{eff} = \gamma_{max} \left\{ 1 - \left( 1 - \frac{\gamma_{eff0}}{\gamma_{max}} \right) \left( \frac{\log f - \log f_p}{\log f_e - \log f_p} \right)^m \right\} & f_p \leq f \leq f_e \\ \gamma_{eff} = \gamma_{eff0} e^{-a(f-f_e)} & f > f_e \end{cases}$$

なお、 $0 > \text{GEFFMN} > -1$  の入力が行われたときは、 $\gamma_{eff0} = |\text{GEFFMN}| \gamma_{max}$  とな



るように決める。

21～30 GEFFPW 高振動数の低減を制御するパラメータ。正の数字を入力すれば有効になる。上の式の  $a$  を入力する。大きい方が急に有効ひずみが小さくなる。0とすれば、一定ひずみ GEFFMN となる。

## 11.2 吉田らの方法の計算

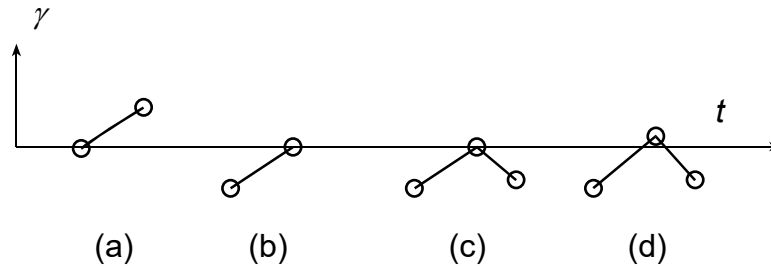
### 11.2.1 ゼロクロス

前回の値  $x_b$  と今回の値  $x$  を比較することによってひずみがゼロ軸を横切ったときの判定は可能である。すなわち、 $x_b x \leq 0$  であれば、ゼロ軸を横切っている。ただし、等号の場合、次の問題がある。

①ゼロ軸を横切るのは、常に  $x=0$  となったときとする（下図の a）。つまり、 $x_b=0$  ではゼロ軸を横切っていないと考える（下図の b）。

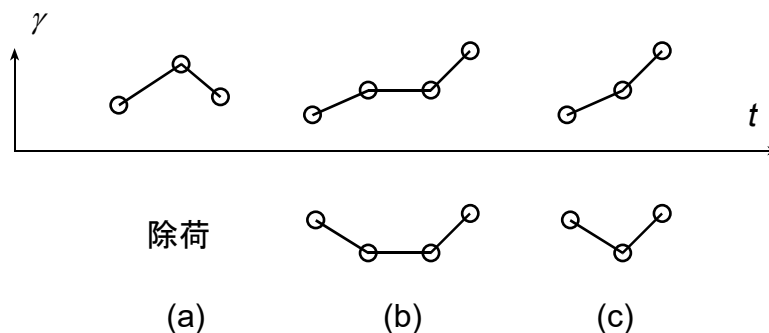
② $x=0$  となったからといって、ゼロ軸を横切っているとは限らない。すなわち、 $x=0$  となり、ここで方向が反転することもあるわけである（下図の c）。この場合には、少し行き過ぎたと考えれ（下図の d）ば、やはり、ここで周期の基準点と考えて問題ない。

従って、常に、 $x=0$  になったときにゼロクロスの基準点と考える。



### 11.3 除荷点の判定

現在と、過去二つの値を用いる。ここで、下図の(a)の時は除荷である。しかし、(b)のケースでは、除荷か载荷の継続かを見分けることが出来ない。そこで、前と同じ値となったときには、その点は考慮しないことにする。



### 11.4 最小自乗法の計算

直線式一般

$$\gamma = af + b$$

$$S = \sum (\gamma - \bar{\gamma})^2 = \sum (af + b - \bar{\gamma})^2$$

$$\frac{\partial S}{\partial a} = \sum 2(af + b - \bar{\gamma})f = 2a \sum f^2 + 2b \sum f - 2 \sum f\bar{\gamma} = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = \sum 2(af + b - \bar{\gamma}) = 2a \sum f + 2bn - 2 \sum \bar{\gamma} = 0$$

$$\begin{bmatrix} \sum f^2 & \sum f \\ \sum f & n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a \\ b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum f\bar{\gamma} \\ \sum \bar{\gamma} \end{Bmatrix}$$

定点を通る m 次式

$$\gamma = a(f - f_p)^n + \gamma_p$$

ここで,  $f_p$ ,  $\gamma_p$  は通るべき点。

$$S = \sum (a(f - f_p)^m + \gamma_p - \bar{\gamma})^2$$

$$\frac{\partial S}{\partial a} = \sum 2(a(f - f_p)^m + \gamma_p - \bar{\gamma})(f - f_p)^m = 2a \sum (f - f_p)^{2m} + 2 \sum (\gamma_p - \bar{\gamma})(f - f_p)^m = 0$$

$$a = - \frac{\sum (\gamma_p - \bar{\gamma})(f - f_p)^m}{\sum (f - f_p)^{2m}}$$

#### 11.4.1 最小自乗法によらない方法

下図のように, 頂点( $f_{max}, r_p$ )を通る多項式を考える。式は, 次のように表せる。

$$r = -A(f - f_{max})^m + r_p$$

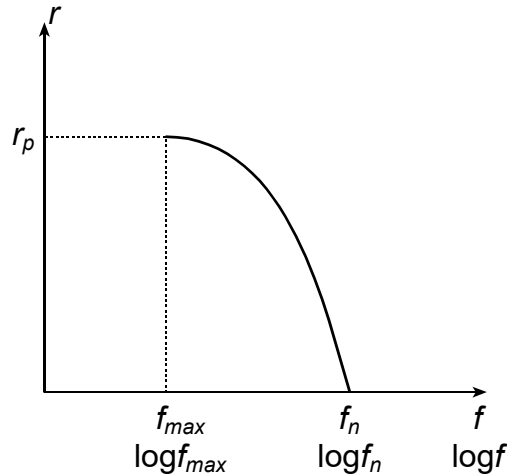
もう一つの点は, 振幅0で Nyquist 周波数  $f_n$  とする。すると, 係数 A は次のようになる。

$$A = \frac{r_p}{(f_n - f_{max})^m}$$

したがって, 求める式は次のようになる。

$$r = -r_p \left( \frac{f - f_{max}}{f_n - f_{max}} \right)^m + r_p = r_p \left\{ 1 - \left( \frac{f - f_{max}}{f_n - f_{max}} \right)^m \right\}$$

対数軸の時は,  $f$  を  $\log f$  に変えればよい。



## 11.5 応力-ひずみ関係に対する補間

表形式のデータでは与えられたひずみの外側のデータが要求されることがある。

### 11.5.1 小さいひずみに対する補間

表形式のデータでは、最小ひずみ時の剛性が初期剛性  $G_{max}$  と等しくないことがある。この補間は次のようにする。

双曲線モデルで補間する。

$$\tau = \frac{G_{max}\gamma}{1+a\gamma}$$

ここで、 $(\gamma_1, \tau_1)$ を通るという条件を与えると、

$$a = \frac{G_{max}\gamma_1 - \tau_1}{\gamma_1\tau_1}$$

もう一つの考えとして、割線剛性をひずみに依存すると考える。等価線形の考え方からすればこの方が自然かもしれないので、現在はこちらを用いている。

$$g = \frac{g_1 - 1}{\gamma_1}\gamma + 1$$

ここで、 $g = G/G_{max}$  である。

応力-ひずみ関係は次のようになる。  $\tau = G\gamma = G/G_{max} \gamma G_{max} = g \gamma G_{max}$

$$g = \frac{\tau}{\gamma G_{max}} = \frac{g_1 - 1}{\gamma_1}\gamma + 1$$

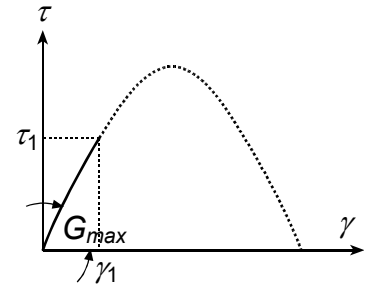
すなわち、

$$\tau = G_{max} \left( \frac{g_1 - 1}{\gamma_1}\gamma + 1 \right) \gamma$$

これをひずみについて解くと、次のようになる。

$$\gamma = \frac{-G_{max} \pm \sqrt{G_{max}^2 + 4\tau G_{max} \frac{g_1 - 1}{\gamma_1}}}{2G_{max} \frac{g_1 - 1}{\gamma_1}} = \frac{1 \pm \sqrt{1 - 4\tau \frac{1 - g_1}{G_{max}\gamma_1}}}{2 \frac{1 - g_1}{\gamma_1}}$$

曲線形状から見て、明らかに小さい方をとるべきである。（負の符号：右図参照）ここで、チェックのため、 $\tau = \tau_1$ を代入すると次のようになる。



$$\gamma = \frac{1 - \sqrt{1 - 4\tau_1 \frac{1 - g_1}{G_{max}\gamma_1}}}{2 \frac{1 - g_1}{\gamma_1}} = \frac{1 - \sqrt{1 - 4g_1(1 - g_1)}}{2 \frac{1 - g_1}{\gamma_1}} = \frac{1 - (2g_1 - 1)}{2 \frac{1 - g_1}{\gamma_1}} = \frac{2(1 - g_1)}{2 \frac{1 - g_1}{\gamma_1}} = \gamma_1$$

次に、減衰を考える。例えば安田・山口の提案式では減衰を与える最小ひずみは0.01%である。これに対応するひずみはしばしば数%となり、最小ひずみにするには大きすぎる。それで、補間することを考える。補間は双曲線を利用するとする。すなわち、

$$h - h_{min} = \frac{A}{\log \gamma - B}$$

ここで、 $A$  と  $B$  は未知数であり、次の二つの条件から決める。

- ・提案式の最小ひずみに対応する減衰
- ・このときの折線が連続している。

この条件は、次のように表される。

$$h - h_{min} = \frac{A}{\log \gamma - B}$$

$$h' = \frac{-A}{(\log \gamma - B)^2}$$

ここで、ひずみは対数軸を使っているので注意。これを解くと未知数  $A$ ,  $B$  は次のように表される。

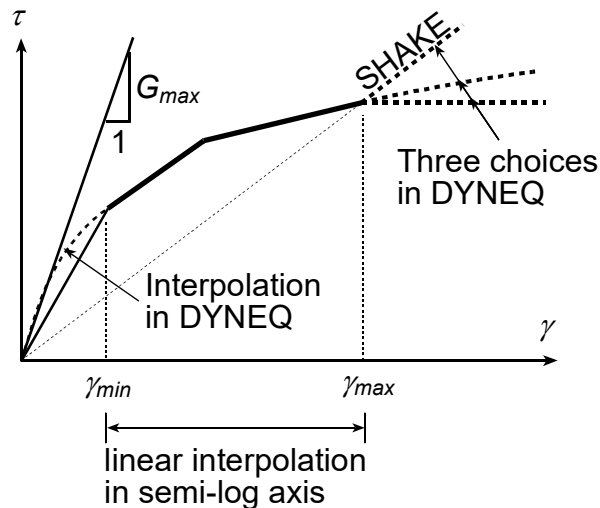
$$A = -\frac{(h - h_{min})^2}{h'}$$

$$B = \frac{h - h_{min}}{h'} + \log \gamma$$

### 11.5.2 大きいひずみに対する補間

表形式の入力では、一番大きいひずみより大きいところでデータがない。考え方は以下の4つである。

- ①  $G$  が一定とする SHAKE や FLUSH の方法。これは、せん断応力が線形に大きくなるので物理的におかしいし、収束しなくなる可能性もある。
- ② せん断応力を一定とする。これは、せん断強度をあまりにも過小評価している可能性がある。
- ③ 双曲線モデルを近似するが、初期剛性を  $G_{max}$  のままとする。強度は未定
- ④ 双曲線モデルを近似するが、接線が連続する様にする。現在のオプションにはない。



- ①  $G$  が一定

$$\tau = G\gamma = gG_{max}\gamma$$

②  $\tau$ が一定

$$\begin{aligned}\tau &= \tau_n = G_n \gamma_n = g_n G_{max} \gamma_n \\ G &= \tau / \gamma = g_n G_{max} \gamma_n / \gamma\end{aligned}$$

③ 双曲線モデル

双曲線モデルは次式で表される。

$$\begin{aligned}G / G_{max} &= g = 1 / (1 + \gamma / \gamma_r) \\ \text{ここで, 最後の点を通る条件から, 基準ひずみが求まる。} \\ g_n &= 1 / (1 + \gamma_n / \gamma_r) \\ \gamma_r &= \frac{\gamma_n g_n}{1 - g_n}\end{aligned}$$

したがって, 式は次のようになる。

$$\begin{aligned}g &= 1 / (1 + \gamma / \gamma_r) \\ \tau &= \frac{G_{max} \gamma}{(1 + \gamma / \gamma_r)} \\ \gamma &= \frac{\tau}{G_{max} - \tau / \gamma_r} = \frac{1}{G_{max}} \frac{\tau}{1 - \tau / (G_{max} \gamma_r)}\end{aligned}$$

ここで, ひずみ無限大に相当する最大せん断応力は次のようである。

$$\tau_{max} = G_{max} \gamma_r = G_{max} \frac{\gamma_n g_n}{1 - g_n}$$

④ 前の計算では  $G_{max}$  が初期値と変わらないとしたが, これにこだわる必要もない。それより, 最後の点での接線が一致する方が自然である。すると, 以前の定式化で  $G_{max}$  も変わって良いことになる。すなわち,

$$\tau = \frac{G_{max} \gamma}{1 + \gamma / \gamma_r}$$

において, 基準ひずみと  $G_{max}$  の両方をパラメータとする。

$$\begin{aligned}\text{条件1: } \tau_n &= \frac{G_{max} \gamma_n}{1 + \gamma_n / \gamma_r} \\ \text{条件2: } k_n &= \left. \frac{d\tau}{d\gamma} \right|_{\gamma=\gamma_n} = \frac{G_{max}}{(1 + \gamma_n / \gamma_r)^2} \\ \text{ここで, } k_n &= \frac{\tau_n - \tau_{n-1}}{\gamma_n - \gamma_{n-1}}\end{aligned}$$

これを解くと次のようになる。

$$\begin{aligned}\frac{\tau_n}{k_n} &= \frac{\gamma_n}{\frac{1}{1 + \gamma_n / \gamma_r}} = \gamma_n (1 + \gamma_n / \gamma_r) \quad \text{すなわち, } \gamma_r = \frac{\gamma_n}{\frac{\tau_n}{\gamma_n k_n} - 1} \\ G_{max} &= \frac{\tau_n^2}{\gamma_n^2 k_n}\end{aligned}$$

せん断強度は次のようになる。

$$\tau_{max} = \frac{\tau_n}{1 - \gamma_n k_n / \tau_n}$$

次に，減衰を考える。双曲線モデルを考えると，減衰は次のように表される。

$$h = h_{max} \left(1 - \frac{G}{G_{max}}\right) = h_{max} \left(1 - \frac{1}{1 + \gamma / \gamma_r}\right)$$

これより，最後の点を通ることにして，仮想の基準ひずみを求めると次のようになる。

$$\gamma_r = \frac{\gamma(h_{max} - h)}{h}$$