

## 参考資料 - 2 DYNES3D について (プログラム開発の経緯)

浅部地盤の強震動計算においては、地盤の非線形性（地盤材料の剛性の歪依存性）が考慮できる計算手法を採用することが望ましい。そして、地盤の非線形性を考慮するには、地盤の材料特性の変化を時々刻々計算し、数値積分に反映していく方法である、いわゆる非線形法が好ましい。

地盤の地震応答解析では、非線形法はそのはじめから、全応力解析と有効応力解析を同時に扱えるプログラムが作られてきて、全応力解析のみのプログラムはそれほど多くない。一次元の問題に対してこれまで多く使われてきているのが YSUAYSUA<sup>1)</sup>と DESRA<sup>2)</sup>である。これらは作られたのが古いということソースリストが公開されていることなどが多く使われている理由である。DESRA と YUSAYUSA は過剰間隙水圧発生モデル化を除けば、ほとんど同じプログラムで、応力 - ひずみ関係については双曲線モデルを用いている。従って、全応力解析では両者はほとんど同じ結果を与える。なお、YUSAYUSA については、その後 Ramberg-Osgood モデルが加えられ、YUSAYUSA-2<sup>3)</sup>として公開されている。

非線形法では、応力 - ひずみ関係のモデル化が解析結果に非常に影響を与える。さらに、減衰特性なども解析結果に影響するし、液状化解析では数値計算の手法で答の異なることもある。しかし、現行の非線形解析では減衰特性としては Rayleigh 減衰を用いるのが一般的であり、それ以外の減衰はほとんど用いられない。そこで、ここでは、応力 - ひずみ関係に着目し、より現実的なモデルが考慮できるプログラムの開発が試みられた。

### 1 非線形解析に用いられる構成則

地盤の地震応答解析では多様な構成則が用いられる。一次元解析に限れば比較的単純な構成則でモデルパラメータが設定できる。

全応力一次元の条件化では、せん断応力 $\tau$  - せん断ひずみ $\gamma$ 関係のみが対象である。多く用いられるモデルは次の構成をしている。

- 1) 骨格曲線：処女載荷時の挙動を表す。
- 2) 履歴曲線：骨格曲線から除荷した後の挙動を表す。履歴曲線は骨格曲線に Masing 則を適用して作られるのが普通である。すなわち、図-1に示すように、骨格曲線を2倍し、原点を除荷点に移動すると履歴曲線を作ることが出来る。

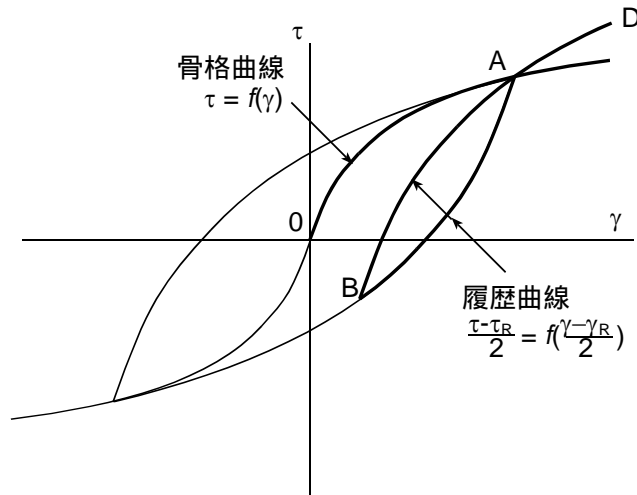


図-1 骨格曲線と履歴曲線

土の非線形特性は、動的変形特性として与えられる。すなわち、せん断剛性（剛性率）のひずみ依存性（ $G$ - $\gamma$ 関係）と減衰定数のひずみ依存性（ $h$ - $\gamma$ 関係）で与えられる。図-2にその求め方を示すが、一定応力振幅の実験を行い、除荷点を結ぶ割線剛性をせん断剛性（剛性率）、履歴曲線の面積をひずみエネルギーで無次元化することによって減衰定数を求めている。これを図-1のモデルと比較すると、 $G$ - $\gamma$ 関係は骨格曲線を、 $h$ - $\gamma$ 関係は履歴曲線を表していることがわかる。

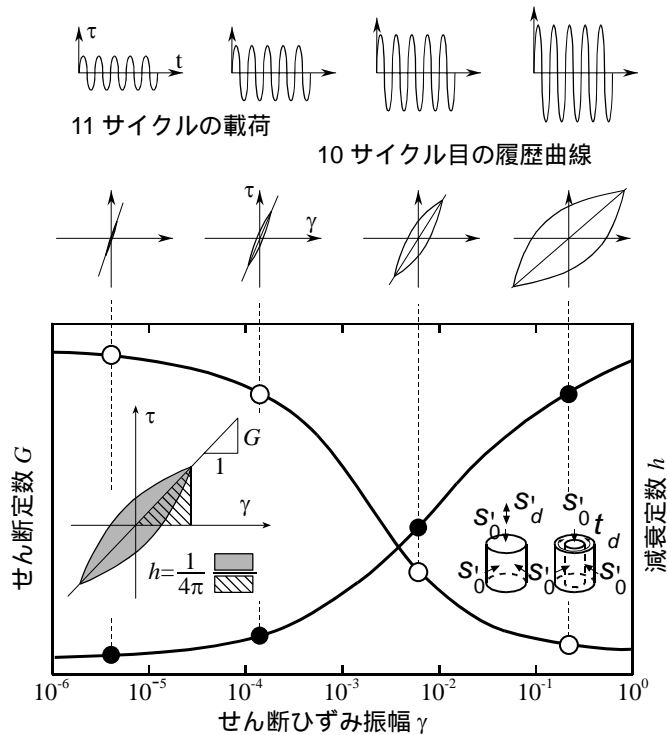


図-2 動的変形特性の求め方

骨格曲線として実用的によく用いられるのは、双曲線モデル<sup>4)</sup>と Ramberg-Osgood

モデル<sup>5)</sup>である。これらはそれぞれ次のような形をしている。

$$\text{双曲線モデル} : \tau = \frac{G_{max}\gamma}{1 + G_{max}\gamma/\tau_{max}} \quad (4a)$$

$$\text{Ramberg-Osgood モデル} : \gamma = \frac{\tau}{G_{max}} \left[ 1 + \alpha \left( \frac{\tau}{\tau_f} \right)^{\beta-1} \right] \quad (4b)$$

なお、これらは骨格曲線に対する式であるが、これを動的変形特性で用いられるせん断定数のひずみ依存性を書き換えると次のようになる。

$$\text{双曲線モデル} : \frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + G_{max}\gamma/\tau_{max}} = \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_r} \quad (5a)$$

$$\text{Ramberg-Osgood モデル} : 1 = \frac{G}{G_{max}} \left[ 1 + \alpha \left( \frac{G}{G_{max}} \frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^{\beta-1} \right] \quad (5b)$$

また、これらに Masing 則を適用して得られる減衰定数は次のようになる。

$$\text{双曲線モデル} : h = \frac{4}{\pi} \left( 1 + \frac{\gamma_r}{\gamma} \right) \left[ 1 - \frac{\gamma_r}{\gamma} \ln \left( 1 + \frac{\gamma}{\gamma_r} \right) \right] - \frac{2}{\pi} \quad (6a)$$

$$\text{Ramberg-Osgood モデル} : h = \frac{2}{\pi} \frac{\beta-1}{\beta+1} \left( 1 - \frac{G}{G_{max}} \right) \quad (6b)$$

これら二つのモデルがよく用いられるのは、次のような理由によると考えられる。動的変形特性に関する先駆的な研究である Hardin と Drnevich<sup>8)</sup>によれば、動的変形特性は次のようにモデル化することが出来る。

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_r}, \quad h = h_{max} \left( 1 - \frac{G}{G_{max}} \right) \quad (7)$$

これからわかるように双曲線モデルは  $G$ - $\gamma$ 関係、Ramberg-Osgood モデルは  $h$ - $\gamma$ 関係に対するモデルと一致している。しかし、このことは一方では Masing 則は実材料では成立していないことを表している。すなわち、Masing 則を用いている限り土の非線形性を正確に表現することは出来ない。

この点を改良する履歴法則を提案がなされた<sup>6)</sup>。すなわち、図-3に示すように、実際の骨格曲線とは異なる仮定の骨格曲線を考え、これに Masing 則を適用しようというものである。仮定の履歴曲線は、最低限、除荷点を通る、Masing 則を適用して得られる履歴曲線の減衰定数が実材料の減衰定数になっている、の二つの条件を満たせばよい。すなわち、二つ以上のパラメータがある数式モデルであれば何でも用いることが出来る。彼らは、二つのパラメータを持つ数式として双曲線モデル、更に除荷時の剛性が弾性剛性であるという三つ目の条件を加えた場合に三つのパラメータを持つ数式として Ramberg-Osgood を用いる方法を示し、計算例を示している。この方法は、彼らによって汎用プログラム STADAS、その次元版である DYNES に組み込まれたほか、液状化解析プログラム FLIP にも取り入れられているし、JR の指針でも考え方が紹介されている。

この考え方の導入により、非線形解析においても減衰定数のひずみ依存性を完全

に満たすことが可能になった。しかし，骨格曲線については依然数式モデルが用いられていた。その後，骨格曲線も実験値を完全に満たす方法が提案された<sup>7)</sup>。前述のように， $G-\gamma$ 関係が骨格曲線と対応しているので， $G-\gamma$ 関係から $\tau-\gamma$ 関係を計算し，いくつかの点として与えられた $\tau-\gamma$ 関係を適当な関数で補間するのである。補間方法としては線形補間が一番簡単で，骨格曲線は次のように表される。

$$\tau = \frac{\tau_{i+1} - \tau_i}{\gamma_{i+1} - \gamma_i} (\tau - \tau_i) + \gamma_i \quad (\gamma_i \leq \gamma \leq \gamma_{i+1}) \quad (8)$$

この方法はその後次元解析<sup>9)</sup>，液状化解析<sup>10)</sup>においても使うことが出来るように改良されている。

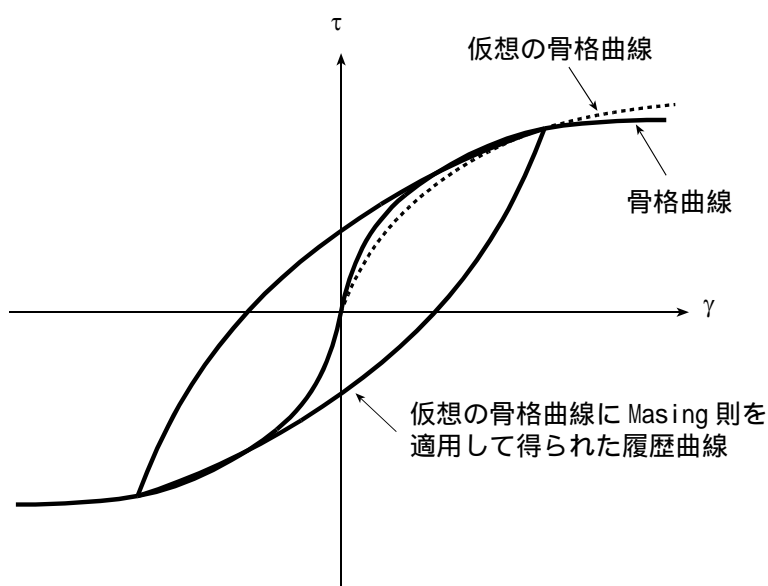


図-3 石原・吉田らによる履歴モデルの改良法

### 3 YUSAYUSA との比較

YUSAYUSA-2は特定の構成則に基づく液状化解析専用のソフトであるのに対し，DYNES3D は前述のように汎用プログラム STADAS から次元の地震応答解析部分を切り出したプログラムであり，かなり広範囲な内容を持っている。主要な部分について両者を比較すると次のようになる。

なお，一般的な定数を用いるとすれば，YUSAYUSA-2と DYNES3D の違いは応力-ひずみ関係のみであり，全応力解析では YUSAYUSA-2の機能はすべて DYNES3D でカバーされている。また，同じ構成則を用いれば，両者はほとんど同じ結果を与える。若干の違いは非線形法の解法の違い，除荷時の扱いの違いなどによるものであり，工学的意味のある差ではない。

表 - 1 YUSAYUSA-2と DYNES3D との比較

項 目	YUSAYUSA-2	DYNES3D
地震力	・ 水平1方向	・ 水平2方向 + 上下動
運動方程式の解法	・ Newmark の $\beta$ 法	・ Newmark の $\beta$ 法 ・ 中央差分 ・ 予測子修正子法
応力 - ひずみ関係	・ 双曲線モデル ・ Ramberg-Osgood モデル	・ 数式モデル ( YUSAYUSA の機能はカバー ) ・ 吉田・石原モデル ・ 飛田・吉田モデル ・ 自由なユーザールーチン
過剰間隙水圧	・ 東畑・石原モデル	・ 応力 - ひずみモデルに依存する
速度比例減衰	・ Rayleigh 減衰	・ Rayleigh 減衰 ・ モード比例減衰 ・ ひずみエネルギー比例減衰
不釣合力	加速度を修正することで次回に持ち越さない。	運動方程式の解法によるが、次のステップに持ち越すこともふつう。
除荷時の扱い	解析時間を細分化	除荷剛性を用いる増分形さんも可能

#### 4 各種の非線形解析の適用性に関する計算事例<sup>11)</sup>

各種非線形法の適用性を検討するために、鉛直アレー記録の解析を行う。解析の対象としたのは、1983年8月8日の神奈川県・山梨県境地震 ( M=6.0, 震源深さ22km ) の際得られた記録である。地震の規模は小さいが観測位置が震央距離18kmと非常に短いことから、液状化に関係のない記録としては最もひずみの大きい記録が得られた。図-4に地盤の柱状図を示す。また、図-5に観測された地震波形を示す。

各種の非線形法の適用性を検証するために、2つの等価線形法と3つの非線形法、計5つの解析を行った結果を示す。等価線形法は重複反射理論に基づく周波数領域の解析で、一つは SHAKE と同様の方法 ( 図では Eq. linear と表示。以下、単に等価線形と呼ぶ )、もう一つは、杉戸らによるひずみ依存性の周波数依存の考えを取り入れたもの<sup>12)</sup> ( 図では Eq. linear (fq)、以下周波数型等価線形 ) で、有効ひずみを  $\gamma_{eff} = \alpha \gamma_{max} F(\omega) / F_{max}$  (  $\alpha$  は係数で0.65を用いた。  $F(\omega)$  はせん断ひずみのフーリエ級数、  $F_{max}$  はその最大値 ) としたものである。非線形法では、Newmark の $\beta$ 法を用いた数値積分を行い、応力 - ひずみ関係として双曲線モデル、Ramberg-Osgood モデル ( 以下

R-O モデル)、吉田・石原らによるモデル<sup>7)</sup>(以下 DYNES3D)を用いた。なお、双曲線モデル、Ramberg-Osgood モデルの計算も DYNES3D を用いて行っているが、YUSAYUSA-2を用いても結果は変わらない。

### (1) 地盤のモデル化

過去のこのサイトの解析に<sup>13)</sup>に習い、材料のひずみ依存性は、岩崎らの提案<sup>14)</sup>による  $G/G_{max}-\gamma$ 、 $h-\gamma$ 関係を用いた。等価線形法、および DYNES3D ではこの関係を直接データとして用いることが出来る。双曲線モデルでは  $G/G_{ma}=0.5$ となるひずみを基準ひずみとしてモデル化した。R-O モデルでは二つのパラメータがあり、先の基準ひずみとひずみが0.1%程度のところの減衰特性に着目して決めた。結果として、最上層の最大減衰比は17%とし、これ以外の層では最大減衰には20%とした(基準ひずみの大きさは深さによって異なるので、非線形特性は全層で異なる)。図-6に比較の一部を示すが、R-O モデルでも減衰特性の一致はそれほどよくない。これは採用したひずみ依存減衰の最小値が4%であるのに対し、R-O モデルの減衰はひずみが小さくなると0に近づくためである。減衰の一致度を上げようとするれば、最大減衰比を大きくするしかないが、それでもひずみの小さいところの一致度を上げることは出来ない。深いところについては常識的な値を採用している。

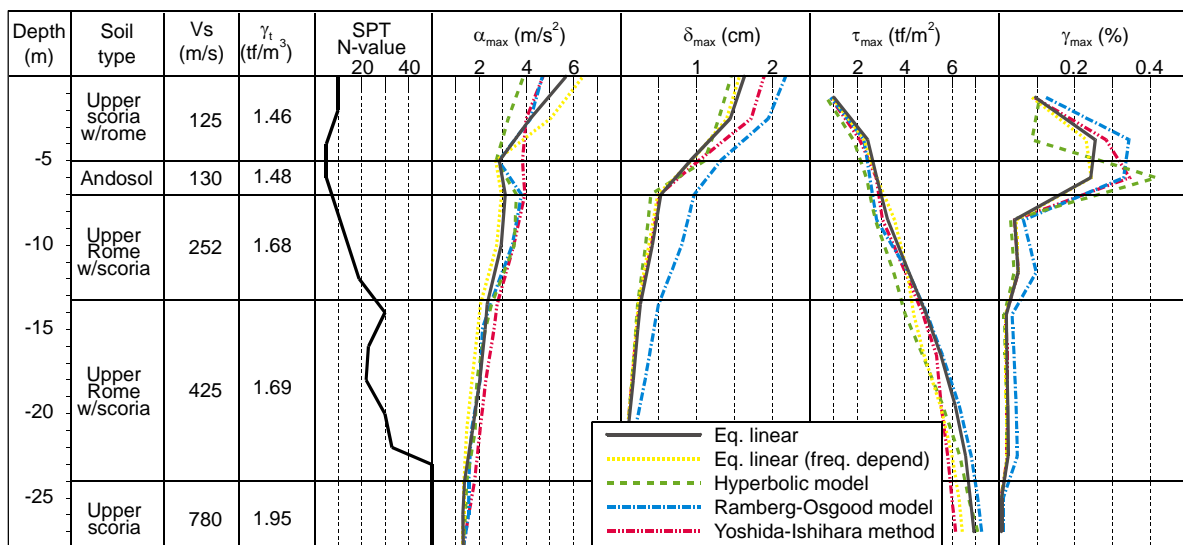


図-4 解析に用いた地盤のモデルと最大応答値

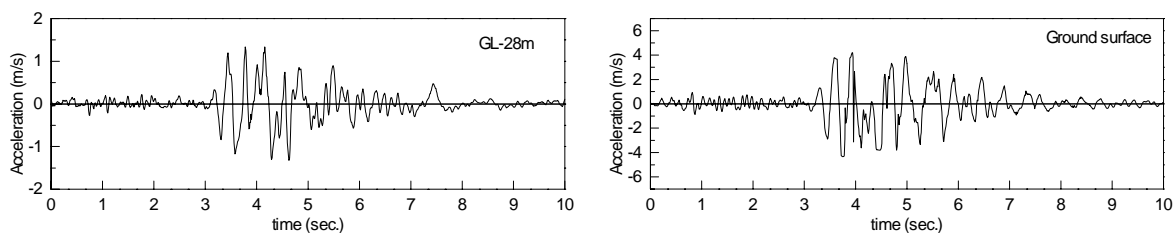


図-5 観測された地震記録

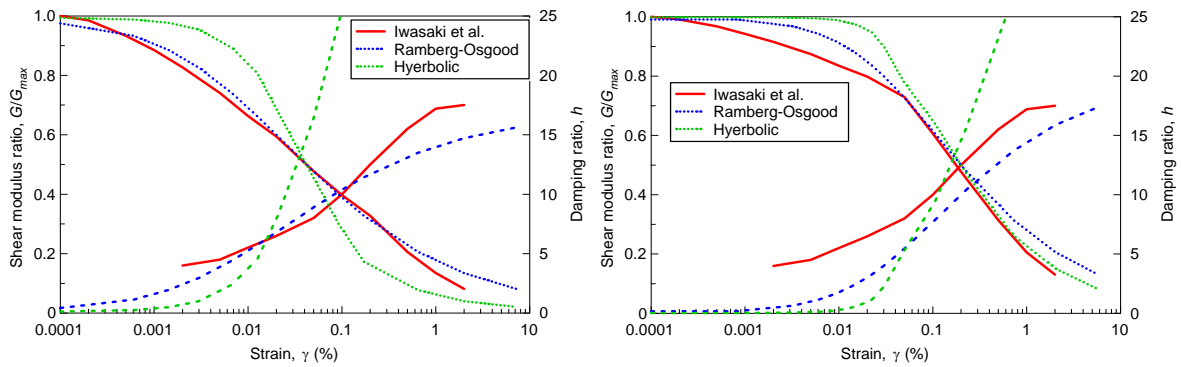


図-6 材料のひずみ依存性（1層と5層）

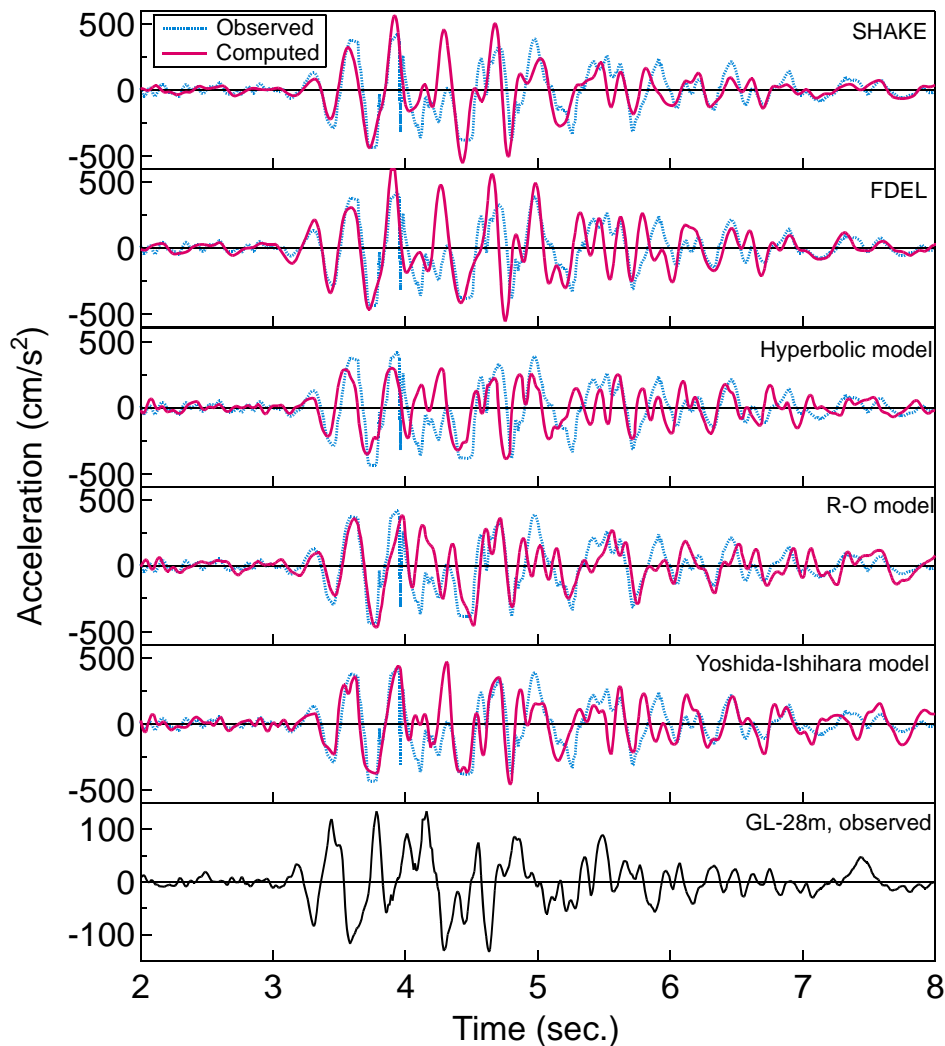


図-7 加速度時刻歴

## (2) 解析結果と考察

解析は記録のうち最初の10秒について行った。図-4に最大応答値を、図-7に地表の加速度時刻歴（3～9秒）の比較を、図-8に第3層の応力 - ひずみ関係（等価線形法では複素剛性による位相のずれを考慮）の比較を、図-9に地表の最大加速度による加速度応答スペクトルをそれぞれ示す。

まず、最大応答値を検討する。非線形挙動は第3層で大きく、0.25～0.4%程度のひ

ずみが発生している。これより地表側のせん断ひずみは第3層より小さいが、これは第3層の非線形挙動のため、上部への地震動の伝播が押さえられたためと考えられる。このことは、最大加速度が第3層で減少していること、最大変位が急激に大きくなっていることとも対応している。図-8で第3層の応力 - ひずみ関係を示しているのはこのためである。

観測値の地表最大加速度 ( $4.35\text{m/s}^2$ ) ともっともよく一致しているのは R-O モデルと DYNES3D である。二つの等価線形解析はこれより大きい最大加速度を与える。この二つは第3層まではほとんど差のない挙動をするが、地表部では差が現れ、周波数型等価線形の方が大きな加速度となっている。これは、周波数依存型等価線形は高周波数域の応答を大きくするようなモデル化であるので、当然の結果といえる。

全体として、R-O モデルは他の方法に比べ特殊な応答をしている。これは、図-6に示したように、R-O モデルでは、ひずみの小さいところで剛性が大きいという特徴があり、小ひずみ域での剛性を大きめに評価しているためと考えられる。小ひずみ域での挙動は、実数軸で表現すると全く差が分からないが、挙動に大きく影響するようである。また、中ひずみ域では、本計算では R-O モデルのみが減衰が小さめに入っているため、これが結果に影響した可能性もある。

時刻歴応答を見ると、主要動部分では双曲線モデルを除き、位相特性も含め、観

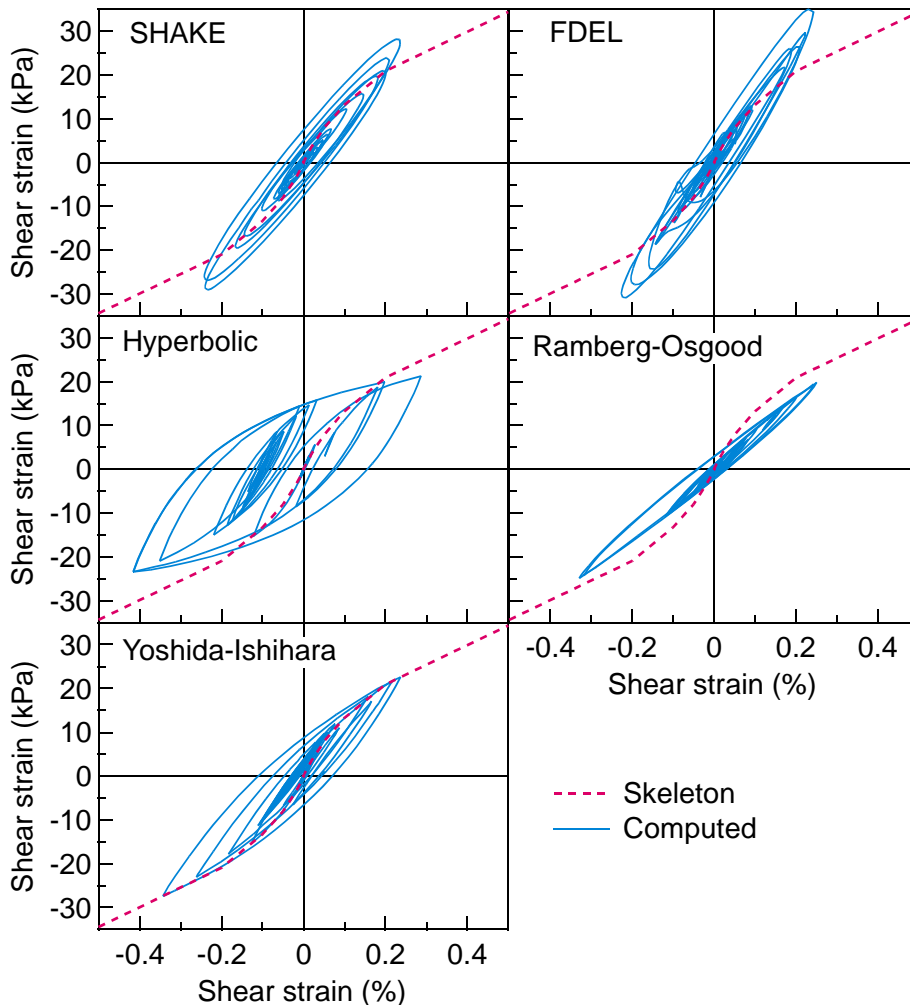


図-8 第3層の応力 - ひずみ関係



測値との一致はよい。しかし、ピーク時の高さに差があり、これが最大応答加速度の違いとなっている。図-8から、この付近では非線形挙動が現れていると考えられる。この際、非線形解析では耐力の低下があり、加速度の低下が期待できる。一方、等価線形解析では図で Skeleton として示した  $G-\gamma$  関係より求めた応力 - ひずみ関係より高い剛性を示し（等価ひずみ位置で両者が一致する）、そのため加速度の低下が大きくは見込めないことが原因と考えられる。また、双曲線モデルがやや異なる挙動をするのは、図-8から、このひずみ域ではすでにせん断強度に近い応力が発揮されており、上層へのせん断応力の伝播が小さくなっているためと考えられる。

一方、主要動以降については、等価線形法の方がよい結果を与えている。これは、非線形解析では小さい応答に対しては減衰が小さくなるのに対し、等価線形法ではここでも大きい減衰が作用しているからと考えられる。実地盤では散乱の減衰などがあり、小さい地震でもこの程度の減衰があることがふつうであるが、非線形法ではこの効果が考慮されていないためと考えられる。

応答スペクトルで見ると、一次の卓越周期付近では等価線形法が大きめ、非線形法が小さめの値となっているが、二次以降では解析値は全体に大きめである。

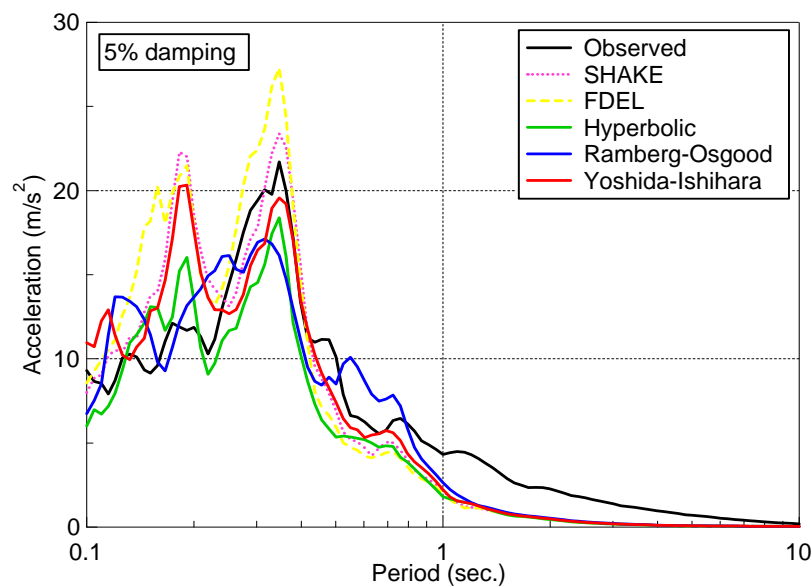


図-9 応答スペクトル

### (3) まとめ

本解析で検討した地震では、最大せん断ひずみはもっとも大きい層で0.2~0.4%と、かなり大きいとはいえ既往の研究から知られている等価線形法の適用範囲の限界近くにある。そのためか、等価線形法でもシミュレーション結果は比較的よかった。しかし、いくつかの点で DYNES3D（吉田-石原モデル）を用いた非線形法の方がより観測値を説明できる可能性があることが示された。

## 参考文献

- 1) Ishihara, K. and Towhata, I. (1980): One-dimensional Soil Response Analysis during Earthquake Based on Effective Stress Method, Journal of the Faculty of Engineering, Vol. XXXV, No. 4, The University of Tokyo, pp. 656-700
- 2) Lee, M. K. W. and Finn, W. D. L. (1985): DESRA-2, Dynamic effective stress response analysis of soil deposits with energy transmitting boundary including assessment of liquefaction potential, University of British Columbia
- 3) 吉田望，東畑郁生（1991）：YUSAYUSA-2・SIMMDL-2理論と使用法，佐藤工業・東京大学，1995年改訂
- 4) Kondner, R. L. (1963): Hyperbolic Stress-strain Response; Cohesive Soils, Proc. ASCE, SM1, pp. 115-143
- 5) Jennings, P. C. (1964): Periodic Response of a General Yielding Structure, Proc. ASCE, Vol. 80, No. EM2, pp. 133-166
- 6) Ishihara, K., Yoshida, N. and Tsujino, S. (1985): Modelling of stress-strain relations of soils in cyclic loading, Proc. 5th International Conference for Numerical Method in Geomechanics, Nagoya, Vol. 1, pp. 373-380, 1985
- 7) 吉田望，辻野修一，石原研而（1990）：地盤の1次元非線形解析に用いる土のせん断応力 - 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
- 8) Hardin, B. O. and Drnevich, V. P. (1972): Shear modulus and damping in soils: design equations and curves, Proc. of the American Society of civil engineers, Vol. 98, No. SM7, pp. 667-692
- 9) 吉田望，辻野修一（1993）：多次元解析に用いる簡易な構成則，第28回土質工学研究発表会平成5年度発表講演集，pp. 1221-1224
- 10) 吉田望，辻野修一，中島智樹，矢野康明（1993）：多次元解析に用いる簡易な構成則 その2 ダイレクタンシーの考慮，土木学会48回年次学術講演会講演概要集，第3部，pp. 1218-1219
- 11) 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
- 12) 杉戸真太，合田尚義，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
- 13) 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
- 14) 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