# 液状化対策要否判定の高精度化に関する研究 (その2)

# WG検討資料

ŧ

## 平成12年3月

# 財団法人 地震予知総合研究振興会

#### 7. 地盤の地震応答解析手法に関する検討

この章では、二つの問題を取り上げる。一つは、等価線形化法の改良に関する問題 である。これまでの報告書で指摘してきたとおり、実現象の把握という観点からみる と、等価線形化法は場合によってはかなりの誤差を含むこともある。ここではその原 因と改良法について提案する。

もう一つは局所的な地盤の不整形性の影響である。前年度の報告書で代表的な局所 的な地盤の不整形現象として,軟弱な層がレンズ状に存在する場合と傾斜して存在す る場合を取り上げ,いずれもケーススタディながら傾斜する軟弱な薄層の計算ではそ のサイトの一次元解析で概ね挙動が表現できることを示した。一方,レンズ状に存在 する場合にはその影響は軟弱層周辺に及ぶことが分かった。そこで,本報告では,後 者のケースについて,さらに詳細に検討する。

### 7.1 レベル2地震動に対する等価線形化手法の適用性検証と改良法の提案

大地震に対する地盤の地震応答解析では、理論的には非線形の応力-ひずみ関係を 追いかけながら逐次積分による数値解析を行う非線形法の方が精度が高い。しかし、 現状を考えると、必ずしも逐次積分による解析法の方が好ましいとはいえず、等価線 形解析の方が好ましいこともある。これは、主として以下のような理由による。

①過去の実績 SHAKE は過去の多く使われており、多くの事例の蓄積がある。これ は、経験が時として重要な役割を担うエンジニアリングの面で重要である。

- ②応力-ひずみ関係モデル 非線形法では応力-ひずみ関係を表すのに数式モデルや 力学モデルが用いられることが多い。したがって、与えられた動的変形特性からこ れらのモデルパラメータを決める必要があるが、モデルが必ずしも十分に動的変形 特性を表し得るとは限らないので、広いひずみ領域で材料特性に見合うパラメータ を決めるのが困難である。パラメータの決め方が悪ければ、精度は等価線形化法よ り悪くなることもある。応答に応じてパラメータの決め方を変えるなどすれば状況 は改善されるが、かなりの判断力が必要となる。もちろん、吉田・石原のモデル<sup>1)</sup> を用いればこの問題は回避できるが、用いることのできるプログラムは限られてい る。
- ③非線形法では、数値計算の安定性をあげるためなどの目的で Rayleigh 減衰がよく用いられるが、これを用いると高振動数領域の応答が落ちる。したがって、剛な構造物の設計用の地震動の算出では高振動数領域での応答が落ちない手法が要求される。一般の等価線形解析ではこの面での問題があるが、ここで提案する手法ではこの面での改良も行われている。
- ④地表の観測記録を入力として基盤への入射波を求めるという,実務上重要な作業は, 非線形法では困難であり,等価線形化法によらざるを得ない。
- ⑤散乱の減衰の様な周波数に依存するような特性を考慮することは非線形法では困 難である

このようなケースを考えると、実用的には SHAKE に代表される等価線化形法も必要である。したがって、そのその精度を上げることは重要である。本論では、等価線形化法の改良方法を提案する。

#### 7.1.1 等価線形化法の問題点

等価線形化法には大きく二つの欠点がある。

最初の欠点は,非線形領域では等価線形化法が最大加速度を大きめに評価することである<sup>2</sup>。図7.1.1はこれを模式的に示したものである。図の実線が設定した応力-ひずみ関係とする。等価線形化法では,最大ひずみγ<sub>max</sub>より有効ひずみγ<sub>eff</sub>を次式で求め, これを元に線形の応力-ひずみ関係を仮定して計算を行う。

$$\gamma_{eff} = \alpha \gamma_{max} \tag{7.1.1}$$

ここで、αは0.65が用いられることが多い。すると、解析に用いられる応カーひずみ 関係は図7.1.1の OAC となり、最大ひずみ時の応力はτ<sub>1</sub>で、設定した応カーひずみ関係 から得られる値τ<sub>2</sub>より大きい。つまり、実線の応カーひずみ関係を入力すると、最大 ひずみー最大せん断応力の関係は図7.1.1の波線となるわけである。せん断応力が大き く評価されるので、最大加速度も大きくなる。なお、最大加速度が大きくなる原因と して、以前には、等価線形化法は線形の計算であるので、共振が起こっているという 指摘<sup>34)</sup>もあったが、後に実例を示すように、この考えは間違っている。



図7.1.1 等価線形解析が最大せん断応力を過大評価するメカニズム

等価線形化法のもう一つの問題は、これとは逆に加速度の過小評価である。後に示す図7.1.8では計算例の基盤と地表のフーリエスペクトルの比を示しているが、観測値に対して高周波成分で既往の等価線形化法(SHAKE)は増幅が非常に小さくなっている。入力が小さいと、最大加速度に与える高周波成分の影響が大きくなるので、最大加速度も過小評価されることとなる。

この二つは、相反する性質である。前者の問題を解決するためには、αの値を大き くする必要があるのに対し、後者の問題を解決するためには、αの値を小さくする必 要がある。前者の実例は、文献5)に示されている。後者に関しては、小さいαの方が 観測記録を説明できるという報告がある。。

後者の問題に対する解決は、杉戸ら<sup>7</sup>、清田ら<sup>8</sup>によって行われた。杉戸らは、ひず みのフーリエスペクトル F(f)とその最大値 F<sub>max</sub>を用いて、有効ひずみを周波数の関数 として次式のように表した。

$$\gamma_{eff}(f) = \alpha \gamma_{max} \frac{F(f)}{F_{max}}$$
(7.1.2)

高振動数成分に小さい有効ひずみを用いることによって、高周波成分の増幅を大きく したわけである。清田らは、固有値解析を行い各固有モードについて異なる特性を用 いることにより同じ様な効果を得ようとしている。この方法は、SHAKE に代表され る等価線形化法とは異なる方法であることから、以後本報告では論じないが、本質的 に杉戸らの方法と同じ特徴を持っている。

杉戸らの方法(以後, FDEL と呼ぶ)<sup>4</sup>は,ケースによっては等価線形化法の精度を 飛躍的に向上させた<sup>79</sup>。しかし,式(7.1.2)の物理的な意味は明瞭ではない。また,こ の方法は,必ず SHAKE より大きい加速度を与える。先に論じたように,大地震時に は SHAKE は加速度を過大評価するので,後に例題で見るように,FDEL の大地震に 対する適用性は非常に悪くなる。

式(7.1.1)のαの最適な値がケースによって変わることは以前から知られていた(例 えば文献10)が、これは、この様な相反する要因があることが原因の一つと考えられ る。

#### 7.1.2 提案する方法の考え方

FDEL で用いられる式(7.1.2)に対する疑問の一つは、有効ひずみに周波数依存性を もうけると、せん断波速度に周波数依存性があることになり、物理的におかしいとい うことである。そこで、実現象における周波数依存性を考えてみる。図7.1.2は応カー ひずみ関係を模式的に書いたものである。ここで、大きい振幅に対する履歴曲線 A と 途中で小さな除荷が起こった履歴曲線 B を考えると、A の履歴が発生するときには見 かけの剛性は小さく、周期は長いのに対し、B の履歴が発生するときには見かけの剛 性が大きく周期は短い。なお、剛性が大きいときには履歴減衰は小さく、剛性が小さ いときには履歴減衰が小さいので、ここでは、剛性だけで議論を進めるが、減衰につ いても同時に議論をしていると考えていただきたい。

このメカニズムから分かるように、時間領域で見ると、履歴曲線の振幅とそれが発生する周期(または周波数)には相関関係がありそうである。そこで、図7.1.3に示す ゼロクロス法で、次に示す計算例で得られたせん断ひずみの時刻歴から振幅 A とその ときの周期 T の関係を求め、周波数との関係として書き直したのが、図7.1.4である。 ばらつきは大きいが、この傾向は伺える。図には、ひずみのフーリエスペクトルも示 しているが、これとも、相関がありそうである。

この様に、周波数領域の現象であるフーリエスペクトルと時間領域の現象であるゼ ロクロス法に基づく振幅-周波数関係にはある程度の相関があるので、この性質を利 用すれば,等価線形化法の改良が図れる可能性がある。その意味で,FDELの考え方 には意味があることになる。しかし,次の様な問題もある。図のフーリエスペクトル はウインドウ処理をしてスムーズにしているが,そのスムーズ化の程度に一貫性がな い。次に,図7.1.4に見られるように,フーリエスペクトルがピークとなる周波数は必 ずしも一致していない。さらに,本来異なる現象である時間領域の現象と周波数領域 の間に,常に式(2)の関係が成立するという保証はない。そして,すでに示したように, FDEL で勧めているα=0.65を用いることは SHAKE 以上の加速度の過大評価につなが るため,大地震には適用できない。



図7.1.4 周波数-ひずみ振幅関係

これまでの議論から、大ひずみもターゲットにするには、α=1.0は必須である。では、式(7.1.2)でα=1.0でよいかというと、そうではないことは、文献6の検証でα=0.65 がよい結果を示していることから、明らかである。ここでは、次の方針で周波数の関数として有効ひずみを算出する。

これまでは、ひずみ時刻歴からゼロクロス法で周波数とひずみ振幅の関係を求めた。 しかし、ひずみを剛性と対応させようとすると、ゼロクロス法は好ましくない。これ は、処女載荷時と履歴時ではひずみと剛性の対応関係が異なっているためである。また、ひずみが一方向にドリフトするようなケースでは高周波数成分の応答が拾えない可能性もある。そこで、図7.1.3に示すピーク法に基づき周期Tとひずみ振幅Aの関係を求める。ただし、処女載荷時には、片振幅を振幅として用いる。

この様にして求めた周波数と振幅の関係も図7.1.4に示されている。全体的な傾向は, ゼロクロス法と大きな差はない。これを基に、次の関数を設定する。

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

$$\gamma_{eff} = \gamma_{max} f < f_p$$
(7.1.3)

ここで、f<sub>p</sub>はゼロクロス法でひずみが最大ひずみとなるときの周波数である。この式は、両対数軸上で有効ひずみを周波数の関数としてm次式においたことを意味している。m=2とし、係数Aを最小自乗法で計算する。

#### 7.1.3 計算例と考察

1987年千葉県東方沖地震(*M*=6.7)の際,東京大学生産研究所千葉実験所で得られた鉛直アレー記録(NS 成分)の解析を行う。材料定数等は、文献11に従う。解析プログラムは筆者らの開発した DYNEQ<sup>12)</sup>を改良して用いる。以下の計算は全て DYNEQを用いているが、手法の区別をするために、SHAKE、FDEL、DYNEQ の名称を用いる。

図7.1.5に最大応答値, 図7.1.6に地表(GL-1m)の加速度時刻歴をそれぞれ観測値と 比較して示す。

最大加速度では、特に非線形の影響を受けていると考えられる地表(Gl-1m)では、 FDEL、SHAKE、DYNEQの順で最大加速度は小さくなっており、DYNEQが一番観測 値に近い。加速度応答がこの順に並ぶのは、これまでの説明から明らかである。そし て、DYNEQが観測値とほぼ一致しているのは、ここで設定した方法が妥当であった ことを示している。

図7.1.6では二つの時刻歴を比較しているので、詳細な差が見づらい。そこで、着目 すべき点を①~⑤で示した。ここで、矢印は観測値のピークの位置につけられている。 ①は最大加速度に対応する点であるが、SHAKE、FDELではピークの近傍で観測値よ り大きくなる現象が目立つ。このような差は、図7.1.1のメカニズムを考えると理解で きる。逆に共振とすれば、このような現象は説明しにくい。

①~⑤のいずれのピークでも、提案手法は観測値とほぼ同じであるのに対し、
 SHAKE はこれより大きめ、FDEL はさらに大きい応答を示している。また、例えば、
 ①→②の過程を見ると、提案法では位相もほぼ一致しているのに対し、SHAKE と
 FDEL では解析値の位相が早くなっている。その他の場所でも、全体に提案手法の方が位相の一致はよい。一方、提案手法でも観測値と一致していない部分もある。しかし、これらの場所でも、他の方法の方が明らかによいというところはない。すなわち、
 全体としてみても、提案手法の方が他の方法に比べて観測値をよく説明しているといえる。



図7.1.6 GL-1mの加速度時刻歴の比較

Time (sec.)

図7.1.7には最もひずみが大きい,第5層(GL-4~5m)の複素剛性を考慮した応カー ひずみ関係が比較されている。図で点線で示したのは入力した応カーひずみ関係であ るが,図7.1.1で示した様に,SHAKE では最大ひずみ付近では入力値より大きなせん 断応力となっているのに対し,本手法では最大応答はほぼ一致している。このことが, 最大加速度のよい評価に結びついている。



図7.1.7 第5層(GL-4~5m)の応力-ひずみ関係の比較



図7.1.9 第5層の剛性と減衰

図7.1.8には基盤に対する GL-1m の加速度応答のスペクトル比を示している。ここで、観測値は図を見やすくするために平滑化している。まず、数 Hz 以上の高周波数 領域で SHAKE が過小評価していることが明瞭であるが、FDEL と提案手法はこの点 が改良されていることが分かる。なお、解析では20Hz 以上の周波数成分の計算は行 っていない。一方、これより低周波数側では、本提案手法が全体に小さめの値となっ ているが、これは、応力が一番小さいことに起因している。図には示していないが、 1Hz より低周波側では各解析の差はほとんどない。

図7.1.9には、第5層の材料特性の周波数依存性を示している。この層では、せん断 弾性定数は22540kN/m<sup>2</sup>であるので、FDELでは1Hz以下、10Hz以上ではほとんど弾性 挙動を用いているので、中間部の比較的小さい周波数領域のみで非線形性が考慮され ている。これに対して、提案手法では、低周波数領域では最大応答にあわせたので剛 性が小さく、減衰が大きくなっている。この領域でのSHAKEと提案手法の違いは、 有効ひずみを最大ひずみから計算する際の係数の差と考えてよい。高周波数領域では、 提案手法は次第に剛性が大きく、減衰が小さくなり、約20Hzで弾性挙動に至る。

#### 7.1.4 まとめ

小ひずみから大ひずみまで適用が可能な等価線形化手法を提案した。検証に用いた 計算例は最大ひずみが0.08%で等価線形範囲の適用範囲<sup>13)</sup>であるが、それでも最大加 速度の誤差は大きかった。提案手法は既往の等価線形化法よりよい応答を与えている。

高周波領域のキーは図7.1.9で数 Hz からの挙動で、これにどのような関数を考える かによって挙動が変わるので、提案式よりもっとよい式がある可能性もある。今後、 ケーススタディの数を増やすとともに、この点の検討もしていきたい。

#### 7.2 地盤不整形による影響に関する検討

液状化判定は一次元解析で行われるが、実際の地盤では水平成層であることはほとんどなく、局所的にみると何らかの不整形がある事が普通である。液状化判定の上で このような不整形が問題となるのは、局所的に軟弱層があるケースである。

特にレベル2地震動のような大きな地震動の基では、軟弱層はせん断強度に至るような大きなひずみを受ける。地震動の主体はせん断波であるからせん断強度を超える 地震動は伝播しない。すなわち、軟弱層より上の地震動は軟弱層の存在により上限値 があるわけである。

このような局所的な不整形の事例として,前年度の報告書では,軟弱な層がレンズ 状に存在する場合と傾斜して存在する場合について,予備的な検討を行った。その結 果,軟弱層が傾斜して存在する場合には,それぞれも場所の地震動は概ねその場所の 一次元解析で説明できることが分かった。しかし,レンズ状に存在する場合には二次 元的な影響があることが分かった。そこで,ここでは,レンズ状の地盤についてパラ メトリックスタディを行い,一次元解析との違いについて検討する。

#### 7.2.1 地盤と材料特性

地盤およびは,前年度の報告と同様,千葉火力の地盤を簡素化・模式化したもので あるが,昨年度より層厚を半分にした。

地盤モデルを図7.2.1に示す。モデルは基本的には二層地盤とし、中央部のみにレンズ状に軟弱層を配置している。上の層は $A_{s1}$ 、下の層は $D_{s1}$ としてモデル化し、軟弱層は $A_{sc}$ 層としてモデル化する。図の中央部の黒い部分がレンズ状のモデルで、その幅を変化させるわけである。



図7.2.1 レンズ状地盤のモデル

材料特性も前年度と同様,安田・山口の経験式によることにする。図7.2.2に動的変 形特性を示す。



### 7.2.2 地震動

地震動は、レベル2地震動を想定し、昨年度で作成された模擬地震波で、図7.2.3の ような波形である。この波形は工学的基盤が解放しているときの複合波として定義さ れている。しかし、本検討では非線形の影響をより明瞭にみるために、これを基盤複 合波として取り扱う。



図7.2.3 計算に用いた地震動(解放基盤複合波)

#### 7.2.3 一次元解析の結果

昨年度の報告では,逐次積分に基づく非線形化法で解析を行った。本検討では,液 状化判定が等価線形化法で行われることと整合性をとるために,等価線形化法を用い ることにする。

図7.2.4に一次元解析の結果を示す。ここで、図の左側には土質等がまとめられているが、このうち GL-4~5m のシルト層が、本検討で問題としている軟弱層である。一次元解析ではこの軟弱層があるときと無いときの二通りを計算している。軟弱層が無

いときには、この層はすぐ上の微細砂層と同じ材料特性となっているわけである。

深さ (m)	層厚 (m)	土質	<i>V<sub>s</sub></i> (m/s)	γ' <sub>t</sub> (t/m <sup>3</sup> )	最大加速度 (m/sec <sup>2</sup> ) 5 10	最大変位 (cm) 1 2 3	最大せん断応力 (kPa) 50 100 150	最大せん断ひずみ (%) 1 2 3
- 1.0 - 2.0	4.0	微細砂	170	1.86				
- 3.0 - 4.0	1.0	シルト	100	1.74				
- 5.0 - 6.0 - 7.0		-						
- 8.0 - 9.0	6.0	砂	300	1.70				
[ <sup>10.0</sup> 11.0						★ 1D 軟弱	層なし 層あり	

図7.2.4 最大応答值(一次元解析)

軟弱層がある場合には、この層のひずみは2%程度と大きく、著しい非線形域に入っていることが分かる。この層で最大加速度は頭打ちとなり、一方、変位は著しく大きくなっていることが分かる。

せん断応力に着目すると、軟弱層なしのせん断応力は軟弱層ありに比べかなり大き くなっている。軟弱層がある場合には、この節の始めに述べたような理由で軟弱層よ り上の地震波動の伝播が押さえられるので、上部の層のせん断応力が小さくなるのは 理解しやすい。これに対して、軟弱層より下でもせん断応力が小さいのはこのような 理由では説明できない。この理由として、軟弱層でエネルギーが吸収され、この結果、 下方への地震動の反射が小さくなったと考えることができる。なお、液状化判定指針 では層厚1m 以下の薄い層は無視することになっているので、判定は大きい方のせん 断応力を使って行われるが、1m を越える層についてはこのような結果で液状化判定 することになる。すると、ここでみたような理由により、軟弱層の上だけではなく下 でもせん断応力が小さい事になる。

#### 7.2.4 二次元解析

ここでは、中央部の軟弱層を、図7.2.1のメッシュの数を1,3,5,7,9と変えてそれぞれのケースで影響を調べる。これは、レンズの幅を10,30,50,70,90mと変えたことに相当する。

図7.2.5~7.2.9に代表的な場所についての最大応答値を比較して示す。図には図7.2.4 に示した一次元解析の結果も併せて示されている。



図7.2.5 最大応答値(レンズ幅10m)







図7.2.7 最大応答値(レンズ幅50m)







図7.2.9 最大応答値(レンズ幅90m)

各図ではレンズから一番遠い所を A, レンズの中央を B, レンズの端部を C, その 一つ隣を D で表している。ここで、応力とひずみはそれぞれの列を、また、加速度と 変位はその列の左側の節点の値を用いている。もし、完全に不整形の影響が無ければ A 点の応答(細い実線)は太い実線で示した軟弱層がないケース、B 点の応答(細い 点線)は太い点線で示した軟弱層があるケースと一致するはずである。このうち、A 点については概ね太い実線と一致しているので、二次元解析として用いた横幅は概ね 妥当であるといえる。

レンズのすぐ横のD列の応答をみると、せん断応力は軟弱層より上では軟弱層のない一次元の結果、軟弱層より下では二つの一次元解析の間にある。したがって、軟弱層が無い部分については一次元解析で液状化の判定を行うのは妥当といえよう。

次に、レンズの端部である C 列の応答をみると、概ね軟弱層のある一次元解析と同じであるが、軟弱層より下の部分についてはこれよりやや大きめの値となっていることも多い。すなわち、この位置で一次元解析を行うと、せん断応力は10~20%程度過小評価されることになる。

もっとも不可解そうに見えるのは、B点、すなわちレンズ中央の挙動である。

レンズ幅が10mの時には、軟弱層より下のせん断応力は軟弱層のある一次元解析より大きく、一次元解析がせん断応力を過小評価していることが分かる。一方、レンズ幅が30m以上になると、軟弱層部分で最大ひずみが大きくなり、せん断応力も軟弱層のある一次元解析に比べて少し大きめになる。軟弱層の中央で一次元解析よりせん断ひずみが大きくなるのが不可解に見えるわけである。

図7.2.10には代表例としてレンズ幅50mのケースについて最大変位図を示す。図は、 最大値が正の方向を向くように示されている。図を見ると、軟弱層の直上の部分が剛 体的に動いている様子が見て取れる。

既にみたように軟弱層部はひずみが大きく、せん断応力に限度がある。すると、軟 弱層の直上の部分は、下からの地震動の伝播よりも左右の堅い地盤に捕まれて降られ ているような挙動が卓越しており、それが最大変位に見られる中央部の揺すられる現 象につながったものと考えられる。



図7.2.10 最大変位図(レンズ幅50m)

次に、軟弱層部分の深さの水平方向のせん断応力とせん断ひずみの分布を検討する。 図7.2.11に最大値をまとめて図示する。図の上下に引いた太い実線は軟弱層のある場 合とない場合を示している。その他の線はレンズ幅が10~90mのケースを示している が、線とレンズ幅の対応は明らかであるので、凡例はつけていない。

軟弱層のせん断応力についてみると、レンズ幅が10mの時には一次元解析より小さいが、それ以外では全体としてせん断応力は一次元解析より大きくなる。しかし、詳細にみると、レンズの一番外側の要素では一次元解析よりせん断応力は小さい。これは、外側の要素では周辺の部分からの拘束を受けひずみが小さくなるためと考えられる。レンズ幅が10mのケースではこちらの効果のため応力が小さくなったものと考えられる。

この作用の反作用として、レンズのすぐ横の要素ではひずみが大きく、せん断応力 も一次元解析に比べて大きくなる。その量はレンズ幅が10mの時に最大であるが、そ れでも軟弱層がない場合のせん断応力に比べて10%程度であり、7.1節に述べたように SHAKE がレベル2地震動下ではせん断応力をかなり過大評価することを考えれば、無 視しても良いような値と考えられる。

せん断ひずみの分布をみると、これまでに述べてきたことは明らかで、軟弱層の中 央でひずみが蓄積していく様子がうかがえる。しかし、幅が大きくなるにつれ、この 効果は減少していくように見える。



図7.2.11 GL-4.5m (軟弱層のある深さ)における水平方向の分布

### 7.2.5 まとめ

レンズ状の軟弱層がある不整形地盤の影響を検討した。その結果をまとめると次の ようである。

①レンズの外側では一次元解析でせん断応力を評価して良い。レンズのすぐ外側では 一次元解析より大きなせん断変形となることもあるが、その量は大きくなく、 SHAKE が非線形が卓越した場合にせん断応力を大きく評価することを考慮すれば 無視しても良いと考えられる。

②レンズの内側では、レンズより上の部分では一次元解析でせん断応力を評価して良

い。しかし、レンズの下では一次元解析より大きくなることもある。その量は、こ の計算では二つの一次元解析の平均値程度が最大であった。

これらの結果より、レンズ状の軟弱層がある場合の液状化判定として、次のように するのが良いことがわかる。

- ①軟弱層を無視した解析を行えば、せん断応力は大きめに評価される。現在の指針では厚さ1m以下の場合にはこの方法を用いているが、それ以外でも、上下を剛性の高い層に挟まれた柔らかい層がある場合には無視することは安全側の指標を与える。
- ②上記の方法は安全側ではあるが、軟弱層部分ではせん断応力を大きめに評価する。 これが過大評価と考えられる場合には、軟弱層より上では軟弱層を考慮した一次元 解析のせん断応力を、軟弱層より下では、軟弱層を考慮した一次元解析と軟弱層を 考慮しない一次元解析の平均値をとれば、より現実的なせん断応力の評価が可能で ある。
- ③上記の方法を用いても、軟弱層より下の部分ではせん断応力は大きめに評価される。 これ以上の精度を上げるには、二次元解析を行うことが勧められる。

#### 参考文献

- 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カ-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
- 2) 吉田望(1994):実用プログラム SHAKE の適用性,軟弱地盤における地震動増幅 のシンポジウム発表論文集, pp.14 31
- 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, ASCE, GT Special Conference, Vol. 1, pp. 472-491
- 4) 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
- 5) 日本建築学会(1996):入門・建物と地盤との動的相互作用
- 6) 田蔵隆,佐藤正義,清水勝美,小山和夫,渡辺修(1987):地層分割数および有効 ひずみ換算係数が地盤の非線形地震応答解析結果に及ぼす影響に関する基礎的検 討,第22回土質工学研究発表会,pp.64-67
- 7) 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, pp.49-58
- 8) 萩原庸嘉,清田芳治(1992):地盤の歪依存性を考慮した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,日本建築学会学術講演概要集(北

陸),構造I, pp. 487-490

- 9) 上島照幸,中園直秀(1996年):「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
- 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
- 11) 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-その5 自 由地盤の伝達特性について-,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
- 12) 吉田望,末富岩雄(1996): DYNEQ:等価線形化法に基づく水平成層地盤の地震 応答解析プログラム,佐藤工業<sup>4</sup>(株)技術研究所報, pp. 61-70
- 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

ŧ