

表層非線形応答のモデル化(1)

MODELING OF NONLINEAR RESPONSE IN SURFACE GROUND (1)

吉田望¹, 澤田純男², 中村晋³, 規矩大義⁴

¹ 応用地質地震 防災センター

Nozomu Yoshida, Oyo Corporation, yoshida-nozomu@oyonet.oyo.co.jp

² 京都大学 防災研究所

Sumio Sawada, Kyoto University, sawada@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

³ 日本大学 工学部土木工学科

Susumu Nakamura, Nihon University, s-nak@civil.ce.nihon-u.ac.jp

⁴ 関東学院大学 工学部土木工学科

Hiro Yoshi Kiku, Kanto-Gakuin University, kiku@kanto-gakuin.ac.jp

SUMMARY

Investigation is made in order to make earthquake response analysis as precisely as possible. Velocity dependent property and stress-strain relations and its modeling are of interest. It had been found through the past researches that earthquake response analysis gives sufficient accuracy when relevant damping characteristics are specified; tools to consider them have been developed. In this paper, a new test method is proposed to obtain accurate and relevant stress-strain models for earthquake response analysis. This method is similar to conventional dynamic deformation characteristics test, but two points are different. Firstly, 3 cycles of loading is conducted under constant strain amplitude in each stage. Secondly, all stage tests are made under undrained condition whereas excess porewater pressure is dissipated between stages in the conventional test. Through the comparison between the conventional tests it is shown that proposed method agrees with conventional test, but behaviors at large strain can be grasped in the proposed method.

キーワード: 地震応答解析, 動的変形特性, ステージテスト, 液状化, 応力ひずみ関係

Key words: Earthquake response analysis, dynamic deformation characteristics, stage test, liquefaction, stress-strain model

1 はじめに

地盤に限らず, 地震時の挙動を支配する運動方程式は加速度項(慣性力), 速度依存項(減衰)および変位依存項(応力)の線形結合で構成されるので, 地震時の挙動を精度よく再現しようとするれば, これら三つの項の予測精度を上げるとともに, それらを適切にモデル化する手法の開発が必要である。

このうち, 慣性力項については, たとえば, 有限要素法で集中質量と連続質量のモデル化の問題などが議論されることはある¹⁾が, 他の項目に比べれば誤差は小さく, 精度よく評価できるといえる。

地盤は弾性的に挙動していると考えられる小さな振動

でも, 時間と共に振動が減衰していくことから, 何らかの減衰があることは事実である。減衰の中には, 地下逸散減衰や塑性変形に伴う履歴減衰のようにメカニズムとして明らかなものもあるが, 速度比例減衰として表現される部分についてはその実体はよく分かっていない。断層からサイトまでの地震動の伝播を見ると, いわゆる距離減衰もあるが, 表層では地震動はほぼ鉛直に伝播し, この効果はそれほどない。また, 材料自身の速度依存減衰は地震応答程度の速度であればそれほどないことが知られている²⁾。散乱の減衰は小さい地震に関しては影響があることが分かっている唯一ともいえる減衰であるが, これも含め, 表層地盤の減衰特性を表す Q 値に対する特性は十分研究され

ているといえない。従って、本研究でもこれらの減衰を求めることを一つのテーマとしてきた。

地盤のひずみおよび拘束圧に依存する非線形性は表層地盤の地震応答に最も影響を与える要因である。これまでの研究で、応力-ひずみ関係を正しく考慮することができれば地震時の挙動をかなりの高精度で予測できることを示してきた。しかし、一方では現在の地震時の地盤材料の変形特性を求める動的変形特性試験は SHAKES³⁾に代表されるような等価線形法の解析をターゲットに作られているため、近年問題となっている大ひずみ領域の解析や、有効応力解析などの新しい解析で要求される精度を満たしていない。そこで、次章以降に示すように、新しい試験法を提案する。

次に、仮に地盤の挙動が完全に把握でき、モデル化できたとしても、地盤の挙動を求めるためには解析的に求める必要がある。地盤の地震応答を表す運動方程式は時間と空間に関する偏微分方程式である。このうち、時間に関する微分を解く方法には逐次積分により数値積分していく方法（以下、時間領域の解法）と Fourier 級数展開に基づき、周波数領域で解析する方法（以下、周波数領域の解析）があり、どちらも長所と短所がある。時間領域の解析は材料の非線形性を容易に考慮できるが、一方では周波数に依存する散乱の減衰や伝達境界の扱いは不得手である。これに対し、周波数領域の解析は、材料の非線形性を考慮するには等価線形法に依らざるを得ない反面、周波数領域の扱いは用意であるし、特に、一次元の解析においては重複反射理論という空間方向の微分方程式の解析解が求められるという長所がある。従って、両手法はどちらか一方を用いるべきというより、補完的に長所を発揮する使い方をすべきである。しかしながら、これまでの解析コードではその短所を改良する努力が行われず、欠点は放置されたままであった。

本研究では、これを改善するためにいくつかの努力をしてきた。すなわち、周波数領域の解析ではひずみ時刻歴の解析から周波数に応じて有効ひずみを変えた方がよいことを示し、モデル化した⁴⁾。この結果、従来の方法より解析を飛躍的に改善する事に成功した。さらに、各種の周波数に依存した減衰を考慮することで時間領域と同じ条件で比較する下地を作った⁵⁾。一方、時間領域の解析においては、これまで Rayleigh 減衰といわれる、質量マトリックスと剛性マトリックスの線形結合で減衰マトリックスを作る手法を用いてきた。このうち、重要なのは剛性比例減衰で、逐次積分における数値解析を安定にさせる役目を負っている。しかし、この減衰は周波数に比例しているの、散乱の減衰として表現される減衰と性質が異なる。また、比例乗数の決め方は主として数値計算の都合から決められ、実現象を反映するという事は余り行われてこなかった⁶⁾。これに対して、運動方程式が減衰項を含んでもモード分解できるという仮定の下にモードごとに人に指定した減衰から減衰マトリックスを作る手法を示した⁵⁾。これ

により、周波数に依存する減衰を考慮できるようになったが、直接周波数の関数として定義される周波数領域の解析の方法とは差がある。そこで、両者を各種の条件で比較したところ、弾性計算であれば両者はほぼ完全に一致し、非線形でもかなり一致することが明らかとなった⁵⁾。これにより、より複雑な問題に対しても、先に挙げたように両者の内、有利な手法を使って解析したときの誤差評価なども可能になった。

従来、表層地盤の解析は一次元解析で一方向入力で行われてきた。一次元解析は多くの場合、工学的には妥当な判断であるが、地震動は三方向に振動しているので、例えばある方向の振動による非線形性が多方向の挙動に影響を与えることは当然考えられる。そこで、時間領域⁷⁾、周波数領域⁸⁾について三方向入力を可能とする解析コードを開発してきた。これらの解析コードはインターネットを通じて無料で公開してきた（一部、準備中）。

以上に述べたように、本研究では、表層地盤の地震時挙動を精度良く予測するという点に関して、モデル化手法を開発し、これを解析コードに組み込み、その有効性を実証してきた。

最後に残っているのは、解析に用いる応力-ひずみ関係をどのように得るかということである。後に詳細に論じるが、現在一般的に行われている方法は、新しい解析法に対応していない。そこで、新しい実験法を提案する。

2 研究目的

本研究は、表層地盤の地震応答解析を精度良く実施するため行ったものである。このために、これまで、大きな地震動に対する鉛直アレー記録があるサイトについて地震応答解析を実施し、各種の地震応答解析手法の精度を比較し、特徴と明らかにしてきた。この結果、逐次積分法で原位置から採取された応力-ひずみ関係を適切に評価したモデルが最も良い結果を与えることが分かった。

しかし、はじめに述べたように逐次積分に基づく非線形法と周波数領域に基づく等価線形法はそれぞれ特徴があり、地盤の地震応答解析の将来を考えたとき、それぞれ補完しながら使っていく必要がある。そこで、本研究では、両者の欠点を克服するための手法を開発、整備してきた。

I 期、II 期の研究を通じて、手法の整備はほぼ完成した状況にある。しかし、1995 年兵庫県南部地震を契機として設計や照査用の地震動が大きくなり、その結果、最大ひずみが数%に上ることも珍しいことではなくなった。また、液状化や液状化に伴う流動現象の様に 10%を超えるひずみとなる領域においても全応力地震応答解析や有効応力地震応答解析が使われるようになってきた。

一方、既往の地震時の地盤の変形特性は動的変形特性試験や液状化強度試験で求められるが、これらは、SHAKE に代表される等価線形地震応答解析や、液状化の判定を行うために開発してきたものであり、上記のような大きいひ

ずみ領域での応力-ひずみ挙動を精度良く捕らえるための指標とはなり得ないものである。そこで、本研究では、新しい試験方法を開発することを目的とする。

3 動的変形特性試験と液状化強度試験の問題点

地震時の地盤の変形特性は動的変形特性試験⁹⁾で求められている。筆者の一人は、既往の動的変形特性試験の問題点を整理したことがある¹⁰⁾。これは、次のようなものである。

- 1) 11サイクルの载荷を行い10サイクル目の履歴曲線より剛性と減衰を計算しているが、重要なのはより低サイクルの载荷ではないか
- 2) 実験が非排水条件で行われているが、実際の状況とは異なる。
- 3) 履歴特性は減衰比で表されているが、これだけでは履歴曲線を復元できない。
- 4) 一般に実験は等方応力状態を初期値として行われるので、初期応力状態を正しく表現していない。

これに加え、別の問題点も指摘することができる。Figure 1は、同じ材料に対する動的変形特性試験の結果と、液状化強度試験の結果をせん断応力比と繰返し数の関係にして重ね合わせ、ひずみ（片振幅）に対する等値線として表現したものである。ここで、動的変形特性試験でせん断応力比が0.34の载荷では繰返すたびにひずみが大きくなっているのが、点のみが示されている。このように、一定応力振幅の载荷ではひずみが0.1%を超えると履歴曲線が定常化しないので、動的変形特性試験ではこの辺が計測できる最大ひずみとなる。図では同じ繰返し数、せん断ひずみの応力をみると、動的変形特性試験の結果が大きく、液状化強度試験の結果より強く評価されている。すなわち、液状化強度試験の結果は動的変形特性試験の結果の延長上にない。

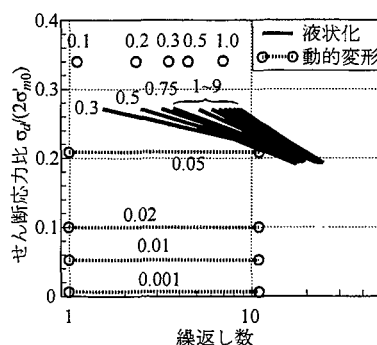


Figure 1 Contour of strain (%) under cyclic loading

これは、動的変形特性試験の試験方法（ステージテスト）を考えると当然の結果であろう。ステージテストでは一定の応力（またはひずみ）振幅の試験を行い、過剰間隙水圧

が発生していればそれを排水した後、次のステージに移るので、ステージを更新するほど、試料はより密になっている。密度が剛性や強度に影響するのは土では常識的な知識であることから、動的変形特性試験では応力振幅が増えるほど密な材料の変形特性を求めていることになり、フレッシュテストで強度を決める液状化強度試験とは整合しないわけである。その他、文献11)で示し、Figure 1にも見られる様にひずみが0.1%を少し超える付近で仕様通りの試験ができなくなるなどの問題もある。

本論では、従来の動的変形特性試験に代わる新しい試験法として、3サイクル定ひずみ载荷と名付ける载荷方法を提案する。この载荷法は、従来のステージテストと基本的には同じ载荷法であるが、各ステージで一定ひずみ振幅で3サイクルのみの繰返し荷重をかける点が異なっている。この点、および、ステージ間で過剰間隙水圧を消散させない点を除けば文献9)の枠組みの中にある。以下、この試験法を選んだ理由を述べる。ここで、小さいひずみから大きいひずみまで、連続的に試験が可能で、実務ベースに乗ること、過去に蓄積された試験データとある程度の整合性があることを考慮した。

(1) 間隙水の扱い

土骨格の挙動を計測するというのであれば、実験は排水条件で行うのが良いが、地震時には非排水状態に近いので、排水試験の結果を使おうとすると別途ダイレイタンシーモデルを導入し有効応力解析を行わざるをえない。また、試験に要する時間も現行より非常に多くなり実用性が失われる。さらに、実務では全応力解析が多く行われており、不便である。加えて、過去の実験の多くが非排水条件で行われているが、これと整合しない。ただし、非排水条件の実験では载荷量に依存して挙動が変わることは認識しておく必要がある。

(2) 载荷方法

現行⁹⁾では一定応力またはひずみ振幅载荷としているが、実務では载荷の制御の都合などから前者が用いられることが多い。しかし、前記のように、ひずみが大きくなると繰返すたびにひずみが大きくなり、実験の継続が困難になるので、大ひずみ時の挙動を求めることが困難になる。そこで、一定ひずみ振幅の载荷を標準とする。

繰返し回数は、現行⁹⁾では11サイクル（10サイクル目を採用）としているが、地震時には同じ応力振幅で10サイクルの载荷を受けることは考えられないし、一定ひずみ振幅の载荷で10サイクルまでの挙動が必要になる状況も余り考えられない。また、等価な繰返し数というようは発想¹²⁾も意味がないであろう。さらに、文献13)14)に示されるような漸増振幅の载荷では問題もあると考え、構造部材の実験で良く行われる、各ステージで3サイクルの载荷を採用する。なお、出力としては1サイクル目と3サイクル目の二

つがあった方がよいと考えられるが、以下では3サイクル目の結果を用いる。

(3) ステージ変化

現行ではステージの間で過剰間隙水圧を排水しているが、これでは有効応力解析のためのパラメータを決めるのも至難の業となることから、全過程で排水しない。次に、ステージ間のひずみ増分は、現行では2倍程度以上となっているが、新しいステージの最初のサイクルは骨格曲線に乗っていることが好ましいので、検討課題とする。

4 実験計画

提案法の特徴を把握し、既往の試験法との違いを検討するために、一連の実験を行った。

実験は中空ねじり試験機を用いる繰返し載荷試験である。Figure 2 に試験装置を示す。試料は外径 10cm、内径 6cm、高さ 10cm の円筒形である。軸方向および半径方向の載荷は空圧で制御し、せん断を与えるための回転は油圧で制御している。載荷速度は 0.1Hz で行った。試料は、空中落下法で作成し、飽和させた後、98kPa の等方応力で圧密し、その後、繰返しせん断を加えた。

試料は、豊浦標準砂を用い、相対密度 D_r を 50%、80% の 2 種類とした。各密度について、次の 9 つのシリーズ (13

供試体) の実験を計画した。

- 1) 単調載荷 非排水条件
- 2) 単調載荷 排水条件
- 3) 動的変形特性試験 stage test (現行法)
- 4) 動的変形特性試験 全過程を非排水
- 5) 液状化強度試験 振幅を 4 種類に変化
- 6) 提案法 ひずみ増分 0.5 桁 stage 間で排水
- 7) 提案法 ひずみ増分 1 桁 stage 間で排水
- 8) 提案法 ひずみ増分 0.5 桁 非排水
- 9) 提案法 ひずみ増分 1 桁 非排水

このうち、5) の液状化強度試験は現在進行中であるので、本論では示さない。

なお、前述のように、既往の試験法では、除荷点も応力またはひずみで決めることとなっており、新しいステージに移行する場合の増分も機関によって差がある。しかし、試験法としてはこれらは同じである方がよいので、ここでは変位振幅で除荷点を決める、いわゆるひずみ制御の試験を行う。

5 実験結果と考察

Figure 3～Figure 5 に実験の結果を示す。いずれの図でも相対密度が 50% のケースが左側、80% のケースが右側に置かれている。また、図中の Conventional は既往の試験法 (11 サイクルの載荷で 10 サイクル目の値)、Proposed は本論で提案した方法で、3 サイクルの載荷を行っているものである。また、Undrain は実験の全過程で非排水、stage は各ステージの間で排水することを示している。

なお、通常、動的変形特性試験ではメンブレン張力の影響 (メンブレンペネトレーション) は考慮しないが、本実験ではひずみが 10% 以上にもおよぶので、実験結果を整理する際にはその影響を考慮している。当然ながら、小さいひずみ領域ではその影響は小さく、考慮してもしなくても値は同じである。

Figure 3 は現行の方法でステージ間で排水するケースとしないケース (全実験過程を非排水) を比較しているが、0.05% 付近から非排水の方が剛性が小さくなって来ている。なお、ひずみが大きくなると剛性が非常に小さくなるので、その差は図からは判別できない。また、差は $D_r=80\%$ の方が大きい。さらに、いずれのケースでも大ひずみ意味で非排水条件の方が減衰比が大きくなっているのが着目される。

Figure 4 は非排水条件で現行の載荷法 (ただし、全過程で非排水) と提案法を比較したものである。両者では、現行法が 11 サイクル、提案法が 3 サイクルの載荷を行っていることと、ひずみ増分の値が異なるだけである。繰返し数以外にステージの数も現行法の方が多く、試料はよりダメージを受けていると考えられる。両者の差は 0.05% より小さいひずみではほとんど現れないが、これより 0.5% 付近ま

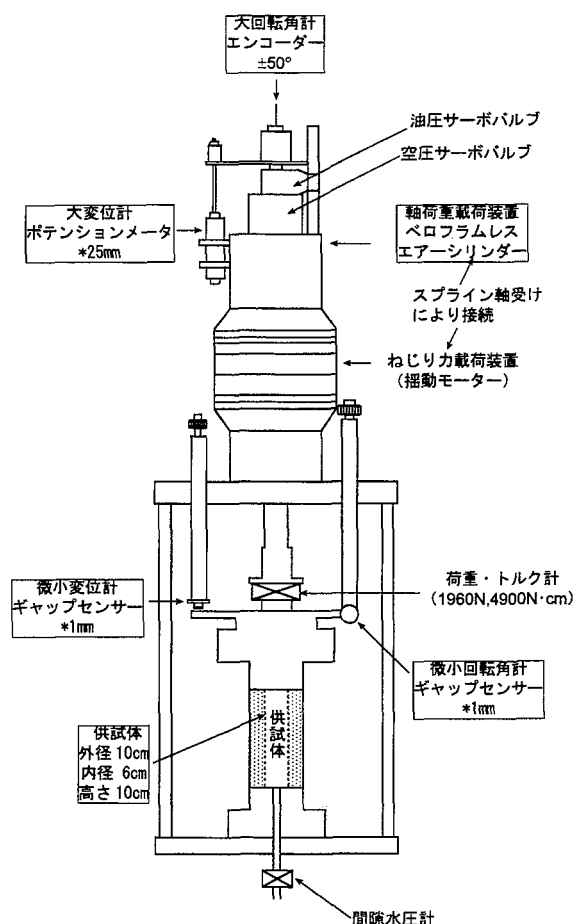


Figure 2 Test apparatus

で大きな差が現れ、現行法の方が小さい剛性を示している。なお、減衰特性はほぼ同じである。

次に、ステージ間のひずみ増分の値について検討する。現行ではあるステージのひずみ振幅は前回の倍以上となっているが、ここでは、0.5桁（3.16倍）と、1桁（10倍）を比較した。Figure 5に結果を示すが、両者は良く似た挙動となっており、どちらでも構わないと考えられる。ただし、1桁の増分としたものは、変形特性が急変する付近で全体挙動を捕らえ損なっているところがある。この意味では、増分を1桁とすることは問題があり、0.5桁程度が適当であろう。

最後に、Figure 6は提案法でステージ間のひずみ増分を1桁（10倍）としたケースの応力-ひずみ関係と単調載荷時のものを比較したものである。ここで、単調載荷の結果は、非排水条件で行ったものと排水で行ったものがある。

まず、単調載荷の結果を比較すると、よく知られていることではあるが、排水と非排水では、载荷のはじめは同じ挙動であるが、比較的小さいひずみ（0.1%よりやや少なめ）から両者でさあ現れだし、非排水条件のせん断応力が小さくなる。しかし、ひずみが大きくなると、非排水条件の実験では正のダイレイタンスーが卓越するようになり、応力経路が破壊線を上がりせん断強度も増加するのに対して、

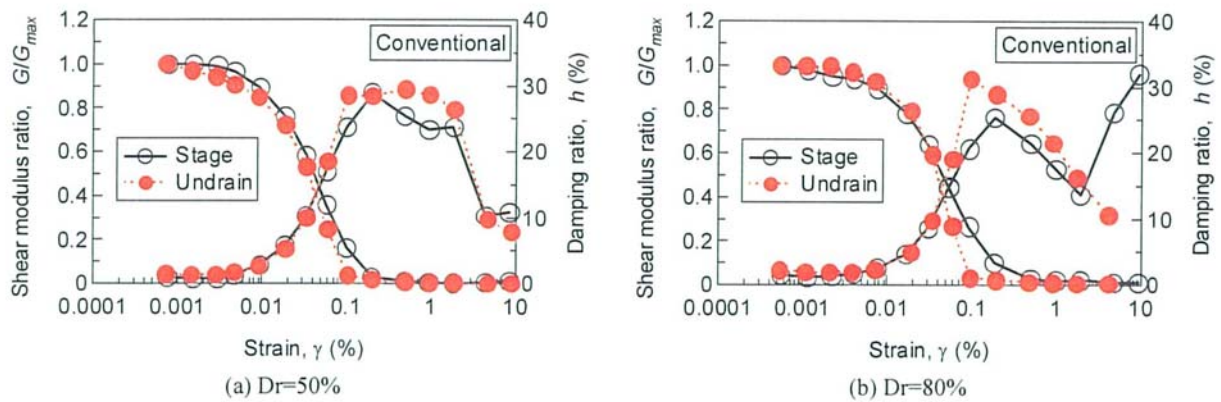


Figure 3 Effect of drainage of excess PWP between stages

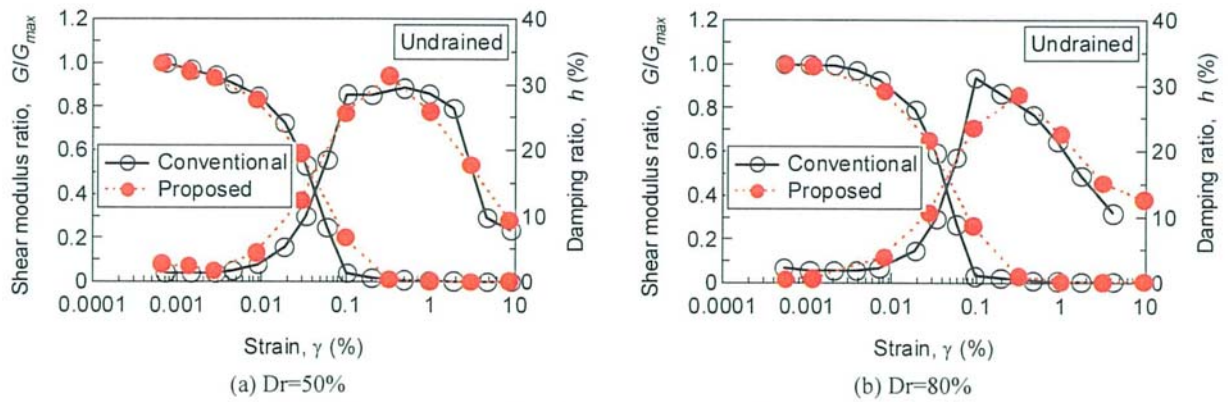


Figure 4 Comparison with conventional and proposed method

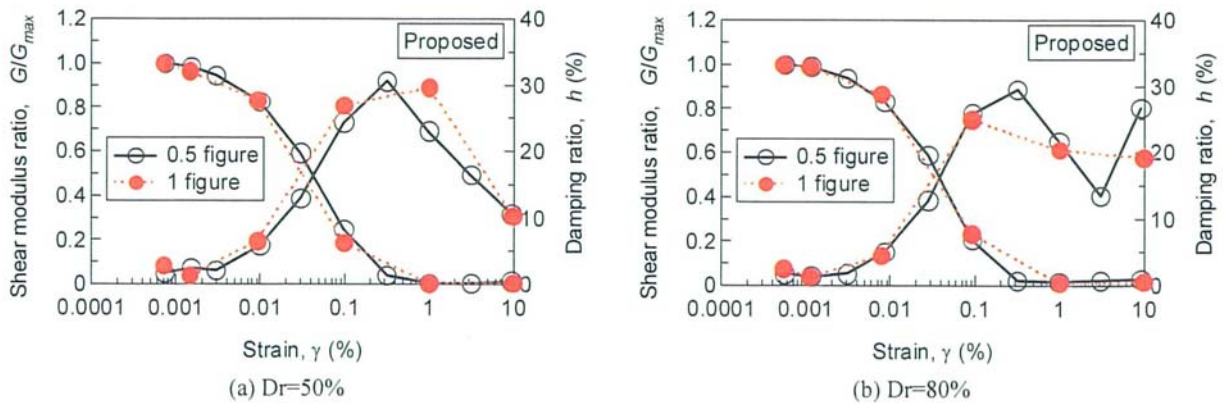
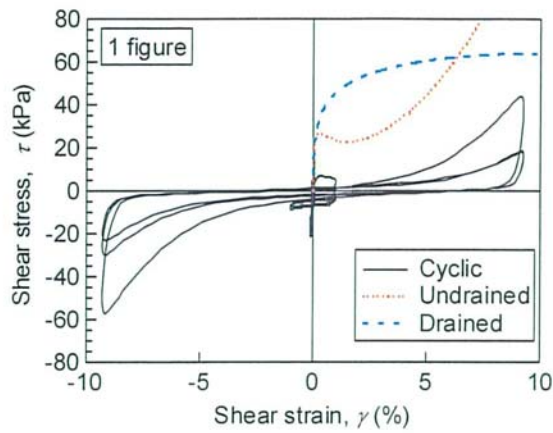
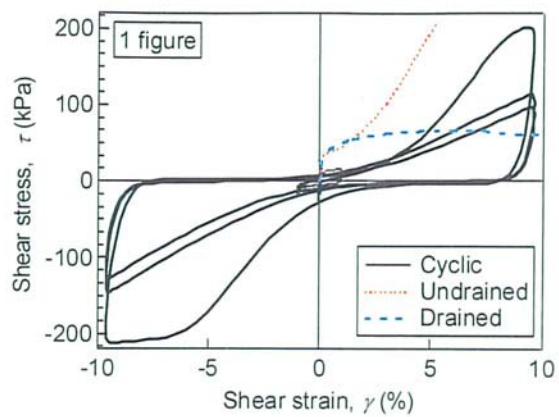


Figure 5 Effect of strain amplitude increment



(a) $D_r=50\%$



(b) $D_r=80\%$

Figure 6 Stress-strain relationships under monotonic and cyclic loading

排水条件下では拘束圧が一定であるため、せん断応力はこの拘束圧に対応したせん断強度に近づくのみであるので、せん断応力は逆転する。逆転するひずみは $D_r=50\%$ のケースでは約6%であるが、 $D_r=80\%$ では約2%である。

次に、繰返し載荷と単調載荷を比べてみると、繰返し載荷の結果は全体的に単調載荷の結果より下方にある。繰返し載荷が非排水で行われているため、履歴曲線も1サイクル目は非排水載荷の結果と良く似た形状をしている。しかし、図のようにひずみ増分を1桁増やしても、応力は単調載荷より遙かに低いところにある。先にも論じたように、ひずみ増分を1桁大きくすることは、間隔が荒すぎて、実用的には無理があることから、このような載荷で骨格曲線に乗るまで載荷することは実用的ではないといえる。すなわち、繰返し載荷の結果を単調載荷の結果から予測することはできない。これは、従来の知見¹⁵⁾とは異なっている、重要な点である。

これらの結果から、次のようなことがいえる。

1) ひずみ振幅一定の試験をすることで、10%を超える大ひずみまでの挙動を小さいひずみ領域から連続的に把握することができる。

2) 当然のことであるが、過剰間隙水圧が発生するまでは非排水、排水条件の試験結果は一致する。この最大のひずみは今回用いた豊浦標準砂で約0.05%である。これ以後のひずみ域では、排水条件により大きく挙動が異なるようになる。

3) 提案法の3サイクル程度の載荷で、従来の動的変形特性とそれほど変わらない変形特性を得ることができた。実験のばらつきなどを考えると、従来の試験法を提案法で置き換えても、1%以下の領域ではそれほど大きな混乱は起こらないと考えられる。

4) 現行の試験法は余りに許容する範囲が多すぎる。例えば、ひずみ振幅一定の挙動と応力振幅一定の挙動は大きく異なるが、それも区別されていないし、ステージ間の増分の取り方にしても、明確な規定はない。本提案法のよう

に、規定した方が、実験結果に基づいて解析用のモデルパラメータの値を決める際に便利である。

5) 将来の課題として、次の二つが重要である。

- ・動的変形特性と液状化強度試験の整合性をどのように図るか
- ・本検討は、動的変形特性試験の通常出力方法である、剛性と減衰比のみに着目した。今後、応力-ひずみ関係の比較など、より詳細に比較していくことが必要である。

6 おわりに

ここでは、強震動予測マスターモデルにおける最後の出力である、表層地盤の地震応答解析の精度向上のアプローチを示した。はじめに示したように、精度良い解析を行うためのツールはかなり準備できたと考えている。しかしながら、地震応答解析に用いるべき適切な応力-ひずみ関係や減衰特性をどのように求めるかという点についてはまだ問題も残っている。本報告では新しい試験法を提案し、大ひずみまでの挙動が追跡できることを示した。このような試験法が地震応答解析の精度向上に役に立つと考えている。

参考文献

- 1) 戸川隼人 (1975) : 有限要素法による振動解析, サイエンスライブラリー情報電算機 33, サイエンス社
- 2) 原昭夫 (1973) : 地盤の動力学的性質とその応用 その1. 地盤の動力学的性質 (ストレン・レイト, レベルによる粘性土の力学的性質の変化), 第2回地盤震動シンポジウム資料集, 日本建築学会, pp.33-39
- 3) 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
- 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, Elsevier, Vol. 22, No. 3, pp. 205-222
- 5) Yoshida, N., Sawada, S., and Nakamura, S. (2004): Accuracy of Dynamic Response Analysis of Ground by Means of Damping and Nonlinear Characteristics, Proc. The 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering and The 3rd International Conference on earthquake Geotechnical Engineering, Berkeley, USA, Vol. 1, pp. 126-133
 - 6) 吉田望 (1998) : 有効応力解析は実現象をシミュレート出来るか, 建築基礎の設計施工に関する研究資料 4、液状化地盤における基礎設計の考え方、日本建築学会構造委員会基礎構造運営委員会編、日本建築学会、pp. 47-92
 - 7) 吉田望 (1995) : DYNES3D, A computer program for dynamic response analysis of level ground by effective stress-nonlinear method, Revised in 2004, <http://boh0709.ld.infoseek.co.jp/>
 - 8) 吉田望, 末富岩雄, 中村晋 (2004) : DYNEQ, A computer program, for, DYNAmic response analysis of level ground, by, EQuivalent linear method, Ver. 4 (公開準備中)
 - 9) 地盤工学会 (2000) : 土質試験の方法と解説-第 1 回改訂版-
 - 10) Yoshida, N. (1995): Processing of strain dependent characteristics of soil for nonlinear analysis, Proc., First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Tokyo, pp. 473-478
 - 11) 規矩大義, 吉田望 (1998) : 大ひずみ領域における豊浦砂の動的変形特性試験, 第 25 回関東支部技術研究発表会講演概要集, pp. 404-405
 - 12) Tatsuoka, F., Iwasaki, T. and Takagi, Y. (1978): Hysteretic damping of sands under cyclic loading and its relation to shear modulus, Soils and Foundations, Vol. 18, No. 2, pp. 25-40
 - 13) 森伸一郎, 岡崎健, 門脇慶典, 御子柴正 (2002) : 砂質土の繰り返し変形特性の試験方法, 第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 677-680
 - 14) 清田芳治, 萩原庸嘉, 田村英雄 (1996) : 珪砂 6 号の動的変形特性に関する研究その 2, 第 39 回地盤工学研究発表会, pp. 1003-1004
 - 15) Ishihara, K. (1996): Soil behavior in Earthquake Geotechnics, Oxford Engineering Science Series 46, Oxford Science Publications