

時代の要請に応える土の繰返しせん断変形特性試験の確立を

Establishment of Cyclic Shear Deformation Characteristics Test that Responds to Demands of Times

吉田 望 (よしだ のぞむ)

東北学院大学工学部 教授

三上 武子 (みかみ たけこ)

応用地質コアラボ試験センター 専門職

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震が設計分野に与えた影響はいくつかあるが、そのうちもっとも大きなものの一つは、それまでの設計指針等で考慮していた地震力が小さかったという認識であろう。これに対して土木分野ではレベル2地震動が考慮されるようになった。この様なこともあり、土木、建築の分野を問わず、最近では地盤の地震応答解析が多く行われるようになってきている。

地盤の地震応答解析といえば、SHAKE¹⁾の名前が浮かぶ。このプログラムは過去に多く用いられてきたし、現在でも多く用いられている。しかしながら、最近の地震応答解析に用いられる大きな入力地震動に対しては、1%以上のひずみが得られることも多く、SHAKEで用いられている等価線形化手法(以下、等価線形化法と呼ぶ)の適用範囲²⁾を超えていることから、原理的にはより精度が高く、また、ひずみに対する適用範囲も広い、応力-ひずみ関係の変化を追跡しながら逐次積分法により数値積分を進めていく非線形解析に基づく方法(以下、等価線形化法に対応させる意味で、単に非線形法と呼ぶ)が用いられるようになってきている。

非線形法による解析は等価線形化法に比べてより高度な解析手法で、扱いにくい、それでも、個々の物件に対する解析のみならず、例えば、中央防災会議による南海・東南海地震に対する地震動計算に用いられた³⁾のをはじめとして、被害想定などでも用いられるようになり、一般的な手法としての地位を築いている。

地盤の地震応答解析に限らず、解析では力学特性を精度良く把握し、応力-ひずみ関係としてモデル化することが重要である。しかし、現在行われている力学特性を把握するための繰返しせん断変形特性試験⁴⁾では、入力地震動が大きくなり、著しい非線形性を示すような挙動に対しては十分なデータを提供しているとはいえないのではないかと、という問いかけがこの総説の趣旨である。入力が大きくなると、軟弱な層ではせん断強度に至るような応答が起きる。そして、ある層がせん断強度に至れば、それより上の層の加速度はその層のせん断強度とそれより上の土の質量によって決まる上限加速度に至る⁵⁾。また、対応して地表における計測震度なども上限がある⁶⁾。すなわち、材料の強度付近の挙動は地震応答解析で重要なものであるが、現行の試験法ではこれもうまく把握できていないと考えられる。

ここでは、特に砂質土を対象とし、その理由を説明し、液化化までを考慮した将来への新しい試験法の開発につなげたいと考えている。

2. 現行の方法と問題点

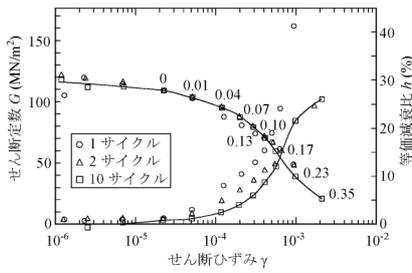
地盤工学会の試験法に示される方法⁴⁾ではかなり広範囲の実験法が示されている。そこで、ここでは最も一般的に行われる方法⁷⁾をターゲットとして議論を進める。その方法とはステージ載荷といわれる方法であり、等方の応力状態から載荷を始め、小さい応力振幅から大きい応力振幅の試験へと移行する方法である。各ステージでは11サイクルの載荷を行い、10サイクル目の履歴曲線から割線剛性 G (せん断定数と呼ばれることが一般的)と減衰定数 h を求め、ひずみ振幅 γ の関数として表現する。なお、ステージ間では蓄積された過剰間隙水圧は排水される。この様な試験法に対して、常に新しい試料で実験を行うフレッシュテストとは差がないという報告⁸⁾や、等方応力状態ではなく、 K_0 応力状態でも得られる繰返しせん断特性は同じであるという報告もあり⁹⁾、この試験法はかなり適用性が高いと認識されている。

この試験法が確立されたのは、SHAKEが発表されたのと同時期、すなわち、1970年代の初めであると考えられる。現在も繰返しせん断特性のモデル化手法としてよく用いられるHardinとDrnevichによる実験とそのモデル化¹⁰⁾が提案されたのも同じ年である。そして、非線形法が現れるのはこれより少し後である。そのため、現行の繰返しせん断変形特性試験は、SHAKEによる解析にフィットした試験法であるように見える。そしてそのことが現在の解析のニーズに対応していないように見えるわけである。以下、具体例を挙げて説明する。

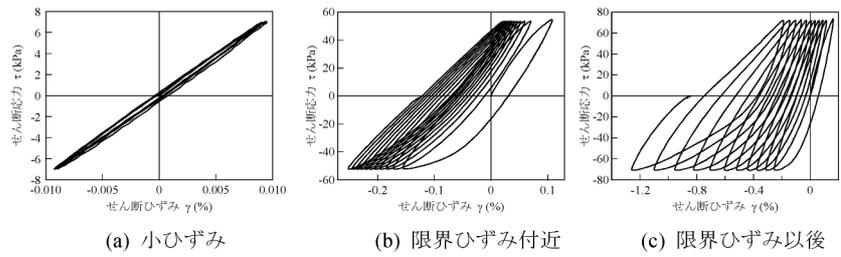
2.1 有効繰返し数

SHAKEでは解析時間を通して力学特性は一定である。したがって、応力-ひずみ関係として全解析時間を代表するものが適当であり、そのため、全解析時間を通した有効繰返し数を求める様な研究が行われてきた(例えば文献11))。

しかしながら、地震応答解析の結果として重要である、最大加速度のような応答は、大きな波が来たときに発生しており、10サイクルの履歴曲線を用いる現行の方向とはなじまない。図-1に示すように、1サイクル目と10サイクル目では変形特性が相当に異なる^{12),13)}ので、10サイクル目を基準にした変形特性では最大値の評価



図一 繰返しに伴う変形特性の変化



図二 繰返しせん断試験時の応力-ひずみ関係

に誤差が出てしまうという問題がある。

2.2 中ひずみに対する挙動

現行の繰返しせん断特性試験の適用範囲はおおよそひずみ振幅で0.1%を少し超えたところ（以下、限界ひずみと呼ぶ）と考えられる。これ以上のひずみになると、過剰間隙水圧発生のために、繰返しに伴ってひずみが増大するからである。図一2は実験例であるが、ひずみ振幅が限界ひずみ付近までは履歴曲線は10サイクルの载荷でほぼ定常化しているが、これよりひずみが大きくなると、定常化しない。しかし、この様なときにも繰返しせん断特性を求めることは可能で、例えば、10サイクルを3サイクルにするとか、各サイクルごとの履歴曲線を用いるなどの方法が採られる。これも試験法としては許容されている。この様に適当に判断基準を変えたものが、正しい応力-ひずみ関係を表しているといえるであろうか、という疑問がまず挙げられる。これについては、4項で少し議論する。

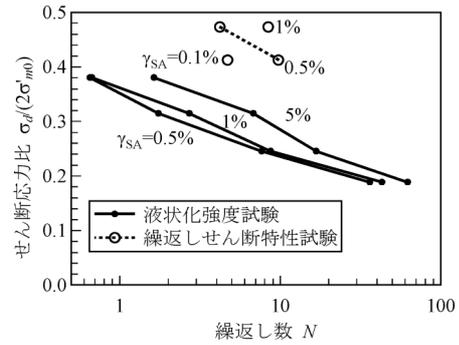
ここで述べたいのはもう少し別の話である。これまでの話から限界ひずみを超えるひずみ領域の繰返しせん断特性試験のデータはほとんど無いことがわかる。実際、既往の研究を見ても最大ひずみはほとんどが1%以下である。

限界ひずみより大きいひずみに対する試験には液状化強度試験がある。この試験では液状化の判定として初期液状化や軸ひずみ両振幅 $DA=5\%$ （三軸試験）が用いられることが多い。軸ひずみの $DA=5\%$ は、片振幅せん断ひずみに直すと3.75%である。なお、この試験は液状化強度を求めることが目的であるので、その際の応力-ひずみ関係が結果として論文等では表示されないこと、応力-ひずみ関係の整理方法が定まっていないことから、液状化強度以外のデータが出力されることはあまりない。

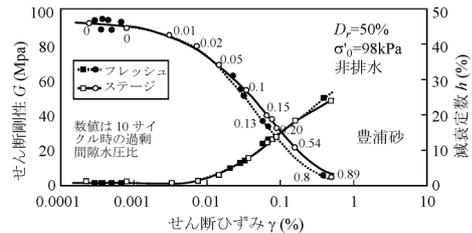
これらのことは、限界ひずみから数%のひずみまでの挙動に対しては、試験結果の蓄積がほとんど無いことを意味している。はじめにでも述べたが、最近の大きい入力地震動に関しては、最大ひずみが数%のオーダーになることも珍しくない。データの無いところで適当に補間し解析しているというのが現状である。

2.3 ステージテストの試験条件

図一3はあるサイトで採取した不攪乱試料による液状化強度試験と繰返しせん断特性試験の結果を比較したものである。両試験では出力が異なるので、ここでは、液状化強度試験の整理法に準じて、せん断ひずみ片振幅に



図三 液状化強度試験と繰返しせん断特性試験の比較



図四 ステージテストとフレッシュテストの比較

よる等ひずみ線表示としている。繰返しせん断特性試験の結果には先に述べた理由により大きなひずみのデータが無いが、図に表示されたデータの範囲では、繰返しせん断特性試験の結果の方が同じ繰返し数に対するせん断応力比は大きい。これは、繰返しせん断試験ではステージ終了ごとに発生した過剰間隙水圧を消散させていることに起因している。すなわち、ステージを重ねるたびに試料は密になっているわけで、これが強度の増加の原因である。

過去にはステージテストとフレッシュテストで差がないという報告もある⁸⁾が、図一4に示すように、限界ひずみ程度までの実験であり、さらに詳細に見るとステージテストの方が剛性が高い（これは試料作製時のばらつきによるものかもしれない）。一方、通常解析では初期状態を参照して挙動を決めているので、現行の方法のように、途中で材料特性が変化することを想定していない。また、各ステージにおける排水量は実験報告には書いてあるものの、論文等では記述されておらず、仮に実験条件を反映したシミュレーションが可能だとしてもすることもできない。

2.4 データ整理に係わる問題(1)

不攪乱試料といえども原位置のせん断弾性係数と室内

試験で得られた微小ひずみ時のせん断剛性の間に差がある¹⁴⁾ことはよく知られている。このため、地盤の地震応答解析を行う際には、室内試験で得られたせん断定数を微小ひずみ時のせん断定数で除し、原位置で計測したせん断弾性定数をかけることで原位置の非線形特性を求めている。

この方法の問題は、せん断強度に至るような領域までこの方法が適用したときに発生する。一般に地震応答解析を行う際には材料特性が同じ層では繰返しせん断特性とせん断波弾性定数は同じであると設定する。実際、せん断波速度は層内で一定のことが多いし、繰返しせん断特性もほぼ同じである¹⁵⁾。

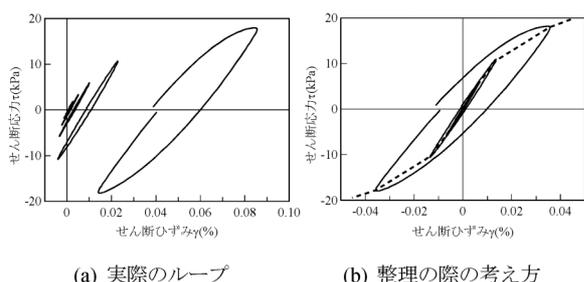
ところで、せん断応力は、せん断定数とひずみの積で得られる。すると、この方法では、せん断強度の拘束圧依存性は、せん断弾性定数のそれと同じものであるということになる。そして、先に述べたように同じ層内で同じせん断弾性定数と繰返しせん断特性を用いると、その層内ではせん断強度は同じであることになり、一方慣性力は下の層の方が大きくなるため、地震応答解析を行うと下に位置する層からひずみが大きくなりせん断強度に至るようになる。

この様な設定は、よく知られている力学特性からは明らかに外れている。もちろん、現行の試験法でせん断強度まで計測できているわけではないことはこれまでの記述から明らかである。しかし、途中まで挙動が同じで、強度付近の挙動が違うというもおかしいことには変わりはない。これも現行の試験法が大ひずみ領域を想定していないことが問題になっていると考えられる。

この様に、大ひずみ・せん断強度付近の強度がとらえられていないことから、解析ではとんでもない設定が行われることがある。例えば、SHAKE では計測された最大ひずみを超える領域では G を一定としている。これはせん断応力がせん断ひずみに比例して大きくなるというモデル化であり、実現象とは大きく離れている。

2.5 データ整理に係わる問題(2)

図—2 では履歴曲線が一方方向にずれていく現象が見られる。しかし、この様な現象は繰返しせん断特性には反映されていない。このことをより明瞭に示したのが図—5である。(a)に示したのは、各ステージにおける10サイクル目の履歴曲線を計測時の応力とひずみでプロットしたものである。しかし、 $G-\gamma$, $h-\gamma$ 関係を求める際には履歴曲線の中心が原点であるかのような整理が行われ



図—5 履歴曲線の考え方 (豊浦砂, $D_r=80\%$)

る。これから再現される応力-ひずみ関係は(b)の点線の様になる。実験の生データを見ない限り、この様な処理が行われていることはわからない。三軸試験ではしばしば伸張側へドリフトすることがこの様な処理が行われるようになった理由と考えられ、等価線形化法とも適合しているのかも知れないが、重要な情報が落ちている。

3. 解析における問題点

本論は現行の繰返しせん断特性試験の問題点を述べるのが目的であり、解析を扱っているわけではない。また、解析時におけるモデル化は解析者の責任で行われるべき問題であるので、試験法の問題として取られることはおかしいかもしれない。しかし、試験法と深く関係した解析におけるモデル化の問題もあるので、ここではそれに焦点を絞って述べる。

3.1 骨格曲線と履歴曲線

繰返しせん断特性試験では、出力として $G-\gamma$ 関係(ないしは G を微小ひずみ時のせん断定数 G_{max} で除した $G/G_{max}-\gamma$ 関係)と $h-\gamma$ 関係が用いられる。 G は履歴曲線の二つの除荷点を結ぶ割線剛性であるが、多くの解析で単調載荷における挙動ととらえられている。

多くの解析モデルでは、応力-ひずみ関係を骨格曲線と履歴曲線に分けて定義している。ここで、骨格曲線は単調載荷時の挙動、履歴曲線は骨格曲線から外れ、除荷、再載荷が起こり、再び骨格曲線に戻ってくるまでの挙動である。この二つを結びつけ、図—5 (b)を見ると、 $G-\gamma$ 関係は骨格曲線そのもの、 $h-\gamma$ 関係は履歴曲線の形状を表していると取られるのが自然であろう。そして、多くの解析ではその様に考えてモデル化が行われている。

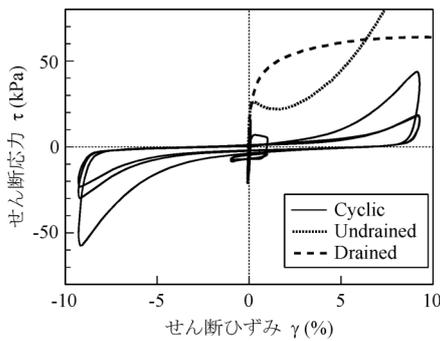
ところで、再三述べてきたように、ひずみ振幅が大きくなると、過剰間隙水圧が発生し、繰返し載荷を受けるたびに応力-ひずみ関係は劣化する。すると、二つの疑問がわいてくる。

一つは、10サイクル目の挙動から求めている G は単調載荷時の G と同じなのであろうかというものである。これは明瞭に否定される。すなわち、図—1 に示すように1サイクル目と10サイクル目の G は異なる¹²⁾。その意味では多く行われている $G-\gamma$ 関係を骨格曲線(単調載荷時の応力-ひずみ関係)と考えるモデル化は正しくないことになる。ただし、過剰間隙水圧の発生がほとんどないときには両者の差は大きくはないので既往の研究が否定されるわけではない。

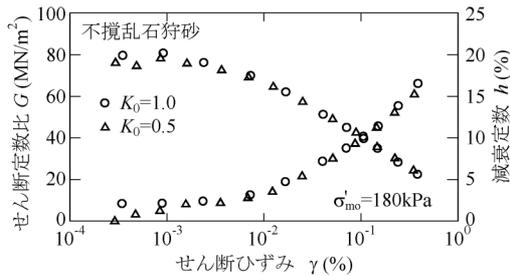
もう一つの疑問は、繰返し載荷の後、ひずみを大きくしたら骨格曲線に戻るのであろうかというものである。図—6 はひずみ振幅を一定とした繰返しせん断試験の例¹⁶⁾であるが、ひずみ振幅の増加を前回の10倍にしても、限界ひずみを超えると単調載荷時の挙動には戻らない。すなわち、大ひずみ領域においては $G-\gamma$ 関係は骨格曲線ではなく、履歴曲線である。また、図からわかるように骨格曲線は得られそうにない。

3.2 初期応力の考慮

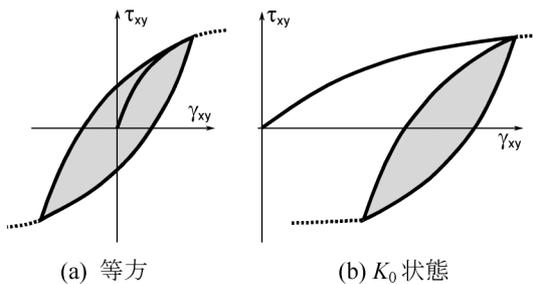
地盤は水平成層地盤であるとしても K_0 応力状態にあ



図一六 単調载荷と繰返し载荷の比較



図一七 K_0 の影響



図一八 初期応力状態の影響

る。ということは初期せん断が作用しているわけである。ところが、等価線形解析では初期せん断が考慮できないため、初期せん断の無い状態を初期状態として解析が行われている。また、図一七¹²⁾に示されるように、 K_0 状態でも変形特性が変わらないということもあり、実務ではほとんど気にされていないようである。

しかし、これにはトリックがある。降伏曲面が等方であるとすれば、初期せん断応力が大きい方が初期剛性(初期応力状態からせん断応力を受けたときの剛性)は小さいはずである。しかし、このような状況でも図一八に模式的に示すように、除荷後の剛性は弾性定数に近く、地震前の初期せん断より小さいせん断応力振幅の载荷では等方応力状態からの载荷と挙動が変わらなくなる¹⁷⁾。このことは、10サイクル目の履歴曲線から得られる繰返しせん断特性、いわゆる $G-\gamma$, $h-\gamma$ 関係が同じになることを示唆している。

これまでの記述から容易に想像できるように、初期せん断を受けている場合でも、作用するせん断応力が過去に受けた最大せん断応力よりも小さければ現行の方法で得られた繰返しせん断特性をそのまま使っても良いと考えられる。多くの地盤では過去に一度は大地震に見舞わ

れているであろうから、それより小さい地震動を扱っている分には現行の試験法はそれほど問題にならないかもしれない。しかし、非常に大きな設計用地震動となると、過去の履歴の影響は期待できない。特に埋立地のような若い地盤では過去の大地震の履歴はないであろうから、正しい1サイクル目の履歴挙動を把握すること、また、初期せん断によって見かけ上せん断強度が小さく見えることなども考慮する必要があるであろう。筆者らは埋立地で地震被害が多い理由の一つがこの現象と考えている。

4. 新しい試験法に向けて

これまで、現行の繰返しせん断特性試験の問題点について述べた。これらの事項は、1995年兵庫県南部地震以前に行われていたような大きいとはいへ比較的小さい入力地震動に対する解析を行っている際にはほとんど問題にならなかった事項である。問題はこれ以前から存在していたが、実用上、それが問題になることはあまりなかったということもできよう。すなわち、ここで指摘した問題は、入力地震動が大きくなり、せん断強度に至るような著しい非線形性を含む解析が必要になって発生してきたといえる。

この様な事態になっているにもかかわらず、この問題はあまり話題にもなっていないように感じられる。これは、いわゆる実験屋は伝統的な実験方法に基づき、データを出しているだけ、解析屋は実験データを都合の良いように解釈して使っているだけという、学問が細分化したがゆえの問題もあるように考えている。

しかし、これまでに述べてきたような問題を考えると、新しい試験法が必要であるということは理解いただけると思う。ただ、どの様にそれを作っていくかと考えると、かなり難しい問題に行き当たる。

昔は、地震応答解析といえば SHAKE であり、実験法も SHAKE をターゲットにしていればよかった。しかし、現在では多様な構成モデルが使われている。これらのすべてに適用できるような実験法はありそうにない。高度な構成モデルを使う際には、必要ならそのモデルに適した実験を行えばよいというのは一つの見識であろう。しかし、解析プログラムごとに異なる実験をするのでは、実験データの蓄積が偏り、共通の認識としての材料特性に対する理解は進まない。したがって、多くの構成モデルに適用可能な試験法が必要である。

解析を行う側の立場からいえば、実験データからそのまま解析に使える整理方法で出力される方がよい。しかし、多様な構成モデルが使われる現状ではこれは困難と考えられる。また、繰返しせん断特性は内部摩擦角などのように一つ、ないしは少数の指標で表すことができないほど複雑であるというのも共通の理解であろう。さらに、繰返しせん断特性を使うのは、地震応答解析がもっぱらであり、その他の目的にはほとんど使われない。

この様な状況を考えると、繰返しせん断特性試験は、ある条件下で行われた試験で、それが構成モデルで満足されていれば、かなりの範囲で構成モデルが土の挙動を

表現しているということがいえる指標になるようなものがよいと考えられる。

この様な観点からみると、まず改めるべきは次の二つと考えられる。

1) ステージテストでは、ステージ間で排水しない。

排水することによって材料が異なるので、同じ材料による試験結果とは考えにくくなる。また、排水が行われると多くの構成モデルでは履歴を追いながら追跡することも困難になる。履歴は単純な方がよい。

2) 载荷の振幅はひずみで設定する。

振幅を応力で設定すると、二つの問題が発生する。一つは図-5に代表されるひずみのドリフトが考慮されないことである。もう一つは破壊近くになるとせん断応力を少し変えるだけでひずみが大きく異なることになるので、履歴曲線が安定しないこともあり、試験者によって結果が変わることが考えられる。ひずみで設定すれば両方の問題は同時に解決し、さらには繰返しによってひずみがどんどん増加するということもなく、大きなひずみまで試験を行うことが可能となる。

これらを考慮し、筆者らは一度試験法を提案したことがある¹⁶⁾。この方法では、限界ひずみより小さいひずみでは現行の繰返しせん断特性試験の結果と一致し、その意味で整合性があることもわかった。しかし、先に述べた指標としての繰返しせん断特性としてどの様な出力がよいのかの議論は十分とはいえなかった。この様な議論は実験を行う人のみでできるものではなく、数値計算を行う立場、構成モデルを扱う立場の人たちが協力して議論を行っていく必要があると考えている。

最後に、もう一つ気になっていることがある。それは試験の際の载荷速度である。繰返しせん断特性では载荷速度依存性が無い¹⁸⁾ということ、実務では0.1 Hz程度の振動数で载荷されていることが多い。しかし、文献18)も今から見るとかなり小さいひずみの範囲でしか実験が行われていない。文献19)では試験機の性能によっては制御が追いつかないメカニズムが示されているが、数%になるようなひずみ領域ではある程度ゆっくり载荷しないと試験機が追いつかないようなことも起こるのではないかと危惧している。また、大ひずみ域のひずみ速度依存性については検証されていないように考えている。

参 考 文 献

1) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B.: SHAKE A Computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, *Report No. EERC72-12*, University of California, Berkeley, 1972.
 2) Ishihara, K.: Evaluation of soil properties for use in earthquake response analysis, *Proc., Int. Symp. on Numerical Models in Geomechanics*, Zurich, pp. 237~259, 1982.
 3) 中央防災会議「東南海、南海地震等に関する専門調査会」

(第5回)説明資料, 2002.

4) 地盤工学会：土質試験の方法と解説—第1回改訂版—, 2000.
 5) 末富岩雄・沢田純男・吉田 望・土岐憲三：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, 2000.
 6) 吉田 望：大振幅地震動と地盤—非線形の問題—, 地震ジャーナル, 地震予知総合研究振興会, 第28号, pp. 66~74, 1999.
 7) 土の動的変形定数試験方法基準化委員会：動的変形定数を求める試験機および試験方法の現状調査報告(国内), 地盤および土構造物の動的問題における地盤材料の変形特性—試験法・調査法および結果の適用—に関する国内シンポジウム発表論文集, pp. 1~22, 1994.
 8) 安田 進・長瀬英生・小田真也・木辻浩二：ステージ载荷が動的変形特性に与える影響, 地盤および土構造物の動的問題における地盤材料の変形特性—試験法・調査法および結果の適用—に関する国内シンポジウム発表論文集, pp. 127~132, 1994.
 9) 山下 聡・土岐祥介：初期応力の相違が砂の繰返し変形特性に及ぼす影響, 地盤および土構造物の動的問題における地盤材料の変形特性—試験法・調査法および結果の適用—に関する国内シンポジウム発表論文集, pp. 163~168, 1994.
 10) Hardin, B. O. and Drnevich, V. P.: 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, 1972.
 11) 副田悦生・玉井秀喜・田中昌廣・竹澤請一郎・前川太：等価線形解析パラメータに及ぼす地震動のひずみレベルと繰返し回数の影響, 土木学会論文集, No. 701/III-58, pp. 197~209, 2002.
 12) 山下 聡：砂の繰返し载荷試験結果に及ぼす諸因子の影響と試験結果の適用に関する研究, 北海道大学学位論文, 258p., 1992.
 13) 森本 巖・亀井祐聡・池端 譲・土谷 尚：繰返し回数による $G, h-\gamma$ 曲線の変化が地震応答解析に及ぼす影響, 第33回地盤工学研究発表会, pp. 771~772, 1998.
 14) 安田 進・山口 勇：室内および原位置で求めた動的せん断定数, 砂質土および砂地盤の変形・破壊強度の評価—室内試験法および試験結果の解釈と適用—に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp. 115~118, 1984.
 15) Masuda, T., Yasuda, S., Yoshida, N. and Sato, M.: Field investigations and laboratory soil tests on heterogeneous nature of alluvial deposits, *Soils and Foundations*, Vol. 41, No. 4, pp. 1~16, 2001.
 16) 吉田 望・三上武子・澤田純男・規矩大義：地盤の地震応答解析のための土の動的変形特性試験の提案, 第40回地盤工学研究発表会講演集, pp. 459~460, 2005.
 17) Yoshida, N.: Initial stress effect on response of level ground, *Proc. 11th World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Mexico, Paper No. 1023, 1996.
 18) 原 昭夫：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, 1973.
 19) 百瀬 忍・中島敬祐・土谷 尚：繰返し三軸圧縮試験機の性能評価について, 第31回地盤工学研究発表会講演集, pp. 977~978, 1996.

(原稿受理 2009.10.30)