

III-246

地盤の非線形地震応答解析とG- γ 、h- γ 関係

佐藤工業（株） 正会員 吉田望

1 はじめに 地盤の動的変形挙動（非線形特性）として、一般にはG- γ 、h- γ 関係が用いられ、動的変形特性に関する基準化の動きでもこれに着目しているようである¹⁾。筆者もこれまでこれを用いて解析を行ってきたが、最近、これで充分なのだろうかという疑問が生じてきた。本報では、これらの疑問を示し、諸賢の意見をうかがいたい。

2 初期応力状態との関係 G- γ 、h- γ 関係は通常振動三軸試験機で求められる。この場合、初期には試料は等方圧密状態にあり、せん断応力は作用していない。一方、実地盤は異方圧密状態にあり、水平成層であったとしても初期せん断応力が作用している。したがって、水平地盤でも地震による水平方向の繰り返しせん断を受けるときには図-1-1に示すように、処女載荷に対しては材料はかなり劣化している。一方、除荷時の剛性は微小ひずみ時の剛性と同程度大きい。つまり処女載荷領域が除荷後かによって挙動が非常に異なる。大地震時には最大加速度や最大変位は最大せん断応力に依存するであろうから、このような異方圧密状態を考慮するのとならないのでは挙動は大きく異なると考えられる。このような挙動の差は、G- γ 、h- γ 関係のみからでは求められない。

等方圧密と異方圧密状態でG- γ 、h- γ 関係が変わらないという報告もある²⁾。G- γ 、h- γ 関係を求める際には、応力振幅を一定とした11サイクルの載荷のうち10サイクル目の履歴曲線を、履歴曲線の中心が原点に一致するようずらした後剛性を計算する。したがって、図-1に示したような処女載荷に伴うドリフトがあったとしても結果には反映されないで、この報告とは矛盾しない。図-2は中空ねじり試験機を用いた異方圧密後の動的変形試験の各ステージの載荷開始時を原点にとり10サイクル目の履歴曲線を描いたものであるが、大きなドリフトが現れている。

ここでは、処女載荷試料を例にしたが、実際の地盤では過去の地震等でせん断応力が作用している。その程度により挙動が異なってくることも考えられる。

3 非排水条件 各ステージ（一定応力振幅載荷中）は非排水条件で載荷を行い、一旦排水した後次のステージの実験が行われる。非排水状態の実験を行うのであるから、砂質材料では過剰間隙水圧も発生する。例えば図-3は豊浦標準砂を用いた実験結果³⁾の一例であるが、ひずみの大きいところでは数十%もの過剰間隙水圧が発生している。つまり、G- γ 、h- γ 関係は過剰間隙水圧の発生とそれに伴う材料特性の変化の影響を含んだものとなっており、純粋なせん断変形による挙動を抽出したものではない。

排水条件で実験を行えば土骨格の挙動は把握できる。しかし、得られた結果は土と水の混合体である地盤を全応力解析する場合の材料特性とは異なる。地震時には非排水仮定がある程度成立するとすれば、現行の試験法にも正当性があるとは考えられるが、地震による有効繰り返し数は地震動の規模により違うはずで、現行の方法がベスト

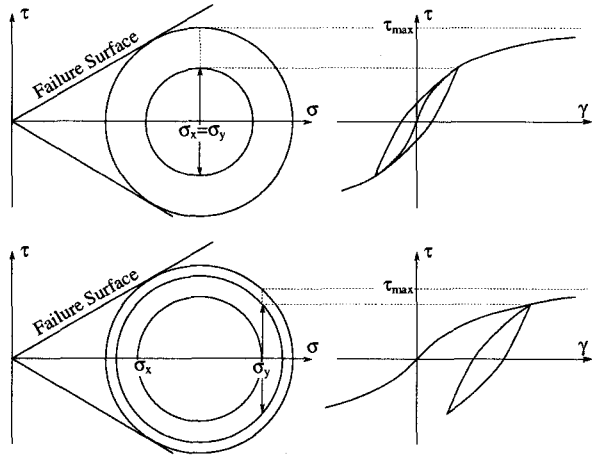


図-1 等方圧密状態と異方圧密状態からせん断変形を受けたときの挙動の違いの模式図

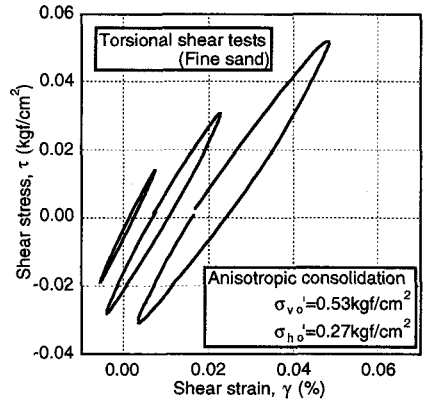


図-2 異方圧密試験の例

な方法とは限らないのではない。また、ここで平均的な値として非線形性を捉えているのであれば、詳細な非線形解析という意味は薄れる。

次の問題として、液状化解析などの有効応力解析に用いる材料の特性はこの実験方法からは求められないことがある。全応力解析と有効応力解析で異なる実験を行わねばならないというのは不便である。

4 小ひずみ時の減衰 ひずみが 10^{-4} 程度より小さいひずみにおける h - γ 関係で、減衰の値が2~4%程度ではほぼ一定となっている

結果がよく見受けられる。この減衰は本当に材料の履歴減衰なのだろうか。著者はこの値は実験を行う機関に依存しているという感じを受けている。また、精度よいひずみ計測をした場合にはほとんど0になっている事例も多々見受けられる（例えば図-3）。試験機の摩擦などが原因であるという話も聞き、それならば先の感じとも整合性がとれる。ただし、そうとすれば、大きいひずみ域ではその誤差は無視できる程度に小さくなっているのであろうか。

5 等価減衰定数と繰り返し時のエネルギー吸収量 繰り返しに伴う挙動は、等価減衰比 h として表されている。 h は履歴によるエネルギー吸収量に対応しているが、これをひずみエネルギーで割った無次元量となっている。したがって、骨格曲線のモデル化が完全でなければ、 h が実験値と同じになったからといって履歴吸収エネルギーが同じになったという保証はない。また、 h は吸収エネルギーと対応しているが、履歴曲線の形状そのものを表しているわけではない。履歴挙動を表すのにこれだけで充分なのだろうか。例えば、大ひずみ時には過剰間隙水圧発生のため、履歴曲線は小ひずみ時の時のような紡錘型とはならず、逆S字型となることもある。一方、全応力非線形解析を行う構成則では仮に h が同じになったとしても履歴曲線の形状としては紡錘型を用いている。これで、精度は充分なのだろうか。

6 10回の繰り返し数 これまでも示したが、 G - γ 、 h - γ 関係は10サイクル目の履歴挙動から求められており、それまでの履歴挙動は考慮されていない。しかし、この間には材料の劣化やドリフト、過剰間隙水圧の発生なども起こっている。これらの挙動を無視しても動的応答結果には影響がないのであろうか。最大応答値には処女載荷時の挙動の方が影響するような気もする。とすれば、1サイクル目の挙動の方が重要かもしれない。

7 おわりに 筆者が感じている G - γ 、 h - γ 関係に関する疑問を示した。この中には、既に問題となっているものもあるであろうが、いわゆる解析屋である筆者とは感覚的にずれているものもある。筆者の感じでは、 G - γ 、 h - γ 関係というのは実験を行う側から提案されている実験結果の整理方法の一つであって、動的解析を行う側の必要性から求められているものではないようである。つまり、 G - γ 、 h - γ 関係は、材料の特性を把握するには優れた指標かもしれないが、これだけで動的解析を行うために必要十分なデータかと考えると、不足しているところもあると考えられる。なお、ここで挙げた疑問点でも解析結果にはあまり影響を与えないものもあるかもしれない。このような点も含め、これまで、材料の非線形特性とその解析結果への影響についてはあまり検討されてこなかったように感じられる。精度よい動的解析を行うには実験値として何が必要かを考えてみる必要があると考える。

参考文献 1) 土の動的変形定数試験方法標準化委員会（1994）、委員会報告、「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、土質工学会、pp.1-126 2) 安田進、増田民夫、木辻浩二、小田真也（1993）、動的変形試験における拘束圧の与え方、第28回土質工学研究発表会平成5年度発表講演集、pp.899-900 3) 山下聡（北海道大学工学部）氏との私信

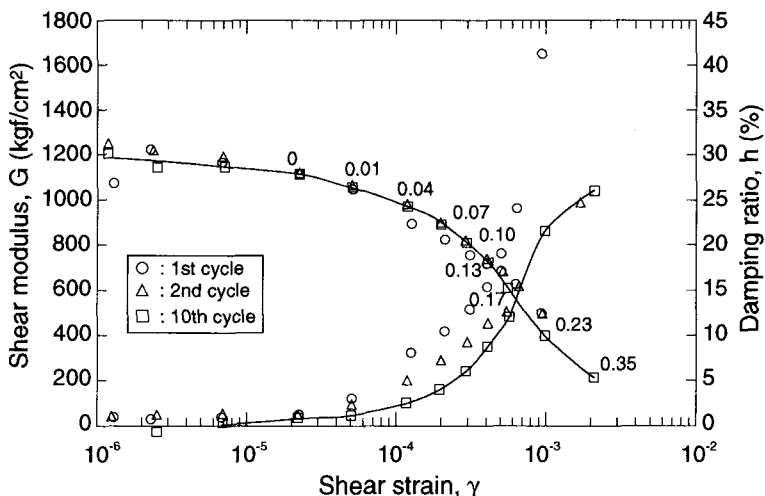


図-3 豊浦砂の動的変形試験結果