



第 1 1 1 話 SHAKE による非線形地盤応答

今回は、人工地震作成で最も良く使われる SHAKE についてお話しする。SHEKE の基礎理論は、既にお話した簡易型の地盤応答解析に基づく。地盤の地震応答解析を知る上で決定的な役割を果たすのが土、または岩石の変形特性であり、この変形特性はせん断弾性係数及び材料減衰比という形で表現できる。これらの定数は土や岩石が受けるひずみの大きさに強く依存し、しかも、ひずみが微小な領域からその特性が現れ出す。動的問題を取り扱おうとするとき、地盤の常時微動や小規模の地震動のようなひずみが  $10^{-3}$  (%) レベルの微小範囲に収まる場合は、その力学的性質は弾性であると仮定して良い。従って、地盤を構成する土の応力 - ひずみ関係も弾性体として定式化すれば良く、水平成層地盤応答解析に重複反射解析をそのまま適用することができる。これよりもひずみレベルが大きくなると弾塑性的な挙動が卓越するが、ひずみレベルが  $10^{-1}$  (%) までは、その現象を定常的なものとみなせる。このような  $10^{-3}$  ~  $10^{-1}$  (%) までの範囲を中ひずみと呼び、このときの土の挙動はせん断弾性係数と減衰比のみで表現しうる。さらに、ひずみレベルが大きくなれば、弾塑性的な変形に加え、繰り返しせん断に伴い体積変化を生じさせるダイラタンシー効果や載荷速度の増大に伴ってせん断剛性の強度が増加する速度効果も現れ、地盤応答解析もこれらを考慮した履歴追跡型の逐次積分法によらねばならない。等価線形化法はこの大ひずみより手前、微小ひずみから中ひずみ領域を対象とした解析手法であり、適用限界には注意を払う必要がある。また液状化についてもこの等価線形化法は適用範囲外であり、懸念されるような地盤については別に地下水の影響を組み込んだ有効応力解析を行う必要がある。

土の特性は、その種類（砂、シルト、粘土など）によって異なるが、ひずみの大きさによっても変化する。室内動的せん断試験を行った結果が Seed, Idriss によりまとめられている(図 1 と 2)。これによれば、土は微小ひずみからせん断剛性が低下し、逆に材料減衰（履歴減衰）は大きくなるという性質を有する。特にこの Seed, Idriss の  $\gamma - G/G_{max}$ 、 $\gamma - \beta$  曲線は

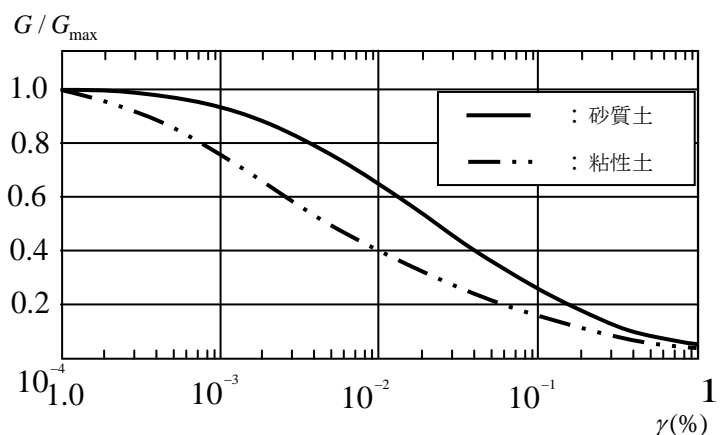


図 1 土のせん断ひずみ-せん断弾性係数低減曲線 ( $\gamma - G/G_{max}$  曲線) [Seed, Idriss]

他の研究者が発表しているものよりも土のひずみ依存性が顕著である。他方、我が国の建設省告示 1457 号付記には同じように粘性土、砂質土の  $\gamma$ - $G/G_{max}$ 、 $\gamma$ - $\beta$  曲線のパラメータが提示されているが、前者の曲線と比べ 1 オーダー程度非線形の開始領域がずれている。これらは使用者が選択して使い分けることになる。

以上のように、土の材料特性はひずみの大きさに依存する。既にお話した周波数領域の解析では、このようなひずみの大きさによって剛性などの特性を変化させて解析することができず、等価線形化法を使用する。

等価線形化法 SHAKE は 1972 年に Schnabel, Seed らによって発表されたソフトであり、周波数領域における一次元の非線形応答解析の近似手法である。SHAKE では伝達関数がある方法によって変化させることで非線形応答を得る。まず、線形系の重複反射理論に基づいた伝達関数を用いて応答解析を実行する。その際、各層のせん断ひずみ時刻歴を計算し、この各層のせん断ひずみ時刻歴の絶対最大値  $\max|\gamma_k(t)|$  に着目し、各層の全時刻歴中の有効せん断ひずみを  $eff\gamma_k = C \cdot \max|\gamma_k(t)|$  として計算する。ここに  $C$  は最大値に対して、全時刻歴中の平均的な等価ひずみを決定する低減率である。経験的に  $C = 0.65$ 、すなわち最大値に対して 65% にすることが多いが、入力地震動のマグニチュードを  $M$  として、その関数を  $C = (M - 1.0) / 10$  と定めることも提案されている。

上記より各層の有効ひずみ  $eff\gamma_k$  を算定した後、先の各層毎の地盤の種類に応じた  $\gamma$ - $G/G_{max}$  と  $\gamma$ - $\beta$  曲線から、有効ひずみ  $eff\gamma_k$  に対応する等価せん断弾性係数  $G_{eqk}$  や等価材料減衰定数  $\beta_{eqk}$  を設定する。これにより全層で等価せん断弾性係数と等価材料減衰を求め、伝達関数を再構築する。再構築した伝達関数により再び周波数領域の応答解析を実施する。出力波形並びに各層のせん断ひずみ時刻歴も最初の応答解析とは異なった波形となり、再度、各層の有効せん断ひずみを応答波形中の最大値から上述と同様の手法で求める。反復応答解析を数回実行することによって、最大値に対する有効せん断ひずみがある一定の値に収束する。通常 4~10 回程度の反復により有効ひずみが一定の値に落ち着き、この収束した状態で非線形応答を、特に最大加速度について等価な線形系に置換できたと見做す手法が等価線形化法 SHAKE である。

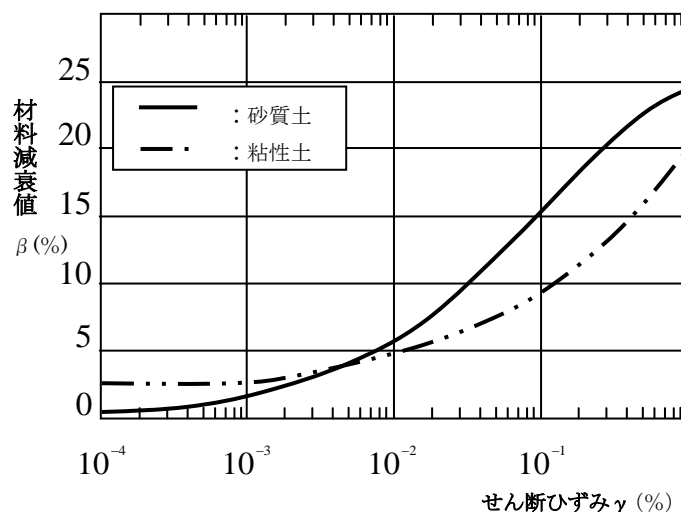


図 2 土のせん断ひずみ-材料減衰増加曲線 ( $\gamma$ - $\beta$  曲線) [Seed, Idriss]