

愛知工業大学 正員 四橋 正俊, 同 建部 英博, 同 大根 義男

1 はじめに 砂地盤等の地震動による液状化については、従来、完全に液状化するか否かの判定が主として行われて来た。振動的なせん断応力を加える実験では、液状化が繰返し回数の増加と共に進行する有様がかなり明らかにされてきており、筆者等はこの実験結果を地震応答計算に取り入れる試みを行っている。この解析が進めば、液状化の進行を伴う土質構造物の安定性の変化を評価することができよう。ここでは堤体を載せた砂地盤についての地震応答解析例を紹介する。

2 計算方式

◎ 平面歪問題とし、有限要素法を用いて、非線形の逐次積分計算を行う。

◎ 運動方程式は $[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = f$

このうち $[M]$, $[C]$ は定数の要素を持つ行列とする。 $[C]$ は $\alpha[M] + \beta[K_0]$ の形で与える。ただし、 $[K_0]$ は初期に与える $[K]$ の値である。 α, β は渡辺等¹⁾と同様の方法を用いて推定した。 $[K]$ は計算の時間刻み毎に作り直していく。

◎ 非線形性は以下の様にして導入する。

筆者等の研究室で行っている動的三軸試験による $\sigma - \gamma$ 曲線のヒステリシスループの一例を図-1に示す。ループは拘束圧と歪振巾によって変化する。拘束圧を一定に保って歪振巾を変えていくと、ループの右上と左下の先端は原点を通る曲線を描くが、これをその拘束圧におけるループの骨格曲線とする。すなわち、ループを骨格曲線による非線形バネと、ループの面積に相当する減衰効果とに分けて考える。この骨格曲線上の各点に対応する剛性率 G を、普通行われているように $G = A(\gamma) \cdot \sigma_0^{m(\gamma)}$ で近似する。ただし σ_0 は拘束圧であり、モデルの静的弾性解析によって求める。また関数 $A(\gamma)$, $m(\gamma)$ は実験結果をまとめて図-2の曲線を与えた。²⁾ 実際の計算ではポアソン比 $\nu = 0.49$ として G を動的ヤング率 $E_d(\sigma_0, \gamma)$ の形に換算して用いた。この E_d を各時間刻みで、各要素毎に求め、 $[K]$ を作り直して次の時間刻みに進む。

◎ 液状化については以下の様にして計算に導入した。

振動三軸試験によると、砂の液状化はせん断応力の繰返し回数に応じて進行していき、進行の度合はせん断応力振巾の大きさ τ_d による。これに関する筆者等の実験結果の一例を図-3に示す。³⁾ この図によると u/σ_0 と N/N_k との関係は τ_d の大きさにあまり左右されない。ただし u : 液状化によって発生した間隙水圧, N : 繰返し回数 N_k : τ_d に応じて決まる完全液状化までの繰返し回数。今回の計算ではこの関係を実験式 $u/\sigma_0 = f_1(N/N_k)$ で表わして用いた。また N_k と τ_d の関係についても図-4に示すような実験結果が得られているので、³⁾ やはり実験式 $N_k = f_2(\tau_d, \sigma_0)$ で表わした。ただしこの場合、限界せん断応力振巾 τ_{dc} (それ以下のせん断応力振巾では何回振動を繰返しても液状化が起らないような振巾) というものを考え、 $\tau_d < \tau_{dc}$ では $N_k = \infty$ とした。さて以上の実験結果は、せん断応力の正弦的变化についてのものである。不規則な振動にはそのまま適用できない。そこで鋼材の疲労に対して用いられる考え方と類似の考え方で、この実験結果の不規則波への適用を計った。図-4の横軸を土の液状化に関わる内部状態を著わす変数と考え、これを S_k と呼ぶことにする。すなわち、ある内部状態 S_k に応じて間隙水圧比が決まると考えるのである。いま内部状態が S_k の土に、 τ_d なる振巾を持つせん断応力振動を n 回加えたとき、 τ_d に対応する完全液状化のための繰返し数 $N_k(\tau_d)$ (図-4) を用いて $\Delta S_k = n/N_k(\tau_d)$ だけ S_k が増加して新しい内部状態 $(S_k + \Delta S_k)$ が生じ、これに対応した間隙水圧が発生するものと仮定した。この仮定の是非を確かめる実験はまだ行っていないが、今後の課題としたい。計算では各要素毎にせん断応力 $\tau(t)$ の時間変化を追って行く。 $\tau(t)$ の山(極大値)と谷(極小値)のうちから、時間順に(谷), 山, 谷, ..., 山, 谷, ...

を $|山_i - 谷_{i-1}|$ および $|谷_{i+1} - 山_i|$ がすべて限界せん断応力振巾 τ_{dc} よりも大きくなるように、かつ大きくなるような山, 谷は必ず入るように入選んで行く。こうしてとった $山_i \rightarrow 谷_{i+1}$ または $谷_i \rightarrow 山_{i+1}$ を、 $|山 - 谷|/2$ の振巾を持つ $1/2$ 回の振動と数え、上述の仮定に基いて ΔS_d を計算し、その時点で S_d に加えて行く。 S_d に応じて間隙水圧 u が発生した要素では、 σ_0 の代りに $\sigma_0 - u$ を用いて動的ヤング率 $E_d(\sigma_0 - u, \gamma)$ を決める。

3 計算結果 ここで用いたモデルは図-6に示す。土質材料を堤体部分と地盤部分とで異ったものとし、堤体材料については液状化が起らないものとした。外力としてエルセントロのNSの加速度記録を用いた。モデルの下底および左右辺を固定とし、これに水平強制変位を与える。図-5は堤頂部の応答変位を示す。破線が液状化させて計算した結果である。図-6に各要素の液状化の進み具合を示す。図-5でみられるように液状化が部分的に起りつつある状態では、構造物の振動波形はさほど影響を受けてないようであるが、そのような場合でも図-6で示されるような結果を利用することによって、振動中の安定解析を、きめ細く行うことが可能になると期待される。 参考文献 1) 渡辺弘他, 土と基礎 Vol. 23, No.1 2) 奥村, 大根, 第33回土木学会 3) 奥村, 大根, 愛知工業大学研究報告 オ13号 (1978)

