

九州大学 工学部 正員 山内豊繁
九州大学 工学部 学生員 〇兵衛正幸

1. まえがき

地震時の液状化に対する対策の一つとして、杭基礎の有効性が言われている。これは、液状化発生の条件となる地盤加速度が、杭の作用により低減されるためと考えられる。そこで本論では、まず図-1のような砂層地盤が基礎から水平方向に正弦波入力を受けた場合について、杭基礎の応答加速度を弾性波動論により求め、これを作用外力として液状化の基本式にとり入れ、過剰間隙水圧の値を求めた。さらに、過剰間隙水圧の時間的変化と深さ方向の変化を求めて、液状化しない地盤の場合と比較してみた。

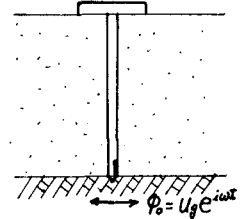


図-1 杭基礎

2. 地盤加速度の仮定

図-2に示すように、作用外力としての地盤加速度は2.0秒まで直線的に増大し、以後は加速度振幅 a_{max} の一定加速度とした。 a_{max} の値は3次元波動方程式の定常解から、杭の応答¹⁾と地盤だけの応答を各深さについて求め、それぞれの値を表わした。その際、砂の減衰定数は実験結果から0.034を使用した。杭の応答については砂の影響が小さく現われ、杭の振動モードも地盤のそれと類似しており、杭の剛性を変えてもさほど変化がなかった。したがって、杭基礎が地盤加速度低減に効力を発するのは地下遠散減衰によるものと考え、杭基礎の減衰定数を0.08程度に仮定した。

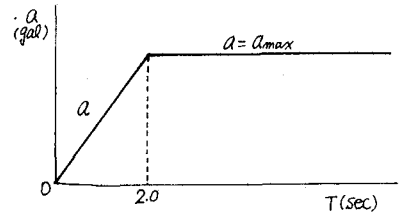


図-2 地盤加速度

3. 励起加速度

液状化は、本来、砂層を構成している砂粒子の構造崩壊に起因する現象であり、この崩壊は、通常、加速度によって表現され得る外力によって生ずるものである。砂粒子から成る構造骨格の強度が入力となる加速度より大きい場合には、各砂粒子は可逆的な運動をするにとどまり、構造骨格もそのまゝの状態を安定を保つことになるが、加速度が大きくなって骨格の強度を越せば、砂粒子は非可逆的な運動を開始し、より安定な位置へ移行する。この際、砂粒子の非可逆的な運動が引き起こされる限界の加速度を、励起加速度²⁾という。そして、この励起加速度を支配する主要因子として砂粒子間の有効応力と空げき率を考え、励起加速度 a_e がこのいずれにも比例して増減するものであるという仮定から、 a_e を次式で表現している。

$$a_e = (\sigma_v - u) \varphi(\lambda) \quad (1)$$

ここに σ_v は有効上載圧を表わし、 $\varphi(\lambda)$ は間隙率 λ の関数で、 λ の減少に伴って増加するような関数である。

4. 液状化の基本式とその近似解²⁾

図-3のような、初期砂層圧と水深とが一致し、砂層表面が水平である2次元モデルにおいて、液状化の基本式は、砂粒子と間隙流体の二相系における流体力学的基礎方程式を拡張させて、次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x \partial z} - k^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} &= F(z, t) & , & a \geq a_e \\ &= 0 & , & a < a_e \end{aligned} \right\}$$

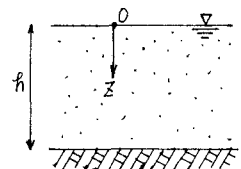


図-3 解析モデル

(2)

$$F(z,t) = \frac{g-1}{g} \frac{R\gamma'}{g} (a - a_e)$$

$$g = 1 + \frac{m_v}{\beta} \frac{2(1-\lambda)}{\lambda}, \quad K^2 = KC^2/gg$$

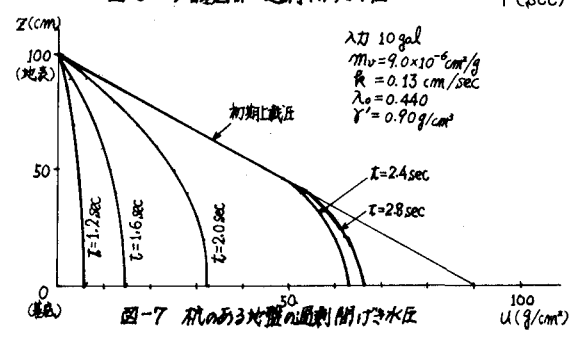
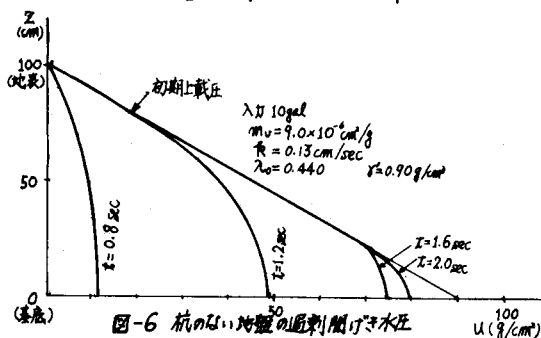
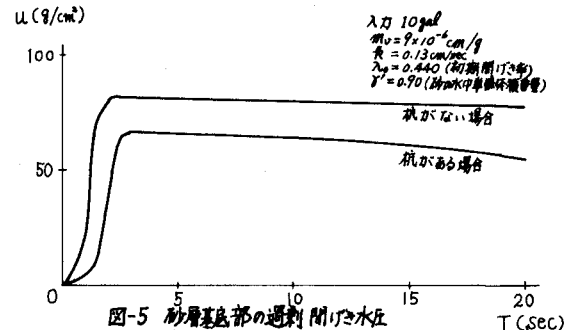
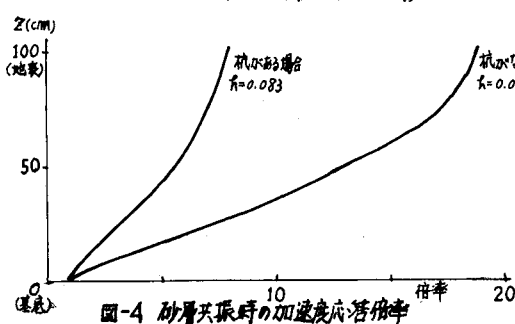
ここにCは水中での音の伝播速度、 β 、 m_v はそれぞれ水と砂層の体積圧縮率、 γ' は砂の水中単位体積重量、 g は重力加速度、 K は砂層の透水係数である。式(2)の近似解は、次のように表わされる。

$$U(z,t) = \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} [e^{-K^2 \lambda_n^2 (t-\tau)} \int_0^h U(z,\tau) \sin \lambda_n z dz + \frac{1}{K^2 \lambda_n^2} (1 - e^{-K^2 \lambda_n^2 (t-\tau)}) \times \int_0^h F(z,\tau) \cos \lambda_n z dz] \sin \lambda_n z, \quad t \geq \tau, \quad \lambda_n = (2n-1)\pi/2h \quad (3)$$

5. 数値計算および考察

式(3)の数値計算を遂行するにあたって、時間 t を0から始め0.1秒さみで増加させ、その都度 U と F の初期値を与えていく方法をとった。砂層厚さを100cmにとり、基盤の入力加速度を10galとした。砂の弾性定数には、沖積シラス弾性波速度の測定結果から得た値を使用し、砂層地盤の剛性率を $G = 364 \text{ kg/cm}^2$ 、Poisson比を $\nu = 0.49$ とした。また杭基礎の応答解析には、杭の先端が基盤に支持され、頭部を構造物に固定されており、杭全体が根入れされている場合を想定した。(図-1参照) 図-4は砂層共振時における各深さの加速度応答倍率である。

図-5は、表層基底部における過剰間げき水圧の時間的変化を示す。初期有効上載圧が 90 g/cm^2 であるので、この図から、みみけの液状化度が、砂だけの場合で約90%、杭がある場合で約70%まで到達することがわかる。図6,7は、表層地盤各深さの過剰間げき水圧の値を、砂だけの場合と杭がある場合についてそれぞれ示すものである。これらの図から、過剰間げき水圧の接線の傾きが初期上載圧の直線の傾きに近づくほど完全液状化が増し、両者が一致した状態では、完全液状化状態になっており、逆に接線がO-Z軸に平行となる深さでは液状化は全く起っていないことが看取される。したがって砂だけの場合には2.0秒後に80cmの深さまで完全液状化状態になるのに対し、杭がある場合には2.8秒後に60cmの深さまで完全液状化状態になることが認められる。



参考文献 1) 工質工学会編：土と構造物の動的相互作用，P.257～275

2) 民島 勝：飽和砂層の液状化に関する理論的研究，土木学会論文報告集，第84号，1970.12