

変動水圧による緩い堆積砂層の進行性液状化過程

岡山大学環境理工学部○学生員 山内 敏行
岡山大学環境理工学部 正会員 名合 宏之
岡山大学環境理工学部 正会員 于 月増

1.はじめに

間隙率 λ_w が 0.48 程度の緩い堆積砂層に変動水圧を作用させると、平均間隙水圧の上昇を伴う進行性の液状化が発生する。著者らは、この液状化現象の力学機構について鉛直 1 次元砂層を対象として従来より研究をすすめ、その数学モデルを明らかにした。本研究は、その数学モデルを用いて、進行性の液状化特性に及ぼす堆積砂層の間隙率の影響を解析的に検討するものである。

2.解析モデルの概要

鉛直 1 次元砂層での間隙水圧 h 、及び砂層変位 u_y は、まず砂層を弾性的とすると、次式で解析される。

$$\frac{1}{\alpha} \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right) = \rho g \frac{\partial h}{\partial y} \quad (1)$$

$$\rho g \left(\beta \lambda_w + \frac{\lambda_a}{p} \right) \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right) = \frac{k}{\gamma} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

α : 砂層の圧縮率, u_y : 砂層変位, h : 間隙水圧水頭: 砂層表面からの深さ, ρ : 水の密度, g : 重力加速度,
 β : 水の圧縮率, λ_w : 水の含有率 λ_a : 空気含有率 P : 砂層中の絶対圧力, k : 砂層の透水係数

鉛直 1 次元砂層の表面から深さ y において、上載荷重が有効応力 σ_y と間隙水圧 ρgh の和につり合うとすると、
$$\sigma_y + \rho gh = p_s + \gamma_s y \quad (3)$$

式(3)は、式(4),(5),(6)を考慮すると、無次元有効応力の式(7)に変形される。

$$\rho gh = p_{s*} + \rho g((y - y_*) + h') \quad (4),$$

$$p_{s*} = p_s + \gamma_s y. \quad (5),$$

$$\gamma_s = \rho_s g(1 - \lambda) + \rho g \lambda_w \quad (6)$$

$$\frac{\sigma_y}{(\rho_s - \rho)g(y - y_*)(1 - \lambda)} = 1 - \frac{\rho gh'}{(\rho_s - \rho)g(y - y_*)(1 - \lambda)} \quad (7)$$

ρ_s : 砂の密度, γ_s : 混合流体密度, h' : 過剰間隙水圧, λ : 砂層間隙率, p_s : 初期砂層面に作用する変動水圧
 p_{s*} : 非液状化砂層面に作用する変動水圧 y_* : 混合流体化する領域の深さ

ここで式(1)、(2)を 境界条件 : $y=y_*$ で $h=0, \sigma_y=0$ および $y=D$ で $\frac{\partial h'}{\partial y} = 0, u_y=0$

初期条件 : $t=0$ で $y_*=0$ で解析する。

次に、式(7)より得られる無次元有効応力の値が降伏応力 σ_c よりも大きくなる砂層領域では、砂層骨格が塑性変形するとして図 1 の応力-ひずみ曲線に従い、塑性ひずみ ε_p を考慮し P_1 (弾性解析解)の有効応力 σ_1 から P_1' (塑性解析解)の有効応力 σ_1' へと塑性解析を行う。

以上に説明した鉛直 1 次元弾塑性モデルより、微小時間ステップごとの砂層内の間隙水圧 h 、有効応力 σ_y が求められる。

作用する変動水圧 h_v が減少する時、砂層表面付近で有効応力 σ_y が 0 となる領域 y_0 が生じる。この領域は、間隙率 λ_w が大きいと混合流体化するが、小さくなるにつれ混合流体化しにくくなる。有効応力 $\sigma_y=0$ となる領域の深さ y_0 に対する混合流体化する領域の深さ y_* の比を液状化率 $R_L (\leq 1)$ とする。本解析では液状化率 R_L と間隙率 λ_w との関係を、式(8)のように線

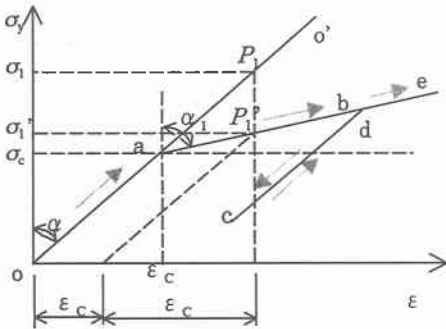


図 1 応力-ひずみ曲線

形的であると仮定した。有効応力 σ_y の値から y_{*0} は求められるので、式(9)を用いて y_* を計算することができる。

$$R_L (=y/y_{*0}) = a \cdot \lambda_w - b \quad (8) \quad , \quad y_* = R_L \cdot y_{*0} \quad (9)$$

作用する変動水圧が増加する時、流体化した液状化領域において、砂粒子の沈降に伴い領域下方から高密度化して砂層が回復する。その砂層回復速度 V_r は、経験式(10)により与えられる。

$$V_r = \left[0.0015 \left(\frac{g}{a_0 f^2} \right) + 0.0081 \right] f \sqrt{a_0 y_*} \quad (10)$$

f : 作用する変動水圧の周波数, a_0 : 作用する変動水圧振幅

砂層の回復期すなわち高密度化していく過程での間隙率 λ_w は、作用する変動水圧の波数 ft の関数とし、次式で仮定した。

$$\lambda_w = m - n \cdot \log(ft) \quad (11)$$

この高密度化領域では、 λ_w の変化に伴い透水係数 k 、降伏応力 σ_c も次式に従い変化するものとする。

$$k = 0.3164 \lambda_w - 0.1115 \quad (12) \quad , \quad \sigma_c = p \cdot \lambda_w + q \quad (13)$$

式(12)は定水位透水試験の結果による関係を示しており、式(13)は線形仮定したものである。

以上の数学モデルより、変動水圧 p_s が作用したときの砂層内の間隙水圧、有効応力、混合流体領域および砂層表面の沈下量が解析される。なお、混合流体化した領域は、密度 γ_s の流体として取り扱い、それより下方の砂層面に変動水圧 p_s が作用するものとしている。

3. 解析結果及び考察

本解析では、砂層面に作用する変動水圧として、平均の静水圧が $\rho g h_0$ 、変動振幅が a_0 、変動周波数が f の次式で表される正弦波形を用いて、進行性の液状化特性に及ぼす堆積砂層の間隙率の影響を解析的に検討した。

$$p_s / \rho g = h_0 + a_0 \sin 2\pi ft \quad (14)$$

なお、本解析で用いたパラメータの値を以下に示す。

$D=3.2(\text{m}), \lambda_s=0.0023, \rho_s=2.65(\text{t/m}^3), \rho=1000(\text{kg/m}^3), h_0=1.0(\text{m}), a_0=0.8(\text{m}), f=1.0(\text{hz}), \alpha=6.0 \times 10^{-9}(\text{m}^2/\text{N}), \beta=4.3 \times 10^{-10}(\text{m}^2/\text{N}), a=33.3, b=15, m=0.498, n=0.0122, p=-13.9, q=8.0$

解析方法は有限要素法を用い、時間差分 Δt は 0.02sec 、鉛直方向の距離差分 Δy は 0.53cm としている。

図2は、砂層の初期間隙率 λ_{w0} が $0.48, 0.47, 0.46$ と変化した時の液状化深さ y_* の進行特性を比較している。縦軸は、混合流体化する領域の深さ y_* 、横軸は砂層に作用した変動水圧の波数 ft である。この解析結果より、 λ_{w0} が大きな砂層ほど、変動水圧作用による1波あたりの液状化深さが大きく、また最大の液状化深さ y_{*max} も大きくなるのがわかる。

図3は、砂層の初期間隙率 λ_{w0} が $0.45 \sim 0.48$ の範囲において、最大液状化深さ y_{*max} の変化を計算した結果をプロットしたものである。この図より λ_{w0} が大きくなるに従い y_{*max} も徐々に大きくなることかわかる。

4. あとがき

本研究より、砂層の初期間隙率が液状化に及ぼす影響が解析的に示されたが、今後の課題として本解析に用いられた諸定数の性質についてはさらに検討していく必要がある。

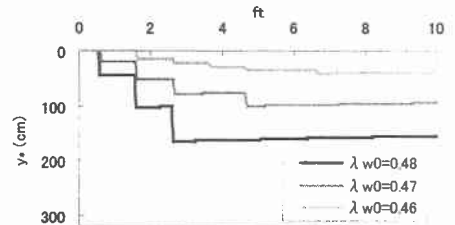


図2 液状化の進行特性

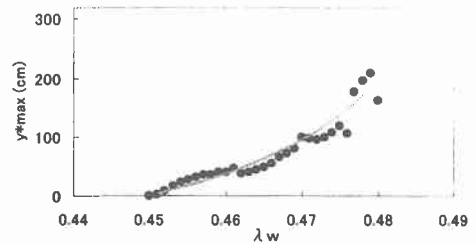


図3 最大液状化深さ y_{*max}