

変動水圧による不均質砂層の液状化に関する研究

五洋建設株式会社 正会員 伊野 同
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 次元均質砂層を対象として従来より研究をすすめる数学モデルを明らかにした¹⁾。しかし、実際の海底地盤では、過去の変動水圧の影響によって砂層の上層が高密度化され、不均質砂層が形成されていると考えられる。そこで、本研究ではそのような不均質砂層を対象とした数学モデルを提案し、さらに実験結果と比較しその数学モデルの妥当性を検討する。

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。

$$\frac{1}{a} \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right) = r g \frac{\partial h}{\partial y} \quad (1) \quad r g \left(b l_w + \frac{l_a}{p} \right) \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right) = \frac{k}{g} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

a : 砂層の圧縮率, u_y : 砂層変位, h : 間隙水圧水頭, y : 砂層表面からの深さ, r : 水の密度, g : 重力加速度, b : 水の圧縮率, l_w : 水の含有率

l_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 $rg h$ の和につり合うとすると、

$$\sigma_y + r g h = p_s + g_s y \quad (3)$$

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。

$$r g h = p_{s*} + r g ((y - y_*) + h') \quad (4), \quad p_{s*} = p_s + \gamma_s y_* \quad (5), \quad g_s = r_s g (1 - l) + r g l_w \quad (6)$$

$$\frac{\sigma_y}{(r_s - r) g (y - y_*) (1 - l)} \approx 1 - \frac{r g h'}{(r_s - r) g (y - y_*) (1 - l)} \quad (7)$$

r_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

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。(y_* : 混合流体化する領域の深さ, D : 砂層厚)

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 σ_y も大きくなると、砂層骨格は弾性的な挙動から塑性的な挙動へと遷移するものとし、そのような塑性領域については、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不均質砂層内の間隙水圧 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 (1) とする。液状化率 R_L と間隙率 λ_w は、図 2 の破線のような関係であり、これらの関係は変動水圧の振幅により変化すると考えられる。本解析では液状化率 R_L を間隙率 λ_w の関数とし図 2 の実線で表される式(8),(9)で仮定した。

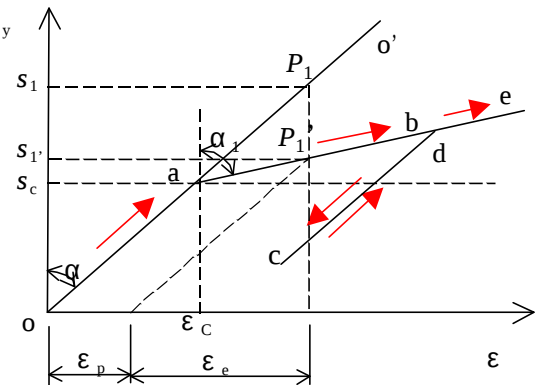


図 1 応力 - ひずみ曲線

$$R_L (=y_*/y_{*0}) = a1 \lambda_w - b1 \quad (\lambda_w > \lambda_{w1}) \quad (8)$$

$$R_L (=y_*/y_{*0}) = a2 \lambda_w - b2 \quad (\lambda_w < \lambda_{w1}) \quad (9)$$

作用する変動水圧の上昇時、流体化した液状化領域では、砂粒子の沈降により、領域下方から砂層が高密度化を伴って回復する。その砂層回復速度 V_r は、経験式(10)により与えられる。

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

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、式(11)で仮定した。また、このような高密度化領域では、 λ_w の変化に伴い透水係数 k 、および降伏応力 σ_c も式(12),(13)に従い変化するものとする。

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

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

式(12)は定水位透水試験結果による関係式、式(13)は線型的に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 の流体となり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. 実験の概要

解析の妥当性を検討するために行った実験では、図3に示す実験容器を用いた。容器内には、図3にその間隙率分布を示しているように、砂層上層が高密度化された不均質砂層が形成されている。そして、変動水圧を作用させた時の不均質砂層内の間隙水圧を Pt.1～8 で測定する。なお、Pt.1 は図3からもわかるように測定点が水中にあり、砂層表面に作用する変動水圧 p_s を測定している。

4. 解析結果と実験結果の比較

解析で用いた砂層の表面に作用する変動水圧 p_s は、実験により得られた Pt.1 の水圧データを用いている。初期間隙率は、実験と同様、図3に示す間隙率データを採用した。実験条件は平均水圧 $h_0=100\text{cm}$ 、変動水圧の振幅 $a_0=113\text{cm}$ 、周波数 $f=1.0\text{Hz}$ 、初期砂層厚 $D=309\text{cm}$ である。解析に用いたその他のパラメーターの値を以下に示す。

$$r_s = 2.65(\text{t/m}^3), a = 6.0 \times 10^{-9}(\text{m}^2/\text{N}), b = 4.3 \times 10^{-10}(\text{m}^2/\text{N}), l_0 = 0.0015, a1 = 90.0, a2 = 13.75$$

$$b1 = 39.15, b2 = 5.6, \lambda_{w1} = 0.44, c = 0.75, m = 0.48, n = 0.0094, p = -32.0, q = 16.66$$

時間差分 Δt は 0.02sec、鉛直方向の距離差分 Δy は 0.53cm である。

図4は、不均質砂層内の Pt.1,4,7 における、間隙水圧の時間変化の数値解析結果と実験結果を示している。これより、間隙水圧の解析結果は、変動水圧開始後上昇した平均間隙水圧が徐々に消散していくという傾向について実験結果とよく一致している。しかし、平均間隙水圧の消散過程において、砂層内の間隙水圧の振幅が実験結果ほど減衰していないのがわかる。この点については、本解析では高密度化領域における圧縮率 α の値を初期砂層の値と同じとしているが、その変化を考慮していく必要がある。

4. あとがき

本研究で用いた数学モデルは、変動水圧による不均質砂層の液状化現象をほぼ再現しているといえよう。しかし、高密度化領域での圧縮率 α の取り扱いについては、さらに検討していく必要がある。

【参考文献】1) 于月増 他(1999)：変動水圧による緩い堆積砂層の進行性液状化過程, 土木学会中国支部年講

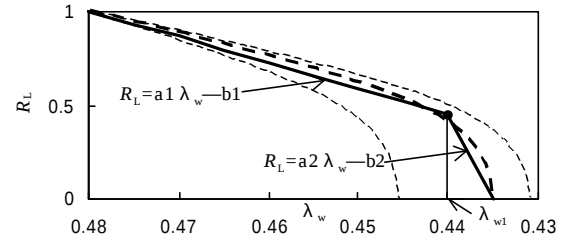


図2 R_L と λ_w の関係

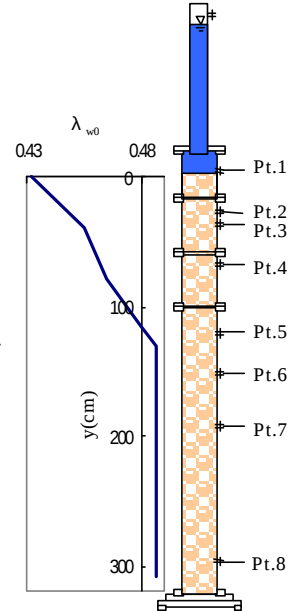


図3 実験容器

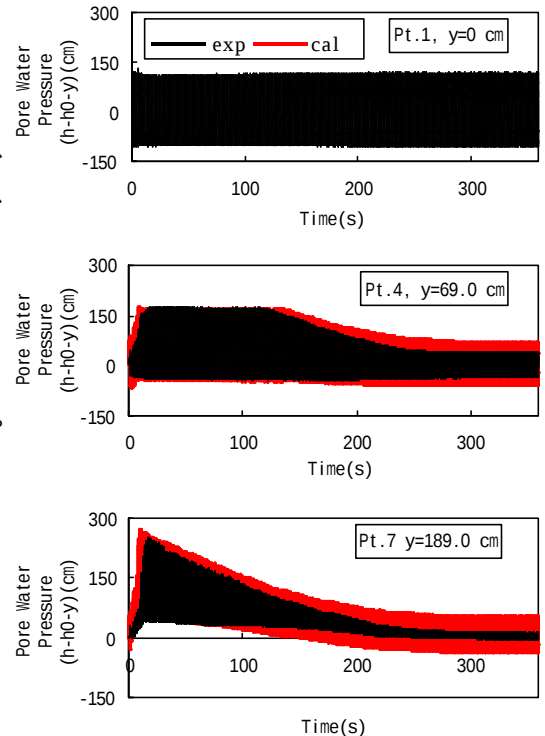


図4 間隙水圧の時間変化