

正規圧密状態にある飽和粘性土の圧密と透水力の影響について

○ 千葉県庁 正会員 熊谷 岳志
 法政大学 正会員 草深 守人
 法政大学 正会員 竹内 則雄
 法政大学 学生会員 張 升翼

1. はじめに

本文は、正規圧密状態にある粘土地盤に対する直接基礎の載荷模型実験と数値解析結果の比較から、圧密の進行におよぼす透水力の影響について考察したものである。実験では、基礎載荷時に正規圧密状態を維持する方法として、圧密によって粘土層内に発生する間隙水の流れ方向を圧密進行方向（沈下変位方向）に一致させることにより、透水力によって初期圧密荷重を常時維持するようにした。解析は、Biot の圧密支配方程式と拡張型修正 Cam-Clay モデルを用いた 3 次元弾塑性圧密解析を実施した。

2. 圧密支配方程式

土粒子骨格構造の変形と間隙水の流れに関する支配方程式の基本形は、それぞれ次式によって与えられる。

$$G \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} + (G + \lambda) \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_j} - \alpha \frac{\partial \phi_p}{\partial x_i} + F_i = 0 \quad \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_i \partial x_i} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (1)$$

ここで、 u_i は変位、 ϕ_p は圧力ポテンシャル、 G はせん断弾性係数、 λ はLameの定数、 F_i は物体力、 k は透水係数、 γ_w は間隙水の質量、 ϕ は全ポテンシャルを表す。さらに、式(1)の物体力として、次式で表される透水力を考慮した。

$$\gamma_w I_{x_i} = -\gamma_w \frac{\partial h}{\partial x_i} = -\frac{\partial \phi_p}{\partial x_i} \quad (i=1,2) \quad \gamma_w I_{x_i} = -\gamma_w \frac{\partial h}{\partial x_i} = -\frac{\partial \phi_p}{\partial x_i} - \gamma_w \quad (i=3) \quad (2)$$

ここで、 I は動水勾配、 h は全水頭を表す。

3. 降伏関数

降伏関数は、修正 Cam-Clay モデルを特別な場合として含む拡張型修正 Cam-Clay モデルを用いた。このモデルは、降伏キャップを楕円の一部分と仮定し、かつ限界状態線がこの楕円の頂点で交わると仮定したもので、次式で表現される。

$$f = 27(1 - \Lambda)^2 J_{2D} + \Lambda^2 M^2 J_1^2 - 2\Lambda^3 M^2 J_{01} J_1 + \Lambda^2 (2\Lambda - 1) M^2 J_{01}^2 = 0 \quad (3)$$

ここで、 M は限界状態線の勾配、 Λ は材料パラメータ、 J_{2D} は偏差応力テンソルの第二不変量、 J_1 は応力テンソルの第一不変量であり、 J_{10} は降伏キャップの硬化パラメータを表す等方圧密状態に対する J_1 の値である。

4. 実験

実験装置は図1に示すように粘土層上部を定水位に保持し、粘土層下部には排水層としての砂層を配置し、この排水砂層より真空供給・排水を行い、圧密期間中は粘土層内を圧密進行方向に間隙水が流れるようにした。実験は、透水力のみにより初期圧密を完了させた後、この透水力を維持した状態で載荷板上に静的荷重（98N）を載荷し、沈下がほぼ終了した時点で段階的に荷重（49N）を載荷する工程を3回繰り返した。計測は、基礎の沈下量を1時間サイクルで計72時間計測した。載荷過程終了後は、載荷荷重の全てを同時除荷し、載荷過程と同様に基礎の沈下を計20時間計測した。実験結果を荷重－沈下量の関係で図2に示す。

キーワード：圧密，粘土，降伏関数，数値解析，透水力

連絡先：〒184-0002 東京都小金井市梶野町 3-7-2 法政大学工学部土木工学科 草深守人

5. 解析結果

図3に示すように、解析対象領域は $500 \times 500 \times 130$ mm の一様な飽和粘土層とし、側面を非排水境界、上・下面を排水境界とした。荷重条件は、荷重板 (190×60 mm) に 245N を作用させた。解析に用いた材料定数は $M = 1.5$, $\lambda = 0.1$, $\kappa = 0.01$, $\nu = 0.3$, $E_0 = 41$ kPa, $k = 1.0 \times 10^{-6}$ cm/sec である。

図4に示すように、解析結果としての最終沈下量は、実験値の 25 mm に対して、透水力を作用させた場合で 26 mm, 透水力を無視した場合で 23 mm となった。また、解析値によると透水力が有る場合の沈下量は、無い場合に比べ約 13% 程度大き目の沈下となった。これは前者が正規圧密状態の粘土層に対する基礎荷重の荷重をシミュレーションした結果であるのに対し、後者は、初期圧密荷重を除去した過圧密状態から荷重し、正規圧密状態に移行していることを意味している。

図3の ABEF 断面での過剰間隙水圧の分布を図6(a)～(c)に示す。左側が透水力有り、右側が透水力無しの過剰間隙水圧分布である。時間経過に伴い両者とも次第に過剰間隙水圧が消散していく過程が表現されている。透水力を考慮した場合は、考慮しない場合に比べ荷重直後から高い過剰間隙水圧の分布が見られ、かつ過剰間隙水圧の消散も遅れていることから、圧密に要する時間も長いことがわかる。これも上記に述べた沈下と同様な理由によるものであり、透水力を作用させない場合は過圧密過程での過剰間隙水圧の発生が少なく、実際よりも過小評価された結果と考えられる。

5. あとがき

粘土層を通過する間隙水の流れを圧密進行方向と同方向とすることにより、正規圧密状態を維持した実験を行った。さらに、Biot の圧密支配方程式と拡張型修正 Cam-Clay モデルを用いた 3次元弾塑性圧密解析を、透水力の影響を考慮して実施した。その結果、解析値と実験値はほぼ対応し、透水力が圧密の進行に有意な影響を与え、これを無視できないことを示唆した。

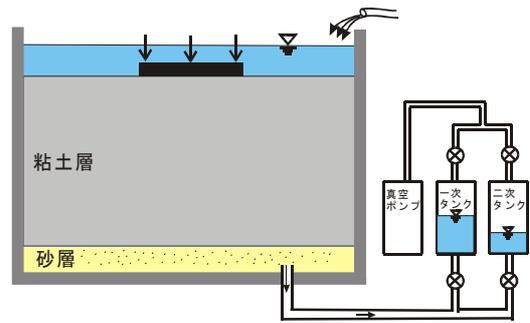


図1. 実験装置

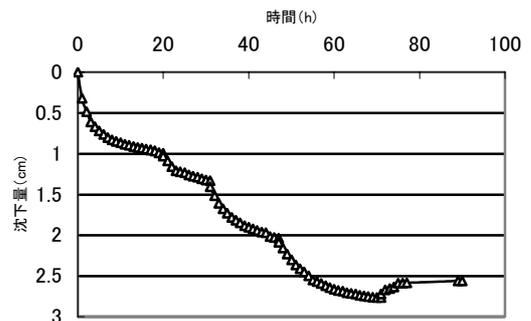


図2. 時間—沈下量関係（実験）

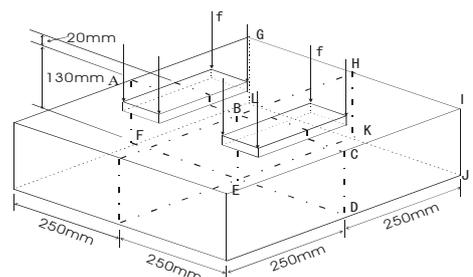


図3. 解析モデル図

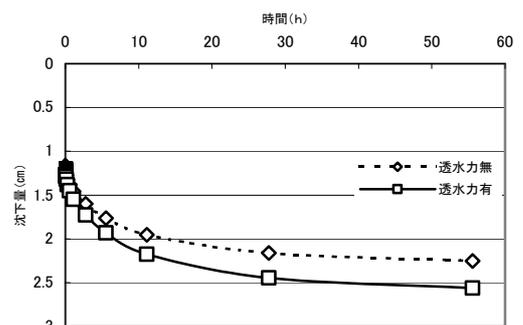


図4. 時間—沈下量関係（解析）

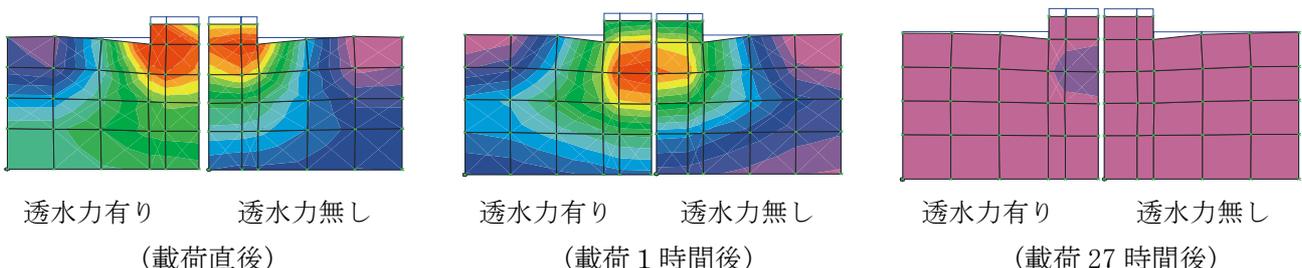


図5. 過剰間隙水圧分布