

1. はじめに

Terzaghiによる一次元圧密理論は、粘土を弾性体と仮定し、過剰間隙水圧の概念を導入して粘土地盤の沈下現象を説明した。しかし、標準圧密試験などにおいて過剰水圧がゼロとなっても沈下が継続的に起こることが知られており、この粘弾性変形を二次圧密としていた。この二次圧密問題は、従来から多くの研究者によって、一次圧密の弾性モデルと、二次圧密を起こす各種のレオロジーモデルの組み合わせで説明しようとする取り組みがなされてきた。その中で、Bjerrumは彼の「Rankine Lecture(1967)」において、粘土の変形が瞬時圧縮と遅延圧縮の両成分からなるとして、従来の二次圧密の概念をより明確にした。

そこで、多くの粘土の二次圧密においては、その変形が時間の対数に対して線形であることから遅延成分をVoigtモデルで表示し、一次圧密の排水による体積ひずみは、瞬時圧縮成分によるひずみと遅延圧縮成分によるひずみとの和に等しいとにおいて二次圧密を伴う圧密曲線の数値解析を行った。

2. 一次元圧密における瞬時圧縮

1) 一次元圧密のメカニズム

σ_{v0} の鉛直圧力の下で、鉛直流れの一次元圧密を終了した粘土に、 $\Delta\sigma_v$ に等しい垂直応力の増分を鉛直方向に作用させると、載荷と同時に同量の側方拘束圧力が増加して、水平方向への膨張が阻止される。ここで、鉛直方向の全垂直応力は圧密の全期間を通じて一定に保たれるとすると、側方拘束圧力 σ_h は初期値 σ_{h0} から最終値 σ_{ht} まで減少する。いま、圧密開始からある時間を経過した時点での排水面から深さ Z の位置における鉛直及び水平方向の有効垂直応力の増分量 $\delta\sigma_v'$ 、 $\delta\sigma_h'$ を求め、また、ある時刻の側方拘束圧力の減少量 $\Delta\sigma_h(z, t)$ を導く。この側方拘束圧力の減少量は鉛直方向の有効垂直応力の増分量に比例するから、ある時刻の側方拘束圧力の深さ方向分布は、排水面の近傍ほど大きな減少を呈する曲線分布となる。

Masaaki NOTANI, Hiroshi NAKANO

近畿大学大学院 学生員○野谷 正明

近畿大学理工学部 正 員 中野 坦

側方拘束圧力の減少に伴う過剰水圧の消失量 $\Delta u''$ が $\Delta\sigma_h$ に比例すると仮定する。また、ある位置及び時刻の鉛直方向の有効垂直応力の増分は、応力のつり合い条件から、同点の全過剰間隙水圧の消失量 Δu に等しい。ただし、全過剰水圧の消失量は圧密排水に伴う有効垂直応力の肩代わりによる消失分 $\Delta u'$ と側方拘束圧力の減少に起因する $\Delta u''$ との和とする。

いま、土を等方性の弾性体と仮定すると、間隙圧係数 α は、水平方向の2つの主応力の変化に対応するものであるから2/3に等しい。これより、体積圧縮係数 m_v は、

$$m_v = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)E} \quad \text{----- ①}$$

となる。これは、一次元ひずみの m_v に帰着することを示し、このような一次元圧密のメカニズムを想定することに矛盾がないことを立証し得た。

次に、ある時刻のある位置における側方拘束圧力の変化量 $\Delta\sigma_h$ は、

$$\Delta\sigma_h = \frac{E}{1+\nu} \delta\epsilon_v \quad \text{----- ②}$$

となり、土を等方性の弾性体と仮定することができるならば、体積圧縮係数は①式、また、側方拘束圧力の変化量と体積ひずみ ϵ_v との関係は②式によって与えられる。

2) 一次元圧密の数値解析法

圧密の有限要素法による解法は、過剰間隙水圧の項を含むつり合い方程式と圧密排水の連続条件の差分近似式とを連立させることによって解かれる。通常の解析では、鉛直境界面上に位置する節点の水平方向の変位をゼロとして、鉛直流れによって生じる過剰水圧の経時変化から圧密度、沈下（鉛直変位）が算定される。

粘土を等方性の弾性体と仮定すると、先述のように任意の時刻と位置における側方拘束圧力の変化量を算定し得るから、鉛直境界面上に位置する節点に全応力に対応する水平方向の等価節点力を与えて解析を行った。すなわち、鉛直方向の全応力は圧密の全期間を通じて一定に保たれるけれども、側方拘束

圧力は②式に示されるように要素の体積ひずみに比例して減少するため、各時間間隔毎に生じる各要素の体積ひずみから、当該要素の同時刻内に生じる側圧の変化量 $\Delta\sigma_h$ を算定して、鉛直境界面上に位置する節点の水平方向の等価節点力を修正していくことにより、一次元ひずみの圧密を起こさせることができる。

この解析手法は、二段解の構成として考えることができる。まず、最初のステップは、 t 時刻の過剰間隙水圧の分布に基づき連続の式によって、この時刻から Δt 時間以内に生じる各要素の体積変化を計算し、応力のつり合い条件によって $t + \Delta t$ 時刻における過剰間隙水圧を算定する。なお、この過剰水圧は、圧密排水に起因するもの、すなわち $\Delta u'$ である。次のステップで、この Δt の時間内に生じた体積ひずみによる側方拘束圧力の減少量 $\Delta\sigma_h$ を算定して、鉛直境界面上の節点の水平方向の節点力を修正して、再び応力のつり合い条件式を解くと $\Delta\sigma_h$ に基づく過剰水圧の変化 $\Delta u'$ を付加した過剰間隙水圧の分布が確定する。

これら一連の計算を繰り返すことによって一次元圧密における一次圧密の全過程を算定することができる。ここに提案した数値解析法を使用すれば、一次圧密に含まれる遅延圧縮成分のひずみを排水による体積ひずみに取り込んで計算することは極めて容易となる。

3. 遅延圧縮成分（二次圧密）

Gibson & Loは、二次圧密をVoigtモデルで表示し、圧密試験によって得られる二次圧密曲線からそのパラメータを決定する方法を提案した。

また、粘土の二次圧密をVoigtモデルで表示できる土の Δt 時間内に起こるクリープひずみは、

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_{\text{c}} &= (a - b \epsilon) \Delta t & \text{----- ③} \\ a &= (\Delta P / n) / \eta & b = E_c / \eta \\ E_c &: \text{スプリングのパネ係数} & \eta : \text{ダッシュポット粘性係数} \\ \Delta P &: \text{載荷荷重による増分応力} \end{aligned}$$

以上より、一次圧密期間中に生じる有効応力の増加に合わせてクリープ変形を発生させ始め、以後 Δt 時間経過する毎に $\Delta \epsilon_{\text{c}}$ のクリープひずみを増加させていくことになる。なお、一次圧密期間中の体積ひずみは、瞬時圧縮と遅延圧縮ひずみとの和であるから各 Δt 時間毎に起こる各要素の排水量からクリ

ープ量を差し引いた量が瞬時圧縮量となる。先述したように、この瞬時圧縮量に対する側方拘束圧力の減少を伴って一次元圧密が進行していくわけである。

4. 圧密沈下ひずみ-時間曲線に及ぼす層厚の影響

本研究で提案したモデルを用いて層厚の違いによる終局の圧密沈下時間曲線のズレを以下の条件について検討した結果を図-1に示す。

層厚 2, 4, 8, 50, 500 (cm) 一次圧密のパネ係数 50 (KN/m²)
二次圧密のパネ係数 290 (KN/m²) 透水係数 3.56E-8 (cm/sec)
二次圧密の粘性係数 4.5E+7 (kg/cm²/sec)

なお、これらの粘係数は圧密期間中常に一定とする。

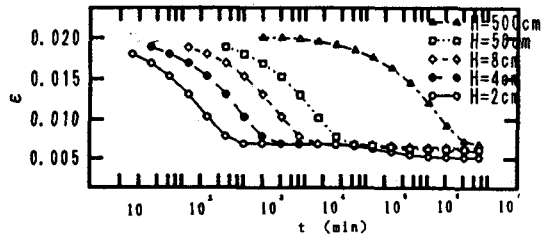


図-1 圧密沈下ひずみ-時間曲線

図-1に示すように、層厚が大きくなると圧密沈下時間曲線は右方向に平行移動したような曲線となる。層厚が大きくなると、一次圧密終了時間に遅れが生じるため、二次圧密過程に入っても同一のクリープ曲線には乗らず圧密が進行する事がわかる。

5. 粘性係数が及ぼす圧密速度への影響

圧縮係数を一定にし粘性係数を変化させた時の圧密速度への影響について図-2のような結果を得た。

粘性係数が大きくなる、すなわち、圧縮性が小さくなると二次圧密速度も小さくなり圧密終了時間が遅くなる。

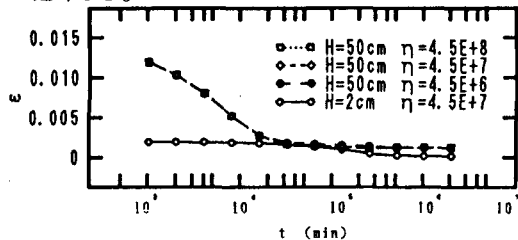


図-2 粘性係数が圧密速度に及ぼす影響

6. まとめ

・本研究で提案したモデルを用いて、層厚の違いによる圧密沈下ひずみ時間曲線の終局のズレは、網干らの実験結果と同様の傾向、つまり二次圧密過程に入っても同一曲線には乗らないことを確認できた。