漸増載荷の一次元圧密計算と H^2 則

東海大学大学院 学生会員 ○吉富 隆弘
新日本開発工業（株） 正会員 赤石 勝
（株）オオバ 正会員 飯沼 孝一
東海大学 正会員 杉山 太宏

１．はじめに

最大排水距離の異なる供試体の圧密量時間曲線には，アイソタック型と平行移動型の二つの仮説がある．著者らは，両者の違いが一次圧密中の二次圧密発生開始挙動に関する仮定によって再現計算可能なことを報告している [1)]．本報告では，間隙水圧とひずみの圧密方程式の比較から，二次圧密と類似の挙動を与える漸増載荷の差分計算を行い，差分間隔（要素分割や時間増分）ならびに H^2 則に対する影響を検討した．

２．計算方法

(1) 差分法による漸増載荷の圧密計算

漸増載荷の圧密計算には，式(1)，(2)に示す間隙水圧とひずみの圧密方程式を利用した．

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial t} \tag{1}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial y^2} \tag{2}$$

ここに，u は間隙水圧，t は時間， y は圧密層内の位置座標，$\partial\sigma_y/\partial t$ は載荷速度，ε はひずみ，c_v (=k/($\gamma_w m_v$))は圧密係数である．陽的差分法を用いれば，両式はそれぞれ式(3)，(4)で表される．

$$u_{y,t+\Delta t} = \alpha\left(u_{y-\Delta y,t} + u_{y+\Delta y,t}\right) + \sigma_{y,t+\Delta t} - \sigma_{y,t} \tag{3}$$

$$\varepsilon_{y,t+\Delta t} = \alpha(\varepsilon_{y-\Delta y,t} + \varepsilon_{y+\Delta y,t}) \tag{4}$$

ここに，$\alpha=c_v\Delta t/\Delta y^2 \leqq 1/2$，Δt は時間増分，Δy は圧密層の分割片長である．

式(4)は，圧密層を均等分割した場合で格子点間隔は等しい．この報告では，計算時間短縮のため，圧密計算時の Δt を変えず圧密層分割数 NP を減少させる工夫をした．排水面に接する圧密層分割片の長さを dy_1 とした場合，それに接する分割片の長さ $dy_2= r\times dy_1$（定数 r>1, r=1 なら均等分割）とすれば，m 番目の分割片長 $dy_m= r^{m-1}\times dy_1$ である．格子点の水の流れの連続性を考慮したひずみの圧密方程式の差分近似は式(5)で表される．

$$\Delta\varepsilon_i = \frac{2\alpha}{r^{2i+1}(r+1)}[\varepsilon_{i+1} - (r+1)\varepsilon_i + r\varepsilon_{i-1}] \tag{5}$$

式(2)には漸増載荷に関する項がなく，漸増載荷計算では，排水面の全圧密量を荷重変化に応じて変化させる [2)]．漸増載荷重は，差分計算における Δy の影響を調べるため式(6)で表す．

$$\Delta\sigma_y = \Delta\sigma_0 + \beta \log(t/t_i) \tag{6}$$

ここに，$\Delta\sigma_0$ は瞬間載荷の荷重増分，β は載荷速度係数である．式(6)は，$t>t_i$ の場合に荷重が時間の対数に比例する．一定荷重載荷時の二次圧密挙動と類似な圧密量時間曲線が計算できる．

一次元圧密試験における全圧密量 Δε は体積圧縮係数 m_v と Δσ の積であり，式(7)で表される．

$$\Delta\varepsilon = m_v(= const.)\Delta\sigma(\propto time)\ or$$

$$= m_v(\propto time)\Delta\sigma(= const.) \tag{7}$$

式(7)のように，m_v 一定で荷重が時間依存性の場合と一定荷重で m_v が時間依存性の場合，漸増載荷の計算を行うには，いずれも排水面の圧密量の経時変化を制御することで対応可能である．漸増載荷重を式(6)のように設定すれば，二次圧密を考慮した一次元圧密解析と類似の計算結果が得られる．したがって，式(6)の漸増載荷重により発生する全圧密量 Δε は，式(6)に m_v を乗じた式(8)で表される．

$$\Delta\varepsilon = m_v\Delta\sigma_0 + \alpha \log(t/t_i) \tag{8}$$

ここに，α はひずみで定義した二次圧密係数である．

(2) 土質定数と計算条件

計算に用いる土質定数として， $m_v=4.86\times10^{-3}$ 1/kPa, $c_v=0.05$ cm^2/min を仮定した．また，$\Delta\sigma_0=14$ kN/m^2，$\beta = 6.92\times10^{-3}$ とした．差分計算の格子点間隔，時間は表-1 のように 4 種類を設定して計算・比較した．

キーワード 一次元圧密方程式，漸増載荷，二次圧密，H^2 則，差分法
連絡先 〒252-1292 神奈川県平塚市北金目 4-1-1 TEL：0463-58-1211 E-mail：7bckm025@mail.u-tokai.ac.jp

表-1 差分計算における格子点間隔，時間

	Case1	Case2	Case3	Case4
最大排水距離 H[cm]	1	10	10	10
圧密層分割数 NP	10	10	100	10
分割片長 Δy[cm]	0.1	1	0.1	不均等
時間増分 Δt[min]	0.083	8.3	0.083	不均等
圧密開始時間 t_i[min]	0.25	25	0.25	0.25

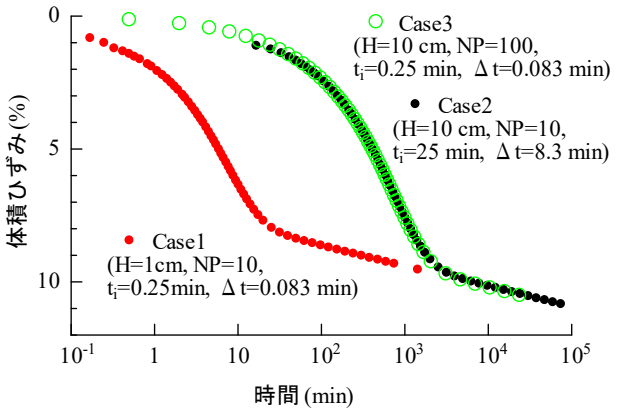

図-1 間隙水圧の圧密方程式による圧密曲線

3．計算結果と考察

(1) 間隙水圧とひずみの両圧密方程式による計算

間隙水圧の圧密方程式による漸増載荷の計算が，ひずみの方程式によるそれと同じになることを確認する．

図-1 は間隙水圧の方程式による計算である．●で示した H=1 cm の Case1 を基準とすると，H=10 cm で●で示した Case2 と，Δt が 100 倍異なる○で示した Case3 は要素分割片長によらずアイソタック型の圧密量時間曲線が計算される．間隙水圧の圧密方程式では，アイソタック型の圧密量時間曲線が計算されることを確認しうる．

図-2 はひずみの方程式による計算である．■で示した H=1 cm の Case1 の計算結果は，図-1 のそれと同じになる．H=10 cm の Case2 では，Δy が 10 倍になることに対応して t_i を H^2 倍(100 倍)した t_i=25 min 以降を漸増載荷で計算すると，圧密量時間曲線は■のように平行移動型となる．□で示した Case3 で H が 10 倍になっても Case1 と同じ Δy, Δt そして t_i で計算するとアイソタック型の圧密量時間曲線が計算される．

(2) 不均等分割片長による計算

H の異なる供試体のアイソタック型圧密量時間曲線を計算するには，図-1，図-2 の Case3 と同じように Case1 と同じ計算条件や漸増載荷時間が必要になり，H に応じて計算時間が増大し計算困難になる．

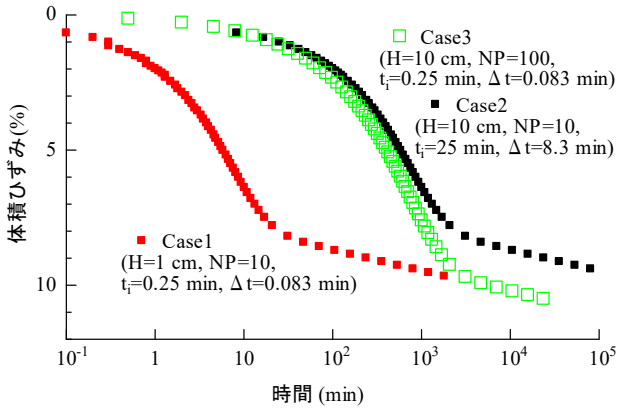

図-2 ひずみの圧密方程式による圧密曲線

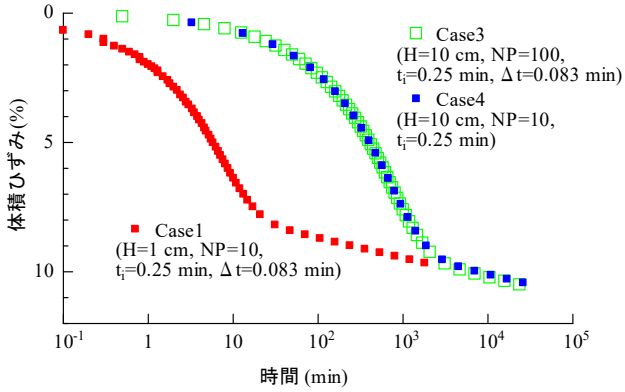

図-3 不均等分割片長による圧密曲線

式(5)の不均等分割片長を用いて計算時間の短縮を試みた結果が図-3 である．不均等分割片長による計算結果は■で示した Case4 であり，□で示した Case3 と一致し，アイソタック型の圧密量時間関係が計算できた．計算時間もかなり減少できた．しかし，ひずみの圧密方程式による漸増載荷の圧密計算では，計算条件に注意する必要があると考えられる．

4．おわりに

差分法による二次圧密と類似の圧密挙動を示す漸増載荷の圧密計算で得られた結果は次のようである．

(1)間隙水圧の圧密方程式では，アイソタック型の圧密量時間関係が計算され，計算条件に影響されないが，ひずみの圧密方程式のそれは計算条件の影響を受ける．

(2)H^2 則に関係する間隙水圧の圧密方程式による圧密量時間曲線がアイソタック型になるには，漸増載荷のような二次圧密挙動を仮定する必要がある．

参考文献

1)白子博明，杉山太宏，外崎明，赤石勝：一次圧密中に発生する二次圧密の推定，土木学会論文集 C, Vol.64, No.3, pp.565-570, 2008.
2)三笠正人：軟弱粘土の圧密，鹿島研究所出版会，pp.3-19, 1963.