

関口・太田モデルによる粘土の圧密沈下に関する一考察

広島大学 正会員 ○土田 孝
 港湾空港技術研究所 正会員 姜 敏秀

1. 一次元圧密における関口・太田モデル（流動曲面型）と修正関口太田モデル（超過応力型）の比較

関口・太田は、粘土の異方性と粘性を考慮した塑性体積ひずみを表現する式として次式を提案した¹⁾。

$$v_p = F - \alpha \ln(\dot{v}/\dot{v}_0) \quad (1)$$

ここで \dot{v} と \dot{v}_0 は塑性体積ひずみ速度とその初期値である。Fは粘性が無く平均有効応力の増加とダイラタンシーによる塑性体積ひずみであり、次式で与えられる。

$$F = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p}{p_0} + \frac{\eta^*}{M}$$

ここに、 λ 、 β はそれぞれ圧縮指数と膨張指数、 p と p_0 は平均主応力と初期平均主応力、 η^* は異方性を考慮した応力比、 M は限界状態指数である。上式をFが一定の時に成り立つとして積分すると(2)式が得られる。

$$v_p = \alpha \ln \{ 1 + \dot{v}_0 t \cdot \exp(F/\alpha) \} \quad (2)$$

(2)式による塑性体積ひずみ v_p は関口・太田モデルにおける粘塑性ポテンシャルであり、(2)式は関口・太田モデルの基本式である。これに対して小林は(1)式を、

$$\dot{v} = \dot{v}_0 \exp\{(F - v_p)/\alpha\} \quad (1)'$$

と変換して超過応力型の構成式として直接用いている（修正関口・太田モデル）²⁾。

一次元圧密について2つのモデルの比較検討を行ってみる。二次圧密を考慮しない場合、一次元圧密の初期には平均圧密度が時間の $\sqrt{\quad}$ に比例するので、簡単に、

$$F = kt^{0.5} \quad (4)$$

と仮定し(1)式に代入して積分すると次式が得られる。

$$v_p = \alpha \ln \{ 1 + 2\dot{v}_0 \alpha / k^2 + 2\dot{v}_0 (t^{0.5}/k - \alpha/k^2) \exp(kt^{0.5}/\alpha) \} \quad (5)$$

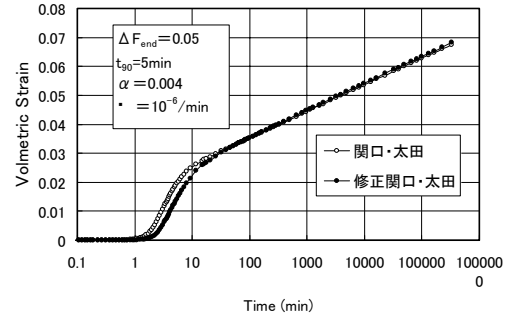
一方、関口・太田モデルの場合は(2)式より

$$v_p = \alpha \ln [1 + \dot{v}_0 t \cdot \exp \{ kt^{0.5}/\alpha \}] \quad (6)$$

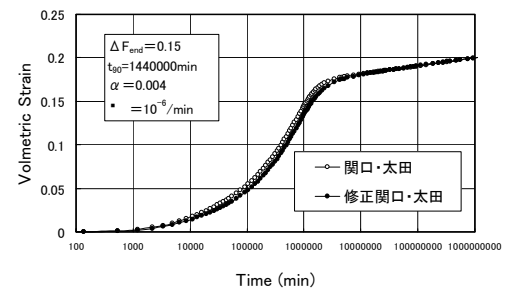
となり、2つのモデルの違いが(5)、(6)式より陽に示される。

このように、関口・太田モデルと修正関口・太田モデルの違いは(1)式の積分の仕方によるが、(2)式の関口・太田モデルでは塑性体積ひずみが陽に示されており、わかりやすさという点で大きな利点といえる。

一次元圧密における2つのモデルの相違を検討するため、Fの増加 ΔF と時間の関係がテルツァギ理論による時間と平均圧密度の関係と同じと仮定し、関口式と修正関口式によ



(a) $\Delta F_{END} = 5\%$, $t_{90} = 5$ 分



(b) $\Delta F_{END} = 15\%$, $t_{90} = 1440000$ 分

図-1 時間-体積ひずみ関係の比較

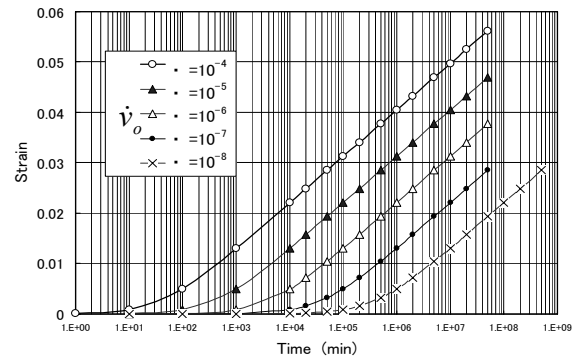


図-2(a) \dot{v}_0 が時間-沈下関係に及ぼす影響

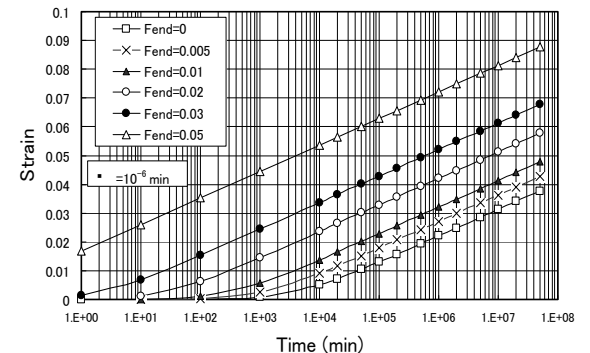


図-2(b) F_{end} が時間-沈下関係に及ぼす影響

キーワード：圧密、二次圧密、粘塑性モデル

連絡先：〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1, 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻 TEL&FAX.0824-24-7784

る計算結果を比較した。圧密度と時間係数の関係から ΔF と時間の関係を求め、(2)式を適用して直接計算した体積ひずみ（関口・太田モデル）と(1)'式を数値積分して求めた体積ひずみを比較した結果（修正関口・太田モデル）を図-1(a), (b)に示した。ただし粘性を考慮しない最終体積ひずみ ΔF_{END} をそれぞれ 5%, 15%, $\Delta F = 0.9 \Delta F_{END}$ となる時間 t_{90} を 5 分, 1440000 分としている。いずれの場合にも修正関口・太田モデルでは関口・太田モデルよりも圧密の進行が遅れるが、その差は t_{90} が大きくなるとともに縮小しているように見える。いずれも二次圧密領域にはいると両者の差はほとんどない。

2. 関口・太田モデルで表現される時間-沈下関係と沈下開始時間に関する考察

関口・太田モデル (2)式) では ΔF_{end} と \dot{v}_0 によって時間と体積ひずみの関係が陽に求められることが大きな利点である。図-1 より二次圧密領域では 2 つのモデルの差は小さいので、次に(2)式を用い、間隙水圧は発生しないとして時間-沈下関係を検討する。 ΔF_{end} と \dot{v}_0 の影響を検討したのが図-2(a), (b)である。図をみると、沈下はある沈下開始時間より始まり、一定の時間が経過すると沈下量と $\log t$ が直線関係になる。沈下開始時間 t^* は \dot{v}_0 と F (載荷荷重) の大きさによるが、ほぼ $t^* = (0.1 \sim 1)t_0$ で沈下が始まる。ただし t_0 は前段階の載荷重による圧密経過時間 $t_0 = \alpha / (\dot{v}_0 \exp(F/\alpha))$ である。したがって、圧密荷重増分 ΔF_{end} が 0 に近い場合は、前段階での経過時間に近くなるまで沈下は始まらない。図-2 のように、関口・太田モデルでは一次圧密と無関係な沈下-時間関係が最初に存在していて、一次圧密は透水性が小さく間隙水圧の消散に時間を要することによる ΔF の時間遅れである。一次圧密と二次圧密の区分は透水性と境界条件によるものであって、粘土にとって本質的な区分ではない。

一次圧密終了時間 t_{EOP} を基準にしてその n 倍の時間が経過した時を初期条件として層厚の異なる粘土層で段階的に圧密を行った場合を考える。層厚 H が大きいほど t_{EOP} が大きく次段階の初期体積ひずみ速度 \dot{v}_0 が小さいので、沈下開始時間が遅くなり沈下がゆっくり始まる。このため間隙水圧の消散（一次圧密）も沈下開始時間も層厚 H の 2 乗に比例するので、時間-沈下関係は層厚が変化しても相似形になるのである。これに対して、同一の圧密圧力のもとで体積ひずみ速度 \dot{v}_0 一定の条件で層厚の異なる粘土層の圧密を行った場合には、沈下開始時間が同じなので圧密時間が長いほど最終的な沈下量は大きくなる。この場合はアイソタック形となる。

次に小さい載荷重で多段階で載荷した場合の二次圧密について検討する。載荷重 ΔF_{end} を小さくすると次段階での \dot{v}_0 も小さくなるので、次段階の載荷時による沈下開始時間が遅くなる。したがって、載荷後の一定時間内における沈下発生量は載荷重を小さくするほど小さい。逆に載荷荷重が大きいほど沈下開始時間が早いので、初期に大きな沈下が生じる。図-3 は $\Delta F_{end} = 0.2$ の載荷を 1 段階で実施した場合と 5 段階に分けた場合の時間-沈下関係である。図のように、多段階にして載荷重が小さくなると沈下の開始が遅れ、一次圧密量は小さく主にもっぱら二次圧密によってのみ沈下が生じるようになる。しかし、載荷段階によらず沈下量は (\dot{v}_0 が同じ場合は) 一致しており、このような関係が(2)式から容易に計算できる。以上のように粘塑性モデルでは実質的な沈下開始時間が存在する。 $\lambda/(1+e_0)$ の値を 0.2 とすると、荷重増加率 1.02, 1.05, 1.1, 1.2 のとき F は 0.004, 0.01, 0.02, 0.036 である。 $\alpha = 0.004$ とすると荷重増加率が 1.1 以下の場合、沈下の開始自体が遅いため間隙水圧の消散に要する時間内ではほとんど沈下しない。以上の結果は、軟弱地盤上の盛土において盛土厚さを少しだけ増加させるときの沈下の考え方に適用できる。たとえばドレーンを打設した地盤で 1 年後に荷重増加率 1.1 で追加盛土する場合、沈下開始時間は約 10 日後になる。

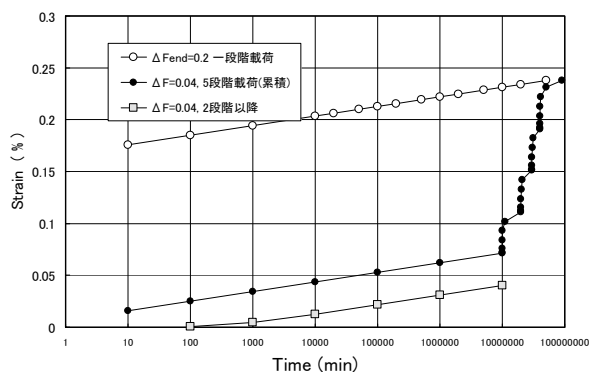


図-3 1 段階載荷と多段階載荷による時間-沈下関係（関口・太田モデル）

参考文献

- 1) Sekiguchi, H. and Ohta, H.: Induced Anisotropy and Time Dependency in Clays, Specialty Session 9, 9th ICSMFE, pp.229-238, 1977.
- 2) 小林正樹: 非線形一次元圧密沈下の解析法とその適用, 港研報告, Vol.21, No.1, 1982.