

III-92

掘削問題を対象とした間隙水と変形の連成効果に関する一考察

大成建設(株)正会員 ○大津 宏康, 安達 哲也

1. はじめに

従来より、軟弱地盤での圧密現象の解法として、Biotの多次元圧密理論¹⁾とTerzaghi-Rendulic²⁾系の理論との相違は、間隙水と変形の連成効果を厳密に考慮するか否かであることが、Christianら³⁾により議論されてきた。そして、Terzaghi-Rendulic系の理論の問題点は、荷重変化に伴う平均主応力 σ_m の時間変化を一定と仮定していることであることが明らかにされている。

近年、圧密問題だけでなくトンネル掘削の問題に対しても、Biotの多次元圧密理論を支配方程式とした解析結果が数多く報告されつつある。また、解析対象とする地盤条件も、従来の軟弱地盤から洪積層、土丹および軟岩等の比較的硬質な地盤へと拡大されつつある。この傾向に対して、筆者ら⁴⁾は、対象とする地盤の剛性が高くなるに連れて、従来のBiotのパラメーターが無視できなくなることおよび、見かけ上の間隙水と変形との連成効果が変化することを指摘してきた。

本研究では、掘削問題を対象として、地盤の剛性による見かけ上の間隙水と変形との連成効果の変化について、数値解析により検討を加える。

2. 間隙水と変形の連成効果を表す連続式

筆者ら⁴⁾の誘導した本質的にはBiotの多次元圧密方程式と等価な地下水挙動を評価する連続式は、変形と水圧(全水頭)を未知数とする、以下のような偏微分方程式となる。

$$\left[k(\phi + z) \right]_{,i} = -\beta \frac{\partial \epsilon_{kk}}{\partial t} + \gamma_w \frac{1}{Q} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (1) \quad \beta = 1 - \frac{c_s}{c_b} \quad \frac{1}{Q} = n c_b \left(\frac{c_l}{c_b} \right) + (1-n) c_b \left(\frac{c_s}{c_b} \right) - c_s \left(\frac{c_s}{c_b} \right) \quad (2)$$

ここに、 k は透水係数を、 ϕ は圧力水頭を、 z は位置水頭を、 ϵ_{kk} は構造骨格の体積ひずみを、 γ_w は水の単位体積重量を表す。また、 c_l は間隙水の圧縮率を、 c_s は土粒子実質部分の圧縮率を、 c_b は土粒子構造骨格の圧縮率を、 n は間隙率を表す。

式(1)は、土粒子構造骨格の体積ひずみの項に、応力-ひずみの構成関係と有効応力の定義を適用することで以下のように変形される。

$$\left[k(\phi + z) \right]_{,i} = -\beta c_b \frac{\partial \sigma_m}{\partial t} + \left(\beta c_b + \gamma_w \frac{1}{Q} \right) \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (3)$$

この式(3)は、右辺第1項を無視した場合には、
圧密理論でのTerzaghi-Rendulic系の圧密理論および、浸透理論と等価な拡散方程式となる。そして、式(3)

の右辺第2項の係数が、浸透理論での比貯留係数となる。

したがって、式(3)の右辺第1項が、間隙水と変形との連成効果を支配する項となり、この項は、厳密には釣合式と連立させることによって評価されるものである。

3. 解析事例

本研究では、地盤の剛性による見かけ上の間隙水と変形との連成効果の変化について検討を加えるため、立坑掘削問題を対象とした応力-浸透連成解析により、式(3)の右辺第1項の変化について明らかにする。

なお、掘削過程のモデル化は、一回の掘削サイクルが掘進長4mでその後11時間を排水放置期間と設定し、このサイクルを5回繰り返すものとした。また、解析ケースは、硬岩から堆積軟岩までの材料を想定し、変形係数 E が100,000, 10,000, 1,000kgf/cm²の3ケースとした。そして、透水係数は、従来の原位置計測結果での岩盤としての平均的な値として 1×10^{-6} cm/secとした。

前述のTerzaghi-Rendulic系の方程式の矛盾点とされる、平均主応力 σ_m の時間変化を明らかにするために、各変形係数に対する立坑深度11.5mレベルで坑壁からの距離が、0.25m, 1.0m, 2.0m, 3.0mの各点での平均

主応力 σ_m の経時変化を図-1に示す。
 なお、ここでは紙面の制限上、変形係数 E が 100,000, 1,000 kgf/cm² の 2 ケースの結果のみを示した。

図-1に示すように、変形係数が大きい場合ほど、掘削直後の平均主応力 σ_m の時間変化が大きくなり、また坑壁に近い領域ほど、同様に掘削直後の平均主応力 σ_m の時間変化が大きくなる。ただし、この場合には、急激に平均主応力 σ_m の時間変化はほぼ一定値となるので、間隙水圧等は比較的短時間に定常状態となることが推定される。このため、間隙水圧等は、厳密に間隙水と変形との連成効果を考慮するか否かでの相違は見かけ上小さくなるものと推定される。

一方、変形係数が小さくなるに連れて、掘削直後の平均主応力 σ_m の時間変化が小さくなり、また坑壁から離れた領域ほど、同様に掘削直後の平均主応力 σ_m の時間変化が小さくなる。このため、変形係数が小さいほど、見かけ上拡散方程式型の理論の矛盾点である平均主応力 σ_m の時間変化が小さくなる。ただし、この場合には、平均主応力 σ_m の時間変化がほぼ一定値となるまで比較的時間を要する。このため、非定常過程での間隙水圧等は、厳密に間隙水と変形との連成効果を考慮するか否かでの相違が生じるものと推定される。

4. まとめ

以上の検討結果より、逐次掘削に伴う非定常状態での間隙水圧および有効応力の変化を詳細に検討するためには、応力・浸透連成解析を適用することが必要である。ただし、変形係数をパラメーターとした掘削に伴う平均主応力 σ_m の経時変化の比較で、変形係数が数万 kgf/cm² の硬岩の場合には、掘削後短時間の内に間隙水圧は定常状態となる。このため、変形係数が数万 kgf/cm² 以上の硬岩での掘削に伴う地下水挙動は、工学的な判断として、逐次掘削段階毎での各構造系に対する定常浸透流解析により評価可能である。

(参考文献)

- 1) Biot, M. A.: General Theory of Three-dimensional Consolidation, Jour. Appl. Phys., Vol. 12, pp. 152-164, 1941.
- 2) Rendulic, L.: Der Hydrodynamische Spannungsungleich in Zentral Entwässerten Tonzylindern, Wasserwirt. und Tech., 3-1, 1935
- 3) Christian, J. T. and J. W. Boehmer: Plain Strain Consolidation by Finite Elements, Proc. ASCE., SM4, pp. 1435-1457, 1970.
- 4) 大津宏康, 瀧治雄, 亀村勝美: 堆積軟岩における空洞掘削に伴う地下水流動特性評価に関する検討, 第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.76-80, 1992.

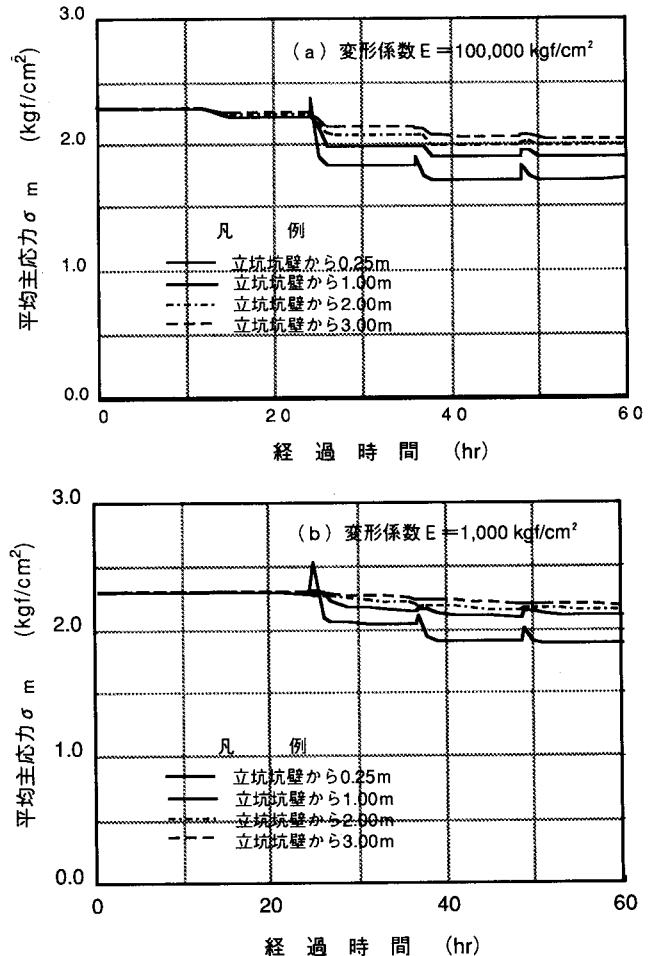


図-1 平均主応力 σ_m の経時変化