

(24) トンネル掘削にともなう地盤と地下水の変動に関する数値解析

京都大学工学部 大西 有 三
京都大学大学院 ○大津 宏 康

1. まえがき

地下水の存在する地盤あるいは岩盤を掘削する場合、一般に地下水位を低下させて工事が進められる。その時に、地盤が変形する要因としては、掘削の影響、浸透流の変化、地下水面の変動による圧密現象などが考えられる。特に泥岩あるいは粘土層など水圧変動による圧密沈下が大きいと予測される地盤では、工事の進行にともなつて重大な支障をきたすこともあり、都市部等での掘削工事では、周辺構造物への影響が大きいので細心の注意が必要である。またトンネル等の掘削にともなう地下水位変動も環境保全の意味も含めて、社会的関心が深いので事前の十分な調査が必要な問題である。このような複雑な問題に対して、従来から応力・変形解析と浸透流解析が別々に行われてきたが、その連携は十分であつたとは言ひ難い。しかし最近になり、数値解析法の進歩とともに新しい手法が開発され、その一体化が可能になりつつある。そこで、ここでは地盤の変形と浸透流の動きの両者を同時に相互作用として解析できる数値解析手法の概略を示しその内容を説明する。そしてさらに、飽和-不飽和領域を考慮したトンネル掘削にともなう地盤内の応力と変形および地下水面の時間的変化についてのいくつかの解析例を提示する。

2. 解析手法

支配式としては、Biot系の圧密式と同様に、つりあい式と連続式を連立させたものとする。定式化に対しては、有限要素法により四角形アイソパラメトリック要素を用いて、重みつき残差法により行う。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{C} \\ \mathbf{L} & (\Delta t/2)\mathbf{H} + \mathbf{E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{u} \\ \mathbf{h}_{t+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{F} + \mathbf{C} \mathbf{h}_t \\ \{(-\Delta t/2)\mathbf{H} + \mathbf{E}\} \mathbf{h}_t \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここに、 $\Delta \mathbf{u}$: 変位ベクトル、 $\mathbf{h}$: 全水頭ベクトル、 $\Delta \mathbf{F}$: 荷重ベクトル

まず、飽和-不飽和領域のとりあつかいについて述べる。解析手法上、飽和-不飽和領域のとりあつかいの違いは、次の2点とする。(a)透水係数、(b)比水分容量

(a)の透水係数の変化については、飽和度 S_r の変化により透水性が変化することは言うまでもないことである。一方(b)の比水分容量の変化を考慮することは、以下のような理由による。不飽和領域において、飽和領域では無視されうる間げき流体の圧縮性を考慮するために連続式に導入したパラメーターである。(a)、(b)に示す2つのパラメーターを定める手法としては、Fig-1に透水特性曲線を用いる。透水特性曲線を用いることにより、サクシオン ψ ~ 体積含水率 θ ~ 透水係数比 (飽和時の透水係数との比) K_r の関係が、サクシオン ψ が既知になれば、他の値は一意的に定められる。ここで比水分容量 $c(\psi)$ は、 $c(\psi) = d\theta/d\psi$ で与えられるものである。

次に、飽和-不飽和領域におけるつりあい式について述べる。

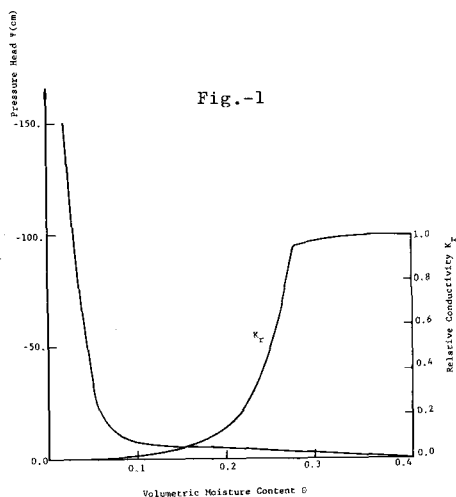


Fig.-1

つりあい式において、有効応力の定義としては Bishop により提案された次式を用いている。

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \chi \delta_{ij} \gamma_w \psi \quad (2)$$

σ_{ij} : 全応力, σ'_{ij} : 有効応力, ψ : 圧力水頭

(2)において、パラメーター χ は飽和-不飽和領域を考慮するものであり、飽和領域においては、 $\chi = 1$ と考えられ、不飽和領域においては、 $0 < \chi < 1$ と考えられる。現在までに、Bishop により提案されたパラメーター χ に対して、その存在性について疑問視された報告がなされている。また、実際に χ の値を定量的にとらえることも極めて困難である。したがって、今回の解析においては近似的に χ は S_r と等しいという仮定をしている。

また、構成式については応力-ひずみ関係は、Hook の法則に従う等方弾性体であると仮定して解析を行っている。

3. 解析結果および考察

解析例のモデル図は、Fig-2 に示す 224 節点、195 エレメントからなるものである。計算のケースとしては、Table-1 に示した地盤構成の 2 つのケースについて、それぞれをケース 1、ケース 2 とした。

以下に解析結果について述べるが、(1)水面形の変動、(2)地表面の沈下、(3)トンネル断面の形状変化、(4)トンネル断面周辺の応力経路の 4 点について時間的変化を示していく。

(1) 水面形の変動

第一に、飽和-不飽和の Coupling 問題を考える上で着眼点として、水面形の非定常-定常状態への変動をとりあげる。飽和-不飽和の問題を考える場合、飽和から不飽和領域へと土中水が移動した部分においては、作用していた浮力が作用しなくなる。これにより、物体力が変化して自重による圧密が生じることが容易に想像される。このような意味からも、飽和-不飽和領域の判定規準として水面形を考えることが適当であると思われる。

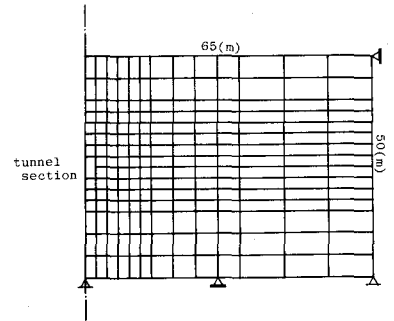


Fig.-2

解析例として、case 1, case 2 の各水面形の時間的変化を Fig-3

(a), (b) に示す。両ケースの比較を考える場合、前者の透水係数が後者より 1 オーダー大きいので、前者の方が自由水面の低下が後者の場合より著しく大きいことが、Fig-3 (a), (b) に表わされている。また、ケース 1 において約 27 日後には定常状態に到っているが、ケース 2 においてはまだ定常状態には達していない。ただし、この解析では影響圏以遠からの水の供給量を無限であると考えて

	Young's Modulus (t/m ²)	Poisson's Ratio	Void Ratio	Unit Weight (t/m ³)	Coefficient of Permeability (m/sec)
CASE-1	1.0×10^3	0.33	0.7	1.6	1.0×10^{-6}
CASE-2	1.0×10^4	0.33	0.5	2.3	1.0×10^{-7}

Table-1

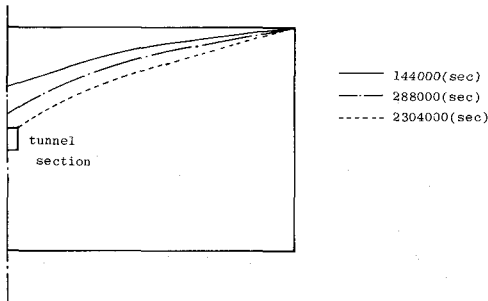


Fig.-3 (a)

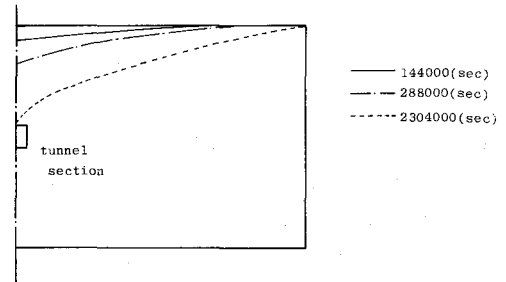


Fig.-3 (b)

いる。したがって、実際の現場条件で側方からの供給量に限りがあるような場合には、定常状態へ到る過程はここに示したものよりもさらに早まるものと考えられる。

(2) 地表面の沈下

(1)に示すように、自由水面の低下により不飽和領域が発生しこれにともない、地表面が沈下することが予測される。ケース1、ケース2の地表面沈下図をFig-4(a),(b)に示した。Fig-4において、地表面の沈下のようなすは両ケース共に水面形の各時間ステップ時の形状と相似な形状を示している。弾性定数の比較から、ケース2が1オーダー小さな値であるので沈下量は、ほぼケース1に比べ1オーダー小さな値を示しているが、形状としては同様の傾向であると言える。また、各時間ステップごとでの最大沈下は、トンネル断面の直上の部分に表われている。一方、トンネル部分から最速の境界部分での沈下量は、Fig-4で示すように比較的大きな値を示している。これは、解析手法上の問題点と考えられる。つまり自由水面の低下の影響圏は、この場合半径65mと仮定しているのに対して、地表面の沈下の影響圏は、さらに側方まで広がっていると仮定をしている。したがって、この解析においては厳密な意味では自由水面と地表面の影響圏は一致しないという仮定のもとで行っている。この仮定を行っている理由を以下に述べると、今解析の目的は定性的な変化を予測することであり、特にトンネル掘削部分の周辺の変化を主目的としている。したがって、比較的トンネル部分から離れた部分の予測には限界があるのであり、また重要性が低いと考えたからである。しかし、現場条件ではここに考えているよりはるかに側方まで、水面形および地表面沈下が表われてくるものと考えられる。

(3) トンネル断面の形状変化

トンネル断面の時間的の形状変化をFig-5(a),(b)に示す。断面の変形特性は、掘削直後には全体的に内側に変形し、断面積を著しく減少しようとする。その後、時間的経過を経るにしたがい全体的に鉛直方向へ沈下していく傾向にある。トンネル断面の上部は、掘削直後から常に鉛直方向へ沈下しつづけていく。これに対して、トンネル断面の下部では掘削直後には上方へ隆起するのであるが、その後、しだいに鉛直方向へ沈下していく。

また、側方変位に関しては掘削直後に内側に変形するし、その後再び側方へ広がっていく傾向にあるが、その量はきわめて小さくほとんど変化はないものと思われる。

Fig-5において、ケース1とケース2の比較を行うと、当然弾性定数の違いからケース1の方が変形は大きいのであるが、ケース1においては確実に長時間後にはトンネル下部で掘削以前のレベルよりも沈下している。一方、ケース2においては変形の傾向は同様であるが、掘削以前のレベルより沈下するのは遅くなっている。また、両ケース

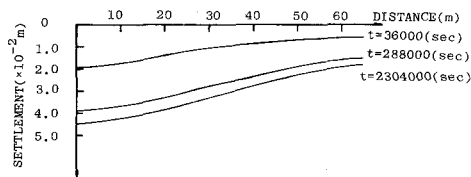


Fig.-4 (a)

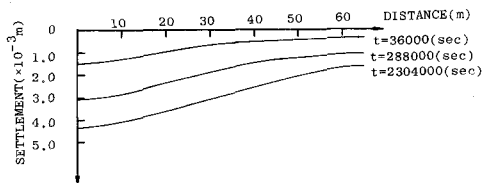


Fig.-4 (b)

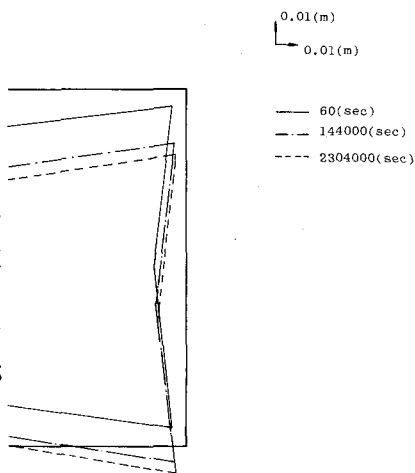


Fig.-5 (a)

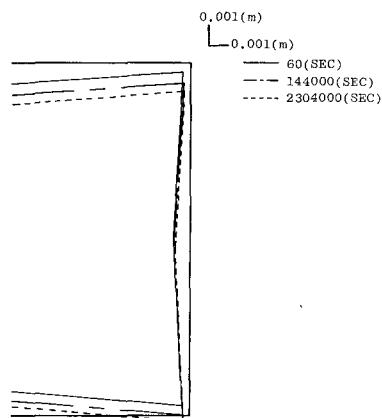


Fig.-5 (b)

とも側方への広がりにはきわめて小さく表われている。

したがって、トンネル断面の変形は、トンネル部分の断面積を減少していく傾向にあるものと思われる。

また、解析の手法上トンネル断面の形状が、この解析においては長方形断面を用いている。したがって、これによる隅角部での応力集中およびこの隅角部の接点に直接荷重を作用させることによる応力集中の影響が、多少あるものと思われる。つまり、トンネル断面の形状を実際の施工条件に照らしあわせて多角形断面あるいは円形断面を想定した場合には、トンネルの形状変化はまた異なる特性を表わすものになると思われる。

(4) トンネル断面周辺の応力経路

次に、参考のために case 1 での応力経路を Fig-6 に示す。この解析は、弾性解析であるので降伏破壊を論じることは本質的に不可能であるが、定性的な地盤内応力状態を示すために応力経路についてここで考察を加えていく。

Fig-6 でトンネル周辺のエレメントとして、代表的な CROWN 部と SPRING LINE の部分を考える。

CROWN 部の応力経路は、掘削直後に急激に偏差応力 q が増加する。 q が増加する原因は、CROWN 部では鉛直方向の応力 σ_v' が急激に減少するためである。その後、応力経路は平均主応力 p' の増加とともに q は減少していく。し

たがって、CROWN の部分は、掘削直後に最も危険側つまり破壊状態に近づくことが予想される。一方、CROWN 上部のエレメントでは、比較的 safety 側にあると思われる応力経路を示している。

次に、SPRING LINE 部の応力経路も CROWN 部と同様な傾向を示す。

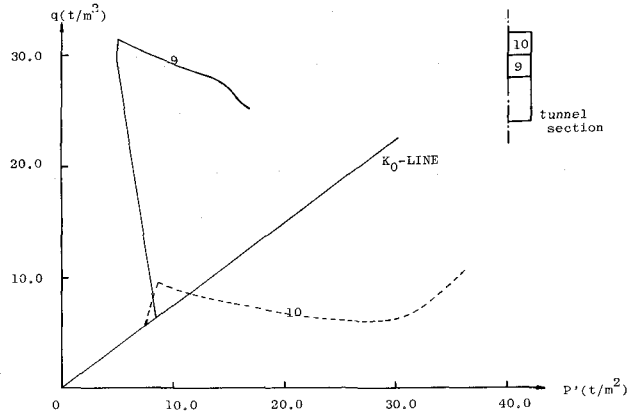


Fig.-6

4. 結論

上述の解析手法を用いることにより、飽和-不飽和領域を考慮に入れて(1)水面形の変動、(2)地表面の沈下、(3)トンネル断面の形状変化、(4)トンネル断面の周辺の応力経路を計算することが可能であることを示してきた。この解析は、都市トンネルを想定して行つたものであり、実際の工事を行う上での目安となるべき数値解析による予想手法を提示したものである。

5. 参考文献

- 1)大西有三・村上 毅：有限要素法による地盤の応力・変形を考慮した浸透流解析，土木学会論文報告集投稿中
- 2)日比野・駒田・徳江・本島・永島：軟質地盤のトンネル掘削による地表沈下の予測解析，第10回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要集，1976.
- 3)大西有三・村上 毅：変形を考えた飽和-不飽和浸透解析，第14回土質工学研究発表会講演概要集，1979.

NUMERICAL ANALYSIS OF MOVEMENT OF GROUND AND
GROUNDWATER DUE TO TUNNEL EXCAVATION

Yuzo OHNISHI
Hiroyasu OHTSU

Movement of ground and groundwater due to tunnel excavation is very important because of its engineering and environmental impact. The stress analysis of excavation and seepage flow analysis are often done independently. However, it has been recognized that the stress flow coupling effect should be considered seriously to know the actual behavior of the ground.

Here we have developed a new new method to solve the coupled stress-flow problem taking into account the saturated and unsaturated regions. Then the case of unconfined flow with free surfaces can be analysed. The governing equation was derived from Biot's consolidation theory. The finite element formulation was adopted using Galerkin's process.

In the case that a tunnel is fairly close to the ground surface, the surface settles and water table is lowered due to tunnel excavation. This problem was solved with a simple model to show the large potential of this proposed method. The movement of water table, settlement of ground surface, deformation of tunnel wall and stress changes of surrounding area were calculated at one time. The result was very satisfactory.