

(100) ダイラタンシーの有効封圧依存を考慮したトンネルの変形解析

大成建設株式会社 正会員 ○ 里 優
正会員 飯星 茂

Numerical analysis of tunnel excavation
considering rock dilatancy dependent on the effective confining pressure.

Masaru SATO, Taisei Corporation
Shigeru IIHOSHI, Taisei Corporation

Abstract

The authors have found that rock dilatancy is dependent on the effective confining pressure (i.e. the difference between confining and pore pressures), based on the theoretical and experimental studies. This behavior should be incorporated in the constitutive model. A coupling analysis, which solves rock deformation and pore water flow simultaneously, is considered to be an effective tool to examine the stability of underground openings excavated in water-saturated rock. In this paper, constitutive equations which incorporate the dilatancy behavior dependent on the effective confining pressure are proposed. The coupling analyses are carried out on the stability of tunnels excavated in a saturated rock to understand the rock behavior caused by the interaction between dilatancy and pore water pressure. The results are summarized as shown:

- i) The dilatancy resulted from stress concentration around the tunnel significantly affects the deformation of rock as well as the distribution of pore water pressure.
- ii) Rock stability can be improved by the supports which increase the effective confining pressure as a result of applying the confining pressure to the rock wall.
- iii) Low-permeable supports cause the increase of pore water pressure in the rock around the tunnel. This induced pore pressure decreases the effective confining pressure and hence, can result in instability of the rock behind the supports.

1. はじめに

筆者らは、岩石で生ずるダイラタンシーが有効封圧（封圧と間隙水圧の差）に反比例することを明らかにした¹⁾。すなわち、岩石の三軸圧縮試験などで観測されるダイラタンシーは、封圧と間隙水圧の差が大きくなることで抑制される。これらの知見を岩盤構造物の安定性向上に結び付けていくため、連成解析にダイラタンシーの有効封圧依存を組み入れることを試みた。連成解析とは、岩盤の変形と地下水の流れを、所定の境界条件や初期条件のもとで同時に解く手法であり、地下水で飽和した岩盤に掘削された空洞の安定性を議論する際などに有力なツールとなり得るものである。本論文では、ダイラタンシーの特徴を考慮した岩盤の構成方程式を提案するとともに、これを用いて行ったトンネルの変形解析の例を幾つか紹介し、ダイラタンシーがトンネルの変形挙動に及ぼす影響を検討する。

2. 岩盤の構成方程式と連成解析

三軸圧縮試験において観測されるダイラタンシーの特徴を示すと次のとおりである。

- (1) 軸差応力の増加にともないクラックの破壊が進行し、この結果、接線ヤング率が低下していくと

もにダイラタンシーが生ずる。

(2) ダイラタンシーひずみは、有効封圧（封圧と間隙水圧の差）に反比例する。

これらの性質は、以下のようにして岩盤の構成方程式に反映させることができる。なお、式を記述するにあたり、平面ひずみ条件を仮定した。

応力に対する偏差ひずみと体積ひずみの非線形性は、いずれもクラックの破壊に原因があり、相互に関連していると考えられる。これを次式で簡単に表現した。

$$\Delta \varepsilon_v^i = \alpha \Delta \varepsilon_s^i \quad (\varepsilon_s = \varepsilon_1 - \varepsilon_2, \quad \varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (1)$$

ここに、 $\Delta \varepsilon_s^i$ 、 $\Delta \varepsilon_v^i$ は、それぞれ偏差ひずみと体積ひずみの非弾性成分である。また、 α は、非弾性偏差ひずみと非弾性体積ひずみの比を定める係数とする。非弾性体積ひずみはダイラタンシーによるひずみであるが、これは次式で表現した。

$$\Delta \varepsilon_v^i = \frac{\alpha}{H} \frac{\Delta \sigma_s^3}{\sigma_1 - \phi} \quad (\sigma_s = \sigma_1 - \sigma_2) \quad (2)$$

ここに、 H はダイラタンシーの大きさを定める係数である。

すなわち、非弾性体積ひずみは σ_1 （圧縮を負としているために最小圧縮応力を意味する）と間隙水圧 ϕ の差に反比例し、偏差応力の3乗に比例して発生するとした。

岩盤の構成方程式は、これらに弾性変形を記述する項を加えることで次のように得られる。

$$\Delta \varepsilon_v = \frac{\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2 + \Delta \sigma_3}{3K_d} - \frac{3\Delta \phi}{K_d} + \frac{\alpha}{H} \frac{\Delta \sigma_s^3}{\sigma_1 - \phi} \quad (3)$$

$$\Delta \varepsilon_s = \frac{\Delta \sigma_s}{G} + \frac{1}{H} \frac{\Delta \sigma_s^3}{\sigma_1 - \phi} \quad (4)$$

$$K_d = \frac{E_d}{3(1-2\nu_d)}, \quad G = \frac{E_d}{2(1+\nu_d)} = \frac{E_u}{2(1+\nu_u)}$$

図-1～図-3に、これらの式を用いて描いた応力-ひずみ、間隙水圧の関係を示す。式中の各定数は下記のとおりである。なお、添え字のdとuは、それぞれ排水、非排水条件での計測値を表すこととする。また、各図では便宜上圧縮を正とした。

$$E_u = 10^4 \text{ (MPa)}, \quad \nu_u = 0.4, \quad \nu_d = 0.2$$

$$\alpha = 0.3, \quad H = 10^0 \text{ (MPa}^2\text{)}$$

連成解析では、岩盤の構成方程式の他に地下水の流れを記述する方程式が必要であり、これは次式を用いた。

$$-\frac{k}{\gamma_w} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_i^2} \right) = \frac{\partial \varepsilon_{ii}}{\partial t} - \frac{1}{\beta K_u} \frac{\partial \phi}{\partial t}, \quad \beta = 1 - \frac{K_d}{K_u} \quad (5)$$

ここに、 k と γ_w はそれぞれ岩盤の透水係数と地下水の単位体積重量である。また、 x_i ($i=1, 2, 3$)は直角座標であり、特に断らない限り添え字は総和規約に従うこととする。

(3)～(5)式、および岩盤の平衡方程式が、ここでの連成解析における支配方程式である。本研究では、これらを有限要素法と差分法により離散化し、所定の境界条件や初期条件での近似解を得た。なお、式を導く手続きや離散化の方法についての詳細は既報²⁾を参照されたい。

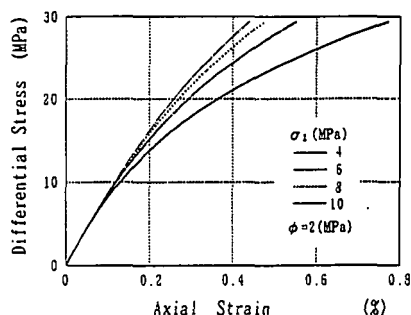


図-1 軸差応力-軸ひずみ線図（排水条件）

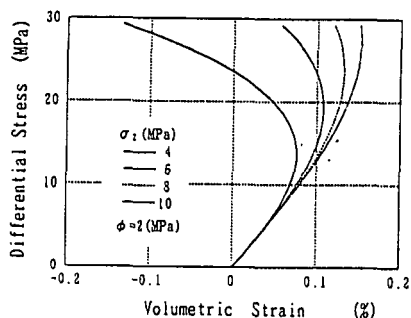


図-2 軸差応力-体積ひずみ線図（排水条件）

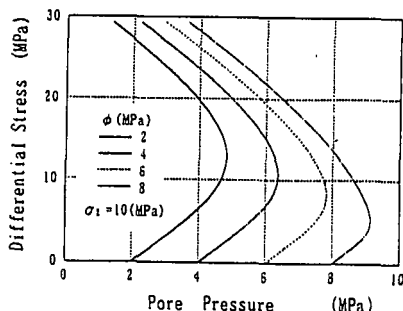


図-3 軸差応力-間隙水圧線図（非排水条件）

3. 解析例と考察

(1) 無支保でのトンネル掘削

最初の解析例として、トンネルの一般的な形状である馬蹄形の空洞を、等方均質な岩盤内に「瞬時に」掘削した場合を取り上げる。実際のトンネル施工においては、掘削が時間とともに徐々に行われるが、本解析では典型的な例として瞬時掘削を仮定した。用いた初期条件と透水係数は、以下のとおりである。

- 初期応力 σ_h (水平) = -10 (MPa)
- σ_v (鉛直) = -10 (MPa)
- 初期間隙水圧 ϕ_0 = -5 (MPa)
- 透水係数 $k = 10^{-9}$ (cm/s)

ただし、擬似的に切羽の進行を考慮するため、空洞掘削にともなう解放力の50%を掘削想定面に加えておき、必要があれば支保工を構造系に追加したのち残りの50%をさらに加える方法を用了³⁾。なお、以下に示す変形分布図には残りの50%を加えた際のものを示すこととする。

図-4は、掘削直後の変形を弾性解との比較のもとで示したものである。ダイラタンシーの発生を考慮した場合、空洞近傍で弾性解の2倍程度の変形が生じている。間隙水圧の時間変化を示した図-5からは、掘削直後はダイラタンシーによって空洞近傍で間隙水圧の低下が生じ、次いで、空洞内空に向かう地下水流れによって広い範囲にわたり間隙水圧が消散していくことがわかる。全体積ひずみの時間変化は図-6のようになる。空洞の下盤では、形状の影響により体積応力が減少するため弾性的にも膨張ひずみとなるが、さらにダイラタンシーが加わって大きな膨張ひずみが生ずる。また、時間が経過すると下盤ではさらに膨張ひずみが増加してゆく。これは次のような機構によるものである。

下盤部では掘削直後に大きなダイラタンシーが生じ、この部分では間隙水圧が著しく減少するが、地下水の流れが生ずると、この部分に地下水が流入し間隙水圧は増加する。この結果、有効封圧が減少してゆき、さらにダイラタンシーが生ずることで下盤部の膨張ひずみが増加してゆくのである。

このような現象は、実際のトンネル掘削においても充分起こり得るものであると考える。本解析で用いている構成方程式では、ダイラタンシーが生じて岩盤は弾性的な性質を保持しているとしており、下盤で変

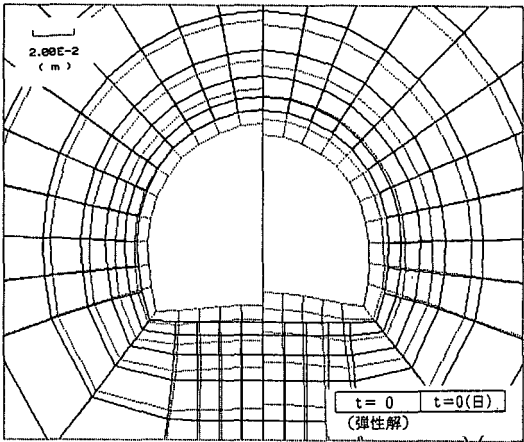


図-4 空洞掘削直後の変位分布の比較

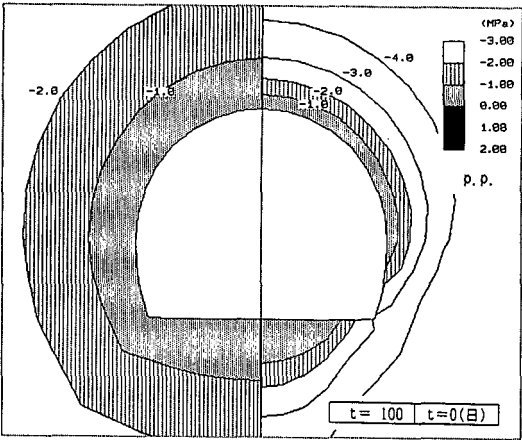


図-5 間隙水圧分布の経時変化

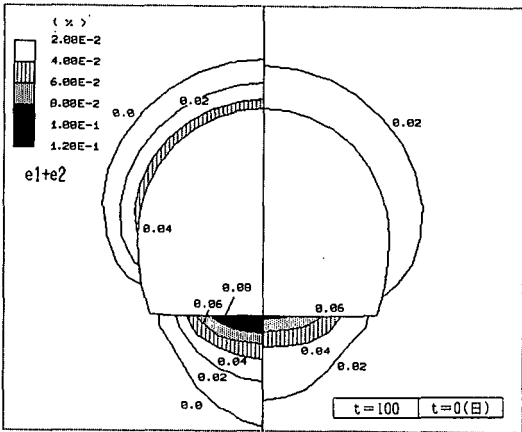


図-6 体積ひずみ分布の経時変化

形の連続性が損なわれることはない。しかし、実際の岩盤では、いったんダイラタンシーが生ずると、空隙の増加やこれにともなう風化の促進によって急速に岩盤の劣化が進行すると想像できる。これに間隙水圧の増加が加われば、下盤部では本解析結果以上に大きな変形が発生するであろう。このような破壊のメカニズムが、いわゆる「盤ぶくれ」現象の一因となっていると推測できる。

(2) 支保工を施した場合

次に、(1) で用いたモデルに岩盤の10倍のヤング率を持つ支保（吹付コンクリートをモデル化）を施した場合の解析例を示す。支保工のその他の物性は、透水係数も含めて岩盤と同じとした。支保工は厚さ20cmとし、トンネル側壁から天床部のみに打設されるものとした。

支保工を付加した後の変形を、無支保の場合との比較のもとで示したのが図-7である。支保工によって岩盤に変形が抑えられていることがわかる。支保工の、いわゆる封圧効果によって、岩盤の最小圧縮応力は無支保の状態に比べ大きくなり、したがって有効封圧も増加する（図-8）。この結果、空洞の側壁部や上部ではダイラタンシーが生じにくくなり空洞の変形が抑えられるのである（図-9）。

このように、支保工は単に岩盤の変形に対抗するだけではなく、岩盤の有効封圧を増加させダイラタンシーを抑制する効果をもたらすことがわかる。

(3) 透水性の低い支保の場合

剛性が岩盤と同じで、透水係数が1/10であるような支保工を用いた場合の解析例を次に示す。この場合には、以下に示すように岩盤の変形挙動が極めて特徴的なものとなる。

図-10には、岩盤の変形を無支保の場合と比較して示した。空洞の上部で大きな変形が生じていることがわかる。このような変形は、空洞上部で生じている大きなダイラタンシーに起因する（図-11）。これは、次のようなメカニズムによって生ずる。

再三述べたように、空洞掘削にともなうダイラタンシーの発生によって、空洞近傍では間隙水圧が減少する。このため、掘削後しばらくの間はこの部分に地下水の流入が生ずるが、無支保の場合には空洞壁面からの地下水の流出が優って間隙水圧はさらに減少してゆく。しかし、空洞壁面に透水性の低い支保工がある場

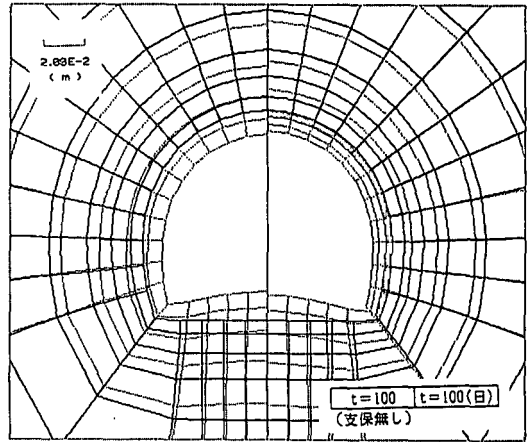


図-7 掘削100日後の変位分布の比較

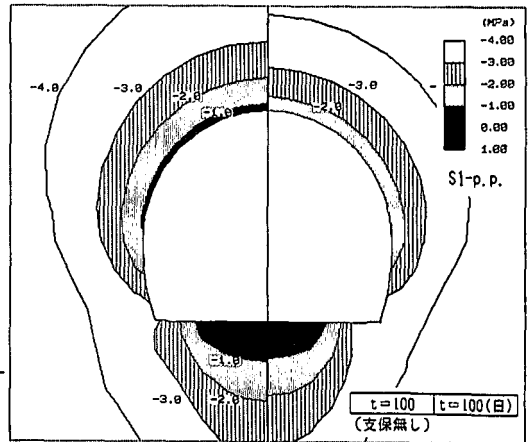


図-8 掘削100日後の有効封圧分布の比較

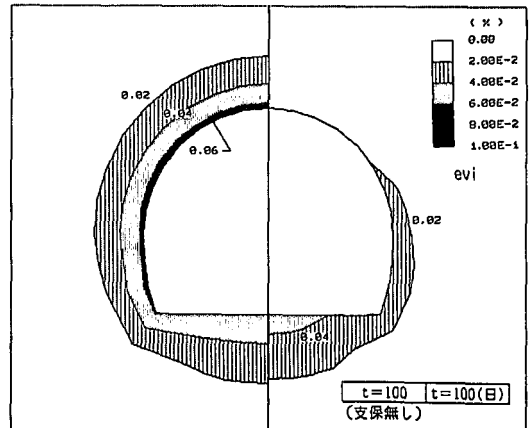


図-9 掘削100日後の非弾性体積ひずみ分布の比較

合には、壁面からの排水が進まず（図-12）空洞近傍の間隙水圧は逆に増加する。空洞上部では、地下水の流入による体積膨張に加え、有効封圧の減少にともなうダイラタンシーにより時間とともに変形が増大してゆく。ダイラタンシーが生ずることにより間隙水圧は一旦減少するが、すぐに地下水が流入し間隙水圧がもとに戻る（図-12左）。このような悪循環が繰り返され、空洞上部では変形が増加してゆくのである。

本解析例からは、支保工や覆工を施す際に岩盤からの地下水の流出を極力妨げない方法をとる必要があることがわかる。いわゆるNATM工法では、2次覆工の背面に水抜きシートを設け地下水の流出経路を確保しているが、これは、2次覆工に作用する間隙水圧を減ずるのみならず、有効封圧を減少させることで岩盤の安定にも寄与しており、理にかなった方法であると考ええる。

4. まとめ

以上の解析例によって、(3)～(5)式を支配方程式とした場合の岩盤の挙動が概ね明らかとなった。同時に、トンネル掘削にともなう変形や地下水流れの予測解析において留意すべき点もいくつか浮上した。

一つは、地下水で飽和した岩盤を対象とした解析では、ダイラタンシーの発生を考慮するかしないかで、解が大きく異なる場合があることであり、今一つは、空洞形状や支保工の物性によって、岩盤の変形挙動が大きな影響を受けることである。

馬蹄形トンネルの掘削を模擬した解析例では、ダイラタンシーによって空洞の下盤で大きな膨張変形が生ずることや、剛性の高い支保工を施工することにより、岩盤の有効封圧を増加させダイラタンシーを抑制できることがわかった。さらに、空洞壁面に透水性の低い支保工を施した場合には、壁面からの排水が進まず、有効封圧の減少にともなうダイラタンシーによって変形が増大してゆくことなども見て取れた。

これらのことは、ダイラタンシーを考慮した連成解析の有効性を示すと同時に、空洞形状や補強工の選択にあたっての重要な知見であると考ええる。

参考文献

- (1) 里: 第9回岩の力学国内シンポジウム, 449-454, 1994.
- (2) 里, 他: 資源と素材, 108, 783-789, 1992.
- (3) 里, 他: 第15回岩盤力学シンポジウム, 150-154, 1983.

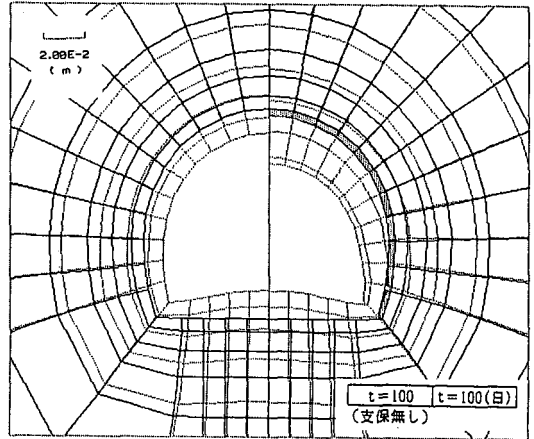


図-10 掘削100日後の変位分布の比較

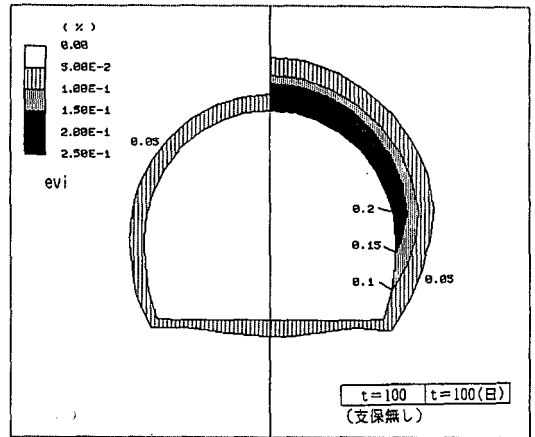


図-11 掘削100日後の非弾性体積ひずみ分布の比較

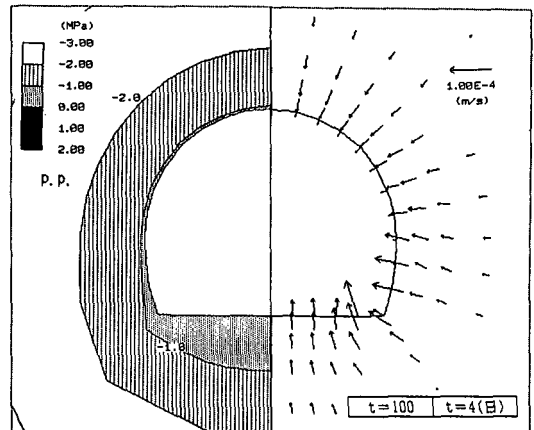


図-12 空洞周囲の間隙水圧と流速分布