

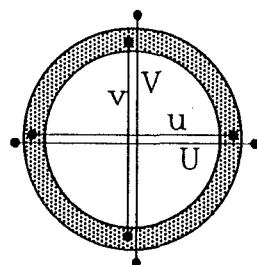
第Ⅲ部門 土被りが浅くなるトンネルの変形挙動シミュレーション

神戸大学大学院
神戸大学工学部
神戸大学工学部

学生会員 ○坂本太志
正会員 芥川真一
正会員 櫻井春輔

1. はじめに 近年、既設トンネルにおける地表面掘削によって、土被りの浅くなる場合がしばしばあり、その際に生じる地盤周辺の応力の変化や変形挙動がトンネルに与える影響を検討する必要性が出てきている。そこで、地表面の掘削によって土被りが浅くなる場合に、地盤中の既設トンネルにどのような応力、変形が生じるかについて、数値シミュレーションを行った。解析の際に、浅くなるトンネルの変形挙動に与える影響を要因の内、特に 1) ライニングの設置のタイミング (α とする) 2) ライニングと地山の剛性比 (β とする) 3) ライニングと地山の接地条件 (すべり、開きを許すかどうか) に注目し、これらが 1) ライニングの内空変位 2) ライニングに作用する土圧 3) トンネル周辺地盤の応力状態 にどのような形で反映されるかについて数値解析による検討を行った。

2. 数値シミュレーションの概要 最も単純なケース (素掘りトンネルの場合) と、ライニングと地山が完全に密着している場合 (密着型) ,そして、ライニングと地山の間の隙間を想定してジョイントを設置した場合 (分離型) における3つの場合の変形挙動を解析する。まず解析の手順を説明する。長方形地盤に Step 1 で重力をかけ、素掘りの場合には Step 2 でトンネルを掘削し、さらに Step 3 から Step 6 で、上部を4段階に分けてそれぞれ 2D (D はトンネルの直径とする) を順次掘削し、密着型と分離型のばあいには、Step 2 でトンネルを掘削し、 $\sigma_0 \cdot \alpha$ を解放する (σ_0 は初期応力; α は解放率を表わし、0%の場合 $\alpha = 0$, 100%の場合 $\alpha = 1$ とする)。次に Step 3 でライニングを設置し $\sigma_0 \cdot (1 - \alpha)$ (残りの初期応力解放分) を載荷すると共にライニング部に重力をかける。その後、Step 4 から Step 7 で、上部を4段階に分けて 2D ずつ順次掘削する。ライニングを入れた場合は、トンネルライニングの内側に設けられた点で定義する内空変位 Δu 、 Δv と、ライニングの外側の地山内に設けた点で定義される内空変位 ΔU 、 ΔV を図-1 のようにに区別することとする。また、 $\alpha = 1$ の場合は掘削相当外力をトンネル外周部に加え、地盤の変形が終了してからライニングを設置することを意味する。従って、この時はライニングに応力は生じない。 $\alpha = 0$ の場合には、その反対を表わし、掘削による変形過程のすべてにおいてライニングはその変形を受け止め、そこに、応力が発生することを意味する。地山の弾性係数は $E_r = 2000 \text{ kgf/cm}^2$ とし、ライニングの弾性係数は $E_c = 2000, 20000, 200000 \text{ kgf/cm}^2$ の三種類の値を用い、剛性比 $\beta (\beta = E_c/E_r)$ が 1, 10, 100 の3つの値をとるようにした。ポアソン比 ν は、ライニング、地山ともに 0.3 とした。



U, V : 地山に設けた点間の相対変位
u, v : ライニングに設けた点間の相対変位

図-1 内空変位の定義

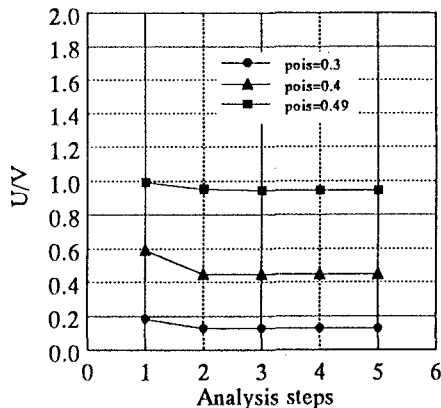
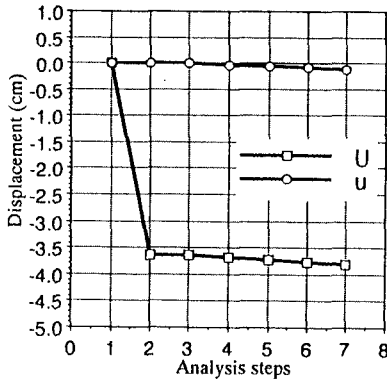


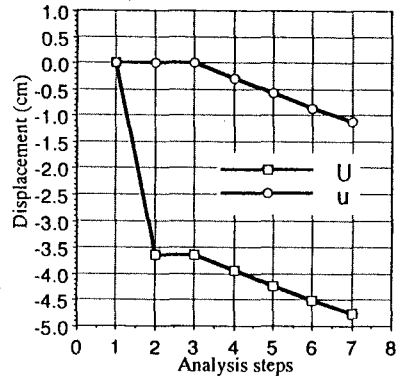
図-2 水平内空変位（素掘り）

3. 数値シミュレーションの結果と考察

素掘りトンネルの場合： 図-2 の内空変位結果において、 $U/V = C$ と置き、 C は側圧係数、或いはポアソン比 ν によって定まる定数で、 $\nu = 0.3, 0.4, 0.49$ の時を考えた。結果は初期の状態における応力状態から掘削によって $\Delta U/\Delta V \cong C$ を保つ内空変位が生じ、上部掘削によって生じる地盤内の応力変化の縦横比がほぼ C に近いため、 $\Delta U/\Delta V \cong C$ の関係が、ほぼ維持されることを意味する。

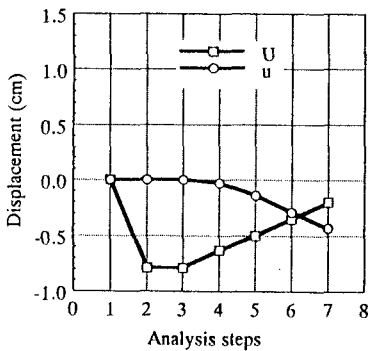


a) $\beta=10$

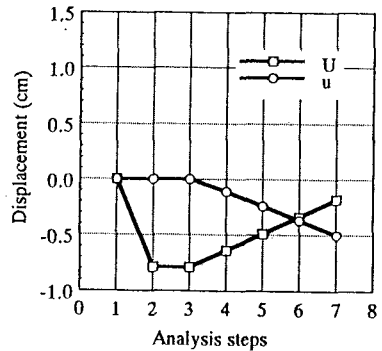


b) $\beta=100$

図-3 水平内空変位 (密着型)



a) $\beta=10$



b) $\beta=100$

図-4 水平内空変位 (分離型)

密着型: α の値に関わらず、 $\beta=10$ 、 100 の場合は、地盤が $\Delta U/\Delta V \cong C$ (C :任意定数、 $\beta=1$ のとき $C=0.3$ 程度)の比で広がろうとするのをライニングが阻止する効果が現われ始めるため β が大きくなるにつれてトンネルの図-3に示す内空変位の値は小さくなる。ところが、トンネル掘削終了時にライニングに蓄えられたひずみエネルギーは、 $\Delta U/\Delta V \cong C$ の比を覚えた形でのひずみエネルギーであるから、トンネル上部掘削時の変位のもどりについては、 $\beta=1$ の時と同様に動く。また、トンネル上部掘削時の水平内空変位は $\beta=1$ では、増大するが、 $\beta=10$ 、 100 の時は減少する傾向を示す。そこで、ライニングに作用する土圧は、 β の値に関わらず水平方向の土圧はトンネル掘削完了時からの増分としては引張力となっている。すなわち、 $\beta=10$ 、 100 の場合、トンネル上部掘削時に水平方向の土圧は引張力であるにもかかわらず、水平内空変位は減少していることがわかる。この現象は剛性の異なるライニングが施された為、水平、鉛直土圧の相互作用により生じたと思われる。

分離型: $\alpha=0$ の場合は、前述の密着型における $\alpha=0$ の場合とほぼ同様の挙動を示す。また、図-4におけるライニングの水平内空変位でライニングがかたい時に減少する傾向がある。このような現象は起こ得ないと考えられるのだが、 β の値が大きくなるとライニングと地盤の微妙な相互作用によってライニングに土圧が作用し結果的にこのような傾向を示したと言える。

4.おわりに 数値解析シミュレーションから得られた知見でわかったことは、地山とでライニングが密着していても、分離していても、ライニングと地山の弾性係数の比を上げるに従って、水平内空変位が減少するというモードが存在することである。本研究で得られた知見により、実際の現場において土被りが浅くなることによりトンネル内部に亀裂などの損傷を未然に防げるかどうか等の安全面の検討もする必要がある。

参考文献: 1) 櫻井、清水、金沢、伊賀: 地表面掘削による既設トンネル挙動, トンネルと地下, Vol.19, No.11, pp.875-878, 1988. 2) 櫻井、清水、金沢、梶原: 地表面掘削に伴う既設トンネルの力学的挙動の測定結果, 建設工学研究所報告, Vol.32, 1990.