

数値解析によるトンネル支保工の脚部沈下に関する研究

(株) エイトコンサルタント 正○桃谷 文 (株) 熊谷組 正 松尾 勉
(株) 熊谷組 正 御手洗 良夫 山口大学 正 河原 幸弘
山口大学 正 中川 浩二

1. はじめに

近年、土被りが小さい軟弱地山中のトンネル掘削において切羽面の安定確保やゆるみ防止のため、トンネルアーチ部に対して各種の長尺先受工法が開発され、数多くの現場で用いられるようになってきている。そのような地山では、切羽周辺の地山がゆるむことによって支保工に大きな荷重が作用し、支保工脚部の地耐力不足による脚部沈下量の増加がしばしば問題となっている。しかし、脚部沈下を抑制する対策工はアーチ部の対策工に比べると開発が遅れているのが現状である。そこで本研究では、有限要素法（FEM）を用いて脚部沈下のモデル化を行い、脚部沈下のメカニズムを力学的に検討すると共に、そのモデルを用いて脚部補強工の効果について考察した。

2. 対象トンネルの地質及び脚部沈下の実態

本研究で検討するトンネルにおいては、土被りが10～20m程度で地山のN値が50以上の区間と、土被りが10m程度で地山のN値が10～20の軟弱な地盤条件の2つの区間を対象とする。前者の区間では、地表面沈下、天端沈下及び脚部沈下ともにほとんど生じておらず、トンネル掘削にはさほど問題のある地山ではない。後者の区間では、先行変位を抑制する補助工法としてAGF工法が施工されているにもかかわらず、地表面、天端、脚部の沈下量は抑制されていない。また、天端沈下と脚部沈下が同程度の沈下量であり、収束時の地表面沈下量と脚部沈下量が同程度となっていることから、図-1のような支保工脚部が部分的に沈む変形モードを示し、トンネル掘削に伴うゆるみ領域はトンネル地表面まで達しているものと考えられる。本研究では、この脚部沈下が大きく起きている区間の計測データを参考に、脚部沈下のモデル化を行う。

3. FEMにおける脚部沈下のモデル化

2次元及び3次元FEMを利用して、次の3つのモデルにおいて解析を行った。

- ①領域全体に重力を考慮した掘削解析（図-2(a)）
- ②Terzaghiの土圧理論による $(45^\circ + \phi/2)$ の領域のみに重力を与えたゆるみ解析（図-2(b)）
- ③トンネル鉛直方向の領域のみに重力を与えたゆるみ解析（図-2(c)）

モデル①の2次元掘削解析は切羽進行の影響を擬似的に考慮するため、応力解放率を用いた掘削解析を行った。応力解放率とは、切羽の仮支保効果を考慮するもので、切羽進行と共に増加する。応力解放率が0%の時は未掘削を表し、100%の時は切羽が対象断面に影響を与えないほど遠くへ離れたことを意味する。逐次掘削解析は、トンネル壁面に $P=P_0(1-\alpha/100)$ （ P_0 :初期応力、 α :応力解放率）を作用させることによって行う。モデル②、③の解析では逐次掘削を考慮するために、実測データから切羽の進行と変位の関係を求めた。図-3にその一例を示す。この関係から切羽進行に伴う変位の発生率をゆるみ荷重分担率とした。ゆるみ荷重のかけ方および2次

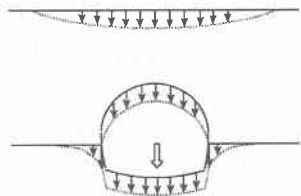


図-1 脚部沈下の変形モード

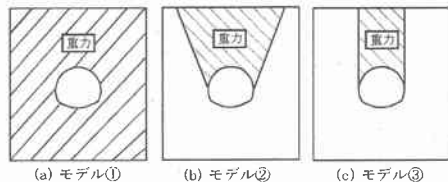


図-2 各モデルの概念図

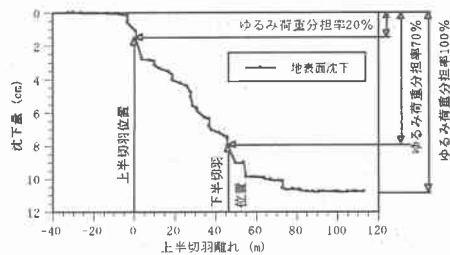


図-3 計測データの地表面沈下によるゆるみ分担率

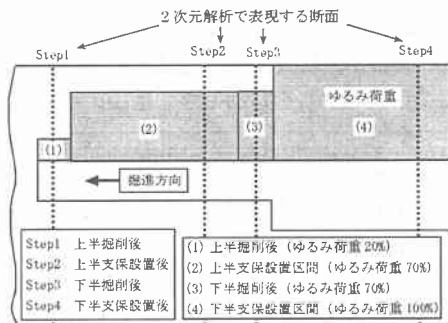


図-4 ゆるみ荷重のかけ方

元解析で表現する断面を図-4に示す。また、それぞれのモデルで地山と支保工の間に弱層という概念を用いた。弱層の導入理由は、脚部沈下は図-5の支保と地山がうまく接合されないために生じるという仮定を表現するためである。弱層の幅、弾性係数については解析の結果、幅は1.0mで弾性係数は地山の1/10を採用した。図-6に、解析結果を示す。モデル①の解析では上半掘削後に脚部が浮き上がる傾向があり、脚部沈下があまり表現できていない。モデル②の解析では上半掘削後から脚部沈下が見れて、各施工過程がよく表現できている。また弱層の有無に関しては、弱層を導入したモデルにおいて脚部沈下の剛体変位がよく表現できている結果となった。

以上のことから、モデル②のゆるみ解析は計測データによる特徴を適切に表現できていると思われる。

4. FEMによる脚部沈下対策工のモデル化

対象トンネルで実際に行われた表-1に示す補助工法を2次元FEMによりモデル化し、脚部沈下の抑制効果について検討する。基本モデルは、前述の解析で検討したモデル②（弱層1.0m導入）を用いた。解析結果を図-7に示す。フットボルトの脚部沈下抑制効果は実施工上明確には分かっていないが、ウイングリブ付き鋼製支保工のみのモデルよりフットボルトとウイングリブ付き鋼製支保工の併用モデルの方が脚部沈下量は小さくなっていることから、フットボルトの脚部沈下抑制効果は期待できると考えられる。仮インバート工のモデルは、上半仮閉合時には脚部沈下抑制効果がほとんど見られなかったが、下半仮閉合時には脚部沈下量を抑制できていることが分かった。また、地盤改良を行うAGP工法は、対策工の中で大きく脚部沈下を抑制している。セメント系とウレタン系の差による脚部沈下抑制効果の違いはほとんど見られなかった。表-1に示すような対象トンネルで施工された補助工法は、脚部沈下を抑制できることが解析により確認された。

5. まとめ

本研究では、2, 3次元FEMを用いて土被りが小さい軟弱地山のトンネル掘削に伴うトンネル支保工の脚部沈下のモデル化、その対策工のモデル化を検討した。その結果を以下に述べる。

- (1) ゆるみ荷重を考慮した解析により、土被りが小さい軟弱地山における脚部沈下のモデルを表現することができた。
- (2) 弱層を導入することにより、トンネル側壁から水平方向にのびる測線上の変形モードを適切に表現できた。
- (3) 脚部対策工の有効性については、ある程度表現することができた。

本研究で提案した解析手法によって、様々な地山においての脚部沈下が表現できるわけではないため、地山条件の異なるトンネルの計測データを基に、今後検討を行う必要がある。



図-5 弱層の概念図

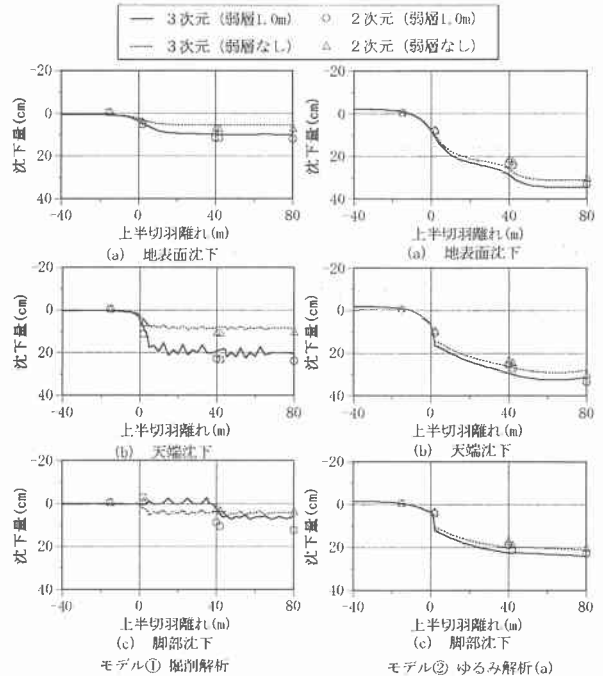


図-6 解析結果

表-1 補助工法一覧表

パターン(1)	ロックボルト
パターン(2)	ウイングリブ付き鋼製支保工
パターン(3)	フットボルト (ウイングリブ付き鋼製支保工を併用)
パターン(4)	仮インバート工
パターン(5)	AGP工法 (ウイングリブ付き鋼製支保工を併用)

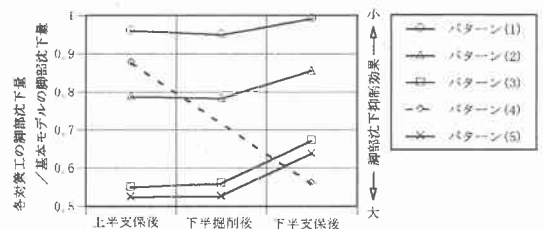


図-7 各対策工モデルの解析結果