

脚部沈下の抑止に注目した土被りの浅いトンネルの実験および解析

Deformational behavior of shallow tunnels considering confinement of foot settlement of steel ribs

久保田晶*・阿部泰典**・芥川真一***・櫻井春輔****

Akira KUBOTA, Yasunori ABE, Shinichi AKUTAGAWA, Shunsuke SAKURAI

In the event of excavation of upper half of a NATM tunnel, subsidence is affected largely by foot settlement of steel ribs. It is in fact a common practice to prevent this settlement by reinforcing ground around foot, casting a temporary invert concrete, etc. These practices succeed, to some extent, in reducing settlement in vertical direction; however, they may not be effective when reduction of inward displacements are considered. If inward displacement is allowed around steel rib foot area, a possibility of formation of shear band increases, which would definitely lead to more subsidence. This report gives a brief summary on the investigation on how inward, as well as vertical, displacements of steel rib foot can be prevented effectively by use of natural strength of ground material.

1. はじめに

NATM 工法のトンネル上半掘削に際して、地表面沈下や共下がり現象に大きく影響を及ぼす因子として、鋼製支保工脚部の沈下が挙げられる。この沈下を抑制することは、応力集中を避け、しいては地山の変形、地表面沈下を抑制することはよく知られている。その点に注目して、現在、多くの脚部補強工法が考案、施工されている。それらのほとんどは鉛直下向きの動きに対して地盤が効率よく対抗できるように考えられたものである。しかしながら、それらの補助工法においてはトンネル断面が閉塞する方向、すなわち水平内空変位が圧縮方向にある時、それを効率よく抑止することに対しては、十分な効果を発揮できないことが考えられる。この方向の変位を許すことは、すなわち応力集中部からのせん断帯の発生を許すことになり、結果的に地表面沈下を助長することになる。

そこで本研究では鋼製支保工の脚部が鉛直下向きに沈下することよりも、むしろその部分がトンネル内側に変形しにくいような施工法について、その原理を検証できるようなモデル実験を考案し、アルミ棒積層体¹⁾による実験および有限要素法を用いてその効果を確認することを試みた。

2. 既存の工法の効果確認

本研究における実験は櫻井²⁾らと同様の装置で、アルミ棒積層体においてエアバック内の圧力の制御を行うことでトンネル掘削をモデル化した。なお、トンネルモデルは直径(D)15cmの半円で、土被り1Dで実験を行った。覆工の入ったケースについては、塩化ビニールの外径15cm、厚さ0.6cmのモデルを用いた。本実験では、天端沈下、地表

* 学生会員 神戸大学大学院自然科学研究科博士前期課程
** 正会員 工修 鹿島建設(株)技術研究所
*** 正会員 Ph.D. 神戸大学工学部建設学科 助教授
**** 正会員 Ph.D.、工博 広島工業大学 学長

面沈下, 脚部沈下をレーザー変位計 (精度 $\pm 1/1000$) により, 内空変位を, トンネル径が小さくなる方を正として, ノギス (精度 $\pm 1/200$) を用いて計測した.

まず, すべての基本となる覆工を入れないケース (Case1, 無支保) と塩化ビニールを用いた覆工を入れたケース (Case2, 半円覆工) について実験を行い結果を比較する. 次に既存の工法の中でウイングリップの沈下抑制効果をモデル化したケース (Case3) と脚部改良の沈下抑制効果をモデル化したケース (Case4) についてモデル実験をそれぞれ行い, Case2 と比較する. 半円覆工を写真-1, 写真-2 に, Case3, Case4 をそれぞれ写真-3, 写真-4 に示す.

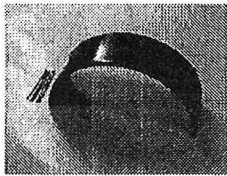


写真-1 半円覆工

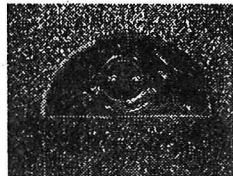


写真-2 地山挿入時

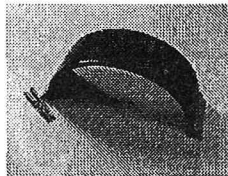


写真-3 脚部拡張

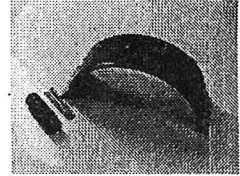


写真-4 脚部改良

まず Case1, Case2 の地表面沈下と天端沈下を図-1, 図-2 に示す.

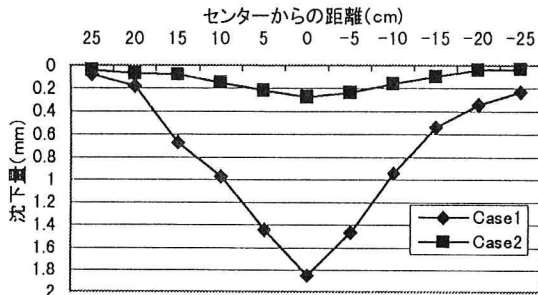


図-1 地表面沈下

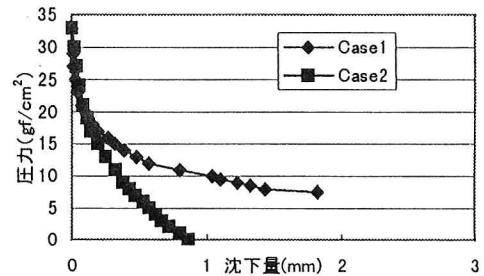


図-2 天端沈下

図-1 を見ると沈下範囲については Case1, Case2 ともにトンネル直上から左右 25cm あたりまでと思われる. 沈下量については覆工の効果で抑制できているのがわかる. 図-2 についても覆工の効果で沈下を抑制できているのがわかる.

次に Case2 の脚部沈下を図-3 に示す. これを見るとグラフの形状が天端沈下曲線と良く似ており, また, 沈下量もほぼ等しいことがわかる. このことは, 覆工が入ったトンネルの場合, 覆工脚部の沈下がそのまま天端の沈下につながっていることを表していると思われ, 無支保の場合と異なる. これは脚部に応力が集中してしまうことが原因であると思われる. このことから地山全体の変形を, 抑制するためには脚部の沈下を抑制することが重要であると言える.

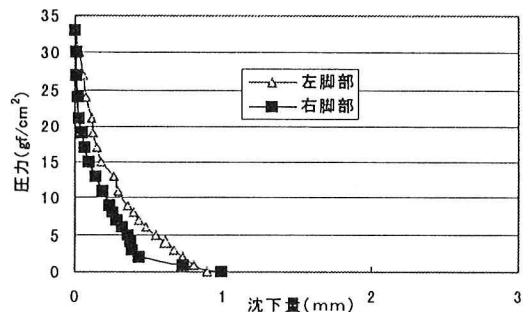


図-3 脚部沈下

Case3, Case4 の天端沈下の値を, 比較のため Case2 とおなじグラフにプロットしたものを図-4 に, Case2, Case3, Case4 の内空変位を表-1 に示す.

図-4 を見ると, Case2 と比較すると Case3, Case4 いずれも沈下量を抑制できており, 脚部を拡張したことや, 改良体挿入したことによる効果を確認することができる. 次に表-1 を見ると, 3 ケースともほぼ同じ変位量を示しており, また方向としては脚部が閉じる方向, つまり内空が小さくなる方向に変形している. このことから, Case3 と Case4 について沈下抑制効果はあるものの内空変位を抑制するには至っ

ていないことがわかる。

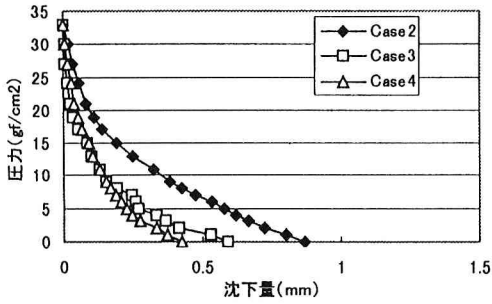


図-4 天端沈下量比較

表-1 内空変位

	Case2	Case3	Case4
内空変位量 (mm)	0.52	0.46	0.46

3. 支保工脚部のトンネル内側への変位を抑制するような工法

以上の結果から、既存の補助工法は上半掘削時の脚部に実際に生じる変位ベクトルのうち、鉛直下向きの成分に対しては、ある程度効果を発揮するものの、水平でトンネル内側への変位抑制効果については小さいことが分かった。そこで地山上部の変形を受け止めることで伝わってきた荷重を、より広範囲に分散し、また脚部付近に発生する変位の水平成分を遮断し、地盤のせん断破壊を早期に抑止することに効果を発揮しうる工法を提案する。その工法の概要図を図-5 に示す。上半の掘削と同時に脚部も掘削し、H 鋼を挿入し、コンクリートを打設して脚部構造体を構築し、その後上半支保と連結する。(この提案はトンネル内側への変位を抑制すると考えられる支保の形状一例である。)

実験に用いた塩化ビニールのモデル (Case5) を写真-5 天端沈下の比較を図-6 に、内空変位を表-2 に示す。

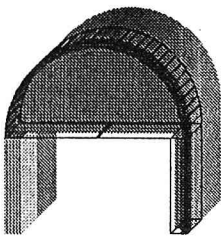


図-5 新工法概要図

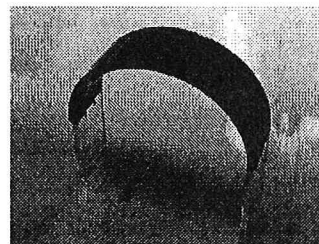


写真-5 Case5 に用いたモデル

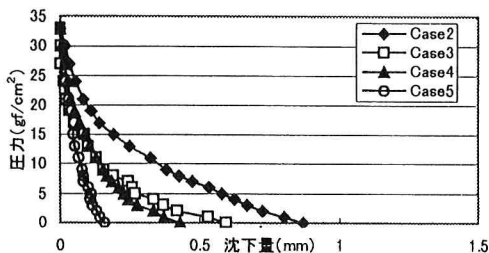


図-6 天端沈下量比較

表-2 内空変位

	Case2	Case3	Case4	Case5
内空変位量 (mm)	0.52	0.46	0.46	0.04

図-6 見ると、Case5 が大幅に沈下を抑制できていることがわかる。具体的には、Case2 と比較して Case3 が約 70%、Case4 が約 50%に沈下を抑制できているのに対して、Case5 は Case2 の約 20%まで沈下を抑制できている。次に、表-2 を見ると Case5 の内空変位量だけが他の 3 ケースと比較してかなり小さくなっており、内空変位を抑制することに成功している。この原因としては、Case5 は下半地盤が未掘削のため地盤自体がインバ

ートと同じような効果を発揮したものと思われる。

4. 解析

ここで実際に行うのは、まず、先に行った横断面トンネルモデル実験を弾塑性有限要素解析を用いて有限要素解析によってシミュレートし、モデル実験では検討できない地山のひずみ状態などを含めて新工法の効果を検証する。

この解析は完全弾塑性型³⁾であり、要素には四角形4節点アイソパラメトリック要素を用いた。ここで、本解析で用いたアルミ棒積層体、塩化ビニール(覆工)の物性値を表-3に示す。なお、ヤング率Eは各土被り圧において、次に示す式-1からトンネル中心深さで求めた値を用いた。ただし、式-1中の σ_m は平均応力である。

$$E=500+10^2 \sigma_m \text{ (左記の係数は gf/cm}^2 \text{ の単位に基づいている.)} \quad \textcircled{1}$$

表-3 解析に用いた物性値

		アルミ棒積層体	塩化ビニール
ヤング率 E	1D	7857.5gf/cm ²	3400000gf/cm ²
	2D	12762.5gf/cm ²	
ポアソン比 ν		0.333	0.38
内部摩擦角 ϕ		28.8°	45°
粘着力 c		2.6gf/cm ²	100000gf/cm ²
単位体積重量 γ		2.18gf/cm ²	1.43gf/cm ²

本解析は二つの段階からなる。まず第一段階では、自重解析として地盤に重力をかけ、同時にトンネルと地山の境界面に初期圧をかける。この時かける初期圧は実験における土被り圧と同じ値、つまり、1D では 33gf/cm² (3.34N/cm²)、2D では 66gf/cm² (6.68N/cm²) を用いた。第二段階では、トンネルと地山の境界面にかけた初期圧から実験と同様に徐々に減圧することによってトンネルの掘削をシミュレートした。この時、減圧段階は 33 のステップに分割した。したがって、ステップ 1 では初期圧の 3.3% を減圧し、ステップ 33 で境界面にかかる圧力が 0gf/cm² となる。また、各荷重ステップでは、弾塑性状態の力の釣り合いが達成されるまで繰り返し計算を行う。その時、力の釣り合いが取れない、つまり、解が収束しない時がある。本解析はその時点で地山が崩壊したと判断する。また、各荷重ステップにおける繰り返し計算は 20 回までとし、20 回を越えると解析をストップさせた。

次に本解析の解析ケースについて説明する。本解析は、前章で行ったモデル実験のうち、Case2 (半円覆工)、Case3 (脚部拡張覆工)、Case5 (脚部延長覆工) について、それぞれ 1D、2D の二つの場合について行った。

実際に地山内の状態を見るために 1D の場合の解析終了時 (圧力 0gf/cm²) における塑性ひずみ図を 3 ケースについて図-7 に示す。

図-7 を見ると、Case2 と Case3 においては、やはり覆工脚部付近にひずみが集中していることがわかる。しかし、Case2 と比較すると Case3 はわずかであるがひずみが小さくなっており、脚部を拡張した効果が表れていると言える。Case5 について見ると、覆工脚部付近のひずみがわずかに大きくなっているものの、他の 2 ケースと比較するとかなり小さくなっている。またひずみの発生している範囲が他の 2 ケースと比較して広く、特に下半の未掘削部分にひずみが発生している。このことは、脚部付近に集中していた応力が、下半のみ掘削部分にま

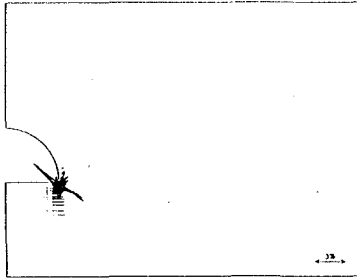


図-7(a) Case2

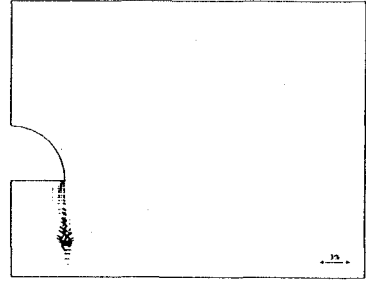


図-7(c) Case5

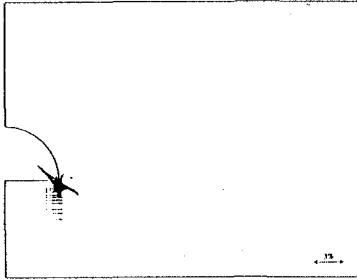


図-7(b) Case3

で分散されたことを表わしている。すなわち、Case2 や Case3 においては応力が伝達されず“仕事”をしていなかった領域が、Case5 においては応力が伝達され“仕事”をすることで Case5 は高い沈下抑制効果を発揮したものと思われる。具体的には、まず脚部延長覆工に対する上向きせん断抵抗力により沈下抑制に貢献し、また内空変位抑制については、地盤自体の圧縮応力耐荷性によって内向きに変形しようとする覆工に対して抵抗したものと思われる。

以上のことをまとめると、新工法が高い沈下抑制効果を発揮できるのは応力の伝達される範囲を大きくし、従来の工法においては“仕事”をしていなかった領域にも“仕事”をさせる、つまり、地山の力をより効果的に利用しているためであると言える。

5. 結論

本研究では以下のような結果が得られた。

- 1) 半円覆工の効果により沈下量を大幅に抑制できるが、無支保のケースにはない脚部沈下が発生した。
- 2) 既存の脚部補強工法（ウィングリブ、脚部改良）との比較を行った。その結果から、既存の工法の脚部沈下抑制効果を確認できた。しかし内空変位については抑制効果が低かった。
- 3) 新工法は地山にインパートの働きをさせ、また従来の工法では仕事をしていなかった領域にも仕事させることで非常に高い沈下抑制効果および内空変位抑制効果を発揮する。

以上の結果からここで提案したような支保の形状は、鋼製支保工の脚部がトンネル内側に変形しにくくすることで、非常に大きな沈下抑制効果を発揮することがわかった。

このように新工法が、安全性については、より良い施工法であるという可能性を示したといえる。しかし、この新工法を実際の施工に適用するには、施工ステップについてより詳しく検討し、合理性、経済性について更に検討する必要がある。

6. 参考文献

- 1) 足立紀尚, 田村武, 矢島厚, 上野洋: 砂質地山トンネルの挙動と解析に関する研究土木学会論文集 Vol.353, pp129~136, 1985
- 2) 櫻井春輔ら: 土被りの浅いトンネルの力学的挙動に関するモデル実験, 土木学会論文集 Vol.487, pp.271~274, 1994
- 3) S.Akutagawa: A Back Analysis Program System For Geomechanics Application, Ph.D Thesis, The University of Queensland, 1991.