

トンネル先受工の地盤変状抑制効果に関する 三次元掘削模型実験

A 3-Dimensional Excavation Model Test about the Effect of a Tunnel Pre-Lining for the Restraint of the Ground Deformation

石村利明¹⁾・真下英人²⁾・真弓英大¹⁾・藤井邦男¹⁾

Toshiaki ISHIMURA, Hideto MASHIMO, Hidemoto MAYUMI, Kunio FUJII

A tunnel pre-lining for the restraint of ground deformation has been widely used in tunnel sites around urban areas. In this report, 3-dimensional model tests were carried out to examine the influence of the material and the length of a pre-lining. As a result, the existence of a pre-lining had the restraint effect near tunnel face, especially when the continuous arch-shell was used. As for the range, the effect of 180° over crown was higher than that of 120°. Moreover, no influence of the rest length over face was found, and the restraint effect could be expected if the length of a pre-lining was equal to that of excavation afterwards.

Key Words : tunnel, pre-lining, 3-dimensional model test

1. はじめに

近年、都市部周辺における地山強度の比較的低い条件下でのトンネルの建設が増加している。都市部におけるトンネル施工に関しては、トンネル周辺環境の保全のため、トンネル掘削によって生じる地表面沈下、あるいは周辺地盤の沈下を極力抑えることが重要な課題の一つとなっている。こうしたことから、トンネル周辺環境への影響に対して有利とされているシールド工法が都市部およびその周辺の地山強度の低い条件下で採用される場合が多い。一方、最近では、経済性および断面形状の変化に有利な山岳工法においても、都市部周辺のこうした地盤に対して、地盤変状抑制対策、切羽安定対策として切羽前方に先受工等による補助工法を採用しながら、トンネルを施工する実績も増加している。しかしながら、現在は、これまで先受工による地盤変状抑制効果は、現場で計測される地表面沈下等により確認されているものの、先受工の地盤変状抑制効果の定量的評価は明らかになっておらず、設計方法も確立されていない状況にある。本報告は、地山強度の比較的低い条件下における山岳工法によるトンネル掘削を想定し、先受工の種類・設置範囲・長さの違いが地盤変状抑制効果に及ぼす影響を把握することを目的として3次元の掘削模型実験を実施したので報告するものである。

2. 実験方法

実験は、図-1に示すような土槽を用いて実際に直径 $D=30\text{ cm}$ のトンネルを掘削する方法とした。実験

1) 正会員 建設省土木研究所

2) 正会員 工博 建設省土木研究所

は、土槽内に所定の含水比に調整した豊浦標準砂を1層約10cm毎に密度管理しながら地山を作成し、作成途中で予め先受工に相当する材料をトンネル覆工外周面と接触する地山位置に設置し地山を作成する。掘削および覆工の建て込みは、1掘進長として3cm

(0.1D)の掘削を手掘りにより行い、その後覆工を逐次建て込む方法とした。掘削長は手掘りで掘削できる限界長の42cmとした。なお、覆工は、アーチ部分と底板部分とから構成され、相互が接触するアーチ部分の脚部の隙間に、反力の小さいバネを挿入しておき掘削面と覆工との間隙を極力なくすようにした。

計測は、トンネル中心の縦断方向の1測線の地表面変位をレーザー変位計により、また、トンネル天端付近およびトンネル底盤付近の鉛直方向土圧の変化を小型土圧計（直径10mm、厚3mm）によりトンネルの各掘削段階毎に測定を行った。なお、地山の物性値は、本実験に用いた材料と同一の条件下の含水比 $w = 2.0\%$ 、密度 $\gamma = 1.2 \text{ gf/cm}^3$ による供試体で実施した低応力一面せん断試験によれば、粘着力 $c = 5.0 \text{ gf/cm}^2$ 、内部摩擦角 $\phi = 33.6^\circ$ が得られている。

実験ケースは、土盛り比 H/D を0.5、先受工の長さを42cmと一定として、先受工の種類をシェルタイプと丸棒タイプの2種類、先受工の設置範囲を天端 120° および 180° の2種類と条件を変化させて表-1に示す条件で行った。なお、ここで先受工の種類のシェルタイプは、横断方向に連続した先受工が施された条件を、丸棒タイプは横断方向には連続していない先受工を想定した。また、先受工にはアクリル材を用いて、表面には地山と十分な密着が図れるようにエポキシ系樹脂により標準砂を付着させたものを使用した。

3. 実験結果

3.1 先受工の種類による地盤変状抑制効果

図-2に先受工の種類としてジェルタイプと丸棒タイプのケースについて、42cm掘削した後の最終の地表面沈下曲線を切羽位置との関係で示す。図より、先受工がない場合には、切羽の進行に伴って切羽前方約

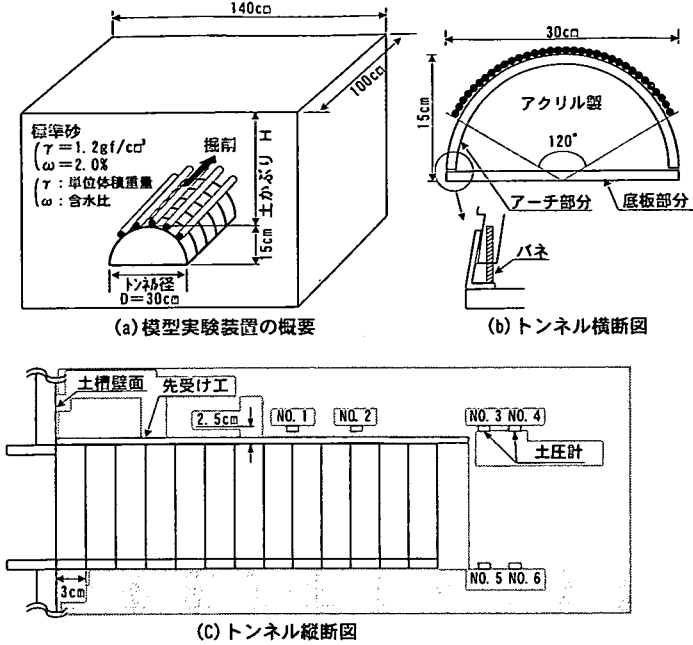


図-1 3次元掘削模型実験の概要図

表-1 実験条件一覧表

NO.	土盛り比 H/D	先受工の種類	先受工の範囲	材質	先受工寸法 (径・長さ) (mm)	先受工間隔
1	0.5	なし	—	—	—	—
2		シェルタイプ	天端 120°	アクリル	厚さ5, 長さ420	—
3			天端 180°			—
4		丸棒タイプ	天端 120°	アクリル	外径4, 長さ420	0 (なし)

1.0 D (D:トンネル径) 程度から変化が現れ始め、切羽通過後約0.5 D程度あたりから沈下量の変化が小さくなる傾向を示す。それに対して先受工のあるケースでは、沈下が生じ始める切羽前方の位置は、先受工がない場合と同様に約1.0 D程度であるものの、切羽位置および切羽前方位置での地表面沈下を比較すると、先受工がない場合に比べて先受工がある場合のほうが若干小さい値を示しており、顕著ではないものの、先受工による切羽前方に対する地盤変状抑制効果が認められる結果を示している。また、切羽通過後の沈下量も先受工がある場合が小さくなっており、先受工による地盤変状抑制効果が現れていることが分かる。特に、シェルタイプの場合で最終の沈下量が先受工がない場合に比べて約1/2の値となっており地盤変状抑制効果が高いことが分かる。

3.2 先受工の設置範囲による地盤変状抑制効果

図-3 にシェルタイプの先受工の設置範囲が変化したケースについて、42 cm掘削した後の最終の地表面沈下曲線を切羽位置との関係で示す。図より、先受工の設置範囲を 120°

から180°に広げた場合は、ほぼ収束した後の最終沈下量が先受工なしに比べて約1/3まで地盤変状を抑制できる結果となり、先受工の設置範囲が広い条件下のほうがさらに地盤変状抑制効果が高いことが明らかとなった。また、設置範囲を180°とした場合では、切羽位置直前の沈下も先受工なしに比べて約1/2以下の小さい値を示しており、設置範囲を広げることにより切羽位置直前に対しても高い地盤変状抑制効果が期待できるものと考えられる。

3.3 先受残長による地盤変状抑制効果

先受残長による地盤変状抑制効果を確認するため、トンネルの各掘削段階毎における先受残長と地表面沈下曲線との関係について整理した。図-4 に先受工なしの場合の各掘削段階毎における地表面沈下曲線の差異を切羽距離との関係で示した。これより、30 cm掘削時以降の沈下曲線は、多少のデータのばらつきはあるものの、ほぼ同一と見なせる沈下曲線を示しており、各掘削段階毎の差はないものと考えられる。このことから、30 cm掘削時以降の沈下曲線は、土槽の壁面およびトンネル掘進長の違いによる影響は現れていないものと考えられる。図-5 に地盤変状抑制効果の高いシェルタイプ180°の場合について、各先受残長と

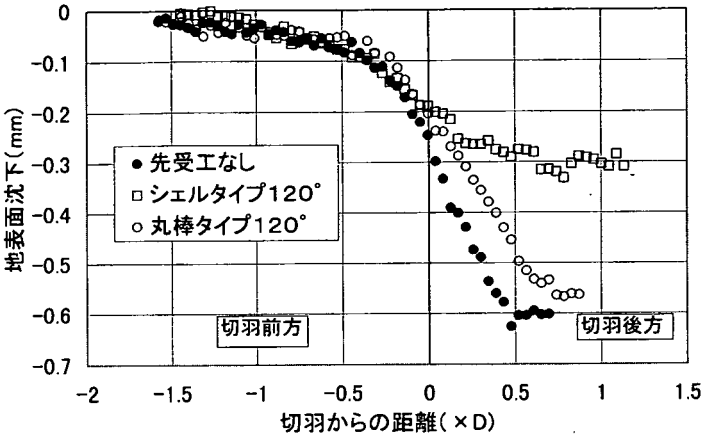


図-2 先受工の種類による地盤変状抑制効果

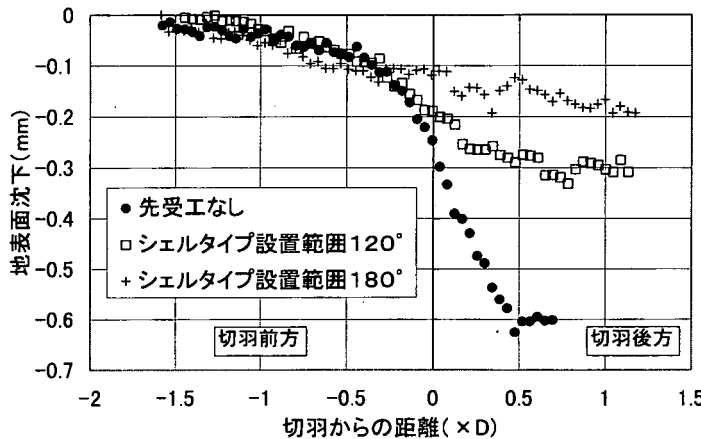


図-3 先受工の設置範囲による地盤変状抑制効果

地表面沈下曲線の差異を切羽距離との関係で示した。これより、先受残長が0.0Dから0.4Dの範囲における切羽前方の地表面沈下曲線はほとんど変わっていないことが分かる。このことは、先受残長によって切羽前方に対する地盤変状抑制効果はほとんど変わらず、先受残長が0.0Dの場合においても地盤変状抑制効果が現れていることを示す結果となった。この結果は、他の先受工の実験ケースでも同様であった。これより、本実験条件下においては、先受工による切羽前方の地盤変状抑制効果を図るためには、先受残長よりも、新たに掘削された区間の緩みを極力防止することが効果的であり、重要であると考えられる。

3.4 先受工設置によるトンネル切羽の安定性の検討

先受工の有無による切羽の安定性について検討するため、トンネル天端付近およびトンネル底盤付近の鉛直方向土圧の変化について整理した。整理にあたっては、各実験条件下におけるトンネル掘削時の周辺土圧の変化を比較するために、初期土圧に対する比率を求めて無次元化した値を用いた。以下に、特に代表的な実験ケースの土圧の変化について示す。

(1) 先受工上部の鉛直方向土圧の変化

図-6にトンネル天端の先受工上部付近の鉛直方向土圧の変化をトンネル切羽位置との関係で示す。先受工なしの場合のトンネル天端付近の鉛直土圧は、切羽前方約0.6D程度から初期土圧に対して上昇する傾向が現れ始め、約0.5Dから0.4D程度で最大値を示し、その後切羽進行に伴って低下する。これは、トンネル掘削による切羽

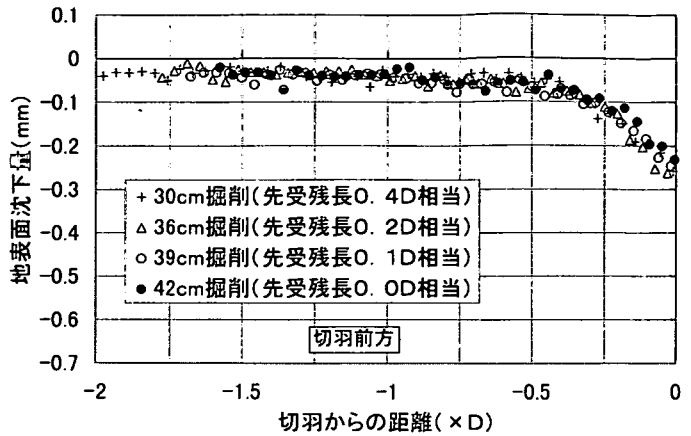


図-4 各掘削段階毎の地表面沈下曲線（先受工なし）

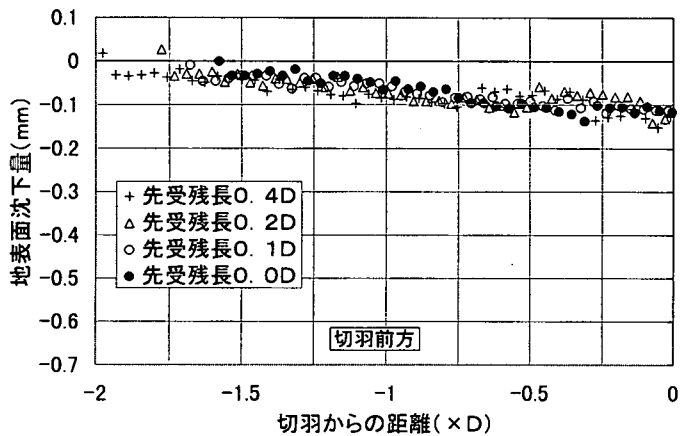


図-5 各掘削段階毎の地表面沈下曲線（シェルタイプ180°）

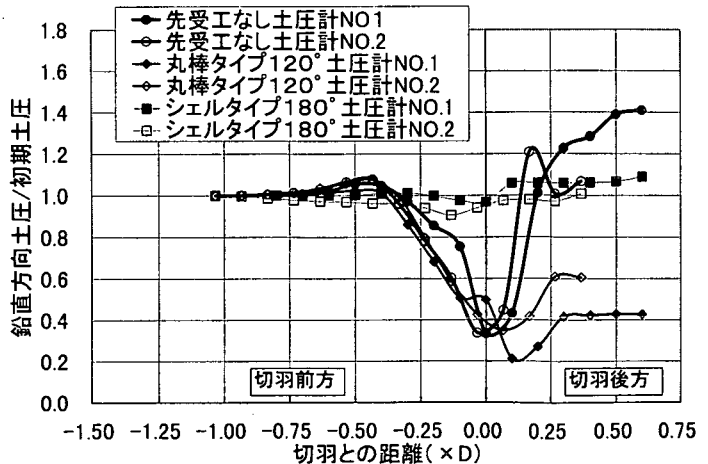


図-6 先受工上部の鉛直方向土圧の変化

前方の緩みに伴い、緩み前方に応力の再配分により鉛直方向土圧の上昇が生じるためと考えられる。したがって、トンネル掘削による切羽前方の緩みは概ね0.4D～0.5D程度までと考えられる。一方、先受工がある場合には、横断方向に連続していない丸棒タイプの場合は、先受工がない場合の土圧の変化と傾向はほとんど変わらない結果であるのに対し、横断方向に連続したシェルタイプで比較的剛性のある先受工では、トンネル掘削に伴う変化はあまりみられず、切羽前方の緩みもほとんど生じていないことが分かる。

以上より、地盤変状抑制効果が高い先受工を実施した場合には、初期応力状態に近い状態で推移し、周辺土圧の変化も小さく、トンネル掘削に伴う切羽前方での鉛直方向土圧の上昇がみられず、切羽前方の緩みも小さいものと考えられる。

(2) トンネル天端付近の鉛直方向土圧の変化

図-7に先受工が設置されていない区間で測定した土圧計NO.3およびNO.4のトンネル天端付近の鉛直方向土圧の変化をトンネル切羽位置との関係で示す。これより、シェルタイプでは、先受工なしおよび丸棒タイプで生じる切羽前方約0.6D程度からの土圧が上昇する現象はみられないものの、先受工なしの場合と同様に切羽前方約0.4Dから低下する現象がみられることが分かる。これは、先受残長が十分な長さの場合は、先受工の効果により切羽前方の緩みはほとんど生じず、図-6に示したように先受工上部の土圧の変化は小さいものとなるが、先受残長が短くなると切羽前方の緩みが生じるためと考えられる。ただし、先に示したように先受残長と地表面沈下曲線との関係から、この緩みによって切羽前方に対する地山変状抑制効果に対する影響は小さいものと考えられる。

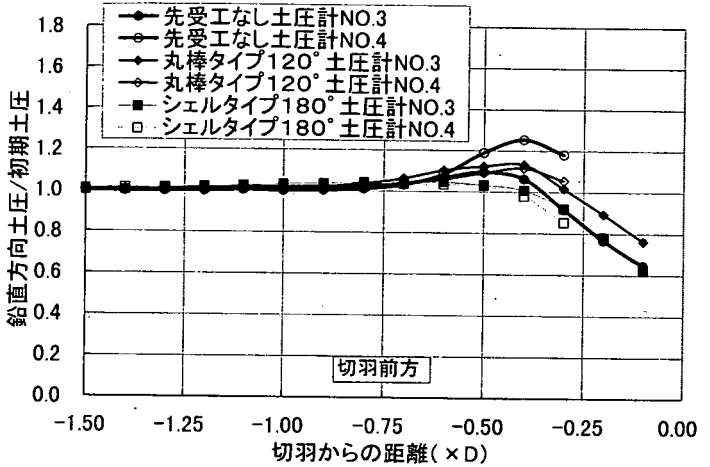


図-7 天端付近の鉛直方向土圧の変化

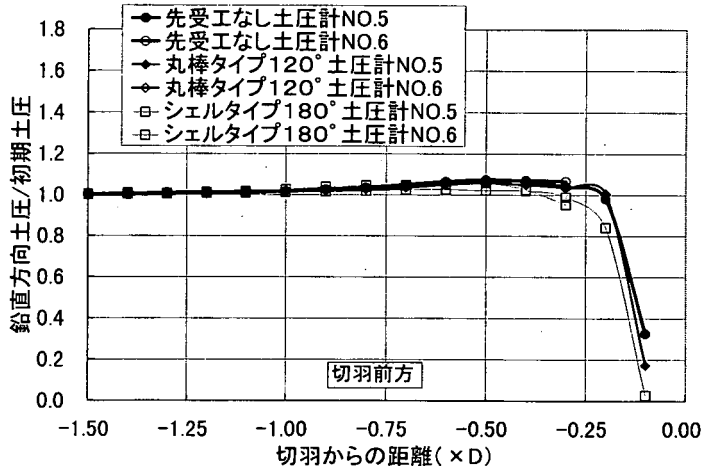


図-8 底盤付近の鉛直方向土圧の変化

図-8に先受工が設置されていない区間で測定した土圧計NO.5およびNO.6におけるトンネル底盤付近の鉛直方向土圧の変化をトンネル切羽位置との関係で示す。これより、先受工がない場合の底盤付近の土圧の変化は、先受工が設置されていない区間で計測されたトンネル天端付近の土圧と比較的同等な傾向を示すが、切羽前方約0.6Dから生じる増加の傾向は小さく、また、切羽前方で土圧が低下し始める位置も0.25D付近と直前まで変化しないことが分かり、トンネル天端付近の土圧の変化に対して急激に変化することが分かった。また、丸棒タイプおよびシェルタイプの先受工のある場合においても先受残長が短くなると天端付近と同様に

(3) トンネル底盤付近の鉛直方向土圧の変化

図-8に先受工が設置されていない区間で測定した土圧計NO.5およびNO.6におけるトンネル底盤付近の鉛直方向土圧の変化をトンネル切羽位置との関係で示す。これより、先受工がない場合の底盤付近の土圧の変化は、先受工が設置されていない区間で計測されたトンネル天端付近の土圧と比較的同等な傾向を示すが、切羽前方約0.6Dから生じる増加の傾向は小さく、また、切羽前方で土圧が低下し始める位置も0.25D付近と直前まで変化しないことが分かり、トンネル天端付近の土圧の変化に対して急激に変化することが分かった。また、丸棒タイプおよびシェルタイプの先受工のある場合においても先受残長が短くなると天端付近と同様に

切羽直前で緩みが生じることが分かった。

4. まとめ

地山強度の比較的低い条件を想定した三次元掘削模型実験条件下において、先受工の地盤変状抑制効果、切羽安定性に関して以下のことが分かった。

- (1) 先受工のある場合は、先受工のない場合に比べて地盤変状抑制効果があることが分かった。また、切羽前方に対する地盤変状抑制効果も認められた。特に、横断方向に連続的な先受工となるシェルタイプの場合が丸棒タイプの先受工に比べて、地盤変状抑制効果が高いことが明らかになった。
- (2) シェルタイプの場合の先受工では、先受工の範囲が天端 120° に比べて天端 180° のほうが地盤変状抑制効果が高いことが明らかとなった。
- (3) 先受工による切羽前方の地盤変状抑制効果を図るためには、先受残長よりも、横断方向に連続した比較的剛性のある先受工により新たに掘削される区間の緩みを極力防止することが効果的であり、重要であると考えられる。
- (4) トンネル掘削に伴うトンネル天端付近の鉛直方向土圧は、十分な先受工を行うことにより切羽前方での土圧の上昇現象がみられず、初期応力に近い状態で推移し、先受工なしに比べて切羽の安定性が高くなることが分かった。

5. 今後の課題

今後、先受工の種類を変化させた種々の実験を実施するとともに、実験結果に対する解析および現場計測結果との比較を行い、先受工の地山変形抑制効果、切羽安定性について定量的に把握することが必要である。また、先受工を実施した場合の合理的なトンネル支保構造を検討するため、トンネルの作用荷重について把握することが必要である。