

トンネル先受けの挙動および変形抑制効果

鹿島技術研究所 正会員 ○伊達健介 北本幸義 山本拓治 後藤直人 岡本道孝
東京工大工学部 正会員 太田秀樹

1 はじめに

低土かぶりの未固結地山にトンネルを掘削する場合、切羽の安定性向上や地表面の沈下抑制を図るため、鋼管や改良体による先受け工を用いた対策が多く実施されている。先受けの補強メカニズムとして、横断方向のアーチ形成効果、縦断方向の梁形成効果などがいわれているが、筆者らは一般的な長尺先受け工法よりも改良ゾーン（シェル厚）を厚く施工する中尺先受け工法（MG F工法）の補強効果について、現場計測結果における優位性を確認している^{1), 2)}。今回は、両工法の鋼管打設方法の差異に着目し、室内土槽による三次元的な大型模型載荷実験を行った。当報文では、鋼管の打設方法が異なる2つの先受けに対し、変形特性や変形抑制効果に及ぼす影響およびその変形特性を比較検討したものである。

2 実験概要

(1) 実験材料

今回使用した主な材料は、地盤を作製する砂、先受けを作製するアルミ棒およびソイルモルタルである。各材料の概要を図-1に示す。

(2) 実験ケース

実験は、図-2に示すとおりアルミ棒群の状態を変えた2ケースについて実施した。Case 1, 2はそれぞれ長尺先受け、中尺先受け¹⁾を対象としており、幾何学的縮尺を1/20に想定しているが、改良ゾーンの大きさや砂、ソイルモルタル物性などの相似性を満足させることが困難であるため、基本的に鋼管打設方法の差異に基づく検討を主眼としている。

(3) 実験手順

先受け（鋼管+ソイルモルタル）の作製については、トンネル掘削を想定してあらかじめ設置した半円柱体の内型枠上に所定の間隔で組立てたアルミ棒群を載せ、外型枠を設置してからソイルモルタルを流し込んだ。ここに、脚部が強固な地盤すなわち脚部沈下を生じない場合を想定し、土槽底面に改良範囲180度で先受けを設置することとした。ソイルモルタルを養生した後外型枠を脱型し、先受けの左右、上部に薄層で砂を締め、地盤を作製した。

次に、内型枠を順次撤去し、油圧ジャッキで載荷を行った。なお、補強効果が最も小さい（切羽が最も不安定な）状況を対象として、内型枠は次ステップの鋼管を打設する直前の状態まで（ラップ長分を残して）撤去した。また、切羽近傍に着目した状態を模擬するため、切羽付近を中心に載荷を行っている。ただし、後続の支保工については考慮せず、先受けのみをモデル化している。

実験中は、トンネルの内空変位、改良ゾーンのひずみ、切羽の水平変位、土圧、地中変位、地表面変位、および載荷荷重について計測を行っている。

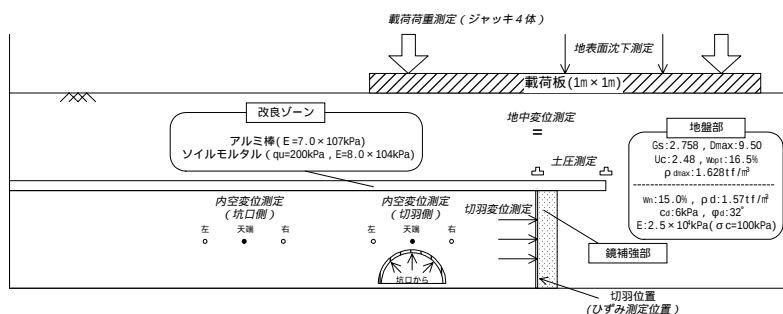


図-1 実験概要

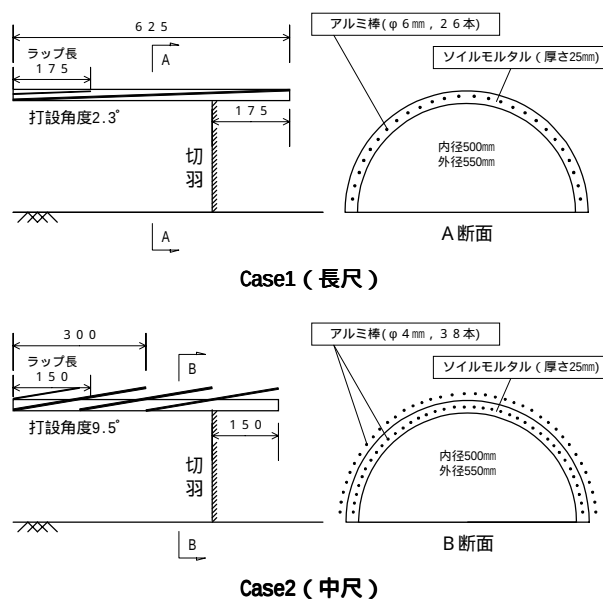


図-2 実験ケース

キーワード：先受け 改良厚さ シェル 変形 載荷試験

連絡先：〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 TEL 0424-89-7062 FAX 0424-89-7060

3 実験結果

Case 1 と Case 2 における載荷応力～切羽近傍の内空変位関係を、それぞれ図-3、図-4に示す。

これらによると変位はほぼ均等に生じており、先受け工内部では径方向に均等に変位（収縮）が生じていることがわかる。この傾向は、坑口側の計測断面においても同様である。

また、同図の弾性挙動を示している部分について着目すると、載荷応力 1N/mm^2 に対して、Case1(長尺)では 18mm 、Case2(中尺)では 12mm 変位が生じている。また、事前に実施した鋼管のないツイルモルタルのみの改良ゾーン（鋼管なしと称する）に載荷した実験結果（図-5 参照）では、 $21\text{mm}/\text{N/mm}^2$ となっていたことから、径方向変位は、中尺、長尺、鋼管なしの順に小さくなっており、鋼管打設による変位抑制効果および、中尺先受けが長尺よりも内空変位を抑制していることが確認できた。

4 考 察

前述のとおり、径方向に均等に変位が生じていたことから、均等な外圧を受ける厚肉円筒シェル理論の適用を試みる。厚肉円筒シェルに径方向等分布荷重 p_0 が作用したとき、径方向変位 u は

$$u = -Ro^2 \cdot p_0 \cdot ((1-\nu) + (1+\nu)(Ri^2/r^2)) \cdot r / (E \cdot (Ro^2 - Ri^2)) \quad (1)$$
によって表される（ r ：半径座標、 E ：弾性係数、 ν ：ポアソン比、 Ri, Ro ：内、外半径、図-6 参照）。鋼管なしの場合、水平分布荷重 1N/mm^2 をシェルの周方向に換算し、式(1)を用いてトンネル内周における径方向変位を算定すると 23mm となり、実験結果 21mm にほぼ合致する。これは当実験と類似条件で施工されるトンネルについては円筒シェル理論適用の可能性があることを示唆している。一方、円筒シェル理論で変位の支配要因となるのは剛性 E であることから、Case1(長尺)とCase2(中尺)について、トンネル軸方向ではあるが、 $1/E$ を比較すると、長尺と中尺の比は 1.3 となり、両者の径方向変位の比 1.5 ($\approx 18/12$) にほぼ一致する。この比は曲げ剛性 EI の比からは説明が困難であり、剛性 E の絶対的評価が重要であることを示している。

5 結 論

鋼管の打設方法を変えた三次元的な大型模型載荷実験を、長尺、中尺先受けの2ケースについて行い、先受け工の変形特性及び変形抑制効果について比較検討を行った。その結果、脚部に沈下が生じない場合、載荷によって生じる先受けの径方向変位はほぼ均等であることがわかった。また、鋼管の打設角度を大きくする中尺先受けの方が長尺よりも変形抑制効果のあることがわかった。さらに、その定量的評価については円筒シェル理論適用の可能性のあることが示され、鋼管を含めた剛性 E の評価が重要であることがわかった。

今後、円筒シェル理論の適用、鋼管を含めたゾーンとしての剛性評価について研究をすすめ、打設範囲やシェル形成度の影響などについても検討を実施したいと考えている。

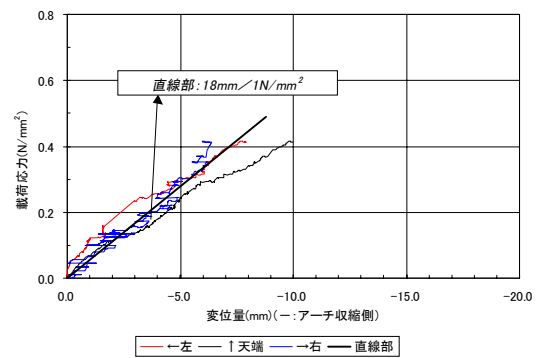


図-3 載荷応力～内空変位(Case1,長尺)

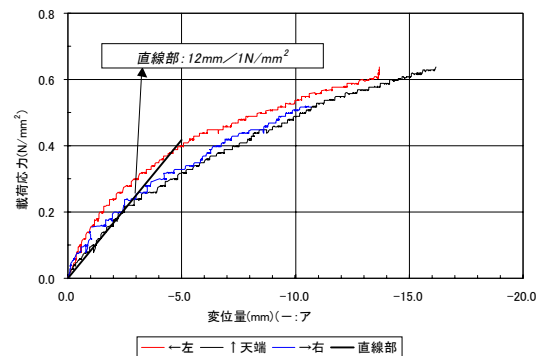


図-4 載荷応力～内空変位(Case2,中尺)

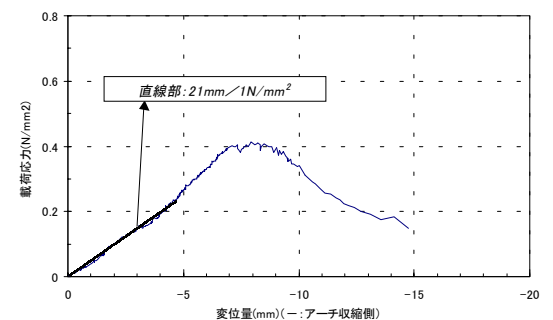


図-5 載荷応力～内空変位(鋼管なし)

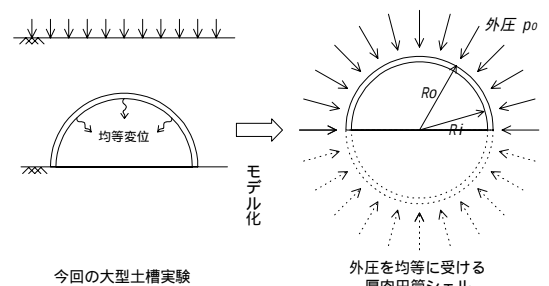


図-6 均等な外圧を受ける厚肉円筒シェル