

外字21-17

早稲田大学大学院理工学研究科

# 博士論文概要

## 論文題目

複円形断面シールドトンネルに作用  
する土圧に関する実験的研究

Experimental study on earth pressure acting on  
the lining of multiple circular shield tunnels

申請者

五十嵐

寛昌

HIROMASA

IGARASHI

2001 年 12 月



理 2699 ( 3337 )

シールドトンネル工法は、我が国では 1950 年代の後半から本格的に採用されるようになり、この工法を用いて地下鉄、上下水道、電力洞道、通信洞道などが次々と建設された。これらのシールドトンネルの幾何形状は単円形であり、力学的安定性や施工性等の面から見ても合理的であるといえる。しかしながら、近年では都市部における地下空間の過密化や、環境問題などの点から、効率的な最小断面でトンネルを構築するニーズが高まり、これらのニーズに対応したシールドトンネル工法の一つとして複円形断面シールドトンネル工法が考案された。複円形断面シールドトンネル工法は、掘削用の複数のカッターを上下、左右に 2 連、3 連等に組み合わせることによりさまざまな断面形状を構築可能な工法である。たとえば、地下鉄道の駅部には横 3 連円形断面トンネル、用地幅の限られた道路下に鉄道や道路の複数路線を近接して構築する場合には縦 2 連円形断面トンネルを建設するのが合理的である。

一方、シールドトンネルの覆工に作用する土圧の評価法については、古くから多くの研究が行われており、さまざまな考え方が展開されてきた。これらは主に重力場における落し戸実験を用いた実験的検討から導き出されたものであり、トンネル形状に着目した検討はあまり行われていなかった。また、「トンネル標準方書」や「鉄道構造物等設計標準・同解説」に定められているシールドトンネルの覆工に作用する土圧の算定方法は単円形を対象にしたもので、Terzaghi のゆるみ土圧式に基づいている。単円形以外の形状のトンネルに作用する土圧については特に定められておらず、単円形トンネルの算定方法を準用しているのが現状である。

このような現状を踏まえて、本論文は横 3 連円形断面および縦 2 連円形断面などの複円形断面シールドトンネル覆工の設計に必要な作用土圧の評価手法を提示することを目的とした。すなわち、遠心模型実験手法を用いて、土の自重による地盤内の応力レベルを実規模相当に再現した実験を行い、この実験結果に基づいて、覆工に作用する土圧をトンネルの幾何形状および地盤条件から求めることのできる土圧の算定式を提案した。さらに、実際の横 3 連円形断面シールドトンネル工事において計測された土圧に基づいて、提案した土圧の算定式の妥当性を実証した。

本論文は、5 章から構成されており、以下に各章の概要を述べる。

第 1 章では、シールドトンネルの覆工に作用するさまざまな荷重について述べ、その中で覆工の設計において支配的な荷重となっている地盤の自重に基づく荷重、すなわち覆工への作用荷重についての現状の設計法と問題点について述べた。さらに、複円形断面シールドトンネルにおける覆工への作用荷重の評価手法確立の必要性を示した。

また、遠心力を利用した遠心模型実験に関する地盤工学的問題における基礎理論を述べ、遠心模型実験装置について概説した。

第 2 章では、横 3 連円形断面および縦 2 連円形断面シールドトンネルに作用する土圧を遠心模型実験により詳細に調査し、その結果に基づいてこれら複円形断面シールドトンネルの覆工に作用する土圧の算定式を誘導する過程を示した。

まず、遠心模型実験手法を採用した理由として、土の自重による地盤内の応力レベルを実規模相当に再現できることを指摘した。

次に、横 3 連円形断面および縦 2 連円形断面シールドトンネルの覆工に作用する土圧を遠心模型実験により調査するため、施工のモデル化および実験の手順について述べた。シールドトンネルの覆工に作用する土圧に影響を与える要因としては、切羽での応力解放、テールボイドでの応力解放、裏込注入材の充填具合、および覆工の変形などが考えられるが、密閉型シールドトンネルの多くの施工実績から、テールボイドの発生を取り上げた研究が多くなされている。これらの研究を参考に、遠心力場で、テールボイドの発生を模擬できる実験装置を開発し、地盤の変位に起因して覆工に作用する土圧を測定した。

シールドトンネルの模型は、直径 48mm の中実円柱を組み合わせる複円形（横 3 連円形および縦 2 連円形）断面シールドトンネルの一次覆工を模擬した部分（以下、一次覆工模型）と、その外側のシールド機のテール部を模擬した肉厚 3mm の部分（以下、シールド機模型）とで構成した。このような模型を幅 500mm、奥行き 150mm、深さ 500mm の土槽に設置し、所定の土被り深さになるように地盤を作成した。そして、この土槽を遠心模型実験装置に搭載し、140 G（G は重力加速度）の遠心加速度を作用させた状態で、シールド機模型をトンネル軸方向に 0.5 mm/s の速度で 150 mm 移動させ、土槽背面側に引き抜くことによって、テールボイドの発生を模擬した。なお、遠心加速度を 140 G としたことにより、一次覆工模型を構成する直径 48mm の部分は、直径 6,720mm の実物に相当し、横 3 連円形の一次覆工模型の幅は約 16m の実物に、縦 2 連円形の一次覆工模型の高さは約 11m の実物に相当する。

地盤材料としては、テールボイドの発生による過剰間隙水圧の発生やその消散による沈下が生じないように、透水性の比較的高い豊浦砂を選定した。豊浦砂を空中落下法により所定の密度になるように堆積させた後、脱気水を通水し、飽和させた。また、深度方向に 1~3 cm 間隔で着色した砂層を設置し、地中鉛直変位の詳細な分析に利用した。一次覆工模型の外周部に設置した土圧計により全土圧を、間隙水圧計により間隙水圧を測定した。

実験においてパラメータとしたのは、トンネルの土被り深さ  $H$  である。土被り深さ  $H$  とトンネル幅  $D_w$  との比を土被り比  $H/D_w$  と定義し、横 3 連円形断面シールドトンネルの場合には、 $H/D_w = 0.1, 1.0, 2.5$  の 3 ケース、縦 2 連円形断面シールドトンネルの場合には、 $H/D_w = 0.3, 1.5, 3.0, 5.0$  の 4 ケースの実験を行った。

土圧計で測定した全土圧から水圧を差し引いて有効応力表示の土圧を求め、この土圧を土の単位体積重量で除してゆるみ高さ  $H_0$  を算定し、さらにトンネル幅

$D_w$  で除してゆるみ高さ比  $H_0/D_w$  と定義した。一次覆工模型のクラウン部で測定した土圧と土被り深さ  $H$  との関係は、下記のように要約することができる。

- 1) トンネルの土被り深さ  $H$  が大きくなると、覆工へ作用する土圧も大きくなる。
- 2) 横 3 連円形断面トンネルでは、土被り比  $H/D_w = 1.0$ 、縦 2 連円形断面では土被り比  $H/D_w = 1.5$  の場合に、覆工へ作用する土圧が土被り圧よりも大きくなる。
- 3) 横 3 連円形断面トンネルでは、土被り比  $H/D_w = 1.0$  以上でゆるみ高さ比  $H_0/D_w$  がほぼ一定（約 1.2）になる。縦 2 連円形断面トンネルでは、土被り比  $H/D_w = 3.0$  以上でゆるみ高さ比  $H_0/D_w$  がほぼ一定（約 2.5）になる。
- 4) Terzaghi のゆるみ土圧式を拡張した式から求めた値と、これらの実験値を比較すると、拡張した Terzaghi 式から求めた値は実験値の約 1/2 である。

またトンネル近傍の模型地盤の変位状況を詳細に検討した結果、横 3 連円形断面および縦 2 連円形断面トンネル形状の両方に共通して下記の事実が確認された。

- 1) トンネル直上の沈下量はテールボイド量と同程度の約 3mm であり、それより上方では地表に近づくに従い、沈下量は小さくなっている。
- 2) テールボイド部分への土の移動により、トンネル側方部における沈下量の最大値はトンネルのテールボイド量 3mm よりも大きい。

この土の移動状況を考慮して、トンネル側方部の領域の土が下方へ移動することによってトンネル直上に付加的な荷重が作用していると考え、3つの地盤変位領域から構成される地盤変位メカニズムを考案し、複円形断面シールドトンネルの覆工に作用する土圧の算定式を誘導した。

第 3 章では、第 2 章で誘導した土圧の算定式に含まれる地盤変位領域の大きさを決めるパラメータ  $B_1, B_2$  および  $H_1$  を遠心模型実験に頼ることなく、トンネルの幾何形状および地盤条件から一意的に決定できる方法について検討し、形状パラメータ  $\delta, \alpha, \beta$  を導入した。これらのパラメータの値について、第 2 章の遠心模型実験結果に基づく感度分析を行い、 $\delta = \pi/4 + \phi/2$ 、 $\alpha = 0.6$ 、 $\beta = 1.5$  と設定できることを示した。この結果、トンネルの幾何形状と地盤条件をもとに、複円形断面シールドトンネルの覆工に作用する土圧の算定が可能になった。

なお、誘導した土圧の算定式の適用範囲は下記のように集約できる。適用可能なトンネルの断面形状は、横 3 連円形および縦 2 連円形である。また、適用地盤については、クーロンによる土の破壊規準式を用いているので、内部摩擦角  $\phi$  だけでなく、粘着力  $c$  を有する土にも適用可能である。

第 4 章では、実工事で得られた横 3 連円形断面の覆工に作用する土圧測定結果を用いて、提案した土圧の算定式の検証・評価を試みた。その結果、拡張した Terzaghi 式は危険側の値を与え、提案した土圧の算定式による値は安全側の値を与えており、提案した土圧の算定式は妥当であることを実証した。

第 5 章は結論であり、本研究で得られた主要な成果を総括した。