

投稿論文(和文ノート)

**TECHNICAL
NOTE**

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

櫻井春輔*・川嶋幾夫**・川端康祝***・
皿海章雄***

土砂地山に土被りの浅いトンネルを掘削する場合に生じる、地表面沈下などの周辺地山の変形、および覆工に作用する緩み荷重等の問題の解明には、モデル実験が有用である。従来のモデル実験では、変位境界によって掘削をシミュレートする 경우가多いが、必ずしもこの方法によって掘削がシミュレートできているとは言えない。そこで、本ノートでは、新たに応力境界によってシミュレートできる装置を開発し実験を行った。その実験結果を基に、トンネル周辺地山の変形挙動について、掘削シミュレートの実験方法による差異を含めて考察を行い、さらに、覆工に作用する緩み荷重について検討した。

Key Words : model test, shallow tunnel, loosening zone, earth pressure

1. はじめに

NATM 工法によって、未固結あるいは土砂地山に土被りの浅いトンネルを掘削する場合、トンネル直上、あるいは近傍に構造物が存在すれば、トンネルの掘削によって構造物が不等沈下などの被害を受けることが懸念される。そのため、トンネルの掘削によって構造物が受ける影響を予測することが必要となる。そのためには、地山の挙動を正確に表現できる解析手法が開発されなければならない。ここでは、まず解析モデルを設定することになるが、それには掘削時に地山がどのように挙動するかを正確に把握することが不可欠である。

このような状況から、未固結地山に土被りの浅いトンネルを掘削するときの地山挙動の解明を目的として、これまで多くのモデル実験が行われてきた。そのなかに村山ら^{1),2)}によって開発された、地山をアルミ棒積層体でモデル化する実験方法がある。

村山ら^{1),2)}は、このアルミ棒積層体を用いて降下床による実験を行い、地山の変形挙動について Fig.1 に示すような変形領域の区分を提案した。その後、足立ら^{3),4)}は降下床実験では解明できなかったトンネルの下部半断面の掘削による影響を明らかにすること、および降下床の左右端における変位の特異点の発生を解消することを目的として、直径可変装置を開発し実験を行った。一方、地山材料として鉛粒を用い、ロックボルトの作用効果の解明を目的とした今田らのモデル実験⁵⁾、および地山材料に砂を用いた直径可変装置による近久らのモデル実験⁶⁾などもある。

いずれにしても、これらはトンネル掘削問題を掘削面

に一定の変位を与えるいわゆる変位境界の問題として取り扱っている。しかし、実際のトンネル掘削における掘削面の境界条件は必ずしも変位境界ではなく、一定応力を与える応力境界に近い場合も考えられよう。すなわち、トンネル掘削面の境界条件は変位境界と応力境界の中間的なものであると考えられる。

そこで本研究では、掘削面に一定応力を与える応力境界の条件によってトンネル掘削問題をシミュレートすることを試み、そのための実験装置を開発した。そして、その装置を用いて実験を行い、その結果を変位境界の結果と比較することにより、それらの相違点を明らかにした。

ここでは、トンネルの掘削はその部分の地山が取り除かれることにより、掘削前に掘削面に作用していた応力が、減少することであると考える。掘削面の応力を上載圧から徐々に減少させ、トンネルの掘削をシミュレートする方法を試みた。なおこの方法は、有限要素法や境界要素法などの解析において、トンネルの掘削をシミュレートするとき掘削面に掘削相当外力を作用させるのと同じ考え方によるものである。

2. 実験装置の概要と実験方法

ここで開発した実験装置は、Fig.2 および Photo 1 に示すものである。この実験装置では、アルミ棒積層体をモデルの側面にあるアクリル板 (1 cm 厚)、および鉄板 (3 mm 厚) と接触しないよう、それぞれから約 1 mm 離して設置した。このアルミ棒積層体内にトンネル部分 (掘削領域) を設定し、その部分にエアバッグを設けた。このエアバッグにはホースを連結し、そのホースは途中、弁を介して水圧～空気圧置換槽 (口を 2 つ設けた容器で下側の口は水槽に、上側の口をエアバッグにそれぞれホースで連結しているもの)、さらには水槽 (昇降可能) へとつながっている。したがって、水槽を昇降させることによってエアバッグ内の空気圧を変化

* 正会員 Ph.D 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657 神戸市灘区六甲台町 1-1)

** 学生会員 修 (工) 神戸大学大学院生 自然科学研究科 (博士課程)

*** 学生会員 神戸大学大学院生 工学研究科 (修士課程)

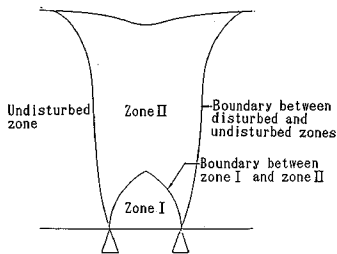


Fig.1 Various zones being developed in sandy materials²⁾

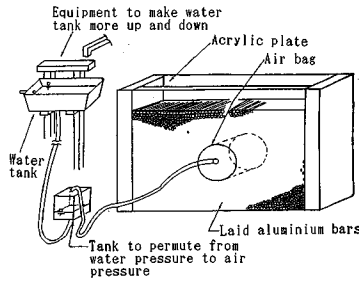


Fig.2 Devices developed in the model test to simulate tunnel excavations

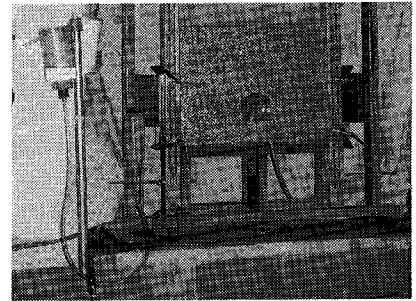
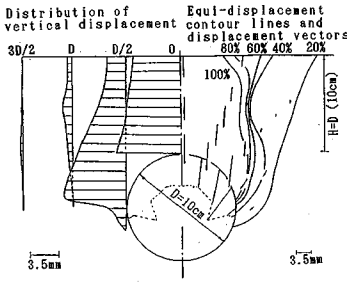
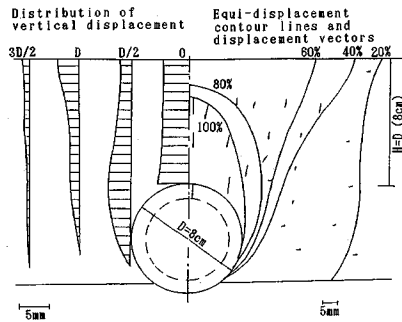


Photo 1 Overall view of the model tests



(a) Constant pressure being applied on the tunnel surface



(b) Constant displacements allowed on the tunnel surface (after Adachi et al.)

Fig.3 Experimental results of vertical displacement distributions, equi-displacement contour lines and displacement vectors (Overburden $H=1D$)

させることができる。このとき、水槽の水位は一定になるように常に給水した。

なお、トンネルの作成は次の手順にしたがった。まずアルミ棒を積み上げる前に、トンネル部分に鉄板で作った型を仮設し、その外側にアルミ棒を積み上げた。その後、トンネル部分にエアバッグを設けてそれを膨らませ、アルミ棒積層体が移動しないよう注意しながら型を外した。なお、このときのエアバッグ内の空気圧はトンネル天端における上載圧 (23 g/cm^2 , $\gamma H=2.3 \text{ (g/cm}^2) \times 10 \text{ (cm)}$) と等しくした。このとき、厳密に言えば、トンネルの底盤付近では、エアバッグからの圧力が初期応力よりも小さくなっているが、アルミ棒間の摩擦力のため、積層体が崩壊することはない。

この状態で、アルミ棒の積層体に約 1 cm 間隔の標点

を記し、その後水槽を順次降下させることにより、エアバッグ内の圧力を低下させて掘削をシミュレートした。なお、掘削前と掘削後に標点の位置をトレーシングペーパーに写し取り、それらの位置をデジタイザーを用いて読み取り、積層体の各点の変位を求めた。

3. 変形挙動について

Fig.3 (a) に土被りが $1D$ (D : トンネル直径) のときの本実験における変位分布を、(b) の足立らの実験と対比して示す。本実験では直径 10 cm のトンネルが、天端沈下約 10 mm になったときの変位分布であり、足立らの実験では、直径 8 cm のトンネルが 10 mm 縮小したときのものである。(a) は足立らの実験⁹⁾ にならい、図の右半分に地山の各点における変位ベクトルおよび等変位線を、図の左半分に鉛直方向変位の分布を示している。ここで、(a) については変形前のトンネルの半径と変形後のトンネルの半径 (変形後のトンネルは真円ではないので面積が等しくなるような円として考える) の差を基準変位量 (Fig.3 のケースでは 3.5 mm) とし、これが (b) と同じ長さになるように補正して、変位ベクトルおよび鉛直方向変位の分布を示してある。また、(a)、(b) それぞれについて、図の右半分の等変位線は、基準変位量を 100% として、100, 80, 60, 40, 20% の変位量に対するものである。

本実験では、トンネルの下半部の壁面における変位がほとんどなく、壁面の変位は上半部に限られていることがわかる。また、トンネル上半部の壁面の変位はほぼ一様である。一方、変位境界によって掘削をシミュレートした足立らの実験では、トンネル壁面における変位は境界条件として与えるため全周にわたって一定変位である。本実験と足立らの実験では、トンネル下半部における変位が重要な差異になっている。

等変位線については、本実験では基準変位量の 100, 80, 60, 40% に相当する等変位線が極めて近接していることがわかる。これより、これらの等変位線が密になっているところで変位の不連続面が生じているものと考えられる。一方、足立らの実験ではいずれの等変位線の間

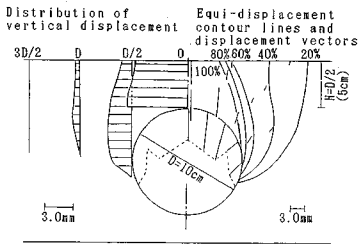


Fig. 4 Vertical displacement distributions, equi-displacement contour lines and displacement vectors (Overburden $H = 0.5 D$)

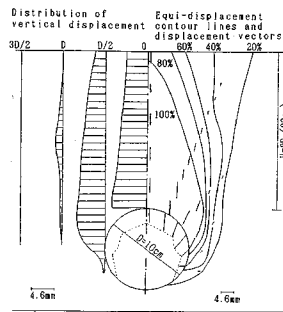


Fig. 5 Vertical displacement distributions, equi-displacement contour lines and displacement vectors (Overburden $H = 2 D$)

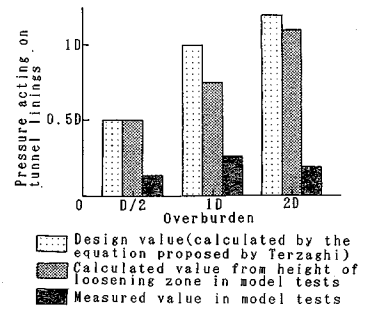


Fig. 6 Pressure due to loosening zone

にもかなりの隔りがあることから、変位の不連続面は現れていないと理解できる。また、20%等変位線は本実験では変位が0.7mmに、また足立らの実験では1mmに対応し、変位検出の限界に近いので、20%等変位線をもって変形領域の境界と考えることができる。このとき、変形領域が本実験では足立らの実験に比べて、かなり狭くなっていることがわかる。

また、変位ベクトルの方向は、本実験において等変位線が集中して分布している箇所の内側の領域、および足立らの60%の等変位線の内側の領域においては互いにほぼ等しい。

つぎに、鉛直方向変位の分布についてみると、本実験ではトンネル中心およびトンネル中心から $D/2$ 離れた鉛直線上の分布が、その他の分布（トンネル中心から D および $3D/2$ 離れた鉛直線上の分布）と比較して極めて大きい。足立らの実験においても、トンネル中心に近い鉛直線上において鉛直方向変位が大きな値になっているが、トンネル付近に変位の集中する程度は本実験の方が極めて大きい。すなわち、鉛直方向変位の分布からも、本実験では足立らの実験に比べてトンネル周辺に変位が集中していることがわかる。

応力境界による本実験においては、トンネル壁面における変位が上半部のみにはかき生じないため、全体の挙動としては落し戸実験に近く、また、トンネル直上の地山の变形挙動は直径可変装置による実験と近いといえる。

つぎに、土被りの影響について検討するため、Fig. 4 および Fig. 5 に、土被りが $D/2$ と $2D$ のときの变形挙動をそれぞれ Fig. 3 と同じ要領で示す。これらの図から土被りが $D/2$ および D のときは、トンネル壁面での变形はほぼトンネル上半部に限られているが、土被りが $2D$ の場合は、トンネルのかなり下部の壁面まで変位の発生していることがわかる。また、いずれのケースにおいても等変位線の集中が見られ、その付近に変位の不連続面が発生していることが推察される。また、20%の等変位線の広がりについてみると、土被りの浅いケース

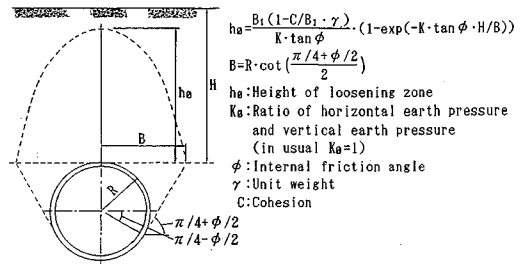


Fig. 7 Design value of earth pressure acting on tunnel linings⁷⁾

ほど、变形する領域が水平方向に広がっていることがわかる。これより、土被りの深いケースの方が、变形がトンネル周辺に集中する傾向にあるといえる。なお、これは変位境界による足立らの実験と同じ結果となっている。

4. 緩み荷重について

本実験装置は、トンネル壁面に圧力を与えるため、地山を安定させるのに必要なトンネル内圧を求めることができる。地山が变形を開始したときの内圧は、地山を支持するために最低限必要な支保圧力と考えられる。すなわち、それは地山の緩み荷重に相当する。そこでモデル実験において、その緩み荷重を計測し、その値について検討した。実験において計測された緩み荷重を Fig. 6 にそれと同じ荷重を与える土被り高さに換算して示す。なお、実験はそれぞれのケースについて、5回ずつ行っており、その再現性は良好であった。図中には、トンネル標準示方書に示されているシールドトンネルに対する設計計算用土圧（テルツァギーの式を利用して求めた緩み荷重⁷⁾）、および本実験において、変位から緩み領域を推定し、その高さから換算した緩み荷重を併せて示している。このとき、前者は土被りが $1D$ までは全土被り圧であり、土被りが $1D$ を超えるときは Fig. 7 に示す式から求められるテルツァギーの緩み土圧である。なお、この式において必要なアルミ樺積層体の C および ϕ は $C=0$ 、 $\phi=30^\circ$ とした¹⁾。また、本実験における緩み領域は、Fig. 3, 4, 5 の 100% の等変位線の内側とした。

Fig.6から明らかなように、テルツァギーの緩み高さから換算した荷重は、本実験で推定した変形領域の高さから換算して求めた値とほぼ等しい。

一方、本実験においてトンネル内圧（エアバッグの圧力）は、緩み高さから求めた値と比較して土被りが $D/2$ と $1D$ のときは $1/3$ 程度、 $2D$ のときは $1/6$ 程度にしか過ぎない。この事実は、緩み高さと緩み荷重は異なるものであることを示している。すなわち、緩み領域と推定されるところにおいても、グラウンドアーチが形成されていると考えられる。また、緩み高さは土被りが大きくなるほど大きくなっているが、緩み荷重は、土被り $1D$ のケースが、土被り $D/2$ および $2D$ のケースに比べて大きく、今回行った実験では $1D$ のケースが極値になっていることがわかる。このことより、土被りが小さいトンネルと大きいトンネルとでは（ここではその境界は $1D\sim 2D$ と考えられる）トンネルの緩み荷重のメカニズムが異なると考えられる。

5. ま と め

本研究によって得られた結果をまとめると次のとおりである。

1) 応力境界によってトンネル掘削をシミュレートした本実験の結果と、変位境界に対する足立らの実験結果との差異について、以下のことが分かった。

- ①応力境界により掘削をシミュレートする本実験では、トンネルの下半部において変形がほとんど生じない。
- ②本実験では、アルミ棒積層体内部に発生する変位の不連続面が明瞭にわかる。これは、村山らの落し戸実験における挙動と共通する。
- ③本実験においては、変位境界による実験に比べてトンネル周辺に変位が集中する。

2) 土被りの違いによる変位挙動の差異について以下のことが分かった。

- ①土被りの大きい場合ほどトンネル下方に変位が発生

する。

- ②土被りの大きい場合は、トンネル周辺に変位が集中する程度が大きい。

3) 緩み荷重について以下のことが分かった。

- ①テルツァギーの緩み高さ、本実験において観察される緩み領域の高さと、ほぼ等しい。
- ②本実験で得られた緩み荷重は、緩み高さから換算して求めた荷重と比べて、土被りが $D/2$ 、および $1D$ のときで $1/3$ 程度、 $2D$ のときは $1/6$ 程度であり、緩み高さと緩み荷重は異なることが分かった。
- ③緩み高さは土被りの増加に伴い順増するが、緩み荷重はある土被りに対して極大となる。

謝辞 本研究に対しては、神戸市開発局の援助を受けていることを付記し、関係各位に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 村山朗郎・松岡元：粒状土地盤の局部沈下減少について、土木学会論文報告集，第172号，pp.31～41，1969年。
- 2) 村山朗郎・松岡元：砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第187号，pp.95～108，1971年。
- 3) 足立紀尚・田村武・八嶋厚：薄肉柔支保構造（吹き付けコンクリート，ロックボルト）の支保機構に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第358号，pp.47～52，1985年。
- 4) 足立紀尚・田村武・八嶋厚・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，第358号，pp.129～136，1985年。
- 5) 今田徹：粒状体地山におけるロックボルトの軸力：土木学会第38回年次学術講演会概要集，第Ⅲ部，pp.125～126，1983年。
- 6) 近久博志・荒井幸夫・筒井雅行・櫻井春輔：トンネル掘削時の挙動に関する模型実験と評価法，土木学会第47回年次学術講演会概要集，第Ⅲ部，pp.678～679，1992年。
- 7) 土木学会トンネル工学委員会：トンネル標準示方書（シールド編）同解説，土木学会，pp.34～36，1977年。
(1993.6.7受付)

MODEL TESTS ON DEFORMATION AND LOOSENING PRESSURE OF SHALLOW TUNNEL

Shunsuke SAKURAI, Ikuo KAWASHIMA, Yasunori KAWABATA and Akio SARAGAI

When excavating shallow tunnels in ground consisting of granular materials like sands, both surface subsidence, due to loosening of the ground, and earth pressure acting on a tunnel lining, become serious problems. In order to solve these problems, model tests have been conducted in the laboratory by using a group of aluminum bars, in which a circular hole is made as a model of a tunnel. In the tests, a new piece of equipment has been developed, which can apply air pressure on the internal surface of the hole. The air pressure is then gradually reduced from a certain level to represent an excavation operation of tunnels. Thus, it enables to us to determine the minimum pressure necessary to stabilize the hole. The experimental results discussed in comparison with those obtained by a conventional method, applying constant displacement all over the internal surface of a tunnel.