

円形トンネル掘削時の力学挙動のモデル実験

名古屋工業大学 学生会員 中原 枝里子 田畑 佑介 永田 政司

正会員 中井 照夫 張 鋒 H.M Shahin 菊本 統

1. はじめに 本研究室では、都市部におけるトンネル掘削が周辺地盤や近接構造物に及ぼす影響を、降下床を用いたモデル実験と数値解析により検討してきた。本研究では、これまでに行ってきた 2 次元降下床実験を発展させ、より実際に近い円形トンネルモデル実験機を試作し円形トンネル収縮実験を行うことで、トンネル上部だけでなく側方部の地盤挙動など、より詳細な地盤の挙動を把握する。本報告ではまず、Green field(周辺に構造物なし)についてトンネル円周の変位の与え方を変え、2 パターンの実験を行ったのでその結果を報告する。なお、円形トンネルモデル実験機は、Adachi et al.¹⁾の装置を参考にして試作した。

2. 円形トンネルモデル実験の概要 Fig.1 に 2 次元モデル実験機の概略図を示す。モデル地盤は幅 80cm で、地盤材料には、直径 1.6mm と 3.0mm のアルミ棒を重量比 3 : 2 で混合したものをを用いる。中央に設置されたトンネルはロードセルを備えた幅 2.35cm、奥行き 5cm のブロックが 12 個円形に配置されている。そのため、トンネル円周上の 12 箇所土圧の計測が可能である。直径は初期 10cm、縮小時 9.2cm である。Fig.2 に円形トンネルの横から見た概略図を示す。下方のハンドルを手動で回転させることでトンネルの収縮を、上方のハンドルを回転させることでトンネル本体の上下移動を行うことができる。

Fig.3 にトンネルの収縮機構を示す。Fig.3 に示すように、トンネルの中心には径が滑らかに変化している軸が設置されており、その軸の周りにはロードセルを設置したブロックが 12 個輪ゴムで固定されている。その軸を引き抜くことによる軸径の変化に従ってトンネルの径も変化する機構になっている。また、中心軸の形状を変更することで異なる掘削過程も再現可能となる。収縮量は、軸が引き抜かれた量をダイヤルゲージで計測し引き抜き量と軸径の関係から換算する。トンネル本体の上下の変位量はトンネル部分と連結している部分の変位量をダイヤルゲージで計測する。実験手順は以下の通りである。まず、トンネルを境界の影響を受けない実験機底面より約 10cm の高さに設置し、アルミ棒を所定の高さまで積む。その際、トンネル下の地盤は緩んだ状態となっているので、Fig.1 に示すハンドルでモデル地盤底面の全ブロックを上昇させ、初期の土圧分布が静止土圧分布になるように調節し初期地盤を作成する。次に、トンネルを収縮させることで地盤の緩みを表現し、土圧と地表面沈下を計測する。地表面沈下はレーザー変位計で計測する。トンネルの変位の与え方は、従来行ってきた降下床実験に対応させ、トンネル天端で 4mm の変位を与えるために、半径方向に 4mm 収縮させるものと(中心固定実験と呼ぶ)、4mm 収縮させながら、トンネル自体を 4mm 降下させ、トンネル下端は固定のままトンネル天端で 8mm の変位を与えるもの(下端固定実験と呼ぶ)の 2 パターンである。Fig.4 にこの 2 パターンの実験についてトンネルの変位の概念図を示す。ちなみに、この 2 つの実験のトンネルの収縮前と収縮後の面積の変化量は同一である。使用したパラメータは土被りを D (地表面からトンネル天端までの深さ)、トンネル幅を B (トンネル直径)、トンネル半径の収縮量を d_r 、トンネル中心軸の降下量を d_c とし、 $D/B=1.0$ の場合について検討する。

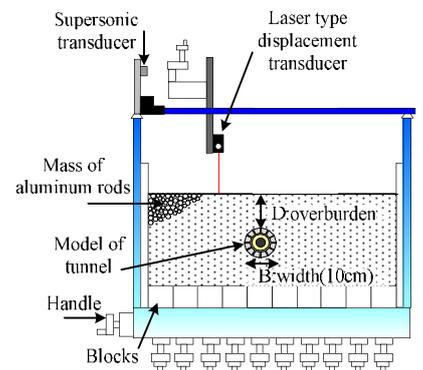


Fig. 1 2次元モデル実験機概要

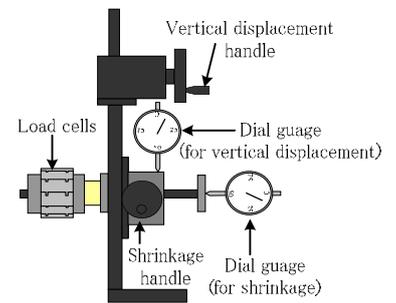


Fig.2 円形トンネル概要

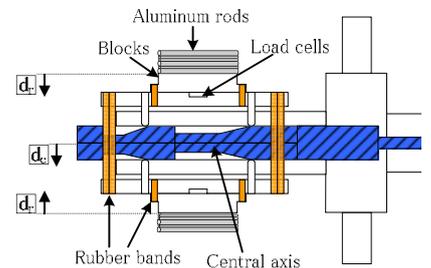
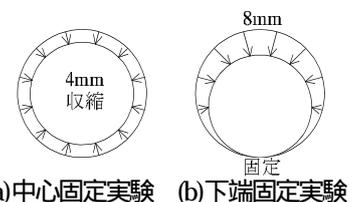


Fig. 3 収縮機構

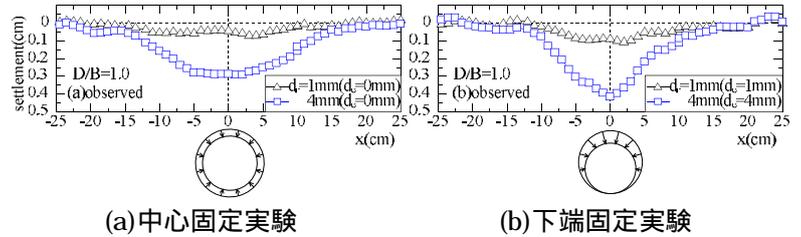


(a)中心固定実験 (b)下端固定実験

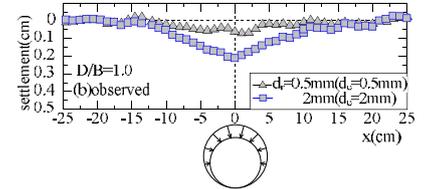
Fig.4 収縮方法概念図

キーワード：トンネル、掘削、モデル実験

3. 実験結果および考察 Fig.5(a),(b)に収縮量 $d_r=1\text{mm}$, 4mm のときの地表面沈下形状を示す。グラフは横軸にトンネル中心からの距離、縦軸に沈下量をとっている。Fig.5 より、トンネルを収縮させたことによる断面積の変化量は同じでも収縮の仕方によって沈下量・沈下形状が異なることが分かる。また、Fig.6 に下端固定実験における収縮量 $d_r=0.5\text{mm}$ (中心軸降下量 $d_c=0.5\text{mm}$)、 2mm ($d_c=2\text{mm}$)のときの地表面沈下形状を示す。Fig.5(a)と Fig.6 の天端の降下量は対応しており、三角プロットで 1mm 、四角プロットで 4mm 降下している。Fig.5(a)、Fig.6 を比較すると、トンネル天端での変位は同量であるのに、下端固定の場合の方が最大沈下量がやや小さくなった。また、中心固定実験の方が影響範囲が大きくなる。

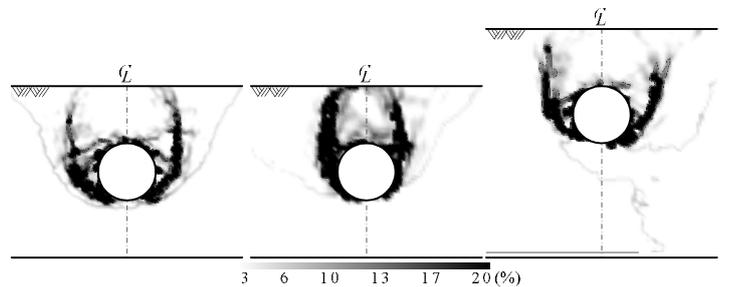


(a)中心固定実験 (b)下端固定実験
Fig.5 1mm、4mm 収縮後地表面沈下形状



(b)下端固定実験
Fig.6 天端 4mm 降下時

Fig.7(a),(b),(c)に 4mm 収縮後のせん断ひずみ分布を示す。ここで、Fig.7(c)は Fig.7(a)と同じ変位量一定条件下でトンネルの下端とモデル地盤との距離を 20cm とし、中心固定実験を行ったときのせん断ひずみ分布である。Fig.7(a)と Fig.7(c)を比較すると、トンネル下の深さが 10cm のときも 20cm のときも同様であり、境界の影響を受けないためにはトンネル下の深さは 10cm あれば十分であることが分かる。



(a)中心固定 (b)下端固定 (c)トンネル下の深さ 20cm
Fig.7 せん断ひずみ分布

Fig.7 より、せん断ひずみはトンネルの底部から曲線を描くようにして発生している。本実験では土被りが小さいため、そのせん断ひずみは地表面まで達している。また、中心固定実験の方が下端固定実験より影響範囲が大きい。

Fig.8 に中心固定実験の土圧分布を示す。グラフはトンネル円周の 12 点に作用する土圧を円形にプロットしたもので、各軸の原点からの距離が各ロードセルの土圧の大きさを示している。 $d_r=0.00\text{mm}$, 0.05mm , 1.00mm , 4.00mm のときの土圧を示す。また、Fig.9 にトンネルの上部 6 点の土圧の履歴を示す。横軸に収縮量、縦軸に土圧を示す。Fig.8 よりトンネル下部では、収縮させると土圧は減少し、 1mm 収縮時には一定値に落ち着く。底部では収縮させることによりトンネルが地盤から離れるため土圧はほぼ 0 となる。しかし、Fig.9 よりトンネルの天端の土圧は一度小さくなってからまた大きくなる傾向が見られる。これは、トンネル収縮に伴って緩み領域が拡大しているためだと思われるが、このような現象は降下床実験では観測することのできなかつた現象である。下端固定実験での土圧の計測に関しては、手動では収縮と上下移動のタイミングに左右されるため、今後、収縮及び上下変位をモーター制御で行い検討する。

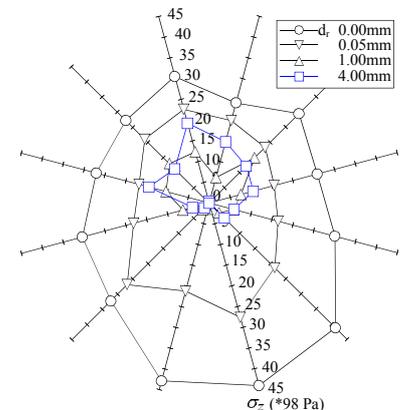


Fig.8 土圧分布(中心固定実験)

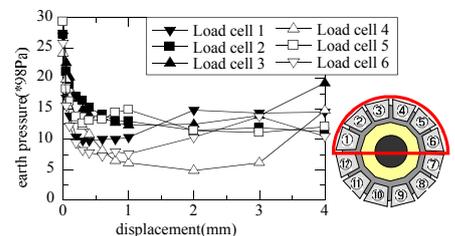


Fig.9 トンネル上部土圧履歴

4. おわりに 円形トンネル模型の使用により降下床実験では把握することのできない地盤の挙動をみる事ができた。また、トンネル円周での変位の与え方の違いにより地盤への影響が異なることもわかった。今後は、土被りの違いや近接構造物の有無による影響などを、実験と解析の両面から検討していきたい。

参考文献 1)Adachi,T.,Kimura,M.,Osada,H.(1993):Interaction Between Multi-Tunnels Under Construction, Proc.11th SEAGC, 51-60. 2) Shahin, H. M. et al. (2004): Influence of surface loads and construction sequence on ground response due to tunneling, *Soils and Foundation*, 44(2), 71-84.