実際の内空変位と周面土圧を考慮できるトンネル掘削モデル実験

名古屋工業大学　学生会員　○岩田敏和　石井健嗣　鬼頭達矢
名古屋工業大学　国際会員　H.M.Shahin　菊本統　中井照夫

1. はじめに

従来，トンネル周辺地山の力学挙動に関する実験的検討は，落し戸[1)]の下降や円形・馬蹄形装置[2),3)]の収縮により掘削を模擬する変位制御型の実験とエアーバッグの減圧により応力解放を模擬する応力制御型の実験[4)]が主流であった。しかし、前者は内空変位を予め仮定する点で、後者はトンネル周面に常に均一な土圧が作用する点で実際のトンネル掘削を必ずしも正確に模擬していなかった。本研究では、収縮量を制御する円形トンネル模型[3)]を改良し、トンネル径の収縮量と鉛直・水平方向の作用土圧の釣り合いを同時に満たすトンネル掘削模型装置を開発した。本稿では、その実験結果を従来の実験結果と比較し、有効性を検証する。

2. 模型実験の概要

既往の装置[2)]を改良した新型の円形トンネル収縮装置の概要を図 1 に示す。新型はトンネル掘削部が軸受けベアリングと水平スライダーによって上下・左右に摩擦なく移動できる機構になっており、掘削部全体の自重は定滑車を介してカウンターウエイトと平衡している。これによりトンネル径の収縮量を制御しつつ、鉛直・水平土圧の釣り合いに任せてトンネルが追随できる。図 2 に 2 次元の模型試験機の概要を示す。試験機の幅 1200mm、トンネル模型の直径 100mm、模型地盤は実現場の 1/100 スケールを想定し、直径 1.6mm と 3.0mm のアルミ棒を重量比 3:2 で混合した積層体を用いた。模型地盤はトンネル模型を設置した後、所定の地盤高さまでアルミ棒を積み上げて作成し、試験機下部のハンドルでアルミブロックを上昇させることでトンネル円周部に作用する荷重が静止土圧分布と一致するように調整した。

実験では、トンネル収縮量を制御しながら所定の収縮量でトンネル周面の土圧と地表面沈下形状、トンネル全体の鉛直・水平変位量を計測した。また、地盤側面のデジタル写真を撮影して地盤内のひずみ分布(PIV 法)を算出した。図 3 にトンネル模型の収縮方法の概要図を示す。トンネル中心方向への収縮量と中心部の変位量をそれぞれ dr ,dc とした。

実験は従来型の試験機で予め設定した内空変位を与える(a)中心固定掘削、(b)下端固定掘削と、新型を用いた(c)変位・応力混合制御型掘削の計 3 パターンを土被り D=2.0B で実施した(以後、各掘削方法をそれぞれ(a),(b),(c)と記す)。なお、各パターンにおけるトンネル収縮が等しいのでボリュームロスも等しい。

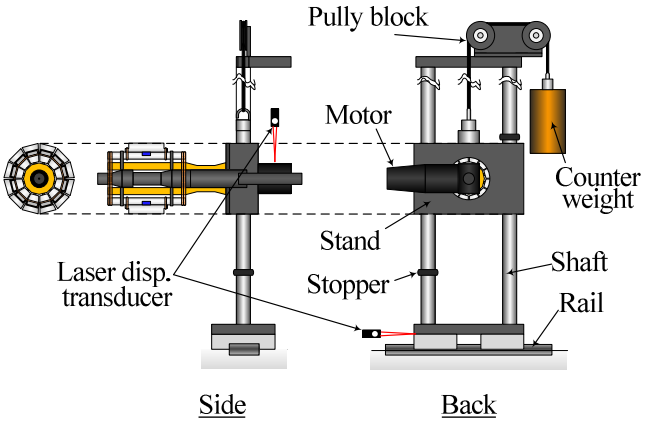

図 1 円形トンネル収縮装置の概要図

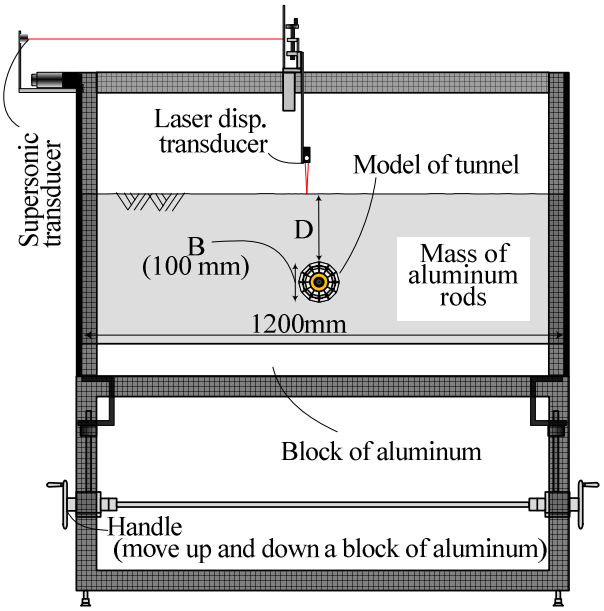

図 2　2 次元模型試験機の概要図

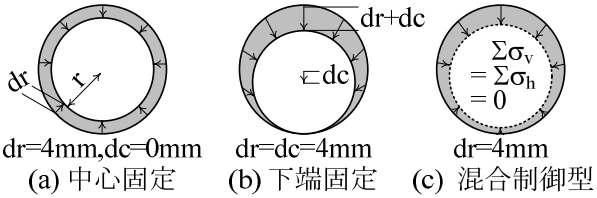

図 3　収縮方法の概要図

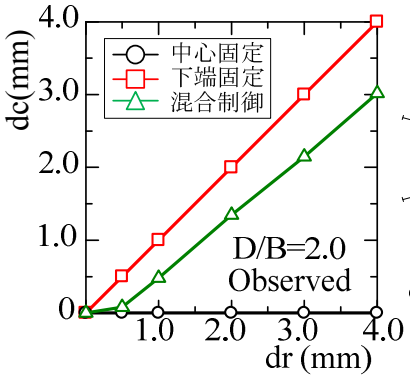

図 4　dr - dc 関係

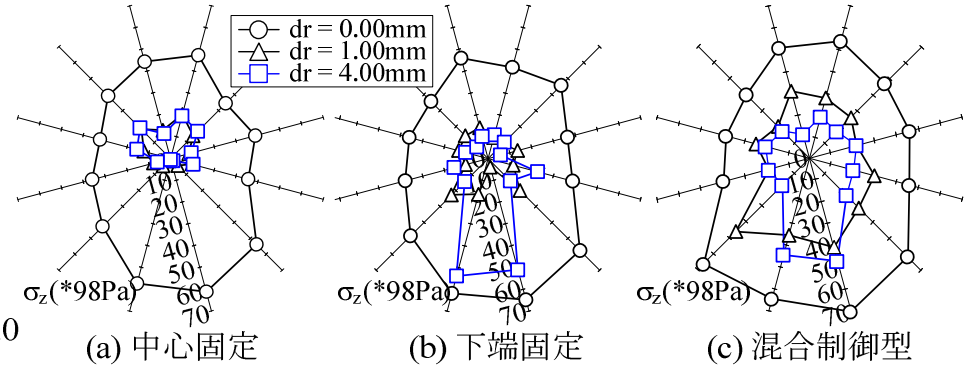

図 5　トンネル周面の土圧分布

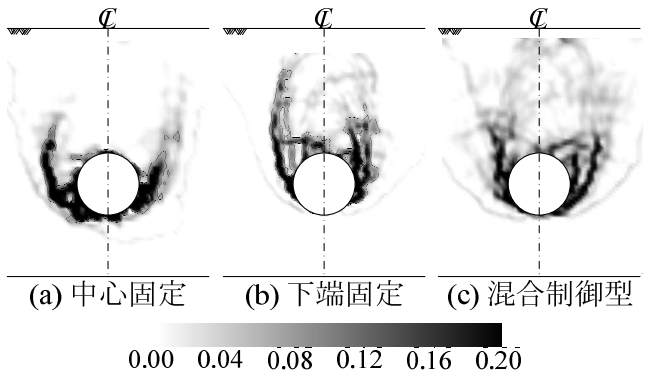

図 6　せん断ひずみ分布

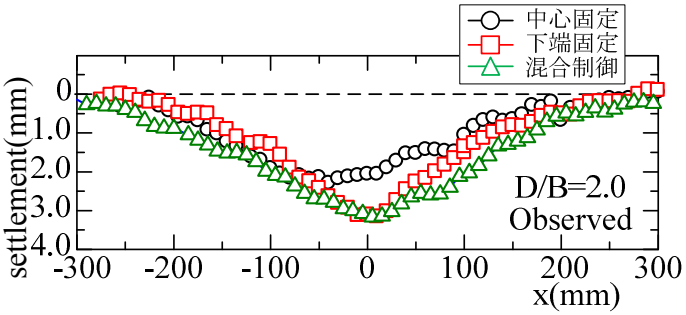

図 7　地表面沈下形状

3. 実験結果と考察

図 4 にトンネル径の収縮量 dr と中心の変位量 dc の関係を示す。同図より変位・応力混合制御型の(c)は、インバート固定の(b)に近い挙動を示すことが確認できる。図 5 にトンネル周面の土圧分布を示す。図より、新型装置を用いた(c)の収縮終了時における土圧分布は(b)に似るものの、変位制御型の従来の実験結果に比べて周面土圧の偏りは小さいことがわかる。図 6 は収縮量 dr=4.0mm での地盤内のせん断ひずみ分布であり、色の濃淡がせん断ひずみの大小を表現している。図より、混合制御型の(c)はインバート付近からせん断変形を生じる点で(a)に似ているが、せん断帯が地表面近くまで達する点は(b)に類似している。このように、実際のトンネル掘削に近い状況を再現した(c)は、トンネル周辺の土圧特性や変形分布が必ずしも中心固定や下端固定に一致するのではなく、地山物性や土被りに応じてその中間的な応答を呈するものと予想される。図 7 に地表面の沈下形状を示す。同図から、(a)の場合の沈下量が最も少ない。これは、トンネル収縮模型の中心部を固定したことが原因と考えられる。(b),(c)の最大沈下量はほぼ等しい値になったが、地盤全体の沈下量は(c)の方が大きい。これは、図 6 の(c)でのせん断ひずみの領域が(a),(b)と比べて地盤内に広く発達しており、地表面への影響範囲が広がったことが原因と考えられる。

4. おわりに

鉛直・水平土圧を平衡させつつトンネル収縮量を制御できる新しい変位・応力ハイブリッド制御型トンネル掘削試験機を開発して、より現実に近いトンネル掘削を模擬した実験を実施し、従来の結果と比較した。新型装置を用いた実験ではインバート固定条件の変位制御型実験に似た結果が得られたが、偏土圧が緩和されるなど従来型に比べて実問題に近い現象を再現できることが示された。

参考文献 1) 村山: 砂層内局部沈下部にかかる垂直土圧, *DPRI Annuals.*, 11(B), 549-565. 2) Adachi et al. 1993. Interaction between Multi-Tunnels under Construction, *Proc. 11th Southeast Asian Geotech. Conf.*, 51-60, 1993. 3) 菊本ら: トンネル掘削の近接群杭構造物への影響, 第 54 回地盤工学シンポジウム論文集, 355-362, 2009. 4) 櫻井ら: 土被りの浅いトンネルの力学的挙動に関するモデル, 土木学会論文集 487/III-26, 271-274, 1994.