

直接基礎構造物への影響を考えた新しいトンネル掘削実験とその解析

名古屋工業大学
名古屋工業大学

学生会員 ○岩田敏和 黒井翔
国際会員 中井照夫 H.M.Shahin

1. はじめに

既設構造物に近接して新たにトンネルを掘削する場合、トンネルに作用する土圧や周辺地盤の変形だけでなく、近接構造物への影響も適切に評価する必要がある。これまでも降下床および円形収縮装置を用いたトンネル掘削モデル実験と弾塑性有限要素解析を実施し、これらの問題に関して検討を加えてきた^{1), 2)}。今回は、改良したトンネル掘削モデル試験装置を用いて、より実際に近いトンネル掘削をシミュレートするとともに、対応する弾塑性有限要素解析を行い、トンネル掘削が近接構造物に及ぼす影響を実験・解析の両面から明らかにする。

2. 模型実験と数値解析の概要

トンネル中心もしくはインバートの絶対変位を固定した上で内空変位与える従来の円形収縮装置²⁾をトンネル自体が上下左右に自由に動ける機構に改良した装置³⁾を用いて、構造物基礎に近接したトンネル掘削の2次元モデル実験を行った。この改良により、トンネルは周辺地盤と釣合いを保ちながらそれ自体が地盤とともに鉛直・水平方向に移動できる。図1に2次元模型試験機全体の概要を示す。モデル地盤の幅800mm、トンネル模型の直径100mmとし、模型地盤としては現場の約1/100のスケールを想定し、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地盤材料として用いた。数値解析は地盤材料の弾塑性モデルに基づく非線形の有限要素解析プログラム FEMtij-2D を用いた。要素分割の一例を図2に示す。地盤材料の応力-ひずみ関係は、等方硬化型の弾塑性構成モデル subloading t_{ij} model⁴⁾で記述した。表1にアルミ棒積層体の構成パラメータを示す。初期の応力状態は、模型地盤と同じ間隙比になるように拘束圧 $p = 9.8 \times 10^{-6}$ kPa での間隙比を $e = 0.328$ として、地盤を自重圧密させて計算した。自重圧密後の地盤の静止土圧係数 K_0 は 0.70~0.74 の範囲にあり、模型地盤のそれ ($K_0 \approx 0.70$) と良い対応をしている。今回は、トンネル直径 B に対する土被り $D=1.0B$ の条件下で、中心固定、インバート固定、混合境界（地盤内で変位を許す）の3パターンの掘削を実施した。

3. 実験結果と考察

中心固定およびインバート固定で変位境界を与えた実験と混合境界の実験について、トンネルの収縮量 $dr = 4.0$ mm での地盤内の偏差ひずみ分布と内空変位のモードを図3に示す。偏差ひずみの大小を色の濃淡で表現している。すべての掘削モードにおいて、基礎側の地盤ではせん断帯が地表面近くまで到達しており、構造物に影響が及ぶことがわかる。なお、混合境界ではイ

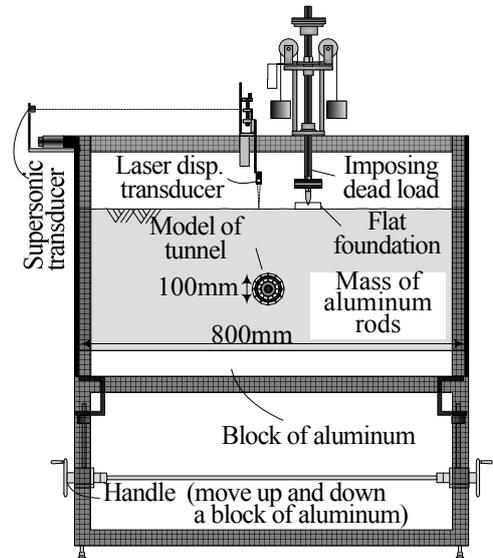


図1 2次元模型試験機

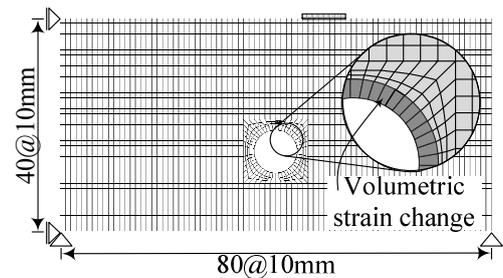


図2 要素分割の一例

表1 アルミ棒積層体の構成パラメータ

λ	0.008	compression index	
κ	0.004	swelling index	
e_{NC}	0.3	reference void ratio on normally consolidation line at $p=98$ kPa & $q=0$ kPa	Same parameters as Cam clay model
R_{cs}	1.8	critical state stress ratio $R_{cs} = (\sigma_1/\sigma_3)_{cs(comp)}$	
ν_e	0.2	Poisson's ratio	
β	1.2	shape of yield surface (same as original Cam clay at $\beta=1$)	
a	1300	influence of confining pressure	

ンバート付近からせん断変形を生じる点では中心固定に似ているが、全体的には直接基礎の両端部に至るせん断帯が形成されるという点を含めてインバート固定に類似している。図4に地表面の沈下形状を示す。いずれの場合もトンネル中心線に対して左右非対称な沈下が生じ、沈下量は構造物直下で最大となる。また、混合境界の実測値の回転量が小さい点を省き、実験と解析は定量的にも良い対応を示している。図5にトンネル周面の土圧分布を示す。図より、基礎に死荷重を載荷する前は当然のこととして左右対称の土圧分布となり、死荷重載荷によって基礎側の右肩部の作用土圧が増加するが、死荷重載荷時にもトンネル（掘削前の地盤）の動きを許す混合境界の場合左下部の土圧も増加する。トンネル掘削後の土圧分布をみると、土圧の大きさや分布形状は仮定する内空変位モードによって大きく異なる。変位境界の実験では、トンネル掘削後に土圧が減少するものの、基礎側であるトンネルの右肩部にかかる土圧は増加に転じる。一方で、混合境界の実験では、トンネル掘削に伴い、むしろ基礎と反対側の左下部の土圧の増加が顕著となる。トンネルの中心の変位量を図6に示す。より現実に近い混合境界では、トンネルは鉛直方向に沈下するだけでなく構造物と反対側に変位することが判る。

4. おわりに

トンネル自体の変位も許す混合境界型トンネル掘削モデル試験機を用いて直接基礎に近接したトンネル掘削実験を実施した。混合境界の実験では、トンネル掘削に伴う地盤内の偏差ひずみ分布や地表面沈下は従来の変位固定の場合と同様周辺構造物の影響を大きく受け、中心固定とインバート固定の中間的な挙動を呈することがわかった。しかし、トンネル周面土圧は変位固定の場合と異なり、特に基礎とトンネルを結ぶ方向の基礎と反対側で増加する。地盤材料の応力ひずみ関係を適切に記述できる構成モデルを用いた数値解析は、過去に実施した変位境界の実験結果を含めて実際の現象を精度よく捉えることが示された。

参考文献 1) Shahin, H. M., Nakai, T., Hinokio, M., Kurimoto, T. and Sada, T.: Influence of surface loads and construction sequence on ground response due to tunneling, *S&F*, **44**(2), 71-84, 2004. 2) Shahin, H. M., Nakai, T., Zhang, F., Kikumoto, M. and Nakahara, E.: Behavior of ground and response of existing foundation due to tunneling, *S&F*, **51**(3), 395-409, 2011.3) 菊本統, 中井照夫, ホサインシャヒン, 石井健嗣, 岩田敏和: 実際の内空変位と周面土圧分布を考慮した単設トンネル掘削モデル実験とその解析, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学) 特集号, 57-65, 2011. 4) Nakai, T. and Hinokio, M.: A Simple Elastoplastic Model for normally and over consolidated soil with unified material parameters, *S&F*, **44**(2), 53-70, 2004.

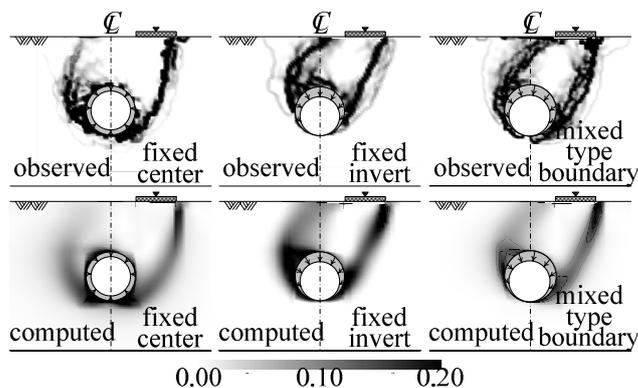


図3 偏差ひずみ分布と内空変位モード

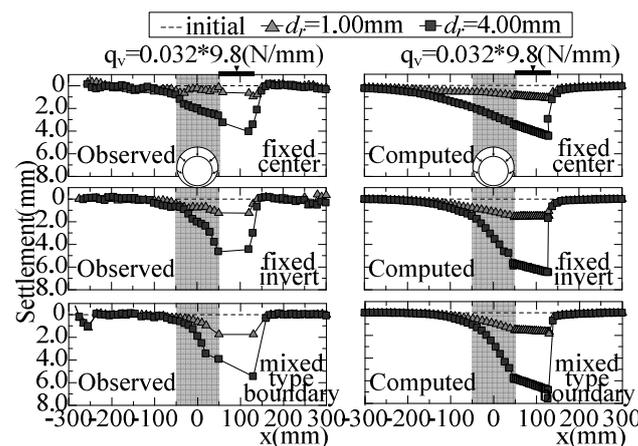


図4 地表面の沈下形状

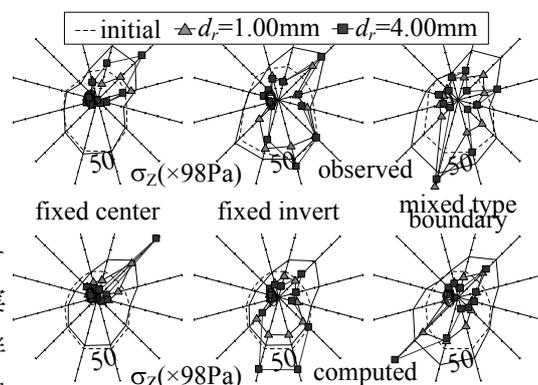


図5 トンネル周面の土圧分布

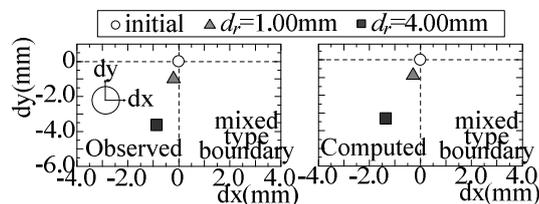


図6 トンネル中心の変位量