

機関番号：13903

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009 ～ 2010

課題番号：21760372

研究課題名 (和文) 都市トンネル掘削時の地盤の応力・変形メカニズム：実験と解析

研究課題名 (英文) Stress-deformation mechanism of ground during urban tunnel excavation:
Model tests and Numerical simulation

研究代表者

ホサイン モハマド シャヒン (Hossain Md. Shahin)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00516495

研究成果の概要 (和文)：都市部の新線は都市浅層および大深度での非開削トンネル工法で建設する必要がある。都市部では必然的に既設構造物や既設トンネル近傍でトンネル掘削を行うことになるが、そこではトンネルに作用する土圧はもとより周辺地盤や既設構造物への影響が大きな問題となる。都市部の掘削で問題となる周辺地盤の沈下や既設構造物の変形に関しては合理的な予測が出来ないため、実務では現場計測で地表面沈下を継続的に測るなどして経験的に対応しているのが現状である。解析に対応したモデル実験も併せて行い、解析・実験の両面から、掘削地盤の2次元変形・破壊メカニズムを明らかにする。

研究成果の概要 (英文)：For the development of urban areas several types of underground structures are constructed by means of tunneling. However, tunnel excavations inevitably cause ground deformations and may affect existing structures near the tunnel. Therefore, it is required to provide reliable forecasts of the inevitable settlement associated with the tunnel excavation. In tunnel design usually the influence of excavation patterns and the interaction effect of ground and existing structure are not taken into account. This research provides a guideline to deal with the soil-structure interaction effect in using underground space, which is a common problem in urban area. In many cities some of the tunnels are located less than 1m gap in some sections and some are parallel to others. In this research the effect of adjacent tunnels has been investigated with laboratory model tests and numerical simulations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：トンネル掘削, 近接施工, 有限要素法

1. 研究開始当初の背景

都市部では地上あるいは地中に様々な構造物が存在するため、新たにトンネルを掘削する場合には、トンネルや周辺地盤の安定性だけでなく既設構造物への影響についても把握する必要がある。しかし、現行のトンネル設計体系では、トンネルへの作用土圧は Terzaghi の緩み土圧理論¹⁾をはじめとする剛塑性論に基づいて予測し、地表面沈下形状は正規分布曲線によるフィッティング²⁾など経験的手法や弾性解析により予測しているため、施工過程の影響やトンネル-地盤-近接構造物の力学的相互作用を考慮できない。一方、これまで Boscarding and Cording(1989) や Franzius et al. (2004), Jacobsz et al. (2004) など多くの研究者がトンネル-地盤-構造物の相互作用メカニズムの解明とトンネル掘削時の土圧・変形特性の予測に取り組んでいるものの、既設構造物に近接したトンネル掘削は施工条件や施工過程、地山条件、構造物との離隔、既設構造物の種類や規模など諸条件が絡み合う複雑な現象であるため、トンネル-地盤-構造物の力学的相互作用は完全には解明されていない。

2. 研究の目的

これに対して本研究では、諸条件を理想化・単純化して土被りや基礎形式など主要な要因のみを考慮した2次元トンネル掘削モデル実験を実施し、トンネルと周辺構造物の力学的相互作用について基礎的な立場から考察を行うとともに、種々の影響要因を適切に考慮した非線形数値解析による土圧・変形特性の統一的な予測を試みた。

3. 研究の方法

構造物基礎に近接したトンネル掘削に関する2次元モデル実験は、著者らが開発した周面の土圧分布を計測可能な円形トンネル掘削装置と杭の荷重分担率を計測可能な群杭基礎模型を用いて実施した。図-1に2次元モデル実験装置を示す。既設構造物の基礎形式は直接基礎と2本杭の群杭基礎およびパイルドラフトを用いる。模型地山は円形断面のアルミ棒を積み上げて作成する。アルミ棒は長さ50mm、直径1.6および3.0mmの2種類を重量比3:2で混合したもの(単位体積重量 $\gamma = 20.4 \text{ kN/m}^3$)で、粒径加積曲線が豊浦砂のそれにほぼ平行になる。

モデル実験および実問題の数値解析は、地盤材料の弾塑性モデルに基づく非線形有限要素法(FEMtij-2D)により実施する。地盤材料の構成関係は、等方硬化型 subloading t_{ij} model(Nakai and Hinokio, 2004)で記述する。このモデルは中間主応力が土の強度・変形特性に及ぼす影響やひずみ増分方向の応力経

路依存性、密度と拘束圧の影響を適切に考慮できる。

実験および解析は近接基礎のないケースと直接基礎、群杭基礎およびパイルドラフトに近接したケースに対して、トンネル直径 B に対する土被り D の比 D/B を 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 として実施した。さらに群杭基礎とパイルドラフトでは、杭長(あるいは杭先端とトンネル天端の鉛直距離 D_p)を変化させて $D_p/B = -0.5, 0.0, 1.0, 2.0$ に対して実験を行った。 D_p/B が負であるとき杭先端はトンネル天端より下に達していることを意味する。

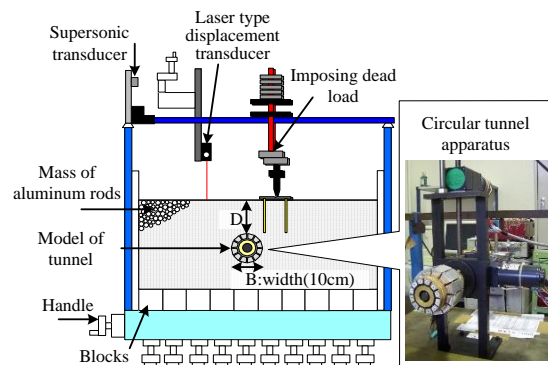


図-1 2次元トンネル掘削モデル実験装置

4. 研究成果

図-2は土被り比 $D/B = 2.0$ でパイルドラフト基礎のケースについて、実験と解析で得られたトンネル収縮量 $d_r = 4 \text{ mm}$ での地表面沈下形状を示している。比較のために既設構造物なしの場合の結果も実線で示してある。図より、既設構造物に近接してトンネルを掘削する場合、トンネル中心線に対して左右非対称な沈下を生じる。基礎直下で沈下量は最大となり、その大きさは既設構造物なしでの最大沈下量より明確に大きい。基礎の回転に着目すると、パイルドラフトはトンネル側、直接基礎はトンネルと反対方向に回転することがわかる。このような基礎の回転について、土被りとの関係を図-3にまとめる。実線は実験値、破線は解析値である。図中には比較のため中心固定条件での結果も示した。図より、既設基礎の回転量や回転方向は掘削モードや基礎の種類、土被りによって大きく異なる。直接基礎の場合、回転量の絶対値は掘削モードによらず土被り比 $D/B = 0.5$ で最大となるが、基礎の回転方向はインバート固定ではトンネル側、中心固定では反対向きに回転する。一方、パイルドラフトの場合、回転量はインバート固定条件のほうが大きくなる傾向を示し、回転量の絶対値は中心固定条件では $D/B = 0.5$ で最大となり、インバート固定条件では $D/B = 1.0$ で最大となる。なお、掘削モードや基礎形式によらず土被り比 D/B

= 3.0 では基礎はほとんど回転しない。また、数値計算はいずれのケースにおいても実測値を的確に捉えていることから、本解析手法は基礎形式や掘削モード、土被りの違いを適切に考慮して近接基礎に及ぼすトンネル掘削の影響を予測している。以上の結果より、実地盤で既設構造物に近接してトンネル掘削を行う場合、地表面沈下はトンネル中心線に対して左右非対称に分布し、近接構造物基礎の不同沈下を引き起こす可能性がある。しかしながら、現行の設計でしばしば用いられるガウスの正規分布曲線による方法では近接構造物の影響を考慮した地表面沈下特性の予測は難しい。

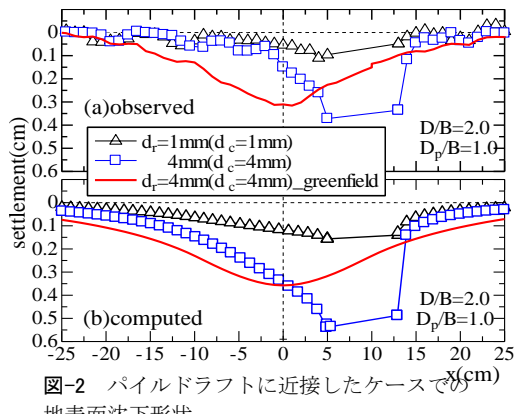


図-2 パイルドラフトに近接したケースでの地表面沈下形状

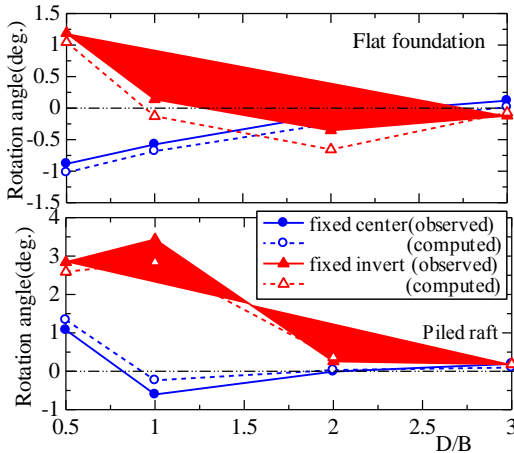


図-3 トンネル4 mm収縮時の基礎の回転量 (上：直接基礎，下：パイルドラフト)

図-4 はパイルドラフトのケースについて、実験と解析で得られたトンネル収縮量 $d_r = 4$ mm での地盤内の偏差ひずみ分布を示している。図より、トンネル周辺に基礎構造物が存在する場合には、トンネルの収縮に伴って現れたせん断帯はトンネルのスプリングライン付近から基礎に向かって進展することがわかる。ただし、基礎形式や土被りによってせん断帯の発達過程は異なる。直接基礎の場合、 $D/B = 1.0$ では基礎の両端部にせん断帯が形成されているのに対して、 $D/B = 2.0$ で

はせん断変形が基礎の右端部（トンネルから遠い側の端部）に集中する。

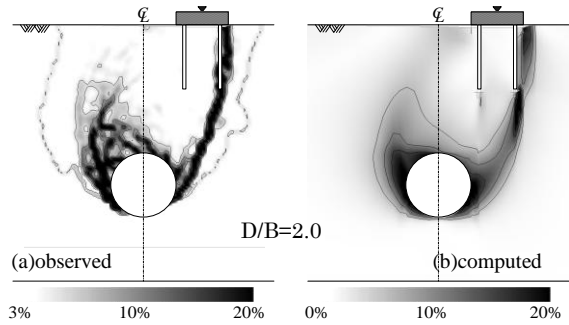


図-4 パイルドラフトに近接したケースでの地盤内の偏差ひずみ分布 (左：実験値，右：解析値)

土圧分布

図-5 は直接基礎およびパイルドラフトのケースについて、実験と解析で得られたトンネル周面土圧の分布を示している。両図はともに土被り比 $D/B = 1.0$ のインバート固定条件での結果であり、黒丸プロットは地盤作成（自重解析）後、白丸プロットは基礎に死荷重を載荷した後の土圧分布を示している。また、実線は構造物なしのケースのトンネル収縮量 $d_r = 4$ mm での土圧分布である。図より、基礎に死荷重を載荷する前は左右対称に土圧が分布するのに対して、死荷重載荷後は基礎側の肩部付近の作用土圧が増加する。一方、トンネル掘削後の周面土圧分布は左右非対称で、既設構造物なしの場合とは大きく異なる。パイルドラフトの場合には作用土圧が単調に減少するのに対して、直接基礎のケース

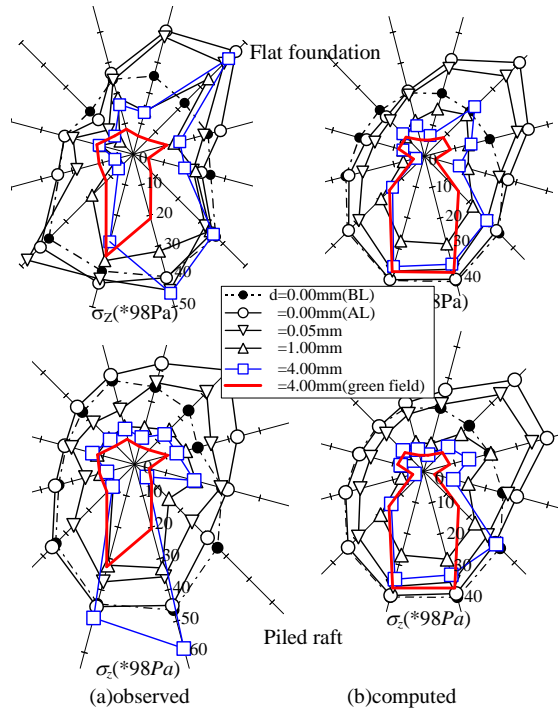


図-5. トンネル周面土圧分布: $D/B=1.0$

ではトンネル掘削初期にトンネル周面土圧はいったん急減した後、収縮量の増加に伴って基礎側の肩部の作用土圧が増加に転じる。数値解析は実験結果を的確に捉えていることから、トンネル-地盤-構造物基礎の力学的相互作用の影響を適切に考慮して解析を行えば、トンネル覆工に作用する土圧を的確に予測できると言える。

近接構造物がある条件では、基礎の種類や杭長、土被りを変化させて検討を行い、以下の結論が得られた。

- (1) トンネル掘削に伴う周辺地盤の変形過程や地表面沈下は周辺構造物に大きく影響を受ける。地表面沈下形状や地盤内のせん断帯はトンネル中心線に対して左右非対称になり、基礎直下で沈下量が最大となる。
- (2) トンネル掘削に伴ってせん断帯はトンネルから基礎に向かって形成される。パイルドラフトや群杭基礎のケースでの地盤の変形過程には、トンネル天端と杭先端の離隔が支配的な影響を示す。離隔が小さい場合、トンネルに近い前方杭の先端にせん断帯が進展し、基礎はトンネル側に回転するモードで不同沈下する。一方、離隔が比較的大きい場合には、トンネルから遠い後方杭までせん断帯が到達するため、基礎の回転・沈下挙動は大きく異なる。
- (3) 浅層トンネルに作用する土圧は地上構造物の影響を受けて左右非対称に分布する。トンネル周面土圧の分布は基礎形式によって大きく異なる。

比較のために実施した弾性解析による検討から導かれる結論は以下の通りである。

- (1) 地盤材料の剛性変化や降伏・破壊を考慮していない線形弾性解析では実現象を予測できない。浅いトンネル掘削時にはトンネル上方地山に局所的に沈下を生じるのに対して、弾性解析は沈下領域を過大に、沈下量を過小に評価する。一方、地盤材料の構成関係を適切に考慮した弾塑性モデルによる数値計算は実現象を定性的にも定量的にも的確に予測する。
- (2) 弾性解析による解は解析領域の設定に大きく依存する。一方、適度な範囲に領域を設定した弾塑性解析は領域境界の影響をあまり受けない。

最後に、地盤材料の応力ひずみ関係を適切に記述できる弾塑性構成モデルに基づく数値計算は、トンネル-地盤-周辺構造物の力学的相互作用を適切に考慮してトンネル掘削時の土圧特性および変形特性を予測する強力なツールとなり得ると言える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

Shahin, H. M., Nakai, T., Zhang, F., Kikumoto, M. and Nakahara, E. (2011), Behavior of ground and response of existing foundation due to tunneling, *Soils and Foundation*, vol. 51, 査読有り, no. 3 (in press).

[学会発表] (計 4 件)

① 戸田和秀, 中井照夫, 張鋒, H. M. Shahin, 菊本統, 杉浦知治 (2010), トンネル掘削が上方の既設直交トンネルに及ぼす影響—モデル実験と数値解析による検討—, 第 45 回地盤工学研究発表会, 8月20日.

② 菊本統, H. M. Shahin, 中井照夫, 永田政司, 戸田和秀 (2009), 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, 11月20日.

③ 戸田和秀, 中井照夫, 張鋒, H. M. Shahin, 菊本統, 永田政司, 中澤修 (2009), 半円形断面トンネルにおけるロックボルト補強メカニズム~2次元モデル実験と数値解析による検討~, 第44回地盤工学研究発表会, 8月19日.

④ 永田政司, 中井照夫, 張鋒, H. M. Shahin, 菊本統, 戸田和秀, 中澤修 (2009), 円形トンネル掘削時の近接杭基礎構造物への影響, 第44回地盤工学研究発表会, 8月19日.

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計◇件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

<http://www.cm.nitech.ac.jp/jiban/english/Staff/Shahin/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

ホサイン モハマド シャヒン

(Hossain Md. Shahin)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00516495

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：