

Study on Support Pressure of the Initial Face of Large Diameter Shield Tunnel in Silt Stratum

Lin Chen¹, Famin Wang²

¹China Railway Tunnel Group, Guangzhou Guangdong

²State Key Laboratory of Shield Machine and Boring Technology, Zhengzhou Henan

Email: 827386077@qq.com

Received: Jan. 28th, 2020; accepted: Feb. 13th, 2020; published: Feb. 20th, 2020

Abstract

In order to select appropriate support pressure for large diameter shield tunneling in silt stratum and ensure the construction safety of large diameter shield tunneling, this paper studies the support pressure of large diameter shield tunneling in silt stratum under the background of large diameter shield tunneling in Sue'e Passage of Shantou City. Through the comparative analysis of the surface settlement and the instability failure of the face under different support pressures, the results show that when the excavation of the initial reinforcement section of shield tunneling is completed, the surface deformation is composed of uplift zone and subsidence zone. With the increase of support pressure, the uplift value increases gradually and the settlement value decreases gradually; the soil in front of the metacarpal formed an upward uplift area, while the overlying soil near the metacarpal was less affected by the support pressure and formed a settlement area. It is suggested that the support pressure ratio of large diameter shallow overburden shield should be within 1~1.2. The research results of this paper can be used for reference for similar projects.

Keywords

Large Diameter Shield, Shield Launching, Stability of Tunnel Face, Support Pressure Ratio, Numerical Simulation

淤泥地层大直径盾构始发掌子面支护压力研究

陈林¹, 王发民²

¹中铁隧道局集团有限公司, 广东 广州

²盾构及掘进技术国家重点实验室, 河南 郑州

Email: 827386077@qq.com

摘要

为了选取合适的掌子面支护压力, 保证淤泥地层大直径盾构始发的施工安全, 本文以汕头市苏埃通道大直径盾构始发为背景, 开展了淤泥地层大直径盾构始发掌子面支护压力的研究。通过对不同支护压力下的地表沉降和掌子面失稳破坏进行对比分析, 研究结果表明: 当盾构始发加固段开挖完成后, 在淤泥地层掘进时, 地表变形由隆起区和沉降区组成, 随着支护压力的增大, 隆起值逐渐增大而沉降值逐渐减小; 掌子面前方土体形成斜向上的隆起区, 而临近掌子面的上覆土体受到支护压力的影响较小形成沉降区; 建议大直径浅覆土盾构始发的支护压力比应在1~1.2范围内。本文研究成果不仅为工程的设计施工提供依据, 还可以为类似工程建设提供技术支持, 因此具有十分重要的意义。

关键词

大直径盾构, 盾构始发, 隧道掌子面稳定性, 支护压力比, 数值模拟

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在盾构隧道施工过程中, 需在掌子面施加适当的支护压力, 从而平衡掌子面的水土压力。支护压力一直以来都是影响工程安全、控制前方地面隆沉的主要施工因素之一[1]。当隧道掌子面处泥水压力设定值较大时, 不仅会诱发产生地表隆起, 甚至会击穿掌子面, 泥浆外泄, 污染环境, 而掌子面支护压力设定值太低又会造成地表沉降[2], 甚至会造成掌子面坍塌。

鉴于此, 已经有许多科研人员对掌子面支护压力做了许多研究, 也取得了丰富的成果[3] [4] [5] [6] [7]。黄振恩[8]等探讨了流固耦合条件下掌子面不同支护压力比对盾构隧道掌子面变形及地表沉降的影响规律, 并探讨了流固耦合效应下掌子面失稳破坏模式。资谊等[9]认为隧道掌子面合理支护压力往往不由极限支护压力确定, 而是由地层变形控制标准来确定, 因此其探讨了掌子面支护压力与地层变形之间的内在关系。吕玺琳等[10]通过离心模型试验获得了支护压力与掌子面位移间的关系曲线及掌子面达到主动极限平衡状态时的破坏模式, 并且渗流条件下掌子面破坏区域及极限支护压力均大于无渗流情况, 极限支护压力随内摩擦角增大而减小, 随隧道埋深增大而减小。

以往的研究多数集中在盾构中心段, 较少涉及到盾构始发段, 然而盾构始发段往往存在着覆土薄、地下水位高和掌子面难以稳定等特点, 容易产生地表沉降大和掌子面失稳等问题, 特别对于淤泥地层大直径盾构隧道始发更是如此。本文依托汕头市苏埃通道工程研究了淤泥地层大直径盾构始发掌子面的合理支护压力比, 不仅为工程的设计施工提供依据, 还可以为类似工程提供参考和借鉴。

2. 工程概况

2.1. 工程简介

汕头市苏埃通道位于海湾大桥与碧石大桥之间, 工程全长 6680 m, 其中盾构隧道东线和西线长分别

为 3047.5 m 和 3045.7 m。隧道于南岸围堰内始发并始发, 抵达北岸华侨公园内接收井接收。工程采用一级公路技术标准, 设计速度为 60 公里/小时, 双向六车道, 如图 1 所示。

盾构隧道内径为 13.3 m, 外径为 14.5 m, 刀盘直径约为 15 m, 是目前国内最大直径的跨海盾构隧道。管片环宽 2 m, 厚 600 mm, 通用双面楔形环, 楔形量 48 mm, 采用“7+2+1”分块模式, 错缝拼装。管片结构采用 C60 高性能耐腐蚀混凝土, 抗渗等级 P12。环、纵缝用斜螺栓连接, 防水设计采用两道三元乙丙弹性密封垫 + 内侧嵌缝防水。



Figure 1. Tunnel line intention
图 1. 苏埃通道示意图

2.2. 工程地质条件

盾构隧道始发段地质如图 2 所示, 至上而下依次为: 围堰填土(砂), 第四系②₁ 淤泥、②₂ 淤泥质土、②₃ 淤泥混砂、②₄ 粉细砂、②₅ 中粗砂、②₁ 粉质粘上、③₄ 中粗细砂、③₅ 砾砂及⑤₁ 砂质粘性土, 下伏全风化—微风化花岗岩。

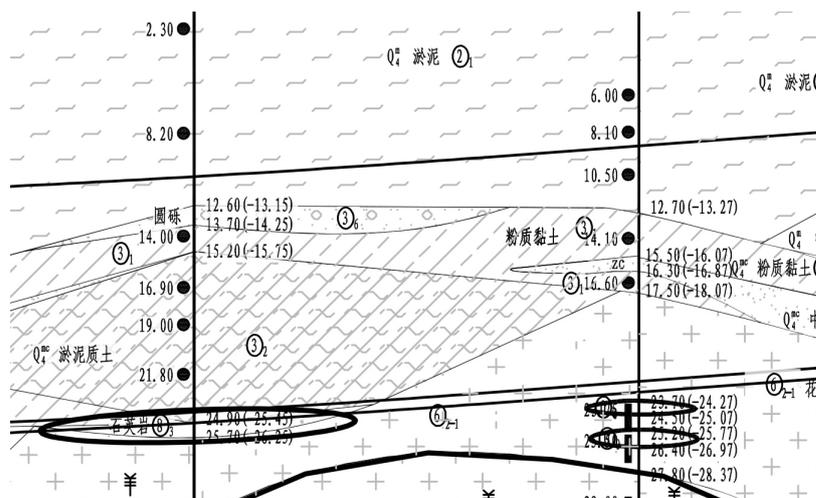


Figure 2. Geological profile map of the initial section of tunnel
图 2. 盾构隧道始发段地质纵断面图

2.3. 水文地质条件

根据区内地下水的赋存特征及形成条件, 场区地下水分为松散岩类孔隙潜水、承压水及块状岩类裂隙水。松散岩类孔隙潜水含水岩组主要为第四系海积成因的②₄ 粉细砂、②₅ 中粗砂、②₆ 砾砂及少量②₃

淤泥混砂层, 渗透系数为 2~50 m/d, 与地表水(海水)存在水力联系。松散岩类孔隙承压水含水岩组主要为第四系全新统海陆交互沉积的③₄ 中粗砂、③₅ 砾砂及部分埋深较大的②₄ 粉细砂、②₅ 中粗砂层, 渗透系数为 5~50 m/d。

3. 盾构始发方案

在盾构始发前期先进行始发端头加固、降水施工, 待始发井主体结构完成后进行始发架安装; 其次, 依次将管片小车、盾构后配套 1 号拖车、盾构主机、刀盘吊入工作井, 同时在始发段副井口吊入盾构后配套拖车(顺序依次为 2 号、3 号、4 号、5 号)并进行组装; 之后, 将刀盘、盾构主机、盾构后配套进行连接组装, 完成后进行盾构整机调试; 最后完成洞门凿除、反力支撑并开始拼装负环管片后形成盾构始发状态, 同时利用管井降水将始发端头承压水位降至设计要求标高。盾构始发施工工艺流程见图 3。



Figure 3. Shield tunnel initiation flow chart
图 3. 盾构始发流程图

4. 三维数值分析

4.1. 计算模型

基于盾构始发方案, 为了得到最佳的掌子面支护压力, 建立 Midas 三维有限元数值模型, 采用不同的掌子面支护压力模拟超大直径盾构始发对淤泥地层的影响。考虑到工程需要和有限元离散误差以及计算误差, 一般选取计算范围沿各个方向均不小于 3 倍开挖深度。依据实际工程以及边界尺寸效应, 计算模型尺寸的取值为: 长 105 m, 宽 72, 深 68.5 m。模型边界条件为: 底部约束竖向位移, 四周约束法向位移, 顶部自由, 计算模型如图 4 所示。

土体采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型, 盾构机壳体和微风化花岗岩按线弹性材料计算, 盾构机外壳采用板单元模拟。各种材料具体参数取值见表 1 和表 2。

4.2. 支护压力确定

本工程盾构始发掘进段地层以淤泥、淤泥质土为主及部分粉质粘土, 地层透水性不强, 以土粒与孔隙水共同组成的土体作为对象, 因此, 本文采用水土合算的计算方式确定掌子面侧向压力。计算公式如下:

$$Pa = (\gamma \times H + P) \times K_a \quad (1)$$

式中:

γ : 地层饱和重度 (kN/m^3); H : 所计算点离填土面的深度 (m); K_a : 主动土压力系数 $K_a = \tan^2(45^\circ - \varphi/2)$; P : 地面荷载, 取 20 kPa; φ : 土层的内摩擦角度($^\circ$)。

取掌子面中心位置作为计算点, 根据式 1 计算过程如下:

$$K_a = \tan^2(45^\circ - 3.2/2) = 0.89$$

$$Pa = (15.4 \times 16 + 20) \times 0.89 = 238.2 \text{ kPa}$$

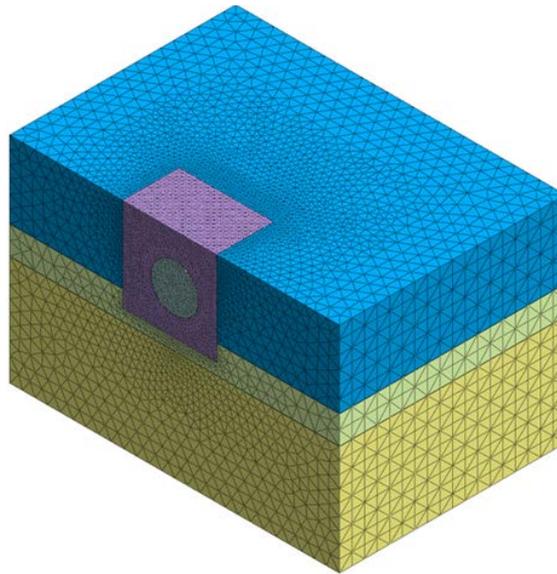


Figure 4. Three-dimensional computing model

图 4. 三维计算模型

Table 1. Shell material parameter table of shield machine

表 1. 盾构机外壳参数表

盾构机外壳	弹性模量 E (MPa)	泊松比	重度(kN/m^3)
Q345B	206000	0.30	78.5

Table 2. Soil parameter table

表 2. 土层计算参数表

土层	弹性模量 E (MPa)	泊松比	重度(kN/m^3)	内摩擦角($^\circ$)	粘聚力 c (kPa)
淤泥	5	0.45	15.4	3.2	9
全风化花岗岩	27.5	0.25	19	23.3	15
微风化花岗岩	44,150	0.2	26.5	/	/
加固土	350	0.2	16.4	32	289

盾构机掘进时的支护压力应介于理论计算值上下限之间, 并根据地表监测沉降的情况和地质条件适当调整。为了研究淤泥地层超大直径盾构始发掌子面支护压力的合理取值, 本文选取支护压力比(掌子面支护压力/掌子面中心点水土压力)分别为 0.6~1.4 (间隔 0.1 取值)。

4.3. 计算结果及分析

1) 地表变形

图 5 是盾构始发加固段开挖完成时, 不同支护压力比下的地表变形图。从图中可以看出, 当支护压力较小时, 掌子面前方一定范围的地表沉降, 而范围之外的地表出现隆起。

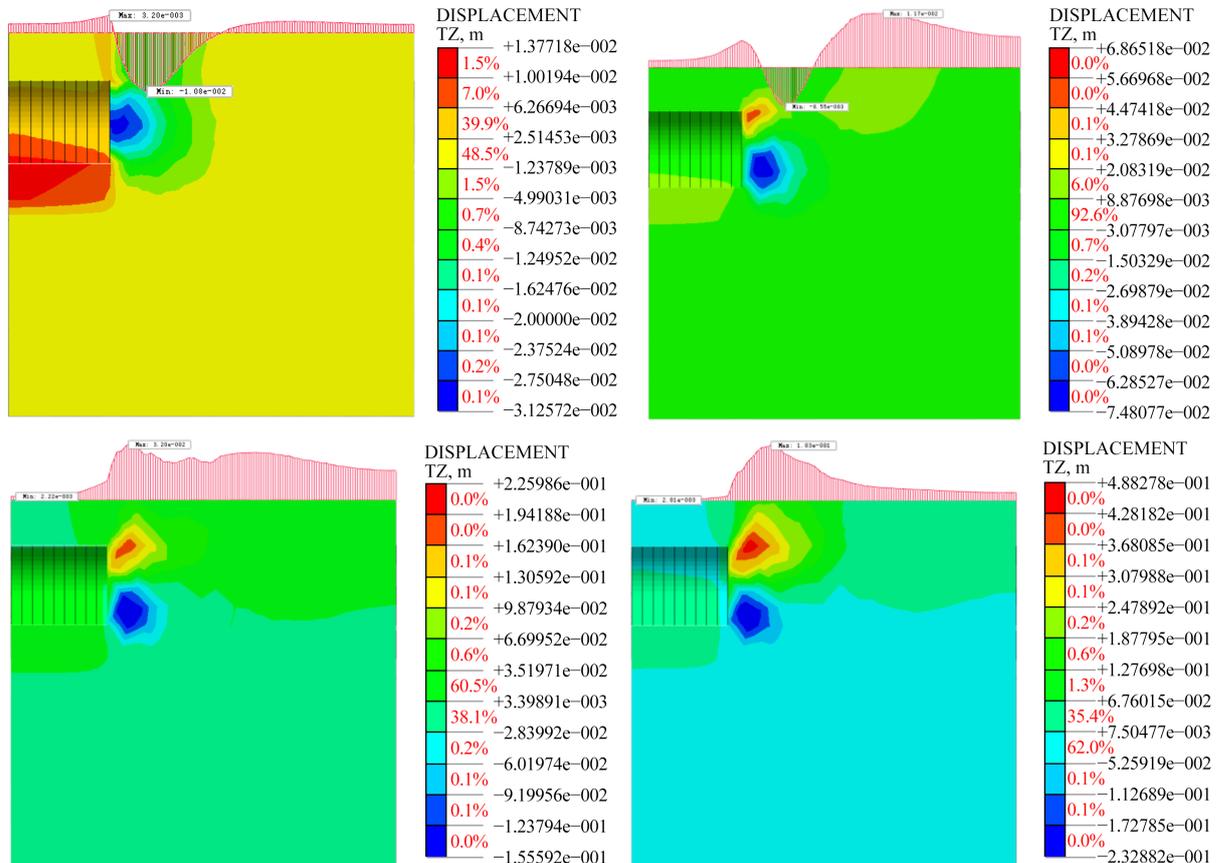


Figure 5. Surface deformation map under different support pressure ratio
图 5. 不同支护压力比下的地表变形图

图 6 是盾构始发加固段开挖完成时, 不同支护压力比对应的地表最大隆起曲线。从图中可以看出, 当支护压力比位于 0.6~1.4 时, 掌子面前方地表均有隆起, 并且随着支护压力比的增大而增大。此外, 支护压力比—地表隆起值曲线经历两个阶段: 缓慢增长段、急剧增长段。当支护压力比小于 1.2 时, 地表隆起值缓慢增长; 当支护压力比大于 1.2 时, 地表隆起值陡增。

图 7 是盾构始发加固段开挖完成时, 不同支护压力比对应的地表最大沉降曲线。由图 7 可知, 与地表隆起曲线相反, 地表沉降值随着支护压力比的增大而减小。然而, 支护压力比—地表沉降值曲线经历三个过程: 稳定段、急剧下降段、缓慢下降段。当支护压力比小于 0.8 时, 地表沉降几乎不随着支护压力比的变化而变化; 当支护压力比位于 0.8~1.0 时, 地表沉降急剧减小; 当支护压力比大于 1.0 时, 地表沉降缓慢减小, 直至地表不发生沉降。

2) 掌子面失稳破坏模式

图 8 是盾构始发加固段开挖完成时, 不同支护压力比对应的掌子面前方土体变形图。从图中可以看出, 当支护压力比开始增大时, 掌子面前方土体先形成一个变形区, 此区域范围较小, 主要分布在掌子

面附近; 当支护压力比继续增大时, 掌子面前方土体变形区开始增大; 当支护压力比继续增大时, 掌子面土体变形区贯通至地表, 此时地表仅隆起而不沉降, 支护压力比的增大仅仅增长了地表的隆起值。

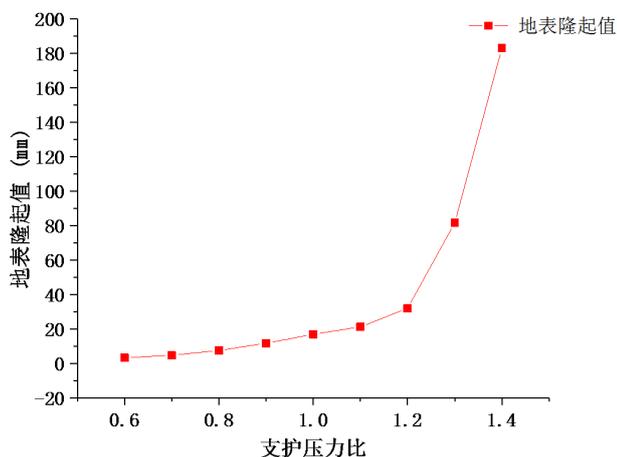


Figure 6. Maximum uplift curve of ground surface corresponding to different support pressure ratio

图 6. 不同支护压力比对应的地表最大隆起曲线

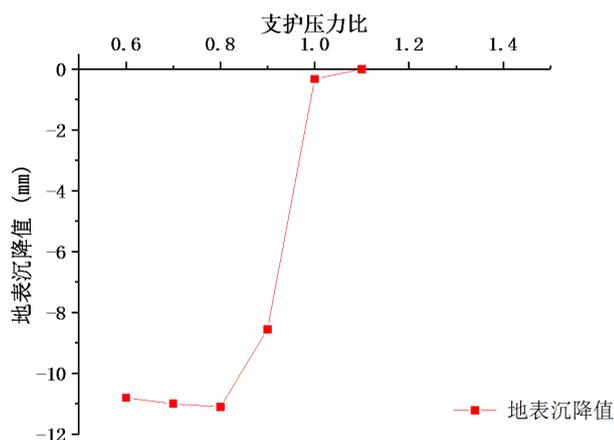


Figure 7. Surface settlement curve corresponding to different support pressure ratio

图 7. 不同支护压力比对应的地表沉降曲线

本文依托工程存在掌子面大和覆径比小的特点, 在盾构机的始发过程中, 当支护压力小于 1.2 时, 掌子面地表存在隆起区和沉降区, 而当支护压力比大于 1.2 时, 地表仅有隆起。由此可见, 对于大直径浅覆土盾构始发, 由于支护压力的作用, 掌子面前方土体形成斜向上的隆起区, 而临近掌子面的上覆土体受到支护压力的影响较小形成沉降区, 但是随着支护压力的进一步增大, 隆起区的范围逐渐增大使得沉降区范围缩小, 直至掌子面前方一定范围内的土体均隆起。

5. 支护压力取值优化

掌子面支护压力对控制土体变形起着重要的作用, 本节拟根据以上数值模拟结果对淤泥地层浅覆土、大直径盾构始发的支护压力取值进行优化, 为工程的设计和施工提供参考。

淤泥地层大直径盾构浅覆土始发的过程中, 由于支护压力的作用, 地表变形存在隆起区和沉降区,

并且随着支护压力的增大, 隆起值逐渐增大而沉降值逐渐减小, 因此, 应将沉降值和隆起值控制在安全的范围内。但是, 从以上分析可知, 地表变形以隆起为主, 即使支护压力为 0.6 时, 地表沉降值也仅有 10.3 mm, 故大直径浅覆土盾构始发应尤为关注地表的隆起值。本文根据数值计算结果分析, 当支护压力比为 1.2 时, 地表隆起值为 32 mm, 因此, 建议大直径浅覆土盾构始发的支护压力比应不超过 1.2。

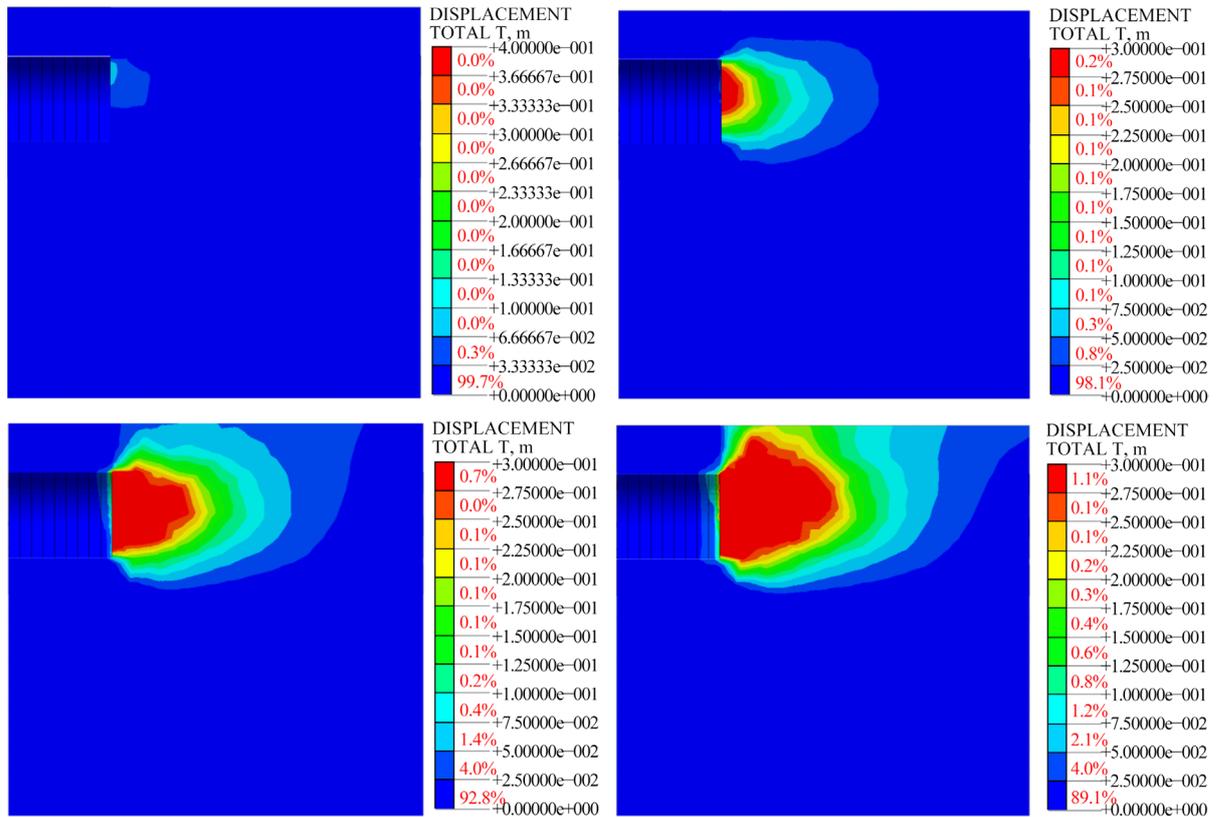


Figure 8. Deformation map of soil in front of face with different support pressure ratio
图 8. 不同支护压力比对应的掌子面前方土体变形图

6. 结语

本文通过 Midas GTS 模拟了不同支护压力下的淤泥地层大直径盾构浅覆土始发对地层变形的影响, 经过设定不同的模拟参数, 对模拟结果多次分析验证, 得出以下结论:

1) 当盾构始发加固段开挖完成时, 地表变形由隆起区和沉降区组成, 随着支护压力的增大, 隆起值逐渐增大而沉降值逐渐减小; 当支护压力比小于 1.2 时, 地表隆起值缓慢增长; 当支护压力比大于 1.2 时, 地表隆起值陡增; 当支护压力比小于 0.8 时, 地表沉降几乎不随着支护压力比的变化而变化; 当支护压力比位于 0.8~1.0 时, 地表沉降急剧减小; 当支护压力比大于 1.0 时, 地表沉降缓慢减小, 直至地表不发生沉降。

2) 大直径浅覆土盾构始发, 由于支护压力的作用, 掌子面前方土体形成斜向上的隆起区, 而临近掌子面的上覆土体受到支护压力的影响较小而形成沉降区, 但是随着支护压力的进一步增大, 隆起区的范围逐渐增大使得沉降区范围缩小, 直至掌子面前方一定范围内的土体均隆起。

3) 当支护压力比为 1.2 时, 地表隆起值为 32 mm, 因此, 建议大直径浅覆土盾构始发的支护压力比应在 1~1.2 范围内。

参考文献

- [1] 黄正荣, 朱伟, 梁精华, 等. 浅埋砂土中盾构法隧道开挖面极限支护压力及稳定研究[J]. 岩土工程学报, 2006(11): 2005-2009.
- [2] 陈家康, 刘陕南, 肖晓春, 等. 复合地层中超大直径泥水盾构施工开挖面泥水压力确定方法研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(4): 619-626.
- [3] 李岳. 超大直径越江盾构隧道管片错台及渗漏影响研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(4): 42-46.
- [4] 孔玉清. 大直径泥水盾构下穿路堑式城市主干道综合施工技术[J]. 山西建筑, 2018, 44(30): 150-152.
- [5] 龚琛杰, 丁文其. 大直径水下盾构隧道接缝弹性密封垫防水性能研究——设计方法与工程指导[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(10): 1712-1722.
- [6] 朱建明, 高林生, 巩晓花. 盾构开挖面极限支护力的简化计算公式[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(4): 988-994.
- [7] 赵文, 程诚, 李慎刚, 等. 盾构开挖面楔形体支护压力模型分析及改进[J]. 中国公路学报, 2017, 30(8): 74-81.
- [8] 黄振恩, 吴俊, 张洋, 等. 考虑流固耦合效应的盾构隧道开挖面稳定性研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(5): 61-71.
- [9] 资谊, 陈强, 章荣军, 等. 复合地层中隧道开挖面支护压力对地层变形的影响[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2010, 27(4): 36-41.
- [10] 吕玺琳, 周运才, 李冯缔. 粉砂地层盾构隧道开挖面稳定性离心试验及数值模拟[J]. 岩土力学, 2016, 37(11): 3324-3328.