

深埋小净距多线平行盾构掘进相互作用分析

付 钊, 柯宁静, 卢康明, 郭萧阳, 张孟喜

An analysis of interaction of deep buried close approaching multi-line parallel shield tunneling

FU Zhao, KE Ningjing, LU Kangming, GUO Xiaoyang, and ZHANG Mengxi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202006009>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

斜井盾构掘进时富水围岩变形特性模拟分析

A study of the rich-water ground rock deformation features as shield tunneling along with inclined shaft

马君伟, 王贤能, 林明博 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 126-131

深埋顺层偏压隧道围岩破坏机理及规律研究——以郑万线某隧道为例

A study of the mechanism and regularity of failures in the surrounding rock of a deep buried bias tunnel embedded in geologically bedding strata: taking one tunnel of the Zhengwan line as an example

胡炜, 谭信荣, 蒋尧, 毛坚强 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 60-68

巴丹吉林沙漠潜水蒸发的数值模拟研究

Numerical simulation of groundwater evaporation in the Badain Jaran Desert of China

周燕怡, 王旭升 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 44-54

地下采动下含深大裂隙岩溶山体变形响应特征

Deformation response characteristics of karst mountains with deep and large fissures under the condition of underground mining

钟祖良, 高国富, 刘新荣, 王南云, 李皓 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 97-106

深圳“12.20”渣土场远程流化滑坡动力过程分析

Dynamics process simulation of long run-out catastrophic landfill flowslide on December 20 th, 2015 in Shenzhen, China

高杨, 卫童瑶, 李滨, 贺凯, 刘铮, 王学良 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 129-129

考虑桩桩相互作用的双排支护桩受力变形分析

Analysis of forced deformation of double row support piles considering pile interaction

张玲, 朱幸仁, 欧强 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 72-80



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202006009

深埋小净距多线平行盾构掘进相互作用分析

付 钊¹, 柯宁静², 卢康明², 郭萧阳², 张孟喜¹

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200072; 2. 上海隧道工程有限公司盾构工程分公司, 上海 200023)

摘要: 浅覆软弱地层中小净距盾构隧道施工时, 后行隧道施工显著影响先行隧道安全, 但深埋情况下, 由于地下岩土层的复杂性和不确定性, 使得多线隧道施工时先行隧道的变形变得复杂。以上海硬 X 射线土建部分盾构隧道为背景, 结合有限元数值模拟, 分析了深埋小净距盾构隧道施工时的相互影响, 并对不同的盾构参数进行了敏感性分析。研究表明: 随着后行隧道的开挖, 先行隧道管片的变形增量变化基本呈双峰特征。当采用左-右-中方式开挖时, 管片变形增量呈一大一小双峰分布; 而采用中-右-左方式时, 管片竖向变形增量峰值的大小和方向相同, 而水平变形增量的峰值相同, 方向不同; 随着浆液弹性模量的增加, 管片竖向变形增量变化较大, 水平变形增量基本不变; 随着顶推力的增大, 管片的变形也在相应地增大, 并在支护应力比为 0.6~0.7 之间时达到稳定; 地下水的存在对管片竖向变形有着一定的影响; 通过对比 2 种开挖方式管片的变形收敛情况, 选择左-右-中次序开挖比较安全。

关键词: 深埋; 小净距; 多线平行盾构; 数值模拟; 管片变形; 断面收敛

中图分类号: U45; TU94⁺.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)02-0044-11

An analysis of interaction of deep buried close approaching multi-line parallel shield tunneling

FU Zhao¹, KE Ningjing², LU Kangming², GUO Xiaoyang², ZHANG Mengxi¹

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 2. Shield Engineering Branch of Shanghai Tunnel Engineering Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Construction of a second shield tunnel in shallow soft strata may reduce the safety of the first shield tunnel, especially when the clear spacing is very small. However, in the case of deep burial, the deformation of the first tunnel becomes complicated due to the complexity and uncertainty of the underground soil layer. With the shield tunnel of hard X-ray civil construction in Shanghai as the background, combined with finite element numerical simulation, the mutual influence during the construction of the deep-buried shield tunnels with small clear spacing is analyzed, and the sensitivity analysis of different shield parameters is carried out. The research results show that with the excavation of the later tunnel, the deformation increment of the first tunnel segment is basically bimodal. When the left-right-middle method is used, the deformation increment of the segment is of a big and a small bimodal distribution. In the middle-right-left method, the peak value of the vertical deformation increment is the same in size and direction, while the horizontal is the same in different directions. With the increase in the elastic modulus of grouting, the vertical deformation increment of the segment changes greatly, while the horizontal deformation increment is basically unchanged. When the pushing force increases, the deformation of the segment increases, and it reaches a stability when the supporting stress ratio is between 0.6-0.7.

收稿日期: 2020-06-04; 修订日期: 2020-09-22

基金项目: 上海市市级科技重大专项资助课题(201SHZDX02)

第一作者: 付钊(1995-), 男, 硕士生, 研究方向为隧道与地下工程。E-mail: 921291423@qq.com

通讯作者: 张孟喜(1963-), 男, 博士后, 教授, 博士生导师, 主要从事隧道工程及地下结构研究。E-mail: mxzhang@i.shu.edu.cn

The existence of groundwater has a certain effect on the vertical deformation of the segment. By comparing the deformation convergence of the two excavation methods, the left-right-middle sequence of excavation is finally selected.

Keywords: deep buried; small spacing; multi-line parallel shield; numerical simulation; segment deformation; section convergence

硬 X 射线自由电子激光装置位于上海张江综合性国家科学中心核心区域,装置总长约 3.1 km,包含超导直线加速器隧道、波荡器隧道、光束线隧道等结构。该装置建成后,将成为世界上最高效和最先进的自由电子激光用户装置之一。硬 X 射线自由电子激光具有更高的亮度、更短的脉冲结构和更好的相干性,能提供的 X 射线峰值亮度比第三代同步辐射光源高 10^9 倍。作为世界顶级的科研基础设施,硬 X 射线自由电子激光装置将刺激多学科的发展,为物理、化学、生命科学、材料科学、能源科学等多学科提供高分辨成像、超快过程探索、先进结构解析等尖端研究手段。该装置的土建部分由多条平行盾构隧道组成。在深埋小净距的特殊情况下,多线盾构隧道的施工必定会给各条隧道,尤其是首挖隧道带来重大影响,也会对随后的科学实验装置的使用产生不利影响。因此,对于深埋小净距多线隧道盾构推进时,各条隧道,尤其是首挖隧道的断面变形历时曲线和收敛规律有必要进行深入研究。

目前多线平行隧道的研究主要集中于双线。针对双线隧道开挖引起的地表沉降、隧道变形等问题,国内外学者通过理论研究^[1-6]、数值模拟^[7-14]、模型试验^[15-16]和现场监测^[17-19]等不同方面进行了深入的探讨。对于三线隧道,王明年等^[20]通过模型试验对软弱围岩下三孔小间距浅埋暗挖隧道的地表沉降控制技术进行了研究;陈越峰等^[21]针对上海某地铁近距离三线并行盾构区间隧道的施工进行现场监测分析研究,总结归纳了盾构施工对周围深层土体水平位移、深层土体沉降、孔隙水压力的基本影响规律;赵建华^[22]采用数值模拟分析方法研究了多线隧道不同施工开挖顺序工况下的地表沉降、初期支护位移、围岩塑性区和初期支护受力情况,并进行对比分析。

由于目前对多线平行盾构的研究主要集中在双线,而对深埋三线及以上平行盾构的研究较少。本文通过结合上海硬 X 射线激光装置土建工程,探究了深埋小净距多线平行盾构隧道在不同开挖顺序条件下,各盾构隧道,尤其是首挖隧道的变形情况,对其断面的变形收敛规律进行了研究,提出了合适的隧道开挖次序;探究了不同施工参数对首挖隧道管片变形的影

响,为后续施工的顺利推进提供了保障。

1 工程概况

上海硬 X 射线自由电子激光装置土建工程位于上海市浦东新区张江园区祖冲之路与华夏中路之间,西侧为罗山路高架和磁悬浮。项目主要由长约 3.2 km 的地下隧道、5 个竖井及竖井附近的地面设施组成。地下隧道段整体呈南北走向。拟建工程地下隧道分为加速器段、波荡器段、光束线段和超长光束线段。加速器段由 1 条隧道构成,长度约 1 285 m;波荡器段由 3 条隧道构成,长度各约 400 m;光束线段由 3 条隧道构成,长度各约 300 m;超长光束线段由 3 条隧道构成,长度各约 785 m。其对应的平面示意图如图 1 所示,盾构之间的关系如图 2 所示。隧道均采用拼装式混凝土衬砌管片,外径为 6.6 m,内径为 5.9 m,管片厚度为 350 mm,环宽 1.5 m。管片混凝土强度等级为 C55,抗渗等级 P12,错缝拼装。隧道间距为 4 m,盾构



图 1 硬 X 射线平行盾构工程平面图

Fig. 1 Layout of the hard X-ray parallel shield engineering

机覆土深度 30 m, C/D 约为 4.55。工程采用 3 台土压式平衡盾构机施工, 相隔一段时间渐次出发。本工程自 2019 年开始施工, 现阶段已完成超深工作井工程, 盾构段还未开始施工。施工方下阶段将会按照本文所提供的开挖次序进行工程测试。盾构推进的准备

工作正在有条不紊的推进当中。

本区间地层由黏性土、粉土、砂性土交互沉积而成, 按土层结构、成因及性状特性将其划分为 7 层, 土层分布情况如图 2 所示, 由地勘报告可得各土层物理力学参数见表 1。地下水为潜水, 埋深 2 m。

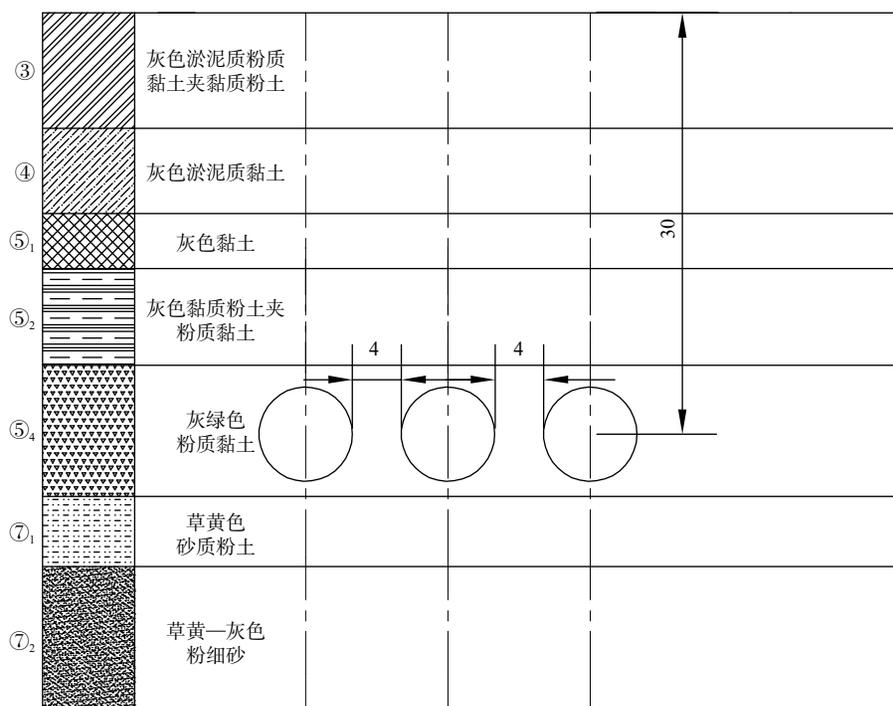


图 2 小净距平行盾构隧道横剖面图 (单位: m)

Fig. 2 Cross section of a parallel shield tunnel (unit: m)

表 1 土体物理力学参数

Table 1 Mechanical parameters of soils

土层	层厚/m	重度/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa	泊松比	渗透系数/(cm·s ⁻¹)
③	11.0	17.7	16	14.0	32.14	0.40	6×10 ⁻⁷
④	8.0	16.8	16	9.5	19.92	0.40	1×10 ⁻⁸
⑤ ₁	1.7	17.7	20	13.5	34.68	0.40	1×10 ⁻⁸
⑤ ₂	5.3	18.1	12	21.5	57.23	0.35	3×10 ⁻⁶
⑤ ₄	14.6	19.8	43	15.5	46.82	0.40	1×10 ⁻⁸
⑦ ₁	6.4	18.9	4	31.0	94.87	0.30	8×10 ⁻⁶
⑦ ₂	15.0	19.3	3	33.0	116.37	0.30	1×10 ⁻⁵

2 多线盾构施工模拟

2.1 多线盾构施工模拟情况

为了更准确地模拟多线平行盾构的开挖情况, 根据对称原则以及实际的盾构开挖情况(以 3#-4#、4#-5#区间为例, 图 3)采用 2 种不同的开挖方式, 开挖示意图如图 4 所示。其中 5#、6#、7#隧道分别对应左、中、右线隧道。

(1)左线-右线-中线

考虑到实际多条隧道开挖间隔以及模型的尺寸

大小, 以 $\Delta=120$ m 为距离进行盾构隧道开挖。整个多线隧道开挖分为 4 步: ①首先开挖左线隧道; ②左线隧道开挖 Δ 距离后, 右线开挖; 开挖 60 m 后, 左线隧道开挖完成; ③右线隧道开挖 Δ 距离之后, 中线开挖; 开挖 60 m 后, 右线隧道开挖完成; ④中线隧道开挖完成。

(2)中线-右线-左线

与工况 1 类似, 以 $\Delta=120$ m 为距离进行盾构隧道开挖。整个多线隧道开挖分为 4 步: ①首先开挖中线隧道; ②中线隧道开挖 Δ 距离后, 右线开挖; 开挖

60 m 后, 中线隧道开挖完成; ③右线隧道开挖 Δ 距离之后, 左线开挖; 开挖 60 m 后, 右线隧道开挖完成; ④左线隧道开挖完成。

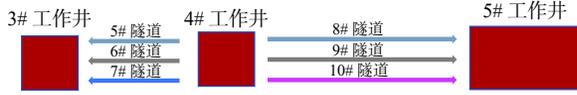


图 3 实际盾构掘进情况

Fig. 3 Actual conditions of shield tunneling

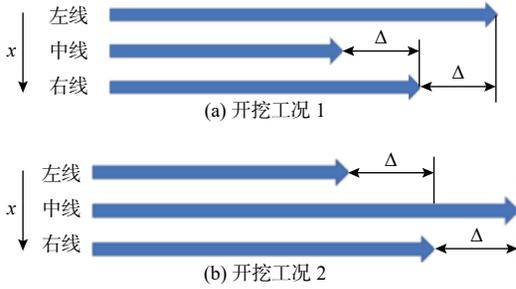


图 4 开挖方式示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the excavation method

2.2 三维有限元模型建立

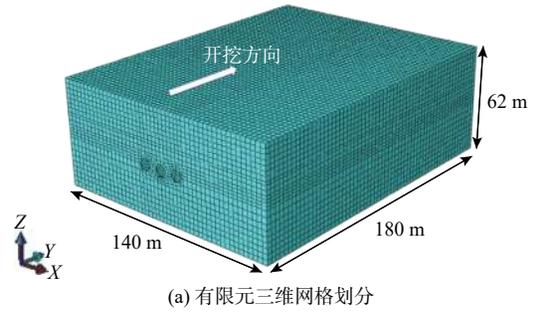
根据隧道间的穿越位置关系, 考虑盾构掘进对土体的扰动及其影响范围, 利用有限元软件 ABAQUS 构建三维有限元模型, 模拟实际工况。模型的尺寸以及盾构相对位置示意图见图 5。模型边界条件: 所有侧面限制其法向位移; 底面设置为 3 个方向全约束; 上表面取至地表, 为自由面, 保证模型的竖向变形不受边界条件约束。盾构隧道的开挖采用生死单元法模拟。

将衬砌管片壁后受扰动土体和注浆情况概化为一均质、等厚的等代层进行计算, 根据文献 [13] 的方法, 将等代层的厚度取为 0.14 m。

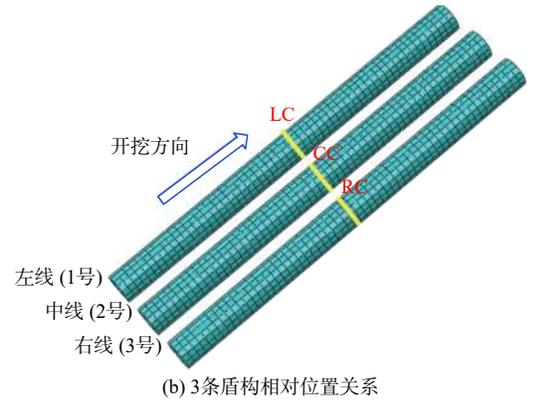
2.3 模型参数选择

土体的本构模型采用 Mohr-Coulomb 模型, 各土层物理力学参数见表 1。衬砌管片采用弹性模型。C55 混凝土根据规范取弹性模量为 35.5 GPa, 泊松比 0.17。为考虑环与环之间连接对隧道整体刚度的降低, 将模型中衬砌弹性模量取为 C55 的 85%, 即折减后衬砌弹性模量 $E = 30.2$ GPa。模拟盾构机施工过程中, 开挖面支护压力采用 0.73 倍的土层静止土压力, 并考虑应力梯度, 将开挖面的支护压力设置为梯形, 上小下大; 为了简化施工步骤, 将 6 环设置为 1 个开挖步, 共计 46 个开挖步。开挖后立即施加支护力, 并添加等代层和衬砌管片。

不施加地下水时, 土体与混凝土管片单元均采用实体单元 C3D8, 模型共计 75 840 个实体单元。施加地下水时, 采用设置孔隙水压力边界的方法进行施



(a) 有限元三维网格划分



(b) 3条盾构相对位置关系

图 5 盾构开挖有限元模型

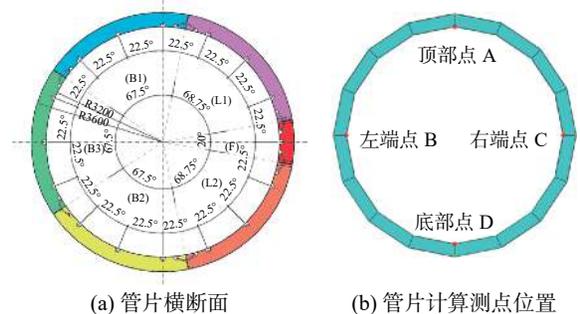
Fig. 5 Finite element model of shield excavation

做。在土层 2 m 深处设置孔隙水压力为 0, 然后以梯度的方式向下进行设置, 梯度值为水的重度。分析步采用 Soils 稳态。土体采用 C3D8P 单元, 管片和等代层依然采用 C3D8 单元。

3 盾构施工影响数值模拟结果分析

3.1 开挖过程中首挖隧道管片变形分析

为简化隧道断面管片变形的描述, 取首挖隧道第 10 节管片, 即图 5 中 LC、CC、RC 位置处管片为研究对象。选取内径顶部处点 A、右端点 C、底部处点 D 和左端点 B 的变形进行研究 (图 6)。



(a) 管片横断面 (b) 管片计算测点位置

图 6 管片截面计算测点位置

Fig. 6 Situation of the segment section

根据各点竖向和水平变形增量数据与隧道开挖历程的关系, 可以得到不同施工阶段首挖隧道管片的

变形增量曲线。

为了更合理地描述管片各特征点的位移增量随时间历程的变化,选取模型的历程分析步为横坐标,用以描述整个模型开挖的过程。由于本节探究的是后挖隧道对首挖隧道管片的变形影响,因此时间历程由第二条隧道开挖起始,直至所有隧道开挖完成。

由于地下岩土层环境的复杂性和不确定性,为了保证盾构掘进的安全性,对盾构的顶推力进行了参数分析。这里引入支护应力比 λ :

$$\lambda = \sigma_s / \sigma_0 \quad (1)$$

式中: λ ——支护应力比,本次 λ 取为 0.5, 0.6, 0.7, 0.8;

σ_s ——开挖面中心顶推力;

σ_0 ——隧道中心原始地层静止土压力。

注浆的弹性模量受材料种类、硬化时间以及周围土体的影响较大,对管片的变形收敛具有一定的影响,因此也对其进行了参数的敏感性分析,这里取弹性模量 4, 6, 8, 10 MPa 进行分析。由表 2 可以看出有无地下水对管片收敛的影响较小,因此选取无地下水时的情况进行参数分析。

3.1.1 工况 1“左-右-中”管片变形分析

选取 LC 管片顶部处与底部处的竖直 U3 变形增量和左端点与右端点的水平 U1 变形增量绘制变形增量图,进行管片变形分析。

(1) 地下水的的影响

由图 7 可知,随着后 2 条隧道的开挖,首挖隧道管片顶部和底部的竖向位移增量呈现一小一大“同向双峰”的变化形式,且双峰出现的位置皆位于另外 2 条隧道开挖面附近所选取管片的时间。峰值不同的原因是由于后 2 条隧道与首挖隧道的不同间距所导致的。由图 7(a)(b)可知,顶部和底部点的位移增量皆为负值,即首挖隧道在另外 2 条隧道开挖的影响下,隧道管片整体不断下移,这是由于后 2 条隧道开挖后应力释放的结果。在地下水的影响下,由于水压的作用,导致隧道的竖向变形增量变大,A 点竖向变形最大值由无水时的-0.066 mm 变为-0.121 mm; D 点的竖向变形最大值由无水时的-0.026 mm 变为-0.072 mm。由图 7(c)(d)可知,在地下水的影响下,管片水平变形增量略有增大,尤其是右侧隧道开挖导致的 LC 管片

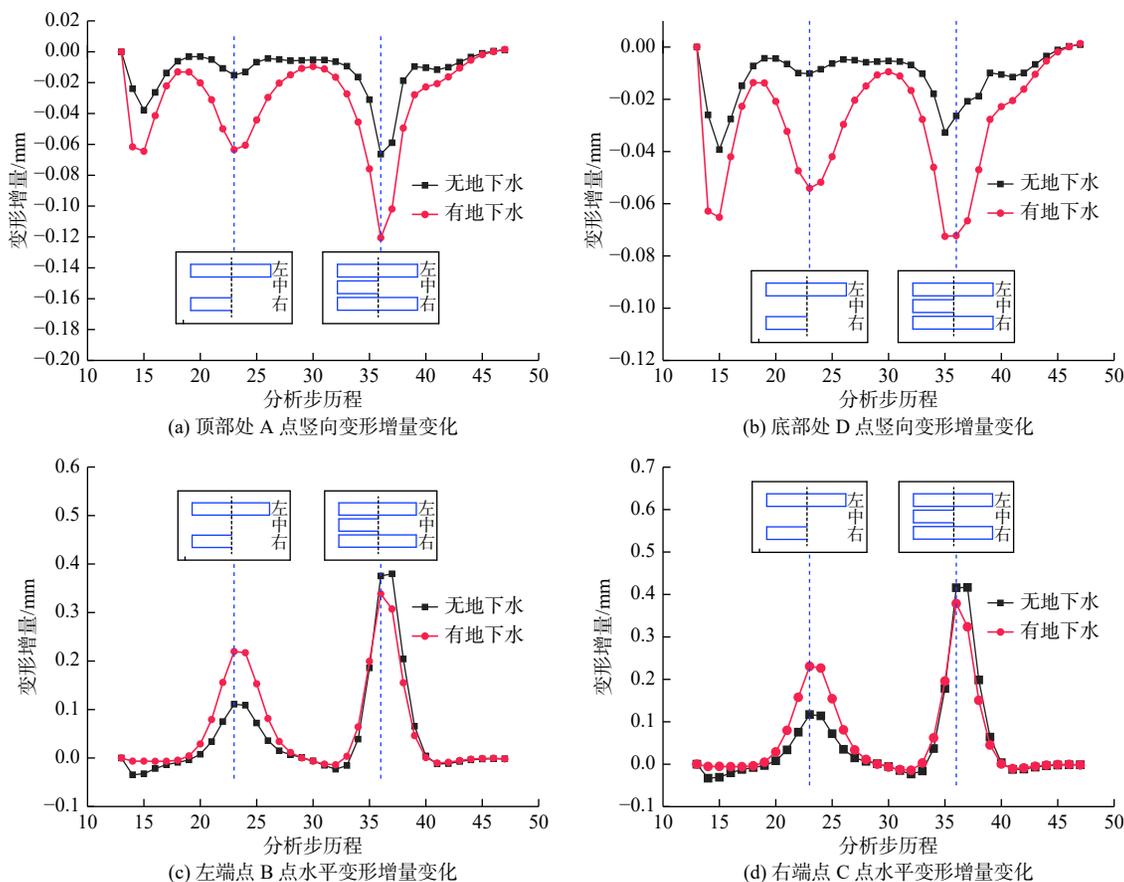


图 7 地下水对管片变形的影响 (工况 1) ($E=10 \text{ MPa}$, $\lambda=0.7$)

Fig. 7 Influence of groundwater on the deformation of pipe segment (case 1) ($E=10 \text{ MPa}$, $\lambda=0.7$)

变形增量显著增大。B点水平变形增量由0.111 mm变为0.219 mm, C点的水平变形增量由0.116 mm变为0.23 mm。综上可知,地下水对工程有着一定的影响。

(2) 注浆弹性模量的影响

由图8(a)(b)可知,在4种工况下,随着注浆弹性

模量的增大,隧道管片顶部和底部的竖向变形增量随之减小。由图8(c)(d)可知,在4种工况下,随着注浆弹性模量的增大,右侧隧道开挖对首挖隧道的水平变形影响随之减小,而中部隧道开挖对首挖隧道水平变形的影响先增大后略微减小。

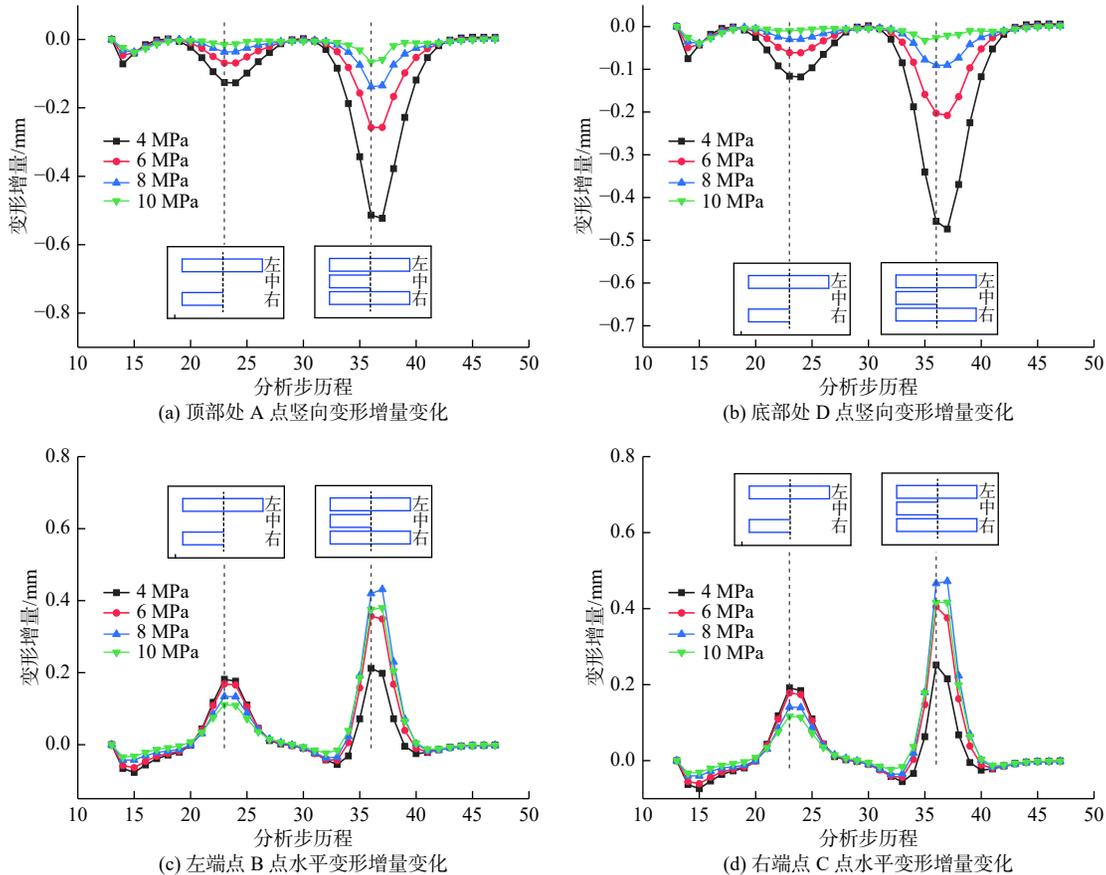


图8 注浆弹性模量对管片变形的影响(工况1)($\lambda=0.7$)

Fig. 8 Influence of elastic modulus of grouting on the deformation of pipe segment (case 1) ($\lambda=0.7$)

(3) 顶推力的影响

如图9所示,在4种工况下,随着开挖面支护力的增加,A点和D点的竖向位移增量不断减小,B点和C点的水平位移增量不断增大。但支护力在 $0.6P$ (P 为隧道中心原始地层静止土压力)和 $0.7P$ 时隧道管片变形增量基本一致,因此将支护力维持在 $0.6P \sim 0.7P$ 之间时,隧道管片变形比较稳定,更容易控制。

3.1.2 工况2“中-右-左”管片变形分析

选取CC管片顶部处与底部处的竖直U3变形增量和左端点与右端点的水平U1变形增量绘制变形增量图如图10所示。

(1) 地下水的影响

由图10(a)(b)可知,在没有地下水的影响下,由于土体开挖导致的应力释放使得首挖的中部隧道整

体上浮,双峰的增量都为正值。而在有地下水的影响下,使得首挖的中部隧道整体下沉,双峰的增量均为负值。由图10(c)(d)可知,在有地下水的影响下,管片左右两侧的水平变形增量相较于无地下水时显著增大,左端点最大值由0.295 mm变为0.427 mm,右端点最大值由0.325 mm变为0.473 mm。地下水对衬砌的变形有着一定的影响。

(2) 注浆弹性模量的影响

如图11(a)(b)所示,在4种工况下,随着注浆弹性模量的增大,隧道管片顶点和底部点的竖向变形增量绝对值不断减小,直至10 MPa时变为正值。这是由于注浆弹性模量过低,会使得衬砌管片直接承受来自周围的围岩压力作用,导致衬砌发生过量变形。而在图11(c)(d)中,管片左右两侧的水平变形会由于等

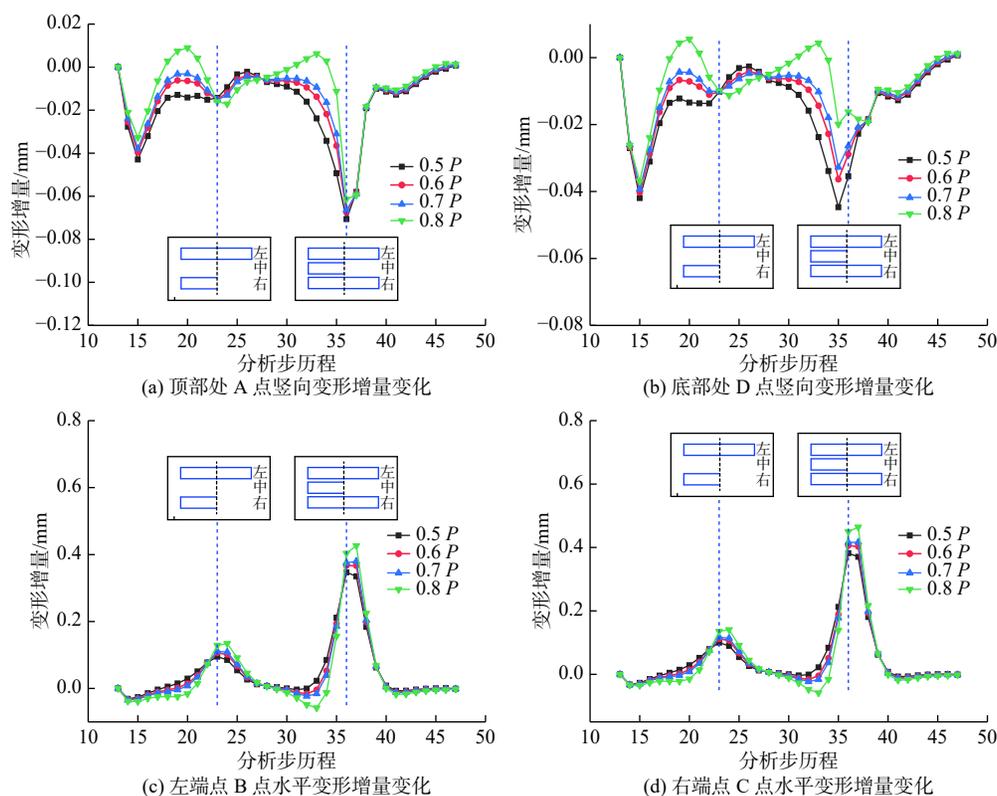


图 9 顶推力对管片变形的影响 (工况 1) ($E=10\text{ MPa}$)

Fig. 9 Influence of supporting force of excavation face on the deformation of pipe segment (case 1) ($E=10\text{ MPa}$)

注: P 为隧道中心原始地层静止土压力, 后同。

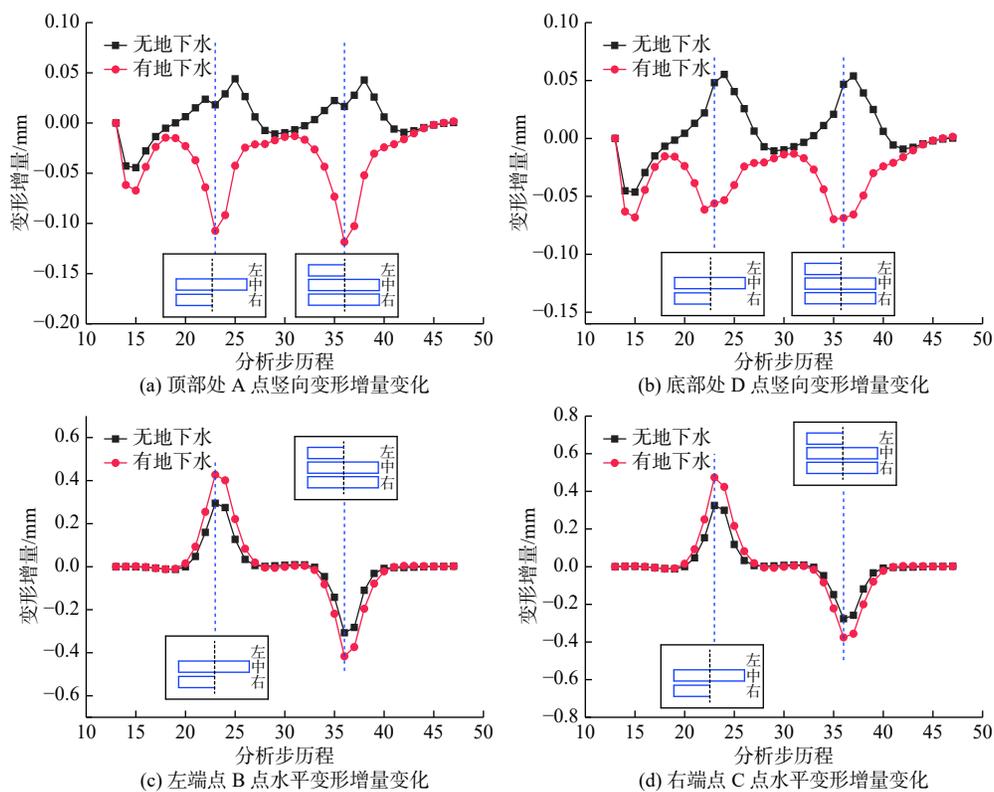
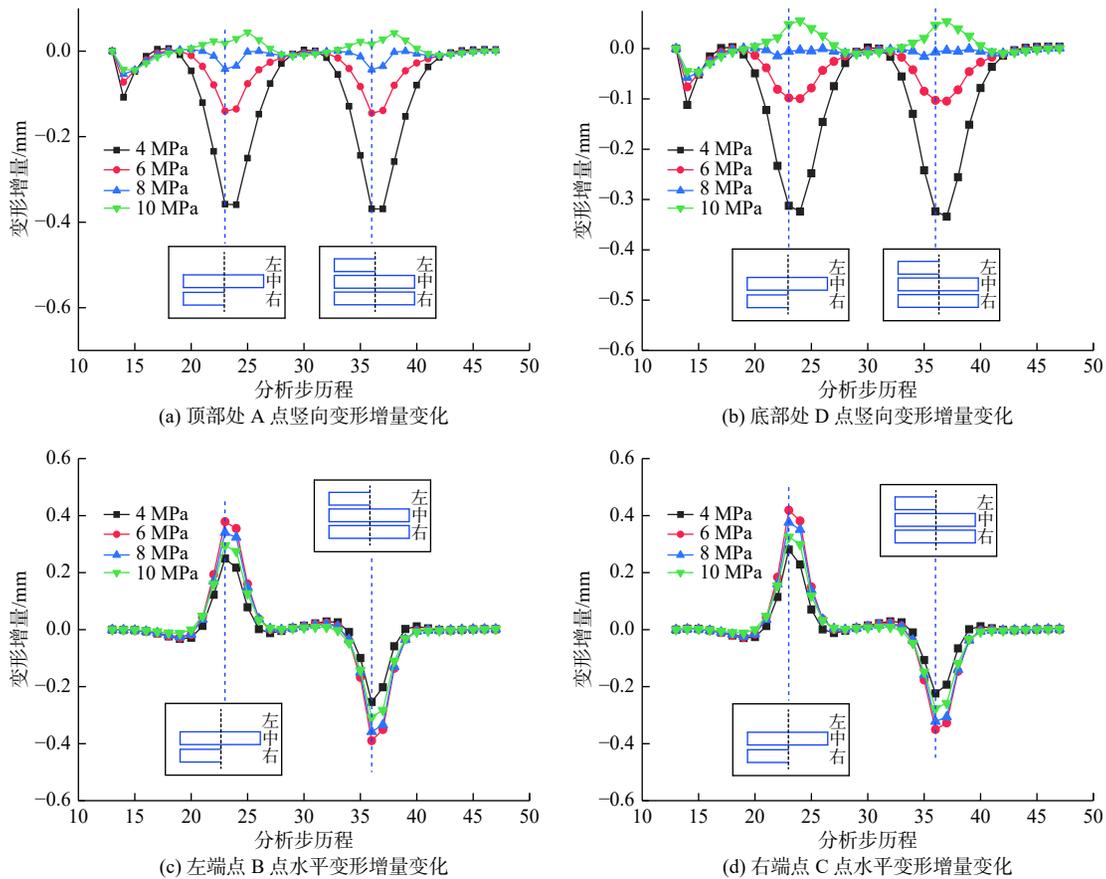


图 10 地下水对管片变形的影响 (工况 2) ($E=10\text{ MPa}$, $\lambda=0.7$)

Fig. 10 Influence of groundwater on the deformation of pipe segment (case 2) ($E=10\text{ MPa}$, $\lambda=0.7$)

图 11 注浆层弹性模量对管片变形的影响 (工况 2) ($\lambda=0.7$)Fig. 11 Influence of elastic modulus of grouting layer on the deformation of pipe segment (case 2) ($\lambda=0.7$)

代层的刚度变化而产生先增大后减小的变化趋势。

(3) 顶推力的影响

由图 12(a)(b)可知,在 4 种工况下,随着开挖面支护力的增大,管片顶部和底部的竖向位移增量基本不变。由图 12(c)(d)可知,随着支护力的增大,管片左右两侧点的水平位移增量不断增大,但增大幅度很小。当支护力在 $0.6P \sim 0.7P$ 之间时,隧道管片变形增量基本一致,因此将支护力维持在 $0.6P \sim 0.7P$ 之间时,隧道管片变形比较稳定,更容易控制。

3.2 隧道横断面管片收敛情况分析

由以上分析可知,工况 1 与工况 2 隧道收敛变形情况有所不同。为了便于管片变形收敛情况的比较,选取首挖隧道第 10 环处管片断面进行分析。分析时分别考虑了有无地下水的影响,2 种工况下管片的收敛变形图如图 13 所示,收敛变形见表 2。

结合图 13 与表 2 中的数据可知,对于工况 1,在无地下水情况下,隧道管片整体向右下方偏移,隧道趋于扁平形状,管片顶、底之间的相对位移量为 0.07 mm,两侧拱腰之间管片的相对位移值 0.08 mm。对于工况 2,隧道管片整体向左上方偏移,表现为隧道趋于扁

平,管片顶、底之间的相对位移量为 0.1 mm,两侧拱腰之间管片的相对位移值为 0.08 mm。当存在地下水时,工况 1 的管片收敛情况变化很小,而工况 2 的收敛变化较大,竖向收敛值达到 0.18 mm。因此,对比这几种情况,第一种开挖方式,即“左-右-中”的开挖方式对首挖隧道影响最小。

4 结论

(1) 首挖隧道为左线隧道时,随着右线和中线隧道的开挖,首挖隧道管片变形增量呈“一小一大”双峰分布,这是由于后续两线隧道距离首挖隧道距离远近的不同导致;首挖隧道为中部隧道时,随着右线和左线隧道的开挖,首挖隧道管片竖直方向变形增量呈现“同侧相同双峰”分布,水平方向变形增量呈现“异侧相同双峰”分布,表明该工况下首挖隧道的管片变形不受两侧隧道开挖次序的影响。

(2) 随着注浆弹性模量的增大,隧道管片竖向变形增量不断减小,水平变形增量有一个先增大后减小的变化;随着开挖面支护力的增大,隧道管片的竖向变形增量绝对值不断减少,水平变形增量不断增大。

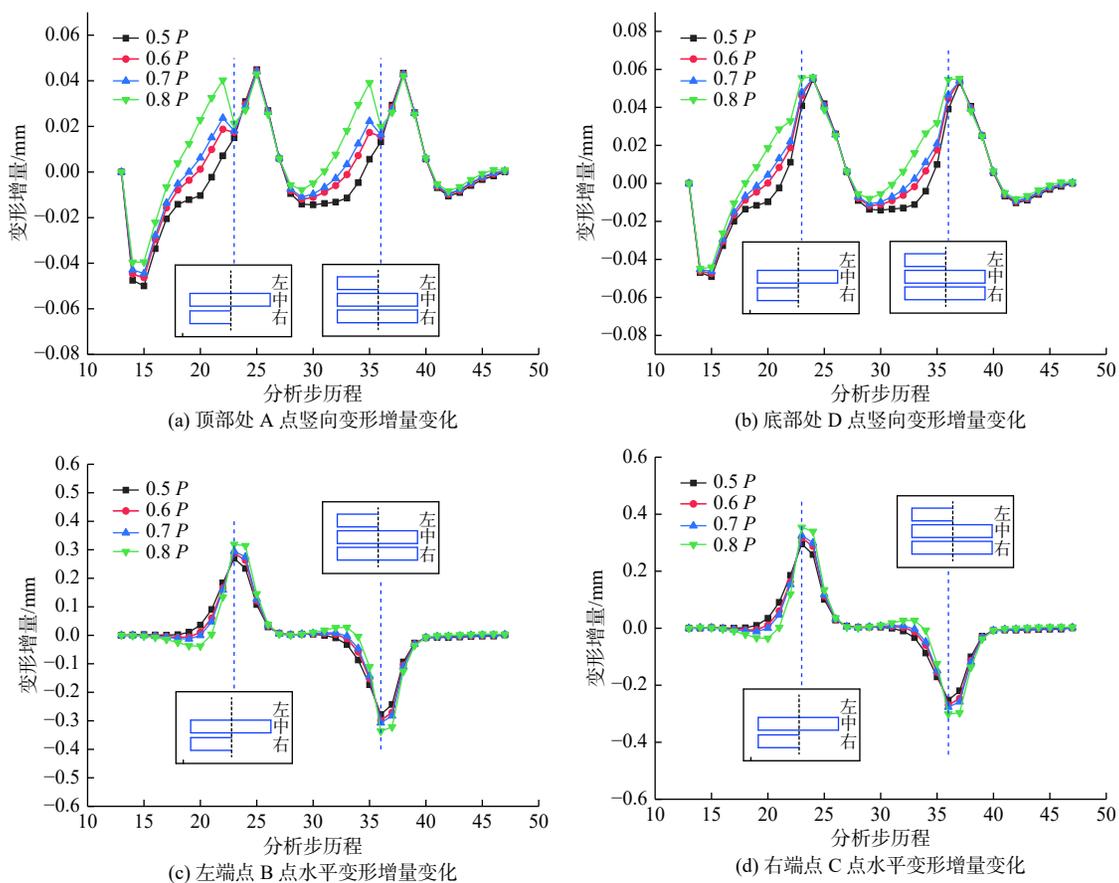


图 12 顶推力对管片变形的影响 (工况 2) ($E=10\text{ MPa}$)

Fig. 12 Influence of supporting force of excavation face on the deformation of pipe segment (case 2) ($E=10\text{ MPa}$)

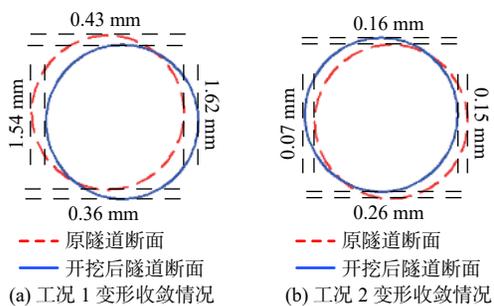


图 13 隧道无地下水时管片收敛变形

Fig. 13 Convergence deformation of tunnel segment without water

当顶推力在 $0.6P \sim 0.7P$ 之间时, 隧道管片变形增量基本一致, 因此将顶推力维持在 $0.6P \sim 0.7P$ 之间时, 隧道管片变形比较稳定, 更容易控制。

(3) 有地下水存在时, 管片变形增量的变化规律基本不变, 但管片整体位移较无地下水时增大。

(4) 在对比 2 种工况隧道开挖完成后的隧道管片收敛情况后, 工况 1 的收敛情况更小, 因此开挖时建议采用左线-右线-中线的开挖方式, 降低隧道开挖对已建隧道管片的影响。

表 2 不同工况下管片收敛变形
Table 2 Convergence deformation of segments under different conditions

/mm

工况		竖向变形			水平变形		
		顶部点(A)	底部点(D)	收敛值	左侧点(B)	右侧点(C)	收敛值
工况1	无地下水	-0.43	-0.36	-0.07	1.54	1.62	0.08
	有地下水	-1.06	-0.95	-0.11	2.01	2.09	0.08
工况2	无地下水	0.16	0.26	-0.10	-0.07	-0.15	0.08
	有地下水	-1.18	-1.00	-0.18	0.10	0.20	0.10

注: 收敛变形, “+”表示外扩, “-”表示内收。

参考文献 (References) :

- [1] 刘大刚, 陶德敬, 王明年. 地铁双隧道施工引起地表沉降及变形的随机预测方法 [J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3422 - 3426. [LIU Dagang, TAO Dejing, WANG Mingnian. Stochastic method for predicting ground surface settlement and deformation induced by metro double tube tunneling [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(12): 3422 - 3426. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 陈春来, 赵城丽, 魏纲, 等. 基于Peck公式的双线盾构引起的土体沉降预测 [J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2212 - 2218. [CHEN Chunlai, ZHAO Chenli, WEI Gang, et al. Prediction of soil settlement induced by double-line shield tunnel based on Peck formula [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(8): 2212 - 2218. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 魏纲, 周杨侃. 双线平行盾构开挖引起的地表沉降随机介质预测 [J]. 现代隧道技术, 2016, 53(5): 92 - 99. [WEI Gang, ZHOU Yangkan. Stochastic medium prediction for ground settlement induced by double-line parallel shield tunnelling [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2016, 53(5): 92 - 99. (in Chinese with English abstract)]
- [4] FU J Y, YANG J S, YAN L, et al. An analytical solution for deforming twin-parallel tunnels in an elastic half plane [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2015, 39(5): 524 - 538.
- [5] YANG X L, WANG J M. Ground movement prediction for tunnels using simplified procedure [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2011, 26(3): 462 - 471.
- [6] SUWANSAWAT S, EINSTEIN H H. Describing settlement troughs over twin tunnels using a superposition technique [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(4): 445 - 468.
- [7] 苑绍东, 杨林, 黄舰. 并行隧道工程中后行隧道分步开挖对先行隧道横纵向地表沉降的影响研究 [J]. 现代隧道技术, 2018, 55(6): 80 - 86. [YUAN Shaodong, YANG Lin, HUANG Jian. Effect of sequential excavation of the second tunnel tube on transverse and longitudinal ground settlements of the first tunnel tube in parallel tunnels [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2018, 55(6): 80 - 86. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 陶连金, 孙斌, 李晓霖. 超近距离双孔并行盾构施工的相互影响分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1856 - 1862. [TAO Lianjin, SUN Bin, LI Xiaolin. Interaction analysis of double holes extremely close approaching parallel shield tunnels construction [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(9): 1856 - 1862. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 卢健, 姚爱军, 郑轩, 等. 地铁双线隧道开挖地表沉降规律及计算方法研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊 2): 3735 - 3747. [LU Jian, YAO Aijun, ZHENG Xuan, et al. Study on the law and computational method of ground surface settlement induced by double-line tunnel excavation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(Sup 2): 3735 - 3747. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 白云, 戴志仁, 徐飞, 等. 后掘盾构越先掘盾构对地层变形的影响研究 [J]. 土木工程学报, 2011, 44(2): 128 - 135. [BAI Yun, DAI Zhiren, XU Fei, et al. Study of the influence of one shield passing another on ground deformation for construction of parallel tunnels [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(2): 128 - 135. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 赵文, 纪新博, 李慎刚, 等. 平行隧道施工引起地表沉降的数值试验研究 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(3): 439 - 443. [ZHAO Wen, JI Xinbo, LI Shengang, et al. Numerical experiment studies on ground settlement during the parallel tunnels construction [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2013, 34(3): 439 - 443. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 王帅帅, 高波, 全晓娟, 等. 不同地质条件下浅埋偏压小净距隧道围岩稳定性研究 [J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(3): 60 - 65. [WANG Shuaishuai, GAO Bo, QUAN Xiaojuan, et al. A study of the surrounding rock stability of bias small-interval tunnel in different rock strata [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014, 41(3): 60 - 65. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 张孟喜, 张靖, 吴应明, 等. 全风化岩层中双线盾构上穿邻近地铁隧道影响分析 [J]. 土木工程学报, 2019, 52(9): 100 - 108. [WANG Shuaishuai, GAO Bo, QUAN Xiaojuan, et al. Analysis of double-line shield tunnel over-crossing subway tunnel in completely weathered rock formation [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(9): 100 - 108. (in Chinese with English abstract)]
- [14] GUO D L, ZHAO D S. Analysis based on FLAC3D of surface subsidence caused by a double-tube parallel tunnel excavation [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013,

- 395/396: 443 – 446.
- [15] 缪林昌, 王非, 吴宏伟, 等. 平行盾构开挖离心机模拟试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(2): 373 – 379. [MIAO Linchang, WANG Fei, WU Hongwei, et al. Centrifugal model tests on excavation of twin parallel tunnels[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(2): 373 – 379. (in Chinese with English abstract)]
- [16] HE C, FENG K, FANG Y, et al. Surface settlement caused by twin-parallel shield tunnelling in sandy cobble strata[J]. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 2012, 13(11): 858 – 869.
- [17] 顾其波, 郑荣跃, 杨芬, 等. 宁波软土盾构隧道施工地表沉降分析[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(1): 85 – 93. [GU Qibo, ZHENG Rongyue, YANG Fen, et al. An analysis of the surface settlement in the shield construction on the Ningbo urban rail transit[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(1): 85 – 93. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 刘书斌, 邓如勇, 方勇. 富水岩溶地层三车道公路隧道二次衬砌受荷特征研究[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(6): 74 – 80. [LIU Shubin, DENG Ruyong, FANG Yong. Research on the mechanical behavior of the secondary lining of a 3-lanes highway tunnel in the water-rich karst strata[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(6): 74 – 80. (in Chinese with English abstract)]
- [19] CHEN R P, ZHU J, LIU W, et al. Ground movement induced by parallel EPB tunnels in silty soils[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2011, 26(1): 163 – 171.
- [20] 王明年, 李志业, 关宝树. 3孔小间距浅埋暗挖隧道地表沉降控制技术研究[J]. *岩土力学*, 2002, 23(6): 821 – 824. [WANG Mingnian, LI Zhiye, GUAN Baoshu. Research on controlling measures for ground surface settlement of three little distance parallel shallow embedded tunnels[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(6): 821 – 824. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 陈越峰, 张庆贺, 张颖, 等. 近距离三线并行盾构隧道施工实测分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2008, 4(2): 335 – 340. [CHEN Yuefeng, ZHANG Qinghe, ZHANG Ying, et al. In-situ monitoring and analyzing on construction of three closely spaced parallel pipe shield tunnels[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2008, 4(2): 335 – 340. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 赵建华. 三孔小净距隧洞下穿既有铁路施工开挖顺序研究[J]. *国防交通工程与技术*, 2016, 14(4): 7 – 10. [ZHAO Jianhua. A study of the excavation sequence for a three-pipe small-spaced tunnel under-crossing an existing railway[J]. *Traffic Engineering and Technology for National Defence*, 2016, 14(4): 7 – 10. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张明霞