

盾构隧道穿上软下硬地层掌子面顶推力优化研究^{*}

何祥凡¹, 高峰², 申兴柱¹, 王帆¹

(1. 西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 成都 610031;

2. 中国水利水电第十一工程局有限公司, 郑州 450001)

摘 要: 上软下硬复合地层是盾构施工中经常遇到的一类地质状况, 在这种特殊地层条件下进行盾构施工有很多难点, 结合深圳地铁7号线穿越上软下硬交界地层的工程实例, 采用数值模拟的计算方法, 对盾构隧道穿上软下硬复合地层(“由软入硬”及“由硬入软”)掌子面各分区内顶推力进行优化分析, 结果表明: 在盾构掘进穿越上软下硬地层的过程中, 适当减小上部分区内千斤顶推力并增大下部分区顶推力的措施可以有效减小“由软入硬”段管片应力(S1减小2.76%~3.1%、S3减小3.39%~3.46%), 并得出掌子面上中下分区内千斤顶推力的比例在8:13:18~10:13:16范围内较为合理。但这种调整盾构姿态的措施会使地表沉降出现增大趋势, 而在实际工程中则可以适当增大土仓压力来抑制地表沉降的增大。

关键词: 盾构隧道; 上软下硬地层; 管片应力; 顶推力优化

中图分类号: U455.43

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)06-1603-08

Optimization Study on Jacking Force of the Tunnel Face when Shield Tunnel Crossing the Upper-soft and Lower-hard Stratum

He Xiangfan¹, Gao Feng², Shen Xingzhu¹, Wang Fan¹

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P.R. China; 2. Sinohydro Bureau 11 Co. Ltd., Zhengzhou 450001, P.R. China)

Abstract: The upper-soft lower-hard composite stratum is a kind of special geological conditions frequently encountered in shield construction, but there are many difficulties in shield construction under such stratum conditions. Based on the shield tunnel engineering crossing the upper-soft lower-hard stratum in Shenzhen Metro Line 7 Project, numerical simulation method is used to optimize different jacking force schemes of each partition in tunnel face when tunnel crossing the upper-soft lower-hard composite stratum (stratum crossed by tunnel “from the soft into hard” and “from the hard into soft”). The calculation results indicate that measures of properly decreasing the jacks’ thrust of upper partition and increasing the jacks’ thrust of lower partition in the tunnel face could effectively reduce the stress of segments in the stratum crossed by tunnel “from the soft into hard” (S1 decreases 2.76~3.1%, S3 decreases 3.39~3.46%), and it also suggests that proportion of jacks’ thrust of the upper, middle and lower parts in tunnel face within the range 8:13:18~10:13:16 is reasonable. However, such adjustment measures of shield posturer will make the ground subsidence show an increase tendency, so we can also increase the soil pressure properly to restrain the increase tendency of ground subsidence in the actual project.

Keywords: shield tunnel; upper-soft lower-hard stratum; segment stress; optimization of jacking force

^{*} 收稿日期: 2018-04-29(修改稿)

作者简介: 何祥凡(1991-), 男, 河南信阳人, 硕士生, 主要从事盾构隧道工程数值分析等研究工作。

E-mail: 185084067@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(51578461)

0 引言

随着我国城市化进程的不断推进,盾构法施工在隧道建设中的应用越来越广泛。上软下硬复合地层常见于我国广州、深圳、福州等地,是一种盾构施工中比较棘手的特殊地质状况。由于介质的不均匀性,盾构机在上软下硬复合地层条件下掘进经常会面临以下难题:盾构姿态不易控制,同时千斤顶受力不均,管片容易破损^[1-5];盾构由软岩向硬岩掘进的过程中,刀盘扭矩不易控制,在硬岩中掘进刀具磨损严重^[2-8];土压及出土量不易控制,容易造成地面较大沉降甚至塌陷^[9-10]。

目前,国内外对于穿越上软下硬复合地层的盾构施工的研究主要集中于盾构机的选型、掘进参数的选取、盾构掘进姿态的控制及盾构机的适应性改造等几个方面。袁敏正等^[11]以广州地铁为工程依托,对在复合地层条件下盾构机的主要技术参数及刀具布置形式进行分析和研究,并对其合理性及适应性进行了评价。张厚美^[12]以广州地铁 3 号线为工程背景,探究了盾构刀盘转速及顶推力等施工参数对掘进速度、刀盘扭矩的影响,同时建立了土压平衡式盾构在软土地层中的掘进速度和刀盘扭矩的数学模型。王晖等^[13]从地质情况、掘进参数、管片选型、成型管片上浮等几个方面提出了影响复合地层盾构掘进姿态的主要因素和控制措施,指出了在掘进参数控制方面存在的误区。韦良文等^[14]结合上海复兴东路越江隧道盾构施工的大量监测数据,论述了开挖面的平衡理论与稳定机理,研究了泥水平衡式盾构施工参数(切口水压、泥密度、排泥密度、推进速度等)对开挖面的稳定性与平衡性的影响机理。

从这些成果来看,现有的研究较少从盾构通过软硬互层交界面时顶推力对地表沉降及管片内力的影响的角度来研究盾构穿越上软下硬地层时掌子面顶推力的优化问题。鉴于此,本文以深圳地铁 7 号线盾构穿越典型的软硬互层区段为研究背景,通过数值计算,获得盾构施工对软硬交界段(分为“由软入硬”、“由硬入软”两种情况)的地表沉降及管片内力的影响规律,对盾构隧道穿越上软下硬地层时的掌子面的顶推力进行优化。

1 工程概况

深圳地铁 7 号线西丽湖站—西丽站区间隧道采用盾构法进行施工,其中管片厚度为 300 mm,幅

宽为 1 500 mm,内直径为 5 400 mm,外直径为 6 000 mm。

区间隧道 DK0+763.427-DK0+863.427 段穿越地层为上软下硬复合地层,洞身主要穿越地层为全风化花岗岩和微风化花岗岩地层,并夹杂有孤石。随着掘进工作的开展,掌子面上微风化花岗岩占比先增大后减小,形成向上突起状。地下水位高于隧道拱顶,地层水理性质较差,全风化花岗岩在饱和状态下受掘进扰动后,易软化变形,强度、承载力降低,易发生围岩失稳。在地质构造作用的影响下,基岩节理裂隙发育,部分揭露的中、微风化花岗岩均较破碎,地质条件较差,此区段隧道左线地质情况如图 1 所示。

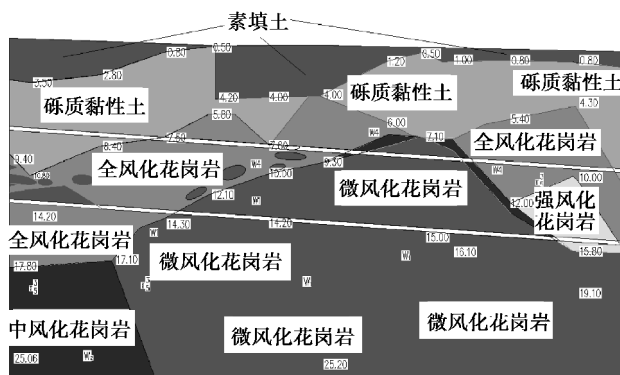


图 1 此区段左线地质剖面图

Fig. 1 Geological profile of the tunnel section in left line

2 盾构掘进过程的数值模拟

2.1 模型及材料参数

按照西丽区间隧道盾构穿越上软下硬区段(DK0+763.427-DK0+863.427)的实际地层分布情况建立数值计算模型,如图 2 所示。在计算模型中,地层、管片衬砌和注浆层使用 SOLID45 进行模拟,并将管片衬砌和注浆层视为弹性材料;地层材料使用各向同性弹塑性本构,并满足 Mohr-Coulomb 屈服准则。同时,在计算过程中仅考虑自重应力场的作用。

考虑到边界效应对计算精度和结果的影响,根据圣维南原理,计算模型的横向宽度为 60 m,高度为 30 m,纵向长度为 99 m,隧道的平均埋深取值为 9 m。考虑注浆层厚度,盾构外径取为 6.4 m,注浆填充层厚度取 0.2 m;衬砌外径取 6 m,每环衬砌幅宽 1.5 m,厚度取 0.3 m。边界条件为:模型四周法向约束,底面为 XYZ 全约束,地表为自由面^[15]。

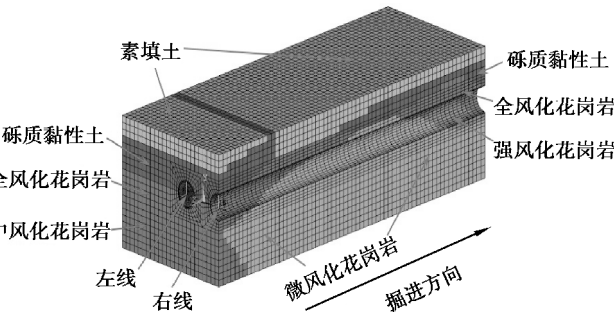


图 2 模型-地层示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the stratum in numerical model

盾构隧道管片衬砌由于接头对结构刚度的削弱效应,管片横向抗弯刚度的有效率取值为0.85^[16],即在计算模型中管片材料的弹性模量取值为 $2.932\ 5\times10^4$ MPa。根据依托工程的岩土工程勘察报告及相关规范,地层土体和结构材料的物理力学参数取值见表 1。

表 1 地层及衬砌、注浆层的材料参数
Table 1 Material parameters of the stratum, tunnel lining and grouting layer

名称	天然重度 /(kN·m ⁻³)	泊松比	内摩 擦角	粘聚力 /kPa	弹性模量 /MPa
素填土	19.4	0.4	22.6	19.2	21.5
砾质黏性土	18.5	0.35	22	21.9	21.7
全风化花岗岩	19.3	0.35	24	23.7	26.1
强风化花岗岩	19.9	0.35	35	17	75
中风化花岗岩	22	0.23	40	500	80
微风化花岗岩	26	0.25	55	2 000	33 000
管片	26	0.2	—	—	29 325
注浆层	21	0.2	—	—	400

2.2 顶推力方案

在实际掘进过程中,盾构机的千斤顶的顶推作用可以看作在 4 个分区内施加的顶推力,其中上下位置分区内的千斤顶控制盾构机在竖向(Y 向)的掘进方向,左右位置分区内的千斤顶控制横向(X 向)的转弯。为了在数值模拟中最大程度与实际情况相对应,在数值模型中人为将顶推力荷载分为上中下 3 部分,其中上下部分对应实际掘进过程中的上下分区,在不考虑盾构机转弯的条件下,左右分区内千斤顶出力相同,将中部与左右分区相对应。在上中下 3 部分按照一定比例分别施加顶推

力,来模拟盾构机掘进至上软下硬复合地层时不同分区顶推力的调整。千斤顶位置分区、顶推力及管片反力荷载的施加情况如图 3~5 所示。

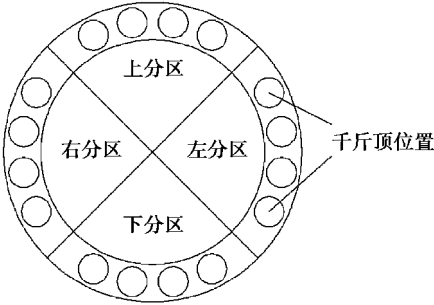


图 3 千斤顶位置与分区示意图

Fig. 3 Schematic diagram of jacks' position and partition

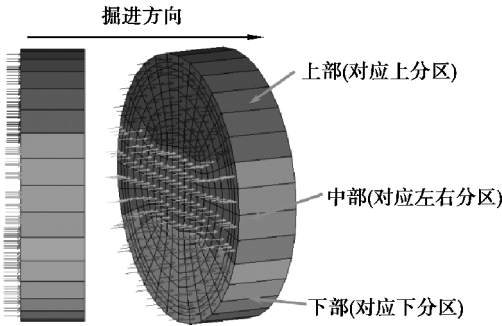


图 4 顶推力荷载施加示意图

Fig. 4 Loading schematic diagram of jacking force

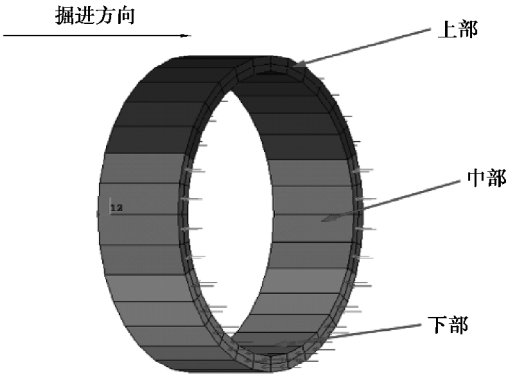


图 5 管片反力荷载施加示意图

Fig. 5 Loading schematic diagram of segment counter-force

本文采用 4 种顶推力施加方案进行计算:①掌子面上中下三部分顶推力按照大约 1:1:1 的比例进行施加;②上中下三部分顶推力按照大约 10:13:16 的比例进行施加;③上中下三部分顶推力按照大约 8:13:18 的比例进行施加;④上中下三部分顶推力按照大约 4:13:22 的比例进行施加。根据盾构穿越上软下硬复合地层施工过程中的掘进参数,千斤顶的顶推力分布于 950~1 100 t 范围

内,对应掌子面的压力范围为 0.289 5~0.335 MPa。取掌子面压力为0.3 MPa时对应的顶推力为 984 t,此时管片受盾构掘进作用影响而所受的压力为 1.796 MPa。数值模拟同时考虑了管片反力及注浆压力(0.15 MPa)的施加,各工况中掌子面及管片的反力荷载值见表 2。

表 2 掌子面顶推力及管片反力荷载值 MPa
Table 2 The load value of tunnel face thrust and segment counter force MPa

方案	比例	顶推力 反力	掌子面位置		
			上部	中部	下部
1	1:1:1	顶推力	0.3	0.3	0.3
		反力	1.796	1.796	1.796
2	10:13:16	顶推力	0.231	0.3	0.369
		反力	1.38	1.796	2.21
3	8:13:18	顶推力	0.185	0.3	0.415
		反力	1.105	1.796	2.487
4	4:13:22	顶推力	0.092	0.3	0.507 7
		反力	0.552	1.796	3.039

2.3 开挖过程的三维模拟

将隧道开挖之前土体在其自重作用下已处于受力变形状态作为有限元分析的初始状态。在数值计算中,采用以下做法从而实现对盾构施工过程的全动态模拟:①在盾构掘削面施加顶推力模拟千斤顶推力对开挖面的作用;②施加注浆压力来模拟盾尾注浆过程;③通过改变注浆层材料参数的方式,模拟注浆浆液的凝结硬化过程;④采用应力释放的方法来实现盾构开挖对土体扰动的时间效应,即土体开挖后,围岩释放荷载的比例为 25%^[17],在注浆层及管片环施作完成后,围岩荷载全部释放,与此同时掌子面向前移动。实际掘进时,采用密闭式的土压平衡盾构,根据相关的研究成果^[18],洞周应力大致释放 20%左右,在此次计算分析中取为 25%。

利用有限元模拟隧道开挖时,根据程序提供的单元“生”与“死”及材料参数变换功能,通过分次杀死单元和分次激活单元以及变换不同位置单元材料参数的操作来实现对盾构掘进全过程的模拟。数值模拟时,将开挖过程简化为循环开挖步,每个计算开挖步(step)长度为 3m(即 2 环衬砌长度),

每个计算开挖步基本分为 2 个时间步(time)进行,双线共计 66 个计算开挖步。

3 计算结果分析

为了获得盾构在穿越软硬不均地层时的地表沉降变化特征,故选取沿隧道纵向 30 m 处的横断面作为隧道穿越上软下硬复合地层“由软入硬”区段的横向观测断面 1,选取沿隧道纵向 75 m 处的横断面作为隧道穿越上软下硬复合地层“由硬入软”区段的横向观测断面 2;选取左线隧道中心处纵向截面作为纵向观测断面,各观测面的分布位置如图 6 所示。

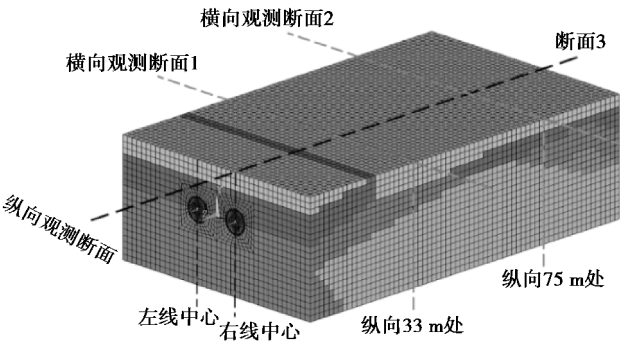


图 6 观测面位置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of observation surface's position

3.1 横向地表沉降

隧道开挖完成后,各项推力施加方案下横向观测断面 1、2 处的地表沉降的变化曲线如图 7、图 8 所示。由图中可以看出:在横向观测面上,地层“由软入硬”处各方案中的地表沉降有较明显的差异,与方案 1 相比分别增大约 0.2 mm(方案 2)、0.4 mm(方案 3)、1.1 mm(方案 4);但在地层“由硬入软”处各方案的地表沉降差异极小。

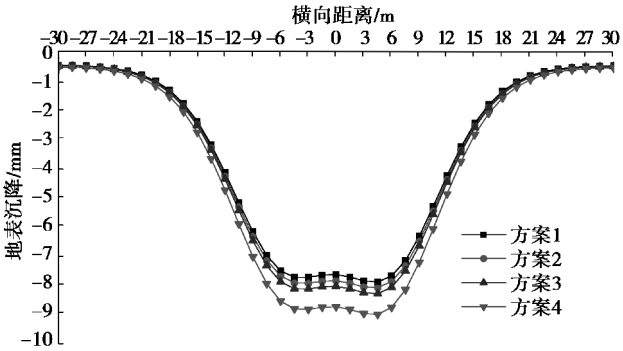


图 7 地层“由软入硬”交界面(观测面 1)处地表沉降

Fig. 7 Surface subsidence at the interface (observation surface 1) of stratum “from the soft into hard”

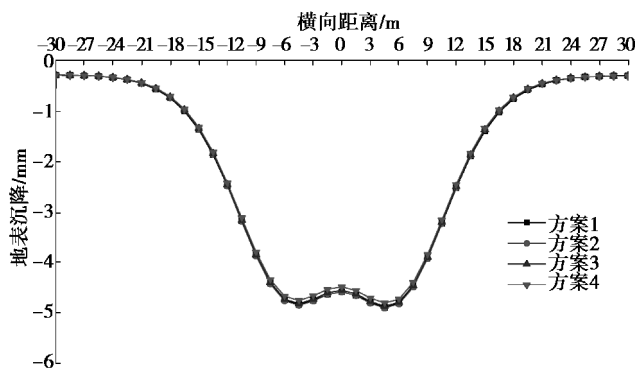


图 8 地层“由硬入软”交界面处(观测面 2)

Fig. 8 Surface subsidence at the interface (observation surface 2) of stratum “from the hard into soft”

3.2 纵向地表沉降

隧道开挖结束之后,在不同顶推力作用下的地表纵向观测断面的沉降随纵向距离的变化曲线如图 9 和图 10 所示。从图中可知,当盾构在软土地层和“由软入硬”地层段施工过程中的地表沉降值在不同顶推力的情况下产生了明显的差异,而地层较硬段地表的沉降在各方案间差异极小。

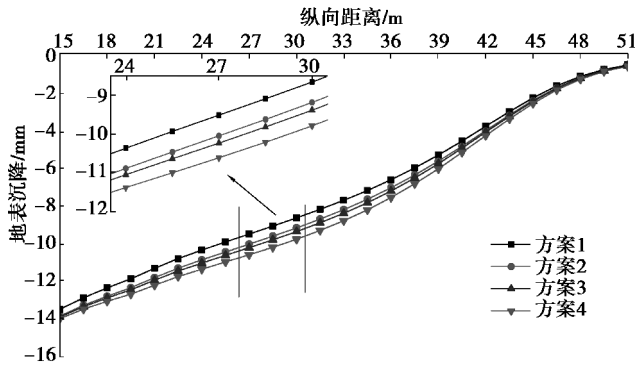


图 9 地层“由软入硬”段沿纵向地表沉降

Fig. 9 Longitudinal surface subsidence in the section (observation surface 1) of stratum “from the soft into hard”

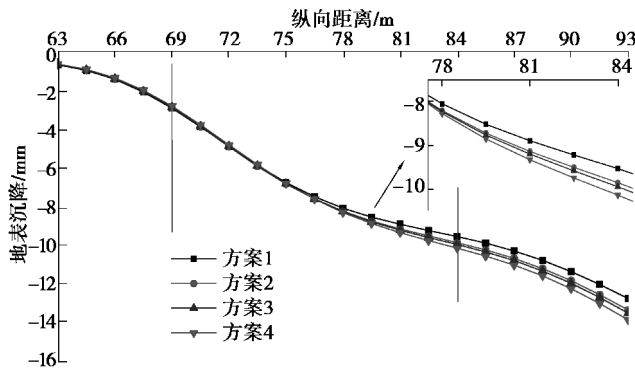


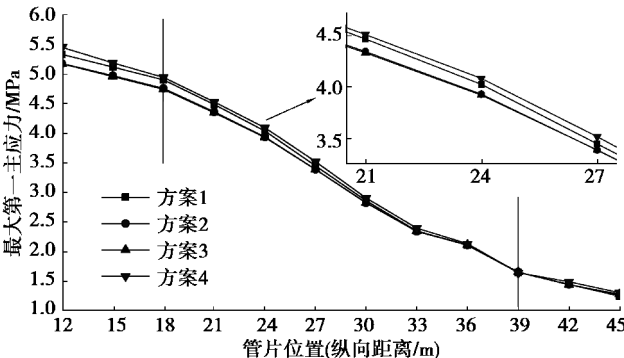
图 10 地层“由硬入软”段沿纵向地表沉降

Fig. 10 Longitudinal surface subsidence in the section (observation surface 2) of stratum “from the hard into soft”

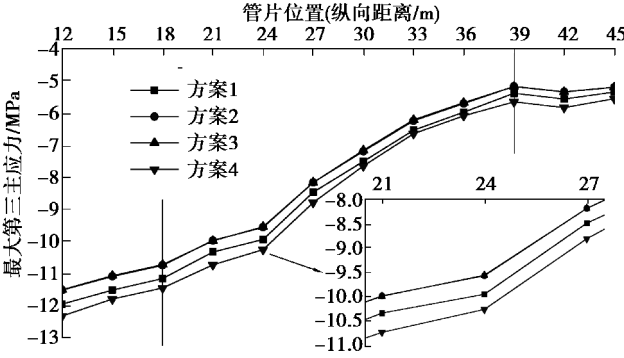
在实际工程中,盾构隧道由较软地层穿越上软下硬地层交界段进入较硬地层的掘进过程中,为调整盾构姿态防止盾构机掌子面出现“磕头”现象,一般会采取适当减小掌子面上部分区内的千斤顶推力而增大下部分区内的千斤顶推力的措施。但从各方案中地表沉降的结果来看,这种措施会使地层较软段及地层“由软入硬”段的地表沉降出现增大的趋势,与方案 1 相比分别增大 6.4%(方案 2)、8.9%(方案 3)、14.1%(方案 4)。因此,建议在能够满足调整盾构姿态的同时适当增大土仓压力。而在盾构隧道由较硬地层穿越软硬地层交界段进入较软地层的掘进过程中,由于盾构机大部分位于较硬地层中,周围地层对盾构机的束缚更强,与“由软入硬”交界段相比盾构姿态不易发生变化,因此掌子面顶推力的调整对地表沉降基本无影响,这也与数值模拟的结果一致。

3.3 管片应力

当双线隧道贯通之后,软硬互层交界断面处的管片衬砌主应力在不同方案下的变化曲线如图 11 和图 12 所示。



(a) 管片内最大第一主应力 S_1



(b) 管片内最大第三主应力 S_3

图 11 地层“由软入硬”段管片主应力变化曲线

Fig. 11 Principal stress curves of segment in the section of stratum “from the soft into hard”

从图 11 中可以看出,方案 2、3 中在地层“由软入硬”段管片内的主应力较小,与方案 1 相比 S_1 减小约 2.76% (方案 2)、3.1% (方案 3), S_3 减小约 3.46% (方案 2)、3.39% (方案 3)。这表明当盾构掘进穿越地层“由软入硬”时,适当增大掌子面上部分区内千斤顶的顶推力而减小掌子面下部的顶推力可以减小“由软入硬”段管片内力。方案 4 的管片应力较大,这说明掌子面上中下分区内顶推力的比例应该在一定范围内,否则会使管片下部的应力过大。以方案 2、3 为例,比例范围取为 8:13:18~10:13:16 之间较为合理。

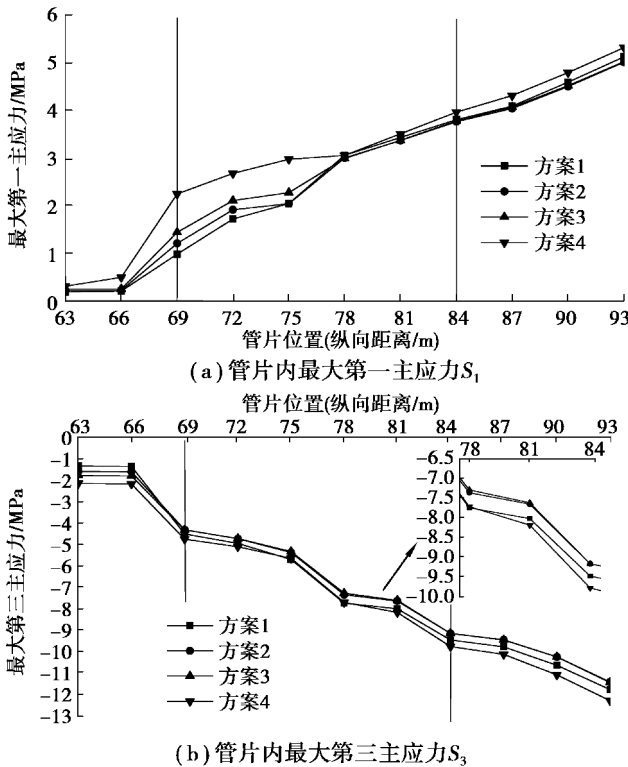


图 12 地层“由硬入软”段管片主应力变化
Fig. 12 Principal stress curves of segment in the section of stratum “from the hard into soft”

从图 12 中可以看出,在地层“由硬入软”段,方案 1 中管片内 S_1 较小,而方案 2、3 中管片内 S_3 较小,且各方案管片内 S_3 相差很小。这表明掌子面顶推力的调整并不能有效降低“由硬入软”段管片的内力。

4 工程应用

根据上述研究结果,在盾构掘进施工过程中,可通过对重要的掘进参数进行优化,并辅以相关的控制措施,从而保证盾构穿越上软下硬复合地层的

安全掘进。

(1)土仓压力控制:基于数值计算分析结果,防止地表沉降增大甚至超过限额,在盾构掘进时适当增大土仓压力,在静止土压力的基础上,增加 10~30 kPa 的预备压力,部分上软下硬地层交界段保持满仓状态掘进。

(2)千斤顶出力:实际推进过程中需根据上软下硬地层的实际情况对油缸的数量及出力大小进行调整,施工过程中各千斤顶的出力大小如表 3 所示,这与结果中 8:13:18~10:13:16 的比例基本一致。

表 3 千斤顶出力值		MPa
Table 3 The output value of jacks		MPa
油缸位置	上软下硬地层	姿态纠偏
上部	10~12	10~15
左	9~15	8~13
右		12~19
下部	13~17	13~18

(3)推进速度:盾构在上软下硬地层的掘进过程中应连续并尽量降低推进速度,保证掘进速度稳定在 20~40 mm/min 为宜,及时进行纠偏,同时减少盾构推进对前方土体造成的扰动。

(4)盾构姿态控制措施:当盾构机掘进至上软下硬复合地层交界段时,应对盾构机姿态采取控制措施以防止掘进轨迹偏离设计轴线。当掘进至“由软入硬”段时,可采取适当加大下部千斤顶推力的方式防止盾构机出现“磕头”现象,而掘进至“由硬入软”段时,可采取适当增大上部千斤顶推力的方式防止盾构机出现“抬头”现象^[15,16]。

为了防止因纠偏造成的刀具异常磨损和盾构机难以推进的现象,盾构倾斜度与隧道坡度差控制在 20% 以内。当盾构机出现姿态异常,纠偏次数不宜过于频繁,同时每环的纠偏量控制在 10 mm 以内,变化趋势控制在 0.3% 之内,以尽可能对降低盾构施工对周围地层的影响。

根据盾构在右线 DK0+801.26~DK0+864.35 区段施工过程中所采集的掘进参数,其中第 131~165 环盾构通过软硬互层。绘制顶部土仓压力变化图、千斤顶推力变化图、推进速度变化图及刀盘扭矩变化图分别如图 13~16 所示。

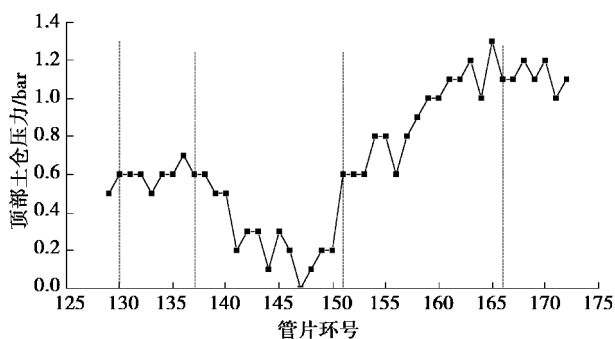


图 13 顶部土仓压力变化图

Fig. 13 Diagram of the soil warehouses pressure on the top section of tunnel face

从图 13 中可以看出,在实际盾构掘进过程中,由软入硬段顶部土仓压力在 60 kPa 左右,为硬岩段的 2~3 倍;而在由硬入软段顶部土仓压力显著增大,且随着隧道进入较软地层,顶部土仓压力逐渐增大,地表沉降因此得到更好的控制。

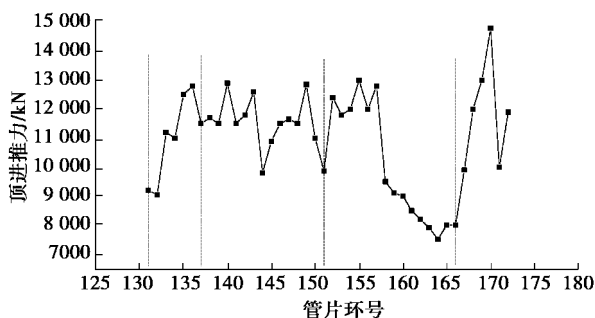


图 14 千斤顶推力变化图

Fig. 14 Diagram of the jacks' thrust

盾构掘进过程中,千斤顶推力保持在 11 000~13 000 kN 的范围内。盾构在此区段内掘进速度处于稳定可控范围内,各项掘进参数均正常,同时地表沉降得到有效控制,说明盾构机在上软下硬地层中掘进的状态较好,可以确保施工顺利进行。

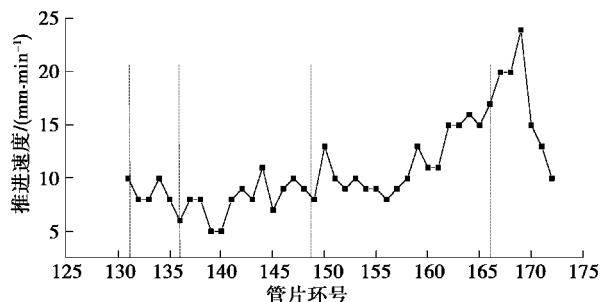


图 15 推进速度变化图

Fig. 15 Diagram of the tunneling speed

从图 15 可以看出,盾构机在软硬互层的掘进过程中,推进速度较为缓慢,掘进速度控制在 5~

15 mm/min,以确保施工过程便于及时调整盾构姿态,防止隧道偏离设计轴线。

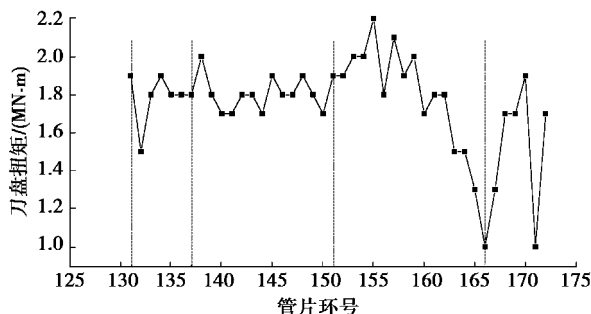


图 16 扭矩变化图

Fig. 16 Diagram of the cutter torque

刀盘扭矩过低会降低施工效率,过高又会使刀盘过度磨损。盾构在上软下硬地层中掘进,刀盘扭矩也是重要的控制指标。从图 16 可知,在该区段软硬互层推进过程中,刀盘扭矩波动较小,基本保持在 1.7~1.9 MN·m 的可控范围内。

5 结论

通过有限元数值模拟分析,重点研究了上软下硬交界地层段的地表沉降及管片应力情况,得出了以下盾构隧道穿越上软下硬地层时关于掌子面顶推力的结论:

(1) 当隧道掘进穿越上软下硬地层时,为调整盾构姿态,实际工程中会适当增大盾构机掌子面下方分区内千斤顶的顶推力,而减小上方分区内千斤顶的顶推力。但这样会增大地层“由软入硬”段的地表沉降,因此,在调整盾构姿态的基础上,可以适当增大土仓压力来应对地表沉降的增大。

(2) 在数值模拟的结果中,方案 2、3 使地层“由软入硬”段管片应力减小 2.76%~3.1% (S_1)、3.39%~3.46% (S_3)。因此,参考方案 2、3 中顶推力的取值,将掌子面上中下各分区内千斤顶推力的比例取在 8:13:18~10:13:16 范围内较为合理。

(3) 与地层“由软入硬”段不同,这种调整盾构姿态的措施(适当增大上部分区内千斤顶推力而减小下部顶推力)对地层“由软入硬”段的地表沉降的影响极小,而且对管片内力也无明显降低效果。

参考文献 (References)

- [1] 谭忠盛,洪开荣,万姜林,等. 软硬不均地层盾构姿态控制及管片防裂损技术[J]. 中国工程科学, 2006, 8(12): 93-96. (Tan Zhongsheng, Hong Kairong, Wan Jianglin, et al. Shield driven tunneling in the complex layer: direction control of shield and preventing segment crack [J]. Engineering Sciences, 2006, 8

- (12): 93-96. (in Chinese))
- [2] 谭忠盛, 洪开荣, 万姜林, 等. 软硬不均地层复合盾构的研究及掘进技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增2): 3945-3952. (Tan Zhongsheng, Hong Kairong, Wan Jianglin, Wang Mengshu. Study on composite shield and construction technique in complex uneven strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.2): 3945-3952. (in Chinese))
- [3] 邓彬, 顾小芳. 上软下硬地层盾构施工技术研究[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(2): 59-64. (Deng Bin, Gu Xiaofang. Study of shield construction technology in soft upper stratum and hard under stratum[J]. Modern Tunneling Technology, 2012, 49(2): 59-64. (in Chinese))
- [4] 杨书江. 盾构在硬岩及软硬不均地层施工技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2006. (Yang Shujiang. Research on tunneling technology in hard and mix ground by shield machine[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2006. (in Chinese))
- [5] 张良辉. 广州复合地层中盾构施工技术难点及应对措施[J]. 施工技术, 2005, 34(6): 21-23. (Zhang Lianghui. Technical problems and countermeasures of shield construction in compound strata of guangzhou area[J]. Construction Technology, 2005, 34(6): 21-23. (in Chinese))
- [6] 李明阳, 杨海涛, 邹高明. 复合地层土压平衡盾构掘进参数模拟分析研究[J]. 隧道建设, 2012, 32(3): 287-295. (Li Mingyang, Yang Haitao, Zou Gaoming. Simulation analysis on boring parameters of epb shield in complex strata[J]. Tunnel Construction, 2012, 32(3): 287-295. (in Chinese))
- [7] 宋克志, 孙谋. 复杂岩石地层盾构掘进效能影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2092-2096. (Song Kezhi, Sun Mou. Analysis of influencing factors of shield tunneling performance in complex rock strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2092-2096. (in Chinese))
- [8] 曹成勇. 浅埋透水复合地层泥水盾构开挖面稳定性及掘进参数研究[D]. 湖南: 中南大学, 2014. (Cao Chengyong. Study on face stability and tunneling parameters of shallow slurry shield-driven tunnel in permeable composite strata[D]. Hunan: Central South University, 2014. (in Chinese))
- [9] 王恒. 上软下硬复合地层盾构施工掘进参数研究[D]. 淮南: 安徽建筑工业学院, 2012. (Wang Heng. Study on the tunneling parameters of shield tunneling in upper-soft and lower-hard composite ground[D]. Huainan: Anhui Jianzhu University, 2012. (in Chinese))
- [10] 王为乐. 长沙地铁复合地层盾构选型与掘进参数研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012. (Wang Weile. Study on the type selection of shield and tunneling parameters of shield method in the composite stratigraphy of the Changsha metro[D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese))
- [11] 袁敏正, 鞠世健, 竺维彬. 广州地铁一号线和二号线盾构机适应性研究与探讨[J]. 现代隧道技术, 2004, 41(3): 31-34. (Yuan Minzheng, Ju Shijian, Zhu Weibin. Study and discussion on the adaptability of shield machines adopted in Guangzhou metro[J]. Modern Tunneling Technology, 2004, 41(3): 31-34. (in Chinese))
- [12] 张厚美. 地铁盾构工程设计与施工过程的若干问题研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2004. (Zhang Houmei. Research on several problems of metro shield engineering design and construction process[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2004. (in Chinese))
- [13] 王晖, 竺维彬, 李大勇. 复合地层中盾构掘进的姿态控制[J]. 施工技术, 2011, 40(19): 67-69. (Wang Hui, Zhu Weibin, Li Dayong. Posture control of shield tunneling in composite strata[J]. Construction Technology, 2011, 40(19): 67-69. (in Chinese))
- [14] 韦良文, 张庆贺, 邓忠义. 大型泥水盾构隧道开挖面稳定机理与应用研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(1): 87-91. (Wei Liangwen, Zhang Qinghe, Deng Zhongyi. Research on mechanism and application of face stability in large slurry shield tunneling[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(1): 87-91. (in Chinese))
- [15] 何祥凡. 盾构隧道穿越上软下硬地层扰动机理及应对措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017. (He Xiangfan. Research on the disturbance mechanism and counter measures of shield tunnel crossing upper-soft lower-hard stratum[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese))
- [16] 何祥凡, 申兴柱, 王帆, 等. 盾构隧道穿越上软下硬地层施工力学特性分析[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(2): 89-95. (He Xiangfan, Shen Xingzhu, Wang Fan, et al. Construction mechanical property analysis of shield tunnel through upper-soft and lower-hard stratum[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(2): 89-95. (in Chinese))
- [17] シールド工法の調査・設計から施工まで編集委員会. シールド工法の調査・設計から施工まで[M]. [S. l.]: 地盤工学会(日), 1997. (Editing committee of investigation of shielding method from design to construction. Investigation of shielding method from design to construction[M]. [S. l.]: The Japanese Geotechnical Society, 1997. (in Japanese))
- [18] 山崎剛. 地盤変状の実態と評価解析手法(その3)[J]. トンネルと地下, 2003, 34(4): 366-372. (Yamazaki K. Numerical analysis for representation and estimate of surrounding rock's stability[J]. Tunnel and Underground Engineering, 2003, 34(4): 366-372. (in Japanese))