

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211103003

## 湖相沉积软土中盾构端头关键控制措施研究\*

阮永芬<sup>1</sup>, 张 虔<sup>1</sup>, 吴 龙<sup>2</sup>, 李飞鹏<sup>2</sup>, 陈 博<sup>2</sup>, 谭桂平<sup>2</sup>

(1. 昆明理工大学建筑工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 中铁十一局集团城市轨道交通工程有限公司, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**湖相沉积软土在昆明地区分布广泛,工程性质极其特殊,在该场地中盾构施工风险性极高,易引发端头失稳,涌水涌砂灾害,探究软土场地盾构端头施工关键控制措施成为亟待解决的问题。采用经验分析法并引入正交试验对端头加固工艺及加固范围进行分析,得出适用性最优工艺与最优加固范围计算模型,给出各工艺应用建议、端头稳定敏感性排序及加固范围理论解。针对现有洞门密封止水系统涌水涌砂风险较大的问题,提出了一种由三道密封构件与两道主动措施组成的新型永久密封止水系统。将所得结论与创新型止水系统应用于昆明轨道交通5号线会宝区间端头,采用MidasGts与对数螺旋滑动计算模型对端头土体进行数值模拟与稳定性计算,所得位移云图及安全系数与实际施工情况相吻合,由此实现端头加固范围理论解与工程解的统一。从施工现场来看,新型止水系统应用效果非常理想,有效保证了盾构进出洞安全,可为相似盾构工程设计与施工提供借鉴。

**关键词:**隧道工程;湖相沉积软土;盾构法;端头加固;洞门止水;数值模拟

**中图分类号:** U455.43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)04-0807-11

### Study on Key Control Measures of Shield End in Lacustrine Sedimentary Soft Soil

RUAN Yongfen<sup>1</sup>, ZHANG Qian<sup>1</sup>, WU Long<sup>2</sup>, LI Feipeng<sup>2</sup>, CHEN Bo<sup>2</sup>, TAN Guiping<sup>2</sup>

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;  
2. China Railway 11th Bureau Group Urban Rail Engineering Co. LTD., Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Lacustrine sedimentary soft soil distributes widely in Kunming area, and its engineering properties are extremely special. In this site, the risk of shield construction is very high, which is easy to cause instability of the shield end and the disaster of water and sand gushing. Therefore, it has become an urgent problem to explore the key control measures for the construction of the shield end in soft soil sites. An empirical analysis method is used to analyze the end reinforcement process, and the orthogonal test is introduced to explore the reinforcement range, so as to obtain an applicable optimal calculation model. Therefore, the application suggestions of each process, the ranking of sensitivity of end stability and the theoretical solution of reinforcement range are given. In view of the great risk of water and sand gushing in the existing portal water sealing and stop system, a new permanent water sealing and stop system is proposed in this paper. This system consists of three sealing components and two active measures. The research conclusion and water stop system are applied to the end of Hui-bao section of Kunming Metro Line 5. Midas Gts and logarithmic spiral sliding calculation model are

\* 收稿日期:2021-11-03;修回日期:2022-03-20

基金项目:云南省重点研发计划项目(2018BC008)资助

作者简介:阮永芬(1964—),女,教授,博士。主要从事岩土与地下工程研究。E-mail:rroyy64@163.com

used to simulate and calculate the stability of the end soil. Calculated displacement contour and safety factors are consistent with the field measurement, achieving a unification of end reinforcement theoretical solution and engineering solution. From the construction site, the application effect of the new water stop system is very ideal, which effectively ensures the safety of shield entering and leaving the tunnel, and can provide a reference for the design and construction of similar shield projects.

**Keywords:** tunnel engineering; lacustrine sedimentary soft soil; shield method; end reinforcement; tunnel portal water stop; numerical simulation

## 0 引言

随着城市经济的快速发展,城市轨道交通建设项目逐年增多。盾构法施工具有广阔的发展前景,逐渐成为最主要的地铁隧道施工方法<sup>[1]</sup>。盾构法施工过程中,始发与接收工序多、工作量大、危险系数高,据统计盾构端头施工引起的事故高达盾构施工总事故的70%,一旦发生灾害将严重威胁人生及财产安全<sup>[2-4]</sup>。粉砂及粉质黏土互层组成的湖相沉积软土地层在昆明地区分布广泛,这类地层含水率高、孔隙比大、有机质含量高,压缩性高、承载力低、灵敏度高特性,工程性质较差<sup>[5-6]</sup>大大增加了端头施工风险。现国内对于软土地层盾构端头施工研究较少,常规土层施工方法用于软土地层效果往往很不理想。软土地层端头施工方法一般依靠工程经验在常规方法基础上提高加固范围,改良洞门密封止水装置等<sup>[7]</sup>,缺乏科学理论依据。故研究湖相沉积软土地层盾构端头施工关键控制措施,对指导安全高效施工具有重大意义。

吴龙等<sup>[8]</sup>在对湖相沉积软土地层盾构施工的研究中指出端头施工关键控制措施为端头加固及洞门密封。丁万涛等<sup>[9]</sup>基于Terzaghi围岩压力理论建立土压平衡盾构端头加固Flac3D模型后,给出加固范围优化解。江玉生等<sup>[10]</sup>通过对多种计算模型综合分析,给出了盾构端头加固的合理范围。辛振省等<sup>[11]</sup>应用三维数值模拟手段,从位移场、应力场等角度出发确定了加固范围数值解。宋克志等<sup>[12]</sup>、曹成勇等<sup>[13]</sup>基于土体极限平衡理论给出不同形式的对数螺旋滑动计算模型。陈仁东等<sup>[14]</sup>针对洞门涌水问题发明了一种盾构隧道洞口气囊式止水密封装置及施工方法。彭云涌等<sup>[15]</sup>积累了大量盾构施工经验后,发明了一种小直径土压平衡盾构施工隧道洞口止水密封装置。归纳已有研究可看出,在端头施工中关键控制措施主要为端头加固、洞门密封

止水两方面。两者常单独研究,忽略洞门大量渗水,动水压力过大引起土体失稳问题,仅研究静水工况端头土体稳定性。此外,对端头加固的研究中,加固工艺与范围常单独考虑,加固范围的计算所选用理论模型繁多,不同模型对软土地层的适用性并未进行综合分析。各项研究给出的加固范围往往与工程经验冲突,导致理论与工程应用相撕裂,不能有效指导工程施工。对洞门密封止水系统改进时,虽发明出气压、油压等形式密封构件,但未在密封构件失效时采取主动措施,不能形成完整、可靠的密封止水系统。

针对现有研究存在对端头加固工艺、加固范围、洞门止水研究割裂,理论计算、数值模拟、工程经验不能相互结合,研究结论在湖相沉积软土地层适用性差等问题,本文首先总结分析软土地层施工经验对不同端头加固工艺,综合考虑其经济性与加固效果给出最优工艺。而后利用正交试验法对多种端头加固范围计算模型对比分析,得出软土地层适用性最优模型并对其敏感性进行分析后给出加固范围最优理论解。为有效防止洞门涌水灾害,有针对性地提出一种新型永久密封止水系统。将所得研究结论与创新型密封系统用于昆明轨道交通5号线会宝区间接收与始发端头,验证其适用性,对端头加固采用理论计算、数值模拟手段进行研究,得出计算结果及位移云图,将两者与工程实际对比分析后得出端头加固范围理论与工程统一解。

## 1 端头加固分析

### 1.1 端头加固工艺

端头加固可有效提高土体强度降低渗透性,常用有水泥土加固法与物理加固法。滇池湖相沉积软土不同于常规滨海软土,其有机质含量大,有机质中的腐殖酸相对含量高,尤其是富里酸对水泥土的强度影响较大,延缓水泥的水化过程,又对水泥

水化生成的晶体产生分解作用,大大削弱水泥对软土的固化效果<sup>[7-8]</sup>。针对其这一特性,依据众多学者对软土地端头加固方式的研究结论<sup>[9-11]</sup>以及在该地区盾构施工工程经验,得出该地区不同端头加固工艺在加固范围均为常规工程解时,所取得的加固止水效果是“水平杯型冷冻”优于“三轴搅拌桩+高压旋喷桩”优于“三轴搅拌桩+水泥注浆”优于“竖直板型冷冻”。

在综合加固效果与施工成本等因素后,笔者认为单一加固工艺对昆明地区软土地端头适用性较差。在场地允许时应优先采用三轴搅拌桩+高压旋喷桩组合加固形式,在场地受限时始发端头建议采用水平杯型冷冻,接收端头建议采用竖直板型冷冻。限于篇幅,各加固形式适用性、施工效果、经济性详可见文献<sup>[16]</sup>。

## 1.2 端头加固范围

为便于盾构机顺利切削端头加固土体完成始发与接收,加固体设计强度一般取0.8~1.4 MPa,这就要求在保证加固效果的情况下加固范围不宜过小。目前纵向加固范围一般采用工程经验解、弹性薄板理论解、滑移失稳理论解、有限元解等,径向加固范围常多用工程解与土体扰动极限平衡理论解。不同计算模型原理与计算过程各有差异,在软土地端的适用性还需验证。

### 1.2.1 端头纵向加固范围

#### (1) 弹性薄板理论解

1991年日本JGGA协会(Japanese Jet Grout Association)提出端头土体纵向加固范围弹性薄板计算模型<sup>[17]</sup>,将端头加固体视为两端自由的弹性薄板,纵向加固范围 $t$ 为:

$$t = \left[ \frac{K_1 \beta P D^2}{4 \sigma_t} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中, $K_1$ 为安全系数,一般可取1.2~2.0; $\beta$ 为计算系数,一般可取1.1~1.2; $P$ 为洞门中心处水土合算压力; $D$ 为洞门直径; $\sigma_t$ 为加固体无侧限抗拉强度,一般取无侧限抗压强度 $q_u$ 的0.1~0.2。

#### (2) 圆弧滑移失稳理论解

模型滑动面由洞门范围内一段圆弧与洞顶至地面的直线组成,如图1所示。圆弧以洞门顶点为圆弧滑动面圆心。洞门直径 $D$ 为滑动半径,直线段延伸至地面。

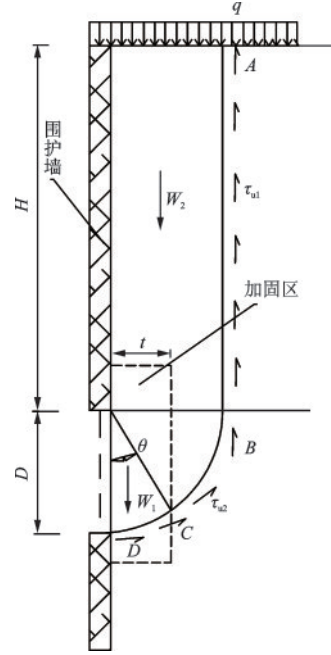


图1 圆弧滑移计算示意

Fig.1 Schematic diagram of arc slip calculation

注: $H$ 为洞门埋深, $t$ 为加固区纵向长度, $W$ 为土体自重, $\tau_u$ 为滑动面剪切强度

以滑动面建立端头土体稳定极限平衡分析:

$$M_s = M_1 + M_2 + M_p \quad (2)$$

$$M_p = \frac{qD^2}{2}, M_1 = \frac{\gamma D^3}{3}, M_2 = \frac{\gamma H D^2}{2} \quad (3)$$

$$M_d = \frac{\pi D^2 c}{2} + H D c + \Delta c \theta D^2 \quad (4)$$

$$K_2 = \frac{M_d}{M_s} \quad (5)$$

式中, $M_s$ 为总下滑力矩; $M_2$ 为直线滑动区下滑力矩; $M_1$ 为圆弧滑动区下滑力矩; $M_p$ 为地面堆载 $q$ 引起的下滑力矩; $q$ 为地面荷载,可取为20 kPa; $\gamma$ 为土层综合重度,加固体重度一般取为18 kN/m<sup>3</sup>; $c$ 为土体黏聚力; $\Delta c$ 为加固体黏聚力增长数; $\theta$ 为加固体与圆弧线交点至 $D$ 点夹角。

#### (3) 对数螺旋滑移失稳理论解

对数螺旋滑移计算模型针对圆弧滑移失稳模型计算结果与工程解相差较大的问题采用对数螺旋线+折线作为滑动面进行计算<sup>[12-13]</sup>,如图2所示。对数螺旋滑动面以 $M$ 为极点, $e$ 为径向加固范围, $\alpha$ 为折线滑动角, $\beta$ 为 $MN$ 与 $MP$ 间夹角, $D$ 、 $H$ 及 $t$ 符号意义同前。

以此滑动面建立端头土体稳定极限平衡分析,在设定的坐标系中,螺旋线方程为:

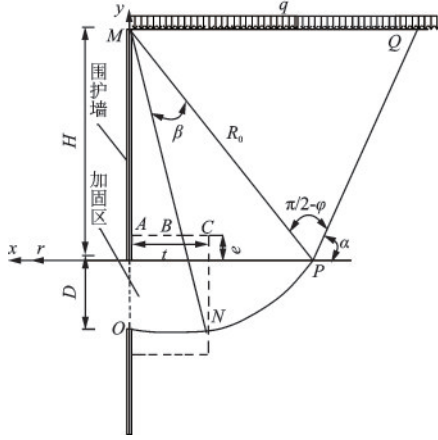


图2 对数螺旋滑移计算示意

Fig.2 Schematic diagram of logarithmic spiral slip calculation

$$R=R_0 \exp (\theta \tan \varphi) \quad (6)$$

$$M_{MNP}=\frac{\gamma R_0^3}{3(1+9 \tan ^2 \varphi)} \times\left\{3 \tan \varphi\left[\sin (\alpha-\varphi-\beta) \exp (3 \beta \tan \varphi)-\sin (\alpha-\varphi)\right]\right\}+ \\ \frac{\gamma R_0^3}{3(1+9 \tan ^2 \varphi)} \times\left[\cos (\alpha-\varphi-\beta) \exp (3 \beta \tan \varphi)-\cos (\alpha-\varphi)\right]+\Delta M_1 \quad (11)$$

$$\Delta M_1=\frac{1}{6}\left(\gamma_0-\gamma\right)\left[t \cot (\alpha-\varphi-\beta)-(H-e)\right]^2 \times \tan ^2(\alpha-\varphi-\beta)\left[2(H-e)+t \cot (\alpha-\varphi-\beta)\right] \quad (12)$$

式中,  $\Delta M_1$  为 MNP 区加固土体的下滑力矩增量;  $\gamma$ 、 $\gamma_0$  为原状土及加固土重; 其他符号同前。

$$M_{OMN}=\frac{\gamma R_0^3 \tan \varphi}{(1+9 \tan ^2 \varphi)} \times \sin (2 \beta) \exp [3(\alpha-\varphi-\beta) \tan \varphi]-\frac{\gamma R_0^3 \tan \varphi}{(1+9 \tan ^2 \varphi)} \sin (\alpha+\beta-\varphi)- \\ \frac{\gamma R_0^3}{3(1+9 \tan ^2 \varphi)} \cos (\alpha+\beta-\varphi)+\frac{\gamma R_0^3 \cos (2 \beta)}{3(1+9 \tan ^2 \varphi)} \exp [3(\alpha-\varphi-\beta) \tan \varphi]-\Delta M_2 \quad (13)$$

$$\Delta M_2=\frac{1}{6}\left(\gamma_0-\gamma\right) \tan ^2(\alpha-\varphi-\beta)(H-e)^3 \quad (14)$$

式中,  $R_0$  为初始径距;  $\varphi$  为土体内摩擦角。

由图 2 中几何关系可知:

$$R_0 \exp [(\alpha-\varphi) \tan \varphi]=H+D \quad (7)$$

$$R_0 \sin (\alpha-\varphi)+H \cot \alpha=R_0 \frac{\cos \varphi}{\sin \alpha} \quad (8)$$

$$t=R_0 \exp (\beta \tan \varphi) \sin (\alpha-\beta-\varphi) \quad (9)$$

超越方程组(7)~(9)由牛顿迭代法可求出直线滑动角  $\alpha$ 、初始径距  $R_0$  及  $\beta$ 。

由图 2 积分关系可知下滑力矩  $M_{MPQ}$ ,  $M_{MNP}$ ,  $M_{OMN}$ :

$$M_{MPQ}=\frac{\gamma H R_0}{6} \cdot \frac{\cos \varphi}{\sin \alpha}\left[H \tan (\alpha-\varphi)+R_0 \frac{\cos \varphi}{\sin \alpha}\right] \quad (10)$$

式中,  $\Delta M_2$  为 OMN 区加固体下滑力矩增量。

由极限平衡状态及摩尔-库仑破坏准则可知抗滑力矩  $M_1, M_2, M_3$  为:

$M_1=$

$$\frac{R_0 \cos \varphi}{\sin \alpha}\left[c_1 H+\frac{(0.5 \gamma H^2-c_1 H) \sin \alpha \tan \varphi_1}{\cos \alpha+\sin \alpha \tan \varphi_1}\right]-\frac{\left(\frac{\gamma H^3}{3}-\frac{\gamma R_0 H^2}{2} \cos \varphi \cos \alpha\right)+\left(c_1 R_0 \cos \varphi \cos \alpha H-\frac{c_1 H^2}{2}\right)}{(\cos \alpha+\tan \varphi_1 \sin \alpha) \sin \alpha} \quad (15)$$

$$M_2=\frac{c R_0^2 \cos \varphi}{2 \tan \varphi}\left[\exp (2 \beta \tan \varphi)-1\right] \quad (16)$$

$M_3=$

$$\frac{c_0 R_0^2 \cos \varphi}{2 \tan \varphi}\left[\exp ((2 \alpha-2 \varphi) \tan \varphi)-\exp (2 \beta \tan \varphi)\right] \quad (17)$$

式中,  $c_1, \varphi_1$  为隧道上覆土体黏聚力与内摩擦角;  $c_0$  为加固体黏聚力。

由此可得抗滑力矩:

$$M_r=M_1+M_2+M_3 \quad (18)$$

下滑力矩为:

$$M_s=M_{MPQ}+M_{MNP}+M_{OMN} \quad (19)$$

则安全系数为:

$$K_3=M_r / M_s \quad (20)$$

(4) 纵向加固工程

端头纵向加固范围一般根据端头的地层情况和盾构机主机长度确定。盾构始发时, 头盾进洞重心前倾, 在盾尾进洞前机组需有足够的支撑。此外考虑到洞门的止水要求, 盾构机头部驶出加固土体前盾尾应完全进入洞门以进行同步注浆堵塞渗水

通道。盾构接收时主要从止水角度选择工程加固长度。现纵向加固工程解长度一般取盾构机长度+1.5~2.5 m,以满足施工工艺要求。在综合地层情况、盾构条件选择合适的工程解后再采用不同计算模型验算其安全系数是否满足要求。一般情况下,工程解远远大于理论解同时加固体应保证盾构机正常切削掘进。因此端头加固不能一味的追求高强度,而应综合适用性、安全性、经济性得出最优加固工艺与加固范围。

### 1.2.2 端头径向加固范围

盾构始发与接收端头加固径向范围一般据不同场地条件取工程解,是依据不同地区的工程经验以控制地面沉降、止水抗渗等为目的选取。王天明等<sup>[4]</sup>、江玉生等<sup>[7,10]</sup>在对端头加固范围的研究中,综合考虑隧道埋深、洞门直径、纵向加固长度等因素给出了径向加固长度工程解(表1)。

大量工程经验表明软土地盾构端头工程解应在常规解基础上适当增大,一般取隧道外扩3 m做径向加固,当 $D > 8$  m时一般采用3.5 m加固以控制地面沉降和支撑盾构机荷载防止“栽头”现象发生。

表1 径向加固工程解

D/m	[1,3)	[3,5)	[5,8)	[8,12)	[12,15)
B/m	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
H <sub>1</sub> /m	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
H <sub>2</sub> /m	1.0	1.0	1.5	2.0	3.0

注:D为洞门直径,B为洞周两侧加固长度建议值,H<sub>1</sub>和H<sub>2</sub>为盾构上、下加固范围建议值

## 2 模型对比分析

针对盾构端头纵向加固范围的弹性薄板理论计算模型与基于极限平衡分析的圆弧滑动计算模型自提出以来应用广泛,对数螺旋滑动模型是对圆弧滑动计算模型的创新。一般认为其在常规土层适用性相差不大,但于湖相沉积软土地应用各模型,计算值随工况变化会出现较大差异。为此,本文采用正交试验法对第1.2.1节所述三种理论计算模型的适用性及敏感性进行综合对比分析。

### 2.1 正交试验法

正交试验法是用“正交表”来安排和分析多因

素问题的一种数理统计学方法<sup>[18]</sup>,该方法具有试验次数少,效果显著,效率高等特点。基于正交试验法,寻求软土地实用模型,探究加固范围理论解影响因素,从而寻求最优解。

据目前常规土层中的研究<sup>[12-13]</sup>,选取黏聚力 $c$ ,内摩擦角 $\varphi$ ,隧道埋深 $H$ ,加固体强度 $q_u$ ,纵向加固范围 $t$ 五个因素。针对软土力学特性选定 $c$ 值水平为14、18、22、26 kPa, $\varphi$ 水平为2°、6°、10°、14°, $H$ 水平为6、9、12、15 m, $q_u$ 水平为0.7、0.8、0.9、1 MPa, $t$ 水平为3、5、7、9 m。三个指标分别为弹性薄板、圆弧滑动及对数螺旋滑动计算模型的安全系数 $K_1$ 、 $K_2$ 与 $K_3$ 。 $K$ 值采用Matlab编程计算,牛顿迭代初始值设为 $\alpha=45^\circ$ , $R_0=1.2H$ , $\beta=35^\circ$ ,误差限设为0.000 01,迭代次数不限,洞门直径 $D$ 取为6 m,径向加固范围 $e$ 取为外扩2.5 m,加固体黏聚力 $c_0$ 取0.2倍 $q_u$ 。试验方案 $L_{16}(4^5)$ 及结果见表2。

表2  $L_{16}(4^5)$ 正交试验方案及计算结果

Table 2  $L_{16}(4^5)$ orthogonal test scheme and calculation results

方案	$c$ /kPa	$\varphi$ /°	$H$ /m	$q_u$ /MPa	$t$ /m	$K_1$	$K_2$	$K_3$
1	14	2	6	0.7	3	0.597	0.935	0.783
2	14	6	9	0.8	5	1.431	1.421	0.927
3	14	10	12	0.9	7	2.535	2.018	1.108
4	14	14	15	1	9	3.891	1.978	1.370
5	18	2	9	0.9	9	5.217	2.355	1.358
6	18	6	6	1	7	4.644	3.047	2.040
7	18	10	15	0.7	5	0.841	1.096	0.710
8	18	14	12	0.8	3	0.414	0.900	0.830
9	22	2	12	1	5	1.437	1.649	0.806
10	22	6	15	0.9	3	0.389	0.976	0.650
11	22	10	6	0.8	9	6.141	2.508	3.081
12	22	14	9	0.7	7	2.455	1.923	1.493
13	26	2	15	0.8	7	1.883	1.792	0.713
14	26	6	12	0.7	9	3.259	1.766	1.042
15	26	10	9	1	3	0.644	1.299	1.112
16	26	14	6	0.9	5	2.132	2.005	2.013

### 2.2 试验结果分析

极差分析法通过极差分析与效应趋势图进行综合比较得出试验结论,设每列第 $i$ 水平计算结果和为 $y_i$ ,则有均值 $A_i=y_i/s$ ,其中 $s$ 为每列所含水平数,均值 $A_i$ 确定同一因素不同水平对指标的影响程度。据表2绘制影响因素极差分析表(表3)及效应趋势图(图3)。

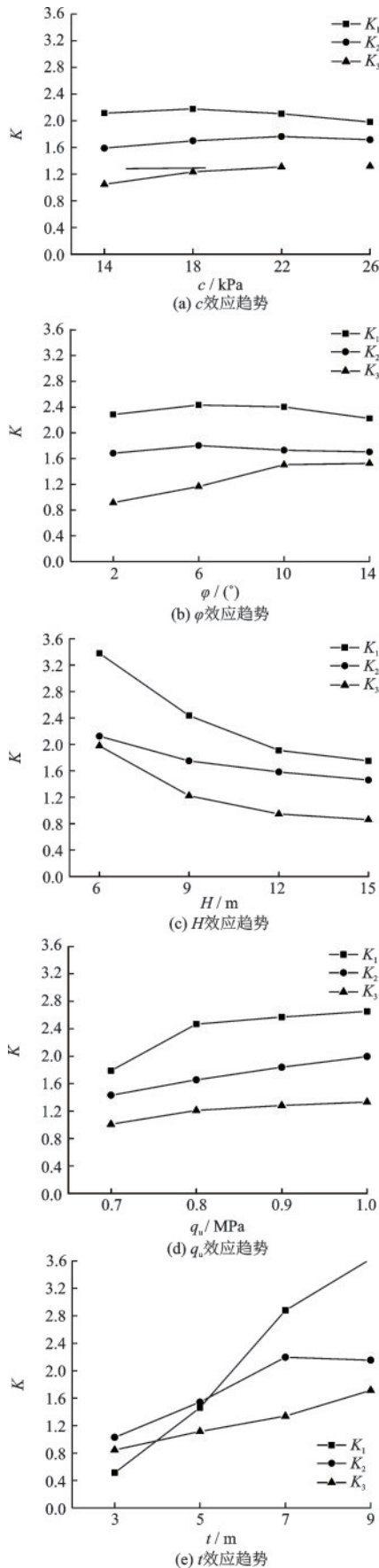


图3 各影响因素效应趋势

Fig.3 Effect trend of each factor

表3 各影响因素极差分析结果

Table 3 Range analysis results of each factor

因素	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$H/\text{m}$	$q_u/\text{MPa}$	$t/\text{m}$
$R_1$	0.199	0.207	1.628	0.866	3.115
$R_2$	0.176	0.101	0.663	0.564	1.170
$R_3$	0.273	0.612	1.118	0.325	0.869
敏感性	$t > H > q_u > \varphi > c$				

由表2及图3可知,弹性薄板与圆弧滑动计算模型所得安全系数与工程实际相差较大,甚至在方案2、9的极端工况下 $K$ 值仍大于1。在软土地地对数螺旋计算模型适用性明显优于另两种传统模型。由表3知,各因素对端头加固安全性影响程度排序为 $t > H > q_u > \varphi > c$ ,影响最为显著的是纵向加固范围 $t$ 。

由图3可以看出, $c$ 、 $\varphi$ 、 $q_u$ 、 $t$ 与安全系数呈正相关, $H$ 对 $K$ 的影响呈负相关。由图3(d)、(e)可得在 $K=1.3$ 时软土地地端头加固范围 $t$ 至少为7 m,加固体抗压强度 $q_u$ 需在0.9 MPa以上。

### 3 洞门密封止水

#### 3.1 新型永久密封止水系统

洞门围护结构凿除后在洞门环梁上安装密封止水系统,其内径小于盾构机外径并具有一定的弹性,可使得盾构机顺利驶入或驶出洞门并与盾构机盾体紧密贴合以完全封闭洞门间隙,将地下水完全隔离在洞门内并形成封闭的注浆环境。常规的洞门止水系统是于洞门环梁外板安装橡胶帘布与折页压板,通过手拉葫芦收紧该装置。橡胶帘布与盾构机间常夹杂土块碎石致使两者不能紧密贴合从而使地下水流入工作井内,渗流通道逐渐扩大造成涌水涌砂及土洞的出现,如图4所示。

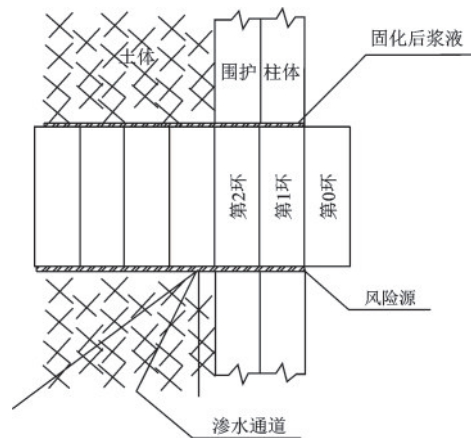


图4 渗水风险源

Fig.4 Water seepage risk source

针对现有密封止水结构存在的问题,本文提出了一种新型永久性密封止水系统如图5所示。该系统由弹性止浆板、长尾刷、橡胶帘布三道密封与主动措施组成。凿除洞门范围内围护结构后清理预留洞门钢环上杂物,依次安装弹性止浆板、长尾刷与橡胶帘布。弹性止浆板由底座、折叠板与反压板组成,首先将止浆板底座焊接于洞门钢环上,再于其上安装折叠板与反压板并用预拉后弹簧连接,止浆板在安装时应注意将板面相互交叠形成一连续且密闭的圆环面,构成第一道密封;安装柔性密封构件长尾刷,将其底座焊接于洞门钢环上,焊接时应注意长尾刷前后支撑板相互交叠,做到不留缝隙,然后将前后两支支撑板间钢丝刷分层注入止水膨胀油脂,注入时应注意相互交错,构成第二道密封;

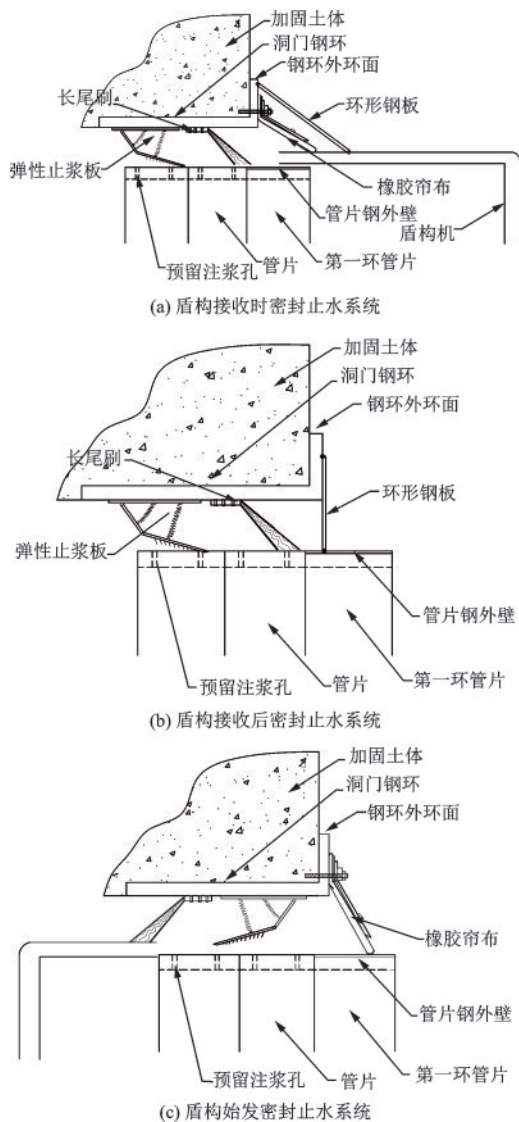


图5 新型永久密封止水系统示意

Fig.5 Diagram of the new permanent water sealing system

安装橡胶帘布与折页压板时,先将橡胶帘布用环形压板固定于洞门钢环外环板上再用膨胀螺钉将折页压板固定折页固定在洞门环梁外环板上,构成第三道密封。

### 3.2 止水原理与有益效果

盾构接收与始发止水过程大同小异,限于篇幅仅介绍盾构接收过程止水原理。盾构接收前进行洞门破除,在主体结构侧墙增设泄水孔,打穿围护结构用pc管连接泄水孔集中至水箱后抽离,以便引流加固土体与围护结构间隙中的水源,并于预埋洞门钢环上安装永久密封止水系统。

盾构机拼装管片后继续前进,驶过弹性止浆板后将与环状柔性长尾刷接触,长尾刷为弹性构件既不会影响盾构机正常掘进又可与盾构机盾体紧密贴合。多层钢丝刷与钢丝刷间止水油脂将会隔绝水源,盾构机扰动形成的碎小颗粒若通过弹性止浆板也会停留在长尾刷钢丝刷之间,将避免卡在橡胶帘布与盾体间,大幅提高橡胶帘布的止水效果。当盾构机驶出洞门时,用张拉机拉近收紧钢丝绳带动折页压板使橡胶帘布紧贴盾体。

盾构机拼接管片继续前进,此时若在洞门间隙处仍有水流渗出,可积极采取主动方案。盾构机停机后用多块环形钢板将洞门环梁外环板与盾壳焊接,各环形钢板间也要焊接密实,形成完全密闭的环境。而后由管片内预留注浆孔向内注入水泥水玻璃双液浆,待其稳定后打开注浆孔观察是否有水流流出,若无水流则切割掉环形钢板,盾构机继续前进完成接收。接收完成后,为防止注浆效果不理想,拆除橡胶帘布用环形钢板将洞门环外环板与最后一环管片钢制外壁焊接,形成永久性止水构件。系统采用三重止水密封构件可从盾构机驶入加固土体至完全驶出洞门全过程止水,保证了主体结构的后期施工安全与正常使用。

## 4 工程案例

### 4.1 工程概况

昆明轨道交通5号线全程29.96 km,共21个站点,有16个站点及区间穿越由泥炭质土、粉土、粉砂及粉质黏土互层组成的湖相沉积软土层。本文选取最具代表性的会展中心站始发至宝丰村站接收

的会宝区间。会展中心始发端头地下水埋深3.55 m,洞门直径 $D=6.2$  m,盾构主机长约7.6 m,洞顶至地面 $H=15.54$  m;宝丰站接收端头地下水埋深2.85 m,洞顶至地面 $H=10.24$  m。端头土层分布与盾构设计尺寸汇总如图6所示。各土层主要计算参数由土工试验测得(表4)。

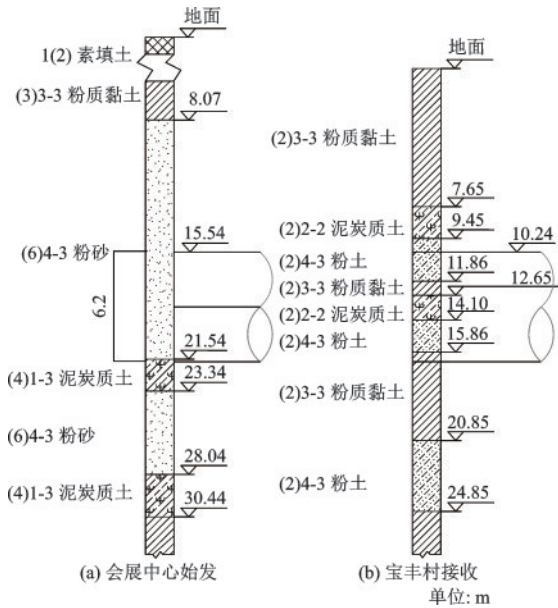


图6 端头工程地质示意

Fig.6 Schematic diagram of engineering geology at the end

表4 各土层计算参数

Table 4 Calculation parameters of each soil layer

土层名称	$\gamma/$ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$c/$ kPa	$\varphi/$ ( $^{\circ}$ )	$E_s/$ MPa	$e$	$w/$ %
1(2)素填土	18	0	10	1.2	0.8	45
(3)3-3粉质黏土	18.9	19	7.9	3.18	1.21	43.2
(6)4-3粉砂	19.3	15.7	29.2	8.14	0.63	24.5
(4)1-3泥炭质土	10.5	12.3	1.7	4.23	5.16	226.9
(2)3-3粉质黏土	16.5	23.3	2.7	4.18	1.96	70.1
(2)2-2泥炭质土	11.8	25.7	2.3	1.17	3.42	147.5
(2)4-3粉土	18.8	14.7	23.7	8.53	0.73	25.93

## 4.2 案例分析

### 4.2.1 实际方案

端头加固工艺及加固范围实际工程值依据第2节中得出的结论进行选取。其中,会展中心始

发端头加固采用三轴深层搅拌桩+高压旋喷桩+井点降水,加固范围采用纵向9 m,径向外扩3 m,首先施作三轴搅拌桩再对搅拌桩加固体与地连墙间缝隙以高压旋喷工艺加固。宝丰村接收端头纵向为9 m加固,径向取外扩2.5 m,加固工艺采用三轴深层搅拌桩+高压旋喷桩。三轴深层搅拌桩桩径800 mm,水泥掺量25%,水灰比1:1.5,实测加固体28 d的 $q_u=0.95$  MPa,高压旋喷桩桩径850 mm,水泥理论质量掺量1:1,搭接长度250 mm。将所用工程解带入对数螺旋滑动失稳计算模型求得安全系数,并运用Midas Gts进行数值模拟,以此验证对数螺旋滑动失稳计算模型的适用性,寻求工程解与最佳理论解的统一。

### 4.2.2 理论计算

(1)会展中心始发:由图6、表4可知, $\varphi=29.2^{\circ}$ , $H=15.54$  m, $D=6.2$  m, $t=9$  m, $e=3$  m,利用Matlab编程解超越方程组(7)~(9),初始值设为 $\alpha=45^{\circ}$ , $R_0=18$  m, $\beta=35^{\circ}$ ,采用牛顿迭代,误差限 $10^{-5}$ ,迭代次数不限,解得 $\alpha=53.79^{\circ}$ , $R_0=17.07$  m, $\beta=0^{\circ}$ 。将其代入式(10)~(20),可得下滑力矩为: $M_0=27\ 479.25$   $\text{kN}\cdot\text{m}$ ,抗滑力矩为: $M_R=41\ 547.91$   $\text{kN}\cdot\text{m}$ ,则 $K\approx 1.51 > 1.3$ ,安全。

(2)宝丰村接收: $\varphi=2.5^{\circ}$ , $H=10.24$  m, $D=6.2$  m, $t=9$  m, $e=2.5$  m。超越方程组牛顿迭代初始值设为 $\alpha=45^{\circ}$ , $R_0=12$  m, $\beta=15^{\circ}$ ,解得 $\alpha=52.08^{\circ}$ , $R_0=15.79$  m, $\beta=15.29^{\circ}$ 。将所得几何数值代入式(10)~(20)可得下滑力矩为: $M_0=30\ 687.09$   $\text{kN}\cdot\text{m}$ ,抗滑力矩为: $M_R=40\ 617.48$   $\text{kN}\cdot\text{m}$ ,则 $K\approx 1.32 > 1.3$ ,安全。

### 4.2.3 数值模拟

对始发与接收端头采用Midas Gts进行数值模拟,建立足尺及同等土层参数二维模型如图7所示。其中,模型边界为 $50\times 50$  m,采用摩尔-库仑模型分析。地连墙采用弹性模型,取弹性模量 $E=30$  GPa,重度 $\gamma=25$   $\text{kN}/\text{m}^3$ ,泊松比 $\nu=0.2$ 。地面荷载 $q$ 取20 kPa。添加自重与边界约束并采用混合网格生成器优化网格拓扑关系,两组模型计算单元网格共计24 500个。加固体参数数据已有研究成果<sup>[5-7,19]</sup>,变形模量 $E_{50}$ 取 $120q_u=114$  MPa,黏聚力取 $0.2q_u=190$  kPa,内摩擦角取 $25^{\circ}$ 。模型所得位移云图及位移等值线如图8所示。

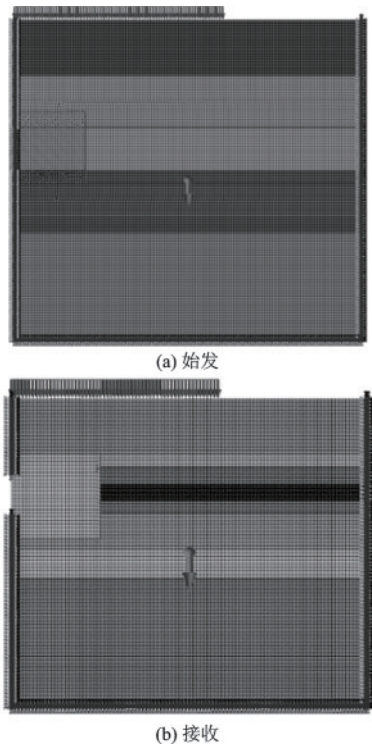


图7 端部土体 Midas 计算模型

Fig.7 Midas calculation models of soil at the end

#### 4.2.4 结果分析及加固效果评价

将实际加固方案代入对数螺旋滑动失稳计算模型中,所得 $K$ 值均大于1.3,该方案加固效果良好有效保证了端头土体稳定性,与本文2.2节所得结论相吻合。对比始发端与接收端加固效果,始发端埋深大于接收端,始发端土层优于接收端。采用同样的加固工艺与相近的加固范围时,始发端安全系数超出接收端约14.5%。接收端土层为典型的泥炭质土、粉土、粉砂及粉质黏土互层组成的湖相沉积软土,这说明在湖相沉积软土地端头加固范围应在第2.2节理论解的基础上适当增加,即纵向9 m,径向外扩3 m为最优理论解。

地铁隧道最常使用的盾构机直径 $D$ 约为6 m,盾构机组总长一般为7.5~8 m。工程施工经验表明端头化学加固范围选取9 m是满足工艺要求的工程解。可知在湖相沉积软土地中施作常规隧道时,端头加固范围取纵向9 m,径向外扩3 m为工程解与理论解的统一。当土层相对较优、地下水位较低时,可采用纵向7 m,径向外扩2.5 m的加固范围以满足端头稳定的要求。

图8为Midas Gts计算所得位移云图,由图8可知洞门破除后,经加固的端头土体最大变形均在安

全范围内。为避免施工中产生过大扰动,采用人工风镐分区分层依次破除洞门地连墙,期间洞门土体稳定,未见渗水、破裂、坍塌等迹象。位移云图、理论计算所得安全系数可支撑施工的进行,施工现场情况验证了研究结果的正确性。

基于位移等值线对滑动面进行定性分析,将总体位移划分为12段,假定1 mm或取极小位移的第7区间限为临界位移值,可以看出临界滑动面的形状与圆弧型相差甚远,大致可视由两部分组成,即对数螺旋段与直线段,符合对数螺旋滑动失稳计算模型假定,验证了正交试验分析所得最优计算模型的结论。

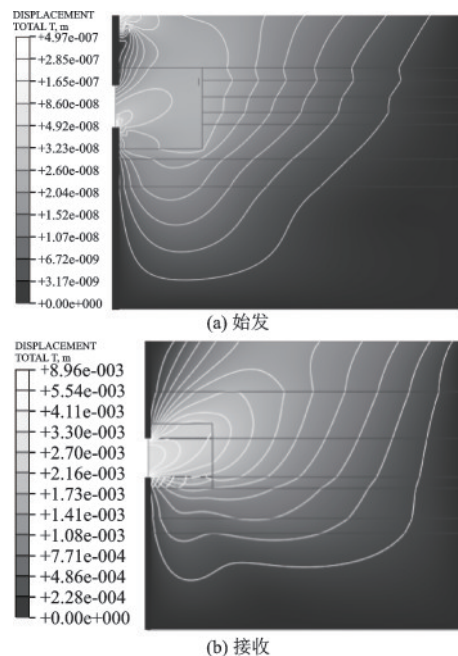


图8 加固后端部土体位移云图

Fig.8 Contour map of soil displacement at the rear end of reinforcement

#### 4.3 洞门密封止水效果

此次会宝区间端头始发与接收施工中洞门密封止水系统采用本文提出的新型系统,从施工现场盾构机进出洞的渗水量来看,洞门渗水主要来源于端头加固土体与地连墙间微小缝隙中,无压缓慢流出,施工中发生涌水涌砂的风险较小。盾构进出洞现场如图9所示。从施工现场来看,本文提出的新型永久性密封止水系统对昆明湖相沉积软土地具有较高的适用性,可有效保证盾构进出洞安全,效果非常理想。



图9 盾构机进出洞现场图

Fig.9 Photos of shield machine out of the tunnel

## 5 结 论

通过总结湖相沉积软土地盾构端头主要施工风险,分析端头加固的工艺、范围及洞门密封止水系统,得出结论如下:

(1) 综合考虑端头加固工艺的施工效果与经济性,认为单一加固工艺在软土地适用性较差,三轴深搅+高压旋喷加固效果适用性最优,当施工场地允许时,应优先采用。

(2) 基于正交试验法对端头加固计算模型对比分析后发现,弹性薄板模型与圆弧滑动失稳计算模型与工程实际相差较大,对数螺旋失稳模型在该场地适用性最优。通过极差分析得出,各因素对端头加固安全系数的影响程度为 $t > H > q_u > \varphi > c$ ,影响程度最大的是纵向加固范围 $t$ 。黏聚力 $c$ 、内摩擦角 $\varphi$ 、加固体强度 $q_u$ 、纵向加固范围 $t$ 与端头土体安全系数呈正相关,隧道理深 $H$ 对安全系数的影响呈负相关。

(3) 分析对数螺旋失稳计算模型试验结果与工程经验,得出在安全系数 $K \geq 1.3$ 时最优理论解为纵向加固范围 $t=7$  m,加固体抗压强度 $q_u$ 需达到0.9 MPa以上;满足地基承载力及洞门止水工艺要求的工程解 $t$ 为盾构机长度+1.5~2.5 m。

(4) 针对现有洞门临时密封止水结构存在涌水涌砂风险较大的问题,本文创新性地提出了一种由弹性止浆板、长尾刷、橡胶帘布三道密封构件与两道主动措施组成的新型永久性密封止水系统。将其应用于昆明轨道交通5号线实际工程中,施工现场渗水量极小,可有效保证盾构进出洞安全,效果非常理想。

(5) 将所得结论应用于会宝区间接收与始发端头,分别利用对数螺旋滑动失稳模型、Midas Gts对加固方案进行理论计算和数值模拟。所得结果均

处于安全范围内,并与现场实际情况吻合,数值模拟结果满足对数螺旋计算模型假定,验证了正交试验所得结论的正确性。对比始发端与接收端加固效果后,得出在湖相沉积软土地中施作常规隧道时,端头加固范围可取纵向9 m,径向外扩3 m以实现工程解与理论解的统一。

## 参考文献:

- [1] 毛保华,姜帆,刘迁,等.城市轨道交通[M].北京:科学出版社,2001.  
Mao B H, Jiang F, Liu Q, et al. City orbit traffic[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [2] 王禹适.地铁工程盾构法施工风险管理研究[D].北京:北京交通大学,2021.  
Wang Y S. Study on risk management of shield tunnel construction in metro engineering [D]. Beijing : Beijing Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [3] 李炜明,李正明,任虹,等.地铁盾构施工土体变形与临近结构失效机理研究[J].防灾减灾工程学报,2018,38(3):472-479.  
Li W M, Li Z M, Ren H, et al. Soil settlements and surrounding structure failure mechanism due to shield tunneling in metro construction [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38 (3) : 472-479. (in Chinese)
- [4] 王天明,戴志仁.盾构法隧道端头井地层加固方法及其应用研究[J].铁道工程学报,2014,31(8):90-95,100.  
Wang T M, Dai Z R. Application on ground reinforcement method of launching shaft for shield tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31 (8) : 90-95, 100. (in Chinese)
- [5] 阮永芬,魏德永,杨均,等.用Bayes法及后验分布极限确定土力学参数[J].岩土工程学报,2019,42(3):438-446.  
Ruan Y F, Wei D Y, Yang J, et al. Determination of soil mechanics parameters based on Baye smethod and posterior distribution limit [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 42(3) : 438-446. (in Chinese)
- [6] 阮永芬,魏德永,高骏,等.K-means聚类分析高原湖相沉积软土参数[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2020,45(1):85-91.  
Ruan Y F, Wei D Y, Gao J, et al. K-means cluster analysis of soft soil parameters of plateau sedimentary [J]. Journal of Kunming University of Scienceand Technolo-

- gy(Natural Sciences), 2020, 45(1):85-91. (in Chinese)
- [7] 江玉生,王春河,江华,等.盾构始发与到达端头加固理论研究与实践[M].北京:人民交通出版社, 2011:56-185.  
Jiang Y S, Wang C H, Jiang H, et al. Shield launching and arriving theoretical study and engineering practice on end reinforcement [M]. Beijing: People's Communications Publishing House, 2011:56-185. (in Chinese)
- [8] 吴龙,阮永芬,李飞鹏,等.泥炭质土层中地铁盾构隧道施工关键控制措施[J].施工技术, 2019, 48(17):76-80.  
Wu L, Ruan Y F, Li F P, et al. Key control measures of subway shield tunnel construction in peat soil [J]. Construction Technology, 2019, 48 (17) : 76-80. (in Chinese)
- [9] 丁万涛,刘克奇,王旭,等.某土压平衡盾构始发地层的加固优化[J].华南理工大学学报(自然科学版), 2017, 45(5):105-112.  
Ding W T, Liu K Q, Wang X, et al. Reinforcement optimization of starting stratum of earth-pressure balance shield [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 45 (5) : 105-112. (in Chinese)
- [10] 江玉生,杨志勇,江华,等.论土压平衡盾构始发和到达端头加固的合理范围[J].隧道建设, 2009, 29(3): 263-266.  
Jiang Y S, Yang Z Y, Jiang H, et al. Study on reasonable strata improvement scopes for EPB shield driving at its start and arrival[J]. Tunnel Construction, 2009, 29 (3):263-266. (in Chinese)
- [11] 辛振省,王金安,马海涛,等.盾构始发端预加固合理范围研究[J].地下空间与工程学报, 2007, 18(3): 513-518.  
Xin Z X, Wang J A, Ma H T, et al. Study on reasonable range of initial prereinforcement for shield tunneling [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 18(3):513-518. (in Chinese)
- [12] 宋克志,王梦恕,孙谋.浅埋盾构隧道端头土体稳定性极限平衡分析[J].岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 407-413.  
Song K Z, Wang M S, Sun M. Limit equilibrium analysis of soils stability at shallow tunnel end upon shield excavation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2):407-413. (in Chinese)
- [13] 曹成勇,施成华,彭立敏.盾构进出洞时端头土体纵向加固范围研究[J].地下空间与工程学报, 2016, 12(1): 119-125.  
Cao C Y, Shi C H, Peng L M. Study on the longitudinal soil reinforcing scope for shield tunnelling breakthrough [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(1):119-125. (in Chinese)
- [14] 陈仁东,庞康,刘明高,等.一种盾构隧道洞口气囊式止水密封装置及施工方法:CN202110798550.2[P]. 2021-10-01.  
Chen R D, Pang K, Liu M G, et al. The invention relates to a shield tunnel orifice gasbag sealing device and a construction method: CN202110798550.2 [P]. 2021-10-01. (in Chinese)
- [15] 彭云涌,杨果林,胡敏,等.一种小直径土压平衡盾构施工隧道洞口止水密封装置:202020537948.1[P]. 2021-02-26.  
Peng Y Y, Yang G L, Hu M, et al. The utility model relates to a small diameter earth pressure balance shield construction tunnel mouth water sealing device: 202020537948.1 [P]. 2021-02-26. (in Chinese)
- [16] 李大勇,王晖,王腾.盾构机始发与到达端头土体加固分析[J].铁道工程学报, 2006, 18(1):87-90.  
Li D Y, Wang H, Wang T. Analysis of soil reinforcement for the starting and arriving of shield machine in metro construction [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006, 18(1):87-90. (in Chinese)
- [17] JJGA 日本ジェットグラウト協会. ジェットグラウト工法 [R]. 東京:鹿島研究所出版会, 1991:17-24.
- [18] 尹艳丽,于鹤龙,周新远,等.基于正交实验方法的蛇纹石润滑油添加剂摩擦学性能[J].材料工程, 2020, 48(7):146-153.  
Yin Y L, Yu H L, Zhou X Y, et al. Tribological properties of serpentine lubricant additives evaluated by orthogonal tests method [J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(7):146-153. (in Chinese)
- [19] 李建军,梁仁旺.水泥石抗压强度和变形模量试验研究[J].岩土力学, 2009, 30(2):473-477.  
Li J J, Liang R W. Research on compression strength and modulus of deformation of cemented soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (2) : 473-477. (in Chinese)

(本文编辑:池营营)