

文章编号: 1674—8247(2023)06—0019—07

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.06.004

## 海陆交互不同地层盾构掘进影响对比分析

马利军<sup>1</sup> 王友枳<sup>1</sup> 杨明勇<sup>1</sup> 朱正国<sup>2</sup> 张 硕<sup>2</sup>

(1. 中交二公局铁路建设有限公司, 西安 710000; 2. 河北省金属矿山安全高效开采技术创新中心, 石家庄 050043)

**摘 要:**为确保天津海陆交互地层盾构掘进施工安全,本文根据海陆交互典型地层(富水软土地层、饱和液化土地层和双层承压水地层)的物理力学特性与渣土改良试验结果,采用 MIDAS-GTS 软件对不同地层盾构掘进施工进行模拟,得到适用于各地层的合理盾构掘进参数,结果表明:(1)海陆交互地层土样具有渗透性差、易于压缩、亲水性强和强度较低等特性;(2)当黏质粉土与淤泥质粉质黏土分别选用泡沫剂与膨润土的组合作为改良剂时,可以满足渣土改良要求;(3)海陆交互 3 种典型地层存在不同的盾构掘进建议值,且富水软土地层掘进参数建议值最小,双层承压水地层掘进参数建议值最大。

**关键词:**盾构施工;渣土改良;地表沉降;数值模拟

**中图分类号:** TU455.43

**文献标志码:** A

## Comparative Analysis for Impact of Shield Tunneling on Different Strata in Marine-terrestrial Interaction Zone

MA Lijun<sup>1</sup> WANG Youzong<sup>1</sup> YANG Mingyong<sup>1</sup> ZHU Zhengguo<sup>2</sup> ZHANG Shuo<sup>2</sup>

(1. CCCC-SHEC Railway Construction Co., Ltd., Xi'an 710000, China;

2. Hebei Technology and Innovation Center on Safe and Efficient Mining of Metal Mines, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** To ensure the safety of shield tunneling in the marine-terrestrial interaction strata in Tianjin, this paper analyzed the physical and mechanical properties of typical marine-terrestrial interaction strata (water-rich soft soil stratum, saturated liquefied soil stratum, and double confined water stratum) and the results of spoil improvement experiments. The MIDAS-GTS software was used to simulate the shield tunneling in different strata, thereby deriving reasonable shield tunneling parameters suitable for each stratum. The results show: (1) The soil samples in the marine-terrestrial interaction strata have characteristics such as poor permeability, a high propensity to compress, strong hydrophilicity, and low strength. (2) When a combination of foaming agents and bentonite is selected for clay and silt clay respectively, and single foaming agents as modifying agents respectively, muck improvement requirements could be met. (3) The three typical strata found in marine-terrestrial interaction zones each have different recommended shield tunneling values. The suggested tunneling parameter value is lowest for the water-rich soft soil stratum, and highest for double confined water stratum.

**Key words:** shield tunneling; muck improvement; surface settlement; numerical simulation

盾构法施工会对土体造成破坏,引起地表沉降,影响地表及周围建筑物的安全。因此,根据实际施工

收稿日期:2023-10-09

作者简介:马利军(1977-),男,高级工程师。

基金项目:国家自然科学基金项目(51978424)

引文格式:马利军,王友枳,杨明勇,等.海陆交互不同地层盾构掘进影响对比分析[J].高速铁路技术,2023,14(6):19-25.

MA Lijun, WANG Youzong, YANG Mingyong, et al. Comparative Analysis for Impact of Shield Tunneling on Different Strata in Marine-terrestrial Interaction Zone [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(6):19-25.

环境进行渣土改良和控制盾构掘进参数是非常有意义的<sup>[1]</sup>。

近些年,国内专家学者关于盾构施工对地表沉降的影响做了很多研究,并取得了不错的进展。陈春来<sup>[2]</sup>等考虑了隧道施工的先后顺序和开挖面的位置因素后,建立修正的三维 Peek 公式;魏纲<sup>[3]</sup>等在双线隧道盾构施工土体变形二维解析解的基础上建立了土体变形三维解析解,得出双线盾构开挖引起的土体变形;朱正国<sup>[4]</sup>等以某盾构隧道下穿既有车站为研究背景,开展了隧道盾构开挖对车站变形机理及控制技术研究,并提出了控制车站主体结构变形的加固措施;王法<sup>[5]</sup>等依托北京 8 号线部分盾构隧道区间研究土仓压力、注浆压力、注浆量和刀盘扭矩在盾构开挖过程中对地表沉降的影响;李吉林<sup>[6]</sup>以某盾构下穿高速铁路桥梁工程为依托,采用数值分析了盾构施工对桥梁的桩基强度、桩基承载力和桥墩变形的影响;章坤<sup>[7]</sup>等基于数值模拟研究了桥式盾构施工过程中不同土体物理性质的路基沉降规律;袁大军<sup>[8]</sup>等以南京长江超大直径泥水盾构隧道为工程背景,研究了泥水平衡盾构机掘进时各阶段对于土体的扰动。

本文以天津海陆交互相地层隧道盾构掘进为研究背景,对海陆交互相典型地层(富水软土地层、饱和液化土地层和双层承压水地层)分别进行土样的物理力学试验,并通过渣土改良试验进行合适的改良,最后通过有限元软件建立海陆交互相典型地层盾构掘进模型,得出合理的盾构掘进参数,研究成果可为类似工程提供一定的理论指导。

## 1 工程概况

本文所研究的盾构隧道线路长 1 733.7 m。盾构隧道附近场地地形较平坦,地势开阔,场地地层自上而下有:①人工填土层;②第Ⅰ陆相层;③第Ⅰ海相层;④第Ⅱ陆相层;⑤第Ⅲ陆相层;⑥第Ⅱ海相层;⑦第Ⅳ陆相层。总体上,场地内地基土水平方向土质尚均匀,但盾构穿越第Ⅰ海相层( $Q_{42m}$ )⑥1粉质黏土、⑥2淤泥质粉质黏土、⑥11黏土;第Ⅱ陆相层( $Q_{41h}$ 、 $Q_{41al}$ )⑦2黏质粉土、⑦24粉砂、⑧1粉质黏土、⑧2黏质粉土、⑧24粉砂;第Ⅲ陆相层( $Q_{3eal}$ )⑨1粉质黏土、⑨11黏土地层,结构坡度较大,岩相变化较多,且分布地震液化层及承压水含水层。

结合该隧道软土地层工程特性、隧道设计情况及周边环境等重要因素,选用中心驱动的辐条面板式复合刀盘。刀盘安装加强耐磨刀具,装备仿形刀及备用刀,具备径向注浆功能,螺旋机装备伸缩机构和前后

两道闸门,后闸门(排土闸门)具有紧急关闭功能。刀盘共由 86 把主刀、12 把外周保护刀、5 把注入口保护刀和 2 把仿形刀组成,刀盘开挖直径为 6 430 mm,开口率为 43%。盾构隧道衬砌采用标准环+转弯环方式,管片环宽 150 cm,厚 3.5 m,楔形量 3.64 cm,双面楔形,采用 6 块模式拼装,即 3 块标准块(B 块)+2 块邻接块(L 块)+1 块封顶块(K 块),管片环与环之间采用 16 根 M30 螺栓,块与块之间采用 12 根 M30 螺栓连接,成块后的管片内径为 5 500 mm,外径为 6 200 mm。

## 2 室内试验与渣土改良试验分析

### 2.1 现场土样室内试验结果分析

对海陆交互相典型地层隧道区间土进行室内试验,根据试验结果得出隧道区间土的密度、含水率、液塑限和渗透系数等物理参数及地层特性。

#### (1) 天然密度

所取隧道区间土不易破碎,采用环刀法测定土体密度较为合适,所取土样包括淤泥质黏土、黏质粉土、粉质黏土,试验测得的上述 3 种土体天然密度分别为:淤泥质黏土  $1.86 \text{ g/cm}^3$ 、黏质粉土  $2.01 \text{ g/cm}^3$ 、粉质黏土  $2.02 \text{ g/cm}^3$ 。

#### (2) 含水率

采用烘干法测定不同地层的天然含水率,每层土样各取 3 个试样放置烘箱内 5~8 h 至试样水分蒸干,取各层试样含水率平均值作为该土层的含水率。测定 3 种土体含水率分别为:淤泥质黏土 39.5%、黏质粉土 23.0%、粉质黏土 22.0%;淤泥质粉质黏土的含水率较大,施工时应做好管片接缝处的防水措施,防止围岩坍塌及加重地表变形。

#### (3) 液塑限

取适量土样放入烘箱烘干,后碾碎成粉末状,将每种土样分成 3 份试样,分别加入适量蒸馏水,调拌为均匀土膏,静置 24 h 后使用液塑限联合测定仪测定其圆锥下沉深度。试验所得淤泥质粉质黏土的塑性指数  $I_p = 12.15$ ,液性指数  $I_L = 1.60$ ;黏质粉土的塑性指数  $I_p = 12.83$ ,液性指数  $I_L = 0.55$ 。实验中原状土的结构已被彻底破坏,用液性指数  $I_L$  用作重塑土的判别标准比较合适。

#### (4) 渗透试验

土中液体会在土骨架相连通的孔隙中流动,而土具有被水等液体透过的性质称作土的渗透性。由于富水软土地区含水量较大,盾构下穿构筑物的施工过程中极有可能使构筑物地基产生渗透变形,直接影响

到建筑物的安全<sup>[9]</sup>。

渗透实验包括常水头渗透实验和变水头渗透实验<sup>[10]</sup>,本文所取土样为细粒土,采用变水头法测定淤泥质黏土、黏质粉土、粉质黏土的渗透系数,分别为  $4.85 \times 10^{-6}$  cm/s、 $12.50 \times 10^{-6}$  cm/s 以及  $26.40 \times 10^{-6}$  cm/s,可以看出淤泥质黏土的渗透系数数量级为  $10^{-6}$ ,渗透性能极差,可视为不透水;黏质粉土和粉质黏土渗透系数数量级为  $10^{-5}$ ,且两层土体的渗透系数接近,可视为隔水层。

## 2.2 渣土改良试验结果分析

渣土经过改良后要有良好的流塑性,理想的塑性流动状况表现为:开挖下来的土体具有强度较低、内摩擦角较低、不易固结排水、黏聚力较低、含水率较高以及渗透性较低的特点。开挖切削下来的原状渣土经过搅拌在土舱内不容易达到这种理想状态的要求,因此有必要使用改良材料来对切削下来的土舱渣土进行改良,使其塑性流动状态得到改变,满足盾构施工需求。

渣土改良标准有塌落度、抗剪强度、渗透系数等评价指标。本次试验以塌落度试验为主,渣土改良后土体的流塑性强弱可用坍落度值来反映,坍落度指标反映了盾构施工是否能顺利排土,顺利掘进。当改良渣土的坍落度值在较合适的范围内时,土体有良好流塑性,通过控制掘进过程的排土量使土舱压力能够得到有效的控制,使开挖面应力维持动态平衡,使掘削面处于稳定状态。实际工程中使用坍落筒来测定坍落度值这一指标,经查阅相关资料,本文以塌落度 150~200 mm 时认为改良土体具有良好的流塑性。

目前工程上所用的改良剂主要有水、矿物类、泡沫剂、分散剂、絮凝剂 5 类,改良剂的选用要根据盾构开挖的地层确定,既可以选用某一种改良剂,也可以由多种改良剂组合使用。

线路穿过的海陆交互典型地层有富水软土地层、饱和液化土地层和双层承压水地层,其中富水软土地层土体为淤泥质粉质黏土,饱和液化土地层土体和双层承压水地层土体为黏质粉土。

### 2.2.1 粉质黏土渣土改良

对粉质黏土进行渣土改良时,将泡沫剂、膨润土泥浆和泡沫剂与膨润土泥浆组合作为改良剂进行试验。

采用泡沫剂进行渣土改良试验时,泡沫剂浓度为 3%,将泡沫注入比设置为 20%、25%、30%、35%、40%、45%、50%。当泡沫注入比从 20% 增大到 50% 时,塌落度从 116 mm 增大到 223 mm,塌落度增大

107 mm,塌落度随泡沫注入比的增大而增大。当泡沫注入比为 30%~40% 时,塌落度分别为 158 mm、183 mm 和 197 mm,均介于 150~200 mm,满足塌落度要求。

采用膨润土泥浆进行渣土改良试验时,泥浆浓度为 10%,泥浆注入比分别设置为 20%、23%、26%、29%、32%、35%。当泥浆注入比从 20% 增大到 35% 时,塌落度从 75 mm 增加到 214 mm,塌落度增加 139 mm,塌落度随泥浆注入比增大而增大。当泥浆注入比为 29%~32% 时,粉质黏土的塌落度分别为 170 mm 和 187 mm,均位于 150~200 mm,满足渣土改良要求。

采用泡沫剂和膨润土组合进行渣土改良试验时,泡沫注入比设置为 20%、25% 和 30%,泥浆注入比选用 8%、12% 和 15%。当泡沫剂与膨润土混合注入来进行渣土改良时,对土体有着较好的改良效果,与单独使用泡沫剂或者膨润土泥浆相比,两者混合改良效果更好。因此,对粉质黏土采用泡沫为主,膨润土为辅的改良方法较为合适;当泡沫注入比为 25%,泥浆注入比为 16% 时,塌落度为 186 mm,可以满足盾构施工要求。

### 2.2.2 淤泥质粉质黏土渣土改良

对淤泥质粉质黏土进行渣土改良时,采用泡沫剂,膨润土泥浆以及泡沫剂与膨润土泥浆混合物 3 种改良剂进行试验。

采用泡沫剂进行渣土改良试验时,泡沫剂浓度设置为 3%,泡沫注入比分别设置为 10%、15%、20%、25%、30%、35%。当泡沫注入比从 10% 增大到 35% 时,塌落度从 97 mm 增大到 221 mm,增大了 124 mm。当泡沫注入比为 25%~30% 时,塌落度分别为 173 mm 和 191 mm,均介于 150~200 mm,满足渣土改良要求。

采用膨润土泥浆进行渣土改良试验时,选用浓度为 10% 的泥浆,泥浆注入比分别设置为 30%、33%、36%、39%、42%、45%。当泥浆注入比从 30% 增大到 45% 时,塌落度从 86 mm 增大到 205 mm,增加了 126 mm。当泥浆注入比为 39%~42%,粉质黏土的塌落度分别为 169 mm 和 191 mm,均位于 150~200 mm,满足渣土改良要求,但是泥浆注入比偏大。从经济性来考虑,淤泥质粉质黏土并不适合采用膨润土进行渣土改良。

泡沫剂和膨润土组合进行渣土改良试验时,泡沫注入比分别为 15%、20% 和 25%,膨润土泥浆注入比分别为 15%、18% 和 21%。当泡沫剂与膨润土混合注入来进行渣土改良时,对土体有着一定的改良效



果,与单独使用泡沫剂或者膨润土泥浆相比,两者混合具有相对较好的改良效果,但与只采用泡沫剂进行渣土改良相差不大。因此,淤泥质粉质黏土采用泡沫剂作为渣土改良材料较为合适;当泡沫注入比为25%时,塌落度为173 mm,可以很好的满足盾构施工要求。

3 数值模拟分析

3.1 计算模型与参数选择

结合工程背景,建立了尺寸为 $X \times Y \times Z = 75\text{ m} \times 51\text{ m} \times 35\text{ m}$ 的模型,其中 $X$ 轴是模型宽度方向, $Y$ 轴是施工掘进方向, $Z$ 轴是重力方向。采用位移边界条件,地表为自由边界,模型四周不发生水平方向的位移,底部为固定边界。盾构隧道管片采用C50混凝土,管片环宽为1.5 m,外径为6.2 m,内径为5.5 m,厚度为0.35 m。施工过程中,管片脱离盾构机外壳后,土体与管片之间形成一道宽度为0.14 m左右的环形间隙,该间隙为注浆层,模型中取注浆层厚度为0.14 m,且不考虑浆液胶凝时间,只考虑注浆硬化后的阶段。隧道埋深为8.6 m,隧道左右线间距15 m。

对于富水软土地层,模型土体和注浆层采用实体单元模拟,土体本构模型为修正摩尔-库伦模型,盾壳及管片采用板单元模拟,本构模型为弹性模型;对于饱和液化土地层,由于受到强烈震动后,土体易液化,因此土体本构模型为修正UBC模型;对于双层承压水地层,土体本构模型为修正摩尔-库伦模型,地下水位稳定埋深-4.68 m,在模型中施加水压力面。

饱和液化土多了黏质粉土⑧2与黏土⑨11地层而少了粉质黏土⑥1、淤泥质粉质黏土⑥2、粉质黏土⑧1、粉质黏土⑨1地层;双层承压水层则少了粉质黏土⑧1、粉质黏土⑨1、粉质黏土⑩1,多了黏质粉土⑪12地层,3种地层所用模型材料参数均相同,模型材料参数如表1所示。结合岩土工程勘察报告参数推荐值和室内试验结果,富水软土地层模型中盾壳、管片和注浆层的计算参数取值如表2所示。

表1 富水软土地层参数表

土层	容重/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	压缩模 量/MPa	泊松 比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/( $^{\circ}$ )
素填土①1	17.4	3.01	0.2	10	10
黏土④11	18.7	4.13	0.31	30.7	13.4
淤泥质黏土⑥21	17.8	3.08	0.29	27.7	11.7
粉质黏土⑥1	18.9	4.27	0.29	25.4	14.7
淤泥质粉质黏土⑥2	18.2	3.64	0.29	18.8	11
粉质黏土⑦1	20.1	5.34	0.25	29	19.1
粉质黏土⑧1	19.6	6.31	0.24	29.3	17.3
粉质黏土⑨1	19.7	5.46	0.27	35	18.3
粉质黏土⑩1	19.8	6.49	0.22	50.2	18.8

表2 盾壳、管片和注浆层计算参数表

名称	重度/( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	弹性模量/MPa	泊松比	厚度/m
盾壳	78.5	210 000	0.30	0.05
管片	25.0	34 500	0.30	0.35
注浆层	24.0	320	0.25	0.14

根据经验公式,结合盾构机刀盘的尺寸参数可以计算出盾构推力。盾构推力的经验公式为:

$$F_e = \frac{1}{4} \pi D^2 p_j \tag{1}$$

式中: $D$ ——盾构机内径(m);  
 $p_j$ ——单位面积的刀盘经验推力( $\text{kN}/\text{m}^2$ )。  
盾构机刀盘摩擦扭矩计算公式为:

$$T_f = \frac{f p_c k \theta D^3}{24} \tag{2}$$

式中: $f$ ——摩擦系数;  
 $k$ ——开口幅度;  
 $\theta$ ——刀盘闭口部分夹角( $^{\circ}$ );  
 $p_c$ ——接触压力( $\text{kN}/\text{m}$ )。

3.2 地层竖向位移对比

当富水软土地层、饱和液化土层以及双层承压水层3种典型地层土仓压力和注浆压力相近时,地层沉降影响范围和隆起影响范围有所差别,不同地层竖向位移如图1所示。

由图1可知,富水软土地层中,盾构施工引起的围岩最大竖向沉降为20.26 mm,最大隆起为26.50 mm;饱和液化土地层中,盾构施工引起的围岩最大竖向沉降为36.30 mm,最大隆起为24.18 mm;双层承压水地层中,盾构施工引起的围岩最大竖向沉降为48.51 mm,最大隆起为26.66 mm。可以看出,海陆交互相不同地层盾构施工所引起的最大隆起值差别不大,但是对最大竖向沉降影响较大;同时,富水软土地层和饱和液化土地层中盾构施工的影响范围较大,而双层承压水地层中影响范围较小。

3.3 地表沉降曲线对比

盾构在3种典型地层施工时,地表沉降曲线如图2、图3所示。

由图2可知,不同地层的横向地表沉降曲线有所区别,富水软土地层呈“W”型,饱和液化地层呈“U”型,双层承压水地层呈不规则“V”型,但是3条沉降曲线最低点均靠近先行开挖隧道一侧。

由图3可知,不同地层下地表纵向沉降曲线都分为3个阶段,区别主要在盾构加固阶段,饱和液化土地层盾构加固阶段沉降变化较为明显,富水软土地层盾构加固阶段沉降较为平缓,近乎直线,双层承压水

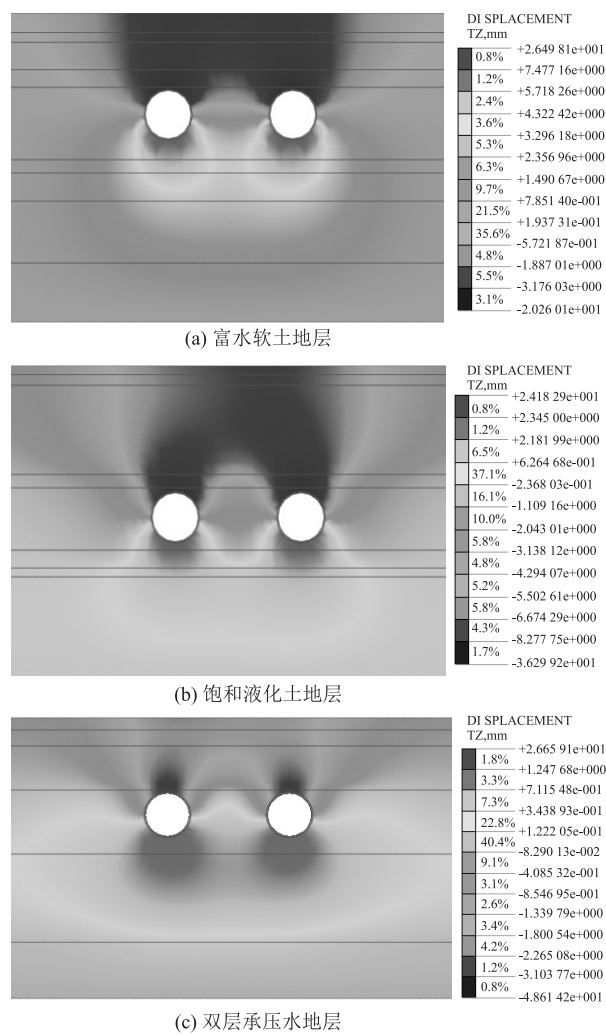
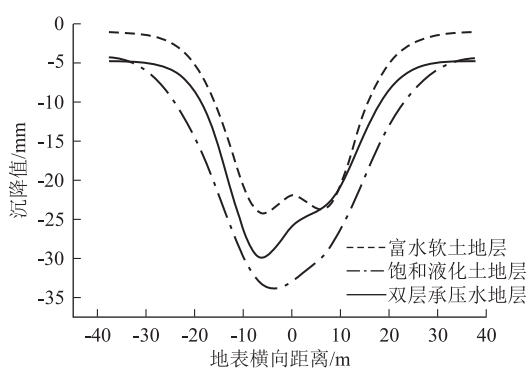


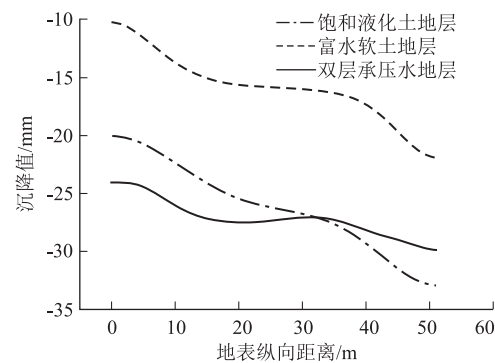
图 1 海陆交互不同地层竖向位移云图



地层盾构加固阶段沉降有所回弹。

3.4 地层参数对比

富水软土地层的含水率、密实度、孔隙比、液塑限、压缩模量、内摩擦角、黏聚力和标贯击数和其他两种地层存在显著差异,如表 3 所示。相对于其他地层,富水软土地层强度低、压缩性高、抗剪强度差,受



到扰动时,地层更易破坏,土仓压力和注浆压力的取值都较小。饱和液化土地层和双层承压水地层除压缩模量外,其它参数相差不大,压缩模量相差 3.23 MPa,饱和液化土地层受到强烈震动后土体称为随水流动的悬浊液,双层承压水地层存在相对稳定的水压力,饱和液化土地层隧道埋深较大,因此双层承压水地层掘进参数建议值大于饱和液化土地层掘进参数,但仅大于 10 kPa。

表 3 典型地层相关参数表

相关参数	富水软土地层	饱和液化土地层	双层承压水地层
含水率/%	39.3	18.5	19.6
密实度/(kN/m³)	18	20.7	20.5
比重	2.74	2.69	2.69
孔隙比	1.123	0.543	0.571
液限/%	36.5	24.1	24.6
塑限/%	20.2	16.3	16.1
压缩模量/MPa	3.4	13.97	10.74
内摩擦角/(°)	8.9	31	30
黏聚力/kPa	15.6	12.5	12.7
标贯击数/(击/30 cm)	3.4	16.3	16.6

3.5 掘进参数建议值

由数值模拟典型地层的掘进参数建议值,如表 4 所示。

表 4 不同地层掘进参数建议值表

地层	土仓压力/kPa	注浆压力/kPa
富水软土地层	110 ~ 130	150 ~ 180
饱和液化土地层	150 ~ 170	170 ~ 200
双层承压水地层	160 ~ 180	180 ~ 210

由表 4 可知,富水软土地层掘进参数建议土仓压力为 110 ~ 130 kPa,注浆压力为 150 ~ 180 kPa;双层承压水地层掘进参数建议土仓压力为 160 ~ 180 kPa,注浆压力为 180 ~ 210 kPa;饱和液化土地层掘进参数建议土仓压力为 150 ~ 170 kPa,注浆压力为 170 ~ 200 kPa。

不同地层之间,土仓压力的建议值最大相差 50 kPa,注浆压力的建议值最大相差 30 kPa。

4 现场监测数据分析

4.1 监测内容

海陆交互相富水软土地层盾构掘进时,土仓压力取 110 kPa,注浆压力取 180 kPa;海陆交互相饱和液化土地层盾构掘进时土仓压力取 150 kPa,注浆压力取 200 kPa;海陆交互相双层承压水地层盾构掘进时土仓压力取 160 kPa,注浆压力取 210 kPa 时。对东丽一经路站—三经路站内 DK 42+299.427 横断面,东丽三经路站—六经路站内 HZ+348.300 和 ZH+126.340 横断面的监测数据进行收集整理,其中里程 DK 42+299.427 处为海陆交互相富水软土地层,里程 HZ+348.300 处为海陆交互相饱和液化土地层,里程 ZH+126.340 处为海陆交互相双层承压水地层。

4.2 监测布置

对地表沉降进行监测时,监测点沿线路中心线布置,每 5 环设置一个监测点,25 环设置一个监测断面,断面范围一般在中心线两侧 30 m 以上。两个监测面之间布置 7 个监测点,监测点之间的距离按照轴线的距离来布置,测点间距 5~15 m。横向监测点布置如图 4 所示,图中的 L1 根据隧道埋深等情况确定,L 根据线间距来进行调整。

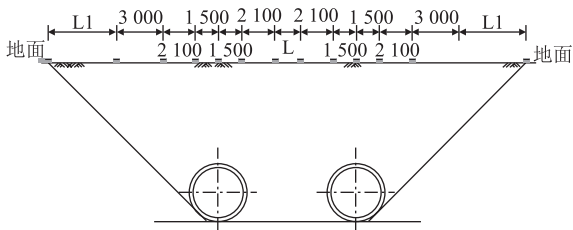


图 4 地面监测点布置图

4.3 监测数据分析

对东丽一经路站—三经路站内 DK 42+299.427 处横断面,东丽三经路站~六经路站内 HZ+348.300 和 ZH+126.340 处横断面的监测数据进行整理分析,绘出地表沉降曲线,和数值模拟的地表沉降曲线进行对比,如图 5 所示。

由图 5 可知,海陆交互相 3 种典型地层监测数据沉降曲线和模拟数据沉降曲线形状相似,且最大沉降相差不大;富水软土地层实际监测和数值模拟下的地表最大沉降分别为 12.21 mm 和 14.49 mm,相差 2.28 mm;饱和液化土地层实际监测和数值模拟下

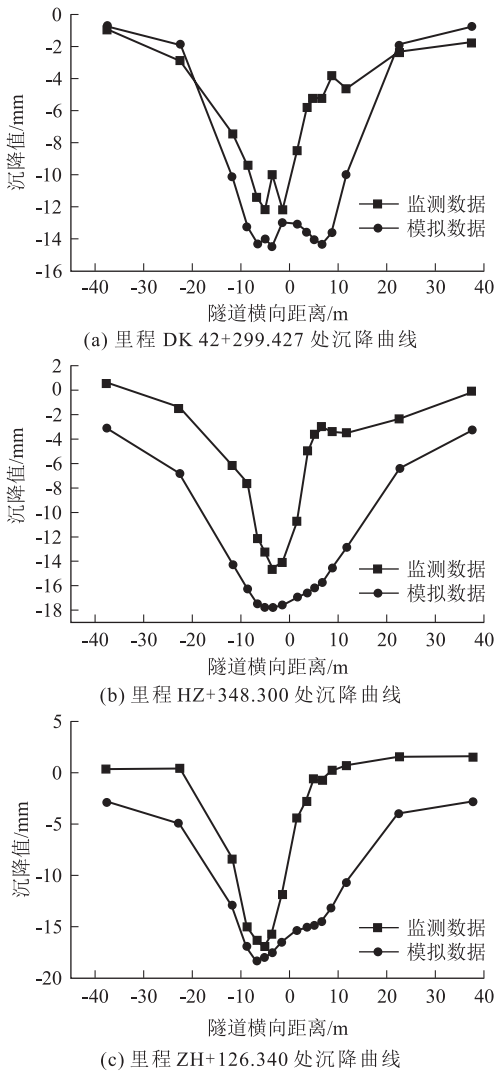


图 5 不同地层沉降曲线监测值与数值模拟对比图

的地表最大沉降分别为 14.59 mm 和 17.77 mm,相差 3.18 mm;双层承压水地层实际监测和数值模拟下的地表最大沉降分别为 16.93 mm 和 18.33 mm,相差 1.4 mm。模拟得到的地表最大沉降均大于实际监测所得,根据数值模拟所提出的土仓压力和注浆压力建议值较为合理,满足施工安全要求。

模拟数值较大的原因为:一方面,数值模拟计算对地层进行了简化处理,认为地层是水平各向同性;另一方面,模拟时的注浆压力假设以均布力形式分布。

5 结论

本文以天津海陆交互相地层盾构掘进为研究背景,开展海陆交互地层的物理力学参数与渣土改良试验,并通过 MIDAS-GTS 对海陆交互不同地层盾构掘进施工进行建模,优化不同地层的盾构掘进参数,



得到主要结论如下:

(1)对土样进行室内实验,得到土样的天然密度、含水率、液塑限、渗透系数等参数,得出土样渗透性差、易于压缩、亲水性强和强度较低。

(2)黏质粉土选用泡沫剂与膨润土的组合作为改良剂,当泡沫剂浓度为3%,注入比为25%,膨润土泥浆浓度为10%,注入比为16%时,渣土塌落度为186 mm,可以满足渣土改良要求;淤泥质粉质黏土选用单一泡沫剂作为改良剂,当泡沫剂浓度为3%,注入比为25%时,渣土塌落度为173 mm,可以满足渣土改良要求。

(3)对海陆交互相3种典型地层盾构施工过程进行数值模拟,得出3种典型地层在不同土仓压力和注浆压力下的地层竖向位移、地表沉降曲线和盾构掘进建议值3个方面的差异性在于地层土体物理性质、力学特性各不相同。

(4)海陆交互相3种典型地层现场监测数据和数值模拟数据所得出的地表沉降曲线形状极为相似,且沉降相差不大,数值模拟具有较高的可信度;根据数值模拟所提出的土仓压力和注浆压力应用于海陆交互相3种典型地层盾构掘进时,都可以很好地满足施工要求。

## 参考文献:

- [1] 赵伟,陈桥枫,张富国,等. 近接既有结构深大基坑隆起变形控制:以天津地铁5号线思源道站接建地下空间工程为例[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(3): 1192–1198.  
ZHAO Wei, CHEN Qiaofeng, ZHANG Fuguo, et al. Heave Deformation Control Method of Large-scale Deep Foundation Pit Adjacent to Existing Structure: Taking the Underground Space Project Connecting to Siyuandao Station of Tianjin Metro Line 5 as an Example [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(3): 1192–1198.
- [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 Chengli, 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.
- [3] 魏纲,庞思远. 双线平行盾构隧道施工引起的三维土体变形研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2562–2568.  
WEI Gang, PANG Siyuan. Study of Three-dimensional Soil Deformation Caused by Double-line Parallel Shield Tunnel Construction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2562–2568.
- [4] 朱正国,陈信宇,陈自飞,等. 盾构隧道下穿既有车站变形控制研究[J]. 高速铁路技术, 2019, 10(4): 6–11.  
ZHU Zhengguo, CHEN Xinyu, CHEN Zifei, et al. Research on Deformation Control of Shield Tunneling under Subway Station [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(4): 6–11.
- [5] 王法,周宏磊,雷崇红,等. 盾构施工参数对地表沉降的因素敏感性分析[J]. 都市轨道交通, 2013, 26(6): 63–67.  
WANG Fa, ZHOU Honglei, LEI Chonghong, et al. Sensitivity Analysis of Shield Tunneling Parameters on Ground Surface Settlements [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2013, 26(6): 63–67.
- [6] 李吉林. 地铁盾构下穿高速铁路桥梁结构安全性评估研究[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(1): 61–65, 75.  
LI Jilin. Study on Structural Safety Assessment of Subway Shield underneath Passing High-speed Railway Bridge [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(1): 61–65, 75.
- [7] 章坤,陈力. 桥式盾构施工中路基沉降影响因素分析[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(4): 12–15.  
ZHANG Kun, CHEN Li. Analysis on Influencing Factors of Subgrade Settlement in Bridge-shield Construction [J]. High Speed Railway Technology, 2016, 7(4): 12–15.
- [8] 袁大军,尹凡,王华伟,等. 超大直径泥水盾构掘进对土体的扰动研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2074–2080.  
YUAN Dajun, YIN Fan, WANG Huawei, et al. Study of Soil Disturbance Caused by Super-large Diameter Slurry Shield Tunnelling [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10): 2074–2080.
- [9] 刘德斌. 富水软土地区盾构施工对邻近建筑物的影响及控制措施[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(11): 127–130.  
LIU Debin. Influence and Control Measures of Shield Construction on Adjacent Buildings in Water Rich Soft Soil Area [J]. Construction Technology, 2022, 51(11): 127–130.
- [10] 王树英,陈宇佳,钟嘉政,等. 泡沫-泥浆-聚合物组合改良粗粒土塑流性及渗透性特征研究[J]. 中国公路学报, 2023, 36(8): 214–224.  
WANG Shuying, CHEN Yujia, ZHONG Jiazheng, et al. Study on Flow Plasticity and Permeability Characteristics of Foam-slurry-polymer Conditioned Coarse-grained Soil [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(8): 214–224.