

# 基于大断面束合管幕法的地铁车站建造方案研究<sup>\*</sup>

张中杰<sup>1</sup> 刘 书<sup>1,2\*\*</sup> 袁 勇<sup>2</sup> 柳 献<sup>2</sup> 陈加核<sup>1</sup> 吴 航<sup>1</sup>

(1. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 200025, 上海; 2. 同济大学土木工程学院, 200092, 上海//第一作者, 正高级工程师)

**摘 要** 目的: 为了在软土暗挖技术领域推广 UBIT(束合管幕)施工方法, 针对应用该施工方法的大断面地铁车站建造方案进行研究。方法: 以上海轨道交通 23 号线的某车站为工程背景, 结合周边环境、道路交通、控制管线明确工作井设置、暗挖段长度及顶覆土厚度等总体方案; 确定包括宽度限界、高度限界、管线排布的使用功能限界, 提出采用 A 型车的地铁车站类矩形断面建筑设计标准; 考虑预应力张拉施工阶段、土体已开挖使用阶段的两阶段受力平衡, 拟合结构断面; 结合束合管节节间接缝的受力特征, 建立刚性板-耦合单元非线性本构模型; 通过有限元手段研究断面内力变形, 并进行预应力配束计算研究。结果及结论: 实施中应尽量减少顶部覆土、缩短一次性管节顶进长度, 以有利于控制钢管节尺寸、施工误差; 大断面束合管幕法地铁车站建造应优选类矩形断面, 以充分利用拱形受力特点。但值得注意的是, 类矩形断面的预应力张拉, 会产生显著的次生内力及变形, 且其影响与曲率成正相关。针对城市轨道交通工程常见的 3~5 m 覆土, 在内力、变形双控标准下, 建立了类矩形断面预应力钢绞线的配束标准。

**关键词** 地铁车站; 束合管幕; 类矩形断面; 本构模型; 预应力配束标准

**中图分类号** U231<sup>+.4</sup>

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.12.012

## Research on Metro Station Construction Scheme Based on Large Profile UBIT Construction Method

ZHANG Zhongjie, LIU Shu, YUAN Yong, LIU Xian, CHEN Jiahe, WU Hang

**Abstract** Objective: In order to promote the UBIT (underground bundle composite pipe integrated by transverse pre-stressing) method in the field of soft soil underground-excavation technology, research is specifically carried out focusing on the construction scheme of large profile metro station applying

this construction method. Method: Taking a station on Shanghai Metro Line 23 as the engineering background, the overall scheme is defined by considering the surrounding environment, road traffic, and control pipelines, including the setting of working shafts, the length of the underground-excavation section, and the thickness of the overlying soil. The application functional limitations including width limits, height limits, and pipeline layout are determined. The design standards for metro stations with A-type trains and quasi-rectangular profile buildings is proposed. The two-stage force balance during the pre-stressing tensioning construction phase and the soil excavation use stage is considered, and the structural profile is fitted. A nonlinear constitutive model of rigid plate-coupling element is established based on the force characteristics of the coupling joints between the bundled tubes. The internal force and deformation of the profile are studied through finite element methods, and research on pre-stressing reinforcement calculations is carried out. Result & Conclusion: During implementation, efforts should be made to minimize the topsoil cover and reduce the length of one-time pipe jacking to control the dimensions of steel pipe sections and construction errors. The construction of large profile metro stations using UBIT method should preferably choose a quasi-rectangular profile to fully utilize the arching force characteristics. However, it is noteworthy that pre-stressing tensioning in quasi-rectangular profiles generates significant secondary internal forces and deformations, and the impact is positively correlated with curvature. For common soil cover of 3 to 5 meters in urban rail transit projects, under the standards of both internal force and deformation control, a standard for pre-stressing reinforcement arrangements in quasi-rectangular profile is established.

**Key words** metro station; UBIT; quasi-rectangular cross-section; constitutive model; pre-stressing reinforcement standard

<sup>\*</sup> 上海市科学技术委员会青年科技英才扬帆计划项目(21YF1433400); 上海市住房和城乡建设管理委员会科研项目(沪建科 2021-002-003); 上海市地质学会科研项目(Dzxh202101)

<sup>\*\*</sup> 通信作者

**Author's address** Shanghai Urban Construction Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., 200025, Shanghai, China

## 0 引言

富水软土地区以上海为典型代表,暗挖施工受地下水位高和土体强度低的地质条件制约,较为普遍地采用盾构法、顶管法和管幕法。盾构法和顶管法的施工工艺较为成熟,但在断面尺寸及覆土方面存在限制。

目前,我国最大断面的盾构为北京东六环改造工程的“京华号”,其直径为 16.07 m<sup>[1]</sup>;最大断面的顶管为嘉兴市快速路环线工程的“南湖号”,其尺寸为 14.8 m×9.4 m (宽×高)<sup>[2]</sup>;二者覆土分别需要至少 1 倍设备直径和 0.6 倍隧道宽度<sup>[3-4]</sup>。因此,盾构法多用于地铁区间隧道,而顶管法多用于地铁车站出入口及连通道。二者在车站主体结构施工中均应用较少,尚需进一步研究。上海轨道交通 14 号线的静安寺站,首次采用了阵列顶管法建造地铁车站主体结构,暗挖段分为 3 根“品”字形分布的类矩形顶管,通过联络通道形成分离式地铁车站<sup>[5]</sup>。深圳地铁 12 号线的沙三站,首次采用了平行超近距顶管建造地铁车站主体结构,依次顶进左右洞车站子结构,通过结构体系转换形成整体地铁车站<sup>[6]</sup>。管幕法,虽然在断面尺寸上实现突破,但由于离散钢管依靠锁扣连接,无法横向协同受力,从而需利用顶进箱涵<sup>[7]</sup>或临时型钢支撑结合水平土体加固和多导洞开挖<sup>[8]</sup>。顶进箱涵需要较大规模的工作井以及稳定的后靠措施,而临时型钢支撑多导洞开挖则会导致挖土效率不高、施工工序复杂。例如:上海中环线虹许路北虹路地道工程,采用了 RBJ(管幕结合箱涵顶进)法,进行大断面双跨箱涵施工。上海轨道交通 14 号线的桂桥路站,采用了管幕结合临时型钢支撑的多导洞挖土法,开挖前需对土体进行水平 MJS(全方位高压喷射技术)加固。

束合管幕(UBIT)法作为一种新型暗挖技术,通过横向张拉预应力钢绞线,将纵向顶进的离散、小断面矩形钢管群,束合成可横向受力的整体结构<sup>[9]</sup>,首次在上海轨道交通 14 号线的武定路站 1 号进出口得到应用<sup>[10]</sup>,解决了富水软土地区无临时支撑、无土体加固、全断面挖土、超前支护与永久结构合一的暗挖难题。目前,关于该施工方法的研究仍主要集中在通过足尺试验揭示受力特性与破坏机

理<sup>[9,11-13]</sup>,或相应小截面矩形顶管机设备开发<sup>[14-15]</sup>,而尚无应用于大断面地铁车站的建造方案研究。因此,本文进一步以上海轨道交通 23 号线的某车站为工程背景,开展大断面束合管幕法地铁车站的建造方案研究。

## 1 工程背景

### 1.1 项目概况

上海轨道交通 23 号线的某车站位于东川路与壁溪路交叉口,车站总长约为 394.5 m。该路口沿碧溪路存在的重要市政管线主要为:1 路 220 kV 高压电力管线,3×7 组(3 排,每排 7 根电缆保护管,类同)排管,中心埋深为 1.95 m;2 路 110 kV 高压电力管线,3×10 组排管,中心埋深分别为 1.39 m 和 1.05 m;1 路规划雨水管,直径为 1 400 mm,中心埋深 3.2 m,见图 1。

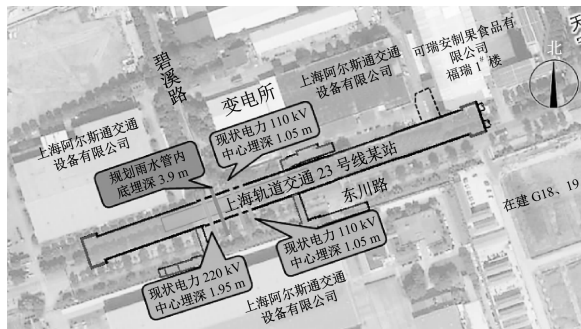


图 1 背景工程总图

Fig. 1 Overview of background engineering

拟建场地属于典型的软土地区,车站主要位于第③层灰色淤泥质粉质黏土和第④层灰色淤泥质黏土,均呈流塑状态、自立性差,属高等压缩性土层。

### 1.2 工程难点

车站主体与 3 路既有高压电力管线及 1 路规划大直径雨水管线平面相交。若采用传统的明挖法施工,不可避免地需改迁上述重要市政管线,以及其他燃气、污水、电信、上水等市政管线,仅管线改迁费用就高达约 2.2 亿元。同时,高压电力管线排管断面较大,改迁选线困难,且改迁及复位工程量、周期长,会严重影响城市环境及居民生活。因此,综合考虑社会及经济效益,采用束合管幕施工方法暗挖实施下穿。

## 2 大断面束合管幕法地铁车站建造方案

### 2.1 总体方案研究

规划雨水管的内底埋深约为 3.9 m,为本工程

覆土控制管线。同时,需满足既有高压电力管线垂直保护距离不小于 1.0 m 的要求。因此,将车站分为东①区及西③区 2 处明挖段,及下穿路口范围的②区暗挖段,暗挖段长度约为 89 m。车站建造方案如下:

方案 1 在规划雨水管处,设置 9 m 宽的明挖中间工作井,作为由①区及③区同时始发顶进的束合管幕接收井,进而将②区分为 32 m 及 48 m,如图 2 所示;中间工作井顶板预留规划雨水管下凹管槽后,暗挖段顶覆土 3.6 m。

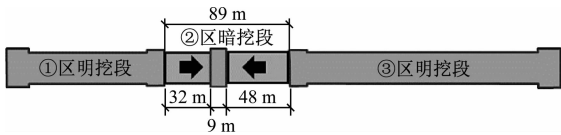


图 2 暗挖段方案 1(有中间工作井)

Fig. 2 Scheme I for underground excavation section (with intermediate working shaft)

方案 2 不设置中间工作井,②区由③区始发顶进束合管幕,①区接收,见图 3。暗挖段顶覆土 4.6 m。

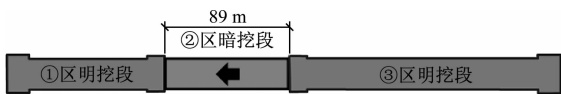


图 3 暗挖段方案 2(无中间工作井)

Fig. 3 Scheme II for concealed excavation section (without intermediate working shaft)

相同暗挖断面下,顶覆土越小,结构所受荷载越小,钢管节尺寸越小,且两侧明挖段①区及③区挖深越小,工程总投资越小。同时,由①区及③区同时始发顶进束合管幕,不但减少了工期,且缩短了暗挖段长度,有利于钢管节顶进施工误差控制。因此,推荐采用方案 1。

断面型式方面,以变形不超过 10 mm 为控制标准,当覆土厚度为 3 m 时,平顶矩形断面适用的最大跨度为 19 m。本工程覆土厚度最小为 3.6 m,最大为 4.6 m,车站断面跨度大于 19 m。因此,拟采用类矩形断面,以充分利用拱形受力特点。

2.2 建筑方案研究

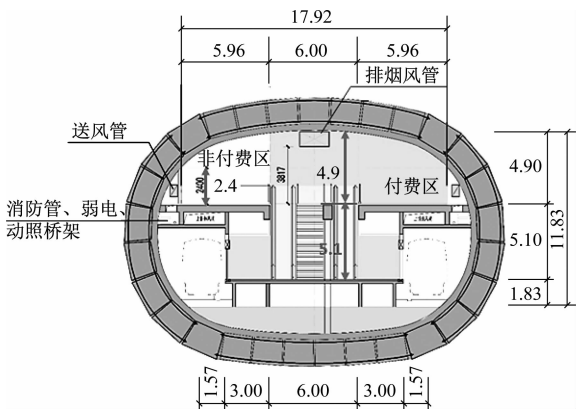
建筑方案研究,即明确标准断面的使用功能界限,包括宽度界限、高度界限、管线排布等。

宽度界限方面:车辆选用 A 型车,设置“两扶一楼”,楼扶梯宽度为 6 m,有效站台宽度为 12 m;站厅层,考虑检票闸机与楼扶梯的控制距离,且满足

非付费区联通兼过街功能,单侧宽度为 5.96 m,总宽度即为 17.92 m。

高度限界方面:站台层,考虑车辆及设备限界,站台板上为 5.10 m,板下为 1.83 m;站厅层,拱顶净高由垂直电梯及排烟风管控制,限界为 4.9 m,拱脚净高由人行通道的最小高度控制,限界为 2.4 m。

管线排布方面,为提升空间尺度感,需尽可能地减少站厅层顶部管线。因此,拱顶处仅设排烟风管,两侧拱脚无效空间内,设送风管、强弱电桥架、消防管等,见图 4。



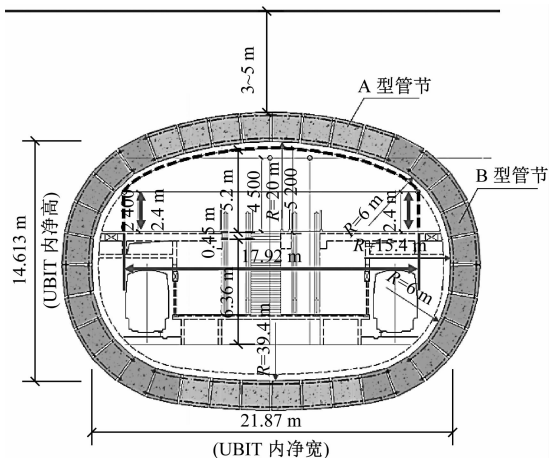
单位:m

图 4 暗挖段建筑标准断面

Fig. 4 Building standard profile of underground excavation section-building standard section

2.3 结构方案研究

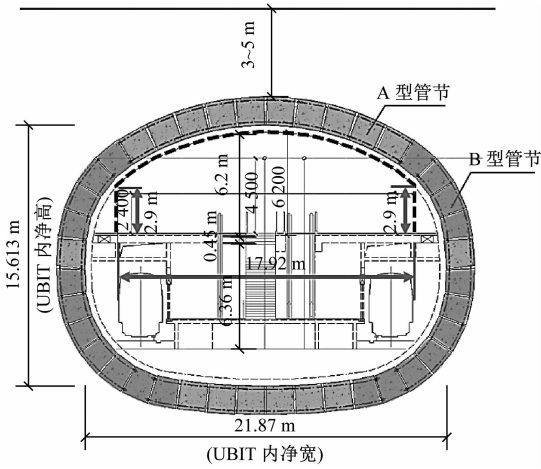
考虑预应力张拉施工阶段、土体已开挖使用阶段的两阶段受力平衡,提出了适用于 3 ~ 5 m 覆土的 I 类与 II 类结构断面,见图 5、图 6。



注:尺寸单位为 mm。

图 5 暗挖段 I 类结构断面

Fig. 5 Undercut section-Class I structural section



注:尺寸单位为 mm。

图 6 暗挖段 II 类结构断面

Fig. 6 Class II structural profile of underground excavation section section

其中,两类结构断面内净宽均为 21.87 m。区别在于拱顶起拱度,即站厅层拱顶高度,分别为 5.2 m 与 6.2 m。进而,相同覆土及预应力配束条件下,Ⅰ类结构断面的管节高度为 1.8 m,而Ⅱ类的管节高度可控制在 1.7 m。但Ⅱ类断面的①区及③区明挖段挖深大,工程投资较大。因此,推荐采用Ⅰ类结构断面。

### 3 有限元计算研究

#### 3.1 本构模型

束合管幕的受力性能重点在于接缝的受力表现与预应力筋的作用<sup>[9]</sup>。因此,在 Kelvin(开尔文)模型的基础上,增加了用于模拟接缝锁扣缝隙的 GAP(间隙)单元及 FSLIDE(滑块)单元。从而,建立了适用于束合管幕结构的接缝耦合单元,见图 7。其中,节点  $i$  与节点  $j$  之间的  $k_1$  为弹簧单元,  $c$  为黏滞阻尼单元。

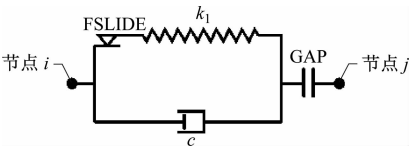


图 7 接缝耦合单元示意图

Fig. 7 Schematic diagram of joint coupling unit

耦合单元的本构模型,见图 8,节点  $i$  的位移  $u_i$  与节点  $j$  的位移  $u_j$  差值小于锁扣缝隙时,横轴及对应 FSLIDE 为负值,表示仍然分离;大于锁扣缝隙时,横轴及对应 FSLIDE 为正值,表示互相接触,并

考虑屈服的非线性状态。在有限元模拟中,采用梁单元模拟管节,采用刚性梁模拟管节腹板,耦合单元模拟接缝,管节腹板上不同节点的位移,例如节点  $i, j, k$ ,等均可通过水平位移  $u_x$ 、竖直位移  $u_y$ 、转角位移  $\theta$  表示,见图 9。

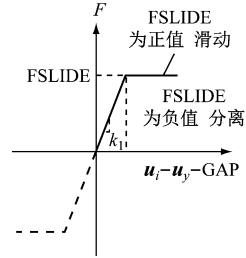


图 8 耦合单元本构关系图

Fig. 8 Constitutive relationship diagram of coupling unit

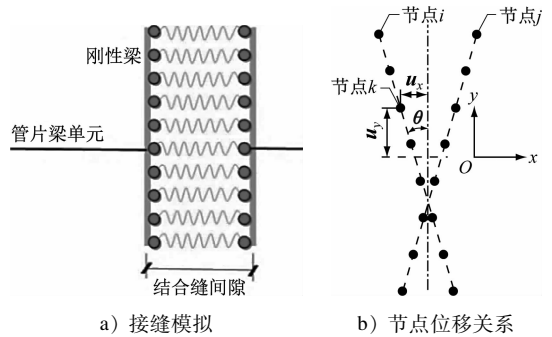


图 9 接缝模拟及节点位移关系图

Fig. 9 Joint simulation and node displacement relationship diagram

#### 3.2 受力性能研究

利用已建立的本构模型,对本工程采用方案 1 的Ⅰ类结构断面进行受力性能研究见图 10、图 11。其分为 2 个阶段:预应力张拉后土体未开挖的施工阶段及土体开挖后的使用阶段。内力控制标准为最大拉应力小于 2 MPa<sup>[9]</sup>,即接缝处不出现开裂,有利于保证结构刚度及防水效果;变形控制标准为小于 10 mm,有利于控制周边地层沉降。

首先,顶、底及侧部的内外侧均配置 9 束预应力筋时,预应力张拉的施工阶段,顶、底部的外侧及侧部的内侧,最大拉应力达到 10.2 MPa,最大变形达到 12.6 mm,均不满足控制标准。使用阶段,拱脚及侧部的内侧最大拉应力达到 4.7 MPa,最大变形达到 7.3 mm,内力不满足,但变形满足控制标准,见图 10。这说明,类矩形断面的预应力张拉,会产生除轴力外显著的次生弯矩及变形,且其影响与曲率成正相关。

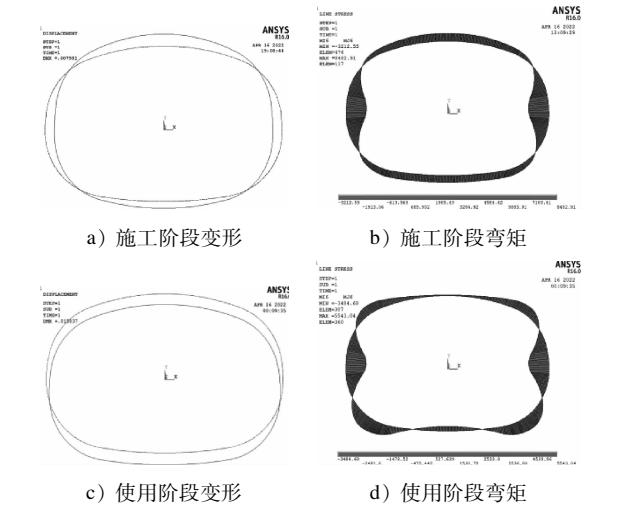


图 10 顶、底、侧部内外侧 9 束预应力筋受力变形及弯矩云图截图

Fig. 10 Nephogram of screenshot of top, bottom, and side internal and external 9 strands of pre-stressing reinforcement subjected to force deformation and bending moment

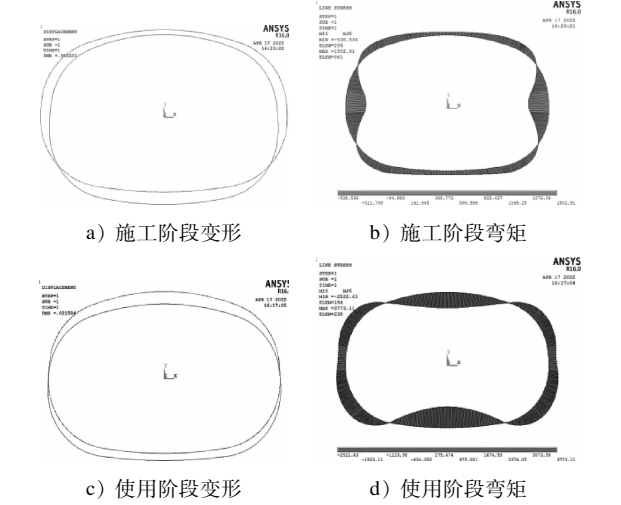


图 11 顶、底部内外侧 9 束及侧部内外侧 2 束预应力筋受力变形及弯矩云图截图

Fig. 11 Screenshot of nephogram of top and bottom inner and outer 9 strands, and side inner and outer 2 strands of pre-stressing reinforcement subjected to force deformation and bending moment

调整侧部的内外侧预应力筋数量为 2 束,通过不均匀预应力配束,平衡施工与使用阶段的内力与变形。可以看出,调整后的配束方案,两个阶段最大拉应力为 1.7 MPa,最大变形为 9.7 m,均满足内力与变形控制标准,见图 11。

### 3.3 预应力钢绞线配束标准研究

针对城市轨道交通常见的 3~5 m 覆土厚度,进

行预应力差异化配束计算研究。预应力张拉后土体未开挖的施工阶段及土体开挖后的使用阶段均满足拉应力 2 MPa 及变形 10 mm 双控标准的预应力筋配束数,见表 1。

为更好地指导采用束合管幕法建造地铁车站的类似工程,进一步调整最大拉应力控制为 1.2 MPa 与 1.6 MPa,即原内力控制标准 2 MPa 的 60% 与 80%,进行参数化分析,进而形成不同覆土条件下,预应力筋的建议配束设计标准,见表 2。

表 1 拉应力 2 MPa 及变形 10 mm 控制的预应力筋配束数

Tab. 1 Prestressed tendons under tensile stress 2 MPa and deformation 10 mm

覆土厚度/m	预应力筋配束数/束					
	顶部外侧	顶部内侧	侧部外侧	侧部内侧	底部外侧	底部内侧
3	2	4	2	2	2	5
4	2	6	2	2	2	6
5	2	6	3	3	2	6

表 2 不同覆土条件下预应力筋的建议筋配束数设计标准

Tab. 2 Design standards for the recommended number of pre-stressing reinforcement strands under different soil cover conditions

覆土厚度/m	预应力筋配束数/束					
	顶部外侧	顶部内侧	侧部外侧	侧部内侧	底部外侧	底部内侧
3	1~4	3~8	1~4	1~4	1~4	3~8
4	2~5	4~10	2~5	2~5	2~5	4~10
5	2~6	6~12	3~6	3~6	2~6	6~12

## 4 结语

本文以上海轨道交通 23 号线的某车站为工程背景,开展了超大断面束合管幕法地铁车站建造方案研究。

首先,提出了采用 A 型车的地铁车站类矩形断面建筑设计标准。其中,总宽度限界建议为 17.92 m,站厅层拱顶净高限界为 4.90 m,拱脚最小净高限界为 2.40 m,站台层净高限界为 6.93 m。站厅层拱顶处仅设排烟风管,两侧拱脚无效空间设其余管线。进而,在满足建筑限界的前提下,拟合出适用于 3~5 m 厚覆土范围的结构断面。

其次,考虑管节间接缝的破坏机理,在 Kelvin 模型基础上,通过增加 GAP 与 FSLIDE 单元,建立了适用于束合管幕施工方法的刚性板-耦合单元非线性本构模型,并进一步利用有限元手段进行了结

构内力变形研究。结果表明,类矩形断面的预应力张拉,会产生显著的次生内力及变形,且其影响与曲率成正相关。

最后,针对城市轨道交通工程常见的3~5 m覆土,在施工、使用2阶段满足内力及变形双控标准下,进行了差异化预应力配束的参数化分析,形成了不同覆土条件下,预应力钢绞线的建议配束标准,可供今后采用束合管幕法建造地铁车站的类似工程作参考。

## 参考文献

- [1] 陈能诵,黄杰. 铁建重工国产最大盾构机荣耀下线[J]. 市政技术, 2020, 38(6): 9.  
CHEN Nengsong, HUANG Jie. The largest domestic shield machine have been successfully off the line in CRCC Heavy Industry Co., Ltd [J]. Municipal Engineering Technology, 2020, 38(6): 9.
- [2] 贾连辉, 湛文涛, 范磊, 等. 特大断面矩形隧道掘进机关键系统设计与应用: 结合嘉兴市市长水路下穿南湖大道项目[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(5): 917.  
JIA Lianhui, CHEN Wentao, FAN Lei, et al. Design and application of key systems of super-large rectangular cross-section pipe jacking machine: a case study on pipe jacking project of Changshui Road crossing underneath Nanhu Avenue in Jiaxing, China [J]. Tunnel Construction, 2022, 42(5): 917.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 盾构法隧道施工及验收规范: GB 50446—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for construction and acceptance of shield tunnelling method: GB 50446—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [4] 上海市住房和城乡建设管理委员会. 顶管工程设计标准: DG/TJ 08-2268—2019 [S]. 上海: 同济大学出版社, 2019.  
Shanghai Housing and Urban Rural Construction Management Committee. Construction design code for pipe jacking: DG/TJ 08-2268—2019 [S]. Shanghai: Tongji University Press, 2019.
- [5] YANG Y F, LIAO S M, LIU M B, et al. A new construction method for metro stations in dense urban areas in Shanghai soft ground: open-cut shafts combined with quasi-rectangular jacking boxes [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 125: 104530.
- [6] 王雷, 刘树亚, 陈湘生, 等. 基于超大断面矩形顶管法的地铁车站建造方案[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(2): 42.  
WANG Lei, LIU Shuya, CHEN Xiangsheng, et al. Construction scheme of metro station based on rectangular pipe jacking method with super-large cross-section [J]. China Railway Science, 2023, 44(2): 42.
- [7] 张俊儒, 严丛文, 叶伦, 等. 箱涵顶进对下方管幕的力学作用分析[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(增刊1): 73.  
ZHANG Junru, YAN Congwen, YE Lun, et al. Analysis of mechanical effect of box culvert jacking on bottom pipe curtain [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(S1): 73.
- [8] 张世宏. 饱和软土地区地下车站管幕法支撑施工关键技术研究[J]. 隧道与轨道交通, 2021(2): 35.  
ZHANG Shihong. Research on key technologies of pipe roof construction for underground station in saturated soft soil area [J]. Tunnel and Rail Transit, 2021(2): 35.
- [9] 毕湘利, 张中杰, 刘书, 等. 饱和软土地区束合管幕结构受力性能足尺试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(6): 953.  
BI Xiangli, ZHANG Zhongjie, LIU Shu, et al. Full-scale experimental study on mechanical behaviors of bundled integrate structure in saturated soft soil area [J]. Tunnel Construction, 2022, 42(6): 953.
- [10] 张中杰, 刘书, 吕培林, 等. 富水软土地区束合管幕(UBIT)暗挖新工法的设计与工程实践[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(增刊2): 267.  
ZHANG Zhongjie, LIU Shu, LYU Peilin, et al. Design and engineering practice of a new mining method using underground bundle composite pipe integrated by transverse pre-stressing in water-rich soft soil area [J]. Tunnel Construction, 2022, 42(S2): 267.
- [11] 毕湘利, 王秀志, 张中杰, 等. 束合管幕结构侧卸载工况下受力性能足尺试验研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(5): 163.  
BI Xiangli, WANG Xiuzhi, ZHANG Zhongjie, et al. Full-scale experimental study on mechanical behavior of the bundled integrate structure under the unloading condition of the side [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(5): 163.
- [12] 毕湘利, 王秀志, 张中杰, 等. 束合管幕结构结合缝受剪性能足尺试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(1): 245.  
BI Xiangli, WANG Xiuzhi, ZHANG Zhongjie, et al. Full-scale experimental study on shear performance of joints of bundled integrate structure [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(1): 245.
- [13] 毕湘利, 王秀志, 张中杰, 等. 束合管幕结构结合缝压弯性能足尺试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(8): 1342.  
BI Xiangli, WANG Xiuzhi, ZHANG Zhongjie, et al. Full-scale experimental study on joint bending performance of bundled integrate structure [J]. Tunnel Construction, 2022, 42(8): 1342.
- [14] 彭世宝. 束合管幕行星多刀盘方形顶管机的研制与工程应用[J]. 建筑科技, 2022, 6(1): 58.  
PENG Shibao. Bundle tube curtain planetary driving multi cutter head square pipe jacking machine development and engineering practice [J]. Building Technology, 2022, 6(1): 58.
- [15] 翟一欣. 束合管幕方形顶管机多刀盘系统设计及应用[J]. 中国市政工程, 2022(2): 96.  
ZHAI Yixin. Design & application of multi-cutter head system for square pipe jacking machine with bundle pipe curtain [J]. China Municipal Engineering, 2022(2): 96.

(收稿日期: 2023-06-08)