

富水软土地层中心城区浅覆土管幕法分析研究

徐志玲

(上海隧道工程有限公司, 上海市 200032)

摘要:为解决富水软土地层中心城区浅覆土无临时支撑、无土体加固的全断面暗挖施工难题,通过对日本MMST、URT和PCR工法从浅覆土可行性、断面多样性、密封止水性等方面进行调研和对比分析,提出了适合上海地区的束合管幕工法(U-BIT工法)。该工法基于超前支护与永久结构合一的设计思路,在管幕顶进完成后,通过张拉环向预应力,使原本纵向顶进的离散型、小断面钢管群束合形成可横向承载的整体受力体系,具有断面多样性、施工高效性、环境友好性和开挖断面利用率高等特点。在上海轨道交通14号线武定路站工程首次成功应用,实现了富水软土地层中心城区浅覆土地下结构低扰动、小变形快速静默施工。

关键词: 富水软土; 中心城区; 浅覆土暗挖施工; 管幕工法; 束合管幕工法

中图分类号: TU94+1

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)07-0198-05

0 引言

近年来,随着我国城市群的兴起和城市化进程的不断加速,城市地下基础设施高质量建造是现代城市平稳、安全运行的根本保证,亦是推动城市可持续发展的重要方向。然而在城市核心区采用明挖法建设地下工程时常面临道路翻交、管线搬迁、环境保护等难题,严重阻碍城市快速发展进程。因此,探究新的保安全、轻影响的地下空间暗挖施工方法势在必行^[1-2]。在以上海为代表的富水软土地区,暗挖施工因受地下水位高、土体强度低等地质条件制约,目前普遍采用盾构法、顶管法和管幕法。其中,盾构法和顶管法施工工艺较为成熟,但对施工覆土深度有严格要求,不适用于浅覆土大尺寸地下基础设施施工^[3]。如北京东六环改造工程中施工的“京华号”为我国超大断面盾构机^[4],直径是16.07 m。根据《盾构法隧道施工及验收规范》(GB 50446—2017)^[5],其最小覆土深度要求为16.07 m(1倍设备直径)。我国超大断面顶管机嘉兴市快速路环线工程的“南湖号”,宽14.80 m,高9.40 m^[6]。根据《顶管工程设计标准》(DG/TJ 08-2268—2019)^[7],其最小覆土深度要求为8.88 m(0.6倍隧道宽度)。传统管幕法虽然可以解决

断面尺寸与覆土深度的矛盾,但由于离散钢管依靠锁扣连接,横向无法协同受力,需利用顶进箱涵^[8]或临时钢支撑结合土体水平加固和多导洞开挖^[9]完成施工,所以施工工序复杂、建造成本高昂、施工效率低下,需进一步改进。

1 日本管幕暗挖工法研究

自地铁车站非开挖技术发展以来,国内外先后有百余例工程案例,其工艺各不相同,地质条件普遍优于上海地区;而日本密集城区内的非开挖施工工况和上海地区最接近,并且拥有世界领先水平的技术和设备。因此,基于日本非开挖技术进行采集分析,通过研究类似工况的技术方案和应用案例为上海地区的车站暗挖施工提供参考。

日本为改善城市基础设施加速发展引发的道路、铁路交叉路口交通拥堵问题,创新提出了系列暗挖工法^[10],大致分为加固扩挖型、盾构/顶管型和管幕型。加固扩挖法是最早的车站暗挖工艺,存在工效低、风险点多等问题;盾构/顶管法适合长距离施工,但也存在空间相对局促的局限性;与之相对,管幕法更适合短距离、大空间的车站施工,尤其是MMST工法、URT工法和PCR工法因在浅覆土中施工效果良好,在日本得到广泛应用。

1.1 MMST工法

MMST工法(Multi-Micro Shield Tunnelling Method)指采用小型断面盾构机构筑大断面隧道的

收稿日期: 2024-06-20

基金项目: 上海隧道科研项目(2020-sk-06)

作者简介: 徐志玲(1971—),女,硕士,高级工程师,从事地下工程科技信息分析研究工作。

施工方法,其施工工序如图 1 所示。该工法应用单体盾构构筑单体隧道结构后,采用钢筋混凝土连接单体隧道结构形成整体隧道结构。随后,灌注混凝土,在隧道结构支护作用下进行土体开挖和结构回筑。图 2 所示为单体隧道结构连接构造图,图 3 所示为单体盾构机样机。

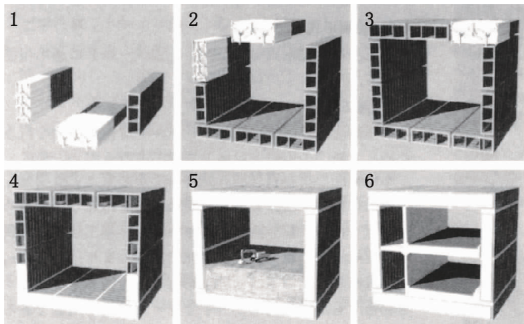


图 1 MMST 施工工序图

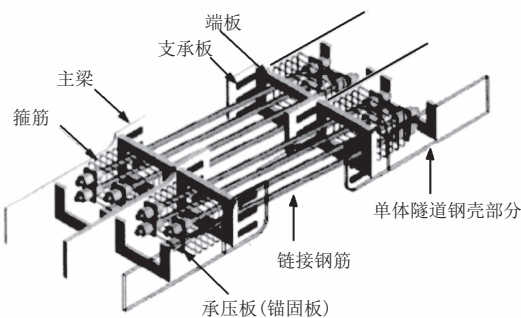


图 2 单体隧道结构连接构造图



图 3 单体盾构机样机

1.2 URT 工法

URT 工法 (Under Railway/Road Tunnelling Method)指在既有道路下方,将兼具支护作用的矩形钢管节采用特制挖掘机依次推进,使多个矩形钢管节在地下形成新的隧道主体结构的方法。图 4 所示为 URT 工法示意图,图 5 所示为 URT 工法施工横断面图。由图 5 可知,URT 结构的四个边角部位分别设置作业用管节,用于张拉垂直于管节方向插入的预应力钢绞线,从而使离散的钢管节组合形成整体受力体系。钢管节间采用咬合锁扣连接,如图 6 所示。

锁扣下方安装涂抹止水密封层的钢制止水板和填充无收缩砂浆防止结构渗漏。

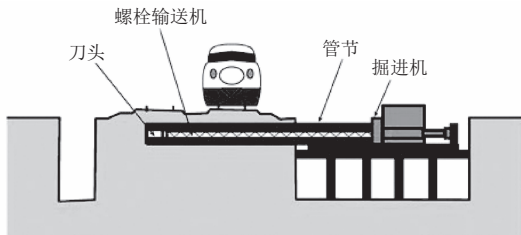


图 4 URT 工法示意图

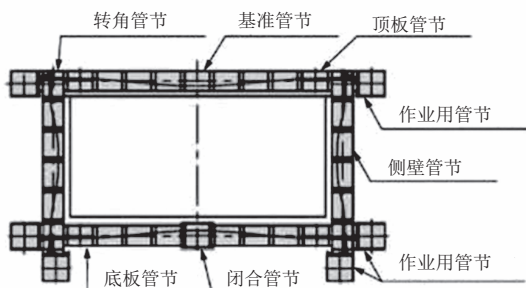


图 5 URT 工法施工横断面图

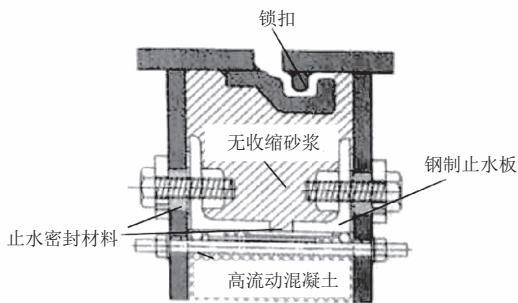


图 6 URT 管节咬合锁扣

1.3 PCR 工法

PCR 工法(Prestressed Concrete Roof Method)是基于“置换推进工艺”,利用预应力混凝土桁架置换先行顶进的钢管节,从而构筑大型地下空间的方法,如图 7 所示。相对于 URT 工法,PCR 工法用四个大尺寸角部钢管节代替作业用管节,进行预应力钢绞线张拉作业。但经工程实践发现,角部钢管节的尺寸大于预应力混凝土桁架,其产生的凸角对内部结构施工产生较大影响,因此将角部钢管节设计为异形,如图 8 所示。管节与管节间通过咬合锁扣连接,其接缝处采用无收缩砂浆填充。

1.4 软土地层中心城区浅覆土管幕暗挖工法比较

由于 MMST 工法、URT 工法和 PCR 工法均基于小管节拼装组合形成大断面地下结构的施工思路,所以上述三种工法对覆土深度要求不高,均可以在浅覆土中施工。但这三种工法是否可直接应用于富水软土地层中心城区,还值得进一步对比分析。

由表 1 可知,MMST 工法采用的单体盾构机有尺寸限制,不能满足城市地下空间多样化建造需求。

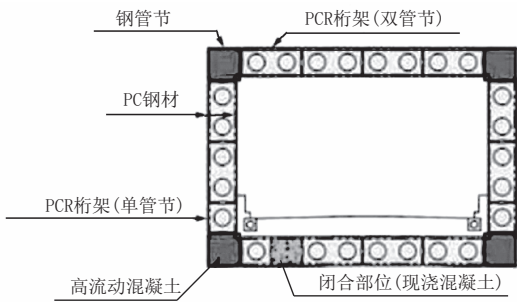


图 7 PCR 工法施工横断面图



(a)PCR 桁架 (b)异形管节

图 8 PCR 工法管节构造图

URT 工法和 PCR 工法虽然可以在不妨碍铁路、公路等交通运行情况下,通过顶进不同数量和形状的管节构筑多样化断面隧道结构,但这两种工法的管节接缝处只填充了无收缩砂浆或额外安装钢制止水板,密封止水性能较差。若将其应用在上海这类土体含水量高的富水软土地区时,依然存在结构渗漏风险。此外,URT 工法采用了外挂式预应力张拉作业用管节,降低了地下空间有效利用率。PCR 工法虽然将 URT 工法外挂式作业用管节优化为内置式异形管节,保证了地下空间有效利用率,但需采用人力挖掘方式推进异形管节,施工效率较低。上述因素导致 MMST 工法、URT 工法和 PCR 工法在富水软土地层中心城区直接推广均存在局限性。基于此,上海隧道工程有限公司对已有管幕暗挖工法进行改进创新,研发了束合管幕工法。

表 1 MMST 工法、URT 工法、PCR 工法对比分析

工法名称	浅覆土可行性	断面多样性	施工高效性	密封止水性	地下空间有效利用率
MMST 工法		单体盾构机有尺寸限制,断面多样性欠佳。	通过单体隧道结构承压连接可以使已施工完成的单体隧道结构直接作为隧道临时支护结构,使施工更加高效便捷。	采用钢筋混凝土材料连接单体隧道结构,密封止水性欠佳。	地下空间有效利用率高
URT 工法	浅覆土可行	通过顶进不同数量和形状的管节可以构筑多样化断面隧道结构。	通过张拉预应力钢绞线可以使已施工完成的管节直接作为隧道临时支护结构,使施工更加高效便捷。	管节接缝处填充无收缩砂浆和安装钢制止水板,依然存在渗漏可能。	采用了外挂式预应力张拉作业用管节,地下空间有效利用率欠佳
PCR 工法			虽然张拉预应力钢绞线可以使已施工完成的管节直接作为隧道临时支护结构,省去支撑工序,但异形钢管节断面呈非对称形状,需采取人力挖掘方式推进,降低了施工效率。	管节接缝处填充无收缩砂浆,密封止水性欠佳。	管节为钢筋混凝土材料,其强度低于钢管混凝土,使得结构厚度增加,降低了地下空间有效利用率

2 束合管幕工法

2.1 工法型式

束合管幕工法(U-BIT 工法,Underground Bundled Integrate Tunnelling Method)在顶进标准管节和工作管节后,通过对各管节施加环向预应力,使原本纵向顶进的离散型、小断面钢管群束合形成可横向承载的协同受力体系^[11-12],如图 9 所示。由图可知,束合管幕结构的管节通过 C-T 锁扣相互连接,锁扣内填满密封油脂,可有效保证结构的止水性能。此外,为提高管幕结构的空间利用率,U-BIT 结构将用于张拉预应力钢绞线的工作管节由外挂型设计为内置型。同时,为满足土体全断面机械切削、预应力张拉、内部结构回筑等施工要求,在工作管节上设置了可拆除的斜腋角,如图 10 所示。在管节顶进时,工作管节设计为矩形,且断面尺寸远大于标准管节。在内

部结构回筑前,拆除斜腋角,工作管节转换为异形断面,可在便于预应力钢绞线张拉施工的同时大幅提升地下空间利用率。

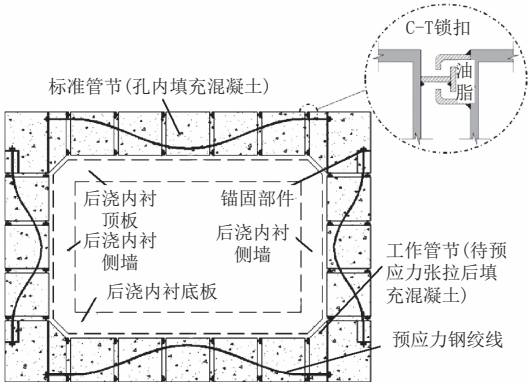


图 9 束合管幕结构

相较于日本 URT 工法和 PCR 工法,U-BIT 工法在日本管幕暗挖工法基础上对锁扣连接型式和张拉预应力钢绞线的工作管节进行改进,更适合应用在

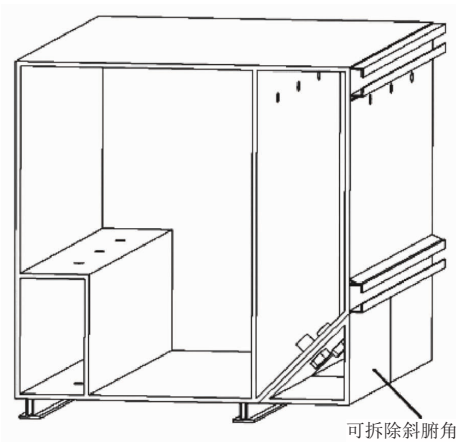


图 10 含可拆除斜脚角的异形工作管节

富水软土地层用地紧张的中心城区浅覆土暗挖施工中。该工法基于超前支护与永久结构合一的设计思路,通过张拉预应力钢绞线实现富水软土地层的无临时支撑、无土体加固的全断面暗挖。

2.2 施工流程

(1)管节顶进。利用微型顶管机在拟建地下结构四周依次顶进标准管节和工作管节。管节纵向现场焊接连接,横向采用充填密封油脂的 C-T 锁扣连接。

(2)预应力张拉。在管节内设置的预应力钢绞线贯穿孔预埋波纹管,然后安装预应力钢绞线。在标准管节和管节接缝内浇筑混凝土,待混凝土强度满足设计要求后,张拉预应力钢绞线并安装锚固部件。在预应力钢绞线和波纹管空隙内注入水泥浆,待水泥浆强度满足设计要求后,在工作管节内浇筑混凝土包裹预应力钢绞线锚固部件进行封锚处理。

(3)土体开挖及结构回筑。环向预应力钢绞线张拉完成后,形成束合管幕结构。随后在束合管幕结构支护作用下,无需土体加固和设置临时支撑,进行土体开挖和结构回筑施工。

3 工程应用示范

束合管幕工法首次在上海轨道交通 14 号线武定路站工程推广应用。该工程位于武定路、武宁南路交叉路口,为地下二层岛式车站。车站 1 号出入口为避让无法搬迁的电力管廊,采用束合管幕工法施工,如图 11 所示。

管幕段覆土深度 3.97 m,宽度 8.4 m,高度 6.2 m,长度 15.3 m。束合管幕结构横向由 4 根 1.4 m×1.4 m 和 16 根 1 m×1 m 的带锁扣矩形钢管拼接组成,纵向由 4 根长 3 m 的标准管节和 1 根长 3.3 m 的特殊管节焊接而成。图 12 所示为上述束合管幕结构横断面图。

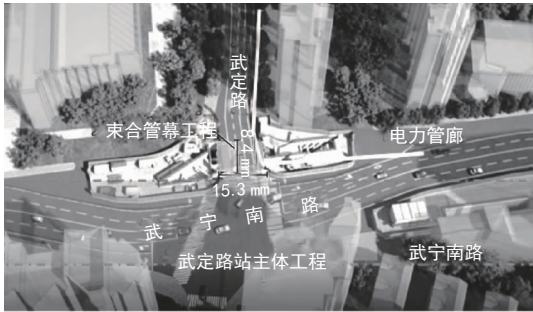


图 11 束合管幕工程平面图

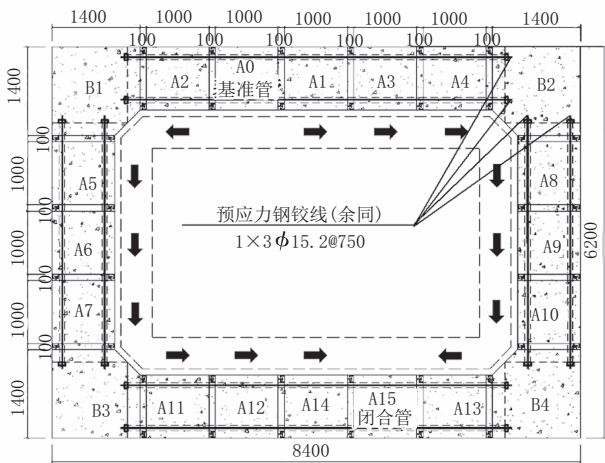
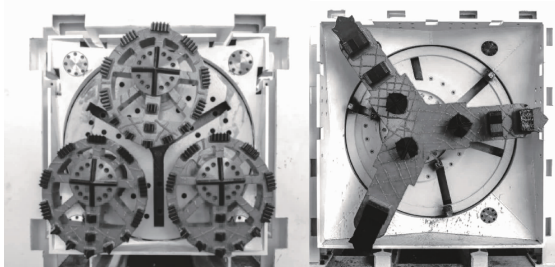


图 12 束合管幕结构横断面图(单位:mm)

为了实现管节内土体全断面切削需求,工程中采用了 1 m 行星三刀盘顶管机和 1.4 m 行星单刀盘顶管机两种土压平衡泥水输送式顶管机,如图 13 所示。



(a) 1 m 行星三刀盘顶管机 (b) 1.4 m 行星单刀盘顶管机

图 13 土压平衡泥水输送式顶管机

预应力钢绞线的约束效果是保证束合管幕结构作为整体结构受力的关键因素。本工程选用空间极为狭小的 B1~B4 管节(1.4 m×1.4 m)作为张拉工作管节。在钢管节顶进完成后,对管节进行预应力钢绞线穿束,并在标准管节内和管节接缝处浇筑混凝土,待混凝土强度满足设计要求后,采用轻量化千斤顶进行预应力钢绞线张拉,张拉控制力为 580 kN。张拉时,同一断面按先竖向、后水平、四束同步张拉原则,不同断面则按从中间往两边对称交错进行张拉。过程中为减小锚具回缩对预应力产生的影响,选用了低回缩锚具系统,使锚具回缩量控制在 1 mm 以内。

预应力张拉稳定后进行锚固、注浆、封锚及土体开挖等施工工序。

目前,该工程已顺利竣工,其中仅用 2 d 就完成 15 m 长管幕内土体开挖,且土体开挖完成后地表最大沉降仅为 10.16 mm,实现了富水软土地层中心城区浅覆土地下结构低扰动、小变形快速静默施工。图 14 所示为地表沉降测点布置图。图 15 所示为地表沉降平均值随施工工序变化曲线。

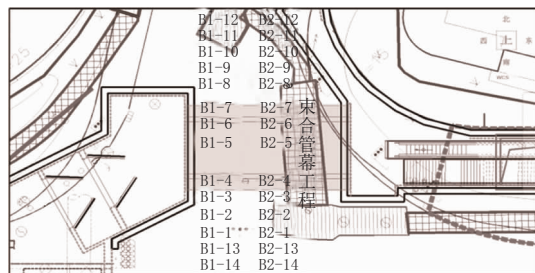


图 14 地表沉降测点布置图

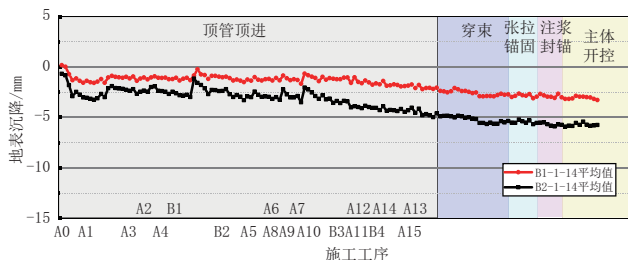


图 15 地表沉降平均值随施工工序变化曲线

4 结 语

束合管幕工法(U-BIT 工法)基于超前支护与永久结构合一的设计思路,通过在管幕顶进完成后对各管节施加环向预应力,使管节受力形式由原来的纵向受力、横向支撑转换为横向预应力张拉、纵横向共同受力,从而形成整体受力体系。相较于日本 URT

工法和 PCR 工法,U-BIT 工法在日本管幕暗挖工法基础上研发了充填密封油脂的 C-T 锁扣和方形-异形转换的可拆除斜腋角式异形工作管节。因此上述工法在保留已有管幕工法断面多样性、浅覆土可行性等优点的同时,创新解决了富水软土地层中心城区浅覆土无临时支撑、无土体加固的全断面微扰动快速暗挖难题。

参考文献:

- [1] 朱雁飞,毕湘利,郭彦,等.富水饱和软土地层轨道交通地下车站暗挖工法研究综述[J].隧道与轨道交通,2021(增刊1):1-7.
- [2] 张中杰,刘书,吕培林,等.富水软土地层束合管幕(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):267-272.
- [3] 张中杰,刘书,袁勇,等.基于大断面束合管幕法的地铁车站建造方案研究[J].城市轨道交通研究,2023,26(12):69-74.
- [4] 陈能涌,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.
- [5] GB 50446—2017,盾构法隧道施工及验收规范[S].
- [6] 贾连辉,谌文涛,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):917-928.
- [7] DG/TJ 08-2268—2019,顶管工程设计标准[S].
- [8] 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):73-79.
- [9] 张世宏.饱和软土地层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):35-40,65.
- [10] 金慧瑛.上海地铁车站非开挖创新技术的科技情报调研,上海隧道(内部文献),2022(2):228-231,237.
- [11] 毕湘利,张中杰,刘书,等.饱和软土地层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):953-959.
- [12] 张耀三.饱和软土地层束合管幕暗挖工艺研究[J].隧道与轨道交通,2020(4):35-38.

(上接第 173 页)

期监测数据结果进行对比验证和反分析,以便更进一步优化设计。

参考文献:

- [1] 李俭霞.市政工程施工中地下管线的保护问题探讨[J].中华建设,2024(1):45-47.
- [2] 程妍妮,费文平.河道挡墙施工对两岸房屋变形的影响研究[J].工业

建筑,2023,53(增刊2):479-482.

- [3] 陈佳鑫.基坑施工对周边环境保护措施的有效性探讨[J].建筑科技,2023,7(3):57-60.
- [4] 张雨剑,田利勇,陈大伟.斜顶桩高桩承台挡土结构分析研究[J].城市道桥与防洪,2018(3):126-129,164.
- [5] 王卫东,王浩然,徐中华.基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J].岩土力学,2012,33(8):2283-2290.