

软土地区交通重载下条形深基坑支护设计

王 新

[上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200125]

摘 要: 借助上海市隆昌路下立交条形深基坑工程,从围护选型、支护结构设计、验算和实测等方面总结了交通重载下的支护设计重点和难点。结果表明:从安全性和经济性考虑,10 m 以内基坑采用型钢水泥土搅拌墙较合理;虽然软件验算结果表明围护各项控制指标均满足规范要求,但实际围护变形量明显偏大,分析原因主要为支撑不及时、降水效果不佳、周边交通重载持续作用、围护刚度偏弱等。为此提出建议:应加强现场施工管理,并针对此类基坑的支护进行加强设计,如部分深基坑可考虑型钢密插以提高围护刚度;地基加固抽条间距加密,加固深度加深;钢支撑间距加密至 3~3.5 m。

关键词: 软土地区;条形基坑;深基坑;围护设计

中图分类号: U451

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)12-0244-04

0 引言

我国东南沿海许多城市如天津、上海、宁波、温州、台州等均分布较深厚的软弱土层,在深基坑工程方面形成了具有地方特色的设计和施工方法^[1-5]。出于经济性考虑,一定深度的基坑支护材料更倾向于可回收利用的钢材,例如常用的 SMW 工法中的型钢。新型的绿色支护技术也不断涌现,例如天津地区某工程尝试采用高压旋喷插入型钢作为基坑支护结构^[1-2],宁波、杭州地区出现大量钢管+拉森钢板桩结合的围护方法^[3],温州地区应用了预应力鱼腹梁的新型支撑^[4-5]。然而在交通重载下,条形基坑的支护结构处于动静结合的受力状态,在此状态下,对于型钢复合支护结构的适用性尚未形成统一认识,尤其是施工栈桥结构与围护结合的协调设计,也未形成统一的设计经验。

本文基于上海北横通道工程隆昌路下立交项目,探索 SMW 工法桩支护在交通重载下的变形规律和适用性,通过实践经验总结此类复杂工况下的围护设计重点和难点,以指导类似工程的设计与施工。

1 工程概况

隆昌路下立交属上海北横通道工程的东端地面扩容段,连接北横东段地道和周家嘴路越江隧道。下立交敷设于周家嘴路上,规模为双向 4 车道,设计时

速 50 km/h;暗埋段主体结构为双孔单箱矩形现浇混凝土结构(见图 1),敞开段为 U 型结构(见图 2)。下立交全长 510 m,其中西侧敞开段 160 m,暗埋段 190 m,东侧敞开段 160 m。下立交基坑开挖宽度 18.4~19.2 m,最大基坑开挖深度约 10 m,局部泵房处落低约 2.8 m。

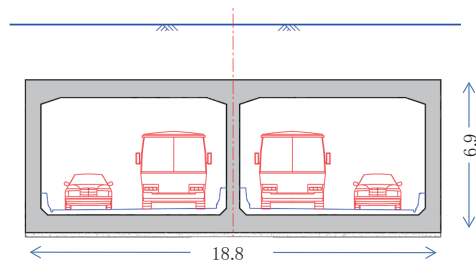


图 1 隆昌路下立交暗埋段结构断面(单位:m)

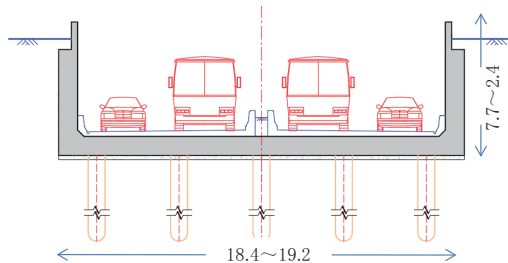


图 2 隆昌路下立交敞开段结构断面(单位:m)

隆昌路下立交地处上海市杨浦区城区周家嘴路上。现状周家嘴路交通繁忙,且重载车辆较多,沿线建筑主要为 2~7 层住宅小区、厂房,距基坑大于 14 m,处于 1~2 倍基坑深度范围。沿线地下管线主要存在给水、雨水、燃气、供电、信息等。直径 1 000 mm 给水管距离基坑 3~4 m,保护要求较高(见图 3)。

工程沿线场地地貌类型单一,属上海地区五大地

收稿日期: 2022-02-15

作者简介: 王新(1984—),男,硕士,高级工程师,主要从事地下结构与科研工作。

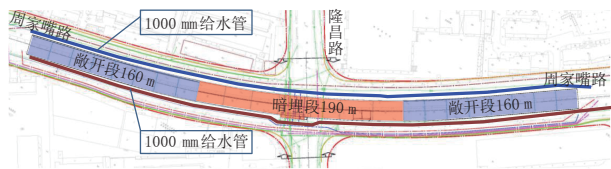


图3 隆昌路立交周边环境总图

貌单元中的滨海平原类型。地势较为平缓,地面标高一般在 2.4~3.1 m。常年平均地下水位埋深一般为 0.50~0.70 m。工程沿线分布的第⑦(含⑦₁和⑦₂)层为第一承压含水层,水位埋深约 3.0~12.0 m,不突涌。

场地地基土在勘察深度范围主要由饱和黏性土、粉性土和砂土组成。由上至下依次发育的土层为:①₁ 填土、②₁ 褐黄-灰黄色粉质黏土、③ 灰色淤泥质粉质黏土夹粉土、③₁ 灰色黏质粉土夹淤泥质粉质黏土、④ 灰色淤泥质黏土、⑤₁ 灰色黏土、⑥ 暗绿-灰绿色粉质黏土、⑦₁ 草黄-灰色砂质粉土、⑦₂ 灰黄-灰色砂质粉土、⑧₁ 灰色粉质黏土、⑧₂ 灰色粉质黏土夹砂质粉土、⑧₂ 灰色粉砂夹粉质黏土。工程基坑坑底主要置于③、③₁层,该2层土属高压缩性高灵敏度软弱土,具有一定的流变及触变性。

2 支护设计

2.1 围护选型

多年来,上海软土地区基坑工程积累了较多建设经验,通过对本工程周边环境、地质和水文条件的研究,基坑可采用的围护结构形式有地下连续墙、钻孔灌注桩+水泥土搅拌桩止水帷幕、型钢水泥土搅拌墙、水泥土重力式挡土墙、放坡等。

(1)地下连续墙。地下连续墙的刚度较大,能承受较大的侧向水平荷载。基坑开挖时,围护结构变形小,周边地面沉降少,能够较好地控制和减少对邻近建筑物、构筑物 and 地下管线的影响。地下连续墙与内衬墙的“两墙合一”技术已日趋成熟,可以实现基坑围护结构在结构使用阶段的再利用。从经济性考虑,当一般软土地区基坑开挖深度大于 10 m,且周边环境保护等级要求较高时,采用地下连续墙围护方式。

(2)钻孔灌注桩+止水帷幕。一般情况下,开挖深度 5~14 m 的软土地区基坑可采用钻孔灌注桩+止水帷幕,灌注桩的桩径 600~1 200 mm,桩间止水帷幕可采用三轴搅拌桩或高压旋喷桩。钻孔灌注桩施工工艺灵活成熟,结构刚度较大,比较有利于基坑变形控制,控制重点在于桩间止水的可靠性。因此,上海地方规范要求当采用高压旋喷桩止水时需双排

设置,围护+止水帷幕的占地宽度相比地下连续墙、型钢水泥土搅拌墙等围护方式稍大。

(3)型钢水泥土搅拌墙。水泥土搅拌桩内插 H 型钢作为围护墙,H 型钢主要承受侧向荷载,水泥土则抵抗地下水的渗透作用。内部主体结构施工完成后,H 型钢可回收,故该种围护类型工程造价较低。型钢搅拌墙按照三轴搅拌桩直径有 650 mm、850 mm、1 000 mm 等尺寸,内插型钢通常有 HW500 mm×300 mm、HN700 mm×300 mm、HN800 mm×300 mm、HN900 mm×300 mm 等尺寸。根据周边环境变形控制,H 型钢可采用插一跳一、插二跳一、密插等布置形式。普通三轴桩施工设备占地范围较大,当环境受限时可采用连续式水泥土搅拌墙(TRD 或 CSM 法成墙),墙体厚度亦能达到 550~1 200 mm。但等厚情况下,型钢水泥土搅拌墙整体刚度不及地下连续墙和钻孔灌注桩,故一般应用于开挖深度小于 13 m 且环境变形控制并不苛刻的基坑工程。此外,受型钢接头焊接质量、型钢刚度、型钢与水泥土黏结强度、内部支撑体系等综合因素影响,一旦型钢发生竖向沉陷,则支撑体系存在失效风险,故型钢水泥土搅拌墙不宜承受竖向荷载。

(4)钢板桩。钢板桩占用空间小,采用拉森钢板桩更兼具止水效果。但其刚度低,受运输条件限制,桩长通常为 6 m、12 m、15 m,当桩长大于 18 m 时需考虑接桩,通常焊接质量难以保证,因此钢板桩一般适用于挖深不超过 7 m 且环境保护要求不高的基坑工程。

(5)水泥土重力式挡土墙。利用水泥土抗渗的材料特性,通过墙体构造设计形成重力挡土坝。重力式水泥土排桩占地面积较大,通常变形量也较大,一般用于基坑开挖深度不超过 7 m,周边场地条件宽松且无重要保护构建筑物的基坑工程。

(6)放坡。基坑开挖深度小于 2.5 m 时,利用浅部填土或黏性土的自立性,基坑通常采用放坡开挖,坡度 1:1.5~1:2。

本工程位于现状周家嘴路中央,在保证施工期社会交通情况下,可用的施工场地非常有限,还需结合支撑设置栈桥以保证施工作业。基坑两侧均有雨污水、燃气等重要管线,且直径 1 000 mm 给水管距离基坑 3~4 m,保护要求较高。受限于经济性,不宜采用地下连续墙围护。钻孔灌注桩+止水帷幕占用空间大,在施工围护时易产生对管线的扰动,不宜采用。钢板桩刚度较小,对变形控制不利。重力式挡土

墙占用场地较大,不适用于本工程。通过综合比较,本工程拟采用型钢水泥土搅拌墙围护,在减少围护占地的同时通过提高型钢的插入密度来控制基坑变形,通过施工栈桥与顶围檩的特殊设计,确保型钢不承受竖向荷载。

2.2 支护结构设计

根据基坑开挖深度,10~7 m 采用 $\phi 850$ 型钢水泥土搅拌墙(HN700 mm $\times$ 300 mm $\times$ 13 mm $\times$ 24 mm),7~2 m 采用 $\phi 650$ 型钢水泥土搅拌墙(HM500 mm $\times$ 300 mm $\times$ 11 mm $\times$ 18 mm),2~0 m 采用放坡。针对地道北侧对直径 1 000 mm 给水管的特殊保护,坑深大于 3 m 时,型钢插二跳一布置以增加围护结构刚度,其余均考虑插一跳一布置。型钢插入坑下深度与基坑深度比(即插入比)根据基坑深度每米变化进行分别设计,按照最不利断面计算的最小插入比为 1~1.8。

按照基坑深度和栈桥设置的需要,深 7~10 m 基坑设置 3 道支撑(并设钢管换撑,见图 4),第 1 道采用钢筋混凝土支撑(间距 9 m),余下为钢支撑(间距 4.5 m);深 5~7 m 基坑设置 2 道支撑,第 1 道采用钢筋混凝土支撑,第 2 道为钢支撑;深 3.5~5 m 基坑设置 1 道钢筋混凝土支撑;深 3.5~2.5 m 基坑设置 1 道钢支撑;深 2.5~2 m 基坑不设置支撑。

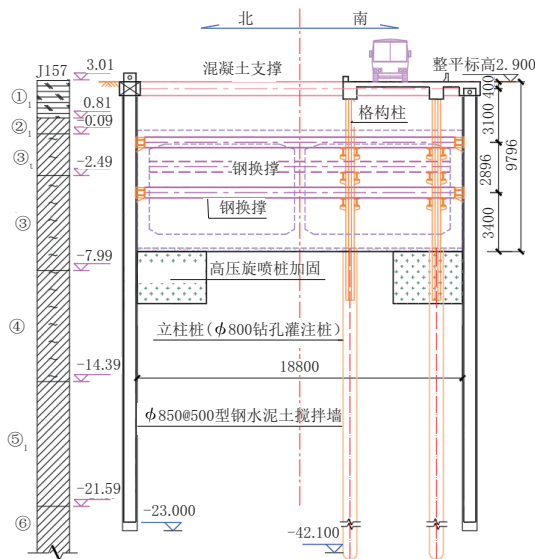


图4 隆昌路下立交基坑围护断面图(典型断面)(单位:mm)

水平支撑体系中,钢筋混凝土支撑尺寸 800 mm $\times$ 800 mm,钢筋混凝土围檩尺寸 800 mm $\times$ 1 200 mm(适用于 $\phi 850$ 搅拌墙)和 800 mm $\times$ 1 000 mm(适用于 $\phi 650$ 搅拌墙),钢支撑全部采用 $\phi 609$ 钢管撑(壁厚 16 mm),2~3 道钢围檩采用双拼 HM500 mm $\times$ 300 mm $\times$ 11 mm $\times$ 18 mm 型钢组合焊接,纵向系梁

采用 2 根 HW400 mm $\times$ 300 mm $\times$ 10 mm $\times$ 16 mm 型钢。

竖向支撑体系中,设置纵向连续栈桥,局部设置横向栈桥以满足挖土和土方车辆的会车,栈桥板厚 300 mm,栈桥梁 800 mm $\times$ 1000 mm,钢立柱采用角钢组合焊接,外包尺寸 460 mm $\times$ 460 mm,立柱桩与抗拔桩尽量结合布置,桩径 800 mm,桩长约 35 m。为避免工法桩承受大量竖向荷载,在近坑边处设计 1 排立柱,立柱与结构墙保证约 1 m 间距,满足主体结构内模的架设空间。型钢与围檩之间设置泡沫板隔离,埋置在围檩中,避免型钢露头影响场地需求。栈桥区域设置隔离墩,通过管控措施确保施工车辆荷载分布在栈桥立柱之间。隔离区以外区域,作为施工人员临时通道。

针对软弱地基土,基坑设置高压旋喷桩裙边+抽条地基加固,裙边和抽条宽度 4 m,加固深度坑下 3 m,抽条加固选择变形缝处,控制结构施工后的差异沉降,水平间距 20~30 m。

降排水方面,基坑挖深大于 5 m 时采用管井降水,平均 150~200 m² 布置一口管井,坑下滤头 5~6 m;基坑挖深 2~5 m 时采用轻型井点降水;基坑挖深小于 2 m 时集水明排。

3 验算与分析

3.1 参数取值

以典型断面为例,基坑开挖深度 9.8 m,宽度 18.8 m,型钢插入坑底深度 15.6 m。根据勘察资料和经验,基坑土层主要物理力学计算参数见表 1。考虑到周边社会交通以重载车居多,考虑 1.3 的动力系数,周边超载值为 $20 \times 1.3 = 26$ kPa。地基加固采用旋喷桩加固,按经验黏聚力 C 值取 20 kPa,摩擦角取 30° , m 值取 6 MN/m⁴。地下水位按照地面以下 0.5 m,计算中不考虑周边水位下降,坑内水位随基坑开挖降至坑下 1 m。保守计,不考虑钢支撑预加轴力。

3.2 验算与实测分析

运用同济启明星深基坑支护设计软件计算,基坑安全等级为二级,环境保护等级为二级,典型断面各项稳定系数验算结果见表 2。插入比深度主要受控于抗倾覆验算。

围护结构变形及内力计算结果见图 5。由图 5 可见:围护最大变形 16.9 mm $<$ $0.3\% \times 9.8$ m = 29.4 mm,最大弯矩 -721.9 kN $\cdot$ m,最大剪力 -569.2 kN。第 1 道支撑轴力 -152.8~79.6 kN/m,第 2 道支撑轴力

表1 土层物理力学计算参数							
土层指标		土层号					
		② ₁	③	③ ₁	④	⑤ ₁	⑥
固结快剪	C/kPa	20.0	13.0	9.0	13.0	17.0	40.0
峰值	$\Phi/(\text{°})$	17.0	15.0	26.0	11.5	15.5	19.0
重度	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	18.5	17.4	18.5	16.8	17.8	19.6
孔隙比	e	0.925	1.207	0.90	1.413	1.086	0.691
地基土水平抗力系数的比例系数	m	4	2.5	2.5	2	3.5	6
	$/(\text{MN}\cdot\text{m}^{-4})$						

表2 典型断面各项稳定系数验算				
整体稳定性	坑底抗隆起	墙底抗隆起	抗倾覆验算	抗渗流验算
1.92>1.25	2.46>1.2	4.86>2.0	1.14>1.1	4.96>1.5

537.6 kN/m,第3道支撑轴力 622.8 kN/m,第2道支撑换撑轴力 609.1 kN/m。地表最大沉降 13.4 mm<0.25%×9.8 m=24.5 mm。通过计算,围护变形和稳定均满足《基坑工程技术标准》(DG/T J08-61—2018)要求;型钢截面和水泥土剪切验算均满足安全要求,过程略。

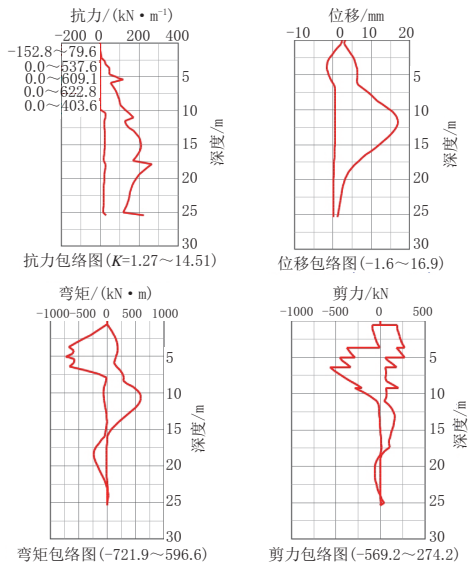


图5 围护结构变形及内力计算结果(典型断面)

通过施工监测数据显示,当基坑开挖至坑底时,围护最大变形达到了 40 mm,底板浇筑后拆除第3道支撑支护附加变形 3~5 mm。周边地表最大沉降 16.35 mm, DN1 000 给水管最大沉降 13.96 mm。

与计算结果相比,实际围护变形量明显偏大,从而说明围护结构刚度明显不足。实测地表沉降比计算值超 22%,也说明首道支撑的刚度略显不足。

通过对现场施工工况、变形数据的整理和分析,总结此次变形过大的主要原因如下:

(1)支撑不及时。土方开挖与支撑架设存在较明

显的时间差,计算软件中无法考虑超挖状态。

(2)降水效果不佳。上海软土孔隙比大,但渗透性极差,即便采用真空管井,也经常出现抽水量不大的情况,降水效果无法达到理想要求,可能导致计算工况与实际存在差异。

(3)周边动载持续作用。周边交通重载的反复、持续和不确定作用,对基坑支护存在较明显的影响,而仅仅提高超载值与实际并不相符。

(4)围护刚度偏弱。在底板浇筑完成后,拆除第3道支撑时,围护墙仍发生 3~5 mm 变形,说明围护结构刚度偏弱。

综上所述,在加强现场施工管理等措施的前提下,仍需要针对此类基坑的支护进行加强设计,例如部分深基坑考虑型钢密插以提高围护刚度;地基加固抽条间距加密,加固深度加深,进一步保障被动区土压力发挥;建议加密钢支撑间距至 3~3.5 m。

4 结 语

(1)从安全性和经济性考虑,10 m 以内基坑采用型钢水泥土搅拌墙较合理。建议采取隔离和管理措施,既保证施工场地平整,又使得型钢不承受主要竖向荷载。

(2)采用同济启明星软件进行设计验算,各项控制指标均满足规范要求,但实际围护变形量明显偏大,实测地表沉降也较计算值超 22%。

(3)通过对现场施工工况、变形数据的整理和分析,此次变形过大的主要原因为支撑不及时、降水效果不佳、周边交通重载持续作用、围护刚度偏弱。

(4)在加强现场施工管理等措施的前提下,仍需要针对此类基坑的支护进行加强设计,例如部分深基坑考虑型钢密插以提高围护刚度;地基加固抽条间距加密,加固深度加深,进一步保障被动区土压力发挥;建议钢支撑间距加密至 3~3.5 m。

参考文献:

[1] 刘永超,王清龙,朱明亮,等.型钢旋喷桩深基坑支护技术在室内复杂环境下的设计 and 应用[J].岩土工程学报,2014,36(增刊1):56-59.
[2] 唐君,闫双跃,段启伟,等.高压旋喷桩内插 H 型钢技术及在某基坑加固工程中的应用[J].施工技术,2017,46(2):72-75.
[3] 徐建军.钢管拉森钢板桩组合围护体系施工技术[J].施工技术,2018,47(7):60-63,148.
[4] 胡廖琪.预应力鱼腹梁钢支撑控制围护桩变形理论研究[J].地下空间与工程学报,2021,17(增刊1):141-149.
[5] 杜常春,杜治国,郭安.预应力鱼腹梁钢支撑在深基坑围护中的应用[J].岩土工程技术,2020,34(5):254-259.