

地下结构梁板替代内支撑在深基坑中的应用

高志磊, 李大华

(安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 地下主体结构与支护结构相结合的深基坑支护设计, 即利用地下结构梁板体系作为水平内支撑体系, 是一种高效节约的新式深基坑支护方案。结合工程条件和水文地质条件, 详细论述了地下梁板结构替代水平内支撑的深基坑支护设计方案。对水平结构与围护结构的连接设计、水平结构与竖向支承结构连接设计、出土进料口设计等关键施工技术进行了详细说明并论述施工流程, 最后分析实地监测数据, 得到了地下结构梁板替代内支撑设计下深基坑的部分变形特征和规律, 论证了新型深基坑支护设计与施工的安全性及可行性。

关键词: 岩土工程; 水平内支撑; 施工流程; 基坑监测

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382(2022)01-015-06

Application of Underground Structural Beams and Plates Instead of the Internal Support in Deep Foundation Pit

GAO Zhilei, LI Dahua

(College of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: The deep foundation pit support combining underground main structure and support structure, i. e., using the underground beam-plate system as the horizontal internal support system, is an efficient, economical scheme. Considering both engineering conditions and hydrogeological conditions, such scheme is discussed, and the key construction techniques such as the connection design of the horizontal structure and the enclosure structure, the connection design of the horizontal structure and the vertical support structure, and the design of excavation are explained, and the construction process is scheduled. The monitoring data are analyzed to obtain the deformation characteristics and laws of the deep foundation pit with the underground beam-plate structure instead of the internal support design. The feasibility of the scheme as well as the safety of the construction are demonstrated.

Keywords: geotechnical engineering; horizontal internal brace; construction process; excavation monitoring

随着现代基坑工程开挖深度逐渐加深,施工面积愈来愈大,传统深基坑支护工程的缺点也愈来愈明显:第一,传统基坑工程的内支撑结构在基坑工程结束后要逐层拆除,然后逐层施工地下主体结构,会导致资源浪费、造价高昂、工期延长;第二,在拆除内支撑进行换撑的时候,由于支护结构的改变,对周围土体的支撑能力也会改变,可能会造成

周围环境的破坏。采用地下主体结构与支护结构相结合的新型基坑支护设计方案可以避免传统基坑支护的缺点^[1]。新方案能够节约大量资源、工程费用以及极大缩短工期,并且由于利用地下永久主体结构作为支撑系统,它的整体刚度相比临时内支撑结构也要更大,基坑的安全性也就更高^[2]。近年来学界已经对这种新型设计方法进行了一系列的

收稿日期: 2021-08-12

基金项目: 安徽建筑大学引进人才及博士启动基金项目(2019QDZ24); 安徽四建科技开发项目(HYB20190126)

作者简介: 高志磊(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 工程结构的现代施工技术。

研究,例如王卫东等人系统地提出了支护结构与主体结构相结合的三种类型^[3],总结了相关的技术措施和典型节点构造。陆余年等人探讨与地下主体结构相结合的超大深基坑支护结构变形规律及内力特征。但这些研究都只是初步提出了此种设计方法和施工方法的大体概念与总体思路,在具体的设计方法和节点构造方面都不够完善,缺乏对支护结构与主体结构相结合支护结构特点的系统性研究,理论研究与设计方法落后于工程实践,这在很大程度上影响了支护结构与主体结构相结合设计方法的进一步推广与应用。本文系统梳理了新型支护设计在深基坑下的关键节点构造、施工流程及对周围土体环境的影响。

这种新型基坑支护设计主要分为三种类型,我们选择水平结构相结合的方案,即地下梁板结构结合临时围护结构的方案,有以下原因:第一,围护结构采用临时围护结构,在满足变形控制的前提下,可以比较灵活地调整围护结构的厚度,从而优化设计。若采用墙体相结合的方法,围护结构需满足正常使用阶段的受载要求,在较深的开挖深度下,无法根据理论计算结果去选择合适的围护体截面厚度;第二,在基坑总延米较长的情况下,采用临时围护结构可以调整围护结构的轮廓形状,而与墙体相结合要考虑地下室形状无法进行优化调整。结合工程实际背景,基坑工程的最优设计就是采用地下主体结构的梁板结构直接作为基坑水平内支撑系统。

1 工程背景

1.1 工程概况

本工程基坑为异形基坑,开挖深度为 18 m,基坑安全等级为一级和二级。地下主体结构采用框架结构体系,水平梁板结构完整并处在同一平面上。地下主体结构有 3 层,底板厚度为 1 m。基坑位于道路交叉口位置,沿道路东西向布置。基坑场地周围环境比较复杂,对基坑文明施工要求较高。

1.2 地质场地

地基土在深度范围内可分为:1 层填土(层厚 4.1 m)、2 层砂质粉土(层厚 6.4 m)、3 层粉质粘土(层厚 5.8 m)、4 层粘土(层厚 4.2 m)、5 层粉质粘土夹粉土(层厚 6.8 m)。工程场地内不存在地表水,

地下水有孔隙承压水和孔隙潜水,潜水深度随季节变化,水位变化幅度大约在 1.2 m~1.5 m 之间。根据承压水抽水试验可知,承压水的水头标高为 -8 m。场地土层物理力学性质参数如表 1 所示。

表 1 土层物理力学性质参数

土层编号	土层	压缩模量 /kPa	层厚 /m	重度 /KN/M ³	$\varphi/^{\circ}$	c/kPa	泊松比
1	填土	3000	2.1	18	16	4	0.32
2	砂质粉土	8500	4.4	19.5	28	6	0.34
3	粉质粘土	7400	5.8	21	23	25	0.3
4	粘土	7500	3.2	20	25	42	0.31
5	粉质粘土夹粉土	4000	4.8	18.2	19	10	0.36

2 地下结构梁板替代内支撑的设计

2.1 总体设计

根据基坑的开挖深度与开挖面积、地下主体结构的平面布置、周围地质情况等因素,本工程决定采用地下结构梁板替代内支撑的设计,即利用地下主体结构的水平梁板系统作为水平内支撑系统来承受水平荷载,采用逆作法施工。考虑到施工的方便性与灵活性、造价合理等条件,围护结构采用的钻孔灌注桩作为临时性围护结构,桩径 1.2 m, 1.5 m 间隔布置。钻孔灌注桩之间通过冠梁和腰梁连接,围护结构外侧采用三轴搅拌桩作为止水帷幕。竖向支撑系统由格构柱组成,格构柱由钢立柱插入立柱桩。为了更好地实现水平内支撑与地下主体结构的一体化,进行平面布置时,立柱桩要尽量布置在主体结构工程柱的位置^[4],将主体结构桩作为立柱桩。

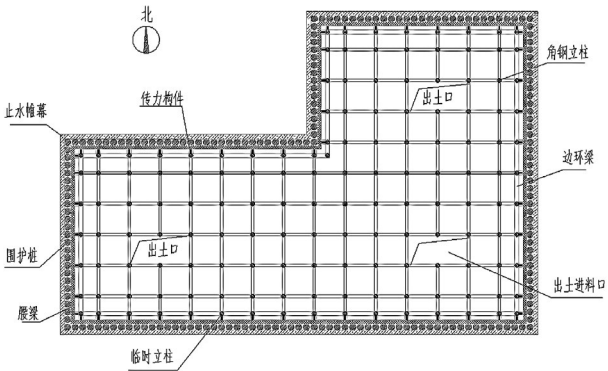


图 1 基坑支护平面图

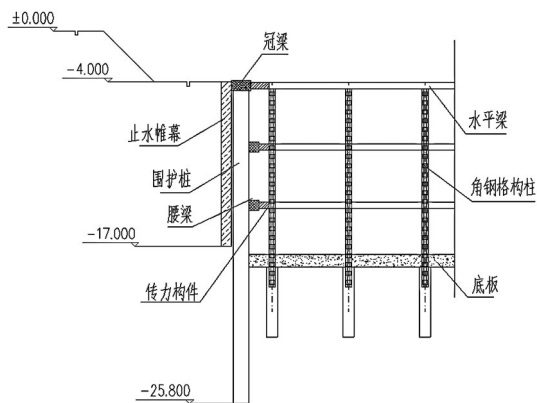


图 2 基坑支护剖面图

钢立柱分为角钢立柱和钢管立柱,这里采用角钢立柱。水平内支撑结构采用地下主体结构的各层梁板结构。基坑支护平面图见图 1,基坑支护结构剖面图见图 2。

2.2 地下梁板结构的设计

将地下主体结构的各层梁板结构直接作为基坑施工时的水平内支撑结构,需要对梁板结构进行设计。为了施工方便,基坑工程采用楼板结构后作施工的梁格体系,具体施工方案是在逆作阶段时仅施工框架梁结构,地下结构底板施工结束后再逐层施工楼板结构。优点是方便开挖运输土方,不需要在楼板上施工运输通道口,不会破坏梁板结构的整体性^[5],并且逆作阶段格构柱所承受的竖向荷载也会减少。不过这将带来新老混凝土连接问题,逆作开挖施工中采用的是先施工结构框架梁体系,逆作施工结束后才开始施工楼板结构,时间间隔较大,产生梁板二次浇筑导致新老混凝土结合问题,需要设置水平施工缝,但这会导致梁板的整体性问题及止水问题。解决办法是需要对旧混凝土界面进行严格清理,清理松动石子,凿成凸凹面,然后在混凝土中掺入膨胀剂,最后在界面上均匀抹上混凝土

砂,连接新旧混凝土。为了增强防水性能可以在连接面上加上一层防水卷材。

2.3 水平内支撑与格构柱连接节点的设计

角钢立柱采用 4L200×18 角钢通过缀板焊接组成,角钢钢材强度等级为 Q235B。在平面布置中,格构柱布置在结构工程柱位置,需要对结构梁和格构柱之间的连接进行设计。采用角钢立柱会带来梁柱钢筋的连接问题,角钢侧肢和连接角钢的缀板会阻碍梁钢筋穿过。我们可以采用传力钢板法解决这个问题,通过在角钢立柱上焊接连接钢板,将无法穿过角钢立柱的钢筋与传力钢板焊接,实现梁柱的连接。这样设计的优点是避免让钢筋穿过角钢而在角钢格构柱上钻孔造成钢立柱截面损伤,缺点是传力钢板法需要进行大量的焊接作业,而焊接造成的高温会使钢结构承载能力降低^[6]。梁柱连接节点主要承受剪力,要按计算要求设置适量的抗剪栓钉。水平内支撑与格构柱连接节点见图 3。

2.4 水平结构与围护体的连接设计

水平结构与围护体的连接主要是解决围护体上水土侧向压力传递的问题^[7]。水平结构与围护结构的连接形式取决于围护结构的选择,本深基坑工程围护结构为钻孔灌注排桩。在围护结构顶部设置冠梁,下部设置腰梁,提高围护结构的稳定性,另外也作为围护体与地下主体结构连接体系的一部分。面对水土侧向压力时,为了防止水平支撑结构受力不均匀,需要在水平结构周边设置一圈边梁,一方面可以提高水平结构的整体刚度,另一方面可以获得一个均匀的受力支撑面。在地下主体结构完工后需要进行标高 4 m 的覆土,增强连接结构的抗剪能力,采用抗剪能力更强的混凝土-型钢组合支撑作为水平传力构件。连接结构的具体施工方法是将围护结构上的冠梁、腰梁的标高分别与

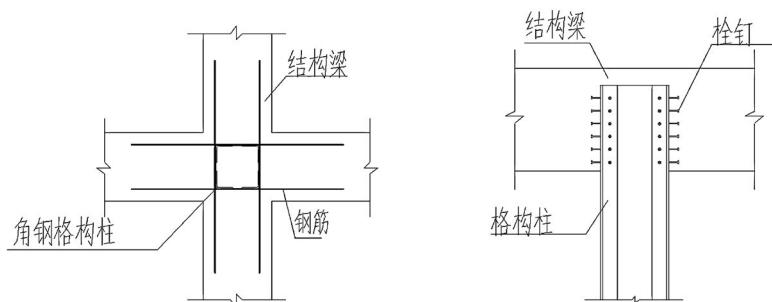


图 3 梁柱连接节点

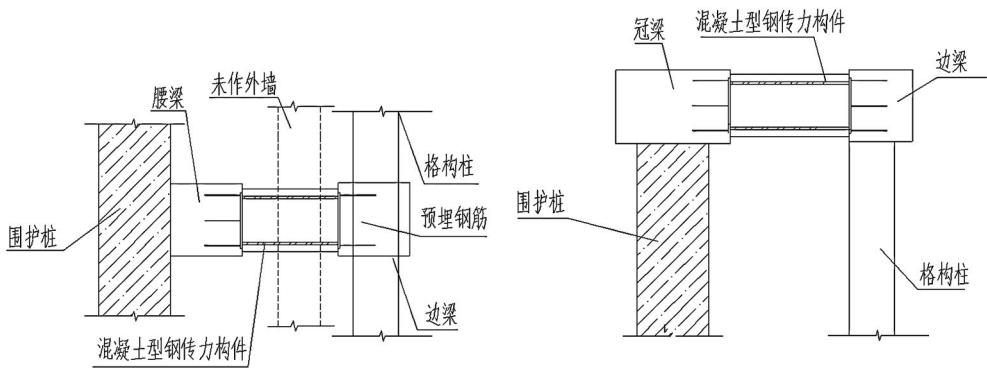


图 4 水平结构与围护体连接节点

地下主体结构上各层梁板结构相对齐,然后将水平结构边梁与围护结构上的冠梁、腰梁通过混凝土-型钢组合支撑相连接,注意混凝土-型钢组合支撑的中心要与内部水平支撑梁的中心相对齐,形成水平传力体系。水平结构与围护体连接节点见图 4。

2.5 出土口设计

逆作施工需要设置出土进料口,以供开挖时开挖土方的运出和混凝土钢筋等材料的运进,这就需要出土口的尺寸满足各项材料通过的要求。当出土口设置过大时,为了防止出土口在水平力的作用下发生破坏,则需要出土口的四角设置额外的型钢斜支撑,保证出土口的整体刚度。出土口设置加强斜梁示意图见图 5。

3 施工流程

逆作施工的施工流程是水平内支撑和地下主体结构相结合设计的关键核心所在,对基坑工程的安全性及可行性具有决定性意义。合理的施工流

程设计对缩短工期和控制基坑变形具有重大意义。本深基坑工程的具体施工流程见下表 2。

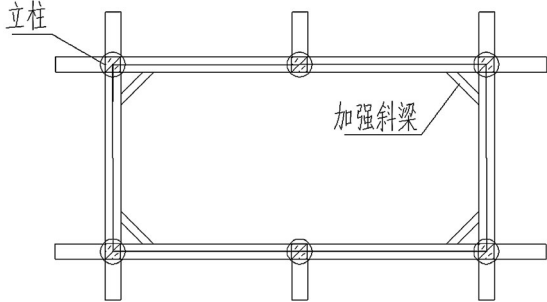


图 5 出土口设置加强斜梁示意图

4 实地监测数据分析

为了解水平内支撑与地下主体结构相结合设计的深基坑工程的变形和结构受力情况,基坑工程进行大量监测,主要包括围护桩水平位移监测、地表沉降监测、水平内支撑轴力监测、立柱竖向位移监测^[8]。

表 2 施工流程表

工况	施工内容
Stage1	场地平整,按 1:1 放坡开挖 4 m。
Stage2	施工钻孔灌注桩围护桩及顶部冠梁,期间施工立柱桩和角钢立柱并进行坑内降水。
Stage3	施工首层框架梁结构,并在梁板适当区域预留出土进料口。冠梁与边梁结构通过混凝土-型钢传力构件连接形成第一道水平内支撑体系。
Stage4	等到水平结构混凝土强度达到设计强度的 85% 后,继续开挖土方至第二层梁板结构中心线下 0.5 m 处,浇筑垫层。
Stage5	施工第二层梁板结构和腰梁,并将梁板结构和腰梁通过混凝土-型钢传力构件连接形成第二道水平内支撑体系。
Stage6	待水平结构达到设计强度后,继续开挖土方至第二层梁板结构中心线下 0.5 m 处,浇筑垫层。
Stage7	施工第三层梁板结构和腰梁,并将梁板结构和腰梁通过混凝土-型钢传力构件连接形成第三道水平内支撑体系。
Stage8	待梁板结构达到设计强度后,继续开挖土方至坑底。
Stage9	底层基础防水与底板施工。
Stage10	逆作阶段结束,在格构柱外侧浇筑外包混凝土形成永久框架柱,施工地下室外墙和各层楼板结构。

4.1 围护桩水平位移监测分析

深基坑工程周围共布置了 40 处围护结构的测斜监测点,由于监测点较多,无法一一分析,现选取一个监测点进行数据分析,绘出围护体水平位移与基坑开挖深度关系曲线图^[9],见图 6。如图所示,开挖早期,围护体位移极小。随着开挖深度的增加,围护体的侧向水平位移也逐渐增加。开挖到坑底标高时,围护体达到累计最大侧向水平位移^[10],位移小于监测报警值 30 mm,且日均变化速率小于报警值 3 mm/d,可见在逆作开挖阶段,围护体是安全稳定的^[11]。在一个开挖深度内,围护桩侧移随着围护桩深度增加先增大后减小然后趋于稳定。随着开挖深度增加,位移累计最大值的位置也在下降。围护体侧向位移与基坑深度高度相关。

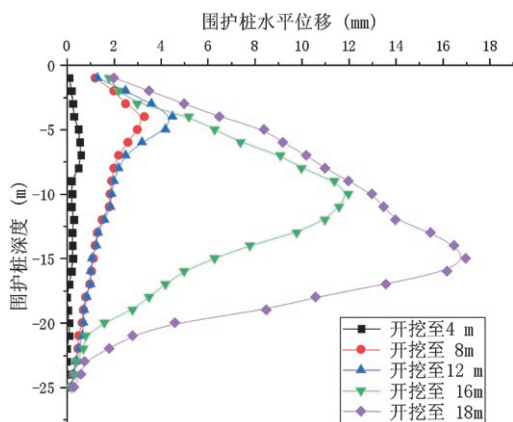


图 6 围护体水平位移变化曲线

4.2 地表沉降监测分析

深基坑工程周围共布置了 144 个地表沉降检测点,选取一个标准段监测点,测点距基坑边缘按 2 m、6 m、10 m、14 m、16 m 距离不等布置^[12],绘出地表沉降值与距基坑距离的关系曲线图,见图 7。在早期开挖至 2 m 时地表沉降几乎没有,仅在距基坑 10 m~20 m 处存在轻微沉降。随着开挖深度的逐渐增加,地表沉降也愈来愈大,在不同开挖深度下,基坑沉降都经历了先增加后减小的过程,并且都在距基坑边缘约 6 m 位置处达到沉降峰值,然后逐渐减小并趋于稳定。开挖到基坑底部时,在距基坑边缘大约 6 m 位置处出现累计沉降最大值 16 mm,远小于监测报警值 35 mm,且日均位移速率也未超过 3 mm/d 的报警值。由此可知,基坑周围地表沉降完全处于安全范围内。

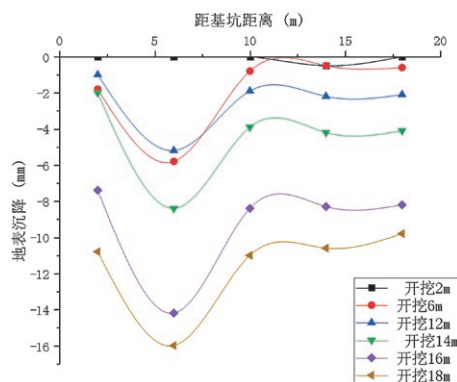


图 7 地表沉降曲线图

4.3 水平内支撑轴力监测分析

深基坑工程共布置了 20 组水平内支撑轴力监测点,选取第一层水平内支撑结构的一个标准段截面的一个监测点进行数据分析,绘出整个逆作阶段的水平内支撑轴力的变化曲线,见图 8。

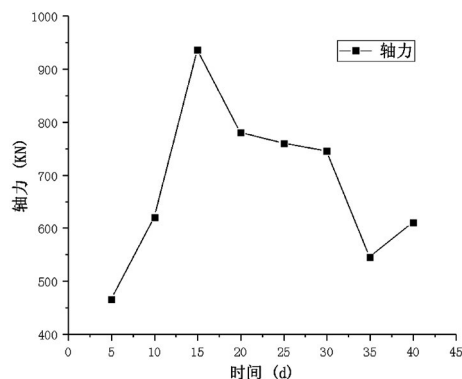


图 8 水平支撑轴力变化曲线

由图可知,在第一层梁板结构支撑施工完后水平结构轴力不断增加,直到第二层水平梁板结构施工完成后轴力开始下降。第二层梁板结构分担了水土侧向荷载,并且随着第三层水平结构完成和开挖到坑底,第一层水平内支撑轴力逐渐趋于稳定。在第二次土体开挖结束后第二层水平结构施工之前,一层水平结构的轴力达到最大值 936 kN,远小于监测报警值,即设计值的 70%。也说明采用地下主体结构梁板体系作为水平内支撑对抑制围护结构的位移和变形的效果是十分明显的,这是因为主体永久结构的刚度比临时支护结构更大。

4.4 立柱竖向位移监测分析

深基坑工程共布置了 18 个立柱竖向位移监测点,选取一个标准段截面的监测点进行数据分析,绘出立柱竖向位移与时间的关系图,见图 9。由图

可知,在基坑开挖的大部分时间里立柱隆起的竖向位移是不断增加的。逆作开挖结束后,立柱累计竖向位移达到最大值 4.1 mm,远小于基坑监测报警值 35 mm,且日均变化速率也小于 3 mm/d。这说明逆作开挖阶段,立柱的状态始终是稳定安全的,并且很好承担了水平梁板结构和施工器械带来的竖向荷载。

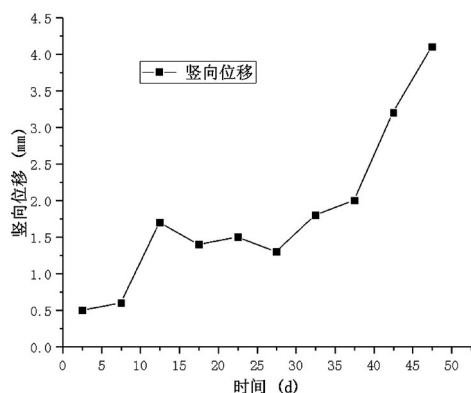


图 9 立柱竖向位移变化曲线

5 总结

5.1 成果总结

地下结构梁板替代水平内支撑的新型基坑支护设计在此深基坑工程中的成功应用获得了很好的经济效益^[12]。在工期进度方面,从 5 月初基坑放坡开挖至 12 月初底层基础防水与底板施工完成用时 7 个月,相比传统施工方法的施工进度计划节约工期约 2 个月。在经济性方面,采用地下梁板结构代替内支撑的逆作法施工相比于传统临时支撑,在支撑费用、拆除费用、人工费用等方面共节省 820 万元。此外,采用临时围护结构相比于墙体相结合的方案节省约 300 万元。综上所述,这种新型基坑支护设计具有相当明显的经济效益与工期优势。

5.2 工程总结

本文以某深基坑工程为案例,论述了地下结构梁板替代水平内支撑的设计与关键施工方法,并对深基坑各种监测数据进行了分析,总结了新型深基坑支护体系的变形特点与规律,得出了下面的结论与观点:

(1) 对基坑工程的各项监测数据分析可知,围护结构位移、地表沉降、支撑轴力及立柱位移均远小于报警值,处在相当安全可控的范围之内,可以说深

基坑工程在逆作施工阶段中是稳定安全的,基坑周围环境也是安全可控的。水平内支撑与地下主体结构相结合的设计基本上达到了预期工程效果。

(2) 新型基坑支护设计方法极大缩短了工期,产生了良好的经济效益。由于采用逆作法施工也达到了文明施工的要求。

(3) 一些施工技术问题需要进一步研究。例如,逆作施工结束后地下结构外墙与框架梁体系的连接与施工;格构柱外包混凝土形成永久结构柱的混凝土浇筑等问题。

(4) 对支护结构与主体结构相结合设计仍缺乏系统性的受力机理和变形特点分析方法。不过,这种新式施工方法仍具有推广意义,希望可以为未来类似设计的基坑支护工程提供一些参考。

参考文献:

- [1] 王卫东,翁其平,胡玉银. 新型逆作法结构型式的设计与应用[J]. 岩土工程学报,2006,28(S1):1546-1551.
- [2] 王卫东,徐中华. 深基坑支护结构与主体结构相结合的设计与施工[J]. 岩土工程学报,2010,32(S1):191-199.
- [3] 陈寿长. 与支护结构相结合的高层建筑地下结构的设计与实践[J]. 建筑结构,2013,43(S2):39-41.
- [4] 岳建勇,周春,任臻,等. 超高层建筑地下主体结构 with 深基坑支护结构相结合的设计和实例[J]. 岩土工程学报,2006,28(S1):1552-1555.
- [5] 梁孟孟,唐明亮,梅轲. 临近超高层建筑超大深基坑桩锚+内支撑与结构一体化施工技术[J]. 施工技术,2017,46(20):34-37.
- [6] 王卫东,王建华. 深基坑支护结构与主体结构相结合的设计、分析与实例[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护技术规程:JGJ 120—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [8] 宋辰辰. 地铁深基坑开挖变形监测与支撑结构影响性分析[D]. 合肥:安徽建筑大学,2019.
- [9] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册. 2 版[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [10] 周淦,曹镛禄,冯玉山. 金茂大厦基坑开挖施工监测[J]. 岩土工程技术,1998,12(3):57-62.
- [11] 汪军,李大华,张自光. “桩墙合一”技术在深基坑工程中的应用[J]. 安徽建筑大学学报,2021,29(1):26-32.
- [12] 吴坤铭. 拉锚地连墙支护深基坑的稳定性分析与优化设计[J]. 安徽建筑大学学报,2021,29(4):1-5,88.