

引文格式:刘永超,贺文贤,李泽源,等.装配式地连墙接缝变形特性研究[J].建筑科学与工程学报,2024,41(2):75-84.

LIU Yongchao, HE Wenxian, LI Zeyuan, et al. Research on joint deformation characteristics of prefabricated diaphragm walls[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(2): 75-84.

DOI:10.19815/j.jace.2022.04028

装配式地连墙接缝变形特性研究

刘永超^{1,2}, 贺文贤¹, 李泽源³, 王川³, 石长城¹, 王成¹, 陆鸿宇²

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300350; 2. 天津建城基业集团有限公司, 天津 300301;

3. 中交第三航务工程局有限公司厦门分公司, 福建 厦门 361006)

摘要:为了研究接缝对装配式地连墙变形特性的影响并采取合理的改进措施,采用现场试验的方法将局部现浇地连墙替换为装配式地连墙,并对其实测的变形数据进行了对比分析;在实测数据分析的基础上,通过 PLAXIS2D 有限元软件模拟分析了不同深度横向接缝对装配式地连墙变形特性的影响规律;通过 PLAXIS3D 有限元软件对比了现浇墙与装配式地连墙水平方向及垂直方向变形形态,分析了竖向接缝对装配式地连墙变形特性的影响规律;最后,针对实测数据显示出的变形偏大问题,提出了改变冠梁刚度、围檩刚度、墙幅宽度、支撑位置 4 种改进措施,并通过 PLAXIS3D 有限元软件进行了验证。结果表明:装配式地连墙的接缝对墙体的刚度存在弱化作用,增大了其变形程度;位于坑底以上的横向接头失效时,墙体水平位移会显著增大,位于坑底以下的横向接头失效时,不会引起墙体水平位移的显著增大;竖向接头会显著减小装配式墙体的整体刚度,使其协同变形能力变差,变形更加难以控制;适当调节支撑位置可有效缓解墙幅间的错动和减小墙体变形。

关键词:装配式地连墙;变形特性;支护结构;接缝

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2024)02-0075-10

Research on joint deformation characteristics of prefabricated diaphragm walls

LIU Yongchao^{1,2}, HE Wenxian¹, LI Zeyuan³, WANG Chuan³, SHI Changcheng¹,
WANG Cheng¹, LU Hongyu²

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300050, China; 2. Tianjin Jiancheng Foundation Industry Group Co. Ltd, Tianjin 300301, China; 3. Xiamen Branch of CCCC Third Navigation Engineering Co. Ltd, Xiamen 361006, Fujian, China)

Abstract: In order to study the influence of joints on the deformation characteristics of prefabricated diaphragm wall and take reasonable improvement measures, the cast-in-place wall was replaced by prefabricated diaphragm wall by field test method, and the measured deformation data were compared and analyzed. Based on the analysis of measured data, PLAXIS2D finite element software was used to simulate and analyze the influence of transverse joints at different depths on the deformation characteristics of prefabricated diaphragm walls. PLAXIS3D finite element software was used to compare the horizontal and vertical deformation patterns of cast-in-

place wall and prefabricated diaphragm wall, and the influence of vertical joints on the deformation characteristics of prefabricated diaphragm wall was analyzed. Finally, aiming at the problem of large deformation shown by the measured data, four improvement measures were proposed to change the stiffness of crown beam, the stiffness of enclosing purlin, the width of wall, and the support position, which were verified by the finite element software PLAXIS3D. The results show that the joints of prefabricated diaphragm walls weaken the stiffness of wall and increase the deformation degree. When the transverse joint above the bottom of the pit fails, the horizontal displacement of the wall will increase significantly, while when the transverse joint below the bottom of the pit fails, the horizontal displacement of the wall will not increase significantly. The vertical joint will significantly reduce the overall stiffness of the prefabricated diaphragm walls, making its collaborative deformation capacity worse and deformation more difficult to control. Properly adjusting the support position can effectively alleviate the dislocation between the wall and reduce the deformation of the wall.

Key words: prefabricated diaphragm wall; deformation characteristic; supporting structure; joint

Author resume: LIU Yongchao(1970-), male, PhD, senior engineer, E-mail: chao96521@vip. sina. com.

0 引言

近年来,城市建设不断加快,在国内大力推进住宅产业化的背景下,地下工程的预制化逐渐成为工程研究的热点,其中包括很多有关预制桩墙用于基坑支护的工程和研究成果^[1-3]。预制桩墙应用于基坑支护不仅可以大幅减少施工工期,提高施工质量,而且一定程度上可以减小工程造价,对比传统基坑支护形式具有明显优越性。预制桩墙接缝对支护结构变形特性的影响是一个重要问题,现有的预制桩墙接头接缝的研究多集中在抗渗性能、结构形式及施工质量控制上,在接缝对装配式地连墙墙体刚度、变形形态等方面仍有较多问题需要解决。

王卫东等^[4]介绍了上海地区的一种新型预制地下连续墙技术。胡坚尉^[5]使用 MIDAS GTS 对常规地连墙、先张法预制预应力地连墙及后张法预制预应力地连墙进行了有限元模拟,分析了围护墙体的变形与受力。洪哲明等^[6]提出了在渠式切割混凝土连续墙中间插入钢筋混凝土预制异型桩的渠式切割装配式地下连续墙工法。杨毅秋等^[7]从构件尺寸、接头形式、连接方法、配套施工机械等几方面论述了装配式地下连续墙的设计及施工工艺。赵旭光^[8]针对沿海软土地区地下连续墙接缝易产生渗漏及绕流问题,对市面上常用接头形式进行了对比分析及研究,提出了预制地下连续墙接头的设计思路并在天津恒隆广场 18.4 m 超深基坑中成功应用,取得了理想的施工效果。许国光等^[9]认为自卡式预制地下

连续墙接头不太适合应用在含有块石或者卵石的地层,更适用于可以使用泥浆护壁的软土地区。崔涛^[10]介绍了一种新型的接头形式,并利用数值模拟方法研究该接头形式在弯矩、剪力作用下的受力变形性能,为预制装配式地下连续墙在工程中的应用提供力学支撑。银霞等^[11]研究了接头力学与抗渗性能,并提出了提高接头性能的措施,发现预制地下连续墙破坏形式主要为变形及滑移导致的接头脱落,即接头为薄弱环节。

本文为研究接缝对装配式地连墙变形特性的影响,在天津地铁景荔道站主体二期基坑中,进行了现场原型试验,完成了 5 幅装配式地下连续墙在现场拼装插入和开挖验证试验。本文对现场实测数据进行了分析,发现装配式地连墙接缝对墙体受力存在不利影响,并针对接缝对装配式地连墙变形的影响规律进行了研究,给出了几种减小这种影响的施工方案,最后通过数值模拟分析,验证了这几种方案的改进效果,以期为今后进行装配式地连墙相关的基坑支护设计和施工提供有益的参考和借鉴。

1 装配式地连墙接缝类型及现场试验

1.1 预制化支护结构接缝类型

地铁基坑装配式地连墙主要分为两个方面:附属结构基坑和主体车站基坑,笔者研究的基坑预制化包括:PRMW 工法(水泥搅拌桩内插矩形桩)是一种集挡土、止水于一体的新型支护形式,用矩形桩以代替水泥搅拌桩墙等工法中的型钢,比型钢有一定

的经济技术优势,避免型钢拔除对环境的影响,并克服施工周期存在不可预测所导致的型钢租赁费不可控的弊端,接缝形式为水泥搅拌桩连接,见图 1(a)。连锁桩亦是集挡土、止水一体化的支护结构,由多根预应力矩形空心方桩连续紧密打入土中并在桩侧灌注混凝土砂浆形成,运输施工便利,受力合理,可大幅缩短施工工期,常用于地铁附属结构基坑的支护工程,接缝形式为后注浆连接,见图 1(b)。装配式地下连续墙技术是对传统地连墙设计和施工技术的重大改进,大幅减小工程风险,提高施工速度,对城市地铁超深基坑施工安全具有重大意义,接缝形式为装配墙制作时的预埋凹凸槽方式,见图 1(c)。

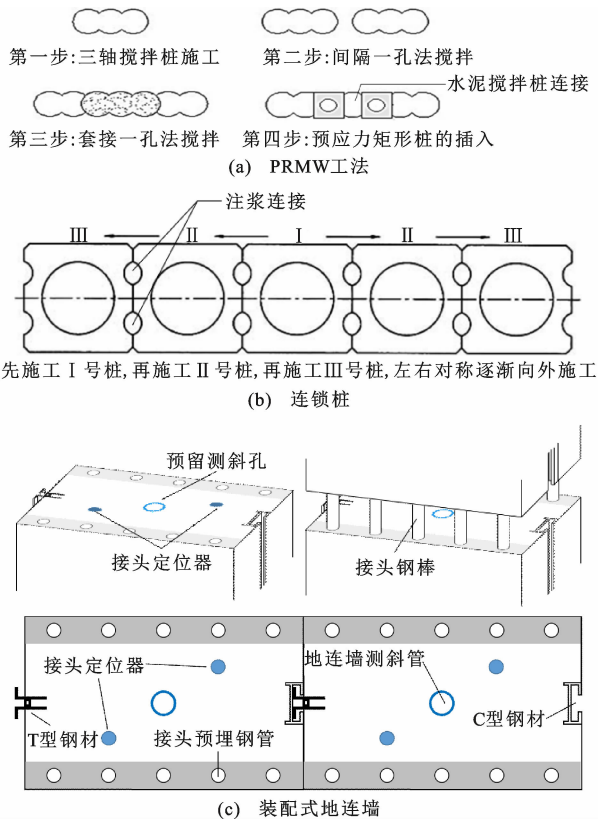


图 1 预制化支护结构接缝示意图

Fig. 1 Joint diagram of prefabricated supporting structure

1.2 装配式地连墙现场试验

试验场地选取天津地铁景荔道站二期基坑,其围护结构采用现浇地连墙(800 mm 厚)+内支撑体系,标准段宽 21.1~26.5 m、深 17.07~17.32 m,墙体插入比为 0.81~0.84。在图 2 所示位置处,将 6 m 宽现浇地连墙变更为预制装配式地连墙(墙体编号 2001~2005),装配式地连墙先于现浇地连墙施工。预制地连墙的混凝土强度等级为 C50,抗渗等级为 P10。幅段尺寸分为 8 m×1.2 m×0.75 m(重 180 kN)和 11 m×1.2 m×0.75 m(重 250 kN)

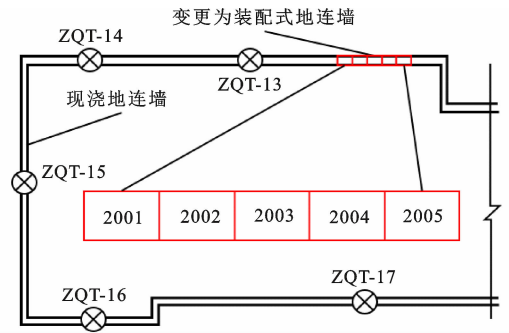


图 2 景荔道站二期基坑局部示意图

Fig. 2 Partial schematic diagram of foundation pit of phase II of Jinglidao station

两种,拼装方式采用错缝拼装,见图 3。图 3 左侧展示了两种墙体的拼装方式,右侧展示了开挖面的情况及支撑情况。开挖工况见表 1。

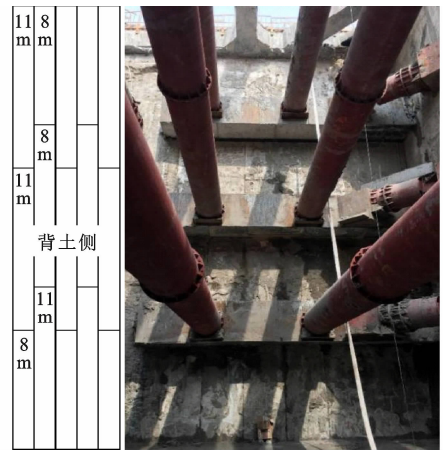


图 3 装配式地连墙拼装方式及开挖效果

Fig. 3 Assembling method and excavation effect of prefabricated diaphragm walls

表 1 开挖工况

Table 1 Excavation conditions

工况编号	工况类型
1	在基坑开挖前抽槽埋设第一道钢筋混凝土支撑,待强度达到 80% 时进行基坑降水
2	开挖土体至第二道支撑以下 0.5 m 的位置,架设钢筋混凝土围檩,并架设第二道钢支撑
3	开挖土体至第三道支撑以下 0.5 m 的位置,架设钢筋混凝土围檩,并架设第三道钢支撑
4	开挖土体至第四道支撑以下 0.5 m 的位置,架设钢筋混凝土围檩,并架设第四道钢支撑
5	开挖至坑底,坑底相对地面埋深-17.07 m

1.3 结果分析

为研究本工程中现浇地连墙的变形形态,且与预制装配式地连墙形成对比与参考,选取了二期基坑中靠近预制墙的 ZQT-13 号测点以及装配式地连

墙 2003 号墙(测点位置如图 2 所示),绘制了其在各开挖阶段的深层水平位移曲线,见图 4。在本次基坑开挖监测中,预制地连墙的测斜由本课题组负责,其他现浇地连墙的测斜委托了第三方进行监测。

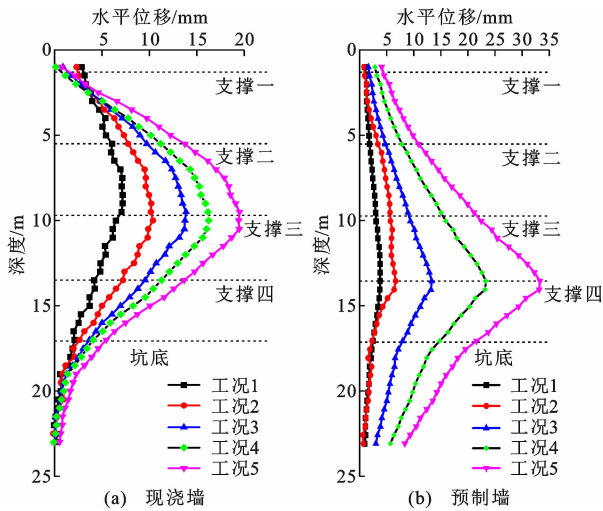


图 4 现浇墙与预制墙的深层水平位移对比

Fig. 4 Comparison of deep horizontal displacement between cast-in-place wall and precast wall

由图 4 可以看出,随着基坑开挖深度 H 的不断增加,现浇墙与预制墙墙身水平位移不断增大,最终均呈现出了“弓形”的水平位移形态。现浇墙及预制墙最大水平位移值分别为 19.49 mm(0.056% H)、33.28 mm(0.195% H),均小于国家标准中规定的变形限值(0.2% H ~0.3% H),且所在深度均出现在了 0.7 H ~0.8 H 之间。可以看出,预制装配式地连墙变形形态与现浇地连墙基本一致,开挖过程中变形稳定且变形量可控。对比图 4(a)和图 4(b)可知,预制墙最大水平位移明显高于现浇地连墙,推测原因在于预制墙接头施工质量的影响,使得墙体刚度弱化,进而导致了墙体水平位移偏大,相关内容

表 2 各土层物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of each soil layer

土层性质	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c'/kPa	$\varphi'/(^{\circ})$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{occ}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{0.7}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}/10^{-4}$	e
4-1 黏土	18.6	6.0	22.1	3.96	3.96	23.76	47.5	1.5	1.015
6-2 淤泥质土	17.9	1.0	17.0	2.73	2.73	19.11	38.2	1.5	1.173
6-4 粉质黏土	20.1	9.5	28.6	6.81	6.81	44.27	88.5	1.7	0.875
8-1 粉质黏土	20.2	14.0	25.7	6.91	6.91	48.37	130.6	4.2	0.672
9-2 粉砂	19.8	5.4	32.2	15.24	15.24	60.96	152.4	4.5	0.602
10-1 粉质黏土	20.6	15.8	19.4	4.00	4.00	44.00	118.8	4.2	0.738
11-2 粉砂	20.1	5.5	32.6	13.75	13.75	55.00	148.5	4.5	0.614

注: γ 为重度; c' 为有效黏聚力; φ' 为有效内摩擦角; E_{50}^{ref} 为三轴固结排水剪切试验测定的参考割线模量; $E_{\text{occ}}^{\text{ref}}$ 为标准固结试验测定的参考应力下的切线模量; $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为三轴固结排水加卸载试验测定的加卸载模量; G_0^{ref} 为动剪切初始模量; $\gamma_{0.7}$ 为剪切模量衰减到初始剪切模量 70%时对应的剪应变; e 为孔隙比。

有待于进一步的研究。

2 接头弱化模拟分析

针对预制装配式地连墙的接头弱化问题,笔者先后建立了 PLAXIS2D 模型与 PLAXIS3D 模型,分别研究横向接缝的弱化作用及竖向接缝的弱化作用。两者本构模型均使用小应变土体硬化(HSS)模型,参数选取参考国内外研究^[12-21]并经历数值反演确定。土体根据土层厚度简化等效成 7 层,初始地下水埋深为 -1.7 m,各土层物理力学参数见表 2,开挖过程工况见表 1。

2.1 横向接缝的弱化作用

运用 PLAXIS2D 软件建立对称的基坑模型,如图 5 所示。模型尺寸为 93.25 m×60 m,现浇墙采用厚 800 mm、弹性模量为 31 GPa 的板单元模拟,预制墙采用厚 750 mm、弹性模量为 34.5 GPa 的板单元模拟,支撑采用锚定杆单元模拟,混凝土弹性模量取 31 GPa,泊松比取 0.2,钢管支撑的弹性模量取 210 GPa,接触面采用 Goodman 单元。

本文假定接头失效后完全丧失抗弯刚度,即在模型中将接头连接方式定义为“铰接”,但并不会发生渗漏,以考虑接头仅抗弯强度完全失效,但构件之间不发生分离破坏的理想状态。为深入了解横向接头的弱化作用,分别在 4 处不同位置设置了横向接头,接头位置如图 6 所示。其中 1 号接头为增加的对照组试验;2 号接头为实际第 3、4 道钢支撑附近接头的简化;3 号接头为增设的关注基坑坑底附近开挖情况的对照组;4 号接头为实际坑底以下接头的简化。4 个接头单独失效及 2 号、4 号接头同时失效后墙体水平位移曲线如图 7 所示。

从图 7 可以看出,横向接头对预制墙体存在弱化作用。当接头位于坑底以上时,失效将导致坑底

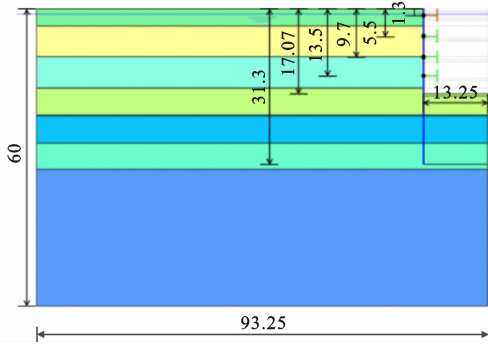


图 5 PLAXIS2D 模型 (单位:m)

Fig. 5 PLAXIS2D model (unit:m)

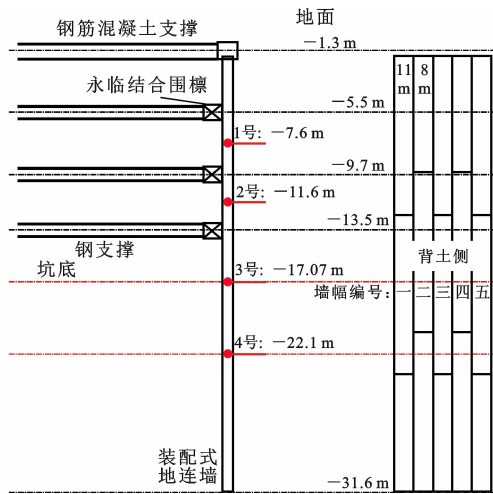


图 6 接头位置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of joint position

以上部分的墙体水平位移显著增大(1号接头失效后最大水平位移由 22.61 mm 增加到 48.44 mm,2号接头失效后最大水平位移由 22.61 mm 增加到 33.16 mm),最大水平位移位置转移到接头位置处。接头位置越深,失效对墙体水平位移的影响越小,这是由于位置越深,上部已架设的横向支撑越多,支护结构水平刚度越大,因此产生的位移就越小。当接头位于坑底或坑底以下时,失效不会引起墙体水平位移的显著增大(3号接头失效后最大水平位移由 22.61 mm 增加到 24.34 mm,4号接头失效后最大水平位移由 22.61 mm 增加到 23.38 mm),整个过程水平位移值始终在安全范围内。

2、4号接头共同失效并未产生较强的叠加效应,其墙体的变形规律仍然与2号接头单独失效时的规律较为一致。由此可见,当接头位于坑底以下一定深度处时,其失效所产生的附加效应可以忽略不计,故在施工时应着重保障坑底上方的接头质量。

2.2 竖向接缝的弱化作用

运用 PLAXIS3D 软件建立的基坑模型尺寸为

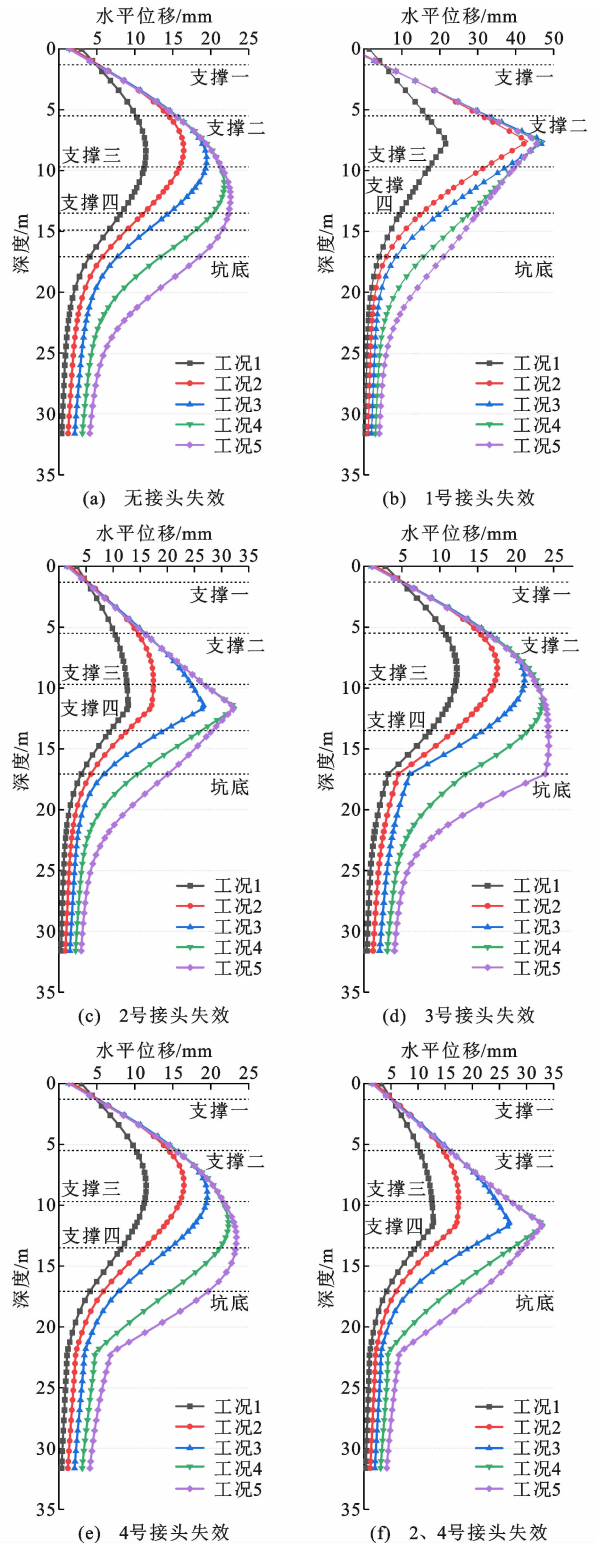


图 7 各接头失效时预制墙水平位移曲线

Fig. 7 Horizontal displacement curves of precast walls when joint fails

93.25 m×18 m×60 m,冠梁及围檩采用梁单元模拟,弹性模量取为 30 GPa,泊松比为 0.2,横截面尺寸为 1 m×1 m,其余结构模拟形式同二维模型。模型示意图如图 8 所示。

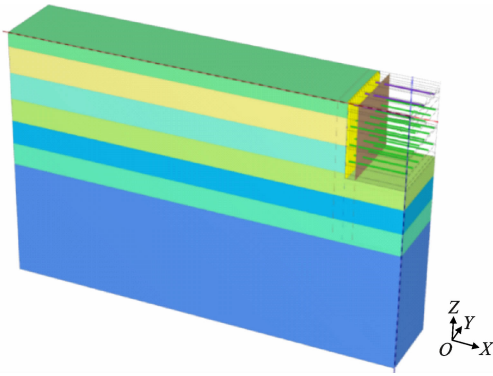


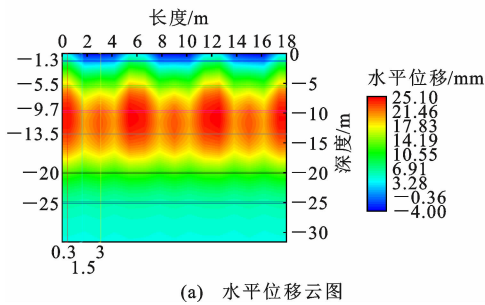
图 8 PLAXIS3D 模型

Fig. 8 PLAXIS3D model

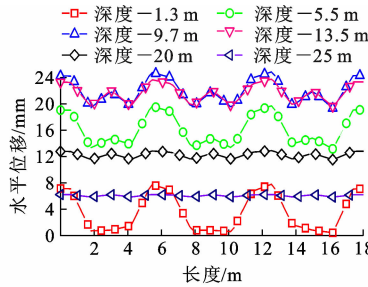
本节分别对装配式墙体与整浇式墙体进行了数值分析,在建立的有限元模型中,预制墙幅宽 1.2,

m,设有支撑及围檩,钢筋混凝土支撑的水平刻度分别为 3、9、15 m,钢支撑的水平刻度分别为 1.5、4.5、7.5、10.5、13.5、16.5 m,假定墙幅间铰接,即墙幅间相对转动自由,但相对位移受到限制,不考虑横向接头失效,而整浇式墙体假定无任何接缝存在。开挖至坑底后的有限元模拟结果如图 9、10 所示,开挖过程中冠梁水平位移变化如图 11、12 所示。

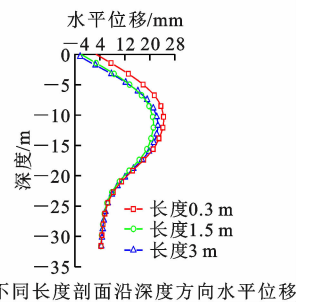
从图 9~12 可以看出,装配式墙体和整浇式墙体变形形态相同,均呈“弓形”,最大水平位移均出现在 2/3 基坑深度附近。装配式墙体的最大水平位移为 25.1 mm,变形沿基坑长度方向变化较大,在设有支撑部位变形最小,两支支撑跨中位置变形最大。在开挖第一层土后,冠梁跨中位移显著增大,随着后



(a) 水平位移云图



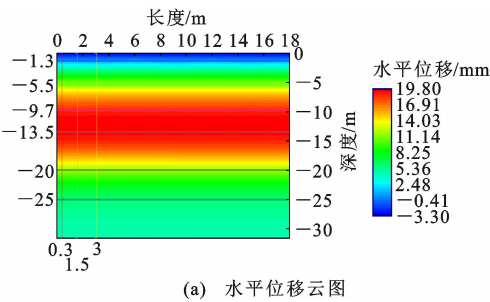
(b) 不同深度剖面沿长度方向水平位移



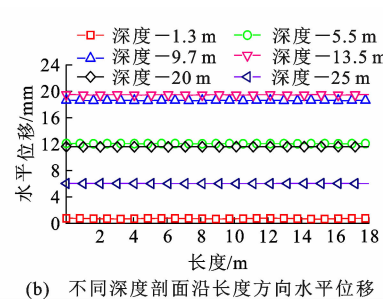
(c) 不同长度剖面沿深度方向水平位移

图 9 装配式墙体计算结果

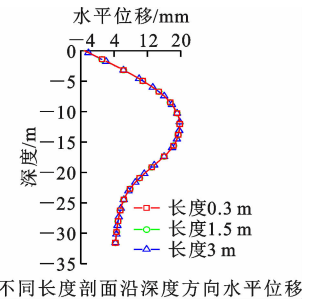
Fig. 9 Calculation results of prefabricated wall



(a) 水平位移云图



(b) 不同深度剖面沿长度方向水平位移



(c) 不同长度剖面沿深度方向水平位移

图 10 整浇式墙体计算结果

Fig. 10 Calculation results of monolithic wall

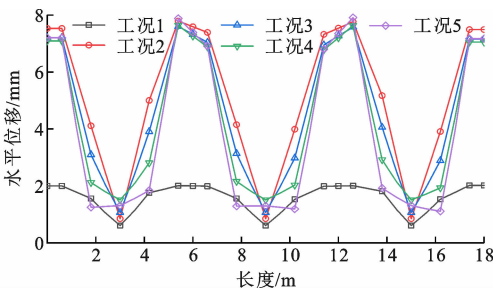


图 11 装配式墙体冠梁水平位移变化

Fig. 11 Horizontal displacement change of crown beam of prefabricated wall

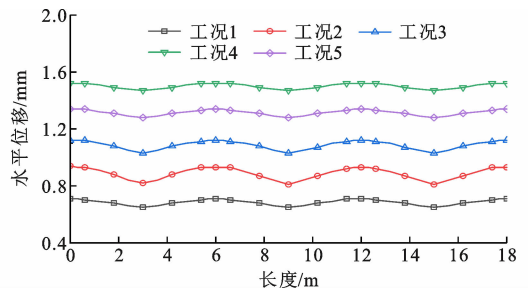


图 12 整浇式墙体冠梁水平位移变化

Fig. 12 Horizontal displacement change of crown beam of monolithic wall

续基坑开挖过程中围檩及支撑的架设,冠梁的变形得到有效控制,并没有随着基坑开挖深度的增加而进一步加大;整浇式墙体的最大水平位移为 19.8 mm,变形沿基坑长度方向均匀分布。冠梁的变形随着开挖深度的增加逐渐增大,始终在控制值以内。

这是由于装配式墙体整体性较差,存在接缝,各墙幅间铰接,墙幅间无法传递弯矩,整个支护结构的刚度较单一装配式墙体明显减小,故墙体变形较难得到有效控制;整浇式墙体整体性好,不存在接缝,墙体可在水平方向上传递弯矩,由此整个支护体系的刚度更大,故墙体变形形态及变形量可得到有效控制。对比两者可知竖向接缝对装配式地连墙受力性能存在不利影响,使其整体刚度减小,协同变形能力变差,变形更加不易控制。由于沿基坑长度方向上的水平支撑刚度分布不均匀,在开挖面之上的墙体变形呈波浪形分布,故在实际工程中,应重点关注水平支撑刚度较小区域。

3 装配式地连墙接缝控制变形的措施

由前文分析结果可知,接缝的存在大幅弱化了装配式地连墙的刚度,增大了变形控制的难度,因此,需采取措施预防装配式地连墙发生过大变形。

本节基于前文 PLAXIS3D 模型,采用改变冠梁刚度、围檩刚度、墙幅宽度、支撑位置 4 种措施,研究控制预制地连墙变形的办法。其中钢支撑的位置调整方案情况如图 13 所示,4 种控制措施的模拟结果如图 14~17 所示。

由图 14~17 可知,4 种控制措施下的墙体最大水平位移分别为 24.8、23.4、21.4、22.3 mm,改变冠梁、围檩刚度的方法最大水平位移较大,且冠梁及围檩各位置的变形较为起伏,控制效果较差;增大墙幅宽度和调整钢支撑位置的方法最大水平位移较小且冠梁及围檩各位置的变形较为平缓,控制效果较好。在实际应用中,应考虑道路运输水平、现场施工机械水平、成本等多方面因素,因此选增大墙幅宽度的方法时存在一定限制。综合而言,调整钢支撑的位置可显著增大装配式地连墙的整体刚度,有效控制墙体的变形,缓解墙幅间的错动,而且该方法不增加造价,不提升施工难度,不延长工期,优于其他几种方法。因此,在设计支护结构时应重视对支撑位置的设置。

4 结语

(1)实际工程中装配式地连墙的水平位移更大,

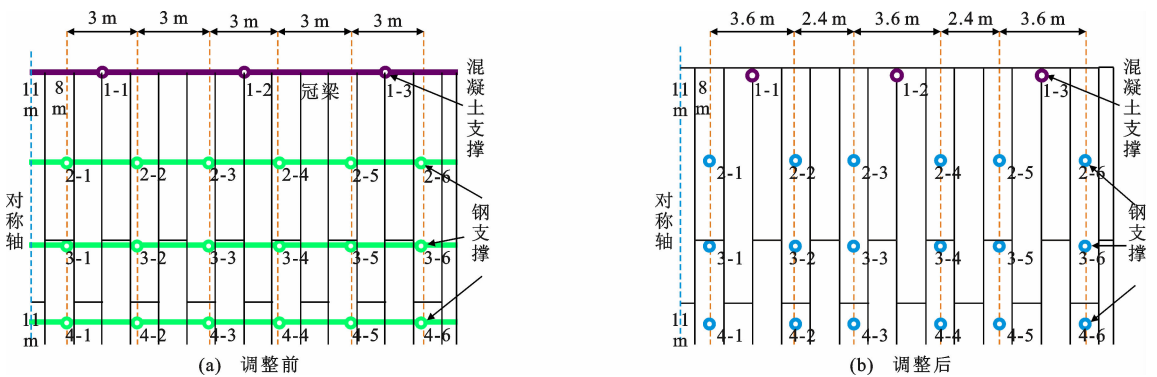


图 13 支撑布设方案

Fig. 13 Support layout scheme

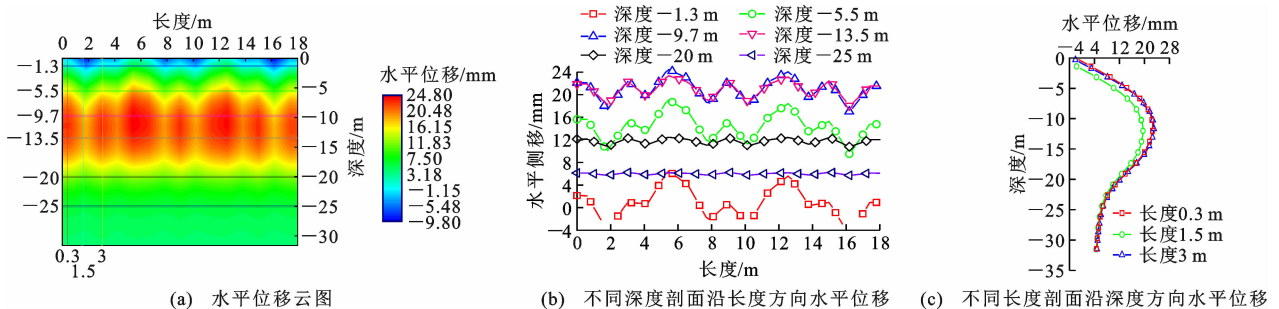


图 14 调整冠梁刚度条件下的模拟结果

Fig. 14 Simulation results under condition of adjusting stiffness of crown beam

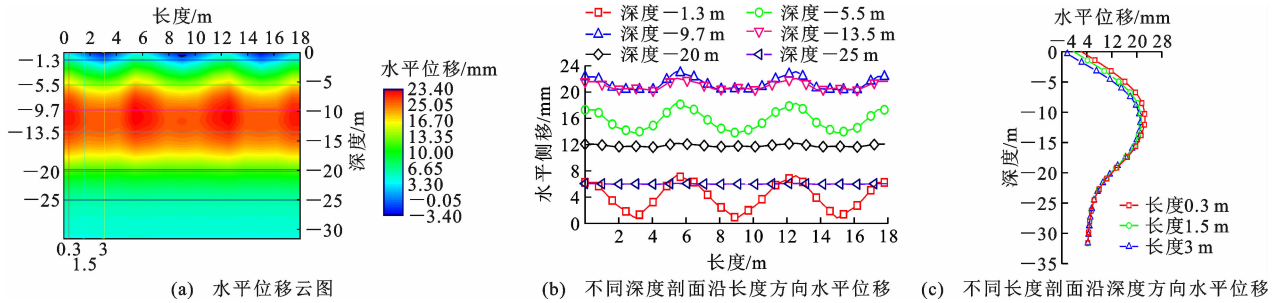


图 15 调整围檩刚度条件下的模拟结果

Fig. 15 Simulation results under condition of adjusting stiffness of enclosing purlins

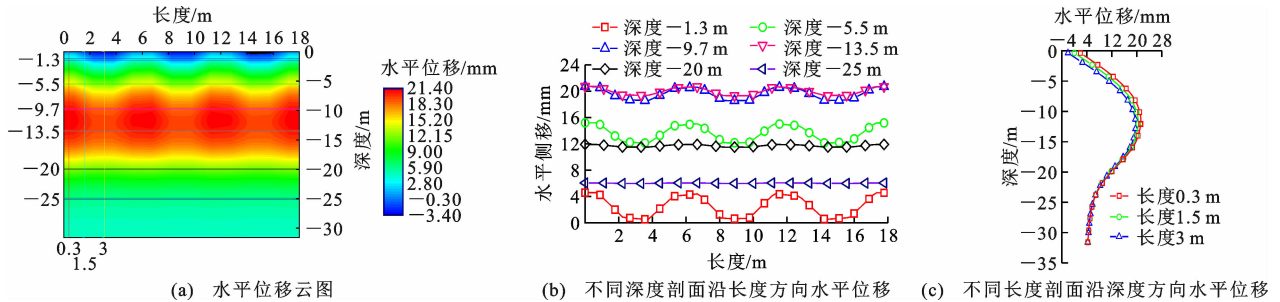


图 16 调整墙幅宽度条件下的模拟结果

Fig. 16 Simulation results under condition of adjusting wall width

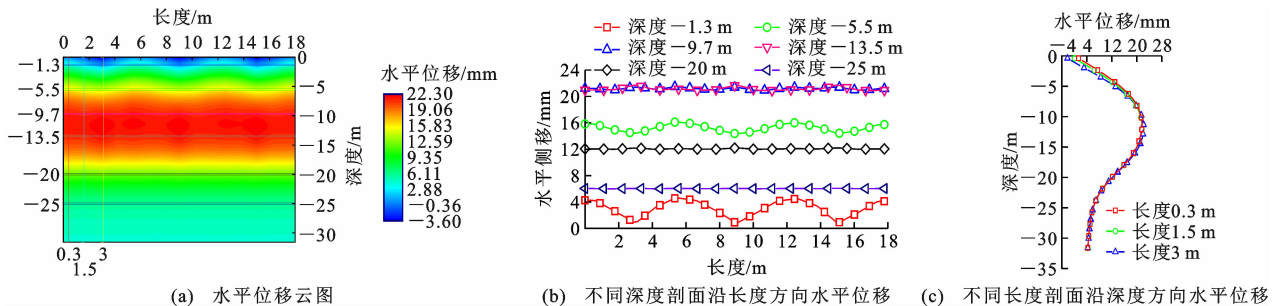


图 17 调整钢支撑位置条件下的模拟结果

Fig. 17 Simulation results under condition of adjusting steel support position

推测原因为装配式地连墙的接缝对墙体整体性存在不利影响,对墙体刚度存在弱化作用。

(2)横向接头对墙体刚度存在弱化作用。位于坑底以上的接头失效时,墙体水平位移会显著增大,且随接头深度的增大这种趋势逐渐减小,最大水平位移发生位置也会向失效接头处移动;位于坑底以下的接头失效时,墙体水平位移不会显著增大。

(3)竖向接头会显著减小装配式墙体的整体刚度,使其协同变形能力变差,变形更加难以控制。由于沿基坑长度方向上的水平支撑刚度分布不均匀,在开挖面之上的墙体变形呈波浪形分布,故在实际工程中,应重点关注水平支撑刚度较小区域。

(4)改变冠梁和围檩刚度、预制墙体幅宽、支撑位置均可以达到一定控制效果,但改变支撑位置效

果最佳,且施工过程中容易实现,因此在设计施工时应尽可能将支撑位置设计更加合理。

参考文献:

References:

[1] 黄广龙,李 勇,宰金珉,等. 预应力混凝土管桩在深基坑支护工程中的应用研究[J]. 建筑施工, 2005, 27(4):12-14.
HUANG Guanglong, LI Yong, ZAI Jinmin, et al. Study on prestressed concrete pipe pile applied to retaining and protecting of deep foundation excavation engineering[J]. Building Construction, 2005, 27(4): 12-14.

[2] 黄广龙,李 勇,夏 佳. 预应力管桩在基坑围护中的应用[J]. 建筑技术, 2006, 37(12):926-927.
HUANG Guanglong, LI Yong, XIA Jia. Application

- of prestressed concrete pipe-pile in deep foundation bracing structure[J]. *Architecture Technology*, 2006, 37(12):926-927.
- [3] 徐洪球,姚燕明. 小型预制桩用于 SMW 工法基坑围护结构的计算分析[J]. *工程建设与设计*, 2003(6): 18-20.
XU Hongqiu, YAO Yanming. Calculation analysis of minitype prefabricated piles in SMW method to brace the pit [J]. *Construction & Design for Project*, 2003(6):18-20.
- [4] 王卫东,邸国恩,黄绍铭. 预制地下连续墙技术的研究与应用[J]. *地下空间与工程学报*, 2005, 1(4): 569-573.
WANG Weidong, DI Guoen, HUANG Shaoming. Study and application of precast diaphragm wall[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2005, 1(4):569-573.
- [5] 胡坚尉. 预制预应力地连墙围护受力及变形分析研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(增 1): 275-280, 290.
HU Jianwei. Analysis on the stress and deformation of precast and prestressed diaphragm wall[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(S1):275-280,290.
- [6] 洪哲明,俞峰,陈鑫,等. 渠式切割装配式地下墙围护开挖环境影响原位试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2019, 15(增 2):942-950.
HONG Zheming, YU Feng, CHEN Xin, et al. In-situ tests on the environmental effect of excavation supported by trench cutting assembled diaphragm wall [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(S2):942-950.
- [7] 杨毅秋,周慧超,杨贵生,等. 装配式地下连续墙设计施工技术研究[J]. *铁道工程学报*, 2020, 37(2): 91-97.
YANG Yiqiu, ZHOU Huichao, YANG Guisheng, et al. Research on the design and construction technique of prefabricated diaphragm walls[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2020, 37(2):91-97.
- [8] 赵旭光. 预制地下连续墙接头在深基坑工程中的应用[J]. *天津建设科技*, 2014, 24(3): 19-21.
ZHAO Xuguang. Application of precast diaphragm wall joint in deep foundation pit engineering[J]. *Tianjin Construction Science and Technology*, 2014, 24(3):19-21.
- [9] 许国光,油新华,耿冬青,等. 自卡式预制地下连续墙接头工艺研究[J]. *施工技术*, 2018, 47(3): 135-136.
XU Guoguang, YOU Xinhua, GENG Dongqing, et al. Study on the technology of self-clamping precast diaphragm wall joints [J]. *Construction Technology*, 2018, 47(3):135-136.
- [10] 崔涛. 新型预制地下连续墙接头性能研究[J]. *施工技术*, 2019, 48(12):36-38.
CUI Tao. Research on the joint's mechanical properties of new prefabricated diaphragm wall [J]. *Construction Technology*, 2019, 48(12):36-38.
- [11] 银霞,袁昌,李栋伟,等. 新型预制地下连续墙接头力学与抗渗性能研究[J]. *施工技术*, 2021, 50(9): 99-102.
YIN Xia, YUAN Chang, LI Dongwei, et al. Study on mechanical property and impermeability of new precast diaphragm wall joint[J]. *Construction Technology*, 2021, 50(9):99-102.
- [12] BOLTON M D. The strength and dilatancy of sands [J]. *Géotechnique*, 1986, 36(1):65-78.
- [13] BRINKGREVE R B J, BROERE W. *PLAXIS Material Models Manual*[M]. Delft:PLAXIS B V, 2006.
- [14] LAWLER M L, FARRELL E R, LOCHADEN A L E. Comparison of the measured and finite element-predicted ground deformations of a stiff lodgement till [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, 48(1): 98-116.
- [15] 顾晓强,吴瑞拓,梁发云,等. 上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J]. *岩土力学*, 2021, 42(3):833-845.
GU Xiaoqiang, WU Ruituo, LIANG Fayun, et al. On HSS model parameters for Shanghai soils with engineering verification [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(3):833-845.
- [16] SIMPSON B. Retaining structures; displacement and design[J]. *Géotechnique*, 1992, 42(4):541-576.
- [17] 王海波,徐明,宋二祥. 基于硬化土模型的小应变本构模型研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(1):39-43, 136.
WANG Haibo, XU Ming, SONG Erxiang. A small strain constitutive model based on hardening soil model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(1):39-43, 136.
- [18] 邵羽,江杰,陈俊羽,等. 基于 HSS 模型与 MCC 模型的深基坑降水开挖变形分析[J]. *水利学报*, 2015, 46(增 1):231-235.
SHAO Yu, JIANG Jie, CHEN Junyu, et al. Deformation of deep foundation pits due to excavation and dewatering based on HSS model and modified cam-clay model[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(S1):231-235.
- [19] 梁发云,贾亚杰,丁钰津,等. 上海地区软土 HSS 模型

- 参数的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(2): 269-278.
- LIANG Fayun, JIA Yajie, DING Yujin, et al. Experimental study on parameters of HSS model for soft soils in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(2): 269-278.
- [20] 宗露丹, 徐中华, 翁其平, 等. 小应变本构模型在超深大基坑分析中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(增1): 231-242.
- ZONG Ludan, XU Zhonghua, WENG Qiping, et al. Application of small strain constitutive model in the analysis of a ultra large and deep excavation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(S1): 231-242.
- [21] 顾晓强, 陆路通, 李雄威, 等. 土体小应变刚度特性的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(3): 312-317.
- GU Xiaoqiang, LU Lutong, LI Xiongwei, et al. Experimental study of small strain stiffness properties of soil[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(3): 312-317.