

上海某基坑超深地墙变形与接缝张开分析

叶可炯

[上海城建市政工程(集团)有限公司, 上海市 200331]

摘 要:超深地下连续墙变形所导致的接缝渗漏问题是上海软土地区超深基坑施工所遇到的典型难题之一。结合上海北横通道某深基坑工程,运用 Plaxis 3D 有限元软件通过计算分析基坑开挖过程不同工况下的地下连续墙的变形规律,以及基坑开挖过程中地墙变形与地下墙接缝张开渗漏的关系。结果表明:当基坑开挖深度大于 12 m 或 20 m 两个临界点时侧向位移增长速度显著。地下连续墙的最大水平位移发生在基坑边的中点附近,向两侧逐步减小,这主要是基坑角部空间效应引起的;地下墙接缝张开渗漏的危险点并不是发生在基坑中点最大侧向变形处,而是基坑边中部与角部之间、靠角部较近的位置;即使对于较小尺寸的超深基坑,当开挖深度较大时,长边位移仍较短边位移有明显增大。结论对超深基坑开挖地墙变形与地墙渗漏控制具有指导意义。

关键词:有限元数值模拟,围护结构变形,接缝渗漏,施工预防措施

中图分类号: TU753

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)10-0154-04

0 引言

近年,随着我国城市地下空间开发的快速发展,超深基坑工程与日俱增,且临近建(构)筑物的密度越来越大,给基坑开挖的环境扰动控制带来了一系列的挑战^[1-7]。超深基坑施工的环境扰动往往与许多因素相关,其中以地下连续墙的变形与接缝渗漏的影响最为显著。

近十年来,地下连续墙的渗漏问题得到了逐步认识和重视^[8-11]。谷湘泉^[9]通过对南昌地铁一号线车站深基坑地下连续墙的渗漏水部位和渗水量值进行分析,得出以下两点主要原因:(1)混凝土在浇筑过程中受钢筋约束,墙缝位置混凝土浇筑困难易产生离析,引起地墙缝处混凝土不密实而出现缝隙,从而引发渗漏;(2)地下连续墙在接缝处的夹泥也是造成地下连续墙渗漏的主要原因之一。国内外大量学者的研究主要集中在对超深地下墙的渗漏检测方法:声呐法、电渗法、光纤测温法、CT 成像法等探索研究^[10,11],对基坑变形与渗漏的关系尚缺乏深入研究,特别是深基坑开挖工序及空间效应导致的变形不均匀性引起的地下墙接缝张开问题,尚未见文献报道。

但是,国内地铁车站渗漏很多是发生在施工开挖到一定深度并产生较大变形后^[12],证明超深基坑的渗漏不仅由围护结构的缺陷造成,基坑开挖过程

中围护结构因开挖的空间效应而产生的纵横向不均匀变形,可能会使得地墙接缝出现某种程度的错动张开,进而也造成坑内外水土连通。因此,本课题结合上海北横通道某深基坑工程,采用数值模拟方法分析基坑开挖全过程地下墙的三维变形规律,建立基坑不同槽段部位变形与其接缝张开的关系,进而判断基坑地下墙接缝渗漏的安全,从而可为深基坑设计和施工优化提供有益的补充和参考。

1 工程背景

1.1 工程概况

上海杨树浦港盾构工作井开挖深度约为 30.5 m,基坑外尺寸为 74.8 m × (24.4~34.8) m (长 × 宽),围护结构采用厚 1.2 m 的地下连续墙,长 63 m,地下连续墙之间接缝采用铰接头。内衬厚度 1.2 m,竖向设置 6 道钢筋混凝土支撑,见图 1、图 2。

工作井基坑采用顺作法施工,从上往下依次开挖、浇筑第一至第六道支撑及围檩(围檩的详细参数见表 1,基坑施工工况见表 2)。其中,盾构穿越工作井时,部分内衬墙、底板与 B1 板(下二层板)已浇筑完毕,第三至第六道支撑已拆除,第一道与第二道支撑保留,阻碍盾构过井的格构柱已割除。盾构过井完成后,由下向上依次浇筑中隔墙、梁柱、B2~B4 板等内部结构。待结构达到设计强度之后,拆除第二道支撑,浇筑顶板。待顶板满足强度要求后,拆除第一道支撑。上述结构达到强度后,凿除剩余格构柱,补浇筑孔洞,回填覆土,恢复交通。

收稿日期: 2022-03-26

作者简介: 叶可炯(1974—),男,本科,高级工程师,从事市政及地下工程技术与管理工作。

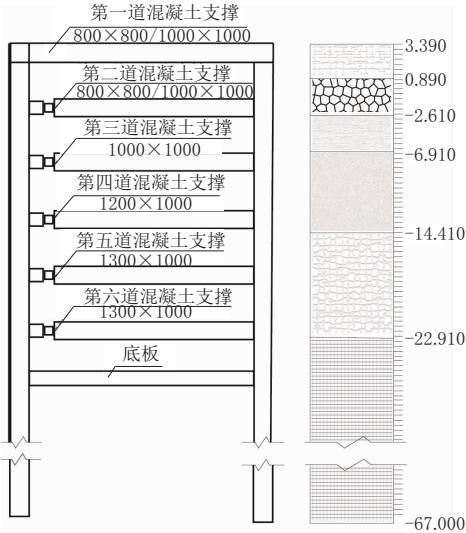


图 1 基坑支护剖面图(单位:mm)

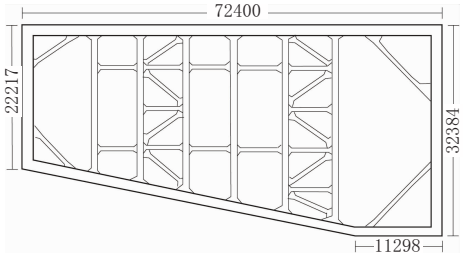


图 2 基坑支撑结构平面示意图(单位:mm)

表 1 工作井基坑混凝土支撑截面

支撑道数	埋深/m	支撑截面/m	围檩截面/m
第 1 道	0.5	0.8×0.8	1.0×1.2
第 2 道	5.7	1.0×0.8	1.0×1.4
第 2 道	11	1.0×1.0	1.0×1.4
第 4 道	16.1	1.2×1.0	1.0×1.7
第 5 道	21.1	1.3×1.0	1.0×1.8
第 6 道	25.65	1.3×1.0	1.0×1.8

表 2 施工工序

工序	挖土深度/m	支撑位置/m	拆撑位置/m
1	0.7	-0.4	—
2	6	-5.7	—
3	11.3	-11	—
4	16.4	-16.1	—
5	21.4	-21.1	—
6	26	-25.7	—
7	30.53	-29.23	-25.7

1.2 周边环境与地质条件

基坑周边环境见图 3, 基坑南北侧为翻交后保持通行的周家嘴路, 基坑北侧有杨浦区中小企业园区(1~5 层砖混结构距离基坑约 9.73 m)、中化道达尔站(距离基坑约 46 m); 基坑西侧有杨树浦港及其桥梁(距离基坑约 64.14 m); 基坑南侧有正在拆迁二钢厂。需要保护的敏感建构筑物较多, 基坑安全等级及

环境保护等级均按一级考虑, 围护结构的变形与渗漏应得到严格的控制。

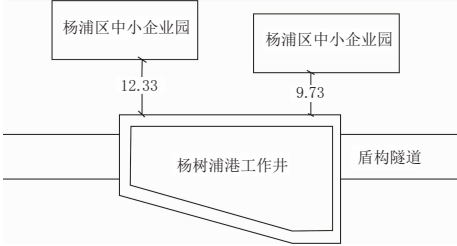


图 3 基坑周围环境图

地层分布见图 1, 自上而下为①₁ 填土、②₁ 褐黄~灰黄色粉质黏土、③₁ 黏质粉土夹淤泥质粉质黏土、③₂ 淤泥质粉质黏土、④₁ 淤泥质黏土、⑤₁ 黏土、⑤₃₋₁ 粉质黏土、⑤₃₋₁ 灰色黏质粉土夹粉质黏土、⑧₁ 粉质黏土、⑧₂₋₁ 粉砂夹粉质黏土、⑧₂ 粉质黏土与粉砂互层、⑨₁ 灰色粉砂。⑨₂ 灰色粉砂。基坑坑底位于⑤₃₋₁ 粉质黏土。

工程场地浅部地下水属潜水类型, 常年平均地下水位埋深为 0.5~0.7 m。据地质勘察资料, ⑤₃₋₁ 层为微承压水层, ⑧₂ 层、⑧₂₋₁ 层、⑨₁ 层为承压水含水层并呈连通状态。据上海地区工程经验, ⑤₃₋₁ 微承压水层水位埋深在 3~11 m, ⑧₂、⑨₁ 层承压含水层水位埋深在 3~12 m。

2 数值计算模型

2.1 土体本构模型及参数

为了模拟基坑开挖过程中土体存在的小应变阶段的非线性、应力相关等特性, 采用土体小应变硬化模型(HHS)。土体的实际参数取值参考顾晓强^[12]等研究, 具体参数见表 3。

表 3 土体材料参数及取值

土层名称	厚度/m	模量幂指数	割线模量/(kN·m ⁻²)	切线模量/(kN·m ⁻²)	加卸载模量/(kN·m ⁻²)	剪胀角/(°)
填土	3.4	0.5	6 000	6 000	31 300	0
粉质黏土	0.7	0.5	6 000	6 000	18 000	0
淤泥质黏土	13.7	0.5	5 200	5 200	15 600	0
黏土	23.7	0.5	8 250	8 250	24 750	0
黏质粉土	7.6	0.5	32 250	32 250	96 750	0
粉质黏土	8.6	0.5	8 250	8 250	24 750	0
粉砂	2.6	0.5	95 870	95 870	287 600	0
粉质黏土	6.5	0.5	32 250	32 250	96 750	0
粉砂	6.8	0.5	160 000	160 000	480 000	2.9

2.2 三维数值模型的建立

模型平面尺寸按地下连续墙深度的 3 倍取值为

200 m×200 m。考虑地下连续墙接缝对三维空间计算收敛及效率的影响,本模型将对地下连续墙进行以下简化:

(1)将地下连续墙视为连续的整体,建模时忽略接缝的影响;

(2)考虑到转角混凝土腋角的存在,认为转角处为刚性。

计算模型见图4。

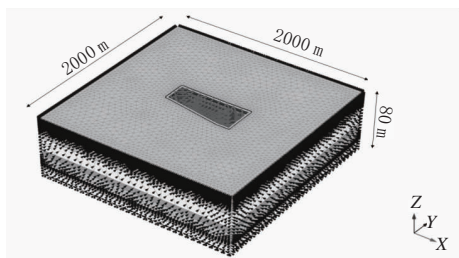


图4 深基坑三维计算模型

3 地下连续墙侧向变形分析

3.1 地下连续墙侧向位移的竖向变化规律

地下连续墙的侧向位移变形云图见图5。可以发现,侧向位移最大发生在开挖面附近(-35.84 m)处,在第五~第六层支撑之间也较大。进一步作出地下连续墙侧移的竖向分布见图6,可见随着开挖深度不断增加,地下连续墙的侧向位移逐渐增大,同时最大侧向位移点逐渐下移始终保持在开挖面附近。最终在基坑开挖到底时,坑底附近变形为最大。

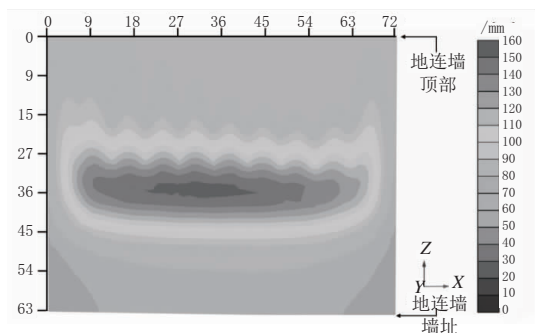


图5 地墙侧向变形云图

3.2 基坑长短边最大侧向位移的变化规律

基坑地连墙的长短边在埋深36 m处(由图5可知为最大侧向变形位置附近)的最终水平位移分布见图7,在土体卸荷的作用下,地连墙的长短边均向基坑内部发生形变,且均在拐角处变形较小,在地连墙中部变形较大,变形呈近似抛物线分布,基坑边长越长变形越大,这与空间效应吻合。

4 地下连续墙接缝变形与渗漏风险分析

通过图7地下连续墙的变形可以看出,沿墙体

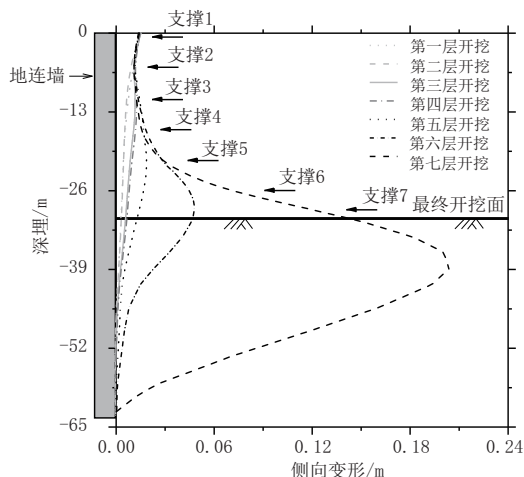


图6 地下连续墙侧向变形分布随土体开挖变化

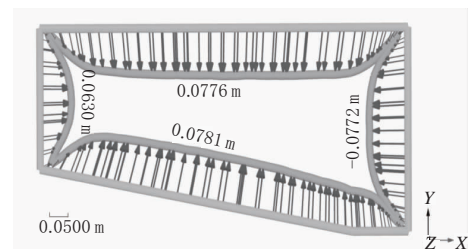


图7 地下连续墙变形水平分布 (z=-36 m)

法向的变形是由基坑外侧指向基坑内侧且位移较大,是最主要的变形。

对本工程基坑北侧17幅地下墙(见图2),从左到右将其编号为1-17,分别对其开挖面(深度30 m)处侧向变形曲线进行线性拟合,然后根据直线段斜率来求得每幅地下墙的转角(见图8及式(1))。为考虑基坑角部空间效应及地墙转角槽段刚性影响,对转角槽段拟合时将直线段截距取为0。可得地下连续墙段间相对转角见表4。

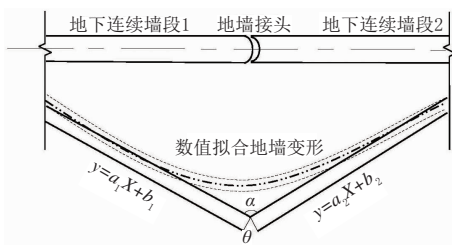


图8 相对转角计算示意图

$$\theta = 180 - \alpha = 180 - [\arctan(a_1) \arctan(a_2)] \quad (1)$$

式中: θ 为地墙接缝相对转角; a_1 、 a_2 分别为相邻两段地墙的变形斜率。

为了更直观表示转角随位置的变化关系,变化趋势制见图8。可以看出地下连续墙在基坑边两端部的2-3幅地墙相对转角明显大于中间部位转角,且越靠近端部增加较快。最大转角分别发生在基坑北侧左右两端邻近转角槽段的地下墙接缝。应该指出

表 4 地下连续墙段之间相对转角									单位:(°)
地下连续墙编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
斜率(10^{-3})	-0.5	-11.2	-2.7	-3.1	0.03	-4.6	2.1	-3.7	-0.6
相对转角 l (°)	0.613	0.487	0.023	0.179	0.265	0.384	0.332	0.178	
地下连续墙编号	9	10	11	12	13	14	15	16	17
斜率(10^{-3})	-0.6	1.5	-2.1	2.6	1.5	-2.3	6	17.3	3
相对转角 l (°)	0.12	0.206	0.269	0.063	0.218	0.476	0.647	0.819	

的是,本文中由于将基坑边转角槽段考虑为刚性,可能导致转角处相邻槽段相对转角偏大。如果转角处槽段发生一定转动,则使得该处邻近槽段相对转角减小。但是,基坑邻近角部的相对转角大于中部的总体趋势不变。

根据地墙厚度为 1.2 m,采用式(2)计算得出每段地墙接缝间的最大宽度见表 5。接缝张开最大为 17.15 mm,张开较大,存在渗漏风险。地墙中间的接缝均存在不同程度的变形,为了更直观体现接缝的变化情况,作图如图 9 所示。地下连续墙接缝张开宽度分布见图 10。

表 5 地下连续墙段之间接缝张开宽度									
地下连续墙编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
相对转角 $\beta(^{\circ})$	12.84	1020	0.48	3.75	5.55	8.04	6.95	3.73	
地下连续墙编号	9	10	11	12	13	14	15	16	17
相对转角 $\beta(^{\circ})$	2.51	4.31	5.63	1.32	4.57	9.97	13.55	17.15	

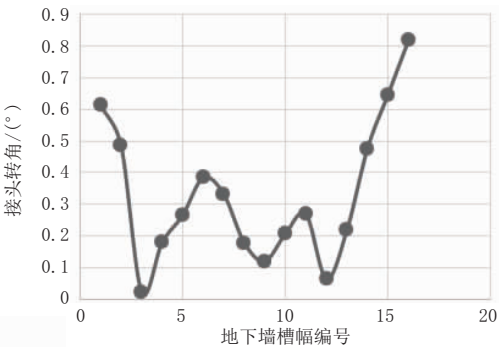


图 9 地下连续墙接头转角分布(单位:°)

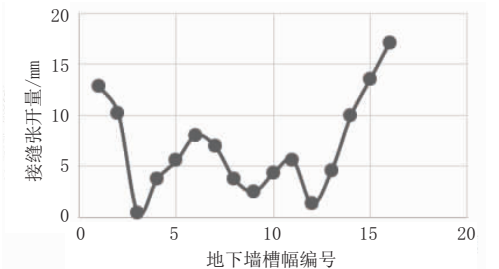


图 10 地下连续墙接缝张开宽度分布(单位:mm)

因此,对长边基坑的深部进行局部地基加固或支撑加强控制基坑变形是有效防止基坑因围护墙体变形造成渗漏的有效手段。

5 结 论

采用三维数值模拟手段对上海某深基坑超深地

$l = d \cdot \theta$ (2)
式中: d 为地墙厚度; l 为接缝张开宽度; θ 为接缝转角。

根据以上对地下连续墙接缝变形分析,可以得出以下结论:

- (1)在垂直方向,渗漏多发生在基坑开挖面附近,及围护结构侧向位移最大处;
- (2)靠近基坑转角的地下连续墙接缝相对变形较大,易出现渗漏;
- (3)在基坑边中部,墙体的相对转角较小,但总位移较大,也是薄弱点。

下连续墙的变形进行了分析,得出以下结论:

- (1)地下连续墙的最大侧向位移及位置随开挖深度增大而下移。当基坑开挖深度大于 12 m 及 20 m 两个临界点时侧向位移增长速度显著。平面上来看,地下连续墙的最大水平位移发生在基坑单边的中点附近,向两侧逐步减小,这主要是基坑角部空间刚度大于侧边的效应引起的。
- (2)与侧向变形分布规律不同,基坑的接缝转角与张开大小则是由基坑边中点向两端逐渐增大,这说明地下墙接缝张开渗漏的危险点并不是发生在基坑中点最大侧向变形处,而是基坑边中部与角部之间、靠角部较近的位置。
- (3)通过对基坑长短边的墙体位移分析,当开挖深度较大时,长边位移较短边位移明显增大,因此对长边基坑的深部进行局部地基加固或支撑加强是控制基坑变形的重要手段。

参考文献:
[1] 李炜明,姚成毅,任虹,等.地铁车站异形狭长基坑地连墙变形分类及规律研究[J].中国铁道科学,2019,40(4):17-26.
[2] 李常茂,祝和意.软土深基坑的空间变形特性分析及危险性评估[J].中国安全生产科学技术,2021,17(1):116-121.

表明:(1)与其他类型相比,梯形弹性垫片遇水时的防水性能更好;(2)交错装配时,弹性垫片贴合接头的开口比正常装配减少 1~2 mm;(3)若遇水膨胀橡胶在组装前已膨胀,需在橡胶垫面涂一层缓膨胀剂,以防止对混凝土的损伤。

成都地铁一线采用挤压接头橡胶垫块(EPDM 非膨胀橡胶)进行防水施工。防水性能试验包括测量防水橡胶垫块力学性能的压缩试验和为验证防水结构合理性而设计的水密性试验。测试结果表明:当压缩量较小时,实验压力值小于计算值。在压缩后期,橡胶垫块被压实,其压力明显增大;当开口为 6 mm,交错缝为 0 mm 或 10 mm 时,接缝耐水压力达到 0.6 MPa。

3 影响管廊防水的其他因素

(1)软基处理的质量。预制装配式综合管廊所处的工程地质条件的好坏,影响管廊施工期以及运营期不均匀沉降大小,其不均匀沉降带来的构件平整误差,造成构件以及接头的变形,从而影响管廊的防水性能。

(2)管廊装配施工的垫层平整度。良好的垫层平整度对于管廊的防水性能起到至关重要的影响,通常做法是于垫层铺设 10 mm 厚度的细砂,从而有效降低预制构件之间的摩擦力。

(3)承插口尺寸的精确度。在预制管廊构件的就位对接中,构件的接头效果允许的误差在(+2~-1 mm),模具插口允许偏差(+1~-2 mm)。过大的接头误差会降低防水性能的发挥效果。

4 结 语

本文对预制装配式综合管廊的接头防水结构、防

水材料及防水技术进行了总结,并提出了相关建议,为今后预制装配式综合管廊接头防水性能的研究和设计提供参考。此外,装配式综合管廊接缝防水技术的发展趋势包括以下几点:(1)提倡多尺寸、分段、拼装;(2)选择合适的接头形式;(3)开发高性能防水材料;(4)选择合理的计算方法;(5)发展方便可靠的施工技术。

参考文献:

- [1] 白帆,张世浪.各型式预制综合管廊的特点与关注问题探讨[J].南方能源建设,2017,4(2):81-85.
- [2] 张国荣.不同压缩比下橡胶老化松弛机理的研究[D].北京:北京化工大学,2011.
- [3] 王恒,钱坤,柯玉超,方炳虎,李方山,章于川,钱家盛,夏茹.天然橡胶/三元乙丙橡胶合金弹性体的共硫化及耐热氧化性能[J].合成橡胶工业,2021,44(4):294-299.
- [4] 宋兆哲.静密封过程中垫片的密封机理及失效分析[D].昆明:昆明理工大学,2011.
- [5] 王昊,危银涛,王静.橡胶材料疲劳寿命影响因素及研究方法综述[J].橡胶工业,2020,67(10):723-735.
- [6] 吴长河,冯晓伟,叶培,符志,刘占芳.应变率对硫化橡胶压缩力学性能的影响[J].功能材料,2013,44,323(8):1098-1101.
- [7] 崔小明.三元乙丙橡胶并用改性的研究进展[J].橡胶科技,2018,16,284(8):5-10.
- [8] 朱祖熹.盾构隧道管片接缝密封垫防水技术的现状与今后的课题[J].隧道建设,2016,36,195(10):1171-1176.
- [9] 肖明清,谢宏明,王士民,钟元元.盾构隧道管片接缝防水体系演化历程与展望[J].隧道建设(中英文),2021,41,256(11):1891-1902.
- [10] SZ102.湖南省标准,湖南工程建设标准设计图集[S].2015.
- [11] 严林.预制拼装综合管廊发展现状及接头防水密封性能的探讨[J].混凝土与水泥制品,2017(1):31-34.
- [12] 胡翔,薛伟辰,王恒栋.上海世博园区预制预应力综合管廊接头防水性能试验研究[J].特种结构,2009,26,104(1):109-113.
- [13] 赵雅婷.高性能盾构管片用遇水膨胀橡胶密封垫性能研究[J].中国橡胶,2020,36,827(11):49-51.5.5

(上接第 157 页)

- [3] Tanner B J,Finno R J.Three-dimensional responses observed in an internally braced excavation in soft clay[J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2007,133(11):1364-137.
- [4] Iyengar M.Analysis of a Diaphragm Wall Panel After Leakage During Deep Excavation, in: Lecture Notes in Civil Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering[M].2019.
- [5] 徐中华.上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形性状研究[D].上海:上海交通大学,2007.
- [6] 刘涛.基于数据挖掘的基坑工程安全评估与变形预测研究[D].上海:同济大学,2007.
- [7] 刘国彬,黄院雄,侯学渊.基坑工程下已运行地铁区间隧道上抬变形的控制研究与实践[J].岩石力学与工程学报,2001(2):202-207.

- [8] 金成武.考虑渗流影响的基坑开挖数值模拟[D].武汉:华中科技大学,2007.
- [9] 谷湘泉.地铁车站深基坑地下连续墙接缝渗漏原因分析及防治[J].江西建材,2014(18):144-145.
- [10] 周游,王益楠,史剑.基于声呐渗流检测的地下连续墙渗漏处置措施研究[J].现代隧道技术,2020,57(S1):1288-1292.
- [11] 郝利伟,彭显晓.电渗法在地下连续墙渗漏检测中的应用[J].中国科技信息,2014(12):40-42.
- [12] 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.