

基于侧向位移特性的长大基坑空间效应分析

金鑫¹, 蓝军剑¹, 孔紫雯¹, 廖红雨^{2,3}, 孙苗苗^{2,3}, 吴熙^{2,3}

(1. 杭州交通投资建设管理集团有限公司, 浙江 杭州 310000; 2. 浙大城市学院, 浙江 杭州 310015;

3. 城市基础设施智能化浙江省工程研究中心, 浙江 杭州 310015)

摘要:以砂土地区的长大基坑工程为研究对象, 结合现场实测数据, 分析基坑开挖导致的围护结构侧向位移和土体侧向位移的变形特征。基于侧向位移变形指标的整体发展规律, 提出考虑空间效应的长大基坑整体变形模式。研究表明, 分区分段开挖的长大基坑变形规律有别于整体开挖基坑的变形规律, 坑角位移明显小于基坑中部位移, 开挖最早完工的中部对边侧的基坑变形具有限制作用; 墙体侧向位移与土体侧向位移沿基坑长边表现的空间分布变形趋势具有一致性, 从而可以依据墙体侧向位移预测土体侧向位移。通过分析变形的激增区和累积最大变形的发生区域等, 可以确定基坑危险工况, 提出加强基坑的措施。研究结论对于优化基坑工程设计、保障施工安全有重要意义。

关键词: 长大基坑; 空间效应; 围护结构侧移; 变形特性

中图分类号: TU441

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)11-0180-08

0 引言

基坑是一个三维的空间结构, 由于基坑本身的几何尺寸和开挖卸荷顺序的设置, 将导致其施工时应力应变产生较大的变化^[1]。有研究表明, 当基坑长宽比为 1 到 3 之间时, 随着长宽比的增大, 基坑长边会因土体分步分区开挖卸荷的作用, 导致其空间结构产生变形, 这种由于空间结构引起的变形情况就叫做空间效应^[2]。

目前国内外采用不同的变形指标对长大基坑的空间效应特性开展了大量研究。俞强^[3]系统分析了不同施工阶段的基坑变形特性, 利用实测数据表明了地铁隧道的位移曲线与基坑周围土层、围护结构的位移曲线发展趋势具有良好的一致性, 均表现出显著的空间效应。赵文等^[4]通过研究某砂土深基坑的桩顶水平位移、桩体水平位移及变形, 发现围护桩桩顶水平位移结构时间效应并不显著, 但空间效应特征明显。奚家米等^[5,6]重点分析了基坑地表沉降、基坑外潜水水位、砼支撑轴力及围护桩深层水平位移在不同时空条件下的表现形式与内在联系, 发现基坑的空间效应影响程度沿远离坑角方向衰减, 且

基坑长深比越大, 空间效应表现得越明显。楼春晖等人^[7]则研究了围护结构侧向变形和地表沉降值的实测值, 给出了空间效应对这两个指标的影响范围。俞晓和宋雷^[8]通过数值模拟, 利用围护结构水平位移和探讨了长大深基坑开挖过程中围护桩的受力与变形情况及其空间分布规律, 发现内支撑对基坑空间效应存在抑制作用。实际上, 众多的文献^[9-13]已经结合开挖后土体位移、围护结构位移与基坑范围存在的对应关系, 证实了在基坑设计和施工时应充分重视基坑的空间效应。

值得注意的是, 上述文献中对基坑开挖空间效应的变形指标不尽相同, 然而采用基坑围护结构侧向位移和土体侧向位移作为空间效应的变形指标研究还有待深入。如何采用有效且合理的指标确定、预测和控制长大基坑在开挖期间的空间效应影响因素, 对保障长大基坑工程的正常施工具有重要的意义。

本项目以砂土地区的长大基坑工程为研究对象, 重点基于侧向位移特性来分析长大隧道基坑空间效应, 考察长大基坑变形的发展趋势, 为复杂地层条件下基坑安全建设的统筹规划、基坑工程优化设计、保障基坑施工安全提供理论基础。

1 工程概况

本工程位于杭州某经济技术开发区 12 号路, 该路段为杭州市东西向交通要道, 车流量大, 交通繁忙, 地下各类管线众多, 错综复杂, 且一般为主干管, 对勘

收稿日期: 2023-01-11

基金项目: 浙江省交通运输厅科技项目(2022-GCKY-11); 浙江省自然科学基金项目(LTGG23E080002)

作者简介: 金鑫(1992—), 男, 学士, 工程师, 从事隧道施工技术研究工作。

察、设计、施工影响较大。项目道路全长约 7.47 km。以其中一段长大基坑作为工程案例进行研究分析,起止桩号为 K0+700 至 K1+075,全长 375 m,宽 29.9 m,开挖深度达到 12.556~15.878 m,采用围护形式为 800 mm 连续墙+四(三)道内支撑,属于一级基坑等级,见图 1。

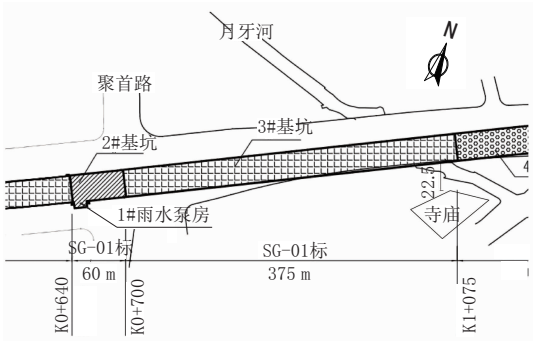


图 1 基坑平面及周边环境示意图

根据场地岩土工程勘察报告,该工程地形地貌简单,自然地面平坦,地面标高在 5.80~7.00 m,属冲海积平原地貌单位。该基坑为砂性土地区,表 1 为基坑土层物理力学参数,在基坑开挖范围内,土层主要为土质松散杂填土,含少量砾碎石、稍密的砂质粉土、中密的粉砂,含云母碎石。考虑地质条件和周边环境,基坑工程采用 800 mm 厚地下连续墙加内支撑的围护体系,第一道支撑采用钢筋混凝土,其余为钢支撑,图 2 为基坑围护结构的典型横断面示意图。

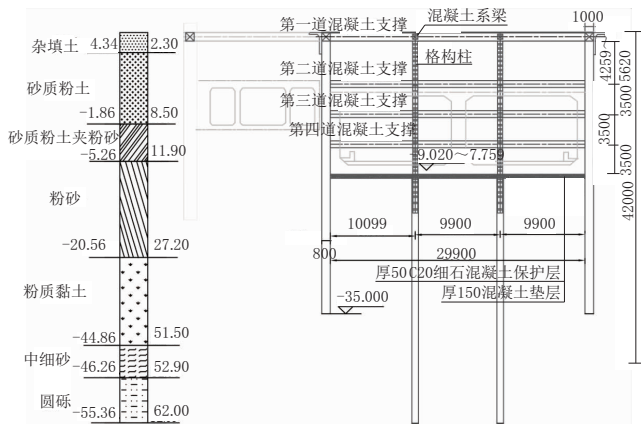


图 2 基坑围护结构的典型横断面示意图(单位:mm)

2 监测数据分析

2.1 施工监测与工况

2.2.1 施工监测

基坑围护监测方案重点包括墙体侧向位移以及坑外土体水平位移监测,对该基坑设置如图 3 所示的监测点。

在地下连续墙内每隔 20~25 m 布设一个测斜管,编号 ZQT16~ZQT41,同样沿基坑周边等间距布设土体测斜监测点,编号 TST16~TST41,为了方便对比分析,每个土体测斜孔均与墙体测斜孔对应。

2.2.1 施工监测

结合现场施工开挖状况,基坑开挖分为 A、B、C

表 1 基坑土层物理力学参数

岩土编号	岩土名称	天然重度 γ /(kN·m ⁻³)	孔隙比 e	凝聚力 c/kPa	内摩擦角 φ /(°)	地基承载力特征值 /kPa	渗透系数 /(cm·s ⁻¹)
① ₁	杂填土	18.4	0.834	(4)	(12)	—	8.00E-04
② ₂	砂质粉土	19.0	0.746	3	23	110	7.00E-04
② ₃	砂质粉土夹粉砂	19.2	0.729	4	25	130	1.00E-03
② ₄	粉砂	19.3	0.698	3	28	160	3.00E-03

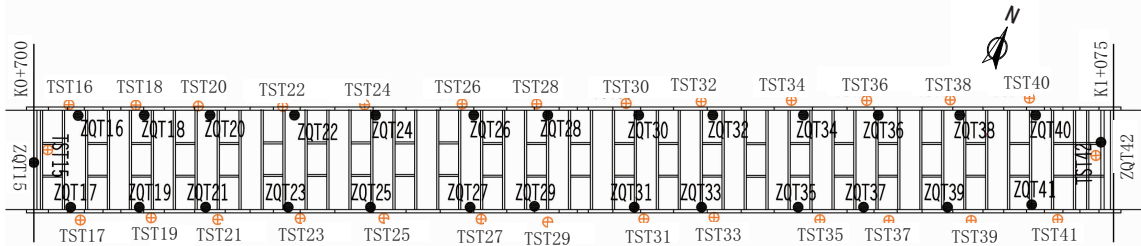


图 3 基坑平面监测点布置图

三个区域,依次进行开挖,在每个区域内分若干区段,见图 4。

基坑于 2020 年 8 月在 K0+800~K0+940 (A 区域)开始开挖,A 区域基坑分 A1、A2、A3 以及 A4 四个分块。同理 B 区域(K0+940~K1+075)设置为 B1、

B2 以及 B3 三个分块,C 区域 (K0+700~K0+800)设置 C1、C2 以及 C3 三个分块。基坑施工顺序为:A 区域基坑(A1→A4)→B 区域基坑(B1→B3)→C 区域基坑(C1→C3)。每个分块按 a~j 从上至下的顺序开挖土体,具体施工步骤见表 2。

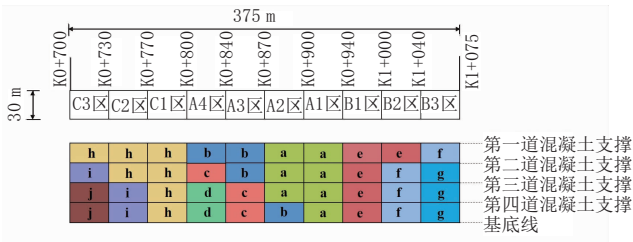


图4 基坑施工工序

表2 基坑施工工况

区域	日期	主要工况	基坑深度/m
A 区域	2020/8/18	工况 1: 开挖 a 地块土体; A1 区开挖到底, A2 开挖至第四道钢支撑下 500 mm	15.385
	2020/8/24	工况 2: 开挖 b 地块土体; A2 开挖到底, A3 开挖至第三道钢支撑下 500 mm	15.152
	2020/9/5	工况 3: 开挖 c 地块土体; A3 开挖到底, A4 开挖至第三道钢支撑下 500 mm	15.045
	2020/9/23	工况 4: 开挖 d 地块土体; A4 开挖到底	14.925
	9/23-11/11	A 区域结构主体施工至封顶	—
B 区域	2020/11/22	工况 5: 开挖 e 地块土体; B1 开挖到底, B2 开挖至第二道钢支撑下 500 mm	15.493
	2020/12/1	工况 6: 开挖 f 地块土体; B2 开挖到底, B3 开挖至第三道钢支撑下 500 mm	15.725
	2020/12/12	工况 7: 开挖 g 地块土体; B3 开挖到底	15.830
	12/12-4/1	B 区域结构主体施工至封顶	—
C 区域	2021/4/18	工况 8: 开挖 h 地块土体; C1 开挖到底, C2 开挖至第三道钢支撑下 500 mm	14.759
	2021/4/27	工况 9: 开挖 i 地块土体; C2 开挖到底, C3 开挖至第二道钢支撑下 500 mm	14.047
	2021/5/21	工况 10: 开挖 j 地块土体; C3 开挖到底	12.568
	5/12-7/5	C 区域结构主体施工至封顶	—

2.2 墙体侧移变形分析

根据基坑开挖步骤设置 10 个工况,分析各工况在不同深度、不同位置的墙体侧移累计值变化。

图 5 为各工况墙体侧移变形曲线图,从图中可以看出,墙体侧移曲线的变化与开挖工序的进行有关,基坑先开挖 A 区域,B、C 区域分别在 A、B 区域地下结构封顶后开挖,可以看出基坑变形随着开挖分区域发展。具体表现为:

由图 5 基坑一侧的曲线变化可见,开挖 A 区域期间,随着开挖工序的进行,最大侧移累计值位于工况 1、2 的 30、32 测点,分别为 14.08 mm、14.56 mm,

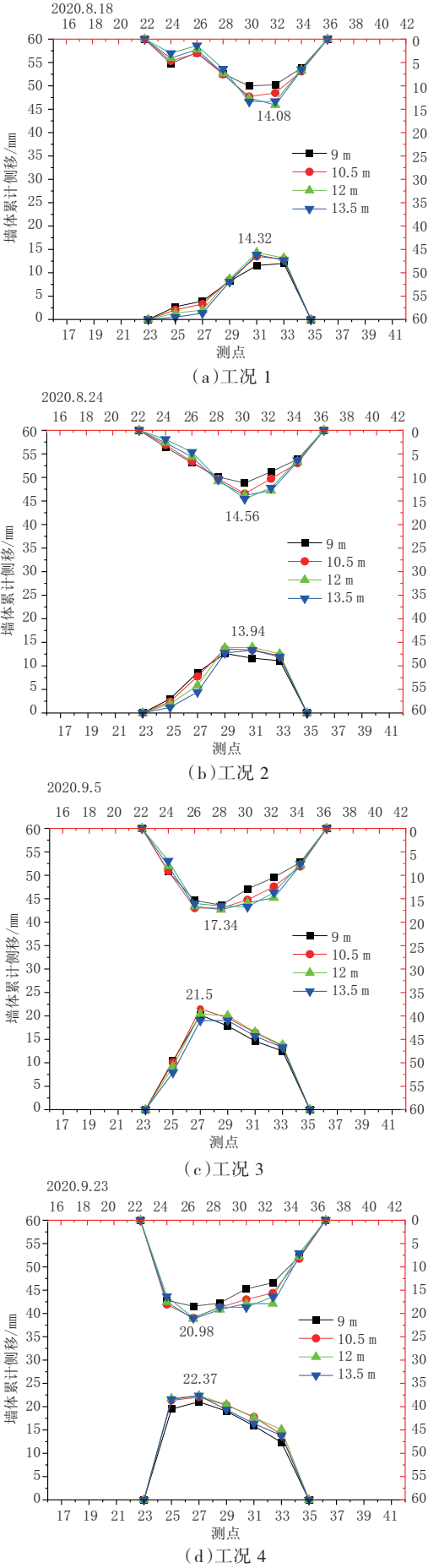


图5 墙体侧移累积位移曲线图

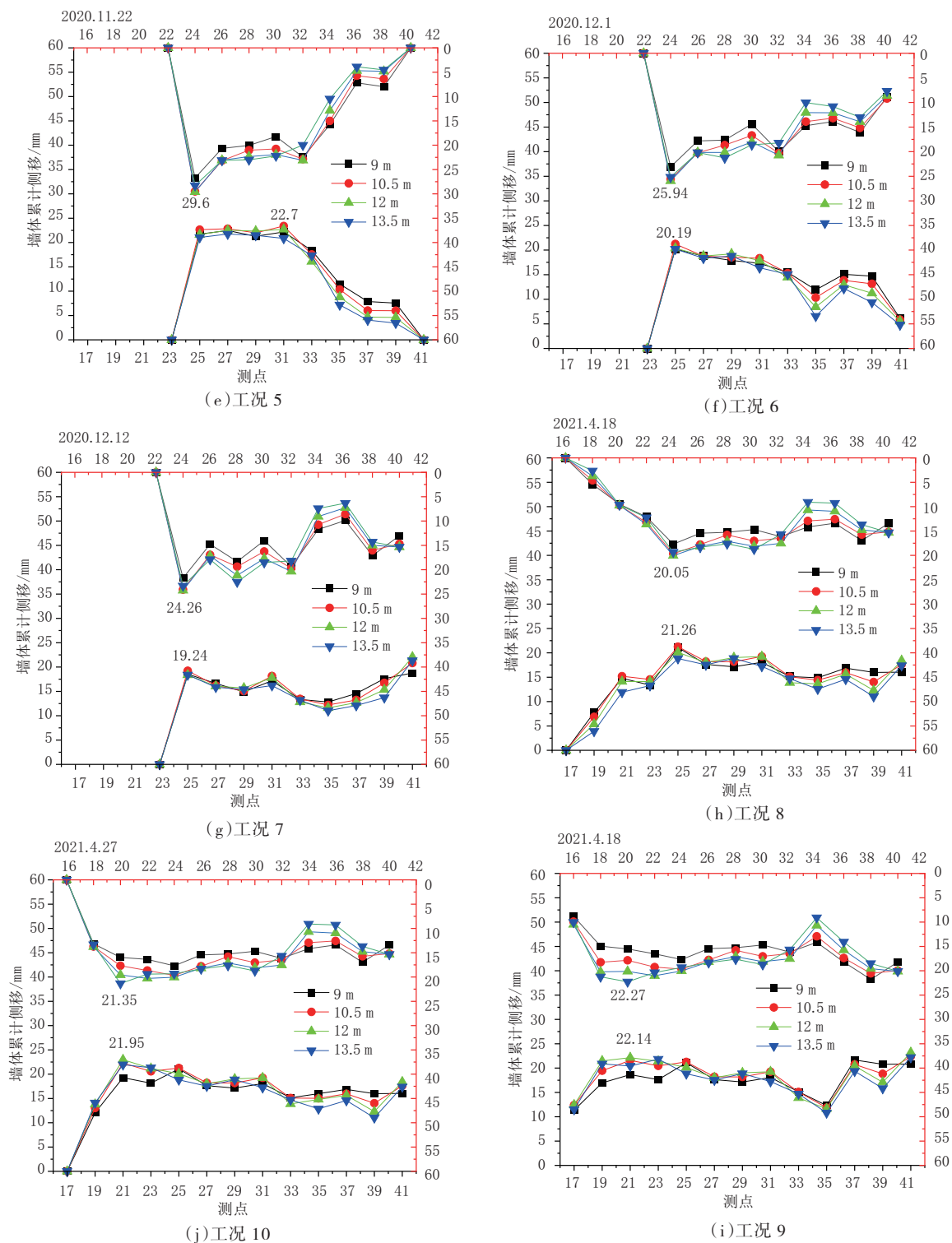


图 5 墙体侧移累积位移曲线图

工况 3、4 的 28、26 测点,分别为 17.34 mm、20.98 mm,同时随着开挖工序的进行,各测点的累计值逐渐增大。开挖 B、C 区域期间,A 区域数值变化不大,说明分段开挖和支撑架设能够有效减小对已开挖区域的位移变形。随着开挖的进行,墙体侧移累计值的变化范围不断向基坑中部扩大,区别于普通基坑分层开挖表现的总体均匀变化趋势,表明基坑分段分区开

挖存在空间效应影响。随着 A 区域主体结构建设完成,B 区域开始开挖,由图 5 工况 5~7 可见,B 区域内 36~40 测点墙体侧移值随着开挖工序进行逐渐增大,且 B 区域范围内最大值位于 38 测点,但整体基坑墙体最大侧移始终位于 24 测点,最大变形为 29.6 mm。同理,由工况 8~10 可见,C 区域开始开挖,16~22 测点墙体侧移值

随着开挖进行逐渐增大,最大侧移值位于 20 测点,最大变形为 22.27 mm。表明基坑在不同位置对墙体的限制效应不一致,基坑坑角处对侧移值限制最大,说明长大基坑存在明显的坑角效应。

由此可知,受开挖方式的影响,墙体侧移沿基坑长边具有一定的空间分布规律,主要体现在坑角效应上,即墙体侧移的最小值出现在基坑端部,并随着侧点向基坑中部的移动而不断增大。由于这种效应的作用,使得基坑短边中部侧移值总是比长边中部侧移值小。

由工况 8 至工况 10 可以发现,位于基坑中部的 A 区域变形值基本处于稳定状态,侧移值大约为 15.56 mm 至 20.36 mm。基坑开挖完成后,最大变形区域位于 B、C 区域,最大累计值分别为 21.77 mm、22.27 mm,大于 A 区域侧移值。考虑到长大基坑具有明显的空间效应,如果采取从一端开挖至另一端的施工方案,基坑中部会产生较大的水平位移。本项目采取从基坑中部分区分段开挖的施工方案,原因在于,中部基坑主体结构建设完成后,对于中部基坑的侧移发展有一定的限制作用,可以达到减小基坑中部的侧移的目的,从而保障基坑的安全性。

由表 3 数据可知,基坑墙体最大侧移基本介于 0.10%He 和 0.19%He 之间,其中 He 为基坑开挖深度。与 Wang^[23]得出的结论(0.10%He~1.00%He)要小得多,造成这种差别原因一方面由于 Wang^[23]所统计的 300 多各深基坑使用不同的支护方式,导致结果离散性较大;另一方面可能存在最大侧移发生深度位于含水量少、压缩性低的砂质粉土土层,受土质条件约束导致墙体侧移值与开挖深度的比值较小;最主要是由于本项目对长大基坑分区分段进行开挖,顺应了基坑的空间效应发展,一定程度上减小了围护结构的变形。

为分析深度对墙体侧向位移分布的影响,选取 3 个典型工况,增加 6 m、16 m 的深度绘制墙体侧移变形曲线见图 6。在 6m 至 12 m 深度范围内,墙体侧向累计值随着深度增加而增加。工况 1、5、8 最大增量分别为 9.80 mm、12.37 mm、10.58 mm。在 12 m 至 16 m 深度,累计值随着深度的增加却在减小。工况 1、5、8 最大减小值分别为 3.38 mm、8.24 mm、5.24 mm。

可见,墙体的侧向侧移在横向上具有一定的空间分布规律,且不受开挖方式的影响,在数值上,随着深度的增加而增加,超过 12 m 深度时会随着开挖深度增加而减小。主要由于在 12 m 位置处,墙体受

表 3 监测最大累积值及发生深度

工况	墙体侧移最大 累计值 /mm	最大墙体 侧移深度 /m	土体侧移最大 累计值 /mm	最大土体 侧移深度 /m
工况 1	14.08	13.5	12.73	11.5
工况 2	14.56	13.5	13.88	11.5
工况 3	16.75	13.5	16.77	11.0
工况 4	18.75	13.0	20.70	10.5
工况 5	29.60	12.0	22.20	12.0
工况 6	25.94	12.0	22.32	12.0
工况 7	24.30	12.0	21.58	12.0
工况 8	20.09	12.0	20.50	12.0
工况 9	20.10	12.0	24.70	12.0
工况 10	21.88	13.0	25.30	12.0

到上方较大的土体自重,自身抵抗变形的能力也在不断增加,因此基坑墙体侧移随着深度的增加,围护墙体更为稳定,自身产生水平位移受到约束。因此,在开挖至 12~13.5 m 范围内存在墙体侧移累计值较大的情况,需要采取合理的监测以及有效减小基坑侧移变形的施工措施。

2.3 土体侧移变形分析

图 7 为根据土体侧移监测数据,绘制的土体侧移累计值变形曲线。各工况最大侧移累计值及其发生深度见表 3。

由图 5 变化曲线可以可看出,开挖 A 区域期间,最大侧移累计值位于工况 1、2 的 30、32 测点,分别为 12.52 mm、13.68 mm,工况 3、4 的 26 测点,分别为 15.96 mm、20.28 mm,同时随着开挖工序的进行,各测点的累计值逐渐增大。开挖 B 区域期间,最大累计值位于 24 测点,开挖 C 区域期间,位于 20 测点。可以看出土体侧移与墙体侧移受基坑空间效应的影响有相同的变化规律,均随着开挖的进行,影响范围不断向中部扩大。也可以看出,基坑开挖过程中,基坑侧移变化曲线分布形状表现为,已施工范围变化小,施工范围变化大,未施工范围几乎不变,体现了开挖卸载的空间效应,即受开挖施工影响最大的为开挖面附近的局部区域。

分析土体侧移曲线工况 1 至工况 4 可以发现,A 区域开挖期间,24 测点与 34 测点皆小于中部测点累计值,表现出两端小,中间大的变化规律,这与墙体侧移的变形规律基本符合,均表现出显著的基坑空间效应。基坑开挖深度的增加使得基坑具有明显的空间效应,且土体与墙体侧移沿基坑长边表现的空间分布规律在总体上是一致的。原因在于,在土体开

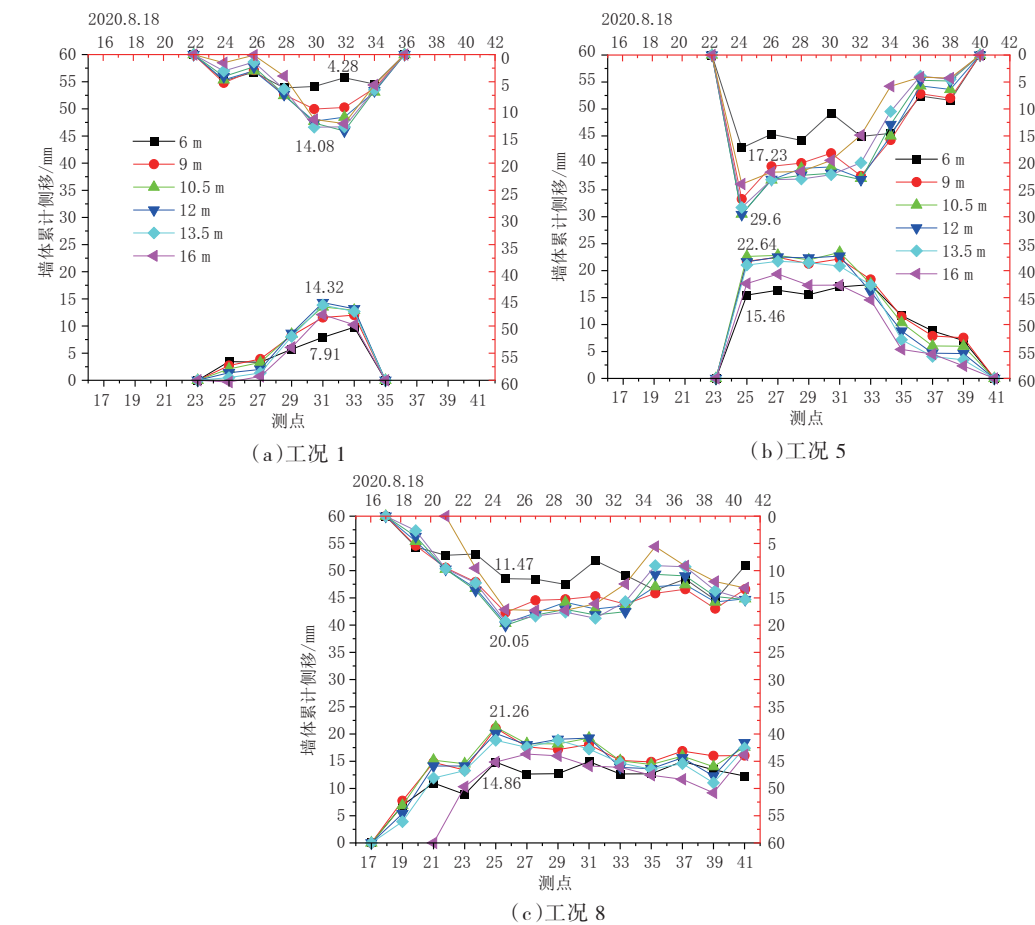


图 6 增加 6 m、16 m 深度墙体侧移累计值变形曲线

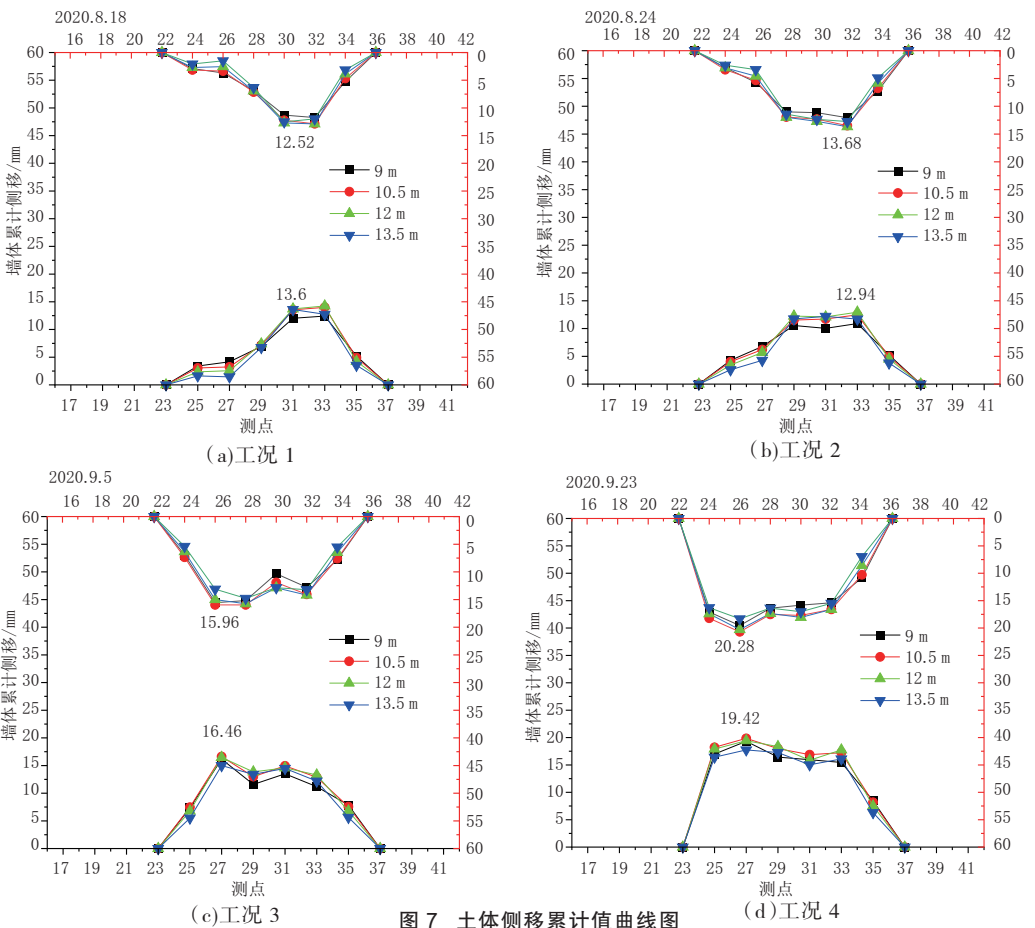


图 7 土体侧移累计值曲线图

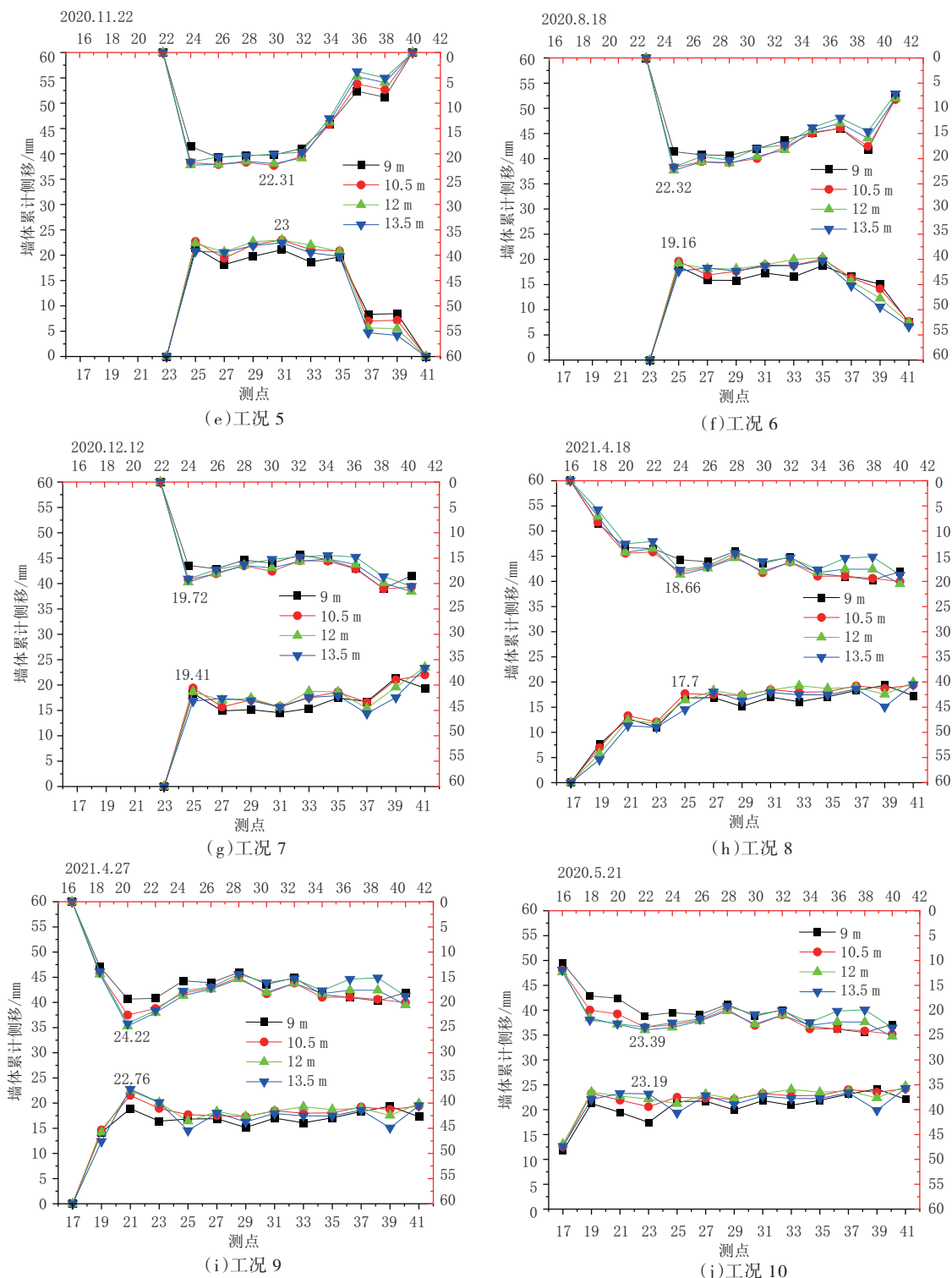


图7 土体侧移累计值曲线图

挖过程中,支撑的架设总是滞后于土体的开挖,使得墙体在支撑架设前就存在位移,而当墙体发生位移时,坑外土体的原始平衡状态被破坏,引起土体发生相应的位移,并伴随着墙体位移的发展而不断变化。

由表3可见,墙体侧移与土体侧移的最大累计值数值与发生深度基本相同,由于土体侧移的发展与墙体侧移的发展具有紧密相关的联系,所以根据围护

结构侧向变形预测土体产生的侧移变形,从而评价基坑开挖对周围环境的影响具有重要意义。

2.3 墙体侧移和土体侧移特性分析

选取典型工况1、5、8、10,合并墙体侧移与土体侧移变形曲线见图8。

工况1、5、8、10的墙体与土体侧移累计曲线,在变形趋势、数值上均保持一致性,反映出土体会随着

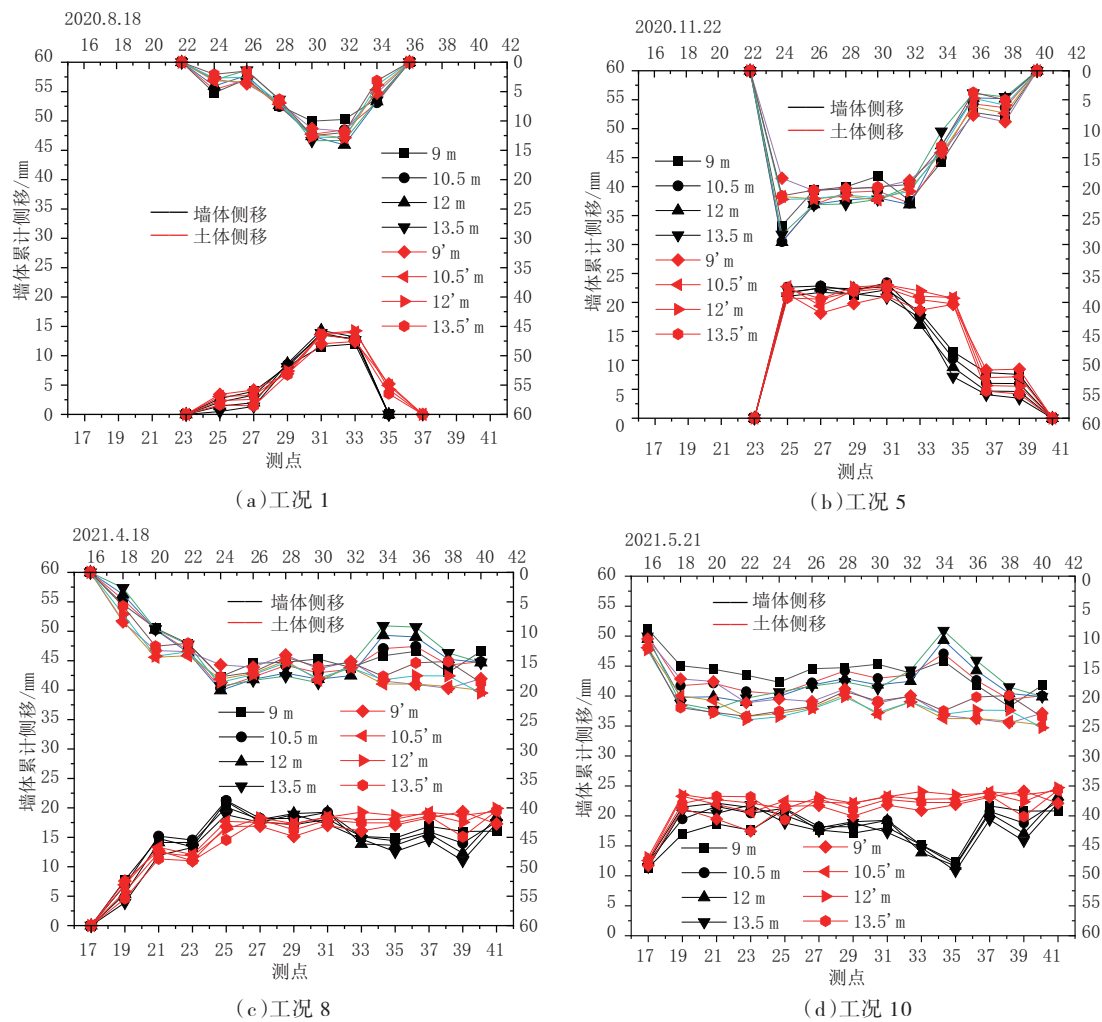


图 8 典型工况墙体与土体侧移合并曲线分析图

墙体变形的性质。但是在个别位置存在差异,有工况 5 测点 24、35 平均差值为 6.69 mm、10.98 mm;工况 8 的 B 区域,土体比墙体侧移累计值平均大 4.98 mm;工况 10 测点 34、35 平均差值为 3.91 mm。可以发现,出现差值的区域均发生在 B 区域,且均表现为土体侧移大于墙体侧移。原因在于 B 区域施工时未及时将开挖土方运出,而是堆积在基坑边缘,从而导致坑外土体受荷过大,使得土体发生塑性变形,加之墙体发生回弹,将无法与墙体位移保持一致。

3 结 论

以杭州某长大基坑工程为研究对象,通过实测数据研究基坑施工过程中的空间效应,提出以基坑安全性的保障措施。具体结论如下:

(1)由于长大基坑采取分区分段开挖,在空间效应的影响下,其变形规律是有别于整体开挖基坑变形规律的,即不同开挖位置的基坑变形存在不同的变化,如长大基坑坑角位移明显小于基坑中部,由于这种空间效应的作用,使得基坑短边中部侧移值总

是比长边中部侧移值小。

(2)由墙体侧移与土体侧移变形曲线具有的一致性可以看出,墙体侧移的发展与土体侧移的发展紧密相关,且均受到相同的空间效应影响。在基坑开挖过程中,围护墙体两侧土压力不平衡导致围护结构产生相应的水平位移,从而带动土体产生水平位移,并且围护墙体的位移状态直接影响坑外土体的位移状态,表现在土体最大侧移累计值与同深度的墙体最大侧移累计值基本保持一致。

(3)由于基坑采取分区分段开挖施工,先开挖中部基坑,中部结构的建造对基坑整体变形有一定约束作用,从而减小基坑变形的风险。可通过加大支撑刚度、进行合理坑底加固等措施,保障基坑安全。

参考文献:

[1] Ter-Martirosyan Z G, Vanina Yu V. Impact of a deep foundation on enclosing wall structure of excavation[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1928: 012004.

[2] 丁勇春. 软土地区深基坑施工引起的变形及控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.

84 d 氯离子扩散系数为 $2.8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, 满足在Ⅲ类海洋环境中抗氯离子扩散系数的技术要求, 原因在于石灰石粉中微细硅质、铝质颗粒具有一定反应活性, 能与水泥水化产物发生二次水化反应生产水化硅酸钙凝胶, 阻断混凝土内部孔隙连通, 提高混凝土的致密性, 从而提高混凝土耐久性能^[6]。

表 4 氯离子扩散系数试验结果一览表

养护龄期	28 d	84 d	RCM-Ⅲ设计值
氯离子扩散系数 / $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	5.1	2.8	2.5 ~ 3.5

电通量试验参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009) 中相关规定进行, 测试龄期为 28 d。从表 5 可以看出, 该混凝土 28 d 电通量小于 1 000 C, 满足Ⅲ类海洋环境下电通量的技术要求。有文献表明在氯盐或化学侵蚀环境下, 当混凝土电通量小于 1 000 C 时, 可满足混凝土使用寿命达到 100 a 的耐久性能要求。

6 结 论

(1) 石灰石粉可以作为一种矿物掺合料取代粉煤灰用于混凝土生产, 其合理掺量在 16% 左右, 此时

表 5 电通量测试结果一览表

龄期	28 d 实测值	Q-Ⅲ设计值
电通量 / C	871	1 000 ~ 2 000

混凝土性能表现最佳。

(2) 石灰石粉能诱导前期水化, 提高混凝土早期强度, 有利于缩短预制梁张拉时间, 提高产梁周期。

(3) 石灰石粉潜在的活性效应能改善混凝土内部孔隙结构, 用石灰石粉配制出混凝土耐久性优良, 能满足恶劣环境下抗渗性技术要求。

参考文献:

[1] 张伟, 李福平, 吴庆嘉等. 石灰石粉在商品混凝土中应用[J]. 商品混凝土, 2014(7).

[2] 雷文哈, 赵大军, 程志勇. 石灰石粉作为混凝土矿物掺合料的应用研究进展[J]. 粉煤灰综合利用, 2013(1):53-56.

[3] 刘娟红, 宋少明. 活性粉末混凝土—配制、性能与微观结构[M]. 北京, 化学工业出版社, 2013(9):186.

[4] 黄汉洋, 贾丽莉, 吴媛媛, 李伟. 石灰石粉混凝土应用关键技术研究[J]. 江西建材, 2015(12):243-247.

[5] 饶美娟, 刘数华, 方坤河. 石灰石粉对水泥早期性能的影响[J]. 粉煤灰, 2010, 22(1):5-7.

[6] 陈建雄, 李鸿芳, 陈寒斌等. 掺超细石灰石粉和铁矿渣粉高强混凝土研究[J]. 建筑材料学报, 2005(12):672-676.

(上接第 187 页)

[3] 俞强. 邻近地铁深大基坑开挖变形与控制措施研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(12):127-133.

[4] 赵文, 韩健勇, 李慎刚, 等. 砂土地层深基坑桩锚支护体系的受力与变形[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(4):576-580, 595.

[5] 奚家米, 尉阳. 软土地区深基坑施工监测与变形特性的时空效应分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(4):1587-1592.

[6] 奚家米, 付垒. 基于时空效应的深基坑工程变形规律分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(16):290-297.

[7] 楼春晖, 夏唐代, 刘念武. 软土地区基坑对周边环境空间效应分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S1):249-252.

[8] 俞晓, 宋雷. 空间效应下不规则深基坑的支护体系变形分析[J]. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2020, 43(5):384-389.

[9] P. Lin, P. Liu, G. Ankit, et al. Deformation monitoring analysis and numerical simulation in a deep foundation Pit[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2021, 58:56-62.

[10] 吴锋波, 金 淮, 朱少坤. 北京市轨道交通基坑工程地表变形特性[J]. 岩土力学, 2016, 37(4):1066-1074.

[11] 王卫东, 徐中华, 宗露丹, 等. 上海国际金融中心超深大基坑工程变形性状实测分析[J]. 建筑结构, 2020, 50(18):126-135.

[12] 唐新华, 李向阳, 张俊赞, 等. 复杂环境下基坑开挖工序对周边构筑物的变形影响分析[J]. 建筑结构, 2022, 52(S1):2531-2535.

[13] 刘维正, 葛孟源, 万家乐, 等. 考虑空间效应的桩锚支护深大基坑变形特性及影响因素数值分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(12):3188-3200.