

滨海软土超长深基坑开挖时空效应监测分析

王小丁¹, 秦善良²

(1. 深圳铁路投资建设集团有限公司, 广东 深圳 518101;

2. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610081)

摘要:滨海软土基坑开挖中的空间效应和时间效应对基坑稳定性具有重要影响。为了控制软土地区基坑变形,本文以穗莞深城际铁路前海站超长深基坑工程为例,通过分析开挖过程中的围护结构水平位移、周边地表沉降、支撑内力等数据,研究超长基坑在开挖过程中的时空效应。结果表明:1) 基坑开挖中空间效应明显,基坑中部围护结构水平位移比端部大 18.3%;2) 围护结构位移差异会导致坑边土体出现差异沉降现象,距离坑边相同距离时基坑纵向最大沉降差异达到 17.5%;3) 施工间期,同一工况下的支护结构位移及受力均会随着时间增长而增大;4) 软土地层中前四道混凝土内支撑养护期间,围护结构最大水平位移分别增长了 31.2%, 30.9%, 23.2%, 14.4%;5) 工程中应合理考虑基坑开挖的时空效应。

关键词:深基坑; 滨海软土; 时空效应; 受力状态; 变形特性; 现场监测

中图分类号: TU94⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)01-0051-06

doi: 10.13402/j.gcs.2024.01.010

Monitoring and analysis on time-space effect of ultra-long deep foundation pit excavation in coastal soft soil

WANG Xiaoding¹, QIN Shanliang²

(1. Shenzhen Metro Group Co., Ltd., Shenzhen 518101, Guangdong, China;

2. Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract: The space-time effect on the excavation of coastal soft soil foundation pit has an important impact on the stability of the foundation pit. In order to control the deformation of foundation pit in soft soil area, the ultra-long deep foundation pit project of Qianhai Station of Guangzhou-Shenzhen Intercity Railway is taken as an example, and the space-time effect of the ultra-long foundation pit in the excavation process is researched by analyzing the horizontal displacement of the enclosure structure, the surrounding surface settlement, and the supporting internal force during the excavation process. The results show that: 1) the spatial effect is obvious in the excavation of the foundation pit, and the horizontal displacement of the enclosure structure in the middle of the foundation pit is 18.3% larger than that at the end; 2) the difference in displacement of the enclosure structure will lead to the differential settlement of the soil at the edge of the pit, and the maximum longitudinal settlement difference of the foundation pit reaches 17.5% when it is at the same distance from the edge of the pit; 3) during the construction interval, the displacement and stress of the supporting structure under the same working condition will increase with the growth of time; 4) during the curing period of the first four concrete internal supports in the soft soil layer, the maximum horizontal displacement of the enclosure structure increases by 31.2%, 30.9%, 23.2% and 14.4%, respectively; 5) the space-time effect of foundation pit excavation should be reasonably considered in the project.

收稿日期: 2023-03-24

作者简介: 王小丁(1978—),男,高级工程师,从事地下工程施工技术和安全管理工作。

Key words: deep foundation pit; coastal soft soil; space-time effect; stress state; deformation characteristics; field monitoring

基坑工程由于岩土应力的复杂性及其周边环境的特殊性,传统理论推导很难准确计算其施工过程中的结构受力及变形状态^[1-3]。目前,研究基坑工程对临近结构的影响采用的手段有理论计算、数值模拟及实测分析等^[4],对于深基坑变形性状的研究多采用工程类比法并结合数值模拟进行。监测数据作为工程现场结构受力及变形特性的真实反映,对于基坑工程的受力特性和稳定性研究具有重要意义^[5-7]。

众多学者搜集不同地区基坑监测数据对基坑变形性状进行了分析,对基坑工程的发展做出了重大贡献。刘兴旺等^[8]通过分析杭州及上海软土地区 15 个基坑的实测数据,初步得出了该区域围护结构侧移与开挖深度的关系;LONG 等^[9]对全球大量基坑实测资料进行了分类整理,重点探讨了支撑形式、坑底隆起系数、开挖深度等对结构变形的影响;LEUNG 等^[10]对香港地区 14 个基坑实测数据进行归纳整理,提出了土体标准贯入基数与结构侧移的关系;叶帅华等^[11-13]基于兰州市多个基坑监测数据,结合数值模拟,得出了兰州湿陷性黄土地区深基坑变形规律。

监测数据能直观反映基坑受力和变形性状,本文基于深圳市滨海软土地区穗莞深城际铁路前海站超长深基坑工程,通过现场监测和数据分析,研究其开挖过程中的时空效应特点,为该地区同类工程提供参考。

1 工程背景

1.1 工程概况

穗莞深城际前海站三期基坑工程总长 314 m,标准段宽度为 27.7 m,端头宽度为 35 m。车站主

体采用明挖法施工,普遍开挖深度约为 29 m。支护结构采用地下连续墙+六道钢筋混凝土支撑,其剖面如图 1 所示。由于车站基坑呈狭长形,纵向跨度较大,因此现场开挖时将基坑分为 4 个区块,采用分区阶梯式开挖,每个位置沿竖向共开挖 7 次,每次开挖至对应内支撑深度处并施作内支撑,第七次开挖至基底。基坑分区如图 2 所示。

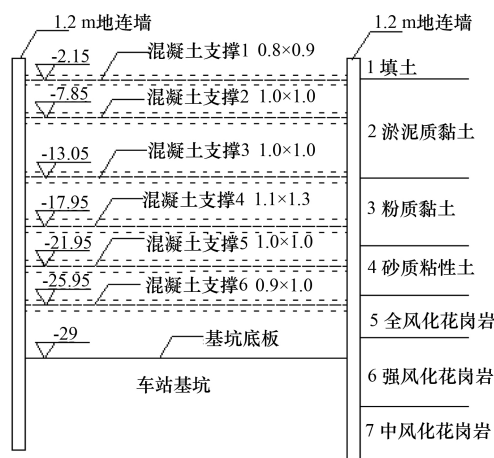


图 1 结构剖面简图

m

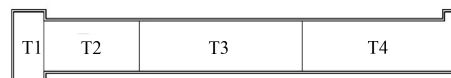


图 2 基坑分区简图

m

1.2 地质条件

1.2.1 工程地质

车站范围内主要地貌单元为海冲积平原带,为海陆交互相沉积相地貌,局部区域进行人工填海造地,区内地势平坦。地层自上而下依次为杂填土、素填土、人工填块石、淤泥质黏土、粉质黏土、中粗砂、全风化花岗岩、强风化花岗岩,车站底板位于全、强、中风化花岗岩地层中。地层剖面如图 3 所示。

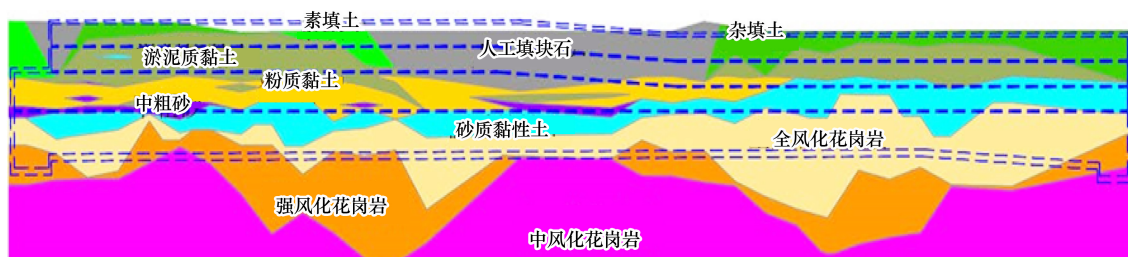


图 3 地层剖面

m

1.2.2 水文地质

场地地表水主要为附近河流、塘、沟水；地下水主要为上层滞水和松散岩类孔隙潜水，上层滞水主要赋存于人工填块石层，孔隙潜水主要赋存于冲洪积中粗砂层中，富水性和透水性较好，下层基岩构造裂隙水，赋存于强、中等风化带。

2 监测方案

为监测基坑施工过程中支护结构受力及位移变形、对周边环境的影响等变化情况,结合工程实

际及一级基坑变形控制要求, 工程设置监测内容:

1) 周边地表沉降监测; 2) 围护结构顶竖向位移监测; 3) 围护结构顶水平位移监测; 4) 支撑轴力监测; 5) 地下水位监测; 6) 立柱沉降检测; 7) 边坡沉降监测; 8) 边坡水平位移监测; 9) 墙体深层水平位移监测。本文主要选取地表沉降、围护结构顶部水平位移、深层水平位移以及内支撑轴力监测数据来研究基坑开挖过程中时空效应, 监测点位布置如图4所示。

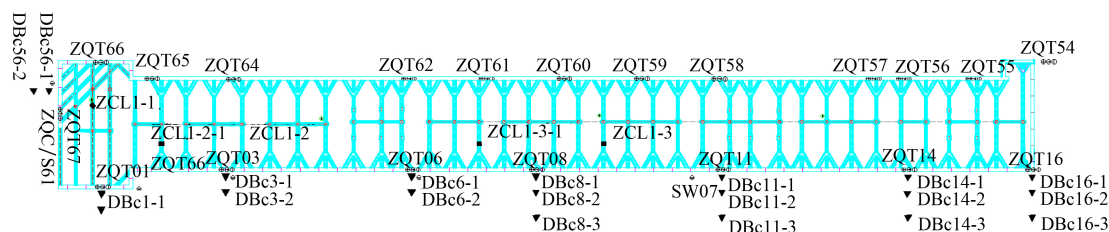


图 4 测点布置

3 监测数据分析

3.1 空间效应

深基坑开挖过程是一个三维空间问题，其不同区段的受力状态不能一概而论。深基坑开挖过程中，其端部存在“边角效应”，会约束端部一定范围内的结构位移，因而围护结构中部与其端部的受力变形存在一定的差异，这便是深基坑开挖过程中的空间效应问题。

3.1.1 围护结构水平位移

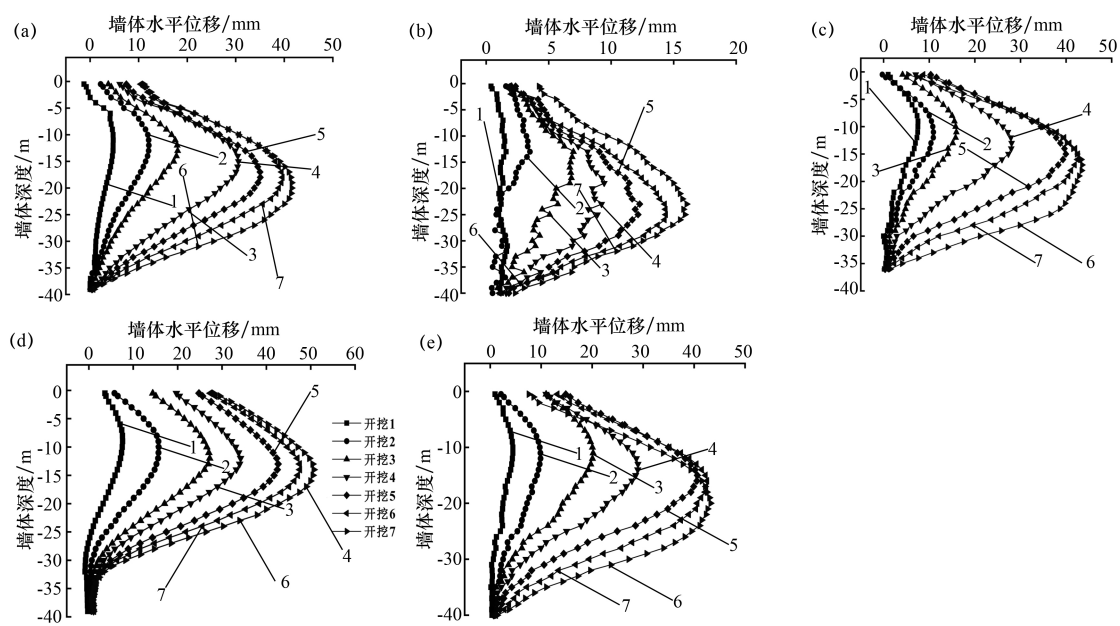
选取基坑端部测斜点 ZQT01、ZQT67 及标准段测斜点 ZQT03、ZQT08、ZQT14 位置每次开挖结束时的数据进行分析,结果如图 5 所示,其中位移正值代表墙体向基坑内侧位移。由图 5 可知:测点 ZQT01、ZQT67 位置结构变形均呈“凸胀型”,墙顶及墙脚位移较小,最大位移位置随开挖进度逐渐向下移动,最终稳定在距离墙顶 20~25 m 区间内。其中测点 ZQT01 土层开挖引起的结构位移较大,最大值为 41.56 mm;而测点 ZQT67 开挖过程中墙体水平最大位移仅为 16.04 mm。出现这种差异的原因是测点 ZQT67 位于基坑端部短边,开挖造成的土体卸荷量较小,且两边角对短边结构变形具有约束作用,即“边角效应”,导致测点 ZQT67 的水平位移远小于同一开挖分区的测点

ZQT01。

基坑标准段测点 ZQT03、ZQT08、ZQT14 位置结构水平变形趋势与测点 ZQT01、ZQT67 一致, 同样向坑内鼓出。其中, 位于标准段两端的测点 ZQT03、ZQT14 围护结构位移值在各工况均较为接近, 开挖结束后两测点最大位移分别为 42.86、42.65 mm; 而位于标准段中部的测点 ZQT08 在各个开挖阶段结构位移均大于其他测点, 开挖过程中最大位移为 50.7 mm。其原因是基坑边角的约束作用随距离的增加逐渐递减, 影响范围约为两倍坑深^[14], 测点 ZQT03、ZQT14 位置均在一定程度上受到了影响, 而测点 ZQT08 已经脱离了边角约束的作用范围, 因此其位置结构位移在各开挖阶段均大于其它两测点。

3.1.2 地表沉降

选取基坑标准段测点 DBC3、DBC8、DBC14 每次开挖结束时的数据进行分析,结果如图 6 所示。由图 6 可知:基坑开挖引起的周边土体沉降呈“V”型,中部大,两端小,这与围护结构的水平位移趋势一致。对比来看,位于基坑长边中部的测点 DBC8 在各阶段的沉降均大于位于基坑长边两端的测点 DBC3、DBC14。其中测点 DBC8 施工中最大沉降量为 30.5 mm,测点 DBC3、DBC14 的最大沉降分别为 26.7、25.96 mm。这是



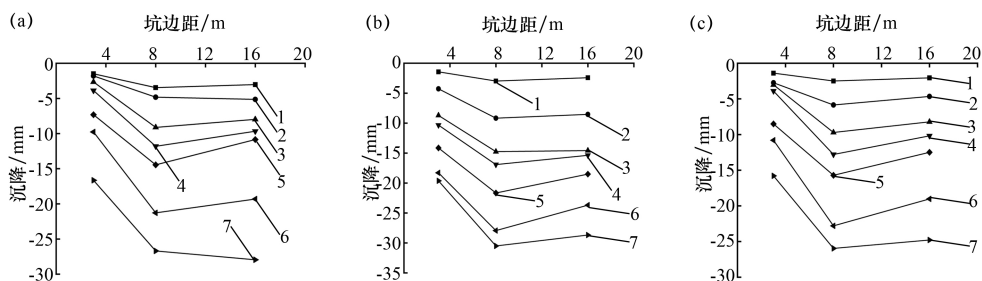
测点: (a) ZQT01; (b) ZQT67; (c) ZQT03; (d) ZQT08; (e) ZQT14

测点: 1—1; 2—2; 3—3; 4—4; 5—5; 6—6; 7—7。

图 5 不同测点围护结构水平位移

因为坑外地表沉降是由土体向基坑内部移动引起,二者正相关,基坑边角对围护结构的变形限制也

会相应减小基坑外的地表沉降,进而对周边地下管线及建筑物造成影响。



测点: (a) DBC3; (b) DBC8; (c) DBC14

测点: 1—1; 2—2; 3—3; 4—4; 5—5; 6—6; 7—7。

图 6 不同测点土体沉降

空间效应在基坑开挖中普遍存在,其影响有利有弊。目前,基坑结构设计时多简化为二维问题,设计偏保守,若利用好端部的约束作用,则可以在保证结构稳定的前提下节约建造资源。而空间效应带来的坑边土体差异沉降问题,也应受到重视,防止其对周边道路、地下管线等造成破坏。

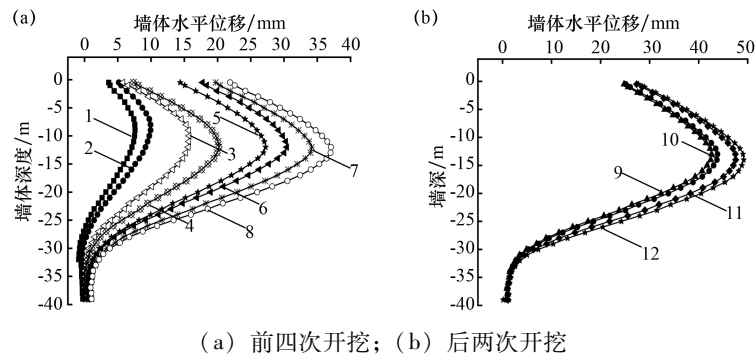
3.2 时间效应

理想状态下,在基坑一层土体开挖结束后施作支撑及支撑养护的开挖间期,由于内部未进行卸载活动,其外部土压力不会进一步增加,结构

受力变形应处于稳定状态。但实践表明,在施工间期坑内土体自由暴露的时间内,由于软土蠕变、孔隙水压力消散、坑边动荷载等原因,即使不进一步开挖卸荷,其结构受力及变形仍会随暴露时间的增加而增加,即开挖间期的时间效应。

3.2.1 围护结构位移

选取淤泥及淤泥质黏土分布较多的 T3 区块测点 ZQT08 位置各阶段开挖后至下一次开挖期间围护结构水平位移变化进行分析,结果如图 7 所示。其中该测点位置具体施工工况对应时间如表 1 所示。



日期：1—2021/8/7；2—2021/9/4；3—2021/9/9；4—2021/9/29；5—2021/10/4；6—2021/11/1；7—2021/11/5；8—2021/11/16；9—2021/11/20；10—2021/12/4；11—2021/12/9；12—2022/1/12。

图 7 ZQT08 测点墙体位移变化

表 1 施工进度

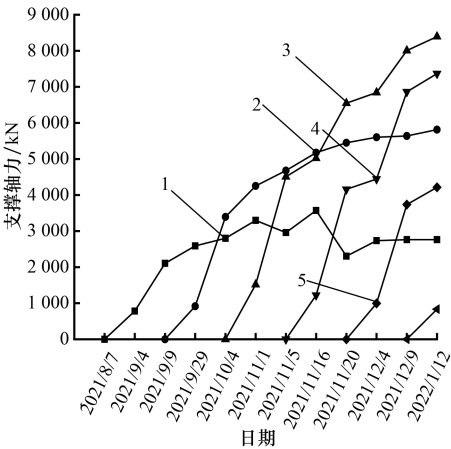
日期/(YYYY/MM/DD)	工况
2021/08/07	第一层土方开挖完成
2021/09/04	准备第二层土方开挖
2021/09/09	第二层土方开挖完成
2021/09/29	准备第三层土方开挖
2021/10/04	第三层土方开挖完成
2021/11/01	准备第四层土方开挖
2021/11/05	第四层土方开挖完成
2021/11/16	准备第五层土方开挖
2021/11/20	第五层土方开挖完成
2021/12/05	准备第六次土方开挖
2021/12/09	第六层土方开挖完成
2022/01/12	准备第七层土方开挖

由图 7 可知：各层土方开挖后，在没有进一步施工的前提下，测点 ZQT08 位置围护结构均有所增长。其中，前四层施工间期结构位移增长较为明显，增量最大处分别增加了 2.36、4.71、3.3、3.44 mm，后两次开挖间期结构位移增长较少。这是因为车站范围内上部土体偏软，特别是淤泥质黏土与淤泥地层，其含水率较高，土性偏流塑、软塑，开挖过程中坑内自由暴露的被动区土体不能提供足够的抗力来平衡外部土压力，因此在未进行施工的情况下墙体仍会向坑内发生变形。第二层土体开挖正处于淤泥质黏土中，因此其结构位移增长也最为明显。坑内土体孔隙水压力消散也会对此产生影响。开挖至第五、第六层土体时，坑内土体自稳性较好，含水率较低，所以施工间期内结构位移增量较小。

3.2.2 支撑内力

选取 T3 中部支撑轴力测点 ZCL3 位置各支撑

内力值进行分析，结果如图 8 所示。由图 8 可知：上部第一、第二道内支撑轴力先随开挖深度增加逐渐增大；当中部第三、第四道内支撑施作完成后，第一道内支撑轴力有所减小，第二道内支撑增速放缓；中部内支撑则随工序推进轴力值不断上升。开挖过程中，支撑轴力最大值出现在第三道支撑上，达到了 8 395 kN。内支撑的受力机理决定了其内力变化与围护结构位移相关联，因此施工间期内内支撑轴力也随结构位移增长而增加。其中，第一道内支撑变化较为明显，其轴力值在第三道内支撑施作后呈下降的趋势，但在施工间期内发生了增长；支撑养护期间，轴力增长最多的为第三道内支撑，增加了 1 519 kN；下部土体施工间期，轴力增加最多的为第二道内支撑在第三层土体开挖间期内的轴力增量，其轴力值增加了 857 kN，增长了 25%。



1—内支撑 1；2—内支撑 2；3—内支撑 3；4—内支撑 4；5—内支撑 5。

图 8 ZCL3 测点轴力值变化

由于时间效应的存在,基坑开挖过程中应尽可能缩短施工间期,防止因坑内土体长时间自由暴露导致结构变形过大。然而,混凝土内支撑刚度的形成需要一定的养护时间,在内支撑未达到足够刚度来承受围护结构传递的荷载前就进行下一步开挖,则可能导致结构失稳,出现工程事故。因此在工程实践中,提前对该问题进行分析,协调好支撑养护时间及土体暴露时间,对控制结构变形十分必要。

4 结 论

本文基于穗莞深城际铁路前海站基坑工程现场监测,通过分析超长深基坑开挖过程中围护结构位移、地表沉降、内支撑轴力等数据,得出了超长基坑开挖的时间效应,主要结论如下。

(1) 超长基坑开挖中存在空间效应。由于端部边角效应的存在,其围护结构中部位移明显大于端部,基坑中部围护结构水平位移比端部大 18.3%;围护结构位移差异会导致坑边土体出现差异沉降现象,距离坑边相同距离时基坑纵向最大沉降差异达到 17.5%。

(2) 施工间期同一工况下支护结构位移及受力均会随着时间增长而增大;软土地层中前四道混凝土内支撑养护期间,围护结构最大水平位移分别增长了 31.2%、30.9%、23.2%、14.4%。时间效应的影响主要出现在上部软土地层的开挖过程中,对下部硬质地层影响较小。

(3) 基坑工程施工中应合理考虑时空效应问题。对于空间效应,可利用其端部约束作用,同时也要注意空间效应引起的差异沉降对周边环境的影响;关于时间效应,应科学规划施工工序,协调好混凝土内支撑养护时间与土体暴露时间,防止因位移过大而出现围护结构失稳。

参考文献:

[1] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京:中国建

筑工业出版社,2009.

- [2] 黄茂松,王卫东,郑刚. 软土地下工程与深基坑研究进展[J]. 土木工程学报,2012,45(6):146-161.
- [3] 孙超,郭浩天. 深基坑支护新技术现状及展望[J]. 建筑科学与工程学报,2018,35(3):104-117.
- [4] 陈甦,孙斌彬,顾凤祥,等. 基坑工程施工对邻近地铁结构影响研究现状与展望[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2018,39(1):108-114.
- [5] 孙钧. 城市地下工程施工安全的智能预测与控制及其三维仿真模拟系统研究[C]. 太原:中国岩石力学与工程学会,1999:24-33.
- [6] 王浩,覃卫民,汤华. 关于深基坑施工期监测现状的一些探讨[J]. 岩土工程学报,2006(S1):1789-1793.
- [7] 朱渊. 深基坑安全监测数据分析及数值模拟研究[D]. 武汉:长江科学院,2021.
- [8] 刘兴旺,施祖元,益德清,等. 软土地区基坑开挖变形性状研究[J]. 岩土工程学报,1999(4):456-460.
- [9] MICHAEL L. Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering,2001,127(3):203-224.
- [10] LEUNG E, NG C. Wall and ground movements associated with deep excavations supported by cast in situ wall in mixed ground conditions[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering,2007,133(2):129-143.
- [11] 叶帅华,陈长流,寇巍巍,等. 兰州市某深基坑工程位移监测及变形特性分析[J]. 岩土工程学报,2014,36(S2):440-445.
- [12] 尹利洁,李宇杰,朱彦鹏,等. 兰州地铁雁园路站基坑支护监测与数值模拟分析[J]. 岩土工程学报,2021,43(S1):111-116.
- [13] 吴意谦,朱彦鹏. 兰州市湿陷性黄土地区地铁车站深基坑变形规律监测与数值模拟研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(S2):404-411.
- [14] 任彦华,李军,樊继良,等. 深基坑工程中空间效应的影响分析[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(S1):177-182.