



软土地层超深圆形地连墙受力变形特性研究

石 波¹, 张光辉¹, 刘云凯¹, 卢春雨^{*2}, 马 迪²

(1. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610081;

2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 软土地层中超深圆形地连墙受力与变形特性复杂, 且开挖过程中地连墙内土体会产生土塞效应。文章以韩江-榕江-练江水系连通后续优化工程中的GX12号工作井深基坑为依托, 建立三维数值模型, 研究超深圆形地连墙的受力变形特性。研究表明: 地连墙摩擦力、弯矩、环向轴力、水平位移均随开挖深度增加逐渐增大; 坑内土体在地连墙内形成土塞, 在地连墙内侧产生摩阻力; 圆形地连墙沿深度方向表现出柔性特质; 地连墙表现为向坑内的挤压变形, 地连墙最大水平位移值为 $0.063\%H$ (H 为基坑开挖深度); 开挖过程中地连墙边缘土体略有隆起, 随着开挖深度的增加, 基坑周边地表出现沉降, 且地表沉降值随着离开基坑距离的增大呈现先增大后减小的趋势, 地表沉降最大值为 $0.034\%H$, 地表沉降的影响范围为 $0.57H$ 。

关键词: 深基坑; 圆形地连墙; 受力特性; 变形特性; 数值模拟

中图分类号: TU753; TU432

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)10-0001-06

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.10.125

Research on stress and deformation characteristics of ultra-deep circular diaphragm walls in soft stratum

SHI Bo¹, ZHANG Guanghui¹, LIU Yunkai¹, LU Chunyu^{*2}, MA Di²

(1. Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu 610081, Sichuan, China;

2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: The stress and deformation characteristics of ultra-deep circular diaphragm wall in soft stratum are complicated and the soil inside the diaphragm wall will produce a soil plugging effect during the excavation process. In this paper, taking the deep foundation pit of well GX12 in Hanjiang-Rongjiang-Lianjiang Drainage system optimization project as a case study, considering the soil plugging effect of the soil in the foundation pit, a three-dimensional numerical model is established, the stress and deformation characteristics of ultra-deep circular diaphragm wall are studied. It is found that the friction force, bending moment, circumferential axial force and horizontal displacement of diaphragm wall increase with the increase of excavation depth; the soil inside the foundation pit forms a soil plug in the diaphragm wall to provide friction resistance to the inner face; the circular diaphragm wall shows flexible characteristics along the depth; the diaphragm wall shows extrusion deformation to the pit, the maximum horizontal displacement is about $0.063\%H$ (H is the excavation depth of the foundation pit); the ground surface around the edge of the diaphragm wall is slightly uplifted during excavation, with the increase of the excavation depth, the surface settlement around the diaphragm wall appears. The ground surface settlement increases first and then decreases with the increase of the distance from the foundation pit, the maximum value of ground surface settlement is about $0.034\%H$, and the influence range of surface settlement is $0.57H$.

Key words: deep foundation pit; circular diaphragm wall; stress characteristic; deformation characteristic; numerical simulation

收稿日期: 2024-02-26

基金项目: 中国水利水电第七工程局有限公司科技攻关项目(GSSC-科研-2023-001)

作者简介: 石 波(1981—), 男, 工程师, 从事水工结构质量分析及施工技术管理工作。

随着建筑行业的迅速发展,地下空间工程也越来越多,在发展地下空间的同时不可避免的涉及到基坑开挖。目前的基坑工程较为复杂,大多具有直径长,深度大,周围环境复杂的特点,此类基坑开挖过程中引起的支护结构的变形受力问题不容小觑;敞口空心桩沉桩过程中土体涌入管内形成的土塞称为土塞效应,施工完成的地连墙类似于空心桩,地连墙内未开挖的土层以及地连墙下部土体受到挤压产生的土体隆起类似于产生的土塞,对基坑的稳定性具有一定的影响作用。张世彬^[1]认为狭小基坑在坑底可以形成相对紧致的土塞,该部分土体受挤压后可以为基坑围护结构提供较大的被动土压力;采用 Midas GTS 对基坑进行整体建模计算,得出土塞效应对于基坑地连墙结构属于直接的有利作用。赵一行等^[2]采用数值模拟的方法分析不同基坑尺寸对地下连续墙水平位移、弯矩、墙后地表沉降、坑底隆起的影响,结合现场监测结果进一步研究了尺寸效应对圆形基坑拱效应特点的影响;肖潇等^[3]在有限差分软件中建立考虑土与结构共同作用的分析模型,采用理想弹塑性接触模型模拟墙土接触力学特性,分析基坑围护墙竖向变形机理。

软土地层中超深圆形地连墙受力与变形特性复杂,且开挖过程中地连墙内土体会产生土塞效应。本文以韩江榕江练江水系连通后续优化工程中的 GX12 号井深基坑为依托,采用 PLAXIS 3D 建立基坑的三维数值模型,研究超深圆形地连墙的受力变形特性,以期为类似工程施工提供参考。

1 工程概况

GX12 号井深基坑是韩江榕江练江连通后续优化工程中的圆形盾构工作井,该工作井位于一池塘内,以北约 100 m 为榕江北河不知名河流,井身及井底位于第四系冲积层,以黏性土、中粗砂和淤泥质土为主,其中,②-3、②-5、②-7 中粗砂为含水层,②-2、②-4、②-6 为隔水层。工作井深基坑周围地层水头高度为 2 m,开挖深度 H 为 34.83 m,坑底承压水水头高度达到 30 m,隔水层②-4 承压水水头高度达 54 m,②-6 承压水水头高度达 77 m。由于工作井处于高承压水地层,

易发生突涌,开挖过程中在坑内布设减压井进行减压降水,具体的方案:地连墙进入②-6 淤泥质土层,深度为 78 m,布置 8 口降水井,每口井抽水量为 $528 \text{ m}^3/\text{d}$,减压井启动高程为 -21 m ,滤管顶高程为 -29.98 m ,滤管底高程为 -69.78 m 。

GX12 号工作井深基坑坑底高程 -32.33 m ,外径为 24 m,采用地下连续墙+混凝土内衬墙支护方案。地连墙、压顶冠梁以及内衬的混凝土强度等级均采用 C30,基坑开挖采用地下连续墙垂直支护,内衬墙采用逆作法施工。具体的基坑支护结构设计:地下连续墙厚度为 1.0 m,嵌入井底,工作井的地质剖面及地连墙支护结构如图 1 所示,工作井的分层开挖高度及每层内衬厚度如表 1 所示。

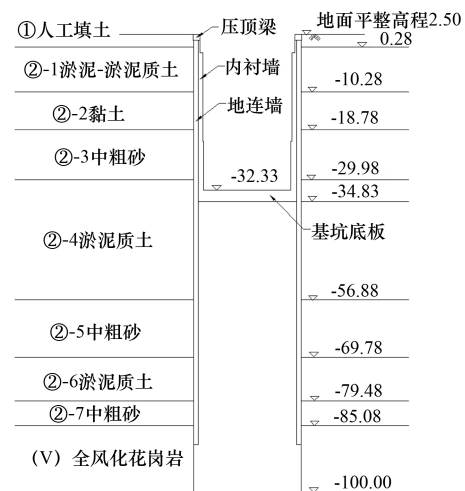


图 1 地层剖面及地连墙支护结构图

m

表 1 GX12 号工作井逆作法各层层高

m

开挖分层	名称	分层高度
1	压顶梁层	1.300
2	内衬墙厚 0.4	2.800
3		1.728
4		4.500
5	内衬墙厚 1.0	4.500
6		4.500
7		4.500
8		4.500
9	内衬墙厚 1.2	4.500
10		2.000

GX12 号井深基坑坑底以下存在淤泥隔水层和强渗透地层,其下淤泥隔水层的承压水水头高度

较大, 强透水地层厚度较大, 为高承压水含水层, 基坑开挖过程中易发生突涌; 抗突涌方案中圆形地连墙底部穿越杂填土层、淤泥、淤泥质土层、中粗砂层等复杂地层, 地连墙与周围各土层之间存在摩擦力, 由于地连墙深度较大其受力变形特性更为复杂, 且圆形支护体系受力特性与矩形支护体系之间存在差异, 因此本文对该工程超深地连墙的受力变形规律进行分析。

2 数值模拟

2.1 数值模型建立

采用 PLAXIS 3D 有限元模拟软件建立三维数值模型, 模型的尺寸为 110 m × 150 m × 102.5 m ($X \times Y \times Z$), 模型约束法向位移, 底面设置固定约束, 顶面为自由边界, 数值模型如图 2 所示。材料的本构模型选用硬化土模型, 根据 PLAXIS 对硬化土模型中的参数设置, $E_{\text{oed}}^{\text{ref}} = E_{50}^{\text{ref}}$, $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 4E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$;

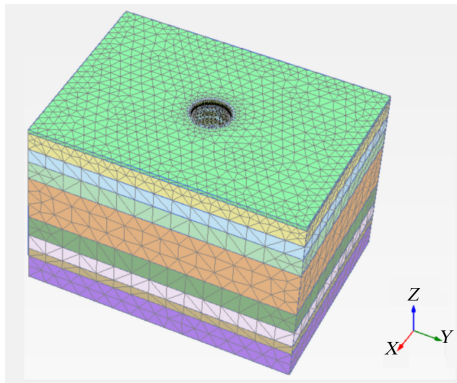
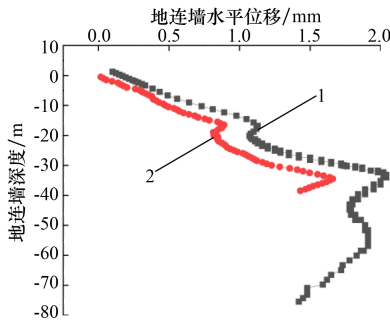


图 2 数值模型

土层参数结合地勘资料取值, 其中根据相关的文献资料 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 取 $1.5E_s^{[4-6]}$, 具体参数如表 2 所示。其中, $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 为侧限压缩试验切线刚度, MPa; E_{50}^{ref} 为三轴排水试验割线刚度, MPa; $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 为卸载/重加载刚度, MPa; E_s 为压缩模量, MPa。压顶冠梁和内衬墙采用实体单元建模, 地连墙采用板单元建模, 地连墙与土体之间的界面强度因子 $R_{\text{inter}} = 0.67$ 。

2.2 模拟结果验证

工程现场监测采用测斜管观测, 测斜管埋深为 38.5 m, 每测段长度为 0.5 m。图 3 为模拟开挖结束后模拟数据与监测数据对比图。由图 3 可知: 现场监测和模拟出的地连墙水平位移都是随着开挖深度的增加而逐渐增大, 坑底附近的水平位移最大; 模拟的数值略大于监测数据, 并且累计位移在预警范围之内, 说明模拟结果符合现场实际开挖的情况, 模拟结果可以用于分析本工程基坑开挖过程中的地连墙受力变形特性。



1—模拟值; 2—监测值。

图 3 地连墙模拟与实测数据对比

表 2 各地层物理力学参数

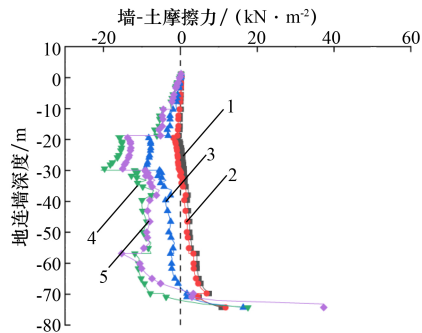
土层序号	土层名称	天然容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦 角/($^{\circ}$)	黏聚 力/kPa	有效内摩 擦角/($^{\circ}$)	渗透系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	压缩模 量/MPa
①	人工填土	19.1	12	10	14	3.00×10^{-6}	5.00
②-1	淤泥~淤泥质土	15.0	4	4	6	6.86×10^{-7}	1.86
②-2	黏土	19.1	12	10	15	6.12×10^{-6}	6.45
②-3	中粗砂	19.7	28	0	28	1.21×10^{-2}	9.14
②-4	淤泥质土	18.1	8	8	10	5.30×10^{-7}	5.61
②-5	中粗砂	19.7	31	0	31	1.62×10^{-2}	10.58
②-6	淤泥质土	18.4	11	9	13	2.10×10^{-6}	5.29
②-7	中粗砂	20.0	32	0	32	1.52×10^{-2}	12.15
②-8	黏性土	19.1	13	15	15	2.00×10^{-6}	7.89
(V)	全风化花岗岩	18.8	26	12	26	7.58×10^{-5}	8.29

3 模拟结果分析

项目土层厚度约为 90 m, 基坑底部至承压含水层②-7 的土层厚度 D 为 52 m 左右, 而基坑内径 B 为 22 m, $B/D < 1$, 在这种情况下, 隔水层呈现整体变形状态, 墙-土之间的摩擦力对抗突涌的贡献不可忽略^[7]。GX12 号工作井深基坑的抗突涌方案基于该理论, 设计地连墙底部进入②-6 隔水层, 隔断了承压含水层②-5 与坑外的水力联系, 同时布设降水井降低了坑底以下②-5 的水头; ②-5 土层的孔隙水压力减小有效应力增加, 与地连墙壁壁的摩擦力增大; 坑底以下土层自重以及②-5 与井壁的摩擦力足以抵抗承压含水层②-7 向上的顶托力, 控制了坑底隆起, 达到了抗突涌的目的。采用该方案施工, 基坑地连墙的受力变形特性分析如下。

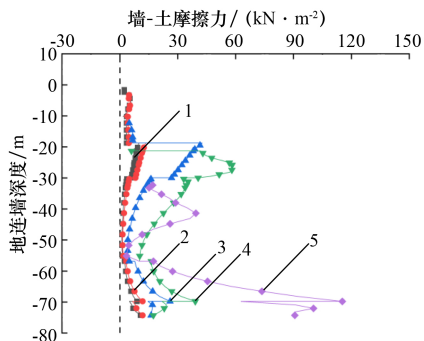
3.1 坑内土体受力特性

图 4 为不同开挖深度墙-土外侧摩擦力分布, 图 5 为不同开挖深度墙-土内侧摩擦力分布。



开挖深度/m: 1—1.6; 2—3.33;
3—12.33; 4—21.33; 5—32.33。

图 4 地连墙外侧摩擦力随开挖深度分布规律



开挖深度/m: 1—1.6; 2—3.33;
3—12.33; 4—21.33; 5—32.33。

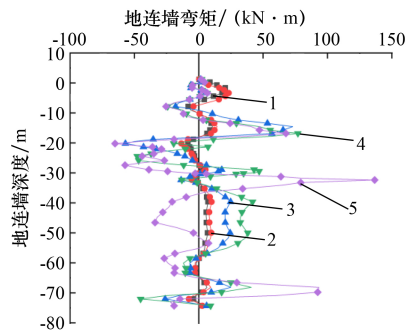
图 5 地连墙内侧摩擦力随开挖深度分布规律

由图 4、5 可知, 墙-土内外侧摩擦力的变化趋势大致呈现为随着开挖深度的增加逐渐增大。

在墙底以上坑外墙-土之间的摩擦力向下, 在墙底附近坑外墙-土之间的摩擦力向上是因为墙底处墙-土之间的相对位移发生了变化; 随着开挖深度增加, 坑内土体卸荷导致基坑外土体作用在挡土墙外侧的有效应力增加, 因此地连墙外侧的摩擦力随开挖深度增加而逐渐增大; 在 -18 ~ -30 m 范围地连墙外侧摩擦力增加较大是因为进入承压含水层, 挡土墙受到水土共同作用; 在开挖至 -21.33 m 时启用减压井, 含水层水压力降低, 因此 -32.33 m 时作用在挡土墙外侧的摩擦力减小。坑底以下地连墙深度大于基坑直径, 坑内土体在地连墙内形成相对紧致的土塞, 该部分土体受挤压后产生被动土压力作用在地连墙内侧, 在地连墙墙壁内侧产生侧摩阻力, 有利于坑内土体的抗隆起稳定性; 且在 -21.33 m 时启用减压井, 坑底以下土层孔隙水压力减小, 有效应力增加, 土塞效应明显, 坑内土体作用在地连墙内侧上的摩擦力增大。

3.2 地连墙弯矩

地连墙作为挡土结构, 在基坑开挖时因为土体卸荷会发生变形, 表现出柔性特质。图 6 为不同开挖深度地连墙弯矩图(坑内受拉为正)。由图 6 可知: 地连墙主要受拉侧为内侧, 最大弯矩值大多集中在地连墙中上部, 且随着基坑开挖深度的增加逐渐增大, 其出现的位置随着开挖深度的增加逐渐下移; 地连墙最大弯矩值出现在基坑开挖深度处, 此处地连墙表现为内侧受拉, 最大弯矩值为 136.73 kN·m。地连墙随着基坑的开挖出现了许多反弯点, 坑内土体开挖, 坑外土体向内挤压地



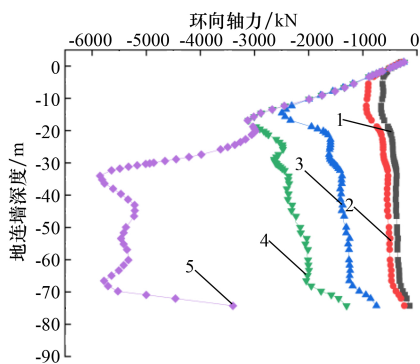
开挖深度/m: 1—1.6; 2—3.33;
3—12.33; 4—21.33; 5—32.33。

图 6 不同开挖深度地连墙弯矩

连墙, 地连墙内侧受拉, 内衬墙厚度变化处由于内衬墙刚度的增加出现反弯点; 随着开挖深度增加, 坑内被动区土压力减小, 坑外作用在地连墙上的主动土压力使得地连墙弯矩图出现反弯点; 启用减压井, 坑内土体孔隙水压力减小, 有效应力增大, 墙壁内侧摩阻力增大, 地连墙弯矩出现反弯点。

3.3 地连墙轴力

不同开挖深度地连墙环向轴力图如图 7 所示。



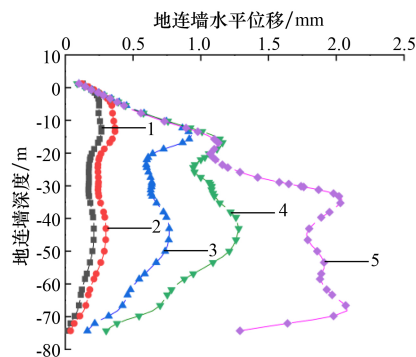
开挖深度/m: 1—-1.6; 2—-3.33;
3—-12.33; 4—-21.33; 5—-32.33。

图 7 不同开挖深度地连墙环向轴力

由上图可知: 地连墙环向轴力随着基坑开挖深度的增加而逐渐增加, 最大值出现在基坑开挖深度处, 最大环向轴力为 6 000 kN; 基坑开挖过程中坑内土体卸荷, 坑外主动区土体向坑内挤压地连墙, 圆形地连墙发挥“拱效应”平衡坑外土体压力, 随着开挖深度的增加地连墙需要平衡的坑外土体压力增大, 因此地连墙的环向轴力也越大; 而坑内开挖面以下土体为被动区可平衡一部分坑外主动土压力, 所以开挖面处环向轴力最大; 开挖至 -32.33 m 时圆形地连墙环向轴力剧增, 是因为此时坑内土体已开挖至土层②-4, 圆形地连墙除了需要平衡土压力之外也需要平衡承压含水层②-3 作用在地连墙上的孔隙水压力, 由此开挖过程中需要格外注意承压含水层对地连墙的影响。

3.4 地连墙水平位移

不同开挖深度地连墙的水平位移图如图 8 所示。由图 8 可知: 地连墙水平位移最大值出现的位置随着开挖深度的增加逐渐下移, 且沿地连墙深度呈现先增大后减小的趋势; 地连墙最大水平位移值出现在基坑底部, 最大值是 2.2 mm, 为



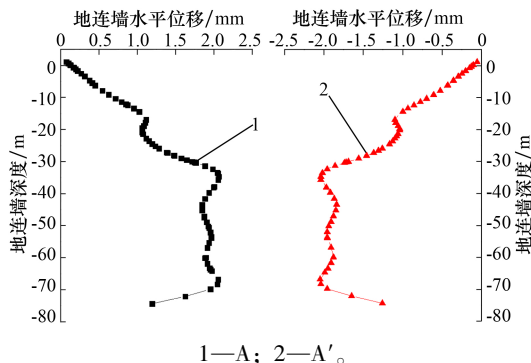
开挖深度/m: 1—-1.6; 2—-3.33;
3—-12.33; 4—-21.33; 5—-32.33。

图 8 不同开挖深度地连墙的水平位移

$0.063\%cH$, 明显小于软土基坑水平位移统计值 $0.329\%cH \sim 2.897\%cH$ ^[8]。开挖至 -32.33 m 时坑底以下地连墙水平位移较大可能是因为减压降水产生了较大的水力梯度, 较大的渗流力作用在该范围内的墙体上, 导致其产生较大的变形, 这与文献^[9]中描述的规律类似。

地连墙水平位移与环向轴力变化趋势一致, 因为随着基坑内土体开挖, 坑外主动区土体向坑内挤压地连墙, 引起地连墙产生向坑内的水平位移。开挖高程为 -32.33 m 的工况下, 地连墙水平位移在 -21 m 的位置明显增大是因为此处启动了减压井, 对坑内进行减压降水, 坑内水头降低, 基坑内外压力差增大导致坑外土体作用在地连墙上的压力增大, 地连墙水平位移增加。

图 9 为基坑开挖至坑底时地连墙对称侧的水平位移图, 图 10 为基坑开挖至坑底时地连墙的横截面图 (图 9、10 中的 A 代表地连墙左侧, A' 代表地连墙右侧)。由于模型按轴对称进行计算, 两侧地连墙的水平位移呈对称分布, 地连墙均产生向坑内的水平位移, 基坑横截面由圆形变为了椭圆形。



1—A; 2—A'。

图 9 开挖至坑底时地连墙对称侧的水平位移

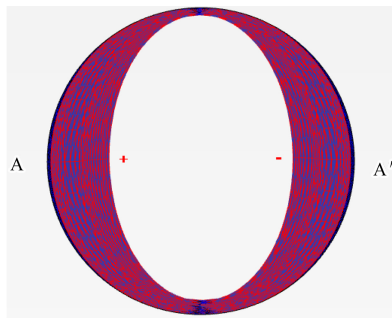
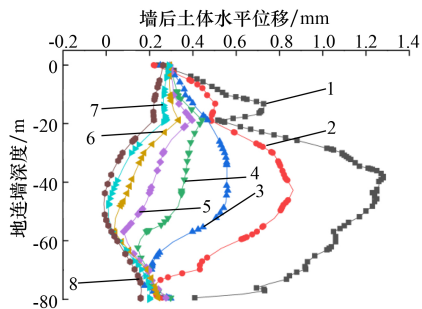


图 10 地连墙横截面

3.5 墙后土体水平位移

基坑开挖至坑底时地连墙墙后土体的水平位移如图 11 所示。



墙后距离/m: 1—5; 2—10; 3—15; 4—20;
5—25; 6—30; 7—35; 8—40。

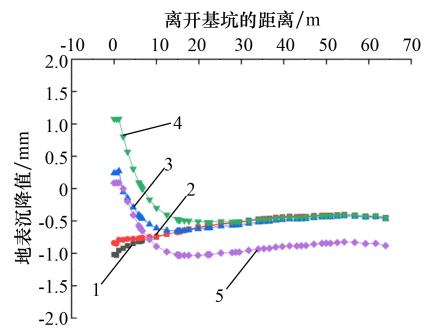
图 11 开挖至坑底时墙后土体的水平位移

由上图可知：在坑底处的墙后水平位移达到最大值，数值为 1.3 mm，距离基坑越近墙后土体产生的水平位移越大，墙后 30 m 土体的水平位移基本可忽略不计；墙后土体向坑内发生位移且位移值随着地连墙深度的增加大致呈现为先增大后减小的趋势，其变化规律与地连墙水平位移变化趋势基本一致，是由于坑内土体卸荷，坑外土体挤压地连墙使其产生向坑内的变形，坑外土体随之产生向坑内的位移。

3.6 基坑周边地表沉降

基坑围护结构变形会对基坑周边地表沉降产生一定的影响，图 12 为不同开挖深度基坑周边地表沉降。

由图 12 可知：开挖至 -1.6 m 和 -3.33 m 时基坑周边地表沉降呈现逐渐减小的趋势，开挖至 -12.33、-21.33、-32.33 m 时基坑周边地表沉降值随着离开基坑距离的增大呈现先增大后减小的趋势；当基坑开挖至坑底时引起的地表沉降值



开挖深度/m: 1—-1.6; 2—-3.33;
3—-12.33; 4—-21.33; 5—-32.33。

图 12 不同开挖深度基坑周边地表沉降

最大，最大值是 1.2 mm，为 $0.034\% H$ ，地表沉降最大值出现在距离基坑 15 m 的位置，约为 $43\% H$ ，基坑开挖引起地表沉降的范围在距离基坑 20 m 内，约为 $0.57H$ ，明显满足软土基坑周边地表沉降统计 $0.5\% H \sim 1.5\% H^{[10]}$ 。

开挖至 -1.6 m 和 -3.33 m 时由于坑内土体开挖，地连墙产生向坑内的位移，所以坑边土体向坑边移动出现沉降；开挖至 -12.33 m 和 -21.33 m 时，在承压水作用下坑底土体隆起导致地连墙产生向上的位移且地连墙与坑外土体联结紧密，因此基坑周边土体随着地连墙的上移而隆起；开挖至 -32.33 m 时，基坑内外土压力差较大，地连墙向坑内的水平位移较大，坑外土体向坑内移动导致基坑周边的土体产生回降。

4 结 论

本文采用 PLAXIS 3D 进行三维数值模拟，研究了基坑施工过程中超深圆形地连墙的受力和变形特性，主要研究结论如下。

(1) 坑内土体在地连墙内形成相对紧密的土塞在地连墙内侧产生侧摩阻力，地连墙内侧土体摩阻力随着开挖深度的增大逐渐增加，土塞效应增强了坑底抗隆起稳定性。

(2) 地连墙的弯矩和环向轴力最大值随着开挖深度的增大而增加，最大值均出现在基坑开挖深度附近；超深圆形地连墙沿深度方向表现出柔性性质，弯矩图中出现多个反弯点。

(3) 圆形地连墙的水平位移随着开挖深度的增大而增加，最大水平位移值 $0.063\% H$ ，明显小

(下转第 30 页)

桩深度划分上部等芯桩和下部刚性桩,上部等芯桩采用考虑柔性荷载作用下的侧阻分段非线性分布特征,下部刚性桩采用线性侧阻分布模式,分别计算上部桩土应力比和下部桩土应力比,采用叠加原理得到长芯复合桩的桩土应力比,试验结果表明,该计算方法是合理可行的。

(2) 与相关文献对比,高填方路堤柔性荷载作用下,加芯搅拌桩桩侧阻力非线性分布模式对桩土应力比的影响是不可忽略的,该分布模式在一定程度上,提高了桩的竖向荷载的分担比,一定荷载条件下的,桩土应力比的计算值比试验值小,说明理论模型的假定条件在一定程度上降低了加芯搅拌桩的荷载分担比。

(3) 芯桩的桩径和桩长能影响一定荷载条件下的长芯复合搅拌桩的桩土应力比,桩径越大、桩长越长,桩土应力比越大,桩长对桩土应力比的影响幅度大于桩径。在进行加芯桩的结构设计时,应对芯桩的桩长、桩径进行合理优化,确定合理的桩长和桩径可以得到更加经济、安全、合理的结构设计方案。

参考文献:

[1] 劲性复合桩技术规程:JGJ/T327—2014[S]. 北京:中

(上接第 6 页)

于软土基坑水平位移统计值 $0.329\%H \sim 2.897\%H$; 圆形地连墙表现为向坑内的挤压变形。

(4) 受基坑内土塞效应和承压水作用的影响,基坑周边地表沉降随着离开基坑的距离增大呈现增大后减小的趋势,地表沉降最大值为 $0.034\%H$,基坑开挖引起地表沉降的范围为 $0.57H$ 。

参考文献:

- [1] 张世彬. 土塞效应在基坑工程中的研究与应用[J]. 城市道桥与防洪. 2021(8):329-332.
- [2] 赵一行,詹刚毅,石钰锋,等. 某超深圆形基坑受力变形的尺寸效应分析[J]. 华东交通大学学报. 2021, 38(5):23-29.
- [3] 肖潇,李明广,陈锦剑,等. 基坑开挖对围护墙竖向变形的影响机理[J]. 上海交通大学学报. 2018, 52(12):1552-1558.

国建筑工业出版社. 2014.

- [2] 罗强,陆清元. 考虑桩土滑移的路堤下刚性桩复合地基沉降计算[J]. 中国公路学报, 2018, 31(1):20-30.
- [3] 吕伟华,缪林昌. 刚性桩复合地基桩土应力比计算方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(3): 624-628.
- [4] 袁杰. 路堤下复合地基桩土应力比计算方法研究[J]. 公路工程, 2015, 40(2):174-177;202.
- [5] 陆清元,罗强,蒋良淮. 路堤下刚性桩复合地基桩-土应力比计算[J]. 岩土力学, 2018, 39(7):2473-2482.
- [6] 庄乐通. 碎石桩复合地基桩土应力比计算新方法[D]. 广州:广州大学, 2018.
- [7] 叶观宝,蔡永生,张振. 加芯水泥土桩复合地基桩土应力比计算方法研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 672-678.
- [8] 朱桃丽,赵桂娥. 考虑桩间土非线性影响的刚性桩复合地基桩土应力比计算方法研究[J]. 湖南交通科技, 2017, 43(2):45-50.
- [9] 姜文雨,刘一. 刚性桩复合地基中性面深度与桩土应力比计算[J]. 岩土力学, 2018, 39(12):4554-4560.
- [10] 顾士坦,施建勇,王春秋,等. 劲性搅拌桩芯桩荷载传递规律理论研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(8):2473-2478.
- [11] 建筑地基处理技术规范:GJG79—2012[S], 北京:中国建筑工业出版社, 2014.

- [4] 冷伍明,姚康,门小雄,等. 考虑工程桩效应的滨海深基坑变形特性分析[J]. 铁道科学与工程学报. 2023, 20(4):1347-1358.
- [5] 张誉津,刘俊城,谭勇. 深厚富水砂性地层深基坑开挖降水变形特性研究[J]. 隧道建设(中英文). 2023, 43(9):1511-1522.
- [6] 林世杰,付浩,宋二祥,等. 圆形竖井变形特性及其计算分析方法[J]. 地基处理. 2023, 5(3):195-204.
- [7] 张世彬. 土塞效应在基坑工程中的研究与应用[J]. 城市道桥与防洪. 2021(8):329-332.
- [8] 邱树远. 佛山地区软土基坑施工全过程围护结构受力与变形分析[D]. 西安:长安大学, 2021.
- [9] 郑启宇. 上海地区承压含水层降水对深基坑受力变形影响研究[D]. 上海:上海交通大学, 2020.
- [10] 贾曾潘,陈保国. “两墙合一”条件下地铁车站深基坑变形特性[J]. 北京交通大学学报. 2021, 45(3):47-54.