

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202006017



严重偏压作用下非对称基坑的 变形及受力特性

黄山景, 肖朝昀, 涂兵雄, 蔡奇鹏, 张强

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为了研究严重偏压作用下的非对称基坑变形及受力特性, 依托福建省厦门市某非对称工作井基坑工程, 通过现场监测方法分析非对称基坑在严重偏压作用下围护桩变形特性与支护内力响应。结果表明: 在严重偏压作用下, 非对称基坑围护桩桩顶整体产生旋转变形, 桩身将产生两个方向的水平位移, 切向水平位移存在悬臂状和“凸肚”状两种不同的变形模式; 超挖、降雨等恶劣情况将严重影响非对称基坑围护结构变形及支护受力; 设计、施工和监测应充分考虑基坑的非对称特性, 单一考虑围护桩法向变形不利于工程风险控制。

关键词: 非对称基坑; 现场监测; 变形特性; 内力响应

中图分类号: TU 43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2021)01-0022-08

Deformation and Stress Characteristics of Asymmetric Excavation Under Severe Asymmetric Loading

HUANG Shanjing, XIAO Zhaoyun, TU Bingxiong,
CAI Qipeng, ZHANG Qiang

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to study the deformation and stress characteristics of asymmetric excavation under severe asymmetric loading, based on an asymmetric excavation project in Xiamen, Fujian, the deformation characteristics of retaining piles and the force response of supporting structures of asymmetric excavation are analyzed by field monitoring method. The results show that under asymmetric loading, the whole torsional deformation occurs on the tops of the asymmetric excavation, the horizontal displacement in two directions occurs in the retaining piles. There are two different deformation modes in tangential horizontal displacement: cantilever type and convex type. Over-excavation, rainfall and other bad conditions will seriously affect the deformation of the retaining structures and the force of the supporting structures of asymmetric excavation. Asymmetrical characteristics of the excavation should be fully considered in design, construction and monitoring. Only considering the normal deformation of retaining piles is not conducive to the project risk control.

Keywords: asymmetric excavation; field monitoring; deformation characteristics; force response

工程建设中常面临复杂的地形地貌及周边环境, 公路隧道工作井基坑的尺寸为 38.4 m(长)×21.3 m(宽)×17.9 m(深), 在地形高度差达 9 m 的区域中进行开挖, 采用复杂的围护结构和支撑体系, 工程施工风险较大, 为典型的严重偏压非对称基坑。基坑受地面标高差异、既有建筑、交通荷载、土层不均匀

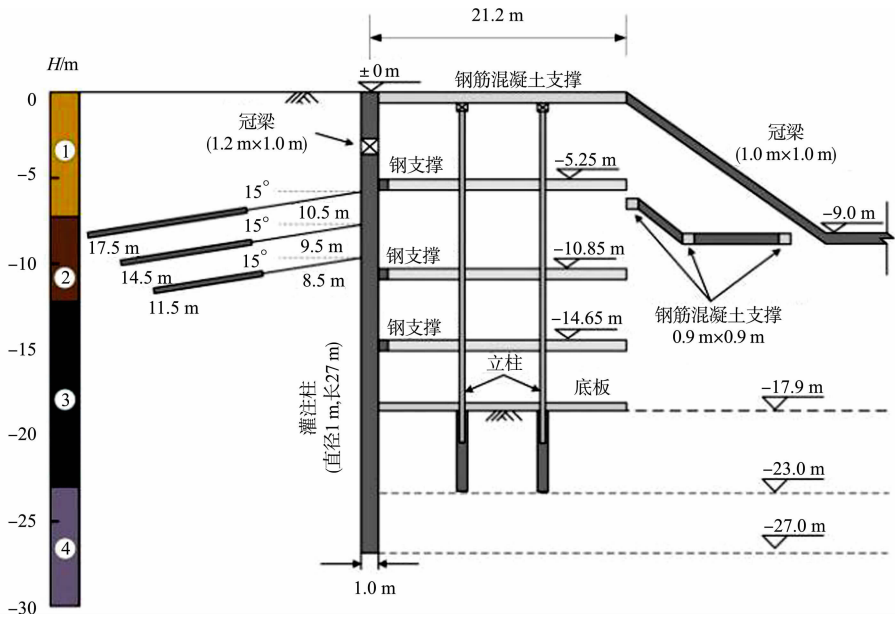
收稿日期: 2020-06-11

通信作者: 肖朝昀(1979-), 男, 教授, 博士, 主要从事隧道与地下结构、深基坑工程施工环境效应及对策、施工监测与控制技术、岩土数值计算及环境岩土工程的研究。E-mail: zyxiao@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778249); 华侨大学研究生科研创新能力培育计划项目(18013086015)

近年来,越来越多的学者关注非对称基坑的变形性状及受力特性,对实际非对称基坑工程进行现场监测是一个主要方法,通过现场监测获取围护桩桩身水平位移、桩顶水平位移、地表沉降和支撑轴力等实测数据,研究非对称基坑的变形特性和支护内力响应等^[2-7]. 由于非对称基坑的复杂性,也有不少学者通过数值模拟方法研究非对称开挖、非对称超载等不同因素对非对称基坑的变形性状及受力特性的影响^[8-15]. 一些学者通过理论解析法推导了适用于非对称基坑的土压力计算方法和支护结构解析解等^[16-18]. 目前,国内对非对称基坑的变形及受力特性仍有待进一步研究. 本文通过现场监测,研究在极端条件下,典型非对称基坑的变形及受力特性.

<http://www.hdxh.hqu.edu.cn>



(b) II-II 断面图

图 2 基坑断面图

Fig. 2 Profile of excavation

坑 1 区和基坑 2 区. 基坑 1 区北侧围护桩上部存在 3 m 的悬臂段,不宜架设内支撑,所以采取锚索结合斜撑的支撑体系,在基坑东侧上部架设 3 道锚索,并且架设 2 道钢支撑斜撑(中心标高分别为-11.20, -15.00 m). 基坑 2 区则均采用斜撑的内支撑体系,一共布置 4 道斜撑,第 1 道为 0.9 m×0.9 m 钢筋混凝土支撑(中心标高为-0.50 m);其余采用钢支撑(中心标高分别为-5.25, -10.85, -14.65 m).

1.3 工程地质条件

根据地勘报告,基坑范围内地层主要分为 4 层:第 1 层为杂填土,主要分布在 0~-7 m 中,成分以碎石、砂砾及花岗岩残积土为主;第 2 层为残积砾质黏土,主要分布在-7~-13 m 中,其粘性较差,系母岩花岗岩风化残积物,遇水后易软化、崩解,局部段夹未风化孤石;第 3 层为全风化花岗岩,主要分布在-13~-23 m 中,呈灰黄或灰白色,除石英以外,其他矿物风化为粉末或粘粒,岩体已呈砂土状,手握即散;第 4 层为中风化花岗岩,主要分布在-23 m 以下,强度较高,围护桩基本嵌岩. 场地土体参数,如表 1 所示. 表 1 中: γ 为重度; w 为含水率; c 为粘聚力; φ 为摩擦角; E_o 为压缩模量. 根据文献[19-20]的基坑工程案例,在类似土岩复合地质条件中,基坑开挖产生的变形较小,小于文献[21]软土地区的基坑工程案例.

表 1 场地土体参数
Tab. 1 Site soil parameters

序号	土层名称	$\gamma / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	$w / \%$	孔隙比	c / kPa	$\varphi / (^\circ)$	E_o / MPa	标贯数
1	杂填土	18.4	21.1	0.83	12.0	23.3	5.38	6~10
2	残积砾质黏土	18.7	24.5	0.81	34.4	28.1	5.33	15~28
3	全风化花岗岩	19.7	24.2	0.72	31.9	26.4	6.31	31~47
4	中风化花岗岩	26.3	—	—	50.0	28.4	—	—

1.4 开挖工况

工作井基坑围护桩、冠梁、南侧的第 1 道混凝土斜撑及东侧挡墙施工完成后,开始开挖坑内土体,基坑开挖过程总共分为 4 个工况. 2018 年 4 月 8 日,工作井基坑正式开挖,2018 年 5 月 21 日完成整个工程结构的底板浇筑工作,整个开挖过程历时 44 d. 第 1~14 天为工况 1,基坑整体开挖至-8.0 m,基坑 1 区坑壁局部预先开挖一道沟槽,架设 3 道锚索;第 15~28 天为工况 2,基坑 2 区施工第 2 道支撑,基坑整体开挖至-14.0 m,基坑 2 区施工第 3 道支撑架设不及时,超挖约 3.2 m;第 29~35 天为工况 3,基坑 1 区施工第 1 道支撑,基坑 2 区施工第 3 道支撑,整体开挖至-16.0 m,在此阶段,第 29 天遭遇强降雨;第 36~44 天为工况 4,基坑 1 区施工第 2 道支撑,基坑 2 区施工第 4 道支撑,整体开挖至坑底-17.9 m,施

工底板垫层. 基坑开挖步骤示意图, 如图 3 所示.

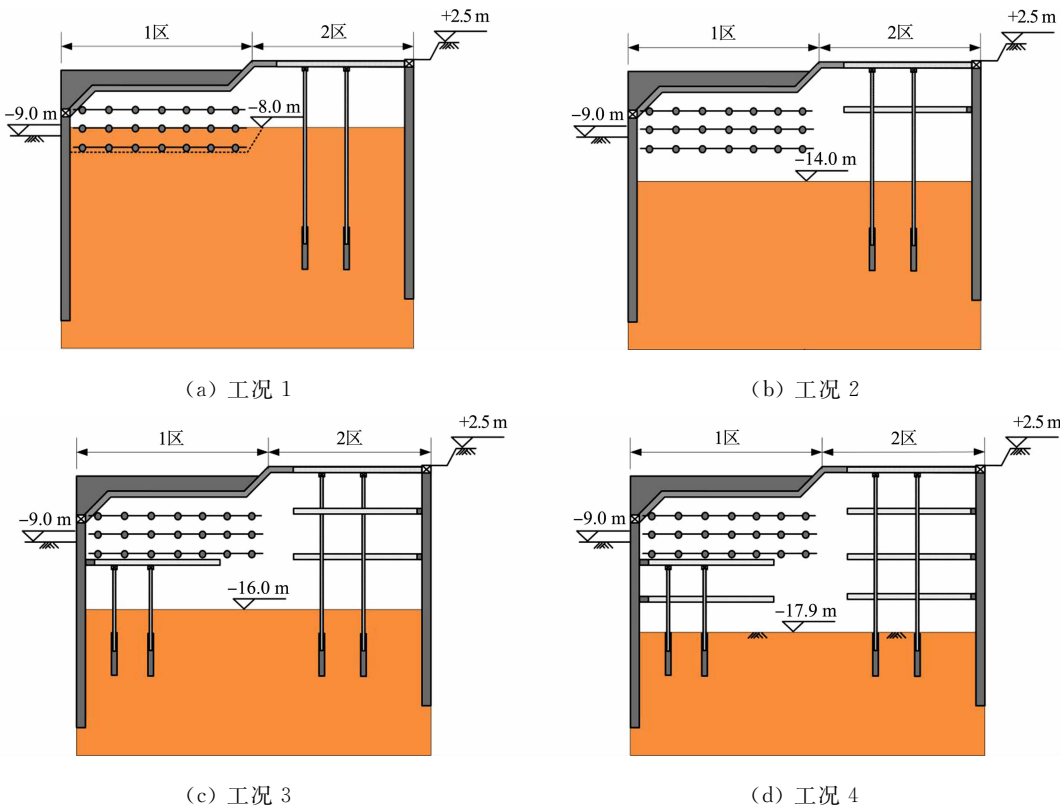


图 3 基坑开挖步骤示意图

Fig. 3 Schematic diagram of excavation digging steps

2 监测结果及分析

2.1 监测方案

为确保基坑开挖施工安全,对围护结构变形及支护内力进行现场监测,基坑 1 区东侧和基坑 2 区为重点观测区域,共布置 5 个测斜点(I-1~I-5),11 个桩顶位移测点(D1~D11).用测斜点观测围护桩水平位移,采用测斜仪获取桩身变形数据.由于打设锚索等施工原因,I-4 和 I-5 两个测斜点被破坏,无法获取到相应位置处桩身水平位移;用桩顶位移测点观测桩顶水平位移和竖向位移.同时,布置 11 个锚索测力计(M1~M11)与 6 个支撑轴力计,分别观测基坑开挖施工过程中锚索拉力与支撑轴力变化.

2.2 桩顶位移

开挖最后阶段围护桩桩顶水平位移,如图 4 所示.围护桩桩顶水平位移与时间关系,如图 5 所示.图 5 中: d_{ht} 为桩顶水平位移; t 为时间;正值表示向开挖侧变形(下同);负值表示向未开挖侧变形(下同).

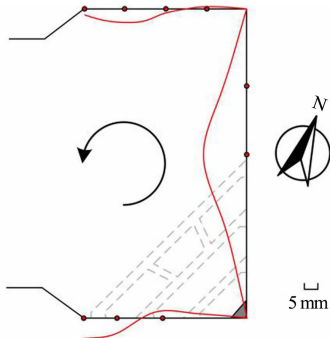


图 4 开挖最后阶段围护桩桩顶水平位移

Fig. 4 Horizontal displacement of retaining pile tops at final stage

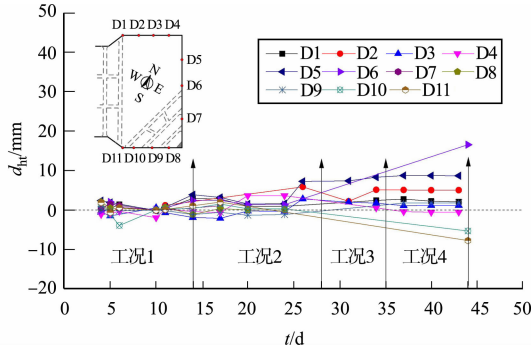


图 5 围护桩桩顶水平位移与时间关系

Fig. 5 Relationship between horizontal displacement and time for retaining pile tops

由图 4 可知:严重偏压作用下的非对称基坑桩顶水平位移与普通对称基坑存在明显差异,非对称基坑桩顶整体产生扭转变形,而普通对称基坑随着土方的开挖,桩顶水平位移逐渐往坑内发展,基坑一侧靠近中部位置桩顶水平位移最大.非对称基坑北侧的地势低,受偏压影响,北侧靠近角部位置桩顶略微地往坑外位移,东侧桩顶水平位移较大,通过第 1 道混凝土支撑推着南侧部分桩顶往坑外位移.

由图 5 可知:桩顶水平位移整体上随着基坑的开挖逐步增大,最大桩顶水平位移出现在基坑东侧中部位置测点 D6(最大值达到 16.56 mm)处;开挖至坑底时,北侧最大桩顶水平位移出现在测点 D2(5.05 mm)处;南侧测点 D10 和 D11 桩顶产生明显的往坑外的水平位移,其值分别为 5.20、7.72 mm.

2.3 桩身水平位移

围护桩桩身水平位移与深度的分布情况,如图 6 所示.为了方便讨论,将桩身发生垂直于基坑围护结构的位移定义为法向水平位移(δ_{hn}),平行于基坑围护结构的位移定义为切向水平位移(δ_{ht}).

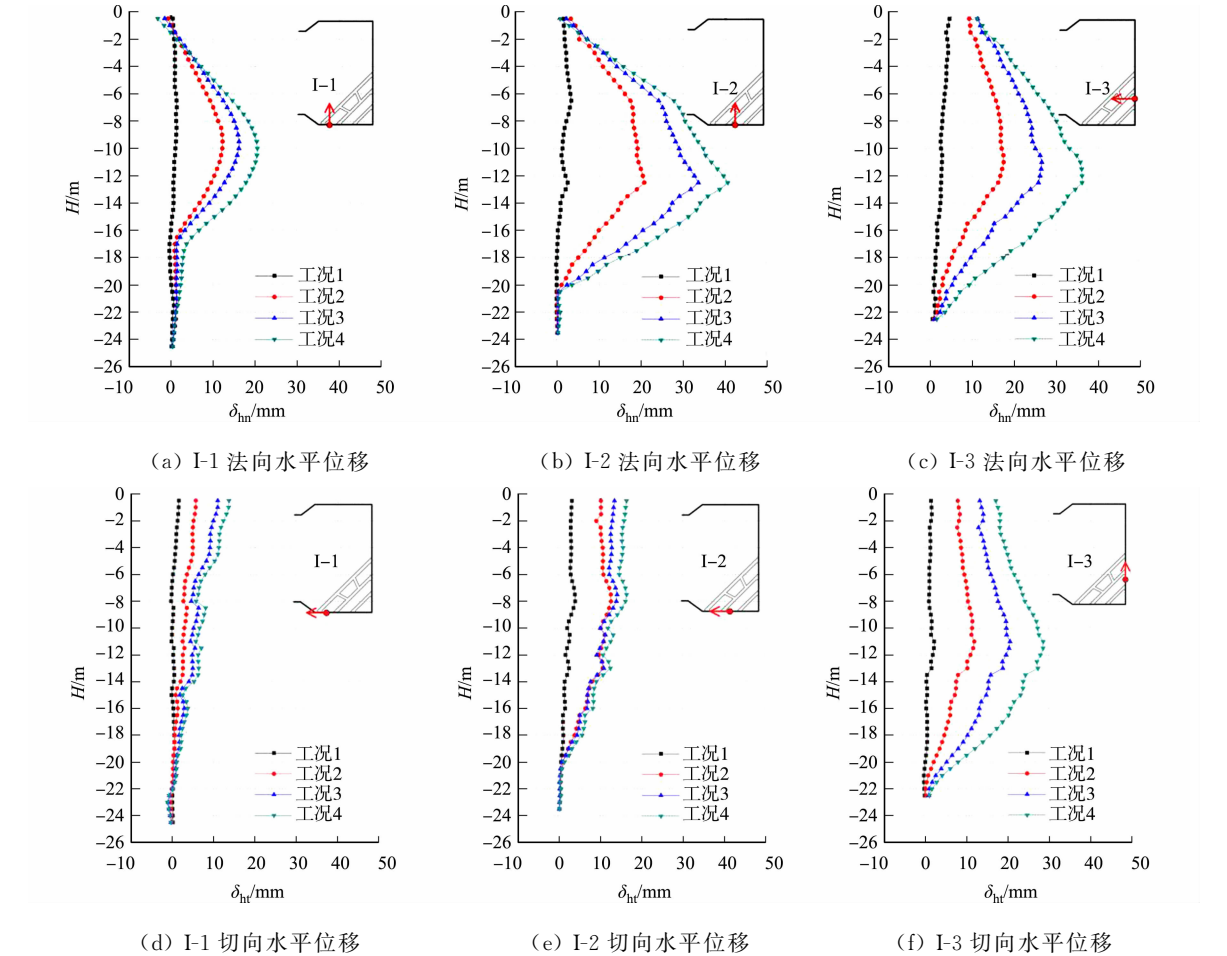


图 6 围护桩桩身水平位移与深度的分布情况

Fig. 6 Distribution between horizontal displacement of retaining pile and depth

由图 6(a)~(c)可知:随着基坑的开挖,桩身法向水平位移呈“凸肚”状,与常见采用多道支撑的围护结构变形特征相符;开挖至坑底时,最大的法向水平位移位于坑底以上 5.4~7.9 m 范围内,I-1~I-3 测点处桩身的最大法向水平位移分别为 20.54 mm($0.11\% H_e$, H_e 为基坑最大开挖深度),40.53 mm ($0.23\% H_e$),36.09 mm($0.20\% H_e$).

对于常规无偏压对称基坑,围护桩不会产生切向水平位移,因此,较少研究关注围护桩的切向水平位移.文中对严重偏压基坑的围护桩切向水平位移进行监测(图 6(d)~(f)).由图 6(d)~(f)可知:I-1~I-3 测点处围护桩均产生较大切向水平位移,基坑开挖至坑底时,最大切向水平位移分别达 13.72 mm ($0.08\% H_e$),16.32 mm($0.09\% H_e$)和 28.56 mm($0.16\% H_e$);围护桩产生了不同的切向变形模式,I-1 测点处围护桩呈明显的悬臂式变形,I-3 测点处围护桩产生了与法向水平位移相同的“凸肚”状变形.

为了反映围护桩变形随着基坑开挖的发展规律,图 7 给出了基坑围护桩最大法向水平位移($\delta_{hn,m}$)

随时间的分布情况. 由图 7 可知: 围护桩整体法向水平位移随开挖不断增大, 在工况 1, 2 阶段前期, 变形随基坑开挖缓慢增长; 由于基坑 2 区在工况 2 阶段超挖约 3.2 m, 未及时架撑, 位于基坑 2 区 I-1~I-3 测点桩身法向水平位移在工况 2 阶段后期急剧增加; 从工况 3 阶段开始, 整体变形增长速率明显加快, 这是由于第 29 天遭遇强降雨, 场地内分布的深厚残积砾质粘性土结构遭到破坏, 承载力急剧降低, 随着基坑开挖扰动, 围护桩变形显著增加; 而 I-3 测点围护桩变形受降雨影响最大, 降雨前最大法向水平位移为 20.63 mm, 降雨后增大至 32.08 mm, 其增幅达 55%, 随着支撑的架设和底板浇筑完成后变形趋于平缓.

2.4 支撑轴力与锚索内力

为了观测偏压基坑开挖过程中支护内力响应, 对每道支撑最外侧角的撑轴力变化进行监测, 砼支撑和钢支撑轴力(F)的历时曲线, 如图 8, 9 所示. 图 8, 9 中: 正值表示支撑受压. 基坑 1 区采用 3 道锚索结合两道角撑的支撑体系, 锚索拉力(T)历时曲线, 如图 10 所示.

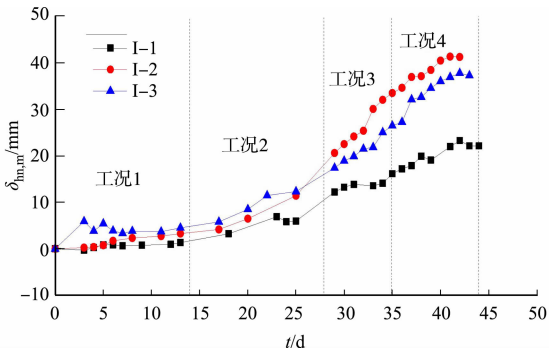


图 7 围护桩最大法向水平位移随时间的分布情况

Fig. 7 Distribution of normal horizontal displacement of retaining piles with time

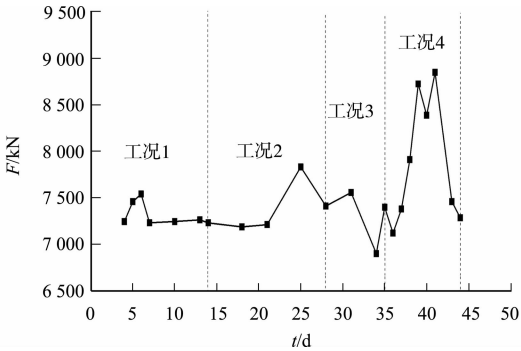


图 8 砼支撑轴力历时曲线

Fig. 8 Axial force duration curves of concrete struts

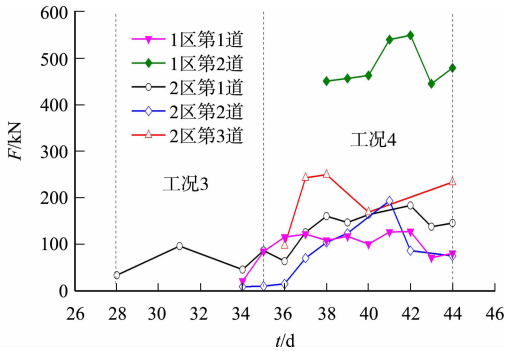


图 9 钢支撑轴力历时曲线

Fig. 9 Axial force duration curves of steel struts

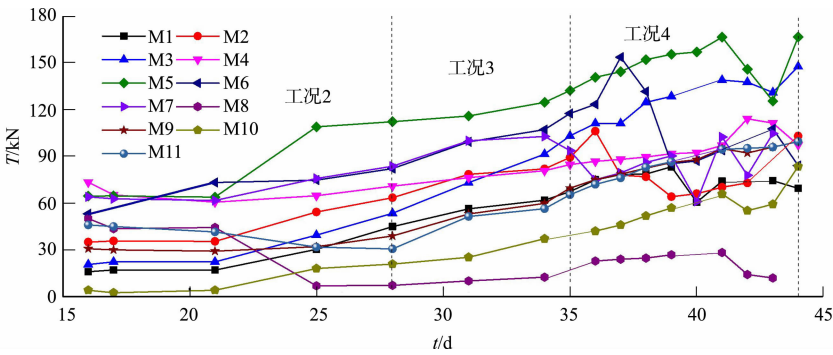


图 10 锚索拉力历时曲线

Fig. 10 Tension force duration curves of anchor cable

由图 8 可知: 砼支撑在整个基坑开挖过程中均处于受压状态, 并且轴力大小均保持较高水平; 在降雨、超挖等恶劣因素影响下, 非对称基坑第 1 道砼支撑轴力基本保持在 7 000 kN 以上, 而对于类似开挖条件的普通对称基坑案例^[22-24], 其第 1 道砼支撑轴力一般小于 2 000 kN, 说明砼支撑在基坑开挖过程中, 对控制基坑变形以及维持基坑稳定起到了重要作用; 工况 4 中砼支撑轴力急剧增加, 这是由于降雨过后, 随着基坑开挖, 围护结构变形显著增加.

由图 9 可知: 所有监测的钢支撑中, 基坑 1 区第 2 道钢支撑轴力最大, 最大值为 540.1 kN, 其余钢支撑轴力值均小于 250 kN, 远小于设计的轴力标准值, 支撑未能有效控制围护结构变形, 这可能是因为最外侧角支撑端部与钢围檩连接不够牢靠. 由于超挖, 围护结构已经先产生变形, 而后架设的支撑使围护

结构变形未能得到有效控制。基坑 2 区为偏压区,在工况 2 时,严重超挖,第 2 道支撑未能及时架设,支撑架的初期轴力基本为 0,而围护结构变形仍在持续发展。对于类似工程,应及时架设支撑,同时确保支撑架设后,充分加力至支撑轴力稳定后,再进行下一步开挖,以减小基坑开挖对围护结构变形的影响。

由图 10 可知:锚索拉力均小于 180.0 kN,且随着基坑开挖的进行,锚索拉力整体上呈增大趋势,对围护结构侧向变形起到一定的抑制作用;基坑 1 区第 1 道钢支撑架设完成后,轴力处于较低水平,未能有效抑制围护结构变形,对锚索拉力影响不大,锚索拉力仍持续增大;基坑 1 区第 2 道钢支撑的架设对锚索拉力产生了一定的影响,对围护结构变形起到一定的抑制作用,部分锚索拉力呈现降低的趋势。

3 案例统计与对比分析

基坑围护桩最大水平位移(δ_{hm})与最大开挖深度的关系,如图 11 所示。图 11 中:虚线为围护桩变形上限;实线为围护桩变形均值线。对于常规无偏压对称基坑,围护桩只产生法向水平位移,文中基坑由于受严重偏压影响产生较大切向水平位移,故将两个方向的合成水平位移加入进行对比。由图 11 可知:基坑的围护桩最大法向水平位移变化介于 $0\% H_e \sim 0.23\% H_e$,平均值为 $0.12\% H_e$;桩身最大合成水平位移的变化介于 $0\% H_e \sim 0.26\% H_e$,平均值为 $0.14\% H_e$,围护桩最大合成水平位移相较于法向水平位移增大了 17%。在具有相似地质条件的普通对称基坑案例中,文献[19]中土岩复合地区基坑围护结构的 δ_{hm} 平均值为 $0.16\% H_e$,文献[20]基坑围护结构的 δ_{hm} 平均值为 $0.20\% H_e$ 。对于类似偏压基坑,施工过程中,单一监测桩身法向水平位移,不利于控制工程风险,需重点关注桩身两个方向上的水平位移,合理布置测点以反映桩身变形特性。

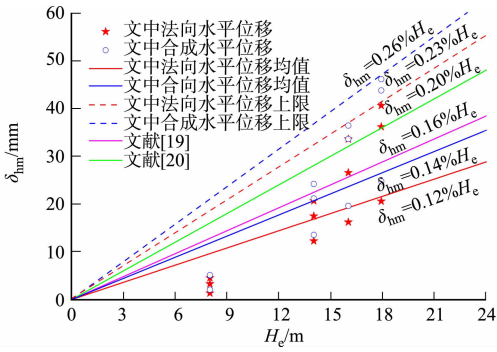


图 11 围护桩最大水平位移与开挖深度关系
Fig. 11 Relationship between maximum horizontal displacement and maximum excavation depth of retaining piles

4 结论

- 1) 在严重偏压作用下,非对称基坑桩顶整体产生扭转变形;围护桩桩身在两个方向上均会产生较大水平位移,法向水平位移均呈“凸肚”状变形,最大法向水平位移达 40.53 mm($0.23\% H_e$),切向水平位移存在悬臂式变形与“凸肚”状变形两种不同的变形模式,最大切向水平位移达 28.56 mm($0.16\% H_e$).
- 2) 基坑偏压区第 1 道砼支撑轴力基本保持 7 000 kN 以上,对控制基坑变形,以及维持基坑稳定起到了重要作用;因超挖及钢围檩连接不牢靠等,钢支撑未能充分发挥对围护桩变形的抑制作用,钢支撑最大轴力仅 540.1 kN,锚索拉力均小于 180.0 kN;残积土地层中,降雨导致围护桩变形显著增加,围护桩变形最大增幅达 55%.
- 3) 非对称基坑围护桩最大法向水平位移为 $0\% H_e \sim 0.23\% H_e$,平均值为 $0.12\% H_e$,最大合成水平位移为 $0\% H_e \sim 0.26\% H_e$,平均值为 $0.14\% H_e$,最大合成水平位移相较于最大法向水平位移增大了 17%.
- 4) 对于严重偏压的非对称基坑,设计中应充分考虑围护桩两个方向上的变形,在施工过程中,单一监测桩身法向水平位移,不利于控制工程风险,需重点关注桩身两个方向上的水平位移,合理布置测点,以反映桩身的变形特性.

参考文献:

[1] 张旷成,李继民. 杭州地铁湘湖站“08.11.15”基坑坍塌事故分析[J]. 岩土工程学报,2010,32(增刊 1):338-342.
[2] 石钰锋,阳军生,白伟,等. 紧邻铁路偏压基坑围护结构变形与内力测试分析[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(4):826-833.
[3] 姚爱军,张新东. 不对称荷载对深基坑围护变形的影响[J]. 岩土力学,2011,32(增刊 2):378-382,388. DOI:10.

- 16285/j. rsm. 2011. s2. 031.
- [4] XU Changjie, XU Yuanlei, SUN Honglei, *et al.* Characteristics of braced excavation under asymmetrical loads[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013(11): 1-12. DOI:10. 1155/2013/452534.
- [5] 朱有奇,周云东,赵元海,等. 非对称深基坑变形规律现场监测[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(6): 157-161. DOI:10. 3969/j. issn. 1672-1144. 2013. 06. 033.
- [6] 魏纲,俞国骅,余剑英,等. 临近地铁隧道的非对称基坑受力及变形性状分析[J]. 施工技术, 2017, 46(增刊1): 22-27.
- [7] OU Xuefeng, ZHANG Xuemin, FU Jinyang, *et al.* Cause investigation of large deformation of a deep excavation support system subjected to unsymmetrical surface loading[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 107: 104202. DOI: 10. 1016/j. engfailanal. 2019. 104202.
- [8] 舒进,丁春林,张思源. 临河地铁车站深基坑变形规律研究[J]. 华东交通大学学报, 2011, 28(5): 57-62.
- [9] 郑刚,宗超,曾超峰,等. 非对称基坑分步降水开挖引起的围护结构变形性状[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊2): 550-554.
- [10] 徐长节,成守泽,蔡袁强,等. 非对称开挖条件下基坑变形性状分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1929-1934. DOI: 10. 16285/j. rsm. 2014. 07. 035.
- [11] 雷崇. 临河地铁深基坑开挖在大偏压作用下的支护结构性状研究[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(5): 130-134. DOI: 10. 13238/j. issn. 1004-2954. 2017. 05. 028.
- [12] 方焘,刘春,郭俊,等. 土体宽度非对称基坑变形特性分析[J]. 华东交通大学学报, 2019, 36(6): 99-105. DOI:10. 16749/j. cnki. jecjtu. 2019. 06. 015.
- [13] LIU Shouhua, YANG Junsheng, FU Jinyang, *et al.* Performance of a deep excavation irregular supporting structure subjected to asymmetric loading[J]. International Journal of Geomechanics, 2019, 19(7): 0915007. 1-0915007. 13. DOI:10. 1061/(ASCE)GM. 1943-5622. 0001468.
- [14] GUO Panpan, GONG Xiaonan, WANG Yixian. Displacement and force analyses of braced structure of deep excavation considering unsymmetrical surcharge effect[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 113: 103102. DOI:10. 1016/j. compgeo. 2019. 103102.
- [15] 孙武斌. 地铁车站偏压基坑围护结构变形影响因素研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(4): 86-91. DOI:10. 3969/j. issn. 1674-0696. 2020. 04. 15.
- [16] 喻军,鲁嘉,龚晓南. 考虑围护结构位移的非对称基坑土压力分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊1): 24-27.
- [17] 徐长节,殷铭,胡文韬. 非对称开挖基坑支撑式围护结构解析解[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2306-2312. DOI:10. 16285/j. rsm. 2017. 08. 019.
- [18] 范晓真,许海明,徐长节,等. 非对称开挖砂性土基坑刚性支护结构解析解[J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(4): 397-405. DOI:10. 16183/j. cnki. jsjtu. 2020. 04. 008.
- [19] YOO C. Behavior of braced and anchored walls in soils overlying rock[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(3): 225-233. DOI:10. 1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:3(225).
- [20] LEUNG E Y, NG C W W. Wall and ground movements associated with deep excavations supported by cast in situ wall in mixed ground conditions[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(2): 129-143. DOI:10. 1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:2(129).
- [21] 徐中华,王建华,王卫东. 上海地区深基坑工程中地下连续墙的变形性状[J]. 土木工程学报, 2008(8): 81-86. DOI: 10. 15951/j. tmgcxb. 2008. 08. 013.
- [22] 夏雄,邓妍,陆天阳,等. 常州市某地铁站深基坑支撑轴力监测与分析[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2019, 17(1): 27-30. DOI:10. 13960/j. issn. 1672-2558. 2019. 01. 006.
- [23] 王宁波,陈志川. 深基坑混凝土支撑轴力监测数据分析与研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2018, 31(增刊1): 115-117. DOI:10. 13319/j. cnki. sjztdxsbzrb. 2018. S1. 29.
- [24] 鲍树峰,邱青长,罗彦,等. 土岩组合基坑施工监控技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊1): 3270-3276. DOI:10. 13722/j. cnki. jrme. 2014. s1. 095.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)