

深回填土砂泥岩组合地层桩锚围护基坑的变形规律^{*}冯 虎¹ 黄 锋² 周启宏³

(1. 重庆交通大学土木工程学院, 400074, 重庆; 2. 重庆交通大学省部共建山区桥梁及隧道工程国家重点实验室, 400074, 重庆; 3. 中铁二十局集团第三工程有限公司, 400065, 重庆)

摘 要 [目的] 目前工程界针对基坑的研究大多数基于软土基坑和岩质基坑的经验, 重庆地区为深回填土砂泥岩组合地层, 需展开基坑变形规律研究。[方法] 以重庆轨道交通 10 号线兰花湖停车场基坑工程为背景, 基于现场监测数据, 总结围护结构水平位移, 围护桩后地面沉降的变化规律, 进而围护结构水平位移与桩后地面沉降相关性。[结果及结论] 围护桩最大侧移 δ_h 变化范围为 $0.048\% H \sim 0.103\% H$ (H 为开挖深度), 远小于软土地区的统计结果; 最大地面沉降 δ_v 介于 $0.033\% H \sim 0.220\% H$, 小于卵石和软土基坑, 与青岛土岩组合基坑较为接近; 基坑开挖影响范围为 $H \sim 1.5H$; 基坑最大地面沉降 δ_v 与围护结构最大侧移 δ_h 关系可表示为 $\delta_v = 0.45\delta_h \sim 2.35\delta_h$, 均值为 $1.31\delta_h$; 地面沉降包络面积和围护结构侧移包络面积比值近似为 1.67。

关键词 基坑工程; 回填土; 砂泥岩; 水平位移; 地面沉降; 监控量测

中图分类号 TU433

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.01.018

Deformation Law of Pile-anchor Retaining Foundation Pit in Deep Backfill Soil Sand-mudstone Composite Stratum

FENG Hu¹, HUANG Feng², ZHOU Qihong³

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, 400074, Chongqing, China; 2. State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong University, 400074, Chongqing, China; 3. Third Engineering of Chinese Railway 20th Bureau Group Co., Ltd., 400065, Chongqing, China)

Abstract [Objective] At present, most research in engineering field regarding foundation pit is based on the experience of excavations in soft soil and rocky strata. Given that the geological conditions in Chongqing involve deep backfill soil sand-mudstone composite stratum, it is essential to conduct a study on the deformation law of foundation pit. [Method] Taking the foundation pit project of Lanhuahu Parking Lot on

Chongqing Rail Transit Line 10 as background, field-monitored data is utilized to summarize the horizontal displacement of retaining structures and the change law of land subsidence behind retaining piles. Additionally, the correlation between retaining structure horizontal displacement and land subsidence behind piles is explored. [Result & Conclusion] The maximum lateral displacement δ_h of the retaining piles ranges from 0.048% to 0.103% of the excavation depth H , which is significantly smaller than the statistical results observed in soft soil regions. The maximum land subsidence δ_v ranges between 0.033% and 0.22% of H , lower than that observed in gravel and soft soil excavations, and closer to the results observed in Qingdao soil-rock composite foundation pit. The influence range of foundation pit excavation extends from 1 to 1.5 times the excavation depth H . The relationship between the foundation pit maximum land subsidence δ_v and the retaining structure maximum lateral displacement δ_h can be expressed as $\delta_v = 0.45\delta_h \sim 2.35\delta_h$, with a mean value of $1.31\delta_h$. The ratio of the enveloped area of land subsidence to the enveloped area of retaining structure lateral displacement (S_w/S_p) is approximately 1.67.

Key words foundation pit engineering; backfill soil; sand-mudstone; horizontal displacement; land subsidence; monitoring and measurement

近年来, 基坑工程向着更复杂的方向发展, 因工程现场情况复杂及地质条件差异, 采用传统的支护结构分析方法所得的内力和变形理论计算结果与实际相差较大。因此, 实际工程需要通过现场监测, 来反馈各施工工况下支护结构及周边环境的变形情况, 从而及时采取措施, 降低基坑施工过程中的风险。

国内外不少学者基于现场实测的数据, 对基坑变形规律进行了研究。文献[1]以基坑开挖的“时空效应”为根据, 对上海市陶家宅深基坑工程的监

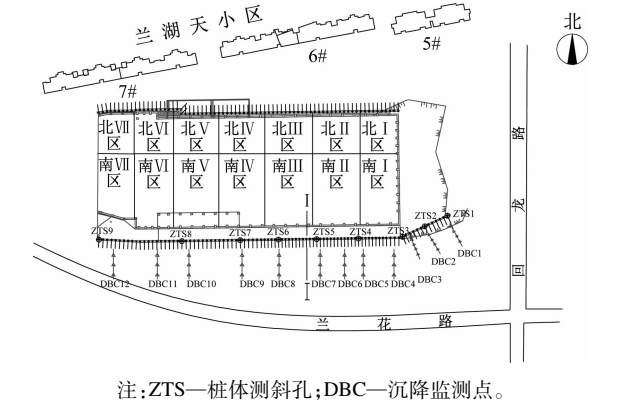
^{*} 国家自然科学基金面上项目 (52078090); 重庆市自然科学基金面上项目 (cstc2020jcyj-msxmX0679); 重庆交通大学省部共建山区桥梁及隧道工程国家重点实验室开放基金项目 (SKLBT-19-006); 重庆市科技型企业技术创新与发展专项课题 (cstc2020kqjsx-phxm0183)

测数据进行统计分析。文献[2]研究了硬黏土、残积土和砂土地层中基坑围护结构最大侧移、最大地面沉降同开挖深度 H 之间的关系,最大地面沉降平均值约为 $0.15\% H$ 。文献[3]研究了上海软土地区 58 个深度为 19 m 以上的超深基坑,得出最大地面沉降与最大墙体测斜的平均比值为 0.83。文献[4]对成都市某砂卵石地层的深基坑进行了现场监测,研究分析了开挖过程中土压力、桩身内力及锚杆拉力的分布和变化规律。

可见,目前工程界针对此类地层基坑的研究大多数仍是基于软土基坑和岩质基坑的经验。由于不同地区的地质差异较大,以往的研究成果无法适用于重庆地区回填土砂泥岩地层。对此,本文以重庆轨道交通 10 号线二期兰花湖停车场基坑为背景,通过现场监测,分析施工过程中基坑的侧向位移及周围地面沉降等变形规律,以期对深回填土砂泥岩组合地层条件下的基坑支护设计提供参考。

1 工程概况

兰花湖停车场位于重庆工商大学兰花湖校区东北侧,南侧紧邻兰花路,东侧紧邻回龙路,北侧紧邻兰湖天小区。兰花湖停车场东西向长约 395.0 m,南北向最窄处长约 13.4 m,最宽处长约 81.4 m。兰花湖停车场基坑周围环境及平面图如图 1 所示。图 1 中的南 I 区—南 VII 区及北 I 区—北 VII 区为基坑开挖分区。



注:ZTS—桩体测斜孔;DBC—沉降监测点。

图 1 兰花湖停车场基坑平面图及监测布置图

Fig. 1 Foundation pit plan and monitoring layout of Lanhuahu Parking Lot

兰花湖停车场场地原始地貌属构造剥蚀浅丘斜坡地貌,其地面呈宽缓的沟槽及丘坡相间分布。场地内大部分为填方区,局部存在岩质斜坡,且

坡角达 40° 。场地东侧有高约 1 ~ 14 m 的土质边坡,且坡角为 $20^\circ \sim 30^\circ$ 。基坑地层由上而下依次为填土层、砂质泥岩层和砂岩层,属于深回填土砂泥岩组合地层。

2 围护设计与监测方案

2.1 基坑围护设计

兰花湖停车场基坑围护结构采用预应力锚索加钻孔灌注桩的形式;灌注桩桩长 7.95 ~ 32.40 m,插入比为 0.17 ~ 0.83,采用 C30 混凝土;预应力锚索采用 1860 级 7 ~ 18 束钢绞线,共设置 6 ~ 10 排,竖向间距为 2.5 m 或 3.0 m,均锚固于岩层中。其围护结构的典型断面如图 2 所示。

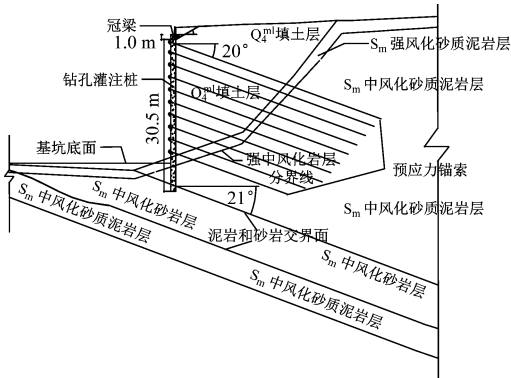


图 2 兰花湖停车场基坑围护结构的典型断面图

Fig. 2 Typical profile diagram of Lanhuahu Parking Lot foundation pit retaining structure

2.2 监测方案及施工工况

兰花湖停车场基坑开挖采用分层、分区开挖,主要施工阶段如表 1 所示。由于北侧基坑靠近兰湖天小区,且未开挖至基底,故本文主要对南 I 区—

表 1 兰花湖停车场基坑主要施工阶段
Tab. 1 Main construction stages of Lanhuahu Parking Lot foundation pit

阶段	施工内容	基坑坑底深度/m	施工日期
1	开挖第一层土,施工圈梁、锚索	3.0	2018-12-14—2019-02-21
2	开挖第二层土,施工锚索	6.0	2019-03-07—2019-03-30
3	开挖第三层土,施工锚索	8.5	2019-04-01—2019-04-07
4	开挖第四层土,施工锚索	11.5	2019-04-18—2019-06-24
5	开挖第五层土,施工锚索	14.5	2019-08-13—2019-10-30
6	开挖第六层土,施工锚索	17.5	2019-11-16—2019-12-24
7	开挖第七层土,施工锚索	20.5	2020-01-03—2020-02-24
8	开挖第八层土,施工锚索	23.5	2020-02-26—2020-03-18
9	开挖至基底,并浇筑底板	27.2	2020-03-25—2020-04-28

南Ⅶ区一侧基坑开挖进行监测分析。在停车场段共设置了 9 个测斜孔 (ZTS1—ZTS9), 用于监测围护结构的水平位移, 并设置了 12 个沉降监测点 (DBC1—DBC12), 用于监测桩后地面沉降。测斜孔及沉降监测点布置见图 1。

3 监测结果分析

3.1 围护结构水平位移

在开挖过程中, 不同部位的围护结构侧移情况不尽相同。根据测斜孔的监测数据, 绘制不同阶段部分围护桩桩体的水平位移曲线, 如图 3 所示。由图 3 可明显看出, ZTS5 处围护桩顶部在背离基坑方向发生了位移。经分析, ZTS5 断面上处覆回填土

层较厚, 结合图 2 可知, 开挖初期随着预应力锚索的施工, 锚索的锚固力大于桩后土体压力, 故导致围护桩向基坑外侧方向发生位移。

结合图 3 a) 进一步分析可知: 由于 ZTS2 所在断面桩底处于顺层层状砂泥岩互层岩体中, 其岩层倾角约为 20° ; 在基坑开挖卸荷作用下, 岩体应力得到释放; 在约束不足的情况下, 岩层易向基坑方向发生变形, 导致岩层间发生错动; 同时, 受上部锚索的锚拉作用, 导致支护桩底部发生位移。由此可见, 施工过程应加强桩底监测频率, 并增大桩体刚度。

绘制 ZTS2、ZTS5、ZTS7、和 ZTS8 处的围护桩的最大水平位移时程曲线, 如图 4 所示。由图 4 可见, 在整个施工过程中, 围护桩最大水平位移基本呈先增大、后逐渐趋于稳定的特点。

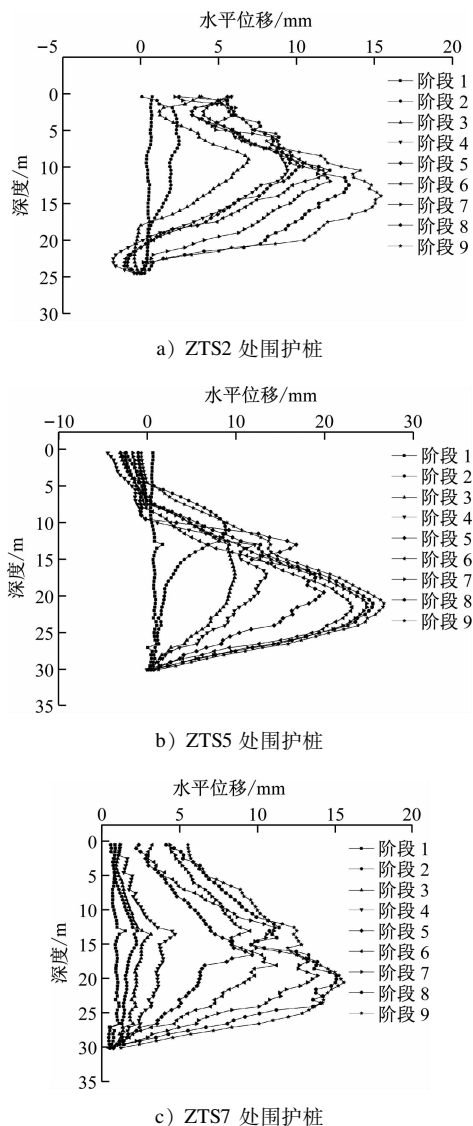


图 3 不同阶段部分围护桩桩体水平位移曲线
Fig. 3 Horizontal displacement curves of some retaining piles at different stages

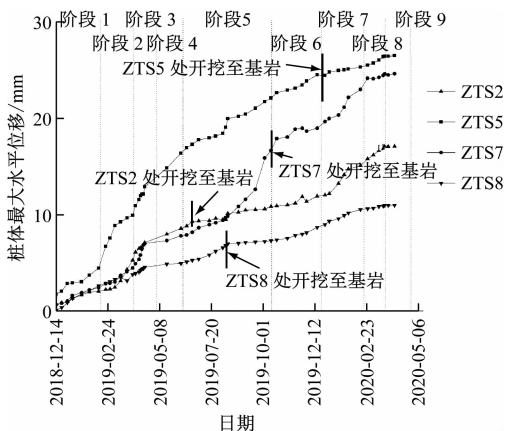


图 4 围护桩最大水平位移随时间的变化
Fig. 4 Changes of retaining pile maximum horizontal displacement over time

经分析, 场地上层土体的压缩性大、抗剪强度较低, 故随着开挖深度的增大, 上层土体在高剪应力水平下变形速率大。因此, 在土层开挖阶段发生的水平位移占总位移的 $63.69\% \sim 92.19\%$ 。下层岩体的抗剪强度高, 故围护桩嵌入段受到刚度较大的岩体的约束, 位移逐渐收敛。因此, 岩层开挖阶段发生的水平位移为 $2.07 \sim 6.55 \text{ mm}$, 仅占总位移的 $7.81\% \sim 36.31\%$ 。

由图 4 可见, 不同测斜孔处围护桩最大水平位移存在很大差异。根据 9 个测斜孔的监测数据, 总结围护桩最大水平位移 δ_h 终值与开挖深度 H 的关系, 并绘制拟合曲线, 如图 5 所示。

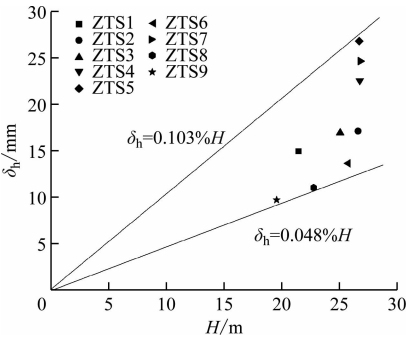


图 5 围护桩 δ_h 终值与 H 的关系

Fig. 5 Relationship of retaining pile final value δ_h and excavation depth H

从图 5 中可看出, $0.048\% H \leq \delta_h \leq 0.103\% H$ 。图 5 中 δ_h 明显小于文献[5]的 δ_h (上海软土基坑, $0.1\% H \leq \delta_h \leq 1.0\% H$)。

3.2 围护桩后的地面沉降

按工程实践经验,围护桩后的地面沉降形态一般可分为凹槽型和拱肩型。为了分析兰花湖停车场基坑围护桩后的地面沉降形态及沉降影响区,本文选取了不同沉降监测点对应断面的围护桩后地面沉降情况进行研究。地面沉降监测数据及沉降形态曲线如图 6 所示。由图 6 可知:基坑周边地面沉降整体分布形态近似于凹槽型;地面沉降主要发生在基坑外 30 m 以内区域,且集中发生在基坑外 20 m 以内区域。由此,本研究认为,基坑外 20 m 以内区域为地面沉降主要影响区,基坑外 20 ~ 30 m 区域为次要影响区。

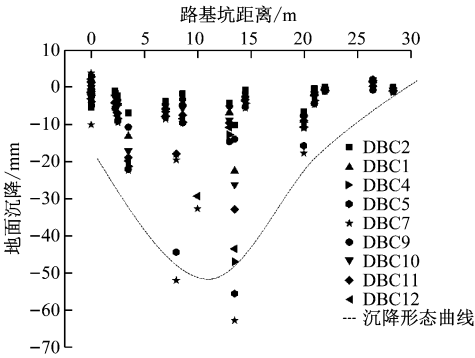


图 6 地面沉降监测数据及沉降形态曲线

Fig. 6 Land subsidence monitoring data and subsidence shape curve

为进一步分析不同监测点的沉降规律,选取 DBC7、DBC9 和 DBC2 的沉降监测数据进行分析。绘制不同阶段部分监测点的地面沉降曲线如图 7 所示。

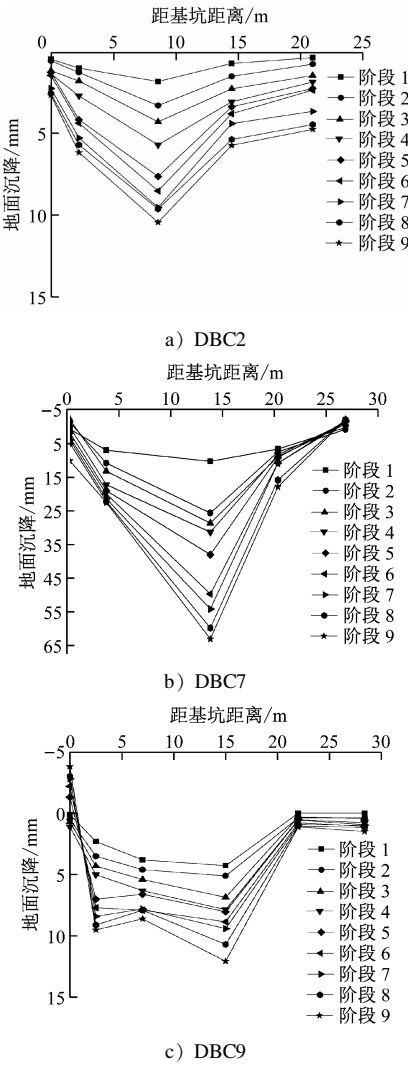


图 7 不同阶段部分监测点的地面沉降曲线

Fig. 7 Land subsidence curves of some monitoring points at different stages

由图 7 可看出,DBC7 的最大沉降值达到 62.00 mm,明显大于 DBC9 和 DBC2 的沉降值(分别为 16.95 mm、10.40 mm)。由围护桩水平位移分析可知,邻近 DBC7 的围护桩桩体水平位移明显大于邻近 DBC9 和 DBC2 的围护桩桩体水平位移,而围护桩水平位移会显著引起地面沉降。图 7 中部分沉降监测点地面出现隆起,且隆起值大多在 5 mm 以内,隆起区域多在距基坑 5 m 以内。经分析,当开挖深度较浅时,锚索锚拉作用较大,使围护桩向背离基坑方向发生位移,进而导致靠近桩体地面有隆起。此外,相邻桩间土体的土拱效应也抑制了地面沉降。

图 8 为地面最大沉降 δ_v 和 H 的分布及关系曲线。由图 8 可知, $0.033\% H < \delta_v < 0.220\% H$ 。由文献[6],在上海软土地区, $0.10\% H < \delta_v < 0.80\% H$ 。

对比可知,深回填土砂泥岩组合地层条件下的 δ_v 小于软土地层条件下的 δ_v ,而文献[7]中,青岛土岩组合地层条件下, $0.034\% H < \delta_v < 0.100\% H$,与本文结果较接近。

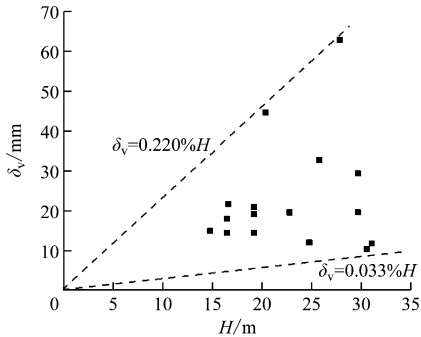


图8 δ_v 和 H 分布及关系曲线

Fig. 8 Distribution and relationship curves between land subsidence maximum value δ_v and excavation depth H

学者 R. B. Peck 通过实测数据分析,提出了不同土层条件下墙后地面沉降分布包络线。为了分析砂泥岩回填土地层桩后地面沉降规律,对地面沉降监测数据进行量纲一化处理,并绘制地面沉降的包络线,如图9所示。

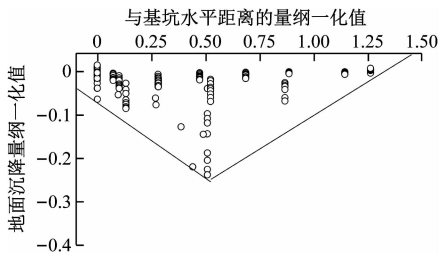


图9 地面沉降量纲一化值及包络线图

Fig. 9 Diagram of land subsidence normalized value and envelope curve

由图9可知:最大沉降发生于 $x_m = 0.51H$ (x_m 为测点与基坑的水平距离)处;地面沉降量纲一化最大值约为0.238;沉降影响距离为 $H \sim 1.5H$,远小于软土地区的沉降影响距离($3.0H \sim 4.0H$)。结合图9进一步计算可得,对于深回填土砂泥岩组合地层基坑,周边地面沉降包络线为:

$$\frac{\delta_v}{H} = \begin{cases} -0.34\% \frac{x_m}{H} - 0.063\%, & 0 < \frac{x_m}{H} \leq 0.51 \\ 0.31\% \frac{x_m}{H} - 0.40\%, & 0.51 < \frac{x_m}{H} \leq 1.50 \end{cases} \quad (1)$$

3.3 围护结构水平位移与桩后地面沉降相关性

基坑周边地面的沉降或隆起受围护结构水平

位移影响,故 δ_v 与 δ_h 存在着某种函数关系。由文献[8],对于厦门地区基坑, δ_v 为 $0.40\delta_h \sim 3.50\delta_h$, δ_v 的均值为 $1.00\delta_h \sim 2.00\delta_h$;由文献[9],对于金华土岩组合地层基坑, δ_v 为 $0.13\delta_h \sim 6.33\delta_h$,均值为 $1.14\delta_h$ 。

兰花湖停车场及文献[8-9]的基坑周边地面沉降与水平位移关系如图10所示。由图10可知,对于深回填土砂泥岩组合地层基坑, δ_v 为 $0.45\delta_h \sim 2.35\delta_h$,均值为 $1.31\delta_h$ 。可见,本研究所得 δ_v 下限值与文献[8-9]的结论较为接近,而上限值远小于文献[8-9]的结论。据分析,这应是受土层条件的影响所致。文献[8-9]涉及的软土地层具有孔隙率高、压缩性高和承载力低的特点,故其水平变形和地面沉降效应明显;而兰花湖停车场基坑的上部填土为压缩性较小的土石混合体,故开挖引起的土体变形较小。

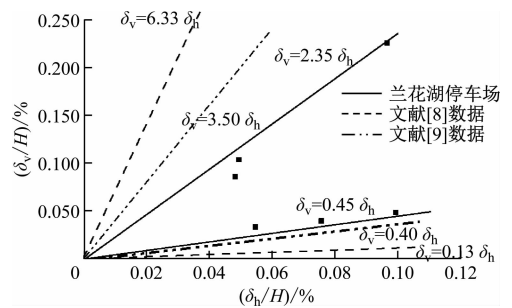


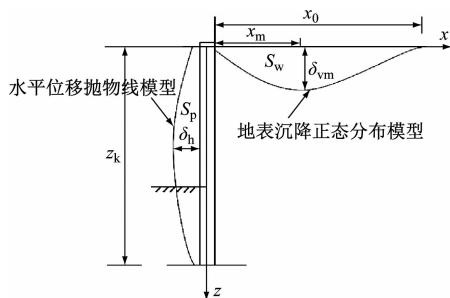
图10 兰花湖停车场及文献[8-9]的基坑周边地面沉降与水平位移关系

Fig. 10 Relationship of foundation pit surrounding land subsidence and horizontal displacement for Lanhuahu Parking Lot and in literature [8-9]

目前,基坑开挖地面沉降估算方法可分为经验法和半经验半理论法。半经验半理论法以《日本道路工程规范》方法为主,该法假定桩后地面沉降曲线与地面所围面积 S_w 和围护结构变形前后所围面积 S_p 相等,但实际工程中, S_w 与 S_p 则是存在一定比例关系。文献[10]在大量实测数据的基础上得到, S_w 与 S_p 比值 $\beta = 0.85$;文献[11]得到徐州地铁某土岩组合地层基坑 $\beta \approx 1.89$ 。

为了研究深回填土砂泥岩组合地层基坑 β ,需先对兰花湖停车场基坑监测数据进行拟合。地面沉降和水平位移曲线计算简图如图11所示。

根据已有的研究以及上文中桩体侧移的分析,



注: z_k —围护结构深度; δ_{vm} —最大沉降值; x_0 —沉降影响半径; x_m —最大沉降点距基坑的距离; z —深度。

图 11 地面沉降和水平位移计算简图

Fig. 11 Simplified diagram of land subsidence and horizontal displacement calculation

围护结构水平位移按抛物线^[11]来考虑,即:

$$\delta_h = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 \quad (2)$$

式中:

a_0 、 a_1 、 a_2 ——拟合曲线的各项系数,可由已知实测数据求得。

$$S_p = \int_0^{z_k} u_z(z) dz = z_k \left(a_0 + \frac{1}{2} a_1 z_k + \frac{1}{3} a_2 z_k^2 \right) \quad (3)$$

由文献[9]中金华地区土岩组合基坑的地面沉降曲线可得:

$$S_w = \int_{-x_m}^{x_0-x_m} \delta(x) dx = \int_{-x_m}^{x_0-x_m} \delta_{vm} e^{-\pi(x/r)^2} dx \quad (4)$$

式中:

$\delta(\cdot)$ ——沉降曲线密度函数;

r ——最大沉降点距沉降影响范围边线的距离,

$r = x_0 - x_m$ 。

将图 3—图 10 的统计结果代入式(2)和式(4)中,算得 S_w 与 S_p ,并对 S_w 与 S_p 进行线性拟合,结果如图 12 所示。根据拟合结果,深回填土砂泥岩组合地层基坑 $\beta \approx 1.67$ 。

4 结语

本文以兰花湖停车场基坑为工程背景,结合工程监测数据,对重庆地区典型深回填土砂泥岩组合地层的基坑围护结构水平位移、围护桩后地面沉降,以及二者之间的关系进行了规律性研究,得出如下结论:

1) 深回填土砂泥岩组合地层的 δ_h 变化范围为 $0.048\% H \sim 0.103\% H$,远小于软土地层的 δ_h 。在岩层开挖阶段和土层开挖阶段,土体变形量明显不同,土层开挖阶段的水平位移值占总位移量的

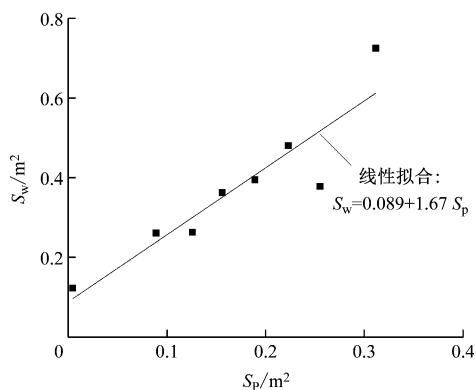


图 12 S_w 与 S_p 拟合曲线

Fig. 12 S_w and S_p fitting curve

63.69% ~ 92.19%。

2) 本基坑开挖影响范围为基坑外 $H \sim 1.5H$ 区域,且基坑外 20 m 以内为主要影响区,20 ~ 30 m 范围为开挖次要影响区。地面沉降形态以凹槽型为主。 $0.033\% H < \delta_v < 0.220\% H$,此时 δ_v 小于软土地层基坑 δ_v ,但与青岛土岩组合基坑 δ_v 较为接近。

3) 对于深回填土砂泥岩组合地层基坑, δ_v 为 $0.45\delta_h \sim 2.35\delta_h$,均值为 $1.31\delta_h$, $\beta \approx 1.67$ 。

本文基于监测数据,对深回填土砂泥岩互层基坑相关变形性状进行了分析及探讨。基坑变形的影响因素很多。未来可利用岩土参数反分析手段,建立数值模型,对变形机理进行系统性参数分析,开展进一步研究。

参考文献

- [1] 奚家米,付奎. 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.
XI Jiami, FU Lei. Analysis of deformation law of deep foundation pit based on space-time effect[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(16): 290.
- [2] CLOUGH G W, O'ROURKE T D. Construction induced movements of in situ walls[C]//Proceedings of ASCE Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structures, Geotechnical Special Publication No. 25. New York: ASCE, 1990: 439-470.
- [3] 江晓峰,刘国彬,张伟立,等. 基于实测数据的上海地区超深基坑变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 2): 570.
JIANG Xiaofeng, LIU Guobin, ZHANG Weili, et al. Deformation characteristics of ultra-deep foundation pit in Shanghai based on measured data[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 570.
- [4] 李红梅,钱霄,赵小庆. 砂卵石地层桩锚支护结构现场实测与研究[J]. 土工基础, 2012, 26(4): 112.

(下转第 110 页)

证导向轮导向力不超过安全限值。

2) 在增加了导向轨面补偿装置后,悬挂式单轨车辆在通过曲线道岔时,导向轮和稳定轮所承受的径向力大大减小,低于导向轮和稳定轮的径向力允许最大值。悬挂式单轨车辆可以以 15 km/h 的速度安全通过 50 m 半径结构的倒 T 形辙叉道岔。

参考文献

- [1] 曹恺. 基于 ADAMS 的悬挂式单轨车辆悬挂参数优化和侧风影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
CAO Kai. The effect of crosswind and the parameter optimization of the suspended monorail car based on ADAMS[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [2] 郑开锋. 带机械差速器的悬挂式单轨转向架设计及动力学仿真分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
ZHENG Kaifeng. Design and dynamics simulation analysis of suspended monorail bogie with mechanical differential[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [3] JIANG Y, WU P, ZENG J, et al. Researches on the resonance of a new type of suspended monorail vehicle-bridge coupling system based on modal analysis and rigid-flexible coupling dynamics[J]. Vehicle System Dynamics, 2021, 59(1): 135.
- [4] HE Q, CAI C, ZHU S, et al. An improved dynamic model of sus-

pending monorail train-bridge system considering a tyre model with patch contact[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 144: 106865.

- [5] HE Q, CAI C, ZHU S, et al. Key parameter selection of suspended monorail system based on vehicle-bridge dynamical interaction analysis[J]. Vehicle System Dynamics, 2020, 58(3): 339.
- [6] 谢倩. 悬挂式单轨系统轨道梁结构优化设计研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
XIE Qian. Research on optimization design of track beam structure of suspended monorail system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [7] 代丰, 李忠继, 林红松, 等. 悬挂式单轨道岔结构设计研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(6): 17.
DAI Feng, LI Zhongji, LIN Hongsong, et al. Research on design of suspended monorail turnout structure[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(6): 17.

· 收稿日期:2021-08-05 修回日期:2021-11-15 出版日期:2024-01-10
Received:2021-08-05 Revised:2021-11-15 Published:2024-01-10
· 通信作者:孟姝, 硕士研究生, 939346497@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 105 页)

- LI Hongmei, QIAN Xiao, ZHAO Xiaoping. Field measurements of pile-anchor supporting structures in sandy cobble soils in Chengdu[J]. Soil Engineering and Foundation, 2012, 26(4): 112.
- [5] WANG J H, XU Z H, WANG W D. Wall and ground movements due to deep excavations in Shanghai soft soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(7): 985.
- [6] 王卫东, 徐中华, 王建华. 上海地区深基坑周边地面变形性状实测统计分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1659.
WANG Weidong, XU Zhonghua, WANG Jianhua. Statistical analysis of characteristics of ground surface settlement caused by deep excavations in Shanghai soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(11): 1659.
- [7] 蔡景萍. 土岩组合地层地铁深基坑地面变形规律研究[J]. 中外公路, 2015, 35(4): 23.
CAI Jingping. Study on surface deformation law of subway deep foundation pit in soil-rock combination stratum[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35(4): 23.
- [8] 李少波. 厦门地区地铁深基坑变形特征实测统计分析[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(增刊1): 376.
LI Shaobo. Statistical analysis on deformation characteristics of deep foundation pit in Xiamen Metro project[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(S1): 376.

- [9] 谢锡荣, 王立峰, 韦康, 等. 土岩组合地层地铁深基坑开挖性状分析及预测[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增刊1): 247.
XIE Xirong, WANG Lifeng, WEI Kang, et al. Analysis and prediction of excavation behavior of metro deep foundation pit in soils underlain by rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(S1): 247.
- [10] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]// Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico: Sociedad Mexicana de Mecanica, 1969: 225.
- [11] 张向东, 刘刚, 李军. 土岩组合地区基坑开挖对扩展基础桥墩沉降影响研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(2): 115.
ZHANG Xiangdong, LIU Gang, LI Jun. Study on influence of foundation pit excavation on settlement of spread foundation piers in soil-rock combined area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(2): 115.

· 收稿日期:2021-07-01 修回日期:2021-11-29 出版日期:2024-01-10
Received:2021-07-01 Revised:2021-11-29 Published:2024-01-10
· 通信作者:冯虎, 硕士研究生, 1042938786@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license