

文章编号:1007-2993(2020)05-0249-05

机场岩溶空腔浅伏区地基处理技术研究

王树华¹ 张鹏² 周治钊² 石天奇³

(1. 郴州市城市规划设计院, 湖南郴州 423000; 2. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南长沙 410219;
3. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

【摘要】 依托湖南郴州机场岩溶空腔浅伏地段工程, 研究在 4000 kN 夯击能处理地基条件下土体变形及物理力学性质变化规律, 通过标准贯入试验及动力触探试验, 对比分析垫层强夯法和强夯置换墩法对浅埋岩溶空腔条件下的地基处理效果, 验证机场工程岩溶空腔浅伏区强夯处理方法的适宜性。结果表明: 地基处理深度在 2.0 m 以内, 直接换填处理; 处理深度为 2.0~8.0 m, 采用垫层强夯法处理, 点夯两遍加满夯一遍, 并采用点夯击数 10~12 击和最后 2 击平均夯沉量小于 5 cm 双重控制; 处理深度为 8.0~10.0 m, 采用强夯置换墩法可以满足存在岩溶的飞行区地基强度要求, 为岩溶空腔浅伏地段机场飞行区地基处理工程提供理论依据。

【关键词】 岩溶; 机场飞行区; 垫层强夯法; 强夯置换墩法

【中图分类号】 TU 472

【文献标识码】 A

doi: 10. 3969/j. issn. 1007-2993. 2020. 05. 001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Foundation Treatment Technology of Airfield in Shallow Karst Cavity

Wang Shuhua¹ Zhang Peng² Zhou Zhizhao² Shi Tianqi³

(1. Chenzhou City Urban Planning and Design, Chenzhou 423000, Hunan, China;

2. Hunan Provincial Communications Planning, Survey and Design Institute, Changsha 410219, Hunan, China;

3. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

【Abstract】 Based on the project of shallow karst cavity in Chenzhou Airport, Hunan Province, the effects of dynamic compaction of cushion and replacement pier of dynamic compaction on the treatment of shallow karst cavity are analyzed. Under the ramming energy of 4000 kN, the law of soil deformation and the change of physical and mechanical properties are studied. The standard and dynamic penetration test are carried out to verify the suitability of dynamic compaction. Results indicate that if the depth of foundation treatment is less than 2.0 m, it can be directly replaced; if the depth of foundation treatment is 2.0~8.0 m, it can be treated by cushion dynamic compaction method with point compaction twice and full compaction once, under the double control of 10~12 point compaction and final twice compaction with average settlement less than 5 cm; if the depth of foundation treatment is 8.0~10.0 m, it can be treated by replacement pier of dynamic compaction method to meet the requirement of foundation strength in karst airfield. It provides theoretical basis for foundation treatment engineering of airfield in shallow karst cavity area.

【Key words】 karst; airfield; cushion dynamic consolidation method; dynamic consolidation replacement pier method

0 引言

岩溶是指水对可溶碳酸盐岩石化学腐蚀使地下岩土体产生空腔的一种地质现象, 严重时会发生区域塌陷引起周围岩土体变形^[1], 这将对机场飞行区道路造成路基局部沉陷开裂, 产生台阶、陷坑和路基

间的局部离层^[2]。目前对岩溶地区不良地质进行地基处理采用的方法主要有碎石桩挤密法、压力注浆法等, 在新建机场工程中, 考虑到后期荷载要求, 通常以强夯法为主, 其次为冲击碾压法。

20 世纪 70 年代德国首次讨论欧洲地区岩溶塌

基金项目: 国家自然科学基金(41772330); 澳门科学技术发展基金(0010/2018/A)

作者简介: 王树华, 男, 1983 年生, 汉族, 湖南郴州人, 工学学士, 高级工程师, 主要从事市政道路与桥梁设计工作。Email: 258419153@qq.com

陷的分布规律和防治措施^[3]; Lee 和 Gu^[4]考虑到计算强夯有效加固深度传统公式仅考虑了锤重和落距两个因素的局限性,利用有限元程序对强夯问题进行了二维分析,建立基于夯锤半径、夯击能和土体初始密实度等因素确定有效加固深度的新方法; Waltham 等^[5]分析岩溶隐患的机理和防治措施; van Paassen 等^[6]对强夯法的主要参数设计、强夯试验和强夯加固岩溶地基效果进行分析; Waele 等^[7]对强夯锤体进行研究,给出了强夯过程中应力传导方程,夯锤运动方程及土体变形规律;何长明等^[8]以红砂岩高路堤为背景,推导出强夯加固地基有效深度的计算公式,提出了强夯加固地基有效范围的经验公式;黄涛等^[9]分析高填方地基沉降变形机理,提出采用强夯施工结合振动碾压的方法,可以加速提高填方层的固结压密程度;张洁琦^[10]针对未用填充物处理的溶洞,采用低标号混凝土填充密实后进行表层强夯处理,路基各项指标均满足设计要求;何春保等^[11]基于强夯加固机理,分析神农架机场工程岩溶工程特征,进行载荷等一系列试验,认为采用垫层强夯法处理岩溶洼地问题可以有效提高地基承载力;夏天^[12]对不同能级强夯加固处理进行静载试

验、多道瞬态面波测试和标准贯入试验,研究岩溶地基的强夯加固效果;黄赫等^[13]突破传统的单层强夯法旧思路,利用双层强夯法和双层强夯置换法处理了岩溶地质溶洞问题,通过重型动力触探和标准贯入试验分析强夯法加固效果;朱彦鹏^[14]评价强夯法在地基加固中的效果,获得强夯法在山区高填方机场地基加固中的最优夯击参数。

目前针对岩溶空洞区域大多数采用强夯法,并推荐了设计夯击参数,但是空洞浅伏区后期为机场飞行区服务,对机场路面不均匀沉降、跑道线路平顺性以及地基承载力要求高于其他地基处理工程项目。本文研究垫层强夯法和强夯置换法对不同场地土层的路基加固效果的差异性及适用性,为机场岩溶区地基处理技术提供理论支撑和科学根据。

1 工程地质条件

拟建场地距郴州市区的直线距离约 16 km,为道槽区,地下水循环交替对岩溶发育范围有着重大的影响。中部为一走向近北东向的山脊,两边为坡地及沟谷,地形起伏较大,沟谷切割较深,形成了机场特殊的岩溶地貌。研究区域地基土以黏土、粉质黏土为主,主要物理力学性质指标见表 1。

表 1 天然地基各土层物理力学指标表

地层	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	E_s/MPa	抗剪强度指标		不固结不排水指标		固结不排水指标	
			c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$
粉质黏土 1	18.5	4.5	25	8				
粉质黏土 2	19.0	7.0	15	20	12	10	18	21
黏土 1	19.2	7.5	20	16	15	14	20	23
黏土 2	19.5	8.0	15	18	18	16	26	22
黏土 3	18.5	3.5	30	10	30	8	25	12

场地内基岩主要为白云质灰岩、灰岩,属可溶性碳酸盐岩。场区发育地质构造主要有华塘背斜、南楼一下村向斜、了尾冲压性断裂及豪里一塔水压性断裂等共计 7 条断层,这些地质构造、岩层层面等结构面在场区呈网格状展布,成为岩溶泉、地下流的主要连通通道。场地内发育的岩溶为隐伏性岩溶,岩溶存在一定的连通性,且被黏性土夹灰岩质碎石及砾砂等充填。岩溶形态主要有溶蚀沟槽、溶蚀裂隙、溶洞等。岩溶埋藏深度以 8.0~16.5 m 为主,少数超过 20 m,为浅伏发育特征,极易形成地下洞穴顶板的坍塌以及溶洞内填充物被地下水的运动带走导致路基结构下沉。

2 地基处理方案及监测方案

2.1 地基处理方案

考虑到强夯法施工工艺较注浆法、沉管挤密桩法简单,经济性好,因此对于存在顶板埋深较浅的岩溶漏斗、裸露型溶洞及隐伏溶洞直接采用清爆换填法和垫层强夯法处理,而对于埋深较大的岩溶条件飞行区采用强夯置换墩法处理。

(1) 垫层强夯法

处理土层厚度为 6~12 m 的道槽填方区的岩溶漏斗和裸露型溶洞(见图 1)。根据能级不同分为 2 组:两遍点夯 4000 kN+一遍满夯 1000 kN,碎石垫层厚度 1.5 m;两遍点夯 8000 kN+一遍满夯

2000 kN,碎石垫层厚度 1.5 m,如表 2 所示。

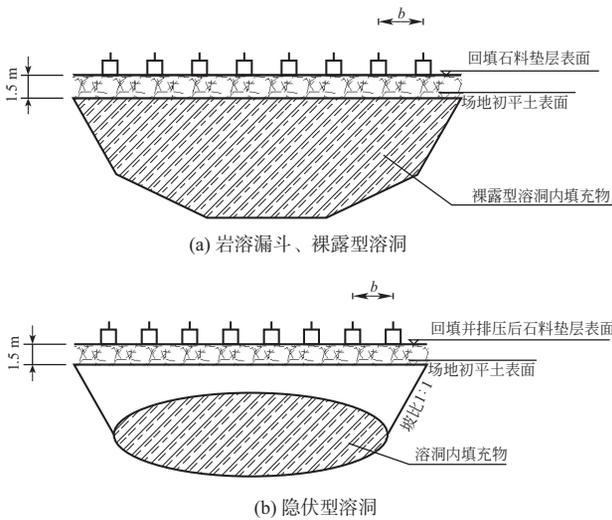


图 1 垫层强夯法处理浅埋不同类型岩溶示意图

表 2 强夯处理试验参数表

夯点间距	夯点布置	夯击遍数	单点击数	收锤标准/cm
4.5 m(4000 kN)	正方形	2 遍	10~12	≤5
5.5 m(8000 kN)				≤10
d/4 搭接	搭接型	1 遍	4~5	≤5

(2)强夯置换墩法

强夯置换墩法要求墩长穿透需要处理的土层,可用于垫层强夯法不适用时,需处理土层厚度小于 15 m 的道槽填方区。墩体直径取 1.1~1.2 倍夯锤直径,材料采用级配良好的块石、碎石等坚硬粗粒材料,最大粒径不大于 40 cm,含泥量不宜超过 7%。墩顶铺设一层厚度为 60 cm 的压实垫层,并铺设防水土工织物和高强土工布,压实垫层材料与墩体材料相同,粒径不宜大于 10 cm。强夯置换墩法夯点间距为 3 m,强夯能级根据需处理土层的厚度确定,初始夯击能按 $940(H-2.1)$ 确定, H 为需穿透土层厚度,按 15 m 进行计算,得到夯击能为 12000 kN,夯点布置方式、收锤标准以及其它设计参数与垫层强夯法中夯基能为 4000 kN 相同,强夯置换墩法处理深埋隐伏型溶洞示意图见图 2。

2.2 地基监测方案

当夯击能为 4000 kN 时,地基处理前后对夯沉量、地面隆起值、干密度、黏聚力、含水量进行测定,确定最佳夯击参数和有效加固深度。为比较两种地基处理技术的适用性,开展相应的地基检测方案。地基处理前,对土体进行标准贯入试验,每监测区检测 2 点。地基处理完成后,进行相同监测试验,对比分析强夯前后各种监测指标的变化规律。对于强夯

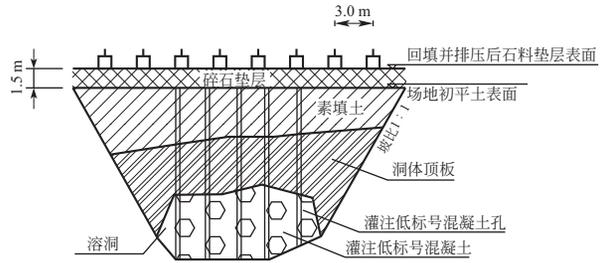


图 2 强夯置换墩法处理深埋隐伏型溶洞示意图

置换墩法,采用重型动力触探试验,验证地基处理效果。

3 结果分析

3.1 夯沉量和地面隆起值

在试验区选取一个夯点进行强夯夯沉量和地面隆起观测,根据观测数据绘制夯沉量曲线及地面隆起曲线见图 3、图 4。由图 3 分析可知,逐击夯沉量随夯击数的增加呈减小趋势,夯击数为 1~4 时逐级夯沉量减小率分别为 22.0%、26.7%、14.9%、10.7%,夯击数达到 6 之后逐击夯沉量继续减小,但是变化范围微小,可以达到最后 2 击平均夯沉量小于 5 cm 的停夯标准。由累计夯沉量曲线分析可知,当夯击数达到 6 时,地面累计夯沉量已经达到 1.52 m,占总累计沉降量的 86.9%,土体密实度显著提高。

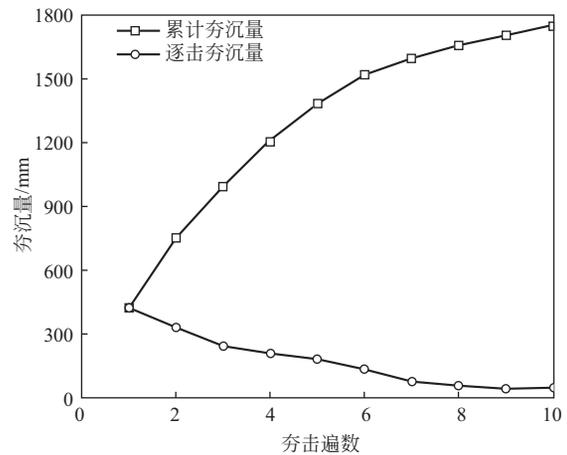


图 3 4000 kN 强夯夯沉量与夯击遍数关系曲线图

在距夯点中心 2.0 m、3.5 m、5.0 m、6.5 m、8 m 进行地面隆起观测点布置,4000 kN 的强夯点夯时,距离夯点 3 m 范围以内出现了地面隆起的现象,原地面最大隆起位置在夯坑边缘,最大隆起值为 18 cm,距夯点 3 m 以外变形隆起很小,其隆起均不超过 15 mm,当夯点间距为 4.5 m,夯击能为 4000 kN 夯击参数下的地面隆起值符合强夯法地基处理的要求。这是由于夯坑周围地面不应发生过大

的隆起,当用强夯法进行地基处理时,夯点周围土体在一定夯击能的作用下若隆起体积过大,会造成有效夯实系数的减小,夯击效率降低,因此夯击次数要适当减小以提高夯击效率。

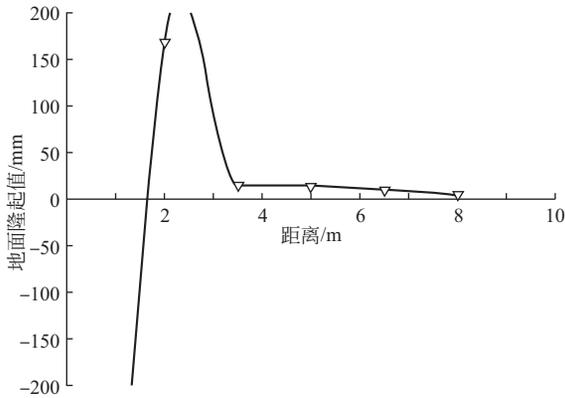


图4 4000 kN强夯引起地面隆起变形量曲线图

3.2 土工试验结果

分别对试验区土层的原状土样以及强夯处理后的土样进行现场采取,采用蜡封法将土样封好,相关物理力学试验结果见图5。由图5(a)分析可知,土体在经过4000 kN强夯处理后,土体干密度相比强夯加固区外的土体干密度有小幅提高,其中试样1的干密度增加幅度最大,为0.06 g/cm³,所有试样干密度平均增加了0.03 g/cm³。据图5(b)分析可知,基岩上覆土层在经过4000 kN夯处理后,土体黏聚力增加,其中试样4的黏聚力增加幅度最大,为5.5 kPa,所有试样黏聚力平均增加了2.6 kPa。由图5(c)分析可知,土体在经过4000 kN夯处理后,土体含水量变化具有相反的趋势,含水量的减小幅度比较大,其中试样2的含水量减小幅度最大,为4.8%,所有试样含水量平均降低了3.3%。

3.3 标准贯入和动力触探试验结果

图6、图7为不同夯击能作用下的垫层强夯法试验结果,由图6可知,标准贯入试验数据表明在垫层强夯后,地基土层强度明显提高。在4000 kN夯击能作用下,贯入深度小于8 m时可以有效提高地基土体的承载力,当处理深度为2.7 m时标贯值增加33.3%,当处理深度为5.0 m时标贯值增加25.0%,当处理深度达到7.0 m时标贯值增加23.5%,但是当贯入深度大于8 m时,地基承载力表现出下降的趋势,这是由于地基所处深度已经超过了垫层强夯法的有效地基处理深度,但是在该夯击能作用下不同贯入深度时的锤击数均超过14击,经换算得到地基承载力基本容许值均超过340 kPa,

满足机场飞行区地基承载力基本容许值300 kPa,因此垫层强夯法适用于处理埋深小于8 m的岩溶。

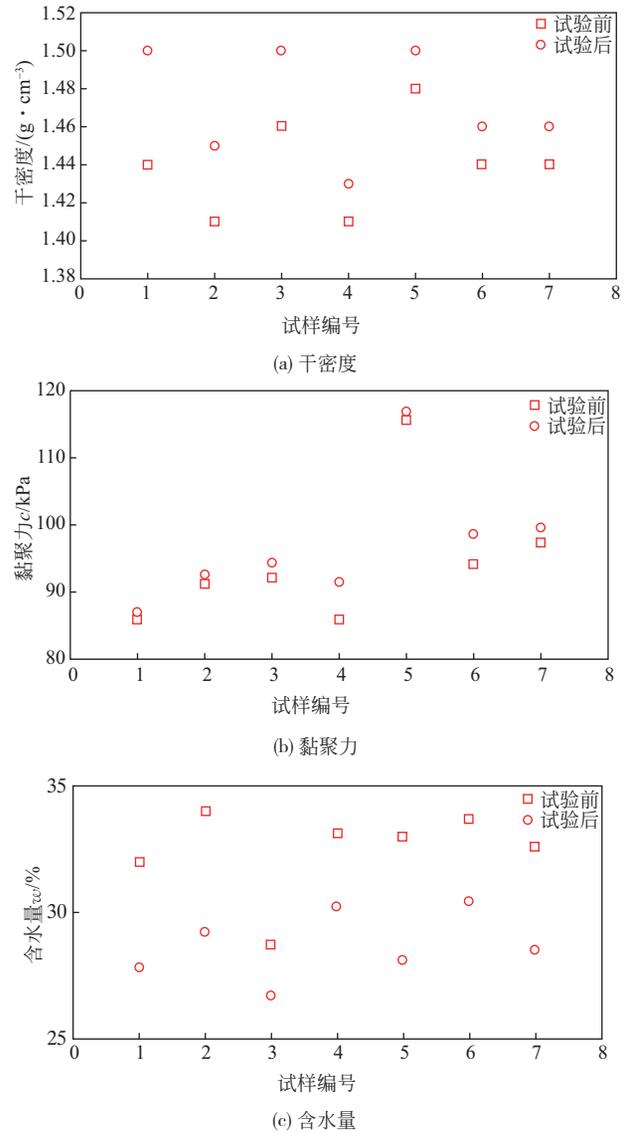


图5 强夯前后相关物理力学性质变化图

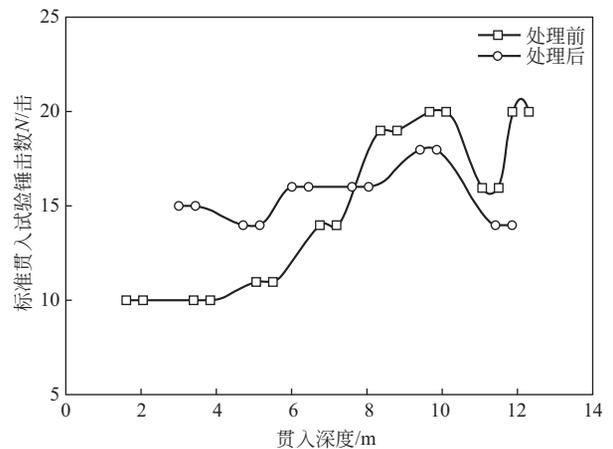


图6 4000 kN垫层强夯处理前后标贯试验曲线图

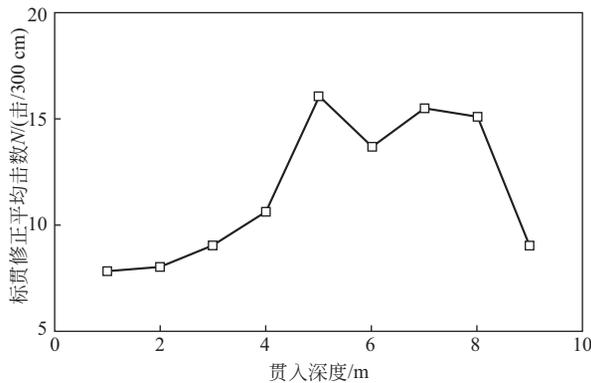


图7 8000 kN 垫层强夯处理后标贯试验曲线图

通过图7以及现场分析,贯入深度5 m范围内平均击数呈现上升的趋势,贯入深度在5~8 m时平均击数比较稳定,在13~16击之间,这是由于在该夯击能作用下土颗粒重新排列,随地基处理深度的增加,地基强度也呈增长的趋势。但贯入深度小于4 m时标贯平均击数不足10击,同时在贯入深度为8 m时土颗粒的平均击数在该夯击能作用下突然减小,这是因为相比于4000 kN夯击能处理地基,夯点间距增大为5.5 m,夯击能在水平方向消散过多,导致有效加固深度减小,同时高能级强夯对颗粒结构影响较大,进一步加剧了能量的损耗,进而导致地基承载力显著降低,经换算得到地基承载力仅为216 kPa,8000 kN夯击能对岩溶上覆土层处理效果不好,不能满足飞行区地基承载力基本容许值要求,还增加了工程的处理费用,因此不考虑将该夯击能应用于机场岩溶区地基处理工程。

图8为强夯置换墩法强夯前后的标准贯入试验结果,强夯置换墩法处理岩溶埋深大于8 m的飞行区可以显著提高地基承载力,贯入深度从0~10 m的地基承载力均有所提高,当贯入深度为6~8 m时,标贯试验值 N 的增加幅度最大为42.9%,可以看到在强夯置换墩法作用下不同贯入深度时的锤击数均超过15击,经换算得到地基承载力基本容许值均超过360 kPa,满足机场飞行区地基承载力基本容许值300 kPa的要求,适用于处理岩溶埋深较大的飞行区。

区别于传统的强夯法,强夯置换墩法采用柱状砂石混凝土墩,配合强夯法形成密实的墩间土,使砂石墩与周围墩间土形成复合地基。同时,强夯置换墩法可以大幅度提高地基承载力和变形模量,是因为强夯置换法利用重锤在一定落距产生的冲击能将原有地基级配或物理性质不良的颗粒排开,置换成

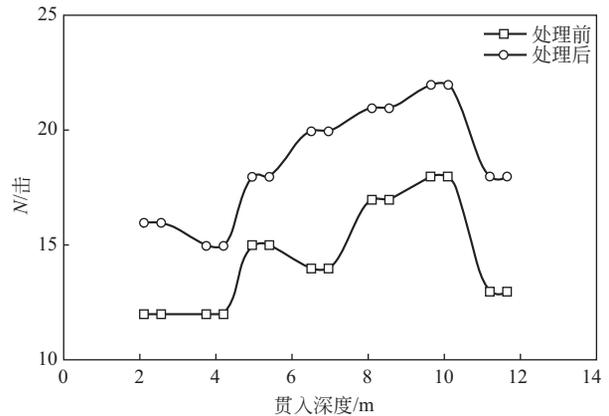


图8 强夯置换墩法标准贯入试验曲线图

级配较好且物理性质能够达到机场地基处理要求的填料,这样经过强夯处治后的地基强度会有效地提高,但是强夯置换墩法处理地基的有效深度由图6可知为12 m,处理效果最好的深度范围在10 m左右的岩溶空腔浅伏地段。动力触探结果见表3,可以看出置换桩的质量符合机场地基承载力的要求。

表3 重型动力触探试验结果表

贯入深度/m	0.4	1.0	2.8	3.4	4.0	5.8
当量击数	16	18	18	16	22	21
贯入深度/m	6.1	6.7	8.8	11.2	11.5	12.0
当量击数	21	22	22	24	26	26

4 结论

通过研究不同措施处理各种类型岩溶的适用性,得到以下结论:

(1)强夯后的土层强度明显增大,且较深处的土层强度增加幅度较大。

(2)土体在经过4000 kN强夯处理后,干密度、黏聚力均有所提高,处理后含水率较天然含水率相比减小;8000 kN夯击能对地基处理效果不好。

(3)地基处理深度在2.0 m以内,直接采用换填处理,挖出土料可用于土面区封土及绿化用土;处理深度2.0~8.0 m,可采用垫层强夯法处理,点夯两遍加满夯一遍,点夯能级可用4000 kN,满夯能级1000 kN,采用点夯击数10~12击和最后两击平均夯沉量小于5 cm双重控制;处理深度为8.0~10.0 m,采用强夯置换墩法可以有效提高岩溶飞行区的地基强度。

(下转第259页)

的整体时进行土方开挖会大大增加基坑失稳的风险。对于软土厚度大的基坑工程,基坑暴露时间过长,也会增大基坑的变形,导致钢支撑失稳、失效。

(3)基坑工程作为地下工程,所处的地质条件复杂,影响因素众多,我们至今对岩土力学性质的了解还不够深入,很多设计计算的理论还不够完善,是建立在半理论、半经验的基础上的。基坑围护施工过程中,应加强安全监测、做到信息化施工,加强应急处理措施,做好动态设计工作,确保基坑及周边环境的安全。

参 考 文 献

- [1] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册(第二版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [2] 高大钊,陈忠汉,黄书秩,等. 深基坑工程[M]. 北京:机械工业出版社,1999.
- [3] 刘合寨,周元,尤波. 软土地区大面积不规则深基坑支护设计实践与分析[J]. 岩土工程技术,2019,32(4):212-217.
- [4] JGJ120—2012 建筑基坑支护技术规程[S].
- [5] 浙江省工程建设标准. DB33T1096—2014 建筑基坑工程技术规程[S].
- [6] 11SG814 建筑基坑支护结构构造[S].
- [7] 龚晓南. 深基坑工程设计施工手册(第二版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [8] T/CCES3—2017 预应力鱼腹式基坑钢支撑技术规程[S].
- [9] 张衡. 装配式预应力鱼腹梁钢结构支撑对深基坑变形的控制技术与方法研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2014.
- [10] 刘发前,卢永成. 装配式预应力鱼腹梁内支撑系统的利与弊[J]. 城市道桥与防洪,2013(7):12,117-118,125.
- [11] JGJT 199—2010 型钢水泥土搅拌墙技术规程[S].
- [12] CECS147—2016 加筋水泥土桩锚技术规程[S].
- [13] JGJ79—2012 建筑地基处理技术规范[S].

收稿日期:2019-09-23

(上接第 253 页)

参 考 文 献

- [1] 陈国亮. 岩溶地面塌陷的成因与防治[M]. 北京:中国铁道出版社,1994.
- [2] Coupe S, Martin C D. Single fluid jet-grouting strength and deformation properties[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2006, 21(6): 690-695.
- [3] 杨立中,王建秀. 国外岩溶塌陷研究的发展及我国的研究现状[J]. 中国地质灾害与防治学报,1997(S1):14-18.
- [4] Lee F H, Gu Q. Method for estimating dynamic compaction effect on sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(2): 139-152.
- [5] Waltham T, Bell F, Culshaw M. Sinkholes and Subsidence: Karst and cavernous rocks in engineering and construction[M]. Berlin: Praxis Publishing Ltd., 2005.
- [6] van Paassen L A, Ghose R, Linden T J M V D, et al. Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogROUT experiment[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(12): 1721-1728.
- [7] Waele J D, Gutiérrez F, Parise M, et al. Geomorphology and natal hazards in karst areas: a review[J]. Geomorphology, 2011, 134(1-2): 1-8.
- [8] 何长明,邹金锋,李亮. 强夯动应力的量测及现场试验研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(4):628-632.
- [9] 黄涛,刘辉. 强夯结合碾压控制高填方沉降的机理研究[J]. 西南交通大学学报,2007,42(2):158-163.
- [10] 张洁琦. 浅谈强夯处理在机场、公路岩溶地基中的应用[J]. 科学之友,2009(12):36-37.
- [11] 何春保,姜志全. 垫层强夯法在岩溶地貌地基处理中的试验研究[J]. 长江科学院院报,2014,31(8):60-65.
- [12] 夏天. 岩溶地基不同能级强夯处理效果分析[J]. 城市住宅,2016,23(9),101-103.
- [13] 黄赫,李凤岭,马永峰,等. 岩溶地质条件下双层强夯地基处理效果分析[J]. 石油工程建设,2017,43(1):6-12.
- [14] 朱彦鹏. 强夯法处理山区机场高填方地基的试验[J]. 兰州理工大学学报,2018,44(5):120-125.

收稿日期:2019-10-17