

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.06.009

覆盖型岩溶土洞泡沫混凝土复合地基 模型试验研究

黄 鹏^{1,2}, 简文彬^{1,2,3}, 洪儒宝^{1,2,4}, 张少波^{1,2}, 陈鸿志^{1,2}

(1. 福州大学 环境与资源学院, 福建 福州 350108;

2. 福州大学 岩土工程与工程地质研究所, 福建 福州 350108;

3. 地质工程福建省高校工程研究中心, 福建 福州 350108;

4. 福建省地质环境监测中心, 福建 福州 350001)

摘 要: 通过建立室内模型,进行了复合地基变形特性研究试验,研究覆盖型岩溶土洞泡沫混凝土复合地基的变形特性。试验设置两种工况共九组试验,探讨在分级荷载作用下不同桩长形成的复合地基的沉降规律,处理前后的土压力变化规律,以及桩土荷载分担比的变化规律。结果表明,当溶洞无充填物时,利用泡沫混凝土进行充填及作竖向增强体桩,桩体与充填体形成整体,与桩间土共同形成复合地基,地基承载力提升明显。若桩长继续增加,承载力没有提高,桩体工作性状接近端承桩。当溶洞被其它软弱土层充填时,桩长越长,承载力越高,但达到一定长度之后承载力提升有限,桩体工作性状接近摩擦桩。试验结果对泡沫混凝土复合地基处理覆盖型岩溶土洞的应用具有参考价值。

关键词: 覆盖型岩溶;泡沫混凝土;复合地基;模型试验

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2018)06—0045—05

Model test of Foam Concrete Composite Foundation in Karst Covered Area

HUANG Peng^{1,2}, JIAN Wenbin^{1,2,3}, HONG Rubao^{1,2,4}, ZHANG Shaobo^{1,2}, CHEN Hongzhi^{1,2}

(1. College of Environment and Resource, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

2. Institute of Geotechnical and Geological Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

3. Fujian University Engineering Research Center of Geological Engineering, Fuzhou, Fujian 350108, China;

4. Fujian Center of Geo-environmental Monitoring, Fuzhou, Fujian 350001, China)

Abstract: The purpose of this paper was to investigate the deformation characteristics of the covered karst treated by foam concrete composite foundation. The deformation characteristics of the composite foundation were studied by establishing the indoor model. The test set two working conditions and nine tests of composite foundation formed by different pile lengths were done under the hierarchical loads. The settlement regularities, the change rules of soil pressure before and after treatment, and the stress of pile were discussed. The results demonstrated that the foam concrete pile and the foam concrete filling formed a unit without filling in the cave. The composite soil was formed together with the soil between the piles. The bearing capacity of the foundation was obviously improved. With increase in the pile length, the bearing capacity was not improved. The working characteristics of the pile were close to that of the end-bearing pile. When the karst cave was filled by soft soil, the foam concrete pile formed composite foundation with the soil between the piles. The longer the pile length was, the higher the bearing capacity was. However, after reaching a certain length, the bearing capacity reaches its limit. The working characteristics of the pile were close to that of the friction pile. The test results are of great reference value for the application of foamed concrete composite foundation to covered karst.

Keywords: covered karst; foam concrete; composite foundation; model test

收稿日期: 2018-07-17

修稿日期: 2018-08-26

基金项目: 福建省科技重大专项(2016YZ002-1)

作者简介: 黄 鹏(1994—),男,福建福州人,硕士研究生,研究方向为岩土工程、地质灾害防灾减灾。E-mail: P_Huang@foxmail.com

通讯作者: 简文彬(1963—),男,福建龙岩人,博士,教授,主要从事岩土工程与工程地质教学与科研工作。E-mail: jwb.fzu@fzu.edu.cn

我国是世界上岩溶最发育的国家之一,可溶岩分布地区占国土面积的 1/3 以上^[1],福建省的可溶岩主要分布在其西南部。近年来,福建省岩溶塌陷发生频次越来越多,据不完全统计,岩溶塌陷已造成人员伤亡数十人,造成的直接和间接经济损失超过数十亿元,占全省地质灾害造成的经济损失 20% 以上,而龙岩市是福建省岩溶塌陷的重灾区,岩溶塌陷数量占全省岩溶塌陷地质灾害数量的 80% 以上^[2]。随着城市化建设的快速推进,岩溶地区的工程项目在规模和数量上急剧增大,建筑物常常遇到隐伏岩溶地基承载力不足、不均匀沉降、地基滑动、地表坍塌等问题,这些问题受到业界的普遍关注^[3-5]。

在福建龙岩地区,岩溶地基中往往发育一定厚度的软弱土覆盖层,其下大多数存在有竖向的呈串珠状的溶洞。由于溶洞顶板厚度小,且起伏不定,难以作为合适的桩基持力层。若将桩穿越多层溶洞选择下伏完整基岩作为桩端持力层,又导致成桩过长,不仅增加施工成本,同时易在施工过程中造成溶洞塌陷。因此,研究覆盖型岩溶区建筑地基处理,对加强岩溶地基稳定性分析评价有着重要的技术价值和经济意义^[6]。

目前国内已有采用复合地基处理覆盖型岩溶地区的地基^[7-14],其有限的应用显示出非常好的技术效果和经济效益,具有开展进一步深入研究和扩大应用范围的重要价值。

泡沫混凝土作为一种新型材料,在建筑工程方面已得到广泛应用^[15-16]。其轻质、水下不分散的特殊性能^[17-18]是普通混凝土不能胜任的。在复杂的岩溶地质环境条件下,采用泡沫混凝土充填溶洞形成复合地基,可有效防止溶洞坍塌。

本文以覆盖型岩溶为研究对象,通过建立室内模型,采用泡沫混凝土材料作为充填材料,进行了复合地基变形特性试验研究。探讨在分级荷载作用下不同桩长形成的复合地基的沉降规律,桩间土压力、溶洞顶、底部在处理前后的土压力变化规律,以及桩土荷载分担比的变化规律。

1 模型试验

1.1 模型试验装置

本模型试验装置主要由加压装置、反力装置、模型桶以及测读系统组成。加压装置由平衡反力架、液压千斤顶、液压泵及加载钢板组成;测读系统主要由微型土压力盒、百分表、带显示屏的荷载传感器、数据采集系统等组成,如图 1 所示。其中,模型桶横

截面直径为 0.5 m,高度 1 m,由钢板加工制成,模型桶侧壁设一开口。加载钢板尺寸同为直径 0.5 m,厚度 5 mm,刚度满足均匀加载要求。

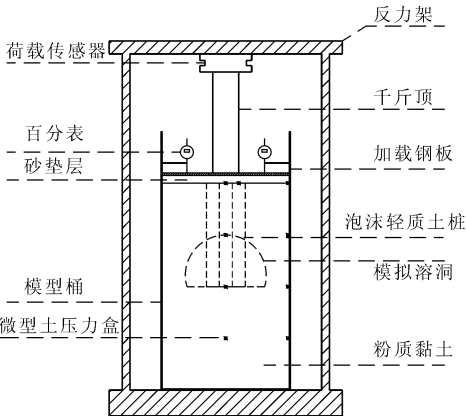


图 1 模型试验装置图

1.2 试验材料

试验用地基土采用龙岩市岩溶发育地区覆盖层的土体,土体主要为含碎石粉质黏土;采用淤泥模拟溶洞充填物,经烘干后碾碎,过 5 mm 的筛子,之后重新配制而成;砂垫层采用中粗砂,铺设厚度 2 cm。土的物理力学指标如表 1 所示。

表 1 试验用土物理力学指标

土类型	含水率 $\omega/\%$	天然重度 γ $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	初始孔隙比 e_0	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
粉质黏土	27.5	18.1	0.819	20.6	19.6
淤泥	64.4	16.0	1.837	5.6	3.9

泡沫混凝土的制备,水泥采用 425 普通硅酸盐水泥,发泡剂为 MS-1 型复合发泡剂。同时添加纤维素醚增加稠度,提高泡沫混凝土的水下不分散性能;添加减水剂,减少拌合用水量。为更符合实际工程情况,提高泡沫混凝土的水下性能,制备的泡沫混凝土密度调节至略大于水的密度,物理力学指标如表 2 所示。

表 2 泡沫混凝土物理力学指标

天然重度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	抗压强度/MPa
12.0	6.0

1.3 监测器件埋设方案

图 2 给出了复合地基模型试验中土压力盒的布置情况。试验共埋置了 10 个土压力盒,在桩顶平面上,桩顶中心、桩间土中心、模型桶边缘均设置土压力盒。同时,桩间土中心、模型桶边缘处 20 cm、40 cm、60 cm 深度均设置土压力盒,用于测定地基土受

压时不同深度处桩间土、边缘土的影响。土压力盒直径 16 mm,厚度 4.2 mm。

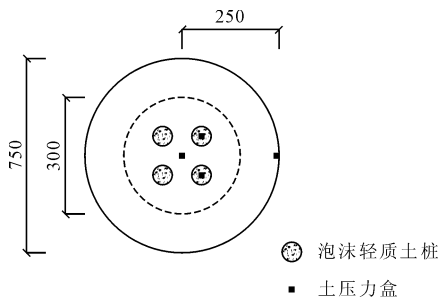


图 2 土压力盒平面布置图

1.4 试验方案

考虑到实际工程情况,溶洞可能是完全中空,也可能被软弱土体所充填,不同的情况采取不同的处理措施,因此试验也设置两类工况进行模拟。第一类是溶洞无充填状态,采用泡沫混凝土充填溶洞且作桩,形成复合地基;第二类是溶洞被淤泥所充填,采用泡沫混凝土作桩形成复合地基。

泡沫混凝土桩的模拟施工采用挖孔成桩,填土完成后用洛阳铲开挖桩位,利用泡沫混凝土的可注性进行灌注并设置不同长度的桩。

桩体采用泡沫混凝土作桩,桩径 50 mm,桩间距 100 mm,采用正方形布置,在溶洞平面范围内设置四根,具体布置如图 2 所示。

试验共 9 组,每组试验做 2 次,具体方案见表 3。

表 3 模型试验方案

试验工况	试验类型	试验编号	溶洞充填	桩长/cm
工况 1	天然地基	1-0	无充填	—
	复合地基	1-1	—	—
		1-40	泡沫	40
		1-50	轻质土	50
		1-60	—	60
工况 2	天然地基	2-0	淤泥	—
	复合地基	2-40	—	40
		2-50	淤泥	50
		2-60	—	60

1.5 试验步骤

(1) 在模型填筑之前,对现场取回的土样进行取样测定土体含水率,若含水率偏小,则加水搅拌至所需含水率;若含水率偏大,则将土体铺平晾晒,直至满足试验要求,控制含水率为 28%~32%之间。

(2) 在模型桶内涂上凡士林,铺设塑料膜以适当消除边界效应,再以密度控制法进行分层填土。

覆盖层土体分层填筑,每层填筑 5 cm(夯实后高度),控制地基土重度在 18 kN/m³~18.5 kN/m³。

(3) 分层填筑时,进行下个分层夯实前,将夯实土层表面捣松,以增强与下一层的土体咬合力,避免出现层与层之间的明显分界。

(4) 当堆填至土压力盒预埋深度时,将土压力盒铺设到所需位置并固定,同时检查传感器读数是否异常。

(5) 填筑完毕后,从模型桶侧壁开口处开挖,开挖出所需模拟溶洞形状及大小。溶洞设置为底面直径 30 cm、高为 15 cm 半球型溶洞,顶部埋深 25 cm。开挖完成后将洞口用粉质黏土回填,关闭模型桶开口,形成一密闭土洞。

(6) 利用洛阳铲开挖桩孔,用于灌注泡沫混凝土。泡沫混凝土即时制备,即时灌注,灌注 7 日之后进行荷载试验。

(7) 在土体顶面铺设 2 cm 砂垫层作为褥垫层。之后在砂垫层上放置刚性加载板用于施加面荷载。

(8) 安装百分表以及加载钢板,检查土压力盒数据是否正常。

(9) 加载采用液压泵+千斤顶进行加载,通过带显示器的荷载传感器进行控制,每一级荷载为 2 kN(10 kPa)。

(10) 每一级沉降稳定后,记录时间及百分表读数,同时与土压力数据进行对应。

2 试验结果与分析

2.1 荷载-沉降曲线

试验的荷载(p)-沉降(s)曲线如图 3、图 4 所示。在较低的荷载范围内(200 kPa),地基基本处于弹性变形状态。

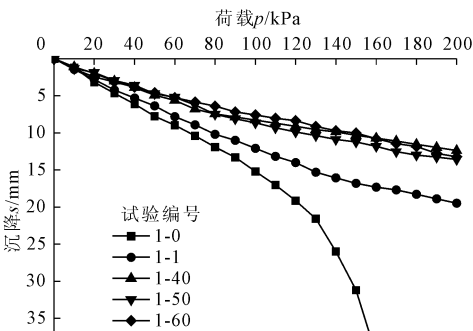


图 3 荷载(p)-沉降(s)曲线(工况 1)

试验 1-0 未进行任何处理时沉降最大,在荷载

达到 150 kPa~160 kPa 时,溶洞开始坍塌,沉降量急剧增大,试验终止。试验 1-1 采用泡沫混凝土对溶洞进行充填,沉降降低至 20 mm 左右。试验 1-40、1-50、1-60 分别对溶洞进行充填,同时增加长度 40 cm、50 cm、60 cm 泡沫混凝土桩作复合地基,沉降均接近,为 13 mm。由此可见,在溶洞被泡沫混凝土充填的情况下,桩体与充填体形成整体,桩长的增加,地基变形并没有明显变化。

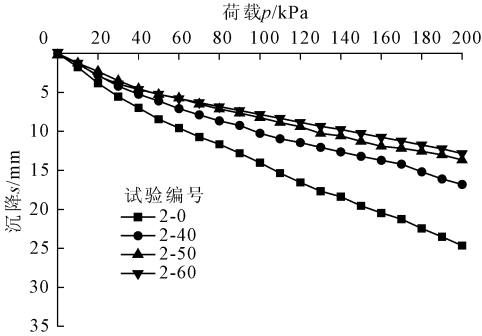


图 4 荷载 (p) - 沉降 (s) 曲线 (工况 2)

试验 2-0 的沉降介于试验 1-0 与试验 1-1 之间,符合实际情况。由于试验模型为有侧限,溶洞没有坍塌,曲线没有出现陡降。试验 2-40 的沉降达到 17 mm,而试验 2-50 与试验 2-60 沉降值比较接近,均接近 15 mm。这说明在工况 2 的情况下,桩长的增加,有利于提高桩体承载力,从而提高整个复合地基承载力,减少沉降。桩长 40 cm 增加至 50 cm 时,地基承载力提升较大,而 50 cm 增加至 60 cm 时,地基承载力没有显著提升。

2.2 地基土压力

为比较不同桩长下地基土压力的变化情况,取承压板荷载 $p=150\text{ kPa}$ 测得的土压力进行对比。图 5、图 6 即工况 1 在 150 kPa 荷载作用下,模型桶中心处、边缘处不同深度处的土压力。

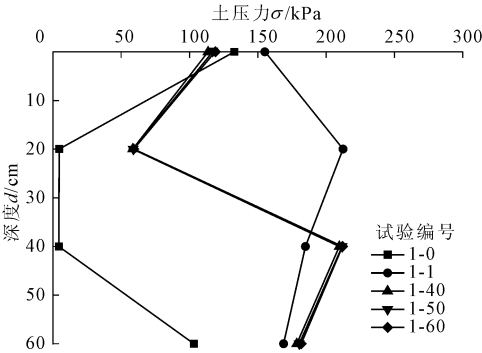


图 5 中心处地基土压力随深度的变化 (工况 1, $p=150\text{ kPa}$)

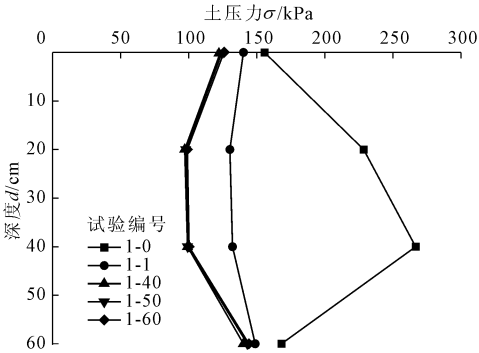


图 6 边缘处地基土压力随深度的变化 (工况 1, $p=150\text{ kPa}$)

试验 1-0 即在进行未进行任何处理的情况下,模拟的溶洞洞顶和洞底的土压力接近于 0,溶洞底部下卧层土压力也较小,而边缘处的土承担了较大的荷载,土压力达到 228 kPa、266 kPa。试验 1-1 即对溶洞填充泡沫混凝土后,由于泡沫混凝土的模量较地基土较高,变形更小,所以中心部分承担的荷载大于边缘部分承担荷载,溶洞顶部处的土压力最大,中心处土压力均大于边缘处土压力。

加入不同长度泡沫混凝土桩,充填体 + 桩结合形成增强体,与桩间土共同作用的复合地基。桩间土压力明显减低,中心 20 cm 处土压力仅 60 kPa,但溶洞底部的土压力最大,这是由于泡沫混凝土充填体将桩体部分承担荷载传递至溶洞底部,较均匀地扩散,减少桩体底部集中力,泡沫混凝土桩形成端承桩。与此同时,相较于试验 1-0、试验 1-1,边缘土压力均更小,复合地基加固区承担了较多的荷载。

试验 2-0 未处理时则同试验 1-2 (仅充填泡沫混凝土) 情况相反,由于溶洞内充填软弱土体,变形较大,溶洞上部土层承担的荷载小于边缘部分的土。加入不同长度的泡沫混凝土桩后,桩体承担了一部分荷载,中心土压力与边缘土压力均明显减小。试验 2-40 的桩间土与边缘土压力略大于试验 2-50 与试验 2-60 的土压力,试验 2-50 与试验 2-60 的情况接近,与沉降规律相同。由此可以说明,在仅有泡沫混凝土桩的情况下,桩长的增加有利于提高地基承载力,但存在一定的“有效桩长”,继续增加桩长并不能大幅度提高地基承载力。

2.3 桩土荷载分担比

在桩顶及桩间土中心布置土压力盒,量测泡沫混凝土桩与桩间土的所承担的土压力,二者比值为桩土荷载分担比。

工况 1 试验不同桩长对应的桩土荷载分担比接近,均接近 6。在 80 kPa 之后桩土荷载分担比趋于

稳定,桩体与桩间土共同形成较稳定的加固区,桩与土承担荷载比例达到稳定值。

试验2-40的桩土荷载分担比仅4左右,而试验2-50与试验2-60的桩土荷载分担比均近5。在荷载达到80 kPa前,桩体承担荷载比例较大,桩土荷载分担比略有上升。荷载达到80 kPa之后,由于单桩承载力有限,此时荷载继续增加,桩体承担比例降低,桩土荷载分担比降低。

3 结 语

本文通过室内模型试验,以福建省龙岩地区常见的覆盖型岩溶土洞为研究对象,通过设计不同工况,改变不同桩长研究了两种不同工况下的复合地基的变形特性,得到以下结论:

(1) 在覆盖型岩溶土洞地区,采用充填泡沫混凝土桩复合地基可以有效提高地基承载力,减少地基沉降。

(2) 对于溶洞无充填的情况下,利用泡沫混凝土的轻质性、可注性,以及良好的水下不分散性能对溶洞进行充填,可以有效防止溶洞坍塌,同时不增加过大的附加应力。如有更高的变形要求,可同时开挖桩孔,直接进行灌注成桩。桩体到达溶洞底部,与充填体形成一个整体即可,桩体穿越溶洞并不能有效提高复合地基承载力。由于充填体与桩体能形成一整体,可以有效提高单桩承载力,同时桩底应力可以被充填体有效扩散,降低对地基下卧层的附加应力。充填体与桩体以及桩间土共同形成复合地基,相比于桩基基础,桩体应力较小,可以充分利用覆盖层土体的承载力。

(3) 对于溶洞被淤泥或其他软弱土体充填的情况,利用泡沫混凝土作桩,穿越溶洞,与桩间土形成复合地基共同承担荷载。桩长增加,桩侧摩阻力增大,单桩承载力提高,地基承载力得到提高。但桩长继续增加,地基承载力提高有限,存在“有效桩长”。

参考文献:

- [1] Lu Yaoru. Karst in China: A World of Improbable Peaks and Wonderful Caves [M]. Beijing: Higher Education Press, 2012: 13-15.
- [2] 吴超凡,邱占林,邹 丹. 福建龙岩新罗区地质灾害形成条件及其机理探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报,

2012, 23(2): 105-110.

- [3] 周 建,张映钱,方亿刚,等. 水位变动及降雨入渗联合作用对岩溶地面塌陷的影响分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(1): 218-222.
- [4] 任新红,郭永春,王清梅,等. 覆盖型岩溶潜蚀塌陷临界裂隙开度模型试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 9(5): 84-87.
- [5] 张 文,武 科,刘国强,等. 城市地铁隧道岩溶地质灾害预警与成因分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(2): 42-46.
- [6] 鲍道亮,罗均宇,刘冬梅. 覆盖型岩溶区岩溶土洞的分布及地基处理方法[J]. 龙岩学院学报, 2011, 29(5): 16-20.
- [7] 毕诗月. 压力注浆技术及其在岩溶路基处理中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2008, 6(1): 82-83.
- [8] 黄俊光,方引晴,袁尚红,等. 岩溶地区地基基础处理的几个问题分析[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2006, 5(1): 74-77.
- [9] 万志勇,韩建强,高玉斌,等. CM 桩复合地基在岩溶地区高层建筑中的应用[J]. 建筑结构, 2012, 42(6): 118-120.
- [10] 张先华. 岩溶地区岩土工程评价及地基基础方案的比选[J]. 资源环境与工程, 2010, 24(3): 265-267.
- [11] 苏 谦,黄俊杰,白 皓,等. 铁路站场岩溶地基加固补强技术与效果分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 776-782.
- [12] 廖文彬. CFG 桩复合地基在岩溶地区高层建筑中的应用[J]. 土工基础, 2004, 18(6): 22-24.
- [13] 邓 磊. 覆盖型岩溶地基控制旋喷成桩质量的施工技术[J]. 路基工程, 2012(5): 130-132.
- [14] 潘纪顺,连光明,冷元宝,等. 综合物探方法在鹤辉高速公路溶洞勘察中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2015, 36(2): 49-53.
- [15] 周明杰,王娜娜,赵晓艳,等. 泡沫混凝土的研究和应用最新进展[J]. 混凝土, 2009(4): 104-107.
- [16] 张福兴. 泡沫轻质土在高速铁路软土路基中的应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [17] Kearsley E P, Wainwright P J. The effect of porosity on the strength of foamed concrete[J]. Cement & Concrete Research, 2002, 32(2): 233-239.
- [18] Tikalsky P J, Pospisil J, Macdonald W. A method for assessment of the freeze-thaw resistance of preformed foam cellular concrete[J]. Cement & Concrete Research, 2004, 34(5): 889-893.