

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.06.029

砂卵石层串珠状溶洞地质条件下大直径单桩水平静载 试验及数值仿真分析

吴子儒

(广东省建科建筑设计院有限公司, 广东 广州 51000)

摘要:砂卵石和串珠溶洞地质条件下的桥梁桩基水平承载力和变形机理研究目前并不充分。为合理确定该地质条件下无铰拱桥桩基水平承载力,开展了现场水平静载试验,分析了该类地质条件下桩基水平承载力的合理值,为类似工程提供参考。并运用GTS有限元软件开展了数值模拟,建模以修正摩尔库伦模型模拟砂卵石层,并在桩土之间设置Goodman接触单元,在桩端设置桩端单元。同时假定串珠状溶洞为椭球状分布,为防止计算出现不收敛的情况,对空腔内部进行特殊处理,采用统一理论模拟钢护筒和筒内混凝土。在此基础上,分析了桩顶受荷时 $H-Y$ 曲线和 $H-\Delta Y_0/\Delta H$ 曲线,并将数值结果与实测结果进行了对比。结果表明,在合理运用本构模型和土工参数情况下,有限元数值仿真结果与现场试验结果吻合度较高,有限元软件可以作为确定这种特殊地质条件下桩基水平承载力的有力技术手段,为确定单桩水平承载力提供新思路。

关键词:本构模型;Goodman接触单元;桩端单元;桩基水平静载试验;荷载位移曲线

中图分类号: TU443.15

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)06-0106-04

0 引言

岩溶地貌在我西南山区分布极为广泛,桥梁穿越该区域桩基难免会穿越溶洞层^[1-2]。而其中串珠状岩溶由于发育程度和规模不一,且沿深度方向溶洞数量分布较多,因此桩基的荷载传递机理尤为复杂^[3]。在桩基设计中,桩-土作用效应机理和桩顶荷载-位移曲线和水平承载力的确定一直是最为核心的问题。而目前对串珠状岩溶条件下的桩基水平承载力的研究极少,开展该类问题的研究具有极为重要的意义。

国内外工程技术和科研人员已采用有限元软件对桩基水平承载力进行了大量的研究工作。朱碧堂^[4]经过大量试验研究,认为5~15 m范围内的土体性质是影响桩基水平承载力的主要因素。马海艳等^[5]进行了不同工况下桩基的水平承载特性试验,拟合得出了不同工况下桩基水平临界承载力经验公式。李洪江等^[6]根据传统分析方法,推导桩基水平承载力挠曲微分方程,首次提出小变形下考虑摩擦效应的桩基水平承载计算方法。Y. M. Hsiung^[7]根据计算分析了影响桩基水平承载力相关因素,主要包括桩径、上部土层物理性质、桩顶约束条件和荷载加载形式等。

但上述研究均是针对串珠状岩溶条件下的桩基水平承载的。鉴于此,首先开展了砂卵石层串珠状溶洞地质条件下大直径单桩水平静载试验,为该类桩基的承载过程提供第一手资料,以供工程设计计算参考。之后在此基础上进行了GTS有限元数值仿真分析,通过有限元数值模拟和现场试验得出单桩的水平临界荷载、水平极限荷载,并与实测数据进行对比验证其合理性。

1 大直径单桩水平静载试验

1.1 桥梁概况

珠江水系南水河河涌宽度约为56 m,河道管理范围控制线宽度约为87.4 m。桥梁采用上承式板拱桥,拱肋矢跨比为1/8,跨径组合为1~56 m。桥宽24 m,主拱圈宽24 m,厚度为1.0 m。主拱圈的线形采用二次抛物线,桩基材料采用C35水下混凝土。

承台下设置3排桩基,桩基横向间距为5 m,每排桩基个数为6个,桩基纵向间距为4.5 m,总共18根直径1.8 m的钻孔灌注桩。桩基均按端承桩设计。桥型布置见图1。

根据勘察资料,检测桩基处于砂卵石土层和微风化岩地质中,根据地质将土层分为2层,且桩位处存在大量随机分布的溶洞,显然为串珠状岩溶。溶洞处理采用钢护筒+冲孔+浇筑混凝土桩基的方式。各土

收稿日期: 2022-08-21

作者简介: 吴子儒(1979—),男,硕士,高级工程师,从事市政路桥、隧道设计与研究工作。

层材料参数见表 1^[8],参数值来源见文献[8]。

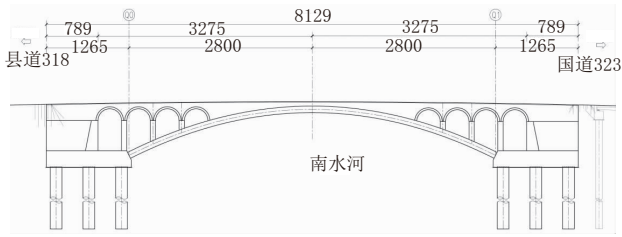


图 1 桥型布置图(单位:cm)

表 1 各土层物理力学指标

序号	土层名称	重度 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ ($^\circ$)	泊松比 ν	E_{50}^{ref}	$E_{\text{ed}}^{\text{ref}}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	R_f
1	砂卵石	20.1	5	35	0.25	28	10	100	0.7
2	风化岩	20.3	120	30	0.3	108	100	318	0.9

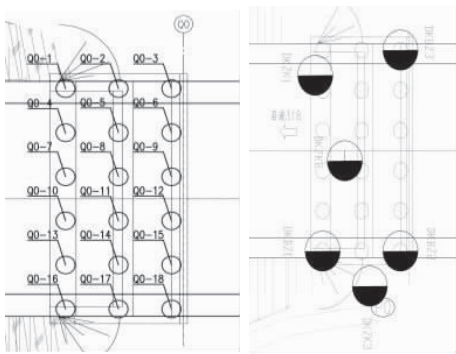


图 2 桩位布置与钻孔平面图

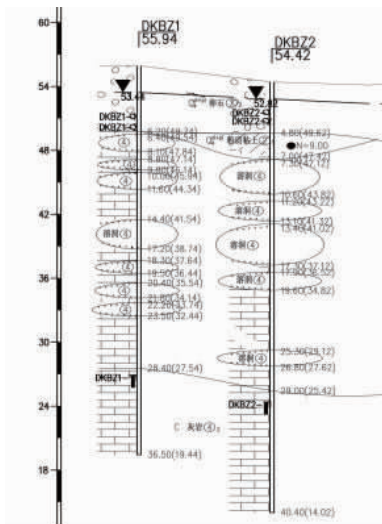


图 3 Q0-13# 与 Q0-16# 桩地质纵断面图

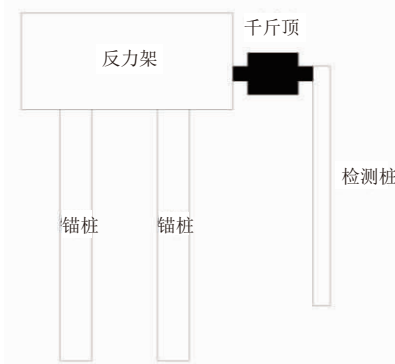


图 4 荷载试验加载装置

1.2 桩位布置

本项目选取 Q0-13# 和 Q0-16# 桩基进行水平承载力试验,桩位布置图与地质纵断面见图 2、图 3。

1.3 试验桩选取与加载装置

试验桩桩径 1.8 m,桩长 30 m,桩顶标高 52.8 m,桩底标高 22.8 m,荷载通过逐级的方式进行施加。加载装置采用千斤顶 + 反力架布置形式(见图 4)。

1.4 现场试验结果分析

大直径单桩水平静载试验结果见表 2, Q0-13# 和 Q0-16# 桩荷载 H - 水平位移 Y 曲线见图 5。

(1)对 Q0-13# 桩进行单桩水平静载试验。随着荷载逐级增加,水平位移量逐渐增大,加载至第 12 级荷载为 2 325 kN 时,最大水平位移量为 46.52 mm,满足终止加载条件,遂终止试验。根据 $H-\Delta Y_0/\Delta H$ 曲线,水平临界荷载取第一拐点对应的水平荷载值,即 1 356 kN, $H-\Delta Y_0/\Delta H$ 曲线未出现第二拐点。

(2)对 Q0-16# 桩进行单桩水平静载试验。随着荷载逐级增加,水平位移量逐渐增大,加载至第 14 级荷载为 2 712.5 kN 时,最大水平位移量为 46.40 mm,满足终止加载条件,遂终止试验。根据 $H-\Delta Y_0/\Delta H$ 曲线水平临界值取第一拐点对应的水平荷载值,即 1 162 kN;水平极限承载力取第二拐点对应的水平荷载值,即 2 131 kN。

由桩基水平承载力试验结果可知,由于桩基完整穿越串珠溶洞,并置于整体性完好的砂卵石地层,因此溶洞对桩基水平承载力的弱化作用较小,不影响桩基水平正常承载。

2 有限元数值仿真分析

2.1 有限元模型建立

计算采用 MIDAS GTS 软件进行数值仿真分析,对 Q0-13# 和 Q0-16# 桩建立有限元单桩模型。根据不同地质划分土层,土体本构采用修正的莫尔-库伦模型^[9-11],土体范围选取 20 m \times 20 m \times 53 m 实体单元。桩采用梁单元进行模拟,桩土之间设置 Goodman 接触单元,桩端设置桩端单元,对桩进行 RZ 约束。

假定溶洞按照椭球状分布,为确保计算收敛,对

表2 静载试验结果

桩位	逐级荷载步 /kN													
	194	388	581	775	969	1163	1356	1550	1744	1938	2131	2325	2519	2713
Q0-16# 水平位移 /mm	0.29	0.55	0.89	1.24	1.85	2.79	4.75	7.23	11.13	15.23	20.07	28.19	35.86	46.4
Q0-13# 水平位移 /mm	0.22	0.59	1.05	1.72	2.68	3.87	5.28	8.77	12.42	21.81	33.23	46.52		

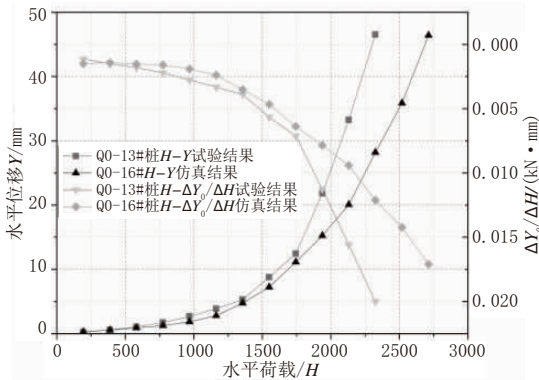


图5 Q0-13#和Q0-16#桩荷载-位移/位移增量曲线

空腔内部进行填充处理,遵循所选填充物对土体结构的物理特性影响较小的原则,可选取淤泥状土层,并把土体容重设置为较小值,且降低材料参数作为虚拟土体。桩基与钢护筒的模拟采用钢管混凝土,不考虑桩基与钢护筒之间的土体。其中,钢管混凝土采用统一理论进行模拟;材料按照各项同性进行模拟;组合截面材料参数经过计算取值为:直径1824mm,组合截面弹性模量为 3.174×10^4 MPa,容重为 27.39 kN/m^3 ,泊松比为0.25。

荷载施加通过分级加载方式,荷载步根据实际加载过程进行设置。计算过程中考虑土层初始应力场作用。有限元模型见图6和图7。

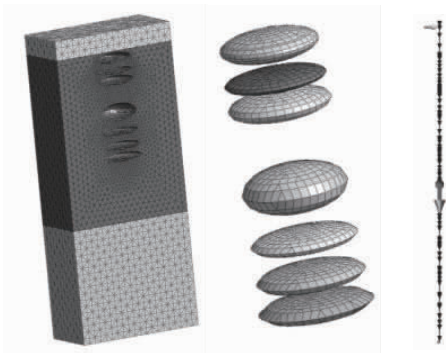


图6 Q0-13#单桩有限元模型

2.2 桩-土耦合位移场分析

经计算,在水平荷载加载下,Q0-13#和Q0-16#桩的水平位移值见图8~图11,结果仅展示特定荷载步下位移结果。由图可知,桩-土耦合场最大水平位移发生在桩顶,桩的水平位移随着桩深的增加而逐渐减小,深度达到一定范围以内,水平位移逐渐接近0;而土体水平位移最大值在桩顶位置,占比较小,

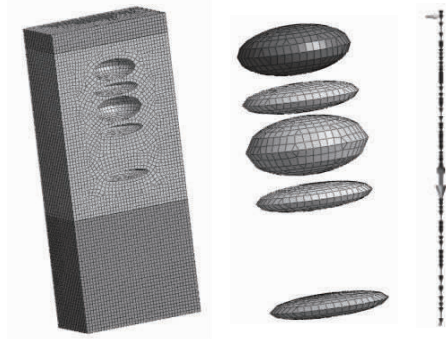


图7 Q0-16#单桩有限元模型

表明桩受土体的阻力最大位置在桩顶部位。其中,Q0-13#桩最大水平位移值为41.35mm,Q0-16#桩最大水平位移值为39.41mm。

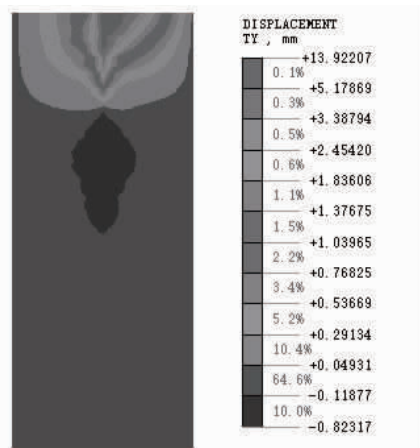


图8 1800kN作用下Q0-13#附近土体位移云图(单位:mm)

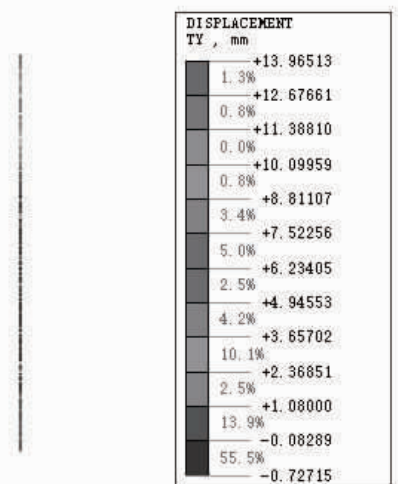


图9 1800kN作用下Q0-13#桩基位移云图(单位:mm)

2.3 试验与仿真结果对比

提取不同荷载步下有限元数值结果与试验结果

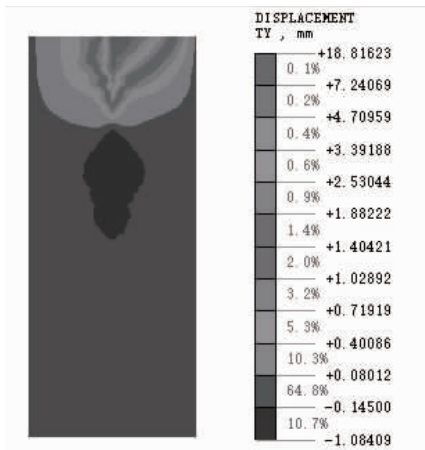


图 10 2 200 kN 作用下 Q0-16# 附近土体位移云图(单位:mm)

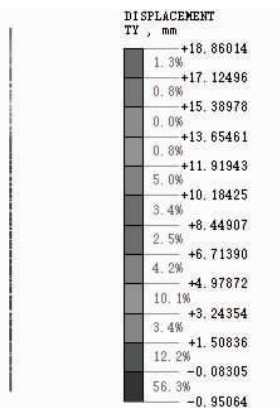


图 11 2 200 kN 作用下 Q0-16# 桩基位移云图(单位:mm)

进行对比,并绘制 $H-Y$ 曲线与 $H-\Delta Y_0/\Delta H$ 曲线,对比结果见图 12 和图 13。

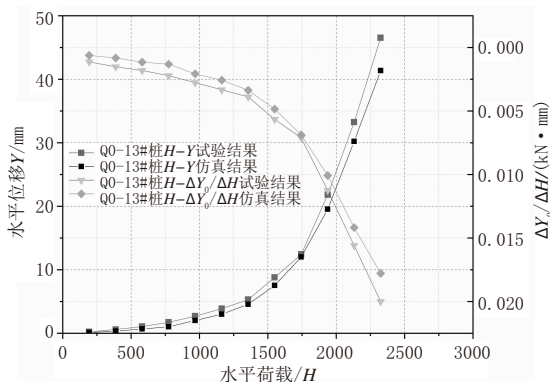


图 12 Q0-13# 桩试验与仿真对比曲线

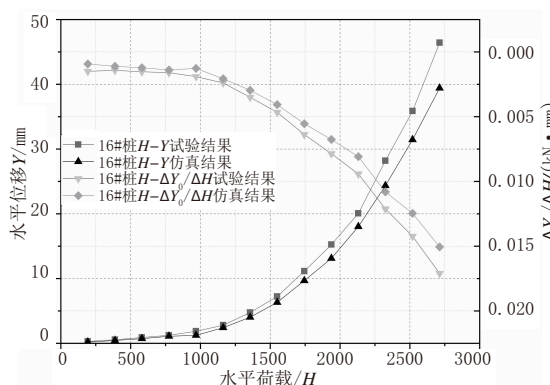


图 13 Q0-16# 桩试验与仿真对比曲线

由图对比可知,Q0-13# 桩试验与仿真 $H-Y$ 曲线位移最大差值百分比为 14.2%, $H-\Delta Y_0/\Delta H$ 曲线位移增量最大差值百分比为 14.3%。而 Q0-16# 桩试验与仿真 $H-Y$ 曲线位移最大差值百分比为 15.1%, $H-\Delta Y_0/\Delta H$ 曲线位移增量最大差值百分比为 15.2%,表明了数值模拟的有效性。

3 结论

通过对穿越串珠类溶洞大直径单桩进行静载试验与数值仿真分析,研究了该类特殊地质条件下大直径单桩水平承载力特性和桩-土耦合场水平位移分析,得到以下结论:

- (1)研究的材料本构、溶洞空腔、钢护筒作用、桩-土接触和桩端单元能较好地模拟岩溶区土体真实的受力状态。
- (2)通过对比现场试验结果与有限元理论结果,两者虽然存在一定误差,但差值较小,可认为有限元数值仿真结果与现场试验结果吻合度较高。
- (3)有限元模拟结果安全可靠,提出的砂卵石本构模型参数不仅可为该地区土层参数提供借鉴,而且在未进行桩基试验时可为确定桩基水平承载力提供新的思路。

参考文献:

- [1] 欧阳孝忠.岩溶地质[M]北京:中国水利水电出版社,2013:21-24.
- [2] 胡柏学,杨明辉,袁铜森,等.基于变形控制的岩溶区桩基承载力研究[J].公路交通科技,2009,26(8):11-15.
- [3] 秦张越.串珠状溶洞地区高速公路桥梁桩基沉降量安全性分析[J].交通科技,2021(4):18-20.
- [4] 朱碧堂.土体的极限抗力与侧向受荷桩性状[D].上海:同济大学,2005.
- [5] 马海艳,陈行,陈文字.不同工况下多年冻土桩基水平承载特性试验研究[J].工程勘察,2021,49(5):18-24.
- [6] 李洪江,刘松玉,童立元,等.小变形下考虑摩擦效应的桩基水平承载分析方法[J].岩石力学与工程学报,2018,37(1):230-238.
- [7] HSIUNG Y M. Theoretical elastic-plastic solution for laterally loaded piles[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(6): 475-480.
- [8] 李建伟,陈沅江,杜金龙.砂卵石地层基坑开挖土体本构模型辨识研究[J].地下空间与工程学报,2013,9(2):223-228.
- [9] 王英华.硬软互层泥岩地质条件下的微型桩复合地基模型数值模拟研究[D].南宁:广西大学,2021.
- [10] 郭丹,王斌,唐凯,等.桩土摩擦系数取值方法对桥桩单侧开挖模拟结果的影响规律[J].公路,2021,66(12):98-106.
- [11] 李峰,程丽娟.基于大型三轴试验的砂卵石土本构模型比选[J].四川水力发电,2020,39(6):8-10.