

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2023.02.003

套护筒间碎石填充对桩基荷载传递的 FLAC-PFC 耦合数值模拟

张华雨¹, 祝方才¹, 周 斌¹, 刘 青¹, 张少龙², 吴彬彬², 陈 琦², 尚亚新²

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 中铁北京工程局集团 第二工程有限公司, 湖南 长沙 410116)

摘 要: 以贵南高铁某桥梁桩基套护筒间填充碎石保持长桩垂直度为工程背景, 研究碎石对桩基荷载传递的影响, 通过碎石孔隙率模拟填充松紧, 建立了碎石不同填充松紧程度下的 FLAC-PFC 桩基荷载传递耦合数值模型。数值分析结果表明, 竖向荷载主要依靠桩端阻力承担, 桩周碎石竖向位移较大, 随孔隙率增加而增大, 水平位移较小, 与孔隙率关系不大。

关键词: 岩溶长桩; FLAC-PFC 耦合模型; 套筒; 护筒; 碎石填充; 端承桩; 摩擦桩

中图分类号: TU753.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2023)02-0016-07

引文格式: 张华雨, 祝方才, 周 斌, 等. 套护筒间碎石填充对桩基荷载传递的 FLAC-PFC 耦合数值模拟 [J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37(2): 16-22.

FLAC-PFC Coupling Numerical Simulation of Load Transfer of Pile Foundation by Casing Gravel Filling

ZHANG Huayu¹, ZHU Fangcai¹, ZHOU Bin¹, LIU Qing¹, ZHANG Shaolong²,
WU Binbin², CHEN Qi², SHANG Yaxing²

(1. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. 2nd Engineering Co. Ltd., China Railway Beijing Engineering Group Co. Ltd., Changsha 410116, China)

Abstract: Taking as the project background of the gravel filling between pile casings of a bridge in Guinan High-Speed Railway to maintain the perpendicularity of long piles, a research has been conducted on the impact of gravel filling on the load transfer of pile foundation. Based on a simulation test of the filling tightness of gravel porosity, an FLAC-PFC pile foundation load transfer coupling numerical model is established under different levels of filling tightness. The numerical analysis results show that the vertical load is mainly borne by the pile end resistance with a large vertical displacement of the gravel around the pile, which is proportional to the increase of the porosity; meanwhile, the horizontal displacement tends to be small, which has little relationship with the porosity.

Keywords: Karst long pile; FLAC-PFC coupling model; casing; protective tube; gravel filling; end bearing pile; friction pile

收稿日期: 2022-03-17

基金项目: 湖南省自然科学基金株洲联合基金资助项目 (2022JJ50087)

作者简介: 张华雨 (1997-), 男, 河南周口人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为粉细砂路基填筑,

E-mail: 1005535615@qq.com

通信作者: 祝方才 (1972-), 男, 湖北荆州人, 湖南工业大学教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为边坡和地下工程,

E-mail: zhufangcai@163.com

0 引言

岩溶地区岩体在地下水侵蚀作用下会产生孔洞, 降低岩体完整性, 导致岩体强度和稳定性降低, 进而降低在此修建的建筑物安全性^[1]。桩基础能够穿过软弱土层和溶洞, 使桩底位于满足承载力要求的岩土体上^[2], 因此被广泛应用于岩溶地区。在岩溶地区进行建筑桩基施工, 经常会遇到岩溶发育深度较大的地段, 按常规的施工机械和施工工艺, 常会出现卡锤、埋锤、漏浆、孔斜、塌孔等事故, 使工程造价增加和工期延长, 影响工程质量与经济效益^[3], 且岩溶桩基桩长过大后其施工难度也会加大。

龚成中等^[4]对岩溶地区桩基承载特性进行了分析和讨论, 并对当前相关规范作了评价。赵明华等^[5]对岩溶地区桩端岩层的变形特性进行了分析, 提出了确定桩端岩层安全厚度的计算公式, 并结合具体工程进行验证。刘铁雄等^[6]通过室内相似模型试验, 研究了嵌岩桩基与岩溶顶板的相互作用。黄生根等^[7]通过现场试验, 研究了岩溶地区的桩基承载特性。李炳行等^[8]通过工程实例研究了桩顶荷载作用下桩端岩体临空面的稳定性。张广春^[9]结合广东省广东高速桩基溶洞处理的工程实例, 介绍了钢护筒跟进法在岩溶地区桩基施工中的应用。该方法在岩溶发育、地质条件复杂的桩基施工中, 安全性能较高, 可有效提高成桩质量。艾凯等^[10]采用有限元法模拟桩基在不同厚度岩层中的受力情况, 分析了岩层厚度对桩的影响及桩的受力状态。认为岩层厚度对桩的影响较大, 岩层位置对桩应力不产生影响, 而对桩位移产生影响。周健等^[11]建立了 FLAC 和 PFC 耦合模型, 模型桩端区域使用离散元模拟, 边缘使用实体模拟桩基在荷载作用下刺入持力层过程, 得出刺入过程中桩周土体运动规律。

贵南高铁某桥梁桩基采用全回转全套管岩溶桩施工工艺, 该工艺特点是钻孔完成后在钢套筒和套管间填充碎石, 用碎石填充溶洞并保证桩身垂直度。相对于传统冲击钻、旋挖钻施工工艺, 全回转全套管施工方法具成孔工效高、成桩质量风险低、施工安全风险低等优势, 尤其适用岩溶强烈发育地区的长大桩基施工。本文依据此工程, 通过数值模拟研究钢套筒和套管间填充碎石的多少对桩基荷载传递的影响。

1 工程概况

某桥梁桩基位于广西南宁, 桩基断面如图1所示。场地上覆第四系全新统人工填筑土层、坡崩积层块石土; 第四系全新统冲洪积层淤泥质土、软土、红黏

土(松软土)、红黏土; 下伏基岩为燧石灰岩夹煤层及硅质岩、二叠系下统茅口组灰岩、栖霞组灰岩。地表水主要为澄江水, 受大气降水及上游多条暗河补给, 流量受季节变化影响较大, 径流途径较长。地下水主要为孔隙水和岩溶水。部分墩台桩基础较深且位于岩溶发育地区, 呈串珠或贯穿桩体分布。此处岩溶属于广西桂西北岩溶山区。具有溶洞多且深浅不一、大小不一、连通性强等特点。通过冲击钻冲击, 多次出现地面塌陷、塌孔、卡锤等情况, 成孔困难。后采用全回转钻机施工, 用全回转套管跟进结合旋挖机工艺, 并跟进钢护筒的方法成孔。

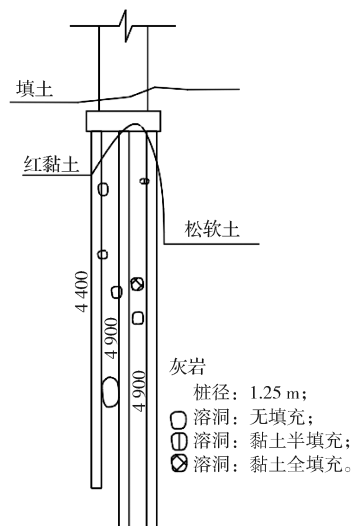


图1 桩基断面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the pile foundation section

2 施工方案

全回转全套管钻孔施工使用大型液压泵站带动全回转钻机钻进并同步跟进钢套管, 旋挖钻机钻取套管内的钻渣, 形成整体式套管护壁成孔。成孔后跟进普通钢护筒并置换拔出钢套管, 拔出的同时需要在钢套管和套筒之间填充碎石。然后吊放钢筋笼, 接着放入导管, 最后灌注混凝土成桩。全回转全套管钻孔施工工艺如图2所示。

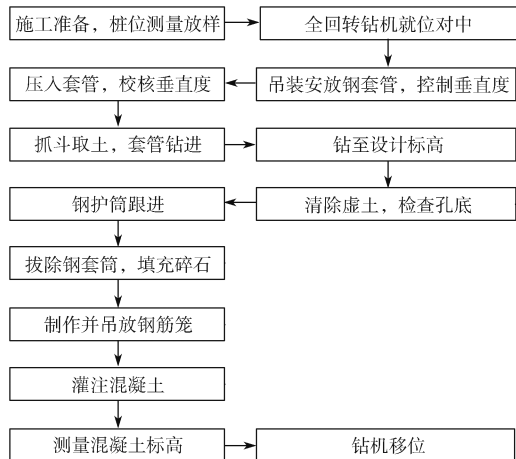


图2 全回转全套管钻孔施工工艺

Fig. 2 Flowchart of the full rotary pipe casing drilling

全回转钻机钻头及钢套管根据设计孔径进行选择,设计桩径为 1.25 m 的桩基,采用内径为 1.4 m 的钻头和钢套管;设计桩径为 1.5 m 的桩基,采用内径为 1.6 m 的钻头和钢套管。

钢护筒和钢套管之间存在 5 cm 的缝隙,因此在跟进钢套管过程中需在缝隙间填充碎石,使用碎石填充空洞并保证桩身垂直度。碎石粒径不大于 5 cm,匀速拔除钢套管并持续填充碎石,直到钢套管完全拔出。钢护筒跟进完成后,反向转动钢套管,将钢套管逐节拆卸。

3 数值模拟

以贵南高铁某桥梁桩基为工程背景,建立 FLAC-PFC 耦合模型,桩周岩体和桩使用连续单元模拟,碎石使用离散元模拟。在桩顶按应力分级加载,对比分析填充不同密实度碎石下桩基荷载传递和填充碎石运动特征,为岩溶桩基施工提供参考依据。

3.1 模型建立及计算参数选取

颗粒流离散单元法是基于颗粒流理论研究非线性介质力学的计算方法^[12]。PFC 是一种基于离散单元代码软件,以散体介质细观力学特性为根本依据,通过模拟颗粒间运动及相互作用来解析模拟对象的宏观物理力学行为,在研究颗粒材料间的相互作用及不连续变形方面具有较大优越性^[13]。

FLAC 是基于快速拉格朗日差分分析法开发的软件,用于模拟三维土体、岩体或其他材料体的力学特性^[14]。本文采用 FLAC^{3D} 有限元软件进行模拟,实体模型如图 3 所示。

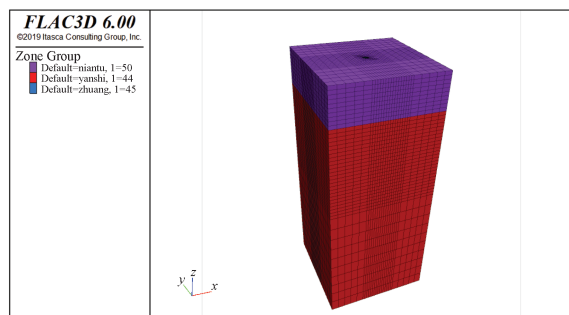


图 3 实体模型模拟图

Fig. 3 Simulated diagram of the entity model

根据工程实际,桩径为 1.25 m,桩高为 35 m。钢套管直径为 1.5 m,碎石填充在钢套管与套管之间,形状为内径 1 250 mm、外径 1 500 mm 的圆环。考虑边界效应的影响,模型长宽均为 30 m,深度方向取 70 m。其中红黏土层厚 10 m,灰岩厚 60 m。桩身和桩周岩体都使用实体单元进行模拟,共建立 87 400 个单元。碎石使用颗粒进行模拟,颗粒和实体通过由

实体或壳单元生成的墙相互作用。模型四边及底面使用固定约束,顶面为自由面。

桩身采用弹性本构模型,桩周岩体采用摩尔-库伦弹塑性本构模型^[14]。根据现场勘探资料模拟使用的参数如表 1 所示。

表 1 实体模型参数取值

Table 1 Parameter values of the entity model

材料	体积模量 K/MPa	剪切模量 G/MPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 / (°)	密度 ρ / (g·cm ⁻³)
红黏土	83.33	38.46	20	15	1 700
灰岩	22 600	10 000	6 000	42	2 400
桩	13 900	10 400	-	-	2 500

桩基加载过程中,桩与桩周岩体之间会发生相对滑动,因此要在桩与桩周岩体间建立接触面。由于全回转全套管岩溶桩在桩侧不直接与桩周岩体接触,通过碎石相互作用,因此本模型仅在桩底与灰岩之间建立接触面。

FLAC^{3D} 中接触面由一组接触面单元集合而成,每个接触面单元由 3 个接触面节点组成的三角形所定义,可在空间的任何位置创建接触面单元。通常,接触面单元被绑定到单元体的面上,对于四边形单元体的面需定义两个接触面单元,接触面节点在其顶点自动创建。当另一网格表面与接触面单元接触时,在接触面节点处会检测到接触,并具法向、切向刚度及滑动特性^[14]。接触面节点本构模型如图 4 所示。

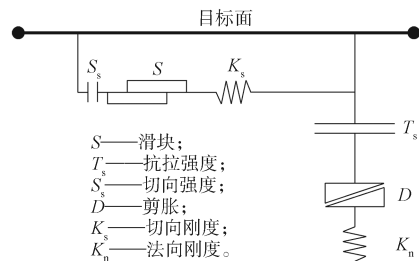


图 4 接触面节点的本构模型组成

Fig. 4 Constitutive model composition of the contact surface node

接触面单元的相关参数为黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、法向刚度 K_n 、切向刚度 K_s 和剪胀角 ψ 。接触面单元是描述可以滑动和分离的平面,用来模拟桩周岩体与桩之间的接触关系,其力学参数与桩周岩体的力学参数有关,但具体取值并无准确规定。参考文献 [15],可通过下式确定接触面单元参数。

$$\delta/\delta^*=0.5\sim0.8,$$

式中: δ 为接触面单元的力学参数; δ^* 为桩周岩体的对应参数,可根据桩体类型与施工方法进行选择。

接触面的法向刚度和剪切刚度可取 10 倍周边单元体的最大等效刚度,即

$$K_n = K_s = 10 \max(K + 4G/3/\Delta Z_{\min})。$$

式中: $\Delta Z_{\min}$ 为周边单元法向最小宽度; G 为剪切模量。

表2 接触面参数取值

Table 2 Parameter values of the contact surface

接触面	法向刚度 K_n / ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)	切向刚度 K_s / ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)	黏聚力 c / Pa	内摩擦角 / ($^\circ$)
桩 - 灰岩	1e9	1e9	30	3e6

接触力学行为是离散元计算方法的关键, 计算中球、簇和墙通过接触相互作用联系, 由局部影响整体, 反映微细观介质的各类力学行为, 所以选择合适的接触模型很重要^[16]。PFC 中内嵌了 10 种接触模型, 常用的有线性接触黏结模型、平行黏结模型和赫兹接触模型。线性接触黏结模型用于连续介质的模拟, 平行黏结模型用于模拟黏结材料的力学行为, 其黏结组件与线性元件平行, 在接触间建立弹性相互作用, 可在不同实体之间传递力和力矩。赫兹接触模型用于分析光滑、弹性球体在摩擦接触变形中产生的法向力和剪切力^[16]。参考文献 [12] 本文选用赫兹接触刚度模型。

赫兹接触刚度模型是一种简化的 Hertz-Mindlin 接触模型, 其主要力学参数为泊松比和剪切模量, 在该模型下颗粒间力学关系通过法向割线刚度和切向割线刚度计算, 表达式如下^[12]:

$$\begin{cases} K_n = \left[\frac{2G\sqrt{2R}}{3(1-\nu)} \right] \sqrt{U}, \\ K_s = \left\{ \frac{2[3G^2(1-\nu)R]^{1/3}}{2-\nu} \right\} |F_{ni}|^{1/3} \end{cases}$$

式中: U 为颗粒接触重叠量; F_{ni} 为法向接触力; ν 为泊松比; R 为任意两接触颗粒的平均半径。

建立实体模型后加载 PFC 模块, 使用 PFC 命令生成域, 然后在桩侧生成壳单元, 再借助壳单元和实体单元在碎石与桩和碎石与桩周岩体之间生成墙单元, 墙和域模型如图 5 所示。

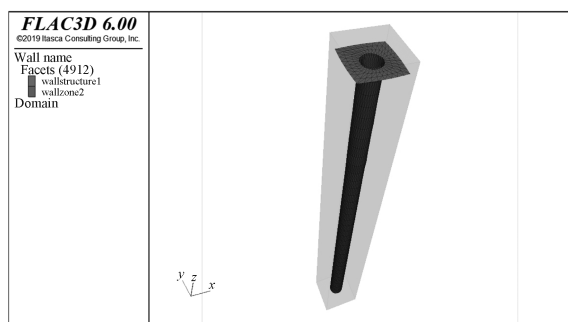


图5 耦合模型的墙和域

Fig. 5 Walls with its domains of a coupled model

生成墙之后将桩和桩周岩体之间需要用离散元模拟的实体删除, 然后在该区域内生成颗粒。使用孔隙率控制碎石的密实程度, 分别生成孔隙率为 0.2, 0.3, 0.4 的颗粒进行计算, 模型中颗粒直径取 10~50 mm, 颗粒模型如图 6 所示。

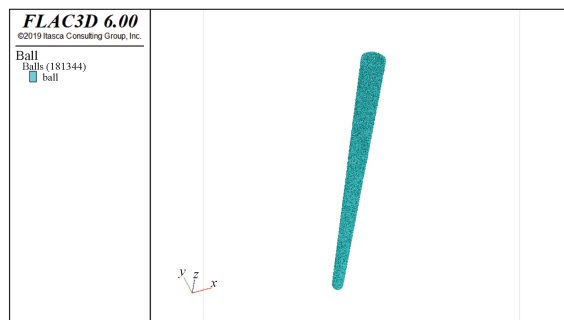


图6 耦合模型的碎石颗粒

Fig. 6 Crushed stone particles of the coupled model

颗粒的微观力学参数对数值模拟结果有很大影响, 因此在参数标定过程中要不断调整颗粒的细观参数, 使实验结果与碎石宏观参数变形模量 E 、泊松比 ν 等匹配。但目前还没有明确的宏细观参数关系理论^[17]。本文参考文献 [12-13], 参数选取如表 3 所示。

表3 碎石微观参数

Table 3 Microscopic parameters of the crushed stone

泊松比	剪切模量 /GPa	摩擦因数
0.2	6.0	0.3

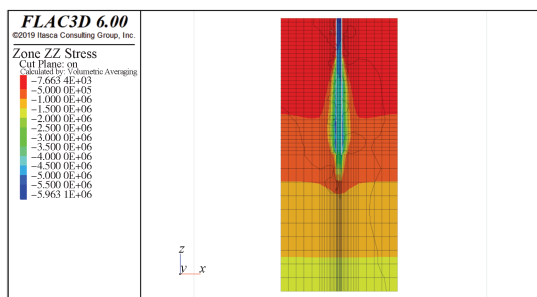
3.2 加载方式选定

FLAC 中有两种加载方式: 一种是按应力加载, 即直接在桩基顶面上施加应力, 如果需逐级加载, 可通过 fish 函数实现; 另一种是按位移加载, 让桩基顶面以一定速度向下运动, 通过运行步数控制桩基顶面位移。因为按应力加载求解快速, 本文使用按应力分级加载, 每级加 1 MPa, 共加 6 级。使用 table 记录荷载沉降曲线, 即每次加载运算后分别将荷载和位移写入 table, 最后得到荷载 - 沉降曲线。

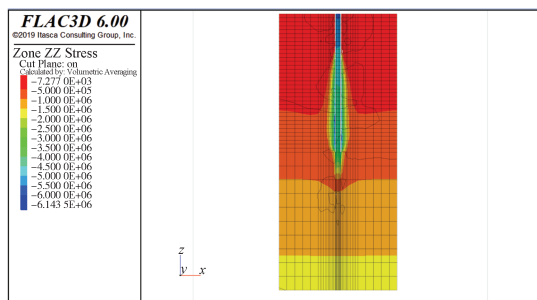
4 模拟结果与分析

通过改变钢套筒与套管间填充碎石的密实度研究桩基荷载传递特性和碎石运动特性, 结果如图 7、8 所示。

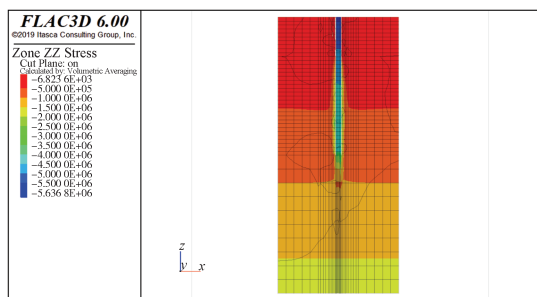
由图 7~8 可看出, 虽然桩体位于灰岩中, 但桩体与桩周岩体间填充碎石, 二者接触并不紧密, 竖向承载力主要由桩端阻力提供。加载后, 桩侧虽然应力较大, 但由于灰岩强度较高, 位移量较小。不同孔隙率下桩体竖向应力基本相同, 随着孔隙率的减小加载后荷载通过碎石传递给桩周岩体的力逐渐增大。



a) 孔隙率为 0.2



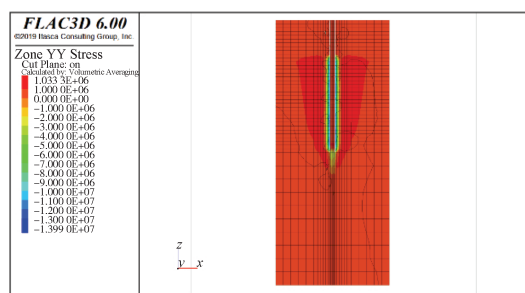
b) 孔隙率为 0.3



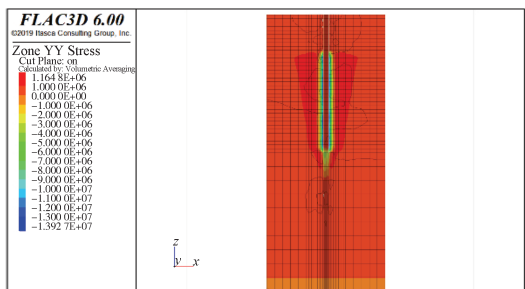
c) 孔隙率为 0.4

图 7 不同孔隙率模型竖向应力云图

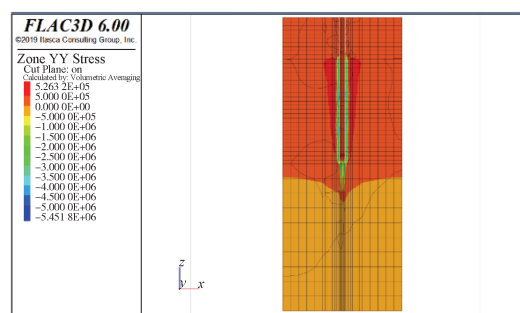
Fig. 7 Vertical stress nephogram of different porosity models



a) 孔隙率为 0.2



b) 孔隙率为 0.3

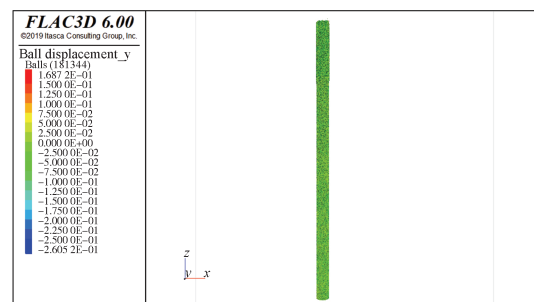


c) 孔隙率为 0.4

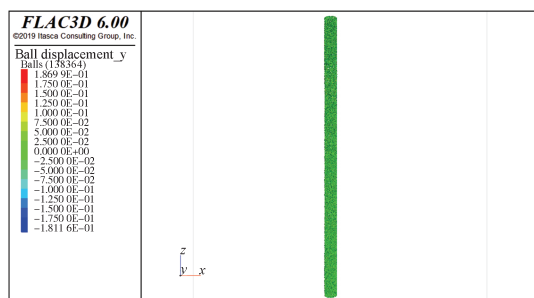
图 8 不同孔隙率模型 Y 向应力云图

Fig. 8 Y-direction stress nephogram of different porosity models

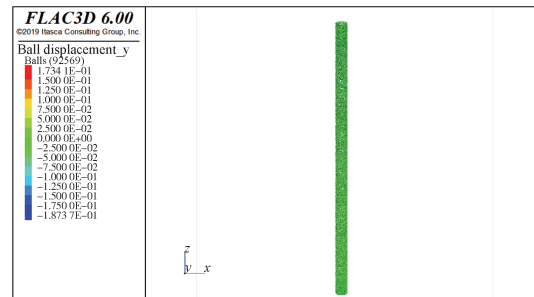
桩周碎石的主要作用是限制桩身侧移, 保证桩的垂直度在设计允许范围内。并在桩侧有溶洞的时候填充进去, 防止施工过程中溶洞出现塌陷。图 9~10 为不同模型中颗粒的位移图。



a) 孔隙率为 0.2



b) 孔隙率为 0.3



c) 孔隙率为 0.4

图 9 不同孔隙率颗粒 Y 向位移

Fig. 9 Y-direction displacement of particles with different porosity

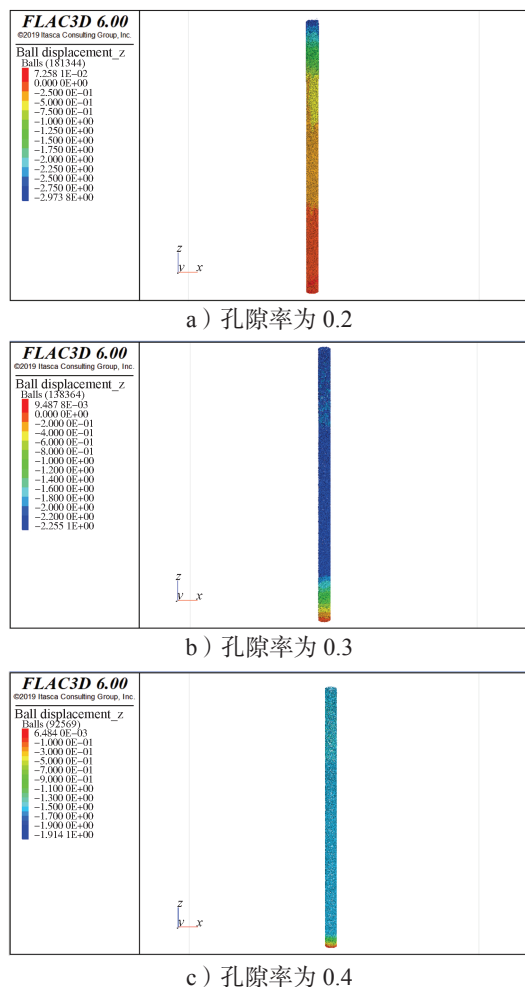


图 10 不同孔隙率颗粒 Z 向位移

Fig. 10 Z-direction displacement of particles with different porosity

由图 9~10 可知, 荷载作用下, 水平方向由于桩周土的约束, 碎石位移较小, 基本不随孔隙率的改变而改变。竖直方向受到重力和桩侧摩擦阻力作用, 碎石向下运动, 越来越密实, 因此深处的碎石竖向位移较小, 越靠近桩顶, 碎石位移越大。整体竖向位移随着孔隙率的增大而增大。

图 11 为桩的荷载 - 沉降曲线:

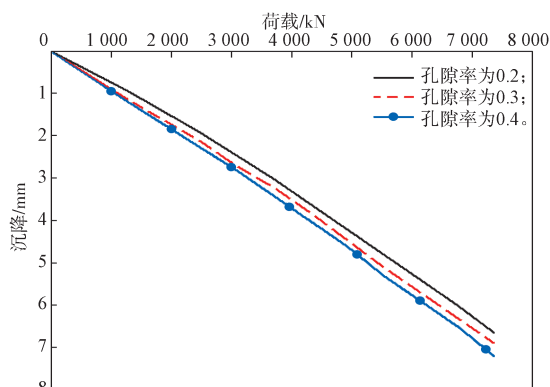


图 11 不同孔隙率模型 P-S 曲线

Fig. 11 P-S curves of different porosity models

由图 11 可知, 不同碎石孔隙率下的荷载 - 沉降曲线呈线性发展, 未出现极限破坏特征。但沉降量不同, 分别为 6.7, 6.9, 7.2 mm, 随着孔隙率的增加桩顶沉降逐渐增大。加载完成后, 桩荷载 - 沉降曲线仍未出现拐点, 说明桩还有一定的承载力储备, 满足设计要求。

桩基在竖向荷载作用下发生轴向弹性压缩, 桩 - 土相对位移产生桩侧摩擦阻力, 竖向荷载克服摩擦阻力沿桩身向下传递, 当桩侧摩擦阻力充分发挥之后, 桩端阻力开始承担增加的竖向荷载^[18]。本工程中的桩侧不是土或岩体, 而是填充的碎石, 在加载过程中会随桩一起向下移动, 产生的侧摩擦阻力较小, 因此桩侧摩擦阻力很快就发挥作用, 桩端阻力几乎承担了桩的全部竖向荷载, 属于端承桩。在最大荷载作用下, 桩侧摩擦阻力也仅承担很少的荷载。

4 结论

利用 FLAC-PFC 研究了某桥梁桩基护筒和套筒间填充碎石的荷载传递特征, 得出以下结论:

- 1) 不同孔隙率碎石填充桩荷载 - 沉降曲线均呈线性特征, 无显著破坏点, 荷载传递呈现为端承桩特性, 桩端阻力几乎承担了全部荷载;
- 2) 护筒、套筒和桩侧碎石共同产生侧向约束, 保证桩垂直度;
- 3) 桩侧碎石由于套筒和护筒约束, 颗粒水平位移较小, 竖向位移随孔隙率增加而增大。

参考文献:

- [1] 沈冰. 岩溶地区桩基础稳定性研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2006.
SHEN Bing. Research on Stability of the Pile Foundation in Karst Areas[D]. Nanning: Guangxi University, 2006.
- [2] 罗源宣. 岩溶地区旋挖钻孔灌注桩施工技术及承载性能研究 [D]. 桂林: 桂林理工大学, 2018.
LUO Yuanxuan. Study on Construction Technology and Bearing Capacity of Bored Piles in Karst Area[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2018.
- [3] 程宇, 文秀, 曹聚凤, 等. 岩溶强发育场地超深大直径桩基础施工技术研究 [J]. 建筑结构, 2020, 50(17): 126-131.
CHENG Yu, WEN Xiu, CAO Jufeng, et al. Study on Construction Technology of Super Deep and Large Diameter Pile Foundation in Well-Developed Karst Terrain[J]. Building Structure, 2020, 50(17): 126-131.
- [4] 龚成中, 何春林. 岩溶地区桩基竖向承载力的研究 [J]. 水运工程, 2006(11): 92-96.

- GONG Chengzhong, HE Chunlin. On Vertical Bearing Capability of Pile Foundation in Karst Area[J]. Port & Waterway Engineering, 2006(11): 92-96.
- [5] 赵明华, 曹文贵, 何鹏祥, 等. 岩溶及采空区桥梁桩基桩端岩层安全厚度研究 [J]. 岩土力学, 2004, 25(1): 64-68.
- ZHAO Minghua, CAO Wengui, HE Pengxiang, et al. Study on Safe Thickness of Rock Mass at End of Bridge Foundation's Pile in Karst and Worked-Out Mine Area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(1): 64-68.
- [6] 刘铁雄, 曹华先, 彭振斌. 岩溶地区嵌岩桩物理模型设计 [J]. 广东土木与建筑, 2005, 12(8): 3-5.
- LIU Tiexiong, CAO Huaxian, PENG Zhenbin. Physical Model Design of Rock-Socketed Pile in Karst Area[J]. Guangdong Civil Engineering & Construction, 2005, 12(8): 3-5.
- [7] 黄生根, 梅世龙, 龚维明. 南盘江特大桥岩溶桩基承载特性的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 809-813.
- HUANG Shenggen, MEI Shilong, GONG Weiming. Testing Study on Bearing Behavior of Piles for Nanpan River Great Bridge in Karst Area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(5): 809-813.
- [8] 李炳行, 肖尚惠, 莫孙庆. 岩溶地区嵌岩桩桩端岩体临空面稳定性初步探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 633-635.
- LI Bingxing, XIAO Shanghui, MO Sunqing. Discussion About the Stability of Rock Mass Free Face on the Tip of Rock-Socketed Pile in Carst Region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 633-635.
- [9] 张广春. 采用钢护筒跟进法处理特大溶洞地层中的桩基施工 [J]. 市政技术, 2013, 31(6): 87-90.
- ZHANG Guangchun. Construction of Pile Foundation by Steel Casing for Follow up Method in Karst Stratum with Large Cave[J]. Municipal Engineering Technology, 2013, 31(6): 87-90.
- [10] 艾 凯, 王 静. 岩溶地区桩基的有限元分析 [J]. 岩土力学, 2003, 24 (增刊 1): 124-126.
- AI Kai, WANG Jing. Study of Piles Foundation in Karst Area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(S1): 124-126.
- [11] 周 健, 黄 金, 张 姣, 等. 基于三维离散-连续耦合方法的分层介质中桩端刺入数值模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2564-2571.
- ZHOU Jian, HUANG Jin, ZHANG Jiao, et al. Coupled 3D Discrete-Continuum Numerical Simulation of Pile Tip Penetration in Layered Media[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(12): 2564-2571.
- [12] 蒋应军, 任蛟龙, 徐寅善, 等. 级配碎石力学性能的颗粒流数值模拟方法 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(5): 699-704.
- JIANG Yingjun, REN Jiaolong, XU Yinshan, et al. Simulation Method of Mechanical Properties of Graded Broken Stone Based on Particle Flow Code[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(5): 699-704.
- [13] 胡军霞. 堆积碎石土离散元细观参数-宏观力学参数相关性研究 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2015.
- HU Junxia. The Study of Accumulation of Gravel Soil Element Mesoscopic Parameters-Macroscopic Mechanical Parameters Correlation[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2015.
- [14] 彭文斌. FLAC 3D 实用教程 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2020: 328-329.
- PENG Wenbin. FLAC3D Practical Tutorial[M]. 2nd Ed. Beijing: China Machine Press, 2020: 328-329.
- [15] 邱瑞成, 艾健森. 基于 FLAC3D 的单桩静载模拟桩土接触面参数敏感性研究 [J]. 路基工程, 2019(2): 164-169.
- QIU Ruicheng, AI Jiansen. FLAC3D-Based Study on Sensitivity of Pile-Soil Interface Parameters by Static Load Test of Single Pile[J]. Subgrade Engineering, 2019(2): 164-169.
- [16] 石 崇, 张 强, 王盛年. 颗粒流 (PFC5.0) 数值模拟技术及应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018: 86-87.
- SHI Chong, ZHANG Qiang, WANG Shengnian. Numerical Simulation Technology and Application with Particle Flow Code (PFC 5.0)[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018: 86-87.
- [17] 吴 洋, 蔡金轩, 吴 斌, 等. 基于颗粒单元接触的三维离散-连续耦合分析方法 [J]. 四川建材, 2021, 47(1): 77-78.
- WU Yang, CAI Jinxuan, WU Bin, et al. Three-Dimensional Discrete-Continuous Coupling Analysis Method Based on Particle Element Contact[J]. Sichuan Building Materials, 2021, 47(1): 77-78.
- [18] 王 陶, 马 晔. 超长钻孔桩竖向承载性状的试验研究 [J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 1053-1057.
- WANG Tao, MA Ye. Study on Over-Length Drilled Pile Bearing Behavior Under Vertical Load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(7): 1053-1057.

(责任编辑: 申 剑)