

# 超大直径嵌岩桩受力特性的数值模拟及其规律性分析

邢皓枫<sup>1, 2</sup>, 李浩铭<sup>1, 2</sup>, 安 新<sup>1, 2</sup>, 李春峰<sup>3</sup>

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司, 贵州 贵阳 550001)

**摘要:** 贵州赫章特大桥主墩高 195 m, 由 20 根直径 2.5 m、长 40 m 的嵌岩桩支撑。桥区范围内地质条件较为复杂, 为了掌握此复杂地质条件下嵌岩桩受力特性、桩侧阻和端阻分布及其变化规律, 建立嵌岩桩单桩和群桩的三维有限元分析模型, 开展超大直径嵌岩桩单、群桩的分析和研究, 获得了一些有价值的结论: 对于覆盖层深厚的超大直径嵌岩桩基础, 覆盖层分担一定比例的桩顶荷载, 若在设计中忽略覆盖层的影响是不经济的; 嵌岩桩侧阻与端阻的发挥并非同步, 即侧阻先于端阻发挥; 合理的嵌岩深度有利于调动整个嵌岩段的侧阻发挥和提高端阻和覆盖层侧阻荷载分担比。

**关键词:** 大直径嵌岩桩; 岩石; 覆盖层; 三维数值模拟; 受力特性

中图分类号: TU473.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)S2-1126-04

**作者简介:** 邢皓枫(1969-), 男, 河南开封人, 博士, 副教授, 从事地基加固技术及桩基工程教学与研究工作。E-mail: hfxing@tongji.edu.cn。

## Numerical simulation and analysis of mechanical characteristics for large-diameter rock-socketed piles

XING Hao-feng<sup>1, 2</sup>, LI Hao-ming<sup>1, 2</sup>, AN Xin<sup>1, 2</sup>, LI Chun-feng<sup>3</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and

Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Guizhou Transportation Planning

Survey and Design Academy Co., Ltd., Guiyang 550001, China)

**Abstract:** The main pier of Hezhang Bridge Guizhou province has a height of 195 m, which is supported by 20 rock-socketed piles with 2.5 m in diameter and 40 m in length. The engineering geological condition of the main pier site is very complex. In order to investigate its mechanical characteristics, end bearing and shaft resistance distribution, 3D finite element analyses for individual pile and pile group are carried out. Some valuable conclusions are drawn: the overlaying stratum shares a certain proportion of the upper load, so it is uneconomical to neglect its influence in design; the shaft resistance and tip resistance are not mobilized synchronously, the shaft resistance is mobilized prior to the tip resistance; the reasonable depth of rock-socketed piles can improve the shaft resistance and enhance the load sharing ratio of the tip resistance and the shaft resistance of the overlaying stratum.

**Key words:** large-diameter rock-socketed pile; rock; overlaying stratum; 3D numerical simulation; mechanical characteristic

## 0 引言

嵌岩桩具有承载力高、群桩效应小、沉降收敛快等特点, 是大型桥梁、高层建筑等建(构)筑物的重要基础型式。目前已出台的有关嵌岩桩的国家及相关行业规范与标准的计算公式、参数取值, 以及计算结果都存在较大的差异, 往往造成嵌岩桩的设计不尽合理<sup>[1]</sup>, 甚至将带来潜在风险和造成不必要的浪费。由于大直径嵌岩桩承载力较高, 实际工程中通常不进行破坏性试验, 针对如此复杂的大直径嵌岩桩, 有限元法可有效开展其受力特性分析及其规律性探索。有限元分析法被认为是行之有效的研究手段和方法<sup>[2-4]</sup>。

贵州省毕威高速公路的赫章特大桥#11 主墩高 195 m, 是世界上连续钢构桥梁中的第一高墩, #11 墩嵌岩桩基础是具有一定代表性的山区桩基工程。该工程不仅上部设计荷载大, 地质条件复杂, 而且桩基础为超大直径的嵌岩群桩, 掌握此工程嵌岩群桩受力特性有很大的工程和实际意义。

## 1 赫章特大桥工程概况

在建贵州省赫章特大桥是毕威高速公路重点控制

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272292); 贵州省交通厅资助项目(2010-122)

收稿日期: 2013-06-15

工程之一, 其#11墩高 195 m, 设计轴力 6.2 万吨, 坐落在长×宽×高为 27.0 m×23.0 m×6.0 m 的承台上, 承台由 20 根长 40 m、直径 2.5 m 的嵌岩桩群桩基础支撑, 基桩纵向配 78 根直径 32 mm 二级钢筋。考虑承台自重, 群桩基础承受总荷载约为 700 MN, 因此, 每根基桩平均分担荷载约 35 MN。

赫章特大桥#11 墩场址地层自上而下分布为: ①卵石层 ( $Q^{al+pl}$ ): 褐黄色、黑色, 中密状态, 卵石成分为灰岩, 粒径 20~40 mm, 含量约为 70%, 余为砂土, 厚 3.20~35.5 m,  $c=12.5$  kPa,  $\phi=40^\circ$ 。②中风化灰岩 ( $P^{lm}$ ): 深灰色, 中厚层状, 岩体较完整, 岩质较硬, 岩芯呈柱状和长柱状, 岩石饱和, 单轴抗压强度标准值 40 MPa, 基岩面朝威宁方向倾斜约  $44^\circ$ , 嵌岩桩成桩后, 嵌岩深度为 12.12~37.48 m, 如图 1 所示。

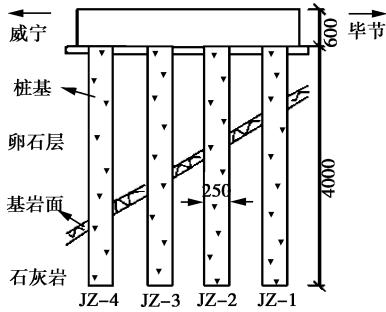


图 1 #11 主墩桩基剖面示意图

Fig. 1 Profile of pile foundation for pile No.11

## 2 有限元计算模型

根据对称性, 单桩、群桩模型分别取 1/4 和 1/2 原型进行模型网格划分与分析, 其单桩模型尺寸为 40 m×40 m×70 m, 群桩模型尺寸为 40 m×100 m×66 m。地层和桩均采用实体单元建立, 在桩与土体和岩土的界面分别设置接触面单元。

为研究嵌岩桩单桩的荷载传递特性以及嵌岩深度和覆盖层厚度的影响, 单桩数值模拟设计三组方案, 保持桩长、桩径一致, 改变覆盖层厚度和嵌岩深度。单桩模拟方案具体参数如表 1 所示。

表 1 单桩数值模拟方案

Table 1 Numerical simulation schemes of individual pile

方案名称	桩长 /m	桩径 /m	覆盖层厚度 /m	嵌岩深度 /m
SP_0	50	2.5	0	50.0 (20d)
SP_1	50	2.5	22.5 (9d)	27.5 (11d)
SP_2	50	2.5	42.5 (17d)	7.5 (3d)

群桩的模拟是按现场#11 墩桩基础实际情况建立仿真模型, 主要研究基岩面倾斜, 以及由此造成的嵌岩深度变化对群桩整体承载性能的影响。如图 1 所示, 群桩模型中位于承台中央的 4 根基桩, 沿基岩面倾斜

方向, 按照嵌岩深度由大到小, 依次以 JZ\_1~JZ\_4 进行编号。各基桩嵌岩深度和覆盖层厚度如表 2 所示。

表 2 群桩数值模拟方案

Table 2 Numerical simulation schemes of pile groups

基桩编号	JZ_1	JZ_2	JZ_3	JZ_4
覆盖层厚度/m	12	18	24	30
嵌岩深度/m	28	22	16	10

计算采用 Mohr-Column 弹塑性本构模型, 并按照实际土层分布赋予相应的物理力学参数。模型材料主要的力学参数如表 3 所示。

表 3 模型计算参数

Table 3 Calculation parameters of model

地层	E/MPa	$\mu$	c/kPa	$\phi/(^\circ)$
卵石覆盖层	45~60	0.30	10	40
中风化灰岩	4300	0.25	1400	43.8

模拟过程中采用逐级加载的方式, 在桩顶面施加均匀布荷载。根据#11 墩桥嵌岩桩承载力验算结果, 单桩的极限桩承载状态由桩身材料强度控制, 其值约为 70 MN。因此, 数值计算中, 单桩桩顶施加的最终荷载取 80 MN, 群桩对应的最终荷载为 1600 MN。具体的加载方案如下: ①单桩模型: 5, 10, 20, 40, 80 MN; ②群桩模型: 100, 200, 400, 800, 1600 MN。

## 3 单、群桩受力特性及其规律性分析

### 3.1 单桩受力特性及其变化特征

#### (1) $Q-s$ 曲线

各单桩模型的  $Q-s$  曲线均基本呈直线型, 未出现拐点。随着嵌岩深度增加, 相同荷载下桩顶沉降明显减小,  $Q-s$  曲线斜率减小, 说明增加嵌岩深度提高了单桩的抗压刚度。单桩模型 SP\_0、SP\_1 和 SP\_2 的沉降依次增加, 可知增加嵌岩深度可以减小桩顶沉降。

#### (2) 轴力和侧摩阻力分布

在各级荷载作用下, 单桩模型 SP\_0、SP\_1 和 SP\_2 的桩身轴力和侧摩阻力沿深度方向的分布如图 2~4 所示。由于桩身完全嵌入岩石, 模型 SP\_0 桩身轴力与侧摩阻力均沿深度方向基本呈指数函数型迅速递减, 轴力与侧摩阻力最大值都出现在桩顶; 各级荷载作用下, 桩端阻力基本为零, 桩顶荷载全部由桩侧阻力承担。单桩模型 SP\_1 和 SP\_2 同时包括覆盖层和嵌岩段, 在桩顶荷载作用下, 桩身轴力沿深度递减。桩顶荷载达到 20 MN 后, 轴力分布曲线在基岩面位置出现明显的拐点, 这是由于基岩段和覆盖层段剪切面摩擦及强度特性不同造成的。在覆盖层段, 轴力基本呈直线型沿深度递减; 在嵌岩段, 模型 SP\_1 的轴力曲线呈指数函数型沿深度递减, 而模型 SP\_2 的轴力曲线基本呈线性递减, 使整个轴力分布曲线呈现双折现

型。可见，嵌岩桩桩身轴力的递减规律与嵌岩深度之间有密切的联系。

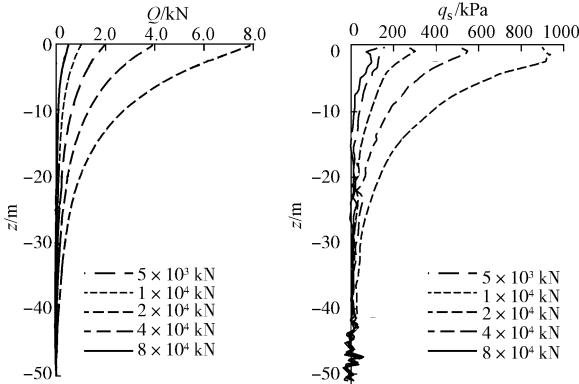


图 2 SP\_0 轴力与侧摩阻力分布

Fig. 2 Distribution of axial force and side resistance of SP\_0

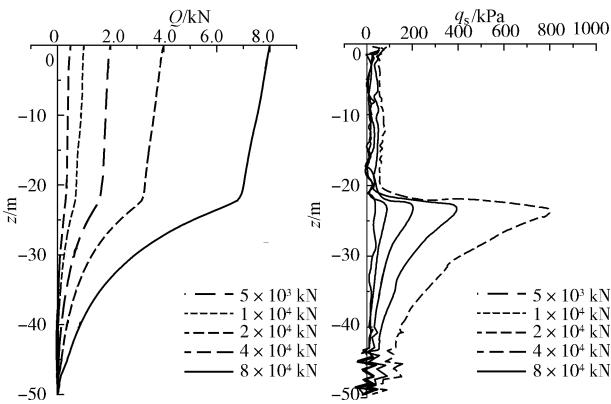


图 3 SP\_1 轴力与侧摩阻力分布

Fig. 3 Distribution of axial force and side resistance of SP\_1

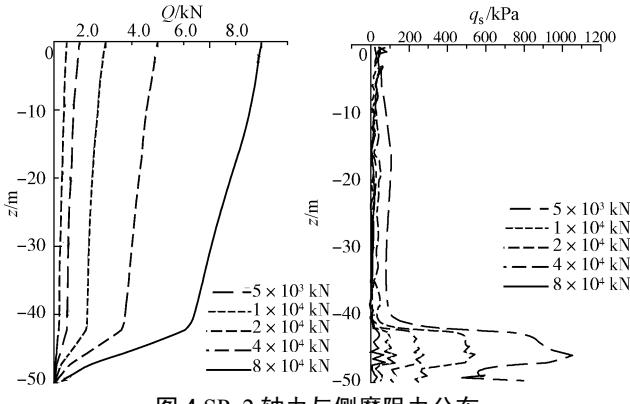


图 4 SP\_2 轴力与侧摩阻力分布

Fig. 4 Distribution of axial force and side resistance of SP\_2

在荷载水平较低时，嵌岩段与覆盖层侧摩阻力相差不大，分布都较为均匀；随着荷载增大，嵌岩段与覆盖层侧摩阻力之间差值逐渐加大，特别是嵌岩段侧摩阻力峰值远大于覆盖层侧摩阻力峰值。在覆盖层段，侧摩阻力分布较为均匀；在嵌岩段，模型 SP\_1 的侧摩阻力基本呈指数函数型沿深度递减，而模型 SP\_2 的侧摩阻力分布相对均匀，且侧摩阻力值较大。

表 4 为最后一级荷载下各单桩模型侧阻的最大值和平均值。可见，随着嵌岩深度的减小，嵌岩段平均

侧阻显著提高，覆盖层侧阻也有所增长，表明减小嵌岩深度有利于调动整个嵌岩段侧阻的发挥以及覆盖层侧阻的荷载分担。

表 4 最后一级荷载下侧阻最大值与平均值

Table 4 Maximum and average values of side resistance

模型	覆盖层侧阻/kPa		嵌岩段侧阻/kPa	
	最大值	平均值	最大值	平均值
SP_0	—	—	935	200
SP_1	247	70	806	313
SP_2	249	86	1051	775

### (3) 荷载分担比

单桩模型 SP\_0 的荷载一直全部由嵌岩段侧阻承担；单桩模型 SP\_1 和 SP\_2 的覆盖层侧阻、嵌岩段侧阻和端阻的荷载分担比分别用  $Q_s/Q$ 、 $Q_r/Q$  和  $Q_b/Q$  表示，随桩顶荷载增加的变化规律如表 5 所示。

表 5 模型 SP\_1、SP\_2 在各级荷载下荷载分担比

Table 5 Load sharing ratio with each load level for models

模型	荷载分担 比/%	各级荷载/MN				
		5	10	20	40	80
SP_1	$Q_s/Q$	38.35	32.77	21.18	20.69	15.32
	$Q_r/Q$	61.11	66.82	78.46	78.97	84.34
	$Q_b/Q$	0.54	0.41	0.36	0.34	0.35
	$Q_s/Q$	63.30	50.55	38.37	35.07	36.92
SP_2	$Q_s/Q$	35.12	47.45	59.34	62.56	59.17
	$Q_r/Q$	1.58	2.00	2.29	2.38	3.91
	$Q_b/Q$	—	—	—	—	—

模型 SP\_1 随着荷载的增大，覆盖层侧阻荷载分担比  $Q_s/Q$  由 38% 逐渐减小到 15%；嵌岩段侧阻荷载分担比  $Q_r/Q$  由 61% 逐渐增加到 84%；端阻基本不承担荷载，其荷载分担比  $Q_b/Q$  一直接近于零。在整个加载阶段，嵌岩段侧阻荷载分担比一直大于覆盖层侧阻的荷载分担比。

模型 SP\_2 嵌岩深度较小，随着荷载的增大，覆盖层侧阻荷载分担比  $Q_s/Q$  由 63% 逐渐减小到 37%；嵌岩段侧阻荷载分担比  $Q_r/Q$  由 35% 逐渐增加到 59%；端阻的荷载分担比  $Q_b/Q$  由 2% 增加到 4%。可见，减小嵌岩深度一定程度上提高了桩端阻和覆盖层侧阻的荷载分担比。

### 3.2 群桩荷载分布及其变形特征

#### (1) 基桩 $Q-s$ 曲线

群桩模型在上部荷载作用下，基桩 JZ\_1~JZ\_4 的  $Q-s$  曲线呈直线型，未出现拐点，说明群桩未达到极限状态；沿基岩面倾向，基桩出现差异沉降，嵌岩深度越大沉降越小。

#### (2) 群桩变形规律

由于基岩面倾斜造成基桩嵌岩深度不同，产生差异沉降和承台倾斜。在最终一级荷载下，沿基岩面倾斜方向，最大沉降差达到 10.49 mm。

赫章特大桥#11 墩设计高度 195 m，桥墩在施工期间处于悬臂状态，因此，可进一步计算出承台倾斜引

起的墩顶水平位移为 88.9 mm, 可能造成桥面施工不便。因此, 差异沉降的控制应在 #11 墩基础的设计与施工中引起考虑和重视。

### (3) 基桩轴力与侧摩阻力分布

图 5 为群桩模型在 800 MN 荷载作用下, 基桩 JZ\_1~JZ\_4 桩身轴力与侧摩阻力沿深度方向的分布图。在上部荷载作用下, 桩身轴力沿深度方向递减, 并在基岩面位置出现拐点。在覆盖层段, 轴力基本呈直线型, 且递减速率较小; 在嵌岩段, 随着嵌岩深度减小, 轴力分布曲线形状由指数函数型逐渐向直线型过渡。此外, 位于承台中间 JZ\_2、JZ\_3 桩顶反力较大, JZ\_1、JZ\_4 略大。

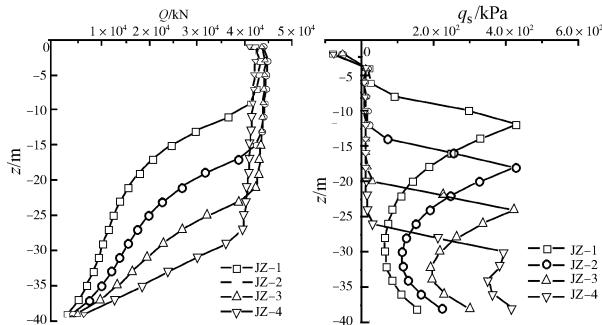


图 5 基桩轴力与侧摩阻力分布

Fig. 5 Distribution of axial force and side resistance of piles

嵌岩段侧阻明显大于覆盖层侧阻, 荷载主要由嵌岩段侧阻承担。各基桩嵌岩段侧摩阻力峰值基本相等, 出现在嵌岩段顶部。嵌岩深度越小, 嵌岩段侧阻分布曲线越均匀, 并且平均侧阻明显增大。#11 墩群桩基础实际所承受的总荷载为 700 MN, 故上述分析的结果基本可以反映群桩基础在桥梁运营期内的基桩受力特征。

### (4) 桩端平面竖向应力与沉降分布

在最后一级荷载下, 桩端平面竖向应力分布不均匀, 应力集中出现在承台中心投影下偏基岩面倾向一侧, 最大应力为 2.4 MPa。说明嵌岩深度小的基桩端阻分担的荷载相对大; 另一方面, 由于基岩的饱和单轴抗压强度为 40 MPa, 故桩端岩石未到极限状态, 还可继续承担上部荷载。

群桩模型在最后一级荷载下, 桩端平面沉降不均匀, 最大沉降发生区域与应力集中区域基本重合, 最大沉降发生在 JZ\_3 桩端, 为 4.6 mm。表明嵌岩深度小, 在有效调动整个嵌岩段的侧阻发挥和提高端阻、覆盖层侧阻荷载分担比的同时, 沉降有所增大。

## 4 结 论

本文通过三维有限元研究了赫章特大桥复杂地质

条件下超大直径嵌岩桩的受力特性及其变化规律, 获得了以下有价值的结论:

(1) 嵌岩桩一般属于摩擦桩或者端承摩擦桩, 覆盖层侧阻可分担一定比例的桩顶荷载, 其荷载分担比与土层厚度、荷载水平等有关, 在设计中不应忽略, 特别是在荷载水平较低和覆盖层深厚的情况下。

(2) 覆盖层侧阻、嵌岩段侧阻和端阻的荷载分担比随着荷载的增加动态变化, 其相对关系和变化过程与侧阻和端阻发挥的先后顺序、程度有关; 嵌岩桩侧阻与端阻的发挥异步, 即侧阻先于端阻发挥。

(3) 嵌岩桩桩顶沉降受嵌岩深度影响明显, 嵌岩深度增加, 沉降减小; 减小嵌岩深度有利于调动整个嵌岩段的侧阻发挥和提高端阻和覆盖层侧阻荷载分担比。

(4) 倾斜基岩面对赫章特大桥群桩基础产生较大的差异沉降, 其将影响上部结构的安全带来风险和增加施工难度, 建议群桩基础采用不等长群桩消除倾向基岩面引起的差异沉降的影响。

## 参考文献:

- [1] 张建新, 叶洪东, 等. 嵌岩桩设计中几个问题的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1222–1225. (ZHANG Jian-xin, YE Hong-dong, et al. Some problems in design of rock-socketed pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1222–1225. (in Chinese))
- [2] 陈斌, 卓家寿, 吴天寿. 嵌岩桩承载性状的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 51–55. (CHEN Bin, ZHUO Jia-shou, WU Tian-shou. Vertical bearing capacity of rock-socketed piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(1): 51–55. (in Chinese))
- [3] 邱钰, 周琳, 刘松玉. 深长大直径嵌岩桩单桩承载性状的有限元分析[J]. 土木工程学报, 2003, 36(10): 95–101. (QIU Yu, ZHOU Lin, LIU Song-yu. Analysis for load-bearing characters of single large diameter, long socketed length pile, by finite element method[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(10): 95–101. (in Chinese))
- [4] 黄生根, 张晓伟, 刘伟峰. 大直径嵌岩桩承载性能的有限元模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊 2): 412–416. (HUANG Sheng-gen, ZHANG Xiao-wei, LIU Wei-bo. FEM analysis of bearing behavior of large-diameter socketed piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S2): 412–416. (in Chinese))