

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2018.01.003

# 岩溶区桥梁桩基沉降量计算的数值分析

林光忠

(福建省交通规划设计院, 福建 福州 350004)

**摘要:** 在建的福建省龙岩市红坊互通立交建设区域属于岩溶极为发育地区,桥梁桩基沉降量计算的准确度直接影响到该工程的安全性和经济性。采用 FLAC3D 有限差分软件进行数值模拟分析,得到 6 种桩径的桩基位移情况。经过与其它 3 种用设计规范计算得到的数值比较,发现用有限元数值模拟的结果与按《建筑桩基规范》计算的结果很接近,并对其进行原因分析。

**关键词:** 岩溶区; 桥梁桩基; 沉降量; 数值模拟

**中图分类号:** U416

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-4348(2018)01-0013-04

## Numerical analysis of settlement calculation of bridge pile foundation in karst area

LIN Guangzhong

(Fujian Communications Planning and Design Institute, Fuzhou 350004, China)

**Abstract:** The Hongfang (an area in Longyan, Fujian) interlinked flyover under construction is located in an area with extremely developed karst. The accuracy of settlement calculation of the bridge pile foundation directly affects the safety and economical efficiency of the project. The displacements of piles with six different diameters were obtained by means of numerical simulation analysis with the finite difference software FLAC3D. After comparison with the numerical values obtained through calculation according to three design codes, it was found that the results of finite element numerical simulation were very close to those obtained through calculation according to Technical Code for Building Pile Foundation, and the reason was analyzed.

**Keywords:** karst region; bridge pile; settlement; numerical simulation

岩溶极为发育地区对桥梁桩基的设计和施工有着重大不利影响<sup>[1-3]</sup>。虽然嵌岩桩在岩溶地区使用广泛,但其设计计算方法却仍存在诸多问题,特别是相关行业标准,对设计和施工控制缺乏可操作性<sup>[4-5]</sup>。为此,本文选取福建省龙岩市红坊镇在建的红坊互通立交 M 主线桥左幅 10#桥墩钻孔号 MX24 处地质作为典型代表,进行桥梁桩基沉降量计算研究,设计直径为 0.8、1.0、1.2、1.5、2.0 和 3.0 m 的 6 种不同桩径,分别根据《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTGD63-2007)<sup>[6]</sup>、《铁路桥涵地基与基础设计规范》(TB10002.5 -

2005)<sup>[7]</sup> 和《建筑桩基技术规范》(JGJ94 - 2008)<sup>[8]</sup> 计算,得到桥梁桩基沉降量值,见表 1。

为验证这 3 部规范计算结果对岩溶区桥梁桩基沉降量计算的适用性,同时更好地指导该互通立交桥梁桩基的设计和施工,本文基于 FLAC3D 有限差分软件对红坊互通立交的桥梁桩基沉降量计算进行数值模拟分析研究。

## 1 桩基沉降量计算数值模拟分析

### 1.1 FLAC3D 软件简介

美国 Itasca 公司开发的 FLAC3D 三维显示有

收稿日期: 2017-10-14

作者简介: 林光忠(1970- ),男,福建福州人,高级工程师,研究方向:桥梁。

限差分软件,能够分析处理较为复杂的力学系统,解决高度非线性问题和模拟岩石、土质和其他材料等的三维结构受力变形,在岩土工程界得以广泛应用<sup>[9-10]</sup>。FLAC3D 可模拟桩-土接触面及基桩施工过程,本文利用 FLAC3D 对溶洞地区竖向受荷单桩和群桩进行数值分析。

1.2 桩基计算模型及参数选取

1.2.1 单元与网格生成

为使研究具有统一性和可比性,选取 M 主线桥左幅 10#桥墩钻孔 MX24 处典型地质条件,建立 6 种设计方案和与之匹配的 6 种模型进行数值模拟计算。首先在 FLAC3D 平台上建立桩基的三维数值模型,如图 1 所示。为方便叙述,将 6 种设计方案简称 1#~6#,考虑到竖向荷载作用下群桩结构和荷载的对称性,取 1/4 模型进行数值分析。1#群桩采用实体模型,岩土体模型尺寸为 60 m×40 m×84 m,承台尺寸为 4.8 m×4.8 m×2 m,单桩直径为 0.8 m,桩长为 31 m,1#和土体模型包括 144 680 个实体单元,151 955 个实体节点。其余 5 种设计方案所建立的模型和 1#类似。

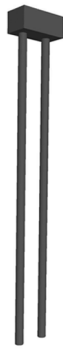


图 1 1#群桩以及岩土体计算模型图  
Fig.1 Calculation model of 1# pile group and rock and soil mass

1.2.2 群桩模型参数选取

模型中的力学参数关系到计算的准度和精度,各土层的参数、桩体参数和接触面参数取值是数值模拟中的关键部分。岩土体采用 Mohr-Coulomb 模型,在 FLAC 程序中,计算土体变形使用的模量参数是剪切模量和体积模量,需利用式(1)和(2)将弹性模量和泊松比转化为剪切模量和体积模量:

$$G = E/2(1 + \nu) \tag{1}$$

$$K = E/3(1 - 2\nu) \tag{2}$$

式中, $E$  为弹性模量; $\nu$  为泊松比; $G$  为剪切模量; $K$  为体积模量。

接触面参数的选取根据 FLAC3D 手册,法向刚度  $k_n$  和切向刚度  $k_s$  按式(3)计算取值:

$$k_n = k_s = 10\max[(K + 4G/3)/\Delta Z_{\min}] \tag{3}$$

式中, $K$  是体积模量; $G$  是剪切模量; $\Delta Z_{\min}$  是法向方向连续区域上最小尺寸。

1.2.3 边界条件及加载

设模型的侧面和底面为位移边界,侧面限制水平移动,地面为固定边界,限制水平移动和垂直移动;模型上表面为地表,取为自由边界。

模型在加载前进行两次初始平衡计算。第一次初平衡将桩单元和岩土体均设置为岩土体的性质,在自重下进行平衡,以使岩土体中各点模拟天然的应力状态。第二次初平衡模拟成桩以后未加载时岩土体和桩单元的应力状态。平衡之后保持初始应力状态,将桩基和土体位移清零,按实际荷载加载,查得群桩外部荷载为 9 407 kN,计算终止条件:最大不平衡力为  $1 \times 10^{-5}$  N。

1.3 桩基计算结果以及分析

1.3.1 1#群桩位移分析

通过 FLAC3D 计算得到群桩以及桩周土位移假定靠近桥梁中心线一侧编号为 a#,远离桥梁中心线单桩编号为 b#,由计算可知:1)群桩最大的沉降出现在承台顶面处,桩基顶部周围土体的沉降沿着桩基往外扩散,沉降值依次减小。群桩中 a# 桩桩顶沉降为 2.17 cm,桩端的沉降值为 1.91 cm;b#桩桩顶沉降为 2.11 cm,桩端沉降值为 1.85 cm,则群桩中,a#和 b#单桩桩身的压缩量都为 0.26 cm。群桩桩身沉降沿深度  $Z$  增加而减小。2)沿桩身向下各基桩的沉降出现分离,a#沉降最大,b#最小。各基桩桩身沉降分离由桩本身的压缩不同导致。各基桩在桩基中所处位置及所受应力叠加不同,各桩所受荷载以及土体扰动程度亦不同,a#距离荷载作用面最近,所受的应力及土体扰动最大。因此,由压缩导致的桩身位移最大,a#桩底沉降最大,而 b#正好相反。

由图 2(a)可看出,1#群桩位移随深度的沉降规律,桩身的位移随深度增加而减小,桩身上部的减小速率较大,桩身下部的减小速率较小。在 16 m 处,a#桩的位移减小量占总位移减小量的 62.5%,b#桩的位移减小量占总位移减小量的 61.4%。

1.3.2 2#~6#桩位移分析

根据相同原理和程序,利用 FLAC3D 软件得

到 2#~6#桩基位移,如图 2(b)~(f)可以看出,桩基沉降量随深度增长的变化规律大体相同。

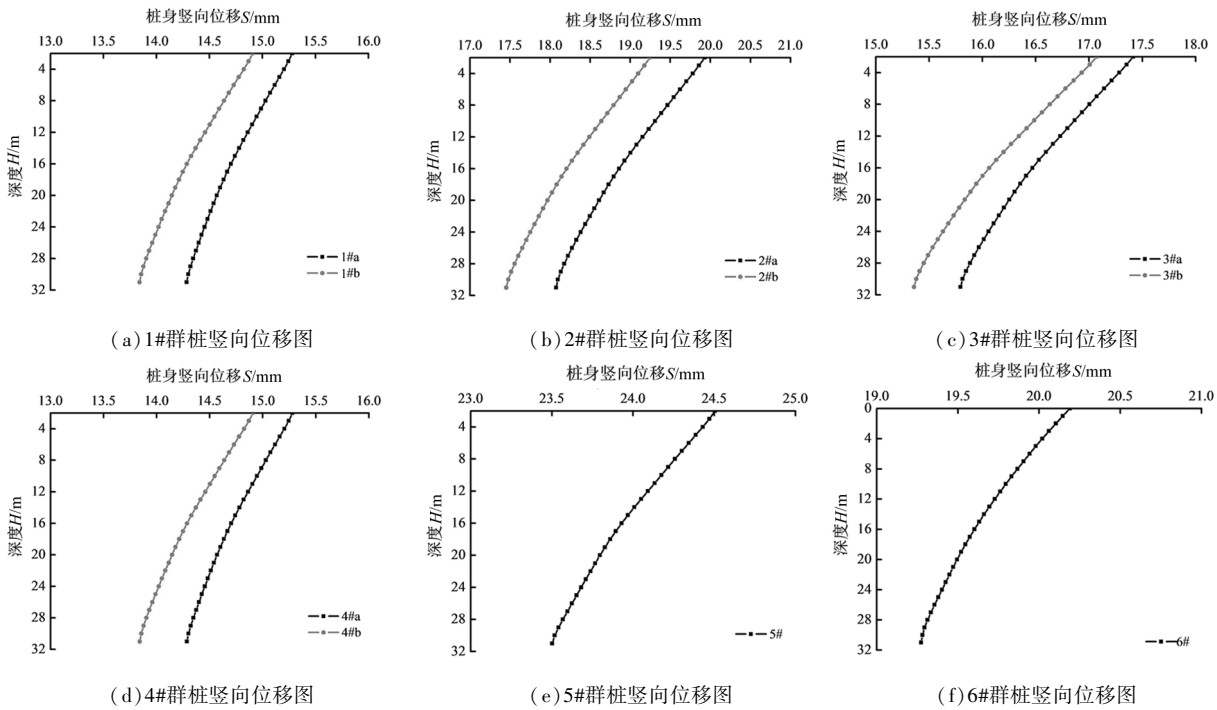


图 2 1#~6#桩基竖向位移图  
Fig.2 Vertical displacement of pile group from 1# to 6#

2 计算结果对比分析

通过 FLAC3D 软件模拟计算结果如表 1。由表 1 可知,桩端的位移从小到大依次为 4#、3#、2#、1#、6#、5#。桩端位移最小的 4#, b 桩位移 13.84 cm, 大约为桩端位移最大的 5# 位移的 1/2。对比 1# 和 2#、3# 和 4# 可知,在相同条件下,增大桩径可有效减小桩基沉降。对比根据 3 种规范计算得到的桩基位移和通过 FLAC3D 软件模拟分析得到的数值,发现用数值软件计算出来的桩基位移和按《建筑桩基规范》计算的结果很接近。

3 计算结果比较及原因分析

设计的群桩按照《公路桥涵地基与基础设计规范》和《铁路桥涵地基和基础设计规范》计算得到的桩基底部中点处的位移值相等,按照《建筑桩基技术规范》计算得到的结果相对较小。该计算中考虑了桩基等效沉降系数,将实体深基础 Boussinesq 解分层总和法算的沉降值,乘以等效

系数,纳入了按 Mindlin 位移解计算桩基础沉降时附加应力及群桩几何参数的影响。《公路桥涵地基与基础设计规范》和《铁路桥涵地基和基础设计规范》采用实体深基础法,其计算应力偏大,且实体深基础模型不能反映桩的长径比、距径比等的影响。因此,《建筑桩基技术规范》计算沉降时考虑桩基等效沉降系数得出的沉降值相对小。

在这 6 种不同直径的桩基设计中,桩基的位移按规范计算和按 FLAC 计算得到的位移最小的都是直径为 1.5 m 的群桩,两者得到的桩基位移所呈现的规律基本一致。建议选用 4# 直径为 1.5 m 的群桩,该方案在控制沉降方面具有优势。但在混凝土用量方面,位移最小的直径为 1.5 m 的群桩混凝土用量为 223.01 m<sup>3</sup>,混凝土用量较大,直径为 2.0 m 的群桩所用的混凝土量最大,其值为 237.86 m<sup>3</sup>,直径为 0.8 m 的群桩所用的混凝土量最小,其值为 103.35 m<sup>3</sup>,最大值是最小值的两倍以上。因此,需要通过多方案的综合比较,既能使设计的桩基造价最低,又确保长久安全。

表 1 不同方法计算 1#~6#的桩端位移

Tab.1 Displacement of pile tips from No.1 to No.6 calculated with different methods

计算方法	mm									
	φ0.8 m 群桩		φ1.0 m 群桩		φ1.2 m 群桩		φ1.5 m 群桩		φ2.0 m 群桩	φ3.0 m 单桩
	1#a	1#b	2#a	2#b	3#a	3#b	4#a	4#b	5#	6#
数值模拟	19.09	18.52	18.08	17.45	15.79	15.36	14.29	13.84	23.50	19.27
公路桥涵规范	94.16		89.82		87.35		80.77		86.61	106.29
建筑桩基规范	19.46		18.80		17.92		16.71		24.83	119.02
铁路桥涵规范	94.16		89.82		87.35		80.77		86.61	106.29

4 结语

通过设计 6 种不同桩径的桩基,分别根据 3 种设计规范和大型模拟分析 FLAC3D 对岩溶区桥

梁桩基的沉降量进行计算,得到 6 种设计方案的桩基位移情况。比较发现,有限元数值模拟的结果与《建筑桩基规范》计算的结果相近。

参考文献:

[1] 王荣华.岩溶区桩基桩基勘察与设计要点分析[J].铁道学报,2012,25(9):53-58.

[2] 马缤辉,赵明华,尹平保,等.岩溶区某桥梁桩基处置方案分析[J].交通科学与工程,2012,28(2):37-42.

[3] 邹黎明.岩溶区桩基桩基设计探析[J].江西建材,2017,20(10):136-137.

[4] 徐长节,陈其志,任凌云.软土地区地铁盾构穿越对城市立交桥的影响分析[J].地下空间与工程学报,2016,12(3):769-775.

[5] 赵秀绍,艾成刚,王旭,等.砂性土深基坑开挖与支护变形监测的数值分析[J].河南科技大学学报,2014,35(6):61-65.

[6] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥涵地基与基础设计规范:JTG 363-2007[S].北京:人民交通出版社,2016.

[7] 中华人民共和国铁道部.铁路桥涵地基和基础设计规范:TB10002.5-2005[S].北京:中国铁道出版社,2005.

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑桩基技术规范:JGJ94-2008[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.

[9] 候青宏,陈文建.基于 FLAC3D 软件在不同桩宽条件下抗滑桩土拱效应的数值模拟研究[J].四川职业技术学院学报,2016,27(3):165-168.

[10] 李永靖,陈通广,郝连学.基于 FLAC3D 的双排桩—锚杆复合支护结构稳定性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2016,27(4):130-134.

(责任编辑:陈雯)