

DOI: 10.11779/CJGE2017S2017

# 特大型溶洞回填体基桩荷载-沉降规律与计算研究

蒋武军<sup>1</sup>, 鄢定媛<sup>1</sup>, 王明明<sup>2</sup>, 李煜<sup>3</sup>, 陈骅伟<sup>2</sup>, 蒋冲<sup>\*3</sup>, 陈兆<sup>2</sup>

(1. 湖南省高速公路建设开发总公司, 湖南 长沙 410000; 2. 湖南省交通规划勘察设计院, 湖南 长沙 410008;  
3. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 为研究特大型岩溶地区回填体特性对桩基础荷载传递的影响, 提高岩溶桩基的安全性与经济性, 本文考虑特大型岩溶地区桩周回填体与基桩协调变形产生侧摩阻力的特性, 基于指数荷载传递函数, 获得了特大型岩溶地区回填体基桩荷载-沉降曲线计算方法, 并结合现有研究成果与工程实例对该计算方法进行验证, 结果表明本文方法与实际工程的结果很吻合, 在此方法的基础上, 分析各参数对岩溶桩基荷载-沉降曲线的影响, 分析结果表明: 桩基的荷载-沉降曲线随着轴向应变、碎石粒径与桩参数 $\alpha_s$ 的变化而变化, 桩基的极限承载力随着轴向应变与桩参数 $\alpha_s$ 的增加而增加, 随着碎石粒径的增加反而减小。

**关键词:** 回填体; 荷载传递; 极限承载力; 参数分析

中图分类号: TU449 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S2-0067-04

作者简介: 蒋武军(1975-), 男, 高级工程师, 主要从事岩土与隧道工程研究。E-mail: nba\_freeman@163.com。

## Load-settlement rules and calculation of foundation piles in karst cave

JIANG Wu-jun<sup>1</sup>, YAN Ding-yuan<sup>1</sup>, WANG Ming-ming<sup>2</sup>, LI Yu<sup>3</sup>, CHENG Hua-wei<sup>2</sup>, JIANG Chong<sup>3</sup>, CHENG Zhao<sup>2</sup>

(1. Hunan Province Highway Construction Development Corporation, Changsha 410000, China; 2. Hunan Provincial Communications

Planning Survey & Design Institute, Changsha 410008, China; 3. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** In order to study the influence of the backfill characteristics of the large karst area on the load transfer of the pile foundation and to improve the safety and economy, considering the characteristics of the side friction resistance of the pile back and the pile in the large karst area, based on the exponential load transfer function, the method for calculating the load-settlement curves of backfill piles in large karst area is obtained. The method is verified by the existing research results and engineering examples. The results show that the proposed method is in good agreement with the actual project. Based on this method, the influence of parameters on the load-settlement curves of karst piles is analyzed. The results show that the load-settlement curves of pile foundation increase with the axial strain, particle size of gravel and pile parameter  $\alpha_b$ , and the ultimate bearing capacity of the piles increases with the increase of the axial strain and pile parameter  $\alpha_s$  and decreases with the increase of the particle size of gravel.

**Key words:** backfill; load transfer method; ultimate bearing capacity; parameter analysis

## 0 引言

随着公路建设在西南部地区的发展, 不可避免地遇到岩溶地区, 尤其是特大型岩溶地区, 导致部分桩基置于回填体的溶洞之中, 回填体地基在荷载作用下发生沉降, 使桩侧产生摩阻力, 摩阻力会提高桩的承载力, 因而, 探讨回填体基桩荷载-沉降规律及其计算方法有重要的理论与工程意义。

桩的承载力作为岩溶桩基工作性能的重要指标, 一直是桩基础的研究重点。蔡登山等<sup>[1]</sup>对全填充溶洞的钻孔灌注桩的荷载传递机理和嵌岩深度等作了一些

探讨性研究, 但没有考虑桩侧是回填体碎石。赵明华等<sup>[2]</sup>通过对嵌岩桩桩端岩层破坏机理的分析, 建立了桩端持力岩层抗冲切的计算模型, 并在此基础上导出了一套能考虑冲切锥体自重及岩层剪、拉应力的岩溶及采空区桩端持力层安全厚度计算公式。但上述方法是考虑嵌岩桩的破坏机理, 赵明华等<sup>[3]</sup>建立了岩溶区嵌岩桩承载力, 提出了岩溶区嵌岩桩承载力的确定方

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478479, 51678570); 湖南省交通科技项目(201524)

收稿日期: 2017-08-02

\*通讯作者 (E-mail: jiang4107@sohu.com)

法。该方法不考虑上部桩周土的侧摩阻力, 赵明华等<sup>[4]</sup>探讨了软土地区大直径超长灌注桩的荷载传递机理和竖向承载特性, 赵明华等<sup>[5]</sup>考虑地基土固结非线性特性, 推导桩侧土沉降随深度和时间变化的计算公式, 建立了反映桩土界面剪切刚度系数随深度非线性增长的荷载传递函数, 但是这两种方法的地基与回填体地基的荷载-沉降规律有差异。

鉴于此, 本文从桩的荷载传递机理角度出发, 以单桩桩身微元体为分析单元, 考虑桩与回填体的协调变形, 利用指数荷载传递模型得到桩侧摩阻力和桩端阻力与桩-回填体相对位移的关系式, 继而绘出岩溶桩基的荷载-沉降曲线图, 从而获得了回填体-岩溶桩基极限承载力计算方法, 同时利用实际工程对该方法进行了验证, 已期为溶洞回填体-桩基的荷载-沉降规律的分析研究提供一种新的思路。

## 1 回填体碎石-桩荷载传递模型

### 1.1 桩身荷载传递机理分析

在桩顶荷载作用下, 要想得到桩-碎石共同作用的荷载-沉降规律, 需对桩进行受力分析, 接下来取桩身任一微元体。结合弹性力学相关理论, 必须考虑每个微元体力学平衡, 如图1所示。

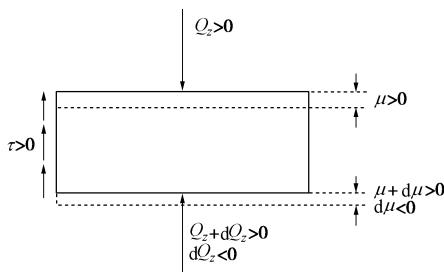


图 1 压缩中的桩段的平衡

Fig. 1 Balance of pile in compression

每一个微元体受到上部微元体作用力 $Q_z$ 、下部微元体作用力 $Q_z + dQ_z$ 和沿桩表面剪切应力 $\tau$ 。写出微元体在深度 $z$ 的力学平衡方程式, 得到

$$\frac{dQ}{d\mu} = \frac{UE_b A_b}{Q} \tau(\mu) , \quad (1)$$

式中,  $U$ 为桩的周长,  $E_b$ 是桩的弹性模量,  $A_b$ 是桩横断面面积, 桩侧传递函数 $\tau(\mu)$ 是由变化的桩侧摩擦力 $\tau$ 和桩横断面相对位移 $\mu$ 描述的函数。

### 1.2 荷载传递函数的推导

考虑桩周土的剪切刚度非线性变化, 根据文献[8]研究桩侧摩阻力的非线性变化, 本文假设桩周回填体的剪切刚度是极限桩侧摩擦力 $q_s$ 和当前产生桩侧摩擦

力 $\tau$ 之间的差成正比和桩端的压缩刚度是极限桩端阻力 $q_b$ 和当前桩端阻力 $q$ 之间的差成正比成立, 即

$$\frac{d\tau}{d\mu} = \frac{q_s - \tau}{\lambda_s} , \quad (2)$$

$$\frac{dq}{d\mu} = \frac{q_b - q}{\lambda_b} , \quad (3)$$

式中,  $q_s$ 为极限桩侧摩擦力,  $q_b$ 为极限桩端阻力,  $\tau$ 为当前产生桩侧摩擦力,  $q$ 为当前产生桩端阻力,  $\lambda_s$ 和 $\lambda_b$ 是取决于碎石的种类、变形模量、桩的直径的阻力因子。

根据式(2)、(3)积分分别推导得

$$\tau(\mu) = q_s (1 - e^{-\mu/\lambda_s}) , \quad (4)$$

$$q(\mu b) = q_b (1 - e^{-\mu b/\lambda_b}) , \quad (5)$$

式中, 函数 $\tau(\mu)$ 为桩侧摩擦力传递函数, 函数 $q(\mu b)$ 为桩端阻力传递函数。

将荷载传递函数式(4)代入式(1)得

$$\frac{dQ}{d\mu} = \frac{UE_b A_b}{Q} q_s (1 - e^{-\mu/\lambda_s}) . \quad (6)$$

式(6)即为桩身荷载传递微分方程。式(6)考虑初始条件 $Q=0$ ,  $\mu=0$ 可以得出

$$Q(z) = \sqrt{2UE_b A_s q_s (\mu(z) + \lambda_s e^{-\mu(z)/\lambda_s} - \lambda_s)} . \quad (7)$$

式(7)只考虑了桩的初始条件而未引入边界条件, 因而式(7)表示的荷载-沉降关系仅仅为桩身任意深度位置处由于荷载引起的弹性压缩量与荷载引起弹性压缩量时的桩身轴力之间的关系。文献[9]在研究双曲线模型用桩端土层压缩所引起的桩端沉降量是桩身的刚性位移。对于钻孔灌注桩来说, 桩端沉降量是确实存在。桩身任意位置处沉降 $S(z)$ 总是等于桩端沉降量 $\mu_b$ 与该处弹性压缩位移 $\mu_s(z)$ 之和, 即式(8)所示:

$$S(z) = \mu_b + \mu_s(z) . \quad (8)$$

桩顶的沉降量 $S_0$ 为

$$S(0) = \mu_b + \mu_s(0) . \quad (9)$$

根据式(5)桩端的荷载传递函数得出桩端的总反力 $Q_b$ 为

$$Q_b = A_b q(\mu_b) = A_b q_b (1 - e^{-\mu_b/\lambda_b}) . \quad (10)$$

根据静力平衡方程可以得到任意深度的桩身截面处的承载力等于该位置的侧摩阻力与桩端阻力之和, 即任意深度的桩身截面处的承载力 $Q$ 为

$$Q = Q_b + Q(z) . \quad (11)$$

联立时(7)、(9)、(10)和(11)得桩顶荷载 $Q_0$ 与沉降 $S_0$ 的关系式:

$$Q_0 = A_b q_b (1 - e^{-\mu_b/\lambda_b}) + \sqrt{2UE_b A_s q_s (\mu(z) + \lambda_s e^{-\mu(z)/\lambda_s} - \lambda_s)} . \quad (12)$$

## 2 实例计算与分析

通过Carrubba<sup>[10]</sup>在对大直径嵌岩桩的侧摩阻力分析时根据实测的桩荷载 - 沉降曲线, 采用反分析的方法, 结合数值模拟确定桩的侧摩阻力。本文引用其中<sup>#1</sup>桩的原始资料, 桩径 $B$ 为1.2 m, 桩长18.5 m, 桩入土深度11 m, 嵌岩深度为7.5 m。荷载传递函数的参数分别为: 岩层中,  $q_s=131 \text{ kN/m}^3$ ,  $\alpha_s=0.2$ 和 $E_0=72 \text{ MPa}$ ; 桩端,  $q_b=44000 \text{ kN/m}^3$ ,  $\alpha_b=11$ 和 $E_0=72 \text{ MPa}$ 土层中:  $q_s=70 \text{ kN/m}^3$ ,  $\alpha_s=1.0$ 和 $E_0=23 \text{ MPa}$ ; 桩的弹性模量为 $E=31500 \text{ MPa}$ 。

运用指型理论公式进行荷载 - 沉降计算, 并与文献[9]双曲线模型的区别。本文的理论计算结果如图2所示。

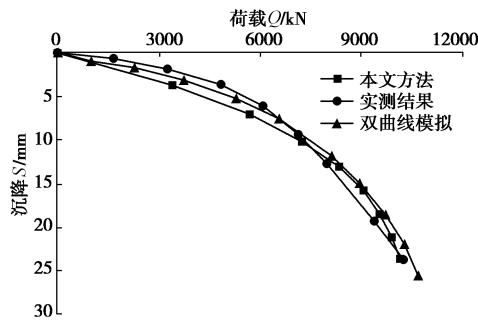


图 2 荷载 - 沉降曲线

Fig. 2 Load-sedimentation curves

从图2所示的荷载 - 沉降关系曲线可见, 本文理论计算结果与Paolo Carrubba采用反分析方法得出的结果接近。从而证明了本文所提出的指型理论公式的计算精度很高, 并且理论公式的实用性较强。

## 3 荷载传递函数的参数分析

参数 $q_s$ ,  $q_b$ ,  $\lambda_s$ 和 $\lambda_b$ 具有明显的物理意义,  $q_s$ 为桩侧摩擦力,  $q_b$ 为极限桩端阻力,  $\lambda_s$ 和 $\lambda_b$ 分别为初始侧摩阻力的变化速度快慢和桩端阻力的变化速度快慢的影响参数, 其值的大小取决于桩周回填体种类、变形模量和桩的直径, 对于不同的回填体材料, 参数 $q_s$ ,  $q_b$ ,  $\lambda_s$ 和 $\lambda_b$ 是有明显差异的, 其具体值均可由室内直剪试验得到。参数 $\lambda_s$ 和 $\lambda_b$ 为

$$\lambda_s = \frac{q_s B}{\alpha_b E_0} \quad , \quad (13)$$

$$\lambda_b = \frac{q_b B}{\alpha_b E_0} \quad , \quad (14)$$

式中,  $B$ 为桩的直径, 参数 $\alpha_s$ ,  $\alpha_b$ 考虑到桩周回填体的影响因素。这两个参数减小与变形模量有关,  $E_0$ 为桩周回填体的变形模量。

文献[11]研究了碎石的变形模量, 通过研究松散岩块压实试验, 得到了切线模量与轴向应变呈指数相关性规律, 并给出了不同碎石粒径的切线模量与轴向应变的回归方程及相关系数, 如表1所示。本文针对回填体碎石的指型模型的影响参数进行分析, 碎石的变形模量用切线模量来表示。

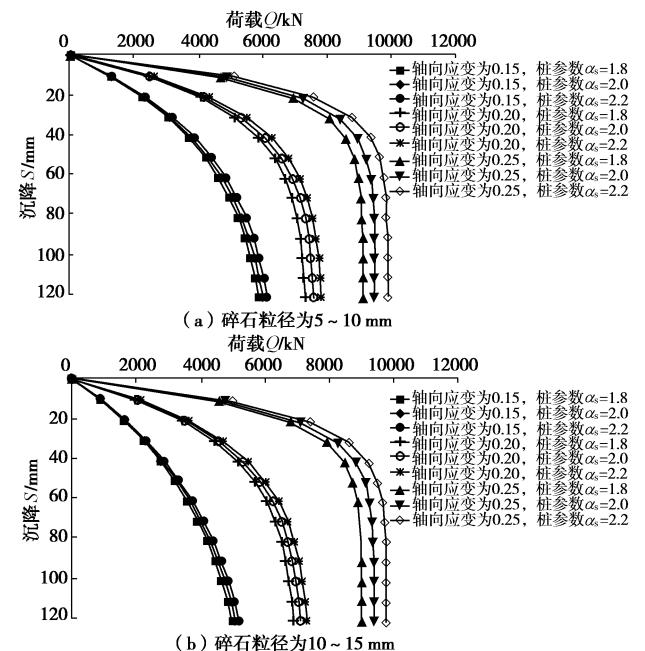
表 1 轴向应变与切线模量的关系

Table 1 Relationship between axial strain and tangential modulus

粒径/mm	回归方程	相关系数 $R^2$
5~10	$E=2.0555e^{11.839\varepsilon}$	0.9643
10~15	$E=0.9342e^{14.914\varepsilon}$	0.9888
15~20	$E=1.1710e^{13.801\varepsilon}$	0.9685

影响岩溶桩基承载力的主要参数有桩参数 $\alpha_s$ 、碎石粒径和轴向应变等, 下面分析各主要参数对岩溶桩基承载力的影响。

保持回填体桩参数 $\alpha_b$ 不变, 分别取碎石粒径为5~10, 10~15, 15~20 mm, 碎石轴向应变 $\varepsilon$ 为0.15, 0.2, 0.25, 桩参数 $\alpha_s$ 为1.8, 2.0, 2.2, 其余取值不变, 得到岩溶桩基的桩顶沉降在不同的轴向应变随着荷载的变化而变化的曲线, 从图3可知, 当荷载 - 沉降曲线出现了拐点时, 桩体承载力不再随着桩顶沉降位移增加而增加, 拐点所对应的荷载即为桩的极限承载力。通过图3(a)、(b)、(c)的对比分析可知, 在其他条件下相同的情况下, 桩体的承载力随着桩参数 $\alpha_s$ 的增加而增加; 与此同时, 回填体的轴向应变 $\varepsilon$ 的增长会有效提高桩的极限承载力, 回填体的轴向应变越大, 出现荷载 - 沉降曲线的拐点的桩顶沉降值越小, 随着碎石粒径的增加, 桩的极限承载力反而减小。



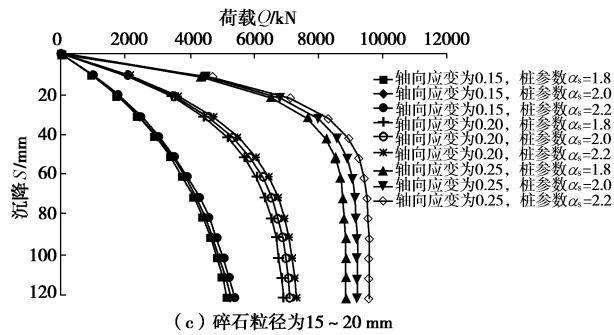


图3 不同的轴向应变、碎石粒径和桩参数 $\alpha_s$ 下荷载沉降曲线  
Fig. 3 Load-settlement curves under different axial strains, gravel particle sizes and pile parameters

岩溶桩基的承载力与桩参数 $\alpha_s$ 、碎石粒径和轴向应变相关,因此在计算岩溶地区的桩基承载力时,需要综合考虑回填体的参数的影响,不能忽略回填体与桩作用下的桩侧摩阻力,充分发挥桩侧摩阻力,增大桩基的极限承载力,提高桩基安全性,节约成本,这是在大型岩溶地区的工程实际中值得研究的课题。

## 4 结 论

在以荷载传递理论研究和工程实际的基础上,探讨了岩溶地区桩周是回填体碎石的竖向荷载桩的荷载沉降规律与计算方法,得到以下3点结论。

(1) 考虑了桩与回填体碎石的协调变形,以及与回填体相互作用下的桩侧摩阻力非线性变化,得到了一种与桩周土体的物理参数相关的指函数型荷载传递函数的模型。从而获得了岩溶地区回填体桩基荷载-沉降曲线。

(2) 参数分析表明:轴向应变对竖向荷载作用下回填体碎石的荷载位移曲线影响非常明显,故在实际工程中压实回填体碎石对提高桩的承载力很有用,参数 $\alpha_s$ 对竖向荷载作用下回填体碎石的荷载位移曲线影响明显,参数 $\alpha_s$ 是影响竖向荷载作用下回填体碎石-桩的极限承载力。

(3) 论文仅考虑了一层回填体条件下的竖向荷载作用下桩的荷载-沉降规律分析,对于多层回填体的条件下有待进一步的研究。

## 参考文献:

- [1] 蔡登山,王邦楣. 岩溶地区钻孔桩受力机理研究[J]. 桥梁建设, 2002(6): 16~19. (CAI Deng-shan, WANG Bang-mei. Study on mechanical behavior of bored pile in karst area[J]. Bridge Construction, 2002(6): 16~19. (in Chinese))
- [2] 赵明华,曹文贵,何鹏祥,等. 岩溶及采空区桥梁基桩桩端岩层安全厚度研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(1): 64~68. (ZHAO Minghua, CAO Wen-gui HE Peng-xiang, et al. Karst and mined area pilethickness of end formations security[J]. Soil Mechanics, 2004, 25(1): 64~68. (in Chinese))
- [3] 赵明华,蒋冲,曹文贵. 岩溶区嵌岩桩承载力及其下伏溶洞顶板安全厚度的研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 29(2): 306~307. (ZHAO Ming-hua, JIANG Chong, CAO Wen-gui. Study on bearing capacity of rock-socketed piles in karst area and safety thickness of lower cave roof[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 29(2): 306~307. (in Chinese))
- [4] 赵明华,邹新军,刘齐建. 洞庭湖软土地区大直径超长灌注桩竖向承载力试验研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(10): 63~67. (ZHAO Ming-hua, ZOU Xin-jun, LIU Qi-jian. Experimental study on vertical bearing capacity of large diameter super-long pile in soft soil area of Dongting Lake[J]. Chinese Journal of Civil Engineering, 2004, 37(10): 63~67. (in Chinese))
- [5] 赵明华,胡倩,杨超炜,等. 考虑地基土非线性固结的桩侧负摩阻力计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1417~1424. (ZHAO Ming-hua, HU Qian, YANG Chao-wei, et al. Study on calculation method of negative friction resistance of pile side considering non-linear consolidation of foundation soil[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(8): 1417~1424. (in Chinese))
- [6] SEED H B, REESE L C. The action of soft clay along friction piles[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1900, 122:731~754.
- [7] LEGRAND S, FRANK R, HABERT J, et al. Model factor for the bearing capacity of piles from pressuremeter test results – Eurocode 7 approach[J]. Géotechnique, 2014, 64: 513~525.
- [8] NANDA S, PATRA N R. Theoretical load-transfer curves along piles considering soil nonlinearity[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(1): 91~101.
- [9] XIAO H B, LUO Q Z, TANG J, et al. Prediction of load-settlement relationship for large-diameter piles[J]. Structural Design of Tall Buildings, 2002, 11(4): 285~293.
- [10] CARRUBBA P. Skin friction on large-diameter piles socketed into rock[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(2): 230~240.
- [11] 张振南,茅献彪,郭广礼. 松散岩块压实变形模量的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 578~581. (ZHANG Zhen-nan, MAO Xian-biao, GUO Guang-li. Experimental study on compaction modulus of loose rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 578~581. (in Chinese))