

Analysis of the Influence of Karst on Pile Foundation of High-Speed Railway Bridge

Qian Chen

China Railway 12 Bureau Group Company, Changsha Hunan
Email: 69377763@qq.com

Received: Apr. 26th, 2018; accepted: May 10th, 2018; published: May 16th, 2018

Abstract

According to Zheng Xu special railway line for passenger transportation project, this paper analyzed the influence of the thickness of the soil layer beneath the pile foundation and the cave span in the lower limestone layer on the settlement of the pile foundation and the post-construction settlement. At the same time, this paper analyzed the characteristics of differential settlement when the adjacent piers and towels adopt two different types of pile foundation. Then the method and construction measures of the lower soil reinforcement were found out and the corresponding construction technology was put forward. The results show that the settlement of pile group is mainly caused by the compression of the lower part of the pile foundation. The size of the cave span basically has little effect on the total settlement of the pile group foundation. When the adjacent two piers use the friction pile and the rock-socketed pile, it is necessary to reinforce the foundation of the friction pile on the soft soil foundation to meet the requirement of post-construction differential settlement.

Keywords

Karst Area, Friction Pile, Post-Construction Settlement, Thickness of Underlying Soil Layer, Cave Span

岩溶对高铁桥梁桩基沉降影响分析

陈 谦

中铁十二局集团七公司, 湖南 长沙
Email: 69377763@qq.com

收稿日期: 2018年4月26日; 录用日期: 2018年5月10日; 发布日期: 2018年5月16日

摘要

本文结合郑徐客专工程,分析了下伏土层的厚度和溶洞跨径等对墩台群桩基础沉降的影响,并分析了当相邻墩台采用两种类型桩基础时,两者之间的差异沉降特点,从中找出下伏土层加固的方法与施工措施。结果表明,群桩沉降变形主要由桩端下卧土层的压缩造成;溶洞跨径基本上对群桩基础的总沉降影响不大;当相邻两墩台基础分别采用摩擦桩与嵌岩桩时,有必要对坐落于软土地基上摩擦型群桩基础进行加固处理,以满足工后差异沉降的要求。

关键词

岩溶区,摩擦桩,工后沉降,下伏土层厚度,溶洞跨径

Copyright © 2018 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

岩溶地质是危害较大的地质条件,溶洞的存在削弱了桩端持力层的承载能力,可能引发一系列的桩承载和变形问题[1]。因此,有很多学者研究了岩溶区溶洞对桩基的影响。何春林等[2]利用有限元分析的方法,研究了溶洞体积大小、顶板厚度以及岩性等因素对桩基承载力的影响。邹新军等人[3]探讨了串珠状岩溶区桥梁桩基的沉降变形特性及其稳定问题,并给出了按桩顶变形控制桩身竖向承载力的简化荷载传递法。赵明华等人[4][5]提出了嵌岩桩承载力及其下伏溶洞顶板安全厚度的计算方法。马缤辉等人[6]从桩基竖向承载力、沉降计算及岩溶顶板抗冲切、抗剪切和抗弯安全性分析等方面对桩端注浆和不注浆两种处治方案进行了对比分析,并进一步探讨了岩溶区桥梁桩基承载和变形特性。本文结合郑徐客专工程中的徐州特大桥341#墩,分析了桥梁桩基础下伏土层的厚度和下伏灰岩层中溶洞跨径等对墩台群桩基础的施工沉降和工后沉降的影响。同时,分析了当相邻墩台采用两种不同类型桩基础时,两者之间的差异沉降特点,从中找出下伏土层加固的方法与施工措施,提出相应的施工工艺,以保证桥梁墩台群桩基础的工后沉降能满足规范的要求。

2. 工程概况

郑州至徐州的客运专线沿线属黄淮冲积平原,地形平坦,多辟为农田、林地、鱼塘、村庄等,且在徐州、萧县有出露的剥蚀丘陵。地质勘测表明,地层中沉积了巨厚的松散堆积物,不良地质和特殊土主要有松软土、岩溶等。其中,徐州特大桥341#桥墩处的地质条件为典型工点地质条件。已知徐州特大桥341#墩为摩擦桩,其承台尺寸为 $6.8\text{ m} \times 10.2\text{ m} \times 2.5\text{ m}$,其墩位布置如图1所示。

2.1. 地质条件

341#群桩基础的桩侧土主要以粉质黏土和黏土为主,下伏基岩为灰岩,其各土层的物理力学参数如表1所示。

2.2. 荷载

承台顶面主要承受的荷载为上部结构的自重和列车活载,其中以轴向荷载为主。为了便于表述,将

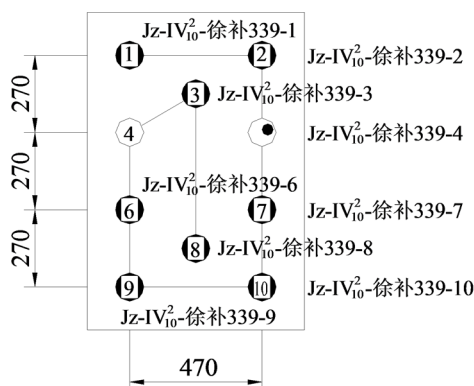


Figure 1. Position arrangement of 341# pier

图 1. 341#墩墩位布置

Table 1. Physical and mechanical parameters of each soil layer

表 1. 各土层的物理力学参数

土层名称	层厚/ m	容重/ kN/m ³	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ °	压缩模量/ MPa	泊松比	抗压强度/ MPa
粉土	3.5	19.3	13.81	11.03	8.33	0.3	
粉质黏土	2	18.7	16.9	8.56	7.53	0.35	
粉土	3	19.3	13.81	11.03	8.33	0.3	
粉质黏土	20	19.9	62.86	15.85	19.17	0.3	
粉质黏土	20	20.0	59.87	14.42	19.33	0.25	
灰岩	12	20.3	15730	40	500	0.2	67.47

成桩完成至铺轨前的这一段施工过程称为工前阶段，将铺轨完成之后称为工后阶段，则承台顶面所承受的荷载大小分别为

- 1) 工前阶段：主要有墩台的自重，约为 13,741.2 kN。
- 2) 工后阶段：主要有梁重、轨道板及其钢轨等重量，工后荷载为 9000 kN 左右。
- 3) 荷载的作用面积为长 4 m (直线段)，宽 2 m 的圆端形范围，计算中按矩形区域进行等效。

3. 天然地基群桩基础分析

3.1. 计算模型

本文采用 FLAC3D 软件对 341#桥墩的基础沉降进行计算，以评估桥梁群桩基础工后沉降的大小和需要采取的沉降控制方法。

如图 2 所示，土层为长方体模型，其深度取 50.5 m~60.5 m，沿线路走向和垂直线路方向的长度均取 8~10 倍的承台宽度，同时用 Mohr-Coulomb 模型来描述土层的应力-应变关系。用 Pile 单元来模拟 10 根长 36 m，桩径为 1.0 m 的摩擦桩，用 Shell 单元来模拟厚度为 2.5 m 的承台，两者采用刚性连接。其中，摩擦桩的弹性模量为 28 GPa，基桩切向和法向刚度取 10 倍左右的土层压缩模量，接触面上的粘聚力和内摩擦角均采用与土体相同的参数。将下伏溶洞简化为直径为 D 的球形空腔，其球心与群桩基础形心位于同一竖轴上。坐标原点位于群桩顶面(地表)的形心位置，计算模型区域为 $-20 \text{ m} \leq x \leq 20 \text{ m}$ 、 $20 \text{ m} \leq y \leq 30 \text{ m}$ 、 $-60.5 \text{ m} \sim -76.5 \text{ m} \leq z \leq 0$ ，模型底面固定，左右边界约束横向水平位移，地表取自由边界。模型网格约划分为 16,000 个单元，18,000 个节点。

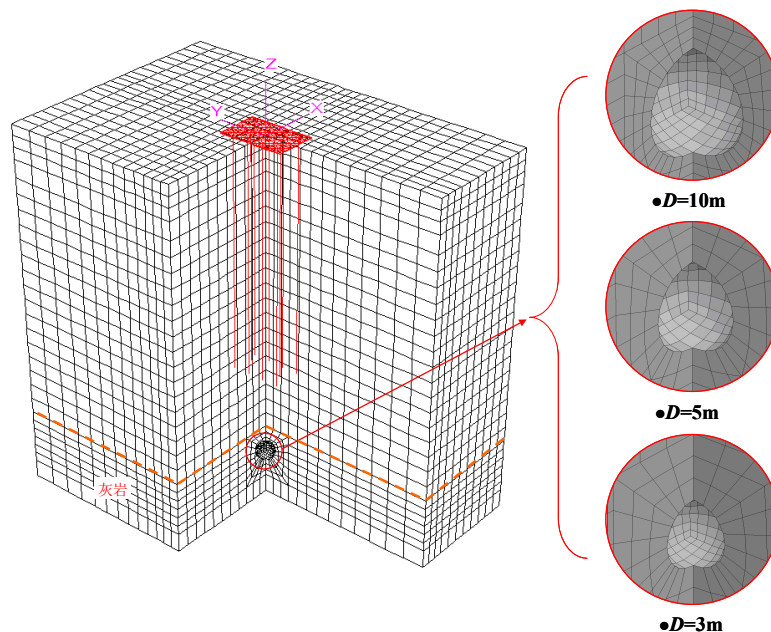


Figure 2. Computational mode
图 2. 计算模型

3.2. h_1 和 h_2 的影响

本节中分析了溶洞跨径 D 为 3 m 时的四种工况($h_1 = 10$ m, $h_2 = 3$ m; $h_1 = 10$ m, $h_2 = 0$ m; $h_1 = 5$ m, $h_2 = 0$ m; $h_1 = 3$ m, $h_2 = 0$ m)下摩擦桩的基础沉降。其中, h_1 为桩端至灰岩顶面的距离(即桩端下卧层厚度), h_2 为下伏溶洞洞顶至灰岩顶面距离。图 3 分别给出了四种工况下的工前和工后两个阶段, 同一基桩(中桩)的桩身沉降沿深度的分布图。图 4 为同样四个工况条件下的工前和工后两个阶段角桩轴力随桩身深度的分布曲线。

由图 3 和图 4 可知,

- 1) 由图 3 可知, 在桩身范围内, 群桩基础的沉降变化小, 且 h_1 越小, 群桩的沉降越小。
- 2) 当处于最不利情况($h_1 = 3$ m, $h_2 = 0$ m)时, 下伏溶洞的存在对群桩基础变形影响不大。
- 3) 这 4 种工况下的桩顶工后沉降差别不大, 大致处于 12.5 mm~14.5 mm 之间, 均满足工后沉降的要求。
- 4) 由图 4 可知, 除工前阶段桩顶轴力存在有一定的差异外, 这 4 种工况条件下的桩身轴力曲线基本重合, 均随着深度的增加, 轴力逐渐减小, 在桩端位置, 桩身轴力趋近于 0。总的说来, 桩端软弱下卧层厚度 h_1 和溶洞顶板高度 h_2 对基桩的受力影响不大。

此外, 本节还分析了四种工况条件下桩端土层和基岩面附加应力沿 y 轴方向的分布曲线(坐标系统参照模型图 2, 坐标轴的原点在墩台底部的形心位置)。其中, 附加应力定义为仅由承台顶面外部荷载引起的土层竖向应力。分析结果如图 5 所示。

由图 5 可知,

- 1) 附加应力在桩端附近达到最大, 当下卧层 $h_1 = 3$ m 时附加应力接近 70 kPa, 且随着向两侧距离的增大而递减。
- 2) 当下卧层 $h_1 = 10$ m, 溶洞顶板厚度 $h_2 = 3$ m 和 0 m 时, 桩端附加应力分布基本相同, 此时溶洞的影响很小。

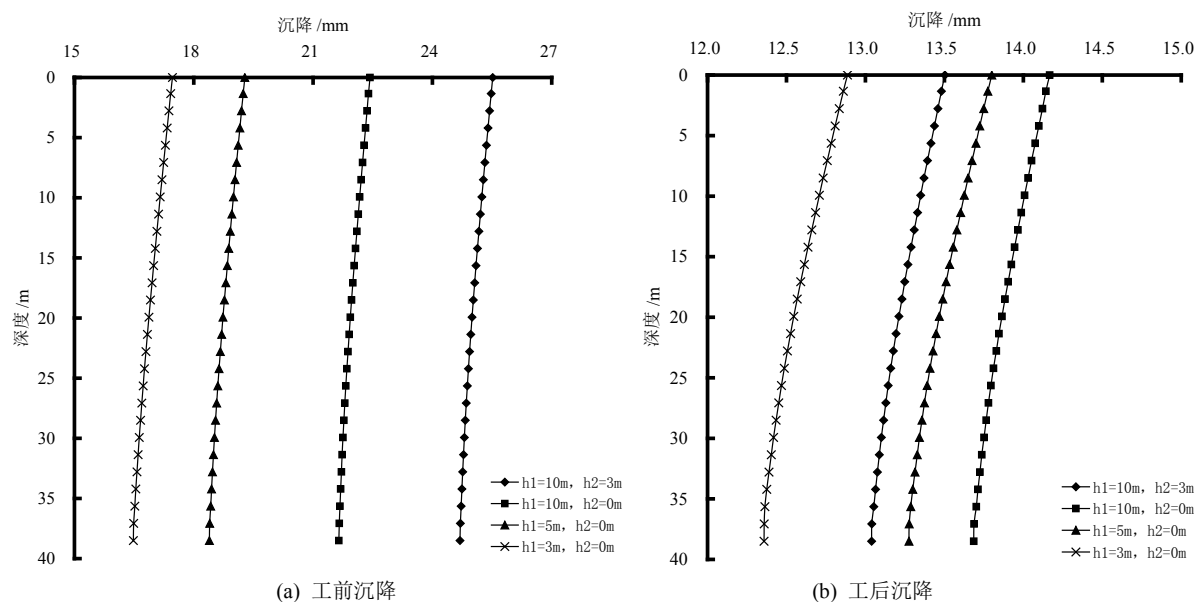


Figure 3. Distribution of pile settlement with the depth of pile body ($D = 3$ m)

图 3. 基桩沉降随桩身深度的分布($D = 3$ m)

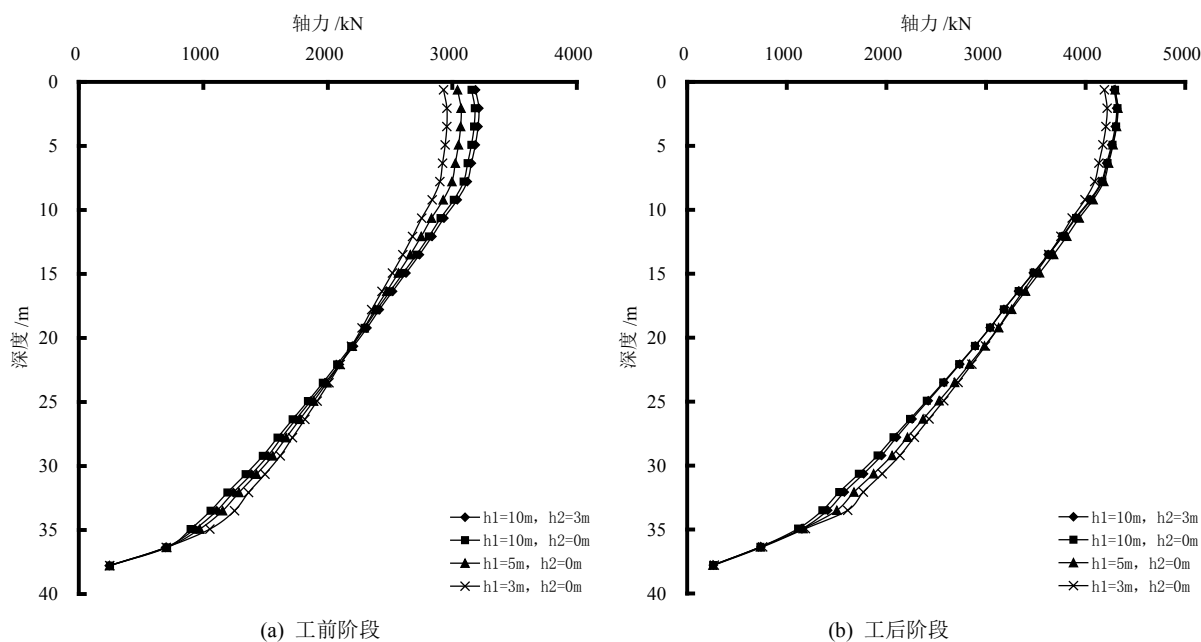


Figure 4. The distribution of axial force of angular pile with the depth of pile body ($D = 3$ m)

图 4. 角桩轴力随桩身深度的分布($D = 3$ m)

3) 由图 5(b)可知, 下卧土层较厚时, 下伏溶洞的拱顶沉降, 将导致洞顶范围内附加应力降低, 并出现了负值; 下卧层较薄时, 由于岩面距离桩端较近, 经桩传递至下卧层的荷载起主导作用, 导致岩面附加应力增加, 此时应力分布曲线呈现出三个极值。同时, 从图上也可以看出, 由摩擦桩传递到基岩面上的附加应力值都不大(最大为 53 kPa 左右), 远小于基岩的抗压强度值(67.47 MPa), 这样的应力条件不能使基岩产生变形破坏。这从另外一个方面也说明在工作荷载作用下, 群桩基础的沉降变形主要由下卧土层的特性与厚度所决定, 而与下伏基岩无关。

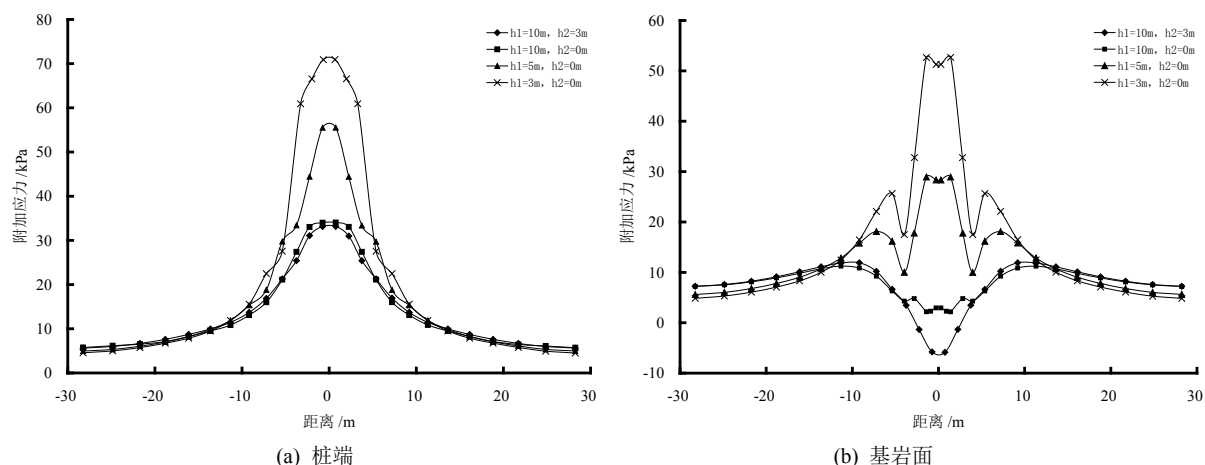


Figure 5. The distribution of additional stress along the horizontal distance ($x = 0$)

图 5. 附加应力沿水平距离的分布($x = 0$)

3.3. 溶洞跨径 D 的影响

在灰岩地层中, 地层中溶洞的大小及其填充物的性质对地层的稳定性有很大的影响, 特别是溶洞的大小(即溶洞跨径 D)对地层的影响非常大, 因此, 需要研究灰岩地层中溶洞的跨径 D 对群桩基础工后沉降的影响。为了和前面的计算结果进行对比分析, 模拟计算了溶洞跨径 D 对工前沉降和工后沉降的影响。在计算过程中, 仍然取 341#墩的实际资料为依据, 桩端下伏土层厚度 h_1 为 10 m, 溶洞顶板厚度 h_2 分别为 3 m、0 m, 溶洞的跨度分别为 3 m、5 m、10 m。图 6 和图 7 分别给出了溶洞跨径 D 对基桩的施工期沉降和工后沉降的影响, 其中图 6 对应的顶板厚度 $h_2 = 3$ m, 图 7 对应的顶板厚度 $h_2 = 0$ m。

由图 6 和图 7 可知,

- 1) 随着溶洞跨径 D 的增大, 土体工后沉降量越大。
- 2) 随着溶洞跨径 D 的增大, 桩顶的沉降变形逐渐增大, 尤其是当溶洞跨径 D 达到 10 m 时, 沉降变形显著增加。而对于工后沉降, 下伏溶洞的跨度越大, 桩顶沉降变形越小。
- 3) 对于总沉降(工前和工后沉降之和)而言, 3 种溶洞跨度条件下的总沉降相差不大, 跨径 $D = 10$ m 时的值稍微偏大。

此外, 本节还分析了溶洞跨径 D 分别为 5 m 和 10 m 时, 工后阶段 $x = 0$ 截面土层附加应力分布及溶洞不同跨径 D 下基岩面附加应力沿 y 轴方向的分布, 如图 8 所示。

由图 8 可知, 由于下伏溶洞的拱顶存在一定的沉降变形, 减小了桩端下方基岩面的附加应力, 并出现了负值; 除溶洞顶部范围内应力存在一定的差异外, 远离溶洞的区域, 不同跨径 D 下的附加应力基本相同。总的说来, 桩端荷载经 10 m 厚软弱下卧土层的扩散, 传递至岩面上的附加应力值已经很小, 大致在 $-10 \sim 15$ kPa 之间, 该量值水平的应力远远小于基岩的抗压强度值(67.47 MPa), 这不足以使基岩产生较大的变形, 而使得整个桩基础发生较大的沉降变形。

3.4. 嵌岩桩

当墩台采用不同类型桩基础时, 产生的基础沉降量不同。本节中假设 341#桥墩的桩基础为嵌岩桩, 此时, 对于嵌岩桩基础沉降的计算仍然采用图 2 中的计算模型, 其他计算参数取表 1 中的数据, 同时, 计算中还假定桩端嵌入岩体深度为 1 m, 溶洞顶板的厚度为 4 m。桩端采用含屈服的法向弹簧模拟端承效应, 面积为 0.785 m^2 , 弹簧刚度为 $2.6 \times 10^{10} \text{ N/m}^3$, 压缩屈服荷载为 785 kN。外部荷载的大小与上述的摩擦桩情况类似。

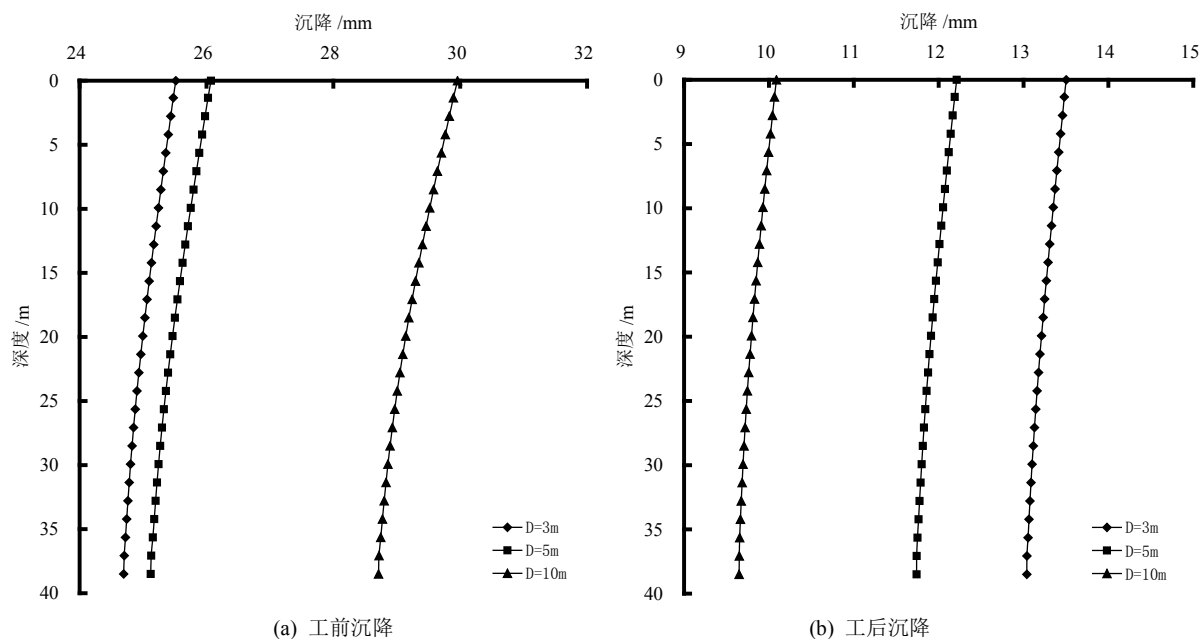


Figure 6. Effect of D on settlement of foundation pile ($h_2 = 3$ m)

图 6. 溶洞跨径 D 对基桩沉降的影响 ($h_2 = 3$ m)

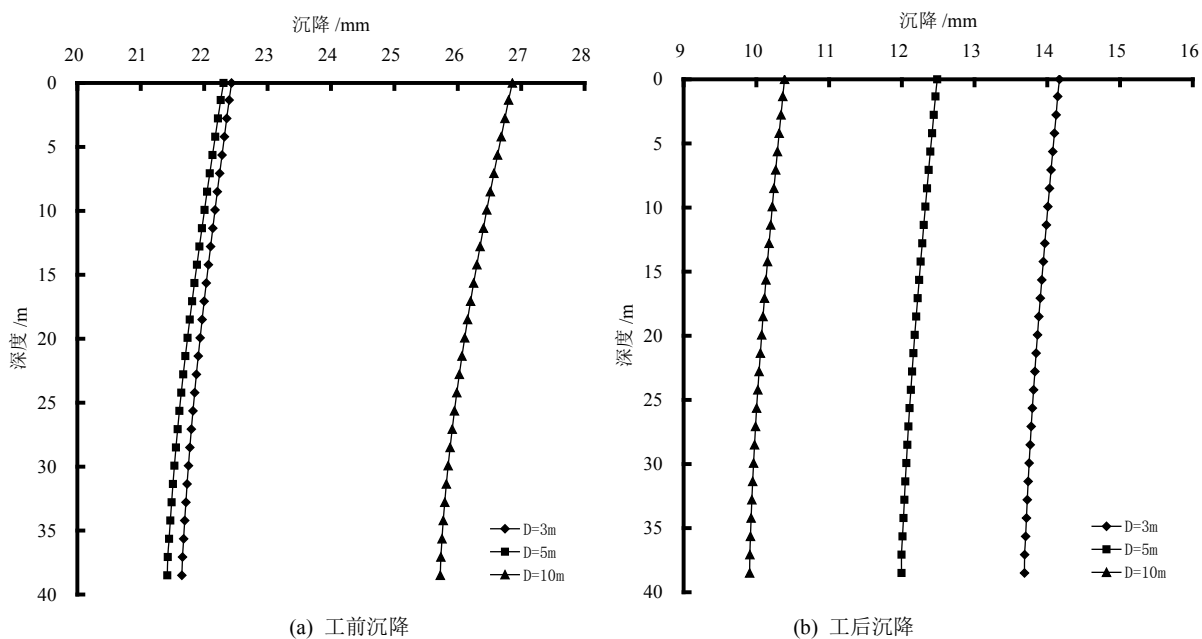


Figure 7. Effect of D on settlement of foundation pile ($h_2 = 0$ m)

图 7. 溶洞跨径 D 对基桩沉降的影响 ($h_2 = 0$ m)

在计算过程中,考虑了两种情况:一种是有溶洞情况,此时溶洞跨径 $D = 3$ m,溶洞顶板厚度为 4 m;另外一种是没有溶洞的情况。图 9 和图 10 分别为有、无溶洞情况下,嵌岩桩桩身位移和轴力沿深度的分布图。

由图 9 和图 10 可知,

1) 对于嵌岩桩,桩顶荷载引起的位移很小,桩顶工后沉降仅为 2.6 mm。

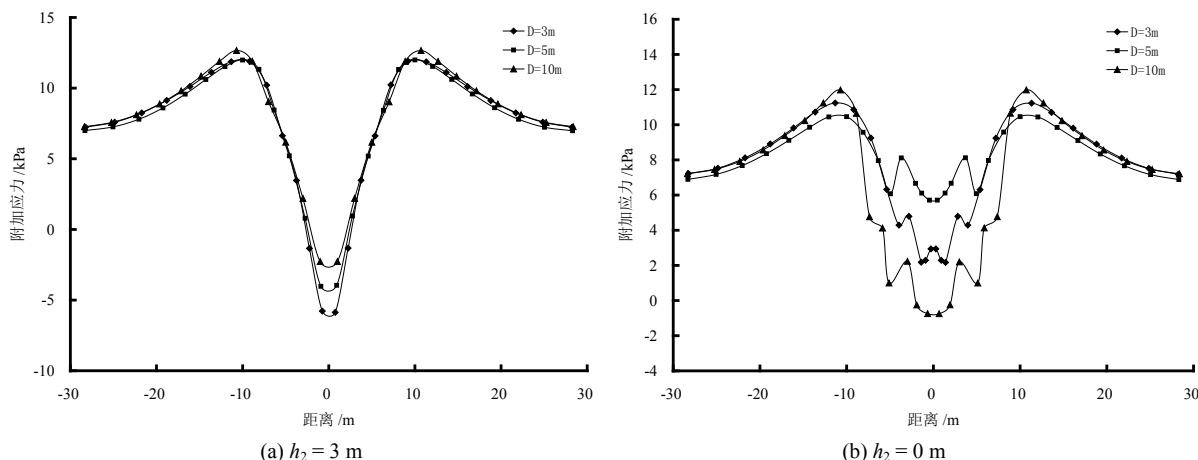


Figure 8. The influence of D on the additional stress of bedrock surface ($x = 0$)
图 8. 溶洞跨径 D 对基岩面附加应力的影响($x = 0$)

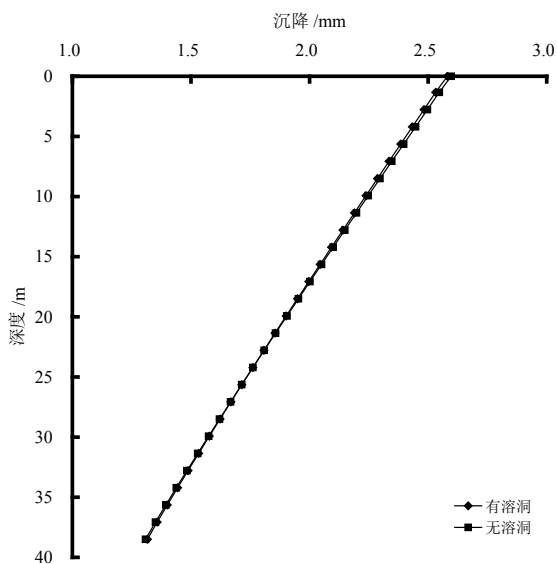


Figure 9. Post pile settlement with pile depth distribution
图 9. 基桩工后沉降随桩身深度的分布

2) 桩顶荷载主要由桩端力平衡，桩侧土摩阻力的承载效应有限，且相比于前述摩擦桩，嵌岩桩桩顶轴力较小，这是由于在嵌岩群桩基础中，各基桩分担的荷载较为均匀，中桩和角桩的荷载差别不大。

3) 有无下伏溶洞对桩的变形、受力影响不大，两者曲线基本重合，这与前述摩擦桩的结论相一致。

表 2 是在荷载，桩长以及溶洞跨径(3 m)均相同的条件下，摩擦桩与嵌岩桩的工后沉降的对比表。从表中可知，嵌岩桩的工后沉降远远小于摩擦桩的工后沉降，两者的差异达到 10.9 mm。

在高速铁路的桩基础设计中，核心问题之一是工后沉降的控制。根据《高速铁路设计规范》(试行) [7]，对于无碴轨道桥梁，墩台容许工后沉降为 20 mm，静定结构相邻墩台沉降差为 5 mm，对于超静定结构，其相邻墩台均匀沉降量之差的容许值，除要满足外静定结构相邻墩台沉降量之差的要求外，还应根据沉降时对结构产生的附加应力的影响而定。对于实际中碰到的嵌岩和非嵌岩的相邻桥墩桩基础，由图 3、图 9 和表 2 可知，沉降差达到 10~12 mm，超过了规范的容许限值，有必要对坐落于软土地基上摩擦型群桩基础进行加固处理，以满足工后差异沉降的要求。

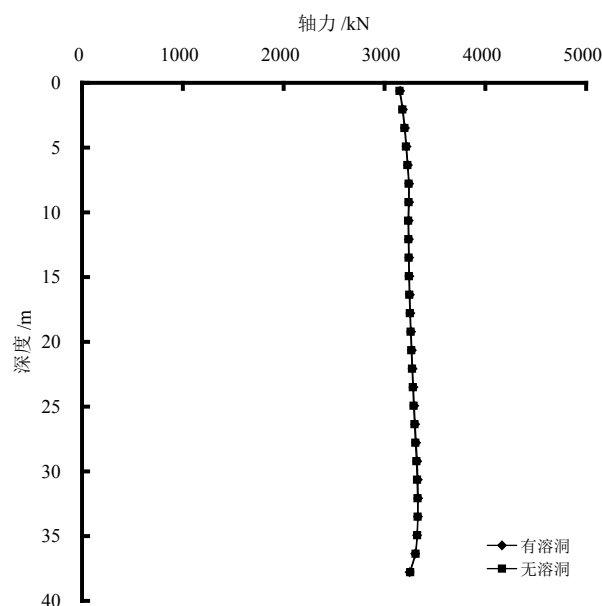


Figure 10. Distribution of axial force of angular pile with the depth of pile body

图 10. 角桩轴力随桩身深度的分布

Table 2. The comparison chart of post-construction of friction pile and rock socketed pile

表 2. 摩擦桩与嵌岩桩工后沉降对比表

	摩擦桩	嵌岩桩
工后沉降值(mm)	13.5	2.6

综上所述, 1) 在相同工作荷载条件与相同参数的条件下, 嵌岩桩的工后沉降远远小于摩擦桩的工后沉降; 2) 当相邻两墩台分别采用摩擦桩与嵌岩桩作为基础的形式时, 两墩台的差异沉降将可能不能满足规范的要求。

4. 结语

1) 341#墩采用摩擦桩时, 群桩基础的工后沉降基本上在规范容许的范围之内, 说明桩基础的设计满足了施工要求, 且群桩沉降变形主要由桩端下卧土层的压缩造成; 且下卧土层越薄, 群桩的沉降也就越小。

2) 在工作荷载作用下, 附加应力在桩端附近达到最大, 且随着向两侧距离的增大而递减。由摩擦桩传递到基岩面上的附加应力值远小于基岩的抗压强度值, 这不能使基岩产生变形破坏。

3) 由于群桩基础的应力扩散效应的影响, 传递到基岩面上的应力远远小于基岩的抗压强度值, 使得基岩的变形处于弹性变形阶段, 且很小。

4) 有溶洞存在时, 群桩基础的沉降变形也基本上是由桩端下卧土层的压缩所引起。溶洞跨度的大小基本上对群桩基础的总沉降影响不大。

5) 当相邻两墩台分别采用摩擦桩与嵌岩桩作为基础的形式时, 两墩台的差异沉降将可能不能满足规范的要求。且在相同工作荷载条件与相同参数的条件下, 嵌岩桩的工后沉降远远小于摩擦桩的工后沉降, 因此, 有必要对坐落于软土地基上摩擦型群桩基础进行加固处理, 以满足工后差异沉降的要求。

参考文献

- [1] 刘伟龙. 岩溶区某桥梁桩基稳定性分析[J]. 公路工程, 2012, 37(5): 97-100.
- [2] 何春林, 龚成中, 吉德广. 岩溶地区溶洞特性对桩基承载性能的影响分析[J]. 淮阴工学院学报, 2006, 15(1): 78-81.
- [3] 邹新军, 唐国东, 赵明华. 串珠状岩溶区桩基沉降计算与稳定分析. 建筑结构, 2013, 43(13): 95-98.
- [4] 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.
- [5] 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, 2007, 29(11): 1618-1622.
- [6] 马缤辉, 赵明华, 杨超炜, 等. 岩溶区某桥梁桩基处治方案分析[J]. 交通科学与工程, 2012, 28(2): 37-42.
- [7] 中华人民共和国铁道部. TB10020-2009 高速铁路设计规范(试行) [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: hjce@hanspub.org