

# 大直径嵌岩桩承载性能的有限元模拟分析

黄生根<sup>1</sup>, 张晓炜<sup>2</sup>, 刘炜嶸<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 河南省交通规划勘察设计院, 河南 郑州 450052;  
3. 郑州市市政工程总公司, 河南 郑州 450052)

**摘 要:** 根据嵌岩桩静载试验资料, 采用接近实际性状的正弦曲线模拟桩岩接触面, 对大直径嵌岩桩承载性能进行了系统的有限元模拟分析。计算结果表明: ①嵌岩部分孔壁越粗糙, 在相同桩顶沉降的情况下, 桩的承载力越高; ②小直径桩摩阻力沿深度方向呈单峰型分布, 大直径桩摩阻力沿深度方向呈双峰型分布; 随着直径的增加, 桩岩之间最大侧阻力值有减小的趋势; ③对软岩, 随嵌岩比的增大, 承载力相应增大, 但增长趋势减缓; 对中硬岩, 当嵌岩比达到 5 后, 基本保持不变; 对硬岩, 当嵌岩比达到 3 后, 不随嵌岩比而变化。④对不同强度的岩石, 嵌岩比对端阻比例的影响程度不同。

**关键词:** 嵌岩桩; 接触面; 粗糙度; 有限元

中图分类号: TU473.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)S2-0412-05

**作者简介:** 黄生根(1967-), 男, 江西上高人, 博士, 教授, 主要从事桩基础、地基处理及基坑工程等方面的研究与教学工作。E-mail: huangshgr@163.com。

## FEM analysis of bearing behavior of large-diameter socketed piles

HUANG Sheng-gen<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-wei<sup>2</sup>, LIU Wei-bo<sup>3</sup>

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Henan Provincial Communications Planning Surveying & Designing Institute, Zhengzhou 450052, China; 3. Zhengzhou Municipal Engineering Corporation, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** According to the test data of a socketed pile, the bearing behavior of large-diameter socketed piles is analyzed systematically with FEM, and the sinusoid is used to simulate the interface of pile and rock. According to the computed results, the following conclusions are drawn: (1) In the same settlement of pile heads, the hole walls are rougher, the capacities of piles are higher. (2) The friction resistances of small diameter plies along pile shafts are unimodal distribution, and that of large-diameter plies are bimodal distribution. The friction resistances decrease with the increasing diameters. (3) In the soft rock, the bearing capacities of piles increase with  $h_r/d$ ; in the medium hard rock, the bearing capacities remain constant when  $h_r/d$  reaches 5; in the hard rock, the bearing capacities remain constant when  $h_r/d$  reaches 3. (4) The ratio of base resistances to the bearing capacities ( $Q_b/Q_u$ ) decrease with the increasing  $h_r/d$ , and the effect of the ratio of socketed depth to diameter of pile ( $h_r/d$ ) on the  $Q_b/Q_u$  is different with the strength of rock.

**Key words:** socketed pile; interface; roughness; FEM

## 0 概 述

嵌岩桩承载性能与岩体、桩身混凝土和桩岩接触面有关, 其中桩岩接触面影响最大。由于岩土刚度、强度的差别以及接触面性状的差别, 嵌岩桩的受力机理与桩在土中的受力机理有很大区别<sup>[1-3]</sup>。嵌岩桩在成桩后, 桩身与岩石的接触面一般为具有一定粗糙度的凹凸曲面, 其性状如图 1。

在桩身受力之前, 桩身混凝土与岩体紧密结合在一起; 当嵌岩桩承受竖向荷载时, 桩岩间的黏结力首先发挥作用, 当黏结力达到极限后, 桩身沿着桩岩接

触面产生滑移, 且沿孔壁方向发生侧向剪胀, 桩身与岩石的凹凸接触面限制了桩的滑移, 增强了法向应力, 使桩侧阻力增大。随着竖向荷载的增加, 当粗糙接触面的剪切强度不能抵抗外荷载时, 初始的滑移机制转变为剪切机制, 此时桩侧阻力达到最大<sup>[4-5]</sup>。

对嵌岩段接触面的形式的数值模拟, 一般采用摩擦面接触或 Goodman 模型为多, 这种方式不能反映桩岩接触面的真实作用机理。Seidel 介绍了一种利用分

形理论描述三角形凸起界面的模拟方法, Hassan 和 O'Neill 直接采用曲线的“滑动线”单元模拟界面<sup>[6-9]</sup>。

本文根据焦桐高速泌阳段梅林河大桥嵌岩桩静载试验资料, 采用接近实际性状的正弦曲线模拟桩岩接触面, 对大直径嵌岩桩承载性能进行系统的有限元模拟分析。

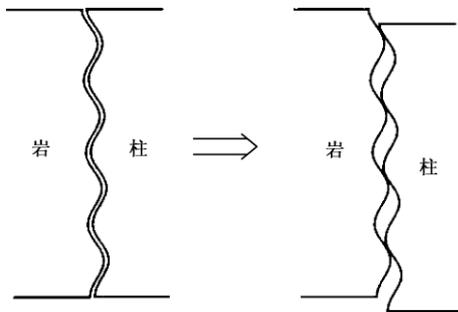


图 1 桩岩接触面作用原理示意图  
Fig. 1 Sketch of interface of pile and rock

## 1 嵌岩桩承载特性的数值分析

### 1.1 计算模型

采用轴对称有限元法对单根嵌岩桩的承载特性进行分析, 上覆土层和岩层的本构模型采用扩展的 Druker-Prager 模型; 桩土界面采用三结点接触单元, 桩土间的剪应力和剪切位移采用库伦摩擦模型; 桩岩接触面用正弦函数形式的曲线进行模拟<sup>[4]</sup>。分析模型如图 2 所示。

对于如图所示的桩岩界面模型, 选取两个特征参数来表征桩岩的曲线咬合形式: ①曲线的振幅, 用符号  $A$  表示; ②曲线的波长, 用符号  $L$  表示。  $A$  分别取 1, 2, 3 cm 和 4 cm;  $L$  分别取 1, 3, 5, 10 cm 进行计算。

对各种  $A, L$  情况进行组合验算, 找出最符合实际情况的一组  $A, L$ 。桩岩计算参数选取焦桐高速泌阳段梅林河大桥试桩资料, 用实际的地层参数 (见表 1) 进行模拟计算。

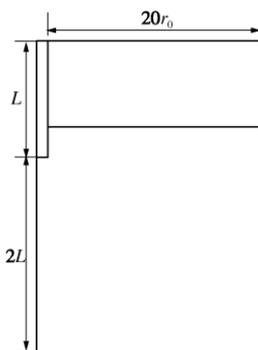


图 2 嵌岩桩分析模型

Fig. 2 Calculation model of a socketed pile

当  $A=1$  cm、 $L=5$  cm 时, 模拟结果和实测结果最接近, 见图 3。因此, 取  $A=1$  cm、 $L=5$  cm 作为桩岩界面粗糙度参数。图 4 为部分计算结果。

表 1 梅林河大桥试桩参数

Table 1 Pile parameters of Mei-lin River Bridge

| 岩土名称   | 层厚 /m | $c$ /kPa | $\varphi$ /( $^{\circ}$ ) | $E$ /MPa | $\nu$ |
|--------|-------|----------|---------------------------|----------|-------|
| 粉质黏土   | 6.7   | 15       | 15                        | 4.5      | 0.3   |
| 粉质黏土   | 6.3   | 12       | 15                        | 3        | 0.3   |
| 粉土     | 1.8   | 5        | 25                        | 15       | 0.3   |
| 强风化花岗岩 | 10.8  | 400      | 30                        | 1000     | 0.2   |
| 弱风化花岗岩 | 5.3   | 800      | 35                        | 20000    | 0.2   |

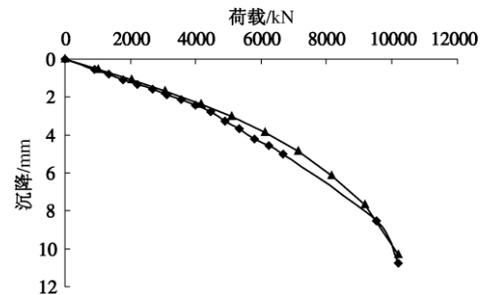
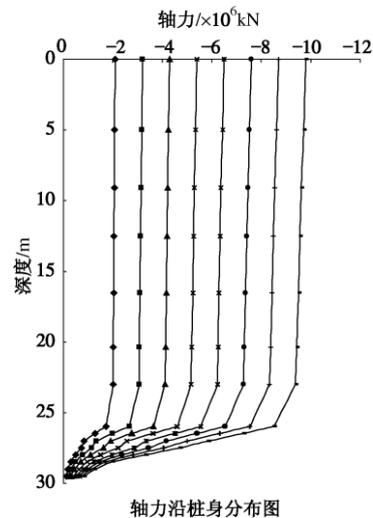
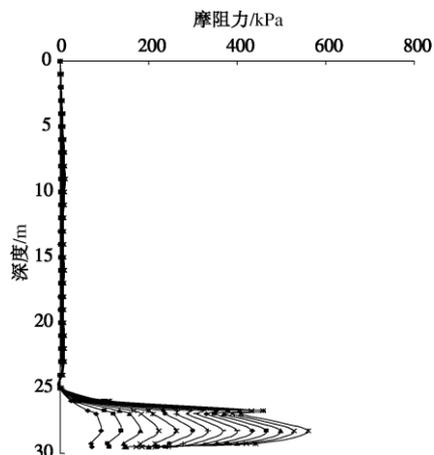


图 3 模拟结果与实测结果对比

Fig. 3 Calculated and measured values



轴力沿桩身分布图



摩阻力沿深度分布图

图4 部分计算结果

Fig. 4 Part of calculated results

1.2 各参数对嵌岩桩承载性能的影响分析

为了分析嵌岩桩的承载特性,取不同桩径、嵌岩比以及上覆土层、岩层和桩身材料参数进行计算,分析各计算参数对嵌岩桩承载性能的影响。

在进行计算时,上覆土层参数统一取值为:覆盖土层厚度 20 m,黏聚力  $c=15$  kPa,  $\varphi=20^\circ$  压缩模量  $E=3.5$  MPa。

(1) 桩的直径效应

计算参数的选取:嵌岩桩桩长  $h=5$  m,桩身混凝土弹性模量  $E_p=2.8 \times 10^4$  MPa,泊松  $\nu=0.18$ ;基岩的弹性模量  $E_r=20000$  MPa,  $\nu=0.22$ ;  $c=800$  kPa,  $\varphi=38^\circ$ 。桩径取 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m 进行计算。

计算得到的荷载沉降关系曲线见图 5。在最大荷载作用下不同直径桩嵌岩段摩阻力分布见图 6。

对大直径嵌岩桩,其侧阻分布规律与小直径桩有所区别:①小直径桩摩阻力沿深度方向呈单峰型分布,大直径桩摩阻力沿深度方向呈双峰型分布;②随着直径的增加,桩岩之间最大侧阻力值有减小的趋势,侧阻最大值从直径 0.5 m 时的 1200 kPa 降为直径 2 m 时的 900 kPa。

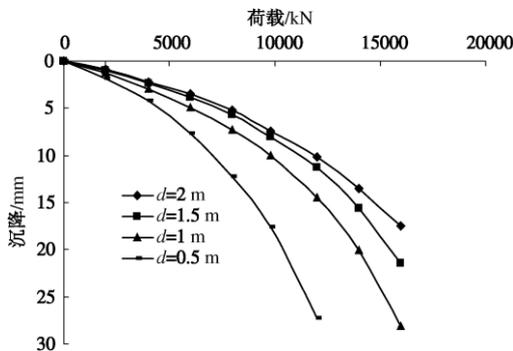


图5 不同直径嵌岩桩 Q-s 计算曲线

Fig. 5 Q-s curves of pile with different diameters

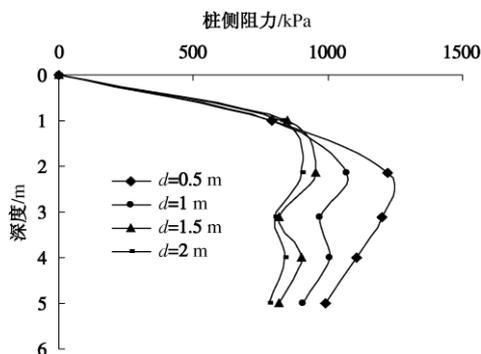


图6 桩嵌岩段摩阻力分布

Fig. 6 Shaft resistance distribution in rock-socketed part

(2) 孔壁粗糙度的影响

取不同的粗糙度参数即正弦曲线的振幅  $A$  和波长  $L$  可模拟孔壁粗糙度对嵌岩桩承载性能的影响。取  $L=5$  cm,  $A$  分别为 0.5, 1, 1.5, 2 cm 进行计算。

嵌岩段长  $h_r=5$  m, 桩身混凝土弹性模量  $E_p=2.8 \times 10^4$  MPa, 泊松  $\nu=0.18$ ; 基岩的弹性模量  $E_r=20000$  MPa,  $\nu=0.22$ ;  $c=800$  kPa,  $\varphi=38^\circ$ 。桩径取 1.0 m 进行计算。

不同粗糙度计算得到的荷载沉降关系曲线见图 7。取  $s=15$  mm 对应的荷载进行分析,可得不同粗糙度(正弦曲线振幅)与荷载关系曲线,见图 8。从图中可看出,嵌岩部分孔壁越粗糙,在相同桩顶沉降的情况下,桩的承载力越高。其原因为较粗糙的岩石和混凝土的结合界面,能更容易地引发岩石的剪胀作用,从而增大嵌岩段的侧摩阻力。

(3) 嵌岩比对荷载传递的影响分析

为对比不同嵌岩比对桩承载性能的影响,岩石强度分软、中、硬 3 种情况,嵌岩比分  $h_r/d=1, 3, 5, 7$  四种情况。有关参数取值见表 2,桩身混凝土弹性模量  $E_p=2.8 \times 10^4$  MPa,泊松  $\nu=0.18$ ,桩径取 1.0 m 进行计算。

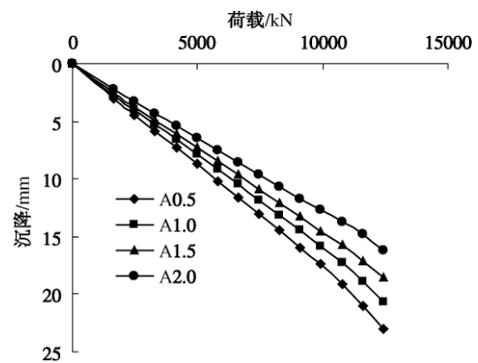


图7 不同粗糙度计算结果

Fig. 7 Q-s curves of pile with different roughnesses

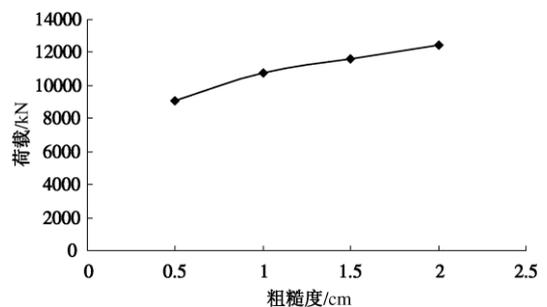


图8 粗糙度与荷载关系曲线 ( $s=15$  mm)

Fig. 8 Curves of relationship between roughness and load

( $s=15$  mm)

图 9 为不同嵌入比的荷载 - 沉降关系曲线。为比

较嵌岩比对嵌岩桩承载性能的影响, 取沉降  $s=12\text{ mm}$  对应的荷载进行比较。图 10 为不同岩石强度的嵌岩比与承载力关系, 图 11 为不同岩石强度的嵌岩比与端阻比例 ( $Q_b/Q_u$ ) 关系。

表 2 有关参数取值

Table 2 Parameters of calculation

| 岩层 | $h_r/d$ | $E$<br>/MPa | $c$<br>/kPa | $\varphi$<br>/( $^\circ$ ) | $\rho$<br>/( $\text{kg m}^{-3}$ ) |
|----|---------|-------------|-------------|----------------------------|-----------------------------------|
| 软  | 嵌岩      | 1000        | 80          | 25                         |                                   |
| 中硬 | 深度      | 10000       | 200         | 30                         | 2200                              |
| 硬  | 5, 7    | 15000       | 400         | 35                         |                                   |

由以上计算结果可知, 不同的岩石强度, 嵌岩比对承载力的影响不同。对软岩, 随嵌岩比  $h_r/d$  的增大, 承载力相应增大, 但增长趋势减缓; 对中硬岩, 随嵌岩比  $h_r/d$  的增大, 承载力总体呈增大趋势, 但  $h_r/d$  达到 5 后, 基本保持不变; 对硬岩, 当  $h_r/d$  小于 3 时, 承载力随嵌岩比  $h_r/d$  的增大而增大, 但  $h_r/d$  达到 3 后, 不随嵌岩比而变化。

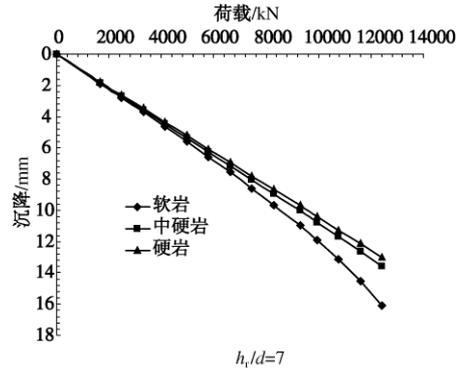
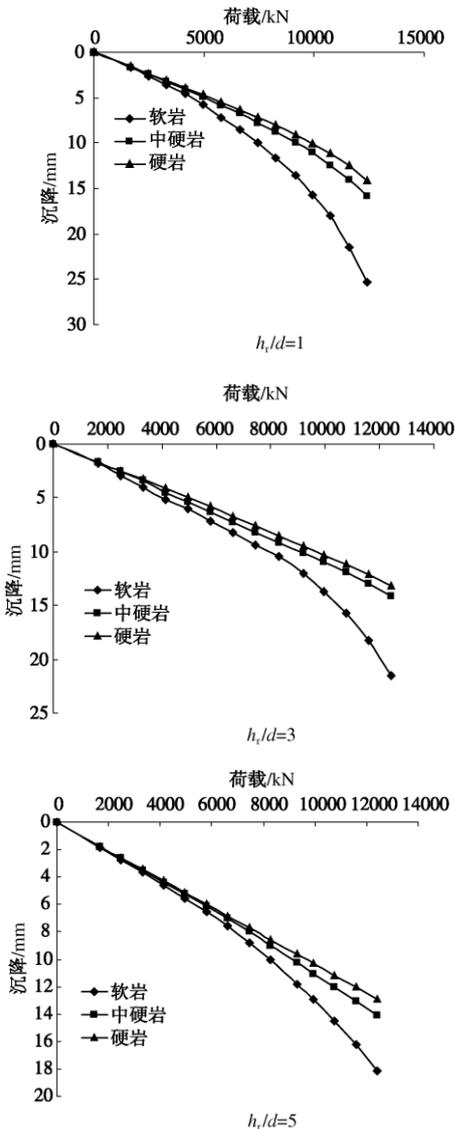


图 9 不同嵌入比的荷载 - 沉降关系曲线

Fig. 9 Load-settlement curves under different  $h_r/d$

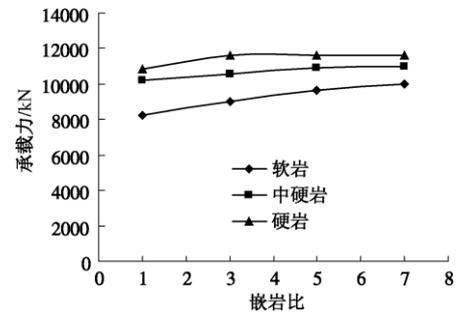


图 10 嵌岩比与承载力关系

Fig. 10 Curves of relationship between  $h_r/d$  and load

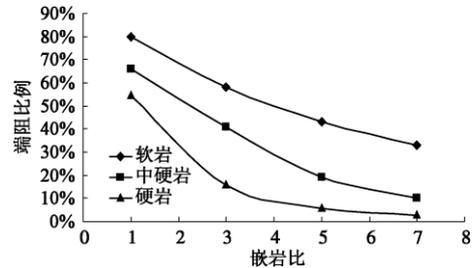


图 11 嵌岩比与端阻比例关系

Fig. 11 Curves of relationship between  $h_r/d$  and tip resistance ratio

端阻在承载力中所占比例随嵌岩比增大而较小。但对不同强度的岩石, 嵌岩比对端阻比例的影响程度不同。对软岩, 当  $h_r/d$  达到 7 时, 端阻所占比例仍可达 35%, 说明其荷载传递深度可达一个较大的范围; 对中硬岩, 当  $h_r/d$  达到 5 后, 端阻比例小于 20%, 当  $h_r/d$  达到 7 时, 端阻比例约为 10%, 说明其荷载传递深度主要在  $h_r/d=5$  范围内; 对硬岩, 当  $h_r/d$  达到 3 后, 端阻比例约为 15%, 当  $h_r/d$  达到 5 时, 端阻比例约为 5%, 说明其荷载传递深度主要在  $h_r/d=3$  范围内。

## 2 结 论

由上述计算结果, 可得到以下规律:

(1) 采用接近实际性状的正弦曲线模拟桩岩接触面, 能反映桩在嵌岩段的作用机制, 计算结果更接近

实际情况。

(2) 嵌岩部分孔壁越粗糙, 在相同桩顶沉降的情况下, 桩的承载力越高。

(3) 小直径桩摩阻力沿深度方向呈单峰型分布, 大直径桩摩阻力沿深度方向呈双峰型分布; 且随着直径的增加, 桩岩之间最大侧阻力值有减小的趋势。

(4) 不同的岩石强度, 嵌岩比对承载力的影响不同。对软岩, 随嵌岩比  $h_r/d$  的增大, 承载力相应增大, 但增长趋势减缓; 对中硬岩, 随嵌岩比  $h_r/d$  的增大, 承载力总体呈增大趋势, 但  $h_r/d$  达到 5 后, 基本保持不变; 对硬岩, 当  $h_r/d$  小于 3 时, 承载力随嵌岩比  $h_r/d$  的增大而增大, 但  $h_r/d$  达到 3 后, 不随嵌岩比而变化。

(5) 端阻在承载力中所占比例随嵌岩比增大而较小。但对不同强度的岩石, 嵌岩比对端阻比例的影响程度不同。对软岩, 当  $h_r/d$  达到 7 时, 端阻所占比例仍可达 35%, 说明其荷载传递深度可达一个较大的范围; 对中硬岩, 当  $h_r/d$  达到 5 后, 端阻比例小于 20%, 当  $h_r/d$  达到 7 时, 端阻比例约为 10%, 说明其荷载传递深度主要在  $h_r/d=5$  范围内; 对硬岩, 当  $h_r/d$  达到 3 后, 端阻比例约为 15%, 当  $h_r/d$  达到 5 时, 端阻比例约为 5%, 说明其荷载传递深度主要在  $h_r/d=3$  范围内。

#### 参考文献:

- [1] SEIDEL J P, HABERFIELD C M. The axial capacity of pile sockets in rocks and hard soils[J]. *Ground Engineering*, 1995: 33 - 38.
- [2] HASSAN K M, O' NEILL M W. Side load-transfer mechanisms in drilled shafts in soft argillaceous rock[J]. *Journal of Geotech and Environmental Engineering*, 1997, **123**: 145 - 152.
- [3] POULOS H G, MATTES N. The behavior of axially loaded end bearing piles[J]. *Géotechnique*, 1969, **19**: 285 - 300.
- [4] R K, ARMITAGE H H. Theoretical solutions for axial deformation of drilled piles in rock[J]. *Can Geotech J*, 1987, **24**(9): 114 - 125.
- [5] 史佩栋, 梁晋渝. 嵌岩桩竖向承载力的研究[J]. *岩土工程学报*, 1994, **16**(4): 32 - 39. (SHI Pei-dong, LIANG Jin-yu. Vertical bearing capacity of rock-socketed piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, **16**(4): 32 - 39. (in Chinese))
- [6] 刘利民, 何水莲. 孔壁粗糙度对嵌岩桩承载力的影响[J]. *建筑结构*, 2000(11): 10 - 12. (LIU Li-min, HE Shui-lian. Effect of hole side roughness on the bearing capacity of rock-socketed pile[J]. *Building Structure*, 2000(11): 10 - 12. (in Chinese))
- [7] 张建新, 刘利民. 孔壁粗糙度对钻孔灌注桩桩侧阻力的影响[J]. *工程勘察*, 2003(1): 13 - 15. (ZHANG Jian-xin, LIU Li-min. Effect of hole side roughness on the side resistance of cast-in-site pile[J]. *Geotechnical Investigation and Surveying*, 2003(1): 13 - 15. (in Chinese))
- [8] 明可前. 嵌岩桩受力机理分析[J]. *岩土力学*, 1998, **19**(1): 65 - 69. (MING Ke-qian. Analysis of bearing mechanism of socketed pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1998, **19**(1): 65 - 69. (in Chinese))
- [9] 张忠苗. 软土地基超长嵌岩桩的受力性状[J]. *岩土工程学报*, 2001, **23**(5): 552 - 556. (ZHANG Zhong-miao. The endurance of super-long piles in soft soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, **23**(5): 552 - 556. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)