

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.01.003

## 喷灌挤压组合桩工作机理现场试验研究\*

李连祥<sup>1,2</sup>, 黄亨利<sup>1,2</sup>, 李金良<sup>3</sup>, 王雷<sup>1,2</sup>, 孙帅帅<sup>3</sup>

(1. 山东大学基坑与深基础工程技术研究中心, 山东 济南 250061; 2. 山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250061; 3. 山东倍特力地基工程技术有限公司, 山东 济宁 272100)

**摘要:** 通过5棵喷灌挤压组合桩破坏性静载试验, 获得该桩工作机理, 明确荷载传递机制、桩身轴力、侧摩阻力分布规律。不同荷载作用下, 轴力沿桩身逐渐减小, 在翼板顶轴力小幅度增大; 桩身侧摩阻力随着外载的增加而逐渐增大, 上部土体侧阻力先于下部土体发挥作用; 揭示喷射注浆效应范围为7~8 m。喷灌挤压综合效应承载力增长显著, 主要表现在侧摩阻; 存在翼板时, 喷射注浆与翼板共同作用, 其侧摩阻极限值在砂土层中提高3~4倍, 在黏土层中提高2~2.5倍。无翼板存在, 但存在喷射注浆效应时, 其侧摩阻力极限值提高了2~2.5倍。与普通长螺旋灌注桩相比其极限承载力提高25%~100%。

**关键词:** 喷灌挤压组合桩; 喷射注浆效应; 端阻; 侧摩阻力

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)01-0018-11

## Study on Work Mechanism and In-situ Test of Pressure-grouting and Squeeze Combined Pile

LI Lianxiang<sup>1,2</sup>, HUANG Hengli<sup>1,2</sup>, LI Jinliang<sup>3</sup>, WANG Lei<sup>1,2</sup>, SUN Shuaishuai<sup>3</sup>

(1. Research Center of Foundation Pit and Deep Foundation Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;  
2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;  
3. Shandong Beiteli Foundation Engineering Technology Co., Ltd., Jining 272100, China)

**Abstract:** Through five destructive static load tests of pressure-grouting and squeeze combined pile, the working mechanism of the pile was obtained, and the load transfer mechanism and pile axial force and lateral friction resistance distribution were clarified. Under different loads, the axial force gradually decreases along the pile body, while increases slightly at the top of the wing; the lateral friction of the pile gradually increases with the increase of the external load, and the lateral resistance of the upper soil precedes the lower soil; the jet grouting effect range is 7~8 m. The comprehensive bearing capacity of pressure-grouting and squeezing has increased significantly, mainly for the side friction. When there is a wing plate, the combined effect of jet grouting and wing plate leads to an increase in side friction limit value by 3 to 4 times in the sand layer, while by 2 to 2.5 times in the clay layer. For cases without wing plates but with a jet grouting effect, the side friction limit is increased by 2 to 2.5 times. Compared with ordinary long spiral cast-in-place piles, the ultimate bearing capacity of pressure-grouting and squeeze combined pile is increased by 25% to 100%.

**Keywords:** pressure-grouting and squeeze combined pile; jet grouting effect; tip resistance; side friction

\* 收稿日期: 2018-11-28; 修回日期: 2019-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508310)、山东省优秀中青年科学家科研基金(BS2013SF024)、济南市科技计划项目(201201145)资助

作者简介: 李连祥(1966-), 男, 教授, 硕导, 博士。主要从事岩土工程研究。Email: jk\_doctor@163.com

# 引言

近年来,国内外学者致力于提高单桩承载力的研究,出现了如异形桩<sup>[1-8]</sup>、组合桩<sup>[9-10]</sup>、压浆桩<sup>[11-12]</sup>、扩底桩<sup>[13]</sup>等新的桩型。

喷灌挤压组合桩<sup>[14]</sup>由多功能长螺旋钻机成孔,提升钻头高压旋喷一定高度土体,压灌定量混凝土,下沉钻杆挤压,再提升钻杆、定喷侧翼、压灌超流态混凝土,最后下放钢筋笼而成桩(图1)。通过喷、灌、挤、压工艺,形成桩端土体挤密、包裹水泥土的混凝土扩径体(图2)。

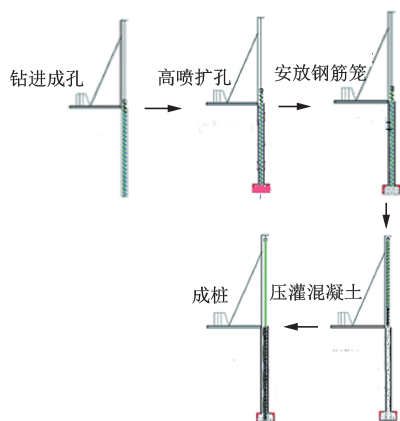


图1 工艺流程

Fig 1 Process flow chart

同时,伴随混凝土压灌,旋喷水泥浆液沿桩孔侧壁上涌,后插钢筋笼挤振,进一步促进混凝土充盈,挤压水泥浆液渗入孔壁。产生类似后压浆效应



图2 双锥台扩径体

Fig.2 Double frustum expansion body

的端阻、侧阻增强现象(喷射注浆效应),进而提高单桩承载力。喷灌挤压组合桩保留了传统灌注桩的优点,桩端扩径,提高桩端承载力;超流态混凝土驱赶旋喷水泥浆,加固桩孔周围的土层增强桩身侧摩阻力;干作业成孔,桩端无虚土,桩侧无泥皮,集成扩底桩与后压浆桩的优势。

作为一种新型高效绿色桩基,喷灌挤压组合桩已经先后应用600万m<sup>2</sup>建筑基础。桩基工程静载检测证明,等径等长条件下,该桩型承载力高于传统工艺桩1~3倍。为掌握其工作机理,明确独有承载力计算方法,进行了5棵该桩的现场试验。

## 1 试验概况

### 1.1 工程地质概况

根据地质勘察报告,工程场地勘探深度范围内揭露的地层除①层素填土外,其余地层主要由黏性土、粉土及砂层组成。其物理力学性质见表1。

表1 土层参数

Table 1 Soil layer parameters

土层名称	层厚/m	含水量/%	孔隙比	压缩模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
素填土	1.60	27.9	0.923	3.72	20	8.3
粉土	1.50	22.3	0.883	4.56	8	17.3
粉砂	2.80	—	—	12.00	—	—
黏土	1.00	29.7	0.850	4.30	25	7.7
粉质黏土	2.00	25.4	0.828	4.40	26	8.1
黏土	2.50	25.1	0.761	7.62	42	11.1
粉砂	2.00	—	—	20.00	—	—
粉质黏土	5.75	21.8	0.715	8.50	45	11.1
粉砂	2.09	—	—	30.00	—	—
粉质黏土	12.50	22.4	0.707	9.28	46	11.8
黏土	12.50	22.9	0.704	9.90	49	11.9

## 1.2 长螺旋多功能钻机

喷灌挤压组合桩由长螺旋多功能钻机一次性施工完成。

钻机钻头处配置三个喷嘴,如图3所示,三个喷嘴位于不同高度,通过上提旋喷,对不同深度土体进行异次喷扩(图4),形成不同直径的扩径体。图4中编号③为上部③号喷嘴旋喷所成的扩径体,编号②为中间②号喷嘴旋喷所成的扩径体,编号①同上。喷扩完成后,压灌混凝土形成上下双锥台扩径体(图2),形成过程如图1所示。

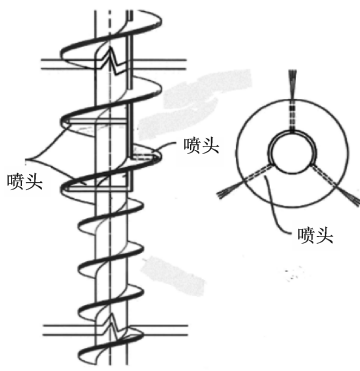


图3 钻头喷嘴

Fig.3 Drill nozzle

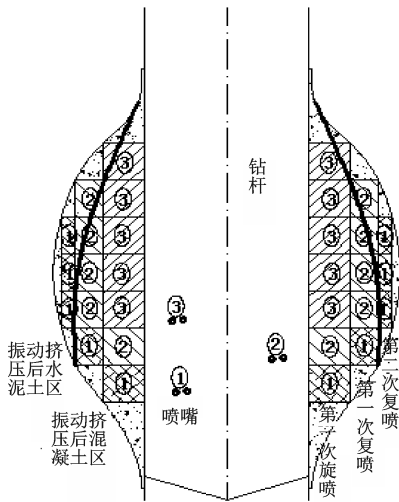


图4 扩径体形成过程

Fig.4 The process of expansion body formation

## 1.3 试验桩设计

桩型及规格见表2,其中翼板从桩端扩大头开始向上喷翼。

表2 试验桩参数

Table 2 Test pile's specification

桩号	桩长/m	桩径/mm	扩径直径/mm	侧翼板高度/m
SZ1	17.5	600	1 200	10
SZ2	18.0	600	1 200	全喷翼
SZ3	24.5	600	1 200	10
SZ4	24.5	600	1 200	全喷翼
SZ5	17.5	600	1 200	0

试验桩侧翼板是指在桩侧喷三个长×宽为(0.1×0.05)m的侧翼。如图5所示。

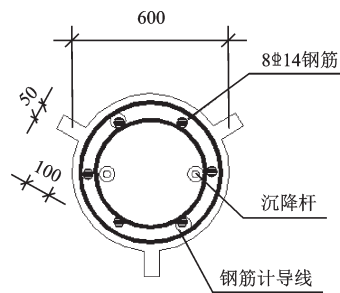


图5 验桩断面

Fig.5 Test pile section

根据《建筑桩基技术规范》<sup>[15]</sup>、《大直径扩底灌注桩技术规范》<sup>[16]</sup>并结合工程经验,可给出喷灌挤压组合桩竖向承载力计算公式:

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{sk1} + Q_{pk} + Q_{bk} = u \sum q_{sik} \times L_i \times \beta_{si} + u_1 \times \sum q_{sik} \times L_{1i} \times t_{si} + q_{pj1k} \times \frac{\pi}{4} (D^2 - d_1^2) \times \beta_p + d_1^2 \times \frac{\pi}{4} \times q_{pk} \times t_p \quad (1)$$

式中, $Q_{uk}$ 为单桩竖向抗压极限承载力标准值; $Q_{sk}$ 为单桩喷浆段(锥台以上桩身)极限侧摩阻力极限值; $Q_{sk1}$ 为单桩非喷浆段(锥台以下桩身)极限侧摩阻力极限值; $Q_{pk}$ 为单桩倒锥台变截面抗压极限承载力极限值; $Q_{bk}$ 为单桩桩端承载力极限值; $q_{sik}$ 为泥浆护壁钻孔桩极限侧阻力标准值; $u$ 为扩径体以上桩身周长, $u=\pi d$ ;  $L_i$ 为扩径体以上桩身穿过第*i*层岩土厚度; $u_1$ 为扩径体以下桩身周长; $u_1=\pi d_1$ ;  $L_{1i}$ 为扩径体以下桩身穿过第*i*层岩土厚度; $q_{pj1k}$ 为干作业钻孔桩极限端阻力标准值; $q_{pk}$ 为泥浆护壁钻孔桩的极限端阻力标准值; $D$ 为扩径体最大直径; $d, d_1$ 为扩径体以上与以下桩身直径; $t_{si}, t_p, \beta_{si}, \beta_p$ 分别为桩非喷浆段侧阻力、端阻力、喷浆段侧阻力、锥台端阻力调整系数。

根据上式计算各试桩单桩极限承载力见表3。

表 3 各试桩单桩承载力计算值

Table 3 Calculated value of bearing capacity of each test pile

桩号	总侧摩阻力( $Q_{sk} + Q_{sk1}$ )/kN	端阻力( $Q_{pk} + Q_{bk}$ )/kN	承载力标准值 $Q_{uk}$ /kN	端阻力承载比/%
SZ1	3 374	1 919	5 293	36
SZ2	3 515	1 919	5 434	35
SZ3	3 416	1 851	5 267	35
SZ4	3 708	1 851	5 559	33
SZ5	3 191	1 919	5 110	38

表 4 各试桩静载试验结果

Table 4 Results of static tests of piles

桩号	桩长/m	压桩时最大荷载/kN	最大沉降/mm	极限荷载时沉降/mm	单桩承载力/kN
SZ1	17.5	4 978	79.54	17.27	4 356
SZ2	18	4 356	53.56	8.84	4 554
SZ3	24.5	6 223	37.86	37.86	6 223
SZ4	24.5	6 223	15.36	15.36	7 696

本试验桩均采用 C50 超流态混凝土,每颗桩土层分界处的钢筋笼上安装振弦式钢筋测力计。钢筋计与钢筋套筒连接。短桩布置 6 组、长桩布置 8 组钢筋应力计,每组 2 个,分别布置在截面对称位置上的两个主筋上,以得到不同荷载等级桩身轴力、不同土层侧摩阻力分布规律(图 6)。图中最底层钢筋计位于桩端扩大头上部,测得数据即为桩端扩头部分承担的荷载。

振弦式钢筋测力计与两边钢筋连接杆连接,钢筋连接杆与钢筋笼中钢筋通过套筒连接,如图 7 所示。钢筋应力计导线通过聚乙烯管保护延伸至桩顶。(图 8)为了测得桩端沉降,下放钢筋笼前在钢筋笼内侧绑扎直径为 66 mm 的钢管→成桩后在实验前插入 22 mm 钢管,在 22 mm 管桩顶位置设测点测量桩端沉降<sup>[17-19]</sup>。

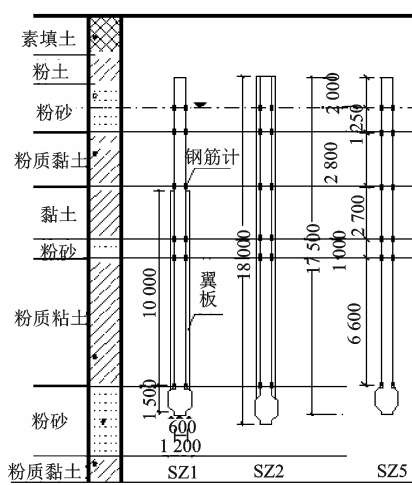
#### 1.4 单桩载荷试验原理

单桩竖向静荷载试验执行标准为建筑基桩检测技术规范<sup>[20]</sup>。本次实验将加载进行分级,采用逐级等量加载。预估极限承载力为 6 200 kN,分级荷载为极限承载力的 1/10 即 620 kN,第一级取为 1 240 kN,将加载过程分为 9 级,逐级加载至极限荷载。

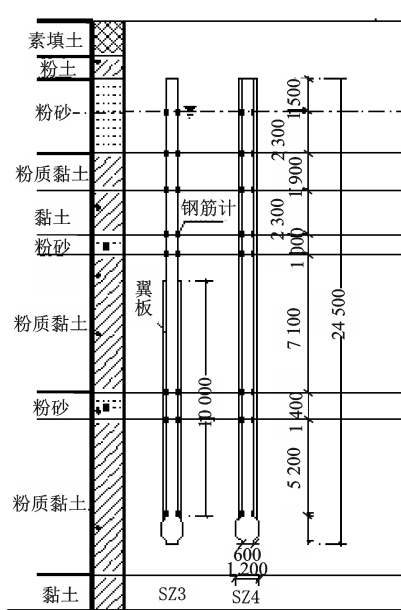
## 2 试验结果分析

### 2.1 试验桩极限承载力的确定

静载试验的  $Q-S$  曲线如图 9 所示,将结果列在表 4 中。根据图 9 可以看出:SZ1 在荷载为 4 978 kN 时沉降达到 79.5 mm,且该级荷载出现陡降:该级荷载下沉降为 62.27 mm,上一级荷载下沉降为 7.47 mm,且累计沉降大于 40 mm;故可判定该级荷载下试桩破坏,达到极限状态,故取上一级荷载为极限承载力,即 SZ1 极限承载力为 4 356 kN;SZ2 在荷载为 4 356 kN 时沉降为 53.56 mm,出现陡降现象, SZ2 极限承载力 3 730 kN。SZ2 由于桩身施工过程中出现混凝土管道出现堵管现象,桩身成桩质量较差,加载过程中桩身断裂,出现较大陡降。在之前工程经验指导下认为,桩身质量良好时,全翼桩 SZ2 承载力应大于十米翼板桩 SZ1,为得到较好的对比,选取 SZ2 在荷载为 3 730 kN 及之前的  $Q-S$  曲线,根据文献[21]作图法:在试桩的  $P-S$  曲线段上选取明显不符合直线的曲线段,再在该曲线段上取两点,把该两点对应的桩顶沉降差等分成若干相等的沉降差(一般不少于 4 等分),过各交点作  $P$  轴平行线与  $P-S$  曲线相交,过各交点作  $S$  轴平行线得与  $P$  轴相交的垂直点,过各垂直点作与  $P$  轴外沿成  $45^\circ$  的斜线,这些斜线与最接近的  $S$  轴平行线相交,这些交点大致落在一条直线上,该直线与  $P$  轴交点的值即为极限承载力  $P_u$ 。



(a) 短桩布置



(b) 长桩布置

图6 试验桩地质条件、桩身与钢筋计安装

Fig. 6 Test pile geological conditions, pile body and steel bar installation diagram



图7 钢筋计连接

Fig. 7 reinforcement metre connection



图8 钢筋计导线保护

Fig. 8 reinforcement metre wire protection

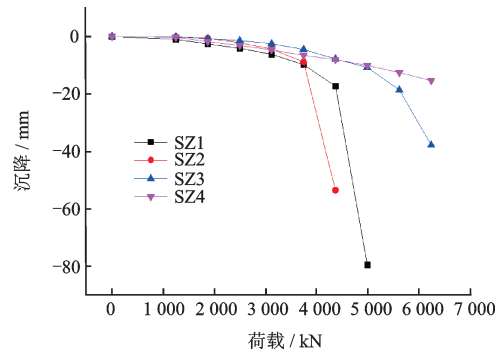


图9 试验桩Q—S曲线

Fig. 9 Load-settlement curves of experimental piles

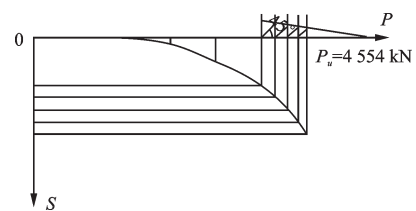


图10 SZ2极限承载力

Fig. 10 SZ2 Ultimate bearing capacity

由作图法得到SZ2极限承载力为4 554 kN。

SZ3在6 223 kN下沉降为37.86 mm,接近极限沉降40 mm,按照Q—S曲线趋势可认定下级荷载沉降大于40 mm,SZ3极限承载力为6 223 kN;SZ4在6 223 kN荷载情况下沉降量为15.36 mm,且未出现陡降现象,SZ4未达到极限状态。根据文献[21]可以计算出未达破坏时单桩极限承载力。因为SZ4的Q—S曲线未出现明显曲线段,无法使用麦随基威克司法(作图法)计算极限值,故采用文中的双曲线法:

假定P—S曲线为双曲线:

$$P = P_u S / (S + a) \quad (2)$$

$$P_u = (S_2 - S_1) / (S_2/P_2 - S_1/P_1) \quad (3)$$

$$a = P_u S_1 / P_1 - S_1 \quad (4)$$

式中,  $a$  为曲线常数;  $P_u$  为极限承载力;  $P, S$  分别为垂直荷载和对应的桩顶累计沉降量。

①根据  $P-S$  曲线已有段的各点坐标值 ( $P, S$ ) 计算  $S/P$ 。

②点出  $S-S/P$  关系。

③用最小二乘法求  $S-S/P$  曲线的平均直线 (即用直线代替曲线) 方程。

④取直线上两组坐标值 ( $P_1, S_1$ ) 和 ( $P_2, S_2$ ), 由式 (3) 和式 (4) 计算  $P_u$  和  $a$ 。

⑤如未给定桩顶极限沉降量, 则可由式 (4) 结果代入式 (2) 求对应的极限承载力。

由上述方法计算得到:

$$P = 4.247S(S + 0.0053) \quad (5)$$

将  $S=0.04$  m 代入式 (5) 可得  $P=7.696$  kN。

表 5 中给出了试桩与相同桩型的长螺旋钻孔压灌桩的单桩承载力对比, 可以看出, 相对于长螺旋钻孔扩压灌桩, 喷灌挤压组合桩承载力有大幅度提升, 其中 17.5 m 短桩承载力提高了 25%~35%, 24.5 m 长桩承载力提高了 60%~100%。

SZ5 由于压桩时桩头出现破坏, 使得压桩试验破坏, 未测得压桩曲线。

由表 5 可以看到对于喷灌挤压组合桩 17.5 m、18 m 短桩其设计值高于单桩承载力极限值, 而 24.5 m 长桩却表现相反。这是因为式 (1) 中对该桩的端阻和侧阻实际发挥情况估计存在偏差: 高估了端阻力的发挥程度, 低估了侧摩阻力的发挥。

表 5 各试桩承载力对比

Table 5 Comparison of bearing capacity of each test pile

桩型	桩长/m	单桩极限承载力/kN	单桩设计值/kN
SZ1	17.5	4.356	5.293
SZ2	18.0	4.554	5.434
SZ3	24.5	6.223	5.267
SZ4	24.5	7.696	5.559
长螺旋钻孔压灌桩	17.5	3.313	3.313
长螺旋钻孔压灌桩	24.5	3.821	3.821

## 2.2 桩身轴力分布

在桩顶受荷时, 钢筋与混凝土有相同的应变, 可通过钢筋轴力计算钢筋和混凝土的应变, 进而计

算混凝土轴力, 两者相加便得出桩身截面轴力:

$$N_i = \frac{P_i}{A_s E_s} A_c E_c + 8P_i \quad (6)$$

式中,  $N_i$  为截面处桩身轴力;  $P_i$  为  $i$  截面处两个钢筋计轴力的平均值;  $E_s, E_c$  分别为钢筋和混凝土的弹性模量;  $A_s, A_c$  分别为钢筋和混凝土的截面面积。

通过式 (6) 计算所得的桩身轴力沿桩身分布如图 11 所示。由于底层钢筋计处于扩大头上部, 未得到扩大头部分数据, 故各曲线图底部处于扩大头上部位置。

由图 (11) 可看出, 在不同桩顶荷载下, 桩身轴力沿着桩身逐渐减小, 这是由于在上部荷载作用下, 桩身产生向下的位移, 桩侧土体阻止桩身向下移动产生向上的侧摩阻力, 进而桩身轴力逐渐减小<sup>[5]</sup>。图中 SZ1 和 SZ3 在 8~10 m 左右出现轴力增加现象, 因为 SZ1 和 SZ3 在桩端扩大头往上存在十米翼板桩, 翼板在桩顶下 8~10 m 处消失, 上部桩身不存在翼板, 翼板上部土体在自重和上部桩身的侧摩阻力的作用下, 对下部翼板有竖向作用力, 下部桩身及翼板在该竖向力作用下, 出现轴力增大现象。同时由于翼板的存在, 桩身截面突然增大, 在试桩受荷过程中, 桩体向下移动, 土体随之移动, 土体应力松弛, 翼板上部土体出现侧阻弱化效应<sup>[22]</sup>。

表 6 各试桩桩端荷载

Table 6 End load of each test pile

桩号	桩顶荷载/kN	扩径体部分所受荷载/kN	扩径体荷载占比/%	侧摩阻力承担比/%
SZ1	3.734	822	22.0	78.0
SZ2	3.734	342	9.2	90.8
SZ3	6.223	1.045	16.7	83.3
SZ4	6.223	219	3.5	96.5

由表 6 可见, 在相同上部荷载作用下, 全翼桩 SZ2 和 SZ4 和扩头荷载占比均小于与之桩型一致的 SZ1 和 SZ3。显而易见, 全翼桩上部桩身侧摩阻承担更多荷载, 较小的荷载传到桩身下部。翼板的存在提高了桩身侧阻极限值, 提高了单桩承载力。

图 12 中, SZ1 扩头部分荷载分担比远大于 SZ3、SZ4, 也远大于与其桩长一致的 SZ2。结合表 5 可以看到, 与 SZ1 相比, SZ2 侧摩阻承担较大荷载, 而桩端承担荷载较小, 其最后一级荷载出现较大沉降, 上部桩身出现破裂。随着荷载的增加, SZ1、SZ2、SZ3 桩端荷载分担比逐渐增加, SZ4 荷载分担

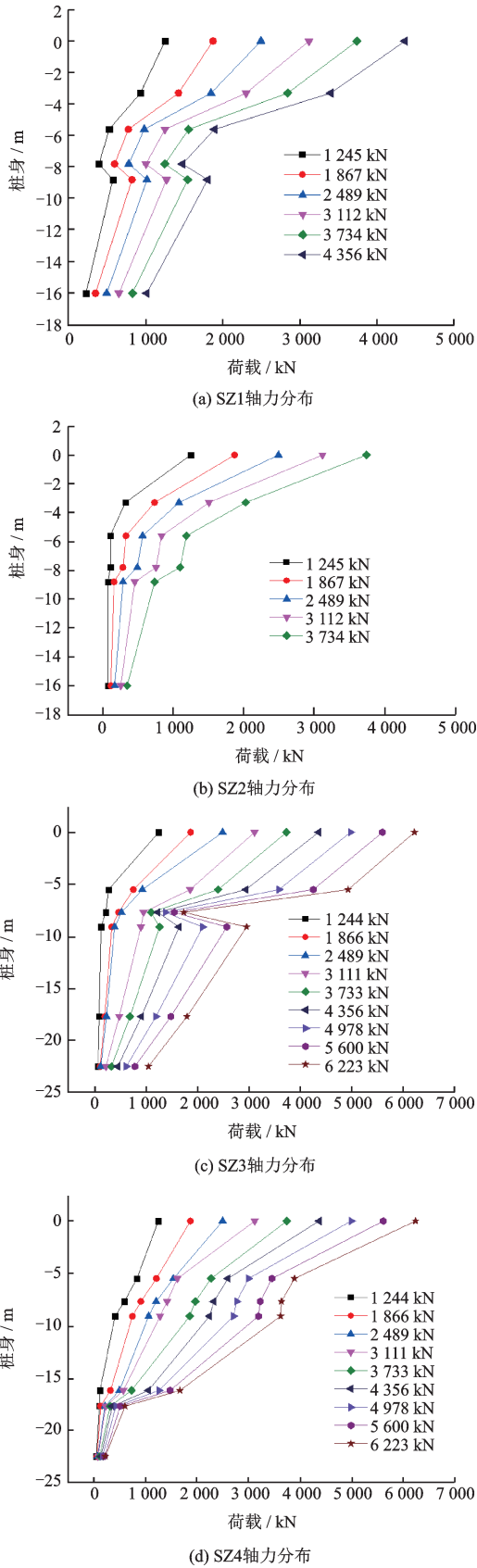


图 11 不同竖向荷载作用下桩身轴力分布  
Fig. 11 Distributions of axial force of pile shaft along pile depth under different vertical loads

比保持不变。这是SZ4桩身侧摩阻极限值较大,在加载过程中上部侧摩阻整体未达到极限状态,侧摩阻承担的荷载随着外部荷载的增加呈同步增加,而SZ1、SZ2、SZ3侧摩阻在加载过程中逐渐达到极限状态,外载越来越多由桩端承担。

各试桩达到极限状态时,其扩径体及桩端荷载分担比较小,最大为SZ1的23%,最小的SZ4在6 223 kN外载下时仅为3%,这四棵桩实际为端承摩擦桩。

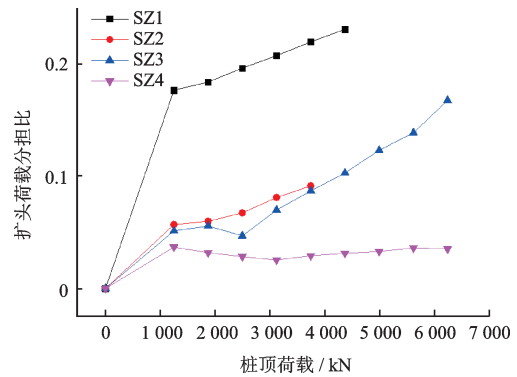


图 12 扩头部分荷载承担比随桩顶荷载变化曲线  
Fig. 12 The load-bearing ratio of the head part changes with the load of the pile top

### 2.3 桩侧摩阻力分布

喷灌挤压组合桩侧摩阻力由以下三个部分组成:①桩身混凝土与桩侧土相互作用;②水泥土与桩周土相互作用;③桩侧侧翼板形成的水泥土与桩周土相互作用。由桩身轴力可计算得出各土层桩侧摩阻力平均值 $f_{si}^{[5]}$ :

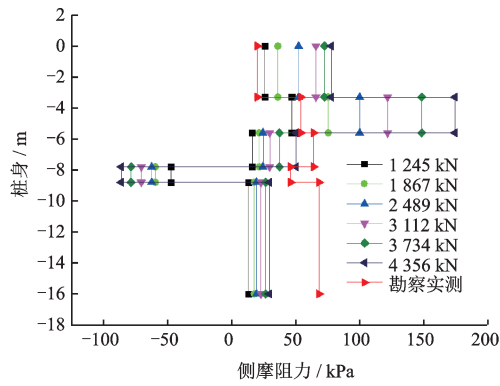
$$f_{si} = \frac{P_i - P_{i+1}}{A_i} \quad (7)$$

式中, $P_i$ 、 $P_{i+1}$ 分别为第*i*和*i+1*截面轴力; $A_i$ 为第*i*段桩侧面积,有翼板时考虑翼板与土体的接触面积。

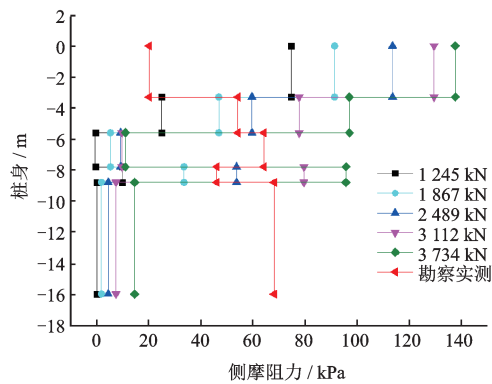
由式7可计算得出的桩侧摩阻力随桩身变化曲线:

由图13(a)、(c)中8~10 m土层侧摩阻力显示为负值,说明并不是该处存在负摩阻力,而是上文所说的下部翼板受到上部土体的竖向作用,下部桩身存在翼板部分在此处轴力增加,通过式(7)计算结果显示为负值,故在侧摩阻曲线图上表现出负摩阻现象。

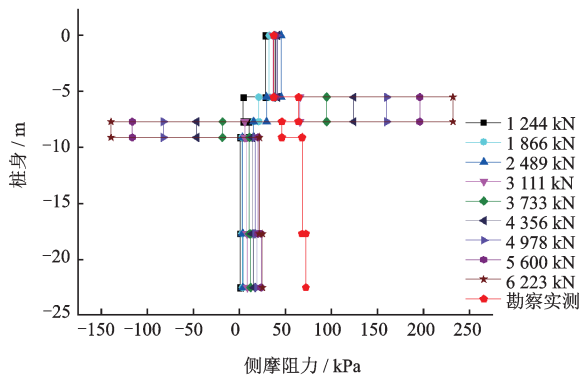
从图13中发现,随着外部荷载的逐渐增加,桩身侧摩阻力也逐渐增大。当外部荷载逐渐达到极



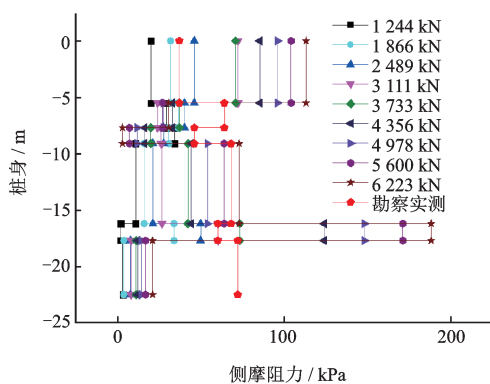
(a) SZ1侧摩阻力分布



(b) SZ2侧摩阻力分布



(c) SZ3侧摩阻力分布



(d) SZ4侧摩阻力分布

图 13 试桩侧摩阻力

Fig. 13 Shaft resistance of test pile

限状态,各试桩上部土层的侧摩阻力基本达到或超过勘察建议值,旋喷注浆和侧喷翼板对侧阻提升显著,同时侧摩阻力是逐步发挥的:在外载作用下,上部土层的侧摩阻先达到极限状态,下部土层随之开始慢慢发挥作用,下部土层的侧摩阻力未达到勘察建议值。

### 3 施工效应分析

在喷灌挤压综合作用下形成的新型桩基,其承载力得到了显著提升。旋喷扩底和定喷翼板的浆液对土体产生喷射注浆效应:对扩头和翼板上部一定高度土体的侧阻有一定增强效应;翼板和底部扩大头的存在增加了与土体的接触面积,侧阻能力增强;底部扩大头提高了端承力和桩周土体强度,对上部侧阻的承载能力有一定增强<sup>[23]</sup>。

表 7 可见,在上部荷载作用下,各试桩侧摩阻力在不同土层中的发挥作用。

#### 3.1 旋喷浆液的影响高度及加固效果

四颗试桩中,SZ1、SZ3为10 m翼板桩,在第一、第二层土中均无翼板存在,SZ2、SZ4为全翼板桩。表 7 中可见,SZ1和SZ2前两层土的侧摩阻发挥值都远大于勘察建议值:在第一层土中SZ1和SZ2的(侧摩阻发挥值/勘察建议值)值分别为3.9、6.85;在第二层土中 $\beta$ 值分别为3.2、1.8;而SZ3中第一层土的 $\beta$ 值为1.1,SZ4达到3.0;第二层土中SZ3的 $\beta$ 值为3.6。对比上述数据可以发现,10 m翼板桩中17.5 m的短桩SZ1在前两层土中侧摩阻均显著增强,而同为10 m翼板桩中24.5 m的长桩SZ3在第一层土中侧阻与勘察建议值一致,在第二层土中侧阻显著增强。可见存在喷射注浆效应,可以得出:喷射注浆效应对上部土体影响范围为7~8 m:即无喷翼情况下,从桩端扩大头往上7~8 m土层侧阻增强;有喷翼时从翼板顶往上7~8 m土层有侧阻增强。SZ1在第一、二层土中的 $\beta$ 值和SZ3在第二层土中的 $\beta$ 值分别为3.9、3.2、3.6;可以看出喷射注浆效应对桩周土体的侧阻增强可达到勘察建议值的3倍,考虑到上部土体侧阻发挥效率较高,可适当减小其增加倍数,宜取2~2.5倍。

#### 3.2 定喷翼板的作用效果

定喷侧翼,增加了桩身截面面积,增大了桩土

接触面积,同时通过水泥浆定喷,对侧翼周边土体有喷灌挤密,以及压灌混凝土时浆液对土体产生挤压渗透。在上述各种作用的综合效应下对桩的侧阻发挥提高显著。

在表 7、8 中,第一、二层土中,SZ2 的  $\beta$  值分别为 6.85 和 1.8,而 SZ4 的  $\beta$  值分别为 3.0、0.48;可以看出由于翼板的存在,SZ2 的第一层砂土侧摩阻提高显著,第二层土侧摩阻也逐渐发挥,却未达极限值;而 SZ4 中第一层土侧摩阻发挥较大,第二层土的侧摩阻开始发挥。SZ2 和 SZ4 的其他土层中,除了 SZ2 中第四层粉砂层、SZ4 中第五层粉砂层,其他土层侧阻均较小,可以看出未充分发挥。对比各个土层侧阻发挥情况以及土性我们可以看到:定喷翼板对砂土层作用显著,随着侧阻发挥,砂土层中极限值达到勘察建议值的 6 倍,考虑到上部土体侧阻发挥效率较高,此处可认为定喷翼板对桩周砂土层侧阻提高了 3~4 倍;SZ2 在第二层粉质黏土层的  $\beta$  值为 1.8,SZ4 在第一层砂土和粉质黏土层的  $\beta$  值为 3.0。考虑到侧阻的发挥程度,可以发现,定喷翼板对黏土层侧阻提高了 2~2.5 倍。在 SZ2 第四层粉砂层、SZ4 第五层粉砂层中的  $\beta$  值均大于上下两层黏

土层,除了由于翼板对砂土层的侧阻提高程度较高外,还由于砂土层侧摩阻存在“深度效应”:砂土所处位置越深,其极限侧摩阻越大,而饱和黏土层侧摩阻不存在“深度效应”<sup>[24]</sup>。

由 3.1、3.2 节分析可知,式(1)中单桩喷浆段极限侧摩阻力极限值  $Q_{sk}$  的计算与实际存在偏差,式中:  $Q_{sk} = u \sum q_{sik} \times L_i \times \beta_{si}$ ,  $\beta_{si}$  可作以下修正:①在桩身有翼板存在时,砂土层中可取 3~4;黏土层中可取 2~2.5;②桩身无翼板,但存在喷射注浆效应时,可取 2~2.5。

### 3.3 桩端扩径的作用

喷灌挤压组合桩通过喷嘴旋喷扩孔,压灌混凝土,形成双锥台扩径体,水泥浆对桩周土体产生挤压、渗透作用,在扩径体周边形成水泥土层,水泥土层外产生土体挤密层(图 14)。

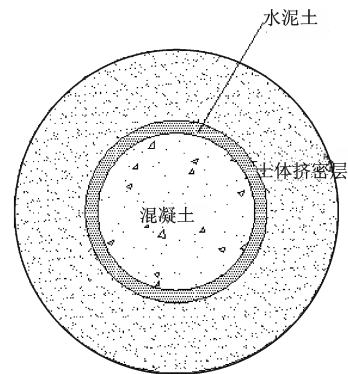


图 14 扩径体截面示意

Fig. 14 Schematic diagram of the enlarged diameter body

表 3 根据式(1)算得的扩头及端阻承载比均达到了 35%,而图 12 中喷灌挤压组合桩扩径体部分实际分担荷载较小,其中 SZ1 分担比最大,为 23%,SZ4 分担比最小,仅为 3%,可以认为在本次试验中扩径体分担荷载远未达到其极限承载能力。喷灌挤压组合桩存在最优构造,在本次实验基础上应减小桩长,满足端承力、侧摩阻力均能充分发挥其承载能力。

## 4 结论

(1)初步获得工作机理,得到名义极限承载力,现有设计端摩擦桩在名义极限承载力状态,相对于传统工艺桩有明显提高。相对于长螺旋钻孔压灌桩,喷灌挤压组合桩承载力有大幅度提升,其中

表 7 SZ1、SZ2 在各土层中侧摩阻发挥值

Table 7 SZ1, SZ2 frictional value in each soil layer

土层	桩号	SZ1	SZ2
		侧摩阻力( $\beta$ =侧摩阻力/勘察建议值)	侧摩阻力/ $\beta$
第一层砂土		78 kPa(3.9)	137 kPa(6.85)
第二层粉质黏土		173 kPa(3.2)	96 kPa(1.8)
第三层黏土层		49 kPa(0.76)	10 kPa(0.16)
第四层粉砂层		负摩阻	95 kPa(2)
第五层粉质黏土		31 kPa(0.45)	14 kPa(0.2)

表 8 SZ3、SZ4 在各土层中侧摩阻发挥值

Table 8 SZ3, SZ4 frictional value in each soil layer

土层	桩号	SZ3	SZ4
		侧摩阻力/ $\beta$	侧摩阻力/ $\beta$
第一层砂土+粉质黏土		40.9 kPa(1.1)	112 kPa(3.0)
第二层黏土		231 kPa(3.6)	30.6 kPa(0.48)
第三层粉砂		负摩阻	34.1 kPa(0.74)
第四层粉质黏土		21.5 kPa(0.32)	72 kPa(1.06)
第五层粉砂		—	187 kPa(3.1)
第六层粉质黏土		24.8 kPa(0.34)	20 kPa(0.28)

17.5 m 桩承载力提高 25%~35%, 24.5 m 桩承载力提高 60%~100%。

(2)在不同荷载作用下,轴力沿桩身逐渐减小,在翼板顶轴力小幅度增大;桩身侧摩阻力随着外载的增加而逐渐增大,上部土体侧阻力先于下部土体发挥作用。

(3)喷灌挤压组合桩对桩周土体的喷射注浆效应有一定影响范围:影响范围为 7~8 m,且翼板范围内均存在喷射注浆效应。喷射注浆效应对受荷影响范围内侧摩阻有明显增强;桩周无翼板时,在喷射注浆影响范围内桩周土侧阻增强 2~2.5 倍;有翼板存在时,喷射注浆效应与翼板共同作用,黏土层侧阻提高了 2~2.5 倍;砂土层侧阻提高了 3~4 倍。

(4)喷灌挤压组合桩存在最佳构造,即土层侧摩阻力均得到加强,且桩端扩径体承担一定作用。现有设计估算方法需要在现有桩基理论上根据施工工艺建立专门理论。

## 参考文献:

- [1] 杨敏,曹方成,张齐兴.介绍几种异形截面桩[J].水利水电科技进展,2003,23(1):58-60.  
Yang M, Cao F Ch, Zhang Q X. Introduce several shaped section piles[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2003, 23(1): 58-60. (in Chinese)
- [2] 张敏霞,刘汉龙,丁选明.现浇 X 形混凝土桩与圆形桩承载性状对比试验研究[J].岩土工程学报,2011,33(9):1469-1476.  
Zhang M X, Liu H L, Ding X M. Comparative tests on bearing capacity of cast-in-situ X-shaped concrete piles and circular pile [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9): 1469-1476. (in Chinese)
- [3] 王新泉,陈永辉,刘汉龙.Y 型沉管灌注桩荷载传递机制的现场试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(3):615-623.  
Wang X Q, Chen Y H, Liu H L. In-situ study on load transfer mechanism of Y-shaped Vibro-pile. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 615-623. (in Chinese)
- [4] 贺德新,沈保汉.DX 挤扩装置及 DX 多节挤扩桩的应用[J].工业建筑,2001,31(1):27-31.  
He D X, Shen B H. DX extruding device and DX pile with multi-under-extruding branches [J]. Industrial Construction, 2001, 31(1): 27-31. (in Chinese)
- [5] 周佳锦,王奎华,龚晓南.静钻根植竹节桩承载力及荷载传递机制研究[J].岩土力学,2014,25(5):1367-1376.  
Zhou J J, Wang K H, Gong X N. Bearing capacity and load transfer mechanism of static drill rooted nodular piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 25(5): 1367-1376. (in Chinese)
- [6] 李连祥,李先军,成晓阳.考虑圆孔扩张理论的支盘桩荷载传递法[J].中国公路学报,2018,31(8):20-29.  
Li L X, Li X J, Chen X Y. Load transfer method for squeezed and branch piles considering cavity expansion theory [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(8): 20-29. (in Chinese)
- [7] 李连祥,李先军.不同扩径体数量、位置对支盘桩承载力的影响[J].山东大学学报(工学版),2016,46(5):88-94.  
Li L X, Li X J. Influence of squeezed branch pile bearing capacity on different numbers and positions of enlarged parts [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2016, 46(5): 88-94. (in Chinese)
- [8] 李连祥,李先军,刘兵.竖向受压支盘桩沉降非线性简化分析方法[J].地下空间与工程学报,2018,14(4):904-911.  
Li L X, Li X J, Liu B. A simplified nonlinear settlement analysis method for axial loaded squeezed and branch piles [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(4): 904-911. (in Chinese)
- [9] 岳建伟,鲍鹏.组合桩的竖向承载力特性研究[J].土木工程学报,2008,41(5):59-64.  
Yue J W, Bao P. Characteristics of the vertical bearing capacity of composite piles [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(5): 59-64. (in Chinese)
- [10] 周德泉,张可能,刘宏利.组合桩型复合地基桩、土受力特性的试验对比与分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(5):872-879.  
Zhou D Q, Zhang K N, Liu H L. Working performance of piles and soil in combined-pile composite foundation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 872-879. (in Chinese)
- [11] 戴国亮,万志辉.后压浆桩增强效应作用机制及荷载沉降关系研究[J].岩土工程学报,2017,39(12):2235-2244.  
Dai G L, Wan Zh H. Enhanced mechanism and load-settlement relationship of post-grouting piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(12): 2235-2244. (in Chinese)
- [12] 田雪飞,卢海筠,闫景侠.后压浆灌注桩基承载力计算方法比较研究[J].岩土工程学报,2013,35(增1):

- 372-377.
- Tian X F, Lu H J, Yan J X. Comparative study on methods for bearing capacity of foundation with post-grouting drilling piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Sup 1): 372-377. (in Chinese)
- [13] 黄强. 大直径扩底桩承载力及变形计算[J]. 建筑结构学报, 1994, 15(1): 67-77.
- Huang Q. Calculation of bearing capacity and deformation of large diameter expanded bottom pile [J]. Journal of Building Structures, 1994, 15(1): 67-77. (in Chinese)
- [14] 李金良. 一种喷灌挤压组合桩 [P] 中国. CN105297710A. 2016-02-03.
- Li J L. Pressure-grouting and squeeze combined pile [P]: China, CN105297710A. 2016-02-03. (in Chinese)
- [15] 建筑桩基技术规范 JGJ94—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- Technical code for building pile foundations: JGJ94—2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)
- [16] 大直径扩底灌注桩技术规程: JGJ/T225—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Technical specification for large-diameter belled cast-in-place pile foundation: JGJ/T225—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [17] 张忠苗, 张乾青. 破坏和非破坏后注浆抗压桩受力性状现场试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1 601-1 608. (in Chinese)
- Zhang Zh M, Zhang Q Q. Field tests on behavior of destructive and non-destructive base-grouting piles under compression [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(10): 1 601-1 608. (in Chinese)
- [18] 张忠苗, 王智杰, 张乾青. 浙江财富金融中心超长单桩与群桩实测沉降分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增 1): 3 199-3 207.
- Zhang Zh M, Wang Zh J, Zhang Q Q. Analysis of measured settlement of super-long piles and pile groups in Zhejiang fortune center [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Sup 1): 3 199-3 207. (in Chinese)
- [19] Zhang Q Q, Zhang Zh M. Complete load transfer behavior of base-grouted bored piles [J]. Journal of Central South University of Technology, 2012, 19: 2 037-2 046.
- [20] 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- Technical code for testing of building foundation piles: JGJ 106—2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [21] 赵春风, 于明章, 吴水根. 试桩未达破坏时单桩极限承载力的估算方法 [J]. 同济大学学报, 1999, 27(4): 474-477.
- Zhao Ch F, Yu M Zh, WU Sh G. Method defining the bearing of single testing pile not reaching degree of failure [J]. Journal of Tongji University, 1999, 27(4): 474-477. (in Chinese)
- [22] 李先军. 多节钻扩灌注桩最优构造与竖向承载力理论研究 [D]. 济南: 山东大学, 2017.
- Li X J. Research on structure optimization and vertical bearing capacity theory for the multi-nodes drilled expanded bored pile [D]. Jinan: Shandong University, 2017. (in Chinese)
- [23] 张建新, 吴东云. 桩端阻力与桩侧阻力相互作用研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 541-544.
- Zhang J X, Wu D Y. Research on interaction between resistance at pile and lateral resistance of pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 541-544. (in Chinese)
- [24] 宋兵. 桩侧摩阻力特性的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- Song B. Study on the characteristics of shaft soil resistance of pile [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010. (in Chinese)

(本文责编: 周小潭)