

静压钢管注浆微型桩抗压与抗拔对比试验研究

宗钟凌^{1,2}, 鲁先龙³, 李青松¹

(1. 淮海工学院 土木工程学院, 连云港, 江苏 222005; 2. 江苏省海洋资源开发研究院 (连云港), 连云港, 江苏 222005;
3. 中国电力科学研究院, 北京 102401)

摘 要: 通过现场桩基承载力试验, 对静压钢管注浆微型桩抗压与抗拔性能进行了对比分析。基于实测 $Q-s$ 曲线, 研究压力注浆工艺及注浆体积比对微型桩抗压极限承载力、抗拔极限承载力以及极限侧阻力的影响, 分析注浆微型桩的桩土作用机理, 对微型桩抗拔极限状态进行讨论, 建议微型桩设计抗拔系数 λ 极限抗拔位移。研究表明, 软土地基中静压钢管注浆微型桩较未注浆钢管微型桩, 桩基极限承载力提高显著, 桩基抗拔性能良好。

关 键 词: 微型桩; 压力注浆; 极限承载力; 软土地基; 施工工艺

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 增 1-0362-07

Comparison test of compression and uplift on pressure-static and grouting micropiles

ZONG Zhong-ling^{1,2}, LU Xian-long³, LI Qin-song¹

(1. College of Civil Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang, Jiangsu 222005, China; 2. Marine Resources Development Institute of Jiangsu (Lianyungang), Lianyungang, Jiangsu 222005, China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 102401, China)

Abstract: Based on the ultimate bearing capacity tests at field site, comparison and analysis between compression and uplift is conducted for pressure-static and post-grouting micropile. A study is carried out in virtue of the $Q-s$ curves to investigate the influence of pressure-grouting process and grouting volume ratios on the bearing capacity and ultimate pile side friction. The pile-soil interaction mechanism and uplift ultimate state is discussed; and then the uplift factor λ and the ultimate uplift displacement are suggested. The results show that compared with micro steel-pipe piles, the ultimate bearing capacity of pressure-static and post-grouting micropiles have been enhanced in soft foundation, especially for the uplift bearing capacity.

Keywords: micropiles; pressure-grouting; ultimate bearing capacity; soft foundation; construction technology

1 引 言

微型桩 (micropiles) 起源于 20 世纪 50 年代意大利人 Lizzi^[1]提出的树根桩 (rooting piles), 通常是指桩径不大于 300 mm, 长细比不小于 30 的小直径桩。微型桩施工设备集约化程度高, 对复杂环境及地质条件适应能力强, 因此在地基处理、基础与边坡加固以及新建基础工程中得到了广泛应用^[2-5]。

微型桩的成桩质量及承载性能与施工工艺有密切关系, Fhwa^[6]依据施工方法将微型桩划分为 A、B、C、D 四类, 并明确了每类桩型的设计参数取值与施工控制措施。AASHTO 在 Fhwa2005 的基础上

按施工工艺又增加了一类新的微型桩: Hollow Bar Micropile, 并定义为 E 类。

国内的微型桩施工工艺与国外有一定区别, 主要体现在两方面, 一是采用钢筋笼代替单根或多根相对独立的大直径高强螺纹钢或钢管; 二是采用投石注浆或直接灌注细石混凝土代替水泥净浆。为了明确施工工艺与桩基承载性能之间的关系, 黄广龙等^[7]通过软土地基中单 (群) 桩的抗拔试验, 研究了投石注浆成桩工艺对微型桩抗拔承载力的影响。龚健等^[8]对投石注浆工艺进行了研究, 结果表明二次注浆工艺对成桩质量及桩基承载力有显著影

收稿日期: 2018-04-03

基金项目: 江苏省“六大人才”高峰项目 (No. 2016-JZ-066); 淮海工学院科研基金项目 (No. Z2015008)。

This work was supported by Six Talent Peaks Project in Jiangsu Province (2016-JZ-066) and Science Foundation of Huaihai Institute of Technology (Z2015008).

第一作者简介: 宗钟凌, 男, 1979 年生, 博士, 副教授, 主要从事软土地基处理方面的研究。E-mail: hhitzhl@163.com

响。苏荣臻等^[9]提出了一种灌注细石混凝土成桩方法，并对施工流程及施工参数进行了研究，验证了成桩方法的可行性。屈伟等^[10]通过现场试验，对采用不同施工工艺成桩的桩基承载力进行了研究，结果表明微型桩施工应注重对桩身的二次注浆。

从目前的研究来看，国内对于微型桩成桩工艺的研究与创新尚显不足，研究不够系统。本文基于软土地基的特点，提出了一种适用于软土地基的静压钢管注浆微型桩及施工工艺，通过现场桩基抗压、抗拔承载力对比试验，对微型桩的承载机制及性能进行了深入分析，以期该类微型桩的工程应用提供有益参考。

2 试验概况

2.1 工程地质条件

场地在埋深 15 m 范围内的地基土层可以划分为 4 个工程地质层：层①素填土，深度范围为 0.8~1.2 m，松散、稍湿，以黏性土为主，性状较差；层②黏土，深度范围为 1.2~1.5 m，软塑、土质较均匀，干剪强度高，韧性高；层③淤泥质黏土，深度范围为 9.2~10 m，流塑、高压缩性，工程性能极差；层④黏土，深度范围为 3.8~4.4 m，硬塑，土质较均匀，压缩性中等，性状较好。各土层的物理力学性质指标见表 1。

表 1 土层物理力学性质指标
Table 1 Physico-mechanical properties of soil layer

土号	土层名称	土层厚度/m	含水率 $w/\%$	重度 $\gamma /(\text{kN}/\text{m}^3)$	直剪固快		压缩模量 E_s/MPa	极限侧阻力 q_{si}/kPa	极限端阻力 q_{pk}/kPa
					黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi /(^{\circ})$			
①	素填土	0.8~1.2							
②	黏土	1.2~1.5	37.6	17.8	10.2	6.2	2.5	30	
③	淤泥质黏土	9.2~10	46.9	17.4	3.4	5.3	1.8	12	
④	黏土	3.8~4.4	44.2	18.0	11.4	6.8	5.5	75	300

2.2 试验桩施工工艺

静压钢管注浆微型桩的成桩工艺主要包括钢管桩制作、静力压桩、重力注浆、两阶段压力注浆和封桩等过程，工艺流程如图 1 所示。

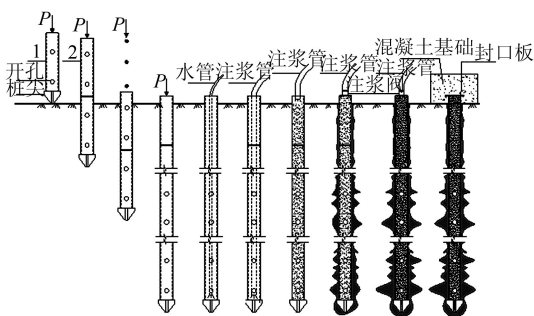


图 1 静压钢管注浆微型桩施工工艺
Fig.1 Construction process of static-pressure & post-grouting micropiles

试验采用钢管桩直径为 102 mm，壁厚 3 mm，共分 4 节制作。前 3 节钢管长度为 3 m，第 4 节钢管长度为 3.5 m，管壁对称开直径为 25 mm 的注浆孔。首节桩焊有桩尖，焊接板直径为钢管直径的 1.4 倍，目的是减小压桩过程桩身的摩擦阻力，并防止短时间内泥土通过管壁开孔挤入钢管内，以便于后续第一阶段压力注。

接桩采用焊接，桩体设计构造如图 2 所示。钢管入土到达设计位置后立即利用射水管对钢管内壁进行清理，直到清水冒出。注浆时先将注浆管放入钢管内直接注入水灰比为 0.5 的水泥净浆，接着进行第一阶段压力注浆，注浆压力为 0.5~1.0 MPa，注浆量达到 2 倍钢管体积时第一阶段注浆结束，间隔约 20~30 min 后再进行第二阶段压力注浆（注浆压力为 2.5~3.0 MPa），注浆量达到 3 倍钢管体积时注浆结束。

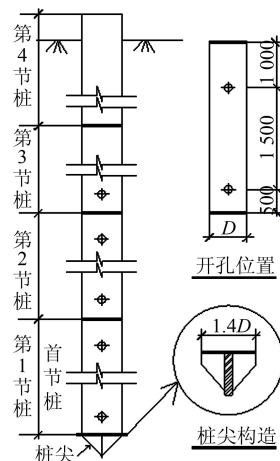


图 2 试验微型桩设计构造 (单位: mm)
Fig.2 Design structure of micropiles (unit: mm)

2.3 试验方案

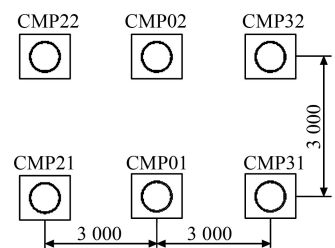
2.3.1 试验安排

对 12 根微型桩进行承载性能试验见表 2, 其中 6 根抗压试验桩, 6 根抗拔试验桩, 平面布置如图 3 所示。通过试验验证静压钢管注浆微型桩成桩工艺的可靠性, 考察注浆量与钢管体积比 (注浆体积比 V_g/V_p) 对承载性能的影响, 并对微型桩抗压与抗拔承载性能进行对比分析。

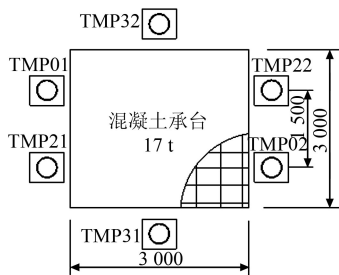
表 2 试验微型桩
Table 2 Test micropiles

桩型	桩编号	V_g/V_p	桩型	桩编号	V_g/V_p
抗压	CMP01	0	抗拔	TMP01	0
	CMP02	0		TMP02	0
	CMP21	2		TMP21	2
	CMP22	2		TMP22	2
	CMP31	3		TMP31	3
	CMP32	3		TMP32	3

注: V_g 为注浆体积(m^3); V_p 为钢管体积(m^3)。



(a) 抗压试验桩



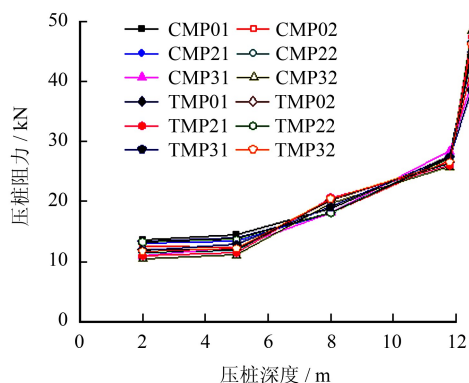
(b) 抗拔试验桩

图 3 试验桩平面布置(mm)

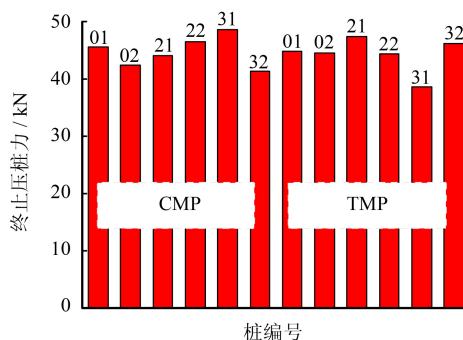
Fig.3 Test pile arrangement(mm)

为了对土层厚度与性质有更直观的了解, 对压桩过程各阶段压桩阻力及终止压桩力进行了测试, 结果如图 4 所示。

压桩力测试结果表明, 12 根试桩的压桩力变化趋势较为一致, 桩尖穿过表层黏土层后压桩阻力在较厚的淤泥质黏土层中基本呈线性增加, 桩尖进入④层黏土层时, 阻力明显增大, 但由于土层厚度的不均匀性, 各个桩的终止压桩力有一定差异。



(a) 压桩过程阻力



(b) 终止压桩力

图 4 压桩力实测值

Fig.4 Measured values of static-pressure forces

2.3.2 试验加载

对于抗压桩, 采用配重法进行加载。对于抗拔桩则利用混凝土承台进行加载, 加载方式如图 5 所示。试验加荷方式均为慢速维持荷载法, 在前一级荷载条件下, 当桩顶位移达到规范^[1]规定的稳定条件时加载下一级荷载, 当某一级荷载下桩顶位移过大且超过标准或者加载达不到下一级荷载时, 结束试验。

3 试验结果及分析

3.1 抗压试验结果

微型桩抗压试验得到的 $Q-s$ 曲线如图 6 所示。从图中可以看出, 注浆前后的微型桩 $Q-s$ 曲线均为陡降型, 但注浆后的微型桩 $Q-s$ 曲线变化相对更平缓, 且注浆体积比越大趋势越明显。静压钢管注浆微型桩的桩基承载力较微型钢管桩提高明显, 相同荷载作用下桩顶沉降位移显著减小。

对于 $Q-s$ 曲线为陡降型的微型桩, 其抗压极限承载力及相应的沉降位移通常取 $Q-s$ 曲线陡降起始点的对应值, 由此确定的单桩抗压极限承载力及位移见表 3。

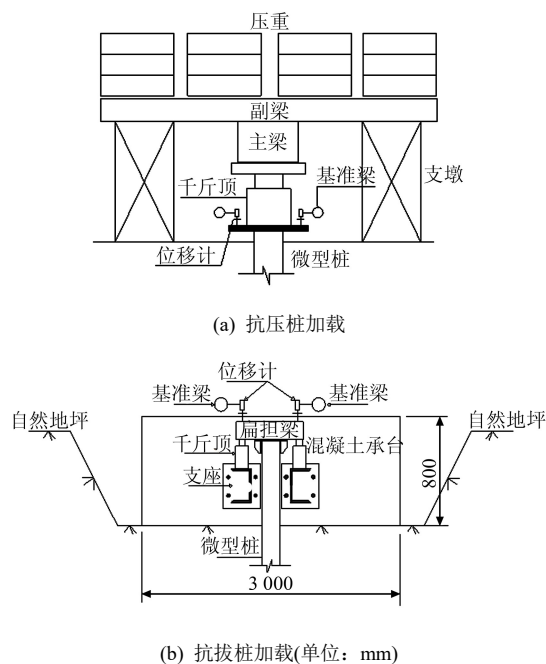


图 5 加载示意图

Fig.5 Sketches of compression and uplift loading

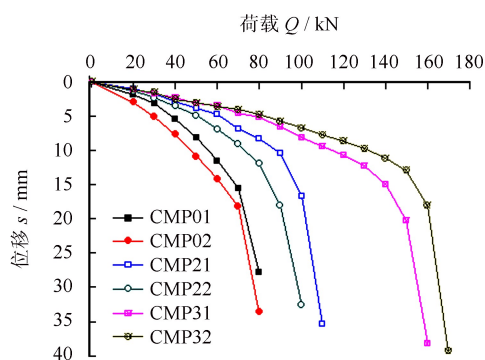


图 6 抗压荷载与位移曲线

Fig.6 Curves of compression load-displacement

表 3 抗压试验结果

Table 3 Test results of compression micropiles

桩编号	V_g/V_p	极限荷载 Q_{uk}/kN	沉降位移 s_{ul}/mm	平均侧阻力 q_{sl}/kPa
CMP01	0	70	15.6	17.4
CMP02	0	70	18.2	17.4
CMP11	2	100	18.1	18.5
CMP12	2	90	16.7	16.6
CMP21	3	150	20.2	28.2
CMP22	3	160	18.1	30.2

规范^[12]建议的桩基承载力计算公式:

$$Q_{uk} = u \sum q_{sik} l_i + q_{pk} A_p \quad (1)$$

式中: Q_{uk} 为单桩竖向极限承载力标准值; u 为桩身周长; q_{sik} 为桩侧第 i 层土的极限侧阻力标准值; l_i 为桩周第 i 层土的厚度; q_{pk} 为极限端阻力标准值;

A_p 为桩端面积。

根据式(1)可以计算得平均侧摩阻力,见表3。计算时桩长取 11.7 m, 即不考虑素填土的作用, 静压钢管注浆微型桩的桩径取 1.4 倍的钢管直径, 即桩端直径为 140 mm。从表 3 中可以看出, 较之未注浆的微型钢管桩, 注浆体积比 $V_g/V_p = 2$ 时, 静压钢管注浆微型桩抗压极限承载力的平均值提高了 36%; 注浆体积比 $V_g/V_p = 3$ 时, 抗压极限承载力的平均值提高了 121%, 可见仅进行第一阶段压力注浆, 桩基抗压极限承载力提高幅度有限, 究其原因可能是静力压桩时扩大的桩尖(见图 2)将桩周土排开形成了空腔, 第一阶段压力注浆所注入的水泥浆大部分进入了这部分空腔, 现场注浆时桩头附近溢出的浆液也验证了这一推断, 因此第一阶段压力注浆后浆液的主要作用是增大了桩身直径, 而对桩周土层的挤压、劈裂及固化作用较弱。第二阶段压力注浆则是在第一阶段水泥注浆液初始硬化时采用较高压力注入, 该阶段所注入水泥浆的作用主要是通过劈裂与挤压改善土层的应力状态, 同时进一步固化桩周土。所以, 两阶段压力注浆后微型桩的极限抗压承载力得到了显著提高。

从计算得到的平均侧阻力来看, 在考虑桩径扩大效应后, 第一阶段压力注浆, 桩周平均侧阻力基本没有变化。第二阶段压力注浆, 桩周平均侧阻力提高了 67%, 可见两阶段压力注浆明显改善了土的物理力学性质。

3.2 抗拔试验结果

微型桩抗拔试验 $Q-s$ 曲线如图 7 所示。从图中可以看出, 抗拔桩与抗压桩的 $Q-s$ 曲线类似, 也基本呈陡降型。同样的, 注浆后的微型桩 $Q-s$ 曲线变化相对更平缓, 且注浆体积比越大趋势越明显。静压钢管注浆微型桩的桩基承载力较微型钢管桩提高明显, 相同荷载作用下桩顶上拔位移显著减小。

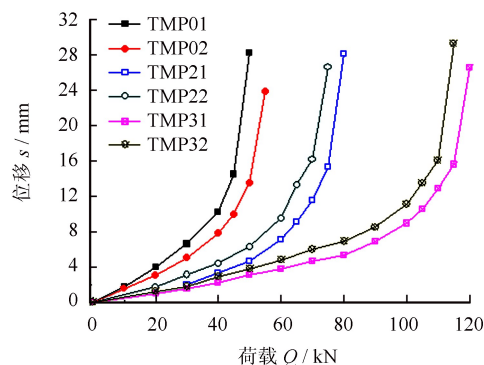


图 7 抗拔荷载与位移曲线

Fig.7 Curves of uplift load-displacement

采用与抗压桩同样的方法确定抗拔桩的极限承载力及相应的上拔位移,见表 4。表中,平均侧阻力也是通过式(1)计算得到,但抗拔极限承载力扣除了桩身自重,并且不考虑桩端的影响。从表 4 中可以看出,较之未注浆的微型钢管桩,注浆体积比为 2 和 3 时,静压钢管注浆微型桩抗拔极限承载力平均值分别提高了 53%和 137%;当 $V_g/V_p = 2.0$ 时平均侧阻力基本没有变化, $V_g/V_p = 3.0$ 时平均侧阻力提高了 72%。

表 4 抗拔试验结果

Table 4 Test results of uplift micropiles

桩编号	V_g/V_p	极限荷载 Q_{u2}/kN	上拔位移 s_{u2}/mm	平均侧阻力 q_{s2}/kPa
TMP01		50	13.6	12.8
TMP02		45	14.5	11.6
TMP11	2	75	15.4	14.0
TMP12	2	70	16.2	13.0
TMP21	3	115	15.6	21.8
TMP22	3	110	16.1	20.8

3.3 抗压与抗拔试验结果对比分析

将相同注浆体积的 2 根微型桩的桩基极限承载力及相应桩顶位移进行平均处理,并将抗拔与抗压结果进行比较,结果见表 5。

表 5 抗压与抗拔试验结果对比

Table 5 Test result comparison of compression and uplift

V_g/V_p	Q_{u2}/Q_{u1}	s_{u2}/s_{u1}	q_{s2}/q_{s1}
0	0.68	0.83	0.70
2	0.76	0.91	0.77
3	0.72	0.83	0.73

从表 5 中可以看出,注浆后微型桩的抗拔极限承载力提高的幅度更明显,注浆体积比 $V_g/V_p = 3.0$ 时抗拔桩的平均极限侧阻力提高百分比约是抗压桩的 1.1 倍,说明注浆后静压钢管注浆微型桩的抗拔破坏机制可能不同于一般桩基的粘结滑移破坏机制,注浆不仅改善了土层的物理力学性质,同时注浆液与土体固化后在注浆孔附近的土层中形成了“局部扩径”,并且注浆孔主要集中在桩体中下部,桩径在总体上呈现“下大上小”的变化规律,因此静压钢管注浆微型桩在抗拔时“剪力键效应”与“楔形效应”同时得到了发挥,使得静压钢管注浆微型桩的抗拔性能更为优越。

从表 5 中极限侧阻力的对比还可以看出,本文提出的静压钢管注浆微型桩的抗拔系数 λ 均大于

0.7,建议实际设计时 λ 取 0.7。按照规范方法确定极限承载力时抗拔桩对应的桩顶上拔位移小于抗压桩的沉降位移,说明抗拔桩只有发生更大的桩顶上拔位移时,极限侧阻力才能得到更充分的发挥。

4 关于微型桩抗拔极限状态的讨论

国内外学者对于微型桩抗拔极限状态的确定,尚未形成统一的认识与结论。Lutenegger 等^[13]在黏土中的抗拔试验结果表明,微型桩破坏时产生的上拔位移与桩径 D 有关,约为 $0.06D$ 。Nusier 等^[14]认为摩擦桩桩顶抗拔位移达到 $(0.02 \sim 0.2)D$ 时,侧摩阻力才能得到充分发挥;Han 等^[15]建议微型桩极限抗拔位移取 $(0.04 \sim 0.07)D$;Hong 等^[16]则定义 $Q-s$ 曲线的峰值点对应的荷载值为微型桩的极限承载力。Doohyun 等^[17]通过微型桩抗拔模型试验,建议取桩顶上拔位移 $(0.05 \sim 0.1)D$ 范围内对应的上拔荷载作为极限承载力更为合理。周俊鹏等^[18]在黄土中的微型桩抗压与抗拔对比试验结果表明,在确定抗拔桩的极限承载力时应考虑桩顶上拔量,并建议黄土中短桩的极限抗拔位移取 $0.025D$ 。

鉴于本文提出的静压钢管注浆微型桩与 FHWA 定义的 B 类和 C 类桩有相似的特点,考虑到不同桩型抗拔位移的变化性,这里分别取抗拔位移为 $0.05D$ 、 $0.075D$ 、 $0.1D$ 时所对应的抗拔荷载进行对比分析。为便于分析,将桩顶上拔位移作为 X 轴,上拔荷载作为 Y 轴,绘制的 $s-Q$ 关系曲线如图 8 所示。图中,虚线与曲线交点即为抗拔极限承载力,见表 6。

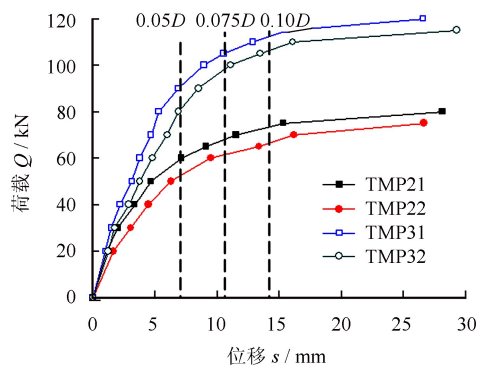


图 8 抗拔位移与荷载曲线

Fig.8 Curves of uplift displacement-load

从图 8 和表 6 可以看出,对于两阶段压力注浆微型桩当桩顶上拔位移为 $0.5D$ 时,桩周土体刚从弹性阶段进入弹塑性阶段,上拔位移在 $(0.05 \sim 0.075)D$ 范围内时,是土体弹塑性初步发展阶段,之后是土体弹塑性充分发展阶段,侧阻力得到显著发挥。而

表 6 上拔位移确定的抗拔极限荷载
Table 6 Ultimate bearing capacity with uplift displacements

桩编号	抗拔极限荷载 / kN		
	0.05D	0.075D	0.1D
TMP21	60.0	68.3	73.2
TMP22	51.6	61.4	66.3
TMP31	90.7	106.2	112.5
TMP32	81.5	98.7	106.8

注：抗拔极限荷载是由试验结果线性插值得到。

对于仅进行一阶段压力注浆的微型桩，上拔位移在 $(0.05 \sim 0.075)D$ 范围内时，土体的弹塑性就已经表现的较为明显。

因此，本文建议对于仅进行一阶段压力注浆的静压钢管注浆微型桩极限抗拔位移取 $(0.05 \sim 0.075)D$ ，对于两阶段压力注浆微型桩极限抗拔位移取 $(0.075 \sim 0.1)D$ ，此时，即发挥了微型桩的抗拔优势，又有一定的安全储备。

5 结 论

(1) 静压钢管注浆微型桩较未注浆的钢管桩，注浆体积比 $V_g/V_p = 2$ 时，抗压与抗拔极限承载力分别提高了 36% 和 53%，注浆效果主要体现在桩径的扩大，对极限侧阻力影响不明显。

(2) 静压钢管注浆微型桩较未注浆的钢管桩，注浆体积比 $V_g/V_p = 3$ 时，抗压与抗拔极限承载力分别提高了 121% 和 137%，极限侧阻力分别提高了 67% 和 72%，两阶段压力注浆效果显著，尤其是微型桩的抗拔性能。

(3) 本次试验得到的静压钢管注浆微型桩的抗拔系数 λ 均大于 0.7，建议微型桩抗拔设计时 λ 取 0.7。

(4) 建议对于仅进行一阶段压力注浆的静压钢管注浆微型桩极限抗拔位移取 $(0.05 \sim 0.075)D$ ，对于两阶段压力注浆微型桩极限抗拔位移取 $(0.075 \sim 0.1)D$ 。

参 考 文 献

- [1] LIZZI F. Reticulated root piles to correct landslides[C]// ASCE Convention and Exposition. Chicago, Illinois: [s. n.], 1978: 16—20.
- [2] 龚健, 陈仁朋, 陈云敏, 等. 微型桩原型水平荷载试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3541—

3546.

GONG Jian, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min, et al. Prototype testing study on micropiles under lateral loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(20): 3541—3546.

- [3] 吕凡任, 陈仁朋, 陈云敏, 等. 软土地基上微型桩抗压和抗拔特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(3): 99—104.

LÜ Fan-ren, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min, et al. Field test on compression and uplift behavior of micropiles in soft ground[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2005, 38(3): 99—104.

- [4] SUN Shu-wei, ZHU Ben-zhen, WANG Jia-Chen. Design method for stabilization of earth slopes with micropiles[J]. **Soils and Foundations**, 2013, 53(4): 487—497.

- [5] BRUCE D A, JURAN I, DIMILLIO A F. High capacity grouted micropiles: the state of practice in the United States[C]//Proceedings of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Netherlands: BALKEMA A A, 2001.

- [6] Federal Highway Administration(FHWA). Micropiles design and construction[Z]. Washington: [s. n.]. 2005.

- [7] 黄广龙, 方乾, 苏荣臻. 软土地基微型桩抗拔试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11): 1788—1793.

HUANG Guang-long, FANG Qian, SU Rong-zhen. Field test on uplift behavior of micropiles in soft ground[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(11): 1788—1793.

- [8] 龚健, 杨建明, 程光明. 微型桩基础的施工技[J]. 施工技术, 2004, 33(1): 29—30.

GONG Jian, YANG Jian-ming, CHENG Guang-ming. Construction technology of micropile[J]. **Construction Technology**, 2004, 33(1): 29—30.

- [9] 苏荣臻, 鲁先龙, 陈培. 微型桩灌注细石混凝土成桩法及其上拔试验[J]. 电力建设, 2010, 31(6): 47—49.

SU Rong-zhen, LU Xian-long, CHEN Pei. Construction and uplift test of micropile of fine-stone concrete[J].

- Electric Power Construction**, 2010, 31(6): 47—49.
- [10] 屈伟, 周峰, 王一超, 等. 不同施工工艺微型桩的承载性能试验[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2015, 37(3): 91—96.
- QU Wei, ZHOU Feng, WANG Yi-chao, et al. Experimental investigation on bearing capacity of micropiles with different construction technologies[J]. **Journal of Nanjing Tech University(Natural Science Edition)**, 2015, 37(3): 91—96.
- [11] 中国建筑科学研究院. JGJ 106—2014 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- China Academy of Building Research. JGJ 106-2014 Technical code for testing of building foundation piles[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [12] 中国建筑科学研究院. JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- China Academy of Building Research. JGJ 94-2008 Technical code for building pile foundations[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [13] LUTENEGGER A J, MILLER G A. Uplift capacity of small diameter drilled shafts from in situ tests[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 120(8): 1362—1380.
- [14] NUSIER O K, ALAWNEH A S. Micropile technique to control upward movement of lightweight structures over expansive soils[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2004, 22(1): 89—104.
- [15] HAN J, YE S L. A field study on the behavior of micropiles in clay under compression or tension[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2006, 43(1): 19—29.
- [16] HONG W P, CHIM N. Prediction of uplift capacity of a micropile embedded in soil[J]. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 2015, 19(1): 116—126.
- [17] KYUNG D, LEE J. Uplift load-carrying capacity of single and group micropiles installed with inclined conditions[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2017, 143(8): 1—8.
- [18] 周俊鹏, 黄雪峰, 刘自龙, 等. 黄土地基中微型抗压与抗拔桩对比试验研究[J]. 水利与建筑学报, 2017, 15(1): 121—125.
- ZHOU Jun-peng, HUANG Xue-feng, LIU Zi-long, et al. Experimental study of micro compression and uplift pile in loess foundation[J]. **Journal of Water Resources and Architectural Engineering**, 2017, 15(1): 121—125.

路基工程

著译者: 石春香 林英 主编 版次: 第一版 出版时间: 2017-01 开本: 小 16 开 装帧: 平膜

出版单位: 中国建筑工业出版社 标准书号: 978-7-112-20170-9

【内容简介】本教材共分 8 章, 其主要内容包括路基工程概论、路基的力学特性与承载力计算、一般路基设计、路基稳定性分析与防护加固技术、路基挡土墙设计与计算、路基排水设计、路基工程施工和路基工程检测。本书为高等学校中应用技术类大学交通土建工程领域中公路工程、城市道路工程、桥梁隧道工程、机场工程、市政工程等专业的教材, 也可供从事路基工程设计、施工及检测有关人员学习参考。

【读者对象】本书为高等学校中应用技术类大学交通土建工程领域中公路工程、城市道路工程、桥梁隧道工程、机场工程、市政工程等专业的教材, 也可供从事路基工程设计、施工及检测有关人员学习参考。

【目录】第 1 章 绪论 第 2 章 路基的强度特性及承载力计算 第 3 章 一般路基设计 第 4 章 路基边坡稳定性分析与加固技术 第 5 章 挡土墙设计 第 6 章 路基排水设计 第 7 章 路基工程施工 第 8 章 路基工程试验检测 文献

(信息来源: 中国建筑书店网站)