

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.015



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



黏性土中桩侧后注浆单桩抗压承载性能 室内模型试验研究

赵春风, 刘鹏伟, 赵程, 张家奇

(同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室; 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 后注浆技术的应用能有效减少桩周土体扰动和泥皮等造成的不利影响, 从而提高钻孔灌注桩的承载力。目前有关后注浆技术的研究多集中于桩端后注浆, 少有涉及桩侧后注浆, 影响了桩侧后注浆技术进一步推广应用。根据桩侧后注浆工艺, 开展单桩抗压室内试验, 以研究桩侧后注浆量对单桩抗压承载性能的影响。结果表明: 在荷载水平较大的工况下, 相较于桩侧后注浆量为 1 L 的单桩, 注浆量为 2, 3 L 时单桩极限抗压承载力分别提高 18.2% 和 66.0%, 提高幅度与注浆量呈正相关, 并且可以在很大程度上减小桩顶沉降量; 桩侧后注浆桩桩身轴力在侧注浆点位附近减小较快, 在整个加载过程中桩端附近处桩身轴力值均比较低, 单桩受压表现为摩擦桩; 水泥浆液同时存在上返和下劈扩散, 在室内试验条件下, 两者扩散高度均约为 14 倍桩径, 在浆液扩散段桩侧摩阻力得到显著提高, 且越靠近注浆点位提高程度越明显。

关键词: 钻孔灌注桩; 承载力; 后注浆; 注浆量; 浆液扩散高度

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)04-0023-06

Model test for single pile compressive bearing behavior with pile side post-grouting in clay

ZHAO Chunfeng, LIU Pengwei, ZHAO Cheng, ZHANG Jiaqi

(Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education; College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: The post-grouting technique can effectively improve the soil performance against disturbance and break the mud crust around the bored pile. Most of the researches on post-grouting focused on pile tip, while the pile side grouting is rarely involved, which affects its further application. To study the influence of pile side grouting volume on the compressive load behavior, an model test was carried out on the basis of the post-grouting technique of the field pile test. The test results show that, when the load is at a high level, the bearing capacity of the pile with 2 L and 3 L grouting volumes are 18.2% and 66.0% greater than that of the pile with volumes of 1 L, respectively. The increased rate is positively correlated with grouting volume, and the settlement of pile top can be greatly reduced. The axial force of the post-grouting pile decreases rapidly near the position of grouting, and the axial force near the tip of post-grouting pile is relatively low in the whole loading process. The post-grouting pile demonstrates the characteristics of the friction piles. The cement grout diffuses

收稿日期: 2021-11-09

基金项目: 国家自然科学基金(41672265)

作者简介: 赵春风(1964-), 男, 博士, 教授, 主要从事桩基工程研究, E-mail: tjzhchf@tongji.edu.cn。

Received: 2021-11-09

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 41672265)

Author brief: ZHAO Chunfeng (1964-), PhD, professor, main research interest: pile foundations, E-mail: tjzhchf@tongji.edu.cn.

upward and downward from the grouting position, and the diffusion heights are both about 14 times the pile diameter for this model test. The pile side resistance of the post-grouting pile increases significantly in the range of the grout diffusion stage, and the increasing trend is more obvious the closer to the grouting point.

Keywords: bored pile; bearing capacity; post-grouting; grouting volume; grouting diffusion height

钻孔灌注桩的施工过程会对桩周土体和持力层土体造成较大扰动,泥浆护壁产生的桩底沉渣和桩周泥皮难以清理干净,这些因素均影响了桩端阻力和桩侧摩阻力的发挥,削弱了桩基承载力^[1-5]。为解决此类问题,后注浆技术应运而生,并在桩基工程中广泛应用。

大量后注浆钻孔灌注桩工程开展的同时,学者们也做了大量的现场试验,得到许多宝贵的工程实测资料,为后注浆灌注桩的受力特性、后注浆加固效果的研究提供数据基础。黄生根等^[6]、张忠苗等^[7]、邹金锋等^[8]诸多学者通过现场试验发现桩侧后注浆可以固化桩侧泥皮,改善桩侧土体受力性能,提高桩侧摩阻力。虽然现场试验可信度高,但经济代价很大,现场情况下多种影响因素无法控制,对参数研究造成诸多不便,也不容易观察后注浆加固情况,而室内试验控制相关因素比较方便。高文生^[9]、刘影等^[10]、赵春风等^[11]、Zhao等^[12]进行了室内模型试验研究,但这些研究主要集中于桩端后注浆,桩侧后注浆模型试验研究很少涉及,且未系统研究注浆量对桩侧后注浆的影响,模型桩的制作方式多是现浇,在室内试验尺度下无法保证桩身质量。笔者采用预制模型桩的方式进行室内模型试验,研究注浆压力相同、注浆量不同的桩侧后注浆单桩抗压承载性能。

1 模型试验方案

基于工程实践,采用预制模型桩的形式,将桩侧注浆管设置在桩身内部,以模拟现场后注浆钻孔灌注桩,通过控制土性、埋深、注浆压力等多种变量,系统研究黏性土中注浆量对桩侧后注浆单桩抗压承载性能,如荷载-沉降关系、桩身轴力分布、桩侧摩阻力发挥等的影响。

1.1 模型槽与模型土

试验在同济大学岩土与地下工程教育部重点实验室大型多功能模型试验槽中完成^[12]。模型槽内部尺寸为 3.0 m×2.1 m×3.0 m,槽内模型桩布置横向间距为 440 mm,纵向间距为 370 mm,桩间距均大于桩径的 6 倍,可忽略群桩效应的影响。

试验研究黏性土中桩侧后注浆单桩承载性能,直接从上海某黏性土层中取土,人工剔除黏性土中碎石块等杂物,破碎较大土块,均匀填入模型槽中。重塑模型土较原状土更均匀,含水率有一定下降,

重塑模型土具体参数见表 1。

表 1 模型土相关物理参数
Table 1 Physical parameters of model soil

含水率/ %	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	重度/ (kN/m ³)	液限/ %	塑限/ %
23.4	16.2	16.7	18.7	36	21

1.2 模型桩设计

模型桩桩径为 46 mm,桩长为 1.9 m,设计埋深为 1.8 m。模型桩由矩形桩芯、注浆管和水泥砂浆组成,注浆管外径为 10 mm,内径为 8 mm,如图 1 所示。桩芯由两根 25 mm×15 mm 的角铝合并而成,在角铝内侧短边处沿桩身一定高度粘贴应变片。模型桩浇筑所用水泥砂浆配合比选为灰:水:砂=1:0.6:2.5。模具采用内径为 46 mm、外径为 50 mm 的 PVC 管。模型桩浇筑完成后养护 28 d 拆模,并用角磨机打磨桩身。为确定模型桩的弹性模量,试验采用简易测量方法,将模型桩视作简支梁,跨中集中荷载 P 逐级加载,用千分表测量跨中挠度 f ,则桩身等效弹性模量为

$$E_p = \frac{\Delta P l^3}{48 I_p \Delta f} \quad (1)$$

式中: l 为两简支点之间的距离; I_p 为模型桩的截面惯性矩。前期通过预埋外径为 50 mm 的 PVC 管成孔,成孔深度为 1.8 m。后期将预制模型桩表层均匀涂刷一层膨润土泥浆以模拟泥皮效应,抽出 PVC 管,将桩沿 PVC 管所成桩孔下放到 1.8 m 深度处,静置 45 d,桩周土体形成一定程度的卸荷效应以模拟工程中钻孔造成的土体扰动。

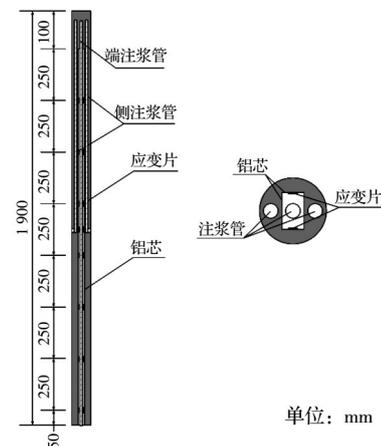


图 1 模型桩结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of model pile structure

1.3 注浆装置与注浆方案设计

室内模型试验采用自主研发的注浆装置进行桩侧和桩端后注浆,注浆装置详见文献[12]。综合考虑注浆管内径和水泥浆液的可注性,结合注浆试验的经验,水泥型号选为P·O42.5普通硅酸盐水泥,水灰比选为0.6。

根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[13]和《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)^[14]中单桩注浆量的经验公式计算得到的室内模型桩注浆量过大,明显不适于室内模型桩注浆设计,根据桩端后注浆试验成果,将总注浆量设置为1、2、3 L三个等级,并设置不注浆模型桩作为对照组。参考室内试验经验,将注浆压力定为0.6 MPa。具体注浆方案如表2所示。

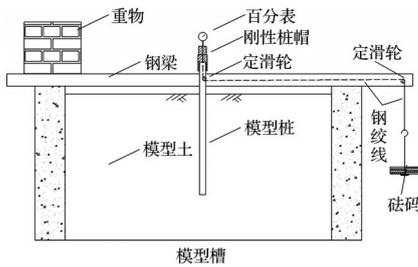
表 2 注浆方案

Table 2 Grouting scheme

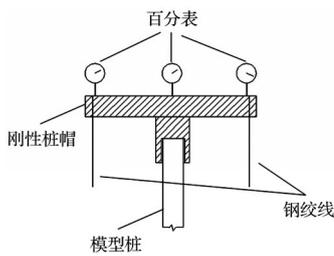
组别	桩编号	桩侧注浆量/L	注浆压力/MPa
不注浆	N00	0	0
桩侧注浆	S16	1	0.6
	S26	2	0.6
	S36	3	0.6

1.4 加载试验方案设计

在注浆工作完成 20 d 后进行加载试验。加载试验采用自制的加载装置,加载装置由 2 根钢梁、1 个刚性桩帽、2 条钢绞线 and 若干砝码组成,通过钢绞线、定滑轮和刚性桩帽将砝码重力加载至桩顶。桩顶沉降量由布置于刚性桩帽的 3 个百分表测得位移取均值后得到,桩身应变数据通过应变片采集。



(a) 加载装置简图



(b) 刚性桩帽简图

图 2 加载装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of loading device

加载装置示意图如图 2 所示。

根据《建筑桩基检测技术规范》(JGJ 106—2014)^[15],试验采用快速维持荷载法进行逐级加载,加载过程中桩顶沉降量读取亦参考规范。加载分级数原则上不少于 10 级。对未注浆桩逐级加载量为 100 N,注浆桩逐级加载量为 200 N,注浆桩加载后期,按加载位移变化适当提高逐级加载量为 400 N。加载过程中出现下列情况之一即可终止加载,试桩已到达极限状态,取前一级荷载作为试桩的极限承载力:

- 1) 在某一荷载下,桩顶实际沉降量超过上一级荷载沉降量的 5 倍;
- 2) 桩顶总沉降量大于 40 mm。

2 试验结果及分析

2.1 注浆量对单桩承载特性的影响分析

图 3 为不同注浆量下的单桩荷载-沉降关系曲线。4 根桩的竖向极限承载力分别为 0.8、4.4、5.2、7.3 kN。试验条件下,由于较低的土体应力水平和桩周土体程度未知的卸荷效应,未注浆桩承载力偏低,直接将桩侧后注浆单桩极限承载力与其比较没有参考价值,与工程实际亦相差较大,试验旨在研究注浆量对桩侧后注浆单桩竖向抗压承载力的影响,因此将极限承载力与注浆量为 1 L 的单桩作对比。相较于桩侧后注浆量为 1 L 的单桩,注浆量为 2、3 L 的单桩竖向极限承载力提高幅度分别为 18.2% 和 66.0%。从图 3 可以看出:对于未注浆桩,曲线几乎不存在直线段,桩顶沉降增量逐级加大直至破坏,表现为缓降型破坏;对于后注浆桩,沉降曲线初期呈线性且斜率绝对值均较小,后期经过 2~3 级荷载的非线性段后出现陡降,桩顶沉降迅速增大,表现为陡降型破坏,S26 和 S36 尤为明显,在破坏前一级荷载下两者的桩顶沉降量仅为 2.24、1.86 mm,没有明显增大的趋势;注浆量越大,同等荷载条件下桩顶沉降量越小,线性段斜率的绝对值越小且比例极限荷载(线性段范围)越大,比例极限荷载与极限荷载的比值越大,说明桩侧注浆能显著

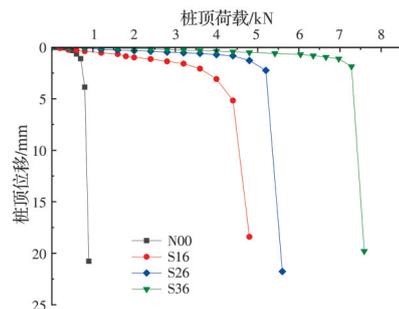


图 3 荷载-沉降关系曲线

Fig. 3 Load-settlement curve of pile top

提高单桩抗压刚度,单桩受压破坏形式由缓降型逐渐变为陡降型。桩顶荷载为 0.8 kN 时,桩顶沉降按注浆量 0~3 L 依次为 3.86、0.38、0.05、0.03 mm,桩侧后注浆可显著降低桩顶沉降量,降低程度与注浆量呈正相关。

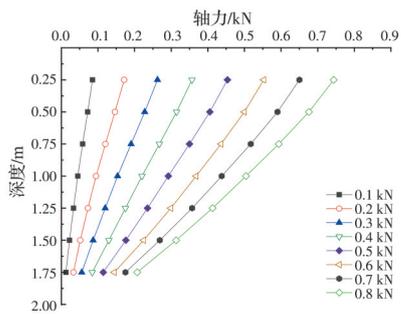
2.2 桩身轴力分析

单桩在各级桩顶荷载下的轴力分布可由粘贴于桩芯的 8 组应变片通过应变仪在加载时采集的应变数据换算得到,角铝桩芯外围浇筑水泥砂浆形成模型桩,假定二者变形一致,即桩身任一断面处水泥砂浆和桩芯具有相同的应变值,则桩身轴力如式(2)所示。

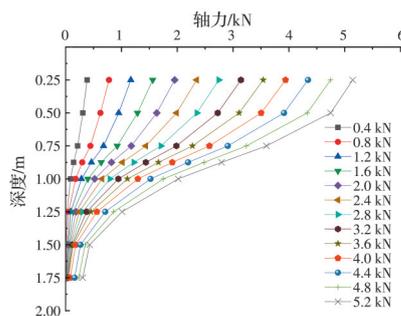
$$P_{ij} = E_p A_p \bar{\epsilon}_{ij} \quad (2)$$

式中: P_{ij} 为第 j 级荷载下为第 i 截面处桩身轴力, P_{0j} 为桩顶轴力, $P_{0j} = Q_j$, Q_j 为第 j 级桩顶荷载; E_p 为该桩弹性模量; A_p 为桩身截面积; $\bar{\epsilon}_{ij}$ 为应变仪在第 j 级荷载下测得的第 i 截面处两个应变片所测的应变均值。桩端阻力近似取作埋深 1.75 m 处截面的轴力近似值。

通过处理电脑端采集的各组应变片数据,得到各桩在各级桩顶荷载下的桩身轴力分布,以 N00 和 S26 为例,桩身轴力分布图如图 4 所示。对于未注浆桩,桩身轴力随深度的增大而减小,轴力分布近乎呈线性,随着桩顶荷载增大,轴力分布曲线的斜率减小,桩侧摩阻力得到发挥。近桩端处轴力可近似为桩端阻力,桩端阻力在各级荷载下的增量先增



(a) N00 桩身轴力



(b) S26 桩身轴力

图 4 桩身轴力分布图

Fig. 4 Axial force distribution diagram of pile body

大后减小。对于桩侧后注浆桩,桩身轴力随深度的增大而减小,桩身轴力曲线在某段深度范围内,轴力曲线斜率变小,在近桩端处斜率变大。当荷载较小时,桩端阻力几乎为 0;当荷载接近极限荷载时,桩端阻力值依旧很低,说明桩侧摩阻力几乎承担了所有的桩顶荷载,单桩抗压特性表现为摩擦桩。

图 5 为 4 根桩在 N00 桩极限荷载 0.8 kN 时的轴力分布情况,从图 5 中可以看出,在深 0.25~1.25 m 时,后注浆桩桩身轴力快速降低,桩端轴力亦明显小于未注浆桩。通过各桩轴力曲线与 X 轴、Y 轴所围合区域面积的比值可得到桩身压缩量的比值,计算得到桩身压缩量的比值为 N00:S16:S26:S36=1:0.69:0.67:0.60,由此可见,桩侧后注浆有助于减小桩身压缩量,且减小量随注浆量的增大而增大。

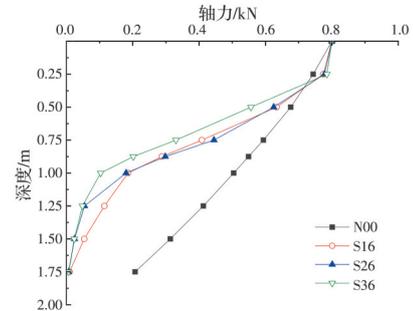


图 5 极限荷载为 0.8 kN 时各桩轴力分布

Fig. 5 Axial force distribution of each pile under 0.8 kN load

图 6 所示为桩端阻力发挥情况。对于未注浆桩,随着荷载的增大,桩端承担荷载比例迅速增大。对于桩侧后注浆桩,当荷载较小时,桩端承担荷载比例基本不变,S26 和 S36 尤为明显,说明桩端阻力和桩侧摩阻力随加载等比例增加。当荷载达到某值时,曲线出现拐点,桩端承担荷载比例增大,且注浆量越大,拐点对应的桩顶荷载越大。桩端承担荷载比例在 10% 以内,当桩顶荷载相同时,注浆量越大,桩端所承担荷载的比例越小,桩侧承担荷载比例越大。

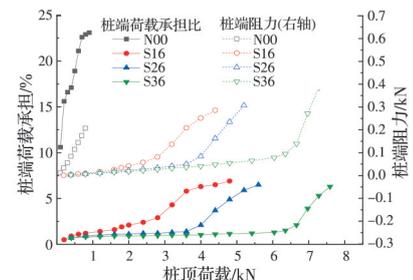


图 6 桩端阻力发挥比例图

Fig. 6 Pile tip resistance ratio

2.3 桩身侧摩阻力分布分析

通过桩身轴力和桩截面参数,假设相邻两截面间桩侧摩阻力平均分布,可得各桩侧摩阻力沿桩身

不同深度的分布。

以 S26 为例,侧摩阻力分布图如图 7 所示,单桩中部侧摩阻力较大,且越靠近侧注浆点位处,侧摩阻力越大,桩顶和桩端附近侧摩阻力较小,其原因是桩侧后注浆水泥浆液通过上返、下劈扩散,对扩散段的桩侧摩阻力起到增强作用。当桩顶荷载较小时,如荷载为 0.8 kN 时,侧摩阻力较大的区段是深 0.25~1.0 m 段,当荷载逐渐增大,如荷载为 4.8 kN 时,侧摩阻力较大的区段是深 0.25~1.5 m 段。由此可见,桩侧摩阻力发挥具有异步性,上部桩身侧摩阻力优先发挥,随着桩顶荷载增大,桩身压缩量增大,桩-土相对位移增大,下部桩身侧摩阻力开始发挥。

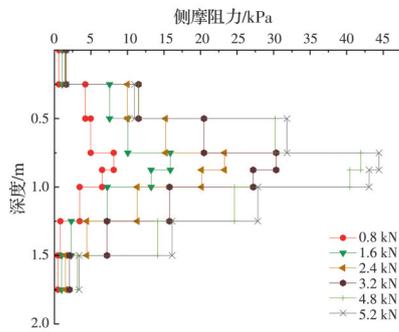


图 7 S26 桩侧摩阻力分布图

Fig. 7 Pile S26 lateral friction resistance distribution

图 8 为桩顶荷载为 0.8 kN 时各桩侧摩阻力分布图。由图 8 可见,注浆桩桩身上部(0.25~0.75 m 段)侧摩阻力明显大于未注浆桩,且注浆量越大,侧摩阻力越大;注浆桩桩身下部侧摩阻力基本小于未注浆桩,说明桩顶荷载主要由上部桩身侧摩阻力承担,下部桩身侧摩阻力还未得到发挥。

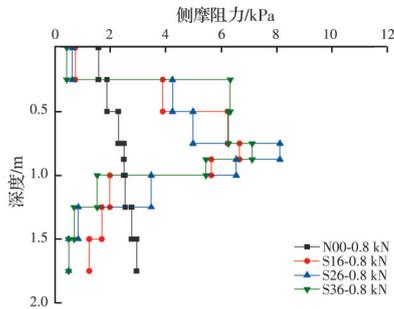


图 8 桩顶荷载 0.8 kN 时各桩侧摩阻力分布

Fig. 8 Lateral friction resistance distribution of each pile under 0.8 kN load

图 9 为各桩极限荷载下侧摩阻力分布图,在极限荷载下桩身各区域侧摩阻力发挥至最大值。将侧摩阻力明显大于未注浆桩的范围视作侧注浆浆液上返、下劈扩散段。从图 9 可以看出,3 根注浆桩浆液扩散段为 0.25~1.5 m 段,即浆液上返、下劈高度均为 0.625 m (约为 14 倍桩径),注浆量大小对其

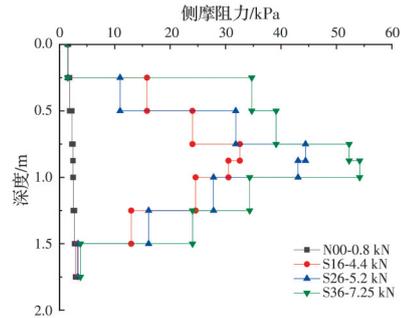


图 9 各桩极限荷载下侧摩阻力分布

Fig. 9 Lateral friction resistance distribution of each pile under ultimate load

影响不大,这可能与试验采用相同的注浆压力有关。计算浆液扩散段平均侧摩阻力,按注浆量 0~3 L 依次为 2.4、21.8、26.1、37.1 kPa,注浆量越大,平均侧摩阻力越大,加固效果越好,这可能是因为注浆量越大,浆液扩散段桩侧所形成的水泥-土结合物越坚固或者水泥浆液覆盖越充分。由于试验条件下土体应力水平较低,同时桩周土体产生较大的卸荷效应,因此未注浆条件下桩侧摩阻力偏低。

结合以上试验结果,分析黏性土中桩侧后注浆工艺对于钻孔灌注桩的加固机理。首先,水泥浆液在压力的作用下,挤密注浆点位附近桩周土体,形成浆泡;其次,水泥浆液在压力作用下上返扩散和下劈扩散,破坏附着于桩周的泥皮,挤密桩周土体,并与桩周土体结合形成水泥石结石体,改善桩周土性。桩侧破坏方式可分为 3 类:

1) 桩表面与水泥石结石体接触面破坏。与未注浆工况下桩表面与泥皮接触面破坏对应,注浆后形成的水泥石与桩表面黏聚力更强,接触面强度更高,单桩承载力提高。

2) 水泥石结石体内部破坏。与未注浆工况下泥皮内部破坏对应,注浆后形成的水泥石结石体强度明显比泥皮强度高,单桩承载力提高。

3) 水泥石结石体与桩周土体间破坏。与未注浆工况下泥皮与桩周土体间破坏对应,后注浆水泥浆液在压力作用下挤密桩周土体,改善桩周土卸荷效应,同时水泥石结石体与桩体粘结,相当于桩径增大,从而促使注浆后单桩承载力提高。

由此可见,在以上 3 类破坏方式下,桩侧后注浆工艺均可不同程度地提高钻孔灌注桩单桩抗压承载力。在实际工程中,由于土体埋深大,土体应力水平高,从而桩侧摩阻力在桩侧后注浆前就可达到较高水平,因此,工程中桩侧后注浆对钻孔灌注桩承载力的提高幅度要小于试验所得到的提高幅度。

3 结论

采用自主研发的注浆装置在注浆压力为 0.6 MPa

工况下对预制模型桩进行了注浆量不同的桩侧后注浆试验,并进行了加载试验以研究超长长径比单桩在黏性土地基中的抗压承载性能,得到以下主要结论:

1)在试验条件下,相比于注浆量为1L的单桩,注浆量为2、3L的单桩极限抗压承载力提高18.2%和66.0%,提高幅度与注浆量正相关,并且可以在很大程度上减小桩端沉降量。

2)桩侧后注浆桩桩身轴力在侧注浆点附近减小较快,在整个加载过程中,桩端附近处桩身轴力值均比较低,单桩受压表现为摩擦桩。同时侧注浆有助于降低桩身平均应力水平,从而减小桩身压缩量。

3)桩侧后注浆单桩侧摩阻力分布具有注浆点附近侧摩阻力大、桩端和桩顶侧摩阻力小的特点,且侧摩阻力发挥具有明显的异步性。桩侧后注浆工况下,水泥浆液同时存在上返和下劈扩散;当注浆压力为0.6 MPa时,上返高度和下劈高度均约为14倍桩径,注浆量的变化对其影响不大。

4)在试验条件下,桩侧后注浆可使浆液扩散段平均侧摩阻力显著提高,最大可提高13.24倍,且注浆量越大,加固效果越好。

参考文献

- [1] REIS M J, COLLARES E G, REIS F M D. Technological assessment of tailings from quartzite mining sites in Alpinópolis (Minas Gerais-Brazil) as aggregates in concrete block paving (CBP) [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2018, 77(4): 1623-1637.
- [2] HARTWIG M E. Detection of mine slope motions in Brazil as revealed by satellite radar interferograms [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2016, 75(2): 605-621.
- [3] JONNET J, RÉMY B, UFFELEN P V. Stress function determination for dislocation configurations obtained from Kröner's theory [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2006, 45(3): 238-251.
- [4] LI J, ZHANG P, LU L, et al. Effect of pre-strain on fatigue crack growth behavior for commercial pure titanium at ambient temperature [J]. International Journal of Fatigue, 2018, 117: 27-38.
- [5] YU F, JAR P Y B, HENDRY M T. Indentation for fracture toughness estimation of high-strength rail steels based on a stress triaxiality-dependent ductile damage model [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2018, 94: 10-25.
- [6] 黄生根, 张晓炜, 曹辉. 后压浆钻孔灌注桩的荷载传递机理研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 251-254.
HUANG S G, ZHANG X W, CAO H. Mechanism study on bored cast-in-place piles with post-grouting technology [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(2): 251-254. (in Chinese)
- [7] 张忠苗, 张乾青. 后注浆抗压桩受力性状的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 475-482.
ZHANG Z M, ZHANG Q Q. Experimental study on mechanical properties of post-grouting compressive pile [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 475-482. (in Chinese)
- [8] 邹金锋, 安爱军, 邓宗伟, 等. 深厚软土地区长钻孔灌注桩后注浆试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(3): 823-828.
ZOU J F, AN A J, DENG Z W, et al. Post-grouting in situ of length bored pile in deep soft regions [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(3): 823-828. (in Chinese)
- [9] 高文生. 后压浆灌注桩单桩模型试验的研究[J]. 建筑科学, 1998, 14(5): 23-26, 36.
GAO W S. Study on model testing of single post grouting slurry drilled pile [J]. Building Science, 1998, 14(5): 23-26, 36. (in Chinese)
- [10] 刘影, 姚勇. 灌注桩桩端后压浆效果的室内模型试验[J]. 西南科技大学学报, 2011, 26(3): 22-26.
LIU Y, YAO Y. Analysis on effect of pressurer grouting at the end of bored piles by model test [J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2011, 26(3): 22-26. (in Chinese)
- [11] 赵春风, 吴悦, 赵程, 等. 黏土中桩端后注浆单桩抗压承载特性室内模型试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(12): 1235-1244.
ZHAO C F, WU Y, ZHAO C, et al. Indoor model tests on the compressive bearing behavior of a single pile in clay with pile end post-grouting [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2019, 52(12): 1235-1244. (in Chinese)
- [12] ZHAO C F, WU Y, ZHAO C, et al. Load-displacement relationship of single piles in clay considering different tip grouting volumes and grouting returned heights [J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(2): 04019158.
- [13] 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
Technical code for building pile foundations: JGJ 94—2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)
- [14] 公路桥涵地基与基础设计规范: JTG 3363—2019 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
Specifications for design of foundation of highway bridges and culverts: JTG 3363—2019 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020. (in Chinese)
- [15] 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)