

桩端不同后注浆方式模型桩力学特性室内试验研究

牛浩宇, 李永升, 王旭, 周亚龙, 刘晓颐, 梁诏

Laboratory model test of post grouting piles with different grouting methods at pile ends

NIU Haoyu, LI Yongsheng, WANG Xu, ZHOU Yalong, LIU Xiaoyi, LIANG Zhao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20220310003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

对称布置翼板加翼桩的水平承载性能分析

Analysis of lateral bearing capacity of wing-monopile with symmetrical wing plates

水利水电工程学报. 2020(5): 109 <https://doi.org/10.12170/20191222001>

吸力式沉箱组合基础承载特性研究

Study of bearing characteristics of combined suction caisson foundation

水利水电工程学报. 2018(1): 73 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.01.011>

黄土地基地下连续墙基础竖向抗压特性试验研究

Experimental study on vertical compressive bearing capacity of underground diaphragm wall foundation in loess area

水利水电工程学报. 2018(5): 89 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.05.013>

考虑土体强度空间变异性的单桩水平承载力研究

Study on the horizontal bearing capacity of single pile foundation considering spatial variability of soil strength

水利水电工程学报. 2020(6): 108 <https://doi.org/10.12170/20200424001>

加翼桩水平承载力计算方法研究

Analysis of calculating method for horizontal bearing capacity of wing-monopile

水利水电工程学报. 2018(4): 1 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.04.001>

土钉支护边坡影响因素试验分析

Influence factors analysis of soil nailing support slope

水利水电工程学报. 2018(4): 54 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.04.008>



扫码进入官网, 阅读更多精彩内容



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20220310003

牛浩宇, 李永升, 王旭, 等. 桩端不同后注浆方式模型桩力学特性室内试验研究 [J]. 水利水运工程学报. (NIU Haoyu, LI Yongsheng, WANG Xu, et al. Laboratory model test of post grouting piles with different grouting methods at pile ends[J]. Hydro-Science and Engineering(in Chinese))

桩端不同后注浆方式模型桩力学特性室内试验研究

牛浩宇¹, 李永升^{1,3,3}, 王旭^{1,3}, 周亚龙¹, 刘晓颐¹, 梁 谔¹

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 太原西北二环高速公路发展有限公司, 山西 太原 030000; 3. 兰州交通大学 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为揭示桩端不同后注浆方式对灌注桩承载特性的影响, 基于自行设计的压力注浆系统对 3 根位于均质黄土层的模型桩(S_1 、 S_2 、 S_3)分别进行桩端开式、闭式及复合式注浆试验, 并设置不注浆桩作对照, 注浆结束 10 d 后开展竖向抗压荷载试验。 S_1 、 S_2 、 S_3 桩的总注浆量均为 3 L, 注浆压力均为 0.3 MPa, 注浆持续时间分别为 25、24、32 s。试验结果表明: 注浆后 S_3 的承载力最大, 3 根桩的极限承载力分别提高 144%、33%、411%; 3 根注浆桩距桩端约 8 倍桩径范围附近的侧阻均有增强, 极限荷载下的增强比例分别为 170.7%、39.5%、233.2%; 静载试验完成后, 挖出模型桩, 观察浆液在桩侧和桩端的分布情况, 发现 S_1 、 S_2 桩浆液沿桩侧上返, 而 S_3 桩除了有部分浆液沿桩侧上返, 还有一部分浆液在桩底形成水泥扩大头。桩端复合式注浆相比其他两种方式注浆效果更显著, 更有利于提高桩的承载力。

关键词: 灌注桩; 桩端后注浆; 注浆方式; 承载特性

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号:

后注浆技术因能消除桩底沉渣, 改善桩的边界条件, 大幅度提高桩的承载能力, 降低桩基沉降变形, 在实际工程中被广泛使用^[1-5]。国内外学者在注浆加固机理、注浆工艺等方面取得了大量研究成果。刘金砺等^[6-7]对后注浆桩基增强效应机理进行了系统阐述; Sze 等^[8]设计了一种压浆管布置在钢筋笼外的压浆装置, 并成功应用于香港某工程中; 龚维明等^[9-10]基于现场试验, 对超长和大直径后压浆灌注桩进行实测分析, 研究了后注浆对灌注桩侧阻与端阻的发挥及沉降变形的影响; 房凯等^[11]建立浆液上返模型, 理论推导了压力作用下浆液上返高度的计算公式。在后压浆模型试验研究方面, 邹建等^[12]开展注浆模拟试验, 研究了黏土中注浆变化规律和压滤效应; Thiyyakkandi 等^[13]开展了黏性土中多桩的后压浆试验, 试验结束后挖出模型桩, 观察浆液在桩周的分布情况; 万志辉等^[14]研究了钙质砂中后压浆桩和未压浆桩的水平承载特性。

现有的桩端注浆方式以开式注浆为主, 桩端开式注浆是指浆液在压力作用下沿桩身布置的注浆管直接注入桩端土层, 但高压作用下的浆液在土层里的流动可控性低, 导致单桩承载力波动大。桩端闭式注浆是指在钢筋笼底部安装钢板胶囊, 桩基成桩后沿注浆管向底部钢板胶囊内注浆, 形成桩底扩大头。然而由于桩底部胶囊的存在, 浆液进入胶囊后主要以压密注浆挤密桩端土体, 浆液无法进入土层形成结合体, 在某些地层中对桩基承载力的提高程度有限。桩端复合式后注浆技术结合了桩端开式、闭式注浆的优点, 在桩底焊接环形钢板胶囊, 通过不同的注浆工艺将浆液的劈裂、渗透和压密 3 种作用集中在桩端共同发挥, 实现“定域、定量、定压力”的注浆^[15-16]。

以上研究未对开式、闭式及复合式注浆对桩基承载性能影响进行量化对比。为此, 本文开展桩端不同注浆方式下模型桩力学特性室内试验研究。在模型箱内通过自行设计的压力注浆系统对模型桩分别进行

收稿日期: 2022-03-10

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51208294); 山西省交通运输厅交通建设科技项目(2021-2-01)

作者简介: 牛浩宇(1997—), 男, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 主要从事桩基工程研究。 E-mail: 470348146@qq.com

桩端开式、闭式及复合式注浆试验和静载试验,并设置不注浆桩作对照,对比分析模型桩各级竖向荷载下的单桩的荷载-沉降曲线、荷载传递规律及桩侧、桩端阻力发挥特性,探究桩端不同压浆方式对铝管桩竖向承载性状的影响,完成竖向受荷试验后,将模型桩从模型箱内挖出,观察浆液结石体的空间分布状态,分析浆液在黄土中的运移规律。

1 模型试验方案

试验采用边长 1.2 m 的正方体模型箱。模型箱内正方形布置 4 根模型桩,4 根桩距箱壁的距离为 30 cm,每根桩间的距离为 60 cm(图 1)。由文献 [17] 可知,模型桩距箱壁的距离和模型桩之间的距离足以消除边界效应影响。

模型桩使用桩长 800 mm、外径 40 mm、内径 36 mm 的铝合金管。从距桩顶 10 cm 处开始沿桩身每隔 10 cm 对称布置 2 个电阻应变片,1 根试桩共布设 16 个电阻应变片。在铝管桩底部用厚度为 2 mm 的铝片封住桩底。万能材料试验机测得 4 根铝管的弹性模量均值为 $E=40.5$ GPa。

模型试验用土取自兰州地区^[18]。实验室内测得黄土的基本物理力学参数为:最大干密度 1.78 g/cm³,最有含水率 14.64%,黏聚力 30.80 kPa,内摩擦角 30.20° ,液塑限分别为 29.97% 和 18.57%。使用预埋法在模型箱中成桩,将黄土分层填入模型箱中,每层 10 cm 并进行充分压实,当填土高度达到 30 cm 时,将模型桩固定在预定位置,并继续填土压实,直至填土高度达到 100 cm。在实验室内进行加水拌土、分层夯实、填筑完成后的模型箱如图 2 所示。

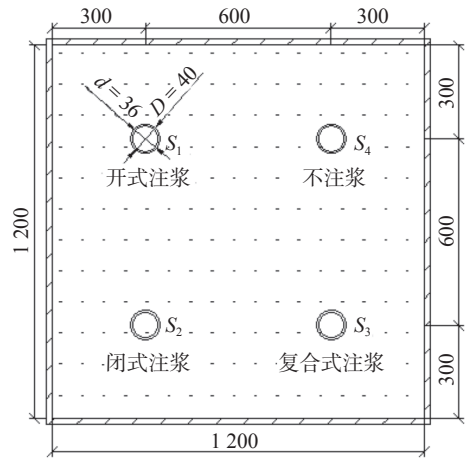


图 1 模型桩布置平面图(单位: mm)

Fig. 1 Model pile layout plan (unit: mm)

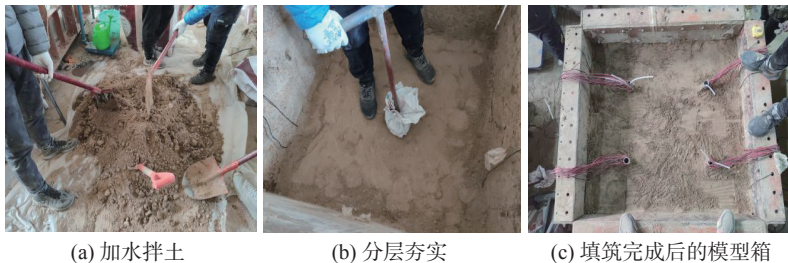


图 2 模型试验用土

Fig. 2 Model test soil

为模拟桩端不同方式的注浆,自行制作了桩端开式、闭式、复合式注浆装置(图 3)。开式注浆装置共设 2 根注浆管,注浆管从距桩底 10 cm 的圆形孔洞穿出,用胶带将其固定在模型桩底部两侧,开式注浆时,水泥浆液在压力作用下沿注浆管直接注入桩端土层;闭式注浆装置设 1 根注浆管,伸入桩底胶囊内,闭式注浆时,浆液在压力作用下沿闭式注浆管直接注入胶囊内形成扩大头;复合式注浆装置是开式注浆和闭式注浆装置的结合,桩底既设有开式注浆管,也设有桩端闭式胶囊,复合式注浆时先进行开式注浆,再进行闭式注浆。正式压浆试验前堵住开式注浆管管口,防止埋桩过程中黄土堵塞注浆管。闭式注浆前使用真空泵把桩底胶囊内的空气沿注浆管排出。

选用一种特制的压浆材料进行注浆试验, 压浆料由水泥、减水剂、矿物改性材料及高分子聚合物等配制而成, 浆液水灰比为 0.8。通过多次预试验发现, 若设计注浆压力、注浆量过大, 则注浆过程中引起的桩顶位移过大, 导致桩土之间相互作用关系破坏。综合预试验的结果, 确定此次模型试验中每根桩的注浆量为 3 L(复合式注浆预估开式注浆量 2 L, 闭式注浆量 1 L), 注浆压力为 0.3 MPa。

压力注浆系统的主要装置有: 空气压缩机、不锈钢压力罐、注浆管、真空泵、调压阀和排气阀, 各装置间的连接如图 4 所示。此系统的优势在于可以通过空气调压阀维持注浆压力, 达到稳压注浆。

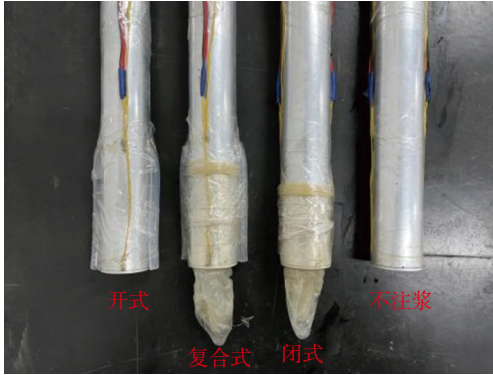
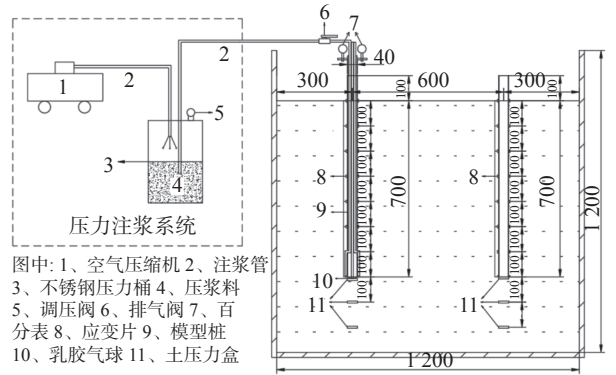


图 3 不同注浆方式下的注浆装置

Fig. 3 Grouting device under different grouting method



图中: 1、空气压缩机 2、注浆管
3、不锈钢压力桶 4、压浆料
5、调压阀 6、排气阀 7、百分表
8、应变片 9、模型桩
10、乳胶气球 11、土压力盒

图 4 压力注浆系统示意

Fig. 4 Pressure grouting system diagram

采用上述注浆系统对 3 根模型桩进行后注浆试验, 压浆过程中的参数如表 1 所示。

正式压浆试验结束 10 d 后对模型桩开展竖向抗压静载试验。加载采用慢速维持荷载法。通过预试验预估 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 极限承载力分别为 1.0、1.0、2.0 和 0.5 kN, 分级加载值分别为 0.1、0.1、0.2、0.05 kN。

表 1 压浆过程中压浆参数
Tab. 1 Grouting parameters in the grouting process

注浆阶段		注浆时长/s	注浆压力/MPa	注浆量/L	桩顶位移/mm	回弹量/mm
开式注浆	第1根管	12	0.3	3	0	0
	第2根管	13	0.3			
闭式注浆		24	0.3	3	0.29	0.29
复合式注浆	开式注浆	第1根管	15	0.3	0	0
		第2根管	7	0.3		
	闭式注浆	10	0.3	1	0.17	0.10

2 试验结果与分析

2.1 荷载-沉降关系

Q - s (荷载-沉降)曲线是直接反映桩基承载特性的重要依据, 可根据桩顶荷载 Q 和桩顶竖向位移 s 的关系确定模型桩的竖向抗压极限承载力, 4 根模型桩加载结果见图 5。

由图 5 可知: 3 根压浆模型桩的 Q - s 曲线在施加最后 1 级荷载前均呈缓变状态, 施加最后一级荷载时曲线产生陡降, 单级荷载下的沉降量是上一级荷载沉降量的 5 倍以上, 模型桩发生破坏, 可以判断 S_1 、 S_2 、 S_3 桩极限承载力分别为 1.1、0.6、2.2 kN。而未压浆桩的 Q - s 曲线在前 4 级荷载作用下较平缓, 第 5 级荷载作用下沉降较上一级发展较快, 当荷载增加至 500 N 时, 沉降迅速发展, 作用在桩顶的荷载不断下降, 反复进行补载后沉降仍继续发展, 可判断 S_4 桩在桩顶荷载为 0.5 kN 发生刺入破坏, 其极限承载力为 0.45 kN。

注浆模型桩的极限承载力比不注浆的模型桩的极限承载力均得到了提升,提高比例分别为 144%、33.3% 和 388.9%。3 根后注浆模型桩破坏时桩顶位移明显小于不注浆模型桩, S_1 、 S_2 、 S_3 桩顶位移分别是 S_4 的 45.4%、26.7%、56.8%。由此可见,后压浆不仅可显著改善桩端的承载特性,还可控制桩基础的沉降,桩端复合式注浆比其他两种注浆方式效果更显著。

综上所述,开式、闭式、复合式注浆均能不同程度地提高桩基承载力。提高机理主要有:(1)开式注浆浆液可与桩底周围地层进行压密固结和胶结钙化,使桩底地层强度显著提高;浆液可能沿桩侧上返,改善桩土接触面的力学性能。(2)闭式注浆主要通过桩底形成扩大头、增加桩端面积的方式来提高承载力。(3)复合式注浆结合了开式与闭式注浆的优点,对桩底周围地层进行了压密固结和胶结钙化,使桩底地层强度显著提高;形成桩端扩大头,增加了桩端面积;浆液可能沿桩侧上返,改善桩土接触面的力学性能;桩底周围地层被挤密、压密,使桩端附近土体的水平应力增加,从而增加桩端附近的侧阻。

2.2 桩身轴力

根据各级荷载加载后桩身应变值,计算并绘制出各模型桩各级荷载下的桩身轴力分布(图6)。

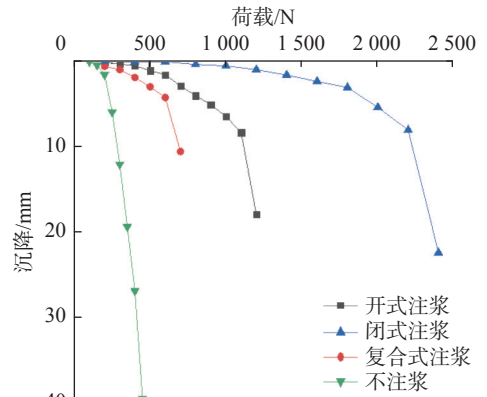


图 5 4 根试桩荷载与沉降关系曲线

Fig. 5 Relationship curve between load and settlement of four model piles

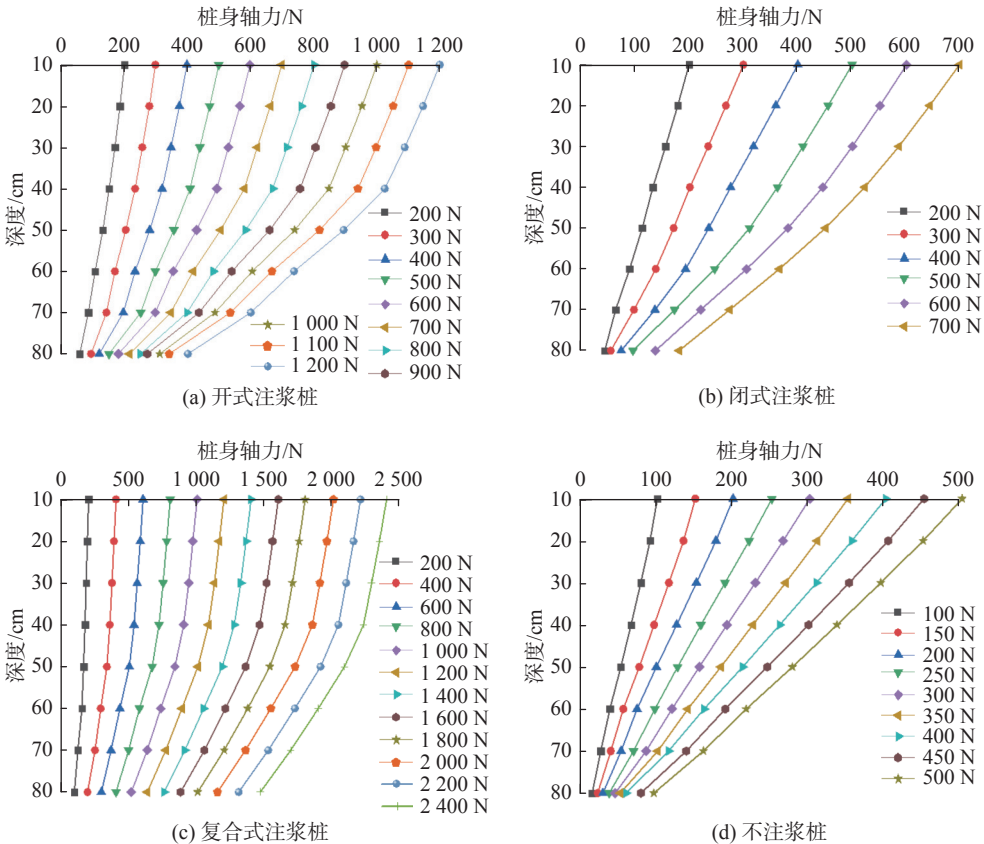


图 6 各级荷载下桩身轴力分布

Fig. 6 Axial force distribution of piles under various loads

分析轴力图可知: 桩身轴力随着桩身深度的增加而逐渐减小。轴力曲线的斜率可反映桩侧摩阻力的变化规律, 轴力曲线的斜率越大, 两截面间的轴力差越小, 侧摩阻力越小。3 根注浆桩轴力曲线在距桩端约 8 倍桩径范围处斜率发生明显变化, 上半部分曲线斜率较下半部分大, 可知下半部分桩身比上半部分桩身承受的轴力多, 这也从侧面反映了桩身距桩端约 8 倍桩径范围内的侧阻得到了增强。未注浆的模型桩某级荷载下的桩身轴力曲线呈斜直线, 未出现明显拐点, 这说明侧阻沿桩身分布较均匀。极限荷载下各桩传递到桩底的荷载不同, S_3 桩最大, S_4 桩最小。

2.3 桩侧摩阻力

计算各级荷载下各截面的分段平均侧摩阻力, 绘制 4 根模型桩桩身平均侧摩阻力沿桩身分布如图 7 所示。

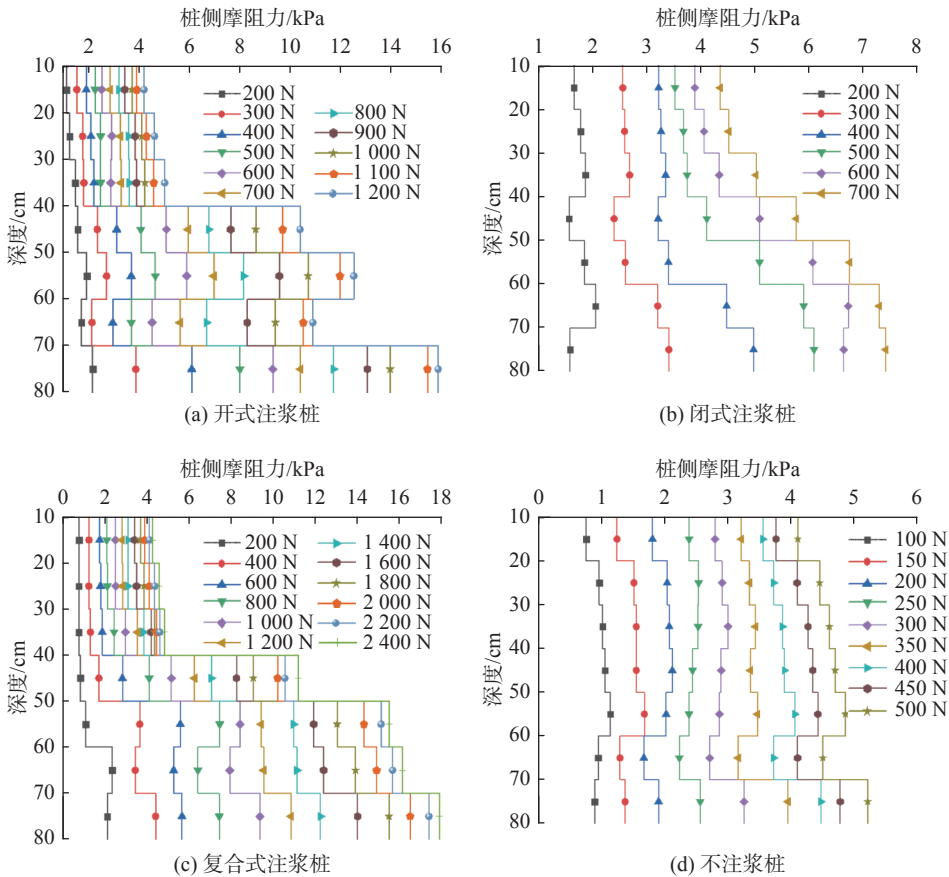


图 7 各级荷载下桩身侧摩阻力分布

Fig. 7 Pile side friction distribution under various loads

由图 7 可知: 各级荷载作用下, 不同桩身截面处侧摩阻力的发挥程度不同。当桩顶作用荷载较小时, 上半部分桩身侧摩阻力先于下半部分桩身发挥, 中下部分桩身侧摩阻力较小, 随着桩顶荷载逐渐增加至极限荷载, 上半部分桩身侧摩阻力增速放缓, 并趋于稳定, 中下部分桩身侧摩阻力继续增加, 且增速较快。3 根注浆试桩侧摩阻力在距桩端 8 倍桩径范围附近有不同程度的增强, 这是因为沿桩身上返的水泥浆液通过劈裂作用改变了模型桩与桩周土间的力学特性, 增大了桩周土体的有效应力, 从而增强了侧阻。3 根注浆桩侧摩阻力最大值点均发生在桩端断面以上 2.5 倍桩径范围内。由于桩端注浆方式的不同, 对桩侧摩阻力增强的程度也不同, 复合式注浆增强效果最强, 封闭式注浆增强效果最弱。

4 根模型桩在达到极限荷载时的桩侧摩阻力分布如图 8 所示。由图 8 可知, 极限荷载作用下 4 根桩上

半部分侧摩阻力发挥基本一致,从距桩端约 8 倍桩径范围内侧摩阻力发挥出现较大差异性。极限荷载作用下 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 桩桩身距桩端约 8 倍桩径范围内平均侧摩阻力分别为 11.91、6.14、14.66、4.40 kPa, 3 根注浆桩较不注浆桩提升的比例为 170.7%、39.5%、233.2%。

2.4 桩端阻力发挥特性

模型桩最下端应变片布置在桩底位置,认为该位置轴力等于桩端阻力,各级荷载作用下各模型桩桩端阻力见图 9。

由图 9 可知,4 根桩的桩端阻力均随着荷载的增加而增加,但桩端阻力发挥程度不同。模型桩在极限荷载作用下产生刺入破坏,但 4 根模型桩的桩端阻力仍呈增长趋势,桩端阻力未产生软化现象。 S_3 桩的桩端阻力显著大于其他 3 根试桩,这是由于其桩底的胶囊在闭式注浆过程中膨胀形成椭球型的桩底扩大头,对桩端土层进行了压密,且扩大头的水泥浆凝结后其强度远大于桩端土层。虽闭式注浆装置也有胶囊,但在注浆过程中破裂,没有形成预期的桩底扩大头。极限荷载作用下的 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 桩桩端阻力分别为 343.7、138.7、1 309.1、79.5 N,分别占总荷载的 31.2%、23.1%、59.5%、17.7%, S_1 、 S_2 、 S_4 桩表现出端承摩擦桩的特性, S_3 桩表现出摩擦端承桩的特性。

3 模型桩周浆液分布

完成静载试验后将模型桩从模型箱内挖出,观察不同注浆方式下浆液结石体的空间分布状态见图 10。可见,开式压浆方式下,大部分浆液进入土中后沿桩身上返,沿桩身上返的高度为 34 cm,沿 2 根注浆管方向形成了两片不对称的浆脉片,如图 10(a)所示。右边浆脉片形状较为规则似直角梯形,浆脉片最大宽度为 20 cm,浆脉片厚不均匀,浆脉片最大厚度为 3 cm,最小厚度为 2 cm;左边浆脉片呈三角型,靠近桩底土部分的浆脉最宽,最大宽度为 33 cm,浆脉片远薄近厚。

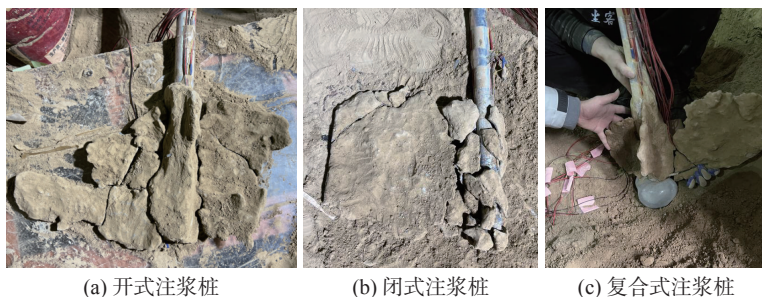


图 10 桩端的浆液分布

Fig. 10 Grout distribution at pile end

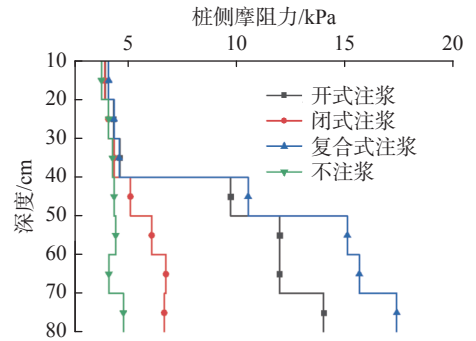


图 8 极限荷载作用下各桩桩侧摩阻力分布

Fig. 8 Pile side friction distribution under ultimate loads

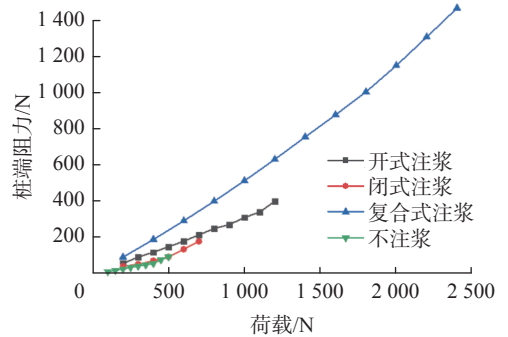


图 9 各级荷载作用下桩端阻力

Fig. 9 Pile tip resistance exertion under various loads

闭式注浆方式下,由于桩底胶囊在注浆过程中破裂,闭式注浆转化为开式注浆,但由于只有1根注浆管,浆液只沿1个截面上返形成浆脉片,如图10(b)所示。浆脉片近似呈正方形,最大宽度和浆液上返最大高度均为32 cm。

复合式注浆方式下,沿桩身共形成3片形状大小不一的浆脉片,桩底的注浆气球内注入浆液形成桩端扩大头,如图10(c)所示。浆液最大上返高度为36 cm,左边和右边两片浆脉片沿注浆管方向形成一个平面,第3片浆脉片垂直于这个平面,右边浆脉片为较规则长方体,长方体的长30 cm,宽25 cm,厚3 cm;中间部分的浆脉片最小,最大宽度为7 cm,高度为20 cm;左边浆脉片最大宽度为10 cm,高度为19 cm,桩底形成的水泥浆扩大头呈椭球体。

4 结 语

模型试验设置桩端不同后注浆方式为单一试验变量,在模型箱内通过自行设计的压力注浆系统对4根模型桩分别进行桩端开式、闭式、复合式和不注浆试验,压浆结束后10天后对每根模型桩进行竖向静载试验,结果表明:开式、闭式、复合式注浆模型桩的极限承载力比不注浆模型桩的极限承载力提高了144%、33.3%、388.9%;极限荷载作用下,注浆桩较不注浆桩侧阻均有增强,复合式注浆增强效果最强,闭式注浆增强效果最弱, S_1 、 S_2 、 S_4 桩表现出端承摩擦桩的特性, S_3 桩表现出摩擦端承桩的特性。这说明桩底复合式注浆技术能有效提高桩基承载力,可为灌注桩后注浆技术的创新与发展提供参考。

参 考 文 献:

- [1] FLEMING W K. The improvement of pile performance by base grouting[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering*, 1993, 97(2): 88-93.
- [2] FAROUZ E, MUCHARD M, KE Y. Evaluation of axial capacity of post grouted drilled shafts[C]//Geoshanghai International Conference. 2010.
- [3] 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 Zhongmiao,ZHANG Qianqing. 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))
- [4] 张忠苗,吴世明,包凤.钻孔灌注桩桩底后注浆机理与应用研究[J].*岩土工程学报*,1999,21(6):681-686.(ZHANG Zhongmiao,WU Shiming,BAO Feng. Study of mechanism and application on bored pile end grouting[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(6): 681-686. (in Chinese))
- [5] 黄生根,龚维明.超长直径桩压浆后的承载性能研究[J].*岩土工程学报*,2006,28(1):113-117.(HUANG Shenggen,GONG Weiming. Study on bearing behavior of super long-large diameter piles after grouting[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(1): 113-117. (in Chinese))
- [6] 刘金砺,祝经成.泥浆护壁灌注桩后注浆技术及其应用[J].*建筑科学*,1996(2):13-18.(LIU Jinli,ZHU Jingcheng. Technology and application of post-grouting for slurry drilling piles[J]. *Building Science*, 1996(2): 13-18. (in Chinese))
- [7] 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 Guoliang,WAN Zhihui. Enhanced mechanism and load-settlement relationship of post-grouting piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(12): 2235-2244. (in Chinese))
- [8] SZE J W C, CHAN K M. Application of shaft grouting technique in deep foundations - Hong Kong experience[C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Grouting and Deep Mixing. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2012: 1085-1094.
- [9] 龚维明,戴国亮,张浩文.桩端后压浆技术在特大桥梁桩基中的试验与研究[J].*东南大学学报(自然科学版)*,2007,37(6):1066-1070.(GONG Weiming,DAI Guoliang,ZHANG Haowen. Test and research on pile-end post-grouting piles technology

- for super-large bridge pile foundations[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2007, 37(6): 1066-1070. (in Chinese))
- [10] 李永辉, 朱翔, 周同和. 桩端后注浆对大直径灌注桩影响的现场对比试验研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(Suppl 2): 388-396. (LI Yonghui, ZHU Xiang, ZHOU Tonghe. Experimental study of effects of pile tip post grouting on bearing characteristics of large-diameter bored pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(Suppl 2): 388-396. (in Chinese))
- [11] 房凯. 桩端后注浆过程中浆土相互作用及其对桩基性状影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. (FANG Kai. Grout-soil interaction during base grouting and its effects on the behavior of grouted piles[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese))
- [12] 邹健. 桩端后注浆浆液扩散机理及残余应力研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010. (ZOU Jian. Study on grout diffusion theory and residual stress on base grouted drilled shaft[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese))
- [13] THIYYAKKANDI S. Study of grouted deep foundations in cohesionless soils[D]. Gainesville: University of Florida, 2013.
- [14] 万志辉, 戴国亮, 龚维明, 等. 钙质砂后压浆桩水平承载性状模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(2): 411-418,429. (WAN Zhihui, DAI Guoliang, GONG Weiming, et al. Experimental study on lateral bearing behavior of post-grouted piles in calcareous sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(2): 411-418,429. (in Chinese))
- [15] 周亚龙, 王旭, 张延杰, 等. 灌注桩基础桩底复合式后注浆及承载特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(10): 0214.1743.006-1872. (ZHOU Yalong, WANG Xu, ZHANG Yanjie, et al. Composite post grouting at pile tip and bearing characteristics of cast-in-place pile foundation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(10): 0214.1743.006-1872. (in Chinese))
- [16] 张晓华, 王旭, 周亚龙, 等. 桩底复合式后注浆灌注桩的竖向承载特性研究[J/OL]. (2021-12-30)[2022-03-09] <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1442.TU.20211230.1024.006.html>. (ZHANG Xiaohua, WANG Xu, ZHOU Yalong, et al. Study on vertical bearing characteristics of composite post grouting cast-in-place pile at pile bottom[J/OL]. (2021-12-30)[2022-03-09] <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1442.TU.20211230.1024.006.html>. (in Chinese))
- [17] 孔纲强, 杨庆, 郑鹏一, 等. 考虑时间效应的群桩负摩阻力模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(12): 1913-1919. (KONG Gangqiang, YANG Qing, ZHENG Pengyi, et al. Model tests on negative skin friction for pile groups considering time effect[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(12): 1913-1919. (in Chinese))
- [18] 陶虎, 邵生俊, 王强, 等. 甘肃兰州大青山 Q_2 黄土构度指标及结构性参数变化规律分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2015, 26(4): 130-137. (TAO Hu, SHAO Shengjun, WANG Qiang, et al. Relation of structural index to changes of structural parameters for Q_2 -loess from Daqing Mountain[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2015, 26(4): 130-137. (in Chinese))

Laboratory model test of post grouting piles with different grouting methods at pile ends

NIU Haoyu¹, LI Yongsheng^{1,3,3}, WANG Xu^{1,3}, ZHOU Yalong¹, LIU Xiaoyi¹, LIANG Zhao¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Taiyuan Northwest Second Ring Expressway Development Corporation, Taiyuan, 030000, China; 3. Key Laboratory of Road, Bridge and Underground Engineering in Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to reveal the influence of different post grouting methods on the bearing characteristics of cast-in-place piles, based on the self-designed pressure grouting system, the open-end, closed-end and composite grouting tests of three model piles (S_1 , S_2 and S_3) located in homogeneous loess layer are carried out respectively, and the non grouting piles are set as the control. The vertical compressive load test is carried out 10 days after the grouting is completed. The grouting volume of S_1 , S_2 and S_3 piles is 3 L, the grouting pressure is 0.3 MPa, and the grouting duration is 33, 47 and 44 s respectively. The test results show that the bearing capacity of S_3 is the largest after grouting, and the ultimate bearing capacity of the three piles is increased by 144%, 33.3% and 411% respectively; The lateral resistance of three grouting piles near the range of about 8 times of pile diameter from the pile end is enhanced, and the enhancement ratios under ultimate load are 170.7%, 39.5% and 233.2% respectively; After the static load test, dig out the model pile and observe the distribution of slurry on the pile side and pile end. It is found that the slurry of S_1 and S_2 piles returns up along the pile side, while for S_3 pile, in addition to some slurry returning up along the pile side, some slurry forms a cement enlarged head at the pile bottom.

Key words: cast-in-place piles; post grouting pile; grouting method; ultimate bearing capacity