

无黏性土地区大直径超长钻孔灌注桩桩端压浆后的 承载性能研究

储诚富^{1,2}, 李小春², 鹿立好³, 席培胜⁴

(1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071;

3. 亳州市恒达公路工程勘察设计院, 安徽 亳州 236800; 4. 安徽建筑工业学院土木工程学院, 安徽 合肥 230022)

摘要: 根据现场试桩试验, 分析研究了在无黏性土地区后压浆技术对大直径超长钻孔灌注桩承载力性状的影响。试验结果表明: 大直径超长钻孔灌注桩桩端后压浆水泥浆液上返高度在该类地质条件下达 16.0 m 左右, 压浆后极限承载力测试值是压浆前的 1.59 倍, 压浆后端阻力是压浆前的 3.23 倍, 压浆后桩侧阻力是压浆前的 1.23 倍。表明利用后压浆技术达到了节约工程投资、提高工程施工质量及可靠性的目的, 并产生了较大的技术经济效益和良好的社会环境效益, 该结论对相同地区同类基桩的设计、施工和深入研究具有一定的指导意义。

关键词: 大直径超长桩; 桩端后压浆; 无黏性土; 桩端阻力; 桩侧摩阻力

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2011)S2-0388-04

作者简介: 储诚富(1975-), 男, 安徽潜山人, 博士研究生, 讲师, 主要从事桩基工程、地基处理等方面的研究与教学工作。E-mail: chuchengfu@163.com。

Load bearing behavior of pile tip post-grouting super-long large-diameter bored piles in cohesionless soil

CHU Cheng-fu^{1,2}, LI Xiao-chun², LU Li-hao³, XI Pei-sheng⁴

(1. School of Resources & Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of Rock and Soil

Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. Bozhou Hengda Highway Design Institute, Bozhou 230000, China; 4.

School of Civil Engineering, Anhui University of Architecture, Hefei 230022, China)

Abstract: According to the results of load tests on piles, the influence of pile tip post-grouting on the load bearing behavior of super-long large-diameter bored piles in cohesionless soil is analyzed. The test results show that the grouting cement can reach 16.0 m from the pile tip under the geological and construction conditions. The values of the ultimate bearing capacity, tip resistance and skin friction of the test piles after grouting are 1.59, 3.23 and 1.23 times those of bored piles without grouting. A conclusion is drawn that by using the tip post-grouting technique, it saves investment, improves construction quality and reliability, and brings considerable economic benefits and good socio-environment effects. Therefore it is instructive for the design and construction of similar piles.

Key words: super-long large-diameter pile; pile tip post-grouting; cohesionless soil; pile tip resistance; skin friction of pile

0 引言

随着我国经济建设的快速发展, 人们对交通基础设施建设提出了越来越高的要求, 继而出现了大量的跨海跨江跨河的大跨径桥梁需要建设。因桥梁跨径的增大以及桥梁承载力要求的提高, 对桥梁基础的承载力要求也越来越高, 故大直径超长钻孔灌注桩(因其承载力高、无挤动和振动、能穿透各种地层等优点)被在桥梁工程建设中广泛应用。但单一工艺的钻孔灌

注桩, 由于成孔工艺的固有缺陷等因素(如桩底沉渣和桩侧泥皮的存在), 导致桩端阻力和桩侧摩阻力显著降低, 大大制约了单桩承载力和钻孔灌注桩质量的提高, 而且这些因素具有很大的随机性, 使得大直径超长钻孔灌注桩的单桩承载力值往往具有很大的离散性^[1-3]。为此国内外把地基处理灌浆技术与桩基技术结

合起来, 采取对桩端和桩侧实施压力灌浆措施, 即所谓的后压浆技术。钻孔灌注桩后压浆技术是成桩时在桩底或桩侧预置压浆管路和压浆装置, 待桩身达到一定强度后, 通过压浆管路, 利用高压注浆泵以水泥为主剂的浆液, 对孔底沉渣和桩侧泥皮进行固化, 从而消除传统灌注桩施工工艺所固有的缺陷, 以达到提高桩的承载力、减少沉降量的一种科学先进的技术方法^[4-7]。

在我国一些地区, 地貌属于河流冲积地貌单元, 表层广泛分布着黄河近代冲(淤)积粉质土及粉细砂(其颗粒级配差, 黏粒含量少, 塑性指数低, 胶体活性差, 并且具有颗粒磨圆度高、表面强度低和难以压实的特点), 硬质岩层埋藏深, 在到达硬质岩持力层之前, 桩要穿过很厚的粉质黏土层、粉土层及细砂层。在该种土层中成桩, 即使在确保泥浆相对密度较大的情况下, 桩身质量也很难以保证, 且成桩后桩侧泥皮过厚, 大大削弱了钻孔灌注桩承载力。本文通过某桥梁桩基现场原位试验, 探讨在无黏性土层中后压浆技术对大直径超长灌注桩承载力性状的影响。

1 工程概况

某单塔双索面斜拉桥, 单塔高 79.0 m, 桥宽 28.0 m, 桥梁设计荷载为公路 I 级。基础采用直径 2.50 m 钻孔灌注桩群桩基础。为了保证施工的顺利进行和结构的安全可靠, 给桩基础设计和施工实施提供科学的依据, 在主桥台附近非桥位桩的位置进行试桩。

场区地质条件概况如下: ②淤泥(Q_4^{al}): 灰褐色, 流塑, 层厚 1.50 m; ③₁层粉质黏土夹粉土薄层(Q_4^{al}): 黄褐~灰褐色, 软塑, 层厚 4.00 m; ③₂层粉质黏土(Q_4^{al}): 黄褐~灰褐色, 软塑~可塑, 局部夹粉土薄层, 局部含有贝壳, 层厚 13.30 m; ③₃层粉质黏土夹粉土及粉砂薄层(Q_4^{al}): 黄褐~灰褐色, 可塑~硬塑, 局部含有钙质结核, 粒径 1~3 cm, 层厚 7.70 m; ④层粉土及粉砂互层(Q_4^{al}): 灰褐~黄褐色, 中密~密实状态, 层厚 11.30 m; ⑤层细砂(Q_4^{al}): 灰褐~黄褐色, 饱和, 中密~密实, 层厚 6.10 m; ⑥层中砂(Q_4^{al}): 灰褐色~黄绿色, 饱和, 中密~密实, 局部含少量砾石, 层厚 7.50 m; ⑦层含砾细砂(Q_4^{al}): 灰色~灰绿色, 饱和, 密实, 钻进速度慢, 局部含砂质结核体, 呈胶结状态, 含少量砂姜、砾石及卵石等, 层厚 8.50 m; ⑧层中砂(Q_4^{al}): 灰绿~黄绿色, 饱和, 密实, 层厚 10.70 m; ⑨层细砂(Q_4^{al}): 灰褐~灰黑色, 饱和, 密实, 局部细砂与粉土及粉质黏土呈互层状, 本次勘察未揭穿此层, 揭露最大层厚 24.20 m。

2 试桩施工介绍

2.1 压浆设备

主要设备有: XPB-10 注浆泵 1 台(最大压力 9.5 MPa, 最大流量 90 L/min); ZJ-400 型涡流制浆机一台; 1000 mm×1000 mm×1000 mm 储浆箱 1 个; 高压压浆管道及浆液测试仪器等。

2.1 压浆管道的安装

根据苏通大桥工程中采用的直管后压浆试验和 U 型管后压浆对比试验结果^[1], 本工程压浆管道采用 4 根 $\phi 60$ mm×3.5 mm 普通钢管(兼用作声测管)组成的 U 型管回路, 回路中桩底部分为直线形, 且压浆管的底标高比钢筋笼底标高高 10 cm。

压浆管路和钢筋笼一起制作, 且与钢筋笼一道进行连接并沉放至孔底。压浆管现场采用丝扣螺纹连接; 底部直线段压浆管道在钢筋笼预制阶段进行, 其底部设置 6 个孔口朝桩底的 $\phi 6$ mm 注浆孔, 在孔中钉上一枚图钉后套上厚 1.5 mm、通长的橡胶管, 再用扎丝扎紧外缠 4 层胶带, 以防泥浆侵入。具体压浆管道布置图见图 1。



图 1 U 型压浆管道布置图

Fig. 1 Picture of U post-grouting pipe

2.2 桩底压浆

根据以前钻孔桩后压浆法施工经验, 本工程试桩注浆管开塞确定在桩基混凝土灌注完毕后 24~48 h 内进行。压浆分 3 次循环进行, 压浆量分配宜为 50%, 30% 和 20%, 第 1 和第 2 次压浆完成后应用清水冲洗管路。

后续的成桩质量检测及注浆施工表明, 开塞时间的选择是合适的, 声测管下端未被水泥浆堵塞, 注浆时管路均保持畅通。

压浆控制原则: 以压浆量控制为主, 注浆压力为主要参数。满足下列条件之一可终止压浆: ①压浆量达到设计要求; ②压浆总量达到设计值的 85%, 且压浆压力达到设计或终止控制的 120%, 并维持 5 min 以上; ③压浆总量达到设计值的 85%, 且桩顶出现明显的上抬。

3 试验结果及分析

3.1 预埋载荷箱法介绍

表 1 桩端后压浆前后试桩载荷试验结果

Table1 Results of load tests on piles before and after grouting

桩径 /mm	桩长 /mm	桩端持力 层/mm	状态	极限承载力 /MN	桩端阻力量 /MN	桩端阻力所 占比例/%	总侧摩阻 /MN	总侧摩阻所 占比例/%
2500	72.0	⑨层细砂	压浆前	39.90	7.12	17.8	32.78	82.2
			压浆后	63.32	23.00	36.7	40.32	61.7

为了测定桩侧土的摩阻力与桩端土阻力及检验桩端压浆后效果，试桩采用预埋载荷箱法单桩竖向静载试验。另外，试桩的桩身按土层界面布置了钢筋计和应变计，每个截面分别对称布置 3 套钢筋计和应变计。

3.2 压浆前后承载特性分析

采用线性化有限单元分析法对该试桩的等效地面载荷试验进行拟合，得到桩顶荷载 - 位移曲线（即 $Q-s$ 曲线），见图 2。从图中可以看出：压浆前桩的荷载 - 位移曲线为陡降型，压浆后桩的荷载 - 位移曲线为缓变型。其原因是压浆前桩顶沉降以桩端的沉渣为主，压浆后桩顶沉降以桩身压缩为主，说明压浆对消除桩端沉渣具有很好的效果。桩端后压浆前后试桩载荷试验结果见表 1。压浆后桩的极限承载力提高了 58.7%，端阻力提高了 223.0%，桩侧阻力提高了 23.0%，说明桩端后压浆法在该种土层中对桩基承载力提高幅度明显。产生压浆前后桩的荷载 - 位移曲线及承载力大小变化的原因可以从以下几个方面得到解释：①预压作用：未压浆桩在荷载作用下，轴力逐渐往下传递，待桩顶位移达到一定程度后，端阻力才开始起作用。而在桩端进行高压压浆，能使桩向上微微抬起（施工过程中要求不超过 3 mm），形成对桩及桩周围土施加了向上的反向预应力，该预压应力对桩端土体及一定范围的桩周土预先完成了一部分向上变形，当钻孔灌注桩承受向下的垂直荷载时，此反向预应力将承担部分荷载，使桩端阻力从一开始就参与作用，这对提高桩基础的整体性和承载力、控制桩基础的沉降十分有益；②渗透固结作用：在渗透性强、可注性好的砂土和碎石土中，浆液在较小的压力下即可渗入桩端土体一定范围，形成一个结构性强、强度高的结石体，增大桩端的承载面积和基桩的有效长度，从而提高基桩的承载力；③挤密充填作用：桩端存在的松散虚土在浆液挤压作用下致密，并被水泥浆胶结形成桩端扩大的固结体；④劈裂加筋作用：当注浆压力大于桩端土层的最小主应力时，会出现劈裂现象。浆液充填裂隙后呈脉状网络分布，对持力层起加筋作用；⑤劈裂泥皮：随着压浆量及压浆压力的提高，水泥浆液沿桩壁上窜一定距离（实测表明：本工程中试桩，桩端压浆对于其上约 16.0 m 范围内侧摩阻力的提高有显著效

果），通过渗透劈裂、充填、挤密和胶结作用破坏泥皮的结 构，并充填于桩体与桩周土之间的孔隙，在桩周形成脉状结石体，如同树根植入土中，从而增大应力扩散范围，提高基桩的承载力^[8]。

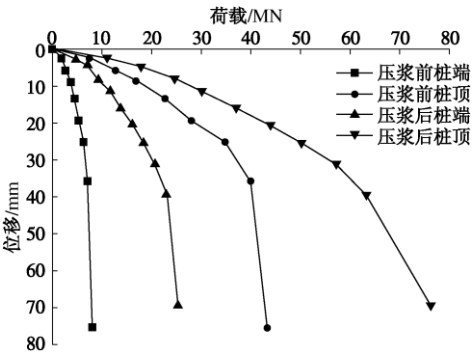


图 2 试桩压浆前后承载力 - 位移曲线图

Fig. 2 Bearing capacity-displacement curves of piles before and after grouting

4 结 论

- （1）采用声测管兼作压浆管进行了桩端后压浆，压力及压浆量均满足要求，施工操作简单、适用、节省时间和材料。
- （2）通过压浆和未压浆试桩静载荷试验，桩端后压浆技术对提高持力层为无黏性土层的钻孔灌注桩的承载力是非常有效的。试验结果表明，在相同地质条件下，压浆后桩的单桩极限承载力是未压浆桩的 1.59 倍，而且桩顶沉降明显减小，说明桩端后压浆明显提高了桩的承载能力，改善了桩的荷载传递性能。
- （3）压浆后桩的荷载 - 沉降关系曲线呈缓变型，且桩顶沉降以桩身压缩为主；未压浆桩的荷载 - 沉降关系曲线为陡降型，桩顶沉降以桩端沉渣的变形为主。
- （4）桩端后压浆一方面通过挤密、劈裂等作用加固桩底沉渣和桩端土层，增加持力层的强度，提高了端阻力；另一面通过渗透加固泥皮和桩周土层，试验表明该土质条件下大直径超长桩桩端后压浆水泥浆上返高度达 16.0 m 左右，亦即桩端后压浆对桩侧摩阻力也具有明显的提高作用。
- （5）桩端后压浆不仅能挤密桩端土体，而且能对基桩产生一定的上抬力作用，使基桩压缩，产生预应

力作用的效果, 对提高基桩承载力十分有利。

(6) 试验结果表明, 在大直径超长钻孔灌注桩中应用U型管压浆技术, 施工工艺、设备管路简单, 具有较好的经济效益和应用价值。但后压浆在大直径超长桩的作用机理以及群桩的作用效应有待进一步研究。

(7) 试验结果表明桩端注浆施工在桩基混凝土灌注完毕后 24~48 h 内进行注浆管开塞是合适的。

参考文献:

- [1] 布克明, 尹坤龙, 龚维明. 钻孔后压浆技术在苏通大桥基础工程中的应用[J]. 岩土力学, 2008, **29**(6): 1697 - 1700. (BU Ke-ming, YIN Kun-long, GONG Wei-ming. Post-grouting technique for piled foundation case history of Su-Tong Bridge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(6): 1697 - 1700. (in Chinese))
- [2] 黄建华. 灌注桩后压浆技法抬升效应机理分析[J]. 工业建筑, 2009, **39**(增刊): 709 - 713. (HUANG Jian-hua. Elevated effect mechanism analysis of posterior grouting bored piles[J]. Industrial Construction, 2009, **39**(S0): 709 - 713. (in Chinese))
- [3] 何 剑. 后注浆钻孔灌注桩承载性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(6): 743 - 746. (HE Jian. Experimental research on vertical bearing properties of base-grouting bored cast-in-place pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(6): 743 - 746. (in Chinese))
- [4] 王秀哲, 龚维明, 薛国亚, 等. 桩端后注浆技术的研究现状及发展[J]. 施工技术, 2004, **33**(5): 28 - 31. (WANG Xiu-zhe, GONG Wei-ming, XUE Guo-ya, et al. Current research status and development of the pile-end post-grouting technology[J]. Construction Technology, 2004, **33**(5): 28 - 31. (in Chinese))
- [5] 方鹏飞, 姜 珂, 朱向荣, 等. 软土地区桩端后注浆桩承载性状对比试验研究[J]. 工程地质学报, 2009, **17**(2): 280 - 283. (FANG Peng-fei, JIAN Ke, ZHU Xiang-rong, et al. Comparison test studies on the bearing characteristics of post-grouted bored piles in soft soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, **17**(2): 280 - 283. (in Chinese))
- [6] 张阳明, 管典志. 钻孔灌注桩后压浆作用机理分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, **35**(7): 890 - 892. (ZHANG Yang-ming, GUAN Dian-zhi. Impacting mechanism of post-grouting of bored cast-in-place piles[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, **35**(7): 890 - 892. (in Chinese))
- [7] 龚维明, 于清泉, 戴国亮. 越南大翁桥桩基承载性能试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(2): 558 - 562. (GONG Wei-ming, YU Qing-quan, DAI Guo-liang. Experimental research on bearing behavior of piles with self-balanced method in Daweng Bridge in Vietnam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(2): 558 - 562. (in Chinese))
- [8] 陈志坚, 韩学伟, 白炳东. 大直径超长钻孔灌注桩桩端后压浆机理探讨[J]. 河海大学学报, 2007, **5**(4): 409 - 412. (CHEN Zhi-jian, HAN Xue-wei, BAI Bing-dong. Discussion on post-grouting mechanism at end of super-long large-diameter bored piles[J]. Journal of Hohai University, 2007, **5**(4): 409 - 412. (in Chinese))

(本文责编 李运辉)