

大直径超长钻孔灌注桩桩端后压浆机理探讨

陈志坚¹ 韩学伟¹ 白炳东²

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098 ; 2. 江苏省苏通大桥建设指挥部, 江苏 南通 226010)

摘要 : 在分析大直径超长灌注桩实时应力监测资料的基础上, 从力学机理入手分析桩端后压浆对基桩承载特性的影响. 分析结果表明 : 桩端后压浆主要通过渗透固结、挤密充填等作用, 改善桩端及桩周地层土的物理力学性质, 消除桩端虚土对承载力的影响效果明显 ; 由于扩底和劈裂泥皮作用, 基桩桩端承载面积及桩体的有效长度与侧摩阻力均得到明显的提高.

关键词 苏通大桥 ; 大直径 ; 钻孔灌注桩 ; 实时监测 ; 桩端后压浆 ; 承载力

中图分类号 : TU473.1 **文献标识码** : A **文章编号** : 1000-198X(2007)04-0409-04

随着我国高层建筑及桥梁工程建设的发展, 大直径灌注桩的应用范围越来越广. 然而, 灌注桩成孔过程对桩周及桩端土层的扰动在一定程度上降低了土体的强度, 泥浆中水的浸泡软化作用又进一步降低了土体的强度, 难以避免的桩端虚土(含沉渣、孔底扰动土以及孔口和孔壁回落土等) 和护壁泥皮等均在一定程度上影响灌注桩的承载力. 试验研究和工程实践表明, 对灌注桩进行桩端后压浆补强能够有效地降低上述影响, 提高承载力, 减小沉降量^[1-6]. 桩端后压浆工艺于 1961 年首次在马拉开波湖(Maracaibo) 大桥基桩工程中得到应用. 西南交通大学岩土工程研究所等对该工艺进行了研究, 并取得了较好的应用效果^[1]. 本文根据苏通大桥桩端后压浆过程中的跟踪观测结果, 探讨桩端后压浆的积极作用和机理, 并就桩端后压浆的效果进行评价.

1 桩端后压浆的施工流程

桩端后压浆^[7-8]即在钻孔灌注桩成桩一定时间后, 通过预埋在桩身的压浆管以一定的压力把水泥浆注入桩端. 注入的浆液大部分分布于桩端并形成扩大的固结体, 小部分沿桩壁上窜分布于中下部桩周土中, 通过渗透、充填、压密和固结等作用使桩端虚土、桩端持力层及其附近的桩周土体发生物理化学反应, 从而可以提高基桩承载力以及控制桩基础沉降. 压浆施工工艺流程如图 1 所示.

桩端后压浆机理可分为力学机理和化学机理. 力学机理一般可归纳为渗透固结作用、挤密充填作用、劈裂加筋作用和预压作用, 按其作用部位的不同分别阐述如下.

作用于桩端土体的机理 (a) 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. (b) 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. (c) 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. (d) 预压作用. 苏通大桥采用的桩端压浆压力为 7.0 ~ 8.5 MPa. 显然, 随着浆液的挤入, 基桩端部和桩端一定范围内的土层必然受到预压作用. 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.

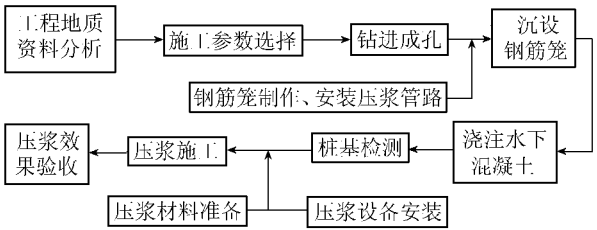


图 1 压浆施工工艺流程

Fig.1 Flow chart of grouting construction

作用于桩侧土体的机理是 (a) 压密作用, 浆液在上窜过程中挤压桩侧土体形成固结体, 加大桩侧土体的侧向压力, 从而提高桩侧摩阻力. (b) 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^[9-10], 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.

化学机理^[7]可概括为化学胶凝作用、充填胶结作用、阳离子交换作用及固化效应.

硅酸盐水泥的主要矿物为由 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 等相互作用生成的硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙和铁铝酸四钙等, 这些矿物在发生水化反应时, 减少了被加固土中的含水量, 增加了土颗粒间的黏结强度; 同时, 生成的水化硅酸钙和水化铁酸钙凝胶、氢氧化钙、水化铝酸钙和水化硫铝酸钙晶体等填充于土颗粒间的孔隙, 改善了土体的物理力学性质, 提高了土体的强度.

水泥浆与桩端及桩侧砂砾石掺和, 水化产生 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 CSH (水化硅酸钙) 等水化物, 增加了溶液中的 Ca^{2+} 含量, 与土颗粒中的阳离子 (K^+ 、 Na^+) 发生等当量的置换作用, 形成水泥与土颗粒的团粒结构, 填充孔隙后形成坚固的类混凝土. 此外, 水泥浆中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与土中或水中的侵蚀性 CO_2 化合生成难溶于水的 CaCO_3 薄壳, 也增强了土颗粒结构的强度.

综上所述, 桩端后压浆可增加基桩的承载面积及其有效长度, 改善桩端土体的物理力学性能, 增大持力层的强度, 提高桩端阻力, 改善桩端以上一定范围内的桩-土接触条件, 提高桩侧摩阻力.

2 桩端后压浆效果分析与机理探讨

2.1 工程概况

在建的苏通大桥主桥索塔基础采用 131 根直径 2.8 m/2.5 m 的变径钻孔灌注桩基础, 基桩按梅花形布置. 其中, 北索塔基桩的桩端高程为 -124 m, 桩长 117 m. 桥位区第四系地层厚达 300 m 左右, 桩端置于上更新统粗砂层中. 为了提高桩基础的承载力、有效控制桩基础的沉降量, 对每根桩采取了桩端后压浆补强措施. 为了研究桩端后压浆的作用机理, 选择预埋了压力盒、钢筋计和混凝土应变计等传感器的代表性基桩开展了跟踪观测.

2.2 桩端后压浆施工工艺与压浆参数

压浆施工工艺流程如图 1 所示. 根据均匀性及便于安装和保护的原则布置 U 形压浆管路, 位于桩端的水平段压浆器为带有 $\varnothing 8\text{ mm}$ 小孔的花管. 为了确保浇注的桩身混凝土不堵塞压浆器, 其小孔须事先用图钉、橡胶带和密封胶带封闭, 且超出钢筋笼底端 200 mm 左右. 压浆水泥采用 42.5 MPa 普通硅酸盐水泥, 水灰比为 0.5~0.6, 外掺剂 (NF-15) 质量分数为 1.5%, 起始水灰比为 0.8, 压力正常后逐渐调整为 0.5, 水泥浆搅拌时间不少于 2 min. 结合工程地质条件并考虑实际损耗, 确定压浆量为 10.5 (第 1 指标), 压浆控制压力为 8.0 MPa (第 2 指标). 桩身混凝土浇注完成 3~4 d 后再进行压浆, 每根桩布置 3 对 U 形压浆管路, 每对压浆管均匀压浆. 用于本文分析的 22 号、29 号、43 号和 120 号桩的最大稳定注浆压力分别为 8.0 MPa、7.0 MPa、8.5 MPa 和 8.0 MPa, 总压浆量分别为 10.2 t、10.5 t、9.3 t 和 10.2 t.

2.3 传感器布设

如上所述, 为了分析桩端后压浆的效果和力学机理, 对 10 根桩进行了现场测试研究. 每根桩布置了 8 个监测断面, 监测点布置遵循对称原则, 各断面布置的传感器如表 1 所示. 其中, 压力盒的布设高程为 -124.5 m. 每类传感器平面投影位置一致.

2.4 跟踪观测结果分析与机理探讨

考虑到传感器的埋设状态受控于长度达 117 m 的桩身钢筋笼, 在桩身混凝土浇注过程中进行跟踪观测并获得了可靠的传感器初参数. 在此基础上, 针对桩端后压浆情况进行跟踪观测. 根据观测结果, 分别研究了桩端后压浆对桩端及桩周土体的挤密作用、桩身预压作用、桩端扩底作用及劈裂桩周泥皮的作用.

2.4.1 挤密作用分析

在 22 号压浆桩桩端后压浆过程中, 29 号监测桩桩端土压力的响应如图 2 所示 (两桩中心距为 6.41 m).

表 1 传感器布置情况
Table 1 Layout of sensors

断面号	高程/m	钢筋计/套	应变计/套	压力盒/套
1	-12	2	2	
2	-25	4	2	
3	-30	4	2	
4	-45	4	2	
5	-55	4	2	
6	-75	2	2	
7	-95	2	2	
8	-123		2	2

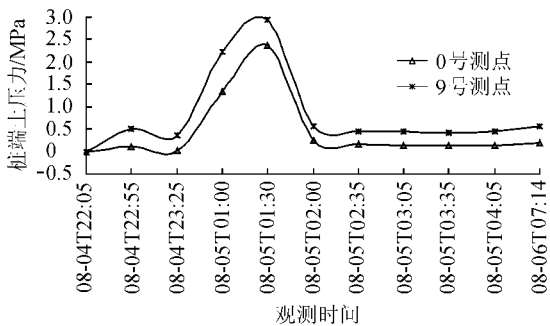


图 2 相邻桩压浆过程中桩端土压力曲线

Fig.2 Pressure curve for pile-end soil during adjoining pile grouting

挤密作用,对提高基桩承载力和控制桩基础沉降十分有益。

2.4.2 桩身预压作用

29 号桩在桩端后压浆过程中,桩身各高程混凝土应变的响应如图 3 所示。图 3 表明:高压桩端后压浆具有明显的预压作用。在 29 号桩后压浆过程中(8 月 4 日 22:25~8 月 5 日 1:35),桩各高程处的混凝土应变第 7 断面(-95 m 高程)最大,第 5 断面(-55 m 高程)的应变则相对小得多,说明后压浆在压密桩端土体的同时向上传递反力,使基桩出现向上的位移,即相当于在桩端给基桩施加了预应力,这有利于控制基桩的沉降和提高其承载力。

2.4.3 桩端扩底作用

在 120 号压浆桩桩端后压浆过程中,126 号监测桩桩端混凝土应变的响应如图 4 所示(两桩中心距为 6.41 m)。图 4 表明:高压桩端后压浆产生明显的桩端扩底作用。126 号监测桩的 2 个测点(编号为 7 和 8)的桩端混凝土应变在 120 号压浆桩(压浆时间为 11:15~13:50)后压浆过程中均有明显的响应,临近压浆桩一侧的 7 号测点受到弯拉作用,实测应变约为 16.21×10^{-6} ,背离压浆桩一侧的 8 号测点受到弯压作用,实测应变相对小些,约为 13.84×10^{-6} ,说明桩端后压浆会对桩端地基土产生一定的扩底作用,且这种扩底作用增大了桩端的承载面积,有利于承载力的提高。

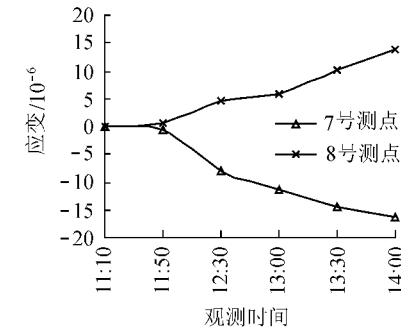


图 4 相邻桩压浆过程中桩端混凝土应变曲线

Fig.4 Strain curve for concrete at the end of pile during adjoining pile grouting

2.4.4 劈裂泥皮作用

在 43 号压浆桩桩端后压浆过程中,36 号监测桩桩身各高程混凝土应变的响应如图 5 所示(两桩中心距为 6.41 m)。图 5 表明:高压桩端后压浆具有一定的破坏泥皮的作用。36 号监测桩的 5 个测点在 43 号压浆桩(压浆时间为 14:28~17:17)后压浆过程中均有响应,以 -95 m 高程测点(编号为 77 和 78)应变最大,说明越靠近端部变形越大; -55 m 高程(近桩长的 1/2 高度)亦有相对较小的变形,充分说明桩端后压浆过程中桩周土体受到挤密压缩作用,这会破坏桩周泥皮的结构,在一定范围内改善桩-土的接触条件,提高桩侧的摩阻力。

图 2 表明:高压桩端后压浆具有明显的挤密桩端及桩周地基土的作用。29 号监测桩的 2 个测点(编号为 0 和 9)的桩端土压力在 22 号压浆桩(压浆时间为 8 月 5 日 2:05~3:57)后压浆过程中均有明显的响应,临近压浆桩一侧的 9 号测点的桩端土压力可达 0.46 MPa,背离压浆桩一侧的 0 号测点的桩端土压力相对小些,说明在桩端后压浆过程中桩端及桩周土体受到明显的挤压增密作用。22 号桩和 29 号桩的压浆量分别为 10.2 t 和 10.5 t,压入的水泥浆的渗透固结和充填作用,对改善桩端及桩周土体的物理力学性能、提高地基土的强度具有积极作用。跟踪观测结果还表明,压浆完成后的桩端土压力略有提高,这进一步说明后压浆具有较好的

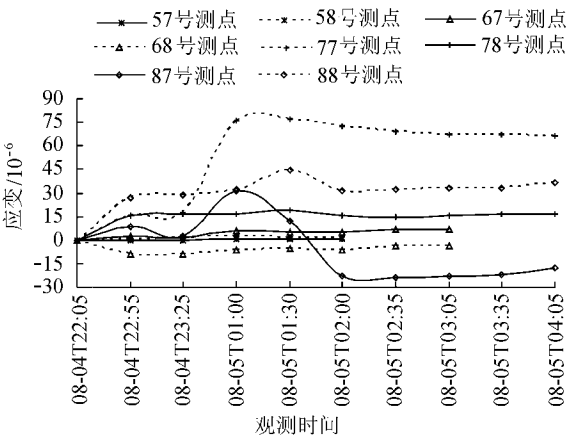


图 3 29 号桩压浆过程中桩身混凝土应变曲线

Fig.3 Strain curve for concrete of pile No.29 during grouting process

图 4 表明:高压桩端后压浆产生明显的桩端扩底作用。126 号监测桩的 2 个测点(编号为 7 和 8)的桩端混凝土应变在 120 号压浆桩(压浆时间为 11:15~13:50)后压浆过程中均有明显的响应,临近压浆桩一侧的 7 号测点受到弯拉作用,实测应变约为 16.21×10^{-6} ,背离压浆桩一侧的 8 号测点受到弯压作用,实测应变相对小些,约为 13.84×10^{-6} ,说明桩端后压浆会对桩端地基土产生一定的扩底作用,且这种扩底作用增大了桩端的承载面积,有利于承载力的提高。

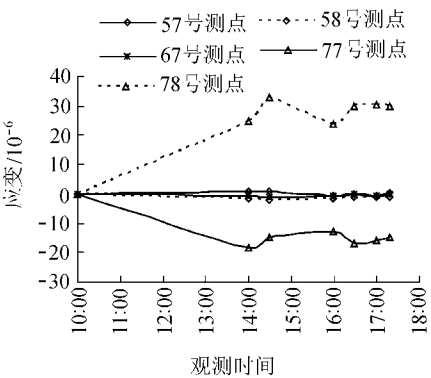


图 5 相邻桩压浆过程中混凝土应变曲线

Fig.5 Strain curve for concrete of pile body during adjoining pile grouting

3 结 论

- a. 桩端后压浆可以有效地改善甚至消除桩端虚土对承载力的影响,改变桩端土体的物理力学性能,从而提高基桩的承载力.
- b. 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.
- c. 桩端后压浆具有一定的桩端扩底作用,可增大基桩的承载面积,提高基桩的承载力.
- d. 桩端后压浆可挤密桩周一定范围内的地层(桩心距为 6.41 m 时可影响至桩长 1/2 高度内的地层),破坏桩周泥皮结构,对提高基桩的承载力起到一定的积极作用.

参考文献:

- [1] 傅旭东. 钻孔灌注桩桩底压力灌浆的工艺、效果及机理[J]. 桥梁建设, 1999(1): 52-55.
- [2] FLEMING W G K. The improvement of pile performance by base grouting[J]. Civil Engineering, 1993, 97: 88-93.
- [3] 薛韬. 灌浆法:一种提高桩基承载力的有效方法[J]. 地基处理, 1999(4): 43-48.
- [4] 刘金砺. 桩基的设计、施工与检测[J]. 施工技术, 1986(4): 37-39.
- [5] 陈愈炯. 对压密灌浆的评价[J]. 岩土工程界, 2004, 7(5): 10-11.
- [6] BRUCE D A. Enhancing the performance of large diameter piles by grouting[J]. Ground Engineering, 1985(4): 9-15.
- [7] 张忠苗, 吴世明, 包风. 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.
- [8] 沈保汉, 应权. 桩端压力注浆桩技术[J]. 建筑技术, 2001, 32(3): 155-157.
- [9] 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.
- [10] 沈保汉. 桩端压力注浆效果分析[J]. 岩土工程界, 2001, 4(8): 60-64.

Discussion on post-grouting mechanism at end of super-long large-diameter bored piles

CHEN Zhi-jian¹, HAN Xue-wei¹, BAI Bing-dong²

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jiangsu Provincial Sutong Bridge Construction Commanding Department, Nantong 226010, China)

Abstract: Based on real-time stress monitoring data for super-long large-diameter bored piles, the influences of post-grouting at the end of piles on bearing characteristics of foundation piles were analyzed. The result shows that post-grouting improves the physical-mechanical properties of pile-surrounding soil and soil stratum at the end of piles by seepage-induced consolidation and compaction filling, and it greatly enhances the bearing capacity of loose soil at the end of piles. Moreover, the loading area at the end of foundation piles, the effective length and lateral friction of piles are also greatly improved by base enlargement and mud-cake fracturing.

Key words: Sutong Bridge; large diameter; bored pile; real-time monitoring; post-grouting at end of pile; bearing capacity