

黄土地区后压浆钻孔灌注桩承载力特性试验研究

马天抒, 龚维明, 戴国亮

(东南大学 土木工程学院, 南京 210096)

摘要: 通过对西安地区某工程中采用桩端后压浆的2根钻孔灌注桩压浆前、压浆后单桩竖向静载荷试验和桩身轴力测试的对比, 分析了黄土地基中后压浆钻孔灌注桩桩身轴力的传递规律、桩侧阻力及桩端阻力的发挥性状, 探讨了后压浆技术对提高黄土地基中钻孔灌注桩承载力的影响。

关键词: 黄土地基; 桩端后压浆; 极限承载力

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Test research on bearing capacity character of post-grouting piles in loess area

MA Tian-shu, GONG Wei-ming, DAI Guo-liang

(School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: According to a project in Xi'an, vertical static bearing tests and axial force tests of two bored piles with post-grouting technology have been carried out. And then axial force transfer law, working trait of side resistance and tip resistance of post-grouting piles in loess foundation are analyzed. Finally the effect of post-grouting technology on bearing capacity of bored piles is discussed.

Key words: loess foundation; pile end post grouting; ultimate bearing capacity

1 引言

钻孔灌注桩桩端后压浆技术, 是利用在灌注桩成桩过程中预先设置在桩端的压浆管路、压浆阀, 注入配制的水泥浆液, 处理加固桩端的松散沉渣和桩端附近桩侧的泥皮及薄弱土体, 达到提高桩端阻力、桩侧阻力及桩的竖向承载力, 减少桩的沉降, 改善桩的工程性状, 减少工程投资的一种先进技术。大量的工程实例表明, 后压浆技术可以提高桩的承载力、改善桩的工程性状, 据统计承载力的增幅为50%~260%, 并且粗粒土地层中的承载力提高比细粒土更为有效。

目前, 常用的对比压浆桩和非压浆桩的静载试验方法有两种: 复式对比法和平行对比法。复式对比法是指对同一根预埋压浆管的桩, 在压浆前先做静载试验确定非压浆桩的承载力, 试验结束后开始压浆, 压浆后经过一段时间的养护, 再进行桩基静载试验, 即所谓的“复压”, 以确定压浆后的承载力。

平行对比法是指对两根同样的灌注桩, 一根桩采用压力注浆, 另一根桩不采用压力注浆, 分别在两根桩上进行静载试验, 分别得出压浆桩与非压浆桩的承载力, 然后进行对比。从理论上讲, 采用平行对比法比较符合实际, 但在实际工程中, 为了节省施工费用, 往往采用复式对比法。

本文通过对西安某工程的实际测试结果的研究, 分析了黄土地基中钻孔灌注桩压浆前后的荷载传递规律, 并对单桩的承载力性状进行了复式对比。

2 工程概况

2.1 本工程黄土地基的岩土工程特性

西安的边郊地区, 多属于皂河阶地和黄土塬梁与古洼地貌, 分布着大面积、深厚的黄土堆积。黄土地基的工程性质指标为: $w = 21\% \sim 25\%$, $\gamma = 16 \sim 20 \text{ kN/m}^3$, $\gamma_d = 14 \sim 16 \text{ kN/m}^3$, $e = 0.65 \sim 0.90$, $I_d = 0.20 \sim 0.50$, $\alpha_{1-2} = 0.13 \sim 0.30 \text{ MPa}^{-1}$, $E_{s1-2} = 8 \sim 14 \text{ MPa}$, 超固结系数大于1。

本文论及的黄土,泛指在桩基受力作用范围内浅层具有轻微湿陷性的黄土,以及下部非湿陷性黄土、黄土状土及粉质黏土,在黄土地基中,往往分布有1.0~3.5 m厚的中砂、中粗砂和粗砂夹层。

拟建工程位于西安市东二环与北二环交汇处辛家庙转盘,场地地形较平坦,地貌单元属渭河Ⅲ级阶地。场地地层自上而下依次由第四系全新统人工填土、上更新统风积黄土、残积古土壤、中更新统风积黄土、冲击中砂、中粗砂及粉质黏土。拟建场地属自重湿陷性场地,地基湿陷等级为Ⅱ(中等),地下水位深度为14.50~24.60 m,相对标高为386.23~377.75 m,属潜水类型。钻孔灌注后压浆桩桩端均设置在深厚的粉质黏土层中。

为了保证结构的安全可靠,并为黄土地基桩基础设计和施工提供合理科学的依据,进行了试桩,并根据试桩结果确定及验证压浆前、后的桩基单桩极限承载力。

2.2 工程概况

本工程为城市立交,基础形式采用钻孔灌注桩,埋深为-2.70 m。建筑物土层0.00 m相当于绝对高程403.43 m。桩长范围内地基土自上而下主要由黄土、古土壤及粉质黏土交互组成。其中,黄土、古土壤层层厚19 m。在下文的承载力计算中,考虑到这部分黄土层对桩身竖向极限承载力的影响,将承载力中相应部分扣除。

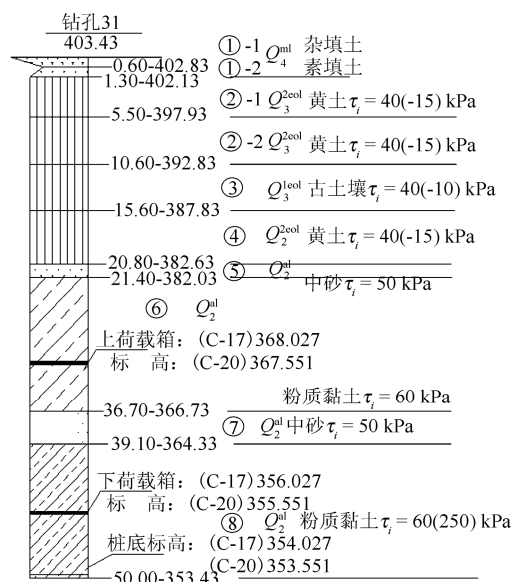


图1 地质剖面及地层参数图

Fig.1 Geological section and formation parameters

桩身穿越的地质剖面图及地层参数分布描述见图1,黄土及古土壤层考虑了 τ_i 在允许范围内折减。

3 单桩竖向静载自平衡测试

3.1 试验参数及测试方法

本工程的2根试桩均采用钢筋混凝土钻孔灌注桩基础,设计桩径为1500 mm,桩长为45.0 m,桩身混凝土强度等级为C25,桩底标高分别为354.03 m和353.55 m,桩端均位于⑧层粉质黏土层中。试桩编号为C-17#和C-20#,在灌注混凝土成桩后先分别对其进行单桩竖向承载力测试,测试完毕后进行压力注浆,间隔养护期后再次对其进行单桩竖向承载力测试,并将2根试桩压浆后的极限承载力与压浆前的进行对比,即为复压对比法。

采用自平衡静载测试法(双荷载箱测试),加载装置荷载箱和钢筋笼焊接在一起埋入桩内,将荷载箱的高压油管引到地面,然后浇注成桩。测试时由高压油泵在地面向荷载箱充油加载,荷载箱将力传递到桩身,其上部桩身的摩擦力与下部桩的摩擦力及端阻力相平衡——自平衡来维持加载。同时,埋设在桩身不同标高处的钢筋应变计可以测出在不同荷载下的钢筋应变,从而推算出桩身轴力、各土层侧摩阻力和桩端阻力等,测试示意图如图2所示。

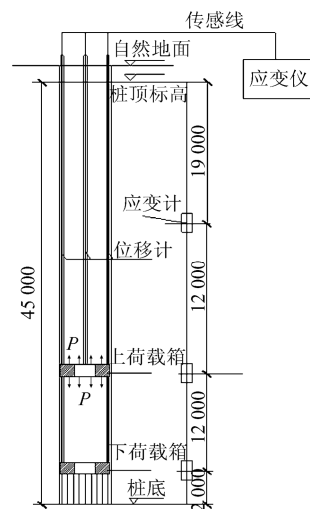


图2 自平衡测试示意图(单位: mm)

Fig.2 Schematic diagram of self-balance load test (unit: mm)

3.2 试验过程和结果

试验方法采用慢速维持荷载法,压浆前每级加载值为预估极限承载力的1/10,按10级9次加载;压浆后每级加载值为预估极限承载力的1/15,按15级14次加载,第1次按两倍荷载分级加载。位移出现突变且本级位移量大于前一级荷载作用下位移量的5倍停止加载,开始卸载。

3.2.1 压浆前测试

C-17#压浆前下荷载箱测试加载至 2×4274 kN

时向下位移出现突变,开始卸载,上荷载箱加载至 $2 \times 7\,810\text{ kN}$ 时卸载。分别取各段桩极限承载力 $Q_{\text{下}} = 3\,843\text{ kN}$, $Q_{\text{中}} = 7\,350\text{ kN}$, $Q_{\text{上}} = 7\,810\text{ kN}$ 。

C-20[#]压浆前下荷载箱加载至 $2 \times 4\,274\text{ kN}$ 时卸载,上荷载箱加载至 $2 \times 7\,810\text{ kN}$ 时卸载。分别取各段桩极限承载力 $Q_{\text{下}} = 3\,843\text{ kN}$, $Q_{\text{中}} = 7\,350\text{ kN}$, $Q_{\text{上}} = 7\,810\text{ kN}$ 。

3.2.2 桩端压浆过程及压浆参数

C-17[#]和 C-20[#]试桩,采用 3 根 $\phi 57\text{ mm}$ 普通钢管作为压浆管,压浆水泥采用 Po42.5 MPa 普通硅酸盐无结块的双检水泥,浆液的水灰比为 0.5~0.7,随着压浆的进程先稀后浓。每根压浆管压入水泥浆 1.25 t,分 3 批连续从 3 根压浆管压入,每根试桩的理论压浆量为 3.75 t。

本工程压浆实行压浆量与压力双控,以压浆量控制为主,注浆压力控制为辅。试桩工作压力为 3.0 MPa,控制最大压力 6.0 MPa,持荷时间为 5 min,压浆流量小于 75 L/min,压浆有关参数见表 1。

表 1 桩端压浆参数
Table 1 Pile base grouting parameters

试桩号	理论压浆量/t	实际压浆量/t	理论压力/MPa	实际压力/MPa
C-17 [#]	3.75	2.78	3.0	10.0
C-20 [#]	3.75	3.75	3.0	0.2

3.2.3 压浆后测试

C-17[#]压浆后下荷载箱加载至 $2 \times 10\,200\text{ kN}$ 卸载,C-17[#]上荷载箱加载至 $2 \times 8\,533\text{ kN}$ 时卸载。分别取各段桩极限承载力 $Q_{\text{下}} = 9\,600\text{ kN}$, $Q_{\text{中}} = 8\,533\text{ kN}$, $Q_{\text{上}} = 8\,533\text{ kN}$ 。

C-20[#]压浆后下荷载箱测试加载到 $2 \times 10\,800\text{ kN}$ 向下位移出现突变且不稳定,开始卸载;上荷载箱加载至 $2 \times 8\,000\text{ kN}$ 时开始卸载。分别取各段桩极限承载力 $Q_{\text{下}} = 10\,200\text{ kN}$, $Q_{\text{中}} = 8\,000\text{ kN}$, $Q_{\text{上}} = 8\,000\text{ kN}$ 。

根据两试桩的测试情况可得到相应的 Q - S 曲线,其中 C-17[#]试桩上、下荷载箱压浆前后的 Q - S 曲线见图 3、4。

4 承载力特性及荷载传递规律

4.1 单桩竖向承载力特性

根据《桩承载力自平衡测试技术规程》(DGJ32/TJ77-2009)中单桩极限承载力的计算公式,结合黄土地区此类试验的特点,并考虑了 19 m 黄土层对承载力的影响,对压浆前及压浆后各试桩极限承载力取值见表 2, Q - S 曲线见图 5。

分析压浆前后单桩测试的结果,从表 2 及图 5 可以得出如下结论:

(1)两试桩压浆前的单桩竖向极限承载力均为 16 875 kN,压浆后的 C17[#]、C20[#]试桩竖向极限承载力分别为 25 268 kN、24 068 kN,均大于压浆前的值,可见压浆后的极限承载力比压浆前有显著的提高,提高幅度分别为 42.63 %、49.74 %,表明钻孔灌注桩采用后压浆技术提高桩的极限承载力在本工程中的应用效果显著。

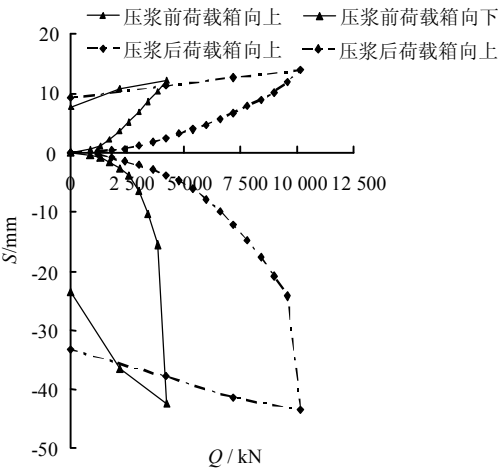


图 3 C-17[#]试桩下荷载箱压浆前后测试曲线

Fig.3 Testing curve of lower load cell of #C-17 before and after grouting

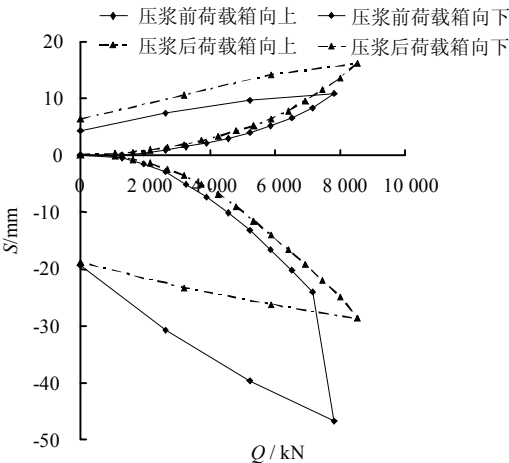


图 4 C-17[#]试桩上荷载箱压浆前后测试曲线

Fig.4 Testing curve of upper load cell of #C-17 before and after grouting

表 2 压浆前后试桩极限承载力(单位: kN)

Table 2 Ultimate bearing capacity of piles before and after grouting(unit: kN)

试桩号	极限承载力/kN		提高比例/%
	压浆前	压浆后	
C-17 [#]	16 875	25 268	49.74
C-20 [#]	16 875	24 068	42.63

(2) 经过桩端后压浆,同时考虑到压浆对桩端

周围土体的加固作用以及经过复压对桩周土压密的影响,两试桩的在同一级荷载下的沉降量均比压浆前显著减小,表明后压浆技术在提高单桩极限承载力的同时,还可以显著减小桩端沉降,改善桩的工作性状。

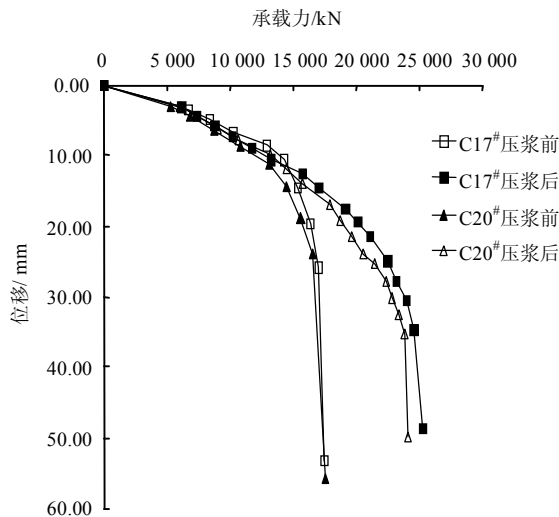


图5 试桩压浆前后承载力-位移关系图

Fig.5 Bearing capacity-displacement of piles before and after grouting

(3) 在成桩参数、土层分布、试桩条件、压浆量相同的情况下, C-17[#]试桩极限承载力比 C-20[#]试桩极限承载力高约 1 000 kN, 分析造成这一结果的原因, 发现压浆过程中 (见表 1) C-17[#]试桩压浆压力维持正常值 (约 10 MPa), 因此桩端压浆的效果较好; 而 C-20[#]试桩的压浆压力开始较大, 后来仅为 0.2 MPa, 表明桩侧附近土体较松散, 可能有裂隙通道存在。当压浆压力大到一定程度时, 浆液会沿桩侧上翻, 使压力减小, 出现这种现象可能会造成部分浆液流失, 朝某个方向渗透, 导致浆液没有均匀分布在桩端周围, 桩端压浆的效果被削弱, 因此, C-20[#]试桩极限承载力没有完全发挥。

4.2 荷载传递规律

在试桩桩身埋设荷载箱及在桩周不同标高处设置钢筋应变计, 并且在桩的静载试验同时进行桩身荷载传递性状的测试, 可以通过求出在荷载箱荷载作用下的桩身轴力分布来计算桩侧摩阻力和桩端阻力, 从而充分了解桩周土体侧摩阻力及端阻力的发挥特征, 并且通过等效转换得到在等效桩顶荷载作用下的桩身轴力分布与等效的荷载-位移曲线。

4.2.1 桩身轴力传递曲线

等效转换将桩身荷载箱荷载作用下的轴力分布转换到桩顶荷载作用下的轴力分布, 根据等效转换的结果, 可以得到两试桩压浆前和压浆后桩身轴力沿深度的分布曲线, 其中 C-17[#]试桩的轴力-深度曲

线见图 6。

由图 6 可以看出:

(1) 在等效桩顶荷载作用下, C-17[#]桩身轴力随着深度的增加而递减, 到桩端时已大幅减小, 反映了端承摩擦型桩的特性。

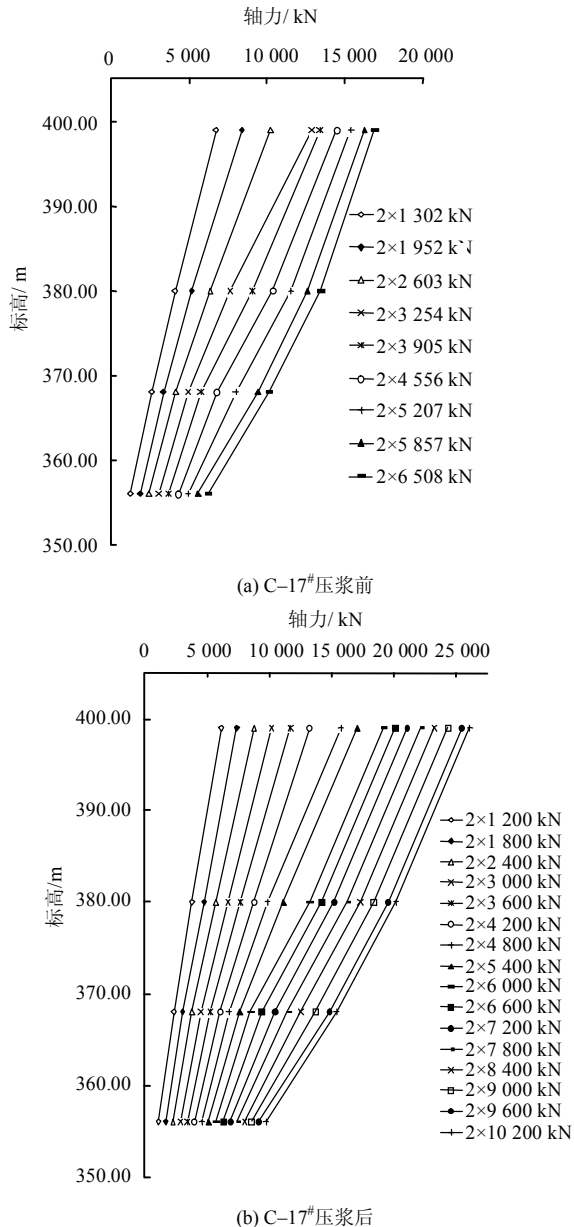


图6 C-17[#]桩身轴力沿深度分布图

Fig.6 Axial force distribution along pile depth of #C-17

(2) 压浆前后桩身轴力沿桩长的衰减速率不同, C-17[#]压浆后桩身轴力比压浆前衰减快, 且桩身下部轴力衰减速度比上部快, 说明压浆后桩身轴力差增大, 侧摩阻力增大, 且桩身下部的侧摩阻力增大幅度比上部要大。

4.2.2 桩侧摩阻力分析

根据桩身轴力分布, 由式 (1) 可以得到各测段桩周的侧摩阻力。本工程由于沿桩身设置的应变片层数较少, 故仅将桩体分为 3 个测段, 其中 C-17[#]

桩周各土层的最大侧摩阻力见表 3。

$$q_s = \frac{\Delta F_z}{\Delta S} \quad (1)$$

式中: q_s 为桩侧各土层的摩阻力 (kPa); ΔF_z 为桩身量测截面之间的轴向力 F_z 之差值 (kN); ΔS 为桩身量测截面之间桩段的侧表面积 (m^2)。

表 3 C-17[#]试桩压浆前后各土层摩阻力
Table 3 Friction resistance of every soil layer of #C-17 before and after grouting

土层标高/m	桩侧摩阻力/kPa		
	压浆前	压浆后	提高比例/%
399.024~380.024	46.56	52.76	13.32
380.024~368.024	64.39	67.36	4.61
368.024~356.024	63.68	92.07	44.58

由表 3 可以发现, 桩端后压浆可以显著提高桩侧摩阻力, 但提高幅度沿桩身不同深度不等。桩顶部分土层 (黄土、古土壤层) 侧摩阻力提高幅度较高, 达 13.32 %; 而桩身中段 (中砂层为主) 侧摩阻力也有提高, 但提高幅度不明显, 仅为 4.61 %; 靠近桩端压浆附近的桩侧侧摩阻力提高最为显著, 高达 44.58 %。由此可见, 桩端后压浆可以大幅提高桩侧摩阻力, 且对桩侧摩阻力的提高在桩端附近土层比桩身上部土层幅度更大。

4.2.3 桩端阻力分析

由于荷载箱离桩端较近, 所以桩底没有设置钢筋应变计。通过荷载箱加载值和桩身应变计的换算, 可以得到不同荷载下的桩端阻力, 还可以通过加载过程中测得的位移量, 得到不同桩端阻力对应的桩端位移, 并且可以据此绘制出桩端阻力-位移的关系曲线。其中 C-17[#]试桩压浆前后的桩端阻力-位移的曲线见图 7。

由图 7 和表 4 可以看出, 经过后压浆, C-17[#]桩在终止荷载下的桩端阻力比压浆前大幅增加, 提

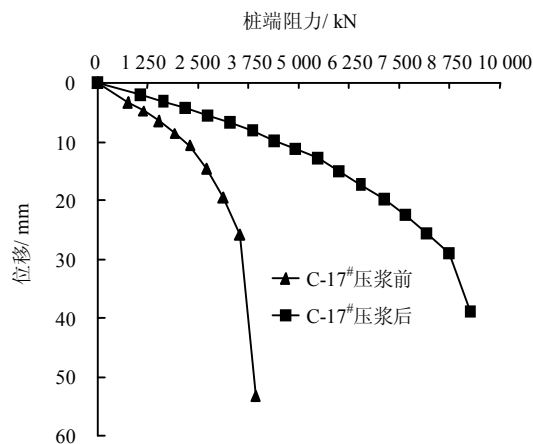


图 7 C-17[#]试桩压浆前后桩端阻力-位移曲线

Fig.7 Tip resistance-displacement curves of #C-17 before and after grouting

表 4 C-17[#]、C-20[#]试桩压浆前后桩端阻力-位移
Table 4 Tip resistance-displacement of #C-17 and #C-20 before and after grouting

桩号	桩端阻力 / kN	桩端位移 / mm	桩端阻力占总承载力比例/%	端阻提高比例/%
C-17 [#] 压浆前	3 924	53.23	21.77	
C-17 [#] 压浆后	9 280	38.76	36.73	136.50
C-20 [#] 压浆前	3 659	55.42	21.68	
C-20 [#] 压浆后	8 205	39.81	34.09	124.24

高比例高达 136.50 %, C-20[#]试桩端阻力的提高比例也达到了 124.24 %, 由此可见, 桩端后压浆可以显著提高桩端极限承载力, 且可以提高桩端阻力在总承载力中的比例, 使桩体的承载特性由摩擦桩向端承桩转变。另外, 由于桩端压浆对桩端附近土体的固结作用, 后压浆还可以减小桩端位移, 减少沉降, 有利于改善桩的沉降特性。

5 结 论

(1) 黄土地区的桩端后压浆使桩身轴力传递衰减加快, 且桩身下部轴力衰减速度比上部更快。

(2) 黄土地区的桩端后压浆使桩周各层地基土的侧摩阻力有较大提高, 同时桩端阻力比压浆前有显著增长, 其中黄土层侧摩阻力的提高幅度高于中砂层, 却低于粉质黏土层的相应提高幅度。

(3) 钻孔灌注桩的后压浆技术在黄土地区的应用可以使桩基的工程性状明显改善, 显著地提高了桩的竖向极限承载力, 减小了桩端沉降量, 经济合理, 应用成功。

(4) 压浆时可考虑采取间接压浆, 用少量浆液先将附近土层中的裂隙通道堵塞, 使得后压浆更集中地分布在桩端, 以达到理想的压浆效果。

参 考 文 献

- [1] 中国建筑科学研究院. JGJ106—2003 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [2] 沈保汉. 后压浆技术(6) [J]. 工业建筑, 2001, 31(10): 62—65.
- [3] BRUCE D A. Enhancing the performance of large diameter piles by grouting[J]. *Grouting Engineering*, 1985, (5): 9—15.
- [4] 胡春林, 李向东, 吴朝晖. 后压浆钻孔灌注桩单桩竖向承载力特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 546—550.
- [5] STOCKER M F. The influence of post grouting on the load bearing capacity of bored piles[C]//Proc. 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. [S. l.]: [s. n.], 1983.
- [6] 黄生根, 龚维明, 张晓炜, 等. 钻孔灌注桩压浆后的承载性能研究[J]. 岩土力学, 2004, 25 (8): 1315—1319.
- [7] 黄生根. 超长钻孔灌注桩后压浆技术研究[D]. 南京: 东南大学土木工程学院, 2005.
- [8] 费鸿庆, 张晓延. 西安地区黄土地基中的钻孔灌注后压浆桩[C]//建(构)筑物地基基础特殊技术. 北京: 人民交通出版社, 2004.