

咸阳机场高速公路桥梁桩端后压浆承载特性研究

李天华^{1,3}, 赵均海¹, 董晓明²

(1. 长安大学 建筑工程学院, 西安 710061; 2. 鲁东大学 岩土工程重点实验室, 山东 烟台 264025;
3. 北京建工建筑设计研究院, 北京 100044)

摘要: 针对西安咸阳国际机场专用高速公路段的 K3+ 966.50 渭河特大桥, 采用钻孔灌注桩桩端后压浆技术和常规灌注桩两种不同方法对其桩基进行了现场静载试验, 并根据实测数据分析探讨了各桩在不同等级荷载作用下的桩-土相互作用、桩端后压浆技术的增强机理, 以及桩端压力注浆和常规钻孔灌注桩两种不同的桩基承载特性, 结果发现, 与未压桩的桩基相比, 桩端后压浆桩基的竖向极限承载力至少提高了 40%, 沉降量减少 25 mm, 说明桩端后压浆技术能够显著提高桩基的承载能力和稳定性。最后, 根据现场实测数据和端后压浆的注浆机理, 提出了后压浆单桩极限承载力的计算公式, 为类似地区的桩基设计提供借鉴

关键词: 桩端后压浆; 灌注桩; 静载试验; 压浆机理; 沉降量; 极限承载力

中图分类号: U443.15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)03-0092-05

Bearing Characteristics of Pile-end Post-grouting Pile of Xi'an Xianyang International Airport Expressway Bridge

LI Tianhua^{1,3}, ZHAO Junhai¹, DONG Xiaoming²

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China;

3. Beijing Civil Engineering Architectural Design & Research Institute, Beijing 100044, China)

Abstract: Two different techniques, pile end post-grouting technology of bored piles and conventional cast-in-place piles, were used to conduct the in situ static loading tests on the pile foundation of the Weihe Bridge K3+ 966.50 of Xi'an Xianyang International Airport Expressway. The measured data were used to analyze the interaction between the pile and soil of each pile under different loadings, the enhanced mechanism of pile end post-grouting technique, and the bearing characteristics of pile foundation of the two different techniques. The research results showed that the vertical ultimate bearing capacity of the pile end post-grouting piles increases by at least 40% and the settlement decreases by about 25 mm compared with that of the non-grouting piles, which suggested that the pile end post-grouting technology can increase the bearing capacity and stability of pile foundation significantly. This paper proposed a calculation formula of the ultimate bearing capacity of a post-grouting single pile based on the observed data and grouting mechanism of pile end post-grouting, which can provide valuable references for the pile foundation design in similar areas.

Key words: pile end post-grouting technology; bored pile; static loading test; grouting mechanism; settlement; ultimate bearing capacity

由于钻孔灌注桩对各种地质条件适应性强、无挤土效应、无振害、无噪声, 且具有施工工期短、造价低、承载力能力高、施工方便等诸多优点, 因此在公路、桥梁、房屋建筑、水利水电等工程中得到广泛应用。但钻孔灌注桩也同时存在如桩端沉渣、桩侧泥皮、压浆管堵塞、水泥用量多等缺点。目前

国内外已有大量学者采用桩端后压浆技术对灌注桩进行设计施工, 能有效的改善灌注桩的一些不足, 解决钻孔灌注桩桩端软弱层对桩基带来的影响。比起常规灌注桩, 后压浆技术能大大提高了桩基承载力和稳定性^[1-3], 而且能缩短工期、减少桩数和桩长, 具有适应性强、效益高、耗费少等特点,

收稿日期: 2012-11-03 修回日期: 2013-04-03 网络出版时间: 2013-04-08

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130408.1631.001.html>

基金项目: 国家西部交通建设科技项目(200331879750); 交通部西部交通建设科研项目(2009310000003); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011ZY017)

作者简介: 李天华(1985-), 女, 河北迁安人, 博士, 主要从事结构工程方面的研究工作。E-mail: 1197130024@qq.com

因此该技术已经在国内外得到广泛推广。由于其设计理论和计算方法比较复杂,目前对承载力和沉降的计算方法还是建立在半经验半理论基础之上,因此,还有必要对采用桩端压力注浆技术的钻孔灌注桩的承载性能进行深入地研究。桩端后注浆技术的应用最早开始于1961年G. Schmitte在委内瑞拉修建Maracaibo Bridge Site中报道的^[45],随后该技术不断创新和发展,应用范围越来越广,取得了显著的效果。本文依托实际工程,设计桩端压力注浆及常规钻孔灌注桩两种不同的现场静载试验,根据实测数据分析了各桩在不同等级荷载作用下桩-土相互作用,研究了西安咸阳机场高速公路段的桩端后压浆灌注桩及常规灌注桩的桩基承载特性。

1 桩端后压浆作用机理

桩端后压浆技术是指钻孔灌注桩在桩身混凝土浇筑完毕混凝土达到一定的强度后,用一定的压力把水泥浆通过注浆通道压入桩底,浆液克服了土粒间的抗渗阻力后渗透到桩底及桩底土的孔隙中,同时将孔隙中的水和空气排出,从而对桩周土层起到了填充、固结、压密和渗透的效果。

钻孔灌注桩采用桩端压力注浆技术,改变了桩端、桩周土体的物理力学性质及结构物的摩擦性状条件,使一定范围的桩周土强度提高,增大桩侧阻力和桩端承载力,从而提高桩的承载力、减少桩的沉降量^[67]。浆液在桩端及桩侧形成的分布情况与注浆材料、浆液用量、浆液配比、容许注浆压力及桩端土的性质、桩长、注浆压力、注浆时间、注浆量等因素有直接关系。后压浆的桩基与普通桩的荷载传递机理是一致的,当桩顶受到轴向力时,桩相对于土体向下移动,就会在桩侧产生正摩擦力,使桩身轴力和变形随着深度的增加而减少。当荷载较小时,摩擦力与位移成正比;随着荷载增加,桩顶沉降与荷载呈非线性状态,荷载部分传给桩端土层产生桩端阻力,局部土体发生塑性变形,表现为弹塑性特性;当桩侧摩擦力达极限后,若荷载继续增大,则桩端持力层土体大量压缩并呈塑性挤出,最终桩端阻力达到极限后使桩破坏。经试验表明,桩上半段侧摩擦力的发挥比桩下半段早,而桩侧摩擦力又总是比桩端摩擦力更早地得到发挥^[89]。

2 工程概况

西安咸阳机场专用高速公路是西北地区建设标准最高的高速公路,起于西安市城市快速干道朱宏路与西安绕城高速公路交叉处的朱宏路互通立交处,终点接机场东进场道路,途经西安市经济开发区、未央区汉城街道办事处、咸阳市渭城区的正阳镇、底张镇,路线全长20.58 km。本文研究地点选择了西安咸阳机场专用高速公路渭河特大桥桥址处,该桥梁全长6 851.4 m,桥面全宽42 m,分左右半幅。全桥共有钻孔灌注桩1 614根,桩径分别为1.2 m、1.3 m、1.8 m,桩长共计60 242 m。

2.1 工程地质条件

根据勘察的钻孔揭示及工程地质调查结果,勘察区内地层均为第四系松散碎屑堆积地层。试验区上部地层为全新统冲积黄土状土、亚黏土、亚砂土,局部含砂粒,下部地层为全新统冲积中细砂、中粗砂含砾及砂砾石层,其间夹薄层透镜状亚黏土、亚砂土层。试验区地层分布与整个工程区区域地层分布相似。根据试验区试验桩地质钻孔资料,桩从上向

下工程地质条件如下。(1)(Q_4^{al})中砂:褐黄色,均匀,稍密,稍湿;地基容许承载力 $[f_{ao}] = 250$ kPa;桩周土极限摩阻力标准值 $[q_{ik}] = 45$ kPa。(2)(Q_4^{al})中粗砂:黄灰—浅灰色,中密,饱和,中等液化;地基容许承载力 $[f_{ao}] = 400$ kPa;桩周土极限摩阻力标准值 $[q_{ik}] = 75$ kPa。(3)(Q_4^{al})亚黏土:褐黄,饱和,可塑;地基容许承载力 $[f_{ao}] = 130$ kPa;桩周土极限摩阻力标准值 $[q_{ik}] = 50$ kPa。(4)(Q_3^{al})粗砂:黄灰—浅灰色;密实;饱和;地基容许承载力 $[f_{ao}] = 410$ kPa;桩周土极限摩阻力标准值 $[q_{ik}] = 75$ kPa。(5)(Q_3^{al})中砂:黄灰—浅灰色;密实;可塑性,稍湿;地基容许承载力 $[f_{ao}] = 400$ kPa;桩周土极限摩阻力标准值 $[q_{ik}] = 55$ kPa。

2.2 试验方案

根据经济、实用、安全原则,拟定在试桩地点现场试桩两组,每组3根,共6根试验桩,桩径均为1.3 m。第一组试验桩(命名为试桩1组,编号为 S_{a1} 、 S_{b1} 、 S_{c1})桩长25 m,均采用后压浆工艺;第二组试验桩(命名为试桩2组,编号为 S_{a2} 、 S_{b2} 、 S_{c2})桩长25 m,均为常规灌注桩。桩身采用C25混凝土,主筋采用24根直径22 mm HRB335钢筋,箍筋采用直径8 mm R235钢筋通长布置,加劲箍采用直径18 mm HRB335钢筋间隔2 m通长布置。试桩拟定加载至破坏。为了节约锚桩,每根试桩相邻布置,每两根相邻试桩共用两根锚桩。试验区共设锚桩16根,桩径均为1.5 m。

本试验对现有的注浆管进行改造,使用改造后的注浆管,将导管改用国标黑铁管。虽然黑铁管与钢筋笼钢材性质相同,但是国标黑铁管能有效的克服PVC管被刺破的问题。两节导管间焊接螺纹,长度不小于2 cm,外螺纹上缠生胶带以密封接头,将直管和U型管在钢筋笼两边均匀布置,并绑扎在钢筋笼内侧。其中每回路U形管连接两根注浆管,并在管上设有独特的单向阀。桩端后压浆装置见图1,改造前后的示意图见图2、图3。

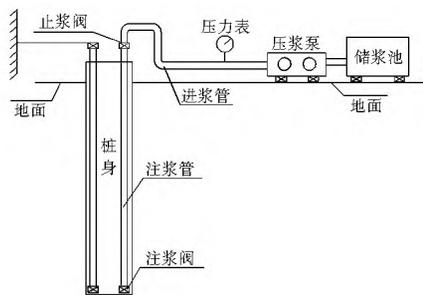


图1 桩端注浆装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Pile end post grouting device

2.3 参数设置

(1)后压浆桩设计参数。试桩1组采用后压浆工艺,布置1根桩侧压浆管,3根桩端压浆管。桩侧环向压浆阀布置在距桩顶15 m处,桩端压浆阀超出钢筋笼底部约10 cm。压浆管采用专用压浆导管。

(2)试桩、锚桩试验参数。此次试桩试验拟定加载至破坏,第1组试桩的桩径为1.3 m,桩长为25 m,最大加载量设计值28 669 kN,合理压浆量为2.4 t,实际压浆量为3.2 t;第2组试桩的桩径为1.3 m,桩长为25 m,最大加载量设计值13 742 kN。第1组对应的锚桩桩径为1.5 m,桩长为42 m,



图 2 桩端注浆管道(改造前)

Fig. 2 Pile end post grouting pipe (before modification)



图 3 桩端注浆管道(改造后)

Fig. 3 Pile end post grouting pipe (after modification)

容许抗拔力为 7 895 kN; 第 2 组对应的锚桩桩径为 1.5 m, 桩长为 26 m, 容许抗拔力为 4 308 kN。

3 试验设备

3.1 加载系统

单桩竖向承载力试验采用锚桩横梁反力装置进行加载, 该装置由反力系统、加载系统、位移测量系统 3 部分组成, 详见试验加载装置图 4。使用的试验设备包括反力梁 4 片、锚拔器 296 根、钢板垫 6 块、4 000 kN 油压千斤顶 8 台、高压电动油泵 2 套, 锚拔器的连接形式见图 5。

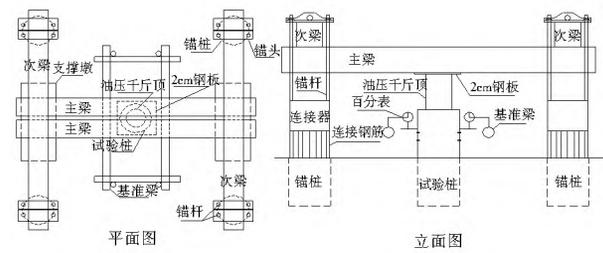


图 4 试验装置图

Fig. 4 Experimental device



图 5 锚拔器连接图

Fig. 5 Connection of Anchor extractor

3.2 内力测试系统

根据试桩主筋型号, 试验选用直径 22 mm 的 JXG 1 型

钢筋计作为测力元件, 经拉压双向带线标定后投入使用。钢筋计量程为 -40 kN(拉) ~ 60 kN(压)。钢筋计布设根据试桩桩周土层分布及埋深情况, 每个测试断面布设 3 套钢筋计, 共使用钢筋计 326 套, 此外, 还布设频率数据采集仪 2 台; 分线盒 2 套。除采用钢筋计测试桩身内力、桩侧阻力和桩端阻力以外, 还使用了滑动测微计 1 套; 滑动测微计测管、测环 200 套, 应变数据采集仪 1 台, 探头、绞盘、标定架、传送杆各 1 套。

4 加载方式

加载方式采用慢速荷载维持法, 即逐级加载。每级加载达到稳定条件后加下一级荷载, 直至达到终止加载条件, 然后分级卸载至零。 S_{a1} 、 S_{b1} 、 S_{c1} 的单级荷载为 2 000 kN, 加载级数为 13 级, 最大加载量为 26 000 kN, 最大加载量估算值为 28 000 kN; S_{a2} 的单级荷载为 2 000 kN, 加载级数为 9 级, 最大加载量为 18 000 kN; S_{b2} 、 S_{b3} 的单级荷载为 1 000 kN, 加载级数为 18 级, 最大加载量为 18 000 kN。每级加载后间隔 5 min 测读一次, 累积 1 h 后每间隔 30 min 测读一次。在每级荷载作用下, 每小时的沉降量不超过 0.1 mm, 并连续出现两次(由 1.5 h 内连续 3 次观测值计算), 即认为已达到相对稳定, 可加下一级荷载, 每级卸载量为每级加载量的 2 倍, 时间间隔为 15 min、15 min、30 min……, 全部卸载后, 隔 3 h 再读最后一次。

5 结果分析

5.1 承载力对比

根据各试桩试验结果, 利用 Q~S 曲线法确定单桩竖向极限承载力见图 6。

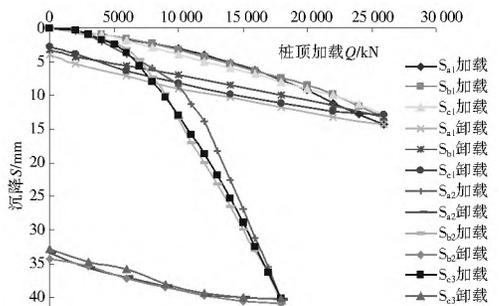


图 6 桩端后压浆与未压浆桩基 Q~S 曲线

Fig. 6 Q~S curves of the pile end post grouting pile and non grouting pile foundation

从图 6 中可以看出, 采用桩端后压浆技术的三根试桩 (S_{a1} 、 S_{b1} 、 S_{c1}) 的 Q~S 曲线为缓变型, 各级荷载下沉降与时间对数呈较好的线性相关, 曲线未出现下弯、突变, 说明试桩 S_{a1} 、 S_{b1} 、 S_{c1} 加载均未达到破坏。而且 S_{a1} 试桩累计沉降量为 14 260 mm, 最大回弹量为 10 342 mm, 回弹率 72.52%; S_{b1} 试桩累计沉降量 13 251 mm, 最大回弹量 10 164 mm, 回弹率 76.70%; S_{c1} 试桩累计沉降量 12 831 mm, 最大回弹量 11 102 mm, 回弹率 86.52%。累计沉降量不足 15 mm。卸载后桩的回弹率都超过 70%, 最高达 86.52%, 由此可以判断 S_{a1} 、 S_{b1} 、 S_{c1} 试桩单桩竖向极限承载力均不小于 26 000 kN。

至于常规灌注桩的三根试桩(S_{a2} 、 S_{b2} 、 S_{c2})，最大加载量均为 18 000 kN，而且 S_{a2} 试桩最大沉降量 40.276 mm，最大回弹量 6 952 mm，回弹率 17.26%； S_{b2} 试桩最大沉降量 40.971 mm，最大回弹量 6 692 mm，回弹率 16.33%； S_{c2} 试桩最大沉降量 40.120 mm，最大回弹量 8 411 mm，回弹率 20.96%。未压浆的三根试桩 $Q \sim S$ 曲线均为缓变型，累计沉降量均超过了 40 mm，回弹率最大为 20.96%，远远小于桩端后压浆的三根试桩的回弹率，说明未压浆桩由于桩端沉渣和持力层的扰动，桩端阻力在大幅沉降的情况下才因沉渣固结而有所发挥。综合判定，取累计沉降量达到 40 mm 时的荷载，则可判断未压浆桩基的竖向极限承载力为 18 000 kN。

上述分析说明，相同桩径、相同桩长的试桩，桩端后压浆的桩基与未压浆的桩基相比，其竖向极限承载力至少提高了 40%、沉降量减少约 25 mm，后压浆灌注桩在各级荷载下的沉降差异较小，沉降稳定的时间短，即后压浆工艺明显减小了桩基沉降。综上所述，桩端后压浆技术能够提高桩基的承载能力和稳定性。

5.2 桩身轴力、桩端阻力发挥性

从测得的数据图形(图 7、图 8)中可以看出：三根桩端后压力注浆试桩与常规灌注桩荷载传递规律基本一致。桩身轴力随着荷载增加由上至下逐步传递，随着桩入土深度的增加，桩身轴力逐步减小，反映了在各级加载条件下，桩在传递竖向荷载过程中，能够将桩顶荷载分散到桩周土体中去，桩侧土的侧摩阻力得以发挥。当大部分荷载给了桩侧土体的情况下，桩端承受的荷载较小，试桩显示出摩擦桩的力学特性，桩土形成共同的承载体系。在施加荷载过程中，当荷载较小时，荷载主要由桩侧摩阻力承担，传至桩端的荷载较小，而随着荷载的增加，传至桩端的荷载也增加。

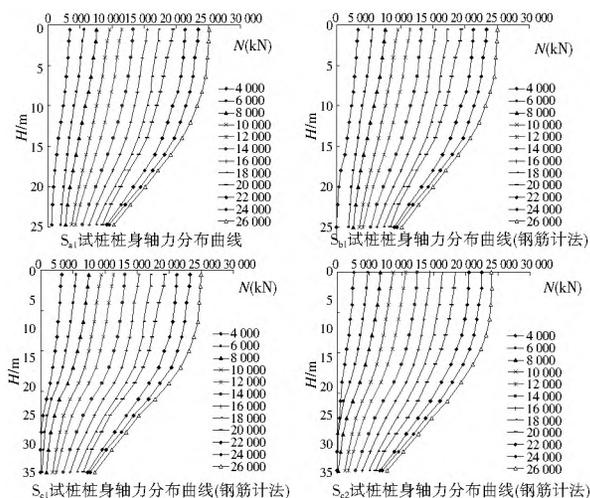


图 7 后压浆桩和未压浆桩的桩身轴力随着深度的变化曲线
Fig. 7 Variation curves of axial force of pile body with the depth of pile end post grouting piles and non grouting piles

图 7 为 S_{a1} 、 S_{b1} 、 S_{c1} 三根采用桩端后压浆和 S_{c2} 未压浆的钻孔灌注桩的桩身轴力随桩身的变化曲线图。从图中可以看出，当荷载较小时，桩的沉降变形很小，此时压浆后桩的轴力向下传递较压浆前的轴向荷载传递衰减程度要小。而随着荷载的增加，桩身产生的竖向变形加大，压浆后桩侧产生的摩阻力逐渐发挥，传至桩底的荷载比例明显较未压浆时

衰减要快，压浆后在施加于桩顶的荷载比压浆前大时，压浆后传至桩端的荷载反而比压浆前的小。这说明在桩端通过压浆的方法可使桩侧极限摩阻力明显增大。

图 8 为后压浆与未压浆时桩顶荷载与端阻力、侧阻力关系图。从图中可以看出，当桩顶荷载达到最大加载量时，采用桩端后压浆桩基的桩端阻力所占比例接近桩顶荷载的 1/2。该桩端阻力曲线斜率较大，表明后压浆桩的桩端端阻力发挥较快。当未压浆桩基的加载量达到最大加载量 50% 时，端阻力增长较快，最大加载量时，未压浆桩的桩端阻力约占 38%。

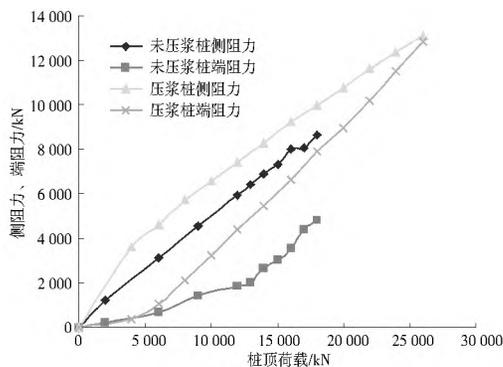


图 8 后压浆与未压浆桩桩顶荷载与端阻力、侧阻力关系
Fig. 8 Relationship between the end resistance and side resistance of the pile end post grouting piles and non grouting piles

5.3 桩侧阻力发挥性

图 9 为后压浆桩和未压浆桩的桩侧摩阻力随着深度的变化曲线图。从图中可以看出，随荷载的增加，两种情况下桩端阻力均呈增加趋势；加载初期，后压浆桩与未压浆桩的端阻力、摩阻力所占比例基本一致，桩端后压浆的效果并未充分体现出来；随着荷载的增加，桩侧下部摩阻力逐步发挥，由于桩端压浆对靠近底部的侧摩阻力也产生增强效果，桩端后压浆的桩基侧壁摩阻力开始较快发挥并且高于未压浆的桩基的摩阻力，与此同时，后压浆桩基的端阻力也呈现较快的增长。而未压浆的桩基随着荷载的增加，沉降较压浆后的桩基增加快，同时桩端阻力也在逐步发挥。图中显示，当荷载量为 12 000 kN 时，采用桩端后压浆的桩侧摩阻力均为 14 000 kN，与未压浆技术的桩侧摩阻力最大差异为 17%，即采用后压浆技术的效果并不明显；随着荷载的增加，桩侧下部摩阻力逐步发挥，达到最大荷载时，约为未压浆桩侧摩阻力的 1.2 倍左右。

以桩基在各土层的埋深为权重，求得最大加载量时各土层(中砂、粗砂)桩侧阻力值，每组试桩再以该组桩中各试桩平均值求平均值；最大加载量时桩端阻力也求平均值，桩端面积按测孔数据取值。各土层侧阻力、端阻力测试值见表 1。

表 1 最大加载量时各土层侧阻力、端阻力测试值

Table 1 The side resistance and end resistance values of each soil layer under the maximum loading

| 阻力 | 地层编号 | 最大加载量时各土层侧阻力、端阻力测试值 | |
|---------|-------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| | | 未压浆桩 $Q_{uk} = 18\ 000\ \text{kN}$ | 压浆桩 $Q_{uk} = 26\ 000\ \text{kN}$ |
| 侧阻力/kPa | 中砂 | 80 | 90 |
| | 粗砂 | 115 | 145 |
| 端阻力/kPa | 持力层中砂 | 4 000 | 9 000 |

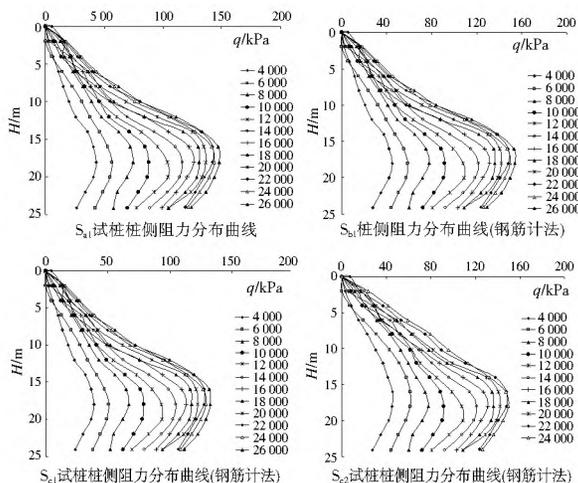


图 9 后压浆桩和未压浆桩的桩侧摩阻力随着深度的变化曲线

Fig. 9 Variation curves of pile side friction resistance with the depth of pile end post grouting piles and non grouting piles

5.4 桩端后压浆桩基极限承载力计算公式

以西安咸阳机场专用高速公路段的工程试桩为工程实例,通过采用桩端注浆和未压浆桩基静载试验和现场测得数据,依据持力层的注浆的机理特点及《建筑桩基技术规范》(JGJ 94 2008)的相关规定,分析发现,该地区桩端后压浆钻孔灌注桩的单桩极限承载力大小由桩径、桩长、桩端土、桩侧土、合理压浆量、实际注浆量、压力注浆量修正系数等因素决定,由此提出了适用于该区后压浆单桩极限承载力的计算公式:

$$Q_{pk} = Q_{sk1} + Q_{sk2} + Q_{pk} = U \sum_{i=1}^n \Psi_i \tau_p L_i + \zeta \lambda_g \left(U \sum_{i=1}^n \alpha \tau_p L_i + \Psi(\beta - 1) \sigma_p A_p \right) \quad (1)$$

式中: Q_{pk} 为单桩极限承载力; Q_{pk} 为压力注浆后桩端阻力; Q_{sk1} 、 Q_{sk2} 分别为上部未压力注浆段侧阻力和桩端压力注浆上返段侧阻力; Ψ_i 、 Ψ 分别为灌注桩桩侧、桩端尺寸效应系数; ζ 为修正系数,对于关中地区的黄土一般取 1.0; α 、 β 为桩侧、桩端增长系数,当为黏性土、粉土时, α 取 0.5~1.0, β 取 1.6~1.7; 当为粉砂、细砂时, α 取 1.5~2.0, β 在 1.7~1.8 之间; 当为中砂时, $\alpha = 2.8$, β 取 1.8~1.9; 当为粗砂、砾砂时, α 取 1.9~2.0, β 取 1.5~2.0; τ_p 、 σ_p 为极限侧阻力和端阻力。

下面以本工程的试验桩 S_{s1} 为例,对该公式进行验证,由于后压浆桩径为 1.3 m,长为 25 m, U 取 4.08 m, α 取 0.75, β 取 1.75, ζ 取 1.0,按照《建筑桩基技术规范》(JGJ 94 2008)计算的 26 000 kN,本公式建议的公式计算值为 27 042 kN,误差为 4%。由于本公式是按照实际用量来考虑的,而试验中实际用量要大于合理用量,因此建议在工程设计中可利用公式(1)进行初步设计阶段承载力预估,而具体设计还应进行静载试验来校核。

6 结论

(1) 在分析了桩端后压浆的钻孔灌注桩的增强机理的基础上,对试验场地的试桩采用桩端后压浆和未压浆两种不同灌注桩进行静载试验。在施工过程中为防止 PVC 管被刺破带来的影响,对现有注浆管进行改造,使用了国标的黑铁管。

(2) 对实测数据分析后得知,采用桩端后压浆技术的桩基竖向极限承载力比未压浆桩时提高了至少 40%,沉降量减少了约 25 mm,后压浆灌注桩在各级荷载下的沉降差异较小,沉降稳定时间短,即后压浆工艺明显减小了桩基沉降,提高了桩基的承载能力和稳定性。

(3) 当桩顶荷载达到最大加载量时,采用桩端后压浆桩基的桩端阻力所占比例接近桩顶荷载的 1/2,桩端阻力曲线斜率较大,后压浆桩的桩端端阻力发挥较快;加载量达到最大加载量一半左右时,端阻力增长较快,最大加载量时,该组桩端阻力所占比例达 38.6%。当荷载较小时,采用后压浆技术的桩侧摩阻力效果并未体现出来;随着荷载的增加,桩侧下部摩阻力逐步发挥,达到最大荷载时,约为未压浆桩侧摩阻力的 1.2 倍左右。

(4) 结合现场实测数据和桩端后压浆的注浆机理,提出了对类似地区桩端后压浆钻孔灌注桩的单桩极限承载力的计算公式,该结论对黄土地区的类似工程具有借鉴意义。

参考文献 (References):

- [1] 陶兴文,吴礼生. 钻孔灌注桩后压浆技术在上海地区的试验[J]. 探矿工程, 1999, (6): 45. (TAO Xing wen, WU Li sheng. Tests on Post Grouting into Bored Pile in Shanghai[J]. Prospecting Engineering, 1999, (6): 45. (in Chinese))
- [2] 黄生根,曹辉. 超长钻孔灌注桩应用后压浆技术的效果分析[J]. 建筑技术, 1999, 3(30): 180-181. (HU ANG Sheng gen, CAO Hui. Efficiency Analysis of Post Technology of an Overpressure Long Bored Grouting Pile[J]. Architecture Technology, 1999, 3(30): 180-181. (in Chinese))
- [3] 袁定安. 钻孔灌注桩低压力后压浆的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2001. (YU AN Ding an. Research on the Use of Later Low Pressure Grouting to the Drilling Hole Pour pile[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2001. (in Chinese))
- [4] G. Schnitter. Model of pile foundation[M]. Schweizerische Bauzeitung, 1961, (2): 13-19.
- [5] Bruck, D. A. Enchanting the performance of Large Diameter Piles by Grouting[J]. Ground Engineering, 1986, 5.
- [6] 冯定波. 桩端后压浆对提高钻孔灌注桩承载力的作用机理分析[J]. 中外建筑, 2009, 6: 198-199. (FENG Ding bo. Analysis on the Mechanism of Post-grouting Pile to Improve the Bearing Capacity of Bored Piles[J]. Chinese & Overseas Architecture, 2009, 6: 198-199. (in Chinese))
- [7] 任文峰. 桩端后压浆桩承载力试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2005. (REN Wen feng. Experimental Study on Bearing Capacity of Pile end Post-grouting Pile[D]. Xi'an: Chang'an University, 2005. (in Chinese))
- [8] 董晓明. 大保高速挖孔灌注桩承载特性数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 4(10): 81-85. (DONG Xiao ming. Bearing Capacity Numerical Simulation of Drilling Bored Piles in Da Bao Highway[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 4(10): 81-85. (in Chinese))
- [9] 董晓明. 人工挖孔灌注桩承载特性数值仿真分析研究[D]. 西安: 长安大学, 2010. (DONG Xiao ming. Numerical Simulation Study on Bearing Behavior of Man Excavated Pile[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese))