

后压浆法对桥梁单桩承载力增强效应研究

严伟飞¹, 尚佩², 陈永生¹, 廖东辉¹

(1.浙江省大成建设集团有限公司, 浙江 杭州 310006; 2.中交二公局 第二工程有限公司, 陕西 西安 710119)

摘要: 鳌江特大桥北引桥 9# 桩基施工中遇到不良地质, 采用桩底后压浆施工方法提高其基底承载力, 并通过单桩竖向抗压静载荷试验判定压浆处理是否满足设计要求, 研究桩底后压浆法对桩基基底承载能力的增强效应。结果表明, 经桩底压浆后单桩竖向极限承载力达 6 000 kN, 满足设计要求, 桩底后压浆法对桩基承载力具有增强效应。

关键词: 桥梁; 桩基; 后压浆; 承载力; 增强效应; 静载试验

中图分类号: U448.21

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)03-0110-03

桥梁工程中, 桩基承受桥梁上部结构传递给墩台的巨大荷载, 除承受竖向、水平荷载、弯矩等静力荷载外, 特殊情况下还承受地震等动力荷载, 桩基承载力至关重要。然而桩基施工中经常会遇到不利地质条件或地质变异等情况, 不得不通过加固提高桩基承载力。后压浆法通过注浆管向不良地质区注入水泥浆, 可使端承桩地基承载力得到增强。黄生根等研究发现钻孔灌注桩压浆后桩基承载力可靠度指标得到大幅提高。张成等认为桩端后压浆工艺可行, 能提高端承桩桩底承载力。该文以浙江鳌江特大桥北引桥 9# 桩基施工为工程背景, 通过单桩竖向抗压静力荷载试验研究桩端后压浆法对桩基承载力的增强效应。

1 工程概况

1.1 工程简介

鳌江特大桥北引桥长 710 m, 桥跨布置为 (12×30+7×50) m, 上部结构采用 30、50 m 先简支后连续 T 梁, 下部结构采用实体墩、桩基础。北引桥 9# 墩里程桩号为 K330+375.98, 左幅 4 根基桩, 分别为 9a-0、9a-1、9b-0、9b-1, 设计桩径 $\phi 1.5$ m, 桩顶标高 1.1 m, 桩底标高 -25 m, 桩长 26.1 m。均为嵌岩桩, 入岩深度不小于 2.5 倍桩径, 设计要求 9# 墩单桩竖向抗压承载力特征值不小于 6 000 kN。

1.2 工程地质条件

根据岩土工程勘察资料, 地基土层自上而下为:

1) 粉质黏土。厚 0.8 m, 灰黄色, 软塑, 饱和, 含大量植物根系, 韧性、干强度中等, 摇震反应无。2) 淤泥质粉质黏土。厚 5.2 m, 黄灰色, 流塑, 饱和, 切面粗糙, 含少量贝壳碎片, 局部夹薄层粉土, 韧性、干强度

高, 摇震反应无。3) 淤泥。厚 12.5 m, 灰色, 流塑, 饱和, 含少量贝壳碎片, 局部夹薄层粉土, 干强度、韧性高, 摇震反应无。4) 含粉质黏土。厚 1.1 m, 灰色, 软塑, 饱和, 切面粗糙, 含大量贝壳碎片及大量砾砂, 细砂, 韧性、干强度高, 摇震反应迅速。5) 块石。厚 4.8 m, 灰色, 中密, 饱和, 粒径 20~30 cm 含量 60%~70%, 2~10 cm 含量 10%~15%, 中粗砂充填, 分选性差, 胶结性差, 钻进易漏浆及塌孔。6) 中风化凝灰岩。厚 6.2 m, 青灰色, 凝灰质结构, 块状构造, 节理裂隙发育, 岩芯呈短柱状, 岩质坚硬(见图 1)。

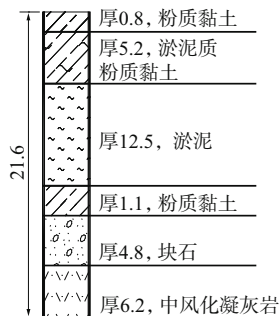


图 1 鳌江特大桥北引桥 9# 桩基单桩岩层剖面图(单位:m)

根据取芯结果, 9# 墩位及周边墩位地质情况异常复杂, 地下岩层跌宕起伏, 局部存在地质突变情况, 结构大部分破坏, 矿物成分显著变化, 风化裂隙发育, 岩体破碎, 岩石抗风化、软化能力差, 岩体承载力及摩阻力较差, 桩端岩石饱和单轴抗压强度标准值小于 2 MPa。采用摩擦桩进行计算的单桩轴向受压承载力为 4 800 kN, 仅为承载力特征值的 80%。因此, 对 9# 墩左幅基桩桩端进行后注浆处理。

2 后压浆施工

2.1 后压浆法工作原理

后注浆法是利用气压或液压的方式把能凝固的浆液均匀注入填料地层中,浆液以填充、挤密等方式驱走土颗粒中的水分和空气并填充其位置。经过一段时间后,浆液将原来松散的土颗粒胶结成整体,使土基得到加固,提高土基承载力。后注浆设备主要包括储浆桶、上料机、搅拌器、压力传感器、流量传感器、压浆输送管、实时数据采集设备和桩基压浆装置等(见图 2)。

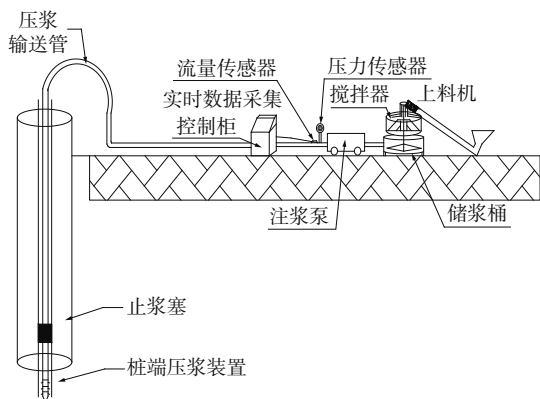


图 2 后注浆设备示意图

2.2 施工工艺

采用常规的注浆施工方法,注浆管为 $\phi 32$ 钢管,顶端高出地面不小于 100 mm,并用堵头封严,防止泥浆等杂物进入。每根桩在取芯孔里设置 1 根 $\phi 32$ (外径) $\times 2.75$ mm(壁厚)钢管作为注浆管,管与管之间用丝扣连接牢固。注浆喷头焊接于注浆管底端,注浆喷头管的外侧打 9 个 10 mm 小孔后缠防水胶布密封,在每个孔的下端焊接垫片,保护注浆孔不受挤压破坏。注浆管喷头见图 3。

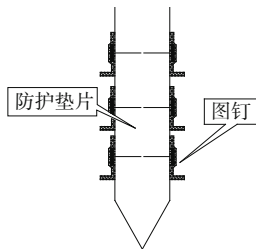


图 3 注浆管喷头示意图(单位:m)

后注浆工艺是决定压浆效果的关键,需严格遵循相关施工手册,其工艺流程见图 4。

2.3 注浆压力和注浆量控制

2.3.1 注浆压力及流量控制要求

注浆过程采用注浆压力及流量双控措施。

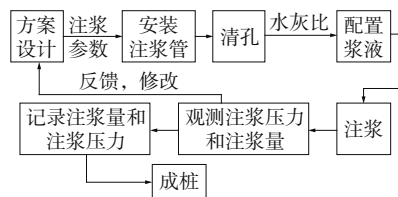
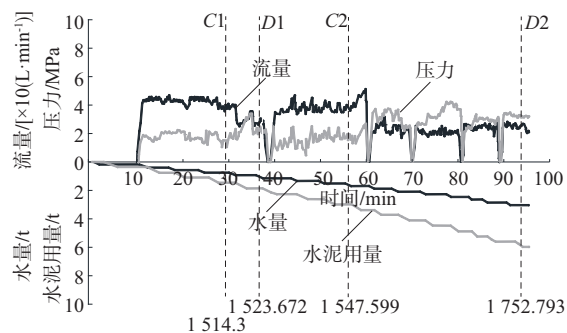


图 4 桩基后压浆施工流程

(1) 注浆量控制。对于直径 1.5 m 的桩,桩端压浆量为 4.5 t,持荷 5 min 后停止注浆。

(2) 注浆压力控制。注浆压力根据土层性质及注浆点深度确定,风化岩、非饱和黏性土及粉土的注浆压力宜为 5~10 MPa,饱和土层的注浆压力宜为 1.5~6 MPa,软土宜取低值,密实黏性土宜取高值。若注浆压力达到控制压力,并持荷 5 min,同时达到设计注浆量的 80%,则可认为满足设计要求。

该工程桩端注浆压力为 1.5~2 MPa,压力达到设计值后持荷时间不少于 5 min。为保证压力真实有效,注浆泵压力传感器需经过标定。为减少管路系统对注浆压力的负荷,注浆泵与注浆孔距离不大于 50 m,并确保注浆过程中注浆管路不产生弯折。现场注浆压力及流量见图 5。



C1、C2、D1、D2 为现场实际压力设定值。

图 5 现场注浆压力及流量曲线

规范要求注浆流量不大于 75 L/min。从图 5 来看,该工程最大注浆流量为 69.8 L/min,满足规范要求。

根据规范,注浆压力和注浆量满足以下条件之一时可终止注浆:1) 注浆总量和注浆压力均达到设计要求;2) 若注浆压力未达到控制压力,但达到控制压力的 80%,应增加设计压浆量的 120%后终止压浆;3) 若注浆压力未达到控制压力的 80%,应增加设计压浆量的 150%后终止压浆。

2.3.2 注浆量及注浆压力估算

注浆量按 JTG D63—2007《公路与桥涵工程地基基础设计规范》计算确定,单桩注浆量 G 为:

$$G_c = a_p d \quad (1)$$

式中: a_p 为桩端注浆量经验系数; d 为桩径。

该工程桩基注浆量设计值为 4.5 t。因压浆量是经过理论计算得出,且不同地质条件压浆量会不同,浆液注入量与用料计算只是一个估计值,最终应以实际注浆量为准。该工程实际注浆量及注浆压力见表 1。

表 1 注浆量及注浆压力

桩号	注浆时间/h	注浆压力/MPa	设计注浆量/t	实际注浆量/t
9b-0	9.9	1.50	4.5	13.42
9b-1	9.9	1.52	4.5	7.76
9a-0	9.1	1.54	4.5	6.73
9a-1	9.1	1.75	4.5	7.52

3 荷载试验及结果分析

9# 墩桩基试验荷载采用堆载法,反力系统采用扇形架+砂包形式,加载系统采用液压千斤顶,数据分析采用全自动静载桩基测试分析仪。采用逐级等量加载方式,每级荷载施加后,在第 5、15、30 min 测读桩顶沉降量,以后每隔 30 min 测读一次,直至桩顶沉降达到稳定为止。分级加载的最大值不小于设计单桩承载力特征值的 2 倍,即 12 000 kN。9a-0 号桩位移测试结果见表 2, $Q-s$ 、 $s-lgt$ 曲线分别见图 6、图 7。

表 2 9a-0 号桩基位移测试结果

荷载/kN	历时/min		沉降/mm	
	本级	累计	本级	累计
0	0	0	0.00	0.00
2 400	120	120	2.65	2.65
4 800	120	240	2.54	5.19
7 200	120	360	3.68	8.87
9 600	120	480	5.52	14.39
12 000	120	600	6.89	21.28
9 600	60	660	-1.32	19.96
7 200	60	720	-1.60	18.36
4 800	60	780	-2.28	16.08
2 400	60	840	-2.57	13.51
0	180	1 020	-3.17	10.34

注:沉降量以向下为正、向上为负。

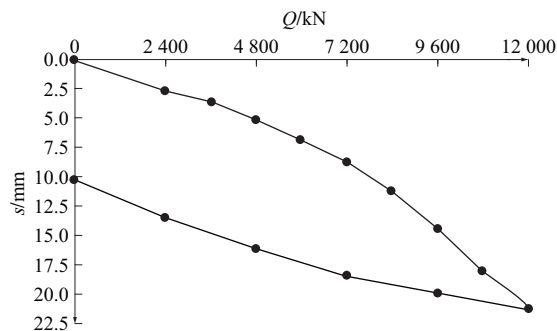


图 6 9a-0 号桩基承载力 $Q-s$ 曲线

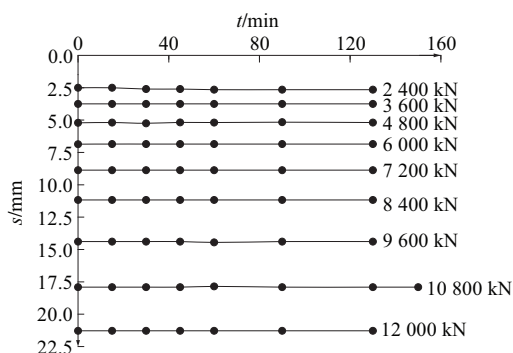


图 7 9a-0 号桩基 $s-lgt$ 曲线

由表 2 可知:9a-0 号桩最大沉降量为 21.28 mm,最大回弹量为 10.94 mm,回弹率 51.4%。

按规范要求,该桩最大单桩竖向极限承载力可取荷载试验最大值。由图 6、图 7 可知:9a-0 号桩的 $Q-s$ 、 $s-lgt$ 曲线均未出现异常。在达到设计要求的最大试验荷载 12 000 kN 时,桩顶累计位移量为 21.28 mm,卸载后桩顶残余沉降量为 10.34 mm。根据 JGJ 106-2014《建筑基桩检测技术规范》,单桩竖向抗压承载力特征值可取单桩竖向抗压极限承载力的一半,即 6 000 kN。经桩底压浆后单桩竖向极限承载力达 6 000 kN,满足设计要求。

4 结论

(1) 通过压浆,浆体的压力作用使桩底虚土压密,一方面可消除高压缩性软垫的影响,另一方面可消除由成孔造成的桩底虚土应力松弛的负作用。

(2) 压浆可改变土体的受力状态。桩尖部分土体先受压,然后卸载,在进行压桩时土体处于再压缩状态,模量提高。

(3) 钻孔灌注桩成桩后应用桩底压浆技术将水泥浆液均匀压注入桩端土体,可改善桩周边界条件和桩底砂土工程特性,提高桩基承载力,减小桩基沉

(下转第 117 页)

宽度影响显著,失稳荷载随翼缘板宽度增大基本呈线性增长。3) 腹板厚度与腹板波高的增加都会引起预弯钢梁预压失稳荷载小幅增加,但与翼缘板宽度的影响相比变化幅度很小。综合分析,预弯钢梁失稳荷载受翼缘板宽度影响最显著。此外,参数分析中所有钢梁的失稳荷载均小于试验预弯荷载 96 kN,预压过程中需做好足够的预防失稳措施,保证预压阶段钢梁不发生屈曲失稳。

6 结论

(1) 合理选择钢材、砼的应力应变关系曲线,采用砼损伤塑性模型和钢材的强化本构模型能较好地模拟波形钢腹板预弯组合梁从预弯阶段至加载破坏全过程的结构响应。

(2) 波形钢腹板预弯组合梁的上、下翼缘板为主要受弯构件,波形钢腹板对抗弯贡献很小。工程应用中,在满足经济性的情况下,可适当增加钢梁高度或增大钢梁翼缘板宽度以获得更高的预压应力和极限承载力。

(3) 增大钢梁翼缘板宽度可显著提高钢梁预压稳定性,但会增加额外的用钢量。因此,需优化预弯钢梁构造形式,使其能在保证有足够承载力的情况下大幅增加预压失稳荷载。简化预压防护措施仍需进一步研究。

参考文献:

- [1] Maeda Yukio, Ajikawa Yasuharu, Kida Hideyuki. Static and fatigue behaviors of continuous composite beams with preflexed beams[R]. Technology Reports of the Osaka University, 1982.
- [2] Asakawa Kazuo, Awakami Hiromichi, Yoshioka Toshiharu, et al. Dynamic response of steel and composite

girders under high speed train[R]. Quarterly Reports-Railway Technical Research Institute, 1983.

- [3] Doobyong Bae, wang-Myong Lee. Behavior of preflex beam in manufacturing process[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2004, 8(1).
- [4] 黄侨. 预弯组合梁桥的设计理论及试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2000.
- [5] 邢力. 基于标准跨径的预弯组合简支梁桥的设计研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [6] 郭赵元. 预弯组合梁开裂荷载试验及理论研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [7] 李喆. 预弯梁预加载失稳机理及其在不同支撑条件下的稳定性研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [8] 林梦凯, 冀伟, 李海莲, 等. 波形钢腹板工字型钢梁的手风琴效应研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(2).
- [9] 陈卓昇, 黄侨, 杨明. 波形钢腹板预弯工形梁的试验研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2013, 43(5).
- [10] GB 50010—2002, 混凝土结构设计规范[S].
- [11] 张劲, 王庆扬, 胡守营, 等. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数验证[J]. 建筑结构, 2008, 38(8).
- [12] 刘巍, 徐明, 陈忠范. ABAQUS 混凝土塑性损伤模型参数标定及验证[J]. 工业建筑, 2014, 44(增刊 1).
- [13] 郭明. 混凝土塑性损伤模型损伤因子研究及其应用[J]. 土木工程与管理学报, 2011, 28(3).
- [14] Jun He, Yuqing Liu, Xiaoqing Xu, et al. Loading capacity evaluation of composite box girder with corrugated webs and steel tube slab[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2014, 50(4).
- [15] Jun He, Chuanxi Li, Yuqing Liu, et al. Dynamic characteristic analysis of composite girder with corrugated steel webs considering shear deformation[A]. Proceedings of International Symposium on Steel Structures[C], 2015.

收稿日期: 2019—09—24

(上接第 112 页)

降量。

参考文献:

- [1] 黄根生, 沈佳虹, 李萌. 钻孔灌注桩压浆后承载性能的可靠度分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(5).
- [2] 张成, 万晓峰, 刘传新. 桩端后压浆工艺对单桩承载力及桩身沉降的影响分析[J]. 现代交通技术, 2018, 15(4).
- [3] 刘占伍. 后压浆灌注桩质量控制研究[J]. 北方交通, 2018(9).
- [4] 杨哲, 张会强, 刘朋. 后注浆法钻孔灌注桩在黄驿港煤

码头三期工程中的应用[J]. 港工技术, 2013, 50(3).

- [5] 胡永生, 张伟, 陈善荣, 等. 软土地区桥梁桩基后压浆施工工艺及面临的问题探讨[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2017(8).
- [6] 彭国婧. 灌注桩后压浆法技术施工工艺探析[J]. 中国新技术新产品, 2010(13).
- [7] 杨小鹏, 党虎平. 后压浆施工工艺[J]. 江西建材, 2015(19).
- [8] GB 50010—2002, 混凝土结构设计规范[S].

收稿日期: 2019—07—10