

苏通大桥超长桩桩底后压浆试验及效果

彭仕奇

(江苏经贸职业技术学院, 江苏 南京 210007)

摘 要:在苏通大桥松散软弱的地层条件,实施超长($>100\text{ m}$)、超大($\varnothing 2.5\text{ m}$)摩擦桩桩底后压浆工程,在我国是首次运用。结合工程实践,就压浆工程的设计、施工的技术要点进行全面介绍。通过对钻孔取样分析,指出浆液初凝时间地表实验与地下实际存在较大差异;通过施工体验,结合取样显示的浆液扩散渗透状况,提出可渗透地层以注浆量为控制参数,压力不列为控制参数的思路。

关键词:钻孔灌注桩;桩底后压浆;注浆量;超长桩;苏通大桥

中图分类号:U443.15⁺4 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2011)11-0054-05

Test of Pile Bottom Post Grouting for Super Long Pile in Sutong Bridge and the Effect/PENG Shi-qi (Jiangsu Institute of Economic & Trade Technology, Nanjing Jiangsu 210007, China)

Abstract: Pile bottom post grouting for friction pile with super long ($>100\text{ m}$) and super large ($\varnothing 2.5\text{ m}$) was first applied in loose and soft formation in Sutong Bridge construction in China. Based on the engineering practice, the design and key technical points were introduced. By the analysis on the samples, the obvious difference of slurry initial setting time between ground experiment and underground situation was found. According to the slurry diffusion and permeation conditions by sampling, the grouting amount, not the pressure, is taken as control parameter in permeable formation.

Key words: bored grouting pile; pile bottom post grouting; grouting amount; super long pile; Sutong bridge

1 工程概况

苏(州)-(南)通大桥是迄今世界上跨度最大的一座斜拉桥。路线全长32.4 km,由主跨1088 m的跨江大桥和南、北岸接线3部分组成。创造了最大规模群桩基础、最高桥塔、最大跨径、最长斜拉索4项斜拉桥世界纪录。基岩埋藏深达300 m,覆盖层厚,土性软弱。基础位于软弱土层中,承受的静、动荷载大,桩基数量多,结构受传力机理复杂,群桩效应突出,国内外规范难以涵盖。

2 地质条件

工程位于长江下游,地质条件较差,具体如下。

第四系全新统冲海积层及上更新统冲积层。岩性以滨海相、河口相粘性土、砂土为主。桩基下部地基土的地质年代、岩性、分布规律和物理力学性质见表1。桩底位于⑧₂粉细砂层。

3 工程试桩

3.1 试验目的

(1)确定桩底后压浆在松散的砂土层中能否提高单桩承载力30%以上。

(2)分别采用U形管和直管两种管道布设进行

桩底压浆效果对比,以确定压浆管的布设方法。

(3)选择确定施工工艺,包括水泥浆配比、注浆流程、注浆量、注浆压力的确定。

(4)比较并选择注浆设备。

3.2 试验程序

试验分2个阶段实施。

第一阶段试验6根工艺桩,桩位不在工程桩设计桩位;第二阶段是3根工程桩试桩。共9根试桩,详见表2。

3.3 试验依据

《公路桥涵设计通用规范》(JTJ 021-89);

《公路桥涵施工技术规范》(JTJ 041-2000);

《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ 024-85);

《苏通大桥工程勘察报告》。

3.4 桩底压浆施工

3.4.1 注浆管道材料的选择及安装

注浆管道材料包括注浆管、桩端部注浆器、橡胶管、图钉等。

注浆管采用符合《低压流体输送用焊接钢管》(GB/T 3092-1993)的焊接钢管,规格 $\varnothing 33.5\text{ mm} \times$

收稿日期:2011-07-29;修回日期:2011-11-06

作者简介:彭仕奇(1955-),男(汉族),湖南人,江苏经贸职业技术学院高级工程师,探矿工程专业,曾多年从事探矿工程及岩土工程技术工作,江苏省南京市石江宁大学城龙眠大道180号,sqczpb@163.com。

表 1 地层工程地质特征表

时代	地层编号	地层名称	层顶标高/m	岩性描述	含水量 W/%	密度 ρ /(g·cm ⁻³)	孔隙比 e	塑性指数 I _p	液性指数 I _L	标贯击数 N	压缩系数 α_{1-2}	压缩模量 e_{1-2}
	⑤ ₁	粉细砂	-49.72	灰、清灰色,中密~密实,局部为粉砂与亚粘土互层	26.0	1.91	0.770			37.7	0.13	14.8
	⑤ ₂	亚粘土	-58.09	灰、灰黄色,软塑、局部流塑,夹亚砂土极薄层,仅以透镜体状局部分布	28.5	1.91	0.836	12.2	0.82	12.3	0.33	5.49
Q ₃	⑥ ₁	中粗砂	-68.27	灰色,密实,含砾石,局部为含砾细砂	14.9	2.04	0.542			41.8	0.08	18.6
	⑥ ₂	细砂、粉砂	-73.31	灰色,密实,局部夹中粗砂	20.7	1.97	0.645			53.6	0.11	16.5
	⑦	粉细砂	-82.41	灰、清灰色,密实,含少量小砾石	21.6	1.98	0.651			57.9	0.11	16.5
	⑧ ₁	中粗砂	-87.65	灰色,密实,含卵砾石,局部含砾砂、细砂	13.8	2.02	0.507			66.6	0.09	17.8
	⑧ ₂	粉细砂	-101.50	灰色,密实,局部夹粗砂	22.4	1.99	0.653			65.1	0.11	15.7
Q ₂	⑨	亚粘土、粘土	-129.10	蓝灰、灰、黄褐色,硬塑,含钙质结核	22.5	2.06	0.628	17.9	0.24	38.0	0.13	14.1

表 2 试桩一览表

位置	编号	桩直径/m	顶标高/m	底标高/m	桩长/m	砼桩号	测试方法
上	SZ2	2.5	4.0	-121	125	C40	先注浆后测试(单层荷载箱)
游	工艺孔 1	2.5	4.0	-121	125		仅作钻孔,不浇砼
侧	工艺孔 2	2.5	4.0	-121	125	C25	利用工艺孔做注浆(U管)研究
	SZ3	2.5	4.0	-106	110	C40	先注浆后测试(单层荷载箱)
下	工艺孔 3	2.5	4.0	-106	110		仅作钻孔,不浇砼
游	工艺孔 4	2.5	4.0	-106	110	C25	利用工艺孔做注浆(直管)研究
	SZ4	2.5	4.0	-121	125	C35	先测试注浆后再测试(双层荷载箱)
侧	工艺孔 5	2.5	4.0	-121	125		仅作钻孔,不浇砼
	工艺孔 6	2.5	4.0	-121	125	C25	利用工艺孔做注浆(U管)研究

6.5 mm。

注浆器采用规格为 $\varnothing 33.5\text{ mm}\times 6.5\text{ mm}$ 钢管制作而成。注浆器有 2 种类型,一种是直管,另一种是 U 形管。直管管壁四边打孔,共 4 圈,位置上下错开,避免钢管强度不够受损;U 形管则在两侧和下侧打孔,孔径均为 8 mm。

图钉钉帽尺寸为 10 mm 的普通图钉。用来封堵注浆器孔。

橡胶管直径 $< \varnothing 33.5\text{ mm}$,壁厚 1.5 mm,套在注浆器上。

注浆器安装时必须与注浆导管焊接牢固。出浆孔采用图钉和橡胶管封闭,防止桩底沉渣、土体侵入堵塞注浆通道。要求直管注浆器在安装时进入桩底沉渣或土层下 40 cm,注浆导管接至地表,高出桩顶 30 cm。U 形管注浆器安装在钢筋笼底部。

预埋检测材料采用规格为 $\varnothing 127\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 钢管制作,用来探孔取样检测注浆质量。

安装过程中,钢筋笼不得强行扭转、墩放,确保注浆管路和检测管不被人损坏。

3.4.2 浆液材料及要求

浆液所需要材料是:水泥、U 形微膨胀剂、膨润

土、高效减水剂。

浆液主要性能指标:初凝时间 3~4 h,浆液稠度 20 s,7 天强度 $\geq 10\text{ MPa}$ 。

通过室内浆液配比试验,优选以下配比:水灰比 0.5~0.55,U 形微膨胀剂为水泥用量的 4%,膨润土为水泥用量的 1%,高效减水剂为水泥用量的 5%。

3.4.3 压浆设备

用 BW-150、BW-320 型泵进行试验,高强度钢编高压胶管、16 MPa 压力表、2 in($\varnothing 50.8\text{ mm}$)闸阀。

3.4.4 压浆工序

(1)在灌注桩灌注混凝土 24~48 h,注入清水开塞。以后每天上、下午各通水一次,每次约 30 min,保证注浆管道畅通。待桩身砼强度达 75% 以上时(灌注混凝土完成 7 天以后)实施压浆。

(2)压浆分 3 次,每次都采用循环均匀间隔跳压,以保证浆液均匀分布。

(3)第一、二、三次循环压浆水泥用量分别控制在 3、3、2 t 左右。

第一次压浆后等待 3 h,第二次压浆后等待 4 h。每次压浆完毕后注入清水替浆。

(4)以压浆量控制为主,压力控制为辅。实际

上,试桩压浆量均达到 8 ~ 10 t,注浆压力在 6 MPa 以内。

3.5 压浆效果

采用自平衡试验方法、桩中及桩周边钻探取样检测。

3.5.1 压浆前后承载力对比

压浆前桩端阻力 730 kN;压浆后桩端阻力 11318 kN。

压浆前试桩单桩竖向极限承载力为 16628 kN;压浆后试桩单桩竖向极限承载力为 49000 kN。

3.5.2 钻探取样检测

每根桩布置了 5 个检测钻孔,其中桩中一个预留检测孔,另外 4 个检测孔距桩周边 0.5、1.0、2.0、4.0 m 处。

每个钻探取样检测孔均见有未固结的水泥浆及其与砂层所形成的混合物,土体结构已发生根本性改变。

大部分钻取出的岩心中水泥浆尚未固结,有少量成半固结状态,未固结或半固结的含有水泥浆的岩心在取出后放入岩心箱内 12 ~ 24 h 后逐渐固结,由此可见随着时间的推移,注浆效果还会有更大提升。

水泥浆侵入厚度见表 3。

表 3 水泥浆侵入厚度

位 置	最大侵入厚度/m	最小侵入厚度/m
桩中孔	8.59	3.9
桩周 0.5 m 孔	9.72	3.2
桩周 1.0 m 孔	11.65	3.7
桩周 2.0 m 孔	11.65	5.1
桩周 4.0 m 孔	6.7	1.6

钻探取样目测结果表明:

(1)U 形管注浆工艺明显好于直管,并且桩底及桩周 0.5 m 范围内影响较大,在土体中水泥浆相对集中;直孔则往桩周扩散更明显。

(2)总的趋势是 0.5 m 以外水泥浆侵入厚度渐小,有的虽然水泥浆侵入厚度较大,但水泥浆侵入土体的量在减少;不同探孔位置和地层,水泥浆在取上的岩心样品中含量在 10% ~ 15% 之间。

(3)颗粒越粗,孔隙率越大的层位水泥浆越容易侵入。

(4)一般在桩体周围 0.5 m 范围内水泥浆含量较高,在三维空间分布上,相同条件下水泥浆向下的渗透能力强,向上渗透能力差,而侧向渗透能力介于两者之间。

(5)在所检测的试验桩中,水泥浆渗透深度最大达到 11.6 m,根据工程勘察资料,该桩底处于中粗砂和砾砂地层中,其渗透性好,由此认为孔隙率越大应相应增加注浆量。

3.5.3 标贯试验(见表 4)

表 4 标贯试验表

孔段/m	标贯实测击数/击
-116.68 ~ -116.98	104
-119.68 ~ -119.98	248
-123.18 ~ -123.48	259
-126.58 ~ -126.88	442

注浆后地层强度明显强于注浆前的地层强度。

注浆前后单桩承载力发生很大变化,注浆后单桩极限承载力提高 195%。

4 几点认识

4.1 本工程对拓展桩底压浆技术具有深远意义

桩底后压浆技术在国外已有 200 年历史,我国 20 世纪 90 年代开始有不少城市有应用。尽管这项技术具有诸多优点,却很少得到大规模的应用。其原因就在于《建筑桩基技术规范》(JGJ 94 - 2008)中桩后注浆内容太过宽泛,可操作性差。但凡能将桩加长、加粗、加密解决问题的,设计单位一般不会采用后压浆技术。而在采用后压浆技术工程中,一般都遵循谁施工、谁设计、谁负责的惯例。绝大部分的后压浆工程效果检验以承载力为唯一标准,因而压浆后的浆液分布、土体性能的变化等缺少实物资料及相关数据。因此,桩底压浆至今仍偏重于经验。

桩底后压浆的工程实践中,还没有与此工程相类似的地质条件、超长、超大桩的后压浆成功案例。这就是为何在第一阶段试验是 3 根工艺桩(所谓工艺桩是专门用于试验后压浆工艺方法的桩基,试验过后即被废弃)。花费如此巨大成本,一方面是科学的谨慎态度,但同时也反映出对后压浆方法在这种地质条件下,在超长超大桩基中能否达到预期效果存在很大的疑虑。

桩基设计要求提高单桩承载力 20%,压浆试验要求提高单桩承载力 30%。而试验效果超出预期,最大提高承载力达到 195%。试验成功,使桩底后压浆工程的应用范围大为扩展。

检验方法也与以往不同。笔者以前所做后压浆工程的检验,是压浆后的实际承载力与理论设计值的差值或者是与同一工程未压浆桩基承载力的差值。而理论设计值一般都要低于实际值;与同一工

程的未压浆桩基的差值,其误差无法测量,因此不能确定承载力提高幅度的准确性。而本项工程,是在同一根桩上压浆前先行测试单桩承载力,压浆后再测试承载力的变化,因此,其提高幅度是绝对准确的数据。试验结果让我们对桩底压浆的潜力有更深入的认识。更可贵的是其钻探取样检验,提供了浆液分布、土体变化等难得的数据,对提高桩底压浆的理论研究有参考意义。

4.2 注浆总体方案设计时应重点考虑的参数

注浆总体方案设计时应重点考虑3个参数:浆液配方、压力、注浆量。

4.2.1 浆液配方

在考虑配方时,水泥浆的强度一般不会太多关注,重点是水灰比和初凝时间、流动性。水灰比常用0.45~0.55。初凝时间关系到注浆的范围控制,是重中之重,一般多选择初凝时间3~4 h,主要考虑从浆液搅拌到全部浆液送到桩底所需要的时间、机械可能出现故障等意外,留有一定余裕。而检验结果差异太大。压浆后7天钻孔取样,将取样时间考虑在内,取上的样已是压浆后8~15天,但绝大多数样中水泥浆并未固化,用手捏即变形、碎掉,可见在不同于地面室内的温度、压力、特别是有地下水的环境下,水泥浆的初凝和终凝时间会大大延长。笔者曾对深层搅拌桩进行取样检验,在实验室2 h初凝时间的浆液,喷入土体7天后,也没有固化(这与本次试验中的情况相吻合),而在添加了一定量的生石膏的桩中固化效果相当理想。原本也想在此次试验中加入生石膏,但考虑到流动性会有所降低,试验耗资巨大,不容失败,因此采取相对保守的方法。这为后压浆工程的浆液配方提供了一个教训:在地下水条件下初凝时间的准确把握,还是一个有待研究的问题。

4.2.2 压力和注浆量

这2个参数决定压浆成败,但如何确定又没有可供操作的依据。

当时的设计思路:从简化设计考虑,将地层分为浆液可渗透与不可渗透的两类。对不可渗透地层,考虑的是土体压缩后永久变形,从而改变土体的工程力学性能,使其成为理想的持力层,与压入的水泥浆组合成合乎要求的持力层。在不可渗透的地层条件下,主要以压力为主要控制参数,目的是将土体挤压改性。

本项目主要为砂砾层,因此按可渗透的考虑,而可渗透地层主要以孔隙率作为主要设计依据。如果此想法成立,则可以采用反推法,即从提高桩基的承

载力一定幅度,桩底的持力层应该有什么样的改变。根据反推过来的地层要求,以此来确定注浆量,注浆压力则作为次要因素。于是,浆液在桩底会以何种方式扩散,成为确定浆量的关键。可这方面的资料数据无从得之。

最后还是决定从经验出发,确定了注浆量和注浆压力双参数控制的方案。

后来的取样检验结果,提供了在渗透性地层中水泥浆的分布规律,即孔隙率大的地层中水泥浆含量明显大于孔隙率小的地层;在空间分布上,往下最多,往侧次之,最次为往上。

而原先设计确定的注浆压力始终无法达到。并且注浆压力并不随着注浆量的增加而提高。第一次、第二次和第三次注浆,按常理压力应该是不断升高的,但实际情况是压力基本平稳。

上述现象说明:注浆量和浆液配方一旦确定,注浆压力只与孔隙率的大小及水泥浆的流动度、初凝速度有关,完全成了被动性参数。本项目中,虽然注浆压力没达到预想,甚至低于以往在 $\phi 1.5$ m桩基后压浆工程的压力,但桩底土体性能改变非常明显。标贯数从原先的最高66击提高到最低104击、最高442击。这些数据,还只是在水泥浆并未终凝的情况下检测得出的,最终的结果肯定远高于实测数据。

由此可以推想,在渗透性地层中,大部分都是砂性土,没有粘性,用压力改变工程力学性能,只是暂时将孔隙压缩,一当浆液凝固,体积收缩,压力会有所释放,加上地下水的作用,被挤压的砂性土相当一部分会恢复原状。压力对于砂性地层性能改变作用很微小。对土体的改变,主要依据水泥浆渗透,与砂层胶结形成真正的持力层,从而提高地层的承载力。

综上,笔者认为:在松散可渗透地层,压浆设计只需确定注浆量就行,压力不做为控制参数;地层越是松散,水泥浆渗透性更好,只要注浆量足够,地层的性能改变更大,后压浆提高承载力效果就越明显。这也是本项目中压浆效果超出预期的原因。

4.3 注浆工艺及设备

注浆器的设计很费了一番心思。当时担心和钢筋笼一起下时可能损坏和变形;上部巨重的混凝土覆盖下注浆管能否保持完整;在混凝土初凝后通道能否打开。

对此采取的措施是:直管注浆器,采用实心钢棒车制,保证有足够的强度。40 cm长的注浆器超出钢筋笼底,是插入到孔底地层中的。U形管注浆器,是平置在笼底的,采用加厚钢管。注浆器的孔,用图

钉扣住,再用自粘胶带缠裹牢实,再套上橡胶车胎保护。在灌注混凝土前,往孔内投放 20~30 cm 的砾料,防止混凝土封死注浆管。整个试验中没有一根注浆管出现问题。

桩身混凝土初凝后,注水开塞,最大瞬时压力直管在 4 MPa 以内,U 形管都在 6 MPa 以内,当初担心的混凝土初凝后堵死注浆孔的事没有发生。现在看来,这个担心也许是多余的,因为设计要求投放砾料 20 cm,实际操作中,由于灌注混凝土由其它单位担任,投放砾料没有达到设计要求,还有一个孔干脆忘记投放砾料了。

注浆泵的选用。BW-320 型泵比 BW-150 型泵要好,主要体现注浆效率高。但在注浆工程量很大的条件下,都不是最佳选择。2 种泵虽然都可以完成注浆任务,但在注粘稠的水泥浆时,部件容易磨损,外观容易腐蚀,体积质量也大。最好选用砂浆泵,小巧结实耐用。

搅拌设备。试验时使用旋转叶片式搅拌桶,由于搅拌桶上面是敞开的,搅拌速度慢,旋转搅拌质量差,效率低。当初浆液配方本来想加入一定量的生石膏,但浆液会更粘稠,搅拌要求更高,而旋转叶片式搅拌设备难以达到要求,可能会导致堵管等恶性故障,因此只好放弃。在施工桩底压浆时,应更换为喷射式搅拌器,体积小,比旋转叶片搅拌效率高,搅拌质量好。并且一般应该配 2 套。

5 结语

虽然在松散软弱地层中,长度 > 110 m、直径达 2.5 m 的巨型桩采用后压浆技术提高承载力 30% 以

上在我国尚属首例,但其设计和施工的技术,对从事压浆工程的技术人员并无艰难深奥可言。它的意义更多的在于对我们思维的拓展,以及对压浆技术所具有潜力认识的提升。钻孔取样发现水泥浆大部分尚未固化的现象对我们提了个警示:自以为不成问题、教科书及规范给予推荐、室内重复试验多次得到验证的配方,其实并不可靠,尤其是对初凝时间有特别要求的桩后压浆;浆液分布及注浆时的压力表现,对业界似乎一致认同的桩后压浆设计中压力、注浆量并重的观点,是一次冲击和考验。

笔者从本工程的试验所得出的认识和看法,不一定准确和全面,希望本文能够抛砖引玉,欢迎业内专家和同行批评指正。

参考文献:

- [1] 雷海军,梁其深,杨吉旺. 复合注浆技术在桥桩基础补强中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(4):70-71,75.
- [2] 徐华,李天斌. 岩土体注浆技术初探及展望[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(1):38-42.
- [3] 麦荣强. 化学灌浆在岩溶地区软土及土洞地基处理中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(5):69-71.
- [4] 李友东,杨生彬,邵卫信. 后压浆钻孔灌注桩施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(4):49-52.
- [5] 陈飞,段新胜,方青春,等. 钻孔灌注桩桩侧桩端后压浆技术在武汉瑞通广场的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2004,31(1):29-31.
- [6] 杨米加,陈明雄,贺永年. 注浆理论的研究现状及发展方向[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(6):839-841.
- [7] 邱砚秀. 钻孔灌注桩桩端后压浆施工技术[J]. 铁道标准设计,1999,(12).
- [8] 陈小明,林山. 泥浆护壁灌注桩桩底后压浆技术及其单桩竖向承载力的估算方法[J]. 探矿工程,1999,(3):17-20.

(上接第 53 页)

沉降预测与实测沉降的准确性,得出指数曲线对软基沉降的预测相对于双曲线沉降预测更加准确。

(2) 两种曲线只是在恒载期沉降才与实测沉降相吻合,对变荷载作用需考虑选用其他方法进行沉降预测。

(3) 由于指数曲线和双曲线都是根据前期实测沉降资料进行后期的沉降的推算,虽然曲线拟合方法推算原理不强,理论性不够明确,预测精度不高,但是比较简明,有一定的实用性,可以根据实测数据进行初步预测,便于工程技术人员的应用。

参考文献:

- [1] 郑澄锋,等. 软土路基沉降计算问题探讨[J]. 路基工程,

2002,(4):7-9.

- [2] 殷宗泽,等. 沪宁高速公路地基沉降有限元计算分析[J]. 水利水电科技进展,1998,18(2):22-26.
- [3] 黄少杰,等. 一维反演分析预测汕汾高速公路软基沉降[J]. 东南大学学报,2000,30(3A):111-115.
- [4] 袁俊平,等. 用神经网络预测路基总沉降和工后沉降[J]. 东南大学学报,2000,30(3A):162-166.
- [5] 赵九斋. 连云港软土路基沉降研究[J]. 岩土工程学报,2000,22(6):643-649.
- [6] 吴大志. 路基沉降计算方法及高路堤沉降稳定分析验证[D]. 湖南长沙:中南大学,2000.
- [7] 李国维,杨涛,宋江波. 公路软基沉降双曲线预测法的进一步探讨[J]. 公路交通科技,2003,20(1):18-20.
- [8] 杨涛,李国维,等. 基于双曲线法的分级填筑路堤沉降预测[J]. 岩土力学,2004,25(10):1551-1554.
- [9] 付宏渊. 高速公路路基沉降预测及施工控制[M]. 北京:人民交通出版社,2007. 10-22.