

自平衡测试技术及桩端后压浆工艺 在大直径超长桩的应用

Application of self-balanced testing and post grouting to large diameter and super-long piles

戴国亮, 龚维明, 程 晔, 薛国亚

(东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘 要: 桩端后压浆对桩承载特性的作用: ①消除工艺因素的影响, 恢复土层原有的承载能力; ②提高桩的承载力。为提高苏通大桥桩基础的承载力, 将不同后压浆工艺应用于苏通大桥大直径超长桩中。采用自平衡试桩法对压浆效果进行了静载荷试验。基于试桩的测试结果, 对桩压浆前后的承载力、位移变化情况以及承载特性作了分析。该研究成果直接应用于苏通大桥主桥桩基础设计中, 取得了显著的经济效益。

关键词: 自平衡测试技术; 后压浆桩; 承载特性; 经济效益

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2005)06-0690-05

作者简介: 戴国亮(1975-), 男, 湖南安化人, 讲师, 博士, 1997年毕业于南京工业大学获工程测量学士学位; 2000年毕业于东南大学获结构工程硕士学位; 2003年毕业于东南大学获结构工程博士学位。目前主要研究方向为地下结构工程, 参与了大量国家重点工程桩基承载力试验研究, 获江苏省科技进步二、三等奖各 1 项, 南京市科技进步二等奖 2 项, 发表论文 20 余篇。

DAI Guo-liang, GONG Wei-ming, CHENG Ye, XUE Guo-ya

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

Abstract: The effects of grouting were as follows: to eliminate the influence of technological defects; to recover the bearing capacities of strata; and to improve the bearing capacities of piles. To improve the bearing capacity of piles under Sutong Yangtze River Bridge, different post grouting techniques were adopted to large diameter and super-long piles. Self-balanced testing was used to determine bearing capacity and to verify grouting effect. Based on the test results, bearing capacity, settlement and bearing characteristic before and after grouting were analyzed. The research results were applied in the design of piles of Sutong Yangtze River Bridge to solve the difficulty and to achieve the remarkable economic benefit.

Key words: self-balanced testing; post grouting pile; bearing characteristic; economic benefit

— S 、 S — $\lg T$ 和 S — $\lg Q$ 等曲线确定桩基承载力^[4-7]。

0 引 言

近 20 多年来, 随着土木工程向大型化、群体化发展, 各种类型的灌注桩的使用也越来越多。单一工艺的灌注桩往往满足不了上述发展的要求。由于成桩工艺的固有缺陷(桩底沉渣和桩侧泥膜), 导致桩端阻力、桩侧阻力显著降低。为了消除桩底沉渣等隐患, 国内外把地基处理灌浆技术引进到桩基, 后压浆技术应运而生^[1-3]。

自平衡桩基测试技术则相对传统静载试验具有省时、经济、技术先进等优点, 是一种很有发展前景的桩基测试技术。该法是把一种特制的加载装置——荷载箱, 埋入桩内, 将荷载箱的高压油管和位移棒引到地面, 由高压油泵向荷载箱充油, 荷载箱将力传递到桩身, 其上部桩身的摩擦力与下部桩身的摩擦力及端阻力相平衡——自平衡来维持加载。根据向上向下 Q

1 工程概况

苏通大桥二期试桩的主要目的在于检验主桥基础钻孔灌注桩的承载力及其施工工艺。由于主墩基础位于水中, 在主墩位置附近进行试桩条件尚不成熟, 为此, 选择在与主墩地质条件较为类似的南岸引桥 93 墩附近位置进行, 场地土层依次如下: ②层: 亚粘土, 灰黄色, 硬塑; ③-1 层: 淤泥质亚粘土, 灰色, 流塑; ③-2 层: 粉砂, 灰色, 饱和, 松散—中密。④层: 亚粘土, 灰色, 软塑; ⑤-2 层: 粉砂, 灰色, 饱和, 密实; ⑥-1 层: 砾砂, 灰色, 饱和, 密实; ⑦层: 细砂, 灰色, 饱和, 密实; ⑧-1 层: 粗砂, 灰色, 饱和, 密实, 含少量中细砂及砾砂; ⑧-2 层: 细砂, 灰色, 饱和, 密实。

表 1 二期试桩概况汇总表
Table 1 General parameters for testing piles

试验类型	编号	直径/m	顶标高/m	底标高/m	桩长/m	压浆管路	测试顺序
压浆工艺桩	GYZ1	2.5	4.0	-102.0	106	6 回路 U 型管	不测试
	GYZ2	2.5	4.0	-121.0	125	4 直管	
	GYZ3	2.5	4.0	-121.0	125	6 回路 U 型管	
载荷试验桩	SZ2	2.5	4.0	-121.0	125	6 回路 U 型管	先压浆后测试
	SZ3	2.5	4.0	-102.0	106	6 回路 U 型管	先压浆后测试
	SZ4	2.5	4.0	-121.0	125	4 回路 U 型管+4 直管	先测试后压浆再测试

二期试桩对 6 根试桩进行了后压浆试验, 分别采用 U 型管和直管两种方案, 具体参数见表 1。SZ2 桩和 SZ3 桩采用六回路 U 型压浆管方案 (见图 1), 端部弯管采用 $\phi 25$ 普通钢管, 桩身直管由 8 根 $\phi 25$ 钢管和 4 根 $\phi 60$ 声测管 (兼用) 组成。



图 1 6 回路 U 型管构造及管路分配阀
Fig. 1 6 circuit U tube and distributing valve of pipeline

SZ4 试桩采用 4 回路 U 型管加 4 直管方案。4 个 U 型回路由 8 根 $\phi 25$ 钢管在桩端每两根由一弯管相连组成一回路, 4 根直管由对称布置的 $\phi 60$ 声测管兼用。

2 测试情况

2.1 SZ2 试桩

SZ2 试桩压浆水泥量 8.6 t, 压浆后测试 $Q-S$ 曲线见图 2。当加载至 2×51000 kN, 向上位移达到 80.12mm, 向下位移达到 81.14 mm, 同时超过 40 mm, 并发生突变。故上段桩和下段桩的极限承载力均取上级加载值 48000 kN。

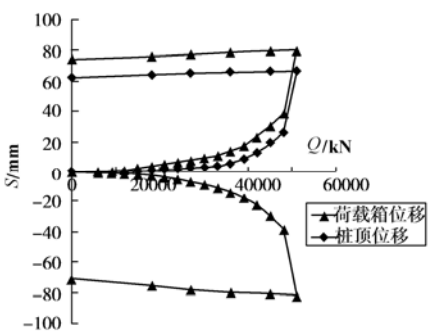


图 2 SZ2 试桩 (压浆后) 自平衡测试曲线
Fig. 2 Test curves of SZ2 after grouting

2.2 SZ3 试桩

SZ3 试桩压浆水泥量 11 t, 压浆后测试 $Q-S$ 曲线见图 3。当加载至 2×48000 kN, 向下位移达到 44.53 mm, 超过 40 mm, 并发生突变。此时上段桩位移较小, 继续加载至荷载箱极限值 2×51000 kN 后卸载。故上段桩的极限承载力取 51000 kN, 下段桩的极限承载力取 45000 kN。

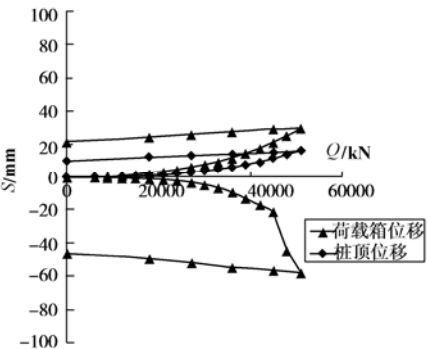


图 3 SZ3 试桩 (压浆后) 自平衡测试曲线
Fig. 2 Test curves of SZ2 after grouting

2.3 SZ4 试桩

为了测出压浆前后桩的极限承载力, SZ4 埋设两个荷载箱, 其中上荷载箱距离桩端 40.8 m, 下荷载箱距离桩端 15 m。

2.3.1 压浆前测试

压浆前先进行下荷载箱测试, 随后进行上荷载箱测试。

(1) 下荷载箱测试

首先进行下荷载箱测试, 测试 $Q-S$ 曲线见图 4。当加载至 2×18000 kN, 向下位移达到 40.87 mm, 超过 40 mm, 但未发生突变, 且荷载很稳定。故继续加载至 2×30000 kN, 此时向下位移超过 100 mm, 为了以后的试验需要, 终止加载, 下段桩的极限承载力取 18000 kN。

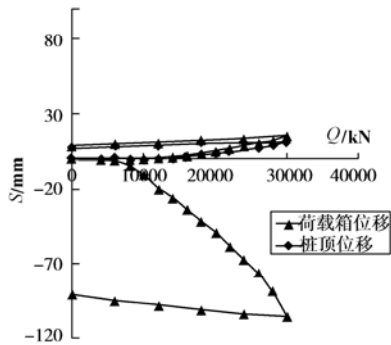


图 4 SZ4 试桩(压浆前)下荷载箱测试曲线

Fig. 4 Test curves for lower load cell of pile SZ4 before grouting

(2) 上荷载箱测试

下荷载箱测试后 10 天进行上荷载箱测试, 测试 $Q-S$ 曲线见图 5。

加载至 2×22400 kN, 向下位移超过 40 mm, 且荷载无法稳定。故把下荷载箱油管封住(关闭下荷载箱)后继续加载至 2×24270 kN, 此时向上、向下位移均超过 40 mm, 荷载无法稳定。上段桩的极限承载力取 22400 kN, 中段桩(上荷载箱与下荷载箱之间桩段)的极限承载力取 20540 N。上荷载箱测试后, 立即进行压浆, 压浆水泥量 9.0 t。

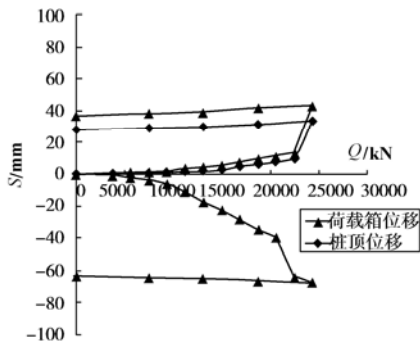


图 5 SZ4 试桩(压浆前)上荷载箱测试曲线

Fig. 5 Test curves for upper load cell of pile SZ4 before grouting

2.3.2 压浆后测试

压浆后 30 天左右进行下荷载箱测试。测试 $Q-S$ 曲线见图 6。当加载至 2×54000 kN, 向下位移超过 40 mm, $Q-S$ 曲线为缓变型, 故下段桩的极限承载力取 54000 kN。

各试桩实测承载力与计算承载力、预估承载力的比较见表 2。

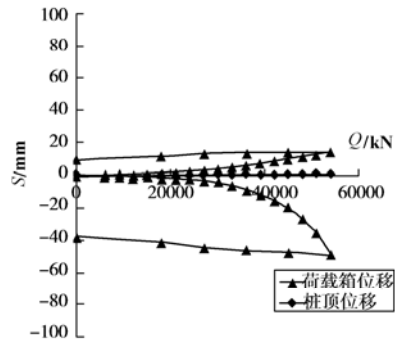


图 6 SZ4 试桩(压浆后)下荷载箱测试曲线

Fig. 6 Test curves for lower load cell of pile SZ4 after grouting

3 压浆效果分析

SZ2 试桩、SZ3 试桩桩顶荷载—位移关系曲线及端阻力、侧阻力构成见图 7、图 8。SZ4 压浆前后桩顶荷载—位移关系曲线及端阻力、侧阻力构成见图 9、图 10。SZ4 压浆前后平均摩阻力—位移曲线见图 11, SZ4 压浆前后桩端阻力—位移曲线见图 12。二期各试桩桩端阻力—位移关系对比曲线见图 13。SZ4 采用双荷载箱进行测试, 压浆后对下荷载箱进行了测试, 考虑重复加载影响, 仅分析下段桩的摩阻力, SZ4 试桩下段桩各土层摩阻力见表 3。各试桩的极限承载力及端阻力、侧阻力组成比例见表 4。

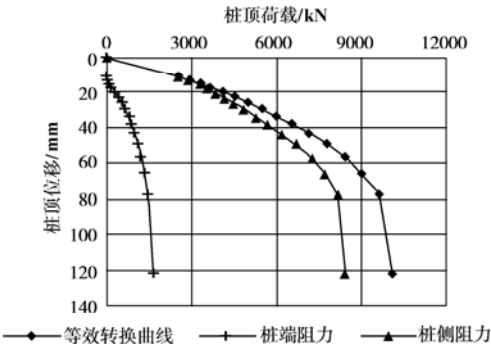


图 7 SZ2 桩顶荷载—位移关系及构成

Fig. 7 Load versus settlement curves and its constituents of pile SZ2

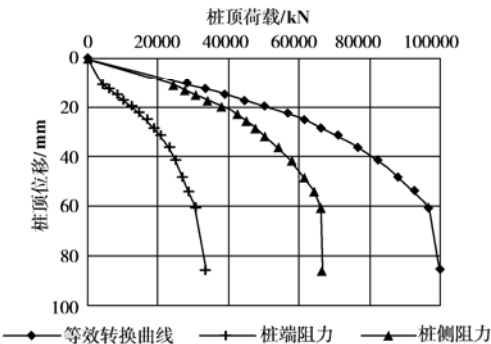


图 8 SZ3 桩顶荷载—位移关系及构成

Fig. 8 Load versus settlement curves and its constituents of pile SZ3

表 2 实测承载力与计算承载力、预估承载力对比

Table 2 Contrast of tested,computed and evaluated bearing capacity

指标 桩号	压浆量 /t	有效桩长承载力/kN (扣除冲刷线以上承载力)			整桩承载力/kN		
		计算值	压浆后预估值	实测值	计算值	压浆后预估值	实测值
SZ2	8.6	54720	76608	81069 ($S=54.90\text{ mm}$)	69760	86188	96481 ($S=77.64\text{ mm}$)
SZ3	11	48300	67620	78009 ($S=38.76\text{ mm}$)	63900	92208	96746 ($S=60.56\text{ mm}$)
SZ4 (压浆前)	9	51780	72492	48587 ($S=53.32\text{ mm}$)	67380	83220	59638 ($S=65.57\text{ mm}$)
SZ4 (压浆后)				86186 ($S=73.23\text{ mm}$)			100538 ($S=94.62\text{ mm}$)

注：压浆后预估值是设计院承载力计算值提高 40%预估的。

表 3 SZ4 试桩下段桩各土层摩阻力

Table 3 Soil friction resistances for pile SZ4 below load cell

地层 编号	岩土层 名称	深度	地质报告值 /kPa	压浆前		压浆后		压浆后 提 高 百分比 /%
				实测极限值/kPa	对应位移值 /mm	实测极限值 /kPa	对应位移值 /mm	
⑧ ₁	砾砂	-102.2~-110.1	130	118	40.82	192.81	48.21	63.40%
⑧ ₂ /⑧ ₁	细砂/粗砂	-110.1~-114.2	85	86.26	40.35	186.53	46.68	116.24%
⑧ ₂	细砂	-114.2~-121	60	55.01	40.05	157.46	45.6	186.24%

表 4 桩的极限承载力及构成比例

Table 4 Limiting bearing capacity and its constituents of piles

桩号	极限承载力/kN	桩端阻力/kN	桩端阻力所占比例/%	总侧摩阻/kN	总侧阻力所占比例/%
SZ2	96481	14656	15.19	81825	84.81
SZ3	96746	30761	31.8	65985	58.43
SZ4	压浆前 59638	8485	14.23	51153	85.77
	压浆后 100538	33375	33.2	68533	66.8

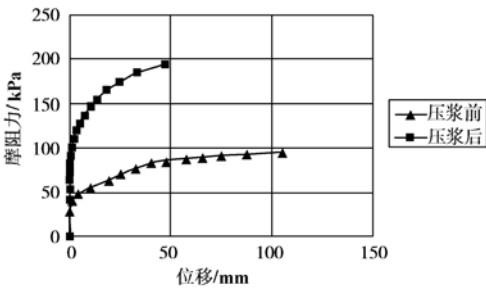


图 9 SZ4 压浆前后平均摩阻力—位移曲线

Fig. 9 Average friction resistances versus settlement curves of pile SZ4 before and after grouting

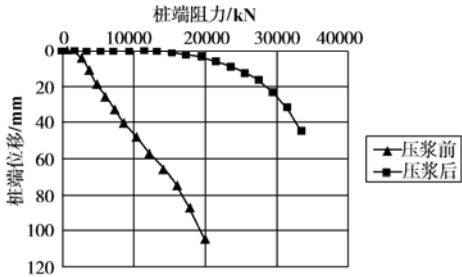


图 10 SZ4 压浆前后桩端阻力—位移曲线

Fig. 10 Pile tip resistances versus settlement curves of pile SZ4 before and after grouting

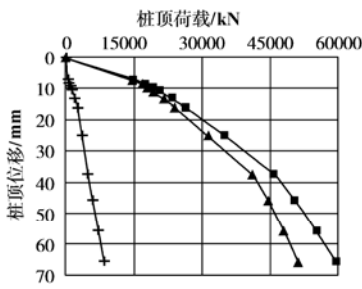


图 11 SZ4 压浆前桩顶荷载—位移关系及构成

Fig. 11 Pile head load versus settlement curves and its constituents of pile SZ4 before grouting

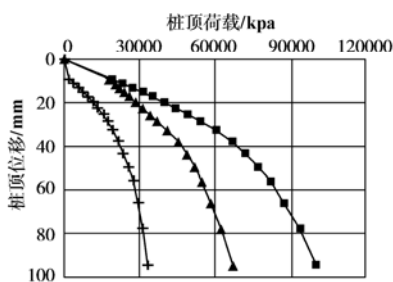


图 12 SZ4 压浆后桩顶荷载—位移关系及构成

Fig. 12 Pile head load versus settlement curves and its constituents of pile SZ4 after grouting

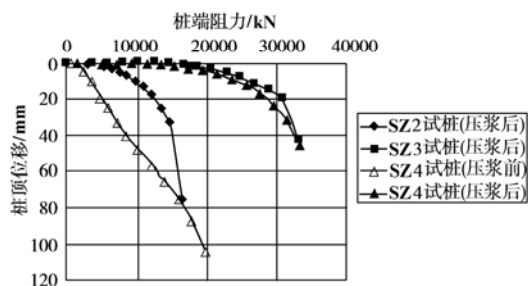


图 13 试桩桩端阻力—位移对比曲线

Fig. 13 Pile tip resistances versus settlement curves

根据自平衡试桩 $Q-S$ 曲线 (图 2~图 6) 和桩顶荷载位移曲线及压浆前后端阻力及侧阻力曲线 (图 7~图 12), 可以看出压浆前后桩具有以下特性: ①压浆前 SZ4 试桩下段 $Q-S$ 曲线在很小的荷载下出现陡降段, 说明桩底存在沉渣 (虚土), 既降低了桩端阻力, 也不利于桩侧阻力、桩端阻力的共同作用。施工因素如: 孔壁暴露的时间、孔壁形状、孔底沉渣的厚度、桩侧泥皮的厚度及性质, 皆对桩的承载性能产生很大影响; ②桩端压浆可固结孔底沉渣, 还可在压力作用下对持力层进行渗透、劈裂和挤密桩端土体, 形成一个较大直径的水泥-土体混合固结体, 使桩端阻力大幅度提高。下部桩身的桩侧泥皮和一定范围的土体也得到加固, 从而使桩端承载力和侧阻力均得到提高。根据试验数据, 压浆后, 桩极限承载力提高幅度为 68.6%, 侧阻力提高 34%, 端阻力提高 293%; ③经桩端压浆, SZ4 试桩的 $Q-S$ 曲线由陡降型转变为缓变型, 桩端刚度得到大幅度提高, 桩的承载型态亦发生改变。压浆前, 端阻占总承载力的比例 14.23%, 基本属摩擦型桩, 压浆后提高到 22.14%~33.2%, 属端承摩擦桩; ④压浆对桩的荷载传递特性产生明显影响。未压浆桩在桩顶荷载作用下, 轴力逐渐往下传递, 侧阻力由上而下逐步发挥, 待桩顶位移达到一定程度后, 端阻力才开始起作用。而压浆桩在桩端压力作用下, 对桩由下而上施加了一个预应力, 桩端土体及一定范围的桩周土预先完成了一部分变形, 使桩端阻力从一开始就参与了作用, 从而较充分地发挥土体的强度, 可大幅提高承载力和减少沉降。

4 结 论

(1) 采用不同后压浆工艺对苏通大桥二期超长直径试桩进行了试验研究, 桩端后压浆对桩承载特性的作用主要表现为两个方面: ①消除工艺因素的影响, 恢复土层原有的承载能力; ②提高桩的承载力。对压

浆效果起主要作用的是压浆量的影响。

(2) 采用桩承载力自平衡法测试技术成功地进行苏通长江大桥大吨位超长钻孔灌注桩的承载力。SZ2 试桩压浆后有效桩长的极限承载力为 81069 kN, 对应位移为 54.90 mm。SZ3 试桩压浆后有效桩长的极限承载力为 78009 kN, 对应位移为 38.76 mm。SZ4 试桩压浆前有效桩长的极限承载力为 48587 kN, 对应位移为 53.32 mm。SZ4 试桩压浆后有效桩长的极限承载力为 86186 kN, 对应位移为 73.23 mm。

(3) 对苏通大桥二期试桩结果进行了分析, 具体对比了压浆前后的桩侧、桩端以及总承载力的变化情况, 为苏通大桥的桩基设计提供了很好的设计依据。自平衡法测试过程中, 上段桩侧摩阻力与承台下桩周土的实际受力条件不尽一致, 测出的是负摩阻力, 小于正摩阻力, 工程设计时为保守起见, 可以直接采用。通过对 SZ4 试桩压浆前后的承载力对比, 可以看出压浆能够有效的提高桩端、桩侧的承载力, 尤其是提高桩端承载力, 提高桩端承载力比例。压浆后桩由摩擦桩转变为端承摩擦桩。

(4) 本次试验结果直接应用于苏通大桥主桥桩基设计中, 取得了显著的经济效益和社会效益。

参考文献:

- [1] Bruce D A. Enhancing the performance of large diameter piles by grouting[J]. Grouting Engineering, 1986, 19(4): 9 - 15.
- [2] Krubasik K. Maßnahmen zur Tragkraftsteigerung an Großbohrpfählen Baumaschine[J]. Bautechnik, 1985, 7(8): 12 - 16.
- [3] Bustamante M, Gouvenot D. Grouting: a method improving the bearing capacity of deep foundation[A]. The 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering [C]. 1983. 131 - 134.
- [4] Osterberg Jori. New device for load testing driven piles and drilled shaft separates friction and end bearing[J]. Piling and Deep Foundations. 1989, 1: 421 - 427.
- [5] Osterberg J O, Hayes J A. The osterberg load cell as a research tool[A]. The XVth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering[C]. Istanbul, 2001. 977 - 979.
- [6] 龚维明, 戴国亮, 蒋永生, 等. 桩自平衡测试理论与实践[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(1): 82 - 88.
- [7] 戴国亮, 吉林, 龚维明, 等. 自平衡试桩法在桥梁大吨位桩基中的应用与研究[J]. 公路交通科技, 2002, 19(2): 63 - 66.