

# 港珠澳大桥大直径钻孔灌注桩自平衡法实验研究

王中文, 刘志峰, 罗永传

(广东省长大公路工程有限公司, 广东 广州 510620)

**摘 要:** 以港珠澳大桥主体工程为背景, 采用两根钻孔灌注桩进行试桩实践, 为获取设计参数, 采用自平衡法进行成桩静载试验, 且对该区深基础海上施工工艺进行了研究。研究表明: 钻进中在覆盖层内采用四翼刮刀钻头, 岩层内采用球齿滚刀钻头解决了海上桩基施工对设备性能要求高的难题; 在实际成孔施工时, 对桩号 SZ5 桩基采用海水+原状土造浆, 对桩号 SZ6 桩基采用淡水+原状土造浆, 研制的高质量泥浆保证了两桩钻孔效果良好; 通过对静载试验数据的分析, 综合考虑多种因素, 获取了相关设计参数, 完善了大桥桩基设计。以上研究成果可为大直径钻孔灌注桩的应用提供参考。

**关键词:** 试桩; 大直径; 钻孔灌注桩; 施工工艺; 泥浆; 自平衡法; 港珠澳大桥

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)S2-1216-04

**作者简介:** 王中文 (1965-), 男, 湖南澧县人, 教授级高级工程师, 主要从事桥梁工程研究。E-mail: wangzhongwen@vip.163.com。

## Self-balanced method for large-diameter bored piles of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

WANG Zhong-wen, LIU Zhi-feng, LUO Yong-chuan

(Guangdong Provincial ChangDa Highway Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510620, China)

**Abstract:** Taking Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge as an engineering example, two bored piles are regarded as the test piles. The parameters are obtained based on self-balanced load test piles. The construction process of deep foundation of the sea is studied. The results verify that the problem of constructing offshore pile foundation with high requirements for equipment performance drilling is solved by using the four-wing drag bit in the cover layer and ball hob drill head in the rock layer. In the actual construction of the bore holes, for pile No. SZ5, seawater + undisturbed soil slurry are used, and for pile No. SZ6, the freshwater + undisturbed soil slurry are used. High-quality mud is developed to ensure the quality of the two bored piles. Through the analysis of the static load test data, comprehensive consideration of various factors, related design parameters are obtained so as to improve the pile foundation design. The results may provide reference for applying large-diameter bored piles.

**Key words:** test pile; large diameter; bored pile; construction technology; mud; self-balanced method; Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

## 0 引 言

港珠澳大桥工程区域地质条件和海况复杂、环境保护要求高, 在该区域无运用大直径、深基础桩的先例, 缺乏可以利用与借鉴的设计资料及施工经验。为确定桩基承载力, 给桩基设计提供各项参数, 完善大桥桩基设计, 并为主体工程钻孔灌注桩的施工积累相关经验, 决定选择两根桩基进行了试桩试验<sup>[1]</sup>。

## 1 工程概况

港珠澳大桥跨越珠江口伶仃洋海域, 是连接香港、珠海及澳门的大型跨海通道。大桥主体工程采用桥隧组合方式, 其中大桥主体工程全长约 29.6 km, 海底

隧道长约 6 km。

本次钻孔灌注桩试桩共两根, 编号为 SZ5 和 SZ6, 桩径为 180 cm, 桩顶标高 4.15 m, 桩底标高 -38.00 m, 进入中风化花岗岩层 5.2 m, 桩长 42.15 m, 按端承桩设计。

## 2 试桩施工技术

### 2.1 地层概况

钻孔灌注桩试桩施工前, 在钻孔灌注桩试桩桩位进行了两个补充地质钻孔。补充地质钻孔揭示的试桩

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40772170); 广东省交通科技项目 (2011-02-043)

收稿日期: 2013-06-15

SZ5 桩位地质简况如表 1 所示。

表 1 SZ5 桩位地质简况表

Table 1 Geological propenties of SZ5 pile

地层编号	层底标高/m	土层类型
	-4.32	海床面标高
1	-10.52	淤泥
2	-14.52	淤泥
1	-18.12	黏土
1	-23.22	黏土
1	-24.12	黏土
5	-25.82	粗砾砂混黏性土
4	-29.02	粉质黏土
4	-29.52	粗砂
	-32.82	残积土
3	-48.02	中风化花岗岩

### 2.2 高质量泥浆研制

自 20 世纪 60 年代钻孔灌注桩在我国出现以来, 钻孔泥浆制造工艺不断进步, 高质量泥浆在钻孔灌注桩中的应用<sup>[2-4]</sup>促进了钻孔灌注桩飞速发展。在本次试桩工程中, 根据地质钻探资料显示, 桩位有较厚的粉质黏土和黏土覆盖层。现场试验室从地质补探黏土层内取土样进行造浆试验, 泥浆性能良好, 添加适量纯碱和 CMC 材料后, 其性能达到高性能泥浆指标要求。实际成孔施工时, SZ5 采用海水加原状土造浆, SZ6 采用淡水加原状土造浆, 两桩成孔效果良好, 成孔阶段泥浆性能指标均满足规范要求。

### 2.3 成孔工艺

对于钻孔工艺前人有大量研究<sup>[5-9]</sup>, 但针对港珠澳大桥桥位特殊水域有必要开展研究。本次试桩钻孔采用 KP3500 型转盘式钻机成孔, 覆盖层内使用刮刀钻头, 进入岩层后更换为滚刀钻头, 并在不同的地层中采用不同的钻进参数, 保证了成孔质量。

钻孔灌注桩施工完成以后经检测: 桩身混凝土完整, 均为 I 类桩, 且混凝土各项指标符合设计要求

## 3 自平衡法试桩

### 3.1 测试原理

荷载试验采用自平衡法进行<sup>[10-13]</sup>, 是利用预埋在桩身的荷载箱进行钻孔灌注桩静载试验方法。本次试验荷载箱采用 Tomer 荷载箱, 最大加载量为 55000 kN。荷载箱中心位置均设置于 -34.5 m 处, 距离桩端 3.5 m。试验采用慢速维持荷载法。

### 3.2 测试

#### (1) 位移测试

荷载箱上、下位移测试各采用 2 组对称分布的位移杆进行测量。桩身截面位移各采用在桩底、中风化花岗岩岩层顶面对应的桩身截面对称设置 2 组位移丝进行测量。然后均通过电子位移计测量位移杆和位移

丝的位移来测定荷载箱上、下位移及桩身位移。

#### (2) 桩身内力测试

桩身轴力采用弦式钢筋计等进行测试。弦式钢筋计等设置在土层的界面处, 每个测试断面设置 4 个, 交叉对称布置。在设置钢筋计位置处将主筋截断, 将钢筋计两端与主筋焊接。

#### (3) 桩端反力测试

桩端反力采取在桩端对称埋设 2 只压力传感器的方式测量。压力传感器的连接板与钢筋笼底端焊接, 随钢筋笼一起下放。

### 3.3 SZ5 钻孔灌注桩试桩试验结果

SZ5 试桩每级试验荷载下荷载 - 位移测试、桩身轴力沿深度分布情况、桩身摩阻力沿深度分布情况及桩身不同断面轴力变化情况见图 1~4。

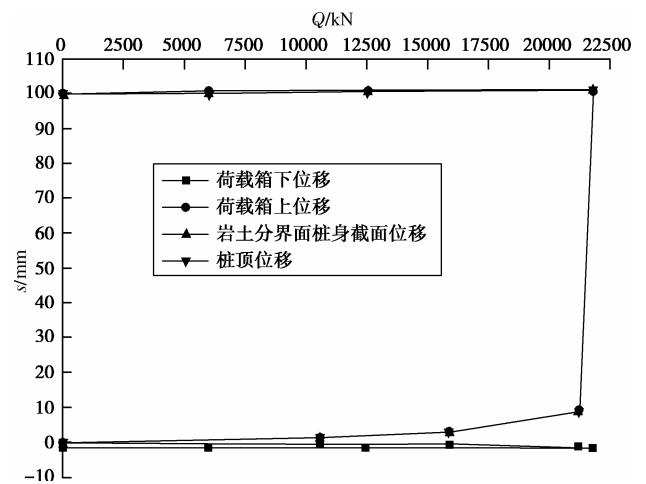


图 1 SZ5 荷载试验荷载 - 位移 (Q-s) 曲线图

Fig. 1 Test load-displacement (Q-s) curves

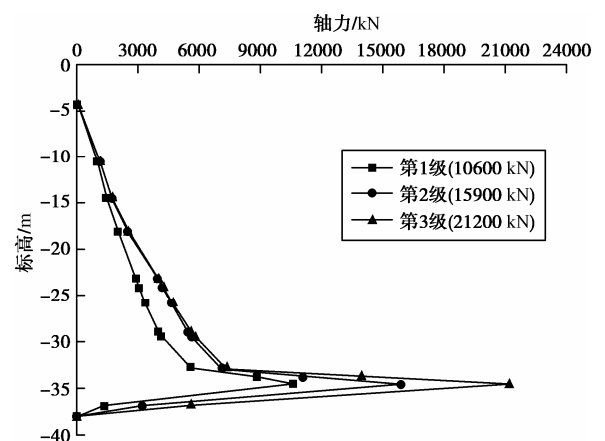


图 2 不同荷载级别下桩身轴力分布图

Fig. 2 Distribution of different load levels of axial force of pile

### 3.4 试桩试验结果分析

(1) 钻孔灌注桩试桩荷载箱以上桩段桩侧极限摩阻力分析

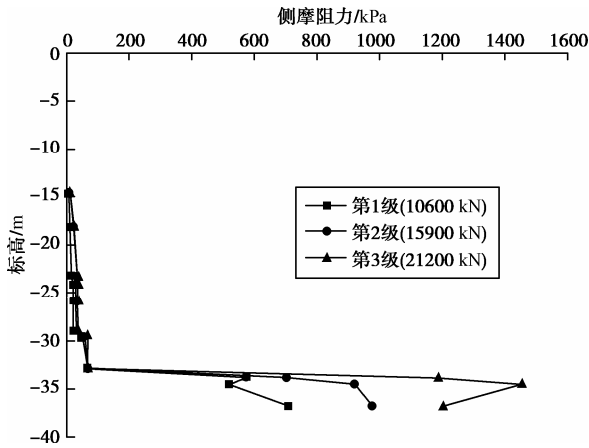


图3 不同荷载级别下桩身各断面间摩阻力分布情况图(根据实测值绘制)

Fig. 3 Different load levels of sections of pile frictional resistance (according to measured values)

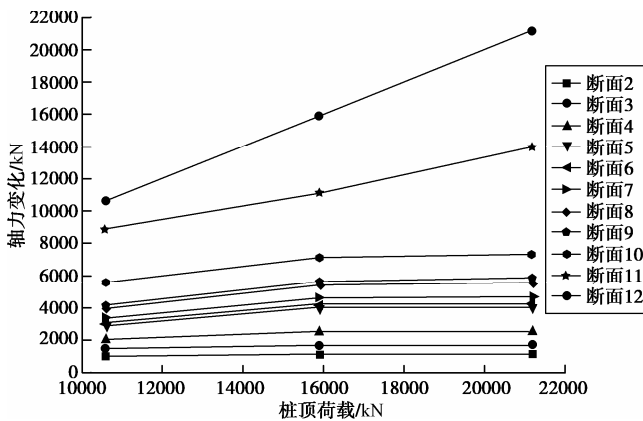


图4 不同荷载级别下桩身各断面轴力变化情况图

Fig. 4 Different load levels of sections of pile axial force

SZ5 试桩上顶与下压试验荷载均达到 21200 kN 后,荷载箱以上桩段的桩顶位移、岩土分界面桩身截面位移、

荷载箱上位移的  $Q-s$  曲线均出现陡降,因此可以认为 SZ5 试桩荷载箱以上桩段的加载极限值为 21200 kN。

(2) 试桩试验荷载与承载力要求的对比分析

根据 SZ5 试桩的补充钻孔资料进行了 SZ5 试桩容许承载力计算。从计算结果可见,考虑桩体自重后, SZ5 的单桩竖向容许承载力为 30833 kN,桩端抗力比例为 49.5%,相应的桩侧抗力比例为 50.5%,则桩侧土的容许承载力为 15570 kN。

荷载箱中心位置均设置于 -34.5 m 处,距桩底 3.5 m。对于 SZ5 试桩,荷载箱以下部分桩段的容许承载力计算值为 9500 kN,则荷载箱以上桩段桩侧土的容许承载力为 6070 kN。

SZ5 试桩荷载箱的上下部分最大试验荷载为 21200 kN,则该桩荷载箱以上桩段桩侧极限摩阻力为 21200 kN,为荷载箱以上桩段桩侧土的容许承载力 6070 kN 的 3.5 倍。

(3) 测试侧摩阻力极限值与勘察报告提供值对比

测试侧摩阻力与勘察报告提供值的对比见表 2 (以 SZ5 为例)。建议在进行工程桩的设计时,应根据工程地质勘察结果、本次试桩结果和本工程所在地相邻工程的经验等,综合选取各项设计参数值。

4 结论与建议

通过港珠澳大桥两根大直径钻孔灌注桩试桩,有如下结论与建议:

(1) 海上桩基础施工,对设备性能和质量依赖程度高,因而选择合适的设备不仅可以保证质量,还可以大大加快施工进度。钻孔应根据地质情况选用刮刀钻头和滚刀钻头。试桩表明,对于与本文中工程背景

表 2 SZ5 桩侧摩阻力极限值与勘察报告提供值的对比表

Table 2 Comparison side friction limit value and survey report value of SZ5 pile

地层编号	第/断面高层/m	土层类型	桩侧极限摩阻力实测值/kPa	桩侧极限摩阻力实测值换算值/kPa	补勘桩侧摩阻力标准值/kPa	初勘桩侧摩阻力标准值/kPa	试验建议桩侧摩阻力标准值/kPa	$c_2$ 实测值	$c_2$ 按规范取值	本次试验建议的 $c_2$
	-4.32	海床面标高								
1	-10.52	淤泥								
2	-14.52	淤泥	10.19	14.55	10	13	10			
1	-18.12	黏土	24.05	30.07	60	50	30			
1	-23.22	黏土	33.41	41.76	60	50	40			
1	-24.12	黏土	36.72	45.91	60	50	45			
5	-25.82	粗砾砂混黏性土	33.91	48.44	50	50	48			
4	-29.02	粉质黏土	38.78	48.47	55	50	48			
4	-29.52	粗砂	67.16	95.94	65	90	65			
	-32.82	残积土	69.43	99.19	60	100	60			
3	-34.50 (荷载箱中心位置)							0.01029	0.024	0.01
3	-36.80	中风化花岗岩						0.00846	0.024	0.01
3	-38.00	中风化花岗岩 (桩底标高)								

相似的地质条件, 在覆盖层内宜采用四翼刮刀钻头; 岩层内宜采用球齿滚刀钻头。

(2) 泥浆采用原状土造浆, 其中 SZ5 采用海水+原状土造浆, SZ6 采用淡水+原状土造浆, 两桩均取得了良好效果, 采用海水或者淡水制备泥浆均能满足使用要求。研制高质量泥浆也是保证钻孔效果良好的关键之一。

(3) SZ5 试桩荷载箱的上下部分最大试验荷载为 21200 kN。建议在进行工程桩的设计时, 应根据工程地质勘察结果、本次试桩结果和本工程所在地相邻工程的经验等, 综合选取各项设计参数值。

#### 参考文献:

- [1] 广东省长大公路工程有限公司联合体. 港珠澳大桥主体工程桥梁试桩工程施工及试验研究[R]. 2011. (Joint Consortium of Guangdong Provincial Changda Highway Engineering CO. Ltd. Construction an experimental study on test piles of Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge[R]. 2011. (in Chinese))
- [2] 郭冉冉. 港珠澳大桥试桩环保泥浆的制备工艺研究[J]. 广东交通职业技术学院学报, 2011, 10(4): 5 – 11. (GUO Ran-ran. Study on preparation of the green mud in the Hongkong Zhuhai Macao Bridge[J]. Journal of Guangdong Communication Polytechnic, 2011, 10(4): 5 – 11. (in Chinese))
- [3] 吴 鹏, 龚维明, 任伟新, 等. 钻孔灌注桩护壁泥浆对桩基承载性能的影响[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1327 – 1332. (WU Peng, GONG Wei-ming, REN Wei-xin, et al. Effect of slurry on bearing performance of bored piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1327 – 1332. (in Chinese))
- [4] 王 强, 赵春风, 赵 程, 等. 钻孔灌注桩正反循环泥浆护壁对孔径的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊 2): 205 – 208. (WANG Qiang, ZHAO Chun-feng, ZHAO Cheng, et al. Influence of normal and reverse mud circulations on hole diameter of cast-in-situ bored piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S2): 205 – 208. (in Chinese))
- [5] 杨明亮, 姚海林, 冯其林, 等. 钻孔灌注桩施工过程中垃圾渗滤液对地下水的污染分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 586 – 590. (YANG Ming-liang, YAO Hai-lin, FENG Qi-lin, et al. Research on groundwater pollution brought out by leachate of municipal refuse in bored pile construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 586 – 590. (in Chinese))
- [6] 秦体达, 郑俊杰. 大直径超长灌注桩在润扬大桥中的应用[J]. 岩土力学, 2002, 23(S10): 110 – 112. (QIN Ti-da, ZHENG Jun-jie. Application of long bored cast-in-place piles with large diameter to Runyang bridge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(S10): 110 – 112. (in Chinese))
- [7] 王有志, 常晓莉, 王效平. 复杂地质条件下超长钻孔灌注桩施工风险分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 770 – 773. (WANG You-zhi, CHANG Xiao-li, WANG Xiao-ping. Risk analysis of overlength bored piles construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10): 770 – 773. (in Chinese))
- [8] 李述宝, 赵鹤鹏. 海中球状风化地层大直径超长钻孔桩施工技术[J]. 桥梁建设, 2011(3): 85 – 88. (LI Shu-bao, ZHAO Kun-peng. Construction techniques for large diameter and very long bored piles in spheroidal weathering granite layer in sea[J]. Bridge Construction, 2011(3): 85 – 88. (in Chinese))
- [9] 石云芳. 钻孔灌注桩常见质量事故的预防和处研究[J]. 铁道工程学报, 2011(1): 92 – 95. (SHI Yun-fang. Technological research of protection and treatment for frequent quality accident of cast-in-situ bored pile[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(1): 92 – 95. (in Chinese))
- [10] 龚维明, 于清泉, 戴国亮. 越南大翁桥桩基承载性能试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 558 – 562. (GONG Wei-ming, YU Qing-quan, DAI Guo-liang. Experimental research on bearing behavior of piles with self-balanced method in daweng bridge in Vietnam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 558 – 562. (in Chinese))
- [11] 于清泉, 龚维明, 薛国亚, 等. 澳门桩基规范的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 303 – 308. (YU Qing-quan, GONG Wei-ming, XUE Guo-ya, et al. Discussion on Macao pile foundation code[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 303 – 308. (in Chinese))
- [12] 张晓炜. 试桩测试方法对桩基承载特性的影响研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1819 – 1833. (ZHANG Xiao-wei. Study on the influence of test methods on the bearing behaviors of piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(11): 1819 – 1833. (in Chinese))
- [13] 邓友生, 龚维明, 韩金生, 等. 挤扩支盘灌注桩承载特性试验研究[J]. 铁道学报, 2005, 27(6): 122 – 127. (DENG You-sheng, GONG Wei-ming, HAN Jin-sheng, et al. Experimental study on bearing characteristic of compaction-under reamed bored pile[J]. Journal of the China Railway Society, 2005, 27(6): 122 – 127. (in Chinese))