

文章编号: 1002-0268 (2004) 01-0058-05

杭州湾跨海大桥桩基承载力的自平衡试验

朱瑶宏¹, 程 晔², 龚维明²

(1. 杭州湾大桥工程指挥部, 浙江 宁波 310006; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 杭州湾大桥试桩工程中, 采用自平衡试桩法对钻孔灌注桩承载力进行测试, 在试桩 A1 中埋设双荷载箱, 测试桩端注浆提高承载力的效果。实践表明该测试法在海洋条件下具有无可比拟的优势, 桩端注浆具有显著效果, 因此其在桥梁桩基中具有广泛的应用前景。

关键词: 自平衡试桩法; 双荷载箱; 桩端注浆

中图分类号: U443.15⁺4 **文献标识码:** A

Test Study on Pile of Hangzhou Bay Bridge

ZHU Yao-hong¹, CHENG Ye², GONG Wei-ming²

(1. Engineering Construction Headquarters of Hangzhou Bay Bridge, Zhejiang Ningbo 310006, China;

2. Department of Civil Engineering, Southeast University, Jiangsu Nanjing 210096, China)

Abstract: The self-balance test method is adopted for Hangzhou Bay Bridge to test the capacity of the bored pile. Two load-boxes are buried in the pile to test the effect of improving the capacity of the pile by injecting cement into the bottom of the pile. The practice has proved that this test method has great advantage to test large capacity pile in the sea and it will find wide application prospect in bridge piles.

Key words: Self-balanced testing method; Two load-boxes; Injecting cement into the bottom of the pile

1 简述

杭州湾跨海大桥位于浙江省嘉兴市海盐县与宁波市慈溪之间, 跨越杭州湾, 为双向 6 车道, 桥宽 33m, 大桥总长 36km, 建成后将是世界上最长的跨海大桥。

杭州湾海域宽阔, 波浪、水流、气象、地质、地形等自然条件复杂, 桥梁基础不但需要承受垂直荷载, 而且还需承受较大的波浪、水流等水平荷载的作用, 同时还要考虑承受船舶的意外撞击。

针对上述难题, 杭州湾大桥工程指挥部开展了大规模工程试桩研究, 针对不同区段的地质、水文条件布置了 A、B、C、D、E 共 5 组试桩, 进行了钻孔灌注桩、预应力混凝土大管桩、PHC 桩及钢管桩等桩型

的垂直向承载力的测试, 还进行了直桩水平承载力、斜管桩受波浪作用等试验。其中 A 组、E 组的 3 根钻孔灌注桩采用了东南大学土木学院专利技术——自平衡试桩法进行测试。

试桩成果将为桩基设计提供最直接的依据, 找出优化的桩端持力层、桩长、桩径。同时还可以验证沉桩工艺和灌注桩施工工艺的可行性, 为桩基施工设备的选择和施工工艺的改进提供重要依据。本文主要简述钻孔灌注桩试桩成果。

2 地质概况

试桩区跨越杭州湾水域, A 组试桩位于慈溪庵东镇滩涂上。地势较平坦, 坡降均小于 1%。E 组试桩位于嘉兴市乍浦港侧深水海域。海面宽约 23.94km,

海底地形变化简单，总体呈现不对称宽 U 形，北陡南缓，水深较浅，一般为-9.8~-12.5m，最大水深为-13.6m。
A 组试桩区地质条件如表 1 所示。

A 组试桩地质资料 表 1

土层名称	层厚 (m)	天然含水量 w (%)	天然重度 ρ (kN/m³)	天然孔隙比 e	塑性指数 I _p	液性指数 I _L	压缩系数 α ₁₋₂ (MPa)	压缩模量 E _s (MPa)	固结快剪	
									摩擦角 φ 度	凝聚力 C
砂质粉土	14	27.2	1.96	0.749	4.8	0.56	0.12	14.73	27.4	16.0
淤泥质粉质粘土	34	38.1	1.81	1.099	14.3	1.22	0.52	4.30	10.53	10.0
粘土	11.10	46.1	1.74	1.327	24.5	0.88	0.22	10.46	8.0	50.0
细砂	2.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
亚粘土	6.3	33.1	1.90	0.920	16.3	0.81	0.16	12.78	—	—
粉砂	15	29.7	1.92	0.826	12.9	0.78	0.27	9.06	—	—
粘土	8.3	30.5	1.92	0.873	24.2	0.21	0.10	18.98	—	—

3 施工工艺

A 组试桩为 2 根 φ1500 钻孔灌注桩，其中 A1 桩长 80m，A2 桩长 90m，两桩相距 9m。采用水上工作平台法组织施工。

3.1 钻进成孔

钻孔设备选用 KP3000 型钻机，配备 1 台 11m³ 压风机以采用气举反循环工艺，采用笼式四翼刮刀钻头。

钢护筒直径 φ1.9m，采用 δ=10mm 钢板制作。钢护筒插打采用 DZ90 震动锤配合筒内吸渣下沉。成孔技术要点有：（1）开钻孔时以低档慢速正循环钻进，钻至淤泥层以下孔深约 50~60m 后改为反循环钻进，保证钻进顺利进展。（2）孔内水头始终保持在 4.0m 以上，加强护壁，避免了塌孔。

钻孔桩施工采用二次清孔工艺，钻孔至设计标高后进行第一次清孔，第一次清孔采用气举反循环，使泥浆比重降至 1.2 左右、含沙率<4%。钢筋笼和导管安装完毕进行第二次清孔，采用导管内安装风管，反循环清孔，清孔后实测底部沉渣厚度为 5cm，确保钻孔桩的承载力和混凝土顺利施工。

3.2 钢筋笼加工及下放

（1）钻孔桩的钢筋笼在现场分段制作，运输到桩位安装。主筋接头采用单面搭接焊接，分段制作时，将各节段编号，保证了安装有测试元件的钢筋笼顺利吊装。施工时在笼内设置内撑骨架，增加钢筋笼刚度，安装钢筋笼时拆除内撑，避免了钢筋笼吊装时变形。

（2）荷载箱安装：在钢筋笼制作时，将测试桩桩身垂直承载力的桩底及中间荷载箱安装到位，然后在压力盒上预留的混凝土灌注导管口处加设导向钢筋，

确保了导管顺利通过荷载箱。同时按测试要求的位置在对应的钢筋笼截面上安装好钢筋应变计。

（3）声测管安装：除底节钢筋笼声测管在钢筋笼制作时即安装好以外，其它各节均将声测管预先吊放在钢筋笼内，吊装时进行对接。声测管通过荷载箱时采用伸缩接头，确保了测试顺利进行。

（4）钢筋笼安装：钢筋笼使用专用起吊工具起吊，避免了钢筋笼起吊变形过大。荷载箱装置下放前，检查钢筋笼垂直度，不满足要求的及时进行调整，确保两节钢筋笼对接时上、下节中心线保持一致，并保证上、下节钢筋搭接长度满足规范要求。

3.3 混凝土浇筑

桩身混凝土的级别为 C30，在二次清孔完成后，进行水下混凝土灌注。因测试设备较多，采用拔球方式填充混凝土。灌注时采用 φ262mm 快速卡口导管，导管埋置深度适当，埋深控制在 3~6m 之间，导管提升缓慢。

3.4 桩端注浆

注浆的技术控制指标如下：

- 第一指标：注浆量≥1500L；
- 第二指标：压力为 3.1MPa；
- 第三指标：上抬量<3mm。

注浆前将试桩 A1 中声测管、位移管上端管口密封，防止浆返流。

注浆量达到 600L 时，发现相临试桩 A2（试桩 A1、A2 间距 9m）预埋位移管开始冒气，随着溢出清水，注浆量达到 1800L 时冒气和溢水现象停止。注浆过程中压力表指针在 0~1.1MPa 之间摆动，注浆泵暂停注浆时压力显示为零。水泥浆施工配合比（重量比）为（海螺）P.C325R：水：膨润土：NF-15（减水剂）

=1∶0.5∶0.1∶0.015。在注浆量达到 2400L，注浆施工结束，注浆过程中未发现桩身有上抬现象。

4 测试机理

自平衡试桩法是接近于竖向抗压桩实际工作条件的试验方法，其加载设备采用荷载箱。试验时，从桩顶通过高压油管对荷载箱内腔施加压力，箱顶与箱底被推开，产生向上与向下的推力，从而调动桩周土的侧阻力与端阻力，进行加载。将桩侧土摩阻力与桩端土阻力迭加而得到单桩抗压极限承载力^[1]。荷载箱的埋设位置是在桩身平衡点处，使上、下段桩的承载力相等以维持加载。其测试机理见图 1。

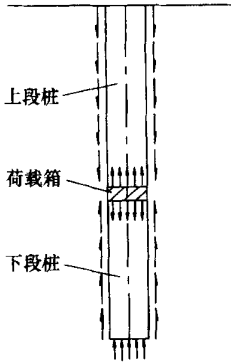


图 1 自平衡测试机理

5 测试过程简述

各试桩主要参数见表 2。其中试桩 A1 埋设双荷载箱，下荷载箱用于测试桩端阻力，上荷载箱用于测试整桩的承载力。为测试各土层的摩阻力，在土层性质发生变化的桩身各截面对称地布置了 1 组(4 根)弦式钢筋应力计。试桩 A1 桩身中布置了 6 组钢筋应力计，试桩 A2 桩身中布置了 8 组钢筋应力计，试桩 E 桩身中布置了 11 组钢筋应力计。试桩 A1 的桩身立面布置示意图见图 2。根据钢筋应力计的测试结果可以得出桩身各截面的轴力，从而得出各截面间土层的摩阻力变化情况。在地面上加载，荷载箱位移由电子表连接位移杆测试获得，加载力由压力表通过标定曲线得出。

各试桩主要参数 表 2

试桩编号	桩径 (mm)	桩长 (m)	桩顶标高 (m)	数量	成桩形式	预估极限承载力值 (kN)	荷载箱距桩底距离 (m)	持力层
试桩 A1	1500	80	5	1	钻孔灌注桩 (桩端注浆)	15800kN 6400kN (桩端)	1.5(下) 8.6(上) 1.5(下)	粉砂层
试桩 A2	1500	90	5	1	钻孔灌注桩	13800kN	15.4	粘土层
试桩 E	1500	101	17	1	钻孔灌注桩	15800kN	23.6	细砂层

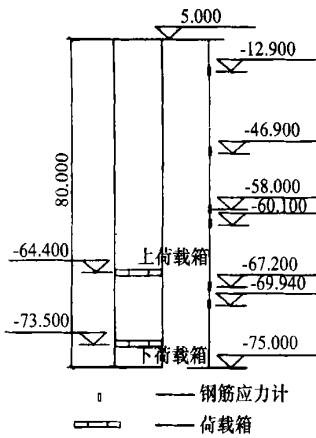


图 2 试桩 A1 立面布置示意

各试桩的测试情况见表 3。

各桩测试情况 表 3

试桩编号	灌注混凝土日期	压浆状况	压浆时间	测试日期	测试内容
试桩 A1	5.20	桩底	6.30	6.14~6.16	桩端阻力 (注浆前)
				7.10~7.13	桩端阻力 (注浆后)
				7.25~7.26	整桩承载力 (注浆后)
试桩 A2	5.3	无	无	6.14~6.16	整桩承载力
试桩 E	6.22	无	无	7.17~7.18	整桩承载力

测试的规程如下：

1. 加载采用荷载箱，试桩的位移量量测采用电子百分表。每桩 6 只表，两只测荷载箱向下位移，两只测荷载箱向上位移，两只测桩顶位移。经应变仪与电脑相联，由电脑控制量测并在电脑屏幕上直接显示 (Q-S) 曲线和 (S-lgT) 曲线和 (S-lgQ) 曲线。

2. 加载采用慢速循环加载法，测试按中华人民共和国交通部标准《公路桥涵施工技术规范》(JTJ 041-2000) 附录 B “试桩试验办法” 和江苏省地方标准《桩承载力自平衡测试技术规程》进行。

(1) 荷载分级：由于试桩吨位大，每级加载为极限承载力的 1/15，第一级按两倍荷载分级加载，卸载仍分 5 级进行。

(2) 位移观测：每级加载后在第 1h 内分别于 5、10、15、30、45、60min 各测读一次，以后每隔 30min 测读一次。电子位移传感器连接到电脑，直接由电脑控制测读，在电脑屏幕上显示 Q-S、S-lgT、S-lgQ 曲线。

(3) 稳定标准：在每级荷载作用下桩的位移量在最后 30min 内小于 0.1mm。

(4) 终止加载条件：总位移量大于或等于 40mm，本级荷载的位移量大于或等于前一级荷载的位移量的 5 倍时，加载即可终止。取此终止时荷载小一级的荷

载为极限荷载。

(5) 卸载及测试：由于加载分级较多，故每级卸载量为 3 个加载级的荷载值。每级荷载卸载后，观测桩顶的回弹量，观测办法与位移相同。直到回弹量稳定后，再卸下一级荷载。回弹量稳定标准与位移稳定标准相同。卸载到零后，至少在 2h 内每 30min 观测一次，开始 30min 内，每 15min 观测一次。

(6) 单桩竖向抗压极限承载力

$$Q_u = \frac{Q_{u上} - W}{\gamma} + Q_{u下} \tag{1}$$

式中， Q_u 为单桩竖向抗压极限承载力； $Q_{u上}$ 为荷载箱上部桩的实测极限值，按《公路桥涵施工技术规范》（JTJ 041-2000）附录 B “试桩试验办法” 确定； $Q_{u下}$ 为荷载箱下部桩的实测极限值，按《公路桥涵施工技术规范》（JTJ 041-2000）附录 B “试桩试验办法” 确定； W 为荷载箱上部桩自重； γ 为荷载箱上部桩侧阻力修正系数。

6 测试结果简述

整个测试过程正常。根据中华人民共和国交通部标准《公路桥涵施工技术规范》（JTJ 041-2000）附录 B “试桩试验办法” 和江苏省地方标准《桩承载力自平衡测试技术规范》（DB32/T291-1999）综合分析确定各试桩如表 4 所示。

各试桩实测结果					表 4
试桩编号	试桩 A1 (下) (注浆前)	试桩 A14 (上) (注浆后)	试桩 A14 (下) (注浆后)	试桩 A2	试桩 E
预定加载值 (kN)	2×3200	2×16000	2×6400	2×16000	2×16000
最终加载值 (kN)	2×2800	2×11000	2×5600	2×12000	2×11000
荷载箱处向上 位移(mm)	8.58	10.13	4.58	27.92	11.21
残余位移 (mm)	5.58	4.97	2.13	20.05	6.25
上部桩土体系 弹性变形(mm)	3.00	5.16	2.45	7.87	4.96
荷载箱处向下 位移(mm)	47.11	114.96	21.77	119.49	97.16
残余位移 (mm)	27.16	74.14	16.23	80.26	60.73
下部桩土体系 弹性变形(mm)	19.95	40.82	5.54	39.23	36.43
桩顶向上位移 (mm)	0.96	4.07	2.38	7.29	4.78
残余位移(mm)	0.47	2.56	1.09	3.01	2.94
上端桩压缩 变形(mm)	7.62	6.06	2.20	20.63	6.43
极限承载力 (kN)	> 17810		> 17640		> 17480

试桩 A1 注浆前后测试结果表明：注浆后桩端阻力得到有效提高，注浆后的桩端阻力极限值（5 200kN）为注浆前的桩端阻力极限值（2 600kN）的 2 倍；注浆后下段桩的桩侧摩阻力也有所提高。注浆前、后加载后桩端阻力与桩端位移的变化关系见图 3。

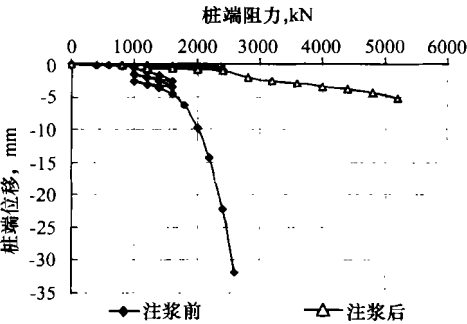


图 3 试桩 A1 注浆前、后桩阻力-位移曲线

根据精确转换法^[4]，试桩 A1、A2、E 自平衡测试法结果向传统方法结果的转换曲线分别如图 4、图 5 和图 6 所示。根据转换曲线，将桩顶位移 40mm 对应荷载作为极限值，判断试桩 A1、A2、E 承载力分别为 18 700kN、19 000kN、19 200kN，两种承载力判断方法结论基本一致，以精确转换值为准。

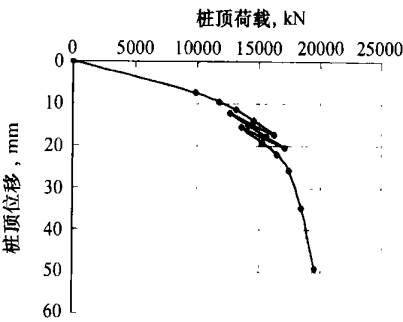


图 4 试桩 A1 精确转换曲线

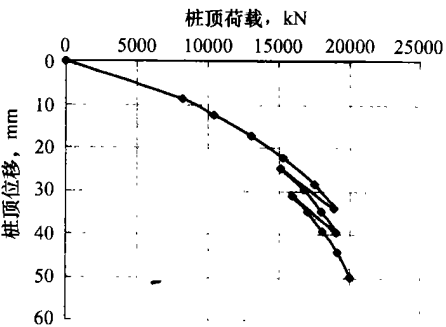


图 5 试桩 A2 精确转换曲线

7 结论

针对桥梁试桩场地特殊特点，采用自平衡试桩法对杭州湾跨海大桥进行桩基静载荷测（下转第 66 页）

(1) 桩底沉渣

由表 5 可知, 1 #、2 #试桩桩侧平均极限摩阻力是 3 #、4 #试桩极限摩阻力的 1.3 倍左右。1 #、2 #试桩上部 78.4%范围内的土层拟极限摩阻力值接近于极限值, 其它土层拟极限摩阻力值平均为极限值的 87.2%; 3 #、4 #试桩分别只有 70.7%、54.5%的土层拟极限摩阻力值接近于极限值, 其它土层拟极限摩阻力值分别为极限值的 77.8%、57.9%, 相当一部分桩侧土层未能达到极限状态。此外, 3 #、4 #试桩极限承载力下的桩端阻力也小于 1 #、2 #试桩的桩端阻力。由此可见, 3 #、4 #试桩桩底沉渣较多, 这是由于持力层沉渣及土层结构受到扰动, 若要充分发挥桩侧摩阻力和桩端阻力需要较大的桩土相对位移量。

(2) 长径比

由于 3 #、4 #试桩位于同一侧河岸, 距离较近, 土层较为相似, 所以重点分析 3 #、4 #试桩长径比对桩侧摩阻力的影响。

3 #、4 #试桩长径比分别为 42.9、48.3, 相差 12.6%。根据表 5, 随着长径比的加大, 桩侧摩阻力的发挥效率降低。3 #、4 #试桩土层拟极限摩阻力加权平均值分别为极限摩阻力的 88.6%、73.3%, 降低了 15.6%; 达到极限摩阻力的土层范围减小 16.2%;

下部土层拟极限摩阻力值也减小 19.9%。

3 结论

根据苏州地区 4 根大直径桥梁钻孔灌注桩桩侧摩阻力试验结果, 得出以下几点结论:

(1) 试桩极限承载力下的桩端阻力平均为极限承载力的 5.8%, 上部荷载主要由土层摩阻力来承担, 属摩擦桩。

(2) 试桩相当一部分桩侧土层未能达到极限状态, 只有 54.5%~78.4%范围内的土层达到极限值。

(3) 桩底沉渣直接影响桩顶沉降, 进而影响极限承载力, 为了能充分发挥土层的摩阻力, 必须控制桩底沉渣量。

(4) 随着长径比的加大, 桩侧摩阻力的发挥效率降低, 所以灌注桩的长径比不宜太大。

(5) 苏州地区土层以亚粘土为主, 极限摩阻力值大多集中在 30~50kPa 左右, 平均值为 41kPa。亚砂土极限摩阻力值差异较大。

参考文献:

[1] 中华人民共和国建设部. 建筑地基基础设计规范 (GB50007-2002) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

(上接第 61 页)

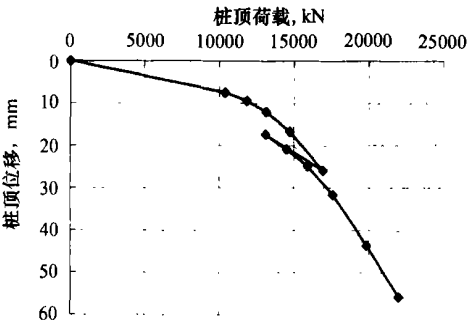


图 6 试桩 E 精确转换曲线

试, 取得了满意的效果。该法相对于传统静载方法具有以下优点:

(1) 水上试桩设置传统的堆载平台或锚桩反力架特别困难和特别花钱, 该法装置较简单, 不需运入数千吨物料, 不需构筑笨重的反力架, 试桩准备工作省时、省力、安全;

(2) 试验费用省, 荷载箱为一次性投入器件, 与传统方法相比可节省试验总费用的 30%左右。

尽管如此, 尚有几个问题值得作进一步探讨:

(1) 由于该法首次使用循环加载法, 加载循环起始点根据传统方法经验确定, 转换曲线循环位置远大于理想点, 导致正常使用状态下刚度系数无法得出。

(2) 本工程砂层为主, 试桩较长, 该试验法钢管焊接量很大, 如何保证下笼时砂层不塌孔或塌孔后如何处理是试验成功的关键。

尽管有上述问题, 但由于该法的特点, 相信不久将在桥梁桩基中广泛地应用。

参考文献:

[1] 龚维明, 等. 桩承载力自平衡测试理论与实践 [J]. 建筑结构学报, 2003, 23 (1).

[2] 中华人民共和国建设部. 建筑桩基技术规范 (JGJ94-94) [S]. 中国建筑工业出版社 2000

[3] 桩承载力自平衡测试技术规程 (DB32/T291-99) (江苏省地方标准) [S]. 1999

[4] 龚维明, 等. 桩承载力自平衡测试法 [J]. 岩土工程学报, 2000, 22 (5): 532—536.