

文章编号: 1000-7598-(2005)07-1053-05

超长钻孔桩竖向承载性状的试验研究

王陶^{1,2}, 马晔²

(1.清华大学 土木水利学院, 北京 100084; 2.交通部公路科学研究所, 北京 100088)

摘要: 利用工程桩作为锚桩, 并在反力系统中充分应用预应力技术, 建立了大吨位静载试验装置。分析了超长桩的承载性能和荷载传递机理, 结果表明: 超长桩的荷载-沉降曲线没有明显破坏点。其竖向荷载主要依靠桩侧摩阻力进行传递, 桩侧摩阻力的发挥存在最佳深度范围。超长桩的承载性能还受土体特性、施工工艺等因素影响。

关键词: 超长桩; 静载试验; 桩侧阻力; 桩端阻力

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

Study on over-length drilled pile bearing behavior under vertical load

WANG Tao^{1,2}, MA Ye²

(1. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Research Institute of Highway, Ministry of Communications, Beijing 100088, China)

Abstract: Static heavy load test of over-length drilled pile is carried out by taking prestressed working pile as part of anchor system, the test equipment is set up capable of heavy weight loading. On the basis of in-situ data of test, the bearing behavior and load transmission characteristics are analyzed. There is no obvious failure feature in over-length drilled piles. The vertical load transmission mostly depends on the side friction of pile, and there is an optimal range of depth for side friction. Besides, the bearing capacity of over-length drilled pile will also be influenced by the factors like constructing technologies and soil properties.

Key words: over-length drilled pile; static load test; side friction of pile; tip resistance of pile

1 引言

桩基础是桥梁结构最普遍的基础形式。随着大跨度桥梁对基础承载力、沉降要求的不断提高, 桩身长度也逐渐延长。现行建筑、公路规范^[1,2]并未专门针对“超长桩”进行界定。工程实践中一般认为, 长径比 ≥ 100 或桩长 >50 m的桩为超长桩^[3-5]。由于桩基的承载能力受到土体特性、桩身刚度、施工工艺等众多因素的影响, 其荷载传递机理尚须进一步探索。超长桩的出现更是对桩基理论与实践的研究提出了新课题。一方面, 超长桩已被大量用于实际工程; 而另一方面超长桩的理论研究虽有一定进展, 但又相对滞后^[6-8]。在这种情况下, 静载试验就成为确定超长单桩竖向承载力最可靠的手段。

湛江海湾大桥是国道 G325 线麻斜海湾的跨海大桥。大桥全长 3 981.17 m, 主桥为双塔斜拉桥。全桥分为陆上东引桥(730.77 m)+水上东引桥(900 m)+主桥(840 m)+水中西引桥(800 m)+海滨路立交

桥(710.4 m)。基础采用桩长 60~104 m 的钻孔灌注桩, 直径为 1.50~2.50 m。由于该桥桩基规模大、地质条件复杂, 为掌握桩的荷载传递及承载性状, 需要进行桩基竖向承载力静载试验。通过试验不但可测定各土层的计算参数、查明桩基的安全储备, 还可以对超长桩的荷载传递特点、传递机理进行研究, 为该种地质条件下超长钻孔灌注桩的设计、施工积累数据和经验。

2 静载试验概况

2.1 现场地质、地貌特点

桥址地貌为滨海平原, 地势变化平缓, 大堤内侧有水塘分布, 两根试桩均在湛江市坡头区一侧海岸, 试桩处地层情况如图 1 所示。受海湾条件影响, 土层分布具有以下特点。

(1) 浅层土软弱, 最上层是 7 m 左右的滨海相淤泥质软土。

(2) 中、下土层为海陆交错沉积, 地层多呈透

镜体, 厚度变化复杂。

(3) 沉积层大部分为粘性土、中砂等颗粒的沉积体, 局部存在细砂层, 地下水位高。

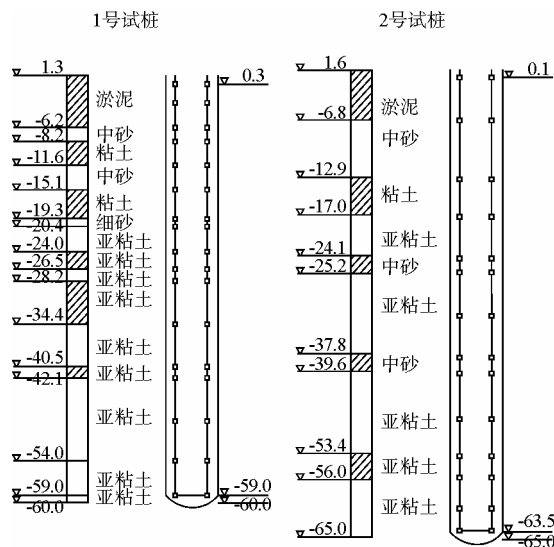


图 1 荷载试验钢筋计布置示意图(单位: m)

Fig.1 Static load test system sketch of piles(unit:m)

2.2 试桩设计、施工

桩基静载试验装置由试验桩、锚桩、承台、反力梁、千斤顶等几部分组成。试验装置设计时遵循的主要原则是:

(1) 试验桩竖向承载力的确定按照《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ024—85) 及施工图阶段勘测单位提供的《工程地质勘察报告》进行。锚桩的抗拔极限摩阻力取抗压极限摩阻力的 65%。

(2) 采用锚桩-反力梁法进行静载试验。利用工程桩作锚桩, 在锚桩中设置预应力钢筋, 并进行最大加载吨位下的抗裂验算, 保证锚桩在加载过程中始终处于受压状态。锚桩上拔量不超过 10 mm。

(3) 反力梁和承台充分应用预应力, 采用深梁理论按照最大加载能力 1.5 倍设计。反力系统如图 2 所示。



图 2 试桩反力系统

Fig.2 Anchor system of static load test

(4) 试验采用慢速维持加载法, 各千斤顶通过

分油管与油泵连接, 同步施加荷载。

试桩施工采用 CZE15 型钻机反循环成孔, 泥浆护壁, 桩身采用 C30 混凝土。试桩工程从 2003 年 1 月初开钻, 同年 6 月中旬结束。试桩工程概况列于表 1。

表 1 试桩工程概况

Table 1 Summary of static load test

参数	1 [#]		2 [#]	
	试验桩	锚桩	试验桩	锚桩
桩径/m	1.2	1.8	1.2	1.5
桩长/m	60.32	72.00	67.82	68.00
数量/根	1	2	1	4
开钻日期/年-月-日	2003-1-17	/	2003-2-13	/
浇注日期/年-月-日	2003-1-28	/	2003-3-2	/
荷载能力/kN	20 000	20 000	32 000	32 000

3 静载试验方法

3.1 桩顶位移测量

基准梁是保证位移测量准确性的关键。在与试验桩中心距不小于 4 m 处对称打入钢管桩, 桩顶焊接工字钢作为基准梁。在试验过程中, 应严格限制场地附近的交通、振动, 并采取措施, 防止基准梁受温度、天气变化的影响。

荷载作用下桩顶竖向位移、锚桩上拔量用电测位移传感器(分辨率 0.01 mm)测量。试验桩顶部对称布设 4 只传感器, 每根锚桩上对称布设 2 只。传感器必须固定于基准梁上, 并注意防水。此外, 在反力梁顶面、底面及侧立面支承线位置附近设观测点, 随时监测其工作状态, 保证试验安全。

试验采取单循环分级加载, 每级加载量 1[#]试桩为 2 000 kN, 2[#]试桩为 1 600 kN。试验数据采集在每级加载后的 1 h 内, 每隔 15 min 进行一次, 以后每隔 30 min 进行一次。沉降稳定后施加下一级荷载。卸载等级为加载等级的 2 倍, 数据采集方法与加载相同。

3.2 轴力、侧摩阻力测量

预埋弦式钢筋计测量的是各截面钢筋的应变。桩身轴力和侧摩阻力则根据钢筋与桩身混凝土应变相同原理进行推算。结合土层分布特点, 钢筋计布置在土层界面(图 1 所示)。钢筋计与钢筋笼对焊连接, 每断面对称布设 4 只。数据采集在每级加载后及稳定后各进行一次。

4 试验结果分析

1[#]试桩最终加载至 22 000 kN, 超出反力系统最大设计加载能力, 为安全起见终止加载。2[#]试桩加

载至 16 000 kN 时, 累计下沉量 $S=37.693$ mm, 此时 $Q-S$ 曲线并没有明显转折, 于是在沉降超过 40 mm 之后继续加载, 最终加至 24 000 kN, 总沉降量达 190.044 mm。

试桩过程中对锚桩的上拔量进行了跟踪检测, 锚桩的最终上拔量列于表 2。可以看出锚桩上拔量远小于规范允许值。现场观察, 锚桩也没有发生任何破坏。

表 2 锚桩最终上拔量(单位:mm)
Table 2 The upward-drawing displacements of anchor piles

桩号	编号				平均
	1	2	3	4	
1 [#]	2.81	2.53	/	/	2.67
2 [#]	5.83	6.52	5.05	5.34	5.69

4.1 荷载-沉降特性分析

试桩的 $Q-S$ 、 $S-\lg Q$ 、 $S-\lg t$ 曲线分别如图 3~6 所示。分析试验结果, 可知:

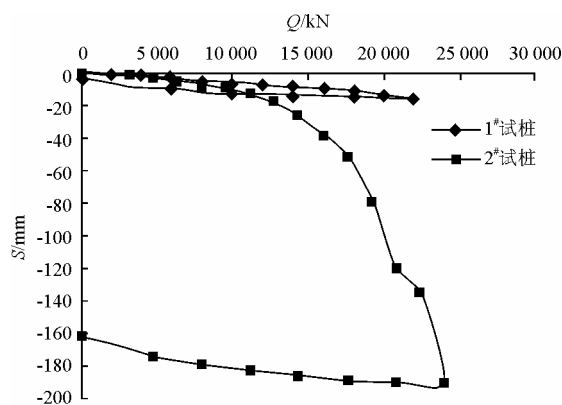


图 3 试桩 $Q-S$ 曲线
Fig.3 The $Q-S$ curves of piles

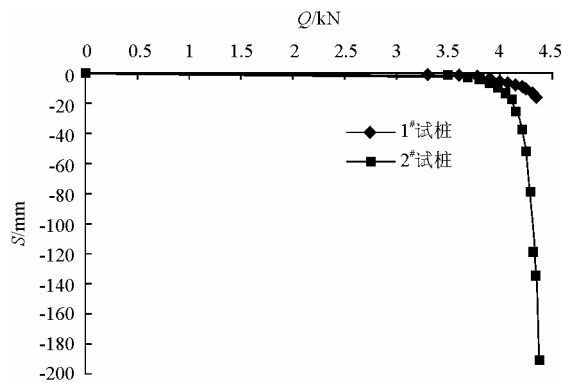


图 4 试桩 $S-\lg Q$ 曲线
Fig.4 The $S-\lg Q$ curves of piles

(1) 1[#]试桩 $Q-S$ 曲线几乎呈线性发展, 未呈现极限破坏特征。最大荷载时, 总沉降量 $S=15.625$ mm,

卸载后残余沉降量 4.075 mm, 回弹率为 73.9%, 表明桩顶沉降主要是桩身压缩引起, 大部分沉降卸载后旋即恢复, 桩身残余应力较小。从图 5 所示的 $S-\lg t$ 曲线中也可以看出, 沉降与时间的关系没有明显的改变。1[#]试桩的极限承载力虽取为最大加载量 22 000 kN, 相信仍有一定的承载力储备。

(2) 2[#]试桩在加载至 20 800 kN 时, 累计沉降量已达 119.3 mm, 但 $Q-S$ 曲线上却未呈现明显拐点。然而 $S-\lg t$ 曲线 (图 6) 显示在 16 000 kN 以后, 沉降与时间的关系已经开始改变。对照 $Q-\lg P$ 曲线也可看出: 17 600 kN 以后每级荷载的沉降量激增, 显示桩-土体系已超出弹性工作范围, 进入破坏状态。卸载后沉降回弹率也只有 14.9 %。由于 $Q-S$ 曲线呈渐变发展, 且桩顶沉降量较大, 于是采用容许沉降量作为确定极限承载力的控制指标。2[#]试桩采用 $S=40$ mm 所对应的荷载作为极限承载力其值为 16 260 kN。

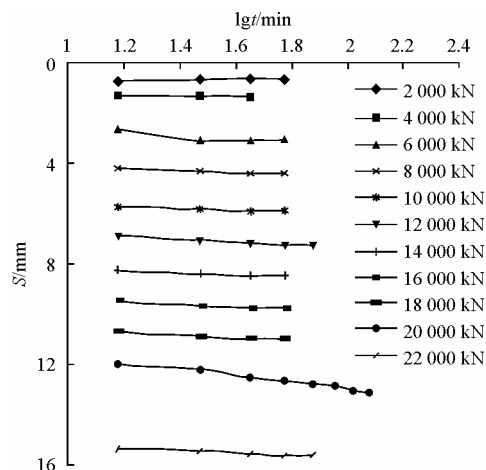


图 5 1[#]试桩 $S-\lg t$ 曲线
Fig.5 The $S-\lg t$ curves of pile No.1

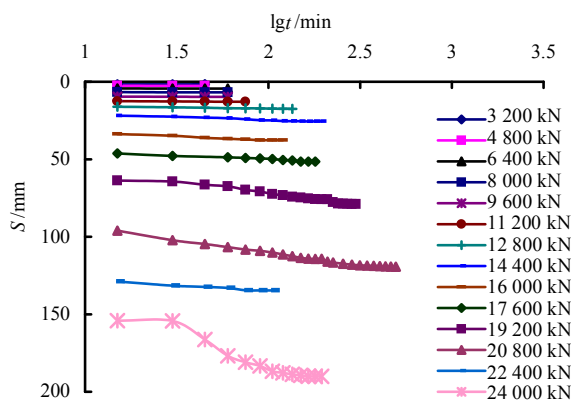


图 6 2[#]试桩 $S-\lg t$ 曲线
Fig.6 The $S-\lg t$ curves of pile No.2

(3) 2[#]试桩 $Q-S$ 曲线在荷载 20 800~22 400 kN 间出现斜率减小的一段, 即硬化现象。究其原因, 此阶段桩侧摩阻力已接近极限, 新增荷载向下传递, 在沉渣消耗一定的桩底位移后, 桩端阻力开始充分发挥作用。 $Q-S$ 曲线的硬化段正是这一过程的完整体现。而当端阻的潜力发挥殆尽, 沉降也就再次加速发展, 表现为 22 400 kN 之后的加速下降段。

4.2 荷载传递特性分析

桩基在竖向荷载作用下发生轴向弹性压缩, 桩-土相对位移产生桩侧摩阻力, 竖向荷载克服摩阻力沿桩身向下传递。由于土层性质、桩-土相对位移量、孔壁应力松弛、泥皮厚度等情况的差异, 竖向荷载沿深度呈现非线性衰减。本次试验所得到的竖向荷载传递情况也体现了这一规律。试桩的轴力分布如图7、图8所示。

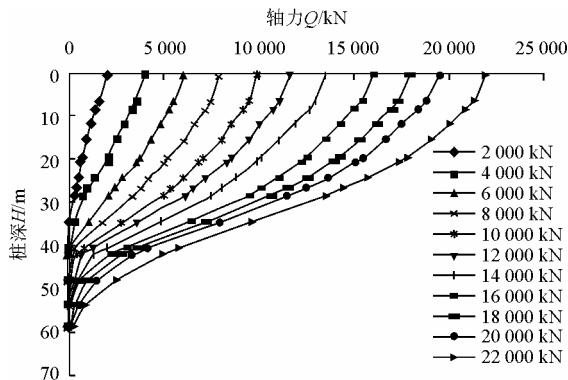


图7 1[#]试桩轴力分布

Fig.7 Axial force distribution of pile No.1

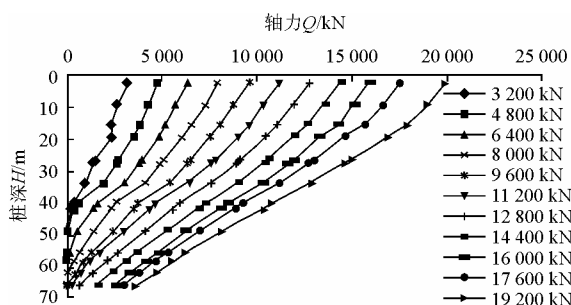


图8 2[#]试桩轴力分布

Fig.8 Axial force distribution of pile No.2

分析图7、图8所示的桩身轴力分布, 可以总结出超长桩基竖向荷载传递的特点:

(1) 即使在最大加载情况下, 1[#]试桩传到桩底的荷载也仅占1.1%, 桩侧摩阻力几乎承担了试桩的全部竖向荷载, 属于摩擦桩。2[#]试桩随荷载增加, 桩底逐渐出现轴力, 表明桩侧摩阻力充分发挥之后, 桩端阻力开始承担增加的竖向荷载。这些都是端承

摩擦桩具有的特点。但是必须注意的是, 在端阻发挥作用前, 过大的沉降量已使桩基对建筑物失去了利用价值, 而在沉降允许范围内, 依然是桩侧阻力在荷载传递中占绝对优势。从2根试桩的荷载传递特点中可以发现, 桩侧摩阻力和桩端阻力的作用时机存在先后顺序, 不同阶段两者发挥作用的比例也不同。然而在现行的建筑、公路规范中单桩承载力计算只是将侧阻、端阻两部分进行简单累加, 与实际情况存在较大差异。

(2) 2根桩的轴力沿深度方向的衰减速度并不相同, 这预示着桩侧摩阻力存在有效发挥段。图9、图10所示的桩侧摩阻力变化进一步证实了这一最佳深度范围的存在。并且这个最佳深度和土层性质、桩-土相对位移量、初始地应力水平等承载力影响因素有关。1[#]试桩在0~6.5 m处由于土层软弱、地应力水平低, 即使有较大的桩-土相对位移, 侧摩阻力依然较低; 深度在19.3~54.0 m处, 侧摩阻力随荷载等级迅速增加, 是侧摩阻力峰值的范围, 表明此范围内相对位移量和地应力水平具有最佳的匹配; 超过54.0 m, 则由于桩-土相对位移很小, 即使具有较高的地应力水平, 桩侧摩阻力也不能充分发挥。2[#]试桩的土层分布与1[#]试桩存在差异, 侧摩阻力分布形态也明显不同, 但2[#]试桩在28~49.3 m深度范围内, 侧摩阻力出现较高的现象(图10), 也表明了最佳深度的存在。

(3) 土质特性对荷载传递性能有显著影响。粘性土桩侧摩阻力发挥迅速, 较小的桩-土相对位移即可作用。砂性土侧摩阻力的发挥则需要相对较大的位移量。粘性土和砂性土的桩侧摩阻力都随荷载等级的增加而增加, 但是砂性土的增幅没有粘性土大。两者极限摩阻力的发挥都需要积累一定的相对位移量。

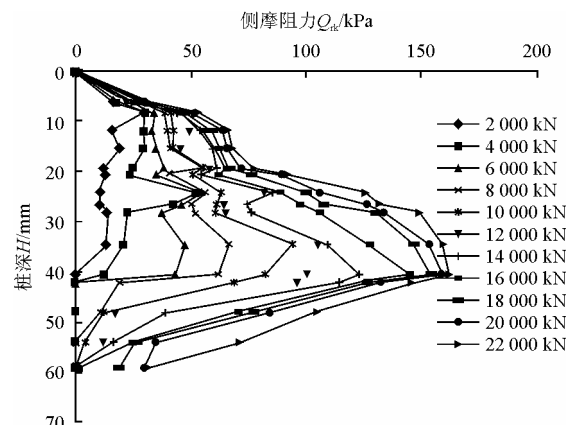


图9 1[#]试桩侧摩阻力

Fig.9 Side friction distribution of pile No.1

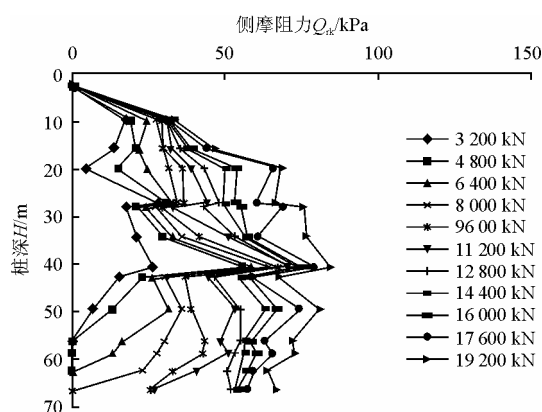
图 10 2[#]试桩侧摩阻力

Fig.10 Side friction distribution of pile No.2

(4) 对比2根试桩的侧摩阻力分布可以发现, 2[#]试桩的桩侧摩阻力总体上较1[#]试桩低。除了地层分布情况的差异外, 查看试桩的施工记录, 发现2[#]试桩钻孔时间较长, 这也是侧摩阻力较低的原因之一。钻孔造成孔壁应力释放, 降低土体的抗剪强度, 导致桩侧摩阻力的降低。这种应力扰动的过程越长对承载力越不利。此外, 由于泥浆比重的不同造成泥皮厚度的差异, 也将导致桩侧摩阻力的差异。

5 结 论

(1) 试验中锚桩上拔量远小于规范允许值, 锚桩没有发生任何破坏, 依然可以作为工程桩使用。

(2) 超长桩的荷载-沉降曲线没有显著破坏点, 荷载传递过程表现为摩擦桩的特性, 桩侧阻力几乎承担全部荷载, 而桩端阻力充分发挥时, 桩顶沉降往往已超出规范要求。因此, 在采用静载试验方法确定极限承载力时应采用桩顶沉降量作为控制指标。

(3) 超长桩的荷载传递过程与普通桩存在较大的差异, 现行的建筑、公路规范中的单桩承载力计算公式并不适用于超长桩基。改进的超长桩承载力计算方法应充分考虑端阻在容许沉降下几乎不发挥作用这一现象, 并注重对设计荷载作用下的桩顶沉降量进行验算。

(4) 由于受土层特性、桩-土相对位移量、初始地应力水平的影响, 桩侧摩阻力的发挥存在最佳深度范围。因此在桩基设计中一味地增加桩长, 并不是满足承载力要求的最佳方案。

(5) 施工工艺是影响桩基承载力的关键因素之一。桩长的增加给施工带来的困难是显著的, 采取合适的成孔方法, 在钻孔、清孔阶段严格控制泥浆比重, 缩短成桩时间, 减小土体扰动等措施将是提高桩基承载力的基本保证。

参 考 文 献

- [1] JGJ94-94, 建筑桩基技术规范[S].
- [2] JTJ024-85, 公路桥涵地基与基础设计规范[S].
- [3] 池跃君. 大直径超长灌注桩承载性状的试验研究[J]. 工业建筑, 2000, 30(8): 26—29.
- [4] 阳吉宝, 钟正雄. 超长桩的荷载传递机理[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(6): 108—112.
YANG Ji-bao, ZHONG Zheng-xiong. Research on load transfer mechanism of super-long pile[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(6): 108—112.
- [5] 朱向荣, 方鹏飞, 黄洪勉, 等. 深厚软基超长桩工程性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25 (1): 76—79.
ZHU Xiang-rong, FANG Peng-fei, HUANG Hong-mian. Research on super-long pile in soft clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20 (6): 76—79.
- [6] 曾友金, 章为民. 用有限单元法分析超长单桩的荷载传递[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 803—806.
ZENG You-jin, ZHANG Wei-min. Analysis of load-transfer of super-long single pile with finite element method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(6): 803—806.
- [7] 曾友金, 章为民. 超长单桩的荷载传递分析[J]. 水利水电工程学报, 2002, (1): 25—30.
ZENG You-jin, ZHANG Wei-min. Analysis of load-transfer of super-long single pile[J]. **Hydroscience and Engineering**, 2002, (1): 25—30.
- [8] 郭忠贤, 杨志红, 李金山, 等. 大直径灌注桩承载性状的试验研究[J]. 工程勘察, 2000, (2): 34—37.
GUO Zhong-xian, YANG Zhi-hong, LI Jin-shan, et al. Study on the bearing behaviors of large diameter last-in-place pile[J]. **Geotechnical Investigation & Surveying**, 2000, (2): 34—37.