

泰州大桥中塔沉井基础承载力模型试验研究

阮 静^{1,2}, 胡 丰³

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 南京 210098; 2. 江苏省长江公路大桥建设指挥部, 江苏泰州 225321;

3. 河海大学力学与材料学院, 南京 210098)

[摘要] 泰州大桥中塔位于江中心, 基础覆盖层高达 200 m。通过多方面比选, 基础采用 58 m × 44 m 四角倒圆的矩形沉井, 高 76 m。为确保泰州大桥中塔沉井基础的安全和稳定, 开展了 1: 100 的模型试验, 获取了泰州大桥沉井极限承载力以及沉井埋深、土体含水量、侧壁摩阻力对极限承载力的影响。

[关键词] 沉井承载力; 泰州大桥; 物理模型试验

[中图分类号] U443.13+1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2012)05-0057-05

1 前言

泰州大桥采用主跨为 1 080 m 三塔两跨悬索桥, 中塔位于主江中心, 河床标高为 $\nabla -15.0$ m, 河床较稳定。河床长期受流砂冲积影响, 覆盖层极为深厚, 基岩埋藏在 200 m 以下, 中塔基础处从河床面向下到 $\nabla -55$ m 以粉细砂为主, $\nabla -55$ m 到 $\nabla -68$ m 以中粗砂为主, $\nabla -68$ m 到 $\nabla -79$ m 以细砂为主, $\nabla -79$ m 以下以中砂、砾砂为主。三塔两跨悬索桥的结构要求中塔有足够的变形刚度及抵抗船舶撞击(或地震力)的能力。通过对沉井基础和高桩承台钻孔桩基础等多项基础方案的比选, 最终采用自身结构刚度大、地基承载力要求相对较低、抵抗水平力性能较好的沉井基础。根据塔柱底的构造与受力要求, 沉井采用 58 m × 44 m 四角倒圆的矩形沉井, 沉井总高 76 m。为能在深水中顺利施工, 沉井下部为钢壳混凝土结构, 上部为钢筋混凝土结构。

泰州大桥中塔重量为 1.35 万 t, 承台及塔座自重 4.56 万 t, 沉井自重为 15.27 万 t, 封底混凝土自重为 4.68 万 t。一般工况时, 上部结构传到沉井顶面的轴力为 4.6 万(恒载)~5.0 万 t(恒载+活载)。泰州大桥中塔沉井基础端部持力层为砂层。

沉井基础尺寸大, 施工过程中摩擦力削弱过大, 设计中不考虑沉井侧面土的摩阻力, 主要考虑端部土承载力, 因而端部土承载力的合理计算显得极其重要^[1]。对于超大超深沉井基础的端部土竖向承载力的计算尚没有找到合适的参考文献, 设计参考了《公路桥涵地基基础规范》浅基础计算公式, 该计算公式是在小平板现场试验基础上建立的, 基础呈整体剪切破坏, 试验板最大尺寸不大于 1 m²、埋深不大于 6 m, 公式中虽然考虑了地基土的深度修正和宽度修正, 其实质还是仍适用于浅基础情况。因此泰州大桥开展了模型试验, 获取极限承载力与沉井埋深、土体含水量、侧壁摩阻力之间的关系, 并根据相似理论将模型极限承载力转化为实桥极限承载力, 确保泰州大桥结构的安全和稳定。

2 中塔沉井基础承载力试验

2.1 试验方法

模型相似比设定为 1: 100。试验前期用混凝土制作沉井模型, 并在沉井外壁安置相应测试传感器。将沉井模型置于含土试验槽内, 在沉井顶部以连续加载方式分级施加竖向载荷, 通过位移表、应变计、土压力表等量测原件获得相应物理量, 从而确定沉

[收稿日期] 2012-03-16

[基金项目] 国家科技支撑计划资助项目(2009BAG15B02)

[作者简介] 阮 静(1975—), 女, 江苏扬州市人, 高级工程师, 河海大学博士研究生, 主要研究方向为大跨径桥梁基础设计施工关键技术;
E-mail: tzbridge@163.com

井的承载性能。

泰州大桥中塔沉井为深水基础,为考虑水下环境的影响,试验土体分一般含水量和饱和含水量两种工况。由于中塔基础局部冲刷较为严重^[2],试验还以不同沉井埋深来模拟多个冲刷深度对承载力的影响。其中不发生冲刷沉井埋深是 55 m,一般冲刷沉井埋深是 50 m,局部冲刷沉井埋深是 10 m。根据模型相似比,对应模型的埋深分别为 55 cm、50 cm 和 10 cm,一般冲刷和局部冲刷的深度跨度较大,故试验增加埋深 30 cm 和 0 cm 的情况。为考虑沉井的深部效应,去掉摩阻力对基础影响,试验还增加了沉井埋深仍是 55 cm,但井壁外侧与土分离的工况。因此,试验共含有如下 12 组工况^[3](见表 1)。

表 1 模型试验的试验工况

Table 1 Test conditions of physics model experiment

工况名称	模型埋深/cm	土体含水量	井侧与土体分离
工况 1	55	非饱和	否
工况 2	55	非饱和	是
工况 3	50	非饱和	否
工况 4	30	非饱和	否
工况 5	10	非饱和	否
工况 6	0	非饱和	否
工况 7	55	饱和	否
工况 8	55	饱和	是
工况 9	50	饱和	否
工况 10	30	饱和	否
工况 11	10	饱和	否
工况 12	0	饱和	否

2.2 试验模型

沉井自身刚度远大于相邻土体,因此可视为刚体,模型采用钢筋混凝土为主要材料制作。沉井模型含井身和底板两部分,由于沉井实际尺寸为长 58 m、宽 44 m、高 76 m,根据相似比系数,井身尺寸为长 0.58 m、宽 0.44 m、高 0.76 m,中间为边长 0.26 m 正方形孔,四角为 0.1 m 圆角,底板厚度为 6 cm。试验土层采用均质土层,有关物理力学参数根据现场原型土层分布按厚度进行加权平均,选用物理力学参数相近的南京某深基坑粉砂作为原型土的相似土,土体物理参数见表 2。

表 2 模型土物理参数

Table 2 Physical parameters of soil used in model experiment

	密度 $\rho/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	孔隙比 e	含水率 $\omega/\%$	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	压缩模量 E_s/MPa
非饱和	1.589	0.782	9.20	5.32	36.46	19.34
饱和	1.876	0.831	26.42	3.63	34.85	13.51

试验槽尺寸设计为 3 m × 2.52 m × 2 m,可使沉井模型外缘至土槽边缘的距离远大于模型半宽,并在模型槽内侧用土工薄膜处理,以适应考虑地下水位方案的需要。试验加载采用吨位为 20 t 的千斤顶置于模型顶部,同时在试验槽内放置反力梁以产生反力,沉井模型及其加载装置如图 1 所示。采用电阻应变式微型土压力盒测量模型基底中心点反力和角点反力,采用电阻应变式位移计测量模型顶部位移,采用河海大学自行研制的摩阻力测试盒测试模型侧壁摩阻力。



图 1 沉井模型及其加载装置

Fig. 1 Caisson model and its loading device

2.3 试验过程

试验采用人工千斤顶加载方式,千斤顶顶端连有压力传感器,可实时获知压力值,经计算每级施加 0.5 t 荷载,待每一级荷载达到稳定时,记录下所有传感器量测值,然后再进行下一级加载。当沉井顶部位移变化过大且千斤顶读数难以稳定时,结束加载并卸载。以工况 1 为例,该工况下沉井模型埋深 55 cm,土体含水量为 9.2%。以每级 0.5 t 加载,在第 32 级时千斤顶读数难以稳定,位移变化较大,停止加载,土体表面已存在微裂缝,以第 31 级荷载 15.5 t 为极限荷载,可获得各级荷载下模型的顶部位移、基底中心点反力、基底角点反力以及侧壁摩阻力。模型基底反力与竖向荷载变化关系如图 2 所

示,侧壁摩阻力与竖向荷载变化关系如图3所示。

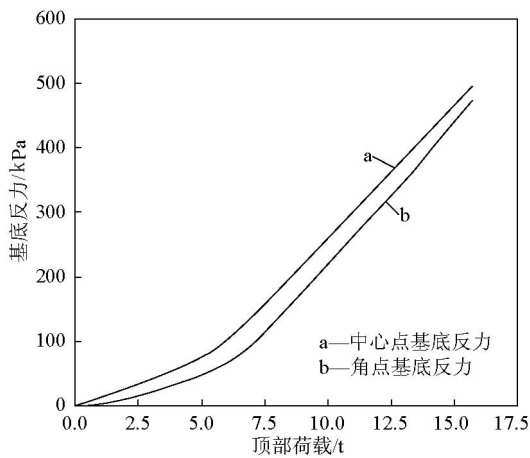


图2 基底反力与竖向荷载变化关系(工况1)

Fig.2 Relationship of base counter-force and vertical load variation (Condition 1)

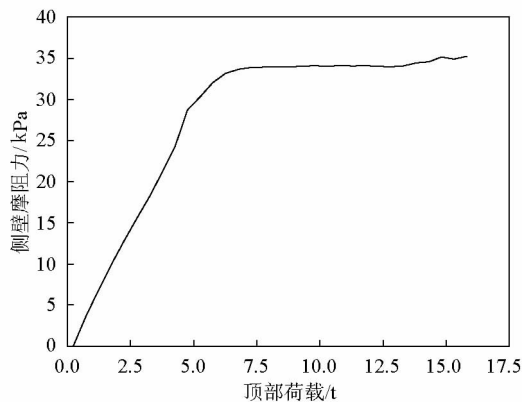


图3 侧壁摩阻力与竖向荷载变化关系(工况1)

Fig.3 Relationship of side wall frictional resistance and vertical load variation (Condition 1)

2.4 试验结果分析

2.4.1 承载性能对比

将不同埋深工况下的荷载-位移曲线进行对比,图4为非饱和土体沉井模型荷载-位移曲线,图5为饱和土体沉井模型荷载-位移曲线。由图可知,模型埋深越小,每级荷载下位移值越大,最终加载极限值也越小。沉井模型在不同埋深、不同含水量条件下,极限承载力变化曲线如图6所示,从图中可知沉井埋深越大,沉井极限承载力也越大。埋深0 cm 工况的承载力是埋深 55 cm 工况的 45% 左右,说明冲刷对基础的承载力影响很大。而含水量变大会使承载力降低,土体饱水相对于土体非饱水时,承载力降低 8.33% ~ 24.00%。

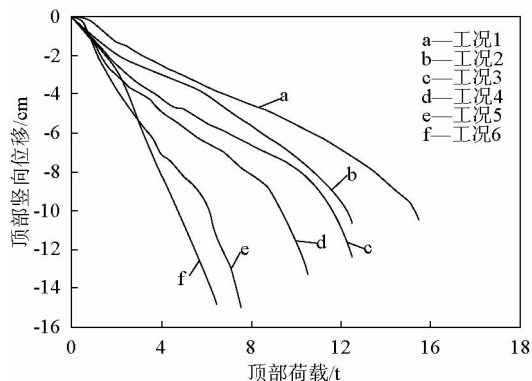


图4 荷载-位移曲线(非饱和土体)

Fig.4 Curve of load and displacement (unsaturated soil)

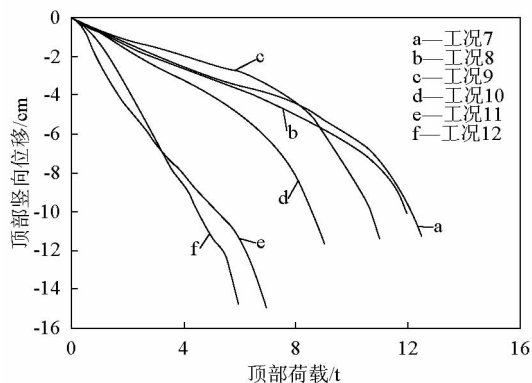


图5 荷载-位移曲线(饱和土体)

Fig.5 Curve of load and displacement (saturated soil)

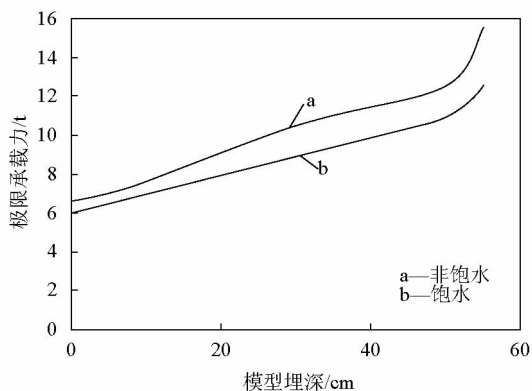


图6 极限承载力与沉井埋深关系曲线

Fig.6 Curve of the ultimate bearing capability and caisson sinking depth

2.4.2 埋深效应分析

对比工况 1、工况 2、工况 7 和工况 8 可知,基础摩阻力占总承载力比重较小,承载力主要来自于基底土反力。工况 1 与工况 2 埋深相同,极限承载力相差 3 t,由于工况 2 还缺少井壁周围部分土体,故工况 1 摩阻力所占总承载力比重要小于 19.3%。工况 7 和工况 8 埋深相同,但由于基础和土体均处在水中,受水压影响,二者承载力只相差 0.5 t,说明摩阻力对水下沉井基础作用更小。再对比其他工况可知,基底的极限承载力与埋深有显著关系。受水压和润滑作用影响,对水下基础而言,侧壁摩阻力对沉井基础中承载力的贡献更小。

3 实桥沉井承载性能转化

由相似理论,实桥荷载-位移曲线可按以下方法转化。半平面受竖向分布载荷的沉降弹性计算公式为

$$\eta_{ki} = \frac{2}{\pi E_c} 2 \int_0^{c/2} \ln \frac{s}{r} dr = \frac{2q}{\pi E} \left(\ln \frac{s}{c} + 1 + \ln 2 \right) \quad (1)$$

式(1)中, q 为荷载集度; E 为土体弹性模量; s 为基点距分布力中点距离; c 为分布荷载宽度; r 为微分力至分布荷载中心点处距离。

实桥沉井与模型沉井的沉降比为

$$\frac{\eta_p}{\eta_m} = \frac{q_p E_m}{q_m E_p} = \frac{Q_p E_m A_m}{Q_m E_p A_p} \quad (2)$$

式(2)中, Q_p 、 Q_m 分别为实桥与模型沉井顶部荷载; A_p 、 A_m 分别为实桥与模型沉井横截面面积; E_p 、 E_m 分别为实桥与模型土体弹性模量。

以实桥基底土层压缩模量(12.20 MPa)作为 E_p ,模型土压缩模量(13.51 MPa)作为 E_m ,根据相似系数, $Q_p/Q_m = 10^4$ 、 $A_p/A_m = 10^4$,则沉降比 $\eta_p/\eta_m = 1.11$ 。

分别以模型埋深 55、50、30 cm 作为无冲刷、一般冲刷及局部冲刷工况,再将沉降比代入模型荷载-位移关系曲线,可得实桥沉井荷载-位移曲线(见图 7)。由图 7 可知,各种冲刷条件下的荷载-位移曲线拐点均大于设计荷载,可证明大桥沉井基础承载力满足设计要求。无冲刷和局部冲刷时对应的极限承载力分别 11 万 t 和 7 万 t,说明冲刷

使得基础承载力降低 36.36%。在最大工况荷载(5 万 t)作用下,无冲刷和局部冲刷对应的位移分别为 3.45 cm 和 4.45 cm,说明冲刷使得竖向位移增加 29.85%。

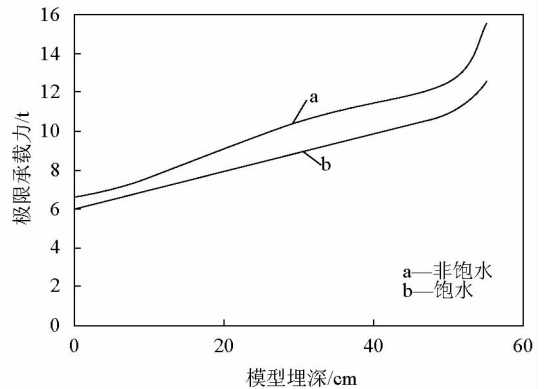


图 7 实桥沉井荷载-位移曲线

Fig.7 Curve of load and displacement for real bridge

4 结语

1) 沉井基础每级荷载下的位移值大小与埋深有关,埋深越大位移值越小,极限承载力越大。埋深 0 cm 工况的承载力是埋深 55 cm 工况的 45% 左右,说明冲刷对基础的承载力影响很大。

2) 土体含水量的增大会使基础承载力降低 8.33% ~ 24.00%,具体降低数值与基础埋深等的变化相关。

3) 基础侧壁摩阻力对沉井总承载力贡献较小,沉井基础承载力主要来自于基底土反力。受水压和润滑作用影响,对水下基础而言,侧壁摩阻力对沉井基础中承载力的贡献更小。

参考文献

- [1] 童小东,殷永高,徐敏,等.沉井基础竖向承载力试验研究[J].地下空间与工程学报,2009,5(5):897-902.
- [2] 卢中一,高正荣.泰州大桥施工期局部冲刷试验报告[R].南京:江苏省长江公路大桥建设指挥部,2007.
- [3] 邵国建,胡丰.泰州大桥中塔沉井基础承载能力研究报告[R].南京:江苏省长江公路大桥建设指挥部,2011.

Physics model experimental research on the bearing capability of the middle tower caisson foundation of Taizhou Bridge

Ruan Jing^{1,2}, Hu Feng³

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Provincial Yangtze River Highway Bridge Construction Commanding Department, Taizhou, Jiangsu 225321, China; 3. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

[**Abstract**] The foundation of the middle pylon of Taizhou Bridge is located above the overlying deposit with the height of 200 m in the water. The round rectangular caisson foundation with the plane dimension of 58 m × 44 m and the height of 76 m is employed. To verify the safety and stability of the middle pylon of Taizhou Bridge, a physics model with the scale of 1:100 to the real structure is built up. The ultimate bearing capacity of the caisson foundation and the influence of sinking depth, soil moisture content, and the side wall friction on the bearing capacity are obtained.

[**Key words**] bearing capability of caisson foundation; Taizhou Bridge; physics model experiment

(上接 40 页)

Approximate calculation method of main cables PPWS construction traction force for extra-large span suspension bridge

Wang Jun¹, Lin Fan²

(1. Jiangsu Provincial Yangtze River Highway Bridge Construction Commanding Department, Taizhou, Jiangsu 225321, China; 2. CCC-SHB Second Engineering Co. Ltd., Xi'an 710119, China)

[**Abstracts**] For the large number of wire strands and the long distance of strand traction, the wire strands are erected normally with gantry pulling traction system that allows continuous pylon passing in the construction of main cables with PPWS (prefabricated parallel wire strand) method for an extra-large span suspension bridge. The accurate calculation of traction force is of realistic significance to the selection of traction equipment and ensuring smooth construction. In early days of suspension bridge construction, the capacity demand and type of traction equipment were determined mainly based on experience. In this article, exploration was made for the traction force calculation method of the gantry pulling traction system for PPWS construction, and the results were compared with measured data on work site. It proves that the calculation result is reliable and can be used in construction calculation.

[**Key words**] suspension bridge; main cable; PPWS; wire strand; traction force