

高桩码头不均匀沉降模型实验与数值模拟¹⁾

王 超²⁾ 陆晶晶 孟祥跃 李世海³⁾

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要 以使用 5 年以上的高桩码头的大管桩为研究对象, 采用模型实验的方法对大管桩的不均匀沉降进行了系统研究. 首先通过量纲分析, 确定模型实验的各个物理量和相关参数, 以及模型材料 (PVC 管) 等; 然后利用电测技术, 经过大量实验, 获得大管桩的不均匀沉降量和变化规律; 同时, 利用数值模拟, 分析了大管桩不均匀沉降变化规律, 验证了模型实验结果的可靠性, 说明了利用数值模拟方法分析大管桩不均匀沉降是可行的.

关键词 高桩码头, 大管桩, 模型实验, 数值模拟

中图分类号: O39 文献标识码: A 文章编号: 1000-0879(2009)03-061-03

MODEL EXPERIMENT AND NUMERICAL SIMULATION OF HIGH-PILED WHARF AND UNEVEN SETTLEMENT¹⁾

WANG Chao²⁾ LU Jingjing MENG Xiangyue LI Shihai³⁾

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract A high-piled wharf in use for more five years are studied with model experiment to obtain the uneven settlement of large-diameter concrete pipes. First, physical parameters for the model (PVC piles) are chosen through dimensional analysis, and then, the uneven settlement of the large-diameter concrete pipe is obtained by electrical measurement technology. At the same time, a numerical simulation is carried out to validate the model experiment results. It is shown that it is feasible to analyze the uneven settlement of the large-diameter concrete pipe with a numerical simulation.

Key words high-piled wharf, large-diameter concrete pipe pile, modeling experiment, numerical simulation

高桩码头中的岸坡变形主要是由于码头施工中先挖后填、破坏了岸坡原有的平衡状态所引起的. 文献 [1] 的研究表明: 码头施工中的前挖后填对码头桩基的影响在工程竣工初期是以侧向作用为主, 造成桩和承台向前移动; 但经过一段时间后, 其影响会逐渐衰减. 当码头宽度足够大, 岸坡坡度平缓且基桩数量较多时, 岸坡侧向位移对高桩码头稳定性的影响期限往往为工程竣工后的 3~4 年. 在此期间内, 岸坡中不均匀沉降的影响慢慢上升为控制因素. 因此, 对于正常运营超过 5 年的高桩码头, 对其进行由于不均匀沉降造成的损伤的研究, 将有助于了解

高桩码头的损伤情况, 并采取及时的修缮措施^[1].

本文以深圳港蛇口港区新建的 6#, 7# 泊位集装箱码头为背景, 利用模型实验和三维数值模拟, 研究高桩码头竣工后的不均匀沉降规律, 为高桩码头工程进行受力分析以及健康诊断提供基础.

1 工程概况

深圳港蛇口港区 6#, 7# 泊位集装箱码头工程位于广东省珠江三角洲南部、珠江入海口东岸. 码头平面布置为顺岸式, 码头结构为全直桩高桩梁板式, 基桩为后张法预应力混凝土大管桩, 前后轨道梁下为

2008-03-24 收到第 1 稿, 2008-05-06 收到修改稿.

1) 国家“973”项目 (2002CB412703) 和中国科学院知识创新项目 (KJCX2-SW-L1) 资助.

2) 王超, 硕士研究生, 主要从事高桩码头健康监测与诊断方面的研究. E-mail: wangchao2011@163.com

3) 李世海, 研究员, 博士生导师, 主要从事大型工程结构监测与健康诊断, 三维离散元数值模拟技术及其在岩土工程中的应用.

E-mail: shli@imech.ac.cn

两根 $\Phi 1400$ mm 的预应力混凝土管桩, 中间为 4 根 $\Phi 1200$ mm(6# 泊位) 或 $\Phi 1400$ mm(7# 泊位) 预应力混凝土管桩. 接岸结构为大抛石棱体上的重力式挡土墙, 挡墙与码头之间设简支板连接. 7# 泊位码头的断面布置图和基桩平面布置图如图 1 所示.

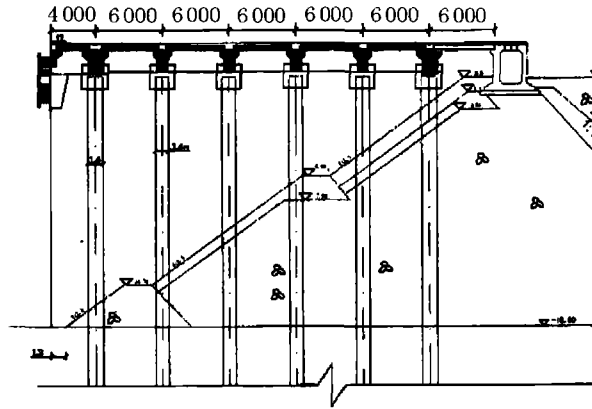


图 1 7# 泊位断面布置图

2 量纲分析

在模型实验中, 实验模型与原型之间应该满足相似条件, 包括几何相似和物理量相似, 几何相似, 要求模型的几何尺寸是实体尺寸的等比例放大或者缩小, 物理量相似, 则要求模型与实体的无量纲量相等.

本研究的对象是一组码头大管桩的不均匀沉降规律以及可能发生破坏情况, 该模型实验涉及的主要特征物理量如表 1 所示.

量纲分析中的基本量为 L, M, T. 对应 3 个基本物理量, 分别选取反映大管桩几何特征的桩高 H , 桩材料密度 ρ 和重力加速度 g . 选取因变量为结构的应变 ϵ , 即

$$\epsilon = f(d_0, d_i, H_b, B_b, L_b, \mu_d, g, I, E, H, \rho, v)$$

取基本物理量为 H, ρ, g , 则有

表 1 模型实验中的主要特征量

变量	桩截面 外径	桩截面 内径	梁截 面高	梁截 面宽	梁长	桩沉 降量	重力 加速度	转动 惯量	弹性 模量	桩高	密度	泊松比
符号	d_o	d_i	H_b	B_b	L_b	μ_d	g	I	E	H	ρ	ν
量纲	L	L	L	L	L	L	$L \cdot T^{-2}$	L^4	$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$	L	$M \cdot L^{-3}$	

$$\epsilon = f\left(\frac{d_0}{H}, \frac{d_i}{H}, \frac{H_b}{H}, \frac{B_b}{H}, \frac{L_b}{H}, \frac{\mu_d}{H}, \frac{I}{H^4}, \frac{E}{\rho g H}, \nu\right)$$

由于模型实验中, d_0, d_i, H_b, B_b, L_b 为常数, 所以考虑它们的影响, 则上式可表示为

$$\epsilon = f\left(\frac{\mu_d}{H}, \frac{I}{H^4}, \frac{E}{\rho g H}, \nu\right)$$

因此, 实验中, 实体和模型的几何尺寸按同一比例缩小, 同时实体和模型要满足上式的要求, 即保证得出的 4 个无量纲量相等或接近相等, 才能保证实验真实性和可靠性.

3 实验方案及数值模拟

选择 PVC 管和有机玻璃模拟实际结构的大管桩和承台. 结构原型与模型的参数如表 2 所示, 几何相似比约为 36, 模型示意图如图 2 所示.

考虑到与实际大管桩不均匀沉降情况相吻合, 不均匀沉降实验主要是对 1,2,3,4,5,6 号桩随机地选择沉降桩的组合, 进行应变值的测量.

实验模型的加载方案, 在模型承台上部, 施加一组顶面均布载荷. 均布载荷的施加主要是在承台顶

表 2 原型与模型参数对照表

特征量	实际模型	实验模型
大管桩外径 d_0 /m	1.4	0.04
大管桩内径 d_i /m	1.2	0.036
大管桩总高度 H /m	43	1.12
大管桩锚固深度 h /m	5	0.125
大管桩弹性模量 E /Pa	3.25×10^{10}	2.13×10^9
大管桩密度 ρ /($kg \cdot m^{-3}$)	2.5×10^3	1.3×10^3
大管桩最大沉降量 μ_d /m	0.2	0.005

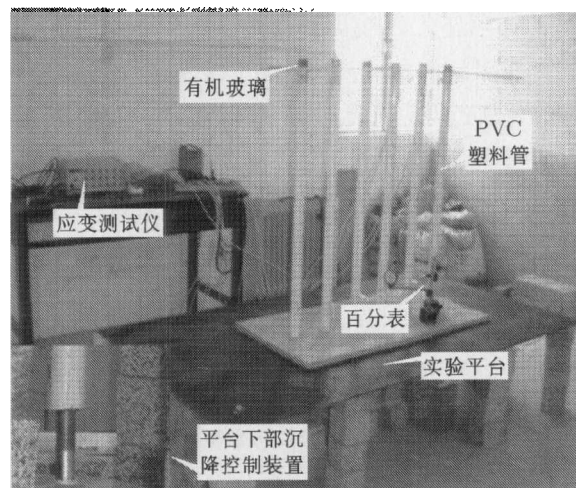


图 2 实验装置图

面放置均匀的石块. 通过换算, 面载荷的值为 820.67 N/m^2 .

对于沉降量的施加, 主要是借助螺栓进行控制, 由于螺距为 2.5 mm , 即理论上讲只要旋转一圈即可沉降 2.5 mm , 同时再利用百分表通过读首末读数的方法, 对沉降量进行同步精确控制, 控制实际的沉降量为 2.5 mm .

本文采用 Patran^[6] 有限元软件进行分析. 具体材料参数为: PVC 管的弹性模量 $E = 2.13 \times 10^9 \text{ Pa}$, 泊松比 $\nu = 0.3$; 有机玻璃的弹性模量 $E = 3.845 \times 10^9 \text{ Pa}$, 泊松比 $\nu = 0.3$.

4 实验及数值模拟结果分析

4.1 沉降量数值解库的建立

数值解库是按照每根桩沉降 1 mm 时, 在 6 个测点处分别产生的应变计算的. 其具体数值如表 3 所示^[2~5].

表 3 不均匀沉降数值解库的建立

被测点号	沉降桩号					
	1	2	3	4	5	6
	应变值 (微应变 10^{-6})					
1	152	280	95	56	30	30
2	280	522	250	100	8	30
3	95	250	520	230	100	56
4	56	100	230	520	250	95
5	30	8	100	250	522	280
6	30	30	56	95	280	152

表 3 中第 m 排, 第 n 列 ($1 \leq m \leq 6, 1 \leq n \leq 6$) 的值表示第 n 根桩沉降 1 mm 时在第 m 号测点处产生的微应变的大小, 计为 a_{mn} . 假设第 1~6 根桩发生的沉降分别为 $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$, 第 1~6 号测点产生的应变分别为 $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6$, 则有下列关系成立

$$x_1 a_{11} + x_2 a_{12} + x_3 a_{13} + x_4 a_{14} + x_5 a_{15} + x_6 a_{16} = y_1$$

$$x_1 a_{21} + x_2 a_{22} + x_3 a_{23} + x_4 a_{24} + x_5 a_{25} + x_6 a_{26} = y_2$$

$$x_1 a_{31} + x_2 a_{32} + x_3 a_{33} + x_4 a_{34} + x_5 a_{35} + x_6 a_{36} = y_3$$

$$x_1 a_{41} + x_2 a_{42} + x_3 a_{43} + x_4 a_{44} + x_5 a_{45} + x_6 a_{46} = y_4$$

$$x_1 a_{51} + x_2 a_{52} + x_3 a_{53} + x_4 a_{54} + x_5 a_{55} + x_6 a_{56} = y_5$$

$$x_1 a_{61} + x_2 a_{62} + x_3 a_{63} + x_4 a_{64} + x_5 a_{65} + x_6 a_{66} = y_6$$

设

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix}$$

$$X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6]^T$$

$$Y = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ y_4 \ y_5 \ y_6]^T$$

则有 $AX = Y$.

因为 $|A| \neq 0$, 所以 $AX = Y$ 有唯一解. 如果知道了测点的应变值, 即可知道沉降量. 同理, 如果知道了沉降量, 同样可以求出测点处产生的应变的理论解.

4.2 实验数据处理

本次实验测试的大管桩分别为 1,3 号桩和 2,4 号桩. 各桩的沉降量均为 2.5 mm . 因沉降所产生的桩身应变量的实验结果及数值模拟计算的理论值如表 4 及图 3, 图 4 所示.

表 4 不均匀沉降实验值及理论值

沉降桩号	被测点号					
	1	2	3	4	5	6
	应变值 (微应变 10^{-6})					
1,3 号桩实验值	589.9	1243.7	1598.1	681.6	348.3	201.7
1,3 号桩理论值	617.5	1325	1537.5	715	325	215
相差百分比 /%	4.7	6.5	-3.8	4.9	-6.7	6.6
2,4 号桩实验值	884.5	1509.4	1134.2	1507	681	303.4
2,4 号桩理论值	840	1555	1200	1550	645	312.5
相差百分比 /%	-5	3	5.8	2.9	-5.3	3.0

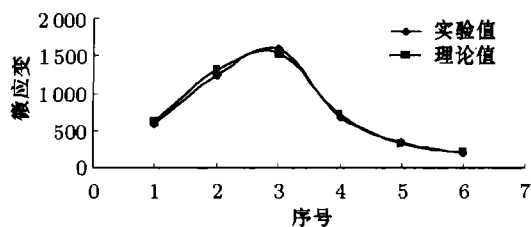


图 3 1,3 号桩实验值与理论值对比

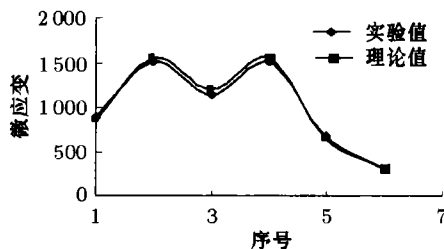


图 4 2,4 号桩实验值与理论值对比

(下转第 68 页)

了移动载荷作用下沥青路面稳态响应和瞬态响应数学模型, 所建数学模型更加贴合实际.

(2) 找到了沥青路面稳态响应与瞬态响应的关系, 推出了沥青路面稳态响应近似解析解.

(3) 通过实例, 给出了沥青路面瞬时载荷影响上限 H_0 的确定方法, 对移动载荷作用下沥青路面稳态响应进行了计算与分析. 计算表明, 对于文中给定的道路参数和车辆载荷, $H_0 = 8\text{ m}$, 当 $x > 8\text{ m}$ 时, 移动载荷作用下沥青路面的瞬态响应就是其稳态响应.

参 考 文 献

- 1 Timoshenko S. Method of analysis of static and dynamic stress in rail. *Proc of the Seco Inter Con for Appl Mech*, Zurich, Switzerland, 1926. 407~418
- 2 Kenney JT. Steady-state vibration of beam on elastic foundation for moving load. *J of Appl Mech*, 1954, 21(4): 359~364
- 3 Fryba L. Infinite beam on an elastic foundation subjected to a moving load. *Appliance Mathematics*, 1957, 2(2):

- 1105~1132
- 4 Steele CR. The finite beam with a moving load. *J of Appl Mech ASME*, 1967. 111~119
- 5 叶开沅, 马国林. 移动载荷作用下的连续梁的横向振动问题. *应用数学和力学*, 1985, 6(10): 873~877 (Ye Kaiyuan, Ma Guolin. The transverse vibration problem of the continuously beam under a moving load. *Applied Mathematics and Mechanics*, 1985, 6(10): 873~877 (in Chinese))
- 6 李云鹏, 王芝银. 黏弹性地基上梁的力学行为分析. *力学与实践*, 2002, 24(4): 33~36 (Li Yunpeng, Wang Zhiyin. Analysis of mechanical behavior of visco-elastic foundation beam. *Mechanics and Engineering*, 2002, 24(4): 33~36 (in Chinese))
- 7 邓学均, 孙璐. 车辆 - 地面结构. 北京: 人民交通出版社, 2000
- 8 Cebon D. Handbook of Vehicle-road Interaction: Vehicle Dynamics, Suspension Design, and Road Damage. Printed in the Netherlands by Krips, Meppel, 1999
- 9 刘小云, 田润利. 移动载荷下黏弹性道路瞬态响应解析解. *工程数学学报*, 2007, 24(6): 1049~1055 (Liu Xiaoyun, Tian Runli. Dynamic response solution in transient state of viscous-elastic road under moving load. *Chinese Journal of Engineering Mathematics*, 2007, 24(6): 1049~1055 (in Chinese))
- 10 黄仰贤(美)著, 余定选, 齐诚译. 路面分析与设计. 北京: 人民交通出版社, 1998

(责任编辑: 刘俊丽)

(上接第 63 页)

从表 4 的对比结果可知, 实验值与理论值相差最大不超过 7%, 属于工程允许的误差范围, 可以接受.

5 结 论

(1) 数值模拟解库的建立为大管桩不均匀沉降实际的监测提供了理论依据;

(2) 通过利用数值模拟工具, 可以有效地将测量数据转化为沉降的大小;

(3) 本模型实验及数值模拟研究为成功识别不均匀沉降对高桩码头造成的损伤提供了新的思路.

参 考 文 献

- 1 魏汝龙. 高桩码头与岸坡变形的相互关系. *港工技术*, 1993, (4): 40~50 (Wei Rulong. Relation between pile-supported pier and deformation of bank slope. *Port Engineering Technology*, 1993, (4): 40~50 (in Chinese))
- 2 廖雄华, 张克绪. 天津港高桩码头桩基 - 岸坡土体相互作用的

数值分析. *水利学报*, 2002, 33(4): 81~87 (Liao Xionghua, Zhang Kexu. Numerical analysis of pile-soil interaction in long-piled wharf of Tianjin Port. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 33(4): 81~87 (in Chinese))

- 3 王元战, 祝振宇, 张宝华等. 高桩码头岸坡稳定有限元分析. *海洋工程*, 2006, 24(4): 27~31 (Wang Yuanzhan, Zhu Zhenyu, Zhang Baohua, et al. Finite elements analysis on slope stability of piled wharf. *The Ocean Engineering*, 2006, 24(4): 27~31 (in Chinese))
- 4 祝振宇, 王元战, 李越松等. 高桩码头 - 岸坡相互作用有限元数值模拟. *中国港湾建设*, 2006, 142(2): 1~4 (Zhu Zhenyu, Wang Yuanzhan, Li Yuesong, et al. Finite element analysis of interaction between piled-wharf and slope. *China Harbour Engineering*, 2006, 142(2): 1~4 (in Chinese))
- 5 陈肇元, 徐有邻, 钱稼茹. 土建结构工程的安全性及耐久性. *建筑技术*, 2002, 33(4): 248~253 (Chen Zhaoyuan, Xu Youlin, Qian Jiaru. Safety and durability of structural works in civil engineering. *Architecture Technology*, 2002, 33(4): 248~253 (in Chinese))
- 6 刘兵山, 黄聪. *Patran 从入门到精通*. 北京: 中国水利水电出版社, 2003

(责任编辑: 何漫丽)