

# 海港码头大管桩力学特性的实验测试与反演研究

张俊红<sup>1</sup>,李世海<sup>2</sup>,许利凯<sup>2</sup>,胡涵<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学岩石力学与分形研究所,北京 100083;2. 中国科学院力学研究所,北京 100080)

**摘要:**利用光纤光栅传感技术,在现场对大管桩在外载作用下的变形情况进行了测试。根据测试结果,利用数值模拟方法对大管桩进行了反演,得出大管桩相关力学参数,为进一步分析大管桩在各种工况下的受力情况提供了基础数据。

**关键词:**大管桩;现场实验;数值模拟;反演分析

中图分类号:U656.109;U656.114

文献标识码:A

文章编号:1004-9592(2006)04-0021-03

## Test by Experiment and Reverse Investigation about Mechanics Characters of Big Pipe Pile at Seaport or Dock

ZHANG Jun-hong<sup>1</sup>, LI Shi-hai<sup>2</sup>, XU Li-kai<sup>2</sup>, HU Han<sup>1</sup>

(1. Institute of rock mechanics and fractals, China University of Mining and Technology, Beijing 100083; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** The deformation of the big pipe pile subjected to external forces is tested on the spot by applying fiber grating sensing technology. Based on test results, the relevant mechanical parameters of the big pipe pile are obtained by using back analysis, thus providing basic data for mechanical analysis of the big pipe pile under various engineering conditions.

**Key words:** big pipe pile; experiment in scene; numerical simulation; reverse investigation

### 1 前言

大管桩是“大直径预应力混凝土管桩”的简称。自上世纪80年代中期研制成功并建厂投入生产以来,在我国桥梁、沿海港口的深水泊位等方面得到广泛的应用。如果在混凝土中加入钢纤维,可以大大提高大管桩的耐锤击性,其耐锤击、抗冲击能力可与钢管桩相媲美,因此大管桩可以适用于复杂的地质条件。大管桩属于预应力组合式制品,即1根大管桩是由许多节预制短管通过钢丝绳串联而成的(图1)。尽管每节短管的力学参数能通过实验室测定,但当分析码头结构在海浪等外力作用下的整体稳定性时,需要知道整根大管桩的力学参数等。目前对整根大管桩的力学行为进行研究的资料未见报道。

本文利用先进的Bragg光栅传感技术,对大管桩在受到外力作用时的应变等力学行为进行了现场测试,获得了大管桩的变形等基础数据。然后利用有限元软件对大管桩的变形行为进行数值模拟,通过反演分析获得大管桩的整体力学参数,为大管桩海港码头的整体稳定性分析提供了基础数据。

### 2 大管桩现场整体实验测试

#### 2.1 Bragg光栅传感器的标定

Bragg光栅传感器不仅在通讯领域有着广阔的应用前景,而且还因其有反射波长会随着温度、应力的变化而发生变化的特点,所以,可用来制成测量传感器用于工程的健康监测<sup>[1]</sup>。

光纤光栅传感技术是利用紫外光在光纤内部写入的光栅反射或透射Bragg波长光谱,实现被测结构的应变和温度量值的变化测量<sup>[2,3]</sup>。应变引起光栅Bragg波长偏移可以由下式给予描述:

$$\lambda_B = \lambda_B (1 - P_e) \cdot \epsilon = K \cdot \epsilon \quad (1)$$

式中,  $P_e$  为光纤的弹光系数;  $K$  为测量应变的灵敏

收稿日期:2006-03-06

基金项目:国家“973”资助项目(2002CB412703);中国科学院知识创新项目(KJ CX2-SW-L1)

作者简介:张俊红(1980-),女,硕士,主要从事工程结构方面的研究。

度。

由(1)式可知,基于此原理的光纤光栅应变传感器是以光的波长为最小计量单位的,而目前对光纤光栅 Bragg 波长移动的探测达到了 pm 量级的高分辨率。因而其具有测量灵敏度高的特点,而且只需要探测到光纤中光栅波长分布图中波峰的准确位置,与光强无关,对光强的波动不敏感,比一般的光纤传感器具有更高的抗干扰能力。

由于我国还未生产标准化的、可应用的光纤传感器,而目前使用的光纤传感器基本都是研究人员自行开发制作的。同时,不同的光纤传感器,应变的灵敏度  $K$  不同。所以,笔者根据项目测试具体情况开发了适宜大管桩应变测试的光纤传感器。并按照

常规的标定办法对光纤传感器进行标定,波长改变量与微应变之间的关系为:

$$= 1.0093 \cdot \quad (2)$$

式中, 的单位为  $\mu$ , 的单位为 pm。波长改变量与微应变之间的相关系数为:  $R = 0.99603$ ,说明它们的相关性很好,可以作为实验测试换算关系式。

### 2.2 大管桩现场实验测试

#### 2.2.1 大管桩的几何尺寸

被测大管桩的总长度为 43.0 m,桩头 2.0 m,中间有 9 节长度为 4.0 m 的短管,末端有 1.0 m 的短管和 4.0 m 长的短管,它们通过钢丝绳串接在一起,接头处用环氧树脂材料填充,如图 1 所示。管桩的外径为 1.4 m、内径 1.1 m、壁厚 0.15 m。

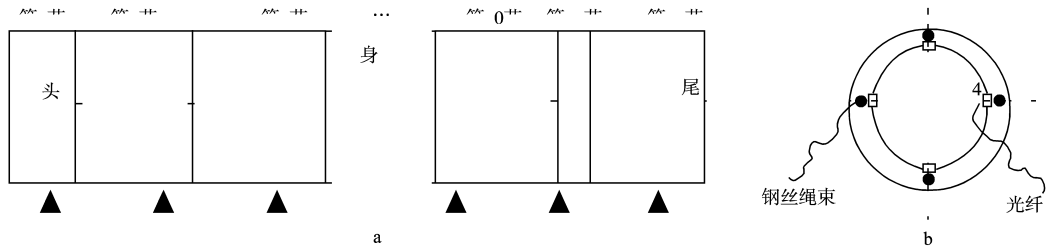


图 1 大管桩的结构组合及光纤传感器布置情况

#### 2.2.2 现场测试实验

首先用吊车把预制好的 43.0 m 长的大管桩平放到高 1.5 m、宽 24 cm、间隔 4.0 m 的水泥支撑墩上,桩头端离第 1 个支撑墩是 1.0 m,桩尾端离最后 1 个支撑墩是 2.0 m,如图 1(a) 所示。

大管桩的内壁上下、左右沿管的长度分别布置 4 条测线,如图 1(b) 所示,每条测线布置了数量不等的光纤传感器,4 条测线共布置 76 个光纤传感器,每个传感器进行了编号。

实验时在距桩尾端 1.0 m 的地方用液压千斤顶顶住大管桩的底部,如图 2 所示。顶起高度分别为:1.0 cm、1.8 cm、2.5 cm 3 种情况。这样可以获得 3 种情况下各传感器的读数,然后根据相应的公式进行变换,得出各个测点的应变值。

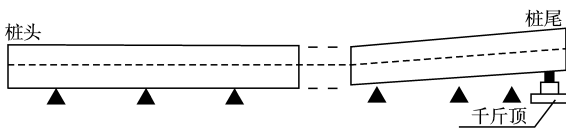


图 2 大管桩现场顶起实验图

#### 2.2.3 实验结果与分析

在假定管桩为梁结构的基础上,经理论推算,得出管内各点的应变与该点转角、挠度的换算关系为:

$$= \cdot l_0 / R \quad (3)$$

$$v = x \quad (4)$$

式中, 为转角 (rad);  $v$  为挠度 (m);  $\cdot$  为应变;  $R$  为分析点到中性点间的距离 (m);  $l_0$  为选取的研究的长度 (m)。

现把 1 号测线的测试结果代入(3)式和(4)式中,可以得到大管桩桩尾抬升 1.0 cm、1.8 cm、2.5 cm 情况下,1 号测线各传感器所对应的大管桩各测点的挠度值,3 种情况下换算的挠度曲线如图 3 所示。

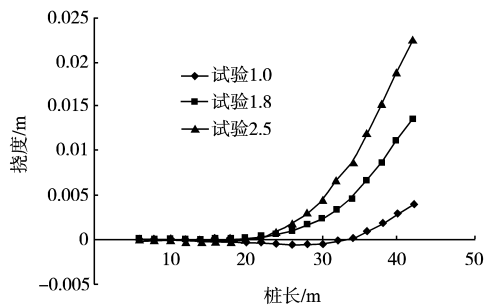


图 3 实验得到的挠度曲线

丁捍东,王林.大管桩使用情况调查.港工技术与管理,2001,(5)~(6):55-56.

刘鹏飞.大管桩在我国港口工程中的应用.港工技术与管理,2001,(5)~(6):66-68.

### 3 数值反演分析

采用 MSC. Software 公司的 MSC. Patran & MSC. Nastran 软件<sup>[4]</sup> 对大管桩力学参数进行数值反演分析。

大管桩的三维有限元模型如图 4 所示。模型的几何尺寸按实际管桩的情况考虑,支撑桩的水泥墩用弹簧代替,弹簧的底端固定,弹簧与桩接触处  $x$  方向的平动与转动、 $z$  向的平动均约束。坐标系如图 4 所示。作用在桩上的外荷载有:自身的重力、弹簧的支撑力以及千斤顶抬升的力。按实验情况,分别考虑桩尾端抬升 1.0 cm、1.8 cm、2.5 cm 与实际测试相同。

然后,通过数值模拟反演分析获得大管桩的相关力学参数。先把短管的力学参数值(如弹性模量  $E$ 、泊松比  $\mu$ ),代入计算模型中,得出大管桩各测点的挠度等结果,表 1 是在抬升 1.5 cm 的情况下实验得到的位移以及不同参数反演得到的位移;将模拟结果与现场实测结果进行比较,差距太大,则再调整反演参数值,直到两者结果基本吻合,如图 5 所示。这样就认为这时的反演参数值即为大管桩整体力学特性参数值。

表 1 实验以及不同参数反演得到的位移值 m

桩长	试验位移	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
6	0	-0.000 138	-0.000 137	-0.000 125	-0.000 128
8	-5.88E-05	-0.000 139	-0.000 137	-0.000 125	-0.000 128
10	-0.000 112	-0.000 136	-0.000 135	-0.000 123	-0.000 128
12	-0.000 112	-0.000 135	-0.000 134	-0.000 123	-0.000 128
14	-0.000 107	-0.000 136	-0.000 137	-0.000 127	-0.000 135
16	-6.34E-05	-0.000 143	-0.000 146	-0.000 139	-0.000 151
18	-1.58E-05	-0.000 163	-0.000 169	-0.000 166	-0.000 180
20	7.235E-05	-0.000 191	-0.000 199	-0.000 198	-0.000 214
22	0.000 159 2	-0.000 220	-0.000 226	-0.000 220	-0.000 231
24	0.000 355 6	-0.000 201	-0.000 196	-0.000 171	-0.000 167
26	0.000 644 9	-0.000 039	-0.000 007	0.000 061	0.000 093
28	0.001 185 7	0.000 358	0.000 428	0.000 559	0.000 628
30	0.001 883 6	0.001 094	0.001 199	0.001 389	0.001 492
32	0.003 014 8	0.002 227	0.002 359	0.002 588	0.002 713
34	0.004 453 5	0.003 783	0.003 923	0.004 166	0.004 298
36	0.006 380 9	0.005 748	0.005 877	0.006 101	0.006 222
38	0.008 514 3	0.008 074	0.008 173	0.008 347	0.008 439
40	0.010 879 5	0.010 674	0.010 728	0.010 826	0.010 874
42	0.013 244 8	0.013 425	0.013 425	0.013 432	0.013 430

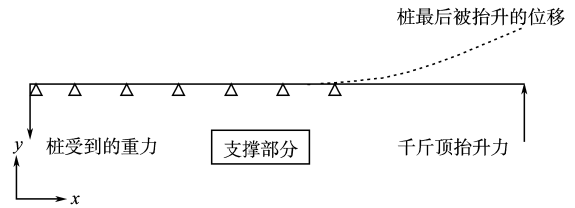


图 4 大管桩的计算力学模型图

图 5 是在抬升 1.8 cm 的情况下,大管桩模拟计算与实验测试的挠度曲线对比图。

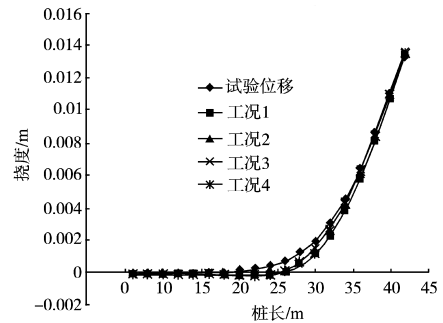


图 5 大管桩挠度曲线对比图

通过模拟反演分析,得出大管桩的整体力学参数为:弹性模量  $E = 5.0 \times 10^{10} \sim 6.5 \times 10^{10}$  Pa,泊松比  $\mu = 0.2 \sim 0.25$ 。根据设计标号查规范<sup>[5]</sup>,短管的力学参数为: $E = 4.0 \times 10^{10}$  Pa,泊松比  $\mu = 0.2$ 。

可以看出:通过数值模拟反演分析得到的大管桩力学参数弹性模量和泊松比与短管的力学参数存在一定的差异。

### 4 结论

通过现场测试和室内数值模拟反演分析,得到以下结论:先进的 Bragg 光栅传感技术可以有效地应用于实际工程的测试。采用实验与数值模拟相结合的方法可以很好地反演大管桩的力学参数,为大管桩在实际投入使用中的健康诊断提供了依据。

#### [参考文献]

- [1] 赵山泉. 光纤光栅传感技术在大结构监测中的应用进展[J]. 传感器技术, 2004, 23(6) :5-7.
- [2] 唐炜, 史仪凯. Bragg 光纤传感技术应用研究[J]. 光学精密工程, 2002, 10(1) :79-83.
- [3] M. Li, N. Zeng, CZ. Shi, et al. Fiber Bragg grating distributed strain sensing: an adaptive simulated annealing algorithm approach [J]. Optics & Laser technology, 2005, 37(7) :454-457.
- [4] 刘兵山, 黄聪. Patran 从入门到精通[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [5] GB 50010-2002, 混凝土结构设计规范[S].