

# 海港大管桩力学性能实验测试与反演研究<sup>1)</sup>

张俊红<sup>\*,†,2)</sup> 李世海<sup>\*\*</sup> 许利凯<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>(华北水利水电学院钢结构与工程研究所, 郑州 450011) <sup>\*\*</sup>(中国科学院力学研究所工程科学部, 北京 100080)

<sup>†</sup>(中国矿业大学岩石力学与分形研究所, 北京 100083)

**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. 根据实验测试结果, 利用数值法反分析大管桩力学性能参数, 同时得到大管桩接缝处的环氧树脂材料对大管桩整体力学性能影响很小. 反演出的合理的力学性能参数为大管桩的正确受力分析以及健康诊断提供了依据.

**关键词** 大管桩, 现场实验, 反分析

## EXPERIMENT AND INVERSE ANALYSIS FOR MECHANICAL PROPERTIES OF LARGE DIAMETER PRESTRESSED CONCRETE TUBULAR PILE AT SEAPORT<sup>1)</sup>

ZHANG Junhong<sup>\*,†,2)</sup> LI Shihai<sup>\*\*</sup> XU Likai<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>(Research Institute of Steel Structures and Engineering, North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

<sup>\*\*</sup>(DES, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

<sup>†</sup>(Institute of Rock Mechanics and Fractals, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract** The deformation of the large diameter prestressed concrete tubular pile subjected to external forces is tested on the spot by applying fiber grating sensing technology. Based on test results, the related mechanical parameters of the large diameter prestressed concrete tubular pile were obtained by an inverse analysis. At the same time, the epoxide resin at the joint gap has little effect on the mechanical properties of the large diameter prestressed concrete tubular pile. The reasonable mechanical parameters obtained by the inverse analysis provide useful data for stress analysis and health monitoring of the large diameter prestressed concrete tubular pile under various engineering conditions.

**Key words** large diameter prestressed concrete tubular pile, field experiment, inverse analysis

自 20 世纪 80 年代中期大管桩 (大直径预应力混凝土管桩) 研制成功并建厂投入生产以来, 在中国桥梁、沿海港口的深水泊位等方面得到广泛的应用<sup>[1,2]</sup>. 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<sup>[2]</sup>. 大管桩属于预应力组合式制品, 即一根大管桩是有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.

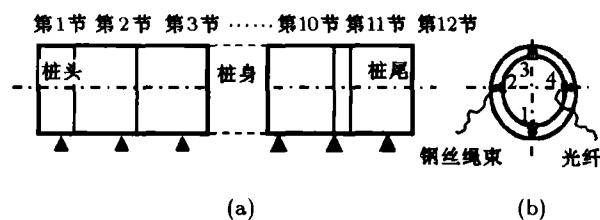


图 1 大管桩的结构组合及光纤传感器布置情况  
(1,2,3,4 为光纤传感器测线)

2006-03-01 收到第 1 稿, 2006-07-25 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-LI) 资助.

2) E-mail: zhangjunhong2002@sohu.com

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. 利用有限元软件对大管桩的力学性能参数进行数值法反分析, 反演出的合理的力学性能参数为以后在现场实验中对桩的正确受力分析以及健康诊断提供了依据.

## 1 大管桩现场整体实验测试

### 1.1 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、应力的变化而发生改变的特点, 所以, 可用来制成测量传感器用于工程的健康监测<sup>[3]</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>[4,5]</sup>. 应变引起光栅 Bragg 波长偏移可以由下式给予描述

$$\Delta\lambda_{B\epsilon} = \lambda_B(1 - P_e) \cdot \epsilon = K_e \cdot \epsilon \quad (1)$$

式中,  $P_e$  为光纤的弹光系数,  $K_e$  为测量应变的灵敏度.

由式 (1) 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.

不同的光纤传感器, 应变的灵敏度  $K_e$  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

$$\epsilon = k \cdot \Delta\lambda \quad (2)$$

式中,  $k$  为比例常数,  $k = 1.0093\mu\epsilon/\text{pm}$ ;  $\epsilon$  为应变, 其单位为  $\mu\epsilon$ ;  $\Delta\lambda$  为波长改变量, 其单位为 pm. 波长改变量与微应变之间关系式的相关系数为:  $R = 0.99603$ , 说明它们的相关性很好, 可以作为实验测试换算关系式.

### 1.2 大管桩现场实验测试

#### 1.2.1 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 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, 测试系统主要由加载装置和测试系统两部分组成 (图 2, 图 3). 测试加载由千斤顶完成; 测试系统由应变监测系统 (FBG, Si425 swept laser interrogator) 和位移测试图. 位移采用最小刻度是 mm 的钢尺.



图 2 大管桩实验中用千斤顶抬升桩

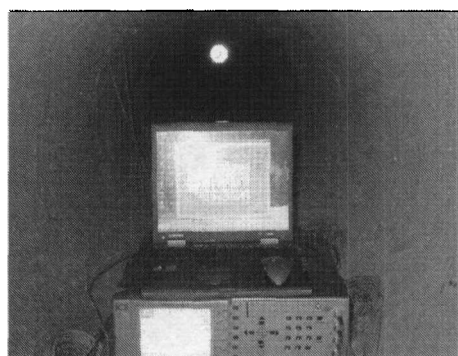


图 3 实验中应变监测系统

#### 1.2.2 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 0.5 m, 宽 24 cm, 间隔 4.0 m 的水泥支撑墩上, 桩头端离第一个支撑墩是 1.0 m, 桩尾端离最后一个支撑墩是 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. 考虑到温度的变化对测量结果的影响, 在 1 号测线的中间和尾端布置了两个温度补偿传感器.

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 4 所示, 顶起高度分别为: 1.0 cm, 1.8 cm, 2.5 cm 等 3 种情况. 这样可以获得 3 种工况下各传感器的读数, 然后根据式 (2) 进行变换, 得出各个测点的应变.

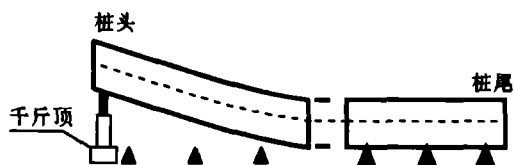


图4 大管桩现场顶起实验图

### 1.2.3 实验结果与分析

根据理论分析,假定管桩为梁结构,经推算得出管内各点的应变与该点转角、挠度的换算关系为

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

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

式中,  $\theta$  是转角, 单位: rad;  $\varepsilon$  是应变;  $l_0$  是选取的研究长度, 单位: m;  $v$  是挠度, 单位: m;  $R$  是分析点到中性点间的距离, 单位: m. 对于本次试验,  $R$  取大管桩内径 0.55 m,  $l_0$  按每节短管的长度取为 4.0 m.

现把 1 号测线的测试结果代入式 (3) 和式 (4) 中, 可以得到大管桩桩尾抬升 1.0 cm, 1.8 cm, 2.5 cm 工况下挠度的变化情况, 其中 1 号测线各传感器所对应的大管桩各测点的挠度值变化曲线如图 5 所示.

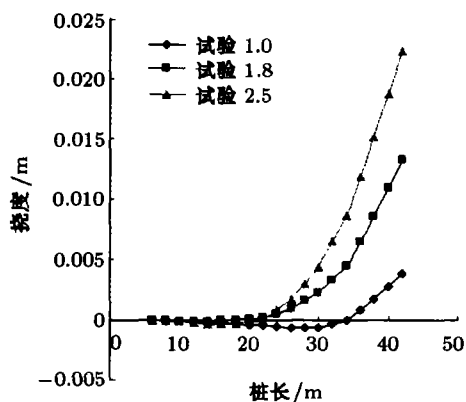


图5 实验得到的挠度曲线

## 2 数值反演分析

采用 MSC. Software 公司的 MSC. Patran 和 MSC. Nastran 软件 [6] 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 6 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、 $z$  方向的平动均约束. 坐标系如图 6 所示. 作用在桩上外荷载有自身的重力、弹簧的支撑力以及千斤顶抬升的力.

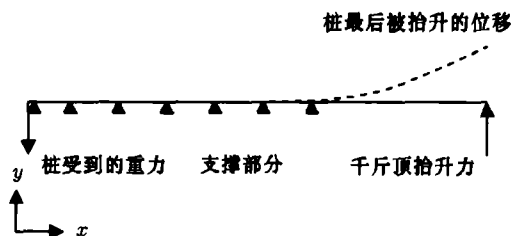


图6 大管桩的计算力学模型图

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 (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, 将模拟结果与现场实测结果进行比较, 通过反复调整力学参数值, 直到两者结果基本吻合 (图 7), 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.

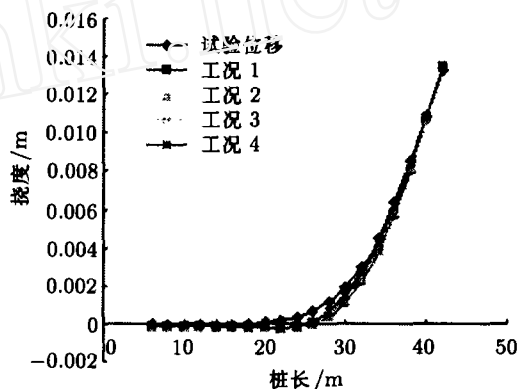


图7 反演的不同工况下的挠度值与实验挠度值的比较

在模型材料的分析中按照一种材料来考虑. 实际工况中短管之间连接用的是环氧树脂, 而环氧树脂的弹性模量小于钢筋混凝土的弹性模量, 不确定接缝处材料的不同是否对分析结果有影响. 于是考虑两种材料并假定接缝处材料的弹性模量是短管弹性模量的 0.5 倍, 通过分析, 得到考虑两种材料和不考虑接缝处材料的比较 (图 8). 通过上面的分析可以看到, 接缝处的弹性模量的减小对整个桩的挠度曲线

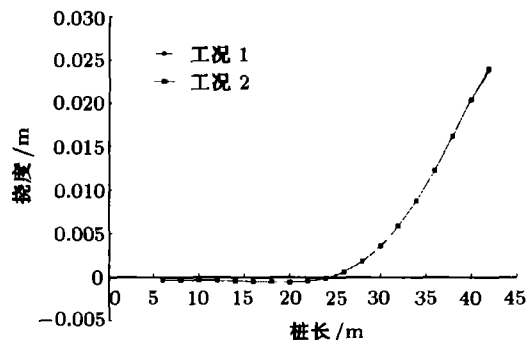


图8 考虑接缝处的材料和不考虑接缝处材料时挠度的比较

影响很小,在反演大管桩力学性能参数时可以忽略缝处的影响。

通过数值法反演,得出大管桩的整体力学特性参数为:弹性模量  $E = 50 \sim 60 \text{ GPa}$ ,泊松比  $\mu = 0.2 \sim 0.25$ 。将反演结果与短管的力学参数进行比较(表 1)。从表 1 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。

表 1 短管与大管桩的力学特性参数表

项目	力学参数	
	弹性模量 /GPa	泊松比
短管 *	40	0.2
大管桩	50~65	0.2~0.25

\* 根据设计标号查《混凝土结构设计规范》(GB50010-2002) [7]

### 3 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量。接缝处的环氧树脂对整个桩的挠度曲线的影响很小,在反演大管桩力学性能参数时可以忽略。采用实验与数值模拟相结合的方法得出大管桩的整体力学性能参数为:弹性模量  $E = 50 \sim 60 \text{ GPa}$ ,泊松比  $\mu = 0.2 \sim 0.25$ 。反演出的

合理的力学性能参数为以后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 丁捍东, 王林. 大管桩使用情况调查. 港工技术与管理, 2001, 5~6: 55~65 (Ding Handong, Wang Lin. Investigation on the application of big pipe pile. *Harbor Technology & Engineering*, 2001, 5~6: 55~66(in Chinese))
- 2 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 (Liu Pengfei. Big pipe pile was applied at seaport engineering in Chinese. *Harbor Technology & Engineering*, 2001, 5~6: 66~88(in Chinese))
- 3 赵山泉. 光纤光栅传感技术在大结构监测中的应用进展. 传感器技术, 2004, 23(6): 5~7 (Zhao Shanquan. New progress of fiber grating sensing technology in large scale structure monitoring. *Journal of Transducer Technology*, 2004, 23(6): 5~7(in Chinese))
- 4 唐炜, 史仪凯. Bragg 光纤传感技术应用研究. 光学精密工程, 2002, 10(1): 79~83 (Tang Wei, Shi Yikai. Optical fiber bragg grating sensing technology. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(1): 79~83(in Chinese))
- 5 Li M, Zeng N, Shi CZ, et al. Fiber Bragg grating distributed strain sensing: an adaptive simulated annealing algorithm approach. *Optics & Laser Technology*, 2005, 37(7): 454~457
- 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
- 7 中华人民共和国建设部. 混凝土结构设计规范 (GB 50010-2002), 北京: 中国建筑工业出版社, 2002

(上接第 37 页)

(1) 对于海水深度、覆岩厚度和隧道断面形状一定时,海底隧道涌水量与围岩渗透系数成线性关系。

(2) 海底隧道涌水量与覆岩厚度关系呈近似抛物线形,涌水量随覆岩厚度增大而逐渐减小,达到某个最小值时,又逐渐增大。

(3) 根据日本最小涌水量法,分别用马卡斯特公式和数值方法计算隧道涌水量,并差值得到海水深度对应的最小覆岩厚度,得出最小覆岩厚度与海水深度成近似线性关系。

### 参 考 文 献

- 1 Odgard Anders, Bridges David G, Rostam Steen. Design of the storebelt railway tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1994, 19(3): 293~307
- 2 Eisenstein ZD. Large undersea tunnels and the progress of tunneling technology. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1994, 9(3): 283~292

- 3 Kitamura Akira. Technical development for the seikan tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1986, 1(3/4): 341~349
- 4 杨家岭, 邱祥波, 陈卫忠等. 海峡海底隧道及其最小覆岩厚度问题. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增 1): 2132~2137 (Yang Jialing, Qiu Xiangbo, Chen Weizhong, et al. Subsea tunnel through channel and its minimum rock cover. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(z1): 2132~2137(in Chinese))
- 5 邓英尔, 谢和平等. 低渗透微尺度孔隙气体渗流规律. 力学与实践, 2005, 27(2): 33~35 (Deng Ying'er, Xie Heping, et al. Gas flows in micro-scale pore of low permeability porous media. *Mechanics in Engineering*, 2005, 27(2): 33~35(in Chinese))
- 6 王建秀, 朱合华, 叶为. 隧道涌水量的预测及工程应用. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1150~1153 (Wang Jianxiu, Zhu Hehua, Ye Weimin. Forward and inverse analyses of water flow into tunnels. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23(7): 1150~1153 (in Chinese))
- 7 董国贤. 水下公路隧道. 北京: 人民交通出版社, 1984, 65~68