

# 光纤光栅传感技术在 PHC 管桩水平载荷试验中的应用

秋仁东<sup>1</sup>, 高文生<sup>1</sup>, 孙军杰<sup>2</sup>, 邱明兵<sup>1</sup>, 万征<sup>1</sup>, 郭金雪<sup>1</sup>, 侯岳峰<sup>3</sup>, 殷瑞<sup>1</sup>

(1. 中国建筑科学研究院地基基础研究所, 北京 100013; 2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃兰州 730000;  
3. 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要:** 光纤 Bragg 光栅(FBG)传感技术在工程测试方面优势显著, 如何合理应用该项技术实施 PHC 管桩的荷载试验, 难度较大, 相关研究工作与实践经验较少。基于 FBG 工作原理与硬件特性的分析, 结合 PHC 管桩成型与现场施工的工艺特点, 利用 PHC 管桩水平承载力荷载试验的实践验证, 研究 FBG 传感器合理应用于 PHC 管桩的埋设方案与施工技术。结果表明: 按笔者提出的预设方案与施工技术, 在 PHC 管桩采用锤击和静压 2 种成桩工艺时, FBG 传感器的成活率可达 100%; FBG 传感器获得的 PHC 管桩应变与应力监测数据, 比传统电阻应变式传感器更具优越性; 实测数据与理论计算的对比分析证实, 《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)中有关水平承载力的计算方法能够较好地反映桩身受力的实际情况。

**关键词:** 桩基础; 光纤 Bragg 光栅(FBG)传感器; PHC 管桩; 荷载试验; 埋设工艺; 桩身内力

**中图分类号:** TU 47

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2013)12 - 2583 - 07

## APPLICATION OF FIBER BRAGG GRATING SENSOR TO LATERAL LOAD TESTS OF PHC PIPE PILES

QIU Rendong<sup>1</sup>, GAO Wensheng<sup>1</sup>, SUN Junjie<sup>2</sup>, QIU Mingbing<sup>1</sup>, WAN Zheng<sup>1</sup>,  
GUO Jinxue<sup>1</sup>, HOU Yuefeng<sup>3</sup>, YIN Rui<sup>1</sup>

(1. *Institute of Foundation Engineering, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China*; 2. *Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou, Gansu 730000, China*; 3. *Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

**Abstract:** Fiber Bragg grating(FBG) sensor has been widely applied to different engineering tests due to its superiority of basic principle and usability. However, it is difficult to adopt FBG sensor on the load tests of PHC pipe pile because the relative research results and practical knowledge in the case of PHC pipe pile are still lack. Based on the analysis of operational principle and hardware features of FBG sensor, embedding methods of FBG sensors for PHC pipe pile through one field test of lateral loading on this kind of pile are carefully investigated. During the embedding process, the special requirements within product and piling of PHC pipe pile are adequately considered. The practical results show that the survival ratio of FBG sensors could reach 100% according to the embedding scheme and technique proposed by the author, while the PHC pipe pile is operated by the both ways of hammering and static pressure. Meanwhile, the test data of lateral load of PHC pipe pile by means of FBG sensors reveal their qualities of precision, zero drift and stability are better than those obtained by

**收稿日期:** 2013 - 01 - 08; **修回日期:** 2013 - 03 - 30

**基金项目:** “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAJ07B01); 中国建筑科学研究院青年基金项目资助

**作者简介:** 秋仁东(1981 -), 男, 2011 年于中国建筑科学研究院岩土工程专业获博士学位, 现任工程师, 主要从事地基基础工程方面的设计咨询、研究和开发方面的研究工作。E-mail: qiurend@163.com

traditional electric resistance wire strain gauges. The further comparative analysis of different internal force distributions in the body of PHC pipe pile, which are respectively received by the field test and theoretical computation method proposed by *Technical code for building pile foundation*(JGJ 94—2008), discloses that the computation method in the code could reflect the practical situation of internal force behaviours of pile under lateral loading. The practical results and comprehensive analysis reported by authors indicate that FBG sensor is a better suitable kind of technique to monitor internal strain behaviors of precast concrete piles under lateral loads.

**Key words:** pile foundations; FBG sensor; PHC pipe pile; load test; embedding method; internal force of pile body

### 1 引言

PHC管桩系在工厂预制,桩身质量能够得以确保;在现场,通过锤击、静压等工艺成桩,施工方便。因此,PHC管桩在工程中被广泛应用。水平荷载作用下桩身应力-应变的测试是桩基工程中的一项重要内容,它不仅能够为桩基水平承载性状的科学判断提供关键数据和可靠依据,也可为桩基工程理论与实践的相关研究提供宝贵的第一手资料。

PHC管桩在制作时,需要经过预应力张拉、离心成型和高温蒸汽养护。在对PHC管桩实施相应监测时,管桩的制作流程使传感器抗高温高压性能面临更高要求;同时,现场施工中,PHC管桩在受打、压入时轴向变形较大,对传感器的变形耐受能力要求很高。由于目标传感器需要符合上述额外特殊要求,传统的电阻应变式传感器应用于混凝土管桩的现场测试时,存活率普遍偏低。即使存活,所用传感器在精度、漂移、稳定性等方面通常难以满足测试需求。加之传统电阻应变式传感器在施工上较为复杂,因此,亟须寻找一种适应PHC管桩特殊要求的传感装置来进行相关现场测试。

近年来,光纤传感技术的兴起给工程监测领域提供了一类新的技术和手段,其中以光纤布拉格光栅(FBG)传感技术尤为突出。自1989年Morey首次报道将光纤光栅用作传感器以来<sup>[1]</sup>,该类传感器即以精度高、准分布、抗干扰及耐腐蚀等突出特点迅速被广泛地应用到航空航天器、土木工程、复合材料、石油电力等诸多工程领域的监测和测试中<sup>[2-3]</sup>,并已在混凝土灌注桩中进行过一些尝试性的应用<sup>[4]</sup>。

目前,国内工程界已有将光纤光栅传感系统应用于混凝土管桩测试的工程实例,但是效果不尽如人意<sup>[5]</sup>。其应用难点正如前文所述,需要在埋设过程中,有针对性地为克服可能遇到的特殊耐受环境

提出有效的解决方案。相关应用性难题,只能在实例中进行思考解决。笔者基于这些考虑,通过光纤光栅传感器在PHC管桩水平承载力试验中的埋设测试,深入研究了光纤光栅传感器在PHC管桩中的埋设技术及适用性测试方法,综合评价了该类传感器应用于混凝土管桩水平承载力测试的可行性。研究结果能够为光纤光栅传感器在PHC管桩测试方面的埋设技术,提供值得借鉴的必要实践数据与可操作性施工方案。

### 2 FBG传感器测试原理

FBG应变监测系统如图1所示。FBG是一种在由光纤刻制而成的波长选择反射器,其背向反射光中心波长 $\lambda_B$ 与纤芯的有效折射率 $n_{eff}$ 和刻制的栅距(周长) $\Lambda$ 有关,即

$$\Delta\lambda_B = 2n_{eff}\Delta\Lambda \tag{1}$$

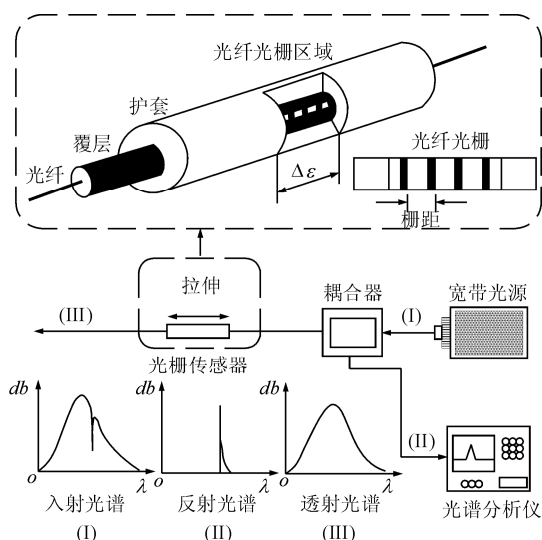


图1 FBG应变监测系统

Fig.1 FBG strain measurement system

应变和温度是2个能直接引起 $\lambda_B$ 产生漂移的物理量。在拉、压应变作用下引起的中心波长漂移 $\Delta\lambda_{Bs}$ 可表示为

$$\Delta\lambda_{Bs} = \lambda_B(1 - P_e)\Delta\varepsilon \quad (2)$$

式中： $\Delta\varepsilon$  为轴向应变增量， $P_e$  为有效光弹系数。由于光纤材料的热膨胀和热光效应所引起的中心波长漂移  $\Delta\lambda_{BT}$  可表示为

$$\Delta\lambda_{BT} = \lambda_B(\alpha + \xi)\Delta T \quad (3)$$

式中： $\alpha$  为热膨胀系数， $\xi$  为热光系数。FBG 的中心波长漂移  $\Delta\lambda_B$  可由式(2)，(3)叠加表示为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\Delta\varepsilon + \lambda_B(\alpha + \xi)\Delta T \quad (4)$$

令  $K_e = 1 - P_e$ ， $K_T = \alpha + \xi$ ，则

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B K_e \Delta\varepsilon + \lambda_B K_T \Delta T \quad (5)$$

式中： $K_e$  为应变传感灵敏度系数， $K_T$  为光纤光栅温度传感灵敏度系数<sup>[6-7]</sup>。

FBG 采用波长编码，这不仅使系统免受噪声和功率波动的干扰，也容易实现在同一根光纤的任意位置上写入不同中心波长的 FBG 进行波分复用，并可根据实际需求利用分光器件、光开关、光回路器等光学元件集成多个支路上的 FBG 一起并用的空分复用及不同位置上相同中心波长的 FBG 串用的时分复用网络，也可将几种复用技术一起混用集成大型传感网络系统<sup>[8-10]</sup>。

### 3 PHC 管桩载荷试验与传感器埋设

试验场地位于东营市河口区的东营港附近，距东营市区约 70 km，场地地势平坦，原位试验现场面积约 1 000 m<sup>2</sup>，地层剖面图和标准贯入试验击数见图 2，土层物理力学参数见表 1，钻孔取样、标贯试验结果表明，水平向分布尚属均匀，垂直向成层明显，水平地面下 1 m 左右见有地下水。

#### 3.1 PHC 管桩成桩工艺

由于现场施工过程中 PHC 管桩锤击施打、静力压入时轴向变形性状不同，其轴向变形的特征直接影响到光纤光栅传感器的成活率。为了能够较全面地研究分析光纤光栅测定 PHC 管桩桩身应变的适宜性，本次试验采用了锤击打入和静力压入 2 种成桩工艺(见图 3)。

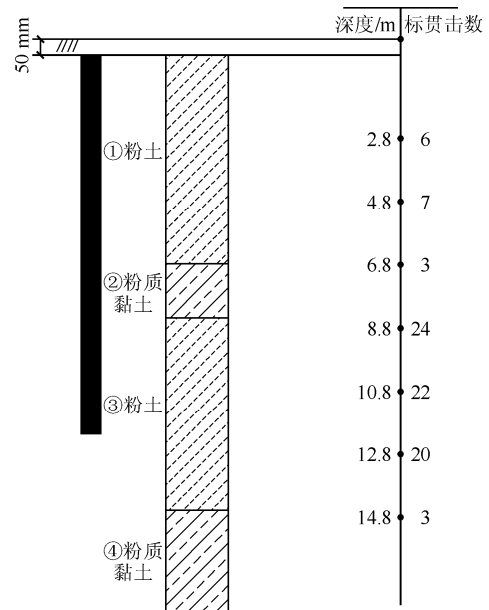


图 2 地层剖面图和相应的土性指标及标准贯入试验锤击数  
Fig.2 Profile of strata and corresponding soil indices and blow counts of standard penetration test

#### 3.2 PHC 管桩载荷试验传感器埋设方法

由于 PHC 管桩事先需在高温高压的生产工艺中成型，若在该阶段安装传感器很难实现成活，本次试验采用现场进行 FBG 光纤光栅传感器安装的方式。FBG 是由光纤去除护套和涂敷层的裸纤刻制而成，极易折断和拉断，若直接将其应用到施工粗放、作业环境复杂的桩基工程中很难成活，因此 FBG 要经过特殊封装后才能满足实际需要。安装流程如图 4 所示。

试验中，采用管片封装式的 FBG 传感器在 PHC 管桩外侧壁安装，该方法是将裸 FBG 附着到特制的管、片或丝等传感媒介器件上(内)，再密闭封装成独立传感器件，是现在最为常用和成熟的 FBG 传感器封装方法<sup>[11]</sup>。

管片封装式的 FBG 传感器安装前需要在管桩外侧壁通长桩身范围用切割机切割开凿深 2 cm、宽 2 cm 的凹槽，为了能够使得该通长凹槽笔直，开凿前需在管桩桩身上放线定位，定位后切割机沿着

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of soil layers

土层编号	介质	w/%	$\gamma'$ (kN·m <sup>-3</sup> )	e	w <sub>L</sub>	w <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>	$\alpha_{1-2}$	E <sub>s</sub> /MPa	备注
①	粉土	24.3	18.8	0.749	28.0	19.9	8.1	0.14	13.49	黄褐色，土质较均匀，含 Fe 质条斑，湿，中密，干强度低，韧性低
②	粉质黏土	32.2	17.8	0.986	33.2	20.4	12.8	0.48	4.17	灰褐色，土质较均匀，含 Fe 质条斑，软塑，干强度中等，韧性中等
③	粉土	24.8	19.3	0.707	28.0	19.6	8.4	0.12	14.77	灰褐色，土质均匀，含 Fe 质条斑，湿，密度，干强度低，韧性低
④	粉质黏土	25.4	19.4	0.722	30.9	17.7	13.2	0.42	4.26	灰褐色，土质较均匀，含 Fe 质条斑，可塑，干强度中等，韧性中等



图 3 试验场地成桩施工照片

Fig.3 Photo for piles construction in test site

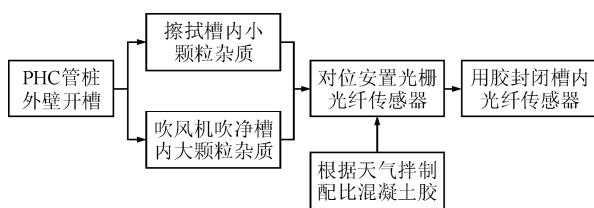


图 4 FBG 传感器安装流程图

Fig.4 Flow chart for installation of FBG sensor

直线进行切割开槽。由于切割开槽过程中会产生大量的尘渣，操作人员需要配戴防尘眼镜及口罩进行操作。桩身凹槽中的尘渣需用吹风机吹净，然后用纱布或棉球沾丙酮或酒精将打磨处擦拭干净，避免粉尘、油污对表面的污染；最后黏贴传感器，安置时保证传感器平整紧密黏贴在桩身混凝土表面，最后用现场拌制的混凝土植筋胶进行固定封闭，如图 5 所示。



(c)



(d)



(e)

图 5 桩身传感器安装固定图

Fig.5 Installation photos of FBG sensors

试验桩采用常规的柴油锤和静压沉桩 2 种工艺，在沉桩完成后测读传感器，发现所有测点全部存活，且读数稳定，零漂极小。

### 3.3 PHC 管桩载荷试验传感器布置方式

本次试验对高强预应力混凝土管桩的 2 种桩径 ( $d = 400, 600 \text{ mm}$ )，3 种型号(A, AB, B)的试验桩进行水平加载试验。为比较沉桩工艺对水平承载力的影响，对桩径 400 mm 桩采用静压和锤击成桩 2 种成桩工艺。

6 根桩采用预埋光纤光栅传感器进行了桩身内力测试。传统的观点认为锤击条件下传感器的成活率较静压工艺低，考虑到节省成本，所以本次试验中静压成桩工艺的管桩桩身上安置较多的传感器，锤击成桩工艺的管桩桩身上安置较少的传感器，传感器布置在水平加载桩身混凝土受压侧。传感器安置详图如图 6 所示。



(a)



(b)

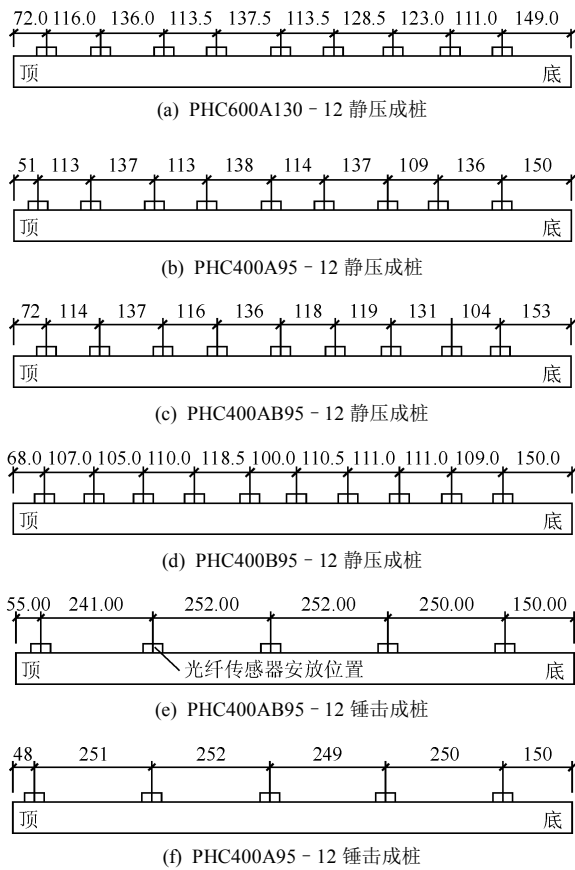


图 6 桩身传感器布置图(单位: mm)

Fig.6 Layouts of sensors on pile body(unit: mm)

### 3.4 PHC 管桩荷载试验加卸载方案

试验设备主要包括加载装置、位移和内力测试装置。其中加载装置主要采用 100 t 的手动千斤顶、传力杆、球型铰座等；测量装置主要包括 4 只 50 mm 量程电子百分表、60 t 压力传感器以及光纤光栅传感器及采集仪。采用双桩对顶加载法，主要试验原理如图 7 所示。

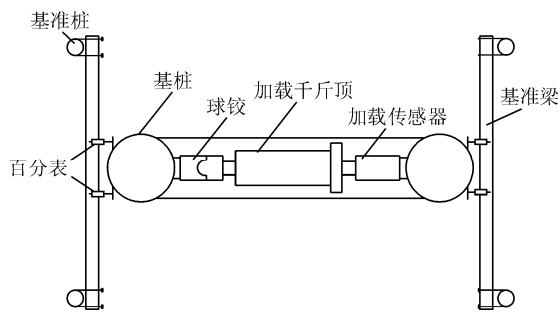


图 7 PHC 管桩和装置加载示意图

Fig.7 Sketch of PHC pipe piles and the loading devices

所有试验均为桩顶自由状态下的单向多循环(5次)加卸载试验以模拟建筑桩基受地震、风载作用，测定各级荷载下的水平位移。试验加卸载方式和水平位移测量应符合下列规定：

(1) 单向多循环加载法的分级荷载应小于预估水平极限承载力或最大试验荷载的 1/10。每级荷载施加后，恒载 4 min 后测读水平位移，然后卸载至 0，停 2 min 测读残余水平位移，至此完成一个加卸载循环。如此循环 5 次，完成一级荷载的位移观测。试验不得中间停顿。

(2) 测量桩身应力时，测试数据的测读与水平位移测量同步。

沉桩后休止期超过 25 d 再进行试验，本次试验为 30 d。

## 4 数据处理与结果对比分析

休止期后，试验开始前测试初读数，47 个测点全部存活，存活率 100%。由于本文重点是为了探究光纤 Bragg 光栅传感技术在 PHC 管桩桩身内力测试适宜性的相关问题，为节省篇幅，同时能够说明问题，本文中只给出了 PHC400A95 - 12(锤击成桩)、PHC400B95 - 12(静压成桩)两根试验桩应变的相关测试结果，具体的测试应变结果如表 2 所示。本次试验结束后，将试验管桩开挖检查桩身裂缝及破坏特征，结果表明，水平加载条件下，PHC 管桩的桩身破坏为受弯破坏。因此文中仅计算弯矩，未计算剪力。

将表 2 相关应变数据换算成弯矩结果见图 8，弯矩图中带 • 的粗线为临界值条件下的弯矩值。S1 桩桩身实测点为 5 个，弯矩计算中多出的测点为上下相邻测点差值所得的结果。为了书写简单，将 PHC400A95 - 12，PHC400B95 - 12 桩分别记为 S1，S2 桩。

从图 8 中可以明显地看出，各级荷载下桩身内力分布规律，特别是桩身开裂后，桩身的弯矩实测值明显大于临界荷载条件下的测量值，即桩身弯矩的测试规律能够较好地反映桩身的开裂情况。从图中可以明显地看出各级荷载下桩身内力分布规律。

为便于分析 PHC 管桩在水平荷载下的桩身内力(弯矩、剪力)分布特性，采用《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)附录 C 中关于承台 - 桩 - 土层共同工作原理计算桩身内力值。图 9 为笔者研究团队自主开发的考虑基桩 - 承台 - 土的弹性抗力作用受水平荷载的桩身内力计算软件界面，软件共包括四大块计算模型：(1) 按圆弧滑动面计算带承台群桩的计算模型；(2) 按折线滑坡面整体稳定计算带承台群桩的计算模型；(3) 考虑基桩 - 承台 - 土弹性抗力作用计算模型；(4) 高桩承台群桩计算模型。

表 2 不同加载条件下桩身不同深度的应变  
Table 2 Strain of different depths of pile body under different loads

距桩顶/m	S1 桩(锤击)应变/ $10^{-6}$								
	8 kN	16 kN	24 kN	32 kN	40 kN	48 kN	56 kN	64 kN	72 kN
0.48	-11.11	-16.16	-23.23	-33.33	-38.38	-45.45	-52.52	-57.57	-65.65
2.99	-17.85	-51.45	-94.50	-148.05	-215.25	-344.40	-550.20	-667.80	-745.50
5.51	0.00	-5.15	-8.24	-15.45	-21.63	-27.81	-36.05	-44.29	-54.59
8.00	-3.03	-3.03	-1.01	3.03	7.07	9.09	13.13	17.17	18.18
10.50	-1.05	-1.05	-1.05	0.00	-4.20	-3.15	-2.10	0.00	-1.05

距桩顶/m	S2 桩(静压)应变/ $10^{-6}$										
	8 kN	16 kN	24k N	32 kN	40 kN	48 kN	56 kN	64 kN	72 kN	80 kN	88 kN
0.68	-19	-30	-32	-40	-37	-49	-57	-64	-73	-67	-72
1.75	-46	-68	-93	-125	-131	-193	-247	-321	-409	-424	-512
2.80	-57	-91	-126	-171	-198	-272	-338	-417	-525	-573	-650
3.90	-20	-38	-54	-74	-87	-114	-135	-156	-177	-193	-205
5.10	-2	-6	-10	-21	-24	-30	-39	-46	-55	-63	-65
6.10	2	2	2	2	0	0	-3	-4	-7	-11	-13
7.20	3	4	6	7	8	12	14	14	15	14	13
8.30	2	1	3	4	6	8	10	13	13	14	16
9.42	-1	0	1	0	1	1	1	1	4	1	3
10.50	-3	-3	-1	-2	-3	-4	-3	-2	-1	1	2

注：8 kN 等代表加载。

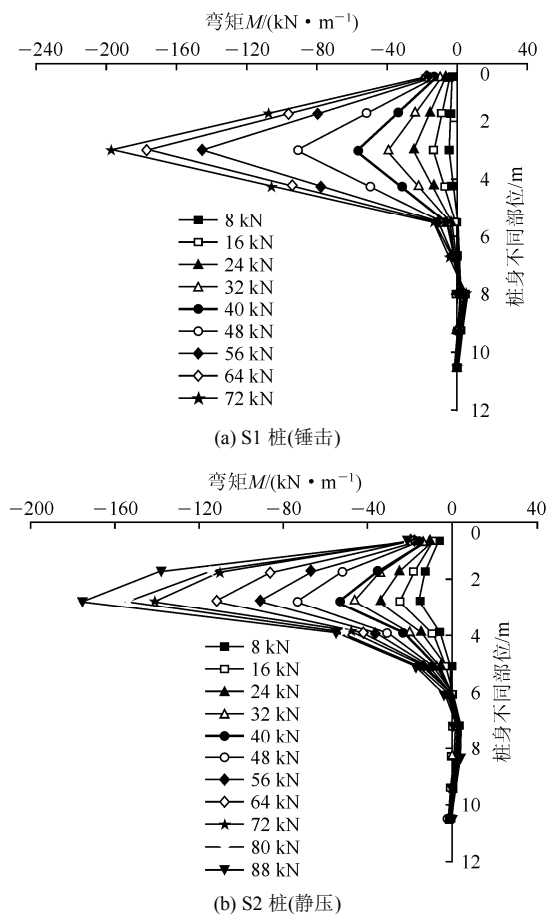


图 8 不同加载条件下桩身不同部位处的弯矩曲线  
Fig.8 Curves of measured bending moment for different depths of pile body under different loads

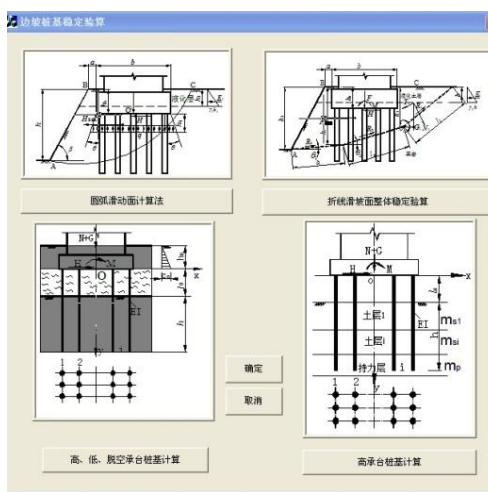


图 9 桩基内力计算程序界面  
Fig.9 Internal force calculation program interface of pile foundation

在本次试验过程中，由于试验为单桩试验，因此可选用高、低、脱空承台桩基计算模型来做计算分析。对于带承台群桩，可通过设置  $x, z$  向桩数为 1 来确定单桩，承台宽长尺寸可设置为与桩直径相同，都设置为 0.4 m，这样实际上计算模型退化为考虑单桩 - 土弹性抗力作用计算受水平荷载的桩身内力计算模型。由理论计算结果可知，在临界荷载条件下，S1, S2 桩桩身的最大弯矩值均为 47 kN，如图 10 所示。



(a) S1 桩



(b) S2 桩

图 10 S1 和 S2 桩基内力计算程序界面

Fig.10 Internal force calculation program interfaces of pile foundation S1 and S2

在临界荷载为 40 kN 条件下，实测 S1, S2 桩的桩身弯矩最大值分别为 57.0 和 67.2 kN·m；理论计算结果 S1, S2 桩的桩身弯矩最大值均为 47 kN·m。由实测结果和理论计算结果的对比分析知道，S1, S2 桩的桩身弯矩实测结果比理论计算结果均大，分别为 17.54%，12.15%。

从本文结果中可以看出，虽然实测值和理论值有一定的误差，考虑到 FBG 传感器的安装、千斤顶加载、仪器测试误差等各种因素的影响，可以认为实验数据可靠、精度满足要求。

## 5 结论

(1) 光纤光栅传感器是一种在混凝土预制桩荷载试验中颇具应用前景的新技术。如何考虑 PHC 管桩成型与现场施工过程中的特殊性，提出具备可操作性的埋设方案与技术，是笔者在此着力解决的关键目标问题。本文研究过程中采用的光纤 FBG 光栅传感器的施工方式，以及为提高传感器成活率而实施的技术细节，可为今后光纤光栅传感技术应用于 PHC 管桩荷载试验的研究实践提供值得借鉴的宝贵经验。

(2) 笔者在研究光纤 FBG 光栅传感器监测 PHC 管桩荷载试验时，基于对光纤光栅传感器自身原理

及硬件特性的深入分析，结合 PHC 现场施工过程中可能遇到的降低传感器成活率的因素，成功地解决了光纤光栅传感器在 PHC 管桩上的针对性埋设技术。锤击和静压成桩后的传感器测试显示，利用笔者提出的埋设方案与施工技术，光纤 FBG 光栅传感器的成活率达 100%。这些结果同时表明，光纤光栅传感器，可应用于锤击和静压成桩的工程施工之中。

(3) 在保证光纤 FBG 光栅传感器成活的前提下，笔者综合分析了这一新型实用传感器所得 PHC 管桩水平荷载试验测试数据。其结果证实，光纤 FBG 光栅传感器获取的相关数据，在精度、零漂、稳定性等方面相较传统电阻应变式传感器，具有十分显著的优越性。这一结果，在明确光纤 FBG 光栅传感器应用于桩基工程研究与实践的可行性的同时，也为今后相关理论研究的试验验证数据的获取提供了更好的选择方式，对桩基工程及其它工程实践的量化与理论化意义重大。

## 参考文献(References):

- [1] RAO Y J. Recent progress in applications in-fibre Bragg grating sensors[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1999, 31(4): 297 - 324.
- [2] LI H N, LI D S, SONG G B. Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering[J]. Engineering Structures, 2004, 26(11): 1 647 - 1 657.
- [3] METJE N, CHAPMAN D N, ROGERS C D F, et al. Optical fibre sensors for remote monitoring of tunnel displacements——prototype tests in the laboratory[J]. Tunnel and Underground Space Technology, 2006, 21(3/4): 417.
- [4] KISTER G, WINTER D, GEBREMICHAEL Y M, et al. Methodology and integrity monitoring of foundation concrete piles using Bragg grating optical fibre sensors[J]. Engineering Structures, 2007, 29(9): 2 048 - 2 055.
- [5] 冯 春, 李世海, 刘天幸, 等. 光纤光栅传感系统在打入桩中的埋设工艺试验研究[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(9): 12 - 15.(FENG Chun, LI Shihai, LIU Tianping, et al. Experimental study on burying technology of fiber grating sensor system in driven pile[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2009, 28(9): 12 - 15.(in Chinese))
- [6] 李 川, 张以谟. 光纤光栅: 原理、技术与传感应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 137 - 138.(LI Chuan, ZHANG Yimo. Fiber grating: principles, techniques, and sensing applications[M]. Beijing: Science Press, 2005: 137 - 138.(in Chinese))
- [7] KUANG K S C, KENNY R, WHELAN M P, et al. Embedded fibre Bragg grating sensors in advanced composite materials[J]. Composites Science and Technology, 2001, 61(10): 1 379 - 1 387.
- [8] 刘丽辉, 赵启大, 张 昊, 等. 光纤光栅传感器的解调技术进展[J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(7): 35 - 39.(LIU Lihui, ZHAO Qida, ZHANG Hao, et al. Progress in demodulation technology of fiber Bragg grating sensor[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2004, 41(7): 35 - 39.(in Chinese))
- [9] GAO H W, LI H M, LI B, et al. A novel fiber Bragg grating sensors multiplexing technique[J]. Optics Communications, 2005, 251(4/6): 361 - 366.
- [10] 周 智, 武湛君, 赵雪峰, 等. 混凝土结构的光纤光栅智能监测技术[J]. 功能材料, 2003, 34(3): 344 - 348.(ZHOU Zhi, WU Zhanjun, ZHAO Xuefeng, et al. Smart monitoring technique of concrete structures based on optical fiber Bragg grating sensors[J]. Journal of Functional Materials, 2003, 34(3): 344 - 348.(in Chinese))