

光纤光栅传感系统在打入桩中的埋设工艺试验研究^{*}

冯 春¹, 李世海¹, 刘天苹², 许利凯¹, 王观石³, 谷雨雷¹

(1 中国科学院 力学研究所, 北京 100190;

2 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 北京 100083;

3 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘 要: 根据光纤 Bragg光栅 (FBG) 传感系统应用于某工程混凝土管桩测试的现状, 对该传感系统的抗击打性能进行了试验评价, 发现法兰盘接头和附近的区域最易发生破坏, 数据连接线也易损坏, 而 FBG 传感器最不易破坏。根据以上试验结果, 提出了相应的减振措施, 采用粘扣、塑料管、麻绳等手段进行保护, 并通过试验验证了此种保护措施的减振效果。

关键词: 光纤 Bragg光栅传感系统; 抗击打性能; 混凝土管桩; 侧阻力与端阻力测试

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-9787(2009)09-0012-04

Experimental study on burying technology of fiber grating sensor system in driven pile^{*}

FENG Chun¹, LI Shi-hai¹, LU Tian-ping², XU Li-ka¹, WANG Guan-shi³, GU Yu-lei¹

(1 Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2 School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China;

3 Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: According to test status of fiber Bragg grating (FBG) sensor system applied to a concrete piles project, the anti-hitting performance of the sensor system is evaluated. Due to experiments, the flange joints and nearby regions are mostly prone to damage, the data connecting cables are also easy to breakage, while the FBG sensors are the most difficult to destroy. According to results of experiment, the corresponding protection measures are adopted. The glue-felt, plastic pipe and twine are used to protect the FBG sensor system, and the effect of the protection approach is approved by the experiment.

Key words: fiber Bragg grating (FBG) sensor system; anti-hitting performance; concrete pipe pile; test of skin and tip friction

0 引言

光纤 Bragg光栅 (FBG) 传感系统以其精度高、稳定性好、抗干扰能力强、安装方便、数据引出线少等优点, 广泛应用于桥梁、隧道等大型结构的施工与健康监测中, 并取得了很好的监测效果^[1-8]。

但该传感系统运用于混凝土管桩侧阻力和端阻力测试的研究却少见报道, 文献 [9] 对该传感系统在灌注桩中的埋设工艺与可行性进行了研究, 但并未涉及此系统运用于混凝土管桩测试的可行性分析。

由于混凝土管桩施打时冲击应力大, 对传感器的抗击打能力要求很高, 而目前混凝土管桩测试用传感器的存活率普遍偏低, 并且, 精度低、漂移大、稳定性差、施工工艺复

杂。因此, 亟须寻找一种符合要求的传感装置来进行测量。

目前, 国内工程界已有将此种传感系统应用于混凝土管桩测试的工程实例, 但成败参半。因此, 有必要对 FBG 传感系统的抗击打性能进行研究, 以便对此系统应用于混凝土管桩测试的可行性做出评价, 并为传感系统的埋设方案提供必要的基础数据。

1 某工程 FBG 传感系统

1.1 工程概括

该工程采用 PHC 桩 (先张法预应力混凝土管桩) 作为工程桩, 桩径包括 1.2、1.0 m 2 种, 桩长普遍为 55~65 m, 桩顶设计标高为 4.7 m, 水深为 4 m, 入土深度为 45~55 m。

该工程采用 HHK20 型液压锤进行打桩, 锤芯重量为

收稿日期: 2009-03-31

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (10632100); 中国科学院重要方向性项目 (KJ CX2-YW-L01)

20 t,最大行程为 1.5 m,最大打击能量为 295 kJ。打桩时,应力控制在 40 MPa 之内,拉应力控制在 5 MPa 之内(由 PDA 进行实时监测)。

1.2 FBG 传感系统的构成

该工程采用的 FBG 传感器主要包括铠装光栅应变传感器(用于测试桩体内的应变,进而计算出轴力、侧阻力及端阻力)和铠装光栅温度传感器(用于对所测应变进行修正)2 种。数据连接线采用铠装单模光纤(FC 接头),并通过光纤法兰盘进行连接。

1.3 FBG 传感系统的埋设工艺

该工程 FBG 传感系统的埋设工艺主要包括划线、切直槽、定位、切传感器与法兰盘槽、除杂、打基底胶、铺结构胶、测试、首尾纤处理及接桩位置数据线保护等。其中,基底胶采用液体环氧树脂,结构胶采用液体环氧树脂与固体环氧树脂的混合物。

1.4 FBG 传感系统的测试

打桩完毕后,对各桩的 FBG 传感器进行了测试,发现传感器的存活率很低,具体见表 1。

表 1 传感器的存活率

Tab 1 Livability of sensors

桩号	埋设传感器只数	存活传感器只数	传感器存活率 (%)
1#	38	5	13
2#	38	18	47
3#	74	2	3
6#	89	22	25

与静载荷试验进行同步测试后发现,存活传感器的精度较高,能准确反映桩体内应变随桩顶载荷的变化,由此可见,只要做好 FBG 传感系统的施工保护,便可将此系统应用于混凝土管桩侧阻力与端阻力的测试。

2 FBG 传感系统抗击打能力的测试

FBG 传感系统由 FBG 传感器、数据连接线及法兰盘组成,为了确定打桩过程中最易损坏的部件,需通过相应的试验进行各部件的工作性能评价。

2.1 FBG 传感器的性能检测

在试验现场的送桩器上按原工艺(与某工程的施工工艺相同)安装了 2 只传感器,送桩器的尺寸为 245 mm × 12 mm × 1 000 mm。由于该送桩器较正常送桩器小,故打了 20 多锤(一根桩没打完),送桩器即损坏,送桩器一侧已经屈曲。查看光栅解调仪记录的传感器数据,发现一只传感器数据良好,另一只传感器在产生应变 $7\,760 \times 10^{-6}$ 时失效(数据出现分支,原光栅由于受不均匀应力影响产生多个小光栅)。

通过送桩器上测得的数据可以看出:传感器有很强的耐受性,当发生应变 $7\,760 \times 10^{-6}$ 时才出现故障,应变

$7\,760 \times 10^{-6}$ 相当于应力 1 630 MPa,而在实际打桩过程中不会出现如此大的打桩应力。

2.2 数据连接线的性能检测

在 1 m 长的 5#槽钢内按原工艺埋设 FBG 传感系统,内含 1 只传感器。在传感系统的上侧涂上结构胶,与槽钢的侧壁平齐。

将埋设有传感器的槽钢置于 2 个 20 cm × 20 cm × 20 cm 的大理石块之上,形成简支梁。在槽钢上侧(数据线所在位置)用铁锤进行反复击打,试验示意图如图 1 所示。

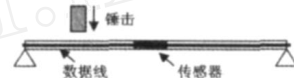


图 1 锤击试验示意图

Fig 1 Schematic diagram of hitting test

槽钢经受 47 次击打时,结构胶出现第一道裂缝,但光栅解调仪仍能测得传感器数据。当击打 200 次时,结构胶严重破坏,解调仪无法检测到传感器数据,传感系统破坏。经现场观测,发现数据线被拉断,且槽钢也产生了严重的变形。

17~47 锤传感器所得应变随时间的变化曲线如图 2 所示。由此图可得,最大的拉应变为 810×10^{-6} (对结构胶来说,约 20.8 MPa 的拉应力),最大压应变为 136×10^{-6} (对结构胶来说,约 5.2 MPa 的压应力)。20.8 MPa 的拉应力已经超过了结构胶的抗拉强度,故结构胶出现裂缝。

由图 2 还可以看出:槽钢有了一定的塑性变形,从而使 FBG 传感器也产生了协调变形,导致所得微应变总体趋于增大,停止锤击后,传感器已不能恢复到零点。

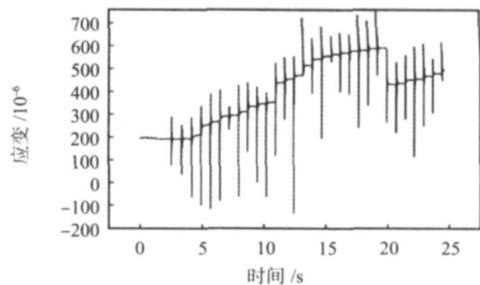


图 2 17~47 锤应变随时间的变化

Fig 2 Strain vs time between hitting No 17~47

170~200 锤时,传感器所得应变随时间的变化曲线如图 3 所示。由此图可得,最大的拉应变为 $2\,617 \times 10^{-6}$ (对结构胶来说,约 99.5 MPa 的拉应力),最大压应变为 261×10^{-6} (对结构胶来说,约 10 MPa 的压应力)。99.5 MPa 的拉应力已经大大超过结构胶的抗拉强度,故结构胶严重开裂,数据线也被拉断。

由此可以判断,结构胶开裂导致数据线被拉断,传感器信号无法正常传输,传感系统破坏。

2.3 法兰盘接头的性能检测

在 2 m 长的 5#槽钢内埋设传感系统,内含 1 只传感器

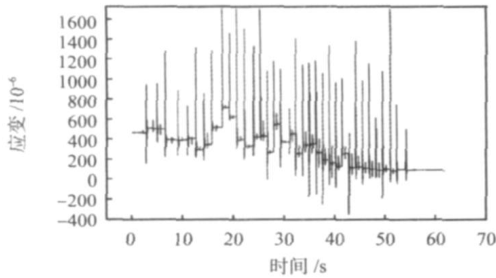


图 3 170~200锤应变随时间的变化

Fig 3 Strain vs time between hitting No. 170~200

和 1 个法兰盘接头,按原工艺安装。在传感系统的上侧涂上结构胶,与槽钢的侧壁平齐。此槽钢也置于两大理石块上,形成简支梁。

在接头法兰盘上侧进行击打,共击打 30 次,传感器首纤信号存在,尾纤信号消失。经观测,接头法兰盘与附近处结构胶产生了裂缝。由于有裂缝,导致接头附近出现问题,从而使此处传感器尾纤信号消失。但接头附近的具体破坏位置和破坏方式还不能确定。

击打过程中,传感器所测得的应变随时间的变化曲线如图 4 所示。由图 4 可得,传感器所测得的最大拉应变变为 257×10^{-6} (对结构胶来说,约 9.8MPa 的拉应力),最大压应变变为 23×10^{-6} (对结构胶来说,约 0.9MPa 的压应力)。

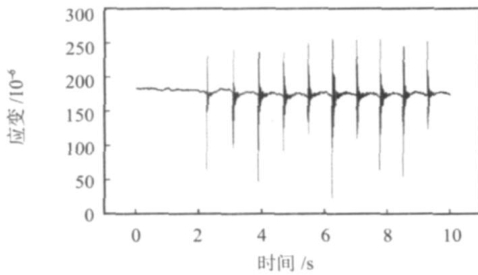


图 4 30锤中应变随时间的变化

Fig 4 Strain vs time between hitting No. 30

为了确定接头附近的具体破坏位置与方式,又采用槽钢以简支梁的形式进行了一次试验。试验时仅在槽钢内埋设数据线与接头,在接头处上侧进行锤击,发现当锤击 35 次后,传感器信号中断。经检查,发现数据线接头与法兰盘对接位置出现问题,数据线接头用于螺旋拧紧的螺扣损坏。

3 FBG传感系统的减振措施

由前述实验可得,FBG传感系统的法兰盘接头、数据线最易损坏,而传感器本身不易损坏。因此,需采取相应的减振措施对法兰盘接头和数据线进行保护。

3.1 法兰盘接头的减振措施

在法兰盘外侧裹上防振垫层(粘扣),防振垫层的材料为两块可以彼此粘接的化纤布。防振垫层可以有效减小打桩过程中拉、压应力波对接头的影响。

3.2 数据连接线的减振措施

在连接线外侧裹上麻绳,在麻绳外侧套上塑料套管,在套管外侧缠上透明胶带,并将保护好的数据连接线置于切好的槽中,涂上结构胶。如此保护后,使得数据线不与桩体

直接连接,可在塑料管内自由移动,减少了打桩振动对数据线的影

4 FBG传感系统减振措施的试验验证

4.1 现场打桩试验验证

在混凝土预制方桩(尺寸为 $400\text{mm} \times 400\text{mm} \times 6000\text{mm}$)上按减振工艺埋设 FBG 传感系统,并采用 5 t 柴油锤(跳高 2m)进行击打试验。

击打过程中产生的最大压应变为 1.135×10^{-6} (约 32MPa),产生的最大拉应变为 171×10^{-6} (约 4MPa),这与某工程现场的实际应力相近。当击打近 200 锤时,该方桩桩尖破裂,但按减振工艺埋设的传感系统始终没坏,这从一个侧面证明了减振工艺的减振效果。

4.2 室内简支梁锤击试验

与 2.2 和 2.3 中所述试验方法类似,采用 2m 的 5# 槽钢形成简支梁,并埋设一套加入减振措施的 FBG 传感系统。

在传感系统的上侧进行击打,共击打 200 次。经观测,在击打处附近的结构胶已经产生了明显裂缝,但传感器的信号仍然存在。在 200 次锤击过程中,所产生的最大拉应变为 1.002×10^{-6} (约 210.4MPa 拉应力),最大压应变为 693×10^{-6} (约 145.5MPa 压应力)。

4.3 粘扣的减振性能试验

为了检验粘扣的减振性能,利用加速度传感器和动测仪进行了减振性能的测试。测试时在钢管桩(尺寸为 $325\text{mm} \times 18\text{mm} \times 11000\text{mm}$)的指定位置贴上粘扣,将 2 只加速度传感器置于粘扣的上侧(减振),将 1 只加速度传感器直接置于钢管桩的表面(未减振),并在钢管桩的一侧进行锤击,利用动测仪记录加速度传感器的响应情况。

未减振和减振后加速度传感器测得的时域图如图 5 所示。由图 5 可得,减振措施处理后,传感器所受振动的振幅明显减小,减振前的振幅为 0.57m/s^2 ,减振后的振幅为 0.2m/s^2 ,减振后振幅比减振前小了 50% 多。

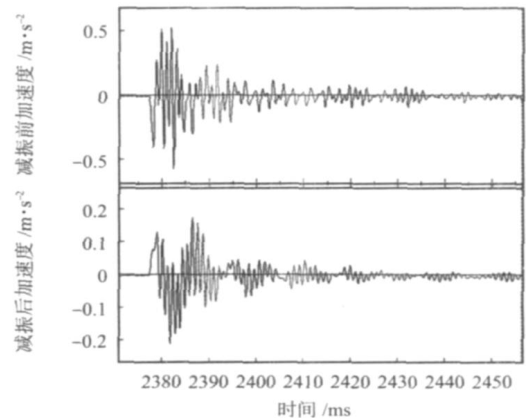


图 5 未减振与减振时加速度传感器的时域图

Fig 5 Acceleration vs time before and after protection measures

5 结论

1) 打桩过程中,FBG 传感系统的法兰盘接头和附近的

区域最易发生破坏,数据连接线也易损坏,而 FBG 传感器最不易破坏;

2)采用粘扣对法兰盘接头进行保护,采用麻绳、塑料管对数据线进行保护能够起到一定的减振效果,但施工工艺较复杂,将其运用与实际工程时传感器的安装还存在一定的困难;

3) FBG 传感系统的精度高、稳定性好,只要做好传感系统的保护,该系统在混凝土打入桩的侧阻力和端阻力测试方面将有一定的应用前景。

参考文献:

- [1] 应祥岳,徐铁锋. 光纤 Bragg 光栅传感器在桥梁监测中的应用[J]. 宁波大学学报:理工版, 2007, 20(1): 5 - 8.
- [2] 黄艳红,高晓蓉,杜路泉. 光纤光栅传感器在桥梁缺陷检测和结构健康监测中的应用[J]. 铁道技术监督, 2007, 35(11): 17 - 20.
- [3] Kister G, Winter D, Badcock R A, et al Structural health monitoring of a composite bridge using Bragg grating sensors Part I: Evaluation of adhesives and protection systems for the optical sensors[J]. Engineering Structures, 2007(29): 440 - 448.
- [4] 张凤梅,雷振山,刘德和. 光纤光栅传感技术在桥梁施工监控中的应用[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(2): 78 - 80.
- [5] Chan T H T, Yu L, Tam H Y, et al Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: Background and experimental observation[J]. Engineering Structures, 2006(28): 648 - 659.
- [6] 武胜军,王宏力,敖红奎. FBG 传感器在隧道锚杆支护结构监测中的应用研究[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(12): 31 - 33.
- [7] 崔天麟,肖红渠,魏产良,等. 广州地铁小北站暗挖隧道 FBG 监测技术研究[J]. 现代隧道技术, 2007, 44(4): 31 - 33.
- [8] 赵星光,邱海涛. 光纤 Bragg 光栅传感技术在隧道监测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 587 - 593.
- [9] 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): 2048 - 2055.
- 作者简介:**
冯 春(1982 -),男,浙江杭州人,硕士研究生,主要从事桩基础的破坏机理、大型工程结构的健康监测及预警的研究。
-
- (上接第 8 页)
- [39] Mwambela A J, Johansen G A. Multiphase flow component volume fraction measurement: Experimental evaluation of entropic thresholding methods using an electrical capacitance tomography system[J]. Measurement Science and Technology, 2001(12): 1092 - 1101.
- [40] Kimoto A, Nakatani T, Matsuoka Y I, et al Reconstruction of temperature patterns in the cylindrical head model from electrical capacitance tomography[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(6): 2407 - 2411.
- [41] Datta U, Dyakowski, Mylvaganam T S Estimation of particulate velocity components in pneumatic transport using pixel based correlation with dual plane ECT[J]. Chemical Engineering Journal, 2007(130): 87 - 99.
- [42] Marashdeh Q, Warsito W, Fan L S, et al Dual imaging modality of granular flow based on ECT sensors[J]. Granular Matter, 2008(10): 75 - 80.
- [43] Liu S, Yang W Q, Wang H, et al Investigation of square fluidized beds using capacitance tomography: Preliminary results[J]. Measurement Science and Technology, 2001(12): 1120 - 1125.
- [44] 张清淳,彭黎辉,姚丹亚,等. 采用改进的 PCA 算法测量两相流相浓度[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2003, 43(3): 400 - 401, 403.
- [45] Yan H, Liu Y H, Liu C T. Identification of flow regimes using back-propagation networks trained on simulated data based on a capacitance tomography sensor[J]. Measurement Science and Technology, 2004(15): 432 - 436.
- [46] 王海刚,阎润生,刘 石,等. 电容层析技术在旋风分离器及料腿中固体颗粒浓度、速度和流量测试中的应用[J]. 动力工程, 2004, 24(5): 675 - 680.
- [47] Liu S, Chen Q, Wang H G, et al Electrical capacitance tomography for gas-solids flow measurement for circulating fluidized beds[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2005(16): 135 - 144.
- [48] Huang Z Y, Xie D L, Zhang H J, et al Gas-liquid two-phase flow measurement using an electrical capacitance tomography system and a venturi meter[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2005(16): 177 - 182.
- [49] 彭珍瑞,王保良,黄志尧,等. 基于电容层析成像和 LS-SVM 的空隙率测量[J]. 浙江大学学报:工学版, 2007, 41(6): 877 - 880.
- 作者简介:**
彭珍瑞(1972 -),男,甘肃民勤人,博士,副教授;主要从事检测技术和支持向量机(SVM)方面的研究。