

基于分布式光纤传感技术的钢板桩施工 全过程演化规律

刘立新¹, 任祥瑞¹, 雷志强¹, 毛景权¹, 罗威力²

(1. 中交一公局桥隧工程有限公司, 湖南 长沙 410000; 2. 广州大学)

摘要: 布里渊光时域分析仪(BOTDA)分布式光纤技术近年来广泛应用于结构健康监测, 该技术能够准确有效地监测结构体的温度和应变。该文将此技术应用于钢板桩围堰施工过程中应变、弯矩和挠度等检测; 开展了光纤传感器室内应变标定试验; 提出了一套光纤传感器的埋设工艺; 通过工程实例验证了分布式光纤传感技术应用于围堰钢板桩检测的可行性。研究表明: 该技术对钢板桩的分布式检测是行之有效的方法, 与土压力盒、应变片等传统监测手段比较, 分布式光纤传感器的优点有分布式测量、抗磁干扰、耐高温、防水、抗腐蚀、便于安装、容易实现长距离监测等优点。分布式光纤测试方法可作为一种新型钢板桩围堰测试技术, 具有重要的应用和推广价值。

关键词: 分布式光纤; 围堰; 钢板桩; 结构健康监测; BOTDA

钢板桩是桥梁基础建设中被广泛应用的支护结构, 是桥梁桩基水下承台建设中最常见的支护形式之一。钢板桩的优点有止水效果好、可回收、施工快、施工成本低等。然而钢板桩的安全可靠性往往比较低, 施工时容易出现安全事故, 若围堰监测手段不足或者监测精度不满足要求, 很容易出现桩的失稳、坍塌, 造成生命财产损失。目前, 围堰监测的传统方法采用点式传感器, 如应变计、测斜仪等。此类传感器具有布点多、路线多、易受环境的影响、安装不便、人工成本高等缺点。另外, 由于传统监测传感器需要人工读数、记录等, 很难实现长期长距离的实时监测。为了克服工程监测存在的弊端、消除施工过程的安全隐患、实现信息化施工, 探索出一种新的围堰监测方式非常必要。

近年来, 分布式光纤传感技术逐渐被用于工程监测中, 因为光纤传感器具有分布式测量、抗电磁干扰、不怕水、耐高温、耐腐蚀、易安装、容易实现长距离监测等优点。光纤传感监测技术广泛应用于结构健康监测中, 其在边坡、桩基、管道、大坝、隧道、基坑、桥梁等结构施工与运行阶段中的监测都有应用, 取得了良好的效果, 具有很大的应用前景。但是尚未见有文献报道应用分布式光纤传感技术监测钢板桩围堰施工全过程的变形。

该文提出一种光纤测量钢板桩受力变形的新方法。在钢板桩上埋设分布式传感光纤, 使传感光纤与钢板桩合为一体, 共同变形, 此时钢板桩成为具有感知变形能力的构件, 它能够实现实时监测钢板桩的应变、弯矩、挠度等数值, 确保围堰开挖的可靠性与安全性。该方法可分析围堰内排水与开挖过程支护结构的内力变化和变形的变化规律, 验证支护结构的有效性, 可作为围堰施工过程的一项安全指标。通过对广州花都至东莞高速公路某合同段仙村涌2号大桥钢板桩围堰的监测实例分析, 以验证该技术在现场适应性、剔除温度影响、远程分布式测量等方面的应用效果。

1 分布式光纤监测原理

1.1 BOTDA 原理

BOTDA 是近年来兴起的一种新的光纤传感技术。此技术原理以光纤为介质, 通过在光纤两端发送脉冲和连续光波, 光纤中的布里渊频率会产生偏移, 从而感知和传输外界发生改变的信号。布里渊频移量与光纤应变成正比关系。所以, 光纤应变可以通过布里渊频移量由下式求出:

收稿日期: 2020-04-20(修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51808147)

作者简介: 刘立新, 男, 硕士, 高级工程师, E-mail: 1162385833@qq.com

$$\nu_B(\epsilon, T) = \nu_B(0, T_0) + \frac{\partial \nu_B(\epsilon, T)}{\partial \epsilon} \Delta \epsilon + \frac{\partial \nu_B(\epsilon, T)}{\partial T} \Delta T \quad (1)$$

式中: $\nu_B(\epsilon, T)$ 为光纤的布里渊频移; $\nu_B(0, T_0)$ 为初始光纤布里渊频移数值; $\frac{\partial \nu_B(\epsilon, T)}{\partial T}$ 为温度系数; $\frac{\partial \nu_B(\epsilon, T)}{\partial \epsilon}$ 为应变系数; T_0 为初始测试温度; T 为测量时的温度; $\Delta \epsilon$ 为应变变化量; ΔT 为温度的变化量。

1.2 工作原理

应用 BOTDA 对钢板桩进行分布式检测。将传感光纤埋设在钢板桩的腹板表面上, 然后把安装有分布式传感光纤的钢板桩竖直沉入河床地基中, 在围堰抽水 and 开挖过程中受水平方向上水、土压力的作用。在此作用下, 光纤传感器和桩身发生变形协调, 在光纤一端通过分布式光纤解调仪对桩内传感光纤长度上任一点的应变信息进行检测, 可得到布里渊频移 $\nu_B(\epsilon, T)$, 通过公式 $\epsilon_c = \nu_B(\epsilon, T)/K$ 求得钢板的应变值, 式中 ϵ_c 为钢板桩应变值; K 为布里渊频移的影响系数, 由应变值可以求得钢板桩相应力学参数。

2 传感光纤安装工艺

为了不削弱钢板桩的截面面积和保护光纤传感器在沉桩时不受破坏, 该文提出一种新的传感光纤安装方法: 从桩顶开始到桩底, 在钢板桩腹板中轴线上侧焊接 2 根保护钢筋, 在钢板桩腹板中轴线下侧焊接 1 根角钢, 将传感光纤黏结在 2 根保护钢筋形成的凹槽以及铺设在空腹的角钢上面, 铺设在桩中的传感光纤呈 U 字形回路, 铺设在保护钢筋形成的凹槽上的光纤测量内力产生的应变, 铺设在空腹角钢上的光纤测量温度产生的应变。为了在围堰施工检测时能够方便地连接光纤解调仪, 在桩头需要留出一定长度的光纤传感器。为了防止后期施工时, 桩头处的光纤受到人为破坏或者环境的影响, 在桩头预留光纤应进行封装保护, 以免影响光纤的使用寿命。传感光纤的安装工艺如图 1、2 所示。

3 传感光纤应变标定室内试验

传感光纤标定试验主要考察应变递增时分布式光纤应变测量系统测得的光纤布里渊频率变化趋势, 验证应变变化与系统所测布里渊频率之间的线性关系,

评价系统的应变测试能力。

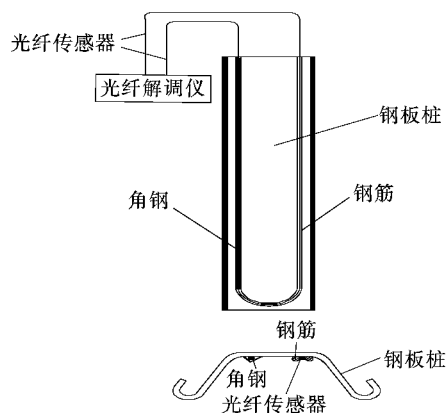


图 1 光纤测量线路构成示意图

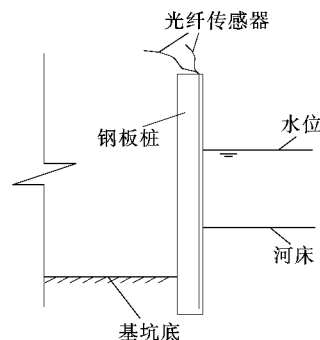


图 2 钢板桩测量系统布置侧面示意图

试验采用的传感光纤原长度为 3 m, 对传感光纤施加轴力, 使传感光纤产生轴向变形, 用激光干涉仪测定受拉传感光纤的伸长量, 通过应变控制数据采集点, 采集传感光纤变形时的布里渊频率变化量。应变每增加 0.003%, 传感光纤解调仪采集一次数据, 直至传感光纤的伸长量达到 9 mm 时停止采集, 得到光纤应变与布里渊频率、频移累计的关系, 如表 1、图 3 所示。

由图 3 可得: 应变变化与布里渊频移累计呈良好的线性关系, 传感光纤应变对布里渊频移的影响系数为:

$$K = \frac{1\,708.64}{(35.26 \times 10^3) \times 10^{-6} \times 100\%} = 48\,458 (\text{MHz}/\%)$$

4 数据处理方法

BOTDA 对钢板桩的检测结果是传感光纤段在每个工况下的应变频谱, 得出的应变频谱含有噪声, 波动性比较大, 难以得出钢板桩应变变化规律, 所以需要对

应变频谱进行消噪和平滑处理。首先运用小波分析法对应变频谱进行消噪,再运用移动平均法进行平滑处理,如图4所示。

表1 光纤应变与布里渊频移的关系

微应变/ ($\times 10^3 \mu\epsilon$)	初始频 率/GHz	拉伸后频 率/GHz	频移/ MHz	频移累 计/MHz
2.71	10.691 25	10.855 65	164.40	164.40
5.42	10.725 65	10.853 64	127.99	292.39
8.14	10.719 8	10.850 38	130.58	422.97
10.85	10.716 52	10.848 54	132.02	554.99
13.56	10.717 77	10.849 35	131.58	686.57
16.27	10.722 10	10.850 97	128.87	815.44
18.99	10.723 18	10.852 50	129.32	944.76
21.70	10.725 83	10.854 89	129.06	1 073.82
24.41	10.725 99	10.854 12	128.13	1 201.95
27.12	10.727 78	10.855 44	127.66	1 329.61
29.84	10.727 14	10.854 62	127.48	1 457.09
32.55	10.722 84	10.850 79	127.95	1 585.04
35.26	10.704 75	10.828 35	123.60	1 708.64

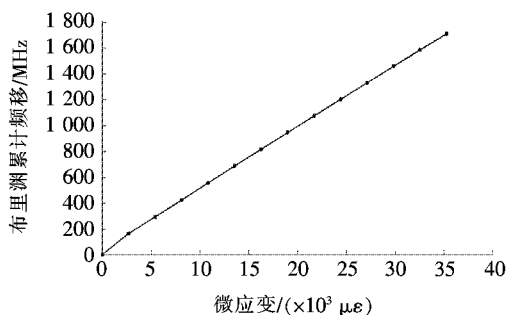


图3 光纤应变与布里渊频移累计的关系

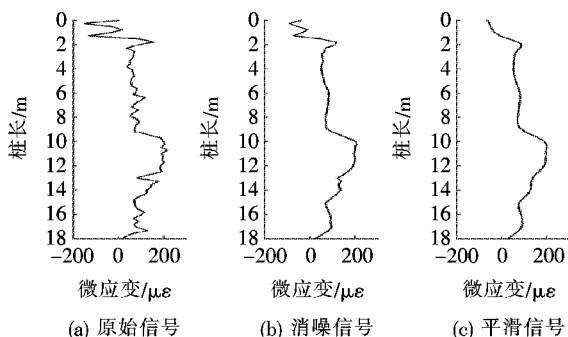


图4 原始、消噪与平滑处理信号

图4为某工程对长度18 m的钢板桩围堰进行施工全过程检测,运用小波变换对原始数据进行降噪处理的信号。从图4可以看出,降噪后的曲线更加光滑,有效抑制了高频信号,降噪效果明显。对降噪后数据

采用移动平均法进行修匀,可有效消除数据的波动性,能消除和减小外界偶然因素的影响,显示钢板桩的应变变化趋势。

由于温度的变化影响BOTDA频移的读数。因此,需要进行温度补偿,以减轻温度对布里渊频移的影响。该工程通过铺设专用的温度补偿光纤来进行温度补偿。由式(1)可知:BOTDA的测量值包含了温度和应变的共同影响,假定BOTDA的测量值为应变测量值,则该应变测量值由两个部分组成:

$$\epsilon_c = \epsilon_\epsilon + \epsilon_T \quad (2)$$

式中: ϵ_c 为总应变; ϵ_ϵ 为真应变; ϵ_T 为温度应变。

在同一温度场内的不同光纤 ϵ_c 可能不相同,但是 ϵ_T 是相同的,因此, ϵ_ϵ 可由式(2)求得。

根据钢板桩的应变,可以计算得到钢板桩弯矩,其计算公式如下:

$$M(x) = \frac{2IE\Delta\epsilon}{y} \quad (3)$$

式中: $M(x)$ 为桩身弯矩值; I 为每根桩的惯性矩; E 为弹性模量; $\Delta\epsilon$ 为应变改变量。

根据弯矩计算公式(3),可计算桩的挠度分布:

$$IEy_d(x) = - \int \left[\int M(x) dx \right] dx + Cx + D \quad (4)$$

式中: y_d 为某截面处的挠度; C 和 D 为由边界条件决定的参数。

由于该文工程土体条件较软,在围堰的抽水与开挖过程中,钢板桩底部会发生旋转。当桩受到水平作用的支撑力时,水平位移受到限制,桩底旋转值无法测量,因此在得到桩体轴向应变的前提下,需要用全站仪监测的桩顶水平位移作为边界条件,利用这些边界条件求出桩身挠度。

5 围堰监测应用实例

5.1 工程概况

广州花都至东莞高速公路某桥墩建于软岩地层中,水下软岩强度性质不稳定,地基土物理力学性质指标详见表2。

围堰采用钢板桩(参数见表3)插打围合而成,围堰长 \times 宽 \times 高=17.90 m \times 12.60 m \times 18 m,水深4~9 m,开挖深度为水面以下6 m,钢板桩嵌固深度为5 m,水平方向上设有4道支撑。

该围堰采用逆做法施工,先下放第1、2道内支撑系统,再打设钢板桩围堰。排水开挖基坑内土层,边开

表 2 土层及填土的物理参数值

土层 编号	土层名称	土层厚 度/m	γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	w / %	G_s	e	E_s / MPa	φ / ($^\circ$)	c / kPa
1	细砂(混夹淤泥)	2.50	17.9	36.0	2.65	1.013	2.65	5.00	23.70
2	强风化泥质粉砂岩	10.50	20.0	17.1	2.72	0.712	3.86	7.00	26.40
3	强风化泥质粉砂岩	18.00	18.6	23.3	2.68	0.652	4.76	33.00	22.10
4	中风化泥质粉砂岩	2.00	18.6	17.6	2.68	0.592	4.19	33.00	22.10

注: γ 为重度; w 为含水率; G_s 为土粒相对密度; e 为孔隙比; E_s 为土体弹性模量; φ 、 c 为土体强度指标。

表 3 拉伸钢板桩截面参数

有效高度/ mm	有效宽度/ mm	厚度/ mm	弹性模量/ GPa	截面二次 力矩/ cm^4	钢材型号
210	600	18	206	8 630	Q235

挖边支撑。基坑开挖如图 5 所示,开挖分 6 个工况,各工况如下:

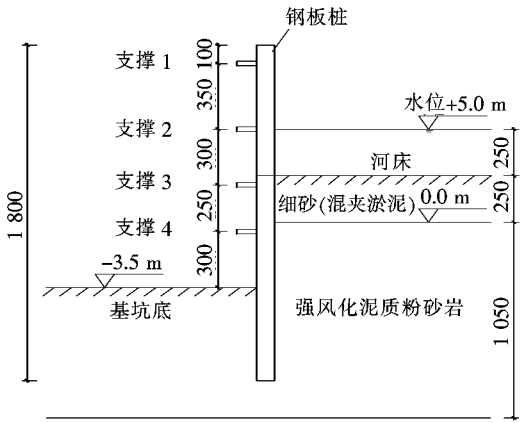


图 5 基坑开挖示意图(单位:cm)

- (1) 工况 1:安装 1、2 道支撑,以 1、2 道内支撑的围檩为基准线,打设钢板桩围堰。
- (2) 工况 2:围堰内抽水,基坑开挖至第 3 层支撑下 0.5 m。
- (3) 工况 3:安装支撑 3,基坑向下开挖 1 m。
- (4) 工况 4:基坑向下开挖至支撑 4 以下 0.5 m。
- (5) 工况 5:安装支撑 4,基坑向下开挖 1.5 m。
- (6) 工况 6:基坑开挖到底。

5.2 现场监测

根据基坑开挖的 6 个工况,分布式光纤传感技术对钢板桩进行检测过程是与围堰基坑开挖同步进行的。在钢板桩沉桩后对桩身进行初值测试,之后每个工况测一次,直至开挖到底、混凝土垫层施工完成。数据处理时把每个工况下所测的变形数据减去初始值就是钢板桩的变形值。

5.3 监测结果分析

BOTDA 仪器的数据采样间距为 0.25 m,根据式(2)得到桩身随桩长变化的应变值分布曲线,并对应变分布曲线除噪和平滑处理,结果如图 6 所示。

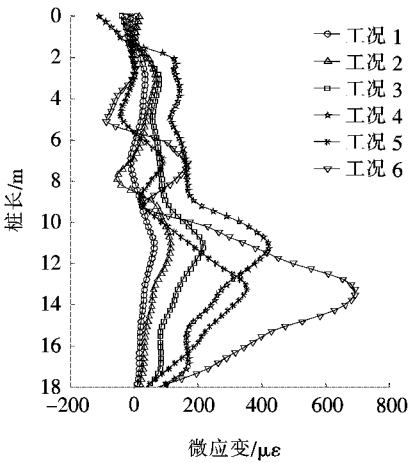


图 6 桩身应变分布图

根据式(3)计算得到各工况下钢板桩的弯矩分布图,如图 7 所示。从图 7 可以看出:钢板桩桩身弯矩值随着开挖工况的进行而增加,在开挖过程中,最大弯矩约为 220 $\text{kN} \cdot \text{m}$;在桩长约 1.4、5.7、9 以及 13 m 处的基坑底分别出现弯矩转折点,实际支撑点位置分别为 1.4、5.7、10 m,基坑底处为 13 m,可以判断弯矩转折点主要由内支撑和基坑开挖面的土体造成;桩身弯矩峰值随着开挖的进行逐步下移;符合实际情况。根据计算钢板桩的抵抗弯矩为 516 $\text{kN} \cdot \text{m}$,围堰施工的最大弯矩小于其抵抗弯矩,满足施工要求。

根据桩身挠度公式(4)计算出桩的挠度,如图 8 所示。

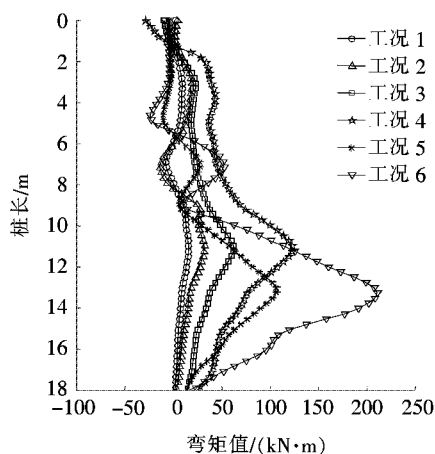


图7 桩身弯矩分布图

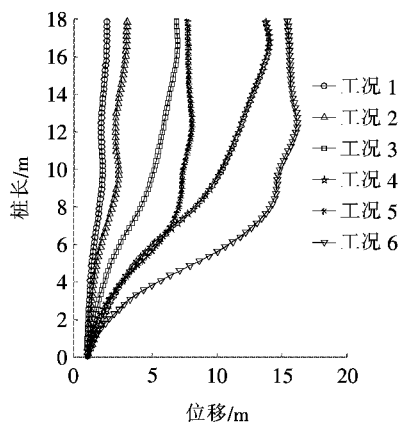


图8 桩身挠度分布图

从图8可知:工况6基坑开挖到底,桩身最大挠度约为17 mm;随着基坑开挖深度逐渐增大,桩身挠度增加;弯矩值越大处,桩身挠度越大;桩身最大挠度处随着开挖的进行逐步下移。根据规范,桩身允许的最大挠度为50 mm,围堰施工最大位移小于其允许挠度,因此该工程施工过程中挠度满足施工要求。

从图7、8可看出:支撑不仅改变了弯矩和挠度的数值大小,也改变了曲线峰值的位置。随着围堰开挖深度的增加,钢板桩的弯矩和挠度增大;水平支撑能够有效减小弯矩和挠度的大小,在支撑安装的位置会出现明显的突变。

为了验证分布式光纤对钢板桩围堰监测的有效性,在钢板桩附近埋设了一根测斜管,通过测斜仪测量出工况6钢板桩的水平位移,并与分布式光纤监测的桩身挠度比较,结果如图9所示。

由图9可知:测斜仪测量出的钢板桩挠度曲线与分布式光纤监测的桩身挠度曲线具有很高的相似度,两者的误差较小,两者之差在2 mm范围内,说明分布

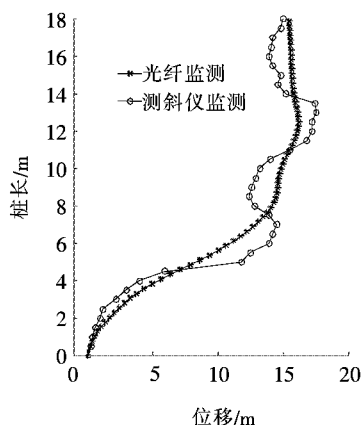


图9 测斜仪监测与光纤监测挠度对比图

式传感光纤技术监测结果有效且准确,将此技术应用于钢板桩围堰监测是一种行之有效的方法。

6 结论

(1) 将分布式光纤传感技术应用于围堰施工过程中钢板桩试桩的应变、弯矩和挠度等检测,其具有分布式测量、抗磁干扰、耐高温、防水、抗腐蚀、便于安装、容易实现长距离监测等优点。

(2) 传感光纤在钢板桩中埋设时工艺十分重要,该文提出一套埋设工艺,既能保护光纤,又不削弱钢板桩截面,解决了传感光纤在钢板上的埋设工艺问题。

(3) 在分布式光纤检测中,考虑了监测周期内环境温度的变化,专门铺设了温度补偿光纤,以消除温度场变化的影响,提高了监测精度。

(4) 分布式光纤传感技术是在钢板桩围堰施工中的首次尝试,为基坑开挖全过程提供了有效检测数据。此技术作为一种新型围堰测试技术,可为今后基坑工程检测提供一种新的检测手段。

参考文献:

- [1] 皇甫海军,梁雪莲.海河特大桥钢板桩围堰施工监测[J].公路,2013(9).
- [2] Hong Cheng-Yua, Zhang Yi-Fan, Li Guo-Wei, et al. Recent Progress of Using Brillouin Distributed Fiber Optic Sensors for Geotechnical Health Monitoring[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017(258):131-145.
- [3] 隋海波,施斌,张丹,等.边坡工程分布式光纤监测技术研究[J].岩石力学与工程学报,2008(9).
- [4] 朴春德,施斌,魏广庆,等.分布式光纤传感技术在钻孔灌注桩检测中的应用[J].岩土工程学报,2008(7).

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.03.025

斜拉桥超高索塔上横梁装配桁架式支撑 体系设计施工关键技术

王鹏

(中铁十一局集团第六工程有限公司, 湖北 襄阳 441104)

摘要:钢筋混凝土 H 形索塔是常见的一种索塔结构类型,其结构组成为塔肢和横梁两部分。索塔上横梁一般为非承重横梁,不同于其他常规预应力钢筋混凝土结构,其在托架结构设计、施工动态控制等方面存在其自身特点。该文结合广东西江特大桥跨西江 600 m 混合梁斜拉桥上横梁托架设计和施工实况,深入研究分析了装配桁架式支撑体系的安全性和便捷性。从结构受力、整体安拆和周转利用等多角度阐述了该类型托架施工技术的可行性,实现了索塔结构安全快速化施工。

关键词:斜拉桥;索塔上横梁;装配式;桁架式;托架设计与施工

随着中国桥梁建设的飞速发展,斜拉桥跨度的增大,使得索塔越来越高。多采用横梁将斜拉桥两侧桥塔联结起来,形成横向框架结构,用以抵抗横向的风力或地震作用。由于上横梁具有结构尺寸大、高度高等特点,从而导致横梁施工支撑体系高度大、承载能力大,支架施工质量不易控制。

上横梁支撑体系有落地钢管支架法和悬空预埋托架法两种施工方法,针对高塔而言,落地钢管支架施工耗材大,且需在塔肢上进行大量预埋,施工周期长,拆除及周转不易。一般的横梁托架采用索塔两侧安装焊接三角托架,为满足现浇承载力要求,三角托架结构尺寸大、片数多,与预埋件采用焊接连接,焊缝受力大,对焊缝质量要求极高,安全风险大。

西江特大桥主桥索塔上横梁现浇采用托架进行施工,结合有限元设计软件,对托架结构进行优化、验算,采用牛腿作剪力键,通过装配桁架式托架进行受力,可大大提高材料利用率和支架的安全性,确保斜拉桥施工质量。

1 工程概况

跨西江主桥采用 $(2 \times 57.5 + 172.5 + 600 + 4 \times 57.5)$ m 混合梁斜拉桥,主跨 600 m 跨越西江,结构总长 1 118.7 m,采用双 H 形双索面等高索塔结构形式,索塔全高分别为 200、208 m。上塔柱为两分离式竖直塔柱;中塔柱为两分离式倾斜塔柱,向内侧倾斜;下塔

- *****
- [5] 周琰,靳世久,张昀超,等.分布式光纤管道泄漏检测和定位技术[J].石油学报,2006(2).
 - [6] 高文傲,刘洋,李登科,等.基于光纤监测技术的燃气管道泄漏研究[J].中国安全科学学报,2018(8).
 - [7] 唐天国,陈春华,刘浩吾.分布式光纤传感用于大坝基座裂缝监测[J].传感技术学报,2008(10).
 - [8] 施斌,徐学军,王楠,等.隧道健康诊断 BOTDR 分布式光纤应变监测技术研究[J].岩石力学与工程学报,2005(15).
 - [9] 刘杰,施斌,张丹,等.基于 BOTDR 的基坑变形分布式监

测实验研究[J].岩石力学,2006(7).

- [10] 丁勇,王平,何宁,等.基于 BOTDA 光纤传感技术的 SMW 工法桩分布式测量研究[J].岩土工程学报,2011(5).
- [11] 张巍,吕志涛.光纤传感技术用于桥梁监测[J].公路交通科技,2003(3).
- [12] 徐洪钟,施斌,张丹,等.基于小波分析的 BOTDR 光纤传感器信号处理方法[J].光电子·激光,2003(7).
- [13] 元四华,费业泰.应用时间序列移动平均模型预测加工精度的研究[J].计量与测试技术,2002(2).

收稿日期:2019-12-02

基金项目:中国铁建股份有限公司科技研究开发计划项目(编号:16-B01)

作者简介:王鹏,男,博士,高级工程师.E-mail:417084328@qq.com