

高速公路钢波纹管涵洞工程应用 及其应变光测技术研究

程 钢¹, 方 萍²

(1. 江苏省交通运输厅, 南京 210001; 2. 江苏省交通规划设计院股份有限公司, 南京 210000)

[摘要] 主要介绍了钢波纹管涵洞在南京长江第四大桥北接线高速公路路基工程中的首次应用。现场实际应用结果表明, 钢波纹管涵洞具有良好的路用结构适应性, 施工简便, 工期短; 现场应变光测测试结果表明, 在软土地基路段修筑钢波纹管涵洞充分利用了钢材的延展性, 能够解决不均匀沉降问题。

[关键词] 钢波纹管涵洞; 高速公路; 软土地基; 现场试验; 光纤测试

[中图分类号] U448 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)08-0108-05

1 前言

涵洞是公路工程中的重要组成部分之一。目前的小桥涵绝大部分采用钢筋混凝土或圬工材料。对公路涵洞来说, 不均匀变形是造成其破坏的主要原因之一。至2008年我国钢材年生产能力达到 7×10^8 t, 钢产量的增长为发展我国建筑钢结构建设事业创造了极好的时机。钢材具有良好的延性, 抗拉、抗压、抗剪强度均较高, 考虑用钢管作为涵洞的主要结构材料, 来代替原来的钢筋混凝土和圬工砌体涵洞, 以解决在涵洞建设中存在的地基不均匀沉降、施工工序繁杂、工期长等缺点。对于跨径较小的涵洞, 如果采用柔性的、高强度的钢质材料圆管涵则可大大改善其对地基及基础变形的适应能力, 解决因地基基础不均匀沉降导致的涵洞破坏问题。但单纯板形钢管的刚性较差, 对失稳型破坏的抵抗能力较弱, 需要较大的钢管板厚度来抵抗破坏, 而采取管轴向的钢板波纹化处理则可大大增加管的径向刚性和降低钢板厚度, 而且钢圆管采取纵轴向波纹化处理后可以具有非常大的管轴向变形补偿能力, 能够非常好地提供适应地基变形的材料伸展余地, 从而可充分发挥其在大的地基基础变形情况下的良好径向与轴向受力特征, 更大程度地分散荷

载效应, 更好地发挥钢结构的优势, 因此在软土、膨胀土、湿陷性黄土、多年冻土等不良工程地质情况下, 利用钢波纹管结构修筑涵洞具有非常明显的优势。

2 工程概况

南京长江第四大桥北接线工程途经路段水网较为发达, 需建设配套的排水设施以保证水流的畅通。N4标工程设计中在K14+174.4~K14+178.4段与K11+205.7~K11+215.7段各设有一道直径为1.5 m的圆管涵(见表1)。钢波纹管涵洞设计及应用技术科研试验研究的实践工程选择在此两处进行管涵的替换, 并开展工程实体试验研究工作, 因此, 需在原有的圆管涵设计基础上加以变更。

表1 需进行工程设计变更的原圆管涵设计情况
Table 1 The design situations of original pipe culvert that need engineering change

涵洞位置	处理方案	处理后沉降量(路中)		
		总沉降量/cm	预压期沉降量/cm	工后沉降/cm
K14+176.4	湿喷桩($L=7$ m, $D=1.3$ m)	32.7	16.6	16.1
K11+203.7	湿喷桩($L=7$ m, $D=1.3$ m)	24.3	11.0	13.3

注: L 为桩长; D 为桩间距

[收稿日期] 2013-06-03

[作者简介] 程 钢(1969—), 男, 上海市人, 高级工程师, 研究方向为交通建设工程管理; E-mail: cg@jscd.gov.cn

选择的工程试验段属于长江漫滩区,地势低平,河渠纵横,表层硬壳层厚度 $<1\text{ m}$,浅部为淤泥质土,其下为厚层状粉砂,工程地质条件较差。原设计方案中采用圆管涵作为排水设施,对原设计的圆管涵,为减少软土地基不均匀沉降可能造成的结构破坏,考虑对软土地基进行湿喷桩处理来提高地基强度,涵洞底部也需要用混凝土结构来稳定。对选择的两处管涵,原施工图设计均采用直径为 1.5 m 的钢筋混凝土圆管,为满足涵洞处工后沉降 $\leq 0.20\text{ m}$ 的要求,原设计在钢筋混凝土圆管涵和涵洞过渡段基底采用 $L=5\sim 7\text{ m}$ 、 $D=1.3\sim 1.5\text{ m}$ 的梅花形湿喷桩处理;K14+176.4处圆管涵的填土高度为 4.1 m ,设计高程为 7.9 m ,涵底原设计采用 $L=7\text{ m}$ 、 $D=1.3\text{ m}$ 的 50 cm 直径湿喷桩处理地基;K11+203.7处圆管涵的填土高度为 3.7 m ,设计高程为 7.3 m ,原设计使用 $L=7\text{ m}$ 、 $D=1.3\text{ m}$ 的 50 cm 直径湿喷桩进行地基处理。

钢波纹管强度高、柔性好,能够很好地适应软土地基的变形,可解决软土地基不均匀沉降造成的涵洞结构破坏。因此,本文采用直径为 1.5 m 的钢波纹管涵洞代替原设计的钢筋混凝土圆管涵^[1]。

1)对K11+203.7处的钢波纹管涵,保留原设计中K11+191.7~K11+201.7、K11+201.7~K11+205.7及K11+205.7~K11+215.7共 24 m 长路段的湿喷桩地基处理,采用波长与波高比为 $150:50$ 、管壁钢板厚度为 3.0 mm 的圆环形钢波纹管(分片式,管片之间采用螺栓进行铆栓拼接)。

2)对K14+176.4处的钢波纹管涵,取消原设计中K14+164.4~K14+174.4、K14+174.4~K14+178.4及K14+178.4~K14+188.4共 24 m 长路段的湿喷桩地基处理,改为与相邻路基段相同的等载预压方案处理,采用波长与波高比为 $76:25$ 、管壁钢板厚度为 2.7 mm 的螺旋形钢波纹管(分节整体式,单节长 12.4 m ,管节之间采用联轴套栓接,见图1)。



图1 K14+176.4螺旋形整体栓接钢波纹管
Fig.1 The spiral and whole bolting steel corrugated pipe in K14+176.4

以上两种方案用以对比不同地基处理形式、不同波纹制作方式与特征的钢波纹管涵工作特性,并采取与一般路基路段同样的工后沉降标准进行沉降衡量,即工后沉降 $\leq 0.30\text{ m}$ 的要求。

3 工程监测

波纹管涵洞测试元件根据布设方案的要求在涵管上布设测点并进行编号,并设置测试仪器,随着填土或采用汽车、压路机等加载情况的不同,测试各荷载作用下的应力、应变。实际测试中,采用光纤光栅传感器进行管不同部位的应变观测;采用振弦式土压力计进行土压力测定,衡量不同力学条件下的涵管力学特征和涵洞变形特征;为采集相关轴向受力和变形特征,分别在管顶和管底处内侧设置跨多个波纹的沿轴向的振弦式位移计。

重大工程结构(如隧道、桥梁和水坝等)的安全监测一直是国内外工程领域广泛关注的重要研究课题。传统的结构变形监测一般都是采用电阻应变片,但其测试结果受温度、湿度、导线长短、电磁干扰等环境因素的影响极大,容易产生温漂和零漂的现象,长期应变测试的结果会严重失真,特别是在潮湿环境下,要保证应变片测试的准确性,将应变片与水完全隔离是很困难的。因此,常规的电阻类传感器已逐渐不能满足对重大工程结构安全的长期监测要求。近年来,随着光纤传感技术的逐渐成熟,光学测试已经成为目前发展最快的应力、应变测试技术。光纤传感技术是继电测技术之后的新型传感技术。该技术具有“传”、“感”合一的特点,并以光波为载体,光纤为媒质,具有抗电磁干扰、动态响应快、灵敏度和测试精度高、尺寸小、质量轻、强度高、耐高温、耐腐蚀及可实现远距离实时监测等优点,一些技术还可对结构进行分布式测量。这些优点决定其在工程结构安全监测方面具有很强的竞争力,并在航空航天、船舶、电力、桥梁、堤坝、边坡和隧道等工程结构及岩土工程的监测与诊断中获得广泛研究与应用。

光纤 Bragg 光栅传感器^[2]的基本原理是:当光栅周围的温度、应变、应力或其他待测物理量发生变化时,将导致光栅周期或纤芯射率的变化,从而产生光栅 Bragg 信号的波长位移,通过监测 Bragg 波长位移情况,即可获得待测物理量的变化情况。光纤光栅传感器的基本工作原理如图2所示。

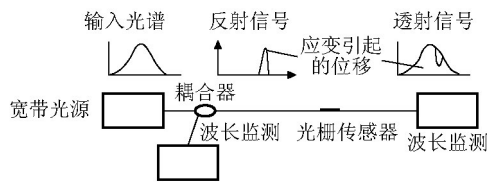


图2 光纤光栅传感器的原理

Fig.2 The principle of fiber Bragg grating sensors

鉴于工程的实际情况,在K14+176.4处的钢波纹管涵的内外侧都按1、2、3、4、5、6测点位置进行光栅应变设置,分别设置I、II、III断面的管圆切向应变以及V断面的管轴向应变(见图3~图5),里外共设置48个测点。K11+203.7处涵管的测点位置采用K14+176.4处的测点布置方案,但由于该圆环型波纹管的波长较大,可以实现波峰、波谷的管轴向光栅粘贴,因此,粘贴断面分别考虑在I、II、III断面设置管圆切向应变,IV、V、VI断面设置管轴向应变,此涵管上光纤光栅传感器的设置数量为72个。为方便布设和提高测试的可靠性,对设置好的各个测试点采取3个应变串联后两头直接连接光缆线的方式通到路基外侧预留的观测箱。

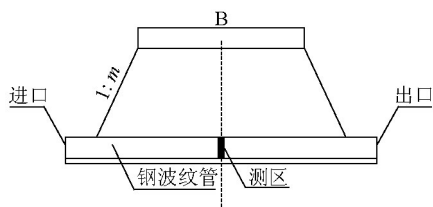


图3 断面示意图

Fig.3 The diagram of cross-section

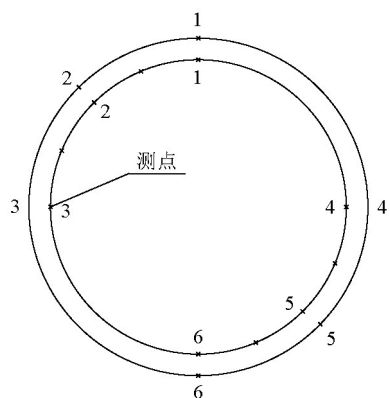


图4 测点示意图

Fig.4 The diagram of measurement points

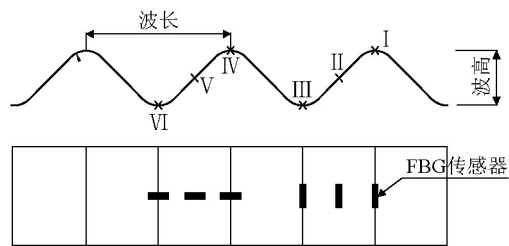


图5 光纤光栅传感器的布置

Fig.5 The arrangement of fiber Bragg grating sensors

注:FBG为光纤布喇格光栅

将FBG传感器粘贴在被测钢波纹管的表面,钢波纹管表面局部变形造成光纤光栅的挤压或伸展,使得光纤光栅的波长发生变化。通过光波检测出光纤光栅Bragg波长的变化,经光纤光栅解调仪分析,输出电信号至计算机进行处理,把波长的变化还原为被测物体位移的变化并定标。实际工程中考虑到测试的方便,兼顾信号传输的可靠性,需要将多个FBG传感器串联,形成简易的传感网络(见图6)。

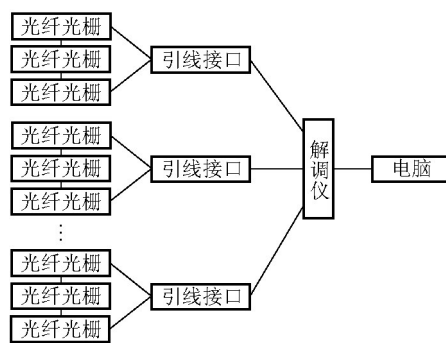


图6 FBG传感器的简易测试网络图

Fig.6 The simple test network diagram of FBG sensor

为了避免光纤光栅传感器在施工过程中受到较大冲击,防止光纤光栅信号传输线在施工过程中被刮坏,制定了相应传感器的布设工艺,且传感器由铠装光缆引出。经过打磨→清洗→粘贴→引线的保护→涵管测试区的保护→传感器光缆的铺设→铠装光缆传输等一系列的光缆布设工艺,光纤安装结束后,检查FBG传感器的完好情况,如果布设的FBG传感器全部完好,说明该工艺过程完全适用于钢波纹管涵洞光纤光栅传感器的安装与保护。图7为铠装光缆。对于K14+176.4处钢波纹管涵洞中央测区波纹的切向和轴向的应变测试,测试中以土体刚好铺筑到钢波纹管涵顶的情况为基准,采用光纤光栅传感器测得的不同填土高度下涵管应变

情况结果如图8、图9所示。

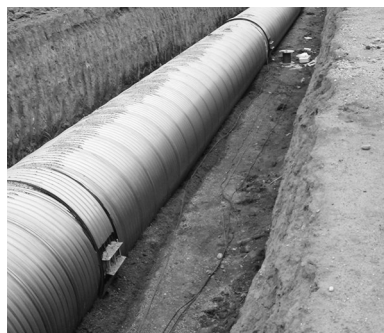


图7 铠装光缆

Fig.7 Shield optical cable

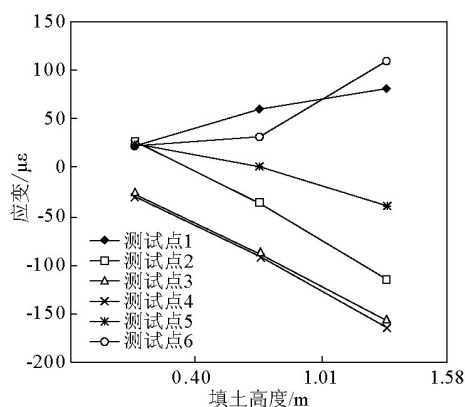


图8 涵管内侧波峰的切向应变增量实测图

Fig.8 The measured figure of tangential strain increment of crest inside the culvert

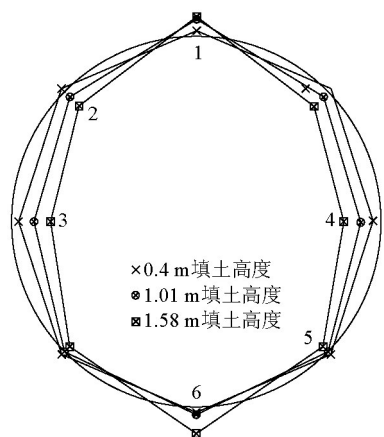


图9 涵管内侧波峰的切向应变增量示意图

Fig.9 The schematic figure of tangential strain increment of crest inside the culvert

测试结果表明,当填土高度大于涵管直径时,涵管的受力状态会逐渐发生变化,同一位置的内外

两个测试点的应力、应变也存在差异,从应变增量数值上看,涵管顶部和涵管底部的变化较为剧烈,其余各测试点的变化不大。在填土高度增加的初期,涵管顶部和底部的应力增量变化不大,而在填土高度增加的后期,涵管顶部和底部应力增量明显。涵管水平直径两端区域基本处于拉应力状态,随着填土高度的增加,其拉应力数值增量略有波动,整体上还是呈现增大趋势。对比钢波纹管涵洞侧壁的光纤光栅传感器的测试结果,软土地基路段的钢波纹管涵洞在地基沉降的过程中,波纹管的侧壁能够起到抵抗轴向拉伸的作用。因此,在填土高度进一步增大以及土体沉降的变化过程中,涵管表现出了轴向拉伸变形的优势,表明钢波纹管能够适应该地区软土地基的变形要求。

4 结语

1)钢波纹管涵洞可以采用标准化设计、生产,有利于降低成本、控制质量,且生产周期短;由于钢结构具有足够壁厚、径向刚度和较大的容许应力,变形后也不易渗漏。

2)根据公路路基设计规范的要求,涵洞处规定路面设计使用年限内残余沉降(即工后沉降)要求 ≤ 0.20 m,软基处理以工后沉降及路基稳定为控制指标。高强度、高柔性钢波纹管涵洞由于其轴向波纹的存在使其具有优良的受力特征,可以更大程度地分散荷载和适应管轴向变形,在较大工后沉降过程中不易造成结构破坏和功能缺失,因此将钢波纹管涵洞与路基的变形同等对待,钢波纹管涵洞处工后沉降要求降低为 ≤ 0.30 m,与一般路基路段工后沉降采用同一标准,从而可降低涵洞基底软土地基处理的工程费用,降低工程总体造价。因此,江苏省软土地区利用钢波纹管修筑道路路基涵洞具有广阔的应用前景。

3)光栅技术相比传统的电测技术有巨大的优越性,采用一系列严格的施工保护工艺,适用于高速公路复杂工况下的钢波纹管涵洞等结构监测,测试精度高、强度高、耐高温、耐腐蚀及可实现远距离实时监测,为钢波纹管涵洞填土施工和运营期间的应变监测提供了准确的数据基础。

参考文献

[1] Li Zhulong. Design and Construction of Highway Corrugated Steel Pipe Culverts[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.

Corrugated steel pipe culvert applying in highway and strain measuring with fiber grating test technology

Cheng Gang¹, Fang Ping²

(1. Jiangsu Provincial Communications Department, Nanjing 210001, China; 2. Jiangsu Provincial Communications Planning and Design Institute Corporation, Nanjing 210000, China)

[Abstract] Two corrugated steel pipe culverts were chosen in north connection highway project of the Fourth Nanjing Yangtze River Bridge. From testing the strain conditions of corrugated steel pipe culvert under different soil fill heights, the fiber Bragg grating sensors were set in the inner or outer of corrugated steel pipe culverts. Corrugated steel pipe culvert has the capacity of larger deformation. So in the soft soil area, using its good ductility can solve the problem of uneven settlement.

[Key words] corrugated steel pipe culvert; highway; soft foundation; field test; fiber test

(上接98页)

Reinforcement design of anchor blocks for external tendons

Hong Hao¹, Tong Yuqiang², He Zhiqi¹, Liu Zhao¹

(1. National Engineering Research Center for Prestressing, Southeast University, Nanjing 210096, China;
2. China Highway Planning and Design Institute (HPDI) Consultants, Inc., Beijing 100088, China)

[Abstract] Reinforced blocks are common anchorage forms for external tendons. However, there was no mature design method. Through finite element analysis, the paper revealed that the tensile stress concentration was caused by three typical local actions. On this basis, three equations for calculating resultant forces of these local actions were formulated. Thus a quantitative reinforcement design method of anchor blocks was proposed. Finally, an anchor block of the Fourth Nanjing Yangtze River Bridge was presented as a design example to demonstrate the effectiveness and convenience of the proposed method.

[Key words] anchor block; external prestressing; reinforcement design; bursting force; cantilever action; tie-back