

圆形截面覆土波纹钢桥涵长期受力性能试验研究

刘保东¹,徐伟博¹,徐道涵²,刘鹏飞¹,田子瀚¹

(1.北京交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044;2.山东省交通规划设计院,济南 250031)

摘 要:以山东某多孔圆形截面波纹钢桥涵为依托,对其土压力和应力进行了长期监测和分析,发现温度和基础沉降对波纹钢桥涵长期受力性能有着较大影响.通过有限元模型具体分析了温度和基础沉降的影响,并对实测数据进行了修正,得出了波纹钢桥涵在填土施工完成后应力和土压力的长期发展规律.结果表明:在施工结束后长期作用阶段,管涵所受土压力变化主要受土体沉降密实的影响,土体沉降密实总体有利于土体与结构相互作用的发挥,而温度对光纤光栅传感器长期测试数据影响较大,去除该影响后各测点应力有所增长,但增长缓慢,且在一段时间以后,甚至有减小趋势,这与土压力长期变化趋势相互印证,说明波纹钢板桥涵长期受力性能将逐渐趋向对结构有利方向发展;基础沉降对管涵应力有一定影响,随沉降值逐渐增加,管中趋于受压,水平土压力也逐渐增加;而管顶趋于受拉,竖向土压力也逐渐减小,说明波纹钢桥涵对于基础沉降有较好的适应性.

关键词:桥梁工程;覆土波纹钢桥涵;有限元分析;温度;基础沉降;力学性能

中图分类号:U449.83 **文献标志码:**A

Experimental study on long term mechanical performance of buried round-pipe corrugated steel culverts

LIU Baodong¹, XU Weibo¹, XU Daohan², LIU Pengfei¹, TIAN Zihan¹

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. Shandong Provincial Communication Planning and Design Institute, Jinan 250031, China)

Abstract:Based on a multi-span circular cross section of corrugated steel culverts in Shandong, it is found that temperature and foundation settlement have great influence on the long-term mechanical performance of corrugated steel culverts after long-term monitoring and analysis of its earth pressure and stress. To analyze the long-term development rule of stress and earth pressure of corrugated steel culverts after the completion of backfilling construction, the influence of temperature and foundation settlement is studied through finite element models, according to which the modified measured data. The results show that earth pressure is influenced by soil settlement after the completion of backfilling, which is generally beneficial to the soil-structure interaction. And temperature has great influence on the long-term test data of fiber grating sensor. The stress of the measuring points increases slowly after eliminating the influence of temperature, and after a certain time, it appears a decreasing trend. The changing tendency of stress is the same as that

收稿日期:2017-05-22
基金项目:山东省交通运输科技计划(2015B31)
Foundation item:Shandong Transportation Technology Plan(2015B31)
第一作者:刘保东(1967—),男,河北廊坊人,教授,博士,博士生导师.研究方向为组合桥梁结构、工程结构抗震及桥梁结构检测、状态评估与加固.email:baodongliu@vip.sina.com.
引用格式:刘保东,徐伟博,徐道涵,等.圆形截面覆土波纹钢桥涵长期受力性能试验研究[J].北京交通大学学报,2018,42(3):66—76.
LIU Baodong, XU Weibo, XU Daohan, et al. Experimental study on long term mechanical performance of buried round-pipe corrugated steel culverts[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(3): 66—76. (in Chinese)

of earth pressure, indicating that the long-term mechanical performance of buried corrugated steel culverts is becoming more and more favorable. The foundation settlement has influence on the pipe stress. With the gradual increase in sedimentation value, the stress on the springline of the culvert is gradually compressed, and the horizontal earth pressure is also increasing. However, the stress on the crown of the culvert gradually pulled, and the vertical earth pressure is gradually decreasing, indicating that the corrugated steel culverts adapt well to foundation settlement.

Keywords: bridge engineering; buried corrugated steel culverts; finite element analysis; temperature; foundation settlement; mechanical performance

覆土波纹钢板桥涵是由波纹钢板和土体组合而成的桥涵结构,通过土体与结构的相互作用,可以将结构上部荷载部分分散到周围土体上,从而有效提高其自身承载能力.相比于混凝土盖板涵,覆土波纹钢板桥涵具有较强的变形适应能力,不仅有利于改善结构物与路堤交界处的“错台”现象,提高路面平整性,并且可以减少建成后的维修费用;施工时利用在工厂加工成型的波纹钢板现场安装,可大大提高施工速度,有效缩短工期;波纹钢板管涵线形非常丰富,可适用于不同的地形地貌,满足不同的使用功能^[1].在我国其结构形式多为圆形,少量使用圆弧拱形.圆形截面波纹钢板管涵在各种功能情况下均使用良好,而且特别适用于高埋深的情况下^[2].

国内外学者对于覆土波纹钢桥涵的短期受力性能进行了大量试验和数值模拟研究,李祝龙等^[3]进行了现场试验,结果表明:钢波纹管涵洞的管顶、管侧沿着波形方向呈现出不同的应力应变变化趋势,波峰和波谷处以及内侧和外侧、切向和轴向的应力应变呈现出管顶与管侧相反的拉压变化规律.白义松^[4]利用 ANSYS 软件并结合现场测试得到在不同工况下涵洞的应变与应力的变化规律,并指出波纹钢管涵洞由于轴向波纹的存在,使其具有优良的受力特征,可以通过轴向和切向的应变,有效地分散外荷载作用及基础冻胀的影响.聂骁隼^[5]对多年冻土地区波纹钢管涵的温度场及受力性能进行了研究,测试了 3 m 直径波纹管不同位置在施工过程中随土压力增加的受力情况和不同活载工况下波纹管涵受力变形情况,并结合有限元分析得出管涵的变形及冻胀变化规律.彭立等^[6]结合湖南某钢波纹管涵工程,对其力学性能进行了现场测试和有限元分析,并探讨了钢管波纹参数、管顶填土高度、地基不均匀沉降等多种因素对钢波纹管涵应力和变形的影响,结果表明,钢波纹管最大变形和等效应力随波高、土体弹模增大而减小,随波距增加而增大.Esra Bayoğlu Flener 等^[7]对瑞典某大跨度拱形波纹钢涵洞的回填施工和使用进行了现场试验,在静动载试

验中测试了管涵的应变、位移和温度,并与理论值进行了对比分析,结果显示,温度能影响传感器读数,应对其进行修正.Damian Beben 等^[8]对正常工作荷载作用下的公路波纹钢板涵洞进行了持续 24 h 的现场监测试验,试验测得选定断面的应变和位移,研究了波纹钢板涵洞的现场受力性能.试验结果表明:工作荷载下管涵应力和变形都较小,最大值在管顶位置,车辆荷载小于 250 kN 时变形可以忽略,管顶填土的正土拱效应也降低了应力和变形.

在长期受力性能方面,Ossama Salem 等^[9]把由俄亥俄州交通部获得的在不同环境下公路过水波纹钢涵洞的变形、腐蚀等检查数据通过二元变量回归分析提出了波纹钢涵洞的初步退化模型,以确定影响涵洞腐蚀的主要因素.Van Thien Mai 等^[10]为了研究腐蚀对波纹钢管涵性能的影响,对从现场挖出的腐蚀程度不同的两个波纹钢管涵在实验室中做了荷载试验,结果表明,在回填土时,由于管涵和回填土的刚度各不相同,被腐蚀的管涵的变形远大于未被腐蚀的管涵;并且在埋深较浅时表面荷载对被腐蚀管涵的影响比埋深较深时的要大.

通过以上的分析可以看出,研究者大多关注波纹钢桥涵的短期受力性能,在长期性能方面比较关注腐蚀的影响,而对其施工完成后的长期受力性能演变规律的研究基本还没有展开.本文作者拟采用试验与有限元数值模拟相结合的方法,对实际圆管涵工程施工结束后的长期受力性能进行监测,并通过建立有限元模型考虑长期温度变化和基础沉降的影响,对长期监测数据进行修正,得出波纹钢桥涵在填土施工完成后应力和土压力的长期发展规律,为以后波纹钢桥涵的应用和研究提供参考.

1 工程简介及测试方案

1.1 工程概况

本文研究依托山东某多孔圆形截面波纹钢桥涵,该波纹钢桥涵 5 孔并排,相邻间距 1.2 m,总跨度 27 m,管顶以上填土高度 0.7 m;圆管直径 4 m,

全长 36.5 m,采用的波纹钢波形为 200 mm×55 mm,钢板厚度 6 mm,材料为 Q235 钢板,钢板材料特性如表 1 所示;工程施工回填采用砂性土,回填土材料性质说明如表 1 所示.

表 1 波纹钢管和覆土材料特性

Tab.1 Properties of corrugated steel pipe and soil cladding materials

材料	弹性模量 E /GPa	泊松比 ν	密度 ρ / (kg/m ³)	热膨胀系数 α $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	屈服强度 σ /MPa	黏聚力 C /kPa	内摩擦角 φ /($^{\circ}$)	压实度/%
波纹钢管	206.00	0.30	7 850	12.00	235	—	—	—
回填砂性土	0.03	0.32	1 900	0.55	—	0	30	96

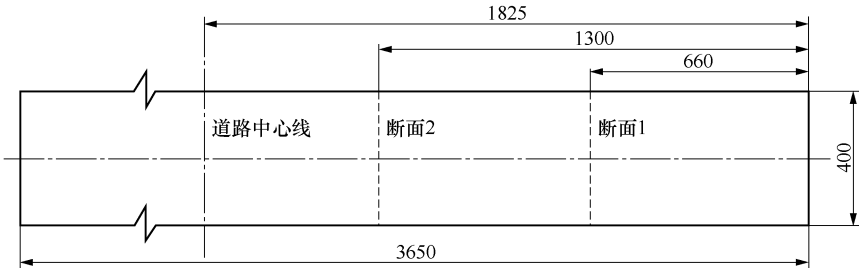


图 1 测区布置(单位:cm)

Fig.1 Arrangement of survey areas (unit:cm)

1.2 光纤光栅传感器布置及应力测试方案

由于该试验需要监测管涵在运营期间的长期受力状况,试验周期较长,使用传统电阻式应变片只能测量施工期间管涵的应变,无法满足长期试验的要求^[11],因此本试验采用 SI425 光纤光栅采集仪,并配套使用光纤光栅应变传感器和光纤温度计,测量波纹钢板桥涵在回填完成后一段周期内各个工况下的应力及温度.

应用光纤光栅传感器测量应变时,温度和应变的变化是同时发生的,无法得知应变和温度各自引起的传感器波长变化,因此需要采取措施进行温度补偿^[12].其原理是将一光栅温度计放置在光纤光栅应变传感器附近,该光栅温度计不会受应变影响,仅能测量温度的变化.假设两者所处相同温度场,利用光栅温度计测得波长移动后,消除光纤光栅应变传感器测量波长移动过程中温度引起的波长干扰,即实现了温度补偿^[13-14].

应力计算公式为

$$\delta = (\epsilon - \epsilon_t) \times E \tag{1}$$

式中: ϵ 为光纤光栅传感器测量应变值; ϵ_t 为温度对传感器产生应变; E 为弹性模量.

两个断面均在结构波腰(波峰与波谷间位置)处布置 4 个测点:管顶(测点 1)、管侧 45°角(测点 2)、管中跨径最大处(测点 3)及温度测点(测点 4),两个断面共计 8 个测点.其中断面 1 测点布置见图 2.

测区选取其中一孔内外两侧车道的中心线位置:断面 1(外侧车道中心线),断面 2(内侧车道中心线).断面 1 距离管口 6.6 m,断面 2 距离管口 13 m,各测区位置如图 1 所示.

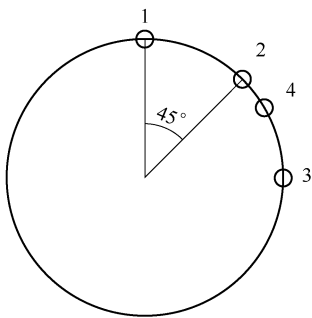


图 2 光纤光栅测点布置

Fig.2 Measuring points arrangement of fiber grating sensor

1.3 土压力测点布置及测试方案

土压力试验监测采用便携式振弦采集仪测量了结构在回填完成后一段周期内的各个工况下水平土压力和竖向土压力.

测点布置如图 3 所示,对于测区 1,在结构管中跨径最大处布置第一层土压力盒(测点 1 和 2);填土

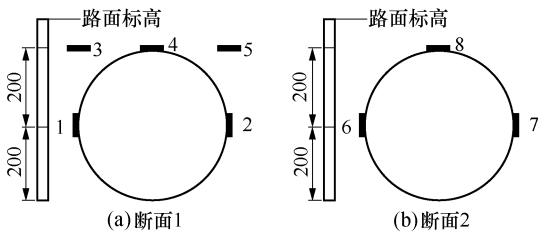


图 3 测区 1、2 土压力测点布置图(单位:cm)

Fig.3 Earth pressure measuring points of survey area 1 and 2(unit:cm)

至管顶时,在管顶正中间和管顶左右两侧布置第二层土压力盒(测点 3、4、5).对于测区 2,仅在管顶正中间和管中跨径最大处布置土压力盒(测点 6、7、8),两个测区共计布置 8 个测点.

2 测试结果及分析

2.1 应力结果及分析

试验测量了管顶、管侧斜向 45°和管中跨径最大位置处在土基回填完成后,不同工况下光纤光栅应变传感器和光纤温度计的数值变化,最终得到了各个测点应力数值以及测量工况的温度变化,进一步分析了管涵应力长期发展规律.

测区 1、2 各工况下的温度变化如表 2 所示,该温度为对应于初始安装传感器时刻的温度变化值.

表 2 测区温度变化值

Tab.2 Temperature change values of survey areas °C

测试工况	测区 1	测区 2	测试工况	测区 1	测区 2
土基回填完成	-1.4	-4.4	130 d 后	-0.1	-2.4
45 d 后	3.9	1.4	165 d 后	-6.5	-9.3
75 d 后	4.5	2.5	237 d 后	-19.0	-22.3
90 d 后	4.3	2.1	340 d 后	-1.5	-4.5
606 d 后	-22.3	-25.3			

下面将以上的温度变化与各测区传感器测得的应力监测变化一同来分析.

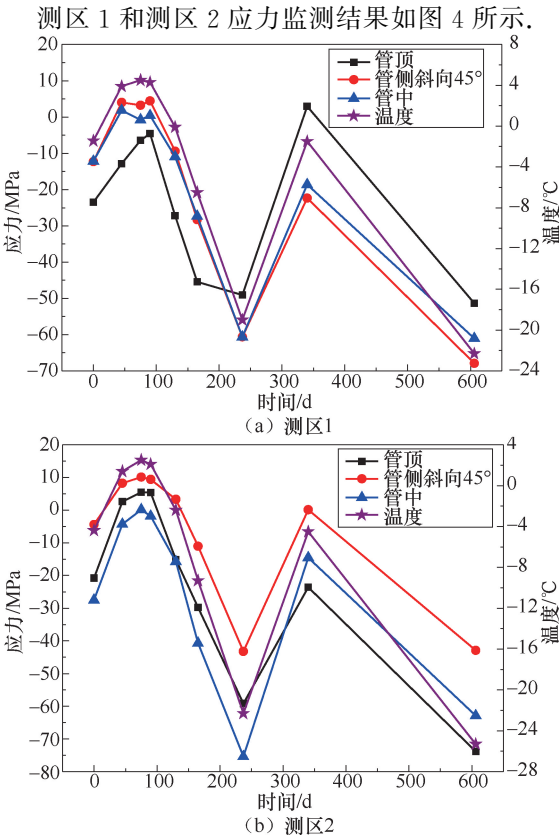


图 4 测区应力值
Fig.4 Press values of survey areas

由图 4 分析可知,测区 1 和测区 2 温度相差不大,故两个测区应力变化趋势基本相同.在土基回填完成时到 90 d 后,此阶段温度变化不大,各测点应力也基本不变;之后温度逐渐降低,各测点压应力也逐渐增大;340 d 之前温度有所回升,各测点压应力也随之减小;606 d 之前温度再次降低,而各测点压应力也再次增大.因此,可以看出管中测点、管侧斜向 45°测点、管顶测点压应力实测值与温度变化趋势一致,均随温度降低而增大,随温度升高而减小.

结合现场实际情况分析原因可知:因为温度对光纤光栅传感器的影响要比对结构的影响大,因此,随温度降低,管涵收缩,使得光纤光栅传感器测得的压应变增大;温度升高,管涵膨胀,使得光纤光栅传感器测得的拉应变增大.故管中测点、管侧斜向 45°测点、管顶测点压应力实测值均随温度降低而增大,随温度升高而减小.

综上所述,结合测区 1 和测区 2 各测点实测变化趋势可以看出,随温度周期性的变化,应力也呈现周期性变化规律,说明研究波纹钢板桥涵长期受力性能应去除温度的影响.

2.2 土压力结果及分析

测区 1 和测区 2 各工况下温度、水平土压力和竖向土压力监测结果如图 5 所示.

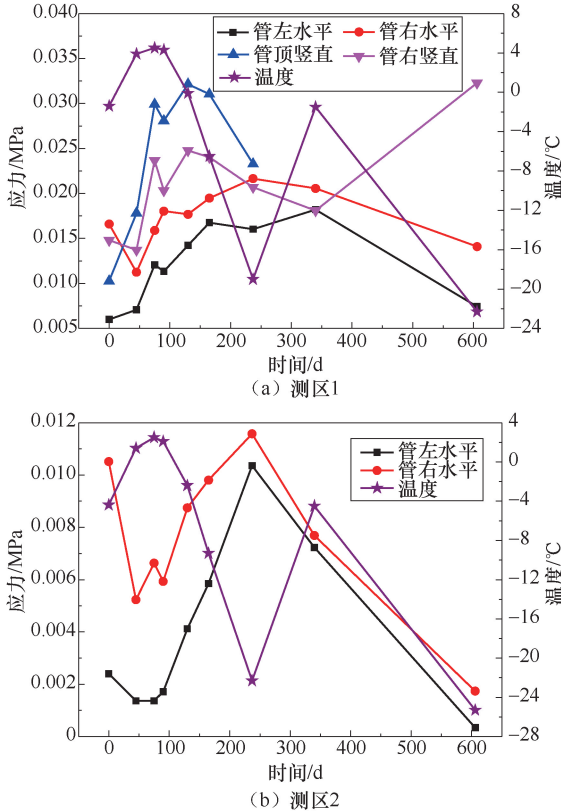


图 5 测区土压力值
Fig.5 Earth pressure values of survey areas

其中,由于测区 1 管顶左侧以及测区 2 管顶正中间土压力盒在施工过程中损坏,因此只剩下测区 1 管顶正中间和管顶右侧的 2 个竖向土压力盒,测区 1 管顶正中间土压力盒在 237 d 后也损坏。

由图 5 分析可知,测区 1 和测区 2 水平土压力和竖向土压力在土基回填完成后的变化趋势并没有像应力一样与温度呈现同样的周期性变化规律,温度对结构所受土压力的影响不显著,但为了研究波纹钢板桥涵在施工完成后土压力的长期发展规律,土压力监测结果应去除温度的影响。

3 考虑温度及沉降影响的有限元分析

3.1 有限元模型的建立

由于管涵纵向长度远大于管涵直径,本文作者根据抗弯刚度等效的原则,取纵向单位长度的管涵进行计算,将模型简化为平面应变问题,采用二维平面应变模型来进行计算^[15],建立有限元模型时,波纹钢管涵采用可承受拉、压、弯作用的 beam3 二维梁单元,波纹钢板截面积和惯性矩均为单位长度的截面积和惯性矩,由所选用的波纹钢板型号确定^[16];土体采用可以适应不规则形状的 plane82 二维平板单元来模拟;管涵和土体之间的接触采用 target169 和 contact172 单元来模拟。根据本文结构参数,可以建立如图 6 所示的有限元模型,通过对实际施工过程中位移实测值和有限元模型的计算结果的对比可以证明该有限元模型的有效性^[17]。

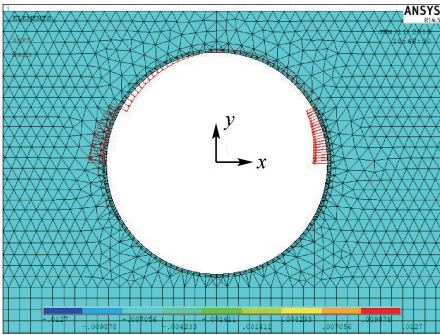


图 6 有限元模型图

Fig.6 Finite element model diagram

为了得到结构长期性能演变规律,需要在监测数据中去除温度和基础不均匀沉降的影响,将现场各工况实测管涵温度以温度荷载的方式施加到有限元模型上,从而得到在重力荷载和温度荷载共同作用下,管涵各点应力值以及水平土压力和竖向土压力值;通过对建立的二维平面应变有限元模型底部施加强制位移约束,来模拟管涵基础沉降。

3.2 考虑温度影响的有限元分析

根据现场各工况实测管涵温度,将其以温度荷载的方式施加到有限元模型上,从而得到在重力荷载和温度荷载共同作用下管涵各点应力值以及水平土压力和竖向土压力值。

3.2.1 土压力分析

圆形截面波纹钢板桥涵测区 1、2 水平土压力和竖向土压力有限元计算值及各工况温度值见图 7。

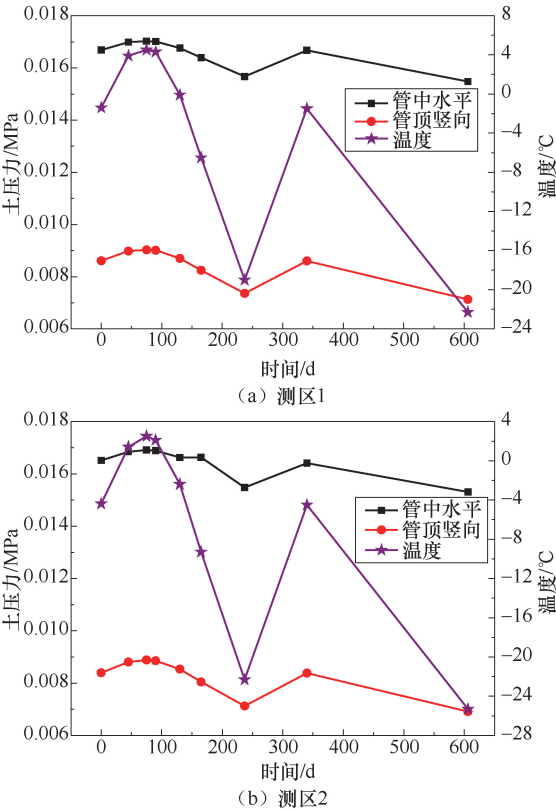


图 7 土压力有限元计算值

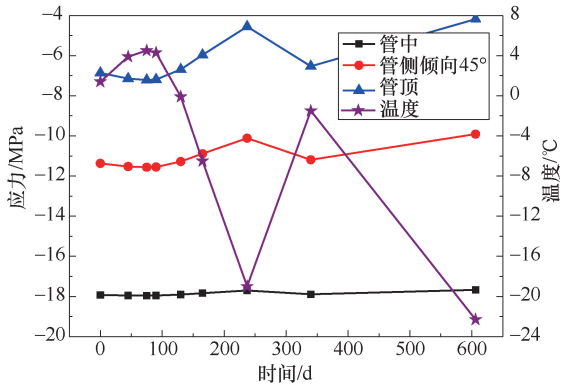
Fig.7 Finite element values of earth pressure

由图 7 分析可知,测区 1 和测区 2 温度相差不大,故两个测区土压力变化趋势基本相同。土基回填完成时到 90 d 后,此阶段温度变化不大,水平和竖向土压力也基本保持不变;130 d 后,温度逐渐降低,水平和竖向土压力也逐渐减小;340 d 后,温度升高,水平和竖向土压力有所增加;606 d 后,温度再次降低,水平和竖向土压力也再次减小。因此,可以看出水平土压力和竖向土压力均随温度降低而减小,随温度升高而增加。

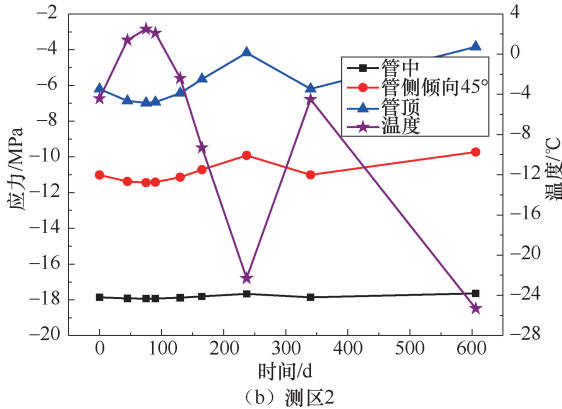
3.2.2 应力分析

圆形截面波纹钢板桥涵测区 1 和测区 2 管顶、管侧斜向 45°、管中测点应力有限元计算值及各工况温度值如图 8 所示。

由图 8 可知,测区 1 和测区 2 温度相差不大,故两个测区应力变化趋势基本相同。土基回填完成时到



(a) 测区1



(b) 测区2

图 8 应力有限元计算值

Fig.8 Finite element values of stress

90 d 后,此阶段温度变化不大,各测点压应力也基本保持不变;130 d 后,温度逐渐降低,3 个测点压应力均逐渐减小;340 d 后,温度升高,3 个测点压应力有所增加;606 d 后,温度再次降低,而 3 个测点压应力也再次减小.因此,可以看出管中测点、管侧斜向 45° 测点、管顶测点压应力均随温度降低而减小,随温度升高而增加.而且,管顶应力变化最明显.

3.3 考虑基础沉降影响的有限元分析

该管涵地处煤矿采空区,通过通车运营后圆形截面波纹钢板桥涵附近现场拍摄的照片可以看出,在外侧车道中心线处路面发生较大沉降,如图 9 所示.因此,本节通过对建立的二维平面应变有限元模型底部施加强制位移约束来模拟管涵基础沉降.



(a) 整体路面沉降



(b) 局部路面沉降

图 9 管涵附近路面沉降照片

Fig.9 Photos of pavement settlement

around the culvert

3.3.1 土压力分析

圆拱形截面波纹钢板桥涵竖向土压力和水平土压力在不同基础沉降值下有限元计算值如图 10 所示,其中,沉降值分别为 10、20、30、40、50 mm.

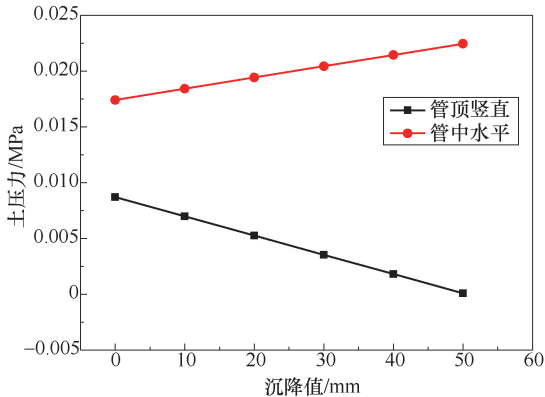


图 10 基础沉降影响下土压力有限元计算值

Fig.10 Finite element values of earth pressure affected by foundation settlement

由图 10 分析可知,随着基础沉降值逐渐增加,管涵管中水平土压力逐渐增加,管顶竖向土压力逐渐减小,水平和竖向土压力均随沉降值增加呈线性变化趋势.而且,基础沉降过程中时,竖向土应力变化比水平土应力变化明显.

3.3.2 应力分析

波纹钢板桥涵各测点应力在不同基础沉降值下有限元计算值如图 11 所示.

由图 11 分析可知,随着基础沉降值逐渐增加,管涵管中测点逐渐受压,压应力逐渐增加;管涵管顶测点逐渐受拉,拉应力逐渐增加;管涵管侧斜向 45° 测点应力则变化不大.因此,各测点随沉降值增加均呈线性变化,管涵管顶拉应力增加比管中压应力增加明显,而管涵管侧斜向 45° 测点应力可视为不变.

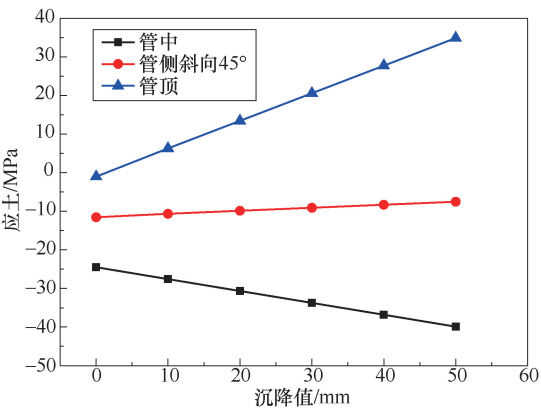


图 11 基础沉降影响下应力有限元计算值

Fig.11 Finite element values of stress affected by foundation settlement

4 波纹钢桥涵长期受力性能规律分析

4.1 土压力长期演变规律分析

4.1.1 考虑温度影响的修正

研究表明^[18],环境温度的剧烈变化,会对土压力盒的读数有一定影响,且土压力盒读数的变化趋势基本与环境温度变化趋势相同.温度对土压力盒读数的影响分为两部分,一部分是温度变化对土压力盒中钢弦的影响,另一部分是温度变化引起管涵变形而对结构周围土压力的影响.本文采用的土压力盒内置了温度传感器,会对外界温度影响产生的变化进行温度修正,所以只考虑管涵热胀冷缩对周围土体的影响,将温度对结构所受土压力产生的影响去掉以后再对其长期变化规律进行分析.

将测区 1 和测区 2 各测点现场实测土压力值减去有限元分析计算所得温度对各测点土压力的影响值,得到的测区 1、测区 2 水平土压力和竖向土压力值如图 12 所示.

由图 12 分析可知,在土基回填完成后 45 d 时,除测区 1 管左外,测区 1、测区 2 其他各测点水平土压力均有所减小,而测区 1 管顶竖向土压力则有所增大;从土基回填完成 45 d 后开始到土基回填完成 130 d 后阶段内,测区 1、测区 2 各测点水平土压力和竖向土压力均逐渐增加;之后到土基完成 237 d 内竖向土压力有逐渐减小的趋势,而水平土压力仍有所增加;从土基完成 237 d 之后的两个测试值出现了相反的变化趋势,测区 1 在土基回填完成 606 d 时,水平土压力明显减小,而竖向土压力则明显增加,测区 2 在土基回填完成 340 d 后,水平土压力也显著减小.

结合现场实际情况分析原因可知:土基回填完成后 45 d 时,由于此时施工暂时结束,施工机械暂时退场,管涵变形有所恢复,因此,测得测区 1 和测区 2 水

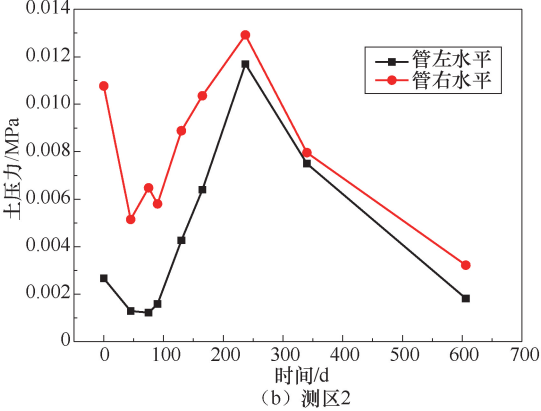
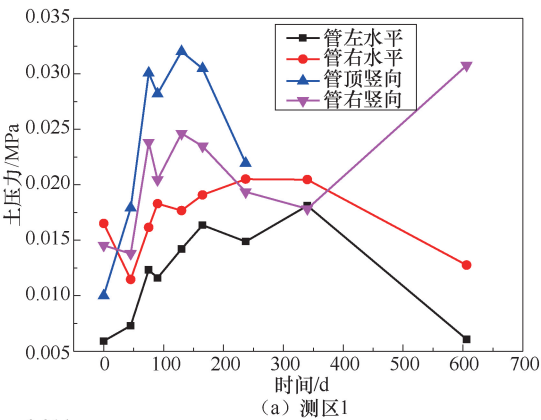


图 12 测点土压力值

Fig.12 Earth pressure points of survey

平土压力均有所减小,而竖向土压力则有所增加.从土基回填完成 75 d 后开始,基层和面层开始填筑,随填土高度的逐渐增加,两个测区各测点水平土压力和竖向土压力均有所增长.土基回填完成 130 d 后,管顶以上施工基本结束,管涵受力不再受施工影响,测区 1 竖向土压力呈现逐渐减小的趋势,同时,测区 1 水平土压力仍有所增加,考虑这可能是因为管涵受基础沉降影响所致.而测区 1 在土基回填完成 606 d 时,水平土压力显著减小,竖向土压力显著增加,测区 2 在土基回填完成 340d 后,水平土压力显著减小,这与现场实测管涵水平方向有所内凹的变形状态相对应,因为现场管涵内部长期有水,无法观测结构变形状态,只在土基回填完成后 606 d 内部结冰时测量了管涵水平方向位移,测量结果显示,此时管涵水平方向相对填土至管顶时向内侧移动了 15.84 mm.

4.1.2 考虑基础沉降的修正

假设从 130 d 施工完毕开始,在长期监测各测试工况下,管涵沉降值分别为 10、15、20、30、50 mm,得到只考虑管涵沉降的土压力变化规律如图 13 所示.

由图 13 可以看出,管涵测区 1 从土基回填完成 130 d 后开始,随基础不断沉降,管涵所受竖向土压力逐渐减小,水平土压力逐渐增大,与测试结果趋势吻合,该过程是结构不断适应基础沉降的过程,证明了

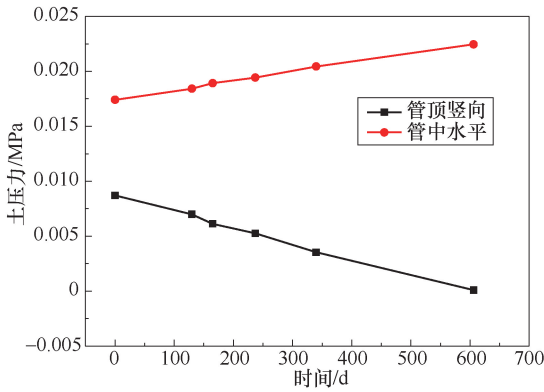


图 13 基础沉降作用下的土压力值

Fig.13 Earth pressure values effected by foundation settlement

相比传统混凝土盖板涵,波纹钢板桥涵对于不良地质条件的适应性更好。

为了单独讨论结构长期性能演变规律,下面将该沉降过程导致的土压力变化去除,管涵测区 1 修正后的土压力如图 14 所示。

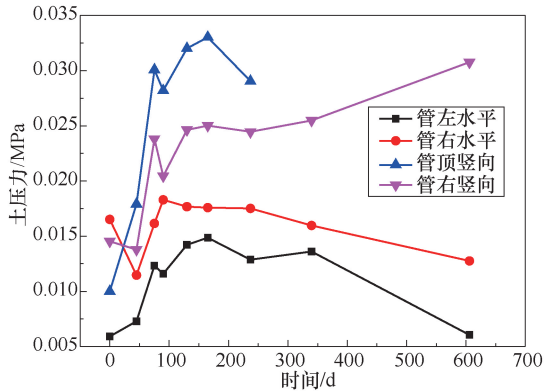


图 14 测区 1 修正后的土压力值

Fig.14 Corrected earth pressure values of survey area 1

由图 14 分析可知,对于圆形截面波纹钢板桥涵测区 1 来说,当去除基础沉降对土压力的影响后,管涵各测点修正后的土压力值随时间推移变化将不再明显。从土基回填完成开始到土基回填完成 130 d 后阶段内,管顶以上面层和基层施工仍未完全结束,受施工影响,测区 1 各测点所受土压力变化较为明显,且无明显规律;从土基回填完成 130 d 后开始,水平土压力逐渐减小,竖直土压力逐渐增加。

4.2 应力长期演变规律分析

4.2.1 考虑温度影响的修正

前面有限元模型已经分析了温度变化对结构受力的影响,而温度变化也会导致应变传感器随钢板热胀冷缩而产生应变。因此,为了能够单独研究分析土-结相互作用下结构应力长期发展规律,需要消除温度对结构受力的影响,并对应变传感器进行温度修正。

应变传感器的温度修正,可以取传感器的实际应力值与根据式(2)求得传感器随温度变化产生的应力之和。

热应力计算公式为

$$\sigma = E\alpha\Delta t \tag{2}$$

式中: σ 为由温度变化产生的轴向应力; E 为材料弹性模量; α 为材料线膨胀系数; Δt 为温度改变量。

本文钢材的弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5$ MPa,钢材的线膨胀系数 $\alpha = 1.2 \times 10^{-7}$,不同工况温度改变量由光纤光栅温度计测得。

在结构没有受到约束时,温度变化结构只会产生热应变,而在受到完全约束的情况下,温度变化结构则只会产生热应力。故需要根据有限元模型计算求得的结构在填土约束下产生的热应力,计算出钢板在约束作用下实际产生的热应变(实际产生的热应变 = (热应力计算公式求得的热应力 - 有限元模型计算求得的热应力)/钢板的弹性模量),再对温度的影响进行修正。

将测区 1、2 各测点在各个工况下经过对传感器进行温度修正后的应力计算值减去有限元模型的计算热应力值,得到测区 1、2 各测点各个工况下的最终应力值,如图 15 所示。

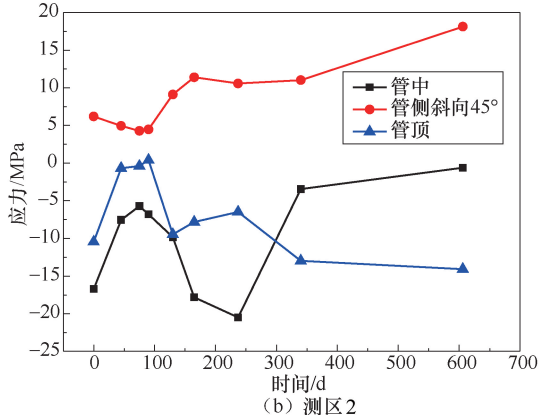
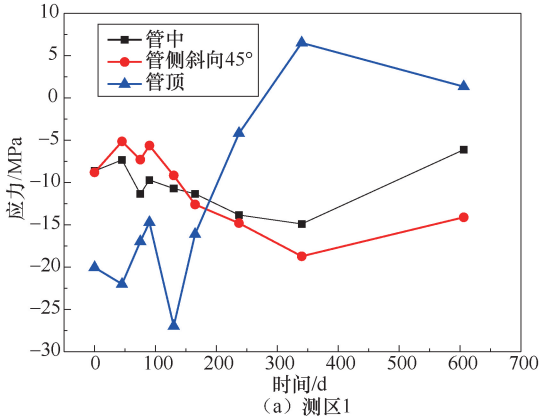


图 15 测区应力值

Fig.15 Press values of survey areas

由图 15 分析可知,从土基回填完成时到土基回

填完成 130 d 后阶段内,测区 1 和测区 2 各测点所受应力变化较为明显,且无明显规律;从土基回填完成 130 d 后开始,测区 1 和测区 2 管中压应力逐渐增加,而管顶拉应力逐渐增加;在土基回填完成 237 d 后,测区 2 各测点应力向相反方向变化,而在土基回填完成 340 d 后,测区 1 各测点应力向相反方向变化。

结合现场实际情况分析原因可知:从土基回填完成时到土基回填完成 130 d 后阶段内,管顶以上面层和基层施工仍未完全结束,受施工影响,管涵各测点所受应力变化较大;从土基回填完成 130 d 后开始,管顶以上施工基本结束,管涵受力不再受施工影响,测区 1 和测区 2 管中压应力逐渐增加,而管顶拉应力逐渐增加,考虑是由于管涵受基础沉降影响所致;而之后测区 1 和测区 2 各测点应力相继有向相反方向变化趋势,这都与现场实测管涵水平方向有所内凹的变形状态相对应。

4.2.2 考虑基础沉降的修正

同样从土基回填完成 130 d 后开始,利用有限元模型对基础沉降影响的数值分析结果,将该阶段内管涵所受应力进行修正。

只考虑沉降过程的情况下,管涵各测点应力变化规律如图 16 所示。

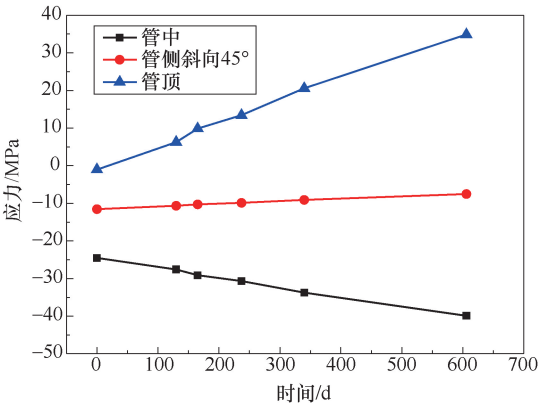


图 16 基础沉降作用下的应力值

Fig.16 Stress values effected by foundation settlement

由图 16 可以看出,管涵测区 1 从土基回填完成 130 d 后开始,随基础不断沉降,管涵管顶测点拉应力逐渐增大,管中测点压应力逐渐增大,而管侧斜向 45°测点应力变化不大.结合基础沉降作用下结构所受土压力变化规律,可以看出该类结构对于基础沉降有较好的适应性。

为了单独讨论结构长期性能演变规律,下面将该沉降过程导致的应力变化去除,管涵测区 1 修正后的应力如图 17 所示。

由图 17 分析可知,对于圆形截面波纹钢板桥涵

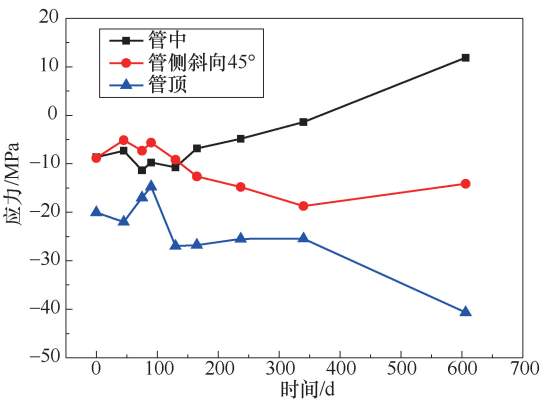


图 17 测区 1 修正后的应力值

Fig.17 Corrected stress values of survey area 1

测区 1 来说,当去除基础沉降对应力的影响后,管涵各测点修正后的应力值随时间推移变化将不再明显.从土基回填完成时到土基回填完成 130 d 阶段内,管顶以上面层和基层施工仍未完全结束,受施工影响,测区 1 各测点所受应力变化较为明显,且无明显规律;从土基回填完成 130 d 后开始,管中和管顶压应力逐渐减小,而管侧斜向 45°测点应力逐渐增加;在土基回填完成 340 d 后,测区 1 各测点应力向相反方向变化,管中由压应力变为拉应力。

4.3 土压力与应力对比分析

为了进一步分析管涵所受土压力和应力的长期变化规律,将测区 1 土压力实测值与应力实测值对比分析,如图 18 所示。

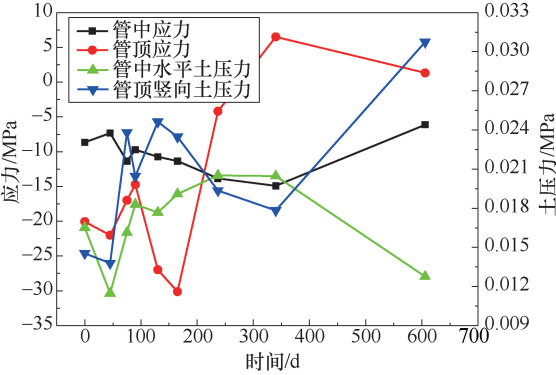


图 18 测区 1 测点应力与土压力对比

Fig.18 Comparison between stress and earth pressure of points in survey area 1

由图 18 对比分析可知,从土基回填完成时到土基回填完成 130 d 后阶段内,管顶以上面层和基层施工仍未完全结束,该过程管涵受力受施工影响较大.其中,在土基回填完成 45 d 时,施工暂时结束,施工机械暂时退场,管涵变形有所恢复.因此,此时测得测区 1 管中水平土压力有所减小,管中测点受拉,管中压应力也相应减小,而管顶竖向土压力有所增加,管顶测点受压,管顶压应力也相应有所增加。

从土基回填完成 75 d 后开始,随着基层和面层填筑高度的逐渐增加,测区 1 各测点水平土压力和竖向土压力均有所增长,而管顶应力和管中应力也有所增长。

从土基回填完成 130 d 后开始,管顶以上基层和面层施工基本结束,管涵受力不再受施工影响,由于管涵竖直方向沉降变形,测区 1 管顶竖向土压力逐渐减小,管顶测点压应力也相应减小,并逐渐趋向受拉,而管中水平土压力逐渐增大,管中压应力也相应增大。土基回填完成 606 d 时,随着管涵两侧回填土体的沉实以及管涵竖直方向外凸的变形,管顶竖向土压力明显增大,管顶又趋向受压状态,而管中水平土压力明显减小。基本上,土压力监测结果与应力监测结果可以相互验证,这也说明结构自身应力与所受土压力之间具有相关性。

5 结论

本文通过现场对圆形截面波纹钢板桥涵在填土施工完成后应力与土压力的长期监测以及建立的二维平面应变有限元模型的分析,对波纹钢板桥涵长期受力性能的发展规律及其主要影响因素进行了研究分析,得到了以下几点结论:

1) 根据现场实测数据可以看出,随温度周期性的变化,光纤光栅传感器测量得到的应力也呈现周期性变化规律;但温度对结构所受土压力影响并不显著。

2) 在施工结束后长期作用阶段,管涵所受土压力主要受土体沉降密实的影响,在施工结束后初期,随着土体密实性逐渐增加,水平土压力和竖向土压力均有所增加,在施工结束后后期,随着土体沉降密实基本完成,水平土压力和竖向土压力也基本不再增长,甚至有逐渐减小的趋势。

3) 温度对光纤光栅传感器长期测试数据影响较大,去除温度影响后波纹钢板桥涵在填土施工完全结束后的长期阶段,其各测点所受应力有所增长,但增长缓慢,且在一段时间以后,其所受应力甚至有减小趋势,这与土压力长期变化趋势相互印证,说明波纹钢板桥涵长期受力性能将逐渐趋向对结构有利的方向发展。

4) 基础沉降对波纹钢桥涵受力有一定影响,随沉降值逐渐增加,管中逐渐受压,压应力逐渐增加,水平土压力也逐渐增加;而管顶逐渐受拉,拉应力逐渐增加,竖向土压力逐渐减小,说明波纹钢板桥涵对于基础沉降有较好的适应性。

参考文献 (References):

- [1] 郭新春, 梁养辉, 胡滨, 等. 钢波纹管在公路涵洞工程中的应用研究[J]. 公路交通技术, 2013(4):113—115.
GUO Xinchun, LIANG Yanghui, HU Bin, et al. Research on application of corrugated steel pipes in highway culvert projects[J]. Technology of Highway and Transport, 2013(4):113—115. (in Chinese)
- [2] 张闻达. 波纹钢板小桥合理形式研究[D]. 西安:长安大学, 2013.
ZHANG Wenda. The applicability study of corrugated steel structure on small bridges and culverts[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [3] 李祝龙, 刘百来, 李自武. 钢波纹管涵洞力学性能现场试验研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(3):79—82.
LI Zhulong, LIU Bailai, LI Ziwu. Field mechanical performance test of corrugated steel culvert[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(3):79—82. (in Chinese)
- [4] 白义松. 小孔径波纹钢管涵洞在公路工程中的应用研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2009.
BAI Yisong. Application research of ripple steel tube culvert of small aperture in highway engineering[D]. Harbin:Northeast Forestry University, 2009. (in Chinese)
- [5] 聂晓隼. 多年冻土地区钢波纹管涵洞温度场及受力分析研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2015.
NIE Xiaojun. Analysis of corrugated steel pipe culvert's temperature field and stress in permafrost region[D]. Chongqing:Chongqing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [6] 彭立, 张阳, 穆程, 等. 高填土大跨波纹钢管涵力学性能分析与测试[J]. 中外公路, 2016(6):103—108.
PENG Li, ZHANG Yang, MU Cheng, et al. Mechanical performance analysis and test of high fill steel corrugated pipe culvert[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2016(6):103—108. (in Chinese)
- [7] FLENER E B, KAROUMI R, SUNDQUIST H. Field testing of a long-span arch steel culvert during backfilling and in service[J]. Structure & Infrastructure Engineering, 2005, 1(3):181—188.
- [8] BEBEN D. Field performance of corrugated steel plate road culvert under normal live-load conditions [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2013, 27(6):807—817.
- [9] SALEM O, SALMAN B, NAJAFI M. Culvert asset management practices and deterioration modeling[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2012, 2285(-1):1—7.
- [10] MAI V T, HOULT N A, MOORE I D. Effect of deterior-

- ration on the performance of corrugated steel culverts[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(2):04013007.
- [11] 信思金, 梁磊, 左军. 光纤光栅传感技术在重大工程结构诊断与监测中的应用[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2005, 26(3):52—55.
- XIN Sijin, LIANG Lei, ZUO Jun. Application of fiber Bragg grating sensing technology in major engineering structure diagnosis and monitoring [J]. Journal of Henan University of Science & Technology (Natural Science), 2005, 26(3):52—55. (in Chinese)
- [12] 胡辽林, 张卫超. 基于参考光栅的光纤光栅应变测量温度补偿[J]. 实验室研究与探索, 2014, 33(11):39—41.
- HU Liaolin, ZHANG Weichao. Temperature compensation of FBG strain measurement based on reference FBG [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2014, 33(11):39—41. (in Chinese)
- [13] 姚远, 易本顺, 肖进胜, 等. 光纤布拉格光栅传感器的温度补偿研究[J]. 应用激光, 2007, 27(3):192—200.
- YAO Yuan, YI Benshun, XIAO Jinsheng, et al. Temperature compensation for fiber Bragg grating sensors [J]. Applied Laser, 2007, 27(3):192—200. (in Chinese)
- [14] 田石柱, 赵雪峰, 欧进萍, 等. 结构健康监测用光纤 Bragg 光栅温度补偿研究[J]. 传感器技术, 2002, 21(12):8—10.
- TIAN Shizhu, ZHAO Xuefeng, OU Jinping, et al. Research on temperature compensation of fiber Bragg grating for structural health monitoring[J]. Journal of Transducer Technology, 2002, 21(12):8—10. (in Chinese)
- [15] 李百建, 符铎. 波形钢板三维模型与二维模型对比研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(23):5913—5917.
- LI Baijian, FU Xinshe. Comparative study on three dimensional model and two-dimensional model of corrugated steel plate[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(23):5913—5917. (in Chinese)
- [16] 刘保东, 尹航, 冯芝茂, 等. 基于土-钢共同作用模型的覆土波纹钢板拱桥施工过程受力分析[J]. 北京交通大学学报, 2009, 33(4):65—68.
- LIU Baodong, YIN Hang, FENG Zhimao, et al. Mechanics behavior of buried corrugated steel arch bridge based on soil-steel interaction mode during construction[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2009, 33(4):65—68. (in Chinese)
- [17] 孙海波, 刘鹏飞, 刘保东, 等. 不同断面线形波纹钢管涵结构力学性能研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(10):75—81.
- SUN Haibo, LIU Pengfei, LIU Baodong, et al. Study on structural mechanical performance of corrugated steel pipe culverts with different cross-section shapes [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(10):75—81. (in Chinese)
- [18] 张信贵, 易念平, 韦珊珊. 消除土压力盒温度应力影响的试验方法[J]. 工业建筑, 2004(增 2):349—351.
- ZHANG Xingui, YI Nianping, WEI Shanshan. Test method to eliminate the influence of temperature stress on earth pressure box [J]. Industrial Construction, 2004(S2):349—351. (in Chinese)