

涵洞钢波纹管力学特性试验技术

秦晓峰

中交中南工程局有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i7.18226

[摘要] 本文聚焦“工程导向型试验技术”,以某公路工程实际工况为出发点,针对钢波纹管在高填方土压力、互通区动载、石方回填应力集中等复杂条件下的力学特性展开系统研究,并通过试验技术与工程实践的深度融合,弥补现有研究在复杂工况针对性方面的不足。旨在为同类高填方公路工程中钢波纹管涵洞的应用提供技术参考与实践范例。

[关键词] 涵洞; 钢波纹管; 力学特性

中图分类号: TG355.3+5 **文献标识码:** A

Experimental Technology for Mechanical Properties of Steel Corrugated Pipe Culverts

Xiaofeng Qin

China Communications Construction Company Central South Engineering Bureau Co., Ltd.

[Abstract] This paper focuses on "engineering-oriented test technology," taking the actual working conditions of this highway project as the starting point. It systematically investigates the mechanical characteristics of steel corrugated pipes under complex conditions such as high-fill earth pressure, dynamic loads in interchange areas, and stress concentration from rock backfill. Through the deep integration of test technology and engineering practice, it addresses the shortcomings of existing research in terms of specificity to complex working conditions, providing technical references and practical examples for the application of steel corrugated pipe culverts in similar high-fill highway projects.

[Key words] Culvert steel; corrugated pipe; mechanical properties

引言

钢波纹管涵洞凭借施工便捷、抗变形能力强、适应性广等优势,在该类工程中得到广泛应用,但高填方土压力、石方回填的应力集中、互通区高频动载等复杂工况,对其力学性能提出了严苛要求,亟需通过科学的试验技术揭示其真实受力特性。

1 工程概况

本项目起讫桩号为K34+023.207~K50+482.775,主线长度16.460km,工程内容涵盖路基、路面、桥梁、涵洞、交叉、交通安全设施、绿化及其他工程,主要工程量包括路基填方288.7万 m^3 、挖方280万 m^3 ,大桥1324m/7座、中桥244m/4座,天桥5座,火马冲互通与辰溪南枢纽互通2处,涵洞52道、通道62道,渡槽2座,预制梁344片(含30m箱梁283片、40mT梁61片),项目具有填方量大、挖方含一定规模石方、涵洞数量多且分布于复杂地形及互通区等特点。

2 试验方案设计

2.1 试验对象选取

试验对象选取应贴合K34+023.207~K50+482.775段公路工程的实际施工状况与工程特性,结合项目52道涵洞的核心使用

需求,试件规格以项目常用钢波纹管的参数为依据,确定管径覆盖1.5m、2.0m、3.0m三个主流规格,波高采用50mm、75mm两种具有代表性的规格,壁厚搭配Q235B材质的3mm、4mm、5mm三个级别,确保试件参数与工程实际安装的钢波纹管完全一致。

工况选择重点覆盖项目关键受力地段,包括高填方段、火马冲互通与辰溪南枢纽互通的车辆高频通行区域、挖石方地段以及狭窄沟谷地形地段,全面模拟不同填土高度、地质条件、荷载频率下的涵洞受力环境,选定3处具有代表性的涵洞进行实地取样,保证试件的材质、制造工艺与施工安装的钢波纹管来源一致,避免试验与工程实际状况产生偏差,为后续试验成果在工程中的应用奠定可靠基础。

2.2 试验设备与仪器

加载装置采用反力架与500kN液压千斤顶配合,具备分级加载与稳定持载的功能,最大加载能力可达设计荷载的1.5倍,精确模拟高填方路基的土压力与公路I级汽车荷载;动载加载系统采用电液伺服疲劳试验机,加载频率可在0-20Hz范围内调节,荷载幅值的精度控制在 $\pm 1\%$,与互通区车辆通行的循环荷载特性匹配。

测试设备包括电阻应变片、振弦式土压力传感器、激光位移仪、压力记录器以及多通道数据采集装置,所有设备仪器均依据JT/T791-2010与GB/T12771-2019规范规定按时校准,校准周期不超过3个月,加载前对反力架刚度、传感器灵敏度进行复核,确保试验数据的准确性与可靠性。

2.3 核心试验内容设计

静载力学特性试验采用分级加载方法,自0起按设计荷载的10%逐次递增至1.5倍设计荷载,每一级加载结束后持荷稳定30分钟,同时采集钢波纹管应力分布、竖向与径向变形数据,重点分析高填方段填土压力作用下结构的承载阶段特征、极限承载力以及应力集中部位,验证结构在288.7万 m^3 填方压力下的安全性。

动载力学特性试验模拟互通区高频车辆通行的工况,将循环加载频率设定为5Hz,将荷载幅值设定为设计荷载的0.3-0.8倍,循环次数累计达到200万次,对结构的疲劳寿命、累积变形以及裂纹扩展规律进行测试,评估互通区长期服役的可靠性^[1]。

密封性能试验采用水压试验方法,依据GB/T12771-2019规定施加1.5倍设计水压,保压时间不少于10分钟,通过压力传感器测定泄漏量,检验涵洞在改河、改沟工程中的防水密封效果。此外,土一管相互作用试验搭建模拟路基填土环境的试验装置,分别对填土高度0-50m、压实度93%-96%的不同工况进行模拟,通过土压力传感器与位移计同步进行土压力分布与结构变形的监测,研究高填方条件下土一管协同作用规律,为项目涵洞的设计与施工优化提供数据支持。

3 试验结果与分析

3.1 静载试验结果分析

在弹性阶段中,荷载与变形呈线性关系,波峰和波谷处的应变分布均匀,将径向变形量控制在2-5mm的区间内,契合规范对弹性变形的要求,此阶段结构主要凭借材料自身的刚度抵御荷载作用,适用于项目常规填土高度的受力情况。当荷载超过0.6倍设计荷载进入弹塑性阶段后,曲线斜率逐渐变小,部分截面出现应力集中,其中以涵洞侧壁与基础的衔接部位最为突出,应变值与弹性阶段相比增长了30%-50%,此时结构开始产生塑性变形,但变形仍处于可控范围,与项目高填方段的实际受力情况相契合。

当荷载增加至1.2-1.5倍设计荷载时,结构进入极限破坏阶段,部分厚壁试件出现波峰局部屈曲现象,而薄壁试件出现整体径向失稳现象,极限承载能力在800-1200kN的区间,其中管径3.0m、壁厚5mm的试件极限承载能力最佳,较1.5m管径试件提高40%以上。基于项目288.7万 m^3 高填方的实际压力情况,所有试验试件的极限承载能力均满足设计标准,且高填方地段推荐采用壁厚 ≥ 4 mm的钢波纹管,可有效避免结构因长期受土压力作用产生过度变形的情况,为项目涵洞结构选型提供了直接数据支撑^[2]。

3.2 动载与疲劳特性分析

在5Hz频率、0.3-0.8倍设计荷载的循环加载过程中,结构累

积变形随循环次数的增加表现出“快速增长—缓慢稳定—加速破坏”的三阶段变化特征:累积变形的增长速率较高,平均每1万次循环增长0.8-1.2mm,主要源于材料弹性后效与局部接触变形;变形的增长速度降至每万次0.1-0.3mm,结构进入疲劳稳定阶段,此时应变的分布趋向均匀,未出现明显的裂纹萌生迹象,对应项目互通区车辆通行初期至中期的服役状态;当循环次数超过180万次后,部分薄壁试件开始出现疲劳裂纹,裂纹大多始于波谷焊接部位,随着循环次数的增加沿环向延伸,直至200万次循环时,3mm壁厚试件的裂纹长度达到50mm,而4mm、5mm壁厚试件仍未出现贯穿裂纹,疲劳寿命较3mm壁厚试件延长60%以上。

对火马冲互通与辰溪南枢纽互通的模拟工况进行对比,由于辰溪南枢纽互通交通流量更大、荷载强度更高,对应的结构累积变形较火马冲互通工况增加了25%,疲劳寿命缩短了30%,这说明高频重载环境会明显加重结构疲劳损伤,试验成果同时显示,结构疲劳破坏的主要原因是循环荷载作用下的应力集中与材料疲劳积累,结合项目互通区长时间高频次车辆通行的实际情况,建议采用壁厚4mm及以上的钢波纹管,同时对焊接处进行防腐强化处理,可使结构疲劳寿命符合设计使用年限要求,进而为互通区涵洞的长期稳定性提供保障。

3.3 土一管相互作用规律

土压力分布情况显示,随着填土高度的增加,涵顶土压力表现出非线性的增长趋势,若填土高度 < 25 m,土压力的增长速率较快,每填土高度增加5m,涵顶土压力会提升15%-20%;当填土高度超过25m后,增长速率逐步变缓,趋于稳定值,此临界高度与项目高填方段的实际情况相符,验证了土拱效应的形成与发展过程。

此外,涵侧与涵底的土压力表现出“涵侧 $>$ 涵底”的分布特征,涵侧土压力约为涵顶的0.6-0.8倍,涵底土压力仅为涵顶的0.3-0.5倍,且在填土压实度提高的过程中,土压力分布的均匀性得到明显改善,当压实度从93%提升至96%时,涵顶土压力变异系数降低了28%,结构径向变形量减少15%-20%,说明提升填土压实度可有效优化土一管相互作用状态^[3]。

对土方填土工况与石方回填工况进行对比,石方回填段涵顶的土压力较土方段增加了30%-40%,且土压力峰值出现明显偏移,结构应变的波动范围增大了25%,这与项目44.2万 m^3 挖石方后的回填地质情况相关,主要由于石方颗粒的刚度较大、接触面积较小,导致土压力集中现象更加突出;在狭窄沟谷地形工况下,涵洞两侧填土的约束情况不对称,导致结构产生侧向偏移变形,最大偏移量为3-5mm,而宽坦地形工况下结构变形的均匀性更好。

3.4 密封性能试验结果

密封性能测试经过1.5倍设计水压的保压检验,明确了钢波纹管涵洞的密封可靠性与影响因素,测试结果表明,92%的试件泄漏量控制在GB/T12771-2019规定的0.05L/($m \cdot h$)以内,符合项目改河、改沟以及地下水作用时的防水密封标准。

从压力变化趋势来看,所有试件在保压起始阶段均出现微

小压力下降,下降幅度为0.02-0.05MPa,主要归因于管道接口处密封材料的初始压缩变形,之后压力逐渐平稳,保压10分钟期间压力波动不超过0.01MPa,体现出密封结构整体稳定性良好。不同规格试件的密封特性存在差异,管径越粗、接口数量越多的试件,泄漏量相对偏高,3.0m管径试件的平均泄漏量为0.03L/(m·h),与1.5m管径试件相比增加了0.015L/(m·h),主要原因是大管径涵洞接口的密封面更长,安装过程中易出现密封材料贴合不紧密的现象。

4 试验技术在工程中的应用

4.1 施工质量控制优化

在填土压实管控环节,根据土一管相互作用试验得出的压实度与土压力分布相关规律,将高填方段填土压实度标准从原设计的93%提高到95%,明确采用分层压实工艺,使每层填土厚度控制在30cm以内,选用20t振动压路机进行碾压,碾压次数不少于6遍,确保填土颗粒紧密接触,减小后期不均匀沉降对涵洞结构的影响。基于石方回填段土压力集中的试验成果,优化回填材料级配,规定石方颗粒最大直径不超过涵洞管径的1/5,同时在石方与钢波纹管之间增设一层10-15cm厚的级配碎石缓冲层,避免尖锐石粒直接接触管道造成局部应力集中。

针对安装工艺优化,根据静载试验中结构应力集中区域的分布情况,确定钢波纹管接口处的焊接工艺参数,采用双侧焊接技术,焊缝高度不小于管材壁厚,焊接完成后进行无损检测,确保焊缝合格率达到100%;参考密封性能试验结果,规范接口密封操作流程,选用耐老化硅酮密封胶,将螺栓预紧力控制在25-30N·m范围,安装后进行1.2倍设计水压的保压检验,保压时间不低于15分钟,泄漏量需满足 $\leq 0.05\text{L}/(\text{m}\cdot\text{h})$ 的要求。在质量检测环节,建立“过程检测+成品验收”双重机制,过程中每施工50m路基或完成10道涵洞安装,进行一次现场载荷试验和应变监测,成品验收时采用超声波检测仪对管道壁厚、焊缝质量进行全面检测,对高填方段和互通区涵洞增设长期沉降观测点,观测频率为施工期间每周1次,通车后每月1次,持续跟踪结构变形情况。

4.2 特殊路段涵洞设计优化

针对高填方区域,根据静载试验中极限承载能力与壁厚的相关数据,将原设计3mm壁厚的钢波纹管调整为4mm,对于管径 $\geq 2.5\text{m}$ 的涵洞采用波纹高度75mm的强化型管材,同时优化涵洞基础形式,将原条形基础调整为整体式钢筋混凝土基础,使基础宽度增大20%,并在基础底部增设一层15cm厚的C15混凝土垫层,增强结构整体承载能力,抵御高填方土压力引发的不均匀下沉,优化后的结构极限承载能力提高45%,可满足288.7万 m^3 填方压力下长期服役的要求。

针对火马冲互通与辰溪南枢纽互通面临的高频动载工况,根据动载及疲劳特性试验结论,优化涵洞结构刚度设计,在涵洞两侧增建抗侧移挡墙,将挡墙间距限定在5m以内,高度与填土高度一致,同时对钢波纹管内壁进行防腐涂层处理,采用厚度 $\geq 1.5\text{mm}$ 的环氧树脂涂层,延长结构疲劳寿命,确保在200万次循环荷载作用下不产生明显裂纹,以匹配互通区日均万辆以上的交通量需求。

针对44.2万 m^3 挖石方作业后的回填路段,依据土一管相互作用试验中石方回填的受力特性,将涵洞管径增大10%,增强断面刚度,同时在涵洞顶部增铺50cm厚的土工格栅加筋层,格栅抗拉强度 $\geq 80\text{kN}/\text{m}$,铺设过程中横向搭接宽度不少于20cm,通过加筋层分散土压力,减轻局部应力集中,试验证明该措施能够让涵顶土压力峰值下降30%。

针对改河改沟段涵洞,结合密封性能试验结果,选用法兰连接方式替代原承插式连接,接口处增设不锈钢防冲刷护圈,护圈厚度 $\geq 5\text{mm}$,同时将涵洞纵向坡度调整为3%-5%,优化水流通道设计,减少高速水流对密封面的冲刷侵蚀,提升结构防水耐久性。通过特殊路段设计优化,项目涵洞结构适配性显著增强,高填方段、互通区等关键区域涵洞的结构安全系数从1.2提升至1.5,后期维护成本预计降低60%,为工程长期稳定运行提供了可靠的设计保障。

5 结论

总而言之,研究成果不仅成功解决了本项目涵洞施工中的关键技术问题,也为同类高填方公路工程中钢波纹管涵洞的选型、设计与施工提供了可复制的技术范例,其核心结论对完善相关行业规范、推动钢波纹管在复杂地形公路工程中的推广应用具有重要参考价值。后续可进一步开展长期服役环境下结构力学性能衰减规律研究,结合监测数据深化土一管相互作用的长期演化机制分析,为结构全寿命周期安全保障提供更全面的技术支撑。

[参考文献]

- [1]沈斌斌.三种大跨钢波纹管涵洞力学特性对比分析[J].水利与建筑工程学报,2025,23(01):109-117.
- [2]张琳.不同跨径下三类钢波纹管涵洞力学特性对比分析[J].福建交通科技,2024,(12):128-136.
- [3]李真,陈泽盟.高原冻土地区公路涵洞冻融力学特性分析[J].中外公路,2023,43(06):240-246.

作者简介:

秦晓峰(1984--),男,汉族,河南邓州人,本科,工程师,从事试验检测研究。