

公路钢波纹管涵洞研究和应用进展

聂晓隼

苏州规划设计研究院股份有限公司, 江苏 苏州 215006

摘要： 钢波纹管作为一种具有良好适应路基变形的柔性材料，被应用到各等级公路的不同类型土质的路堤涵洞通道建设中，其规模化应用已被证明具有良好的环境、经济和社会效益。本文针对钢波纹管涵洞在中国的研究和应用展开文献调研，对包括钢波纹管自身材料、使用环境、基础类型、荷载类型及其作用方式、施工工艺等因素对钢波纹管涵洞的影响及其影响规律进行阐述，并对部分钢波纹管涵洞的实际应用案例进行汇总分析。结论对相关从业人员认识和了解钢波纹管涵洞的技术特点和进行钢波纹管涵洞的设计具有重要的参考价值。

关键词： 钢波纹管涵洞；公路工程；特殊路基；荷载类型；受力特性

Research and Application Progress of Highway Steel Bellows Culvert

Nie Xiaojun

Suzhou Institute of Planning and Design Co., LTD. Suzhou, Jiangsu 215006

Abstract: As a flexible material with excellent adaptability to subgrade deformation, steel corrugated pipes have been utilized in the construction of culverts and passageways across various grades of highways and different types of soil embankments. Their large-scale application has demonstrated significant environmental, economic, and social benefits. This paper conducts a literature review on the research and application of steel corrugated pipe culverts in China, elaborating on the factors influencing these culverts, including the material properties of the steel corrugated pipes themselves, the usage environment, foundation types, load types and their application methods, and construction techniques. It also summarizes and analyzes actual application cases of some steel corrugated pipe culverts. The conclusions provide valuable references for professionals to understand the technical characteristics of steel corrugated pipe culverts and to design them effectively.

Keywords: steel bellows culvert; highway engineering; special subgrade; load type; stress characteristic

涵洞通道作为中国公路交通基础设施的关键组成部分之一，在公路工程施工中具有重要的地位。但传统的钢筋混凝土涵洞通道需要消耗大量水泥、砂石和钢筋，施工周期长、施工工艺复杂，养护要求高，施工受易受气候和环境影响，需要占用较多的人员和大量的施工机械。在施工中，传统的混凝土涵洞通道会受建材原材料、施工和养护工艺等方面的问题影响造成其质量达不到设计及规范要求，给公路后期运营留下一定的安全隐患。

近年来，随着中国公路交通基础设施建设的不断推进，山陵、湿陷性黄土、软土、膨胀土、喀斯特地区、季冻区、常年冻土区等特殊地质和气候区域的高等级公路建设得到了迅猛发展，这些特殊地区的公路建设对涵洞通道的质量也提出了更高的要求^[1]。传统的钢筋混凝土涵洞已不能满足当前公路涵洞通道建设的发展要求。

一、钢波纹管涵洞优点

钢波纹管涵洞作为一种相对新型的公路涵洞通道形式，相对传统钢筋混凝土涵洞，具有如下的优势：① 结构相对简单，可实现在工厂集中生产、现场拼装，有利于控制质量和降低成本；② 自重轻，运输方便，施工简单，对地基扰动小；③ 施工不需要大量的水泥和砂石等材料，节约了建筑材料，有利于低碳环保；④ 波纹管的拼装和路基的施工可分开进行，有利于提高施工进度，缩短工期；⑤ 与地基具有良好的协调变形能力，可不对地基进行

复杂处理；⑥ 轴向补偿位移特性使得荷载分布更为均匀，受力更合理，可较好适应不同地基的变形，降低因地基不均匀沉降导致的涵洞破坏风险；⑦ 有效改善刚性涵洞两侧与路堤交界处的跳车病害及由此产生的涵洞破坏^[2]。

二、钢波纹管涵洞在中国应用现状

钢波纹管涵洞在中国的应用最早可追溯到上世纪50年代的青藏公路不冻泉段。上世纪80年代后，钢波纹管涵洞被用于各地

的煤矿涵洞工程建设中，90年代末开始，其才在中国公路工程路基排水管道和人行通道中才逐步开展应用，并取得了较好的应用效果。

(一) 钢波纹管涵洞的分类

根据钢波纹管涵洞的特点，可对其进行分类如下：(1) 根据直径大小不同，可分为小直径 (< 3m) 和大直径 (≥ 3m)；(2) 根据孔数不同，可分为单孔、双孔和多孔；(3) 根据横断面形状不同，可分为圆形、拱形、半拱形、管拱形和箱型；(4) 根据填土高度不同，可分为低填方和高填方^[3]；(5) 根据与道路主线的交叉角度不同，可分为正交和斜交。钢波纹管涵洞的基础一般有无基、10%灰土、级配砂砾、级配碎石、片石和混凝土等6类，但主要以级配砂砾和级配碎石两类柔性基础为主^[4]。

(二) 钢波纹管涵洞设计内容及流程

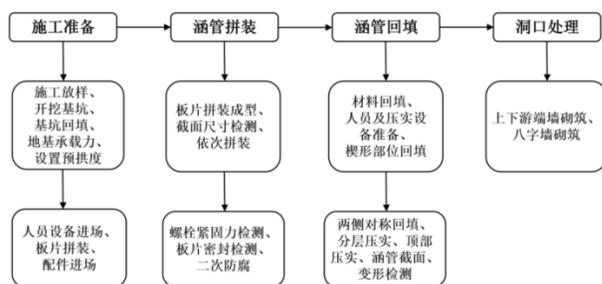
钢波纹管涵洞的设计内容有：①涵洞水力计算与管径；②基础类型、埋置深度、与主线斜交角度；③自身的构造计算；④洞身防腐；⑤细部构造设计与管身强度要求；⑥进出口、管身与进出口结合处设计。

钢波纹管涵洞设计流程主要包括：①涵位现场水文地质勘查资料、交通量情况及气候情况调查；②管涵基础的类型、管形和尺寸大小确定；③影响设计的因素分析；④最小填土高度确定；⑤确定构造要求；⑥确定设计方法；⑦确定设计参数；⑧地基与基础设计；⑨结构设计和验算；⑩耐久性设计；⑪洞口设计。在设计方法方面，穆程采用 CHBDC、AASHTO、AISI 等3种不同的设计方法对钢波纹管涵洞的波形和壁厚进行了优化设计，对比分析了管壁压应力和接缝强度的差异，发现不同的设计方法控制的要求不同。而周启林等则采用 CHBDC 和 AISI 法从不同角度对双孔大直径钢波纹管涵洞结构进行了设计验算^[5]。

(三) 钢波纹管涵洞施工工艺

1. 施工流程

钢波纹管涵洞对施工过程的要求较好，其主要施工流程包括施工准备、涵管拼装、涵管回填和洞口处理四个步骤，具体如图1中所示。



>图1 钢波纹管涵洞施工流程

2. 施工要点

钢波纹管涵洞的主要施工注意要点包括地基施工、管基和基础施工、结构安装、材料回填、施工变形监测与施工质量评定等六大类^[6]。

三、钢波纹管涵洞在中国研究现状

钢波纹管涵洞的研究目前主要有理论分析、有限元数值模拟、现场试验、实验室模拟试验单一研究方法以及上述方法两两结合的组合研究方法等。

(一) 理论分析研究

研究表明，薄壳理论和有限元模型可用于钢波纹管涵洞的受力分析。旋转成壳基本理论发现，工程计算法和解析法不适用于竖向受力的钢波纹管涵洞工程。Spangler的涵土相互作用模型被引入，推导出钢波纹管涵洞的变形计算公式和涵土相对刚度系数计算公式。此外，环向抗弯刚度等效方法分析了填土高度和管径对钢波纹管整体变形的影响。

(二) 有限元模拟分析研究

在钢波纹管涵洞的有限元数值分析领域，Ansys、Flac3D、Abaqus和Midas等四种软件被广泛应用。Ansys作为一款强大的有限元分析软件，尤为受到学者们的青睐，常被用于钢波纹管涵洞的数值模拟研究。有学者利用Ansys软件探究了不同填土高度、管型及荷载作用对圆形钢波纹管涵洞的受力状态的影响，明确了其应力、应变特征、最大控制应力与各因素之间的相关性，从而确定了其适用范围和使用条件，并提出了相应的壁厚建议。此外，还有研究对管拱形钢波纹管涵洞的受力变形进行了计算分析，优化了管型设计。另一些研究则采用了Flac3D软件，分析了不同填土高度和不同压实条件下钢波纹管半拱涵在工后交通荷载作用下的受力和变形情况，验证了其应用的可靠性。Abaqus软件也被用于开口式钢波纹管涵洞的受力性能与变形特性分析，以及大跨径钢波纹管箱涵结构在不同填土高度、壁厚、填土模量以及采用EPS板减荷后的力学特性。同时，也有学者使用Midas建模，对钢波纹管涵洞在埋设前、后多种受力工况进行模拟分析，结果表明钢波纹管涵洞的埋设可有效扩散土体中的应力，降低交通荷载对路面各结构层的沉降变形影响。这一研究还揭示了钢波纹管涵洞变形的特定模式，形象地称之为“飞鸽”模型^[8]。

(三) 现场试验研究

在钢波纹管涵洞的现场试验中，研究的重点主要集中在施工过程中涵洞不同位置处的应力、应变和变形监测。基于现场测试，对钢波纹管涵洞结构不同位置的力学特征进行了系统分析，探明了其管体不同位置处的应力、应变变化趋势和规律。也有学者通过现场试验分析了钢波纹管涵洞在路基填筑过程中的受力和变形特性，结果表面涵洞内、外侧分别主要承受压应力和拉应力。为了更深入地了解大直径高填方钢波纹管涵洞的力学行为和变形规律，研究者们布设了应变计、土压力盒和变形测量仪器，对周围土压力、力学特性进行了详细分析。同时，依托实际工程项目，对钢波纹管涵洞内壁切向应变和外壁土压力进行了现场测试，揭示了波峰、波谷和波侧的应变规律。还有研究基于现场测试，提出了使用管内对拉钢索来控制双孔大跨径钢波纹管涵变形和应力的施工措施^[7]。此外，为了减少涵顶土压力并调整土压力分布，有研究者在钢波纹管涵洞顶铺设了聚苯乙烯泡沫板(EPS)。

在运营阶段的现场试验中,研究的重点主要是钢波纹管涵洞在填土压力和交通荷载作用下的应力、应变和变形。有研究对多跨薄覆土钢波纹管涵洞在运营阶段受力情况进行了跟踪监测与分析,发现外部环境温度的会对涵洞的长期受力性能产生显著影响,对应力的尤为显著。另一项研究则依托实际工程项目,现场测试了车辆荷载作用于不同车道时低路堤钢波纹管涵的切向应变,发现其切向应变会随荷载位置的变化而不同,并且不同断面同一角度的切向应变值也会随着荷载的移动变化但其变化规律相似。

(四) 实验室模拟研究

相对于以上三种研究方法,当前对钢波纹管涵洞采用室内模拟研究的学者相对较少。许江波等通过室内模拟试验分析了管状和拱形两种不同断面的钢波纹管涵洞在振动压路机振动荷载作用下的力学状态,探明了钢波纹管涵洞在不同加载部位振动下的时程曲线、频谱特征曲线及其在三向速度和加速度随振源水平距离的变化规律。冯忠居通过在钢波纹管涵洞的中间断面上的特征点布设应变片、土压力盒和变形测量仪器,对钢波纹管涵洞的力学特性、管周土压力和涵管变形规律进行了分析,得到了应变与应力、管周土压力及涵管变形的变化规律。

(五) 组合分析研究

较单一方法分析研究,更多的国内学者选择使用不同组合分析方法对钢波纹管涵洞进行研究。张毅、姚德昊、钱坤、李清娟等人依托对江西万宜高速的多个钢波纹管涵洞的现场测试结果,分别使用有限元软件分别对钢波纹管涵洞的横截面拱顶设置、波形、管径变化、填土高度、边坡坡度和涵底纵坡对拱顶设置影响进行了研究,基于结果推荐了适用于不同条件下的钢波纹管涵横截面和涵底的拱顶设置方案^[9]。吴冠庆等人通过现场试验得到了填筑施工过程中钢波纹管涵洞的变形特性和管涵周围土压力分布规律,并基于马斯顿理论构建了一种垂直土压力的计算公式,并

结合试验数据和有限元计算对其进行了验证。聂晓隽对直径为3m的钢波纹管涵洞进行有限元模拟,得到钢波纹管涵洞在车辆荷载下的变形情况及冻土地区的温度场分布特征规律,并与青藏公路现场采集的试验数据进行了对比分析,得到了涵洞的变形和冻胀变化规律^[10]。姜涛将室内模拟分析与现场试验相结合,对高填方钢波纹管涵洞的成拱效应进行研究,并根据其成拱效应特点和受力情况,给出了求解钢波纹管涵结构内力计算方法。程雨恒采用室内试验与数值模拟相结合的方法,分析了静载、动载和降雨工况以及采用加固防渗措施后黄土地区钢波纹管涵洞的变形规律。季文玉分别从理论分析、数值模拟计算和结构试验三个方面出发,对钢波纹管涵洞的力学性能进行了研究。

四、结语

(1) 随着中国公路交通基础设施建设不断往中西部和复杂地形山区、特殊地质、气候条件区域推进,基于钢波纹管涵洞对地基要求低、施工简单、可快速安装、大幅缩短工期和降低建设成本等方面的优势,其有望取代部分传统钢筋混凝土盖板涵成为特殊地区涵洞建设的主要构造形式之一,有利于缓解和解决传统钢筋混凝土涵洞的早期和运营期间的病害。(2) 国内对钢波纹管涵洞的设计还主要是参照国外相关设计方法执行,在设计时主要考虑结构的承载和抗变形能力以确定管径、壁厚、钢材类型等,对其过水能力考虑的不足,还需进一步对其水力计算进行进步研究,以综合确定钢波纹管涵洞的各项设计指标。(3) 在钢波纹管涵洞应用时,应通过理论分析和有限元软件模拟分析来合理选择和优化钢波纹管涵洞的管型、管径、壁厚、波长、波高、钢材类型等参数以及基础类型,在满足设计要求的条件下,尽可能节省钢材、降低制造过程中的能源消耗,实现节能减排,助力中国交通强国发展和双碳目标实现。

参考文献

- [1] 解卫江,梁凯,等.湿陷性黄土地区高填方大孔径钢波纹管涵洞受力分析[J].中外公路,2022,42(3):156-160.
- [2] 武新成,高书义,等.钢波纹管涵洞在盐渍土环境下耐久性试验[J].隧道工程,2022,12:111-113.
- [3] 邓斌,李明俊,韦权.大孔径装配式钢波纹管涵洞施工技术[J].西部交通科技,2023,(04):93-96.
- [4] 朱承鸿.大跨径箱型钢波纹管涵洞力学特性数值模拟[J].公路,2022,10:131-139.
- [5] 李晓勇,梁养辉,等.低路堤荷载作用下钢波纹管涵切向应变现场测试[J].公路工程,2013,38(3):90-94+125.
- [6] 吴冠庆,魏进,等.低填方钢波纹管涵洞受力变形特性及垂直土压力计算[J].东北大学学报(自然科学版),2022,43(9):1337-1345.
- [7] 成滢,刘海波.高填方钢波纹管涵土-管共同作用测试与分析[J].公路交通科技,2023,40(2):110-120.
- [8] 乔建刚,彭瑞,王春云.重载交通下钢波纹管涵对沥青路面的变形影响[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2023,39(1):112-120.
- [9] 李清娟.路基边坡坡度与钢波纹管涵拱度关系的研究[D].西安:西安工业大学学位论文,2016.
- [10] 聂晓隽.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:重庆交通大学学位论文,2015.