

# 公路高填方路基大孔径钢波纹管涵洞 径向土压力及效益分析

孙建光<sup>1</sup>, 钟明<sup>2,3</sup>, 易达<sup>1</sup>, 金玉良<sup>1</sup>, 胡滨<sup>2,3\*</sup>

(1. 中交第四公路工程局有限公司, 北京市 100022; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司;  
3. 西安中交土木科技有限公司)

**摘要:**依托试验工程,对公路高填方路基大孔径钢波纹管涵洞管外径向土压力进行测试,得出钢波纹管涵洞管外不同角度土压力值随填土高度增加的变化规律,并得到以下结论:随着填土高度的不断增加,钢波纹管涵洞管外各角度土压力值逐渐增大,分为波动增长→快速增长→缓慢增长3个变化过程;填土后期,钢波纹管与周围土体形成土拱效应,土压力不再增长;管周90°、270°和管底180°位置出现应力集中,但最大应变值小于钢材的允许应变值,施工时应进行重点观测。相比较于混凝土结构,钢波纹管涵洞缩短了施工工期,后期维修方便且可回收利用,具有显著的经济和社会效益。

**关键词:**高填方路基;大孔径;钢波纹管涵洞;土压力

## 1 引言

钢波纹管涵洞是一种波纹状的拼装结构,英国首先用于灌溉农田的涵洞,随后美国、加拿大在公路工程中进行了大量应用,积累了丰富的经验,日本、韩国也进行了钢波纹管桥涵结构的应用,并对其进行了防腐

等方面的研究,制定了各国的标准规范。中国1995—1997年在青藏公路应用,取得了成功,解决了多年冻土地区混凝土涵洞由于冻胀融沉产生的裂缝问题。截至目前,中国已经在青海、安徽、西藏、内蒙、新疆、湖南、山西、河北等30多个省区进行了推广应用。虽然中国一些研究机构和高校对公路小孔径(孔径小于4m)钢波纹管涵洞受力变形、防腐等方面也进行了研

## 5 结语

该文基于悬链线理论推导的斜拉索无应力长度精确计算公式,结合Excel平台内置的规划求解模块,提出了斜拉索线形参数的快速计算方法,依托典型斜拉桥工程实例验证了所提方法的有效性和高效性,所提方法可在设计及施工阶段为同类工程计算斜拉索状态参数提供重要参考。

## 参考文献:

- [1] 陶俊杰,王慧平,付兆茜.斜拉桥拉索损伤对主梁线形的影响分析[J].中外公路,2019(6).
- [2] 谢耿,蒋云锋.刚果(布)小曲线平弯斜拉桥斜拉索张拉力

- 敏感性分析[J].中外公路,2018(2).
- [3] 刘士林,梁智涛,孟凡超.斜拉桥[M].北京:人民交通出版社,2002.
- [4] 郝超,强士中,裴岷山.大跨度斜拉桥拉索无应力长度的计算方法比较[J].重庆交通学院学报,2001(3).
- [5] 吴朴,邹黎琼.无应力长度参数正装迭代法工程应用[J].中外公路,2018(2).
- [6] 靳明君,张志国.悬链线柔索索长的计算[J].铁道标准设计,2004(5).
- [7] 周孟波.悬索桥手册[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [8] 邵旭东,张欣,李立峰.斜拉索索状态的精确计算[J].公路工程,2005(1).
- [9] 沈锐利.悬索桥主缆系统设计及架设计算方法研究[J].土木工程学报,1996(2).

收稿日期:2021-01-06(修改稿)

作者简介:孙建光,男,高级工程师.

\*通信作者:胡滨,男,硕士,高级工程师.

究,但关于高填方路基大孔径钢波纹管涵洞的受力特征、设计和施工技术方面研究得较少,制约了钢波纹管涵洞在公路工程中的推广,因此很有必要对其进行研究。

随着中国公路行业的快速发展,钢波纹管涵洞在公路工程中应用越来越多,特别是在山岭重丘地区应用数量快速增长,但中国关于高填方路基大孔径钢波纹管涵洞土压力研究较少。该文通过对贵州江口至玉屏高速公路高填方 6 m 孔径钢波纹管涵洞施工过程中分层土压力的分析,揭示随着填土高度增加钢波纹管涵洞管周不同位置土压力的变化规律,同时对比分析钢波纹管涵洞与混凝土涵洞的经济和社会效益。

## 2 依托工程概况

依托工程为江口至玉屏高速公路 5 标桩号 K45+936 双孔直径 6 m 钢波纹管涵洞,两孔之间净距为 2 m,波形参数为波距 300 mm×波高 110 mm,壁厚为 6 mm(镀锌前),所用材料为 Q235 钢材,钢波纹板出厂时采用热浸镀锌进行防腐处理,运输至现场采用螺栓进行拼装施工,且现场安装前管壁内外均匀涂刷沥青二次防腐。钢波纹管楔形部位采用粗砂填充、“水密法”施工,进出口为八字墙结构。管周 1 m、两管之间及管顶填筑 1 m 范围内采用小型夯机进行夯实,其他施工区域采用重量为 25 t 压路机进行压实,管顶填筑高度为 13.53 m。

## 3 试验方案

### 3.1 钢波纹管涵洞外壁土压力测试方案

土压力盒出厂前进行了校准,现场进行试测已确保其准确性。按照试验方案,在钢波纹管外壁不同角度按以下方法依次埋设压力盒:压力盒切着管壁,与管壁之间、压力盒周围均采用细沙填充,人工夯实后采用细土再次回填。

压力盒按照一定角度在管外埋设,具体为:在路中位置钢波纹管外侧按照一定的角度进行压力盒的布置,依次为 0°、30°、60°、90°、120°、150°、180°、210°、240°、270°、300°和 330°共计 12 个测点。相隔 1.8 m 按照同样方案布置,作为对照,合计 24 个测点。具体布置如图 1 所示。

### 3.2 测试工况

钢波纹管涵洞施工时,管周 0.3 m 及管顶 0.5 m

范围内应禁止机械施工,避免机械对钢波纹管的破坏。管侧及管顶均采用分层填筑,每层填筑完成后机械驶离钢波纹管 20 m 以外停止施工,后采用土压力测试仪器进行数据采集,待采集完成后方可进行下一步施工。具体测试工况见表 1。

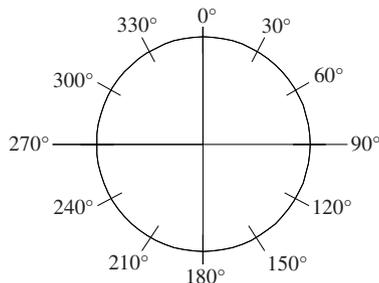


图 1 钢波纹管涵洞外壁压力盒布置图

表 1 测试工况汇总

| 工况 | 填土高度/m         | 备注                   |
|----|----------------|----------------------|
| 1  | 管顶+0.2         |                      |
| 2  | 管顶+0.5         |                      |
| 3  | 管顶+1.0         |                      |
| 4  | 管顶+2.2         |                      |
| 5  | 管顶+3.4         |                      |
| 6  | 管顶+4.1         |                      |
| 7  | 管顶+5.2         | 填土土质:管顶以上素土;测试为填土压实后 |
| 8  | 管顶+6.4         |                      |
| 9  | 管顶+7.1         |                      |
| 10 | 管顶+7.9         |                      |
| 11 | 管顶+9.2         |                      |
| 12 | 管顶+10.3        |                      |
| 13 | 管顶+11.8        |                      |
| 14 | 管顶+13.53(路面顶部) |                      |

## 4 钢波纹管涵洞管外壁径向土压力测试结果及分析

### 4.1 管周径向土压力随填土高度的变化规律

管周径向土压力随填土高度的变化规律见图 2。

从图 2 可以看出:

(1) 钢波纹管涵洞施工过程中,随着填土高度的不断增加,各测点径向土压力值均逐渐增大。

(2) 总体上,管周各角度的土压力增长分为 3 个阶段:① 第 1 阶段波动增长区(管顶+0.2 m 至管顶+1.0 m),各测点径向土压力增长幅度较小,这是由

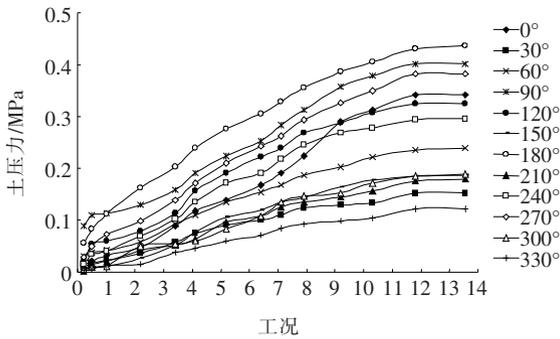


图2 管周径向土压力随填土高度的变化规律

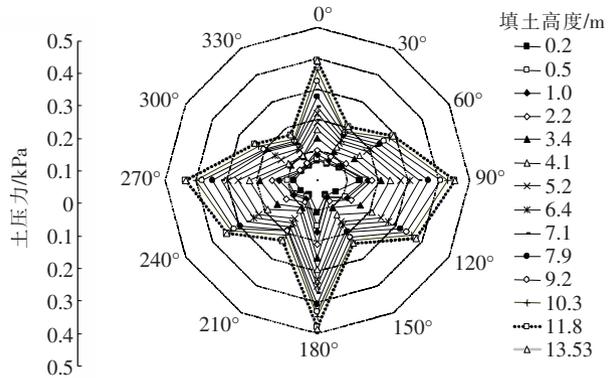


图3 管周径向土压力随测试位置变化规律

于管顶填土 1.0 m 范围内,为避免大型机械施工使钢波纹管产生较大变形,甚至出现垮塌等现象,而采用重量较轻的夯机配合人工进行夯实,压实不够引起的;②第 2 阶段为快速增长区(管顶+2.2 m 至管顶+9.2 m,即填土从管顶至 1.5D 左右, $D$  为直径),随着填土高度的增加以及施工机械进一步的压实,弥补了第 1 阶段压力值不足,部分角度径向土压力值突然增大,但大小关系保持一致,管底  $180^{\circ}$ >管侧  $90^{\circ}$ >管侧  $270^{\circ}$ >管侧  $120^{\circ}$ >管侧  $240^{\circ}$ >管顶  $0^{\circ}$ >管侧  $60^{\circ}$ >管侧  $300^{\circ}$ >管侧  $210^{\circ}$ >管侧  $30^{\circ}$ >管侧  $330^{\circ}$ ;③第 3 阶段为缓慢增长区(管顶+11.8 m 至路面顶部,即填土约为  $2D$  至路面顶部),各角度径向土压力值随着填土高度增加几乎不变,这是由于钢波纹管与周围土体形成土拱效应,形成拱区,减少了钢波纹管的受力。

(3) 施工过程中,填土管顶+9.2 m 时,各角度土压力由快速增长变为缓慢增长,处于增长的拐点,施工时应注意观察并进行必要的检测。

(4) 总体上管底  $180^{\circ}$ 、管侧  $90^{\circ}$ 、管侧  $270^{\circ}$  和管顶  $0^{\circ}$  位置土压力较大,这是因为钢波纹管涵洞为薄壳结构,随着管顶填土的增加,该 4 处测点变形较大,但最大压力值小于允许值,结构整体安全稳定。

(5) 各测点径向土压力均以抛物线形式增长,只是与管顶填土高度的增长斜率有所不同。管顶  $0^{\circ}$  在填土至管顶+9.2 m 时突然增大,说明此时管顶周围受力较大,施工时应进行同步观测。

#### 4.2 管周径向土压力随测试位置的变化规律

管周径向土压力随测试位置的变化规律见图 3。

从图 3 可以看出:

(1) 随着填土高度的增加,不同角度径向土压力分布较为均匀,随着填土高度的增加逐渐增大。

(2) 随着测试位置的变化,从管顶  $0^{\circ}$ →管周  $330^{\circ}$  变化过程中,土压力变化规律为减小→增大→减小→增大→减小→增大的过程,且呈波浪形变化。

(3) 除管顶  $0^{\circ}$  以外,各测点以管底  $180^{\circ}$  为对称轴,呈现对称分布的规律,说明受管周及管顶土体的约束,钢波纹管受力较为均衡,有利于钢波纹管涵洞的整体稳定性。

(4) 管周  $90^{\circ}$ 、管底  $180^{\circ}$  和管周  $270^{\circ}$  出现应力集中,但各角度的最大应力值均小于钢材的允许应力值,结构安全稳定。虽然压力较小,但施工时应采取一定的措施确保工程的整体安全性。

(5) 总体上,各角度土压力值变化规律明显,随着填土高度的增加逐层递增,管底  $180^{\circ}$  的增加幅度要大于其他角度,说明管底受较大的土压力,因此在钢波纹管涵洞地基处理时,应保证地基换填材料满足规范要求,且压实后的承载力满足设计要求,以免工后产生较大的变形。

## 5 钢波纹管涵洞效益分析

### 5.1 经济效益分析

钢波纹管涵洞采用工厂标准化生产,运输至现场进行拼装施工,工艺简单方便,施工速度快,相比较于混凝土涵洞可大幅度缩短施工工期,缩短高速公路项目的建设时间,进而减少施工时人员和机械成本费用的投入,同时相对提高项目运营时间,使项目能尽快投入到运营阶段,尽早产生经济效益。

在公路高填方路基工程中,考虑到地基处理的费用、基础换填及管涵两侧回填施工的费用,钢波纹管涵洞较混凝土涵洞节约工程造价。项目组通过对贵州省江玉高速、都匀高速等多条高速公路的调研,并进行了钢波纹管涵洞与混凝土涵洞的造价对比分析,总体上孔径越大,钢波纹管涵洞节省造价越多。孔径小于 2 m 的钢波纹管涵洞与混凝土涵洞造价相当,节省工期 10~30 d;孔径 3~5 m 时,与钢筋混凝土盖板涵造价

比较节约 10% 左右,相应地节省工期 30~60 d;孔径 6~8 m 时,与钢筋混凝土桥梁造价比较节约 18% 左右,相应地节省工期 50~90 d;孔径 9~10 m 时,与钢筋混凝土桥梁造价比较节约 25% 左右,相应地节省工期 80~150 d。总体上采用钢波纹管结构减少了工程造价,缩短了施工工期,经济效益显著。

## 5.2 社会效益分析

钢波纹管涵洞采用拼装工艺,施工速度快,不需要混凝土结构支模、拆模及后期养生,受天气影响较小,可在雨季和冬季施工,解决了山岭重丘区多雨雪天气影响工程质量和工程进度,解决了冬季温度较低影响混凝土施工质量的难题。

由于受山岭重丘区公路工程高填方路基的影响,材料缺乏及地形的限制,混凝土涵洞后期维护常常较为困难,需要投入大量的人力物力,而钢波纹管涵洞在后期只需定期涂刷乳化沥青进行防腐维护,不但施工工艺简单、操作方便,而且节省了后期维护成本。

对于一些特殊地区(如软土、冻土、湿陷性黄土等地区),应用混凝土涵洞经常出现地基变形产生裂缝进而引起结构物的破坏,钢波纹管涵洞采用拼装施工,能较大地适应地基产生的变形,避免了结构物破坏引起的工程事故,特别适合在以上地区使用。水毁路段、军事保修等临时工程,采用钢波纹管涵洞更具有优势。

钢波纹管涵洞减少了砂石、水泥等材料的用量,避免了山石开采对环境的破坏,减少了环境污染,有利于环保,同时所用钢材后期可回收利用,避免了混凝土结构后期拆除对环境的进一步破坏,符合国家提倡的“环境友好型”理念。

## 6 结论

通过对钢波纹管涵洞管外不同角度位置现场布置土压力盒,持续对路基填筑高度 13.65 m、孔径 6 m 的钢波纹管涵洞施工过程中管外径向土压力值进行了观测,得出了高填方大孔径钢波纹管涵洞的管外径向土压力变化规律,并对钢波纹管涵洞的经济和社会效益进行了分析,得到以下结论:

(1) 施工过程中,随着填土高度的不断增加,钢波纹管涵洞各测点径向土压力值逐渐增大,且呈现出抛物线形式的增长曲线。

(2) 总体上,随着填土高度的增加,钢波纹管涵洞

管外径向土压力增长分为波动增长→快速增长→缓慢增长的过程。

(3) 随着测试位置的变化,从管顶 0°→管周 330°变化过程中,土压力为减小→增大→减小→增大→减小→增大→减小的过程,且呈波浪形变化。除管顶 0°以外,各测点以管底 180°为对称轴,呈现对称分布的规律。

(4) 钢波纹管涵洞采用工厂标准化生产,施工工艺简单,相比较于混凝土结构,孔径越大节省造价越多,同时可大幅度缩短施工工期。钢波纹管涵洞受天气影响较小,减少了砂石等材料的开采,后期维护方便且可回收利用,有利于环保,具有显著的经济和社会效益。

## 参考文献:

- [1] 李祝龙. 公路钢波纹管涵洞设计与施工技术研究[D]. 长安大学博士学位论文, 2006.
- [2] 张博, 梁养辉, 胡滨, 等. 湿陷性黄土地区公路钢波纹管涵洞的受力特征[J]. 筑路机械与施工机械化, 2018(2).
- [3] 李祝龙, 刘百来. 钢波纹管涵洞力学性能现场试验研究[J]. 公路交通科技, 2006(3).
- [4] 刘百来, 李祝龙, 汪双杰. 钢波纹管涵洞力学性能的有限元分析[J]. 西安工业大学学报, 2006(1).
- [5] 李祝龙, 姜涛, 谢晓如, 等. 高填方路基钢波纹管涵洞土拱效应分析[J]. 公路工程, 2016(1).
- [6] 魏连雨, 陈兆南, 郑彦军, 等. 公路路基 FRPM 管涵洞受力变形特性研究[J]. 中外公路, 2018(1).
- [7] 纳启财, 胡滨, 梁养辉, 等. 多年冻土区钢波纹管涵洞应变测试及效益分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2015(9).
- [8] 胡小兵, 李祝龙, 梁养辉, 等. 高路堤钢波纹管涵与钢筋混凝土拱涵土压力对比分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2015(9).
- [9] 邓玉训, 杨波, 梁养辉, 等. 高填方路基大孔径钢波纹管涵洞有限元分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2017(9).
- [10] 姚孝虎, 胡滨, 梁养辉, 等. 公路钢波纹管涵洞施工工艺研究[J]. 山东交通科技, 2004(4).
- [11] 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).
- [12] 刘风云, 万义云, 梁养辉, 等. 基于有限元的钢波纹管涵洞设计方法分析[J]. 山东交通科技, 2016(6).
- [13] 曹兴海, 黄志福, 梁养辉, 等. 低路提荷载作用下钢波纹管涵应力现场测试研究[J]. 黑龙江交通科技, 2013(10).