

不同跨径半圆形钢波纹管涵的力学性能研究

周兆环,黄道斌

(广西交通设计集团有限公司,广西 南宁 530007)

摘 要: 基于精细化 ABAQUS 有限元分析模型,对不同跨径半圆形钢波纹管涵在施工过程和运营状态下的力学性能进行研究。结果表明:回填施工完成时,随着半圆形钢波纹管涵跨径增加,管涵拱顶处竖向变形和弯矩增大;当两侧填土高度接近管涵矢高时,拱顶处上拱变形达到最大值;当管涵跨径大于 12.5 m 时,拱顶处竖向变形受填土高度影响明显,回填完成后的拱顶轴向应力无明显变化,活载作用有利于降低拱顶处轴向应力和弯矩。

关键词: 跨径;有限元分析;半圆形钢波纹管涵;填土高度;活载

中图分类号: U449.84

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)12-0249-04

0 引 言

基础不均匀沉降易引发钢筋混凝土涵洞涵身横向开裂和斜向开裂,从而导致涵洞破坏^[1]。钢波纹管是一种空间柔性薄壳结构,相关研究表明,该结构具有良好的基础变形能力,且运输方便、施工便捷、造价低,因而已被广泛应用于公路工程涵洞、通道结构等。Duncan 等^[2-3]提出了波纹钢管涵土-钢共同作用设计方法,利用有限元分析得出的图表和公式来设计钢波纹管涵,并提出了回填土荷载和车辆活载作用下的波纹钢拱涵弯矩计算公式;李祝龙^[4]通过理论分析与现场试验相结合,分析了不同孔径、不同壁厚和不同波形等条件下钢波纹管涵洞的力学性能;Beben 等^[5]试验发现减载板可将活荷载扩散,并显著降低波纹管内部应力和变形;刘保东等^[6-7]通过建立三维有限元模型,对波纹钢板拱桥拱脚、拱圈加强前后的力学性能进行研究,发现拱脚局部加强后结构受力性能和结构整体性得到明显改善,拱圈双向加强的结构整体性显著优于环向加强的结构。

虽然针对钢波纹管涵的研究取得了一定成果,但研究成果较多针对小孔径圆形钢波纹管涵,关于大孔径半圆形钢波纹管涵力学性能的研究较少。

本文依托广西某高速互通内跨越地方输气管道工程,分别采用了 5.0、7.5、10.0、12.5、15.0 m 跨径

半圆拱桥方案进行数值分析研究,通过建立半圆形钢波纹管涵力学性能的 ABAQUS 精细有限元模型,得到了半圆形钢波纹管涵在施工过程和运营过程中的变形和径向土压力变化规律。研究结果可为半圆形钢波纹管结构的研究和设计提供参考。

1 有限元模型

有限元模型设计方案分别选取跨径为 5.0、7.5、10.0、12.5、15.0 m 的半圆形钢波纹管涵进行建模分析。本文采用工程中常见波形尺寸,具体波形参数见表 1。

表 1 不同跨径半圆形钢波纹管涵采用的波形参数

跨径 /m	波距 /mm	波高 /mm	板厚 /mm
5.0	200	55	6
7.5	381	140	6
10.0	381	140	7
12.5	381	140	8
15.0	381	140	10

为分析跨径对半圆形钢波纹管涵受力性能的影响,按现场施工要求,从半圆形钢波纹管涵拱脚标高开始,以每层 0.3 m 填土厚度累计值作为施工过程计算荷载工况,涵顶填土厚度统一设置为 0.6 m。因波纹钢板正弦型几何属性会影响计算效率,故根据等效前后刚度和质量相等原则将波纹钢板等效为平板,并采用二维平面单元应变模型对波纹管结构进行模拟。不同跨径钢波纹管等效前后的参数见表 2。

等效后波纹钢板采用 ABAQUS 有限元软件中的

收稿日期: 2024-03-29

作者简介: 周兆环(1983—),男,硕士,高级工程师,主要从事桥梁设计工作。

表 2 等效前后波纹钢板参数

波形参数			等效前		等效后		
波距/mm	波高/mm	板厚/mm	抗弯惯性矩/(mm ⁴ ·mm ⁻¹)	面积/(mm ² ·mm ⁻¹)	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	板厚/mm
200	55	6	2 765.85	7.103	815.7	21 405.5	68.4
381	140	6	18 194.44	7.776	364.3	9 559.6	167.6
381	140	7	21 291.06	9.076	424.6	11 143.5	167.8
381	140	8	24 408.55	10.377	484.9	12 723.7	168.0
381	140	10	30 710.01	12.983	604.9	15 874.5	168.5

B21 单元模拟,土体采用 CPE4R 单元模拟;模型底部采用固定边界,模型两侧约束水平向位移,不约束竖向位移。波纹钢拱脚至两侧边界的距离为波纹钢管跨径的 3 倍,基础至底部边界的距离为波纹钢管矢高的 3 倍。

半圆形钢波纹管涵 ABAQUS 数值分析模型见图1。

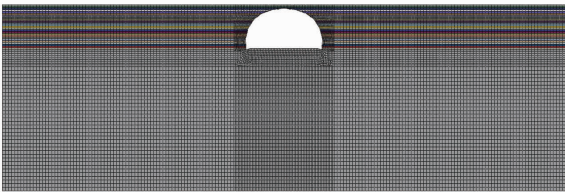


图 1 半圆形钢波纹管涵 ABAQUS 数值分析模型

采用生死单元模拟波纹钢两侧土体的分层回填过程,每层填筑高度为 0.3 m。因土体的压实使得土体内部产生的内力通过预定义场模拟。

已有研究表明,土体、主体波纹钢之间采用绑定约束与采用摩尔-库伦摩擦计算结果相近^[8-9]。据此,为提高计算效率,土体与波纹钢之间采用绑定约束。基础与波纹钢之间、基础与回填土和原状土之间采用共节点的方式进行模拟。波纹钢采用双折线本构模型进行模拟。由于基础和原状土通常应力较小,因此采用弹性本构进行模拟。回填土采用摩尔-库伦本构模型进行模拟。材料性能计算参数见表 3。

表 3 材料性能计算参数

材料	密度 / (kg·m ⁻³)	弹性模量 / MPa	泊松比	黏聚力 / Pa	摩擦角 / (°)
基础	2 400	30 000	0.20		
原状土	2 000	100	0.20		
回填土	2 000	60	0.27	1 000	35

2 计算结果分析

2.1 回填施工过程中钢波纹管涵受力分析

图 2 为在回填过程中不同跨径半圆形钢波纹管涵的回填土高度-拱顶竖向位移曲线;图 3 为跨径 15.0 m 的半圆形钢波纹管涵在特殊工况下的拱涵位

移示意图。

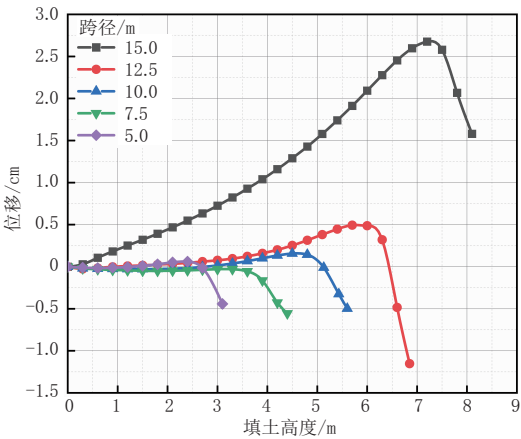


图 2 不同填土高度下钢波纹管涵拱顶竖向位移

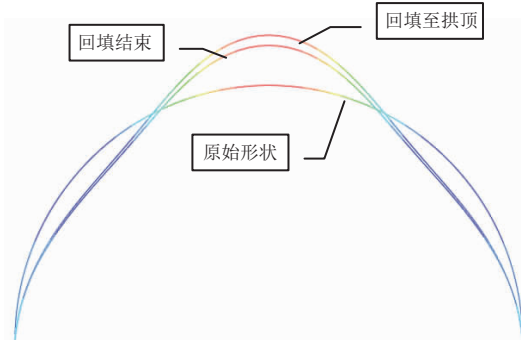


图 3 跨径 15 m 半圆形钢波纹管涵在特殊工况下的拱涵位移示意图

由图 2 可见,不同跨径的钢波纹管涵拱顶位移随回填土高度变化的趋势一致,拱顶处上拱位移量先随着填土高度的增加而增大,位移变化率亦逐渐增大;当回填至拱顶附近时拱顶发生下挠。对比不同跨径下钢波纹管涵拱顶位移可知,跨径小于 12.5 m 的钢波纹管涵在回填完成后,其拱顶残余变形量为负值,且回填过程中拱顶上拱位移变化率较小;跨径为 15.0 m 的钢波纹管涵在回填完成后的拱顶残余变形量为正值,且回填过程中拱顶上拱位移变化率较大。

图 4 为钢波纹管涵回填土高度-拱顶弯矩增量变化曲线。

由图 4 可见,不同跨径的钢波纹管涵拱顶弯矩

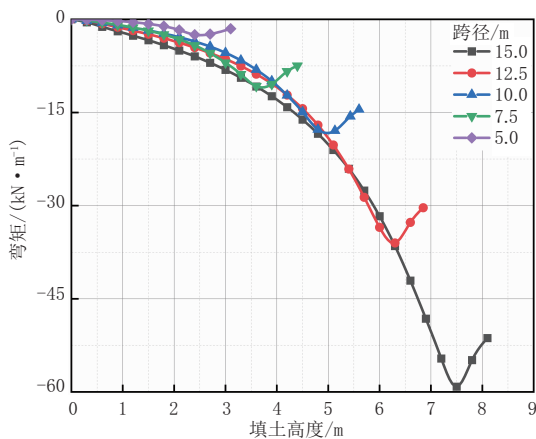


图 4 不同填土高度下钢波纹管涵的拱顶弯矩增量

增量随回填土高度变化的趋势一致，拱顶弯矩增量先随着填土高度的增加而增大，弯矩增量变化率亦逐渐增大；当回填至拱顶附近时拱顶弯矩增量减小；在拱顶弯矩减小前，同一回填高度下不同跨径钢波纹管涵的拱顶弯矩增量相差不大。

图 5 为在回填过程中不同跨径钢波纹管涵回填土高度 - 拱顶轴力增量变化曲线。

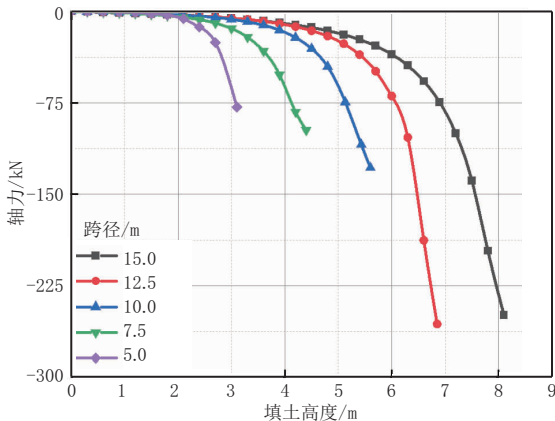


图 5 不同跨径下钢波纹管涵的拱顶轴力增量

由图 5 可见，不同跨径的钢波纹管涵拱顶轴力增量随回填土高度变化的趋势一致，拱顶处轴力增量先随着填土高度的增加而缓慢上升，在填土高度达到涵洞 0.8 倍矢高后轴力增量变化率显著增大。当钢波纹管涵跨径大于 12.5 m 时，钢波纹管涵拱顶处变形量随回填土高度变化的速率明显增大。大跨径钢波纹管涵在回填施工过程中易受机械等临时荷载作用，从而在其局部产生较大变形，进而引发结构局部畸变失稳。大跨径半圆形钢波纹管涵设计时可采用外包轻质泡沫混凝土工艺来提高结构刚度，进而提高施工过程中结构的整体稳定性。

2.2 运营过程中波纹管涵受力分析

图 6~8 为标准车辆荷载下不同跨径半圆形钢波纹管涵拱顶位移、弯矩和轴力的变化量。

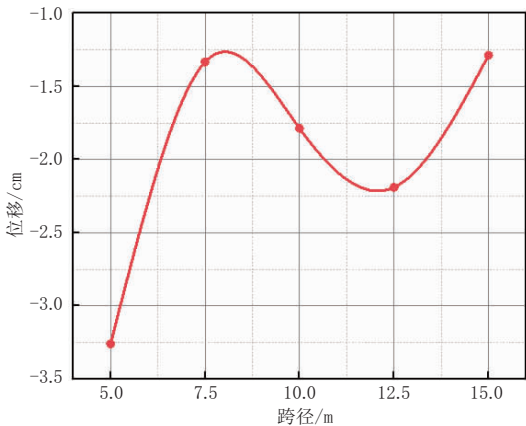


图 6 活载作用下不同跨径钢波纹管涵的拱顶位移

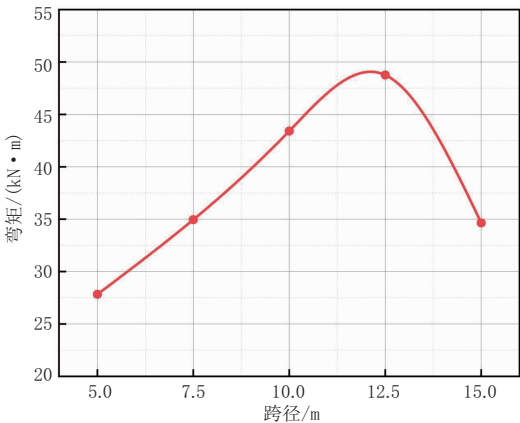


图 7 活载作用下不同跨径钢波纹管涵的拱顶弯矩增量

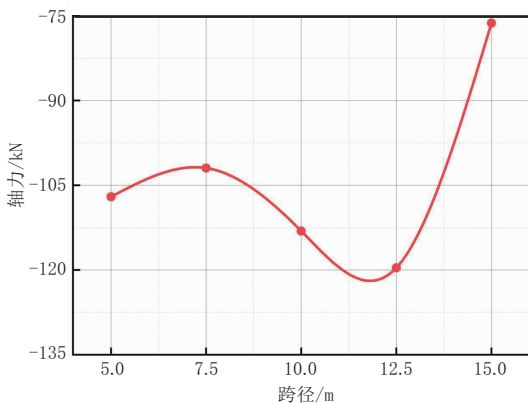


图 8 活载作用下不同跨径钢波纹管涵的拱顶轴力增量

由图 6~8 可见，施加标准车载后，钢波纹管涵拱顶均发生下挠，但下挠值不随跨径增大而增大，下挠值均小于跨径的千分之一；随着跨径的增大，钢波纹管涵拱顶弯矩增量先增大后减小，在跨径为 12.5 m 时达到峰值；当钢波纹管涵跨径超过 12.5 m 时，拱顶轴力增量显著减小，原因是活载作用范围增大引起拱身外围轴向作用力增大，致使拱身轴向应力均匀分配。

3 结 语

(1)半圆形钢波纹管涵回填施工完成时，随着钢

波纹管涵跨径增大,钢波纹管涵拱顶处竖向变形和弯矩增大。大跨径半圆形钢波纹管涵设计时可采用外包轻质泡沫混凝土工艺来提高结构刚度,进而提高施工过程中结构整体稳定性。

(2)当两侧填土高度达到0.8倍半圆形钢波纹管矢高后,拱顶处轴向力随回填土高度增加而显著提升;当两侧填土高度接近半圆形钢波纹管矢高时,拱顶处上拱变形量达到最大值。

(3)活载作用下,随着半圆形钢波纹管涵跨径增大,拱顶弯矩先增大后减小,同一条件下跨径大于某一定值时活载作用有利于拱圈内应力均匀分配。

参考文献:

- [1] 刘鹏.高填方大跨径钢波纹管涵洞通道力学性能研究[J].公路工程,2015,40(4):215-219.
- [2] DUNCAN J M. Soil-culvert interaction method for design of metal culverts[R]. Transportation Research Record 678, Washington D. C., 1978.
- [3] DUNCAN J M, SEED R B, DRAWSKY R H. Design of corrugated metal box culverts[M]. Washington D.C., USA, Transportation Research Record, 1985:33-41.
- [4] 李祝龙.公路钢波纹管涵洞设计与施工技术研究[D].西安:长安大学,2006.
- [5] BEBEN D, MANKO Z. Static tests on a soil-steel bridge structure with a relieving slab[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2010, 6(3): 329-346.
- [6] 刘保东,李雨株,王全录,等.大跨覆土波纹钢板拱桥结构加强措施研究[J].北京交通大学学报,2013,37(4):24-29.
- [7] 张阳,彭志辉.高填方波形钢板拱桥优化设计技术研究[J].公路工程,2017,42(6):122-127.
- [8] KATONA G M. Influence of soil models on structural performance of buried culverts [J]. International Journal of Geomechanics, 2016, 17(1): 04016031-04016031.
- [9] 宫俊飞.高填方大跨钢波纹管涵力学性能测试与分析[D].长沙:湖南大学,2016.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿邮箱:cdq@smedi.com 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com 投稿网站:<http://www.csdqyfh.com>