

铁路波纹钢管涵洞关键设计参数敏感性分析

万 明

中国铁路设计集团有限公司 天津 300308

【摘 要】：为研究铁路波纹钢管涵洞关键设计参数对结构性能的影响规律，本文基于有限元软件 ABAQUS 建立三维数值模型，通过对比不同波形、填土厚度、填土弹性模量及壁厚条件下的波纹钢管应力、变形及土压力分布，定量分析各参数对结构响应的影响，结论可为高海拔多年冻土地区铁路波纹钢管涵的设计参数选取提供理论依据和定量参考。

【关键词】：波纹钢管涵洞；波形；填土厚度；填土模量；壁厚

DOI:10.12417/2811-0536.26.09.082

引言

波纹钢管涵具有良好的基础变形适应能力、施工便捷等优点。其结构性能受波形、填土厚度、填土模量及壁厚等设计参数影响显著，合理选取关键参数是确保涵洞长期安全运营的核心问题，开展相关研究非常有必要。本文通过定量对比不同设计参数组合下的结构响应，明确了各设计参数的敏感性特征，系统性揭示了填土厚度、填土模量等参数对活载应力占比、土拱效应的影响机制。

1 有限元模型

1.1 模型建立

采用有限元软件 ABAQUS 建立计算模型，管轴方向 1.2m，垂直管轴方向 35m，如图 1 所示。为降低模型边界效应对分析结果的影响，模型中结构下侧建立 3 倍结构矢高的原状土体。结构有限元模型包括波纹钢管涵、垫层及回填砂砾土、原状土体 3 个部分。

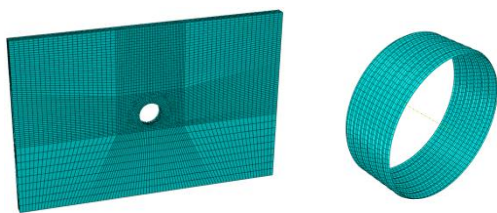


图 1 有限元模型

1.2 材料属性

各材料熟属性如表 1 所示。

表 1 材料属性

材料类别	密度/(kg/m ³)	弹性模量/MPa	泊松比
波纹钢管	8000	206×103	0.28
垫层及回填砂砾土	2000	24	0.3

1.3 接触、边界条件及荷载施加方式

(1) 接触方式：土体和波纹钢管涵的接触方式采

用绑定约束（tie）。

(2) 约束条件：原状土下端采用完全固定的方式进行约束；土体左右两侧及前后侧边界采用对称/反对称的方式进行约束。

(3) 荷载施加方式：考虑道床荷载、列车荷载时，将重量转换为压强的形式施加到结构表面。

2 波形

采用正弦法将波纹钢板简化为平钢板时，波形的大小会对钢板截面单位长度的惯性矩产生很大影响，如同为 6mm 厚度波形（200mm×55mm）和波形（230mm×64mm）的等效截面积基本一致，后者的截面积甚至相对稍小，但截面惯性矩后者是前者的 1.32 倍，截面模量后者是前者的 1.15 倍。管径 1.5m~3.0m 的整体型波纹钢管，主要可供选择的波形有 200mm×55mm 和 230mm×64mm 两种。对管径 3.0m、壁厚 6mm 的波纹钢管涵采用上述两种不同波形进行对比分析，应力结果如表 2 所示。

表 2 管径 3m 不同波形的波纹钢管受力/MPa

波形	管径/m	应力	填土高/m			
			1.5	3.0	6.0	10.0
200×55	3.0	Mises 最大应力	72.08	88.75	121.7	167.2
200×55	3.0	单方向最大弯曲应力	70.57	86.86	119.0	163.6
230×64	3.0	Mises 最大应力	68.93	89.52	116.6	159.8
230×64	3.0	单方向最大弯曲应力	68.82	89.40	116.4	159.5

230mm×64mm 波形的惯性矩及截面模量相对较大，应力相对稍小，两种波形的结构受力差异不大，路基地表竖向变形基本接近。1.5~3.0m 管径的波纹钢

管涵,采用 200mm×55mm 和 230mm×64mm 两种波形均可。

3 填土厚度

对管径 3.0m、壁厚 6mm、波形 200mm×55mm 的波纹钢管涵不同填土厚度进行比较分析,结果如表 3 所示。

表 3 不同填土厚度波纹钢管应力表

填土高度(m)	Mises 应力/MPa			活载占比
	恒载	活载	恒载+活载	
1.5	40.46	34.11	72.08	47.3%
3	59.18	31.3	88.75	35.3%
6	95.24	26.76	121.7	22.0%
8	119.8	24.84	144	17.3%
9	137.9	25.02	162.7	15.4%
10	144.2	23.36	167.1	14.0%

计算表明,填土厚度越大,波纹钢管的水平变形及竖向相对变形越大。随着填土厚度的增加,恒载作用逐渐变大,活载作用逐渐减小,活载减小速率比恒载增加速率小。管顶填土厚度为 1.5m 时,活载产生的应力值占总应力比值为 47.3%,当管顶填土增加到 10m 时,活载产生的应力值占 14.0%。计算表明,继续减小管顶以上填土厚度,活载作用占比将超过总荷载的 50%,不利于结构受力,建议管顶最小填土厚度取 1.5m。

4 填土模量

《Canadian Highway Bridge Design Code》(CSA S6:2019)中对于砂压实度为 85%、90%、95%、100% 时弹性模量分别取 6MPa、12 MPa、24 MPa 和 30 MPa。为研究填土弹性模量对波纹钢管涵洞性能,结合工程实践经验,分别取 6 MPa、12 MPa、16 MPa、24 MPa、30 MPa、36 MPa、42 MPa、48 MPa、54 MPa、60MPa 进行计算分析。以管径 3.0m、壁厚 6mm、波形 230mm×64mm 的波纹钢管涵洞为研究对象,填土厚度 10m。

不同填土弹性模量,波纹钢管应力详见表 4。填土弹性模量对于结构受力影响明显,随着填土弹性模量的增加,波纹钢管应力不断减小,填土弹性模量取 60MPa 时,波纹钢管的最大应力只有填土弹性模量取 6MPa 时的 0.31。其中填土弹性模量在 6MPa~24 MPa 之间变化时,对波纹钢管的受力影响最为显著,在 24MPa~60 MPa 之间变化时,对波纹钢管的受力影响

相对较小。

表 4 不同填土弹性模量影响分析表

填土弹模/MPa	Mises 最大应力/MPa	Mises 最大应力相对值	单方向最大弯曲应力/MPa	单方向最大弯曲应力相对值
6	392.6	2.46	375.3	2.35
12	238.4	1.49	239.6	1.50
16	200.3	1.25	200.9	1.26
24	159.8	1.00	159.5	1.00
30	142.7	0.89	142.2	0.89
36	131.2	0.82	130.3	0.82
42	128	0.80	125.3	0.79
48	125.5	0.79	123	0.77
54	123.5	0.77	121.1	0.76
60	121.8	0.76	119.5	0.75

因此,施工时对于波纹钢管涵洞结构性回填区范围内填土压实度要求较为严格,一般不小于 95%,即弹性模量在 24MPa 左右。

5 壁厚

针对 1.5~3.0m 管径、1.5m~10m 填土厚度的波纹钢管涵洞,选取不同的板厚,对结构恒载+活载工况进行受力分析,填土弹性模量取 24MPa,并分析 12MPa 时的情况,以确保结构安全。

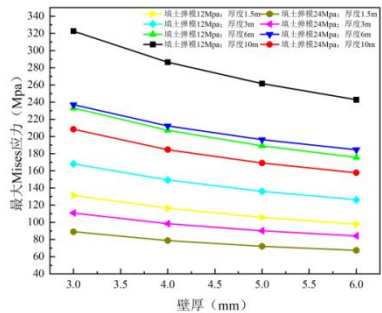


图 2 1.5m 管径时壁厚对波纹钢管受力影响分析图

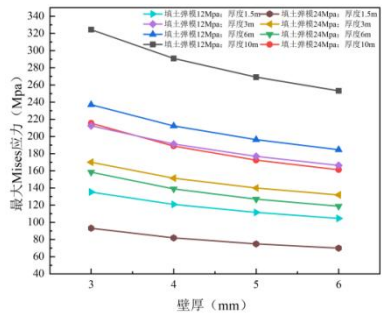


图 3 2.0m 管径时壁厚对波纹钢管受力影响分析图

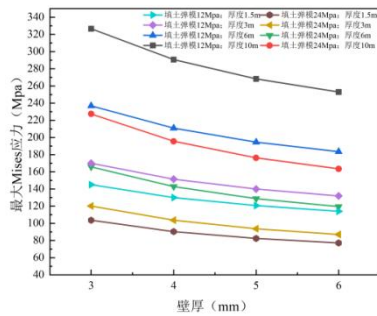


图 4 2.5m 管径时壁厚对波纹钢管受力影响分析图

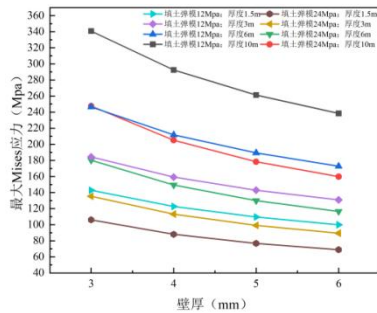


图 5 3.0m 管径时壁厚对波纹钢管受力影响分析图

增加壁厚,能减小波纹钢管的受力,且随着管径的增加,影响会稍显著。应根据结构的受力需要,选用合理的板厚。

6 推荐波纹钢管参数

结合上述分析及工程项目特点,不同管径、填土厚度推荐采用波纹钢管参数详见表 5。当耐久性设计需要时,适当增加钢板厚度。

表 5 推荐采用波纹钢管参数

管径/m	填土厚度/m	波形/mm	板厚/mm
3.0	$1.5 \leq h \leq 6.0$	230×64	6.0
	$6.0 < h \leq 10.0$	230×64	6.0

参考文献:

- [1] 许见超,董亮,随意,等.铁路波纹钢管涵力学特性数值仿真及参数分析[J].铁道建筑,2023,63(8):70-75.
- [2] 郑小艳,胡连军.波纹管涵洞关键设计参数研究[J].铁道工程学报,2016(6):54-59.
- [3] 张红宇,吴文清,梁养辉,等.大孔径钢波纹涵洞受力特征研究及效益分析[J].公路工程,2016,41(2):196-200.
- [4] 姚雷,邹明,吴昌松,等.波纹钢加固盖板涵受力机理及影响参数数值研究[J].工程抗震与加固改造,2024,46(5):169-178.
- [5] 庞军,吴红刚,张辉,等.运营铁路增线帮宽路基变形和稳定性问题综述[J].铁道勘察,2023,49(5):91-101.

管径/m	填土厚度/m	波形/mm	板厚/mm
2.5	$1.5 \leq h \leq 6.0$	200×55	5.0
	$6.0 < h \leq 10.0$	200×55	6.0
2.0	$1.5 \leq h \leq 6.0$	200×55	5.0
	$6.0 < h \leq 10.0$	200×55	6.0
1.5	$1.5 \leq h \leq 6.0$	200×55	5.0
	$6.0 < h \leq 10.0$	200×55	6.0

7 结论

(1) 1.5~3.0m 管径的波纹钢管涵, 200mm×55mm 和 230mm×64mm 两种波形结构受力差异不大, 路基地表竖向变形基本接近。

(2) 随着填土厚度的增加, 恒载作用逐渐变大, 活载作用逐渐减小; 管顶填土厚度从 10m 减小到 1.5m 时, 活载作用占比从 14.0% 增加到 47.3%。

(3) 在管顶以上填土内部, 离管顶高度越小的平面土压力差越大。3m 管径、10m 填土时, 在管顶以上 1m 位置处土压力差约为 21kPa; 管顶 5m 以上位置, 土压力数值在水平方向分布几乎无差异。

(4) 随着填土弹性模量的增加, 波纹钢管应力不断减小, 在 6MPa~24 MPa 之间时对波纹钢管的受力影响最为显著。

(5) 管顶填土厚度及填土弹性模量是波纹钢管涵洞两个非常重要的参数, 建议管顶最小填土厚度取 1.5m。

(6) 不同管径、填土厚度的波纹钢管涵洞推荐采用参数详见表 5 所示。