

# 波形钢板管涵的刚度计算方法

罗国新<sup>1</sup>, 方小林<sup>2</sup>, 钮洪亮<sup>2</sup>, 段宝山<sup>2</sup>

(1. 招商中宇工程咨询(重庆)有限公司, 重庆 400000; 2. 中国建筑先进技术研究院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**结合波形钢板管涵的弹性力学性能与加拿大波形钢桥涵规范,以半圆拱为例推导了波形钢管涵结构变形的计算方法。利用此方法计算了典型尺寸的波形钢板管涵结构在填土作用下结构竖向、横向变形随填土高度的变化规律,并与工程实测结果进行了对比。对比结果显示,提出的计算方法能基本模拟波形钢板管涵结构的形状变化,除填土高度较小时拱顶竖向变形差距较大外,其余工况下提出的方法计算结果与实测值基本吻合,表明提出的波形钢板管涵结构的变形计算方法具有较高的合理性,可作为波形钢板管涵结构设计的参考。

**关键词:**波形钢板管涵;计算方法;拱顶竖向变形;拱腰横向变形

**中图分类号:** TU391 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2024)02-0028-06

## 0 引言

波形钢桥涵结构作为常规涵洞、通道的一种替代选择,具有对地基要求低、变形能力强、抗震性能优越、施工方便等优点,在地基条件不良、常规建筑材料限制较大的地方具有明显优势,在国内得到了越来越广泛的应用。作为一种柔性埋置式结构,波形钢桥涵与周围土体共同承担恒载和活载,在荷载作用下的变形比常规钢筋混凝土结构大。在国内推广应用过程中,施工建设人员及项目主管部门基于社会影响以及结构正常使用状态的考虑,对此类结构的变形问题具有一定的担忧,但目前国内外规范对于变形的计算均未给出简单可行的分析方法。目前对于波形钢桥涵变形问题的研究,田国伟等<sup>[1]</sup>基于耶氏模式推导得出了大口径输水管的弹性力学解;彭述权等<sup>[2]</sup>将文献<sup>[1]</sup>理论进行延伸,得到了开口结构的波形钢桥涵的弹性力学解;刘百来等<sup>[3]</sup>、蒋雪梅<sup>[4]</sup>从数值分析的角度,利用通用有限元对波形钢桥涵的受力过程进行了分析。但这些学者的探索主要从弹性力学角度和数值模拟角度分析波形钢桥涵结构的变形,均是此类结构当作特殊结构进行设计,极不利于此类结构的推广应用,因此迫切需要一种方便工程应用的计算理论和方法,以指导波形钢埋置式结构的变形计算。

结合波形钢管涵在周围覆土作用下的受力状态,借鉴加拿大规范的经验,通过一定的假设和理论推导,给出了波形钢管涵变形的计算方法,为此类结构变形计算提供有益的参考借鉴。

## 1 波形钢桥涵弹性力学性能分析

### 1.1 变形机理

波形钢桥涵是一种柔性结构,通过周围土体的弹性约束和变形实现土压力的重新分布,利用土与结构的相互作用分散上部荷载<sup>[5]</sup>。在周边填土及车轮荷载作用下,柔性的波形钢板产生拱顶的竖向变形及拱脚处的横向变形,经压实的拱脚、拱腰处的填土会阻碍结构的横向变形,如同是波形钢结构的一部分,共同抵抗拱顶的竖向变形,如图1所示。波形钢桥涵作为柔性结构,与土体协同变形,因此波纹钢桥涵拱脚约束

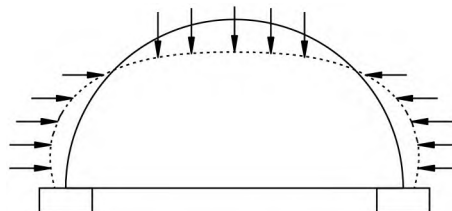


图1 波形钢板桥涵变形示意图

收稿日期:2024-01-04 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20240005

作者简介:罗国新(1983—),男,高级工程师,研究方向为桥梁施工。E-mail:49591537@qq.com

罗国新,方小林,钮洪亮,等.波形钢板管涵的刚度计算方法[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2024,37(2):28-32,112.

设计时,一般采用尺寸较小、约束较弱的混凝土条形基础或波纹钢板基础,使结构的受力模式与管涵相近,此时拱脚基础不限制结构拱脚处的横向变形和转动,仅传递竖向荷载。

## 1.2 受力模式

根据波形钢桥涵的变形机理,可知波形钢桥涵的受力应考虑波形钢板与周围土体之间的相互作用,因此,在填土作用下波形钢桥涵的受力可看作周围土体的静土压力(如图 2 所示)与两者相互作用产生的附加土压力(如图 3 所示)的叠加。

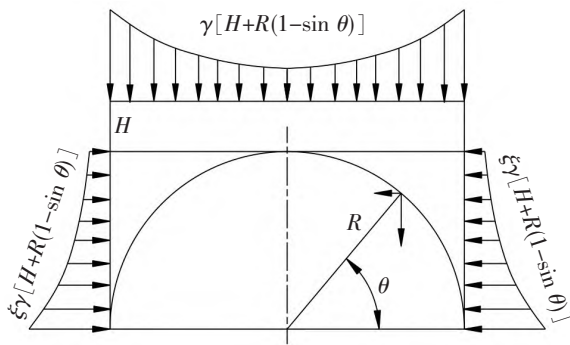


图 2 波形钢桥涵周围土体静压力

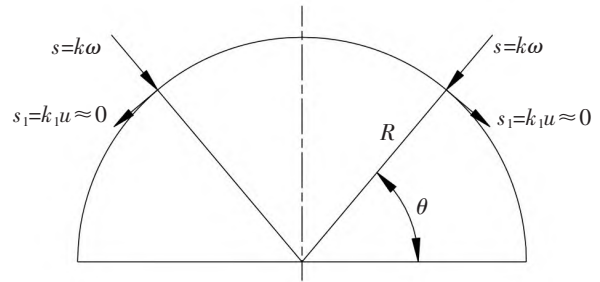


图 3 波形钢桥涵附加土压力

根据图 2,结构受到的竖向静土压力为  $\gamma[H+R(1-\sin\theta)]$ ,水平静土压力为  $\xi\gamma[H+R(1-\sin\theta)]$ ,其中, $\gamma$  为土体重度; $H$  为拱顶以上的填土厚度; $\xi$  为土体侧压力系数。

根据图 3 以及文献[2]的研究可知,波形钢桥涵还要受到自身形状变化引起的土的附加径向力  $s=k\omega$  和附加切向力  $s_1=k_1u$ ,其中, $\omega$ 、 $u$  分别为结构壁上一点的径向、切向位移; $k$  为土抵抗径向位移的抗力系数, $k=\frac{E_0}{2R(1-\mu_0^2)\omega_0}$ , $E_0$  为土的弹性模量, $\mu_0$  为土的泊松比, $\omega_0$  为与结构几何尺寸相关的参数; $k_1$  为土抵抗切向位移的抗力系数,根据文献[2]的研究, $k_1$  较小,可取  $k_1=0$ 。

## 2 工程计算方法

虽然弹性力学解、有限元分析的方法均可得到波形钢桥涵的变形,但这 2 种方法均操作困难,不易于工程设计人员采用,因此在做出合理假设的前提下,探索波形钢桥涵变形计算的工程计算方法。

### 2.1 基本假设

对于波形钢桥涵结构,在周围覆土及活载作用下发生变形,从工程实践及常见病害分析可知,波形钢桥涵主要变形为结构形状的变化,即以结构径向变形为主,环向变形基本可以忽略不计。以填土高度为 20 m 的 6 m 管径波形钢管为例,采用 7 mm 厚、波形尺寸 380 mm×140 mm 的波形钢时,其管壁压力约为 170 MPa,引起的管壁环向压缩约 16 mm,直径减小约 5 mm,基本可忽略不计。基于此,作出如下假设:①考虑波形钢板与周围覆土之间的相互作用;②波形钢管涵在荷载作用下仅发生形状变化,结构环向长度变化忽略不计。

### 2.2 基本方程

基于以上假设,以半圆弧波形钢桥涵为例,结构在承受荷载之后,截面形状由半圆形变化为近似半椭圆形。假设半圆弧拱的半径为  $R$ ,变形后的半椭圆的长半轴为  $\beta R$ 、短半轴为  $\alpha R$ ,则结构在  $\theta$  位置处的法向位移为

$$\omega(\theta) = R - \sqrt{(\alpha R \sin \theta)^2 + (\beta R \cos \theta)^2} \quad (1)$$

式中, $\theta$  为自拱脚水平线起算的转角变量,变化范围为  $0 \sim 0.5\pi$ 。因此, $\theta$  位置处管壁承受的法向附加土压力为

$$s(\theta) = k\omega(\theta) \quad (2)$$

式中,  $k$  为土压力系数

$$k = \frac{E_0}{2R(1-\mu_0^2)\omega_0} \quad (3)$$

式中,  $E_0$ 、 $\mu_0$  分别为土的弹性模量和泊松比;  $\omega_0$  为与结构几何尺寸相关的参数

$$\omega_0 = -0.006\left(\frac{L}{2R}\right)^2 + 0.06\frac{L}{2R} + 0.73 \quad (4)$$

从弹性力学的角度出发, 波形钢管涵的受力模式(图 2、图 3 所示), 可得单位长度半圆弧结构在拱脚位置所承受的竖向力为

$$F_V = 0.5\gamma[D_h(R+H) - 0.5\pi R^2] + \int_0^{0.5\pi} s(\theta)\sin\theta R d\theta \quad (5)$$

式中, 前半部分为起拱线以上、结构范围内的填土静土压力; 第 2 项  $\int_0^{0.5\pi} s(\theta)\sin\theta R d\theta$  为结构形状变化产生的附加土压力。

从经验公式出发, 文献[6]充分考虑了土和波形钢的协同作用, 基于理论和试验统计, 回归拟合了管壁推力的经验计算公式, 被证实具有较高的准确度。根据文献[6], 波形钢桥涵在拱脚处管壁推力的标准值为

$$T_D = 0.5(1 - 0.1C_s)A_f W \quad (6)$$

式中,  $A_f$  为考虑结构土拱效应的经验拱系数;  $C_s$  为考虑填土特性与结构尺寸的轴向刚度参数

$$C_s = \frac{E_0 D_v}{EA} \quad (7)$$

式中,  $E$  为波形钢材料的弹性模量;  $A$  为每延米波形钢截面面积;  $D_v$  为波形钢结构的竖向尺寸, 对于此节讨论的半圆弧拱,  $D_v = 2R$ 。

$W$  为起拱线以上、结构范围内的填土的重力

$$W = \gamma[D_h(R+H) - 0.5\pi R^2] \quad (8)$$

式中,  $H$  为拱顶填土高度;  $\gamma$  为填土重度;  $D_h = 2R$ 。由弹性力学分析得出的拱脚处竖向力与经验公式计算得出的拱脚处管壁推力相同, 可得

$$F_V = T_D \quad (9)$$

根据基本假设(2), 由变形前后结构轴向长度不变, 可得

$$\int_0^\pi \sqrt{(\alpha R \sin\theta)^2 + (\beta R \cos\theta)^2} d\theta = \pi R \quad (10)$$

联立式(9)、式(10)求解, 即可得半圆形拱在竖向和横向上的尺寸扩大系数  $\alpha$ 、 $\beta$ , 进而可求得结构的变形。

### 3 工程实例验证

#### 3.1 工程实例概况

针对提出的工程计算方法, 以某项目 6 m 管径的波形钢圆管为例, 测试结构施工回填过程中结构的变形变化规律, 验证本工程计算方法的合理性和可靠性。

6 m 管径圆形波形钢管采用 380 mm × 140 mm 波形, 波形钢板壁厚 7 mm, 填土高度 7.5 m。波形钢板均采用 Q235-A 热轧钢板加工成型。

#### 3.2 变形测点布置

为了保证测试数据的准确性, 以道路中心线为对称面, 两侧各间距 3~4 m 设置 1 个测试截面, 共设置 3 个变形测试截面, 每个测试截面分别在拱顶、拱底、拱腰两侧设置拉线位移计, 测试截面及测点如图 4 所示。

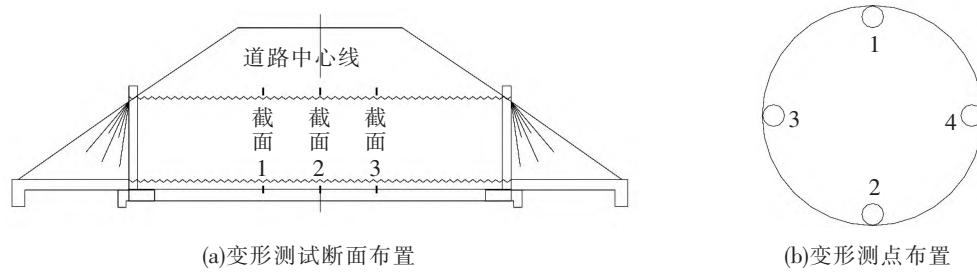


图 4 变形测试断面及测点布置

### 3.3 施工工况

对于结构变形的测试,自圆管涵回填至拱顶齐平时开始测试,在每层填土回填压实完成后,读取各测点的变形值。圆管的施工回填工况如表 1 所示。

表 1 波形钢管施工回填工况表

回填工况	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7	工况 8	工况 9	工况 10
填土高度/m	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.5

注:填土高度自拱顶水平面起算。

## 4 计算结果及对比

### 4.1 本文方法计算过程

以回填工况 7 为例,工程计算方法计算过程如下: $R = 3 \text{ m}$ ,  $L = 6 \text{ m}$ , 根据式(4)计算得  $\omega_0 = 0.784$ ;  $E_0 = 12 \text{ MPa}$ ,  $\mu_0 = 0.35$ , 由式(3)计算得  $k = 2.907 \text{ MPa/m}$ ;  $E = 205 \text{ GPa}$ ,  $A = 9\,076 \text{ mm}^2/\text{m}$ , 由式(7)计算得  $C_s = 0.04$ ;  $H = 4 \text{ m}$ ,  $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ , 由式(8)计算得  $W = 529.5 \text{ kN/m}$ ;  $A_f$  根据  $C_s$  查表得 1.195, 由式(6)计算得  $T_D = 315 \text{ kN/m}$ 。根据式(3)、式(9)、式(10), 利用数值计算方法即可得  $\alpha = 0.994\,2$ ,  $\beta = 1.005\,8$ , 进而求得竖向和横向变形分别为  $17.34 \text{ mm}$ 、 $17.29 \text{ mm}$ 。

### 4.2 本文计算与实测变形对比分析

对于回填过程中的各个工况,分别按照本文计算公式求解,得到与实测变形值对比如图 5、图 6 所示,实测值与本文公式计算值对比如表 2 所示,表 2 中  $a$  为拱顶竖向变形差异,  $b$  为拱腰水平变形差异,均为(计算值 - 实测平均值)/实测平均值。

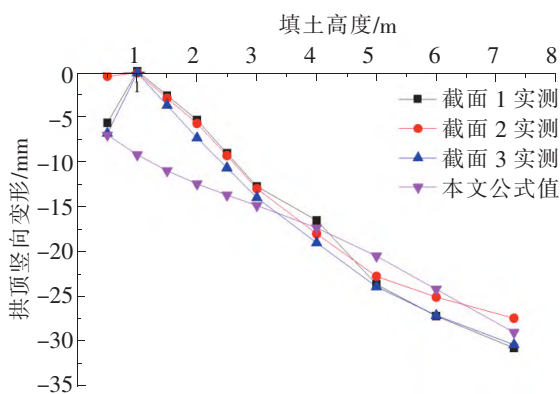


图 5 拱顶竖向变形(测点 1、2 差值)变化

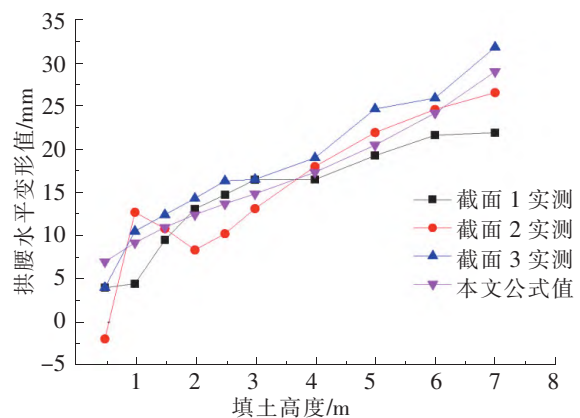


图 6 拱腰水平变形(测点 3、4 差值)变化

从图 5 可知,结构实测和本文公式计算出的结构拱顶竖向变形随填土高度的增加,均呈逐渐增大的总趋势,且随着填土高度的增加竖向变形实测值和计算值差距逐渐变小。在  $0.5 \sim 1 \text{ m}$  填土高度时,实测的 3 个截面处均出现了轻微上拱现象,但本文公式没能体现出此变化趋势。通过理论分析,当填土高度较小时,施工机械荷载对结构竖向变形影响更加明显,在拱顶两侧压实填土时,施工机械荷载较大,会引起两侧土体挤压拱侧,从而引起拱顶上拱;随着填土高度的增加,填土荷载的分布更加均匀,且逐渐成为

波形钢结构的主要荷载,施工机械的影响逐渐减小,此时拱顶竖向变形主要是拱顶填土的重力作用引起的。进一步分析发现,施工机械压实工艺稍有不同时,对上拱的影响具有较大差异性。至于本文公式的计算,考虑到回填高度较小时机械压实具有较大的随机性,拱顶的竖向变形与施工过程息息相关,难以形成标准的分析计算理论,且此阶段的拱顶变形在整个回填过程中的占比不大,因此简化分析,仅针对填土荷载作用下结构的拱顶竖向变形计算方法进行了推导。

从图 6 可知,结构实测和本文公式计算出的拱腰处水平变形随填土高度的增加,也均呈逐渐增大的总趋势。虽然 3 个截面的水平变形实测值具有较大的离散性,但本文公式计算出的水平变形基本在实测范围之间,且与实测的最大变形值误差很小,表明本文提出的计算方法能有效分析拱腰处的水平变形值。

表 2 文中方法与实测值对比分析

填土高度/m	拱顶竖向变形			拱腰水平变形		
	实测平均值/mm	计算值/mm	$a/\%$	实测平均值/mm	计算值/mm	$b/\%$
0.5	-4.30	-7.00	62.79	2.02	7.00	246.53
1.0	-0.02	-9.19	458.50	9.23	9.18	0.54
1.5	-3.06	-10.97	258.50	10.92	10.95	0.27
2.0	-6.12	-12.44	103.27	11.93	12.41	4.02
2.5	-9.66	-13.69	41.72	13.77	13.66	0.80
3.0	-13.23	-14.35	8.47	15.38	14.81	3.71
4.0	-17.83	-17.34	2.75	17.83	17.29	3.03
5.0	-22.00	-20.48	6.91	21.03	20.41	2.95
6.0	-25.31	-24.19	4.43	24.05	24.10	0.21
7.5	-29.49	-30.71	4.14	29.17	30.56	4.77

由表 2 可知,随着填土高度的增加,本文提出的工程计算方法计算出的拱顶竖向变形、拱腰水平变形与实测值间的差距逐渐缩小,在填土 3.0 m 以上时,拱顶竖向变形差异均可达到 10% 以内;在填土 1.0 m 以上时,拱腰水平变形差异即达到 10% 以内,且普遍在 5% 以下,说明在填土高度较高时(大于 3.0 m),本文提出的计算方法具有较高的精度。对比拱顶竖向变形与拱腰水平变形的实测值可知,拱顶竖向挠度的绝对值(即结构竖向压缩变形量)与拱腰水平变形的绝对值(即结构水平宽度伸长量)相差不大,且随着填土高度的增加其差异逐渐缩小,间接证明了本文假设的变形模式的正确性,即主要为形状变化。

## 5 结论

(1)在填土作用下,波形钢结构的变形特点为拱顶竖向下挠、拱腰横向外推,且以截面形状变化为主,波形钢结构沿环向的轴压变形可忽略不计,圆形波形钢结构受压后基本呈椭圆形状。

(2)本文提出的波形钢管涵变形的工程计算方法在填土高度较高时,与实测结果具有较高的吻合度,可作为工程设计人员计算波形钢管涵结构变形的参考。

(3)本文提出的工程计算方法不适用于填土高度较小时结构的变形计算,无法体现出填土高度较小时施工压实引起的结构上拱。

## 参 考 文 献

- [1]田国伟,刘兴业,孙中岳.大口径输水钢管的受力分析[C]//第十届全国结构工程学术会议论文集.南京:中国力学学会,2001:463-467.
- [2]彭述权,樊玲,蒋沧如,等.波形钢板桥涵结构计算及其敏感性分析[J].同济大学学报,2005,33(12):1571-1575.
- [3]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].西安工业学院学报,2006,26(1):83-86.
- [4]蒋雪梅.公路钢波纹拱涵和管涵的试验研究与计算分析[D].北京:北京交通大学,2005.
- [5]段宝山,夏飞,张春华.推力梁对波形钢通道小桥力学性能影响分析[J].中外公路,2018,38(4):164-167.
- [6]CSA.Canadian highway bridge design code:CAN/CSA-S6-06[S].Toronto:Canadian Standards Association,2006.

(下转第 112 页)

conducted. Then, the relationship between the internal volumetric water content of expansive soil filled core subgrade in Meiyu season and the type of surrounding cohesive soil, the thickness of surrounding soil layer and the compaction coefficient of subgrade was studied, and the development of swelling force of filled core expansive soil in Meiyu season was analyzed. Finally, the design scheme for expansive soil filled core subgrade was determined, and the swelling force was introduced into the formula for calculating the safety factor of the broken-line sliding surface stability. The results show that using mild clay as the surrounding soil with a thickness of 1 m and a compaction coefficient of 0.92 for the expansive soil filled core subgrade of Tongling Jiangbei Port Railway Special Line not only reduces waste, but also meets the requirements of the specification.

**Key words:** expansive soil filled core subgrade; Meiyu climate zone; swelling force; volumetric water content

~~~~~  
(上接第 32 页)

## Calculation Method for Stiffness of Corrugated Steel Plate Culvert

LUO Guoxin<sup>1</sup>, FANG Xiaolin<sup>2</sup>, NIU Hongliang<sup>2</sup>, DUAN Baoshan<sup>2</sup>

(1. China Merchants Zhongyu Engineering Consulting(Chongqing) Co. Ltd., Chongqing 400000, China;

2. China Construction Institute of Advanced Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Based on the elastic properties of corrugated steel plate culverts and the Canadian code for corrugated steel bridges and culverts, a calculation method for structural deformation of corrugated steel plate culverts was derived by taking the semi-circular arch as an example. Then, using this method, the vertical and horizontal deformation of typical sized circular corrugated steel plate culvert structures under the action of filling with the change of filling height was calculated, and the results were compared with the actually measured results. The comparison results show that the proposed calculation method can basically simulate the shape change of the corrugated steel plate culvert structure. Except for the large difference in vertical deformation of the arch crown when the filling height is small, the calculation results of this method are basically consistent with the measured values under other working conditions, indicating that the deformation calculation method of the corrugated steel plate culvert structure proposed in this paper is highly reasonable and can be used as a reference for the structural design of corrugated steel plate culverts.

**Key words:** corrugated steel plate culverts; calculation method; vertical deformation of arch crown; horizontal deformation of arch waist