

埋置式钢波纹管设计方法的比较及分析

李元松¹,李洋¹,段鑫¹,余顺新²,卢傲²

1. 武汉工程大学资源与土木工程学院,湖北 武汉 430074;

2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司,湖北 武汉 430056

摘要:埋置式钢波纹管因其具有施工方便、环保等优点,在国外被广泛地应用于水利治理、隧道、小跨径桥涵等工程中,但在国内无成熟经验与相应的设计规范,分析研究美国和加拿大规范对我国相应工程的设计与规范的制订具有重要意义。首先介绍了美加规范关于埋置式钢波纹管的设计原理、计算方法以及参数取值。在此基础上,运用控制变量法对钢波纹管最小覆土厚度和管壁强度验算进行实例对比。算例表明:最小覆土厚度计算时,加拿大规范除考虑管—土相互作用和土拱效应之外,还考虑了波纹管的管形效应,计算值平均比美国规范计算值大34.05%;管壁验算时美国规范没有考虑土拱效应和波纹管两侧填土重量,管壁抗力比加拿大规范计算值平均大50%以上;美国规范中关于施工验算的要求是加拿大规范的有益补充。

关键词:埋置式;钢波纹管;涵洞;设计方法;对比

中图分类号:U449.1

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2014.05.004

0 引言

规范是工程设计的灵魂,系统研究掌握国外标准规范,是企业跨出国门走向海外市场的基础和增强国际竞争力的关键;同时修订与完善国内现行规范,必须借鉴与吸收国际标准的先进经验^[1]。埋置式金属波纹管是一种柔性结构,受力情况合理,荷载分布均匀,具有一定的抗震能力,能适应较大的沉降与变形;金属波纹管采用标准化设计、现场安装土建与型材可分开实施,工期短,环保意义深远,工后营运、养护成本低;被广泛应用于水利治理、隧道、小跨径桥梁等许多方面。我国近年大量建设高速公路,埋置式波纹管具有广阔的应用前景^[2]。

目前埋置式波纹管设计国内并没有相关规范,笔者比较美加规范的目的是为我国的规范制定和工程设计积累经验。

1 加拿大 CHBDC 设计方法

加拿大规范采用极限状态设计理论,包括最小覆土厚度计算和结构验算。

1.1 最小覆土厚度计算

最小覆土厚度(H_{\min})即从波纹顶部到路面刚性材料底部的覆土厚度所需要的最小值。

加拿大规范 CHBDC^[3] (Canadian Highway

Bridge Design Code)规定钢波纹管的最小覆土厚度 H_{\min} 计算公式如下:

$$H_{\min} = \max \left(0.6, \frac{D_h}{6} \left[\frac{D_h}{D_v} \right]^{0.5}, 0.4 \left[\frac{D_h}{D_v} \right]^2 \right)$$

其中, D_v 为波纹管内部空间高度, D_h 为波纹管内部宽度。若选用深波纹的波纹管,即波距 \times 波高大于或者等于 300 mm \times 110 mm 的波纹管,则最小覆土厚度应取 1.5 m 和同尺寸浅波纹管的最小覆土厚度之中的较小值。

1.2 结构验算

加拿大规范的结构验算包括压力计算、管壁验算和连接强度验算。

1.2.1 压力计算 由活载和恒载产生的管壁压力:

$$T_{fl} = \alpha_D T_D + \alpha_L T_L (1 + DLA)$$

其中, T_D 为恒载产生的压力, T_L 为活载产生的压力, DLA 为冲击系数, α_D 为恒载分项系数, α_L 为活载分项系数。

考虑地震作用的总压力 T_{f2} 应按下式计算:

$$T_{f2} = \alpha_D T_D + T_E$$

其中, T_E 为地震作用对管壁产生的压力。

(1) 恒载产生的压力

恒载产生的压力 $T_D = 0.5(1.0 - 0.1C_s)A_f W$ 。其中, A_f 为土拱系数,可由图 1 查得; C_s 为轴向刚度系数; W 为管涵范围上方的土体质量与路面质量之和,见图 1。

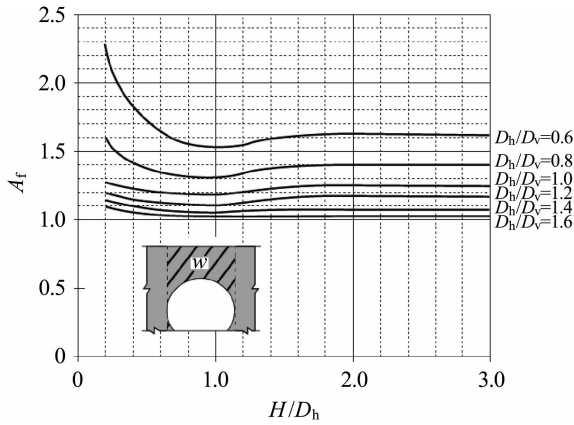


图 1 土拱系数

Fig. 1 Factor used to calculate the thrust due to dead load in a conduit wall

(2) 活载产生的压力

活载产生的压力 $T_L = \min(0.5D_h\sigma_L m_f, 0.5l_i\sigma_L m_f)$. T_L 需分别计算多车道下的最大值, 其中, l_i 为车辆荷载最不利布置下的轴距(包括轮胎接触面积)再加上 $2H$, H 为波纹管实际埋深; m_f 是多车道的折减系数; σ_L 为活载扩散到拱顶的压力.

(3) 地震作用产生的压力

地震的竖向加速度比 A_v 应取作水平加速度比 A_h 的 $2/3$. A_h 具有区域性. 对于波纹钢管涵, 地震作用产生的压力 $T_E = T_D A_v = 2/3 T_D A_h$.

1.2.2 管壁验算 管壁验算分为管壁抗压强度验算、管壁抗弯压强度验算.

(1) 管壁抗压强度

涵管分为上下两部分计算, 分割线与竖直平面夹角 $\theta_0 = 1.6 + 0.2 \log \left[\frac{EI}{E_m R^3} \right]$.

承载能力极限状态下, 压应力 $\sigma = T_f/A$ 不应超过破坏压应力 f_b ;

其中, A 为单位长度的波纹管壁面积.

破坏压应力 f_b 计算:

$$\text{当 } R \leq R_e \text{ 时, } f_b = \phi_t F_m \left[F_y - \frac{(F_y K R)^2}{12 E r^2 \rho} \right];$$

$$\text{当 } R > R_e \text{ 时, } f_b = \frac{3 \phi_t \rho F_m E}{\left[\frac{K R}{r} \right]^2}.$$

其中, ϕ_t 为抗压强度系数, 取值 0.8; F_m 为多管系数; S 为相邻管的最小横向净距; D_h 为多管中的最大值; R 为管半径, R_e 为计算半径, r 为回转半径; ρ 为屈曲折减系数; K 为相对弯曲刚度; E 为波纹管弹性模量, E_m 为土的修正模量; F_y 为波纹钢抗拉屈服强度.

(2) 管壁抗弯压强度验算

分为施工阶段和使用阶段分别验算.

1) 施工阶段的管壁抗弯压强度. 在对结构物进行施工时, 要考虑压力和弯距的组合验算塑性铰的发生. 由恒载和施工荷载产生的弯矩和轴力的组合效应不应超过施工各阶段截面的塑性矩. 组合弯矩和轴力验算:

$$\left[\frac{P}{P_{pf}} \right]^2 + \left| \frac{M}{M_{pf}} \right| \leq 1.0$$

其中, P 为施工活载产生的额外压力; P_{pf} 为波纹管截面可承担的极限压力; M 为波纹管的弯矩; M_{pf} 为波纹管涵修正后的塑性矩; $\left| \frac{M}{M_{pf}} \right|$ 为 M/M_{pf} 的绝对值.

2) 使用阶段的管壁抗弯压强度. 竣工后的波纹管承载能力极限状态下的受弯压组合效应不应超过截面的塑性矩抗力, 力矩和轴向压力组合验算:

$$\left[\frac{T_f}{P_{pf}} \right]^2 + \left| \frac{M_f}{M_{pf}} \right| \leq 1.0$$

其中, M_f 为使用阶段波纹钢管截面所受弯矩.

1.2.3 连接强度验算

(1) 受拉螺栓

承受拉力 T_f 的螺栓抗拉承载力 T_r :

$$T_r = 0.75 \phi_b n A_b F_{ub}$$

其中, ϕ_b 为螺栓的抗力系数, 取 0.8; n 为螺栓个数; A_b 为螺栓基于公称直径的截面积; F_{ub} 为螺栓的极限抗拉强度.

(2) 受剪螺栓

抵抗连接部件之间剪力的螺栓应按抗滑移连接设计.

1) 正常使用极限状态下的抗滑承载力. 抗滑移连接中螺栓的抗滑承载力 V_s :

$$V_s = 0.53 c_1 k_s n m A_b F_{ub}$$

其中, k_s 为平均滑移系数; c_1 为与初始拉力和平均滑移力相关的系数; m 为螺栓连接中接触面或剪切面的个数.

2) 承载能力极限状态下的抗滑承载力. 承受剪力的螺栓抗剪承载力 V_f 取(a)与(b)的较小值:

(a) 螺栓邻板的抗压承载力 B_r :

$$B_r = 3 \phi_{br} n t d F_u$$

其中, F_u 为板的极限强度; $\phi_{br} = 0.67$; t 为板厚度; d 为螺栓直径.

(b) 螺栓的抗剪承载力 V_r :

$$V_r = 0.60 \phi_b n m A_b F_{ub}$$

(3) 受剪受拉螺栓

1) 正常使用极限状态下的承载力. 螺栓同时承受的剪力 V 和拉力 T 应满足下列关系:

$$\frac{V}{V_s} + \frac{1.9T}{nA_b F_{ub}} \leq 1.0$$

2) 承载力极限状态下的承载力承受拉力 T_t 和剪力 V_t 的螺栓应满足下列关系:

$$\left[\frac{V_t}{V_r}\right]^2 + \left[\frac{T_t}{T_r}\right]^2 \leq 1.0$$

2 美国 AASHTO LRFD 设计方法

美国规范 AASHTO LRFD^[4] (AASHTO LRFD Bridge Design Specification) 采用极限应力设计法, 包括最小覆土厚度计算和结构验算。

2.1 最小覆土厚度计算

金属波纹管最小覆土厚度不小于 $S/8$ 和 300 mm 的较大值。其中, S 为波纹管直径。

2.2 结构验算

美国规范的结构验算可分为管壁验算、施工搬运验算和接缝验算。

2.2.1 管壁验算

(1) 荷载计算

作用在波纹管上的荷载包括静荷载 (EL) 和活荷载 (LL)。

静荷载 (EL) = Hw 。

其中, H 为波纹管上填土的厚度; w 为填土的容重。

活荷载 (LL) 已考虑冲击荷载的作用, 按填土的竖直方向向下传递呈减小趋势, 查表时利用线性插值取值。表 1 为美国规范规定 H20 荷载的活荷载 (LL) 的取值。

表 1 (LL) 的取值
Table 1 Value of (LL)

填土厚度/ft(m)	活荷载值/[lb/ft ² (kPa)]
1(0.30)	1 800(86.2)
2(0.61)	800(38.3)
3(0.91)	600(28.7)
4(1.22)	400(19.2)
5(1.52)	250(12.0)
6(1.83)	200(9.6)
7(2.13)	175(8.4)
8(2.44)	100(4.8)
大于 8(2.44)	忽略(LL)

(2) 荷载验算

恒荷载和活荷载的组合 $P_t = 1.95(EL) + 1.75(LL)$, 组合值形成的计算推力 $T_t = P_t S/2$ 。 T_t

不应超过计算的抗力 R_t 。

抗力 $R_t = \phi R_n$ 。

其中, ϕ 为抗力系数, 取值为 1.00; R_n 为管壁抗力 $R_n = f_y A$, A 为单位长度的壁面积, f_y 为材料的屈服强度。

当 $f_y > f_c$ 时, 用 f_c 的值替代 f_y 计算 R_n , f_c 的计算方法如下:

$$\text{当 } s < \frac{r}{k} \sqrt{\frac{24E}{f_u}} \text{ 时, } f_c = f_u - \frac{f_u^2}{48E} \left(\frac{ks}{r}\right)^2;$$

$$\text{当 } s > \frac{r}{k} \sqrt{\frac{24E}{f_u}} \text{ 时, } f_c = \frac{12E}{\left(\frac{ks}{r}\right)^2};$$

其中, r 为回转半径; E 为波纹管弹性模量; f_u 为指定的最小抗拉强度; k 为土的抗力系数。

2.2.2 施工搬运验算 施工搬运需要验算施工刚度 (FF), 使其不大于规范规定的值, 施工刚度 (FF) = $\frac{S^2}{EI}$ 。其中, E 为弹性模量; I 为惯性矩。

2.2.3 接缝验算 计算出的 T_t 不小于每种波纹规格的 seam strength (接缝强度)。

3 美加规范的比较计算

由于两种规范设计方法的计算内容不尽相同, 本文只选择最小覆土厚度计算和管壁压力验算进行比较。

3.1 最小覆土厚度计算比较

本文比较两种规范目的是提出国内钢波纹管计算的建议设计方法, 故本文选取国内规格^[5]的波纹管参数进行计算。取波长 \times 波高 = 300 mm \times 110 mm, 壁厚 $t = 7$ mm 的正圆形波纹管进行计算, 管直径作为控制变量, 计算结果见表 2。

表 2 最小覆土厚度计算

Table 2 Calculation of minimum allowable depth of cover

管直径/m	1	2	3.6	6	8	10
加拿大规范 H_{min}	0.6	0.6	0.6	1	1.33	1.67
美国规范 H_{min}	0.125	0.25	0.45	0.75	1	1.25

由表 2 可见, 美国规范计算的最小覆土厚度平均比加拿大规范小 34.05%。

3.2 结构验算比较

加拿大规范规定的结构验算, 包括管壁验算和接缝验算, 美国规范除规定管壁验算和接缝验算, 另有施工搬运刚度验算。本文只对结构的管壁验算进行比较。

假设跨径 4 m;填土容重为 20 kN/m³;汽车荷载取中国标准^[6]公路一级荷载;波纹钢弹性模量 $E=2.0 \times 10^5$ MPa, Q235 钢, $F_y=235$ MPa, $A=9.19$ mm²/mm, 惯性矩 $I=14\ 005.36$ mm⁴/mm.

3.2.1 荷载计算 取埋置深度和管径两个控制变量分别进行比较计算. 取管径 $D_v=D_h=S=3.6$ m, 改变埋置深度, 计算结果见表 3.

表 3 荷载计算比较 1

Table 3 Comparison of load calculation 1

埋置深度/m	0.6	1	5	10	20
加拿大规范 T_{f1}	182.3	167.1	316.8	588.6	1 146.3
加拿大规范 T_{f2}	56.8	79.9	310.3	598.4	1 174.5
美国规范 T_f	160.7	148.4	333.5	666.9	1 333.8

取埋置深度为 10 m, 改变管径, 计算结果见表 4.

表 4 荷载计算比较 2

Table 4 Comparison of load calculation 2

管径/m	3.6	6	8	10
加拿大规范 T_{f1}	588.6	1 003.5	1 362.9	1 734.8
加拿大规范 T_{f2}	598.4	1 020.4	1 386.2	1 764.7
美国规范 T_f	666.9	1 111.5	1 482.0	1 852.5

由表 3 可见, 改变埋深, 美国规范的荷载 T_f 平均比加拿大规范计算的较大值大 8.37%. 由表 4 可见, 改变管径, 美国规范的荷载 T_f 平均比加拿大规范计算的较大值大 7.19%. 无论改变管径还是埋深, 美国规范计算压力总是大于加拿大规范.

3.2.2 管壁压力验算 分别取相同管径改变埋置深度和相同埋置深度改变管径验算.

取管径 $D_v=D_h=S=3.6$ m, 改变埋置深度, 计算结果见表 5.

表 5 压力验算比较 1

Table 5 Comparison of stress calculation 1

埋深/m	0.6	1	5	10	20
加拿大 压应力 σ_1	19.8	18.2	34.5	64.0	124.7
加拿大 压应力 σ_2	6.2	8.7	33.8	65.1	127.8
加拿大 抗力 f_b	139.7	146.4	152.3	153.2	153.5
美国 压力 T_f	160.7	148.4	333.5	666.9	1 333.8
美国 抗力 R_f	2 113.7				

取埋置深度为 10 m, 改变管径, 计算结果见表 6.

表 6 压力验算比较 2

Table 6 Comparison of stress calculation 2

管径/m	3.6	6	8	10
加拿大 压应力 σ_1	64.0	109.2	148.3	188.8
加拿大 压应力 σ_2	65.1	111.05	150.9	192.0
加拿大 抗力 f_b	153.2	153.7	152.9	151.6
美国 压力 T_f	666.9	1 111.5	1 482.0	1 852.5
美国 抗力 R_f	2 113.7			

将美国规范计算出的抗力换算成单位面积的应力为 230 MPa, 由表 5 可见, 改变埋深, 美国规范取用的抗力平均比加拿大规范大 54.34%; 由表 6 可见, 改变管径, 美国规范取用的抗力平均比加拿大规范大 50.47%, 当管径增大 10 m 时, 加拿大规范下验算已不满足, 在计算出的压力已大于加拿大规范的前提下, 美国规范强度验算仍然满足.

4 结 语

a. 覆土厚度计算, 美国规范计算的最小覆土厚度小于加拿大规范. 对于施工而言, 埋深浅意味土方量少, 施工容易; 但如果埋深较浅则道路上活荷载造成的冲击不能更好的被填土传递和扩散, 造成作用在波纹管上的应力更大, 容易产生破坏. 从安全角度考虑, 加拿大规范更适合推广.

b. 结构强度验算中的管壁强度验算, 从表 4 到表 6 的计算结果看, 美国规范的荷载和抗力都比加拿大大, 且加拿大规范已验算出不满足强度要求的算例美国仍满足, 由此得出加拿大规范更加安全, 更适合推广.

c. 美国规范的施工搬运验算, 用于检验施工搬运过程中结构刚度是否满足, 是加拿大规范的良好补充, 适合推广.

5 致 谢

感谢中交第二公路勘察设计研究院有限公司为本项目提供经费支持.

参考文献:

- [1] 李元松, 夏进, 余顺新, 等. 中欧规范关于桩基承载力确定方法的比较[J]. 武汉工程大学学报, 2012, 34(2): 44-49.
- LI Yuan-song, XIA Jin, YU Shun-xin, et al. Comparing methods of determining foundation pile bearing capacity in EN1997-1 with those in Chinese Geotechnical Design Code[J]. Journal of Wuhan Institute of

- Technology, 2012, 34(2): 44-49. (in Chinese)
- [2] 方亚非, 温学钧. 埋置式波纹钢板管结构的计算方法比较[J]. 城市道桥与防洪, 2007, 5: 126-129.
FANG Ya-fei, WEN Xue-jun. Comparison of calculation methods for embedded corrugated sheet pipe structure[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2007, 5: 126-129.
- [3] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications[S]. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2007.
- [4] CAN/CSA-S06-06, Canadian Highway Bridge Design Code[S]. Ottawa Canada: The Standards Council of Canada, 2010.
- [5] JT/T791-2010 公路桥涵通用波纹钢(板)[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [6] 中交公路规划设计院. JTG-D60-2004 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

Comparison of design method for embedded steel corrugated pipe

LI Yuan-song¹, LI Yang¹, DUAN Xin¹, YU Shun-xin², LU Ao²

1. School of Resource and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. China Communication Construction Company Second Highway Consultants Co. Ltd., Wuhan 430056, China

Abstract: Embedded steel corrugated pipe has been widely used overseas in water treatment, tunnels, bridges culverts and other projects for its advantages of convenient installation and environmental protection. However, there is no mature experience and relative design specification in our country, which shows the great significance to analyze the American and the Canadian specification. First of all, the design principles, calculation methods and parameter selection for embedded steel corrugated pipe were introduced and then control variable method was used to compare result of the minimum thickness of overlying soil and wall strength calculation. Results shows that the minimum thickness of overlying soil calculated by Canadian method is 34.05% larger than that calculated by the American method in average, because the shape effect of the pipe has also been considered in Canadian method besides pipe-soil interaction and soil arch effect which are considered in American method as well. Wall resistance calculated by American method is 50% more than the Canadian results in average in that soil arch effect and the filling weight on both sides of the pipe are ignored in American method. Requirement about construction checking in American method is a good supplement for Canadian method.

Key words: embedded; steel corrugated pipe; culvert; design method; comparison

本文编辑: 龚晓宁