

JTG

中华人民共和国推荐性行业标准

JTG/T 3365-07—2026

公路波纹钢涵洞设计与施工技术规范

Technical Specifications for Design and Construction of
Highway Corrugated Steel Culverts

2026-09-03 发布

2026-11-01 实施

中华人民共和国交通运输部发布

前 言

根据《交通运输部关于下达 2020 年度公路工程行业标准制修订项目计划的通知》（交公路函〔2020〕471 号）的要求，由中交第一公路勘察设计研究院有限公司承担《公路波纹钢涵洞设计与施工技术规范》（以下简称“本规范”）的制定工作。

本规范旨在规范公路波纹钢涵洞设计与施工，解决目前公路波纹钢涵洞设计与施工中存在的问题，形成完整系统的公路波纹钢涵洞设计与施工技术。

本规范严格落实国家有关法律法规，总结提炼国内外成熟的公路波纹钢涵洞设计与施工经验，吸收转化近年来有关波纹钢涵洞新技术、新工艺、新材料的科研成果，收集归纳国内外相关标准、政策制度等，广泛征求了设计、生产、施工、建设、管理等有关单位和个人的意见，经过反复论证和修改而成。

本规范共分为 5 章和 2 个附录，分别是：1 总则、2 术语和符号、3 基本规定、4 设计、5 施工、附录 A 公路波纹钢涵洞极限状态法设计、附录 B 常用波形截面特征参数表。

本规范由冯云成、李祝龙负责起草第 1 章、第 3 章，任成飞、王付负责起草第 2 章，钟明、刘小辉、彭泽友负责起草第 4 章，潘长平、高山、夏飞、王珏负责起草第 5 章，冯云成、滕文刚负责起草附录 A，陈奉民负责起草附录 B。

请各有关单位在执行过程中，将发现的问题和意见，函告本规范日常管理组，联系人：滕文刚（地址：陕西省西安市高新区科技四路 205 号；邮编：710075；电话：029-61322888；电子邮箱：429081428@qq.com），以便修订时参考。

主 编 单 位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

参 编 单 位：西安中交土木科技有限公司

中国市政工程东北设计研究总院有限公司

中铁长江交通设计集团有限公司

中交第二公路勘察设计研究院有限公司

中交第三公路工程局有限公司

主 编：冯云成

主要参编人员：李祝龙 潘长平 钟 明 刘小辉 滕文刚 高 山

陈奉民 彭泽友 夏 飞 任成飞 王 付 王 珏

主 审：黄志福

参与审查人员：伍石生 梁乃兴 王全录 杨永顺 刘保东 霁建平
张 毅 马毓泉 冯忠居 张志新 陈培健 张清照
陈湘华 蒋永生 李明光 毛华荣 张东东 林新元
林再志 薛 飞 王志宏 彭海涛 宋方华 吴有铭

交通运输部信息公开
浏览专用

目次

1	总则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	3
3	基本规定	5
3.1	应用原则	5
3.2	布设基本要求	5
4	设计	6
4.1	水文水力计算	6
4.2	涵洞布设	6
4.3	结构形式	8
4.4	结构计算	11
4.5	构造规定	13
4.6	耐久性设计	13
4.7	垫层及填筑设计	14
4.8	洞口	16
5	施工	17
5.1	一般规定	17
5.2	垫层	17
5.3	运输与存放	17
5.4	安装	18
5.5	防腐防水	18
5.6	填筑	19
5.7	质量控制	20
5.8	养护	21
附录 A	公路波纹钢涵洞极限状态法设计	22
附录 B	常用波形截面特征参数表	30
	本规范用词用语说明	32

1 总则

1.0.1 为规范公路波纹钢涵洞设计与施工，制定本规范。

1.0.2 本规范适用于各等级公路孔径不大于 5m 波纹钢涵洞的设计与施工。

1.0.3 公路波纹钢涵洞设计与施工应遵循安全、耐久、经济、适用、环保原则，满足因地制宜、就地取材、便于施工和养护的要求。

1.0.4 公路波纹钢涵洞设计洪水频率、设计安全等级和汽车荷载等级应符合现行《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60）的有关规定。

1.0.5 公路波纹钢涵洞设计与施工宜推行标准化、工厂化、装配化和信息化，并积极推广使用可靠的新技术、新工艺、新材料和新设备。

1.0.6 公路波纹钢涵洞设计与施工除应符合本规范的规定外，尚应符合国家和行业现行有关强制性标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 波纹钢涵洞 corrugated steel culvert

用波纹钢构件拼装、结构性填筑材料填筑压实，通过填筑材料与波纹钢构件相互作用共同承担荷载的涵洞。波纹钢构件通常分为螺旋波纹钢管、环形波纹钢管和波纹钢板件。

2.1.2 波峰 crest

向波纹钢涵洞外凸起的部分。

2.1.3 波谷 trough

向波纹钢涵洞内凸起的部分。

2.1.4 波距 wave pitch

相邻两个波峰或波谷之间的距离。

2.1.5 波高 wave depth

波峰外缘和波谷内缘之间的垂直高度。

2.1.6 壁厚 plate thickness

波纹钢构件成型后的钢板厚度。

2.1.7 转角半径 fillet radius

波峰或波谷的内圆半径。

2.1.8 孔径 span

波纹钢圆管涵的内圆直径。

2.1.9 矢高 rise

竖向对应截面中心线之间的最大距离。

- 2.1.10 螺旋波纹钢管** helical corrugated steel pipe
钢板或钢带经加工制成螺旋形的波纹管。
- 2.1.11 环形波纹钢管** annular corrugated steel pipe
钢板或钢带经加工制成的环形波纹管。
- 2.1.12 波纹钢板件** corrugated steel plate section
钢板经环向加工制成的具有一定曲面的波纹板件。
- 2.1.13 波纹钢板件长度** length of corrugated steel plate
曲面波纹钢板件的弧长。
- 2.1.14 波纹钢板件宽度** width of corrugated steel plate
曲面波纹钢板件的投影宽度。
- 2.1.15 结构性填筑区** structural filling area
保证公路波纹钢涵洞稳定性和发挥土-波纹钢相互作用的填筑范围。
- 2.1.16 结构性填筑材料** structural filling soil
公路波纹钢涵洞周围按规定方法分层填筑和压实的、材料特性和级配符合一定要求的填筑材料，用以保证结构稳定性和发挥土-波纹钢相互作用。
- 2.1.17 覆土厚度** depth of cover
从公路波纹钢涵洞顶面到路面结构层底面之间的填筑材料厚度。
- 2.1.18 最小覆土厚度** minimum depth of cover
提供公路波纹钢涵洞稳定性和发挥土-波纹钢相互作用的覆土厚度最小值。

2.2 符号

A_l ——一个波距截面面积与波距的比值；

D ——孔径；

D_a ——最小覆土厚度；

D_b ——公路波纹钢涵洞最小间距；

D_h ——公路波纹钢涵洞有效跨度；

D_v ——公路波纹钢涵洞有效矢高；

d ——波高；

E ——波纹钢管（板）弹性模量；
 H_u ——覆土厚度；
 h ——垫层厚度；
 I_l ——一个波距截面惯性矩与波距的比值；
 L_c ——波纹钢板件长度；
 L_p ——管节长度；
 L_w ——波纹钢板件宽度；
 l ——波距；
 r ——转角半径；
 r_l ——一个波距波纹截面回转半径；
 t ——壁厚；
 W_l ——一个波距截面模量与波距的比值。

交通运输部信息公开
浏览专用

3 基本规定

3.1 应用原则

3.1.1 下列条件可选用公路波纹钢涵洞：

- 1 平原水网地带、沼泽区域；
- 2 地形条件复杂，涵洞需分岔、弯曲布设区域；
- 3 横断面高差及工后沉降较大的高填方路段；
- 4 混凝土原料缺乏，施工用水困难；
- 5 软土、湿陷性黄土、高寒冻土或采空区等特殊地质条件；
- 6 地震高烈度设防地区；
- 7 既有桥梁、涵洞的接长或加固；
- 8 抢险、救灾和战备等应急工程。

3.2 布设基本要求

3.2.1 圆形闭口截面公路波纹钢涵洞宜采用 0.75m、1.00m、1.25m、1.50m、2.00m、2.50m、3.00m、4.00m、5.00m 的标准孔径。

3.2.2 采用开口截面、异形截面或孔径大于 5m 的圆形闭口截面公路波纹钢涵洞时，应进行专项设计。

4 设计

4.1 水文水力计算

4.1.1 公路波纹钢涵洞宜采用无压力式，无压力式涵洞内顶点至最高流水面的净高应符合表 4.1.1 的规定。

表 4.1.1 无压力式涵洞净高

涵洞孔径 D (m)	内顶点至最高流水面的净高 (m)
≤ 3	$\geq D/4$
> 3	> 0.75

4.1.2 水文水力计算方法和要求应符合现行《公路涵洞设计规范》(JTG/T 3365-02)的有关规定。当缺乏试验数据或不能进行试验确定糙率时，涵内无铺砌时糙率建议值可按表 4.1.2 选取；涵内采用混凝土内衬时，糙率可取 0.013 ~ 0.014。

表 4.1.2 涵内无铺砌时糙率建议值

波距 (mm) $\times$ 波高 (mm)	糙率
68 $\times$ 13	0.015 ~ 0.022
75 $\times$ 25	0.021 ~ 0.028
125 $\times$ 25	0.022 ~ 0.026
150 $\times$ 50	0.023 ~ 0.034
200 $\times$ 55	0.033 ~ 0.034
230 $\times$ 64	0.033 ~ 0.038
300 $\times$ 110	0.030 ~ 0.040
380 $\times$ 140	0.031 ~ 0.045
400 $\times$ 150	0.032 ~ 0.048

4.2 涵洞布设

4.2.1 公路波纹钢涵洞布设除应符合现行《公路涵洞设计规范》(JTG/T 3365-02)的有关规定外，还应满足下列要求：

- 1 孔径应根据设计洪水流量、路基填土高度等条件确定。
- 2 新建公路波纹钢涵洞孔径宜采用标准孔径，最小 0.75m 孔径只适用于无淤积地区的灌溉渠道，排洪公路波纹钢涵洞孔径不应小于 1.0m。

4.2.2 单孔公路波纹钢涵洞不能满足设计要求时，可采用多孔并列布设。

条文说明

设计流量较大而填土高度不足以设置单孔公路波纹钢涵洞，或填土高度较大设置大孔径公路波纹钢涵洞承载力难以满足时，可采用多孔公路波纹钢涵洞并列布设。

4.2.3 公路波纹钢涵洞与路线斜交时，洞口可斜交斜做，并应符合下列规定：

- 1 当斜交角小于 5° 时可斜交正做，洞口段管可不切割。
- 2 当斜交角不小于 5° 且不大于 20° 时，可将洞口段管节切割成与路线平行的斜面。
- 3 当斜交角大于 20° 时，应对切割管节的端部做相应的加强构造设计。

4.2.4 分岔布设时，可通过弯头、三通等构造连接成整体结构。

4.2.5 涵底纵坡较大时，可采用出水口设置急流槽或分幅错位布设，其中分幅错位的两洞口之间设置具有消力槛的多级跌水构造物，多级跌水构造物如图 4.2.5 所示。

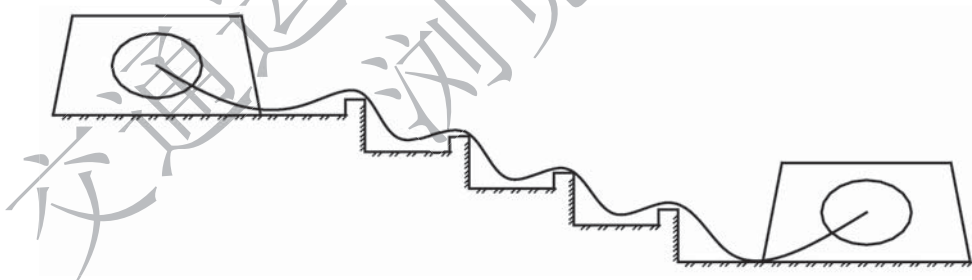


图 4.2.5 具有消力槛的多级跌水构造物

条文说明

涵底纵坡较大时，公路波纹钢涵洞可采用出水口设置急流槽或分幅错位布设，出水口设置急流槽或在两洞口之间设置具有消力槛的多级跌水构造物，消耗能量和防止冲刷。

4.3 结构形式

4.3.1 公路波纹管涵洞应采用螺旋波纹钢管、环形波纹钢管、波纹钢板件三种结构形式拼装，如图 4.3.1-1 ~ 图 4.3.1-3 所示。

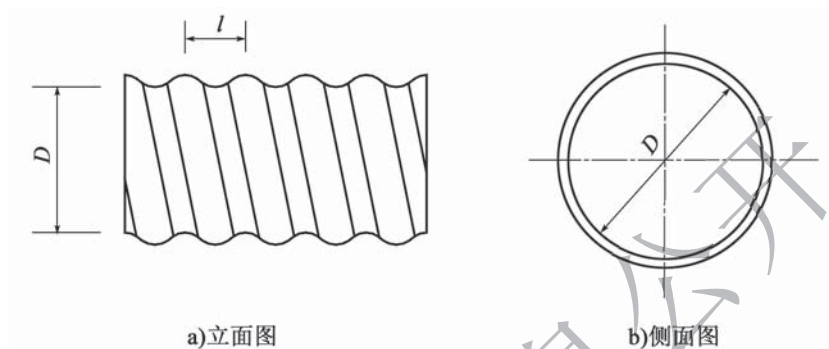


图 4.3.1-1 螺旋波纹钢管

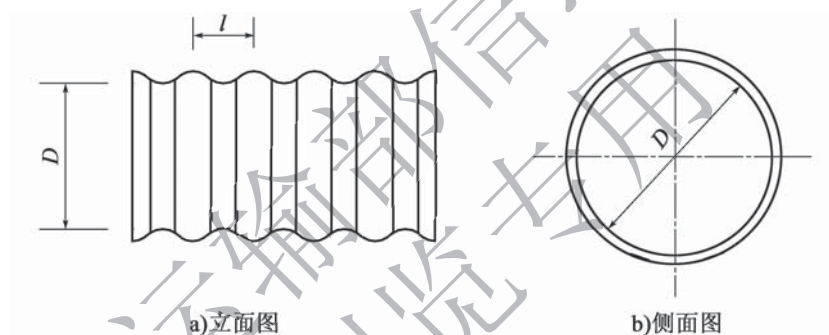


图 4.3.1-2 环形波纹钢管

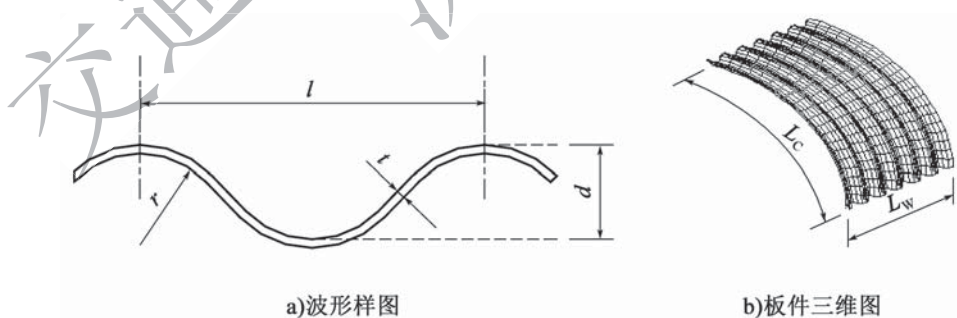


图 4.3.1-3 波纹钢板件

4.3.2 孔径小于 2m 时宜采用螺旋波纹钢管或环形波纹钢管结构形式，孔径大于或等于 2m 时宜采用波纹钢板件拼装结构形式。

4.3.3 采用螺旋波纹钢管拼装时，应符合下列规定：

1 可采用咬口和管箍两种连接方式。咬口连接如图 4.3.3-1 所示。常用波形的咬口连接和管箍连接技术要求应符合表 4.3.3 的规定。

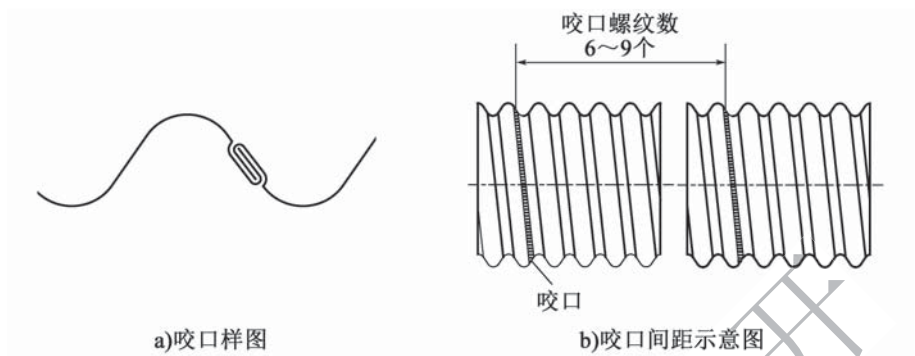


图 4.3.3-1 咬口连接

表 4.3.3 常用波形咬口及管箍连接技术要求

波距 (mm)	波高 (mm)	咬口最小间距 (mm)	咬口间螺纹最少数量 (个)	管箍 形式	管箍最小宽度 (mm)
68	13	610	6	1~2 片连接	410
75	25	533	7	2~3 片连接	430
125	25	750	6	2~3 片连接	430

2 螺旋波纹钢管咬口咬合力应符合现行《冷弯波纹钢管》(GB/T 34567) 的有关规定。

3 螺旋波纹钢管管节之间应采用平行式(管箍螺纹与管节螺纹平行)管箍连接,其管箍形式和宽度应符合表 4.3.3 的规定。螺旋波纹钢管管节之间的连接如图 4.3.3-2 所示,管箍钢板厚度应不小于螺旋波纹钢管管节钢板厚度。管箍与管节之间采用垫片密封防漏。

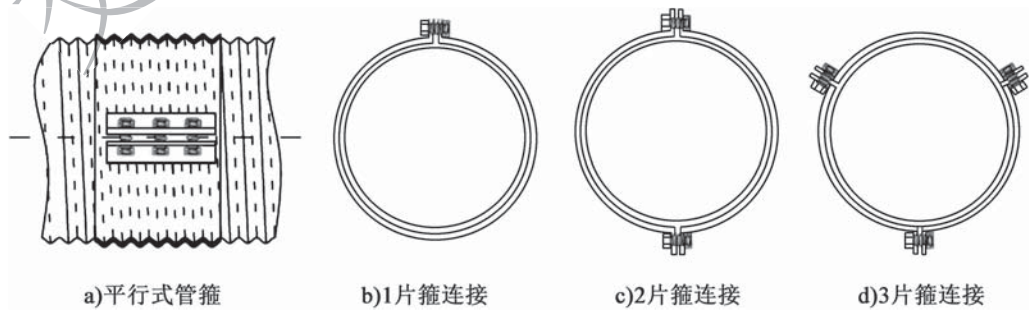


图 4.3.3-2 螺旋波纹钢管管节之间的连接示意图

4.3.4 采用环形波纹钢管拼装时,应符合下列规定:

1 环形波纹钢管的焊缝及两端法兰与管节的焊接质量应符合现行《钢结构焊接规

范》(GB 50661)的有关规定。

2 环形波纹钢管管节的连接形式可采用整管法兰盘连接、半圆管节翻边法兰盘连接、管箍连接。

3 环形波纹钢管采用整管法兰盘对接连接时,相互连接的两个法兰盘之间相对应的连接孔应严格对中,法兰盘周向连接孔为轴向单排孔,孔距均布。法兰盘之间应采用垫圈密封、防渗。环形波纹钢管整管法兰盘连接如图 4.3.4-1 所示。

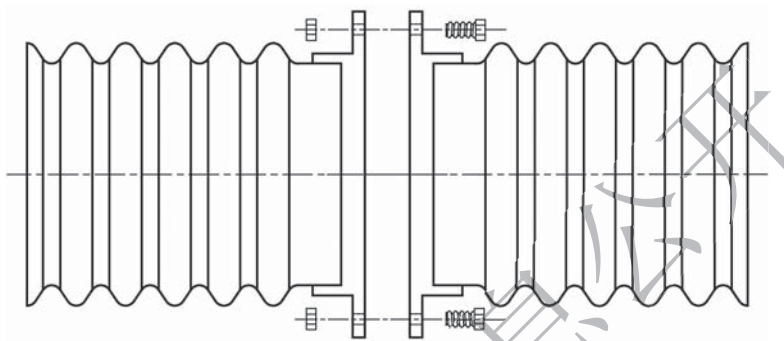


图 4.3.4-1 环形波纹钢管整管法兰盘连接

4 当环形波纹钢管孔径不大于 1.5m 时,采用半圆管节左右(或上下)翻边法兰连接,相互连接的两个法兰之间相对应的连接孔应严格对中,法兰周向连接孔为纵向单排孔,孔距均布。法兰之间采用垫片密封防渗。环形波纹钢管半圆管节翻边法兰连接如图 4.3.4-2 所示。当采用外套与管体相同波形的箍套进行轴向拼接时,箍套轴向长度不应小于 6 个波距,管箍孔径应为环形波纹钢管管节的外径。管箍与管节之间应采用垫片密封防漏。

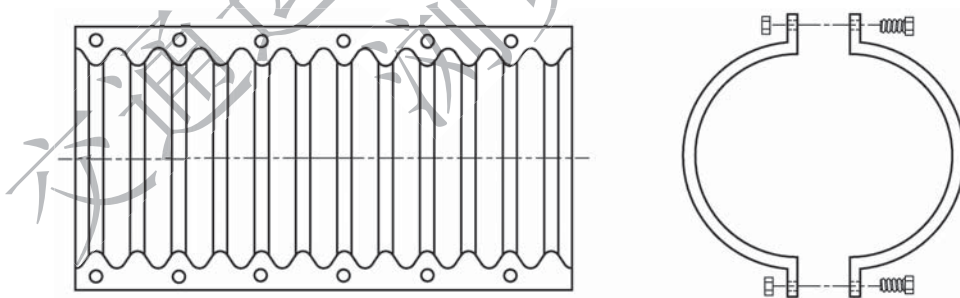


图 4.3.4-2 环形波纹钢管半圆管节翻边法兰连接

4.3.5 采用波纹钢板件拼装时,应符合下列规定:

1 相邻波纹钢板件之间的连接宜采用搭接拼装,高强螺栓连接,不得采用焊接。高强螺栓的布置应符合现行《冷弯波纹钢管》(GB/T 34567)的有关规定。

2 波纹钢板件搭接拼装时,沿涵洞轴向相邻板件应进行错缝栓接拼装,错缝栓接拼装示意图如图 4.3.5 所示。

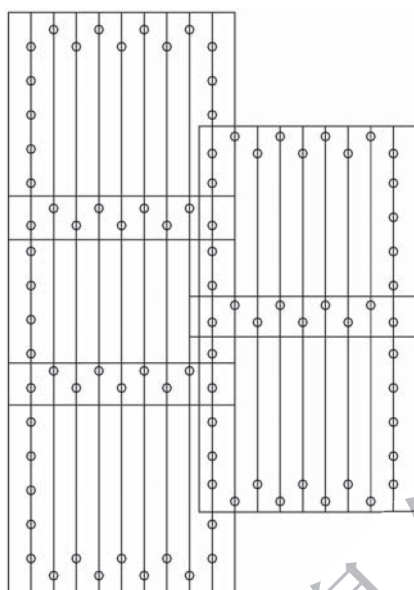


图 4.3.5 波纹钢板件错缝栓接拼装示意图

4.3.6 螺旋波纹钢管及环形波纹钢管的管节长度、波纹钢板件的单片尺寸可根据制造、运输、安装条件进行合理调整。

4.3.7 密封材料可采用天然橡胶、氯丁橡胶或耐候密封胶，其性能与质量应分别符合现行《天然橡胶 术语》（GB/T 14795）、《氯丁二烯橡胶 CR121、CR122》（GB/T 14647）和《建筑密封胶分级和要求》（GB/T 22083）的有关规定。

4.3.8 高强螺栓应采用硅酮结构密封胶进行密封，其性能、质量与技术指标应符合现行《建筑用硅酮结构密封胶》（GB 16776）的有关规定。

4.4 结构计算

4.4.1 公路波纹钢涵洞的设计应符合现行《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60）中的作用及作用组合、《公路涵洞设计规范》（JTG/T 3365-02）中的水文水力计算、《公路桥涵地基与基础设计规范》（JTG 3363）中的地基承载力验算，以及《公路工程抗震规范》（JTG B02）的有关规定。

4.4.2 公路波纹钢涵洞应按极限状态法进行承载能力极限状态和正常使用极限状态计算，对结构强度、刚度、稳定性和连接强度分别进行验算。

4.4.3 公路波纹钢涵洞按承载能力极限状态设计时，应对波纹钢构件进行承载能力

验算，必要时应进行结构的抗滑移验算，验算可采用式 (4.4.3)：

$$\gamma_0 S_d \leq R_d \quad (4.4.3)$$

式中： γ_0 ——结构重要性系数，对应设计安全等级二级和三级分别取 1.0 和 0.9；

S_d ——作用组合的效应设计值，宜按现行《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60) 的规定计算；

R_d ——结构或结构构件的抗力设计值。

4.4.4 填筑完成后公路波纹钢涵洞变形不应超过孔径的 2%。

4.4.5 公路波纹钢涵洞应采用下列两步骤进行设计：

- 1 按本规范附录 A 进行设计，常用波形截面特征参数可按本规范附录 B 取值。
- 2 孔径大于 3m、覆土厚度大于 5m 或受力较复杂的公路波纹钢涵洞采用有限元法进行验算，承载能力极限状态下最大应力均不得大于钢板的屈曲临界应力和钢板的强度设计值。

条文说明

2 公路波纹钢涵洞宜采用三维模型进行分析，其分析需遵循以下要点：

(1) 几何模型。根据波形参数模拟波纹钢管（板），不能采用平钢板等效。对于波纹钢板，沿涵长方向不小于 3 个波长；对于土体，沿涵宽方向单侧不小于 2 倍孔径长度，结构下方取不小于 1.5 倍孔径。

(2) 材料选择。波纹钢管（板）不考虑塑性发展，采用线弹性材料属性，土体材料的选择需综合考虑材料参数的繁简、参数获取的难易程度、计算效率，以及对土体力变行为较准确的模拟，本规范推荐采用莫尔-库仑 (Mohr-Coulomb) 模型。

(3) 单元选择。土体一般采用四面体单元或六面体单元，建议采用六面体单元。波纹钢管（板）一般采用三角形或四边形壳单元，建议采用四边形壳单元。

(4) 网格划分。相较四面体网格，六面体网格计算结果更为精确，建议采用六面体网格。

(5) 边界条件。一般情况下，将除顶面外的其他五个面约束三个方向位移。特殊工况的需根据实际情况选用合理边界。

(6) 荷载施加。一般情况下，需要考虑重力荷载、施工荷载、运营荷载，其中运营车辆荷载参数取值可参考现行《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60) 的有关规定。

4.4.6 公路波纹钢涵洞宜设计预拱度，同时需考虑地基可能产生的下沉量，一般在地基上预留管长的 0.6% ~ 2.0% 的预拱度，管涵中心的高程不高于进水口的高程。

4.5 构造规定

4.5.1 涵洞的洞身和进、出口一定范围的沟床、路基坡面、锥体填方均应铺砌加固。出入口铺砌的平面形式应根据沟形确定，对无明显沟槽者，出口平面宜采用等腰梯形，其铺砌角可取为 20°；铺砌材料应按铺砌层上最大流速确定，铺砌末端应设截水墙。当沟床为岩石或不被洪水冲移的大块石、漂石所覆盖时，沟床可不作铺砌。

4.5.2 采用压力式涵洞时，涵洞结构应配套设置防渗构造措施。

4.5.3 圬工洞口宜在结构性填筑完成后进行施工，必要时应对帽石配置钢筋。

4.5.4 在结构性填筑区顶部应设置土工膜或石灰改善土等隔水层，石灰改善土性能与质量应符合现行《公路路面基层施工技术细则》（JTG/T F20）的有关规定，高密度聚乙烯土工膜性能、质量与技术指标应符合现行《土工合成材料 聚乙烯土工膜》（GB/T 17643）的有关规定。土工膜在涵顶第一层土压实平整后铺设，其横坡不宜小于 2%。

4.5.5 经压实后的垫层表面增设 1.3~1.5 倍波高厚度的松铺层。

4.5.6 涵底纵坡不宜大于 5%。当涵底纵坡超过 5% 时，应采取抗滑措施确保结构稳定。

4.5.7 涵底纵坡较大、流速较大或山区砂石物质通过时，设计应考虑耐磨蚀措施，耐磨蚀措施可采用设置混凝土内衬或其他内衬材料。

4.6 耐久性设计

4.6.1 螺旋波纹钢管、环形波纹钢管、波纹钢板件及连接件应在工厂采用热浸镀锌工艺进行双面防腐，热浸镀锌所用的锌应采用《锌锭》（GB/T 470—2026）规定的 1 号或 0 号锌。锌层附着量应满足表 4.6.1-1 的要求。锌层质量应满足表 4.6.1-2 的要求。

表 4.6.1-1 锌层附着量

项目	要求
单面附着量	热浸镀锌螺旋波纹钢管和管箍 $\geq 300\text{g/m}^2$ ，或镀锌层平均厚度 $\geq 42\mu\text{m}$ ，最小厚度 $32\mu\text{m}$ ； 环形波纹钢管、波纹钢板件、法兰盘 $\geq 600\text{g/m}^2$ ，或镀锌层平均厚度 $\geq 84\mu\text{m}$ ，最小厚度 $62\mu\text{m}$ ； 螺栓、螺母 $\geq 350\text{g/m}^2$ ，或镀锌层平均厚度 $\geq 50\mu\text{m}$ ，最小厚度 $36\mu\text{m}$

表 4.6.1-2 锌层质量要求

项目	要求
镀锌层附着性	镀锌层应与金属结合牢固，经锤击试验不剥离，不凸起
外观质量	锌层应连续、均匀、平整，无漏涂、漏镀、流挂、变色、针孔、起泡、开裂、滴瘤或结块等缺陷
锌层均匀性	锌层应均匀，无金属铜的红色沉积物
锌层耐盐雾性	耐盐雾性试验后，基材不应出现腐蚀现象

4.6.2 采用连续热浸镀锌钢板及钢带加工的波纹钢管（板）时，锌层厚度和质量应满足表 4.6.1-1 和表 4.6.1-2 的要求。

4.6.3 在镀锌防腐的基础上采用非金属材料涂装时，应符合下列规定：

1 当采用油漆防腐涂装时，涂装材料的品种、规格、性能等应符合现行《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》（JT/T 722）的规定。涂层表面应光滑、连续，无肉眼可分辨的小孔、孔隙、裂缝、脱皮及其他缺陷。

2 当采用沥青防腐涂装时，沥青宜使用环氧沥青或改性沥青，其性能、质量与技术指标应分别符合现行《环氧沥青防腐涂料》（GB/T 27806）和《防水用弹性体（SBS）改性沥青》（GB/T 26528）的有关规定，沥青涂层的厚度应为 0.5 ~ 1mm，涂层应均匀光滑、连续，无肉眼可分辨的孔隙、裂缝、脱皮及其他缺陷。

3 其他防腐材料应满足波纹钢涵洞的防腐要求，材料的性能、质量与技术指标应符合国家和行业现行有关标准的规定。

4.6.4 螺旋波纹钢管、环形波纹钢管、波纹钢板件接缝处宜涂抹 1 ~ 2mm 厚的聚氨酯，聚氨酯质量与技术指标、基本性能应符合现行《聚氨酯防水涂料》（GB/T 19250）的有关规定。

4.6.5 当采取静电喷涂等其他防腐措施代替热浸镀锌时，应进行试验验证。

4.7 垫层及填筑设计

4.7.1 公路波纹钢涵洞地基分为一般地基和特殊地基。一般地基经压实可不设垫层。特殊地基处理宜与相同路段地基处理方式一致，并应满足下列要求：

- 1 置于岩石地基、填石路堤、桩类复合地基之上时应设置砂砾或碎石垫层。
- 2 膨胀土、湿陷性黄土和冻土地基应根据需要做好隔水处理。
- 3 涵洞的上游宜进行防渗处理。

4.7.2 垫层的最小厚度应符合表 4.7.2 的规定。

表 4.7.2 垫层的最小厚度

地质条件	垫层最小厚度
一般地基	表层压实可直接将地基作为垫层
岩石地基、填石路堤	400mm；当覆土厚度大于 5m 时，填土每增高 1.0m，其厚度增加 40mm
软土地基、桩类复合地基	不小于 500mm

4.7.3 结构性填筑材料应满足下列要求：

- 1 结构性填筑材料应选用级配较好的砾类土、砂类土、石灰土、水泥土等低压缩性、易压实的填料。
- 2 楔形区结构性填筑材料应采用低强度等级的液态粉煤灰、流态水泥土等易密实的填料。
- 3 在距波纹钢管 0.6m 范围内不得有粒径超过 31.5mm 的石块、混凝土块、冻土块、高塑性黏土块或其他有害腐蚀材料，其他结构性填筑区域不得有粒径超过 80mm 的石块、混凝土块、冻土块、高塑性黏土块或其他有害腐蚀材料。

条文说明

楔形区采用液态粉煤灰、流态水泥土可自密实，满足工程施工需要其坍落度控制在 100~200mm 范围内。为使楔形区与其他结构性填筑区域材料在受压时变形协同，液态粉煤灰、流态水泥土应采用低强度等级，其立方体抗压强度 7d 不小于 0.4MPa，28d 不大于 0.8MPa。

4.7.4 结构性填筑范围如图 4.7.4 所示，应满足下列要求：

- 1 最小覆土厚度应按式 (4.7.4-1) 计算，且不得小于 0.6m。

$$D_a = \max \left\{ \frac{D_h}{6} \left(\frac{D_h}{D_v} \right)^{1/2}, 0.4 \left(\frac{D_h}{D_v} \right)^2 \right\} \quad (4.7.4-1)$$

式中： D_a ——最小覆土厚度 (m)；

D_h ——公路波纹钢涵洞的有效孔径 (m)，按波纹板轴线计算；

D_v ——公路波纹钢涵洞的有效矢高 (m)，按波纹板轴线计算。

- 2 多孔波纹钢涵洞的最小间距应按式 (4.7.4-2) 计算：

$$\begin{aligned} \text{当 } D_h \leq 1\text{m 时,} & D_b = 0.5\text{m} \\ \text{当 } 1\text{m} < D_h \leq 2\text{m 时,} & D_b = 0.5D_h \\ \text{当 } 2\text{m} < D_h \leq 5\text{m 时,} & D_b = 1.0\text{m} \end{aligned} \quad (4.7.4-2)$$

式中： D_b ——波纹钢涵洞的最小间距 (m)，按波纹板轴线计算。

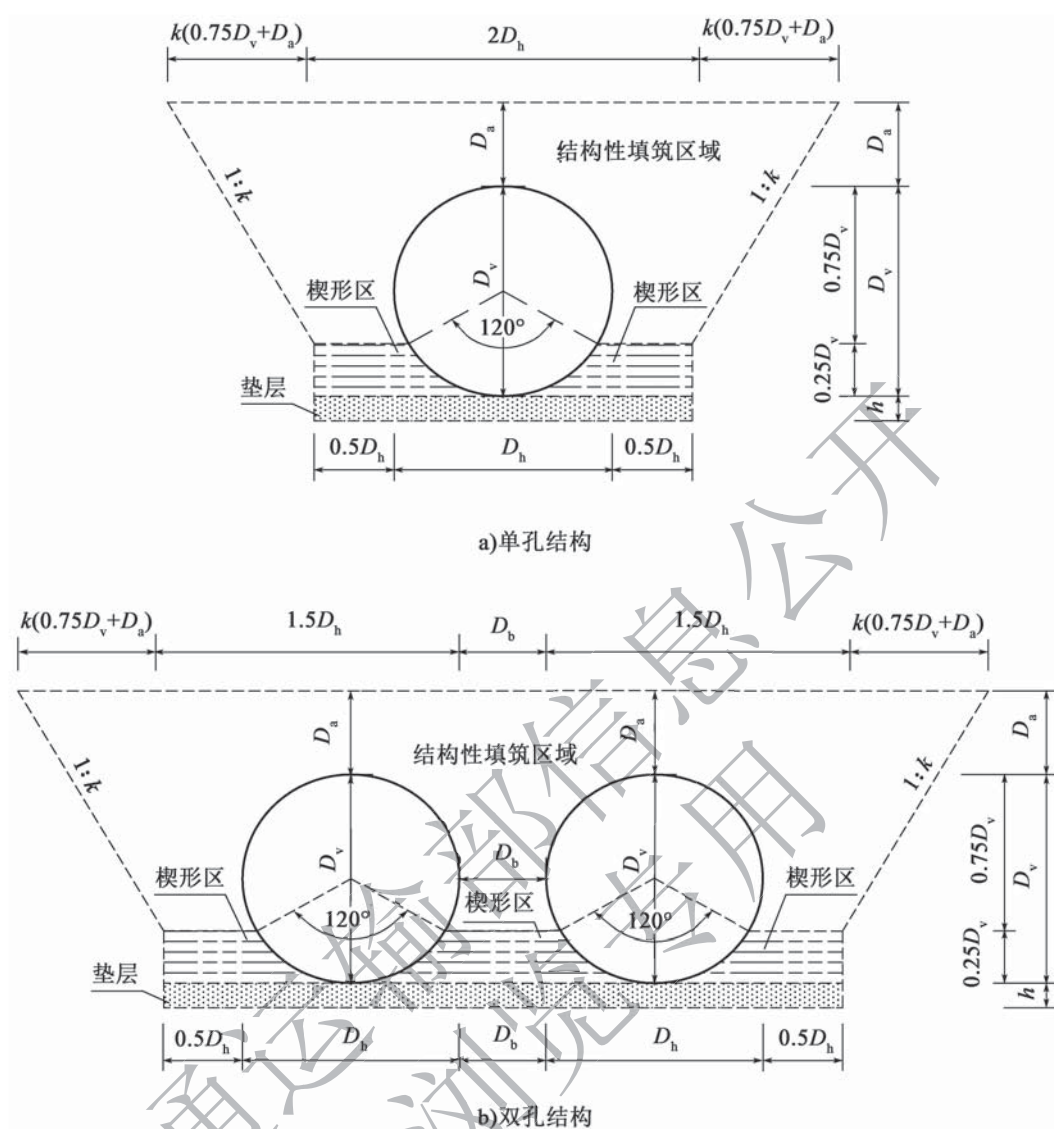


图 4.7.4 结构性填筑范围示意图

4.8 洞口

4.8.1 公路波纹钢涵洞洞口宜采用圬工结构洞口构造，形式包括八字式、一字墙（端墙）式、跌水井式等，洞口构造及计算应符合现行《公路涵洞设计规范》（JTG/T 3365-02）的有关规定。

4.8.2 公路波纹钢涵洞洞口可采用装配式钢结构，形式包括八字式、一字墙（端墙）式、削竹式、簸箕形等，应对洞口进行特殊设计。

4.8.3 洞口、基础及附属工程所用混凝土和砂浆用材料、砌体用料应符合现行《公路涵洞设计规范》（JTG/T 3365-02）的有关规定。

5 施工

5.1 一般规定

5.1.1 安装前应对临时支架、支承等临时结构进行验算；应按照波纹钢管（板）明细表核对进场的管节、板件及零件，查验产品出厂合格证及材料的质量说明书；并对公路波纹钢涵洞高程、中线进行复测，误差在允许偏差内方可安装。

5.1.2 公路波纹钢涵洞宜根据结构形式、孔径、起吊能力、环境条件等情况选择安装方法。

5.1.3 危险性较大的涵洞工程应编制专项施工方案并经报批后方可实施。

5.1.4 波纹钢管（板）及其连接件在运输、存放和安装过程中损坏、变形过大的应进行更换，对局部损伤的镀锌层应进行现场防腐处理。

5.1.5 高强螺栓施工应符合现行《钢结构工程施工质量验收标准》（GB 50205）的有关规定。

5.1.6 填筑施工应符合现行《公路路基施工技术规范》（JTG/T 3610）的有关规定。

5.2 垫层

5.2.1 垫层施工应符合下列规定：

- 1 经压实的垫层表面铺设厚 1.3 ~ 1.5 倍波高的细碎砾石或粗砂松铺层。
- 2 预拱度满足设计要求。

5.3 运输与存放

5.3.1 波纹钢管（板）运输应采取必要的措施，避免管节或板件变形、镀锌层损坏。

5.3.2 波纹钢管（板）存放应符合下列规定：

- 1 存放场地干燥、通风良好、无腐蚀、无粉尘。
- 2 存放过程采取必要的措施，避免管节或板件变形、镀锌层损坏。

5.4 安装

5.4.1 螺旋波纹钢管安装应符合下列规定：

- 1 采用咬口方式连接时，咬口应确保管体强度和防渗，咬口间最小间距和相应的最小螺旋波纹数量应符合本规范表 4.3.3 的规定。
- 2 采用平行式、螺旋式管箍连接时，其管箍形式和宽度应符合本规范表 4.3.3 的规定，管箍钢板厚度不应小于螺旋波纹钢管钢板的厚度。
- 3 采用管箍连接时，涵管安装之前，应先确定涵洞轴线和上下游边线，开始排放第一节管，管端与边线平齐，将管箍内垫密封板，管箍二分之一长度与第一节管端头底部重叠。其次吊装第二节管放到管箍上，使两管节端口对齐，镶好密封板，盖上管箍连接件，对准波峰波谷，穿好螺栓，紧固密封。其他管节依次连接而成。两管节端部接缝处要求平整，接缝宽度不大于 30mm。

5.4.2 环形波纹钢管安装应符合下列规定：

- 1 采用轴向法兰连接时，法兰盘圆周边均匀布设单排螺栓孔，孔位、孔距根据设计确定。互相拼接的两个法兰盘的连接孔应对应。
- 2 采用左右（或上下）半圆管节翻边连接时，螺栓孔应对应，纵向采用单排均匀布置。

5.4.3 波纹钢板件安装应符合下列规定：

- 1 应以中心轴线中点为基准，由下向上对称拼装。
- 2 螺栓连接时，应对正螺栓孔，螺栓由内向外插入孔位，外侧应套上垫圈旋上螺母，用套筒扳手预紧螺母。
- 3 顶部板件合拢时，应测量其位置、高程和预拱度，不符合要求时应进行校正。
- 4 波纹钢板件环向搭接时，上部板件应在下部板件外侧。
- 5 拼装管节时，上游管节的端头应置于下游管节的内侧，不得反置。
- 6 波纹钢板件拼装时，应按设计要求错缝拼装。
- 7 拼装完成后，复测公路波纹钢涵洞孔径、位置、高程和预拱度，符合要求时，终拧所有高强螺栓。
- 8 螺栓终拧完成后，应在波纹钢板件拼接缝和螺栓孔位置采用专业密封胶进行防水处理，防止在波纹钢板件拼接缝和螺栓孔位置发生渗水。

5.5 防腐防水

5.5.1 波纹钢管（板）应在工厂进行热浸镀锌防腐，现场施工的防腐防水措施应按

设计要求进行。

5.5.2 连接处采用聚氨酯防腐防水时，宜采用专用设备喷涂，总干膜厚度不小于设计值。喷涂厚度应均匀、无漏喷涂部位，涂层表面应均匀光洁、连续，无肉眼可分辨的小孔、孔隙、裂缝、脱皮及其他缺陷。聚氨酯涂层干燥后方可进行下一道工序。

5.5.3 公路波纹钢涵洞外表面采用沥青防腐防水时，宜采用专用设备喷涂，总干膜厚度不小于设计值。喷涂厚度应均匀、无漏喷涂部位，涂层表面应均匀光洁、连续，无肉眼可分辨的小孔、孔隙、裂缝、脱皮及其他缺陷。沥青涂层晾干后方可进行填筑施工。

5.6 填筑

5.6.1 填筑施工应符合下列规定：

- 1 管周 10m 范围内不应强夯施工。
- 2 结构性填筑区域范围内压实度不应小于 96%。

5.6.2 涵洞楔形区填筑施工采用液态粉煤灰、流态水泥土等易密实的填料时，应立模浇筑施工。

5.6.3 涵洞两侧填筑施工应符合下列规定：

- 1 填料铺筑时，所有机械严禁碰撞波纹管。
- 2 涵洞两侧应对称、均衡、分层摊铺，逐层压实，每层的压实厚度宜为 150 ~ 200mm，压实高度差应小于 300mm。
- 3 压实方向应与波纹钢涵洞轴向方向一致，严禁垂直行驶。
- 4 填挖交界及搭接区的施工应符合现行《公路路基施工技术规范》（JTG/T 3610）的有关规定。

5.6.4 涵洞顶部填筑施工应符合下列规定：

- 1 涵洞顶部填筑高度小于最小覆土厚度时，应采用轻型压实设备，且不得振动压实。
- 2 涵洞顶部填筑高度小于最小覆土厚度时，严禁夯实（压实）机械以外的重型机械通行。
- 3 涵洞顶部填筑高度超过最小覆土厚度后，先采用轻型压路机静压，后采用重型压路机振压。压实方向应垂直于波纹钢涵洞轴向。

5.7 质量控制

5.7.1 波纹钢涵洞结构性填筑区域压实度应符合表 5.7.1 的规定。

表 5.7.1 结构性填筑区域压实度要求

位置	规定值或允许偏差
垫层	不设垫层时，地基表层压实度不小于 90%；砂砾或碎石垫层需压实
结构性填筑区域	≥96%

5.7.2 波纹钢管（板）出厂时，必须附有产品质量合格证书。出厂时成品允许偏差应符合表 5.7.2 的规定。

表 5.7.2 波纹钢管（板）的尺寸允许偏差

检查项目		规定值或允许偏差
钢板厚度（mm）		不小于设计值
波距（mm）		±3
波高（mm）		±3
波纹钢板件	长度（%）	±1
	宽度（%）	±1
镀锌层或涂层厚度（μm）		不小于设计值

5.7.3 高强螺栓栓孔孔径及孔距允许偏差应符合现行《冷弯波纹钢管》（GB/T 34567）的有关规定。

5.7.4 公路波纹钢涵洞拼装应符合下列规定：

- 1 拼装波纹板涵洞在出厂前应进行必要的预拼装。
- 2 波纹钢管（板）运输至现场应进行检查，允许偏差满足要求时方可组织拼装。
- 公路波纹钢涵洞管节允许偏差应符合表 5.7.4 的规定。

表 5.7.4 波纹钢涵洞管节允许偏差

项目	允许偏差	备注
螺旋波纹钢管或环形波纹钢管管节长度（mm）	±10	拼装期间控制
孔径	±1%	—
顺直度	≤0.2%	—

5.7.5 拼装后的外观质量应符合表 5.7.5 的规定。

表 5.7.5 公路波纹钢涵洞构件的外观质量要求

项目	要求
切口	平直，无明显锯齿状
颜色	表面色泽均匀、无明显缺损
整体外观	表面平整光滑、无损伤、无破裂、无孔洞，波形无明显变形
镀锌层	表面平滑、均匀、无滴瘤、无剥落、无漏镀、无残留的溶剂渣
涂塑层、沥青层	无破裂、无剥离、无孔洞
焊缝表面	无气孔、裂纹、夹渣及飞溅物等缺陷，焊缝处镀锌层符合本标准规定
端面错位	$\leq 5\text{mm}$

5.7.6 公路波纹钢涵洞施工实测项目允许偏差应符合表 5.7.6 的规定。

表 5.7.6 公路波纹钢涵洞施工实测项目

检测项目	规定值或允许偏差	备注
垫层压实度	$\geq$ 设计要求	每涵不少于 3 处
轴线偏位 (mm)	≤ 50	全站仪测量不少于 3 点
涵底流水面高程 (mm)	≤ 20	水准仪测量不少于 3 点
涵洞长度 (mm)	± 100	—
结构性填筑压实度	$\geq$ 设计要求	各层不少于 3 处
管身顺直，进出水口平整，无阻水现象。帽石及一字墙或八字墙等平直，无翘曲现象		

5.7.7 截面变形测量与控制应符合下列规定：

- 1 公路波纹钢涵洞在安装完成、填筑过程中、施工完成后应测量截面的形状，测点不少于 3 处。
- 2 安装完成后开始填筑前，截面尺寸偏差不应超过孔径的 $\pm 1\%$ 。
- 3 从填筑开始至涵顶填筑结束，波纹钢涵洞截面水平方向和竖直方向的尺寸偏差均不应超过孔径的 $\pm 2\%$ ，不满足要求时，应立即终止施工并组织查明原因，并采取措施进行校正。

5.8 养护

5.8.1 公路波纹钢涵洞的养护应符合现行《公路桥涵养护规范》(JTG 5120) 的有关规定。

5.8.2 公路波纹钢涵洞出现防腐防水层起皮、脱落等病害时应及时进行修复，洞口及洞内淤积物应及时清理。

附录 A 公路波纹管涵洞极限状态法设计

A.1 作用

A.1.1 土的推力 T_G 在涵顶填土的作用范围如图 A.1.1-1 所示，其每延米土的推力 T_G 应按式（A.1.1）计算。

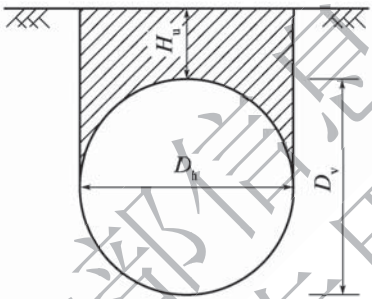


图 A.1.1-1 涵顶填土作用范围示意图

$$T_G = 0.5 (1.0 - 0.1 C_s) A_f W \tag{A.1.1}$$

式中： T_G ——涵顶填土引起的波纹管每延米推力（kN/m）；

C_s ——轴向刚度系数， $C_s = \frac{1\,000 E_s D_v}{E A_l}$ ；

A_l ——一个波距截面面积与波距的比值（mm²/mm）；

D_v ——公路波纹管涵洞有效矢高（m），按波纹管涵洞轴线计算；

E 、 E_s ——波纹钢管（板）弹性模量、填土的割线模量（MPa），无试验数据时，填土的割线模量可按表 A.1.1-1 取值；

表 A.1.1-1 填土的割线模量参考值

类型	压实度（%）	割线模量 E_s （MPa）
级配砾石、砂砾、砂或砾质砂	85	6
	90	12
	95	24
	100	30

续表 A. 1. 1-1

类型	压实度 (%)	割线模量 E_s (MPa)
含黏土的砾石、砂砾、 砂或砾质砂	85	3
	90	6
	95	12
	100	15

A_f ——考虑结构起拱效应的土压力增大系数，按附表 A. 1. 1-2 取值，当 $H_u/D_h < 0.2$ 时，可线性外插，前提 H_u 不小于规定的最小覆土厚度；
 H_u ——覆土厚度 (m)，如图 A. 1. 1-2 所示；

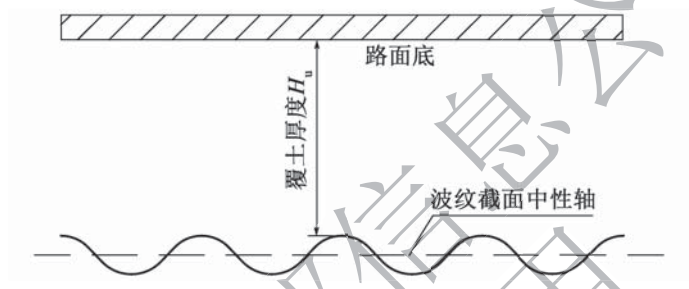


图 A. 1. 1-2 覆土厚度示意图

D_h ——公路波纹钢涵洞有效跨径 (m)，按波纹钢涵洞轴线计算；
 W ——涵顶填土每延米的重量 (kN/m)， $W = \gamma D_h (H_u + 0.1075 D_v)$ ；
 γ ——涵顶填土的重度 (kN/m³)。

表 A. 1. 1-2 A_f 系数取值表

A_f	D_h/D_v					
	≤ 0.6	$= 0.8$	$= 1.0$	$= 1.2$	$= 1.4$	≥ 1.6
$H_u > 3D_h$	1.62	1.40	1.25	1.10	1.05	1.02
$H_u = 3D_h$	1.62	1.40	1.25	1.18	1.08	1.02
$H_u = 2D_h$	1.62	1.40	1.25	1.18	1.08	1.02
$H_u = 1.8D_h$	1.61	1.40	1.25	1.18	1.08	1.02
$H_u = 1.6D_h$	1.60	1.39	1.24	1.17	1.08	1.02
$H_u = 1.4D_h$	1.59	1.38	1.22	1.15	1.08	1.02
$H_u = 1.2D_h$	1.55	1.34	1.20	1.12	1.07	1.02
$H_u = D_h$	1.53	1.30	1.19	1.10	1.05	1.02
$H_u = 0.8D_h$	1.55	1.31	1.19	1.11	1.06	1.03
$H_u = 0.6D_h$	1.65	1.34	1.2	1.12	1.07	1.04
$H_u = 0.4D_h$	1.82	1.40	1.23	1.15	1.10	1.05
$H_u \leq 0.2D_h$	2.28	1.60	1.28	1.20	1.15	1.10

注： A_f 和 D_h/D_v 通过线性内插取值。

A.1.2 汽车荷载推力 T_Q 公路波纹钢涵洞设计应采用车辆荷载, 不计汽车荷载冲击力。汽车荷载推力 T_Q 应按式 (A.1.2) 计算。

$$T_Q = \min\left(0.5m \frac{\sum G}{ab} D_h, 0.5m \frac{\sum G_b}{ab}\right) \quad (\text{A.1.2})$$

式中: T_Q ——汽车荷载引起的波纹管每延米推力 (kN/m);

m ——横向车道布载系数, 应符合现行《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60) 的相关规定;

$\sum G$ ——扩散面积内的车轮总重力 (kN), 应符合现行《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60) 的相关规定, 在施工验算中需按实际轴重验算;

a 、 b ——车辆荷载横向、纵向分布宽度 (m), 应符合现行《公路涵洞设计规范》(JTG/T 3365-02) 的相关规定。

A.1.3 地震推力 T_E 地震动峰值加速度大于或等于 $0.2g$ 地区的公路波纹钢涵洞应进行抗震设计, 考虑地震推力。对公路波纹钢涵洞可仅考虑竖向地震作用, 地震推力 T_E 应按式 (A.1.3) 计算。

$$T_E = C_i C_z A_v \frac{T_G}{g} \quad (\text{A.1.3})$$

式中: T_E ——地震作用引起的波纹管每延米推力 (kN/m);

C_i ——抗震重要性修正系数, 应符合现行《公路工程抗震规范》(JTG B02) 的相关规定;

C_z ——综合影响系数, 取 0.3;

A_v ——竖向设计基本地震动峰值加速度, 按表 A.1.3 选用;

g ——重力加速度, 取值 9.80665m/s^2 。

表 A.1.3 地震基本烈度和设计基本地震动峰值加速度对应表

地震基本烈度	6	7		8		9
水平向设计基本地震动峰值加速度	$\geq 0.05g$	0.10g	0.15g	0.20g	0.30g	$\geq 0.40g$
竖向设计基本地震动峰值加速度	0	0	0	0.10g	0.17g	0.25g

A.2 结构验算

A.2.1 基本组合 (永久作用设计值与可变作用设计值) 下应满足式 (A.2.1)。

$$S_{ud} = \frac{\gamma_0 (\gamma_G T_G + \gamma_Q T_Q)}{A_l} \leq \min(f_d, f_b) \quad (\text{A.2.1})$$

式中: S_{ud} ——承载力极限状态下作用基本组合的效应设计值;

γ_0 ——结构重要性系数, 对应设计安全等级二级和三级分别取 1.0 和 0.9;

γ_G ——土的推力分项系数, 取 1.2;

γ_Q ——汽车荷载推力分项系数, 取 1.8;

- T_G ——涵顶填土引起的波纹管每延米推力；
 T_Q ——汽车荷载引起的波纹管每延米推力；
 A_l ——一个波距截面面积与波距的比值 (mm^2/mm)；
 f_d ——波纹钢板材的强度设计值 (MPa)，按现行《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64) 取值；
 f_b ——波纹钢板的屈曲临界应力 (MPa)。

A. 2.2 地震组合（永久作用效应与地震作用效应的最不利组合）应满足式 (A. 2.2)。

$$S_{ad} = \frac{T_G \pm T_E}{A_l} \leq \min(f_d, f_b) \quad (\text{A. 2.2})$$

式中： S_{ad} ——承载能力极限状态下作用地震组合的效应设计值；

T_E ——地震作用引起的波纹管每延米推力。

A. 2.3 屈曲临界应力应按式 (A. 2.3) 验算。

$$\left. \begin{aligned} f_b &= \phi_t F_m \left\{ f_y - \left[\frac{f_y^2}{12 E \rho} \left(\frac{K R}{r_l} \right)^2 \right] \right\}, R \leq R_e \\ f_b &= \frac{3 \phi_t \rho F_m E}{(K R / r_l)^2}, R > R_e \end{aligned} \right\} \quad (\text{A. 2.3})$$

式中： f_b ——波纹钢板的屈曲临界应力 (MPa)；

ϕ_t ——抗压强度的阻抗系数，土—金属结构时取 0.8；

f_y ——波纹钢板材的屈服强度 (MPa)；

K ——结构与周围土体相对弯曲刚度系数， $K = \lambda \left(\frac{EI}{E_m R^3} \right)^{0.25}$ ；

R ——结构的曲率半径 (mm)，按波纹钢涵洞轴线计算；

R_e ——等效半径 (mm)， $R_e = \frac{r_l}{K} \left(\frac{6 E \rho}{f_y} \right)^{0.5}$ ；

E ——波纹钢板材的弹性模量 (MPa)；

ρ ——屈曲折减系数， $\rho = \left(1000 \frac{H_u + H'}{R} \right)^{0.5} \leq 1.0$ ；

H' ——起拱线到拱顶之间竖直距离的一半 (m)；

r_l ——一个波距波纹截面回转半径 (mm)；

λ ——计算 K 值时的修正系数， $\lambda = 1.22 \left[1.0 + 1.6 \left(\frac{EI_l}{E_m R^3} \right)^{0.25} \right]$ ；

E_m ——填土的割线模量修正值， $E_m = E_s \left[1 - \left(\frac{R}{R + 1000(H_u + H')} \right)^2 \right]$ ；

E_s ——填土的割线模量 (MPa)；

F_m ——结构屈曲应力折减系数, 对于单跨结构, 取 1.0; 对于多跨结构, $F_m = \left(0.85 + \frac{0.3c}{D_h}\right) \leq 1.0$;
 c ——多孔结构间的最小净距。

A.2.4 螺栓连接验算应满足下列要求:

A.2.4.1 承压型高强度螺栓的抗剪强度主要由螺栓杆受剪和孔壁承压两种破坏模式控制, 应分别计算, 取其最小值进行设计。

1 受剪承载力设计值按式 (A.2.4-1) 计算。

$$N_v^b = n_v \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{f_v^b}{1\,000} \quad (\text{A.2.4-1})$$

式中: N_v^b ——一个螺栓受剪承载力设计值 (kN);

n_v ——每只螺栓受剪面数量;

d ——螺栓杆直径 (mm);

f_v^b ——高强度螺栓抗剪强度设计值 (MPa)。

2 承压承载力设计值按式 (A.2.4-2) 计算。

$$N_c^b = d \cdot \sum t \cdot \frac{f_c^b}{1\,000} \quad (\text{A.2.4-2})$$

式中: N_c^b ——一个螺栓承压承载力设计值 (kN);

d ——螺栓杆直径 (mm);

$\sum t$ ——在不同受力方向中一个受力方向承压构件总厚度的较小值 (mm);

f_c^b ——高强度螺栓承压强度设计值 (MPa)。

A.2.4.2 在抗剪连接中, 每个摩擦型高强度螺栓承载力设计值按式 (A.2.4-3) 计算。

$$N_v^b = 0.9 n_f \mu P \quad (\text{A.2.4-3})$$

式中: N_v^b ——一个螺栓的受剪承载力设计值 (kN);

n_f ——传力摩擦面数目;

μ ——摩擦面的抗滑移系数, 按表 A.2.4-1 采用;

P ——一个高强度螺栓的预拉力, 按表 A.2.4-2 采用。

表 A.2.4-1 摩擦面的抗滑移系数 μ

在连接处构件接触面的处理方法	构件的钢号		
	Q235 钢	Q355 钢、Q390 钢	Q420 钢
喷砂 (丸)	0.45	0.50	0.50
喷砂 (丸) 后涂无机富锌漆	0.35	0.40	0.40
喷砂 (丸) 后生赤锈	0.45	0.50	0.50
钢丝刷清除浮锈或未经处理的干净轧制表面	0.30	0.35	0.40

表 A. 2. 4-2 一个高强度螺栓的预拉力 P (kN)

螺栓的性能等级	螺栓公称直径 (mm)						
	M12	M16	M20	M22	M24	M27	M30
8.8 级	45	80	125	150	175	230	280
10.9 级	60	100	155	190	225	290	355

A. 2. 5 施工过程波纹截面的弯矩与轴向压力的组合应满足式 (A. 2. 5-1)。

$$\left(\frac{P}{P_{pf}}\right)^2 + \left|\frac{M}{M_{pf}}\right| \leq 1.0 \quad (\text{A. 2. 5-1})$$

式中各符号含义及计算方法如下：

1 P 为波纹截面所受轴向压力，按式 (A. 2. 5-2) 计算。计算中包含土的重力和汽车荷载（考虑施工机械）两部分引起的压力。当 $H_Q/D_h < 0.2$ 时，可取 $P = 0$ ，其中 H_Q 为施工过程中的填土高度， D_h 波纹钢涵洞的有效跨度径，按波纹钢涵洞轴线计算。

$$P = T_G + T_Q \quad (\text{A. 2. 5-2})$$

式中： T_G ——施工过程中涵顶填土引起的波纹管每延米推力 (kN/m)，计算方法同式 (A. 1. 1)；

T_Q ——汽车荷载（考虑施工机械）引起的波纹管每延米推力 (kN/m)，计算方法同式 (A. 1. 2)。

2 P_{pf} 为波纹截面考虑塑性抵抗系数的设计压力，按式 (A. 2. 5-3) 计算。

$$P_{pf} = \phi_h A_l f_y \quad (\text{A. 2. 5-3})$$

式中： ϕ_h ——波纹钢板材抵抗塑性铰的抗力系数，取 0.7；

A_l ——一个波距截面面积与波距的比值 (mm^2/mm)；

f_y ——波纹钢板材的屈服强度 (MPa)。

3 M 为波纹截面所受弯矩，由三部分组成，按式 (A. 2. 5-4) ~ 式 (A. 2. 5-7) 计算。

$$M = M_1 + M_B + M_Q \quad (\text{A. 2. 5-4})$$

$$M_1 = K_{M1} \gamma D_h^3 \quad (\text{A. 2. 5-5})$$

$$M_B = -K_{M2} \gamma D_h^2 H_Q \quad (\text{A. 2. 5-6})$$

$$M_Q = K_{M3} R_L D_h L_Q \quad (\text{A. 2. 5-7})$$

式中： M_1 ——公路波纹钢板涵洞在土体均布力作用下跨中截面的弯矩 ($\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}$)；

M_B ——由于周边土体的支撑作用，使波纹钢板涵洞结构跨中截面减小的弯矩 ($\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}$)，为负值；

M_Q ——汽车荷载（考虑施工机械）引起的结构跨中截面的弯矩 ($\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}$)；

L_Q ——施工过程中作用于结构上汽车荷载（考虑施工机械）的等效荷载值 (kN/m)， $L_Q = A_Q/K_4$ ，其中， A_Q 为施工过程中的车辆轴重；

γ ——涵顶填土的重度 (kN/m^3)；

K_{M1} , K_{M2} , K_{M3} , K_4 , R_L ——计算施工弯矩的参数, 取值方法详见 A. 2. 6。

4 M_{pf} 为波纹截面考虑塑性抵抗系数的设计弯矩, 按式 (A. 2. 5-8)、式 (A. 2. 5-9) 计算。

$$M_{pf} = \phi_h M_p \quad (\text{A. 2. 5-8})$$

$$M_p = \frac{2I_l}{d+t} \cdot f_y \quad (\text{A. 2. 5-9})$$

式中: ϕ_h ——波纹钢板材抵抗塑性铰的抗力系数, 取 0.9。

M_p ——波纹钢板波纹横截面可承受的塑性弯矩, 即依材料极限抗拉强度计算所得的波纹横截面所能承受的最大弯矩 ($\text{kN} \cdot \text{m/m}$);

I_l ——一个波距波纹截面惯性矩与波距的比值 (mm^4/mm);

d ——波高 (mm);

t ——壁厚 (mm)。

A. 2. 6 施工验算中的参数按下列公式进行计算。

1 施工过程验算中具体参数的计算公式:

$$N_f = \frac{E_s (1\,000D_h)^3}{EI_l} \quad (\text{A. 2. 6-1})$$

$$\left. \begin{aligned} K_{M1} &= 0.004\,6 - 0.001 \lg N_f, \quad N_f \leq 5\,000 \\ K_{M1} &= 0.000\,9, \quad N_f > 5\,000 \end{aligned} \right\} \quad (\text{A. 2. 6-2})$$

$$\left. \begin{aligned} K_{M2} &= 0.018 - 0.004 \lg N_f, \quad N_f \leq 5\,000 \\ K_{M2} &= 0.003\,2, \quad N_f > 5\,000 \end{aligned} \right\} \quad (\text{A. 2. 6-3})$$

$$\left. \begin{aligned} K_{M3} &= 0.12 - 0.018 \lg N_f, \quad N_f \leq 100\,000 \\ K_{M3} &= 0.03, \quad N_f > 100\,000 \end{aligned} \right\} \quad (\text{A. 2. 6-4})$$

$$R_L = \frac{0.265 - 0.053 \lg N_f}{\left(\frac{H_Q}{D_h}\right)^{0.75}} \leq 1.0 \quad (\text{A. 2. 6-5})$$

2 等效线性荷载的参数 K_4 按照表 A. 2. 6 线性插值取得。

表 A. 2. 6 等效线性荷载的参数 K_4 的取值

埋深 (m)	K_4 (m)		
	每轴双轮	每轴四轮	每轴八轮
0.3	1.3	1.5	2.6
0.6	1.6	2.0	2.8
0.9	2.1	2.7	3.2
1.5	3.7	3.8	4.1
2.1	4.4	4.4	4.5
3.0	4.9	4.9	4.9

A. 2.7 运营阶段的深波纹截面的弯矩与轴向压力的组合应满足式 (A. 2.7-1)。

$$\left(\frac{T_f}{P_{pf}}\right)^2 + \left|\frac{M_f}{M_{pf}}\right| \leq 1.0 \quad (\text{A. 2.7-1})$$

$$P_{pf} = \phi_h A_l f_y \quad (\text{A. 2.7-2})$$

$$M_f = \gamma_G M_1 + \gamma_G M_G + \gamma_Q M_Q \quad (\text{A. 2.7-3})$$

$$M_G = -k_{M2} R_B \gamma D_h^2 H_e \quad (\text{A. 2.7-4})$$

$$H_e = \min\left(H_u, \frac{D_h}{2}\right) \quad (\text{A. 2.7-5})$$

$$M_Q = \frac{k_{M3} R_u D_h A_L}{k_4} \quad (\text{A. 2.7-6})$$

$$R_u = \frac{0.265 - 0.053 \lg N_F}{\left(\frac{H_u}{D_h}\right)^{0.75}} \leq 1.0 \quad (\text{A. 2.7-7})$$

式中： M_f ——运营阶段波纹钢板波纹截面所受弯矩 ($\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}$)；

M_G ——运营阶段拱顶以上 H_e 高度的填土产生的截面弯矩 ($\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}$)；

M_Q ——运营阶段活载作用产生的截面弯矩 ($\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}$)；

H_e ——覆土厚度 H_u 和有效跨径 D_h 一半中的最小值 (m)。

附录 B 常用波形截面特征参数表

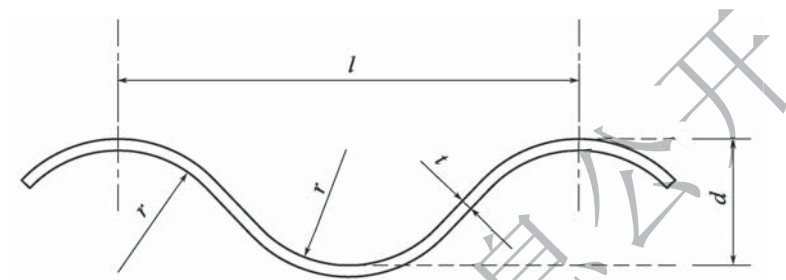


图 B 波纹截面示意图

表 B 常用波形截面特征参数表

波距	波高	转角半径	壁厚	截面面积	惯性矩	回转半径	截面模量
l	d	r	t	A_l	I_l	r_l	W_l
mm	mm	mm	mm	mm ² /mm	mm ⁴ /mm	mm	mm ³ /mm
68	13	17.5	1.6	1.733	34.54	4.464	4.73
			2.0	2.167	43.62	4.487	5.82
			4.0	4.338	93.81	4.650	11.04
75	25	14.3	1.6	1.986	145.88	8.570	10.97
			2.0	2.485	183.60	8.596	13.60
			4.0	4.988	382.51	8.757	26.38
125	25	40	1.6	1.756	138.74	8.889	10.43
			2.0	2.195	174.10	8.905	12.90
			4.0	4.395	356.97	9.012	24.62
150	50	28	2.0	2.478	717.58	17.016	27.60
			4.0	4.965	1 458.63	17.141	54.02
			6.0	7.460	2 230.13	17.290	79.65
			8.0	9.964	3 039.13	17.465	104.80
200	55	53	2.0	2.361	899.39	19.517	31.56
			4.0	4.729	1 819.24	19.614	61.67
			6.0	7.103	2 765.85	19.733	90.68
			8.0	9.486	3 745.58	19.871	118.91

续表 B

波距	波高	转角半径	壁厚	截面面积	惯性矩	回转半径	截面模量
l	d	r	t	A_l	I_l	r_l	W_l
mm	mm	mm	mm	mm ² /mm	mm ⁴ /mm	mm	mm ³ /mm
230	64	57	2.0	2.360	1 190.04	22.455	36.06
			4.0	4.725	2 402.72	22.551	70.67
			6.0	7.094	3 644.30	22.665	104.12
			8.0	9.470	4 921.08	22.796	136.70
300	110	70	4.0	5.238	7 911.51	38.863	138.80
			6.0	7.870	11 956.88	38.978	206.15
			8.0	10.511	16 072.34	39.103	272.41
			10.0	13.163	20 265.75	39.238	337.76
380	140	76	4.0	5.179	12 060.04	48.255	167.50
			6.0	7.776	18 194.44	48.373	249.24
			8.0	10.377	24 408.55	48.500	329.85
			10.0	12.983	30 710.01	48.636	409.47
400	150	81	4.0	5.224	14 024.13	51.814	182.13
			6.0	7.843	21 150.36	51.931	271.16
			8.0	10.466	28 362.99	52.057	359.03
			10.0	13.095	35 669.78	52.191	445.87

注：其他波形及壁厚的截面特性可参考《冷弯波纹钢管》（GB/T 34567—2017）的有关规定。

本规范用词用语说明

1 本规范执行严格程度的用词，采用下列写法：

- 1) 表示很严格，非这样做不可的用词，正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”。
- 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词，正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。
- 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词，正面词采用“宜”反面词采用“不宜”。
- 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 引用标准的用语采用下列写法：

- 1) 在标准总则中表述与相关标准的关系时，采用“除应符合本规范的规定外，尚应符合国家和行业现行有关强制性标准的规定”。
- 2) 在标准条文及其他规定中，当引用的标准为国家标准和行业标准时，表述为“应符合《×××××》(×××)的有关规定”。
- 3) 当引用本规范中的其他规定时，表述为“应符合本规范第×章的有关规定”“应符合本规范第×.×节的有关规定”“应符合本规范第×.×.×条的有关规定或“应按本规范第×.×.×条的有关规定执行”。