

内蒙古自治区地方标准

DB15/T 654—2021

代替DB15/T 654-2013

公路波纹钢管（板）桥涵设计与施工规范

Specification for design and construction of corrugated steel pipe and plate for highway bridges and culverts

地方标准信息服务平台

2021-05-10 发布

2021-06-10 实施

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号	4
4.1 材料性能	4
4.2 几何参数	4
4.3 设计参数	5
5 桥涵布置	6
5.1 一般规定	6
5.2 桥涵跨径	6
5.3 桥涵构造	7
6 材料	13
6.1 主体结构材料	13
6.2 连接件	14
6.3 焊接材料	14
6.4 密封材料	14
6.5 结构性回填材料	15
6.6 防腐材料	15
7 设计	15
7.1 一般规定	15
7.2 基础设计	15
7.3 最小覆土厚度	16
7.4 作用	17
7.5 钢板应力验算	19
7.6 钢板屈曲验算	21
7.7 弯矩和轴力组合效应的验算	23
7.8 施工过程的验算	25
7.9 波纹钢板螺栓连接验算	26
7.10 加强措施	27
7.11 耐久性设计	27
8 施工	28
8.1 一般规定	28
8.2 波纹钢板结构物的安装	28
8.3 施工过程中的临时性加强措施	30
8.4 结构性回填及上部土层施工	31
8.5 线形控制	32
8.6 其它事项	32

8.7 改扩建施工.....	32
附录 A（规范性） 公路波纹钢管（板）桥涵的常用类型与功能.....	34
附录 B（规范性） 公路常用波纹钢管（板）截面特性参数表.....	36
附录 C（规范性） 设计流程图	39
附录 D（规范性） 相关参数计算公式	40
附录 E（规范性） 条文说明	42

地方标准信息服务平台

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件代替DB15/T 654—2013《公路波纹钢管（板）桥涵设计与施工规范》，与DB15/T 654—2013相比，除编辑性更改外主要技术变化如下：

- 更改了术语螺旋波纹钢管、环形波纹钢管、波纹钢板件、壁厚、作用（见3.5、3.6、3.7、3.12、3.21，2013版的3.5、3.6、3.7、3.12、3.17），增加了术语浅波、中波、深波、大波、矢高、结构性回填材料和结构性回填范围新术语，将术语圆管内径和孔径合并为新术语跨径（见3.13、3.14、3.15、3.16、3.17、3.18、3.22、3.23）；
- 增加了符号（见4）；
- 删除了桥涵设计洪水频率、汽车荷载及安全等级的规定（见2013版4.2.1）；
- 增加了一般规定（见5.1）；
- 更改了桥涵孔径（见5.2，2013版4.3）；
- 更改了闭口截面波纹钢管连接方式（见5.3.1.1，2013版4.4.1.1）；
- 删除了螺旋波纹钢管咬口连接图示（见2013版图2）；
- 更改了波纹钢板件拼装图示（见5.3.1.1图5～图8，2013版4.4.1.1图6）；
- 更改了开口截面结构物要求（见5.3.1.2，2013版4.4.1.2）；
- 更改了波纹钢板与基础连接图示（见5.3.1.2图9，2013版4.4.1.2图7）；
- 更改了直管延长式洞口图示（见5.3.2.4图13，2013版4.4.2.4图11）；
- 更改了簸箕式洞口的规定（见5.3.2.5，2013版4.4.2.5）；
- 更改了簸箕式洞口图示（见5.3.2.5图14，2013版4.4.2.5图12）；
- 删除了附属设施（见2013版4.5）；
- 增加了新的波形截面特性数据（见6.1.1和附录B，2013版5.1.1）；
- 更改了螺旋波纹钢管、环形波纹钢管、波纹钢板件的尺寸允许偏差要求（见6.1.2表1，2013版5.1.2表3）；
- 删除了抗拉强度不小于350MPa的规定（见6.1.3和6.1.5，2013版5.1.3和5.1.5）；
- 更改了高强螺栓、螺母的规格（见6.2.2，2013版5.2.2）；
- 增加了密封材料质量规定（见6.4.1，2013版5.4.1）；
- 增加了钢垫片、螺帽的密封要求（见6.4.2）；
- 更改了防腐内容，调整至耐久性设计（见6.6和7.11，2013版5.5）；
- 更改了结构性回填内容，调整至结构性回填材料和结构性回填施工（见6.5和8.4.1，2013版5.6）；
- 删除了外观质量要求（见2013版5.7）；
- 更改了基本设计规定（见7.1，2013版6.1）；
- 更改了内衬设计的规定（见7.11.3，2013版6.1.2）；
- 更改了基础设计的规定（见7.2，2013版6.2）；
- 更改了闭口截面结构物基础的最小厚度与宽度要求（见7.2.1.2表2，2013版6.2.1.2表7）；
- 更改了设置预拱度的要求（见7.2.1.3，2013版6.2.1.3）；
- 更改了开口截面结构物基础的规定（见7.2.2.1，2013版6.2.2.1）；
- 增加了地基处理（见7.2.3）；
- 更改了车辆冲击系数的规定（见7.4.2.3，2013版6.4.2.3）；
- 增加了关于施工荷载取值的规定（见7.4.2.4）；

- 增加了地震作用引起的附加弯矩规定（见7.4.3，2013版6.4.3）；
- 更改了内力验算规定（见7.5，2013版6.5）；
- 更改了结构起拱效应的土压力增大系数 A_f 的取值（见7.5，2013版6.5）；
- 更改了钢板屈曲验算的规定（见7.6，2013版6.6）；
- 增加了弯矩和轴力组合效应的验算（见7.7）；
- 更改了一个高强度螺栓的预拉力的规定（见7.9.3 表6，2013版6.8.3 表11）；
- 删除了设计流程（见2013版6.9）；
- 增加了加强措施的规定（见7.10）；
- 增加了特殊防腐设计规定（见7.11.4）；
- 增加了一般规定（见8.1）；
- 更改了材料的检验及现场准备的规定（见8.2.1，2013版7.1.1）；
- 更改了波纹钢管吊装要求，增加了波纹钢管的吊运图（见8.2.2.1 b），2013版7.1.2.1）；
- 更改了螺旋波纹钢管咬口及管箍连接要求（见8.2.2.1 表8，2013版7.1.2.1 表12）；
- 更改了螺栓预紧力扭矩的规定（见8.2.2.3 f），2013版7.1.2.3 f））；
- 增加了施工过程中的临时性加强措施的规定（见8.3）；
- 更改了最小填土高度的规定（见8.4.2.2，2013版7.2.2.2）；
- 更改了构造物最终允许变形的规定（见8.5.3，2013版7.3.3）；
- 增加了施工质量的规定（见8.5.4）；
- 增加了改扩建施工的规定（见8.7）；
- 删除了水文、水力计算（见2013版附录A）；
- 更改了公路波纹钢管（板）桥梁的类型与功能（见附录A，2013版附录B）；
- 更改了车辆荷载的扩散图（见7.4.2，2013版附录C）；
- 更改了设计流程图（见附录C，2013版附录E）；
- 增加了条文说明（见附录E）。

本文件由内蒙古自治区交通运输厅归口。

本文件由内蒙古交通设计研究院有限责任公司负责起草，北京交通大学、衡水益通金属制品有限公司、河北腾是达金属结构有限公司、青海路拓波纹管制造有限公司、南京联众工程技术有限公司、哈尔滨金阳光管业有限责任公司参加起草。

本文件主要起草人：王全录、刘保东、刘瑞、高延奎、张俊、盛海峰、杜子义、侯庆军、王进田、金浩然、王集忠、郝凯荣、霍永成、陈瑞林、王志宏、刘志罡、李元庆、战福军、刘晟。

本文件的历次版本发布情况为：

- 2013年首次发布为DB15/T 654-2013；
- 本次为第一次修订。

公路波纹钢管（板）桥涵设计与施工规范

1 范围

本文件规定了公路波纹钢管（板）桥涵结构的桥涵布置、材料、设计及施工。
本文件适用于新建和改扩建各级公路波纹钢管（板）桥涵结构的设计及施工。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 470 锌锭
- GB/T 700 碳素结构钢
- GB/T 706 热轧型钢
- GB/T 709 热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差
- GB/T 1231 钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件
- GB/T 2518 连续热镀锌和锌合金镀层钢板及钢带
- GB/T 3274 碳素结构钢和低合金结构钢热轧钢板和钢带
- GB/T 6723 通用冷弯开口型钢
- GB/T 12467.1 金属材料熔焊质量要求 第1部分：质量要求相应等级的选择准则
- GB/T 22083 建筑密封胶分级和要求
- GB/T 34567 冷弯波纹钢管
- GB 50017 钢结构设计标准
- GB 50205 钢结构工程施工质量验收标准
- GB 50661 钢结构焊接规范（附条文说明）
- JB/T 3223 焊接材料质量管理规程
- JC/T 483 聚硫建筑密封胶
- JTG D60 公路桥涵设计通用规范
- JTG D64 公路钢结构桥梁设计规范
- JTG F80/1 公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程
- JT/T 722 公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件
- JTG 3362 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
- JTG 3363 公路桥涵地基与基础设计规范
- JTG/T 3365-02 公路涵洞设计规范
- JTG/T 3650-2020 公路桥涵施工技术规范
- DB15/T 1276 公路波纹钢管（板）桥涵工程质量检验评定标准

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

波纹钢板 corrugated steel plate

采用符合规定要求厚度和性能的热轧钢板为板材，按照规定的尺寸，经过波形轧制及冷弯加工而制成的一种波纹板状材料。

3.2

公路波纹钢管（板）桥涵 corrugated steel pipe (plate) for highway bridges and culverts

用螺旋波纹钢管、环形波纹钢管或用波纹钢板件连接形成主体结构之后，周边用结构性回填材料回填压实，以保证充分发挥土-结相互作用共同承担荷载的结构物。

3.3

闭口截面结构物 structures with closed conduit

横截面是封闭的结构物，如圆形、椭圆形、梨形等。

3.4

开口截面结构物 structures with open conduit

横截面不是封闭的结构物，如半圆形拱、低弧形拱等。

3.5

螺旋波纹钢管 helical corrugated steel pipe

钢带经轧波及螺旋锁缝咬合制成的，具有完整截面的钢管。

3.6

环形波纹钢管 annular corrugated steel pipe

钢板或者钢带经焊接后冷弯加工制成环形波纹，具有圆形截面的钢管。

3.7

波纹钢板件 corrugated steel plate section

波纹钢板经形弧制成的具有一定曲率的板件。

3.8

波纹钢板件长度 length of corrugated steel plate section

曲面波纹板件的弧长。

3.9

波纹钢板件宽度 width of corrugated steel plate section

曲面波纹板件的投影宽度。

3.10

波距 wave pitch

波纹钢管（板）相邻两个波峰或波谷之间的距离。

3.11

波高 wave depth

波纹钢管（板）波峰与波谷之间的垂直高度。

3.12

壁厚 plate thickness

波纹钢管（板）的厚度。

3.13

浅波 shallow wave

波高在 1 mm~49 mm的波形。

3.14

中波 middle wave

波高在 50 mm~99 mm的波形。

3.15

深波 deep wave

波高在 100 mm~149 mm的波形。

3.16

大波 big wave

波高在 150 mm以上的波形。

3.17

跨径 span

波纹钢管（板）桥涵安装成形后水平方向对应波谷之间的最大距离。

3.18

矢高 rise

波纹钢管（板）桥涵安装成形后竖向对应波谷之间的最大距离，对于开口截面，指拱顶与拱脚之间的竖向距离。

3.19

覆盖土层 soil cover

从波纹钢管（板）桥涵结构顶点（波峰）到路面结构层底面处的回填材料。

3.20

最小覆土厚度 minimum depth of soil cover

能够保证波纹钢管（板）桥涵稳定性和发挥土-结相互作用的覆盖土层厚度的最小值。

3.21

作用 action

施加在结构上的集中力或分布力（直接作用，也称为荷载）和引起结构外加变形或约束变形的原因（间接作用）。

3.22

结构性回填材料 engineered back material

波纹钢管（板）桥涵结构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回填材料，以保证结构稳定性和发挥土-结构相互作用。

3.23

结构性回填范围 structural backfill

波纹钢管（板）桥涵结构周围结构性回填土的包络范围，包括管基。

4 符号

4.1 材料性能

下列符号适用于本文件。

E : 波纹钢板材弹性模量，单位为兆帕（MPa）

E_m : 土体弹性模量的修正值，单位为兆帕（MPa）

E_s : 土体弹性模量，单位为兆帕（MPa）

f_b : 临界屈曲应力，单位为兆帕（MPa）

f_d : 材料强度设计值，单位为兆帕（MPa）

f_f : 材料极限抗拉强度，单位为兆帕（MPa）

f_y : 波纹钢板材屈服强度，单位为兆帕（MPa）

f_{cb} : 高强螺栓承压强度设计值，单位为兆帕（MPa）

f_{vb} : 高强螺栓抗剪强度设计值，单位为兆帕（MPa）

γ : 土的容重，单位为千牛每立方米（kN/m³）

ϕ_h : 波纹钢板材抵抗塑性铰的抗力系数

ϕ_t : 波纹钢板材抗压系数

4.2 几何参数

下列符号适用于本文件。

A : 波纹钢板材单位长度横截面面积，单位为平方毫米每毫米（mm²/mm）

D : 波纹钢管（板）桥涵的跨径，单位为毫米（mm）

- D_a : 波纹钢管(板)桥涵结构的最小覆土厚度, 单位为米(m)
 D_b : 波纹钢管(板)桥涵结构的最小间距要求, 单位为米(m)
 D_c : 波纹钢管(板)桥涵结构距结构性回填范围边缘的距离, 单位为米(m)
 D_h : 波纹钢管(板)桥涵的有效跨度(按波纹钢板轴线计算), 单位为米(m)
 D_v : 波纹钢管(板)桥涵的有效矢高(按波纹钢板轴线计算), 单位为米(m)
 H : 波纹钢管(板)桥涵顶部填土高度, 单位为米(m)
 H_c : 施工过程中填土高度, 单位为米(m)
 H' : 拱顶与起拱线之间垂直距离的一半, 单位为米(m)
 I : 截面的惯性矩, 单位为毫米四次方每毫米(mm^4/mm)
 R : 结构的曲率半径, 单位为毫米(mm)
 R_c : 波纹钢管(板)桥涵顶部的曲率半径, 单位为毫米(mm)
 R_e : 等效曲率半径, 单位为毫米(mm)
 S : 多跨结构间的间距, 单位为米(m)
 d : 波高, 单位为毫米(mm)
 d_v : 螺栓杆直径, 单位为毫米(mm)
 l : 波距, 单位为毫米(mm)
 r : 波纹钢板材回转半径, 单位为毫米(mm)
 t : 壁厚, 单位为毫米(mm)

4.3 设计参数

下列符号适用于本文件。

- A_c : 施工过程中的车辆轴重, 单位为千牛(kN)
 A_L : 车辆荷载后轴轴重, 单位为千牛(kN)
 A_v : 竖向地震作用系数
 A_f : 考虑结构起拱效应的土压力增大系数
 C_s : 考虑回填土性质与结构尺寸的土压力折减系数
 F_m : 多跨结构屈曲应力折减系数
 K : 波纹钢管(板)桥涵与周围土体相对弯曲刚度系数
 L_c : 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, 单位为千牛每米(kN/m)
 M : 波纹钢管(板)桥涵结构跨中截面所受弯矩, 单位为千牛米每米($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$)
 M_B : 在施工过程中由超出拱顶的拱上填土部分引起波纹钢管(板)桥涵结构跨中截面产生的弯矩, 单位为千牛米每米($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$)
 M_C : 施工过程中汽车荷载(考虑施工机械)引起的结构跨中截面的弯矩, 单位为千牛米每米($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$)
 M_{DH} : 由超出拱顶的拱上填土部分引起波纹钢管(板)桥涵结构跨中截面产生的弯矩, 单位为千牛米每米($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$)
 M_E : 竖向地震作用引起的波纹钢管(板)桥涵结构跨中截面的附加弯矩, 单位为千牛米每米($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$)
 M_G : 恒载作用下波纹钢管(板)桥涵结构跨中截面弯矩, 单位为千牛米每米($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$)
 M_L : 活载作用下波纹钢管(板)桥涵结构跨中截面产生的弯矩值, 单位为千牛米每米($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$)
 M_f : 波纹钢板考虑荷载组合时的结构跨中截面弯矩, 单位为千牛米每米($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$)
 M_p : 考虑材料极限抗拉强度时截面能承受的最大弯矩, 单位为千牛米每米($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$)
 M_{pf} : 波纹钢板截面考虑塑性抵抗系数的设计弯矩, 单位为千牛米每米($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$)
 M_I : 在回填至拱顶之前的土体引起波纹钢管(板)桥涵结构跨中截面产生的弯矩, 单位为千牛米每米($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$)
 N : 波纹钢板截面所受轴向压力, 单位为千牛每米(kN/m)
 N_c : 施工过程中汽车荷载(考虑施工机械)引起的波纹钢板压力, 单位为千牛每米(kN/m)
 N_E : 竖向地震作用引起的波纹钢板压力, 单位为千牛每米(kN/m)
 N_G : 土的重力引起的波纹钢板压力, 单位为千牛每米(kN/m)
 N_Q : 汽车荷载引起的波纹钢板压力, 单位为千牛每米(kN/m)
 N_{pf} : 波纹钢板截面考虑塑性抵抗系数的设计压力, 单位为千牛每米(kN/m)

- N_c : 单个螺栓承压承载力设计值, 单位为千牛 (kN)
 N_v : 单个螺栓受剪承载力设计值, 单位为千牛 (kN)
 P : 一个高强度螺栓的预拉力, 单位为千牛 (kN)
 R_0 : 竖向地震作用与水平地震作用比值函数
 W : 拱上填土每延米的重力, 单位为千牛每米 (kN/m)
 l_t : 沿车辆长度方向扩散后的尺寸, 单位为米 (m)
 m_f : 多车道折减系数
 n_v : 每只螺栓受剪面数量
 w : 沿车辆宽度方向扩散后的尺寸, 单位为米 (m)
 γ_E : 地震作用的分项系数
 γ_G : 永久作用的分项系数
 γ_Q : 可变作用的分项系数
 γ_0 : 结构重要性系数
 δ : 地震动水平加速度峰值
 θ_0 : 通过拱顶圆弧中心并与竖向中心线形成的夹角, 单位为度 ($^\circ$)
 λ : 计算 K 的一个系数
 μ : 车辆冲击系数
 μ_f : 摩擦面的抗滑移系数
 ρ : 屈曲折减系数
 σ_L : 汽车荷载扩散到拱顶的压力, 单位为千帕 (kPa)

5 桥涵布置

5.1 一般规定

5.1.1 适用条件

公路波纹钢管(板)桥涵适用地基条件广泛, 一般桥梁涵洞处均可设置公路波纹钢管(板)桥涵, 下列情况宜优先考虑公路波纹钢管(板)桥涵:

- 承载力较低, 会有较大沉降与变形的地基、煤矿等采空区;
- 地形条件复杂地区;
- 高寒冻土地区;
- 砂石等资源缺乏地区;
- 应急抢险、救灾等临时性工程;
- 高填方地区。

5.1.2 桥涵布设基本要求

5.1.2.1 冰冻地区不应采用小孔径管涵和倒虹吸管涵。当有农田灌溉需要采用时, 应在冻期前将管内积水排除, 并将两端进出口封闭。

5.1.2.2 桥涵位置应符合沿线线形布设要求。当不受线形布设限制时, 应将桥涵位置选择在地形有利、地质条件良好、沟床稳定的河(沟)段上。

5.2 桥涵跨径

5.2.1 桥涵跨径的设计应保证设计洪水以内的各级洪水及水流、泥石流、漂流物等安全通过, 并应考虑壅水、冲刷对上下游的影响, 确保桥涵附近路堤的稳定。

5.2.2 桥涵跨径的设计应考虑上下游已建或拟建桥涵和水工建筑物的状况及其对河床演变的影响。

5.2.3 桥涵跨径设计尚应注意河床地形，不宜过分压缩河道、改变水流的天然状态。

5.2.4 桥涵的跨径应参照 JTG/T 3365-02 中的规定，根据设计洪水流量、河床地质、河床和锥坡加固形式等条件确定。当桥涵的上游条件许可积水时，依暴雨径流计算的流量可考虑减少，但减少的流量不应大于总流量的 1/4。

5.2.5 公路波纹管（板）桥涵可按照附录 A 的类型与功能选用闭口截面或开口截面。闭口截面结构物宜选用 0.5 m、0.75 m、1.0 m、1.25 m、1.5 m、2.0 m、2.5 m、3.0 m、4.0 m、5.0 m、6.0 m、7.0 m、8.0 m、10.0 m 的孔径，同一座桥涵可根据实际地形地貌调整走向及进出口数目，见图 1，可变化孔径。其中 0.75 m 以及 0.75 m 以下的孔径只适用于无淤积地区的灌溉渠。排洪涵洞孔径不应小于 1.0 m。开口截面结构物可根据实际需要选择孔径。

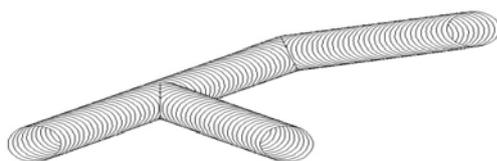


图1 三通及变走向示意图

5.3 桥涵构造

5.3.1 波纹管（板）结构物洞身构造

5.3.1.1 闭口截面结构物

闭口截面结构物的一般规定如下：

- a) 闭口截面波纹管（板）结构分为整体式波纹管 and 拼装式波纹管两种形式。整体式波纹管是用螺旋波纹管或环形波纹管拼装而成的管形结构物。拼装式波纹管是用波纹钢板件拼装而成的管形结构物；
- b) 波纹管的连接应符合 GB/T 34567 的规定，螺旋波纹管可采用平行式、螺旋式管箍连接见图 2。环形波纹管可整体采用轴向法兰盘连接见图 3，或采用左右（或上下）半圆管节翻边连接见图 4；

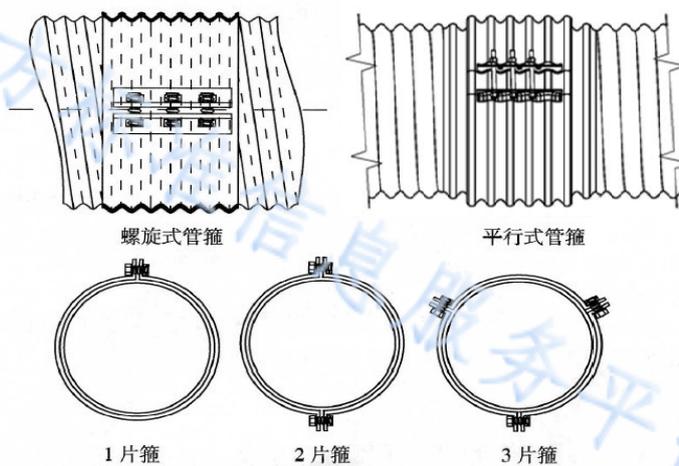


图2 螺旋波纹管管箍连接

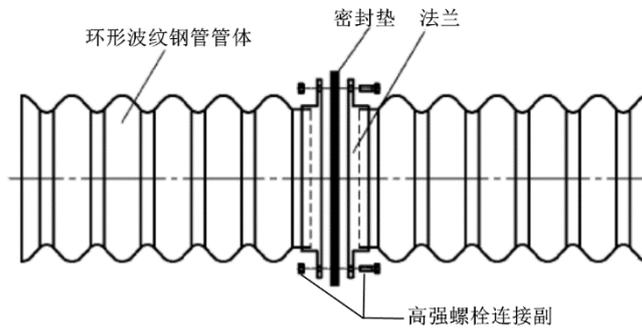


图3 环形波纹钢管法兰盘连接

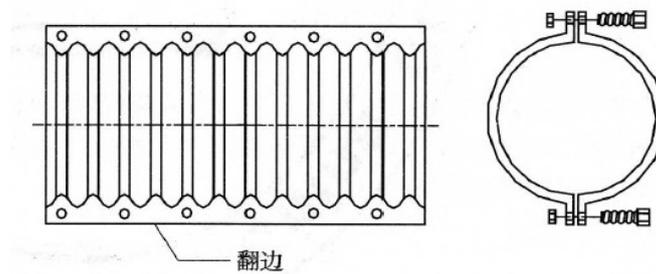
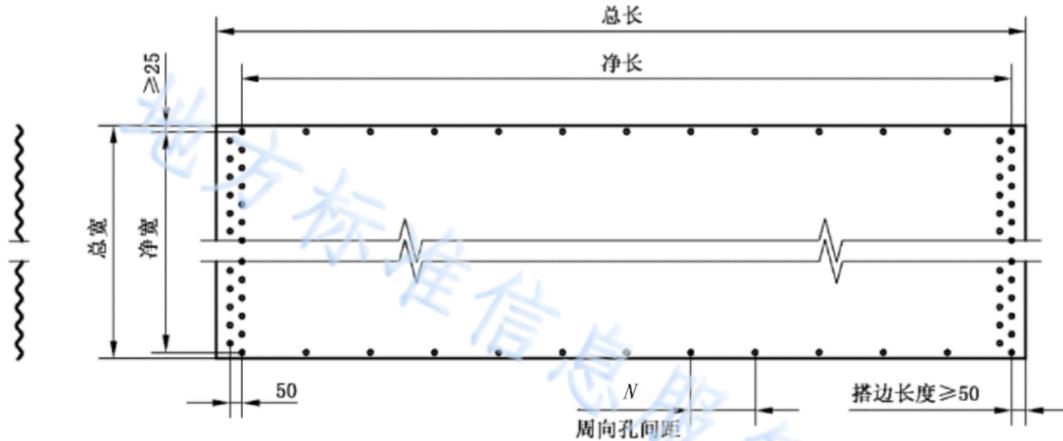


图4 环形波纹钢管半圆管节翻边连接

- c) 拼装式波纹管可将工厂预制的波纹钢板件在现场采用高强螺栓进行拼接，浅波拼装波纹管用波纹钢板件板型展开示意图见图 5；

单位为毫米

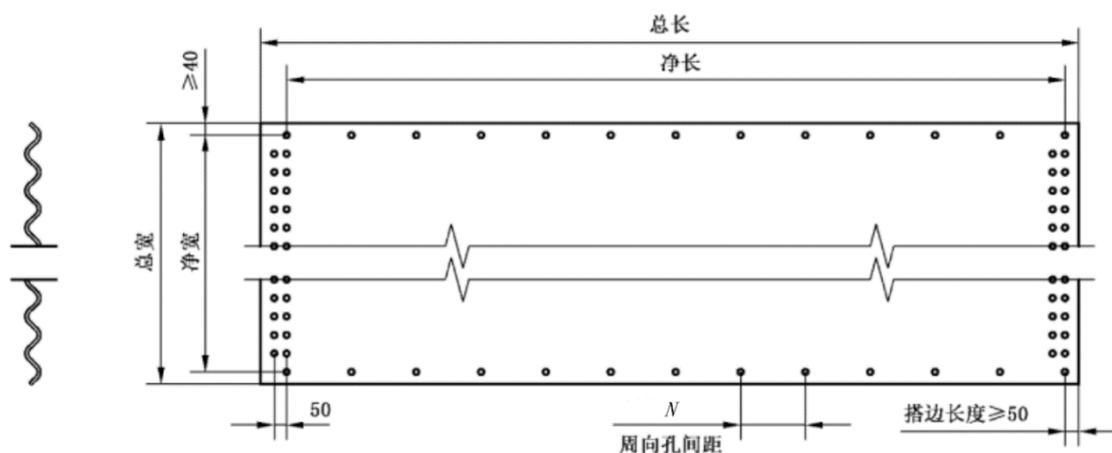


注：适用的波形（波距×波高）有68 mm×13 mm、75 mm×25 mm。68 mm×13 mm波形净宽小于等于1360 mm，75 mm×25 mm波形净宽小于等于1275 mm， $N \leq 270$ mm。

图5 浅波波纹钢板件板型展开示意图

中波拼装波纹管用波纹钢板件板型展开示意图见图6；

单位为毫米

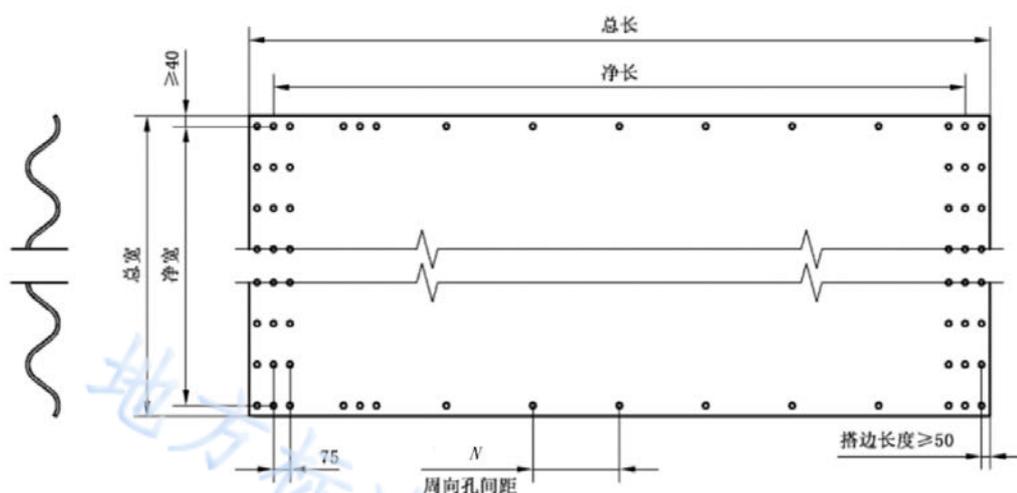


注：适用的波形（波距×波高）有150 mm×50 mm、200 mm×55 mm、230 mm×64 mm。150 mm×50 mm波形净宽小于等于1200 mm，200 mm×55 mm波形净宽≤1200 mm，230 mm×64 mm波形净宽小于等于1150 mm， $N \leq 270$ mm。

图6 中波波纹钢板件板型展开示意图

深波拼装波纹钢管用波纹钢板件板型展开示意图见图7；

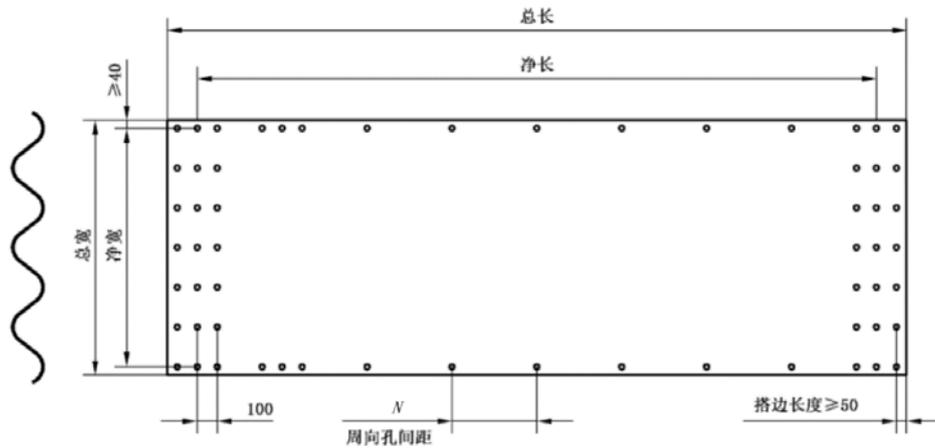
单位为毫米



注：适用的波形（波距×波高）有300 mm×110 mm、380 mm×140 mm。300 mm×110 mm波形净宽小于等于1500 mm，380 mm×140 mm波形净宽小于等于1520 mm， $N \leq 410$ mm。

图7 深波波纹钢板件板型展开示意图

大波拼装波纹钢管用波纹钢板件板型展开示意图见图8；



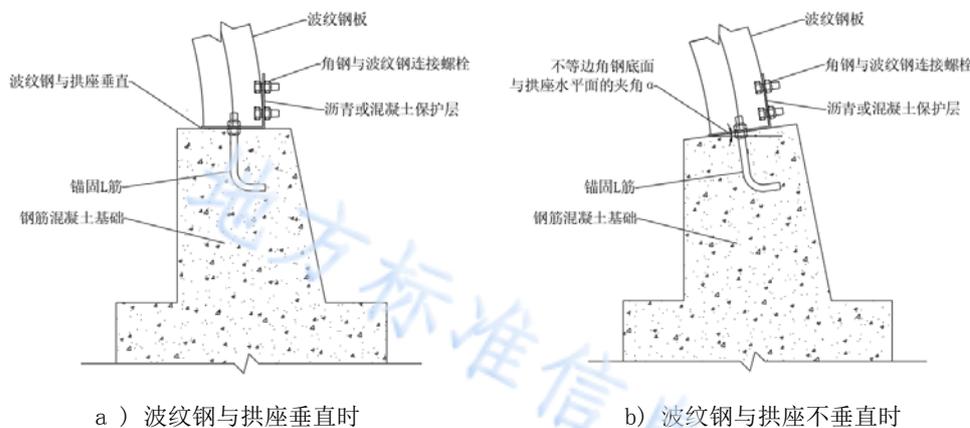
注：适用的波形（波距×波高）有400 mm×150 mm。净宽小于等于1200 mm， $N \leq 425$ mm。

图8 大波波纹钢板件板型展开示意图

d) 波纹管外面和紧固连接件等均应进行热镀锌防腐处理。

5.3.1.2 开口截面结构物

波纹钢板与钢筋混凝土拱座基础之间可通过预埋不等边角钢用螺栓连接，不等边角钢底面应与波纹钢板拱脚处切线垂直，不等边角钢底面与拱座水平面的夹角 α 应根据波纹钢板拱脚的角度计算调整布置。不等边角钢材料性能、外形、重量及允许偏差应符合GB/T 6723的有关规定，通过预埋不等边角钢的方式连接拱座基础与波纹钢板时的具体做法见图9。



注：锚固L筋的尺寸和间距由拱脚内力计算得出。

图9 波纹钢板与基础连接

5.3.2 进出水口构造

5.3.2.1 八字式洞口

5.3.2.1.1 正八字式洞口由敞开斜置八字墙构成见图 10 a)，敞开角宜采用 30° ，且左右翼墙对称；适用于河沟平坦顺直，无明显沟槽且沟底与涵底高差变化不大的情况。当八字墙与路中线垂直时，称直墙式洞口见图 10 b)；适用于涵洞孔径与沟宽基本一致，无须集纳和扩散水流或仅为疏通两侧农田灌溉时的情况。八字墙墙身宜由块（片）石砌筑，有条件时可做料石或混凝土预制块镶面。正八字墙洞口也

可采用工厂预制的波纹钢板洞口。

5.3.2.1.2 当地形和水流条件要求涵洞与路线斜交时，应做斜八字式洞口，分斜交斜做见图 10 c) 或斜交正做见图 10 d)，洞口建筑应做特殊设计。

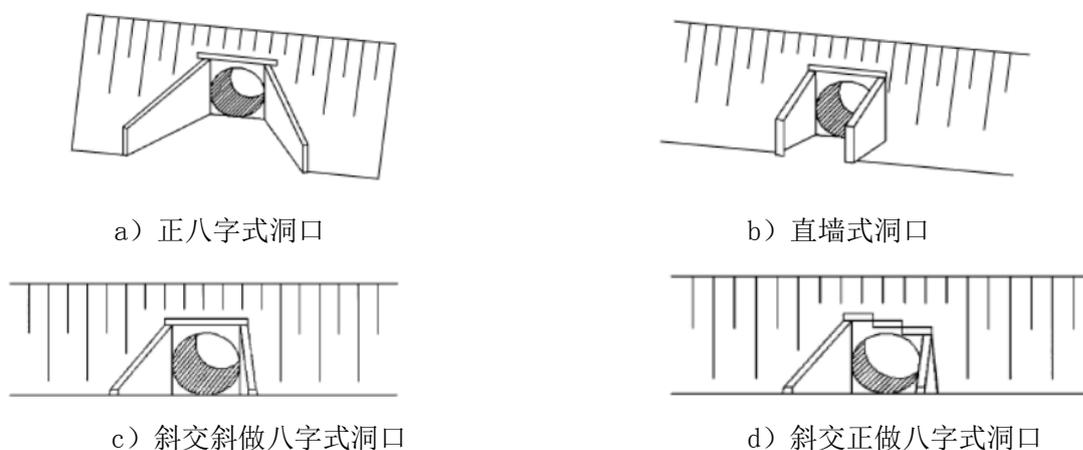


图10 八字式洞口

5.3.2.2 一字墙式（端墙式）洞口

5.3.2.2.1 一字墙式正洞口采用涵台两侧垂直涵洞轴线部分挡住路堤边坡的矮墙（端墙），墙外侧可用砌石椭圆锥坡、天然土坡、砌石护坡或挡土墙与天然沟槽、渠道和路基相连接，构成多种形式的一字墙式洞口见图 11 a)、b)、c)；适用于沟床稳定、土质坚实的河沟以及流速较小的人工渠道或不易受冲刷的岩石河沟。一字墙式正洞口也可采用工厂预制的波纹钢板洞口。

5.3.2.2.2 当涵洞与路线斜交时，锥坡洞口宜采用斜交正做洞口见图 11 d)，其端墙可做成斜坡式或台阶式。

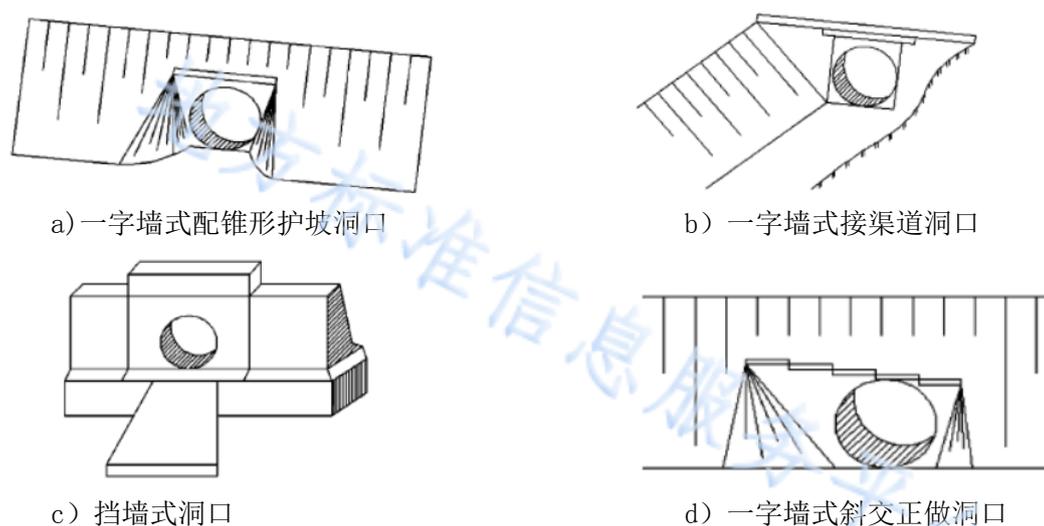


图11 一字墙式洞口

5.3.2.3 平头式洞口

平头式（又称领圈式），需要制作特殊的洞口管节见图12。

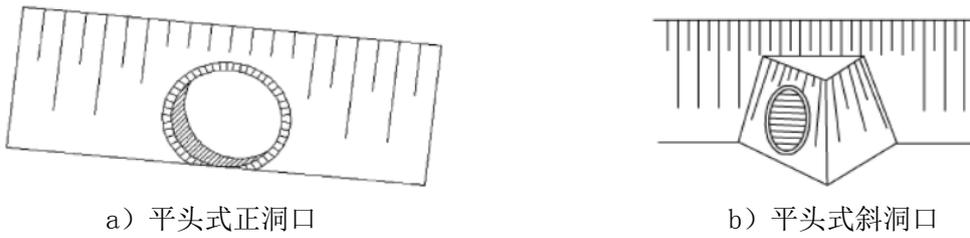


图12 平头式洞口

5.3.2.4 直管或直管延长式洞口

采用直管（孔径大、河沟宽）或将涵管适当延长伸出路基边坡以外（孔径小、河沟狭窄），不需对边坡进行处理，根据需要对进出口一定范围内进行铺砌，涵管两侧及顶部一定范围内，边坡回填材料应采用块、片石，以预防水流冲刷危害路基见图13。

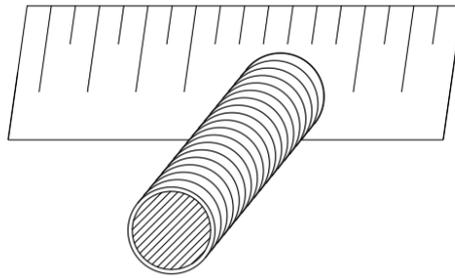


图13 直管延长式洞口

5.3.2.5 簸箕式洞口

洞口采用预制的呈簸箕状的洞口，端部与直管用螺栓连接，侧面呈曲面，洞口一定范围内根据需要进行铺砌，适用于流速较大的涵洞见图14。

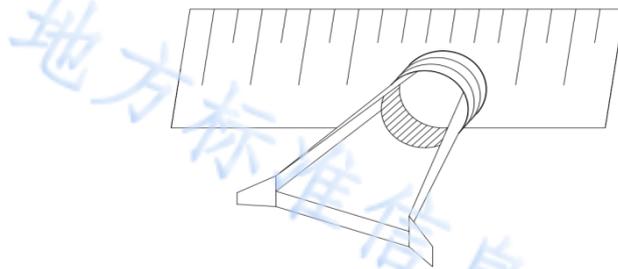


图14 簸箕式洞口

5.3.3 沟床加固及防护

5.3.3.1 在桥涵上、下游河沟和路基边坡一定范围内，宜采取冲刷防护措施。当沟底纵坡小于或等于15%时，可铺砌到上、下游翼墙端部，并应在上、下游铺砌端部设置截水墙，其埋置深度不小于台身或翼墙基础深度。

5.3.3.2 进水口沟床加固及防护要求如下：

- a) 当河沟纵坡小于10%，河沟顺直，且土质和流速许可时，可对进口采用浆砌片石铺砌加固；
- b) 当河沟纵坡为10%~50%时，除岩石沟槽外，沟底和沟槽侧向边坡以及路基边沟均应采取人工铺砌加固。加固类型由水流流速确定；

- c) 当河沟纵坡大于 50 %时, 流速很大, 进口处宜设置跌水井, 可采用急流槽与天然河沟连接。急流槽底每隔 1.5 m~2.0 m 宜设一防滑墙。为减缓槽内流速, 可在槽底增设人工加糙设施;
- d) 涵洞一侧应设置流水踏步, 便于检查、养护、清淤。
- 5.3.3.3 出水洞口沟床加固及防护要求如下:
- a) 在河沟纵坡小于 3 %的缓坡涵洞中, 当出水流速小于土壤的允许冲刷流速时, 下游洞口河床可不作处理; 当出水口流速大于或等于土壤的允许冲刷流速时, 下游洞口沟床应铺砌片石进行加固或设置挑坎防护;
- b) 在河沟纵坡小于或等于 15 %的缓坡涵洞中, 出水口流速较小时, 可对下游河床进行一般的铺砌加固, 并在铺砌末端设置截水墙, 其埋置深度应不小于洞身或翼墙基础深度。截水墙外做干砌片石加固。出口流速较大时, 采用延长铺砌石块或混凝土块, 同时设深埋的截水墙, 其深度应大于铺砌末端冲刷深度 0.1 m~0.25 m;
- c) 在河沟纵坡大于 15 %的陡坡涵洞中, 其洞口末端应视河沟的地质、地形和水力条件, 采用出口阶梯、急流槽、导流槽、跌水、消力池、消力槛、人工加糙等特殊加固消能设施。

6 材料

6.1 主体结构材料

6.1.1 波纹钢板的波距×波高、壁厚宜按下表 1 选用, 具体壁厚应按填土高度与跨径计算确定。

表1 波纹钢板规格表

类型	波距 mm×波高 mm	壁厚 mm
螺旋波纹钢管	68×13	1.6~3.2
	75×25	1.6~4.2
	125×25	1.6~4.2
环形波纹钢管	125×25	2.0~4.2
	150×50	3.0~6.0
	200×55	3.0~6.0
波纹钢板件	68×13	1.6~4.0
	75×25	1.6~4.2
	125×25	1.6~4.2
	150×50	3.0~10.0
	200×55	2.0~7.0
	230×64	3.0~7.0
	300×110	4.0~10.0
	380×140	5.0~10.0
400×150	5.0~8.0	

注: 其他尺寸的螺旋波纹钢管、环形波纹钢管和波纹钢板件可按照 GB/T 34567 选用。公路常用波纹钢管(板)截面特性参数符合附录 B。

6.1.2 螺旋波纹钢管、环形波纹钢管、波纹钢板件的尺寸允许偏差应符合表 2 的规定。

表2 螺旋波纹钢管、环形波纹钢管、波纹钢板件的尺寸允许偏差

序号	项目			允许偏差
1	钢板厚度 (mm)			下偏差: 0 mm
2	波距	浅波形	68 mm×13 mm	±3 mm
			75 mm×25 mm	±3 mm
			125 mm×25 mm	±3 mm
		中、深、大波形		±3 mm
	波高	浅波形	68 mm×13 mm	-1 mm~+3 mm
			75 mm×25 mm	-1 mm~+3 mm
125 mm×25 mm			-1 mm~+3 mm	
中波形		-2 mm~+3 mm		
深、大波形		±3 mm		
3	跨径, 矢高	≤1000 mm	±3%	
		>1000 mm	±2%	
4	波纹钢板件孔中心到板边长度			0 mm~+5 mm
5	管箍间搭接长度			±5 mm

6.1.3 螺旋波纹钢管、环形波纹钢管、波纹钢板件的材料采用碳素结构钢时, 其性能、抗拉强度应符合 GB/T 700 要求抗拉强度。

6.1.4 螺旋波纹钢管、环形波纹钢管及波纹钢板件所用的钢板、钢带强度应符合 GB/T 3274 的规定, 其尺寸、外形、重量及允许偏差应符合 GB/T 709 的规定。

6.1.5 采用连续热镀锌钢板及钢带加工波纹钢管、波纹钢板件时, 其性能、尺寸、外形、重量及允许偏差、抗拉强度应符合 GB/T 2518 的规定。

6.2 连接件

6.2.1 连接件采用扭剪型高强度螺栓、螺母时, 其性能指标应符合 GB/T 1231 的要求。

6.2.2 高强度螺栓、螺母规格为 M16、M20、M22、M24, 螺栓紧固后锚栓外露丝扣不应少于两扣。

6.2.3 结构用高强度垫圈应符合 GB/T 1231 的规定。

6.2.4 管箍、法兰盘的材料采用碳素结构钢时, 其性能应符合 GB/T 700 要求, 抗拉强度不小于 350 MPa。

6.2.5 法兰盘用角钢尺寸、重量及允许偏差应符合 GB/T 706 的规定。

6.3 焊接材料

6.3.1 焊接材料采用的型号应符合 GB/T 12467.1 的要求。

6.3.2 焊接材料的质量应符合 JB/T 3223 的要求。

6.4 密封材料

6.4.1 密封材料可选用天然橡胶、氯丁橡胶、聚乙烯泡沫或耐候密封胶。应根据不同的区域和气候条件选择相应材料。其质量均应符合 GB/T 22083 的有关规定。

6.4.2 高强度螺栓的钢垫片、螺帽应采用密封圈或密封胶防渗密封, 采用聚硫密封胶密封防渗处理时, 密封胶质量应符合 JC/T 483 的有关规定。

6.4.3 波纹钢管的管箍与管节之间、法兰盘之间或翻边接合面之间, 以及各搭接的波纹钢板件之间应采取密封措施。密封材料应具有弹性和不透水性, 并应填塞紧密。低温条件下密封材料应具有良好的抗冻、耐寒性能。

6.5 结构性回填材料

6.5.1 结构性回填材料应选用级配较好的砾类土、砂类土等低腐蚀性、易压实的填料。冻土地区的回填材料中小于 0.075 mm 颗粒含量应不大于 15 %。填料最大粒径应小于 50 mm。

6.5.2 结构性回填材料宜采用天然级配砂砾或水稳性好的材料，如砾类土、砂类土，或砾、卵石与细粒土的混合料。

6.5.3 结构性回填材料不得使用垃圾和腐殖质土、有机土、泥炭、淤泥、冻土、膨胀土、粉质土、草皮、白垩土、硅藻土等任何有腐蚀性的回填土。

6.6 防腐材料

6.6.1 热浸镀锌防腐处理所用的锌应符合现行 GB/T 470 的规定，采用 1 号锌或 0 号锌，镀锌前钢表面除锈处理的最低等级为 Sa2.5。

6.6.2 防腐涂装材料的品种、规格、性能等应符合 JT/T 722 的规定。

6.6.3 防腐材料及工艺亦可采用其他新材料、新工艺。

7 设计

7.1 一般规定

7.1.1 波纹钢管（板）桥涵的设计应考虑永久作用、可变作用和地震作用。永久作用主要为覆土产生的作用，以及其他可视为永久作用的荷载。可变作用主要为汽车荷载和施工阶段的临时荷载，以及实际工程中可能出现的短暂荷载。公路波纹钢管（板）桥涵设计流程按附录 C。

7.1.2 波纹钢管（板）桥涵应按承载能力极限状态和正常使用极限状态设计。按承载能力极限状态设计时，对持久设计状况和短暂设计状况应采用作用的基本组合，对地震设计状况应采用作用的地震组合。按正常使用极限状态设计时，应根据不同的设计要求，采用作用的频遇组合或准永久组合。作用的组合方法应按 JTG D60 的规定确定。

7.1.3 公路波纹钢管（板）桥涵的墩台、基础及进出水口的基础的设计应符合 JTG 3362 及 JTG 3363 的规定。

7.2 基础设计

7.2.1 闭口截面结构物的基础

7.2.1.1 闭口截面结构物的基础应为整个波纹钢管提供均匀的支承力。基础材料采用具有一定级配的天然砂砾，对材料的最大粒径和粉黏粒含量进行控制，最大粒径不宜超过 50 mm，且不能超过钢板波距的 1/2；0.075 mm 以下粉黏粒含量不得超过 3 %。基础的工后沉降量不应大于 200 mm，地基承载力不满足要求时，应进行地基处理。

7.2.1.2 闭口截面结构物的地基或基础应均匀坚固，其地基或基础的最小厚度与宽度应符合表 3 的规定，以保证提供足够的空间组装波纹钢管及进行周边结构性回填材料的回填压实。

表3 闭口截面结构物地基基础的最小厚度与宽度

地质条件		基础最小厚度	基础宽度
碎石土、卵石土、砂砾、粗砂		表层夯实可直接将地基作为基础	
中砂、细砂	跨径 $D < 900$ mm	200 mm	2D
	跨径 $D = 900$ mm~2000 mm	300 mm	
	跨径 $D > 2000$ mm	0.20D	
岩石地基		200 mm~400 mm, 但当填土高度大于 5 m 时, 填土每增高 1.0 m, 其厚度增加 40 mm	2D
软土地基		$(0.3 \sim 0.5) D$ 且不小于 500 mm	$(2 \sim 3) D$

7.2.1.3 波纹钢管底部宜设置预拱度, 其大小应根据地基可能产生的下沉量、涵底纵坡和填土高度等因素综合确定, 一般在基础上预留管长的 0.6%~1.0% 的预拱度, 最大不超过管长的 2%。管涵中心的高程应不高于进水口的高程。

7.2.2 开口截面结构物的基础

7.2.2.1 对于开口截面(拱形截面)结构物, 基础宜为钢筋混凝土或圬工结构, 也可用钢结构基础。基础顶面的宽度应不小于波纹钢板的波幅尺寸。进出水口的基础及桥涵墩台、基础的设计应符合 JTG 3362 及 JTG 3363 的规定。

7.2.2.2 波纹钢板和基础的连接应符合下列规定:

- 波纹钢板和基础混凝土应利用钢板连接件连接;
- 在浇筑混凝土基础时应预埋钢板连接件;
- 钢板连接件应垂直连接在波纹钢板上;
- 波纹钢板与钢结构基础宜采用螺栓连接。

7.2.3 地基处理

7.2.3.1 除设计要求有规定之外, 闭口截面结构物不能直接置于岩石地基或混凝土基座上, 对岩石地基应在管节和地基之间设置砂砾垫层或其他适宜材料。

7.2.3.2 当闭口截面结构物处于软土地基上时, 需对软土路基进行处理。地基处理方式应符合相关规范要求, 然后在其上填一层厚度不小于 500 mm 的砂砾垫层, 并夯实紧密, 方可安装管节。

7.3 最小覆土厚度

最小覆土厚度 D_a 可按下列公式计算结果取较大值, 且不得小于 0.6 m。

$$D_a = \frac{D_h}{6} \left(\frac{D_h}{D_v} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

D_a ——波纹钢管(板)桥涵结构的最小覆土厚度, 单位为米(m);

D_h ——波纹钢管(板)桥涵结构的有效跨度(按波纹钢板轴线计算), 单位为米(m);

D_v ——波纹钢管(板)桥涵结构的有效矢高(按波纹钢板轴线计算), 单位为米(m)。

$$D_a = 0.4 \left(\frac{D_h}{D_v} \right)^2 \dots\dots\dots (2)$$

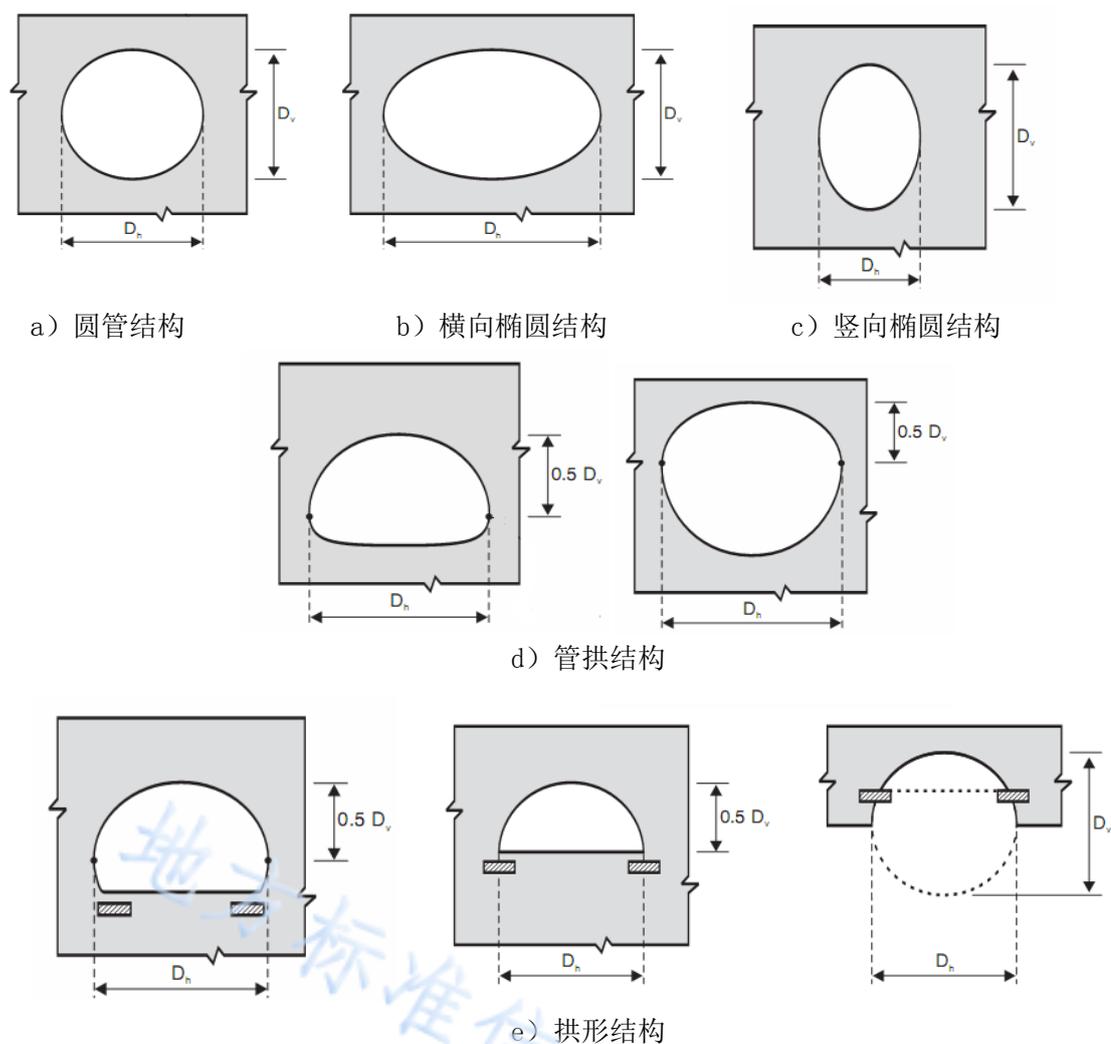
式中：

D_a ——波纹管（板）桥涵结构的最小覆土厚度，单位为米（m）；

D_h ——波纹管（板）桥涵结构的有效跨度（按波纹钢板轴线计算），单位为米（m）；

D_v ——波纹管（板）桥涵结构的有效矢高（按波纹钢板轴线计算），单位为米（m）。

对不同横截面形式， D_h 和 D_v 的取值方法见图15。最小填土厚度不满足要求时可采用减载板措施，具体方法见7.10。



注： D_h ——波纹管（板）桥涵结构的有效跨度（按波纹钢板轴线计算），单位为米（m）；

D_v ——波纹管（板）桥涵结构的有效矢高（按波纹钢板轴线计算），单位为米（m）。

图15 D_h 和 D_v 的定义图

7.4 作用

7.4.1 土的重力

作用在结构上的拱上填土的作用范围如图16所示，其每延米的重力按式（3）计算。

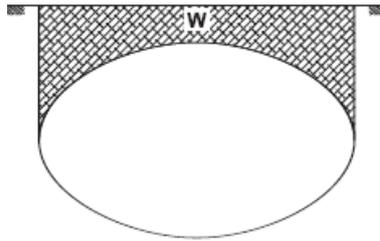


图16 拱上填土的重力作用范围示意图

$$W = \gamma \cdot D_h \cdot (H + 0.1075D_v) \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- W——拱上填土每延米的重力，单位为千牛每米（kN/m）；
- γ ——土的容重，单位为千牛每立方米（kN/m³）；
- D_h——波纹管（板）桥涵结构的有效跨度，单位为米（m）；
- H——波纹管（板）桥涵顶部填土高度，单位为米（m）；
- D_v——波纹管（板）桥涵结构的有效矢高，单位为米（m）。

7.4.2 汽车荷载

7.4.2.1 公路波纹管（板）桥涵的汽车荷载应采用车辆荷载图式。

7.4.2.2 汽车荷载的活载扩散方法和多车道折减系数参考 JTG D60 相关规定，其扩散压力按式（4）计算。

$$\sigma_L = m_f \cdot \frac{A_L}{wl_t} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

- σ_L ——汽车荷载扩散到拱顶的压力，单位为千帕（kPa）；
- m_f ——多车道折减系数，参考 JTG D60 规定；
- A_L——车辆荷载后轴轴重，单位为千牛（kN），荷载取值参考 JTG D60，在施工验算中需按实际轴重验算；
- w——沿车辆宽度方向扩散后的尺寸，单位为米（m）；
- l_t——沿车辆长度方向扩散后的尺寸，单位为米（m），车辆荷载扩散见图17。

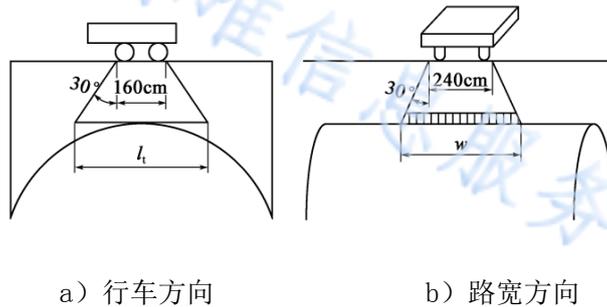


图17 车辆荷载的扩散图

7.4.2.3 车辆冲击系数按式（5）计算。

$$\mu = 0.4(1.0 - 0.5H) \dots\dots\dots (5)$$

式中：

μ ——车辆冲击系数；

H ——波纹管（板）桥涵顶部填土高度，单位为米（m）。

注：对于填土高度大于0.5 m时的情况，可不考虑冲击影响。

7.4.2.4 施工过程中应按实际的荷载状态考虑。施工荷载是永久荷载和其他仅在施工期间作用于结构的荷载，包括施工设备重力荷载和通过临时支撑施加到结构上的荷载。在施工过程中，用于结构和附加设备重力的荷载系数，取值不应小于1.25；除特殊要求外，施工荷载的放大系数不应小于1.5。

7.4.3 地震作用

7.4.3.1 抗震设防烈度大于等于7度地区的公路波纹管（板）桥涵应进行抗震设计，考虑地震作用。对波纹管（板）桥涵一般可只考虑竖向地震作用，其值按式（6）计算。

$$N_E = 0.5 \times A_V \times W \cdots \cdots \cdots (6)$$

式中：

N_E ——竖向地震作用引起的波纹钢板压力，单位为千牛每米（kN/m）；

A_V ——竖向地震作用系数，无量纲， $A_V = \frac{R_0 \times \delta}{g}$ ，其中 R_0 取 0.65， g 为重力加速度， δ 按下表 4 取值；

W ——拱上填土每延米的重力，单位为千牛每米（kN/m）。

表4 抗震设防烈度和水平向设计基本地震动加速度峰值

抗震设防烈度	7	8	9
δ	0.10 (0.15) g	0.20 (0.30) g	0.40g
注：括号内数值分别用于设计基本地震加速度为 0.15g 和 0.30g 的地区			

7.4.3.2 对于采用深、大波形波纹板的结构，应当考虑竖向地震作用对恒载弯矩的放大作用。由地震作用产生的附加弯矩 M_E 按式（7）计算。

$$M_E = A_V \times M_G \cdots \cdots \cdots (7)$$

式中：

M_E ——竖向地震作用引起的波纹管（板）桥涵结构跨中截面的附加弯矩，单位为千牛米每米（kN·m/m）；

A_V ——竖向地震作用系数；

M_G ——恒载作用下波纹管（板）桥涵结构跨中截面弯矩，单位为千牛米每米（kN·m/m），其值可按照7.7节计算。

7.5 钢板应力验算

闭口截面和开口截面公路波纹管（板）结构的应力可按以下方法验算：

a) 当不考虑地震作用时，波纹钢板的轴向压应力应满足式（8）。

$$\gamma_0[\gamma_G N_G + \gamma_Q N_Q(1 + \mu)] / A < \min(f_y, f_b) \cdots \cdots \cdots (8)$$

式中：

γ_0 ——结构重要性系数，取值按照 JTG D60 规定；

γ_G ——永久作用的分项系数，取值按照 JTG D60 规定；

- γ_Q ——可变作用的分项系数，取值按照 JTG D60 规定；
 - N_G ——土的重力引起的波纹钢板压力，，单位为千牛每米 (kN/m)；
 - N_Q ——汽车荷载引起的波纹钢板压力，，单位为千牛每米 (kN/m)；
 - A ——单位长度的波纹钢板截面积，单位为平方毫米每毫米 (mm²/mm)；
 - μ ——车辆活载冲击系数，按 7.4.2.3 条规定取值；
 - f_y ——波纹钢板材料屈服应力，单位为兆帕 (MPa)，取值按照 GB 50017 规定；
 - f_b ——临界屈曲应力，单位为兆帕 (MPa)；
 - A_f ——考虑结构起拱效应的土压力增大系数；可按表 5 选用；
 - C_S ——考虑回填土性质与结构尺寸的土压力折减系数，；
 - W ——拱上填土每延米的重量，单位为千牛每米 (kN/m)；
 - D_h ——波纹钢管（板）桥涵结构有效跨度，单位为米 (m)，参见图 15；
 - D_v ——波纹钢管（板）桥涵结构有效矢高，单位为米 (m)，参见图 15；
 - E_s ——土体的弹性模量，单位为兆帕 (MPa)；
 - E ——波纹钢板材料的弹性模量，单位为兆帕 (MPa)。
- b) 当考虑地震作用时，波纹钢板的轴向压应力应满足式 (9)。

$$\gamma_0(\gamma_G N_G + \gamma_E N_E) / A < \min(f_y, f_b) \dots\dots\dots (9)$$

式中：

- γ_0 ——结构重要性系数，取值按照 JTG D60 规定；
- γ_G ——永久作用的分项系数，取值按照 JTG D60 规定；
- γ_E ——地震作用的分项系数，取值按照 JTG D60 规定；
- N_G ——土的重力引起的波纹钢板压力，，单位为千牛每米 (kN/m)；
- N_E ——竖向地震作用引起的波纹钢板压力，单位为千牛每米 (kN/m)，可按式 (6) 计算；
- A ——单位长度的波纹钢板截面积，单位为平方毫米每毫米 (mm²/mm)；
- f_y ——波纹钢板材料屈服应力，单位为兆帕 (MPa)，取值按照 GB 50017 规定；
- f_b ——临界屈曲应力，单位为兆帕 (MPa)；
- A_f ——考虑结构起拱效应的土压力增大系数；可按表 5 选用；
- C_S ——考虑回填土性质与结构尺寸的土压力折减系数，；
- W ——拱上填土每延米的重量，单位为千牛每米 (kN/m)；
- D_v ——波纹钢管（板）桥涵结构有效矢高，单位为米 (m)，参见图 15；
- E_s ——土体的弹性模量，单位为兆帕 (MPa)；
- E ——波纹钢板材料的弹性模量，单位为兆帕 (MPa)。



表5 A_f 系数取值表

A_f	$D_h/D_v \leq 0.6$	$D_h/D_v \leq 0.8$	$D_h/D_v = 1$	$D_h/D_v = 1.2$	$D_h/D_v = 1.4$	$D_h/D_v \geq 1.6$
$H > 3D_h$	1.62	1.40	1.20	1.10	1.05	1.02
$H = 3D_h$	1.62	1.40	1.25	1.18	1.08	1.02
$H = 2D_h$	1.62	1.40	1.25	1.18	1.08	1.02
$H = 1.8D_h$	1.61	1.40	1.25	1.18	1.08	1.02
$H = 1.6D_h$	1.60	1.39	1.24	1.17	1.08	1.02
$H = 1.4D_h$	1.59	1.38	1.22	1.15	1.08	1.02
$H = 1.2D_h$	1.55	1.34	1.20	1.12	1.07	1.02
$H = D_h$	1.53	1.30	1.19	1.10	1.05	1.02
$H = 0.8D_h$	1.55	1.31	1.19	1.11	1.06	1.03
$H = 0.6D_h$	1.65	1.34	1.2	1.12	1.07	1.04
$H = 0.4D_h$	1.82	1.40	1.23	1.15	1.10	1.05
$H \leq 0.2D_h$	2.28	1.60	1.28	1.20	1.15	1.10

注： H 和 D_h/D_v 不能通过查表得到时，通过线性内插取值。对于圆管涵结构，当 $H > 4D_h$ 时， A_f 可取1.15。

7.6 钢板屈曲验算

通过拱顶圆弧圆心并与竖向中心线形成夹角 θ_0 (rad) 的两条对称直线将管壁划分为上下两部分，见图18，分别验算管壁抗压强度。 θ_0 按式(10)计算。

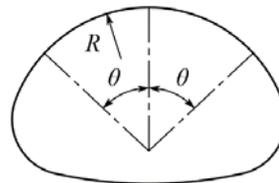


图18 上下管壁划分示意图

$$\theta_0 = 1.6 + 0.2 \log \left(\frac{EI}{E_m R^3} \right) \dots \dots \dots (10)$$

式中：

θ_0 ——通过拱顶圆弧中心并与竖向中心线形成的夹角，单位为度 (°)；

E ——波纹钢板材料的弹性模量，单位为兆帕(MPa)；

I ——截面的惯性矩，单位为毫米四次方每毫米 (mm⁴/mm)；

E_m ——土体弹性模量的修正值，结构壁侧面和下半部分 $E_m = E_s$ ，而结构壁上半部分则应按下式计

$$\text{算 } E_m = E_s \left(1 - \left(\frac{R_c}{R_c + 1000 \square H + H' \square} \right)^2 \right) ;$$

E_s ——土体的弹性模量，单位为兆帕 (MPa)；

R_c ——拱顶处的曲率半径，单位为毫米 (mm)；

H ——波纹钢管 (板) 桥涵顶部填土高度，单位为米 (m)；

H' ——拱顶与起拱线之间垂直距离的一半，单位为米 (m)；

R ——结构的曲率半径，单位为毫米（mm）。

为保证波纹钢板结构的稳定性，应按下式验算钢板的屈曲临界应力。

$$\text{当 } R \leq R_e \text{ 时, } f_b = \phi_t F_m \left[f_y - \left\{ \frac{f_y^2}{12E\rho} \left(\frac{KR}{r} \right)^2 \right\} \right] \dots\dots\dots (11)$$

式中：

R ——结构的曲率半径，单位为毫米（mm）；

R_e ——等效半径，单位为毫米（mm）， $R_e = \frac{r}{K} \left(\frac{6E\rho}{f_y} \right)^{1/2}$ ；

r ——波纹钢板材回转半径，单位为毫米（mm）；

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

λ ——计算 K 的一个系数，除矢跨比小于 0.4 的圆弧拱之外，所有结构上半部分的 λ 应按下式计算，

$$\lambda = 1.22 \left[1.0 + 1.6 \left(\frac{EI}{E_m R_c^3} \right)^{0.25} \right], \text{ 任何其他情况下的 } \lambda \text{ 都为 } 1.22;$$

E ——波纹钢板材的弹性模量，单位为兆帕（MPa）；

I ——截面的惯性矩，单位为毫米四次方每毫米（mm⁴/mm）；

E_m ——土体弹性模量的修正值，结构壁侧面和下半部分 $E_m = E_s$ ，而结构壁上半部分则应按下式计

$$\text{算 } E_m = E_s \left[1 - \left(\frac{R_c}{R_c + 1000 H + H'} \right)^2 \right];$$

E_s ——土体的弹性模量，单位为兆帕（MPa）；

R_c ——拱顶处的曲率半径，单位为毫米（mm）；

H ——波纹钢管（板）桥涵顶部填土高度，单位为米（m）；

H' ——拱顶与起拱线之间垂直距离的一半，单位为米（m）；

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

f_y ——波纹钢板材屈服强度，单位为兆帕（MPa）；

f_b ——波纹钢板的屈曲临界应力，单位为兆帕（MPa）；

ϕ_t ——波纹钢板材抗压系数，取 0.8；

F_m ——多跨结构屈曲应力折减系数， $F_m = \left(0.85 + \frac{0.3S}{D_h} \right) \leq 1.0$ ；

S ——多跨结构之间的间距，单位为米（m）；

D_h ——波纹钢管（板）桥涵结构有效跨度，单位为米（m），参见图15。

$$\text{当 } R > R_e \text{ 时, } f_b = \frac{3\phi_t \rho F_m E}{(KR/r)^2} \dots\dots\dots (12)$$

式中：

R ——结构的曲率半径，单位为毫米（mm）；

R_e ——等效半径，单位为毫米（mm）， $R_e = \frac{r}{K} \left(\frac{6E\rho}{f_y} \right)^{1/2}$ ；

r ——波纹钢板材回转半径，单位为毫米（mm）；

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

λ ——计算 K 的一个系数，除矢跨比小于 0.4 的圆弧拱之外，所有结构上半部分的 λ 应按下列式计算，

$$\lambda = 1.22 \left[1.0 + 1.6 \left(\frac{EI}{E_m R_c^3} \right)^{0.25} \right]，\text{任何其他情况下的 } \lambda \text{ 都为 } 1.22；$$

E ——波纹钢板材的弹性模量，单位为兆帕（MPa）；

I ——截面的惯性矩，单位为毫米四次方每毫米（ mm^4/mm ）；

E_m ——土体弹性模量的修正值，结构壁侧面和下半部分 $E_m = E_s$ ，而结构壁上半部分则应按下列式计

$$\text{算 } E_m = E_s \left[1 - \left(\frac{R_c}{R_c + 1000(H + H')} \right)^2 \right]；$$

E_s ——土体的弹性模量，单位为兆帕（MPa）；

R_c ——拱顶处的曲率半径，单位为毫米（mm）；

H ——波纹钢管（板）桥涵顶部填土高度，单位为米（m）；

H' ——拱顶与起拱线之间垂直距离的一半，单位为米（m）；

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

f_y ——波纹钢板材屈服强度，单位为兆帕（MPa）；

f_b ——波纹钢板的屈曲临界应力，单位为兆帕（MPa）；

ϕ_t ——波纹钢板材抗压系数，取 0.8；

F_m ——多跨结构屈曲应力折减系数， $F_m = \left(0.85 + \frac{0.3S}{D_h} \right) \leq 1.0$ ；

S ——多跨结构之间的间距，单位为米（m）；

D_h ——波纹钢管（板）桥涵结构有效跨度，单位为米（m），参见图15。

7.7 弯矩和轴力组合效应的验算

成桥阶段，对于采用深、大波形波纹钢板结构，弯矩和轴力的组合效应应小于截面乘系数的塑形抗弯承载力，按式（13）计算。当考虑地震作用时，也应满足下式（13）要求。

$$\left(\frac{N}{N_{pf}} \right)^2 + \left| \frac{M_f}{M_{pf}} \right| \leq 1.0 \dots\dots\dots(13)$$

式中：

N ——波纹钢板截面所受轴向压力，单位为千牛每米（kN/m），按式（14）和式（15）计算。

$$\text{当不考虑地震作用时， } N = \gamma_G N_G + \gamma_Q N_Q (1 + \mu) \dots\dots\dots(14)$$

式中：

γ_G ——永久作用的分项系数，取值按照JTG D60规定；

γ_Q ——可变作用的分项系数，取值按照JTG D60规定；

N_G ——土的重力引起的波纹钢板压力，单位为千牛每米（kN/m），按7.5节计算；

N_Q ——汽车荷载引起的波纹钢板压力，按7.5节计算；

μ ——车辆活载冲击系数，按7.4.2.3条规定取值。

$$\text{当考虑地震作用时， } N = \gamma_G N_G + \gamma_E N_E \dots\dots\dots(15)$$

式中：

- γ_G ——永久作用的分项系数，取值按照JTG D60规定；
- γ_E ——地震作用的分项系数，取值按照JTG D60规定；
- NG ——土的重力引起的波纹钢板压力，单位为千牛每米（kN/m），按7.5节计算；
- NE——竖向地震作用引起的波纹钢板压力，单位为千牛每米(kN/m)，可按式（6）计算。
- NPf 为波纹钢板截面考虑塑性抵抗系数的设计压力，单位为千牛每米(kN/m)，按式（16）计算。

$$N_{pf} = \phi_h A f_y \dots\dots\dots (16)$$

式中：

- ϕ_h ——波纹钢板材抵抗塑性铰的抗力系数，取 0.7；
- A ——波纹钢板材单位长度横截面面积，单位为平方毫米每毫米（mm²/mm）；
- f_y ——波纹钢板材屈服强度，单位为兆帕（MPa）。

M_f 为波纹钢板考虑荷载组合时的结构跨中截面弯矩，单位为千牛米每米（kN·m/m），按式（17）和式（18）计算。

$$\text{当不考虑地震作用时, } M_f = \gamma_G M_G + \gamma_Q M_L (1 + \mu) \dots\dots\dots (17)$$

式中：

- γ_G ——永久作用的分项系数，取值按照 JTG D60 规定；
- γ_Q ——可变作用的分项系数，取值按照 JTG D60 规定；
- M_G ——恒载作用下波纹钢管（板）桥涵结构跨中截面弯矩，单位为千牛米每米（kN·m/m），按式（19）计算；
- M_L ——活载作用下波纹钢管（板）桥涵结构跨中截面产生的弯矩，单位为千牛米每米（kN·m/m），按式（21）计算；
- μ —— 车辆活载冲击系数，按7.4.2.3条规定取值。

$$\text{当考虑地震作用时, } M_f = \gamma_G M_G + \gamma_E M_E \dots\dots\dots (18)$$

式中：

- γ_G ——永久作用的分项系数，取值按照 JTG D60 规定；
- γ_E ——地震作用的分项系数，取值按照 JTG D60 规定；
- M_G ——恒载作用下波纹钢管（板）桥涵结构跨中截面弯矩，单位为千牛米每米（kN·m/m），按式（19）计算；
- M_E ——竖向地震作用引起的波纹钢管（板）桥涵结构跨中截面的附加弯矩，单位为千牛米每米（kN·m/m），按式（7）计算。

$$M_G = |M_1 + M_{DH}| \dots\dots\dots (19)$$

式中：

- M_1 ——在回填至拱顶之前的土体引起波纹钢管（板）桥涵结构跨中截面产生的弯矩，单位为千牛米每米（kN·m/m），按式（20）计算；
- M_{DH} ——由超出拱顶的拱上填土部分引起波纹钢管（板）桥涵结构跨中截面产生的弯矩，单位为千牛米每米（kN·m/m）。当 $H < \frac{D_h}{2}$ 时， $M_{DH} = -k_{M2} R_B \gamma D_h^2 H$ 。当 $H \geq \frac{D_h}{2}$ 时，应采用有限元数值模拟方法计算 M_{DH} 的值。

$$M_1 = k_{M1} R_B \gamma D_h^3 \dots\dots\dots (20)$$

式中：

- γ ——土的容重，单位为千牛每立方米（kN/m³）；

D_h ——波纹钢管（板）桥涵结构有效跨度，单位为米（m），参见图15。

$$M_L = \frac{k_{M3} R_U D_h A_L}{k_4} \dots\dots\dots(21)$$

式中：

D_h ——波纹钢管（板）桥涵结构有效跨度，单位为米（m），参见图15；

A_L ——车辆荷载后轴轴重，单位为千牛（kN），荷载取值参考 JTG D60。

R_U 按式（22）计算得出。

$$R_U = \frac{0.265 - 0.053 \log_{10}(N_f)}{(H/D_h)^{0.75}} \leq 1.0 \dots\dots\dots(22)$$

式中：

H ——波纹钢管（板）桥涵顶部填土高度，单位为米（m）；

D_h ——波纹钢管（板）桥涵结构有效跨度，单位为米（m），参见图15。

公式（19）-（22）中参数 k_{M1} 、 k_{M2} 、 k_{M3} 、 k_4 、 R_B 的计算需要根据柔度系数 N_f 来确定，具体计算公式见附录 D。

M_{pf} 为波纹钢板截面考虑塑性抵抗系数的设计弯矩，单位为千牛米每米（kN·m/m），按式（23）计算。

$$M_{pf} = \phi_h M_p \dots\dots\dots(23)$$

式中：

ϕ_h ——波纹钢板材抵抗塑性铰的抗力系数，取 0.7。

M_p ——考虑材料极限抗拉强度时截面能承受的最大弯矩，单位为千牛米每米（kN·m/m），按式（24）计算。

$$M_p = \frac{2I}{d+t} \cdot f_f \dots\dots\dots(24)$$

式中：

I ——截面的惯性矩，单位为毫米四次方每毫米（mm⁴/mm）；

d ——波高，单位为毫米（mm）；

t ——壁厚，单位为毫米（mm）；

f_f ——材料极限抗拉强度，单位为兆帕（MPa），取 GB/T 700 规范中相关材料参考范围的最小值。

7.8 施工过程的验算

施工过程中波纹钢板截面的弯矩与轴向压力的内力组合应满足式（25）。

$$\left(\frac{N}{N_{pf}} \right)^2 + \left| \frac{M}{M_{pf}} \right| \leq 1.0 \dots\dots\dots(25)$$

式中：

N ——波纹钢板截面所受轴向压力，按式（26）计算。当 $H_c/D_h < 0.2$ 时，可取 $\lambda = 0$ ，其中 H_c 为施工过程中的填土高度。

$$N = N_G + N_C \dots\dots\dots(26)$$

式中：

N_G ——土的重力引起的波纹钢板压力，单位为千牛每米（kN/m），按 7.5 节计算；

N_C ——施工过程中汽车荷载（考虑施工机械）引起的波纹钢板压力，单位为千牛每米（kN/m），按

7.5 节计算。

N_{pf} 为波纹钢板截面考虑塑性抵抗系数的设计压力，单位为千牛每米(kN/m)，按式(16)计算。

M 为波纹钢管(板)桥涵结构跨中截面所受弯矩，单位为千牛米每米(kN·m/m)，由三部分组成，按式(27)计算。

$$M = M_I + M_B + M_C \dots\dots\dots(27)$$

式中：

M_I ——在回填至拱顶之前的土体引起波纹钢管(板)桥涵结构跨中截面产生的弯矩，单位为千牛米每米(kN·m/m)，按式(20)计算；

M_B ——在施工过程中由超出拱顶的拱上填土部分引起波纹钢管(板)桥涵结构跨中截面产生的弯矩，单位为千牛米每米(kN·m/m)，是负值。按式(28)计算；

M_C ——施工过程中汽车荷载(考虑施工机械)引起的结构跨中截面的弯矩，单位为千牛米每米(kN·m/m)，按式(29)计算。

$$M_B = -k_{M2}R_B\gamma D_h^2 H_C \dots\dots\dots(28)$$

式中：

γ ——土的容重，单位为千牛每立方米(kN/m³)；

D_h ——波纹钢管(板)桥涵结构有效跨度，单位为米(m)，参见图15；

H_C ——施工过程中填土高度，单位为米(m)。

$$M_C = k_{M3}R_L D_h L_C \dots\dots\dots(29)$$

式中：

D_h ——波纹钢管(板)桥涵结构有效跨度，单位为米(m)，参见图15；

L_C ——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)， $L_C = A_c / k_4$ 。其中， A_c 为施工过程中的车辆轴重，单位为千牛(kN)。

公式(20)、(28)和(29)中参数 k_{M1} 、 k_{M2} 、 k_{M3} 、 k_4 、 R_B 、 R_L 的计算需要根据柔度系数 N_f 来确定，具体公式见附录D。

M_{pf} 为波纹钢板截面考虑塑性抵抗系数的设计弯矩，按式(23)计算。

7.9 波纹钢板螺栓连接验算

7.9.1 波纹钢板采用高强螺栓连接，连接验算应满足GB 50017相关规定。

7.9.2 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，因此应分别计算，取其最小值进行设计。

a) 受剪承载力设计值可按式(30)计算。

$$N_v^b = n_v \cdot \frac{\pi d_v^2}{4} \cdot f_v^b \dots\dots\dots(30)$$

式中：

N_v^b ——单个螺栓受剪承载力设计值，单位为千牛(kN)；

n_v ——每只螺栓受剪面数量；

d_v ——螺栓杆直径，单位为毫米(mm)；

f_v^b ——高强螺栓抗剪强度设计值，单位为兆帕(MPa)。

b) 承压承载力设计值可按式(31)计算。

$$N_c^b = d_v \cdot \sum t \cdot f_c^b \dots\dots\dots(31)$$

式中:

N_c^b ——单个螺栓承压承载力设计值,单位为千牛(kN);

d_v ——螺栓杆直径,单位为毫米(mm);

Σt ——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,单位为毫米(mm);

f_c^b ——高强螺栓承压强度设计值,单位为兆帕(MPa)。

7.9.3 高强度螺栓摩擦型连接应按下列规定计算。

在抗剪连接中,每个高强度螺栓的承载力设计值应按式(32)计算。

$$N_v^b = 0.9n_f\mu_fP \dots\dots\dots(32)$$

式中:

N_v^b ——单个螺栓受剪承载力设计值,单位为千牛(kN);

n_f ——传力摩擦面数目;

μ_f ——摩擦面的抗滑移系数,按表6采用;

P ——一个高强度螺栓的预拉力,应按表7采用。

表6 摩擦面的抗滑移系数 μ_f

在连接处构件接触面的处理方法	构件的钢号		
	Q235	Q355、Q390	Q420
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7 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)			
	M16	M20	M22	M24
8.8S	80	125	150	175
10.9S	100	155	190	225

7.10 加强措施

7.10.1 加劲肋

波纹钢板结构的承载能力可以通过对结构的外部(土壤一侧)附加环向加强构件(包括波纹板肋或具有与主结构的外半径有相同的内部曲率半径的型钢)来加强,可以依据强度需求,在波纹管最大跨径处加强或围绕着整个结构环向加强。倒扣波纹板板厚应小于或等于主体钢板厚。在结构和加劲肋之间填筑自密实混凝土能够进一步提升承载力。

7.10.2 减载板

对于大跨度的波纹钢管(板)桥涵结构,当填土厚度不满足规范最小覆土厚度要求的情况。可以设置混凝土减载板,一方面可以降低结构上方填土厚度的要求,另一方面可以使活载扩散,使波纹钢受力更均匀。使用前应根据实际需要进行安全性验算。

7.11 耐久性设计

7.11.1 防腐镀层的类型及要求

采用碳素结构钢的波纹钢管、波纹钢板件和管箍、法兰盘及高强度螺栓、螺母，出厂前应进行热镀锌防腐处理方法如下：

- a) 热浸镀锌所用的锌应为 GB/T 470 规定的 1 号锌或 0 号锌，钢表面处理的最低等级为 Sa2.5，热浸镀锌层技术质量应符合表 8 的规定。
- b) 当采用热浸镀锌、静电喷涂等其他防腐方法代替镀锌时，应有试验验证资料，确保其防腐性能不低于表 8 规定的热浸镀锌方法的相应要求。

表8 热浸镀锌质量要求

项 目	要 求
单面附着量 (g/m ²)	强腐蚀性环境：波纹钢管、波纹钢板件和管箍≥600；螺栓、螺母≥350； 中等腐蚀性和弱腐蚀性环境：波纹钢管、波纹钢板件和管箍≥300；螺栓、螺母≥175
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	镀锌层应均匀完整、颜色一致，无漏镀缺陷，表面光滑，不允许有流挂、滴瘤或结块
镀锌层均匀性	镀锌层应均匀，无金属铜的红色沉积物
镀锌层耐盐雾性	耐盐雾性试验后，基材不应出现腐蚀现象
注：强腐蚀性：指金属表面均匀腐蚀大于 0.5 mm/年；中等腐蚀：指金属表面均匀腐蚀（0.1~0.5）mm/年；弱腐蚀性：指金属表面均匀腐蚀小于 0.1 mm/年。	

7.11.2 防腐涂层的类型及选取

在镀锌防腐的基础上还可采用涂装或喷涂沥青等非金属覆盖层以增强防腐性能。

- a) 当采用涂装时，涂装的总厚度应大于 120 μm，表面应均匀光滑、连续，无肉眼可分辨的小孔、孔隙、裂缝、脱皮及其他缺陷；
- b) 当采用喷涂沥青时，沥青涂层的厚度应为 0.5 mm~1 mm，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。

7.11.3 内衬设计

当公路波纹钢管（板）桥涵可能发生较强腐蚀或磨蚀时，或闭口截面结构物作为通行通道使用时，应做内衬设计。内衬设计一般可在波纹钢管（板）桥涵底部一定范围内浇筑混凝土或采用其他内衬材料，作为特殊水质条件下的防腐措施，也可以防止水流冲击物磨蚀。内衬设计应根据不同工况，进行相应的特殊设计。

7.11.4 特殊防腐设计

如果波纹钢结构必须在可能发生强腐蚀性、防腐层损伤等风险的环境下使用时，应增加波纹钢板厚度或增强防腐措施。

8 施工

8.1 一般规定

8.1.1 波纹钢管（板）桥涵施工过程主要包括：材料检验及现场准备、波纹钢管加工及组装、结构性回填及上部土层施工等。

8.1.2 波纹钢管（板）桥涵开工前应根据设计文件进行现场核对，无误后方可进行施工。

8.2 波纹钢板结构物的安装

8.2.1 材料的检验及现场准备

8.2.1.1 一般规定

材料的检验及现场准备的一般规定应满足以下两个要求：

- a) 波纹钢管和波纹钢板件在出厂前应严格按钢制波纹板加工验收标准进行验收，并进行必要的预拼装；
- b) 波纹钢管和波纹钢板件的现场拼装，应严格按设计图纸进行。现场施工中土建部分验收标准应符合 JTG F80/1 规定，并按 DB15/T 1276 中的有关规定执行。

8.2.1.2 基本要求

波纹钢管（板）桥涵施工基本要求如下：

- a) 波纹钢板出厂时，应附有产品质量合格证书；
- b) 波纹钢板运到施工现场后，应逐块检查，凡在运输过程中变形的钢板不得使用。应对波纹钢板的质量、钢板厚度、镀锌层厚度、波形的几何尺寸等进行检测。质量合格后才能进行拼装；
- c) 波纹钢板在安装时，拼接处应清理干净。以确保接缝搭接紧密；
- d) 波纹钢板安装铺设应平顺、稳固、管底坡度不得出现反坡，管涵内不得有泥土、砖石等杂物；
- e) 高强度螺栓紧固后，在二次防腐处理前，应在搭接处用专用密封胶涂装；
- f) 验收表格式应符合 JTG F80/1 规定，并按 DB15/T 1276 中分项工程质量检查评定表执行。

8.2.1.3 材料储存与保护

波纹钢管（板）桥涵材料储存与保护应满足以下两个要求：

- a) 在工地现场应事先规划波纹钢板和附属品的保管位置、各种施工机械设备的工作位置和进出路线等。
- b) 施工期间发现损坏、变形过大或镀锌层脱落的波纹钢板应及时更换。波纹钢板件尺寸允许偏差和热浸镀锌质量要求应分别满足表 1 和表 7 中的相关规定。

8.2.2 波纹钢管的加工及组装

8.2.2.1 螺旋波纹钢管的加工及组装应符合以下五个要求：

- a) 螺旋波纹钢管每节的长度由吊装、运输、安装条件确定；
- b) 螺旋波纹钢管在运输装卸过程中，应避免碰撞，防止管口变形破坏或碰伤镀锌防腐层。涵管装卸应采用吊具进行，宜事先在 $1/4$ 管节长度处用织物包裹的钢丝绳顺波纹绑扎钢管。吊运过程中应保持钢管水平，吊索与钢管之间的夹角不宜小于 45° ，见图 19。不应在波纹钢管上焊接或栓接吊耳作为吊点。

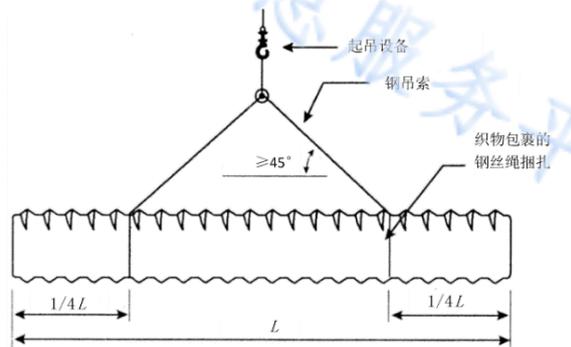


图19 波纹钢管的吊运图

- c) 螺旋波纹管采用工厂咬口方式连接时，咬口应确保管体强度和防渗，咬口间最小间距和相应的最少螺旋波纹数量应符合表 8 的规定；
- d) 螺旋波纹管采用平行式、螺旋式管箍连接时，其管箍形式和宽度应符合表 9 的规定，管箍钢板厚度不应小于螺旋波纹管钢板厚度；
- e) 螺旋波纹管采用卡箍连接时，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，将卡箍内垫密封板，卡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卡箍上，使两管节端口对齐，镶好密封板，盖上卡箍连接件，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 30 mm。

表9 螺旋波纹管咬口及管箍连接要求

波距 mm×波高 mm	咬口间最小间距 mm	咬口间螺旋波纹最少数量 个	管箍形式	管箍最小宽度 mm
68×13	610	6	1~2片箍	410
75×25	533	7	2~3片箍	430
125×25	750	6	2~3片箍	

8.2.2.2 环形波纹管的加工及组装应符合以下四个要求：

- a) 环形波纹管每节的长度由吊装、运输、安装条件确定；
- b) 环形波纹管（内径不大于 2000 mm）整体采用轴向法兰盘连接时，法兰盘和管节焊接及焊接质量应符合 GB 50661 的要求。法兰盘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；
- c) 环形波纹管圆管（内径 750 mm~1500 mm）轴向采用左右（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；
- d) 环形波纹管圆管（内径 750 mm~1500 mm）轴向采用左右（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；

8.2.2.3 波纹钢板件的加工及组装应符合以下六个方面的要求：

- a) 波纹钢板件长度和宽度应根据钢板尺寸及吊装、运输和拼装条件确定；
- b) 波纹钢板件拼装时，板件之间应采用搭接，并用高强度螺栓连接，不应采用焊接。板件环向搭接的重叠部分边缘至最外缘螺栓孔距离应大于 50 mm，轴向搭接螺栓孔边缘距离视波距大小而定；
- c) 波纹钢板件的拼装应按安装图纸或施工作业书进行，必要时可以利用支撑装置来维持设计截面的形状；
- d) 波纹钢板件搭接应结合紧密，在同一位置不得重叠四张以上的波纹钢板。在波纹钢板件连接处可用衬垫或填充物来减小空隙；
- e) 每米长度拼装成型后，要测定一次截面形状，达到标准后再继续拼装，达不到标准应及时调整。圆周向拼装到环形圈合拢时，测定截面形状，采用定位拉杆固定，调整预紧螺栓，拼装顶部第一块波纹板；
- f) 螺栓预紧力扭矩应满足 GB 50205 的要求。

8.3 施工过程中的临时性加强措施

施工过程中的临时性加强措施应满足以下两个要求：

- a) 回填和端墙的施工过程中，可根据需要设置临时水平支撑防止结构变形过大；

b) 斜坡路面或是斜交涵管，可根据需要设置临时支撑，直到斜坡路面或加固圈建设完成。

8.4 结构性回填及上部土层施工

8.4.1 结构性回填施工

8.4.1.1 结构性回填范围

结构性回填范围见图20。 D_h 为波纹管（板）桥涵结构的有效跨度（按波纹钢板轴线计算）， D_a 为波纹管（板）桥涵结构的最小覆土厚度， D_b 为波纹管（板）桥涵结构的最小间距要求， D_c 为波纹管（板）桥涵结构距结构性回填范围边缘的距离。当 $D_h \leq 1$ m时， $D_b = 0.5$ m， $D_c = 1.5D_h$ ；当 $1 \text{ m} < D_h \leq 2$ m时， $D_b = 0.5D_h$ ， $D_c = 1.0D_h$ ；当 $2 \text{ m} < D_h \leq 10$ m时， $D_b = 1.0$ m， $D_c = 0.5D_h$ ；当 $D_h > 10$ m时， $D_b = 0.1D_h$ ， $D_c = 0.5D_h$ 。

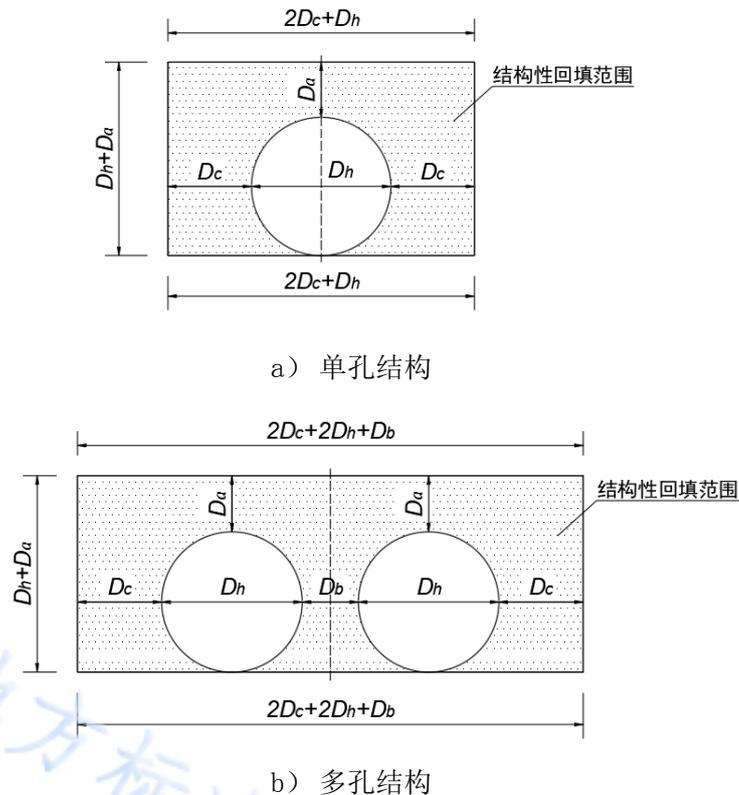


图20 结构性回填范围示意图

8.4.1.2 结构性回填范围不能采用大型机械填筑、压实。

8.4.1.3 结构物两侧保持对称均匀、分层摊铺、逐层压实，每层厚度宜为 150 mm~200 mm，其压实度不应小于 96%，夯实高度差应小于一层夯实厚度，由偏土压引起的结构物变形应采取措施消除，校正截面形状后重新实施夯实。

8.4.1.4 在回填夯实过程中，从结构物外边缘向外 2.0 m 以内的范围内，应严格控制除夯实机械以外的重型机械的运行。夯实侧面时，夯实机械应与结构物的长度方向平行行驶；夯实结构物上方回填土时，应垂直于结构物长度方向行驶。

8.4.1.5 对于闭口截面结构物管下方楔形部填料可采用“水密法”并用振荡器振实。

8.4.2 上部土层施工

8.4.2.1 从钢板结构物顶部到最小覆土厚度以内的范围应按结构性回填部分的要求进行施工。

8.4.2.2 结构顶部填土应符合 JTG/T 3650-2020 第 24.7.8 条表 24.7.8 的最小填土高度要求，并进行结构承载力验算，满足要求后，方可允许车辆或筑路机械通行。

8.4.2.3 结构顶部填土应符合 JTG/T 3650-2020 第 24.7.8 条表 24.7.8 的最小填土高度要求，并进行结构承载力验算，满足要求后，方可允许车辆或筑路机械通行。

8.4.2.4 波纹钢管（板）桥涵顶部及周围 20 m 范围内，不允许强夯。

8.5 线形控制

8.5.1 波纹钢板结构物在拼装完成后、回填过程中以及回填完成后都要检测截面的形状变化。

8.5.2 拼装完毕后在开始回填之前应检测截面大小，若其大小超过设计形状的 1%，则应拧开螺栓校正形状后重新拼装。

8.5.3 路面施工完成后构造物的最终允许变形不能超过设计形状的 2%。在施工过程中，当变形量超出设计形状的限值要求时，应立即中止施工，查明原因，采取适当措施将变形量减小到规定范围以内。

8.5.4 波纹钢管（板）桥涵施工的质量应符合 JTG F80/1 及 DB15/T 1276 的规定。

8.6 其它事项

8.6.1 为了防止在波纹钢板连接处或螺栓孔位置发生渗水，在波纹钢板连接处和螺栓孔位置应采用专业密封胶进行防水处理。必要时应在上部土层内埋设防水膜。

8.6.2 若将波纹钢板结构物与现有的混凝土结构物等刚性受力体连接施工时，应对结构物连接处的应力进行验算，采用适当的方式设置连接或加固。

8.7 改扩建施工

8.7.1 一般规定

8.7.1.1 波纹钢管（板）桥涵改扩建施工时，除应满足本节规定外，尚应满足本文件第 8 章相关施工要求。

8.7.1.2 波纹钢管（板）桥涵接长施工时，新建桥涵与既有桥涵连接处应按沉降缝处理。接长桥涵的涵底应与既有桥涵的涵底顺接，并应符合设计要求的涵底纵坡。

8.7.1.3 对流水的涵址，施工前应根据实际情况制定可行的排水措施。

8.7.2 基础开挖

8.7.2.1 波纹钢管（板）桥涵基础开挖应按设计要求，标记管涵位置后开挖基础。基础的宽度应满足表 2 中最小基础宽度的要求。

8.7.2.2 新建桥台的基底高程原则上应与原涵台基底高程相同。如因地基承载力不满足要求，应对地基进行处理。基底高程低于原基底高程时，应对既有涵台基础做好防护措施。

8.7.3 管基施工

8.7.3.1 闭口截面波纹钢管基础开挖完毕后，应按设计要求铺筑砂砾，将表面塑成与底拱相适应的外形，并应按设计设置预拱度，与原桥涵保持一致。

8.7.3.2 开口截面波纹钢结构地基开挖完毕后，应按设计要求进行基础施工，并应注意与原结构物基础的衔接。

8.7.4 波纹钢管的加工与组装

8.7.4.1 波纹钢管（板）桥涵改扩建加工与组装的要求应满足 8.2 节的要求，应注意与原结构物的衔接，并应采取适当措施防止原结构与新建波纹钢结构刚度不同造成的变形差别。

8.7.4.2 安装完毕后应注意校正波纹钢管（板）桥涵，使其中心位于涵位的中心轴线上。

8.7.5 结构性回填

结构性回填应满足8.4节的要求，并应注意与原结构物及路基的衔接。

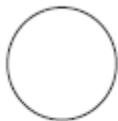
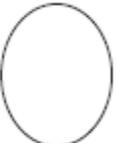
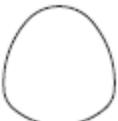
地方标准信息服务平台

附录 A
(规范性)

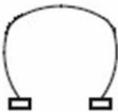
公路波纹管(板)桥涵的常用类型与功能

公路波纹管(板)桥涵常用类型与功能见表A.1。

表A.1 公路波纹管(板)桥涵的常用类型与功能

结构名称	结构形式	功能与应用
圆形 Round		涵洞, 雨水管, 污水管, 通车或行人通道, 在各种功能状况下均使用良好, 尤其是埋深较大的情况下。
竖向椭圆 Vertical Ellipse		涵洞, 雨水管, 污水管, 通车或行人通道, 埋深较大时使用较好。
梨形 Pear-shaped Pipe		在最小覆土厚度的情况下可作人行、机动车和自行车通道使用。
管形拱 Pipe-Arch		净空较小, 具有水力优势, 可作涵洞, 污水管, 立交桥, 雨水管。
横向椭圆 Horizontal Ellipse		路基较低、地基土较差时宜选用。
拱 Arch(single radius)		净空较小, 过水面较大, 形式优美, 无损天然河床的环境友好型截面。
低弧拱 Low-Profile Arch		净空较小, 过水断面较大, 无损天然河床的环境友好型截面。
高弧拱 High Profile arch		矢高较大, 断面较大, 无损天然河床的环境友好型截面。

表A1 公路波纹钢管（板）桥涵的常用类型与功能（续）

结构名称	结构形式	功能与应用
梨形拱 Pear-Arch		铁路通道或其它要求净空较大的情况。
倒梨形 Inverted Pear-shaped		铁路通道或其它要求净空较大的情况。

地方标准信息服务平台

附录 B

(规范性)

公路常用波纹钢管(板)截面特性参数表

公路常用波纹钢管(板)截面特性见表B.1。

表B.1 公路常用波纹钢管(板)截面特性

分类	波距 mm	波高 mm	规定厚度 mm	截面面积 mm ² /mm	转动惯量 mm ⁴ /mm	回转半径 mm
螺旋波纹钢管	68	13	1.6	1.733	34.54	4.464
			2.0	2.167	43.62	4.487
			2.7	2.926	60.18	4.535
			3.2	3.469	72.62	4.575
	75	25	1.6	1.986	145.88	8.570
			2.0	2.485	183.60	8.596
			2.7	3.359	251.12	8.647
			3.2	3.984	300.66	8.687
			4.0	4.988	382.51	8.757
			4.2	5.239	403.51	8.776
	125	25	1.6	1.756	138.74	8.889
			2.0	2.195	174.10	8.905
			2.7	2.965	236.83	8.938
			3.2	3.514	282.43	8.965
			4.0	4.395	356.99	9.013
4.2			4.615	375.94	9.025	
环形波纹钢管	125	25	2.0	2.195	174.10	8.905
			2.7	2.965	236.83	8.938
			3.2	3.514	282.43	8.965
			4.0	4.395	356.99	9.013
			4.2	4.615	375.94	9.025
	150	50	3.0	3.720	1084.74	17.075
			4.0	4.965	1458.63	17.141
			5.0	6.211	1840.13	17.213
			6.0	7.460	2230.13	17.290
	200	55	3.0	3.544	1356.36	19.563
			4.0	4.729	1819.24	19.614
			5.0	5.915	2288.80	19.671
			6.0	7.103	2765.85	19.733
波纹钢板件	68	13	1.6	1.733	34.54	4.464
			2.0	2.167	43.62	4.487

表B.1 波纹钢管(板)截面特性(续)

分类	波距 mm	波高 mm	规定厚度 mm	截面面积 mm ² /mm	转动惯量 mm ⁴ /mm	回转半径 mm
波纹钢板件	68	13	2.7	2.926	60.18	4.535
			3.2	3.469	72.62	4.575
			4.0	4.338	93.81	4.650
	75	25	1.6	1.986	145.88	8.570
			2.0	2.485	183.60	8.596
			2.7	3.359	251.12	8.647
			3.2	3.984	300.66	8.687
			4.0	4.988	382.51	8.757
			4.2	5.239	403.51	8.776
	125	25	1.6	1.756	138.74	8.889
			2.0	2.195	174.10	8.905
			2.7	2.965	236.83	8.938
			3.2	3.514	282.43	8.965
			4.0	4.395	356.99	9.013
			4.2	4.615	375.94	9.025
	150	50	3.0	3.720	1084.74	17.075
			4.0	4.965	1458.63	17.141
			5.0	6.211	1840.13	17.213
			6.0	7.460	2230.13	17.290
			7.0	8.711	2629.50	17.375
			8.0	9.964	3039.13	17.465
			9.0	11.220	3459.93	17.561
			10.0	12.479	3982.81	17.662
	200	55	2.0	2.361	899.39	19.517
			3.0	3.544	1356.36	19.563
			4.0	4.729	1819.24	19.614
			5.0	5.915	2288.80	19.671
			6.0	7.103	2765.85	19.733
			7.0	8.293	3251.17	19.799
	230	64	3.0	3.542	1793.16	22.501
			4.0	4.725	2402.72	22.551
			5.0	5.909	3019.50	22.605
			6.0	7.094	3644.30	22.665
7.0			8.281	4277.89	22.728	
300	110	4.0	5.238	7911.51	38.863	
		5.0	6.553	9925.92	38.919	
		6.0	7.870	11956.88	38.978	
		7.0	9.189	14005.36	39.039	

表B.1 波纹钢管（板）截面特性（续）

分类	波距 mm	波高 mm	规定厚度 mm	截面面积 mm ² /mm	转动惯量 mm ⁴ /mm	回转半径 mm
波纹钢板件	300	110	8.0	10.511	16072.34	39.103
			9.0	11.836	18158.81	39.170
			10.0	13.163	20265.75	39.238
	380	140	5.0	6.477	15117.75	48.313
			6.0	7.776	18194.44	48.373
			7.0	9.076	21291.06	48.435
			8.0	10.377	24408.55	48.500
			9.0	11.679	27547.88	48.567
			10.0	12.983	30710.01	48.636
	400	150	5.0	6.533	17576.93	51.871
			6.0	7.843	21150.36	51.931
			7.0	9.154	24745.40	51.993
			8.0	10.466	28362.99	52.057

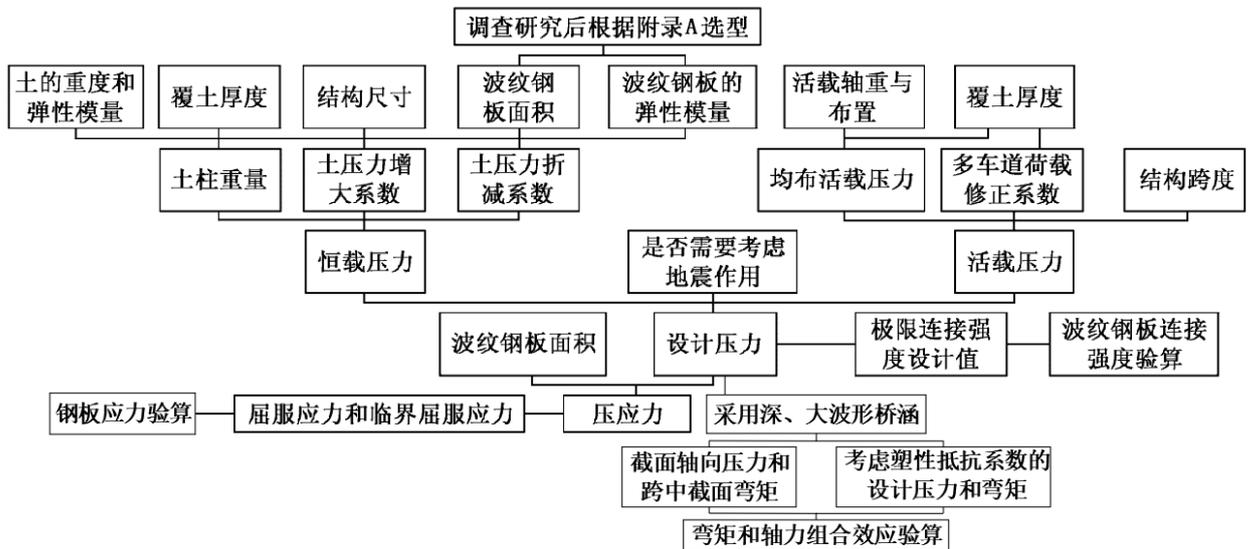
注：本表中未涉及的波纹钢管（板）截面特性可按照 GB / T 34567 选用。

地方标准信息服务平台

附录 C
(规范性)
设计流程图

C.1 钢板应力和连接强度计算

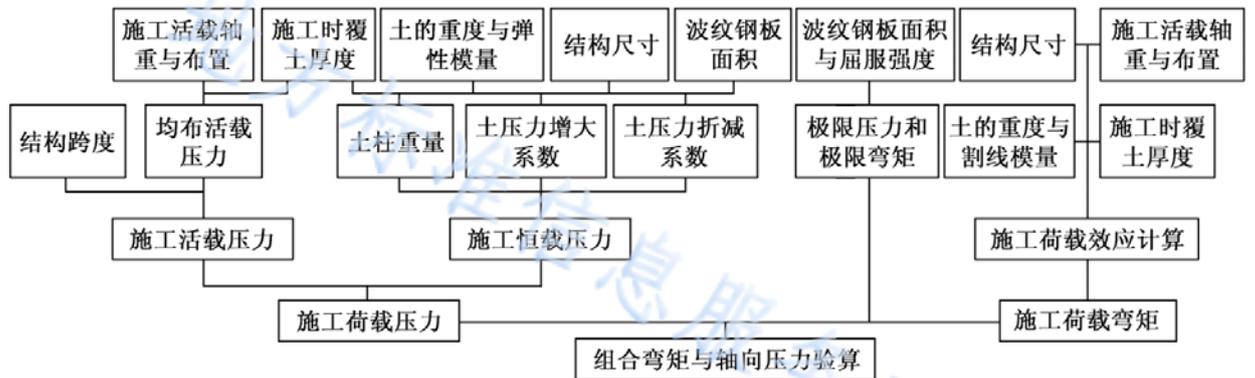
波纹钢管（板）桥涵钢板应力和连接强度计算流程图见图C.1。



图C.1 钢板应力和连接强度计算流程图

C.2 施工阶段验算

波纹钢管（板）桥涵施工阶段验算流程图见图C.2。



图C.2 施工阶段验算流程图

附录 D
(规范性)
相关参数计算公式

D.1 参数 k_{M1} , k_{M2} , k_{M3} , k_B , R_B , R_L 的计算需要根据柔度系数 N_f 来确定, 具体公式如下。

$$N_f = E_s \square 1000 D_h \square^3 / EI \quad \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

- E_s ——土体的弹性模量, 单位为兆帕 (MPa);
- D_h ——波纹钢管 (板) 桥涵结构有效跨度, 单位为米 (m), 参见图 15;
- E ——波纹钢板材料的弹性模量, 单位为兆帕 (MPa);
- I ——截面的惯性矩, 单位为毫米四次方每毫米 (mm^4/mm)。

$$\left. \begin{aligned} k_{M1} &= 0.0046 - 0.0010 \log_{10}(N_f) && (N_f \leq 5000) \\ &= 0.0009 && (N_f > 5000) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (D.2)$$

式中:

N_f ——柔度系数, 按 D.1 计算。

$$\left. \begin{aligned} k_{M2} &= 0.018 - 0.004 \log_{10} \square N_f \square && (N_f \leq 5000) \\ &= 0.0032 && (N_f > 5000) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (D.3)$$

式中:

N_f ——柔度系数, 按 D.1 计算。

$$\left. \begin{aligned} k_{M3} &= 0.12 - 0.018 \log_{10}(N_f) && (N_f \leq 10000) \\ &= 0.030 && (N_f > 10000) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (D.4)$$

式中:

N_f ——柔度系数, 按 D.1 计算。

$$\left. \begin{aligned} R_B &= 0.67 + 0.87 \left(\frac{D_v}{2D_h} - 0.20 \right) && (0.2 \leq \frac{D_v}{2D_h} \leq 0.35) \\ &= 0.80 + 1.33 \left(\frac{D_v}{2D_h} - 0.35 \right) && (0.35 < \frac{D_v}{2D_h} \leq 0.5) \\ &= \frac{D_v}{D_h} && (\frac{D_v}{2D_h} > 0.5) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (D.5)$$

式中:

- D_h ——波纹钢管 (板) 桥涵结构有效跨度, 单位为米 (m), 参见图 15;
- D_v ——波纹钢管 (板) 桥涵结构的有效矢高, 单位为米 (m), 参见图 15。

$$R_L = [0.265 - 0.053 \log_{10}(N_f)] / (H_c / D_h)^{0.75} \leq 1.0 \quad \dots\dots\dots (D.6)$$

式中:

- N_f ——柔度系数, 按 D.1 计算;
- H_c ——施工过程中填土高度, 单位为米 (m);
- D_h ——波纹钢管 (板) 桥涵结构有效跨度, 单位为米 (m), 参见图 15。

D.2 等效线性荷载的参数 k_r 按照表 D.1 线性插值取得。

表D.1 k_4 取值表

埋深	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

地方标准信息服务平台

附 录 E
(规范性)
条文说明

E.1 桥涵布置

E.1.1 桥涵跨径

桥涵的水力计算具体内容可参考JTG/T D65-04。桥涵水力计算公式中的涵内粗糙率 n_h 与波纹钢板的波距和波高以及桥涵跨径等因素有关，具体计算方法可参考美国钢铁学会AISI出版的Modern Sewer Design以及美国钢铁学会AISI和加拿大钢波纹管协会共同出版的Handbook of Steel Drainage and Highway Construction Products。表E.1给出的是我国常用波形桥涵无铺装时粗糙率的建议值。其它波形可参照下表内插得出。

表E.1 我国常用波形桥涵无铺装时粗糙率建议值

波距 mm×波高 mm	粗糙率 n_h
68×13	0.015~0.022
125×25	0.020~0.025
150×50	0.026~0.037
200×55	0.028~0.039
400×150	0.032~0.048

E.1.2 桥涵构造

E.1.2.1 开口截面结构物

E.1.2.1.1 不等边角钢厚度应大于等于波纹钢板件的壁厚，角钢内净宽应大于等于波纹钢板件的壁厚×2+波高或波深。不等边角钢材料性能、外形、重量及允许偏差应符合 GB/T 6723 的有关规定。

E.1.2.1.2 不等边角钢布置于钢筋混凝土拱座之上通过预埋锚筋或地脚螺栓连接，锚筋或地脚螺栓的间距应为波纹钢板的波谷位置。波纹钢板拱脚与不等边角钢连接的高强度螺栓间距为波距距离（波纹钢板的外波峰位置）。

E.1.2.1.3 波纹钢板与不等边角钢连接的高强度螺栓强度等级、规格，宜按跨径等因素选取。对小于等于 8 m 跨径的波纹钢板拱结构，宜选用 8.8S 或 10.9S、M20 或 M16 的螺栓连接。

E.1.2.1.4 波纹钢板件内外面和连接件等均应进行热镀锌防腐处理，接缝应进行密封防水和防腐处理。

E.1.2.2 进出水口构造

E.1.2.2.1 洞口建筑是由进水口和出水口两部分组成。洞口应与洞身、路基顺接平顺，并起到调节水流和形成良好流态（流线）的作用，同时使洞身、洞口（包括基础）、两侧路基以及上下游附近河床免受冲刷。另外，洞口形式的选定，还直接影响着涵洞的宣泄能力和河床加固类型的选用。

表E.2 各种洞口建筑类型的适用性和优缺点比较

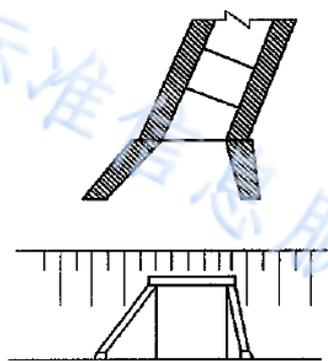
洞口形式	适用性	优缺点	备注
八字式	平坦顺直，河床比降不大的河沟。配合路堤边坡设置，广泛应用于需收纳、扩散水流处	水力性能好，施工简单，工程量较小	
端墙式	平原地区流速很小、流量不大的河沟、水渠	构造简单，造价低，但水力性能不好	
锥坡式	宽浅河沟上，对水流压缩较大的涵洞。常与较高较大的涵洞配合	水力性能较好，能增强高路堤的洞口、洞身稳定性，但工程量较大	
平头式	水流过涵侧向挤束不大，流速较小	节省材料，工艺较复杂，水力性能稍差，洞口管节可预制	
直管或直管延长式	流速较大的河沟、水渠。管节孔径大适用于河沟宽的情况，采用直管不需延长；孔径小适用于河沟狭窄的情况，适当延长管节	结构简单，预制方便，对涵洞的加长较为便利，但当孔径较小时洞口宣泄能力相对较差。水力性能不好	干旱、半干旱地区多用于不长期流水孔径小于河沟渠的涵洞
簸箕式	流速较大、流量较大的宽浅河沟	簸箕结构相对复杂，水力性能不好	簸箕可为波纹状或平板状

波纹钢板洞口：在公路建设中，对于圆管涵、盖板涵、箱涵、拱涵、小桥等结构，传统的方法基本上都是水泥混凝土制作而成，而水泥构造物的缺陷很多，比如容易开裂、冻裂、施工周期长、环境污染严重等问题；为此近几年开发了新的材料和工艺，利用金属波纹管制作洞口，解决了水泥构造物的缺陷。经过几年的应用发现，这种新材料确实非常的方便，它的优点是水泥构造物无法比拟的，随着大面积的普及，从中也发现了一些问题，涵洞的主体结构变成了波纹钢板，但涵洞洞口还是采用传统的混凝土结构，这样一来需要钢结构与混凝土结构相连接；刚性结构的混凝土与柔性结构的波纹钢板之间连接造成刚度突变，整个涵洞的美观度差，钢波纹管允许适当的变形，变形时连接部位容易出现裂缝，混凝土部分容易开裂，且混凝土洞口施工慢，影响整个工期。

E.1.2.2.2 涵洞与路线相交，可分为正交和斜交两种。当涵洞沿纵轴线方向与路线轴线方向相互垂直时，称为涵洞与路线正交；当涵洞纵轴线与路线轴线方向不互相垂直时，称为涵洞与路线斜交。当涵洞与路线斜交时，其洞口建筑所采用的各种形式与正交时基本相同。根据洞身的构造不同，有两种处理方法：

a) 斜交斜做

为求外形美观及适应水流条件，可使涵洞洞身端部与路线平行，此种做法称为斜交斜做，见图E.1。对于盖板涵和箱涵，运用斜交斜做法比较普遍。在这种情况下，除洞口建筑外，还须对涵身的两端需另行设计预制，以适应斜边的需要。

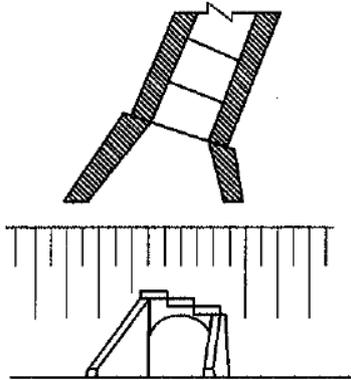


图E.1 斜交斜做

b) 斜交正做

在管涵中，为避免两端圆管的施工困难，可采用斜交正做法处理洞口，见图E.2。即涵身部分与正交时完全相同，而对洞口的端墙高度予以调整，一般将端墙设计成斜坡形或阶梯形。为使水流顺畅，宜

配合路堤边坡对洞口建筑另行设计。当斜交涵管采用平头式洞口时，对其突出路基之外的三角台，则以铺砌护道边坡的方法予以加固。



图E.2 斜交正做

E.2 设计

E.2.1 一般规定

公路波纹钢管（板）桥涵设计时的永久作用、可变作用、偶然作用和地震作用的分类以及荷载作用取值和组合方法按照 JTG D60 的规定进行。

永久作用的代表值为其标准值。永久作用标准值可根据统计、计算，并结合工程经验综合分析确定。可变作用代表值包括标准值、组合值、频遇值和准永久值。组合值、频遇值和准永久值可通过可变作用的标准值分别乘以组合值系数、频遇值系数和准永久系数来确定，应按照 JTG D60 的规定进行。偶然作用取其设计值作为代表值，可根据历史记载、现场观测和试验，并结合工程经验综合分析确定，也可根据有关标准的专门规定确定。地震作用的代表值为其标准值。地震作用的标准值应根据 JTG/T 2231-01 的规定确定。

公路波纹钢管（板）桥涵设计应考虑结构上可能同时出现的作用，按承载能力极限状态、正常使用极限状态进行作用组合，均应按下列原则取其最不利组合效应进行设计：

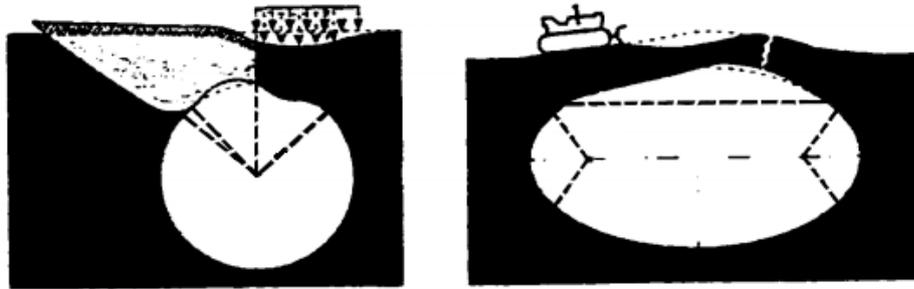
- 只有在结构上可能同时出现的作用，才进行组合。当结构或结构构件需做不同受力方向的验算时，则应以不同方向的最不利的作用组合效应进行计算；
- 当可变作用的出现对结构构件产生有利影响时，该作用不应参与组合；
- 施工阶段的作用组合，应按计算需要及结构所处的条件而定，结构上的施工人员和施工机具设备均应作为可变作用加以考虑；
- 多个偶然作用不同时参与组合；
- 地震作用不与偶然作用同时参与组合。

闭口截面管涵不能放置在过于刚性的支承上，刚性支承不但会降低管壁本身所具有的良好柔性，而且还会减小管涵的承载能力。开挖软岩沟槽时不得使用烈性炸药和放深孔炮，否则将使得沟槽外范围较大的外层岩层被炸松散。

E.2.2 最小覆土厚度

公路波纹钢管（板）桥涵的特点是通过土与结构的相互作用来充分发挥结构的承载力，回填材料在这一过程中发挥着至关重要的角色，然而结构的破坏可能最初是由于拱上覆土的剪切滑移破坏和拉裂破坏导致的，见图E.3，各国现行规范中，主要是通过限制拱上覆土的最小埋深来避免此类破坏。设计最

小覆土厚度的另一原因是由于各国现行规范普遍采用环向压力设计法，结构内力只计算轴力压力，忽略弯矩作用，限制最小覆土厚度就是确保荷载引起的弯矩被控制在对安全设计不影响的程度。当然，如果设置了诸如减载板之类的加强措施，最小覆土厚度的要求可以适当降低。



图E.3 覆土的剪切滑移破坏与拉裂破坏示意图

E.2.3 作用

E.2.3.1 土的重力

土体重力计算公式如下：

$$W = \gamma \cdot D_h \cdot (H + 0.1075D_v) \dots\dots\dots (E.1)$$

0.1075D_v为土拱两侧拱肋到拱顶垂直距离内土的体积换算成用跨径表达所需要的高度，具体的推导如下：

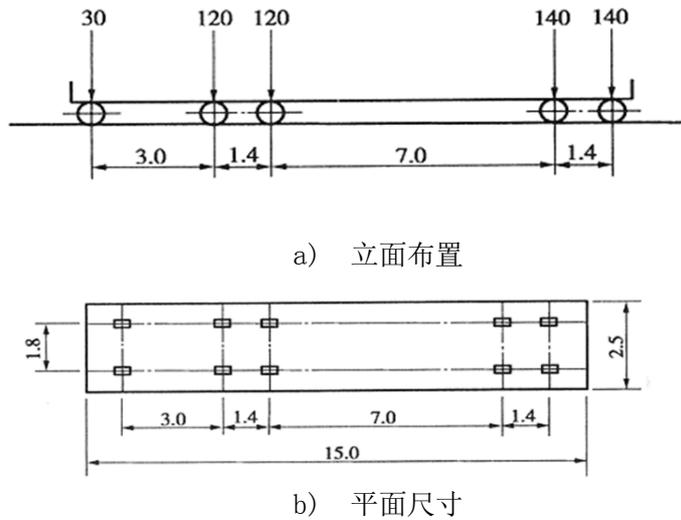
$$\frac{D \times \frac{D}{2} - \frac{\pi D^2}{8}}{D} = \frac{0.1075D^2}{D} = 0.1075D \dots\dots\dots (E.2)$$

通过对各国规范的试算比较，加拿大公路桥梁设计规范计算出的恒载标准值最大，我国公路桥梁规范计算的活载标准值最大，美国 AASHTO 规范与加拿大规范计算出的总荷载设计值相近，美国规范略大，而按我国公路桥涵规范计算出的总荷载设计值却比其它两国规范小。分析原因，是由于加拿大规范考虑了结构两侧土体的重量和不利的结构上拱作用，所以恒载的标准值最大，实际上，结构两侧土体的重量占恒载的比重较大，因此为了保证结构的安全设计，结构两侧的土体应该计入恒载的计算中而不应忽略。我国规范中汽车荷载的轴重大于其它两国规范，因此计算出的活载标准值大于其它两国规范。在恒载设计值的计算中，美国规范和加拿大规范的计算结果之所以相近，是因为两国规范都从不同方面放大了恒载，加拿大规范通过结构土拱作用系数，美国规范通过较大的恒载分项系数。综上所述，如果按我国公路桥涵通用规范来计算公路波纹管（板）桥涵所承受的荷载设计值将偏于不安全，因此，本规范考虑结构两侧土体的自重并考虑结构上拱增大系数来达到安全设计的目的。

回填土的容重常用实验确定，若无实验资料，或需要其他类型的材料及其材料特性时，可参考JTG D30和JTG C20的相关规定。

E.2.3.2 汽车荷载

E.2.3.2.1 作用在结构上的活载可通过把车辆荷载通过路面层与路基土扩散到结构顶部来得到。我国公路桥涵规范中的车辆荷载，见图 E.4，最重的两个轴分布在车辆的尾部，轴重为 140 kN，间距 1.4 m。设计中应按可能出现的最不利情况布置。



注：图中尺寸单位为m，荷载单位为kN。

图E.4 我国公路桥涵规范中的汽车荷载

E. 2. 3. 2. 2 车辆荷载通过填土分布在结构顶部的水平剖面上。这个分布在行车方向(与结构轴线正交)和在路宽方向(平行于结构轴线)的扩散角在各国规范中是不同的。为了确定等效的换算均布活载压力，总轴重被均匀地分布在一个矩形区域，这个矩形区域的边界就是通过填土扩散角确定的。

E. 2. 3. 2. 3 计算活载时还引入了一个冲击系数。冲击系数通过放大活载来考虑汽车通过结构时引起的等效冲击力，此系数随埋深而变化，埋深较小时，冲击系数较大，一般当埋深超过 2 m 时，就不需要考虑了。我国公路桥涵规范中，对于钢筋混凝土结构当埋深大于 0.5 m 时就不考虑了。

E. 2. 3. 2. 4 施工荷载是在施工阶段为考虑结构安全度所考虑的临时荷载，波纹管为柔性结构，施工过程中的不确定荷载对其影响较大，故在施工过程的结构设计时，将荷载系数放大以满足受力要求。施工荷载可以参考以下施工机械。

表E.3 常用打夯机参数

分类	常用型号	工作重量
蛙式打夯机	HW60	150kg
链条打夯机	170 型四轮手扶链条冲击式打夯机	398-550kg
冲击夯	HCD70-100	70-110kg

表E.4 常用压路机参数

分类依据	分类标准
操作重量	微型 (1 吨以下); 小型 (1-6 吨); 中型 (6-10 吨); 重型 (10-14 吨); 超重型 (16 吨以上)
压轮	单钢轮、双钢轮、三光轮、轮胎
压实原理	振动压路机、静作用压路机、冲击压路机、组合压路机
常用种类	单钢轮振动压路机: 12T/14T/16T/18T/20T/22T/26T 双钢轮振动压路机: 12T/13T/14T 三光轮静作用压路机: 15-18T/ 18-21T / 21-24T (或 21-25T) 轮胎压路机: 16T/20T/26T/30T

表E.5 常用装载机参数

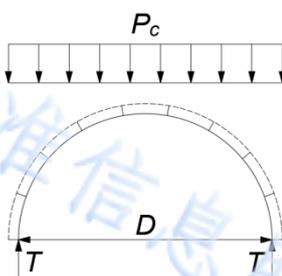
额定载重量 (kg)	设备型号	整机操作重量 (kg)
3t 以下	山工 SEM630B-30 系列装载机 (3t)	9700
	柳工 CLG836 (国三)-3t 轮式装载机	10300
	徐工 LW300KN 装载机 (3t)	11000±200
3-4t	柳工 ZL40B 轮式装载机 (4t)	13800
	徐工 LW400KN 装载机 (4t)	14500
4-5t	山工 SEM655D 装载机 (5t)	16500
	柳工 CLG855N-3 (国三)-5t 轮式装载机	16900
	徐工 LW500FN 装载机 (5t)	16700±300
5-8t	山工 SEM660B U 型高卸装煤王 (6t)	20500
	柳工 CLG888 轮式装载机 (8t)	30500
	徐工 LW600FN (6t)	19500
8t 以上	柳工 CLG8128H 轮式装载机 (12t)	50600
	徐工 LW500KL-T18 轮式装载机 (18t)	21000

E.2.3.3 地震作用

R_0 的取值参考GB 50011中相应的规定而确定。

E.2.4 钢板应力验算

二十世纪六十年代末发展起来的环向压力理论认为,在深埋的地下圆弧形结构中,结构周围土压力分布的不均匀性对管壁推力的大小和分布的影响很小,对于公路波纹管(板)桥涵结构,由于其固有韧性,垂直方向的总荷载(恒载+活载)使管壁发生变形,挤压两侧土体,回填土体受到挤压后形成被动土压力,随着变形增大,土体与管壁承担的荷载重新分布,调整的结果使管壁周围的土压力趋于均匀环压状态,从而提高了结构的承载能力。结构受力分析时认为环向压力是一致的,管壁应具有足够强度来承担这种径向压力,计算简图见图E.5。

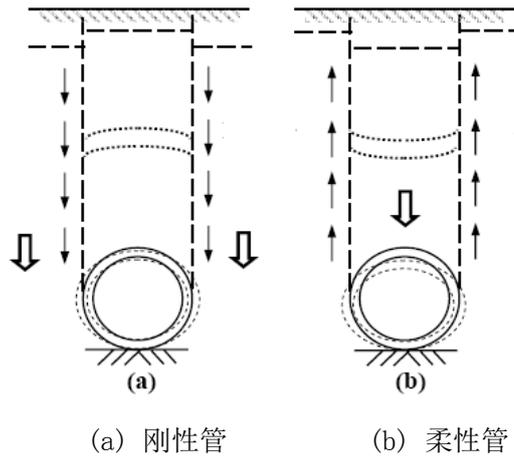


图E.5 计算简图

本规范是基于环向压力法进行设计,对于箱子形涵洞需考虑弯矩的影响,应单独计算。当桥涵上覆土较低、跨度较大时,也应考虑弯矩的影响,具体方法可以采用施工验算中关于弯矩的考虑,也可以采用有限元方法计算。 A_f 为考虑结构在回填材料挤压条件下上拱而使拱上土压力增大的效应,该系数的取值与结构线形及填土高度相关,本规范所用系数取值是参考加拿大公路桥梁设计规范(Canadian Highway Bridge Design Code 2000)并通过对比我国规范的相关计算公式得到的。

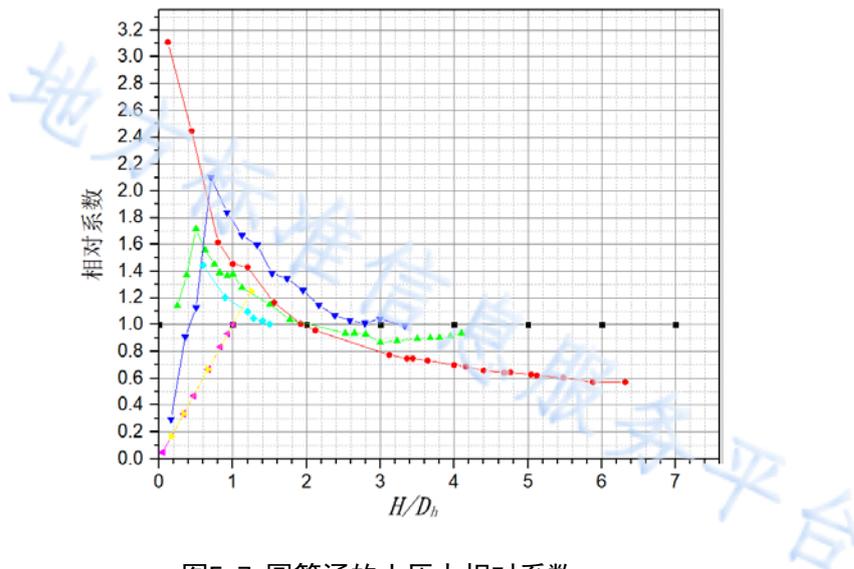
实际工程在填土中埋设涵管，由于涵管的刚度与其周围的土壤刚度不同，涵管管顶上的土柱与涵管两侧土柱的沉降不一致，因而管顶土柱与管侧土柱之间产生摩擦力，涵管所受的垂直土压力不再等于其上的土柱重量。

对于钢筋混凝土涵管（刚性管）来说，其两侧土壤的可压缩性比涵管本身的可压缩性大，管侧土柱对管顶土柱产生向下的摩擦力，因此刚性涵管所受垂直土压力大于涵管上的土柱重量；对于波纹钢管（板）桥涵（柔性管）则产生向上的摩擦力，波纹钢管（板）桥涵所受的垂直土压力要小于涵管上的土柱重量，见图E.6。



图E.6 结构和土的沉降与土拱作用

近年来国内对于波纹钢管（板）桥涵结构的实体工程进行了大量的施工阶段的监测记录，整理总结了大量的管涵附近的土压力随填土高增长的变化规律。以圆管涵为例，研究其管顶的土压力变化规律，定义相关系数为土压力实测值与土柱法（土的容重与填土高度的乘积）计算得到的土压力的比值，部分数据绘制成图E.7。



图E.7 圆管涵的土压力相对系数

H 为管顶以上的填土高度，由图E.7可以得出，一般圆管涵在管顶以上继续填土时，管顶土压力会持续增长，填土到一定高度后，管顶土压力开始下降，随着填土高度继续增大，下降趋势慢慢变小，变化开始趋于平缓。管顶填土高度相对于管涵跨径来说较大时，管顶的土压力已经小于土的容重与填土高度的乘积，产生了一定的卸载作用，对结构来说是有利的。

随着波纹钢管（板）桥涵在国内的推广应用，大跨径、高填方的工程越来越多。由试验和理论分析可知，高填方结构的土压力系数有减小的趋势，因此在原有 A_r 取值表格的基础上，对于高填方结构的情况予以进一步的折减。规范中予以注明，对于圆管涵结构，当 $H > 4D_b$ 时， A_f 可取 1.15。

C_s 为考虑回填土性质与结构尺寸的土压力折减系数，此参数考虑了土与结构的竖向压缩刚度比，实际上是考虑结构刚柔性对土压力的减小。当波纹钢结构刚度较大时，该系数较小，土压力减小幅度很小；但当波纹钢结构为柔性结构时，该系数变大，此时会使土压力的折减增大。

公式（8）和公式（9）中 $C_s = \frac{1000E_s D_v}{EA}$ 为考虑回填土性质与结构尺寸影响的土压力折减系数，无量纲，1000 是单位换算系数， D_v 单位为 m， A 的单位为 mm^2/mm 。

参考加拿大公路桥梁设计规范（Canadian Highway Bridge Design Code），结合我国的实际工程情况，回填土按表 E.6 进行分类。

表 E.6 回填土的分类

类型	粒径	描述
I	粗	级配良好的砾石或砂砾
		级配较差的砾石或砂砾
		级配良好的砂或砾质砂
		级配较差的砂或砾质砂
II	中等	含黏土的砾石或砂砾
		含黏土的砂或砾质砂
		粉砂或砾质砂

不同结构类型的回填土的弹性模量按表 E.7 线性内取插值。

表 E.7 回填土的弹性模量

类型	压实度 (%)	弹性模量 E_s (MPa)
I	85	6
	90	12
	95	24
	100	30
II	85	3
	90	6
	95	12
	100	15

对于跨度较大，矢跨比较小，或受力情况复杂的结构，应进行有限元分析确定结构的受力状况。基于广受认可的软件工具的二维、三维分析均可用于结构计算，2D 模型一般沿涵长方向对几何结构和荷载进行适当简化，耗费计算资源较少，3D 模型则可考虑精细几何结构及荷载布置，耗费计算资源相对较高，设计人员可根据问题特点、软件工具和计算能力自行选择模型维度。目前广受认可的 2D 有限元软件包括 CANDE、PLAXIS 2D、ANSYS、ABAQUS 等，3D 有限元软件包括 ANSYS、ABAQUS、DIANA 等。

波纹钢管（板）桥涵结构的有限元分析应遵循以下要点：

——二维建模方法。

- 几何模型绘制。对于波纹钢管（板）桥涵结构，建模时重点关注的是管涵的内力及变形响应，可采用等效刚度法将其简化为二维有限元模型，首先计算波纹钢板截面的转动惯量 I_{csp} 和面积 A_{csp} ，随后根据抗弯刚度、抗压刚度和材料质量三个等效原则将波纹钢板截面等效成矩形截面，进而以梁单元模型进行数值分析。

由抗弯刚度的等效得： $E_s I_{csp} = E_{equ} I_{equ}$ ；

由抗压刚度的等效得： $E_s A_{csp} = E_{equ} A_{equ}$ ；

由单位长度材料质量的等效得： $\rho_s A_{csp} = \rho_{equ} A_{equ}$ 。

对于矩形截面，有 $A_{equ} = b d_{equ}$ ， $I_{equ} = b d_{equ}^3 / 12$ ， b 取值1，故有

$$d_{equ} = \sqrt{\frac{12 I_{equ}}{A_{equ}}}, \quad E_{equ} = \frac{12 E_s I_{csp}}{d_{equ}^3} = \frac{E_s A_{csp}}{d_{equ}}, \quad \rho_{equ} = \frac{\rho_s A_{csp}}{d_{equ}}$$

土体模型几何尺寸可参考 CANDE 建议，两侧土体宽度从主体结构最宽处起算，取不小于 2.5 Dh，模型下部土体可取不小于 1.5 倍矢高。

- 材料选择。对于主体结构，设计过程暂不考虑波纹钢板/管的塑性发展，因此可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，综合考虑以上因素，本规范推荐采用 Mohr-Coulomb 模型。
- 模型部件的组合。部件的组合，主要是波纹钢板/管主体结构同土体的相互组合，大量的计算结果表明，如无特殊情况，绑定边界可满足一般设计计算要求，特殊情况下（如特殊土质、波纹钢板非常规表面处理等）需根据实际情况选择合理的接触边界形式。
- 单元选择及网格划分。土体建议采用四边形平面单元，波纹钢板/管则建议采用二次 Timoshenko 梁单元或三次 Euler-Bernoulli 梁单元。相比于三角形网格，四边形网格计算结果更为准确，但对复杂几何结构的适用性相对稍差，基于目前大多数有限元程序网格划分功能都比较强大，对复杂几何模型的处理能力也比较强大，因此建议优先采用四边形网格。
- 边界定义。模型的左、右边界宜约束水平变形，允许竖向沉降；模型底边界宜约束两个方向变形。特殊工况的需根据实际情况选用合理边界。
- 荷载定义。一般模型需考虑重力荷载、运营活载、施工荷载及压实效应，运营活载的换算建议参考加拿大规范（CHBDC）或美国规范（AASHTO）；压实效应可采用被动土压法、土条挤压法等。

以下被动土压法建模方法可作为参考方法之一：当填土超过跨径最大处但在管顶以下时，在管涵两侧跨径最大处附近对称施加均布的被动土压力，当填土超过管顶之后，在波纹钢管（板）桥涵两侧分别施加渐变的被动土压力。

——三维建模方法。

- 几何模型绘制。覆土波纹钢板/管桥涵属于土-钢组合结构，土体同结构共同受力，形成稳定的承载结构，故在几何建模时需考虑足够尺寸的土体。本规范参考 NCHRP 相关研究结果，提出对有限元模型的几何尺寸相关规定。对于波纹钢板建议沿桥宽/涵宽方向取不小于 3 个波长进行建模；对于土体模型，建议结构左右两侧各取不小于 2 倍跨径长度，结构下方取不小于 1.5 倍矢高。
- 材料选择。对于主体结构，设计过程暂不考虑波纹钢板/管的塑性发展，因此可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，综合考虑以上因素，本规范推荐采用 Mohr-Coulomb 模型。

- 模型部件的组合。部件的组合，主要是波纹钢板/管主体结构同土体的相互组合，大量的计算结果表明，如无特殊情况，绑定边界可满足一般设计计算要求，特殊情况下（如特殊土质、波纹钢板非常规表面处理等）需根据实际情况选择合理的接触边界形式。
- 单元选择及网格划分。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。相比于四面体网格，六面体网格计算结果更为准确，但对复杂几何结构的适用性相对稍差，基于目前大多数有限元程序网格划分功能都比较强大，对复杂几何模型的处理能力也比较强大，因此建议优先采用六面体网格。
- 边界定义。三维模型在沿桥长/涵长方向一般取用3~M倍波长长度进行建模，为考虑该方向的结构对称性，一般在模型正剖面、背剖面施加对称边界；模型的左、右边界宜约束水平变形，允许竖向沉降；模型底边界宜约束三个方向变形。特殊工况的需根据实际情况选用合理边界。
- 荷载定义。一般情况下，模型需考虑重力荷载、运营活载、施工荷载及压实效应，三维模型中车辆荷载参数取值可参考JTG D60相关规定。压实效应考虑方法可参照二维模型。

E.2.5 钢板屈曲验算

通过拱顶圆弧圆心并与竖向中心线形成夹角 θ_0 (rad)的两条对称直线将管壁划分为上下两部分，分别验算管壁抗压强度。 θ_0 按下式计算。该处是参考Canadian Highway Bridge Design Code。原因是上下两部分波纹钢管（板）桥涵所处的约束状态不同，上部更相似于一种弹性支撑拱结构，是需要重点关注的位置，计算屈曲荷载的方法没有更改，而下部结构约束较强，受力状态较为有利，计算屈曲荷载时适当增大。

$$\theta_0 = 1.6 + 0.2 \log \left(\frac{EI}{E_m R^3} \right) \dots \dots \dots (E.3)$$

对于钢板屈曲应力 f_b 的计算公式中，有如下几个参数的说明：

——拱顶的下挠对屈曲应力的影响。

对于矢跨比较小的结构，在荷载的作用下，拱顶会发生不可忽略的下挠，而拱顶的下挠一定程度上减弱了土对结构的支承，这必然会降低结构的极限屈曲荷载，因此，加拿大规范规定，对于矢跨比小于0.4的结构，土与结构的相对刚度比用下式计算：

$$K = \lambda \left(\frac{EI}{E_m R^3} \right)^{0.25} \dots \dots \dots (E.4)$$

——多跨结构对屈曲应力的影响。

对于多跨结构，在对其中一跨加载时，埋置结构的一侧是土，另一侧是相邻的结构，支承条件是不对称的，为了考虑其对结构不利影响，多跨结构的屈曲应力引入了一个系数。

$$F_m = \left(0.85 + \frac{0.3S}{D_h} \right) \leq 1.0 \dots \dots \dots (E.5)$$

其中， S 为多跨结构之间的间距，显然，如果间距足够大， F_m 等于1，上述不利影响也就不显著了。

——浅埋对屈曲应力的影响。

埋深较浅时，土对结构的约束作用降低，这也必然会降低结构的极限屈曲荷载。因此，在规范中采用了一个折减系数来考虑这种不利影响。

$$\rho = \left(1000 \frac{H + H'}{R_c} \right)^{0.5} \dots \dots \dots (E.6)$$

其中，H 为埋深，当埋深较小时， ρ 也较小，计算出的极限屈曲应力也越小。

E.2.6 弯矩和轴力组合效应的验算

采用深、大波形的大跨度波纹钢管（板）桥涵结构，弯矩的影响不可忽略，需要加以考虑。

E.2.7 施工过程的验算

在下列施工阶段应对施工过程的内力进行重点验算：

- 填土高度刚达到桥涵顶部时，此时结构顶部出现上拱较大，随着顶部填土高度的增加，结构应力与弯矩将发生明显变化。
- 填土高度达到最小覆土厚度时，此时如进行机械作业，会出现较大的应力与弯矩值，结构易发生屈曲破坏，特别是施工机械偏载时。
- 填土高度达到允许车辆通行的顶部最小填土高度时，此时应按通行车辆的最大轴重对结构物的内力进行验算。

E.2.8 波纹钢板螺栓连接验算

根据GB 50017的计算方法规定，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，因此应分别计算，取其最小值进行设计。

E.2.9 加强措施

随着波纹钢管（板）桥涵结构向大波形、大跨度、高埋深方向迈进，可能出现的问题有：

从传统的覆土波纹钢板设计施工来看，当该结构跨度增加或管顶以上存在大型机械施工作业时，结构稳定性显著降低，极易产生失稳现象，有时严重威胁公路交通的安全运营，因此需要增加结构整体稳定性，控制结构变形，提高壳体抗压能力，防止钢板局部屈曲。

从其自身受力特性来看，在覆土较厚或大型施工机械作用下，波纹钢板会发生较大变形。随覆土波纹钢管（板）桥涵跨径增大或覆土厚度埋深增加，其变形增大、强度不足，有必要采取加强措施，增大波纹板结构的强度与刚度。

根据目前国内外相关研究，总结起来可采取的方法有：

- 采用大波形板或增大波纹板板厚；
- 采用双层或多层波纹板加劲肋；
- 在波纹钢板上设置混凝土加劲肋，或内衬混凝土等构造性措施；
- 采用波纹钢板-混凝土组合结构。

对于大跨度的波纹钢管（板）桥涵结构，由于路基高程的限制，容易出现回填土厚度不满足规范最小覆土厚度要求的情况。设置混凝土减载板是一种结构加强措施，一方面可以降低结构上方填土厚度的要求，另一方面可以使活载扩散，使波纹钢受力更均匀。

减载板可以用于减小波纹钢管（板）桥涵弯矩，混凝土减载板的长度在每一侧至少超出桥涵基础 300 mm，不能与拱顶接触，见图 E.8。减载板应根据活荷载在宽度方向延伸。

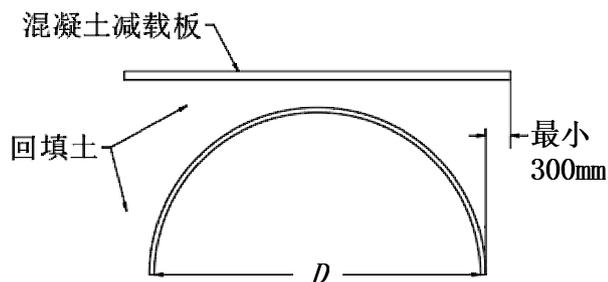
混凝土减载板深度应该满足下式：

$$t = t_b R_{AL} R_c R_f \dots\dots\dots (E.7)$$

式中：

- t ——减载板高出桥涵的最小深度，单位为毫米（mm）；
- t_b ——减载板厚度，按照表 E.8 取，单位为毫米（mm）；
- R_{AL} ——轴向荷载校正系数，按照表 E.9 取；
- R_c ——混凝土强度校正系数，按照表 E.10 取；

R_f ——考虑桥涵结构跨度影响的参数，取 1.2。



图E.8 使用混凝土减载板的桥涵

表E.8 减载板厚度 (tb)

路基板下土壤分类	标准压实度对应的最大干密度		
	100	95	90
	t_b, mm		
砾石或砂质砾石, 粗砂或砾砂, 淤泥砂或淤泥砾砂	190	200	205
黏质砂土或黏质砾砂	200	215	230

表E.9 轴向荷载校正系数 (R_{AL})

等效单轴荷载 kN	R_{AL}
80	0.750
96	0.815
120	0.914
120	0.914
142.3	1.005
160	1.031
175	1.060
177.9	1.065
200	1.107
240	1.183
250	1.202

表E.10 混凝土强度校正系数 (R_c)

混凝土抗压强度 (f'_c)	R_c
20	1.19
25	1.14
32	1.04
40	0.95

对于填土高度受限制不能满足要求的结构，可以考虑采用使用减载板以满足最小覆土高度的要求，减载板的等效土层厚度可按式计算。

$$t_{eq} = n^{1/3} \times t_c \dots\dots\dots (E.8)$$

式中：

t_{eq} ——减载板等效土层厚度，单位为毫米 (mm)；

n ——混凝土板与土层弹模之比；

t_c ——混凝土板厚，单位为毫米 (mm)。

具体设计和验算可通过试验或有限元数值模拟方法。

E. 2. 10 耐久性设计

E. 2. 10. 1 公路波纹钢管（板）桥涵设计中应在材料选择、结构设计等多方面考虑其腐蚀效应，具体可以从以下几个方面着手：

- 正确选择材料、防腐蚀方法及结构的使用年限，并处理好其与工程经济的关系。
- 结构设计应尽可能采用简单形状，核算结构的强度与刚度及腐蚀对其的影响，考虑安装过程中的损伤或防腐措施，充分考虑应力与腐蚀共同作用的疲劳极限，考虑介质的流动、冲击状态及其影响，充分考虑连接部位的腐蚀及应力损失。
- 结构制作和防腐处理过程中，应将金属表面彻底清洗除锈，并达到规定的表面处理等级；防腐处理应均匀并包含连接螺栓等紧固件，运输和安装过程中应注意不致损伤防腐层，如有损伤应及时采取补救措施。

E. 2. 10. 2 结合我国防腐技术和公路服务寿命、服务水平，参考建筑行业、公路工程其他钢构件和工业管道等的防腐蚀措施以及国内外埋地管道、排水管线的防腐蚀研究与应用成果，针对不同场合推荐下表的防腐方案。对个别地区土壤 pH 值较小或较大地区，应进行独立防腐设计。

表E. 11 公路波纹钢管（板）桥涵不同场合推荐采用的防腐方案

方案	适用场合	内壁防腐方案	外壁防腐方案
方案一	干旱~半干旱、弱腐蚀地区	镀锌层厚 86 μm +热涂沥青层	镀锌层厚 86 μm +热涂沥青层
方案二	弱腐蚀	镀锌层厚 86 μm +（聚合物）水泥砂浆+热涂沥青层	镀锌层厚 86 μm +（聚合物）水泥砂浆+热涂沥青层
方案三	中等腐蚀	镀锌层厚 86 μm +涂层系统 1+热涂沥青层	镀锌层厚 86 μm +热涂沥青层
方案四	强腐蚀	镀锌层厚 86 μm +涂层系统 2+热涂沥青层	镀锌层厚 86 μm +涂层系统 1+热涂沥青层
方案五	海港地区强腐蚀	镀锌层厚 86 μm +涂层系统 2+聚合物水泥砂浆	镀锌层厚 86 μm +涂层系统 2+热涂沥青层
方案六	山区冲刷严重地区	镀锌层厚 86 μm +（聚合物）水泥砂浆	镀锌层厚 86 μm +热涂沥青层
方案七	钢波纹管涵洞腐蚀层的更新或维护	(1) 涂层系统：底层：富锌漆（无机或有机）厚 75 μm ，面层：氧化橡胶漆、聚氨酯漆、丙烯酸树脂漆、乙烯树脂漆厚 250 μm 或 (2) 喷涂锌厚 250 μm 。	
<p>注 1：当采用热浸镀锌、静电喷涂等其他防腐方法代替镀锌时，应有可靠的技术数据和实验验证资料，其防腐性能应不小于本文件规定的热浸镀锌方法的相应要求；</p> <p>注 2：涂层系统 1 参见表 E. 12 中小于 5 年的涂层系统，涂层系统 2 参见表 E. 12 中 5~10 年的涂层系统；</p> <p>注 3：可采用水泥砂浆或聚合物水泥砂浆，根据需要设置。</p>			

表E. 12 涂层系统设计使用年限参考

设计使用年限	配套涂层系统			平均涂层厚度 μm			
				(1)	(2)		
10~20	底层		富锌漆（无机或有机）				
	面层	I	氧化橡胶漆 聚氨酯漆 丙烯酸树脂漆 乙烯树脂漆			10	75
II		280				250	
III							
IV							
5~10	底层		富锌漆（无机或有机）			40	
	同品种底面层配套		氧化橡胶漆 聚氨酯漆 乙烯树脂漆			100	
	第一类	I	橡胶树脂漆（氧化橡胶漆或氧化碳化聚乙烯漆）			180~220	
		II	乙烯树脂漆				
		III	丙烯酸树脂漆				
	第二类	I	油性漆			190~230	
		II	酚醛树脂漆				
		III	醇酸树脂漆				
		IV	环氧树脂漆				
	第三类		聚氨酯漆			220~240	
第四类		环氧树脂漆			240~260		
<5	同品种底面层配套		I	油性漆			170~190
			II	酚醛树脂漆			
			III	醇酸树脂漆			
			IV	环氧树脂漆			
			其他			200	
注 1：涂层厚度可按 GB 1764—1979 测定；							
注 2：表列 I、II、III、IV 配套涂料及平均涂层厚度（1）、（2）可任选其中一种；							
注 3：表列各种涂料，系指该涂料系列中的防锈漆和防腐漆。							

E. 2. 10. 3 采用热浸镀锌方法进行金属防腐处理时，热浸镀锌所用的锌应为 GB 470 规定的 1 号或 0 号锌。镀锌构件的锌附着量应符合要求。锌附着量采用氯化铈法测定，也可用镀层测厚仪直接测量锌层厚度，发生争议时，以氯化铈法作为仲裁试验方法。镀锌构件表面应具有均匀完整的涂层，颜色一致，表面具有实用性光滑，不允许有流挂、滴瘤或多余结块。镀件表面应无漏镀、露铁等缺陷。有螺纹的构件在热浸镀锌后，应清理螺纹或作离心分离。镀锌构件的锌层应均匀，试样经硫酸铜溶液浸蚀 5 次不变红。镀锌构件的鲜层应与基底金属结合牢固，经锤击试验镀锌层不剥离、不凸起。

当采用热浸镀铝、静电喷涂等其他防腐方法时，应有可靠的技术数据和试验验证材料，其防腐性能应不低于表 E. 13 规定的热浸镀锌方法的相应要求。

表E.13 波纹钢管（板）及连接件热浸镀锌质量要求

项 目	要 求	
单面镀锌附着量	波纹钢板件 $\geq 600 \text{ g/m}^2$ 、或镀锌层平均厚度 $\geq 84 \mu\text{m}$	试验方法和评判标准： GB/T 2518
	螺栓、螺母、钢垫圈、不等边角钢与其他金属连接件 $\geq 350 \text{ g/m}^2$ 、或镀锌层平均厚度 $\geq 50 \mu\text{m}$	
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	镀锌层应均匀完整、颜色一致，无漏镀缺陷，表面光滑，不允许有流挂、滴瘤或结块等现象	
镀锌层均匀性	镀锌层应均匀，无金属铜的红色沉积物	
镀锌层耐盐雾性	耐盐雾性试验后，基材不应出现腐蚀现象	
注：强腐蚀性：指金属表面均匀腐蚀大于 0.5 mm/年 ；中等腐蚀：指金属表面均匀腐蚀 $0.1 \text{ mm} \sim 0.5 \text{ mm/年}$ ；弱腐蚀性：指金属表面均匀腐蚀小于 0.1 mm/年 。		

E.2.10.4 防渗、防水及防腐应根据结构耐久性设计使用年限、结构所处腐蚀性环境的确定相应的技术措施，确保结构安全使用和耐久性满足设计使用年限要求。

E.2.10.5 波纹钢管法兰、管箍连接和波纹钢拼装管、拼装拱连接的高强度螺栓连接搭接缝之间的防渗密封条宽度不小于搭接重叠宽度，长度搭接缝全长，并在接缝处采用双组分聚硫密封胶进行防渗处理。

E.2.10.6 高强度螺栓的钢垫片和螺帽处，应采用双组分聚硫密封胶对螺栓处密封防渗处理。

E.2.10.7 波纹钢与土壤接触面镀锌层表面应采用沥青涂层防腐（防水）时，宜采用改性沥青或环氧沥青，沥青涂层总厚度为 $0.5 \text{ mm} \sim 1.0 \text{ mm}$ 。强腐蚀性环境宜在镀锌层表面采用厚度不小于 1.5 mm 的聚氨酯防水层，再在聚氨酯防水层喷涂一层 $0.5 \text{ mm} \sim 1.0 \text{ mm}$ 厚的改性沥青或环氧沥青。

E.2.10.8 波纹钢管结构，宜在二次防腐层表面严密裹覆以层 $2.5 \text{ mm} \sim 3.0 \text{ mm}$ 厚的环保用高密度聚乙烯土工膜隔水层；波纹钢板拱顶结构性填料中，按2%横坡满铺一层 $2.5 \text{ mm} \sim 3.0 \text{ mm}$ 厚的环保用高密度聚乙烯土工膜隔水层，将渗水隔离。土工膜接缝连接时上层布压下层布搭接宽度不小于 5 cm ，搭接连接采用耐候胶粘接。

E.2.10.9 波纹钢管、拱的外露面在常水位以上的大气腐蚀损失通常可忽略不计，对于长期处于工业气体环境或空气中盐分较高、干湿交替区或水下区等极端环境下应考虑大气腐蚀，应按JT/T 722有关规定可采用普通型和长效型涂装，普通型和长效型涂装总干膜厚度分别不小于 $210 \mu\text{m}$ 和 $240 \mu\text{m}$ 。波纹钢板拱干湿交替区或水下区涂装总干膜厚度应不小于 $450 \mu\text{m}$ 。

E.2.10.10 对于波纹钢管冲刷部位，宜采用钢筋混凝土或其他有效防冲刷涂层处理。

E.2.10.11 内衬设计一般可用在波纹钢管(板)桥涵底部一定范围内浇筑混凝土或采取其它内衬材料，可以作为特殊水质条件下的防腐措施，也可以防止水流磨蚀；当作为人行或机动车通道时还可以提供平整的路面。内衬设计也可根据实际情况采取灵活的形式。

E.3 施工

E.3.1 波纹钢板件的加工与组装

波纹钢板件加工与组装流程如下：

- 波纹钢板件连接安装的一副高强度螺栓连接副，由一个螺栓、一个螺母和两个凸凹钢垫片组成，使用组合应符合表E.14的规定。
- 螺栓现场安装时应能自由穿入螺栓孔，不得强行穿入。若螺栓不能自由穿入时，不应强行将螺栓打入螺栓孔而损伤螺纹，可采用铰刀或锉刀修整螺栓孔，不应采用气割扩孔，扩孔数量

应征得设计同意，修整后或扩孔后的孔径不应超过 1.2 倍螺栓直径，否则应更换螺栓孔符合要求的波纹钢板件重新安装。

- c) 钢垫片的凸面朝向波谷、凹面朝向波峰、平整面与螺杆两端的螺帽接触套装与螺杆上，拧紧的螺帽一律位于拱顶(背)面。高强度螺栓应在构件安装精度调整后进行调整。不得采用焊接。
- d) 螺栓施拧用的扭矩扳手使用前应进行校正，其扭矩相对误差不得大于±5 %；校正用的扭矩扳手，其扭矩相对误差不得大于±3 %；检查终拧后扭矩用的扳手，其相对误差不得大于±3 %。
- e) 施拧时，应在螺母上施加扭矩；施拧应分为初拧和终拧，初拧扭矩可取施工终拧扭矩的 70 %，终拧扭矩可按下式计算确定。

$$T_c = kP_c d \dots\dots\dots (E.9)$$

式中：

T_c ——螺栓终拧扭矩(N·m)；

k ——高强度螺栓连接副的扭矩系数平均值，取 0.110~0.150；

P_c ——高强度螺栓施工预拉力(kN)，可按表 E.14 取值；

d ——高强度螺栓公称直径(mm)。

表E.14 高强度螺栓施工预拉力

螺栓的 性能等级	螺栓公称直径 d			
	mm			
	M16	M20	M22	M24
	施工预拉力 P_c			
	kN			
8.8S	90	140	165	195
10.9S	110	170	210	250

- f) 螺栓拧紧应采用合理的施拧顺序，螺栓每拧一遍时，边拧边对拧过的螺母涂画每拧一遍相同的颜色标记。螺栓连接副的初拧、复拧、终拧应在 24 小时内完成。
- g) 螺栓连接施工紧固后应进行下列质量检查：
 - 1) 检查终拧颜色标记，同时用约 0.3 kg 重小锤敲击螺母对螺栓进行逐个检查，以防漏拧；
 - 2) 螺栓终拧扭矩的检测，按一片板宽的横桥向搭接缝（含不等边角钢螺栓连接）为一个连接节点、一道纵桥向搭接缝为一个连接节点计算一孔的螺栓连接节点数，对每个连接节点的螺栓终拧扭矩按 25 %抽查，且每个连接节点抽查不应少于 5 个螺栓；
 - 3) 检查时先在螺杆端面和螺母上画一直线，然后将螺母拧松约 60 °；再用扭矩扳手重新拧紧，使两线重合，测得此时的扭矩应在终拧扭矩计算结果的 0.9 倍~1.1 倍范围内为合格；
 - 4) 若发现有不合规定或终拧后的扭矩不合格时，应再扩大 1 倍的检查数量；若仍有不合格者，则整个节点的螺栓应重新施拧。超过扭矩要求的螺栓应更换，不得重复使用；
 - 5) 螺栓终拧后的扭矩检查宜在螺栓终拧 1 h 以后 24 h 之前完成。

E.3.2 结构性回填及上部土层施工

E.3.2.1 结构性回填范围

多孔波纹钢管（板）结构最小净距可参考表E.15。

表E.15 多孔波纹管（板）结构最小净距

回填材料	最小净距 mm		
	$D \leq 3000$ mm	$3000 \text{ mm} < D \leq 6000$ mm	$6000 \text{ mm} < D \leq 8000$ mm
级配碎石	600	800	800
粗砂、砂砾	600	800	800
混凝土	300	400	500

注1：当管径大于8000 mm时，最小净距宜通过极限状态计算或数值分析计算确定；
注2：对其他回填材料，最小净距应通过现场试验进行确定，以满足路基压实度要求为原则。

E.3.2.2 上部土层施工

JTG/T 3650第24.7.8条表24.7.8的最小填土高度要求如下：

表E.16 公路波纹管（板）桥涵顶部允许车辆通行的最小填土高度（mm）

跨径 m	车辆轴载 kN		
	100~200	201~500	501~1000
0.75	500	600	800
0.80~1.25	600	800	1200
1.30~2.00	800	1200	1600
3.00~4.00	1200	1600	2000

注1：表中数值未考虑动荷载的效应；
注2：跨径的数值不连续时，其最小填土高度的数值可内插求得。