

ICS 93.080.01

CCS P 28

DB 65

新疆维吾尔自治区地方标准

DB 65/T 4766—2024

公路波纹钢桥涵设计规范

Specification for Design of Highway Corrugated Steel Arch Bridge

2024-07-11发布

2024-09-10实施

新疆维吾尔自治区市场监督管理局 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 符号	3
4.1 材料性能	3
4.2 几何参数	3
4.3 作用、效应和抗力	4
4.4 计算系数及其他	4
5 基本规定	5
5.1 一般规定	5
5.2 桥涵布设	5
5.3 跨径（直径）及净高	6
5.4 水文、水力计算	6
6 波纹钢管（拱）结构设计	7
6.1 一般规定	7
6.2 设计计算及分析	8
6.3 高强度螺栓连接强度及扭矩	8
7 构造设计	8
7.1 一般规定	8
7.2 波纹钢管（拱）构造	9
7.3 连接构造	10
7.4 加劲肋（杆）构造	12
7.5 结构性回填范围、最小覆土厚度	14
7.6 减载板构造	16
7.7 洞口构造	17
8 基础及下部结构设计	18
8.1 一般规定	18
8.2 波纹钢板拱桥基础及下部结构	18
8.3 波纹钢管涵洞地基及垫层	18
9 构件及材料	19
9.1 一般规定	20
9.2 波纹钢管（板）	20
9.3 连接件	20
9.4 防腐材料	21
9.5 防渗密封材料	21

9.6 结构性回填材料..... 22

9.7 其他材料..... 22

10 防腐及防渗设计..... 22

10.1 一般规定..... 22

10.2 镀锌防腐..... 23

10.3 喷涂防腐..... 23

10.4 隔层防腐..... 23

10.5 管（拱）内壁防磨蚀..... 24

10.6 接缝连接防渗..... 24

11 附属工程设计..... 25

附录 A（规范性） 波纹钢管（拱）结构设计计算..... 26

附录 B（规范性） 波纹钢管（拱）结构参数与覆土厚度..... 34

附录 C（规范性） 结构性回填最小覆土厚度及减载板计算..... 36

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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由新疆交通建设集团股份有限公司提出。

本文件由新疆维吾尔自治区交通运输厅归口并组织实施。

本文件起草单位：新疆交通建设集团股份有限公司、新疆维吾尔自治区交通运输综合行政执法局工程质量监督执法支队、新疆交建通达新材料科技有限公司、新疆交建公路规划勘察设计有限公司、新疆交建物流有限公司、新疆华天工程建设股份有限公司、新疆交通科学研究院有限责任公司。

本文件主要起草人：王成、马莲霞、刘志国、王永学、伍松、柳人铭、高源、雷国斌、马建生、杨秋菊、马振斌、张铖、贾华宽、尹强、刘月涵、李宏亮、陈芳、陈伟、马梦宇、邢磊、何蓉、王豫仲、张银博、骆丽珍、甘彦文、地里夏提·奥斯曼、杨亮、刘永、杨心皓、龙凤茹、努尔麦麦提·阿卜力米提。

本文件实施应用中的疑问，请咨询新疆交通建设集团股份有限公司。

对本文件的修改意见和建议，请反馈至新疆交通建设集团股份有限公司（乌鲁木齐市乌昌路辅道840号）、新疆交建通达新材料科技有限公司（乌鲁木齐市经济技术开发区融合南路688号）、新疆维吾尔自治区交通运输厅（乌鲁木齐市黄河路路301号）、新疆维吾尔自治区市场监督管理局（乌鲁木齐市新华南路167号）。

新疆交通建设集团股份有限公司 联系电话：0991-6272936；传真0991-：3713944；邮编：830016

新疆交建通达新材料科技有限公司 联系电话：18196109555；传真：0994-2590066；邮编：830026

新疆维吾尔自治区交通运输厅 联系电话：0991-5281305；传真：0991-5281301；邮编：830000

新疆维吾尔自治区市场监督管理局 联系电话：0991-2818750；传真：0991-2311250；邮编：830000

公路波纹钢桥涵设计规范

1 范围

本文件规定了公路波纹钢桥涵工程设计的术语和定义、符号、基本规定、波纹钢管（拱）结构设计、构造设计、基础及下部结构设计、构件及材料、防腐及防渗设计和附属工程设计等技术内容。

本文件适用于公路波纹钢小桥涵工程的设计。市政道路、应急抢险保通等其他工程可参照本文件进行设计。

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 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 1499.2 钢筋混凝土用钢 第2部分：热轧带肋钢筋
- GB/T 1591 低合金高强度结构钢
- GB/T 2518 连续热镀锌和锌合金镀层钢板及钢带
- GB/T 6725 冷弯型钢通用技术要求
- GB/T 8162 结构用无缝钢管
- GB/T 14683 硅酮和改性硅酮建筑密封胶
- GB/T 15180 重交通道路石油沥青
- GB/T 19250 聚氨酯防水涂料
- GB/T 26528 防水用弹性体(SBS)改性沥青
- GB/T 27806 环氧沥青防腐涂料
- GB/T 34567 冷弯波纹钢管
- GB 50661 钢结构焊接规范
- JC/T 483 聚硫建筑密封胶
- JGJ 82 钢结构高强度螺栓连接技术规程
- JT/T 536 路桥用塑性体改性沥青防水卷材
- JT/T 722 公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件
- JT/T 971 沥青加铺层用聚合物改性沥青抗裂贴
- JTG 2120 公路工程结构可靠性设计统一标准
- JTG/T 2231-01 公路桥梁抗震设计规范
- 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 公路桥涵施工技术规范

JTG B01 公路工程技术标准
 JTG B02 公路工程抗震规范
 JTG C30 公路工程水文勘察设计规范
 JTG D30 公路路基设计规范
 JTG/T D32 公路土工合成材料应用技术规范
 JTG D60 公路桥涵设计通用规范
 JTG/T D81 公路交通安全设施设计细则

3 术语和定义

GB/T 34567界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

波纹钢 corrugated steel

采用符合规定厚度和性能的热轧钢板或钢带为板材，按照规定尺寸和波形参数冷弯加工成型、增加其结构刚度的圆弧波纹状的管形、板形构件材料。

3.2

波纹钢桥涵 corrugated steel Bridges and culverts

采用螺旋波纹钢管、环形波纹钢管或波纹钢板拼装连接管（拱）形成主体结构之后，其周边采用结构性回填材料回填压实，以保证充分发挥土-钢结合相互作用共同承担荷载的结构物。

3.3

拼装波纹钢管（拱） assembled corrugated steel pipe (arch)

由变曲面弧形波纹钢板通过高强度螺栓连接拼装不同截面的波纹钢管（拱）。

3.4

壁厚 plate thickness

波纹钢管（板）的厚度（不含镀锌层等防腐层）。

3.5

加劲肋板 stiffened rib plate

用于结构加强作用安装于波纹钢管顶部或波纹钢板拱肩及拱顶部位的波纹钢板。

3.6

螺栓连接副 bolt connection pair

用于波纹钢管（拱）连接的高强度螺栓标准套装组合件，一套螺栓连接副由一个螺栓、一个螺母及两个钢垫片组成。

3.7

计算矢高 calculate rise of arch

圆弧拱形结构为拱顶波纹中性轴（波峰与波谷中间）处拱半径的2倍、箱形拱结构为拱顶波纹中性轴处至拱脚的竖向距离，波纹钢管圆管形结构为波纹中性轴处管的直径、管拱形结构为管底波纹中性轴处至管顶波纹中性轴处高度的0.5倍。

3.8

直径或跨径 diameter or span

波纹钢管（拱）内侧水平方向波峰之间的最大净距离。

3.9

计算直径或跨径 calculated diameter or span

波纹钢管（拱）内水平方向的波纹中性轴（波峰与波谷之间的1/2处）之间的最大距离。

3.10

减载板 load shedding plate

布置于波纹钢管（拱）顶结构性回填层中的钢筋混凝土板。

3.11

结构性回填 structural backfill

对发挥回填土体—波纹钢管（拱）相互作用的回填区域进行的土体回填。

3.12

最小覆土厚度 minimum depth of soil cover

能够保证波纹钢管（拱）结构稳定性和发挥土—钢结合相互作用的管（拱）顶以上的填筑层厚度（垂直距离）最小值。

4 符号

下列符号适用于本文件。

4.1 材料性能

E ——波纹钢板材料的弹性模量，单位为兆帕（MPa）；

E_m ——结构性回填土体弹性模量的修正值；

E_s ——结构性回填土体材料的弹性模量，单位为兆帕（MPa）；

f_b ——波纹钢板极限抗力（临界屈曲应力），单位为兆帕（MPa）；

f_f ——波纹钢板极限抗拉强度，单位为兆帕（MPa）；

f_y ——波纹钢板屈服强度，单位为兆帕（MPa）；

W ——波纹钢管（拱）上填料每延米的重力，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）；

ϕ_t ——波纹钢板材料抗力系数。

4.2 几何参数

A ——波纹钢板单位长度横截面面积，单位为平方毫米每毫米（mm²/mm）；

D_h ——波纹钢管（拱）的计算直径或跨径，单位为米（m）；

D_v ——波纹钢管（拱）的计算矢高，单位为米（m）；

H ——波纹钢管（拱）顶部包括路面在内的填土总高度，单位为米（m）；

H' ——波纹钢管（拱）顶至起拱线垂直距离的一半，单位为米（m）；

H_c ——施工过程中波纹钢管（拱）顶以上的填土厚度，单位为米（m）；

H_{min} ——波纹钢管（拱）顶结构性回填最小覆土厚度，单位为米（m）；

I ——波纹钢板截面的惯性矩，单位为毫米四次方每毫米（mm⁴/mm）；

P ——波纹钢管（板）的波距，单位为毫米（mm）；

R ——波纹钢管（拱）结构的曲率半径，单位为毫米（mm）；

R_c ——波纹钢管（拱）拱顶处的曲率半径，单位为毫米（mm）；

R_e ——等效曲率半径，单位为毫米（mm）；

S ——双孔或多孔结构之间的最小间距，单位为米（m）；

t ——波纹钢管（板）的壁厚，单位为毫米（mm）；

t_b ——减载板最小厚度，单位为毫米（mm）；

r ——波纹钢板材料回转半径，单位为毫米（mm）；

- r_h ——管拱形拱脚处半径，单位为米（m）；
 r_t ——管拱形顶部半径，单位为米（m）；
 t, W ——沿车轮长度和宽度方向扩散后尺寸，单位为米（m）。

4.3 作用、效应和抗力

- A_C ——施工过程中的车辆（机械）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_t ——跨径长度范围内布置的设计车辆荷载总轴重，单位为千牛（kN）；
 E_d ——最不利设计作用效应，单位为千牛每米（kN/m）；
 E_V ——竖向地震作用，单位为千牛每米（kN/m）；
 L_H ——施工过程中作用于结构上的施工机械（汽车）荷载的等效荷载值，单位为千牛每米（kN/m）；
 M ——波纹钢板截面所受弯矩，单位为千牛米每米（kN·m/m）；
 M_B ——由波纹钢管（拱）结构周边土体的支撑作用，使波纹钢（管）拱结构跨中截面减小的弯矩，单位为千牛米每米（kN·m/m）；
 M_C ——施工机械荷载引起的波纹钢管（拱）结构跨中截面的弯矩，单位为千牛米每米（kN·m/m）；
 M_D ——波纹钢管（拱）顶由恒载产生的弯矩之和，单位为千牛米每米（kN·m/m）；
 M_f ——波纹钢管（拱）运营阶段结构截面所受弯矩，单位为千牛米每米（kN·m/m）；
 M_L ——波纹钢管（拱）顶由汽车荷载产生的弯矩之和，单位为千牛米每米（kN·m/m）；
 M_P ——波纹钢板截面可承受的塑性弯矩，单位为千牛米每米（kN·m/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（kN·m/m）；
 M_1 ——波纹钢管（拱）结构在土体均布力作用下跨中截面的弯矩，单位为千牛米每米（kN·m/m）；
 P_{Pf} ——波纹钢板截面考虑塑性抵抗系数的设计（极限）压力，单位为千牛每米（kN/m）；
 R_d ——结构的承载力设计值；
 S_d ——荷载组合的效应设计值；
 S_E ——荷载和地震作用组合的效应设计值；
 T_C ——汽车荷载（考虑施工机械）引起的波纹钢管（拱）压力，单位为千牛每米（kN/m）；
 T_D ——恒载（土地重力）引起的波纹钢管（拱）压力，单位为千牛每米（kN/m）；
 T_f ——承载能力极限状态组合下恒载和活载引起波纹钢板结构轴向内力，单位为千牛每米（kN/m）；
 T_L ——活载引起的波纹钢管（拱）压力或推力，单位为千牛每米（kN/m）；
 p ——波纹钢板截面所受轴向压力，单位为千牛每米（kN/m）；
 p_h ——荷载在管拱形波纹钢结构拱脚处产生的压力，单位为千帕（kPa）；
 p_u ——管拱形波纹钢结构拱脚极限承载力，单位为千帕（kPa）；
 σ_L ——汽车荷载扩散到波纹钢管（拱）顶的压力，单位为千帕（kPa）。

4.4 计算系数及其他

- A_f ——土压力增大系数；
 C_S ——回填土性质与结构尺寸的土压力折减系数；
 F_m ——多孔结构屈曲应力折减系数；
 H_e ——与 $D_h/2$ 两者的较小值；
 K ——波纹钢管（拱）结构与周围土体相对弯曲刚度系数；
 k_{M1} 、 k_{M2} 、 k_{M3} ——计算弯矩的参数；
 k_4 ——等效线性荷载参数；
 m_f ——多车道折减系数；

N_f ——波纹钢柔度系数；
 R_{AL} ——轴向荷载修正系数；
 R_B ——计算弯矩的参数；
 R_L ——计算弯矩的参数；
 R_f ——波纹钢管（拱）直径或跨径影响系数；
 R_0 ——竖向地震作用与水平地震作用比值函数；
 R_U ——无量纲参数；
 X_C ——混凝土强度修正系数
 α_D ——恒载分项系数；
 α_E ——地震作用分项系数；
 α_L ——活载（汽车荷载及动力作用）分项系数；
 γ_E ——地震作用分项系数；
 γ_G ——永久作用分项系数；
 γ_Q ——可变作用分项系数；
 γ_0 ——结构重要性系数；
 γ_{RE} ——承载力抗震调整系数；
 ϕ_h ——波纹钢板材抵抗塑性铰的抗力系数；
 δ ——地震动水平加速度峰值；
 λ ——计算 K 值的系数；
 μ ——车辆冲击扩大系数；
 ρ ——屈曲折减系数。

5 基本规定

5.1 一般规定

- 5.1.1 设计应综合考虑公路等级、重要性程度、地形、地质、荷载、洞口（进出口）排水或通行条件、路基填高、结构性回填最小覆土厚度、材料运输、施工条件、养护等特征条件，合理布设，并遵循“安全、耐久、环保、经济、适用”的原则。
- 5.1.2 设计洪水频率、设计荷载、设计安全等级和结构重要性系数等，应符合 JTG D60、JTG/T 3365-02 和 JTG 2120 的规定。
- 5.1.3 抗震设计应符合 JTG B02 和 JTG/T 2231-01 的规定。
- 5.1.4 高速及一级公路的波纹钢桥涵主体结构设计使用年限不应低于 50 年，其余等级公路不应低于 30 年。
- 5.1.5 应针对波纹钢桥涵路段的腐蚀性环境和排水环境，进行防腐和防冲刷（防磨蚀）设计。

5.2 桥涵布设

- 5.2.1 波纹钢桥涵适用条件广泛，一般地质路段均可设置，下列条件宜优先设置：
- 设计基本地震动峰值加速度大于或等于 0.2 g 的地区；
 - 地基承载力相对较低的路段；
 - 地形条件复杂路段，涵洞需分岔、曲线布设时；
 - 砂、石等原材料缺乏地区；

- e) 多年冻土路段;
 - f) 交通应急抢险或保通等工程。
- 5.2.2 水文调查与勘察、设计洪水分析与计算、水文计算等应符合 JTJG C30 的规定。
- 5.2.3 桥涵布设除应满足路基排水要求外,还应与水利规划及农田排灌设施相配合
- 5.2.4 根据排水能力和管(拱)顶最小覆土厚度,可并列双孔或多孔布设。
- 5.2.5 涵洞分岔布设时,可通过弯头、三通等构造连接成整体的波纹钢管结构。
- 5.2.6 桥涵中线与道路中线宜正交布设,斜交时的波纹钢板拱桥斜交角不小于 60°、管涵斜交角不小于 45°。
- 5.2.7 桥涵洞口(进出口)处的构造设置型式和尺寸,应使桥涵具有相应过水能力和路堤的稳定。
- 5.2.8 桥涵的其他布设要求及勘测等,应符合 JTJG D60 和 JTJG/T 3365-02 的规定。

5.3 跨径(直径)及净高

- 5.3.1 波纹钢拱桥跨径应符合下列规定:
- a) 标准跨径采用 5.0 m、6.0 m、8.0 m、10.0 m、13.0 m、16.0 m;
 - b) 拱下净空符合 JTJG B01 规定的建筑界限和 JTJG D60 的规定。
- 5.3.2 波纹钢涵洞直径应符合下列规定:
- a) 标准直径采用 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、9.0 m、10.0 m;
 - b) 采用无压力式涵洞设计,直径根据设计洪水或灌溉流量、河沟断面形态、地质和洞口(进出口)沟床加固形式等条件和 JTJG/T 3365-02 的有关勘测、水文和水力等计算确定,最小直径、涵洞内顶点至最高流水面净高见表 1。

表 1 波纹钢涵洞不同长度的最小直径和流水面净高

波纹钢管涵洞长度 L/m	最小直径或跨径 D ， 不小于 $/m$	流水面以上净高
$L<15.0$	1.0（排洪涵 1.5）	直径或跨径（ D ） ≤ 3.0 m 时，涵洞内顶点至最高流水面净高 $\geq D/4$ ； 直径或跨径（ D ） > 3.0 m时，涵洞内顶点至最高流水面净高 >0.75 m
$15.0\leq L<30.0$	1.5	
$30.0\leq L<60.0$	2.0	
$L\geq 60.0$	2.5	
注：高寒或高海拔地区有涎流冰影响的波纹钢管涵洞，应视涎流冰最大聚集量增加净高或内径。		

5.4 水文、水力计算

- 5.4.1 波纹钢桥涵的设计洪水频率和水文、水力计算,应符合 JTJG D60 和 JTJG/T 3365-02 的规定。
- 5.4.2 波纹钢管涵洞内下部无防磨蚀铺装层的水力计算时,糙率可按表 2 取值。

表 2 波纹钢涵洞内无防磨蚀铺装时的糙率推荐值

波纹钢管波形(波距×波深或波高) $p \times d/mm$	糙率 n_h
68×13	0.015~0.022
75×25	0.022~0.027
200×55	0.028~0.039
400×150	0.032~0.048
注:波纹钢管直径较小者取低值、直径较大者取高值。	

6 波纹钢管（拱）结构设计

6.1 一般规定

- 6.1.1 波纹钢管（拱）主体结构，采用以概率理论为基础的极限状态设计法，以可靠度指标度量结构构件的可靠度，按分项系数的设计表达式进行设计。
- 6.1.2 计算承载能力极限状态下的内力，作用效应组合采用作用效应基本组合和作用效应偶然组合。各组合考虑的作用及分项系数、常用材料容重（比重）参考 JTG D60 的规定。
- 6.1.3 当结构按承载力极限状态设计时，持久设计状况、短暂设计状况应满足公式（1）要求。

$$\gamma_0 S_d \leq R_d \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- γ_0 ——结构重要性系数，对应于设计安全等级一级、二级和三级分别取1.1、1.0和0.9；
- S_d ——不考虑地震作用时，荷载组合的效应设计值；
- R_d ——结构的承载力设计值。

- 6.1.4 当抗震设防烈度为 7 度及以上时，应进行竖向地震作用的组合效应计算，地震作用设计状况应满足公式（2）的要求。

$$S_E \leq R_d / \gamma_{RE} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- S_E ——考虑多遇地震作用时，荷载和地震作用组合的效应设计值；
- R_d ——结构的承载力设计值；
- γ_{RE} ——承载力抗震调整系数，基础取0.9、波纹钢管（拱）结构取0.85。

- 6.1.5 结构按正常使用极限状态设计时，波纹钢管（拱）上部回填完成后管（拱）变形、标准荷载下变形等控制值，应符合表 3 的规定。

表 3 波纹钢管（拱）变形控制值

波纹钢管（拱） 直径或跨径/m	变形控制值，不大于/mm		
	安装及回填施工过程中 允许最大变形值	施工完成后的恒载、 永久残余变形量	运营阶段 允许最大变形量
0.4~0.75	22	10	0.01
1.0~1.25	37	12	0.02
1.5~2.0	40	15	0.03
3.0~4.0	80	18	0.07
5.0~6.0	95	21	0.09
7.0	110	25	0.12
8.0	120	29	0.13
9.0	135	32	0.15
10.0	150	36	0.17
13.0	195	46	0.22
16.0	240	54	0.26

波纹钢管（拱） 直径或跨径/m	变形控制值，不大于/mm		
	安装及回填施工过程中 允许最大变形值	施工完成后的恒载、 永久残余变形量	运营阶段 允许最大变形量
注1：施工完成后引起的恒载永久残余变形量和汽车荷载最大变形值，均为相对于波纹钢管（拱）设计位置。 注2：表中变形值（变形量）为未设减载板及加劲肋板或加劲杆件时的波纹钢管（拱）变形控制值。			

6.2 设计计算及分析

6.2.1 波纹钢管（拱）主体结构的作用设计应符合以下规定：

- 恒载作用，作用在波纹钢管（拱）结构上每延米填料的重力；
- 汽车荷载，荷载扩散到波纹钢管（拱）结构上的压力和冲击荷载；二级及以上等级公路采用公路-I级汽车荷载、三级及以下等级公路采用公路-II级汽车荷载；重交通公路采用实际最大汽车荷载；施工过程中按施工采用的机械设备（车辆）重力等确定荷载；
- 地震作用，抗震设防烈度大于或等于Ⅶ度的地区进行抗震设计（竖向地震作用）。

6.2.2 波纹钢管（拱）主体结构设计计算及分析应符合以下规定：

- 波纹钢管（拱）结构的内力，分别为不考虑和考虑地震作用时的波纹钢管（拱）的轴向压应力；
- 极限抗力（屈曲），保证波纹钢管（拱）结构稳定性的波纹钢临界屈曲应力；
- 管拱形波纹钢管拱脚处压力的极限状态，为荷载在管拱脚处产生的压力；
- 施工过程结构验算，波纹钢管（拱）在施工过程中的截面弯矩和轴向压力的内力组合；
- 运营阶段结构验算，施工完成后运营阶段的波纹钢管（拱）结构承载能力极限状态下的弯矩和轴向压力的组合效应校核；
- 波纹钢圆弧拱桥和波纹钢管涵采用极限状态法设计计算见附录A；
- 直径大于或等于8.0m的波纹钢管涵、波纹钢箱形拱桥和跨径10.0m~16.0m的圆弧拱桥进行有限元分析。

6.3 高强度螺栓连接强度及扭矩

6.3.1 波纹钢板拼装管（拱）宜采用高强度螺栓承压型连接；当波纹钢板镀锌层表面摩擦力和接缝连接叠合的波纹板在波峰波谷处缝隙能满足摩擦型连接要求时，可采用摩擦型连接。

6.3.2 高强度螺栓承压型连接的抗剪强度主要由螺栓杆受剪和波纹钢板螺栓孔壁承压两种破坏模式控制，应分别对受剪承载力设计值、承压承载力设计值和受拉承载力进行计算，并满足同时承受剪力和杆轴方向拉力的承载力。

6.3.3 高强度螺栓摩擦型连接，应分别计算在受剪连接中每个高强度螺栓的承载力设计值、在螺栓杆轴方向受拉的连接中每个高强度螺栓的承载力；当摩擦型连接同时承受摩擦面间的剪力和螺栓杆轴方向的外拉力时，需进行验证计算。

6.3.4 高强度螺栓承压型连接或摩擦型连接接缝承载力（强度）计算，应符合并满足JGJ 82的规定。

6.3.5 高强度螺栓终拧扭矩，根据JGJ 82的规定计算确定。

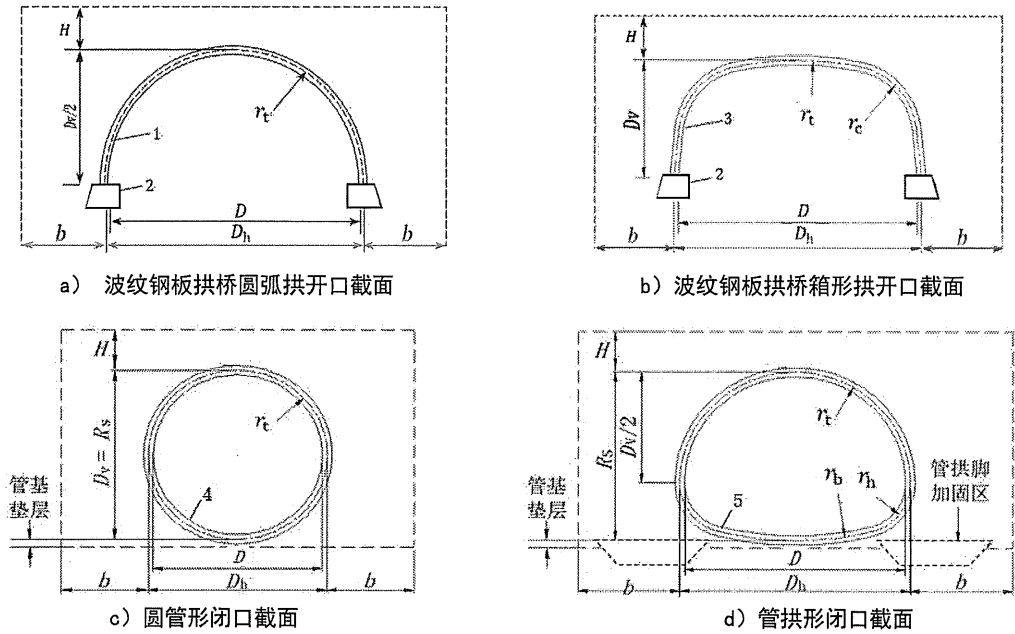
7 构造设计

7.1 一般规定

7.1.1 波纹钢板拱桥宜采用圆弧拱（见图1分图a）和箱形拱（见图1分图b）两种开口截面，波纹钢管涵洞宜采用圆管形（见图1分图c）和管拱形（见图1分图d）两种闭口截面。

7.1.2 波纹钢板圆弧拱适宜拱顶以上填土较高的路段、箱形拱适宜拱顶以上填土较低的路段。

7.1.3 当波纹钢管涵洞的直径（空间）受限或不能满足排洪等能力时，宜采用波纹钢板圆弧拱或箱形拱开口截面。



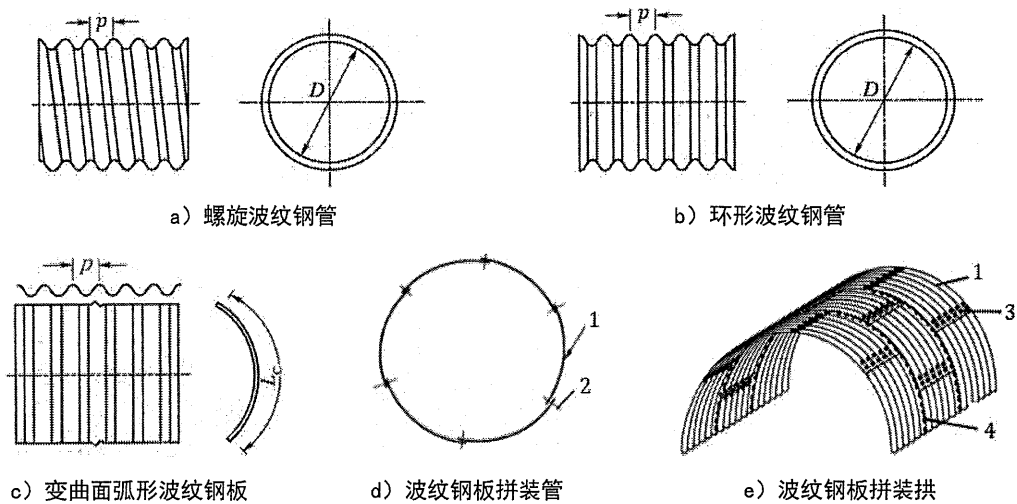
标引符号说明：

- 1 —— 波纹钢板拱（圆弧拱）；
- 2 —— 钢筋混凝土拱座；
- 3 —— 波纹钢板拱（箱形拱）；
- 4 —— 波纹钢管（圆管形）；
- 5 —— 波纹钢管（管拱形）；
- D —— 波纹钢管（拱）直径或跨径；
- H —— 波纹钢管（拱）顶以上填土总厚度（含路面结构层厚度）；
- D_h —— 计算跨径（波纹中性轴处计算）；
- D_v —— 计算矢高（波纹中性轴处计算）；
- b —— 结构性回填最小宽度范围区；
- R_s —— 计算矢高（波纹中性轴处计算）；
- r_b —— 管拱形底部半径；
- r_c —— 箱形拱拱肩半径；
- r_t —— 波纹钢管（拱）顶部半径；
- r_h —— 管拱形拱脚处半径。

图 1 波纹钢桥涵截面形式示意图

7.2 波纹钢管（拱）构造

7.2.1 分节整装螺旋波纹钢管见图 2 分图 a)、分节整装环形波纹钢管见图 2 分图 b) 的分节段长度根据运输和施工现场安装条件等确定；拼装管（拱）的波纹钢板见图 2 分图 c)、波纹钢板拼装管见图 2 分图 d)、波纹钢板拼装拱见图 2 分图 e)。



标引符号说明：

1 —— 波纹钢板；

2 —— 拼装波纹钢管（拱）接缝连接螺栓；

3 —— 拼装波纹钢管（拱）连接纵缝；

4 —— 拼装波纹钢管（拱）连接环缝；

D —— 波纹钢管直径或跨径；

L_c —— 波纹钢板弧线长；

p —— 波纹钢管（板）波纹的波距。

图 2 波纹钢管和波纹钢板拼装管（拱）构造示意图

- 7.2.2 运输条件受限、直径大于 2.5 m 或 3.0 m 的波纹钢管，宜采用波纹钢板拼装管。
- 7.2.3 波纹钢板标准长度和宽度宜参考 GB/T 34567 的规定，当拼装管（拱）或加劲肋板的局部长度和宽度需减小时，经计算确定。
- 7.2.4 波纹钢管（拱）类别及适宜桥涵类型见表 4，波纹钢管（拱）构造参数见附录 B。

表 4 波纹钢管（拱）类别及适宜桥涵类型

波纹钢类别	波纹钢波形 $p \times d$ （波距 $\times$ 波高）/mm	直径或跨径 D /m	壁厚范围 t /mm	适宜桥涵类型
螺旋波纹钢管（圆管形）	68 $\times$ 13	0.5~1.5	1.3~3.0	涵洞 （闭口截面结构物）
	75 $\times$ 25	1.0~2.0	1.6~3.2	
环形波纹钢管（圆管形）	200 $\times$ 55	2.0~3.0	3.5~4.5	
波纹钢板拼装管 （圆管形或管拱形）	200 $\times$ 55	2.5~6.0	3.0~5.0	
	400 $\times$ 150	6.0~10.0	4.5~7.0	小桥 （开口截面结构物）
波纹钢板拼装拱 （圆弧拱或箱形拱）	400 $\times$ 150	5.0~13.0	4.5~8.5	
	500 $\times$ 237	10.0~16.0	7.0~10.0	

注：不同标准直径或跨径的波纹钢管（拱）具体壁厚见附录B。

7.3 连接构造

7.3.1 螺旋波纹钢管的管身咬口连接构造及咬合力和管箍连接件构造、环形波纹钢管法兰连接构造，应符合 GB/T 34567 的规定。

- 7.3.2 波纹钢板拼装管（拱）连接构造应符合下列规定：
- a) 拼装波纹钢管（拱）的纵缝采用错缝（T形缝）连接、环缝采用通缝（见图2分图e）连接；
 - b) 波纹钢板纵缝、环缝连接螺栓孔采用标准圆孔，与螺栓规格（公称直径）配套的孔径见表5，孔位、孔边距和孔间距等符合GB/T 34567的规定，纵缝、环缝均不允许焊接连接；
 - c) 波纹钢板拼装管（拱）纵缝连接的螺栓规格及数量见表6；环缝采用单排螺栓连接，高强度螺栓连接副（规格）与纵缝连接相同。

表5 螺栓规格配套的螺栓孔径

螺栓规格	螺栓孔（标准圆孔）直径，不大于/mm	
	承压型连接	摩擦型连接
M16	18.00	17.93
M20	22.00	22.52
M24	26.00	26.52
M27	29.00	30.89

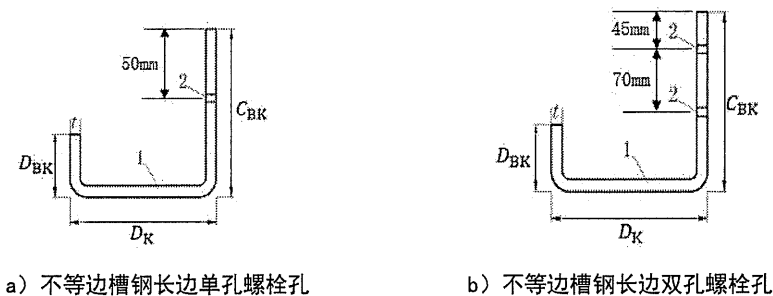
表6 波纹钢板拼装管（拱）纵缝连接高强度螺栓规格及数量

结构类型	波纹钢波形 $p \times d$ （波距 $\times$ 波高）/mm	直径（跨径） D/m	螺栓规格 （公称直径）		高强度螺栓数量，不少于/个	
					波峰处	波谷处
波纹钢板拼装管 涵洞	200 $\times$ 55	$2.5 \leq D \leq 5.0$	任选 一种	M16	2	2
				M20	1	2
	400 $\times$ 150	$5.0 < D \leq 8.0$	M16		3	3
		$8.0 < D \leq 10.0$	M20		3	3
波纹钢板拼装拱桥	400 $\times$ 150	$5.0 \leq D \leq 13.0$	M20		3	3
	500 $\times$ 237	$13.0 < D \leq 16.0$	M24或M27		4	4

- 7.3.3 波纹钢板拱桥的拱脚与拱座连接构造应符合下列规定：
- a) 波纹钢板拱脚与钢筋混凝土拱座采用铰接连接，拱座上预埋不等边槽钢的截面尺寸见表7；
 - b) 跨径小于10m时，槽钢长边采用单排螺栓孔布置（见图3分图a）；跨径大于或等于10m时，槽钢长边采用双排螺栓孔布置（见图3分图b）；
 - c) 槽钢长边上的螺栓孔横向（水平）间距为波纹钢板的波距，螺栓孔位对应于波纹钢板拱脚处外
侧波峰部位（波峰与槽钢长边螺栓连接），且波纹钢板拱脚底端头座实于槽钢底面；
 - d) 槽钢底面与波纹钢板拱脚处切线垂直（见图4），槽钢底面与拱座水平面的夹角 α （见图4分图b）根据波纹钢板拱脚的角度计算调整布置；
 - e) 槽钢底面中轴线上栓接或焊接预埋钢筋，并与钢筋混凝土拱座中钢筋连接一体（见图4）；预埋钢筋直径不小于20mm、直线段长度不小于拱座高度的2/3、间距不大于400mm。

表7 不等边槽钢横截面尺寸

波纹钢板波形 $p \times d$ （波距 $\times$ 波高）/mm	横截面尺寸，不小于/mm			
	壁厚（边厚） t	底宽 D_K	长边宽 C_{BK}	短边宽 D_{BK}
400 $\times$ 150	8	220	200	35
500 $\times$ 237	10	300	220	50



标引序号说明：

1 ——不等边槽钢；

2 ——不等边槽钢长边螺栓孔；

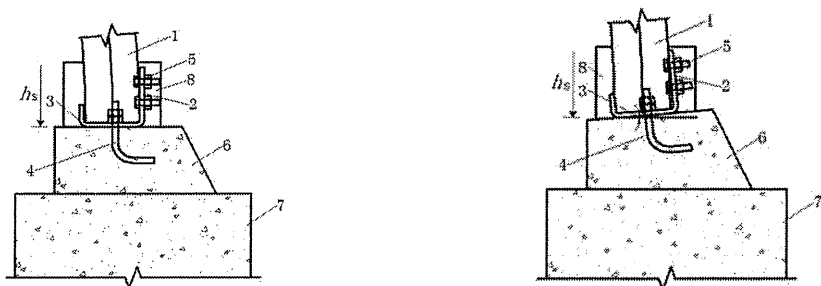
C_{BK} ——不等边槽钢长边宽；

D_{BK} ——不等边槽钢短边宽；

D_K ——不等边槽钢底宽；

t ——不等边槽钢壁厚（边厚）。

图 3 不等边槽钢构造截面示意图



a) 波纹钢板拱脚与槽钢和拱座垂直连接

b) 波纹钢板拱脚垂直于槽钢与拱座不垂直连接

标引序号说明：

1 ——波纹钢板拱脚；

2 ——不等边槽钢；

3 ——不等边槽钢底面与拱座水平面的夹角 (α)；

4 ——连接不等边槽钢底部的预埋钢筋；

5 ——波纹钢板拱脚与不等边槽钢连接的高强度螺栓；

6 ——钢筋混凝土拱座；

7 ——混凝土基础；

8 ——后浇混凝土；

h_s ——矢高。

图 4 波纹钢板拱脚钢铰接连接构造示意图

7.4 加劲肋（杆）构造

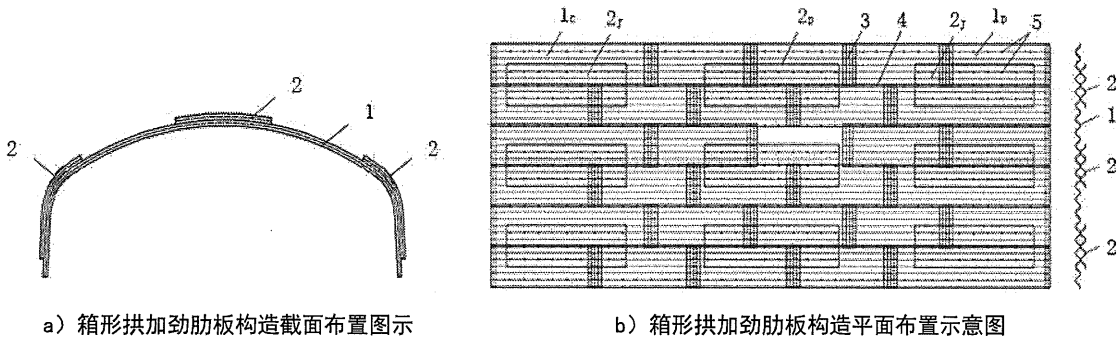
7.4.1 抗震设防烈度大于或等于Ⅶ度的地区、直径或跨径大于或等于 8.0 m 的波纹钢板拼装管（拱）结构，宜设置波纹钢板加劲肋板。

7.4.2 加劲肋板的波形、壁厚、宽度、弧形曲面及半径、镀锌层厚度等，应与波纹钢管（拱）主体结

构的波纹钢板相同。

7.4.3 加劲肋板设置与波纹钢管（拱）背面，其构造应符合下列规定：

- a) 圆弧拱结构波纹钢加劲肋板截面布置及构造参照波纹钢板拼装管的加劲肋板；
- b) 箱形拱结构，在拱顶和拱肩处设置环向波纹钢加劲肋板，纵向每间隔 3 个波距设置（见图 5）。拱肩处的加劲肋板底端距拱座顶面为 400 mm~600 mm；拱肩处加劲肋板长度与拱脚处的短基板相同，拱顶处加劲肋板长度与拱脚处的长基板相同；
- c) 加劲肋板与波纹钢管（拱）主体结构波峰对波峰连接与螺栓孔布置见图 5 分图 b），并利用主体结构接缝连接螺栓一体化连接，形成组合截面。

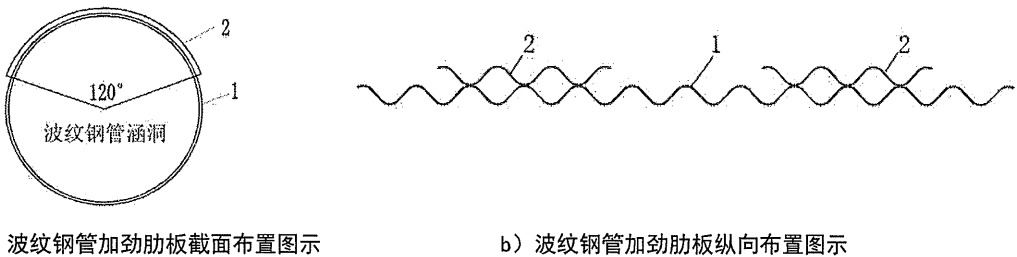


标引序号说明：

- 1——波纹钢板拱主体结构；
- 1_c——波纹钢板拱脚长基板；
- 1_b——波纹钢板拱脚短基板；
- 2——波纹钢加劲肋板；
- 2_b——拱顶处波纹钢加劲肋板；
- 2_j——拱肩处波纹钢加劲肋板；
- 3——波纹钢板拼装拱螺栓连接纵缝；
- 4——波纹钢板拼装拱螺栓连接环缝；
- 5——波纹钢板拱波峰、波谷处连接螺栓。

图 5 波纹钢板箱形拱加劲肋板构造示意图

7.4.4 波纹钢板拼装管结构顶面加劲肋板，设置于波纹钢管顶纵轴线上，截面长度为圆心角 120° 扇形弧长，呈扇形组合截面，见图 6 分图 a）；沿管顶纵轴线每间隔 3 个波距设置，见图 6 分图 b）。



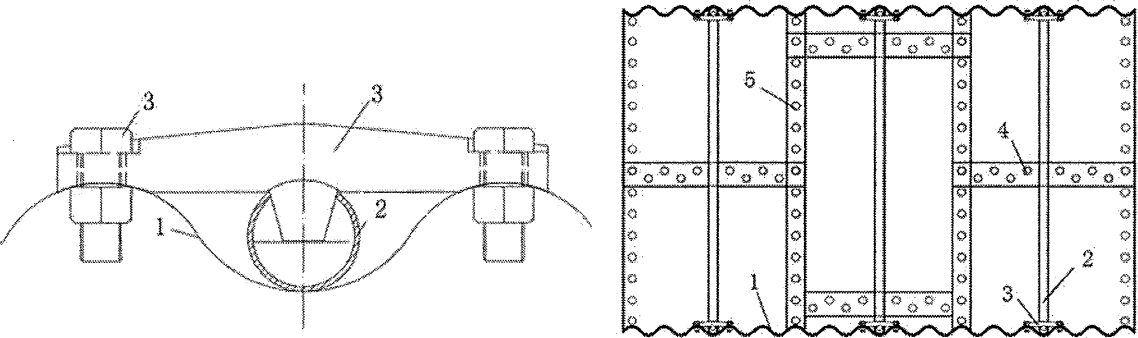
标引序号说明：

- 1——波纹钢管（拱）主体结构；
- 2——波纹钢加劲肋板。

图 6 波纹钢管顶加劲肋板构造示意图

7.4.5 抗震设防烈度大于或等于Ⅶ度地区的波纹钢板件拼装管，在结构验算满足要求的基础上需增加整体刚度时，可采用管内加劲杆件增强（见图7），其构造应符合下列规定：

- a) 加劲杆件布设于波纹钢管内壁波谷内；
- b) 固定杆件的灰口铸铁件，利用波纹钢板件端头搭接头（环向接缝处）螺栓孔及高强度螺栓固定于波纹钢管内壁一体化连接；
- c) 增强杆件之间的间距，按每一片板中间波谷位置布置（一片板件中间一道加劲杆件）。



a) 波纹钢管内壁（波谷）加劲杆件截面构造图示 b) 波纹钢管内壁（波谷）加劲杆件布置图示

- 标引序号说明：
- 1——波纹钢管；
 - 2——加劲杆件；
 - 3——加劲杆连接件；
 - 4——环向螺栓连接接缝；
 - 5——纵向螺栓连接接缝。

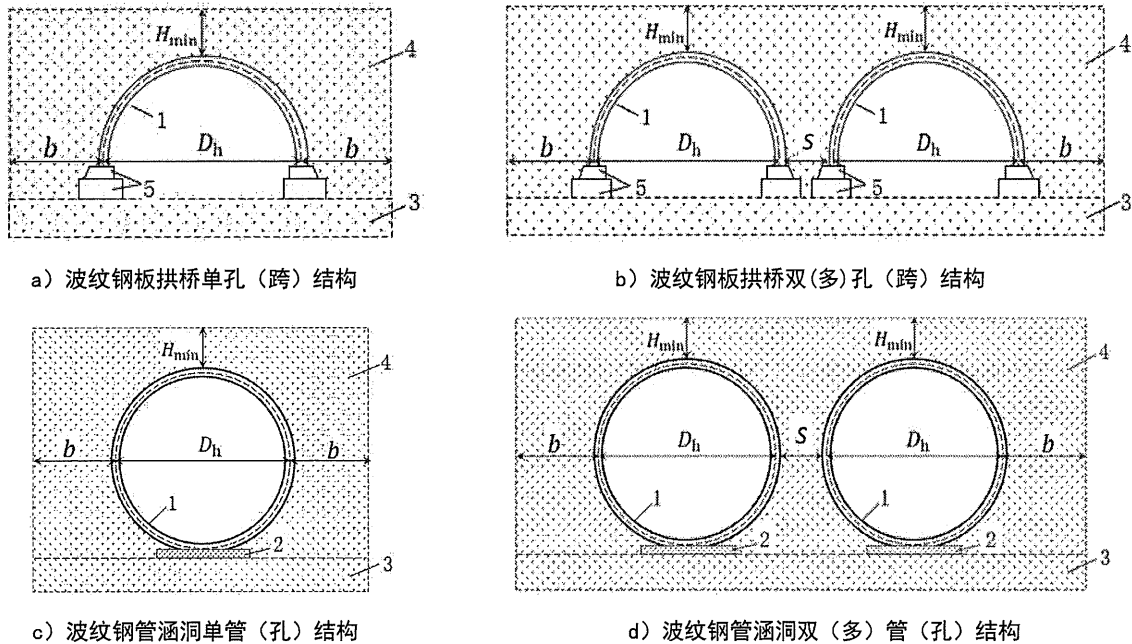
图7 波纹钢管内壁加劲杆件构造示意图

7.5 结构性回填范围、最小覆土厚度

7.5.1 波纹钢管（拱）侧地基以上的结构性回填最小宽度（沿路线方向）范围、并列双管（拱）或多管（拱）之间的结构性回填最小宽度见表8、图8。

表8 结构性回填最小宽度

波纹钢桥涵 计算直径或跨径 D_h /m	管（拱）外侧结构性回填最小宽度/m		计算直径或跨径 D_h +结构性回填最小宽度/m		
	b	S	单孔（跨）结构	双孔（跨）结构	三孔（跨）结构
$D_h \leq 1.0$	$1.5 D_h$	0.5	$2b + D_h$	$2b + 2D_h + S$	$2b + 3D_h + 2S$
$1.0 < D_h \leq 2.0$	$1.0 D_h$	$0.5 D_h$			
$2.0 < D_h \leq 10.0$	$0.5 D_h$	1.0			
$D_h > 10.0$	$0.5 D_h$	$0.1 D_h$			
注：三孔（跨）以上多孔（跨）结构的计算直径或跨径+结构性回填最小宽度类推计算。					



标引序号说明：

1 ——波纹钢管（拱）主体结构；

2 ——管基松铺垫层；

3 ——地基宽度范围；

4 ——结构性回填范围区；

5 ——钢筋混凝土基础（下部结构）、拱座；

D_h ——计算跨径（波纹中性轴处计算）；

H_{min} ——管（拱）顶以上结构性回填最小覆土厚度（不含路面结构层）；

b ——结构性回填最小宽度；

S ——双孔或多孔结构之间的最小间距。

图 8 波纹钢管（拱）两侧结构性回填范围（最小宽度）示意图

7.5.2 结构性回填长度（横路基向）范围，与路基边坡坡脚宽度（包括路基边坡侧墙或护坡等）相同。

7.5.3 波纹钢管（拱）顶以上的结构性回填主要包括路基填筑范围内的最小覆土厚度见图 9 分图 a）和分图 b）、路面结构层以下范围内的最小覆土厚度见图 9 分图 c）和分图 d）、路面结构层中的底基层或基层范围内的最小覆土厚度见图 9 分图 e）和分图 f），具体的最小覆土厚度根据管（拱）顶至路面的高度按附录 C 计算确定；箱形拱顶最小和最大覆土厚度见附录 B。

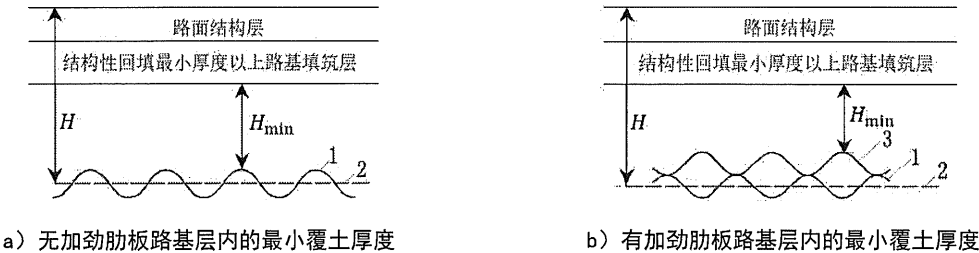
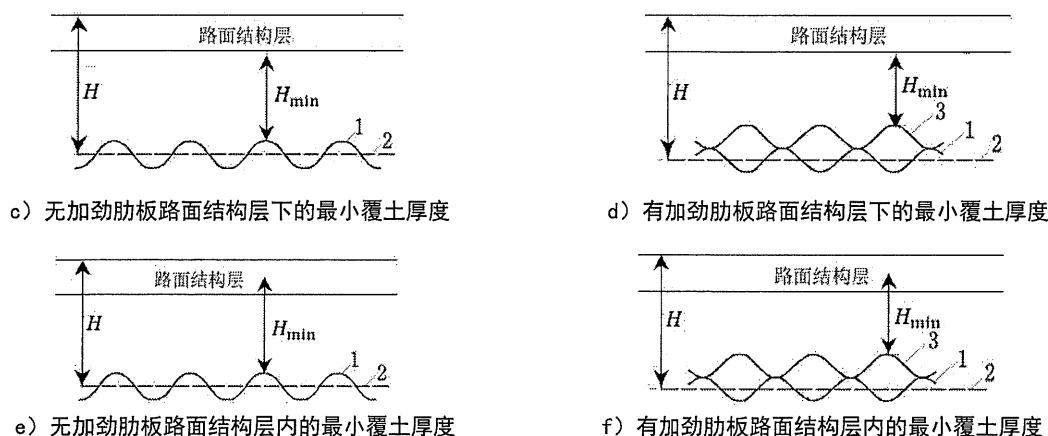


图 9 波纹钢管（拱）顶以上结构性回填最小覆土厚度范围示意图



标引序号说明:

- 1 —— 波纹钢管(拱)主体结构;
- 2 —— 波纹钢管(拱)的波纹剖面中性轴;
- 3 —— 波纹钢加劲肋板;
- H —— 波纹钢管(拱)顶以上填料总厚度;
- H_{min} —— 波纹钢管(拱)顶结构性回填最小覆土厚度。

图9 波纹钢管(拱)顶以上结构性回填最小覆土厚度范围示意图(续)

7.5.4 波纹钢管(拱)顶结构性回填最小覆土厚度不足或受限时,宜在管(拱)顶结构性回填层中设置钢筋混凝土减载板,设减载板的结构层回填最小覆土厚度,按附录C计算确定;也可减小跨径或直径设置双孔或多孔结构。

7.5.5 波纹钢管(拱)外侧结构性回填范围内和管(拱)顶以上结构性回填,采用土质填筑的最小覆土厚度的压实度不应小于96%,最小覆土厚度以上属于路基填筑范围的压实度按路基设计文件执行、最小覆土厚度至路面结构层内的压实度按路面设计文件执行。

7.5.6 波纹钢管外侧楔形区或波纹钢板拱双孔或多孔结构的拱脚处之间(不易压实部位),可按以下方法处理:

- a) 平面地基松铺管基松铺垫层上安装的波纹钢管外侧楔形区或波纹钢板拱双孔(多孔)拱脚之间(不易压实部位),可采用流动性低强度(小于10 MPa)混凝土浇筑,也可采用轻质土材料填筑;
- b) 开槽安装波纹钢管时,在地基上填筑结构性回填层至管直径1/2以下高度时,在结构性回填层上开挖半圆弧形槽,槽内松铺管基松铺垫层,将波纹钢管安放于槽内。

7.5.7 结构性回填设计应与洞口构造、边坡侧墙或“削竹式”洞口等相衔接。

7.6 减载板构造

7.6.1 符合下列情况时,应在波纹钢管(拱)顶的结构性回填层中设置钢筋混凝土减载板:

- a) 管(拱)顶部以上的结构性回填最小覆土厚度不满足计算厚度或路基顶面标高受限时;
- b) 波纹钢拱桥、涵洞直径或跨径大于或等于8.0 m时。

7.6.2 减载板宽度与减载板底面的结构性回填层同宽,长度(路线方向)应延伸到最外侧的波纹钢管(拱)起拱线外不小于30 cm;不同直径或跨径的管(拱)的减载板最小厚度见附录C,参照桥头搭板布置减载板钢筋,双孔或多孔之间(起拱线净距中间)宜设置伸缩缝及钢筋传力杆。

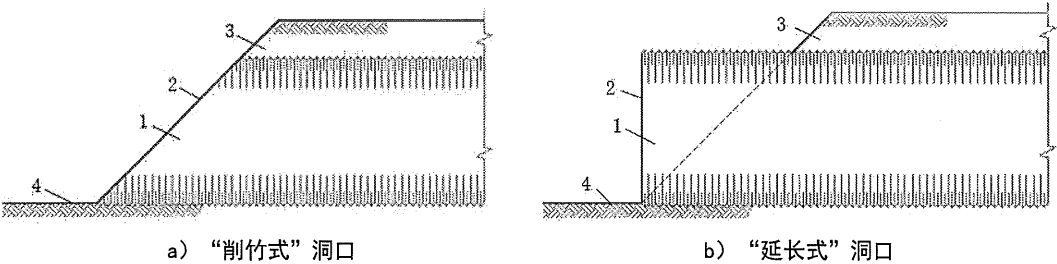
7.6.3 减载板底面与波纹钢管(拱)顶(波峰)上之间的最小净距不宜小于20 cm。

7.6.4 二级及以上等级公路的减载板混凝土强度等级不低于 C40、其余公路不低于 C30。

7.7 洞口构造

7.7.1 波纹管（拱）洞口（进出口）应根据路基高度、回填土体压力、结构安全性、环境条件、景观、施工便捷等因素，可参照 JTG/T 3365-02 选择设置八字墙式、一字墙式（端墙式）、扭坡式、平头式、走廊式、流线型、跌水井式等。

7.7.2 波纹管（拱）两端也可采用“削竹式”或“延长式”洞口（见图 10），管（拱）口周围路基边坡的坡面可采用铺砌或混凝土预制块网格等防护。



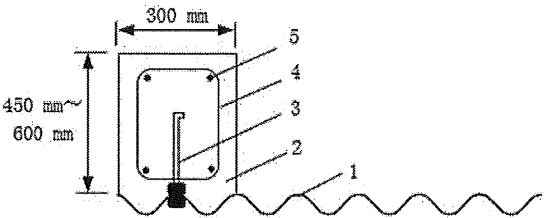
标引序号说明：

- 1——波纹管（拱）主体结构；
- 2——“削竹式”、“延长式”洞口；
- 3——结构性回填层；
- 4——洞口地面。

图 10 波纹管（拱）“削竹式”和“延长式”洞口构造示意图

7.7.3 “削竹式”的洞口管（拱）缘宜采用钢筋混凝土加强圈（细部构造见图 11），强度等级不低于 C30，并符合下列规定：

- a) 波纹管涵洞加强圈宜设置在起拱线以上，波纹钢板拱洞口拱缘在拱脚以上设置；
- b) 波纹管涵洞直径小于或等于 4.0 m 时，洞口管缘预置 M16 螺栓，加强圈高度为 450 mm；管直径大于 4.0 m 时和波纹钢板拱桥，洞口管（拱）缘预置 M20 螺栓，加强圈高度宜为 600 mm；
- c) 直径 8 mm 光圆钢筋（箍筋）间距和预置螺栓间距为 450 mm，箍筋与预置螺栓绑扎连接；
- d) 钢筋保护层厚度为 50 mm。



标引序号说明：

- 1——波纹管结构；
- 2——水泥混凝土；
- 3——预置 M16 或 M20 螺栓；
- 4——直径 8 mm 光圆钢筋（箍筋）；
- 5——直径 16 mm 带肋钢筋。

图 11 波纹管（拱）洞口钢筋混凝土加强圈构造示意图

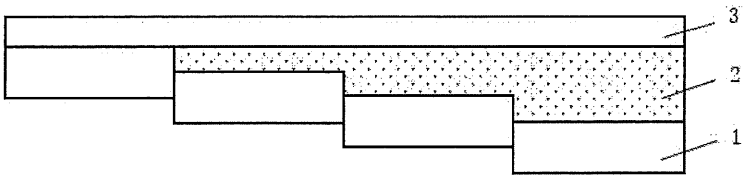
8 基础及下部结构设计

8.1 一般规定

- 8.1.1 应根据波纹钢管（拱）自重、波纹钢拱桥基础及下部结构、土-钢结合共同受力、土拱效应和柔性结构等特性，结合 JTG 3363 的规定对地基及基础、地基承载力、沉降和稳定性等进行设计及计算。
- 8.1.2 非冻胀土层基础、冻胀土层基础、基础防冲刷和洞口（进出口）的地基及基础、洞口构造物的地基及基础，应符合 JTG 3363 和 JTG D30 的规定。

8.2 波纹钢板拱桥基础及下部结构

- 8.2.1 波纹钢拱桥的地基及基底处理应符合 JTG 3363 的规定。
- 8.2.2 基础采用强度等级不低于 C30 的钢筋混凝土扩大基础（浅基础），陡坡处台阶式基础上应设置使拱座呈水平的实体墙式 C30 混凝土调平段（见图 12）。



标引序号说明：

1——陡坡处台阶式基础；

2——台阶式基础上实体墙式混凝土调平段；

3——钢筋混凝土拱座。

图 12 陡坡处台阶式基础上实体墙式混凝土调平段示意图

- 8.2.3 波纹钢拱桥矢高不能满足桥下净高要求时、箱形拱顶结构层回填层超过 1.5 m（不含路面结构层）限值时，宜在基础上增加实体墙式钢筋混凝土墩（台）身至满足拱下净空要求。
- 8.2.4 波纹钢板拱脚处位于严重磨蚀环境时，可在基础上增加实体墙式钢筋混凝土墩台身至磨损高度。
- 8.2.5 基础上或实体墙式墩（台）身顶上设置钢筋混凝土拱座，强度等级不低于 C40，拱座配筋布置和计算应满足承载能力要求；跨径小于或等于 10 m 的拱座宽度不小于 100 cm，跨径大于 10 m 的拱座宽度不小于 120 cm，拱座高度不小于 60 cm。
- 8.2.6 拱座预埋波纹钢板拱脚两侧的后浇混凝土钢筋，后浇混凝土强度等级不低于 C30，顶面设斜坡面形式（里高外低），外边缘高度宜为 30 cm。

8.3 波纹钢管涵洞地基及垫层

- 8.3.1 地基处理最小厚度及处理方案应符合表 9 的规定；涵底纵坡不宜大于 5%，当涵底纵坡大于 5% 时，应采取抗滑稳定措施。

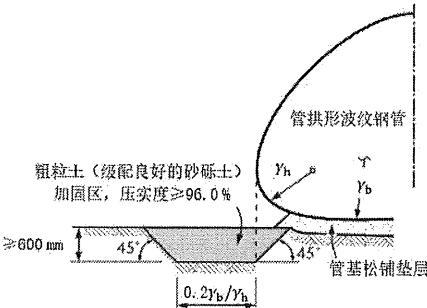
表 9 波纹钢管涵洞地基处理最小厚（深）度及处理方案

地基地质	不同管径与地基处理最小厚（深）度/mm	地基处理方案
优质土地基（碎石土、卵石土、砂砾、粗砂等）	地基压（夯）实处理	压实度 $\geq 95\%$

表 9 波纹钢管涵洞地基处理最小厚（深）度及处理方案（续）

地基地质	不同管径与地基处理最小厚（深）度/mm		地基处理方案
一般土质地基 （中砂、细砂等）	$D<900$	200	换填粗粒土（砂砾等），换填压实度 $\geq 95\%$
	$900<D\leq 2000$	300	
	$D>2000$	$0.2D$	
软土（包括花岗岩残积土） 地基	$500<D\leq 5000$	$0.3D\sim 0.5D$ ， 且不小于500 mm	按JTG D30、JTG 3363的规定处理，换填压实度 $\geq 95\%$
	$D>5000$	$0.2D\sim 0.3D$	
岩石地基	200 mm~400 mm（波深小于55 mm时采用较小值、波深大于或等于55 mm时采用较大值）。当管顶以上填土高度大于5.0 m 时，管顶以上填土每增高1.0 m，地基处理厚度增加40 mm。风化岩层处理厚度为满足地基承载力要求		岩石与土质地基衔接段清除风化岩层或表层，衔接段换填长度不小于波纹钢管直径的1.5 倍；换填压实度 $\geq 95\%$
多年冻土、盐渍土等地基	按JTG D30和JTG 3363的规定处理，换填压实度 $\geq 95\%$		
注： D 为波纹钢管的直径或跨径，以mm计。			

8.3.2 管拱形波纹钢管拱脚处的极限状态或压力不满足计算要求时，应加固处理（见图 13）。



标引符号说明：
 r_b ——管拱形底部半径；
 r_h ——管拱形拱脚处半径。

图 13 管拱形拱脚处地基加固处理示意图

- 8.3.3 除岩石地基外，应根据地基的预期最大变形（沉降量）、管底纵坡和填土高度等因素综合确定设置防沉降积水的预拱度。一般在管基上预留设置管顶以上填料总高度（ H ）的 0.25%~0.5%与管长度（ L ）的 0.3%~0.6%之和的预拱度。
- 8.3.4 洞口底部应衔接设置混凝土枕梁基础，宽度不小于 30 cm、长度不小于波纹钢管直径，基础埋深应在季节性最大冻深以下不小于 25 cm，并对基础土质进行防冻处理。
- 8.3.5 位于严重磨蚀环境的涵洞，波纹钢管下部可埋置于地下，埋置于洞口标高以下深度不宜小于 50 cm，管内铺砌标高的截面空间（流水面净高）应满足 5.3.2 b) 的要求。
- 8.3.6 波纹钢管涵洞管基松铺垫层应符合下列规定：
- a) 管基松铺垫层最大厚度不大于波深的 1.6 倍，且不小于波深的 1.3 倍；
 - b) 圆管形截面的管基宽度，平面地基上安装时为管径的 0.4 倍，开槽安装时为槽的弧长；管拱形截面的管基松铺垫层宽度为管底弧长的 1.2 倍。

9 构件及材料

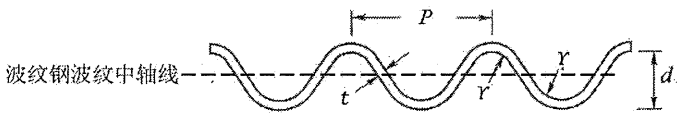
9.1 一般规定

- 9.1.1 波纹管用钢材应满足地区最不利低温环境和冷弯加工工艺等性能要求。
- 9.1.2 环形波纹钢管的管体焊接、管节连接角钢法兰焊接、管体三通或弯头焊接、管箍连接件焊接等的焊缝内部缺陷，应符合 GB 50661 规定的检验等级 B 级和评定等级 II 级质量要求，焊缝外观质量应符合 GB 50661 规定的一级焊缝等级要求。
- 9.1.3 波纹钢管（拱）装配化安装应采用高强度螺栓连接副连接构件。
- 9.1.4 防渗密封垫应具有良好的抗冻、耐寒、耐腐蚀性能。

9.2 波纹钢管（板）

- 9.2.1 螺旋波纹钢管用钢带，宜采用 S300GD+Z、S320GD+Z 或 S350GD+Z 牌号的热镀纯锌镀层结构钢，力学性能、尺寸、外形、重量及允许偏差应符合 GB/T 2518 的规定。
- 9.2.2 环形波纹钢管或拼装管（拱）用钢带或钢板，宜采用 Q235 碳素结构钢、Q355 低合金高强度结构钢，钢级宜采用 B 级、C 级或 D 级。力学性能应分别符合 GB/T 700 和 GB/T 1591 的规定。尺寸、外形、重量及允许偏差应符合 GB/T 709 的规定，厚度允许偏差应符合 C 类规定。
- 9.2.3 波纹钢管（拱）不应采用沸腾钢。
- 9.2.4 波纹钢管（板）宜采用公路波纹钢桥涵用常规波形，波纹钢类型、波形（规格）及壁厚见表 10。波纹钢管（板）的波高或波深、几何尺寸允许偏差，应符合 GB/T 34567 的规定。

表 10 波纹钢类型及波形（规格）及壁厚参数

波纹钢类型	波形（规格）及壁厚参数/mm		
	波距×波高或波深 $p \times d$	波峰波谷处圆弧半径 r	壁厚 t
分节整装螺旋波纹钢管（圆管形）	68×13	17.5	波纹钢管（板）的不同 波形、结构的不同标准直 径（跨径）和不同的回填 厚度的波纹钢具体壁厚 见附录B
	75×25	14.3	
分节整装环形波纹钢管（圆管形）	200×55	53.0	
波纹钢板拼装管（圆管形或管拱形）	200×55	53.0	
	400×150	80.0	
波纹钢板拼装拱（圆弧拱或箱形拱）	400×150	80.0	
	500×237	80.0	
波纹钢波形图示			

9.3 连接件

- 9.3.1 螺旋波纹钢管的管节采用管箍连接时，管箍用钢带或钢板，应采用与管体相同的钢材。
- 9.3.2 环形波纹钢管的管节采用等边角钢法兰连接时，宜采用碳素结构钢或低合金高强度结构钢，力学性能应分别符合 GB/T 700 和 GB/T 1591 的规定；理论重量等应符合 GB/T 706 的规定，不同直径用不同的角钢截面尺寸应符合 GB/T 34567 的规定。
- 9.3.3 螺旋波纹钢管的管箍连接、环形波纹钢管法兰连接和波纹钢板拼装管（拱）连接，采用大六角头螺栓、大六角螺母和钢垫片高强度螺栓连接副连接，其性能应符合 GB/T 1231 的规定，螺栓连接副的钢垫片类型及尺寸见表 11，钢垫片的螺栓孔型及孔径与被连接件一致；根据 JGJ 82 的规定计算确定螺栓长度，终拧后外露出 2~3 个扣丝。连接副的性能等级配套组合及扭矩系数应符合表 12 的规定。

表 11 钢垫片尺寸

钢垫片类型	尺寸类别	配套螺栓规格				
		M12	M16	M20	M24	M27
平面型钢垫片尺寸	平面尺寸/mm	25.0	33.0	—	—	—
	厚度/mm	3.8	4.8	—	—	—
凸凹面型钢垫片尺寸	平面尺寸/mm	—	30.0×30.0	40.0×45.0	48.0×55.0	50.0×55.0
	厚度/mm	—	2.5	3.0	3.0	4.0
注1：凸凹面型钢垫片厚度为最薄处厚度。						
注2：凸凹面型钢垫片的凸凹面半径与波纹钢板件的波峰处或波谷处半径一致。						

表 12 高强度螺栓连接副性能等级配套组合及扭矩系数

螺栓连接副组合	性能等级及硬度					螺栓扭矩系数
	大六角头螺栓		大六角螺母		钢垫片	
组合1	8.8 S	24 HRC~31 HRC	8 H	30 HRC	35 HRC~45 HRC	0.110~0.150
组合2	10.9 S	33 HRC~39 HRC	10 H	32 HRC	35 HRC~45 HRC	0.110~0.150
注1：S、H分别为螺栓和螺母的性能等级符号，HRC为螺栓和螺母的洛氏硬度。						
注2：螺栓连接副组合1和组合2在设计螺栓连接时，按满足计算强度（性能等级）配套组合采用。						

9.3.4 波纹钢板件拼装拱形结构的拱脚与拱座之间宜采用不等边槽钢连接件，不等边槽钢内底净宽不应小于波纹钢板件的波高或波深与2倍壁厚之和，边厚不小于波纹钢板件壁厚，长边高（与波纹钢板拱脚螺栓连接边高）不小于螺栓公称直径的10倍，螺栓孔间距及孔径与波纹钢板件的波距一致。不等边槽钢力学性能应符合GB/T 6725的规定。不等边槽钢底面设预埋地脚锚筋（带肋钢筋）时，力学性能、质量指标等，应符合GB/T 1499.2的规定。

9.3.5 波纹钢管内加劲杆件宜采用Q355或Q390钢号的无缝钢管，壁厚不小于5.0mm、直径宜采用不小于波谷圆弧半径的1.075倍，无缝钢管力学性能、直径和壁厚允许偏差应符合GB/T 8162的规定。杆件连接构件宜采用高强度螺栓和灰口铸铁件。

9.4 防腐材料

9.4.1 波纹钢管（板）、连接件和加劲杆件，采用热浸镀锌防腐的锌应符合GB/T 34567的规定。

9.4.2 波纹钢管（拱）外壁与土体接触面防腐层，宜采用环氧沥青、改性沥青（Ⅱ型）或普通沥青（标号与沥青路面相同）喷涂层，产品性能（产品要求、技术要求）应分别符合GB/T 27806、GB/T 26528和GB/T 15180的规定；当采用其他防腐涂层材料时，性能不应低于环氧沥青、改性沥青或普通沥青的防腐性能要求。

9.4.3 波纹钢管（拱）内壁的外露面在镀锌层表面采用防腐涂装时，宜根据使用环境采用长效型涂装材料及超强耐磨环氧漆、环氧玻璃鳞片漆、环氧漆等，性能等应符合JT/T 722的规定。

9.4.4 波纹钢管（拱）外壁涂层采用防腐保护（包裹）层时或结构性回填层中需设置隔水层时，宜采用公路构筑物表面防腐用土工膜，性能应符合JTG/T D32的规定。

9.5 防渗密封材料

9.5.1 管箍、法兰和波纹钢板拼装管（拱）连接的接缝防渗密封垫应符合GB/T 34567的规定。

9.5.2 波纹钢管（拱）外壁的螺母及钢垫片防渗密封处理宜采用硅酮密封胶（SR类）或双组分聚硫密封胶，其性能应分别符合GB/T 14683、JC/T 483的规定。采用其他密封胶时，性能不低于硅酮密封胶（SR类）或双组分聚硫密封胶的性能要求。

9.5.3 拼装波纹钢管（拱）连接接缝处的防渗材料，采用聚氨酯涂层时，宜采用聚氨酯防水涂层（MPU 类），性能应符合 GB/T 19250 的规定；采用防水卷材或抗裂贴时，宜采用聚合物改性沥青抗裂贴或路桥用塑性体改性沥青防水卷材，性能应分别符合 JT/T 971、JT/T 536 的规定。

9.6 结构性回填材料

9.6.1 波纹钢管（拱）结构周围规定范围内的结构性回填，宜选用砾类土、砂类土等低腐蚀性、低压缩性、易压实的填料，最大粒径不应大于波纹钢管（拱）波深的 0.5 倍、且不大于 50 mm。

9.6.2 最大冻深范围内或冻土区宜采用砾类土、砂类土回填。

9.6.3 液限大于 50 %、塑性指数大于 26 的土，膨胀率大于 3 %的土以及对波纹钢有严重腐蚀性的土，不应用于结构性回填。

9.7 其他材料

9.7.1 地基换填的材料宜采用级配良好的砂砾或透水性较强的土。

9.7.2 波纹钢管涵的地基（管基）上松铺垫层，宜采用砂砾、粗砂或中砂等，不应有尖锐颗粒，最大粒径不大于波深的 0.5 倍。

9.7.3 波纹钢板拱结构的基础及拱座、实体墙式混凝土墩台身下部结构、钢筋混凝土减载板、洞口（进出口）、附属工程和洞口外调治构造物等水泥混凝土、砂浆、片（块）石等材料的质量和钢筋力学性能等，应符合 JTG/T 3650 和 JTG/T 3365-02 的规定。

10 防腐及防渗设计

10.1 一般规定

10.1.1 应根据波纹钢桥涵路段的水文地质、土体腐蚀特性、结构特点、施工方法和使用条件等综合考虑波纹钢管（拱）及金属连接件防腐设计，并应满足结构安全、耐久（设计使用年限）和使用功能要求。

10.1.2 波纹钢管（板）、波纹钢加劲肋板和金属连接件均采用热浸镀锌层防腐，管（拱）结构现场采用喷涂层防腐。

10.1.3 采用其它防腐层（如热浸镀铝、锌铝镁、锌镁、热浸塑、静电喷涂等）代替镀锌层时，应有试验验证资料，且防腐性能不应低于 GB/T 34567 规定的热浸镀锌方法相应要求。

10.1.4 波纹钢管（拱）结构受周围土体长期作用下的腐蚀性等级指标见表 13，并通过测试确定，根据腐蚀性指标等级采取喷涂层防腐技术措施。

表 13 土体腐蚀性等级指标

土体腐蚀性等级	腐蚀性介质及其指标			
	电阻率/ $\Omega \cdot m$	含盐率/%	含水率/%	pH 值
微腐蚀性	>100	<0.02	<3	5.5~8.5
弱腐蚀性	50~100	0.02~0.05	3~5	4.5~5.4 或 8.6~9.5
中腐蚀性	20~50	0.06~0.75	6~12	3.5~4.4 或 9.6~10.5
强腐蚀性	<20	>0.75	>12	<3.5 或 >10.5
注：当波纹钢所处土体（环境）的腐蚀性处于多种介质同时作用时，应采用腐蚀性介质指标最高的腐蚀性等级。				

10.1.5 波纹钢管（拱）位于强腐蚀性环境时，可按附录 B 规定的壁厚适当增加壁厚。

10.1.6 波纹钢管（拱）内壁需设防磨蚀时，通过勘察预测水流推移质磨蚀特征、预期流速等，根据水

流推移质磨蚀指标等级（见表 14）采取防磨蚀措施。

表 14 波纹钢管（拱）内壁磨蚀指标等级

磨蚀等级	推移质的特征	预期流速/（m/s）
微磨蚀	流水中夹带砂土、砾等推移质体积约<5 %	<1.0
弱磨蚀	流水中夹带少量砂、砾推移质体积约<20 %	1.0~1.5
中度磨蚀	流水中夹带中等砂土、砾推移质体积约<40 %	1.6~4.5
严重磨蚀	流水中夹带大量砂石土、砾和岩石推移质体积约≥40 %	>4.5
注：当波纹钢管（拱）推移质或流速处于多种同时作用时，应采用推移质或流速指标最高的磨蚀性等级。		

10.2 镀锌防腐

波纹钢、连接件等镀锌防腐层厚度及质量应符合 GB/T 34567 的规定，不等边槽钢连接件和加劲杆件的镀锌层厚度及质量应与波纹钢相同。

10.3 喷涂防腐

10.3.1 波纹钢管（拱）外壁与周围土体接触面的现场喷涂层防腐应符合下列规定：

- a) 位于微腐蚀性环境时，可不考虑在镀锌防腐层表面喷涂防腐层；
- b) 位于弱腐蚀性、中腐蚀性和强腐蚀性环境的喷涂防腐层及总干膜平均厚度见表 15。

表 15 弱腐蚀性、中腐蚀性和强腐蚀性环境的喷涂防腐层厚度

腐蚀性等级	防腐涂装材料		总干膜厚度，不小于/mm
弱腐蚀性	改性沥青或普通沥青		1.0
中腐蚀性	任选1种	环氧沥青	1.0
		改性沥青	1.5
		普通沥青	2.0
强腐蚀性	任选1种	环氧沥青	1.5
		改性沥青	2.0
		普通沥青	2.5

10.3.2 波纹钢管涵内壁喷涂防腐应符合下列规定：

- a) 位于工业大气腐蚀、中等二氧化硫污染腐蚀或低等级以上盐度区域环境时，根据结构设计不同使用年限，参照 JT/T 722 规定分别采用普通型或长效型喷涂及其材料，总干膜厚度不小于 210 μm 或 240 μm；
- b) 干湿交替区域和水下区域（最高流水面长期淹没内壁区域），参照 JT/T 722 规定喷涂超强耐磨环氧漆、环氧玻璃鳞片漆或环氧漆涂装防腐，总干膜厚度不小于 450 μm。

10.3.3 波纹钢拱内壁喷涂防腐层应符合下列规定：

- a) 拱脚内壁部位干湿交替区域和水下区域喷涂防腐见 10.3.2 b) ；
- b) 拱肩、拱顶内壁喷涂防腐层时，采用颜色与环境相协调的防腐漆喷涂，总干膜厚度不小于 100 μm。

10.4 隔层防腐

10.4.1 波纹钢管（拱）位于强腐蚀性环境时，宜采用厚度不小于 1.0 mm 的公路构筑物防腐土工膜包裹或密贴于波纹钢管（拱）喷涂防腐层表面加强防腐。

10.4.2 强腐蚀性环境（见 10.1.4）和非干旱地区路段的结构性回填层中，宜在波纹钢管（拱）顶上结构性回填压实层约 20 cm 厚的顶面或减载板底部的回填层顶面设置满铺一层厚度不小于 1.5 mm 的公路构筑物防腐土工膜隔水层。

10.5 管（拱）内壁防磨蚀

10.5.1 波纹钢管（拱）内壁防磨蚀，应采取以洞口外的调治构造物控制推移质防护为主、管（拱）内壁设置防护层为辅的措施。

10.5.2 波纹钢管（拱）内壁需设置防磨蚀层的部位不应设置喷涂防腐层。

10.5.3 波纹钢管（拱）内壁磨蚀部位的防磨蚀层应符合下列规定：

- a) 微磨蚀环境时，仅镀锌防腐层可不考虑防磨蚀层；
- b) 弱磨蚀环境时，镀锌防腐层表面喷涂层见 10.3.1 b)；
- c) 中度磨蚀环境时，管（拱）内壁最大流水面范围设置厚度不小于 5.0 mm 的聚合物涂层，或按 10.3.2 b) 水下区域涂装；
- d) 严重磨蚀环境时，管（拱）内壁最大流水面范围设置复合混凝土防冲刷层，强度等级不低于 C30、波峰上厚度不小于 50 mm，混凝土内布置直径 5 mm、间距 100 mm 热镀锌钢丝网，钢丝网保护层厚度不小于 25 mm。也可采用强度等级不低于 C30、波峰上厚度不小于 50 mm 的钢纤维（塑料纤维）复合混凝土防冲刷层；
- e) 严重磨蚀环境的波纹钢涵管下部埋置于地面以下时，管内底部至进出口面高度范围内采用厚度不小于 10 cm 的钢筋混凝土铺砌，强度等级不低于 C30；混凝土层下部与波纹钢管之间采用压实砂砾过渡层；
- f) 波纹钢板拱脚处防严重磨蚀增加实体墙式钢筋混凝土墩台身见 8.2.4 的规定。

10.6 接缝连接防渗

10.6.1 波纹钢结构主体接缝连接防渗密封垫应符合下列规定：

- a) 密封垫厚度不小于 5 mm；
- b) 密封垫螺栓孔应与被连接件的螺栓孔对应、且不大于螺栓公称直径；
- c) 螺栓密封垫的尺寸不小于钢垫片尺寸。

10.6.2 波纹钢板拼装管（拱）接缝连接防渗密封垫应符合下列规定：

- a) 波纹钢板件接缝搭接面之间设置防渗密封垫，螺栓密封垫设置于高强度螺栓的钢垫片与波纹钢板件之间；
- b) 拼装管（拱）的波纹钢板接缝（纵缝、环缝）搭接面之间的密封垫长度不小于接缝长度、宽度与接缝搭接面宽度一致。

10.6.3 波纹钢板拼装管（拱）连接缝处防渗（水）处理应符合下列规定：

- a) 管（拱）外壁外露螺栓、螺帽、钢垫片、防渗密封垫及周围缝隙，采用硅酮密封胶（SR 类）或双组分聚硫密封胶进行防渗处理；
- b) 管（拱）外壁接缝处（环缝、纵缝）涂装聚氨酯（MPU 类）防水涂层，厚度不小于 2 mm、纵缝涂层宽度不小于 120 mm、环缝涂层宽度不小于 80 mm；
- c) 聚氨酯（MPU 类）防水涂层表面，粘贴一层厚度不小于 2.0 mm 的聚合物改性沥青抗裂贴或厚度不小于 3.3 mm 的路桥用塑性体改性沥青防水卷材，纵缝粘贴宽度不小于 120 mm、环缝粘贴宽度不小于 80 mm。

10.6.4 分节整装螺旋波纹钢管接头管箍连接防渗应符合下列规定：

- a) 管箍内侧与管体端头外侧之间设置防渗密封垫；
 - b) 管箍连接防渗密封垫的长度大于管体外周长（接头搭接不小于 5 cm）、宽度不小于管箍宽度；
 - c) 管端头对合缝位于防渗密封垫和管箍宽度的 1/2 处。
- 10.6.5 分节整装环形波纹钢管接头法兰连接防渗密封应符合下列规定：
- a) 管端头两个法兰盘对接之间设置防渗密封垫，螺栓密封垫设置于钢垫片与法兰之间；
 - b) 法兰连接密封垫的长度闭合弧段周长、宽度不小于法兰对合面宽度；
 - c) 法兰连接的外露螺栓、螺帽、钢垫片及周围缝隙和法兰对接缝（内外圈），采用硅酮密封胶（SR 类）或双组分聚硫密封胶加强防渗处理。

11 附属工程设计

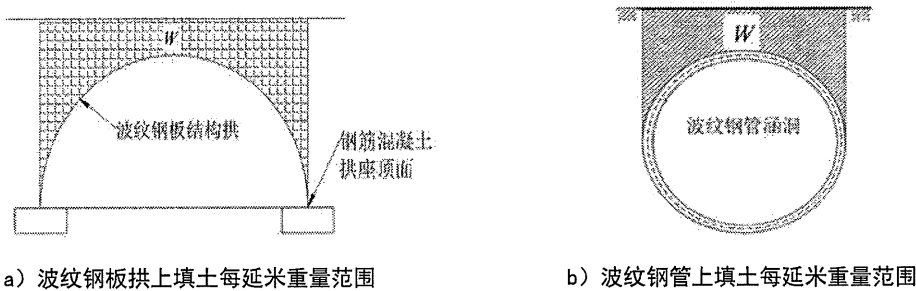
- 11.1 波纹钢桥涵洞口铺砌、拱下铺砌等设计，应符合 JTG/T 3365-02 的规定。
- 11.2 波纹钢桥涵洞口结构性回填范围内路肩式侧墙（挡墙）顶防护栏应符合 JTG/T D81 的规定。
- 11.3 波纹钢桥涵洞口外需设置水渠、河床加固及防护和设防泥石流冲刷（磨蚀）的调治构造物（导流坝、丁坝、截水沟、排水沟、急流槽、消力池、跌井、防堵栅栏等），应符合 JTG D30、JTG/T 3365-02 的规定。

附录 A
(规范性)
波纹管(拱)结构设计计算

A.1 作用(荷载)

A.1.1 恒载作用

作用在波纹管(拱)结构上的恒载为管(拱)上填土每延米的重量(kN/m),如图A.1所示,按公式(A.1)计算。



标引符号说明:

W——波纹管(拱)上填料每延米的重力(范围)。

图 A.1 波纹管(拱)结构上恒载作用范围示意图

$$W = A_f \gamma \cdot D_h \cdot (H + 0.1075 D_v) \cdots \cdots (A.1)$$

式中:

W——波纹管(拱)上填土每延米的重力,单位为千牛每米(kN/m);

A_f ——土压力增大系数,按表A.1取值;

γ ——土的容重,单位为千牛每立方米(kN/m³);

H——波纹管(拱)顶填料总高度,单位为米(m)。

表 A.1 土压力增大系数 A_f

A_f	D_h/D_v					
	≤ 0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	≥ 1.6
$H > 3.0 D_h$	1.62	1.40	1.20	1.10	1.05	1.02
$H = 3.0 D_h$	1.62	1.40	1.25	1.18	1.08	1.02
$H = 2.0 D_h$	1.62	1.40	1.25	1.18	1.08	1.02
$H = 1.8 D_h$	1.61	1.40	1.25	1.18	1.08	1.02
$H = 1.6 D_h$	1.60	1.39	1.24	1.17	1.08	1.02
$H = 1.4 D_h$	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
--------------	------	------	------	------	------	------

表 A.1 土压力增大系数 A_f （续）

A_f	D_h/D_v					
	≤ 0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	≥ 1.6
$H = 1.0D_h$	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	1.20	1.12	1.07	1.04
$H = 0.4D_h$	1.82	1.40	1.23	1.15	1.10	1.05
$H \leq 0.2D_h$	2.25	1.60	1.28	1.20	1.15	1.10
$H \leq 0.1D_h$	2.70	1.74	1.30	1.23	1.18	1.12
注： A_f 不能通过查表得到时，通过线性内差取值。						

A.1.2 汽车荷载

A.1.2.1 波纹钢管（拱）的汽车荷载应采用 JTG D60 规定的车辆荷载，汽车荷载的扩散压力按公式（A.2）计算。

$$\sigma_L = \frac{A_L}{w \cdot l_t} \times m_f \cdots \cdots \cdots (A.2)$$

式中：

σ_L ——汽车荷载扩散到波纹钢管（拱）顶的压力，单位为千帕（kPa）；

A_L ——跨径长度范围内布置的设计车辆荷载总轴重，单位为千牛（kN），荷载取值参考 JTG D60 的规定，应考虑车道数。在施工过程中，按实际施工机械及车辆总轴重验算；

m_f ——多车道折减系数，参考 JTG D60 的规定；

l_t 、 w ——沿车轮长度和宽度方向扩散后尺寸，单位为米（m）。汽车荷载扩散方式和多车道折减系数参考 JTG D60 的规定。

A.1.2.2 车辆冲击扩大系数，按公式（A.3）计算：拱顶以上填土厚度大于 2.0 m 时，可不考虑冲击影响。

$$\mu = 0.4 \times (1.0 - 0.5H) \cdots \cdots \cdots (A.3)$$

式中：

μ ——车辆冲击扩大系数。

A.1.3 地震作用

抗震设防烈度大于或等于Ⅶ度的地区，波纹钢桥涵应进行抗震设计，考虑地震作用。一般可只考虑竖向地震作用，按公式（A.4）计算。

$$E_v = R_0 \times \delta \times W \cdots \cdots \cdots (A.4)$$

式中：

E_v ——竖向地震作用，单位为千牛每米（kN/m）；

R_0 ——竖向地震作用与水平地震作用比值函数，取 0.65；

δ ——地震动水平加速度峰值，按表 A.2 取值。

表 A.2 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	0.10g~0.15g	0.20g~0.30g	0.40g

A.2 波纹钢管（拱）结构的内力计算

A.2.1 当不考虑地震作用时，波纹钢管（拱）的轴向压应力应满足公式（A.5）的要求。

$$\left. \begin{aligned} & [\alpha_D \cdot T_D + \alpha_L \cdot T_L(1 + \mu)]/A < \min(f_y, f_b) \\ & T_D = 0.5(1.0 - 0.1C_S)W \\ & T_L = 0.5D_h\sigma_L \\ & C_S = \frac{1000E_S D_V}{EA} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (A.5)$$

式中：

α_D ——恒载分项系数，取1.2；

T_D ——恒载（土地重力）引起的波纹钢板管（拱）压力或推力，单位为千牛每米（kN/m）；

α_L ——活载（汽车荷载及动力作用）分项系数，取1.4；

T_L ——活载引起的波纹钢管（拱）压力或推力，单位为千牛每米（kN/m）；

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），对于高强度螺栓连接的波纹钢板，应扣除螺栓孔截面面积；

f_y ——波纹钢板材料屈服强度，单位为兆帕（MPa）；

f_b ——波纹钢板极限抗力（临界屈曲应力），单位为兆帕（MPa）；

C_S ——回填土性质与结构尺寸的土压力折减系数；

α_E ——地震作用分项系数，取 1.0；

E_S ——结构性回填土体材料的弹性模量，单位为兆帕（MPa）；

E ——波纹钢板材料的弹性模量，单位为兆帕（MPa）。

A.2.2 当考虑地震作用时，波纹钢板的轴向压应力应满足公式（A.6）的要求。

$$[\alpha_D \cdot T_D + \alpha_L \cdot T_L(1 + \mu) + \alpha_E \cdot E_V]/A < \min(f_y, f_b) \dots\dots\dots (A.6)$$

A.3 极限抗力（屈曲）计算

为保证波纹钢板结构的稳定性，波纹钢板屈曲临界应力按公式（A.7）～（A.13）验算。

$$\left. \begin{aligned} f_b &= \phi_t F_m \left[f_y - \left\{ \frac{f_y^2}{12E\rho} \left(\frac{KR}{r} \right)^2 \right\} \right], R \leq R_e \\ f_b &= \frac{3\phi_t \rho F_m E}{(KR/r)^2}, R > R_e \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (A.7)$$

$$K = \lambda \left(\frac{EI}{E_m R^3} \right)^{0.25} \dots\dots\dots (A.8)$$

$$R_e = \frac{r}{K} \left(\frac{6E\rho}{f_y} \right)^{0.5} \dots\dots\dots (A. 9)$$

$$\rho = \left(1000 \frac{H+H'}{R_c} \right)^{0.5} \leq 1.0 \dots\dots\dots (A. 10)$$

$$\lambda = 1.22 \left[1.0 + 1.6 \left(\frac{EI}{E_m R_c^3} \right)^{0.25} \right] \dots\dots\dots (A. 11)$$

$$E_m = E_s \left[1.0 - \left(\frac{R_c}{R_c + 1000(H+H')} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (A. 12)$$

$$F_m = 0.85 + \frac{0.3S}{D_h} \leq 1.0 \dots\dots\dots (A. 13)$$

式中:

ϕ_t ——波纹钢材抗力系数, 取0.8;

F_m ——多孔结构屈曲应力折减系数;

ρ ——屈曲折减系数;

K ——波纹钢管(拱)结构与周围土体相对弯曲刚度系数;

R ——波纹钢管(拱)结构的曲率半径, 单位为毫米(mm);

r ——波纹钢板材回转半径, 单位为毫米(mm), 按GB/T 34567的规定取值;

R_e ——等效曲率半径, 单位为毫米(mm);

λ ——计算 K 值的系数;

I ——波纹钢板材截面的惯性矩, 单位为毫米四次方每毫米(mm^4/mm), 按GB/T 34567规定取值;

E_m ——结构性回填土体的弹性模量的修正值;

H' ——波纹钢管(拱)顶至起拱线垂直距离的一半, 单位为米(m);

R_c ——波纹钢管(拱)拱顶处的曲率半径, 单位为毫米(mm);

S ——双孔或多孔结构之间的最小间距, 单位为米(m)。

A.4 管拱形拱脚处压力的极限状态计算

管拱形波纹钢管的拱脚处极限状态按公式(A.14)、(A.15)计算。

$$p_h = \frac{E_d}{A \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{r_t}{r_h} \leq p_u \dots\dots\dots (A. 14)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{永久作用和可变作用组合时: } E_d = (\gamma_G W, \gamma_Q \sigma_L) \\ \text{永久作用和地震作用组合时: } E_d = (\gamma_G W, \gamma_E E_V) \end{array} \right\} \dots\dots\dots (A. 15)$$

式中:

p_h ——荷载在管拱形波纹钢结构拱脚处产生的压力(见图A.2), 单位为千帕(kPa);

E_d ——最不利设计作用效应, 单位为千牛每米(kN/m);

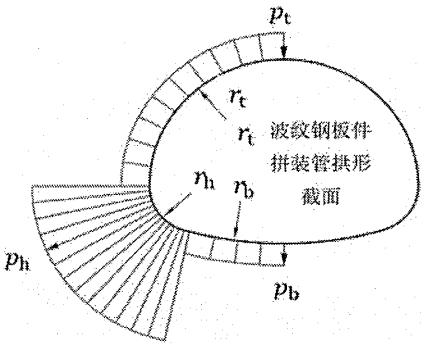
r_t ——管拱形顶部半径(见图A.2), 单位为毫米(mm);

r_h ——管拱形拱脚处半径(见图A.2), 单位为毫米(mm);

p_u ——管拱形波纹钢结构拱脚极限承载力(见表A.3), 单位为千帕(kPa);

γ_G ——永久作用分项系数, 取1.2;

γ_Q ——可变作用分项系数，取 1.4；
 γ_E ——地震作用分项系数，取 1.0。



标引序号说明：
 p_t 、 p_b 、 p_h ——分别为顶部、底部和拱脚处的压力。

图 A.2 压力绕管拱形状的变化示意图

表 A.3 管拱形的拱脚处极限承载力

拱脚处的回填材料	结构性回填土	均匀的粗碎石 (<400mm)	胶结砂/碎石 (3 %~6 %)
拱脚处极限承载力 p_u /kPa	450	900	1350

A.5 施工过程结构计算

波纹钢管（拱）在施工过程中，波纹钢截面的弯矩和轴向压力的内力组合应满足公式（A.16）的要求，按公式（A.16）～（A.31）计算。

$$\left(\frac{p}{P_{Pf}}\right)^2 + \left|\frac{M}{M_{Pf}}\right| \leq 1.0 \dots\dots\dots (A.16)$$

$$p = T_D + T_C \dots\dots\dots (A.17)$$

$$P_{Pf} = \phi_h A f_y \dots\dots\dots (A.18)$$

$$M = M_1 + M_B + M_C \dots\dots\dots (A.19)$$

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

$$M_B = -k_{M2} R_B \gamma D_h^2 H_C \dots\dots\dots (A.21)$$

$$M_C = k_{M3} R_L D_h L_H \dots\dots\dots (A.22)$$

$$R_L = [0.265 - 0.053 \lg N_f] / (H_C / D_h)^{0.75} \leq 1.0 \dots\dots\dots (A.23)$$

$$L_H = A_C/k_4 \quad \text{..... (A. 24)}$$

$$N_f = E_S(1000D_h)^3/EI \quad \text{..... (A. 25)}$$

$$K_{M1} = \begin{cases} 0.0046 - 0.001 \lg N_f, & N_f \leq 5000 \\ 0.0009, & N_f > 5000 \end{cases} \quad \text{..... (A. 26)}$$

$$k_{M2} = \begin{cases} 0.018 - 0.004 \lg N_f, & N_f \leq 5000 \\ 0.0032, & N_f > 5000 \end{cases} \quad \text{..... (A. 27)}$$

$$k_{M3} = \begin{cases} 0.12 - 0.018 \lg N_f, & N_f \leq 100000 \\ 0.030, & N_f > 100000 \end{cases} \quad \text{..... (A. 28)}$$

$$R_B = \begin{cases} 0.67 + 0.87 \left(\frac{D_V}{2D_h} - 0.20 \right), & 0.20 \leq \frac{D_V}{2D_h} \leq 0.35 \\ 0.80 + 1.33 \left(\frac{D_V}{2D_h} - 0.35 \right), & 0.35 \leq \frac{D_V}{2D_h} \leq 0.50 \\ \frac{D_V}{D_h}, & \frac{D_V}{2D_h} > 0.50 \end{cases} \quad \text{..... (A. 29)}$$

$$M_{Pf} = \phi_h M_P \quad \text{..... (A. 30)}$$

$$M_P = \frac{2I}{P+t} f_f \quad \text{..... (A. 31)}$$

式中:

p —— 波纹钢板截面所受轴向压力, 单位为千牛每米 (kN/m), 计算包含两部分, 分别为土的重力和汽车荷载 (考虑施工机械) 引起的压力, 当 $H_C/D_h < 0.2$ 时, 取 $P=0$, 其中 H_C 为施工过程中的填土高度 (m);

P_{Pf} —— 波纹钢板截面考虑塑性抵抗系数的设计 (极限) 压力, 单位为千牛每米 (kN/m);

M —— 波纹钢板截面所受弯矩, 单位为千牛米每米 (kN·m/m), 由三部分组成;

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 (kN·m/m);

T_C —— 汽车荷载 (考虑施工机械) 引起的波纹钢管 (拱) 压力, 单位为千牛米每米 (kN/m);

ϕ_h —— 波纹钢板材抵抗塑性铰的抗力系数, 取 0.7;

M_1 —— 波纹钢管 (拱) 结构在土体均布力作用下跨中截面的弯矩, 单位为千牛米每米 (kN·m/m);

M_B —— 由波纹钢管 (拱) 结构周边土体的支撑作用, 使波纹钢管 (拱) 结构跨中截面减小的弯矩, 单位为千牛米每米 (kN·m/m); 为负值;

M_C —— 施工机械荷载引起的波纹钢管 (拱) 结构跨中截面的弯矩, 单位为千牛米每米 (kN·m/m);

k_{M1} —— 计算弯矩的参数;

R_B —— 计算弯矩的参数;

k_{M2} —— 计算弯矩的参数;

H_C —— 施工过程中波纹钢管 (拱) 顶以上的填土厚度, 单位为米 (m);

k_{M3} —— 施工阶段计算弯矩的参数;

R_L —— 施工阶段计算弯矩的参数;

L_H ——施工过程中作用于结构上的施工机械（汽车）荷载的等效荷载值，单位为千牛每米（kN/m）；
 N_f ——波纹钢柔度系数，对于高强度螺栓连接的波纹钢板，截面惯性矩 I 应扣除螺栓孔面积；
 A_c ——施工过程中的车辆（机械）轴重，单位为千牛（kN）；
 k_4 ——等效线性荷载参数，按表 A.4 取值；
 M_p ——波纹钢板截面可承受的塑性弯矩，即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）；
 P ——波纹钢管（板）的波距，单位为毫米（mm）；
 t ——波纹钢管（板）的壁厚，单位为毫米（mm）；
 f_f ——波纹钢材极限抗拉强度，单位为兆帕（MPa）。

表 A.4 等效线性荷载参数 k_4 的取值

单位为米

波纹钢管（拱）顶 填料厚度	k_4		
	每轴双轮 （单轴两轮）	每轴四轮 （单轴四轮、双轴 每轴两轮）	每轴八轮 （双轴每轴四轮、三轴每轴 两轮或四轮、履带车）
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
4.5	6.62	6.62	6.62
6.0	8.42	8.42	8.42
9.0	12.02	12.02	12.02

A.6 运营阶段结构计算

应对波纹钢管（拱）桥涵施工完成后的运营阶段进行校核验算，承载能力极限状态下的弯矩和轴向压力的组合效应不大于截面的塑性抗弯承载力，并满足公式（A.32）的要求，按公式（A.32）～（A.37）计算。

$$\left(\frac{T_f}{P_{Pf}}\right)^2 + \left|\frac{M_f}{M_{Pf}}\right| \leq 1.0 \dots\dots\dots (A.32)$$

$$M_f = \alpha_D M_1 + \alpha_D M_D + \alpha_L M_L (1 + \mu) \dots\dots\dots (A.33)$$

$$M_D = -k_{M2} R_B \gamma D_h^2 H_e \dots\dots\dots (A.34)$$

$$M_L = \frac{k_{M3} R_U D_h A_L}{k_4} \dots\dots\dots (A.35)$$

$$H_e = \min(H, D_h/2) \dots\dots\dots (A.36)$$

$$R_U = \frac{0.265 - 0.053 \lg N_f}{(H/D_h)^{0.75}} \dots\dots\dots (A.37)$$

式中：

T_f ——承载能力极限状态基本组合下由恒载和活载引起的波纹钢板结构的轴向内力，单位为千牛每米（kN/m）；

M_f ——波纹钢管（拱）运营阶段结构截面所受弯矩，单位为千牛米每米（kN·m/m）；

M_D ——波纹钢管（拱）顶由恒载产生的弯矩之和，单位为千牛米每米（kN·m/m）；

M_L ——波纹钢管（拱）顶由汽车荷载产生的弯矩之和，单位为千牛米每米（kN·m/m）；

H_e ——与 $D_h/2$ 两者的较小值；

R_U ——无量纲参数；

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

附 录 B
(规范性)
波纹钢管(拱)结构参数与覆土厚度

B.1 波纹钢管涵结构参数与覆土厚度

波纹钢管类型、波形、壁厚、管内径等参数与管顶覆土厚度见表 A.1。

表 B.1 波纹钢管涵结构参数与覆土厚度

波纹钢管类型	波距×波高（ $p \times d$ ）/mm	波纹钢管壁厚 t /mm	管内径 D /m	管顶最小覆土厚度 $H_{\min}$ /m	
螺旋波纹钢管 （分节整装管）	68×13	1.3~3.0	0.5~1.5	0.6	管顶最小覆土 厚度含路面结构 层
	75×25	1.6~3.2	1.0~2.0	0.6	
环形波纹钢管 （分节整装管）	200×55	3.5~4.5	2.0~3.0	0.6	
波纹钢板件 拼装管	200×55	3.0~3.5	2.5	0.6	
		3.0~3.5	3.0	0.6	
		3.5~4.0	4.0	0.76	
		4.0~4.5	5.0	0.93	
		4.5~5.0	6.0	1.10	
	400×150	4.5~5.0	6.0	1.10	
		5.0~5.5	7.0	1.20	
		5.5~6.0	8.0	1.36	
		6.0~6.5	9.0	1.50	
		6.5~7.0	10.0	1.50	
注1：波纹钢管顶最小覆土厚度根据附录C.1计算所得（不考虑减载板时），最小覆土厚度范围见7.5.3条规定。					
注2：管顶最大填土厚度为按本文件计算满足波纹钢管极限状态承载能力（轴向压应力、极限抗力等）时的厚度（含路面结构层）。					

B.2 波纹钢板拱结构参数与覆土厚度

B.2.1 波纹钢板圆弧拱结构的跨径、拱半径、矢高、壁厚等参数与覆土厚度见表A.2。

表 B.2 波纹钢板圆弧拱结构参数与覆土厚度

跨径 D/m	拱半径 R/m	矢高 H_s/m	波纹钢板壁厚 t/mm	拱顶最小覆土厚度 $H_{\min}/\text{m}$	
5.0	2.5	≤ 2.5	4.5~5.0	1.20	拱顶最小覆 土厚度含路面 结构层
6.0	3.0	≤ 3.0	5.0~5.5	1.25	
8.0	4.0	≤ 4.0	6.0~6.5	1.40	
10.0	5.0	≤ 5.0	7.0~7.5	1.50	
13.0	6.5	≤ 6.5	8.0~8.5	1.50	
16.0	8.0	≤ 8.0	9.0~9.5	1.50	
注1: 波纹钢板拱顶最小覆土厚度根据附录C.1计算所得(不考虑减载板时), 最小覆土厚度范围见7.5.3条规定。					
注2: 圆弧拱顶最大填土厚度为按本文件计算满足波纹钢板拱极限状态承载能力(轴向压应力、极限抗力等)时的厚度(含路面结构层)。					

B.2.2 波纹钢板箱形拱结构的跨径、拱半径、矢高、壁厚等参数与覆土厚度见表A.3。

表 B.3 波纹钢板箱形拱结构参数与覆土厚度

跨径 <i>D</i> /m	拱半径 <i>R</i> /m		矢高 <i>H_s</i> /m	波纹钢板 壁厚范围 <i>t</i> /mm	拱顶结构性回 填最小厚度 <i>H_{min}</i> /m	波纹钢板拱顶填土厚度范围与壁厚 <i>H</i> /m		
	拱肩	拱顶				0.30~0.70	0.70~1.00	1.00~1.50
						波纹钢板壁厚 <i>t</i> /≥mm		
8000	1245	7470	2000	6.0~7.0	0.30	6.0	6.5	7.0
	1245	7850	2185					
10000	1245	8560	2590	7.0~8.0	0.30	7.0	7.5	8.0
	1245	8890	2800					
	1245	9300	3000					
13000	1250	13000	3500	8.0~9.0	0.30	8.0	8.5	9.0
16000	1250	16000	4200	9.0~10.0	0.30	9.0	9.5	10.0
注1：波纹钢板项形拱顶最小覆土厚度0.30 m和最大覆土厚度1.50 m为附录C.1的规定值（不考虑减载板时），最小覆土厚度范围见7.5.3条规定。								
注2：跨径16 m箱形拱的拱上填料宜采用轻质土材料。								

附录 C

(规范性)

结构性回填最小覆土厚度及减载板计算

C.1 结构性回填最小覆土厚度

波纹钢管和波纹钢圆弧拱的顶部（波峰）以上结构性回填最小覆土厚度按公式（C.1）计算确定（取最大值）、且不应小于 0.60 m；但对于 400×150 和 500×237 波形的波纹钢板拼装管（拱）结构，最小覆土厚度为公式（C.1）计算的最大值与 1.50 m 比较，两者取较小值；波纹钢箱形拱顶部（波峰）以上最小覆土厚度不应小于 0.3 m（不含路面结构层厚度）、最大覆土厚度不应大于 1.5 m；最小覆土厚度范围见 7.5.3 条。

$$H_{min} = \max \left[\frac{D_h}{6} \left(\frac{D_h}{D_v} \right)^{0.5}, 0.4 \left(\frac{D_h}{D_v} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (C.1)$$

式中：

- H_{min} ——波纹钢管（拱）顶结构性回填最小覆土厚度（不考虑减载板时），单位为米（m）；
- D_h ——波纹钢管（拱）的计算直径或跨径，单位为米（m）；
- D_v ——波纹钢管（拱）的计算矢高，单位为米（m）。

C.2 钢筋混凝土减载板最小覆土厚度

增设钢筋混凝土减载板后的结构性回填最小覆土厚度按公式（C.2）计算确定，计算结果小于或等于 30 cm 时，按 30 cm 控制；计算结果大于 30 cm 时，按计算结果控制；最小覆土厚度范围见 7.5.3 条。

$$H_{min} = t_b R_{AL} X_C R_f \dots\dots\dots (C.2)$$

式中：

- H_{min} ——波纹钢管（管）顶结构性回填最小覆土厚度（设减载板时），单位为毫米（mm）；
- t_b ——减载板最小厚度（见表C.1），单位为毫米（mm）；
- R_{AL} ——轴向荷载修正系数，按表C.2取值；
- X_C ——混凝土强度修正系数，C30 混凝土取1.05、C40 混凝土取0.95；
- R_f ——波纹钢管（拱）直径或跨径影响系数，取1.2。

表 C.1 钢筋混凝土减载板最小厚度

项目	不同直径或跨径波纹钢管（拱）的钢筋混凝土减载板最小厚度			
波纹钢桥涵直径或跨径 D/m	$D \leq 3.0$	$3.0 < D \leq 5.0$	$5.0 < D \leq 8.0$	$D > 8.0$
钢筋混凝土减载板最小厚度 t_b/mm	180	200	220	250

表 C.2 轴向荷载修正系数 R_{AL}

等效单轴荷载/kN	R_{AL}	等效单轴荷载/kN	R_{AL}
80.0	0.750	96.0	0.815
120.0	0.914	142.3	1.005

等效单轴荷载/kN	R_{AL}	等效单轴荷载/kN	R_{AL}
160.0	1.031	175.0	1.060

G.3 波纹钢管（拱）顶允许车辆通行的结构性回填最小厚度

结构性回填施工时，结构性回填层中未设减载板时的波纹钢管顶以上允许重型车辆（施工机械）通行时的最小覆土厚度，按公式（C.3）计算。结构性回填层中设有钢筋混凝土减载板时，不需计算通行最小厚度，可允许在减载板上通行。

$$H_{min} = \min \left\{ 1\,500; \max \left[600; D_h \times \frac{\sqrt{D_h/D_v}}{6}; 400 \times \left(\frac{D_h}{D_v} \right)^2 \right] \right\} \cdots \cdots (C.3)$$

式中：
 H_{min} ——波纹钢管（拱）顶结构性回填最小覆土厚度（允许施工机械或车辆通行时），单位为米（m）。