



中国工程建设标准化协会标准
Standard of China Association for Engineering Construction
Standardization

公路波纹钢涵洞技术规程

Technical Specification for corrugated steel culverts
for highways
(征求意见稿)

中国工程建设标准化协会 发布
Issued by China Association for Engineering Construction
Standardization

中国工程建设标准化协会标准
Standard of China Association for Engineering Construction
Standardization

公路波纹钢涵洞技术规程

Technical Specification for corrugated steel culverts
for highways

主编单位：中交第二公路勘察设计研究院有限公司

发布机构：中国工程建设标准化协会

施行日期：XX 年 XX 月 XX 日

人民交通出版社股份有限公司

XX 北 京

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2016 年第二批工程建设协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字〔2016〕26 号）的要求，中交第二公路勘察设计研究院有限公司主编单位承担《公路波纹钢涵洞技术规程》（以下简称“本规程”）的制订工作。

本规程的主要内容是：

本规程是基于通用的工程建设理论及原则编制，适用于本规程提出的应用条件。对于某些特定专项应用条件，使用本规程相关条文时，应对适用性及有效性进行验证。

本规程由中国工程建设标准化协会公路分会负责归口管理，由中交第二公路勘察设计研究院有限公司主编单位负责具体技术内容的解释，在执行过程中如有意见或建议，请函告本规程日常管理组，中国工程建设标准化协会公路分会（地址：北京市海淀区西土城路 8 号；邮编：100088；电话：010-62079839；传真：010-62079983；电子邮箱：shc@rioh.cn），或中交第二公路勘察设计研究院有限公司主编单位（地址：武汉市经济技术开发区创业路 18 号，邮编：430056，电子邮箱：741283551@qq.com），以便修订时参考。

主 编 单 位： 中交第二公路勘察设计研究院有限公司

参 编 单 位： 中交第一公路勘察设计研究院有限公司

河北易德利橡胶制品有限责任公司

衡水奇佳工程材料有限公司

青海路拓工程设施制造有限公司

衡水光辉橡塑有限公司

衡水益通管业股份有限公司

安徽省交通控股集团有限公司

主 编： 冯鹏程

主要参编人员：

主 审： 刘新生

参与审查人员：

目次

1 总则.....	- 1 -
2 术语和符号.....	- 2 -
2.1 术语.....	- 2 -
2.2 符号.....	- 6 -
3 基本规定.....	- 10 -
3.1 应用原则.....	- 10 -
3.2 结构类型.....	- 10 -
3.3 布设基本要求.....	- 12 -
3.4 水力水文计算.....	- 12 -
4 材料.....	- 14 -
4.1 结构主体材料.....	- 14 -
4.2 连接件.....	- 14 -
4.3 焊接材料.....	- 14 -
4.4 密封材料.....	- 15 -
4.5 结构性回填材料.....	- 15 -
5 结构设计.....	- 16 -
5.1 一般规定.....	- 16 -
5.2 作用.....	- 16 -
5.3 内力计算.....	- 17 -
5.4 结构破坏验算.....	- 19 -
5.5 塑性铰破坏验算.....	- 20 -
5.6 连接破坏验算.....	- 23 -
6 构造规定.....	- 24 -
6.1 洞身构造要求.....	- 24 -
6.2 洞口构造要求.....	- 26 -
6.3 进出口沟床加固及防护设计.....	- 27 -
7 地基与基础.....	- 29 -
7.1 涵底管基.....	- 29 -
7.2 基础设计.....	- 29 -
7.3 地基和基础沉降.....	- 29 -
7.4 地基处理.....	- 30 -
7.5 拱腋处承载力计算.....	- 30 -
8 加固设计.....	- 32 -
8.1 一般规定.....	- 32 -

8.2	加固的结构设计.....	- 32 -
8.3	加固施工.....	- 32 -
9	耐久性设计.....	- 33 -
9.1	一般规定.....	- 33 -
9.2	防腐蚀与磨蚀材料质量要求.....	- 33 -
9.3	涂层与内衬的选择.....	- 34 -
10	施工.....	- 36 -
10.1	地基施工.....	- 36 -
10.2	基础施工.....	- 36 -
10.3	装卸与运输.....	- 36 -
10.4	安装.....	- 36 -
10.5	回填.....	- 37 -
11	质量检验评定.....	- 39 -
11.1	一般规定.....	- 39 -
11.2	材料检验.....	- 39 -
11.3	安装检验.....	- 39 -
11.4	形状检验.....	- 40 -
本规程用词用语说明.....		41
附 录 A（资料性附录） 常用波纹钢涵洞规格表.....		43
附 录 B（资料性附录） 设计流程图.....		45
附 录 C（资料性附录） 纵向螺栓接缝承载力试验.....		47
附 录 D（资料性附录） 耐久性设计方法.....		47

1 总则

1.0.1 为规范公路波纹钢涵洞的应用，按照安全、耐久、适用、环保、经济和美观的原则，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于新建、改扩建公路工程中波纹钢涵洞设计和施工。其它专用公路、市政道路中波纹钢涵洞可参照执行。

1.0.3 公路波纹钢涵洞应按不小于 50 年使用年限进行设计。

1.0.4 公路波纹钢涵洞的勘察、设计与施工除应符合本规程的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准及规范的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 埋置式结构 buried structures

周边及拱顶采用结构性回填土经压实,以保证土与结构物相互作用共同承担荷载的构造物(桥梁、涵洞、通道、管道及隧道内衬)。

2.1.2 圆管 round pipe

圆形或长短轴之比不大于1.1的椭圆形管。

2.1.3 水平(竖直)椭圆形管 horizontally/vertically elliptical pipe

长轴为水平(竖直)方向且长短轴之比大于1.1的椭圆形管。

2.1.4 管拱 pipe-arch

由至少三种半径的弧形组成且拱底半径大于拱顶和拱侧半径的闭口结构。

2.1.5 圆弧拱 arch

由一种半径的圆弧组成的带基础的开口结构,一般分为半圆拱、小半圆拱、马蹄形拱。

2.1.6 多圆弧拱 multi-radius arch

由两种或两种以上半径的圆弧组成的带基础的开口结构,一般起拱线高于基础顶面。常见有椭圆形拱、两半径拱、三半径拱。

2.1.7 箱形结构 box culvert

截面近乎矩形、拱顶较为平坦(拱顶半径较大)的一种特殊的多圆弧拱。

2.1.8 拱顶 crown

波纹钢结构横断面的最高点或附近的一段区域。

2.1.9 拱底 invert

波纹钢结构横断面的最低点或附近的一段区域。

2.1.10 拱腋 haunch

波纹钢结构横断面上位于起拱线与管基或基础顶部之间的部分。

2.1.11 拱肩 shoulder

波纹钢结构横断面上位于拱顶与起拱线之间的部分。

2.1.12 起拱线 spring line

波纹钢结构横断面上水平方向最外侧点的连线。

2.1.13 管基 bedding

天然地基或换填后的地基与闭口结构底部之间与拱底外形相适应的一定厚度的垫层。

2.1.14 波纹钢板 corrugated steel plate

采用热轧钢板，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形板状材料。

2.1.15 整体式螺旋形波纹钢管 helical corrugated steel pipe

钢板或钢带经加工制成的螺旋形波纹钢管。

2.1.16 整体式环形波纹钢管 annular corrugated steel pipe

钢板或钢带经加工制成的环形波纹钢管。

2.1.17 波纹钢结构板 corrugated steel structural plate

经环向加工制成的具有一定曲面、一定尺寸的波纹钢板，也称拼装式波纹管板。

2.1.18 波纹钢结构板长度 length of corrugated steel structural plate

曲面波纹钢结构板的环向弧长。

2. 1. 19 波纹钢结构板宽度 width of corrugated steel structural plate

曲面波纹钢结构板的纵向宽度。

2. 1. 20 波距 corrugation pitch

波纹剖面相邻两个波峰之间的距离。

2. 1. 21 波高 corrugation depth

波纹剖面波峰与波谷之间的垂直高度。

2. 1. 22 壁厚 plate thickness

波纹剖面的钢板厚度（不含镀锌层）。

2. 1. 23 深波纹 deep corrugations

波高在130mm及以上且波矩在380mm及以上的波纹钢结构板。

2. 1. 24 浅波纹 shallow corrugations

除深波纹外的所有波形。

2. 1. 25 圆管内径 inner diameter

从波纹钢圆管内量测的波谷之间的内圆直径。

2. 1. 26 跨径 span

结构安装成形后水平方向对应截面中心线之间的最大距离。

2. 1. 27 矢高 rise

结构安装成形后竖向对应截面中心线之间的最大距离，对于开口截面，指拱顶截面中心线与拱脚之间的竖向距离。

2. 1. 28 预拱度 camber

用来补偿闭口结构管基工后沉降的一种纵断面调节措施。

2.1.29 结构性回填土 engineered soil

波纹钢埋置式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土，以保证结构稳定性和发挥土-结构相互作用。

2.1.30 结构性回填区 structural backfill

波纹钢埋置式结构周围结构性回填土的包络范围，包括管基。

2.1.31 填土厚度 depth / height of fill

从结构拱顶波纹剖面中性轴到路面或地面或道砟底面之间的竖向距离。

2.1.32 最小填土厚度 minimum depth of cover

为保证土与结构共同作用所需要的拱顶最小填土厚度，指从拱顶（波峰）到路面结构层底面之间的竖向距离的最小值。

2.1.33 环向压力 ring compression

回填材料 and 外荷载在结构壁内产生的单位长度上的切向压力。

2.1.34 土拱作用 arching

埋置式结构周围土体对结构产生的增荷（不利土拱效应）或卸荷作用（有利土拱效应）。

2.1.35 筑堤法施工 embankment installation

筑堤法施工是指在原有（或开挖后的）开阔地面上安装波纹钢结构并填筑结构性回填和周围路堤的施工方法。

2.1.36 管沟法施工 trench installation

管沟法施工是指在原有地面开挖管沟，再安装结构并回填。

2.1.37 耐久性裕量 durability allowance

结构耐久性设计时考虑腐蚀、磨蚀等因素后，需要在结构计算所需的基材厚度的基础上额外增加的厚度。

2.1.38 柔度系数 flexibility factor

为实现在运输和安装的过程中波纹钢结构不产生永久变形,对波纹钢结构管壁柔度的度量。

2.1.39 防护涂层 protective coating

设计用于使波纹钢结构材料免遭环境侵蚀的防护层。防护层的类型包括镀铝、镀锌、高分子聚合材料、沥青和环氧树脂材料等。

2.2 符号

2.2.1 材料性能有关符号

- E ——波纹钢材料的弹性模量;
- E_s ——土体压缩模量;
- E_{sm} ——土体平均压缩模量的修正值;
- f_y ——波纹钢材料屈服强度;
- M_p ——波纹钢截面的塑性抗弯承载力标准值;
- N_s ——波纹钢结构的轴向抗压承载力标准值;
- p_u ——管拱形波纹钢结构拱肋极限承载力;
- R_{bs} ——纵向螺栓接缝的承载力;
- W_{pl} ——波纹钢截面的塑性截面模量;
- R_u ——波纹钢结构设计抗压承载力;
- n_h ——过水结构的糙率。

2.2.2 作用与作用效应有关符号

- A_L ——跨径长度范围内布置的设计车辆荷载总轴重;
- E_d ——设计作用组合效应;
- E_u ——竖向地震作用;
- F ——运营阶段波纹钢截面的推力组合值;

- F_{ax} ——车辆的最不利轴重；
 F_G ——永久作用产生的管壁压力标准值；
 F_l ——活载的等效线荷载；
 F_Q ——可变作用产生的管壁压力标准值；
 F_E ——竖向地震作用产生的管壁压力标准值；
 G ——永久作用；
 l_l, l_t ——车辆荷载沿车道横向和纵向扩散至结构顶部的尺寸；
 M ——施工阶段波纹钢截面的弯矩组合值；
 M_l ——填土至拱顶高度时，填土产生的弯矩；
 M_B ——拱顶至 H_c 高度填土填土产生的弯矩；
 M_C ——施工活载产生的弯矩；
 M_f ——运营阶段波纹钢截面的弯矩组合值；
 P ——施工阶段波纹钢截面的最不利推力组合值；
 p_Q ——可变作用产生的管顶压力（考虑冲击系数）；
 p_h ——管拱结构拱腋处法向压力；
 p_t ——管拱结构拱顶处法向压力；
 p_b ——管拱结构拱底处法向压力；
 Q ——运营阶段的可变作用；
 Q_c ——施工过程中的可变作用；
 W ——拱上填土每延米的重量；
 Δ ——开口结构两侧基础之间的沉降差。

2.2.3 几何参数有关符号

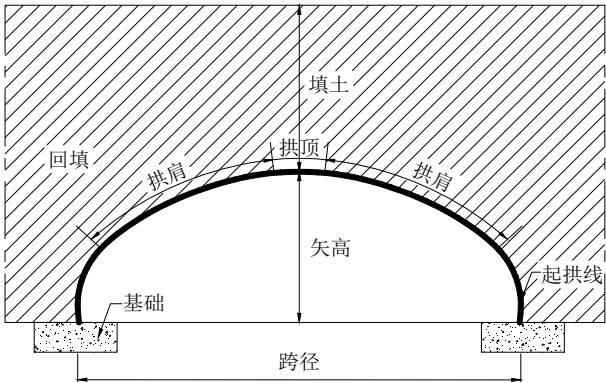
- A ——单位宽度波纹钢截面面积；
 d_h ——波纹钢埋置式结构的有效跨径（详见图 3.2.2）；

- d_v —— 波纹钢埋置式结构竖向尺寸（详见图 3.2.2）；
 H —— 波纹钢埋置式结构填土高度；
 H' —— 起拱线到拱顶之间垂直距离的一半；
 H_e —— 有效填土高度；
 H_c —— 实际填土厚度；
 I —— 单位宽度波纹管截面惯性矩；
 i —— 波纹截面的回转半径；
 R_s —— 波纹钢埋置式结构的有效矢高（详见图 3.2.2）；
 r —— 波纹钢结构的曲率半径；
 r_e —— 等效半径；
 r_h —— 拱腋曲率半径（详见图 3.2.2）；
 r_t —— 结构拱顶曲率半径（详见图 3.2.2）；
 r_b —— 拱底曲率半径（详见图 3.2.2）；
 S_m —— 多跨结构之间的最小横向净间距；
 b —— 结构单侧结构性回填区宽度（详见图 3.2.2）；
 h_b —— 结构拱顶以上结构性回填区高度（详见图 3.2.2）。

2.2.4 计算系数及其他有关符号

- A_v —— 地震加速度的竖向分量；
 A_h —— 水平向设计基本地震动加速度峰值；
 C_s —— 考虑回填土性质与结构尺寸的轴向刚度参数；
 F_f —— 波纹钢结构柔度系数；
 $F_{f,max}$ —— 波纹钢结构最大柔度系数；
 k_3 —— 结构屈曲应力折减系数；
 k_4 —— 计算等效线荷载的系数；

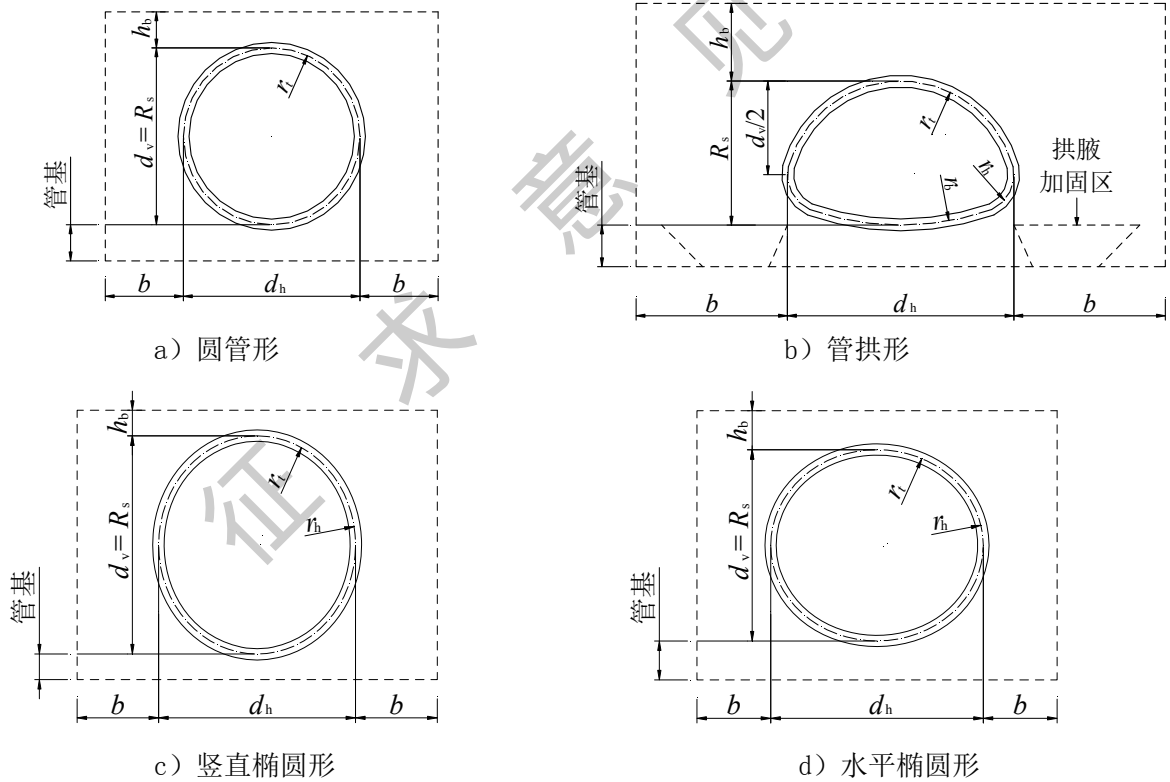
- k_5 —— 波纹钢结构管壁与相邻土体的相对刚度系数；
- k_6 —— 从拱顶至管侧土体刚度变化系数；
- k_7 —— 计算管壁相对刚度 k_5 的系数；
- k_f —— 考虑结构起拱效应的土压力增大系数；
- k_{M1} —— 用于计算波纹钢结构弯矩的参数；
- k_{M2} —— 用于计算波纹钢结构弯矩的参数；
- k_{M3} —— 用于计算波纹钢结构弯矩的参数；
- k_{M4} —— 用于计算波纹钢结构弯矩的参数；
- k_{M5} —— 用于计算波纹钢结构弯矩的参数；
- m_f —— 多车道折减系数；
- N_F —— 计算波纹钢结构弯矩的柔度数；
- γ_G —— 永久作用的组合系数；
- γ_Q —— 可变作用的组合系数；
- γ_E —— 地震作用的组合系数；
- ϕ_{hc} —— 施工阶段塑性铰的材料抗力系数；
- ϕ_h —— 运营阶段塑性铰的材料抗力系数；
- ϕ_c —— 抗压承载力的材料抗力系数；
- ϕ_j —— 连接件的材料抗力系数；
- μ —— 冲击系数；
- ϕ_{bs} —— 凹拱角。



b) 开口结构

图 3.2.1 波纹钢涵洞典型横断面

3.2.2 波纹钢涵洞根据截面形状可分为圆管形、管拱形、竖直椭圆形、水平椭圆形、马蹄形拱、椭圆形拱、单圆弧拱、双圆弧拱和三圆弧拱等，如图 3.2.2 所示。



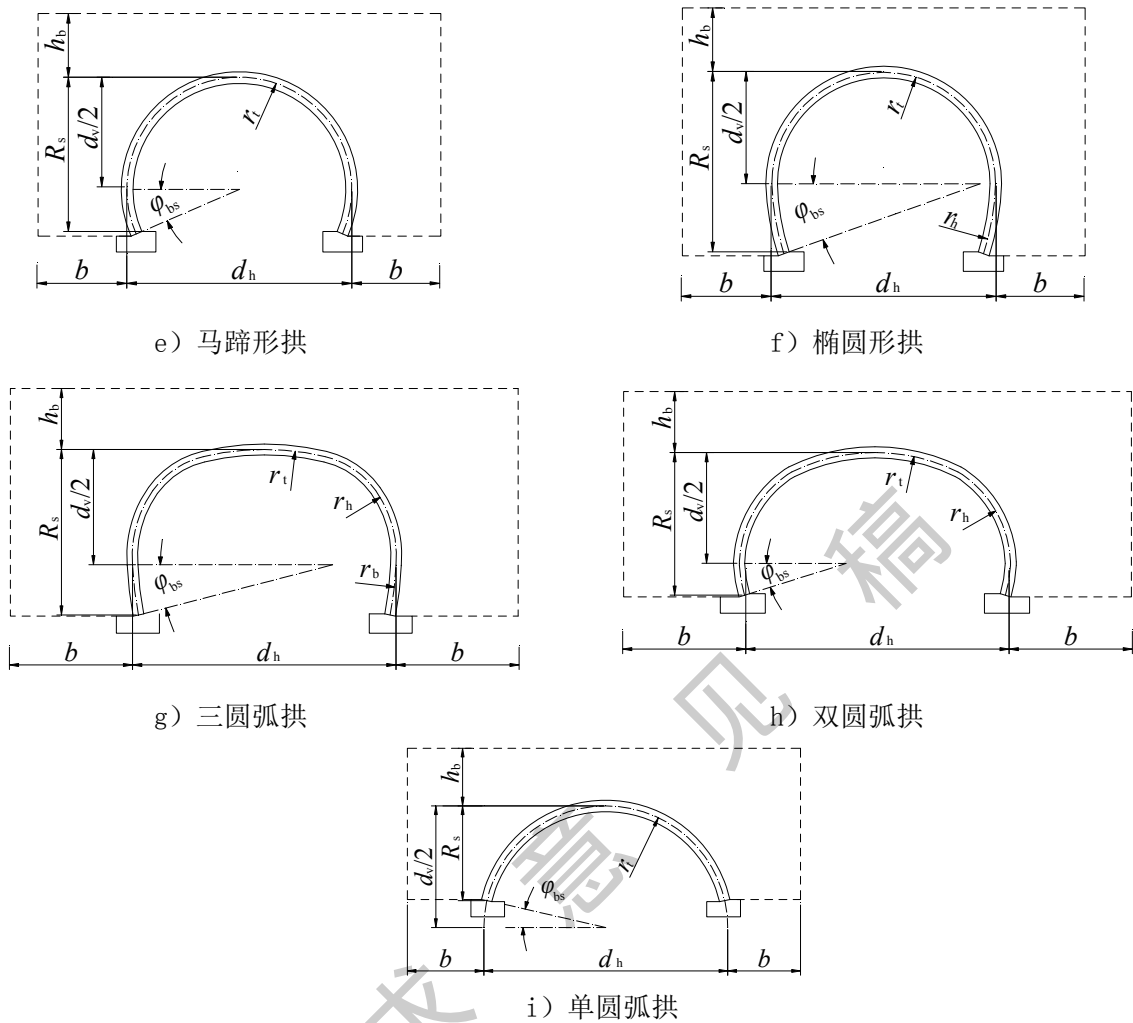


图 3.2.2 波纹管涵洞尺寸详图

3.3 布设基本要求

3.3.1 波纹管涵洞设计标准孔径、洪水频率应符合《公路工程技术标准》（JTG B01）规定。

3.3.2 波纹管涵洞与路线斜交时，洞口处宜采取斜交正做的方式。

3.3.3 当涵底纵坡大于 5%时，应对结构进行分段加固以限制其位移。

3.3.4 涵洞沿折线布设或分岔布设时，可通过弯头、三通等构造连接成整体结构。

3.4 水力水文计算

3.4.1 涵洞勘测及水力水文计算方法及要求应符合《公路涵洞设计细则》（JTG-TD65-04-2007）中的相关规定。

3.4.2 涵洞水力计算公式中的涵内糙率 n_h 与波纹形状及涵洞孔径等因素有关。

3.4.3 螺旋形波纹钢管涵洞结构的糙率可按表 3.4.3 内插取值。

表 3.4.3 螺旋形波纹钢管桥涵结构的糙率 n_h

波距×波高 mm	直径 mm				
	750	1000	1250	1500	2000
75×25	0.021	0.022	0.023	0.024	0.027
125×25	—	—	0.022	0.023	0.025

3.4.4 环形波纹钢管涵洞结构的糙率可按表 3.4.4 内插取值。

表 3.4.4 环形波纹钢管桥涵结构的糙率 n_h

波距×波高 mm	直径 mm							
	750	1000	1250	1500	2000	2500	3000	≥4000
75×25	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.027	0.027
125×25	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.025	0.025	0.024
150×50	0.025	0.025	0.025	0.025	0.024	0.023	0.023	—

3.4.5 采用波纹钢板件拼装而成的闭口截面结构，其糙率可按表 3.4.5 内插取值。

表 3.4.5 拼装板闭口截面结构的糙率 n_h

波距×波高 mm	直径或等代直径 mm				
	2500	3000	4000	5000	≥6000
150×50	0.034	0.034	0.034	0.033	0.033
200×55	0.034	0.034	0.033	0.033	0.033
注：其它波纹形状的闭口截面大跨深波纹结构的糙率可取为： 波距×波高=300×110： $n_h = 0.030\sim0.040$ 波距×波高=380×140： $n_h = 0.031\sim0.045$ 波距×波高=400×150： $n_h = 0.032\sim0.048$					

4 材料

4.1 结构主体材料

4.1.1 螺旋波纹钢管采用连续热镀锌钢板及钢带时，其性能、尺寸、外形、重量及允许偏差应符合《连续热镀锌钢板及钢带》（GB/T 2518）规定。

4.1.2 环形波纹钢管、拼装波纹钢管的材料采用碳素结构钢时，其性能应符合《碳素结构钢》（GB/T 700）要求，其尺寸、外形、重量及允许偏差应符合《热轧钢板和钢带的重量及允许偏差》（GB/T 709）的规定，且厚度的下偏差应不小于零。

4.1.3 环形波纹钢管、拼装波纹钢管的材料采用低合金高强度结构钢时，其性能应符合《低合金高强度结构钢》（GB/T 1591）要求，其尺寸、外形、重量及允许偏差应符合《热轧钢板和钢带的重量及允许偏差》（GB/T 709）的规定，且厚度的下偏差应不小于零。

4.2 连接件

4.2.1 管箍、法兰盘的材料采用碳素结构钢时，其性能应符合《碳素结构钢》（GB/T 700）要求，其尺寸、外形、重量及允许偏差应符合《热轧钢板和钢带的重量及允许偏差》（GB/T 709）的规定。

4.2.2 法兰盘的材料采用角钢时，其性能应符合《碳素结构钢》（GB/T 700）要求，尺寸、重量、允许偏差应符合《热轧型钢》（GB/T 706）的规定。

4.2.3 连接件采用高强度螺栓、螺母，强度等级不低于 8.8 级，其力学性能指标应符合《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 1231）的要求。

4.2.4 高强度螺栓、螺母规格为 M12、M16、M20、M24，螺栓长度宜为 30mm～70mm。

4.2.5 结构用高强度垫圈采用专用垫圈，其力学性能指标应符合《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 1231）的规定。

4.3 焊接材料

4.3.1 焊接材料的采用应符合《焊接质量要求 金属材料的熔化焊》（GB/T 12467）的要求。

4.3.2 焊接材料的质量应符合《焊接材料质量管理规程》（JB/T 3223）的要求。

4.4 密封材料

4.4.1 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。

4.4.2 对于密封要求一般的工程，密封材料可采用聚乙烯发泡材料、天然橡胶、氯丁橡胶、EVA 泡沫板或耐候密封胶等。对于密封要求较高的项目，则应选择与板片粘结力强、使用年限长、耐久性高的密封材料。

4.5 结构性回填材料

4.5.1 结构性回填材料宜采用砾类土、砂类土，或砾、卵石与细粒土的混合料；当细粒土的成分为黏性土或粉土时，所掺入的石料体积应占总体积的 2/3 以上。

4.5.2 结构性回填材料应具有良好的透水性，渗透系数不小于 10^{-3}cm/s ，塑性指数不应大于 6。

4.5.3 在距波纹钢管 0.3m 范围内的填土中，不得含有尺寸超过 80mm 的石块、混凝土块、冻土块、高塑性黏土块或其他有害腐蚀材料。

4.5.4 寒冷地区，回填料中粘性土或粉性土含量应不大于混合料体积的 5%。

5 结构设计

5.1 一般规定

5.1.1 根据使用条件和环境要求，公路波纹钢涵洞可按本规程附录 B 的流程图进行设计。

5.1.2 公路波纹钢涵洞宜按正常使用极限状态和承载能力极限状态设计，其中承载能力极限状态验算内容见表 5.1.2 的内容。

表 5.1.2 验算项目

设计验算	适用条款
结构破坏	5.4
塑性铰破坏	5.5
连接破坏	5.6

5.1.3 承载能力极限状态设计可按本规程附录 B 的流程图 B.2 进行设计。

5.1.4 按正常使用极限状态设计时，应对结构的变形进行验算，可采用数值方法。

5.2 作用

5.2.1 承载能力极限状态的设计作用应符合以下规定：

1. 永久作用应考虑结构顶部所有回填的自重，包括路基路面；
2. 可变作用应考虑运营阶段车辆荷载及施工阶段的施工车辆荷载；
3. 偶然作用应考虑地震作用，抗震设计要求应符合《公路工程技术标准》（JTGB01-2014）的规定。

5.2.2 按承载能力极限状态进行作用效应组合，取最不利效应组合 E_d 进行设计， E_d 应根据不同状态按下列公式计算：

1. 对于结构破坏、连接破坏或运营阶段的塑性铰破坏：

1) 运营阶段的永久作用与可变作用组合：

$$E_d = (\gamma_G G, \gamma_Q Q) \dots\dots\dots (1)$$

2) 运营阶段的永久作用与地震作用组合：

$$E_d = (\gamma_G G, \gamma_E E_u) \dots\dots\dots (2)$$

2. 对于施工阶段塑性铰破坏, 应取施工阶段的永久作用和可变作用组合:

$$E_d = (\gamma_G G, \gamma_Q Q_c) \dots\dots\dots (3)$$

式中:

E_d ——设计作用效应组合;

γ_G 、 γ_Q 、 γ_E ——永久作用、可变作用、地震作用的组合系数, 按《公路桥涵设计

通用规范》(JTG D60-2015) 取值;

G ——永久作用;

Q ——运营阶段的可变作用;

Q_c ——施工阶段的可变作用;

E_u ——竖向地震作用。

5.3 内力计算

承载能力极限状态的设计内力应符合以下规定:

1. 波纹管涵洞中由永久作用产生的管壁压力应按下列公式计算:

$$(\gamma_G, G) = \gamma_G F_G = \gamma_G \times 0.5 k_f W (1.0 - 0.1 C_s) \dots\dots\dots (4)$$

$$C_s = \frac{E_s d_v}{EA} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

F_G ——永久作用产生的管壁压力标准值;

k_f ——考虑结构起拱效应的土压力增大系数, 见图5.3;

W ——拱上填土每延米的重量, 见图5.3;

C_s ——考虑回填土性质与结构尺寸的轴向刚度参数;

E_s ——土体压缩模量;

E ——波纹钢材料弹性模量;

d_v ——波纹钢埋置式结构竖向尺寸 (详见图3.2.2);

A ——单位宽度波纹钢截面面积。

注：
计算施工阶段的永久作用产生的内力时，应按当前施工阶段回填高度计算。

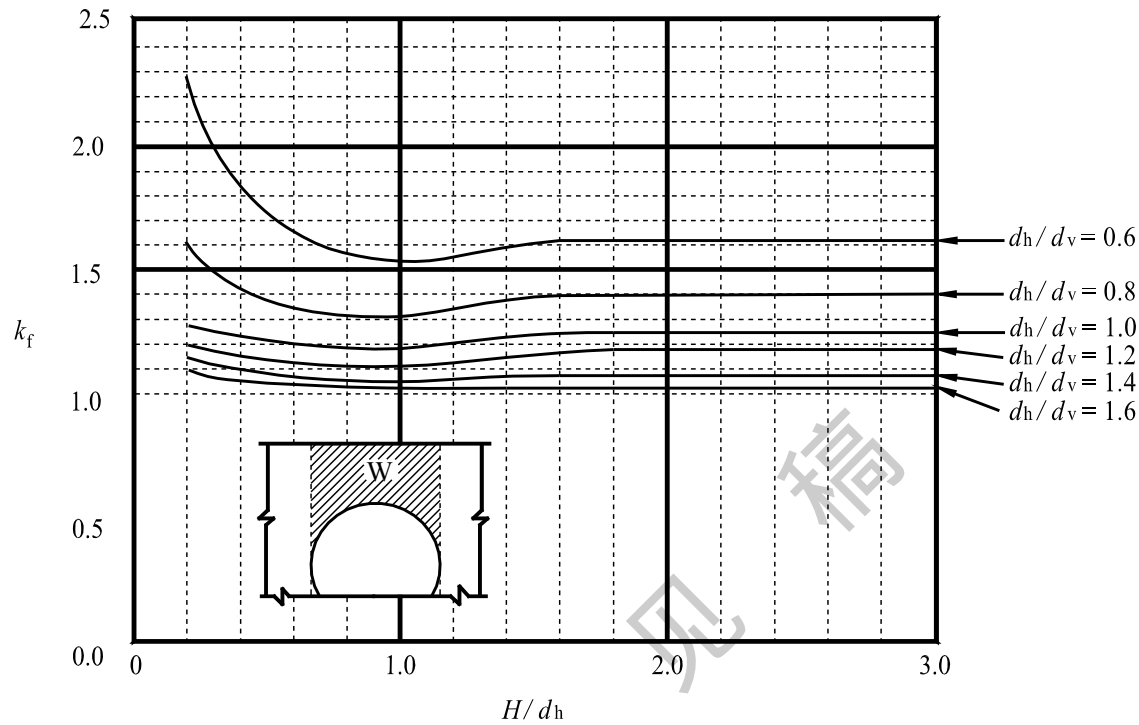


图 5.3 土压力增大系数 k_f 关系图

2. 波纹管涵洞中由可变作用产生的管壁内力应按以下公式计算：

$$(\gamma_Q, Q) = \gamma_Q F_Q = \min(\gamma_Q 0.5 d_h p_Q m_f, \gamma_Q 0.5 l_t p_Q m_f) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$p_Q = \frac{A_L (1 + \mu)}{l_1 \cdot l_t} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中：

- F_Q ——可变作用产生的管壁压力标准值；
- p_Q ——可变作用产生的管顶压力；
- m_f ——多车道折减系数；
- A_L ——跨径长度范围内布置的设计车辆荷载总轴重；
- l_1, l_t ——沿车道横向和纵向扩散至结构顶部的尺寸，按《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60-2015）计算。

3. 施工阶段可变作用产生的管壁压力 (γ_Q, Q_c) 计算方法与运营阶段相同，按照施工临时机械或施工车辆计算。

4. 波纹钢涵洞仅考虑竖向地震作用，地震作用产生的管壁压力按下式计算：

$$(\gamma_E, E_u) = \gamma_E F_u = \gamma_E F_G A_v / g \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$A_v = 0.7 A_h \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中：

F_u ——竖向地震作用产生的管壁压力标准值；

F_G ——永久作用产生的管壁压力标准值；

A_v ——竖向加速度；

A_h ——水平向设计基本地震动加速度峰值，见表5.3。

表 5.3 水平向设计基本地震动加速度峰值 A_h

抗震设防烈度	7	8	9
A_h	0.10g~0.15g	0.20g~0.30g	0.40g

5.4 结构破坏验算

结构破坏的承载能力极限状态应按下列公式计算：

$$\phi_c \cdot \min(R_u, f_y) \geq F \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\text{当 } r \leq r_e \text{ 时, } R_u = k_3 \left[f_y - \frac{(f_y k_5 r)^2}{12 E i k_6} \right] \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\text{当 } r > r_e \text{ 时, } R_u = \frac{3 k_3 k_6 E}{[k_5 R / i]^2} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$r_e = \left(\frac{6 E k_6}{f_y} \right)^{0.5} \frac{i}{k_5} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$k_5 = k_7 \left(\frac{E I}{E_{sm} r^3} \right)^{0.25} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$k_6 = \left(\frac{H + H'}{r_i} \right)^{0.5} \leq 1.0 \quad \dots\dots\dots (15)$$

结构管壁应根据两条对称的半径线分上、下两部分验算结构破坏，从竖直线到半径线的夹角 $\theta_0 = 1.6 + 0.2 \cdot \lg \left(\frac{E I}{E_{sm} r^3} \right)$ 为分界点。

式中：

ϕ_c ——抗压承载力的材料抗力系数，取0.8；

R_u ——波纹钢结构设计抗压承载力；

F ——运营阶段波纹钢截面承受的推力组合值，取组合值 $[\gamma_G G, \gamma_Q Q]$ 、

$[\gamma_G G, \gamma_E E_u]$ 的最大值；

r ——波纹钢结构的曲率半径；

r_e ——等效半径；

k_3 ——结构屈曲应力折减系数，对于单跨结构，取 $k_3=1.0$ ；对于多跨结构，取

$$k_3 = 0.85 + 0.3S_m / d_h, \text{ 大于1时取1；}$$

f_y ——波纹钢材料的屈服强度；

k_5 ——波纹钢结构管壁与相邻土体的相对刚度系数；

i ——波纹截面的回转半径；

k_6 ——从管顶到管侧土体刚度变化的系数；

S_m ——多跨结构之间的最小横向净间距；

E_{sm} ——土体平均压缩模量的修正值，对于结构的两侧和下半部分，分别取 $E_{sm} = E_s$ 、

$$E_{sm} = E_s \left[1 - \left(\frac{r_t}{r_t + H + H'} \right)^2 \right];$$

H ——填土高度；

H' ——起拱线至拱顶之间垂直距离的一半；

r_t ——结构拱顶处曲率半径；

k_7 ——计算 k_5 的一个系数，对于除 $R_s < d_v / 2$ 且 $d_v / d_h < 0.4$ 的圆拱结构之外的所有结构上

$$\text{半部分， } k_7 = 1.22 \left[1.0 + 1.6 \left(\frac{EI}{E_{sm} r_t^3} \right)^{0.25} \right]; \text{ 其余情况下，取 } k_7 = 1.22。$$

5.5 塑性铰破坏验算

(1) 运营阶段

$$\left(\frac{F}{\phi_h N_s}\right)^2 + \left|\frac{M_f}{\phi_h M_p}\right| \leq 1.0 \quad \dots\dots\dots (16)$$

(2) 施工阶段

$$\left(\frac{P}{\phi_{hc} N_s}\right)^2 + \left|\frac{M}{\phi_{hc} M_p}\right| \leq 1.0 \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$N_s = A f_y \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$M_p = W_{pl} f_y \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$M_f = |\gamma_G M_1 + \gamma_G M_B| + \gamma_Q M_C (1 + \mu) \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$M = M_1 + M_B + M_C \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$M_1 = k_{M1} k_{M4} \gamma d_h^3 \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$M_B = -k_{M2} k_{M4} \gamma H_c d_h^2 \quad \dots\dots\dots (23)$$

$$M_C = k_{M3} k_{M5} d_h F_1 \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$k_{M1} \begin{cases} \text{当 } N_F \leq 5000 \text{ 时, } k_{M1} = 0.0046 - 0.001 \lg(N_F) \\ \text{当 } N_F > 5000 \text{ 时, } k_{M1} = 0.0009 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (25)$$

$$k_{M2} \begin{cases} \text{当 } N_F \leq 5000 \text{ 时, } k_{M2} = 0.018 - 0.004 \lg(N_F) \\ \text{当 } N_F > 5000 \text{ 时, } k_{M2} = 0.0032 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (26)$$

$$k_{M3} \begin{cases} \text{当 } N_F \leq 100\,000 \text{ 时, } k_{M3} = 0.120 - 0.018 \lg(N_F) \\ \text{当 } N_F > 100\,000 \text{ 时, } k_{M3} = 0.030 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (27)$$

$$k_{M4} \begin{cases} \text{当 } 0.2 \leq \frac{d_v}{2d_h} \leq 0.35 \text{ 时, } k_{M4} = 0.67 + 0.87 \left(\frac{d_v}{2d_h} - 0.2 \right) \\ \text{当 } 0.35 < \frac{d_v}{2d_h} \leq 0.50 \text{ 时, } k_{M4} = 0.80 + 1.33 \left(\frac{d_v}{2d_h} - 0.35 \right) \\ \text{当 } \frac{d_v}{2d_h} > 0.50 \text{ 时, } k_{M4} = \frac{d_v}{d_h} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (28)$$

$$k_{M5} = \frac{[0.265 - 0.053 \lg(N_F)]}{(H_c / d_h)^{0.75}} \leq 1.0 \quad \dots\dots\dots (29)$$

$$F_1 = \frac{F_{ax}}{k_4} \quad \dots\dots\dots (30)$$

$$N_F = \frac{E_s d_h^3}{EI} \quad \dots\dots\dots (31)$$

式中:

ϕ_h ——营运阶段塑性铰的材料抗力系数, 取0.85;

ϕ_{hc} ——施工阶段塑性铰的材料抗力系数，取0.9；

N_s ——波纹钢结构的轴向抗压承载力标准值；

M_p ——波纹钢截面的塑性抗弯承载力标准值；

M_f ——运营阶段波纹钢截面的弯矩组合值；

P ——施工阶段波纹钢截面的最不利推力组合值，取组合值 $[\gamma_G G, \gamma_Q Q_c]$ ；

M ——施工阶段波纹钢截面的弯矩组合值；

W_{pl} ——波纹钢截面的塑性截面模量；

H_c ——实际填土高度，对于运营阶段，指最终填土高度；对于施工阶段，指当前填土高度；

H_e ——有效填土高度，对于营运阶段，取 H 和 $d_h/2$ 的较小值；对于施工阶段，取该阶段的回填高度；

F_l ——活载的等效线荷载，对于运营阶段，指车辆荷载的等效线荷载；对于施工阶段，指施工车辆的等效线荷载；

F_{ax} ——车辆的最不利轴载；

k_4 ——计算等效线荷载时使用的系数，见表5.5-1；

N_F ——计算波纹钢结构弯矩的弹性系数。

表5.5-1 用于计算等效线荷载的 k_4 值

填土厚度 m	k_4 (m)		
	每轴理论双轮	每轴理论四轮	每轴理论八轮
0.6	1.65	1.95	2.81
0.9	2.34	2.61	3.22
1.5	3.69	3.75	4.03
2.1	4.41	4.40	4.51
3.0	4.82	4.82	4.82
4.5	6.62	6.62	6.62
6.0	8.42	8.42	8.42
≥ 9.0	12.02	12.02	12.02

每轴理论轮数应按表5.5-2确定。

表5.5-2 每轴理论轮数

轴重类型	每轴理论轮数
单轴，每轴双轮	2
单辆，每轴四轮	4
双轴，每轴双轮	4
双轴，每轴双轮或四轮	8
三轴，每轴双轮或四轮	8
相邻车道的轴重	8

5.6 连接破坏验算

纵向螺栓连接破坏的承载能力极限状态应按下式计算：

$$\phi_j R_{bs} \geq E_d \quad \dots\dots\dots (32)$$

式中：

- ϕ_j ——连接件的材料抗力系数， R_{bs} 由试验数据得到时，取0.7； R_{bs} 无试验数据时，取1.0；
- R_{bs} ——纵向螺栓接缝的承载力：

- 1) 纵向螺栓接缝的承载力 R_{bs} 根据生产商提供的试验数据确定时，试验方法应符合本规程附录 C 的有关规定；
- 2) 无试验数据时， R_{bs} 的可根据《钢结构设计规范》（GB 50017-2014）计算。

6 构造规定

6.1 洞身构造要求

6.1.1 波纹钢整体管涵洞：

1. 螺旋带肋钢管和螺旋形波纹钢管可采用工厂咬口方式连接或平行式连接。
2. 环形波纹钢管可采用轴向法兰盘连接或采用半圆管节翻边连接。

6.1.2 波纹钢拼装管涵洞：

1. 板分片尺寸由母材尺寸及镀锌、吊装、运输和拼装条件确定。
2. 波纹钢板纵、环向均须错缝搭接，环向搭接长度不宜小于 50 mm，纵向搭接长度不宜小于 100 mm；
3. 波纹管内外两面和紧固连接件等均须进行镀锌防腐处理，接缝应进行密封防水防腐处理。

6.1.3 在运营车辆荷载、施工荷载及特殊荷载作用下，应分别验算波纹钢涵洞最小填土厚度，并满足下列要求，最小填土厚度定义见图 6.1.3。

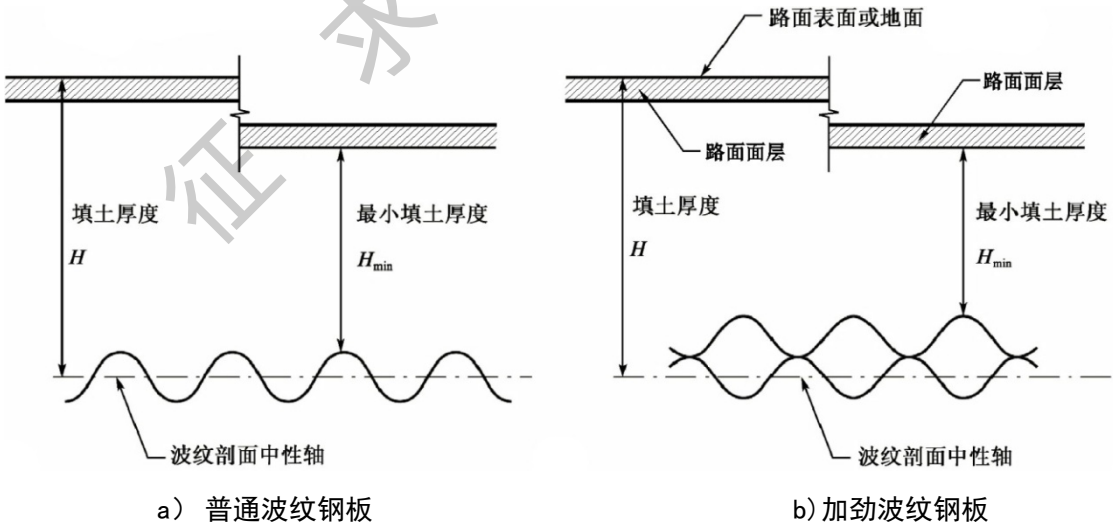


图 6.1.3 填土厚度与最小填土厚度的定义

1. 最小填土厚度应符合以下要求：
 - 1) 对于浅波纹的拼装波纹板结构，其最小填土厚度取下式的较大值：

$$\begin{cases} \text{(i)} 600\text{mm}; \\ \text{(ii)} d_h / 6 \times \sqrt{d_h / d_v} \\ \text{(iii)} 400\text{mm} \times (d_h / d_v)^2 \end{cases} \dots\dots\dots (33)$$

式中， d_h 和 d_v 分别为波纹涵洞的有效跨度和竖向尺寸。

- 2) 对于深波纹的拼装波纹板结构，其最小填土厚度取 1500 mm 和按同尺寸浅波纹结构计算的最小填土厚度的较小值。
- 3) 施工荷载或特殊荷载的最小填土厚度应根据以下规定取值：
- 4) 最小填土厚度应根据实际施工荷载或特殊荷载进行计算；
- 5) 最小填土厚度应不小于运营车辆荷载的最小填土厚度。

6.1.4 多涵洞并列设置和安装时，间距应满足表 6.1.4 中的最小间距要求。

表 6.1.4 多涵洞的最小间距

结构性回填 类型	相邻涵洞的最小净距（mm）				
	$d_h \leq 600$	$600 < d_h \leq 3000$	$3000 < d_h \leq 8000$	$8000 < d_h \leq 12000$	$d_h > 12000$
压实型	600	800	1000	1200	通过极限状态设计 或数值分析确定

6.1.5 结构性回填应满足以下规定：

- 1. 单管结构的结构性回填应从结构两侧起拱线开始，管断面横向分别向外延伸不小于表 6.2 中的长度；
- 2. 多管结构，相邻结构之间间隙应进行结构性回填，采用结构性回填材料时应分层压实，且结构性回填应从最外侧结构横向向外延伸不小于表 6.1.5 中的长度；
- 3. 结构性回填区的高度为结构的最小填土厚度顶面。

表 6.1.5 波纹涵洞埋置式单管结构回填的最小横向距离

施工 方法	地基类型	回填最小横向距离 b mm				
		$d_h \leq 600$	$600 < d_h \leq 3000$	$3000 < d_h \leq 8000$	$8000 < d_h \leq 12000$	$d_h > 12000$
管沟法	岩石	600	800	1000	1200	1200
	基底土体强度大于 回填土的良好基础	600	800	1000	1200	1200
	沟壁材料强度小于 回填土的软弱基础	600	$d_h / 2$ 但不小于 600	$d_h / 2$ 但不小于 1500	$d_h / 2$ 但不小于 3000	$d_h / 2$ 但不小于 5000
筑堤法	—	600	$d_h / 2$ 但不小于 800	$d_h / 3$ 但不小于 1500	$d_h / 3$ 但不小于 3000	$d_h / 3$ 但不小于 5000
注：管沟法施工时，最小横向回填距离应考虑对压实机械设备预留安全操作范围； 对于竖向尺寸较大的竖立椭圆形，取 $d_h = d_v$ 。						

6.1.6 波纹钢管或板件在运输和安装过程中应验算最大柔度。柔度系数应按式计算：

$$F_f = \frac{d_h^2}{EI} \leq F_{f,\max} \dots\dots\dots (34)$$

式中：

F_f ——波纹钢结构柔度系数；

$F_{f,\max}$ ——波纹钢结构的最大柔度系数，见表6.1.6。

表 6.1.6 最大柔度系数 $F_{f,\max}$

波纹参数（波距×波高） mm	施工方法	
	管沟法 (mm/N)	筑堤法 (mm/N)
75×25	0.343	0.247
125×25	0.188	0.188
150×50	0.114	圆管：0.114；非圆管：0.171
200×55	0.114	圆管：0.114；非圆管：0.171
300×110	0.114	圆管：0.114；非圆管：0.171
380×140	0.114	圆管：0.114；非圆管：0.171
400×150	0.114	圆管：0.114；非圆管：0.171
注：当施工不确定为管沟法或筑堤法时，应假设为筑堤法。		

6.1.7 对于多圆弧组成的开口或闭口截面，管壁在任意位置处的曲率半径都不应小于拱顶曲率半径的 0.2 倍。

6.1.8 对于高填方闭口结构，应根据涵底坡度和拱底处地基的预期最大变形，确定设置预拱度。预拱度一般为涵洞长度的 0.5%~1%，涵洞中心的高程应不高于进水口的高程。

6.2 洞口构造要求

6.2.1 波纹钢涵洞应根据地质、地形、路基边坡等因素优先采用削竹式、簸箕式轻型进出口形式。

6.2.2 削竹式洞口适用于涵洞管径与沟宽基本一致，无需集纳和扩散水流的农田灌溉涵洞。

6.2.3 削竹式洞口宜采用混凝土领圈进行加固，如图 6.2.3。流速较大时，应对边坡迎水面进行铺砌加固，并设置隔水墙和趾部锚固措施。

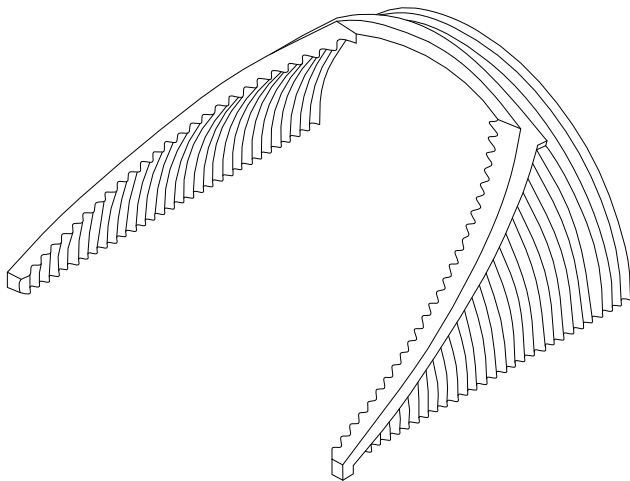


图 6.2.3 混凝土领圈

6.2.4 簸箕形洞口宜在工厂轧制成型，端部与洞身采用螺栓或管箍连接，适用于流速较大的涵洞。

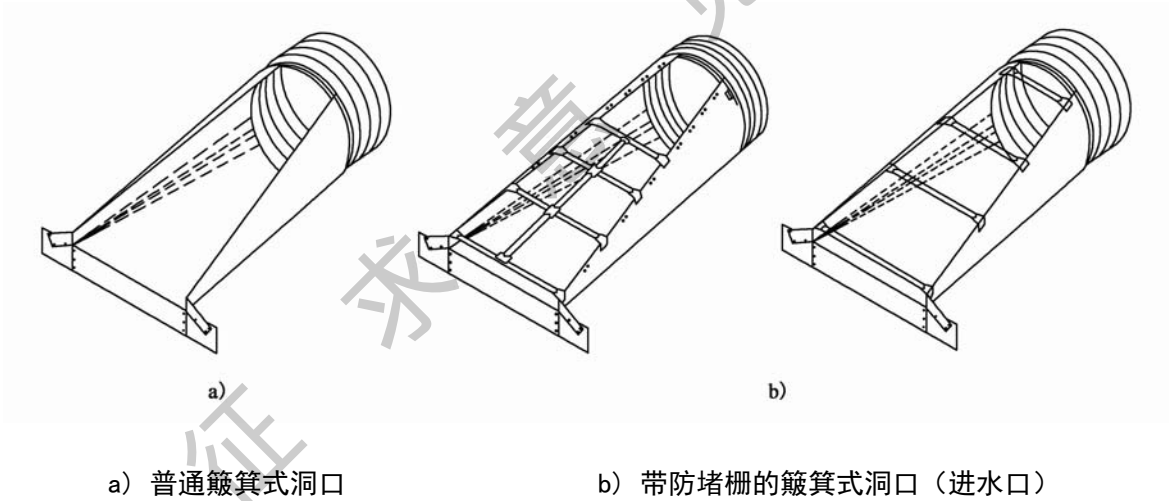


图 6.2.4 簸箕式洞口

6.3 进出口沟床加固及防护设计

- 6.3.1 应根据河沟纵坡按照《公路涵洞设计细则》（JTG-TD65-04-2007）对进出水口沟床进行加固及防护设计。
- 6.3.2 当采用直立式或削竹式洞口的涵洞与路线斜交时，洞口边坡坡顶宜适当加宽形成一个平坦或坡度较缓的平台，以避免洞口两侧回填的不平衡，如图 6.3.2。

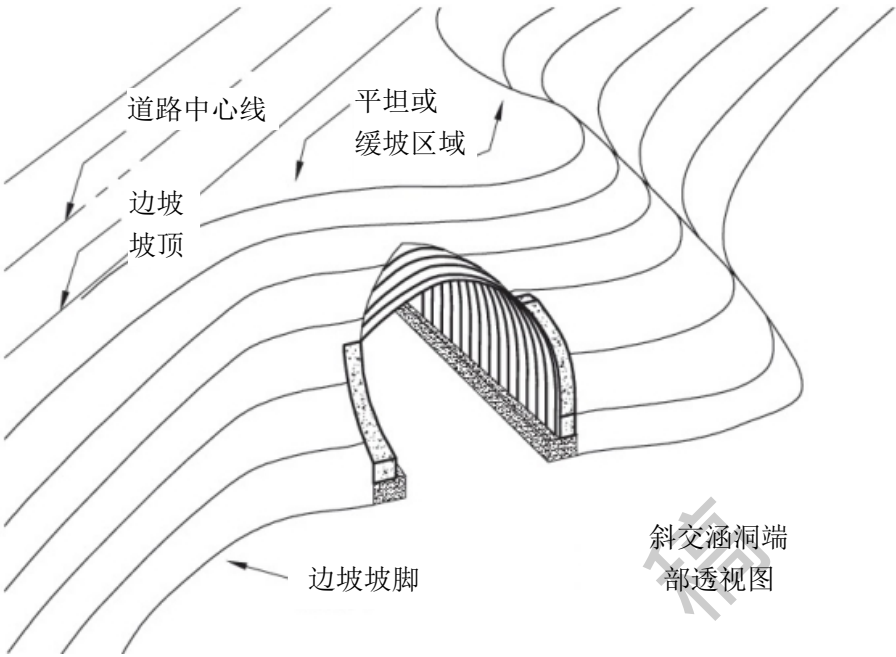


图 6.3.2 斜交涵洞端部处理

7 地基与基础

7.1 涵底管基

7.1.1 管基材料宜采用级配良好的天然砂砾，最大粒径不宜超过 50mm。

7.1.2 不同地基条件下闭口结构管基的最小厚度与宽度应满足表 7.1.2 要求。

表 7.1.2 闭口结构管基的最小厚度与宽度

地基条件		最小厚度	最小宽度
优质土地基		可直接将地基作为管基	
一般性 土地基	跨径<900 mm	200 mm	$2d_h$
	跨径=900 mm~2000 mm	300 mm	
	跨径>2000 mm	$0.2d_h$	
岩石地基		200 mm~400 mm，但当填土厚度大于 5m 时，填土每增高 1.0 m，其厚度增加 40 mm	$2d_h$
软土地基		$0.3d_h \sim 0.5d_h$ 或 500mm 以上	$2d_h \sim 3d_h$

注：1. 优质土地基指天然地基符合管基的材料性能要求。

7.2 基础设计

7.2.1 基础设计应满足《公路桥涵地基与基础设计规范》（JTG D63-2007）要求。

7.2.2 基础宜采用钢筋混凝土或圬工基础，地基承载力较低时可采用波纹钢基础。

7.2.3 波纹钢拱脚应采用钢板连接件与混凝土基础连接，钢板连接件底面应与拱脚处切线垂直。

7.3 地基和基础沉降

7.3.1 结构地基的沉降量应大于两侧结构回填区的地基沉降量，沉降差应小于 25 mm；

7.3.2 管基的工后沉降应与路基沉降相同，且不得大于 200mm。

7.3.3 开口结构两侧基础之间的沉降差应满足下列公式要求：

$$\Delta \leq 0.01 \times \frac{d_h^2}{R_s} \dots\dots\dots (35)$$

式中:

Δ ——两侧基础之间的沉降差 (mm);

d_h ——开口结构的跨径 (mm);

R_s ——开口结构的矢高 (mm)。

7.3.4 开口结构基础应与结构性回填沉降一致, 不宜采用桩基础。

7.4 地基处理

7.4.1 对于软土地基, 应先进行软基处理再填筑管基。对于岩石地基, 应开挖换填后再填筑管基, 换填厚度不小于 30cm。

7.4.2 膨胀土、湿陷性黄土地区涵洞管基一下应做隔水处理。

7.4.3 冻土地区管基厚度应不小于 50cm, 材料中 0.074mm 以下粉黏粒含量不得超过 3%。

7.4.4 当结构纵向位于岩石地基与土质地基的强弱变化区时, 应在分界处换填长度为 $4d_h$ 的过渡段, 过渡段材料宜为砂砾。

7.5 拱腋处承载力计算

7.5.1 拱液压力的极限状态应符合下式:

$$p_h = \frac{E_d}{A \times 10^{-6}} \times \frac{r_i}{r_h} \leq p_u \quad \dots\dots\dots (36)$$

式中:

p_h ——荷载在管拱形波纹钢结构拱腋处产生的压力 (kPa), 见图 7.5.1;

E_d ——最不利设计作用效应 (kN/m);

A ——单位长度的波纹钢管 (板) 截面积 (mm^2/mm);

r_i ——拱顶半径 (波纹中性轴) (mm);

r_h ——拱腋半径 (波纹中性轴) (mm);

p_u ——管拱形波纹钢结构拱腋极限承载力 (kPa), 见表 7.5.1。

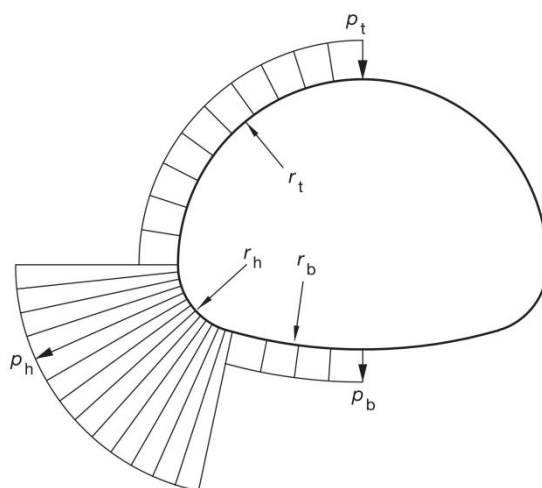


图 7.5.1 压力绕管拱形状的变化（图中 p_t 、 p_b 、 p_h 分别为顶部、底部和拱腋处的压力）

表 7.5.1 拱腋极限承载力

拱腋处的回填材料	拱腋极限承载力 p_a kPa
结构性回填土	450
均匀的粗碎石 (<40mm)	900
胶结砂/碎石 (3~6%)	1350

7.5.2 当管拱拱腋处的土体地基承载力不满足要求时，应采用级配良好的粗砂或砂砾换填，压实度不小于 96%，如图 7.5.2 所示。

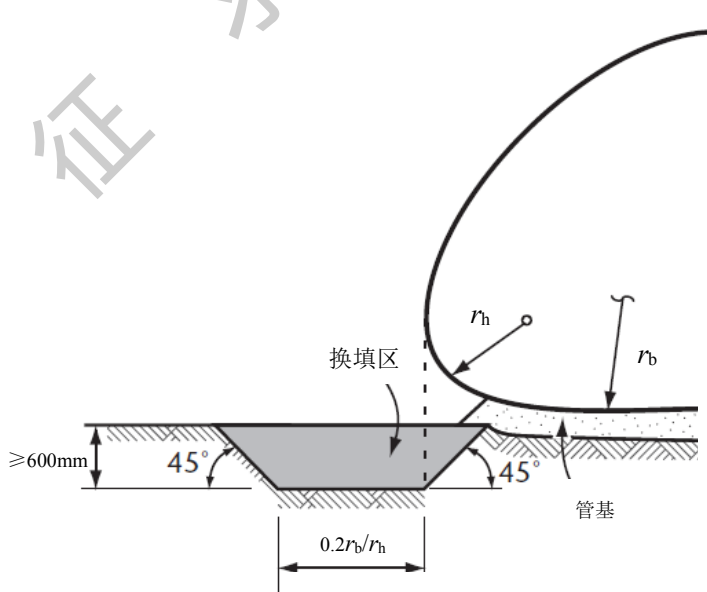


图 7.5.2 管拱拱腋地基的加固

8 加固设计

8.1 一般规定

- 8.1.1 波纹钢涵洞加固设计适用于公路涵洞、通道。
- 8.1.2 波纹钢涵洞加固设计应核实泄洪流量及通行净空。
- 8.1.3 加固前应按照相关规范对原结构技术状况、承载能力进行检测、评定。
- 8.1.4 灌浆材料宜采用抗压强度不小于 2.1Mpa 的无收缩水泥砂浆混合料。

8.2 加固的结构设计

- 8.2.1 加固设计应满足承载能力极限状态和正常使用极限状态设计的规定。
- 8.2.2 结构计算宜采用数值法，原结构剩余承载力无法确定时可忽略不计。

8.3 加固施工

- 8.3.1 加固前应清除旧结构物内的杂物、泥沙等碎屑，对裸露的钢筋进行除锈防腐处理，修补原结构物裂缝。
- 8.3.2 波纹钢涵洞底部与原有结构之间应维持不小于 5cm 的空隙，以方便灌浆。
- 8.3.3 波纹钢涵洞周围与原有结构之间应设制限位块，防止灌浆时偏移和上浮。
- 8.3.4 当管径小于或等于 1m 时，可从波纹钢涵洞顶部一次浇筑。当管径大于 1m 时，应沿管周从下向上分阶段对称灌注。
- 8.3.5 灌浆应连续，并确保填充密实。

9 耐久性设计

9.1 一般规定

9.1.1 波纹涵洞所用钢板及配件应具有足够的耐腐蚀与磨蚀能力，设计和施工应考虑防腐与磨蚀裕量，耐久性设计方法可参考附录 D。

9.2 防腐与磨蚀材料质量要求

波纹涵洞应使用镀锌涂层提高耐久性，也可使用其他金属或非金属涂层，或使用内衬提高过水能力和耐磨性能。

9.2.1 常用的金属涂层应满足以下要求：

1. 热浸镀锌应采用《锌锭》（GB/T 470-2008）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 9.2.1 的规定。
2. 当采用静电喷涂等其他防腐方法代替热浸镀锌时，应有试验验证资料，确保其防腐性能不低于表 9.2.1 规定的热浸镀锌方法的相应要求。
3. 铝-锌合金涂层钢板表面的附着量不小于 214g/m^2 ，且每个表面的涂层厚度不小于 $30\mu\text{m}$ 。

表 9.2.1 热浸镀锌质量要求

项 目	要 求
单面镀锌层厚度	板厚 $< 4.0\text{mm}$ 时， $\geq 65\mu\text{m}$ ；板厚 $\geq 4.0\text{mm}$ 时， $\geq 86\mu\text{m}$ ；。
单面附着量 (g/m^2)	波纹钢管、波纹钢板件、法兰盘和管箍(双面)：板厚 $< 4.0\text{mm}$ 时， ≥ 915 ；板厚 $\geq 4.0\text{mm}$ 时， ≥ 1220 。 螺栓、螺母： ≥ 350 。
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。

9.2.2 为进一步延长波纹涵洞的使用寿命，可在金属涂层的表面补充敷涂沥青涂层，且应满足以下要求：

1. 当采用涂装时，涂装材料的品种、规格、性能等应符合《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》（JT/T 722-2008）的规定。涂装的总厚度应大于 1.3mm ，表面应均匀光滑、连续，无肉眼可分辨的小孔、空间、孔隙、裂缝、脱皮及其他缺陷。
2. 当采用喷涂沥青时，沥青涂层的厚度不小于 1mm ，涂层应均匀光滑、连续，无肉眼可分辨的孔隙、裂缝、脱皮及其他缺陷。

9.2.3 对于冲刷严重的涵洞结构，可在底拱一定范围内增加内部衬砌（混凝土或工程塑料）。

9.2.4 非金属涂层和内衬的附加使用寿命按表 9.2.4 取用。

表 9.2.4 非金属涂层和内衬的附加使用寿命（年）

涂层	水侧		土侧附加寿命
	附加寿命	最大磨损等级	
沥青涂层	2 - 20	2	25 - 50
沥青涂层+内衬	10 - 30	3	25 - 50
聚合物涂层	25 - 100	3	50 - 100
聚合物涂层+内衬	30 - 100	3	50 - 100
底拱采用聚合沥青涂层	15 - 40	3	—
底拱采用混凝土或塑料内衬	25 - 75	4	—

9.3 涂层与内衬的选择

9.3.1 耐久性设计时，应根据结构的使用环境（腐蚀和磨蚀），按表 9.3.1 选择使用涂层和内衬。

表 9.3.1 波纹钢涵洞涂层与内衬的选择

涂层（内衬）类型与使用条件	无腐蚀/ 一般条件	轻微腐蚀	腐蚀	无磨蚀/ 轻微磨蚀	中度磨蚀	严重磨蚀
[1] 锌涂层，有底拱，正常流时结构与水接触	√	√	X	√	X	X
[2] 锌涂层+混凝土拱底铺砌	√	√	X	√	√	√
[3] 锌涂层，无底拱，正常流时结构与水无接触	√	√	X	√	√	√
[4] 锌涂层+聚合物涂层	√	√	√	√	√	X
[5] 锌涂层+聚合物涂层+混凝土拱底铺砌	√	√	√	√	√	√
注：表中√表示适用，X表示不适用						

9.3.2 应根据结构的使用环境，测试环境相关指标进行腐蚀分级与磨蚀分级：

表 9.3.2-1 常见类型土壤的标准电阻率

土壤类别	电阻率 $\Omega\cdot\text{cm}$
粘土	750-2000
壤土	2000-10000
砾石	10000-30000
砂	30000-50000
岩石	50000- ∞

表 9.3.2-2 腐蚀等级

腐蚀等级	pH值	电阻率 $\Omega\cdot\text{cm}$
1 (无腐蚀)	$5\leq\text{pH}\leq 12$	≥ 10000
2 (一般条件)	$5\leq\text{pH}\leq 8$	$2000\leq\text{电阻率}\leq 10000$
3 (轻微腐蚀)	$5\leq\text{pH}\leq 8$	$1500\leq\text{电阻率}\leq 2000$
4 (腐蚀)	$5\leq\text{pH}\leq 10$	>1500

表 9.3.2-3 磨蚀等级

磨蚀等级	推移质描述	预期流速 m/s
1 (无磨蚀)	无推移质 (如雨水管、蓄水系统、开口结构)	—
2 (轻微磨蚀)	少量砂、砾推移质	0-1.5
3 (中度磨蚀)	中等砂、砾推移质	1.5-4.6
4 (严重磨蚀)	大量砂、砾和岩石推移质	>4.6

10 施工

10.1 地基施工

10.1.1 应清除涵洞及回填区范围内植被、有机土壤、松散沉积物和粒径大于 75mm 的卵砾石。

10.1.2 开挖至标高的土质基坑不得长期暴露或浸泡，并应及时检查基坑尺寸、高程，符合要求后应立即进行管基填筑或基础施工。

10.1.3 地基处理完毕后，按设计要求铺筑管基，管基表面应与涵洞底部半径匹配。

10.2 基础施工

10.2.1 混凝土结构浇注达到设计强度 80% 后方能拆模，达到完全设计强度方能进行回填工作。

10.2.2 混凝土基础浇注前应预埋钢板连接件及锚栓。

10.3 装卸与运输

10.3.1 波纹钢管或波纹钢板件在装卸与运输过程中应避免其表面涂层被破坏。

10.3.2 对于涂层脱落或镀锌后焊接的区域，应清除表面附着物后，采用环氧富锌底漆进行修补。

10.3.3 吊运过程中应保持钢管水平，吊点设置于 1/4 管节处，吊索与钢管之间的夹角不宜小于 45°。不应在波纹钢管上焊接或栓接吊耳作为吊点。

10.3.4 波纹钢管或波纹钢板件可采用套叠方式运输，并应防止钢管或板件翻滚、碰撞及滑移。

10.4 安装

10.4.1 波纹钢管安装要求应符合以下规定：

1. 波纹钢管采用管箍连接时，其管箍形式和宽度应符合表 10.4.1 的规定，管箍钢板厚度不应小于螺旋形波纹钢管钢板厚度；

管箍与管节应根据产品说明书就位及组装。组装时应确保管节间的缝隙不大于25mm，紧固时应保证管箍在整个宽度和长度范围内与圆管紧密贴合。

表 10.4.1 波纹钢管管箍连接要求

波形 波距×波高 mm	管箍连接	
	管箍形式	管箍最小宽度 mm
68×13	1~2 片箍	410
75×25	2~3 片箍	430
125×25	2~3 片箍	625

波纹钢圆管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《铁路钢桥制造规范》（TB 10212）的要求。法兰盘圆周边均匀布设单排螺栓孔，孔位、孔距根据设计确定。

10.4.2 波纹钢板件安装要求应符合以下规定：

1. 波纹钢板件可在场外或现场拼装，拼装前须准确标记，宜从底拱开始，再到侧面，最后到拱顶，对称拼装；
2. 开口结构拼装前，应检查拱座基础上的不对称槽钢的线形、坡度、尺寸，并确保对称槽钢上的预冲孔完全对齐，然后由侧面向拱顶对称拼装。开口结构现场拼装通常必须配备脚手架或临时支撑；
3. 板件之间须搭接，并用高强度螺栓连接，禁止采用焊接。
4. 拼装板结构，安装后的板长与标准板长差值应不大于±1%；
5. 波纹钢板片的搭接应结合紧密，在同一位置不得重叠 4 片以上的波纹钢板。

10.4.3 螺栓紧固应符合以下规定：

1. 使用扭力扳手，其扭矩宜控制在 220 Nm~400 Nm 区间，全部螺栓应用均等的扭矩来拼装；
- 钢板拼装完毕后，应在纵向和横向连接处各自随机选取螺栓总数的 5 %，用扭矩计量器检查，若所检查螺栓中超过 10 %的螺栓扭矩不满足要求，则应松开全部螺栓重新紧固；
- 超过扭矩要求的螺栓必须更换，不得重复使用；
- 在回填之前所有螺栓应沿纵缝和环缝方向紧固到位，确保波纹重叠部分紧密贴合；

10.4.4 如安装处水位较高，应采取锚固设施防止波纹钢结构在回填过程中上浮。

10.5 回填

10.5.1 回填应分层水平均匀填筑，压实厚度不超过 200mm。填筑应在结构物两侧同时进行，两侧高差不大于 200mm，并严密监测结构变形。

10.5.2 涵洞结构性回填区范围内压实度应大于 95%。

10.5.3 楔形区域的填料应与结构紧密压实，可采用人工作业或水密法，并用振荡器振实。

10.5.4 涵洞侧面的回填压实，设备应沿涵洞的纵向轴线行进，禁止垂直于管身铲运或直接倾倒。涵洞顶面的回填压实，应垂直于涵洞长度方向进行。

10.5.5 设置有端墙的涵洞，回填顺序宜由端墙向中心进行，无端墙的涵洞宜由中心向两端进行。

10.5.6 结构顶部及两侧 20m 路基范围内，禁止采用强夯。

10.5.7 回填压实过程中，未达到最小填土厚度前严禁重型车辆和机械在其上方作业。最小填土厚度规定可参照《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T F50）表 22.3.7 执行。

10.5.8 涵洞管底楔形部应采用小型夯实机具或人工夯实，使用水密法时，应防止结构浮动或材料冻结。

10.5.9 涵洞外侧 60cm 范围内宜采用手持式振动压路机，60cm~200cm 范围内宜采用轻型压路机，重型压路机距涵洞的安全距离应不小于 200cm。

10.5.10 跨径大于 2m 波纹钢涵洞拼装及回填时，宜设置临时支撑，保持设计截面的形状。

11 质量检验评定

11.1 一般规定

11.1.1 波纹钢涵洞分部工程质量检验评定包含洞身各部分构件、洞口、基础、回填等分项工程。

11.1.2 涵洞现场施工土建部分参照《公路工程质量检验评定标准》(JTG F80/1)执行。

11.1.3 验收表式采用《公路工程质量检验评定标准》(JTGF80/1)中分项工程质量检查评定表。

11.2 材料检验

11.2.1 波纹钢管和波纹钢板件及配件出厂前应严格按《公路涵洞通道用波纹钢管(板)》(JT/T 791)及《公路桥涵用波纹钢板》(JT/T 710)进行验收,并附有产品质量合格证书。

11.2.2 安装前波纹钢管和波纹钢板件及配件应逐件与设计图纸对照检查,包括波纹钢管(板)的质量、钢板厚度、镀锌层厚度、波形的几何尺寸等。涂层脱落的波纹钢管(板)需要进行修复,损坏、变形过大的应更换。

11.2.3 波纹钢管及板件的尺寸允许偏差应符合表 11.2.3 的规定;

表 11.2.3 波纹钢管及板件的尺寸允许偏差

序号	项目	允许偏差
1	壁厚 t (mm)	不小于设计值
2	波距 l (mm)	± 3
3	波高 d (mm)	± 3
4	管节长度 L_p (%)	± 2
5	跨径 d_h (%)	± 2
6	波纹钢板件长度 L_L (%)	± 1
7	波纹钢板件宽度 L_W (%)	± 1

11.3 安装检验

11.3.1 地基应按下表进行实测:

表 11.3.1 地基实测项目

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法
1	地基承载力	偏差系数不大于 20 %	波纹管涵轴线投影下的地基每 6m 测一处，且不少于 6 处
2	管拱拱腋处压实度 %	达到设计要求	两侧拱腋处每 6 m 测一处，且不少于 3 处
3	涵底纵坡	达到设计要求	高程测量每 6m 一处，且不少于 2 处
4	管基宽度及厚度	达到设计要求	尺量：沿涵洞方向每 6m 测一处，且不少于 3 处

11.3.2 波纹钢涵洞安装实测项目应满足表 11.3.2 的规定。

表 11.3.2 安装实测项目控制标准

项目	规定值或允许偏差	检查方法
结构性回填区范围	$\geq$ 设计值	尺量：沿涵洞方向每 6m 测一处，且不少于 3 处
结构性回填区压实度	$\geq$ 设计值	各层不少于 3 处
轴线偏位 (mm)	≤ 50	经纬仪或拉线：每 6m 测一处，且不少于 3 处
流水面高程 (mm)	± 20	水准仪或尺量：检查洞口两处，拉线检查中段 1 处~2 处

11.4 形状检验

11.4.1 采用波纹钢板拼装的开口或闭口结构，拼装完成后其截面大小与设计形状之间的误差不大于 $\pm 1\%$ 。

11.4.2 每填筑 1/5 管拱高度或不大于 1m 时应检查一次结构几何尺寸。最大变形量不大于最终容许变形量的 1.25 倍，超出变形范围应及时修正调整。

11.4.3 整体管涵洞回填完成后，管纵向轴垂直方向的直径与设计值相差不大于 $\pm 5\%$ 。

11.4.4 拼装板涵洞回填完成后，最终的形状与设计值相差不大于 $\pm 2\%$ 。

本规程用词用语说明

为准确地掌握技术规程条文，对执行规程严格程度的用词特做如下规定：

1. 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；
2. 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；表示有选择，在一定条件下可以这样做时，采用“可”。

附 录 A

(资料性附录)

常用波纹钢涵洞规格表

单位为毫米

类型	波距	波高	板厚	适用内径
整体型	75	25	1.5~4.5	750~2000
	125	25	2.0~5.0	750~2000
	150	50	2.0~10.0	1500~2000
	200	55	2.0~8.0	1500~2000
分片拼装型	125	25	2.0~5.0	1500~3000
	150	50	2.0~10.0	1500~8000
	200	55	2.0~8.0	1500~8000
	300	110	4.0~10.0	1500~8000
	380	140	5.0~10.0	1500~10000
	400	150	5.0~8.0	1500~10000

附录 B

(资料性附录)

设计流程图

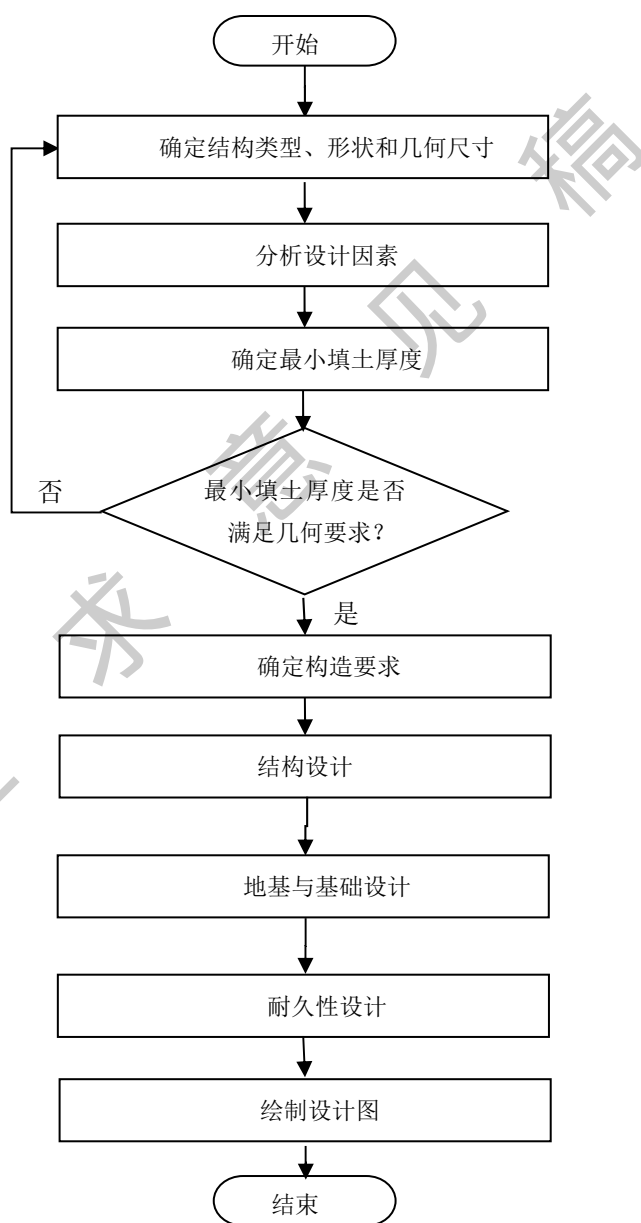


图 B.1 设计总流程图

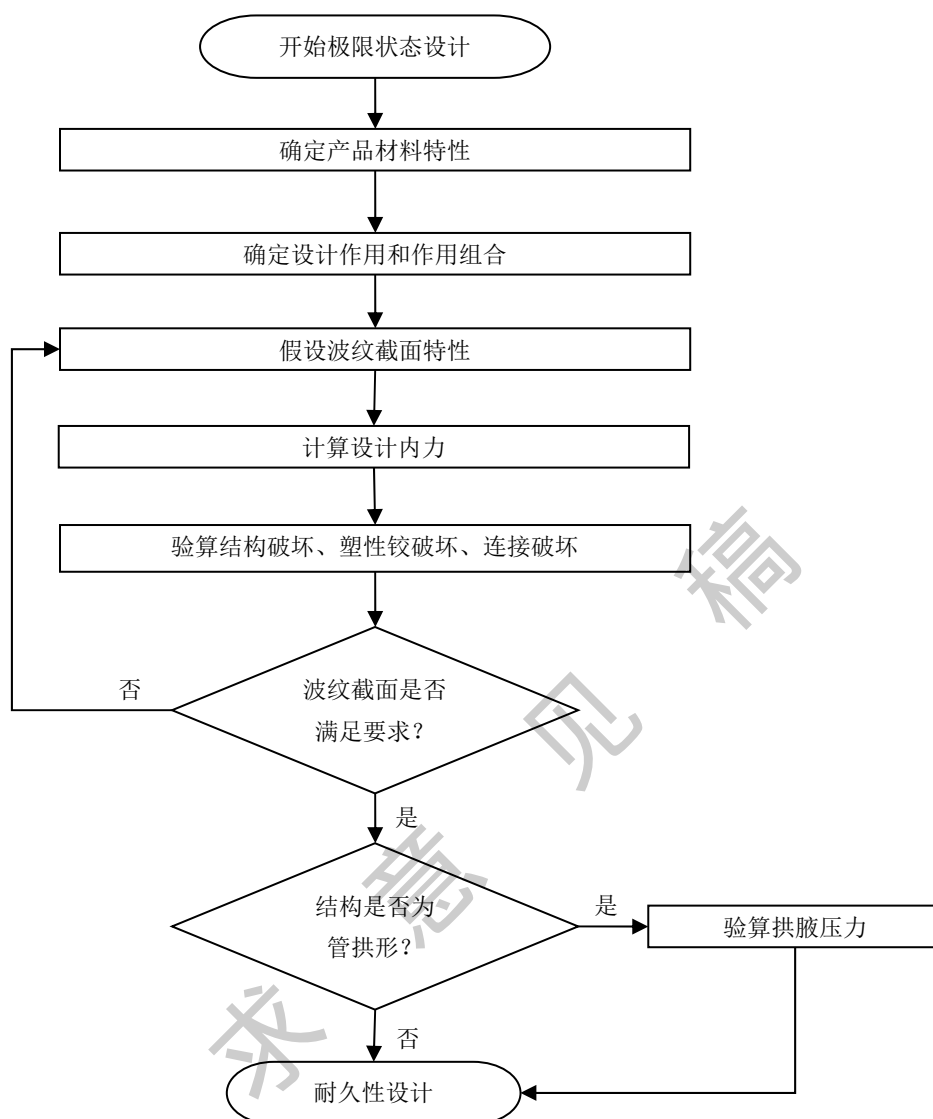


图 B.2 承载能力极限状态设计流程图

附 录 C

(资料性附录)

纵向螺栓接缝承载力试验

C.1 一般规定

C.1.1 生产商或供应商应提供纵向螺栓接缝的受压试验结果,以确定在设计中使用的公称接缝承载力。设计中用到的波纹型号、板厚和螺栓布置的不同组合均需进行试验。

C.2 试验样本

C.2.1 试验样本的型号、材料、参数和螺栓布置等应和实际使用的波纹钢拼装结构一致。

C.2.2 应根据不同波纹参数、板厚和螺栓布置分别进行试验,每组试验样本不少于3个,每个样本的纵向接缝均贯穿板长。

C.2.3 样本不应有保护涂层。

C.2.4 每个样本应至少包含2个完整波形,且互相拼接的波纹钢板波数应相同。

C.2.5 应在样本两端垂直于波纹板平面焊接2块互相平行的矩形平钢板作为承压面,平钢板从样本焊缝端部向外分别延伸至少30 mm。焊缝方向与纵向螺栓接缝平行,且延伸出最外侧螺栓的距离不应大于纵向螺栓间距的一半。

C.2.6 样本的长度应保证在允许位移内,波纹钢板不会接触对面的平钢板或焊缝。

C.3 试验方法

C.3.1 应在有资质的试验室进行试验。试验仪器应能匀速加载,且装备有不小于样本尺寸的垫板,试验过程中样本不允许发生水平滑移。当仪器不能同时记录荷载和挠度时,应在两端平钢板处沿样本纵向中心线各装配1块精确度为0.1 mm的千分表。

C.3.2 试验中施加的荷载不应偏心。当有可靠经验时,应分为20级匀速加载。如果缺乏经验支持,则应先进行试加载。当可以自动加载时,波纹钢板可以每分钟变形不超过5 mm的速度连续加载,并自动记录荷载下的相应位移。

C.4 公称接缝承载力

C.4.1 样本的接缝承载力应取以下三者的最小值：

3. 样本破坏时的荷载；
4. 接缝位移达到波高或 40 mm 时的荷载；
5. 破坏位移的 1/3 时对应的荷载的 3 倍。

C.4.2 公称纵向接缝承载力应取3次试验结果的平均值，且3次结果的最小值不偏离最大值的10 %，试验过程中不允许出现螺栓剪断。

C.5 结果报告

试验结果应包含以下内容：

6. 样本的产品合格证和数量；
7. 对试验过程详细准确的描述；
8. 波纹型号和波纹钢板板厚；
9. 螺栓类型、尺寸和布置以及强度标号；
10. 螺栓孔的成孔方法以及螺栓孔尺寸；
11. 每次试验的荷载-位移关系图；
12. 每次试验的破坏形式；
13. 每次试验的极限荷载和相应的位移；
14. 位移等于波高或 40 mm 时对应的荷载；
15. 每种波纹型号/螺栓布置对应的公称接缝承载力；
16. 每个试验样本破坏后的照片。

C.6 样本保存

报告提交后，样本应妥善保存3个月以上，以备检查。

附录 D

(资料性附录)

耐久性设计方法

D.1 耐久性设计方法分为简化方法和详细方法，适用范围见表D.1。

表 D.1 耐久性设计方法

重要性等级	跨径 d_h (mm)	设计方法
1	$d_h < 600$ $d_h \geq 600$	简化方法 简化方法或详细方法
2	$d_h < 600$ $600 \leq d_h < 3600$ $d_h \geq 3600$	经验认可时可采用简化方法 简化方法或详细方法 详细方法
3、4	所有尺寸	详细方法
注：对于大型项目或多管结构，建议采用详细方法。		

D.2 简化方法一般用于已知现场条件良好但没有进行详细试验的情况，见表D.2。

表 D.2 简化方法

条件	简化设计方法
1. 符合本规范要求的镀锌波纹钢涵洞	满足全部条件时，可不设计壁厚裕度
2. 结构跨径或矢高小于1.5m且易于更换	
3. 设计寿命不大于30年	
4. 积水时间不超过2月/年	
5. 所在区域没有矿井或工业腐蚀性径流	
6. 回填料干燥且透水性好	
7. 现场土壤和填料pH值在5-8之间	
8. 现场土壤不含盐分或硫酸盐	
9. 磨蚀等级为1级（无磨蚀）或2级（轻微磨蚀）	
1. 符合本规范要求的波纹钢涵洞	满足全部条件时，可设计1mm的壁厚裕度
2. 结构跨径不大于3.0m且更换成本不高	
3. 设计寿命不大于50年	
4. 积水时间不超过2月/年	
5. 所在区域没有矿井或工业腐蚀性径流	
6. 回填料干燥且透水性好	

7. 现场土壤和填料pH值在5-8之间	
8. 现场土壤不含盐分或硫酸盐	
9. 磨蚀等级为1级（无磨蚀）或2级（轻微磨蚀）	

D.3 详细方法

D.3.1 应根据级配填料的pH值和电阻率计算腐蚀损失：

17. 级配填料的 pH 值和电阻率符合表 D. 3-1 要求时（无腐蚀性环境），按表 D. 3-1 计算土侧的腐蚀损失；
18. 级配填料的 pH 值和电阻率接近表 D. 3-1 的限值时，应测定氯离子和硫离子浓度并分别计算：
 - a) 氯离子浓度不大于200mg/kg，且硫离子浓度不大于1000mg/kg时，可按表D. 3-1 计算土侧的腐蚀损失；
 - b) 氯离子浓度大于200mg/kg，或硫离子浓度大于1000mg/kg时，应按表D. 3-2和表D. 3-3计算土侧的腐蚀损失。
19. 级配填料的 pH 值和电阻率超出表 D. 3-1 的限值时，不建议使用。
20. 结构性回填材料周围的天然土壤具有腐蚀性时，应避免腐蚀性元素渗入侵蚀结构。

D.3.2 结构承受磨蚀、积水或涓流作用，或内壁承受侵蚀时，可增设拱底内衬。

D.3.3 极端环境下需考虑结构受大气腐蚀，见《大气环境腐蚀性分类》（GB/T 15957）的相关规定。

D.3.4 按本方法计算的腐蚀损失过大时，可使用表15的非金属涂层和内衬提高结构的使用寿命。

表 D. 3-1 无腐蚀性环境下镀锌层及钢材的腐蚀速率

结构性回填材料的 电阻率（ $\Omega\cdot\text{cm}$ ）	结构性回填材料的 pH值范围	锌涂层腐蚀速率 （ $\mu\text{m}/\text{年}$ ）	钢材腐蚀速率 （ $\mu\text{m}/\text{年}$ ）
≥ 10000	5-12	前2年为15 后期为4	12
2000-10000	6-10		
500-2000	5-10	—	—
注： 1) 本表不适用于积水或淤泥环境； 2) 矿区应用时，某些可溶性金属的含量可能会增强腐蚀性； 3) 水泥改良土与无机填料通常pH值达到9，在不良排水条件下电阻率低于1000 $\Omega\cdot\text{cm}$ ，排水条件下可高于2000 $\Omega\cdot\text{cm}$ 。水泥含量中等或较高时，pH值可能远大于9。采用这类填料时应测定pH值和电阻率； 4) 对于循环使用的材料，应监测重金属；			

5) 软水对锌涂层有显著影响,但对聚合物涂层的寿命没有影响。表列腐蚀速率适用于碳酸钙 (CaCO₃) 含量低于50ppm的天然水,否则应采用拱底防护或补充涂层。

表 D. 3-2 腐蚀性环境下镀锌层的平均腐蚀速率

土壤pH值	锌涂层的平均腐蚀速率 (μm/年)	
	排水土壤	不排水土壤
<4	>6.5	>20
4-4.9	2.6-5.2	6.7-13.3
5-7.9	2.2-4.3	5.5-11.0
8-9	3.3-6.5	6.1-12.1
>9	>8.6	>17.2
土壤电阻率 (Ω-cm)	所有土壤	
<500	>3.5	
500-1000	1.5-3.5	
1000-2000	1.3-1.5	
2000-5000	0.9-1.5	
>5000	<0.9	

注:

- 1) 腐蚀速率应分别按pH值和电阻率计算后取最大值,二者不可相加;
- 2) 在全浸没条件下,氧气水平较低,表列腐蚀速率可适当折减;

表 D. 3-3 腐蚀性环境下基材的平均腐蚀速率 (不含镀锌层)

土壤条件				钢材的平均腐蚀速率 (μm/年)	
pH 值	氯离子含量		电阻率 (Ω-cm)	排水土壤	不排水土壤
	土中 (%)	水中 (ppm)			
>5	<0.5	<1000	>5000	<10	<10
4-5	0.5-2	1000-10000	2000-5000	<10	10-20
3-3.9	2-5	10000-20000	1000-2000	10-20	20-40
<3	>5	>20000	<1000	10-40	40-300

注: 表中给出了一系列的极限值,腐蚀速率应取 pH 值、氯离子含量和电阻率最不利情况