



T/CECS G XXXX: 2026

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

公路波纹钢结构明洞和棚洞技术规程
(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

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2024 年第一批工程建设协会标准制订、修订计划>的通知》的要求，由中国市政工程东北设计研究总院有限公司和徐州市交通工程总承包有限公司作为主编单位承担《公路波纹钢结构明洞和棚洞技术规程》（以下简称“本规程”）的制定工作。

本规程制定过程中，编制组在实际工程和科研经验基础上，经广泛调查和深入研究，吸收了国内外相关研究成果和经验，并经过广泛征求意见、反复讨论、修改，最终定稿。

本规程共 6 章和 3 个附录，主要内容包括：1 总则、2 术语和符号、3 基本规定、4 材料、5 设计、6 施工、7 质量检验、附录 A 常用波形截面特征参数表、附录 B 波纹钢板拱结构计算和附录 C 落石冲击力计算。

请注意本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利，本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程基于通用的工程建设理论及原则编制，适用于本标准提出的应用条件。对于某些特定专项应用条件，使用本标准相关条文时，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，由中国市政工程东北设计研究总院有限公司负责具体技术内容的解释，在执行过程中如有意见或建议，请函告本标准日常管理组，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），或中国市政工程东北设计研究总院有限公司（地址：吉林省长春市工农大路 618 号；邮编：130021；电话：18691522327），以便下次修订时参考。

主 编 单 位：中国市政工程东北设计研究总院有限公司
徐州市交通工程总承包有限公司

参 编 单 位：（待补充）

主 编：梁养辉

主要参编人员：（待补充）

主 审：余顺新

参与审查人员：（待补充）

征求意见稿

目 次

1 总则	1
2 术语和符号	2
2.1 术语	2
2.2 符号	2
3 基本规定	7
4 材料	8
4.1 主体结构	8
4.2 连接件	8
4.3 防腐	9
4.4 填筑材料	10
5 设计	11
5.1 一般规定	11
5.2 组合结构计算假定	11
5.3 结构计算	12
5.4 基础设计	15
5.5 防腐设计	16
5.6 构造规定	16
5.7 填筑设计	17
5.8 附属工程设计	18
6 施工	19
6.1 一般规定	19
6.2 施工工艺流程	19
6.3 地基与基础施工	20

6.4 拼装施工	20
6.5 防腐施工	21
6.6 填筑施工	22
6.7 附属工程施工	22
7 质量检验	23
7.1 下部结构检验	23
7.2 波纹钢拱结构检验	23
7.3 填筑质量检验	24
附录 A 常用波形截面特征参数表	25
附录 B 波纹钢板拱结构计算	26
附录 C 落石冲击力计算	34

1 总则

1.0.1 为规范公路波纹钢结构明洞和棚洞技术规程的设计与施工，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于各等级公路波纹钢结构明洞和棚洞的设计与施工。

1.0.3 公路波纹钢结构明洞和棚洞技术规程的设计与施工应遵循安全、耐久、适用、环保、经济的原则。

1.0.4 公路波纹钢结构明洞和棚洞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的规定。

征求意见稿

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 波纹钢结构明洞 corrugated steel structure open-cut tunnel

用明挖法修建的用于保护公路免受上方崩塌落石等自然灾害影响的钢波纹板与混凝土共同承担荷载的结构。

2.1.2 波纹钢结构棚洞 corrugated steel structure shed tunnel

用于保护公路免受上方崩塌落石等自然灾害影响的抗冲击波纹钢与混凝土共同承担荷载的棚式结构。

2.1.3 拱顶 crown

波纹钢结构明洞（棚洞）的拱圈最高处。

2.1.4 矢高 rise

拱顶截面中心线与拱脚之间的竖向距离。

2.2 符号

2.2.1 材料性能有关符号

A_1 、 A_2 ——等效前后波纹钢板的面积；

A_s ——波纹钢板受拉区钢板面积；

$A_{s'}$ ——受压区钢筋面积；

E_1 、 E_2 ——等效前后波纹钢板的弹性模量；

E_k ——落石的冲击动能；

E_m ——填筑材料弹性模量的修正值；

E_s ——填筑材料割线模量；

I_1 、 I_2 ——等效前后波纹钢板的惯性矩；

p_1 、 p_2 ——等效前后波纹钢板的密度；

f_b ——波纹钢板屈曲临界应力；

f_{cd} ——混凝土抗压强度设计值；

f_{td} ——混凝土抗拉强度设计值；

f_{sd} ——波纹钢板抗拉强度设计值；

$f_{sd'}$ ——受压区钢筋抗压强度设计值；

f_d ——钢材的抗拉压强度设计值；

f_v ——钢材屈服强度；

γ ——填筑材料的重度。

2.2.2 作用效应有关符号

F ——落石冲击力；

G ——每延米填筑材料的重量；

M ——施工过程波纹钢结构截面所受弯矩；

M_B ——由周边土体支撑作用，使波纹钢结构跨中截面减小的弯矩；

M_C ——施工机械引起的结构跨中截面的弯矩；

M_d ——加固后弯矩组合设计值；

M_p ——波纹钢板波纹横截面可承受的塑性弯矩；

M_f ——运营阶段波纹钢结构截面所受弯矩；

M_{pf} ——波纹钢结构考虑塑性抵抗系数的设计弯矩；

N_d ——波纹钢结构轴向力设计值；

P ——施工过程作用引起波纹钢结构环向压力；

P_{pf} ——波纹钢结构截面考虑塑性抵抗系数的设计压力；

Q ——车辆荷载扩散到波纹钢结构顶部的压力；

R_d ——结构或结构构件的抗力设计值；

S_{ad} ——承载能力极限状态下作用地震组合的效应设计值；

S_{ud} ——承载能力极限状态下作用基本组合的效应设计值；

T_c ——施工机械荷载引起的波纹钢结构环向压力；

T_D ——恒载引起的波纹钢结构环向压力；

T_E ——地震作用引起的波纹钢结构明洞和棚洞每延米推力；

T_G ——波纹钢结构明洞（棚洞）拱顶填土引起的波纹钢结构拱圈每延米推力；

T_f ——作用引起波纹钢结构环向压力；

T_L ——活载引起的波纹钢结构环向压力；

V ——计算荷载作用下剪力组合设计值；

W ——波纹钢结构明洞（棚洞）拱顶填土每延米的重量。

2.2.3 几何参数有关符号

$a_{s'}$ ——受压区普通钢筋合力点至受压区边缘的距离；

A_{s1} ——波纹钢板受压部分面积；

A_{s2} ——波纹钢板受拉部分面积；

Al ——一个波距截面面积与波距的比值；

b ——波纹钢组合结构截面计算宽度；

d ——落石的等效直径；

D_h ——公路波纹钢涵洞有效跨径；

D_v ——公路波纹钢涵洞有效矢高；

h_0 ——组合结构截面有效高度，取波纹钢板截面重心至受压区边缘的距离；

h ——组合结构缓冲层厚度；

h_c ——波纹钢板波峰至原结构底面距离；

H_u ——波纹钢结构明洞（棚洞）拱顶填土高度；

I_l ——一个波距截面惯性矩与波距的比值；

m_R ——落石的质量；

r ——转角半径；

γ_0 ——结构重要性系数；

R_a ——冲击落石的等效半径；

R_c ——波纹钢结构板顶部的曲率半径；

R_e ——等效半径；

S ——落石冲击力扩散范围面积

e_s ——轴向力作用点至受拉边或者受压较小边波纹板片重心处距离；

e_0 ——轴向力对组合结构后截面重心轴的距离；

$e_{s'}$ ——轴向力作用点至原构件受压较大区钢筋的距离；

e_x ——轴向力作用点至截面受压区下缘的距离；

v ——冲击落石的体积；

x ——混凝土受压区应力图的高度；

ξ_b ——正截面相对界限受压区高度；

ξ ——正截面相对受压区高度。

2.2.4 计算系数及其他有关符号

A_f ——土拱系数；

C_s ——轴向刚性系数；

d ——波高；

F_m ——多跨结构应力折减系数；

K ——波纹钢结构与周围土体相对弯曲刚度系数；

K_4 ——等效线性荷载参数；

l ——波距；

N_F ——波纹钢结构柔度系数；

t ——波纹钢结构壁厚；

W_L ——一个波距截面模量与波距的比值；

η ——偏心受压构件偏心距增大系数，

β ——截面受压区矩形应力图高度与实际受压区高度的比值；

ρ ——屈曲折减系数；

γ_o ——结构重要性系数；

γ_G ——恒载分项系数；

γ_Q ——活载分项系数；

ε ——缓冲层被动破坏夹角；

ϕ ——缓冲层内摩擦角；

ϕ_h ——钢波纹钢结构抵抗塑性铰的抗力系数；

ϕ_t ——抗压强度的阻抗系数。

3 基本规定

3.0.1 波纹钢结构明洞和棚洞断面形式宜设置为拱形结构，有利于波纹钢薄巧结构的稳定。

3.0.2 当高速公路、一级公路整体式路基段双幅设置明洞或棚洞时，宜采用双孔布置。

3.0.3 波纹钢结构明洞和棚洞应根据公路等级、使用功能、通行能力等要求，结合地质、地形、水文和环境等条件进行总体设计。

3.0.4 波纹钢结构明洞和棚洞线形设计应符合路线设计的总体要求，平、纵、横技术指标应与路线总体布设相协调，并应符合现行《公路路线设计规范》（JTG D20）及《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》（JTG 3370.1）的规定。

3.0.5 高速公路、一级公路波纹钢结构明洞和棚洞建筑限界宜与路基同宽，二级及以下等级公路宜按现行《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》（JTG 3370.1）的规定执行。

3.0.6 波纹钢结构明洞和棚洞内轮廓设计应满足建筑限界的要求，并应预留不小于 100mm 的富余量。

3.0.7 波纹钢结构明洞和棚洞设计应考虑施工、运营管理与养护的要求。

3.0.8 波纹钢结构明洞和棚洞应满足现行《公路隧道抗震设计规范》（JTG 2232）的抗震要求。

4 材料

4.1 主体结构

4.1.1 波纹钢板件所用钢材应根据其受力状态、连接方法和所处环境条件合理选择。钢板性能、外形、重量及允许偏差应符合现行《热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差》（GB/T 709）的有关规定。

4.1.2 波纹钢板件应采用低合金高强度结构钢，其质量应符合现行《低合金高强度结构钢》（GB/T 1591）的有关规定。

4.1.3 采用连续热镀锌钢板加工波纹钢板件时，其性能、尺寸、外形、重量及允许偏差应符合现行《连续热镀锌钢板及钢带》（GB/T 2518）要求。

4.1.4 波纹钢板件的规格、尺寸允许偏差、技术要求、试验方法、检验规则、标志、质量证明书及运输等应符合现行《冷弯波纹钢管》（GB/T 34567）的有关规定。

4.1.5 波纹钢板件表面应符合现行《热轧钢板表面质量的一般要求》（GB/T 14977）的有关规定。

4.2 连接件

4.2.1 高强度螺栓、螺母、垫圈的技术条件应符合现行《钢结构用高强度大六角头螺栓》（GB/T 1228）、《钢结构用高强度大六角螺母》（GB/T 1229）、《钢结构用高强度垫圈》（GB/T 1230）、《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）、《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副》（GB/T 3632）的有关规定。

4.2.2 波纹钢板件与墩台之间采用不等边槽钢或角钢等冷弯型钢连接时，其性能、外形、重量及允许偏差应符合现行《通用冷弯开口型钢》（GB/T 6723）的有关规定。

4.2.3 焊接材料应与被焊接钢材相匹配，并应符合下列规定：

1 手工焊接采用的焊条应符合现行《非合金钢及细晶粒钢焊条》（GB/T 5117）或《热

强钢焊条》（GB/T 5118）的有关规定。

2 自动焊和半自动焊采用的焊丝和焊剂应符合现行《熔化焊用钢丝》（GB/T 14957）、《熔化极气体保护电弧焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝》（GB/T 8110）、《非合金钢及细晶粒钢药芯焊丝》（GB/T 10045）、《热强钢药芯焊丝》（GB/T 17493）、《埋弧焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝、药芯焊丝和焊丝-焊剂组合分类要求》（GB/T 5293）的有关规定。

4.3 防腐

4.3.1 波纹钢板件及连接件应采用工厂热浸镀锌防腐，热浸镀锌所用的锌应符合现行《锌锭》（GB/T 470）规定的 1 号或 0 号锌。现场局部修补可采用冷喷锌防腐，冷喷锌材料应符合现行《桥梁钢结构冷喷锌防腐技术条件》（JT/T 1266）的有关规定。

4.3.2 在镀锌防腐基础上可采用涂装或喷涂沥青等非金属覆盖层增强耐久防腐性能，应符合下列规定：

1 采用聚氨酯防腐时，其质量与技术指标、基本性能应符合现行《聚氨酯防水涂料》（GB/T 19250）的有关规定。

2 采用沥青涂层防腐时，宜根据要求采用环氧沥青或改性沥青，其性能、质量与技术指标应分别符合现行《环氧沥青防腐涂料》（GB/T 27806）和《防水用塑性体改性沥青》（GB/T 26510）的有关规定。

4.3.3 波纹钢板连接缝防渗密封材料应根据区域环境和气候条件选取，可选用天然橡胶、氯丁橡胶或耐候密封胶等。其性能与质量应分别符合现行《天然橡胶》（GB/T 14795）、《氯丁二烯橡胶》（GB/T 14647）和《建筑密封胶分级和要求》（GB/T 22083）的有关规定。

4.3.4 高强度螺栓连接处采用厌氧胶（螺丝锁固剂）和双组分聚硫密封胶进行密封防渗处理时，密封胶的性能、质量与技术指标应符合现行《聚硫建筑密封膏》（JC/T 483）的有关规定。

4.3.5 采用其他耐久防腐材料时，应满足波纹钢明洞（棚洞）在设计使用年限内的防腐、抗渗基本要求，采用的材料性能、质量与技术指标应符合国家和行业现行有关标准的规定。

4.4 填筑材料

4.4.1 钢波纹板与钢筋之间宜采用自密实混凝土填筑，且自密实混凝土材料应符合现行《自密实混凝土应用技术规程》（JGJ/T 283）的有关规定。

4.4.2 波纹钢结构明洞和棚洞顶部填筑材料宜选用级配较好的砾类土、砂类土、石灰土或水泥土等低压缩性、易压实的填筑材料。

征求意见稿

5 设计

5.1 一般规定

5.1.1 公路波纹钢结构明洞和棚洞技术规程应按极限状态法进行承载能力极限状态和正常作用极限状态设计，对结构强度、刚度、稳定性和连接强度分别进行验算。

5.1.2 按承载能力极限状态设计时，应对构件进行承载能力验算，必要时尚应进行结构的抗倾覆和滑移验算，可采用式（5.1.2）：

$$\gamma_0 S_d \leq R_d \quad (5.1.2)$$

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，按现行《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60）的有关规定选取；

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

R_d ——结构或结构构件的抗力设计值。

5.1.3 按正常使用极限状态设计时，应根据结构的具体使用要求对构件的裂缝宽度及挠度进行验算，以控制构件在使用期间能正常工作。

5.1.4 波纹钢结构明洞和棚洞的拱形类型宜采用半圆弧拱，常用波形截面特征参数见附录 A。

5.1.5 波纹钢结构拱圈设计时应考虑波纹钢板件原材料负偏差及加工等因素引起的厚度不足。

5.2 组合结构计算假定

5.2.1 波纹钢板根据面积、刚度和密度一致原则，按式 5.2.1-1、5.2.1-2 和 5.2.1-3 等效为平钢板，等效示意图如图 5.2.1。

$$\text{抗拉刚度等效: } E_1 A_1 = E_2 A_2 \quad (5.2.1-1)$$

$$\text{抗弯刚度等效: } E_1 I_1 = E_2 I_2 \quad (5.2.1-2)$$

$$\text{钢材密度等效: } P_1 A_1 = P_2 A_2 \quad (5.2.1-3)$$

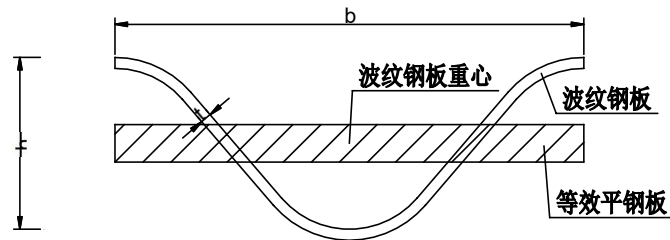


图5.2.1 波纹钢板结构等效示意图

式中: E_1 、 E_2 ——等效前后波纹钢板的弹性模量 (MPa);

A_1 、 A_2 ——等效前后波纹钢板的面积 (mm^2/mm);

I_1 、 I_2 ——等效前后波纹钢板的惯性矩 (mm^4/mm);

p_1 、 p_2 ——等效前后波纹钢板的密度 (kg/m^3)。

5.2.2 波纹钢组合结构应按钢混组合结构计算。

5.3 结构计算

5.3.1 波纹钢结构明洞(棚洞)应根据跨径和填土高度,参考附录 A 初选波纹钢基本参数进行土—钢共同作用分析计算,并按极限状态法进行结构验算。

5.3.2 波纹钢板拱应按极限状态法进行结构验算,计算过程参照附录 B。

5.3.3 波纹钢板及混凝土组合结构应对截面进行偏心受压正截面抗压承载力和斜截面抗剪承载力计算,可按照 5.3.4~5.3.7 计算。

5.3.4 截面偏心受压正截面抗压承载力计算应按式 5.3.4-1~5.3.4-5 计算。

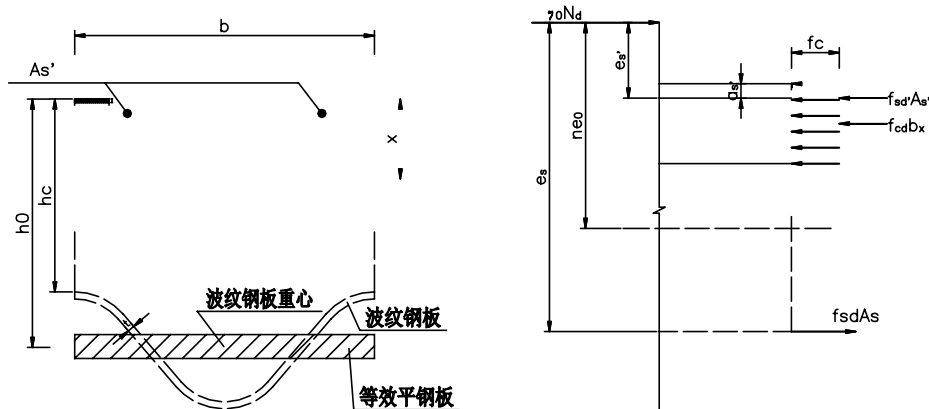


图 5.3.4 矩形截面偏心受压构件正截面抗压承载力计算

$$\gamma_0 N_d \leq f_{cd}bx + f_{sd'}A_{s'} - f_{sd}A_s \quad (5.3.4-1)$$

$$\gamma_0 N_d e_s \leq f_{cd}bx(h_0 - x/2) + f_{sd'}A_{s'}(h_0 - a_{s'}) \quad (5.3.4-2)$$

$$f_{cd}bx(e_s - h_0 + x/2) = f_{sd}A_s e_s - f_{sd'}A_{s'} e_{s'} \quad (5.3.4-3)$$

$$e_s = \eta e_0 + h_0 / 2 \quad (5.3.4-4)$$

$$e_{s'} = \eta e_0 - h_0 / 2 + a_{s'} \quad (5.3.4-5)$$

式中： γ_0 ——结构重要性系数，按照现行《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60）取值；

N_d ——轴向力设计值（kN）；

f_{cd} ——混凝土抗压强度设计值（MPa）；

f_{sd} ——波纹钢板抗拉强度设计值（MPa）；

$f_{sd'}$ ——受压区钢筋抗压强度设计值（MPa）；

A_s ——波纹钢板受拉区钢板面积（mm²）；

$A_{s'}$ ——受压区钢筋面积（mm²）；

b ——波纹钢组合结构截面计算宽度（mm）；

$a_{s'}$ ——受压区普通钢筋合力点至受压区边缘的距离（mm）；

h_0 ——组合结构截面有效高度，取波纹钢板截面重心至受压区边缘的距离（mm）；

x ——混凝土受压区矩形应力图的高度（mm）；

e_s ——轴向力作用点至受拉边或者受压较小边波纹板片重心处距离（mm）；

e_0 ——轴向力对组合结构后截面重心轴的距离， $e_0 = M_d / N_d$ （mm）；

$e_{s'}$ ——轴向力作用点至原构件受压较大区钢筋的距离（mm）；

M_d ——相应于轴向力 N_d 的加固后弯矩组合设计值（N.mm）；

η ——偏心受压构件偏心距增大系数，按现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）取值。

5.3.5 受压区高度 $x \leq h_c$ 且 $\xi \leq \xi_b$ 时，为大偏心受压构件，当 $\xi > \xi_b$ 时，为小偏心受压构件。相对界限受压区高度 ξ_b 按照式（5.3.5）计算。

$$\xi_b = \frac{\beta}{1 + \frac{f_{sd}}{E_s \varepsilon_{cu}}} \quad (5.3.5)$$

式中： ξ_b ——正截面相对界限受压区高度；

ξ ——正截面相对受压区高度，按照现行《公路钢筋混凝土及预应力桥涵设计规范》（JTG 3362）中相关规定计算；

h_c ——波纹钢板波峰至原结构底面距离（mm）；

β ——截面受压区矩形应力图高度与实际受压区高度的比值，当混凝土强度等级为

C50 及以下时，取 $\beta=0.8$ 。其余混凝土强度等级 β 取值参考现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG3362）。

5.3.6 当小偏心受压构件受压区高度 $x > h_c$ ，且当小偏心受压构件轴力作用点在 A_s' 和 A_s 之间时，截面抗压承载力应按式 5.3.6-1~5.3.6-2 计算。

$$\gamma_0 N_d e_x \leq f_{cd} b h_c x / 2 + f_{sd} A_{s2} h_s / 2 + f_{sd} A_{s1} (x - h_c) / 2 + f_{sd} A_{s'} (x - a_{s'}) \quad (5.3.6-1)$$

$$\gamma_0 N_d = f_{cd} b h_c + f_{sd} A_{s'} + f_{sd} A_{s1} - f_{sd} A_{s2} \quad (5.3.6-2)$$

式中： e_x ——轴向力作用点至截面受压区 x 下缘的距离（mm）；

A_{s1} ——波纹钢板受压部分面积（mm²）；

A_{s2} ——波纹钢板受拉部分面积（mm²）， $A_{s1} + A_{s2} = A_s$ ；

h_s ——波纹钢结构高度（mm），含波纹钢板厚度。

5.3.7 波纹钢与混凝土组合结构斜截面抗剪承载力计算应按式5.3.7 计算。

$$r_0 V \leq 0.7 \times 10^{-3} f_{td} b h_0 + 0.75 \times 10^{-3} (f_{sd} A_s + f_{sd}' A_s') \quad (5.3.7)$$

式中： V ——计算荷载作用下剪力组合设计值（kN）；

f_{td} ——混凝土抗拉强度设计值（MPa）。

5.3.8 明洞和棚洞顶部落石冲击力扩散范围应按式5.3.8-1~5.3.8-3 计算，落石冲击力按附录 C 的方法计算。

$$S = \pi(R + h \cdot \tan \varepsilon)^2 \quad (5.3.8-1)$$

$$R_a = \sqrt[3]{\frac{3v}{4\pi}} \quad (5.3.8-2)$$

$$\varepsilon = 45 - \frac{\phi}{2} \quad (5.3.8-3)$$

式中： S ——落石冲击力扩散范围面积（m²）；

R_a ——冲击落石的等效半径（m）；

h ——缓冲层厚度（m）；

v ——冲击落石的体积（m³）；

ε ——缓冲层被动破坏夹角（°）；

ϕ ——缓冲层内摩擦角（°）。

5.4 基础设计

5.4.1 波纹钢结构明洞（棚洞）基础的形式应根据水文、地质、地形、荷载、材料、上下部结构型式和施工条件等合理选用。

5.4.2 波纹钢结构明洞（棚洞）的基础设计按现行《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》（JTG 3370.1）的规定执行，同时应验算地基承载力、抗倾覆及抗滑稳定性。

5.5 防腐设计

5.5.1 波纹钢板件应在工厂采用热浸镀锌进行双面防腐，热浸镀锌层技术质量应符合表 5.5.1 的规定。

表 5.5.1 热浸镀锌层质量要求

项 目	要 求
单面附着量（g/m ² ）	强腐蚀性环境：波纹钢板件≥600；螺栓、螺母≥350；中等腐蚀性和弱腐蚀性环境：波纹钢板件≥300；螺栓、螺母≥175。
镀锌层附着性	镀锌层应与金属结合牢固，经锤击实验不剥离，不凸起。
外观质量	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。
锌层均匀性	锌层应均匀，无金属铜的红色沉积物。
锌层耐盐雾性	耐盐雾性试验后，基材不应出现腐蚀现象。

注：强腐蚀、中等腐蚀性和弱腐蚀分别指金属表面均匀磨蚀大于 0.5mm/年、0.1~0.5mm/年和小于 0.1mm/年。

5.5.2 安装前及安装过程中局部损坏的镀锌层可采用冷喷锌防腐工艺进行修补。

5.5.3 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，并应符合下列规定：

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

2 当采用喷涂沥青时，沥青涂层的厚度应为 0.5~1mm，涂层应均匀光滑、连续，无肉眼可分辨的孔隙、裂缝、脱皮及其他缺陷。

5.6 构造规定

5.6.1 波纹钢结构明洞和棚洞组合结构采用钢波纹板与槽型钢板结构，之间浇筑混凝土。槽型钢板的厚度不应小于钢波纹板厚度。如图 5.6.1 所示

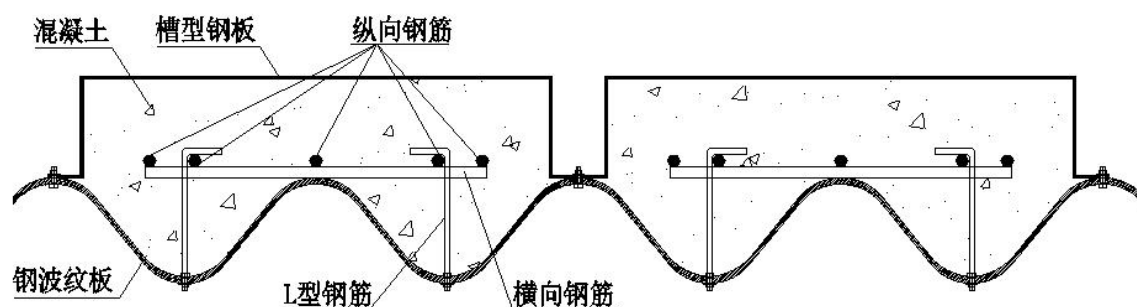


图 5.6.1 钢混组合结构布置图

5.6.2 多跨波纹钢结构明洞（棚洞）相邻拱脚处的最小距离不应小于 1m，按波纹钢结构明洞（棚洞）拱圈轴线计算。

5.6.3 波纹钢板件与墩台之间采用不等边槽钢连接时，宜采用双面固定，螺栓位于槽钢内侧，螺母位于外侧，槽钢腹板厚度不应小于波纹钢板件的厚度，内净宽不应小于波纹钢板件波高的 1.2 倍。

5.6.4 波纹钢板件纵向及横向均应错缝搭接，纵向搭接长度不应小于 50mm，横向搭接长度不应小于 100mm，错缝距离不应小于 200mm。

5.6.5 连接件采用的高强度螺栓、螺母，强度等级不应低于 8.8 级，垫圈应采用与波纹钢板件的波纹圆弧半径一致的凸凹形。

5.6.6 波纹钢结构明洞（棚洞）应进行防水处理，可采用土工膜防水，宜采用环保用高密度聚乙烯土工膜，其性能、质量与技术指标应符合现行《土工合成材料聚乙烯土工膜》（GB/T 17643）的有关规定。

5.7 填筑设计

5.7.1 波纹钢结构明洞和棚洞填筑前宜在拱内设置竖向和横向临时支撑，拱顶部以上回填完成后可拆除拱内临时支撑。

5.7.2 波纹钢结构明洞和棚洞拱周应分层对称填筑，各层压实度不小于 96%；拱顶区应分层填筑，各层压实度不小于 96%。

5.7.3 回填材料与内侧边坡接触界面宜开挖成台阶。

5.7.4 波纹钢结构明洞和棚洞顶引流槽沟底距结构外边缘厚度不应小于 1.5m。

5.7.5 洞顶回填横向坡度不宜小于 1:5。

5.8 附属工程设计

5.4.1 明洞和棚洞顶部边坡存在冲沟汇水时，宜设置引流槽，引流槽设计应符合下列规定：

- 1 沟壁顶面宜与两侧回填顶面齐平，与坡面衔接应顺适过渡。
- 2 断面宜采用梯形或矩形，宽深比宜取 2.0~6.0。
- 3 宜采用整体式钢筋混凝土结构，厚度不小于 50cm。
- 4 底部应设置锯齿、肋板等抗滑结构，间距宜小于 5m。

5.4.2 明洞和棚洞土建与交通工程及附属设施等应进行综合设计。

5.4.3 明洞和棚洞宜设置检修爬梯及清除洞顶堆积体的通道。

6 施工

6.1 一般规定

6.1.1 施工前应熟悉设计文件，对结构设计尺寸和关键施工参数进行核对，且应由设计单位进行设计交底。

6.1.2 应对工程进行施工调查及现场核对后，根据设计要求、合同条件及现场情况等，编制实施性施工组织设计，并通过安全技术评价。

6.1.3 波纹钢板件安装前应根据设计文件对地基、基础、墩台及预埋件、坐标、高程、跨径等进行全面检查，达到合格要求后方可安装。

6.1.4 波纹钢板件及连接件安装前应按现行《冷弯波纹钢管》（GB/T 34567）的有关规定验收。运输过程中损坏、变形过大的波纹钢板件应进行更换，局部损伤的镀锌层可采用现场冷喷锌防腐处理。

6.1.5 应按波纹钢板明细表核对进场的板件及零件，查验产品出厂合格证及结构材料的材质单。

6.1.6 波纹钢板件出厂前，应根据设计文件对整座明洞或棚洞的每一片波纹钢板件进行安装部位编号标识，并按设计文件编制安装图或安装说明书及进行试拼装合格。

6.2 施工工艺流程

6.2.1 波纹钢结构明洞和棚洞可按图 6.2.1 所示流程进行施工。

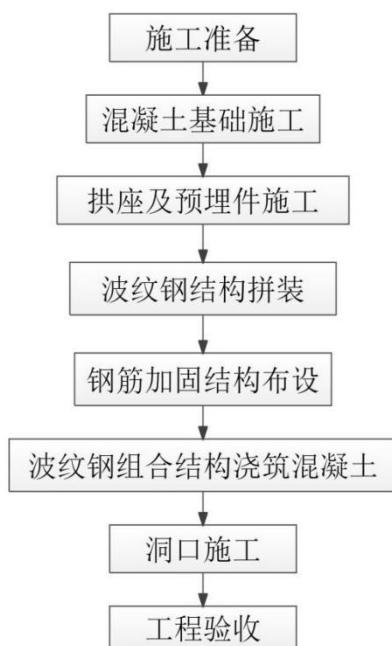


图 6.2.1 波纹钢结构明洞和棚洞施工工艺流程图

6.3 地基与基础施工

6.3.1 地基承载力应满足设计要求，不满足时应进行地基处理。

6.3.2 混凝土基础浇筑前应根据设计图纸安装预埋件。

6.3.3 扩大基础、洞口构筑物基础、混凝土墩台、拱座等混凝土及钢筋施工，应符合设计文件和现行《公路隧道施工技术规范》（JTG/T 3660）的有关规定。

6.3.4 混凝土基础浇筑完成后，混凝土的养护应符合现行《公路隧道施工技术规范》（JTG/T 3660）的有关规定。强度达到设计强度 90% 方可进行结构性填筑施工。

6.3.5 基础施工需要开挖时，基坑的施工应符合现行《公路路基施工技术规范》（JTG/T 3610）的有关规定。

6.4 拼装施工

6.4.1 拼装前应准确标记波纹钢板件，拼装应自下而上，先拱脚后拱顶的顺序对称进行，且应从明洞和棚洞内向外拼装，不得出现反拼。

6.4.2 拼装前应检查墩台上预埋型钢的位置、线形、坡度、尺寸及螺栓孔位置，合格后方可拼装施工。

6.4.3 波纹钢板件之间搭接时，上方的波纹钢板件均应搭接在下方波纹钢板件的外侧，螺栓应在结构之内，螺母应在结构之外。

6.4.4 安装机械设备应与施工需要相匹配，数量满足施工进度需求，机械设备的性能应满足安装精度、最大荷载、作业条件和安全生产要求，并对机械设备全面检查无误后方可使用。

6.4.5 波纹钢板件宜采用吊钩式吊装，吊装处可采用橡胶材料裹好防止损坏镀锌层。

6.4.6 波纹钢板件搭接缝防渗密封材料应衬垫严密，厚度应能有效填满搭接板之间所有的空隙、长度应与缝长一致、宽度与波纹钢板件搭接宽度一致。防渗密封衬垫材料的螺栓孔应与波纹钢板连接孔一致。防渗密封衬垫材料安装时应平整顺直，不得扭曲变形或损坏。

6.4.7 拼装完成后，应复测波纹钢结构跨径、失高，符合要求时，应终拧所有高强螺栓。螺栓终拧完成后，应在波纹钢板件拼接缝和螺栓孔位置采用专用密封胶进行防水处理。

6.4.8 拱体在脚手架临时支撑条件下测量截面形状，以每一环波纹钢板连接螺栓初拧完成并成型拱状后，对拱体截面形状进行检查与校正调整。

6.5 防腐施工

6.5.1 波纹钢板件应在工厂进行热浸镀锌防腐。拼装前局部破损的镀锌层可采用冷喷锌进行现场修补，冷喷锌材料应符合现行《桥梁钢结构冷喷锌防腐技术条件》（JT/T 1266）的有关规定。设计要求二次防腐时，应在拼装完成后按设计要求进行。

6.5.2 拼装好的波纹钢板现场二次防腐宜采用专用机械喷涂，现场沥青防腐应符合下列规定：

1 喷涂前，波纹钢面板镀锌层表面应洁净、干燥，不得有泥土、灰尘、油渍、水及其他污染：

2 应采用专用机械喷涂不少于 2 遍，每一遍喷涂厚度应均匀，无漏喷涂部位，涂层表面应均匀光洁、连续，无肉眼可分辨的小孔、孔隙、裂缝、脱皮及其它缺陷。涂层干燥后方可进行下一道施工。

6.6 填筑施工

6.6.1 填筑前在拱内安装临时支撑，临时支撑点与拱内壁之间可采用分节段通长木条支撑，待填筑完成后方可拆除。

6.6.2 填筑应对称、均衡、分层摊铺，逐层压实，每层的压实厚度宜为 150~200mm，其压实度不应小于 96%，夯实高度差应小于一层夯实厚度，并严密监测结构变形。

6.6.3 填筑高度小于等于 0.6m 时，应采用轻型压实设备，且不得振动压实，严禁除夯实（压实）机械以外的重型机械通行。填筑高度大于 0.6m 后，先采用轻型压路机静压，后采用重型压路机振压。

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

6.7 附属工程施工

6.7.1 波纹钢结构明洞、棚洞的洞口及防护等施工应符合现行《公路隧道施工技术规范》（JTG/T 3660）的有关规定。

7 质量检验

7.1 下部结构检验

7.1.1 波纹钢结构明洞、棚洞的下部结构质量控制应符合表 7.1.1 的规定。

表 7.1.1 下部结构质量控制指标

检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
混凝土强度 (MPa)		在合格标准内	按现行《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1) 规定的方法检查
平面尺寸 (mm)		± 50	尺量: 长度、宽度各测 3 处
基础底面高程 (mm)	土质	± 50	水准仪: 测 5 处
	石质	+50, -200	
基础顶面高程 (mm)		± 30	水准仪: 测 5 处
墩台顶面高程 (mm)		± 10	水准仪: 测 5 处
轴线偏位 (mm)		≤ 10	全站仪: 纵、横向各测 5 点
连接件预埋位置 (mm)		满足设计要求, 设计未要求时 ≤ 5	尺量: 每件测
墩台顶面平整度 (mm)		≤ 5	2m 直尺: 墩台横桥向每侧面测 3 处

7.1.2 混凝土结构的施工质量应符合现行《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1) 的有关规定。

7.2 波纹钢拱结构检验

7.2.1 波纹钢板件及连接件质量应符合表 7.2.1 的规定。

表 7.2.1 波纹钢板件及连接件质量要求

检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
钢板厚度 (mm)		不小于设计值	测厚仪: 抽取的每节或每片不少于 10 点, 同一长度、宽度 (径向) 方向不少于 3 点
波距 (mm)		± 3	游标卡尺: 抽取的每片不少于 5 个波段
波高 (mm)		± 2	游标卡尺: 抽取的每片不少于 5 个波段
波纹钢板件	长度	$\pm 1\%$	尺量: 抽取的每节
	宽度	$\pm 1\%$	尺量: 抽取的每节
镀 (涂) 层厚度 (μm)		不小于设计值	测厚仪: 抽取的每节或每片不少于 10 点, 同一长度、宽度 (径向) 方向不少于 3 点
螺栓孔间距 (mm)		± 1.0	游标卡尺: 抽取的每片不少于 3 个

螺栓孔孔径 (mm)	+0.7 -0	游标卡尺: 抽取的每片不少于 3 个
外排螺栓孔中心到板边长度 (mm)	0~+5	尺量: 抽取的每节或每片不少于 3 个

7.2.2 波纹钢板拼装完成后的质量要求应符合表 7.2.2 的规定。

表 7.2.2 波纹钢板拼装后允许偏差

检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
跨径	±5‰	尺量: 每 5m 测一处, 不少于 3 个断面
矢高	±5‰	尺量: 每 5m 测一处, 不少于 3 个断面
工地防腐涂层	不小于设计值	测厚仪: 每洞不少于 10 处
高强螺栓扭矩	±10%	扭矩扳手: 检查 5%, 且不少于 2 个

7.2.3 每填筑不大于 1m 时应检查一次结构的几何尺寸。最大变形量不应大于最终容许变形量, 超出变形范围应及时修正调整。

7.3 填筑质量检验

7.3.1 填筑施工过程质量控制应符合表 7.3.1 的规定。

表 7.3.1 填筑施工过程质量控制指标

检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
压实度 (%)	≥设计值	灌砂法: 分层检测, 每压实层每侧各测 3 处。
两侧分层填筑高差 (mm)	≤300	尺量: 每层每侧测 3 点
分层压实厚度 (mm)	≤200	尺量: 每层每侧测 3 点

7.3.2 填筑完成后总体质量要求应符合表 7.3.2 的规定。

表 7.3.2 填筑完成后总体质量控制指标

检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
明洞 (棚洞) 洞中线偏位 (mm)	≤20	全站仪: 每 50m 测 1 点, 不少于 5 点
明洞 (棚洞) 长 (mm)	+200, -100	全站仪或钢尺: 检查中心线处
跨径	±1%	尺量: 每 5m 测一处, 不少于 3 个断面
矢高	±1%	尺量: 每 5m 测一处, 不少于 3 个断面

附录 A 常用波形截面特征参数表

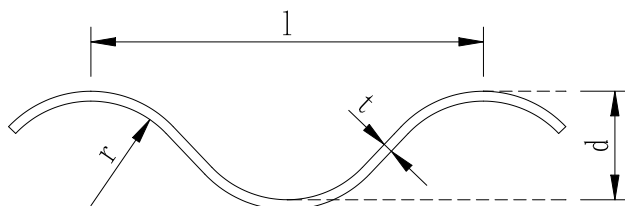


图 A.1 波形截面示意图

表 A.1 常用波形截面特征参数表

波距	波高	转角半径	壁厚	截面面积	惯性矩	回转半径	截面模量
l	d	r	t	A_l	I_l	r_l	W_l
mm	mm	mm	mm	mm ² /mm	mm ⁴ /mm	mm	mm ³ /mm
150	50	28	4.0	4.965	1458.630	17.141	54.023
			6.0	7.460	2230.128	17.290	79.647
			8.0	9.964	3039.134	17.465	104.798
			10.0	12.479	3892.805	17.662	129.760
200	55	53	4.0	4.729	1819.240	19.614	61.669
			6.0	7.103	2765.848	19.733	90.684
			8.0	9.486	3745.581	19.871	118.907
			10.0	11.878	4764.905	20.029	146.612
300	110	70	4.0	5.238	7911.514	38.863	138.798
			6.0	7.870	11956.877	38.978	206.153
			8.0	10.511	16072.340	39.103	272.413
			10.0	13.163	20265.753	39.238	337.763
380	140	76	4.0	5.179	12060.038	48.255	167.501
			6.0	7.776	18194.441	48.373	249.239
			8.0	10.377	24408.550	48.500	329.845
			10.0	12.983	30710.006	48.636	409.467
400	150	81	4.0	5.224	14024.132	51.814	182.132
			6.0	7.843	21150.365	51.931	271.159
			8.0	10.466	28362.993	52.057	359.025
			10.0	13.095	35669.782	52.191	445.872

附录 B 波纹钢板拱结构计算

B.1 作用

B.1.1 土的推力 T_G

作用在波纹钢结构明洞（棚洞）拱顶填土的作用范围如图 B.1.1 所示，其每延米土的推力 T_G 按式（B.1.1）计算。

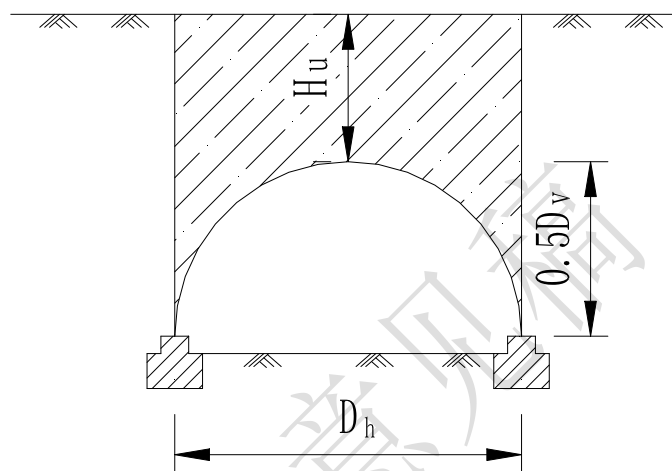


图 B.1.1 波纹钢结构明洞（棚洞）拱顶填土作用范围示意图

$$T_G = 0.5(1.0 - 0.1C_s)A_f W \quad (\text{B.1.1})$$

式中： T_G ——波纹钢结构明洞（棚洞）拱顶填土引起的波纹钢结构拱圈每延米推力（kN/m）；

C_s ——轴向刚度系数， $C_s = \frac{1000E_s D_h}{EA_l}$ ；

A_l ——一个波距截面面积与波距的比值（mm²/mm）；

D_h ——波纹钢结构明洞（棚洞）的有效跨度（m），按波纹钢结构拱圈轴线计算；

E 、 E_s ——波纹钢板材料和填土的弹性模型（MPa）；

A_f ——考虑结构起拱效应的土压力增大系数，按附表 B.1.1 取值；

H_u ——波纹钢结构明洞（棚洞）拱顶填土高度（m）；

W ——波纹钢结构明洞（棚洞）拱顶填土每延米的重量（kN/m），

$$W = \gamma D_h (H_u + 0.1075 D_v);$$

γ ——波纹钢结构明洞（棚洞）拱顶填土的容重（ kN/m^3 ）；

D_v ——波纹钢结构明洞（棚洞）的有效矢高（ m ），按波纹钢结构拱圈轴线计算。

表 B.1.1 土压力增大系数取值表

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

注： A_f 和 D_h/D_v 通过线性内插取值。

B.1.2 地震推力

地震动峰值加速度 $\geq 0.2g$ 地区的公路波纹钢结构明洞和棚洞应进行抗震设计，地震推力 T_E 按式（B.1.2）计算。

$$T_E = 0.5 A_v \frac{W}{g} \quad (\text{B.1.2})$$

式中： T_E ——地震作用引起的波纹钢结构明洞和棚洞每延米推力（ kN/m ）；

A_v ——竖向设计基本地震动峰值加速度，按表 B.1.2 选用；

W ——涵顶填土每延米的重量（ kN/m ）；

g ——重力加速度，取值 9.80665m/s^2 。

表 B.1.2 地震基本烈度和设计基本地震动峰值加速度对应表

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

B.2 结构验算

B.2.1 基本组合

永久作用设计值与可变作用设计值相组合应满足式 (B.2.1)。

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

式中： S_{ud} ——承载能力极限状态下作用基本组合的效应设计值；

γ_0 ——结构重要性系数，对应于设计安全等级一级、二级和三级分别取 1.1、1.0 和 0.9，按现行《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60) 的有关规定选取；

γ_G ——土的推力分项系数，取 1.2；

γ_Q ——汽车荷载推力分项系数，采用车道荷载计算时取 1.4，采用车辆荷载计算时取 1.8；

T_G ——拱顶填土引起的波纹钢结构拱圈每延米推力；

T_Q ——汽车荷载引起的波纹钢结构拱圈每延米推力；

A_t ——一个波距截面面积与波距的比值 (mm^2/mm)；

f_d ——波纹钢板材的强度设计值 (MPa)，按现行《钢结构设计标准》(GB 50017) 取值；

f_b ——波纹钢板的屈曲临界应力 (MPa)。

B.2.2 地震组合

永久作用效应与地震作用效应的最不利组合应满足式（B.2.2）。

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

式中： S_{ad} ——承载能力极限状态下作用地震组合的效应设计值；

T_E ——地震作用引起的波纹钢结构拱圈每延米推力。

B. 2. 3 屈曲临界应力

为保证波纹钢板结构的稳定性，应按式（B.2.3）验算钢板的屈曲临界应力。

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

式中： f_b ——波纹钢板的屈曲临界应力（MPa）；

ϕ_t ——抗压强度的阻抗系数，土与波纹钢结构时取 0.8；

f_y ——波纹钢板材的屈服强度（MPa）；

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

R ——结构的曲率半径（mm），按波纹钢结构轴线计算；

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

E ——波纹钢板材的弹性模量（MPa）；

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

r_l ——一个波距波纹截面回转半径（mm）；

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

E_m ——土体弹性模型量修正值, $E_m = E_s \left[1 - \left(\frac{R}{R + 1000H_u} \right)^2 \right]$;

E_s ——土体弹性模量 (MPa) ;

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

L ——多孔结构之间的间距。

B.2.4 螺栓连接验算

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

1) 受剪承载力设计值按式 (B.2.4-1) 计算。

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

式中: n_v ——每只螺栓受剪面数量;

d ——螺栓杆直径 (mm) ;

f_v^b ——高强度螺栓抗剪强度设计值 (MPa) 。

2) 承压承载力设计值按式 (B.2.4-2) 计算。

$$N_c^b = d \cdot \sum t \cdot f_c^b \quad (\text{B.2.4-2})$$

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

f_c^b ——高强度螺栓承压强度设计值 (MPa) 。

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

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

式中: n_f ——传力摩擦面数目;

μ ——摩擦面的抗滑移系数, 按表 B.2.4-1 采用;

P ——一个高强度螺栓的预拉力, 按表 B.2.4-2 采用。

表 B.2.4-1 摩擦面的抗滑移系数 μ

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

表 B.2.4-2 一个高强度螺栓的预拉力 P (kN)

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

B. 2.5 施工过程验算

施工过程中波纹截面的弯矩与轴向压力的组合应满足式 (B.2.5-1)。

$$\left(\frac{P}{P_{pf}}\right)^2 + \left|\frac{M}{M_{pf}}\right| \leq 1.0 \quad (\text{B.2.5-1})$$

式中各符号含义及计算方法如下：

1 P 为波纹截面所受轴向压力，按式 (B.2.5-2) 计算。计算中包含土的重力和汽车荷载（考虑施工机械）两部分引起的压力。当 $H_c/D_h < 0.2$ 时，可取 $P=0$ ，其中 H_c 为施工过程中的填土高度， D_h 为波纹钢结构明洞（棚洞）的有效跨度径，按波纹钢结构拱圈轴线计算。

$$P = T_G + T_C \quad (\text{B.2.5-2})$$

式中： T_G ——施工过程中涵顶填土引起的波纹钢结构拱圈每延米推力（kN/m），计算方法同式 (B.1.1)；

T_C ——汽车荷载（考虑施工机械）引起的波纹钢结构拱圈每延米推力（kN/m），计算方法同式 (B.1.2)。

2 P_{pf} 为波纹截面考虑塑性抵抗系数的设计压力，按式 (B.2.5-3) 计算。

$$P_{pf} = \phi_h A f_y \quad (\text{B.2.5-3})$$

式中： ϕ_h ——波纹钢板材抵抗塑性铰的抗力系数，取 0.7。

3 M 为波纹截面所受弯矩，由三部分组成，按式（B.2.5-4）~式（B.2.5-7）计算。

$$M = M_1 + M_B + M_C \quad (\text{B.2.5-4})$$

$$M_1 = K_{M1} \gamma D_h^3 \quad (\text{B.2.5-5})$$

$$M_B = -K_{M2} \gamma D_h^2 H_C \quad (\text{B.2.5-6})$$

$$M_C = K_{M3} R_L D_h L_C \quad (\text{B.2.5-7})$$

式中： M_1 ——波纹钢结构拱圈在土体均布力作用下跨中截面的弯矩（ $\text{kN}\cdot\text{m/m}$ ）；

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

M_C ——施工机械引起的结构跨中截面的弯矩（ $\text{kN}\cdot\text{m/m}$ ）；

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；

γ ——波纹钢结构拱顶填土的容重（ kN/m^3 ）；

K_{M1} ， K_{M2} ， K_{M3} ， K_4 ， R_L ——计算施工弯矩的参数。其取值方法详见 B.2.6。

4 M_{pf} 为波纹截面考虑塑性抵抗系数的设计弯矩，按式（B.2.5-8）、式（B.2.5-9）计算。

$$M_{pf} = \phi_h M_p \quad (\text{B.2.5-8})$$

$$M_p = \frac{2I_l}{d+t} \cdot f_y \quad (\text{B.2.5-9})$$

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

I_l ——一个波距波纹截面惯性矩与波距的比值（ mm^4/mm ）；

d ——波高（ mm ）；

t ——壁厚（ mm ）。

B.2.6 施工验算参数的计算公式

1 施工过程验算中具体参数的计算公式：

$$N_f = E_s (1000 D_c)^3 / EI_l \quad (\text{B.2.6-1})$$

$$\left. \begin{aligned} K_{M1} &= 0.0046 - 0.0010 \lg N_f, \quad N_f \leq 5000 \\ K_{M1} &= 0.0009, \quad N_f > 5000 \end{aligned} \right\} \quad (\text{B.2.6-2})$$

$$\left. \begin{aligned} K_{M2} &= 0.018 - 0.0041 \lg N_f, \quad N_f \leq 5000 \\ K_{M2} &= 0.0032, \quad N_f > 5000 \end{aligned} \right\} \quad (\text{B.2.6-3})$$

$$\left. \begin{aligned} K_{M3} &= 0.12 - 0.0181 \lg N_f, \quad N_f \leq 100000 \\ K_{M3} &= 0.030, \quad N_f > 100000 \end{aligned} \right\} \quad (\text{B.2.6-4})$$

$$R_L = [0.265 - 0.053 \lg(N_f)] / (H_c / D_h)^{0.75} \leq 1.0 \quad (\text{B.2.6-5})$$

2 等效线性荷载的参数 K_4 按照表 B.2.6 线性插值取得。

表 B.2.6 等效线性荷载的参数 K_4 的取值

埋深 (m)	K_4 (m)		
	每轴双轮	每轴四轮	每轴八轮
0.6	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

附录 C 落石冲击力计算

C.0.1 基于荷载传递理论的落石冲击力按式 (C.0.1) 计算。

$$F = \varsigma \sqrt{\frac{2EdE_k}{1-\mu^2}} \tag{C.0.1}$$

式中： F ——落石冲击力 (kN)；
 ς ——动力系数，可按表 C.0.1 取值；
 E ——缓冲层弹性模量 (kPa)；
 d ——落石的等效直径 (m)；
 E_k ——落石冲击能量 (kJ)，按 C.0.2 计算；
 μ ——缓冲层泊松比。

表 C.0.1 动力系数表

$2h/d$	动力系数 ς
0.5	1.87
1.0	1.39
1.5	1.22
2.0	1.14
3.0	1.06
4.0	1.02
5.0	1.00

注： h 为缓冲层厚度 (m)。

C.0.2 单个落石产生的冲击动能按式 (C.0.2) 计算。

$$E_k = (1 + \beta_R) \left(1 - \frac{\mu_\beta}{\tan \theta}\right) m_R \cdot g \cdot H_R \tag{C.0.2}$$

式中： E_k ——落石的冲击动能 (J)；
 β_R ——旋转能量系数，取 0.1；
 θ ——斜坡坡度角 (°)；
 m_R ——落石的质量 (kg)；
 g ——重力加速度 (9.8m/s²)；
 H_R ——落石下落的高度 (m)；

μ_β ——摩擦系数，可参照表 C. 0. 2 选用。

表 C. 0. 2 不同边坡类型的 μ_β 值

落石及斜坡的特性	μ_β
硬岩、圆状；凹凸小，没有树木	0. 05
软岩、圆状~角状；凹凸中~大、没有树木	0. 15
砂土岩锥、圆状~角状；凹凸小~中、没有树木	0. 25
岩锥、巨大石砾夹杂岩锥、角状；凹凸中~大、树木无~有	0. 35

本规程用词用语说明

1 本规程执行严格程度的用词，采用下列写法：

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

2 引用标准的用语采用下列写法：

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