



T/CECS G XXXX: 2023

中国工程建设协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction Standardization

公路桥涵波纹钢结构加固技术规程

Technical specification for reinforcement of corrugated steel structures
of highway bridges and culverts

(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

中国工程建设协会标准

公路桥涵波纹钢结构加固技术规程

Technical specification for reinforcement of corrugated steel structures
of highway bridges and culverts

T/CECS G: DXX-XX-2023

主编单位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

徐州市公路工程总公司

发布机构：中国工程建设标准化协会

实施日期：2023 年 XX 月 XX 日

人民交通出版社股份有限公司

北京

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2019 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〔2019〕169 号）的要求，由中交第一公路勘察设计研究院有限公司和徐州市公路工程总公司作为主编单位承担《公路桥涵波纹钢结构加固技术规程》（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 5 章和 2 个附录，主要内容包括：1 总则、2 术语和符号、3 加固用材料、4 基本规定、5 加固设计、6 加固施工、7 质量控制。

请注意本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利，本规程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，由中交第一公路勘察设计研究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），或中交第一公路勘察设计研究院有限公司（地址：陕西省西安市高新区科技二路 63 号；邮编：710075；电话：029-88832888），以便下次修订时参考。

主 编 单 位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司
徐州市公路工程总公司

参 编 单 位：西安中交土木科技有限公司
山西省交通规划勘察设计院
济南金衢公路勘察设计研究有限公司

主 编：滕文刚

主要参编人员：任成飞、彭泽友、潘长平、高山、杨安、胡滨、梁凯、王付、丁卫峰、樊泽、潘小虎、李江、高斐、贺轶静、王元、车浩、马浩

主 审：李春风

主要审查人员：伍石生、梁乃兴、李祝龙、黄志福、王全录、宋方华

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.....	3
3 加固用材料.....	4
3.1 主体结构.....	4
3.2 连接件.....	4
3.3 防腐材料.....	5
3.4 防水材料.....	5
3.5 填筑材料.....	6
3.6 洞口材料.....	6
4 基本规定.....	7
5 加固设计.....	8
5.1 一般规定.....	8
5.2 开口截面加固法.....	8
5.3 闭口截面加固法.....	9
5.4 构造要求.....	10
5.5 耐久性设计.....	11
5.6 洞口设计.....	11
6 加固施工.....	12
6.1 一般规定.....	12
6.2.1 施工工艺流程.....	12
6.3 拼装施工.....	13
6.4 填筑施工.....	14
6.5 防腐施工.....	15
6.6 洞口施工.....	15
7 质量控制.....	16
附录 A 常用波形截面特征参数表.....	18
附录 B 波纹钢结构加固桥涵截面形式.....	20
附录 C 波纹钢结构加固桥梁计算.....	22
B.1 波纹钢板结构等效.....	22
B.2 正截面受弯承载力计算.....	22

B.3 受弯构件加固后斜截面抗剪	24
B.4 轴心受压构件加固计算	25
B.5 偏心受压构件加固计算	26
附录 D 波纹钢结构加固涵洞计算.....	28
D.1 作用.....	28
C.2 结构验算	30

征求意见稿

征求意见稿

1 总则

1.0.1 为规范公路桥涵波纹钢结构加固设计与施工，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于各级公路桥涵采用波纹钢结构加固的设计与施工。

1.0.3 公路桥涵波纹钢结构加固设计与施工应遵循安全、耐久、适用、环保、经济的原则。

1.0.4 公路桥涵加固前，应按照有关要求及相关规范对其技术状况、承载能力进行检测、评定。

1.0.5 公路桥涵波纹钢结构加固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。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 公路桥涵波纹钢结构加固 corrugated steel structures strengthening of highway bridges and culverts

采用波纹钢结构对既有桥涵进行增强,提高结构的承载力和刚度,使其满足现行设计规范要求。

2.1.2 波距 wave pitch

相邻两个波峰或波谷之间的距离。

2.1.3 波高 wave depth

波峰外缘和波谷内缘之间的垂直高度。

2.1.4 波谷 trough

向波纹钢涵洞内凸起部分为波谷。

2.1.5 波峰 crest

向波纹钢涵洞外凸起部分为波峰。

2.1.6 最小填筑厚度 minimum depth of cover

提供波纹钢结构稳定性和施工安全性的填料厚度最小值。

2.1.7 开口截面加固法 structure member strengthening with open section of corrugated steel

采用单孔或多孔拱形等开口截面加固既有桥涵,以提高原结构的承载力和刚度的方法。

2.1.8 闭口截面加固法 structure member strengthening with closed section of corrugated steel

采用单孔或多孔圆形等闭口截面加固既有桥涵,以提高原结构的承载力和刚度的方法。

2.2 符号

- A_l ——一个波距截面面积与波距的比值 (mm^2/mm) ;
- D_a ——最小填筑厚度 (m) ;
- D_b ——多跨波纹钢结构的最小间距 (m) , 按波纹钢结构外侧计算;
- D_h ——波纹钢结构有效跨径 (m) , 按波纹钢结构截面轴线计算;
- D_v ——波纹钢结构有效矢高 (m) , 按波纹钢结构截面轴线计算;
- d ——波高 (mm) ;
- E ——波纹钢板的弹性模量 (MPa) ;
- E_s ——填筑材料的弹性模量 (MPa) ;
- H_u ——填筑厚度 (m) ;
- I_l ——一个波距截面惯性矩与波距的比值 (mm^4/mm) ;
- l ——波距 (mm) ;
- r ——转角半径 (mm) ;
- r_l ——一个波距波纹截面回转半径 (mm) ;
- t ——壁厚 (mm) ;
- W_l ——一个波距截面模量与波距的比值 (mm^3/mm) 。

3 加固用材料

3.1 主体结构

3.1.1 波纹钢材料宜采用碳素结构钢、低合金高强度结构钢,其性能应分别符合现行《碳素结构钢》(GB/T 700)、《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591)的有关规定。

3.1.2 波纹钢板件所用钢板及钢带应符合现行《碳素结构钢和低合金结构钢热轧钢板和钢带》(GB/T 3274)的有关规定。其尺寸、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。

3.1.3 采用连续热镀锌钢板及钢带加工波纹钢构件时,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)的有关规定。

3.1.4 采用工字钢、槽钢、角钢、H型钢、T型钢等型钢对波纹钢管或板件进行加强时,其质量应符合现行《热轧型钢》(GB/T 706)和《热轧H型钢和部分T型钢》(GB/T 11263)的有关规定。

3.1.5 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。

3.2 连接件

3.2.1 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、大六角螺母、垫圈技术条件》(GB/T 1231)的有关规定。

3.2.2 螺栓螺母强度等级不应低于 8.8S 级。

3.2.3 采用与波纹钢板件的波纹半径一致的凹凸形垫片,其力学性能应符合现行《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)的有关规定,其规格和尺寸应符合现行《冷弯波纹钢管》(GB/T 34567)的有关规定。

3.2.4 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。

3.2.5 管箍、法兰盘材料应符合本规程第 3.1.1 条规定，并与主体结构材料一致。

3.2.6 焊接材料应与被焊接钢材相匹配，并应符合现行《钢结构焊接规范》（GB 50661）的有关规定。

3.3 防腐材料

3.3.1 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。

3.3.2 在工厂热浸镀锌防腐基础上可采用喷涂沥青等非金属覆盖层增强耐久防腐性能，沥青宜使用环氧沥青或改性沥青，其性能、质量与技术指标应分别符合现行《环氧沥青防腐涂料》（GB/T 27806）和《防水用弹性体（SBS）改性沥青》（GB/T 26528）的有关规定。

3.3.3 采用其他防腐材料时，应满足波纹钢结构桥涵在设计使用年限内的防腐要求，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。

3.4 防水材料

3.4.1 天然橡胶、氯丁橡胶或耐候密封胶连接缝密封材料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。

3.4.2 高强度螺栓连接用硅酮结构密封胶的性能、质量与技术指标应符合现行《建筑用硅酮结构密封胶》（GB 16776）的有关规定。

3.4.3 石灰改善土性能与质量应符合现行《公路路基施工技术规范》（JTG/T 3610）的有关规定。

3.4.4 聚氨酯质量与技术指标、基本性能应符合现行《聚氨酯防水涂料》（GB/T 19250）的有关规定。

3.4.5 高密度聚乙烯土工膜性能、质量与技术指标应符合现行《土工合成材料聚乙烯土

工膜》(GB/T 17643)的有关规定。

3.4.6 其他防水材料应满足公路波纹钢涵洞的防水要求,材料的性能、质量与技术指标应符合国家和行业现行有关标准的规定。

3.5 填筑材料

3.5.1 开口截面波纹钢结构与既有桥涵结构之间可采用流动性较好的自密实混凝土填筑。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。

3.5.2 闭口截面波纹钢结构与既有桥涵结构之间可采用流动性较好的流态水泥土或流态粉煤灰填筑。

3.6 洞口材料

3.6.1 一字墙、八字墙、铺砌、截水墙或侧墙等结构采用强度等级不低于 C30 的混凝土或 M7.5 浆砌 MU30 片石。

4 基本规定

4.1.1 公路波纹钢结构加固对象为中小跨径桥梁和涵洞。

4.1.2 波纹钢结构加固既有桥涵可采用闭口截面加固法和开口截面加固法,选用时应尽量减少对净空或过水断面的压缩,常见的波纹钢结构加固截面型式见附录 B。

4.1.3 公路桥涵采用波纹钢结构加固时,开口截面波纹钢结构跨径不宜大于 10m,闭口截面波纹钢结构跨径不宜大于 5m,可采用多跨或者多孔波纹钢结构加固。

4.1.4 采用波纹钢结构进行加固时,应尽量减少对既有结构使用功能的影响。

4.1.5 加固过程中应尽可能不损伤原结构,必要时应对原结构进行保护。

征求意见稿

5 加固设计

5.1 一般规定

5.1.1 波纹钢结构加固既有涵洞时，应根据使用功能、通行能力、抗洪防灾等要求，结合地质、地形、水文和环境等条件进行综合设计，并应符合现行《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60）的有关规定。

5.1.2 波纹钢结构加固既有桥涵的设计使用年限应满足现行《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60）规范要求。

5.1.3 既有桥涵加固设计荷载应满足现行《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60）的要求。

5.1.4 波纹钢结构加固既有桥涵后的强度验算应考虑内力重分布。

5.2 开口截面加固法

5.2.1 采用开口截面加固时，波纹钢结构跨径应小于现有结构净跨径，且波峰距现有结构的距离应不小于 150 mm。

5.2.2 原结构病害和新老混凝土结合面应按照现行《公路桥梁加固设计规范》（JTG/T J22）中相关规定进行处理。

5.2.3 波纹钢板与原桥涵之间填充的自密实混凝土强度等级应比原桥涵混凝土强度等级高一级。波峰外填筑厚度不得小于 150mm。填筑混凝土中可根据需要设置钢筋网，直径不小于 16mm。

5.2.4 波纹钢拱的拱脚应可靠锚固于旧桥基础或者新建基础，旧桥基础应进行计算，不满足要求应按现行《公路桥梁加固设计规范》（JTG/T J22）进行加固，新建基础设计应满足现行《公路桥涵地基与基础设计规范》（JTG 3363）的有关规定。

5.2.5 开口截面加固法的内力分析可采用附录 C 进行初步设计，并采用有限元方法进行验算，有限元方法应充分考虑不同材料的接触情况与非线性。计算承载能力极限状态下最大应力不得大于钢板的临界屈曲应力和强度设计值。波纹钢结构常用波形截面特征参

数见附录 A。

5.2.6 按承载能力极限状态设计时，应对构件进行承载能力验算，必要时应进行结构的抗倾覆和滑移验算，可采用式（5.2.4）：

$$\gamma_0 S_d \leq R_d \quad (5.2.4)$$

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。

5.2.7 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，验算结果应满足现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）的有关规定。

5.2.8 开口截面法采用有限元验算承载能力极限状态和正常使用极限状态，波纹钢结构变形应满足下列要求：

- 1 竖向变形不超过跨径或孔径的 1/200。
- 2 水平变形不超过跨径或孔径的 1/200。

5.3 闭口截面加固法

5.3.1 采用闭口截面加固时，波纹钢管外径应小于现有结构净跨径，且波峰距现有结构的距离应不小于 100 mm。

5.3.2 波纹管底部不得直接置于原结构混凝土基础上，应在管身与地基之间按照现行《公路涵洞设计规范》（JTG/T 3365-02）设置砂垫层或者其他材料，使其紧密相贴。

5.3.3 闭口波纹钢结构加固应按附录 D 中极限状态法进行承载能力极限状态和正常使用极限状态设计，对结构强度、刚度、稳定性和连接强度分别进行计算，必要时进行有限元验算。波纹钢结构常用波形截面特征参数见附录 A。

5.2.6 闭口截面加固法采用有限元验算时，波纹钢结构变形应满足下列要求：

- 1 竖向变形不超过跨径或孔径的 1/100。
- 2 水平变形不超过跨径或孔径的 1/100。

5.4.3 流态水泥土或流态粉煤灰结构性填筑应符合下列规定：

- a. 最小填筑厚度按照式（5.4.3）计算，且不得小于 0.6m。

$$D_a = \max \left\{ \frac{D_h}{6} \left(\frac{D_h}{D_v} \right)^{1/2}, 0.4 \left(\frac{D_h}{D_v} \right)^2 \right\} \quad (5.4.3)$$

式中： D_a ——最小覆土厚度（m）；

D_h ——波纹钢涵洞的有效跨度（m），按波纹钢涵洞轴线计算；

D_v ——波纹钢涵洞的有效矢高（m），按波纹钢涵洞轴线计算。对于圆形截面， D_h 与 D_v 相等，等于波纹钢涵洞中圆直径。

- b. 填筑范围如图 5.4.3 所示，回填区域应根据现场情况确定，且应符合现行《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）的有关规定。

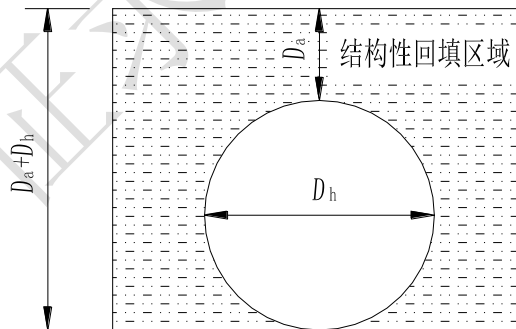


图 5.4.3 土体结构性填筑范围示意图

5.4 构造要求

5.4.1 既有桥涵采用波纹钢管（拱）结构加固，应根据既有桥涵下部空间大小、采用波纹钢管或波纹钢板件在其空间内内衬加固，连接方式宜采用内连接。

5.4.2 开口截面加固宜在波纹钢板波谷处外侧设置剪力钉，剪力钉布置型号和间距根据计算得出，剪力钉长度应超出波峰不小于 50mm。

5.4.3 当波纹钢管直径小于 2000 mm 时，宜采用分节整管波纹钢管；当波纹钢管直径大于或等于 2000 mm 时，宜采用波纹钢板件拼装管。

5.5 耐久性设计

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： ≥ 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： 1、强腐蚀性：指金属表面均匀磨蚀大于 0.5mm/年；中等腐蚀：指金属表面均匀腐蚀 0.1~0.5mm/年；弱腐蚀性：指金属表面均匀腐蚀小于 0.1mm/年。 2、镀锌层单面公称厚度 (μm) = 镀锌层单面公称重量的数值 $\times 0.1415$ 。	

5.5.2 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 当采用油漆防腐涂装时，涂装材料的品种、规格、性能等应符合现行《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》(JT/T 722)的有关规定。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。通道内侧可不喷涂防腐沥青。

5.6 洞口设计

5.6.1 采用闭口截面波纹钢结构内衬加固时，进出口两端应设置混凝土强度等级不低于 C30 的混凝土截水墙和铺砌，并确保进出口排水顺畅。

5.6.2 采用流态水泥土或者流态粉煤灰填筑时，波纹钢结构两端应设置混凝土挡墙，并通过锚栓与波纹钢结构相连接，强度等级不得低于 C30。

6 加固施工

6.1 一般规定

6.1.1 波纹钢结构安装前应根据设计文件对地基、基础、墩台、高程、跨径及预埋件位置等进行核查，达到合格要求后方可安装。

6.1.2 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，局部损伤的镀锌层需进行修复。

6.1.3 基础、墩台、侧墙及附属工程施工应符合现行《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）的有关规定，并按现行《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》（JTG F80/1）的有关规定进行质量检验。

6.2.1 施工工艺流程

1 开口截面波纹钢结构加固的施工工艺流程如图 6.2.1 所示。



图 6.2.1 开口截面波纹钢加固施工工艺流程图

2 闭口截面波纹钢结构加固的施工工艺流程如图 6.2.2 所示。

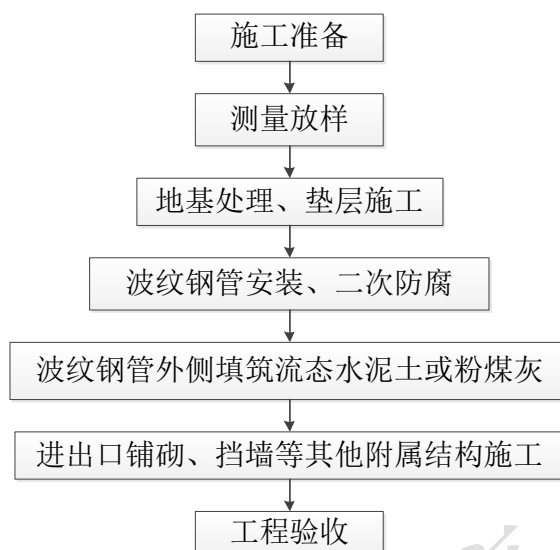


图 6.2.2 闭口截面波纹钢加固施工工艺流程图

6.3 拼装施工

6.3.1 波纹钢板拱拼装前应检查墩台上预埋型钢的位置、线形、坡度、尺寸及预埋螺栓位置，合格后方可拼装施工。

6.3.2 拼装前应准确标记波纹钢板件，拼装应自下而上顺次对称进行。

6.3.3 波纹钢板件搭接时，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。波纹钢板环向拼装时，应采用错缝拼装。

6.3.4 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。

6.3.5 拼装完成后，复测波纹钢结构孔径、位置、高程和预拱度。符合要求时，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业密封胶进行防水处理，防止在波纹钢板件拼接缝和螺栓孔位置发生渗水。

6.4 填筑施工

6.4.1 波纹钢板拱与既有结构盖板、板梁、拱圈、墩台身之间空隙的填筑，采用自密实混凝土填筑时，应符合下列规定：

1 采用自密实混凝土填充时，自密实混凝土强度等级和相关参数应符合现行《自密实混凝土应用技术规程》（JGJ/T 283）的有关规定；

2 在波纹钢板拱两端自下而上随混凝土浇筑高度逐步加高安装两侧定制模板，可从波纹钢板拱）从中部向两端部逐层填充浇筑混凝土；

3 当无法确保从两端口填充浇筑混凝土饱满密实时，可采用从原结构开孔将混凝土输送管伸入到填充浇筑部位进行浇筑填充；

4 混凝土浇筑时，应在波纹钢板拱两侧对称、均衡浇筑，防止因混凝土浇筑偏载造成波纹钢板拱变形；

5 待填筑完成后，再浇筑波纹钢板拱拱脚处混凝土护脚；

6 混凝土浇筑施工操作工艺及质量，应符合现行《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）的有关规定。

6.4.2 波纹钢管与既有结构盖板、板梁、拱圈、墩台身之间空隙的填筑，采用流态水泥土或流态粉煤灰填筑时，应符合下列规定：

1 流态水泥土或流态粉煤灰填筑材料性能和配合比应符合相关规范的要求；

2 在波纹钢管两端自下而上随填筑高度逐步加高安装两侧定制模板，可从波纹钢管从中部向两端部逐层填充浇筑混凝土；

3 对于较长既有结构与波纹钢管之间空隙的填筑，可分段安装波纹钢板（管），并分段填筑，分段长度根据现场情况确定；

4 涵洞两侧应对称、均衡填筑，防止因混凝土浇筑偏载造成波纹钢管（拱）变形；由偏压引起的结构物变形应采取措施消除，校正截面形状后应重新实施填筑。

6.4.3 填筑的检查方法和评定，应符合现行《公路工程质量检验评定标准》（JTG/T F80/1）的有关规定。

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。拼装前及拼装过程中局部损坏的镀锌层应进行现场修补。

6.5.2 现场防腐喷涂（涂装）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。

6.5.3 波纹钢结构现场二次防腐宜采用专用机械喷涂，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。涂层干燥后再进行下一道防腐层施工。沥青晾干后再进行结构性填筑。

6.5.4 下雨雪天、大风沙天气、扬尘或气温低于 0°C 时，应严禁进行现场防腐施工。

6.6 洞口施工

6.6.1 进出口侧墙、八字墙洞口或者其他形式洞口、铺砌、挡水墙及防护措施等洞口结构施工应符合现行《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）的有关规定。

7 质量控制

7.1 开口截面下部结构质量控制应符合表 7.1 的规定。

表 7.1 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)		≤ 50	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
平整度 (mm)		≤ 8	2m 直尺: 墩台横桥向每侧面测 3 处

7.2 波纹钢板件及连接件外观应切口平直, 无明显锯齿状, 防腐涂层表面光滑、均匀、无滴瘤、无损伤、无破裂、无孔洞, 无明显机械划痕。螺栓、螺母、垫圈、法兰盘、型钢等不应出现裂纹或损伤、生锈和沾染赃物。

7.3 波纹钢板件及连接件质量应符合表 7.3 的规定。

表 7.3 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
波纹钢管节	长度	$\pm 2\%$	尺量: 抽取的每节
	宽度	$\pm 2\%$	尺量: 抽取的每节
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
镀锌层厚度 (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

检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
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)	$0 \sim +5$	尺量: 抽取的每节或每片不少于 3 个

7.4 波纹钢板拼装完成后的质量要求应符合表 7.4 的规定。

表 7.4 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
管径或跨径	$\pm 1\%$	尺量: 每 5m 测一处, 不少于 3 个断面
矢高	$\pm 1\%$	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: 每桥不少于 10 处
高强螺栓扭矩	$\pm 10\%$	扭矩扳手: 检查 5%, 且不少于 2 个

7.5 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。

7.6 波纹钢板现场防腐施工完成后的质量要求应符合表 7.6 的规定。

表 7.6 防腐施工质量

检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
涂装总干膜厚度 / μm	平均厚度 $\geq$ 设计厚度, 80 %点的厚度 $\geq$ 设计厚度, 最小厚度 $\geq$ 80 %设计厚度	测厚仪: 总干膜厚每 20m 测 10 点, 且不少于 10 点
涂装层附着力/MPa	满足设计要求, 设计未要求时 ≥ 0.5	附着力测试仪: 测 4 处

7.7 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。

附录 A 常用波形截面特征参数表

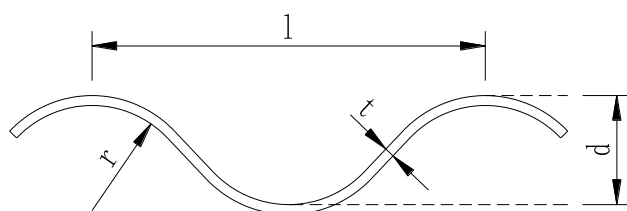


图 A.1 波形截面示意图

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
68	13	17.5	1.6	1.733	34.54	4.464	4.73
			2.0	2.167	43.62	4.487	5.82
			4.0	4.338	93.81	4.650	11.04
75	25	14.3	1.6	1.986	145.88	8.570	10.97
			2.0	2.485	183.60	8.596	13.60
			4.0	4.988	382.51	8.757	26.38
125	25	40	1.6	1.756	138.74	8.889	10.43
			2.0	2.195	174.10	8.905	12.90
			4.0	4.395	356.97	9.012	24.62
150	50	28	2.0	2.478	717.58	17.016	27.60
			4.0	4.965	1458.63	17.141	54.02
			6.0	7.460	2230.13	17.290	79.65
			8.0	9.964	3039.13	17.465	104.80
200	55	53	2.0	2.361	899.39	19.517	31.56
			4.0	4.729	1819.24	19.614	61.67
			6.0	7.103	2765.85	19.733	90.68
			8.0	9.486	3745.58	19.871	118.91

波距	波高	转角半径	壁厚	截面面积	惯性矩	回转半径	截面模量
l	d	r	t	A_l	I_l	r_l	W_l
mm	mm	mm	mm	mm ² /mm	mm ⁴ /mm	mm	mm ³ /mm
230	64	57	2.0	2.360	1190.04	22.455	36.06
			4.0	4.725	2402.72	22.551	70.67
			6.0	7.094	3644.30	22.665	104.12
			8.0	9.470	4921.08	22.796	136.70
300	110	70	4.0	5.238	7911.51	38.863	138.80
			6.0	7.870	11956.88	38.978	206.15
			8.0	10.511	16072.34	39.103	272.41
			10.0	13.163	20265.75	39.238	337.76
380	140	76	4.0	5.179	12060.04	48.255	167.50
			6.0	7.776	18194.44	48.373	249.24
			8.0	10.377	24408.55	48.500	329.85
			10.0	12.983	30710.01	48.636	409.47
400	150	81	4.0	5.224	14024.13	51.814	182.13
			6.0	7.843	21150.36	51.931	271.16
			8.0	10.466	28362.99	52.057	359.03
			10.0	13.095	35669.78	52.191	445.87

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

附录 B 波纹钢结构加固桥涵截面形式

B.1 开口截面加固法截面形式

开口截面加固截面形式包括采用波纹钢拱对既有混凝土拱桥和梁桥进行加固。

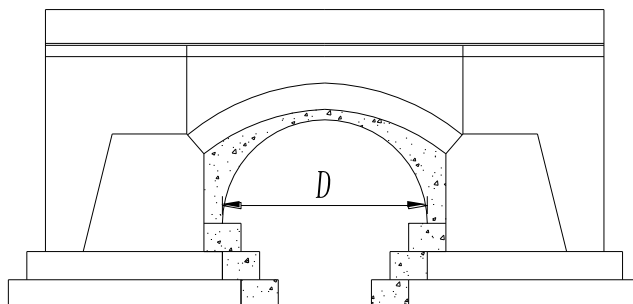


图 B.1.1 波纹钢拱加固混凝土拱桥

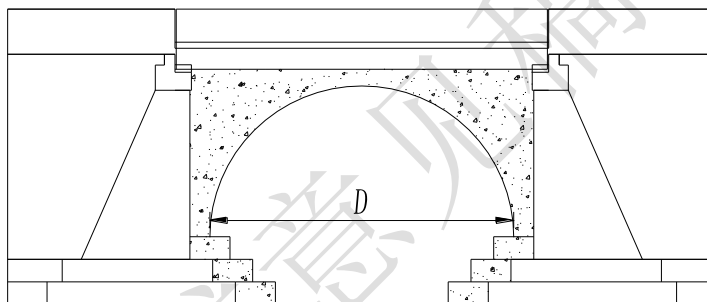


图 B.1.2 波纹钢拱加固混凝土梁桥

B.2 闭口截面加固法截面形式

闭口截面加固截面形式包括采用波纹钢管对既有混凝土拱桥、梁桥和涵洞进行加固。

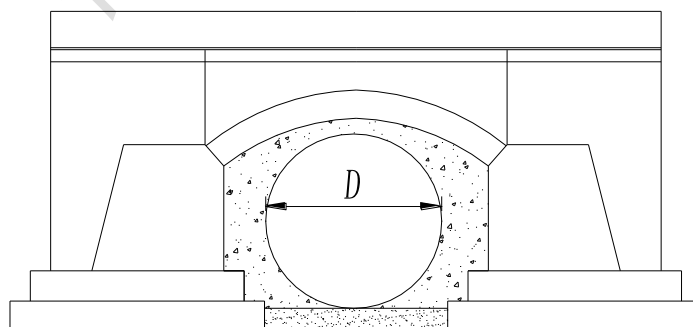


图 B.2.1 波纹钢管加固混凝土拱桥

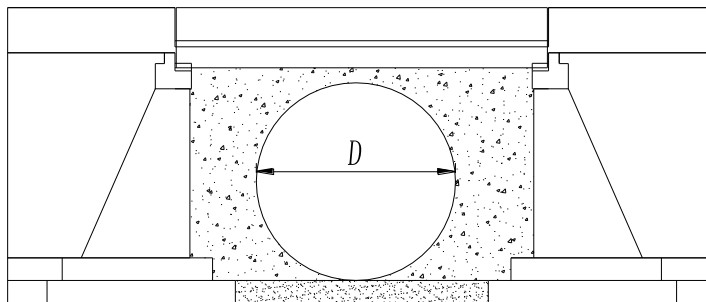


图 B.2.2 波纹钢管加固混凝土梁桥

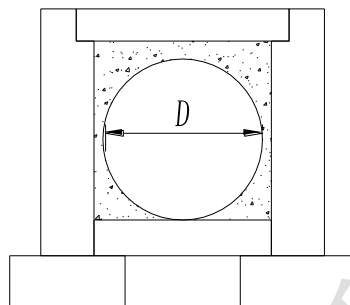


图 B.2.3 波纹钢管加固混凝土涵洞

附录 C 开口截面波纹钢结构加固法计算

C.1 波纹钢结构计算假定

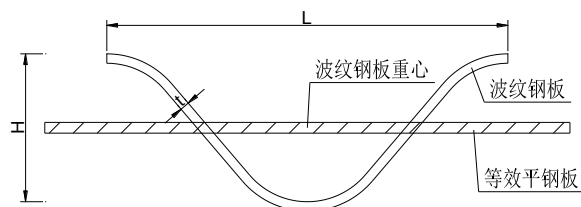


图 C.1.1 波纹钢板结构等效示意图

将波纹钢板等效为平钢板，应确保等效前后的钢板面积和刚度一致，即应满足：

$$Lh_l = A_l L; E_s Lh_l^3 / 12 = E_s I_l L \quad (\text{C.1.1})$$

式中： E_s ——等效后平钢板的弹性模量；

h_l ——等效后平钢板的厚度。

波纹钢组合结构计算尺寸 h 从波纹板片直至原结构下缘，均匀厚度直至拱脚。波纹钢组合结构与原混凝土结构计算符合平截面假定。

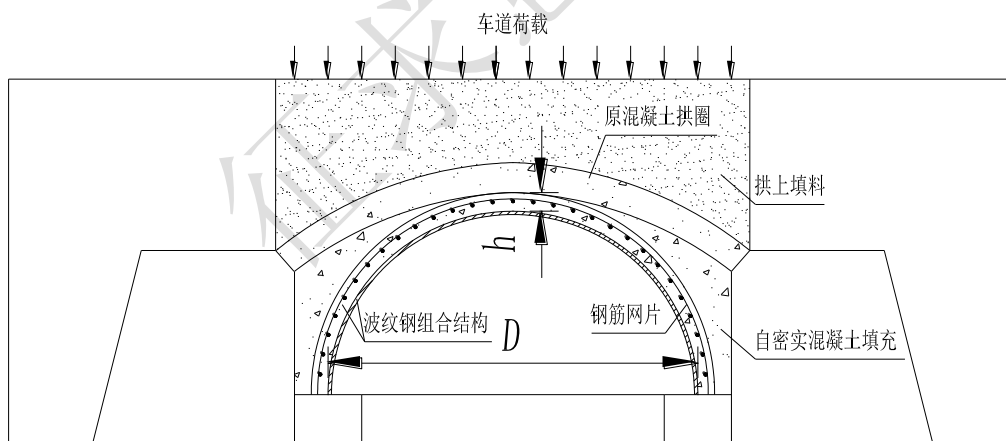


图 C.1.2 开口截面波纹钢结构加固受力示意图

C.2 正截面受弯承载力计算

钢筋混凝土构件采用波纹钢板加固后，正截面抗弯承载力计算应按下列公式计算(图 C.2.1)：

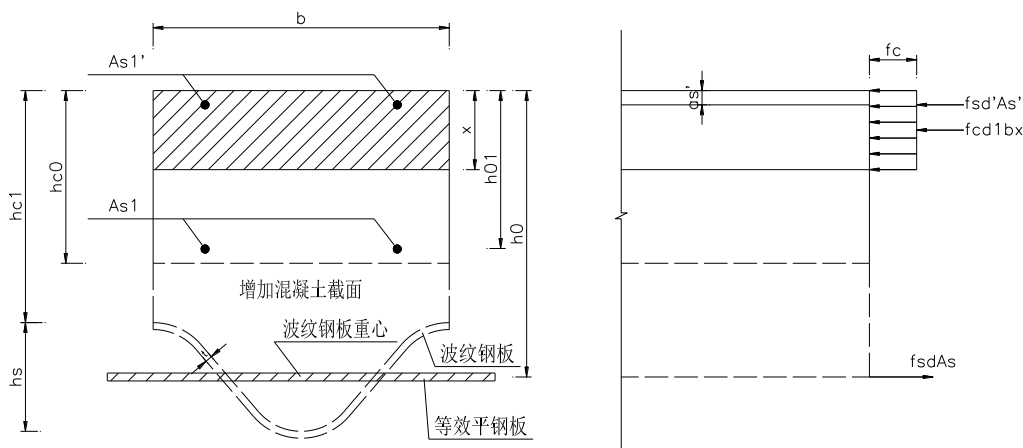


图 C.2.1 波纹钢板抗弯承载力计算

$$\gamma_0 M \leq f_{cd1} b x (h_0 - x/2) + f_{sd'} A_s (h_0 - a_s) \quad (\text{C.2.1})$$

由于 A_{s1} 钢筋距离中性轴较近，应变较小，不计入 A_{s1} 钢筋对抗弯承载力的影响。混凝土受压区高度 x 应按下式计算：

$$x = \frac{f_{sd} A_s - f_{sd'} A_s'}{f_{cd1} b} \quad (\text{C.2.2})$$

适用条件： $x \leq h_{01}$ 且 $x \leq \xi_b h_0$ ，当 $x > \xi_b h_0$ 时，取 $x = \xi_b h_0$ 。

相对界限受压区高度 ξ_b 按下式计算：

$$\xi_b = \frac{\beta}{1 + \frac{f_{sd}}{E_s \epsilon_{cu}}} \quad (\text{C.2.3})$$

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）；

M ——计算荷载作用下弯矩组合设计值；

f_{cd1} ——原构件混凝土抗压强度设计值；

f_{sd} ——波纹钢板抗拉强度设计值；

$f_{sd'}$ ——原构件钢筋抗压强度设计值；

A_s ——波纹钢板受拉区钢板面积；

$A_{s'}$ ——原构件受压区钢筋面积；

b ——波纹钢结构加固后截面计算宽度；

a_s ——原构件受压区普通钢筋合力点至受压区边缘的距离；

h_0 ——加固后截面有效高度，取波纹钢板截面重心至受压区边缘的距离；

h_{01} ——加固前截面有效高度，取原截面受拉区钢筋合力点至受压区边缘的距离；

x ——混凝土受压区矩形应力图的高度；

ξ_b ——正截面相对界限受压区高度，按照式 C.2.3 计算；

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 C50 以下时，取 $\beta=0.8$ 。

C.3 受弯构件加固后斜截面抗剪

钢筋混凝土构件采用波纹钢板加固后，其抗剪截面尺寸应符合下列要求：

$$\frac{\gamma_0 V_{d1}}{bh_{01}} + \frac{\gamma_0 V_{d2}}{bh_0} \leq 0.51 \times 10^{-3} \sqrt{f_{cu,k}} \quad (\text{C.3.1})$$

式中： V_{d1} ——加固时原构件由荷载产生的验算截面处的剪力组合值（kN），若封闭桥上交通进行加固，则为恒载作用的剪力组合设计值；

V_{d2} ——加固后构件验算截面处由后加恒载、车辆荷载及其他作用力产生的剪力组合设计值（kN）；

b ——构件截面宽度（mm）；

h_{01} ——原构件截面有效高度（mm），取原构件斜截面剪压区对应正截面处、子纵向受力钢筋合力点至受压区边缘的距离；

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

钢筋混凝土构件采用波纹钢板加固后，斜截面抗剪承载力计算应按下列公式计算（C.3.2）：

$$\gamma_0 V_d \leq 0.45 \times 10^{-3} \alpha_1 \alpha_3 b h_0 \psi_{cs} \sqrt{(2+0.6P)} \sqrt{f_{cu,k} \rho_{sv} f_{sv}}$$

$$+0.75 \times 10^{-3} f_{sd} A_s + 0.8 V_{d2} \quad (\text{C.3.2})$$

式中： V_d ——加固后构件验算截面处第二阶段剪力组合设计值；

α_1 ——异号弯矩影响系数，计算简支梁和连续梁近边支点梁段的抗剪承载力时， $\alpha_1=1.0$ ，计算连续梁和悬臂梁近中间支点梁段的抗剪承载力时，

$\alpha_1=0.9$ ；

α_3 ——受压翼缘的影响系数，对矩形截面，取 $\alpha_3=1.0$ ，对 T 形和 I 形截面，取 $\alpha_3=1.1$ ；

ψ_{cs} ——与原构件斜裂缝有关的修正系数，加固前未出现斜裂缝时，取 $\psi_{cs}=1.0$ ；斜裂缝宽度小于 0.2mm 时，取 $\psi_{cs}=0.9$ ，斜裂缝宽度大于 0.2mm 时，取 $\psi_{cs}=0.78$ ；

P ——斜截面内纵向受拉钢筋的配筋百分率， $P=100\rho$ ， $\rho=As/(bh_0)$ ，当 $P>2.5$ 时，取 $P=2.5$ ；

$f_{cu,k}$ ——边长为 150mm 的混凝土立方体抗压强度标准值（MPa）；

ρ_{sv} ——原梁斜截面内箍筋配筋率， $\rho_{sv}=A_{sv}/(s_v b)$ ，式中 s_v 为斜截面内箍筋间距（mm）；

f_{sv} ——原梁箍筋抗拉强度设计值（MPa）；

C.4 轴心受压构件加固计算

采用波纹钢板加固钢筋混凝土轴心受压构件时，其正截面抗压承载力应符合下列规定：

$$\gamma_0 N_d \leq 0.9\varphi (f_{cd1} A_{c1} + f_{sd'} A_{s'} + \sigma_{c2} A_{c2} + \sigma_s A_s) \quad (\text{C.4.1})$$

式中： N_d ——加固后轴向力组合设计值；

φ ——轴心受压构件稳定系数；

f_{cd1} 、 $f_{sd'}$ ——分别为原构件混凝土轴心抗压强度和纵向钢筋抗压强度设计值；

A_{c1} 、 A_{c2} ——分别为原构件和新增部分混凝土截面面积;

A_s 、 A_s' ——分别为原有纵向普通钢筋和新增波纹钢板截面面积;

σ_{c2} ——承载力极限状态时, 新增混凝土的应力, $\sigma_{c2} = E_c \varepsilon_{c2} \leq f_{cd}$;

$$\varepsilon_{c2} \text{——新增混凝土的应变, } \varepsilon_{c2} = \varepsilon_{cu} - \frac{N_{d1}}{(bh_{c0} + \alpha_{Es} A_s') E_c}; b、h_{c0} \text{ 分别为原构件截}$$

面宽度和高度:

σ_s ——承载能力极限状态时, 波纹钢板的应力, $\sigma_s = E_s \varepsilon_s \leq f_{sd}$;

$$\varepsilon_s \text{——波纹钢板的应变; } \varepsilon_s = \varepsilon_{cu} - \frac{N_{d1}}{(bh_{c0} + \alpha_{Fs} A'_s) E_c};$$

ε_{cu} ——轴心受压混凝土极限压应变, 取 $\varepsilon_{cu}=0.002$;

E_c 、 E_s ——分别为原构件混凝土弹性模量和波纹钢板弹性模量;

α_{Fs} ——原构件纵向普通钢筋与混凝土的弹性模量比值;

C.5 偏心受压构件加固计算

计算时将波纹板重心处至受压边缘距离作为构件总体高度,即总高为 h_0 。采用波纹板加固后矩形截面偏心受压正截面抗压承载力复核下列规定:

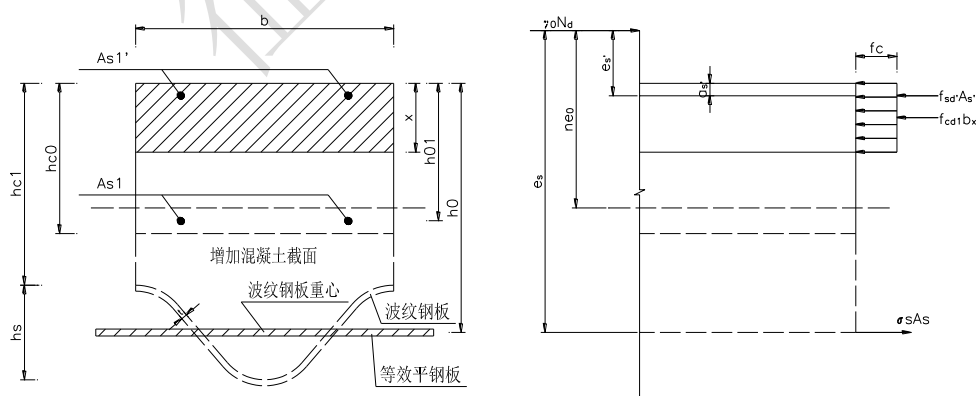


图 C.5.1 波纹板加固后矩形截面偏心受压构件正截面抗压承载力计算

$$\gamma_0 N_d \leq f_{cd} b x + f_{sd'} A_{s'} - \sigma_s A_s \quad (\text{C.5.1})$$

$$\gamma_0 N_d e_s \leq f_{cd1} b x (h_0 - x/2) + f_{sd1} A_s (h_0 - a_s) \quad (\text{C.5.2})$$

$$f_{cd1}bx(e_s - h_0 + x/2) = \sigma_s A_s e_s - f_{sd'} A_{s'} e_{s'} \quad (\text{C.5.3})$$

$$e_s = \eta e_0 + h_0 / 2 \quad (\text{C.5.4})$$

$$e_{s'} = \eta e_0 - h_0 / 2 + a_{s'} \quad (\text{C.5.5})$$

式中： 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 ——轴向力对加固后截面重心轴的距离， $e_0 = M_d / N_d$ ；

$e_{s'}$ ——轴向力作用点至原构件受压较大区钢筋的距离；

M_d ——相应于轴向力 N_d 的加固后弯矩组合设计值；

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；

波纹板加固的矩形截面偏心受压构件截面受拉边或者受压较小边波纹板应力 σ_s 应按下列公式计算：

$$-f_{sd} \leq \sigma_s = E_s \varepsilon_s \leq f_{sd} \quad (\text{C.5.6})$$

$$\varepsilon_s = \frac{\beta h_0 - x}{x} \varepsilon_{cu} - \varepsilon_{s'} \quad (\text{C.5.7})$$

式中： ε_s ——受拉边或者受压较小边波纹板应变；

$\varepsilon_{s'}$ ——加固前原构件截面相应于波纹板处的应变，计算时计入应变符号，拉应变为正压应变为负。

附录 D 闭口截面波纹钢结构加固法计算

D.1 作用

D.1.1 土的推力 T_G

作用在波纹钢结构管顶填土的作用范围如图 D.1.1 所示, 其每延米土的推力 T_G 按式 (D.1.1) 计算。

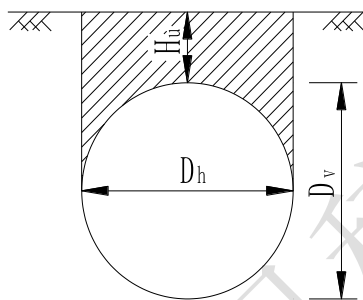


图 D.1.1 波纹钢结构管顶填土作用范围示意图

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

式中: T_G ——波纹钢结构管顶填土引起的波纹钢结构每延米推力 (kN/m);

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

A_f ——一个波距截面面积与波距的比值 (mm^2/mm);

D_h ——波纹钢结构有效跨度 (m), 按波纹钢结构轴线计算;

D_v ——波纹钢结构有效矢高 (m), 按波纹钢结构轴线计算;

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, $H_u/D_h < 0.2$

时, 可外插, 前提 H_u 不小于规定的最小覆土厚度;

H_u ——波纹钢结构管顶填土高度 (m);

W ——波纹钢结构管顶填土每延米的重量 (kN/m),

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

γ ——波纹钢结构管顶填土的容重 (kN/m^3)。

表 D.1.1 A_f 系数取值表

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

D.1.2 原结构恒载 T_{G1}

计算时考虑应力重分布, 将原混凝土结构部分恒载作用于波纹钢结构。

D.1.3 汽车荷载推力 T_Q

波纹钢结构采用车车辆荷载计算, 不计汽车荷载冲击力。车辆荷载推力 T_Q 按式 (D.1.2-1) 计算。

$$T_Q = 0.5m \sum_{ab} \frac{G}{D_h} \quad (\text{D.1.2-1})$$

式中: T_Q ——车辆荷载引起的波纹钢结构每延米推力 (kN/m) ;

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

的有关规定；

$\sum G$ ——扩散面积内的车轮总重力 (kN)，应符合现行《公路桥涵设计通用规

范》(JTG D60)的有关规定，在施工验算中需按实际轴重验算；

a 、 b ——车辆荷载沿横向、顺向扩散至管顶的分布宽度 (m)，应符合现行《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60)的有关规定。

D.1.4 地震推力 T_E

地震动峰值加速度 $\geq 0.2g$ 地区的公路波纹钢结构应进行抗震设计，考虑地震推力。

对公路波纹钢结构一般可只考虑竖向地震作用，地震推力 T_E 按式 (D.1.3) 计算。

$$T_E = 0.5A_v \frac{W}{g} \quad (\text{D.1.3})$$

式中： T_E ——地震作用引起的波纹管每延米推力 (kN/m)；

A_v ——竖向设计基本地震动峰值加速度，按表 D.1.3 选用；

W ——管顶填土每延米的重量 (kN/m)；

g ——重力加速度，取值 9.80665m/s^2 。

表 D.1.3 地震基本烈度和设计基本地震动峰值加速度对应表

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

D.2 结构验算

D.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 (D.2.1)。

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

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，采用车辆荷载计算时取 1.8；

T_G ——管顶填土引起的波纹钢结构每延米推力；

T_Q ——汽车荷载引起的波纹钢结构每延米推力；

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）。

D.2.2 偶然组合

永久作用效应与地震作用效应的最不利组合应满足式（D.2.2）。

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

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每延米推力。

D.2.3 屈曲临界应力

为保证波纹钢结构的稳定性，应按式（C.2.3）验算钢板的屈曲临界应力。

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

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

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。

D.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 (D.2.4-1) 计算。

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

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 (D.2.4-2) 计算。

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

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。

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

式中： n_f ——传力摩擦面数目；

μ ——摩擦面的抗滑移系数，按表 D.2.4-1 采用；

P ——一个高强度螺栓的预拉力，按表 D.2.4-2 采用。

表 D.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 D.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

D.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（D.2.5-1）。

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

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（D.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 为波纹钢结构桥梁的有效跨径, 按波纹钢结构轴线计算。

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

式中: T_G ——施工过程中管顶填土引起的波纹钢结构每延米推力 (kN/m), 计算方法同式 (D.1.1);

T_C ——汽车荷载 (考虑施工机械) 引起的波纹钢结构每延米推力 (kN/m), 计算方法同式 (D.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 (D.2.5-3) 计算。

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

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 (D.2.5-4)~式 (D.2.5-7) 计算。

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

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

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

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

式中: M_1 ——波纹钢结构在土体均布力作用下跨中截面的弯矩 (kN m/m);

M_B ——由于周边土体的支撑作用, 使波纹钢结构跨中截面减小的弯矩 (kN m/m), 为负值;

M_C ——汽车荷载 (考虑施工机械) 引起的结构跨中截面的弯矩 (kN 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 ——波纹钢结构管顶填土的容重 (kN/m³);

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（D.2.5-8）、式（D.2.5-9）计算。

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

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

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（kN m/m）；

I_l ——一个波距波纹截面惯性矩与波距的比值（mm⁴/mm）；

d ——波高（mm）；

t ——壁厚（mm）。

D.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：

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

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

$$\left. \begin{aligned} K_{M2} &= 0.018 - 0.004 \lg N_f, \quad N_f \leq 5000 \\ K_{M2} &= 0.0032, \quad N_f > 5000 \end{aligned} \right\} \quad (\text{D.2.6-3})$$

$$\left. \begin{aligned} K_{M3} &= 0.12 - 0.018 \lg N_f, \quad N_f \leq 100000 \\ K_{M3} &= 0.030, \quad N_f > 100000 \end{aligned} \right\} \quad (\text{D.2.6-4})$$

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

2 等效线性荷载的参数 K_4 按照表 D.2.6 线性插值取得。

表 D.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

征求意见稿

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”。