

ICS 93.010

CCS R26

团 体 标 准

T/CCTAS 107—2024

装配式波纹钢结构技术规程

Technical specification for fabricated corrugated steel structures

2024-07-01 发布

2024-07-01 实施

中国交通运输协会 发 布

目 次

前言..... II

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 2

4 基本规定..... 2

5 分类..... 3

6 材料..... 4

6.1 主体结构..... 4

6.2 连接件..... 4

6.3 防腐..... 4

6.4 密封..... 5

6.5 回填..... 5

7 设计..... 5

7.1 适用性分析..... 5

7.2 主体结构..... 5

7.3 连接..... 5

7.4 特殊构造..... 6

7.5 密封..... 9

7.6 耐久性设计..... 10

8 施工..... 11

8.1 准备..... 11

8.2 基础..... 11

8.3 安装..... 11

8.4 回填..... 12

9 质量控制..... 12

9.1 一般规定..... 12

9.2 基础..... 12

9.3 波纹钢结构..... 12

9.4 回填..... 14

10 养护..... 14

附录 A（资料性） 装配式波纹钢结构适用类型..... 15

附录 B（资料性） 装配式波纹钢结构极限状态设计方法..... 16

附录 C（资料性） 装配式波纹钢结构尺寸表..... 28

前 言

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

本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由中国交通运输协会交通工程设施分会提出。

本文件由中国交通运输协会标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：衡水奇佳工程材料有限公司、中铁第一勘察设计院集团有限公司、山东省交通规划设计院集团有限公司、中铁二院工程集团有限责任公司、同济大学、西安中交土木科技有限公司、云南省昆明市交通运输局、四川省交通勘察设计研究院有限公司、中交瑞通路桥养护科技有限公司、中煤西安设计工程有限责任公司、河南省交通规划设计研究院股份有限公司、福州大学、湖南省交通规划勘察设计院有限公司、陕西中晟科创建设工程有限公司、北方工业大学、山西省交通规划勘察设计院有限公司、福建省交通规划设计院有限公司、国家工程橡胶产品质量检验检测中心、中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司、南平武沙高速公路有限责任公司、中国铁路设计集团有限公司。

本文件主要起草人：曹宁宁、张景利、孙海波、郭伦波、张清照、高山、吴永芳、袁大伟、宋松科、杨进平、梁养辉、段李莉、阙云、傅立新、罗强、滕文刚、林光忠、鄢玉胜、王河山、王新、牟宏霖、李东潇、郑永红、宋顺心、孙士鹏、李春枝、李雅梅、刘峰斌、王海波、鲍明智、张程、王铁映、肖建辉、罗伯婵、高晓佳、唐宁。

装配式波纹钢结构技术规程

1 范围

本文件规定了装配式波纹钢结构的分类、材料、设计、施工、质量控制以及养护等要求。

本文件适用于公路工程 and 市政工程装配式波纹钢结构的设计、施工和养护，其他工程可参照使用。

2 规范性引用文件

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

GB/T 470 锌锭
GB/T 700 碳素结构钢
GB/T 706 热轧型钢
GB/T 709 热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差
GB/T 912 碳素结构钢和低合金结构钢热轧薄钢板及钢带
GB/T 1228 钢结构用高强度大六角头螺栓
GB/T 1229 钢结构用高强度大六角螺母
GB/T 1230 钢结构用高强度垫圈
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 3274 碳素结构钢和低合金结构钢热轧钢板和钢带
GB/T 8081 天然生胶 技术分级橡胶（TSR）规格导则
GB/T 11263 热轧H型钢和剖分T型钢
GB/T 14647 氯丁橡胶CR121
GB/T 19250 聚氨酯防水涂料
GB/T 22083 建筑密封胶分级和要求
GB/T 23446 喷涂聚脲防水涂料
GB/T 27806 环氧沥青防腐涂料
GB/T 34567 冷弯波纹钢管
GB 50108 地下工程防水技术规范
GB 50661 钢结构焊接规范
JTG 3363 公路桥涵地基与基础设计规范
JTG/T 3650 公路桥涵施工技术规范
JTG D30 公路路基设计规范
JTG D60 公路桥涵设计通用规范
JTG F40 公路沥青路面施工技术规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

波纹钢板 corrugated steel plate

按照规定的尺寸将金属钢板经过波形滚压而形成的一种板状材料。

3.2

波纹钢板件 corrugated steel plate part

波纹钢板经成弧加工制成的具有一定曲率的板件。

3.3

波纹钢管 corrugated steel pipe

波纹钢板或钢带经加工制成的波纹管。

3.4

壁厚 plate thickness

波纹钢板波纹剖面的钢板厚度。

3.5

波距 corrugation pitch

相邻两个波峰或波谷之间的距离。

3.6

波高 corrugation height

波峰与波谷之间的垂直距离。

3.7

变位伸缩装置 directional telescopic device

安装在波纹钢结构连接位置，可以调节被连接的波纹钢结构的相对位置的装置。

4 基本规定

4.1 装配式波纹钢结构应用过程应包括建设信息收集、适用性分析、结构设计、安装施工、质量控制及养护阶段，可按图1所示的流程进行。

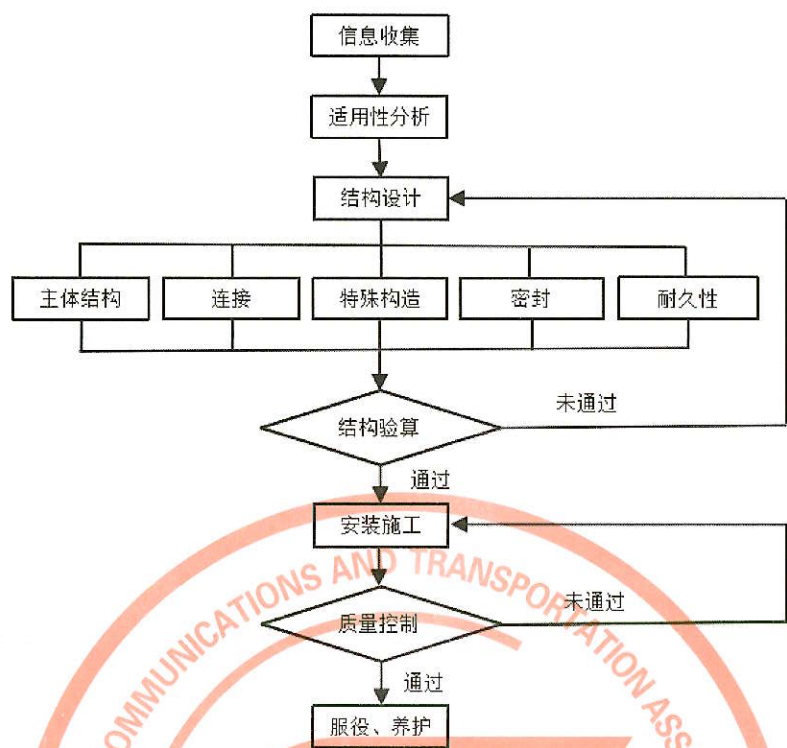


图 1 装配式波纹钢结构应用流程图

4.2 装配式波纹钢结构应用前应进行地基承载力验算，地基承载力特征值宜由载荷试验或其他原位测试方法实测取得，地基承载力不满足要求时应对地基进行补强处理。

4.3 应遵循预防为主和防护结合的原则，根据装配式波纹钢结构材料、应用环境、施工和养护管理条件，综合比较确定耐久性措施。

5 分类

5.1 装配式波纹钢结构按照截面形状可分为圆形、拱形、门形、箱形、马蹄形等，如图 2 所示。

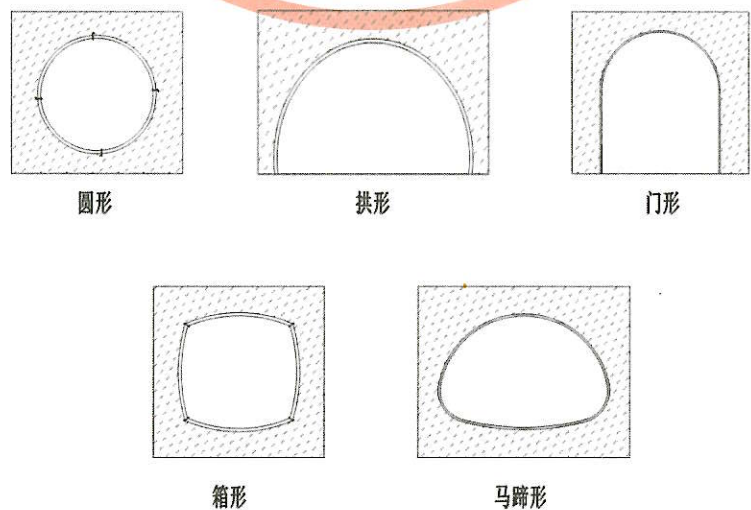


图 2 装配式波纹钢结构按形状分类示意图

5.2 装配式波纹钢结构按照使用功能可分为波纹钢涵洞、波纹钢通道、波纹钢结构桥梁、波纹钢棚洞、波纹钢支护及加固结构等。

5.3 波纹钢波形可根据波距和波高分为浅波形、中波形、深波形、大波形等 4 类。

6 材料

6.1 主体结构

6.1.1 波纹钢板件、波纹钢管的材料采用碳素结构钢时,其化学成分及力学性能应符合 GB/T 700 要求。

6.1.2 波纹钢板件、波纹钢管的材料采用低合金高强度结构钢时,其化学成分及力学性能应符合 GB/T 1591 的规定。

6.1.3 波纹钢板件、波纹钢管所用的钢板与钢带应符合 GB/T 912 或 GB/T 3274 的规定,其尺寸、外形、重量及允许偏差应符合 GB/T 709 的规定。

6.1.4 波纹钢板件、波纹钢管所用的连续热镀锌钢板与钢带的性能、尺寸、外形、重量及允许偏差应符合 GB/T 2518 规定。

6.1.5 波纹钢结构加强时所用槽钢、工字钢和 T 型钢的型号规格应符合 GB/T 706 与 GB/T 11263 要求。

6.2 连接件

6.2.1 连接件应采用高强度螺栓、螺母,其要求应符合表 1 的规定。

表 1 高强度螺栓、螺母的性能

类别	螺栓	螺母
型式尺寸	符合 GB/T 1228 规定	符合 GB/T 1229 规定
性能等级	不低于 8.8S	不低于 8H

6.2.2 高强度螺栓、螺母规格宜采用 M16、M20、M22、M24 等规格,螺栓紧固后锚栓外露丝扣应不少于两扣。

6.2.3 管箍、法兰盘所用碳素结构钢的化学及力学性能应符合 GB/T 700 要求,其尺寸、外形、重量及允许偏差应符合 GB/T 709 的规定。

6.2.4 管箍、法兰盘所用低合金高强度结构钢的化学及力学性能应符合 GB/T 1591 要求,其尺寸、外形、重量及允许偏差应符合 GB/T 709 的规定。

6.2.5 垫圈材料的形式尺寸应符合 GB/T 1230 的规定,性能等级应满足 35HRC~45HRC。

6.2.6 焊接材料应符合 GB 50661 的规定。

6.3 防腐

6.3.1 镀锌防腐所采用的锌应采用符合 GB/T 470 规定的 1 号锌或 0 号锌。镀锌层应与金属结合牢固,锌层应均匀完整、颜色一致,无漏镀缺陷,表面光滑,不应有流挂或结块现象。

6.3.2 采用沥青涂层防腐时,所用的环氧沥青性能应符合 GB/T 27806 的规定,所用的改性沥青性能应符合 JTGF40 的规定。

6.3.3 采用聚脲防腐时,所用聚脲性能应符合 GB/T 23446 的规定。

6.4 密封

6.4.1 密封材料应具有弹性和不透水性，应填塞紧密，可选用天然橡胶、氯丁橡胶、耐候密封胶或聚氨酯密封材料等。

6.4.2 天然橡胶密封材料技术指标和性能应符合GB/T 8081的规定。

6.4.3 氯丁橡胶密封材料技术指标和性能应符合GB/T 14647的规定。

6.4.4 耐候密封胶连接缝密封材料技术指标和性能应符合GB/T 22083的规定。

6.4.5 聚氨酯密封材料技术指标和性能应符合GB/T 19250的规定。

6.5 回填

6.5.1 砾类土、砂类土或其他改良土回填材料在结构附近50cm范围内的最大粒径应不大于50mm，塑性指数应小于12。

6.5.2 混凝土类回填材料性能技术指标和性能应符合JTG/T 3650的规定。

7 设计

7.1 适用性分析

7.1.1 结构设计前应充分收集地形、地貌、地质、水文、气象、交通和工程状况等建设信息资料。

7.1.2 工程建设出现下列情况时宜选用装配式波纹钢结构：

- a) 浇筑混凝土使用的原材料缺乏，施工用水困难或水泥、钢材等材料运输不便时；
- b) 多年冻土、膨胀土、软土、湿陷性黄土等不良地质条件下，地基容易产生不均匀沉降时；
- c) 受工期影响或季节气候制约，采用混凝土结构难以满足工期要求时；
- d) 应急抢险、救灾等对工期要求较紧时；
- e) 地震烈度较高，钢筋混凝土结构不满足抗震要求或造价较高时；
- f) 桥梁、涵洞、隧道等结构物不满足使用要求，需进行加固处置时。

7.1.3 道路改扩建工程中旧桥加宽或涵洞、通道接长宜选用与原结构形状相同的波纹钢结构。

7.1.4 装配式波纹钢结构选型应综合考虑工程建设信息和各类波纹钢结构的技术特点，不同工程中装配式波纹钢结构类型可参考附录A选用。

7.2 主体结构

7.2.1 主体结构设计应采用承载能力极限状态和正常使用极限状态设计方法，可根据结构特点选择AISI法、AASHTO法或CHBDC法，也可参照附录B进行计算。

7.2.2 波纹钢结构设计采用的作用分为永久作用、可变作用、偶然作用和地震作用四类，作用代表值和作用组合应符合JTG D60的规定。

7.2.3 应根据项目特点选用适宜的波形，常用波形如下：

- a) 浅波形，包括68 mm×13 mm，75 mm×25 mm，125 mm×25 mm波形；
- b) 中波形，包括150 mm×50 mm，200 mm×55 mm，230 mm×64 mm波形；
- c) 深波形，包括300 mm×110 mm，380 mm×140 mm波形；
- d) 大波形，包括400 mm×150 mm，600 mm×200 mm波形。

7.2.4 装配式波纹钢主体结构及其构件的尺寸规格可参考附录C选用。

7.3 连接

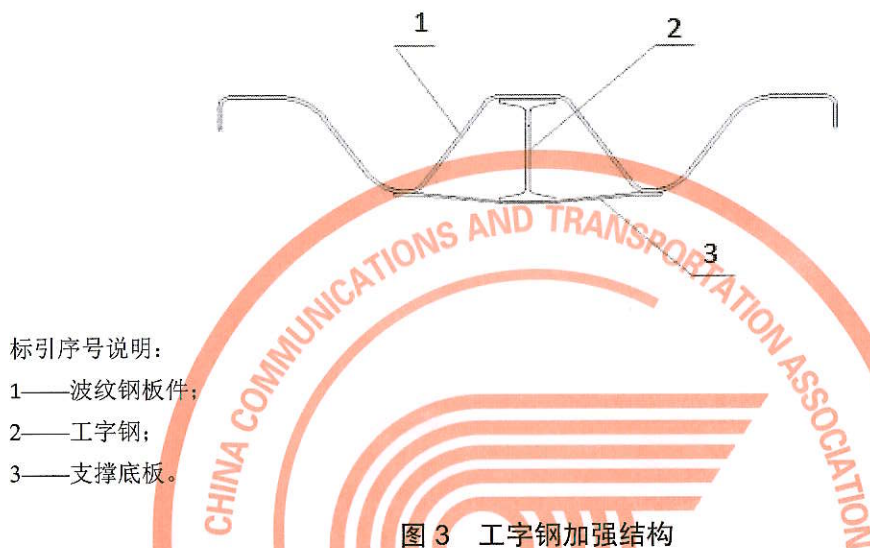
7.3.1 连接设计应包含环向接缝设计和纵向接缝设计。

7.3.2 环向接缝连接可分为弯矩释放型连接和弯矩传递型连接两种方式，弯矩释放型连接可采用套环或套管连接，弯矩传递型连接可采用管箍、焊接或螺栓连接。

7.3.3 纵向接缝连接可采用卷边、铆接、点焊或螺栓接缝连接。

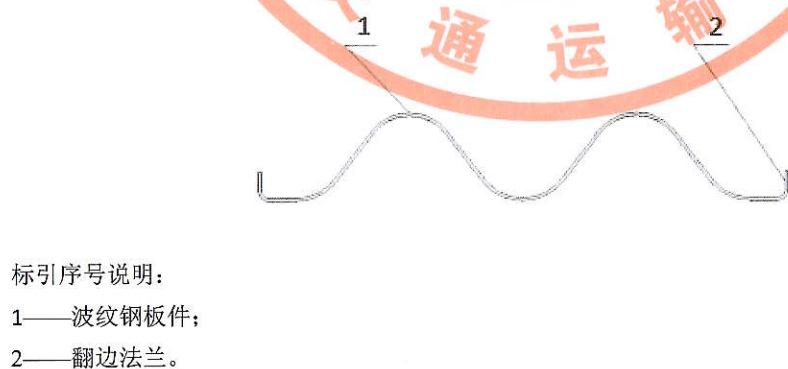
7.4 特殊构造

7.4.1 在高填方及重载交通路段应用波纹钢结构，波纹钢结构内部可设置工字钢加强结构，工字钢应贴合在波纹板内壁并采用支撑底板进行固定，支撑底板与波纹钢板件的连接方式可采用螺栓连接或焊接，如图 3 所示，工字钢规格可参考附录 C。

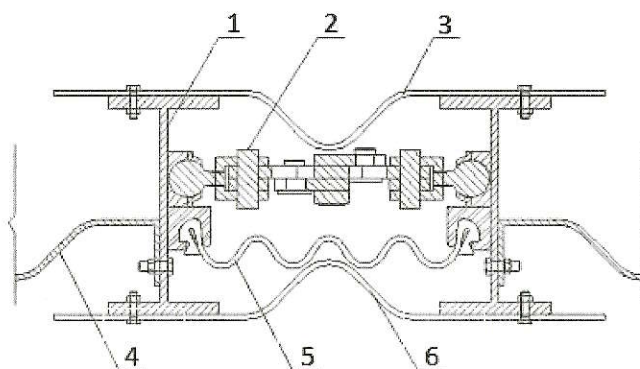


7.4.2 波纹钢结构可在波纹钢板的两端焊接 Z 型法兰，通过 Z 型法兰对波纹钢板进行连接固定，具体尺寸可参考附录 C 选用。

7.4.3 在加固类工程或安装空间受限的情况下可采用环向翻边波纹钢结构，降低安装难度，提升施工效率，如图 4 所示，具体尺寸可参考附录 C 选用。



7.4.4 针对复杂的地形条件或不良地质条件，波纹钢结构可在连接位置设置变位伸缩装置，降低地基不均匀沉降对波纹钢结构造成的损坏，变位伸缩装置如图 5 所示。

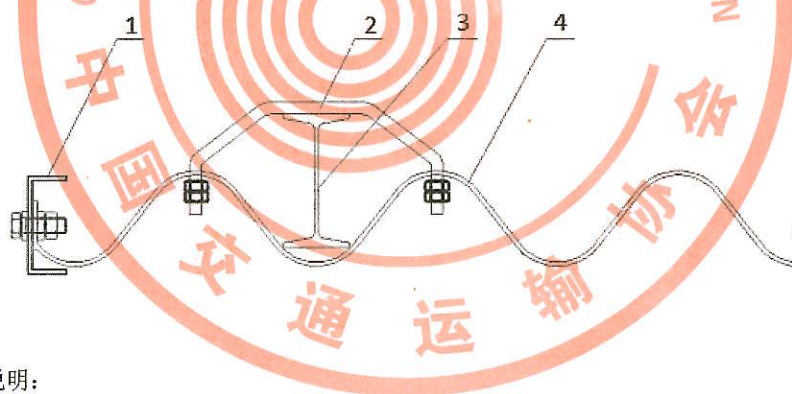


标引序号说明:

- 1——固定槽钢;
- 2——铰链;
- 3——外覆板;
- 4——波纹钢板件;
- 5——弹性体;
- 6——内覆板。

图 5 变位伸缩装置

7.4.5 在斜交式洞口或洞口上方可能存在坍塌的情况下, 波纹钢结构可在两端管口处设置型钢加强结构, 提升管口位置承载能力, 如图 6 所示。

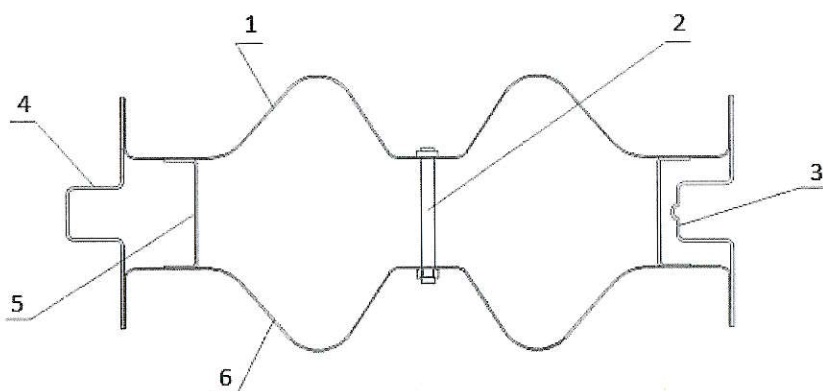


标引序号说明:

- 1——槽钢;
- 2——U 型卡环;
- 3——工字钢;
- 4——波纹钢板件。

图 6 型钢加强结构

7.4.6 双层波纹钢结构由两层波纹钢板组成, 内部设置加强筋并浇筑混凝土, 每一环采用凸起环形套和凹陷环形套配合螺栓进行连接固定, 如图 7 所示。

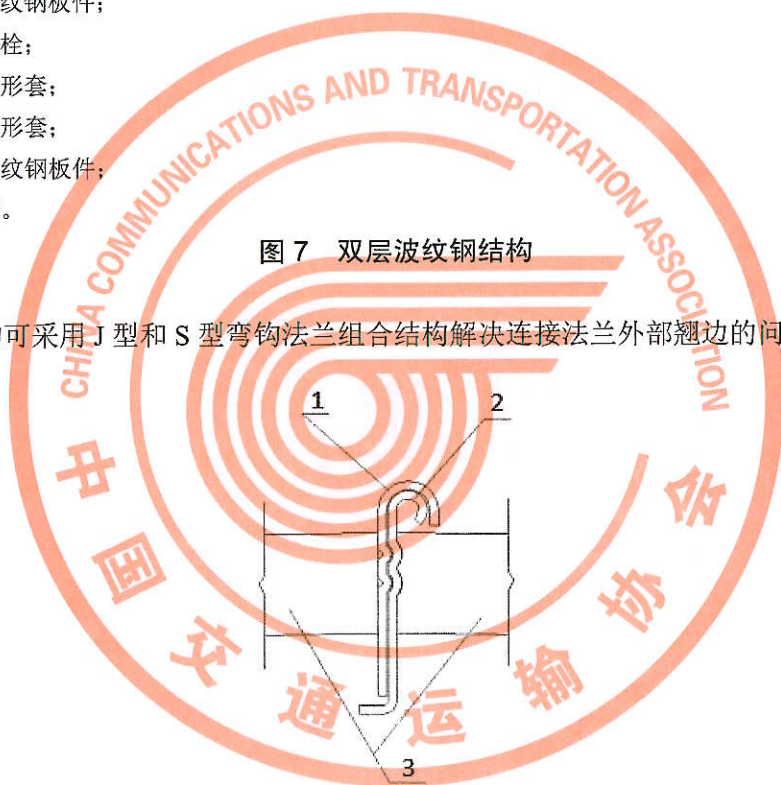


标引序号说明：

- 1——外部波纹钢板件；
- 2——连接螺栓；
- 3——凹陷环形套；
- 4——凸起环形套；
- 5——内部波纹钢板件；
- 6——加强筋。

图 7 双层波纹钢结构

7.4.7 波纹钢结构可采用 J 型和 S 型弯钩法兰组合结构解决连接法兰外部翘边的问题，如图 8 所示。

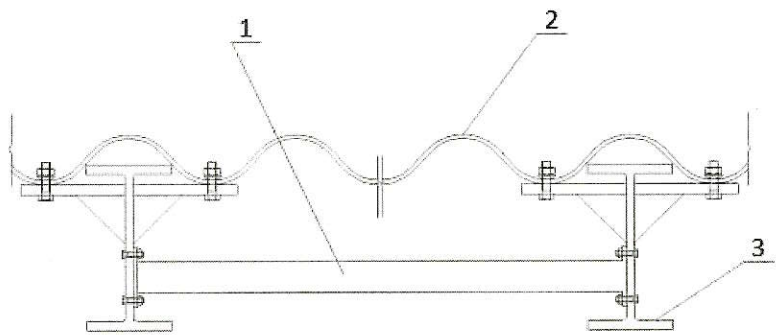


标引序号说明：

- 1——J 型弯钩法兰；
- 2——S 型弯钩法兰；
- 3——波纹钢板件。

图 8 弯钩法兰结构

7.4.8 在高填方以及需要过重载车辆的情况下，波纹钢结构内部可设置钢架加强结构提升波纹钢结构的抗压强度，如图 9 所示。



标引序号说明:

- 1——型钢;
- 2——波纹钢板件;
- 3——横向支撑筋。

图 9 钢架加强结构图

7.5 密封

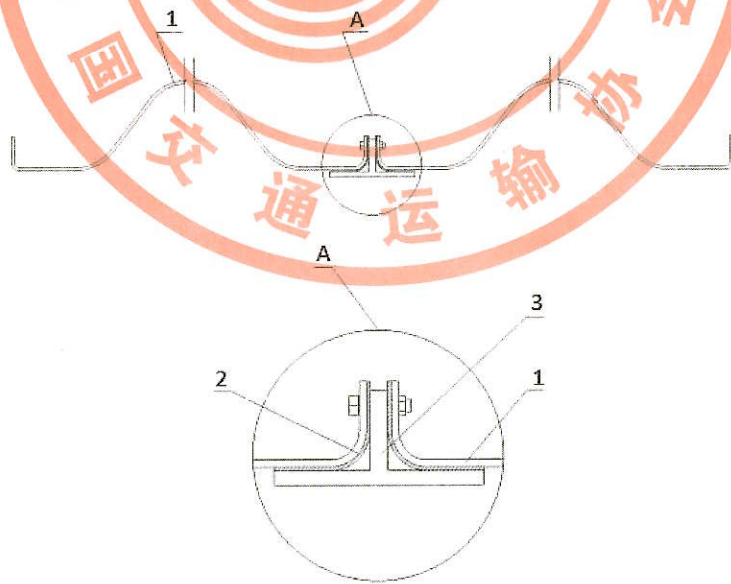
7.5.1 波纹钢结构的管箍与管节之间、法兰盘之间、翻边接合面之间以及各搭接的波纹钢板件之间应进行密封设计。

7.5.2 波纹钢结构在连接缝位置应采用密封材料填充缝隙，保证连接位置的密封性。

7.5.3 螺栓紧固后，宜在所有连接缝、螺栓孔处均匀涂抹耐候密封胶。

7.5.4 不同防水等级工程的密封设计可参照 GB 50108 根据不同密封材料的性能进行组合设计。

7.5.5 波纹钢结构环向连接位置可设置 T 型密封结构，提升波纹钢结构环向连接位置的密封效果，如图 10 所示，具体应用尺寸可参考附录 C。



标引序号说明:

- 1——波纹钢板件;
- 2——密封垫;
- 3——T 型钢。

图 10 T 型钢密封结构

7.6 耐久性设计

7.6.1 耐久性设计应遵循预防为主和防护结合的原则，根据环境条件、材质、施工条件和维护管理条件等，经综合比较确定耐久性设计方案。

7.6.2 波纹钢板件、波纹钢管、法兰盘、高强度螺栓、螺母、钢垫圈以及其他波纹钢结构配件，应采用热浸镀锌防腐处理，波纹钢板表面处理最低等级为 Sa2.5，镀锌层质量应符合表 2 的规定。

表 2 热浸镀锌质量要求

项目	要求
外观质量	锌层应均匀完整、颜色一致，无漏镀缺陷，表面光滑，不应有流挂、滴瘤或结块现象。
单面附着量	波纹钢板件、波纹钢管、法兰盘 $\geq 600\text{g/m}^2$ ，或镀锌层平均厚度 $\geq 84\mu\text{m}$ ，最小厚度 $\geq 62\mu\text{m}$ ；螺栓、螺母 $\geq 350\text{g/m}^2$ ，或镀锌层平均厚度 $\geq 50\mu\text{m}$ ，最小厚度 $\geq 36\mu\text{m}$ 。
镀锌层附着性	镀锌层应与金属结合牢固，经锤击试验不剥离，不凸起。

7.6.3 在镀锌防腐的基础上可采用涂层的方式增强防腐性能，沥青漆涂层的厚度不宜小于 0.5mm，聚脲涂层的厚度不应小于 0.3mm，涂层应均匀、光滑、连续，无肉眼可见的裂缝、孔隙、脱皮及其他缺陷。

7.6.4 对于水流冲蚀严重的项目，可在波纹钢结构内部底层浇筑混凝土防冲刷层，降低冲刷对结构造成的磨蚀。

7.6.5 对存在磨蚀和强腐蚀的项目，可在波纹钢结构内壁铺设聚酯内衬，保护内壁涂层，提高防腐能力。

7.6.6 波纹钢结构的耐久性设计宜根据腐蚀等级和磨蚀等级按表 3 选择使用涂层和内衬。

表 3 波纹钢结构涂层与内衬的选择

涂层（内衬）类型与使用条件	腐蚀			磨蚀		
	无腐蚀	轻微腐蚀	腐蚀	无、轻微磨蚀	中度磨蚀	严重磨蚀
锌涂层	+	+	—	+	—	—
锌涂层+沥青涂层	+	+	+	+	—	—
锌涂层+聚脲涂层	+	+	+	+	+	—
锌涂层+混凝土防冲刷层	+	+	—	+	+	+
锌涂层+聚酯内衬	+	+	+	+	+	+
注：“+”表示推荐，“—”表示不推荐。						

7.6.7 冬季需进行融雪处理路段的波纹钢结构露出部分应采取特殊防盐侵蚀措施，可采用补喷环氧树脂方式，厚度不应小于 1mm。

7.6.8 表面防腐层存在损伤处应清理除锈后采用喷涂环氧树脂、涂刷沥青等不同方式补救处理。

8 施工

8.1 准备

- 8.1.1 施工前应熟悉施工图纸，对发现的图纸问题应严格按照相应程序报审，经相关单位确认后方可实施。
- 8.1.2 波纹钢构件运到施工现场后，应逐块检查，凡在运输过程中变形的钢板不得使用。应对波纹钢板的钢板厚度、镀锌层厚度、波形的几何尺寸等进行检测，质量合格后才能进行拼装，进场后按照 GB/T 34567 进行验收。
- 8.1.3 施工前应建立现场平面测量控制网，对测量控制点做好保护及定期监测工作。
- 8.1.4 施工前应确定波纹钢结构的位置、中心轴线、中点，核对基础顶面的平整度、高程、坐标。

8.2 基础

- 8.2.1 圆形、箱形、马蹄形波纹钢结构基底应根据实际情况进行基底处理，并符合以下规定：
- 对于优质土地基，可选用未经筛分的砂、碎石、砂砾土和砂质土等材料填筑基础并分层压实；
 - 一般性土地基应设一定厚度的垫层；
 - 对于岩石地基，除设计要求有规定之外，波纹钢管不应直接安装岩石或混凝土基床上，应设置一层垫层；
 - 当波纹钢结构处于软土地基上时，应对软土地基进行处理，地基处理方式应符合 JTG D30 的要求，处理后在其上应铺设不小于 200mm 厚的砂砾垫层，并夯实紧密。
- 8.2.2 拱形和门形波纹钢结构基底处理应符合以下规定：
- 地基应进行地基固结和沉降分析；
 - 基础应为钢筋混凝土或圬工结构，也可用钢结构，基础顶面的宽度应不小于波纹钢板的波幅尺寸，设计应符合 JTG 3363 的规定；
 - 钢筋混凝土基础应提前预埋地脚或锚栓。

8.3 安装

- 8.3.1 波纹钢结构安装应严格按照设计文件、专项施工技术方案、波纹钢板件生产厂家提供的安装图或安装说明书等规定要求实施。
- 8.3.2 波纹钢板件环向拼装时，宜由下向上顺序拼装，并应将上部板片搭接在下部板片之外。
- 8.3.3 波纹钢板件纵向拼装时，应依据设计坡度方向将上游板片搭接在下游板片之内。
- 8.3.4 管节安装时，应进行错位安装，错缝距离不得小于两倍的螺栓孔距。
- 8.3.5 拼装完成第一节后，应测定一次截面形状，后续每拼装 4 节应测定一次截面形状，达到标准再继续拼装，达不到标准应及时调整。
- 8.3.6 结构拼装完成后，用扭矩扳手拧紧所有螺栓，螺栓施加预拉力应满足表 4 的要求。

表 4 高强度螺栓施工预拉力 (kN)

螺栓等级	螺栓规格			
	M16	M20	M22	M24
8.8 级	≥90	≥140	≥165	≥195
10.9 级	≥110	≥170	≥210	≥250

8.3.7 波纹钢结构现场防腐施工宜采用专用机械喷涂沥青两遍，每一遍喷涂厚度应均匀，涂层干燥后再进行下一道施工工序。

8.4 回填

8.4.1 回填材料的选取应考虑结构形状、荷载、填土高度及其他现场条件和回填材料的类型、级配、压实度、含水率等要素，宜选用级配良好的颗粒材料。

8.4.2 当回填空间受限时，可根据当地的施工经验使用现浇素混凝土、胶结砂和砂浆等可流动填料，并应考虑材料硬化前对结构产生的上举力。

8.4.3 回填区的填筑和压实应符合下列规定：

- a) 回填材料的压实密度至少达到规定标准普氏密度的 96%；
- b) 压实过程中，填料的含水率控制在最佳含水率的 $\pm 3\%$ 以内，如果填料的 0.425mm 筛分通过率大于 20%，则应控制在 $\pm 2\%$ 以内；
- c) 采用可流动填料时，采取与混凝土类似的方法浇筑并机械振捣密实。

8.4.4 结构两侧结构性回填应分层排铺，逐层压实，顶面水平，压实前每层厚度宜不大于 20cm，压实度达到设计要求的压实度后再摊铺下一层。

8.4.5 结构两侧的回填施工应同时对称进行，或者从结构的一侧到另一侧交替铺设填料。交替施工时，两侧的高度差不应大于单层厚度。

8.4.6 回填过程中应分阶段监测截面的形状变化，任何方向上的截面变形不得超过 2%。如果检查发现变形超过允许值，应立即终止施工，查明原因，修正回填和压实方法，将变形减少到规定范围内。

9 质量控制

9.1 一般规定

9.1.1 装配式波纹钢结构各分部工程质量检验应包含基础、波纹钢结构、回填等分项工程。

9.1.2 波纹钢管和板件规格和尺寸的测试应使用经标定的精度符合偏差要求的计量器具进行，镀锌层外观质量按目测方法进行。

9.2 基础

9.2.1 基础平面尺寸和承载力应满足设计要求。

9.2.2 基础施工允许偏差应满足表 5 的规定

表 5 基础施工允许偏差

序号	项目	规定值或允许偏差
1	基础前后、左右边缘距设计中心线尺寸 (mm)	± 100
2	基础顶面高程 (mm)	± 60
3	平整度 (mm)	≤ 10
4	基础材料粒径 (mm)	最大粒径不能超过钢板波距的 1/2，并不得大于 50mm。

9.3 波纹钢结构

9.3.1 装配式波纹钢结构在安装前应安排对波纹钢板件进行抽检。

9.3.2 波纹钢板件的尺寸误差应符合表 6 的规定。

表 6 波纹钢结构的尺寸允许偏差

序号	项目		允许偏差
1	壁厚 T(mm)(含镀锌层厚度)		不允许小于设计壁厚
2	波距 p(mm)		±3
3	波高 d(mm)	浅波形	-1~+3
		中波形	-2~+3
		深波形	±3
		大波形	±3
4	直径 D, 或内跨度 S, 高度 H (%)	≤1 000mm	±3
		>1 000mm	±2
5	波纹钢板件孔中心到板边长度(mm)		0~+5
6	管箍间搭接长度(mm)		±5

9.3.3 装配式波纹钢结构的外观质量要求应符合表 7 的规定。

表 7 装配式波纹钢结构外观质量要求

序号	项目	要求
1	切口	平直, 无明显锯齿状
2	颜色	表面色泽均匀, 无明显缺损
3	整体外观	表面平整光滑, 无损伤, 破裂, 孔洞, 波形无明显变形
4	锌层	表面平滑、均匀, 无滴瘤、剥落、漏镀, 无残留溶剂渣
5	涂塑层沥青层	无破裂、剥离、孔洞
6	焊缝表面	无气孔、裂纹、夹渣及飞溅物等缺陷, 焊缝处镀锌层符合本标准要求
7	机械划痕	不明显
8	断面错位(mm)	≤5

9.3.4 波纹钢结构安装质量应符合表 8 的规定。

表 8 安装质量要求

序号	项目	允许偏差值
1	截面形状 (%)	±2%
2	轴线偏位 (mm)	±10
3	底面高程 (mm)	±10
4	结构长度 (mm)	+10, -20

9.4 回填

9.4.1 回填材料类型及性能应满足设计要求，回填应分层填筑压实，每层表面平整。

9.2.2 回填的质量控制应满足表 9 的规定。

表 9 回填检测项目

序号	项目	规定值或允许偏差
1	回填层厚（mm）	150~200
2	压实度（mm）	≥96%

10 养护

10.1 波纹钢结构养护应符合以下基本要求：

- a) 建立健全完善的技术档案，准确掌握结构的技术状况；
- b) 定期进行检查，发现病害及时修复加固；
- c) 加强对结构的经常性保养、维修，对损坏严重的结构应及时加固或改建。

10.2 波纹钢结构定期检查每年不少于一次，应根据波纹钢结构的服役状况，及时提出日常养护、维修、加固、改建等建议。

10.3 波纹钢结构的日常养护应符合以下要求：

- a) 洞口应保持清洁，发现杂物堆积应及时清除；
- b) 及时清除波纹钢结构的露出位置的污垢，保持结构清洁；
- c) 发现连接螺栓松动应及时拧紧，更换损坏的螺栓；
- d) 构件受到冲击造成局部弯曲时，应及时矫正或更换；
- e) 定期对波纹钢构件进行防锈处理，一般应每 2 年进行一次，若所处环境对波纹钢构件腐蚀较严重，则防锈间隔时间应适当缩短。

10.4 对局部损坏及承载力不足的波纹钢结构应及时维修加固或改建，保障结构服役安全。

附录 A
(资料性)
装配式波纹钢结构适用类型

A.1 不同工程中装配式波纹钢结构类型可参照表A.1选用。

表 A.1 不同工程中装配式波纹钢结构适用类型

工程类型	形状				
	圆形	拱形	门形	箱形	马蹄形
新建涵洞、通道、小桥等工程	+	+	—	+	+
涵洞、通道、小桥、隧道等修复加固工程	+	+	+	—	—
市政工程中管廊、检修通道、地下防空设施等	—	+	—	+	—
工业工程中运输管道、通风及救援通道等	+	+	—	+	+
隧道口、傍山道路防落石和寒冷地区防雪等棚洞工程	—	+	—	—	—
安装位置可开挖范围小或安装施工操作空间小的工程	+	—	—	+	—
注：“+”表示推荐，“—”表示不推荐。					

附录 B

(资料性)

装配式波纹钢结构极限状态设计方法

B.1 波纹钢结构主体设计应按照表B.1中要求进行极限状态设计。

表 B.1 极限状态设计

极限状态	设计验算
承载能力极限状态	结构受压破坏
	施工阶段出现塑性铰
	运营阶段出现塑性铰(深波纹结构)
	连接破坏
正常使用极限状态	施工阶段的变形

B.2 波纹钢结构设计采用的作用、作用代表值和作用组合按JTG D60执行。

B.3 结构计算时材料抗力系数应采用表B.2 中规定值。

表 B.2 材料抗力系数

结构类型	抗力验算	材料抗力系数
浅、中波形波纹钢结构	抗压强度	$\phi_t = 0.80$
	施工阶段的塑性铰	$\phi_{hc} = 0.90$
	接缝强度	$\phi_j = 0.70$
深、大波形波纹钢结构	抗压强度	$\phi_t = 0.80$
	运营阶段的塑性铰	$\phi_h = 0.85$
	施工阶段的塑性铰	$\phi_{hc} = 0.90$
	接缝强度	$\phi_j = 0.70$

B.4 最小填土厚度按式B.1计算。

$$H_{\min} = \max \left\{ 0.6, \frac{D_h}{6} \left(\frac{D_h}{D_v} \right)^{0.5}, 0.4 \left(\frac{D_h}{D_v} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

$H_{\min}$ ——最小填土厚度 (m);

D_h ——结构的水平尺寸 (有效跨径) (m);

D_v ——结构的竖向尺寸 (有效矢高) (m)。

B.5 对于承载能力极限状态下的基本组合, 由恒载和活载引起的波纹钢结构的环向内力 T_{fb} (kN/m) 采用式 B.2 计算 (对于符合最小填土厚度要求的结构不考虑活载的冲击力); 对于承载能力极限状态下的偶然组合, 由恒载和地震荷载引起的波纹钢结构的环向内力 T_{fo} (kN/m) 采用式 B.3 计算; 承载能力极限状态下由恒载和活载引起的波纹钢结构的环向内力 T_f (kN/m) 按式 B.4 计算。

$$T_{fb} = \alpha_D T_D + \alpha_L T_L \dots\dots\dots (B.2)$$

$$T_{fo} = \alpha_D T_D + \alpha_E E_v \dots\dots\dots (B.3)$$

$$T_f = \max(T_{fb}, T_{fo}) \dots\dots\dots (B.4)$$

式中:

T_f —— 承载能力极限状态下波纹钢结构的环向内力 (kN/m);

α_D —— 恒载分项系数, 根据结构的应用领域按相应行业标准采用 (如公路桥涵取 1.2);

α_L —— 活载分项系数, 根据结构的应用领域按相应行业标准采用 (如公路桥涵取 1.4);

α_E —— 地震荷载分项系数, 根据结构的应用领域按相应行业标准采用 (如公路桥涵取 1.0);

T_D —— 恒载引起的波纹钢结构环向压力 (kN/m);

T_L —— 活载引起的波纹钢结构环向压力 (kN/m);

E_v —— 地震荷载引起的波纹钢结构环向压力 (kN/m)。

B.6 地震荷载引起的波纹钢结构环向压力 E_v 采用式 B.5 计算。

$$E_v = T_D A_v \dots\dots\dots (B.5)$$

式中:

A_v —— 地震荷载的垂直加速度比, 为水平加速比 A_H 的 2/3, 无量纲;

B.7 结构上部填土与附加恒载共同产生的波纹钢结构环向压力采用式 B.6 计算。

$$T_D = 0.5(1.0 - 0.1C_s) A_f W + 0.5 A_p W_p \dots\dots\dots (B.6)$$

式中:

A_f —— 考虑结构起拱效应的土压力增大系数, 可按表 B.3 选用;

A_p —— 附加恒载影响系数, 一般取 1.0;

W ——拱上填土每延米的质量 (kN/m)；

W_p ——附加恒载 (kN/m)；

C_s ——考虑回填土性质与结构尺寸的轴向刚度系数，采用式 B.7 计算。

$$C_s = \frac{1000E_s D_v}{EA} \dots\dots\dots (B.7)$$

式中：

E_s ——回填土的割线模量 (MPa)，见表 B.4、表 B.5；

E ——波纹钢结构的弹性模量 (MPa) ；

A ——单位长度的波纹钢结构截面积 (mm^2/mm)；

表 B.3 A_f 系数取值表

H/D_h	D_h/D_v					
	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6
0	3.23	1.95	1.33	1.26	1.21	1.16
0.05	3	1.84	1.31	1.25	1.19	1.14
0.1	2.7	1.74	1.3	1.23	1.18	1.12
0.2	2.25	1.6	1.26	1.2	1.14	1.1
0.4	1.82	1.41	1.22	1.15	1.1	1.05
0.6	1.65	1.35	1.2	1.12	1.07	1.03
0.8	1.55	1.31	1.19	1.11	1.05	1.02
1	1.53	1.31	1.18	1.1	1.04	1.02
1.2	1.55	1.33	1.2	1.12	1.07	1.02
1.4	1.59	1.38	1.22	1.15	1.08	1.02
1.6	1.6	1.39	1.24	1.17	1.08	1.02
1.8	1.61	1.4	1.25	1.18	1.08	1.02
2	1.62	1.4	1.25	1.18	1.08	1.02

表 B.4 土壤分类

类型	粒径	描述	统一分类符号 (按 ASTM D 2487)
I	粗	级配良好的砾石或砂砾	GW
		级配较差的砾石或砂砾	GP
		级配良好的砂或砾质砂	SW
		级配较差的砂或砾质砂	SP
II	中等	含黏土的砾石或砂砾	GC
		含黏土的砂或砾质砂	SC
		粉砂或粉质砾砂	SM

表 B.5 结构性回填材料的割线模量 E_s (MPa)

类型	标准普氏密度 (% , 按 ASTM D 698)	割线模量 (MPa)
I	85	6
	90	12
	95	24
	100	30
II	85	3
	90	6
	95	12
	100	15

注：对于其他标准普氏密度，可通过线性内插得到 E_s 。采用受控低强度材料 (CLSM) 作为填料时，如果没有试验资料，其 E_s 可取 300MPa。

B.8 汽车荷载、特殊车辆荷载、施工荷载等活载产生的波纹钢结构环向压力采用式 B.8 计算。

$$T_L = \min(0.5D_h\sigma_L m_f, 0.5l_t\sigma_L m_f) \dots\dots\dots (B.8)$$

式中：

- D_h ——波纹钢结构的有效跨径 (m) ；
- m_f ——多车道折减系数，汽车荷载按 JTG D60 取值，其他活载取 1.0 ；
- σ_L ——活载扩散到拱顶的压力 (kPa)，采用式 B.9 计算。

$$\sigma_L = \frac{A_L(1+\mu)}{wl_t} \dots\dots\dots (B.9)$$

式中：

- A_L ——跨径长度范围内布置的设计车辆荷载总轴重 (kN)；
- $w、l_t$ ——沿车轮宽度和长度方向扩散后的尺寸 (m) ；
- μ ——车辆冲击放大系数,采用式 B.10 计算。

$$\mu = 0.4(1.0 - 0.5H) \dots\dots\dots (B.10)$$

式中：

- H ——填土厚度 (m)，大于 2 时，可不考虑冲击影响。

B.9 抗压强度验算

B.9.1 承载能力极限状态下波纹钢结构管壁的轴向压应力 σ 采用式 B.11 计算：

$$\sigma = \frac{T_f}{A} \leq \min(f_y, f_b) \dots\dots\dots (B.11)$$

式中:

f_y ——波纹钢结构基材的屈服应力 (MPa);

f_b ——波纹钢结构基材的临界屈服应力 (Mpa)。

B.9.2 为计算 f_b , 将波纹钢结构截面用通过拱顶圆弧中心并与竖向中心线成夹角 θ_0 (单位: rad) 的两条对称直线划分为上下两部分, 分别计算其临界屈曲应力。 θ_0 采用式 B.12 计算:

$$\theta_0 = 1.6 + 0.2 \lg \left(\frac{EI}{E_m R_c^3} \right) \dots\dots\dots (B.12)$$

式中:

E ——波纹钢结构基材的弹性模量 (MPa);

I ——波纹钢结构每延米截面惯性矩 (mm^4/mm), 对于采用螺栓拼装的波纹钢板, 应扣除螺栓孔截面;

R_c ——拱顶处的曲率半径 (mm);

E_m ——回填土弹性模量的修正值, 对于结构的下半部分, 取 E_s ; 上半部分采用式 B.13 计算:

$$E_m = E_s \left\{ 1 - \left[\frac{R_c}{R_c + 1000(H + H')} \right]^2 \right\} \dots\dots\dots (B.13)$$

式中:

H' ——拱顶与起拱线之间的垂直距离的一半 (m)。

B.9.3 针对以上划分的上下两部分中不同部位的曲率半径 R , 根据情况计算其临界屈曲应力:

当 $R \leq R_c$ 时, 采用式 B.14 计算:

$$f_b = \phi_t F_m \left[f_y - \frac{(f_y K R)^2}{12 E r^2 \rho} \right] \dots\dots\dots (B.14)$$

当 $R > R_c$ 时, 采用式 B.15 计算:

$$f_b = \frac{3 \phi_t \rho F_m E}{\left(\frac{K R}{r} \right)^2} \dots\dots\dots (B.15)$$

式中:

R ——计算部位的曲率半径 (mm), 自波纹面中性轴处计算;

ϕ_t ——波纹钢结构材料受压时的抗力系数;

F_m ——多跨结构屈曲应力折减系数,对于单跨结构,或计算深波纹结构的上半部分时,取 1.0,
对于多跨结构,采用式 B.16 计算:

$$F_m = 0.85 + \frac{0.3S}{D_h} \leq 1.0 \quad \text{..... (B.16)}$$

S ——多跨结构之间的最小横向间距(m);

R_e ——等效半径 (mm),采用式 B.17 计算

$$R_e = \frac{r}{K} \left(\frac{6E\rho}{f_y} \right)^{0.5} \quad \text{..... (B.17)}$$

r ——波纹面的回转半径 (mm);

K ——表示结构与周围土体相对刚度的系数,采用式 B.18 计算:

$$K = \lambda \left[\frac{EI}{E_m R^3} \right]^{0.25} \quad \text{..... (B.18)}$$

ρ ——屈曲折减系数,采用式 B.19 计算:

$$\rho = \left[1000 \frac{(H + H')}{R_C} \right]^{0.5} \leq 1.0 \quad \text{..... (B.19)}$$

λ ——计算 K 的一个系数,对于除矢跨比小于 0.4 的圆形拱结构之外的所有结构的上半部分,采用式 B.20 计算,其余情况下,取 $\lambda = 1.22$ 。

$$\lambda = 1.22 \left[1.0 + 1.6 \left(\frac{EI}{E_m R_C^3} \right)^{0.25} \right] \quad \text{..... (B.20)}$$

B.10 弯压强度验算

B.10.1 波纹钢结构设计时应限制施工期间不同填土高度时作用在拱顶的施工设备轴载 A_C 。由恒载和施工设备产生的弯矩和环向压力的组合效应应不大于截面的塑性抗弯承载力。

B.10.2 施工阶段波纹钢结构截面的弯矩与环向压力的组合效应应满足式 B.21:

$$\left(\frac{P}{P_{pf}} \right)^2 + \left| \frac{M}{M_{pf}} \right| \leq 1.0 \quad \text{..... (B.21)}$$

式中:

P 为波纹钢结构截面所受环向压力,采用式 B.22 计算,当拱顶填土厚度 $H_c < 0.2D_h$ 时,取 $P = 0$ 。

$$P = \alpha_D T_D + \alpha_C T_C \quad \text{..... (B.22)}$$

式中:

α_c ——施工荷载分项系数;

T_c ——施工机械引起的波纹钢结构环向压力, 与 T_L 计算方式相同, 采用式 B.8 进行计算, 轮载采用施工机械的轮载, 扩散深度采用施工过程中的填土厚度。

P_{pf} 为波纹钢结构截面可承担的极限压力, 采用式 B.23 计算:

$$P_{pf} = \phi_{hc} A f_y \dots\dots\dots (B.23)$$

式中:

ϕ_{hc} ——施工阶段波纹钢结构材料抵抗塑性铰的抗力系数, 见表 B.2。

M 为施工阶段波纹钢结构截面所受弯矩, 采用式 B.24 计算。

$$\left. \begin{aligned} M &= M_1 + M_B + M_C \\ M_1 &= k_{M1} R_B \gamma D_h^3 \\ M_B &= -k_{M2} R_B \gamma D_h^2 H_c \\ M_C &= k_{M3} R_L D_h L_c \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (B.24)$$

式中:

M_1 ——回填至拱顶高程时回填土产生的波纹钢结构跨中截面的弯矩;

M_B ——施工阶段拱顶以上 H_c 高度的填土产生的波纹钢结构跨中截面的弯矩, 为负值, H_c 为施工阶段填土高度;

M_C ——施工机械引起的结构跨中截面的弯矩;

L_c ——施工过程中作用于结构上的施工机械等效荷载值 (kN/m), 按采用式 B.25 计算, 其中 A_c 为施工过程中的车辆轴重, 参数 k_4 按照表 B.6 线性插值;

$$L_c = A_c / k_4 \dots\dots\dots (B.25)$$

γ ——结构性回填材料的重度 (kN/m^3)。

表 B.6 k_4 值

覆土厚度(m)	k_4			
	每轴双轮	每轴四轮	每轴八轮	有减载板时
0.30	1.28	1.51	2.57	3.90
0.45	1.42	1.69	2.67	4.00
0.60	1.65	1.95	2.81	4.08

表 B.6 k_4 值

覆土厚度(m)	k_4			
	每轴双轮	每轴四轮	每轴八轮	有减载板时
0.90	2.34	2.61	3.22	4.23
1.50	3.69	3.75	4.03	4.47
2.10	4.41	4.4	4.51	4.65
3.00	4.82	4.82	4.82	4.82
4.50	6.62	6.62	6.62	6.62
6.00	8.42	8.42	8.42	8.42
9.00	12.02	12.02	12.02	12.02
注：控制弯矩的车轴类型规定如下： 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、列车、履带车。				

上述公式中，参数的计算需要根据柔度系数 N_F 来确定，柔度系数 N_F 采用式 B.26 计算：

$$N_F = \frac{E_s (1000 D_h)^3}{EI} \dots\dots\dots (B.26)$$

对于采用螺栓拼装的波纹钢板，截面惯性矩 I 应扣除螺栓孔截面。其余参数采用式 B.27、式 B.28、式 B.29 计算：

$$\left. \begin{aligned} k_{M1} &= 0.0046 - 0.0010 \lg N_F, N_F \leq 5000 \\ k_{M1} &= 0.0009, N_F > 5000 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (B.27)$$

$$\left. \begin{aligned} k_{M2} &= 0.018 - 0.004 \lg N_F, N_F \leq 5000 \\ k_{M2} &= 0.0032, N_F > 5000 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (B.28)$$

$$\left. \begin{aligned} k_{M3} &= 0.120 - 0.018 \lg N_F, N_F \leq 100000 \\ k_{M3} &= 0.030, N_F > 100000 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (B.29)$$

R_B 的取值，根据 $\frac{D_v}{2D_h}$ 的取值范围进行计算，

当 $0.2 \leq \frac{D_v}{2D_h} \leq 0.35$ 时，采用式 B.30 计算：

$$R_B = 0.67 + 0.87[(D_v / 2D_h) - 0.2] \dots\dots\dots (B.30)$$

当 $0.35 < \frac{D_v}{2D_h} \leq 0.5$ 时, 采用式 B.31 计算:

$$R_B = 0.80 + 1.33 \left[\left(\frac{D_v}{2D_h} \right) - 0.35 \right] \dots\dots\dots (B.31)$$

当 $\frac{D_v}{2D_h} > 0.5$ 时, 采用式 B.32 计算:

$$R_B = \frac{D_v}{D_h} \dots\dots\dots (B.32)$$

R_L 采用式 B.33 计算:

$$R_L = \frac{0.265 - 0.053 \lg N_E}{\left(\frac{H_c}{D_h} \right)^{0.75}} \leq 1.0 \dots\dots\dots (B.33)$$

M_{Pf} 为波纹钢结构截面可承担的极限弯矩, 采用式 B.34 计算:

$$\left. \begin{aligned} M_{Pf} &= \phi_h M_P \\ M_P &= Z f_y \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (B.34)$$

式中:

ϕ_h ——波纹钢结构材料抵抗塑性铰的抗力系数;

M_P ——波纹钢结构承受的最大塑性弯矩 ($kN \cdot m/m$);

Z ——波纹钢结构单位长度的塑性截面模量 (mm^3/mm), 对于采用螺栓拼装的波纹钢板, 应扣除螺栓孔截面。

B.11 运营阶段验算

B.11.1 对于施工完成后的波纹钢结构, 承载能力极限状态下的弯矩和环向压力的组合效应应不大于截面的塑性抗弯承载力。采用式 B.35 验算:

$$\left. \begin{aligned} (T_f / P_{Pf})^2 + |M_f / M_{Pf}| &\leq 1.0 \\ P_{Pf} &= \phi_h A f_y \\ M_f &= \alpha_D M_1 + \alpha_D M_D + \alpha_L M_L (1 + \mu) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (B.35)$$

式中:

M_f ——运营阶段波纹钢结构截面所受弯矩。

M_1 、 M_D 采用式 B.36 计算, H_e 、 M_L 采用式 B.37 计算,

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= k_{M1} R_B \gamma D_h^3 \\ M_D &= -k_{M2} R_B \gamma D_h^2 H_e \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (B.36)$$

$$\left. \begin{aligned} H_e &= \min(H, D_h / 2) \\ M_L &= k_{M3} R_U D_h A_L / k_4 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (B.37)$$

式中:

A_L ——跨径长度范围内布置的设计车辆荷载总轴重 (kN);

k_4 ——插值同施工阶段, 但当填土厚度大于 3.0m 时, 取 $k_4 = 4.9m$ 。

注: R_U 采用式 B.38 计算:

$$R_U = \frac{(0.265 - 0.0531 \lg N_F)}{(H / D_h)^{0.75}} \leq 1.0 \dots\dots\dots (B.38)$$

B.12 连接设计

B.12.1 对于圆形或接近圆形的闭口截面或单圆弧拱形结构, 纵向接缝主要承受环向压力, 设计应采用式 B.39 验算。

$$\phi_j R_{bs} \geq T_f \dots\dots\dots (B.39)$$

式中:

ϕ_j ——接缝抗力系数, 见表 B.2;

R_{bs} ——纵向接缝极限抗压强度 (kN/m);

T_f ——承载能力极限状态下由恒载和活载引起的环向压力 (kN/m)。

B.12.2 对于非圆形截面或多圆弧拱形结构, 施工阶段和运营阶段纵向接缝除满足 B.10.1 要求外, 还应按式 B.40 验算接缝的抗弯承载力。

$$\phi_j R_{bm} \geq M_f \dots\dots\dots (B.40)$$

式中:

ϕ_j ——接缝抗力系数, 见表 B.2;

R_{bm} ——纵向接缝极限抗弯强度 (kN · m/m);

M_f ——承载能力极限状态下由恒载和活载引起的最大截面弯矩 (kN · m/m)。

B.12.3 波纹钢结构采用高强螺栓连接时, 纵向接缝验算可参考 GB50017 对抗剪承载力、抗压承载力和抗拉承载力进行验算。

B.12.4 波纹钢结构中采用管箍或焊接连接的弯矩传递型环向接缝, 作用于接缝上的剪力和弯矩设计值分别按式 B.41、B.42 计算。

$$V_{j-d} = 0.154 \frac{W_E}{\lambda} + \frac{P_L \nu}{L_0 + LLDF \cdot H} \quad \text{..... (B.41)}$$

$$M_{j-d} = 0.058 \frac{W_E}{\lambda^2} + \frac{P_L m}{L_0 + LLDF \cdot H} \quad \text{..... (B.42)}$$

式中:

W_E ——竖向土压力, 按式 B.43 计算;

$$W_E = \alpha_D \cdot VAF \cdot \gamma_s \cdot OD \cdot H \quad \text{..... (B.43)}$$

ν ——参数, 按式 B.44 计算;

$$\nu = \left| \frac{1 + e^{-\lambda L_H} (\sin \lambda L_H - \cos \lambda L_H)}{4\lambda} \right| \quad \text{..... (B.44)}$$

m ——参数, 按式 B.45 计算;

$$m = \left| \frac{e^{-\frac{\lambda L_H}{2}} \sin \frac{\lambda L_H}{2}}{2\lambda^2} \right| \quad \text{..... (B.45)}$$

λ ——参数, 按式 B.46 计算;

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k_{soil} OD}{4EI}} \quad \text{..... (B.46)}$$

α_D ——土压力荷载系数;

VAF——竖向土拱系数, 对于波纹管, 取 1.0;

γ_s ——拱顶填土重度 (kN/m^3);

OD ——波纹管的外部直径 (m);

H ——波纹管起拱线以上填土厚度 (m)

P_L ——地面上乘系数的活载 (kN);

k_{soil} ——结构性回填土壤的刚度 (kN/m^3), 一般取 30000kN/m^3 ;

EI ——波纹管按弹性地基梁考虑的纵向整体抗弯刚度 ($\text{kN} \cdot \text{m}^2$)。

B.12.5 波纹管结构中采用套环或套管连接的弯矩释放型环向接缝, 作用于接缝上的剪力和转角设计值分别按式 B.47、B.48 计算。

$$V_{j-d} = 0.157 \frac{W_E}{\lambda} + \frac{P_L \nu}{L_0 + LLDF \cdot H} \quad \text{..... (B.47)}$$

$$\theta_{j-d} = 0.0918 \frac{W_E \lambda}{k_{soil} OD} + \frac{P_L r}{L_0 + LLDF \cdot H} \dots\dots\dots (B.48)$$

式中：
r——参数，按式 B.49 计算；

$$r = \left| \frac{4\lambda}{k_{soil} OD} e^{\frac{-\lambda L_H}{2}} \sin \frac{\lambda L_H}{2} \right| \dots\dots\dots (B.49)$$



附录 C
(资料性)
装配式波纹钢结构尺寸表

C.1 圆形装配式波纹钢结构设计尺寸如表C.1所示。

表 C.1 圆形装配式波纹钢结构尺寸表 (单位: mm)

波形	直径	板厚	Z 型法兰 长×宽	翻边高度	T 型钢 高×宽	工字钢
200×55	2000~6000	4.0-8.0	1200×230	70	75×80	10#
300×110	3000~8000	5.0-8.0	1100×300	80	85×100	14#
400×150	5000~12000	6.0-10.0	1100×330	90	95×100	16#

C.2 箱形装配式波纹钢结构设计尺寸如表C.2所示。

表 C.2 箱形装配式波纹钢结构尺寸表 (单位: mm)

波形	跨径×矢高	板厚	Z 型法兰 长×宽	翻边高度	T 型钢 高×宽	工字钢
200×55	2000×2000~4000×4000	4.0~8.0	1200×251	70	75×80	10#
300×110	3000×3000~5000×5000	5.0~8.0	1100×330	80	85×100	14#
400×150	4000×4000~6000×6000	6.0~10.0	1100×352	90	95×100	16#

C.3 拱形装配式波纹钢结构设计尺寸如表C.3所示。

表 C.3 拱形装配式波纹钢结构尺寸表 (单位: mm)

波形	跨径×矢高	板厚	Z 型法兰 长×宽	翻边高度	T 型钢 高×宽	工字钢
200×55	3000×1500~6000×3000	4.0-8.0	1200×251	70	75×80	10#
300×110	5000×2500~8000×4000	5.0-8.0	1100×330	80	85×100	16#
400×150	7000×3500~15000×6500	6.0-10.0	1100×352	90	95×100	22#

C.4 马蹄形装配式波纹钢结构设计尺寸如表C.4所示。

表 C.4 马蹄形装配式波纹钢结构尺寸表 (单位: mm)

波形	跨径×矢高	板厚	Z 型法兰 长×宽	翻边高度	T 型钢 高×宽	工字钢
200×55	2000×1500~5000×3500	4.0-8.0	1200×251	70	75×80	10#
300×110	4000×2500~7000×5000	5.0-8.0	1100×330	80	85×100	16#
400×150	6000×4500~12000×9000	6.0-10.0	1100×352	90	95×100	22#