

DB 54

西 藏 自 治 区 地 方 标 准

DB 54/T 0287—2023

公路波纹钢桥涵设计与施工技术规范

2023 - 07 - 01 发布

2023 - 08 - 02 实施

西藏自治区市场监督管理局 发 布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 2

4 总体原则 3

5 材料及构件 3

 5.1 基本规定 3

 5.2 波纹钢 4

 5.3 连接件 4

 5.4 防渗材料 4

 5.5 防腐材料 5

 5.6 结构性回填材料 5

 5.7 其他材料 5

6 设计 5

 6.1 基本规定 6

 6.2 桥涵布设 6

 6.3 跨径（直径）及净高 6

 6.4 水文、水力计算 7

 6.5 地基、基础及下部结构设计 7

 6.6 构造设计 1

 6.7 主体结构设计 1

 6.8 防渗设计 1

 6.9 防腐及防磨蚀设计 1

 6.10 附属工程设计 1

7 施工 1

 7.1 基本规定 1

 7.2 施工准备 1

 7.3 基坑开挖及地基处理 1

 7.4 波纹钢板拱桥基础及下部结构施工 1

 7.5 波纹钢管涵基础及垫层施工 1

 7.6 波纹钢安装 1

 7.7 防腐及防磨蚀施工 1

 7.8 结构性回填施工 1

 7.9 减载板施工 1

 7.10 洞口构造物施工 1

 7.11 附属工程施工 1

 7.12 现场恢复 1

8 质量检查及验收 1

8.1 基本规定 1

8.2 进场材料及构件质量验收 1

8.3 工程质量检验与评定 1

8.4 质量检验与评定用表 1

附录 A（规范性） 波纹钢管（拱）构造参数 1

附录 B（资料性） 波纹钢桥涵结构设计计算相关参数计算 1

附录 C（规范性） 公路波纹钢桥涵工程划分 1

附录 D（规范性） 公路波纹钢桥涵洞工程质量检验评定用表 1

前 言

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

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由西藏自治区交通运输厅提出。

本文件由西藏自治区交通运输厅归口。

本文件起草单位：西藏自治区交通勘察设计研究院、青海路拓工程设施制造集团有限公司。

本文件主要起草人：拉巴、宋方华、孔宪科、韩馨、米玛、李元庆、边巴琼达、彭有宏、白玛贡觉、韩昌花、尼玛旺拉、杨雅芝。

本文件为首次发布。

公路波纹钢桥涵设计与施工技术规程

1 范围

本文件规定了公路波纹钢桥涵的术语和定义、总体原则、材料及构件、设计、施工、质量检查及验收等技术内容。

本文件适用于公路波纹钢桥涵工程设计、施工、质量检查及验收。

2 规范性引用文件

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

- GB/T 700 碳素结构钢
- GB/T 706 热轧型钢
- GB/T 709 热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差
- GB/T 1231 钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件
- GB/T 1591 低合金高强度结构钢
- GB/T 2518 连续热镀锌和锌合金镀层钢板及钢带
- GB/T 6725 冷弯型钢通用技术要求
- GB/T 1499.2 钢筋混凝土用钢第2部分:热轧带肋钢筋
- GB/T 14683 硅酮和改性硅酮建筑密封胶
- GB/T 17643 土工合成材料 聚乙烯土工膜
- GB/T 19250 聚氨酯防水涂料
- GB/T 26528 防水用弹性体(SBS)改性沥青
- GB/T 27806 环氧沥青防腐涂料
- GB/T 3323.1 焊缝无损检测射线检测第1部分:X和伽玛射线的胶片技术
- GB/T 3323.2 焊缝无损检测射线检测第2部分:使用数字化探测器的X和伽玛射线技术
- GB/T 34567 冷弯波纹钢管
- GB 50017 钢结构设计标准
- GB 50661 钢结构焊接规范
- JC/T 483 聚硫建筑密封胶
- JGJ 82 钢结构高强度螺栓连接技术规程
- JT/T 536 路桥用塑性体改性沥青防水卷材
- JT/T 722 公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件
- JTG 2120 公路工程结构可靠性设计统一标准
- JTG/T 2231 公路桥梁抗震设计规范
- JTG 3363 公路桥涵地基与基础设计规范
- JTG/T 3365-02 公路涵洞设计规范
- JTG/T 3610 公路路基施工技术规范

JTG/T 3650 公路桥涵施工技术规范
 JTG 5120 公路桥涵养护规范
 JTG B01 公路工程技术标准
 JTG D30 公路路基设计规范
 JTG D40 公路水泥混凝土路面设计规范
 JTG D60 公路桥涵设计通用规范
 JTG/T D81 公路交通安全设施设计细则
 JTG/T F30 公路水泥混凝土路面施工技术细则
 JTG/T F80/1 公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程
 JTG F90 公路工程施工安全技术规范
 JTG H10 公路养护技术规范
 JTG H30 公路养护安全作业规程

3 术语和定义

GB/T 34567界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

波纹钢桥涵 corrugated steel bridge and culvert

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

3.2

分节整装波纹钢管 sectional corrugated steel pipe

将螺旋波纹钢管或环形波纹钢管，按照一定长度分成节段，安装连接而成整体的波纹钢管。

3.3

加劲肋板 stiffened rib plate

用于结构加强作用安装于波纹钢管顶部或波纹钢板拱肩及拱顶部位的波纹钢板。

3.4

壁厚 plate thickness

波纹钢管、波纹钢板厚度（不含镀锌层等防腐层）。

3.5

管箍、法兰盘 pipe hoop、flange plate

用于波纹钢管接头连接的部件。

3.6

螺栓连接副 bolt connection pair

用于波纹钢管连接的高强度螺栓标准套装组合件。一套螺栓连接副由一个螺栓、一个螺母和两个钢垫片组成。

3.7

波纹钢管（拱）跨径（直径） corrugated steel pipe(arch) diameter(span)

波纹钢桥涵管（拱）内水平方向对应波峰之间的最大净距离。

3.8

计算跨径或直径 calculated diameter

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

3.9

计算矢高 **calculated vector height**

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

3.10

结构性回填 **structural backfill**

对发挥回填土体-波纹钢管相互作用的回填区域进行的土体回填。

3.11

最小填土厚度 **minimum depth of cover**

能够保证波纹钢管（拱）结构稳定性和发挥土-钢结合相互作用的管顶以上的覆盖土层厚度（垂直距离）最小值（不含路面结构层厚度）。

3.12

减载板 **load shedding plate**

布置于波纹钢管顶结构性回填层中的钢筋混凝土板或波纹钢板。

3.13

磨蚀 **abrasion**

指流水等所携碎屑物通过波纹钢管涵洞时对其内壁自然进行的机械磨损。

3.14

喷涂防腐 **secondary painting for anticorrosive**

在波纹钢管（拱）镀锌防腐层表面采用防腐材料进行的喷涂防腐层。

3.15

质量证明文件 **certificate of quality**

随同进场构件及材料等一同提供用于证明其质量状况的有效文件。

4 总体原则

4.1 波纹钢桥涵设计与施工应遵循“安全、环保、耐久、适用、经济”原则。

4.2 设计与施工应符合生态环境保护要求，并与自然环境和景观相协调。

4.3 波纹钢桥涵的养护检查和日常养护、定期养护、灾害防治等，参照 JTG 5120、JTG H10 和 JTG H30 规定执行。

4.4 波纹钢桥涵设计、施工及质量验收除应符合本文件规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准（规范）规定。

5 材料及构件

5.1 基本规定

5.1.1 波纹钢用钢材应满足高寒高海拔低温环境和冷弯加工工艺等性能要求。

5.1.2 波纹钢管（拱）不宜采用耐候结构钢或不锈钢复合钢板及钢带。

5.1.3 环形波纹钢管的管体焊接、管节连接角钢法兰焊接、管体三通或弯头焊接、管箍连接件焊接等的焊缝内部缺陷，应符合 GB 50661 规定的检验等级 B 级和评定等级 II 级质量要求，焊缝外观质量应符合 GB 50661 规定的一级焊缝等级要求。

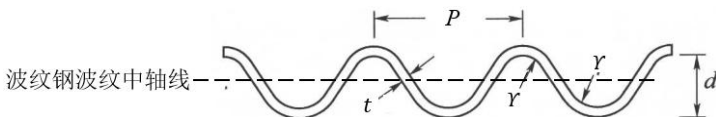
- 5.1.4 波纹钢管（拱）装配化安装应采用高强度螺栓连接副连接构件。
- 5.1.5 防渗密封垫应具有良好的抗冻、耐寒、耐腐蚀性能。

5.2 波纹钢

- 5.2.1 螺旋波纹钢管用钢带，宜采用 S300GD+Z、S320GD+Z 或 S350GD+Z 牌号的热镀纯锌镀层结构钢，力学性能、尺寸、外形、重量及允许偏差应符合 GB/T 2518 规定。
- 5.2.2 环形波纹钢管或拼装管（拱）用钢板或钢带，宜采用 Q235 碳素结构钢、Q355 低合金高强度结构钢，钢级宜采用 B 级、C 级或 D 级。力学性能应分别符合 GB/T 700 和 GB/T 1591 规定。尺寸、外形、重量及允许偏差应符合 GB/T 709 规定，厚度允许偏差应符合 C 类规定。
- 5.2.3 GB/T 700 规定的 Q235B 级沸腾钢轧制的钢板或钢带（钢牌号：Q235AF-U12350、Q235BF-U12353）不应用于环境温度等于或低于-20℃的波纹钢管（拱）结构。
- 5.2.4 波纹钢管（板）宜采用常规波形，波纹钢类型、波形（规格）及壁厚见表 1；

表 1 波纹钢类型及波形（规格）及壁厚参数

单位为毫米

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

5.3 连接件

- 5.3.1 高强度螺栓副连接，采用大六角头螺栓、大六角螺母和钢垫片的性能应符合 GB/T 1231 规定，连接副的性能等级配套组合见 6.6.3.1。
- 5.3.2 管箍连接件用钢带见 5.2.1、波形和尺寸见 6.6.3.2。
- 5.3.3 等边角钢法兰连接件宜采用碳素结构钢或低合金高强度结构钢，力学性能应分别符合 GB/T 700 和 GB/T 1591 规定。角钢法兰尺寸见 6.6.3.3，角钢截面积、截面特性、理论重量等应符合 GB/T 706 规定。
- 5.3.4 波纹钢板拱脚不等边槽钢连接件，力学性能应符合 GB/T 6725 规定，不等边槽钢尺寸见 6.6.3.5；槽钢底部焊接预埋带肋钢筋，力学性能应符合 GB/T 1499.2 规定。

5.4 防渗材料

- 5.4.1 管箍连接、法兰连接、波纹钢板拼装管（拱）连接的接缝防渗密封垫应符合 GB/T 34567 规定。
- 5.4.2 波纹钢管（拱）外壁的螺母及钢垫片防渗密封处理宜采用硅酮密封胶（SR 类）或双组分聚硫密封胶，其性能应分别符合 GB/T 14683、JC/T 483 规定。采用其他密封胶时，性能不低于硅酮密封胶（SR 类）或双组分聚硫密封胶的性能要求。

- 5.4.3 波纹钢拼装管（拱）连接接缝处的防渗材料，采用聚氨酯涂层时，宜采用聚氨酯防水涂层（MPU 类），性能应符合 GB/T 19250 规定；采用防水卷材时，宜采用路桥用塑性体改性沥青防水卷材，性能应符合 JT/T 536 规定。
- 5.4.4 结构性回填层中的防渗隔水层，宜采用环保用高密度聚乙烯土工膜，性能应符合 GB/T 17643 规定。

5.5 防腐材料

- 5.5.1 波纹钢管（板）、连接件，采用热浸镀锌防腐的锌应符合 GB/T 34567 规定。
- 5.5.2 波纹钢管（拱）外壁与土体接触面防腐层，宜采用环氧沥青或改性沥青涂层，性能（产品要求、技术要求）应分别符合 GB/T 27806、GB/T 26528 规定。当采用其他防腐涂层材料时，性能不应低于环氧沥青或改性沥青的防腐性能要求。
- 5.5.3 波纹钢管（拱）内壁的外露面在镀锌层表面采用防腐涂装时，宜根据使用环境采用普通型或长效型涂装材料及超强耐磨环氧漆、环氧玻璃鳞片漆、环氧漆等，性能等应符合 JT/T 722 规定。
- 5.5.4 波纹钢管（拱）涂装防腐保护（包裹）层，宜采用环保用高密度聚乙烯土工膜，性能应符合 GB/T 17643 规定。

5.6 结构性回填材料

- 5.6.1 波纹钢管（拱）结构周围规定范围内的结构性回填，宜选用砾类土、砂类土等低腐蚀性、低压缩性、易压实的填料，最大粒径不应大于波纹钢管（拱）波深的 0.5 倍、且不大于 50 mm。
- 5.6.2 最大冻深范围内或冻土区的回填，应采用粗粒土，小于 0.075 mm 颗粒含量不大于 5 %。
- 5.6.3 液限大于 50 %、塑性指数大于 26（多年冻土区液限大于 32 %、塑性指数大于 12）的细粒土或黏性土、高液限粉土、膨胀率大于 3 % 的土以及对波纹钢产生严重腐蚀性的土，不准许用于结构性回填。

5.7 其他材料

- 5.7.1 地基换填的材料宜采用级配良好的砂砾。
- 5.7.2 波纹钢涵管的地基（管基）上松铺垫层和波纹钢板减载板底面松铺垫层，宜采用级配良好的砂砾石混合料、砂质土等，不应有尖锐颗粒，最大粒径应符合表 2 规定，小于 0.075 mm 颗粒含量应不大于 5.0 %。

表 2 松铺砂砾垫层材料规格

单位为毫米

波纹钢类型	波距×波高或波深 $p \times d$	松铺垫层最大粒径
分节整装螺旋波纹钢管（圆管形）	68×13	5
	75×25	10
分节整装环形波纹钢管（圆管形）	200×55	30
波纹钢板拼装管（圆管形或管拱形）	200×55	30
	400×150	50

- 5.7.3 波纹钢板拱结构的基础及拱座（混凝土墩台身下部结构）、洞口、附属工程和洞口外调治构造物等水泥混凝土、砂浆、片（块）石等材料的质量和钢筋力学性能等，应符合 JTG/T 3650 和 JTG/T 3365-02 规定。
- 5.7.4 钢筋混凝土减载板材料的质量和钢筋力学性能，应符合 JTG/T F30 规定。

6 设计

6.1 基本规定

- 6.1.1 波纹钢桥涵设计应综合考虑公路等级、重要性程度、地形地貌、地质、荷载、进出口排水或通行条件、路基填高、结构性回填最小高度、材料运输、施工、养护等特征条件。
- 6.1.2 波纹钢桥涵设计洪水频率、设计荷载、设计安全等级和结构重要性系数等，应符合 JTG D60、JTG/T 3365-02 和 JTG 2120 规定。
- 6.1.3 一级及以上等级公路的波纹钢桥涵主体结构设计使用年限不应低于 50 年、二级及以下等级公路不应低于 30 年。
- 6.1.4 应针对波纹钢桥涵路段的腐蚀性环境和排水环境，进行防腐和防冲刷（防磨蚀）设计。

6.2 桥涵布设

- 6.2.1 波纹钢结构桥涵适用条件广泛，一般地质均可设置，下列条件宜优先设置：
- a) 设计基本地震动峰值加速度大于或等于 0.2 g 的地区；
 - b) 地基承载力相对较低的路段；
 - c) 地形条件复杂路段，涵洞需分岔、曲线布设时；
 - d) 砂、石等原材料缺乏地区；
 - e) 多年冻土路段；
 - f) 交通应急抢险保通等工程。
- 6.2.2 波纹钢桥涵的位置应符合公路路线布设要求。
- 6.2.3 应详细调查、分析历史最大洪水量，合理布设孔径（直径），并采取防洪等安全措施。
- 6.2.4 桥涵布设除应满足排洪（排水）要求外，还应与公路排水系统、水利规划及排灌相配合。
- 6.2.5 根据工程现场勘察结果，波纹钢桥涵单孔不满足排洪、灌溉时或不能满足管（拱）顶最小填土高度时，可并列双孔或多孔布设。一处多孔布设时的波纹钢板拱桥见 6.3.1、波纹钢涵洞不宜超过三孔。涵洞分岔布设时，可通过弯头、三通等构造连接成整体结构。
- 6.2.6 桥涵中线与道路中线宜正交布设，波纹钢板拱桥斜交时交角不宜大于 30°、波纹钢管涵斜交时交角不宜大于 45°。
- 6.2.7 桥涵洞口（进出口）处的构造设置，其型式和尺寸应使桥涵具有相应过水能力和保证桥涵处路堤的稳定。
- 6.2.8 桥涵的其他布设及勘测等，应符合 JTG D60 和 JTG/T 3365-02 规定。

6.3 跨径（直径）及净高

- 6.3.1 波纹钢板拱桥跨径（直径）应符合下列规定：
- a) 波纹钢板拱桥的标准化跨径、连续孔数及多孔跨径总长符合表 3 规定；
 - b) 拱下净空（建筑界限）符合 JTG D60 和 JTG B01 规定；
 - c) 矢高不能满足拱下净高时，采用实体墙式钢筋混凝土墩台身增加拱下净高。

表 3 波纹钢板拱桥标准化跨径、孔数及多孔跨径总长

单孔跨径/m	连续孔数/孔	多孔跨径总长/m	单孔跨径/m	连续孔数/孔	多孔跨径总长/m
5.0	6	30.0	10.0	3	30.0
6.0	5	30.0	13.0	2	26.0
8.0	3	24.0	16.0	1	16.0
注1：多孔跨径总长为孔内起拱线间的距离。					
注2：应急抢险保通时的一处连续最多孔数不受限制。					

6.3.2 波纹钢管涵洞跨径（直径）应符合下列规定：

- a) 涵洞标准化跨径（直径）采用 0.50 m、0.75 m、1.00 m、1.25 m、1.50 m、2.00 m、2.50 m、3.00 m、4.00 m、5.00 m、6.00 m、7.00 m、8.00 m、9.00 m、10.00 m；
- b) 采用无压力式涵洞设计，跨径（直径）根据设计洪水流量、河沟断面形态、地质和进出口沟床加固形式等条件和 JTG/T 3365-02 的有关勘测、水文和水力等计算确定，最小跨径（直径）、涵洞内顶点至最高流水面净高符合表 4 规定。

表 4 波纹钢管涵洞不同长度的最小跨径（直径）、流水面净高

单位为米

波纹钢管涵洞长度 L	最小跨径（直径） D ，不小于	流水面以上净高
$L<15.0$	1.0（排洪涵 1.5）	内径（ D ） ≤ 3.0 m 时，涵洞内顶点至最高流水面净高 $\geq D/4$ ； 内径（ D ） > 3.0 m 时，涵洞内顶点至最高流水面净高 >0.75 m
$15.0\leq L<30.0$	1.5	
$30.0\leq L<60.0$	2.0	
$L\geq 60.0$	2.5	
注1：高寒或高海拔地区有涎流冰影响的波纹钢管涵洞，应视涎流冰最大聚集量增加净高或内径。 注2：最小跨径（直径）不包括灌溉涵。		

6.4 水文、水力计算

6.4.1 波纹钢桥涵的设计洪水频率和水文、水力计算，应符合 JTG D60 和 JTG/T 3365-02 规定。

6.4.2 波纹钢管涵洞内下部无防腐蚀铺装层的水力计算时，糙率可按表 5 取值。

表 5 波纹钢管涵洞内无防腐蚀铺装时的糙率推荐值

波纹钢管波形（波距 $\times$ 波深或波高） $p \times d/\text{mm}$	糙率 n_h
68×13	0.015~0.022
75×25	0.022~0.027
200×55	0.028~0.039
400×150	0.032~0.048

6.5 地基、基础及下部结构设计

6.5.1 一般规定

6.5.1.1 波纹钢结构桥涵的地基设计，应分析管（拱）底部及起拱线两侧结构性回填范围内（见 6.6.6.1）地基土体的均匀连续力学特性、承载力和沉降性能。

6.5.1.2 地基处理宽度（纵路线向）应不小于 6.6.5.1 规定的结构性回填最小宽度，长度（横路基向）应为波纹钢管（拱）底部和洞口（进出口）部分。

6.5.1.3 应根据波纹钢管（拱）自重、波纹钢板拱桥基础及下部结构、土-钢结合共同受力、土拱效应和柔性结构等特性，结合 JTG 3363 规定对地基及基础、地基承载力、沉降和稳定性等进行计算。

6.5.1.4 非冻胀土层基础、冻胀土层基础、基础防冲刷和洞口（进出口）路基边坡挡土墙的地基及基础、洞口构造物的地基及基础，应符合 JTG 3363 和 JTG D30 规定。

6.5.2 波纹钢板拱桥基础及下部结构

6.5.2.1 波纹钢板拱的地基及基底处理应符合 JTG 3363 规定。

6.5.2.2 基础采用强度等级不低于 C30 的钢筋混凝土扩大基础（浅基础）。

- 6.5.2.3 波纹钢板拱不能满足拱下净空要求时或箱形拱顶以上填土超过 6.6.5.2 规定的最大厚度限值时，可在基础上增加实体墙式钢筋混凝土墩(台)身至满足拱下净空要求。
- 6.5.2.4 基础上或实体墙式墩(台)身顶上设置钢筋混凝土拱座，混凝土强度等级不低于 C40。跨径大于或等于 10 m 时的拱座宽度不小于 100 cm，跨径大于 10 m 时的拱座宽度不小于 120 cm，拱座高度为 60 cm~100 cm。多孔连拱之间的拱座宽度应满足 6.6.5.1 规定的波纹钢板拱脚之间的结构性回填最小宽度。拱座配筋布置和计算满足承载能力要求。
- 6.5.2.5 拱座预埋波纹钢板拱脚两侧的后浇混凝土（见图 5）钢筋。后浇混凝土强度等级不低于 C30，顶面设斜坡面形式（里高外低），外边缘高度宜为 30 cm，且不与拱肩部位波纹钢加劲肋板底部接触。

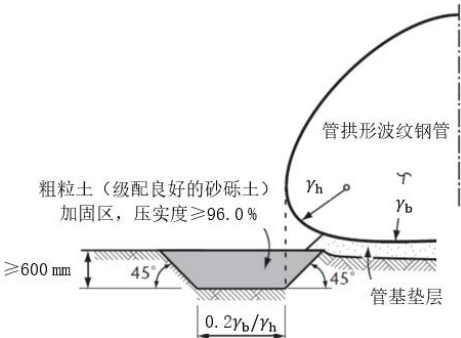
6.5.3 波纹钢管涵洞地基及垫层

6.5.3.1 地基处理最小厚度及处理方案应符合表 6 规定。

表 6 波纹钢管涵洞地基处理最小厚（深）度及处理方案

地基地质	地基处理最小厚（深）度/mm		地基处理方案
优质土地基（碎石土、卵石土、砂砾、粗砂等）	地基压（夯）实处理		压实度≥95 %
一般土质地基 （中砂、细砂等）	$D<900$	200	换填粗粒土（砂砾等），换填压实度≥95 %
	$900<D\leq2000$	300	
	$D>2000$	$0.2 D$	
软土（包括花岗岩残积土） 地基	$500 <D\leq5000$	$0.3 D\sim0.5 D$ ， 且不小于500 mm	按JTG D30、JTG 3363 规定处理，换填压实度≥95 %
	$D>5000$	$0.2 D\sim0.3 D$	
岩石地基	200 mm～400 mm（波深小于55 mm时采用较小值、波深大于或等于55 mm时采用较大值）。当管顶以上填土高度大于5.0 m 时，管顶以上填土每增高1.0 m，地基处理厚度增加40 mm。风化岩层处理厚度为满足地基承载力要求		岩石与土质地基衔接段清除风化岩层或表层，衔接段换填长度不小于波纹钢管直径的1.5 倍；换填压实度≥95 %
多年冻土、盐渍土等地基	按JTG D30和JTG 3363规定处理，换填压实度≥95 %		
注： D 为波纹钢管直径，以mm计。			

6.5.3.2 波纹钢管拱形拱脚处的极限状态或压力不满足计算要求时，应加固处理（见图 1）。



标引符号说明：

r_b ——管拱形底部半径；

r_h ——管拱形拱脚处半径。

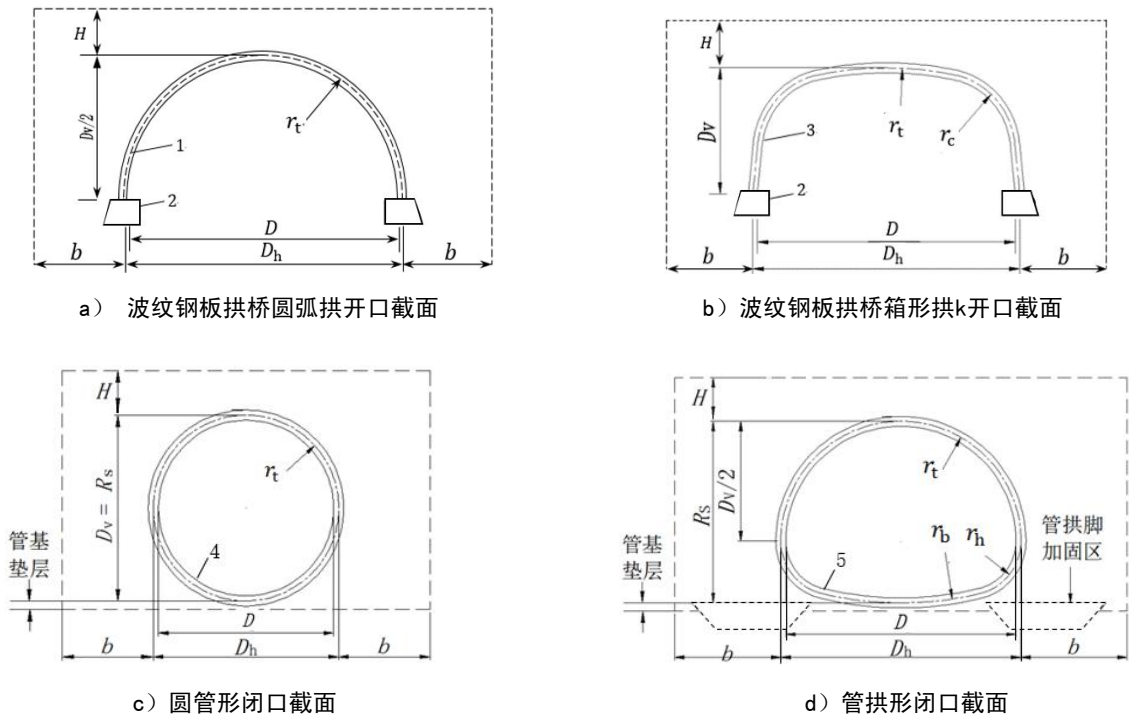
图 1 管拱形拱脚处地基加固处理示意图

- 6.5.3.3 除岩石地基外，应根据地基的预期最大变形（沉降量）、管底纵坡和填土高度等因素综合确定设置防沉降积水的预拱度。一般在管基上预留设置管顶以上总填土高度（ H ）的 0.25%~0.5%与管长度（ L ）的 0.3%~0.6%之和的预拱度；多年冻土路段或部位的波纹钢管涵洞预拱度可适当增大，且涵洞中心的高程不高于进水口的高程。
- 6.5.3.4 涵洞洞口底部应衔接设置混凝土枕梁基础，宽度不小于 30 cm、长度不小于波纹钢管直径，基础埋深应在季节性最大冻深以下不小于 25 cm，并对基础土质进行防冻处理。
- 6.5.3.5 符合 6.9.1.5 规定的严重磨蚀的涵洞，波纹钢管下部可埋置于地下，埋置于洞口标高以下深度不宜小于 50 cm，管内铺砌至地面标高的截面空间（流水面净高）应满足 6.3.2 b) 的要求。
- 6.5.3.6 波纹钢管涵洞管基松铺垫层应符合下列规定：
- a) 管基垫层采用级配砂砾，松铺厚度应填充波谷（波深），最大厚度不大于波深的 1.6 倍，且不小于波深的 1.3 倍；
 - b) 圆管形截面的管基宽度，平面地基上安装时宜为管径的 0.4 倍，开槽安装时应为槽的弧长；管拱形截面的管基垫层宽度宜为管底弧长的 1.2 倍。

6.6 构造设计

6.6.1 一般规定

6.6.1.1 波纹钢板拱桥宜采用圆弧拱（见图 2 分图 a）和箱形拱（见图 2 分图 b）两种开口截面；波纹钢管涵洞宜采圆管形（见图 2 分图 c）和管拱形（见图 2 分图 d）两种闭口截面。



标引符号说明：

- 1 ——波纹钢板拱（圆弧拱）；
- 2 ——钢筋混凝土拱座；
- 3 ——波纹钢板拱（箱形拱）；
- 4 ——波纹钢管（圆管形）；

图 2 波纹钢桥涵截面形式示意图

- 5 —— 波纹钢管（管拱形）；
- D —— 波纹钢管（拱）跨径（直径）；
- H —— 波纹钢管（拱）顶以上填土厚度（含路面结构层厚度）；
- D_h —— 计算跨径（波纹中性轴处计算）；
- D_v —— 计算矢高（波纹中性轴处计算）；
- b —— 结构性回填最小宽度范围区；
- R_s —— 计算矢高（波纹中性轴处计算）；
- r_b —— 管拱形底部半径；
- r_c —— 箱形拱拱肩半径；
- r_t —— 波纹钢管（拱）顶部半径；
- r_h —— 管拱拱脚半径。

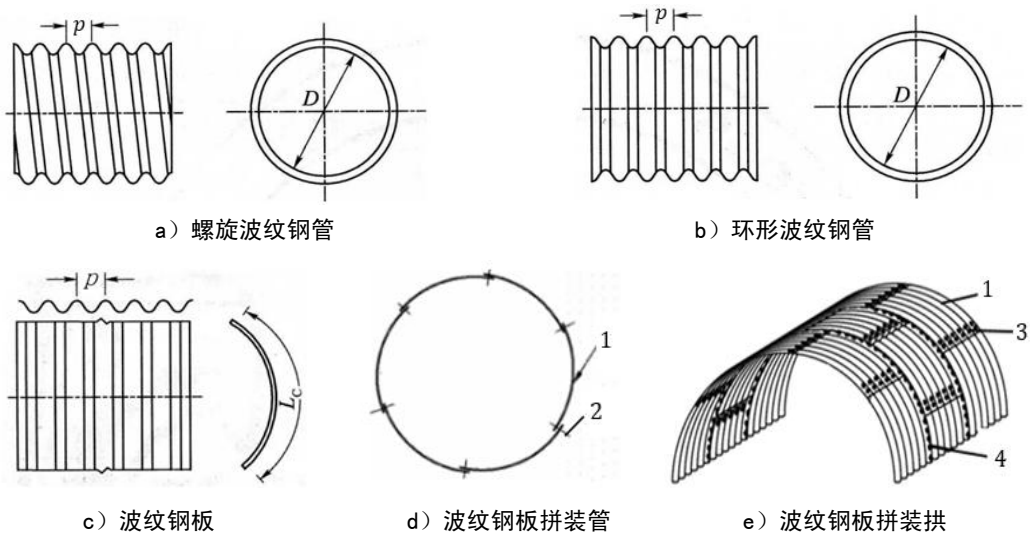
图 2 波纹钢桥涵截面形式示意图（续）

6.6.1.2 波纹钢板圆弧拱适宜拱顶以上填土较高的路段、箱形拱适宜拱顶以上填土较低的路段。拱形选择以拱下通行能力并满足附录 A 的技术参数确定，拱下净空不足时，可根据 6.5.2.3 调整空间。

6.6.1.3 当波纹钢管涵洞不能满足排洪等能力时，宜采用圆弧拱或箱形拱开口截面结构。

6.6.2 波纹钢管（拱）构造

6.6.2.1 分节整装螺旋波纹钢管见图 3 分图 a)、分节整装环形波纹钢管见图 3 分图 b)，分节段长度根据运输和施工现场安装条件等确定；拼装管（拱）的波纹钢板见图 3 分图 c)、波纹钢板拼装管见图 3 分图 d)、波纹钢板拼装拱见图 3 分图 e)。



标引符号说明：

- 1 —— 波纹钢板；
- 2 —— 拼装波纹钢管（拱）接缝连接螺栓；
- 3 —— 拼装波纹钢管（拱）连接纵缝；
- 4 —— 拼装波纹钢管（拱）连接环缝；
- D —— 波纹钢管直径；
- L_c —— 波纹钢板弧线长；
- p —— 波纹钢管(板)波纹的波距。

图 3 波纹钢管和波纹钢板拼装管（拱）示意图

- 6.6.2.2 运输条件受限时或直径大于 3.0 m 的波纹钢管，宜采用波纹钢板拼装管。
- 6.6.2.3 波纹钢板标准长度和宽度宜参考 GB/T 34567 规定，当拼装管（拱）或加劲肋板的局部长度和宽度需减小时，经计算确定。
- 6.6.2.4 波纹钢管（拱）类别及适宜工程类型见表 7，波纹钢管（拱）构造参数见附录 A。

表 7 波纹钢管（拱）类别及适宜工程类型

单位为毫米

波纹钢类别	波形参数 $p \times d$	适用标准跨径（直径） D	壁厚范围 t	适宜工程类型
螺旋波纹钢管（圆管形）	68×13	500~2000	1.6~3.0	涵洞
	75×25	1000~2500	1.6~4.0	
环形波纹钢管（圆管形）	200×55	1500~3000	3.0~5.0	
波纹钢板拼装管 （圆管形或管拱形）	200×55	3000~5000	4.0~6.0	
	400×150	5000~10000	6.0~8.0	
波纹钢板拼装拱 （圆弧拱或箱形拱）	400×150	5000~16000	6.0~10.0	小桥
注：不同标准跨径（直径）的波纹钢管（拱）具体壁厚见附录A。				

6.6.3 连接构造

- 6.6.3.1 高强度螺栓连接构造应符合下列规定：
- a) 分节整装的螺旋波纹钢管的管箍连接、环形波纹钢管法兰连接和波纹钢板拼装管（拱）连接，采用高强度螺栓连接；
 - b) 高强度螺栓连接副的性能等级配套组合见表 8；
 - c) 螺栓连接副的钢垫片尺寸见表 9，钢垫片的螺栓孔型及孔径与被连接件一致；
 - d) 凸凹面型钢垫片的凸凹面半径与波纹钢板件的波峰处或波谷处半径一致；
 - e) 根据 JGJ 82 规定计算确定螺栓长度，终拧后外露出 2~3 个扣丝。

表 8 高强度螺栓连接副性能等级配套组合及扭矩系数

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

表 9 钢垫片尺寸

单位为毫米

钢垫片类型	尺寸类别	配套螺栓规格				
		M12	M16	M20	M24	M27
平面型	平面尺寸	25.0	33.0	—	—	—
	厚度	3.8	4.8	—	—	—
凸凹面型	平面尺寸	—	30.0×30.0	40.0×45.0	48.0×55.0	50.0×55.0
	厚度	—	2.5	3.0	3.0	4.0
注：凸凹面型钢垫片厚度为最薄处厚度。						

- 6.6.3.2 分节整装螺旋波纹钢管连接构造应符合下列规定：
- a) 分节整装螺旋波纹钢管的管身咬口连接构造及咬合力、管箍连接件构造符合 GB/T 34567 规定；
 - b) 管箍的波形(规格)及壁厚与被连接的主体管节相同；
 - c) 管箍连接螺栓规格及管箍的段式见表 10。

表 10 管箍连接螺栓规格及段式

单位为毫米

波距×波高或波深 $p \times d$	高强度螺栓规格		管箍连接段式	
	螺旋波纹钢管直径 D	螺栓规格	螺旋波纹钢管直径 D	管箍
68×13、75×25	$500 \leq D \leq 1400$	M12	$D \leq 1000$	二段式
	$1400 < D \leq 2000$	M16	$1000 < D \leq 1600$	
			$1600 < D \leq 2000$	三段式

- 6.6.3.3 分节整装环形波纹钢管法兰连接构造应符合 GB/T 34567 规定，法兰螺栓孔距不大于 157 mm（弧长）并均匀分布。法兰尺寸及连接螺栓规格见表 11。

表 11 法兰尺寸及连接螺栓规格

单位为毫米

波距×波高或波深 $l \times d$	环形波纹钢管直径 D	角钢法兰边宽×厚度	高强度螺栓规格
200×55	$1000 \leq D \leq 3000$	70×7	M16

- 6.6.3.4 波纹钢板件拼装管（拱）连接构造应符合下列规定：
- a) 拼装波纹钢管（拱）的纵缝（板件端头短边）采用错缝（T 形缝）、环缝（板件侧边长边）采用通缝；
 - b) 波纹钢板纵缝、环缝连接螺栓孔采用标准圆孔，螺栓规格（公称直径）配套的孔径见表 12，孔位、孔边距和孔间距等符合 GB/T 34567 规定，纵缝、环缝均不焊接连接；
 - c) 波纹钢板拼装管（拱）纵缝连接的螺栓规格及数量见表 13，环缝采用单排螺栓连接，高强度螺栓连接副（规格）与纵缝连接相同。

表 12 螺栓规格配套的螺栓孔径

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

表 13 波纹钢板拼装管（拱）纵缝连接高强度螺栓规格及数量

结构类型	波距×波高 $p \times d/\text{mm}$	跨径或直径 D/mm	螺栓规格 (公称直径)		高强度螺栓数量，不少于/个	
					波峰处	波谷处
波纹钢板拼装管 涵洞	200×55	$3000 \leq D \leq 5000$	任选 一种	M16	2	2
				M20	1	2
	400×150	$5000 < D \leq 8000$	M16		3	3
		$8000 < D \leq 10000$	M20		3	3

表 13 波纹钢板拼装管（拱）纵缝连接高强度螺栓规格及数量（续）

结构类型	波距×波高 $p \times d/\text{mm}$	跨径或直径 D/mm	螺栓规格 (公称直径)	高强度螺栓数量, 不少于/个	
				波峰处	波谷处
波纹钢板拼装拱桥	400×150	$8000 \leq D \leq 13000$	M20	3	3
		$13000 < D \leq 16000$	M24或M27	3	3
注: 接缝连接强度计算的螺栓规格或螺栓数量大于表列规格或数量时, 采用计算的螺栓规格或数量; 计算小于表列规格或数量时, 采用表列螺栓规格或数量。					

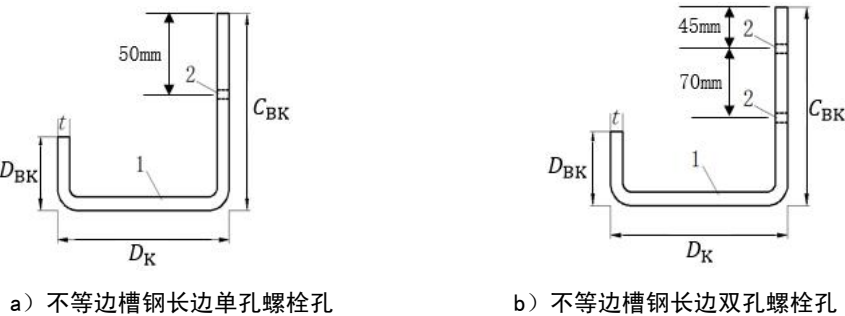
6.6.3.5 波纹钢板拱桥的拱脚与拱座连接构造应符合下列规定:

- a) 波纹钢板拱脚与钢筋混凝土拱座采用铰接连接。拱座上预埋不等槽钢, 截面尺寸见表 14;
- b) 跨径小于 10 m 时, 槽钢长边采用单排螺栓孔布置 (见图 4 分图 a); 跨径大于或等于 10 m 时, 槽钢长边采用双排螺栓孔布置 (见图 4 分图 b);
- c) 槽钢长边上的螺栓孔横向 (水平) 间距为波纹钢板的波距, 螺栓孔位对应于波纹钢板拱脚处外侧波峰部位 (波峰与不等边槽钢长边螺栓连接), 且波纹钢板拱脚端头座实于槽钢底面;
- d) 槽钢底面与波纹钢板拱脚处切线垂直 (见图 5), 槽钢底面与拱座水平面的夹角 α (见图 5 分图 b) 根据波纹钢板拱脚的角度计算调整布置;
- e) 槽钢底面中轴线上栓接或焊接预埋钢筋, 并与钢筋混凝土拱座中钢筋连接一体 (见图 5); 预埋根据直径不小于 20 mm、直线段长度不小于拱座高度的 2/3、间距 400 mm。

表 14 不等边槽钢横截面尺寸

单位为毫米

波纹钢板波形 波距×波高或波深 $p \times d$	横截面尺寸, 不小于			
	边厚 t	底宽 D_K	长边宽 C_{BK}	短边宽 D_{BK}
400×150	8	220	200	35



标引序号说明:

- 1 ——不等边槽钢;
- 2 ——不等边槽钢长边螺栓孔;
- C_{BK} ——不等边槽钢长边宽;
- D_{BK} ——不等边槽钢短边宽;
- D_K ——不等边槽钢底宽;
- t ——不等边槽钢边厚。

图 4 不等边槽钢示意图

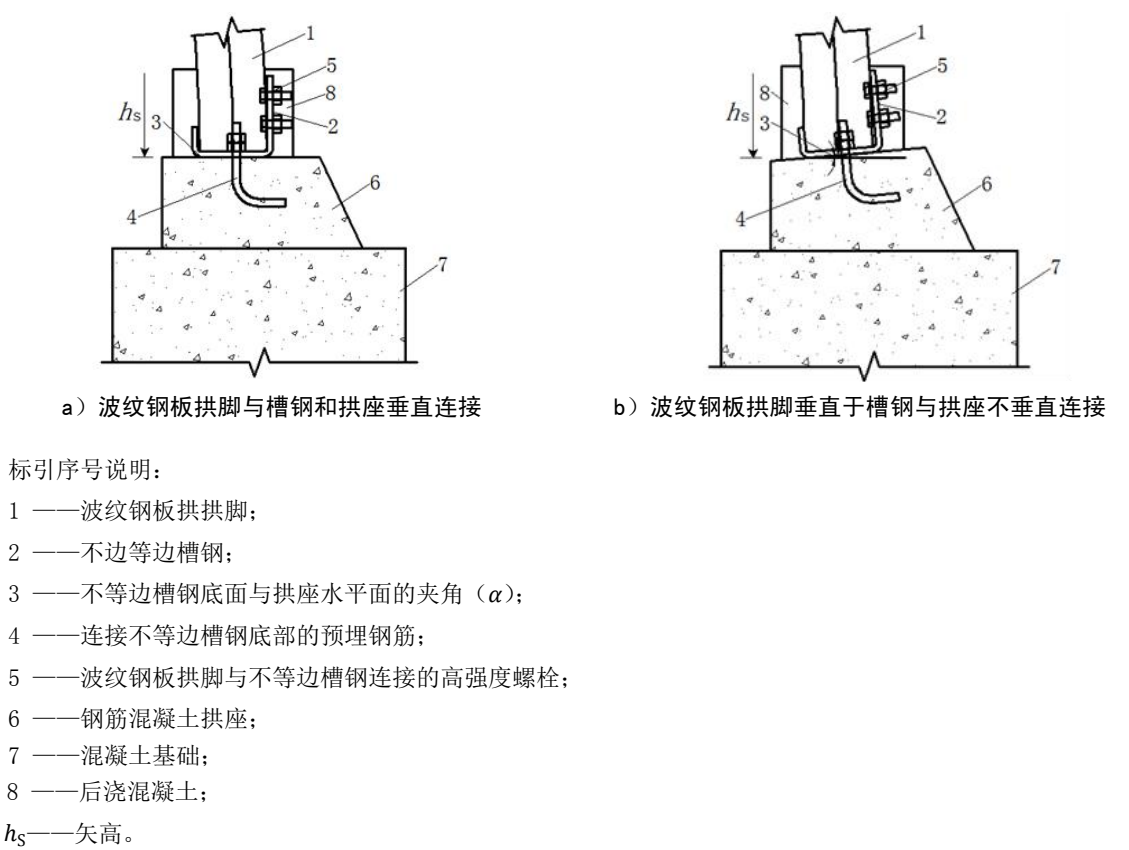
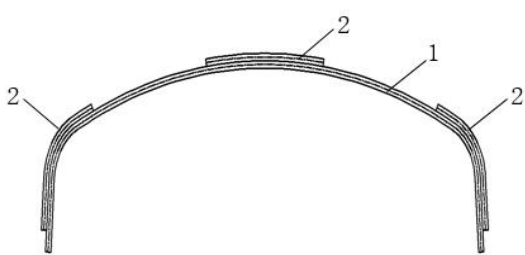


图 5 波纹钢板拱脚钢铰接连接示意图

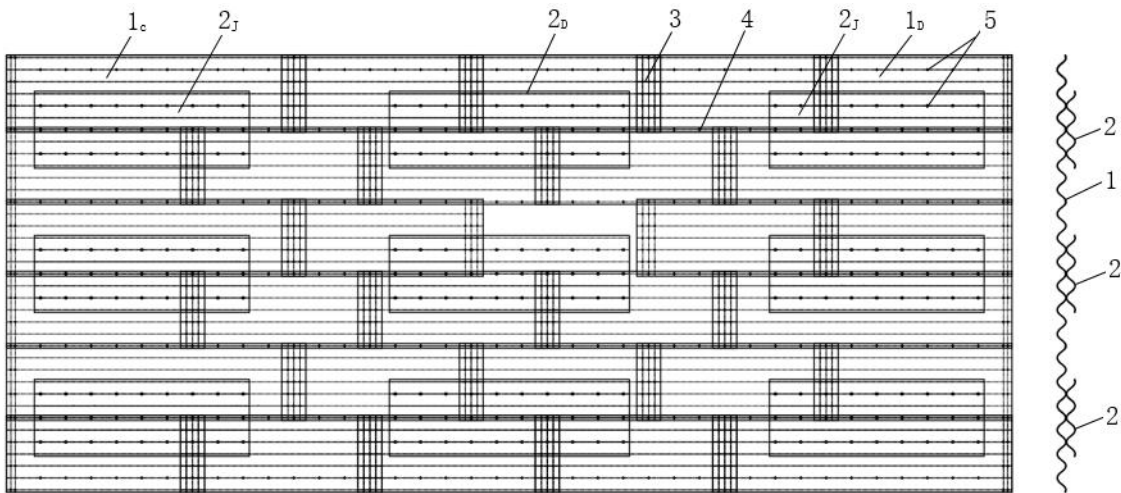
6.6.4 加劲肋板构造

- 6.6.4.1 跨径（直径）大于或等于 8.0 m 的波纹钢板拱桥和波纹钢管涵洞，宜设置波纹钢板加劲肋板。
- 6.6.4.2 加劲肋板的波形、壁厚、宽度、弧形曲面及半径、镀锌层厚度等，应与波纹钢管（拱）主体结构的波纹钢板相同。
- 6.6.4.3 波纹钢板拱桥拼装拱加劲肋板构造应符合下列规定：
- a) 圆弧拱顶的波纹钢加劲肋板截面布置及构造见 6.6.4.4；
 - b) 箱形拱结构，在拱顶和拱肩处设置环向波纹钢加劲肋板，纵向每间隔 3 个波距设置（见图 6）。拱肩处的加劲肋板底端距拱座顶面宜为 400 mm~600 mm；拱肩处加劲肋板长度与拱脚处的短基板相同，拱顶处加劲肋板长度与拱脚处的长基板相同；
 - c) 加劲肋板与波纹钢管（拱）主体结构波峰对波峰连接与螺栓孔布置见图 6 分图 b），并利用主体结构接缝连接螺栓一体化连接，形成组合截面。



a) 波纹钢板箱形拱加劲肋板构造立面布置图示

图 6 波纹钢板拱加劲肋板构造示意图

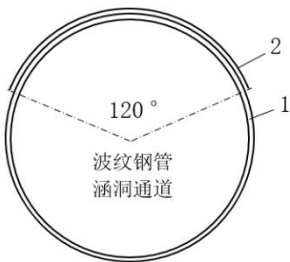


b) 波纹钢板箱形拱加劲肋板构造平面布置示意图

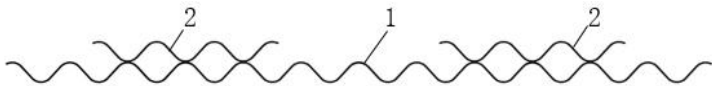
- 标引序号说明：
- 1——波纹钢板拱主体结构；
 - 1_c——波纹钢板拱脚长基板；
 - 1_b——波纹钢板拱脚短基板；
 - 2——波纹钢加劲肋板；
 - 2_b——拱顶处波纹钢加劲肋板；
 - 2_j——拱肩处波纹钢加劲肋板；
 - 3——波纹钢件拼装拱螺栓连接纵缝；
 - 4——波纹钢件拼装拱螺栓连接环缝；
 - 5——波纹钢板拱波峰、波谷处连接螺栓。

图 6 波纹钢板拱加劲肋板构造示意图（续）

6.6.4.4 波纹钢管涵板拼装管加劲肋板，设置于波纹钢管顶纵轴线上，截面长度为圆心角 120° 扇形弧长，呈扇形组合截面，见图 7 分图 a)；沿波纹钢管顶纵轴线每间隔 3 个波距设置，见图 7 分图 b)。



a) 波纹钢管加劲肋板截面构造



b) 波纹钢加劲肋板纵向构造（波峰对波峰连接）

- 标引序号说明：
- 1——波纹钢管（拱）主体结构；
 - 2——波纹钢加劲肋板。

图 7 波纹钢管顶加劲肋板构造示意图

6.6.5 结构性回填范围、最小厚度及隔水层

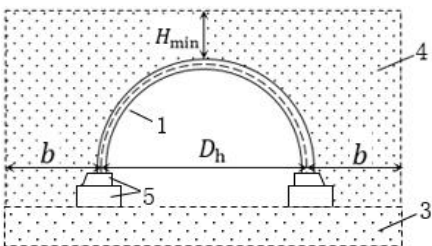
6.6.5.1 波纹钢管（拱）侧的结构性回填范围应符合下列规定：

- a) 波纹钢管(拱)侧地基以上的结构性回填最小宽度(纵路线向)范围、并列双管（拱）或多管（拱）之间的结构性回填最小宽度见表 15、图 8；
- b) 波纹钢管（拱）地基以上的结构性回填长度（横路基向）范围，与路基边坡坡脚宽度（包括路基边坡侧墙或护坡等）相同。

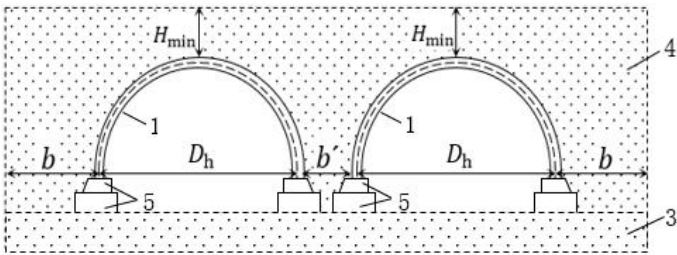
表 15 结构性回填最小宽度

单位为米

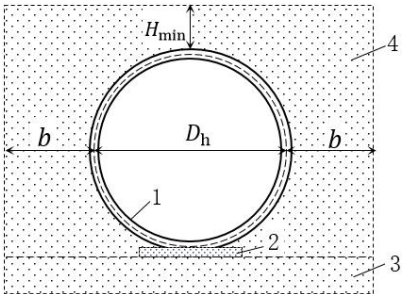
波纹钢桥涵 计算跨径（直径） D_h	管（拱）外侧结构性回填最小宽度		计算跨径（直径）+结构性回填最小宽度		
	b	b'	单孔（跨）结构	双孔（跨）结构	三孔（跨）结构
$D_h \leq 1.0$	$1.5 D_h$	0.5	$2b + D_h$	$2b + 2D_h + b'$	$2b + 3D_h + 2b'$
$1.0 < D_h \leq 2.0$	$1.0 D_h$	$0.5 D_h$			
$2.0 < D_h \leq 10.0$	$0.5 D_h$	1.0			
$D_h > 10.0$	$0.5 D_h$	$0.1 D_h$			



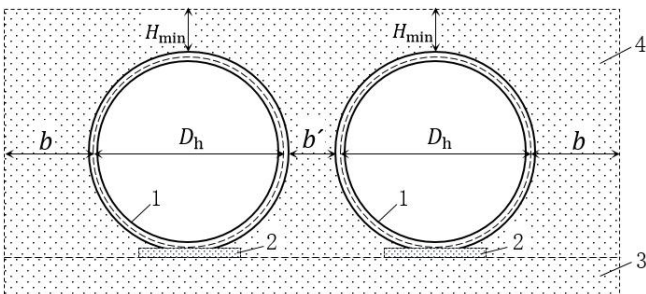
a) 波纹钢板拱桥单孔（跨）结构



b) 波纹钢板拱桥双（多）孔（跨）结构



c) 波纹钢管涵洞单管（孔）结构



d) 波纹钢管涵洞双（多）管（孔）结构

标引序号说明：

- 1 ——波纹钢管（拱）主体结构；
- 2 ——管基松铺砂砾垫层；
- 3 ——地基宽度范围；
- 4 ——结构性回填范围区；
- 5 ——钢筋混凝土基础（下部结构）、拱座；

D_h ——计算跨径（波纹中性轴处计算）；

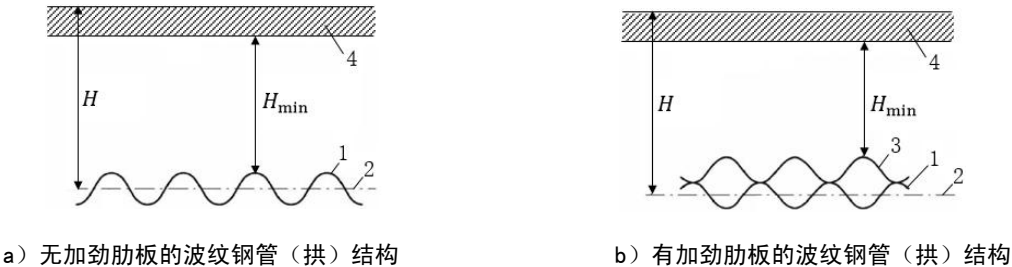
H_{min} ——管（拱）顶（波纹中轴线处）以上结构性回填最小填土厚度（不含路面结构层）；

b ——结构性回填最小宽度范围区；

b' ——多孔（跨）之间最小净距。

图 8 波纹管（拱）两侧结构性回填范围示意图

- 6.6.5.2 波纹管（拱）顶以上的结构性回填最小厚度应符合下列规定：
- a) 波纹管（拱）顶波峰以上（见图 9）的结构性回填最小厚度，除波纹钢箱形拱结构外，按公式(1)中的两个公式计算取最大值、且不小于 0.60 m；对于 400×150 波形的波纹钢拼装管（拱）结构，最小填土厚度为公式（1）计算的最大值与 1.50 m 比较，两者取较小值；
 - b) 波纹钢箱形拱顶波峰以上结构性回填最小填土厚度不小于 0.45 m、最大填土厚度不大于 1.50 mm（不含路面结构层），并进行有限元分析（见 6.7.3.7）；
 - c) 波纹钢板箱形拱依赖自身抗弯承载能力承担外荷载，若箱形拱顶以上填土厚度（不含路面结构层）超过 1.50 m 时，按 6.5.2.3 设置墩（台）身至拱顶以上填土厚度限值符合要求；
 - d) 当波纹管（拱）顶以上结构性回填最小厚度不足或受限时，设置减载板（见 6.6.6），并满足设置减载板后的最小填土厚度。



标引序号说明：

- 1 ——波纹管（拱）主体结构；
 - 2 ——波纹管（拱）的波纹剖面中性轴；
 - 3 ——波纹钢加劲肋板；
 - 4 ——结构性回填最小厚度以上的筑层厚度；
- H ——波纹管（拱）顶以上填筑总厚度（含路基填筑层和路面结构层）；
- H_{min} ——波纹管（拱）顶结构性回填最小厚度（不含路面结构层厚度）。

图 9 波纹管顶以上结构性回填最小厚度示意图

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

式中：

- H_{min} ——波纹管（拱）顶以上结构性回填最小厚度（不含路面结构层厚度），单位为米（m）；
- $\max$ ——计算结果取最大值，单位为米（m）；
- D_h ——波纹管（拱）计算科技或计算直径，单位为米（m），按图2 界限取值；
- D_v ——波纹管（拱）计算矢高，单位为米（m），按图2 界限取值。

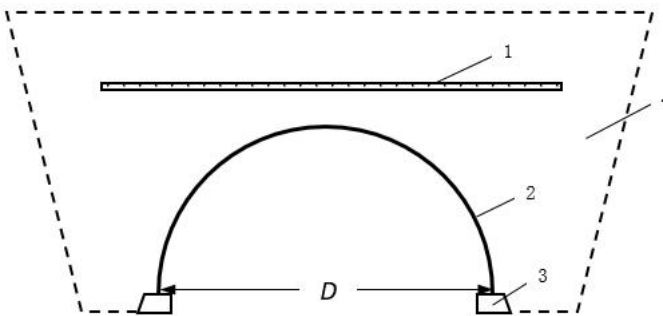
- 6.6.5.3 波纹管（拱）侧结构性回填范围内和管（拱）顶以上结构性回填最小厚度的分层压实度不应小于 96%。
- 6.6.5.4 结构性回填设计应与洞口构造、边坡侧墙或“削竹式”洞口（见 6.6.7）等相衔接。
- 6.6.5.5 强腐蚀性环境（见 6.9.1.3）和非干旱地区路段的结构性回填层中，应设置一层高密度聚乙烯土工膜隔水层。隔水层设置尺寸及部位应符合下列规定：
- a) 厚度不小于 2 mm、宽度不小于路基宽度（或至路基边坡挡墙内侧）、沿路线方向长度延伸到端孔外侧起拱线外部小于 2 m；
 - b) 波纹管（拱）顶上结构性回填压实层约 30 cm 厚的顶面；

- c) 钢筋混凝土减载板底部的回填层顶面；
- d) 波纹钢板减载板上不大于 15 cm 厚的回填层顶面。

6.6.6 减载板构造

6.6.6.1 符合下列情况时，应在管（拱）顶的结构性回填层中设置钢筋混凝土减载板或波纹钢板减载板（见图 10）：

- a) 波纹钢桥涵管（拱）顶部以上的结构性回填厚度不满足计算厚度或路基顶面标高受限时；
- b) 波纹钢板拱桥跨径大于或等于 10.0 m、波纹钢管涵洞直径大于或等于 8.0 m 时。



标引序号说明：

- 1——减载板；
- 2——波纹钢管（拱）；
- 3——拱座；
- 4——结构性回填范围；
- D ——波纹钢管（拱）直径或跨径。

图 10 管（拱）顶的结构性回填层中减载板布置示意图

6.6.6.2 减载板宽度与减载板底面的结构性回填层同宽，长度（纵路线方向）应延伸到最外侧的波纹钢管（拱）起拱线外不小于 100 cm。

6.6.6.3 减载板底面与波纹钢管（拱）顶（波峰）上之间的最小净距应符合表 16 规定。

表 16 减载板底面与波纹钢管（拱）顶的最小净距

波纹钢类别	波距×波高或波深 ($p \times d$) /mm	跨径（孔径） D /mm	管（拱）顶至减载板底面 最小净距/mm
螺旋波纹钢管（圆管形）	68×13	500~2000	200
	75×25	1000~2500	250
环形波纹钢管（圆管形）	200×55	1500~3000	250
波纹钢板拼装管（圆管形或管拱形）	200×55	3000~5000	300
	400×150	5000~10000	300
波纹钢板拼装拱（圆弧拱或箱形拱）	400×150	5000~16000	300

6.6.6.4 钢筋混凝土减载板应符合下列规定：

- a) 混凝土强度等级不低于 C30；
- b) 参照 JTG D40 规定的圆形管状构造物上混凝土路面单层钢筋网布置和多孔结构之间的伸缩缝设置及传力杆钢筋布置；

c) 设置钢筋混凝土减载板的波纹钢管顶以上结构性回填最小厚度按公式（2）计算确定，并满足表 16 的最小净距要求。

$$H_{\min} = t_b R_{AL} R_C R_f \dots\dots\dots (1)$$

式中：
 t_c ——设置钢筋混凝土减载板后的结构性回填最小厚度，单位为毫米（mm）；
 t_b ——钢筋混凝土减载板最小厚度，单位为毫米（mm），按表17取值；
 R_{AL} ——轴向荷载修正系数，按表18取值；
 R_C ——混凝土强度修正系数，C30 混凝土取1.05、C40 混凝土取0.95；
 R_f ——结构跨径（直径）影响系数，取1.2。

表 17 钢筋混凝土减载板最小厚度

项目	不同孔径（直径）的钢筋混凝土减载板最小厚度			
波纹钢桥涵跨径（直径） D/m	$D\leq 3.0$	$3.0 < D \leq 5.0$	$5.0 < D \leq 8.0$	$D > 8.0$
钢筋混凝土减载板最小厚度 t_b/cm	18	20	22	25

表 18 轴向荷载修正系数 R_{AL}

等效单轴荷载/kN	R_{AL}	等效单轴荷载/kN	R_{AL}
80.0	0.750	96.0	0.815
120.0	0.914	142.3	1.005
160.0	1.031	175.0	1.060
177.9	1.065	200.0	1.107
240.0	1.183	250.0	1.202

6.6.6.5 波纹钢板减载板设置应符合下列规定：

- a) 波纹钢板采用平直板，波纹顺路线方向设置，减载板底面波峰与波纹钢管（拱）顶（波峰）的最小净距见 6.6.6.3；
- b) 波纹钢板减载板底面满铺松铺垫层，厚度为波深的 1.3~1.4 倍；
- c) 减载板的壁厚、波形和减载板上最小回填厚度见表 19；
- d) 减载板搭连接参照 6.6.3.4 规定。

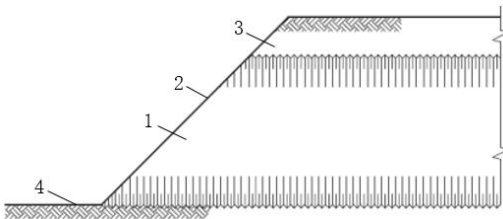
表 19 波纹钢板减载板壁厚、波形及板上最小回填厚度

单位为毫米

波纹钢类别及波距×波高或波深 $p \times d$		标准跨径 （孔径） D	波纹钢板减载板		减载板上结构性回 填最小厚度
			壁厚	波距×波高 $p \times d$	
螺旋波纹钢管（圆管形）	68×13、75×25	500~2500	4~5	200×55	≥300
环形波纹钢管（圆管形）	200×55	1500~3000			
波纹钢板拼装管 （圆管形或管拱形）	200×55	3000~5000	6~7	400×150	≥400
	400×150	5000~10000	7~10		≥700
波纹钢板拼装圆弧拱	400×150	5000~16000	8~12		≥1000
波纹钢板拼装箱形拱	400×150	5000~16000	8~12	400×150	≥450

6.6.7 洞口构造

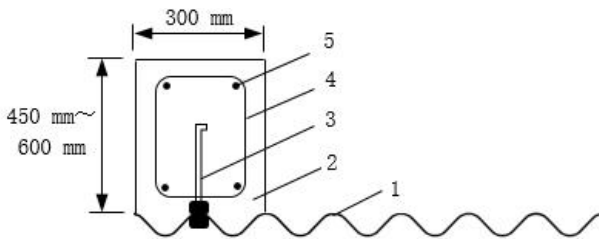
- 6.6.7.1 用八字墙式、一字墙式（端墙、侧墙）、挡墙式等，可参照 JTG/T 3365-02 设置。
- 6.6.7.2 波纹钢管（拱）洞口应根据路基高度、回填土体压力、结构安全性、环境条件、景观、施工便捷等因素，可参照 JTG/T 3365-02 设置八字墙式、一字墙式（端墙、侧墙）、挡墙式等，参照 JTG D30 采用有面板（预制块砌体）加筋土挡墙、钢筋混凝土挡墙、片石混凝土挡墙、浆砌片（块）石挡墙等；也可采用波纹钢板加筋土挡墙结构形式（参照有面板加筋土挡墙设计）。
- 6.6.7.3 波纹钢管（拱）两端也可采用“削竹式”洞口（见图 11），管（拱）口的坡度与路基边坡坡度相同，管（拱）口周围路基边坡的坡面可采用铺砌或混凝土预制块网格等防护。



- 标引序号说明：
- 1——波纹钢管涵洞主体结构；
 - 2——“削竹式”洞口；
 - 3——结构性回填层；
 - 4——洞口地面。

图 11 波纹钢管涵洞“削竹式”洞口示意图

- 6.6.7.4 “削竹式”的洞口管（拱）缘宜采用钢筋混凝土加强圈（细部构造见图 12），强度等级不低于 C30。并符合下列规定：
- a) 波纹钢涵洞加强圈宜设置在起拱线以上，波纹钢板拱洞口拱缘在拱脚以上设置；
 - b) 波纹钢管涵洞直径小于或等于 4.0 m 时，洞口管缘预置 M16 螺栓，加强圈高度为 450 mm；波纹钢管涵洞直径大于 4.0 m 时和波纹钢板拱桥，洞口管（拱）缘预置 M20 螺栓，加强圈高度宜为 600 mm；
 - c) 直径 8 mm 光圆钢筋（箍筋）间距和预置螺栓间距为 450 mm，箍筋与预置螺栓绑扎连接；
 - d) 钢筋保护层厚度为 50 mm。



- 标引序号说明：
- 1——波纹钢管结构；
 - 2——水泥混凝土；
 - 3——预置 M26 或 M20 螺栓；
 - 4——直径 8 mm 光圆钢筋（箍筋）；
 - 5——N16 带肋钢筋。

图 12 波纹钢管（拱）洞口钢筋混凝土加强圈示意图

6.7 主体结构设计

6.7.1 一般规定

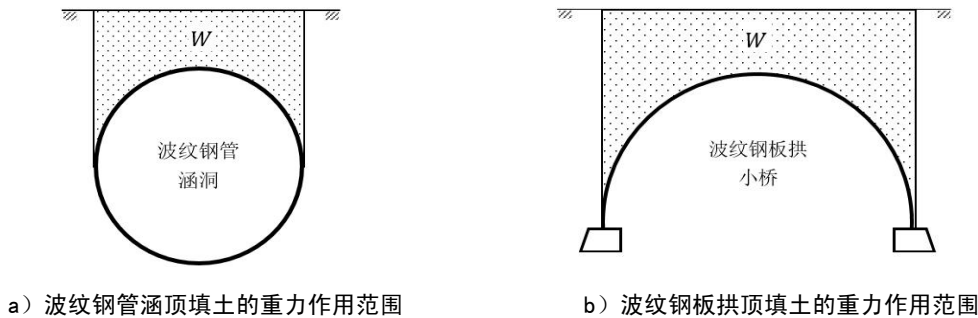
6.7.1.1 波纹钢管（拱）桥涵主体结构按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行设计。按承载能力极限状态设计时，对持久设计状况和短暂设计状况应采用作用的基本组合，对地震设计状况应采用作用的地震组合；按正常使用极限状态设计时，根据不同的设计要求，采用作用的频遇组合或准永久组合。作用的组合方法按 JTG D60 规定确定。

6.7.1.2 设计应考虑永久作用、可变作用和地震作用。永久作用主要为波纹钢管（拱）上回填后产生的作用，可变作用主要为车辆荷载和施工设备（车辆）等临时荷载。

6.7.2 作用（荷载）

6.7.2.1 恒载（回填土的重力）：

作用在波纹钢管（拱）上的结构性回填土体（恒载 W ）作用范围见图 13，每延米的重力按公式（3）计算。



标引符号说明：

W ——波纹钢管（拱）上填土每延米重力的范围。

图 13 波纹钢桥涵结构上部填土的重力作用范围示意图

$$W = \gamma \cdot D_h \cdot (H + 0.1075 D_v) \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- W ——波纹钢管（拱）上填土每延米的重力，单位为千牛每米（kN/m）；
- γ ——回填土的容重，单位为千牛每立方米（kN/m³）；
- D_h ——波纹钢管（拱）计算直径或计算跨径，单位为米（m），按图2界限取值；
- H ——波纹钢管（拱）顶填土高度，以波纹钢的波纹中轴线以上计算，单位为米（m）；
- D_v ——波纹钢管（拱）计算矢高，单位为米（m），按图2界限取值。

6.7.2.2 汽车荷载：

- a) 公路波纹钢桥涵上的汽车荷载采用车辆荷载图式；
- b) 汽车荷载的扩散方法和多车道折减系数参考 JTG D60 规定，扩散压力按公式（4）计算；
- c) 车辆冲击系数按公式（5）计算。拱顶以上填土厚度大于 2.0 m 时，可不考虑冲击影响。

$$\sigma_L = \frac{A_L}{l_t \cdot W} \cdot m_f \dots\dots\dots (2)$$

$$\mu = 0.4(1.0 - 0.5H) \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- σ_L ——汽车荷载扩散到波纹钢管（拱）顶的压力，单位为千帕（kPa）；
- A_L ——跨径长度范围内布置的设计车辆荷载总轴重，单位为千牛（kN），参考JTG D60取值，并考虑车道数。施工过程中的计算，按实际施工机械及施工车辆总轴重验算；
- m_f ——多车道折减系数，参考JTG D60 取值；
- l_t 、 W ——沿车轮长度和宽度方向扩散后尺寸，单位为米（m）。活载扩散方法参考 JTG D60 规定，车轮按其着地面积的边缘向下作 30° 角分布。当几个车轮的压力扩散线相重叠时，扩散面积以最外边的扩散线为准。车辆荷载扩散见图14；
- μ ——车辆冲击扩大系数；
- H ——波纹钢管顶（拱）填土高度，以波纹管的波纹中轴线以上计算，单位为米（m）。

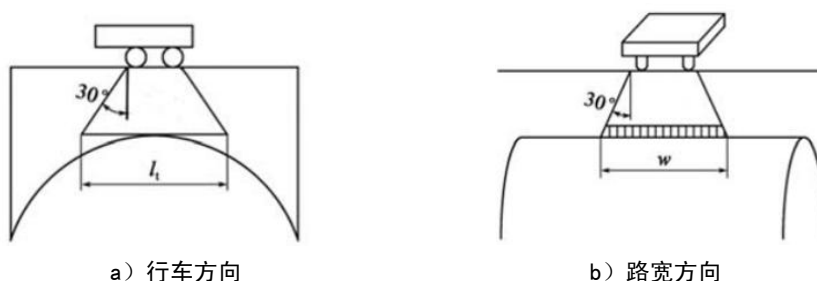


图 14 车辆荷载扩散示意图

6.7.2.3 施工过程中荷载：

- a) 施工过程中应按实际的荷载状态考虑。施工荷载是永久和其他仅在施工期间作用于结构的荷载，包括施工设备重力荷载和通过临时支撑附加到结构上的荷载；
- b) 在施工过程中，用于结构和附加设备重力的荷载系数不小于 1.25；除特殊要求外，施工荷载的放大系数不小于 1.5。

6.7.2.4 地震作用：

- a) 抗震设防烈度大于或等于 7 度的地区，波纹钢管（拱）结构应考虑地震作用并进行抗震设计。一般只考虑竖向地震作用，按公式（6）计算；
- b) 对于波距 400 mm、波深 150 mm 波形的波纹钢管（拱）结构，应考虑竖向地震作用对恒载弯矩的放大作用。由地震作用产生的附加弯矩按公式（7）计算。

$$N_E = 0.5 \frac{R_0 \delta}{g} W \dots\dots\dots (1)$$

$$M_E = \frac{R_0 \delta}{g} M_G \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- N_E ——竖向地震作用引起的波纹钢管（拱）压力，单位为千牛每米（kN/m）；
- R_0 ——竖向地震作用与水平地震作用比值函数，取 0.65；
- δ ——地震动水平加速度峰值，参照 JTG/T 2231 取值；
- g ——重力加速度，单位为米每平方秒（ m/s^2 ），取 9.80665；
- W ——波纹钢管（拱）上填土每延米的重力，单位为千牛每米（kN/m），按公式（3）计算；
- M_E ——竖向地震作用引起的波纹钢管（拱）结构跨中截面附加弯矩，单位为千牛米每米（ $kN \cdot m/m$ ）；

M_G ——恒载作用下波纹钢管（拱）跨中截面弯矩，单位为千牛米每米（ $\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}$ ），按 6.7.3.3 计算。

6.7.3 结构设计计算

6.7.3.1 波纹钢管（板）应力计算：

- a) 当不考虑地震作用时，波纹钢管（拱）的轴向压应力应满足公式（8）的要求；
- b) 当考虑地震作用时，波纹钢管（拱）的轴向压应力满足公式（9）的要求。

$$\gamma_0[\gamma_G N_G + \gamma_Q N_Q(1 + \mu)]/A < \min(f_y, f_b) \dots\dots\dots (1)$$

$$\gamma_0(\gamma_G N_G + \gamma_E N_E)/A < \min(f_y, f_b) \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- γ_0 ——结构重要性系数，设计安全等级为二级时取1.0、三级时取0.9；
- γ_G ——永久作用分项系数，取1.2；
- N_G ——土的重力引起的波纹钢管（拱）压力，单位为千牛每米（ kN/m ）， $N_G = 0.5(1.0 - 0.1C_S)A_f W$ ；
- γ_Q ——可变作用分项系数，取1.4；
- N_Q ——车辆荷载引起的波纹钢管（拱）压力，单位为千牛每米（ kN/m ）， $N_Q = 0.5D_h \sigma_L$ ；
- μ ——车辆活载冲击系数，按公式（5）计算；
- A ——波纹钢板材单位长度截面积，单位为平方毫米每毫米（ mm^2/mm ）；
- f_y ——波纹钢板材料屈服应力（强度设计值），单位为兆帕（ MPa ），参照 GB 50017取值；
- f_b ——波纹钢板屈曲临界应力，单位为兆帕（ MPa ），按公式（11）计算；
- γ_E ——地震作用分项系数，取1.0；
- N_E ——竖向地震作用引起的波纹钢管（拱）压力，单位为千牛每米（ kN/m ），按公式（6）计算；
- C_S ——回填土性质与结构尺寸的土压力折减系数， $C_S = \frac{1000E_S D_V}{EA}$ ；
- A_f ——结构起拱效应的土压力增大系数；按表20取值；
- W ——波纹钢管（拱）上填土每延米的重力，单位为千牛每米（ kN/m ），按公式（3）计算；
- D_h ——波纹钢管（拱）计算直径或计算跨径，单位为米（ m ），按图2界限取值；
- σ_L ——活载扩散到波纹钢管（拱）顶的压力，单位为千帕（ kPa ），按公式（4）计算；
- E_S ——结构性回填土的弹性模量，单位为兆帕（ MPa ）；
- D_V ——波纹钢管（拱）计算矢高，单位为米（ m ），按图2界限取值；
- E ——波纹钢板材的弹性模量，单位为兆帕（ MPa ）。

表 20 土压力增大系数 A_f

H/D_h	A_f			
	$D_h/D_V=1.0$	$D_h/D_V=1.2$	$D_h/D_V=1.4$	$D_h/D_V \geq 1.6$
≤ 0.2	1.28	1.20	1.15	1.10
0.4	1.23	1.15	1.10	1.05
0.6	1.20	1.12	1.07	1.04
0.8	1.19	1.11	1.06	1.03
1.0	1.19	1.10	1.05	1.02
1.2	1.20	1.12	1.07	1.02
1.4	1.22	1.15	1.08	1.02

H/D_h	A_f			
1.6	1.24	1.17	1.08	1.02
1.8	1.25	1.18	1.08	1.02
2.0	1.25	1.18	1.08	1.02

表 20 土压力增大系数 A_f （续）

H/D_h	A_f			
	$D_h/D_V=1.0$	$D_h/D_V=1.2$	$D_h/D_V=1.4$	$D_h/D_V\geq 1.6$
3.0	1.25	1.18	1.08	1.02
>3.0	1.20	1.10	1.05	1.02

注： H/D_h 和 D_h/D_V 不能通过查表得到时，通过线性内差取值。

6.7.3.2 极限抗力（屈曲）计算：

- a) 通过波纹钢管（拱）结构顶部圆弧圆心与竖向中心线形成夹角 θ_0 （rad）的两条对称直线将管（拱）壁划分上下两部分（见图 15），分别计算管（拱）壁抗压强度。 θ_0 按公式（10）计算；
- b) 为保证波纹钢管（拱）结构的稳定性，应按公式（11）计算屈曲临界应力。

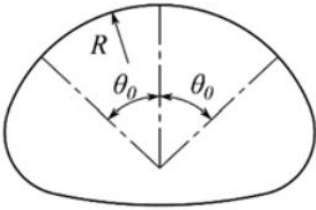


图 15 上下管壁划分示意图

$$\theta_0 = 1.6 + 0.2 \log \left(\frac{EI}{E_m R^3} \right) \dots\dots\dots (3)$$

$$\left. \begin{aligned} &\text{当 } R \leq R_e \text{ 时, } f_b = \phi_t F_m \left[f_y - \left\{ \frac{f_y^2}{12E\rho} \left(\frac{KR}{r} \right)^2 \right\} \right] \\ &\text{当 } R > R_e \text{ 时, } f_b = \frac{3\phi_t \rho F_m E}{(KR/r)^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

θ_0 ——通过管（拱）顶圆弧中心并与竖向中心线形成的夹角，单位为度（°）；

E ——波纹钢板材的弹性模量，单位为兆帕（MPa）；

I ——波纹钢板材截面惯性矩，单位为毫米四次方每毫米（mm⁴/mm），参照GB/T 34567取值；

E_m ——土体弹性模量的修正值，结构壁上半部分 $E_m = E_S \left[1.0 - \left(\frac{R_c}{R_c + 1000(H+H')} \right)^2 \right]$ ，结构壁侧面和下
半部分 $E_m = E_S$ ；

R ——结构的曲率半径，单位为毫米（mm）；

R_e ——等效曲率半径，单位为毫米（mm）， $R_e = \frac{r}{K} \left(\frac{6E\rho}{f_y} \right)^{0.5}$ ；

f_b ——波纹钢板屈曲临界应力，单位为兆帕（MPa）；

ϕ_t ——波纹钢材料抗力系数，取0.8；

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

f_y ——波纹钢板材屈服强度, 单位为兆帕 (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 ——波纹钢板材回转半径, 单位为毫米 (mm), 参照GB/T 34567取值;

E_s ——结构性回填土的弹性模量, 单位为兆帕 (MPa);

R_c ——波纹钢管 (拱) 顶处的曲率半径, 单位为毫米 (mm);

H ——波纹钢管 (拱) 顶填土高度, 以波纹管的波纹中轴线以上计算, 单位为米 (m);

H' ——波纹钢管 (拱) 顶与起拱线之间垂直距离的一半, 单位为米 (m);

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

S ——双孔或多孔结构之间的最小间距, 单位为米 (m);

D_h ——波纹钢管 (拱) 计算直径或计算跨径, 单位为米 (m), 按图 2 界限取值;

λ ——计算 K 值的一个系数, $\lambda = 1.22 \left[1.0 + 1.6 \left(\frac{EI}{E_m R_c^3} \right)^{0.25} \right]$ 。

6.7.3.3 弯矩和轴力组合效应:

- 波纹钢管 (拱) 弯矩和轴力的组合效应应满足公式 (12) 的要求。对于波距 400 mm、波深 150 mm 波形的波纹钢管 (拱) 结构, 弯矩和轴力的组合效应应小于截面乘系数的塑形抗弯承载力。
- 弯矩和轴力组合效应计算应用的参数 (k_{M1} 、 k_{M2} 、 k_{M3} 、 R_B), 应根据波纹钢管 (板) 柔度系数 N_f 计算确定 (见附录 B)。

$$\left(\frac{N}{N_{pf}} \right)^2 + \left| \frac{M_f}{M_{pf}} \right| \leq 1.0 \quad (5)$$

式中:

N ——波纹钢截面所受轴向压力, 单位为千牛每米 (kN/m), 当考虑地震作用时、 $N = \gamma_G N_G + \gamma_E N_E$;
当不考虑地震作用时、 $N = \gamma_G N_G + \gamma_Q N_Q (1 + \mu)$;

N_{pf} ——波纹钢管 (拱) 截面塑性抵抗系数的设计压力, 单位为千牛每米 (kN/m), $N_{pf} = \phi_h A f_y$;

M_f ——荷载组合时的波纹钢结构跨中截面弯矩, 单位为千牛米每米 (kN·m/m)。当考虑地震作用

时, $M_f = \gamma_G M_G + \gamma_E M_E$; 当不考虑地震作用时, $M_f = \gamma_G M_G + \gamma_Q M_L (1 + \mu)$;

M_{pf} ——波纹钢管 (拱) 截面塑性抵抗系数设计弯矩, 单位为千牛米每米 (kN·m/m), $M_{pf} = \phi_h M_p$;

γ_G ——永久作用 (填土推力) 分项系数, 取 1.2;

N_G ——土的重力引起的波纹钢管 (拱) 压力, 单位为千牛每米 (kN/m), $N_G = 0.5(1.0 - 0.1C_s) A_f W$;

γ_E ——地震作用分项系数, 取 1.0;

N_E ——竖向地震作用引起的波纹钢管 (拱) 压力, 单位为千牛每米 (kN/m), 按公式 (6) 计算;

γ_Q ——可变作用分项系数, 取 1.4;

N_Q ——车辆荷载引起的波纹钢管 (拱) 压力, 单位为千牛每米 (kN/m), $N_Q = 0.5 D_h \sigma_L$;

μ ——车辆活载冲击系数, 按公式 (5) 计算;

ϕ_h ——波纹钢板材抵抗塑性铰的抗力系数, 取 0.7;

A ——波纹钢板材单位长度截面积, 单位为平方毫米每毫米 (mm²/mm);

f_y ——波纹钢板材屈服强度, 单位为兆帕 (MPa);

M_G ——恒载作用下波纹钢管 (拱) 跨中截面弯矩, 单位为千牛米每米 (kN·m/m), $M_G = |M_1 + M_{DH}|$;

M_E ——竖向地震作用引起的波纹钢管 (拱) 结构跨中截面的附加弯矩, 单位为千牛米每米 (kN·m/m),

按公式 (7) 计算:

M_L ——活载作用下波纹钢管 (拱) 跨中截面弯矩, 单位为千牛米每米 ($\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}$), $M_L = \frac{k_{M3} R_U D_h A_L}{k_4}$;

M_p ——考虑材料极限抗拉强度时截面能承受的最大弯矩, 单位为千牛米每米 ($\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}$),

$$M_p = \frac{2I}{d+t} f_f;$$

M_1 ——在回填至管 (拱) 顶之前的土体引起波纹钢管 (拱) 结构跨中截面产生的弯矩, 单位为千牛米每米 ($\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}$), $M_1 = k_{M1} R_B \gamma D_h^3$;

R_U ——计算系数, $R_U = \frac{0.265-0.053 \cdot \lg N_f}{(H/D_h)^{0.75}}$;

M_{DH} ——管 (拱) 上填土部分引起波纹钢管 (拱) 结构跨中截面产生的弯矩, 单位为千牛米每米 ($\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}$), 当 $H < \frac{D_h}{2}$ 时、 $M_{DH} = -k_{M2} R_B \gamma D_h^2 H$; 当 $H \geq \frac{D_h}{2}$ 时, M_{DH} 采用有限元数值模拟

方法计算;

D_h ——波纹钢管 (拱) 计算直径或计算跨径, 单位为米 (m), 按图 2 界限取值;

A_L ——车辆荷载后轴轴重, 单位为千牛 (kN), 参照 JTG D60 取值;

k_4 ——等效线性荷载参数, 按表 21 取值;

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

d ——波纹钢管 (拱) 的波高或波深, 单位为毫米 (mm);

t ——波纹钢管 (拱) 壁厚 (不含镀锌等防腐层厚度), 单位为毫米 (mm);

f_f ——波纹钢材料极限抗拉强度, 单位为兆帕 (MPa);

γ ——回填土的重度, 单位为千牛每立方米 (kN/m^3), 参照 JTG D60 取值;

H ——波纹钢管 (拱) 顶填土高度, 以波纹钢管 (拱) 的波纹中轴线以上计算, 单位为米 (m);

D_v ——波纹钢管 (拱) 计算矢高, 单位为米 (m), 按图 2 界限取值。

E_s ——结构性回填土的弹性模量, 单位为兆帕 (MPa);

E ——波纹钢板材的弹性模量, 单位为兆帕 (MPa)。

表 21 等效线性荷载参数 k_4

波纹钢管 (拱) 顶 回填厚度	k_4		
	每轴双轮 (单轴两轮)	每轴四轮 (单轴四轮、 双轴每轴两轮)	每轴八轮 (双轴每轴四轮、 三轴每轴两轮或四轮、履带车)
0.6	1.6	2.0	2.8
0.9	2.1	2.7	3.2
1.5	3.7	3.8	4.1
2.1	4.4	4.4	4.5
3.0	4.9	4.9	4.9
4.5	6.6	6.6	6.6
6.0	8.4	8.4	8.4
9.0	12.0	12.0	12.0

6.7.3.4 施工过程结构刚度及内力组合:

- 波纹钢管 (板) 运输和安装施工过程中的柔度, 按公式 (13) 校核计算;
- 施工过程中波纹钢桥涵结构截面弯矩与轴向压力的内力组合应满足公式 (14) 的要求;

c) 施工过程结构刚度及内力组合计算应用的参数 (k_{M2} 、 k_{M3} 、 R_B)，应根据波纹钢管 (板) 柔度系数 N_f 计算确定 (见附录 B)。

$$F_f = \frac{D^2}{EI} \leq F_{f, \max} \dots\dots\dots (6)$$

$$\left(\frac{N}{N_{pf}}\right)^2 + \left|\frac{M}{M_{pf}}\right| \leq 1.0 \dots\dots\dots (7)$$

式中：

F_f ——波纹钢管 (板) 柔度，单位为毫米每牛 (mm/N)；

D ——波纹钢管 (拱) 结构的孔径或跨径，单位为毫米 (mm)；

E ——波纹钢板材的弹性模量，单位为兆帕 (MPa)；

I ——波纹钢板材的截面惯性矩，单位为毫米四次方每毫米 (mm⁴/mm)，参照 GB/T 34567 取值；

$F_{f, \max}$ ——波纹钢管 (板) 的最大柔度见表22，单位为毫米每牛 (mm/N)；

N ——波纹钢管 (拱) 截面所受轴向压力，单位为千牛每米 (kN/m)， $N = N_G + N_Q$ ，当 $H_C/D_h < 0.2$ 时， $N = 0$ ；

N_{pf} ——波纹钢管 (拱) 截面塑性抵抗系数设计压力，单位为千牛米每米 (kN/m)， $N_{pf} = \phi_h A f_y$ ；

M ——波纹钢管 (拱) 跨中截面所受弯矩，单位为千牛米每米 (kN·m/m)， $M = M_1 + M_B + M_C$ ；

M_{pf} ——波纹钢管 (拱) 截面塑性抵抗系数设计弯矩，单位为千牛米每米 (kN·m/m)， $M_{pf} = \phi_h M_p$ ；

N_G ——土的重力引起的波纹钢管 (拱) 压力，单位为千牛每米 (kN/m)， $N_G = 0.5(1.0 - 0.1C_S)A_f W$ ；

N_Q ——车辆荷载引起的波纹钢管 (拱) 压力，单位为千牛每米 (kN/m)， $N_Q = 0.5D_h \sigma_L$ ；

H_C ——施工过程中的填土高度，单位为米 (m)；

D_h ——波纹钢管 (拱) 计算直径或计算跨径，单位为米 (m)，按图 2 界限取值；

M_1 ——在回填至管 (拱) 顶之前的土体引起波纹钢管 (拱) 结构跨中截面产生的弯矩，单位为千牛米每米 (kN·m/m)， $M_1 = k_{M1} R_B \gamma D_h^3$ ；

M_B ——在施工过程中由超出管 (拱) 顶上填土部分引起波纹钢管 (拱) 结构跨中截面产生的弯矩，单位为千牛米每米 (kN·m/m)，为负值， $M_B = -k_{M2} R_B \gamma D_h^2 H_C$ ；

M_C ——施工过程中汽车荷载 (考虑施工机械荷载) 引起的波纹钢管 (拱) 结构跨中截面的弯矩，单位为千牛米每米 (kN·m/m)， $M_C = k_{M3} R_L D_h L_C$ ；

γ ——回填土的重度，单位为千牛每立方米 (kN/m³)；

R_L ——计算弯矩的参数， $R_L = (0.265 - 0.053 \cdot \lg N_f) / (H_C/D_h)^{0.75} \leq 1.0$ ；

L_C ——施工过程中作用于波纹钢管 (拱) 结构上汽车荷载 (考虑施工机械荷载) 的等效荷载值，单位为千牛每米 (kN/m)， $L_C = A_C/k_4$ ；

A_C ——施工过程中的车辆 (机械) 轴重，单位为千牛 (kN)；

k_4 ——等效线性荷载参数，按表 21 取值。

表 22 不同波形的波纹钢管 (板) 最大柔度 $F_{f, \max}$

波纹钢管波形参数 波距×波高或波深 $p \times d$	$F_{f, \max}$		
	筑堤法施工	管沟法施工	
68×13	0.245	$D < 1000 \text{ mm}$	0.245
68×13	0.245	$1000 \text{ mm} \leq D < 1500 \text{ mm}$	0.342
		$1500 \text{ mm} \leq D < 2000 \text{ mm}$	0.406
		$D \geq 2000 \text{ mm}$	0.457
75×25	0.247	0.343	

波纹钢管波形参数	$F_f, \max$
200×55	圆管形:0.114、管拱形:0.171
400×150	
注1: D 为波纹钢管直径。 注2: 当施工方法不确定为筑堤法或管沟法时, 按筑堤法取值。	

6.7.3.5 管拱形波纹钢管拱脚处极限状态压力:

管拱形 (见图 16) 的管拱脚处极限状态压力应满足公式 (15) 的要求。

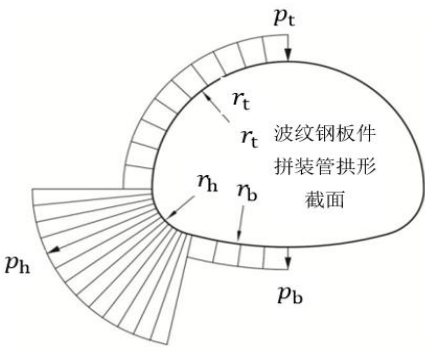
$$p_h = \frac{E_d}{A \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{r_t}{r_h} \leq p_u \dots\dots\dots (1)$$

式中:

p_h ——荷载在管拱形波纹钢结构拱脚处产生的压力, 单位为千帕 (kPa), 见图 16;
 E_d ——考虑结构上可能同时出现的作用, 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 (即最不利设计作用效应), 单位为千牛每米 (kN/m)。永久作用和可变作用组合:

$E_d = (\gamma_G W, \gamma_Q \sigma_L)$; 永久作用和地震作用组合: $E_d = (\gamma_G W, \gamma_E N_E)$;

- A ——波纹钢板材单位长度截面积, 单位为平方毫米每毫米 (mm²/mm);
- r_t ——管拱顶处的半径, 单位为毫米 (mm), 见图 16;
- r_h ——管拱的拱脚处半径, 单位为毫米 (mm), 见图 16;
- p_u ——管拱形波纹钢结构拱脚极限承载力 (见表 23), 单位为千帕 (kPa);
- γ_G ——永久作用分项系数, 取1.2;
- W ——波纹钢管 (拱) 上填土每延米的重力, 单位为千牛每米 (kN/m), 按公式 (3) 计算;
- γ_Q ——可变作用分项系数, 取1.4;
- σ_L ——汽车荷载扩散到波纹钢管顶的压力, 单位为千帕 (kPa), 按公式 (4) 计算;
- γ_E ——地震作用分项系数, 取 1.0;
- N_E ——竖向地震作用引起的波纹钢管压力, 单位为千牛每米 (kN/m), 按公式 (6) 计算。



标引符号说明:
 p_b ——管拱底部的压力;
 p_t ——管拱顶部的压力;
 p_h ——管拱脚处的压力。

图 16 压力绕管拱形状的变化示意图

表 23 管拱形的拱脚处极限承载力

拱脚处的回填材料	结构性回填土	均匀的粗碎石（≤50 mm）	砂砾/碎石（3 %~6 %）
管拱脚处极限承载力 p_u /kPa	450	900	1350

6.7.3.6 波纹钢板拼装管（拱）高强度螺栓连接强度及扭矩设计计算应符合下列规定：

- 波纹钢板拼装管采用高强度螺栓承压型连接。当波纹钢板镀锌层表面摩擦力和接缝连接叠合的波纹板件在波峰、波谷处的缝隙能满足摩擦型连接要求时，可采用摩擦型连接；
- 高强度螺栓承压型连接的抗剪强度主要由螺栓杆受剪和波纹钢板螺栓孔壁承压两种破坏模式控制，分别计算每个高强度螺栓的受拉承载力设计值、受剪承载力和承压承载力设计值，并满足同时承受剪力和杆轴方向拉力的承载力，计算满足 JGJ 82 的要求；
- 高强度螺栓摩擦型连接，分别计算每个高强度螺栓的受剪承载力设计值、受拉承载力设计值，并满足同时承受剪力和外拉力承载力，计算满足 JGJ 82 的要求；
- 高强度螺栓终拧扭矩，根据 JGJ 82 规定计算确定。

6.7.3.7 有限元分析建模应符合下列规定。

a) 二维建模宜遵循下列要点：

- 几何模型：波纹钢管（拱）结构有限元分析建模重点为波纹钢管道内力及变形响应，可采用等效刚度法将其简化为二维有限元模型，首先计算波纹钢板截面的转动惯量 I_{CSP} 和面积 A_{CSP} ，根据抗弯刚度、抗压刚度和材料质量三个等效原则将波纹钢板截面等效成矩形截面，以梁单元模型进行数值分析；

由抗弯刚度等效得： $E_S I_{CSP} = E_{equ} I_{equ}$ ，

由抗压刚度等效得： $E_S A_{CSP} = E_{equ} A_{equ}$ ，

由单位长度材料质量等效得： $\rho_S A_{CSP} = E_{equ} \rho_{equ}$ ，

对于矩形截面，有 $A_{equ} = b d_{equ}$ ， $I_{equ} = b d_{equ}^3 / 12$ ， b 取 1，故有：

$$d_{equ} = \sqrt{\frac{12 I_{equ}}{A_{equ}}}, E_{equ} = \frac{12 E_S I_{CSP}}{d_{equ}^3} = \frac{E_S A_{CSP}}{d_{equ}}, \rho_{equ} = \frac{\rho_S A_{CSP}}{d_{equ}}$$

土体模型几何尺寸可参考 CANDE 建议，波纹钢管（拱）两侧土体宽度从主体结构最宽处起算，取不小于 $2.5 D_h$ ，模型下部土体可取不小于 1.5 倍矢高；

- 材料选择：主体结构设计过程暂不考虑波纹钢管塑性发展，可采用线弹性材料属性，土体材料选择综合考虑材料参数的繁简、参数获取的难易程度、计算效率，以及对土体力变行为较准确的模拟，可采用 Mohr-Coulomb 模型；
- 模型部件组合：主要为波纹钢管（拱）主体结构与土体的相互组合，大量计算结果表明，如无特殊情况，绑定边界可满足一般设计计算要求，特殊情况下（如特殊土质、波纹钢非常规表面处理等）应根据实际情况选择合理的接触边界形式；
- 单元选择及网格划分：土体宜采用四边形平面单元，波纹钢管（拱）采用二次 Timoshenko 梁单元或三次 Euler-Bernoulli 梁单元；
- 边界：模型的左、右边界应约束水平变形，允许竖向沉降；模型底边界约束两个方向变形。特殊工况时根据实际情况选用合理边界；
- 荷载：主要为重力荷载、运营荷载、施工荷载及压实效应。运营荷载换算建议参考加拿大规范（CHBDC）或美国规范（AASHTO），压实效应可采用被动土压法、土条挤压法等。采用被动土压法时，当填土超过管径最大处但在管顶以下时，在管两侧管径最大处附近对称施加均布被动土压力；当填土超过管顶后，在管两侧分别施加渐变被动土压力。

b) 三维建模宜遵循下列要点：

- 几何模型：覆土波纹钢管（拱）属于土-钢组合结构，土体同结构共同受力，形成稳定的承载结构，故在几何建模时应考虑足够尺寸的土体。宜沿涵宽方向取不小于 3 个波长建

模；对于土体模型，可对结构左右两侧各取不小于 2 倍跨径长度、结构下方取不小于 1.5 倍矢高；

- 2) 材料选择：模型部件组合，与二维建模相同；
- 3) 单元选择及网格划分：土体采用六面体单元；波纹钢管采用四边形壳单元；
- 4) 边界：三维模型在沿涵长方向一般取用 3~N 倍波纹长度建模，考虑该方向的结构对称性，一般在模型正剖面、背剖面施加对称边界；模型的左、右边界约束水平变形，允许竖向沉降；模型底边界约束三个方向变形。特殊工况需根据实际情况选用合理边界；
- 5) 荷载：一般情况下，模型考虑重力荷载、运营活载、施工荷载及压实效应，三维模型中车辆荷载参数取值可参考 JTG D60 规定。压实效应考虑方法可参照二维模型。

6.8 防渗设计

6.8.1 一般规定

6.8.1.1 应根据波纹钢结构特点、施工方法和使用条件等综合考虑波纹钢管（拱）接缝防渗设计，并应满足结构安全、耐久性（设计使用年限）和使用功能要求。

6.8.1.2 强腐蚀环境和非干旱地区路段的波纹钢管（拱）结构性回填层中，宜在管（拱）顶上结构性回填层约 30 cm 厚的顶面或减载板底部设置满铺一层厚度不小于 2.0 mm 的高密度聚乙烯土工膜隔水层。

6.8.2 接缝连接防渗

6.8.2.1 波纹钢接缝连接防渗密封垫应符合下列规定：

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

6.8.2.2 波纹钢板拼装管（拱）接缝连接防渗密封应符合下列规定：

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

6.8.2.3 波纹钢板拼装管（拱）连接缝处防渗（水）处理应符合下列规定：

- a) 管（拱）外壁外露螺栓、螺帽、钢垫片、防渗密封垫及周围缝隙，采用硅酮密封胶（SR 类）或双组分聚硫密封胶进行防渗处理；
- b) 管（拱）外壁接缝处（环缝、纵缝）涂装聚氨酯（MPU 类）防水涂层，厚度不小于 2 mm、纵缝涂层宽度不小于 120 mm、环缝涂层宽度不小于 80 mm；
- c) 聚氨酯（MPU 类）防水涂层表面，粘贴一层路桥用塑性体改性沥青防水卷材，平均厚度不小于 3.5 mm、最小厚度不小于 3.3 mm，纵缝粘贴宽度不小于 120 mm、环缝粘贴宽度不小于 80 mm。

6.8.2.4 分节整装螺旋波纹钢管接头管箍连接防渗应符合下列规定：

- a) 管箍内侧与管体端头外侧之间设置防渗密封垫；
- b) 管箍连接防渗密封垫的长度大于管体外周长（接头搭接不小于 5 cm）、宽度不小于管箍宽度；
- c) 管端头对合缝位于防渗密封垫和管箍宽度的 1/2 处。

6.8.2.5 分节整装环形波纹钢管接头法兰连接防渗密封应符合下列规定：

- a) 管端头两个法兰盘对接之间设置防渗密封垫，螺栓密封垫设置于钢垫片与法兰之间；
- b) 法兰连接密封垫的长度应闭合弧段周长、宽度不小于法兰对合面宽度；

c) 法兰连接的外露螺栓、螺帽、钢垫片及周围缝隙和法兰对接缝（内外圈），采用硅酮密封胶（SR 类）或双组分聚硫密封胶加强防渗处理。

6.9 防腐及防磨蚀设计

6.9.1 一般规定

- 6.9.1.1 应根据水文地质、土体腐蚀特性、结构特点、施工方法和使用条件等综合考虑波纹钢管（拱）及金属连接件防腐设计，并应满足结构安全、耐久性（设计使用年限）和使用功能要求。
- 6.9.1.2 波纹钢管（板）和金属连接件，均采用镀锌防腐加施工现场喷涂防腐层的双重防腐措施。
- 6.9.1.3 波纹钢管（拱）结构受周围土体长期作用下的腐蚀性等级指标见表 24，并通过测试确定，根据腐蚀性指标等级采取涂装防腐技术措施。

表 24 土体腐蚀性等级指标

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

- 6.9.1.4 波纹钢管（拱）位于强腐蚀性时，可按附录 A 规定的壁厚适当增加壁厚。
- 6.9.1.5 波纹钢管（拱）内壁需设防磨蚀时，通过勘察预测水流推移质磨蚀特征、预期流速等，根据水流推移质磨蚀指标等级（见表 25）采取防磨蚀措施。

表 25 波纹钢管（拱）内壁磨蚀指标等级

磨蚀等级	推移质的特征	预期流速/（m/s）
微磨蚀	流水中夹带砂土、砾等推移质体积约 $<5\%$	<1.0
弱磨蚀	流水中夹带少量砂、砾推移质体积约 $<20\%$	1.0~1.5
中度磨蚀	流水中夹带中等砂土、砾推移质体积约 $<40\%$	1.6~4.5
严重磨蚀	流水中夹带大量砂石土、砾和岩石推移质体积约 $\geq 40\%$	>4.5

6.9.2 镀层防腐

- 6.9.2.1 波纹钢管、波纹钢板（包括波纹钢加劲肋板、波纹钢减载板）、连接件（螺栓、螺母、钢垫片、法兰、管箍）等，均应采用工厂化热浸锌工艺镀锌防腐，镀锌防腐层厚度及质量，应符合 GB/T 34567 规定，不等边槽钢镀锌层厚度及质量应与波纹钢板相同。
- 6.9.2.2 采用其它防腐层（如热浸镀铝、锌铝镁、锌镁等）代替镀锌层时，其防腐性能应不低于 GB/T 34567 规定的热浸镀锌方法相应要求。

6.9.3 喷涂防腐

6.9.3.1 波纹钢管（拱）外壁和波纹钢板减载板（镀锌防腐层）与周围土体接触面的喷涂防腐应符合下列规定：

- a) 位于微腐蚀性环境时，可不考虑在镀锌防腐层表面喷涂防腐；
- b) 位于弱腐蚀性、中腐蚀性和强腐蚀性环境的喷涂防腐及总干膜平均厚度见表 26；
- c) 位于强腐蚀性环境时，采用厚度不小于 2.0 mm 的高密度聚乙烯土工膜包裹于波纹钢管或密贴于波纹钢拱喷涂防腐层表面加强防腐。

表 26 弱腐蚀性、中腐蚀性和强腐蚀性环境的喷涂防腐层

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

6.9.3.2 波纹钢涵管内壁（镀锌防腐层表面）喷涂防腐应符合下列规定：

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

6.9.3.3 波纹钢板拱内壁（镀锌防腐层表面）喷涂防腐应符合下列规定：

- a) 拱脚内壁部位干湿交替区域和 underwater 区域喷涂防腐见 6.9.3.2 b)；
- b) 拱肩、拱顶内壁喷涂防腐时，采用颜色与环境相协调的防腐漆喷涂，总干膜厚度不小于 100 μm；
- c) 可考虑后期养护重新涂装等措施。

6.9.4 管（拱）内壁防磨蚀

6.9.4.1 波纹钢管（拱）内壁需设防磨蚀层的部位，其镀锌层表面不设喷涂防腐层。

6.9.4.2 波纹钢管（拱）内壁（镀锌层表面）磨蚀部位的防磨蚀应符合下列规定：

- a) 微磨蚀时，仅镀锌防腐层可不考虑防磨蚀；
- b) 弱磨蚀时，镀锌防腐层表面喷涂层见 6.9.3.2 b)；
- c) 中度磨蚀时，管（拱）内壁最大流水面范围设置厚度不小于 2.0 mm 的聚合物涂层，或按 6.9.3.2 b) 水下区域涂装，可考虑后期养护重新涂装等维护措施；
- d) 严重磨蚀时，管（拱）内壁最大流水面范围，设置复合混凝土防冲刷层，强度等级不低于 C30、波峰上厚度不小于 50 mm，混凝土内布置直径 5 mm、间距 100 mm 热镀锌钢丝网，钢丝网保护层厚度不小于 25 mm；也可采用强度等级不低于 C30、波峰上厚度不小于 50 mm 的钢纤维（塑料纤维）复合混凝土防冲刷层。当防冲刷层不能满足设计使用年限或外界自然因素破坏等，并考虑后期养护重新铺装等维护措施；
- e) 波纹钢涵管下部埋置于地面以下时，管内底部至进出口面高度范围内采用厚度不小于 10 cm 的钢筋混凝土铺砌，强度等级不低于 C30。混凝土层下部与波纹钢管之间采用压实砂砾过渡层。

6.10 附属工程设计

- 6.10.1 波纹钢桥涵洞口铺砌、拱下铺砌等设计，应符合 JTG/T 3365-02 规定。
- 6.10.2 波纹钢桥涵洞口结构性回填范围内路肩式侧墙（挡墙）顶防护栏应符合 JTG/T D81 规定。
- 6.10.3 波纹钢桥涵洞口外需设置调治构造物（倒流坝、丁坝、截水沟、排水沟、急流槽、消力池、跌井、防堵栅栏、河床加固及防护等）时，应符合 JTG D30、JTG/T 3365-02 规定。

7 施工

7.1 基本规定

- 7.1.1 波纹钢桥涵道施工方案应根据施工现场位置的填挖条件、结构特点、施工工艺、安全、环保等因素确定。
- 7.1.2 危险性较大的工程，应按 JTG F90 规定制定专项施工方案。
- 7.1.3 特殊岩土地基（如：软土、岩石、多年冻土、盐渍土等地基）应进行现场核查，结合设计文件制定地基处理专项施工方案。
- 7.1.4 冬期、雨期（汛期）施工，安全环保施工，高海拔地区施工，应符合 JTG/T 3650 和 JTG F90 规定。
- 7.1.5 其他有关施工的基本要求应符合 JTG/T 3650 规定。

7.2 施工准备

- 7.2.1 施工前，应根据设计文件对波纹钢桥涵所处路段的地形、地质、水文、地面标高、平面位置及桩号等进行现场复查。
- 7.2.2 测试仪器、临建设施、安全防护及防汛设施等施工前的准备，应符合 JTG/T 3650 规定。
- 7.2.3 施工测量放样应符合设计文件和 JTG/T 3650 规定。
- 7.2.4 材料及构件试验检测、土工试验、混凝土和砂浆配合比试验验证等，应在施工前完成。
- 7.2.5 材料及构件进场应进行质量验收，进场检验合格的材料及构件数量，应满足施工进度计划需求。
- 7.2.6 材料及构件应按不同品种、规格、型号、用途分类标识，防变形、防磨损、防火、防污染等安全存储。
- 7.2.7 施工机械设备配置应满足施工进度需求，机械设备的功率、技术性能应满足最大荷载、作业条件、安装精度及安全生产要求，且经验收合格后使用。
- 7.2.8 应配备足够的高强度螺栓连接副施拧的扭矩扳手，所用扭矩扳手的扭矩误差不应超过使用扭矩值的 $\pm 5\%$ ，高强度螺栓扭矩检查所用扭矩扳手的误差不准许超过使用扭矩值的 $\pm 3\%$ 。施拧和检查用的扳手应在施工前进行检定和校正。

7.3 基坑开挖及地基处理

- 7.3.1 波纹钢桥涵基坑开挖、降排水（截排地表水、导排地下水）、边坡支（防）护等施工，除应符合 JTG/T 3650 和 JTG F90 规定。
- 7.3.2 地基（包括结构性回填范围地基和洞口构造物地基）的压实或换填处理，管拱形的拱脚处地基加固处理，应满足设计文件、JTG/T 3650 和 JTG F90 规定。
- 7.3.3 波纹钢管涵的非岩石地基的管基预拱度值应符合设计文件要求。预拱度为波纹钢管中心处结构底中部的的设计高程与连接洞口的直线计算的高程之差（涵洞中心高程应不高于进水口高程）。可将波纹钢管上游半段设置为接近水平，下游半段设置为比设计纵坡稍陡坡度形成预拱度。

7.4 波纹钢板拱桥基础及下部结构施工

7.4.1 波纹钢板拱桥混凝土扩大基础和进出口构造基础和下部实体墙式混凝土墩台、拱座等施工及质量，应符合设计文件、JTG/T 3650 和 8.3.2 规定。

7.4.2 拱座预埋件施工应符合下列规定：

- a) 钢筋混凝土拱座顶面预埋的不等边槽钢锚筋与槽钢底面焊接连接；
- b) 混凝土拱座横桥向应水平，横桥向中心线与拱座、拱脚不等边槽钢平行；
- c) 不等边槽钢长边位于拱脚外侧、短边位于拱脚内侧，槽钢预埋时的长边螺栓孔与波纹钢板拱脚外侧波峰中心线上的螺栓孔对应；
- d) 槽钢底面与波纹钢板拱脚切线垂直（见 6.6.3.5），箱形拱和矢高大于拱半径的圆弧拱拱脚槽钢安装向拱内倾斜的角度与设计相符，矢高与半径相等的圆弧拱的拱脚槽钢水平安装；
- e) 槽钢焊接符合 JTG/T 3650 规定。施工现场焊接后，对焊接处的镀锌层损坏部位，进行现场冷喷锌等防腐处理；
- f) 拱脚有后浇混凝土时，在槽钢两侧按设计文件预埋后浇混凝土钢筋。

7.5 波纹钢管涵基础及垫层施工

7.5.1 经处理合格的地基作为波纹钢管涵的管基，地基上松铺垫层厚度、宽度和长度应符合设计文件要求，厚度应均匀、预拱度与地基一致、表面平整，并能充分填充波谷或波深。

7.5.2 波纹钢管涵的洞口构造物基础、管口底部防水冲刷混凝土枕梁施工，应符合设计文件和 JTG/T 3650 规定。

7.5.3 波纹钢管涵基础及垫层施工质量，应分别符合 8.3.3 规定。

7.6 波纹钢安装

7.6.1 波纹钢桥涵（板拱和涵管）安装应考虑施工条件、安全作业、方便操作等因素。宜采用汽车吊、倒链等机械设备吊装作业，人工配合安装。

7.6.2 安装施工前，应对波纹钢板拱结构基础（下部结构）及拱座、波纹钢管涵地基、松铺垫层等检查验收合格，并进行准确测量放线和设置安装定位标志。

7.6.3 波纹钢运输及吊装应符合下列规定：

- a) 运输车辆具备牢固捆扎、防磨损设施；采用大直径管内套装小直径管、同规格板件层叠等方式运输时，采取捆绑、固定和防磨损措施；
- b) 采用小型吊机装卸时，吊装设备具备吊装作业的安全性能和满足吊装荷载能力等基本要求；
- c) 不应在管体上焊接或栓接吊耳作为吊点。可在管节长度的 1/4 处（两端）波谷内牢固捆绑用织物包裹钢丝绳吊装（装卸）；
- d) 吊装（装卸）过程中保持管体水平，吊索与管体之间的夹角不小于 45°。

7.6.4 波纹钢板拼装管（拱）安装及防渗应符合下列规定。

a) 波纹钢板安装：

- 1) 按照设计文件和生产厂家提供的波纹钢板编号标识图对应安装部位定位安装，确保拼装波纹钢板拱各部位的半径和波纹钢板的曲率一致；
- 2) 波纹钢板拼装管安装时，每一环向板从管的下游端口向上游端口延伸拼装安装，每一环向波纹钢板逐片向管顶呈台阶式拼装安装；
- 3) 波纹钢板拼装拱安装时，每一环向板从拱的上游端口向下游端口延伸拼装安装，每一环向波纹钢板拱脚座实到不等边槽钢底面上，且拱脚波峰上的连接螺栓孔与不等边槽钢长边螺栓孔对应，每一环向波纹钢板逐片向拱肩、拱顶呈台阶式拼装安装；

- 4) 波纹钢板拼装管（拱）安装过程中，通常以脚手架或临时支撑装置等方法维持螺栓终拧前管（拱）的截面设计形状；
 - 5) 拼装管（拱）环缝（板侧边）采用通缝连接、纵缝（板端头）与环缝采用“T”形缝连接安装（见图 3 分图 e）；环缝和纵缝螺栓孔对应一致，所有螺栓孔不准许扩孔安装；
 - 6) 每一环形的下游波纹钢板环缝搭接于上游板外侧面（外环搭内环）安装，拼装管（拱）内壁的环缝板侧边顺水流方向；
 - 7) 管顶面或拱顶拱肩、拱顶面设置有加劲肋板时的安装，采用与管（拱）体结构相同波形和壁厚的波纹钢板、利用（管）拱体接缝连接的高强度螺栓，在管（拱）体安装的同时，按照设计文件和生产厂家提供的安装说明书同步安装加劲肋板。
 - b) 接缝搭接面防渗密封垫安装：
 - 1) 防渗密封垫的厚度、尺寸、螺栓孔径符合设计文件规定；
 - 2) 不准许在密封垫上开挖螺栓孔以外的孔或扩大螺栓孔；
 - 3) 波纹钢板接缝搭接面之间单面可采用液体胶粘贴防渗密封垫，并与板的边缘齐平；螺栓钢垫片与板之间的防渗垫粘贴于板的螺栓孔周围并对齐螺栓孔；
 - 4) 密封垫粘贴严密、平整顺直、牢固；
 - 5) 板的波峰与波谷搭接面之间缝隙较大或“T”型缝处三块板接缝重叠搭接面等缝隙较大时，根据实际缝隙加贴不同厚度密封垫，并能紧密填充连接缝之间所有缝隙。
 - c) 高强度螺栓连接副安装：
 - 1) 波纹钢板拼装拱的拱脚、环缝和纵缝均采用高强度螺栓连接，螺栓规格与性能等级配套符合设计文件规定；不准许焊接连接；
 - 2) 板的拼装搭接接缝面对合后随即安装高强度螺栓连接副，螺帽和螺母与板的密封垫之间均对应波谷、波峰处安装凸凹形钢垫片，且螺母（螺栓丝扣端头）均位于管（拱）外侧；
 - 3) 高强度螺栓的安装、施拧按 JTG/T 3650 规定执行，并按设计文件规定或按 JTG/T 3650 规定计算的扭矩 $\pm 10\%$ 控制终拧扭矩。施拧超过扭矩要求的螺栓进行更换，不准许重复使用。
 - d) 拼装管（拱）体截面形状控制：
 - 1) 管（拱）体在分离脚手架或临时支撑条件下测定截面形状，以每一环波纹钢板连接螺栓初拧完成并成型拱状后，对管（拱）形截面形状进行检查与校正调整；
 - 2) 螺栓终拧合格后，再重复检查，并使管（拱）形截面形状与设计之差控制在 $\pm 1\%$ 以内，不符合时，拧开螺栓校正截面形状后重新调整安装。
 - e) 接缝防渗处理：
 - 1) 波纹钢板拼装管（拱）外壁的外露螺栓、螺帽及钢垫片周围缝隙处，硅酮密封胶（SR 类）或双组分聚硫密封胶防渗处理，按照产品说明书配比，并充分搅拌均匀；根据一次性的使用量确定配比量，配比后的密封胶未使用完或剩余时不准许下一次使用，作废弃处理；密封胶涂装及填缝饱满、厚度均匀；
 - 2) 波纹钢管（拱）外壁接缝（环缝、纵缝）处，聚氨酯防水（MPU 类）涂装防渗涂层厚度和宽度符合设计文件规定，填缝饱满、厚度均匀；
 - 3) 在聚氨酯防渗涂层表面粘贴路桥用塑性体改性沥青防水卷材时，厚度和宽度符合设计文件规定，粘贴平顺、严密。
 - f) 波纹钢板拼装管（拱）板件制作质量符合 8.3.4 规定、安装（防渗）质量符合 8.3.5 规定。
- 7.6.5 分节整装波纹钢管安装及防渗应符合下列规定。**
- a) 在结构性回填层上采用开挖管槽法松铺砂砾垫层安装波纹钢管时，地基上的结构性回填层回填至波纹钢管直径的 0.3~0.4 倍厚度时，测量涵管中轴线开挖管槽，槽的弧形与波纹钢管弧形一致，槽底（管基）预拱度符合设计文件规定，槽内松铺管基垫层上安装波纹钢管；

- b) 在平面管基上松铺砂砾垫层安装波纹钢管时，管基预拱度符合设计文件规定，测量放线涵管中轴线和垫层宽度与长度，在平面管基上松铺管基垫层安装波纹钢管。
- c) 分节整装螺旋波纹钢管的管箍连接安装：
 - 1) 管体两个端头对合缝位于密封垫宽度的 1/2 处；
 - 2) 管箍密封垫宽度、接头重叠搭接长度符合设计文件规定；
 - 3) 管箍与管体之间严密包裹防渗密封垫，安装时防止密封垫皱折或破损；
 - 4) 管体两个端头分别不少于 3 个波峰扣入管箍的波谷内，扣合管箍对合焊接件上安装高强度螺栓连接副，螺栓规格与性能等级配套符合设计文件规定，螺栓的安装及施拧符合 JTG/T 3650 规定。
- d) 分节整装环形波纹钢管法兰连接安装及防渗处理：
 - 1) 安装前，可在管体一端的法兰盘对合面上采用液体胶粘贴防渗密封垫；
 - 2) 防渗密封垫螺栓孔对应于法兰盘螺栓孔平整顺直安装；
 - 3) 法兰盘对合后安装高强度螺栓连接副，螺栓规格与性能等级配套符合设计文件规定，螺栓安装及施拧符合 JTG/T 3650 规定；
 - 4) 法兰连接的外露螺栓、螺帽、钢垫片及周围缝隙和法兰对接缝（内外圈），采用硅酮密封胶（SR 类）或双组分聚硫密封胶加强防渗处理见 7.6.4 e）。
- e) 分节整装波纹钢管制作质量符合 8.3.4 规定、安装（防渗）处理质量符合 8.3.5 规定。

7.7 防腐及防磨蚀施工

7.7.1 波纹钢管（拱）外壁和波纹钢板减载板与土体接触面的防腐喷涂施工应符合下列规定：

- a) 现场喷涂防腐施工前，对喷涂面的表面和接缝处进行清洁及干燥处理，并防止对镀锌层造成划痕或损伤；如局部镀锌层划损可冷喷锌修补，清洁干燥后 4 h 内完成喷涂施工；
- b) 根据波纹钢管（拱）和波纹钢板减载板结构特点和喷涂材料的性能等，确定喷涂工艺方法、喷涂顺序、多遍喷涂层间隔时间和喷涂环境温度等；
- c) 对双组分或多组分的喷涂材料，按产品说明书控制配制比例，配合比准确计量，并根据有效时间确定每次配制的用量。配制后、使用前充分搅拌均匀；
- d) 采用专用喷涂机械高压无气喷涂工艺，调整喷涂工艺参数且稳定后可大面积喷涂；
- e) 多遍喷涂时，前一遍和后一遍“纵横交叉”喷涂（后一遍喷涂宜垂直于前一遍喷涂方向）；
- f) 在已喷前一遍涂层干燥后 12 h 内进行后一遍喷涂或按产品说明书要求间隔时间喷涂；
- g) 每一遍连续喷涂、先后搭压（接槎）宽度不小于 100 mm，接槎应平整；
- h) 喷涂过程中随时检测涂层厚度，同一喷涂层的总干膜平均厚度均匀，每一层喷涂层应均匀完整、表面平整光滑、颜色一致；
- i) 遇雨雪天、大风沙、扬尘或气温低于 0℃时，不进行防腐喷涂施工。

7.7.2 强腐蚀性环境的波纹钢管（拱）外壁喷涂防腐层表面设有包裹高密度聚乙烯土工膜加强防腐时，采用人工将土工膜以“螺旋形”接缝搭接严密包裹于波纹钢管平台防腐层表面或密贴于波纹钢拱喷涂防腐层表面，土工膜紧密、平顺、无皱褶。

7.7.3 结构性回填完成后，波纹钢管（拱）内壁按设计文件进行防腐喷涂层和防磨蚀施工，并应符合下列规定：

- a) 防腐喷涂或防磨蚀施工前，对波纹钢管（拱）内壁镀锌层表面进行清洁处理，涂（铺）装施工过程中对波纹钢管（拱）和镀锌层加强保护，不应碰撞、划伤等；
- b) 波纹钢管（拱）内壁镀锌层表面（包括干湿交替区域和最高流水面长期淹没内壁区域），清理清洁后涂装的时间限定、涂装环境要求、涂料配制和使用时间、涂覆工艺等，参照 JT/T 722 规定喷涂，总干膜厚度符合设计文件规定；

- c) 波纹钢管（拱）内壁防磨蚀层施工，从管（拱）出口方向逐渐向进口方向涂（铺）装防磨蚀层，钢筋（钢丝）网和混凝土层施工符合设计文件和 JTG/T 3650 规定，混凝土防磨蚀层表面平整，进出口处标高与涵洞内的混凝土防磨蚀层衔接平顺、不积水；保湿保温养护不少于 7 d。

7.7.4 波纹钢管（拱）防腐及防磨蚀施工质量应符合 8.3.6 规定。

7.8 结构性回填施工

7.8.1 波纹钢管（拱）周围结构性回填前，应对波纹钢管（拱）结构及外壁防腐进行质量验收合格。

7.8.2 回填前，应测量波纹钢管（拱）的任一断面的任意方向的截面形状与设计之差不超过 $\pm 1\%$ 。

7.8.3 回填材料的含水量应控制在最佳含水量的 $\pm 3\%$ 以内。除防冻胀土和隔断层填料外，回填料中小于 0.5 mm 颗粒含量超过 20 % 时，含水量应控制在最佳含水量的 $\pm 2\%$ 以内。

7.8.4 回填前，宜在管（拱）内安装竖向和横向临时支撑（直径小于 2.0 m 的波纹钢管可不设临时支撑）。临时支撑点与波纹钢管内壁之间，宜采用分节段通长木条支撑。管顶部以上路基回填完成后可拆除管内临时支撑。

7.8.5 结构性回填部位衔接于洞口边坡挡墙等构造物施工时应同步施工。

7.8.6 结构性回填的地基及以上宽度（纵路线方向）、长度范围和结构性回填衔接于路基施工，符合设计文件和 JTG/T 3610 规定。

7.8.7 波纹钢管（拱）顶部结构性回填最小厚度以上的路基填筑施工，按照 JTG/T 3610 和 JTG F80/1 规定执行。

7.8.8 结构性回填施工应符合下列规定：

- 开挖管槽法安装的波纹钢管两侧下部结构性回填与开挖管槽见 7.6.5 a)；
- 平面地基上安装的波纹钢管下方两侧楔形部位或双管（多管）之间等不易压实部位的回填，采用砂砾料回填，“水密法”密实并用振荡器振实；
- 波纹钢管（拱）两侧和管（拱）顶结构性回填，采用同步、对称、均衡、水平、分层、均匀摊铺厚度、均匀压实、逐层向上回填的工艺方法回填；
- 根据不同的回填土质、压实机具和要求的压实度确定每层压实厚度，且最大压实厚度不大于 15 cm，分层压实度不小于 96 %。每层压实到位、平整密实、无死角，无坑槽积水、排水顺畅；
- 结构性回填全过程中，宜采用防雨雪的遮盖篷布随时对回填层进行严密覆盖。

7.8.9 结构性回填层中设有防渗隔水层施工时应符合下列规定：

- 按设计文件规定的高密度聚乙烯土工膜厚度和平面尺寸要求满铺平整，并设 1 %~2 % 横坡。土工膜接缝搭接应顺水流方向，接缝搭接宽度不应小于 20 cm、并采用液体胶粘贴接缝搭接面；
- 土工膜隔水层上进行结构性回填时，防止土工膜受损或破坏，机械车辆等不直接在土工膜上作业，从土工膜两端将回填料预留松铺层以上的填料向前推移至土工膜上平整压实。

7.8.10 结构性回填施工过程中应防止波纹钢管（拱）变形，并符合下列规定：

- 回填施工全过程防止施工机械等碰撞波纹钢管（拱）结构；
- 距波纹钢管（拱）结构外侧边缘 2.0 m 范围内，采用小型压实机械或夯实机具进行作业，并应控制除压实机具以外的大型或重型机械、载货车辆等靠近，以减小对管体两侧偏载横向压力；
- 管（拱）两侧外侧边缘 2.0 m 范围外回填时，压实机械应与管（拱）的长度方向平行驶；管（拱）顶部以上回填压实，压实机械垂直于管（拱）长度方向行驶；
- 管（拱）两侧及管（拱）顶部以上回填过程中的高度差不超过 20 cm，且不应集中堆土或堆积重物，控制偏载回填造成波纹钢管（拱）截面变形；
- 回填过程中和回填完成后的管（拱）体截面变形不超过设计形状的 $\pm 2\%$ ；
- 管（拱）顶回填层中无减载板时，通行重型施工机械（载重车辆）时的管顶最小填土符合设计文件规定；有减载板时，管顶达到设计最小填土厚度时可通行施工机械；

g) 结构性回填完成前,其周围 20 m 范围内不应有强夯、冲击碾压等强振动性的机械作业。

7.8.11 结构性回填施工质量应符合 8.3.7 规定。

7.9 减载板施工

7.9.1 钢筋混凝土基础在施工应符合下列规定:

- a) 减载板底面与波纹钢管顶波峰之间的最小净距(高度)和尺寸(宽度、长度、厚度)等符合设计文件规定;
- b) 混凝土的配合比、试验验证及施工配合比等应符合 JTG/T F30 规定,混凝土强度等级符合设计文件规定;
- c) 模板和钢筋安装、混凝土拌和、运输、浇筑、振捣、养生等施工工艺符合设计文件规定和 JTG/T F30 规定。

7.9.2 波纹钢板减载板施工应符合下列规定:

- a) 减载板底面波峰与波纹钢管(拱)顶波峰之间的最小净距(高度)和尺寸(宽度、长度、壁厚)等符合设计文件规定;
- b) 减载板底面按设计松铺厚度在结构性回填层上满铺一层砂砾垫层,松铺砂砾垫层能够填充到波纹钢板底面的波谷内;
- c) 减载板高强度螺栓连接参照 7.6.4 连接;
- d) 防腐喷涂参照 7.7.1 施工。

7.9.3 减载板施工质量应符合 8.3.8 规定。

7.10 洞口构造物施工

7.10.1 洞口构造物(八字墙、一字墙、端墙或侧墙、挡墙等)施工及质量,应符合设计文件、JTG/T 3650 和 8.3.9 规定。

7.10.2 洞口处的路基边坡侧墙或挡墙等,宜与结构性回填同步施工,侧墙或挡墙、洞口边坡铺砌等施工及质量,应符合设计文件、JTG/T 3610 和 8.3.9 规定。

7.11 附属工程施工

洞口铺砌、拱下铺砌、路肩式侧墙(挡墙)顶防护栏、洞口外调治构造物等施工及质量,应符合设计文件、JTG/T 3610、JTG/T 3650 和 8.3.9 规定。

7.12 现场恢复

7.12.1 施工结束时,应清除波纹钢管(拱)内外污染物,并清理处置施工垃圾。

7.12.2 施工结束后,应及时对施工临时占(用)地、临时道路(涵洞)、材料堆放地及机械设备停放地等进行恢复。

7.12.3 原属性为农田或草原地的,应复耕或恢复草甸植被。

7.12.4 占用的河沟(渠)应清理疏通,保持原河沟(渠)宽度、流向及流速。

7.12.5 施工现场恢复后,应尽量保持原有地形地貌和景观。

8 质量检查及验收

8.1 基本规定

8.1.1 公路波纹钢管涵洞和波纹钢板拱桥分项工程、分部工程和单位工程划分见附录 C。

8.1.2 分项工程质量检验（基本要求、实测项目、外观质量检查和检查项目合格判定与评定）、质量保证资料，检测项目质量评定和分项工程质量评定等，应符合 JTG F80/1 规定。

8.1.3 分项工程中对结构安全、耐久性和主要使用功能起决定性作用的关键项目“△”合格率应不低于 95%、一般项目的合格率应不低于 80%，按 JTG F80/1 规定计算和判定合格率。不合格点的检测值应不大于允许偏差的 1.2 倍，且不存在严重缺陷，否则该检查项目为不合格。

8.1.4 对抽检不合格批次的材料和构件不准许使用。

8.1.5 地基和结构性回填压实度按 JTG F80/1 规定的方法进行检验评定，不满足要求时为不合格。

8.1.6 检验项目评定为不合格的，应进行整修、加固、补强或返工处理直至合格。分项工程评定为不合格的，经返工、加固、补强等，满足设计要求后，可重新进行检验评定。

8.2 进场材料及构件质量验收

8.2.1 一般规定

8.2.1.1 材料及构件进场检验批应符合下列规定：

- a) 波纹钢管（板）和管箍，以同一生产厂家（同一料源）的同一规格（直径、波形）、同一出厂批（编）号，按分节整装波纹钢管 50 节、管箍 50 个、波纹钢板件 100 片为一检验批组批抽样检验，不足 50 节（个）或不足 100 片为一检验批；
- b) 高强度螺栓连接副，以同一生产厂家的同一直径、性能等级、材料、炉号、螺纹规格，按螺栓、螺母、钢垫片各 3000 件（套）为一检验批组批抽样检验，不足 3000 件（套）亦为一检验批；
- c) 防渗密封、防腐（防磨蚀）喷涂材料，以同一生产厂家的同一品种（规格）、同一出厂批（编）号为为一检验批组批抽样检验；
- d) 地基换填材料、管基基层材料、结构性回填材料，同一料源（料场）为一检验批组批抽样检验；
- e) 水泥混凝土材料和钢筋的质量检验批符合 JTG/T 3650 规定、水泥混凝土减载板材料的质量检验批符合 JTG/T F30 规定。

8.2.1.2 外购材料及构件，应具有出厂检验合格证、检验报告等质量证明文件，有下列情况之一的应视为不合格：

- a) 变形、磨损或破损，外观有其他严重质量缺陷；
- b) 螺栓连接副、管箍等连接构件不配套或缺失；
- c) 品种（种类）、规格（型号）与设计文件不相符；
- d) 检验合格证、检验报告等质量证明文件缺失或无法证明其质量；
- e) 出厂批（编）号与出厂检验合格证、检验报告等质量证明文件不相符；
- f) 检验合格证、检验报告等质量证明文件与实物（体）不相符。

8.2.1.3 分节整装波纹钢管管体、法兰和管箍等焊接连接的焊缝检测分别以每一检验批抽取 20% 的焊缝进行复检和评定，不合格时不准许使用。焊缝内部缺陷检测、外观质量检查及评定应符合下列规定：

- a) 采用超声波探伤检测时，检测设备、检测频率、工艺要求及缺陷评定符合 GB 50661 规定；
- b) 无条件采用超声波探伤或对超声波检测结果有异议时，可采用射线检测验证，检验批内的检查数量 100% 检测，射线检测技术符合 GB/T 3323.1 或 GB/T 3323.2 规定；
- c) 焊缝符合 GB 50661 规定的检验等级 B 级、评定等级 II 级、焊缝外观一级及焊缝缺陷评定要求。

8.2.2 材料及构件进场验收质量

- 8.2.2.1 波纹钢管（板）进场验收质量应符合 8.3.4 规定。
- 8.2.2.2 波纹钢管箍、不等边槽钢、高强度螺栓连接副的允许偏差和镀锌层厚度应符合表 27 规定，法兰的尺寸允许偏差、焊接和镀锌层厚度等应符合 8.3.4 规定。

表 27 连接件进场质量验收

检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
波纹钢管箍	壁厚/mm	≥管体壁厚	尺量：每一检验批随机抽取 1 个管箍测 1 处/项
	宽度/mm	≥6 个波距长度	

表27 连接件进场质量验收（续）

检查项目			规定值或允许偏差			检查方法和频率
波纹钢管箍	螺栓连接 焊接件 尺寸/mm	长度	≥4 个波距长度			尺量：每一检验批随机抽取 1 个管箍测 1 处/项
		边宽	±1.5			
		边厚	±0.5			
	螺栓孔径/mm		不大于螺栓公称直径 3.0			
不等边槽钢 尺寸/mm		边厚 t	不小于设计值			尺量：每一检验批随机抽取 2 根槽钢测 1 处/项
		底宽 D_K	+2、-1			
		长边宽 C_{BK}	±2			
		短边宽 D_{BK}	±2			
		长度 L	不小于设计值			
高强度螺栓 连接副	型号规格（直径、尺寸）		符合设计			卡尺量尺寸、洛氏硬度计 检测硬度：每一组合的检验 批抽检不少于 5 套/项
	组合 1	性能等级	8.8 S 螺栓	8 H 螺母	钢垫片	
		硬度（洛氏）/HRC	24 ~31	30	35 ~45	
	组合 2	性能等级	10.9 S 螺栓	10 H 螺母	钢垫片	
		硬度（洛氏）/HRC	33 ~39	32	35 ~45	
单面镀锌层 厚度/ μm	波纹钢管箍		平均≥42，最小 32			磁性测厚仪检测：每一检 验批抽 5 %，每件（套）检 查 3 处，取平均值及最小值
	不等边槽钢		平均≥84，最小 62			
	螺栓、螺母、钢垫片		平均≥50，最小 36			

- 8.2.2.3 防渗密封材料、防腐材料、结构性回填材料、其他材料的进场验收质量，应分别符合 5.4、5.5、5.6、5.7 规定。

8.3 工程质量检验与评定

8.3.1 波纹钢桥涵总体

- 8.3.1.1 波纹钢桥涵总体应符合下列基本要求：
- a) 按设计文件全部完成施工项目；
 - b) 涵洞内、桥下净空不小于设计要求，波纹钢管（拱）结构无异常变形；
 - c) 波纹钢管（拱）接缝密封严密，无渗漏水。
- 8.3.1.2 波纹钢板拱桥总体实测项目应符合表 28 规定，波纹钢涵洞总体实测项目应符合表 29 规定。

表 28 波纹钢板拱桥总体实测项目

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	轴线偏位/mm	≤ 20	全站仪：每跨测5处
2	拱顶高程/mm	± 30	水准仪：每孔跨中拱顶边缘和拱中线波峰上测3点
3	拱下净高/mm	$\geq$ 设计值，-50	尺量：测洞口及中心共3处
4	跨径/mm	$\pm 2 \% D$	尺量：每5 m测1处，且不少于3处
5	波纹钢拱体总宽/mm	± 30	钢尺量或仪器检测：拱脚、拱肩和拱顶3个断面各1处
注：D 为波纹钢管直径，以mm计。			

表 29 波纹钢管涵洞总体实测项目

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	轴线偏位/mm	≤ 50	全站仪：测中心线5处
2	洞内流水面高程/mm	± 20	水准仪：测洞口、中点和其他四分点附近5处
3	波纹钢管内径/mm	$\pm 2 \% D$	尺量：每5m测1处，且不少于3处，测相互垂直两个方向
4	管体总长/mm	+100，-50	钢尺量：测两侧起拱线处和管顶处
注：D 为波纹钢管直径，以mm计。			

8.3.1.3 波纹钢桥涵总体外观质量应符合下列规定：

- a) 波纹钢管（拱）内清洁，不应有施工垃圾、杂物；
- b) 洞口与路线边坡或挡土墙线形平顺；
- c) 进出口衔接平顺。

8.3.2 波纹钢板拱桥基础及下部结构

波纹钢板拱桥基础的基底处理（包括结构性回填和洞口构造物等基底）、地基承载力、基础埋深、基础、下部钢筋混凝土墩台身和钢筋混凝土拱座等，施工质量的基本要求、实测项目、外观质量检验评定，应符合 JTG F80/1 规定。

8.3.3 波纹钢管涵洞地基及垫层

8.3.3.1 地基及管基垫层应符合下列基本要求：

- a) 地基（结构性回填范围和洞口构造物）处理符合 JTG/T 3650 规定和设计文件要求；
- b) 地基承载力满足设计文件要求；
- c) 管基松铺垫层材料合格，且不应有泥块、冰（雪）块或冻结块、尖锐石块、草皮、垃圾等；
- d) 洞口构造物施工质量的基本要求符合 JTG F80/1 规定。

8.3.3.2 涵洞地基及管基松铺垫层实测项目应符合表 30 规定，洞口构造物基础的实测项目符合 JTG F80/1 规定。

表 30 波纹钢管涵洞地基及管基松铺垫层实测项目

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
1△	压实度/%	≥ 95	灌砂法或环刀法、无核密度仪法：每道波纹钢桥涵地基测 5 处
2	轴线偏位/mm	10	全站仪：测中心线 5 处
3	纵断高程/mm	± 15	水准仪：以管基中轴线处测洞口、中点和其他 4 分点附近 5 处

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
4		平面尺寸/m	$\geq$ 设计值	尺量：长、宽各量 2 处
5		岩土过渡段地基处理长度/m	$\geq$ 设计值 或管径的 1.5 倍	尺量：每一岩石-土渡段过
6		风化岩层或表层换填厚度/mm	$\geq$ 设计值	尺量：每 5 m 测 1 处探坑
7		处理深度/m	$\geq$ 设计值	尺量：测 3 处探坑
8		平整度/mm	≤ 10.0	3m 直尺：连续 3 尺为 1 处，测 2 处取最大间隙值
9		预拱度/mm	$\pm 0.5\% L$	水准仪：测洞口、中点和其他 4 分点附近 5 处
10	松铺	宽度/mm	-20、+50	尺量：测 3 个断面
11	垫层	厚度/mm	符合设计值	尺量：测 3 个断面

表 30 波纹管涵洞地基及管基松铺垫层实测项目（续）

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
12	松铺	平整度/mm	15	3 m 直尺：连续 3 尺为 1 处，测 2 处取最大间隙值
13	垫层	轴线偏位/mm	10	全站仪：测中心线 5 处
注：L 为波纹管长度，以 mm 计。				

8.3.3.3 波纹管涵洞的基础及垫层外观质量应符合下列规定：

- a) 地基（包括结构性回填区域）处理及压实无死角、表面平整密实、不积水，垫层平整；
- b) 洞口构造物基础的外观质量符合 JTG F80/1 规定。

8.3.4 波纹钢管和波纹钢板制作

8.3.4.1 波纹钢管和波纹钢板制作应符合下列基本要求：

- a) 所用钢材的钢号（材质）力学性能符合设计文件要求；
- b) 管节尺寸、板件尺寸和螺栓孔符合设计文件要求，并试拼装合格。

8.3.4.2 分节整装波纹钢管制作实测项目应符合表 31 规定，拼装波纹钢管（拱）和加劲肋板、减载板用波纹钢板制作实测项目应符合表 32 规定。

表 31 分节整装波纹钢管制作实测项目

项次	检查项目			规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	波距 p /mm	螺旋波纹钢管	68×13、75×25 波形	± 3	尺量：每一检验批随机抽取 1 个管节量取 2 处
		环形波纹钢管	200×55 波形	± 3	
2	波高或波深 d /mm	螺旋波纹钢管	68×13、75×25 波形	-1~+3	
		环形波纹钢管	200×55 波形	-2~+3	
3	波纹钢管内径/%	螺旋波纹钢管	68×13、75×25 波形	$\pm 1 D$	尺量：每一检验批随机抽取 1 个管节，管内波峰处测相互垂直两个方向
		环形波纹钢管	200×55 波形	$\pm 1 D$	
4△	壁厚 t /mm	螺旋波纹钢管	68×13、75×25 波形	不小于设计值	尺量：每一检验批随机抽取 1 个管节，测 4 处
		环形波纹钢管	200×55 波形		
5	螺旋波纹钢管端头的管箍搭接长度/mm		68×13 波形	≥ 204	尺量：每一检验批随机抽取 1 管节测 2 个端头
			75×25 波形	≥ 225	
6△	波纹钢管焊缝	管体、法兰	焊缝内部缺陷	检验等级 B 级和评定等级 II 级	按 7.2.1.4 规定检验

			焊缝外观质量	一级焊缝质量	
7	分节整装波纹钢管法兰	尺寸/mm	边宽	±1.2	尺寸：每一检验批随机抽取 2 个法兰测 2 处/项
			边厚	±0.6	
		螺栓孔径/mm	M16 螺栓	≤19	
		螺栓孔距（弧长）/mm		≤157	
8△	单面镀锌层厚度/μm	螺旋波纹钢管	68×13、75×25 波形	平均≥42，最小 32	磁性测厚法测厚仪检测：每一检验批抽 5%，每件（套）检查 3 处，取平均值及最小值
9△		环形波纹钢管（含法兰）	200×55 波形	平均≥84，最小 62	
注1：D 为波纹钢管直径，以mm计。					
注2：镀锌层厚度检查结果有争议时以单位面积质量称量法为准。					

表 32 拼装波纹管（拱）、加劲肋板和减载板用波纹钢板制作实测项目

项次	检查项目			规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	波距 p/mm	200×55 波形、400×150 波形		±3	尺量：每一检验批随机抽取 1 片量取 2 处/项
2	波高或波深 d/mm	200×55 波形		-2~+3	
		400×150 波形		±3	
3	波纹钢板长度（弧长）/mm	200×55 波形、400×150 波形		±1 %	尺量：每一检验批随机抽取 1 片量取 2 处/项
4	波纹钢板宽度/mm	200×55 波形、400×150 波形		±1 %	卡尺量：每一检验批随机抽取 1 片量取 2 处/项
5△	壁厚 t/mm	200×55 波形、400×150 波形		不小于设计值	
6	螺栓孔径/mm	承压型连接	M16、M20、M24、M27 螺栓	不大于螺栓公称直径 2	
6	螺栓孔径/mm	摩擦型连接	M16 螺栓	17.93	卡尺量：每一检验批随机抽取 1 片量取 2 处/项
			M20 螺栓	22.52	
			M24 螺栓	26.52	
			M27 螺栓	30.84	
7	螺栓孔距/mm	孔距范围	≤500	±1.0	尺量：每一检验批随机抽取 1 片量取 2 处/项
			>500	±1.5	
		边孔至板边缘距离		±1.5	
8△	单面镀锌层厚度/ μm	200×55 波形、400×150 波形		平均≥84，最小 62	磁性测厚法测厚仪检测：每一检验批抽 5%，每件（套）检查 3 处，取平均值及最小值
注：镀锌层厚度检查结果有争议时以单位面积质量称量法为准。					

- 8.3.4.3 波纹钢管（拱）和板件制作外观质量应符合下列规定：
- a) 波纹钢管（板）不应有折弯、坑凹或凸鼓、变形和不符合设计的弯曲，波峰不应有塌陷变形等缺陷，切边应平直，边缘应无毛刺或锯齿状；
 - b) 焊缝饱满平整，无裂纹、焊瘤、气孔、夹渣、电弧擦伤、未焊透等不允许出现的外观缺陷；
 - c) 镀锌防腐层结合牢固、无划痕，经锤击试验不剥离、不凸起；镀锌层均匀完整、颜色一致，无漏镀缺陷，表面平整光滑，无流挂、滴瘤或结块、损伤、裂纹、孔洞、磨蚀等现象。

8.3.5 波纹钢管（拱）安装

8.3.5.1 波纹钢管（拱）安装应符合下列基本要求：

- a) 波纹钢管、波纹钢板、波纹钢管箍、螺栓连接副、防渗密封垫等构件和材料合格；
- b) 波纹钢管坐实到管基垫层上（砂砾垫层填充管底波谷内）；
- c) 波纹钢板拱脚自由落座于拱座上的槽钢内底面，无间隙（缝）；
- d) 接缝防渗密封垫安装严密、平顺、无漏装，防渗处理完整、填缝饱满，无扭曲、变形、破损；
- e) 波纹钢加劲肋板安装位置符合设计文件要求，且无漏装或错装；
- f) 高强度螺栓无漏装或未拧紧，螺母（螺栓丝扣端头）均位于波纹钢管（拱）外侧；
- g) 波纹钢板拼装波纹钢管（拱）的连接内壁搭接板台不应逆水流向。

8.3.5.2 波纹钢板拼装管安装实测项目应符合表 33 规定、波纹钢板拱安装实测项目应符合表 34 规定、分节整装波纹钢管安装实测项目应符合表 35 规定。

表 33 波纹钢板拼装管安装实测项目

项次	检查项目			规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	轴线偏位/mm			≤50	全站仪：中心线测 5 处
2	管总长度/mm			+100， -50	尺量：测中心线处
3	直径（内径）/mm			±1 % <i>D</i>	尺量：每 5 m 测 1 处，且不少于 3 处，测相互垂直两个方向
4	管内底面高程/mm			±10	水准仪：测洞口、中点和其他 4 分点附近 5 处
5	顺直度/mm			0.1 % <i>L</i>	拉线：测洞口、中点和其他 4 分点附近 5 处
6△	高强度螺栓终拧扭矩/N·m			±10 %	扭矩扳手：检查螺栓，且不少于 5 个。
7	聚氨酯涂层	总干膜厚度/mm		≥2	测厚仪：每一道波纹钢桥涵的纵缝、环缝各抽检 10 点
		宽度/mm	纵缝	≥120	尺量：每一道波纹钢桥涵的纵缝、环缝各抽检 10 处
			环缝	≥80	
8	粘贴防水卷材	厚度/mm		平均≥3.5、最小≥3.3	测厚仪：每一道波纹钢桥涵的纵缝、环缝各抽检 5 点
		宽度/mm	纵缝	≥120	尺量：每一道波纹钢桥涵的纵缝、环缝各抽检 5 处
			环缝	≥80	
注： <i>D</i> 为波纹钢管直径， <i>L</i> 为波纹钢管长度，均以mm计。					

表 34 波纹钢板拱安装实测项目

项次	检查项目			规定值或允许偏差	检查方法和频率
1△	拱形截面形状与设计之差/%			±1	钢尺：拱边缘和每 2 m~5 m 拱宽检测，且不少于 3 个断面
2	轴线偏位/mm			≤10	全站仪：每孔测 5 处
3	拱圈高程/mm			±20	水准仪：每孔拱脚、拱肩、拱顶测 3 个断面，每断面测拱边缘和拱中线处
4△	高强螺栓终拧扭矩/N·m			±10 %	扭矩扳手：每孔检查 5 %螺栓
5	聚氨酯涂层	总干膜厚度/mm		≥2	测厚仪：每一道波纹钢桥涵的纵缝、环缝各抽检 10 点
		宽度/mm	纵缝	≥120	尺量：每一道波纹钢桥涵的纵缝、环缝各抽检 10 处
			环缝	≥80	
6	粘贴防水卷材	厚度/mm		平均≥3.5、最小≥3.3	测厚仪：每一道波纹钢桥涵的纵缝、环缝各抽检 5 点

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
	宽度/mm	纵缝	≥ 120	尺量：每一道波纹钢桥涵的纵缝、环缝各抽检 5 处
		环缝	≥ 80	

表 35 分节整装波纹钢管安装实测项目

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	轴线偏位/mm	≤ 50	全站仪：中心线测 5 处
2	管总长度/mm	+100, -50	尺量：测中心线处
3	直径（内径）/mm	$\pm 1 \% D$	尺量：每 5 m 测 1 处，且不少于 3 处，测相互垂直两个方向
4	管内底面高程/mm	± 10	水准仪：测洞口、中点和其他 4 分点附近 5 处
5	顺直度/mm	$0.1 \% L$	拉线：测洞口、中点和其他 4 分点附近 5 处
6△	管箍、法兰高强度螺栓终拧扭矩/N·m	$\pm 10 \%$	扭矩扳手：检查螺栓，且不少于 5 个。
注：D 为波纹钢管直径，L 为波纹钢管长度，均以 mm 计。			

- 8.3.5.3 波纹钢管（拱）安装外观质量应符合下列规定：
- a) 波纹钢管（拱）平顺，无异常变形；
 - b) 拼装波纹钢管（拱）搭接接头错缝、重叠符合设计要求，搭接接头处无翘起现象；
 - c) 拼装管（拱）接缝防渗处理卷材平整，无脱落、破损、缺边，无漏贴。

8.3.6 防腐喷涂及防磨蚀层

- 8.3.6.1 波纹钢管（拱）防腐喷涂及防磨蚀层应符合下列基本要求：
- a) 防腐平台及防磨蚀层材料合格；
 - b) 防腐喷涂前，波纹钢管（板）镀锌层和防渗处理层表面清洁、干燥。
- 8.3.6.2 波纹钢管（拱）防腐喷涂及防磨蚀层实测项目应符合表 36 规定。

表 36 防腐喷涂及防磨蚀层实测项目

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
1△	防腐（防磨蚀）涂装层	涂装层总干膜厚度/ μm	平均厚度 $\geq$ 设计厚度，单点最小厚度 $\geq 90 \%$ 设计厚度	测厚仪：总干膜厚每 20 m 测 10 点，且不少于 10 点
2	防磨蚀混凝土防冲刷铺装层	强度/MPa	$\geq$ 设计值	压力机：取 2 组标准试件，测 28d 抗压强度
3		厚度/mm	± 10	以管直径控制：测洞口、中点和其他 4 分点附近 5 处
4		钢筋（钢丝网）保护层厚度/mm	≥ 25	钢筋保护层测试仪：测 3 个断面，每断面测 3 处
5		长度/mm	不小于管涵全长	钢尺量：测 1 处
6		上边缘高度/mm	± 20	钢尺量：测洞口、中点和其他 4 分点附近 5 处
7	防磨蚀混凝土防冲刷铺装层	平整度/mm	10	2 m 直尺：连续 3 尺为 1 处，测 2 处取最大间隙值

- 8.3.6.3 防腐喷涂及防磨蚀层外观质量应符合下列规定：
- a) 涂层无漏涂，表面平整、光滑；
 - b) 涂层不应有剥落（剥离）、起泡、滴瘤、结块（凝凸块）、凹陷、气泡和裂纹等缺陷；

- c) 涂层表面无污染；
- d) 防腐蚀层平整、无裂纹（裂缝）；
- e) 土工膜包裹完整、平整、严密。

8.3.7 结构性回填

8.3.7.1 结构性回填应符合下列基本要求：

- a) 结构性回填材料合格；
- b) 波纹管桥涵进出口端路基边坡有侧墙时，结构性回填与侧墙衔接同步施工；
- c) 施工工艺或方法及与路基衔接填筑符合设计文件要求；
- d) 回填过程中严格控制波纹管（拱）的截面形状，并对波纹管（拱）进行变形监测；
- e) 回填应分层填筑、分层平整压（夯）实，分层压实厚度不应超厚或偏载回填；
- f) 土工膜隔水层铺设范围（长度、宽度、位置）满足设计要求，铺设应平整、搭接接缝严密、无破坏。

8.3.7.2 结构性回填实测项目应符合表 37 规定；波纹管（拱）顶部以上的回填分层压实度为设计规定的结构性回填最小厚度范围内压实度，除此以上路基填筑部分的压实度按照 JTG/T F80/1 规定执行。

表 37 结构性回填实测项目

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
1△	结构性回填分层压实度/%	≥96	灌砂法、环刀法、无核密度仪法：按每压实层每 1000 m ² 测 3 处，且不应少于 3 处
2	每层压实层厚/mm	≤150	尺量：每压实层测 5 处
3△	管（拱）侧结构性回填压实宽度（沿路线方向）/mm	≥设计值	尺量：每侧端头、中部 3 处
4	管（拱）顶以上回填压实宽度/mm	≥设计值	尺量：管（拱）顶端头、中间 3 处
5	回填层中土工膜隔水层厚度、平面尺寸/mm	≥设计值	尺量：每处每层测长度、宽度和 2 处厚度
注：波纹管（拱）顶部以上的结构性回填分层压实度为设计规定的结构性回填最小厚度范围内的压实度，除此以上路基填筑部分的压实度按照 JTG/T F80/1 规定执行。			

8.3.7.3 结构性回填外观质量应符合下列规定：

- a) 每层填土表面不平整的累计长度不超过总长度的 10 %；
- b) 回填分层表面不应有积水，表面无翻浆、松散现象。

8.3.8 减载板

8.3.8.1 结构性回填层中的减载板应符合下列基本要求：

- a) 减载板基底回填层密实，压实度满足设计要求；
- b) 钢筋尺寸及布置符合设计要求；
- c) 混凝土浇筑后按要求保湿保温养护，防止混凝土干缩、温缩裂缝；
- d) 波纹钢板减载板底面松铺垫层和高强度螺栓连接符合设计要求。

8.3.8.2 减载板实测项目应符合表 38 规定。

表 38 减载板实测项目

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
----	------	----------	---------

1△	混凝土 28d 抗压强度/MPa	≥设计强度等级	标准试件抗压：不少于 1 组试件
2△	混凝土板厚度或波纹钢板 壁厚/mm	≥设计值	钢尺量：测 10 点
3	波纹钢减载板涂装（喷涂） 防腐层总干膜厚度/mm	平均厚度≥设计厚度，单点 最小厚度≥90 %设计厚度	测厚仪：总干膜厚每 20 m 测 5 点，且不少于 5 点
4	板底部距波纹钢管（拱）顶 波峰的距离/mm	±20	水准仪：回填前测波纹钢管顶波峰高程 3 处、 减载板施工前测回填层顶面高程 3 处
5	平面尺寸/mm	≥设计值	尺量：长、宽各量取 1 处
6	平整度/mm	15	3 m 直尺、塞尺：每半幅测 2 处×5 尺（连 续），塞尺量取最大间隙
7	中线偏位/mm	20	全站仪：侧 3 点
8	纵断高程/mm	±15	水准仪：测 3 个断面

8.3.8.3 减载板外观质量应符合下列规定：

- a) 混凝土板无断板、无断角和缺边掉角；
- b) 混凝土板不应有露筋、疏松或不密实现象；
- c) 混凝土板不应有空（孔）洞、坑穴、鼓包；
- d) 混凝土板表面无积水；
- e) 波纹钢板螺栓无漏装漏连；
- f) 波纹钢板防腐涂装无漏涂；
- g) 波纹钢板平整、无变形。

8.3.9 洞口及附属工程

洞口构造物、洞口外调治构造物等施工质量的基本要求、实测项目、外观质量检验评定，应符合 JTG F80/1 规定。

8.4 质量检验与评定用表

8.4.1 施工记录表、检验报告用表等，按工程建设单位规定的表格采用。

8.4.2 波纹钢桥涵分项工程、分部工程和单位工程的质量检验评定用表，见附录 D。

附录 A
(规范性)
波纹钢管（拱）构造参数

A.1 波纹钢板拱构造参数

A.1.1 波纹钢板拱的壁厚、拱顶填筑厚度等应符合下列基本规定：

- a) 波纹钢板拱主体结构的计算壁厚小于表 A.1、A.2 中壁厚时，采用表 A.1、A.2 中壁厚；计算壁厚大于表 A.1、A.2 中壁厚时，采用计算壁厚；
- b) 当波纹钢板拱位于强腐蚀性环境时，壁厚可适当增加 0.5 mm~1.0 mm；
- c) 当拱顶结构性回填层最小厚度不足或受限时，按 6.6.6 设置减载板；
- d) 波纹钢板圆弧拱顶填土厚度范围大于 8.0 m 时的河沟或冲沟路段，一般为较大排洪量，可在基础与拱座之间按 6.5.2.3 增加实体墙式钢筋混凝土墩台身提高桥下空间，同时减少拱顶以上填土厚度；
- e) 波纹钢板箱形拱顶结构性回填厚度不超过 1.5 m（不含路面结构层厚度），大于 1.5 m 时，可在基础与拱座之间按 6.5.2.3 增加实体墙式钢筋混凝土墩台身提高桥下空间，同时减少拱顶填土厚度。

A.1.2 波纹钢板圆弧拱构造参数，见表A.1。

表 A.1 400×150 波形的波纹钢板圆弧拱构造参数

标准跨径 L_K/mm	拱半径 r_t/mm	矢高 h_s/mm	波纹钢板 壁厚范围 t/mm	拱顶结构性回 填最小厚度 $H_{\min}/\text{m}$	波纹钢板拱顶填土厚度范围 H/m			
					1.36~2.5	2.5~4.0	4.0~6.0	6.0~8.0
					波纹钢板壁厚 t ，不小于/mm			
5000	3000	≤2500	6.0~6.5	0.930	6.0	6.0	6.5	6.5
6000	3500	≤3000	6.0~6.5	1.100	6.0	6.5	6.5	6.5
8000	4000	≤4000	6.0~7.0	1.360	6.0	6.5	7.0	8.0
10000	5000	≤5000	7.0~8.0	1.500	7.0	7.5	8.0	9.0
13000	6500	≤6500	8.0~9.0	1.500	8.0	8.5	9.0	10.0
16000	8000	≤8000	9.0~10.0	1.500	9.0	9.5	10.0	11.0
注：拱顶结构性回填最小厚度不含路面结构层以下的路基填筑厚度和路面结构层厚度。								

A.1.3 波纹钢板箱形拱构造参数，见表A.2。

表 A.2 400×150 波形的波纹钢板箱形拱构造参数

标准跨径 L_K/mm	拱半径/mm		矢高 h_s/mm	波纹钢板壁厚范围 t/mm	拱顶结构性回填最小厚度 $H_{\min}/\text{m}$	波纹钢板拱顶填土厚度范围 H/m		
						0.45~0.7	0.70~1.0	1.0~1.5
	拱肩 r_c	拱顶 r_t				波纹钢板壁厚 t ，不小于/mm		
8000	1245	7470	2000	6.0~7.0	0.45	6.0	6.5	7.0
	1245	7850	2185					
10000	1245	8560	2590	7.0~8.0	0.45	7.0	7.5	8.0

表A.2 400×150波形的波纹钢板箱形拱构造参数（续）

标准 跨径 L_K/mm	拱半径/mm		矢高 h_s/mm	波纹钢板 壁厚范围 t/mm	拱顶结构性回 填最小厚度 $H_{\min}/\text{m}$	波纹钢板拱顶填土厚度范围 H/m		
	拱肩 r_c	拱顶 r_t				0.45~0.7	0.7~1.0	1.0~1.5
						波纹钢板壁厚 t , 不小于/mm		
10000	1245	8890	2800	7.0~8.0	0.45	7.0	7.5	8.0
	1245	9300	3000					
13000	1250	13000	3500	8.0~9.0	0.45	8.0	8.5	9.0
16000	1250	16000	4200	9.0~10.0	0.45	9.0	9.5	10.0
注：拱顶结构性回填厚度范围不包含路面结构层厚度。								

A.2 波纹钢管涵洞构造参数

A.2.1 波纹钢管涵洞构造参数见表A.3, 并应符合下列规定:

- a) 计算壁厚小于表 A.3 中壁厚时, 采用表中壁厚; 计算壁厚大于表 A.3 中壁厚时, 采用计算壁厚;
- b) 波纹钢管(拱)位于强腐蚀性环境时, 壁厚可适当增加 0.5 mm~1.0 mm;
- c) 当波纹钢管顶结构性回填层最小厚度不足或受限时, 按 6.6.6 设置减载板。

表 A.3 波纹钢管涵洞构造参数

波纹钢管类型	波形参数 ($p \times d$)/mm	波纹钢管壁厚范围 t/mm	管内径 D/m	波纹钢管壁厚 t/mm	管顶结构性回填最小厚度 $H_{\min}/\text{m}$
螺旋波纹钢管	68×13	1.6~3.0	0.50	1.5	0.6
			0.75	1.5	
			1.00	1.6	
			1.25	2.0	
			1.50	3.0	
			2.00	4.0	
	75×25	1.6~4.0	1.00	1.6	0.6
			1.25	2.0	
			1.50	2.5	
			2.00	3.0	
			2.50	4.0	
环形波纹钢管	200×55	3.0~5.0	1.50	3.0	0.6
			2.00	3.5	
			2.50	4.0	
			3.00	5.0	
波纹钢板拼装管	200×55	4.0~6.0	3.00	4.0	0.6
			4.00	5.0	0.76
			5.00	6.0	0.93
	400×150	6.0~8.0	5.00	6.0	0.95
			6.00	6.0	1.10
			7.00	6.5	1.20
			8.00	7.0	1.36
			9.00	7.5	1.50
			10.00	8.0	

附录 B
(资料性)

波纹钢桥涵结构设计计算相关参数计算

B.1 波纹钢管（拱）结构的弯矩和轴力组合效应计算、施工过程结构刚度及内力组合计算应用的参数（ k_{M1} 、 k_{M2} 、 k_{M3} 、 R_B ），应根据波纹钢管（板）柔度系数 N_f 确定。

B.2 波纹钢管（板）柔度系数，按公式（B.1）计算。

$$N_f = \frac{E_S(1000D_h)^3}{EI} \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

N_f ——波纹钢管（板）柔度系数；

E_S ——结构性回填土的弹性模量，单位为兆帕（MPa）；

D_h ——波纹钢管（拱）计算直径或计算跨径，单位为米（m），按图2界限取值；

E ——波纹钢板材的弹性模量，单位为兆帕（MPa）；

I ——波纹钢板材截面惯性矩，单位为毫米四次方每毫米（ mm^4/mm ），参照 GB/T 34567 取值。

B.3 弯矩和轴力组合效应计算、施工过程结构刚度及内力组合计算应用的参数（ K_{M1} 、 k_{M2} 、 k_{M3} 、 R_B ），按公式（B.2）～（B.5）计算

$$\left. \begin{array}{l} \text{当 } N_f \leq 5000 \text{ 时, } K_{M1} = 0.0046 - 0.001 \cdot \lg N_f \\ \text{当 } N_f \geq 5000 \text{ 时, } K_{M1} = 0.0009 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (B.2)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{当 } N_f \leq 5000 \text{ 时, } k_{M2} = 0.018 - 0.004 \cdot \lg N_f \\ \text{当 } N_f > 5000 \text{ 时, } k_{M2} = 0.0032 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (B.3)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{当 } N_f \leq 100000 \text{ 时, } k_{M3} = 0.12 - 0.018 \cdot \lg N_f \\ \text{当 } N_f > 100000 \text{ 时, } k_{M3} = 0.030 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (B.4)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{当 } 0.20 \leq \frac{D_V}{2D_h} \leq 0.35 \text{ 时, } R_B = 0.67 + 0.87 \left(\frac{D_V}{2D_h} - 0.20 \right) \\ \text{当 } 0.35 \leq \frac{D_V}{2D_h} \leq 0.50 \text{ 时, } R_B = 0.80 + 1.33 \left(\frac{D_V}{2D_h} - 0.35 \right) \\ \text{当 } \frac{D_V}{2D_h} > 0.50 \text{ 时, } R_B = \frac{D_V}{D_h} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (B.5)$$

式中：

N_f ——波纹钢管（板）柔度系数；

k_{M1} 、 k_{M2} 、 k_{M3} 、 R_B ——计算参数；

D_V ——波纹钢管（拱）计算矢高，单位为米（m），按图2界限取值；

D_h ——波纹钢管（拱）计算直径或计算跨径，单位为米（m），按图2界限取值。

附 录 C
(规范性)
公路波纹钢桥涵工程划分

公路波纹钢桥涵的单位工程、分部工程和分项工程划分，见表C. 1。

表 C. 1 公路波纹钢桥涵的单位工程、分部工程和分项工程划分

单位工程	分部工程	分项工程
路基工程 (每10 km或每标段)	小桥 (每座)	钢筋加工及安装，混凝土扩大基础（浅基础），混凝土墩台，波纹钢板制作，波纹钢板拱安装，防腐（防磨蚀），结构性回填土，减载板，波纹钢板桥总体等
	涵洞 (1 km～3 km路段)	管基基层，波纹钢管（板件）制作，波纹钢管安装，防腐（防磨蚀）结构性回填，减载板，波纹钢管涵洞总体等
	相关其他分部工程	洞口构造物及附属工程等，按JTG F80/1规定划分
注：波纹钢桥涵按路段长度划分的分部工程，高速公路、一级公路宜取低值，二级及二级以下公路可取高值。		

合同段号：

编号：

施工单位				分部工程编号	
工程部位		分部工程		所属单位工程	
分项工程					
分项工程编号	分项工程名称		质量等级	备注	
外观质量					
评定资料					
质量等级					
评定意见					

检验负责人： 记录： 复核： 年 月 日

D.3 单位工程质量检验评定表见表 D.3。

