

DB 63

青 海 省 地 方 标 准

DB 63/T 2083—2022

公路波纹钢管涵洞通道设计规范

2022 - 12 - 30 发布

2023 - 03 - 01 实施

青海省市场监督管理局 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 总则 3

5 基本要求 3

 5.1 适用条件 3

 5.2 布设要求 3

 5.3 孔径与净空 4

6 构件及材料 5

 6.1 一般规定 5

 6.2 构件要求 5

 6.3 材料要求 6

7 地基及垫层设计 7

 7.1 一般规定 7

 7.2 地基设计 7

 7.3 垫层设计 8

8 构造设计 8

 8.1 一般规定 8

 8.2 波纹钢管构造 8

 8.3 连接构造 10

 8.4 加劲肋板构造 11

 8.5 结构性回填 12

 8.6 减载板构造 13

 8.7 洞口构造 13

9 主体结构设计 15

 9.1 一般规定 15

 9.2 设计计算 15

10 防渗及防腐设计 16

 10.1 一般规定 16

 10.2 防渗设计 16

 10.3 防腐设计 17

11 附属工程设计 18

 11.1 一般规定 18

 11.2 洞内工程 18

11.3 洞外工程 19

附录 A（规范性） 波纹钢管构造参数 20

附录 B（规范性） 结构性回填最小填土厚度计算 21

附录 C（规范性） 波纹钢管结构设计计算 23

参考文献 34

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。

本文件由青海省交通运输标准化专业技术委员会提出。

本文件由青海省交通运输厅归口。

本文件起草单位：正平路桥建设股份有限公司、青海路拓工程设施制造集团有限公司、青海省交通工程技术服务中心、青海蓝图公路勘察设计有限责任公司、青海交通职业技术学院、中国建筑第二工程局有限公司。

本文件主要起草人：金生光、宋其忠、陈世英、李元庆、李元吉、王旭斌、任罗英、何彦邦、张义刚、王玉光、宋方华、韩昌花、莫文生、韩鹏程、李炎、刘军辉、袁乾龙。

本文件由青海省交通运输厅监督实施。

公路波纹钢管涵洞通道设计规范

1 范围

本文件规定了公路波纹钢管涵洞通道工程设计的术语和定义、总则、基本要求、构件及材料、地基及垫层设计、构造设计、主体结构设计、防渗及防腐设计和附属工程设计等内容。

本文件适用于公路波纹钢管涵洞通道工程设计。

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 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 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 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
- JT/T 536 路桥用塑性体改性沥青防水卷材
- JGJ 82 钢结构高强度螺栓连接技术规程
- JT/T 722 公路桥梁钢结构防腐喷涂技术条件
- JTG 2120 公路工程结构可靠性设计统一标准
- JTG/T 2231-01 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 3650 公路桥涵施工技术规范
- JTG/T 3365-02 公路涵洞设计规范
- 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 D50 公路沥青路面设计规范
- 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 F20 公路路面基层施工技术细则
JTG/T F30 公路水泥混凝土路面施工技术细则
JTG F40 公路沥青路面施工技术规范
DB 63/T 1735 波纹钢板拱桥设计规程
DB 63/T 1850 公路波纹钢板挡土墙设计规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

螺旋波纹钢管

钢带经轧制及螺旋锁缝咬合制成的，具有完整截面的钢管。

[来源：GB/T 34567-2017, 3.1.1]

3.2

环形波纹钢管

钢板或者钢带经焊接后冷弯加工制成环形波纹，具有圆形截面的钢管。

[来源：GB/T 34567-2017, 3.1.6]

3.3

波纹钢板件

波纹钢板经形弧加工制成的具有一定曲率的板件。

[来源：GB/T 34567-2017, 3.1.8]

3.4

拼装波纹钢管

由波纹钢板件通过高强度螺栓连接拼装不同截面的钢管。

[来源：GB/T 34567-2017, 3.1.7, 有修改]

3.5

波纹钢管涵洞

洞身由螺旋波纹钢管、环形波纹钢管或波纹钢板件拼装管构成，具有过水能力的管状形构筑物。

3.6

波纹钢管通道

由波纹钢板件拼装管和管内路面构成，具有通行车辆、人员等功能的管状形构筑物。

3.7

孔径（直径）

波纹钢管涵洞通道管内水平方向对应波峰之间的最大距离。

3.8

计算直径

波纹钢管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

波纹钢管圆形管为波纹中性轴处管的直径、管拱形为波纹中性轴处管底至管顶高度的0.5倍。

3.10

螺栓连接副

用于波纹管连接的高强度螺栓标准套装组合件，由螺栓、螺母和钢垫片组成。

3.11

加劲肋板

波纹管周长 $1/3$ 弧长的波纹钢板件连接安装于波纹管顶部的部件。

3.12

减载板

布置于波纹管顶结构性回填层中的钢筋混凝土板。

3.13

最小填土厚度

保证波纹管涵洞通道结构稳定性和发挥土—钢结合相互作用的管顶最小覆土厚度(管顶至路面底层之间的最小距离)。

4 总则

4.1 设计应遵循“安全、耐久、环保、适用、经济”原则。

4.2 应综合考虑公路等级、地形地貌、地质、水文、进出口排水、通行条件、路基填高、最小填土厚度、材料运输、施工条件、养护等因素合理布设。

4.3 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。

4.4 通行二级及以上公路的通道不宜采用波纹管结构。

4.5 位于腐蚀环境时应进行防腐蚀设计。

4.6 一级及以上公路的波纹管涵洞通道主体结构设计使用年限不应低于 50 年、二级及以下公路不应低于 30 年。

5 基本要求

5.1 适用条件

5.1.1 碎石土、砂土、粉土、黏性土、软土、岩石等地质条件均可设置波纹管涵通道，其他地质条件可经论证后设置。

5.1.2 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 $0.2g$ 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。

5.2 布设要求

5.2.1 涵洞通道位置应符合公路路线布设要求。

5.2.2 波纹管排洪涵洞或通道兼排水功能时，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。

- 5.2.3 根据工程现场勘察结果，可接单孔、双孔或多孔布设。
- 5.2.4 洞口的型式和尺寸应具有过水能力并保证路堤的稳定。
- 5.2.5 涵洞通道中线与道路中线宜正交布设。涵洞斜交时交角不宜大于 45° （分岔或曲线布设时根据现场实际布设交角），通道斜交时交角不宜大于 30° 。
- 5.2.6 涵洞通道其他布设要求应符合 JTG/T 3365-02 和 JTG D60 规定。

5.3 孔径与净空

5.3.1 波纹钢管涵洞孔径应符合下列规定：

- a) 涵洞孔径（直径）宜采用 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，孔径应根据 JTG/T 3365-02 有关勘测、水文和水力等计算确定，最小孔径（内径）、涵洞内顶点至最高流水面净高应符合表 1 规定；
- c) 涵管下部埋置于地下时的管内底部铺砌，不应小于表 1 规定的最小孔径截面。

表 1 波纹钢管涵洞不同长度的最小孔径

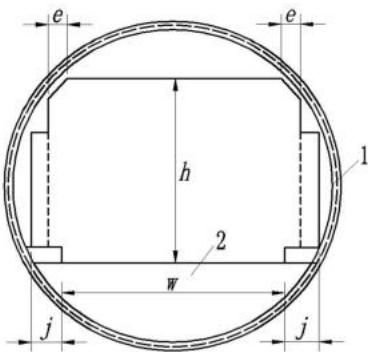
波纹钢管涵洞长度 L/m		最小孔径（直径） D/m	备注
$L<15.0$	灌溉涵	≥ 1.0	内径（ D ） $\leq 3.0\text{ m}$ 时，涵洞内顶点至最高流水面净高 $\geq D/4$ ； 内径（ D ） $> 3.0\text{ m}$ 时，涵洞内顶点至最高流水面净高 $>0.75\text{ m}$
	排洪涵	≥ 1.5	
$15.0\leq L<30.0$		≥ 1.5	
$30.0\leq L<60.0$		≥ 2.0	
$L\geq 60.0$		≥ 2.5	
注：高寒高海拔地区有涎流冰影响的波纹钢管涵洞，应视涎流冰最大聚集量增加净高或内径。			

5.3.2 应根据通道功能和交通特征，合理确定通道净空（净宽、净高）及孔径，并符合下列规定：

- a) 通道建筑限界（净空）及波纹钢管参考孔径（直径）见表 2，建筑限界（净空）见图 1。通道孔径（直径）根据建筑限界净空（净高、净宽）计算确定；
- b) 通道长度超过 20.0 m、敷设排水管（沟、渠）、机车通道兼人行通道时，加宽通道内净宽。

表 2 波纹钢管通道建筑限界及参考孔径（直径）

波纹钢管通道类型		通道内建筑限界（净空）/m		参考孔径（直径） D /m			
		净高 h	净宽 w				
汽车通道	三级、四级公路	≥ 4.5	$\geq$ 路基宽度	≥ 9.0 (40 km/h)	≥ 8.5 (30 km/h)	≥ 7.6 (20 km/h 双车道)	≥ 6.1 (20 km/h 单车道)
	等外公路	≥ 3.5	≥ 6.0	≥ 7.5			
	农牧通道	≥ 3.2	≥ 4.0	≥ 5.1			
拖拉机或畜力车通道		≥ 2.7	≥ 4.0	≥ 4.8			
人行通道、动物通道		≥ 2.5	≥ 4.0	≥ 4.7			
注：表列净宽、参考孔径（直径）不包括通道内两侧需设置防撞墙、人行道（检修道）、过水沟渠等。							



标引序号说明：

1——波纹管；

2——填料过渡层及路面；

e ——建筑限界顶角宽度（1.0 m）；

h ——净高；

j ——检修道或人行道；

w ——净宽（通行道宽度）。

图 1 波纹管通道建筑限界（净空）示意图

6 构件及材料

6.1 一般规定

- 6.1.1 螺旋波纹管用钢带，宜采用 GB/T 2518 规定的牌号为 S300GD+Z、S320GD+Z 或 S350GD+Z 的热镀纯锌镀层结构钢。
- 6.1.2 钢板或钢带采用冷弯工艺加工环形波纹管或波纹钢板时，宜采用 GB/T 700 规定的牌号为 Q235 碳素结构钢，或宜采用 GB/T 1591 规定的热轧钢牌号为 Q355 低合金高强度结构钢。钢级宜采用 B 级、C 级或 D 级。
- 6.1.3 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℃的波纹管结构。
- 6.1.4 不宜采用耐候结构钢或不锈钢复合钢板及钢带。
- 6.1.5 装配化安装连接应采用高强度螺栓连接副构件。
- 6.1.6 防渗密封垫应具有良好的抗冻、抗腐蚀性能。

6.2 构件要求

- 6.2.1 波纹管（板件）应符合下列规定：
- a) 螺旋波纹管用钢带的力学性能、尺寸、外形、重量及允许偏差符合 GB/T 2518 规定；
 - b) 环形波纹管、波纹钢板件拼装管、加劲肋板使用的钢板或钢带，其力学性能分别符合 GB/T 700 和 GB/T 1591 规定；

- c) 环形波纹钢管的管体（法兰）、三通或弯头波纹钢管、螺旋波纹钢管的管箍连接焊接，其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，焊缝外观质量符合 GB 50661 规定的一级焊缝等级要求；
- d) 波纹钢管类型、波形（规格）参数见附录 A。

6.2.2 连接件应符合下列规定：

- a) 管箍用钢板或钢带与 6.1.1 和 6.2.1 a) 的钢材相同；
- b) 法兰用碳素结构钢、低合金高强度结构钢的力学性能分别符合 GB/T 700、GB/T 1591 规定，角钢截面面积、截面特性、理论重量等符合 GB/T 706 规定；
- c) 高强度螺栓连接副用大六角头螺栓、大六角螺母和钢垫片性能符合 GB/T 1231 规定。螺栓连接副、规格、性能等级及配套组合见 8.3.1。

6.3 材料要求

6.3.1 接缝密封及接缝处防水材料应符合下列规定：

- a) 管箍连接、法兰连接、波纹钢板件拼装管连接安装的接缝密封垫符合 GB/T 34567 规定；
- b) 波纹钢管外壁的螺母及钢垫片和法兰接缝防水处理，采用硅酮密封胶（SR 类）或双组分聚硫密封胶时，性能分别符合 GB/T 14683、JC/T 483 规定；
- c) 波纹钢拼装管连接接缝处的防水处理，宜采用聚氨酯涂层（MPU 类）和路桥用塑性体改性沥青防水卷材，性能分别符合 GB/T 19250 和 JT/T 536 规定；
- d) 采用土工膜隔离（防水）层时，宜采用高密度聚乙烯土工膜，性能符合 GB/T 17643 规定。

6.3.2 喷涂防腐材料应符合下列规定：

- a) 波纹钢管外壁与土体接触面的防腐喷涂层宜采用环氧沥青或改性沥青，性能分别符合 GB/T 27806、GB/T 26528 规定；
- b) 波纹钢管内壁喷涂防腐（防磨蚀）材料品种、规格、性能符合 JT/T 722 规定。

6.3.3 结构性回填材料应符合下列规定：

- a) 选用砾类土、砂类土等低腐蚀性、低压缩性、易压实的填料；
- b) 回填层的最大冻深范围内采用粗粒土，小于 0.075 mm 颗粒（粉黏粒）含量不大于 5%；
- c) 不准许采用高液限的细粒土或黏性土、高液限粉土、盐渍土、膨胀土、含冰块土（冻结土）、泥炭、淤泥、草皮土、树（草）根土等以及对波纹钢结构产生严重腐蚀性的土。

6.3.4 其他材料应符合下列规定：

- a) 地基换填材料优先选用级配良好的砂砾混合料、砂质土、碎石土等；
- b) 管基松铺砂砾垫层最大粒径不大于波纹钢管波深的 0.5 倍，且不大于 50.0 mm，小于 0.075 mm 颗粒（粉黏粒）含量不大于 5%；
- c) 通道内防撞墙、涵洞内防磨蚀混凝土层、洞口路基边坡侧墙（挡土墙）和洞外等工程的水泥混凝土材料，符合 JTG/T 3650 规定；
- d) 洞口路基边坡侧墙（挡土墙）采用波纹钢板侧墙时的材料，符合 DB 63/T 1850 规定；
- e) 通道内道路路面基层材料符合 JTG/T F20 规定，水泥混凝土路面材料符合 JTG/T F30 规定，沥青路面材料符合 JTG F40 规定；
- f) 减载板钢筋混凝土材料符合 JTG/T F30 规定。

7 地基及垫层设计

7.1 一般规定

- 7.1.1 地基设计应分析管底下部及起拱线两侧结构性回填范围（见 8.5.3）、地基土体的均匀连续力学特性、承载力和沉降性能。
- 7.1.2 地基处理宽度（沿路线方向）应不小于 8.5.3 规定的结构性回填最小宽度，长度应为波纹钢管底部全长和洞口部分。
- 7.1.3 应根据波纹钢管自重、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。
- 7.1.4 涵洞位于 10.3.6 规定的中度或严重磨蚀环境时，管体下部埋置于洞口标高以下深度不宜小于 50 cm，管内铺砌后的截面空间应满足 5.3.1 规定。

7.2 地基设计

7.2.1 地基处理最小厚度及处理方案，应符合表 3 规定。

表 3 地基处理最小厚度及处理方案

地基地质	地基处理最小厚度/mm		地基处理方案
优质土地基（碎石土、卵石土、砂砾、粗砂等）	地基表层压（夯）实处理		压实度 $\geq 95\%$
一般土地基 （中砂、细砂等砂土）	$1000 < D \leq 2000$	300	换填粗粒土（砂砾等），压实度 $\geq 95\%$
	$D > 2000$	$0.2 D$	
粉土、黏性土、 软土等地基	$1000 < D \leq 5000$	$0.3 D \sim 0.5 D$ ， 且不小于500 mm	应符合JTG D30、JTG 3363的规定，压实度 $\geq 95\%$
	$D > 5000$	$0.2 D \sim 0.3 D$	
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		按7.2.2 规定处理
湿陷性黄土、盐渍土、 多年冻土等地基	应符合7.2.3 的规定		
注： D 为波纹钢管直径，以mm计。			

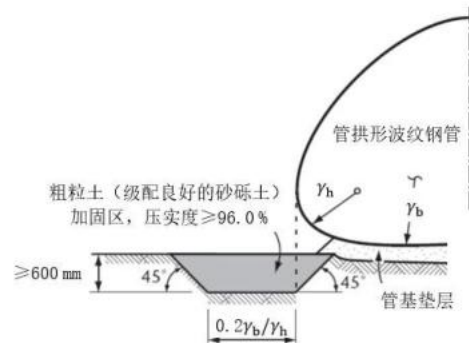
7.2.2 岩石地基应符合下列规定：

- a) 岩石与土质地基衔接段清除风化层或表层，衔接段换填长度不小于波纹钢管直径的 1.5 倍；
- b) 风化岩层处理厚度为满足地基承载力要求；
- c) 采用级配砂砾等材料换填处理，换填压实度不小于 95%。

7.2.3 其他特殊岩土地基处理应符合下列规定：

- a) 湿陷性黄土、盐渍土、多年冻土地基处理及封水层处理符合 JTG D30 和 JTG 3363 规定；
- b) 换填处理压实度不小于 95%。

7.2.4 管拱形拱脚处的极限状态或压力不满足附录 C.6 计算要求时，应进行加固设计（见图 2）。



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 2 管拱形拱脚处地基加固处理示意图

7.2.5 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。

7.2.6 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。

7.2.7 涵洞通道洞口构筑物地基及基础和洞口路基边坡挡墙设计，应符合 JTG D30 和 JTG 3363 规定。

7.3 垫层设计

7.3.1 管基垫层应采用级配砂砾，松铺厚度应填充波谷（波深），最大厚度不宜大于波深的 1.6 倍，且不小于波深的 1.3 倍。

7.3.2 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。

8 构造设计

8.1 一般规定

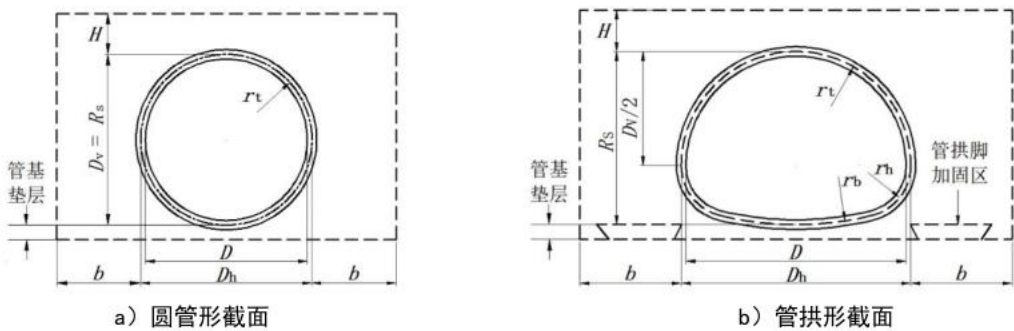
8.1.1 波纹钢管涵洞通道采用闭口结构形式，截面形式宜采用圆管形和管拱形，见图 3。

8.1.2 波纹钢管（闭口结构）截面不能满足排水或通行能力时，宜采用波纹钢板拱形（开口结构）截面，并按 DB 63/T 1735 规定进行设计。

8.1.3 涵洞分岔或曲线布设时，除现场采用管箍、法兰和波纹钢板件高强螺栓连接外，分岔或曲线段的波纹钢管弯头、三通等连接采用工厂焊接连接成整装构件。

8.2 波纹钢管构造

8.2.1 分节整装螺旋波纹钢管构造见图 4 分图 a)、分节整装环形波纹钢管构造见图 4 分图 b)、波纹钢板件构造见图 4 分图 c) 和波纹钢板件拼装管构造见图 4 分图 d)。



标引符号说明：

D ——波纹管直径；

H ——管顶以上回填总厚度（含路面结构层厚度）；

D_h ——计算直径（波纹中性轴处计算）；

D_v ——计算矢高（波纹中性轴处计算）；

R_s ——矢高（波纹中性轴处计算）；

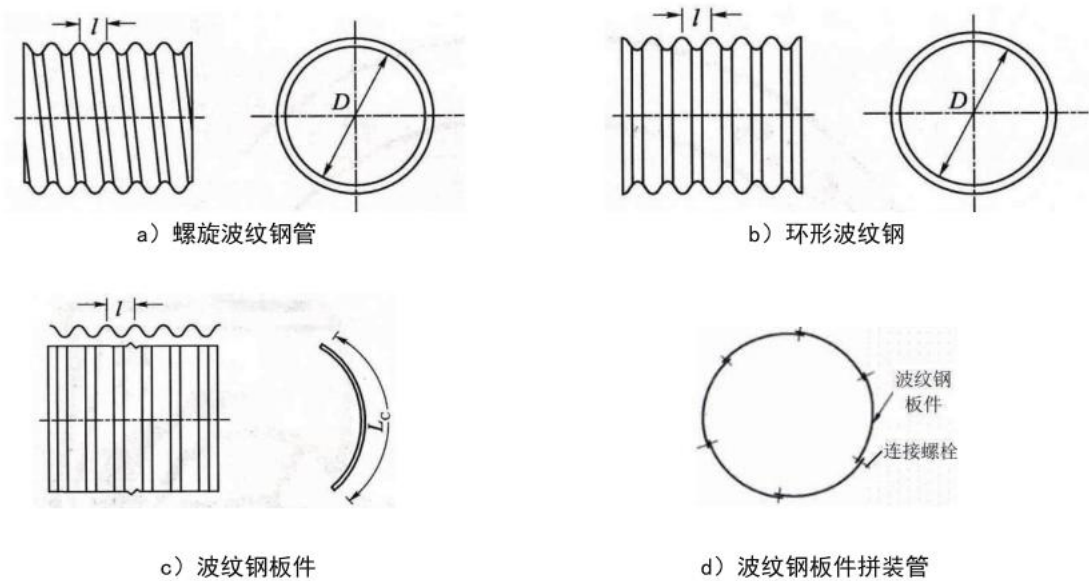
b ——结构性回填最小宽度范围区；

r_b ——管拱底部半径；

r_h ——管拱拱脚处半径；

r_t ——圆管半径或管拱拱顶半径。

图 3 波纹管涵洞通道截面形式示意图



标引符号说明：

D ——波纹管直径；

L_c ——波纹钢板件弧线长；

l ——波纹管波纹的波距。

图 4 分节整装波纹管和波纹钢板件拼装管构造示意图

8.2.2 分节整装波纹管最大直径应根据运输条件确定，孔径（直径）不宜大于 3.0 m；当孔径（直径）大于 3.0 m 时，宜采用波纹钢板件拼装管。

8.2.3 波纹钢板件标准长度和宽度宜符合 GB/T 34567 规定，当波纹钢板件拼装管和加劲肋板的局部长度和宽度需减小时，依据直径等计算确定。

8.2.4 波纹钢管类别、构造参数见附录 A。

8.3 连接构造

8.3.1 分节整装螺旋波纹钢管管箍连接、环形波纹钢管法兰连接和波纹钢板件拼装管采用高强度螺栓连接，并符合以下规定：

- a) 高强度螺栓连接副性能等级配套组合应符合表 4 规定；
- b) 螺栓连接副的钢垫片尺寸见表 5，钢垫片的螺栓孔型及孔径应与被连接件一致；
- c) 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；
- d) 根据 JGJ 82 的规定计算确定螺栓长度，终拧后外露出 2~3 个扣丝。

表 4 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	
1	8.8 S	24 HRC~31 HRC	8 H	30 HRC	35 HRC~45 HRC	0.110~0.150
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 5 钢垫片尺寸

钢垫片类型	尺寸类别	配套螺栓规格			
		M12	M16	M20	M24
管箍和法兰螺栓 平面型钢垫片	平面尺寸/mm	25.0	33.0	—	—
	厚度/mm	3.8	4.8	—	—
波纹钢板螺栓连接 凸凹面型钢垫片	平面尺寸/mm	—	30.0×30.0	40.0×45.0	48.0×55.0
	厚度/mm	—	2.5	3.0	3.0
注：凸凹面型钢垫片厚度为最薄处厚度。					

8.3.2 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 6。

表 6 法兰尺寸及连接螺栓规格

波距×波高 ($l \times d$) /mm	波纹钢管直径 D /mm	法兰角钢边宽×厚度/mm	高强度螺栓规格
200×55	$1000 \leq D \leq 3000$	70×7	M16

8.3.3 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段式见表 7。

表 7 管箍连接螺栓规格及段式

波距×波高 ($l \times d$) /mm	高强度螺栓规格		管箍连接段式	
	螺旋波纹管直径 D /mm	螺栓规格	螺旋波纹管直径 D /mm	管箍段式
68×13	$1000 \leq D \leq 1400$	M12	$D \leq 1000$	二段式
	$1400 < D \leq 2000$	M16	$1000 < D \leq 1600$	二段式
			$1600 < D \leq 2000$	三段式
75×25、 76.2×25.4	$1500 \leq D \leq 3000$	M16	$1000 \leq D \leq 1600$	二段式
			$1600 < D \leq 3000$	三段式

8.3.4 波纹钢板件拼装管连接构造应符合下列规定：

- a) 拼装波纹钢管的板件端头（短边）纵缝采用错缝连接、板件侧边（长边）环缝采用通缝连接，不应焊接连接；
- b) 波纹钢板件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 8，孔位、孔边距和孔间距符合 GB/T 34567 规定；
- c) 波纹钢板件拼装管纵缝（板件端头）连接的螺栓规格及数量符合表 8 规定，环缝（板件侧边）采用单排螺栓连接，规格及螺栓连接副配套性能等级与纵缝（板件端头）连接相同。

表 8 螺栓规格配套的螺栓孔径

波距×波高 ($l \times d$) /mm	孔径（直径） D /mm	高强度螺栓 规格（公称直径）	螺栓孔（标准圆孔）直径， 不大于/mm		每波纹数量（个）
			承压型连接	摩擦型连接	
200×55	$3000 \leq D \leq 5000$	M16	18.00	17.93	≥ 4
		或 M20	22.00	22.52	≥ 3
400×150	$5000 < D \leq 8000$	M16	26.00	26.52	≥ 6
	> 8000	M20	18.00	17.93	≥ 6
注：当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。否则，采用表列螺栓规格或数量。					

8.4 加劲肋板构造

8.4.1 孔径（直径）大于或等于 8.00 m 的波纹钢板件拼装管，孔径（直径）6.00 m～小于 8.00 m 且壁厚为附录 A 规定的最小值、管顶填土总厚度（含路面结构层）大于 5.0 m 的波纹钢板件拼装管，均应增设波纹钢加劲肋板。

8.4.2 加劲肋板的波形、壁厚、宽度、弧形曲面及半径、镀锌层厚度等，应与主体结构的波纹钢板件相同。

8.4.3 加劲肋板与波纹钢管主体结构波峰对波峰连接，见图 5 分图 b），加劲肋板螺栓孔布设应与波纹钢管主体结构螺栓孔一致，并利用主体结构螺栓一体化连接，形成组合截面。

8.4.4 加劲肋板宜设在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 5 分图 a）；沿波纹钢管顶纵轴线每间隔 3 个波距设置，见图 5 分图 b）。

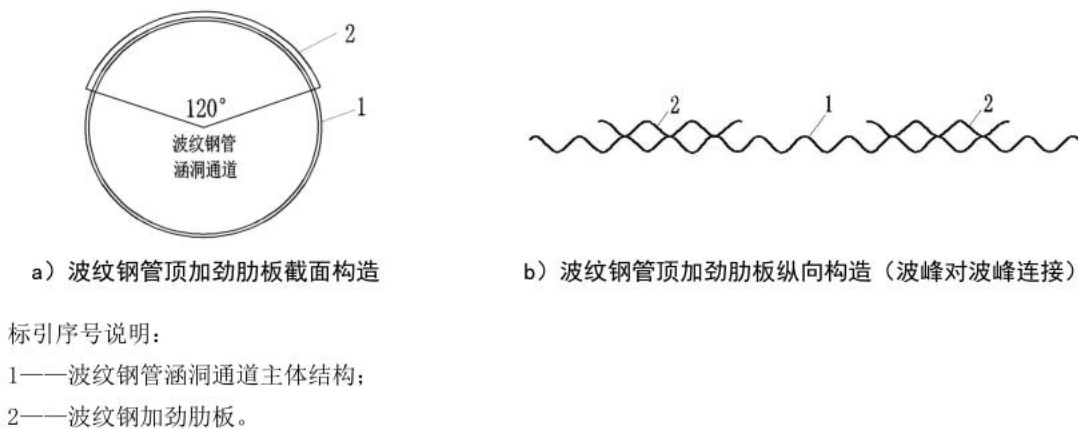


图 5 波纹钢管顶加劲肋板构造示意图

8.5 结构性回填

8.5.1 波纹钢管顶（波峰）以上的结构性回填最小填土厚度（见图 6），并按附录 B 规定计算确定。

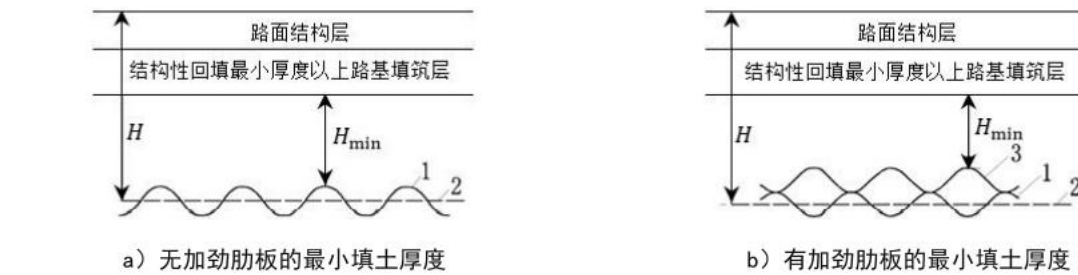


图 6 波纹钢管顶以上结构性回填最小填土厚度示意图

8.5.2 当波纹钢管顶结构性回填最小填土厚度不足或受限时，按 8.6 设置混凝土减载板。管顶设减载板的结构层回填最小填土厚度，按附录 B 计算确定。

8.5.3 波纹钢管周围起拱线处的管基以上结构性回填最小宽度（沿路线方向）范围、并列双孔或多孔起拱线之间的回填最小宽度见表 9、图 7。

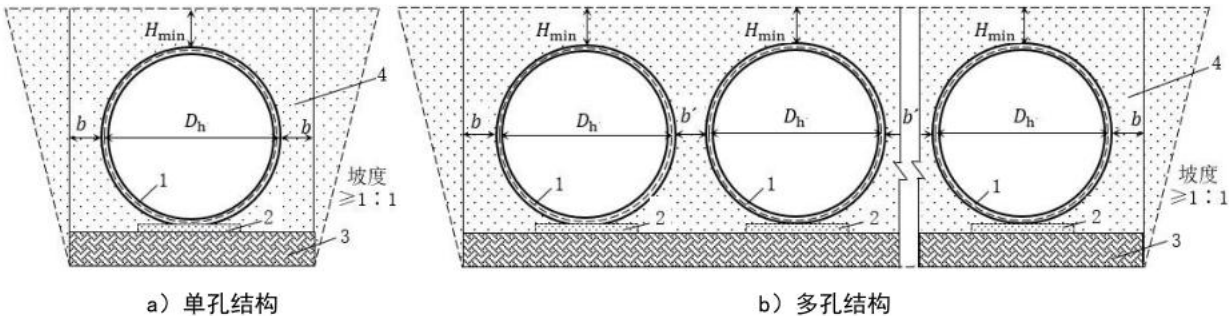
表 9 结构性回填最小宽度

波纹钢管涵洞通道 计算直径 D_h /m	管外侧结构性回填最小宽度/m		结构性回填最小宽度/m
	b	b'	
$D_h = 1.0$	$1.5 D_h$	0.5	$2 b + n D_h + (n - 1) b'$
$1.0 < D_h \leq 2.0$	$1.0 D_h$	$0.5 D_h$	

表 9 结构性回填最小宽度（续）

波纹钢管涵洞通道 计算直径 D_h /m	管外侧结构性回填最小宽度/m		结构性回填最小宽度/m
	b	b'	
$2.0 < D_h \leq 10.0$	$0.5 D_h$	1.0	$2 b + n D_h + (n - 1) b'$
$D_h > 10.0$	$0.5 D_h$	$0.1 D_h$	

注：n为波纹钢管孔数。

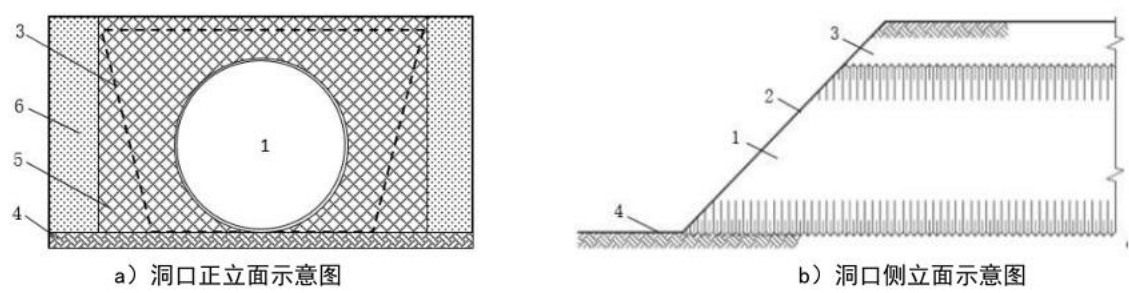


- 标引序号说明：
- 1 ——波纹钢管涵洞通道主体结构；
 - 2 ——管基松铺砂砾垫层；
 - 3 ——地基宽度范围；
 - 4 ——结构性回填范围区；
 - D_h ——计算直径（波纹中轴线处计算）；
 - H_{min} ——管顶（波峰）以上结构性回填最小填土厚度（见图 6）；
 - b ——结构性回填最小宽度范围区；
 - b' ——多孔之间最小净距。

图 7 波纹钢管结构性回填范围示意图

- 8.5.4 结构性回填层与岩石路基（沿路线方向）衔接时，衔接直径宜设置不小于 2.0 m 的半刚性（水泥稳定层等）过渡段。
- 8.5.5 波纹钢管的管基顶面以上结构性回填长度（沿涵洞通道的长度方向）范围，应与路基宽度（包括路基边坡及边坡侧墙或护坡等）相同。
- 8.5.6 非干旱地区路段的波纹钢管涵洞通道结构性回填层顶面宜设置不渗水的防渗水层。
- 8.6 减载板构造
- 8.6.1 管顶结构性回填土最小厚度不满足计算厚度时应设置减载板，混凝土强度等级不低于 C30。
- 8.6.2 减载板底面与波纹钢管顶（波峰）之间的最小净距（结构性回填层厚度）宜为 30 cm~35 cm。
- 8.6.3 减载板长度按设置位置计算确定，宽度应延伸至最外侧的波纹钢管起拱线外不小于 1.0 m。
- 8.6.4 通过计算确定减载板钢筋网、多孔结构之间的伸缩缝及传力杆钢筋布置，宜按 JTG D40 规定的圆管状构筑物上混凝土路面单层钢筋网布置。
- 8.7 洞口构造

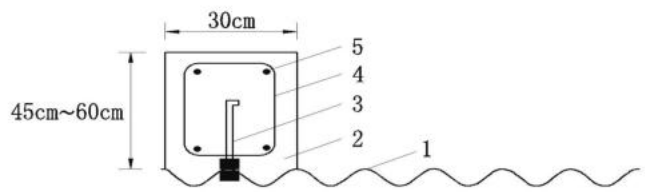
- 8.7.1 洞口可采用八字墙、一字墙、端墙、翼墙等，构造参照 JTG/T 3365-02 规定设计。
- 8.7.2 洞口周围的路基边坡挡墙可采用波纹钢板挡墙（参照 DB 63/T 1850 设计），以及钢筋混凝土挡墙、有面板（预制块砌体）加筋土挡墙、浆砌预制块或片（块）石挡墙等参照 JTG D30 设计。
- 8.7.3 洞口可采用“削竹式”（见图 8），洞口斜坡（坡度）与路基边坡相同。



- 标引序号说明：
- 1——波纹钢管主体结构；
 - 2——“削竹式”洞口；
 - 3——结构性回填范围；
 - 4——洞口地面；
 - 5——洞口坡面防护；
 - 6——填筑路基。

图 8 “削竹式”洞口示意图

- 8.7.4 “削竹式”的洞口管缘宜采用钢筋混凝土加强圈（细部构造见图 9），强度等级不低于 C30。并符合下列规定：
- a) 加强圈宜设置在起拱线以上；
 - b) 波纹钢管直径小于或等于 4.00 m 时，洞口管缘预置 M16 螺栓，加强圈高度为 45 cm；直径大于 4.00 m 时，洞口管缘预置 M20 螺栓，加强圈高度宜为 60 cm；
 - c) 直径 8 mm 光圆钢筋（箍筋）间距和预置螺栓间距为 45 cm，箍筋与预置螺栓绑扎连接；
 - d) 钢筋保护层厚度不小于 50 mm。



- 标引序号说明：
- 1——波纹钢管结构；
 - 2——水泥混凝土；
 - 3——预置 M16 或 M20 螺栓；
 - 4——直径 8 mm 光圆钢筋（箍筋）；
 - 5——N16 带肋钢筋。

图 9 钢筋混凝土加强圈示意图

- 8.7.5 洞口路基边坡的坡面可采用浆砌片石或混凝土预制块铺砌、混凝土预制块网格等防护（不宜采

用干砌片石防护)。

9 主体结构设计

9.1 一般规定

9.1.1 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。

9.1.2 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上回填后产生的作用,可变作用主要为车辆荷载和施工阶段施工设备(车辆)等临时荷载。

9.2 设计计算

9.2.1 主体结构的作用设计应符合以下规定:

- a) 波纹钢管上回填后产生的作用主要为波纹钢管涵洞通道结构上每延米填土的重力;
- b) 车辆荷载主要为汽车荷载为荷载扩散到波纹钢管顶的压力和冲击荷载,施工设备(车辆)重力等临时荷载;
- c) 地震作用为抗震设防烈度大于等于 7 度的地区,一般只考虑竖向地震作用引起的波纹钢管压力。对于波距 400 mm、波深 150 mm 波形的波纹钢管涵洞通道结构,考虑竖向地震作用对恒载弯矩的放大作用(由地震作用引起的波纹钢管结构跨中截面的附加弯矩);
- d) 结构设计安全等级、汽车荷载及其主要技术指标、常用材料重度、作用及分项系数、作用的组合方法和结构重要性系数等参数确定,并符合 JTG 3365-02 和 JTG D60 规定;对于波纹钢管结构按下列原则取其最不利组合效应进行设计:
 - 1) 结构上可能同时出现的作用应进行组合,当结构或结构构件需进行不同受力方向的验算时,则以不同方向的最不利的作用组合效应进行计算,
 - 2) 当可变作用的出现对结构构件产生有利影响时,该作用不参与组合,
 - 3) 施工阶段的作用组合,按计算需要及结构所处的条件而定,结构上的施工人员和施工机具设备均作为可变作用加以考虑,
 - 4) 多个偶然作用不同时参与组合,
 - 5) 地震作用不与偶然作用同时参与组合;
- e) 作用按附录 C.1 计算确定。

9.2.2 主体结构设计计算应符合以下规定:

- a) 波纹钢管结构应力分别按考虑地震作用和不考虑地震作用计算波纹钢管的轴向压应力;
- b) 极限抗力,通过波纹钢管结构截面上部圆弧圆心与竖向中心线形成夹角的两条对称直线将管壁划分为上下两部分,分别验算管壁抗压强度,并计算极限抗力临界应力验证结构稳定性;
- c) 弯矩和轴力组合效应,分别按考虑地震作用和不考虑地震作用计算。对于波距 400 mm、波深 150 mm 波形的波纹钢管结构,其弯矩和轴力组合效应小于截面乘系数的塑形抗弯承载力;
- d) 管拱形拱脚处极限状态压力,主要考虑荷载在拱脚处产生的压力;
- e) 施工过程结构验算应校核波纹钢管运输和安装施工过程中刚度(以最大柔度系数控制),主要考虑施工过程中涵洞通道结构的截面弯矩与轴向压力的内力组合进行强度计算;
- f) 按附录 C.2~C.7 进行结构设计计算。

9.2.3 波纹钢板件拼装管高强度螺栓连接强度及扭矩应符合下列规定：

- a) 波纹钢板件拼装管采用高强度螺栓承压型连接。当波纹钢板件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缝隙能满足摩擦型连接要求时，可采用摩擦型连接；
- b) 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 要求；
- c) 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 要求；
- d) 高强度螺栓终拧扭矩，根据 JGJ 82 的规定计算确定。

10 防渗及防腐设计

10.1 一般规定

- 10.1.1 应对管体接缝高强度螺栓连接防渗、管体内外壁防腐和涵洞内壁防磨蚀等进行防渗、防腐设计。
- 10.1.2 应通过测试确定结构受周围土体长期作用下的腐蚀性物质指标和等级，采取相应防腐措施。
- 10.1.3 应通过勘察预测涵洞内排水磨蚀推移质的量、预期流速指标，采取相应的防磨蚀措施。
- 10.1.4 波纹钢管（板）和连接件等的防腐锌层应采用工厂化热浸镀锌工艺，局部修补可采用喷涂工艺。
- 10.1.5 非干旱地区宜在管顶上结构性回填层顶面设置防渗水层，管顶结构性回填层中设减载板时宜在减载板底部设置防渗水层。防渗水层的长度与路基同宽，宽度与结构性回填层一致。

10.2 防渗设计

10.2.1 接缝防渗密封垫应符合下列规定：

- a) 波纹钢管连接接缝防渗密封垫厚度不小于 5.0 mm；
- b) 宽度与被连接件的连接部位接缝（搭接）面宽度一致；
- c) 管箍密封垫的长度不小于管体外周长，法兰密封垫与法兰周长一致，拼装管搭接连接密封垫长度不小于接缝长度；
- d) 螺栓密封垫的尺寸不小于钢垫片尺寸，孔径不大于螺栓公称直径。

10.2.2 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) 管端头紧密对合，管箍的波峰对应于管体的波谷紧扣压于防渗密封垫上，管端头对合缝处位于管箍宽度的 1/2 处。

10.2.3 分节整装环形波纹钢管接头法兰连接防渗应符合下列规定：

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

10.2.4 拼装管接缝连接防渗应符合下列规定：

- 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) 三块波纹钢板件搭接接缝重叠处或波峰与波谷之间搭接面缝隙较大时，根据缝隙大小增设满足缝隙填充的密封垫厚度。

10.2.5 拼装管连接接缝处防水处理应符合下列规定：

- a) 管外壁外露螺栓、螺帽、钢垫片、防渗密封垫及周围缝隙，采用 6.3.1 b) 规定的硅酮密封胶（SR 类）或双组分聚硫密封胶加强防渗（防水）处理；
- b) 管外壁接缝处采用 6.3.1 c) 规定的聚氨酯（MPU 类）防水涂层，厚度不小于 2.0 mm，涂层宽度纵缝不小于 120 mm、环缝不小于 80 mm；
- c) 聚氨酯（MPU 类）防水涂层表面，粘贴一层 6.3.1 c) 规定的路桥用塑性体改性沥青防水卷材的要求，平均厚度不小于 3.5 mm、最小厚度不小于 3.3 mm，粘贴宽度纵缝不小于 120 mm、环缝不小于 80 mm。

10.3 防腐设计

10.3.1 波纹钢管、波纹钢加劲肋板、连接件，均应进行热浸镀锌防腐，镀锌防腐层厚度及其质量，应符合 GB/T 34567 规定。

10.3.2 波纹钢管的使用年限应综合考虑结构性回填土体的腐蚀特性、波纹钢管壁厚及镀锌防腐层构造等因素。结构受周围土体长期作用下的腐蚀性等级指标见表 10，当波纹钢管所处土体（环境）的腐蚀性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。

表 10 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/ $\Omega \cdot m$	含盐率/%	含水率/%	pH 值
微腐蚀性	>100	<0.02	<3	5.5~8.5
弱腐蚀性	51~100	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

10.3.3 波纹钢管外壁与周围土体接触面的喷涂防腐应符合下列规定：

- a) 微腐蚀性环境时，仅镀锌防腐层可不考虑喷涂防腐；
- b) 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符合表 11 规定；
- c) 位于强腐蚀性环境时，采用 6.3.1 d) 规定的厚度不小于 2.0 mm 的环保用高密度聚乙烯土工膜严密包裹于波纹钢管防腐喷涂层表面，隔离腐蚀性物质侵入。

表 11 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	防腐喷涂材料	喷涂总干膜厚度/mm
弱腐蚀性	改性沥青	≥ 1.0
中腐蚀性	环氧沥青	≥ 1.0
	或改性沥青	≥ 1.5
强腐蚀性	环氧沥青	≥ 1.5
	或改性沥青	≥ 2.0

10.3.4 涵洞内壁（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，按照 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 $210\mu\text{m}$ 或 $240\mu\text{m}$ ；
- b) 干湿交替区域和水下区域（管内最高流水面长期淹没内壁区域），按照 JT/T 722 规定喷涂超强耐磨环氧漆、环氧玻璃鳞片漆（适用于干湿交替区域）或环氧漆（适用于水下区域）喷涂防腐，总干膜厚度不小于 $450\mu\text{m}$ 。

10.3.5 通道内壁（镀锌防腐层表面）喷涂防腐应符合下列规定：

- a) 内壁外露面可采用防腐漆喷涂，总干膜厚度不小于 $100\mu\text{m}$ 。颜色与环境要求相协调；
- b) 内壁下侧与通道路面底部接触面范围，采用总干膜厚度不小于 1.0mm 的环氧沥青或总干膜厚度不小于 1.5mm 的改性沥青喷涂防腐；
- c) 通道内两侧设置混凝土防撞墙的部位，不设喷涂防腐层。

10.3.6 涵洞内壁磨蚀指标等级见表 12，防磨蚀应符合下列规定：

- a) 1 级（微磨蚀）：可不考虑防磨蚀层；
- b) 2 级（弱磨蚀）：镀锌防腐层表面按 10.3.4 b) 规定的水下区域喷涂；
- c) 3 级（中度磨蚀）：管内最大流水面设置厚度不小于 2.0mm 的聚合物涂层，或按 10.3.4 b) 规定的水下区域喷涂；
- d) 4 级（严重磨蚀）：管内最大冲刷面范围设置钢丝网片或钢纤维（塑料纤维）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 50.0mm ，混凝土内布置直径 5.0mm 、间距 100.0mm 热镀锌钢丝网，钢丝网片保护层厚度不小于 25.0mm 。

表 12 波纹钢管涵洞内壁磨蚀指标等级

磨蚀等级		推移质特征	预期流速/（ m/s ）
1 级	微磨蚀	流水中夹带砂土、砾等推移质体积约 $<5\%$	<1.0
2 级	弱磨蚀	流水中夹带少量砂、砾推移质体积约 $<20\%$	≥ 1.0 、 <1.5
3 级	中度磨蚀	流水中夹带中等砂土、砾推移质体积约 $<40\%$	≥ 1.5 、 <4.5
4 级	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

11 附属工程设计

11.1 一般规定

11.1.1 通道内道路宜与既有道路相协调，距通道洞口路段的圆曲线最小半径、最大纵坡、停车视距、会车与超车视距及路段长度等，应符合 JTG B01 规定。

11.1.2 护栏、限高或限宽等安全防护设施设计，应符合 JTG/T D81 规定。

11.1.3 通道长度超过 50m 时，通道内宜设置照明设施。

11.2 洞内工程

11.2.1 路面标高应满足通道孔径内建筑限界要求，路面结构层应与洞外路面结构层衔接一致，路面结

构层底面以下至管内壁之间，宜采用砂砾垫层过渡层，压实度应大于或等于 95 %。

11.2.2 水泥混凝土路面结构设计应符合 JTG D40 规定，沥青路面结构设计应符合 JTG D50 规定。

11.2.3 通道设置人行道、过水沟（渠）时，人行道应设置在行车道两侧，水沟（渠）宜采用预制盖板沟（渠）设置在人行道外侧（人行道与管内壁或防撞墙之间）。

11.2.4 通道内机动车通道两侧需设防撞墙保护管内壁时应符合下列规定：

- a) 通道内建筑限界外侧与管壁之间设置钢筋混凝土防撞墙时，强度等级不低于 C30，路面以上垂直高度不小于 1.5 m；
- b) 防撞墙采用直径 20 mm 的带肋钢筋、横向间距为 2 个波距，水平筋采用直径 8 mm 或 10 mm 光圆钢筋、竖向间距 150 mm。钢筋保护层厚度不小于 50 mm；
- c) 防撞墙伸缩缝每 15 m～20 m 设置一道通缝；
- d) 防撞墙的防撞性能（等级）符合 JTG/T D81 规定。

11.3 洞外工程

11.3.1 通道洞口外衔接与洞内路面的长度不宜小于 20.0 m。

11.3.2 涵洞洞口铺砌、沟床加固及防护等设计，应符合 JTG/T 3365-02 规定。

11.3.3 根据现场实际可增设截（排）水沟、急流槽、导流坝等。

附录 A
(规范性)
波纹钢管构造参数

波纹钢管结构波形、管径、壁厚与管顶填筑层最小填土厚度参数，见表A.1。

表 A.1 波纹钢管结构波形、管径、壁厚与管顶填筑层厚度参考参数

波纹钢管 类型	波距×波高 ($l \times d$) /mm	波纹钢管壁厚 范围 t /mm	波纹钢管孔径 (直径) D /m	波纹钢管壁厚 t , 不小于/mm	管顶结构性回填 最小填土 厚度 $H_{\min}$ /m	备注
螺旋波纹 钢管	68×13	1.6~3.0	1.00	1.6	0.60	适用于 涵洞
			1.25	2.0		
			1.50	2.5		
			2.00	3.0		
	75×25、 76.2×25.4	1.6~4.0	1.00	1.6	0.60	
			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	
2.00				3.5		
2.50				4.0		
3.00				5.0		
波纹钢板件 拼装管	200×55	4.0~6.0	3.00	4.0	0.60	适用于 涵洞、通道
			4.00	5.0	0.76	
			5.00	6.0	0.93	
	400×150	6.0~10.0	5.00	6.0	0.95	
			6.00		1.10	
			7.00	6.5	1.20	
			8.00		1.36	
			9.00	7.0	1.50	
			10.00	7.5		
			11.0	8.0		
			12.0	8.5		
			13.0	9.0		
			14.0	9.5		
			15.0	10.0		
注1：计算壁厚小于表中壁厚时，采用表中壁厚；计算壁厚大于表中壁厚时，采用计算壁厚；位于强腐蚀环境或严重磨蚀环境时，宜增加0.5 mm~1.0 mm壁厚。						
注2：管顶结构性回填最小填土厚度不满足表列要求时，宜按8.6设置减载板。						

附录 B
(规范性)
结构性回填最小填土厚度计算

B.1 结构性回填最小填土厚度

波纹钢管涵洞通道的管顶（波峰）以上的结构性回填最小填土厚度按公式（B.1）计算确定（取最大值），且不应小于 0.6 m；但对于波距 400 mm、波深 150 mm 波形的波纹钢板件拼装管结构，最小填土厚度为公式（B.1）计算的最大值与 1.500 m 比较，两者取较小值。

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

式中：

- $H_{\min}$ ——结构性回填最小填土厚度，单位为米（m）；
- D_h ——波纹钢管涵洞通道计算直径或计算跨径，单位为米（m），按图3 界限取值；
- D_v ——波纹钢管涵洞通道计算矢高，单位为米（m），按图3 界限取值。

B.2 钢筋混凝土减载板最小填土厚度

增加钢筋混凝土减载板后的结构性回填最小填土厚度按公式（B.2）计算确定，计算结果小于或等于 30 cm 时，按 30 cm 控制；计算结果大于 30 cm 时，按计算结果控制。

$$H_{\min} = t_b R_{AL} R_C R_f \dots\dots\dots (B.2)$$

式中：

- $H_{\min}$ ——设置钢筋混凝土减载板后的结构性回填最小填土厚度，单位为毫米（mm）；
- t_b ——减载板最小厚度，单位为毫米（mm），按表B.1 取值；
- R_{AL} ——轴向荷载修正系数，按表B.2 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 ——结构直径（跨度）影响系数，取1.2。

表 B.1 钢筋混凝土减载板最小厚度

项目	不同孔径（直径）的减载板最小厚度			
波纹钢管孔径（直径） D /m	$D \leq 3.0$	$3.0 < D \leq 5.0$	$5.0 < D \leq 8.0$	$D > 8.0$
减载板最小厚度 t_b /mm	180	200	220	250

表 B.2 轴向荷载修正系数

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

B.3 管顶允许车辆通行的结构性回填最小厚度

结构性回填施工时，机共享回填层中未设减载板时的波纹钢管顶以上允许重型车辆（施工机械）通行时的最小填土厚度，按公式（B.3）计算。结构性回填层中设有钢筋混凝土减载板时，不需计算通行最小厚度，可允许在减载板上通行。

$$H_{\min} = \min \left\{ 1\,500; \max \left[600; D_h \times \frac{\sqrt{D_h/D_v}}{6}; 400 \times \left(\frac{D_h}{D_v} \right)^2 \right] \right\} \cdots \cdots (B.3)$$

式中：

$H_{\min}$ ——波纹钢管顶允许车辆（施工机械）通行时的结构性最小填土厚度，单位为米（m）；

D_h ——波纹钢管涵洞通道计算直径或计算跨径，单位为米（m），按图3 界限取值；

D_v ——波纹钢管涵洞通道计算矢高，单位为米（m），按图3 界限取值。

附录 C
(规范性)
波纹管结构设计计算

C.1 作用

C.1.1 土的重力计算：

作用在波纹管上结构性回填土体（恒载）作用范围见图C.1，每延米的重力按公式（C.1）计算。



图 C.1 波纹管结构上填土的重力作用范围示意图

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

式中：

- W ——波纹管上填土每延米的重力，单位为千牛每米（kN/m）；
- γ ——回填土的重度，单位为千牛每立方米（kN/m³），参照JTG D60 规定取值；
- D_h ——波纹管涵洞通道计算直径或计算跨径，单位为米（m），按图3 界限取值；
- H ——波纹管顶填土高度，以波纹管的波纹中轴线以上计算，单位为米（m）；
- D_v ——波纹管涵洞通道计算矢高，单位为米（m），按图3 界限取值。

C.1.2 汽车荷载计算：

- a) 公路波纹管涵洞通道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照 JTG D60 规定，扩散压力按公式（C.2）计算；
- c) 车辆冲击系数，按公式（C.3）计算。管顶以上填土厚度大于 2.0 m 时，可不考虑冲击影响。

$$\sigma_L = \frac{A_L}{l_t \cdot w} \cdot m_f \dots\dots\dots (C.2)$$

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

式中：

- σ_L ——汽车荷载扩散到波纹管管顶的压力，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），荷载取值参照JTG D60 规定，应考虑车道数。施工过程中计算，按实际施工机械及车辆总轴重验算；
- m_f ——多车道折减系数，参照JTG D60 规定取值；
- l_t 、 w ——沿车轮长度和宽度方向扩散后尺寸，单位为米（m）。活载扩散方法参照 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C.2；

μ ——车辆冲击扩大系数；

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

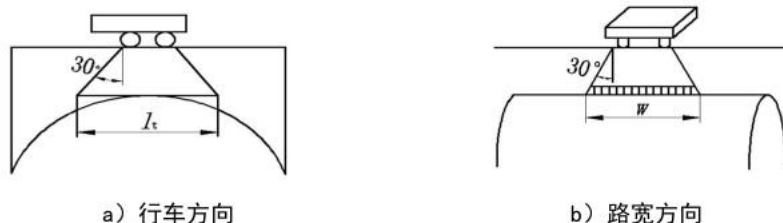


图 C.2 车辆荷载扩散示意图

C.1.3 施工过程中荷载计算：

- 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；
- 在施工过程中，用于结构和附加设备重力的荷载系数不应小于 1.25；除特殊要求外，施工荷载的放大系数不应小于 1.5。

C.1.4 地震作用计算：

- 抗震设防烈度大于或等于 7 度地区路段的波纹钢管涵洞通道，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（C.4）计算；
- 对于波距 400 mm、波深 150 mm 波形的波纹钢管涵洞通道结构，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（C.5）计算。

$$N_E = 0.5 \frac{R_0 \delta}{g} W \dots\dots\dots (C.4)$$

$$M_E = \frac{R_0 \delta}{g} M_G \dots\dots\dots (C.5)$$

式中：

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）；

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 2231-01 规定取值；

g ——重力加速度，单位为米每平方秒（m/s²），取 9.80665；

W ——波纹钢管上填土每延米的重力，单位为千牛每米（kN/m），按公式（C.1）计算；

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

M_G ——恒载作用下波纹钢管跨中截面弯矩，单位为千牛米每米（kN·m/m），按公式（C.24）计算。

C.2 波纹钢管结构应力：

波纹钢管的轴向压应力按公式（C.6）～（C.10）计算。当考虑地震作用时，应满足公式（C.6）的要求；当不考虑地震作用时，应满足公式（C.7）的要求。

$$\text{当考虑地震作用时，} \gamma_0(\gamma_G N_G + \gamma_E N_E)/A < \min(f_y, f_b) \dots\dots\dots (C.6)$$

$$\text{当不考虑地震作用时，} \gamma_0[\gamma_G N_G + \gamma_Q N_Q(1 + \mu)]/A < \min(f_y, f_b) \dots\dots\dots (C.7)$$

$$N_G = 0.5(1.0 - 0.1C_S)A_fW \dots\dots\dots (C.8)$$

$$N_Q = 0.5D_h\sigma_L \dots\dots\dots (C.9)$$

$$C_S = \frac{1000E_S D_V}{EA} \dots\dots\dots (C.10)$$

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（填土推力）分项系数，取1.2；

N_G ——波纹钢管上填土引起的波纹管每延米推力，单位为千牛每米（kN/m），按公式（C.8）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（C.4）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（mm²/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 规定取值；

f_b ——波纹钢板屈曲临界应力，单位为兆帕（MPa），按公式（C.13）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压力，单位为千牛每米（kN/m），按公式（C.9）计算；

μ ——车辆活载冲击系数，按公式（C.3）计算；

C_S ——回填土性质与结构尺寸的土压力折减系数，按公式（C.10）计算；

A_f ——结构起拱效应的土压力增大系数；按表C.1 取值；

W ——波纹钢管上填土每延米的重力，单位为千牛每米（kN/m），按公式（C.1）计算；

D_h ——波纹钢管涵洞通道计算直径或计算跨径，单位为米（m），按图3 界限取值；

σ_L ——活载扩散到波纹钢板拱顶的压力，单位为千帕（kPa），按公式（C.2）计算；

E_S ——结构性回填土的弹性模量，单位为兆帕（MPa）；

D_V ——波纹钢管涵洞通道计算矢高，单位为米（m），按图3 界限取值；

E ——波纹钢板材的弹性模量，单位为兆帕（MPa）。

表 C.1 土压力增大系数 A_f

H/D_h	A_f			
	$D_h/D_V=1.0$	$D_h/D_V=1.2$	$D_h/D_V=1.4$	$D_h/D_V\geq 1.6$
>3.0	1.20	1.10	1.05	1.02
3.0	1.25	1.18	1.08	1.02
2.0	1.25	1.18	1.08	1.02
1.8	1.25	1.18	1.08	1.02
1.6	1.24	1.17	1.08	1.02
1.4	1.22	1.15	1.08	1.02
1.2	1.20	1.12	1.07	1.02
1.0	1.19	1.10	1.05	1.02
0.8	1.19	1.11	1.06	1.03

0.6	1.20	1.12	1.07	1.04
0.4	1.23	1.15	1.10	1.05
≤0.2	1.28	1.20	1.15	1.10
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。				

C.3 极限抗力

C.3.1 通过波纹钢管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壁划分为上下两部分，见图C.3，分别验算管壁抗压强度。 θ_0 按公式(C.11)～(C.12)计算。

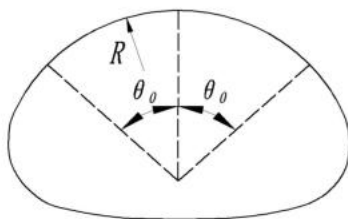


图 C.3 上下管壁划分示意图

$$\theta_0 = 1.6 + 0.2 \log \left(\frac{EI}{E_m R^3} \right) \dots\dots\dots (C.11)$$

$$E_m = E_s \left[1.0 - \left(\frac{R_c}{R_c + 1000(H+H')} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (C.12)$$

式中：

θ_0 ——通过管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 规定取值；

E_m ——土体弹性模量的修正值，结构壁侧面和下半部分等于 E_s 、上半部分按公式(C.12)计算；

R ——结构的曲率半径，单位为毫米(mm)；

E_s ——结构性回填土的弹性模量，单位为兆帕(MPa)；

R_c ——波纹钢管顶处的曲率半径，单位为毫米(mm)；

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

H' ——波纹钢管顶与起拱线之间垂直距离的一半，单位为米(m)。

C.3.2 为保证波纹钢管涵洞通道结构的稳定性，应按公式(C.13)～(C.18)计算极限抗力临界应力。

$$\left. \begin{aligned} \text{当 } R \leq R_e \text{ 时, } f_b &= \phi_t F_m \left[f_y - \left\{ \frac{f_y^2}{12E\rho} \left(\frac{KR}{r} \right)^2 \right\} \right] \\ \text{当 } R > R_e \text{ 时, } f_b &= \frac{3\phi_t \rho F_m E}{(KR/r)^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (C.13)$$

$$R_e = \frac{r}{K} \left(\frac{6E\rho}{f_y} \right)^{0.5} \dots\dots\dots (C.14)$$

$$F_m = 0.85 + \frac{0.3S}{D_h} \leq 1.0 \dots\dots\dots (C.15)$$

$$\rho = \left(1000 \frac{H+H'}{R_c}\right)^{0.5} \leq 1.0 \quad (\text{C. 16})$$

$$K = \lambda \left(\frac{EI}{E_m R^3}\right)^{0.25} \quad (\text{C. 17})$$

$$\lambda = 1.22 \left[1.0 + 1.6 \left(\frac{EI}{E_m R_c^3}\right)^{0.25}\right] \quad (\text{C. 18})$$

式中：

- 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），按公式（C. 14）计算；
 f_b ——波纹钢板极限抗力临界应力，单位为兆帕（MPa），按公式（C. 13）计算；
 ϕ_t ——波纹钢材料抗力系数，取0.8；
 F_m ——多孔结构极限抗力的应力折减系数，按公式（C. 15）计算；
 f_y ——波纹钢板材屈服强度，单位为兆帕（MPa）；
 E ——波纹钢板材的弹性模量，单位为兆帕（MPa）；
 ρ ——屈曲折减系数，按公式（C. 16）计算；
 K ——结构与周围土体相对弯曲刚度系数，按公式（C. 17）计算；
 r ——波纹钢板材回转半径，单位为毫米（mm），参照 GB/T 34567 规定取值；
 S ——双孔或多孔结构之间的最小间距，单位为米（m）；
 D_h ——波纹钢管涵洞通道计算直径或计算跨径，单位为米（m），按图 3 界限取值；
 H ——波纹钢管顶填土高度，以波纹钢管的波纹中轴线以上计算，单位为米（m）；
 H' ——管顶与起拱线之间垂直距离的一半，单位为米（m）；
 R_c ——管顶处的曲率半径，单位为毫米（mm）；
 λ ——计算 K 值的一个系数，按公式（C. 18）计算；
 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 规定取值；
 E_m ——土体弹性模量的修正值，结构壁侧面和下半部分等于 E_s （结构性回填土的弹性模量 MPa）、上半部分按下式（C. 12）计算。

C.4 弯矩和轴力组合效应

波纹钢管弯矩和轴力的组合效应按公式（C. 19）～（C. 34）计算，并应满足公式（C. 19）的要求。对于波距400 mm、波深150 mm波形的波纹钢管涵洞通道结构，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。

$$\left(\frac{N}{N_{pf}}\right)^2 + \left|\frac{M_f}{M_{pf}}\right| \leq 1.0 \quad (\text{C. 19})$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{当考虑地震作用时, } N = \gamma_G N_G + \gamma_E N_E \\ \text{当不考虑地震作用时, } N = \gamma_G N_G + \gamma_Q N_Q (1 + \mu) \end{array} \right\} \quad (\text{C. 20})$$

$$N_{pf} = \phi_h A f_y \quad (\text{C. 21})$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{当考虑地震作用时, } M_f = \gamma_G M_G + \gamma_E M_E \\ \text{当不考虑地震作用时, } M_f = \gamma_G M_G + \gamma_Q M_L (1 + \mu) \end{array} \right\} \dots\dots\dots (C. 22)$$

$$M_{pf} = \phi_h M_p \dots\dots\dots (C. 23)$$

$$M_G = |M_1 + M_{DH}| \dots\dots\dots (C. 24)$$

$$M_L = \frac{k_{M3} R_U D_h A_L}{k_4} \dots\dots\dots (C. 25)$$

$$M_p = \frac{2I}{d+t} f_f \dots\dots\dots (C. 26)$$

$$M_1 = k_{M1} R_B \gamma D_h^3 \dots\dots\dots (C. 27)$$

$$R_U = \frac{0.265 - 0.053 \cdot \lg N_f}{(H/D_h)^{0.75}} \dots\dots\dots (C. 28)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{当 } H < \frac{D_h}{2} \text{ 时, } M_{DH} = -k_{M2} R_B \gamma D_h^2 H \\ \text{当 } H \geq \frac{D_h}{2} \text{ 时, } M_{DH} \text{ 采用有限元数值模拟方法计算} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (C. 29)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{当 } N_f \leq 100000 \text{ 时, } k_{M3} = 0.12 - 0.018 \cdot \lg N_f \\ \text{当 } N_f > 100000 \text{ 时, } k_{M3} = 0.030 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (C. 30)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{当 } N_f \leq 5000 \text{ 时, } K_{M1} = 0.0046 - 0.001 \cdot \lg N_f \\ \text{当 } N_f \geq 5000 \text{ 时, } K_{M1} = 0.0009 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (C. 31)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{当 } 0.20 \leq \frac{D_V}{2D_h} \leq 0.35 \text{ 时, } R_B = 0.67 + 0.87 \left(\frac{D_V}{2D_h} - 0.20 \right) \\ \text{当 } 0.35 \leq \frac{D_V}{2D_h} \leq 0.50 \text{ 时, } R_B = 0.80 + 1.33 \left(\frac{D_V}{2D_h} - 0.35 \right) \\ \text{当 } \frac{D_V}{2D_h} > 0.50 \text{ 时, } R_B = \frac{D_V}{D_h} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (C. 32)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{当 } N_f \leq 5000 \text{ 时, } k_{M2} = 0.018 - 0.004 \cdot \lg N_f \\ \text{当 } N_f > 5000 \text{ 时, } k_{M2} = 0.0032 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (C. 33)$$

$$N_f = \frac{E_S (1000 D_h)^3}{EI} \dots\dots\dots (C. 34)$$

式中:

N ——波纹钢截面所受轴向压力, 单位为千牛每米(kN/m), 按公式 (C. 20) 计算;

N_{pf} ——波纹钢管截面塑性抵抗系数的设计压力, 单位为千牛每米(kN/m), 按公式 (C. 21) 计算。

- M_f ——荷载组合时的波纹钢管结构跨中截面弯矩，单位为千牛米每米 ($\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}$)，按公式 (C.22) 计算；
- M_{pf} ——波纹钢管截面塑性抵抗系数设计弯矩，单位为千牛米每米 ($\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}$)，按公式 (C.23) 计算；
- γ_G ——永久作用（填土推力）分项系数，取1.2；
- N_G ——结构性回填土重力引起的波纹钢管压力，单位为千牛每米 (kN/m)，按公式 (C.8) 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 (C.4) 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压力，单位为千牛每米 (kN/m)，按公式 (C.9) 计算；
- μ ——车辆活载冲击系数，按公式 (C.3) 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 (mm^2/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跨中截面弯矩，单位为千牛米每米 ($\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}$)，按公式 (C.24) 计算；
- M_E ——竖向地震作用引起的波纹钢管结构跨中截面的附加弯矩，单位为千牛米每米 ($\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}$)，按公式 (C.5) 计算；
- M_L ——活载作用下波纹钢管跨中截面弯矩，单位为千牛米每米 ($\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}$)，按公式 (C.25) 计算；
- 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 ($\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}$)，按公式 (C.26) 计算；
- M_1 ——在回填至管顶之前的土体引起波纹钢管结构跨中截面产生的弯矩，单位为千牛米每米 ($\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}$)，按公式 (C.27) 计算；
- R_U ——计算系数，按公式 (C.28) 计算；
- M_{DH} ——由超出管顶的管上填土部分引起波纹钢管结构跨中截面产生的弯矩，单位为千牛米每米 ($\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}$)，按公式 (C.29) 计算；
- k_{M3} ——计算弯矩的参数，按公式 (C.30) 计算；
- D_h ——波纹钢管计算直径或计算跨径，单位为米 (m)，按图3界限取值；
- A_L ——车辆荷载后轴轴重，单位为千牛 (kN)，参照 JTG D60 规定取值；
- k_4 ——等效线性荷载参数，按表 C.2 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 规定取值；
- d ——波纹钢管的波高或波深，单位为毫米 (mm)；
- t ——波纹钢管壁厚（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)；
- k_{M1} ——计算弯矩的参数，按公式 (C.31) 计算；
- R_B ——计算弯矩的参数，按公式 (C.32) 计算；
- γ ——回填土的重度，单位为千牛每立方米 (kN/m^3)，参照 JTG D60 规定取值；
- H ——波纹钢管填土高度，以波纹钢管的波纹中轴线以上计算，单位为米 (m)；
- k_{M2} ——计算弯矩的参数，按公式 (C.33) 计算；
- N_f ——波纹钢管柔度系数，按公式 (C.34) 计算；
- D_V ——波纹钢管涵洞通道计算矢高，单位为米 (m)，按图3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 C.2 等效线性荷载参数 k_4

波纹钢管顶 回填厚度/m	k_4/m		
	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

C.5 施工过程结构刚度及内力组合

C.5.1 波纹钢管运输和安装施工过程中柔度，应按公式 (C.35) 校核计算。

$$F_f = \frac{D^2}{EI} \leq F_{f, \max} \quad \text{..... (C.35)}$$

式中：

F_f ——波纹钢管柔度，单位为毫米每牛 (mm/N)；

D ——波纹钢管涵洞通道结构的孔径或跨径，单位为毫米 (mm)；

E ——波纹钢板材的弹性模量，单位为兆帕 (MPa)；

I ——波纹钢管壁截面惯性矩，单位为四次方毫米每毫米 (mm⁴/mm)，参照 GB/T 34567 规定取值；

$F_{f, \max}$ ——波纹钢管的最大柔度见表 C.3，单位为毫米每牛 (mm/N)。

表 C.3 不同波形的波纹钢管最大柔度 $F_{f, \max}$

波纹钢管波高×波高 ($l \times d$) /mm	最大柔度 $F_f, \max/$ (mm/N)		
	筑堤法施工	管沟法施工	
68×13	0.247	1000 mm≤ D <1500 mm	0.342
		1500 mm≤ D <2000 mm	0.406
		$D \geq 2000$ mm	0.457
75×25 或76.2×25.4	0.247	0.343	
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。			

C.5.2 施工过程中波纹钢管涵洞通道结构截面弯矩与轴向压力的内力组合按公式 (C.36) ~ (C.42) 计算，并应满足公式 (C.36) 的要求。

$$\left(\frac{N}{N_{Pf}}\right)^2 + \left|\frac{M}{M_{Pf}}\right| \leq 1.0 \quad \text{..... (C.36)}$$

$$\left. \begin{aligned} N &= N_G + N_Q \\ H_C/D_h < 0.2 \text{ 时}, N &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (C. 37)$$

$$M = M_1 + M_B + M_C \dots\dots\dots (C. 38)$$

$$M_B = -k_{M2} R_B \gamma D_h^2 H_C \dots\dots\dots (C. 39)$$

$$M_C = k_{M3} R_L D_h L_C \dots\dots\dots (C. 40)$$

$$R_L = (0.265 - 0.053 \cdot \lg N_f) / (H_C/D_h)^{0.75} \leq 1.0 \dots\dots\dots (C. 41)$$

$$L_C = A_C / k_4 \dots\dots\dots (C. 42)$$

式中：

- N ——波纹钢管截面所受轴向压力，单位为千牛每米(kN/m)，按公式(C. 37)计算；
- N_{Pf} ——波纹钢管截面塑性抵抗系数设计压力，单位为千牛米每米(kN/m)，按公式(C. 21)计算；
- M ——波纹钢管跨中截面所受弯矩，单位为千牛米每米(kN·m/m)，按公式(C. 38)计算；
- M_{Pf} ——波纹钢管截面塑性抵抗系数设计弯矩，单位为千牛米每米(kN·m/m)，按公式(C. 23)计算；
- N_G ——结构性回填土重力引起波纹钢管压力，单位为千牛每米(kN/m)，按公式(C. 8)计算；
- N_Q ——汽车(施工机械)荷载引起的波纹钢管压力，单位为千牛每米(kN/m)，按公式(C. 9)计算；
- H_C ——施工过程中的填土高度，单位为米(m)；
- D_h ——波纹钢管涵洞通道计算直径或计算跨径，单位为米(m)，按图3界限取值；
- M_1 ——在回填至管顶之前的土体引起波纹钢管结构跨中截面产生的弯矩，单位为千牛米每米(kN·m/m)，按公式(C. 27)计算；
- M_B ——在施工过程中由超出管顶的管上填土部分引起波纹钢管结构跨中截面产生的弯矩，单位为千牛米每米(kN·m/m)，是负值，按公式(C. 39)计算；
- M_C ——施工过程中汽车荷载(考虑施工机械荷载)引起的波纹钢管结构跨中截面的弯矩，单位为千牛米每米(kN·m/m)，按公式(C. 40)计算；
- k_{M2} ——计算弯矩的参数，按公式(C. 33)计算；
- R_B ——计算弯矩的参数，按公式(C. 32)计算；
- γ ——回填土的重度，单位为千牛每立方米(kN/m³)；
- k_{M3} ——计算弯矩的参数，按公式(C. 30)计算；
- R_L ——计算弯矩的参数，按公式(C. 41)计算；
- L_C ——施工过程中作用于波纹钢管结构上汽车荷载(考虑施工机械荷载)的等效荷载值，单位为千牛每米(kN/m)，按公式(C. 42)计算；
- N_f ——波纹钢管柔度系数，按公式(C. 34)计算；
- 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C. 2取值。

C.6 管拱形拱脚处极限状态压力

管拱形波纹钢管拱脚处极限状态压力应满足公式 (C.43) 的要求。

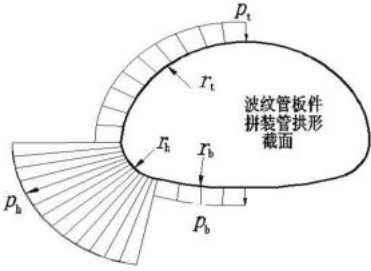
$$p_h = \frac{E_d}{A \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{r_t}{r_h} \leq p_u \dots\dots\dots (C.43)$$

永久作用和可变作用组合, $E_d = (\gamma_G W, \gamma_Q \sigma_L) \dots\dots\dots (C.44)$

永久作用和地震作用组合, $E_d = (\gamma_G W, \gamma_E E_u) \dots\dots\dots (C.45)$

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 C.2;
- 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); 分别按公式 (C.44) 和 (C.45) 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 (mm²/mm);
- r_t ——管拱顶处的半径, 单位为毫米 (mm), 见图 C.4;
- r_h ——管拱的拱脚处半径, 单位为毫米 (mm), 见图 C.4;
- p_u ——管拱形波纹钢结构拱脚极限承载力, 单位为千帕 (kPa), 见表 C.4;
- γ_G ——永久作用分项系数, 取1.2;
- W ——永久作用, 单位为千牛每米 (kN/m);
- γ_Q ——可变作用分项系数, 取1.4;
- σ_L ——可变作用, 单位为千牛米每米 (kN/m);
- γ_E ——地震作用分项系数, 取 1.0;
- E_u ——竖向地震作用, 单位为千牛每米 (kN/m)。



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 C.4 压力绕管拱形状的变化示意图

表 C.4 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

C.7 有限元分析建模

C.7.1 二维建模宜遵循以下要点：

- a) 几何模型：波纹钢管涵洞通道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，进而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，波纹钢管涵洞通道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；

- b) 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，土体材料选择应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；
- c) 模型部件组合：主要为波纹钢管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、波纹钢管非常规表面处理等）应根据实际情况选择合理的接触边界形式；
- d) 单元选择及网格划分：土体采用四边形平面单元，波纹钢管采用二次 Timoshenko 梁单元或三次 Euler-Bernoulli 梁单元；
- e) 边界：模型的左、右边界约束水平变形，允许竖向沉降；模型底边界约束两个方向变形。特殊工况时根据实际情况选用合理边界；
- f) 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。

C.7.2 三维建模宜遵循下列要点：

- a) 几何模型：覆土波纹钢管涵洞通道属于土-钢组合结构，土体同结构共同受力，形成稳定的承载结构，故在几何建模时考虑足够尺寸的土体。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；
- b) 材料选择：模型部件组合，与二维建模相同；
- c) 单元选择及网格划分：土体宜采用六面体单元；波纹钢管采用四边形壳单元；
- d) 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。特殊工况的需根据实际情况选用合理边界；
- e) 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 相关规定。压实效应考虑方法可参照二维模型。

参 考 文 献

- [1] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范
 - [2] GB 50021—2009 岩土工程勘察规范
 - [3] GB 50046—2018 工业建筑防腐蚀设计规范
 - [4] JTG B02-2013 公路工程抗震规范
 - [5] T/SCECS 491—2017 埋地排水用螺旋钢管管道工程技术规程
 - [6] 余顺新, 卢敖, 波纹钢埋置式结构设计施工手册 [M], 北京: 人民交通出版社, 2014
-