

公路钢波纹板桥涵设计与验收规范

Specifications for the design, construction and acceptance of
highway corrugated steel plate bridge culverts

2024 - 08 - 30 发布

2024 - 11 - 30 实施

目 次

前言 III

引言V

1 范围1

2 规范性引用文件1

3 术语和定义2

4 材料3

 4.1 主体结构材料3

 4.2 连接件材料3

 4.3 密封材料4

 4.4 防腐耐久材料4

 4.5 焊接材料4

 4.6 结构性填筑材料4

 4.7 其他材料5

5 布设基本规定5

 5.1 应用原则5

 5.2 新建结构形式6

 5.3 加固既有桥涵形式8

 5.4 既有桥梁拼宽形式9

 5.5 布设基本要求10

 5.6 附属设施10

6 结构计算11

 6.1 一般规定11

 6.2 作用11

 6.3 闭口结构内力计算11

 6.4 闭口结构验算13

7 结构构造设计18

 7.1 水文水力计算18

 7.2 桥涵主体结构18

 7.3 结构性填筑区19

 7.4 洞口构造21

8 地基与基础设计22

 8.1 一般规定22

 8.2 闭口结构管基22

 8.3 开口结构基础23

 8.4 地基处理23

 8.5 沉降要求24

9	耐久性措施	24
9.1	一般规定	24
9.2	防腐蚀、防磨蚀	24
9.3	密封	25
10	施工	26
10.1	基础施工	26
10.2	钢波纹板件加工	26
10.3	钢波纹板件装卸、运输与存放	27
10.4	钢波纹板件安装	27
10.5	密封和防腐耐久	27
10.6	结构性填筑	28
10.7	附属结构物施工	28
11	质量验收	28
11.1	一般规定	28
11.2	基础工程验收	28
11.3	结构安装验收	29
11.4	密封及防腐耐久验收	30
11.5	结构性填筑区填筑验收	31
11.6	断面验收	31
11.7	附属工程验收	31
11.8	施工完成后验收	31
12	管养维护	32
12.1	养护管理	32
12.2	预防性养护	32
12.3	抢修加固	32
附录A（资料性）	钢波纹板尺寸	33
附录B（资料性）	设计流程	35
附录C（资料性）	纵向螺栓接缝承载力试验	36
C.1	一般规定	36
C.2	试验样本	36
C.3	试验要求	36
C.4	公称接缝承载力	36
C.5	试验报告	36
C.6	样本保存	37
附录D（资料性）	预变形量	38

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。

本文件由湖南省交通运输厅提出并归口。

本文件起草单位：湖南省交通规划勘察设计院有限公司、湖南大学、衡水益通管业股份有限公司、南京联众工程技术有限公司、上海市建筑科学研究院有限公司、中国建筑第五工程局有限公司、中南公路建设及养护技术湖南省重点实验室、华南理工大学。

本文件主要起草人：贺耀北、张阳、彭立、穆程、李大、彭海涛、廖新辉、吴涛、巴西、王志宏、战福军、符铨砂、彭云涌、胡玉华、陈光、罗思慧、任启江、付俊俊、廖志宏、王兴凯、徐连云、陈科、邹德强、谭红平、苏振宇、刘新奇、肖雅丹、罗东、赵和锐、李中贤、徐子兵。

引 言

随着我省新建与改扩建公路的快速发展，钢波纹板桥涵得到了广泛的应用，其结构具有力学性能优良、便于工业化生产、适应性强、施工速度快、旧桥加固无需中断交通、后期维护方便、节约资源等优点。针对湖南省山区、丘陵和湖区平原多变地形条件，以及多雨潮湿环境下的钢波纹板桥涵应用特点，编制本文件，形成了成套公路钢波纹板桥涵设计、施工与验收方法，用于指导我省新建钢波纹板桥涵及旧桥涵加固，提高钢波纹板桥涵结构适应能力和应用范围，助力我国钢波纹板桥涵整体技术水平的发展，具有重要意义。

公路钢波纹板桥涵设计施工与验收规范

1 范围

本文件规定了公路钢波纹板桥涵的材料、布设基本规定、结构计算、结构构造设计、地基与基础设计、耐久性措施、施工、质量验收和管养维护。

本文件适用于公路新建、改扩建钢波纹板桥涵，以及采用钢波纹板加固既有桥涵的设计、施工与验收，适用跨径不大于16 m的开口结构，跨径不大于7 m的闭口结构，其他跨径参考使用。

2 规范性引用文件

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

- GB/T 470 锌锭
- GB/T 700 碳素结构钢
- GB/T 706 热轧型钢
- GB/T 799 地脚螺栓
- GB/T 1231 钢结构用高强度大六角头螺母、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 3274 碳素结构钢和低合金结构钢热轧钢板和钢带
- GB/T 5117 非合金钢及细晶粒钢焊条
- GB/T 5118 热强钢焊条
- GB/T 10433 电弧螺柱焊用圆柱头焊钉
- GB 12952 聚氯乙烯（PVC）防水卷材
- GB/T 14647 氯丁二烯橡胶
- GB 16776 建筑用硅酮结构密封胶
- 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 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 50205 钢结构工程施工质量验收标准
- JTG C10 公路勘测规范
- JTG C20 公路工程地质勘察规范
- JTG D60 公路桥涵设计通用规范
- JTG D64 公路钢结构桥梁设计规范
- JTG F80/1 公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程
- JTG H10 公路养护技术规范

JG/T 266 泡沫混凝土
JT/T 722 公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件
JT/T 791 公路涵洞通道用波纹钢管（板）
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

3 术语和定义

JT/T 791 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

钢波纹板 corrugated steel plate

钢板按照规定尺寸，经过轧制及冷弯加工而形成的波形板状材料。

3.2

钢波纹板桥涵 corrugated steel bridges and culverts

采用钢波纹板件连接形成主体结构之后，周边用结构性填筑材料填筑压实，充分发挥土—钢波纹板相互作用共同承担荷载的结构物。

3.3

波峰 crest

向钢波纹板桥涵外凸起部分为波峰。

3.4

波谷 trough

向钢波纹板桥涵内凸起部分为波谷。

3.5

开口结构 structures with closed conduit

单圆弧拱、多圆弧拱等由钢波纹板与基础连接形成的结构。

3.6

闭口结构 structures with closed conduit

圆管形、马蹄形、箱拱形、高拱马蹄形等由钢波纹板形成的闭合结构。

3.7

起拱线 spring line

钢波纹板桥涵（不包括基础）横断面上水平方向最外侧点的连线。

3.8

拱顶 crown

横断面的最高点及附近的一段区域。

3.9

拱底 invert

横断面的最低点及附近的一段区域。

3.10

矢高 rise

闭口结构竖向对应截面中心线之间的最大距离。开口结构为拱顶截面中心线与拱脚之间连线的竖向距离。

3.11

跨径 span

钢波纹板桥涵安装成形后结构水平方向对应截面中心线之间的最大距离。

3.12

孔径 aperture

钢波纹板圆管涵波谷所在圆的直径。

3.13

管基 bedding

天然地基或换填后的地基与拱底外形相适应的一定厚度的垫层共同形成的基础。

3.14

结构性填筑区 structural filling area

为确保钢波纹板结构的稳定性和发挥覆土—结构相互作用的填筑范围。

3.15

结构性填筑材料 structural filling materials

钢波纹板结构性填筑区范围内按规定方法分层填筑和压实的、材料特性和级配满足设计要求的水稳性好的填筑材料。

3.16

覆土厚度 depth of cover

从钢波纹板桥涵结构中点到路面结构层底面之间的竖向距离。

3.17

最小覆土厚度 minimum depth of cover

为保证钢波纹板桥涵稳定性和发挥土—钢波纹板相互作用所需要的拱顶最小覆土厚度。

3.18

预变形量 pre-deformation

用来补偿钢波纹板桥涵截面形态在施工期间产生的变形预留的反向校正量。

3.19

预拱度 camber

用来补偿桥涵结构轴向在施工时预留的反向校正量。

4 材料

4.1 主体结构材料

4.1.1 主体结构的钢板宜采用碳素结构钢、低合金高强度结构钢，其材料应分别符合GB/T 700、GB/T 1591的规定，其尺寸、外形、重量及允许偏差应符合GB/T 3274、GB/T 709的规定。

4.1.2 采用连续热镀锌钢板及钢带加工钢波纹板构件时，其材料、性能、尺寸、外形、重量及允许偏差应符合GB/T 2518的规定。

4.1.3 冷弯钢波纹板件的规格、尺寸允许偏差、技术要求、试验方法、检验规则、标志、质量说明书及运输等应符合JT/T 791、GB/T 34567的规定。

4.1.4 常用钢波纹板尺寸宜按附录A选用。

4.2 连接件材料

4.2.1 连接件采用高强度螺栓、螺母时，强度等级不应低于8.8级，其力学性能指标应符合GB/T 1231

- 的规定；采用带爪螺栓、螺母时，其规格、尺寸等应符合GB/T 34567的规定。
- 4.2.2 垫圈应采用与钢波纹板圆弧半径一致的专用凹凸形垫圈，其力学性能指标应符合GB/T 1231的规定，其规格、尺寸等应符合GB/T 34567的规定。
- 4.2.3 开口结构与混凝土基础采用预埋地脚螺栓、焊接钢垫板连接，其力学性能指标及型号规格应分别符合GB/T 799、GB 50017的规定。
- 4.2.4 圆柱头焊钉连接件材料应符合GB/T 10433的规定。
- 4.3 密封材料
- 4.3.1 密封材料应具有弹性和防渗透性，并应填塞紧密、粘贴牢固。
- 4.3.2 密封材料宜采用聚乙烯发泡材料、氯丁橡胶、聚氯乙烯防水卷材、非固化橡胶沥青或耐候密封胶、聚氨酯等，其性能与质量应分别符合GB/T 14647、GB 12952、JC/T 2428、GB 16776、GB/T 19250的规定。
- 4.4 防腐耐久材料
- 4.4.1 钢波纹板和高强度螺栓、螺母、钢垫圈等金属连接件，宜采用热浸镀锌防腐处理，所用锌应符合GB/T 470规定的1号或0号锌，钢表面处理的最低等级为Sa 2.5。防腐性能应符合JT/T 791和GB/T 2518的规定。
- 4.4.2 当采用热浸镀铝、镀塑、静电喷涂等其他防腐方法代替镀锌时，应有试验验证资料，其防腐性能应不低于热浸镀锌方法的相应要求。
- 4.4.3 钢波纹板桥涵在镀锌防腐基础上采用防腐涂层、防水涂料时，材料应符合下列规定：
- a) 沥青涂层防腐、防水的性能、质量与技术指标应符合GB/T 27806的规定；
 - b) 涂装防腐的品种、规格、性能等应符合JT/T 722的规定；
 - c) 土工膜宜采用环保用高密度聚乙烯土工膜，其性能、质量与技术指标应符合GB/T 17643的规定。
- 4.5 焊接材料
- 4.5.1 焊接材料应符合GB/T 5117和GB/T 5118的规定。
- 4.5.2 焊接材料应与母材相适应。当强度不同的钢材连接时，宜采用与强度较低的钢材牌号相适应的焊接材料。
- 4.6 结构性填筑材料
- 4.6.1 结构性填筑材料应选用级配较好的砾类土、砂类土等具有低压缩性、易压实、透水性良好的材料。
- 4.6.2 结构性填筑材料的容重宜采用试验确定，无试验资料时参考表1取用；结构性填筑材料的压缩模量宜采用试验确定，无试验资料时参考表2线性内插取值。

表1 结构性填筑材料的容重

单位为千牛每立方米

种类	容重
砾石	22.0
粗粒土（颗粒状）	22.0
碎石土	21.0
细粒砂土	20.0

表2 结构性填筑材料分类及压缩模量

类型	粒径	描述	标准普氏压实度 %	压缩模量 E_s MPa
I	粗	级配良好的砾石、砂砾、砂、砾质砂	90	12
			95	24
			100	30
II	中等	含粘土的砾石、砂砾、砂、砾质砂或粉砂	90	6
			95	12
			100	15

4.6.3 楔形部填筑材料应采用强度为0.6 MPa-0.8 MPa的易密实流态填筑料，材质宜为流态粉煤灰、流态水泥土等。

4.6.4 距钢波纹板壁0.6 m范围内不应有粒径超过31.5 mm和带尖角的石块、混凝土块、冻土块、高塑性黏土块或其他有害腐蚀材料，结构性填筑区其他部分不应有粒径超过80 mm的石块、混凝土块、高塑性黏土块或其他有害腐蚀材料。

4.6.5 结构性填筑材料可采用泡沫轻质混凝土，其配合比应根据设计要求的强度经试验验证后确定，材料、性能、分类、尺寸应满足JG/T 266的有关规定。

4.7 其他材料

4.7.1 涵洞洞口、桥涵基础及附属结构所用混凝土、砂、石料及砌体等材料应符合JTG/T 3365-02、JTG/T 3650的要求。

4.7.2 圬工砌体工程所用石料，石质应均匀、不易风化、无裂纹，其形状尺寸应满足JTG/T 3650的要求。

4.7.3 用于圬工砌体工程的混凝土预制块，其规格、形状和尺寸应统一，表面应平整，其材料应符合JTG/T 3365-02的要求。采用轻质混凝土等特殊材料制作预制块时，配合比应经试验验证后确定。

5 布设基本规定

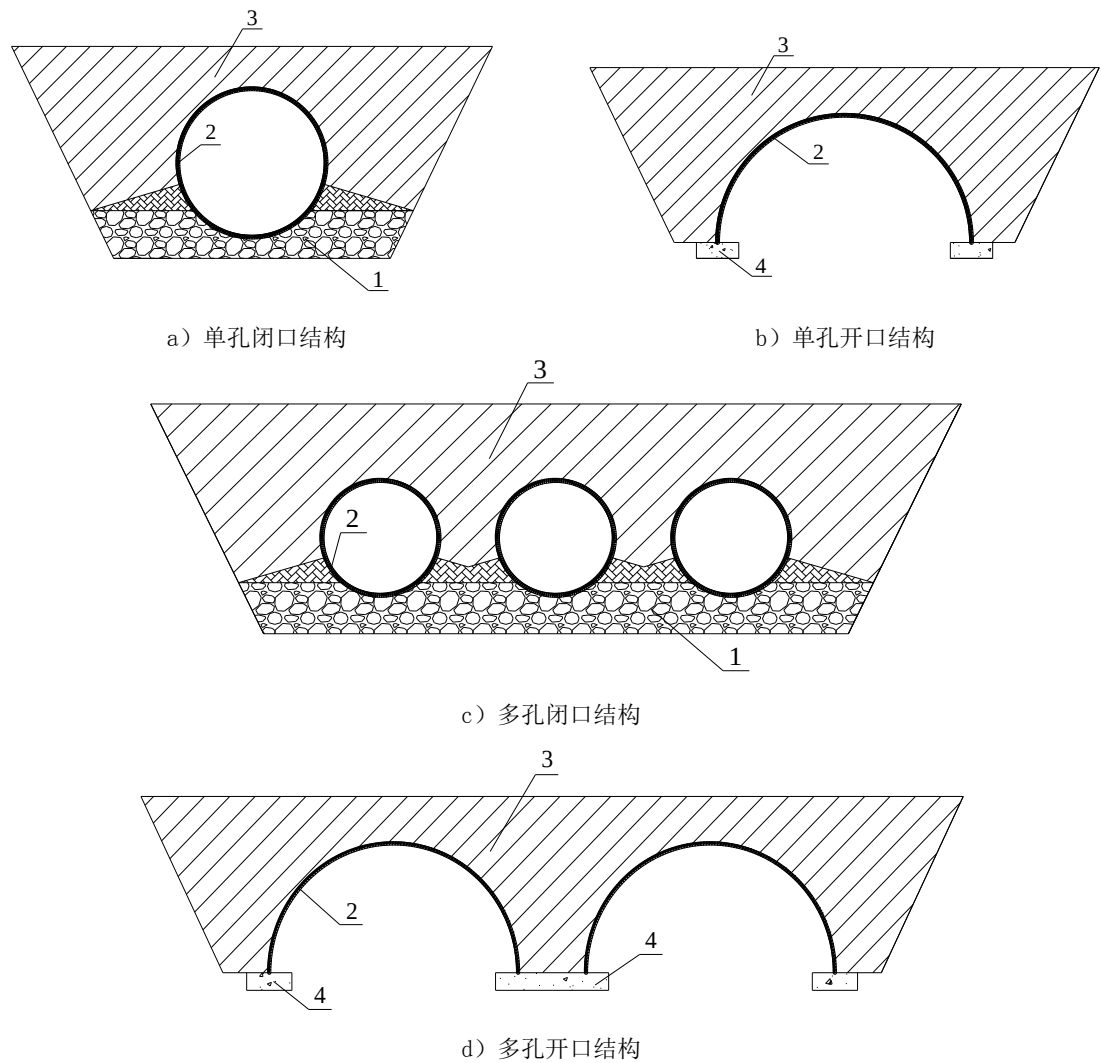
5.1 应用原则

- 5.1.1 根据应用场景，钢波纹板桥涵可分为新建桥涵结构、加固既有桥涵结构、改扩建桥涵结构。
- 5.1.2 采用钢波纹板新建桥涵与加固、改造既有桥涵应综合考虑地形地貌、地质、公路等级、施工条件及防腐等因素，遵循因地制宜、满足功能、便于施工及养护管理的基本要求。
- 5.1.3 满足下列条件之一时，宜选用钢波纹板桥涵：
- a) 混凝土原料缺乏，运输、施工用水困难地区；
 - b) 承载力较低的软弱地基地区；
 - c) 高填方路段；
 - d) 应急抢险、救灾和战备等对工期要求较紧的桥涵通道；
 - e) 既有桥梁、涵洞的接长拼宽或加固。

5.1.4 既有桥涵加固改造后，应进行通行净空或行洪能力复核。

5.2 新建结构形式

5.2.1 钢波纹板桥涵分为闭口结构和开口结构两种形式，典型断面形式如图1所示。开口结构不能应用于地震动峰值加速度大于或等于0.2 g的地区，地基承载力较低的路段或高填方路段宜采用闭口结构。

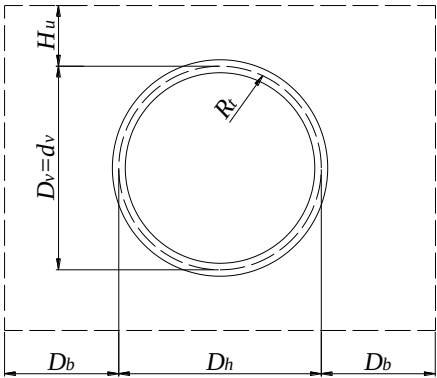


标引序号说明：

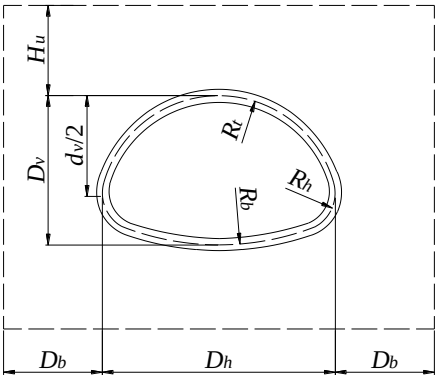
- 1——管基；
- 2——钢波纹板结构；
- 3——填筑材料；
- 4——混凝土基础。

图1 钢波纹板桥涵典型断面形式

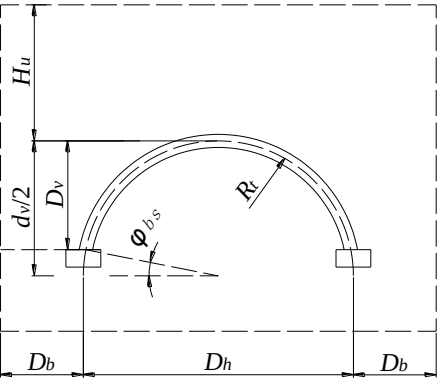
5.2.2 按截面形状，钢波纹板桥涵可分为圆管形、马蹄形、单圆弧拱、多圆弧拱、箱拱形、高拱马蹄形等，如图2所示。



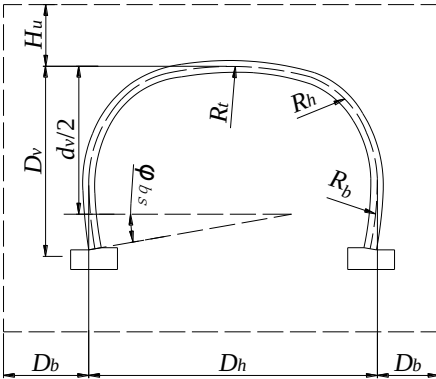
a) 圆管形



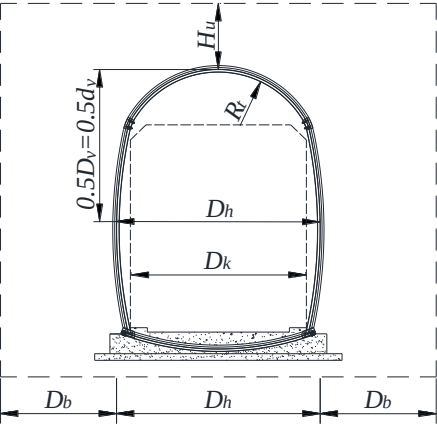
b) 马蹄形拱



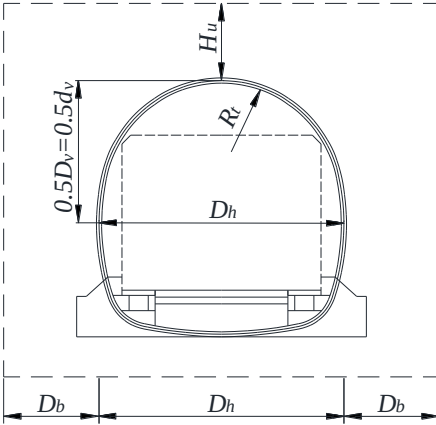
c) 单圆弧拱



d) 多圆弧拱



e) 箱拱形



f) 高拱马蹄形

标引序号说明:

D_b ——结构单侧结构性填筑区宽度;

D_h ——结构的有效跨径;

d_v ——结构的竖向计算直径;

H_u ——覆土厚度;

D_v ——结构的有效矢高;

R_b ——结构拱底曲率半径;

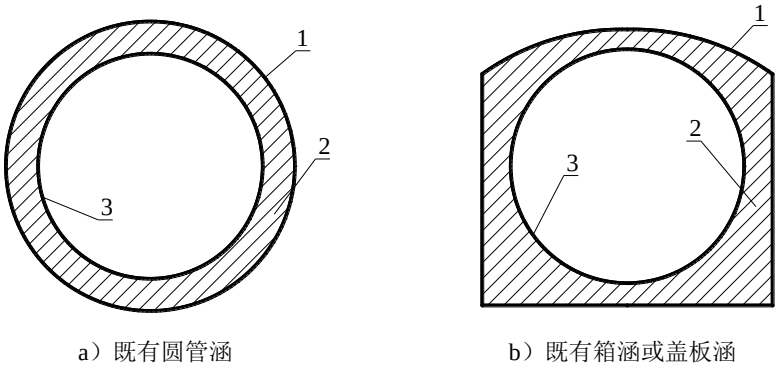
图2 钢波纹板桥涵尺寸

- R_h ——结构拱腋曲率半径;
- R_t ——结构拱顶曲率半径;
- φ_{bs} ——结构凹拱角;
- H_1 ——顶板拱高值;
- H_2 ——侧板拱高值;
- H_3 ——底板拱高值;
- HY_1 ——顶板预变形值;
- HY_2 ——侧板预变形值;
- D_k ——通道结构跨径。

图2 钢波纹板桥涵尺寸（续）

5.3 加固既有桥涵形式

5.3.1 钢波纹板加固既有涵洞宜采用套管加固，二者之间应采用低收缩的砂浆或自密实微膨胀混凝土填充，如图3所示。



- 标引序号说明：
- 1——既有涵洞；
 - 2——低收缩砂浆或自密实混凝土；
 - 3——钢波纹板。

图3 涵洞加固示意图

5.3.2 采用钢波纹板加固既有桥梁的典型形式如图4所示。既有桥梁与钢波纹板之间宜采用自密实式混凝土、微膨胀混凝土等材料填充。

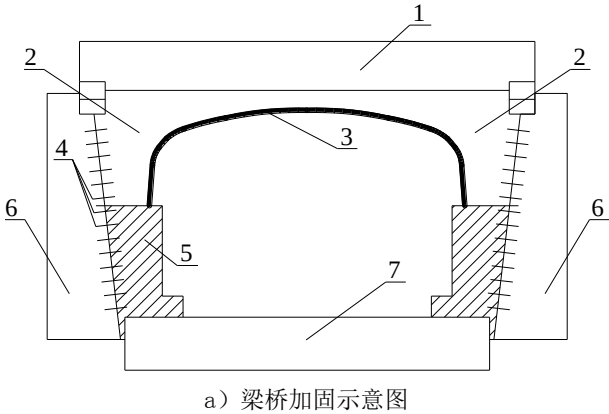
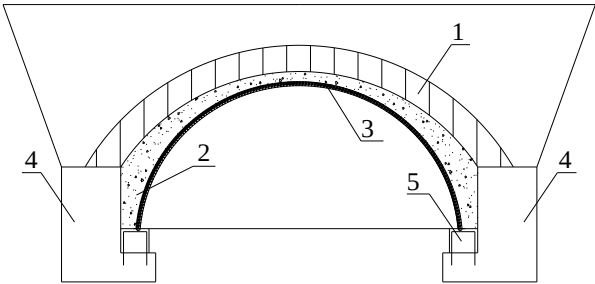


图4 加固既有桥梁典型形式示意图

标引序号说明:

- 1——既有桥梁;
- 2——填充混凝土;
- 3——钢波纹板;
- 4——植筋;
- 5——后浇桥台;
- 6——既有桥台;
- 7——基础。



b) 拱桥加固示意图

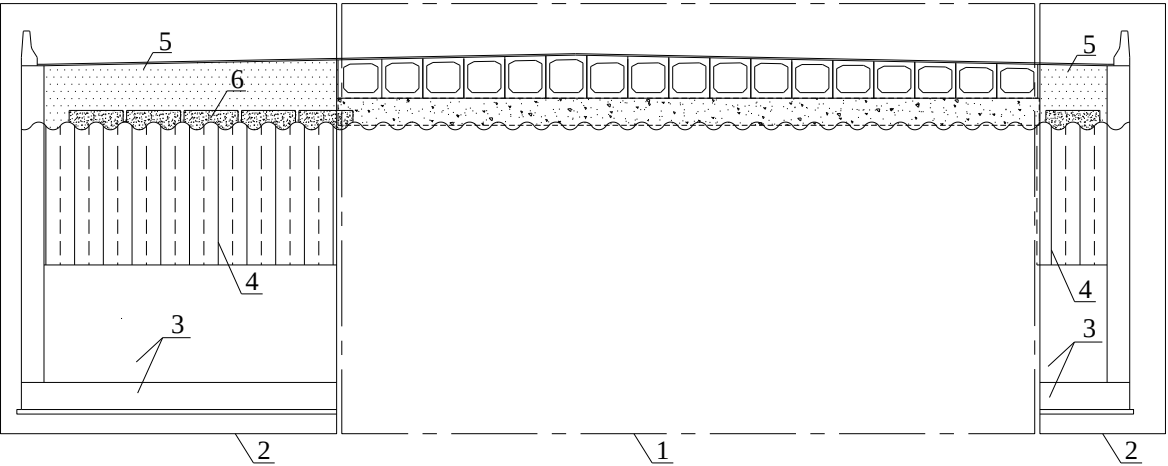
标引序号说明:

- 1——既有拱圈;
- 2——填充混凝土;
- 3——钢波纹板;
- 4——既有基础;
- 5——后浇基础。

图4 加固既有桥梁典型形式示意图 (续)

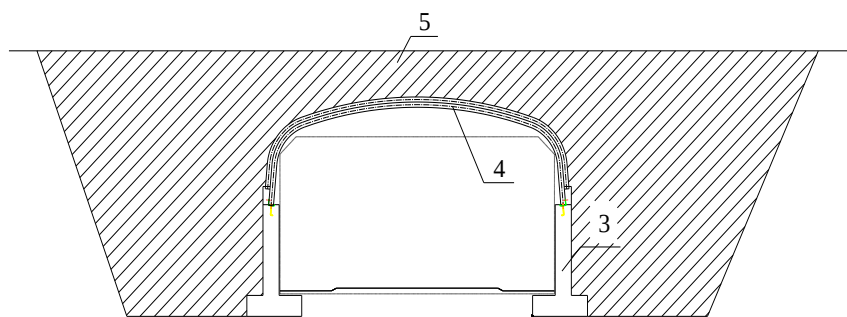
5.4 既有桥梁拼宽形式

既有桥梁拼宽可采用钢波纹板、设置加劲肋组合梁的钢波纹板、钢波纹板与其他材料的组合结构进行拼宽, 典型拼宽形式如图5所示。



a) 拼宽桥梁横断面图

图5 既有桥梁典型拼宽形式示意图



b) 拼宽桥梁剖面图

标引序号说明：

- 1——既有桥梁；
- 2——拼宽结构；
- 3——基础；
- 4——钢波纹板；
- 5——填充轻质混凝土；
- 6——钢波纹板加劲肋组合梁。

图5 既有桥梁典型拼宽形式示意图（续）

5.5 布设基本要求

5.5.1 钢波纹板桥涵应按JTG C10、JTG C20的规定开展外业调查。

5.5.2 钢波纹板桥涵布设应满足JTG/T 3365-02、JTG D60规定，并符合下列要求：

- a) 孔径或跨径应根据设计洪水流量、路基填土高度等条件确定；
- b) 新建涵洞宜采用标准孔径，排洪涵洞孔径不宜小于1.0 m，无淤积地区的灌溉涵洞孔径不宜小于0.75 m；
- c) 闭口结构物宜选用0.75 m、1.0 m、1.25 m、1.5 m、2.0 m、2.5 m、3.0 m、4.0 m、5.0 m、6.0 m、7.0 m的标准孔径；开口结构物宜选用8 m、10 m、13 m、16 m的标准孔径；
- d) 单孔或单跨不能满足设计要求时，可采用多孔或多跨并列布设。

5.5.3 钢波纹板桥涵遇到斜交的特殊情形时，布设基本要求如下：

- a) 斜交角小于 5° 时宜斜交正做，洞口段管可不切割；
- b) 斜交角不小于 5° 且不大于 20° 时，洞口段管节宜切割成与路线平行的斜面，洞口应采用型钢加强环或钢筋混凝土加强圈加强构造。

5.5.4 钢波纹板桥涵底部纵坡不应大于5%。

5.5.5 分岔布设时，宜通过弯头、三通等构造连接成整体结构，应进行特殊设计。

5.6 附属设施

5.6.1 涵洞洞口外宜根据地形进行抗冲刷、抗浮处理。

5.6.2 河沟纵坡较陡、泥石流易发、人烟稀少或清淤不便的地区，宜在涵洞进口设置防堵栅栏。

5.6.3 有冲刷现象的闭口结构，应沿全长在洞身底部内壁设置内衬，内衬顶部应高于常水位0.2 m～0.5 m。

5.6.4 有冲刷现象的开口结构，基础埋置深度应满足JTG 3363的要求。

5.6.5 涵洞布置在纵坡陡、流速大的河沟时，进口应设置截水墙，出口应设置急流槽、跌水等设施。

6 结构计算

6.1 一般规定

6.1.1 公路钢波纹板桥涵应按本文件附录B的流程进行设计。

6.1.2 钢波纹板桥涵的结构设计应符合JTG D60、JTG/T 3365-02规定，验算结构强度、连接强度与结构刚度。

6.1.3 承载能力极限状态计算应满足式（1）要求：

$$\gamma_0 S_d \leq R_d \quad (1)$$

式中：

γ_0 ——结构重要性系数，按JTG D60取值；

S_d ——作用组合的效应设计值；

R_d ——结构承载力设计值。

6.1.4 孔径不大于7 m的新建闭口结构应按本文件要求进行结构计算，孔径大于7 m的新建闭口结构宜增加数值模拟结构计算校核，开口结构应进行数值模拟结构计算。

6.2 作用

6.2.1 结构设计采用的作用应符合JTG D60的规定。

6.2.2 按承载能力极限状态进行作用效应组合，取最不利效应组合值进行设计。运营阶段永久作用与可变作用组合值按式（2）计算，永久作用与地震作用组合值按式（3）计算；施工阶段永久作用和可变作用组合值按式（4）计算。

$$E_{d1} = \gamma_G G + \gamma_Q Q \quad (2)$$

$$E_{d2} = \gamma_G G + F_u \quad (3)$$

$$E_{d3} = \gamma_G G + Q_c \quad (4)$$

式中：

E_{d1} 、 E_{d2} 、 E_{d3} ——设计作用组合值；

γ_G 、 γ_Q ——永久作用、可变作用组合系数，按JTG D60取值；

G ——永久作用；

F_u ——竖向地震作用；

Q ——运营阶段可变作用；

Q_c ——施工阶段可变作用。

6.3 闭口结构内力计算

6.3.1 钢波纹板桥涵中由永久作用产生的板壁环向压力应按式（5）、式（6）计算：

$$\gamma_G F_G = \gamma_G \times 0.5 (1.0 - 0.1 C_S) A_f W \quad (5)$$

$$C_S = \frac{E_S d_v}{EA} \quad (6)$$

式中：

F_G ——永久作用产生的每延米板壁环向压力值，单位为千牛每米（kN/m）；

C_S ——考虑填筑土性质与结构尺寸的轴向刚度参数；

- A_f ——考虑结构起拱效应的土压力增大系数，按表3选用；
 W ——涵顶覆土每延米的重量，单位为千牛每米（kN/m）；
 E_S ——土体压缩模量，单位为兆帕（MPa），无试验数据时，宜按表2取值；
 d_v ——结构的竖向计算直径，单位为米（m），如图2所示；
 E ——钢的弹性模量，单位为兆帕（MPa）；
 A ——每延米钢波纹板截面面积，单位为平方米每米（m²/m），对于采用螺栓拼装的钢波纹板应扣除螺栓孔截面面积。

表3 A_f 系数取值表

H_u/D_h	D_h/d_v					
	≤ 0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	≥ 1.6
0.2	2.25	1.60	1.26	1.20	1.14	1.10
0.4	1.82	1.41	1.22	1.15	1.10	1.05
0.6	1.65	1.35	1.20	1.12	1.07	1.03
0.8	1.55	1.31	1.19	1.11	1.05	1.02
1.0	1.53	1.31	1.18	1.10	1.04	1.02
1.2	1.55	1.33	1.20	1.12	1.07	1.02
1.4	1.59	1.38	1.22	1.15	1.08	1.02
1.6	1.60	1.39	1.24	1.17	1.08	1.02
1.8	1.61	1.40	1.25	1.18	1.08	1.02
≥ 2.0	1.62	1.40	1.25	1.18	1.08	1.02

注： H_u 和 D_h/D_v 不能通过查表得到时，通过线性内插取值，对于圆管涵结构，当 $H_u > D_h$ 时， A_f 可取 1.15。 D_h 为结构的有效跨径（m），如图 2 所示。

6.3.2 钢波纹板桥涵中由可变作用产生的板壁环向压力应按式（7）、式（8）计算：

$$\gamma_Q F_Q = \min(\gamma_Q \times 0.5 D_h P_Q m_f, \gamma_Q \times 0.5 l_l P_Q m_f) \quad (7)$$

$$P_Q = \frac{A_L}{l_l \times l_t} \quad (8)$$

式中：

- F_Q ——可变作用产生的每延米板壁环向压力值，单位为千牛每米（kN/m）；
 D_h ——结构的有效跨径，单位为米（m），如图2所示；
 P_Q ——可变作用产生的管顶压应力，单位为千帕（kPa）；
 m_f ——多车道折减系数，按JTG D60取值；
 $l_l \times l_t$ ——车辆荷载沿车道纵向和横向扩散至结构顶部的尺寸（m），按JTG D60计算；
 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）。

6.3.3 $l_l \times l_t$ 施工阶段可变作用产生的板壁环向压力（ γ_Q ， Q_c ）计算方法应与运营阶段相同，采用施工

临时机械或施工车辆计算。

6.3.4 钢波纹板桥涵仅考虑竖向地震作用时，地震作用产生的板壁环向压力宜按式（9）计算：

$$F_u=0.5A_vW/g\cdots\cdots\cdots (9)$$

式中：

- F_u ——竖向地震作用产生的每延米板壁环向压力值，单位为千牛每米（kN/m）；
- A_v ——竖向设计基本地震动峰值加速度，宜按表4取用；
- W ——涵顶覆土每延米的重量，单位为千牛每米（kN/m）；
- g ——重力加速度，取值9.8 m/s²。

表4 竖向设计基本地震动峰值加速度 A_v

抗震设防烈度	VII	VIII	IX
A_v	0	0.10 g~0.17 g	0.25 g

6.4 闭口结构验算

6.4.1 承载力极限状态下，结构承载力应根据两条对称的半径线分上、下两部分验算，如图6所示，以竖直线到起拱线的夹角 $\theta_0=1.6+0.2lg(EI/E_{sm}R^3)$ 为分界点，结构承载力应按式（10）~式（15）验算。

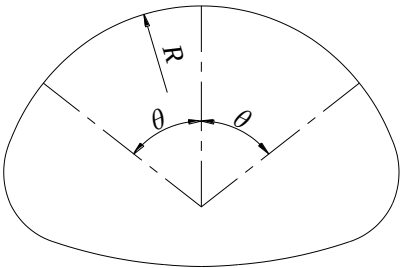


图6 上下板壁划分示意图

$$\phi_c \min (R_u, f_y) \geq \frac{F}{A} \cdots \cdots \cdots (10)$$

当 $R \leq R_e$ 时，

$$R_u=k_3[f_y-\frac{(f_yk_5R)^2}{12Ei^2k_6}] \cdots \cdots \cdots (11)$$

当 $R > R_e$ 时，

$$R_u=\frac{3k_3k_6E}{(k_5R/i)^2} \cdots \cdots \cdots (12)$$

$$R_e=(\frac{6Ek_6}{f_y})^{0.5} \frac{i}{k_5} \cdots \cdots \cdots (13)$$

$$k_5=k_7(\frac{EI}{E_{sm}R^3})^{0.25} \cdots \cdots \cdots (14)$$

$$k_6=(\frac{H_u}{R_t})^{0.5} \leq 1.0 \cdots \cdots \cdots (15)$$

式中：

ϕ_c ——抗压承载力的材料抗力系数，取 0.8；

- R_u ——钢波纹板结构设计抗压承载力, 单位为兆帕 (MPa);
 f_y ——钢的屈服强度, 单位为兆帕 (MPa);
 F ——运营阶段钢波纹板截面压力组合值, 取组合值 E_{d1} 、 E_{d2} 的最大值;
 A ——每延米钢波纹板截面面积, 单位为平方米每米 (m^2/m);
 R_e ——等效半径, 单位为米 (m);
 k_3 ——结构屈曲应力折减系数, 取 1; 对于多跨结构圆形结构 $k_3=0.85+0.3c/D_h$, 大于 1 时取 1;
 c ——结构间的最小净距, 单位为米 (m);
 D_h ——结构的有效跨径, 单位为米 (m), 如图 2 所示;
 k_5 ——钢波纹板结构板壁与相邻土体的相对刚度系数;
 R ——钢波纹板结构的曲率半径, 单位为米 (m);
 E ——钢的弹性模量, 单位为兆帕 (MPa);
 i ——波纹截面的回转半径, 单位为米 (m);
 k_6 ——从管顶至管侧土体刚度变化系数;
 k_7 ——计算板壁相对刚度 k_5 的系数, 对于除 $D_v < d_v/2$ 且 $d_v/D_h < 0.4$ 的圆拱结构之外的所有结构上半部分, $k_7=1.22[1.0+1.6(EI/E_{sm}R_t^3)^{0.25}]$, 其余情况下, 取 $k_7=1.22$ 。
 D_v ——结构的有效矢高, 单位为米 (m), 如图 2 所示;
 d_v ——结构的竖向计算直径, 单位为米 (m), 如图 2 所示;
 I ——每延米钢波纹板截面惯性矩, 单位为米的四次方每米 (m^4/m);
 E_{sm} ——土体平均压缩模量的修正值, 结构两侧和下半部分取值 $E_{sm}=E_s$, 上半部分按公式

$$E_{sm}=E_s[1-(\frac{R_t}{R_t+H_u+H'})^2];$$

 E_s ——土体压缩模量, 单位为兆帕 (MPa), 无试验数据时, 可按表 2 取值;
 R_t ——结构拱顶曲率半径, 单位为米 (m), 如图 2 所示;
 H_u ——覆土厚度, 单位为米 (m), 如图 2 所示。

6.4.2 承载能力极限状态下, 塑性铰应按式 (16) ~ 式 (31) 验算。

a) 施工阶段:

$$(\frac{P}{\phi_{hc}N_s})^2 + |\frac{M}{\phi_{hc}M_p}| \leq 1.0 \dots \dots \dots (16)$$

b) 运营阶段:

$$(\frac{F}{\phi_h N_s})^2 + |\frac{M_f}{\phi_h M_p}| \leq 1.0 \dots \dots \dots (17)$$

$$N_s = A f_y \dots \dots \dots (18)$$

$$M_p = W_p f_y \dots \dots \dots (19)$$

$$M_f = |\gamma_G M_I + \gamma_G M_B| + \gamma_Q M_C \dots \dots \dots (20)$$

$$M=M_1+M_B+M_C \quad (21)$$

$$M_1=k_{M_1}k_{M_4}\gamma D_h^3 \quad (22)$$

$$M_B=-k_{M_2}k_{M_4}\gamma H_e D_h^2 \quad (23)$$

$$M_C=k_{M_3}k_{M_5}D_h F_1 \quad (24)$$

$$k_{M_1}=\begin{cases} 0.0046-0.001\lg(N_F), & N_F \leq 5000 \\ 0.0009, & N_F > 5000 \end{cases} \quad (25)$$

$$k_{M_2}=\begin{cases} 0.018-0.004\lg(N_F), & N_F \leq 5000 \\ 0.0032, & N_F > 5000 \end{cases} \quad (26)$$

$$k_{M_3}=\begin{cases} 0.120-0.018\lg(N_F), & N_F \leq 100000 \\ 0.030, & N_F > 100000 \end{cases} \quad (27)$$

$$k_{M_4}=\begin{cases} 0.67+0.87\left(\frac{d_v}{2D_h}-0.2\right), & 0.2 \leq \frac{d_v}{2D_h} \leq 0.35 \\ 0.80+1.33\left(\frac{d_v}{2D_h}-0.35\right), & 0.35 < \frac{d_v}{2D_h} \leq 0.50 \\ \frac{d_v}{D_h}, & \frac{d_v}{2D_h} > 0.50 \end{cases} \quad (28)$$

$$k_{M_5}=\frac{[0.265-0.053\lg(N_F)]}{(H_e/D_h)^{0.75}} \leq 1.0 \quad (29)$$

$$F_1=\frac{F_{ax}}{k_4} \quad (30)$$

$$N_F=\frac{E_s D_h^3}{EI} \quad (31)$$

式中:

P ——施工阶段每延米钢波纹板截面的最不利压力组合值, 单位为千牛每米 (kN/m);

ϕ_{hc} ——施工阶段塑性铰的材料抗力系数, 取 0.7;

N_s ——每延米钢波纹板截面的轴向抗压承载力标准值, 单位为千牛每米 (kN/m);

M ——施工阶段每延米钢波纹板截面弯矩组合值, 单位为千牛米每米 (kN·m/m);

M_p ——每延米钢波纹板截面的塑性抗弯承载力标准值, 单位为千牛米每米 (kN·m/m);

M_f ——运营阶段每延米钢波纹板截面的弯矩组合值, 单位为千牛米每米 (kN·m/m);

ϕ_h ——运营阶段塑性铰的材料抗力系数, 取 0.7;

W_{pl} ——每延米钢波纹板截面的塑性截面模量, 单位为立方米每米 (m³/m) $W_{pl}=\frac{2I_l}{d+t}$;

I_l ——每延米钢波纹板截面惯性矩, 单位为米的四次方每米 (m⁴/m);

D ——波高, 单位为米 (m);

T ——壁厚, 单位为米 (m);

γ_G ——永久作用的组合系数;

M_1 ——钢波纹板在土体均布力作用下跨中截面的弯矩, 单位为千牛米每米 (kN·m/m);

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/256132123035010243>