ICS 93.040
P28
备案号：

DB63

青 海 省 地 方 标 准

DB 63/ XXXXX—2019

波纹钢板拱桥设计规程

Code of design for corrugated steel arch bridge

（报批稿）

2019－XX－XX 发布　　2019－XX－XX 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　材料及构件 4
5　设计 7
附录 A（规范性附录）　波纹钢板拱结构技术参数 28

前　　言

本标准按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准由青海省交通运输标准化专业技术委员会提出并归口。

本标准起草单位：青海省公路建设管理局、正平路桥建设股份有限公司、华南理工大学、青海蓝图公路勘察设计有限责任公司、青海路拓工程设施制造有限公司、海东正平管廊设施制造有限公司、青海正通土木工程试验检测有限公司、苏交科集团股份有限公司。

本标准起草人：苗广营、祁文斌、辛海生、王丽娜、金生光、宋方华、符锌砂、李万财、张云必、李 萍、祁文锦、李百建、冯晓楠、李　勇。

波纹钢板拱桥设计规程

1 范围

本标准规定了波纹钢板拱结构计算理论与设计方法，以及波纹钢板拱桥的材料、构件、基础、回填和附属工程的设计。

本标准适用于新建和改（扩）建各等级公路20 m及以内标准跨径的波纹钢板拱桥设计，跨径小于8 m的波纹钢板拱桥，可参照本标准的方法设计。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是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 709 热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差
GB/T 1228 钢结构用高强度大六角头螺栓
GB/T 1229 钢结构用高强度大六角螺母
GB/T 1230 钢结构用高强度垫圈
GB/T 1231 钢结构用高强度大六角头螺栓、螺母、垫圈技术条件
GB/T 1499.2 钢筋混凝土用钢 第2部分：热轧带肋钢筋
GB/T 1591 低合金高强度结构钢
GB/T 4171 耐候结构钢
GB/T 6723 通用冷弯开口型钢
GB/T 11263 热轧H型钢和部分T型钢
GB/T 14647 氯丁二烯橡胶 CR121、CR122
GB/T 14795 天然橡胶 术语
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 22083 建筑密封胶分级和要求
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 50755 钢结构工程施工规范
JC/T 483 聚硫建筑密封胶
JT/T 722 公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件
JTG 3362 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
JTG B01 公路工程技术标准
JTG C30 公路工程水文勘测设计规范

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 D63　公路桥涵地基与基础设计规范
JTG 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
JTG/T F50　公路桥涵施工技术规范

3　术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

波纹钢板

采用符合规定要求厚度和性能的热轧钢板为板材，按照规定的尺寸和参数的波形轧制及冷弯成型、增加其结构刚度的一种波纹板状材料。

3.2

波纹钢板件

波纹钢板经环向加工制成的具有一定曲面的波纹板件。

3.3

加劲肋板

在拱顶（箱形拱含拱肩）背面增设与主体结构相同的波纹钢板件，形成组合截面，以增强主体结构的抗弯承载能力。

3.4

波纹钢板件长度

曲面波纹钢板件的弧长。

3.5

波纹钢板件宽度

曲面波纹钢板件的投影宽度。

3.6

波距

波纹钢板相邻两个波峰（或波谷）之间的距离。

3.7

波高或波深

波纹钢板波峰与波谷之间的垂直高度。

3.8

波纹圆弧半径

波纹钢板波峰、波谷处内圆半径。

3.9

深波形

波高或波深大于等于140mm的波形。

3.10

壁厚

波纹钢板（件）的厚度(不含镀锌层等防腐层)。

3.11

开口结构

横断面不封闭的波纹钢结构物，一般为拱式结构，拱脚与下部的拱座相连接。

3.12

圆弧拱

由一种半径的圆弧组成的开口结构，一般指半圆拱和矢高小于半径的圆弧拱。

3.13

箱形拱

截面近乎矩形、拱顶较为平坦的特殊多圆弧拱，并且波纹钢板拱的曲率半径大于0.2倍拱顶半径的波纹钢板拱结构。

3.14

拱顶

波纹钢板拱横断面的最高点或附件等一段区域。

3.15

拱肩

波纹钢板拱断面上位于拱顶与起拱线之间的部位。

3.16

拱檐

波纹钢板拱背两端口边缘上采用钢筋与波纹钢板拱连接、浇筑混凝土并伸出拱边缘的帽檐。

3.17

起拱线

波纹钢板拱桥横断面上水平方向最外侧点的连线。

3.18

标准跨径（净跨径）

波纹钢板拱桥水平方向内侧的最大净距离。

3.19

计算跨径

波纹钢板拱桥水平方向波纹钢中性轴的最大距离。

3.20

矢高

波纹钢板拱桥拱顶内边缘至起拱线的竖向距离。

3.21

计算矢高

波纹钢圆弧拱取拱顶中性轴半径的2倍，箱型拱取拱顶波纹的中性轴至拱脚的竖向距离。

3.22

筑堤法

在波纹钢板拱桥周围进行结构性回填以及结构性回填范围衔接的路堤填筑。

3.23

结构性回填

对发挥土体—波纹钢相互作用的回填区域进行的土体回填。

3.24

最小填土厚度或范围

确保波纹钢板拱桥的稳定性和发挥土—钢相互作用所需的拱顶最小填土高度或范围。

3.25

减载板

为降低波纹钢板拱桥结构的弯矩，在拱顶以上一定位置设置的钢筋混凝土板结构。

3.26

作用

施加在结构上的集中力或分布力，如结构的自重及土压力、行车荷载等，为直接作用，也称为荷载。引起结构外加变形或约束变形的原因，如基础不均匀沉降、温度变化、水力冲刷、地震等，为间接作用。两者统称为作用。

4 材料及构件

4.1 主体结构材料

4.1.1 波纹钢板用钢材可采用碳素结构钢、低合金高强度结构钢、耐候钢。钢板尺寸、外形、重量及允许偏差应符合 GB/T 709 的有关规定。

4.1.2 采用碳素结构钢时，宜选用 Q235 牌号的钢材，其质量应符合 GB/T 700 的有关规定。其中，Q235 钢中的沸腾钢不宜用于需要验算疲劳且工作温度等于或低于－20℃的波纹钢板拱结构。

4.1.3 采用低合金高强度结构钢时，宜选用 Q355 牌号的钢材，其质量应符合 GB/T 1591 的有关规定。

4.1.4　对耐腐蚀有特殊要求或处于侵蚀性介质环境中的波纹钢板拱，宜采用耐候结构钢，宜选用Q235NH、Q355NH 牌号的钢材，其质量应符合 GB/T 4171 的有关规定。

4.1.5　波纹钢板件的长度和宽度应根据其制造设备所允许的加工尺寸、钢板尺寸、波距、开口结构截面的半径组成、桥宽、吊装、运输和安装等条件计算确定。几何尺寸、波纹参数及允许偏差，见表 1。

表1　波纹钢板件几何尺寸、波纹参数允许偏差

单位：mm

项 目	规定尺寸	允许偏差
波纹钢板厚度(壁厚) t	设计值	不小于设计值
波 距 l	400	±3
波 高 d	150	±3
波纹钢板件长度 L_C	≤6000	±30
波纹钢板件宽度 L_W	≤1280	±15

4.1.6　波纹钢板件连接的螺栓孔数量及孔径（螺栓直径），应根据结构要求验算确定。螺栓孔采用标准圆孔（见表 2)。400 mm×150 mm 波纹钢板，展开后的标准板片和螺栓孔中心距（如图 1 所示）。螺栓孔距允许偏差，见表 3，螺栓孔中心至板边缘的距离偏差应≤5 mm。

表2　波纹钢板件螺栓连接的标准孔型尺寸表

单位：mm

螺栓公称直径	M16	M20	M22	M24	M27	M30
标准圆孔直径	17.5	22	24	26	30	33
标准圆孔直径允许偏差	＋0.430	＋0.520	＋0.520	＋0.520	+0.840	+0.840

表3　波纹钢板件螺栓孔距允许偏差

单位：mm

孔距范围	≤500	501～1200	1201～3000	＞3000
同一组内任意两孔间	±1.0	±1.5	—	—
相邻两孔的端孔间	±1.5	±2.0	±2.5	±3.0

单位：mm

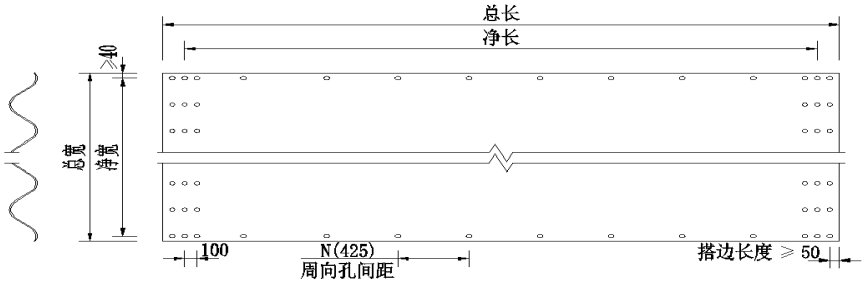


图1　400mm×150mm 波形展开标准板片和螺栓孔孔距示意图

4.2 连接件

4.2.1 波纹钢板件等连接用螺栓的强度等级、规格型号及相应数量，根据设计荷载、波纹钢板件参数等计算确定。波纹钢板件的连接应采用强度等级为 8.8 S 或 10.9 S 的螺栓连接，一般规格为 M16、M20、M22、M24、M27、M30，螺栓长度宜为螺栓连接副终拧紧后外露出 2～3 个扣丝，螺栓长度计算应符合 GB 50755 的有关规定。螺栓组合应符合表 4 的规定，其性能指标应符合 GB/T 1231 有关规定。

表4 高强度螺栓连接副组合

类别	螺栓	螺母	垫圈
形式尺寸	按 GB/T 1228 规定	按 GB/T 1229 规定	按 GB/T 1230 规定
性能等级	8.8 S	8 H	35 HRC～45 HRC
	10.9 S	10 H	35 HRC～45 HRC

4.2.2 螺栓用钢垫圈，其外形设计应符合波纹钢板件的波纹圆弧半径（弧度）一致的凸凹形，垫圈最薄处厚度不宜小于被连接的波纹钢板件厚度，垫圈的孔径应符合表 2 的规定。

4.2.3 波纹钢板拱脚与拱座连接的槽钢宜采用不等边槽钢，槽钢厚度应大于或等于波纹钢板件的壁厚，槽钢内净宽应大于或等于波纹钢板波高的 1.2 倍。槽钢材料性能、外形、重量及允许偏差应符合 GB/T 6723 的有关规定。

4.2.4 拱座连接槽钢宜设预埋地脚锚筋（带肋钢筋），其性能、质量指标等，应符合 GB/T 1499.2 的有关规定。当设地脚锚固螺栓时，其性能、质量指标等，应符合 GB 50017 的有关规定。

4.2.5 采用 H 型钢作为波纹钢板拱腹的加劲肋拱梁时，H 型钢应符合 GB/T 11263 的有关规定。

4.2.6 用于波纹钢板件加工焊接、槽钢接长焊接、H 型钢加劲肋拱梁接长焊接及钢管桩焊接等金属件的连接焊接材料，应与被焊接的钢材相匹配，焊接材料应符合 GB 50017 的有关规定。

4.3 防腐材料及防腐

4.3.1 波纹钢板件和高强度螺栓、螺母、钢垫圈以及槽钢、H 型钢等，应采用热浸镀锌防腐处理，其防腐性能应符合 GB/T 34567 的有关规定。

4.3.2 镀锌防腐所用的锌，应符合 GB/T 470 规定的 1 号锌或 0 号锌。

4.3.3 当采用其它防腐处理（如：锌铝镁、锌镁、热浸镀铝、静电喷涂等其他防腐方法代替热浸镀锌等）时，其防腐性能应不低于 GB/T 34567 有关热浸镀锌的防腐要求。

4.4 接缝防渗密封、二次防腐及防水材料

4.4.1 波纹钢板件接缝防渗密封材料，应根据不同的区域环境和气候条件选择相适应的接缝防渗材料，宜采用具有良好的抗冻、耐寒、耐腐蚀、耐老化和不透水性等性能的材料。可选用天然橡胶、氯丁橡胶或耐候密封胶。其性能与质量应分别符合 GB/T 14795、GB/T 14647、GB/T 22083 的有关规定。

4.4.2 高强度螺栓的螺帽防松动和防渗，宜采用厌氧胶（螺丝锁固剂）和双组分聚硫密封胶密封防渗处理。密封胶性能、质量与技术指标应符合 JC/T 483 的有关规定。

4.4.3 采用聚氨酯防腐（防水）时，其质量与技术指标、基本性能（产品适用类型）的选用，应符合 GB/T 19250 的有关规定。

4.4.4 采用沥青涂层防腐（防水）时，宜采用环氧沥青或改性沥青，其性能、质量与技术指标应分别符合 GB/T 27806 和 JTG F40 的有关规定。

4.4.5 防水土工膜隔水层，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 的有关规定。

4.4.6 采用其他防渗密封、防腐及防水材料时，应满足波纹钢板拱在设计使用年限内防腐、抗渗基本要求，采用的材料性能、质量与技术指标应符合国家或行业现行标准的有关规定。

4.4.7 采用涂装时，涂装材料品种、性能与适应的腐蚀环境等，应符合 JT/T 722 的有关规定。

4.5 结构性回填材料

4.5.1 结构性回填材料，宜选用级配较好的砾类土、砂类土等低腐蚀性、低压缩性、易压实的填料。填料最大粒径应小于 150 mm。冻土地区的回填材料,粒径小于 0.075 mm 颗粒含量宜小于 5 %。

4.5.2 结构性回填材料不得采用液限大于 50 %、塑性指数大于 26（冻土区液限大于 32 %、塑性指数大于 12）的细粒土或黏性土和垃圾、含有腐蚀性化学物质的土、腐殖质土、有机土、粉质土、泥炭、淤泥、冻土、膨胀土、粉质土、草皮、白垩土、硅藻土、易溶盐超过允许含量的土和含有二价以上铜、锰、铁离子及氯化钙、碳酸钠、硫化物等对波纹钢板拱结构存在严重腐蚀性的土。

4.5.3 波纹钢板拱桥侧的结构性回填，需采用挡土墙侧墙时，可根据波纹钢板拱桥所处环境、条件及景观等因素，采用有面板加筋土挡土墙、钢筋混凝土挡土墙、片石混凝土挡土墙、浆砌片（块）石或料石挡土墙、波纹钢板加筋土挡土墙等：

a) 采用有面板加筋土挡土墙结构时，面板、加筋带、基础等材料质量，应符合 JTG D30 的有关规定。
b) 采用钢筋混凝土挡土墙、片石混凝土挡土墙、浆砌片（块）石或料石挡土墙时，其材料质量等应符合 JTG/T F50 的有关规定。
c) 采用波纹钢板加筋土挡土墙时，波纹钢板质量应符合本标准第 4.1 条的相关要求，连接件（螺栓）性能应符合本标准第 4.2 条的相关要求，加筋带性能及质量应符合 JTG D30 的有关规定。

4.5.4 波纹钢板拱上结构性回填厚度小于 1.0 m 或压实困难，可考虑采用 C20 轻质混凝土（发泡混凝土或泡沫水泥轻质土）填料。

4.5.5 当在结构性回填层顶或路面结构层设置钢筋混凝土减载板时，材料应符合 JTG F30 的有关规定。

4.6 基础、下部结构及附属工程材料

钢筋及其他钢材（钢管桩等）、混凝土和砌体砂浆用材料（水泥、细集料、粗集料、水、外加剂、掺合料等）、砌体用片石、块石和片石混凝土用片石、混凝土用模板等，各材料的性能、质量技术指标，应符合JTG/T F50的有关规定。

5 设计

5.1 一般规定

5.1.1 波纹钢板拱桥应根据使用功能、通行能力、抗洪防灾等要求，结合地质、地形、水文和环境等条件进行综合设计，并应符合 JTG D60 的有关规定。

5.1.2 线形设计应符合路线设计的总体要求。

5.1.3 对于分期修建或后期需加宽的，应满足先期与后期易衔接的结构形式。

5.1.4 用于灌溉功能的波纹钢板拱桥，应结合当地农田基本建设考虑排灌的需要。

5.1.5 用于排洪功能的波纹钢板拱桥，应满足排洪的需要。

5.1.6 用于通道功能的波纹钢板拱桥，应满足道路通行的需要。

5.1.7 波纹钢板箱形拱应进行抗疲劳设计。

5.1.8 应满足环境保护、与自然环境和景观相协调，有景观要求时应进行景观设计。

5.1.9 波纹钢板拱桥的设计使用年限，见表 5。

表5 波纹钢板拱拱结构中小桥的设计使用年限

单位：年

公路等级	主体结构	
	中桥	小桥
高速公路、一级公路	100	50
二级公路及以下等级公路	50	30

5.1.10 波纹钢板拱结构采用以概率理论为基础的极限状态设计法，以可靠指标度量结构构件的可靠度，按分项系数的设计表达式进行设计。波纹钢板拱结构承载能力极限状态，按式（1）验算。

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

式中：

γ_0——结构重要性系数，安全等级为一级时取 1.1，安全等级为二级时取 1.0，施工阶段取 0.9；

S_d——不考虑地震作用时，荷载组合的效应设计值；

R_d——结构的承载力设计值。

5.1.11 当抗震设防烈度为 7 度及以上时，应进行竖向地震作用的组合效应验算，地震作用设计状况应满足式（2）的要求。

$$S_E \leq R_d / \gamma_{RE} \quad \cdots\cdots (2)$$

式中：

S_E ——考虑多遇地震作用时，荷载和地震作用组合的效应设计值；

R_d ——结构的承载力设计值；

γ_{RE}——承载力抗震调整系数，基础取 0.9、波纹钢板拱结构取 0.85。

5.1.12 波纹钢板拱结构上的作用，按性质可分为永久荷载、可变荷载和偶然荷载。各组合考虑的作用及分项系数，见表 6。

表6 公路波纹钢板拱结构中小桥荷载组合与分项系数

组合方式		作用类别		分项系数	
				对结构的承载能力不利时	对结构的承载能力有利时
基本组合	永久荷载	结构自重		1.2	1.0
		结构性回填土的重力		1.2	1.0
		基础变位作用	混凝土	0.5	0.5
			钢结构	1.0	1.0
	可变荷载	汽车荷载及动力作用		1.4	—

表 6　公路波纹钢板结构中小桥荷载组合与分项系数（续）

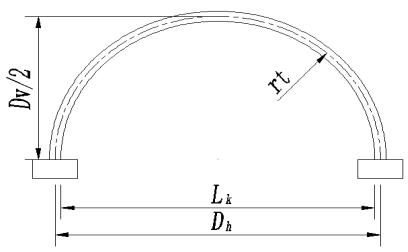
组合方式		作用类别	分项系数	
			对结构的承载能力不利时	对结构的承载能力有利时
基本组合	可变荷载	施工荷载	2.0	—
偶然组合	偶然荷载	土的重力	1.2	1.0
		地震作用	1.0	0

5.1.13　结构按正常使用极限状态设计时，应采用荷载的标准值组合计算变形，波纹钢板拱的竖向挠度限值（拱的下挠或上拱）的变形量不应超过计算矢高的 1.5 %。

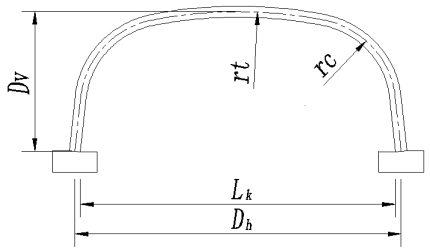
5.1.14　对适宜本标准规定跨径范围内需加固的原混凝土旧桥加固与加宽，参照本标准进行设计。加固旧桥对波纹钢板拱座需在混凝土基础上提高的，应紧贴原旧桥墩台身设置实体墙式钢筋混凝土拱座台身，并在原旧桥墩台身植入钢筋与实体墙式钢筋混凝土拱座台身钢筋连为一体。

5.2　波纹钢板拱基本类型

5.2.1　波纹钢板拱桥的拱形类型，采用圆弧拱和箱形拱两种拱形，即开口结构，见图 2 所示。圆弧拱适宜拱上填土较高的路段、箱形拱适宜拱上填土较低的路段。拱形选择应以工程现场实际并满足本标准附录 A 的技术参数选型。当采用其它拱形时，应具有成熟、可靠的结构验算，并经工程建设单位组织有关专家论证通过。



a）　圆弧拱



b）　箱形拱

说明：

D_V——计算矢高；

r_t ——拱顶半径；

r_c ——拱肩半径；

L_k ——标准跨径；

D_h——计算跨径。

图2　波纹钢板拱桥拱形示意图

5.2.2　波纹钢板拱结构基本技术参数，见附录 A。

5.3　波纹钢板拱桥布置

5.3.1　水文、水力和设计洪水频率，应符合 JTG C30 和 JTG D60 的有关规定。

5.3.2　波纹钢板拱桥的纵轴线宜与洪水流向正交（可根据现场设导流呈正交）。对跨（穿）越道路的波纹钢板拱桥，其纵轴线宜与跨（穿）越道路正交。斜交应符合表 7 规定的交角。

5.4 波纹钢板拱桥跨径、交角、安全等级

5.4.1 波纹钢板拱桥跨径，应满足河(沟)设计洪水以内的各级洪水及水流、泥石流、漂流物或通道下的人员、车辆、牲畜等从桥下安全通过的要求，并应考虑壅水、冲刷对上下游的影响，确保桥位附近路堤的稳定。跨径分类及跨径布置，应符合 JTG D60 的有关规定。

5.4.2 波纹钢板拱桥设计跨径、交角、安全等级，见表 7。当采用非标准跨径时，应参照本标准进行结构验算与设计。

表7 波纹钢板拱桥跨径、交角、安全等级

公路等级	高速公路、一级公路、二级公路	三级公路、四级公路
汽车荷载等级	公路—Ⅰ级	公路—Ⅱ级
安全等级	一级	二级
标准跨径（L_k/m）	8、10、13、16、20	
交角 （°）	跨径小于等于 16m 的圆弧拱结构的轴线与道路中心线的夹角不小于 60 ° 跨径 20m 的圆弧拱结构以及箱形拱结构的轴线与道路中心线宜正交	
环境类别	应符合 JTG 3362 有关环境类别及其作用等级	

5.5 波纹钢板拱桥净空

5.5.1 波纹钢板拱桥净空，应符合 JTG B01 中的公路建筑界限的规定和 JTG D60 的有关规定。

5.5.2 根据波纹钢板拱形技术参数（附录 A），当波纹钢板拱矢高受限不能满足桥下净高要求、或需要增加桥下净高时，可采用实体墙式钢筋混凝土墩台身的方法，调整或提高桥下净高。

5.5.3 波纹钢板拱桥改扩建路基需加宽增高时，根据拱顶填土厚度限制条件，在满足使用功能、荷载、桥下净空或通行能力、使用年限等要求前提下，可利用或加固利用。

5.6 多孔(连拱)结构之间的最小净距

5.6.1 当波纹钢板拱结构两孔或多孔连拱平行布置时，孔之间起拱线处的净距，应根据拱形与尺寸及结构性回填材料的类型，满足起拱线与压实区域的回填要求。

5.6.2 采用级配材料作为结构性回填材料时，孔之间起拱线处的最小净距，见表 8。

表8 波纹钢板拱桥多孔连拱结构起拱线外侧之间最小净距

单位：m

结构性回填条件	结构类型				
	圆弧拱结构			箱形拱结构	
	D_h≤8.0	8.0＜D_h≤12.0	D_h＞12.0	D_h≤8.0	D_h＞8.0
压实填料	1.0	1.2	有限元分析确定或 0.1D_h	1.0	有限元分析确定或 0.1D_h

5.7 线形及引道

5.7.1 波纹钢板拱桥的平、纵、横技术指标，应与路线总体布设相协调，并应符合 TG D60 的有关规定。

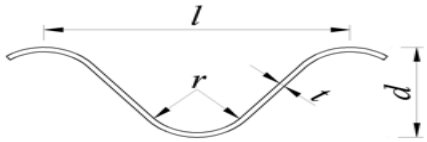
5.7.2 结构性回填区长度范围内的路面纵坡不宜大于 4 %，桥头引道纵坡不宜大于 5 %。易积雪、结冰的路段，桥上路面纵坡不应大于 3 %。

5.8 波纹钢板件设计参数

5.8.1 波纹钢板件的壁厚、波纹标准参数及适宜标准跨径，见表 9。

表9 波纹钢板的壁厚、波纹参数及适宜跨径

单位：mm

波纹钢板厚度(壁厚) t	波距 l	波高 d	波纹圆弧半径 r	波形类别	波纹钢板件宽度 L_C	波纹钢板件长度 L_W	适宜标准跨径 L_k
6.0～7.0	400	150	80	深波形	≤1280	≤6000	8000
7.0～8.0							10000
8.0～9.0							13000
9.0～10.0							16000
11.0～12.0							20000
波纹钢板件波形尺寸示意图							

5.8.2 波纹钢板原材的物理性能指标，见表 10。

表10 波纹钢板原材的物理性能指标表

名 称	钢牌号	屈服强度 R_{eH}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 A/%
碳素结构钢	Q235	≥235	≥370	≥26
低合金高强度结构钢	Q355	≥355	≥470	横向≥20、纵向≥22
耐候结构钢	Q235NH	≥235	≥360	≥25
	Q355NH	≥355	≥490	≥22

5.8.3 波纹钢的强度设计值，见表 11。

表11　波纹钢的强度设计值

钢牌号	钢材厚度（壁厚） t/mm	抗拉、抗压和抗弯 f/N/mm^2	抗剪 f_v/N/mm^2	端面承压（磨平顶紧） f_{ce}/N/mm^2
Q235 钢	≤12	205	120	310
Q355 钢	≤12	300	175	400

5.8.4　波纹钢板截面特性，见表 12。

表12　波纹钢板截面特性值

波纹钢板壁厚 t/mm	波纹参数 mm			截面积 A/mm^2/mm	惯性矩 I/mm^4/mm	塑性截面模量 Z/mm^3/mm
	波距 l	波高 d	波纹圆弧半径 r			
6	400	150	80	7.836	21054.371	361.211
6.5				8.491	22841.016	391.697
7				9.146	24633.163	422.207
8				10.457	28234.450	483.455
9				11.769	31859.201	544.935
10				13.083	35508.390	606.680
11				14.360	39332.000	670.05
注：其他壁厚的波纹钢板截面特性值，应通过计算求得。						

5.9　基础（下部）结构设计

5.9.1　波纹钢板拱结构的基础，宜采用强度等级不低于 C30 钢筋混凝土扩大基础，在特殊条件下可采用钢筋混凝土桩基础或钢管桩基础。地基与基础(包括非冻胀土层和冻胀土层及防冲刷的基础埋置深度、地基与基础计算、地基承载力、基础沉降和稳定性计算、软土或软弱地基处理、湿陷性黄土地基处理等)设计，应符合 JTG D63 的有关规定。

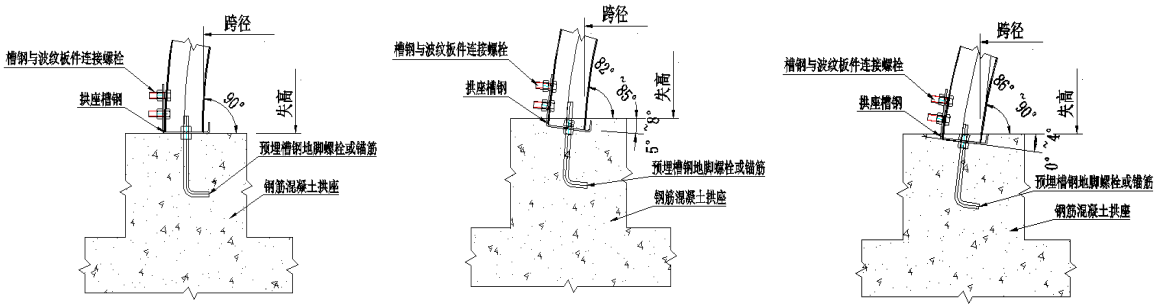
5.9.2　波纹钢板拱桥的地基设计考虑范围，包括结构性回填区的范围，应符合本标准第 5.15.2 条的相关要求，地基宽度应为全桥宽度。

5.9.3　波纹钢板拱的拱座，宜采用强度等级不低于 C30 钢筋混凝土，跨径 8 m、10 m、13 m 的拱座宽度宜为 1000 mm～1200 mm，跨径 16 m、20 m 的拱座宽度宜为 1200 mm～1500 mm，拱座高度宜为 800 mm～1200 mm。对多孔连拱之间的拱座宽度，还应满足本标准第 5.6 条规定的波纹钢板拱脚最小净距的要求。拱座配筋布置和计算，应满足承载能力要求。

5.9.4　钢筋混凝土拱座应水平布置于基础顶面或实体墙式钢筋混凝土墩(台)身顶面。拱座连接应符合下列规定：

a)　波纹钢板立置于槽钢内，波纹钢板波峰处用螺栓连接于槽钢。槽钢应与波纹钢板件拱脚处切线垂直，槽钢底面与拱座水平面的夹角，见图 3 所示。应根据波纹钢板拱脚的角度计算调整布置：

1) 半圆拱，槽钢底面垂直于拱座水平布置,见图 3、a）；
2) 矢高小于拱半径的圆弧拱，矢高宜为拱半径的 0.90～0.99 ，半径较小取较小值、 反之取较大值,见图 3、b）；
3) 箱形拱的拱侧（拱脚）与拱座的水平内夹角宜为 82 ° ～85 ° ，矢高较小取较小值，反之取较大值,见图 3、c）。



a ）矢高等于半径的圆弧拱　　b）矢高小于半径的圆弧拱　　c）箱形拱

图3　波纹钢板拱脚与槽钢和拱座连接示意图

b) 拱脚槽钢壁厚、槽内净宽，应符合本标准第 4.2.3 条的要求。槽钢布置于钢筋混凝土拱座之上通过预埋锚筋（钢筋）或地脚螺栓连接，锚筋（钢筋）或地脚螺栓的间距应为 400 mm(对应于波纹钢板件的波谷位置)。波纹钢板件拱脚与槽钢连接的高强度螺栓间距应为 400 mm（对应于波纹钢板件的波峰位置）。波纹钢板件与槽钢连接的高强度螺栓强度等级、规格，参见表 13 选择。

表13　波纹钢板拱脚与槽钢连接的高强度螺栓等级及规格

跨径 L_K/m	高强度螺栓等级及规格	
	螺栓强度等级	螺栓规格
8	8.8 S 或 10.9 S	M16 或 M20
10、13	8.8 S 或 10.9	M20 或 M24
16	8.8 S 或 10.9 S	M24 或 M27
20	8.8 S 或 10.9 S	M27 或 M30

5.9.5　钢筋混凝土拱座上，应预埋拱脚处波纹钢板件两侧后浇混凝土钢筋，后浇混凝土应符合本标准第 5.15.3 条的要求。

5.10　结构上的荷载及作用

5.10.1　土的重力

作用在波纹钢板拱上结构性回填土的作用范围，见图 4 所示，其每延米的重力(W) 按式（3）计算。

$$W = \gamma \times D_h \times \left(H + 0.1075\, D_v\right) \qquad (3)$$

式中：

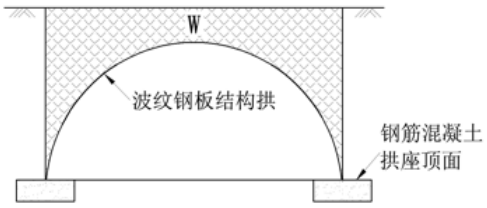
W ——波纹钢板拱上填土每延米的重力（kN/m）；

γ ——土的重度（kN/m^3）；

D_h ——波纹钢板拱桥计算跨径（m），参见图 13 定义；

H ——拱上填土厚度（m）；

D_v ——波纹钢板拱桥计算矢高（m），参见图 13 定义。



说明：

W——拱上结构性回填土每延米重力的截面。

图4　波纹钢板拱上恒载范围图示

5.10.2　汽车荷载

5.10.2.1　波纹钢板拱桥的汽车荷载，应采用车辆荷载图式。

5.10.2.2　汽车荷载的扩散方法和多车道折减系数，参考 JTG D60 相关规定，扩散压力按式（4）计算。

$$\sigma_L = \frac{A_L}{B \times l_t} \times m_f \quad \cdots\cdots (4)$$

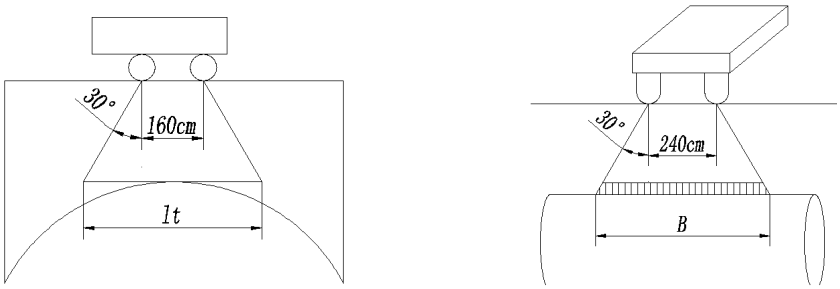
式中：

σ_L ——汽车荷载扩散到波纹钢板拱顶的压力（kPa）；

A_L ——跨径长度范围内布置的设计车辆荷载总轴重（kN），应考虑车道数。在施工过程中，按实际施工机械及车辆总轴重验算；

m_f ——多车道折减系数；

l_t、B ——沿车轮长度和宽度方向扩散后尺寸（m），若 l_t 大于 D_h 时，$l_t = D_h$；单车道车辆荷载扩散见图5。



a）行车方向　　b ）路宽方向

说明：

l_t——沿车轮长度（行车）方向扩散后的尺寸；

B ——沿车轮宽度（路宽）方向扩散后的尺寸。

图5　单车道车辆荷载扩散图示

5.10.2.3　车辆冲击扩大系数，按式（5）计算：拱顶以上填土厚度大于 2 m时，可不考虑冲击影响。

$$\mu = 0.4 \times (1.0 - 0.5H) \quad \cdots\cdots (5)$$

式中：

μ ——车辆冲击扩大系数；

H ——波纹钢板拱上填土(含路面结构层)厚度(m)。

5.10.3　地震作用

抗震设防烈度大于或等于7度（0.10 g）的地区，波纹钢板拱桥应进行抗震设计，考虑地震作用。一般可只考虑竖向地震作用，按式（6）计算。

$$E_v = R_o \times \delta \times M \quad \cdots\cdots (6)$$

式中：

E_v——竖向地震作用（kN/m）；

R_o——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，按表 14 取值；

M——拱上填土每延米的质量（t/m），取式（3）土体重力除于重力加速度 g。

表14　抗震设防烈度和水平向设计基本地震动加速度峰值

抗震设防烈度	7	8	9
δ	0.10（0.15）g	0.20（0.30）g	0.40g

5.11　波纹钢板圆弧拱结构计算

5.11.1　内力计算和连接强度计算

5.11.1.1　内力计算和连接强度计算程序，见图 6。

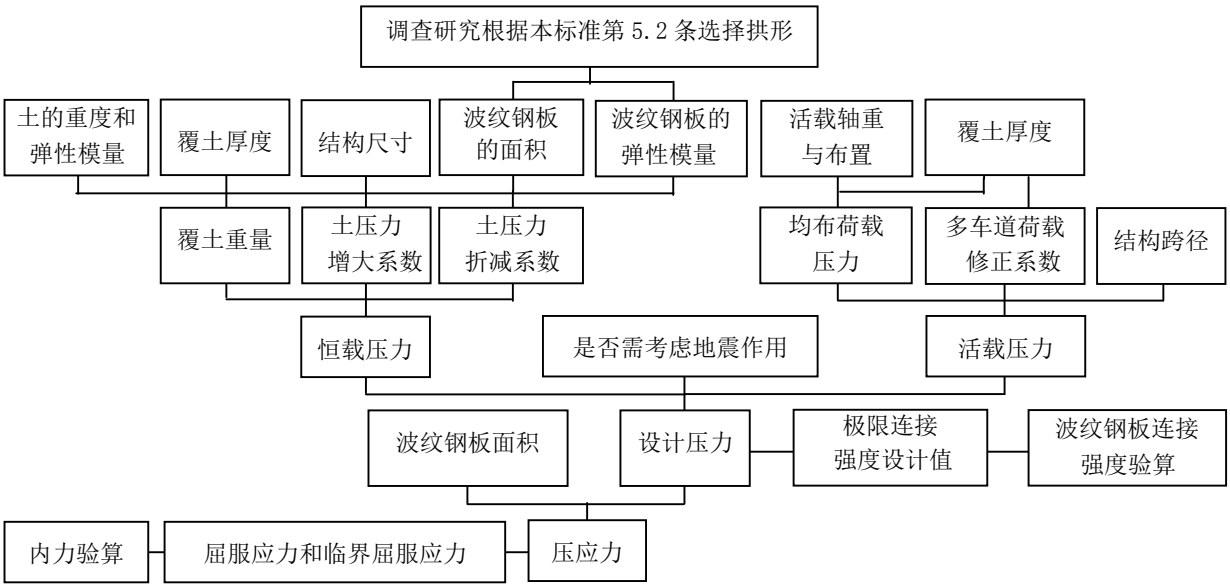


图6　内力和连接强度计算程序示意图

5.11.1.2 波纹钢板结构的内力按式（7）、式（8）计算：

a) 当不考虑地震作用时，波纹钢板的轴向压应力应满足式（7）的要求。

$$[\alpha_D \times T_D + \alpha_L \times T_L(1+\mu)]/A < \min(f_y, f_b) \quad (7)$$

b) 当考虑地震作用时，波纹钢板的轴向压应力应满足式（8）的要求。

$$(\alpha_D \times T_D + \alpha_E \times E_V)/A < \min(f_y, f_b) \quad (8)$$

$$T_D = 0.5 \times (1.0 - 0.1C_S)A_f W \quad (9)$$

$$T_L = 0.5 l_t \sigma_L \quad (10)$$

$$C_S = \frac{1000\ E_S D_V}{E \times A} \quad (11)$$

式中：

α_D——恒载分项系数，按表 6 取值；

T_D——恒载引起的波纹钢板压力或推力（kN/m），按式（9）计算；

α_L——活载（汽车荷载及动力作用）分项系数，按表 6 取值；

T_L——活载引起的波纹钢板压力或推力(kN/m)，按式（10）计算；

μ—— 车辆活载冲击系数，按式（5）计算；

A—— 单位长度的波纹钢板截面积（mm^2/mm）；

f_y——波纹钢板材料屈服应力（MPa）；

f_b ——波纹钢板的极限抗力（MPa）；

α_E——地震作用分项系数，按表 6 取值；

E_V ——竖向地震作用（kN/m），按式（6）计算；

C_S ——回填土性质与结构尺寸的土压力折减系数，按式（11）计算；

A_f ——考虑结构起拱效应的土压力增大系数；按表 15 取值；

W ——拱上填土每延米的重量（kN/m），按式（3）计算；

l_t ——沿车轮长度（行车）方向扩散后的尺寸；若 l_t 大于 D_h 时，l_t=D_h；

σ_L——活载扩散到波纹钢板拱顶的压力（kPa），按式（4）计算；

E_S ——回填土体材料的弹性模量(MPa)；

D_V——波纹钢板拱桥计算矢高（m），参见图 13 定义；

E ——波纹钢板材料的弹性模量(MPa)。

表15 土压力增大系数 A_f

A_f	D_h/D_V				
	0.8	1.0	1.2	1.4	≥1.6
H = 1.2D_h	1.34	1.20	1.12	1.07	1.02
H = 1.0D_h	1.30	1.19	1.10	1.05	1.02
H = 0.8D_h	1.31	1.19	1.11	1.06	1.03

表 15　土压力增大系数 A_f（续）

A_f	D_h/D_V				
	0.8	1.0	1.2	1.4	≥1.6
$H=0.6D_h$	1.34	1.20	1.12	1.07	1.04
$H=0.4D_h$	1.40	1.23	1.15	1.10	1.05
$H\leqslant 0.2D_h$	1.60	1.28	1.20	1.15	1.10
$H\leqslant 0.1D_h$	1.74	1.30	1.23	1.18	1.12
注：A_f不能通过查表得到时，通过线性内差取值。					

5.11.1.3　波纹钢板件连接强度计算：

a)　波纹钢板件端头（短边）采用错缝连接，板件侧面(长边)连接采用通缝连接。波纹钢板件连接搭接宽度，应满足上下层波纹钢板件螺栓孔全部贯通对应一致。

b)　波纹钢板件采用高强度螺栓连接，应根据施工环境条件和作用力的性质选择其连接方法，宜采用承压型连接，当波纹钢板件满足摩擦型连接要求时，可采用摩擦型连接。

c)　高强度螺栓承压型连接的抗剪强度主要由螺栓杆受剪和孔壁承压两种破坏模式控制，应分别对受剪承载力设计值、承压承载力设计值和受拉承载力进行计算。高强度螺栓摩擦型连接，应分别计算在受剪连接中每个高强度螺栓的承载力设计值、在螺栓杆轴方向受拉的连接中每个高强度螺栓的承载力；当摩擦型连接同时承受摩擦面间的剪力和螺栓杆轴方向的外拉力时，需进行验证计算。高强度螺栓连接强度计算，应符合 GB 50017 的有关规定。

5.11.2　波纹钢板件极限抗力计算

为保证波纹钢板拱桥结构的稳定性，应按式（12）计算波纹钢板件的极限抗力。

$$f_b=\begin{cases}\phi_t F_m\left[f_y-\dfrac{f_y^2}{12E\rho}\left(\dfrac{KR}{r}\right)^2\right], R\leq R_e\\ \dfrac{3\phi_t\rho F_m E}{(KR/r)^2}, R>R_e\end{cases} \quad \cdots\cdots (12)$$

$$K=\lambda\left(\frac{EI}{E_m R^3}\right)^{0.25} \quad \cdots\cdots (13)$$

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

$$\rho=\left(1000\frac{H+H'}{R_c}\right)^{0.5}\leq 1.0 \quad \cdots\cdots (15)$$

$$\lambda=1.22\left[1.0+1.6\left(\frac{EI}{E_m R_c^3}\right)^{0.25}\right] \quad \cdots\cdots (16)$$

$$E_m = E_s\left[1-\left(\frac{R_c}{R_c+1000(H+H')}\right)^2\right] \quad (17)$$

$$F_m = 0.85+\frac{0.3S}{D_h} \le 1.0 \quad (18)$$

式中：

f_b——波纹钢板的极限抗力（MPa）；

ϕ_t——波纹钢材料抗力系数，取 0.8；

F_m——多跨结构屈曲应力折减系数，按式（18）计算；

f_y——波纹钢板材屈服强度（MPa）；

K——结构与周围土体相对弯曲刚度系数，按式（13）计算；

R ——结构的曲率半径（mm）；

E ——波纹钢板材的弹性模量（MPa）；

ρ ——屈曲折减系数，按式（15）计算；

r ——波纹钢板材回转半径（mm）；

R_e ——等效半径（mm），按式（14）计算；

λ ——计算 K 的一个系数，按式（16）计算；

I ——波纹钢板材的惯性矩（mm^4/mm）；

E_m ——土体弹性模量的修正值，按式（17）计算；

H ——波纹钢板拱顶以上填土厚度（m）；

H'——拱顶至起拱线垂直距离的一半（m）；

R_C ——拱顶处的曲率半径（mm）；

E_S ——回填土体弹性模量（MPa）；

S ——多跨结构之间的最小间距（m）；

D_h ——波纹钢板拱结构计算跨径（m），参见图 13 定义。

5.11.3 施工过程验算

5.11.3.1 施工过程验算程序，见图 7。

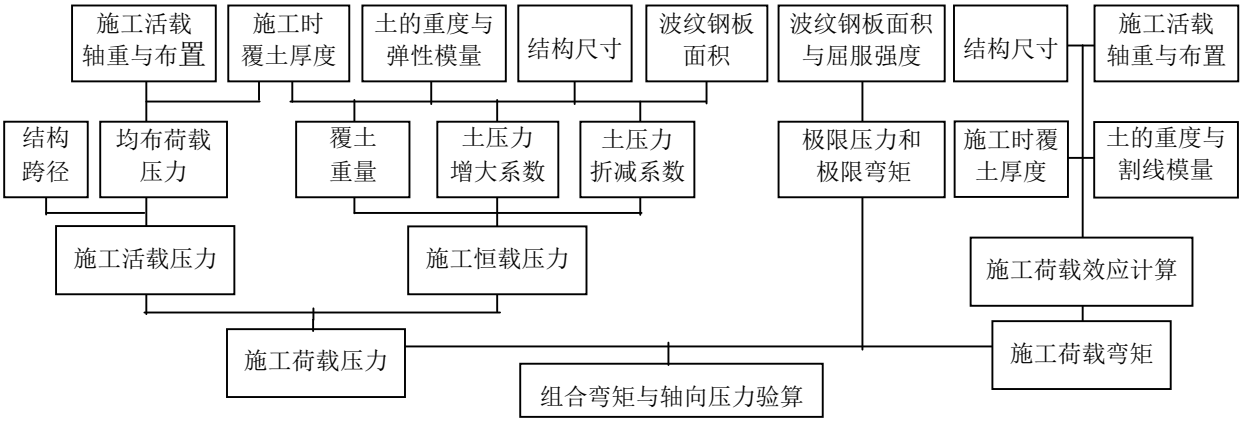


图7 施工过程验算程序图

5.11.3.2 波纹钢板拱在施工过程中，波纹钢板件截面的弯矩与轴向压力的内力组合，应满足式（19）的要求。

$$\left(\frac{P}{P_{Pf}}\right)^2+\left|\frac{M}{M_{Pf}}\right|\le 1.0 \quad \cdots\cdots (19)$$

$$P=T_D+T_C \quad \cdots\cdots (20)$$

$$P_{Pf}=\phi_h A f_y \quad \cdots\cdots (21)$$

$$M=M_1+M_B+M_C \quad \cdots\cdots (22)$$

$$M_1=k_{M1}R_B\gamma D_h^3 \quad \cdots\cdots (23)$$

$$M_B=-k_{M2}R_B\gamma D_h^2 H_C \quad \cdots\cdots (24)$$

$$M_C=k_{M3}R_L D_h L_C \quad \cdots\cdots (25)$$

$$L_C=A_C/k_4 \quad \cdots\cdots (26)$$

$$N_f=E_S(1000\,D_h)^3/EI \quad \cdots\cdots (27)$$

$$K_{M1}=\begin{cases}0.0046-0.001\lg N_f, & N_f\le 5000\\ 0.0009, & N_f>5000\end{cases} \quad \cdots\cdots (28)$$

$$K_{M2}=\begin{cases}0.018-0.004\lg N_f, & N_f\le 5000\\ 0.0032, & N_f>5000\end{cases} \quad \cdots\cdots (29)$$

$$K_{M3}=\begin{cases}0.12-0.018\lg N_f, & N_f\le 100000\\ 0.030, & N_f>100000\end{cases} \quad \cdots\cdots (30)$$

$$R_B=\begin{cases}0.67+0.87\left(\dfrac{D_V}{2D_h}-0.20\right), & 0.20\le\dfrac{D_V}{2D_h}\le 0.35\\ 0.80+1.33\left(\dfrac{D_V}{2D_h}-0.35\right), & 0.35\le\dfrac{D_V}{2D_h}\le 0.50\\ \dfrac{D_V}{D_h},\ \dfrac{D_V}{2D_h}>0.50 & \end{cases} \quad \cdots\cdots (31)$$

$$R_L=\left[0.265-0.053\lg(N_f)\right]/(H_C/D_h)^{0.75}\le 1.0 \quad \cdots\cdots (32)$$

$$M_{Pf}=\phi_h M_P \quad \cdots\cdots (33)$$

$$M_P = Zf_y \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (34)$$

式中：

P ——波纹钢板截面所受轴向压力，按式（20）计算。计算包含两部分，分别为土的重力和汽车荷载(考虑施工机械)引起的压力，计算方法与式（9）、式（10）相同，当$H_C/D_h<0.2$时，取 P ＝0；

T_D——土的重力（恒载）引起的波纹钢板压力（KN/m），按式（9）计算；

T_C——汽车荷载（考虑施工机械）引起的波纹钢板压力；

P_{Pf}——波纹钢板截面考虑塑性抵抗系数的设计（极限）压力，按式（21）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横截面面积（mm^2/mm），对于高强度螺栓连接的波纹钢板，应扣除螺栓孔截面面积；

f_y——波纹钢板材屈服强度（MPa）；

M ——波纹钢板截面所受弯矩由三部分组成，按式（22）计算；

M_1——波纹钢板拱结构在土体均布力作用下跨中截面的弯矩；

M_B——由于周边土体的支撑作用，使波纹钢板拱结构跨中截面减小的弯矩，是负值，按式（24）计算；

M_C——施工机械荷载引起的波纹钢板拱结构跨中截面的弯矩；

γ ——结构性回填材料的重度（kN/m^3）；

D_h——波纹钢板拱结构计算跨径（m），参见图 13 定义；

H_C——施工过程中波纹钢板拱顶以上的填土厚度；

L_C——施工过程中作用于结构上的施工机械（包括汽车荷载）的等效荷载值（kN/m），按式（26）计算；

A_C——施工过程中的车辆轴重；

k_4——等效线性荷载参数，按表 16 取值；

N_F——波纹钢板柔度系数，按式（27）计算。对于高强度螺栓连接的波纹钢板，截面惯性矩I应扣除螺栓孔面积；

E_S——结构性回填土的弹性模量（MPa）；

E ——波纹钢板的弹性模量（MPa）；

I ——波纹钢板材的惯性矩（mm^4/mm）；

k_{M1}——参数，按式（28）计算；

k_{m2} ——参数，按式（29）计算；

k_{m3}——参数，按式（30）计算；

R_B ——施工阶段计算弯矩的参数，按式（31）计算；

R_L ——施工阶段计算弯矩的参数，按式（32）计算；

M_{Pf}——波纹钢板截面考虑塑性抵抗系数的设计弯矩，按式（33）计算；

M_P ——波纹钢板截面可承受的塑性弯矩，即考虑材料极限抗拉强度时截面能承受的最大弯矩（kN·m/m），按式（34）计算；

d ——波纹钢板的波高（mm）；

t——波纹钢板的壁厚（mm）；

f_f ——波纹钢板材极限抗拉强度（MPa），按照采用的钢材相对应的现行国家标准中相关材料参考范围取最小值。

Z ——截面塑性模量，按表12取值。

表16　等效线性荷载参数k_4的取值

单位：m

波纹钢板拱顶回填厚度	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）
0.3	1.3	1.5	2.6
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	6.62	6.62	6.62
6.0	8.42	8.42	8.42
9.0	12.02	12.02	12.02

5.11.4　运营阶段结构验算

波纹钢板拱桥施工完成后的运营阶段，应对波纹钢板拱结构进行校核验算，承载能力极限状态下的弯矩和轴向压力的组合效应不大于截面的塑性抗弯承载力，应满足式（35）的要求。

$$\left(\frac{T_{\mathrm{f}}}{P_{\mathrm{P}f}}\right)^2+\left|\frac{M_{\mathrm{f}}}{M_{\mathrm{P}f}}\right|\leq 1.0 \quad \cdots\cdots (35)$$

$$M_{\mathrm{f}}=\alpha_{\mathrm{D}}M_{\mathrm{I}}+\alpha_{\mathrm{D}}M_{\mathrm{D}}+\alpha_{\mathrm{L}}M_{\mathrm{L}}(1+\mu) \quad \cdots\cdots (36)$$

$$M_{\mathrm{D}}=-k_{\mathrm{M2}}R_{\mathrm{B}}\gamma D_{\mathrm{h}}^2 H\mathrm{e} \quad \cdots\cdots (37)$$

$$M_{\mathrm{L}}=\frac{k_{\mathrm{M3}}R_{\mathrm{U}}D_{\mathrm{h}}A_{\mathrm{L}}}{k_4} \quad \cdots\cdots (38)$$

$$H_{\mathrm{e}}=\min\left(H,D\mathrm{h}/2\right) \quad \cdots\cdots (39)$$

$$R_{\mathrm{U}}=\frac{0.265-0.053\lg N_{\mathrm{F}}}{\left(H/D_{\mathrm{h}}\right)^{0.75}}\leq 1.0 \quad \cdots\cdots (40)$$

式中：

T_f ——承载能力极限状态基本组合下由恒载和活载引起的波纹钢板结构的轴向内力（kN/m）；

P_{Pf} ——按式（21）计算；

M_F ——波纹钢板拱桥运营阶段结构截面所受弯矩，按式（36）计算；

M_{pf}——波纹钢板截面可承受的极限弯矩，按式（33）计算；

α_D——恒载分项系数，按表（6）取值；

M_1——波纹钢板拱结构在土体均布力作用下跨中截面的弯矩，按式（23）计算；

M_D——波纹钢板拱顶和拱肩由恒载产生的弯矩之和（kN·m/m）；

α_L——活载分项系数，按表（6）取值；

M_L ——波纹钢板拱顶和拱肩由汽车荷载产生的弯矩之和（kN·m/m）；

μ ——车辆活载冲击系数，按式（5）计算；

k_{M2}——参数，按式（29）计算；

k_{M3}——参数，按式（30）计算；

R_B ——参数，按式（31）计算；

γ ——结构性回填材料的重度（kN/m^3）；

D_h ——波纹钢板拱结构计算跨径（m），参见图 13 定义；

H_e——取H_e和D_h/2 两者的较小值；

R_U ——系数，按式（40）计算；

A_L——跨径长度范围内布置的设计车辆荷载总轴重（kN）；

k_4——按表 16 取值；

H ——波纹钢板拱顶以上填土厚度（m）；

N_F ——波纹钢板柔度系数，按式（27）计算，对于高强度螺栓连接的波纹钢板，截面惯性矩I应扣除螺栓孔面积。

5.12 箱形拱结构计算

波纹钢板箱形拱结构设计计算,应采用非线性土体本构关系并考虑与结构的相互作用或其他可被接受的替代方法，以抗弯控制设计为主，检查结构的最大填土厚度、等效应力和变形是否满足要求等进行有限元分析。

5.13 加劲肋设计

5.13.1 对于波纹钢板箱形拱和跨径≥13m 的圆弧拱结构，宜在箱形拱拱顶和拱肩处、圆弧拱的拱顶处增加周向波纹钢板件加劲肋板，以提高塑性抗弯承载力。加劲肋板应与主体结构的波纹钢板件参数（壁厚、波纹参数、弧形曲面、螺栓、镀锌层等）相同，形成组合截面。

5.13.2 加劲肋板的布置：

a) 箱形拱的拱肩处非通长加劲肋板应对称设置,从波纹钢板拱一侧的四分之一点以下开始跨越拱肩至结构另一侧的对应点。拱肩上的波纹钢板加劲肋板下端距拱座顶面不宜小于 75 mm、拱肩圆弧中间处以上的加劲肋板长度应不小于拱肩圆弧中间处以下加劲肋板长度的 1/3，拱顶（跨中）加劲肋板长度应不小于跨径的 1/3。通过计算确定加劲肋板纵桥向长度、横桥向宽度及纵、横向间距（间隔波距）。波纹钢板件非通长加劲肋板截面布置形式见图 8、图 9。

b) 通长加劲肋板为箱形拱顶拱顶、拱肩分三段和圆弧拱的拱顶段以横桥向连续布置，截面形式见图 10）。

c) 对于跨径≥16m 的圆弧拱结构，在拱顶背面（圆弧拱顶处）增加的波纹钢板加筋肋板，其长度为圆弧拱的圆心角 120 ° 扇形弧长。

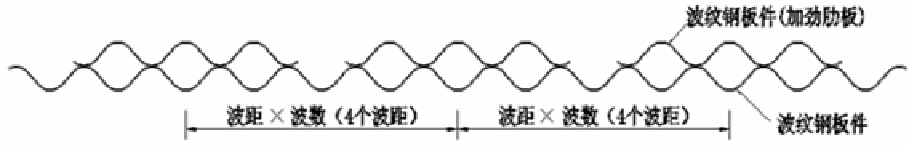


图8　非通长波纹钢板件加劲肋板每 4 个波距示意图

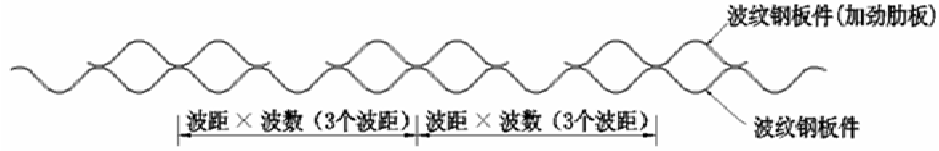


图9　非通长波纹钢板件加劲肋板每 3 个波距示意图

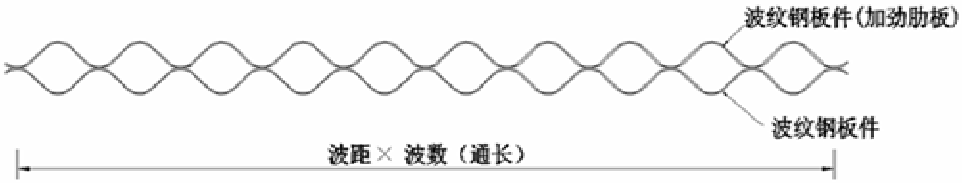


图10　通长（连续）波纹钢板件加劲肋板示意图

5.13.3　加劲肋拱梁布置：

a) 跨径≥16 m 的箱形拱和圆弧拱结构，除拱顶上布置波纹钢板件加劲肋板外，宜在拱腹（拱下）增加栓接“H“型钢加劲肋拱梁。加劲肋拱梁“H“型钢的断面尺寸应符合波纹钢板件的波距与波深要求，宜采用 200 mm×200 mm 型号的标准型钢或采用 220 mm×120 mm 的非标准型钢。型钢加劲肋梁横桥向布置宽度不宜超过一片波纹钢板件的宽度，布置于波谷位置。

b) 型钢腰板处通过不小于 12 mm 厚钢板与两侧波峰处采用高强度螺栓连接，见图 11。

c) 型钢接长，宜在型钢两端头处采用 12 mm 厚钢板、高强度螺栓连接。

d) 型钢与拱座连接，在拱座上预埋厚度不小于 12 mm 的钢板，型钢下端头可焊接或高强度螺栓连接于拱座预埋钢板上。

e) 跨径＜16 m 的箱形拱和圆弧拱结构，可根据结构受力等具体情况，参照以上方法增加“H“型钢加劲肋拱梁。

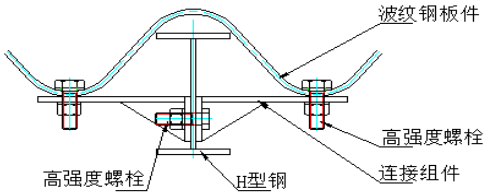


图11　波纹钢板拱腹（拱下）增加栓接“H“型钢加劲肋拱梁示意图

5.14 结构耐久性及防腐设计

5.14.1 基础、拱座等混凝土的腐蚀环境、耐久性设计，应符合 JTG 3362 的规定。

5.14.2 波纹钢板拱结构的防水（防渗）、防腐，应根据腐蚀环境、腐蚀特性、防腐材料性能、结构特点、结构使用年限等因素综合确定：

a) 波纹钢板件高强度螺栓连接搭接缝之间防渗处理，宜采用防渗密封条密封，防渗密封条宽度不小于波纹钢板搭接重叠板宽度，长度为波纹钢板搭接缝全长。

b) 波纹钢板拱顶面螺栓的螺帽处防渗处理，宜采用厌氧胶（螺丝锁固剂）和双组分聚硫密封胶对螺栓处密封防渗处理。

c) 波纹钢板拱顶面螺栓及接缝连接处防水处理，宜采用聚氨酯防水层，总干膜厚度不小于 1.5 mm；

d) 波纹钢板顶面与土壤接触面的防腐处理，应结合回填土腐蚀性等级（见表 17），在波纹钢板件防腐镀锌层的基础上，按表 18 组合防腐。

e) 波纹钢板拱背的波纹钢加劲肋板端头，宜采用 2.5 mm～3.0 mm 厚的环保用高密度聚乙烯土工膜上下两层搭连封堵，土工膜接缝搭接宽度不小于 5 cm，采用耐候胶连接。波纹钢板加劲肋板下（拱背波谷内）不得有土等杂物进入填充。

   波纹钢板拱顶上约 20 cm 压实层厚的结构性回填层中，按 2%横坡满铺一层 2.5 mm～3.0 mm 厚的环保用高密度聚乙烯土工膜隔水层，将其上部回填土中渗水隔离。土工膜接缝连接时上层布压下层布搭接宽度不小于 5 cm，搭接连接采用耐候胶粘接。土工膜总宽度不宜小于桥宽、总长度不宜小于（延伸到）结构性回填范围两端头以外各 10.0 m。

f) 波纹钢板拱腹面（外露面）、干湿交替区或水下区、钢管桩及下部钢结构等，需采用涂装防腐时，应按 JT/T 722 的有关规定采用普通型和长效型涂装，普通型和长效型涂装总干膜厚度分别不小于 210 μm 和 240 μm。波纹钢板拱干湿交替区或水下区涂装总干膜厚度应不小于 450 μm。

表17 结构性回填土的腐蚀性等级指标

回填土腐蚀性等级	电阻率 Ω．m	电流密度 mA/cm^2	含盐率 %	含水率 %	pH 值
强腐蚀性	＜20	＞0.3	＞0.75	＞12	＜5 或＞9
中腐蚀性	20～50	0.3～0.025	0.75～0.05	5～12	5～6
弱腐蚀性	＞50	＜0.025	＜0.05	＜5	6～9
注：当波纹钢板拱结构所处土壤的腐蚀性质处于多种介质同时作用时，腐蚀性等级应取最高者。					

表18 波纹钢板拱顶面防腐组合

土壤腐蚀性等级	结构设计使用年限	防腐材料组合与各材料的总干膜厚度 mm			结构性回填中隔水层厚度 mm
	年	聚氨酯	环氧沥青	改性沥青	高密度聚乙烯土工膜
强腐蚀性	100	≥1.5	≥1.0	—	≥3.0
	50	—	≥0.5 或采用改性沥青	或≥1.0	≥3.0
中腐蚀性	100	—	≥0.5 或采用改性沥青	或≥1.0	≥3.0

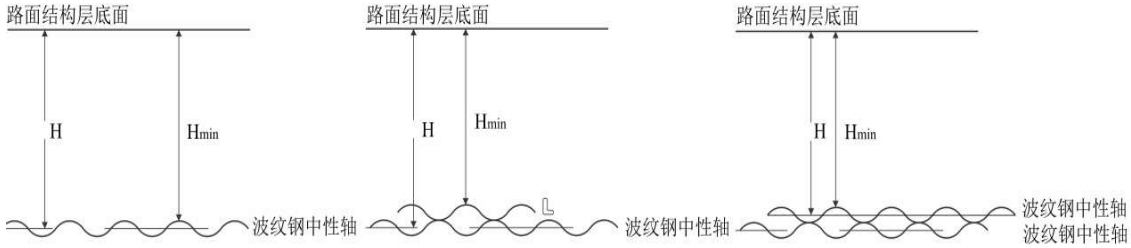
表 18　波纹钢板拱顶面防腐组合（续）

土壤腐蚀性等级	结构设计使用年限	防腐材料组合与各材料的总干膜厚度 mm			结构性回填中隔水层厚度 mm
	年	聚氨酯	环氧沥青	改性沥青	高密度聚乙烯土工膜
中腐蚀性	50	—	—	≥1.0	≥2.5
弱腐蚀性	100	—	—	≥1.0	≥2.5
	50	—	—	—	≥2.5
注1：当不采用环氧沥青时，可采用改性沥青及其总干膜厚度。 注2：结构设计使用年限为30年时，可参照表中50年防腐组合。					

5.15　结构性回填设计

5.15.1　结构性回填厚度

5.15.1.1　波纹钢板拱桥结构性回填最小填土厚度（H_{min}）为波纹钢板拱顶(波峰顶)到路面结构层（不含级配砂砾垫层）底面之间的竖向距离的最小值，详见图 12 所示。



说明：

H ——填土厚度；

H_{min}——拱顶最小填土厚度或范围。

图12　波纹钢板拱结构性回填拱顶最小厚度或范围图示

5.15.1.2　波纹钢板拱顶结构性回填厚度，对于深波形（波高或波深为 150 mm）波纹钢板拱结构，其最小填土厚度应取式（41）计算的最小填土厚度与 1500 mm 两者的较小值。因此，对于跨径≤8 m 的圆弧拱顶的最小填土厚度取式（41）计算结果的较大值，且不得小于 0.6 m；对跨径＞8 m 的圆弧拱顶的最小填土厚度应不小于 1.5 m。

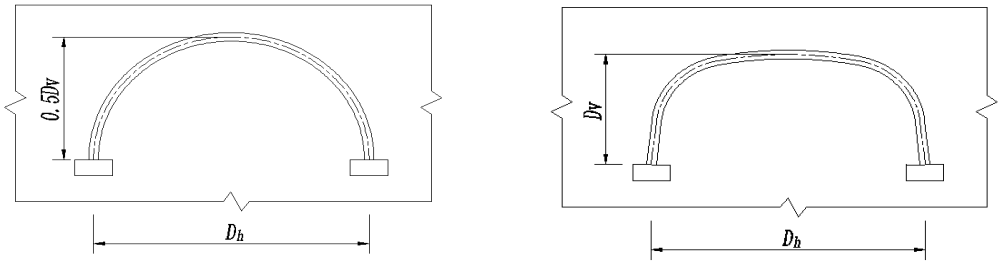
$$H_{min} = \max\left[0.6\text{m}, \frac{D_h}{6}\left(\frac{D_h}{D_V}\right)^{0.5}, 0.4\left(\frac{D_h}{D_V}\right)^{2}\right] \quad \cdots\cdots (41)$$

式中：

H_{min}——波纹钢板拱顶最小填土厚度（m），参见图 12；

D_h ——计算跨径(自波纹截面中性轴起算：即：起拱线处净跨径+波高)；

D_V ——计算矢高(自波纹截面中性轴起算，按图13的定义界限取值。



a）圆弧拱　　b）箱形拱

说明：

D_V——计算矢高；

D_h ——计算跨径。

图13　波纹钢板拱桥拱形结构D_h和D_v的取值定义图示

5.15.1.3　波纹钢板箱形拱的拱顶结构性回填土最小厚度不小于 300 mm，最大厚度不宜超过 1500 mm，并应根据本标准第 5.12 条采用有限元分析确定。

5.15.1.4　波纹钢板箱形拱依赖自身抗弯承载能力承担外荷载，若填土高度超过 1500 mm 时，应按钢结构或其他拱形结构进行抗弯承载力设计，或者采用有限元分析进行结构设计。

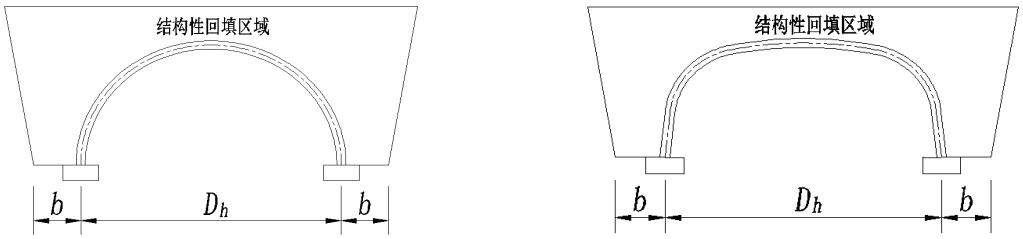
5.15.2　结构性回填区的范围

5.15.2.1　单孔结构起拱线外侧和多孔（连拱）两端孔起拱线外侧的最小纵向长度范围 b 区(如图 14 所示)，见表 19。结构性回填长度范围，应足以限制波纹钢板拱每侧的水平压应变不大于跨径的 1.0 %。

表19　单孔和多孔（连拱）两端孔起拱线外侧结构性回填最小长度

单位：m

回填条件	拱形结构类型				
	圆弧拱结构			箱形拱结构	
	D_h≤8.0	8.0<D_h≤10.0	D_V>10.0	D_h≤8.0	D_h>8.0
筑堤法施工，压实填料	b =D_h/3，且≥1.5	b =D_h/3，且≥3.0	b=D_h/3，且≥5.0 或不小于矢高与D_h/2 之间的较小值	b =≥1.0	b =不小于矢高与D_h/2 之间的较小值



a）圆弧拱　　b）箱形拱

说明：

b ——结构性回填最小长度范围区；

D_h——计算跨径。

图14　结构性回填最小长度范围区(b)示意图

5.15.2.2　多孔（连拱）之间的结构性回填最小净距，按本标准第 5.6 条规定的最小净距确定。

5.15.3　结构性回填

5.15.3.1　单孔拱外侧拱脚拱座上和多孔（连拱）最小净距之间的拱脚拱座上，宜采用 C25 钢筋混凝土回填，钢筋预埋于混凝土拱座上。拱座上的钢筋混凝土回填高度以不埋置拱肩加筋肋板下端为宜。

5.15.3.2　结构性回填设计可根据高度、回填土体压力、环境条件、景观、施工便捷及结构安全稳定性的因素，可采用有面板加筋土挡土墙、混凝土挡土墙、片石混凝土挡土墙、浆砌片块石挡土墙等结构形式。也可采用波纹钢板拱进出口与路基边坡坡率相同的削竹式洞口或下挡土墙的形式，拱缘上设置钢筋混凝土，拱侧及拱顶路基边坡与桥两端路基边坡防护一致。加筋土挡土墙（侧墙）的设计，应符合 JTG D30 有面板加筋土挡土墙结构的有关规定，波纹钢板挡土墙可参照设计。

5.15.3.3　当波纹钢板拱宽度按路基同宽设计时，结构性回填加筋土挡土墙一般采用路肩式挡土墙。当波纹钢板拱宽度大于路基宽度时，结构性回填侧墙可采用路堤式挡土墙。

5.15.3.4　在结构性回填区域范围内（不包括路面结构层），拱座（拱脚）以下分层压实度不得小于 95 %、拱座（拱脚）以上分层压实度不得小于 96 %，以保证结构稳定性和发挥土—钢结构相互作用。

5.15.4　减载板设置

5.15.4.1　对于跨径≥16 m 的圆弧拱和箱形拱结构，宜在结构性回填层中设置钢筋混凝土减载板时，减载板不得与波纹钢板拱顶接触，减载板底面与波纹钢板拱顶（波峰）之间的最小净高应大于或等于 500mm，减载板长度应延伸到波纹钢板拱起拱线外大于或等于 1000 mm。减载板厚度不宜小于 200 mm。

5.15.4.2　在沥青路面结构层下设钢筋混凝土刚性基层或水泥混凝土路面作为波纹钢板拱桥减载板的设计，应符合 JTG D40 的有关规定，减载板厚度不宜小于 200 mm。

5.15.5　旧桥加固拱上回填

利用波纹钢板拱可加固的混凝土旧桥结构性回填，在原旧桥梁板下或拱下与波纹钢板拱之间，宜采用轻质混凝土填充。对旧桥进出口端加宽延伸的波纹钢板拱的结构性回填，按本标准的有关规定执行。

5.16　附属工程设计

波纹钢板拱桥的其它防护、排水、铺砌、护栏等附属工程设计，根据国家或行业现行相关标准的有关规定执行。

附　录　A
（规范性附录）
波纹钢板拱结构技术参数

A.1　波纹钢板圆弧拱结构技术参数，见表A.1。

表A.1　400×150 波形的波纹钢板圆弧拱结构技术参数

标准跨径 L_K/mm	拱半径 R/mm	矢高 h_s/mm	波纹钢板壁厚范围 t/mm	拱顶最小填土厚度 Hmin /m	波纹钢板拱顶填土厚度范围 H/m		
					1.50～2.50	2.50～4.00	＞4.00
					波纹钢板壁厚 t/≥mm		
8000	4000	≤4000	6.0～7.0	1.358	6.0	6.5	7.0
10000	5000	≤5000	7.0～8.0	1.500	7.0	7.5	8.0
13000	6500	≤6500	8.0～9.0	1.500	8.0	8.5	9.0
16000	8000	≤8000	9.0～10.0	1.500	9.0	9.5	10.0
20000	10000	≤10000	11.0～12.0	1.500	11.0	11.5	12.0

注1：波纹钢板厚度（壁厚）为参考值，应按本标准通过计算确定。

注2：结构性回填最小厚度（Hmin）为波纹钢板拱顶(波峰顶)到路面结构层底面之间的垂直距离，最大填土厚度尚需通过计算确定。

A.2　波纹钢板圆弧拱结构技术参数，见表A.2。

表A.2　400×150 波形的波纹钢板箱形拱结构技术参数

标准跨径 L_K/mm	拱半径 R/mm		矢高 h_s/mm	波纹钢板壁厚范围 t/mm	拱顶最小填土厚度 Hmin /m	波纹钢板拱顶填土厚度范围 H/m		
						0.30～0.70	0.70～1.00	1.00～1.50
	拱肩	拱顶				波纹钢板壁厚 t/≥mm		
8000	1245	7470	2000	6.0～7.0	0.300	6.0	6.5	7.0
	1245	7850	2185					
10000	1245	8560	2590	7.0～8.0	0.300	7.0	7.5	8.0
	1245	8890	2800					
	1245	9300	3000					
13000	1250	13000	3500	8.0～9.0	0.300	8.0	8.5	9.0
16000	1250	16000	4200	9.0～10.0	0.300	9.0	9.5	10.0
20000	1250	19500	4800	11.0～12.0	0.300	11.0	11.5	12.0

注1：不同跨径、不同填土高度的不同板厚仅为参考值，具体值应按本标准通过计算或有限元分析确定。

注2：结构性回填最小厚度（Hmin）为波纹钢板拱顶(波峰顶)到路面结构层底面之间的垂直距离，最大填土厚度尚需通过计算确定。跨径 16 m 和跨径 20 m 的箱形拱的拱上结构性回填材料宜采用轻质土。

附件

青海省地方标准

波纹钢板拱桥设计规程

DB 63/ XXXXX—2019

条文说明

1 范围

本标准适用于新建和改（扩）建各等级公路的波纹钢板拱桥 8 m、10 m、13 m、16 m、20 m 标准跨径及其圆弧拱结构、箱形拱结构的设计，跨径小于 8 m 的波纹钢板拱桥以及市政道路工程的波纹钢板拱桥结构中小桥，可参照本标准的方法设计。

2 规范性引用文件

规范性引用文件只列出了本标准中引出并明确的国家和行业现行标准。

3 术语和定义

本标准未列出已引用并明确的现行国家标准和行业标准已有或已规定的相关术语和定义。

4 材料及构件

4.1.2 JTG D64-2015 第 3.1.2 条和 GB 50017-2017 第 4.1 条规定：钢材宜选用 Q235 钢、Q345 钢（GB/T 1591—2018 修订为 Q355 钢），其质量应分别符合 GB/T 700 和 GB/T 1591 的规定；其中，Q235 钢中的沸腾钢不宜用于需要验算疲劳且工作温度低于或等于-20 ℃的非焊接结构。Q235 钢中的沸腾钢脱氧不充分，含氧量较高，内部组织不够致密，硫、磷的偏析大，冲击韧性较低，冷脆性和时效倾向亦大，在低温时和动力荷载作用下易发生脆断，因而对其使用范围应加以限制。

4.1.5 为保证波纹钢板结构的强度和刚度，采用波纹钢板件拼装的埋置式结构，在加工能力和运输、吊装设备允许条件下，环向分片以接缝最少为原则，即尽量使用最大的环向板宽和板长（即标准板宽和板长）。需调整波纹钢板件长度时，根据跨径、拱半径、拱圈长度、板件连接搭接长度等计算调整；桥中间的波纹钢板应采用标准板宽，桥两侧（边板）需调整波纹钢板件宽度时，应根据桥宽、波纹钢板件的波距、纵向搭接宽度等计算调整。

4.3 波纹钢板和高强度螺栓、螺母、钢垫圈以及槽钢等连接件和加劲肋拱梁用 H 型钢等，均应进行热浸镀锌防腐处理，镀锌质量应符合下列要求：

a) 钢板表面处理的最低等级不低于 Sa2.5。

b) 热浸镀锌波纹钢板及其他金属件防腐，其有效镀锌层平均厚度和质量不应低于下表规定要求。

波纹钢板及其他金属件热浸镀锌质量要求

项　目	镀锌层质量要求	
单面镀锌附着量	波纹钢板件≥600 g/m^2、或镀锌层平均厚度≥84 μm	试验方法和评判标准：GB/T 2518
	螺栓、螺母、钢垫圈、槽钢、H 型钢等金属连接件≥350 g/m^2、或镀锌层平均厚度≥50 μm	

波纹钢板及其他金属件热浸镀锌质量要求(续)

项　目	镀锌层质量要求
镀锌层附着性	镀锌层应与金属结合牢固，经锤击试验不剥离、不凸起
镀锌层均匀性	镀锌层应均匀，无金属铜的红色沉积物
镀锌层耐盐雾性	耐盐雾性试验后，基材不应出现腐蚀现象
外观质量	镀锌层应均匀完整、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、孔洞等现象

4.4　应根据水、土等的腐蚀性等级及防腐蚀等级、工程特点、使用年限等条件，在镀锌防腐的基础上，对与水、土接触部位的波纹钢板及连接件，还应进行现场二次防腐处理，应以防腐材料的不同特性有针对性地选择防腐材料，以增强波纹钢结构的耐久性。

4.5.3　当采用波纹钢板加筋土挡墙时，根据波纹钢板不同波形的结构受力特征选用波纹钢板，并进行结构稳定性等验算。对于最大墙高不超过 5 m 的挡墙，宜采用中波形（波距 200 mm、波高或波深 55 mm）的波纹钢板；对于最大墙高超过 5 m 的挡墙，宜采用深波形（波距 400 mm、波高或波深 150 mm）波形的波纹钢板。

4.5.4　发泡混凝土（又名泡沫混凝土或轻质混凝土）和泡沫水泥轻质土，是通过气泡机的发泡系统将发泡剂用机械方式充分发泡，并将泡沫与水泥浆均匀混合，然后经过发泡机的泵送系统进行现浇施工，经自然养护所形成的一种含有大量封闭气孔的新型轻质保温材料。属于气泡状绝热材料，突出特点是在混凝土内部形成封闭的泡沫孔，使混凝土轻质化，可减轻波纹钢板拱上恒载。泡沫水泥轻质土的多孔性使其具有低的弹性模量，从而使其对冲击载荷具有良好的吸收和分散作用。

5.1.12　由于波纹钢板拱结构受回填土层的保护，外界的风荷载、车辆的制动力、离心力、撞击力一般对结构没有影响，设计时可不考虑；与填土恒载相比，行人荷载、冰荷载等影响很小，设计时可忽略。

5.2　开口结构为横截面不封闭的结构物，由一种或若干种半径的弧形(不同变曲面)的波纹钢板件，采用高强度螺栓拼装连接而成的拱形结构。拱脚处与钢筋混凝土基础顶或墙式墩台身顶的钢筋混凝土拱座连接，根据波纹钢结构受力特性、拱桥结构布置等因素，本标准采用的拱形为圆弧拱和箱形拱两种拱形为主。圆弧拱适用于路基填方较高或沟壑较深的部位，箱形拱适用于路基填方较低或沟壑较浅的部位，在拱形选型上以工程现场实际并满足本标准附录 A 的技术参数进行比较选择。

5.4.2　跨径为波纹钢板起拱线处内侧波峰之间的距离：

a)　交角为斜交时，纵桥向波纹采用 90 ° 布置，不宜采用与桥梁斜交角度一致的斜交波纹布置；
b)　当采用斜交角度时，也可采用斜交正做的方式进行设计。
c)　当采用表列以外的其它交角时，应参照本标准进行相关计算，确保结构满足稳定性及安全要求。
d)　除表列标准跨径外，可根据工程现场实际情况灵活采用其他尺寸的跨径，拱半径和矢高应随跨径而变。采用非标准跨径时，应按本标准进行结构验算，确保结构安全。

5.5.2　波纹钢板拱矢高受限不能满足桥下净高需采用实体墙式钢筋混凝土墩台身高度调整桥下净高时，应考虑波纹钢板拱顶的结构性回填最小填土厚度或厚度范围确保满足附录 A 的要求。

5.6.2 多孔结构起拱线之间最小净距，根据不同的施工方法(如预拼装)和现场条件(如软弱地基)视情况进行调整：

a) 地震荷载控制设计时，最小净距适当增加。
b) 极限状态设计或有限元分析时，应考虑净距对结构压曲的影响。

5.7 结构性回填区长度范围内路面纵坡、桥头引道纵坡和易积雪、结冰路段桥上路面纵坡的规定，主要为考虑有利于波纹钢板拱控制偏载侧压因素而规定，同时参考JTG D60的规定而提出的最大纵坡要求。

5.8.1 不同跨径、不同填土厚度的波纹钢板壁厚采用，应根据其截面面积和惯性矩等力学参数、截面所受应力强度、稳定性、塑性铰等验算确定。

5.9 钢筋混凝土扩大基础应能与结构一起产生共同的沉降，从而减轻拱板上的荷载，促进回填土的成拱作用。应尽量避免基础邻近土体相对于基础发生沉降，这种沉降会对结构产生向下的拉力：

a) 地基设计考虑全长范围内的地基，应具有较为均匀的力学特性，应具有足够的强度、稳定性和均匀性，但其强度和刚度不应大于两侧支撑回填的地基强度和刚度，以避免产生负土拱作用引起对结构不利的下拉力。沿结构长度方向，根据地质条件和填土荷载的变化情况，可采用不同的地基设计。
b) 基础的水平反力通常可由基础与支承土壤之间的摩擦力克服。如果摩擦力不足以抵抗水平反力，基础底面可设置竖向的剪力键。水平反力很大时，可在基础之间设置钢筋混凝土支撑梁。
c) 通常假定在拱内产生水平力的主动土压力由径向的环压力抵消。这些压力在恒载反力中考虑。
d) 盐渍土或含盐量较高的地区、腐蚀环境较为严重的地区和结构设计使用年限大于 30 年，不宜采用钢管桩基础。

5.9.1 地基承载力为地基对基础及上部结构荷载的承受能力。波纹钢板具有较大的变形能力和柔性，能够适应地基的不均匀沉降，加上波纹钢板拱结构自重较轻，因此，波纹钢板拱桥的地基承载力要求相对较低：

a) 当地基承载力不能满足设计要求时，应根据地基土的种类、强度、密度、地质特征、地下水位等因素进行分析，结合现场情况，以安全、适用、技术可靠、施工方便、环境保护等为原则，采取适宜的处理方式提高地基的承载力。地基处理的范围至少应宽出基础之外 1.0m。确保地基处理至承载力、密实（压实度）等满足设计要求。
b) 对于黄土地基，可分析采用换填法、挤密桩法、振冲挤密法、重锤夯实法、强夯法，以及其他适宜的处理方法。
c) 对于沙漠土地基，可分析采用换填法、挤密桩法、振冲挤密法、水坠法和基底周围加固法，以及其他适宜的处理方法。
d) 属细粒土或特殊土类的饱和软弱粘土层、粉砂土层及湿陷性黄土、膨胀土和粘土及季节性冻土，强度低，稳定性差，设计处理时应视该类土的处治深度、含水量等情况 ，按基底的要求采取固结处理，以满足设计要求。
e) 冻土地区，可根据地区施工经验将基础基底至冻结线处的冻胀土换填为粗粒土，其中小于 0.074 mm 的颗粒宜小于 5 %。

5.9.4 为达到箱形拱的拱脚外侧结构性回填侧压力与拱上受载压力的拱脚内外水平推力能达到基本平衡状态，国内外大量研究证明，箱形拱的波纹钢板拱侧（拱脚）与拱座的水平内夹角按 82 ° ～85 ° 控制是较为理想的角度。超过该角度范围时，拱脚外侧压力与拱上受载压力会使拱脚内外水平推力失去较大的平衡。对于多孔连拱结构，在波纹钢板拱脚之间的钢筋混凝土拱座上设置全拱宽的钢筋混凝土(其

高度控制在不埋值箱形拱肩处的加劲肋板位置）代替结构性回填土，可减小拱脚水平推力。

5.11　波纹钢板圆弧拱结构计算内容，主要包括内力计算和连接强度计算、波纹钢板件屈曲计算、施工过程验算、运营阶段结构验算。

5.12　波纹钢板箱形拱结构有限元分析，应优先采用三维模型，并反映实际的结构形式。有限元模型的长度一般取结构跨度的 3 倍，高度为波纹钢板拱基础底部至路面顶部，宽度一般取全桥宽（考虑或不考虑路基边坡）。波纹钢板模型边界条件为铰接，约束三个方向位移；有限元模型两侧区域约束水平方向位移，端面约束前后方向位移，模型下部约束竖直方向位移。局部表面荷载采用在表面创建荷载作用的局部几何面和控制单元划分精度保证在荷载作用面的范围内生成单元。

5.14.2　波纹钢板拱防腐耐久性设计是一项综合性工程，有诸多方面需要进行选择。除了对结构性回填材料严格控制采用低腐蚀性材料外，防腐蚀涂层材料的选用尤为重要。就目前国内外的技术和防腐材料产品的性能水平，还没有一种防腐蚀涂层材料可以解决所有防腐蚀问题，而只能根据不同材料的不同性能采取多种防腐材料组合“对症下药”的方式进行针对性地选择。因此对于准确调查腐蚀环境、确定腐蚀性等级极为重要：

a)　波纹钢板拱顶面的波纹钢板加劲肋板端头设 2.5 mm～3.0 mm 厚的环保用高密度聚乙烯土工膜上下两层搭连封堵，其主要目的是防止结构性回填材料进入加劲肋板与波纹钢板拱之间的波谷内填充后对结构受力的影响。

b)　波纹钢板拱顶结构性填层中，环保用高密度聚乙烯土工膜隔水层宜在拱顶以上 20 cm 压实层位置铺设。总长度为不小于结构性回填范围两端头以外各 10.0 m 的目的，是防止波纹钢板拱桥两端头的填料也具有腐蚀性元素渗入，从而避免对波纹钢板拱结构产生侵蚀的一项极其重要的技术措施。

5.15.1.3　大多数有限元分析无法精确模拟填土很小的结构在局部车轮荷载作用下的破坏情况，因此建议进行有限元分析时，采用最小填土厚度。

5.15.2.1　结构性回填区及回填影响区一般指结构起拱线两侧纵桥向最小填土长度(起拱线向外延伸水平距离如图 14 所示拱侧 b 的范围内，自钢筋混凝土拱座顶面或下部结构与波纹钢板连接处向上延伸至拱顶以上最小填土厚度范围内所包络的一个矩形或倒梯形区域，回填影响区还包括向上延伸到路面的范围。

5.15.3.4　结构性回填为波纹钢板拱结构周围按规定方法分层填筑、压实的材料特性和较好级配的回填土，并确保全部分层压实厚度均匀及厚度合格、分层压实均匀及压实度合格，才能保证结构稳定性和发挥土—钢结构相互作用。

5.15.4　波纹钢板拱上填料一般为柔性结构，在路面结构层的沥青路面层下设钢筋混凝土刚性基层和采用水泥混凝土路面作为波纹钢板拱桥减载板，可有效扩散行车荷载、减小柔性结构填料的沉降和提高结构塑性抗弯承载力、降低结构的弯矩，并有效控制路面裂缝及破坏。

5.15.5　利用波纹钢板拱加固的混凝土旧桥时，波纹钢板拱上的结构性回填，一般采用输送泵注压轻质混凝土填充，在原旧桥面打孔进行二次注压防收缩的水泥砂浆填充密实。

附录 A　　表 A.2 波纹钢板箱形拱的填土厚度范围最大为 1.50 m，跨径 16 m 和跨径 20 m 的箱形拱的拱上结构性回填材料宜采用轻质土，为采用国内外大量理论研究和工程实践结果。在拱上结构性回填厚度较薄、在行车荷载等作用下结构易发生变形等因素，为增强塑性抗弯承载力、降低结构的弯矩，拱上应按本标准第 5.13 条规定布置波纹钢板件加劲肋板，同时还可采用 H 型钢加劲肋拱梁、在结构性回填层采用钢塑复合加筋带加筋土，并在结构性回填层中按本标准第 5.15.4 条的规定设置钢筋混凝土减载板等技术措施。**应**采用有限元分析等效应力和变形、抗弯控制设计是否满足要求，在某种行车等荷载承载能力极限状态下不能满足要求时，不得采用跨径 16 m 或跨径 20 m 的箱形拱结构，如填土较高时，可采用圆弧拱结构。