

# 波纹钢埋置式结构 设计施工手册

Manual for Design and Construction of Corrugated Steel Buried Structures

余顺新 卢 傲 编著



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

Manual for Design and Construction of

# 波纹钢埋置式结构

Corrugated Steel Buried Structures

## 设计施工手册

余顺新 卢 傲 编著



人民交通出版社股份有限公司

China Communications Press Co., Ltd.

## 内 容 提 要

本书概括和总结了国内外波纹钢埋置式结构的最新研究成果与应用经验,系统介绍了波纹钢埋置式结构的概念和组成、研究与应用、产品类型与规格、水力设计、结构设计和耐久性设计方法及安装、施工、检查、维护和修复,并提供了设计实例。

本书可作为公路、市政等工程领域波纹钢埋置式结构的生 产、设计、施工、维护的技术手册,可供相关技术人员参考使用,也可供行业标准制修订时参考借鉴。

### 图书在版编目(CIP)数据

波纹钢埋置式结构设计施工手册 / 余顺新, 卢傲编  
著. — 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2014. 12  
ISBN 978-7-114-11939-2

I. ①波… II. ①余… ②卢… III. ①波纹管—钢管  
结构—桥梁设计—技术手册②波纹管—钢管结构—桥梁施  
工—技术手册 IV. ①U448.36-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 304393 号

书 名: 波纹钢埋置式结构设计施工手册

著 作 者: 余顺新 卢 傲

责任编辑: 李 喆

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京盛通印刷股份有限公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 25.25

字 数: 580 千

版 次: 2014 年 12 月 第 1 版

印 次: 2014 年 12 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-11939-2

定 价: 67.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)



# 序

波纹钢埋置式结构在欧美国家已经有百余年的悠久历史和成功应用案例,随着材料技术、制造工艺和设计手段的不断发展,人们对这类结构的力学性能、耐久性、设计施工方法和适用条件有了更加深入的认识。

国内外的工程实践证明,波纹钢埋置式结构由于具有良好的变形适应能力,特别适用于常年冻土、膨胀土、软土、湿陷性黄土等不良地质条件、高填方路段及地震地区的公路或铁路涵洞与通道。深波纹和超厚结构板的开发,使得波纹钢埋置式结构的跨越能力进一步提高,国外在桥梁、分离式立交中有着广泛的应用,且具有非常美观的视觉效果。与传统圬工或钢筋混凝土结构相比,波纹钢埋置式结构在受力性能、施工工期、使用寿命、行车舒适性、养护成本、综合造价等方面具有明显优势和可比性,因而可作为公路工程中传统结构形式的替代者。波纹钢埋置式结构横向有一定的刚度,纵向有良好的柔度,在构造上具有优越的灵活性,可广泛用于有弯曲、分岔等特殊需要的市政、水利和人防工程。波纹钢埋置式结构还特别适用于军事、抢险、灾后重建等快修工程及道路改扩建工程中对原有结构的加固、置换、修复或接长。

与欧美国家相比,国内钢结构在公路、市政工程中的应用并不普遍,这可能与我国钢材曾经短缺的历史及材料生产和加工工艺水平相对较低有关。我国公路桥梁以钢筋混凝土结构为主,约占桥梁总数的85%,而钢桥所占比例则不到1%。相比之下,美国钢结构桥梁所占比例达到33%,日本则达到41%。随着国内基础设施建设的快速发展,我国钢产量已多年位居世界第一,2013年达到7.82亿t,超过全球总产量的50%,但多年来,我国钢铁产能的增速始终高于需求的增速。钢铁产能从2004年年底的4.2亿t上升到2012年年底的9.7亿t,同时国内钢铁产能的利用率仅达到72%,远低于合理水平。

与混凝土结构相比,钢结构不仅强度高、自重轻、施工工期短、构造灵活,还具有回收利用率高的特点。在国家大力提倡保护环境、低碳经济、可持续发展的政策背景下,在国内钢材产能过剩、价格低迷的市场环境下,波纹钢埋置式结构在土木工程建设领域有着广阔的应用空间。

他山之石,可以攻玉。本书在总结国内外研究成果和应用经验的基础上,着重介绍了波纹钢埋置式结构的制造工艺、结构构造、设计技术、施工方法,以及在检查、维护和修复方面的最新技术,内容丰富、全面,可作为广大工程技术人员从事波纹钢埋置式结构的设计、制造、施工和维护的技术指南,也可作为从事相关技术研究的机构和大专院校的参考



用书。本书结合国内公路行业的技术标准体系,提出了波纹钢埋置式结构的设计施工方法,对于推动公路和市政行业的技术进步具有十分重要的现实意义。本书还介绍了国外波纹钢埋置式结构在其他领域的大量应用,对于促进新技术、新产品的推广应用具有积极的推动作用。

中国工程设计大师  
中交第二公路勘察设计研究院有限公司 总工程师



2014 年 4 月

# 前 言

波纹钢埋置式结构是一种典型的柔性结构,长期以来被公认为具有优异的结构强度,经常用来承受较大的活载和较高的填土。这种结构通过波纹钢薄壁与土壤的相互作用,将结构上部的荷载分散到周围的土体上,从而提高了结构自身的承载力。

波纹钢埋置式结构历史上有记载的应用始于 19 世纪末。1896 年美国交通部率先开展了波纹钢板埋置式通道和涵洞的研究并在公路涵洞中推广应用,1913 年英国第一次在苏格兰爱丁堡近郊修建了采用波纹钢结构板拼装的波纹钢管涵洞,1929 年加拿大在一座煤矿中首次采用了波纹钢管结构。

20 世纪 60 年代开始,美国开展了土与结构相互作用的研究。1960 年犹他州立大学 K. W. Reynold 通过研究提出了环向压力理论,这为波纹钢埋置式结构的设计提供了可靠的理论基础。1967 年,美国钢铁学会(AISI, American Iron and Steel Institute)在《钢制排水产品与公路建设产品手册》(Handbook of steel drainage & highway construction products)第一版中,第一次基于环向压力理论和工作应力设计(Working stress design)原理给出了波纹钢埋置式结构的设计方法。在此期间波纹钢埋置式结构的最大跨径已经达到了 8.16m。

20 世纪 70 年代开始,数值计算和有限元分析方法逐渐在波纹钢埋置式结构的研究和设计中发挥了重要作用,有限元模型从最初的二维平面应变简化模型发展为复杂的三维模型,对材料的模拟也从弹性逐渐过渡到塑性。有限元技术的发展为这类结构的受力分析提供了科学可靠的工具,这一阶段比较有代表性的有限元分析软件有 CANDE(Culvert ANalysis and DEsign)和 SSTIPN(现称为 PIPE5),这些软件经过不断的改进,和 PLAXIS 一起成为埋置式结构重要的分析工具。通过加劲肋和组合结构的应用,此期间波纹钢拱形结构的最大跨径超过了 16m,箱形结构的跨径也达到了 8m。

20 世纪 90 年代,随着制造工艺的发展,深波纹结构板的生产和应用进一步提升了波纹钢埋置式结构的跨越能力,此期间波纹钢圆弧拱桥的最大跨径达到了 24m(加拿大,施工仅用 6 周),箱形结构的最大跨径达到了 16m。

随着波纹钢埋置式结构的不断普及应用,欧美许多国家对这类结构开展了大量的理论研究和试验研究,积累了大量的研究成果和应用经验,不少国家的结构设计规范对这种结构的材料、工艺、耐久性、设计与施工方法、质量控制措施等进行了详细的规定,并不断修正与调整。通过百余年的研究和应用,波纹钢埋置式结构已经成为一种非常成熟的结

构形式。

在国内,波纹钢埋置式结构最早在20世纪50年代开始有少量的应用,但由于诸多原因一直未能得到推广。20世纪90年代末,我国逐步开展了公路钢波纹管涵洞的理论和试验研究,通过试验和力学模型分析了波纹钢桥涵的受力性能,发布了产品标准,并在北方冻土地地区开始推广应用。然而,国内尚没有支持这类结构设计和施工的技术标准。近年来的一些应用基本上都是参照加拿大CHBDC规范并根据设计单位和制造商对这种结构的认识和经验进行设计和施工,因而未能得以大规模推广。

随着公路建设的快速发展、钢材加工工艺特别是防腐技术的提高,波纹钢埋置式结构以其良好的力学性能及施工简便、适应性强、耐久性好的特点,正逐步在国内公路建设中得到认识和重视。尤其是近年来在国内钢材产能过剩、价格低迷的市场环境下,在国家大力提倡低碳交通、节能环保及推动城镇化建设快速发展的大背景下,波纹钢埋置式结构具有更加优越的性价比和社会效益,在公路、市政等诸多工程领域有着广阔的应用空间。

为推动交通建设的健康发展,促进行业标准的建立和新产品的推广应用,中交第二公路勘察设计研究院有限公司立项开展了波纹钢埋置式结构的技术研究。研究过程中申报了多项发明和实用新型专利,借鉴了美国AASHTO标准、加拿大CHBDC规范和澳大利亚国家标准,并充分考虑国内外标准体系在材料、荷载、制造工艺、施工设备等方面的差异,进行了大量分析计算,编制了《CSPC系列波纹钢管涵洞设计通用图》、《CSPB系列波纹钢板埋置式通道、小桥设计通用图》和《CSBS系列波纹钢埋置式结构产品设计图》,开发了“波纹钢埋置式结构计算软件”,形成了一套满足波纹钢埋置式结构设计和施工的成套技术。同时,结合近年来在国内应用的成功经验,正在编制公路波纹钢埋置式桥涵结构设计与施工地方标准和企业标准,对这种结构的设计方法、施工程序、质量控制等进行统一的规定。

本书共分九章,主要内容包括:概述,波纹钢埋置式结构的研究与应用,产品类型与规格,水力设计,结构设计,耐久性设计,安装与施工,检查、维护和修复,设计实例等。本书是对国内外波纹钢埋置式结构最新研究成果和应用经验的概括和总结,可作为公路、市政等工程领域波纹钢埋置式结构的生 产、设计、施工、维护的技术手册,也可供相关行业标准制修订时参考借鉴。书中专门提供了设计实例(用带底纹文字表示),以帮助读者更好地理解设计方法。

在课题研究过程中,得到了中交第二公路勘察设计研究院有限公司杨季湘副总经理、邓涛主任的大力支持,感谢课题组成员柯杨博士、王志成、夏飞及张春华等高级工程师的潜心研究。本书在撰写过程中得到中国工程设计大师廖朝华总工的悉心指导,并为本书亲自作序,在此表示深深的谢意。

本书在研究和撰写过程中得到了衡水益通金属制品有限责任公司李恒永、王志宏及

河北华虹工程材料有限公司王晓康、衡水奇佳工程材料有限公司曹宁宁等的支持和协助,并提供部分工程资料,在此一并致谢。

本书综合了不同国家对波纹钢埋置式结构相关材料、工艺、产品及设计、施工、检查、维护和修复等方面的技术发展,难免有理解上的不足之处。因编著者水平所限,本书可能尚有不完善之处,欢迎读者批评指正。

中交第二公路勘察设计院有限公司

余顺新 卢 傲

2014 年 4 月



# 目 录

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 第 1 章 概述             | 1   |
| 1.1 基本概念             | 2   |
| 1.2 结构特征             | 7   |
| 1.3 适用条件             | 13  |
| 第 2 章 波纹钢埋置式结构的研究与应用 | 15  |
| 2.1 理论基础             | 16  |
| 2.2 破坏模式             | 20  |
| 2.3 力学性能             | 22  |
| 2.4 应用领域             | 26  |
| 第 3 章 产品类型与规格        | 44  |
| 3.1 截面形状与特性          | 44  |
| 3.2 波纹钢整体管           | 55  |
| 3.3 波纹钢结构板           | 65  |
| 3.4 接缝与连接系统          | 111 |
| 3.5 配件               | 120 |
| 3.6 端部构造             | 125 |
| 第 4 章 水力设计           | 133 |
| 4.1 明渠水力学            | 133 |
| 4.2 涵洞水力学            | 138 |
| 4.3 大跨结构水力学          | 163 |
| 4.4 地下排水             | 171 |
| 4.5 特殊水力现象           | 173 |
| 第 5 章 结构设计           | 175 |
| 5.1 土与结构相互作用         | 175 |
| 5.2 国外结构设计方法         | 178 |
| 5.3 材料               | 244 |
| 5.4 主体结构设计           | 247 |
| 5.5 连接设计             | 259 |
| 5.6 地基与基础设计          | 267 |
| 5.7 回填设计             | 273 |
| 5.8 端部处理             | 275 |
| 5.9 构造要求             | 279 |

第6章 耐久性设计..... 283

6.1 耐久性影响因素 ..... 283

6.2 耐久性研究 ..... 285

6.3 涂层与内衬 ..... 292

6.4 设计寿命与使用寿命 ..... 300

6.5 耐久性设计 ..... 303

第7章 安装与施工..... 309

7.1 地基处理与基础施工 ..... 309

7.2 结构安装 ..... 313

7.3 回填 ..... 317

7.4 形状控制与保护措施 ..... 323

7.5 端部处理与冲刷防护 ..... 325

7.6 施工监督和控制 ..... 326

第8章 检查、维护与修复 ..... 328

8.1 检查 ..... 328

8.2 维护 ..... 330

8.3 修复 ..... 331

第9章 设计实例..... 352

9.1 实例1:直径3 600mm 的圆管涵洞(填土厚度8.0m,考虑抗震)..... 352

9.2 实例2:8 970mm ×6 070mm 水平椭圆形通道(填土厚度3.0m) ..... 361

9.3 实例3:6 250mm ×3 910mm 管拱涵洞(填土厚度2.0m) ..... 370

9.4 实例4:13 000mm ×6 510mm 拱形小桥(填土厚度3.0m) ..... 379

参考文献..... 391

# 第1章 概 述

波纹钢埋置式结构是指将一定厚度(通常为2~12mm)的热轧钢板或钢带按照规定的尺寸经波形轧制和冷弯加工而制成的波纹圆管(管径通常为750~2500mm)或弧形波纹钢板(跨径大于1500mm),在现场分节组装(波纹圆管)或分片拼装(波纹钢板),并在周边及拱顶采用结构性回填材料压实,以保证土与结构物相互作用共同承担荷载的桥跨结构(桥梁、涵洞、通道或管道)。

普通平钢板加工成波纹形状后,大大增加了截面惯性矩,因而其承载能力也大幅增加(图1-1)。

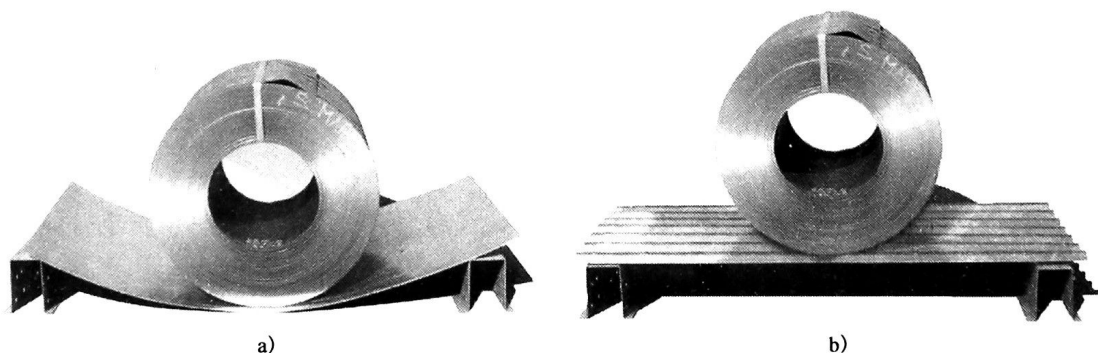


图1-1 波纹钢板与平钢板相比承载力大幅提高

波纹钢埋置式结构是一种具有较高的承载力和较强变形适应能力的地下柔性结构,它通过结构周围土体的弹性约束和变形实现土压力的重新分布,利用土与结构的相互作用来分散上部荷载。拱顶的填土有助于分散地面上的集中荷载(如车轮荷载)。作为一种柔性结构,拱顶填土达到一定厚度时,在竖向荷载作用下,拱顶会发生较大的竖向变形,拱顶上部土体在下沉时受到周围土体的摩阻力作用,在一定程度上减小了结构实际承受的土压力荷载,从而产生有利的土拱作用,这使得波纹钢埋置式结构特别适用于较高的填方。此外,这种结构允许发生较大的均匀沉降,因而对地基承载力要求不高。

相比于传统的刚性埋置式结构(如钢筋混凝土圆管涵、盖板涵等),该结构有其独特的优势,具体表现在以下方面:

(1)产品多样化,适用范围广。充分利用钢材的可再加工能力,采用不同的壁厚、波形(波距×波高)可生产不同形状的产品,满足不同的使用功能和强度要求。同时,可通过弯头、三通等制作成弯曲、分岔结构,适应不同的沟渠线形需要。

(2)对地基要求低,具有较强的变形能力。充分发挥钢材抗拉强度高、抗变形能力强的特点,能够满足软土、膨胀土、湿陷性黄土、多年冻土等不良地质条件下不均匀沉降对结构变形的特殊需求。同时,波纹钢埋置式结构对地基扰动小,对土层的热扰动小,特别适用于北方寒冷冰冻地区。



(3)良好的抗震性能。波纹钢埋置式结构的自重轻,依靠结构的柔性和土与结构的相互作用,可有效减小地震对结构的破坏。用于公路桥涵构造物时,有利于改善软土地基桥涵与路堤交界处的“错台”现象,提高行车的舒适度与安全性。

(4)工厂化生产,有利于降低成本,控制质量。波纹钢埋置式结构通常在工厂集中预制成管节或板片,生产过程不受环境影响,生产效率高、周期短,并可确保加工精度和质量。

(5)运输、安装方便。波纹钢埋置式结构的自重仅为同等条件下钢筋混凝土结构的4%~20%,每片或每节只有50~800kg,吊装无须采用大型起吊设备。整体波纹钢管可采用套叠方式运输,波纹钢板可采用捆扎运输(图1-2、图1-3)。

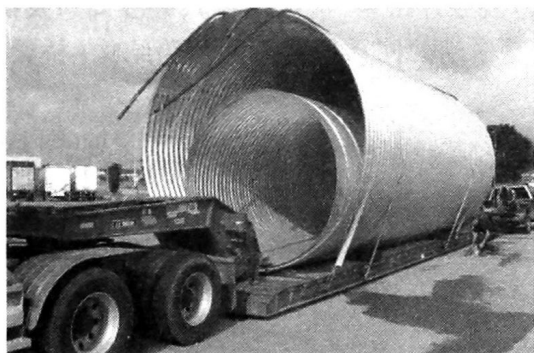


图1-2 嵌套运输的波纹钢管

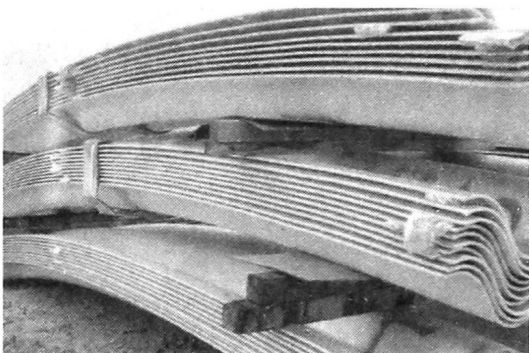


图1-3 叠置存放的波纹钢板

(6)施工简便,大幅缩短工期。波纹钢埋置式结构采用半成品现场拼装施工,与钢筋混凝土结构相比,工期可缩短70%以上。

(7)低碳环保。减少或舍弃了常规建材,如水泥、黄砂、石子、木材的使用,有利于环境保护。

## 1.1 基本概念

波纹钢埋置式结构依靠结构与周围土壤之间的相互作用来共同抵抗荷载,因此国外的文献有的称之为“土—钢结构”(Soil-Steel Structures)。为便于阅读和理解,本手册对这类结构有关的常用术语定义如下,部分术语的定义参见图1-4、图1-5。

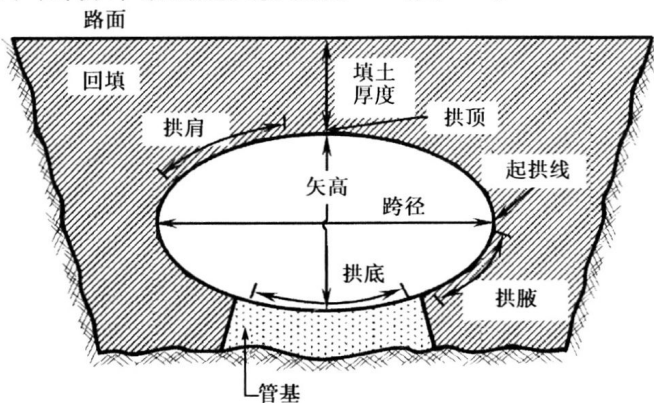


图1-4 埋置式结构典型横断面

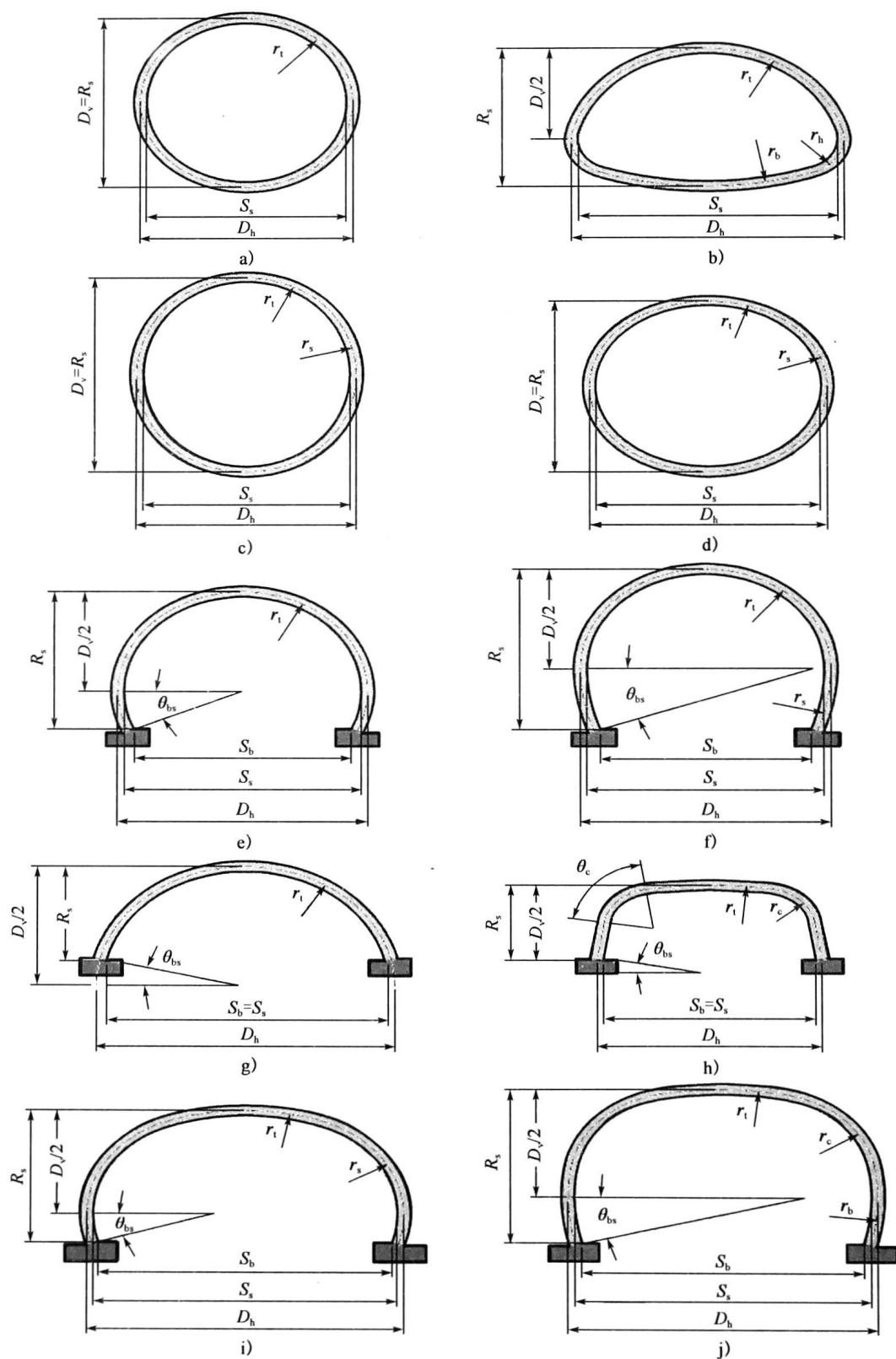


图 1-5 常见波纹钢埋置式结构类型

a) 圆管形; b) 管拱形; c) 竖直椭圆形; d) 水平椭圆形; e) 马蹄形拱; f) 椭圆形拱; g) 圆弧形; h) 箱形结构;  
i) 两半径圆弧形; j) 三半径圆弧形





### (1) 埋置式结构(Buried Structures)

埋置式结构指周边及拱顶采用结构性回填材料压实,以保证土与结构物相互作用共同承担荷载的桥跨结构(如桥梁、涵洞、通道或管道)。

### (2) 闭口结构(Structures with Closed Conduit)

闭口结构指横截面是封闭的结构物,如圆形、椭圆形、梨形等。

### (3) 开口结构(Structures with Open Conduit)

开口结构指横截面不封闭的结构物,一般为拱式结构,拱脚处与基础连接,如圆弧拱、多圆弧拱及箱形结构等。

### (4) 圆管(Round Pipe)

圆形或长短轴之比不大于 1.1 的椭圆形波纹钢管。

### (5) 水平(竖直)椭圆形管(Horizontally/Vertically Elliptical Pipe)

长轴为水平(竖直)方向且长短轴之比大于 1.1 的椭圆形波纹钢管。

### (6) 管拱(Pipe-Arch)

管拱指至少由三种半径的弧形组成且拱底半径大于拱顶和拱侧半径的闭口结构。

### (7) 圆弧拱(Arch)

圆弧拱指由一种半径的圆弧组成的带基础的开口结构,一般分为半圆拱、小半圆拱和马蹄形拱。

### (8) 多圆弧拱(Multi Radius Arch)

由两种或两种以上半径的圆弧组成的带基础的开口结构,一般起拱线高于基础顶面。常见有椭圆形拱、两半径拱及三半径拱。

### (9) 箱形结构(Box Culvert)

截面近乎矩形、拱顶较为平坦(拱顶半径较大)的一种特殊的多圆弧拱。

### (10) 拱顶(Crown)

拱顶指桥跨结构横断面的最高点或附近的一段区域。

### (11) 拱底(Invert)

拱底指桥跨结构横断面的最低点或附近的一段区域。

### (12) 拱腋(Haunch)

拱腋指桥跨结构横断面上位于起拱线与管基或基础顶部之间的部分。

### (13) 拱肩(Shoulder)

拱肩指桥跨结构横断面上位于拱顶与起拱线之间的部分。

### (14) 起拱线(Spring Line)

起拱线指桥跨结构横断面上水平方向最外侧点的连线。

### (15) 管基(Bedding)

管基指天然地基或换填后的地基与闭口结构底部之间与拱底外形相适应的一定厚度的垫层,见第 5.6.2 节。

### (16) 基础(Footing)

基础指用来支承开口结构的混凝土(或钢)基脚。

### (17) 地基(Foundation)



地基指支撑管基或基础的土壤或岩石。

(18) 波纹钢板 (Corrugated Steel Plate)

波纹钢板指采用热轧钢板,按照规定的尺寸,经过波形轧制及冷弯加工而制成的一种波形板状材料。

(19) 螺旋形波纹钢管 (Helical Corrugated Steel Pipe)

螺旋形波纹钢管指钢板或钢带经加工制成的螺旋形波纹钢管。

(20) 环形波纹钢管 (Annular Corrugated Steel Pipe)

环形波纹钢管指钢板或钢带经加工制成的环形波纹钢管。

(21) 波纹钢结构板 (Corrugated Steel Structural Plate)

波纹钢结构板指经环向加工制成的具有一定曲面的波纹钢板。

(22) 波纹钢结构板长度 (Length of Corrugated Steel Structural Plate)

波纹钢结构板长度指曲面波纹钢结构板的环向弧长。

(23) 波纹钢结构板宽度 (Width of Corrugated Steel Structural Plate)

波纹钢结构板宽度指曲面波纹钢结构板的纵向宽度。

(24) 波距 (Corrugation Pitch)

波距指波纹剖面相邻两个波峰之间的距离。

(25) 波高 (Corrugation Depth)

波高指波纹剖面波峰与波谷之间的垂直高度。

(26) 壁厚 (Plate Thickness)

壁厚指波纹剖面的钢板厚度(不含镀锌层)。

(27) 深波纹钢结构板 (Deep Corrugations)

深波纹钢结构板指波高 100mm 以上的波纹钢结构板。工程中常用的有 380mm × 140mm 和 400mm × 150mm 波纹剖面,其他如 300mm × 110mm、500mm × 237mm 波纹剖面在某些国家和地区也有生产和应用。

(28) 浅波纹钢结构板 (Shallow Corrugations)

浅波纹钢结构板指波高 100mm 以下的波纹钢结构板。工程中常用的有 150mm × 50mm 波纹剖面,其他如 68mm × 13mm、125mm × 25mm、200mm × 55mm、230mm × 64mm 波纹剖面在某些国家和地区也有生产和应用。

(29) 圆管内径 (Inner Diameter)

圆管内径指从波纹圆管内量测的波谷之间的内圆直径。

(30) 跨径 (Span)

跨径指结构安装成形后水平方向对应波谷之间的最大距离。

(31) 矢高 (Rise)

矢高指结构安装成形后竖向对应波谷之间的最大距离,对于开口截面,指拱顶与拱脚之间的竖向距离。

(32) 预拱度 (Camber)

预拱度指用来补偿闭口结构管基工后沉降的一种纵断面调节措施。

(33) 结构性回填土 (Engineered Soil)



波纹钢埋置式结构周围按规定方法分层填筑和压实的,材料特性和级配符合一定要求的回填土,以保证结构稳定性和发挥土—结构相互作用。

#### (34) 结构性回填区 (Structural Backfill)

波纹钢埋置式结构周围结构性回填土的包络范围,包括管基。

#### (35) 受控低强度材料 CLSM (Controlled Low Strength Material)

用级配材料、粉煤灰、水泥和水按一定配合比(一般为 72% : 8% : 3% : 17%)拌和的可流动填料 (Flowable Fill), 其 28d 抗压强度一般不大于 10 MPa, 通常采取与湿混凝土类似的方法浇筑并机械振捣压实。CLSM 一般仅用于管沟法施工时空间受限的情况下,且不得用作管基,见第 5.3.4 节。

#### (36) 填土厚度 (Depth of Fill 或 Height of Fill)

填土厚度指从结构拱顶波纹剖面中性轴到路面或地面或道砟底面之间的竖向距离,见图 1-6。

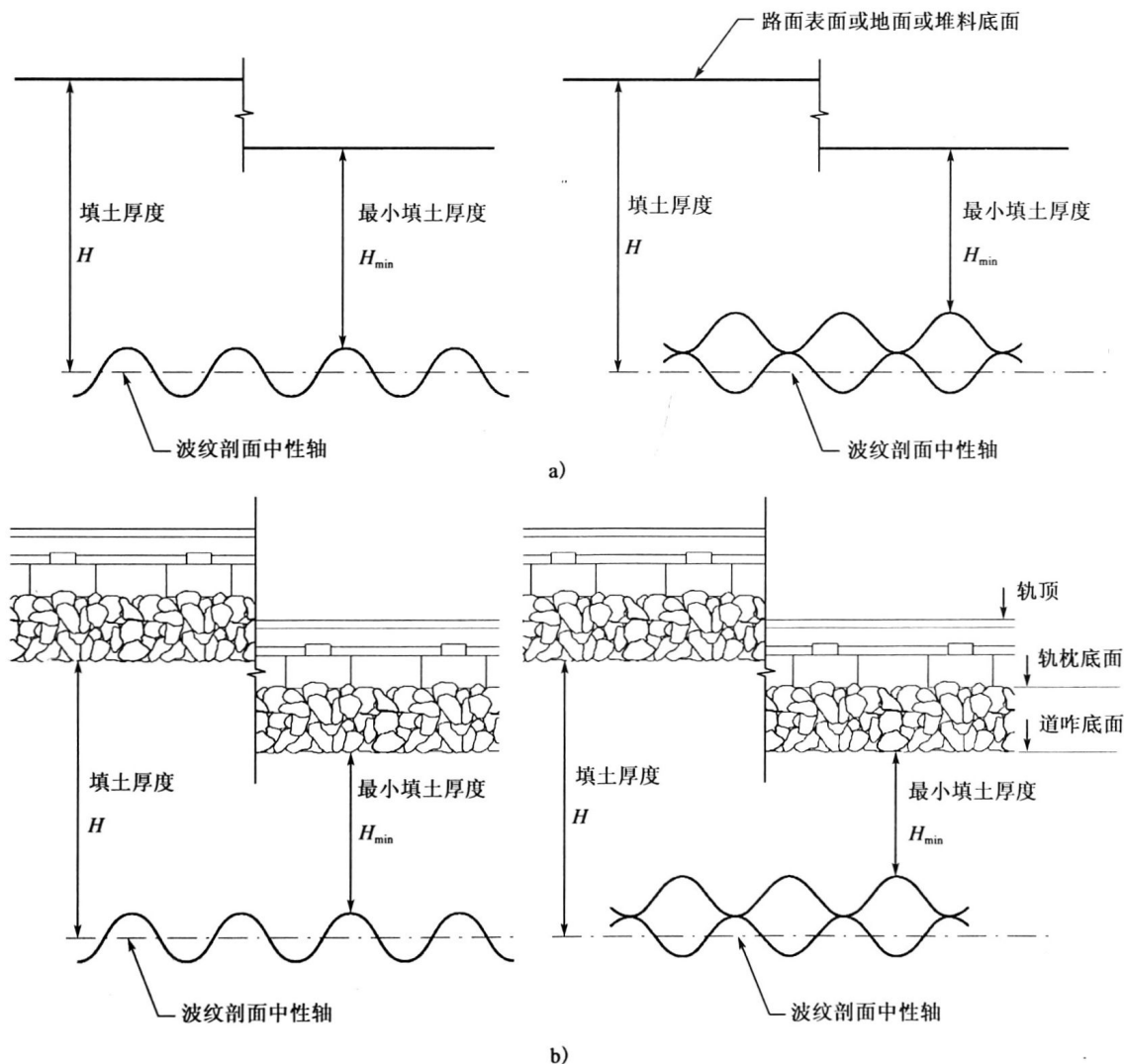


图 1-6 填土厚度与最小填土厚度的定义

a) 道路或堆料; b) 铁路



### (37)最小填土厚度( Minimum Depth of Cover 或 Design Cover)

最小填土厚度指从拱顶(波峰)到路面或地面或道砟底面之间的竖向距离的最小值,见图 1-6。

### (38)环向压力( Circumferential Compressive Force)

环向压力指回填材料 and 外荷载在结构壁内产生的单位长度上的圆周向压力。

### (39)土拱作用( Arching)

土拱作用指埋置式结构之上或周围邻近土体之间发生相对位移时产生的竖向压力的传递。

### (40)筑堤法( Embankment Installation)

筑堤法施工指在原有(或开挖后的)开阔地面上安装波纹钢结构并填筑结构性回填和周围路堤。

### (41)管沟法( Trench Installation)

管沟法施工指在原有地面开挖管沟,再安装结构并回填。如果结构性回填区周围的天然土壤或管沟壁的强度和刚度小于结构性回填材料的强度和刚度,则认为是筑堤法。

### (42)压实( Compaction)

压实是在指定含水率时,通过羊足碾、夯击式压路机、振动设备或人工对土或其他筑路材料施加压力以提高密实度的作业。

### (43)设计使用寿命( Design Working Life)

设计使用寿命指结构或构件设计时预计在正常维护但不需大修条件下不失去使用功能的有效使用时间。

### (44)耐久性裕度( Durability Allowance)

耐久性裕度指结构耐久性设计时考虑腐蚀、磨蚀等因素需要在结构计算所需的基材厚度基础上增加的额外厚度。

## 1.2 结 构 特 征

波纹钢埋置式结构用于土建工程时,通常按弹性薄壳理论进行分析研究和设计。因此,其结构构造应满足以下假定:

(1)壳体是均匀、连续的且各向同性。

(2)壳体是线弹性的。

(3)壳体的变形是微小的。

(4)壳体变形前垂直于中轴面的法线段在变形后仍为长度不变的直线,并仍垂直于变形后的中轴面。

(5)假设法向应力很小,远小于其他应力分量,可忽略不计。

(6)中轴面上所有点在变形时不会在中轴面内移动。

土建工程中常见的波纹钢埋置式结构类型与用途见表 1-1。

### 1.2.1 闭口结构

闭口截面波纹钢埋置式结构分为整体式波纹管 and 拼装式波纹管两种形式。