

# 钢波纹板及其复合结构 在大基建中的创新研究与应用

彭海涛 王兴平 徐 华 王兆建 雷景堂  
尹智勇 李祥玮 高 勇 孙彦卓<sup>◎</sup>著  
冯守中 韩静涛 王志杰 李德钦 江大兴<sup>◎</sup>主审



西南交通大学出版社  
· 成 都 ·



钢波纹板及其复合结构在大基建中的创新研究与应用

## 编写委员会

主任委员	彭海涛	王兴平	徐 华	王兆建	雷景堂
	尹智勇	李祥玮	高 勇	孙彦卓	吴灵生
副主任委员	郭 春	冯冀蒙	段玉良	杨九明	卞玉刚
	梁 栋	张伟民	蒋 琳	李 健	寇 伟
委 员	滕文刚	曾江朋	高 山	狄海波	罗 勇
	寇宝文	白小东	李春枝	林贵满	冷德黔
	郭梦俭	邓文强	邹德强	孙红磊	韩 宇
	谯利锋	赵柯柯	冯秋喻	许劲松	孙润方
	殷开为	马 骏	章 轶	张 洋	蒋正华
	穆 程	刘洪林	江孝礼	徐海岩	徐连云
	彭 立	张 博	彭梓润	郭 涛	陈益飞
	彭有宏	唐慧枝			

钢波纹板及其复合结构在大基建中的创新研究与应用

## 审稿委员会

主 审	冯守中	韩静涛	王志杰	李德钦	江大兴
-----	-----	-----	-----	-----	-----

审 赵建华 王志宏 战福军 曹宁宁 李向国



# 总序

钢波纹板及其复合结构在大基建中的创新研究与应用

## FOREWORD

交通运输部发布的《交通运输部关于推动交通运输领域新型基础设施建设的指导意见》提出，要想快速实现交通强国目标，需要以技术创新为新基建驱动，以数字化、网络化、智能化为主线，实现智慧公路、铁路、航道、港口、民航、邮政、枢纽、新能源新材料行业应用 8 个领域基础设施建设运营能耗水平的有效控制，各项技术应用要居于世界前列，以支撑一流设施建设与维护，让我国交通运输的高质量发展正式迈入实施阶段。

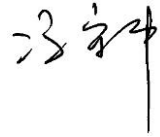
基建领域从过去的“铁公机”发展到大基建时代“陆海空 网智数”，提升了祖国经济发展的科技含量、推动科技与经济融合、赋能经济发展。在其中，钢波纹板及其复合结构为大基建建设减少资源

浪费、能源消耗、碳排放，降低环保压力，提升国家整体实力起到积极的作用。

《钢波纹板及其复合结构在大基建中的创新研究与应用》全面介绍了钢波纹板及其复合结构在国内外的的发展情况，系统地分析了钢波纹板及其复合结构与传统钢筋混凝土结构的优缺点，提出的耐久性和防腐蚀措施，能极大地提高产、学、研、用、管等方面的建设者去了解钢波纹板及其复合结构在科研、勘察、设计、建设、养护、运营管理等相关信息，有利于实现公路工程项目管理的精细化、规范化、便捷化、共享化、智慧化。

本书是基于钢波纹板及其复合结构科技创新、精细化设计、加工生产和建设管理团队多年来的生产实践、科学研究和施工管理的研发与应用，以全国大基建各领域的相关设计成果为基础，深入浅出地为大家打开一扇了解钢波纹板及其复合结构在各个工程领域的研发和推广应用的大门，无论是对于专业研究者还是普通工程技术人员，都是开卷有益。本书的新理论、新技术将有效提升我国大基

建的建设与运营管理水平。

Handwritten signature in black ink, appearing to be '梁守' (Liang Shou).

俄罗斯工程院工程生态与资源节约学部 外籍院士  
天津大学、同济大学 教授、博导  
国家交通运输科普基地道路绿色照明与安全防灾新材料试验室 主任



# 前言

钢波纹板及其复合结构在大基建中的创新研究与应用

## PREFACE

2021年，我们踏上了国家经济发展“双循环”新征程。在新征程中，我们以新发展理念为引领，实践构建新发展格局，加快构建安全、便捷、高效、绿色、经济的现代综合交通运输体系；以新发展理念为根本，加快交通运输高质量发展，实现质量、结构、规模、速度、效益和安全相统一；紧紧围绕我国经济实力、科技实力、综合国力要大幅跃升的目标要求，要基本形成现代化综合交通体系，基本建成交通科技创新体系，显著提升交通国际竞争力和影响力；落实我国2030年前碳达峰、2060年前碳中和重大决策，形成交通与自然和谐共生的绿色发展模式。在新征程中，生态环境安全是国家安全的重要组成部分，破解生态安全威胁，意义重大。

保障国家生态环境安全，技术创新是关键，是抓好经济社会持续健康发展、落实生态环保建设发展理念的重要技术保障。在基建

工程领域中，波纹板及其复合结构以其优异的受力性能、施工速度快、工程造价低、耐久性好等显著优势正在国内外获得广泛应用，特别适用于多年冻土、膨胀土、软土、湿陷性黄土、高填方路段及地震地区等不利地质条件下的公路、市政、铁路项目中修建涵洞、通道、桥梁、管廊和隧道工程等，尤其可以发挥其适应变形能力将桥梁工程改为填方工程消化大量土建工程弃碴。国内 20 世纪 50 年代修建青藏公路不冻泉段时，即将波纹管涵应用于抢修工程，90 年代末我国逐步开展更多公路钢波纹管涵洞的研究和应用、生产。

近几十年来，钢波纹板结构发展迅速，已成功应用在涵洞通道工程、桥梁（加固）工程、隧道（加固）工程、房屋建筑工程、排水工程、管廊工程、水利工程、能源工程、军事工程、采矿工程等，内蒙古、河北、青海、云南等省（自治区）编制了涵洞通道、管廊、挡土墙等设计、施工、验收技术规程，行业标准《公路桥涵施工设计技术规范》(JTG/T 3650—2020) 专篇描述了钢波纹板涵洞施工工艺要点，产品标准已上升到国家标准《冷弯波纹管》(GB/T 34567—2017)，新版《公路涵洞设计规范》已将波纹板结构的设计纳入其中。

就应用案例而言，大跨径钢波纹板结构已在全世界普及应用，

在国外，迪拜某立交桥采用主跨 32.39 m 的波纹板拱桥；加拿大最大跨径为 24 m，为重型交通桥，施工仅 6 周；韩国也在很多明挖隧道中采用钢波纹板复合结构。在国内，青海玉树钢波纹板复合结构拱桥跨径达 36 m、桥宽 12 m，为目前世界最大跨径；广梧高速某分离式立交桥跨径 10 m；最大的梨形结构位于河北邯郸某旅游区，该桥跨径 15.3 m；最大的圆截面结构，其跨径为 12 m。

展望未来，随着新材料、新结构、新工艺、新设备等新技术的发展，UHPC（超高性能混凝土）、耐候钢、泡沫轻质土、合金钢、高强钢、玄武岩纤维等材料将在波纹板复合结构中应用；钢-混复合结构、减荷结构、钢-格宾复合结构、波纹钢-型钢组合结构等新型结构体系将陆续研发；镀锌、镀锌铝、覆膜、敷塑等耐久性防护措施不断革新，使得其受力性能更优、耐久性更好、跨越能力更大、施工更快捷、材料更环保，让波纹钢结构焕发新机，相信该种结构在未来工业化建筑进程中，将会越来越展现其优势，也将在更多领域更广泛应用，发挥更大的经济效益、生态效益。

为便于大基建领域参建工作者更加全面地了解波纹板及其复合结构的相关信息和技術，中国钢结构协会冷弯型钢分会组织相关专

家编著了本书。其间，波纹钢行业内众多知名单位、知名人士给予了大量帮助和支持，并提供了珍贵的素材，这些单位主要包括同济大学、西南交通大学、湖南大学、北京交通大学、北京科技大学、中交第一公路勘察设计研究院有限公司、中交第二公路勘察设计研究院有限公司、中交综合规划设计院有限公司、湖南省交通规划勘察设计院有限公司、四川省公路规划勘察设计研究院有限公司、四川天府机场高速公路有限公司、四川汶马高速公路有限责任公司、安徽中益新材料科技有限公司、利奥生态科技集团有限公司、西安世纪金属结构有限公司、衡水益通管业股份有限公司、南京联众工程技术有限公司、衡水奇佳工程材料有限公司、河北世纪金属结构有限公司、青海路拓工程设施制造有限公司、河北丞璐建设工程有限公司等，在此我们表示诚挚感谢，他们为行业的健康发展贡献了力量，为钢波纹板及其复合结构技术的进步提供了强有力的技术支撑，通过产学研结合，研究成果丰富，支撑了技术标准、设计规范、设计图库等技术文件编制，是波纹板行业的中坚力量！

本书以具有典型意义的各类基建工程案例为主，通过大量具体案例的介绍和分析，让读者深刻理解钢波纹板（管）及其复合结构

的优势和应用场景，通过精美图片的分享感受结构之美和工程之美。

因著者水平所限、时间仓促，可能尚有不完善之处，欢迎读者批评

指正。



北京科技大学材料加工工程学科 主任、教授、博导  
中国科学技术协会第六届全国委员会 委员  
中国金属学会 荣誉理事



## 目 录

1	绪 论 .....	001
1.1	基本概念 .....	001
1.2	受力特点及主要优势 .....	003
1.3	种类与规格 .....	006
1.4	适用范围 .....	007
1.5	规范和技术标准 .....	008
1.6	国外研究与应用现状 .....	009
1.7	国内研究与应用现状 .....	020
2	主要结构设计与施工要点 .....	040
2.1	结构设计要点 .....	040
2.2	耐久性设计 .....	046
2.3	管涵主要施工工艺 .....	061
2.4	波纹钢拱桥设计计算与分析 .....	075
2.5	钢波纹板拱桥主要施工工艺 .....	115
2.6	小 结 .....	118
3	大基建各专业领域的应用案例 .....	120
3.1	桥涵工程创新应用案例 .....	120
3.2	隧道、棚洞工程创新应用案例 .....	154

3.3	综合管廊工程创新应用案例 .....	160
3.4	其他工程创新应用案例 .....	168

## 4 创新研究典型案例的论证与实践 .....176

4.1	钢波纹板加筋土轻型挡土墙工程应用案例 .....	176
4.2	钢波纹板隧道初支结构 .....	192
4.3	隧道通风平导中隔墙结构 .....	209
4.4	方拱形装配式钢波纹板结构 .....	251
4.5	旧桥加固拼宽一体化结构 .....	263
4.6	动物通道应用案例 .....	273
4.7	钢架加强型钢波纹结构 .....	282
4.8	地下罐体结构应用案例 .....	289

## 5 创新研究方向与应用展望 .....327

5.1	概 述 .....	327
5.2	钢-混组合结构 .....	327
5.3	UHPC-钢波纹板组合结构 .....	328
5.4	耐候钢、不锈钢波纹板结构 .....	329
5.5	钢波纹板-格宾结构新型组合结构 .....	330
5.6	隧道工程 .....	330
5.7	敞口式金属波纹管涵洞洞口 .....	331
5.8	大跨径钢波纹板隧道渐进式透光遮光棚 .....	332
5.9	钢波纹板通道安全屋 .....	335
5.10	开展超大跨径钢波纹板复合结构拱桥论证总结与 推广应用 .....	335

## 6 结 语 .....338



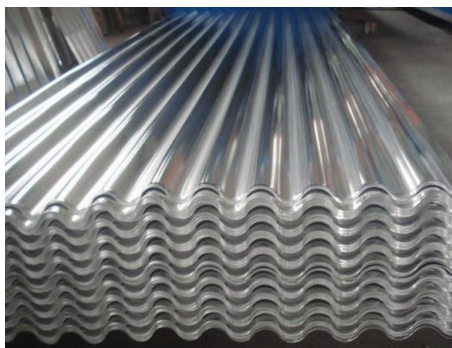
参考文献 .....339



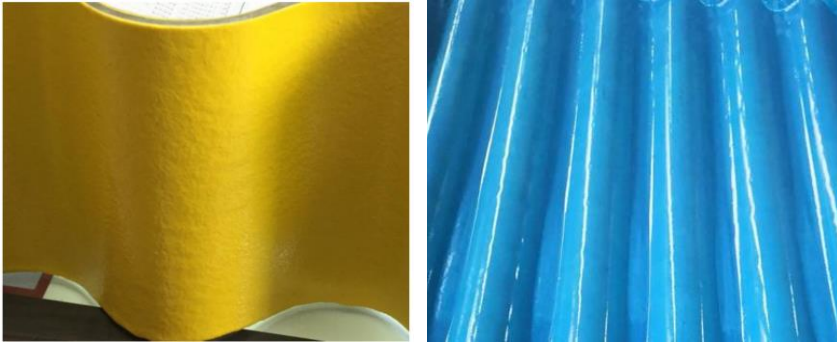
# 1 绪 论

## 1.1 基本概念

钢波纹板是冷轧热卷板经波形成型后再进行热浸锌等防腐工艺技术处理后的板材。钢波纹板（管）是一种典型的空壳薄壳柔性结构，波纹使其具有良好的受力性能（轴向和径向同时承载）和补偿横向位移等特征，能充分发挥钢材强度高、适应变形大等优点。钢波纹板（管）填土后可用来代替钢筋混凝土/圬工中小桥涵，其工作原理：钢波纹板（管）与周围填土发生相互作用，形成一个拱形结构和弹性层组合的复合结构，该结构既柔韧又结拱成型受力；弹性层能不断均衡土压力，将荷载分散到两侧的土体上；周围土体在钢波纹板（管）四周形成若干支撑点，提高了钢板的自身承载力；波纹板拱桥（涵）跨越河流、通道、管线两侧可以用弃土（石）填筑，可以大大减少桥梁长度、减少弃渣占地带来的土地占用及环保压力，还能避免桥头跳车等质量通病。钢板表面美观、光滑，镀锌层牢固，有优良的耐大气腐蚀性能；同时，钢板还有良好的焊接性能。与电镀锌薄钢板相比，热镀锌薄钢板镀锌层较厚，表面形成了铁锌合金保护层，耐腐蚀性很强。镀锌板（见图 1.1）广泛用于公路、建筑、包装、铁路车辆、农机制造及日常生活用品等方面，近几年也用于地下围护结构、地下通风竖井、消防水管、城市管廊、防空洞、蓄水池、水泥存储罐、拱桥、结构物加固、全装配式桥梁等领域。



(a) 镀锌钢波纹板



(b) 彩色油漆钢波纹板

图 1.1 钢波纹板结构

钢波纹板复合结构是在钢波纹板结构基础上增加钢筋混凝土加劲肋（如 CBS）、加筋条、加筋格宾、泡沫轻质土等加强构造，或者双层波纹板结构，使得其截面或结构承载能力更高，跨越能力更大，耐久性更好。钢波纹板复合结构扩大了钢波纹结构的应用范围，增强了其适应能力。目前，国内钢波纹板复合结构申请的专利数量较多，但应用案例不多，有些直接引进了国外成熟技术。

实际上，波形板结构在基建领域已经有广泛的应用，譬如用于路基防撞设施的波形护栏，用于桥梁工程中的波形钢腹板，用于楼板结构的波形钢板。这些波形板构件都属于预制拼装技术，在基建领域发挥了非常重要的作用，符合我国建筑工业化发展方向。此外，随着我国工程总承包趋势的日趋成熟，EPC 项目会越来越多，EPC 项目具备四大本质特征：① 单一责任主体；② 固定总价模式；③ 设计主导；④ 设计采购施工深度融合。因此，对于 EPC 项目固定总价模式而言，预制拼装技术具有施工速度快、施工质量好、工程造价低、设计与施工深度融合、吊装重量轻等优势，钢波纹板结构技术将会得到很好的发展。

在生产钢波纹板设备方面，初期一般采用进口，主要进口国家有加拿大、韩国等，目前国内能自我研制、生产，部分厂家通过改装既有机械进行生产，主要包括钢波纹板生产机组和螺旋管生产机组等。

典型的钢波纹板生产机组包括设备主机平台、轧辊基座、轧辊组部件、卷弧机组等几个部件。平直的波纹钢板通过轧辊基座逐个波形进行对称碾压。

典型的螺旋管生产机组包括设备主机平台、轧辊基座、轧辊组部件、咬

合机头部件，模板部件、液压站、等离子切割组件、放料架、出料架几个部件。主机平台和轧辊基座主要是由框架结构焊接而成，然后整形打磨抛光。轧辊组共两套，主要使用墙板、上下轴、齿轮和轧辊组成。轧辊组部件由 12 和 13 个轧辊组两种规格组成。咬合机构部件主要是由上下咬合轮，压紧大梁和压紧油缸等部件组成。模板部件主要是由模板支撑架、模板、管道成圆挡轮组组成，此部件主要是减少工人操作技术要求，使工人更快速简单地掌握生产要领。液压站由油箱、油泵、液压阀等液压元器件组成，液压站主要是用于压紧咬合口。板材越厚压力越大，板材越薄压力越小。等离子部件是由等离子发生器、割枪、枪架、传感器移动台、除尘箱组成。料架的主要功能是稳定承托管道的重量，料架的工作是由电器控制自动放料，料架带有感应轮，可通过循环放料达到进料均匀的目的；放料架主要使用钢板进行框架式焊接，焊接完成后经过时效处理最后加工和安装；出料架是板料焊接拼装而成的框架结构，焊接完成后进行时效处理，去除应力。

## 1.2 受力特点及主要优势

### 1.2.1 受力特点

钢波纹板为典型的柔性结构，与结构性回填材料共同承担恒载和活载，通过竖向和横向变形，将竖向荷载传递给结构性回填材料，进而提高结构整体承载力。

### 1.2.2 主要优势

从工程质量、结构安全、经久耐用、施工周期、工程造价、环保施工、符合绿色交通与环保建设发展等要求出发，钢波纹板可有效解决高寒地区或冻土地区混凝土结构或砌体结构因寒冷、大温差、冻胀等因素造成施工困难、强度低、裂缝、变形、断裂、破坏等质量通病问题，还可有效解决桥台、涵台沉降及跳车问题。与传统的钢筋混凝土结构或砌体等圬工结构相比，因其独特的优越性，在经济、社会、环保等效益方面十分显著。具体优势如下：

(1) 强度高，结构轻。

钢材强度高，结构尺寸小，自重轻。波形钢板仅为钢筋混凝土结构重量的 4%~22%，这给施工带来了极大的方便，采用小型起重机械即可安装。同时，转运和装卸费用也大大减少。

(2) 受力性能好。

钢波纹板能充分发挥钢材抗拉强度高、抗变形能力强等特点，钢材受压和受拉性能基本一致，各向基本同性，对地基要求低，能够满足软土、膨胀土、湿陷性黄土、冻土、高填方、采空区和地震多发区等不良地质条件下不均匀沉降对结构变形的特殊需求。相比于圬工材料，钢材的抗拉能力特别优秀，在荷载作用下基本不存在开裂问题。同时，钢波纹板结构对地基扰动小，对土层的热扰动小，特别适用于高寒地区及冻土地区等工程。

### （3）耐久性好。

大量工程实例表明，镀锌钢波纹板（管）使用寿命在 50~100 年及以上，目前仍有百年以上结构仍在使用的，根据具体环境类别，采取多重防腐措施后寿命会大大延长，特别是采用覆膜工艺技术或者敷塑工艺技术，可显著提高其耐久寿命。对于常规的土木工程来说，其使用寿命完全可以满足要求。

### （4）良好的抗震性能。

钢波纹板结构自重轻，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。

### （5）生产效率高、周期短。

工厂加工与现场施工准备同时实施，大幅缩短工期 50% 以上，且不受温度与环境的影响，延长了可施工期。钢波纹板结构通常在专业工厂集中加工制造成型管节、板件或板片，生产过程不受环境影响，并可确保加工精度和质量，降低成本，大大减少了现场的劳动投入量。

### （6）运输安装都更方便安全。

钢波纹板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 50~800 kg，吊装无需采用大型吊装设备。整体波纹钢管可以分节段圆管套装、分片钢波纹板、板件采用层叠捆扎方式运输。由于波形钢板结构的安装过程是简单的栓接和就位过程，因此，施工人员不必经过特殊培训即可操作。

### （7）产品多样化，使用范围广。

充分利用钢材的可再加工特点，采用不同的壁厚、波形（波距×波高）、尺寸和结构设计等可生产不同形状的产品，满足不同的使用功能和要求。同时，可通过弯头、三通等制作弯曲、分岔等结构，适应不同的沟渠线性需求，适应或满足不同的强度或刚度要求及使用功能的构造物。

### （8）低碳环保。

可大量利用钢产能资源，大量减少或降低了常规建材，如水泥、沙石及

其开采、模板、钢筋、木材等的使用，不产生施工垃圾，有利于环境保护。

(9) 质量缺陷易处理和修复容易。

可采取直接新装、套衬等措施加强有质量缺陷的板片。工后（运营阶段）病害少、养护成本低。

(10) 装配化施工，工艺简单，方便快捷。

无须采用大型机械设备，可减少大量的施工作业人工（手工操作）和机械设备。与传统的钢筋混凝土结构或砌体结构相比，钢波纹管结构采用半成品现场拼装施工，施工速度快而简便，大幅缩短工期，工期可缩短 50% 以上，特别利于抢险救灾。

(11) 工程造价低。

钢波纹管结构具备较强的变形适应能力，并且自重小，与同跨径的钢筋混凝土结构相比，从设计上可以简化基础工程的费用。使用钢波纹管，对地基进行简易处理，采用柔性的砂砾垫层作基础则可满足涵洞的使用要求，工期及费用可以大大缩减。工程实例表明，钢波纹管（管）及其复合结构拱桥的费用较同跨径其他钢筋混凝土或圬工桥涵低 5% ~ 30%（钢波纹管费用 1.1 ~ 1.6 万元/t），尤其在不良地质条件下，大大减少了基础处理费用，经济效益更为可观。钢波纹管应用在桥梁工程，可与不同高度路堤直接相连，利用隧道及路基挖方弃碴填筑路堤，桥梁长度可以大大减短，且取消了桥台，避免了桥头跳车的质量通病，减少大量临时占地，而大幅节省造价，降低环保影响。

### 1.2.3 主要缺点与问题

(1) 钢波纹管及其复合结构的缺点。

① 施工专业度要求高，导致此项技术推广较慢。

② 成桥前变形较大，对实时监测要求较高，对填土质量和碾压工艺有严格要求，对填料的准备和操作技术人员素质要求比较高。某些项目反复强调填土质量和碾压工艺，仍然做不到位，导致施工质量较差，影响结构的安全性，甚至返工。

③ 对材料耐久性和防腐技术不是特别了解的人，不容易理解和接受。

(2) 存在的主要问题。

① 产品质量同质化竞争趋势加强。随着国内应用越来越多，产品日趋成熟，同质化竞争趋势加强，产品利润趋低。只有部分厂家为保持竞争优势，积极谋求差异化竞争，如研究新型产品，申请发明专利，通过知识产权的保护，形成竞争优势。

② 国内已有主要生产厂家约 30 家，产品参差不齐，一般采用专业分包模

式进行低价中标。部分厂家为谋取中标，甚至低于成本价，为了降低成本，导致板材及连接件产品质量不达标，热浸镀锌擅自更改为喷锌或者涂刷，造成较为恶劣的影响，进而造成整个基建行业对波纹板结构的怀疑。

③部分项目工厂制造时，原材料不合格，个别公司技术力量落后，施工经验不足，安装时不熟练，有些部位安装不规范；缺少售后服务，没有指导、督促施工单位按设计图纸及施工规范要求施工。

## 1.3 种类与规格

钢波纹板（管）结构按截面形状可分为闭口截面和开口截面两大类，闭口截面包括圆形、竖向椭圆、梨形、管形拱、横向椭圆等，开口截面包括圆弧拱、低弧拱、高弧拱、梨形拱等。钢波纹板（管）结构断面形式的多样化，可适用于不同的使用环境，开口截面结构物可根据实际需要确定孔径。因此其用途十分广泛。

### 1. 主要断面形式及适用条件

（1）圆形：在各种功能状况下均使用良好，尤其是埋深较大的情况下，最大跨径 12 m。

（2）竖向椭圆：涵洞、雨水管、下水道、通道，埋深较大时使用较好。

（3）梨形：在取最小的埋置深度的情况时可作人行道、机动车道、自行车道使用。

（4）管形拱：净空较小，具有水利优势，可作涵洞、下水道、立交桥、雨水管。目前查到已知国内外最大跨径为 7 m，但矢高不到 3 m。

（5）横向椭圆：净空较小，具有水利优势，地基土较差时是个较好的选择。

（6）圆弧拱：净空较小，过水断面较大，形式优美，无损天然河床的环境友好型截面。

（7）低弧拱：涵洞、小桥、下水道，净空较小，过水断面较大，无损天然河床的环境友好型截面。

（8）高弧拱：涵洞、小桥、下水管，净空较大，无损天然河床的环境友好型截面。

（9）梨形拱：铁路通道或其他要求净空较大的情况。

（10）箱涵：净空较小，跨度较大，是小跨度桥梁的较好替代。

### 2. 产品结构形式



钢波纹板（管）按产品结构形式可分为环形钢波纹圆管、拼装式钢波纹板（管）涵和螺旋形钢波纹圆管，如图 1.2 所示。



(a) 环形波纹钢圆管



(b) 螺旋形波纹钢圆管

图 1.2 钢波纹圆管结构形式

环形波纹钢圆管常用孔径：0.5 m、0.6 m、0.7 m、0.75 m、1.0 m、1.25 m、1.5 m、2.0 m、2.5 m。

螺旋形波纹钢圆管常用孔径：0.3 m、0.4 m、0.5 m、0.6 m、0.7 m、0.8 m、0.9 m、1.0 m、1.2 m、1.4 m、1.6 m、1.6 m、1.8 m、2.0 m、2.2 m、2.4 m。

分片拼装波纹钢圆管宜选用 0.5 m、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、8.0 m、9.0 m、10 m 的标准孔径。

闭口截面结构物宜选用 0.5 m、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、8.0 m 的标准孔径，其中 0.75 m 以及 0.75 m 以下的孔径只适用于无淤积地区的灌溉渠。排洪涵洞孔径不宜小于 1.0 m。

## 1.4 适用范围

- (1) 软土地区涵洞通道工程。
- (2) 冻融土地区涵洞通道工程。
- (3) 中小跨径桥梁工程（5 ~ 32 m）。
- (4) 高填方涵洞通道工程。
- (5) 既有桥梁、既有涵洞、既有隧道承载力加固工程。
- (6) 新建明挖隧道、棚洞工程。
- (7) 地下工程。
- (8) 采矿工程。

- (9) 房屋建筑工程。
- (10) 雨水系统(海绵城市)工程。
- (11) 综合管廊工程。
- (12) 军事工程。
- (13) 水池结构(如小型水坝、养鱼池等)。
- (14) 基础工程。

## 1.5 规范和技术标准

### 1.5.1 国外主要规范和技术标准

(1) *American Iron and Steel Institute, Modern Sewer Design* (美国工业协会:排水设计)。

(2) *Canadian Standards Association. Canadian Highway Bridge Design Codes-Section 7: Buried Structures* (加拿大公路桥梁设计规范)。

(3) *AASHTO. American Association of State Highways and Transportation Officials Load and Resistance Factor Design. Section 12: Buried Structures And Tunnel Liners* (美国 AASHTO 设计规范)。

(4) *Specifications for the Design & Construction of Buried Structures using Corrugated Steel Plates* (韩国建设交通部、韩国道路公社编写的波形钢板结构物设计及施工指南)。

(5) UNE-EN ISO 10380—2013 (西班牙标准化学会)。

(6) ISO 10380—2012 (国际标准化组织)。

(7) EN ISO 10380—2012 (欧洲标准化委员会)。

(8) NFE 29-834-2012 (法国标准化协会)。

(9) CSN EN ISO 10380—2013。

(10) *Corrugated Steel Pipe Design Manual* (钢波纹管设计手册)。

(11) *Buried Corrugated Metal Structures* (钢波纹管结构)。

(12) *National Corrugated Steel Pipe Association. Field Performance Evaluation of Polymer Coated CSP Structures in New York.*

### 1.5.2 国内主要规范和技术标准

(1) 《冷弯波纹钢管》(GB/T 34567—2017)。

(2) 《波纹钢管涵洞设计与施工技术规范》(DB13/T 5079—2019)。

- (3)《公路钢波纹管涵设计指南》(DB14/T 1022—2014)。
- (4)《钢波纹板桥涵施工技术指南》(DB34/T 2378—2015)。
- (5)《公路工程钢波纹管涵设计与施工技术规范》(DB34/T 2747—2016)。
- (6)《道路钢波纹管(板)桥涵施工技术规范》(DB65/T 4010—2017)。
- (7)《公路波纹管(板)桥涵工程质量检验评定标准》(DB15/T 1276—2017)。
- (8)《公路涵洞通道用复合钢波纹管涵管通用技术要求》(DB13/T 2585—2017)。
- (9)《公路波纹管(板)桥涵设计与施工技术规范》(DB15/T 654—2021)。
- (10)《波纹管涵洞设计与施工技术规范》(DB22/T 2419—2015)。
- (11)《装配式钢制波纹管综合管廊工程技术规程》(T/CCIAT 0012—2019)。
- (12)《公路钢波纹管涵设计与施工技术规范》(DB34/T 2747—2016)(安徽)。

## 1.6 国外研究与应用现状

### 1.6.1 国外研究现状

#### 1. 主要研究情况

在美国、加拿大等一些发达国家,波纹管涵已广泛应用于公路工程建设和危桥加固中,并制定了设计、制造及施工安装手册,积累了较为成熟的波纹管涵的设计理论及修建和加固经验。尤其是在加拿大、美国、波兰等分布有多年冻土的国家,由于其良好的散热性能、较强的变形适应能力,更成为涵洞与管道修筑及危桥加固的主要形式,已广泛地应用于道路工程。

1886年,钢材工人詹姆斯受到包裹药瓶的波纹纸板的启发而发明金属波纹管。

美国对波纹钢结构的研究起步较早。1896年,美国交通部率先进行了钢波纹板的通道、涵洞及危桥加固的可行性研究,并首先应用于公路涵洞。

1913年,首条拼装式结构板波纹管涵洞应用于英国兰爱丁堡近郊的农田灌溉。

1923年,美国铁路工程协会在伊利诺伊州中央铁路进行测试。

1929年,加拿大首座波纹管应用于一煤矿中。

1931年，澳大利亚首次建成一座8 m跨径汽车通道。

在 20 世纪 30 年代以前，钢波纹管涵洞主要根据经验进行设计。40 ~ 50 年代，为深入了解钢波纹管涵的受力性能，进行了相关试验研究。

1955 年，Armco 公司发行了钢波纹管设计尺寸和填土高度等设计参数表，但未提供具体设计方法；美国公路与运输协会（以下简称 AASHTO）依据已有经验和环形压力理论建立了设计计算方法，环形压力理论近似假定结构只受环形压力，该理论的成立依赖于结构周围材料有足够的密实度以形成拱效应，所以回填材料应满足一定条件。

1975 年，第一座钢波纹管箱型拱桥涵采用经验设计方法完成设计并建成，此后建成了几座同类桥涵。箱型桥涵非圆形受压结构，而是土体支撑的半刚性框架结构，其设计基于弯矩和塑性弯矩强度。大跨径箱型拱涵的需求不断增加，依靠经验设计方法不再适用。（AASHTO 公路桥梁设计规范第 12 章节提供了设计方法）

1978 年，美国钢铁学会 AISI 研究表明钢波纹管应用于雨水管时，81 道保持良好状况，其使用时间为 65 年。

1979 年之前，加拿大参考 AASHTO 的设计方法；由于 AASHTO 设计方法不满足发展需求，1976 年，加拿大安大略省决定研究并编写新的桥梁设计规范；1979 年，BaidarBakht 博士编写第一版安大略公路桥梁设计规范（以下简称 OHBDC），该规范基于极限状态设计方法，并第一次提出了“soil-mental（土-钢结构）”概念；随着最小填土高度、施工回填过程的试验方法、土拱效应系数等的提出，OHBDC 设计规范逐步形成和完善，且开发了第一套钢波纹管涵洞 FEA 计算分析程序 CANDE。

1980 年，日本在《日本高等级公路设计规范》中对钢波纹管涵有较为详细的规定，该规范给出了五种类型波纹管涵在不同管径和填土厚度条件下的波纹管管壁厚度查用表格、管段组合螺栓选用方法、对于半沟型和突出型两种背填材料方式的背景设计方法、基础和管端部的设计方法等。

1984 年，澳大利亚编写了《埋入地下的波纹金属构件》（AS2042: 1984）。

1986 年，美国钢波纹管协会 NCSA 与美国钢铁学会 AISI 合作，对钢波纹管排水管道进行研究，使用时间 74 年，结果表明涂装后的钢波纹管系列在一些土和水环境下可提供近 100 年的寿命。

1989 年，AASHTO 校仿 OHBDC 修改规范，该规范取名 AASHTO LRFD，于 1994 年出版，但仅应用一年时间；1995 年，安大略省与加拿大其他省份合作编写加拿大公路桥梁设计规范（简称 CHBDC），2000 年第一次出版，第二版在 2006 年出版。

1990 年，《日本高速公路设计规范》制定了波纹管设计技术规范。随着波

纹管在世界各地安装使用，证明此种结构物在各种使用情况的通用性，而且其寿命已超过了设计寿命，同时在危桥加固方面对于结构补强的效果显著。

1993年，英国哥伦比亚21个结构板和有镀锌保护层的内壁，安装时间全部超过20年，试验估计除2个结构外，服务寿命超过100年。

1998年，澳大利亚和新西兰合作编写了AS/NZS 2041—1998，后更新为AS/NZS 2041—2011。

1998年秋，世界上同类中最大跨度的钢波纹板拱桥（23.3 m）在加拿大不列颠哥伦比亚省北部的公路上建成。由于其特殊的地理位置，加拿大主要将波纹钢应用在多年冻土区；由于其良好的散热性能、较强的变形适应能力，成为涵洞与管道修筑和危桥加固的主要形式，已广泛地应用于道路工程。北欧最具代表性的国家是波兰，1997—1998年的洪水，许多桥涵被水毁，波兰将波纹钢结构用于抢修工程。韩国自1997年开始研究应用钢波纹管涵洞，经过吸收国外的设计与施工技术，到2008年已有2000多座波纹钢涵洞，同时把波纹钢大量运用到桥梁加固领域。

## 2. 设计方法

美国、加拿大、韩国、波兰、瑞典等国家对波纹板桥梁的设计理论及用于危桥加固领域的设计施工方法比较成熟，相应地也建成了许多钢波纹板桥梁。国外关于波纹钢桥涵的设计方法包括

（1）爱荷华公式（The Iowa Formule）：这种用来估计柔性管变形的公式起源于早期确定管涵的合理承载力的研究（1930）。

（2）美国钢铁协会设计法（The AISI Method）：这种方法主要是环向压力设计法。

（3）美国试验与材料协会的方法（The ASTM Method）：采用了纯环向压力设计法。

（4）美国各州公路与运输官员协会设计法（The AASHTO Method）：公路桥梁设计规范第一部分设计的12章：波纹钢结构相互作用系统。这个规范包括“容许应力法与极限状态法”，类似于美国钢铁协会的方法。

（5）Armttec（专利的）大跨桥梁设计法（The Armttec Super-Span Method）：这种方法考虑了组合弯矩与拱顶处的轴向应力，同时也把顶推梁作为了横向支承。

（6）涵洞分析与设计程序（The CANDE Program）：有限元设计法。

（7）土-钢共同作用设计法（The SCI Method）：有限元设计法。

（8）UBC涵洞设计方法（The UBC Culvert Design Procedure）：这种方法

基于土-钢共同作用设计法，弯矩与压力以一定的安全系数进行验算，对连接强度与组合弯矩及轴向应力也进行了验算。

(9) 安大略省公路桥梁设计规范 (Ontario Highway Bridge Design Code): 这种设计法由安大略省交通厅于 1979 年首次发表，同时这也是北美波纹钢结构设计规范中首次使用极限状态设计法。

(10) 加拿大公路桥梁设计规范 (Canadian Highway Bridge Design Code): 其中波纹钢结构的设计条款基于安大略省公路桥梁设计规范，但是这些条款经过了重新修订以适用于加拿大全境。它同时包括了一些 UBC 的设计方法，特别是它在处理施工阶段的计算时取代了原来的经验性柔度系数法。新规范修订了其中关于公路活载与钢箱结构的条款。

国外对于覆土钢波纹板桥以及此种结构应用于危桥加固领域已有成熟的理论与可靠的有限元设计工具，并积累了大量施工经验与试验数据。出台了相关规范，制定了设计、制造及施工安装手册，积累了较为成熟的修建加固经验，如：日本标准《波形钢管及波形型材》(JISG 3471—1977)；美国钢铁研究会 AISI 结构设计规范，美国钢铁研究会 AISI 出版的 *Modern Sewer Design* (1999 年版)，系统地讨论了钢波纹管排水管道和涵洞的应用、设计、施工；加拿大 *Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products* (2007 年版)，系统地总结了钢波纹板涵的构造、应用、水力计算、结构设计、施工以及养护方法，特别是对大跨钢波纹板桥涵及各种特殊形式结构的施工、设计进行了详细地阐述。在高寒地区的工程中，应用金属波纹管涵洞更显其优越性。许多国家已经将钢波纹板作为对老桥梁的加固及替代方式。

从 20 世纪末至今，国外对于覆土钢波纹板桥涵的研究取得了一些新的进展。主要表现在对覆土的强度分析、增强结构承载力的措施、荷载效应与动力特性等几个方面。

国外对于覆土钢波纹板桥涵已有成熟的理论与可靠的有限元设计工具，并积累了大量施工经验与试验数据，对该结构的设计以及危桥加固等应用，跨度已能达到 26 m 以上。国外在修筑此类结构较大跨度时，发现已有设计方法的不足，目前，国外的研究集中在采用大钢波纹板对覆土与拱结构进行加强设计的大跨度结构，并开始关注结构的动力特性。

## 1.6.2 国外应用现状

### 1. 百年使用寿命涵洞

该涵洞位于加拿大某公路，于 1933 年建成，至今已服务 90 多年。其现

场照片如图 1.3 所示。

## 2. 高速公路动物通道

如图 1.4 所示。

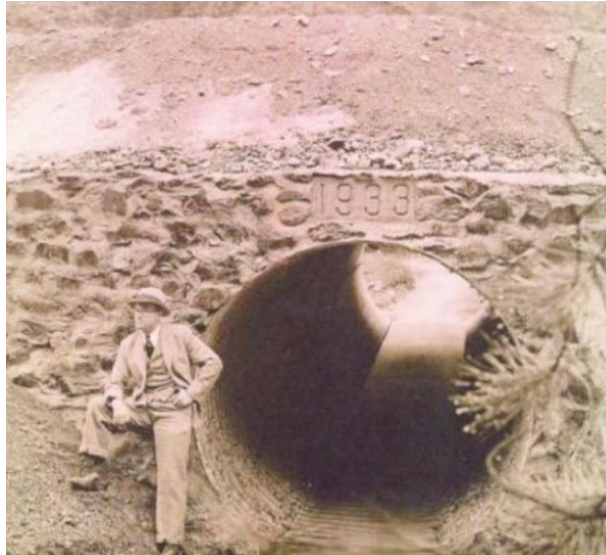


图 1.3 百年使用寿命涵洞



图 1.4 高速公路动物通道

## 3. 明挖隧道工程

双向四车道，拱顶设置了人行道爬山通道，如图 1.5 ~ 图 1.9 所示。





图 1.5 市政道路明挖隧道



图 1.6 隧道洞门段



图 1.7 双孔明挖隧道



图 1.8 市政明挖隧道



图 1.9 双跨明挖隧道

#### 4. 桥梁工程（见图 1.10 ~ 图 1.14）



图 1.10 市政小桥



图 1.11 双孔桥梁



图 1.12 市政桥梁

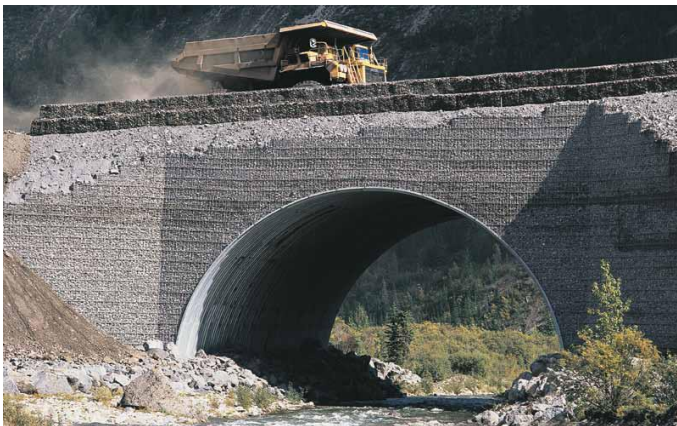


图 1.13 怀特霍斯煤矿运输道路波形钢板拱桥（跨度 24 m）



( a )



( b )



( c )



( d )



( e )



( f )



(g)



(h)



(i)

图 1.14 韩国钢波纹板拱桥

图 1.14 (a) 中韩国的 18.0 m 跨径小桥, 采用圆弧拱桥结构, 侧墙采用预制块砌筑, 两侧预制块通过对拉纤维板连接, 增强其稳定性, 桥梁上为双向两车道道路。

## 5. 立交桥

如图 1.15 所示为一座国外某波纹板拱型立交桥，由 Atlantic Industries Limited 公司建造完成，主体结构呈半圆形，两侧采用挡土墙与路基衔接，挡土墙外侧设置了装饰板，在蓝天白云的衬托下显得简洁大气。桥下道路为双向两车道，车行道外侧设置了波纹板防撞栏杆。



图 1.15 立交桥

## 1.7 国内研究与应用现状

### 1.7.1 国内研究现状

20 世纪 50 年代修建青藏公路不冻泉段时，将波纹管涵应用于抢修工程。新中国成立后由于诸多因素，波纹管涵未能广泛得到应用，至 20 世纪 90 年代末，我国才逐步开展公路钢波纹管涵洞的研究及应用、生产。

1965 年，云南公路局在缅甸公路的大修中曾挖掘出一段钢质波纹管的过水涵管，被证实为二战时期安装的（材料从美国进口），用于当时的军事便道。

为解决多年冻土地地区涵洞工程病害，提高涵洞工程在多年冻土地地区的使用寿命，改善青藏公路多年冻土地地区路基横向排水条件，1997 年在青藏公路 K3278+200 与 K3280+915 处各修建波纹管涵一道，作为试验工程。

1998 年 9 月又在 K3263+094 修建波纹管涵一道作为对比研究，取得了初步成功。研究表明：相同围压时，波纹管与普通圆管的径向最大位移相当，但波纹管的轴向位移明显大于普通圆管，表现出波纹管具有轴向补偿位移的功能；波纹管的内部应力拉、压相间，充分发挥了金属材料各向同性的优良

特性，而普通圆管内部拉应力较小，压应力较大。金属波纹管涵施工过程中对地基扰动小，且不渗水，有利于保持多年冻土地区的水热平衡，达到了保护冻土、整治青藏公路涵洞工程病害的目的。

1998年，上海市政工程设计研究院和上海公路处在上海新开河对4 m直径钢波纹管（板）涵洞进行了荷载试验，结合试验采用有限元对波纹管结构进行了初步力学分析，其研究表明：最大拉应力和压应力均出现在上半圆两个45°方向上，最大拉应力在波峰，最大压应力在波谷。

2000年，中交第一公路勘察设计研究院（以下简称“中交一院”）的李祝龙对波纹管波进行热学与力学方面的研究与探讨，开展了交通部标准规范专题“公路钢波纹管涵洞设计与施工技术研究”，研究表明：使用钢质波纹管涵洞比钢筋混凝土盖板涵具有更优越的散热性能，对涵洞下地基或涵洞周围地基冻土上限的抬升较为有利；钢波纹管具有较明显的横向补偿位移的作用，钢波纹管比普通圆管有较大的延伸性。这些特性都更有利于结构的补强。并出版国内第一部钢波纹管领域的著作《公路钢波纹管涵洞设计与施工技术》。

2001年，北京交通大学季文玉教授承担了铁道部科研开发计划项目（2001Gool-F），进行了金属波纹管涵洞受力行为理论分析与试验研究，分别从理论分析、数值计算和结构试验三个方面出发，对波纹管的力学性能进行了研究，并测试了填土土压力和波纹管应力、变形的变化。

2003年，武汉理工大学彭述权在其硕士论文中按照耶梅里杨诺夫的计算模型，建立了钢波纹板桥涵和土的共同作用模型，将钢波纹板桥涵简化为固支拱结构，按平面应变问题进行计算；按E.B.seydel方法，将钢波纹板的几何正交异性转化为材料正交异性，计算了其等效材料常数；通过现场静载试验，从结构的静态应变、相对变形、基础沉降等多个方面，对钢波纹板桥涵的力学性能进行了分析。

2003—2006年内蒙古交通勘察设计研究院也针对工程需要开展了钢波纹管（板）涵洞荷载试验、施工工艺等研究。

到2005年底推广应用的涵洞超过800道，主要集中在青海、西藏、内蒙古、新疆、山西、河北、上海。新藏公路、青藏公路等改建工程中还将应用500道以上。

2006年，李祝龙出版了国内第一本专著《公路钢波纹管涵洞设计与施工技术》。该书是在7年研究的基础上进行系统总结，并对公路钢波纹管涵洞的设计内容和方法进行充分分析之后，同时参照了国内外该领域研究与应用情况，形成系统的目前可指导工程设计和施工的技术著作。

2006年，内蒙古交通设计研究院与北京交通大学共同承担了西部交通建



设科技项目《波纹钢结构在小桥与涵洞上的应用技术研究》(项目编号:200631877245)。该项目的成果之一是:基于对国际最新钢波纹板桥涵设计规范的分析,提出了适用于我国材料、荷载标准与可靠度统一标准的公路钢波纹板桥涵设计方法,并编制了《钢波纹板小桥涵设计与施工指南》。该指南填补了国内该领域的空白,为修编相关标准规范提供了重要的基础技术资料。

2007年,内蒙古交通设计研究院与北京交通大学合作进行了波纹小桥模型试验。试验模型位于河北省衡水市景县,根据内蒙古某覆土钢波纹板拱桥按1:2的比例微缩后建立,拱圈线型为圆弧形,跨度为3.7m,拱高为1.25m;模型使用钢波纹板波形为200mm×55mm×5mm,拱脚采用100mm×100mm×10mm角钢与基础连接;拱顶填土高度为90cm,采用砂土回填,模型沿轴线方向两端有厚度为25cm的混凝土挡土墙。试验中对施工过程中结构的应力和位移以及填土压力进行了详细的监测,并且进行了成桥后加载检测试验。试验结果分析中建立了两种ANSYS计算模型,对拱桥两侧混凝土挡土墙的影响进行了模拟,与试验各工况的结果进行了对比分析。

2005—2006年,中交一院组织开展了“公路钢波纹管涵洞设计软件”的研究与开发,通过程序嵌入有限元分析软件进行参数分析,以达到可视化的设计目的。

2007年,我国交通运输部对于波纹钢管涵桥涵的研究及应用给予了充分的重视和肯定,在颁布的《公路涵洞设计细则》(JTG/TD 60-04-2007)中就列出了波纹钢管(板)涵洞的适用跨径,对波纹钢管(板)涵洞的适用条件提出了建议,明确提出“4.2.7 波纹钢管涵洞适用于地基承载力较低,或有较大沉降与变形的路基”。

2008年交通部颁布了《公路桥涵用波形钢板》(JT/T 710—2008)。

2008年4月,河北省交通厅公路管理局编制发布了《圆形钢制波纹管涵》。

2009年,刘保冬等通过积分计算波纹钢板截面特性,并利用刚度等效的原则将其简化为平钢板,建立了平面二维土体与结构共同作用模型,计算分析了土体参数对结构受力的影响。采用有限元分析技巧,对一座实际波纹钢板拱桥的施工过程进行了模拟,计算分析了施工过程中关键截面的变形和内力变化规律;计算和分析结果表明,波纹板截面特性的积分算法具有很高的精度,通过刚度等效方法建立的土、钢共同作用模型可以考虑土与结构的相互作用;施工过程的模拟结果说明,覆土波纹钢板拱桥施工过程中变形和内力变化较大,施工中应严格分层,对称回填、压实,并应特别注意覆土回填至拱顶附近时的位移和内力变化。

2010年,中交一院等编写了《公路涵洞通道用波纹钢管(板)》(JT/T 791—

2010)。

2011年10月,南京联众建设工程技术有限公司更新了《波纹管涵通用图》。

2011年,骆志红通过对3种不同直径及不同壁厚的波纹管涵对应不同的填土高度进行有限元计算,得出波纹管涵最大等效应力、最大竖向变形随填土高度的变化情况,分析了波纹管涵及周边土体的等效应力分布规律。

2012年8月,衡水益通金属制品有限责任公司更新了《波纹管涵洞设计图》。湖南金迪波纹管业有限公司、湖南省交通规划勘察设计院有限公司、中交一院、中交第二公路勘察设计研究院有限公司(以下简称:中交二院)、中设计集团等单位相继编制了通用图。通用图的编制进一步规范了设计图纸,提高了设计质量。

2013年,冯忠居、乌延玲通过室内模拟试验,对波纹管涵洞的力学性能、管周土压力及涵管变形规律进行了研究,分析了应变与应力、管周土压力及涵管变形的变化规律。

2013年,李晓勇、梁养辉、李祝龙等为研究波纹管涵在低路堤荷载作用下的力学性能,依托泗许高速安徽淮北段一处试验涵,对荷载分别作用于超车道、行车道、应急车道情况下管涵的切向应变进行现场测试。

2013年8月,中交二院编制发布了《波纹管涵洞设计通用图》。

2015年,蔡事廷、符锌砂等研究将钢波纹板结构应用于危桥加固。

2015年,内蒙古自治区颁布了地方标准《公路波纹管(板)桥涵设计与施工规范》(DB15/T 645—2015),给出了波纹管涵洞的构造、设计、计算方法和公式,较全面地列举了钢波纹板的规格。

2015年,大秦铁路股份有限公司田英等人总结了采用拼装钢波纹板加固大秦铁路一宽5.0 m、高3.6 m盖板涵洞的技术经验。该涵洞加固采用在原有盖板涵洞基础上植筋、现浇C30钢筋混凝土基础,并预埋设角钢作为钢波纹板内衬拱结构的拱座基础。钢波纹板内衬拱结构与原有盖板涵之间的空隙采用注浆填筑。钢波纹板结构加固涵洞施工便利,不需要大型机械作业,整个涵洞加固过程不中断原有铁路交通,具有很大的社会意义。

2015年,山西省交通规划勘察设计院桑明泰,总结了山西某高速一处3.5 m钢筋混凝土盖板过水涵洞采用拱形钢波纹板加固的技术方法。该加固工程在原有盖板涵洞内嵌入一道拱形钢波纹板,拱形钢波纹板台身采用钢筋混凝土结构,并且通过植筋与原有盖板涵洞台身连接,达到缩小嵌入台身尺寸的目的,降低对原有盖板涵洞净空间的影响。钢波纹板拱圈与原有盖板涵洞之间空隙采用预留导管注入膨胀混凝土,以保证加固钢波纹板内衬与原有盖板涵连接紧密。

2016年,张阳、彭志辉等提出波形钢板周围换填泡沫水泥轻质土、波纹钢板顶部铺设柔性材料两种优化设计技术,并使用有限元分析软件 ANSYS 分析各方案的可行性及受力特点。

2017年,张阳、宫俊飞、穆程、彭海涛等为了解双孔钢波纹管涵应用于高填方路基时径向土压力及变形特性,结合依托工程,通过现场试验,并采用精细化有限元建模方法对其进行分析。

2017年,穆程、彭海涛通过资料收集、设计计算、调查研究等方面探讨波纹管结构力学性能、设计构造、密封方案、防腐措施等几个关键技术问题的处理方案,为类似工程设计、技术标准和设计规范的制定提供参考和依据。

2019年颁布的《冷弯波纹钢管》(GB/T 34567—2017)产品行业标准,对波纹板(管)的规格及防腐要求进行了规定。

2019年,贺文涛、刘保东等以某四跨简支板桥实际工程的加固改造方案为依托,对加固桥梁进行合理简化,建立了有限元分析模型。经过计算得到桥梁在加固后各关键截面的变形、内力和应力,将加固后桥梁在荷载作用下的反应与现行规范进行对比分析。

2019年,中国建筑业协会发布《装配式钢制波纹管综合管廊工程技术规程》(T/CCIAT 0012—2019)。本规程是根据中国建筑业协会《关于开展第一批团体标准编制工作的通知》(建协函〔2018〕7号文)的要求,由中冶京诚工程技术有限公司会同中冶天工、衡水益通管业等相关参编单位共同编制。在编制过程中本规范编制组经广泛调查研究,认真总结了近年来装配式钢制波纹管综合管廊建设中的经验,参考有关综合管廊及波纹管公桥涵国家地方标准,并在广泛征求意见的基础上完成。本规程共分6章和3个附录,主要技术内容:(1)总则;(2)术语和符号;(3)基本规定;(4)设计;(5)施工与验收;(6)运行与维护。3个附录内容:A.钢制管廊选型表;B.常用波纹板截面特性;C.密封带性能指标。本规程由中国建筑业协会科技应用与团体标准工作室负责管理及解释。

2020年,李百建、朱良生、李勇、符锌砂等为了更好地了解波纹钢加固混凝土管涵的力学性能,采用钢筋混凝土管作为既有管涵,通过试验确定了5个试件的试验承载力,了解了波纹管的作用,分析了偏心加固对加固管承载力的影响,提出了一种估算偏心加固管承载力的方法。

2020年,T/CHTS 标准《方拱型装配式钢结构公路箱涵与通道工程技术规程》、CECS 标准《装配式钢结构地下综合管廊工程技术规程》《装配式钢结构排水箱涵工程技术规程》《装配式钢结构水池工程技术规程》已经完成编写和多轮审查,即将正式发布。

中交一院、中交二院，以及江苏、江西、河北、内蒙古、广东等省部级公路设计院也纷纷编制了地方波纹管（板）桥涵设计通用图，对该新技术的应用和发展提供了有力的技术支持。随着这些钢波纹管（管）行业标准、规范的提出，对钢波纹管这种先进的新型桥涵结构在我国公路工程建设中的大范围推广应用创造了条件，并将产生巨大的社会效益和经济效益。

### 1.7.2 国内主要设计、科研及生产单位

（1）中交一院在国内研究起步较早，2001—2003年负责完成了交通部标准规范专题研究“公路波纹管涵洞设计与施工技术研究”，其成果填补了我国公路单管波纹管涵洞设计与施工领域的空白，总体处于国际先进水平。其中公路波纹管涵洞受力分析处于国际领先水平，获中国交通建设股份有限公司2005年度科学技术进步二等奖。该单位2005—2007年负责完成“公路波纹管涵洞结构计算软件”项目的研究与开发，获陕西省科学技术三等奖。授权专利1项：一种排水用钢质管，实用新型专利，ZL200520105937.1。2006—2009年负责完成“大孔径波纹管涵洞技术研究”获河北省科学技术二等奖。完成的“公路波纹管涵洞关键技术”获中国公路学会科学技术二等奖。

（2）中交二院余顺新、卢傲等主持编著了《波纹钢埋置式结构设计施工手册》，该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。

（3）湖南省交通规划勘察设计院有限公司自2008年开始研究，承担了湖南省交通运输厅3项科研课题，分别是“湖南省波纹管涵洞通道通用图”“大跨径波纹桥涵结构与施工成套技术”“基于波纹板的危桥加固技术研究及应用”。还完成了“金属波纹管明洞设计与应用”自主课题研究。

（4）北京交通大学土木建筑工程学院波纹钢结构研发中心在波纹钢结构研究和应用领域有深厚的基础，主持和参与了国家自然科学基金、交通部西部交通科技项目、内蒙古和山东省交通厅等多项相关科技项目，发表了大量相关文章，并参与了国内第一部和随后多部相关规范的编制。初期联合内蒙古交通设计研究院有限责任公司、山东省交通规划设计院为技术支持单位，衡水益通管业股份有限公司、河北腾是达金属结构有限公司为试验和创新基地，共同组建产、学、研一体化团队，发挥各自优势，开展波纹钢结构相关科研项目的申请、实体工程项目咨询设计、应用新领域的拓展、国内外

学术交流等工作，促进波纹钢结构的进一步研发和应用。刘保东教授完成了自然科学基金项目“埋入式波纹钢板结构土-钢相互作用及设计理论研究”，建造了多座不同断面形式、不同刚度的波纹钢板桥涵模型，探讨了不同断面形式、不同刚度结构的受力特点，如图 1.16 所示。与内蒙古交通设计院合作完成了交通部西部交通科技项目“波纹钢结构在小桥和涵洞中的应用”，依据一座跨径 7.4 m 的波纹钢板圆弧拱小桥，如图 1.17 所示，根据理论研究和模型试验研究成果进行了实桥施工监测和成桥检测，并编写了《波纹钢板小桥涵设计与施工指南》。与内蒙古交通设计院合作完成了内蒙古交通厅科技项目“覆土波纹钢结构技术指标研究”，对高填方波纹钢板管涵进行监测，通过总结多年的科研成果和实际应用经验，制定了内蒙古地方标准《公路波纹钢管（板）桥涵设计与施工规范》。与山东省交通规划设计院合作项目“波纹钢管涵在公路工程中的研究与应用”，首次应用光栅光纤传感器对跨度 8.1 m、矢高 5.6 m 的管拱断面连拱波纹钢板桥，进行施工过程和运营阶段的受力性能监测，如图 1.18 所示。



图 1.16 钢波纹板试验桥及涵洞



图 1.17 7.4 m 圆弧形钢波纹板试验桥



图 1.18 连拱型钢波纹板桥现场试验

(5) 同济大学开展了将钢筋混凝土矩形框架棚洞优化为装配式钢波纹钢复合结构拱形棚洞的研究，并进行了受力性能试验研究，其成果应用于云南怒江美丽公路项目的棚洞工程，共实施三道棚洞以解决泥石流问题，大大节约了工程造价。该校还在云南思澜高速高山寨隧道开展波纹钢明洞工程应用研究。此外，该校丁文其主持了上海市 2020 年度“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目：“既有隧道的高强柔性钢结构快速拼装修复关键技术研究及应用”。

(6) 湖南大学的张阳长期从事钢波纹板结构技术研究，联合湖南省交通规划勘察设计院有限公司开展了厅级课题 2 项，开展现场试验研究，参与通用图编制，在大跨径钢波纹结构领域，开展受力性能研究，支撑新型结构的落地，获得发明专利多项。

(7) 中国建筑第五工程局有限公司的市政、公路设计院自 2019 年初成立以来，开展了钢波纹板结构设计、施工等系列调研工作，开展了《钢波纹管涵洞通道设计施工验收成套技术》的编制，并针对 D1.5 m、D2.0 m、D3.0 m、D4.0 m、D5.0 m、D5.5 m、D6.0 m 直径的钢波纹板涵洞通道编制了设计通用图。该公司还在上饶、长沙综合管廊项目及雄安新区北部郊野公园配套给排水管线工程项目等中推广应用了钢波纹板(管)结构。典型工程案例如图 1.19 所示。

(8) 西安世纪金属结构有限公司主要技术团队于 1995 年涉足钢结构行业，2014 年先后与中国交建、中国中铁、中国铁建，中国建筑、中国电建、中国中冶，以及各大路桥公司在大直径高填土钢管波纹管涵洞项目上广泛合作；与中国交建、中国中铁、中国中冶等各大设计院一起探讨研发各类新科技桥涵技术；同长安大学、西南交大合作完成了多个项目的涵洞及中小桥科研项目；积极参编了中国公路学会标准《钢管波纹管(板)涵洞设计与施工技术指

南》、中国工程建设标准化协会标准《公路波纹钢结构桥涵加固技术规程》等。  
该公司完成的典型工程项目如图 1.20 所示。

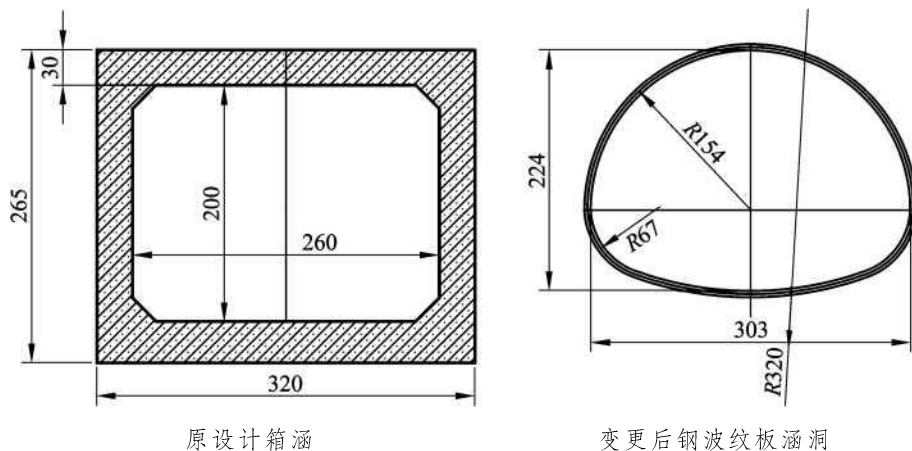


图 1.19 雄安新区北部郊野公园配套给排水管线工程项目涵洞



(a) 管涵



(b) 天府机场项目一



(c) 天府机场项目二



(d) 汶马高速公路鹏鹞山隧道（左）与国道 345 线动物通道（右）

图 1.20 应用案例（1）

(9) 南京联众工程技术有限公司成立于 1999 年，是国家级高新技术企业。公司致力于钢结构产品在交通及市政工程中的研究和应用，主要产品：全装配式钢-混凝土组合结构公路涵洞通道、装配式钢结构地下通道、全装配式钢-混凝土组合结构拱桥、装配式钢结构城市地下综合管廊、钢波纹管公路涵洞、军用地下工程的钢结构防护装置、超大口径钢质输水管道（直径大于 6 m）、装配式钢结构隧道衬砌。该公司生产的产品大部分拥有自主知识产权，已取得国际 PCT 专利 9 项，国家发明专利 18 项，实用新型专利 50 余项，其技术含量及先进程度在国际上领先。生产这些产品所需的专用设备及生产线，全部由该公司自行研制设计及制造。该公司参与了《公路涵洞通过波纹钢管（板）》（JT/T791—2010）的编写，参与“耐候钢在涵洞中使用的研究”“钢波纹板在公路隧道穿越断层的应用”“新型加固涵洞项目的研究”等课题十余项。

参与了江苏、云南、湖北、安徽、广东、江西、山西等省的高速公路、国道省道、市政工程、城市管廊项目建设，典型工程案例如图 1.21 所示。

(10) 衡水益通管业股份有限公司成立于 1998 年，一直致力于波形钢板结构产品的技术改进、开发和应用，集科研、生产和施工于一体，同交通部



公路科学研究院、中冶京诚工程技术有限公司、中交一院、上海市政设计研究院、清华大学、北京交通大学、河北省交通规划设计院、内蒙古交通设计研究院有限责任公司等单位都有着多年的技术协作关系，并参与了多个省部级波形钢板桥涵的研究课题，是部颁行业标准重点参与起草单位。2002 年至今已先后获得钢波纹涵管产品专利 30 余项。2005 年开展异形截面钢波纹涵管、波纹板通道的研究与应用，2006 年参与制订《河北省公路桥涵通用图》的编制工作，2007 年参与交通部西部课题研究并参与制定交通部部颁标准《公路桥涵用波形钢板》(XJT/T 710—2008)。该公司参与或主持完成的“公路大孔径波纹钢管涵技术研究”“公路钢波纹管涵洞成套技术”“波纹管结构在小桥与涵洞上的应用技术研究”等成果先后获得“河北省科学技术科技进步奖”“中国公路学会科学技术二等奖”“内蒙古自治区科学技术进步三等奖”。



图 1.21 应用案例(2)

(11) 衡水奇佳工程材料有限公司成立于 2006 年，研发了钢架加强的钢波纹板拱涵、伸缩式管节连接装置等多项新型产品，积极参编了中国工程建设标准化协会标准《波纹钢结构桥梁设计与施工技术规程》《波纹钢结构涵洞工程质量检验评定标准》。

(12) 河北世纪金属结构有限公司成立于 1985 年，2003 年获得英国 NQA 认证公司颁发的 ISO 9001；2012 年引进国内最先进波纹板生产线，年生产波纹涵管 8 万 m；拥有热浸镀锌生产线两条，年生产 12 万 t；为首批获国家技术监督检验检疫总局颁发的《生产许可证》企业。

(13) 青海省正平股份有限公司长期从事波纹钢产品的工程应用技术研发与推广,在公路与市政等工程领域拥有丰富的工程实践经验,先后获得 2 项专利、1 项新技术应用奖、1 项部级科技创新成果奖和 1 项部级工法。该公司结合近年来实施的青海省省道 102 线平互大公路工程 and 扎隆沟至碾伯镇公路工程等项目的钢波纹板拱桥,为地方标准——《钢波纹板拱桥施工技术规程》(DB63/T 1733—2019)、《钢波纹板拱桥质量检验与评定技术指南》(DB63/T 1734—2019)、《钢波纹板拱桥设计规程》(DB63/T 1735—2019)、《青海省波纹钢综合管廊施工质量验收规范》(DB63/T 1846—2020)的编制提供了大量、翔实的实验数据和应用成果。钢波纹板拱桥地方标准的发布实施,结束了钢波纹板只有国家和行业产品标准,而无应用于桥梁工程设计、施工及质量检验评定标准的现状,将有效解决高寒区混凝土中小桥因寒冷、大温差、冻胀等因素造成的混凝土强度低、裂缝、变形、断裂以及养护成本高等问题,同时也为加速推广波纹钢产品工程应用提供了有力的技术支撑。

### 1.7.3 国内应用现状

#### (1) 新建桥涵工程。

钢波纹板桥涵是以波纹钢管(或板)和回填土作为主要建筑材料,通过机械施工将土与波纹钢结构密切结合在一起,形成土-钢共同作用体系,共同承受自重及外荷载的新型桥涵结构形式。采用该技术的桥梁、涵洞,拼装速度快,结构承载力强,其洞口宽度和倾斜角度可随路线灵活调整。

1998 年以后,国内开始自主生产加工金属波纹管。国内经过十余年的研发、应用,总结了大量的应用资料。目前此种结构圆形截面结构的最大跨径成功应用到了 12 m,拱形结构成功应用到了 22 m,异型截面成功应用到了 10 m,个别管径波纹管的顶部覆土深度成功应用到了 60 m。目前波纹管广泛应用于公路建设中的排水涵洞、人行(车行)通道和中小跨径桥梁,使用效果良好。

#### (2) 已有桥涵的加固维护。

随着我国汽车荷载标准不断提高,特别是中小跨径桥梁的荷载标准提高幅度较大,大批年代久远的桥涵已不能满足现行标准、规范要求,大量中小跨径桥梁已成为四、五类危桥,急需拆除重建或加固处治。拆除重建不但耗资巨大,并且会长时间中断交通,对社会造成严重影响。采用钢波纹板技术进行中小跨径桥梁加固不仅提高、改善了既有桥涵的受力状态,最大限度减少对桥涵上交通的影响,而且还能节省工程费用。

### (3) 隧道工程。

将波纹板技术应用于隧道的支护结构可以简化施工工序，工期也大大缩短，并且应用于隧道受力较大易产生变形的地区，还可以避免出现混凝土支护结构开裂、掉块的现象。此外钢波纹板的波形设计能吸附噪声以及尾气，可以减小城市隧道对周围居民的影响。

如图 1.22 所示为新型中隔墙技术方案及研究过程。隧道平导是平行于隧道主洞，为隧道施工而增设的辅助工作面。而隧道中隔墙是实现隧道空间分割的重要结构，目前其施工方法主要是采用预制方法和现浇方法。现浇方法采用钢筋混凝土，衬砌采用模筑混凝土施工，单侧加固施作二衬时预留钢筋以供中隔墙钢筋绑扎。而现有预制中隔墙的方法较为简单，施工应用较少，整体性较差。因此提出用采用钢波纹板材料修筑平导中隔墙的想法。该项目已成功运用于汶马高速公路鹫鸪山隧道出口路线左侧的一座通风平导（单洞），采用钢筋混凝土方案的原工期为 5 个月，但由于运营管理需要，需提前完成中隔墙修筑。在成都华川公路建设集团有限公司、西南交通大学和西安世纪金属结构有限公司与设计单位共同研究下确定了全拼装式钢波纹板新型结构方案。该方案施工工期仅需两个月，提前 3 个月完工通车，全工程按照瓦斯隧道调整预算，该项设计优化变更如能顺利获得批复，可减小一半工期。此外本项目的研究成果已总结申报发明专利、省部级工法各 1 项，论文 2 篇，是对新型中隔墙技术的重要实践。

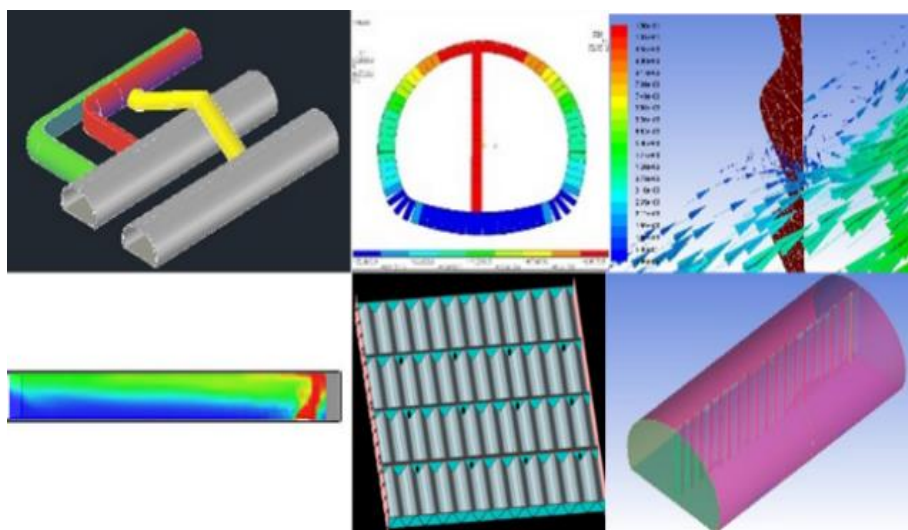


图 1.22 新型中隔墙技术方案及研究过程

#### （4）路基挡防工程。

在公路建设中，无论是新建还是改建项目，都会出现填挖现象。挡土墙是挡防工程使用的主要构造物，其通常分为重力挡土墙和轻型挡土墙。

与重力式挡土墙相比较，轻型挡土墙可大大地减少用地面积，抗震性能好，对地基承载力的要求较低，且能承受一定的不均匀沉降。在经济性上，轻型挡土墙比重力式挡土墙节省成本约 20%~30%，并且墙体越高，节省得就越多，因此轻型挡土墙较传统重力式挡土墙更具有优势。

钢波纹加筋土挡墙是一种新型的轻型挡土墙，采用钢波纹板与土中的筋带、锚定板或钢拉杆连接形成的一种挡土墙结构形式。由于钢板波形的存在，增大了钢波纹板的抗弯惯性矩，使其具有优良的受力特征和较高的承载能力和稳定性，轴向和径向同时分担因荷载引起的应力应变，可以更大程度地分散荷载的应力集中，更好地发挥钢结构的优势，因此较一般轻型挡土墙更具有优势，也具有更广阔的应用前景。

如图 1.23 所示为青海李坎公路边坡挡土墙项目路基挡防工程。由于地处高寒地区，使用传统挡土墙将严重拖延工程项目的进度和工期，因此该项目使用钢波纹板挡土墙。此外为保证该工程的安全、耐久、美观和快速施工，低挡墙背后具备压实条件的填料采用透水性材料填筑，征地困难、其他地形陡峭或狭窄不利于压实地段采用气泡混合沫轻质土作为路基挡墙台背填料。

#### （5）大跨径钢波纹板隧道遮光棚。

遮光棚按照结构材料主要分为钢结构遮光棚、钢筋混凝土遮光棚、钢-钢筋混凝土组合结构遮光棚等。钢结构遮光棚建设成本较高，耐火性差，且材料本身易锈蚀，需要在运营期间定期进行防锈维护工作，运维成本费用较高。钢筋混凝土遮光棚的建设周期长，结构自重较大，结构抗拉强度低，易开裂，维修补强工作难度大。钢-钢筋混凝土组合结构遮光棚结合两种材料的优缺点互补，现在应用较为广泛。

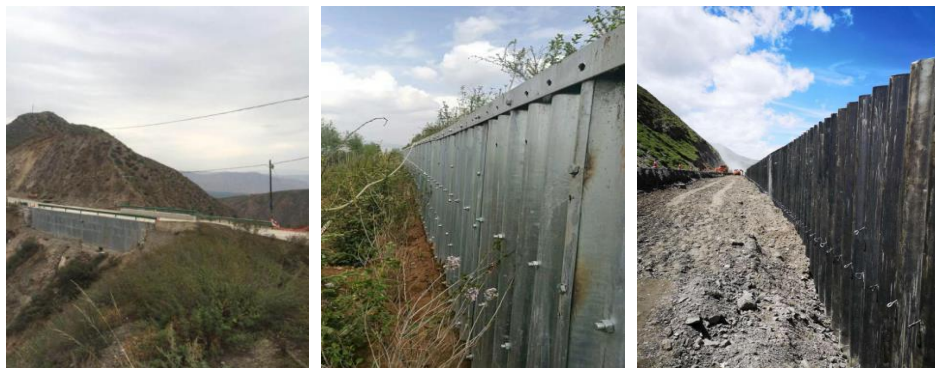




图 1.23 钢波纹板路基挡防工程

鉴于钢波纹板这种新型材料的发展，并且其可塑性强，可选的波形多，强度大，适应性强，由此形成的大跨径钢波纹板隧道遮光棚不仅和钢-钢筋混凝土组合结构遮光棚的优点差不多，并且还可以根据结构需要设计成半开放式结构，与周围的景观融为一体，在满足隧道通风及防灾的同时，还能提高隧道的景观效果，起到节能、安全、景观的三重作用。大跨径钢波纹板隧道渐进式透光遮光棚效果与模型如图 1.24 所示。



图 1.24 钢波纹板隧道渐进式透光遮光棚

#### (6) 应急救援。

在中国西部山区，山势陡峭，地质松散，路网单一。一旦发生地震、山洪等自然灾害，常会伴随山体滑坡，阻碍了救援通道。因此可以在靠近山体侧清开滑坡体，同时快速拼装波纹板结构，并采用滑坡体碎料或者碎石进行回填，外侧车道布置在坡脚以外。该方案施工速度快，能满足救援对时间的需求，最重要的一点是对滑坡体坡脚具有一定反压作用，大大提高了山体滑坡体的稳定性和安全性。该方案可作为我国抗震、抗洪应急救援特种结构。如图 1.25 所示。



图 1.25 国道 213 线超大型坍方堆积体采用钢波纹板临时通道

当长隧道内突发如火灾、地震等紧急状况，司乘人员还在隧道中间段距离进出口很远时，他们的生命将受到严重威胁，逃离隧道又不切实际，此时则需要转移至隧道安全屋中保障自身安全并等待救援。在一般长隧道中，安全屋的设置个数较多，设置传统安全小屋施工时间长，造价较高，因此可以使用如图 1.26 所示钢波纹板制作的隧道安全屋。



图 1.26 钢波纹板隧道避难所（战时地下救护掩体防空洞）、隧道安全屋

#### （7）房建工程。

钢波纹板独具典型的波浪形流畅线条外观，搭配上水平、垂直或不同角度的安装方式用于民用建筑，能在大面积区域内给人营造出生动震撼的视觉

感受。并且随着钢波纹板建筑的结构优化和工期优化，现在仅需 30 万就可建一栋豪华房屋，工期也缩短到只有 1 个月。如图 1.27 所示为民用的横纹和竖纹的钢波纹板房屋。



图 1.27 民用钢波纹板房屋案例

由于钢波纹管柔性、高强度的特点，能够制成各种造型的房屋。这些房屋整体结构在强度有保证的同时，也兼具美观新颖的特性，因此也常被用于商用建筑。如图 1.28 所示某家咖啡厅，其由弧形钢波纹板穹顶与砖砌体端墙构成，造型别致，广受年轻人的喜爱。



图 1.28 钢波纹板咖啡厅

#### (8) 钢波纹板地下综合管廊。

针对现有地下综合管廊，由于长期处于阴暗潮湿，二氧化碳浓度较高的封闭地下环境，钢筋混凝土不仅受到这些外部环境影响而发生化学腐蚀，混凝土自身碳化也会使内部钢筋锈蚀。根据《城市综合管廊工程技术规范》的强制性条文规定：管廊结构的使用年限应为 100 年，为此钢筋混凝土地下管廊需要将混凝土保护层厚度提高到普通混凝土保护层厚度的 1.4 倍，但是较厚的混凝土保护层厚度容易导致混凝土开裂，因此需要对钢筋混凝土进行耐久性质量控制。而经过防锈处理的钢波纹板能够满足使用年限的要求，并且对耐久性质量控制的条件相对容易。钢波纹板地下综合管廊如图 1.29 所示。



图 1.29 钢波纹板地下综合管廊案例

在地下管廊的建设中，防、排水是十分重要的环节，并且地下管廊的防水等级为二级，即不允许漏水，结构表面可有少量湿渍。现有的管廊主体结构采用防水混凝土加防水涂料及防水卷材等，而钢波纹板最初就是使用于桥涵工程中，不会发生渗水现象，并且波纹结构还能起到引导水流的作用，保证地下管廊的耐久性。以距今已有 74 年历史、建于德国耶拿市最早使用钢波纹管的管廊为例，管廊使用状态良好，内部无明显锈蚀、腐蚀痕迹，各项管道运作正常。



在产品的经济性上，以  $4\text{ m}\times 3.5\text{ m}$  钢筋混凝土管廊为例，其土建造价约为每千米 8 000 万元，而采用  $\phi 4.5\text{ m}$  圆形钢波纹板替代，使用功能完全可以满足工程需求，其土建造价为每千米 6 000 ~ 7 000 万元，造价节约 15% ~ 25%，比传统混凝土结构具有明显优势。

利用钢波纹板技术形成的综合管廊能有效改善“马路拉链”现象，并且将这一概念融入城市建设中，与现在智慧城市管网相结合，为城市地下建设提供一条新思路，并且有利于绿色、现代、智慧、可持续发展的宜居城市建设。

#### （9）钢波纹板高速公路服务区。

近年来，我国高速公路飞速发展，与之而来的是沿线服务设施以及房建工程的发展。装配式建筑以其施工速度快、工程造价低等优势受政府支持，采用钢波纹板修建房屋也是装配式建筑的一种。将钢波纹板技术应用于高速公路服务区建筑设计中，不仅可以在缓解高速公路服务区建筑资源稀缺、难获取的问题，还能够体现绿色、节能、环保的高速公路设计思想，如图 1.30 所示。



图 1.30 钢波纹板高速公路服务区案例

#### （10）雨水蓄水池。

蓄水池亦可采用标准尺寸弧形波纹板片拼装，同时辅以镀锌防腐工艺，内侧采用塑料内膜热敷，满足防水要求。该类型蓄水池波纹板片在现场采用螺栓连接成整体，施工速度快，同时利用地下土地资源设置蓄水池，相比地上设置的蓄水池，土地成本更低，蓄水池上方还可以修建停车场、广场等场所，综合利用土地资源。如图 1.31、图 1.32 所示。

随着十九大提出建设安全、节能、环保、高效的现代化交通强国的战略，建设各方对节能环保意识的不断增强，同时还要克服工程造价高、施工工期长等问题，钢波纹板技术在节能、安全、快捷等领域的优势日渐明显。它不仅应用于上述领域，而且还可应用于其他领域，钢波纹板技术的应用前景十分广阔。



图 1.31 地下蓄水工程



图 1.32 直径 30 m 钢波纹板蓄水池案例