

X INXING ZHIDANG JIEGOU
SHEJI YU GONGCHENG SHILI



新型支挡结构 设计与工程实例

• 李海光 等编著



人民交通出版社

China Communications Press

新型支挡结构 设计与工程实例

X INXING ZHIDANG JIEGOU
SHEJI YU GONGCHENG SHILI



人民交通出版社

China Communications Press

内 容 提 要

本书由铁道第二勘察设计院和西南交通大学的几位专家合作完成,他们多年来在支挡结构领域进行了卓有成效的研究工作,并承担了大量设计任务,拥有丰富的研究成果和工程实践经验,本书即在此基础上完成。

本书对近年来大量应用的新型支挡结构进行了全面介绍,尽可能地反映了工程设计领域的最新成果和有关设计规范中的新内容,包括卸荷板挡土墙、悬臂式挡土墙和扶壁式挡土墙、锚定板挡土墙、锚杆挡土墙、加筋土挡土墙、土钉墙、抗滑桩、由抗滑桩演变而来的桩板式挡土墙和桩基托梁挡土墙、预应力锚索加固技术以及植被防护技术。每种结构都介绍了结构特点和使用条件、荷载和结构内力计算、结构强度和稳定性设计、构造要求、设计注意事项及工程实例,本书既介绍了设计理论和设计方法,又有大量设计实例以供参考,内容全面,实用性很强。

本书可供铁路、公路、建筑工程中从事支挡结构设计的技术人员使用,亦可供有关师生和科研人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

新型支挡结构设计/李海光等编著. —北京:人民交通出版社, 2004.
ISBN 7-114-04934-X

I. 新… II. 李… III. 铁路路基-抗滑支挡-结构设计 IV. U213.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 001279 号

新型支挡结构设计 with 工程实例

李海光 等编著

正文设计: 彭小秋 责任校对: 尹 静 责任印制: 张 恺

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010 64216602)

各地新华书店经销

北京牛山世兴印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 26.25 字数: 644 千

2004 年 2 月 第 1 版

2004 年 2 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 0001~4000 册 定价: 45.00 元

ISBN 7-114-04934-X

支挡结构是岩土工程的主要组成部分之一,是山区基本建设中为保证山体和工程建筑物及运营安全常采用的一种工程措施。山区地质地貌复杂多变,不同工程建筑条件下,设计最经济合理的支挡结构形式较平原地区更为复杂。不同的结构形式和复杂的地质地貌条件,形成多样的边界条件,因而相应的结构物后土压力计算及其计算参数的确定也更为困难。

半个世纪以来,铁道第二勘察设计院重点承担了西南山区铁路的勘测设计任务,对此有过大量的工程实践,并对山区支挡结构形式有所发展和创新,同时与西南交通大学等单位一起,结合工程进行了大量的室内外实验和原型观测。作者结合国内支挡结构设计有关规范的内容,将他们积累的宝贵经验和科研成果编著成书,本书具有以下几个特点:

1. 结合常采用的新型支挡结构,介绍了相应的土压力(或滑坡推力)计算、参数确定、结构分析和施工工艺;

2. 介绍了一些工程实例,某些工程实例中还介绍了几种方案的比较选用;

3. 介绍了结合工程所开展的科研试验,如岩土边坡开挖工序对山体松弛区的影响等。

因而,本书的内容有很大的实用性,在当前西部大开发的时期,本书的出版对于本领域的科研、教学和工程技术人员将是一本很有价值的参考文献。但在支挡结构的设计和施工中,仍有许多疑难问题,如活荷载的影响、滑坡推力的分析、多排抗滑桩上受力的分布、锚杆(索)后填土(石)的碾压工艺等等,尚有待更多的工程实践和科学研究,以对其加以改进和提高。

中国工程院院士

周鏡

二〇〇三年十月

QH 577/03

近20年来,我国岩土工程中的支挡技术发展很快,支挡结构形式已从单纯依靠墙身自重来平衡边坡土压力和滑坡下滑力的重力式挡土墙,发展为采用支撑、土筋复合结构以及锚固技术等多种新型、轻型支挡新技术,例如,悬臂式、扶壁式、锚杆式、加筋土式、锚定板式等新类型的挡土墙以及抗滑桩、桩板式墙、土钉墙、预应力锚索等新型的支挡结构。这些新型支挡结构具有结构轻、施工快捷、便于预制和机械化施工、节省材料和劳动力、造价低等优点,很快在各类岩土工程中得到广泛应用。

在多年的工作中,我们经历了许多铁路、公路路基工程的设计以及滑坡等地质灾害整治加固工程实践,亲身参与了支挡结构多年来的发展、推广和应用的过程,深知新型支挡结构的应用增加了岩土工程技术人员克服陡峻地形和不良地质艰难工程的技术手段,也促进了支挡工程技术水平的不断发展和提高。为了更好地把我们在20世纪中已经取得的工程经验和科研成果继续推广运用,同时也为了更好地与同行交流设计心得体会,共同提高支挡结构理论水平,我们把近几年来在工程实践中的经验和结合工程开展的试验成果汇编成书,以供有关专业技术人员和大专院校的教学人员参考。

本书着重介绍了卸荷板挡土墙、悬臂式挡土墙和扶壁式挡土墙、锚定板挡土墙、锚杆挡土墙、加筋土挡土墙、土钉墙、抗滑桩、桩板式挡土墙、桩基托梁挡土墙、预应力锚索、锚索桩等支挡结构及与支挡结构有关的植被护坡技术。每种结构介绍了它的结构特点及使用条件、荷载和结构内力计算、结构强度和稳定性设计、构造要求、设计注意事项以及工程实例,既有设计理论方面的介绍,又有工程实例以供参考。本书力求文字简练通顺,除介绍我们常用的设计计算方法和经验外,还尽可能地反映了近年来工程设计领域中的最新成果和有关设计规范中的新内容,因此本书内容有很大的实用性。

本书由李海光主编,并对全书进行统校和定稿。本书各章的编写者为:第一章,李海光;第二、五、七、十二章,周德培;第三、八、十一章,李安洪;第四章,闵卫鲸;第六、九、十章,罗一农。

本书编写中参阅了大量的参考资料,在此向这些资料的作者表示感谢。本书内容如有不全或错误之处,恳切希望读者们提出批评和建议。(四川省成都市通锦路3号铁道第二勘察设计院地质路基设计处,610031或西南交通大学土木工程学院周德培教授,610031)

目 录

MULU

第一章 绪论	1
第一节 支挡结构的发展和展望	1
一、重力式挡土墙	1
二、新型支挡结构	2
三、支挡结构将不断发展和不断创新	5
四、分层稳定施工法和信息施工法	8
五、岩土工程生态环境保护问题	8
第二节 支挡结构类型及使用范围	9
一、支挡结构的分类	9
二、常用支挡结构类型介绍	9
第三节 支挡结构设置原则	13
一、设置原则	13
二、支挡结构设置位置的选择	13
第四节 支挡结构设计要求及注意事项	14
一、支挡结构设计要求	14
二、设计方案的比选	15
三、设计步骤	15
四、设计注意事项	16
第五节 本书内容介绍	16
第二章 土压力与滑坡推力	18
第一节 概述	18
一、支挡结构上的土压力和滑坡推力	18
二、土压力类型和性质	18
三、开挖岩体诱发的土压力和滑坡推力	20
第二节 静止土压力计算	20
第三节 库仑土压力理论	21

一、主动土压力计算	21
二、被动土压力计算	23
三、库仑理论适用条件	23
四、第二破裂面计算法	24
第四节 朗金土压力理论	24
一、主动土压力计算公式	25
二、被动土压力计算	25
三、朗金理论的适用范围	26
第五节 特定条件下的土压力计算	26
一、折线形墙背土压力计算	26
二、多层填土时的土压力计算	28
三、有限范围填土的土压力计算	29
四、地震时土压力计算	29
五、墙后填土有地下水时土压力计算	30
六、填土表面不规则时土压力计算	32
第六节 地面超载作用下的土压力计算	33
一、填土表面满布均布荷载	33
二、距离墙顶有一段距离的均布荷载	34
三、地面有局部均布荷载	34
四、集中荷载和纵向条形荷载引起的土压力	35
五、车辆引起的土压力计算	36
六、铁路荷载下土压力计算	37
第七节 岩土边坡开挖变形分析	38
一、综述	38
二、边坡开挖的影响范围	39
三、开挖松弛区的试验研究	40
第八节 几种简单滑移面的确定方法	43
一、平面型滑面的确定方法	43
二、曲面型滑面的确定方法	43
第九节 滑坡推力计算	46
一、简介	46
二、滑坡推力计算的基本原则	48
三、传递系数法计算滑坡推力	48
四、分块极限平衡法计算滑坡推力	50
第三章 卸荷板式挡土墙	54
第一节 概述	54
第二节 卸荷板式挡土墙的结构特征	54
一、目前常用的几种结构类型	54
二、受力特点	55
第三节 短卸荷板式挡土墙的设计	56

一、结构特点	56
二、稳定性计算	56
三、结构设计	58
第四节 拉杆卸荷板柱板式挡土墙的设计	60
一、结构特点	60
二、受力计算	60
三、结构设计及构造要求	62
第五节 卸荷板—托盘式挡土墙的设计	63
一、结构特点	63
二、受力计算	63
三、结构设计及构造要求	64
第六节 工程实例	64
工程实例一 候月铁路短卸荷板挡土墙	64
工程实例二 拉杆卸荷板柱板式挡土墙	68
工程实例三 南昆铁路卸荷板—托盘式挡土墙	68
第四章 悬臂式与扶壁式挡土墙设计	72
第一节 概述	72
第二节 一般规定	72
第三节 悬臂式挡土墙构造	73
一、立臂	73
二、墙趾板和墙踵板	73
三、凸榫	74
第四节 悬臂式挡土墙设计	74
一、墙身截面尺寸的拟定	74
二、土压力计算	77
三、墙身内力计算	78
四、凸榫设计	79
五、墙身钢筋混凝土配筋设计	80
六、算例	82
第五节 悬臂式挡土墙工程实例	86
工程实例一 成都市三环路铁路立交工程	86
工程实例二 兰新铁路大风地区 L 型挡风墙	87
第六节 扶壁式挡土墙构造	88
第七节 扶壁式挡土墙设计	88
一、土压力计算	88
二、墙踵板与墙趾板长度的确定	88
三、墙身内力计算	89
四、墙身钢筋混凝土配筋设计	93
五、工程实例	95
第五章 锚定板挡土墙	96

第一节 概述	96
一、锚定板结构与挡土原理	96
二、锚定板挡土墙类型	97
三、设计原理	97
第二节 肋柱式锚定板挡土墙构造	97
第三节 肋柱式锚定板挡土墙设计	99
一、墙背土压力计算	99
二、锚定板容许抗拔力	100
三、稳定性分析	102
四、构件设计	110
第四节 工程实例	117
一、已建几项工程简介	117
二、设计实例	118
第六章 锚杆挡土墙	124
第一节 概述	124
一、结构的发展和适用条件	124
二、锚杆挡土墙的类型和特点	124
三、理论现状和存在的问题	127
第二节 锚杆挡土墙设计荷载及内力计算	128
一、锚杆挡土墙的布置原则	128
二、设计荷载及分布	129
三、肋柱的支点反力和内力计算	134
四、锚杆和挡土板的内力计算	140
五、格构式锚杆墙的内力计算	140
第三节 结构设计	141
一、锚杆挡土墙设计流程图(图 6-23)	141
二、肋柱和挡土板的结构设计	142
三、锚杆的结构设计	150
第四节 构造特征	156
一、构造要求	156
二、材料要求	157
第五节 设计、施工注意事项	158
一、锚杆设计中有关注意事项	158
二、施工注意事项	159
第六节 工程实例	161
工程实例一 重庆轻轨佛图关车站锚杆挡土墙工程	161
工程实例二 内昆铁路某锚杆挡土墙工程	164
第七章 加筋土挡土墙	169
第一节 概述	169
一、结构与挡土原理	169

二、加筋土加固机理	169
第二节 加筋土挡土墙构造	171
一、墙面板	171
二、拉筋	172
三、拉筋与面板的连接	173
四、填料	173
五、墙面板下基础	174
六、沉降缝与伸缩缝	174
七、帽石与栏杆	175
第三节 加筋土挡土墙设计	175
一、加筋土挡土墙设计理论简介	175
二、土压力计算	176
三、墙面板设计	181
四、拉筋设计	182
五、填料的选择	187
六、加筋土挡土墙稳定性验算	189
第四节 工程实例	191
工程实例一 贵州铝厂甘冲专用线加筋土挡土墙	191
工程实例二 南昆铁路田林站加筋土挡土墙设计	196
第八章 土钉墙	205
第一节 概述	205
一、土钉墙的概念	205
二、土钉墙的发展状况	205
三、土钉墙的类型、特点及适用性	206
第二节 构造特征	207
一、土钉墙的结构原理	207
二、土钉墙的构造特征	208
第三节 土钉墙设计与计算	209
一、土钉墙稳定计算分析方法	209
二、土钉墙设计	211
第四节 现场监测与信息施工	216
一、现场监测内容	216
二、信息施工与动态设计	217
第五节 工程实例	218
工程实例一 山西柳湾煤矿边坡土钉墙工程	218
工程实例二 南昆铁路破碎软岩路堑高边坡土钉墙试验工程	219
工程实例三 武汉科技会展中心风化岩边坡土钉墙工程	225
第九章 抗滑桩	227
第一节 概述	227
一、结构的发展和适用条件	227

二、抗滑桩的类型	227
三、抗滑桩与其他抗滑措施的特点比较(表 9-1)	229
四、理论现状和简介	229
第二节 设置原则和设计荷载	230
一、抗滑桩的设置原则和桩上的基本力系	230
二、作用于滑体上的力系分析及推力计算	231
三、桩前反力的计算和桩身受力的的大小	236
四、抗滑桩上设计荷载及其分布	238
五、埋式双排抗滑桩滑坡推力	238
第三节 滑动面以下地基的抗力	239
一、基本假定	239
二、滑面以下桩的正面计算宽度	240
三、地基弹性抗力系数	240
四、桩底的约束条件	246
五、埋式双排抗滑桩基床反力	246
第四节 桩身内力和变位计算	246
一、滑动面以上桩身内力和变位计算	247
二、滑动面以下桩身内力和变位按弹性地基梁计算	249
三、地基强度校核和桩身变位控制	258
第五节 结构的承载力设计	261
一、荷载效应组合及荷载分项系数的确定	261
二、正截面设计	262
三、斜截面设计	264
四、桩的设计步骤及注意事项	265
第六节 构造特征及施工注意事项	267
一、构造要求和结构构件的基本规定	267
二、材料要求	268
三、施工注意事项	268
第七节 工程实例	269
一、概况	269
二、主要工程措施	271
三、施工注意事项	272
四、主要工程数量	272
第十章 桩板式挡土墙及桩基托梁挡土墙	273
第一节 概述	273
一、结构的发展和适用条件	273
二、桩板墙和桩基托梁挡土墙的类型	274
三、桩板墙和桩基托梁挡土墙的特点	278
第二节 桩板式挡土墙设计	278
一、布置原则	278

二、设计荷载及其分布	278
三、内力和变位计算	283
四、结构的承载力设计和正常使用极限状态的验算	284
第三节 桩基托梁挡土墙设计	294
一、布置原则	294
二、桩基托梁挡土墙的理论现状和存在的问题	295
三、设计荷载的分布及内力和变位计算	296
四、结构设计	302
第四节 构造特征	304
一、构造要求和结构构件的基本规定	304
二、材料要求	304
第五节 有关注意事项	305
一、设计的步骤及注意事项	305
二、施工注意事项	306
第六节 工程实例	306
工程实例一 马嘎车站桩板墙工程	306
工程实例二 白沙沱车站桩基托梁挡土墙	310
工程实例三 内昆铁路小儿坪车站桩板式挡土墙	315
第十一章 预应力锚索	318
第一节 概述	318
一、预应力锚索发展概况	318
二、预应力锚索特点	318
三、预应力锚索的应用	319
第二节 构造特征	321
一、锚索类型	321
二、锚索构造	322
三、材料及防腐要求	323
第三节 锚固设计与计算	327
一、锚固设计的主要内容	327
二、设计锚固力的计算	328
三、锚固体设计计算	330
四、锚索的布置	332
五、锚索的预应力与超张拉	333
六、算例	333
第四节 预应力锚索板、梁设计	334
一、钢筋混凝土垫蹬	335
二、地梁、格子梁	335
第五节 预应力锚索桩设计	336
一、计算假定条件	336
二、锚索受力计算	336

三、桩身内力计算	339
四、算例	339
第六节 试验与监测设计	340
一、试验	340
二、原位监测设计	342
第七节 工程实例	342
工程实例一 马岭山滑坡	342
工程实例二 南昆铁路平中 2 号隧道出口滑坡	344
工程实例三 南昆铁路八渡车站滑坡	345
工程实例四 内昆铁路李子沟特大桥 11 号墩岸坡加固工程	347
工程实例五 南昆铁路石头寨预应力锚拉式桩板墙	348
第十二章 支挡结构与植被防护	354
第一节 概述	354
一、国内外植被防护技术	354
二、植被护坡的优点和主要功能	357
第二节 支挡结构与植被防护的结合模式	359
第三节 植被防护的设计原则	361
第四节 缓边坡及墙面的几种植被护坡技术	369
一、挂三维网喷播植草绿化	370
二、挖沟植草绿化技术	370
三、土工(网)格栅植草绿化技术	372
四、土工格室植草绿化	372
五、垂直绿化法	375
六、工程实例	375
第五节 高陡边坡的植被护坡方法	377
一、植被护坡一般原则	377
二、钢筋混凝土框架内填土植被护坡	378
三、预应力锚索框架地梁植被护坡	379
四、预应力锚索地梁植被护坡	382
五、工程实例	384
第六节 厚层基材喷射植被护坡技术	386
一、护坡原理	386
二、基材混合物组成、作用及基本性质	388
三、厚层基材喷射植被护坡工程设计	389
参考文献	397

绪论

第一节 支挡结构的发展和展望

支挡结构包括挡土墙、抗滑桩、预应力锚索等支撑和锚固结构,是用来支撑、加固填土或山坡土体,防止其坍滑以保持稳定的一种建筑物。在铁路、公路路基工程中,支挡结构被广泛应用于稳定路堤、路堑、隧道洞口以及桥梁两端的路基边坡等,主要用于承受土体侧向土压力。在水利、矿场、房屋建筑等工程中,支挡结构主要用于加固山坡、基坑边坡和河流岸壁。当以上工程或其他岩土工程遇到滑坡、崩塌、岩堆体、落石、泥石流等不良地质灾害时,支挡结构主要用于加固或拦挡不良地质体。支挡结构是岩土工程中的一个重要组成部分,随着我国国民经济水平的提高与基本建设的不断发展,以及支挡结构技术水平的提高和减少环境破坏、节约用地观念的加强等,支挡结构在岩土工程中的使用越来越广泛,特别是在铁路、公路路基及建筑基础工程中所占的比重也越来越大。

一、重力式挡土墙

由于我国的一些地区石料来源丰富,就地取材方便,再加上施工方法简单,因此,在过去很长一段时间内,石砌的重力式挡土墙(如图 1-1 所示)是我国岩土工程中广泛采用的主要支挡结构。这种挡土墙形式简单,设计一般采用库仑土压力理论。当墙体向外变形墙后土体达到主动土压力状态时,假定土中主动土压滑动面为平面并按滑动土楔的极限平衡条件来求算主动土压力。在侧向土压力作用下,重力式挡土墙的稳定性主要靠墙身的自重来维持,墙身一般采用浆砌片石来砌筑,有时也用混凝土。20 世纪 50 年代为适应西南山区地形陡峻的特点,出现了我国独创的衡重式挡土墙(如图 1-1 所示)。衡重式挡土墙最初在宝(鸡)成(都)铁路广元至略阳段使用。1959 年,铁道部第二勘测设计院(现改名为“铁道第二勘察设计院”)在西安召开的全国坍方滑坡会议上介绍了这种挡墙新形式,得到了大会

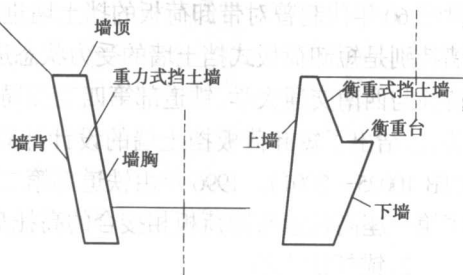


图 1-1 重力式挡土墙和衡重式挡土墙

的赞许,以后在铁路路基工程中逐步推广,又由铁道部科学研究院、专业设计院、铁二院等单位联合开展了科研攻关,完善了衡重式挡墙按第二破裂面计算的理论,编制了有关标准图,加快了在铁路系统的推广。衡重式挡土墙是我国山区铁路应用较广泛的一种挡墙形式,并已在公路等其他行业中得到推广运用。

二、新型支挡结构

长期以来重力式挡土墙在支挡工程中一直占有主导地位,但由于其截面大、圬工数量多、施工进度慢,在地形困难、石料缺乏地区应用不便,其使用上的缺点也是明显的。因此,研究、引进和推广新型、轻型支挡结构,一直是岩土工程技术人员在工程实践中的一个主要内容。20世纪五六十年代,水利、铁道、公路、建筑等部门就开始引进推广锚杆挡土墙、桩基挡土墙等钢筋混凝土挡土结构,取得了一定的进展,成(都)昆(明)铁路大力推广运用新结构就是一典型实例。成昆铁路修建时,铁道部集中了全路科研精英以及部分其他系统的专家,组成50多个新技术战斗组,开展线路、桥梁、隧道、路基等各专业的新技术攻关,其科研成果《在复杂地质、艰险山区修建成昆铁路新技术》获得了国家科技进步特等奖。支挡工程方面,成昆线大力推广了锚杆挡土墙、桩基挡土墙、托盘式路基墙、挖孔抗滑桩等,为支挡工程的新型化跨出了一大步。但由于当时我国总体经济技术水平还比较落后,新型支挡结构的进展也较缓慢。近20多年来,随着我国国民经济的不断发展,机械、材料工业水平及岩土加固技术水平的不断提高,我国岩土工程中支挡技术水平也获得了迅速发展,支挡结构形式也从过去单纯靠重力维持平衡的挡土墙,发展为采用支撑、土筋复合结构以及锚固技术等多种新型、轻型支挡新技术。例如,悬臂式、扶壁式、锚杆式、加筋土式、锚定板式等新类型的挡土墙以及抗滑桩、桩板式墙、土钉墙、锚索桩等新型的支挡结构迅速得到推广运用。这些新型支挡结构具有结构轻、施工快捷、便于预制和机械化施工、节省材料和劳动力、造价低等优点,很快在各类岩土工程中得到广泛应用。现以几种挡墙作为例子,概略介绍新型支挡结构在我国发展的情况(以下介绍的几种新型支挡结构图型参见本章第二节“二、常用支挡结构类型介绍”)。

1. 卸荷板式挡土墙

衡重式挡土墙较以往的重力式挡土墙可节省圬工20%~30%,但当挡墙较高时,墙身截面还是很大,因此,又出现了一种改进型的结构形式——卸荷板式挡土墙。在地基承载力较高的情况下,卸荷板式挡土墙由于卸荷板的作用,使卸荷板上的填料作为墙体重量,而卸荷板又减少了衡重式挡墙下墙的土压力,增加全墙的抗倾覆稳定性,可节省墙体圬工,从而节省工程投资。前苏联、日本等国家在港工建筑物中对有卸荷板或卸荷平台的挡土结构研究较多,国内在港工建筑工程方面的应用也较早,主要用在重力式码头、坞墙及岸壁结构。交通部设计院、天津大学等单位对具有卸荷板或卸荷平台的港工结构的受力状态和计算方法进行过一些研究。铁路部门从20世纪60年代起曾对带卸荷板的挡土墙进行过一系列的研究,20世纪80年代末又对卸荷板挡土墙特别是短卸荷板式挡土墙的受力状态进行了系统的分析。1990年由铁道部第一勘测设计院主持并与西南交通大学、铁道部第四工程局合作,在侯(马)月(山)铁路上进行了结合工程的科学试验,总结出了短卸荷板挡土墙的设计计算方法,有关内容已纳入《铁路路基支挡结构设计规范》(TB 10025—2001)。1996年由铁道部第二勘测设计院设计、第二工程局施工,在南昆铁路建成我国第一座高托盘与卸荷板相接合的高托盘卸荷板式铁路路肩挡土墙。

2. 锚杆挡土墙

20世纪四、五十年代,美国、法国、原德意志联邦共和国等国家就开始利用锚杆加固水电

站边坡、隧道及洞口边坡等。例如,1945年,法国修建某大型混凝土建筑物时,发现附近的悬崖出现移动,为了保证其稳定,采用锚杆加固边坡。20世纪50年代中期,在隧道衬砌中,开始采用小型永久性灌浆锚杆,随后,锚杆挡土墙和锚杆护壁在西方国家得到广泛运用。我国20世纪50年代开始引进锚杆技术,最初在煤炭系统中使用,随后又在水利、铁道、建筑、国防工程中逐渐推广。1966年铁路部门在成昆铁路上首次将锚杆挡土墙用来加固边坡,成昆铁路共修建小锚杆(锚孔直径为40~50mm)挡土墙14处、大锚杆(锚孔直径为100~150mm)挡土墙3处,总长度为1029m。锚杆类型为灌浆楔缝式、灌浆钢筋束式等,最大墙高为16m。继而在川黔、湘黔、太焦、京九、南昆铁路等线上推广运用锚杆挡土墙,例如,衡(阳)广(州)复线旧横石车站的整体肋板式锚杆挡土墙(长119m,高10m)等,使用效果都很好。1990年铁道部将锚杆挡土墙纳入《铁路路基支挡结构设计规则》中,并编制了相应的标准图供设计中运用,加速了这种结构在铁路中的推广使用。建筑、冶金等行业70年代末和80年代初在高层建筑的深基坑支护中大量采用了锚杆加固技术。由于锚杆在土质边坡中的加固作用比较复杂,《土层锚杆设计与施工规范》(中国工程建设标准化协会标准)对永久性锚杆的使用作了一些限制,例如,永久性锚杆设计时必须先进行基本试验,永久性锚杆的锚固段不应设置在未经处理的有机质土、液限 $w_L > 50\%$ 的土层、相对密度 $D_r < 0.3$ 的土层等。铁路部门在2001年《铁路路基支挡结构设计规范》中规定锚杆挡土墙仅适用于一般地区岩质路堑地段,目前锚杆挡土墙在土质边坡的支挡工程中常用于临时加固工程。

3. 加筋土挡土墙

加筋土工程起源于法国,亨利·维特儿于1963年提出加筋土结构新概念,1965年在法国建起了世界上第一座加筋土挡墙。尔后,加筋土挡墙在世界各国迅速发展。我国从70年代初就开始了加筋土挡土墙的研究工作。1979年云南省煤矿设计院在云南田坝矿区建成了我国第一座加筋土挡土墙储煤仓,该挡墙长80m,高2.3~8.3m,采用钢筋混凝土墙面板,素混凝土块穿钢筋作拉筋。该挡墙的建造成功,推动了加筋土挡墙在我国的推广运用。20世纪80年代,先后在公路、水运、铁路、水利、市政、煤矿、林业等部门运用这项技术,加筋土工程的设计计算理论和施工技术也日臻成熟。1990年铁道部将加筋土挡土墙纳入《铁路路基支挡结构物设计规则》中,交通部也于1991年正式颁发了公路加筋土工程设计规范和施工技术规范。近年来,加筋土技术不断提高,据不完全统计,全国已建成加筋土挡土墙上千余座。许多部门都在相应的设计规范和施工技术规范中列入了有关加筋土技术的内容或条款。结构中已广泛采用钢筋混凝土、复合土工带、土工格栅等材料作为拉筋,墙面板除采用钢筋混凝土面板外,也出现了采用土工合成材料的无面板包裹式加筋土挡土墙。

4. 锚定板挡土墙

锚定板在港口码头护岸工程中用来锚定岸壁钢板桩或混凝土板桩的顶部,已有很久的历史,一般要求锚定板埋设在被动土压区,大多数只用单层。20世纪70年代,铁路系统首先把锚定板结构作为支挡结构运用于铁路路基工程,这种结构由墙面系、钢拉杆、锚定板和填土共同组成。填土的侧压力通过墙面传至钢拉杆,钢拉杆则依靠锚定板在填土中的抗拔力而维持平衡。1974年,铁道部科学研究院、第三工程局和铁三院共同试验研究在太焦铁路稍院首次建成了一座12m高的多层锚定板挡墙。1976年以后,铁路、公路、建筑、航运等在不同线路和边坡工程上修建了一些锚定板桥台、锚定板挡墙,例如,北京枢纽西北环线锚定板挡墙、武汉南环铁路和武豹公路立交桥的锚定板桥台、贵州六盘水小云尚煤矿专用线锚定板挡墙、南平造纸厂锚定板挡墙等,加速了锚定板挡墙的推广。1990年,锚定板挡墙设计的有关要求已纳入《铁

路路基支挡结构物设计规则》。由于锚定板结构是我国修建铁路支挡工程中发展起来的一种新结构,墙面、拉杆、锚定板以及其间的填土组成一种复合结构,受力比较复杂,铁科院、铁三院、铁四院等单位通过试验提出了不同的计算模式,尚有待在实践中进一步研究、验证。

5. 土钉墙

1972年,法国瓦尔赛市铁路边坡开挖工程中成功地应用土钉墙来加固边坡,成为世界上首次将土钉墙作为支挡结构运用于岩土边坡的先行者。此后,土钉墙在法国和世界各地迅速推广。我国80年代初期开始引进这项技术,1980年山西柳湾煤矿的边坡稳定工程中首次运用土钉墙来加固边坡。1987年,总参工程兵科研所在洛阳王城公园首次采用注浆式土钉墙和钢筋混凝土梁板护壁结构相结合的措施成功加固了30m高的护岸。冶金、建筑、铁路、公路等行业也将这项技术运用于基坑边坡加固及路基边坡加固工程中。20世纪90年代基坑采用土钉加固防护的深度为10~18m,北京新亚综合楼工程,地下基坑深15.2m,采用土钉支护。南宁至昆明铁路,铁道部第二勘测设计院等单位,为解决软弱破碎岩质高边坡的稳定问题,结合工程开展了分层开挖分层稳定新技术的研究,在DK333、DK339等工点采用土钉墙作为路堑边坡的支挡结构,最大墙高27m,属国内路堑土钉墙之最,并根据试验成果,提出了土钉墙设计计算建议公式,其有关成果已纳入新修编的《铁路路基支挡结构设计规范》中。其后,土钉墙在内昆铁路、株六铁路复线工程、渝怀铁路等路堑边坡支挡工程中大量使用。

6. 抗滑桩

抗滑桩是我国铁路部门20世纪60年代开发、研究的一种抗滑支挡结构,1966年铁道部第二勘测设计院在成昆铁路沙北1号滑坡及甘洛车站2号滑坡中首次采用钢筋混凝土桩来加固稳定滑坡,桩截面分别为 $2.0\text{m} \times 2.0\text{m}$ 、 $2.5\text{m} \times 4.0\text{m}$ 、 $2.5\text{m} \times 3.1\text{m}$ 等,桩长为9~17m,桩间距为4~8m,锚固深度为桩长之半。据统计,成昆线在六处滑坡中采用了120根抗滑桩,累计长度为1364m,抗滑效果良好。这种结构很快在铁路路基工程中迅速推广,20世纪70年代湘黔线贵州境内全段采用抗滑桩处理各类问题31处,共计340根桩,总延长3342m。襄(樊)渝线位于汉江边的赵家塘滑坡,滑坡主轴长250m、宽500m、厚度约50m、体积约250万立方米、滑坡月平均位移最大30mm,如果改线则出现高桥和长隧,并将延误工期,后采用了63根抗滑桩,桩身总延长米1681m,最大桩截面 $3.5\text{m} \times 7.0\text{m}$,最大桩长46.7m,稳定了滑坡。襄渝线共采用408根抗滑桩,总延长7796m。其后,枝柳、阳安、太焦等线均积极采用抗滑桩整治滑坡,并迅速在岩土工程的各个领域得到推广运用。铁二院、铁道部科学研究院西北分院、西南交大等单位对抗滑桩的设计及计算理论进行了深入的研究。1977年,铁二院、西南交大、成都铁路局等单位在成昆线狮子山滑坡工点进行了抗滑桩的破坏性试验,实测桩的弹性曲线、位移、转角、弯矩、土压力等资料,为理论研究提供了基础数据。抗滑桩设计及计算研究科研项目曾获铁道部科技进步二等奖,有关成果已纳入《铁路路基支挡结构设计规范》。20世纪90年代以来,通过南昆线软弱破碎岩质深路堑高边坡的结合工程试验,研究开发了分层开挖、分层稳定、坡脚预加固新技术,抗滑桩与钢筋混凝土挡板、桩间挡土墙、土钉墙、预应力锚索等结构结合组成桩板墙、锚索桩等复合结构,大量使用在路堑边坡的坡脚预加固工程中。这些复合结构后来在内昆、株六复线、渝怀线等新线建设工程中,得到推广运用。

7. 预应力锚索

预应力锚索技术用于岩土工程在国外已有很长的历史,1933年阿尔及利亚首次将锚索用于水电工程的坝体加固。20世纪40年代至70年代,锚索技术得到迅速推广,加固理论和设计方法逐步完善。我国从20世纪60年代开始引进这项技术,1964年梅山水库使用锚索技术加