

机场工程特殊土地基 处理技术

◎ 何光武 周虎鑫 主编



人民交通出版社
China Communications Press

机场工程特殊土地基 ——处理技术

何光武 周虎鑫 主编



人民交通出版社

China Communications Press

内 容 提 要

本书系统全面总结了我国机场工程特殊土地基处理方面的经验、方法、有关理论、设计、施工工艺与试验技术,反映了我国机场特殊土地基处理水平,书中附有大量工程实例。全书由我国 10 多位专家、学者、工程师编写,是一部有份量的参考书。

全书分 8 章。内容包括:绪言;机场场道工程设计要求及标准;软土地基处理技术;膨胀土地基处理技术;湿陷性黄土地基处理技术、冻土地基处理技术;盐渍土地基处理技术;高填方地基处理技术等。书末均有参考文献。

本书可供从事机场工程地基设计和施工人员使用,亦可供工程勘察、设计、监理以及大专院校有关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

机场工程特殊土地基处理技术 / 何光武, 周虎鑫主编.
北京: 人民交通出版社, 2003.8
ISBN 7 - 114 - 04801 - 7

I. 机… II. ①何… ②周… III. 机场—地基—建筑工程 IV.TU248.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 078466 号

机场工程特殊土地基处理技术

何光武 周虎鑫 主编

正文设计: 彭小秋 责任校对: 王静红 责任印制: 杨柏力

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

北京明十三陵印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 10.25 字数: 243 千

2003 年 10 月 第 1 版

2003 年 10 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 0001—3000 册 定价: 25.00 元

ISBN 7-114-04801-7

《机场工程特殊土地基处理技术》

编写委员会

主 编：何光武 周虎鑫

编 委：刘志雄 孙永泉 沈 清 黄晓波 朱冀军

王 旭 刘国忠 刘一通 李 岩

秘 书：周虎鑫 朱冀军

序 言

现代航空事业的发展突飞猛进、日新月异。航空运输是交通运输业中一个独立的、充满生机和活力的行业,它已经直接或间接地影响着人们的生活。航空服务于人类,人类需要航空。人们对航空的日益关心和需求使航空运输业具有巨大的潜力和发展的空间。

机场建设在民用航空运输事业、通用航空服务事业以及国防建设事业中均占有极其重要的地位。这是因为不论何种飞机,也不管它飞多快、多高、多远,机场总是飞机在地面起飞、中转和回归着陆的结点。确切地说,机场是用于飞机起飞、着陆、停放、维修和实施飞行保障活动的场所。因此,对于发展民用航空运输事业和国家空防建设而言,必不可少的三大要素(即人才、飞机和机场)中,人才和飞机固然重要,但机场更是不可或缺的重要一环。机场建设既有与一般基础设施建设相类似的共同特点,同时又具有其特殊性。机场建设的主要特点是占地广,与空中、地面的关系复杂,投资大,工程门类多,并要求采用先进的现代化科学技术。

机场的土建工程是机场建设众多工程门类中的重要组成部分。由于机场是飞机起降的场所,占地面积一般较大。过去使用轻型飞机,占地问题不十分突出。随着使用飞机的大小、重量和速度日益增长,机场占地面积已相当可观。以大型民用机场而论,少的两三平方公里,多的达十平方公里以上。这还是只指机场内各项建筑设施所需的用地,若加上机场为建立各个通信导航站、油库、进场公路、铁路专用线等所需的用地,则占地范围更大、更广。而机场用地一般要求比较开阔平坦,以减少开拓场地的工程量,节省工程费用。然而,在我国人口众多,且仍在不断地增长,人均耕地日趋减少的情况下,为少占耕地和良田,这一要求又往往难以满足。因此,有时机场场址不得不选择在地理环境较差、地质条件不良的地方。此外,由于我国幅员辽阔,各地的气候条件、环境条件及地质条件千差万别,因此,也给机场场址的选择及机场土建工程的建设带来了不少的困难。几十年来,我国在机场建设的工程实践中,鉴于受到上述各种条件的限制,在既有机场的建设过程或运营过程中,因对复杂多变的地质构造认识不足,或对各种特殊地基处理不当等原因,而导致机场地基出现不均匀沉降、道面过早损坏,以致迫使飞机停止起降,甚至机场关闭。由于这种工程建设中的失误、不足或欠缺时有发生,紧急的维修工程会给旅客带来不便和麻烦,有的不良工程还使国家造成重大经济损失。

近 20 多年来,随着我国经济建设持续高速发展,神州大地呈现一片欣欣向荣、蒸蒸日上的繁荣景象。人们的生活水平日益改善、不断提高,旅游事业的发展也十分迅速。国家发展的良好形势已为民用航空运输事业带来了良好的发展机遇。机场建设必将如雨后春笋,蓬勃发展。

何光武、周虎鑫以及参加本书编写的其他同志,长期从事机场规划、勘察、设计、施工等方面的的工作,积累了丰富的实践经验,在学术上都有较高的造诣。他们在辛勤工作的同时,将自己多年的工作成绩和积累的经验进行认真的归纳、分析和总结,写成了本书。它是我国第一部机场工程特殊土处理技术方面的专著,诸位作者为我国机场建设作出了一项杰出的贡献。

本书对过去修建机场遇到的部分典型特殊土地基及处理方法进行了总结。书中不仅对软土、膨胀土、冻土、盐渍土、黄土及高填方等特殊土地基的处理进行了论述,而且还结合工程实例进行了翔实的分析。相信本书的出版对从事机场建设等土建工程教学、科研、勘察、设计、施工的科技人员都有所借鉴和帮助。

陈 荣 生

2003年8月28日

目 录

第一章 绪 言	1
第二章 机场场道工程设计要求及标准	3
2.1 场道工程设计要求及标准分析	3
2.1.1 概述	3
2.1.2 机场道面设计施工要求分析	3
2.1.3 综述	5
2.2 稳定分析	5
2.2.1 稳定影响因素	6
2.2.2 稳定验算	7
2.2.3 稳定观测及特殊情况处理	11
2.2.4 高填方的边坡稳定问题	14
2.2.5 特殊土质边坡的稳定问题	14
2.3 沉降分析	15
2.3.1 沉降产生的原因	15
2.3.2 沉降控制标准	15
2.3.3 工程实例分析	16
2.4 结论	18
2.4.1 沉降与不均匀沉降要求	18
2.4.2 压实度指标要求	18
2.4.3 稳定要求	18
第三章 软土地基处理技术	19
3.1 软土特点及工程性质	19
3.1.1 软土的定义	19
3.1.2 软土的工程性质	20
3.2 软土地基处理方法概述	20
3.2.1 真空预压法	21
3.2.2 真空联合堆载预压法	21
3.2.3 强夯加固法	22
3.2.4 排水板(袋装砂井)+堆载预压的深层加固法	24
3.2.5 粉喷桩法	25

3.2.6 深层搅拌桩法	25
3.2.7 几种软基处理对比方法分析	25
3.3 工程实例	27
3.3.1 浙江温州机场	27
3.3.2 浙江宁波栎社机场	35
3.3.3 山东济南遥墙机场	41
3.3.4 上海浦东国际机场	45
第四章 膨胀土地基加固处理	52
4.1 膨胀土特点及工程性质	52
4.1.1 膨胀土定义	52
4.1.2 膨胀土的工程特点	52
4.1.3 膨胀土对机场跑道的破坏机理	55
4.2 膨胀土地基处理方法概述	55
4.2.1 换土	56
4.2.2 加强防排水措施	56
4.2.3 改良土性	56
4.2.4 其它措施	56
4.3 工程实例	56
4.3.1 西双版纳民用机场	56
4.3.2 湖北汉口某机场	58
第五章 湿陷性黄土地基加固处理	70
5.1 湿陷性黄土特点及工程性质	70
5.1.1 湿陷性黄土定义	70
5.1.2 湿陷性黄土的工程特点	70
5.2 湿陷性黄土地基处理方法概述	74
5.2.1 土或灰土垫层	74
5.2.2 土桩或灰土桩	75
5.2.3 强夯法和重锤夯实法	75
5.2.4 预浸水法	75
5.2.5 振冲法	76
5.3 工程实例分析	76
5.3.1 甘肃天水机场	76
第六章 冻土地基加固处理	91
6.1 冻土的特点及工程性质	91
6.1.1 冻土的定义	91
6.1.2 冻土的工程性质	92
6.1.3 冻胀对机场场道的破坏和影响	92

6.2 冻土地基处理方法概述	93
6.2.1 处理原则	93
6.2.2 冻土地区地基处理指标	93
6.2.3 处理方法	93
6.3 工程实例	95
6.3.1 辽宁省某机场	95
6.3.2 黑龙江某机场	95
6.3.3 阿勒泰机场	95
第七章 盐渍土地基处理	105
7.1 盐渍土特点及工程性质	105
7.1.1 盐渍土定义	105
7.1.2 盐渍土工程特点	107
7.2 盐渍土地基处理方法概述	109
7.3 工程实例	112
7.3.1 新疆克拉玛依机场	112
第八章 高填方地基加固处理	118
8.1 高填方工程地基特点及工程性质	118
8.1.1 高填方工程地基定义	118
8.1.2 高填方地基工程性质	118
8.2 高填方地基处理方法概述	119
8.2.1 高填方地基处理原则	119
8.2.2 机场地基处理指标	119
8.2.3 地基处理方法	120
8.3 工程实例	121
8.3.1 云南大理机场	121
8.3.2 四川攀枝花机场	126
8.3.3 贵州兴义机场	139
参考文献	151

第一章 绪 言

飞机从发明到现在仅仅经历了一百年,但这一百年是航空运输业飞速发展的一百年。航空运输业同以船舶为主的海运业,以轨道运输为主的铁路运输业,以各种车辆为主的公路运输业相比,有其独特的优势,它给人们提供了一个快捷、舒适、安全通道,它可以使人们真正做到飞千山、越万水,到达地球上想去的地方。可以不夸张地说,航空运输业的发展给人们的生活带来了天翻地覆的变化。

航空运输业是一个复杂的系统,又是一个网络结构。它包括飞机制造,飞行人员培训,运营管理,机场建设与维护等系统。机场是飞机起降的场地,又是人员、货物集散地。机场建设涉及到净空、空域、自然气象、工程地质、水文地质、交通条件、离服务地区(城市)的距离等,需要的投资大,建一个机场,大的需要上百亿甚至几百亿人民币,中等的十几亿、几十亿人民币,小的也要上亿或几亿人民币。几十年来,尤其是我国改革开放以来,随着社会的进步,经济的发展,人们的活动由本区域向外界区域进行物质和精神交流,人们对航空运输业提出了越来越高的需要。机场建设也出现了前所未有的发展高潮。枢纽机场、干线机场、支线机场、旅游机场大量的修建。根据有关资料不完全统计,截止 2000 年底我国已有定期航班机场 129 个,其中 4E 级 23 个,4D 级 35 个,4C 级 40 个,4C 级以下 31 个。我国已初步建立起国内的航空网络,形成了比较完整的国内航空运输市场,并具有 128 条国际航线同世界 33 个国家的 60 个城市通航,已成为世界航空运输网络的组成部分。

开发资源、改善投资环境,需要建设机场;满足人们了解各地人情风俗,享受自然风光,探幽访古,探亲访友,需要建设机场;树立一个城市、一个地区的形象需要建设机场;战胜突发性灾害,需要建设机场。现代社会一个城市,一个地区,机场设施不仅是重要的交通运输设施,亦是连接各城市、地区的空中桥梁的起点或终点,因此,它是进入这个城市、地区的大门,考查这个城市和地区的窗口。机场设施反映了当地的经济、文化的发展程度,对经济建设形成强烈的推动力。我国机场总数不多,总体上和世界发达地区机场数量有一定差距。据有关资料统计,以国土每万平方公里拥有机场数为例,日本 2.63,韩国 1.6,印度 0.73,英国 7.79,法国 3.64,德国 4.21,意大利 1.33,俄罗斯 1.75,美国 0.57,我国内地 0.13;以每 100 万人所占机场数为例,日本 0.81,韩国 0.37,印度 0.26,英国 3.33,法国 3.51,德国 1.88,意大利 0.90,俄罗斯 20.00,美国 2.15,我国内地 0.10。因此我国民用机场建设还任重道远。

就机场布局而言,有一定不平衡性,东部地区密集,西部地区稀疏,在沿海地区由北向南的京津塘地区,沪嘉杭地区,和珠江三角洲地区机场更为集中。今后机场建设除了向西部倾斜外,还有因搬迁而对机场和城市建设都有影响的东西部地区的机场。我国东部沿海,西部多山,北处寒温带、南处亚热带,气候类型多,修建机场都会遇到复杂的地形、地貌,现有“世界屋脊”的高寒地区,又有低于海平面的盆地,既有沙漠戈壁,又有草原湿地;既有连绵高山,又有沟壑纵横;既有水网地带,又有干旱缺雨的黄土高原。在修建机场时,必然会遇到“移山填海”;“移山填沟”的高填高挖、滑坡等灾害性地质治理,软基、盐渍土、湿陷性黄土、冻土、膨胀土、溶洞等不良地质治理。过去在这方面已经取得了一些成功,今后机场建设遇到的特殊地基还会

很多,很复杂。参加本书编写的作者都是长期从事我国机场建设的专家,在选点、勘察、设计、施工、地基处理试验研究等方面积累了丰富的经验,为新中国的机场建设贡献了毕生的精力,创造了一次又一次的奇迹。本书中对过去修建机场遇到的部分典型特殊地基及处理办法进行总结,还很不全面,如对今后的工作有所启迪,有所帮助,在工程实践中对过去经验有所再认识,使正确的得到发扬,错误的得到纠正,我们就深感欣慰,出版本书的目的也就达到了。

我们将分别对软土、膨胀土、湿陷性黄土、冻土、盐渍土及高填方等特殊地基的基础处理技术进行论述,同时结合工程实例进行一些分析,相信会对今后类似的机场建设有所借鉴和帮助。

第二章 机场场道工程设计要求及标准

2.1 场道工程设计要求及标准分析

2.1.1 概述

通常,土木工程设计、施工中存在三方面的问题。第一,沉降及不均匀沉降,这会引起结构物的沉陷和倾斜,从而影响结构物的正常使用;第二,土基的强度,这会引起结构物的倒塌或持续下沉,导致工程质量事故;第三,土坡的稳定问题,影响结构物的使用,严重的会导致工程事故。对机场跑道而言,机场道面是为飞机提供起飞、着落和滑跑的建筑物,由于飞机在机场道面上的高速行驶,因此,机场道面必须提供一定的强度和刚度,同时还必须满足功能性的要求,以确保飞机的行驶安全。

根据机场道面设计规范和机型,对道面厚度进行设计计算,通常机场道面结构层的总厚度约为 60~80cm。因此,机场道面的结构层已经能提供足够的强度。但是由于土基的变形(沉陷或隆起)和不均匀变形(不均匀沉陷或不均匀隆起)较大,容易造成水泥混凝土道面结构层的破坏和功能性不能满足设计要求,为此机场设计工作者提出了变形与不均匀变形的要求。土基的变形包括三个部分:一是动荷载的累积变形,二是静荷载的压缩固结变形,三是环境因素(如温度、水等)等引起的变形。为了满足变形与不均匀变形要求,对土基提出了压实度要求和防护措施。通常,压实度大,压缩变形和累积变形就小;防护措施得当,环境因素影响就小。具体分析如下。

2.1.2 机场道面设计施工要求分析

一、军用机场设计施工规范分析

根据“军用机场水泥混凝土道面设计规范(GJB 1278—91)”第 5.1.3 条土基和垫层、基层的压实,土基和垫层、基层必须具有足够的压实度。机场道面部分,应采用重型压实标准,土基的压实度应符合表 2.1.2.1 的规定。

土基压实度标准(重型)

表 2.1.2.1

填挖类别	土基顶面以下深度(cm)	压实度(%)	
		特、I、II级	III级
填方	0~80	≥95	≥93
	80以下	≥90	≥90
挖方及零填	0~40	≥95	≥93

注:(1)表中压实度是按重型击实试验法求得的最大干密度的百分数。

(2)特殊干旱(年降雨量不足 100mm,并且地下水源稀少),或特殊潮湿(年降雨量大于 2500mm,或年降雨天数多于 180 天)地区,表内的压实度数值可减少 2%~3%。

(3)轻粘土(高液限粘土)、重粘土(很高液限粘土)表内的压实度数值可减少 1%~2%。

(4)填方厚度小于 40cm 时,原地面压实度标准按挖方及零填要求。

在“军用机场场道工程施工及验收规范(GJB 1112—91)”第 4.12.1 条,土石方的压实度均采用重型压实标准。其质量标准和检验方法见表 2.1.2.2。

土基压实度标准 表 2.1.2.2

填 挖 类 别	设计高程以下深度(m)	压 实 度 (%)	
		特、I、II 级	III 级
填 方	0~0.8	≥95	≥93
	>0.8	≥90	≥87
零填及挖方	0~0.4	≥95	≥93

注:(1)特殊干旱(年降雨量不足 100mm,且地下水源稀少),或特殊潮湿(年降雨量大于 2500mm,或年降雨天数多于 180 天)地区的压实度由设计确定,一般可按表内数值可降低 2%~3%;轻粘土(高液限粘土)、重粘土(很高液限粘土)可按表内数值降低 1%~2%。

(2)填方厚度小于 40cm 时,原地面压实度标准按“零填及挖方”要求;当碾压机器的压实功能达不到 40cm 深度时,应作翻压处理。

(3)用石方或天然砂砾作填料,其压实度不易用灌砂法测定时,也可用灌水法测定;或者以振动式压路机或重型压路机碾压至无波浪,无明显轮迹。

外观要求:表面平整,无软弹、翻浆、浮石以及粗料或细料积聚等现象。

从表 2.1.2.1 和表 2.1.2.2 可知:对于土基的设计施工要求主要是压实度标准,而没有其它要求。事实上,在飞机重复荷载作用下,对于军用飞机其影响深度约为 1.5~1.8m(包括道面结构层),规范要求:填方区土基顶面以下 80cm,压实度要求较高(95%),而零填及挖方区土基顶面以下 40cm,压实度要求较高(95%),两者相差 40cm,这主要是考虑到填方区土基为新近沉积土,结构性不好,而挖方与零填区的土基为长期沉积土,本身具有一定的结构性,土基强度也较高。所以,填方区与挖方区是有一定差别的。

二、民用机场设计施工规范分析

根据“民用航空运输机场水泥混凝土道面设计规范(MHJ 5004—95)”第 4.2.3 条土基压实,土基必须具有足够的压实度。道面下土基压实度不得小于表 2.1.2.3 的规定。

土基压实度标准(重型) 表 2.1.2.3

填 挖 类 型	土基顶面以下深度(cm)	压 实 度 (%)	
		A、B	C、D、E
填 方	0~100	≥95	≥98
	100~400	≥93	≥95
	400 以下	≥90	≥93
挖方及零填	0~40	≥95	≥98

注:(1)在多雨潮湿地区或当土基为高液限粘土时,根据现场实际情况表内压实度可适当降低 1%~3%;

(2)特殊土质土基,应根据土基处理要求,通过现场试验分析确定压实标准;

(3)对于高填方地区,除了满足土基压实度要求外,还应满足沉降控制要求。

在“民航机场场道工程施工技术要求(暂行本)”第 307 条,机场飞行区各地段的土壤压实要求,按表 2.1.2.4 所列。

土基压实度标准

表 2.1.2.4

填 挖 类 型		土基顶面以下 深度 (cm)	相对压实度 (%)	
			标准击实法	重型击实法
填 方		不 限	98	96
挖 方	冰冻区	≥ 30	98	96
	非冰冻区	≥ 15	98	96

注:(1)由于机场飞行区各地段的土基及其上部的道面工程,一般均在一、二年内连续施工完毕,土基填土没有足够的自然沉落时间;同时机场道面也不可能先做成低级道面,使土基填土在使用中得到充分的压实。因此,本技术要求不以填土深度来划分对土基压实度的不同要求。

从表 2.1.2.3 可知:对于填方,土基顶面以下 0~100cm,其土基的压实度要求高,这是由于该深度是在飞机轮载作用的影响深度范围内。土基顶面以下 100~400cm,其土基的压实度要求较高,飞机轮载作用的影响较弱。通常,压实度高,在飞机重复荷载作用下的残余变形就小,这对于保证道面的使用性能和延长道面的使用寿命是十分有利的。而对于 400cm 以下土堤部分的压实度明显可以降低,只须满足沉降变形要求,这在附注中已经加以说明。对于零填或挖方,只须 0~40cm,压实度要求较高,这在规范中就没有规定,因为零填或挖方地段几乎没有沉降问题。

从表 2.1.2.4 可知:对于填方,没有深度限制,全部都用一个压实度来控制,显然不尽合理,但附注中的说明也有一定的道理。对于高填方机场,原土基的沉降与填筑体的沉降都是比较大的。尤其是原土基沉降较大,这是因为填筑体附加荷载十分巨大,有时填方高度大于 20m,则附加荷载可达 400kN 以上,而且机场面积大,影响深度就深,所以对于高填方机场,原土基处理是十分重要的,否则其沉降与不均匀沉降无法满足设计要求。另外,填筑体下部的沉降也较大(相对于填筑体的上部),这是因为填筑体下部所承受的附加荷载较大,正如附注中所说的:土基填土没有足够的自然沉落时间,也就是说没有足够的固结沉降时间,所以规范要求填筑体下部填土的压实度与上部相同。

但是,对机场道面有影响的是工后沉降,工后沉降是与时间相关的,一般要求,高填方机场土石方施工完毕后要经过一个雨季,其目的就是在施工机场道面之前,尽可能提供较长的自然固结沉降时间,减少工后沉降。另外工后沉降和填料的性质密切相关,一般情况下,填料颗粒较大(粘粒含量较少),施工过程中发生的沉降较多,而工后沉降就较小。反之,工后沉降就较大。

2.1.3 综述

分析军、民用机场道面设计施工规范,其重点主要针对的是机场道面,因为飞机的重复荷载影响是有一定深度限制的,所以浅层主要是飞机重复荷载影响的累积变形,深层主要是土基自重荷载作用下的沉降变形。为此只要地基稳定,即地基没有沉降或沉降满足设计要求,对土基的压实度控制较为宽松,这是因为 100cm 以下的土基主要是沉降问题。而民用机场道面施工规范,其重点是地基的沉降,沉降的发生主要在填筑体的下层,为了减少沉降和工后沉降,因而对土基压实度要求进行适当提高。当然,定性的分析可以认为:压实度高,沉降量就小。

2.2 稳定分析

机场场道工程的稳定问题通常是指边坡的稳定。边坡失稳从现象上来分主要表现为以下

三类:

一是滑坡,滑坡是斜坡的部分岩土体,在自然下移动。滑坡按其引起滑动的力学特性来区分,可分为牵引式和推移式滑坡。牵引式滑坡是下部先滑动,使上部失去支撑而变形滑动,一般速度较慢,横向张性裂隙发育,表面多呈阶梯状或陡坎状。推移式滑坡是上部岩土挤压下部岩土体产生变形,滑动速度较快,滑体表面波浪状或直线状。

边坡的第二类病害是崩塌。所谓崩塌是整体岩土块脱离母体突然从较陡的斜坡上崩落下来,并顺斜坡猛烈翻转、跳跃,最后堆落在山脚。它有突发性,危害较大。

边坡的第三类病害是剥落。边坡表层受风化,在冲刷和重力作用下,不断沿斜坡滚落。

2.2.1 稳定影响因素

在地基上填筑路堤等机场构造物,使地基中土体应力状态发生变化,在土体自重及外荷载作用下,土坡丧失其原有稳定性,一部分土体相对另一部分土体产生移动,这种现象称为失稳。失稳是最常见的工程问题之一。土坡在发生滑动之前,通常在坡顶首先出现明显的裂缝,坡脚附近的原地面则有较大的侧向位移并微微隆起,随着坡顶裂缝开展和坡脚侧向位移的增加,部分土体突然沿着某一个滑动面急剧下滑,造成工程事故。

引起失稳的根本原因在于土体内部某个面上的剪应力达到或超过了它的抗剪强度,稳定平衡遭到破坏。评价地基上土坡稳定性的方法可分为两大类:一类是首先建立土体的本构关系,应用有限元等数值解法,求出土体各单元的应力和变形,然后通过某些间接的途径来评价地基及土坡的整体稳定性。这类方法的优点是可以比较正确地模拟土的本构关系,也可以通过分步计算了解土坡稳定破坏的发生及发展过程。但此方法需较多的土性参数,参数测定及分析计算均比较复杂,最大的缺点是不能直观地与潜在滑动面及土坡的整体稳定安全系数建立直接联系,缺少一个为工程界普遍接受的合理评价标准。另一类方法是直接与潜在滑动面相联系的方法,包括滑移场法,塑性极限分析法,变分法和静力极限平衡法等,其中在工程中得到广泛应用的静力极限平衡法。

静力极限平衡法的基本原理是先假定一个潜在的滑动面,然后通过对滑动面上滑动土体进行静力平衡分析,求出作用于滑动面上的法向应力和剪应力,并假定土体符合摩尔-库伦破坏准则,从而求出滑动面上土体的抗剪强度,而将滑动面上平均抗剪强度与平均剪应力之比定义为该滑动面的稳定安全系数。假定若干个滑动面,取这些滑动面中安全系数最小的滑动面为最危险滑动面,其对应的最小安全系数也就是土坡的整体稳定安全系数。

一般的路堤,其土坡的长度远大于高度和宽度,而滑坡体沿长度方向的范围是不肯定的。滑坡体两端对土体的滑动虽有阻力,但对土体稳定性的影响目前还很难正确确定。为此,通常在分析软土地基和土坡的稳定性时,不考虑滑动土体两端阻力的影响,而将其简化为平面应变课题。

土坡滑动面的形状,经实际调查表明:由砂、卵石、风化砾石等粗粒料筑成的无粘性土土坡,其滑动面常近似为一平面,而对均质粘性土土坡如软土地基上的粘土路堤等,滑动面通常是一光滑曲面,顶部曲率较小,常垂直于坡顶,底部则较平缓。根据经验,在稳定计算时,在最危险滑动面附近,假定滑动面形状稍有出入,对安全系数影响并不大。因此为方便起见,常将均质粘性土土坡破坏的滑动面假定为一圆柱面,其在平面上的投影是一圆弧,称作滑弧,其稳定分析方法就称作圆弧滑动分析法。对于非均质的粘性土土坡,如地基中存在有软弱夹层或其它薄弱环节或不同材料接触面上的摩擦角比土体更小,则土坡会沿着软弱层面发生滑动,此

时的滑动面往往是直线和曲线组成的复合滑动面,甚至可能是不规则的。

土坡滑动面的位置,除非土体中存在明显的薄弱环节(如裂缝、软弱夹层、老滑坡体等),一般情况下是不知道的。因此,在进行稳定计算时,首先要假定若干可能的滑动面,分别求出它们的抗滑安全系数,从中找出最小值,以此来代表土坡的稳定安全系数,而与此相应的滑动面层的埋藏深度有关。

2.2.2 稳定验算

一、均质土坡整体分析

粘性土由于颗粒间存在粘结力,发生滑坡时是整块土体向下滑动的。若按平面应变问题考虑,可将滑动面以上土体看作刚体,并以它为脱离体,分析在极限平衡条件下作用于其上的各种力和力矩,而以整个滑动面上的平均抗剪强度与平均剪应力比来定义该滑动面的稳定安全系数,即:

$$F_s = \tau_f / \tau \quad (2.2.2.1)$$

若滑动面为平面,则上式可改写为:

$$F_s = T_R / T_n \quad (2.2.2.2)$$

式中: T_R 及 T_n ——分别为作用于滑动平面上的抗剪力 and 剪切力。

对于均质粘性土土坡,其滑动方式可假定为圆弧滑动,其安全系数可用下式表示:

$$F_s = M_R / M_n \quad (2.2.2.3)$$

式中: M_R 及 M_n ——分别为作用于滑动土体上的抗滑力矩和滑动力矩。

图 2.2.2.1 为一均质粘性土土坡, AB 为假定的圆弧滑动面, O 点为其圆心,半径为 R 。为使滑动面土体保持稳定,必须满足力矩平衡条件(此时滑弧上的法向反力 N 通过圆心)。可求得该滑动面的抗滑安全系数为:

$$F_s = \tau_f \hat{L} R / W \cdot X \quad (2.2.2.4)$$

式中: L ——滑弧弧长, m ;

W ——滑动土体总重, kN/m ;

X ——土体重心离滑弧圆心的水平距离, m ;

R ——滑弧半径, m 。

一般情况下,粘性土的抗剪强度 τ 由内聚力 c 和

摩擦力 $\sigma \tan \varphi$ 两部分组成,因此它是随着滑动面上法向应力 σ 的改变而变化的,沿整个滑动面并非一个常数。

二、圆弧滑动条分法

当粘性土土坡的内摩擦角 φ 大于零时,滑动面各点的抗剪强度与该点法向应力有关,在假定整个滑动面各点安全系数 F_s 均相同的前提下,首先要设法求出滑动面上法向应力的分布,才能求出 F_s 值。为此,常用的方法是将滑动土体分成若干条块,分析每一条块上的作用力,然后利用每一条块上的力和力矩的静力平衡条件,求出安全系数的表达式。这种方法统称为条分法。它可用于圆弧滑动面也可用于非圆弧滑动面,并可用来考虑各种复杂外形、成层土坡以及某些特殊外力(如渗流、地震惯性力等)作用等复杂情况的求解。

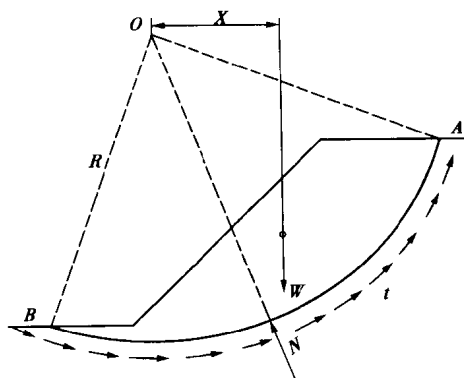


图 2.2.2.1 粘性土坡整体圆弧滑动

图 2.2.2.2 表示一任意滑动面的滑动土体,被分成若干土条,每一土条上作用的力:有土条的自重和其它垂直荷载 W_i ,水平荷载 Q_i ,作用于土条底面的法向反力 N_i 和切向反力 T_i 以及作用于土条两侧的作用力 E_i 、 F_i 和 E_{i+1} 、 F_{i+1} 。如果土条分得足够多,也就是土条宽度足够的小,可以足够精确地认为 W_i 及 N_i 均作用于土条底面的中点。根据安全系数的定义和摩尔-库仑破坏准则,很容易求出 T 与 N 的关系为:

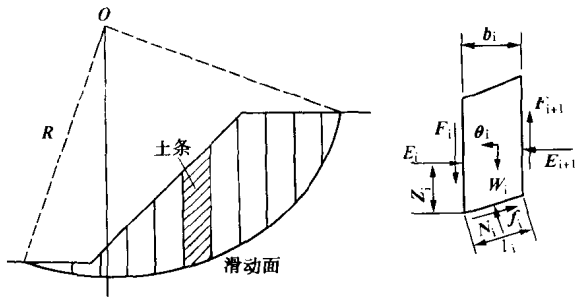


图 2.2.2.2 土条及作用于土条上的力

$$T_i = \tau_{fi} l_i / F_s = (c_i l_i + N_i \tan \varphi_i) / F_s \quad (2.2.2.5)$$

式中: l_i ——土条面长度;
 c_i 和 φ_i ——分别为土条底面土层的粘聚力和内摩擦角。

如果划分的土条条数为 n ,此时整个滑动土体要求的未知量为:

安全系数 F_s	1 个
土条底面法向反力 N_i	n 个
法向条间力 E_i	$n-1$ 个
切向条间力 F_i	$n-1$ 个
条间力作用点位置 Z_i	$n-1$ 个
合 计	$4n-2$ 个

由于每个土条只能有两个关于力的和一个关于矩的静力平衡议程,方程总数为 $3n$ 个,还多余 $(n-2)$ 未知量。因此,一般的土坡稳定分析问题是个超静定问题,要使它转化为静定问题,必须对土条分界面上的作用力作出假定才有可能。这样的假定有三种类型,一是假定条间力的大小,如瑞典法和毕肖普法;二是假定条间力的方向如斯宾塞法、摩根斯坦-普赖斯法;三是假定土条间力作用点的位置,如杨布的普通条分法。如果通过假定能使 $3n$ 个方程均得到满足,并同时满足合理性要求(在土条分界面上不出现拉力并不违反摩尔-库仑破坏准则),这种方法被称作“严格”的方法,如斯宾塞、摩根斯坦-普赖斯和杨布的方法等,否则只能是一种近似的解法。目前工程上普遍采用的瑞典法和简化毕肖普法均是一种近似的解法,但因为分析方法比较简单,使用方便,算出的安全系数与严格的方法相比误差不大,故仍被广泛采用。

必须指出,这样求出的安全系数仅是所假定滑动面上的抗滑稳定安全系数,为了求得土坡的稳定安全系数,仍需假定若干个滑动面从中选择 F_s 的最小值和相应的最危险滑动面。

三、瑞典法

瑞典法是条分法中最古老而又最简单的方法,除假定滑动面为圆柱面及滑动土体为不变形的刚体外,还假定不考虑土条两侧面上的作用力,这样就减少了 $(3n-3)$ 个未知量,还剩 $(n+1)$ 个未知量(土条底面法向力 N_i 安全系数 F_s)。然后利用土条底面法向力的平衡条件求 N_i ,再用整个土体力矩平衡条件求出 F_s 。现以均质土坡为例说明其原理和公式的推导过程。

图 2.2.2.3 为一均质土坡, AB 是假定的滑动面,其圆心为 O ,半径为 R 。将滑动土体分成若干土条,取其中任一条 i 分析其受力情况。若没有其它的外荷载且不考虑土条侧面上的作用力,则 i 土条上作用着的力有: