



李志勇
苏永华

著

半填半挖路基稳定性 分析理论与方法



科学出版社

www.sciencep.com

半填半挖路基稳定性 分析理论与方法

李志勇 苏永华 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从西南山区地理、地形及地质条件特征和不确定性现象入手,采用确定与非确定性思路,综合研究了半挖半填路基的稳定性分析理论与方法。主要内容有:针对决定高速公路建设场地类型因素中存在的模糊性,提出了隶属函数的等效性原理,导出了隶属函数的建造模型,建立了基于粗糙集理论的权重确定方法和岩体力学参数变权重处理方法;构建了可考虑地形坡度、地震烈度、岩溶发育程度、岩土力学参数等因素的山区高速公路建设场地模糊分类理论。针对半挖半填交接面路基工程结构模式的特点,研究提出了路基边坡稳定可靠度四类求解方法。通过大量试验,揭示了交接面力学、几何参数对路基稳定的控制程度,得出了关键因素对路基稳定的敏感性排序以及各种加筋材料对半挖半填路基稳定性、沉降差异的影响。对不平衡推力法进行了改进,研究了路基中锚杆、土工材料等的加固力学机理,推导了加固材料在边坡中的力学作用模式,建立了挖填交接面路基稳定性分析集成方法。研发了具有岩土力学参数统计、路基边坡模式建立、极限平衡稳定性系数计算、可靠度和参数敏感性分析等功能的软件。对半挖半填高陡交接面路基的施工、断面形式及支挡结构选择、监测等提出了相应对策和技术。

本书可供高等院校交通运输工程、土木工程、地质勘察专业高年级学生、研究生以及岩土工程勘察、设计研究人员学习、参考,此外,亦可供从事山区公路施工的高级管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

半填半挖路基稳定性分析理论与方法/李志勇,苏永华著. —北京:科学出版社, 2010

ISBN 978-7-03-029138-7

I. ①半… II. ①李… ②苏… III. ①半填半挖路基-稳定性-研究
IV. ①U416.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 191537 号

责任编辑:沈 建/责任校对:冯 琳
责任印制:赵 博/封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717*

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 10 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2010 年 10 月第一次印刷 印张: 12 3/4

印数: 1—2 000 字数: 247 000

定价: 50.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

我国是一个多山的国家，根据大致的统计，山地面积在国土面积中占据的份额超过了三分之二。在山区经济建设和开发中，高等级公路是优先修筑的主要基础设施之一。在山区，特别是西南山区修筑公路，与平原地区或其他地区相比，具有其独特的特点。

在建造环境方面，公路是带状工程（或线状工程），公路修筑处理的基本对象是不同区域的岩土体，而岩土体是地质体，是在漫长地质历史时期过程中形成的，经历了无数次的地质构造运动。山区是地质历史上强烈地质构造运动的产物，地形沟壑纵横，地表高程变化剧烈，同时原始应力条件复杂，工程地质条件及稳定程度差异大、抗扰动能力弱，生态环境脆弱。公路等基础设施的建设，容易引发各类潜在的地质灾害，导致了山区公路地质、地理条件的复杂性和多变性。山区公路在建造环境上存在诸多不确定性因素。在设计和施工中，对工程的环境评估及路基的稳定性分析，不但要考虑地质条件，同时还需要根据山区的特点，综合考虑地形、地理等各方面的因素。

山区公路线路的构成主要是桥梁、隧道和岩土路基三部分。对于岩土路基，基于山区坡地和生态环境要求，在绝大多数情况下尽可能减少自然地表挖填面积。因此，山地上的路基通常采用半填半挖形式。这种路基一部分是天然地质体，另一部分是坡地上切削下来的地质体，在两部分之间存在交接面。这种路基的稳定性问题，牵涉到自然山体、填筑地质体及交接面等多方面的问题，路基的破坏失效模式是非规则滑动的。对于这种形式，通常采用不平衡推力分析方法，在应用中发现不平衡推力法具有很大的局限性。故半填半挖路基的稳定性设计和分析方法是一个需要重点研究的问题。

对于我国大部分山区，特别是西南山区，由于运输条件、施工环境、生态保护及防御自然次生灾害等方面的限制，公路填筑料要求就地取材。而山区地质结构复杂，各种破碎区、堆积体随处可见，浅部地层的稳定性及其岩土体本身的路用性、水稳定性能很差。因此山区半填半挖路基的稳定加固措施和材料，需要对路基的天然部分和填筑部分区别对待。

本书就是针对这些问题深入研究成果的总结，共分9章。第1章，绪论，总结了路基边坡稳定性研究的基本进展和现状。第2章，针对岩土体工程中的不确定性因素，提出并证明了隶属函数的等效性原理，导出了隶属函数的建造模型，

建立了基于粗糙集理论的分类因素权重计算方法和岩体力学参数试验样本的变权重处理公式等。这些成果构成了路基边坡岩土体的模糊分类理论及参数处理新方法。第3章,综合考虑西南山区地形、地貌和地质特点,结合路基工程的带状特征,推导了山区地形坡度、地震烈度、岩溶发育程度、岩土力学参数等因素的隶属函数解析表达式,研究了山区场地的分类级别,建立了山区高速公路建设场地模糊分类理论。第4章,针对边坡岩体工程稳定性结构模式分析的特点,提出了路基边坡稳定可靠度分析的差分求解模式、响应面优化方法、逐步修正近似求解和支持向量机显式化方法等。第5章,提出了半挖半填路基交接面分类模式,利用正交方法设计了试验方案,采用萨尔玛理论,通过试验揭示了交接面力学因素和路基几何因素对路基稳定的控制程度,得出了关键因素对路基的稳定敏感性程度排序。第6章,全面研究了各种土工加筋材料方案对半挖半填路基稳定性、路基沉降差异的影响。第7章,对《公路路基设计规范》(JTGD30—2004)中推荐的半挖半填路基稳定性分析模式——不平衡推力法存在的缺陷进行了改进,研究了路基中锚杆、土工材料的加固力学机理,推导了加固材料在边坡中的力学分析模式,建立了挖填交接面路基稳定性分析模式与集成方法。第8章,研发了具有岩土力学参数统计分析、路基边坡模式建立、圆弧与非规则滑面各类极限平衡模式分析、稳定性系数计算、可靠度计算和力学参数敏感性分析等功能的分析软件。第9章,对半挖半填高陡交接面路基的施工、处理方法、路基断面形式、支挡结构、监测等提出了成套技术体系。

同时本书是如下基金资助研究获得的成果:①交通部西部科技项目:土工合成材料在边坡处治中的应用研究(编号:200131878528);②湖南省交通厅科技项目:山区高等级公路半填半挖路基建造关键技术研究(合同编号200503);③国家高技术发展“863计划”项目:山区公路路基边坡地质灾害监测与预警系统研究(编号:2007AA11Z121);④交通部西部科技项目:路基耐久性的实用工程技术研究(编号:200731822301—3);⑤湖南省自然科学基金项目:基于稳健理论的岩石隧道支护结构协同优化设计方法(编号:09JJ3113);⑥湖南省交通厅科技项目:山区公路隧道过沟谷地段建造关键技术研究(合同编号200717)。特向上述基金资助单位表示感谢。

在课题研究及著作撰写过程中,受到了作者所在单位领导和同事等的支持和帮助,在出版过程中对科学出版社沈建先生的辛勤劳动表示真诚感谢!

另外,本书是集体研究的成果,作者的研究生管梦清、颜永国、欧阳光前、邹志鹏、常伟涛、张月英、马宁,李青海、封立志及张鹏等,参与了作者有关课题的工作,同时作者研究团队及课题组同事为本书的研究成果做出了贡献。

由于半填半挖路基稳定性问题的复杂性,有关理论、方法和技术都不够完善

和成熟，很多方面还有待更深入的进一步研究。特别是由于作者的学识、水平和研究深度有限，虽然尽了最大努力，但仍然难免挂一漏万，存在不当之处，恳请读者批评指正！

李志勇，苏永华

2010.4

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 路基概况	1
1.2 研究现状	3
1.3 山区挖填路基的研究内容与方法	11
第 2 章 路基地质体模糊分类描述与参数处理	13
2.1 隶属函数的构造	13
2.2 隶属函数的等效性	18
2.3 模糊权重确定方法	25
2.4 模糊重心分类方法	35
2.5 岩体力学参数的模糊权重	41
第 3 章 西南山区带状工程建设场地模糊分类	46
3.1 山区带状工程构筑环境影响因素	46
3.2 山区带状工程构筑环境分级模式	47
3.3 湘西山区地理基本概况	48
3.4 场地分级因素的模糊表达	51
3.5 山区公路建设场地模糊分级系统	58
3.6 不同可建性类别场地的力学参数	60
3.7 邵怀高速公路溆浦连接线建设场地分类	61
第 4 章 路基边坡稳定可靠度数值求解方法	70
4.1 岩体工程结构的特点	70
4.2 边坡工程稳定可靠度差分求解	70
4.3 可靠度响应面法的优化	80
第 5 章 基于交接面的挖填路基边坡分析	101
5.1 主要影响因素	101
5.2 交接面类型	102
5.3 交接面路基破坏形态	105
5.4 计算模式与数据分析方法	108
5.5 普通交接面组合设计参数影响排序	113
5.6 高陡交接面组合设计参数影响排序	120

第 6 章 土工材料对挖填路基沉降的作用	126
6.1 计算模型及方案	127
6.2 土工材料对沉降的影响效果	129
6.3 材料与路堤高度对沉降影响	133
6.4 材料与路堤填筑宽度对沉降影响	136
6.5 材料与地基强度对沉降影响	139
6.6 不同加筋层数对沉降的影响	142
第 7 章 挖填交接面稳定性分析模式与集成方法	145
7.1 不平衡推力法的选用	145
7.2 Morgenstern-Price 模式算法原理	149
7.3 其他模式算法原理	151
7.4 加强材料的力学作用	152
7.5 加固后安全系数校核	154
7.6 程序主要功能的实现示意图	156
第 8 章 确定与非确定性集成分析程序功能	160
8.1 集成分析程序功能	160
8.2 集成分析系统功能检验	171
第 9 章 半填半挖路基施工处理方法	183
9.1 场地勘探与现场评估	183
9.2 断面形式修正	184
9.3 切削体填料性能及施工	184
9.4 填方路基外侧支挡选型	186
9.5 交接面处理方法	188
9.6 某高速公路交接面路基稳定性监测	189
参考文献	191

第 1 章 绪 论

西部地区，特别是西南地区，起伏蜿蜒，沟壑纵横，河谷深切，高程起伏巨大，相对高程为 400~2000m，是典型的山地，地形地貌条件极为复杂，环境条件恶劣。出露地层多为寒武系的片麻岩、片岩、板岩等变质岩，其余为侏罗系、白垩系、二叠系的红色砂岩、页岩、泥岩地层，岩性软弱，风化严重，是我国有名的易滑坡地层。在离地表不深的浅部，大小不等的溶洞星罗棋布，属于典型的喀斯特地区。这些山区公路不可避免地依山傍水展布，形成沿河线、越岭线和山脊线等。在路基填筑过程中，附近弃土场地难找，有时无法找到合适的弃土场地，如果采用全路基开挖的话，弃土运输距离必然很长，而行车条件又极为困难。必然导致投资加大，施工安全环境更加恶化。因此，在山区公路中，除了具有桥隧比例所占份额较大外，路基的构筑具有山地特点。路基通常的理想方式是在山坡中切挖出一半路基，另一半路基利用切削下来的地质体作为填料填筑另一半路基，形成半填半挖路基。

对于路基工程，其稳定性分析在很多情况下属于边坡工程。但半填半挖路基与一般路基工程存在很大差别。主要表现为，一般路基工程在同一个横断面上以及在某一里程路段内，其构成时间、材料基本是一致的，而山区半填半挖路基其中一部分是通过切削山坡体而成的，是天然地质体，通过了漫长的地质历史形成时期，具有较高的稳定性和强度；另一部分是在利用切削下来的岩土体填筑在斜坡山体上形成。路基的天然部分与填筑部分存在交接面，交接面两侧组成和形成过程完全不同。导致这种路基的稳定性分析，填筑方法、工艺、加固技术及措施与常规程序的差异，因此吸引了许多学者从不同的方面开展研究，目前已经取得了一些成果。

1.1 路 基 概 况

半填半挖路基因山区公路的大量修建而受到重视，同时在工程实践中积累了一些处理方法和经验。梁仕森^[1]等通过对山区已建的半填半挖路基调查后发现，这种路基形式大部分填方路基出现路基下沉、开裂，更有甚者，填方部分路基沿挖填界面出现整体滑坡的严重的自然灾害。同时找到这种病害出现的主要原因在于填方部分的土体强度和稳定性难以与挖方或自然坡面土体相一致。曹映^[2]等也发现半填半挖路基下沉、变形和沿填挖界面开裂等现象经常发生，其原因主要是

填挖两部分土体的强度和稳定性存在着差异。半填半挖路基施工虽然在规范上原则规定了若干施工程序、处理措施和填筑要求,但他认为标准太低,无法满足强度和稳定性要求。罗良繁、李永龙^[3]等重点考察半填半挖路基的常规施工过程,在有关文献中介绍了某公路半填半挖路基的测量放样、基底处理、填挖交接面处理、临时排水处理、填料选择、摊铺与压实、路堑与开挖、上路床施工、修坡养护等方面的施工过程。邓卫东等^[4]、张兴强等^[5]为了研究路基不均匀沉降对沥青路面受力变形的影响,对半填半挖路基进行弹塑性动力有限元分析,计算出在汽车荷载作用下由于路基土在力学和物理性质上的差异而产生的差异沉降,研究了两种工况(汽车荷载作用产生的差异沉降及汽车荷载和土体固结共同作用产生的差异沉降)对沥青路面受力变形特性的影响,进而得出一种计算沥青路面破坏时临界差异沉降的方法,为实际工程设计、施工提供参考依据。谭继承等在文献^[6]中介绍了某高填方路基的施工和加固工艺。该高填方路基最大填方达25.6m,采用加筋路堤挡土墙收缩坡脚,加筋边坡采用1:0.75。路肩以下10m处设一级2m宽平台,路肩以下25m处设路堤式挡土墙。加筋路堤坡面采用三维网加种草防护,加筋采用单向土工格栅。为减少不均匀沉降,路基填挖结合部采用重锤夯实。宋继先等在文献^[7]中考虑了填料性质对填方路基的影响,认为半填半挖路基是山区高速公路的一大特点,且填方部分一般属于高填方,填料多取自于路基附近的挖方段,常以碎石土为主。由于存在多种客观因素的影响,高填方路基的特点是路基边缘的压实度往往难以达到标准,造成路基沉降过大,影响行车安全。并介绍了高填方路基加固的几种方法。韩字乐^[8]等选取了广西某复杂山区地形高速公路某路段的深切高填方式的半填半挖路基进行了介绍。该路段在不到5km的范围内,仅20m以上的切方7处(30m以上的3处,最大切深41.47m),10m以上的填方12处(20m以上的3处,最大填高25.33m)。在填方路基与山坡坡面交接面的施工中采取了多种稳定路基的技术和措施。史志勇^[9]等结合工程事例,对半填半挖路基施工中常用的横挖法、纵挖法和混合挖法的适用条件进行了简单的讨论。邵建梁^[10]等对半填半挖交接面土工合成材料的加固作用进行了一些探讨,收集了高填方路基部分采用分层铺设高强土工格栅以增强填方部分的路基强度,减少路基沉降与挖方路基部分的不均匀沉降的作用的工程实例,并对该类路基中铺设土工格栅的滑动稳定性验算公式、土工格栅的铺设层数、分层厚度等进行了讨论。王晋明等^[11]分析了高填方路基的沉陷及介绍了常规的防治措施,并阐述了施工中的某些技术参数。如在高填方路基的填挖结合部,当由填方底部在挖方一侧沿路线纵向挖台阶,当地面倾斜度小于1:2时,台阶宽2.0m;当地面倾斜度大于1:2时,台阶宽度不小于1.0m,台阶底设置2%~4%向内倾斜的坡度。当填方区填至路槽底以下6.0~8.0m时,应增设土工格栅,土工格栅沿路线纵向长7.0m(填方区和挖方区各3.5m),横向宽度为

路基填筑宽度,端部包括填料厚 0.3m。土工格栅一般为 4 层,间距为 1.0~2.0m,以减小因路基沉陷不均匀带来的危害。刘以波等^[12]简单介绍了云南某高速公路在一深切沟谷地段采用半挖半填路基建造过程中,对填方路基采用预应力锚索桩板墙承担较大的滑坡推力,在滑体中下部集中承载,填方反压加涵洞排水的工程措施。

由于半填半挖路基工程的大量建设,其中出现的许多问题急需理论的指导,相关的理论研究获得了一定进展。蒋鑫^[13]等针对填挖结合部存有软弱夹层的横向半填半挖式路基,基于 FLAC/SLOPE 软件平台,运用强度折减法,探讨了潜在滑动面性态随软弱夹层与地基黏聚力之比值增加而演化的全过程。基于三维快速拉格朗日有限差分法 FLAC3D 软件平台,分析了同时受横向、竖向地震荷载作用的半填半挖式路基地震动力响应及稳定性。发现半填半挖式路基必须高度重视填挖结合部的良好处理以防止可能出现的滑动失稳,地震将对半填半挖式路基产生不可忽视的影响。刘建磊^[14]等分析了半填半挖路基稳定性受填挖结合部位软弱交接面结构类型、岩性等控制条件。调查了由于对软弱结合部处理措施采取不当将造成路基变形不协调,甚至发生整体失稳破坏的例子。然后采用简化 Bishop 法,从填方高度、地下水、填土力学参数和交接面结构类型 4 个方面进行稳定性对比,通过灵敏度分析,确定填方高度、地下水和填土黏聚力是影响路基稳定的较敏感因素。李群^[15]等分析了山区公路的选型特点,得出由于半填半挖形式可大量减少土方运输量及保护自然环境,在山区横坡陡峻地段得到了广泛应用。但由于挖方与填方材料在工程性质上的巨大差异,经常造成填挖交界面土体滑移型路基破坏和沉降差。然后利用极限平衡法,分析了填挖交界面台阶的影响及土工加筋材料的加固功能,得出设置台阶及土工合成材料可较大的增强路堤的抗滑能力。

1.2 研究现状

1.2.1 路基建造场地分类

在山区的半填半挖路基,其建造场地是在重丘或山岭区域,场地类别是影响工程的重要因素。对于工程场地分类,目前的研究方法主要有确定性和非确定性两类。目前关于岩、土的分类规范及准则主要是基于确定性的,在分类过程中考虑的主要是地质因素。例如对于岩石工程领域,国内煤炭、冶金、水利水电、公路交通等各个行业,根据各自的特点和侧重点,在多年资料积累和研究的基础上颁布了各自的分类方案。后来在综合各种分类方案的基础上,《工程岩体分级标准》(GB50218—94)在 1992 年颁布,1994 年被确认为国家标准,在 1995 年下半年开始执行。该标准分两步进行,首先考虑岩石强度和岩体完整性,对岩体形成基本评价。然后进一步根据岩体的弱面与工程关系、地下水和地应力场三个因

素进行修正,最后得出总体评价。国外对岩体分类比较著名的有 CSIR 分类法、Q 分类法。CSIR 分类法考虑了岩块强度、岩心质量指标、节理间距、节理条件及地下水条件 5 个条件,然后根据节理与工程的关系进行修正,最后将岩体分为五级。Q 分类法主要考虑了岩石质量指标、节理组数、节理粗糙系数、蚀变系数、节理水折减系数和应力折减系数。这些分类方法在边坡、地下洞室、隧道及各类工程中被广泛采用。这些方法的重点在于评价场地的稳定性问题,对山区公路路基建设场地的分析具有借鉴和指导作用,但又不能套用。山区公路是带状工程,相对来说是一种表面工程。其建造方式、工艺固然与场地的地质因素有关,但同时与地形、地貌有关。所以山区公路场地类型不但要考虑地质因素,而且应该考虑地理因素。

另外基于稳定性评价的地质因素分类方法中,由于地质体是长期的地质历史运动形成的,各类因素中存在不确定性。为了考虑这种不确定性,在分类时通过模糊理论表达,即模糊分类方法。

1.2.2 力学分析模式

半填半挖路基沿交接面的稳定性问题在力学上属于边坡问题。它的稳定性分析可以按照边坡力学模式进行。对于边坡的力学分析,成熟的模式和方法在总体上可以分为模型试验法和数学模拟法。模型试验法主要有块体结构模型试验、底面摩擦试验和离心模型试验。块体结构模型试验主要用于研究在施工和荷载作用下边坡岩土体的变形机制,常用于重要工程边坡。底面摩擦试验的作用与前者相近,但费用较少,简单易行。离心模型试验的突出优点是可真实反映原型结构的工作状态,只是试验条件复杂,费用高,使用还不普遍。数学模拟法主要有极限平衡分析法、极限分析法、数值模拟法及其他方法。其中极限平衡分析法是发展最早,最成熟的方法之一,主要计算模式见表 1.1。

表 1.1 极限平衡各模式及特点

方法	力的平衡	力矩平衡	对多余未知量的假定	滑裂面形状	特点
瑞典法	满足	部分满足	不考虑土条间作用力	圆弧	计算简单, F_s 值偏小 10%~20%, 适宜 φ 值较小的软岩和土质边坡
简化 Bishop	满足	部分满足	条间力合力方向水平	圆弧	F_s 比较接近实际。常用于分析土质、软岩质及碎岩边坡
简化 Janbu	满足	满足	假定条间力位置 $A_c = 1/3$	任意形状	适合各种形状的边坡, 需迭代求出 F_s 。

续表

方法	力的平衡	力矩平衡	对多余未知量的假定	滑裂面形状	特点
Spencer	满足	满足	假设条间力方向夹角为常数 δ	任意形状	所得 F_s 在工程角度已经足够精确
Mongenstern-Price 法	满足	满足	法向条间力和切向条间力之比为各种可能函数	任意形状	稳定系数 F_s 已经很精确
不平衡推力法	不满足	满足	条间力合力方向与滑面倾角一致	任意形状	工程中建议滑面控制点处的倾角变化小于 10°
Sarma	满足	不满足	滑面与侧面都达到极限状态,滑体作用临界水平加速度	任意形状	该法对滑坡体进行斜条分,可模拟断层节理等不连续面

在《公路路基设计规范》(JT GD30—2004)中,对半填半挖路基沿交接面的稳定性分析,推荐使用极限平衡分析中的不平衡推力法。不平衡推力法是一种计算简便、物理概念清晰、能够计算加固力、易于掌握和应用的边坡稳定性系数计算方法。不平衡推力法在具体计算上具有超载法和强度储备法,具体差异见表1.2。其在许多工程中获得了广泛应用^[13~21]。但在大量的工程应该分析中,也表现出其局限性。时卫民等^[22]、张鲁谕等^[23]、郑颖人等^[24,25]、梁斌等^[26]、季微微等^[27]对不平衡推力法的精度及应该注意的问题进行了系统的分析。

表 1.2 传递系数法的分类及其特点

计算方法	力的平衡条件	基本特点
强度储备法	分块及整体静力平衡	各条块的稳定系数与整体稳定系数相等。采用上一条块的剩余下滑力向下一条块滑动面逐块投影法, $D_i < 0$ 时,取 $D_i = 0$ 。假定滑动面剪切强度参数黏聚力 c 及摩擦系数 $\tan\varphi$ 具有一定的安全储备,将其除滑坡体各条块及整体的 F_s ,再视滑坡体处于极限平衡状态,由此求得滑坡体的 F_s 。
超载法	整体静力平衡	仅考虑整体静力平衡。采用上一条块的滑动力与抗滑力向下一条块滑动面上分别逐块投影,假定黏聚力 c 及摩擦系数 $\tan\varphi$ 不变,将滑动力乘滑坡体各条块及整体的 F_s ,再视滑坡体处于极限平衡状态,由此求得滑坡体的 F_s 。计算稳定系数时,不考虑剩余下滑力为负值时,令其为零的情况;但推力计算时,则考虑剩余下滑力为负值时令其为零

强度储备法是通过不断折减抗剪强度,使坡体达到极限状态,以此来求稳定系数。采用试算法:先假设一个稳定性系数 F_s 值,自上往下依次计算条块间的净滑力 D_i ,由于土条之间不能承受拉力,所以当条间力 $D_i < 0$ 时,取 $D_i = 0$,自

此不再向下传递, 注意到滑体的边界条件 $D_0 = D_n = 0$, 当出现 $D_n > 0$ 时, 说明 F_s 偏高; 当出现 $D_n < 0$ 时, 说明 F_s 偏低, 应当适当调整, 直至满足 $D_n = 0$, 此时 F_s 即为所求。

超载法是在正常荷载组合作用的基础上, 按一定的倍数增大荷载直至边坡破坏失稳, 用这种方法求得的安全系数叫超载安全系数。超载法不满足条块剩余下滑力的合力小于零时令其等于零的条件, 即条块之间允许出现拉应力, 当出现条块剩余下滑力小于零的情况时, 超载法计算所得到的稳定系数明显偏大。

文献 [22]、[23]、[25] 分别采用超载法 (显式计算方法)、强度储备法 (隐式计算方法) 和 Morgenstern-Price 法对某具体边坡工程的稳定性进行分析, 在计算中对比了边坡滑面不同分条数、分条底滑面倾角差大小不同时, 稳定性系数的变化与差异。图 1.1 是对一圆弧形滑面划分成不同的分条数时, 三种方法计算时稳定性系数随分块数的变化曲线, 即分条底滑面倾角变化与稳定性系数的变化关系。当滑面的倾角变化在 7.5° 以内时, 误差都在 3% 以内。所以时卫民等^[22]提出, 在实际工程中, 可将使用条件限制在 10° 以内。当滑面控制节点处的滑面倾角变化量小于 10° 时, 可以使用不平衡推力法。对于转折点处的倾角变化量超过 10° 时, 应对滑面进行处理, 消除突变及尖角效应。

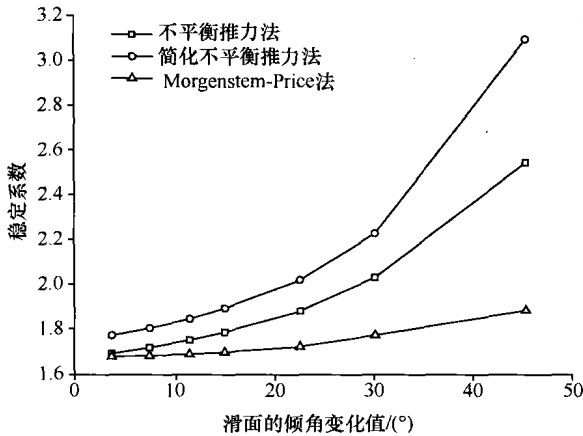


图 1.1 三种计算方法稳定性系数随分条底滑面倾角差的变化^[22]

1.2.3 不确定性因素描述

对于半填半挖路基的稳定性中的不确定性, 在总体上可归为两类。一类是模式的不确定性, 一类是参数的不确定性。潜在的不稳定模式可表现为折线形或圆弧形, 在采用极限平衡方法时, 滑动模式对稳定性系数的影响可通过适当增加分条数目, 减少分条底滑面之间的倾角差, 降低模式不确定性的影响。对于参数的

不确定性,目前主要有概率分布函数模拟、区间方法及模糊统计方法三类。常用来模拟的概率分布函数有正态函数、对数正态函数、威布尔函数、指数函数、均匀函数、伽马函数和极值函数等。作为各种分布函数的统一近似模拟,苏永华等^[28]提出了一种多项式近似模拟方法。对于岩土参数分布,许多学者在研究中取得了大量成就。如松尾稔^[29]曾对各主要土性参数的统计特征进行过详细研究,其结果可归纳为表 1.3。

表 1.3 各主要土性参数的统计特征值^[29]

土性参数	分布特征	变异系数	研究土性
粒度	正态分布		粉土或黏土
空隙比	正态分布		饱和黏土
含水量	正态分布	9.4%~20.5%	不饱和黏土和粉土
重度	正态分布	2.5%~4.1%	不饱和黏土和粉土
稠度	正态分布		黏土
无限侧抗压强度	正态分布(深度方向)	18%~40.9%	饱和黏土
不排水抗剪强度	正态分布(深度方向)	16%~35%	饱和黏土
抗剪强度	正态分布	5.3%~15.3%	不饱和砂质粉土、粉砂
内聚力	正态分布	19.3%~48.7%	不饱和土
摩擦系数	正态分布	5.75%~46%	不饱和土
压缩指数	正态分布	9%~52.6%	正常固结黏土
压缩比	正态分布	9.6%~38.4%	正常固结黏土
固结前空隙比	正态分布	5.5%~28.3%	正常固结黏土
体积压缩系数	对数正态分布	2.7%~27.5%	海底黏土
固结系数	对数正态分布	6%~57.5%	海底黏土

在岩体参数统计特性方面,除基本的物理力学参数外,还有结构参数。对于岩体结构,主要表征参数是节理迹长、间距、倾向和倾角等,也获得了很多进展。表 1.4 是学者们对有关岩体结构参数统计特征的部分研究成果。

表 1.4 岩体结构参数的分布形式^[37]

研究者	时间	节理间距	节理迹长	产状(倾角、倾向)
Hudson & Priest	1979 年	负指数		
Priest & Hudson	1981 年		负指数	
Barton et al	1985 年		对数正态	
Robertson	1970 年		负指数	
McMahon	1974 年		对数正态	

续表

研究者	时间	节理间距	节理迹长	产状(倾角、倾向)
Call et al	1976 年	负指数	负指数	
Priest & Priest	1976 年	负指数		
Bridges et al	1975 年	对数正态	对数正态	
Baecher et al	1977 年	负指数	对数正态	
Yong	1977 年			正态分布
Herget	1978 年			相互独立的正态分布
Herget	1982 年	负指数	负指数	
Einstein & Baecher	1983 年	负指数	对数正态	
Mahtab & Yegulp	1982 年			联合正态分布
Kulatilake	1985 年			联合 Fisher 分布
Barton et al	1975 年	对数正态分布	对数正态分布	
Mahtab & Bolstad	1985 年			球面正态分布

岩土力学参数的不确定性不但表现为随机性,通过统计特征模拟,同时还发现具有模糊性。因此,岩土参数是模糊-随机参数,有关学者研究了岩土参数的随机-模糊分析方法。如张玉香^[30]讨论了随机-模糊处理方法在岩石力学指标统计分析中的应用,并对计算中诸如迭代精度、隶属函数的取值等关键问题进行了研究。结果表明,基于岩石样本力学参数的离散性中既包含随机不确定性,又包含模糊不确定性,采用随机-模糊处理方法优于其他常规的统计方法。宋克志等^[31]分析了隧道及岩土参数分布的随机性、地层变位的不确定性;采用蒙特卡罗方法模拟出地层位移的统计值,进而计算出地层变位的可靠指标与失效概率,并通过相关系数矩阵和概率灵敏度图分析了随机输入参数对地层变位的影响。张征等^[32]探讨了岩土参数空间最优估计精度的特异值处理方法,提出对存在特异值的岩土参数随机场进行估计时,应用指示克立格法能够获得符合实际的最优估计效果。

刘春原等^[33]分析了半变异函数和相关函数两种描述岩土参数随机场的随机性的内涵和联系,证明加权最小二乘多项式可作为最佳线性预测函数。张永杰等^[34]根据岩土抗剪强度试验数据的随机性与模糊性特点,采用试验值相对估计值的隶属度以反映其偏离程度及其所具有的模糊性,并将隶属度作为残差权值以减少异常试验数据对拟合结果的影响,建立岩土抗剪强度参数模糊拟合方法。胡小荣等^[35,36]将岩土力学介质视为随机场,应用地质统计学方法对岩土力学参数随机场的空间变异性进行分析,提出利用地质统计学方法进行有限元单元体岩体力学参数赋值。李胡生等^[38~41]对岩土参数的模糊性及随机模糊性进行过系统

的研究,提出了岩土参数的模糊层次处理,随机参数特征值的模糊计算方法等。同时有关学者对边坡的圆弧形破坏^[42]、平面形破坏^[43]、陡峭型破坏等模式的随机-模糊分析方法也进行了比较完整的探讨^[44]。

岩土工程中的不确定性采用统计方法、模糊方法或随机-模糊方法进行描述时,为了得到比较准确的表达函数(分布概率函数、隶属函数或随机-模糊函数),通常需要得到一个容量较大的样本。如果样本容量不够大,需要假设分布函数的形式,而最终的分析结论对分布函数的形式很敏感,有可能导致较大误差。在大多数情况下,岩土基本参数的样本容量是有限的,采用统计方法、模糊方法或统计-模糊方法就存在困难或导致分析结论的准确程度很难判断。为了克服这一困难,有关学者考虑到区间理论与不确定性的天然联系,提出了岩土工程不确定性的区间分析方法,并取得了不少进展。王登刚等^[45]、李守巨等^[46]、刘世君等^[47]建立了识别地应力和围岩弹性模量的反演模型,考虑其不确定性因素,通过反分析后,得出了地应力、弹性模量、泊松比、黏聚力和内摩擦角等参数的区间范围。曹文贵等^[48]采用非对称三角模糊数反映岩石抗剪强度参数取值的区间性特征及可能性分布,提出了基于非对称三角模糊数的岩石抗剪强度参数区间表达方法。蒋冲等^[49]、苏永华等^[50,51]、王继承等^[52]等基于岩土参数的非确定性区间表达方法,把岩土力学参数以及由此得到的响应量当做区间变量,建立了基于区间的岩土结构稳定非概率可靠性分析模型。

1.2.4 不确定性模型的近似分析

半填半挖路基交接面与地形地貌、地质条件及施工、加固等多种方式有关,在几何形状上是复杂的。对于复杂形状滑面的岩土边坡,其力学模型复杂,导致相应的非确定性分析计算过程复杂且计算工作量大。为了简化计算,研究者们提出了各类近似且具有较高精度的方法。随着响应面方法^[53~56]的发展,Felix和Wong等^[57]学者提出了以有限元模拟为工具,建立边坡结构状态方程,然后采用精确分析方法计算失效概率。在边坡稳定性分析中,极限平衡理论是一种成熟且常用的方法,但极限平衡理论各模式的稳定性系数计算是单个条分稳定性系数计算的累积形式,极限状态方程无法通过显式表达。为了将极限状态方程显式化,苏永华等^[58~60]利用稳定性系数计算作为虚拟试验,以二次多项式为过渡函数、可靠度指标迭代计算收敛为标准的响应面可靠度方法,获得了较好的计算效果。

1.2.5 影响因素的敏感性

在边坡稳定性分析中找出影响边坡稳定的敏感因素是非常有意义的,可根据敏感性因素确定试验组数和取值,分析边坡的稳定可靠程度,提高防治和监测方