

花岗岩类土质边坡特性 及其组合锚固设计

赵晓彦 黄少强 胡厚田 ◎ 著

**HUAGANGYAN LEITUZHI
BIANPO TEXING JIQI ZUHE
MAOGU SHEJI**



人民交通出版社
China Communications Press

花岗岩类土质边坡特性 及其组合锚固设计

赵晓彦 黄少强 胡厚田 ◎ 著

**HUAGANGYAN LEITUZHI
BIANPO TEXING JIQI ZUHE
MAOGU SHEJI**



人民交通出版社
China Communications Press

序

由胡厚田教授主持、赵晓彦副教授等主研的国家自然科学基金项目“类土质边坡锚固体与坡体耦合的理论研究”，及由黄少强高工、胡厚田教授联合主持，赵晓彦副教授、陈志新工程师等主研的广东省公路管理局科技项目“公路类土质高边坡预应力锚固优化设计研究”，对花岗岩类土质边坡的特性及其锚固设计方法进行了深入细致的研究，得出了良多有益的成果，特别是以下两个创新性成果。

一为花岗岩类土质边坡概念的提出及其工程特性的分析。这是对边坡工程领域一个重要的补充，以往将其视为一般的均质土边坡进行勘察、设计，造成了设计浪费或设计失败，该成果将为花岗岩风化介质组成的边坡的勘察、稳定性分析及加固设计提供重要的理论基础。

二为主被动组合锚固边坡设计方法的提出。预应力锚索作为主动锚固措施、非预应力锚杆作为被动锚固措施，两者联合应用于边坡加固，在工程实践中被越来越多地采用，但两者如何协调作用，在设计中如何体现这种主被动措施间的协调作用，一直是困扰工程界的一个难题。上述项目的研究对该问题进行了深入的探索，初步提出了主被动组合措施锚固边坡的两阶段设计方法，将有力地促进这种组合措施的优化设计，在交通领域具有重要的理论意义和实际应用价值。

本书是我国有关花岗岩类土质边坡锚固设计的第一本专著，是作者对花岗岩类土质边坡进行系统研究的总结。本书的主要内容包括：绪论；花岗岩类土质边坡的性质；花岗岩类土质边坡开挖卸荷效应及稳

定特性的离心模型试验;锚固力在坡体内的分布及边坡锚固能力;预应力锚索框架梁内力计算;坡体与锚固体耦合及解耦作用下的边坡稳定性计算;主被动组合锚固边坡的设计方法;主被动组合锚固边坡设计实例。本书可供有关岩土工程的科研、勘察、设计、施工人员参考、应用。

A stylized, handwritten signature in black ink, consisting of three characters: '郑', '颖', and '人'.

中国工程院院士 郑颖人

二〇一一年三月

前 言

按照边坡的构成介质,可以把边坡分为岩质边坡、土质边坡及二元边坡。现行规范对边坡稳定性评价及加固措施设计的相关规定,也多集中于均质土边坡或岩质边坡。随着高等级铁路、公路向山区的纵深发展及深基坑的开挖,在花岗岩及花岗类岩石地区遇到了性质介于岩质边坡和土质边坡之间的过渡型边坡——花岗岩土质边坡。该类边坡的构成介质为由花岗岩或花岗类岩石风化成的土体,土体本身属砂性土或黏性土,但边坡坡体在一定程度上继承了母岩结构面等岩体结构特征,土体中保留或部分保留原岩中的结构面,有时还残存少量弱风化的花岗岩硬核,从而具有特殊的稳定性及开挖卸荷特性,边坡稳定性明显不同于一般的均质土边坡。

我国花岗岩出露广泛,广东省花岗岩出露面积占全省总面积的30%~40%,福建省约有40%,香港特别行政区有30%以上,广西壮族自治区、湖南省、江西省分别占本省面积的10%~20%。由于南方湿润多雨,这些地区的山体多发育很厚的花岗岩风化壳。如汕(头)梅(州)高速公路汕揭段钻探资料揭示的全强风化的类土质厚度达60m以上。我国正加大力度进行高等级铁路及公路的建设,势必将形成更多的类土质边坡。

然而,长期以来,该类边坡特殊的稳定性并未引起足够的重视。在边坡加固及边坡病害整治设计中,多将该类边坡视为一般均质土边坡,没有考虑到其中的结构面等类似于岩体边坡的特征,这可能出现两种疏漏问题:一是在没有搞清楚类土质边坡的结构和稳定性的情况下,盲目采用加固工程,造成浪费;二是对一般类土质边坡在

没有查清潜在滑动面的情况下,草率地作出不做加固处理的决定,给工程带来隐患。

为了强调该类边坡的特殊性,引起工程人员对该类边坡的重视,本书在总结以往研究的基础上,提出花岗岩类土质边坡的概念——由花岗类岩体风化而成,保留或部分继承了原岩的结构面等其他岩体特征且未经二次堆积的土体物质或破碎岩体物质构成,稳定特性明显区别于均质土边坡及岩质边坡的一类边坡;分析该类边坡的特性,并在此基础上提出该类边坡的锚固设计方法,特别是主被动组合锚固措施的设计方法。

本书编写人员包括:西南交通大学赵晓彦、广东省清远公路管理局黄少强、西南交通大学胡厚田、广东省清远公路管理局陈志新。

本书是国家自然科学基金项目“类土质边坡锚固体与坡体耦合的理论研究”(项目编号 50278081)和广东省公路管理局科技项目“公路类土质高边坡预应力锚固优化设计研究”的科研成果之一。项目开展及项目鉴定过程中得到了郑颖人院士、张玉芳教授级高工、马竞教授级高工、王春生教授级高工、陈振秀教授级高工、刘瀚飏高工、黄家亮工程师、林卓然工程师、冯水财工程师、廖军辉高工、黄伟思工程师、李瑞文工程师、陈强副教授等的指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

本书可供相关工程地质、岩土工程科研人员以及从事边坡勘察、设计、施工的工程技术人员参考使用。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏和错误,敬请读者批评指正。

作 者

二〇一一年三月

目 录

1 绪论	1
1.1 花岗岩类土质边坡的研究现状	2
1.2 边坡锚固技术的研究现状	7
1.3 本书主要内容	8
2 花岗岩类土质边坡的性质	10
2.1 边坡介质特征	10
2.2 边坡结构特征	14
2.3 边坡坡体结构类型	16
2.4 边坡主要破坏方式及破坏机理	22
2.5 边坡的工程性质	27
2.6 边坡设计建议	30
2.7 小结	35
3 花岗岩类土质边坡开挖卸荷效应及稳定特性的离心模型试验	36
3.1 离心模型试验中的误差处理	36
3.2 离心相似模型的推导	39
3.3 试验模型制作及测量元件的埋设	42
3.4 试验方案	46
3.5 离心模型试验结果分析	49
3.6 小结	55
4 锚固力在坡体内的分布及边坡锚固能力	57
4.1 锚固力在坡体内分布的理论推导	57
4.2 锚固力在坡体内分布的离心模型试验	71
4.3 花岗岩类土质边坡的锚固能力	78
4.4 小结	86
5 预应力锚索框架梁内力计算	88
5.1 预应力锚索框架(地梁)现有计算方法评述	89

5.2	预应力锚索框架(地梁)的力学计算研究	91
5.3	离心模型试验	103
5.4	小结	108
6	坡体与锚固体耦合及解耦作用下边坡稳定性计算	110
6.1	预应力锚索加固边坡的力学机理	111
6.2	预应力锚固后边坡稳定性计算	112
6.3	锚固体与坡体耦合阶段边坡稳定性计算	129
6.4	解耦阶段的边坡稳定性计算	136
6.5	小结	139
7	主被动组合锚固边坡的设计方法	140
7.1	主被动组合锚固边坡的离心模型试验	140
7.2	主被动组合锚固边坡设计方法	146
7.3	小结	150
8	主被动组合锚固边坡设计实例	151
8.1	边坡概况	151
8.2	组合锚固设计过程	154
8.3	组合锚固边坡的现场测试	156
8.4	小结	187
	参考文献	188

1 绪论

花岗岩作为一种常见的深成侵入岩,在世界范围内分布广泛,亦广泛分布于我国各地,约占我国国土面积的 9%,尤其在东南地区,大面积裸露各类花岗岩体,其在福建省所占比重甚至超过 40%。构造作用会使岩体暴露于地表,受长期风化作用后易形成厚度不一的风化残积土覆盖层,特别是在气候湿润多雨的地区,如我国的东部及东南部地区,往往形成几十米甚至上百米的花岗岩风化壳。在该类地区修建公路及铁路,会形成大量的花岗岩残积土及全强风化的花岗岩路堑边坡,该类边坡的坡体介质中由于继承或部分保留了原岩中的结构面等岩体结构特征,而与一般的均质土边坡相比有明显不同的稳定特性等工程性质。而工程实践中往往将其当作均质土边坡进行勘察、设计,造成设计失败或设计浪费。

在该类高边坡的加固工程实践中,由于坡体介质多较致密,越来越多地采用锚固措施,广泛应用的是预应力锚索与非预应力杆联合应用的主被动组合锚固。但这种主被动组合锚固的设计方法尚不成熟,设计中多不计非预应力锚杆对边坡整体稳定性的贡献,仅仅将其视为用于局部加固的辅助措施,不能良好地体现主动锚固和被动锚固间的协调作用,从而造成设计浪费。

为了较系统地解决该类边坡的稳定性评价及其组合锚固设计中的关键问题,引起人们对该类边坡特殊性的重视,将该类边坡称为花岗岩类土质边坡^[1]。本书主要研究花岗岩类土质边坡的工程特性及其主被动组合锚固的设计方法。

本书所述花岗岩类土质边坡,是指由花岗类岩体风化而成,保留或部分继承了原岩的结构面等其他岩体特征且未经二次堆积的土体物质或破碎岩体物质构成,稳定特性明显区别于均质土边坡及岩质边坡的一类边坡。

1.1 花岗岩类土质边坡的研究现状

1.1.1 花岗岩类土质边坡概念的沿革

花岗岩类土质边坡,作为一个概念的形成经历了如下三个阶段。

(1)最初的“类土质边坡”阶段

类土质边坡作为一个新概念是由杨明、胡厚田(2002)在文献[2]中首次系统提出的,两位学者在调查福建省三(明)福(州)、漳(州)龙(岩)等多条高速公路沿线的花岗岩残积土边坡的基础上,提出了类土质边坡的概念,即“由花岗岩、熔岩等火山岩风化而成的具有岩体结构特征的土体物质或破碎岩体物质组成的边坡,包括残积土边坡、全风化和强风化软岩边坡等”。该概念认为除了花岗岩外,熔岩等其他火山岩边坡风化后亦可形成类土质边坡,其构成介质具有岩体结构特征。

(2)类土质边坡概念的扩大阶段

最初的类土质边坡概念提出后,卢才金^[3-4]、廖小平^[5]、赵晓彦^[6]等以此概念为基础,对类土质边坡的性质及稳定性计算、边坡设计方法进行了相关研究。其间最显著的特征是将类土质边坡的概念进行了扩大。如廖小平^[5](2003)根据类土质路堑边坡的物质组成、成因机制和坡体结构特征,将类土质边坡分为如下类型。

①残积土边坡:该类型中强调边坡的二元结构,包括上覆坡残积层与下伏残积层、上覆坡残积层与下伏基岩、上覆坡残积层与下伏风化岩层组成的二元结构边坡。

②风化土边坡:边坡主体由全强风化土层或砂土状强风化层组成。

③崩滑流堆积物边坡:边坡主体由崩塌、滑坡或泥石流堆积体组成。

④复杂结构边坡:边坡坡体结构是由上述三种基本坡体结构类型复合组成,体现不同结构类型特点及其相互作用和影响。

赵晓彦^[6](2005)通过对四川红层及滇西红层中发育的残积土边坡的调查,在文献[2]中将最初的“类土质边坡”的概念进行扩大,认为类土质边坡应包括“由岩体风化而成的保留或部分继承了原岩的结构面的土体物质或破碎岩体物质构成,无法单独应用传统的土力学理论进行求解的边坡”。该概念进一步强调残积土中继承自原岩的结构面对边坡稳定性的影响。该类边坡中的潜在滑动面不能完全采用适用于均质土边坡的圆弧搜索法。文献[2]中给出的类土质边坡的类型划分如下。

①软岩全强风化边坡:主要出露在诸如砂岩、泥岩、页岩等的全强风化带。软岩已经基本风化成砂质黏土、粉质黏土或黏砂土,但土体中保留或部分保留了软岩体中原有的层面和节理。由于软弱结构面的强度远低于风化土的强度,当其倾向边坡时,使得该类边坡常沿这些软弱结构面失稳,形成平面滑动或错落、溜坍;与边坡大角度相交时,形成类似岩体的楔形破坏。

②软硬相间的砂页岩全强风化边坡:此类边坡岩体易沿层面或节理面等各种结构面进行风化。特别是岩体具有层间错动而形成张开裂缝时,水体易沿这些裂缝渗入、流动,加速边坡岩体的风化,并形成泥质充填物。边坡开挖后,沿结构面的风化作用使得边坡浅层呈碎裂岩体状。在作者进行调查的达(州)渝高速、渝涪(陵)高速、渝长(寿)高速等川、渝境内的多条高速公路路堑边坡中均有大量此类边坡。

③坚硬的花岗岩类岩石全强风化边坡:即最初的“类土质边坡”,土体中保留了原岩中的结构面,如岩脉、岩墙接触面、原生节理及浅表生结构面,如卸荷裂隙、风化裂隙、软化夹层、次生夹泥等。

该扩大的类土质边坡概念,虽然涵盖了更多具有结构面等岩体结构特征的残积土边坡,但就概念本身而言,过于宽泛,不能有针对性地体现类土质边坡的特点。因为红层等沉积软岩的残积土边坡、软硬相间的砂页岩全强风化边坡的破坏,一般沿土石接触面滑动,将其归为类土质边坡将使该类边坡的稳定性分析复杂化。

(3)花岗岩类土质边坡概念的最终形成

通过对 G323 国道、G318 国道、汕(头)揭(阳)高速公路等大量的野外调查研究,作者发现,由于花岗岩及花岗岩类岩石本身的结构特征,使得类土质特征,即边坡土体介质中继承了原岩中的结构面,在花岗岩残积土及全强风化花岗岩边坡中最典型^[6],将其单独归类,更利于该类边坡工程地质模型的建立及边坡稳定性、加固工程设计的研究。故本书将“类土质边坡”的概念限定在花岗岩及花岗岩类岩石的风化边坡中,命名为“花岗岩类土质边坡”。

1.1.2 类土质边坡的稳定性分析方法

类土质边坡的概念提出后,学者们认识到了其在自然状态及工程开挖过程中的稳定性及失稳模式有别于一般的均质土边坡和岩质边坡。对于该类边坡稳定性的计算分析方法,有学者进行了一定的研究。

廖小平^[4](2003)将类土质路堑边坡的滑动模式归纳为四种类型:均匀层状型、基底控制型、结构面组合型和固定滑面型,在此基础上采用常用的边坡稳定性计算方法进行该类边坡的稳定性分析评价。该滑动模式的划分是基于扩大的

类土质边坡进行的,分类中强调了结构面的重要性,是类土质边坡稳定性分析技术研究方面的一大进步,但未针对花岗岩风化土体中的结构面特征进行花岗岩类土质边坡滑动模式的划分。

卢才金^[4](2006)基于坡体中结构面的空间特征,提出了如图 1-1 所示的几种滑面形状,并以这些滑面形状和传递系数法为基础,设计了边坡稳定性计算软件。

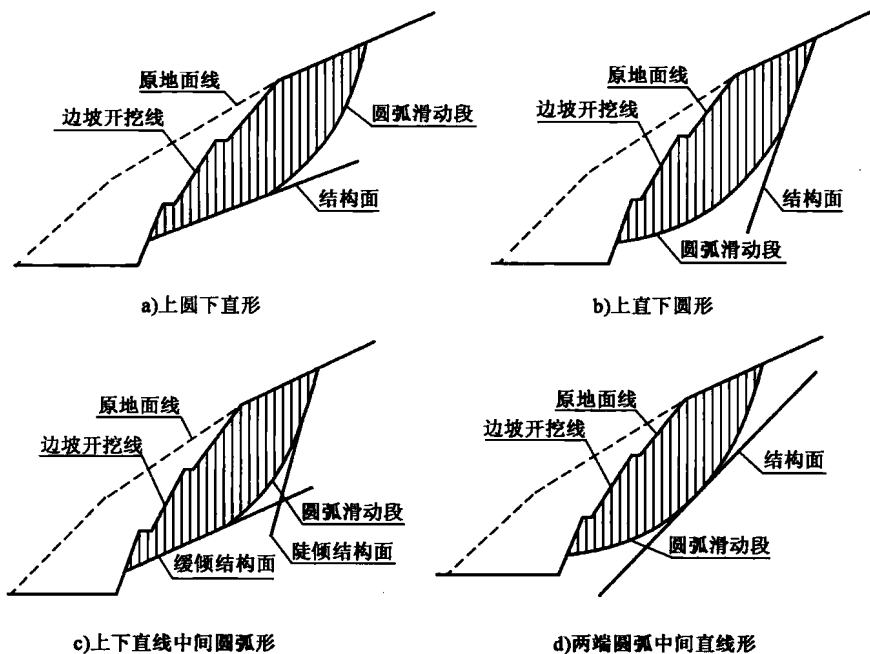


图 1-1 受结构面控制的类土质边坡滑面形式(据卢才金)

- ①上圆下直形:结构面在组合滑动面的下部,一般为缓倾结构面。
- ②上直下圆形:结构面在组合滑动面的上部,一般为陡倾结构面。
- ③上下直线中间圆弧形:坡体内具有两组以上结构面,且均对边坡破坏具有控制作用。
- ④两端圆弧中间直线形:滑动面中部为直线,依附于较陡倾角的结构面或土岩交界面,而上下部为贯穿土体的圆弧面。

对于坡体中结构面抗剪强度指标的选取,卢才金提出了以下几种情况。

(1)平直光滑的节理面:建议采用一般的直接剪切试验确定摩擦角,一般可取其黏聚力为 0;摩擦角可取为 $12^{\circ} \sim 22^{\circ}$ 。

(2)粗糙无充填物节理面:采用土体的强度作为结构的强度,或进行一定程

度的折减。

(3)具有充填物的结构面:根据孙广忠提出的方法,依充填物性质取摩擦系数和黏聚力经验值。

(4)软弱夹层:由于软弱夹层厚度一般可满足取样要求,故建议进行室内剪切试验确定抗剪强度指标。对于未曾沿其错动的结构面取峰值强度,对于曾经沿其错动过的结构面则取其残余强度。

(5)岩土风化界面:一般取力学指标较低的那一组土体的指标,并且根据界面积水情况和土体性质进行折减。

以上类土质边坡稳定性计算分析方法,均强调了坡体中结构面的存在对边坡稳定性及其计算模式的影响,特别是在卢才金提出的计算分析方法中,给出了不同结构面类型的抗剪强度指标取值方法。

然而,类土质边坡中的结构面与岩质边坡中的结构面有很大程度的不同,最重要的区别在于类土质边坡中的结构面多数是隐藏的^[6],边坡开挖前是肉眼不可见或难于直接勘察的。工程实践中,人们往往很难像勘察岩质边坡中的结构面那样确定类土质边坡中结构面的空间分布。因此,在花岗岩类土质边坡的工程实践中,仍需按均质土边坡的圆弧滑面进行边坡稳定性计算。

1.1.3 花岗岩风化土体特征的研究现状

类土质边坡的概念是从研究花岗岩残积土边坡入手而提出的,类土质边坡的特性主要表现在其边坡的构成介质保留了原岩岩体的部分性质,从而使其破坏方式存在异于均质土边坡的特殊性。

自20世纪60年代以来,国内外很多学者在花岗岩风化特征,风化壳的分带、分布规律及地貌过程等方面进行了研究,取得了可喜的成果^[7-15]。但这些研究主要是从花岗岩残积层作为地基基础、路基填料或地貌景观的出发点进行研究的。

陈晓明^[16](2002)通过分析花岗岩风化作用及其主要影响因素,了解其风化剖面的特征及其在广东省沿海地区的分布特点,研究了燕山期花岗岩风化剖面的垂直分带性及差异风化现象,指出了微风化起伏与风化球的区别及风化球的鉴别方法。

阳发清、孙瑞娟^[17](2002)对厦门汇成发展有限公司嘉莲西栋花岗岩残积土的物理力学性质,尤其是变形特性进行了详细的分析与探讨,得出了基本物理指标(天然含水率、孔隙比、天然重度)及变形模量与压缩模量、垂直固结系数随深度的变化。

魏克和、刘殿选^[18](1991)研究了闽粤地区的花岗岩残积土。研究结果表

明,花岗岩残积土是一种强度较高,压缩性较低的土体,可作为20层以下中高层建筑的天然地基;风化花岗岩的承载力高于规范的取值,给出花岗岩残积层的承载力经验值为150~600kPa,强风化层为600~1500kPa。

可见,以往对花岗岩残积土的研究主要围绕以下几方面展开:

- (1)风化残积土的平面分布特征研究;
- (2)风化残积土的垂直分带性及其物理力学性质变化研究;
- (3)风化残积土垂直分带的化学指标体系研究。

广东省惠州市水电建筑工程总公司陈泳周、广西大学黄绍派等^[19-20],研究了花岗岩风化残积土的平面分布特征,根据广东各河系侵蚀河谷的基准高程大致为45~50m的特点,同时结合广东较低的几级侵蚀面的高程,从平面上把广东花岗岩类风化土厚度特征和地貌形态分为三大类区。黄欢通过研究番禺地区花岗岩残积土,将该地区花岗岩残积土分为地表残积土、地下残积土上部和地下残积土下部三带,并把地下残积土又细分为三层,其中第二层偶见原岩结构,第三层原岩结构明显^[21-22]。陈泳周、黄绍派等通过对广东省花岗岩风化土的广泛调研,将该类土体从上到下分为三个带,研究了三个带中土的基本性质。他们给出了花岗岩风化土不同分带土的颗粒组成,以及各带风化土的物理力学性质。花岗岩风化的化学机理方面的研究成果也较多^[23-25],对其风化土的变化模式业内达成了水化—溶解—水解的共识。但对其风化土按化学指标体系进行垂直分带的研究成果还不多见。香港科技大学吴宏伟、P. M. Banna,中科院地质研究所尚彦军、曲永新^[26],对香港的花岗岩风化土给出了分带指标。

风化花岗岩边坡稳定性方面的研究较少,对其中的结构面很少有人加以重视。山口真一、中村三郎^[27],王彦华、谢先德、王春云^[28](2000)对风化花岗岩崩塌灾害的成因机理进行了研究,计算出了坡体滑动或崩塌面的临界深度及降雨对坡体稳定性的影响,指出其崩塌的主要影响因素为坡体介质的粒度组成、密度、含水率和饱和度等。但他们是把风化花岗岩边坡作为均质土边坡进行研究的,没有考虑其中的结构面对坡体稳定性的影响。李思平^[29-30](1992)对花岗岩风化壳的滑坡特性进行了研究,总结出花岗岩风化壳斜坡的失稳过程有四个特点:降雨主诱,即主要为牵引式滑动;距离短,主要为浅层滑动,滑体厚度一般在1m左右;滑坡多发育于阴坡,即滑坡多以急剧方式运动;发生滑坡的自然坡度大多为40°~50°。值得注意的是,李思平提出了坡体中的裂隙面对坡体稳定性的影响,他将其中的裂隙作为地表水吸收中心,从而使毛细水形成的负孔隙压力消失,强度骤降而导致斜坡土体失稳。他指出沿结构面的滑动发生在山丘陡壁,一般方量为一平方米至数平方米时,应定义为滑塌。

分析以上研究成果,尚存在如下问题。

对花岗岩风化土开挖的人工边坡的稳定性缺乏研究。以往及当前研究花岗岩的风化土性质,主要为其作为天然地基持力层、桩基持力层提供依据,其研究也是从这些方面出发的。对边坡稳定性的研究,就必须考虑边坡的结构性质,考虑其中结构面的影响,这一点在花岗岩风化土的研究中还未涉及。陈泳周、曲永新等在谈到花岗岩风化土边坡(主要为基坑边坡)破坏时曾提到应该注意其中的裂缝,但并未从这些裂缝或结构面的存在出发,对边坡的稳定性作深入的研究。其实,土体中的结构面对土体性质及其破坏特性的影响是很大的。王桢发现裂隙的存在不仅破坏了土体的连续性,而且结构面的不利组合控制了土体滑动面的形状^[31]。

1.2 边坡锚固技术的研究现状

边坡锚固技术以主动改善边坡的应力状态为特征,其综合造价及社会经济效益要明显优于传统的重型支挡结构(如重力式挡墙、抗滑桩等被动加固措施)^[32-33]。锚索框架,即预应力锚索与格形地梁结构,是一种新型的锚固结构。运用这种结构进行边坡的加固是近十几年才发展起来的一项技术^[34-37]。采用预应力锚索抗滑,抑制件为连续格形结构地梁,将梁嵌入坡体与坡面平直,格内种植草皮或镶嵌片石,既能抑制因雨水等因素造成的坡面岩体风化、剥落以及溜坍等灾害,又能保证锚索在抗滑中的均匀性、连续性及整体性,达到完全稳固边坡的目的。

锚索框架技术在我国已越来越被重视并取得了相当规模的应用,但框架的设计(如框架梁的截面尺寸、梁的间距、梁的内力计算等)往往是基于经验或一些粗略的计算,导致锚索框架结构设置不合理,且大多集中于岩石边坡和一般均质土边坡,没有专门针对类土质边坡的特性进行研究。

同时,在边坡锚固工程设计中,一般是根据边坡未加固时的危险面位置,按抗滑力和下滑力大小来确定锚固方案的。但边坡未加固时的状态根本不同于实际工作状态,因此以未加固时的状态出发来设计边坡锚固工程不能充分体现锚固技术的主动加固特点,必然造成资源的浪费。

目前也有部分学者试图从加固后的边坡工作状态入手,探讨锚固岩体的性质。重庆交通学院陈洪凯等^[38]试图通过等效的方法来研究锚固岩体的参数。武汉科技大学李德芳,中科院武汉岩土力学研究所张友良、陈从新基于结构力学理论,提出了框架设计的矩阵方法^[39]。邹志晖、汪志林^[40]提出了不同弹模的围岩岩体存在布锚优化的问题,探讨了锚杆对不同岩体的约束效应和锚杆对不同弹模岩体的 E 、 c 、 φ 值等破坏强度的影响机制,初步提出了锚固体与围岩体的相

互作用机制。王建宇、牟瑞芳^[41]提出了按共同变形原理计算地锚工程中黏结型锚头内力,提出了一种考虑锚杆、浆体和岩土间共同作用的计算模型。

但以上研究多是简单的推导或分析,没能在锚固体与被加固体的相互作用方面从理论上获得较大的突破,而且都是集中研究岩体的锚固。

对锚索框架的设计计算现主要是沿用半无限弹性地基上连续梁的计算方法^[42-44]。关于地基梁的计算,虽然也出现了一些新的方法^[45-47],但大多只是基于单梁的计算,没有考虑锚拉力通过梁的分配和各节点荷载之间的相互影响。

以上研究成果很少考虑在锚固力作用下,岩土体与锚固体的耦合效应,而这往往对锚固效果有很大的影响。著名岩土锚固专家程良奎在他的《岩土锚固的现状与发展》^[48]一文中也建议,应重视锚固预应力对岩土体应力重分布及岩土体力学性能影响方面的研究。

另外,在边坡锚固的工程实践中,越来越多地采用预应力锚索和非预应力锚杆或其他被动锚固措施的联合应用^[1,49-50]。预应力锚索锚固为主动加固措施,非预应力锚杆锚固为被动加固措施。在边坡加固设计中,如何协调主被动加固措施的作用是目前设计中的难点。目前,尚缺乏主被动锚固措施联合加固边坡的设计方法。实际边坡设计中,往往是让预应力锚索承担整体边坡所有的剩余下滑力,而非预应力锚杆则只起局部加固作用,多不计其在边坡整体稳定性中的贡献,造成了大量的设计浪费。

1.3 本书主要内容

本书的主要内容如下。

(1) 花岗岩类土质边坡的特性

包括花岗岩类土质边坡的坡体介质特征、坡体结构类型和各类型边坡的稳定特性及其失稳控制因素、边坡的主要破坏方式及破坏机理、边坡的工程特性。在此基础上,提出花岗岩类土质边坡的设计建议。

(2) 花岗岩类土质边坡的开挖卸荷效应

该类边坡由于坡体中结构面的存在,使其较一般均质土边坡具有更显著的开挖卸荷效应。本书介绍该类边坡开挖卸荷效应的离心模型试验及数值模拟过程和结果,总结该类边坡的开挖卸荷效应特征。

(3) 锚固预应力在坡体内的分布规律

即单锚及框架锚固情况下,预应力自坡面向坡体内的传递及分布规律,包括基于弹性理论的解析解和离心模型试验结果。

(4) 框架梁的内力计算

包括预应力锚索框架的内力计算方法、离心模型试验结果、计算实例及现场测试结果。

(5) 锚固体与坡体耦合作用下的边坡稳定性计算方法

包括锚固体与坡体耦合作用机理、耦合作用下锚固边坡的稳定性计算方法、解耦情况下边坡的稳定性计算方法。

(6) 主被动组合锚固边坡的设计方法及算例

包括锚固后边坡稳定性的极限平衡算法、锚杆按其对边坡稳定性贡献的分类、被动组合锚固边坡的设计方法及实例。