

THEORY AND APPLICATION ON
GEOGRID REINFORCED SUBGRAD IN
LOESS RAVINE REGION

黄土沟壑区 加筋路基理论与应用

刘少文 申俊敏 赵建斌 张 军◎编著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

黄土沟壑区加筋路基理论与应用

Theory and Application on Geogrid Reinforced
Subgrad in Loess Ravine Region

刘少文 申俊敏 赵建斌 张 军 编著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

黄土沟壑区地质条件差异、地基高低起伏,非对称路基形式极为普遍。目前,主要采用加筋土技术对非对称路基进行处理,以缓解路基整体受力和变形的不均匀性。本书以非对称加筋路基为研究对象,在充分考虑了路基结构形式和交通重载的非对称性的基础上,深入调研了黄土沟壑区非对称路基病害特征和破坏机理,探讨了非对称路基现行技术规范中的设计施工方法;建立了筋—土拉拔试验颗粒流数值模型,揭示了拉拔过程中筋—土界面的宏观力学行为和细观组构参量的演化规律;系统开展了非对称加筋路基现场试验,对非对称加筋路基地基沉降、侧向位移、基底压力和筋材变形进行了长期监测;结合静/动力数值模拟,揭示了重载交通作用下非对称加筋路基受力机理与动力特性;提出了降雨入渗折减因子和降雨折减模式的概念,深入分析了降雨入渗对斜坡高填方加筋路基稳定性的影响。

本书可供从事公路、铁路和水利工程科研、设计、施工和管理工作的相关人员参考和借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

黄土沟壑区加筋路基理论与应用/刘少文等编著

—北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.2

ISBN 978-7-114-11978-1

I. ①黄… II. ①刘… III. ①黄土区—沟壑—加筋—
路基工程—研究 IV. ①U416.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 003941 号

书 名:黄土沟壑区加筋路基理论与应用

著 作 者:刘少文 申俊敏 赵建斌 张 军

责任编辑:周 宇 牛家鸣

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:11.5

字 数:264 千

版 次:2015 年 3 月 第 1 版

印 次:2015 年 3 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-11978-1

定 价:39.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前 言

随着我国不断深入推进西部大开发战略,黄土地区交通运输量日益增加,高等级公路作为最为方便快捷的交通运输资源,在该地区得到了大力发展。在高等级公路建设中,受实际建设条件制约,不可避免地要通过山涧谷地、沟壑纵横的黄土沟壑区。黄土沟壑区地质条件差异大、地基高低起伏,该地区路基形式具有显著的非对称性。由于路基结构形式的非对称性,其受力和变形极不均匀,导致运营过程中相继出现了诸如路基沉降、不均匀沉降量过大、坡体或坡面沉陷、滑坍破坏等病害。

目前,黄土沟壑区非对称路基主要采用加筋土技术进行处理,以缓解路基整体受力和变形的不均匀性。本书以非对称加筋路基为研究对象,在充分考虑了路基结构形式和交通重载的非对称性的基础上,深入调研了黄土沟壑区非对称路基病害特征和破坏机理,探讨了非对称路基现行技术规范中的设计施工方法;建立了筋—土拉拔试验颗粒流数值模型,揭示了拉拔过程中筋—土界面的宏观力学行为和细观组构参量的演化规律;系统开展了非对称加筋路基现场试验,对非对称加筋路基地基沉降、侧向位移、基底压力和筋材变形进行了长期监测;结合静/动力数值模拟,揭示了重载交通作用下非对称加筋路基受力机理与动力特性;提出了降雨入渗折减因子和降雨折减模式的概念,深入分析了降雨入渗对斜坡高填方加筋路基稳定性的影响。

本书在撰写过程中得到了交通运输部和山西省交通运输厅各级领导的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢!

本书共分14章,第1、2、7、10、12章由刘少文撰写,第3、4、13章由申俊敏撰写,第6、9、11章由赵建斌撰写,第5、8、14章由张军撰写。由于时间仓促及作者水平有限,书中难免有疏漏和不足之处,敬请各位读者批评指正。

作 者
2014年岁末

目 录

1 绪论	001
1.1 研究背景及意义	001
1.2 黄土路基工作特性研究现状	001
1.3 加筋土技术研究现状	005
1.4 路基稳定性研究现状	009
1.5 主要研究工作	014
2 黄土沟壑区非对称路基病害特征和破坏机理	016
2.1 引言	016
2.2 非对称路基的特点	016
2.3 黄土沟壑区非对称路基病害特征	016
2.4 非对称路基主要病害成因分析	020
2.5 本章小结	021
3 现行技术规范及计算分析方法	023
3.1 引言	023
3.2 现行行业技术规范中的相关规定	023
3.3 路基稳定性分析方法	025
3.4 路面结构地基分析模型	027
3.5 本章小结	027
4 黄土沟壑区路堤填料土性参数研究	028
4.1 引言	028
4.2 黄土路堤填料物理特性及参数	028
4.3 黄土路堤填料力学性质试验	030
4.4 本章小结	036
5 循环荷载下击实黄土路基动力响应研究	037
5.1 概述	037
5.2 试验设备及试验材料	037
5.3 击实黄土动力特性研究	039
5.4 参数分析	042
5.5 本章小结	045
6 黄土路基筋—土界面细观特性研究	047
6.1 概述	047
6.2 格栅拉拔离散元模型建立	047

6.3	数值模拟结果分析	049
6.4	组构各向异性演化分析	051
6.5	本章小结	057
7	黄土沟壑区不均匀填方加筋路基现场试验研究	059
7.1	概述	059
7.2	现场试验	059
7.3	试验结果分析	061
7.4	本章小结	064
8	黄土沟壑区不均匀填方加筋路基变形特性研究	065
8.1	概述	065
8.2	计算模型建立	065
8.3	计算结果分析	067
8.4	参数分析	071
8.5	本章小结	078
9	黄土沟壑区不均匀填方加筋路基稳定性分析	080
9.1	概述	080
9.2	计算模型建立	080
9.3	计算结果分析	081
9.4	参数分析	087
9.5	本章小结	094
10	黄土沟壑区不均匀填方加筋路基动力特性研究	096
10.1	概述	096
10.2	计算模型建立	096
10.3	动力响应分析结果	097
10.4	参数分析	101
10.5	本章小结	108
11	黄土沟壑区斜坡加筋路堤变形特性研究	109
11.1	工程背景	109
11.2	数值模拟结果分析	111
11.3	本章小结	130
12	黄土沟壑区斜坡加筋路堤工作性状研究	131
12.1	静力荷载下斜坡加筋路堤工作性状	131
12.2	动力荷载下斜坡加筋路堤工作性状	133
12.3	本章小结	142
13	黄土沟壑区斜坡加筋路堤稳定性分析	143
13.1	强度折减法简介	143
13.2	斜坡填方路堤稳定性分析	143
13.3	斜坡填方加筋路堤稳定性分析	150

13.4 本章小结.....	155
14 降雨作用下斜坡加筋路堤稳定性分析	157
14.1 降雨折减因子的提出.....	157
14.2 斜坡高填方路堤稳定性分析.....	158
14.3 斜坡高填方加筋路堤稳定性分析.....	164
14.4 本章小结.....	169
参考文献.....	170

1 绪 论

1.1 研究背景及意义

随着我国不断深入推进西部大开发,西部地区交通运输量日益增加,高等级公路作为最为方便快捷的交通运输资源,在该地区得到了大力发展。在高等级公路建设中,受实际建设条件制约,不可避免地要通过一些山涧谷地、沟壑纵横的复杂地形。当高等级公路穿越这些复杂地形时,势必会面临一系列与路基修筑相关的技术难题。

工程调研结果表明,在黄土沟壑区修筑的路基相继出现了一些病害,如路堤沉降,不均匀沉降量过大以及坡体或坡面沉陷、滑坍破坏等。如铁阜高速公路自 2008 年雨季以来,黄土沟壑区多处路基出现下沉、开裂现象;又如大运高速公路一处 26m 高的黄土路堤出现了两次大变形、线路下沉及整体护坡外鼓现象。这些黄土沟壑区路基病害直接影响到高速公路的正常运营,甚至直接威胁到高速公路行驶车辆和乘客生命财产的安全,同时也将严重增加后期为维护道路正常运营而产生的养护费用。

由于黄土沟壑区地质条件差异大、地基高低起伏、填筑条件不同,导致路基两侧填土的性质不同,也就是路基具有非对称性,这样的路基称为非对称路基。非对称路基主要分为不均匀填方和斜坡填方两种。这类路基受力和变形极不均匀,黄土沟壑区路基路面病害主要集中于非对称路基。目前,黄土沟壑区非对称路基主要采用加筋土技术进行处理,以缓解路基整体受力和变形的不均匀性。关于黄土沟壑区加筋路基的研究,国内外大量学者主要通过现场试验、理论分析和数值模拟等手段对其受力、变形及稳定进行分析和研究,并提出了大量的加筋路基设计方法。然而,大部分的理论计算方法都基于大量的假设,且未能考虑降雨作用、交通荷载等因素,计算结果与实际情形往往有较大的差异,导致加筋不足路堤边坡失稳或加筋过多造成不必要的浪费。因此,对黄土沟壑区加筋路基修筑技术进行研究,深入揭示黄土沟壑区加筋路基工作机理具有重要的现实意义。

此外,经济发展使得黄土地区公路重载车辆(山西省乃至华北、西北黄土地区大吨位运煤车辆)增加,造成黄土路基在运营期内力学稳定性及承载能力发生衰退,这也成为目前黄土路基发生不均匀沉降的主要原因。研究高频重载条件下黄土路堤不均匀沉降的成因,分析车辆动荷载对路基力学响应的影响,进一步摸清黄土路堤动力学变形特性,对治理公路病害、延长路堤使用寿命、减少后期养护费用,具有重要的理论和实际意义。

1.2 黄土路基工作特性研究现状

1.2.1 湿陷变形

由于黄土的结构特性,当水分浸入黄土后,容易引起土体结构的破坏,该现象称为黄土的

湿陷变形。即便黄土在施工过程中被充分压实,黄土路基在后期运营中依然有可能出现湿陷变形。主要是因为施工过程中,由于施工条件限制,很难准确地控制黄土的含水率,导致压实度难以达到设计要求。另外,在黄土路堤后期运营期间,还有很多不确定因素导致黄土的含水率快速升高,进而发生湿陷变形。黄土的湿陷变形具有浸水突变性、不可逆性和不连续性等特点,对实际工程会产生较为严重的危害。目前,国内外学者对于黄土湿陷性的成因没有统一的看法,许多学者做了大量的工作,并基于不同假说在理论和应用上取得了一些阶段性的研究成果。

20 世纪 50 年代以前,大量学者将黄土作为一种均质土体进行研究,并从物理化学角度分析其受力变形特性。朱海之(1963)认为黄土的湿陷性是由于黄土中胶体不足引起的(“胶体不足假说”),并研究了黄土体中黏粒的含量对黄土湿陷性的影响。捷尼索夫(1956)认为黄土的湿陷性是由于黄土体颗粒表面水膜较薄引起的(“水膜楔入假说”)。该假说认为,土体颗粒间黏聚力随着水膜厚度的增加而减小,在水膜遇水增厚的过程中,土体出现膨胀,进而导致土体颗粒散化出现湿陷现象。此外,波雷诺夫(1930)和波斯特罗夫(1936)则主张“盐类淋溶假说”。该假说认为,黄土土体颗粒间存在大量的可溶性胶结物,遇水易被溶解,进而引起黄土土体骨架失稳破坏。该假说虽遭到怀疑和反对,但仍有部分学者认为不能全盘否定该假说。总之,黄土湿陷是一个复杂的物理化学和力学作用。

各国学者在 20 世纪 50 年代末至 70 年代初开始着手对黄土土体的微观结构进行研究。Dudley(1970)认为黄土土体中毛细压力是引起土体中细粉粒和絮状黏粒相互黏结的关键因素,并基于该假设提出了三种胶结模型。Barden 等(1973)通过电镜扫描,证实了葱皮胶结真实存在于湿陷性黄土中。Derbyshire(1994)等从力学和微结构方面研究了黄土湿陷机理。张宗桔(1959,1964)、林崇义(1961)、朱海之(1963)、刘东生(1966)等通过偏光镜观察并分析了黄土的微观结构特性以及相应的物理力学特性。

20 世纪 70 年代中期以来,大量学者通过电镜扫描的方式,从黄土微观结构对其湿陷变形进行了系统分析。高国瑞(1980)基于电镜扫描分析结果,认为黄土的骨架颗粒主要包括粒状颗粒和凝块状颗粒两大类型,颗粒间的接触主要分为点接触和面胶结两种类型,提出了黄土微结构与湿陷性的 12 级分类,并于 1990 年在总结分析前人研究成果的基础上,探索了黄土湿陷变形的结构原因,采用黄土结构理论来分析黄土湿陷变形的机理。张宗桔等(1985)通过电镜扫描,研究了黄土土体微观结构与黄土湿陷变形间的相互关系,并以此对黄土湿陷性特性进行评价。冯连昌、郑晏武(1982)也认为黄土微观结构以及其大孔隙率对黄土的湿陷特性有重要影响。雷祥义(1983,1984,1987)基于黄土微观结构分析结果划分了黄土类别,并通过试验研究了黄土湿陷性与孔隙率的相互关系。陈正汉等(1986)基于室内三轴试验和侧限压缩试验,系统地研究了黄土的湿陷变形规律。苗天德等(1990)基于微观结构突变失稳对黄土体的湿陷变形机理进行了深入分析。杨运来(1988)通过偏光显微镜,对比分析了湿陷前后黄土中孔隙的分布规律。王家鼎(1999)提出“脉动液化假说”,认为饱和黄土在地球脉动作用下会发生液化,液化导致黄土颗粒蠕动,并最终发展为自重湿陷变形。胡瑞林等(1998,1999)定量分析了黄土微结构要素在压力的作用下的变化规律,认为是多种因素综合作用导致了黄土湿陷变形。胡再强等(2000)基于侧限抗压试验,研究了黄土含水率对其微结构的影响,2002 年又基于三轴剪切试验和侧限压缩试验,研究了黄土微结构与黄土力学特性的相互关系。沈珠江(1996)

认为广义吸力(所有影响颗粒间阻力的因素)的丧失将有助于超压缩和欠压缩土朝稳定状态发展,通过建立考虑黄土膨胀特性和湿陷特性的本构模型,分析了浸水和加载方式对试样的影响。汤连生(2003)认为水分变化引起黄土中大小孔隙吸力变化,进而导致微结构重组,引起黄土湿陷,并分析了黄土湿陷的影响因素和相关条件。

因此,针对黄土湿陷性主要存在三大类型的假说:①基于黄土力学机制的湿陷性成因研究,如:脉动液化假说、毛细管力降低假说、水膜楔入假说、抗剪强度降低假说和微结构不平衡假说;②基于黄土物质成分的湿陷性成因研究,如:胶体不足假说和盐溶假说;③基于黄土结构的湿陷性成因研究,如:结构假说和欠压密假说。

1.2.2 动力特性

20世纪70年代开始,大量学者开始通过现场波速测试和室内动三轴试验方法,对黄土基本动力特性进行研究。学者对黄土动力特性的研究,整体上可分为两大类:一是将地震荷载等效地简化为等幅正弦波,分析黄土的动强度—变形特性;二是采用不规则激振波模拟地震波施加在试样上,分析黄土的动力特性。

(1) 等效正弦波

谢定义等(1986,1994,1999,2001)、巫志辉等(1990)、段汝文等(1979,1990)、骆亚生等(2001,2005)、陈存礼等(2007)采用振动三轴仪,通过对黄土试样施加等幅正弦循环荷载,对黄土在循环荷载下受力变形特性进行了系统分析,获得了丰硕的成果。另外,王建荣等(1999)基于动三轴试验,分析了不同频率等幅正弦荷载工况下,原状黄土的动应力应变关系曲线;骆亚生(2004)基于动扭剪三轴试验,对非饱和黄土原状和重塑试样的动力特性进行了系统分析;柴华友等(2004)通过室内试验对黄土的软化和液化特性进行了系统分析,并提出可采用广义塑性模型对黄土的软化和液化进行预测;余跃心(2002)通过室内试验,分析了击实黄土在循环荷载作用下其孔压的增长特性;刘红玫(2004)基于室内试验,分析了饱和黄土在循环荷载孔压增长与土体密度、饱和度以及动荷载之间的相互关系;陈存礼等(2007)采用三轴剪切试验,研究了不同加卸载路径工况下,原状黄土中孔压的变化规律;Wang等(2004)研究了冻结黄土在等幅正弦循环荷载下的应力应变曲线。

(2) 不规则激振波

Qiu(1985)通过对黄土试样施加不规则激振波,分析了黄土中不同黏粒含量工况下的动力响应特性;王兰民(1991,1994,1999,2003)、王峻(1992,2001)采用多组随机地震荷载进行动三轴试验,探讨了黄土的弹性模量、动弹性模量、动剪切模量以及黄土的动本构模型等参量的变化规律,得到了动本构模型参数与随机地震荷载周期之间的定量关系;何光等(1990)对多组浸水和浸水黄土试样进行了动三轴试验,并对试验过程中各组试样的破坏形态、震陷曲线、孔隙水压力等的变化规律进行对比研究;胡瑞林等(2000)对黄土进行室内模拟强夯试验,研究结果表明在动荷载作用下黄土强度和结构发生了明显变化,而且强度特征变化和结构变化有着关联性;李兰等(2005)采用了先进的扫描和图像处理技术,分析了各震级工况下黄土的孔隙分布曲线和微观结构;刘健等(2008)在室内动三轴试验的基础上,结合数值模拟试验推导了复杂动荷载下重塑饱和黄土的相关动响应方程曲线,研究表明采用两种试验结果推导的曲线较为一致,可为黄土工程实际动力分析提供参考。

另外,孙崇绍(1981)、林学文(1990)通过钻孔剖面 and 仪器观测,对当地黄土地区地脉动特征进行了探讨,并提出以地面脉动评价工程场地优劣的方法;石玉成(2001)以西北黄土地区工程实测数据阐述了黄土地区地面脉动周期、主峰型等的特性;袁中夏等(2004)为满足对黄土动力研究硬件改善的需求,开发了黄土动力数据分析软件。

1.2.3 路基变形特性

路基在交通荷载作用下,土的变形包括两个部分,一部分是回弹变形,另一部分是塑性变形。Seed 和 Chan(1955,1958,1959)以多种方法研究了动力荷载作用下黏土的强度特征和变形特性。但是,在早期的研究中,由于技术水平的限制,特别是机械方面的限制,路基土变形的研究基本上以总变形为主,故建立的是总变形与循环荷载的方程曲线。以路基土研究得到的总变形与循环荷载的方程曲线可知,土基回弹模量越大,产生的塑性变形越小,相应的路面使用性能越好。

美国国家公路与运输协会(American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO)在 20 世纪 50 年代末期至 60 年代初期对柔性路面的挠度进行测量发现,其大部分是由于路基土的永久塑性变形所致。此后,土体塑性变形研究逐渐得到了国内外学者的重视,而且研究方法以三轴循环试验为主,由此得出了以下主要结论:土体塑性变形随动应力水平的增加而加大(Barksdale, 1972)。叶国铮(1987)采用模型试验,对循环荷载作用下的柔性路面变形特性进行了研究,并依据室内试验结果推导出循环次数、压力大小等参数与路面永久变形的方程曲线。徐攸在(1987)以现场长期振动荷载试验为基础,结合室内动三轴试验分析了长期振动荷载作用下不同粒径饱和、非饱和砂土的破坏形态、蠕变特性等应力应变关系。阎澍旺(1991)对港区重塑黏土进行等向和不等向的静三轴试验,并结合诸多文献提出,试验所得变形、强度以及有效应力三者的唯一对应关系对往复荷载下的土体也成立,而且指出以此原理采用有限元软件可以求出往复荷载作用下软弱基础的永久变形。蔡英、曹新文(1996)进行了室内动三轴试验,得出了路堤填土永久变形、临界动应力等与重复荷载相关特性的关系。王建华和要明伦(1996)对不排水循环荷载条件下软黏土的弹塑性进行了模拟。周建(1998)以杭州地区正常固结的饱和软黏土为试样,采用循环三轴试验研究了不同荷载特性、循环应力比值等相关参数对该类土的孔压和应变的影响,并且在此试验结果基础上建立了该类土体应变软化本构方程。蒋军和陈龙珠(2001)进行了多种波形的循环荷载重塑黏土固结试验,研究了试验过程中土体的沉降特性,为循环荷载作用下黏土翻浆冒泥现象提供了新的认识。钟辉虹等(2002)采用室内循环三轴试验和数值模拟试验两种方法,对循环荷载作用下饱和软黏土的累计残余变形特性进行了研究。黄茂松等(2006)以上海地区饱和软黏土为试样,进行了不排水静三轴和动三轴试验,对比分析了两种不同试验条件下软黏土塑性累积变形的影响因素。王常品和陈云敏(2007)以正弦荷载叠加静偏应力的荷载形式进行不排水条件下饱和软黏土的动三轴试验,分析了静偏应力对饱和软黏土破坏的不利影响。

近年来,对于循环荷载作用下黄土的力学特性研究已有了颇多成果。余跃心等(2002)为研究击实黄土的循环液化和动力液化特性,进行了室内饱和击实黄土的液化试验。试验结果表明,击实黄土在循环荷载作用下容易出现软化和液化现象,故在动荷载下,饱和击实黄土路基会产生较大变形破坏。杨超等(2008)以相关土体的损伤理论为基础,推导出了循环荷载条

件下非饱和黏土的损伤模型,同时通过与循环三轴试验结果的对比分析验证了该模型的正确性。柴华友等(2005)考虑到法国黄土与砂土有着诸多相似特征,尝试将预测砂土特性的广义模型和边界面模型,应用于研究该类黄土的液化现象。研究结果显示,采用广义塑性模型预测的黄土液化现象较符合实际,该模型参数对液化结果预测有着重要的影响。

1.3 加筋土技术研究现状

现代加筋土技术源于20世纪60年代初,随着加筋技术的发展,加筋材料的应用越来越广泛,土工合成材料在不良地基处理中也得到了广泛应用。筋材(如土工格栅、土工格室等)可以有效地减小地基的沉降和不均匀沉降,提高地基承载力。目前,加筋材料的理论研究远落后于工程实践。筋—土相互作用机理是加筋地基理论研究和设计中关键点之一,能否完全掌握筋土相互作用机理将直接关系加筋技术在实际工程中的应用。

加筋路基的相关研究,有理论分析、数值模拟与试验等手段,其中常用的试验方法有现场原位试验、离心模型试验、室内模型试验三种。

1.3.1 理论研究现状

徐少曼(2000)指出现行圆弧法在加筋路堤稳定性分析中的局限性,通过考虑筋土相互作用产生的摩擦力以及筋材的应力扩散,改进该方法并将其运用于加筋路堤稳定性的分析中。王钊(2000)以实际工程为依托,基于对筋材拉力的分析,采用极限平衡法计算筋材的拉力,并考虑垫层的应力扩散作用,提出了对地基承载力的修正计算公式。王钊(2001)通过改进宾奎特筋材拉力和太沙基地基承载力计算公式,并将两者相结合提出了适用于筋材加筋地基的设计计算式,最后通过工程实例验证了该公式的适用性。王炳龙(2003)基于列车荷载作用下基床土动应力的现场实测数据,证明了土工格室加筋能有效减小列车荷载对基床的影响。陈胜立(2005)基于离心模型试验,分析了软基上加筋和未加筋工况下防波堤的变形规律,研究结果显示筋材能有效地限制地基的沉降和侧向变形。Hufenus(2006)基于现场实测,对加筋和未加筋软基进行对比分析,研究了筋材在软基加固中的作用机理以及加筋效果。Zhang(2008)采用理论分析,对多层筋材加筋砂土地基的作用机理进行了系统分析,研究了多层土工合成材料共同作用机理,最后通过三轴试验验证所提理论方法的正确性。

徐少曼(1999)指出在确定堤坝下软基加筋土工织物的允许抗拉强度时,应根据允许应变和堤坝允许织物产生的应变来控制,而不仅是考虑织物所能提供的拉力。

Kaniraj(1996)、Borges(2001,2002)、Tandjiria(2002)对加筋路堤的稳定性都采用圆弧滑动极限平衡法进行分析。这些文献中在进行稳定性计算时没有考虑加筋路堤破坏时由于滑动面位置不同而出现的各种结构破坏形态,即圆弧内加筋的破坏、圆弧外加筋的破坏以及加筋路堤的整体破坏等。

1.3.2 试验研究现状

Ingold(1981)、McGown(1982)、El-Fermaoui(1982)、Christopher(1986)、Palmeira(1989)、肖为民(1992)、徐林荣(2001)等基于室内筋材加筋拉拔模型试验,对筋材和土体间相

互作用机理以及筋土界面特性进行了深入的研究。研究表明,拉拔力受填料粒径和法向应力影响较大,筋土界面摩擦系数与拉拔位移有关。

Gray(1983,1986)、Chandrasekaran(1989)、马时冬等(1992)采用三轴试验,系统研究了加筋土的作用机理,试验结果表明,土工织物可有效地限制土体的侧向变形。俞仲泉(1989)基于离心模型试验,对土工织物加固砂层的作用机理进行了深入分析。吴景海(2000)基于三轴试验,对不同加筋材料与砂土间的界面特性进行了系统研究,试验结果可为土工合成材料的选择和优化提供一定的指导。

马存明(2004)基于室内格栅加筋拉拔试验,对拉拔过程中格栅表面摩阻力分布进行了分析,并将摩阻力发展分成了四个过程。徐超(2004)总结分析了国内外对土工合成材料加筋的筋—土界面特性研究成果。包承纲(2006)基于国内外土工合成材料加筋界面特性的研究现状,提出直接和间接加固的综合加筋机制,并对该加筋机制进行了系统分析。最后通过室内模型试验和现场实测数据对该加筋机制进行了验证。魏红卫(2007)基于三轴剪切试验,对加筋黏土的变形、抗剪强度和应力—应变特性进行了系统分析,试验结果表明筋材可有效改善黏土强度。

软基处理工程中,土工合成材料的应用更为广泛,特别对路堤下方的软基加固处理方面。在加筋地基极限承载力试验研究方面,Akinmusuru(1981)基于室内模型试验,研究了方形基础下用长条片状纤维加筋工况下承载比的变化规律。Fumio(1985)基于室内条形基础下加筋地基模型试验,获得了该类型地基加筋的优化加筋设计方案。赵炎华(1987)基于现场试验,采用筋条对挡土墙进行加筋处理,通过对筋条拉力的测试,获得了筋条拉力的相关分布规律。Guido(1985)基于现场试验,对3种不同土工格栅加筋工况地基承载力进行了分析。试验结果表明,相同筋材类型工况下,多层加筋地基承载力随加筋深度和加筋间距的增加而减小;相同加筋深度和间距工况下,最优加筋层数为3层。曾令录(1989)基于现场拉拔试验,分析了混凝土楔形和矩形两种拉筋工况下,筋材中拉拔力分布以及拉拔力随拉拔位移增加的变化规律。林开球(1992)采用现场载荷试验研究了加筋软基的承载力特性。

李广信(1994)基于改装的三轴试验仪,对加筋与未加筋工况下碎石地基的承载力进行了系统分析,同时对不同加筋工况下地基承载力的变化规律进行了系统分析。试验结果表明,碎石地基加筋可有效提高地基的承载力。

Temel(1994)基于室内模型试验建立相应的有限元数值模型,对格栅加筋地基的承载力进行了分析,并得到了优化的加筋参数。

杨庆(2005)基于室内模型试验,分析了加筋边坡在外部荷载作用下筋材和边坡的变形规律,并对不同加筋工况下边坡的稳定性进行了系统分析,得到一些对实际施工有意义的结论。Thamm(1990)、Bathurst(2006)基于加筋挡土墙室内模型试验,对筋材的拉力分布规律、挡土墙中土压力分布规律,以及挡土墙结构的相关变形规律进行了系统分析。朱湘(2002)通过室内模型试验和现场实测,证明了土工格栅能有效减小地基的工后沉降。胡启军(2007)通过对格栅拉力和路基变形进行现场监测,分析了格栅横纵向拉力分布规律以及格栅加筋对路基变形的影响规律。

苗英豪(2006)基于离心模型试验,分析了浸水对加筋和未加筋路堤工况的变形和稳定的影响。试验结果表明,加筋可有效地增强路堤的整体性和稳定性。同时发现加筋会

增大路堤倾覆的趋势,并提出加筋路堤中筋材的变形主要是由路堤填筑过程中的碾压引起的。

苗英豪(2008)通过现场长期观测,对加筋路堤中筋材的变形以及筋材对路堤压实特性的影响进行了深入研究。基于现场试验结果提出了加筋路堤的优化设计方案,并对加筋路堤稳定性有影响的相关因素进行分析。

王钊(1992)比较了土工织物在不同约束条件下的拉伸和蠕变试验结果。对预拉力土工织物加筋路堤的特性进行分析,指出预拉力土工织物加筋可有效约束路堤水平位移,同时对路堤顶承载力的提高也很显著。

陈群(2000)基于对实际加筋挡土墙工程的监测,研究了筋材和挡墙面板的受力分布规律以及相关参数的变化规律。Lee(2000)采用高度为0.83~1.20m的小比例无坡面结构模型,研究了土工合成材料铺设方式(如铺设深度、嵌入长度等)对边坡极限承载能力的影响。Blatz(2003),Richard(2004)和陶连金(2005)通过大型室内试验,研究了未加固边坡和土工格栅加固土坡的变形与破坏规律。

1.3.3 数值模拟研究现状

黄广军(2001)结合工程实例,基于室内相关模型试验结果,采用有限元法建立了采用不同筋材以及不同加筋方式的数值分析模型。通过对地基沉降量的比较,分析了筋材对地基沉降的影响。模拟结果表明,土工格室能够有效地控制地基的沉降。朱湘(2002)通过建立加筋路堤有限元数值模型,对影响加筋效果的一系列参数进行了深入分析,例如软土和筋材的物理力学参数、筋土界面参数和施工情况等。刘华北(2004)建立了加筋挡土墙弹塑性有限元模型,基于设计参数变化对加筋挡土墙加筋特性影响进行分析,提出了加筋挡土墙优化设计参数。顾长存(2005)采用ABAQUS建立非线性有限元路堤加筋和未加筋数值模型,并对加筋和未加筋工况下位移场进行了对比分析。模拟结果表明,土工格栅能很好地减小路堤沉降,限制路堤的侧向位移。

栾茂田(2005)采用非线性有限元数值分析方法,研究了不同填土的强度和刚度,筋材的刚度、长度和间距等参数对加筋挡土墙工作性能的影响。栾茂田(2006)认为在对加筋挡土墙的分析中,应考虑填土和地基的流变特性。在建立的非线性有限元数值模型中,格栅采用了考虑蠕变特性的黏弹性模型,着重分析了路堤填筑和加筋参数对加筋挡墙应力变形特性的影响。计算结果表明,格栅加筋可有效改善填筑过程中应力变形状况。毛林峰(2006)认为筋土接触界面本质上为非线性接触,基于非线性有限元方法,建立加筋和未加筋工况路堤数值模型。通过对两种工况下不良地基位移场的深入分析,模拟结果表明筋材能有效加固路堤,减小路堤沉降和不均匀沉降,限制路堤的侧向位移。

张志清(2007)基于实地调研以及一系列的室内土工试验结果,建立了一系列的有限元数值模型。针对加筋和未加筋工况,对黄土路堤中应力变形规律进行了深入分析。模拟结果表明,土工格栅可减缓路堤变形,改善路堤的受力状态。并基于数值模拟结果,提出了优化的加筋方案。付海峰(2007)在软土地基上路基加宽工程中提出了采用“土工合成材料加筋+路基注浆+桩支撑”系统的复合地基。采用弹塑性有限元程序,分析比较了路堤在加桩和不加桩情况下的沉降大小、不均匀沉降以及土体中的应力水平。

1.3.4 筋—土界面细观研究现状

土工格栅与填料的界面特性是加筋机理研究的关键问题之一,能否准确了解加筋界面特性并应用于工程实践,将直接影响加筋土工程的稳定性。

Sugimoto(2003)利用大尺寸拉拔试验研究了不同刚度格栅的拉拔力、格栅应变、格栅摩阻力等随拉拔位移的变化规律,并且指出当格栅刚度较小时,拉拔过程中格栅发生拉伸变形,上覆压力对摩阻力影响较小。而当格栅刚度较大时,拉拔过程格栅以整体的滑动为主,格栅拉伸变形对摩阻力贡献少,上覆压力对拉拔阻力影响大。

杨广庆等(2004)认为影响土工格栅与填料间接触界面特性的影响因素很多,并对众多影响因素进行了分析,如试验方法、模型箱侧壁光滑程度和模型箱尺寸的影响、填料参数以及土工格栅的固定方式等,并得出了相关的结论。

汪明元(2009)以南水北调中线膨胀土处治为背景,针对筋材在膨胀土中的应用,对其筋土界面特性进行了分析,并基于室内拉拔试验和数值模拟的方法,提出了筋材与膨胀土的界面模型和参数。

Wilson-Fahmy(1994)基于一系列的室内拉拔试验,分析了格栅随拉拔位移变化的荷载响应。其研究发现格栅的张拉力、摩阻力以及承载力与格栅尺寸、拉拔方法和格栅固定等参数相关。

吴景海(2001)基于一系列的室内直剪和拉拔试验,对土工合成材料与填料的界面特性进行了深入分析。试验结果表明,由于粉煤灰比砂土颗粒细,比表面积较大,其与土工合成材料接触较好,并且压实后的粉煤灰对格栅嵌固作用大,所以拉拔系数较大。

李齐任(2010)采用大型叠环式剪切仪进行了一系列拉拔试验,分析了含水率对界面拉拔特性的影响。研究表明,含水率较高时,土工格栅发生刚体平动的时间较早,偏于理想刚塑性特征。

史旦达(2009)结合工程,通过模型试验分析了不同填料下单向、双向土工格栅与填料接触界面特性,并分析了不同参数对接触界面特性的影响。通过对直剪试验数据和拉拔试验数据的分析,对单向格栅和双向格栅的加筋效果以及筋土界面特性进行了深入研究。

李飞(2012)通过包裹式加筋边坡模型试验,对加筋边坡的宏观变形模型、宏观力学特性以及筋土界面细观作用和剪切破坏带处土颗粒运动进行研究,分析了土工合成材料加筋边坡的宏细观机理。

徐超(2003)将粒子图像测速(PIV)技术应用于筋土界面直剪试验中,从细观角度来研究剪切过程中土颗粒的运动情况。试验结果表明,界面附近颗粒的水平位移、竖向位移均随着剪切位移增加而增加,且后期水平位移变化较为明显。

纵观上述研究,拉拔和剪切模型试验可以很好地得出格栅受力和位移之间的关系,对筋土界面特性的研究主要集中于宏观力学特性,但对格栅界面细观特性的变化无法深入研究。诸多学者针对上述问题,提出了在试验的基础上结合数值模拟对筋土界面细观参数特性进行探讨。

Tran(2013)采用有限元和离散元耦合的方法建立格栅拉拔模型,系统地分析了筋土界面细观特性,结果表明较大的格栅应力和位移主要集中在拉拔端,随着格栅拉拔位移的增加,颗

粒接触力的方向发生了明显的变化。

周健(2010)从细观角度分析了砂土颗粒与土工合成材料接触特性,得出上下界面颗粒的运动方式和影响范围不同,接触界面颗粒发生较大相对位移,孔隙率增大,同时接触数减少。

郑俊杰(2013)通过开发砂土椭圆形颗粒,建立三维离散元模型分析了拉拔阻力、局部孔隙率以及格栅应变等力学响应。通过对不同拉拔位移下颗粒间接触力演化分析,可以看出格栅横肋周围逐渐出现八字楔形强力链,肋后有稀疏弱力链。这为从细观角度探究筋土界面机理提供了新的认识。

陈建峰(2011)开发类三角形颗粒模拟砂砾对格栅拉拔试验进行离散元模拟,分析得出格栅拉拔过程中下界面扰动大于上界面,上下界面呈非对称性,而且界面厚度与上覆压力呈负相关的线性关系。

Dong(2011)采用梁单元对双向格栅和三向格栅进行拉伸模拟试验。模拟试验表明双向格栅的极限抗拉强度主要取决于格栅的拉伸方向,而三向格栅的各向极限抗拉强度较为均匀,但是略低于双向格栅。

尽管目前已有对黄土地区格栅加筋路堤的试验及理论研究,但是,对于考虑黄土地区非对称荷载影响的路堤加筋的作用机理、变形特性、稳定性和动力响应的研究工作开展得较少。

1.4 路基稳定性研究现状

1.4.1 稳定性分析方法

土坡稳定性问题是岩土工程学科中最古老的典型研究课题之一。《公路路基设计规范》(JTG D30—2004)以边坡的总高度作为划分界限,规定当总高度大于 20m 时,宜对边坡进行稳定性验算。目前,高填方路堤边坡稳定性分析验算方法主要包括以下几种:

(1) 极限平衡法

极限平衡法的基本思路:首先假设岩土体为刚体,边坡破坏是由岩土体在滑裂面上发生滑动引起的,滑裂面上的岩土体服从破坏条件;然后假设滑裂面为一已知的平面或曲面,通过考虑隔离体之间的静力平衡条件来确定滑裂面发生滑动时的破坏荷载。根据假设条件的不同,极限平衡法可分为瑞典圆弧条分法、简化 Bishop 条分法、简布法等。

(2) 极限分析法

极限分析法是运用塑性力学的上、下限定理求解边坡稳定性问题。其中,上限定理即能量法,通过先假设一个滑裂面,然后构筑一个协调位移场,利用虚功原理对安全系数进行求解。

(3) 滑移线场法

滑移线场法严格满足塑性理论,在不考虑土体变形与强度软化的情况下,将边坡划分为塑性区和刚性区,在塑性区应用静力平衡条件和 Mohr-Coulomb 准则,根据特定的边界条件和土性参数对偏微分方程用特征线法求解。

(4) 数值分析法

数值分析方法大致可以分为两种:一种是基于连续性介质的应力应变分析方法,主要包括:有限元法(FEM)、边界元法(BEM)、快速拉格朗日法(FLAC);另一种是基于非连续性介

质的应力应变分析方法,主要有:离散元法(DEM)、不连续分析法(DDA)等。

鉴于极限平衡法中的一些简化和假设导致其求解的安全系数具有多解性,以及极限分析法和滑移线场法在实际应用中的局限性,一些学者在数值分析方法的基础上提出了强度折减法。

所谓强度折减法,是指在理想的弹塑性计算中,将岩土体的抗剪强度参数逐渐降低,直至边坡失稳破坏。Zienkiewicz(1975)首次提出了抗剪强度折减系数的概念,其所确定的强度储备系数与 Bishop 条分法所确定的稳定性安全系数在概念上是一致的。

迟世春(2004)在应用强度折减法时发现当折减系数大于某一数值之后,土坡顶点的水平位移增长迅速,因此提出了界定土坡破坏的坡顶位移增量标准,以避免在应用强度折减法分析土坡稳定性时以不收敛或者迭代次数作为判别边坡破坏的“模糊”标准。

杨有成(2008)采用 FLAC3D 对强度折减法的若干问题进行了讨论,他认为在利用强度折减法求解边坡稳定性安全系数时,为了得到与极限平衡法类似的结果,需要采用合理的网格密度以及合适的边界条件。

1.4.2 降雨对边坡稳定性的影响

工程实践中,降雨对路堤边坡稳定性影响的重要性已经得到了广泛重视,但是相关的稳定性设计计算方法并不完善。“十个边坡九个水”,这句话较为形象地反映了边坡失稳破坏往往与边坡所处的水文地质环境有着非常密切的联系。降雨特别是暴雨对路堤边坡的危害主要表现在以下两个方面:

(1)坡面冲刷

暴雨冲刷路堤边坡,形成冲沟,甚至冲毁整段路堤。

(2)滑动破坏

大量雨水渗透进入路堤边坡土体内,使路堤填土强度降低,降雨入渗降低了路堤的稳定性,引起了边坡的滑动破坏。

因此,研究雨水作用下土坡的稳定性问题,从理论上及工程实际上都有着十分重要的意义。对降雨入渗条件下路堤边坡稳定性的研究,主要通过以下几种方式:理论研究、试验研究(主要包括原位试验和室内模型试验)及数值模拟研究。实际上许多学者在研究过程中都是结合上述两种乃至三种研究方法,以达到对这一问题的深刻认识。

Green(1911)通过室内模型试验,对三种不同性质的土进行了相关的研究,对气体和液体在土体中的运动模式形成了初步的认识。他将土体中水的渗透系数定义为常数,即单位横截面积、单位长度的土柱体,在 1cm 的水头压力下,单位时间内通过其内部水的体积,并且认为水的流动符合 Poiseuille 毛细管定律。建立了土体饱和条件雨水浸润线的运动微分方程,并结合初始条件推导了土体在三种渗流模式(竖直向下,竖直向上以及水平流动)下渗透系数的表达式。试验结果表明,渗透系数是一个与土体初始孔隙率有关的常量。同时,他还开展了三种渗流模式下的模型试验研究,分析了不同性质的土体在不同含水率条件、不同初始孔隙率条件下的渗透系数,验证了其理论分析的合理性。

Brakersiek(1977)在建立雨水入渗模型时,提出了如下假定:①边坡处于持续降雨条件下;②在土体边坡中有一个明显的浸润面;③浸润区域土体的渗透系数保持不变;④浸润峰上