

● 谢婉丽 王家鼎 编著

加筋黄土体 稳定性分析

Jiajin
Huangtuti
Wendingxing
Fenxi



陕西科学技术出版社

加筋黄土体稳定性分析

谢婉丽 王家鼎 编著

陕西科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

加筋黄土体稳定性分析 / 谢婉丽, 王家鼎编著. —西安: 陕西科学技术出版社, 2006. 12

ISBN 7-5369-4154-4

I. 加... II. ①谢... ②王... III. 加筋土—黄土地基—地基稳定性—分析 IV. TU471.91

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 125220 号

出版者 陕西科学技术出版社
西安北大街 131 号 邮编 710003
电话 (029)87211894 传真 (029) 87218236
<http://www.snstp.com>

发行者 陕西科学技术出版社
电话 (029)87212206 87260001

印刷 陕西丰源印务有限公司

规格 787mm × 1092mm 16 开本

印张 9.25

字数 220 千字

版次 2006 年 12 月第 1 版
2006 年 12 月第 1 次印刷

定价 30.00 元

版权所有 翻印必究

本书获以下基金资助:

国家自然科学基金项目(编号:40502028)

国家自然科学基金项目(编号:40572157)

高等学校博士学科点专项科研基金项目(编号:20050697013)

西北大学科学研究基金项目(编号:04NW59)

内 容 提 要

本书是一部有关加筋黄土体稳定性研究方面的专著。全书共分8章。第1章介绍课题研究的意义,加筋土技术国内外研究动态及其评述,课题研究的技术路线、方法和主要内容;第2章介绍加筋黄土工程的组成,特点及其加筋、破坏机理和强度理论;第3章详细地介绍了室内三轴试验、模型试验、现场试验方法及方案,探讨了不同加筋方式对加筋黄土应力、应变和抗剪强度特性的影响;第4章介绍动、静力作用下加筋黄土体工程数值模拟过程;第5章介绍利用模糊信息优化处理在加筋黄土体工程进行稳定性评价的应用;第6章介绍高填加筋黄土路堤下涵洞上土压力计算方法;第7章针对黄土路堤的病害提出防治措施;第8章进行总结。

本书可供从事公路、铁路、地质、水利、水电、地震等部门的地质工程、岩土工程、地震工程等专业的科技工作者及大专院校师生参考。

序

随着西部大开发的不断深入,黄土高原地区公路、铁路等基础建设取得了长足的发展,大大地推动了地方经济建设的可持续发展,特别是近年来黄土高原地区高速公路、高速铁路的建设,极大地缓解了黄土高原的交通压力。然而,黄土高原生态环境脆弱,地质、地貌单元复杂,沟壑纵横,加之黄土疏松,在外界荷载作用下极易改变其性质,诱发一系列地质灾害,如黄土体失稳、黄土滑坡、黄土湿陷与振陷、黄土液化及黄土泥石流等。为此,如何在黄土高原如此复杂的地质环境中修建高等级公路、铁路而又能有效地防治黄土灾害,是值得探索的问题。王家鼎教授及其课题组自20世纪80年代后期以来即潜心钻研黄土工程地质性质、黄土动力学、黄土滑坡、黄土液化及黄土湿陷等,取得了显著的成果。本专著将是有关黄土工程地质性质及黄土灾害系列研究之一——加筋黄土体稳定性研究,主要有以下几方面的进展:

1. 分析了高等级公路、铁路以高填加筋黄土路堤通过黄土冲沟的可能性,并以山西霍县北张沟高填加筋黄土路堤(62m)为例进行探索。

2. 通过黄土填料和加筋黄土试样的三轴试验、室内实体静载模拟试验及现场沉降观测等,获得黄土非线性模型参数,探讨了不同加筋方式对加筋黄土应力、应变和抗剪强度特征的影响,预测了高填加筋黄土路堤工后沉降量。

3. 通过数值模拟分析,研究了加筋和未加筋黄土路堤在自重和地震作用下的应力分布和变形情况,预测了加筋黄土高路堤边坡在未来地震荷载作用下是否失稳。利用模糊信息优化处理理论建立了加筋黄土高路堤的稳定性计算模型。

4. 针对加筋黄土高路堤可能出现的灾害(如加筋黄土高路堤边坡失稳、路基沉降等)提出了切实可行的防治措施,并将该跨越黄土冲沟的工程形式与桥梁跨越进行了对比,提出了优化设计方案。

相信本专著的问世,不仅对黄土工程地质性质及黄土灾害研究有所促进,而且对黄土高原公路、铁路等工程建设具有重要的参考价值,特为之序。

王保元

2006年1月于成都

目 录

1 绪 论	(1)
1.1 课题研究的意义	(1)
1.2 加筋土技术国内外研究动态及其评述	(2)
1.2.1 加筋土试验方面的研究	(3)
1.2.2 加筋土计算方面的研究	(4)
1.2.3 加筋黄土体动力反应分析现状	(5)
1.3 课题研究的主要内容、方法和技术路线	(5)
1.3.1 研究内容	(5)
1.3.2 研究方法	(6)
1.3.3 技术路线	(6)
2 加筋土结构的组成和加筋机理分析	(8)
2.1 加筋土结构的组成和特点	(8)
2.1.1 加筋土结构的组成	(8)
2.1.2 加筋黄土体的特点	(10)
2.2 加筋土的加筋原理	(11)
2.2.1 摩擦加筋原理	(11)
2.2.2 准黏聚力原理	(12)
2.3 加筋土的破坏机理和强度理论	(14)
2.3.1 拉力破坏条件下的加筋土的强度特点	(14)
2.3.2 滑动破坏条件下的加筋土的强度特点	(14)
2.3.3 加筋土破坏形态的判断	(16)
3 加筋黄土体的试验研究	(18)
3.1 加筋黄土体实例分析	(18)
3.1.1 研究区工程地质环境条件	(18)
3.1.2 高填加筋黄土路堤设计方案	(22)
3.1.3 填料的物理、力学性质试验	(25)
3.2 加筋黄土的三轴试验及分析	(28)
3.2.1 试验设备、材料及方法	(28)
3.2.2 试验成果及分析	(29)
3.3 加筋黄土路堤的室内模拟试验及分析	(34)
3.3.1 模型试验的相似条件分析	(34)
3.3.2 模型试验的设计	(35)
3.3.3 模型试验的步骤	(36)
3.3.4 模型试验的实测结果及分析	(38)
3.4 加筋黄土路堤现场试验及分析	(41)

3.4.1	加筋黄土路堤土压力现场测试及分析	(41)
3.4.2	加筋黄土路堤剪切带拉应力现场测试及分析	(54)
3.4.3	加筋黄土路堤竖向沉降变形现场观测及分析	(61)
4	动、静力作用下高填加筋黄土体数值模拟	(70)
4.1	静力作用下加筋黄土体数值模拟	(70)
4.1.1	有限元分析的特点	(70)
4.1.2	静力作用下有限元分析理论	(70)
4.1.3	加筋黄土路堤分步施工模拟分析	(78)
4.1.4	加筋黄土路堤静力有限元分析	(79)
4.2	动力作用下加筋黄土体数值模拟	(82)
4.2.1	动力作用下加筋黄土体研究的必要性	(82)
4.2.2	FLAC 法	(82)
4.2.3	加筋黄土路堤 Flac 动力分析过程	(85)
5	加筋黄土体边坡稳定性分析	(93)
5.1	加筋黄土体边坡稳定性分析中的改进圆弧条分法	(93)
5.1.1	现有的加筋黄土体边坡稳定性验算公式及改进公式	(93)
5.1.2	加筋黄土体稳定性验算	(94)
5.2	加筋黄土体稳定性分析中的模糊信息优化处理方法	(95)
5.2.1	模糊信息优化处理理论体系的建立	(95)
5.2.2	模糊信息扩散技术在加筋黄土体稳定性评价中的应用	(101)
6	高填加筋黄土路堤下涵洞上土压力计算	(106)
6.1	涵洞土压力作用机理分析	(106)
6.1.1	涵洞土压力的影响因素	(106)
6.1.2	涵洞结构物的受土压力作用机理分析	(107)
6.1.3	涵洞土压力与填土变形分析	(107)
6.2	涵洞土压力的有限元分析	(109)
6.2.1	计算方案	(109)
6.2.2	有限元分析过程	(109)
6.2.3	计算结果分析	(111)
6.2.4	减荷措施	(115)
7	黄土路堤病害的防治研究及工程技术经济综合评价	(117)
7.1	黄土路堤病害的防治研究	(117)
7.1.1	高填黄土路堤病害的防治目的、意义	(117)
7.1.2	高填黄土路堤病害的防治原则	(118)
7.1.3	高填黄土路堤病害的预防措施	(118)
7.1.4	高填黄土路堤病害的整治措施	(120)
7.2	工程技术经济综合评价	(123)
8	结 论	(125)
	参考文献	(127)

1 绪 论

1.1 课题研究的意义

黄土作为一种特殊性土类,在我国有着广泛的分布,面积约为 $640,000\text{km}^2$, 占我国国土面积的 6.6% 。我国的黄土高原号称世界上面积最大、厚度最厚的高原,在内动力和外营力相互影响及水流的冲蚀作用下,形成了冲沟发育、沟壑纵横、平原割裂的现代黄土地貌。近年来,随着西部大开发的不断深入,黄土地区高速公路、高速铁路建设飞速猛进。然而,具有特殊性的黄土在外界荷载作用下其性质极易改变而导致一系列灾害现象,如湿陷^[1]、振陷、液化、滑坡^[2]及地震反应破坏^[3]等。这些黄土灾害机理复杂,危害严重,是困扰高速公路(铁)路建设的难题。黄土地区高等级公路以何种形式跨越黄土冲沟是个值得研究的问题。若采用桥跨方案,大部分冲沟桥墩高、跨径大、造价高,设计和施工难度较大,并且冲沟两侧又都是深路堑路段,频发的地质灾害会对桥梁设施构成不同程度的威胁;若采用高路堤,存在填方量大,占地数量多,高陡长大的路堤边坡病害问题繁多,路基存在工后沉降等一系列工程问题。解决此类问题是否可以采用强度高、变形小的土工格栅,在大填方路基中分层加铺,形成加筋土路堤。加筋土就是在土体内部埋设抗拉强度较高的材料,使筋材的抗拉强度和土体的抗压强度结合起来,从而提高土体的整体强度、加强土体的稳定性的一种土工复合体。工程实践证明^[4~9],加筋可以增加边坡的稳定性和路堤整体性,使填方边坡适当变陡,减少土方、节约占地、降低工程造价。加筋黄土体包括工程中常用的加筋土结构如:加筋土挡墙、加筋土边坡、加筋土地基、加筋土路堤和加筋路面等,本书所提到的加筋黄土体以加筋黄土路堤为主要研究对象。

山西省祁(县)至临(汾)高速公路北张沟高填方路堤位于山西省霍州市三教乡村东约 300m 处,全长 177.07m 。该处地貌类型为黄土塬——冲积扇区,线路跨越处为一天然大冲沟,沟顶宽约 100m ,沟深 62m ,底宽 $10\sim 25\text{m}$ 不等。原设计为一座 $45\text{m}+80\text{m}+45\text{m}$ 连续刚构桥,墩高 33m ,柱式台,桩基础。为了保证工期,节约工程费用,本着求实、创新的精神,我们提出改桥为高填加筋黄土路堤方案。经实际踏勘认为:该处沟形狭窄,呈“V”形沟谷,沟底平缓,地质条件良好,高路堤方案基本可行,但由于填土高度达 62m ,在国内高速公路建设中尚属首例,具有一定的风险。因此,以科学试验和理论分析解决高路堤的技术问题具有以下意义:

(1) 目前,加筋路堤在国内外都有一定研究和应用^[10~17],其稳定性计算和布筋方法一般以极限平衡理论为基础,但由于这种理论在边坡稳定计算中所作的一些假设简化及加筋土机理的复杂性,其计算结果与实际情况有较大差异^[18],致使由于布筋不足而导致边坡失稳或布筋过多造成浪费。另一方面,公路建设中对高路堤稳定和变形分析假定是在无侧限情况下进行的并假定路堤作为整体一次加载形成,这与路堤分层加载形成的实际情况有根本区别。前人成果基本上是建立在不侧限情况下,并不完全适用于黄土冲沟地形条件,沉降变形分析与实际存在较大差

别;涵洞设计采用规范方法,也较难真实反映具体工况下涵洞的受力情况,虽然国内外对填埋式结构物垂直土压力的计算已提出了十几种方法,但计算结果偏差较大。这种理论研究滞后于工程实践的现象在相当大的程度上限制了高填路基和高填方涵洞的推广应用。因此,及时开展土工格栅在加固陡坡路堤方面的研究十分必要。

(2)加筋这种形式在其他土体已有较深入的研究和广泛的应用。然而,黄土不同于其他土类,有其特殊性:疏松、大孔隙、强度低,遇水易软化而湿陷,受振(震)易振陷或液化^[19],加之黄土湿陷、振陷和液化等黄土灾害的机理十分复杂。如何在黄土中加筋而形成“加筋黄土体”并将其应用于高填路堤而消除一系列黄土灾害的出现,需要进行大量、具体的深入研究并结合具体工程来进行显得十分重要。

(3)地震是一种危害性极大的突发性自然灾害,为了客观正确地评价地震动对岩土及其结构物的影响,地震时程分析变得越来越重要^[20]。目前,国内外对加筋土在地震作用下的机理研究刚刚开始,加筋土技术在国内公路和铁路工程应用中,大多限于非地震活动区。为了深入研究我国公路、铁路工程中高填加筋土路堤的地震反应效应,为地震活动频繁地区特别是地震高烈度黄土地区加筋土工程设计提供一些初步的定性指导,提高加筋土路堤的研究与设计水平,使其能在地震高烈度区得到合理运用,具有极其重要的实际意义。

(4)涵洞垂直土压力的计算,决定着涵洞结构的设计、施工和运营等各个环节^[21]。我国基本上沿用国外的一些理论公式,种类相当繁多,计算结果和实际测试结果相比出入较大。根据对现行公路路堤下涵洞结构物的大量调查资料分析结果,高填方涵洞垂直土压力的计算则存在两种情况:一是涵洞上土压力计算值小于实际土压力,导致涵洞结构的开裂破坏;另一种则是土压力值计算偏大,涵洞结构设计偏于保守,造成不必要的浪费。在公路工程中,规范^[22]规定涵洞上垂直土压力按面内土柱重量计算,不能反映具体工况下涵洞的真实土压力。对于涵洞地基设计,较多的做法是对涵洞地基进行加固处理,这在大多数情况下,对于涵洞受力是非常不利的,对明涵还加大了桥头路基与结构物之间的沉降差。近年来,由于高等级公路的迅猛发展,在高填土路基中修筑涵洞等结构物的情况越来越多,为了确保高等级公路的正常运营及行车的安全、舒适,对高填土路基中涵洞等结构物土压力的计算方法探讨具有极其重要的价值。

综上所述,本课题的开展,对于加深认识高填方加筋黄土体的破坏机理、推动加筋土的应用具有现实意义。其研究成果则为黄土地区的工程建设事业发挥更大作用,在工程中推广使用将会产生较大的经济效益和社会效益;本书中的试验内容和理论创新,为今后继续研究同类工程提供宝贵的资料、经验和观测依据。

1.2 加筋土技术国内外研究动态及其评述

加筋土的应用历史悠久,远在新石器时期我们的祖先就开始利用茅草作为土的加筋材料,但直到20世纪60年代,法国工程师Vidal提出了加筋土的概念后,加筋土技术在世界各国工程界应用范围也日益广泛^[23~25]。20世纪70年代是加筋土在世界范围传播、发展的阶段。相应的试验、研究工作也同时进行,法国Schlosser, Long, Juran, 美国加州大学Lee以及Mckittrick等学者作出了突出贡献。20世纪80年代,除了进一步探讨加筋土结构的基本性状、完善设计计算理论之外,许多国家还在拓宽填料、筋材的应用范围方面做了大量工作。

80 年代中期,美、法合作,利用离心机进行模拟试验,以了解不同的筋材、面板刚度、地基土的压缩性以及不同的超载和填料对加筋土结构内部稳定性的影响,并利用有限元法对加筋土结构的设计和试验成果讲行数值分析。90 年代加筋土的研究工作主要集中在完善设计计算理论,进一步拓宽应用范围,并研究与其他加固技术的配合应用问题。迄今,我国已建成数千座加筋土工程,大部分应用于公路和城市建设、水运和水利工程^[26~57]。

1.2.1 加筋土试验方面的研究

20 世纪 60 年代初法国工程师 Vidal 在模型试验中发现,当土中掺入有机纤维材料后,其强度可明显提高,有关加筋土技术的试验在全世界就相继展开^[58~60]。法国在 1968 年对修建于娜艾斯—曼顿高速公路上的一座最早的大型加筋土挡墙进行了原型研究^[61]。

1970 年开始进行实验室试验。Al Hussaini^[62] (1978) 等对一加筋土挡墙进行了原型观测及现场拉拔试验。Lee (1976)^[63] 推断完全固结后的黏性加筋土与加筋砂加筋效果类似。Broms^[64] (1977) 和 McGown^[65] (1978) 等分别用三轴试验对加筋砂土的应力—应变和强度特性进行了研究,认为加筋土强度的提高原理存在于筋—土之间的互相摩阻联结中。Ingold (1983)^[66] 等对多孔塑料加筋的饱和黏性加筋土进行不排水剪试验,发现试样直径/加筋间距 > 1 时,加筋明显。Gray (1986)^[67] 等对砂土加筋进行三轴试验研究,推导出拉应力沿剪切面分布公式,得出纤维面积比、初始方向以及弹性模量是影响加筋土强度的因素。Wilson—Fahmy^[68] 等 (1994) 通过土工格栅的拉拔试验获得其应力—应变曲线接近双曲线。Mohamed^[69] 等 (1997) 通过室内模型试验进行了路堤高度、竖向加筋间距、路堤边坡坡度及加筋长度对加筋路堤稳定性的研究。

同时, Schofield^[70] (1980), Taniguchi^[71] (1988) 等, Zhang^[72] (1993), Manda^[73] (1996) 等, Sharma^[74] (1996) 等应用离心模型技术进行加筋土工程的试验。N. Gurung^[75~76] (2001, 2003) 分别对两种不同型号的土工布和土工格栅进行室内拉拔试验,试验表明加筋可以增加路基的整体性,使路堤可以承受更大的车辆荷载及环境变化。

20 世纪 70 年代中期,我国才开始对加筋土挡墙进行研究,于 1979 年在云南田坝煤矿建成了第一座加筋土挡墙。赵炎华^[77] (1983), 邓卫东^[78] (1992) 等, 徐少曼^[79] (1996), 陈群^[80] (1996), 杨果林^[81] (1999), 朱湘^[82] (2000), 王伟^[83] (2000), 苏谦^[84] (2001), 陈周与^[85] (2001), 刘俊彦^[86] (2002), 谢春庆^[87] (2002), 徐波^[88] (2002), 扬广庆^[89] (2003), 王详^[90] (2003) 等进行进行了一系列室内模拟试验和现场沉降观测。同时,我国的俞仲泉^[91] (1989), 林开球^[92] (1992) 等, 杜鸿梁^[93] (1993) 等, 施建勇^[94] (1996) 等, 侯瑜京 (1997)^[95] 等, 林彤 (2001)^[96] 等对不同的加筋土工程进行了离心模型试验。

李广信 (1992)^[97] 等进行土工织物在土中沿不同角度的拉拔试验,随后提出将多层加筋土中筋材看作沿布筋方向施加压应力的各向同性材料,利用已有的土的本构模型和计算参数来进行计算^[98]。之后,周志刚^[99] (1998), 杨果林^[100] (2000), 吴景海^[101] (2001), 余建华^[102] (2002) 等, 张茹^[103] (2002) 等对土工合成材料加筋土进行了拉拔试验研究。

赵爱根 (1988)^[104] 用针刺无纺布物做加筋,进行了饱和黏土的固结不排水剪试验,结果表明加筋土的强度有所降低。王吉力^[105] (1992) 通过三轴试验,利用加筋效益系数和极限平衡原理,着重探讨两种织造型土工织物铺设层数对加筋砂强度增长的影响及作用机理。梁波 (1992)^[106] 等用饱和黏性土中加窗纱和塑料片组成的加筋土进行了三轴试验研究,之

后又推导出加筋土在拉力破坏条件下极限应力状态的表达式^[107]。随后,郑荣基^[108](1994),陈存礼(1998)^[109]等,邹新华(1998)^[110]等,舒子亨(1999)^[111]等,雷胜友(2000)^[112],保华富(2001)^[113]等,吴景海(2002)^[114]等,杨锡武(2002)^[115]等,廖红建(2003)^[116]等,通过三轴试验对加筋土进行了试验研究,得到一些有益的结果。赵川(2002)^[117]等提出了塑料土工格栅加筋碎石土的E-S非线性本构关系模型。

虽然以上针对加筋土工程的试验进行了许多,大多数都是针对砂土和饱和黏土,而针对黄土加筋的试验非常之少,由于加筋土工程主要由筋材和填土相互协调作用而维持其稳定,相互作用机理较复杂,他们研究的结果很难适应于加筋黄土体工程中。本书中选用工程中广泛应用的土工格栅作为加筋材料,进行加筋黄土的三轴试验、模拟试验和现场试验,以研究加筋黄土体的加筋机理及其特性,探讨加筋位置及加筋层间距对加筋效果的影响。

1.2.2 加筋土计算方面的研究

加筋土工程的设计原理和方法大多以极限平衡法为基础^[118~124],其优点是能给出安全系数的指标,方法概念直观,设计时仅需考虑强度方面的参数,计算工作量较小,与素土边坡的分析方法相近,易为工程界接受。但是该方法偏于保守,容易造成浪费;对筋材强度、许可变形等取值具有很大的任意性;研究的是假想的极限平衡状态而不是空际工作状态。没有充分揭示土与织物的相互作用机理,不能充分考虑各种增强稳定的因素;不能计算土体的应力和变形,也不能模拟施工进度。另外,用不同方法设计同一加筋土工程,其结果也往往各不相同,有时甚至差别很大。

有限单元法是当前计算土力学中普遍采用的手段,从分析思路上看存在两种思路^[124~129]:

一种是把加筋土结构看成由土与筋材两种不同性质的材料组成,两者通过界面相互影响、相互作用。一般将加筋材料用一维线性单元或薄层矩形单元进行模拟,土体仍为未加筋时的本构模型。土筋之间的相互作用采用接触单元进行模拟。Andrawes K. Z., et al, Rowe R. K.,等进行了这方面的研究工作。这种方法思路比较直观、应用较广泛,但对某些加筋结构物,例如土钉墙、格栅加筋的结构等不适用,并且筋土之间界面单元的参数确定也较困难。

一种是把加筋土看成复合材料,采用土和筋材复合体建立一个模型进行计算,不需要复杂的筋土界面的模拟,但复合材料往往是各向异性的,其纵、横向模量不等,拉、压模量也不相同,这就给刚度矩阵运算、方程求解造成很大困难。Shahrour等进行了这方面的研究工作。

此外,我国的王钊(1990)^[130]根据砂土的平面应变等应力比试验,提出加筋土的幂函数模型,并对加筋模型土坡进行了有限元分析。闫澎旺^[131](1997)等对土工格栅与土相互作用进行了有限元分析。殷建华^[132](1998)推导出一个代表软土双曲线弹簧支撑的土工布加筋基础一维非线性模型,并着重讨论了非线性弹簧参数对加筋基础的沉降和土工布拉力的影响。介玉新^[133](1999)等提出计算加筋土工织物的等效附加应力法,把筋材的作用当成外力(等效附加应力)加在土骨梁上。张孟喜和孙钧^[134](2000)等在土工合成材料加筋土应变软化特性试验研究的基础上,提出了三段式弹塑性计算模型,并对加筋土挡墙进行了弹塑性有限元分析。

有限单元法虽是一种有效的数值分析方法,但有限元计算比较复杂,模型中包含大量参

数,只有通过精确的试验才能获得这些参数^[135~136]。加之,土工织物本身以及织物与土的相互作用关系的复杂性,在试验如何进行和参数取法上仍存在许多争议。目前,针对黄土进行这方面的工作较少。所以,针对黄土与加筋材料的相互作用机理,在实际工程中加筋对黄土体变形及破坏机理的认识还处于探索阶段,对材料本身及其与黄土体相互作用的试验、模型试验和现场观测等还存在不少技术困难。这些还有待继续深入研究,使加筋技术充实、完善、提高。

1.2.3 加筋黄土体动力反应分析现状

目前,国内外对加筋土在地震作用下的工作机理和行为的研究刚刚开始^[137],国外虽有美国 Lee,日本的 Chida,法国加筋土公司 Tenlar 等致力于地震区加筋土的研究工作,完成了部分大小不等的比例模型实验,并试用有限元法做了相应的理论计算,但在设计规范中尚无完整的计算方法^[138]。我国相关单位对地震区加筋土的研究所见报道不多。由于目前对加筋土结构在地震作用下的响应认识不深,使得这一经济合理的工程结构在运用上受到很大限制。加筋土技术在国内公路和铁路工程应用中,还仅限于非地震活动区。

一些学者对动载作用下加筋土的计算模型进行了探索,Muthucumarasamy^[139]等(1992)和 Kavazanjian^[140]等(1995)研究表明:在计算中忽略土工合成材料的作用将过高地估计加速度,因此分析这种问题时应该采用适当的接触面模型来模拟加筋材料与土之间的动力相互作用。Bray^[141~142]等(1995,1996)研究表明在某种条件下接触面一维模型和二维模型有类似的结果。但是一维模型在实际计算中模拟摩擦接触面的不稳定性有缺点。当前,地震响应数值计算中,一般在计算中忽略土工合成材料的作用。Yegian^[143]等(1998)采用等效弹簧阻尼延迟器质量块系统来模拟动载作用下土工合成材料与土的接触面特性,并将土工合成材料与土的接触面、土工合成材料等效为一土层来研究加筋土的动力特性。Ashmawy等^[144]人通过数值研究表明循环荷载作用下加筋体的应力应变主要由土体与筋材之间接触面的应力-位移变形特性所控制。

我国的张小江(1997)^[145]等通过单轴静动拉压试验结果表明纤维加筋土比素土有很好的抗震性能。张兴强^[146]等(2001)用有限元方法研究了在交通荷载作用下加筋路基位移和加速度响应特性和土工格栅与土的相互作用对加速度的影响。杨有海(2002)^[147]引用重力式挡墙分析的方法,并考虑加筋土挡墙本身的工作特性,推求加筋土挡墙在水平地震力作用下的拟静力分析。张友葩(2002)^[148]等用 LUSAS 有限元软件对加筋土挡墙在动荷载条件下承受荷载状况进行分析。杨果林(2002,2003)^[149]等通过循环荷载作用下的模型试验,得出了加筋土挡墙在水平、竖向加速度和位移均值随挡墙高度的变化规律。

虽然以上研究者从试验和理论上对加筋土在动载作用下的响应问题进行了探索,但是由于加筋材料与土的接触面结构形式在动力荷载作用下的加筋材料作用机理的复杂性和试验手段等方面的原因,对加筋土计算方法的研究还很缺乏。在土工格栅加筋土结构的动力有限元分析时,如何模拟土工格栅与土的相互作用仍是关键问题。

1.3 课题研究的主要内容、方法和技术路线

1.3.1 研究内容

针对本课题研究的目的和意义,开展了以下工作:

(1)在三轴剪切仪上,分别对不同层数(1、2、3、4、5层)的加筋黄土试样进行试验,并与未加筋黄土进行比较,以探讨加筋黄土应力、应变和抗剪强度特性,分析加筋机理。

(2)在北张沟高填加筋黄土路堤中埋设沉降标进行现场观测,并在路堤的不同部位布置了压力盒,同时在不同层位的土工格栅粘贴塑性应变计,了解加筋黄土高填路堤中的应力应变规律,以及加筋黄土高填路堤的沉降、工后沉降及沉降稳定时间等问题。

(3)根据野外实际地形地貌条件,利用相似原理,制作室内模拟模型;模拟施工过程,在填土中埋设传感器与应变片,观测加筋黄土体与地基在施工过程中的应力分布、沉降和变形情况;对成果进行整理分析,以得到加筋黄土高填路堤、地基中的应力分布、竖向沉降和水平变形规律。

(4)分别建立高填路堤加筋和未加筋二维几何模型,对加筋和未加筋黄土高路堤分别进行在自重作用和地震作用有限元分析,研究加筋和未加筋黄土高路堤在自重作用下的应力和变形情况以及在地震作用下变形和应力的发生、发展情况,与室内模拟试验、现场实测结果进行对比,进一步探索加筋黄土体的工作状态和加筋机理。

(5)收集大量加筋路堤的资料,利用模糊信息优化处理的基本理论(信息扩散、模糊近似推论、信息集中),建立加筋黄土体稳定性的分类及评价指标的信息矩阵,并对北张沟加筋黄土高路堤进行稳定性评价。

(6)根据对现行有关涵洞病害调查分析,针对冲沟地形中修筑涵洞的情况,利用有限元法研究填土高度、沟坡、涵洞上填方加筋与否对涵洞受压的影响效应,并结合相关资料及有限元数值模拟结果,对高填加筋黄土路基中涵洞土压力及其加筋黄土体变形的影响因素和规律进行分析研究,在此基础上提出合理减小涵洞土压力的有效措施。

(7)针对加筋黄土高填路堤病害提出设计方案及防治措施。

(8)针对加筋黄土高填加筋黄土路堤和桥跨进行技术和经济对比。

本课题的开展,对于加深认识加筋黄土的破坏机理、推动加筋黄土的应用是具有现实意义的。研究成果可推广到黄土地区的其他工程建设事业中,将产生巨大的经济效益和社会效益。本试验课题,就其试验内容之全面,其理论和实践创新,大量的实测数据,为今后继续研究同类问题提供了宝贵的资料。由此可见,本课题的开展具有非常重要的理论价值和现实工程意义。

1.3.2 研究方法

以工作区的工程地质条件研究为基础,以室内和现场试验为纽带,以数值模拟方法为手段,首次较为系统地开展加筋黄土体变形和稳定的系统研究。通过室内、现场试验研究和理论分析,融汇土力学、土动力学、现代数学和力学以及先进的现代土体测试技术。采用定性综合分析与土体定量、半定量计算相结合,确定性与不确定性分析法相结合,线性与非线性理论相结合,静态与动态分析相结合,现场试验与室内试验相结合,模拟与计算相结合。从多方面进行静力和动力作用下加筋黄土体的变形和稳定研究,进一步探讨土工格栅的加筋机理。

1.3.3 技术路线

针对上述研究内容,拟采取如下技术路线,见框图1-3-1。

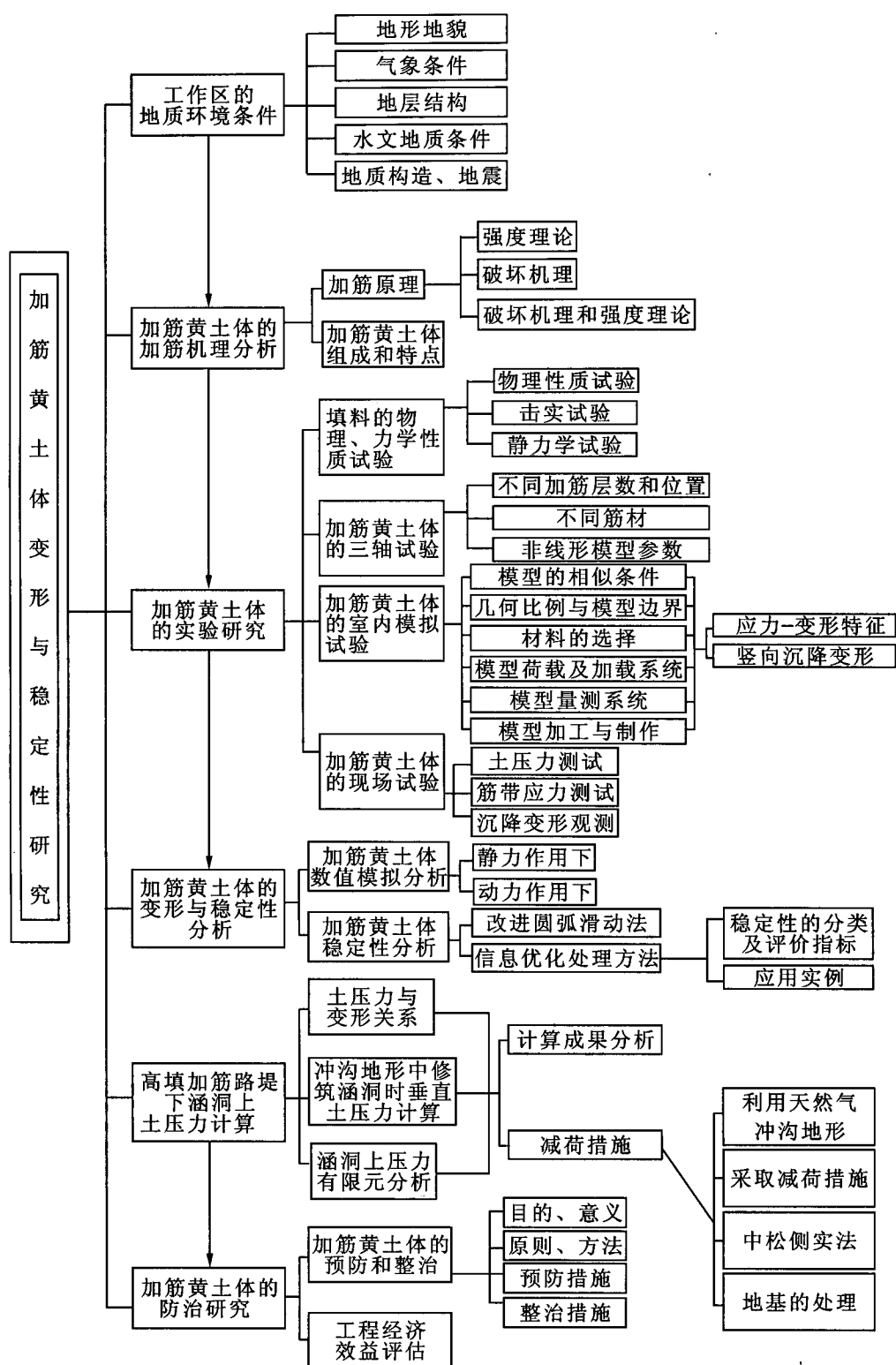


图 1-3-1 技术路线框图

2 加筋土结构的组成和加筋机理分析

2.1 加筋土结构的组成和特点

2.1.1 加筋土结构的组成

筋材的加入可以提高土体的强度,增强土体的整体稳定性。这种在土体中加入加筋材料使整个土工结构的力学性能得到改善和提高的加固方法称为土工加筋技术,形成的结构称为加筋土结构。

目前,工程中常用的加筋土结构主要有:加筋土挡墙、加筋土边坡、加筋土地基、加筋土路堤和加筋路面^[150]。

加筋土挡墙一般由基础、面板、加筋材料、土体填料、帽石等主要部分组成,见图 2-1-1。加筋土地基主要由加筋材料和土体填料组成,见图 2-1-2。加筋土边坡一般由加筋材料和土体填料组成,坡面比较陡,根据工作条件和需要,坡面可以设面板,见图 2-1-3。加筋土路堤是近几十年来发展起来的,介于挡墙(重力式或加筋挡墙)与一般填方路堤之间的一种新型加筋土结构,是在土工结构物的路堤内适当位置加入具有抗拉性能的土工合成材料组成的一种复合体。由于土与加筋材料之间的摩擦作用,使加筋路堤形成了稳定的整体复合结构,见图 2-1-4。

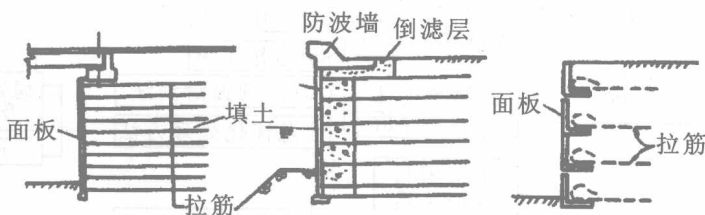


图 2-1-1 加筋土挡墙

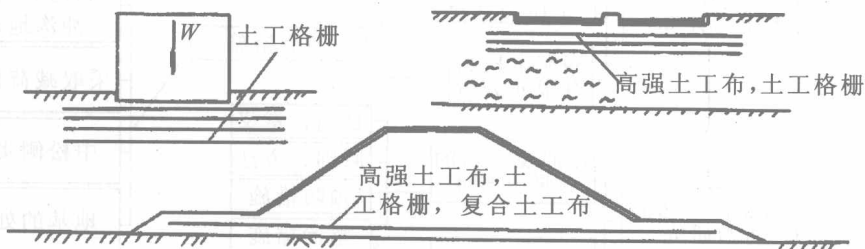


图 2-1-2 加筋土地基

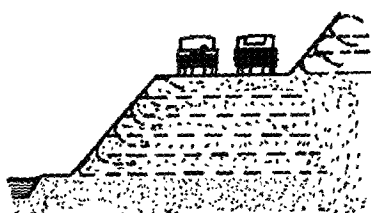


图 2-1-3 加筋土边坡

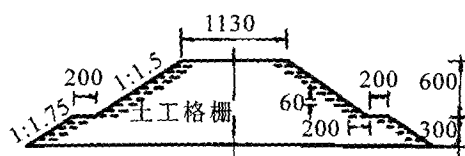


图 2-1-4 土工格栅加筋路堤

在加筋土挡墙结构中,面板的作用是阻止土体填料滑塌,使加筋材料与土体填料组成的复合体免遭侵蚀。面板材料有金属制品、混凝土或钢筋混凝土、条石或石板等。目前,我国大部分加筋土工程采用钢筋混凝土面板。

2.1.1.1 加筋材料

加筋材料是加筋土结构的关键部分,正是因为加筋材料的研究开发才使加筋土技术得以广泛应用和不断发展。

在筋土路堤系统中采用的加筋材料,按其几何形状可分为条带式加筋(包括钢带、聚合物加筋带、混凝土带等)、网眼型宽幅加筋(包括土工格网、土工格栅或钢筋网)和非网眼型宽幅加筋(主要为土工布)三种类型。

按加筋原材料分为金属类加筋和非金属类加筋。金属类加筋包括扁钢带、带肋钢带、镀锌钢带和不锈钢钢带等,其中需对钢材进行电镀或涂环氧树脂等防锈处理;非金属类加筋,包括各种合成材料。如聚丙烯、聚乙烯、尼龙和玻璃纤维材料等。其形式主要有聚丙烯条带、土工格栅、土工网、土工织物、土工膜、土工格室等。这两类加筋材料的性能和耐久性性能显著不同。

按加筋材料的延展性分为不可延展的(加筋材料破坏时的变形量远小于土体的变形)与可延展的(加筋材料破坏时的变形量与土体变形量相当或甚至更大)。

目前,国内外工程中大量采用土工格栅加筋路基路面。土工格栅分为塑料类和玻璃纤维类。

(1) 塑料类土工格栅^[150-151]

塑料类土工格栅是经过拉伸形成的具有方形或矩形格栅的聚合物网材,按其制造时拉伸方向不同分为单向拉伸和双向拉伸两种,见图 2-1-5。它是在经挤压制出的聚合物板材(原料目前多为聚丙烯或高密度聚乙烯一般为高密度聚乙烯、聚丙烯或高密度聚乙烯/聚丙烯共混物)上冲孔,孔的形状、大小及布置按最终制成的土工格栅产品确定。然后在加热条件下施行定向拉伸。单向拉伸格栅只沿板材长度方向拉伸制成,双向拉伸格栅则是继续将单向拉伸的格栅在与其长度垂直的方向拉伸制成。

由于这种格栅制造中聚合物的高分子随加热延伸过程而重新排列定向、加强了分子链间的联结力,从而达到提高其强度的目的。但其延伸率却只有原板材的 10%~15%。土工格栅随温度的升高而强度降低,变形增大,反之则相反。由于土工格栅中加入了炭黑等抗老化材料,因而使

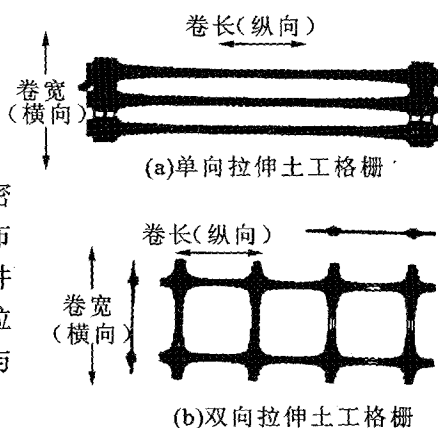


图 2-1-5 塑料土工格栅示意图

它具有较好的耐酸、耐碱、耐腐蚀和抗老化等耐久性能。本书中的土工格栅属于此类土工格栅。

(2) 玻璃纤维类^[152]

此类土工格栅是以高强度玻璃纤维为材质,有的配合自黏感压胶和表面沥青浸渍处理,使格栅和沥青路面紧密结合成一体,如加拿大贝密斯有限公司生产的自黏式玻璃纤维增强网栅,具有易建性、符合环保要求、熔点高和耐腐蚀等优点。

土工格栅与其他土工合成材料相比,它具有独特的性能与功效^[153~154]。土工格栅与土颗粒间的摩擦咬合产生的摩擦阻力可以限制土体的侧向变形使土体剪应力增大,起到增加土体抗剪强度的作用;摩阻力的大小随列车荷载的变化而变化,荷载越大,摩阻力也越大;土工格栅受荷载变形后的张力效应产生的拉力承担了部分竖向应力和土体的水平拉应力,可以提高土体的承载能力和抗变形能力;由于土工格栅与土界面的摩擦作用,将土中的垂直应力和水平应力沿土工格栅面层水平扩散,将应力向四周均匀扩散,从而防止地基的不均匀沉降。土工格栅埋入土中的抗拔力由于格栅与土体间的摩擦咬合力较强而显著增大。同时土工格栅是一种质量轻,具有一定柔性的塑料平面网材,易于现场裁剪和连接,也可重叠格接,施工简便,不需要特殊的施工机械和专业技术人员,因此它是一种很好的加筋材料。近年来,随着我国基础设施建设的不断加强,越来越认识到在我国推广使用土工格栅的重要性和必要性,从而促使土工格栅的生产和应用得到迅速发展。

2.1.1.2 加筋土填料

加筋土填料是加筋土结构的主体材料。从工程实践来看,填料的选取直接关系到工程的安全和造价。国外在加筋土结构试建初期,对填料的要求较高,仅限于使用砂性土,而且对填料组成的各种粒径含量也有严格要求。我国加筋土的填料从开始时即打破了国外的只能用砂土的框框,为降低造价,我国加筋土的填料大多是就地取材。砂土、河卵石当然不成问题,挖方弃土、黄土、黏土等等也已广泛地应用于各工点,甚至还有用粉煤灰、裂隙黏土和煤矸石作填料的例子^[155]。这些成功的经验为加筋土的填料来源开辟了新的途径,对利用废渣,减少占地,减少污染,降低工程造价起了积极的作用。我国幅员辽阔,南方多黏土、西北多黄土、矿区多矸石,填料范围的扩大,为加筋土技术的推广开辟了广阔的市场。填料的选择范围越来越大,我国交通部颁发的《公路加筋土工程设计规范》(JTJ015-91)、《公路工程加筋土施工技术规范》(JTJ035-91)对填料的限制较少,除腐殖土、冻结土、白垩土及硅藻土禁止使用,其余的原则上都可以用作填料。不过,填料的选用还得根据工程的环境条件和使用功能,以就近、易取、廉价、满足施工标准为原则。

2.1.2 加筋黄土体的特点

采用土工格栅加固黄土体具有稳定性好、边坡安全度高、沉降及差异沉降小承载力强和节约投资等诸多优点^[156],因而在土建工程各行业得到广泛的应用。加筋黄土体在岩土工程界表现出强大的生命力,这是因为该结构具有如下突出优点:

第一,造价低廉、效益明显。加筋黄土体可以充分利用现场弃料,主要材料为黄土及土工合成材料,价格便宜,就地取材。加筋黄土体的造价与其他结构(如桥梁)相比,造价降低幅度一般在10%~50%。另外,施工时对环境的影响小,其综合效益十分明显。

第二,施工简便、施工速度快,工期短。加筋黄土体结构简单,技术容易掌握,对施工人