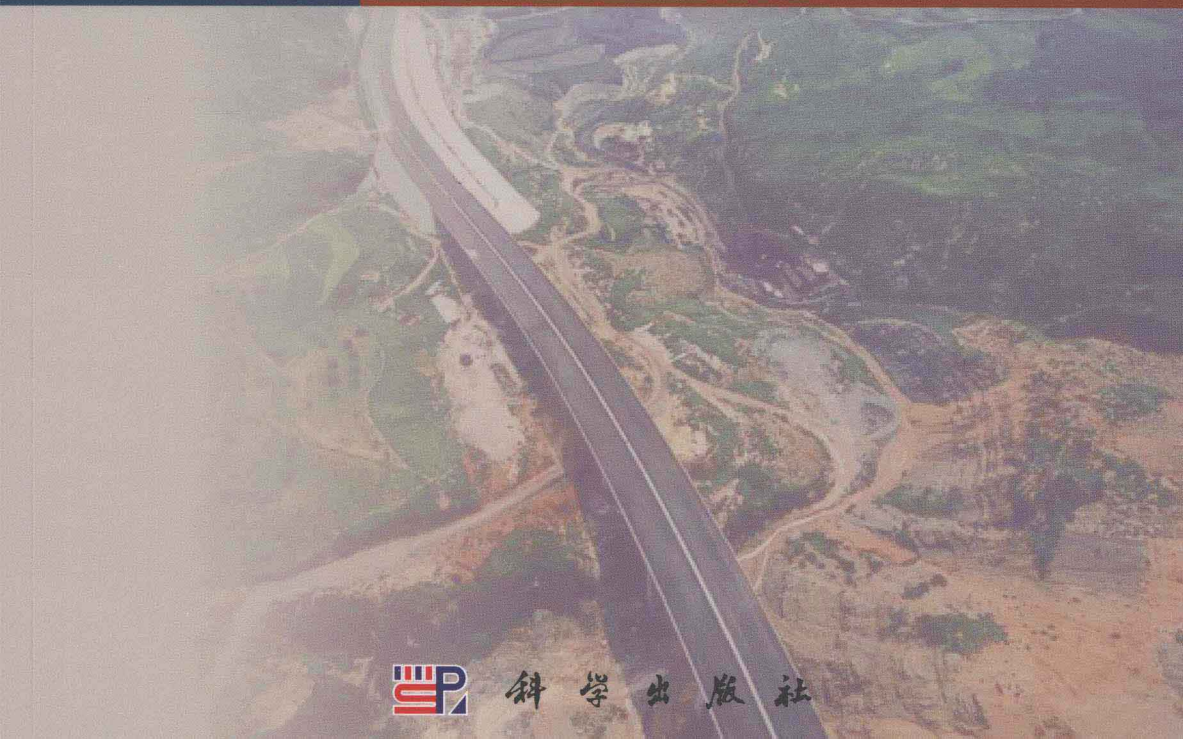




西南红层工程特性及其路堤稳定性

刘俊新 胡启军 邱恩喜 谢强 等 编著



科学出版社

西南红层工程特性 及其路堤稳定性

刘俊新 胡启军 邱恩喜 谢 强 等 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书首先采用电子显微镜法、X射线衍射法、室内外崩解、CBR 试验以及蠕变等试验对西南红层的物理力学性能进行了系统的研究,同时基于非饱和土单变量的有效应力理论,在考虑地表径流-地下渗流和流体-固体双耦合的情况下,利用神经网络模型反演的非饱和参数对降雨下红层路堤边坡稳定性进行了研究,得出了一些有益的结论;其次以单轴压缩红层蠕变试验为基础,提出了基于非饱和土单变量理论的红层非饱和土路堤沉降计算理论,通过有限元对离心试验某工点实际填筑过程进行了数值模拟,证明了该理论的正确性;最后通过足尺动态模型试验,模拟在实际荷载条件下基床的动态特性,证明了措施的可行性和可靠性。

本书可供道路与桥梁工程、岩土工程等专业的工程技术人员与科研人员参考,也可作为高等院校相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

西南红层工程特性及其路堤稳定性 / 刘俊新等编著. —北京:科学出版社, 2013. 1

ISBN 978-7-03-036556-9

I. ①西… II. ①刘… III. ①红层-路堤-稳定性-研究-西南地区
IV. ①U416. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 017629 号

责任编辑:耿建业 刘翠娜 / 责任校对:林青梅

责任印制:张 倩 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 1 月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2013 年 1 月第一次印刷 印张:14 1/2

字数:273 000

定价:75.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

随着铁路客运专线的发展,路基的设计思想与普通铁路相比有了很大的转变,其中集中体现的一点就是过去对路基工程主要是强度上的要求,而客运专线则更体现在对路堤沉降变形的严格控制,同时对路堤边坡的稳定性也提出了更高的要求。由于路堤填土基本上都是非饱和土,其边坡稳定性和路堤变形理论与饱和土相比更复杂,同时鉴于红层易于崩解等特性,对红层作为填料能否满足客运专线建设的需要作出评价显得更为迫切。

对路堤本体沉降性状的分析研究,不仅是正确认识和评价路基稳定的基础,更是提高路基设计水平,发展施工控制技术的有效途径。世界各国历来十分重视对路堤本体沉降计算的研究,然而由于非饱和土本身问题的复杂性和非饱和土力学理论的不成熟性,目前对非饱和高路堤的沉降规律尚缺乏合理的理论计算方法,尤其是对于铁路客运专线和公路的沉降控制要求更高,但国内外尚无同类工程的可靠技术成果和工程经验可以借鉴,可供应用的系统观测资料尤其缺少。

本书作者在铁道部科技发展计划项目“西南红层软黏土工程特性及地基加固技术研究”的研究成果的基础上,撰写了这本专著。该书揭示了红层路堤在非饱和渗流条件下应力和变形的变化规律,提出了在考虑非饱和渗流条件下红层路堤的稳定性计算方法,具体有以下几方面的创新性:

首先,以 FLAC^{2d}为基础,利用其自带的 fish 语言编制了考虑非饱和土水气两相渗流-地表径流耦合程序;通过算例计算分析表明,要准确评价降雨对边坡稳定性的影响,需要考虑耦合边界和水气两相的流动。

其次,鉴于非饱和土土水特征曲线与渗透系数参数的确定是非饱和土理论应用于实际的关键,而确定这些参数需要耗费的代价也较高,这为非饱和土理论的实际应用带来了很大的困难,作者采用了径向基函数神经网络模型对非饱和参数进行了反演,并证明了该方法的可行性。同时基于非饱和土单变量的有效应力理论,在考虑地表径流-地下渗流和流体-固体双耦合的情况下,利用神经网络模型反演的非饱和参数对降雨下红层路堤边坡稳定性进行了研究,得到了一些有益的结论。

最后,作者以单轴压缩红层蠕变试验为基础,提出基于非饱和土单变量理论的红层非饱和土路堤沉降计算理论,利用该理论通过有限元对离心试验某工点实际填筑过程进行了数值模拟,证明了该理论的正确性。

总之,该项研究不仅为路堤本体的沉降问题提供了较为坚实的理论基础,还为类似工程的施工建设提供了一定的技术指导。该书的出版将为今后在非饱和渗流条件下对路堤稳定性的进一步研究起到推进作用。

特为之序。



成都理工大学

2012年11月

前 言

铁路客运专线飞速发展,路基的设计思路有了一个质的变化,过去对路基工程主要满足在强度的要求上,而如今客运专线更体现在对路堤沉降的严格控制中,同时对路堤边坡的稳定性提出了更高的要求。由于路堤填土基本上都是非饱和土,其边坡稳定性和路堤变形理论与饱和土相比,更复杂。

路堤本体的沉降一直是路基研究解决的热点问题。对路堤本体沉降性状的研究,不仅能更深刻地认识路基的稳定性,而且也是提高路基设计水平,发展施工控制技术的有效途径。世界各国历来十分重视对路堤本体沉降计算的研究。然而由于非饱和土本身问题的复杂性和非饱和土力学理论的不成熟,目前对非饱和高路堤的沉降规律尚缺乏合理的理论计算方法,尤其是对于铁路客运专线和高速公路,其沉降控制的要求更高,但国内外尚无同类工程的可靠技术成果和工程经验可以借鉴,可供参考的系统观测资料尤其缺少。

从国内外研究现状可知,考虑降雨条件下的饱和-非饱和渗流问题基本上不考虑地表径流和地下渗流耦合计算,而是对完全入渗向有压入渗阶段转化,直至稳定的过程采用简化的边界处理:当降雨强度大于土的饱和渗透系数时,采用“零”水头边界代替。考虑降雨对边坡稳定性的影响主要通过简化降雨入渗的边界进行分析。首先通过地下水的非饱和渗流计算求得基质吸力的暂态分布,然后基于非饱和双应力变量和抗剪强度理论,利用极限平衡理论对边坡稳定性进行评价,而没有考虑水气两相流体-固体在入渗过程的耦合过程。

同时非饱和土的固结理论基本上是基于双应力变量建立的,没有考虑与饱和土的固结理论过渡问题;对于路堤本体本身的沉降基本上也是忽略水气两相孔隙介质的流动对土的有效应力的影响,而是把非饱和岩土介质当作一种工程材料来考虑它的变形问题。

近几年来,铁路客运专线和公路建设突飞猛进,红层在公路和铁路建设中如何使用就成为工程技术人员普遍关注的问题。蠕变参数与应力路径有关,因此建立基于非线性蠕变的非饱和单变量流固耦合的土体沉降计算理论仍是今后研究的重点。

本书基于上述研究需求,采用数值和理论分析方法,并结合具体的工程实例和试验,针对遂渝客运专线和达成复线客运专线的建设,开展红层泥岩填料的工程特性和其路堤在非饱和渗流条件下的稳定性的研究。通过对非饱和渗流条件下的红层路堤研究,揭示了红层路堤在非饱和渗流条件下应力和变形的变化规律,提出红

层路堤在考虑非饱和渗流条件下红层路堤稳定性计算方法。研究成果可直接为工程建设服务,同时也为今后进一步深入研究红层作为路基填料奠定了一定的理论基础。

全书共有 9 章,第 1 章为绪论,通过概述当今铁路客运专线的发展,提出了本书的研究问题,并详细地概述了当今关于红层路堤稳定性的研究现状,提出了其存在的问题和拟解决的方法,并给出了系统的研究内容和技术路线。

第 2 章主要基于广泛的地质资料和现场地质勘察,对红层的定义给予了界定,并描述了四川及我国其他地区红层的分布特征。

第 3 章针对遂渝客运专线和达成复线客运专线建设,同时鉴于线路经过地区均为红层泥岩发育地带,其物质成分和工程特性与湖南红砂岩有着较大的差别,为此展开了川中红层泥岩的工程地质特性分析。

第 4 章主要对降雨入渗过程即地表径流-非饱和水气两相渗流的耦合方程进行了分析,同时以现用商业程序 FLAC^{2d}为基础,利用其自带的 fish 语言编制了地表径流-渗流耦合程序,对坡地降雨入渗过程进行了数值模拟。

第 5 章通过假定非饱和土土水特征曲线和渗透系数的函数关系式满足于 van Genuchten 模型,对非饱和参数进行了反演。

第 6 章主要通过考虑地表径流-地下渗流和流体-固体双耦情况,对降雨下路堤边坡的稳定性进行了验算。

第 7 章主要以单轴压缩红层蠕变试验为基础,对减速蠕变曲线采用两个 Kelvin 体模型进行拟合,提出了基于非饱和土单变量理论的红层非饱和土路堤沉降计算理论,并研究了红层路堤本体的沉降规律,基于流变的非饱和流固耦合理论,建立了路堤本体的沉降理论。

第 8 章主要通过离心试验,在不考虑填筑路堤后土体本身的性质对路堤病害的影响下,对红层填料在不同压实度条件下的变形特性进行了研究,从而确定路堤本身填筑的参数,同时以离心试验结果和野外实测数据为基础,通过数值模拟,对红层路堤非饱和和沉降理论进行了验证。

第 9 章主要通过足尺动态模型试验,模拟在实际荷载条件下基床的动态特性,证明了措施的可行性和可靠性。

特别感谢西南交通大学土木工程学院曹新文教授,地球科学与环境工程学院文江泉、郭永春、赵文副教授的无私帮助,他们为本书提供了部分技术资料 and 现场试验资料。

本书在撰写过程中,得到了西南科技大学土木工程与建筑学院的王汝恒教授、姚勇教授与其他同事的大力支持与帮助,在此一并向他们表示衷心的感谢。

本书中的研究成果得到了铁道部科技发展计划项目“西南红层软黏土工程特性及地基加固技术研究”(编号:2004G026)的资助,在此表示感谢。

感谢成都理工大学黄润秋教授为本书作序。

在本书的撰写过程中,参阅了国内外相关专业的大量文献,在此向所有文献作者表示由衷的感谢。

由于作者的水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评与指正。

作 者

2012 年 11 月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 饱和-非饱和渗流研究现状	3
1.2.2 地表径流研究现状	7
1.2.3 降雨对边坡稳定性影响的研究现状	9
1.2.4 路堤本体沉降变形理论的研究现状	13
1.2.5 基床结构动态特性的研究现状	19
1.3 存在的问题及拟解决办法	20
1.4 本书研究的主要内容及技术路线	21
第 2 章 我国红层与四川红层的分布特征	23
2.1 引言	23
2.2 红层的界定	23
2.3 中国红层的分布及一般特征	23
2.4 四川盆地红层的一般特征	27
2.4.1 新构造特征及川中红层形成	27
2.4.2 四川红层的分布特征	27
2.5 本章小结	29
第 3 章 红层泥岩填料工程地质特性	30
3.1 引言	30
3.2 红层泥岩的成分及微结构分析	30
3.2.1 化学成分	30
3.2.2 矿物成分及微结构	31
3.3 红层泥岩的物性参数分析	37
3.4 红层泥岩填料水理性质	39
3.4.1 红层泥岩填料的膨胀特性	39
3.4.2 红层泥岩崩解特性	40
3.4.3 红层泥岩崩解分形分析	44

3.5	红层泥岩填料的主要工程特性	46
3.5.1	红层泥岩填料的压实特性	46
3.5.2	红层泥岩填料的抗压强度	47
3.5.3	红层泥岩填料的抗剪强度	48
3.5.4	红层泥岩填料的渗透特性	54
3.5.5	红层泥岩填料 CBR 强度	56
3.5.6	红层泥岩填料的长期强度特性	58
3.6	本章小结	65
第4章	考虑地表径流-渗流的耦合理论与应用研究	67
4.1	引言	67
4.2	饱和-非饱和水气两相渗流的基本理论	68
4.2.1	水气两相流体驱动势	68
4.2.2	饱和-非饱和水气两相渗流 Darcy 定律	69
4.2.3	土-水特征曲线和非饱和水气两相渗透函数	71
4.2.4	饱和-非饱和水气两相渗流的基本微分方程	77
4.3	边坡降雨入渗问题	80
4.3.1	边坡降雨入渗过程	80
4.3.2	边坡降雨入渗过程的影响因素	82
4.4	坡面流问题的基本理论	83
4.4.1	经典的坡面流问题	84
4.4.2	坡面流控制方程与定解条件	85
4.4.3	坡面流微分方程的解析解	86
4.5	地表径流-非饱和渗流的耦合在 FLAC 中的数值模拟	86
4.6	坡面产流数学模型的验证	88
4.7	考虑耦合和简化边界对坡面入渗的影响	89
4.8	考虑水气两相对坡面入渗的影响	91
4.9	本章小结	91
第5章	基于径向基函数神经网络模型对非饱和参数的反演	92
5.1	引言	92
5.2	径向基函数网络算法的原理	92
5.2.1	径向基函数网络结构	92
5.2.2	径向基函数	93
5.2.3	径向基函数的工作原理	94
5.2.4	RBF 网络的训练	95
5.3	非饱和参数的反演	96

5.3.1 模型的制作与设计	96
5.3.2 有限元模拟	97
5.3.3 参数的反演	100
5.4 本章小结	100
第6章 降雨入渗对路堤边坡的稳定性研究	102
6.1 引言	102
6.2 非饱和土有效应力的描述	103
6.2.1 饱和土有效应力的概念	103
6.2.2 非饱和土的单变量有效应力描述	104
6.3 非饱和土单变量的流固耦合理论	106
6.3.1 传导定律	106
6.3.2 毛细定律	107
6.3.3 流体连续方程	107
6.3.4 流体本构方程	107
6.3.5 流体平衡方程	108
6.3.6 土体平衡方程	110
6.3.7 土体本构方程	110
6.3.8 几何相容方程	111
6.3.9 应力场对渗流场的影响	111
6.4 非饱和土流固耦合在 FLAC 中的实现	114
6.4.1 流体本构方程的离散化	114
6.4.2 节点的流动速率	115
6.4.3 时步的控制	115
6.5 流固耦合对边坡稳定性的影响	115
6.6 工程实例分析	118
6.6.1 坡度的影响	119
6.6.2 坡高的影响	121
6.6.3 水平渗透性的影响	123
6.6.4 降雨强度的影响	124
6.6.5 初始饱和度的影响	126
6.6.6 压实度的影响	128
6.6.7 长期强度的影响	129
6.7 本章小结	131
第7章 红层路堤非饱和沉降理论研究	132
7.1 引言	132

7.2	土体流变模型理论	132
7.2.1	基本流变元件	132
7.2.2	组合黏弹性模型	134
7.2.3	组合黏弹塑性模型	138
7.2.4	描述土体蠕变特性的其他理论	139
7.3	红层蠕变本构识别	140
7.4	饱和土体的固结-蠕变耦合理论	145
7.4.1	陈宗基流变-固结耦合模型	145
7.4.2	Merchant 流变-固结耦合模型	147
7.5	基于红层蠕变试验的非饱和流变-固结耦合模型	149
7.6	本章小结	151
第8章	红层路堤非饱和沉降理论验证	152
8.1	引言	152
8.2	土工离心模型试验的机理	152
8.3	红层填料路堤离心模型试验	156
8.3.1	离心模型试验方案	156
8.3.2	离心模型试验结果分析	157
8.3.3	路堤施工期沉降-路堤高度的关系	158
8.3.4	路堤的总沉降-时间-路堤高度的关系	159
8.3.5	路堤工后沉降-时间-路堤高度的关系	160
8.3.6	路堤工后沉降预测计算方法	161
8.3.7	路堤最终工后沉降-压实系数的关系	162
8.3.8	路堤工后沉降-总沉降的关系	163
8.4	离心试验对沉降计算理论的验证	163
8.5	工程实例对沉降计算理论的验证	170
8.6	本章小结	171
第9章	半刚性基床结构动态特性试验研究	173
9.1	引言	173
9.2	试验概况	173
9.2.1	试验模型	173
9.2.2	测试内容与传感器布置	175
9.2.3	试验荷载设计	175
9.2.4	试验分组步骤	178
9.3	模型填料与施工	179
9.4	数据处理	181

9.4.1 应力	181
9.4.2 变形	189
9.4.3 加速度	196
9.4.4 基床表面应变	197
9.4.5 刚度	199
9.5 本章小结	200
结论	202
参考文献	204

第 1 章 绪 论

1.1 问题的提出

铁路客运专线要为列车的高速行驶提供一个高平顺性和稳定性的轨下基础,而路基作为轨道结构的基础,必须具有强度高、刚度大、稳定性和耐久性好的特点,并能抵抗各种自然因素的影响,在运营条件下将线路轨道的设计参数保持在标准范围之内。因此,铁路客运专线路基的设计思想与普通铁路相比需要有一个很大的转变,其中集中体现的一点:过去对路基工程主要满足强度的要求,而铁路客运专线更体现在对路堤沉降的严格控制。因此路堤填料应满足下列三个基本要求^[1]:①在列车和路堤自重荷载作用下,路堤能保持长期稳定;②路堤本体的压缩沉降能很快完成;③在既有路基设计方案下,其力学特性不会受其他因素(水、温度、地震)影响而发生不利于路堤稳定的变化,因此,只要土质经过处理后能满足上述要求,是足可以充当填料的。

但是,对于铁路客运专线,使用的填料应该是最好的,这样既可以减少后期沉降,又可以有较高的安全储备以保证路堤的稳定,并保证不产生病害。因此,首先应该采用目前路基规范中所要求的优质填料类型。实际观测表明,采用优质、级配良好的粗颗粒可以大大减小路基的后期沉降。因此,在可能的条件下,路堤填料应优先选择 A 组、B 组填料。

然而,由于铁路线路很长,通过地段的地质条件变化复杂,都使用优质填料的可能性不大。因此有必要研究 C、D 类填料作为铁路客运专线填料的适用性。

红层指三叠纪、侏罗纪、白垩纪和古近纪沉积中外观上以紫红色和杂色的陆相碎屑岩沉积地层,岩性为砂岩、泥岩、砂泥岩、页岩,其分布十分广泛,主要分布于我国的西南、华中、华南和西北地区,其他地区只有零星分布。西南的四川盆地和西北的陕甘宁盆地(又称鄂尔多斯盆地)以及云南高原中部、南部等地,都有完整成片的红层分布。特别是四川盆地,是我国有名的“紫色盆地”。在华中、华南地区,红层多分布在一些山间中小盆地中,如湖南的衡阳盆地、江西的赣州盆地等。这些红色盆地分散、相互隔离,广泛分布于我国江南的丘陵低山中。西北的准噶尔盆地、吐鲁番哈密盆地、塔里木盆地、柴达木盆地以及秦岭南部山间盆地等地区都有典型的红层。

由于红层分布十分广泛,以红层作为填料广泛用于公路和铁路路基上。而红

层作为 C 类填料,水稳性差,易崩解,饱水后单轴抗压强度绝大多数小于 30MPa,属于软岩,其流变性明显。

随着高速公路和铁路客运专线的发展,水泥砼路面结构的出现,红层路基沉陷造成路面开裂、断板、错台等病害显得非常突出。为此对采用红层作为路基填料而产生危害进行了调查,比较典型的例子有:

(1) 达成线 K240+10~+4 连续降雨两天后突然下沉,边坡鼓起,最高处达到了 50cm,致使路堤严重变形,降雨过后继续观测发现轨面仍在不断下沉,平均每天下沉(起道量)60mm,最大为 70mm,最小 30mm。路基基底有约 5°的横坡,右侧边坡斜边长 21.5m 左右,采用条石骨架护坡,条石厚度约 15cm,共 7 拱,平均每拱宽度 6.4m 左右,其中有 5 拱明显被挤压鼓起,两拱较严重的拱间土体已经有流动过的迹象。同时路基靠小里程有一涵洞,涵洞内沿线路纵向被拉裂,裂缝 4~5mm,靠线路右半部分出现了较大的沉降,造成涵洞顶移位错开。

(2) 达成线 K143 边坡由于连续降雨致使路堤发生鼓胀,其程度与 K240+10~+4 比较稍微偏小。该段路基基底横坡稍大,约 5°,路基填高 5~9m,在右侧边坡坡脚下原地面为缓坡,下部为水田。现场调绘发现该段填方大里程方向右侧边坡下沉较大,30~40cm,30m 范围内路肩条石被拉裂,并向外有较大移位,边坡上条石骨架护坡也有破坏迹象。

(3) 320 国道莲易路东富乡杨林冲段(K1143),以易崩解的红砂岩填筑路堤,在铁路跨线桥头出现不均匀沉降,桥头水泥砼路面板出现横向贯通裂缝,缝宽 1.0cm,路肩沉降达 40cm;桥另一头砼路面板出现纵向裂缝,缝宽 3~6.5cm。

(4) 320 国道莲易路 K1180 处红砂岩路段,水泥砼路面出现纵向裂缝,缝长 55m,宽 11.0cm;纵缝两侧高差 1~2cm,同一侧路堤边坡产生坍方。

(5) 107 国道湘潭、湘江二桥桥头南接线采用易崩解的红砂岩填筑路堤,路堤出现沉陷,水泥砼路面板纵横裂缝满布,裂缝宽 1~2cm,错台现象严重。

(6) 107 国道的 K1922+950 及 K1980+200 处,因红砂岩路基沉陷,导致路面开裂,裂缝宽 2.0cm,裂缝两边高差 2~3cm。

(7) 京珠高速公路长沙至湘潭 K18 至 K19 处,有长约 250m 的红砂岩填方路段。路堤高达 13m,在未铺筑砼面板之前即因雨季来临,导致红砂岩路堤填料受雨水的浸湿而软化和崩解,在已铺筑的路面基层顶面产生两条长 60~70m、宽 1~2cm 的纵向裂缝,路基平均下沉达 10cm,最大处达 18cm。该段路基经压浆处理一个月后,路基再下沉 18cm,压浆前后合计平均沉降超过 28cm。

产生上述现象的原因是红层软岩遇水易崩解和在水气两相非饱和渗流下土体发生较大变形所致。因此,针对遂渝客运专线和达成复线客运专线建设,同时鉴于线路经过地区均为红层泥岩发育地带,展开红层泥岩填料的工程特性和其路堤在非饱和渗流条件下的稳定性研究有其重要意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 饱和-非饱和渗流研究现状

岩土介质是一种多孔介质,由含有孔隙的固体骨架组成,其中孔隙可能是由水或空气,或者水与空气共同填充的,若充填物全是水,则为完全饱和多孔介质;若充填物全是气,则为完全干燥多孔介质,而通常不存在严格意义上的完全饱和或完全干燥介质,多孔介质通常是部分饱和的,且具有固、液、气三相性,在这种情况下,水的饱和度和空气的饱和度之和为常量 1。渗流力学是一门研究流体在多孔介质中运动规律的科学,是一门流体力学与岩石力学、土力学、多孔介质理论、表面物理学交叉渗透而形成的学科。渗流力学作为渗流学科的核心课程,在 20 世纪受到国际学术界和工程界的高度重视,随着各相关学科的不断发展和生产实践中提出的渗流问题日益广泛复杂,渗流已逐渐发展成为具有自己的理论、方法和应用范围的独立的学科。

1856 年,法国工程师 Darcy 通过试验提出了线性渗流理论,为渗流理论的发展奠定了坚实的基础。1889 年,茹可夫斯基首先推导了渗流的微分方程。此后许多数学家和地下水动力学科工作者对渗流模型及其解析解法进行了广泛和深入的研究,并取得了一系列的研究成果。但解析解毕竟仅适用于均值介质和简单的边界条件,在使用上受到很大的限制。

1922 年,巴甫洛夫斯基正式提出了求解渗流场的电模拟法,为解决比较复杂的渗流问题提供了一种有效的工具。起初,电模拟法多采用导电液体模型进行试验,但它无法模拟非均质各向异性渗流介质,对复杂的地质和边界条件也不适应。为了解决更复杂的渗流问题,逐渐发展和研究了电网模拟法。

在 1931 年 Richards^[2]将 Darcy 的线性渗流理论推广应用到非饱和渗流中以后,人们才开始了非饱和渗流理论的研究。水相所满足的 Richards 控制方程便很快地建立,随后基于 Richards 控制方程的饱和-非饱和渗流后来得到了深入的研究,并被成功地应用到许多实际工程中。

随着电子计算机技术的发展与普及,工程渗流问题的分析方法也得到了很大的发展。以往用数值法分析渗流问题,一般是以自由水面为边界,在饱和区内进行计算研究,但这种分析方法在计算的每个时段都要试求自由水面边界,过程比较繁琐,而且也没有考虑非饱和区的孔隙水压力状况,因此不能全面真实地反映地下水的渗流动态。为此,国外从 20 世纪 70 年代开始考虑非饱和区水的流动,即把饱和与非饱和区在一起进行整体分析。压力水头在饱和区为正值,而在非饱和区为负值,零压力面就是自由水面,即饱和与非饱和区的分界面。这样计算域内不再有自

由水面边界,使得计算简化,程序处理也比较容易。

数值模拟应用到 Richards 控制方程中以后,使得饱和-非饱和的渗流场获得合理的数值解成为可能,早期主要采用有限差分的方法求解 Richards 方程,随着有限元技术的发展和逐渐成熟,有限元方法成为求解饱和-非饱和渗流问题的主要方法。

在有限差分数值模拟饱和-非饱和渗流问题方面,Rubin^[3]对二维饱和-非饱和土进行了研究,用有限差分的方法给出了 Richards 控制方程的数值解;Freeze^[4]研究了地下含水层饱和-非饱和非稳态流,给出了数值解法,并对以前的饱和-非饱和渗流有限差分数值模拟进行了比较系统的阐述和总结。

津克威茨(Zienkiewicz)第一次具体地将有限元法应用于稳定渗流的分析,Desai^[5]将有限元法引入非稳定渗流,Remson 等^[6]出版了《地下水文学的数值法》专著,他们对 20 世纪 70 年代以前的饱和-非饱和渗流有限差分数值模拟作了比较全面的回顾和介绍。

最早应用有限元法求解饱和-非饱和渗流问题的是 Neuman,他采用了 Galerkin 法对 Richards 方程进行空间域的离散,用 Crank-Nicolson 有限差分格式对时间域进行离散,在 1973 年提出了一维非饱和渗流的有限元法(finite element method, FEM)之后,又提出解决二维饱和-非饱和渗流问题的有限元法^[7,8]。同时对非线性迭代时初值的选取作了具体的指导。Neuman 以后,许多专家和技术人员对饱和-非饱和渗流问题进行更加广泛深入的研究和探讨,对 Richards 方程从不同的方面进行了大量的数值计算工作,也取得了一些可喜的成果和经验。

赤井浩一等^[9]日本学者采用了 Neuman 的数值模型和有限元法进行了试验与数值计算,研究了考虑土-水特征曲线吸湿不同情形影响的饱和-非饱和渗流,做了砂槽模型试验,用有限元方法对砂槽试验进行了数值模拟,而且数值模拟的结果与砂槽模型试验结果比较接近。

Papagiannakis 和 Fredlund^[10]用 Galerkin 加权余量原理推导了二维稳态渗流的有限元形式;Miller 提出了非饱和介质的渗透系数是含水量或水压力水头的函数即 $k_r(\theta)$ 和 $k_r(h)$,这种函数关系随多孔介质性质的变化而变化。这就为 Darcy 定律应用于非饱和区域,进而同时对饱和区域和非饱和区域的渗流场进行计算提供了基本的理论依据。

在进行饱和-非饱和的有限元计算时,多孔介质的非饱和参数的确定存在一定的困难,van Genuchten 提出了一个土体非饱和参数的表达式,在这个表达式中存在未知的参数,可以根据土体的非饱和和特征曲线 $k_r-\theta$ 和 $\theta-h$ 来确定。这种方法在实际的计算中应用比较广泛^[11]。

Lam 和 Fredlund^[12,13]在 1984 年应用饱和-非饱和渗流分析程序 Trasee 对这些渗流问题进行了求解,对饱和-非饱和土体的渗流问题作了较完整的论述,把非