

PHYSICAL PROPERTIES, MECHANICAL BEHAVIOR AND
ENGINEERING APPLICATION OF
WEATHERED GRANITE SOILS

强风化花岗岩

物理力学特性与工程应用

牛玺荣 著

非外借



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

强风化花岗岩物理力学特性 与工程应用

牛玺荣 著



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

内 容 提 要

本书介绍强风化花岗岩的基本物理力学特性,包括岩石学特性、风化机制、击实特性、承载特性、变形特性、剪胀特性、强度特性和颗粒破碎特性等,在修正强度条件基础上提出压实风化花岗岩的本构模型,并通过室内试验和实体工程验证本构模型的合理性。围绕风化花岗岩的工程特性,总结风化花岗岩地区工程勘察和评价的规定。结合实体工程,重点论述了风化花岗岩地区路基填筑施工工艺和质量控制要点。

本书适合高等院校和科研院所相关科技工作者阅读,也可供勘察、设计、施工、管理部门专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

强风化花岗岩物理力学特性与工程应用 / 牛玺荣著

. — 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2019.7

ISBN 978-7-114-15580-2

I. ①强… II. ①牛… III. ①风化壳—花岗岩—物理力学—研究 IV. ①P588.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 098446 号

书 名: 强风化花岗岩物理力学特性与工程应用

著 作 者: 牛玺荣

责任编辑: 刘 倩

责任校对: 张 贺

责任印制: 张 凯

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.ccpres.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: 北京虎彩文化传播有限公司

开 本: 720×960 1/16

印 张: 12.5

字 数: 230 千

版 次: 2019 年 7 月 第 1 版

印 次: 2019 年 7 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-15580-2

定 价: 40.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前 言

随着国家公路基础设施建设的进一步推进,越来越多的公路工程建设项目在山区实施。为了解决山区路基填料匮乏问题,研究特殊填料的工程性状及适用性成为亟待解决的问题。风化花岗岩作为一种特殊填料,除具有一般土的应力应变非线性、弹塑性、剪胀(缩)性等特征外,还具有其独特的工程性质。

为了较全面理解强风化花岗岩的力学性状,本书通过大量室内试验对风化花岗岩的岩石学特性、击实特性、承载特性、变形特性、剪胀特性、强度特性、颗粒破碎特性等进行全面研究。特别关注花岗岩的风化机制,建立地质年代数、筛分等比常数与岩体深度之间的关系,重点分析颗粒级配、矿物成分、密实度、应力水平等对颗粒破碎的影响。

通过大三轴剪切试验拟合风化花岗岩的峰值应力比曲线和状态应力比曲线,在已有研究成果的基础上重新建立峰值应力比和状态应力比之间的关系,探讨风化花岗岩的强度条件,认为峰值应力比和状态应力比的乘积并非常数,而是平均主应力的幂函数。将状态应力比引入修正剑桥模型的剪胀方程,采用相关联正交流动法则,推求考虑颗粒破碎风化花岗岩的屈服函数。利用本书提出的风化花岗岩的强度条件,对已有的硬化参数进行修正,最终建立考虑颗粒破碎的强风化花岗岩的应力-应变关系。

通过比较数值计算与三轴试验的应力-应变关系,验证修正强度条件下考虑颗粒破碎强风化花岗岩弹塑性本构模型的合理性。采用本书模型对路堤填筑过程进行沉降计算,并与已有模型沉降计算结果和实体工程沉降观测结果进行比较分析,认为本书

的研究模型计算结果更能反映公路路基填筑过程中的实际沉降情况。

为了评价强风化花岗岩作为路基填料的适用性和施工可操作性,通过铺筑试验路,提出强风化花岗岩路基填筑的施工工艺和质量控制要点,针对风化花岗岩颗粒易碎、存在球状风化等特点,重点探讨风化花岗岩填料的选择和路基碾压方案的确定,并强调路基排水和防护的重要性。

本书充分贯彻“因地制宜,就地取材”的公路修筑理念,研究成果可为公路路基设计和施工技术规范的修订提供理论依据,并可为相关工程实践提供技术支撑。

本书共8章。第1章为绪论,总结有关风化花岗岩工程特性和工程应用的研究进展,并介绍本书主要研究内容;第2章为花岗岩岩石学特性及其风化机制,重点阐述花岗岩的风化机制,并采用数学模型描述花岗岩的风化进程;第3章为强风化花岗岩物理力学性能试验,在物理力学性能试验基础上,研究压实风化花岗岩的击实特性、承载特性、变形特性、剪胀特性、强度特性、颗粒破碎特性等物理力学特性;第4章为考虑颗粒破碎的强风化花岗岩本构模型,参考已有研究成果,修正粗粒土的强度条件,建立强风化花岗岩的本构模型;第5章为强风化花岗岩本构模型验证与路堤沉降计算;第6章为风化花岗岩地区工程勘察,参考相关规范,总结风化岩勘察和评价的要点;第7章为强风化花岗岩路基填筑技术,依托实体工程提出强风化花岗岩路堤填筑施工工艺和压实质量控制方法与标准;第8章为结论与展望,总结全书的主要研究成果,并提出未来研究的建议。

本书是作者十余年研究成果的总结,相关内容的研究得到国家自然科学基金项目、中国博士后科学基金项目、山西省应用基础研究计划(面上自然基金)项目、山西省交通运输科研计划项目、中央高校基本科研业务费资助项目,以及交通行业重点实验

室开放基金项目经费的资助。此外,本书的研究得到长安大学高江平教授和陈忠达教授的指导,也得到北京航空航天大学姚仰平教授的帮助,作者在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,本书错漏缺点在所难免,敬请读者批评指正。

作 者
2019 年 3 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 风化花岗岩物理力学特性研究现状	3
1.3 风化花岗岩在工程中的应用	10
1.4 主要研究内容	13
第2章 花岗岩岩石学特性及其风化机制	15
2.1 概述	15
2.2 矿物(化学)成分与岩石学特性分析	17
2.3 花岗岩风化机理及影响风化程度的因素	21
2.4 花岗岩风化过程数学描述	24
2.5 本章小结	29
第3章 强风化花岗岩物理力学性能试验	31
3.1 工程类型划分	31
3.2 击实特性	32
3.3 加州承载比试验	34
3.4 变形特性	36
3.5 应力应变特性	40
3.6 颗粒破碎特性	70
3.7 本章小结	79
第4章 考虑颗粒破碎的强风化花岗岩本构模型	81
4.1 概述	81
4.2 风化花岗岩强度条件的探讨	124
4.3 考虑颗粒破碎的强风化花岗岩本构模型	125
4.4 本章小结	132
第5章 强风化花岗岩本构模型验证与路堤沉降计算	134
5.1 概述	134

5.2	风化花岗岩本构模型验证	135
5.3	风化花岗岩路堤沉降计算	140
5.4	本章小结	146
第6章	风化花岗岩地区工程勘察	148
6.1	岩石的风化剖面	148
6.2	风化岩和残积土的勘察	150
6.3	风化岩和残积土的评价	152
6.4	花岗岩残积土在公路工程勘察中的规定	157
6.5	本章小结	160
第7章	强风化花岗岩路基填筑技术	161
7.1	概述	161
7.2	强风化花岗岩填筑路基施工工艺	164
7.3	强风化花岗岩填筑路基施工质量控制要点	168
7.4	强风化花岗岩路基边坡防护	169
7.5	本章小结	171
第8章	结论与展望	172
8.1	结论	172
8.2	展望	175
	参考文献	176

▶▶▶ 第1章 绪论

1.1 引言

花岗岩(Granite)是一种岩浆在地表以下凝固形成的火成岩,主要成分是长石和石英。花岗岩的语源是拉丁文 granum,意思是谷粒或颗粒。因为花岗岩是深成岩,常能形成发育良好、肉眼可辨的矿物颗粒,因而得名^[1]。

风化花岗岩在我国分布较广,约占国土面积的9%,达80多万 km²,集中分布在云贵高原和燕山山脉以东的第二、三级地形阶梯上,以海拔2 500m 以下的中低山和丘陵为主,其他一些山地也有分布。尤其在广东、福建以及桂东南与湘南、赣南一带,更为集中。花岗岩出露面积,在闽、粤两省都占其总面积的30%~40%,桂、湘、赣三省(自治区)均占其总面积的10%~20%。自西北向东南,依次出露加里东、海西、印支、燕山各期花岗岩,其中以燕山期花岗岩出露最广,地质年代愈新的花岗岩,愈向东南迁移。根据不完全统计,花岗岩石有300多种。

花岗岩的主要成分是石英(20%~60%)、长石(20%~40%)、云母及角闪石(5%~10%),其呈全晶质等粒结构,质地坚硬,性质均一,岩块抗压强度高(120~200MPa)。因长石和云母具有节理,花岗岩多具有三组原生节理,而且由于石英和长石的膨胀系数相差近一倍,在热胀冷缩的过程中,花岗岩表面容易产生裂隙,因此花岗岩易风化,尤其是粗粒结构花岗岩更易风化^[2]。花岗岩在特殊地理环境下经历长期地质构造运动、气候差异变化等的影响,由于组成花岗岩的矿物成分物理化学性质的差异,花岗岩风化侵蚀,最终形成微风化、中风化、强风化、残积土等不同程度的风化花岗岩^[3]。

由于花岗岩节理发育,沿着节理进行风化作用,可以向岩体内部深入形成很厚的红色风化壳,这是我国东南部花岗岩地貌的一大特点。花岗岩风化壳的厚度,取决于花岗岩种类、节理疏密和形式、气候条件、地表水与地下水的活动状态等多种因素,通常气温愈高,雨量愈多,风化壳和残积层愈厚。

花岗岩是山西重要的岩石类型,分布十分广泛,主要分布在吕梁山中部之云

中山一带、恒山东麓—太行山西麓—五台山北麓一带、太岳山之绵山—霍山—塔儿山一带、中条山区、大同采梁山一带等,出露面积2 849.74km²。较大岩体分布于山西东北部五台山地区和中西部地区,五台山地区较大的花岗岩岩体有五台岩体独口、岔口、六棱山、铁瓦殿、古花岩、盘道、黑崖、定襄等。中部主要在太原北部和西部吕梁山地区,有悬钟、惠家庄堂儿、真武山花岗岩岩体。山西花岗岩岩石类型分布见表 1-1,岩石类型主要为黑云母花岗岩,主要矿物组成有石英 25%~35%,正长石 30%~45%,更长石 15%~25%,黑云母 2%~5%。

山西花岗岩岩石类型分布 表 1-1

时期	中条山区	吕梁山区	霍山— 塔儿山地区	五台山—恒山区	左玉— 阳高地区
燕山期	石英斑岩,二 长花岗岩	—	花岗斑岩	花岗斑岩,黑云母 花岗岩	—
印支期	—	—	—	—	石英斑岩
蓟县期	花岗岩	—	—	—	—
吕梁期	二长花岗岩, 黑云母花岗岩	二长花岗岩,花岗 斑岩,黑云母花岗岩	—	二长花岗岩,花岗 斑岩,黑云母花岗岩, 角闪花岗岩	—

国家经济可持续发展离不开基础设施的建设,其中包括交通基础设施的完善。在国家“经济又好又快发展”“全面建成小康社会”政策和“一带一路”倡议进一步实施的大背景下,公路交通事业得到纵深发展,大量公路建设项目已从地形平坦地区转向地形复杂的山区。山区公路(特别是高速公路)的修筑与平原微丘区具有很大不同,从修筑技术的革新到优良工程的实现,从生态环境的保护到工程造价的最小化,均需要广大工程技术人员具有较强的创新能力和挑战精神。

我国花岗岩分布广泛,在花岗岩山区修筑公路已成为现实。由于风化岩的特殊性质,现行公路路基设计和施工规范对风化岩的使用做出了限制。《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)中 3.8.1 条规定“膨胀性岩石、易溶性岩石、崩解性岩石和盐化岩石等均不应用于路基填筑”,以及《公路路基施工技术规范》(JTG F10—2006)中 4.2.3 条规定:“膨胀岩石、易溶性岩石不宜直接用于路基填筑,强风化石料、崩解性岩石和盐化石不得直接用于路基填筑”。为了解决山区筑路材料匮乏的问题,研究山区岩土材料的工程特性和适用性,并将其充分利用到路基填筑中,成为亟待解决的问题,更是充分贯彻“因地制宜、就地取材”公路建设理念的迫切需要。

作为一种探索和尝试,本书在室内试验和实体工程铺筑的基础上,结合理论

分析和数值计算,对风化花岗岩的力学性状进行了较系统的研究,并探讨风化岩路基的填筑技术。

通过本书研究,可较全面认识风化花岗岩的工程特性,可对其特殊的力学机制有更深层次的理解;通过探讨其作为路基填料的适宜性,可积累风化岩填筑路基的施工经验。

本书的研究成果可为公路路基建造标准和规范的修订提供技术支撑,对提升和完善特殊地区(特别是风化岩地区)公路修筑(设计和施工)技术提供理论参考。利用本书的研究成果可以充分利用废弃风化石料,在公路修筑阶段能起到少占耕地、节约资源、减少投资、保护环境的作用,本书成果具有较广阔的应用前景,其推广和应用将产生明显的经济和社会效益。

1.2 风化花岗岩物理力学特性研究现状

风化花岗岩具有其独特的物理力学特性,全面研究其工程性状对深入认识其力学机制具有重要的意义。风化花岗岩的物理力学特性主要包括岩石(地质)学特性和工程特性,岩石学特性是从地质成因上认识其工程特性内在机制的基础,而工程特性是风化花岗岩在物理力学特性上的外在表现。本节重点综述与本研究有关的风化花岗岩的工程类型、矿物(化学)成分、击实特性、承载特性、固结变形、强度特性、本构模型等方面的物理力学特性。

1.2.1 工程类型划分

工程类型划分是研究土工材料工程特性的前提和基础,以往学者就风化花岗岩的类型划分做了大量研究工作。

因日本存在大量风化花岗岩,日本学者对风化花岗岩工程类型划分的研究最早。Nishida & Aoyama(1988)^[5]针对当时风化花岗岩没有统一的工程分类体系的情况,根据风化花岗岩的物理力学特性较早提出了原状风化花岗岩的工程类型划分方法。此后,Fukumoto(1990)^[6]通过大量筛分试验,提出了能反映不同风化程度的风化花岗岩级配的等比级数数学模型。张永波等(1997)^[7]通过寻找孔隙比、压缩模量、内摩擦角与粒径大于0.5mm颗粒含量的关系,选用粒径大于0.5mm的颗粒含量作为花岗岩残积土的分类指标,按小于15%、15%~35%、大于35%,将花岗岩残积土分为残积黏性土、残积砂质黏性土、残积砂砾质土三类。吴志峰等(1997)^[8]用分维值定量地表征了土体粒度分布特征,其值大小反映了风化壳的风化强弱。吴能森(2006)^[9]在张永波分类方法的基础上提出了综合分类法,建议首先根据《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)(以下称“国标”)的分类原则,即粗、细粒组相对含量,将花岗岩残积土分为细粒

土质粗粒土和含粗粒细粒土两个亚类;然后根据大于 0.5mm 颗粒含量将亚类土分为次亚类土,即将细粒土质粗粒土分为细粒土质砂砾和细粒土质砂,将含粗粒细粒土分为含砂砾细粒土和含砂细粒土;最后根据塑性指数具体确定各种土的名称。综合分类法较好地反映花岗岩残积土的结构性和土性指标变化特征,并综合考虑土的粒度成分和塑性特性影响,符合土质分类的目的和原则。花岗岩残积土的亚类划分与“国标”完全一致,即按粗细比 $\lambda = 1$ 为粗粒土和细粒土的分界值;但轻亚类并非按照“国标”以砾粒组含量 50% 为界分为砾类和砂类,而是以大于 0.5mm 颗粒含量 35% 为界,分为砂砾类和砂类。彭勃(2009)^[10] 将以往花岗岩残积土的分类方法综合后用于广州轨道交通的建设中,取得了很好的工程效果。

在此后的 10 年间,少有专门研究风化花岗岩分类方法的报道。

纵观风化花岗岩的工程分类方法,可以看出,以往的分类方法主要针对风化残积土,其分类方法综合考虑了物理力学特性对其的影响。本书在综合以往研究成果基础上,对强风化花岗岩进行了工程类型的划分。

1.2.2 矿物(化学)成分分析

花岗岩微观特征的研究手段主要有光学显微镜分析、电镜扫描分析、X 射线衍射分析、差热分析以及化学分析等。光学显微镜分析和电镜扫描分析主要用于研究矿物微观结构,而 X 射线衍射分析和差热分析主要用于确定岩石的矿物成分,化学分析用来确定矿物的化学成分。从 20 世纪 80 年代,科研工作者就开始对有关矿物(化学)成分与物理力学特性之间关系进行研究。

Gilkes 等(1980)^[11] 较早用扫描电子显微镜(SEM)对砖红壤型花岗岩风化壳进行了研究。Tomita 等(1993)^[12] 探索了用非结晶材料含量来定量表征花岗岩风化程度的可能性,通过酸碱溶液替代法和烧失量法试验,认为风化花岗岩内的黏土矿物主要是高岭土,深色的变质矿物和长石加速了风化的发生。尚彦军、岳中琦等^[13-19] 对香港九龙一带的风化花岗岩的化学成分、矿物成分、微观特征、孔径分布等进行了较系统的研究,并就各指标之间的相关性进行了统计分析,为深入研究华南一带风化花岗岩和花岗岩残积土的工程特性提供了依据。张军等(2004)^[20] 通过承载比和回弹模量试验,研究了不同云母含量对风化花岗岩路基土的影响。冯涛等(2008)^[21] 采用 X 射线衍射物相分析法(JCPDS)对武广客运专线韶关至花都段岭牌隧道同一钻孔中四个风化程度不同的风化花岗岩样进行了矿物成分分析,总结了不同风化程度岩样矿物含量的变化规律和转化机制。冯涛等(2009)^[22-23] 采用光学显微镜和扫描电镜测试手段,通过对薄片鉴定结果和电镜扫描图片特征的对比分析,对武广客运专线韶关至花都段花岗岩岩样在风化作用过程中的微观特征的变化情况进行了研究。许碧铨(2009)^[24] 通过研

究福建花岗岩残积土的化学成分的变化,分析了风化程度与化学成分的关系,并探讨了不同风化程度花岗岩残积土的物理力学特性。陈爱云(2016)^[25]为全面了解华东、华南地区黑云母花岗岩的工程地质特性,对风化层的矿物风化特征、物理特性、强度特性以及膨胀性进行系统研究,结果表明华东、华南地区黑云母花岗岩的矿物成分主要是石英、长石和黑云母,发生风化蚀变的主要是长石和云母,长石风化蚀变成高岭石、伊利石或蒙脱石,黑云母蚀变为伊利石和铁锰质物。

1.2.3 击实特性研究

击实试验采用的主要形式包括轻型击实试验和重型击实试验,通过研究土体的击实特性,可评价土体作为路基填料的适宜性和施工可操作性。

史迅(1999)^[26]在三峡坝区道路路基施工中利用三因素关系图描述了风化花岗岩填料压实特性,由于减少了标准击实试验的次数,大大节约了压实度的检测时间,加快了施工进度。武鹤等(2001)^[27]建立了风化砂岩粗料含量与最大干密度的关系,并在鹤大公路鸡西段的建设中得到了应用。郭建华等(2002)^[28]研究了含水率对风化泥岩击实特性的影响,得出了压实度随含水率增加呈增→减→增→减的变化趋势,即双峰击实曲线。邓天天等(2009)^[29]在武广客运专线英德至花都段路基填筑中对石灰(或水泥)改良的高液限全风化花岗岩进行了一系列击实试验。但汉成等(2009)^[30]对武广高铁强风化板岩的击实特性进行了较系统的研究,对击实岩样的抗剪强度、回弹模量、CBR值、渗水特性、压缩特性等指标做了试验研究,认为强风化板岩适合做高速铁路路基填料,能满足路基强度和稳定性的要求,重要的是要注意路基压实工艺的控制。陈杰等(2016)^[31]研究了湿法击实下广佛肇高速公路花岗岩残积土填料的击实特性,认为湿法击实可以显著提高填料的水稳性。徐立红等(2017)^[32]采用便携式落锤弯沉仪(Portable Falling Weight Deflectometer, PFWD)研究了江西安远至定南高速公路所用风化花岗岩残积土的压实特性,对比分析了填方和挖方段落残积土压实的差异性,认为其挖方段落的压实度明显高于填方段落。

总结发现,以往对风化花岗岩击实特性的研究主要针对南方地区的残积土(属于细粒土范畴),并未就北方地区风化花岗岩粗粒土开展击实特性的研究。

1.2.4 承载力评价

采用标准贯入试验、加州承载比试验、动力触探、旁压试验、承载板试验等手段,可以了解风化花岗岩的承载力,可为准确评价其作为路基填料的承载能力提供依据。

张永波等(1997)^[33]以静载试验为基础,提出了利用标准贯入试验击数确定

浅层地基承载力的修改方案,并探讨了土体含水率和浅层地基承载力之间的相互关系。张昆等(2008)^[34]对深圳地铁2号线的风化花岗岩的标贯击数做了概率统计分析,得出了其服从正态分布的结论。马宏剑等(2006)^[35]通过在广东燕山期全风化花岗岩(残积黏性土)中掺入砂,研究总结了掺砂量对CBR值的影响,随掺砂量的增加,CBR值也在增加,且增加幅度也在增加。黄建南等(2008)^[36]研究了厦门地区砂砾状强风化花岗岩承载力和变形模量与标准贯入试验之间的对应关系,认为其承载力特征值 f_{ak} 均大于600kPa,地基承载力提高20%以上,变形模量在30~50MPa,而过去提供的变形模量均大于50MPa。眭彪等(2010)^[37]采用静力触探和标准贯入试验方法,对厦门海沧地区花岗岩残积土的出露特性以及工程特性进行了研究,提出了以静力触探方法评价花岗岩残积土的承载力特征值和变形指标的方法,建立了比贯入阻力与承载力特征值和变形模量之间的线性关系。樊友杰(2016)^[38]在赣南某电站建设过程中,采用标贯击数计算地基实际承载力、按临塑荷载公式计算地基承载力和通过载荷试验计算地基承载力三种方法对花岗岩进行对比分析,认为在花岗岩残积土地区工程中不能按照常规黏性土单纯地用标贯击数或土工试验指标查表方法来确定残积土的承载力和压缩模量,宜采用室内试验与原位测试相结合,以载荷试验为主确定承载力和压缩模量,以免承载力浪费。

其他文献中也就风化花岗岩的承载力做了研究,在此不再一一列出。

1.2.5 固结变形分析

有关风化花岗岩的变形特性研究主要集中在室内试验,有关其实体工程固结沉降分析的文献并不多见。变形模量、压缩系数、固结系数、孔隙比等指标及其之间关系的研究是当今土体固结变形特性研究的主流。

日本神户大学的Tanimoto(1983)^[39]研究了重复荷载下风化花岗岩的变形模量,认为细粒含量会显著影响变形模量的大小,而粗粒含量影响不显著。韩国学者Shin等(1997)^[40]通过三轴试验和离心试验,采用Lade弹塑性本构模型,对风化花岗岩的变形特性做了较原创性的室内试验研究。许宏发等(2002)^[41]在三峡工程三斗坪地区坝址右岸二期围堰堰体的填筑中,对该地区震旦系闪云斜长强风化花岗岩的侧限压缩特性进行了试验研究,认为含水率对砂样的固结试验结果影响程度比较小,分析了风化砂压缩变形随时间的变化、孔隙比随应力增加而降低的情况以及其应力-应变关系,得出了孔隙比随应力变化的回归公式,以及不同初始孔隙比下的应力-应变关系式。赵建军等(2005)^[42]对香港九龙观塘和石硤尾原状全风化花岗岩(属黏性土或砂质黏性土)的真空饱和快速侧限固结试验,发现先期固结压力在深度上存在异常现象,并分析了这种异常的影响因素,发现压缩系数的变化幅度比固结系数大,认为这种压缩性特点是全风化花岗

岩经历风化作用所产生的结构强度造成的。戴继等(2008)^[43]根据广东地区花岗岩残积土天然地基大量的标贯试验和载荷试验对变形模量进行了修正。刘翔等(2012)^[44]采用非饱和三轴仪(GDS)对高速公路路基所用的花岗岩全风化土进行了湿化变形试验,结果表明土体经湿化后湿样的强度明显低于干样的强度,黏聚力 c 值减少明显,内摩擦角 φ 值变化不大;在初始有效围压较低的情况下,试样在轴向应变10%左右时体积变形由剪缩变为剪胀;土体湿化现象使路基产生了变形及强度衰减,给实际工程带来极为不利的影响。周德泉等(2013)^[45]采用压缩试验和平板载荷试验对比研究了广州云浮至罗定高速公路使用的花岗岩残积土循环荷载作用下累积变形与湿化规律,认为随着等载压实遍数增加,沉降增量递减,累积沉降增大;超载压缩曲线回归到首次压缩曲线的延长线上,具有记忆效应;荷载越大,某次压缩总变形和永久变形也越大;循环荷载作用后的压实填土遇水产生湿化沉降。刘正楠等(2016)^[46]对广东省广佛肇高速全风化花岗岩路基所用全风化花岗岩进行了加州承载比试验(CBR)和固结试验,认为在上覆荷载相同条件下,全风化花岗岩在最大承载力状态时的固结沉降量较最大干密度状态要小。在维持上覆荷载不变下对全风化花岗岩进行饱和,通过测得膨胀变形发现,当上覆荷载为25kPa时,最大承载力状态的膨胀变形为最大干密度状态的16.1%,而随着上覆荷载继续增加,两种湿度状态下的全风化花岗岩膨胀变形无明显差异,建议在最大承载力湿度状态进行填筑,路基稳定性和抗变形能力均较强。祝方才等(2019)^[47]以衡阳非饱和花岗岩残积土为研究对象,分析了吸力、净围压等对非饱和花岗岩残积土的变形特性的影响,认为非饱和花岗岩残积土的最大动弹性模量随动应变增大而减小;吸力一定时,最大动弹性模量随着净围压的增大近似线性增加,相同净围压下,阻尼比随动应变的增大而增大。

1.2.6 强度试验研究

强度试验研究的手段包括单轴(拉、压)试验、直剪试验、三轴试验等,除了常规的试验方法外,还包括动三轴试验、扭转试验、真三轴试验、共振柱试验等非正规试验。为了满足岩土工程的需要,科研工作人员还研发出了各种改进的试验仪器。学术界对风化花岗岩的研究也是随着试验手段和仪器的不断更新和改进而逐渐深入的。

日本学者 Onodera 等(1976)^[48]在国际学术界较早开展了风化花岗岩强度特性的研究工作,他通过直剪试验得出原状风化花岗岩的孔隙率和烧失量是影响强度参数(c, φ)的主要因素,并对比了常体积和常应力下直剪试验和排水三轴试验之间的关系。Jeong 等(2000)^[49]通过固结排水三轴试验,认为风化程度、颗粒破碎等初始条件会影响风化花岗岩的剪切特性,低围压下的原状风化岩表

现为与超固结黏土相同的“硬化→软化”过渡型的特点,而压实风化岩表现为与正常固结黏土相同的常硬化型的特点。陈洪江等(1999~2001)^[50-52]对东南沿海地区花岗岩残积土含水率、重度、孔隙比、塑性指数、液性指数、压缩系数、内摩擦角、黏聚力和标贯击数等指标做了概率统计分析,得出了这些指标服从正态分布或对数分布的结论。潘天有等(2004,2008)^[53-54]对闽西北地区花岗岩风化物也做了物理力学性能指标的概率统计分析。尚彦军等(2004)^[55]通过全风化花岗岩样三轴固结不排水剪切和慢剪试验,对比分析了两种试验得到的有效黏聚力和有效内摩擦角之间的关系,认为黏粒含量、石英含量、天然密度和游离 Fe_2O_3 百分比是影响两者抗剪指标的主要因素。赵建军等(2005)^[56-57]研究了香港全风化花岗岩三轴抗剪强度指标黏聚力和内摩擦角同微结构及成分的关系,并就其饱和慢剪试验中的剪胀问题做了探讨。

为了解风化花岗岩的动力学强度特性,国内一些学者通过室内和现场试验初步开展了风化花岗岩的动力学特性研究。向大济(1988)^[58]对泉州地区花岗岩风化残积黏性土进行动三轴试验后得到估算最大动弹性模量的经验公式及动弹性模量相对比值和阻尼比随动应变幅值的变化规律,是我国较早研究风化花岗岩动力特性的学者。在三峡水利枢纽二期围堰填筑时,包承纲等(1997)^[59]对花岗岩风化砂动力特性进行研究,结果表明风化砂为剪胀性砂土,其有明显的应变硬化特征,不会出现流滑,且液化度低,动强度指标较高,动剪切模量 $G/G_{\max}$ 与剪应变 γ 的关系、阻尼比 D 与剪应变 γ 的关系与一般砂土相比,呈现更强的非线性特性。李志勇等(2005)^[60]对京珠高速公路临湘至长沙段黏性全风化花岗岩的动强度和动模量指标做了初步试验研究。何群(2007)^[61]较系统地对武广客运专线路基填筑所用的水泥改良全风化花岗岩的动力学特性进行了研究。邹静蓉等(2007)^[62]用室内模型试验检测了双圆加载板动荷载下全风化花岗岩(属残积黏性土)路基内应力应变的变化情况。

齐明山等(2007)^[63]对厦门海底隧道砂质黏土或砂质亚黏土(花岗岩风化物)进行了室内三轴压缩流变试验,较准确地拟合出了第三阶段流变外的幂律型蠕变模型。代伟等(2008)^[64]在重庆市向家坡边坡治理工程用单轴试验和三轴试验对不同风化程度砂岩力学特性做了初步研究。胡毅夫等(2011)^[65]针对风化花岗岩试样偏差的特点,对边坡通平高速公路强风化花岗岩进行了室内直剪试验、现场水平推挤试验和高风化程度花岗岩抗剪参数数据库工程类比,最后利用模糊决策的方法,求取了岩体抗剪参数,为边坡稳定性分析中力学参数的选择提供了思路。汤连生等(2014)^[66]利用自行研制的土体单轴抗拉强度试验仪,对华南地区广泛分布的两种花岗岩残积土的抗拉强度进行了试验研究,同时通过快剪试验得到了黏性花岗岩残积土的抗剪强度参数,并对花岗岩残积土的抗拉强度机理进行了分析。他们认为花岗岩残积土的抗拉强度主要源于土颗粒间

的连接作用,包括土颗粒间的直接接触连接、土颗粒间的微观非接触连接和通过胶结物或气液收缩膜作用产生的间接接触连接。简文彬等(2017)^[67]为了模拟自然环境中降雨—蒸发的干湿交替过程对花岗岩残积土剪切强度的影响规律,通过人工增湿和脱湿,研究了在干湿循环下试样黏聚力和内摩擦角的变化,认为在干湿循环过程中花岗岩残积土内部微裂隙扩展,水的楔入作用加剧,颗粒间胶结作用减弱,土体强度逐渐衰减累积并不断扩展直至发生破坏。

1.2.7 本构模型

有针对性地研究风化花岗岩本构模型的文献并不多见。科研人员以往对风化花岗岩的理论研究主要集中在本构关系的建立、本构关系参数的测试以及本构关系的试验验证及其数值分析等方面。

Onodera 等(1976)^[48]和 Yoshinaka 等(1977)^[68]通过研究非扰动风化花岗岩的力学特性较早探讨了其应力-应变的本构关系。栾茂田等(2000)^[69]在国内较早对香港钻石山地区全风化花岗岩(CDG)残积土的本构模型做了研究。他们利用临界状态土力学基本理论,建立了描述峰值剪应力点处应力状态及简化破坏面的实用方法,并进一步与由两个双曲线函数组成的四参数非线性应力-应变关系相结合,建立了饱和松散砂质土不排水剪切条件下的复合本构模型。李光范等(2003,2004)^[70-71]将包括屈服函数、塑性势和硬化系数的等向硬化弹塑性本构模型——Yasufuku 模型应用到了描述韩国益山地区的花岗土的应力-应变关系上,并通过三轴固结排水试验、复合应力路径试验、 p 定值试验和 η 定值试验,验证了其适用性。

以上学者对风化花岗岩本构模型的研究均用到了 Cam-lay 模型的基础理论,其核心为“临界状态土力学”。临界状态土力学由以 Roscoe 为代表的剑桥学派所创立(1958,1963,1968)^[72-74]。

因风化花岗岩具有明显的颗粒破碎特性,以往大量研究都是从颗粒破碎角度构建了风化花岗岩的本构模型。本书第4章对考虑颗粒破碎风化花岗岩的本构模型研究进行了综述。

纵观以往研究成果可以发现,以往研究的风化花岗岩大多属于残积黏性土和残积砂质黏性土(日本、韩国,我国香港、湖南、广东等地大多数的风化花岗岩属于残积黏性土和残积砂质黏性土),与本书中的强风化花岗岩差别较大,前者属黏土范畴,后者属砂砾土范畴。虽然科研人员对风化花岗岩的物理力学特性做了较多研究,但对风化花岗岩主要是从单方面的力学特性进行研究,并未对其物理力学特性进行系统全面的研究,而且对风化花岗岩缺乏深入的力学机制研究,未考虑风化花岗岩易碎特性对其力学机制的影响。