



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

岩质隧道开挖面空间 效应及支护优化

张常光 著



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

岩质隧道开挖面空间效应 及支护优化

张常光 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者在长安大学地质资源与地质工程博士后科研流动站做博士后研究的学术成果总结。其内容可归纳为“五个一”：针对一个问题(隧道支护优化设计问题)，将其简化为一个模型(隧道轴对称开挖模型)，采用一个理论(统一强度理论)，使用一种方法(弹塑性解析法)，解决一系列研究关键(围岩特征曲线、隧道开挖面空间效应、围岩自承载能力、最优支护参数、结构强度理论、中间主应力效应、围岩强度参数取值方法、塑性区变形特性等)。

本书可供土木工程、地质工程、水利工程、交通工程、矿业工程等领域的科研人员、教师、工程技术人员以及高等院校相关专业的研究生、本科生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩质隧道开挖面空间效应及支护优化/张常光著. —北京：科学出版社，2019.2

(博士后文库)

ISBN 978-7-03-060577-1

I. ①岩… II. ①张… III. ①围岩-隧道施工-研究 ②围岩-隧道支护-研究 IV. ①U455

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 029964

责任编辑：亢列梅 宋无汗 / 责任校对：郭瑞芝

责任印制：师艳茹 / 封面设计：陈 敬

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年2月第 一 版 开本：720×1000 B5

2019年2月第一次印刷 印张：11

字数：222 000

定价：**95.00 元**

(如有印装质量问题，我社负责调换)

《博士后文库》编委会名单

主任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编委(按姓氏汉语拼音排序)

付小兵 傅伯杰 郭坤宇 胡 滨 贾国柱 刘 伟

卢秉恒 毛大立 权良柱 任南琪 万国华 王光谦

吴硕贤 杨宝峰 印遇龙 喻树迅 张文栋 赵 路

赵晓哲 钟登华 周宪梁

是也

中国科学院研究生院

《博士后文库》序言

1985年，在李政道先生的倡议和邓小平同志的亲自关怀下，我国建立了博士后制度，同时设立了博士后科学基金。30多年来，在党和国家的高度重视下，在社会各方面的关心和支持下，博士后制度为我国培养了一大批青年高层次创新人才。在这一过程中，博士后科学基金发挥了不可替代的独特作用。

博士后科学基金是中国特色博士后制度的重要组成部分，专门用于资助博士后研究人员开展创新探索。博士后科学基金的资助，对正处于独立科研生涯起步阶段的博士后研究人员来说，适逢其时，有利于培养他们独立的科研人格、在选题方面的竞争意识以及负责的精神，是他们独立从事科研工作的“第一桶金”。尽管博士后科学基金资助金额不大，但对博士后青年创新人才的培养和激励作用不可估量。四两拨千斤，博士后科学基金有效地推动了博士后研究人员迅速成长为高水平的研究人才，“小基金发挥了大作用”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员的优秀学术成果不断涌现。2013年，为提高博士后科学基金的资助效益，中国博士后科学基金会联合科学出版社开展了博士后优秀学术专著出版资助工作，通过专家评审遴选出优秀的博士后学术著作，收入《博士后文库》，由博士后科学基金资助、科学出版社出版。我们希望，借此打造专属于博士后学术创新的旗舰图书品牌，激励博士后研究人员潜心科研，扎实治学，提升博士后优秀学术成果的社会影响力。

2015年，国务院办公厅印发了《关于改革完善博士后制度的意见》（国办发〔2015〕87号），将“实施自然科学、人文社会科学优秀博士后论著出版支持计划”作为“十三五”期间博士后工作的重要内容和提升博士后研究人员培养质量的重要手段，这更加凸显了出版资助工作的意义。我相信，我们提供的这个出版资助平台将对博士后研究人员激发创新智慧、凝聚创新力量发挥独特的作用，促使博士后研究人员的创新成果更好地服务于创新驱动发展战略和创新型国家的建设。

祝愿广大博士后研究人员在博士后科学基金的资助下早日成长为栋梁之材，为实现中华民族伟大复兴的中国梦做出更大的贡献。



中国博士后科学基金会理事长

前 言

岩质隧道开挖是一个三维问题,特别是在隧道的开挖面附近,前方未开挖的岩体对后方围岩具有“半穹顶”的支撑作用,围岩压力随着开挖面的接近和远离逐步释放,直到开挖面的空间效应完全消失。围岩与支护之间的相互作用随开挖面空间效应的变化而不同,对此认识不清就会造成支护压力和围岩稳定变形的错误估计,以致支护结构设计不当,甚至引发工程事故。合理的开挖面空间效应方法是充分调动和发挥围岩自承载能力的前提,依据位移释放系数确定支护施作时隧道的前期变形是实现收敛约束法的关键;而不同位移释放系数公式的应用对象、适用范围、相互关系以及具体空间效应差异都尚不明确,应用时常存在选择混乱或概念性错误,难以达到既安全又经济的支护效果。一个合理又恰当的强度准则,不但可以提高工程的质量和耐久性,而且能带来巨大的经济效益和社会效益,因此隧道结构强度理论效应研究的意义重大。本书对岩质隧道开挖面空间效应及支护优化进行系统的理论研究,所得结论对深埋隧道工程的设计及施工具有重要的指导意义。

本书是长安大学张常光博士在地质资源与地质工程博士后科研流动站做博士后研究以来的学术成果总结,力求使用通俗的语言描述工程实际中的复杂问题,通过数学方程表达科学问题背后隐藏的本质。本书共8章,第1章介绍研究背景、研究现状及主要研究内容;第2~4章全面、系统地论述围岩特征曲线构建、岩质隧道开挖面空间效应机理、位移释放系数法分类与比较、支护力系数法以及两种方法的应用差异;第5~7章分别从围岩自承载能力评价、稳定蠕变最优支护计算、结构强度理论效应以及围岩强度参数取值方法等方面对岩质隧道支护进行优化设计;第8章给出主要研究结论,并提出研究展望与建议。本书内容可综合归纳为“五个一”:一个问题、一个模型、一个理论、一种方法、一系列研究关键。本书所有的公式推导及运算,只需具备普通高等教育本科高等数学的基本知识即可完成,特别适合科研入门者阅读且重复本书研究工作不需大额研究经费支持。

本书研究工作得到诸多专家和领导的指导与鼓励,在此向长安大学赵均海教授、范文教授、许岁爱副处长、刘鸣教授、孙珊珊博士、张冬芳博士、朱倩博士、姜华博士,同济大学张庆贺教授、胡向东副教授、杨砚宗博士,上海理工大学饶平平副教授,南昌工程学院曾开华教授表示衷心的感谢!

感谢中国博士后科学基金项目(2014M562358、2016T90879)和成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金项目(SKLG2017K025)对作者研究工作的大力支持。感谢中国博士后科学基金会给予的出版基金支持和

目 录

《博士后文库》序言

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	研究背景及意义	1
1.2	国内外研究现状	2
1.2.1	岩石强度特性研究现状	2
1.2.2	收敛约束法研究现状	9
1.3	本书主要研究内容	14
第 2 章	深埋圆形岩质隧道弹-脆-塑性分析	15
2.1	基本假定	15
2.2	半径相关的塑性区弹性模量	17
2.3	围岩塑性区位移及特征曲线	19
2.3.1	塑性区弹性应变定义	20
2.3.2	围岩特征曲线	21
2.3.3	可比性分析	22
2.4	对塑性区位移解答的验证	22
2.4.1	与统一弹-塑性有限元数值解比较	22
2.4.2	与广义 Hoek-Brown 经验强度准则解比较	24
2.5	参数影响分析	26
2.5.1	中间主应力	26
2.5.2	脆性软化	28
2.5.3	剪胀特性	29
2.5.4	塑性区弹性模量	30
2.5.5	塑性区弹性应变	35
2.6	本章小结	40
第 3 章	隧道开挖面空间效应的位移释放系数法	42
3.1	开挖面空间效应	42
3.2	位移释放系数及公式	44
3.3	位移释放系数比较	46
3.3.1	分类比较	46

3.3.2	开挖面空间效应比较	47
3.4	支护压力及围岩稳定变形确定	54
3.4.1	位移释放系数不同	57
3.4.2	支护施作距离不同	59
3.4.3	收敛约束要求不同	61
3.5	本章小结	62
第 4 章	隧道开挖面空间效应方法比较及应用	64
4.1	理论基础	64
4.2	T-N(09) 支护力系数	65
4.2.1	来源及公式	65
4.2.2	空间效应实现	66
4.2.3	因素影响分析	67
4.3	V-D(09) 位移释放系数	68
4.3.1	来源及公式	68
4.3.2	空间效应实现	69
4.3.3	因素影响分析	70
4.4	空间效应方法比较	70
4.4.1	定性比较	70
4.4.2	定量比较	71
4.5	收敛约束比较	72
4.6	参数影响分析	75
4.6.1	中间主应力	75
4.6.2	脆性软化	77
4.6.3	剪胀特性	79
4.6.4	塑性区弹性模量	80
4.6.5	塑性区弹性应变	83
4.7	本章小结	86
第 5 章	隧道围岩自承载能力评价	87
5.1	岩体自承载系数	87
5.2	岩体缩孔自承载系数	89
5.3	岩体扩孔自承载系数	91
5.4	参数影响分析	92
5.4.1	应力状态和孔壁压力	92
5.4.2	黏聚力和内摩擦角	94
5.4.3	中间主应力和剪胀特性	96

5.5	弹-脆-塑性隧道围岩自承载系数	98
5.5.1	支护力和材料模型	99
5.5.2	中间主应力	101
5.5.3	脆性软化	101
5.5.4	剪胀特性	102
5.5.5	塑性区弹性模量	103
5.6	本章小结	104
第 6 章	软岩隧道最优支护计算及比对	106
6.1	基本理论	106
6.1.1	软岩流变控制原则	106
6.1.2	软岩稳定蠕变准则	106
6.1.3	统一强度理论	107
6.2	最优支护计算	108
6.2.1	弹塑性应力	108
6.2.2	最优支护力	109
6.2.3	允许最大位移	110
6.3	适用条件及应用步骤	111
6.3.1	适用条件	111
6.3.2	应用步骤	112
6.4	可比性分析和应用实例	113
6.4.1	可比性分析	113
6.4.2	应用实例	113
6.5	参数影响分析	114
6.5.1	中间主应力	114
6.5.2	长期强度	115
6.5.3	抗剪强度参数	116
6.6	本章小结	119
第 7 章	隧道结构强度理论效应与参数取值	120
7.1	常用准则的平面应变统一方程	120
7.1.1	Mohr-Coulomb 准则	120
7.1.2	Tresca 准则	121
7.1.3	Von Mises 准则	121
7.1.4	Drucker-Prager 系列准则	122
7.1.5	Mogi-Coulomb 准则	123
7.1.6	广义 Matsuoka-Nakai 准则	123

7.1.7	广义 Lade-Duncan 准则	124
7.1.8	统一强度理论准则	125
7.1.9	准则的统一方程	125
7.2	隧道围岩弹塑性新解	127
7.3	可比性分析	130
7.4	参数影响分析	131
7.4.1	强度理论效应	131
7.4.2	剪胀特性	135
7.4.3	塑性区弹性应变	139
7.5	岩石强度参数取值方法	143
7.6	本章小结	147
第 8 章	结论和展望	149
8.1	结论	149
8.2	展望与建议	150
	参考文献	152
	编后记	164

第1章 绪 论

1.1 研究背景及意义

国民经济的持续稳定增长,极大地促进了水利水电、铁路公路、城市交通、核废料处理和深部矿山开采等领域的快速建设。地下洞室及隧道是这些领域建设的主要载体与使用空间,将在我国基础设施建设和能源资源开发中占据越来越重要的地位。同时,资源的开采和能源的开发及储存正在向深部发展^[1],一批大型水电工程正在兴建,还有一些大型地下洞室正在规划和设计当中,深部岩体中埋设放射性核废物也已列入国家发展规划。例如,铜陵狮子山铜矿开采深度为1100 m,开滦赵各庄矿开采深度为1159 m,雅砻江锦屏二级水电站最大埋深达2525 m,青藏铁路隧道、南水北调西线许多洞段的埋深都超过1000 m,拟建的高放核废料处置库埋深达700 m等。随着地下工程埋深的不断增加,地质条件变得更为恶劣和复杂,可概括为“三高一扰动”,即高地应力、高地温、高岩溶水压与开挖扰动,使得深部工程围岩的地质力学环境较浅部发生了很大变化,表现出其特有的力学特征。

收敛约束法在上述地下工程施工中得到了较广泛的应用。与经验类比等设计方法不同^[2],收敛约束法将支护结构和围岩视为一个受力整体,隧道支护设计需要考虑的问题已不局限于支护结构本身的强度和稳定性,而是以充分发挥围岩的自承载能力为目的。隧道开挖后,开挖面附近的岩体呈现三维应力状态。随着开挖面的推进,隧道开挖面附近的岩体受扰动而失去原有的应力平衡状态,其应力和变形随之重新调整而达到新的平衡状态,这种围岩应力和变形随开挖面前进而不断重分布的现象,称为隧道开挖面的空间效应^[3]。围岩与支护之间的相互作用随开挖面空间效应的变化而变化,对此过程认识不清就会造成支护压力和围岩稳定变形的错误估计,进而使支护结构设计不当,使得工程造价增加或支护安全度不够。在应用收敛约束法时,确定支护设置时隧道洞壁因应力释放而产生的前期变形至关重要,已成为影响收敛约束法应用与发展的关键^[2]。此外,采用收敛约束法设计与施工时也遇到了很多其他问题,如高地应力下岩石强度准则的选取、围岩破坏范围及变形控制、开挖扰动的描述和评估、支护时机和支护优化等。总之,面对高地应力作用下的深埋岩质隧道工程,采用何种强度准则描述三向不等高地应力下的岩石强度,开挖扰动的合理评价,以及更好地完善改进收敛约束方法的各特征曲线,都成为颇具挑战性的课题。

材料的屈服准则或强度准则对结构的强度与变形分析均有较大的影响,即结构的强度理论效应,有时比计算方法的改进影响还大得多^[4,5]。如果计算方法的差别引起的误差为 10%,则采用不同的强度理论计算的结果可能相差 30%之多。结构强度理论的研究需要考虑其对应材料强度理论的选用,现有结构强度理论效应的研究只采用了一两个零散的单一准则,有的甚至是不合理的,不能在理论上给出总的变化规律。西安交通大学俞茂宏教授提出的统一强度理论^[6,7]包括现有的各种主要强度理论,适用于各类不同特性的材料,同时覆盖了外凸极限面的所有区域,可以给出一系列有序的理论解答,为结构强度理论效应的研究提供一个有力的手段和理论基础。

尽管一般情况下岩土体应被视为非连续介质,但在一定条件下仍满足连续介质力学的基本假定。连续性模型是功能模型,而不是实际的物理模型,这种情况在岩体中更为突出^[8]。文献 [8] 研究发现,连续介质力学的弹性或弹塑性理论分析不仅对趋势的预测研究具有不可估量的价值,而且有些情况完全可以采用这种分析来预测岩体的力学行为或求解岩体的极限荷载。因此,开展深埋岩质隧道开挖面空间效应及支护优化研究具有重要的理论意义和良好的应用前景。

本书在连续介质理论和工程应用的框架下,以统一强度理论为基础,拟建立考虑多因素综合影响的围岩特征曲线,并对圆形隧道开挖面空间效应进行分类、比较及应用,探讨围岩新的自承载系数及最优支护、强度理论效应和强度参数取值方法。该研究成果不仅可以完善收敛约束法的理论基础,推进其在隧道工程设计与施工中的应用,而且能准确确定支护压力及支护合理选型,大幅度降低工程造价,具有重大的经济效益和社会效益。

1.2 国内外研究现状

本节主要从岩石强度特性和收敛约束法两个大的方面来综述相关研究现状与代表性成果。

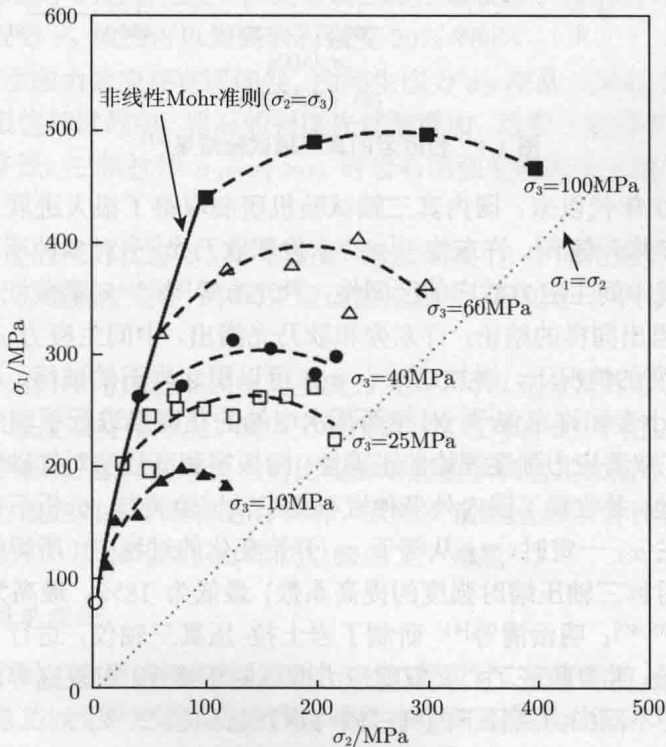
1.2.1 岩石强度特性研究现状

岩石强度理论是研究岩体强度理论的基础,是岩石本构关系的重要组成部分。岩石真三轴试验是一种全面的岩石强度试验方法,它不仅是建立岩石强度准则的重要资料,而且是检验岩石强度准则的有效依据。岩石真三轴试验要求对试件施加 3 对相互独立均匀的主应力,其中一个重要内容就是中间主应力效应研究。岩石的中间主应力效应研究,不仅具有理论意义,而且具有巨大的工程实践意义和社会经济效益,已成为各国学者热心研究而经久不衰的一个兴趣问题^[6]。

1. 岩石中间主应力效应试验及规律

从 20 世纪初 Karman 和 Boker 研究岩石中间主应力效力开始,至今已有 100

年的研究历史。他们发现岩石三轴拉伸时的强度高于三轴压缩的强度，这是 Mohr-Coulomb 准则和 Hoek-Brown 经验强度准则所不能解释的。20 世纪 60 年代岩石中间主应力效应研究取得重要进展，70 年代有比较明确的结论，代表性的研究者有 Hobbs^[9]、Murrell^[10]、Handin 等^[11]、Hoskins^[12]。20 世纪七八十年代，日本东京大学的 Mogi 教授为岩石中间主应力效应的阐明做出了杰出的贡献^[13-17]，他改造原有轴对称三轴试验机，成功研制出世界上第一台岩石真三轴试验机，得到一系列不同小主应力 σ_3 时的中间主应力效应曲线，试验充分证明了岩石中间主应力效应的存在。Michelis^[18,19] 对大理岩进行了真三轴试验，并指出中间主应力效应是岩石材料的重要特性。Takahashi 和 Koide^[20] 对沉积岩进行了真三轴强度和变形试验。近年来，美国威斯康星大学的 Haimson 团队^[21-29] 改进了 Mogi 的真三轴试验机，提高其加载能力，简化操作程序，对多种脆性硬岩进行了真三轴试验，探讨中间主应力对强度、变形和剪胀的影响规律，同时利用电子扫描显微镜观测裂纹发展和应变局部化情况，将岩石真三轴试验结果应用于确定地应力分布等。台湾车笼埔断层粉砂岩的真三轴试验结果^[27] 如图 1.1 所示，图中 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别为大主应力、中间主应力和小主应力。



(a) 上断层岩石

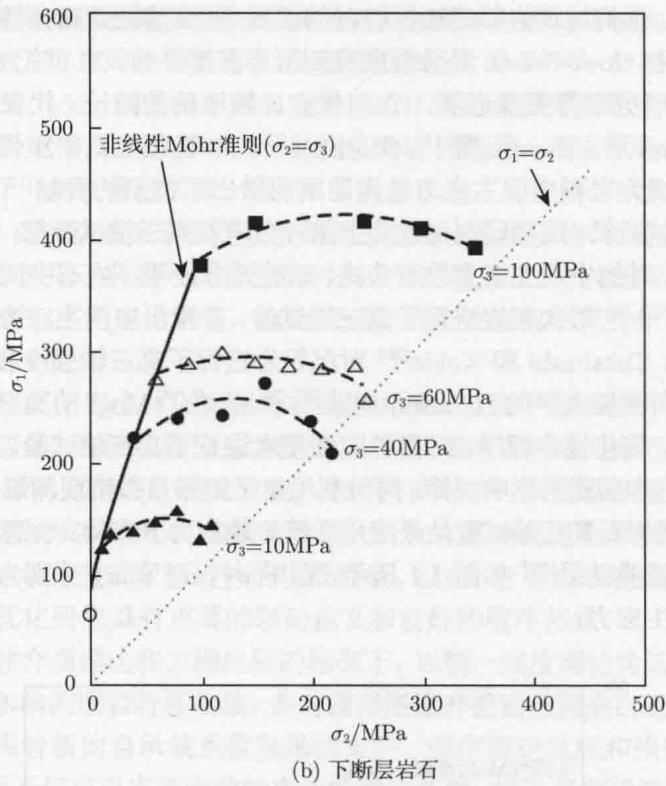


图 1.1 粉砂岩的真三轴试验结果^[27]

20 世纪 80 年代以来，国内真三轴试验机研制取得了很大进展，代表性的研究有：张金铸和林天健^[30]、许东俊^[31]、许东俊和耿乃光^[32] 对多种不同岩石进行真三轴试验，发现中间主应力效应的区间性；尹光志等^[33,34] 对嘉陵江石灰岩、砂岩真三轴试验也得出同样的结论；许东俊和耿乃光指出，中间主应力 σ_2 的改变（在 σ_1 和 σ_3 都不变的情况下，增加或减小 σ_2 ）可以引起岩石的破坏，甚至可能引发地震^[35-37]；李小春和许东俊^[38] 对拉西瓦水电站的花岗岩进行了较完整的真三轴试验，并验证了双剪应力强度理论的正确性；陶振宇和高廷法对红砂岩进行了中间主应力效应试验，并收集了国内外多种岩石真三轴试验资料，分析后指出中间主应力影响系数（在 σ_3 一定时， σ_2 从等于 σ_3 开始变化的过程中，所得最大极限荷载 σ_{1max} 相对于对称三轴压缩时强度的提高系数）最低为 18%，最高为 75%，一般为 25%~40%^[39,40]；明治清等^[41] 研制了岩土拉-压真三轴仪，进行了岩石相似材料的真三轴试验，并且验证了广义双剪应力准则的正确性；冯夏庭等对多种硬岩进行了卸荷、支护不同应力路径下的真三轴与声发射试验^[42-45]；刘汉东等采用 LY-C 拉-压真三轴仪对完整岩体和节理岩体模型进行了试验^[46,47]。

以上岩石真三轴试验结果和得出的曲线都是十分珍贵的,但有些试验的数量不够或只集中于某些特殊的应力状态。比较系统的岩石极限面试验应包括中间主应力效应试验、不同应力角的子午极限线试验和 π 平面极限线试验,这些可为工程中验证和选用强度理论提供更加全面的依据。

另外, Mogi^[17], Tiwari 和 Rao^[48,49] 对各向异性岩石进行了真三轴试验,指出中间主应力效应与弱面倾向、岩石种类等密切相关。连志升和张金铸^[50]、陈安敏等^[51]、孙晓明等^[52]、姜耀东等^[53]、张强勇等^[54,55]、朱维申等^[56,57] 对真三向应力作用下的隧道变形与破坏开展了大型地质力学模型试验研究,更加全面地认识了真实应力下岩石的强度特性、破裂过程及机制和隧道的锚固效应。周火明等^[58]、熊诗湖等^[59] 对小主应力 σ_3 卸荷条件下大理岩、白云岩的原位强度进行了真三轴试验,获得了能反映深埋隧道围岩实际应力状态和开挖应力路径的真实强度。

总之,岩石的中间主应力效应已经被大量的试验所证实,并认为是岩石的一个重要特性。岩石中间主应力效应的基本规律为^[6,32]:

(1) 中间主应力 σ_2 对岩石强度有明显的影响。在小主应力 σ_3 一定的应力状态下,增加 σ_2 的各种应力状态(即 $\sigma_1 \geq \sigma_2 > \sigma_3$)下的岩石强度均大于 $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ 轴对称压缩状态下的岩石强度,因此常规三轴压缩状态下得出的岩石强度均偏低,考虑中间主应力 σ_2 效应可以提高岩石强度20%~30%。

(2) 中间主应力效应存在区间性。中间主应力 σ_2 在从 $\sigma_2 = \sigma_3$ 的下限值增加到 $\sigma_2 = \sigma_1$ 的上限值的过程中,岩石的强度先逐渐增加,达到一定峰值后随 σ_2 的继续增加而逐渐降低。三轴拉伸 $\sigma_2 = \sigma_1 > \sigma_3$ 时岩石的强度略高于三轴压缩 $\sigma_2 = \sigma_3 < \sigma_1$ 时的强度。

(3) 在一定的应力状态下,单独改变(增加或减小)中间主应力 σ_2 可以引起岩石的破坏。岩石越致密坚硬,中间主应力效应越大,但仍小于小主应力 σ_3 的围压效应。

在工程应用中,考虑岩石的中间主应力效应,可以充分发挥岩石材料的强度潜能,减小支护强度或衬砌厚度,减少工程投资,这是对岩石中间主应力效应及其应用的一个重要推动。如何在理论上用比较简单的数学表达式来描述岩石强度,并对其中间主应力效应的各个规律进行解释,且能灵活地适用于各种岩石不同程度的中间主应力效应,是20世纪90年代以来的又一难题^[6]。

2. 岩石强度理论

建立一个科学合理的岩石强度理论,对工程设计、灾害预防、资源开发等领域都具有重要意义。西安交通大学俞茂宏教授将众多强度理论划分为单剪强度理论、双剪强度理论和八面体剪应力强度理论三大系列^[60]。沈珠江^[61]则将岩石强度理论分为理论公式、经验公式和内插公式三大类。

在岩石强度理论的发展历程中,最初引用金属强度(屈服)理论和土体强度理论,后来随着岩石试验技术的发展,逐渐发现岩石材料的基本力学特性^[62]:单轴抗压强度不等、拉伸子午线与压缩子午线不重合(即 Lode 角效应)、静水应力效应、中间主应力效应及其区间性、不同的岩石材料具有不同程度的中间主应力效应,以及屈服面的外凸性等。结合已有岩石试验结果,至今已提出几十个岩石的屈服或破坏准则,以修正金属和土体的强度理论。

当前岩土工程中最常用的是 Mohr-Coulomb 准则和外接圆 Drucker-Prager 准则,前者忽略中间主应力影响而计算偏保守,后者夸大中间主应力影响而计算偏危险,实际上二者对中间主应力的处理为两个极端情况。

Mohr-Coulomb 准则的表达式为

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi + c \cos \varphi \quad (1.1)$$

式中, c 、 φ 分别为材料的黏聚力和内摩擦角。

Mohr-Coulomb 准则属于单剪强度理论,只考虑了最大剪应力 $\tau_{13}=(\sigma_1-\sigma_3)/2$ 及其面上的正应力 $\sigma_{13}=(\sigma_1+\sigma_3)/2$ 对材料屈服或破坏的影响,只适用于 $\sigma_2=\sigma_3 < \sigma_1$ 的轴对称特殊应力状态,没有考虑材料的中间主应力 σ_2 效应,与很多材料的真三轴试验结果相差较大。

外接圆 Drucker-Prager 准则的表达式为

$$\sqrt{J_2} = \alpha I_1 + k \quad (1.2)$$

式中, α 、 k 均为材料强度参数; $I_1=\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3$, 为应力张量第一不变量; $J_2=[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2]/6$, 为应力偏张量第二不变量。

外接圆 Drucker-Prager 准则属于八面体剪应力强度理论,也称为广义 Mises 准则,考虑了中间主应力效应和静水应力效应,并且具有光滑圆锥极限面,在大型计算分析软件中得到了广泛应用和推广。但外接圆 Drucker-Prager 准则认为中间主应力 σ_2 对材料强度的影响和小主应力 σ_3 一样,高估了 σ_2 对材料强度的提高作用,同时没有反映岩土材料拉压异性、Lode 角效应等基本力学特性,难以与岩土材料的真三轴试验相吻合。

在众多岩石经验强度准则中, Hoek-Brown 经验强度准则被工程所接受,广泛应用于岩石边坡和地下隧道工程,其主要原因在于它与许多岩石轴对称三轴试验结果相吻合,同时参数取值能反映岩体的结构特征。Hoek-Brown 经验强度准则是 Hoek 和 Brown^[63] 通过试错法拟合大量轴对称三轴试验结果提出的,最初应用于完整岩石,中间曾多次调整^[64], 2002 年版的广义 Hoek-Brown 经验强度准则的表达式为^[65]

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left[m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right]^a \quad (1.3)$$