

朱珍德
张爱军 著
蒋志坚

膨胀红砂岩水理性试验及 渐进破坏理论



科学出版社

膨胀红砂岩水理性试验及 渐进破坏理论

朱珍德 张爱军 蒋志坚 著

国家自然科学基金面上项目资助(50479021、41272329)

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书全面、系统地阐述膨胀红砂岩宏细观水理特性的相关理论及研究成果。依托红山窑水利枢纽改造工程,通过对红砂岩进行室内和现场试验,包括膨胀变形试验、膨胀力试验、单轴压缩试验等,分析膨胀红砂岩随吸水率变化的膨缩规律。以试验结果为依据,建立了考虑吸水率因素的膨胀红砂岩宏细观本构模型;编制有限元计算程序,对试验结果进行数值模拟验证。结合膨胀红砂岩相关理论成果,应用于相关工程,确定红山窑水利枢纽工程的地基处理方案。

本书可供从事岩石力学研究的工程人员参考,也可作为高等院校相关专业的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

膨胀红砂岩水理性试验及渐进破坏理论/朱珍德,张爱军,蒋志坚著.

—北京:科学出版社,2017.10

ISBN 978-7-03-052388-4

I. ①膨… II. ①朱… ②张… ③蒋… III. ①砂岩-膨胀性-研究

IV. ①P588.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 069254 号

责任编辑:周 炜 / 责任校对:桂伟利

责任印制:肖 兴 / 封面设计:陈 静

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

*

2017 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 10 月第一次印刷 印张:10 1/2

字数:212 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

为适应人口增长与经济发展的需要,水利水电枢纽、建筑、运输等大型工程迅速兴建,而且呈现出向西部发展和往地下延伸的趋势。与此同时,工程建设过程面临的地质环境愈加复杂。膨胀岩在全球范围分布广泛且性质复杂,在工程建设过程中对工程体的稳定有极大威胁,一直以来是相关专业学者最关注的问题之一。为解决膨胀岩膨胀变形以及强度劣化产生的工程问题,必须研究膨胀岩的水理性,揭示其渐进破坏机理,以期为工程加固提供理论性指导。

膨胀红砂岩是一种特殊的岩石材料,因蒙脱石含量高,具有膨胀性和软化性。尽管对该类岩石相关特性的研究已有很多,但目前对膨胀红砂岩水理特性的系统性研究尚未完善,岩石的膨胀理论以及微细观角度的损伤发展理论分析还缺少数学力学基础,非量化的描述难以为工程提供有价值的指导。因此,为适应工程发展以及理论完善的需要,很有必要撰写一本关于膨胀红砂岩方面的专著。

本书共6章,第1章简要分析膨胀岩的判别方法、研究意义和发展状况。第2章通过膨胀红砂岩变形性质、力学特性以及湿化性试验研究,提出膨胀稳定时间的理想概化数学模型、膨胀力与膨胀变形规律、抗剪强度与吸水率的关系,揭示膨胀红砂岩湿化机理。第3章在室内试验基础上建立应力-应变关系与吸水率之间的本构模型,编制适用于模拟膨胀问题的有限单元法程序 SNEP,对各种情况下膨胀岩的受力特点与变化规律进行数值模拟。第4章通过对膨胀红砂岩细观损伤演化的试验研究,得到反映细观结构损伤动态演化的特征参数,分析膨胀红砂岩损伤演化过程,将损伤演化进行量化,建立岩石力学性质与细观结构的内在联系。第5章基于损伤力学理论,推导出损伤本构方程,建立一个包含多个强度影响因素的损伤本构模型。第6章结合红山窑水利枢纽地基处理工程对膨胀红砂岩进行现场膨胀率、力学特性试验,并结合室内试验结论,选定膨胀红砂岩地基处理方案,并开发出三维非饱和湿度应力场弹塑性耦合有限元程序,将模拟结果与现场试验的结果进行比较,验证选取的地基处理方案的可靠性。

本书部分内容为国家自然科学基金课题(50479021、41272329)的研究成果。本书第1章、第4章、第5章由朱珍德撰写;第2章、第3章由张爱军撰写;第6章由蒋志坚撰写。本书得到魏玉寒、马文琪两位硕士研究生的帮助,在此表示感谢。

感谢重庆大学刘汉龙教授、河海大学高玉峰教授、南京水利规划设计院徐惠民教授、陈勇教授的一贯支持和鼓励。特别感谢为本书做出贡献的王军、邢福东、何山、张勇博士,是他们的鼎力相助,才使我们的成果得以早日与读者见面。

应该指出,膨胀红砂岩宏观水理性的研究是岩石力学中极其重要的一个方面,目前还有许多理论及实践性的问题需进一步的研究和完善。限于作者水平,书中难免存在疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

朱珍德

2017年1月

于古都南京清凉山南麓

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 问题的提出	1
1.2.1 工程需要的紧迫性	1
1.2.2 膨胀性质的复杂性	2
1.2.3 认识的不足性	2
1.3 膨胀岩的判别及分类	3
1.3.1 膨胀岩的判别	3
1.3.2 膨胀岩的分类	5
1.4 国内外研究现状	7
1.4.1 膨胀机理的研究	7
1.4.2 膨胀特性试验研究	11
1.4.3 膨胀岩的膨胀本构关系	12
1.5 主要研究内容	16
参考文献	17
第 2 章 膨胀红砂岩水理性试验研究	21
2.1 概述	21
2.2 膨胀红砂岩的物理特性	21
2.2.1 密度试验	21
2.2.2 含水率试验	22
2.2.3 比重试验	23
2.3 膨胀红砂岩膨胀力学特性试验研究	23
2.3.1 膨胀力变化规律研究	23
2.3.2 膨胀力与膨胀变形的规律研究	25
2.3.3 膨胀力力学参数变化规律研究	26
2.4 膨胀红砂岩变形特性试验研究	29
2.4.1 原岩自由膨胀率试验	29
2.4.2 原岩有侧限膨胀特性试验	30
2.5 膨胀红砂岩力学性质试验研究	37

2.5.1 单轴抗压强度试验	37
2.5.2 抗剪强度试验	40
2.6 膨胀红砂岩湿化特性试验研究	45
2.6.1 微观结构试验	45
2.6.2 湿化性试验	46
2.6.3 湿化机理探究	48
参考文献	50
第3章 膨胀红砂岩弹塑性本构模型研究	51
3.1 概述	51
3.2 基于湿度应力场理论的膨胀红砂岩弹塑性本构模型	52
3.2.1 弹性状态的本构模型	52
3.2.2 塑性状态的本构模型	53
3.3 膨胀红砂岩模型数值模拟及模型验证	56
3.3.1 三维有限元程序原理	57
3.3.2 有限元程序编制	62
3.3.3 计算结果与实测结果的对比分析	63
3.3.4 计算结果与分析	65
参考文献	72
第4章 膨胀红砂岩渐进破坏损伤理论研究	74
4.1 概述	74
4.2 膨胀红砂岩细观损伤演化试验研究	74
4.2.1 试验简介	75
4.2.2 水对膨胀红砂岩细观结构变化的影响	77
4.3 膨胀红砂岩损伤演化的数字图像分析描述	82
4.3.1 Geo-image 程序简介	82
4.3.2 细观结构演化量化分析	85
4.4 膨胀红砂岩渐进破坏理论分析	100
4.4.1 岩石渐进破坏理论	100
4.4.2 膨胀红砂岩细观损伤演化与宏观力学响应的关系	102
参考文献	110
第5章 膨胀红砂岩细观损伤演化本构模型	112
5.1 损伤变量的选取	112
5.2 膨胀红砂岩细观损伤演化本构方程	114
5.2.1 膨胀红砂岩峰值应变前损伤本构方程	114
5.2.2 膨胀红砂岩峰值应变后损伤本构方程	115

5.3 膨胀红砂岩细观损伤演化本构方程的验证	118
5.3.1 损伤本构方程简介	118
5.3.2 本构方程的验证与分析	121
参考文献	124
第6章 工程实例应用研究——膨胀红砂岩现场特性试验	126
6.1 概述	126
6.2 工程概况	126
6.2.1 工程背景	126
6.2.2 工程地质情况	127
6.3 膨胀红砂岩与混凝土胶结面现场剪切试验研究	128
6.3.1 试验方案选定	128
6.3.2 试验结果分析	132
6.4 红山窑膨胀红砂岩地基荷载试验	134
6.4.1 试验方案选定	134
6.4.2 试验结果分析	136
6.5 膨胀红砂岩膨胀率现场试验	137
6.5.1 试验方案选定	137
6.5.2 膨胀率特性观测结果及分析	139
6.6 地基处理方案确定	143
6.6.1 构筑物地基处理范围的确定	144
6.6.2 地基处理方案初步比较	144
6.6.3 地基处理方案最终确定	145
6.7 地基处理方案的有限元验证	148
6.7.1 膨胀红砂岩膨胀率数值模拟试验	148
6.7.2 中风化膨胀红砂岩地基平板荷载试验数值模拟	156
参考文献	159

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

膨胀岩是指含有大量亲水矿物,由于与水发生物理化学反应引起体积变化,且当变形受约束时会产生较大内应力的一类岩石。膨胀岩在全球范围内分布极广,形成过程复杂,其水理特性因含水率不同而有较大差异。膨胀岩体的破坏给水利水电、地下硐室、边坡等大型工程的建设带来不便,常引发严重的工程事故,造成经济损失,危及生命安全。只有掌握其水理性质及损伤演化规律才能为工程加固提供可靠的理论支持。

目前关于膨胀岩的研究尚处于起步阶段。膨胀岩的物理力学性质与黏粒含量和外部环境等因素密切相关,而对于膨胀岩的判别和分类尚未统一,对其水理性质和损伤演化规律的定量表述也不足。因此,对膨胀红砂岩水理性质的宏观和细观研究意义重大。

本章首先对膨胀岩的判别分类方法进行归纳总结,然后从膨胀岩膨胀机理、膨胀特性试验和膨胀本构三个方面探讨国内外关于膨胀岩研究的现状,在前人研究的基础上,提出本书的研究思路与主要内容。

1.2 问题的提出

1.2.1 工程需要的紧迫性

膨胀岩在世界范围内分布极广,迄今为止已发现存在膨胀岩的国家达 40 余个,遍及五大洲。由于膨胀岩显著的胀缩特性,建设在膨胀岩地区的各类工程常遭受严重损坏。Grob 报道了瑞士的一些公路隧道因膨胀引起的底鼓破坏情况,最大底鼓量在几个月内达 90cm。在美国,每年因膨胀岩对房屋、建筑、公路和管道的破坏所造成的经济损失高达 23 亿美元,是由台风、洪水等造成经济损失总和的两倍多。在苏丹,存在潜在膨胀岩的地区占整个国土面积的 1/3 多,位于这些地区的水利灌溉系统、下水管、建筑物、道路以及其他结构同样时常出现膨胀破坏现象^[1~5]。

随着经济发展,我国水利水电、交通运输、采矿、建筑等领域的大型工程迅速

兴起,遇到的复杂地质状况也随之增多,膨胀岩引发的工程问题日益突出。例如,南水北调中线工程干线需要处理的主要技术问题包括占干线总长度近 1/4 的膨胀岩问题^[6];三峡水利工程中的巫山、奉节、巴东等地区广泛分布着膨胀性岩土,使得在工程施工过程中出现开挖剖面产生收缩裂隙、地基变形、坡面滑坡崩塌等工程灾害^[7]。据初步估计,我国每年因膨胀岩造成的各类工程建筑物破坏的损失达数十亿元以上。

膨胀岩对环境的温度、湿度、压力和地下水等因素的变化极为敏感,它的性状变化主要是由岩石中亲水矿物含量及岩石中含水量的变化引起的。所以,膨胀岩一旦暴露极易风化干裂,卸荷张裂,遇水软化膨胀,具有很差的工程地质性质,对土工建筑的地基、地下洞室(隧洞)及边坡工程影响甚大,往往引起重大工程事故,造成楼房、桥梁开裂,地下洞室围岩隆起,支护破裂,地基承载力丧失等。上述工程问题在工程建设运行过程中造成极大的安全隐患和经济损失,为了适应工程发展需要,必须对膨胀岩的水理性质进行全面研究,采取经济、工程实施方面可行的处理措施,解决膨胀岩地区工程建设问题。

1.2.2 膨胀性质的复杂性

膨胀岩是在复杂的地质发展过程中经物理风化和水流搬运分离作用形成的。由于地质年代和沉积作用的不同,膨胀岩的分布具有区域性,且类型不同。膨胀岩的胀缩性不仅与岩体所处的物理环境有关,而且由于其内部含有大量亲水矿物,黏粒含量的不同对性质也有很大影响,二者共同作用。外界湿度变化时,膨胀岩与水接触,发生物理化学反应引起体积变化,体积发展受限产生膨胀力,导致膨胀岩受力状态的变化;含水率的改变同时引起膨胀岩力学特性的变化,一般岩石的本构方程对膨胀岩不再适用。

岩石遇水发生崩解的性质称为岩石水敏性。膨胀岩主要由强亲水性的蒙脱石和伊利石组成,耐崩解性差,湿化性明显。膨胀岩湿化性及导致的强度衰减尚未有专门的研究,探讨湿化机理对膨胀岩特性的了解帮助甚大。

众所周知,岩石类材料是含夹杂、孔洞、裂隙和微结构面的非均匀各向异性介质,当这些缺陷存在且材料对缺陷敏感时往往容易发生意外事故。膨胀岩在含水情况下的渐进破坏还需要考虑水化损伤的影响,其内部裂隙的产生和扩展规律、损伤变量及损伤演化方程都因水的存在而更为复杂。

1.2.3 认识的不足性

膨胀岩问题是当今工程地质学和岩石力学领域中最复杂的研究课题之一^[8],其水理性质及损伤演化机理均比普通岩石复杂很多,人们对膨胀岩的研究目前尚处于起步阶段,虽然相关的研究已经取得很多有价值的成果,但缺乏统一性和整

体性。像单轴压缩损伤劣化看似简单,但这个对以承压为主的岩石固体的十分重要的问题至今尚未解决,还没有一种模型能较好地模拟大部分岩石受压膨胀破坏过程。

对于膨胀岩石的分类至今没有统一的定量判别方法与分级标准,对膨胀力学机制的认识也才刚刚起步,膨胀软化的本构关系还需深入研究;此外,膨胀岩细观渐进损伤机理还需进一步的理论研究。研究不同地区不同类型膨胀岩的判别与分级标准、分析膨胀变形机理及相应的本构关系模型^[9],不仅具有重大的理论意义,对膨胀岩地区工程的勘探、设计和施工也具有重要的现实指导意义。

1.3 膨胀岩的判别及分类

1.3.1 膨胀岩的判别

本节根据膨胀岩胀缩特性的实质及其影响因素,综合前人的判别方法,提出膨胀岩的判别主要包括以下两个方面:一是黏土矿物成分的鉴定;二是亲水程度的确定。

1. 根据野外特征判别

根据地貌特征判别。膨胀岩分布区域一般为呈波状起伏的低缓丘陵,相对高度为20~30m,丘顶浑圆,坡面圆顺,无天然陡坡,坡度缓于30°,岗丘之间以宽阔的U形阔地相间。

根据岩性特征判别。膨胀岩多为灰白色、灰绿色、灰黄色、紫红色和灰色泥岩、泥质粉砂、页岩、风化的泥灰岩、风化的基性岩浆岩、蒙脱石化的凝灰岩等。岩石遇水后手摸有油腻感。

根据结构构造特征判别。膨胀岩岩层多为中厚层或薄层,裂隙发育,隙壁周围常有异种灰白、灰绿色物质充填或替代,岩体中的波状结构面光滑且有擦痕。

根据岩石野外风化特征判别。膨胀岩经风化作用裂隙发育,岩体被切割成10~20cm碎块,易剥落。干燥岩块泡水后崩解成碎块或碎片。天然含水岩块在曝晒下失水产生细微裂隙。

2. 根据崩解特征判别

膨胀岩的崩解特征可以通过崩解试验进行观察。崩解试验取100g左右的原状不规则岩块在105℃下烘干至恒重,在湿化仪上进行试验,观察崩解特征,判别膨胀性的大小。

不同岩石的崩解类型及特征见表1.1。其中Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类可初判为膨胀岩,Ⅳ

类则为不亲水的非膨胀岩。

表 1.1 岩石崩解类型及特征

崩解类型	崩解物形态	崩解特征
I	泥状	浸入水中即刻剧烈崩解,呈土状撒落
II	碎隙泥、碎块泥	浸入水中成絮状、粉末状崩落,崩解物为粒状、片状碎隙或碎块
III	碎岩片、碎岩块	浸入水中呈块状崩裂塌落或片状开裂,崩解物为碎岩片或碎岩块
IV	整体块状	浸入水中岩块坚硬、不崩解

3. 根据自由膨胀率判别

自由膨胀率是用粉碎样测得的,可反映出岩石的物质组成。根据现有研究成果,自由膨胀率大于 30% 的岩石就具有很大的膨胀力。因此可把自由膨胀率小于 30% 的岩石判断为非膨胀岩,大于或等于 30% 的判断为膨胀岩。其中自由膨胀率 30%~50% 的为微膨胀岩,50%~70% 的为弱膨胀岩,大于 70% 的为强膨胀岩。

4. 根据岩块干燥饱和吸水率判别

将 100~200g 不规则岩块在 105℃ 条件下烘至恒重后再浸泡 24h,测得其含水量占岩块质量之比即为岩块干燥饱和吸水率。它反映了岩石矿物成分的亲水特征和结构连接特征。一般可将干燥饱和吸水率大于或等于 10% 的岩石初判为膨胀岩。其中,岩块干燥饱和吸水率 10%~30% 的为微膨胀岩,30%~50% 的为弱膨胀岩,大于 50% 的为强膨胀岩。

5. 根据极限膨胀量判别

将原状岩样在 105℃ 条件下烘干至恒重,制成厚度 1cm、直径 5.8cm 的样品,在瓦氏膨胀仪上即可测出岩样的无荷极限膨胀量。极限膨胀量能充分反映原状结构下岩石的膨胀特性。从测得的指标看,极限膨胀量在 5% 以下的岩石湿化后不崩解、不软化,保持原始形态不变,可判断为非膨胀岩,而极限膨胀量大于或等于 5% 的则可判断为膨胀岩。其中,极限膨胀量 5%~10% 的为微膨胀岩,10%~20% 的为弱膨胀岩,大于 20% 的为强膨胀岩。

6. 根据极限膨胀力判别

极限膨胀力是将原状样品烘干至恒重,用平衡法在固结仪上测得的力。极限膨胀力是反映岩石膨胀性大小的最直观的指标,它不仅能反映岩石的矿物成分,

还能反映岩石的结构和胶结程度。试验研究认为极限膨胀力小于 100kPa 的为非膨胀岩,大于或等于 100kPa 的为膨胀岩。其中极限膨胀力 100~300kPa 的为微膨胀岩,300~500kPa 的为弱膨胀岩,大于 500kPa 的为强膨胀岩。

7. 根据岩石的比表面积判别

由于不同的黏土矿物具有不同的结构形式,所以它们的比表面积是不一样的。主要的黏土矿物蒙脱石、伊利石、高岭石的比表面积都比较大,因此可以根据比表面积来判别岩石的膨胀性。由于黏质岩样几乎都不是单矿物成分的,常常是多种黏土矿物组成的混合物,测得的比表面积数值也就是多种黏土矿物的综合值。一般可将比表面积大于或等于 $50\text{m}^2/\text{g}$ 的岩石初判为膨胀岩。其中比表面积 $50\sim 100\text{m}^2/\text{g}$ 的为微膨胀岩, $100\sim 300\text{m}^2/\text{g}$ 的为弱膨胀岩,大于 $300\text{m}^2/\text{g}$ 的为强膨胀岩。

除上述特征及指标之外,还可根据交换容量、液限、耐久性指标、软化系数、围岩强度等指标来判别岩石是否为膨胀岩。

1.3.2 膨胀岩的分类

关于膨胀岩的分类,目前还没有统一的国际和国内标准,各地区各部门的分类标准多种多样、各不相同。既有的国内外膨胀岩主要分类标准见表 1.2。

表 1.2 既有的国内外膨胀岩分类标准

岩石类型	自由膨胀率/%	干燥饱和吸水率/%	浸水崩解度	极限膨胀量/%	极限膨胀力/kPa	比表面积/ (m^2/g)	交换容量/ (mL/g)	围岩强度/MPa
非膨胀岩	<30	<10	A	<5	<100	<50	<0.1	>1
微膨胀岩	30~50	10~30	B,C	5~10	100~300	50~100	0.1~0.2	0.70~1
弱膨胀岩	50~70	30~50	C,D	10~20	300~500	100~300	0.2~0.5	0.40~0.70
强膨胀岩	>70	>50	D	>20	>500	>300	>0.5	<0.40

注:浸水崩解度 A 表示几乎无变化,B 表示变化程度中等偏小,C 表示变化程度中等偏大,D 表示完全崩坏。

1. 专家数据系统

表 1.2 判别标准的依据主要来源于大量的原始数据以及地质学者和工程师的经验,可称为专家数据系统^[10]。为使专家数据系统在实践中能得到更广泛的应用,本节将探讨如何利用专家数据系统来指导今后的工作,使膨胀岩的判别与分类工作更方便、快速、准确,从而为工程设计提供更合理的力学指标,达到优化工程设计的目的。

膨胀岩的分类指标较多,若仅采用某单项因素来进行分类就很难做到科学合理,甚至会导致不切实际的结果。下面探讨如何利用专家数据系统对膨胀岩进行分类。采用现有的国内外膨胀岩主要分类指标,即自由膨胀率、干燥饱和吸水率、浸水崩解度、极限膨胀量、极限膨胀力、比表面积、交换容量及围岩强度等因素,构成因素集 $U = \{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6, U_7, U_8\}$ 。根据既有国内外膨胀岩主要分类标准确定膨胀岩分类的专家数据系统模式,其集合为 $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4\}$,其中 $V_1 \sim V_4$ 分别代表非膨胀岩、微膨胀岩、弱膨胀岩、强膨胀岩,且每一个 V 均有一组因素 U 与之对应。

2. 数据标准化

对于确定的专家数据系统与待归类样本,由于各分类指标因素单位不同,数据相差悬殊,若直接进行运算分析,那么数值越小则运算中的信息损失就越大。为避免信息损失,可先对原始数据做标准化处理,将各数据压缩在 $[0, 1]$ 闭区间内。设待分类的样本共有 i 个 ($i = 1, 2, \dots, n$), 记为 A_i , 其中某一因素可以取得 n 个原始数据, 设为 $u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{ij} (j = 1, 2, \dots, n)$, 为这一因素的各个元素。为把这些数据标准化, 先求出它们的平均值和标准差。

平均值:

$$u_{ij} = \frac{1}{n}(u_{i1} + u_{i2} + \dots + u_{ij}) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n u_{ij} \quad (1.1)$$

标准差:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (u_{i1} - u_{ij})^2}{n}} \quad (1.2)$$

将 u_{ij} 、 s 的值代入式(1.3)可求出标准化的值。

$$u'_{ij} = \frac{u_{ij}}{s} \quad (1.3)$$

为确保标准化数据在 $[0, 1]$ 闭区间上, 采用极值标准化公式:

$$u''_{ij} = \frac{u'_{ij} - u'_{\min}}{u'_{\max} - u'_{\min}} \quad (1.4)$$

式中, $u'_{\min}$ 和 $u'_{\max}$ 分别为 u'_{ij} 中的最小值和最大值。

3. 分类方法

在确定的专家数据系统模式和待分类的样本之间建立一种距离关系, 以此来标定样本与专家数据系统的接近度 $d(A_i, V)$ 。本节采用广义海明加权距离公式:

$$d(A_i, V) = \sum_{i,j=1}^n W_j (U_{A_i} - U_V) \quad (1.5)$$

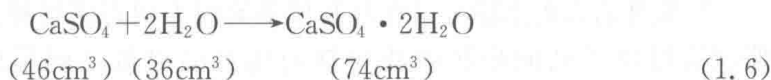
计算中一般考虑将各分类因素等权重计算。当然也可根据各因素在工程设计中的重要性定出权重。

1.4 国内外研究现状

1.4.1 膨胀机理的研究

工程中所遇到的膨胀性岩石有两类：一类是含有强亲水性黏土矿物的泥质岩类。强亲水性黏土矿物主要有蒙脱石和伊利石。在天然膨胀岩中的蒙脱石含有很高的水分，达 25%~50%，大量的吸附水使蒙脱石晶层内外表面形成发育的水化层。无论晶层间的吸附水还是颗粒周围的吸附水，在干燥环境风干失去较多的水分后，不仅会造成颗粒体积的减小和宏观收缩裂缝的形成，而且会使微结构潜在破坏。这样，一旦再与水相互作用，脱水的黏土岩类将产生强烈的吸水现象，导致晶层间吸附水的厚度增加，以及颗粒周围结合水膜的厚度加大，从而伴随产生颗粒间结合水的巨大楔压，导致软岩膨胀。另一类是化学转化膨胀岩，如硬石膏（ CaSO_4 ）、无水芒硝（ Na_2SO_4 ）和钙芒硝（ $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$ ）等。它们因吸水变相和结晶而引起体积增大。

硬石膏吸水发生化学反应：



体积增加量为

$$\frac{74-46}{46} = 61\% \quad (1.7)$$

硬石膏所处温度在 38℃ 以下时，是相当稳定的，故这种膨胀被认为是不可逆的，这类岩石是在干旱半干旱气候条件下，在封闭半封闭的蒸发盆地中所形成的含石膏和芒硝的沉积物经过成岩脱水作用而形成的。

目前，关于硬石膏的膨胀过程及膨胀机理的认识尚不十分清楚，Holtz 等^[11]研究的结果表明，岩石在石膏化过程中并无体积增加，另一些学者所做的长期室内试验说明，纯硬石膏吸水时的体积膨胀应变比硬石膏含量为 50% 的岩石体积膨胀应变要小^[2,12,13]，目前在理论上还很难解释这种现象产生的原因。

另一类膨胀岩是含有强亲水黏土矿物的黏土类岩。强亲水黏土矿物主要有蒙脱石、高岭石和伊利石等，尤以蒙脱石最为显著。这几类矿物晶体结构特殊，能将水分子吸附在晶层表面和晶层内^[14]，研究已知，未浸水黏土矿物的晶层间距为 29Å，浸水后则变为 33Å，引起体积增加近 14%^[15]，这类矿物失水后会收缩，膨胀是可逆的。包含这类矿物的岩石有泥岩、页岩、黏土岩、片岩、凝灰岩、蛇纹岩、玢岩等。

影响岩石膨胀的主要因素如下:

(1) 环境湿度历史。

岩石的膨胀应变与初始含水量近似呈线性关系,初始含水量越小,其膨胀应变量就越大。Huang 等^[16]通过侧向约束试验,得出了最大膨胀压力与相对湿度 RH 和湿度活性指数 I_{RH} 的关系模型,并绘制了一系列湿度和膨胀压力的关系曲线,用以预测最大的膨胀压力。其模型为

$$P_{\max} = 0.0686RH - 0.0008RH^2 + 1.7423I_{RH} - 0.0132I_{RH}^2 - 0.0145RH \times I_{RH} + 0.9594 \quad (1.8)$$

式中, $P_{\max}$ 为最大膨胀压力(MPa)。

事实上,膨胀岩吸水膨胀是非常复杂的。可以描述成由两个相互联系的过程组成:在第一过程中,水被膨胀岩的孔隙吸收后,在骨架中就会产生负的有效应力,导致体积发生膨胀,此时的膨胀变形发展进程同吸水过程是同步的。在这一过程中,岩体微粒之间水膜变厚,也导致了微粒的机械膨胀,这种体积膨胀量直接取决于参与该过程中水的体积。在第二过程中,水被矿物集合体所吸收,导致体积发生膨胀,这是一物理化学过程,在这个过程中,膨胀的进程是滞后于吸水过程的。

(2) 围岩的应力状态。

膨胀性岩石吸水膨胀过程与其所受的应力状态密切相关。许多学者通过膨胀试验得出了轴向膨胀应变与轴向压力的对数之间呈线性关系。1972 年, Einstein^[17]指出围岩膨胀是由应力第一不变量的变化所引起的。

(3) 岩石的结构。

岩石的内部结构以及胶结状态对其膨胀性质有相当大的影响。对无胶结的黏土岩,风干后再吸水会发生膨胀崩解,其体积可增加近十倍。胶结情况对膨胀过程也有影响,如有钙质胶结的黏土质砂岩,测定其最大膨胀压力的稳定时间过程需要 10 天以上,而无钙质胶结的只需 10 天。粒径小于 0.01mm 的硬石膏的膨胀系数为岩样相应值的两倍以上。一般说来,阳离子交换量和比表面积较高的软岩,胀缩性能比较强烈。

(4) 岩石的干重度及孔隙率。

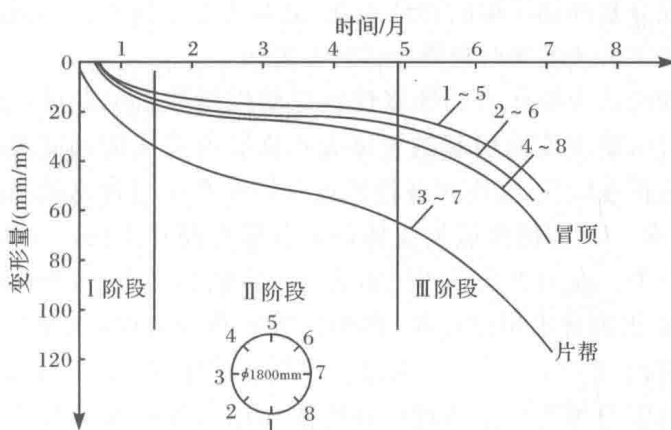
岩石的初始干燥密度对其膨胀有很大影响。在含水量一定的条件下,体积膨胀量随其干重度的增大而增加。

天然状态与风干状态的黏土岩胀缩性指标有很大的差别,见表 1.3。

表 1.3 南水北调工程膨胀岩胀缩特性指标

岩类	自由膨胀率/%	岩块干燥饱和吸水率/%	指标				
			天然状态			风干状态	
			体缩率/%	膨胀量/%	膨胀力/kPa	膨胀量/%	膨胀力/kPa
灰绿色黏土岩	66	52.3	16.41	14.24	196	63.07	1400
褐黄色黏土岩	54	48.6	11.57	10.69	191	41.68	930
绿色砂质黏土岩	49	42.7	9.23	9.01	161	38.64	540

在隧道工程的围岩中,水分的补给是形成膨胀压力的必要因素。通常,水分的来源主要是地下水、施工和使用过程中的积水以及空气中的潮气。因此,膨胀压力还与季节有关,夏季空气湿度大,雨季地下水渗入量大,都会使膨胀压力增大。图 1.1 为片状泥质页岩隧洞围岩变形曲线。曲线表明,第Ⅰ阶段是由围岩应力所引起的弹性变形,这一阶段中变形出现快,方向性强烈,各向变形不等。第Ⅱ阶段是由围岩吸收隧洞中潮气而产生的膨胀变形,表现为变形比较缓慢,在各处湿度相同的条件下,围岩各向膨胀量和变形速度基本相同。但随着夏天到来,空气中湿度增大,水气进入围岩深部,围岩变形进入第Ⅲ阶段,变形急剧增大,直至发生片帮冒顶。

图 1.1 片状泥质页岩隧洞围岩变形曲线^[18]

杨庆等^[19]对具有膨胀性的黑云母安山岩与辉石闪长玢岩的体积应力与吸水量的关系做了试验。在试验中发现,岩石吸水膨胀过程不是连续的。当对试件施加一定的体积应力后,一开始吸水速度较快,随着时间的延长,吸水速度逐渐降低,最后达到稳定值。此时卸载,试件又开始吸水,随着时间的延长又达到稳定值,即膨胀岩在一定的体积应力作用下,其吸水量有一个饱和值,饱和量是体积应