

文章编号: 1674—8247(2021)01—0006—06  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.01.002

## 岩石含水状态对岩石膨胀力影响的研究

张廷雷 李蓉仑 杨 鸿 方 明 李 玲

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘 要:**岩石膨胀力试验是测定膨胀岩在水环境下所产生膨胀应力的试验方法。岩石的含水状态对膨胀力测试值具有重要影响。本文通过对岩石试样进行不同含水状态的膨胀力试验,研究了含水状态对岩石膨胀力试验结果的影响程度和规律。结果表明:含水状态对膨胀力测试值的影响显著,风干状态下的膨胀力平均值是饱和状态的 83.0 倍,烘干状态下的膨胀力平均值是饱和状态的 77.6 倍,烘干或风干状态的岩石再次遇水后,会出现持续膨胀的趋势,长期干燥环境使岩石内部毛细水充分排出,当岩石再次吸水膨胀时其更具危害性。对于材质均匀,一致性较好的膨胀岩,膨胀力测试值随含水比的增大而减小,随空孔率的增大而增大,且相关性较好。

**关键词:**膨胀岩; 膨胀力; 含水状态; 试验; 含水率

**中图分类号:**TU45 **文献标志码:**A

6

## A Study on Influence of Rock Moisture Condition on Rock Swelling Force

ZHANG Tinglei LI Ronglun YANG Hong FANG Ming LI Ling

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Rock swelling force test is a test method to determine the swelling stress produced by swelling rock in the water. The moisture condition of rock has an important influence on the measured value of swelling force. This paper studies the influence degree and law of moisture conditions on the test results of rock swelling force through the swelling force tests of rock samples under different moisture conditions. The results show that the moisture condition has a significant influence on the test value of swelling force. The average swelling force in air-dried state is 83.0 times that in a saturated state and 77.6 times that in a drying state. After the rocks in drying or air-dried state meet with water again, there will be a tendency of continuous swelling. The long-term dry environment makes the capillary water in the rocks fully discharged, which is more harmful when the rocks absorb water and swell again. For swelling rock with uniform material and good consistency, the measured value of swelling force decreases with the increase of water content ratio and increases with the increase of porosity, and the correlation is good.

**Key words:** swelling rock; swelling force; moisture condition; test; moisture content

膨胀岩指含有较多亲水性矿物的岩石,当含水率发生变化时,岩体会发生较大体积变化的一类特殊岩石。我国膨胀岩的分布十分广泛,全国有多个省、区存

在膨胀岩。从膨胀岩形成的地质年代划分,早自上二叠统,晚到上第三系都有。膨胀岩是对工程危害较大的一类软岩,是岩土工程领域中的一个重点研究对

收稿日期:2020-10-22

作者简介:张廷雷(1982-)男,高级工程师。

基金项目:四川省科技服务业示范项目科研课题(2020GFW054)

引文格式:张廷雷,李蓉仑,杨鸿,等. 岩石含水状态对岩石膨胀力影响的研究[J]. 高速铁路技术,2021,12(1):6-11.

ZHANG Tinglei, LI Ronglun, YANG Hong, et al. A Study on Influence of Rock Moisture Condition on Rock Swelling Force[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(1):6-11.

象<sup>[1]</sup>。膨胀岩的工程性质明显区别于硬质岩体和软弱土体,尤其是在水环境的作用下,岩体内部变形受到约束,其内部结构的变化就会产生膨胀应力,当膨胀导致的变形受到约束较小或应力足够大时,膨胀变形会发生<sup>[2]</sup>。近几年,成渝客运专线、西成铁路等均出现了岩石膨胀性导致围岩遭到破坏,承载力不足,产生掌子面失稳,拱顶下沉增大的现象,使得铁路建设对岩石的膨胀性愈加重视,对岩石膨胀性试验的要求也越来越严格。这使得确保岩石膨胀性试验方法的标准性、一致性和试验数据的准确性、可靠性显得尤为重要。

膨胀力试验是测定膨胀岩在水中浸泡情况下产生膨胀应力的试验方法。膨胀岩是在水环境的作用下发生膨胀的,试验前,其含水状态的不同对岩石膨胀力试验结果影响显著。然而,相关岩石试验规程规范<sup>[3-5]</sup>对膨胀力试验样品含水状态的要求并不明确,试验方法的标准性、一致性较差,导致试验数据的准确性、可靠性差,进而影响膨胀岩判定及膨胀岩工程的安全。目前,岩石含水状态对膨胀力试验结果影响的相关研究较少,对膨胀力试验结果影响的规律和程度不能确定,是否会严重影响到岩石膨胀性判定,甚至危害到工程结构的稳定性等问题需进一步研究。

本文选取具有代表性的岩石样品57组进行不同含水状态的膨胀力试验,同时测试饱和吸水率、自由膨胀率、含水率等参数。通过对比分析,研究含水状态对岩石膨胀力试验结果的影响程度,以期为岩石膨胀力试验及解决工程中膨胀岩带来的问题提供指导。

## 1 试验样品、仪器设备及试验方法

### 1.1 试验样品

选取部分需要进行膨胀性判定的岩石样品共57组,以岩石试样开展含水状态对岩石膨胀力试验结果影响的研究。其中,硬质岩(包括板岩、花岗岩、灰岩、石英岩、玄武岩)12组,砂岩12组,泥质砂岩12组,泥岩21组。对岩石样品进行天然、风干、烘干、饱和4种含水状态的膨胀力试验,试件尺寸为 $\phi 50\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 。风干时,将岩石试件放于 $(40 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的鼓风干燥箱中7 d。烘干、饱和按照TB 10115-2014《铁路工程岩石试验规程》方法进行,饱和采用真空抽气法。

### 1.2 主要仪器设备

- (1) 钻石机、切石机、磨石机等试件加工设备。
- (2) 直角尺、放大镜等试件检查设备。
- (3) 岩石膨胀压力测试仪<sup>[6]</sup>。
- (4) 游标卡尺:分度值0.02 mm。

(5) 千分表:量程5 mm,分度值0.001 mm。

(6) 鼓风干燥箱:24 h内温度能保持在 $105^\circ\text{C} \sim 110^\circ\text{C}$ 范围和7 d内温度能保持在 $(40 \pm 5)^\circ\text{C}$ 范围。

(7) 真空饱水仪。

### 1.3 试验方法

按照TB 10115-2014《铁路工程岩石试验规程》进行饱和吸水率试验和含水率试验,按照TB 10102-2010《铁路工程土工试验规程》进行自由膨胀率试验。

按照TB 10115-2014《铁路工程岩石试验规程》第9.3款进行岩石膨胀力试验,并应符合以下要求:

(1) 膨胀力试验前,应测试岩石样品的含水率。

(2) 将试件装入内壁涂有凡士林的金属套环内,并在试件上下端分别放置一张薄型滤纸和金属透水板。

(3) 安装加压系统和测量试件变形的千分表,应使仪器各部位和试件在同一轴线上,不得出现偏心。

(4) 对试件施加产生0.01 MPa压力的荷载,测记千分表读数,每隔10 min测读1次,直至连续3次读数不变。

(5) 向容器内缓缓地注入蒸馏水,直至淹没上部透水板。立即清零压力值,观测千分表和压力指示器读数的变化,保持试件高度在整个试验过程中始终不变。

(6) 开始时每10 min读数1次,连续30 min读数不变时,每小时读数1次,连续3 h读数不变或持续下降时,则认为稳定并记录试验压力。浸水后总试验时间不得少于48 h。

(7) 试验过程中,应保持水位不变,水温变化不得大于 $2^\circ\text{C}$ 。

(8) 结束后,应描述试件表面的泥化和软化现象。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 含水状态对岩石膨胀力测试值的影响分析

选取57组岩石样品,进行天然、风干、烘干、饱和4种含水状态的膨胀力试验、饱和吸水率试验和自由膨胀率试验,按岩石硬度由硬到软(硬质岩-砂岩-泥质砂岩-泥岩)的顺序,绘制4种含水状态的膨胀力曲线(如图1所示)和含水率曲线(如图2所示)。各含水状态下,57组岩石膨胀力平均值从小到大的变化趋势如图3所示。57组岩石样品在不同含水状态下,出现膨胀力最大值的含水状态的占比如图4所示。

从图1可以看出,各岩性饱和状态岩石样品的膨胀力很小,基本趋近于0。硬质岩石在任何含水状态下均没有膨胀力,为非膨胀岩。含水状态对膨胀力测

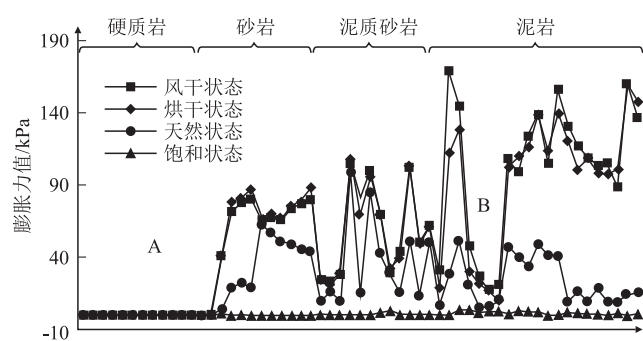


图1 不同含水状态岩石膨胀力试验数据图

试值的影响显著,烘干状态和风干状态的膨胀力测试值明显高于饱和状态的膨胀力测试值。不同岩性岩石烘干状态下的膨胀力值大于饱和状态下的膨胀力值的程度不尽相同,砂岩和泥岩更显著,这说明砂岩和泥岩的吸水膨胀性更显著。

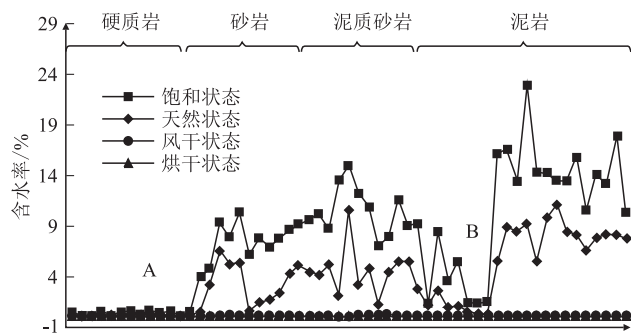


图2 不同含水状态岩石膨胀力试验前含水率图

从图2可以看出,硬质岩石在任何含水状态下的含水率均较小,这是因为硬质岩石的结构密实,孔隙率小。烘干状态和风干状态下,岩石样品的含水率很小,理论上接近0,此时岩石的膨胀力测试值较其他状态更大。饱和状态和天然状态下,岩石样品的含水率波动较大,其中泥岩的饱和含水率最大,饱和状态与烘干或风干状态的膨胀力差值也较大,其膨胀力受吸水膨胀的影响程度较大。图1和图2中,A处、B处饱和状态的含水率较小,饱和状态与烘干状态含水率的差值相对较小,说明岩石样品结构较密实,各含水状态下吸水率均较小,膨胀力值也较小。

从图3可以看出,在饱和状态、天然状态、烘干状态、风干状态下,膨胀力平均值依次增大。饱和状态下的膨胀力平均值最小,为0.77 kPa,风干状态下的膨胀力平均值最大,为63.94 kPa,为饱和状态的83.0倍。烘干状态比风干状态膨胀力平均值略低,为59.77 kPa,为饱和状态的77.6倍。

从图4可以看出,膨胀力最大值出现在风干状态

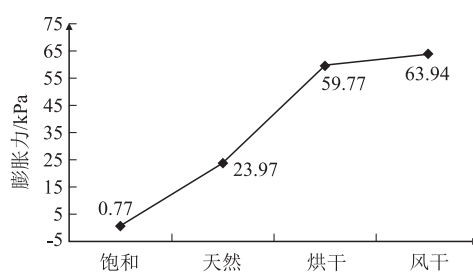


图3 不同含水状态下膨胀力平均值的变化趋势图

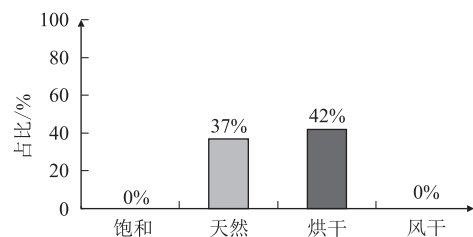


图4 不同含水状态下膨胀力最大值占比图

的占比为42%,出现在烘干状态的占比为37%,出现在天然状态和饱和状态的占比均为0。总体表现为岩石样品含水率越小,其膨胀力越大,可见,含水状态对膨胀力测试值的影响非常显著,饱和状态与烘干状态和风干状态的差异非常大。这主要是因为饱和状态和风干状态是岩石含水状态的两个极端状态。理论上,饱和状态岩石中的所有孔隙均被水填充,岩石无法再吸水;烘干状态岩石中的所有水分均被烘出,岩石内部所有孔隙均暴露在空气中,当再次遇水时,会出现持续的吸水膨胀趋势,产生膨胀压力。

受样品干缩湿胀的特性的影响,具有膨胀性的岩石在烘干状态、风干状态至再次浸水的过程中,会出现持续膨胀的趋势,故烘干状态和风干状态时的膨胀力较大。同时,岩石膨胀力在风干状态下出现最大值的概率高于在烘干状态下,风干状态下岩石膨胀力的平均值也大于烘干状态下的膨胀力平均值。可见,长时间的干燥环境致使岩石的自然风干会导致岩石内部毛细水更充分排除<sup>[7]</sup>,当岩石再次吸水,水分再次进入岩石内部的毛细孔隙时,便产生更大的应力,膨胀力测试值也更大。

因此,岩石的膨胀力值除受岩石本身的膨胀特性及结构特性的影响外,试验前的含水状态对膨胀力值的影响也十分显著。烘干或风干状态的岩石再次遇水后,会出现持续膨胀的趋势,与天然状态相比膨胀力显著增大。鉴于含水状态对岩石膨胀力的试验结果影响较大,试验过程中应对试验前岩石的含水状态进行规定或通过研究确定各含水状态的换算关系,以免含水

状态的不同对岩石膨胀力试验结果及岩石膨胀性判定产生影响。在实际工程中,若岩石因气候条件变得干燥,含水率变小,当再次大量吸水后,将产生巨大的膨胀力,对实体工程造成损害。

## 2.2 岩石膨胀力与含水比的相关关系分析

天然状态的岩石因所含水分填充岩石自身孔隙的程度不同,膨胀力测试值也存在较大差异。含水率与饱和吸水率的比值称为含水比,表征着岩石含水状态接近饱和的程度,即水分填充岩石自身孔隙的程度。含水比为0%时,岩石内部没有水分,孔隙全部暴露在空气中,这便是烘干状态。随着含水比的增大,岩石内部孔隙逐渐被水分填充,直至含水比达到100%,岩石内部孔隙全部被水填充,这便是饱和状态。

含水状态对岩石膨胀力值的影响显著,对不同岩性的岩石膨胀特性的影响一致,即风干状态和烘干状态的膨胀力值>天然状态的膨胀力值>饱和状态的膨胀力值。天然含水状态因含水比的不同,岩石膨胀性不同,膨胀力测试值也不同。含水比主要由含水率和饱和吸水率决定。57组岩石试样删除饱和吸水率小于4的,剩余38组岩石试样在天然状态下的膨胀力与含水比通过最小二乘法拟合所得的关系曲线<sup>[8-9]</sup>,如图5所示。曲线明显呈现出膨胀力随着含水比的增大而减小的趋势。因试验数据岩性较多,性质不稳定,固相关系数 $R^2$ 仅为0.4602,相关性差。

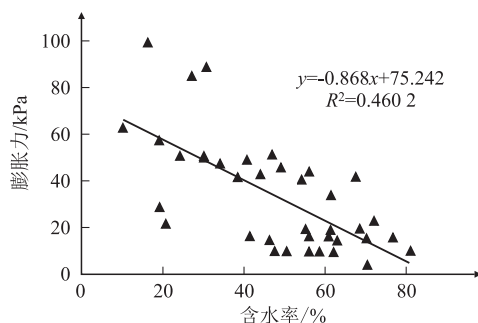


图5 天然状态下岩石膨胀力与含水比相关关系曲线图

为了研究岩石膨胀力测试值与含水比的相关关系,选取材质较为均匀,一致性较好的2组泥岩(编号为45号和46号)分别进行6种含水率下的膨胀力试验。依次对试件采取烘干、40℃烘箱烘干24h、自然风干24h、天然、自由浸水24h、抽真空饱和等处理过程,使岩石具有不同的含水率,并对岩石试验前的实际含水率进行测试,然后对不同含水率的岩石试样进行膨胀力测试。通过最小二乘法对膨胀力与含水比关系曲线进行拟合,如图6所示。

从图6可以看出,泥岩样品的膨胀力值与试验前

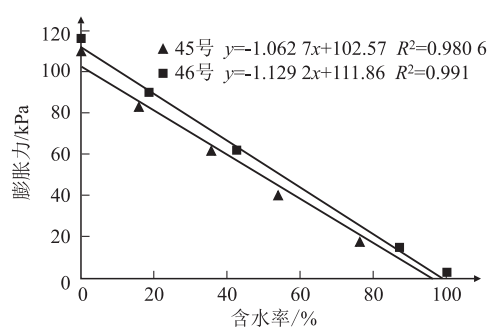


图6 膨胀力与含水比相关关系曲线图

含水比存在较好的线性关系,线性相关系数 $R^2$ 均大于0.98。当试验前试样含水率为0时,膨胀力达到最大值,随着含水比的增大,膨胀力值减小,当试验前含水比达到100%,即试件含水达到饱和时,膨胀力值最小,接近0。这说明天然含水状态岩石试样的含水饱和程度,即含水比的大小对岩石膨胀力试验结果的影响显著。试验过程中应对试验前岩石的含水状态进行规定,或要求试验报告除给出膨胀力值外,还应给出饱和吸水率和含水率值。实际应用过程中,应综合考虑含水比对膨胀性判定的影响。

## 2.3 膨胀力、饱和吸水率、自由膨胀率相关关系分析

饱和吸水率试验和自由膨胀率试验同步于膨胀力试验进行,共进行了57组试验。饱和吸水率和自由膨胀率均为岩石烘干状态下的试验结果,试验前岩石的含水状态为烘干状态,岩石本身的含水状态对这两个参数的试验结果没有影响。然而,当饱和吸水率和自由膨胀率与膨胀力同时作为岩石膨胀性的判定指标时,其必然存在相关性。

岩石饱和吸水率与烘干状态和风干状态下膨胀力值的相关关系曲线如图7所示。从图7可以看出,烘干状态和风干状态下,岩石膨胀力值与岩石的饱和吸水率存在递增关系,烘干状态下的相关系数 $R^2$ 为0.7357,风干状态下的相关系数 $R^2$ 为0.5658,即随着岩石饱和吸水率的增大,岩石的膨胀力值增大。

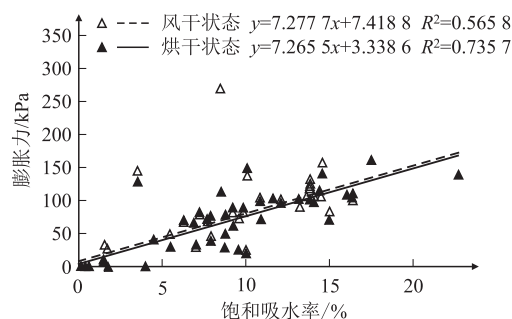


图7 岩石饱和吸水率与膨胀力的相关关系图



岩石自由膨胀率与饱和吸水率的相关关系曲线如图8所示。从图8可以看出,岩石自由膨胀率与岩石的饱和吸水率存在线性递增关系,相关系数 $R^2$ 为0.7357,即随着岩石饱和吸水率的增大,岩石的自由膨胀率增大。这与岩石膨胀力与饱和吸水率的相关关系一致,其原因在于饱和吸水率直接反应了岩石的密实程度和孔隙率情况,饱和吸水率越大,岩石孔隙率越大,烘干状态下,岩石内部孔隙中水分全部排出,吸水量越大,产生的吸水膨胀越显著。

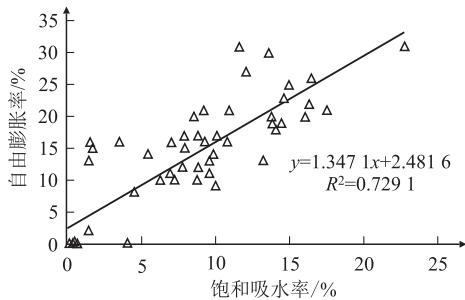


图8 岩石自由膨胀率与饱和吸水率的相关关系图

#### 2.4 膨胀力与空孔率的相关关系分析

膨胀力与饱和吸水率的相关关系、自由膨胀率与饱和吸水率的相关关系、膨胀力与含水比的相关关系等分析结论均表明:膨胀力试验前岩石样品内部空孔率越大,岩石的膨胀力越大。利用全部泥岩试验数据,计算岩石膨胀力试验前空孔率(即没有被水分填充的孔隙可填充水的质量占岩石质量的百分比),计算方法如公式(1)所示。

$$n = \omega_{sa} - \omega \quad (1)$$

式中: $n$ ——空孔率(%);

$\omega_{sa}$ ——饱和吸水率(%);

$\omega$ ——含水率(%)。

绘制膨胀力与空孔率关系曲线,如图9所示。从图9可以看出,岩石的膨胀力随着空孔率的增大而增大,但相关性较差,相关系 $R^2$ 仅为0.344。

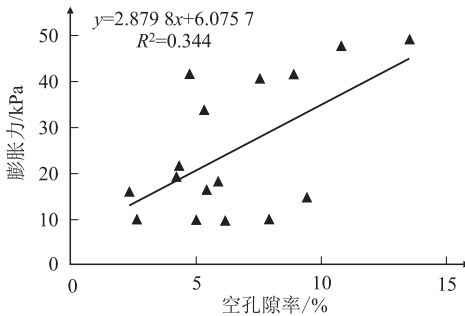


图9 岩石膨胀力与空孔率的相关关系图

利用岩石膨胀力与含水比的相关关系分析的试验

(45号、46号泥岩在6种含水率下的膨胀力试验)数据进行岩石膨胀力与岩石空孔率的相关关系拟合,结果如图10所示。

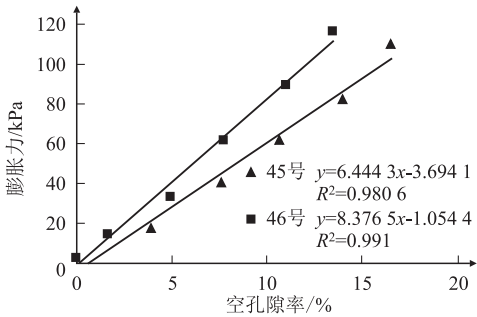


图10 单组岩石膨胀力与空孔率的相关关系图

从图10可以看出,对于材质较为均匀,一致性较好的岩石,膨胀力与空孔率的相关关系较好,相关系数 $R^2$ 为0.98以上。在实际应用中,如能对材质较为均匀,一致性较好的一类岩石建立膨胀力与空孔率的相关关系方程,则可通过关系方程获得任何含水状态的膨胀力值。

由此可见,岩石的密实程度或岩石的空孔率是影响岩石膨胀性的决定性因素。饱和吸水率是岩石密实程度及孔隙率的表征,含水率是岩石内部孔隙被填充程度的表征。空孔率是饱和吸水率与含水率之差,空孔率越大,则岩石内部孔隙越多,密实程度越差,膨胀力测试值越大,对工程稳定性越不利。

### 3 结论

本文通过岩石含水状态对岩石膨胀力试验结果的影响研究,得出以下主要结论:

(1) 硬质岩(如板岩、花岗岩、灰岩、石英岩、玄武岩等)在任何含水状态下均没有膨胀力,为非膨胀岩。

(2) 岩石样品的含水状态对膨胀力测试值的影响显著,烘干状态和风干状态的膨胀力测试值明显高于饱和状态的膨胀力测试值。烘干或风干状态的岩石因内部水分排尽,再次遇水后,会出现持续膨胀的趋势,风干状态下的膨胀力平均值是饱和状态的83.0倍,烘干状态下的膨胀力平均值是饱和状态的77.6倍。鉴于含水状态对岩石膨胀力试验结果影响较大,试验过程中应对试验前岩石的含水状态进行规定,或得出不同含水状态下膨胀力测试值的变化规律,以免含水状态对试验结果及膨胀性判定产生影响。

(3) 长时间的干燥环境致使岩石的自然风干会导致岩石内部毛细水更充分地排出,当岩石再次吸水时,毛细水的吸入使膨胀力更大,其危害性较烘干状态更大。

(4) 岩石的含水率与饱和吸水率的比值表征着岩石含水状态的饱和程度。天然状态岩石的含水情况不尽相同,膨胀力测试值随着试件初始含水比的增大而减小。

(5) 饱和吸水率直接反应了岩石的密实程度和孔隙率情况,饱和吸水率越大,岩石孔隙率越大。烘干状态下,岩石内部孔隙中水分全部排出,吸水量越大,产生的吸水膨胀越显著。

(6) 岩石的密实程度或岩石的空孔率是影响岩石膨胀性的决定性因素。空孔率越大,岩石膨胀力测试值越大,对工程稳定性越不利。

参考文献:

[1] 王美乾. 膨胀岩膨胀—蠕变耦合试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2012.  
WANG Meiqian. Expansive Rock of Expansion-Creep Coupling Test Reseach[D]. Nanning: Guangxi University, 2012.

[2] 范秋雁, 刘金泉, 杨典森, 等. 不同降雨模式下膨胀岩边坡模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3401–3409.  
FAN Qiuyan, LIU Jinquan, YANG Diansen, et al. Model Test Study of Expansive Rock Slope under Different Types of Precipitation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(12): 3401–3409.

(上接第 5 页)

定验算项,其最不利极值亦为 1.31,大于控制值 1.2,满足要求,表明既有挡墙在洪水位 10~0 m 条件下工作,也是安全的。

7 结束语

铁路行业的最不利水位是按重力式支挡结构的稳定性检算内容来定义的,这种定义对重力式以外的其他支挡结构并不完全合适。因此,本文建议以支挡结构各功能的验算内容,重新定义最不利水位,拓展最不利水位的适用范围,可采用比较偏移率的通用方法来确定支挡结构的控制项,将最不利水位定义为控制项不利极值对应的水位。确定最不利水位的一般步骤为:确定计算条件和检算项目→逐水位计算支挡结构各检算项,找出各检算项不利极值及对应水位→计算偏移率,确定控制项→选定控制项不利极值对应的水位为最不利水位。

参考文献:

[1] 阙云. 浸水重力式挡土墙稳定性的最不利水位确定[J]. 福建建设科技, 2012(5): 11–14.  
QUE Yun. Determination of the most Unfavorable Water Level Equation of the Wetted Gravity Retaining Wall [J]. Fujian Construction Science & Technology, 2012(5): 11–14.

[2] 中国铁路总公司. 铁路防洪工作指南[M]. 北京: 中国铁道出版

[3] TB 10115–2014 铁路工程岩石试验规程[S].  
TB 10115–2014 Code for Rock Test of Railway Engineering [S].

[4] TB 10077–2019 铁路工程岩土分类标准[S].  
TB 10077–2019 Code for Rock and Soil Classification of Railway Engineering [S].

[5] TB 10102–2010 铁路工程土工试验规程[S].  
TB 10102–2010 Code for Soil Test of Railway Engineering [S].

[6] 吴会东. 膨胀岩试验设备改进与评价研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(4): 75–78.  
WU Huidong. Study on Improvement and Evaluation of Swelling Rock Test Equipment[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(4): 75–78.

[7] 余尚银. 材料物理化学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1994.  
YU Shangyin. Physical Chemistry of Materials [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1994.

[8] 张廷雷, 方明, 李建兵, 等.  $K_{30}$  曲线拟合及修正的程序设计[J]. 高速铁路技术, 2012, 3(4): 42–47.  
ZHANG Tinglei, FANG Ming, LI Jianbing, et al. Program Design for  $K_{30}$  Curve Fitting and Revising[J]. High Speed Railway Technology, 2012, 3(4): 42–47.

[9] 张廷雷, 蒋良文, 张晓晖, 等. 含水率对  $K_{30}$  值和  $E_{vd}$  值相关性的影响研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(4): 10–14.  
ZHANG Tinglei, JIANG Liangwen, ZHANG Xiaohui, et al. Research on the Effect of Moisture Content on Correlation between  $K_{30}$  and  $E_{vd}$  [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(4): 10–14.

社, 2017.  
China Railway. Guide for Railway Flood Control Work[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.

[3] 梅锦山, 侯传河, 司富安. 水工设计手册(第 2 卷): 规划、水文、地质(第二版)[M]. 北京: 水利水电出版社, 2014.  
MEI Jinshan, HOU Chuanhe, SI Fu'an. Hydraulic Design Manual (Volume 2): Planing, Hydrology and Geology (2nd Edition) [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2014.

[4] TB 10025–2006 铁路路基支挡结构设计规范[S].  
TB 10025–2006 Code for Design on Retaining Structures of Railway Subgrade[S].

[5] 李海光, 等. 新型支挡结构设计工程实例(第二版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.  
Li Haiguang et al. Design and Engineering Examples of New Retaining Structures(2 Edition) [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.

[6] 王秀丽. 支挡结构设计计算手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.  
WANG Xiuli. Design and Calculation Manual of Retaining Structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.

[7] 尉希成, 周美玲. 支挡结构设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.  
WEI Xicheng, ZHOU Meiling. Design Manual of Retaining Structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.

[8] TB 10025–2019 铁路路基支挡结构设计规范[S].  
TB 10025–2019 Code for Design on Retaining Structures of Railway Earthworks[S].

[9] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算(第二版)[M]. 北京: 水利水电出版社, 1996.  
QIAN Jiahuan, YIN Zongze. Geotechnical Principles and Calculations (2 Edition) [M]. Beijing: China Water & Power Press, 1996.