

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.04.009

# 硬石膏膨胀特性及其湿度应力场膨胀本构模型

任松<sup>1</sup>, 欧阳汛<sup>1,2</sup>, 姜德义<sup>1</sup>, 吴建勋<sup>1</sup>, 陈结<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 中电建路桥集团有限公司, 北京 100048)

**摘要:**硬石膏岩遇水表现出很强的膨胀特性,且由于地下水分布的动态不均匀性,导致围岩不均匀膨胀。以梁忠高速公路礼让隧道中硬石膏岩为研究对象,采用土工固结试验仪,设置不同初始浸泡水量,对硬石膏进行侧限膨胀试验,研究其吸水率、膨胀应变及应力变化规律。结果表明:硬石膏吸水率呈先快后慢型增长,快速增长过程中硬石膏吸收的水主要转化为结晶水,慢速增长阶段,硬石膏内部自由水逐渐增多;硬石膏膨胀应变及膨胀应力随浸泡水量增加而增大,当浸泡水量为硬石膏完全石膏化理论耗水量的1/4时,达到二者增长率明显减小的转折点;硬石膏吸水率具有时间效应,且吸水率与时间呈负指数关系,基于此,结合湿度应力场理论,得到了硬石膏湿度应力场膨胀时变本构。

**关键词:**硬石膏;侧限膨胀;岩水比;时间效应;吸水率

**中图分类号:**U451

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2018)04-071-09

## The swelling properties of anhydrite and its humidity-stress-field swelling constitutive model

REN Song<sup>1</sup>, OUYANG Xun<sup>1,2</sup>, JIANG Deyi<sup>1</sup>, WU Jianxun<sup>1</sup>, CHEN Jie<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China; 2. Power China Road Bridge Group Co., Ltd., Beijing 100048, P.R.China)

**Abstract:** The anhydrite rock swells obviously when it's exposed to water, and the non-uniform dynamic distribution of groundwater leads to uneven expansion of surrounding rock. We take the anhydrite rock in Lirang tunnel, Liangzhong highway, as the research object, and set different initial water amount to carry out the anhydrite confined swelling experiment with using the consolidometer, which aims at figuring out the change rules of water absorption, swelling strain and confined swelling stress of the anhydrite rock. The results show that the water absorption rate of anhydrite increases rapidly at first and then slowly. The water absorbed by anhydrite in the process of rapid growth is mainly converted to crystal water, and in the slowly growth process, the free water inside the anhydrite gradually increases. The swelling strain and swelling stress of anhydrite increase with the increase of soaking water. When the soaking water volume is one-fourth of the theoretical water consumption of complete gypsification, it reaches the turning point where the growth rates of swelling strain and stress significantly decrease. The

**收稿日期:**2017-11-01

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51774057);重庆市研究生科研创新项目(CYB17046)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51774057) and the Postgraduates Innovation Fund of Chongqing University (CYB17046).

**作者简介:**任松(1975—),男,重庆大学,教授,博士生导师,从事岩石力学与工程方面研究,(E-mail)rs\_rwx@cqa.edu.cn。

water absorption of anhydrite rock has a time effect, and there is a negative exponent relation between water absorption and time. Based on it, combined with the humidity stress field theory, the anhydrite time-dependent constitutive is obtained.

**Keywords:** anhydrite; confined swelling; rock to water ratio; time-dependent effect; bibulous rate

硬石膏岩是一类容易在水的作用下产生膨胀变形的岩石,主要成分为  $\text{CaSO}_4$ 。其膨胀机理相对其他岩石更为复杂,膨胀过程中涉及了物理作用和化学反应。物理作用在于,硬石膏吸水后,水逐步向孔隙中渗透,从而宏观表现为岩石体积膨胀;化学反应则是通过吸水变相或结晶,使体积膨胀增大<sup>[1]</sup>。硬石膏岩水化膨胀为二水石膏后,理论上其体积最大可增加 61%左右<sup>[2-3]</sup>。近年来,随着国内公路、铁路建设事业的发展,硬石膏岩对工程建设的危害悬而未决,对岩土工程稳定性,特别是路基、隧道、边坡稳定性等造成了严重破坏,修复时耗费巨资<sup>[4-5]</sup>,因此很有必要研究硬石膏的膨胀特性。

刘艳敏等<sup>[6]</sup>采用硬石膏岩圆盘形粉样进行膨胀特性研究,并对硬石膏岩病害作用机制进行分析,发现对隧道支护结构的危害主要表现在其水化膨胀作用及溶蚀产生的硫酸盐侵蚀;Rauh 等<sup>[7]</sup>对三种不同地方的石膏质岩粉状样进行了膨胀试验、薄片分析、电镜扫描分析、X-衍射分析和比表面积分析,发现硬石膏膨胀与  $\text{CaSO}_4$  结晶度有关,且晶体尺寸越大,膨胀能力越小;Molina<sup>[8]</sup>基于现场观测与试验,得出硬石膏石膏化过程中导致膨胀力增加,且隧道开挖过程中应力重分布对其转化具有促进作用;郭印同等<sup>[9]</sup>则对硬石膏试样进行常规力学试验研究,得出其强度参数和变形特性。季明等<sup>[10]</sup>将灰质泥岩膨胀特性结合含水率、浸水时间等因素进行研究分析,提出膨胀稳定阈值概念;谭罗荣等<sup>[11]</sup>对膨胀土与干密度、饱和度及含水量关系进行研究,得出其膨胀特性变化规律。

采用粉状样代替块状试件,虽然膨胀效果更为明显,但岩石内部结构破坏严重,且以上试验均在试件与水充分接触的情况下进行,不能体现实际工程情况中围岩周围地下水分布差异导致其膨胀的不均匀性。

笔者设置不同浸泡水量,对硬石膏试件进行侧限膨胀试验,研究其在不同水量分布下的吸水时变特性,同时考虑外部湿度量变,深入分析硬石膏石膏化过程中水的性状变化,以及水量分布对轴向膨胀应变、侧限膨胀应力的影响规律,并尝试进一步得到硬石膏湿度应力场本构模型,得出具有一定理论价值和工程意义的结论。

## 1 硬石膏侧限膨胀试验

### 1.1 试验试件

重庆梁平至忠县高速公路礼让隧道穿越了近 700 m 的硬石膏地层,其地层年代属于三叠系下统嘉陵江组四段。对所取岩样进行 X-衍射分析,其矿物成分如表 1 所示。所取岩样中  $\text{CaSO}_4$  的平均含量为 91%, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  的平均含量为 5.25%,杂质的平均含量为 3.75%,该岩石是典型的硬石膏岩。岩石中杂质是  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{FeO}_3$  和  $\text{CaCO}_3$ 。对硬石膏岩样,进行手工干法打磨,加工为直径 50 mm,长度 20 mm 的圆柱体,作为试验试件,其尺寸偏差控制在 0.2 mm 以内,如图 1 所示。



图 1 硬石膏试件  
Fig.1 The anhydrite rock sample

表 1 硬石膏岩矿物成分  
Table 1 The mineral composition of anhydrite

成分/%	试件				平均值/%
	1	2	3	4	
$\text{CaSO}_4$	90	91	88	95	91.00
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	8	4	7	2	5.25
杂质	2	5	5	3	3.75

## 1.2 试验装置

试验采用土工固结试验仪,如图2所示,将其分成两部分,分别为:轴向变形测量部分、侧压测定部分。轴向变形测量部分为南京智龙科技开发公司的TWJ数据采集处理系统。该系统由计算机、传感器、伺服电路、局域网组成,可与固结仪的千分表连接,实现自动采样的功能,最小能测得0.001 mm的变形,并能对数据进行处理,如图2所示;侧压测定部分则采用FSR400薄膜型电阻式压力传感器,如图3所示。该传感器的电阻值随薄膜区压力增大而减小。通过读取电阻值,可间接获得所测压力。传感器最大应力量程为5 MPa。

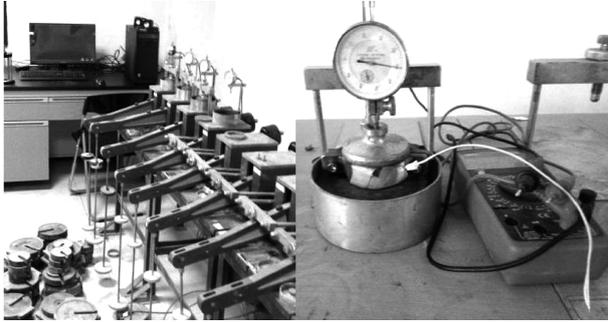


图2 试验装置

Fig.2 The testing apparatus



图3 FSR400侧限膨胀应力测量传感器

Fig.3 The FSR400 confining stress measurement sensor

## 1.3 试验内容及步骤

地下水的分布对硬石膏岩体膨胀特性具有重要影响,并可能导致巷道支护初期便开始出现受力不均等的情况。通过进行硬石膏侧限膨胀试验,一方面研究不同浸泡水量下,硬石膏膨胀的不均匀特性,另一方面还研究同一浸泡水量下,硬石膏吸水率时间特性。

### 1.3.1 不同浸泡水量的硬石膏侧限膨胀试验

不同的浸泡水量,是通过硬石膏试件设置不同的初始岩水比来反映,以此研究硬石膏膨胀特性,具体步骤为:

1) 将各试件放入40℃恒温箱中烘干24 h以上,直至试件质量变化速率小于0.01 g/h<sup>[12]</sup>。记录此时质量,记作 $m_0$ 。

2) 测量各试件的长度和直径,并根据试件质量 $m_0$ ,通过式(1),设置浸泡水量 $m_w$ 。

3) 采用薄膜气球进行密封,并用装好电阻应力片的试件环对其进行侧限。将千分表及金属盖抵住试件,使其充分接触,测量并记录试件在试验过程中的轴向膨胀变形,同时,此过程中用万用表测定侧向膨胀力。

4) 待各试件72 h内不再发生膨胀变形,且应力也基本不变时终止试验,立即取出试件称重,记录此时质量 $m_1$ ,并通过式(2)计算试件在试验后的吸水率 $w_1$ 。

5) 再次将试件放入40℃恒温箱中烘干24 h以上,烘干试验后试件中的自由水,再次称重,记录此时质量 $m_2$ ,并通过式(3)计算试件在试验后的结晶水含水率 $w_2$ 。

$$m_w = m_s h = \frac{36}{136} m_0 h, \quad (1)$$

$$w_1 = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\%, \quad (2)$$

$$w_2 = \frac{m_2 - m_0}{m_0} \times 100\%, \quad (3)$$

式中: $m_s$ 为硬石膏完全水化的理论耗水量,由方程式 $\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 计算; $h$ 为表2中的岩水比例系数; $w_1$ 为吸水率; $w_2$ 为结晶水含水率。

表 2 不同浸泡水量的膨胀试验方案

Table 2 The expansion test scheme with different amount of soaking water

试件编号	岩水比例系数
$H_1$	0.062 5
$H_2$	0.125 0
$H_3$	0.250 0
$H_4$	0.500 0
$H_5$	1.000 0

### 1.3.2 硬石膏侧限膨胀吸水率时间特性试验

由于试验 1) 方案只能得到试验结束后试件的最终吸水率, 不能反映出各试件在吸水膨胀过程中水的转化情况。一方面, 考虑到初始湿度越大, 膨胀稳定所需时间越长。另一方面, 此试验为试验 1) 的延伸, 其中岩水比例系数以及终止时间的设置也是参考了试验 1) 的结果, 其吸水率变化具有代表性。因此, 采用 0.25 初始岩水比系数, 通过设置不同时间, 进一步研究硬石膏吸水膨胀过程中其内部水的转化情况。步骤如下:

1) 取多个试件进行试验, 设置如表 3 所示的时间梯度, 试验前 3 步与试验方案 1) 相同。

2) 待达到 1 d 试验时间, 取出试件  $D_1$ , 立即进行称重, 记录此时质量  $m_1$ , 并通过式 (2), 得出试件在试验后吸水率  $\omega_1$ 。

3) 再次将试件置于 40 °C 恒温烘干箱中烘干 24 h 以上, 并再次称重, 记录此时质量  $m_2$ , 并通过式 (3), 得出试件在试验过程中结晶水含水率  $\omega_2$ 。

4) 待达到 7, 14, 21, 28 d 试验时间, 分别取出相应试件, 重复试验步骤 (2)、(3) 操作。

表 3 不同膨胀时间试验方案

Table 3 The test scheme with different expansion time in 28 days

试件编号	岩水比例系数	终止时间/d
$D_1$	0.25	1
$D_2$	0.25	7
$D_3$	0.25	14
$D_4$	0.25	21
$D_5$	0.25	28

## 2 试验结果及分析

综合以上各试验, 对试验数据进行处理, 其结果如表 4 所示。

表 4 硬石膏侧限膨胀试验数据

Table 4 The testing data of anhydrite confined swelling

编号	岩水比例系数 $h$	时间 $t/d$	吸水率 $\omega_1/\%$	最大膨胀应变/ $\%$	最大膨胀应力/kPa
$H_1$	0.062 5	7	0.08	0.05	75.17
$H_2$	0.125 0	12	0.87	0.07	93.96

续表 4

编号	岩水比例 系数 $h$	时间 $t/d$	吸水率 $w_1/\%$	最大膨胀 应变/ $\%$	最大膨胀 应力/ $kPa$
$H_3$	0.250 0	24	1.61	0.11	163.76
$H_4$	0.500 0	30	1.65	0.13	193.29
$H_5$	1.000 0	47	1.74	0.16	236.24
$D_1$	0.250 0	1	0.42	0.07	34.90
$D_2$	0.250 0	7	1.31	0.10	104.70
$D_3$	0.250 0	14	1.59	0.12	139.60
$D_4$	0.250 0	21	1.56	0.13	147.65
$D_5$	0.250 0	28	1.60	0.14	163.76

注:表中编号含“H”的试件,其时间是不再膨胀的时间,而编号含“D”的试件,是预设的试验结束的时间;最大膨胀应变和最大膨胀应力,分别是试验停止时的轴向应变和侧向应力

## 2.1 浸泡水量对硬石膏膨胀特性的影响

### 2.1.1 浸泡水量对硬石膏吸水率影响

由于试验过程中硬石膏岩膨胀特性与吸水率直接相关,因此先对吸水率进行分析。图 4 为各浸泡水量下,硬石膏吸水率变化。各试件吸水率  $w_1$  及结晶水含水率  $w_2$  均随着岩水比系数  $h$  的增加而增大,两者增长率则先增大后减小,当  $h < 0.25$  时,待试验结束后取出试件并烘干,此时质量基本不变。当  $h = 0.25$  时,试验结束烘干试件,其前后质量( $m_1 - m_2$ )开始有较小变化,可见,此时试件内部开始含有少量自由水。当  $h > 0.25$  时,各试件内部自由水量有增大趋势。说明在浸泡水量设置较少时,硬石膏在膨胀过程中吸收的水主要转化为结晶水,随着浸泡水量的增加,还会以自由水形式存在。

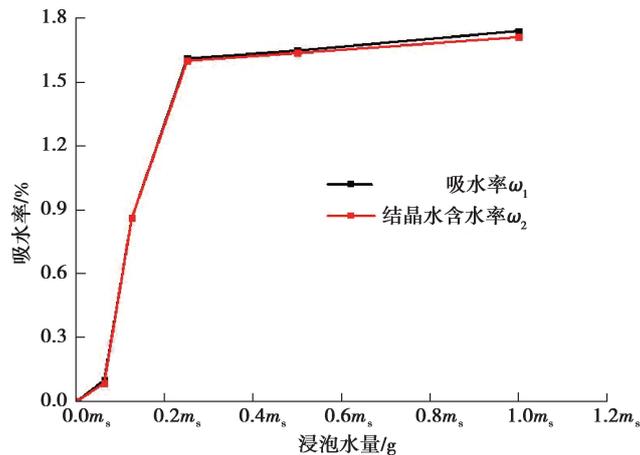


图 4 各浸泡水量下试件吸水率

Table 4 The testing data of anhydrite confined swelling

### 2.1.2 浸泡水量对硬石膏膨胀应变影响

由于对硬石膏试件进行了侧限约束,因此测量其轴向膨胀变形。以 1 d 为一个测量周期(为便于作图,此处以 10 d 为梯度),硬石膏岩膨胀应变结果如图 5 所示。试件在前 10 天应变变化最大,应变速率随时间减小。随岩水比系数  $h$  的增加,应变增长率体现出一定的阶段性, $h < 0.25$  时,硬石膏膨胀应变增长率逐渐增大,但当  $h = 0.25$  时,试件膨胀变形更为明显,应变增长率也开始明显减小,可以将其认为是应变随浸泡水量

变化的一个转折点。当  $h > 0.25$ , 膨胀应变变化更为缓慢并逐渐趋于稳定。

各试件稳定后的最终膨胀应变  $\epsilon_m$  不同, 且浸泡水量越多, 最终膨胀应变越大, 但稳定所需时间也更长。

### 2.1.3 浸泡水量对硬石膏膨胀应力影响

不同浸泡水量下, 硬石膏侧限膨胀应力结果如图 6 所示。同一时段下, 硬石膏膨胀应力随着水岩比系数  $h$  增大呈先快后慢型增长。当  $h$  达到 0.25 时, 试件膨胀应力增长率开始明显减小, 此时膨胀应力开始随浸泡水量增加变化更为缓慢并逐渐趋于稳定, 同样可以将其认为是膨胀应力随浸泡水量变化的一个转折点。

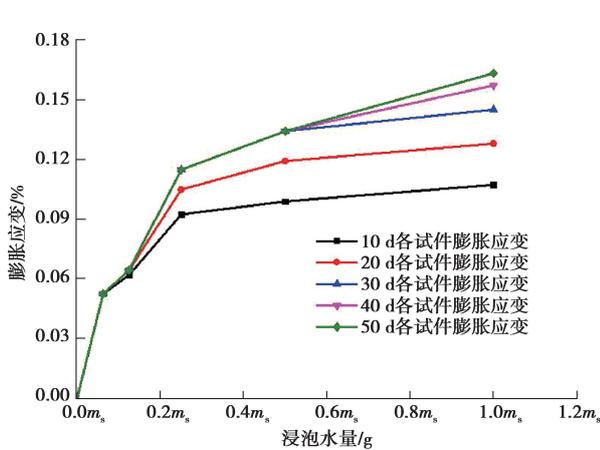


图 5 浸泡水量与膨胀应变关系

Fig.5 The relation between water amount and swelling strain

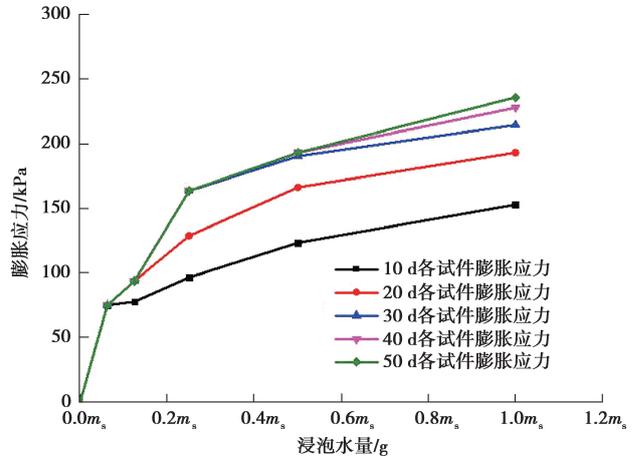


图 6 浸泡水量与膨胀应力关系

Fig.6 The relation between water amount and swelling stress

各试件最终膨胀应力  $\sigma_m$  随  $h$  增大而增大, 但达到应力稳定所需时间也越长。前 10 天各试件膨胀应力变化最大, 且均随着时间而增大, 变化速率则在减小, 并逐渐趋于稳定。

综上所述, 将试件与水置于气球中之后, 水与试件开始接触并渗入其内部, 使得各试件在试验前期均有较大膨胀变形。由于浸泡水量随着时间的增加而减少,  $h$  越小, 试件与水反应面积更小, 保持充分接触的时间也相对更短, 试件吸水率、膨胀应力及应变也率先开始变小, 当气球中已无水分存在时, 此类试件已不能表现出宏观物理吸水特性, 而且其化学膨胀也将停止。但当  $h \geq 0.25$  时, 达到(超过)膨胀应力及应变随浸泡水量变化的一个转折点, 试件与水反应面积更大, 充分接触时间更长, 相同时间段内, 试件仍能吸水膨胀, 使得各试件最终表现出相应的膨胀差异, 达到变形稳定所需时间也不同。因此试验后最终各试件吸水率、膨胀应力及膨胀应变不相同。

## 2.2 时间对硬石膏吸水率的影响

由于硬石膏试件在  $h = 0.25$  条件下, 前 7 天其吸水率变化更为明显, 因此前两天试验时间间隔设置更小, 之后以 1 d 为时间间隔, 对前 5 天的硬石膏吸水率试验进一步进行了补充, 补充后的硬石膏不同时间吸水率试验结果如表 5 所示。试验得吸水率  $w_1$  以及结晶水含水率  $w_2$  随时间变化如图 7 散点所示。可以看出, 试验过程中,  $w_1$  及  $w_2$  随时间逐渐增大, 增长速率则一直随时间减小, 当试件不再膨胀, 两者均不再变化。对试件进行烘干, 试件质量发生较小变化, 此时试件中只剩结晶水。需要说明的是: 岩石吸水膨胀过程中质量增加,  $m_1 - m_0$  为增加的水的质量, 这包括赋存于岩石表面、内部空隙中的自由水的质量, 以及硫酸钙水化反应增加的结晶水的质量。在  $40^\circ\text{C}$  条件下, 岩石只会失去自由水, 不会失去结晶水<sup>[13]</sup>。

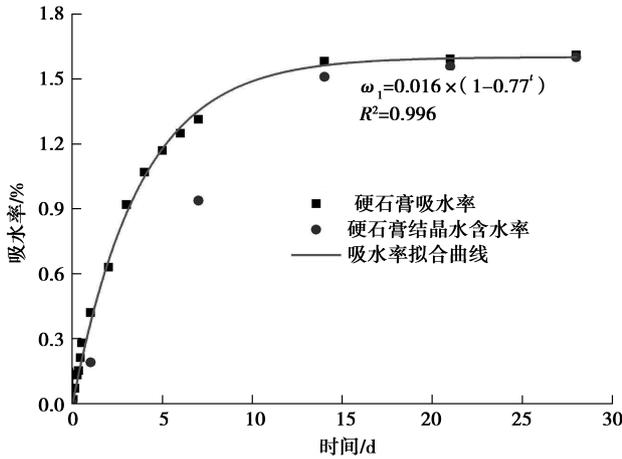


图 7 不同时间  $h=0.25$  试件吸水率

Fig.7 Bibulous rate of rock samples at different time with  $h=0.25$

表 5 不同时间下的硬石膏吸水率结果

Table 5 The results of anhydrite bibulous rate at different time

编号	岩水比例系数	试验时间/d	吸水率/%
$B_1$	0.25	0.040	0.02
$B_2$	0.25	0.333	0.15
$B_3$	0.25	0.500	0.28
$B_4$	0.25	1.040	0.41
$B_5$	0.25	1.250	0.44
$B_6$	0.25	1.333	0.51
$B_7$	0.25	1.500	0.54
$B_8$	0.25	2.000	0.63
$B_9$	0.25	3.000	0.92
$B_{10}$	0.25	4.000	1.07
$B_{11}$	0.25	5.000	1.17

综上所述,硬石膏吸水产生物理作用和化学反应,是导致其发生膨胀变形的根本原因,因此对硬石膏岩吸水率的时间效应进行了进一步研究。当时间趋于零时,岩石未吸水,且未发生化学反应,吸水率为零。但随着时间的增加,吸水率并不会无限增大,可以认为,当时间  $t$  趋向于无穷,吸水率也将趋于稳定。基于试验结果,进一步提出一种硬石膏岩的吸水率-时间模型,采用负指数函数的一般形式,见式(4),将其与试验数据进行拟合,得拟合结果如图 6 曲线。

$$\omega_1 = \omega_m (1 - a^t), \tag{4}$$

式中: $\omega_1$  为  $t$  时刻硬石膏吸水率; $\omega_m$  为最终吸水率; $t$  为时间; $a$  是吸水系数,是用于描述吸水快慢的参数。

### 3 硬石膏湿度应力场膨胀本构模型

#### 3.1 硬石膏湿度应力场本构模型

缪协兴等<sup>[14]</sup>受温度应力场理论启发,提出了湿度应力场理论,并得出了粘土类膨胀岩的膨胀本构关系如下:

$$\epsilon_{tot} = \epsilon_e + \epsilon_s = \frac{\sigma_e}{E} + \frac{\sigma_s}{E} = \frac{\sigma_e}{E} + \alpha \Delta w, \tag{5}$$

式中: $\epsilon_{tot}$  为湿度条件下的总应变, $\epsilon_e$  为弹性应变部分, $\epsilon_s$  为膨胀应变部分, $\sigma_e$  为弹性应力, $\sigma_s$  为膨胀应力, $E$  为弹性模量, $\alpha$  为线膨胀系数, $\Delta w$  为湿度变化。

式(5)中,潜在假设是:围岩膨胀阶段的变形模量与自身弹性模量相等(等式右半部分),即  $\epsilon_s = E\alpha\Delta w/E$ 。相较于粘土类岩石,硬石膏岩膨胀机理更复杂,膨胀时间更漫长<sup>[12]</sup>,同时,笔者的膨胀试验结果表明,此假设并不适用于硬石膏岩。对于礼让隧道硬石膏围岩,取 5 个代表性岩样进行力学试验,得其弹性模量结果如表 6 所示。根据前节试验,得不同变形模量计算结果如图 8 所示。其中,黑色实线及红色实线分别由表 6 中弹性模量最小值( $S_5$ )、红色实线为弹性模量最大值( $S_2$ )与侧限膨胀试验的膨胀应变乘积所得,可见,根据式(5)等式右半部分计算所得膨胀应力  $\sigma_s$  远大于试验所得膨胀应力结果。由上述分析结果,基于膨胀岩体湿度应力场理论基本假设,将硬石膏试件视为均匀各向同性介质体,此时试验测得侧向膨胀应力等同于轴向应力<sup>[15]</sup>,进而结合文献<sup>[16]</sup>,根据膨胀试验所得各试件最终膨胀应力与最终膨胀应变,定义膨胀模量,记作  $E_s$ ,其值如表 7,并得硬石膏相应的膨胀本构关系,如式(6)。

$$\epsilon_{tot} = \epsilon_e + \epsilon_s = \frac{\sigma_e}{E_e} + \frac{E_s \alpha \Delta w}{E_e}, \tag{6}$$

式中: $E_e$  代替  $E$  为弹性模量,取平均值; $E_s$  为膨胀模量。

表 6 硬石膏弹性模量试验结果

Table 6 The test results of elastic modulus of anhydrite

试件编号	弹性模量/GPa	均值/GPa
S <sub>1</sub>	4.39	—
S <sub>2</sub>	5.57	—
S <sub>3</sub>	4.06	—
S <sub>4</sub>	3.97	—
S <sub>5</sub>	2.71	—
—	—	4.14

表 7 硬石膏膨胀模量试验结果

Table 7 The test results of swelling modulus of anhydrite

试件编号	弹性模量/GPa	均值/GPa
H <sub>1</sub>	0.143	—
H <sub>2</sub>	0.145	—
H <sub>3</sub>	0.142	—
H <sub>4</sub>	0.144	—
H <sub>5</sub>	0.144	—
—	—	0.143 6

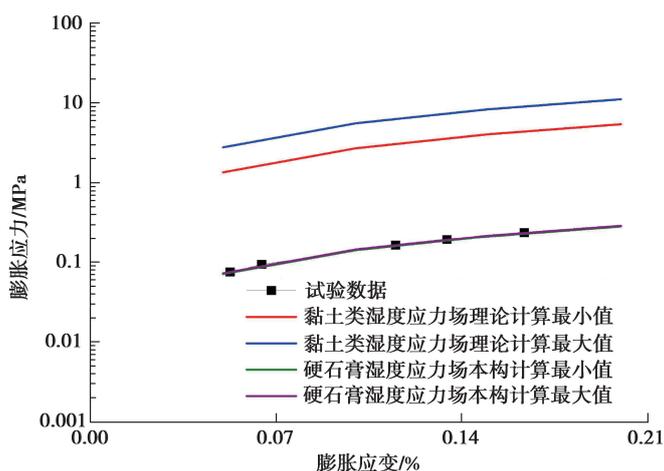


图 8 不同膨胀变形模量计算值与实测值对比

Fig.8 Comparison between calculated values and measured values of different deformation modulus

### 3.2 硬石膏湿度应力场时变本构模型

考虑围岩吸水过程中的动态非均匀膨胀,联立式(4)和(6),可得硬石膏岩湿度应力场时变本构模型

$$\varepsilon_{\text{tot}} = \varepsilon_e + \varepsilon_s = \frac{\sigma_e}{E_e} + \frac{E_s \alpha \omega_m (1 - a^{-t})}{E_e} \quad (7)$$

## 4 讨 论

1) 采用气球装载试件和水,形成了密闭空间,试验过程中,浸泡水量相对未密闭时蒸发速率减小;对于工程实际情况,地下水同样分布于密闭的岩层空间中,且仍然会有部分蒸发。本次试验采取的措施使其与现场工程实际情况较为符合。

2) 地下水是导致硬石膏岩膨胀的根本原因,排水后进行隧道开挖,在初期由于地下水的重新运移,此时围岩不均匀膨胀变形也最为明显,且易导致支护结构在支护初期出现受力不均的情况。另外,由于膨胀岩隧道开挖前需先进行钻探水措施,因此建议在隧道断面选取不同部位进行地下水钻探,根据各位置钻探水量来对施工期考虑围岩变形量进行支护设计,并对隧道探水量大的部位加强支护,有效指导施工。

## 5 结 论

1) 硬石膏吸水率  $\omega_1$  和结晶水含水率  $\omega_2$  均随岩水比系数  $h$  的增大而增大,二者增长率则先增大后减小,  $h < 0.25$  时,岩石吸收的水主要转化为结晶水;浸泡水量继续增加,岩石内部自由水含量逐渐增大。

2) 硬石膏岩吸水率  $\omega_1$  和结晶水含水率  $\omega_2$  均随时间的增加而增加,并逐渐趋于稳定,膨胀过程中吸水率与时间呈负指数函数形式增长。

3) 应变增长率先随岩水比系数  $h$  增大而增大, 膨胀应变速率则随时间减小, 当  $h=0.25$  时, 增长率明显减小, 最终膨胀应变  $\epsilon_m$  随  $h$  增大而增加, 膨胀应力与  $h$  表现出类似规律,  $h$  越大, 硬石膏膨胀稳定所需时间也越长, 体现了不同水量分布下硬石膏的膨胀不均匀性。

4) 对于硬石膏膨胀应变, 采用膨胀模量  $E_s$  代替弹性模量  $E$  进行计算, 推广得到适用于硬石膏类膨胀岩的湿度应力场理论, 并得出相应的湿度应力场时变本构模型。

#### 参考文献:

- [1] 刘晓丽, 王思敬, 王恩志, 等. 含时间效应的膨胀岩膨胀本构关系[J]. 水利学报, 2006, 37(2): 195-199.  
LIU Xiaoli, WANG Sijing, WANG Enzhi, et al. Study on time-dependent swelling constitute relation of swelling rock[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(2): 195-199. (in Chinese)
- [2] 蒲文明, 陈钊, 任松, 等. 膨胀岩研究现状及其隧道施工技术综述[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(S1): 232-239.  
PU Wenming, CHEN Fan, REN Song, et al. Research of swelling rock and summarize of tunnel construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(S1): 232-239. (in Chinese)
- [3] Azam S. Study on the geological and engineering aspects of anhydrite/gypsum transition in the Arabian Gulf coastal deposits[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2007, 66(2): 177-185.
- [4] Serafeimidis K, Anagnostou G. Simultaneous anhydrite dissolution and gypsum precipitation in a closed swelling rock system[C]//46th US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium, June 24-27, 2012, Chicago, Illinois. [S.l.]: American Rock Mechanics Association, 2012.
- [5] Butscher C, Huggenberger P, Zechner E. Impact of tunneling on regional groundwater flow and implications for swelling of clay-sulfate rocks[J]. Engineering Geology, 2011, 117(3): 198-206.
- [6] 刘艳敏, 余宏明. 白云岩层中硬石膏岩对隧道结构危害机制研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2704-2708.  
LIU Yanmin, YU Hongming. Research on mechanism of damage of anhydrock in dolomite layer to tunnel structure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2704-2708. (in Chinese)
- [7] Rauh F, Thuro K. Investigations on the swelling behavior of pure anhydrites[C]//1st Canada-U.S. Rock Mechanics Symposium, May 27-31, 2007, Vancouver, Canada. [S.l.]: American Rock Mechanics Association, 2007: 1-7.
- [8] Molina M. The anhydrite surface-cause of problems in tunnel constructions (new results based on measurements and observations) [C]// ISRM International Symposium - EUROCK 2010, June 15-18, 2010, Lausanne, Switzerland. [S.l.]: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010.
- [9] 郭印同, 杨春和. 硬石膏常规三轴压缩下强度和变形特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1776-1780.  
GUO Yintong, YANG Chunhe. Experimental investigation on strength and deformation properties of anhydrite under conventional triaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1776-1780. (in Chinese)
- [10] 季明, 高峰, 高亚楠, 等. 灰质泥岩遇水膨胀的时间效应研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(4): 511-515.  
JI Ming, GAO Feng, GAO Yanan, et al. Study on time-dependent effect of calcareous mudstone expansion after infiltrated with water[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(4): 511-515. (in Chinese)
- [11] 谭罗荣, 孔令伟. 膨胀土膨胀特性的变化规律研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1555-1559.  
TAN Luorong, KONG Lingwei. Study on variation regularity of swelling behavior of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10): 1555-1559. (in Chinese)
- [12] 任松, 邓高岭, 吴建勋, 等. 石膏岩淡水浸泡软化试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 1-8.  
REN Song, DENG Gaoling, WU Jianxun, et al. Immersion tests on gypsum rocks using fresh water[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(4): 1-8. (in Chinese)
- [13] 白冷, 彭家惠, 等. 天然硬石膏水硬化研究[J]. 非金属矿, 2008, 31(4): 1000-8098.  
BAI Leng, PENG Jiahui, et al. Study on hydration and hardening of natural anhydrite[J]. Non-Metallic Mines, 2008, 31(4): 1000-8098. (in Chinese)
- [14] 缪协兴, 杨成永, 陈至达. 膨胀岩体中的湿度应力场理论[J]. 岩土力学, 1993(4): 49-55.  
MIAO Xiexing, YANG Chengyong, CHEN Zhida. Humidity stress field theory in swelling rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 1993(4): 49-55. (in Chinese)
- [15] Einstein H. Suggested methods for laboratory testing of argillaceous swelling rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1989, 26(5): 415-426.
- [16] Pimentel E. Existing methods for swelling tests: A critical review[J]. Energy Procedia, 2015, 76(1): 96-105.