

文章编号: 1673-9469 (2017) 02-0026-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2017.02.006

## 引江济淮试验工程膨胀岩膨胀特性试验研究

曹雪山<sup>1,2</sup>, 张荣宽<sup>1,2</sup>, 李国维<sup>1,2</sup>, 袁俊平<sup>2</sup>, 吴建涛<sup>1</sup>, 张坤勇<sup>2</sup>

(1. 河海大学 道路与铁道研究所, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 100084)

**摘要:** 对引江济淮试验工程的膨胀岩进行膨胀特性试验研究。通过对膨胀岩重塑样进行无荷、有荷膨胀率及饱和直剪试验, 探究不同初始含水率和荷载下的膨胀率变化规律; 分析了膨胀率与初始膨胀速度、强度参数间的关系, 得出初始膨胀速度与最终膨胀率成二次函数正相关, 强度参数随膨胀率的增大而减小。

**关键词:** 膨胀岩; 膨胀率; 含水率; 荷载

**中图分类号:** TU411.3

**文献标识码:** A

## Test research of swelling properties of swelling rock in the Project of Diversion of Water from Yangtze to Huaihe River

CAO Xueshan<sup>1,2</sup>, ZHANG Rongkuan<sup>1,2</sup>, LI Guowei<sup>1,2</sup>, YUAN Junping<sup>2</sup>,  
WU Jiantao<sup>1</sup>, ZHANG Kunyong<sup>2</sup>

(1. Institute of road and railway, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Jiangsu Nanjing 100084, China)

**Abstract:** The swelling properties of remodeled swelling rock were carried out in the test section project of leading water from Yangtze to Huaihe River. By the test of free swelling ratio, swelling ratio under different pressure and saturated direct shear test, the properties of swelling ratio under different initial water content and different pressure were explored; the relationship between expansion ratio with initial expansion rate was analyzed. The conclusion show that initial expansion rate is quadratic positive correlated with expansion ratio, the strength parameters are negative correlated with expansion ratio.

**Key words:** swelling rock; expansion ratio; water content; pressure

引江济淮工程被列为国家近期加快推进的172项重大水利工程中1号工程, 号称“安徽版南水北调工程”。为指导优化引江济淮工程膨胀土(岩)段渠道工程设计, 开展了试验工程膨胀土(岩)项目研究工作, 意义重大。以往学者对膨胀岩的膨胀特性基本规律已作了一些研究。温春莲<sup>[1]</sup>对粘土质软岩膨胀的影响因素进行了原状样室内实验研究, 得出粘土质软岩的最大膨胀率与初始含水率呈线性负相关、与初始干容重呈正相关、与初始荷载呈负指数关系。刘静德等<sup>[2]</sup>对南水北调中线强膨胀岩重塑样进行了膨胀率实验和控制应变的广义膨胀力实验, 得出强膨胀岩的无荷载膨胀率与干密度和初始含水率呈线性关系; 广义膨胀力随膨胀应变的增加

而减小。朱珍德<sup>[3]</sup>等对膨胀红砂岩的膨胀率与吸水率的相关性进行了研究, 得出吸水率在0%~6%时膨胀力增长率较大, 随后至试样吸水饱和膨胀力增长率相对平缓。张计<sup>[4]</sup>、何晓民<sup>[5]</sup>等均通过试验得出膨胀岩重塑后的结构性发生破坏, 其胀缩特性比原状样要大得多。膨胀岩的强度参数受含水率影响较大, 含水率越大其非饱和强度参数越小, 非饱和强度参数比饱和强度参数大很多<sup>[6-8]</sup>。

本文针对引江济淮试验段较强崩解性的弱膨胀岩, 通过探究不同荷载和初始含水率对膨胀率的共同影响, 进一步揭示了膨胀率的变化规律; 同时提出了最终膨胀率与初始膨胀速度关系, 据此成果可以通过初始膨胀速度推断膨胀率值; 探究了膨胀率

收稿日期: 2017-01-18

基金项目: 河海大学中央高校基本科研业务费资助项目(2010B03414); 引江济淮试验工程项目(20168011716)

作者简介: 曹雪山(1970-), 男, 江苏海门人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事膨胀岩土、崩解岩、路基工程方面的研究。

大小对抗剪强度参数的影响,为工程实际提供参考。

## 1 试验岩样基本特性

试验岩样的取样地点是 K41+700 北岸一级坡顶,距地表约 20 m。原状岩样颜色呈暗红色,结构面发育明显,部分充填黑色铁锰质薄膜及少量白色钙质结核。遇水易软化,失水易产生开裂。天然的抗压强度较低,具有强崩解性。

岩样的物理力学性质指标及矿物成分分析结果见表 1 和表 2。该岩样的蒙脱石含量为 44%,根据《岩石与岩体鉴定和描述标准》<sup>[9]</sup> (CECS 239-2008) 蒙脱石含量 20%~30%,即具有强~弱膨胀潜势;自由膨胀率为 30%,但根据南水北调中线干线建设管理局发布的《南水北调中线一期工程总干渠初步设计工程勘察技术规定》(NSBD-ZGJ-1-16) 的规定:当岩石自由膨胀率 <40% 时,判断为非膨胀岩。因此从不同角度分析软岩的膨胀潜势,得出结果相差甚大,为掌握软岩的膨胀特性,还需通过膨胀性试验作进一步分析。

## 2 试验研究方案

试验采用人工制备重塑样及少量原状样。

重塑试样制备制作过程是将取自现场的岩样风干、碾碎,过 2 mm 筛;测量其含水率,计算掺水量,掺水后闷料 24 h,重新测取含水率值即可。每种含水率均以与现场原状岩样相同的干密度 1.69 g/cm<sup>3</sup> 计算试样原料用量。压样时将固结仪上的护环套在环刀上,将试样原料倒入后一次性压入环刀后即完成试样的制作。

原状环刀样的制备过程是在现场取回块状岩样后,通过角磨机、磨石机等切削成与环刀直径相同

的圆柱样,然后用内壁涂抹凡士林的环刀样套入圆柱样,将两侧多出的岩样切掉,即可制成原状膨胀岩环刀样。

有荷及无荷膨胀率试验的试样含水率取 11.33%、16.70%、19.47% 三种,每种含水率制备 8 个环刀样。每种含水率下施加土覆荷载 0、1、6.23、12.5、25、50、100、200 kPa。试验时首先在对对应荷载下固结至每小时变形不超过 0.01 mm,约 7 h 后加水,浸水时间 24 h。前 1 h 每 10 min 读数一次,后每 1 h 读数 1 次。

制备含水率分别为 11.33%、16.70%、19.47% 的重塑样,每种含水率 4 个。在 1 kPa 压力下浸水 24 h 后进行不固结不排水的快剪试验。制备初始含水率为 16.7% 的膨胀岩原状环刀样。在 1 kPa 压力下浸水 24 h 后,进行不固结不排水快剪直剪试验。

以上试验均按照《土工试验规程》<sup>[10]</sup> (SL237—1999) 的要求进行。

## 3 试验结果分析

### 3.1 膨胀率的影响因素研究

#### 3.1.1 初始含水率对膨胀率的影响

根据试验结果对不同荷载下的膨胀率与含水率的关系进行了拟合。图 1 是不同荷载时的膨胀率-含水率拟合曲线,其中拟合参数见表 3。

拟合曲线的表达为:

$$\delta_{ep} = aw + b \quad (1)$$

式中:  $\delta_{ep}$  为有荷膨胀率 (%);  $w$  为含水率 (%)。

从图 1 中可以看出,膨胀率随含水率成线性递减。这是由膨胀岩吸水膨胀、失水收缩的特性决定的。当初始含水率较低时,蒙脱石等矿物成分处于收缩状态,吸水膨胀的潜势大,吸水后的膨胀率大;当初始含水率较高时,蒙脱石等矿物成分已产生部

表 1 岩样物理力学性质

Tab.1 Physical and mechanical properties of rock sample

类别	密度 /g/cm <sup>3</sup>	含水率 /%	比重	孔隙比	自由膨胀率 /%	无荷膨胀率 /%	烘干状态下的无荷膨胀率 /%	饱和吸水率 /%	抗压强度 /MPa	耐崩解指数 /%
泥岩	2.01	18.68	2.5	0.479	30	4.23	38.25	39.28	1.4	1.2

表 2 岩样矿物成分组成

Tab.2 Mineral composition of rock sample

样品名称	蒙脱石	水云母	绿泥石	石英	长石	方解石	赤铁矿	单位 (%)
泥岩	44	9	2	27	12	4	2	

分膨胀,因此吸水膨胀的潜势相对较小,所以膨胀率也较小。

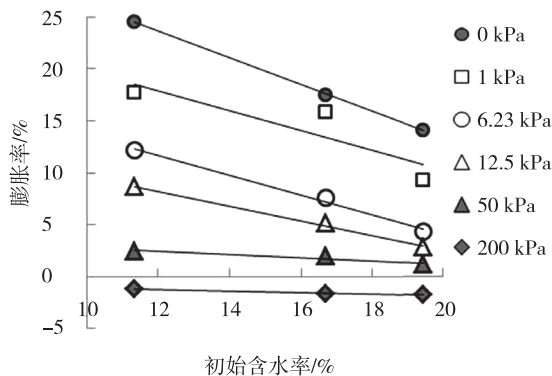


图1 不同荷载时膨胀率-初始含水率拟合曲线  
Fig.1 Expansion ratio-water content under different pressures

表3 膨胀率-初始含水率回归参数表

Tab.3 Parameters for expansion ratio-water content

荷载 /kPa	斜率 $a$	截距 $b$	相关系数
0	-1.29	39.05	0.99
1	-0.95	29.37	0.77
6.23	-0.94	22.90	0.99
12.5	-0.71	16.68	0.99
50	-0.16	4.30	0.90
200	-0.07	-0.37	0.97

由图1及表3可知,膨胀率与初始含水率的线性相关关系受荷载的影响。斜率 $a$ 的绝对值代表膨胀率随含水率的变化梯度。随着上覆荷载的增加, $a$ 的绝对值随荷载的增大而减小,表明膨胀率对含水率变化的敏感度随荷载的增加而减弱。随着荷载的增大,吸水产生的膨胀变形受到抑制,膨胀率减小,此时荷载是影响膨胀率的主要因素,因此荷载较大时不同初始含水率对膨胀率的影响较小。在自然界中,靠近表层的岩土体受大气影响较大,含水率变化较大,同时上覆荷载较小,易产生较大的膨胀变形。在边坡开挖过程中,应保持岩石内水分,如薄膜覆盖等,防止因水分散失过多而造成膨胀岩遇水后产生较大变形,同时应尽快施加荷载,如换填土等,减小含水率变化对膨胀变形的影响。

此外,通过图1的拟合曲线可以求出任意初始含水率时的膨胀率。当初始含水率为0时,通过图1的拟合曲线求得膨胀率 $\delta_{ep}$ 值为39.05%,该膨胀率值与烘干状态原状样的无荷载膨胀率39.28%很接近。当初始含水率 $w$ 为18.68%时,通过此拟合曲线所求膨胀率 $\delta_{ep}$ 值14.95%与原状样在相同初始

含水率下的无荷载膨胀率为4.23%相差较大。这是由于烘干状态下的原状岩样裂隙开展充分,崩解性也较强,水分能充分进入岩样,所以膨胀率与重塑样接近。而天然状态下的原状样含水率较高,无裂隙开展,水分难以进入,同时由于结构未受到破坏,颗粒之间的粘结性较强,因此膨胀率相对于重塑样较小。由此可知,膨胀岩重塑后的膨胀率会大大增加,因此工程中不宜将此岩样重塑后作为换填土覆盖。

### 3.1.2 上覆荷载对膨胀率的影响

荷载会抑制膨胀变形,荷载越大,膨胀率越小,当荷载大于膨胀力时,甚至会产生压缩变形。荷载与膨胀率的具体函数关系仍需进一步研究。由试验结果可知,不同含水率时膨胀率随上覆荷载的增加近似成指数关系减小,即在荷载较小时,增加很小的荷载,就能明显减小膨胀岩的膨胀变形。不同初始含水率下12.5 kPa时的膨胀率比0 kPa降低约65%~80%,50 kPa时的膨胀率比0 kPa降低90%~92%,其中初始含水率较高时,上覆荷载增加时膨胀率的降低比率更大。当产生相同膨胀率时,初始含水率较低时需要施加较大荷载。

根据不同初始含水率时的膨胀率试验结果,取荷载的自然对数作为横轴,膨胀率为纵轴进行半对数关系拟合,得到了膨胀率与荷载的半对数关系曲线,相关性较好。拟合曲线及参数见图2和表4。

拟合曲线表达式为:

$$\delta_{ep} = c \ln P + d \quad (2)$$

式中: $\delta_{ep}$ 为有荷载膨胀率(%); $P$ 为上覆荷载(kPa)。

膨胀率与荷载的半对数关系与土体压缩固结曲线<sup>[11-14]</sup>有一定的相似性,表明岩土体的压缩与膨胀均在荷载较小时对荷载的变化相对敏感。

由表4可看出,斜率 $c$ 的绝对值与截距 $d$ 均随

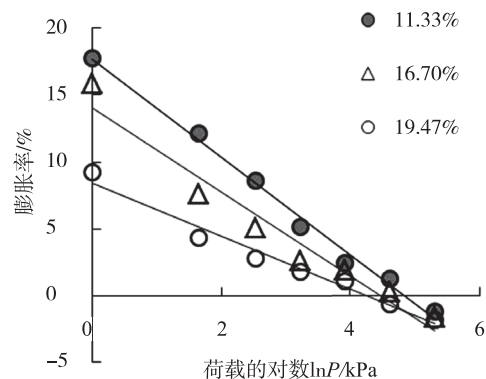


图2 膨胀率与荷载的对数拟合曲线  
Fig.2 Fitted curves of expansion ratio-logarithm of load

表 4 膨胀率与荷载的自然对数回归参数表  
Tab.4 Parameters for expansion ratio-logarithm of load

含水率 /%	斜率 <i>c</i>	截距 <i>d</i>	相关系数
11.33	-3.66	17.78	0.99
16.7	-3.15	14.06	0.96
19.47	-1.98	8.36	0.98

着含水率的增加而降低，但不同含水率下的半对数线性相关性均较好，表明不同含水率下膨胀率与荷载均成半对数关系。在实际工程中，浅层岩石若无上覆回填土层或其他加固措施，则易发生较大的膨胀变形。

### 3.2 膨胀率与膨胀速度的关系

膨胀岩浸水饱和后的最终膨胀率值  $\delta_{ep}$  除与初始含水率、上覆荷载、干密度、矿物成分、结构状态等因素相关外，与浸水膨胀的过程量初始膨胀速度  $v$  也存在一定的相关性。初始膨胀速度是膨胀初始阶段的速度。由于初始阶段的速度相对较大且有波动，因此宜用平均膨胀速度代替，这里采用前 10 分钟内的平均膨胀速度作为初始膨胀速度。

图 3 是初始膨胀速度  $v$  与最终膨胀率  $\delta_{ep}$  的关系曲线。曲线包括每个含水率、荷载条件下的膨胀速度和最终膨胀率，且增加了原状样烘干状态下的无荷载膨胀率 38.25% 及其初始膨胀速度 0.498 mm/min。为了能更清楚的展现初始膨胀速度与最终膨胀率的关系，将初始膨胀速度放大 100 倍，与最终膨胀率进行关系拟合。由拟合结果可知，初始膨胀速度随着最终膨胀率的增大而增大，二者近似成二次函数关系。

初始膨胀速度与最终膨胀率呈正相关是由于初始膨胀速度在一定程度上反映了岩样的膨胀潜势。

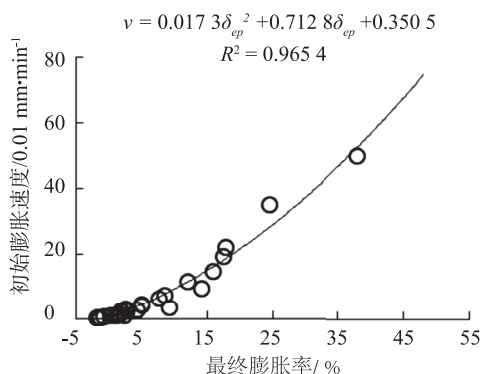


图 3 初始膨胀速度与最终膨胀率关系曲线  
Fig.3 Curve of the initial expansion rate-final expansion ratio

膨胀潜势较大时，初始膨胀速度也较大。在工程监测时，为了能通过短时间的监测，得出试验结果，就可以通过建立初始速度与最终膨胀率的关系来推断最终膨胀变形量大小。

### 3.3 膨胀率与饱和强度参数的关系

膨胀岩的抗剪强度与含水率状态、饱和度等密切相关。当发生一定的膨胀变形后，膨胀岩的干密度、含水率、饱和度等均产生变化，因此强度也会发生变化。

图 4 是饱和强度参数与膨胀率的关系曲线，可以看出随着膨胀率的增加，粘聚力和内摩擦角均减小，抗剪强度减小。当膨胀率由 9.2% 增加到 17.7% 时，粘聚力由 50.98 kPa 减小到 40.03 kPa，约衰减 21%；内摩擦角由 4.5° 衰减到 3.26°。这是由于发生膨胀后，干密度、孔隙比减小，含水率增大，岩样颗粒间的胶结力和摩阻力减小，造成强度参数减小。

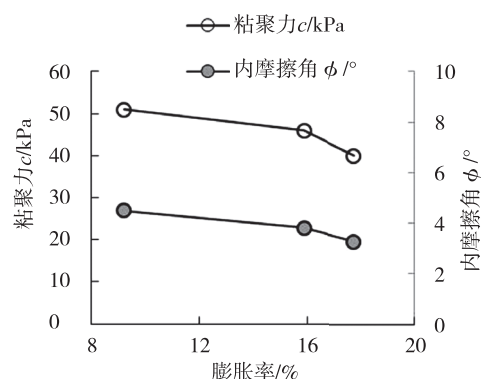


图 4 饱和强度参数与膨胀率的关系曲线  
Fig.4 Curves of saturated strength parameter-expansion ratio

由实验测得初始含水率为 16.7% 时原状样饱和后的粘聚力为 76.85 kPa，内摩擦角为 31.57°，二者均远远大于重塑样的强度参数，其中粘聚力是重塑样的 1.67 倍，内摩擦角是重塑样的 6.07 倍。表明原状样重塑后抗剪强度会大大减小。这是由于原状岩经过长期的固结成岩，胶结力较强。而重塑样虽然与原状样的干密度接近，但重塑样破坏了原状样的结构，胶结力降低，颗粒间的摩阻力也大大减小，因此重塑样的强度参数远小于原状样。

## 4 结论

1) 膨胀率与初始含水率呈线性正相关，膨胀率对含水率的敏感度随荷载的增加而 (下转第 49 页)

electric conductivity logs[J]. Journal of Hydrology, 2005, 3(10): 157-180.

- [4] SERGE BROUYÈRE, JORDI BATLLE-AGUILAR, Pascal Goderniaux, et al. A new tracer technique for monitoring groundwater fluxes: The Finite Volume Point Dilution Method[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2008, (95): 121-140.
- [5] TINGWU L, YAN Y, SHI X N, et al. Measuring velocity of water flow within a gravel layer using an electrolyte tracer method with a Pulse Boundary Model[J].

Journal of Hydrology, 2013, (500): 37-44.

- [6] 陈建生, 赵维炳. 单孔示踪方法测定裂隙岩体渗透性研究[J]. 河海大学学报, 2000, 28(3): 44-50.
- [7] 高正夏, 徐军海, 王建平. 同位素技术测试地下水流速流向的原理及应用[J]. 河海大学学报, 2003, 31(6): 655-658.
- [8] 任宏微, 刘耀炜, 孙小龙, 等. 单孔同位素稀释示踪法测定地下水渗流速度、流向的技术发展[J]. 国际地震动态, 2013, (2): 5-15.

(责任编辑 王利君)

(上接第29页)

减小, 即荷载较大时, 初始含水率对膨胀率的影响较小。

2) 不同含水率下膨胀率与上覆荷载均呈半对数线性相关关系。

3) 初始膨胀速度  $v$  与最终膨胀率  $\delta_{ep}$  呈正相关, 用二次函数拟合相关性较好, 在工程中通过应用此关系可由短期监测预测长期膨胀变形量。

4) 膨胀率与饱和抗剪强度参数呈负相关。重塑样的膨胀率及强度参数均大于原状样, 不宜将此膨胀岩重塑后作为回填土覆盖。

#### 参考文献:

- [1] 温春莲. 初始含水率、容重及荷载对膨胀岩特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报. 1992, 11(3): 304-311.
- [2] 刘静德, 李青云, 龚壁卫. 南水北调中线膨胀岩膨胀特性研究[J]. 岩土工程学报. 2011, 33(5): 826-830.
- [3] 朱珍德, 邢福东, 刘汉龙等. 红砂岩膨胀力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2011, 33(5): 826-830.
- [4] 张计, 黄斌, 饶锡保, 等. 结构性对膨胀岩膨胀特性

影响试验研究[C]. 兰州大学学报: 自然科学版. 2011, 47: 283-286.

- [5] 何晓民, 黄斌, 饶锡保, 等. 膨胀岩击实样胀缩特性试验研究[J]. 长江科学院院报. 2009, 26(11): 14-19.
- [6] 赵二平, 李建林. 南水北调中线膨胀岩膨胀特性试验研究[J]. 水资源与水工程学报. 2015, 26(1): 171-178.
- [7] 何建新, 刘亮. 膨胀岩抗剪强度特性研究[J]. 水资源与水工程学报. 2013, 24(6): 92-94.
- [8] 徐晗, 黄斌, 何晓民. 膨胀岩工程特性试验研究[J]. 水利学报. 2007: 716-722.
- [9] CECS 239-2008, 岩石与岩体鉴定和描述标准[S].
- [10] GB/T 50123-1999, 土工试验方法标准[S].
- [11] 曹雪山. 非饱和膨胀土的弹塑性本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 832-836.
- [12] 曹雪山, 殷宗泽, 凌华. 非饱和土受压变形的简化计算研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(1): 61-65.
- [13] 曹雪山, 殷宗泽. 非饱和土二维固结简化计算的研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2575-2580.
- [14] 曹雪山, 殷宗泽. 一维非饱和土固结简化计算的改进方法[J]. 公路交通科技, 2009, 26(10): 1-5.

(责任编辑 王利君)