

砂质泥岩互层结构重塑弱膨胀岩变形试验研究

Experimental Study on the Deformation of Weakly Expansive Rocks by Reshaping
the Interlayered Structure of Sandy Mudstone

陈剑锋, 徐保林, 钟佩, 班明才, 朱双云

(中南勘察基础工程有限公司, 武汉 430081)

摘要: 为探讨砂岩夹杂膨胀泥岩互层结构变形规律及对路基的影响, 对平层、斜层、竖层三种重塑砂岩与泥岩膨胀岩互层产状结构在不同层厚比、不同上覆荷载进行了室内模型试验和有限元模拟分析。结果表明: 产状、层厚比和上覆荷载对于互层结构膨胀岩变形的影响均较大, 层厚比和上覆荷载越大, 变形量越小, 平层产状影响最大, 竖层产状影响最小, 斜层产状影响居中; 当互层结构膨胀力大于上覆荷载时, 岩样处于膨胀变形, 当互层结构膨胀力小于上覆荷载时, 岩样处于压缩变形; 平层产状在 1:1、2:1 层厚比时, 膨胀力介于 12.5~25 kPa 之间, 其余情况均小于 12.5 kPa; 在最不利工况下, 平层、斜层、竖层三种互层结构对路基膨胀变形的影响长度分别为 60、30、20 m。

关键词: 砂岩; 膨胀泥岩; 层厚比; 产状; 上覆荷载; 膨胀力; 膨胀变形

中图分类号: U213.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 01-0055-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.01.011

CHEN Jianfeng, XU Baolin, ZHONG Pei, BAN Mingcai, ZHU Shuangyun

(Zhongnan Survey Foundation Engineering Co., Ltd., Wuhan 430081, China)

Abstract: In order to explore the deformation law of sandstone interbedded with expansive mudstone and its influence on roadbed, indoor model tests and finite element simulation analysis were conducted on the interbedded structure of reshaped sandstone and expansive mudstone in three different layers: flat layer, inclined layer, and vertical layer, under different layer thickness ratios and overlying loads. The results show that the attitude, layer thickness ratio, and overlying load have a significant impact on the deformation of interlayer structured expansive rocks. The larger the layer thickness ratio and overlying load, the smaller the deformation. The influence of the flat layer attitude is the greatest, the vertical layer attitude is the smallest, and the inclined layer attitude is in the middle; When the expansion force of the interlayer structure is greater than the overlying load, the rock sample is in expansion deformation. When the expansion force of the interlayer structure is less than the overlying load, the rock sample is in compression deformation; When the layer thickness ratio is 1:1 or 2:1, the expansion force ranges from 12.5 to 25 kPa, while in other cases it is less than 12.5 kPa; Under the most unfavorable working conditions, the lengths of the influence of the three layered structures of flat, inclined, and vertical layers on the expansion deformation of the roadbed are 60 m, 30 m, and 20 m, respectively.

Key words: sandstone; expansive mudstone; layer thickness ratio; attitude; overburden load; expansion force; expansion deformation

岩土力学

0 引言

膨胀岩具有吸水膨胀和失水收缩的特性,反复的膨胀和收缩变形会引发许多工程地质问题,如路面横向波浪变形、溅泥等问题,路堤病害主要集中在坍塌、滑坡等问题,路堑病害主要集中在侵蚀、剥落、滑坡、溜塌等问题^[1-4]。因此,对于膨胀岩的变形规律研究具有十分重要的工程意义。

一般而言,认为自由膨胀率大于30%的岩类即具有弱膨胀性,粉质黏土、泥岩等普遍具有弱膨胀性^[5-6]。左清军等^[7]通过试验发现,泥质板岩的膨胀变形具有明显的各向异性,随着结构面倾角的增大,膨胀稳定后的孔隙数量、面积和面孔率逐渐减小。范秋雁等^[8-9]对不同含水率膨胀土的膨胀特性进行了试验研究,均得出膨胀变形过程可划分为快速膨胀、缓慢膨胀和膨胀稳定3个阶段;魏存兰^[10]对单向顶部和单向底部两种浸水方式下土体膨胀变形进行了试验,得出平均渗透系数随深度增加均呈减小的变化趋势;段君义等^[11]研究了膨胀岩土浸水变形对无砟轨道铁路路基结构的影响,得出隆起变形在沿路基本体向上传递时存在变形衰减特点这一结论。由于在实际工程中,膨胀岩大多数时候并不是单独存在的,而是与其他岩类相互掺杂在一起,成互层结构,力学性质更加复杂,因而有必要对这类互层结构膨胀岩展开专项研究^[12-13]。龚军等^[14]通过现场实测,发现极高地应力软岩膨胀岩存在大变形问题,提出在该地质条件下,应采用增加临时仰拱、增长锚杆长度和加大支护刚度,配合加强超前支护、刚柔结合和增加预留变形量的施工措施,从而确保施工安全;何钰铭等^[15]基于现场调查,并结合室内试验,分析了砂泥岩互层结构的岸坡岩体劣化变形过程,并对砂泥岩互层岩体的劣化机理及其对岸坡致灾发展的影响程度进行了揭示;肖大强等^[16]等采用数值模拟方式,研究了均质砂岩、均质泥岩、砂泥岩互层结构的受力特性,法向砂泥岩互层隧道的应力、位移、塑性区变化介于砂岩和泥岩之间,当采用复合式衬砌支护方式时,可以有效保证隧道的稳定性。

砂质泥岩互层弱膨胀岩展开了不同产状、不同层厚比和不同上覆荷载的胀缩变形试验,相关试验

成果可为膨胀岩路基治理提供借鉴。

1 试验概况

1.1 弱膨胀岩理化特性

试验土样取自某高速公路工程路基中的岩样(砂岩夹泥岩),两种岩样呈互层结构,取样深度为2.5~3.4 m,将取回的样品密封带回试验室进行XRD测试,测得两种弱膨胀岩的主要成分均为石英,除此之外,泥岩中还含有亲水性很强的黏土矿物成分高岭石,故泥岩具有弱膨胀性(自由膨胀率>30%),而砂岩不具备弱膨胀性(自由膨胀率<30%)。两种岩样的基本理化性质见表1。

表1 试验岩样理化性质

岩样类型	天然含水率/%	天然密度 / (g/cm ³)	最优含水率/%	干密度 / (g/cm ³)	自由膨胀率/%
泥岩	19.2	2.07	21	2.47	34
砂岩	13.2	2.30	13	2.60	27

1.2 试验方案

将取回的岩样进行锤击、风干、粉碎和过筛,按照最优含水率进行搅拌击实,在模型箱中制成不同产状及层厚比互层结构,模型箱的内部空间净尺寸为0.475 m×0.44 m×0.6 m,重塑岩样示意如图1所示。

采用静压法配制好重塑互层结构土样,土样的层厚比(砂岩:泥岩)分别为1:1、2:1和3:1三种,每种层厚比下,又分为平层(倾角0°)、斜层(倾角30°)和竖层(倾角90°)三种,将制作好的9种互层结构土样在0、12.5和25 kPa荷载条件下进行浸水胀缩试验,探讨变形规律,试验方案见表2。

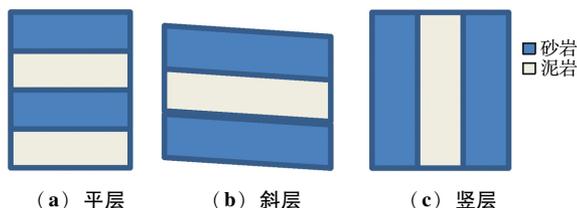


图1 重塑岩样产状示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reshaped rock sample orientation

1.3 试验流程

将制作好的土样装入固结仪中,并用滤纸盖住试样的上下表面,防止试验土样在浸水时发生脱落,在滤纸表面上放置透水石;向容器中注入蒸馏水使土样达到饱和;对土样逐渐加载至对应的荷载;往水

表 2 试验方案
Table 2 Test plan

试验编号	产状结构	层厚比	荷载/kPa
1	平层	1:1	0
2	斜层	1:1	0
3	竖层	1:1	0
4	平层	2:1	0
5	斜层	2:1	0
6	竖层	2:1	0
7	平层	3:1	0
8	斜层	3:1	0
9	竖层	3:1	0
10	平层	1:1	12.5
11	斜层	1:1	12.5
12	竖层	1:1	12.5
13	平层	2:1	12.5
14	斜层	2:1	12.5
15	竖层	2:1	12.5
16	平层	3:1	12.5
17	斜层	3:1	12.5
18	竖层	3:1	12.5
19	平层	1:1	25.0
20	斜层	1:1	25.0
21	竖层	1:1	25.0
22	平层	2:1	25.0
23	斜层	2:1	25.0
24	竖层	2:1	25.0
25	平层	3:1	25.0
26	斜层	3:1	25.0
27	竖层	3:1	25.0

槽中注满水，确保水面完全淹没土样至承载板表面，并在试验过程中及时补充水；通过激光位移传感器测量土样的变形情况，数据监测采集频率为 1 次/5 min（当监测时间超过 60 min 后，时间间隔适当延长），直至土样变形达到完全稳定为止。

2 试验结果分析

2.1 产状互层结构对变形的影响

以层厚比为 1:1、荷载为 12.5 kPa 的工况为例，三种不同产状互层结构岩样的变形规律如图 2 所示。当层厚比和荷载相同时，岩样产状对于膨胀变形有较大影响。当产状为平层时，在 0~5 min 内，膨胀变形量为 0；5~25 min 内，膨胀变形量迅速增大，并在 25 min 后达到稳定。当产状为斜层时，膨胀变形量相比平层而言很小，主要膨胀变形发生在 0~5 min，5~25 min 膨胀变形微弱增长，在 25 min 后也达到了稳定。当产状为竖层时，岩样整体呈压缩状态，说明

在此产状下，膨胀力小于 12.5 kPa，在 0~25 min 时，变形量缓慢增长；在 25~35 min 内，变形量迅速增大；35 min 后，变形量达到稳定。

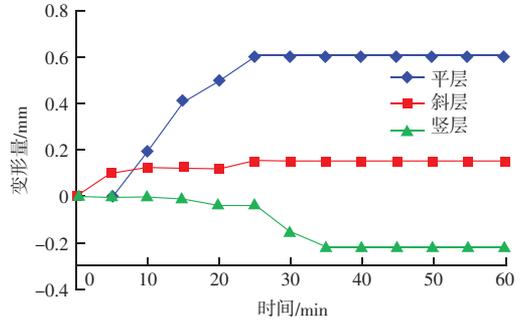


图 2 产状对互层结构对变形的影响
Fig. 2 The influence of attitude on interlayer structure and deformation

2.2 层厚比对变形的影响

以斜层产状、荷载为 12.5 kPa 的工况为例，三种不同层厚比岩样的变形规律如图 3 所示。当产状和荷载一致时，岩样层厚比对于膨胀变形的影响显著；当层厚比为 1:1 时，岩样属于膨胀变形，且膨胀变形量主要集中在 0~5 min，5~25 min 内的膨胀变形量增长较为缓慢，25 min 后，膨胀变形量达到稳定；当层厚比为 2:1 和 3:1 时，岩样处于压缩变形状态，说明在此层厚比下，岩样膨胀力已经低于 12.5 kPa，层厚比越大，压缩变形量越小，且达到稳定状态所用时间越短。

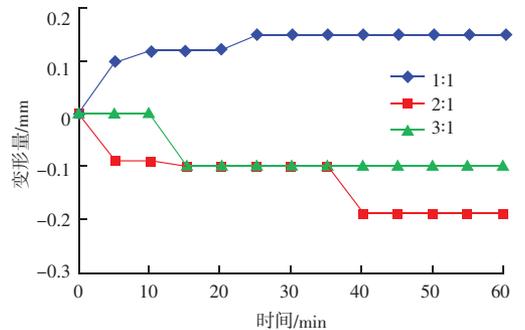


图 3 层厚比对变形的影响
Fig. 3 Effect of layer thickness ratio on deformation

2.3 荷载大小对变形的影响

以斜层产状、层厚比 1:1 的情况举例进行说明，三种不同荷载下岩样的变形规律如图 4 所示。当岩样产状和层厚比一定时，荷载对于变形量的影响亦十分显著，且随着荷载值的增加，岩样从膨胀变形逐渐向压缩变形转变。当荷载为 12.5 kPa 时，岩样尚处于微弱膨胀状态；而当荷载为 25 kPa 时，岩样就处于较

岩土力学

大的压缩变形状态,这说明,在斜层产状和层厚比 1:1 情况下时,岩样产生的膨胀力介于 12.5~25 kPa 之间,且更接近于 12.5 kPa;在无荷载情况下时,岩样达到稳定变形的时间远高于在 12.5 和 25 kPa 所用的时间,说明在荷载作用下,能够加速岩样达到变形稳定。

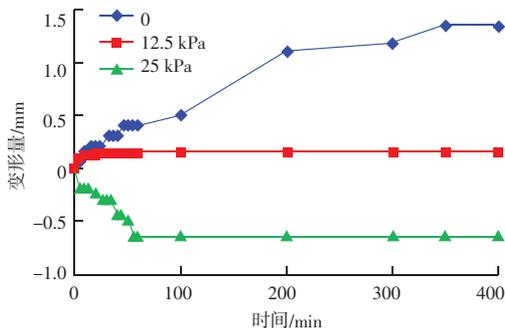


图4 荷载大小对变形的影响

Fig. 4 The influence of load size on deformation

2.4 最大变形量对比

对 27 组岩样的最大变形进行对比分析,结果如图 5 所示。在荷载和层厚比一定时,平层产状的岩样变形最大,其次为斜层产状,竖层产状的变形量最小。当层厚比为 1:1 时,三种产状的变形量相差较大,且为膨胀变形,当砂岩与泥岩的层厚比增大至 2:1 后,三种产状的变形量差距逐渐减小,且基本处于压缩变形。相同层厚比和产状时,随着荷载的增大,变形量逐渐由膨胀变形转变为压缩变形。当荷载为 0 时,9 组均呈膨胀变形;当荷载为 12.5 kPa 时,第 10、11、13、16 组为膨胀变形,其余 5 组均为压缩变形;当荷载增大至 25 kPa 后,所有试验组均为压缩变形;当荷载和产状一定时,随着层厚比增大,变形量也是呈逐渐减小的变化趋势。

岩样由膨胀变形转变为压缩变形的原因在于,互层结构中泥岩存在弱膨胀力(泥岩具有吸水膨胀变形的特性),泥岩的占比越高,膨胀力越大,膨胀变形量越大,当上覆荷载超过膨胀力后,互层结构便会表现出压缩变形。从试验结果来讲,当无上覆荷载时,不管砂岩与泥岩层厚比是多大,岩样均会表现出不同程度的膨胀特性。据此可以判断,平层产状在 1:1、2:1 层厚比时,膨胀力介于 12.5~25 kPa 之间;在 3:1 层厚比时,膨胀力介于 0~12.5 kPa 之间。斜层产状和竖层产状层厚比为 1:1、2:1 和 3:1

时,膨胀力均小于 12.5 kPa。

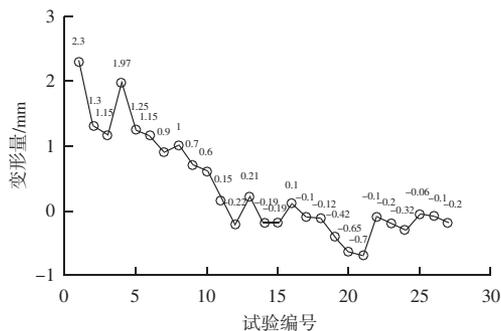


图5 不同岩样最大变形量对比

Fig. 5 Comparison of maximum deformation of different rock samples

3 数值模拟分析

3.1 数值模型构建

利用 ABAQUS 有限元软件构建铁路路基模型,模型尺寸为 90 m (长) × 10 m (深) × 8.6 m (宽,路基实际宽度),路基坡度取值为 1:1.5。砂岩的弹性模量取值为 34 GPa,泊松比为 0.18,黏聚力为 30 kPa,内摩擦角为 33.7°;泥岩的弹性模量取值为 4 GPa,泊松比 0.23,黏聚力为 11.3 kPa,内摩擦角为 25.7°,线性膨胀系数取值为 2.961×10^{-4} 。砂岩与泥岩按照 1:1 层厚比(最不利工况)进行分析,斜层、平层、竖层的长度取值均为 10、20、30、40、50、60、70 m,探讨不同长度下的膨胀变形量。构建的模型示意如图 6 所示。

3.2 模拟结果分析

对三种不同互层结构岩样的路基最大膨胀变形量模拟结果进行统计,结果如图 7 所示。随着长度的增加,路基最大膨胀变形量逐渐增大,平层变形量最大,斜层变形量次之,竖层变形量最小,这与试验结果一致。当长度增加到一定后,膨胀变形量将达到稳定状态。平层结构在长度达到 60 m 后,膨胀变形量达到稳定值 5.13 mm;斜层结构在长度达到 20 m 后,膨胀变形量达到稳定值 4.57 mm;竖层结构在长度达到 30 m 后,膨胀变形量达到稳定值 3.11 mm;由此可见,互层结构型式不同对于路基膨胀变形的影响长度也是不同的,平层结构的影响最长,其次为竖层结构,最小的为斜层结构。

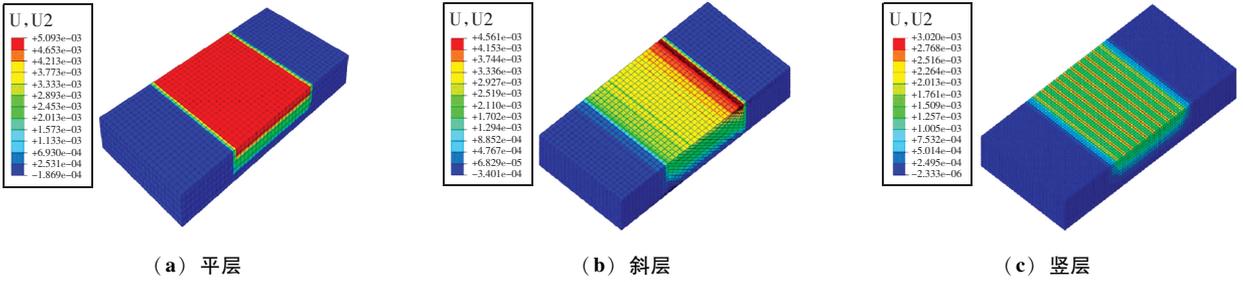


图6 互层结构有限元模型

Fig. 6 Finite element model of interlayer structure

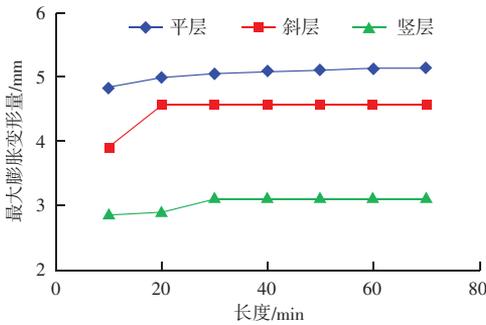


图7 最大膨胀量随长度的变化曲线

Fig. 7 Curve of maximum expansion with length

4 结论

(1) 砂岩与泥岩的层厚比越大, 变形量越小; 上覆荷载越大, 变形量逐渐越小; 平层产状的岩样变形最大, 其次为斜层产状, 竖层产状的变形量最小。

(2) 平层产状在 1:1、2:1 层厚比时, 膨胀力介于 12.5~25 kPa 之间, 在 3:1 层厚比时, 膨胀力小于 12.5 kPa; 斜层产状和竖层产状在 1:1、2:1 和 3:1 层厚比时, 膨胀力均小于 12.5 kPa。

(3) 互层结构型式不同对于路基膨胀变形的影响长度有所差异, 平层结构的影响最长 (60 m), 其次为竖层结构 (30 m), 最小的为斜层结构 (20 m)。

参考文献

[1] 田京飞, 冯伟, 赵丽朋. 南水北调中线禹长段膨胀岩渠坡处理技术分析 [J]. 人民黄河, 2019, 41 (增刊2): 72-74.

[2] 刁心宏, 洪鹏, 傅昱, 等. 膨胀岩相似材料水分迁移试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17 (1): 80-86.

[3] 程树范, 曾亚武, 叶阳, 等. 基于相对湿度场和变模量本构的岩土膨胀分析模型 [J]. 工程科学与技术, 2023, 55 (5): 99-

108.

[4] 刘景宇, 张千里, 郭浏奔, 等. 高速铁路地基石岩膨胀变形计算方法及应用研究 [J]. 中国铁道科学, 2023, 44 (1): 50-57.

[5] 于洪丹, 陈卫忠, 谭贤君等. 饱和过程中黏土岩变形和水化膨胀特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41 (增刊2): 3534-3542.

[6] 刘景宇. 时间效应下泥岩浸水膨胀本构模型研究 [J]. 铁道建筑, 2021, 61 (6): 94-98.

[7] 左清军, 李朝铭, 张中君等. 富水环境下泥质板岩膨胀演变各向异性特征研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41 (11): 2210-2224.

[8] 范秋雁, 梁昕, 韩进仕. 非饱和膨胀岩饱和度及胀缩特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39 (1): 45-56.

[9] 胡鹏飞, 骆行文, 卢正, 等. 不同初始含水率砂质泥岩膨胀特性试验研究 [J]. 公路, 2020, 65 (7): 256-261.

[10] 魏存兰. 不同浸水方式下泥岩膨胀变形及含水量变化规律研究 [J]. 铁道建筑技术, 2019 (7): 5-9, 35.

[11] 段君义, 杨果林, 刘洋, 等. 膨胀岩地基浸水条件下双线无砟轨道路基变形特性 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2020, 51 (1): 156-164.

[12] 陈志敏, 赵吉万, 龚军, 等. 软岩膨胀岩软化崩解特性 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (13): 5358-5365.

[13] 陈志敏, 朱炬. 砂泥岩互层边坡膨胀性泥岩力学性能试验研究 [J]. 路基工程, 2017 (3): 97-102.

[14] 龚军, 唐帅尧, 张丹峰, 等. 极高地应力软岩膨胀岩互层隧道大变形施工技术 [J]. 隧道建设 (中英文), 2021, 41 (增刊2): 485-493.

[15] 何钰铭, 彭正华, 石长柏, 等. 湖北省三峡库区砂泥岩互层岩体劣化特征与劣化机理分析 [J]. 中国资源综合利用, 2024, 42 (1): 34-37.

[16] 肖大强, 周易. 深埋软硬互层隧道施工变形破坏规律研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (1): 20-24, 46.