

川中红层泥岩时效膨胀变形特性试验研究

钟志彬^{1, 2}, 李安洪¹, 邓荣贵², 吴沛沛¹, 徐 骏¹

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 四川盆地及周边山地广泛分布俗称为“川中红层”的侏罗系泥岩, 是一种典型的软岩, 其强度低, 易风化崩解, 流变特性显著, 具有一定的膨胀特性, 是引起该地区多处高速铁路路基长期持续性上拱变形的一个重要因素。为揭示红层泥岩在浸水条件下的时效变形特性, 以川中红层典型泥岩为对象, 在室内开展原状岩样浸水物化膨胀性试验, 分析红层泥岩的吸水膨胀变形随时间的变化规律及其影响因素。试验结果表明, 常规膨胀性指标显示川中红层泥岩为非膨胀岩, 或仅具有弱膨胀性, 原状岩样吸水膨胀率较小, 但具有显著的时间效应; 采用类 Kelvin 体建立红层泥岩膨胀蠕变模型, 模型参数 K 和 η 可有效度量膨胀蠕变的极限应变及黏滞特性; 原状岩样的结构性是影响其吸水率的重要因素, 通过岩屑筛分试验获得最大含量组颗粒粒径 d_{\max} 、细粒和微粒质量占比 $\omega_{1.0}$ 和有效粒径 d_{10} 三个参数, 可以定量判断泥岩的吸水特性和膨胀特性, d_{\max} 越小、 d_{10} 越小、 $\omega_{1.0}$ 越大, 则泥岩的吸水率越大, 膨胀性越强。研究成果对川中红层泥岩地层高速铁路路基长期持续性上拱变形的机制认识及治理方案论证具有参考作用, 并为红层泥岩物理、水理及力学特性及其相互关系的定量研究提供基础。

关键词: 岩石力学; 红层泥岩; 膨胀; 蠕变模型; 吸水率; 原状岩样结构性

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2019)01 - 0076 - 11

Experimental study on the time-dependent swelling characteristics of red-bed mudstone in Central Sichuan

ZHONG Zhibin^{1, 2}, LI Anhong¹, DENG Ronggui², WU Peipei¹, XU Jun¹

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: The Jurassic red-bed mudstone, widely distributed in Sichuan basin and the peripheral mountains and named as Sichuan Central Red-bed, is a typical kind of soft rock with low strength, easily weathering and disintegrating, notable rheology and slightly swelling, and taken as one of the most important factors resulted in the upheaval deformation of some high speed railway subgrade sections. In order to reveal the time-dependent swelling characteristics of red-bed mudstone under soaking condition, the expansion tests were carried out on typical Central Sichuan red-bed mudstone samples, and the hydrophil expansion deformation of red-bed mudstone with time and the influence factors were analysed. The results show that as indicated by the conventional swelling index, the selected red-bed mudstone is non-swelling or weakly swelling, and that the water-absorption expansion rate is low but time-dependent significantly. A swelling creep model of red-bed mudstone was proposed based on the Kelvin system, in which the creep parameters, K and η , can effectively quantify the ultimate swelling strain

收稿日期: 2018 - 07 - 19; **修回日期:** 2018 - 09 - 13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41272321, 51808458); 中国博士后科学基金资助(2018M640934)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 41272321 and 51808458) and China Postdoctoral Science Foundation(Grant No. 2018M640934)

作者简介: 钟志彬(1988 -), 男, 2017 年于西南交通大学岩土工程专业获博士学位, 现为博士后, 主要从事岩石力学、路基工程方面的研究工作。E-mail: zzb2007@163.com。通讯作者: 李安洪(1965 -), 男, 现任教授级高级工程师。E-mail: liyd4321@com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0861

and viscous properties during creeping, respectively. The structure of undisturbed rock samples is an important factor influencing the water-absorption. The grain size of the maximum content group, d_{\max} , the weight ratio of fine and micro particles, $\omega_{1.0}$, and the effective particle size, d_{10} , obtained through the sieve tests, can quantitatively evaluate the water-absorption and swelling characteristics of red-bed mudstone. The smaller d_{\max} and d_{10} , the larger $\omega_{1.0}$ is and as a result, the water-absorption and swelling are stronger. The research work can provide a reference for revealing the long-term upheaval mechanism and demonstrating the treatment scheme of high speed railway subgrade Sichuan Central red-bed mudstone, and also laid a basis for the further quantitative research of red-bed mudstone on the physical, hydraulic and mechanical properties and their relationships.

Key words: rock mechanics; red-bed mudstone; swelling; creep model; water-absorption rate; structure of undisturbed rock samples

1 引 言

红层是一种外观以红色为主色调的陆相高温及氧化环境中沉积的碎屑岩地层, 主要形成于侏罗系和白垩系。我国红层分布总面积约 826 389 km², 其中南方红层约占全国总面积的 60%, 尤其是西南地区红层分布广泛, 占全国总面积的 33%, 是我国红层分布最多地区^[1-2]。红层以泥岩、砂质泥岩和砂岩为主, 其中泥岩的工程性质最差, 其强度低、颗粒易破碎、遇水易软化、崩解、易风化, 具有一定的膨胀性和显著的流变性^[3-5]。近年来, 川中红层泥岩地层修筑的高速铁路部分深挖路堑及隧道基底出现持续上拱变形现象, 而高速列车的安全运行要求路基变形控制在毫米级以内, 同时无砟轨道对上拱变形调节空间又十分有限(仅 4.0 mm), 使得红层泥岩路基上拱变形成为高速铁路工程建设面临的又一个新的难题。

泥岩的膨胀性是引起路基持续上拱的一个不可忽略的因素。红层泥岩主要由蒙脱石等黏土矿物和石英、长石等碎屑矿物成份组成^[6-8], 亲水性黏土矿物是软岩吸水膨胀的物质基础。为此, 红层泥岩的吸水膨胀特性一直以来都备受关注。如胡文静等^[8]对重庆地区侏罗系中统沙溪庙组泥岩开展了侧限有荷膨胀和无荷膨胀试样, 研究了侧限、荷载及加水条件对红层泥岩膨胀性的影响规律; 胡安华等^[9]对达成客运专线沿途广泛分布的红层泥岩开展了自由和有荷膨胀率试验; 魏永幸等^[3]对四川盆地红层泥岩开展了较为系统的膨胀性试验研究; 殷跃平和胡瑞林^[7]结合黏土矿物含量分析了三峡库区巴东组红层泥岩的膨胀性。一方面, 由于红层泥岩本身含有一定的黏土矿物成份, 具备吸水膨胀的物质基础, 使得研究人员特别关注其膨胀性及膨胀变形有可能对工程结构造成的影响; 另一方面, 从这些研究成

果来看, 无论是从矿物成份及含量还是常规膨胀性试验指标分析, 大部分红层泥岩达不到典型膨胀岩(土)的标准, 或仅具有弱膨胀性^[3, 7-9]。

泥岩的膨胀性其实是水和应力释放共同作用下的一种长期复杂物理化学变化过程^[10], 膨胀潜势是与时间有关的复杂过程参数^[11]。一些学者开展了部分软岩膨胀变形时间效应的研究工作。C. L. Zhang 等^[12]通过对 2 种泥岩的吸水膨胀性试验发现, 泥岩膨胀变形规律与吸水过程有关, 浸水条件下膨胀应变首先快速增大, 然后缓慢增大, 并趋于稳定; 王贤能等^[13]基于南昆线膨胀岩的膨胀性试验结果认为, 膨胀岩的膨胀过程其实是一个流变过程; 朱珍德等^[14]对南京红山窑第三系红砂岩开展了不同荷载及吸水条件下的原状岩样膨胀性试验, 结果显示, 红砂岩吸水膨胀应变在较短的时间内基本完成, 随着时间的延长, 膨胀变形将趋于稳定, 并通过分段函数拟合分析了红砂岩膨胀性与吸水率和时间的相关关系; 王萍等^[15]认为膨胀岩石吸水不只是瞬时发生的, 而是一个随时间增长的过程, 为此采用黏性元件模拟泥页岩吸水膨胀的时间因素, 建立了泥页岩在水化环境下的非线性膨胀蠕变模型; 刘晓丽等^[16]引入时间效应, 提出了岩石浸水非稳定膨胀本构关系, 并认为应力一定的情况下, 岩石的体积膨胀应变应随时间变化, 实际工程中可以将岩石遇水膨胀问题转换为岩石流变问题。典型膨胀岩吸水膨胀变形通常在短时间内即完成, 一些弱膨胀性泥岩和砂岩的膨胀变形则表现出显著的时间效应现象, 但是, 由于这种时效膨胀变形量值有限而变形过程复杂, 在常规工程领域还未引起足够重视, 相关研究成果也十分有限。

以往对红层泥岩膨胀性的研究大多从膨胀岩(土)判定方法出发, 通过开展常规膨胀性试验获得泥岩膨胀性指标, 进而指导工程建设。这对普速铁路工程建设是适用的, 因为普速铁路有砟轨道变形

调节能力强，弱膨胀性泥岩吸水产生的微小膨胀变形并不会对列车安全运行造成影响，也无需关注其时效膨胀变形^[17]。但是，对变形控制要求极高的高速铁路无砟轨道，毫米级的上拱变形对于线路的安全运行都将是严重的灾害。然而，当前鲜有针对红层泥岩开展时效膨胀变形特性的研究，传统岩石膨胀性试验及相应指标很难解释川中红层地区高速铁路深挖路堑和隧道基底出现持续上拱变形的内在机制。

为此，本文以四川盆地广泛分布的典型红层泥岩为研究对象，开展不同初始含水率和侧限条件下原状泥岩试样的长期物化膨胀变形试验。从泥岩膨胀变形特征、吸水率、岩屑破碎程度等角度，建立川中红层泥岩膨胀蠕变模型，并分析影响泥岩时效膨胀变形的因素及规律。研究成果将为红层泥岩地区高速铁路工程设计提供参考，同时为川中红层泥岩的水-力耦合流变模型的建立奠定基础。

2 川中红层泥岩基本物理力学性能

试验用红层泥岩取自四川盆地侏罗系中统上沙溪庙组(J2s)泥岩夹砂岩地层(以下称“川中红层”)，位于川中平缓低褶皱带，单斜构造，近水平岩层。泥岩主要为紫红色，夹部分灰绿色，泥质结构，泥质胶结；砂岩为灰绿色，中细粒结构，钙质胶结，如图1所示。现场新鲜开挖泥岩及砂岩外观完整，节理、裂隙不发育，暴露很短时间即可在大块石表面观察到细微网状裂隙，风化速度较快。

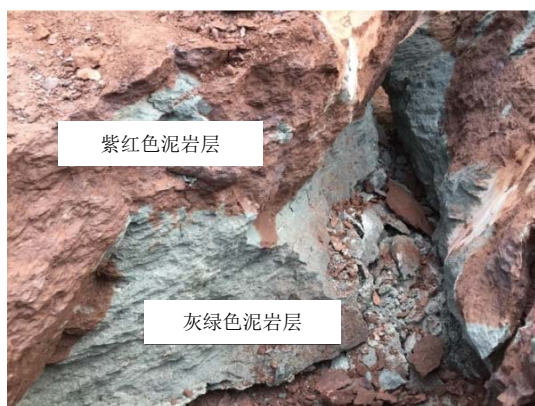


图1 典型川中红层泥岩
Fig.1 The typical Central Sichuan red-bed mudstone

在现场采集新鲜开挖的完整泥岩大块石，采用保鲜膜及防震泡沫板包裹后小心运回实验室，确保泥岩保水并且无显著二次裂隙。室内制取直径为50 mm、高100 mm标准圆柱形原状泥岩试样，用于物化膨胀变形试验。同时，依据《工程岩体试验方法

标准》(GB/T 50266—2013)方法测定采样区泥岩基本物理力学性能及膨胀性指标，测试结果显示，该红层泥岩平均密度为2.49 g/cm³，平均天然单轴抗压强度为10.39 MPa，平均天然含水率为4.3%，平均饱和吸水率约17.03%，重塑样(岩粉)平均自由膨胀率25.09%，平均膨胀力49.69 kPa。根据《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001)、《膨胀土地区建筑技术规范》(GB50112—2013)及《铁路工程岩土分类标准》(TB10077—2001)对膨胀岩的判定标准，采样区红层泥岩为非膨胀岩。

作为一种典型的黏土类膨胀岩，泥岩的膨胀性取决于黏土颗粒的粒间或晶间膨胀，黏土矿物含量越高，膨胀率也就越大。为获得该红层泥岩矿物成份，特别是蒙脱石、伊利石和高岭石等膨胀性黏土矿物的含量，试验前选取紫红色和灰绿色两类典型泥岩样品10~20 g，烘干、研磨、过0.05 mm筛，进行X射线衍射(XRD)测定其矿物成份及含量。表1为2种泥岩XRD矿物分析结果，图2为紫红色泥岩XRD分析能谱图。可以看出，2种颜色泥岩主要矿物成份相近，黏土矿物均以伊利石为主，分别占46.1%和48.9%，灰绿色泥岩伊利石含量略大，其次为石英、长石和绿泥石，紫红色泥岩含5.2%的赤铁矿。可以看出，对于本试验所采用川中红层泥岩，典型的亲水性黏土矿物伊利石含量较大，已经达到膨胀岩标准，表明川中红层泥岩具备吸水膨胀变形的物质基础。

表1 泥岩 XRD 矿物分析结果

Table 1 XRD mineral analysis results of mudstone

泥岩	矿物含量/%							
	伊利石	石英	钠长石	赤铁矿	沸石	正长石	斜绿泥石	钙长石
紫红色	46.1	23.2	9.3	5.2	-	-	10.10	6.10
灰绿色	48.9	32.5	15.3	-	0.10	3.20	-	-

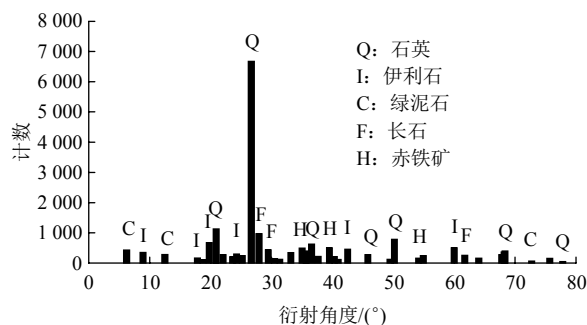


图2 紫红色泥岩 XRD 测试结果
Fig.2 XRD results of fuchsia mudstone

由于膨胀岩的膨胀变形较膨胀土复杂，目前还没有针对膨胀岩的统一判定标准，大多参照膨胀土

指标对岩石的膨胀潜势进行判定。根据部分指标界定的非膨胀岩并不能认为就不具有膨胀性，而仅能说明其膨胀变形在特定试验条件下尚不足以对常规建筑、普速铁路等工程构成显著的影响。但是，对于变形要求更加苛刻的高速铁路工程或者在岩体赋存环境、本身结构发生改变后，就可能成为“膨胀岩”。

3 原状岩样膨胀性试验设计

川中红层泥岩是一种典型的软岩，极易风化，遇水崩解、失水收缩开裂，并且岩石内初始隐微裂隙发育。尽管室内在大块石中钻取岩样过程中仅用极少量的水用于钻具降温，但依然很难制取大量完整的标准试样，特别是灰绿色泥岩，大多在钻进过程中即碎裂或崩解。最后，选取 7 个完整标准岩样，其中紫红色泥岩试样 4 个(编号 R - 1~R - 4)，灰绿色泥岩试样 2 个(编号 G - 1, G - 2)，灰绿色夹紫红色泥岩试样 1 个(编号 GR - 1)，均在无上覆荷载作用下监测试样在完全浸水情况下的长期膨胀变形规律。

(1) 为考虑吸水率对膨胀变形的影响，将其中 2 个试样(紫红色泥岩 R - 3 和灰绿色泥岩 R - 2)预先置于烘箱中 105 °C 烘干 24 h 至恒重，取出置于干燥器中 24 h 自然冷却。经过烘干处理后的试样表面没有出现明显的扩展裂隙，试样保持完整。干燥试样和天然含水率试样用于开展浸水膨胀性试验。

(2) 侧向约束方面，考虑侧向刚性约束的 R - 4 试样通过圆形钢管进行约束，钢管表面沿环向和竖向总共预留 24 个直径 10.0 mm 圆孔，便于浸水过程中试样通过预留孔均匀吸水(见图 3(a))。对于无侧向约束情况，考虑到泥岩吸水易崩解，采用 2 层保鲜膜包裹试样，并同样在保鲜膜上预留 24 个孔，便于试样均匀吸水(见图 3(b))。保鲜膜为极柔性透明材料，伸长率大，且水稳定性好，长期浸水过程中，在不影响泥岩试样物理力学性能的情况下可以有效

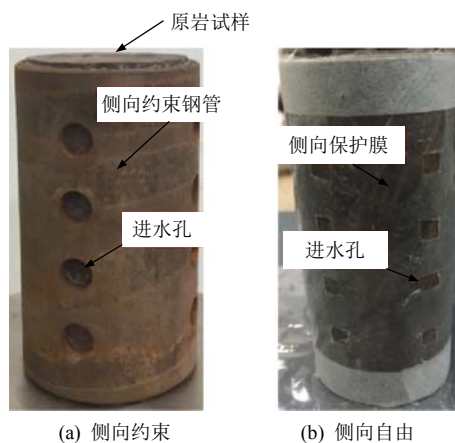


图 3 原状岩样侧向约束情况

Fig.3 Lateral restraint condition of undisturbed samples

保护试样充分吸水，并且对试样约束力极小，不会影响试样的侧向膨胀变形。试验条件及分组如表 2 所示。

采用自行制备的原状泥岩试样浸水膨胀变形试验设备开展试验，试验过程中试样完全浸没在水中，试样底部和顶部各放置一块透水石。试样竖向膨胀变形量通过顶部 2 个数显千分表测量后取平均值获得，在试样高度中间部位的 2 个径向数显千分表测量值求和作为试样径向膨胀变形值(见图 4)。鉴于原状岩样吸水速率较慢，为研究其长期变形特征，借鉴岩石蠕变试验稳定标准，即试样轴向和径向变形值小于 0.001 mm/d，且总计浸水试验时长不少于 100 h，认为膨胀变形稳定，排水停止试验，取下试样，最后测定试验后试样含水率，并进行岩屑筛分试验。

4 试验结果及分析

4.1 川中红层泥岩膨胀特性与蠕变模型

以初始天然含水率、无侧限约束情况下的 G - 1 试样吸水膨胀试验结果(见图 5)为例分析典型川中

表 2 物化膨胀试验结果
Table 2 Experimental results of soaking swelling

编号	侧限	$w_0/\%$	$w_f/\%$	$w_a/\%$	$\varepsilon_t/\%$	$s_{24h}/\%$	$s_{100h}/\%$	$s_{200h}/\%$	K	η	R^2
R - 1	无侧限	3.06	11.48	8.42	4.78	96.82	99.79	-	4.671	1.324	0.991
R - 2		3.06	4.87	1.81	0.89	89.61	93.45	97.74	0.842	0.724	0.964
G - 1		2.97	6.70	3.73	1.93	76.64	89.64	95.51	1.723	0.338	0.946
GR - 1		5.57	8.60	3.03	1.84	90.53	97.83	-	1.611	1.136	0.904
R - 3		0.00	13.35	13.35	5.30	97.74	99.38	-	5.169	3.107	0.990
G - 2		0.00	14.94	14.94	5.71	95.66	99.82	-	5.587	0.969	0.984
R - 4		侧限约束	5.19	8.92	3.73	1.80	96.06	98.53	-	1.772	1.574

注： w_0 为初始试样含水率； w_f 为试验结束后试样含水率； w_a 为吸水率； ε_t 为稳定时竖向总膨胀应变； s_{24h} ， s_{100h} 和 s_{200h} 分别为 24，100 和 200 h 对应竖向膨胀应变占总竖向膨胀应变比率。

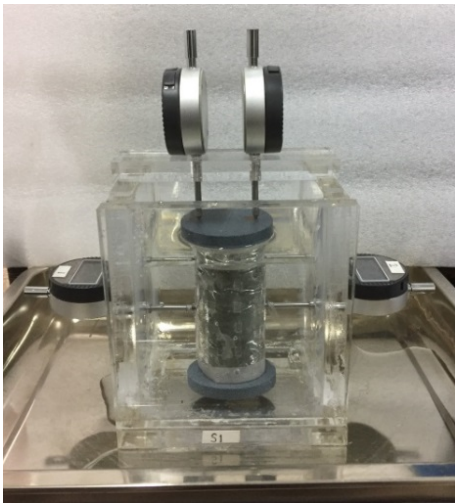


图4 原状泥岩试样膨胀性试验装置

Fig.4 Experimental apparatus of swelling for undisturbed mudstone samples

红层泥岩的时效变形规律。从图5中可以看出，浸水初期岩样吸水膨胀速率极快，但很快趋于稳定。试样浸水后竖向和径向变形规律一致，表现出显著的3个膨胀变形阶段：OA段为加速膨胀变形阶段，试样浸水后短时间(0.5 h)内竖向和径向均急剧膨胀变形，膨胀速率较大；AB段为减速膨胀变形阶段(约170 h)，经过短时的加速膨胀变形后，试样膨胀变形速率显著减小，但依然处于膨胀变形中；BC段为稳定变形阶段，此阶段试样膨胀变形速率趋于0，竖向和径向基本不再膨胀变形，随着浸水时间的增长(时长1104 h)，试样变形值不再增大。

其余6组试验具有相同的膨胀变形规律，但是，由于侧向千分表在长期泡水过程中进水失效，造成部分试样径向膨胀变形数据缺失，同时从图5可以看到，试样径向膨胀变形规律与竖向膨胀变形规律一致，因此，以下仅对各试样竖向膨胀变形规律进行对比分析。

由以上分析可知，川中红层泥岩在无上覆荷载

条件下的物化膨胀变形规律具有显著的时间效应，表现出类似于岩石在荷载作用下的蠕变过程。事实上，泥岩的物化膨胀也是一种蠕变过程，它是岩石内黏土矿物吸水后颗粒间膨胀力作用下表现出的宏观膨胀变形随时间变化的过程。借鉴岩石蠕变的元件模型，可以采用弹性体元件(H 体)模拟吸水膨胀的准瞬时变形(OA 段)，黏性膨胀变形(AC 段)采用黏性元件(N 体)模拟，根据图5所示膨胀蠕变规律，将两元件并联可以得到反映川中红层泥岩物化膨胀变形过程的蠕变模型(见图6)，参照 Kelvin 模型可得膨胀蠕变方程：

$$\epsilon(t) = K(1 - e^{-\eta t}) \tag{1}$$

式中： $\epsilon(t)$ 为与时间相关的膨胀应变， t 为时长， K 和 η 为与岩石本身物理力学性能有关的参数。

由式(1)可知，当 $t = 0$ 时，膨胀应变 $\epsilon = 0$ ，对应试验初始自然状态；当 $t \rightarrow \infty$ 时， $\epsilon \rightarrow K$ 为定值，则参数 K 的物理意义为岩石浸水后最终稳定膨胀应变值。参数 η 的存在使膨胀变形从初始自然状态达到稳定值 K 的过程变长，也即参数 η 可以视为吸水膨胀黏滞系数。

采用式(1)对全部7组物化膨胀试验数据进行拟合，获得拟合参数 K 和 η ，拟合曲线如图7所示。另外，根据试验稳定膨胀变形判定标准，获得了各试样不同时刻膨胀应变、最终稳定总膨胀应变及含水率变化数据，试验结果及曲线拟合参数列于表2。从表2可以看出，膨胀蠕变模型曲线拟合相关系数 R^2 均大于0.9，表明具有较好的相关性。

对比拟合参数 K 与试验获得的稳定总膨胀应变 ϵ_1 (见图8)，代表试样最终稳定膨胀应变的参数 K 与试验结果吻合，误差均小于5%，表明参数 K 可以用于描述泥岩膨胀蠕变的最终总膨胀应变。作为黏滞特性的参数 η 应该与试样膨胀稳定过程相关，同时考虑到试样初始含水率及侧限条件的影响，

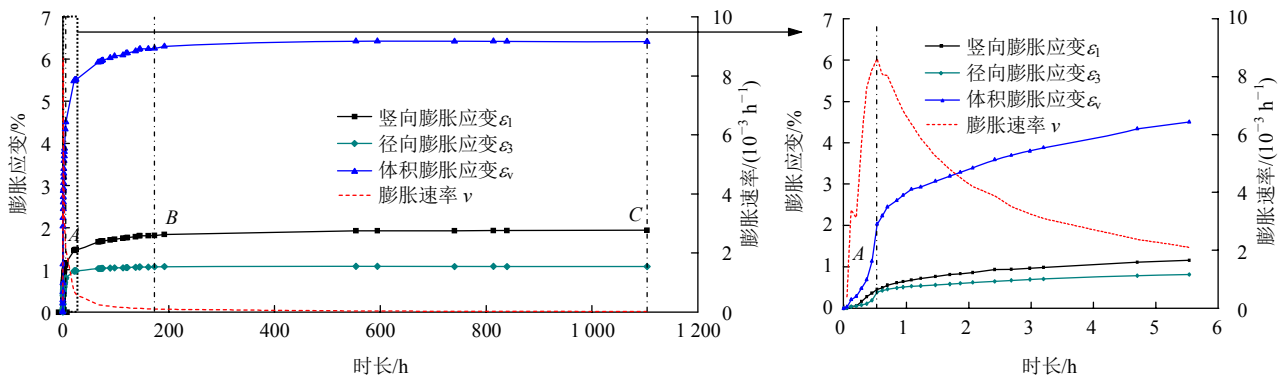


图5 G-1 试样长期膨胀变形曲线

Fig.5 Long-term swelling deformation curves of G-1

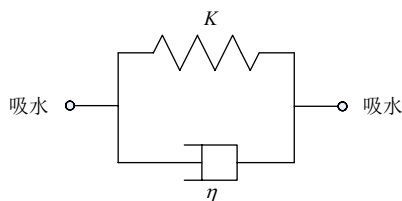


图 6 泥岩吸水膨胀蠕变模型

Fig.6 Soaking swelling creep model of mudstone

选取初始同为天然含水率状态、无侧向约束条件下的 R - 1, R - 2, G - 1 和 GR - 1 四组试验下的 24 h 膨胀应变占最终总膨胀应变的比率 s_{24} , 对模拟拟合参数 η 进行分析(见图 9)。从图 9 中可以看出, 总体上 s_{24} 随参数 η 的增大而增大, 即随着黏滞系数 η 的增大, 试样膨胀稳定速率变快。表明, 模型中参数 η 可以有效描述泥岩吸水膨胀变形的黏滞特性。因此, 式(1)所示泥岩膨胀蠕变模型中, 参数 K 和 η 分别用于描述泥岩吸水膨胀变形的总膨胀应变及膨胀过程的时间效应现象具有明确的物理意义。

进一步对试样膨胀变形速率进行分析, 从表 2 中试样 24, 100 和 200 h 膨胀变形量占总膨胀变形量比率的试验结果可以看出, 不同初始含水率、不同侧向约束试样, 24 h 膨胀变形量 s_{24h} 大部分达到 90% 以上, 100 h 膨胀变形量 s_{100h} 基本达到 93%(除 G - 1 试样), 200 h 以内膨胀变形量全部达到 95% 以上。表明, 标准原状岩样在实验室浸水条件下, 吸水膨胀变形速率较快, 浸水后短时内即完成大部分膨胀变形, 后期蠕变变形量有限, 并最终趋于稳定。

结合吸水膨胀蠕变模型及室内原状岩样膨胀试验结果, 可以总结川中红层泥岩膨胀蠕变具有以下特点:

(1) 膨胀蠕变具有典型的三阶段特征: 加速膨胀阶段、减速膨胀阶段和稳定膨胀阶段, 浸水后瞬

时变形速率快、量值大, 后期蠕变变形量有限, 最终变形趋于稳定;

(2) 膨胀蠕变过程可以采用弹性元件和黏性元件并联的类 Kelvin 模型进行模拟, 可以有效描述川中红层泥岩吸水的时效膨胀变形特性;

(3) 膨胀蠕变稳定的最终总膨胀应变 ϵ_t 由蠕变模型的应变参数 K 进行描述, 膨胀过程的时间效应由蠕变模型的黏滞参数 η 进行描述, 膨胀蠕变模型中 2 个参数具有明确的物理意义。

事实上, 不仅川中红层泥岩吸水膨胀变形具有显著的时间效应, 测定黏土质岩石的膨胀变形需要几天时间, 对含无水石膏的岩石而言, 甚至可能需要几年的时间^[18]。

4.2 原状岩样吸水率与膨胀性的关系

泥岩物化膨胀的本质是组成岩石的黏土矿物吸水, 产生体积膨胀的过程, 同时, 膨胀过程受岩石本身结构特征及外部环境因素的影响, 包括岩石本身裂隙发育特征、初始含水率、约束状态等^[8, 12-14, 19-25]。本试验采用同一场地采集的泥岩开展, 不考虑各试样矿物成份及含量的差异, 分析岩样吸水率和结构特征与其长期膨胀变形特征的关系。

胡文静等^[8, 12, 22-25]对泥岩初始含水率与其膨胀变形的影响规律开展研究, 结果表明, 对于相同岩石, 初始含水率越小, 膨胀性越大。然而, 相同初始含水率的原状岩样, 也会表现出明显不同的膨胀变形特性, 这与其吸水率不同有关。

图 10 选取无侧向约束下不同吸水率 3 组膨胀性试验结果曲线进行对比分析, 其中 R - 1 和 R - 2 组为天然试样, 初始含水率相同($w_0 = 3.05\%$), 但试验结束后 R - 1 组试样吸水率显著大于 R - 2 组, 其总膨胀应变也显著大于 R - 2 组; R - 3 组为初始干燥

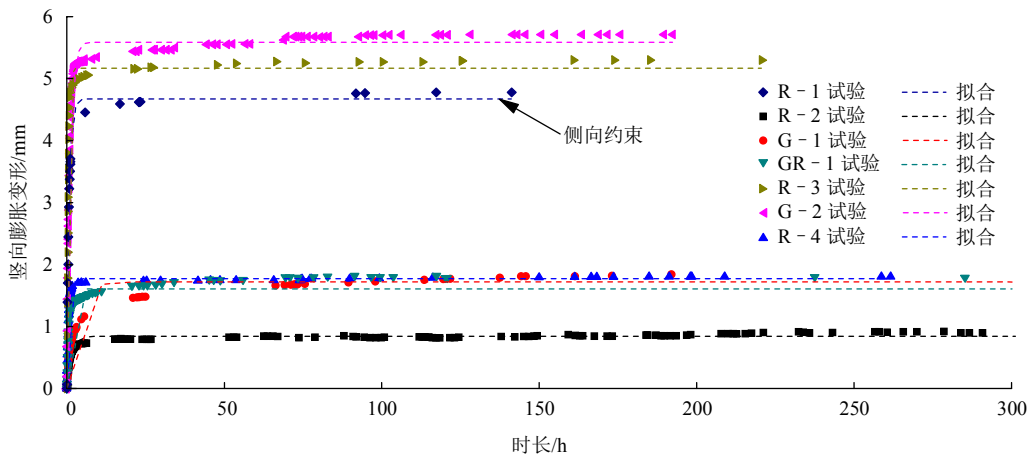


图 7 膨胀蠕变试验数据拟合

Fig.7 Fitting of swelling creep data

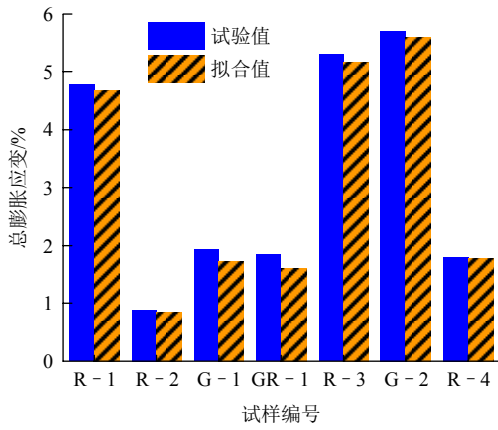


图8 总膨胀应变对比

Fig.8 Comparisons of the total swelling strain

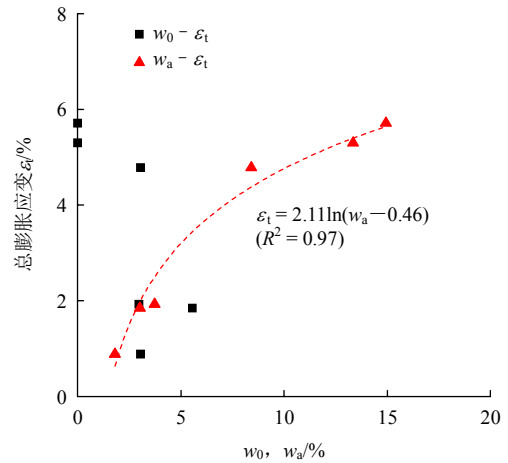


图11 初始含水率和吸水率影响对比

Fig.11 Influence of the initial water-content and the water-absorption on the total swelling strain

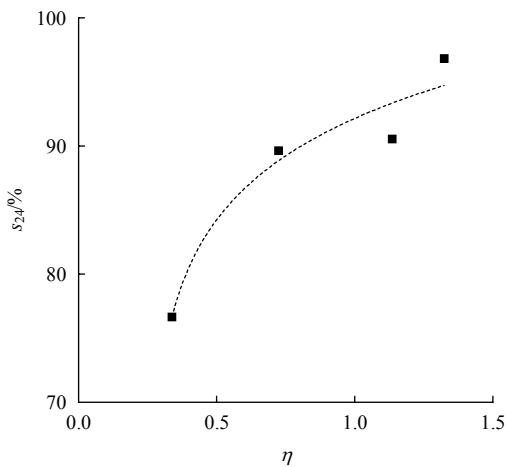


图9 参数η与24h膨胀应变比率关系

Fig.9 Relationship between η and s_{24}

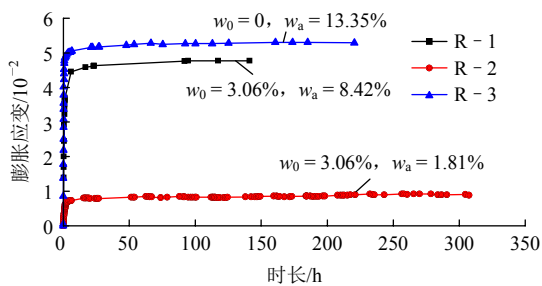


图10 吸水率影响分析

Fig.10 Influence of water-absorption

试样($w_0 = 0$), 试验后吸水率最大($w_a = 13.35\%$), 总膨胀应变也最大。类似地, G-1(天然含水率 $w_0 = 2.97\%$)与 G-2(干燥 $w_0 = 0$)组具有相同的规律。图 11 对比了无侧限约束 6 组试验初始含水率 w_0 和吸水率 w_a 与总膨胀应变 ε_t 的关系。可以看出, w_0 与 ε_t 没有明显的相关性, 而 ε_t 明显随着 w_a 的增大而增大, 对数函数拟合相关系数 $R^2 = 0.97$, 两者具有较强的相关性。表明, 吸水率更适用于评价川中红层泥岩物化膨胀特性。这是由于川中红层泥岩仅具有弱膨

胀性, 物化膨胀变形量较小, 并且, 试验采用原状岩石试样, 长期浸水也很难达到理想的饱和状态, 相同初始含水率的不同试样内部裂隙发育特征存在差异, 造成吸水量不同, 测得的膨胀变形量也就不同。从而, 采用吸水率评价其物化膨胀变形特性更加合理。

4.3 原状岩样结构特征对膨胀变形的影响

完整泥岩本身渗透系数极小, 浸水后水分大多通过岩石内发育的隐微裂隙渗透, 并与泥岩中黏土矿物发生物理化学反应, 引起体积膨胀。具有相同矿物成份及含量、相同初始含水率的泥岩试样(如 R-1 与 R-2 组), 在相同条件下吸水率及膨胀应变差异较大, 这可能是因为 2 个试样具有不同的微结构特征, 即初始微裂隙发育程度不同, 吸水过程出现差异, 从而造成最终膨胀变形量的显著差异。对于具有相同黏土矿物及含量的不同岩样, 隐微裂隙越发育, 岩石吸水越充分, 引起的膨胀变形越充分, 膨胀变形速率也越快。因此, 通过原状岩石隐微裂隙发育程度可以间接评价泥岩的膨胀性。

已有大量研究成果表明, 结构性是岩石作为一种天然地质材料的重要特征, 也是影响岩石物理力学性能的重要因素。然而, 由于很难对岩石内微裂隙进行准确的统计和分析, 目前鲜有研究关注泥岩结构特征对其膨胀性能的影响规律。为此, 将各泥岩试样浸水膨胀稳定后小心取下(由于有保鲜膜及钢管保护, 可以很容易收集破碎岩屑), 放入烘箱, 105 °C 烘干 24 h 至恒重, 然后进行筛分试验, 筛径分别为 20, 10, 5, 2, 1, 0.25 和 0.075 mm, 测量各筛子上余留岩屑质量(见图 12)。将岩屑按照粒径大小划分为粗粒($r \geq 10.0$ mm)、中粒(1.0 mm $\leq r <$

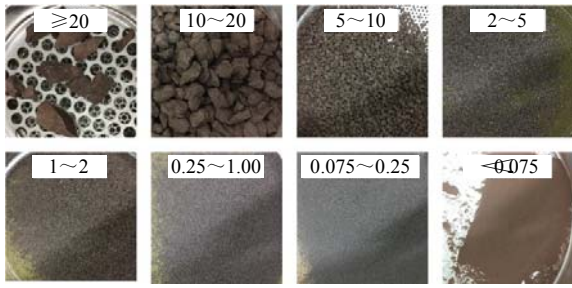


图 12 膨胀试验后岩屑筛分(单位: mm)

Fig.12 Sieving of rock debris after expansion tests(unit: mm)

10.0 mm)、细粒(0.075 mm ≤ r < 1.0 mm)和微粒(r < 0.075 mm)。表 3 为各试样试验后岩屑颗粒筛分结果, 图 13 为岩屑颗粒筛分曲线, 可以看出:

表 3 岩屑颗粒筛分结果

Table 3 Grain screening results of rock debris

编号	$w_a/\%$	$\varepsilon_t/\%$	d_{max}/mm	$\omega_{d_{max}}/\%$	$\omega_{1.0}/\%$	d_{10}/mm
R-1	8.42	4.78	5~10	53.8	3.2	1.38
R-2	1.81	0.89	≥20	95.2	0.4	10.54
G-1	3.73	1.93	10~20	36.8	5.9	1.21
GR-1	3.03	1.84	≥20	62.6	0.5	5.66
R-3	13.35	5.30	5~10	50.1	10.0	0.36
G-2	14.94	5.71	10~20	40.6	8.3	0.56
R-4	3.73	1.80	10~20	74.7	1.0	2.83

注: d_{max} 为岩屑最大含量组颗粒粒径; $\omega_{d_{max}}$ 为对应于 d_{max} 的质量占比; $\omega_{1.0}$ 为粒径小于 1.0mm 颗粒质量占比; d_{10} 为有效粒径。

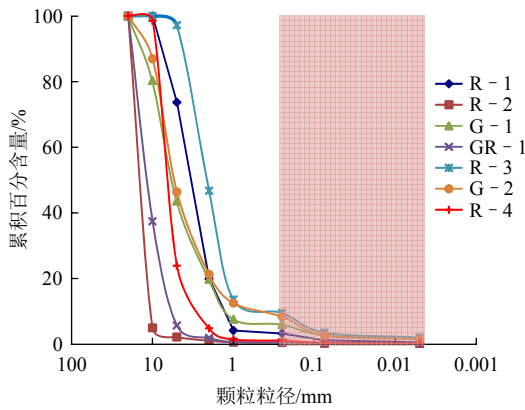


图 13 岩屑颗粒筛分曲线

Fig.13 Grain screening curves of rock debris

(1) 筛分曲线均为前段陡峭后段平缓, 表明岩屑以粗粒和中粒为主, 岩屑最大含量组颗粒粒径 d_{max} 全部为粗粒和中粒, $r < 1.0$ mm 的细粒和微粒质量占比 $\omega_{1.0}$ 都不超过 10%, R-2 组最小, $\omega_{1.0}$ 仅为 0.4%。

(2) 对比 R-1, R-2 和 R-3 三组试样, R-2 组 d_{max} 最大(≥20), 且对应的 $\omega_{d_{max}}$ 达到 95.2%, 粒径小于 1.0 mm 的细粒仅占 $\omega_{1.0} = 0.4\%$, 试验后岩屑

几乎全部以粗颗粒出现, 其总膨胀变形应变最小(仅 0.89%), R-1 和 R-3 组具有相同的 d_{max} , 且对应于 d_{max} 的岩屑质量比例 $\omega_{d_{max}}$ 也相近, 但 R-3 组的细粒和微粒比例 $\omega_{1.0}$ 显著大于 R-1 组(细粒含量较大), 因此 R-3 组总膨胀应变也大于 R-1 组。表明, 岩屑最大含量组颗粒粒径越大、细粒和微粒含量越小, 总膨胀应变越小, 即岩石越破碎、微裂隙发育程度越大, 膨胀变形量越大。

(3) 有效粒径 d_{10} 可以用于间接表征岩屑的吸水特征, 图 14 为试验后岩屑有效粒径 d_{10} 与其吸水率 w_a 的关系。可以看出, 有效粒径越大, 岩样吸水率越小, 两者存在较好的幂函数相关性。结合图 7 可知, 岩屑有效粒径越小, 岩样膨胀性越强, 这与张巍等^[26]对泥岩崩解颗粒与其膨胀性能的研究结果一致。

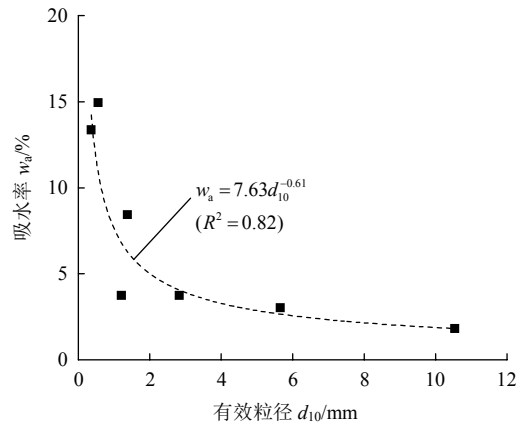


图 14 岩屑有效粒径与吸水率关系

Fig.14 Relationship between the effective grain size of rock debris and the water-absorption

以上分析表明, 可以综合采用岩屑最大含量组颗粒粒径 d_{max} 、细粒和微粒占比 $\omega_{1.0}$ 和有效粒径 d_{10} 三个岩屑筛分数据判断原状岩样的吸水特性和膨胀特性, d_{max} 越小、 $\omega_{1.0}$ 越大、 d_{10} 越小, 则岩石微裂隙发育程度越大, 泥岩的吸水率也就越大、膨胀性越强。

4.4 侧限对膨胀变形的影响

侧向刚性约束的存在, 使得原状岩样在吸水过程中侧向不能产生膨胀变形, 而只能转向轴向膨胀变形。从图 6 中 R-4 组试样膨胀变形曲线可以看到, 与初始同样为天然含水率的试样相比, 侧向约束后泥岩轴向膨胀变形明显增大, 但依然小于初始干燥 R-3 和 G-2 组试样。对比吸水率相同侧向自由的 G-1 组试样和侧向约束 R-4 组试样, 两者的体积应变, 从图 15 可以看出, 侧向约束后试样的体

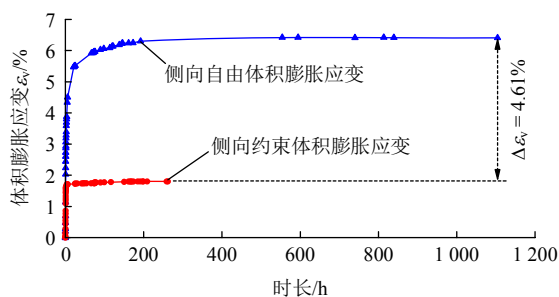


图 15 侧向约束作用对泥岩体积膨胀应变影响

Fig.15 Influence of lateral restraint on the volumetric swelling strain of mudstone

积应变明显减小。当然，由以上分析可知，泥岩吸水率和裂隙发育程度是影响其膨胀性的主要因素，侧向约束的存在，一方面约束了侧向膨胀变形转而增大轴向膨胀变形，另一方面也在一定程度上限制了泥岩充分吸水，并且泥岩在吸水过程中裂隙扩展难度更大，从而又进一步限制了其膨胀变形，总体表现为体积膨胀应变显著减小。因此，侧向约束作用对泥岩膨胀性的影响是一个更为复杂的过程，仅分析侧限约束对泥岩膨胀性的影响显然是不合适的，也很难做到单因素定量对比分析。相比而言，泥岩吸水率和试验后岩屑破碎程度则是原状岩样吸水膨胀后的 2 个重要现象表征，更容易建立其与泥岩膨胀性的定性和定量关系。

5 讨论

川中红层泥岩的原状岩样浸水膨胀率较小，根据现行膨胀土(岩)判定标准并不足以影响工程结构的稳定性。然而，川中红层泥岩在浸水条件下的物化膨胀变形就有显著的时效性，其吸水及膨胀过程是与时间相关的，长期浸水条件下原状岩样内裂隙处于“吸水→膨胀→裂隙扩展→进一步吸水→进一步膨胀”的过程，最终使得岩体膨胀变形随时间而稳定发展。这种时效膨胀变形是否会引起高速铁路路基的持续上拱变形，除与泥岩本身的矿物成份及其含量直接相关以外，还应考虑泥岩的结构特征(节理、裂隙发育程度)、吸水过程的时效性、应力状态及改变过程等因素，通过膨胀蠕变模型对其时效膨胀变形特性进行评价是一个有效的途径。

原状泥岩试样物化膨胀具有显著的尺寸效应，这与不同尺寸岩样在浸水过程中吸水率、水分渗透难易程度、隐微裂隙发育程度等众多因素有关。室内常规方法采用重塑样开展自由膨胀率试验，重塑过程破坏了岩石的内部结构及固化凝聚力，并使亲

水性黏土矿物处于自由状态^[13, 23-25]，试验获得的是岩石的极限膨胀变形状态。但是，实际工程岩体是以致密岩石块体及不同尺度结构面构成的复合地质体出现，即使在长期饱水状态下，后期吸水过程也很缓慢，膨胀变形也很难达到岩粉自由膨胀率的程度，同时，这也是泥岩出现时效膨胀变形的主要原因^[22]，国际岩石力学学会(ISRM)建议采用原状岩样开展膨胀岩的膨胀性室内试验^[18]。本试验通过直径 50 mm、高 100 mm 试样开展无荷膨胀变形试验，测得的膨胀应变及规律更接近于实际工程岩体的膨胀变形状态，但依然属于一种半理想状态下的岩石材料物理力学性能试验，旨在研究原状岩样吸水膨胀变形的时效性、可能的影响因素及影响规律，并为进一步建立常规弱膨胀性泥岩在不同应力路径下的水-力耦合蠕变理论模型奠定基础。

6 结论

- (1) 川中红层泥岩为典型软岩，原状岩样隐微裂隙发育，易风化，具有显著的崩解及弱膨胀特性，以伊利石和石英 2 种矿物为主，伊利石含量较高，是引起泥岩吸水膨胀的内因。
- (2) 浸水条件下，川中红层泥岩膨胀变形过程具典型的三阶段特征：初始短时间内急剧膨胀；减速膨胀阶段膨胀速率迅速减小，持续膨胀变形；稳定膨胀阶段基本不再发生膨胀变形。岩样吸水膨胀变形具有显著的时间效应，采用类 Kelvin 体模型可以较好模拟其膨胀蠕变规律，模型参数 K 和 η 可以有效度量泥岩总膨胀变形量及黏滞特性。
- (3) 川中红层泥岩膨胀变形量与浸水过程中试样吸水率呈对数相关，吸水率越大，膨胀变形量越大，采用吸水率更适合于评价其膨胀特性。
- (4) 原状岩石结构性是影响泥岩吸水膨胀的重要因素，隐微裂隙越发育的试样，吸水率就越大，膨胀速率越快、膨胀变形量也越大。通过试验后岩屑的筛分试验获得岩屑最大含量粒组颗粒粒径 d_{max} 、细粒和微粒质量占比 $\omega_{1.0}$ 和有效粒径 d_{10} 三个岩屑筛分数据，可以定量判断泥岩的吸水特性和膨胀特性， d_{max} 和 d_{10} 越小、 $\omega_{1.0}$ 越大，则泥岩的吸水率越大、膨胀性越强，反之亦然。
- (5) 川中红层泥岩吸水膨胀变形具有显著的时效性，且与吸水率、岩体结构特征、约束情况密切相关。对于在该地区修筑的高速铁路工程，应该在

对基底泥岩层水力环境改变、岩体结构特征调查的基础上, 结合原状泥岩试样膨胀蠕变试验, 判定泥岩吸水时效膨胀变形规律及变形量值, 从而指导相关工程设计。

参考文献(References):

- [1] 郭永春, 谢强, 文江泉. 我国红层分布特征及主要工程地质问题[J]. 水文地质工程地质, 2007, (6): 67 - 71.(GUO Yongchun, XIE Qiang, WEN Jiangquan. Red beds distribution and engineering geological problem in China[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2007, (6): 67 - 71.(in Chinese))
- [2] 黄绍斌, 程强, 胡厚田. 四川红层分布及工程环境特征研究[J]. 公路, 2005, (5): 81 - 85.(HUANG Shaobin, CHENG Qiang, HU Houtian. A study on distribution of Sichuan red beds and engineering environment characteristics[J]. Highway, 2005, (5): 81 - 85.(in Chinese))
- [3] 魏永幸, 张仕忠, 甘鹰, 等. 四川盆地红层泥岩的基本特性和膨胀性及软化的试验研究[J]. 工程勘察, 2010, (增1): 61 - 68.(WEI Yongxing, ZHANG Shizhong, GAN Ying, et al. Experimental study on the essential feature and swelling and softening characteristics of red-bed mudstone in Sichuan basin[J]. Geotechnical Investigation and Survying, 2010, (Supp.1): 61 - 68.(in Chinese))
- [4] 谌文武, 原鹏博, 刘小伟. 分级加载条件下红层软岩蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增1): 3 076 - 3 081.(CHEN Wenwu, YUAN Pengbo, LIU Xiaowei. Study on creep properties of red-bed soft rock under step load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp.1): 3 076 - 3 081.(in Chinese))
- [5] 杨宗才, 张俊云, 周德培. 红层泥岩边坡快速风化特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 275 - 283.(YANG Zongcai, ZHANG Junyun, ZHOU Depei. Study on fast weathering characteristics of red bed mudstone slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(2): 275 - 283.(in Chinese))
- [6] 冯启言, 韩宝平, 隋旺华. 鲁西南地区红层软岩水岩作用特征与工程应用[J]. 工程地质学报, 1999, 7(3): 266 - 271.(FENG Qiyang, HAN Baoping, SUI Wanghua. Characteristics of water-rock interaction of red-beds and its application to engineering in southwestern Shandong[J]. Journal of Engineering Geology, 1999, 7(3): 266 - 271. (in Chinese))
- [7] 殷跃平, 胡瑞林. 三峡库区巴东组 T_{2b} 紫红色泥岩工程地质特征研究[J]. 工程地质学报, 2004, 12(2): 124 - 135.(YIN Yueping, HU Ruilin. Engineering geological characteristics of purplish-red mudstone of middle tertiary formation at the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(2): 124 - 135.(in Chinese))
- [8] 胡文静, 丁瑜, 夏振尧, 等. 重庆地区红层泥岩侧限膨胀性能试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(5): 607 - 611.(HU Wenjing, DING Yu, XIA Zhenyao, et al. Experimental study on confined swelling characteristic of redbed mudstone in Chongqing[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(5): 607 - 611.(in Chinese))
- [9] 胡安华, 蒋关鲁, 王智猛, 等. 高速铁路路基红层泥岩填料力学特性试验研究[J]. 铁道工程学报, 2008, (2): 21 - 25.(HU Anhua, JIANG Guanlu, WANG Zhimeng, et al. Experimental research on mechanical characteristics of red rock filling for subgrade of high-speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008, (2): 21 - 25.(in Chinese))
- [10] STEINER W. Swelling rock in tunnels: rock characterization, effect of horizontal stresses and construction procedures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1993, 30(4): 361 - 380.
- [11] DOOSTMOHAMMADI R, MUTSCHLER T, OSAN C. Modeling the complex and long term swelling behavior of argillaceous rocks[J]. Mining Science and Technology(China), 2011, 21(5): 655 - 659.
- [12] ZHANG C L, WIECZOREK K, XIE M L. Swelling experiments on mudstones[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2010, 2(1): 44 - 51.
- [13] 王贤能, 韩会增, 文江泉. 膨胀岩边坡工程中膨胀与流变的耦合效应[J]. 地质灾害与环境保护, 1997, 8(4): 33 - 39.(WANG Xianneng, HAN Huizeng, WEN Jiangquan. The coupled effect of swell and rheology for the slope engineering of swelling rock[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1997, 8(4): 33 - 39.(in Chinese))
- [14] 朱珍德, 邢福东, 刘汉龙, 等. 南京红山窑第三系红砂岩膨胀变形性质试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1 041 - 1 044.(ZHU Zhende, XING Fudong, LIU Hanlong, et al. Experimental research on expansive deformation of tertiary red sandstone in Nanjing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(7): 1 041 - 1 044.(in Chinese))
- [15] 王萍, 屈展, 刘易非, 等. 泥页岩水化膨胀的非线性蠕变模型[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2015, 45(1): 117 - 122.(WANG Ping, QU Zhan, LIU Yifei, et al. Nonlinear creep model of mud shale hydration expansion[J]. Journal of Northwest University: Natural Science, 2015, 45(1): 117 - 122.(in Chinese))
- [16] 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))
- [17] 王冲, 王起才, 张戎令, 等. 低黏土矿物含量泥岩有荷膨胀试验研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(11): 107 - 111.(WANG Chong, WANG Qicai, ZHANG Rongling, et al. Expansion test of mudstone with low content of clay minerals under overburden load[J]. Journal of

- Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(11): 107 - 111. (in Chinese))
- [18] MADSEN F T. International Society for Rock Mechanics Commission on swelling rocks and commission on testing methods-suggested methods for laboratory testing of swelling rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(3): 291 - 306.
- [19] 刁心宏, 杨守兴, 冒小波. 不同温湿环境下泥岩吸水及膨胀特性的试验研究[J]. 华东交通大学学报, 2017, 34(3): 14 - 18.(DIAO Xinhong, YANG Shouxing, MAO Xiaobo. Experimental study on water absorption and expansion characteristics of mudstone under conditions of different temperature and humidity[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2017, 34(3): 14 - 18.(in Chinese))
- [20] 马丽娜. 高速铁路路基低黏土矿物泥岩膨胀机理及影响研究[博士学位论文][D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.(MA Lina. Research on low clay mineral mudstone expansion mechanism and influence for high-speed railway subgrade[Ph. D. Thesis][D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016.(in Chinese))
- [21] 陈志敏, 朱 烜. 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.(CHEN Zhimin, ZHU Xuan. Research on mechanical behavior of expansive mudstone of sand shale interbed slope[J]. Subgrade Engineering, 2017, (3): 97 - 102.(in Chinese))
- [22] 崔晓宁, 王起才, 张戎令, 等. 无砟轨道膨胀土地基的泥岩膨胀变形试验[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(11): 2 339 - 2 344.(CUI Xiaoning, WANG Qicai, ZHANG Rongling, et al. Expansive deformation test on ballastless track of expansive mudstone[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(11): 2 339 - 2 344.(in Chinese))
- [23] 马丽娜, 严松宏, 张戎令, 等. 低黏土矿物含量泥岩浸水膨胀变形的试验研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(11): 111 - 115.(MA Lina, YAN Songhong, ZHANG Rongling, et al. Experimental research on soaking swelling deformation of mudstone with low content of clay minerals[J]. Industrial Construction, 2015, 45(11): 111 - 115.(in Chinese))
- [24] 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.(LIU Jingde, LI Qingyun, GONG Biwei. Swelling properties of expansive rock in middle route project of South-to North Water Diversion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(5): 826 - 830.(in Chinese))
- [25] 温春莲, 陈新万. 初始含水率、容量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.(WEN Chunlian, CHEN Xinwan. Effects of initial water content, dry unit weight and load on the swelling of clayey weak rock: an experimental study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1992, 11(3): 304 - 311.(in Chinese))
- [26] 张 巍, 尚彦军, 曲永新, 等. 泥质膨胀岩崩解物粒径分布与膨胀性关系试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 66 - 72.(ZHANG Wei, SHANG Yanjun, QU Yongxin, et al. Grain size distribution of collapsed scraps of argillaceous rock and its relationship with expansibility: an experimental study[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 66 - 72.(in Chinese))

下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》主要发表下列内容的文章:

- (1) 高静荷载下卸载速率对岩石动力学特性及破坏模式的影响;
- (2) 考虑充填顺序与后壁黏结力的采场充填计算统一解;
- (3) 大光包滑坡启动机制: 强震过程滑带非协调变形与岩体动力致损;
- (4) 高温脱水石膏岩物理力学效应的试验研究;
- (5) 柱状炮孔端部爆生裂纹动态扩展力学行为研究;
- (6) 挤压陡倾千枚岩地层小净距隧道大变形研究;
- (7) 基于滑坡分类和加权频率比模型的滑坡易发性评价;
- (8) 二维非测速条件下声发射震源定位方法数值验证。

土工基础