

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.01.17

荷载条件下原状与重塑泥岩渗透性试验研究

王炳忠¹, 王起才^{1,2}, 张戎令^{1,2,3}, 薛彦瑾¹, 崔晓宁¹, 卓彬¹

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 兰州交通大学道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室, 甘肃 兰州 730070;

3. 兰州交通大学甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要:为模拟地基土普遍受上覆荷载等实际情况,研制了可加载渗透仪。文章以兰新铁路第二双线一处典型膨胀泥岩为研究对象,进行了原状土和重塑土不同荷载等级下渗透试验,荷载大小为0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 MPa。试验结果表明:随着渗透时间变长,原状土和重塑土的渗透系数略微增大。原状土渗透系数随荷载增大而变小,为现场地基土随埋深增加渗透性变小提供依据;重塑土渗透系数随荷载增大而变小,对于高填方路基地层土而言上覆荷载对其渗透性产生影响。通过进一步对比原状土与重塑土渗透性差异,可知重塑土渗透系数比原状土渗透系数大1个数量级,且原状土渗透系数呈“外凸形”减小,重塑土渗透系数呈“内凹形”减小,荷载对两种土体渗透系数影响机理不同。

关键词:渗透系数;可加载渗透仪;泥岩;荷载;原状土;重塑泥岩;兰新铁路

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)01-0123-06

An experimental study of the permeability of undisturbed and remolded mudstones under the loading condition

WANG Bingzhong¹, WANG Qicai^{1,2}, ZHANG Rongling^{1,2,3}, XUE Yanjin¹, CUI Xiaoning¹, ZHUO Bin¹

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. Key Laboratory of Road & Bridges and Underground Engineering of Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 3. National and Provincial Joint Engineering Laboratory of Road & Bridge Disaster Prevention and Control, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: In order to simulate the fact that the foundation soil is generally subjected to overlying loads and so on, a loadable osmosis apparatus is developed in this paper. The typical dilated mudstone at the second double line of the Lanxin railway is taken as the research object, and the permeability test under different load grades of the original and remolded soils is carried out. Value of the load is 0, 0.1, 0.2, 0.3 and 0.4 MPa. The results show that, the coefficient of permeability increases slightly with the increasing infiltration time. The coefficient of permeability of the undisturbed soil decreases with the increasing load. The results, provide a basis for analyzing the decrease in permeability of the foundation soil with the burial depth. The coefficient of permeability of the remolded soil decreases with the increasing load. For the high fill road foundation soil, the overburden load has an effect on the permeability. By further comparing the permeability of the intact soil and remolded soil, it is found that the coefficient of permeability of the remolded soil is 1 order of magnitude larger

收稿日期: 2018-05-30; 修订日期: 2018-09-03

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划滚动支持(IRT_15R29); 中国铁路总公司科技研究开发计划课题(Z2015-G001); 青年人才托举工程(2015QNRC001); 飞天学者特聘计划; 陇原青年创新人才扶持计划; 甘肃省基础研究创新群体(145RJIA332)

第一作者: 王炳忠(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事桥梁与隧道方面的研究。E-mail: 982881022@qq.com

通讯作者: 王起才(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事混凝土结构耐久性、新型工程材料与技术研究。

E-mail: wangqc@mail.lzjtu.cn

than that of the intact soil. The variation law of the coefficient of permeability is compared, and the reasons for the change in the permeability of the undisturbed soil and remolded soil are analyzed.

Keywords: coefficient of permeability; loadable osmosis apparatus; mudstone; load; undisturbed soil; remolded soil; Lanxin railway

近年来,我国高速铁路建设进入快速发展阶段。高铁线路网在全国范围延伸,不可避免地经过地质条件不良地段,尤其是一些以膨胀泥岩为地基的高铁工程引起了工程界高度关注。膨胀性泥岩是一类由强亲水性黏土矿物,包括蒙脱石、伊利石、高岭石等组成的特殊软岩,具有吸水膨胀、失水收缩并反复变形的性质,常使建筑物产生不均匀竖向或水平向胀缩变形^[2-4]。膨胀泥岩的矿物成分和结构特征是其产生膨胀变形的内因,水分入渗是最主要诱发因素,土体在隔水状态下不会发生膨胀变形^[5]。土体的渗透性直接关系到水分入渗的速度和总量,关系膨胀土地基上拱变形速率及最大上拱量计算。因此,研究地基土渗透性对于膨胀土地基渗流、膨胀量计算和水环境评价具有重要的理论与工程实际意义。

在膨胀土渗透特性方面,大多数专家学者集中研究了膨胀土边坡裂隙开展、干密度等对渗透性影响^[6-8],对于地基膨胀土渗透性,尤其是低黏土矿物含量膨胀泥岩的渗透性研究并不多见。主要是因为过去地基土主要关注发生沉降问题,膨胀上拱病害并不多见。兰新二线运营后出现多处路基上拱病害,且随着时间推移上拱量持续增长,这主要是由于其地基为低黏土矿物含量泥岩,设计规范判定为无膨胀性土,因而在设计中没有受到足够重视。而高铁无砟轨道对上拱变形要求十分严格,从扣件可调整的角度来看,路基出现膨胀后,仅有 4 mm 的调整空间^[9],低黏土矿物含量膨胀泥岩浸水后引起膨胀变形将对高铁无砟轨道运营安全及舒适性带来严峻挑战。从施工方面看,高速公路等工程建设中均存在开挖路堑等外部荷载变化情况,这将进一步引起地基渗流量变化。从地基土存在状态看,不同应力历史、不同深度地基土所受压力大小不同引起的渗透性不同^[10]。

有关荷载作用引起土体渗透性变化问题的研究,国内外已经开展了探索性研究。蒋中明等^[11]使用渗透变形加载系统,研究了侧限条件竖直应力大小对临界水力梯度的影响;冯树荣等^[12]通过对比分析室内试验、现场原位试验、钻孔高压压水试验成果,得出应力状态对含黏粗粒土渗透变形临界水力梯度试验取值有重大的影响;李兆峰等^[13]通过室内模型试验探究弱透

水层水流运移规律,得出土层的应力历史对土层的渗透系数影响不大;Tomlinson 等^[14]、Chang 等^[15]通过室内试验研究了应力状态对无黏性砂土渗透变形的影响;辛利伟等^[16]开展了裂隙试件受轴压、围压加载和卸载作用渗流试验,结果表明裂隙面的法向应力是影响裂隙渗流的主要因素;何俊等^[17]进行了不同温度和围压下黏土渗透特性试验,结果表明渗透系数随温度的升高而增大,随围压的增大而减小。可见正确评价应力状态对土体渗透性的影响十分重要,研究荷载对地基泥岩渗透性对上拱病害治理及预警具有重要现实意义。但目前对荷载条件下原状土地基泥岩的渗透性研究并不多见,开挖路堑将引起地基原状土卸荷,土体渗透性发生变化,打破原有平衡,地基进一步浸水引起膨胀,因此研究荷载条件下泥岩渗透性变得很有必要。而地基土原状样较致密,不易取样和制样,且加载渗透试验装置还处在开发阶段,因此有必要探究原状土和重塑土渗透性两者之间差异和联系。

本文依托兰新二线高速铁路,以沿线一典型膨胀地段微膨胀泥岩为研究对象,通过制作加载渗透仪,进行了荷载为 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 MPa 下原状及重塑泥岩饱和渗透性试验,探究荷载对土体渗透性的影响,并比较原状样与重塑样渗透性差异,为高速铁路地基土设计、上拱病害预警及治理提供理论支撑。

1 室内试验

1.1 试验原材料

试验所用土样取自兰新二线沿线典型膨胀地段,取样里程为 DK1345+300 m,深度为 10~15 m。钻机取样直径为 10 cm,钻机取出土样后,迅速用保鲜膜包裹并密封,防止水分蒸发产生裂隙。试验前按照《铁路工程土工试验规程》(TB10102-2010)测得土样基本物理指标,如表 1 所示。

1.2 试验方案及过程

目前测定土体渗透性的仪器主要有常水头土壤渗透仪、变水头土壤渗透仪、GDS 三轴仪等,现有仪器在获取各类土体渗透系数方面发挥了重要作用。如常水头土壤渗透仪主要用于无荷砂类土渗透性测定;变水头土壤渗透仪主要用于无荷黏质土渗透性

测定;GDS 三轴仪尽管可测定荷载下土体的渗透性,但试验操作复杂、费时,成本高。

为探究竖向荷载对原状土及重塑土渗透性的影响,研制了液压千斤顶加载渗透仪,以实现不同上覆荷载下土体渗透性测定,如图 1 所示。可加载渗透仪由渗透装置、竖向加载装置及供水装置组成。考虑到现场钻孔取样直径为 10 cm,渗透仪直径设计为 8 cm,高 4 cm。为保证进水时水分只通过土体渗透,在透水石周围设置密封圈以防止渗透筒与下底板、上盖板之间侧向漏水。试验开始后水从进水管首先进入水槽,然后通过透水石向土体渗透。

试验分为原状土和重塑土两组。每组试验制作 5 个试样,分别为 5 个荷载等级:0,0.1,0.2,0.3,0.4 MPa。

试验前挑选干密度(1.96 ~2.04 g/cm³)相近的 5 组原状样,采用切割机、打磨机、砂纸等加工试样。考虑到原状样与渗透筒内壁有缝隙而不密贴,为防止试验时缝隙渗水,放置试样时使用石蜡密封试样与筒内

壁缝隙,加工试样直径比筒壁直径小 0.4 cm,即试样尺寸为 $\phi 7.6\text{ cm}\times 4\text{ cm}$,取相同里程土样砸成重塑土,过 0.5 mm 筛子,通过分层击实法制成重塑样,干密度为 1.65 g/cm³,试样尺寸为 $\phi 8\text{ cm}\times 4\text{ cm}$ 。

本试验依据《铁路工程土工试验规程》(TB10102—2010)中变水头法的相关规定进行。加载完成后首先饱和试样,当看到上盖有水渗出且漫过整个上部时认为试样完全饱和,本试验饱和时间为 3~5 d。饱和后当看到上部无水泡冒出时开始渗透试验,试验时记录好开始水头高度、终了水头高度、经过时间,同时测记水温。

渗透试验开始时首先将水头设置为高出土样 2 m 位置,在水头下降的不同位置读取 3~4 组数据,计算求平均值后作为第一次渗透系数结果;接着把水头升至同一高度进行第二次、第三次试验。本试验进行中发现水头下降很缓慢,24 h 下降 1~2 cm;为了排除读数误差,试验时使得水头下降值达到 10 cm,渗透时间一般为 5~7 d。

表 1 土样基本物理性质
Table 1 Basic physical properties of the soil samples

蒙脱石含量/%	伊利石含量/%	高岭石含量/%	自由膨胀率/%	塑限/%	阳离子交换/(mmol·kg ⁻¹)	
2.1	2.8	1.4	28.6	22.4	287.47	
天然含水率/%	最大干密/(g·cm ⁻³)	最优含水率/%	液限/%	塑性指数	颗粒组成	
					<0.25 mm/%	<0.075 mm/%
5.6	1.79	16.2	45.6	23.2	62	28

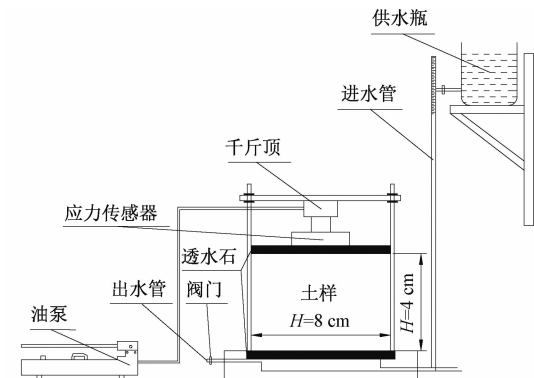


图 1 试验仪器

Fig. 1 Test instrument



图 2 制样及试验照片

Fig. 2 Sample preparation and photos of the test

2 结果与分析

试验结束后整理数据并计算饱和渗透系数,根据《铁路工程土工试验规程》TB10102—2010 中渗透系数公式计算,如下:

$$k_T = 2.3 \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \lg \frac{H_1}{H_2}$$
$$k_{20} = k_T \frac{\eta_T}{\eta_{20}}$$

式中: k_{20} ——20℃时土样渗透系数/(cm·s⁻¹);
 k_T —— T ℃时土样渗透系数/(cm·s⁻¹);
 a ——变水头管断面面积/cm²;

L ——试样高度/cm;

t_1 、 t_2 ——测读水头的起始和终止时间/s;

H_1 、 H_2 ——起始和终止水头/cm;

η_T 、 η_{20} —— T °C 和 20 °C 时水的动力黏度/
(10^{-6} kPa·s)。

本试验饱和渗透系数均换算为 20°C 时的渗透系数。

2.1 荷载条件下原状土渗透系数试验

不同荷载作用下原状土渗透试验结果见表 2。

表 2 不同荷载下原状土渗透试验结果

Table 2 Test results of soil permeability under different loads

荷载级别/ MPa	渗透系数/(10^{-9} cm·s $^{-1}$)			
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均值
0	6.13	6.16	6.27	6.19
0.1	5.85	5.86	5.92	5.88
0.2	4.86	5.01	5.02	4.96
0.3	3.21	3.22	3.25	3.23
0.4	2.68	2.72	2.81	2.74

由表 2 可以看出,第 1 次、第 2 次、第 3 次渗透系数依次略微增大。试验中发现随着渗透时间的推移,在土样上盖顶有细小土颗粒被水带出,即出水口水滴混合有微小土颗粒。当进行第 2 次、第 3 次试验时经过渗透时间较长(第 3 次试验一般在第 10 天后开始),土样内部渗流孔隙内的细小颗粒在水压力作用下逐渐被水带出,这样便形成了更加畅通的联通孔隙,因而同一土样随着试验次数增加,渗透系数略微增大。

取表 2 中每级荷载下平均渗透系数绘制渗透系数-压力关系曲线,如图 3 所示。由图可知:随着土体竖向荷载增大,渗透系数呈减小变化。渗透系数随荷载变化曲线首先为外凸形减小,经过转折点后缓慢减小。荷载为 0.1、0.2、0.3、0.4 MPa 渗透系数分别为无

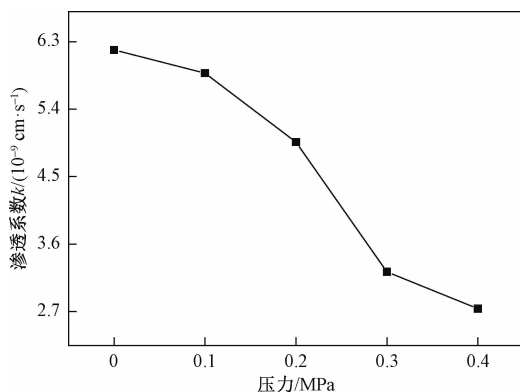


图 3 不同荷载下原状土渗透系数曲线

Fig. 3 Coefficient of permeability of the original soil under different loads

荷时渗透系数的 95%、80.1%、52.2%、44.3%,说明渗透系数减小幅度先增大后减小。由于原状土密实度较高,达到 2 g/cm 3 ,且具有一定结构强度,通过荷载对土样进一步压密改变其孔隙比较困难,但由于其内部微裂隙发育,荷载作用可使这种微裂隙闭合。且由于土样为膨胀性泥岩,施加荷载后土体未饱和时膨胀量没有发生,土样在侧向约束和上覆荷载作用下进行饱和,在饱和过程中膨胀性矿物膨胀量会向土体孔隙释放填堵渗水通道,土体渗透性降低。当对土样施加 0.1 MPa 荷载后渗透系数仅减小了 5%,说明土体受结构性影响,较低荷载作用时对裂隙作用不明显,对渗透性影响不大;荷载增加至 0.2 MPa 时渗透系数减小了 19.9%,荷载对渗透系数影响变大;当作用荷载为 0.3 MPa 时,渗透系数减小了 47.8%,减小幅度最大,说明大部分微裂隙闭合,荷载对渗透性产生较大影响;荷载增加至 0.4 MPa 时渗透系数缓慢减小。

综上可知,现场地基土埋深越深,所受上覆荷载越大,渗透系数越小。

2.2 荷载条件下重塑土渗透系数试验

不同荷载作用下重塑土渗透试验结果见表 3。与表 2 对比可知,第 1 次、第 2 次、第 3 次渗透系数依次略微增大,与原状土具有相同的规律。试验中随着渗透时间的推移,在土样上盖顶有细小土颗粒被水带出,出水口水滴混合有细小土颗粒。由于土样为原状样破碎后重塑形成,土体大颗粒周围附着有细小颗粒,土样渗流时孔隙内的细小颗粒在水压力作用下逐渐被水带出,形成了更加畅通的联通孔隙,因而同一土样随着试验次数增加,渗透系数略微增大。

表 3 不同荷载下重塑土渗透试验结果

Table 3 Experimental results of the remolded soil permeability under different loads

荷载级别/ MPa	渗透系数/(10^{-8} cm·s $^{-1}$)			
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均值
0	8.91	8.94	9.08	8.98
0.1	7.32	7.35	7.41	7.36
0.2	5.76	5.89	5.96	5.87
0.3	5.28	5.29	5.38	5.32
0.4	4.81	4.86	4.87	4.85

取表 3 中每级荷载下平均渗透系数绘制渗透系数-压力关系曲线,如图 4 所示。由图可知:随着土体竖向荷载增大,渗透系数呈减小变化。渗透系数随荷载变化曲线首先为较大幅度减小,然后经过转折点后缓慢减小。荷载为 0.1、0.2、0.3、0.4 MPa 渗透系数分别为无荷时渗透系数 82%、65.4%、59.2%、54%,渗

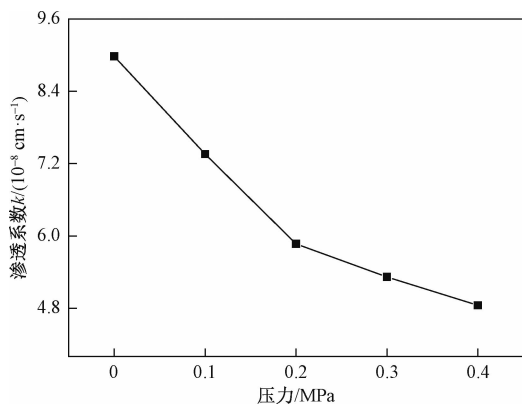


图4 不同荷载下重塑土渗透系数曲线

Fig. 4 Coefficient of permeability of the remolded soil under different loads

透系数减大幅度由大变小。本文重塑土压实度为92%,荷载作用使得土体进一步压密,改变其孔隙率,荷载通过改变重塑土孔隙比而引起渗透系数变化,且由于土体为膨胀性泥岩,在侧向约束和上覆荷载作用下进行试样饱和,饱和过程中浸水使得膨胀性矿物膨胀并向土体孔隙释放填堵孔隙,土体渗透性降低。对土体施加0.1,0.2 MPa时渗透系数比无荷时减小了18%、34.6%,施加0.3,0.4 MPa时渗透系数比无荷时减小了40.8%、46%,0.2 MPa为渗透系数减小幅度变化的转折点,说明施加较小荷载(<0.2 MPa)时土体孔隙率减小幅度较大,对渗透系数影响大,而在此基础上再施加荷载对土体孔隙率改变幅度较小,对渗透系数影响变小。

综上可知,对于实际工程中高填方路基而言,路基底层土体随填方增大所受上覆荷载变大,渗透性变小。

2.3 荷载条件下原状土与重塑土渗透系数比较

由图5可知,荷载为0,0.1,0.2,0.3,0.4 MPa时重塑土渗透系数是原状土渗透系数14.5,12.5,11.8,16.5,17.7倍,即重塑土渗透系数大于原状土渗透系数,且相差一个数量级。这主要是由于原状土是经过长期历史沉积等因素形成,干密度达 2 g/cm^3 ,较为致密;而重塑土干密度为 1.65 g/cm^3 ,重塑土孔隙率大于原状土孔隙率,两者孔隙数量及大小不同。

由图2~3及表2~3可以看出,随着竖向荷载的增加,原状土和重塑土渗透系数减小趋势不同。总体上看,原状土渗透系数呈“外凸形”减小,重塑土渗透系数呈“内凹形”减小。这可能是由于荷载引起两者渗透系数减小的原因不同,荷载对原状土作用主要以减小微裂缝为主;重塑土在荷载作用下进一步压密,孔隙率减小。

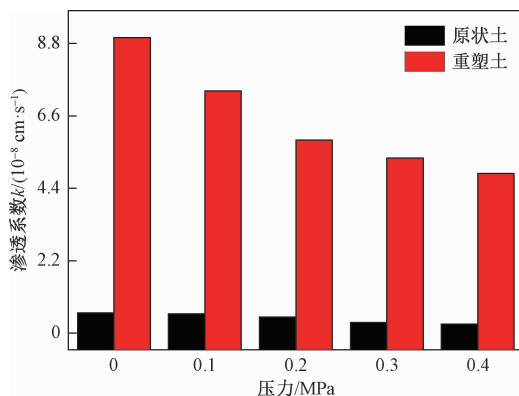


图5 不同荷载下原状土与重塑土渗透系数比较

Fig. 5 Comparison of coefficient of permeability between the intact soil and remolded soil under different loads

为了描述上述原因引起的两者渗透系数之间差别,若定义重塑土与原状土渗透系数比值为 η ,即 $\eta = \frac{k_{\text{重塑土}}}{k_{\text{原状土}}}$ 。当压力 $P = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ MPa时, $\eta = 14.5, 12.5, 11.8, 16.5, 17.7$;可以看出, η 随 P 的增加先减小后增大,在0.2 MPa时最小。

由于原状土取样成本高、制样及试验要求高,可根据原状土与重塑土之间孔隙率、孔隙分布形态等方面的差异,进一步探讨两者之间渗透性关系。

3 结论

(1) 本文研制的可加载渗透仪可以对原状土和重塑土进行不同荷载等级下的渗透性试验,具有较好的实用性。

(2) 原状土渗透系数随着荷载增大而变小,变化曲线呈“外凸形”变化规律,现场地基土随着埋深增加,土体渗透系数变小。

(3) 重塑土渗透系数随着荷载增大而变小,变化曲线呈“内凹形”,对于高填方路基土而言,底层土渗透系数随着上覆荷载增大而变小。

(4) 通过对比原状土和重塑土两者渗透性,可知重塑土渗透系数比原状土渗透系数大,且相差一个数量级。荷载引起原状土、重塑土渗透性变化的原因不同:对较致密的原状土荷载使其微裂缝闭合,而重塑土则在荷载作用下进一步压密。

参考文献:

- [1] 杨果林,邱明明,杨啸,等. 高铁膨胀土新型路堑基床动力特性与参数敏感性[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(1): 63-72. [YANG G L, QIU M M,

- YANG X, *et al.* Dynamic characteristics and parameter sensitivities of new cutting subgrade for high-speed railway in expansive soil area [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2016, 16 (1): 63 - 72. (in Chinese)]
- [2] ITO M, AZAM S. Engineering characteristics of aglaciolacustrine clay deposit in a semiarid climate [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2009, 68(4): 551 - 557.
- [3] ITO M, AZAM S. Determination of swelling and shrinkage properties of undisturbed expansive soils [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2010, 28(4): 413 - 422.
- [4] TRIPATHY S, SUBBA R K S. Cyclic swell - shrink behavior of a compacted expansive soil [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2009, 27 (1): 89 - 103.
- [5] 秦朝辉. 云桂铁路膨胀土膨胀特性与强度特性现场试验研究[D]. 长沙:中南大学, 2012. [QIN Z H. Field test and Study on expansive characteristics and strength characteristics of expansive soil in Yunnan Guangxi Railway [D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese)]
- [6] 陈洁, 张永浩, 韩小元, 等. 渗流条件下含裂缝压实膨润土应力及渗透性能试验研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(2): 487 - 492. [CHEN J, ZHANG Y H, HAN X Y, *et al.* Experimental study of stress and permeability property of compacted bentonite with cracks under water intrusion [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(2): 487 - 492. (in Chinese)]
- [7] 袁俊平, 丁巍, 蔺彦玲, 等. 浸水历时对裂隙膨胀土渗透性的影响[J]. *水利与建筑工程学报*, 2014, 12 (1): 83 - 86. [YUAN J P, DING W, LIN Y L, *et al.* Influence of soaked period on permeability of cracked expansive soil [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2014, 12 (1): 83 - 86. (in Chinese)]
- [8] 吴波鸿, 莫疆. 膨胀土路堑边坡降雨入渗稳定性分析[J]. *建筑结构*, 2016, 46(增刊1): 851 - 855. [WU B H, MO J. Effects of rainfall and infiltration on the stability of expansive soil cutting slope [J]. *Building Structure*, 2016, 46 (Sup1): 851 - 855. (in Chinese)]
- [9] TB10621 - 2014 高速铁路设计规范[S]. 北京: 国家铁路局, 2014. [TB10621 - 2014 Design specification for high speed railway [S]. Beijing: National Railway Administration of PRC, 2014. (in Chinese)]
- [10] 付宏渊, 吴胜军, 王桂尧. 荷载作用引起砂土渗透性变化的试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(12): 3677 - 3681. [FU H Y, WU S J, WANG G Y. Experimental study of influence of compressive stress on water permeability of sands soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30 (12): 3677 - 3681. (in Chinese)]
- [11] 蒋中明, 王为, 冯树荣, 等. 应力状态下含黏粗粒土渗透变形特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(1): 98 - 104. [JIANG Z M, WANG W, FENG S R, *et al.* Experimental study on influence of stress state on seepage failure characteristics of coarse grained soil with cohesive particles [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36 (1): 98 - 104. (in Chinese)]
- [12] 冯树荣, 赵海斌, 蒋中明, 等. 向家坝水电站左岸坝基破碎岩体渗透变形特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(4): 600 - 605. [FENG S R, ZHAO H B, JIANG Z M, *et al.* Experimental study on seepage failure characteristics of broken rock mass in dam foundation at left bank of Xiangjiaba Hydropower Project [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34 (4): 600 - 605. (in Chinese)]
- [13] 李兆峰, 戴云峰, 周志芳, 等. 应力历史对弱透水层参数影响试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(5): 14 - 19. [LI Z F, DAI Y F, ZHOU Z F, *et al.* An experimental study of the influence of stress history on parameters of an aquitard [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(5): 14 - 19. (in Chinese)]
- [14] TOMLINSON S S, VAID Y P. Seepage forces and confining pressure effects on piping erosion [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, 37 (1): 1 - 13.
- [15] CHANG D S, ZHANG L M, XU T H. Laboratory investigation of initiation and development of internal erosion in soils under complex stress states [C]// ICSE6 Paris. Paris, 2012: 895 - 902.
- [16] 辛利伟, 孙可明, 李天舒. 加卸载作用下裂隙岩芯渗透性变化规律研究[J]. *安全与环境学报*, 2017, 17 (1): 72 - 75. [XIN L W, SUN K M, LI T S. Probe to permeability variation regularity of the fractured core rock under the impact of loading and unloading vibrations [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(1): 72 - 75. (in Chinese)]
- [17] 何俊, 阮晓晨, 胡晓瑾, 等. 温度和模拟渗滤液作用下黏土的渗透性能研究[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(1): 116 - 122. [HE J, RUAN X C, HU X J, *et al.* Effects of temperature and analog leachate on hydraulic conductivity of compacted clay. [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(1): 116 - 122. (in Chinese)]

编辑: 汪美华