

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.157>



水位波动下滑带土的渗透—固结变形特征试验

李岚星, 胡新丽*, 黄悦庭, 张海燕, 李亚博

中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

摘要: 三峡库区水位波动期间, 滑坡岩土体的渗流—应力耦合特性关系到滑坡的稳定性. 开展了一维渗透试验, 通过分析马家沟滑坡滑带土的渗流速度和水力坡降的关系, 得到了渗透压加卸载过程的渗流特征; 同时开展稳态和周期性渗透压下的三轴固结试验, 分别分析了围压、渗透压幅值和加载过程对渗透系数和体积应变的影响. 研究表明: (1) 渗透压加载至一个阈值前, 滑带土中的渗流满足达西定律, 超过该阈值渗流呈现非线性, 卸载时渗流符合达西定律; (2) 稳态渗透压作用下, 滑带土的渗透系数与围压的对数呈线性关系, 滑带土的瞬时模量影响系数随着渗透压增大呈现显著的指数下降的趋势; (3) 动态渗透压作用下, 滑带土的渗透系数随波动次数呈指数下降, 且各周期内均出现回弹效应, 整体上先膨胀再压缩, 累积变形回弹的时间节点与渗透系数衰减速率的阈值一致.

关键词: 滑带土; 水位波动; 固结变形; 渗透特性; 周期性渗透压; 工程地质.

中图分类号: P642.3

文章编号: 1000-2383(2024)12-4690-11

收稿日期: 2023-07-23

Seepage-Consolidation Deformation Characters of Sliding-Zone Soils under Water Level Fluctuation

Li Lanxing, Hu Xinli*, Huang Yueting, Zhang Haiyan, Li Yabo

Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: During the water level fluctuation period of the Three Gorges reservoir area, the seepage stress coupling characteristics of the geotechnical body in the landslide have a great influence on the stability of the landslide. In this paper, a one-dimensional seepage test was conducted on the sliding-zone soil of Majiagou landslide. It tested the relationship between the seepage velocity of the soil and the hydraulic gradient and found the seepage characteristics of the seepage pressure p loading and unloading process. It also performed triaxial consolidation tests under steady-state and cyclical p and analyzed the effects of the confining pressure σ_3 , the amplitude of the p , and the loading process on the permeability coefficient k and the volume strain. The following conclusions were drawn. (1) During the loading process, the seepage flow in the soil conforms to Darcy's law when the p was less than a certain threshold value, and the seepage flow shows nonlinearity when the p exceeds the threshold. The seepage flow conforms to Darcy's law when the p was unloaded. (2) When under a steady p , the k of soil is linear to the logarithm of the σ_3 . Its instantaneous modulus influence coefficient decreases exponentially when the p increases. (3) When under a cyclical p , the k of soil decreased exponentially as the number of fluctuations increases. And a rebound effect of expansion and then compression appears in the

基金项目: 国家自然科学基金重点国际(地区)合作研究项目(No.42020104006).

作者简介: 李岚星(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事岩土测试技术与复杂条件下土体力学特性研究. ORCID: 0000-0001-9347-4990.

E-mail: lilanxing0531@cug.edu.cn

* **通讯作者:** 胡新丽, 教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害防治及岩土体稳定性评价等研究工作. ORCID: 0000-0003-3440-0064. E-mail:

huxinli@cug.edu.cn

引用格式: 李岚星, 胡新丽, 黄悦庭, 张海燕, 李亚博, 2024. 水位波动下滑带土的渗透—固结变形特征试验. 地球科学, 49(12): 4690—4700.

Citation: Li Lanxing, Hu Xinli, Huang Yueting, Zhang Haiyan, Li Yabo, 2024. Seepage-Consolidation Deformation Characters of Sliding-Zone Soils under Water Level Fluctuation. *Earth Science*, 49(12): 4690—4700.

specimens in each cycle. The rebound of accumulated deformation occurs at a certain time point, which is almost consistent with the threshold value in the fitting function of the k and the number of cycles under the same conditions.

Key words: sliding-zone soil; water level fluctuation; consolidation deformation; permeability; cyclical seepage pressure; engineering geology.

0 引言

随着我国经济的发展,我国在长江流域建成一大批水利水电工程.水库蓄水导致库岸滑坡岩土体的原始状态发生改变,使其处于渗流场和应力场相互耦合的复杂环境中,影响了岩土体的力学特性与渗透特性,滑坡变形和失稳滑动问题时有发生(罗红明等,2008;向玲等,2014;陈勇等,2017;Wang *et al.*, 2018;Wang *et al.*, 2020;Kang *et al.*, 2022;杨雨亭等,2024).因此,研究滑坡岩土体,尤其是滑带在渗流-应力耦合下的力学性质和渗透性尤为重要.

目前,更多的研究集中在对干湿循环或浸泡作用对土的力学或者物理化学性质的影响上.邓华锋等(2017)开展了典型岸坡消落带土体的干湿循环试验,研究了土体抗剪强度参数劣化幅度随循环次数的趋势,并认为在干湿循环作用下,土样内部的损伤是导致其抗剪强度参数逐渐劣化的原因.单慧媚等(2018)通过开展库岸滑坡土样的饱水再失水试验,构建了离子浓度变化与土颗粒特征的多元回归方程,定量分析了水化学作用对其结构参数的影响.Hu *et al.*(2020)通过三轴试验和SEM研究了干密度、干湿循环路径对重塑黄土的强度衰减的影响,定量分析了这些因素对强度指标劣化率和劣化速度的影响,并建立了综合考虑影响因素的黄土劣化模型.张迪等(2021)以马家沟滑坡滑带土为研究对象,开展了浸泡软化试验,通过比较浸泡不同时间后土的粒度、化学成分、抗剪强度等性质,探讨了滑带土浸泡软化的机理.

同时也有针对渗流对滑坡土体强度等性质的研究.杨希等(2011)利用室内模型试验模拟地下水位波动变化,分析了水位波动、荷载作用以及不同含水率条件下粉土的力学指标值的变化规律.杨希等(2011)、陈能远等(2014)、高明和柴守宏(2016)都开展了荷载与水位波动耦合作用下的固结模型试验,他们的研究结果都认为水位循环会使得固结压缩程度提高,降低土的压缩性,水位的升降会使黏土颗粒发生团聚和排列的变化,渗透特性有所降

低.安鹏举等(2022)通过渗流试验结合CT技术获取了黄土坡滑坡滑带土在不同渗流条件下的微观结构特征,定量分析了不同渗透压下滑带土结构的演变规律.Zhou *et al.*(2014)指出很少用从现场试验中得到的水力传导系数来代替固结系数计算土的变形,同样地也很少通过用固结试验得到的水力传导系数代替固结系数的计算来分析渗流,基于这两者的关系与差异,他们提出了一个CDM模型用于联系饱和土的渗透和变形,并在饱和软土的物理模型试验中验证了他们提出的解析解.

综上所述,可以发现有不少研究致力于研究水位波动对土体强度或结构变化的影响,但皆是集中于静水作用,或者是较低的水头,一般受限于渗透压的加载装置或者测定渗透系数的仪器,上述涉及到水位波动的渗透压,往往难以超过30 kPa,甚至更低.而库岸滑坡所在水库的水位波动幅值较大,例如:紫坪铺水库(Lei, 2011)的水位波动范围是817~877 m,Revelstoke水库(Donati *et al.*, 2020)的水位波动范围是507~573 m,溪洛渡水库(Zhu *et al.*, 2022)的水位波动范围是540~600 m.本文研究的土所在三峡水库(He *et al.*, 2018;何成等,2021;Liao *et al.*, 2024)则是145~175 m.这意味着三峡库区蓄水以来,防洪极限水位以下岩土体将在原有基础上受到0~300 kPa周期性动态渗透压,目前对于较高渗透压下土体的渗透性以及强度变化研究较欠缺,尤其是考虑模拟库水位波动的动态渗透压下土体工程特性的研究亟待开展.

为研究水位波动下的滑带土的渗透固结特性,本文设计了一维渗透试验,分析滑带土试样的渗流速度和水力坡降的关系,并比较分析了渗透压加、卸载过程渗流特征;同时开展了稳态和周期性渗透压作用下的三轴固结试验,测定了滑带土的渗透系数和体积应变,分别分析了围压对渗流特性和固结特性的影响、渗透压幅值和加载过程对固结特性的影响.本研究可为后续考虑渗透压周期性变化的库岸滑坡岩土体流变本构提供理论基础,进一步地为优化滑坡的治理提供一定的参考价值.

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本文试验材料取自三峡库区马家沟滑坡后缘竖井(图1),滑带土在竖井内的埋深为15.8~16.6 m,其天然干密度为 1.98 g/cm^3 .

本文一维渗透试验试样高度为42.5 mm、直径约为40 mm,三轴渗透固结试样的高度为100 mm、直径为50 mm.根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)三轴试验的试样允许的最大粒径为1/5,为方便对比,一维渗透试验所采用的试样粒径级配应与三轴试验试样完全一致,拟用土的最大粒径定为5 mm.采用筛分法与沉降法测定得到原状滑带土的颗粒级配如图2所示,其中粒径大于5 mm的土颗粒占原状土总质量的31.3%,制样前将该部分的大颗粒用5 mm孔径的筛剔除,保留余下部分,并在45 °C下风干备用.

采用击实试验测得剔除粒径大于5 mm颗粒的土样最大干密度为 2.05 g/cm^3 ,按照规范要求以及土样天然密度的大小,确定本文所用土样的干密度均为 1.90 g/cm^3 ,制样时土样的含水率控制在塑限附近,制样的误差控制在 $\pm 0.02 \text{ g/cm}^3$ 内.

风干土样的基本物理性质指标可见于表1,其中压缩系数为单轴固结仪法测得的平均值.

风干土样采用分层静压法制备,层与层之间须进行刮毛处理,确保土样不会出现明显的分层现象.制备好的试样采用逐层加水的办法进行抽真空饱和,确保试验前土样接近完全饱和状态.

1.2 试验装置

目前实验室的一维渗透仪多数只能完成较低水头(一般不超过200 cm)下的常水头或者变水头试验,故需要设计研发新的装置开展高渗透压下的滑带土一维渗透试验,测定在高渗透压下滑带土的渗透系数.本文自行设计了如图3所示的渗透仪,为保证水不是从试样上表面某个点渗入试样,对装置的上下盖按照图示开凹槽处理,这样也可以尽量避免透水石因受到一个集中力作用而被压裂.装置中的套筒内壁必须进行毛化处理,套筒具有一定的刚

度,在特别定制的制样器内采用静压法进行制样,同时试样顶面与上盖接触的边缘处增加一个环状



图1 研究区及取样位置

Fig.1 Study area and sampling site

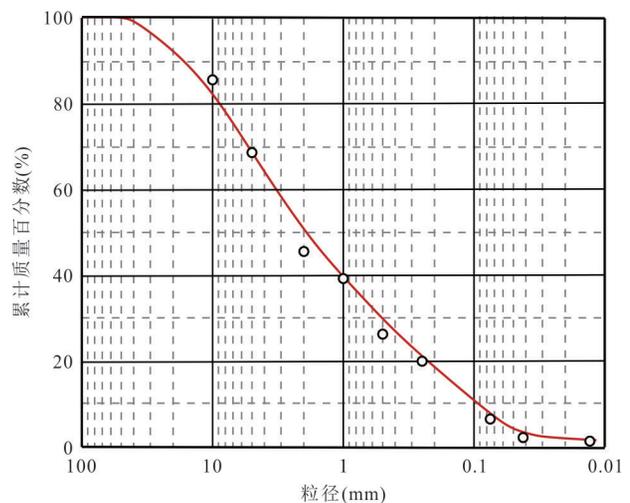


图2 滑带土颗粒级配曲线

Fig.2 Particle size distribution curve of sliding-zone soil

表1 试验用土的基本物理性质

Table 1 Basic index properties of testing soil

干密度	比重	塑限	液限	压缩系数
$\rho_d(\text{g/cm}^3)$	G_s	$\omega_p(\%)$	$\omega_L(\%)$	$a_{1-2}(\text{MPa}^{-1})$
1.90	2.62	16.03	29.76	0.037

橡皮圈,尽量确保水不会从土样与套筒内壁界面渗出.试样安装好后,用螺栓固定好上下盖,然后采用体积控制器施加相应的渗透压,底部则接另一台体积控制器,以测量渗流量.

试验前,需对试样施加一个较小的渗透压,验证入口处和出口处的流量是否差别不大.若入口处和出口处的流量变化差别较大,则说明试样并没有完全饱和,应当在试样底部施加一个不超过 10 kPa 的低渗透压,顶部连接真空泵,持续抽气,保证顶部进水口的水管内连续出水,不再有气泡为止.当试样确定完全饱和后,再按照既定的方案进行加载.

另外,为了研究高渗透压下滑带土的固结变形特征,本文利用已有的压力室与体积压力控制器设计改装了三轴渗流-固结试验装置(图4),其中体积控制器的最大压力可以给到 2 MPa,可通过自编的代码生成相应波形,并导入配套软件中实现动态渗透压的加载,并监控试样体积与渗流量的实时变化.试样的变形,可通过施加围压的体积压力控制器的体积变化进行计算.

1.3 试验方案设计

根据钻孔资料与监测数据,本文研究的滑带在钻孔中揭示埋深最大为 34.1 m,将滑坡上房屋道路等荷载计算在内,确定本次试验的 σ_3 最大值为 800 kPa.根据试验操作规程要求,土的三轴测试中围压必须比反压大 30 kPa,本文确定最小的围压为 350 kPa.

本文研究共分 A、B、C 三组试验,共计 16 个试样.其中,为了更好地确定滑带土的渗透特性,需要在一维渗透试验中设置比较小的水头间隔,因此 A 组的渗透压加载的间隔相对较小,具体见表 2, A1~A4 渗透压由低至高加载, A5 的渗透压则由高至低施加,每一级渗透压稳定时间为 2 h.

B 组为稳态渗透压作用下的三轴固结试验,每级围压加载 24 h.渗透压取 6 个值,分别为 0、100、130、150、200、300 kPa.

C 组为在 350 kPa 固结完成后施加周期性动态渗透压的三轴渗透试验,按图 5 所示的方案对该组施加动态渗透压的波形,幅值则与 B 组的稳态渗透压保持一致,在张玉明(2018)提出的库水位概化模型基础上,考虑滑坡不同埋深的滑带土所受的渗透压差不一样,但是地下水位升降时间几乎一致,本

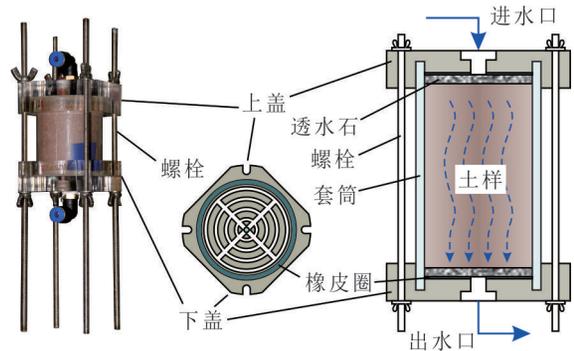


图 3 一维渗透试验装置示意图

Fig.3 The apparatus of 1-D permeability test

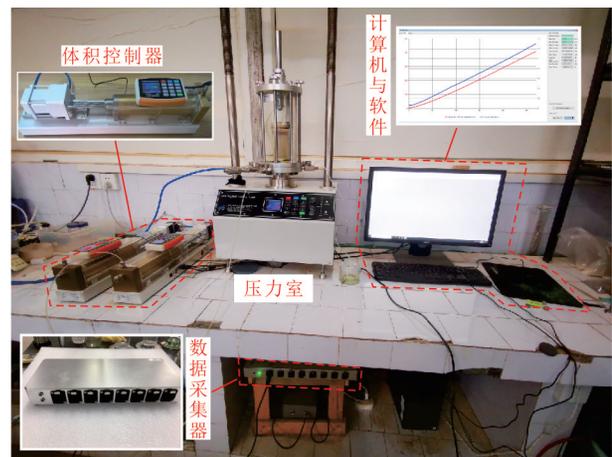


图 4 三轴渗透固结试验装置

Fig.4 The apparatus of triaxial seepage consolidation test

文将渗透压的升降所需时间设置为相同大小,即由稳定值达到波峰或波谷的时间均为 1/24 周期,同时为了测定每个周期内的渗流速度,需要将渗透压的幅值保持在 40 min 以上.每个试样需完成 12 个图 5 中相应的波形.

施加渗透压前,仪器上下排水阀均打开,排水管应浸泡在盛有纯净水的容器中,始终保持试验全过程管道内充满水,确保试样不会脱湿.在 350 kPa 的围压下进行初始固结,当固结体积变形小于 $100 \text{ mm}^3/\text{h}$ 时(为 26~30 h),对试样施加动态渗透压.动态渗透压的波形均采用归一化后的文本数据进行加载,该波形包含了 1 000 个时间序列数据,在软件中更改自定义波形的幅值和周期即可.每个波形的周期均为 2 h.

每组试样在试验前需按照规范测量并记录其实际高度与直径.

表 2 试验分组与编号

Table 2 Test grouping and numbering table

试样编号	围压(kPa)	渗透压(kPa)	时长(h)
A1~A4	/	50~75~100~125~150~200~250~300	16×4
A5	/	300~250~200~150~125~100~75~50	16
B1		0	150
B2		100	150
B3	350~350~400~500~600~800	130	150
B4		150	150
B5		200	150
B6		300	150
C1		0~100~0 (周期×12)	24
C2		0~130~0 (周期×12)	24
C3	350	0~150~0 (周期×12)	24
C4		0~200~0 (周期×12)	24
C5		0~300~0 (周期×12)	24

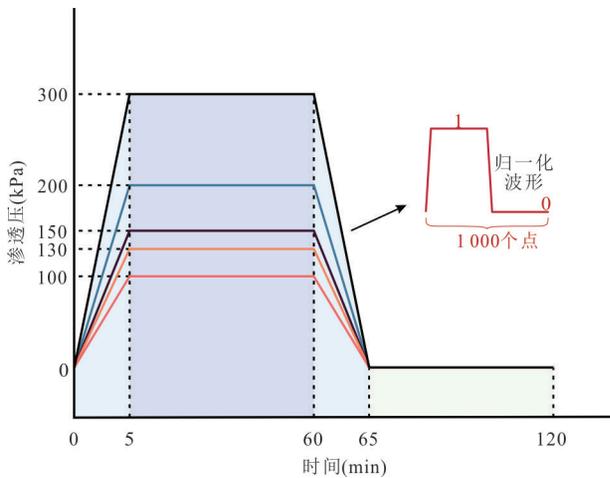


图 5 C 组试验周期性渗透压加载波形

Fig.5 The waveform of cyclical seepage pressure of group C

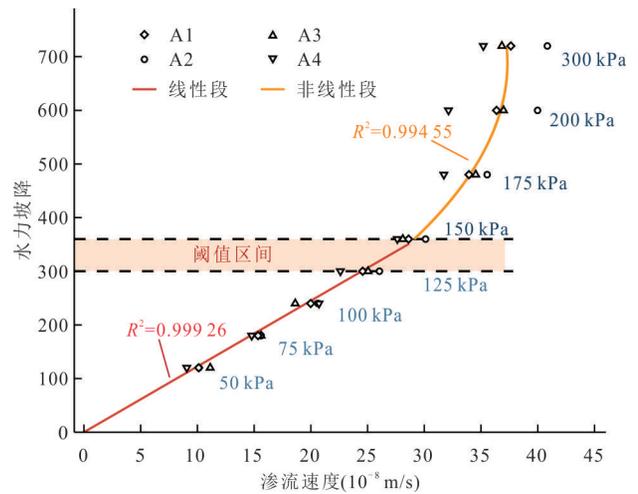


图 6 渗流速度与水力坡降关系曲线

Fig.6 The curves of hydraulic gradient J vs. seepage velocity v

2 试验结果与分析

2.1 一维渗流速度

对 A1~A4 四个土样进行一维渗透试验,按照从低到高的加载顺序依次施加渗透压设计值,因为出口处连接的体积控制器的压力设置为恒定的 0 kPa(误差为 ±1 kPa),所以采用出口处体积控制器记录的体积变化值更能够代表流经土样的渗流量.在试验全过程中,由于渗透水的流速很慢,管道与连接处的水头损失非常小,可以忽略不计.试样内的渗流速度与水力坡降采用式(1)和(2)分别进行计算:

$$v = \frac{\Delta Q}{60A\Delta t}, \quad (1)$$

$$J = \frac{102\Delta P}{H}, \quad (2)$$

式(2)中: ΔQ 为在 Δt 时间间隔内的出口处体积变化量 (mL); Δt 为间隔时间 (min); A 为试样面积 (mm^2); ΔP 为压力差 (kPa, 1 kPa 压力相当于 102 mm 水头); H 为试样高度 (mm); J 为水力坡降; v 为渗流速度 (m/s).

4 个样品的水力坡降与渗流速度的关系图如图 6 可看出,当渗透压低于 125 kPa 时,试样的渗流速度与水力坡降的线性拟合度非常高,也就是在较低的渗透压下,滑带土的渗流特征符合达西定律;而当渗透压高于 150 kPa 时, J - v 曲线的线性拟合度较低.

分别对低渗透压下的 $J-v$ 数据平均值采用达西定律(式 3)进行拟合,而采用 Forchheimer 方程(式 4)对试验数据的平均值进行拟合(万军伟等,2013).

$$v = kJ, \tag{3}$$

$$J = av + bv^2, \tag{4}$$

式(3~4)中: k 为渗透系数(m/s); a 、 b 均为经验常数.

如果设系数 $b=0$,式(4)将退化成式(3).孙明贵等(2006)指出 b 为加速度系数,是反映渗流维持原有速度的指标,该系数越大,其流动状态越难变化.岩土体的劣化的过程,往往会使得这种惯性减弱,即 b 变小.

线性段和非线性段曲线的拟合度分别达到了 0.999 26 与 0.994 55,拟合参数的数值大小分别为: $k=8.16 \times 10^{-10}$ 、 $a=4.90 \times 10^{-8}$ 、 $b=3.24 \times 10^{-17}$,验证了上文线性段和非线性段划分的正确性.对于本文所研究的滑带土,可认为在渗透压逐渐增大的过程中,渗透压除了引起土体内的渗流,高渗透压对土体也存在着一定的压实作用,这是因为滑带土较致密($a_{1-2} < 0.1$),渗透压的能量无法通过土体孔隙及时消散,剩余的能量将作用在土骨架上.

为验证上述观点,另外增加了 A5 试样与 A1~A4 进行对照,并做出 A1(该组数据与平均值最贴合)与 A5 的 $J-v$ 曲线对照(图 7).

从图 7 很明显可以看出,当试样 A5 上游的渗透压加载方式是从高到低的,试样表现出更明显的线性渗流特征,且在相同水力坡降下,A5 的渗流速度均比 A1 要大.

综上所述,渗透压的加载方式对滑带土的渗流特征有着很大的影响,加载过程中滑带土对渗流速度的阻尼效应更大,反之渗透压卸载时滑带土中渗流阻力更小,这是因为在渗透压加载过程中,由于渗透压逐步增加,而因为滑带土较密实,渗透系数较小,在试样的上表面渗透压的能量来不及消散,一部分将以压力的形式作用在土体上,从而导致土孔隙被压缩,而反过来卸载过程中,这种压缩在逐步削弱,土中孔隙结构在自愈合.这一点也可以更好地佐证库岸滑坡在库水位下降时稳定性系数更低(薛阳等,2020;付小林等,2021)的推论.

2.2 稳态渗透压下滑带土渗流固结特性

2.2.1 不同围压下的渗透系数 虽然在上文中,验证了滑带土在高渗透压作用下展现出一定的非线性渗流特征,但是一维渗透试验结果所求得的

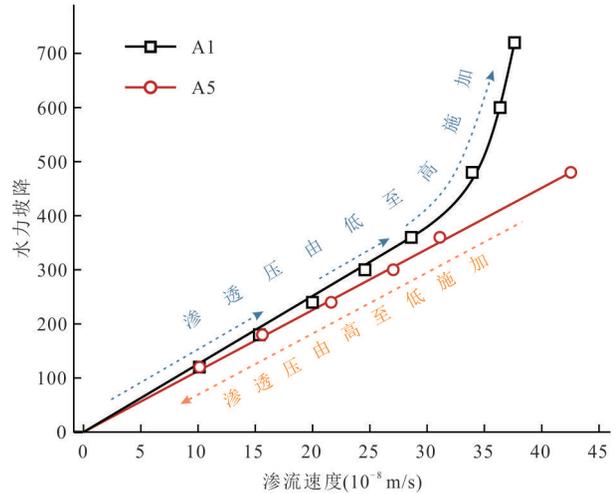


图 7 不同渗透压加载方式试样 $J-v$ 曲线对比
Fig.7 Comparison of $J-v$ curves with different loading paths of p

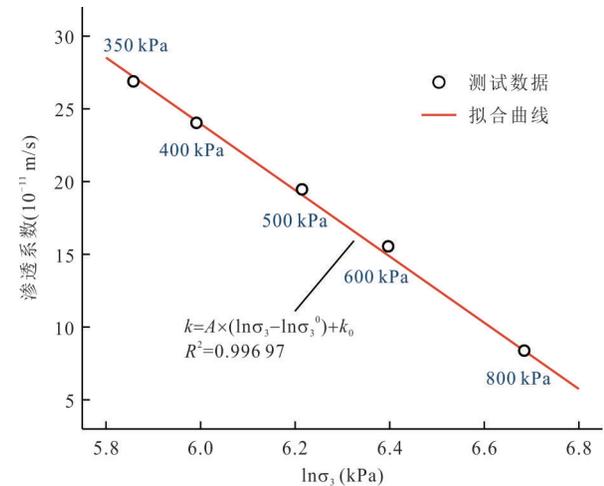


图 8 不同围压下试样的渗透系数
Fig.8 Permeability coefficients of specimens with different σ_3

Forchheimer 方程系数 b 的值很小,所以仍可认为滑带土中的渗流是符合达西定律的(许凯等,2012).

根据式(1)~(3)求出相应的渗透系数 k .将求出的渗透系数与围压 σ_3 的对数绘制成曲线,如图 8 所示.对 $k-\ln\sigma_3$ 数据进行线性拟合,得到渗透系数与围压的关系式为:

$$k \times 10^{11} = -22.78 \times (\ln \sigma_3 - \ln 800) + 8.38, \tag{5}$$

式(5)所展现的关系式与等向固结试验压缩阶段的 $e-\ln p$ 的关系式的形式是完全一致的,可以说明在考虑渗流应力耦合时,渗透系数与孔隙比是正相关的,这与文献(金超奇等,2022)的结论是一致的.

2.2.2 体积应变 本文在排除体积控制器在加卸

载瞬间水本身的压缩性影响后,采用式(6)计算不同渗透压条件下试样的体积应变:

$$\varepsilon_v = \frac{4(\Delta V - V_{cw})}{\pi D_0^2 H_0}, \quad (6)$$

式(6)中: D_0 为试样初始直径(mm); H_0 为试样初始高度(mm); ΔV 为体积控制器的体积变化(mm^3); V_{cw} 为围压稳定前体积控制器水的体积变化(mm^3);本文中,试样体积变化均以压缩为正。

经数据处理后,B组试样的体积应变随时间变化的曲线如图9所示。

由图9可以看出,试样在不同的渗透压作用下的固结变形曲线可大致分为3种类型:(1)未施加渗透压时,试样B1在围压刚加载时有一个瞬时变形,而后固结初始阶段变形呈速度衰减的增长趋势,当到了后期,固结变形趋于稳定;(2)渗透压较小时,试样B2、B3、B4的变形特征相对于B1,整体趋势类似,但是速度衰减的增长阶段极短,这说明在100~150 kPa渗透压下,围压压实作用与渗透压对土骨架的撑开作用在一定程度上是相互抵消了;(3)渗透压较大时,试样B5、B6也有着围压加载时刻的瞬时变形,但是当加载稳定后,两组试样均是先压缩后膨胀,围压与渗透压的差值越大,膨胀出现的时间节点越靠前。

出现上述3种类型变形特征的是因为两种压力作用时,初期以围压的压实作用为主,而后期随着渗透压的能量逐渐在试样内传递,渗透压对试样对土骨架的撑开作用(下文中称为“劈裂作用”)开始发挥效果,而不同压差会使得这两种作用的效果在不同阶段分别发挥着不同的效果。

2.2.3 渗透压对瞬时模量的影响 前文3种类型的变形中都有围压突然改变引起的瞬时变形 ε_v^0 。计算B组各试样的瞬时模量,即围压的变化值与相应的体积应变的比值。具体计算公式如下:

$$E_0 = \frac{\Delta\sigma_3}{\Delta\varepsilon_v^0}, \quad (7)$$

按照式(7)计算出不同渗透压条件下试样的瞬时弹性模量,并引入一个影响系数,来评估渗透压对滑带土弹性变形特性的影响(廖智强,2007)。

$$\zeta(p) = \frac{E_0(p)}{E_0(0)}, \quad (8)$$

式(8)中: ζ 为影响系数; $E_0(p)$ 为渗透压为 p 时的瞬时模量(MPa); $E_0(0)$ 为未施加渗透压时的瞬时模量(MPa)。

渗透压与影响系数关系曲线见图10(将渗透压

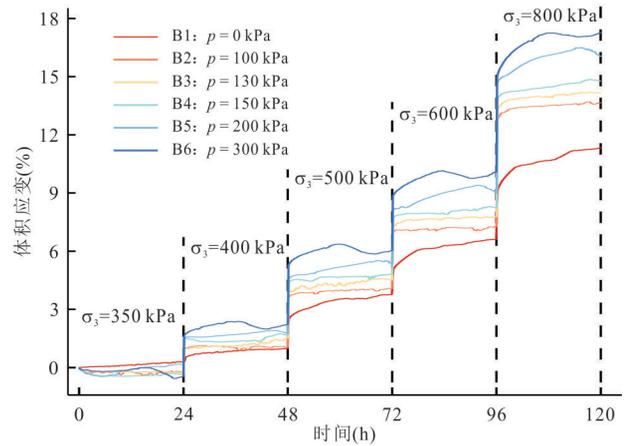


图9 试样体积应变变化曲线

Fig.9 The volumetric strain curves of the specimens

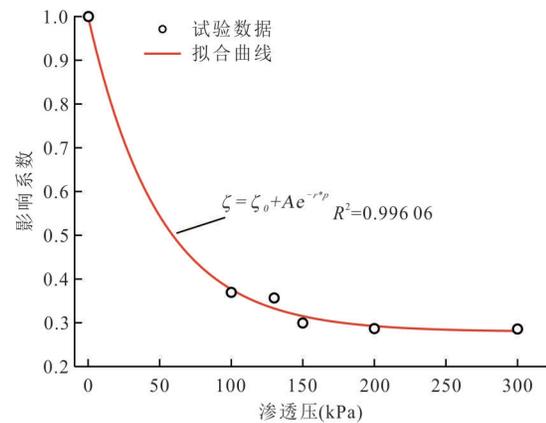


图10 影响系数 ζ 与渗透压 p 关系

Fig.10 The relationship between ζ and p

为0的滑带土瞬时模量作为基准弹性模量 $E_0(0)$ 。由于有渗透压的施加,土样都受到了一定的劣化作用,对比没有施加渗透压的,各试样的瞬时模量影响系数都有较明显的降低,且均随着渗透压增大呈现显著的指数下降的趋势。影响系数与渗透压之间的关系式经拟合后为:

$$\zeta = 0.279 + 0.720e^{-0.020p}. \quad (9)$$

众所周知,弹性模量越大,材料越难变形。从宏观角度上来说,弹性模量是衡量土体抵抗弹性变形能力大小的指标,从细观角度来说,则是土颗粒之间黏合强度的反映。渗透压的施加,对土体骨架有着破坏作用,从而使得土体的弹性变形能力明显下降,但这种劣化效应并不是随着渗透压的增加而线性增加。式(9)所表示的关系式,也可以进一步解释前文中出现高渗透压下滑带土渗流呈现非线性的现象:在渗透压逐步加载的过程中,相同水力坡降对应的渗流速度更低,高渗透压下滑带土的变形能

力下降,其对水的阻力也增加。

2.3 周期性渗透压下滑带土渗流固结特性

2.3.1 不同周期的渗透系数 选取每个周期渗透压达到幅值 p_m 后的最后 30 min 的渗流量,根据式(1)~(3)求出不同周期相应的渗透系数.将绘制出渗透系数与周期数 N 的关系曲线,如图 11 所示.采用下式对渗透系数进行拟合:

$$k_N = k_0 + \frac{k_0 - k_\infty}{1 + (N/N_i)^\beta}, \quad (10)$$

式(10)中各参数的定义为: k_N 为第 N 次循环时试样的渗透系数(m/s); k_0 为渗透系数的初始值,取 2.2.1 中围压为 350 kPa 对应的渗透系数,为一固定参数(m/s); k_∞ 为 N 趋于正无穷时的渗透系数(m/s); N_i 为临界值,无量纲且为自然数; β 为衰减系数,无量纲。

对图 11 的数据按式(10)拟合,得到各参数的大小依次为: $k_0=2.689 \times 10^{-12}$ m/s, $k_\infty=1.099 \times 10^{-12}$ m/s, $N_i=4$, $\beta=0.466$ 。

由于动态渗透压的施加,土样在稳态渗透压和围压作用的基础上又受到了更进一步的劣化作用,对比施加稳态渗透压的,滑带土的渗透系数随着时间有较明显的降低,且随着周期数的增大呈现显著的指数下降的趋势.同时,这个下降趋势的速率也存在着一个阈值 N_i ,即在第 4 个周期后,渗透系数的下降趋势会减缓。

2.3.2 体积应变 动态渗透压下的三轴固结试验完成后,对 C 组的试样同样采用式(6)计算不同时刻的体积应变,并绘制出 C1~C5 的体积应变随时间变化的曲线,具体如图 12 所示。

由图 12 可看出,C 组试样在动态渗透压施加的每一个周期内,均出现了明显的回弹效应(王钰轲等,2020),即:当刚施加渗透压的时候,体积变形均在负增长,试样发生膨胀,孔隙比增大;当渗透压卸载(该过程 5 min 内完成)后,试样因渗透压施加的变形在逐渐恢复,出现明显的回弹效应.也就是,每个周期内 C 组试样都是先体积膨胀,而后体积压缩,但是膨胀的体积与压缩的体积并不相等,各周期的始末阶段的体积应变存在着一个差值,说明动态渗透压对土体造成的变形有一部分是不可恢复的。

为分析上述不可恢复变形的累积效果.可以只关注每个周期最后时刻的变形,在时间轴上,C 组试样也是出现明显的先膨胀后压缩的现象,在曲线

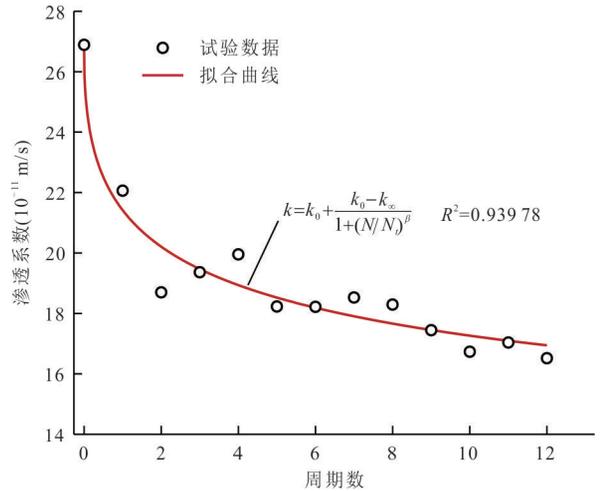


图 11 滑带土渗透系数 k 与周期数 N 关系
Fig.11 The relationship between k vs. N

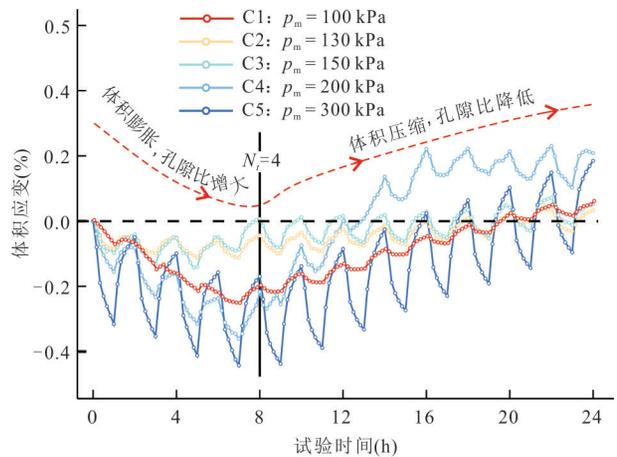


图 12 周期性动态渗透压下滑带土试样体积应变变化曲线
Fig.12 The volumetric strain curves with cyclical seepage pressure

上表现为,体应变均是先向纵轴负方向变化,而后在某时间点,体应变反过来增大.这是因为试样在 350 kPa 下的围压完成固结后,土体内结构已经稳定,当渗透压施加后,土中逐步产生孔隙水压力,使土的孔隙率增大,但是随着渗透压能量逐渐传递到试样内部,颗粒排列逐渐趋于稳定,围压的压实作用扮演着更重要的角色.而从图 12 可以很清晰地发现,由膨胀至压缩的变形转换时间,为在开始施加动态渗透压后的 6~8 h 内,即在第 3 个或第 4 个周期,这与前文所拟合得到的参数 N_i 是高度吻合的.这一现象,可以在后续研究中,结合试样内孔隙水压力分布或者试样不同高度的局部变形特征,找到一个合适的本构去描述渗透压与围压耦合作用下滑带土的应力应变关系.这也将会为研究

考虑渗透压变化的库岸滑坡岩土体流变本构提供强有力的理论支撑。

3 结论

通过开展高渗透压下一维渗透试验与稳(动)态渗透压下三轴渗透试验,分析试样的渗透特性、固结变形与应力应变路径等,本文得到了以下主要结论。

(1)渗透压加载过程中,当渗透压较小时,滑带土中的渗流满足达西定律,而当渗透压较大时,滑带土中的渗流呈现非线性,渗流的线性与非线性特征的阈值在 125~150 kPa;渗透压卸载过程中,滑带土中的渗流符合达西定律。

(2)滑带土的渗透系数与围压的对数成线性关系,与等向固结试验压缩阶段的 $e-\ln p$ 的关系式形式一致,说明在渗流应力耦合过程中,渗透系数与体积应变或孔隙比是正相关的。

(3)未施加渗透压的试样在围压加载时有一个瞬时变形,初始阶段变形减速增长趋势,后期变形趋于稳定;施加较小稳态渗透压的试样与前者整体趋势类似,但是减速增长阶段极短,围压的压实作用与渗透压的劈裂作用在一定程度上相互抵消;施加了较大稳态渗透压的试样在加载稳定后均是先压缩后膨胀,围压与渗透压的差值越大,膨胀出现的时间节点越靠前。

(4)渗透压的施加会使得滑带土受到一定的劣化作用,对比未施加渗透压的试样,其瞬时模量影响系数都有较明显的降低,且随着渗透压增大呈现显著的指数下降的趋势。

(5)动态渗透压会使得滑带土的渗透系数随着波动次数呈现指数下降趋势,且使滑带土在一个周期内均出现回弹效应,所有试样在累积变形上也是先膨胀再压缩,累积变形回弹的时间节点与渗透系数衰减速率的阈值一致。

References

An, P. J., Lu, S., Tang, H. M., et al., 2022. Meso-Structure Evolution of the Sliding Zone under Seepage Conditions. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 41(6): 169–179(in Chinese with English abstract).

Chen, N. Y., Meng, Q. S., Ma, L., et al., 2014. Study on Consolidation Behavior of Silty Soil under Coupling Action of Load and Water Level Fluctuation. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 42(9):11–16(in Chinese with Eng-

lish abstract).

Chen, Y., Yang, Y., Cao, L., 2017. Deformation Characteristics Simulation of Bank Slope Saturated Soils under Special Stress Paths. *Rock and Soil Mechanics*, 38(3):672–677, 684(in Chinese with English abstract).

Deng, H. F., Xiao, Y., Fang, J. C., et al., 2017. Shear Strength Degradation and Slope Stability of Soils at Hydro-Fluctuation Belt of River Bank Slope during Drying-Wetting Cycle. *Rock and Soil Mechanics*, 38(9):2629–2638 (in Chinese with English abstract).

Donati, D., Stead, D., Stewart, T. W., et al., 2020. Numerical Modelling of Slope Damage in Large, Slowly Moving Rockslides: Insights from the Downie Slide, British Columbia, Canada. *Engineering Geology*, 273:105693. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105693>

Fu, X. L., Tang, M. G., Ye, R. Q., et al., 2021. Study on Deformation and Stability of Hydrodynamic Landslide under Different Reservoir Water Fluctuation Modes. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 52(1): 201–211 (in Chinese with English abstract).

Gao, M., Chai, S. H., 2016. Deformation Response of the Unsaturated Soft Clay under Water Level Fluctuations. *Soil Engineering and Foundation*, 30(4): 491–494(in Chinese with English abstract).

He, C., Tang, H. M., Shen, P. W., et al., 2021. Progressive Failure Mode and Stability Reliability of Strain-Softening Slope. *Earth Science*, 46(2): 697–707(in Chinese with English abstract).

He, C. C., Hu, X. L., Tannant, D. D., et al., 2018. Response of a Landslide to Reservoir Impoundment in Model Tests. *Engineering Geology*, 247: 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.10.021>

Hu, C. M., Yuan, Y. L., Mei, Y., et al., 2020. Comprehensive Strength Deterioration Model of Compacted Loess Exposed to Drying-Wetting Cycles. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(1): 383–398. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01561-8>

Jin, C. Q., Xu, C. J., Jiang, P., et al., 2022. One Dimensional Consolidation Calculation Considering the Change of Permeability Coefficient with Time and the Influence of Consolidation State. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 44(5):157–164(in Chinese with English abstract).

Kang, X., Wang, S., Wu, W., et al., 2022. Residual State Rate Effects of Shear-Zone Soil Regulating Slow-to-Fast Transition of Catastrophic Landslides. *Engineering Geology*, 304: 106692. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106692>

- Lei, X. L., 2011. Possible Roles of the Zipingpu Reservoir in Triggering the 2008 Wenchuan Earthquake. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(4): 844–854. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2010.05.004>
- Liao, K., Wu, Y. P., Miao, F. S., 2024. System Reliability Analysis of Reservoir Landslides: Insights from Long-Term Reservoir Operation. *Journal of Earth Science*, 35(5): 1583–1593. <https://doi.org/10.1007/s12583-022-1668-3>
- Liao, Z. Q., 2007. Experimental Study and Mechanism Analysis of Transient Modulus Changing Law of MSW. *Rock and Soil Mechanics*, 28(3): 482–486(in Chinese with English abstract).
- Luo, H. M., Tang, H. M., Zhang, G. C., et al., 2008. The Influence of Water Level Fluctuation on the Bank Landslide Stability. *Earth Science*, 33(5): 687–692(in Chinese with English abstract).
- Sun, M. G., Huang, X. W., Li, T. Z., et al., 2006. Seepage Properties of Non-Darcy Flow in Complete Failure Process of Limestone. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25(3): 484–491(in Chinese with English abstract).
- Wan, J. W., Huang, K., Chen, C. X., 2013. Reassessing Darcy's Law on Water Flow in Porous Media. *Earth Science*, 38(6): 1327–1330(in Chinese with English abstract).
- Wang, S., Wang, J. E., Wu, W., et al., 2020. Creep Properties of Clastic Soil in a Reactivated Slow-Moving Landslide in the Three Gorges Reservoir Region, China. *Engineering Geology*, 267: 105493. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105493>
- Wang, S., Wu, W., Wang, J. G., et al., 2018. Residual-State Creep of Clastic Soil in a Reactivated Slow-Moving Landslide in the Three Gorges Reservoir Region, China. *Landslides*, 15(12): 2413–2422. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1043-8>
- Wang, Y. K., Wan, Y. S., Fang, H. Y., et al., 2020. Experimental Study of Cyclic Behavior of Soft Clay under Circle Stress Paths. *Rock and Soil Mechanics*, 41(5): 1643–1652(in Chinese with English abstract).
- Xiang, L., Wang, S. M., Wang, L., 2014. Response of Typical Hydrodynamic Pressure Landslide to Reservoir Water Level Fluctuation: Shuping Landslide in Three Gorges Reservoir as an Example. *Journal of Engineering Geology*, 22(5): 876–882(in Chinese with English abstract).
- Xu, K., Lei, X. W., Meng, Q. S., et al., 2012. Study of Inertial Coefficient of Non-Darcy Seepage Flow. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31(1): 164–170(in Chinese with English abstract).
- Xue, Y., Wu, Y. P., Miao, F. S., et al., 2020. Seepage and Deformation Analysis of Baishuihe Landslide Considering Spatial Variability of Saturated Hydraulic Conductivity under Reservoir Water Level Fluctuation. *Rock and Soil Mechanics*, 41(5): 1709–1720(in Chinese with English abstract).
- Yang, X., Lei, X. W., Meng, Q. S., 2011. Laboratory Investigation on the Shear Strength Characteristics of Silt under Coupling Effect of Changes in Groundwater Table and Vertical Load. *Construction & Design for Project*, (10): 118–120(in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. T., Dai, Z. W., Lu, Y. S., et al., 2024. Deformation Characteristics and Stability Changes Characteristics of Reservoir Landslides with Double-Sliding Zones. *Earth Science*, 49(4): 1498–1514(in Chinese with English abstract).
- Zhang, D., Li, L. X., Hu, X. L., et al., 2021. Effect of Long-Term Immersion in Static Water on the Physical, Chemical, and Mechanical Properties of Sliding Zone Soil in the Three Gorges Reservoir Area. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 40(5): 281–289(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. M., 2018. Multi-Field Characteristics and Evolution Mechanism of Majiagou Landslide-Stabilizing Piles System under Reservoir Operations (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan(in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z. F., Wang, J. G., Huang, Y., et al., 2014. Conceptual Data Model and Method of Settlement Calculation for Deformation and Water Release from Saturated Soft Soil. *Environmental Earth Sciences*, 71(9): 4235–4245. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2818-9>
- Zhu, Y. F., Yao, X., Yao, L. H., et al., 2022. Identifying the Mechanism of Toppling Deformation by InSAR: A Case Study in Xiluodu Reservoir, Jinsha River. *Landslides*, 19(10): 2311–2327. <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01908-5>

中文参考文献

- 安鹏举, 鲁莎, 唐辉明, 等, 2022. 渗透作用下滑带微观结构演变特性. *地质科技通报*, 41(6): 169–179.
- 陈能远, 孟庆山, 马丽, 等, 2014. 荷载与水位波动耦合作用下粉土的固结性状研究. *工程勘察*, 42(9): 11–16.
- 陈勇, 杨迎, 曹玲, 2017. 特殊应力路径下岸坡饱和土体变形特性模拟. *岩土力学*, 38(3): 672–677, 684.
- 邓华锋, 肖瑶, 方景成, 等, 2017. 干湿循环作用下岸坡消落带土体抗剪强度劣化规律及其对岸坡稳定性影响研究. *岩土力学*, 38(9): 2629–2638.

- 付小林, 汤明高, 叶润青, 等, 2021. 不同库水消落方式下动水压力型滑坡变形与稳定性响应研究. 水利水电技术(中英文), 52(1):201—211.
- 高明, 柴守宏, 2016. 非饱和和软粘土在水位波动下的变形响应. 土工基础, 30(4):491—494.
- 何成, 唐辉明, 申培武, 等, 2021. 应变软化边坡渐进破坏模式及稳定性可靠度. 地球科学, 46(2):697—707.
- 金超奇, 徐长节, 江平, 等, 2022. 考虑渗透系数随时间变化及固结状态影响的一维固结计算. 土木与环境工程学报(中英文), 44(5):157—164.
- 廖智强, 2007. 垃圾土瞬时模量变化规律的试验研究及机制分析. 岩土力学, 28(3):482—486.
- 罗红明, 唐辉明, 章广成, 等, 2008. 库水位涨落对库岸滑坡稳定性的影响. 地球科学, 33(5):687—692.
- 单慧媚, 彭三曦, 梁和成, 等, 2018. 多次饱水下水化学作用对库岸土体的微结构效应研究. 自然灾害学报, 27(3):39—46.
- 孙明贵, 黄先伍, 李天珍, 等, 2006. 石灰岩应力—应变全过程的非 Darcy 流渗透特性. 岩石力学与工程学报, 25(3):484—491.
- 万军伟, 黄琨, 陈崇希, 2013. 达西定律成立吗. 地球科学, 38(6):1327—1330.
- 王钰轲, 万永帅, 方宏远, 等, 2020. 圆形应力路径下软黏土的动力特性试验研究. 岩土力学, 41(5):1643—1652.
- 向玲, 王世梅, 王力, 2014. 动水压力型滑坡对库水位升降作用的响应:以三峡库区树坪滑坡为例. 工程地质学报, 22(5):876—882.
- 许凯, 雷学文, 孟庆山, 等, 2012. 非达西渗流惯性系数研究. 岩石力学与工程学报, 31(1):164—170.
- 薛阳, 吴益平, 苗发盛, 等, 2020. 库水升降条件下考虑饱和渗透系数空间变异性的白水河滑坡渗流变形分析. 岩土力学, 41(5):1709—1720.
- 杨希, 雷学文, 孟庆山, 2011. 水位波动与荷载耦合作用下粉土强度特性试验研究. 工程建设与设计, (10):118—120.
- 杨雨亭, 代贞伟, 陆愈实, 等, 2024. 库岸古滑坡复活变形特征及双滑带稳定性响应. 地球科学, 49(4):1498—1514.
- 张迪, 李岚星, 胡新丽, 等, 2021. 长期静水浸泡对三峡库区滑带土物理—化学—力学性质的影响. 地质科技通报, 40(5):281—289.
- 张玉明, 2018. 水库运行条件下马家沟滑坡—抗滑桩体系多场特征与演化机理研究(博士学位论文). 武汉:中国地质大学.