

北疆白砂岩力学特性及其微观机制试验研究

杨振杰^{1,2}, 张凌凯^{1,2}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;
2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:为深入分析北疆白砂岩的力学特性,通过开展不同因素条件下白砂岩的直剪、压缩、渗透以及SEM扫描电镜试验,从宏观、微观角度分析了其力学特性并揭示了其微观机制。试验结果表明:直剪试验中,黏聚力随含水率增大呈二次抛物线变化规律,在最优含水率附近达到峰值,内摩擦角随含水率增大呈线性下降趋势;随着干密度的增大,黏聚力与内摩擦角均呈线性上升趋势。压缩试验中,随着含水率增大,压缩指数逐渐增大,回弹指数呈波动变化;随着干密度的增大,压缩指数与回弹指数逐渐减小,函数关系可用指数函数表示;微观方面,随着竖向压力增大,粒径增大,圆度、孔径及微观孔隙率减小,颗粒与孔隙有明显定向性,其中微观孔隙率是影响压缩指标的主要因素。渗透试验中,渗透系数随着干密度增大呈指数趋势下降,在 $1.60 \sim 1.84 \text{ g/cm}^3$ 范围内渗透系数数量级从 10^{-4} 降至 10^{-6} ;微观方面,随着干密度增大,架空孔隙减少,土体渗透性降低,各项微观参数中平均孔径与渗透系数有显著的相关性,是影响白砂岩渗透性的重要因素。

关键词:白砂岩;剪切特性;压缩特性;渗透特性;微观机制;北疆

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2024)05-0094-09

Experimental study on mechanical characteristics and microscopic mechanism of white sandstone in northern Xinjiang//YANG Zhenjie^{1,2}, ZHANG Lingkai^{1,2} (1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, China)

Abstract: In order to analyze the mechanical properties of white sandstone in northern Xinjiang, the direct shear, compression, permeability and SEM tests of white sandstone under different factors were carried out to analyze the mechanical properties from the macro and micro perspectives and reveal its microscopic mechanism. The test results show that in the direct shear test, the cohesion changes parabolically with the increase of moisture content, reaching a peak near the optimal moisture content, the internal friction angle decreases linearly with the increase of moisture content, and the cohesion and internal friction angle both show a linear upward trend with the increase of dry density. In the compression test, the compression index gradually increases and the rebound index fluctuates with the increase of moisture content, the compression index and rebound index decrease exponentially with the increase of dry density, the particle size increases and the roundness, pore size and microscopic porosity decrease with the increase of vertical pressure, the particles and pores have obvious orientation, and the microscopic porosity is the main factor affecting the compression index. In the permeability test, the permeability coefficient decreases exponentially with the increase of dry density, the magnitude of permeability coefficient decreases from 10^{-4} to 10^{-6} when the dry density increases from 1.60 g/cm^3 to 1.84 g/cm^3 , the trellis pore and permeability decrease with the increase of dry density, there is a significant correlation between the average pore size and permeability coefficient, and the average pore size is the key factor influencing the permeability of white sandstone.

Key words: white sandstone; shear characteristics; compression characteristics; permeability; microscopic mechanism; northern Xinjiang

北疆供水一期工程是我国西北地区建成的最大的供水工程,该工程穿越了泥岩、砂质泥岩、含砾泥

岩等多种地层区域,其中戈壁明渠段全长120.62 km,分布了94 km的膨胀土^[1]。因膨胀土具

基金项目:新疆维吾尔自治区中央引导地方科技发展资金项目(ZYYD2024CG20);2023年度自治区“天山英才”培养计划青年拔尖人才项目(2023TSYCJU0007);2023年新疆农业大学研究生校级科研创新计划项目(XJAUGRI2023041)

作者简介:杨振杰(1997—),男,硕士研究生,主要从事砂土力学特性试验研究。E-mail:y_zhenjie@163.com

通信作者:张凌凯(1987—),男,副教授,博士,主要从事环境岩土工程研究。E-mail:xjau_zlk@163.com

有显著的胀缩性,建设初期采用当地白砂岩对渠基膨胀土进行换填,自 2000 年运行以来,渠坡仍多次发生滑动破坏。为明确其破坏机理,需对白砂岩力学特性进行深入分析。

白砂岩为砂类土,天然状态下为灰白色,遭到渠水浸入后具有显著的黏性,干燥后强度上升,这不同于普通的砂土。目前国内外学者关于砂土的研究较多,黄琨等^[2-5]对砂土开展了直剪试验,研究结果表明随着含水率的增大,黏聚力先增大后减小,内摩擦角无明显变化;朱旭芬等^[6]对加固砂土进行了直剪试验,发现随着砂土中聚合物和纤维含量增大,抗剪强度明显上升;孙越等^[7]对石英砂、钙质砂开展了侧限压缩试验,发现随着轴向应力增大,两类砂土 $e\text{-}l\text{g}p$ (其中 e 为孔隙比, p 为竖向荷载) 曲线趋向线性关系;唐凯等^[8-9]通过渗透试验探究了砂土级配状态参数(曲率系数、不均匀系数)与渗透系数的函数关系,得出两者的函数关系可分别用线性函数、幂函数表示;付佳佳等^[10-12]采用 SEM 扫描电镜对土体微观结构进行了分析,为揭示其宏观力学特性变化规律奠定了理论基础。相对砂土而言,目前对白砂岩的研究较少,邓铭江等^[13-14]对白砂岩进行了不同环境因素下的三轴试验,结果表明在常温条件下,白砂岩随着压实度上升黏聚力显著增大,内摩擦角无明显变化,而在干湿与冻融循环条件下,黏聚力随循环次数增加略有变化,内摩擦角基本不受影响;谭志翔等^[15]对白砂岩的抗渗各项指标进行了测试,结果表明白砂岩为低渗透性土,饱和渗透系数为 7.23×10^{-7} m/s;席福来等^[16-17]对白砂岩进行了室内力学试验,结果表明白砂岩具有弱冻胀性、高剪切强度、低压缩性等特点。

综上所述,国内外学者对砂土的宏观力学特性与微观结构进行了深入研究,但对于北疆白砂岩这类特殊的砂土研究较少,尤其缺少微观结构的分析成果。基于此,本文以北疆供水一期工程为背景,以白砂岩为研究对象,进行不同因素条件下直剪、压缩、渗透以及 SEM 扫描电镜试验,从宏观、微观角度分析其力学特性,以期为明渠滑坡的破坏机理研究提供参考。

1 试验概况

1.1 试验材料

试验所用白砂岩取自北疆供水一期工程,将取回的土样风干碾碎过 2 mm 筛,根据 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》进行室内基础物理性质试验、X 射线衍射矿物成分试验(该试验样品为研磨过 0.075 mm 筛土样)。由基础物理性质试验结果

可知,最优含水率为 12.2%,最大干密度为 1.86 g/cm^3 ,相对密度为 2.66;液限为 26.3%,塑限为 9.8%,塑性指数为 16.5%,可归类为低液限黏土(代号为 CL)。由 X 射线衍射矿物成分试验结果可知原生矿物主要由石英、钠长石、微斜长石组成,质量分数分别为 68.4%、7.6%、4.7%,次生矿物主要由高岭石、水云母、蒙脱石组成,质量分数分别为 13.2%、3.7%、2.4%。级配曲线如图 1 所示,将其归类为粉土质砂(代号为 SM),其中有效、连续、控制粒径分别为 0.005 mm、0.09 mm、0.257 mm,不均匀系数为 51.4,曲率系数为 6.3,可判定白砂岩为级配不良土。

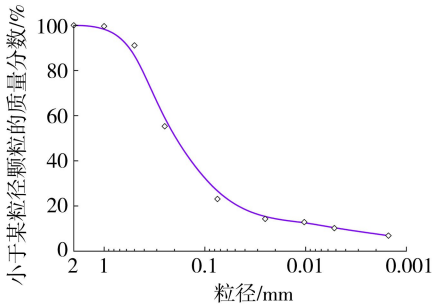


图 1 白砂岩颗粒级配曲线

1.2 试样制备

根据目标含水率与干密度计算出环刀试样所需土样质量。将风干土样放置在 105℃ 烘箱内经 12 h 烘干,将烘干土样取出放置至室温,然后用喷壶对土样均匀洒水并拌合,每次洒水用电子秤控制质量,直至达到目标含水率土体的土水总质量,之后将土样装入塑料袋内密封,24 h 后取平行试样并采用烘干法测量其含水率,与目标含水率误差在 $\pm 0.5\%$ 以内方可继续试验,不符合要求的则重新制样。取符合要求的土样放入压样器中,使用千斤顶对其轴向加压制取环刀试样,具体制样流程如图 2 所示。

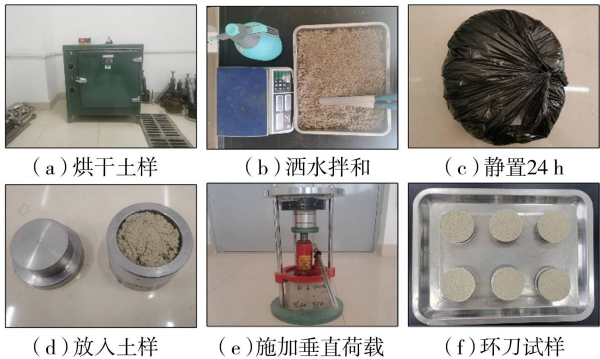


图 2 环刀试样制备流程

1.3 试验方案

为探究白砂岩力学特性变化规律与微观机制,对白砂岩进行直剪、压缩、渗透、SEM 扫描电镜试验,表 1 为各试验方案直剪与压缩试验控制指标。

表 1 直剪与压缩试验控制指标

方案	含水率/%	干密度/(g/cm ³)	方案	含水率/%	干密度/(g/cm ³)
1	6.2	1.80	6	12.2	1.65
2	9.2	1.80	7	12.2	1.70
3	12.2	1.80	8	12.2	1.75
4	15.2	1.80	9	12.2	1.80
5	18.2	1.80	10	12.2	1.84

1.3.1 直剪试验

采用固结快剪试验测定抗剪强度参数,垂直压力设置为 100、200、300、400 kPa,待土体固结 24 h 后采用剪切速度 0.8 mm/min 进行快剪试验。

1.3.2 侧限压缩试验

对不同含水率与干密度试样进行侧限压缩试验,加压方式为加载、卸载、加载,加载与卸载等级设置为 25、50、100、200、400、200、100、50、25、50、100、200、400、800、1 600 kPa。

1.3.3 渗透试验

根据界限含水率试验可知白砂岩具有黏性土性质,故采用变水头渗透试验。将干密度为 1.60、1.65、1.70、1.75、1.80、1.84 g/cm³ 的渗透环刀试样进行抽气饱和,后采用 TST-55 型渗透仪进行饱和渗透系数的测定。

1.3.4 SEM 扫描电镜试验

a. SEM 扫描电镜试验流程。对微观试样进行粘样、喷金处理,后采用 JSM-7610FPlus 型扫描电子显微镜进行抽真空并扫描,采用 Image-J 与 Matlab 软件对微观扫描图像进行定量分析,具体试验过程如图 3 所示。

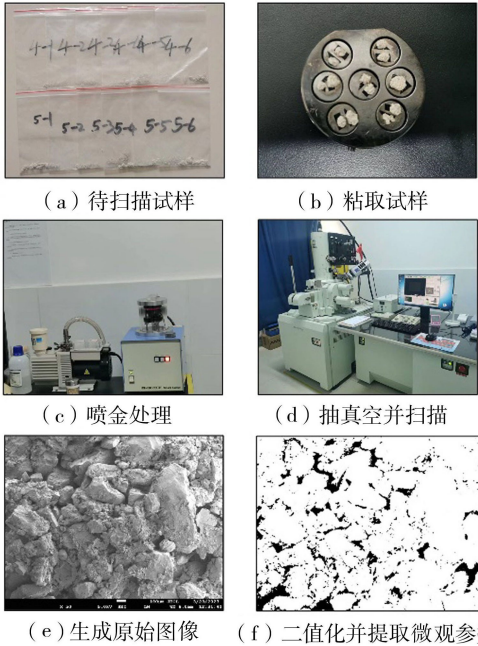


图 3 电镜扫描及图像处理流程

b. 微观定量分析。目前主要采用面积、周长、

等效粒/孔径、长宽比、圆度、表观孔隙率、定向频率等微观参数评价颗粒与孔隙的大小、形态与定向性^[18-20]。本文采用平均粒径 d (不同土颗粒面积等效圆的直径平均值) 与平均圆度 R (范围为 0~1,数值越大,颗粒形态越趋于圆形) 评价颗粒的大小与圆程度,采用不同孔隙面积等效圆的直径平均值与微观孔隙率(土体总体积中孔隙体积的占比)评价孔隙的大小,采用定向频率^[18]评价颗粒与孔隙的定向性。

2 试验结果与分析

2.1 直剪试验结果与分析

2.1.1 含水率对白砂岩剪切特性的影响

图 4 为白砂岩的抗剪强度指标与含水率的关系曲线。由图 4 可知:①在相同初始干密度条件下,黏聚力 c 随含水率 w 增大而增大,至最优含水率附近 ($w=12.4\%$) 达到峰值 ($c=14.76$ kPa),随着 w 继续增大, c 逐渐减小,最低下降至 3.9 kPa,整体变化规律可用二次函数拟合,拟合公式如式 (1) 所示。②随着 w 增大内摩擦角 φ 呈线性下降趋势,变化规律可用一次函数拟合,拟合公式如式 (2) 所示。综上可知,白砂岩 w 从 12.4% 上升至 17.9%, c 发生骤降。在实际工程中,容易导致白砂岩边坡抗剪能力下降,引发滑动破坏,因此应及时抽排,尽可能使白砂岩含水率维持在最优含水率附近。

$$c = -0.28w^2 + 6.64w - 25.38 \quad (R^2 = 0.88) \quad (1)$$

$$\varphi = -0.33w + 33.57 \quad (R^2 = 0.82) \quad (2)$$

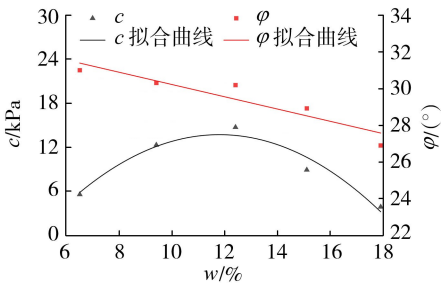


图 4 白砂岩的抗剪强度指标与含水率的关系曲线

2.1.2 干密度对白砂岩剪切特性的影响

图 5 为白砂岩的抗剪强度指标与干密度的关系曲线。由图 5 可知:①在相同初始含水率条件下,随着干密度 ρ_d 增大 c 迅速上升,在 1.65~1.84 g/cm³ 之间黏聚力增长了 15.15 kPa,说明 ρ_d 对 c 有较大的影响。整体变化规律可用一次函数拟合,拟合公式如式 (3) 所示。②随着 ρ_d 增大 φ 缓慢上升,整体变化幅度不大,在 1.65~1.84 g/cm³ 之间内摩擦角增长了 1.33°,表明 ρ_d 对 φ 影响不大,变化规律拟合公式如式 (4) 所示。

$$c = 81.78\rho_d - 132.39 \quad (R^2 = 0.94) \quad (3)$$

$\varphi = 7.19\rho_d + 17.22 \quad (R^2 = 0.89) \quad (4)$

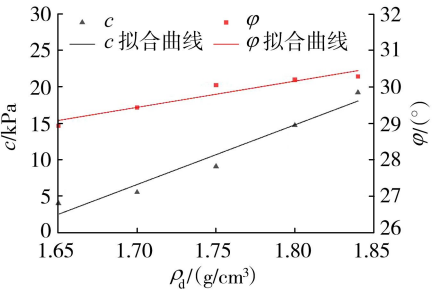


图5 白砂岩的抗剪强度指标与干密度的关系曲线

2.1.3 白砂岩的剪切特性机理分析

a. 不同含水率状态下土体内部土、水、气三相共同存在,土颗粒间存在弯月形收缩水膜^[21],其水膜-空气间的压力差会对土颗粒产生压应力,从而对土体黏聚力产生影响。随着含水率增大,土颗粒间的收缩水膜相应增多,与土颗粒间的接触面积相应增大,压力差即压应力增大,黏聚力随之增大^[3]。但压应力并不会持续增大,其主要由于含水率继续增大,内部空气减少,少量空气被水分包围,这时由收缩水膜产生的压应力并不会作用在土颗粒上^[22],从而导致土颗粒间压应力减小,黏聚力降低。同时随着含水率增大,颗粒间润滑度随之增大,致使内摩擦角随之减小。

b. 随着干密度增大,白砂岩孔隙比减小,内部结构更加密实,颗粒间接触面积与相互作用力增大,颗粒间的滑动与咬合摩擦力也随之增大,导致破坏其内部结构需要更大的剪应力,从而抗剪强度增大,黏聚力与内摩擦角也随之增大。

2.2 压缩试验结果与分析

2.2.1 含水率对白砂岩压缩特性的影响

图6为不同含水率白砂岩e-lgp压缩曲线。由图6可知:①不同含水率e-lgp曲线变化规律相似,较小的固结压力,对土体内部孔隙结构影响不大,产生的竖向变形较小,孔隙比下降缓慢,随着压力增大,孔隙结构受到破坏,孔隙水排出,孔隙体积减小,竖向沉降变形增大,孔隙比迅速下降。②随着含水率增大,孔隙比降低幅度增大,w=6.5%时孔隙比整体下降了8.7%,w=18.1%时孔隙比整体下降了20.69%,

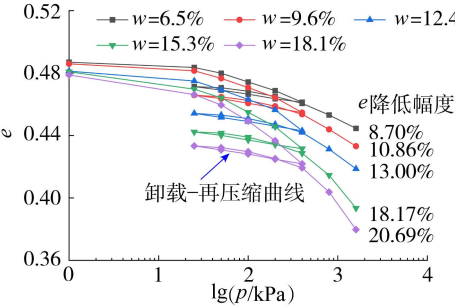


图6 不同含水率白砂岩e-lgp压缩曲线

降低了8.7%,w=18.1%时孔隙比整体下降了20.69%,主要原因是含水率越大,颗粒间摩擦力越小,在压力作用下颗粒间更容易产生相对位移,从而导致竖向沉降变形量相对较大,孔隙比下降幅度较大。

采用压缩指数C_c与回弹指数C_s表示白砂岩的压缩特性,图7为压缩指数、回弹指数与含水率的关系曲线,由图7可知,不同含水率下白砂岩压缩指数小于0.2,为低压缩性土,压缩指数随含水率增大呈线性增大趋势,拟合公式如式(5)所示,回弹指数在0.009附近呈波动变化,可见含水率对白砂岩沉降变形有较明显的影响,对回弹变形可能无影响。

$C_c = 0.004w + 7.037 \times 10^{-4} \quad (R^2 = 0.93) \quad (5)$

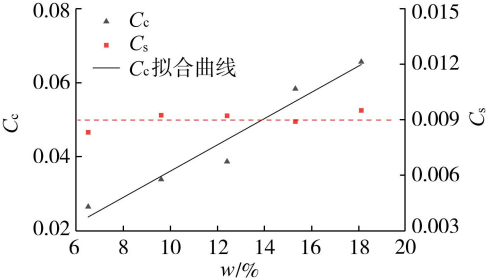


图7 压缩指数、回弹指数与含水率的关系曲线

2.2.2 干密度对白砂岩压缩特性的影响

图8为不同干密度白砂岩e-lgp压缩曲线。由图8可知:①初始干密度越大,初始孔隙比越小,随着竖向压力增大,不同干密度试样孔隙比变化规律相似。在固结前期,孔隙比缓慢下降,e-lgp曲线趋于直线,随着竖向压力增大,孔隙比迅速下降,e-lgp曲线趋于非线性。②初始干密度越大,孔隙比下降幅度越小,其主要由于随着干密度增大,土样内部更加密实,颗粒间连接更加紧密,在竖向压力作用下,土颗粒在发生位移与翻转时受到限制,故而不易产生沉降变形。

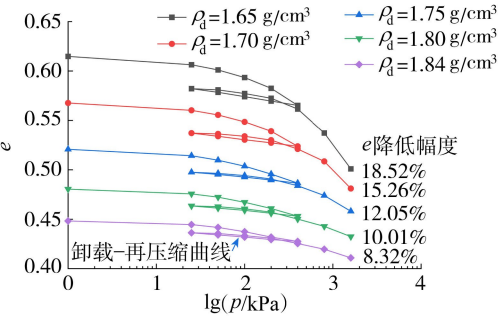


图8 不同干密度白砂岩e-lgp压缩曲线

图9为压缩指数、回弹指数与干密度的关系曲线,由图9可知,不同干密度下白砂岩压缩指数介于0.02~0.10区间内,属于低压缩性土,压缩指数、回弹指数与干密度的关系可用指数函数拟合,拟合公式如式(6)(7)所示。产生这一变化规律的原因是:

随着干密度增大,土样孔隙比逐渐减小,孔隙结构趋于稳定,不易被扰动,从而导致在加载与卸载时产生的竖向沉降变形与回弹变形量相对较小。

$$C_c = e^{-7.68\rho_d + 10.34} \quad (R^2 = 0.99) \quad (6)$$

$$C_s = e^{-3.31\rho_d + 1.15} \quad (R^2 = 0.96) \quad (7)$$

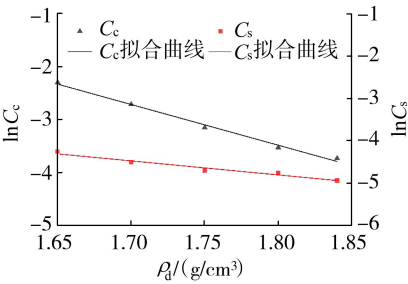


图9 压缩指数、回弹指数与干密度的关系曲线

2.2.3 不同压力下白砂岩压缩特性的微观机制

以干密度 1.8 g/cm³ 为例,图 10 为不同压力下白砂岩试样的 SEM 图像,可见随竖向压力增大白砂岩微观结构发生了改变。①未压缩土样以团粒状结构为主,颗粒间多以点-点方式接触,粒间孔隙较大,且存在一些架空孔隙,颗粒与孔隙无明显定向性。②随着压力增大,在 100~400 kPa 压力作用下,部分颗粒被挤压呈片状,颗粒团聚体发生破碎与重组,小粒径砂颗粒镶嵌在大粒径砂颗粒间,粒间孔隙减小,但架空孔隙依然存在。③随着压力继续增大,架空孔隙明显减少,碎屑颗粒填充在粒间孔隙内,颗粒间接触更加紧密,接触方式向面-面过渡,颗粒与孔隙有明显的定向性。综上所述,在 800~1 600 kPa 范

围内白砂岩架空结构遭到破坏,孔隙体积被压缩,是产生竖向沉降变形的主要阶段,与图 8 中干密度为 1.8 g/cm³ 时 e-lgp 曲线变化规律一致。

a. 颗粒的大小与形态。采用平均粒径与平均圆度描述颗粒的大小与形态。图 11 为白砂岩微观参数与竖向压力之间的关系曲线,图 11(a) 为白砂岩平均粒径、平均圆度与竖向压力的关系,由图 11(a) 可知:①随着压力增大,平均粒径呈线性上升趋势,其主要由于在压力作用下更多颗粒团聚在一起,片状颗粒增多,颗粒的比表面积增大,等效粒径随之增大。此外,发现压力在 0~400 kPa 增长过程中,颗粒平均粒径处于波动变化,这是由于土体内部颗粒在进行重排列,对应团聚体形成、破碎、形成的过程,因此导致在此阶段平均粒径呈波动变化。②随着压力增大,平均圆度呈线性下降趋势,并在 0~400 kPa 阶段呈波动变化,这与平均粒径随竖向压力增大的变化趋势相似,这是由于比表面积增大致使颗粒趋于扁角状,从而导致圆度随之下降。

b. 平均孔径与微观孔隙率。图 11(b) 为平均孔径、微观孔隙率与竖向压力的关系,由图 11(b) 可知,平均孔径与微观孔隙率随压力增大呈线性下降趋势,其主要由于土样在压力作用下,土颗粒产生相对位移,颗粒间间距减小,排列更加紧密,粒间孔隙逐渐闭合,孔径与微观孔隙率随之下降。

c. 颗粒与孔隙的定向性。颗粒与孔隙的定向性采用 0°~360° 范围的玫瑰图表示,如图 11(c) (d) 所示。由图 11(c) 可知,不同竖向压力作用下,

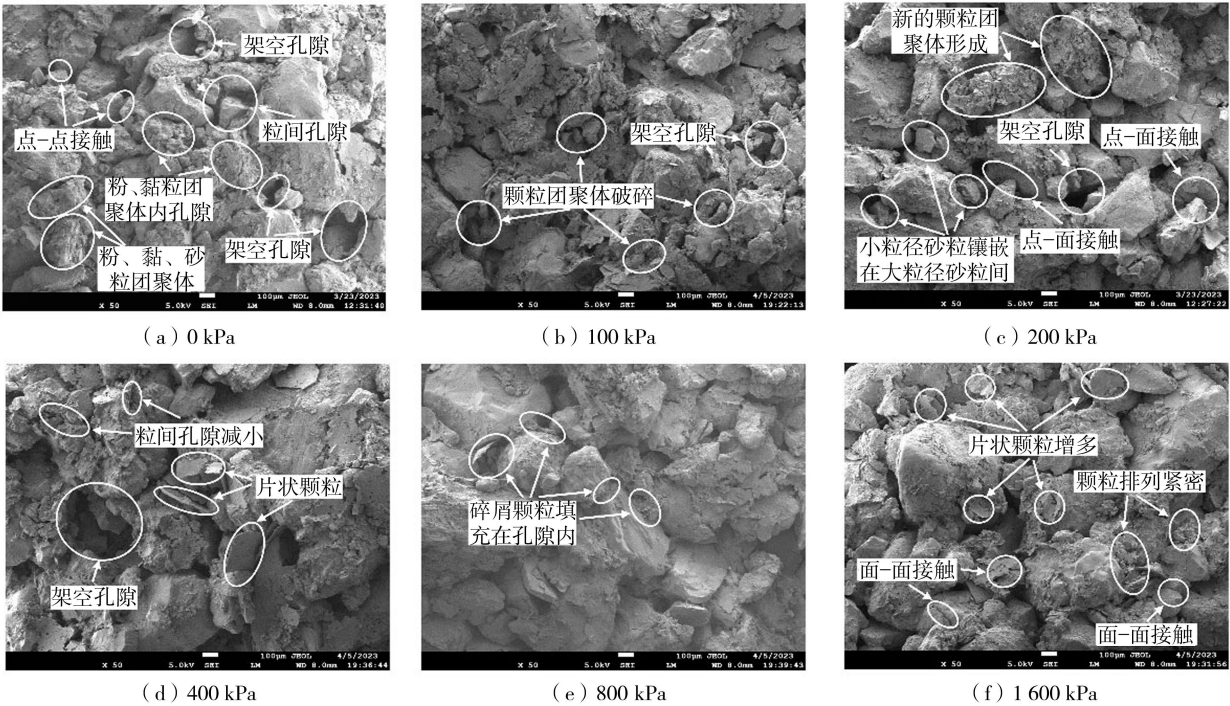
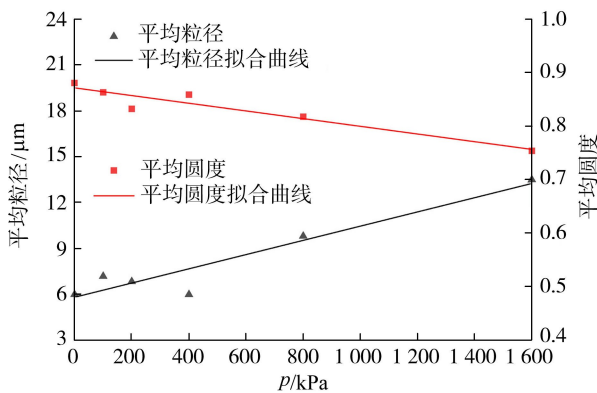
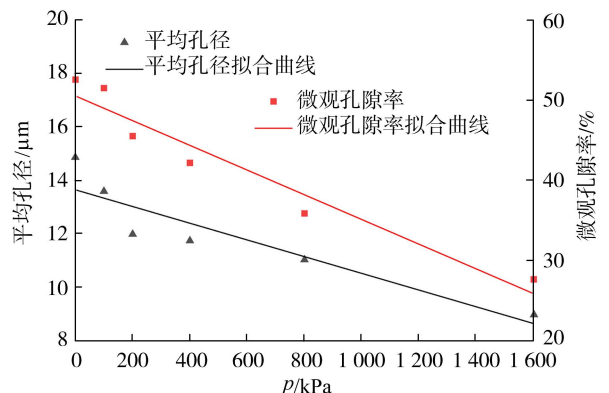


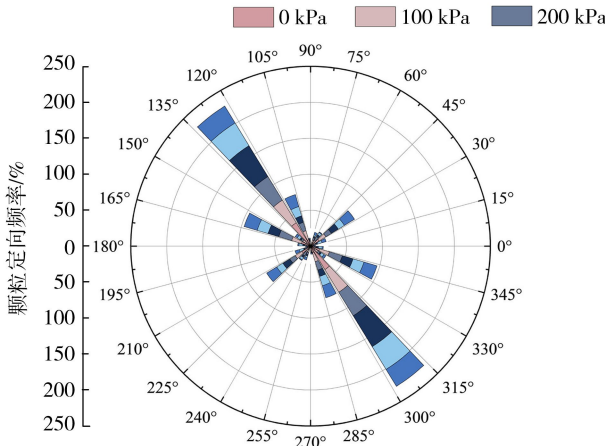
图 10 不同压力下白砂岩试样的 SEM 图像



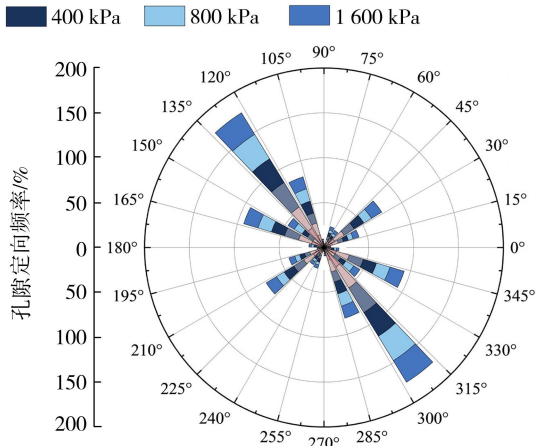
(a) 平均粒径、平均圆度与竖向压力的关系



(b) 平均孔径、微观孔隙率与竖向压力的关系



(c) 不同压力下颗粒定向频率分布玫瑰图



(d) 不同压力下孔隙定向频率分布玫瑰图

图 11 白砂岩微观参数与竖向压力之间的关系曲线

颗粒定向频率在 $120^{\circ} \sim 135^{\circ}$ 、 $300^{\circ} \sim 315^{\circ}$ 区间达到最大值,其主要由于在竖向压力作用下,颗粒发生移动、偏转与重新排列,最终颗粒长轴垂直于加压方向,即水平方向。由图 11(d) 可知,孔隙与颗粒的分布方向具有相似性,都具有一定的定向性,在 $120^{\circ} \sim 135^{\circ}$ 、 $300^{\circ} \sim 315^{\circ}$ 集中分布,其主要由于在竖向压力作用下孔隙逐渐闭合,即趋于水平状态。

2.2.4 相关性分析

为确定各项微观参数对白砂岩压缩特性的影响程度,采用 SPSS 软件,基于皮尔逊相关系数对压缩系数与各项微观参数进行相关性分析,得出平均粒径、平均孔径、平均圆度、微观孔隙率、平均颗粒角与压缩系数的相关系数分别为 -0.557 、 0.875 、 0.670 、 0.885 、 0.212 ,表明在轴压作用下,各项微观参数均对压缩系数有一定的影响,但微观孔隙率的相关性最强,是影响白砂岩压缩特性的一个主要因素。

2.3 渗透试验结果与分析

2.3.1 干密度对白砂岩渗透特性的影响

图 12 为渗透系数 k_s 与干密度 ρ_d 之间的关系曲线,由图 12 可知:①渗透系数随干密度增大呈指数下降趋势,拟合公式如式(8)所示。渗透系数下降过程可分为三个阶段:干密度在 $1.60 \sim 1.70 \text{ g/cm}^3$

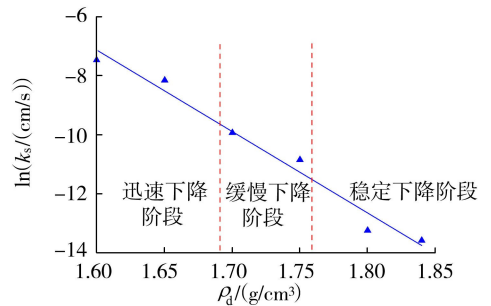


图 12 渗透系数与干密度之间的关系曲线

之间时渗透系数迅速下降,在 $1.70 \sim 1.75 \text{ g/cm}^3$ 之间时渗透系数缓慢下降,在 $1.75 \sim 1.84 \text{ g/cm}^3$ 之间时渗透系数趋于稳定。②干密度为 1.60 g/cm^3 和 1.84 g/cm^3 时渗透系数分别为 $5.83 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 和 $1.27 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$,在 $1.60 \sim 1.84 \text{ g/cm}^3$ 之间时渗透系数数量级从 10^{-4} 降至 10^{-6} ,跨越了两个量级,表明干密度对白砂岩的渗透性影响较大,因此在实际工程中应及时对白砂岩边坡松动部位进行夯实,使白砂岩干密度控制在 1.8 g/cm^3 以上,渗透系数维持在 10^{-6} 量级,以有效预防深层入渗问题。

$$k_s = e^{-27.59\rho_d + 37.02} \quad (R^2 = 0.97) \quad (8)$$

2.3.2 不同干密度白砂岩渗透特性的微观机制

图 13 为不同干密度白砂岩渗透试样的 SEM 图

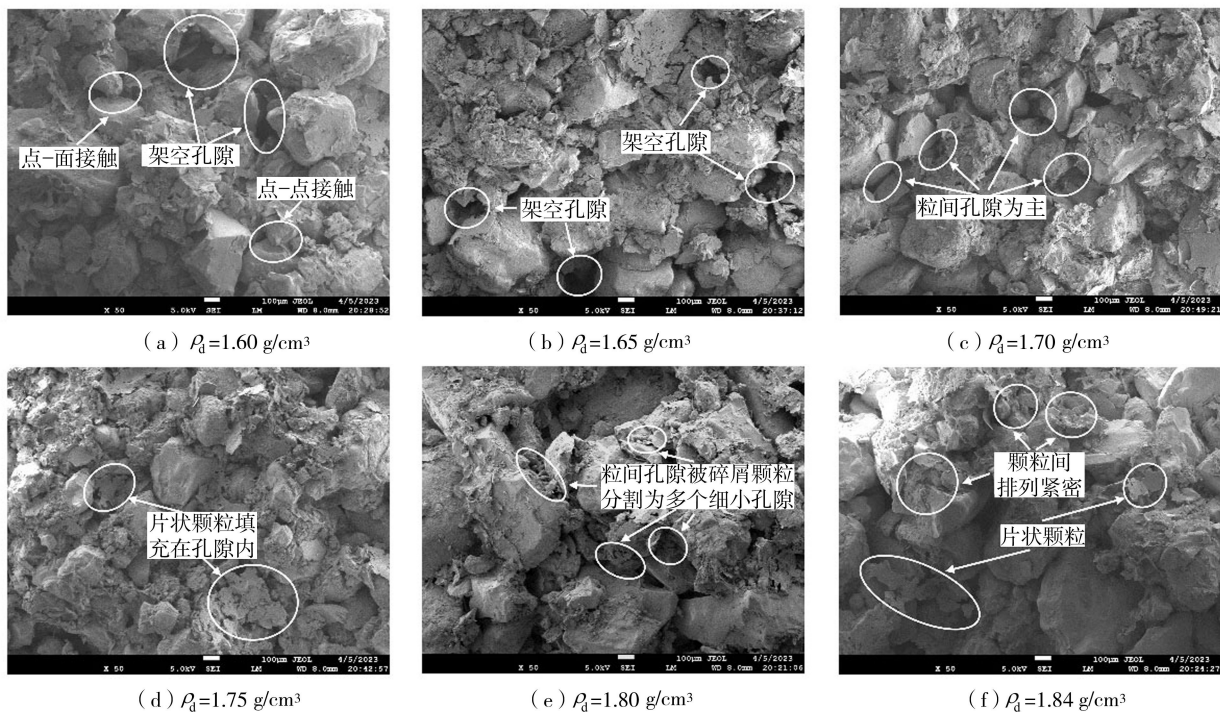


图 13 不同干密度白砂岩渗透试样的 SEM 图像

像,由图 13 可知:①干密度较小时颗粒排列较为松散,以架空孔隙为主,孔隙有较好的连通性,水分在孔隙结构内迁徙过程中阻力较小,渗透性较好;②随着干密度增大,架空孔隙减少,而以粒间孔隙为主,且一些比表面积较大的片状颗粒填充在孔隙内,从而导致过水断面减小,渗透性随之减小;③干密度继续增大,颗粒间连接紧密,碎屑颗粒填充在粒间孔隙内,将粒间孔隙分割为多个细小孔隙,土体内部孔隙分布更为复杂,渗流路径更加曲折,渗透性迅速降低。

为定量度量各项微观参数对渗透系数的影响,选用平均粒径、平均孔径、平均圆度等微观参数与渗透系数进行相关性分析,得到平均粒径、平均孔径、平均圆度、微观孔隙率、平均颗粒角与渗透系数的相关系数分别为-0.576、0.890、0.656、0.686、0.772,可知平均孔径与渗透系数有显著的相关性,是影响白砂岩渗透性的主要因素。

基于各项微观参数与渗透系数相关性分析结果,对平均孔径与渗透系数的关系展开分析,图 14 描述了平均孔径与渗透系数的变化规律,由图 14 可知,随着平均孔径增大渗透系数呈指数上升趋势,这是由于孔径较小时孔隙间连通性差,土体渗透系数变化相对较小,随着孔径增大,孔隙间相互连通,单位体积土体渗流量增大,渗透系数迅速增大。

3 结 论

a. 直剪试验:受气-水界面收缩膜表面张力的

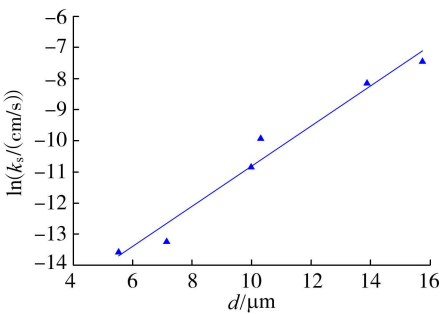


图 14 平均孔径与渗透系数关系曲线

影响,黏聚力随含水率增大呈二次抛物线变化,并在最优含水率附近达到峰值,同时含水率增大降低了颗粒间摩擦力,从而使内摩擦角逐渐减小。随着干密度增大,黏聚力与内摩擦角呈线性上升趋势,主要由颗粒间间距减小,接触面积增大,咬合与滑动摩擦力增大,抗剪强度增大所导致。

b. 压缩试验:随着含水率增大,压缩指数呈线性增大,回弹指数呈波动变化;随着干密度增大,压缩指数与回弹指数在 1.65~1.75 g/cm³ 阶段迅速下降,在 1.75~1.84 g/cm³ 阶段下降速度减缓。不同含水率与干密度白砂岩压缩指数小于 0.2,可判定白砂岩为低压缩性土。微观结果显示:随着压力增大,颗粒团聚体发生破碎与重组,粒间孔隙减小,粒径增大,圆度、孔径、微观孔隙率减小,各项微观参数中微观孔隙率是影响白砂岩压缩特性的主要因素。

c. 渗透试验:干密度对白砂岩渗透性影响较大,在 1.60~1.84 g/cm³ 范围内渗透系数下降了两个量级,整体变化趋势分为迅速、缓慢、稳定下降三

个阶段,可用指数函数拟合。在迅速下降阶段:干密度较小,架空孔隙较多,孔隙连通性较好,渗透系数变化较大。在缓慢下降阶段:随着干密度增大,架空孔隙减少,粒间孔隙增多,渗流速度减缓,渗透系数缓慢下降。在稳定下降阶段:干密度继续增大,粒间孔隙被分割为多个细小孔隙,孔隙连通性较差,渗透性降低,渗透系数逐渐稳定。在各项微观参数中,平均孔径是影响白砂岩渗透性的一个重要因素。

参考文献:

[1] 于海鸣,李江. 新疆北疆一期供水工程关键技术与设计实践[C]//调水工程应用技术交流大会. 沈阳:中国水利水电勘测设计协会,2009:119-127.

[2] 黄琨,万军伟,陈刚,等. 非饱和土的抗剪强度与含水率关系的试验研究[J]. 岩土力学,2012,33(9):2600-2604. (HUANG Kun, WAN Junwei, CHEN Gang, et al. Testing study of relationship between water content and shear strength of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9):2600-2604. (in Chinese))

[3] 林鸿州,李广信,于玉贞,等. 基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响[J]. 岩土力学,2007,28(9):1931-1938. (LIN Hongzhou, LI Guangxin, YU Yuzhen, et al. Influence of matric suction on shear strength behavior of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9):1931-1938. (in Chinese))

[4] DONALD I B. Shear strength measurements in unsaturated non-cohesive soil with negative pore pressures [C]//Proc 2nd Australia-New Zealand Conf Soil Mech Foun Eng. Christchurch: [s. n.],1956: 200-205.

[5] CHENG D H , WANG W K , WEI L , et al. The unsaturated hydraulic parameters for aeolian sand[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 11(2):1-3.

[6] 朱旭芬,郑加强,魏继红,等. 纤维-水溶性聚合物加固砂土抗剪强度特性试验研究[J]. 水利水电科技进展,2023,43(6):50-59. (ZHU Xufen, ZHENG Jiaqiang, WEI Jihong, et al. Experimental study on shear strength characteristics of fiber-water-soluble polymer reinforced sand[J]. Progress in Science and Technology of Water Resources and Hydropower, 2023, 43(6):50-59. (in Chinese))

[7] 孙越,肖杨,周伟等. 钙质砂和石英砂压缩下的颗粒破碎与形状演化[J]. 岩土工程学报,2022,44(6):1061-1068. (SUN Yue, XIAO Yang, ZHOU Wei, et al. Particle fragmentation and shape evolution under compression of calcareous sand and quartz sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(6):1061-1068. (in Chinese))

[8] 唐凯,郭丹,沈才华,等. 细颗粒含量对极细砂渗透性的影响规律和细观机理[J]. 水利水电科技进展,2021,41(6):46-51. (TANG Kai, GUO Dan, SHEN Caihua, et

al. Influence rule of fine particle content on sand permeability and its mesoscopic mechanism [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(6):46-51. (in Chinese))

[9] 苏立君,张宜健,王铁行. 不同粒径级砂土渗透特性试验研究[J]. 岩土力学,2014,35(5):1289-1294. (SU Lijun, ZHANG Yijian, WANG Tiexing. Investigation on permeability of sands with different particle sizes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(5):1289-1294. (in Chinese))

[10] 付佳佳,王炼,尤苏南,等. 黏-砂混合土压缩特性与微观结构特征关系研究[J]. 长江科学院院报,2021,38(5):115-122. (FU Jiajia, WANG Lian, YOU Sunan, et al. Study on the relationship between compressive characteristics and microstructure characteristics of clay-sand mixed soil[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(5):115-122. (in Chinese))

[11] 李温,王海龙,张佳豪,等. 胶粉煤矸石混凝土力学特性及微观结构试验研究[J]. 排灌机械工程学报,2023,41(2):140-146. (LI Wen, WANG Hailong, ZHANG Jiahao, et al. Experimental study on mechanical properties and microstructure of powdered coal gangue concrete[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023,41(2):140-146. (in Chinese))

[12] 何俊,管家贤,张磊,等. 干湿循环对固化污泥微观结构及强度的影响[J]. 水利水电科技进展,2022,42(4):39-44. (HE Jun, GUAN Jiaxian, ZHANG Lei, et al. Effect of dry-wet cycle on microstructure and strength of solidified sludge[J]. Progress in Water Resources and Hydropower Science and Technology, 2022, 42(4):39-44. (in Chinese))

[13] 邓铭江,蔡正银,郭万里,等. 新疆白砂岩特殊物理力学性质试验研究[J]. 岩土工程学报,2020,42(增刊1):1-5. (DENG Mingjiang, CAI Zhengyin, GUO Wanli, et al. Experimental study on special physical and mechanical properties of white sandstone in Northern Xinjiang[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(Sup1):1-5. (in Chinese))

[14] 邓铭江,蔡正银,郭万里,等. 换填及排水改造对北疆输水渠道稳定性的影响[J]. 岩土工程学报,2021,43(5):789-794. (DENG Mingjiang, CAI Zhengyin, GUO Wanli, et al. Effects of replacement and drainage renovation on the stability of water transmission channels in Northern Xinjiang[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(5):789-794. (in Chinese))

[15] 谭志翔,王正中,葛建锐,等. 北疆白砂岩与泥岩的土水特征曲线及渗透曲线实验研究[J]. 岩土工程学报,2020,42(增刊1):229-233. (TAN Zhixiang, WANG Zhengzhong, GE Jianrui, et al. Experimental study on soil-water characteristic curve and permeability curve of

- white sandstone and mudstone in Northern Xinjiang[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42 (Sup1):229-233. (in Chinese))
- [16] 席福来. 准噶尔盆地白砂岩工程特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(5): 62-64. (Xi Fulai. Experimental study on engineering characteristics of white sandstone in Junggar Basin[J]. Journal of Yangtze River Research Institute, 2009, 26(5):62-64. (in Chinese))
- [17] 孙翀,郑飞,庄志凤等. 白砂岩特性分析及其在工程中的利用[J]. 山东水利,2005(10):48-50. (SUN Chong, ZHENG Fei, ZHUANG Zhifeng, et al. Characterization of white sandstone and its utilization in engineering [J]. Shandong Water Conservancy, 2005 (10): 48-50. (in Chinese))
- [18] 张凌凯,崔子晏. 干湿-冻融循环条件下膨胀土的压缩及渗透特性变化规律[J]. 岩土力学,2023,44(3):728-740. (ZHANG Lingkai, CUI Ziyang. Compression and permeability characteristics of expansive soil under dry-wet-freeze-thaw cycles [J]. Geotechnical Mechanics, 2023,44 (3) : 728-740. (in Chinese))
- [19] 张浩,张凌凯,许佳,等. 北疆供水一期工程膨胀土不同循环模式条件下的胀缩特性[J]. 水利水电科技进展, 2023,43(5):107-114. (ZHANG Hao, ZHANG Lingkai, XU Jia, et al. Swelling-shrinkage characteristics of expansive soil under different circulation models in first phase of Northern Xinjiang Water Supply Project [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources and Hydropower, 2023, 43(5):107-114. (in Chinese))
- [20] 苏安双,王宇,石北啸,等. 冻融循环条件下粗粒料变形特性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023,51(6): 61-66. (SU Anshuang, WANG Yu, SHI Beixiao, et al. Experimental study on deformation characteristics of coarse aggregates under freeze-thaw cycling conditions [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023,51(6):61-66. (in Chinese))
- [21] 董倩,侯龙,赵宝云. 基质吸力对非饱和粉质砂土抗剪强度的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(10):4017-4021. (DONG Qian, HOU Long, ZHAO Baoyun. Effect of matrix suction on shear strength of unsaturated silty sand [J]. Journal of Central South University(Natural Science Edition), 2012, 43 (10) : 4017-4021. (in Chinese))
- [22] 李宣,孙德安. 非饱和砂土和粉土的抗剪强度及其预测[J]. 工业建筑,2017,47(3):102-106. (LI Xuan, SUN Dean. Shear strength and prediction of unsaturated sand and silt[J]. Industrial Construction, 2017, 47(3):102-106. (in Chinese))

(收稿日期:2023-10-29 编辑:骆超)

(上接第 86 页)

- [29] 向镇洋,包腾飞,白妍丽,等. 基于混合注意力机制和深度学习的大坝变形预测模型[J]. 水利水电科技进展, 2023,43(2):96-101. (XIANG Zhenyang, BAO Tengfei, BAI Yanli, et al. Dam deformation prediction model based on mixed attention mechanism and deep learning [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023,43(2):96-101. (in Chinese))
- [30] 王新. 乌鲁瓦提水库建设对和田河的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(1):191-194. (WANG Xin. Study on influence of Wuluwati reservoir construction on Hotan River [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2014,25(1):191-194. (in Chinese))
- [31] 王海龙,赵岩,王海军,等. 基于 CEEMDAN-小波包分析的隧道爆破信号去噪方法[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(5):055202. (WANG Hailong, ZHAO Yan, WANG Haijun, et al. De-noising method of tunnel blasting signal based on CEEMDAN decomposition-wavelet packet analysis[J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(5):055202. (in Chinese))
- [32] 李龙起,王梦云,赵皓璆,等. 基于 CEEMDAN-BA-SVR-Adaboost 模型的白水河滑坡位移预测[J]. 长江科学院院报,2021,38(6):52-59. (LI Longqi, WANG Mengyun, ZHAO Haoqiu, et al. Predicting displacement of Baishuihe Landslide using CEEMDAN-BA-SVR-Adaboost model [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021,38(6):52-59. (in Chinese))
- [33] 宿辉,栾亚伟,胡宝文,等. 基于 CEEMDAN 和 SVM 的混凝土破坏状态声发射信号识别[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(1):93-98. (SU Hui, LUAN Yawei, HU Baowen, et al. Acoustic emission signal recognition of concrete failure state based on CEEMDAN and SVM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023,43(1):93-98. (in Chinese))
- [34] 刘伟琪,陈波,葛盼猛,等. 基于聚类分区和 MO-LSSVR 的高拱坝变形预测模型[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(2):102-108. (LIU Weiqi, CHEN Bo, GE Panmeng, et al. Deformation prediction model of a high arch dam based on clustering and MO-LSSVR [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(2):102-108. (in Chinese))

(收稿日期:2023-09-29 编辑:俞云利)