

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.269

引用格式:贾威, 张凌凯, 丁旭升. 塔里木河干流沿岸风积沙物理力学特性及其影响机制[J]. 重庆大学学报, 2025, 48(6): 34-44.



塔里木河干流沿岸风积沙物理力学特性及其影响机制

贾威^{a,b}, 张凌凯^{a,b}, 丁旭升^{a,b}

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

摘要: 塔里木河干流沿岸分布着大量的风积沙, 因季节性洪水的冲刷作用, 导致河岸出现滑动破坏现象。为深入探究其破坏机理, 通过开展室内直剪、压缩、渗透试验, 探究在不同含水率、不同干密度条件下风积沙力学特性的变化规律。试验结果表明, 随着含水率增加, 黏聚力呈先增大后减小趋势, 在最优含水率处达到峰值, 变化曲线可以用二次函数来表示, 内摩擦角呈线性减小趋势。随着含水率增加, 颗粒表面形成了具有黏滞性的水膜, 达到最优含水率后, 水膜产生的黏滞性减弱, 导致黏聚力呈先增大后减小趋势; 水膜加厚导致颗粒间发生滚动时受到的滑动摩擦力减小。随着干密度增加, 黏聚力、内摩擦角均呈线性增大趋势; 且颗粒间距减小, 范德华力增加, 黏聚力增大; 同时颗粒间接触咬合能力增强, 内摩擦角增大。随着含水率增加, 压缩系数、回弹模量均呈线性增大趋势。在同一轴向应力下, 随着含水率增加, 水膜加厚, 颗粒间发生错动位移时所受到的阻力变小, 压缩性增大, 回弹量也增大。随着干密度增加, 压缩系数呈线性减小趋势, 回弹模量呈线性增大趋势; 且颗粒之间的联系更紧密, 颗粒之间发生错动位移时受到的阻力增大, 土体接触点的弹性变形增加, 压缩变形减小, 回弹量增大; 渗透系数呈线性减小趋势, 分布在 $1 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-4}$ cm/s 之间, 与经验得出的理论值相差 2~3 个数量级。对传统的理论渗透系数计算公式进行修正, 排除因干密度较低造成的误差后, 通过试验得到的实测值与计算得出的经验值较为接近, 整体可以用一次函数来表示。随着干密度增加, 水分子通过土体颗粒之间的孔隙时受到阻力变大, 导致其渗透性减弱。

关键词: 风积沙; 剪切特性; 压缩特性; 渗透特性; 影响机制

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2025)06-034-11

Physical and mechanical properties of aeolian sand along the main stream of the Tarim river and its influence mechanism

JIA Wei^{a,b}, ZHANG Lingkai^{a,b}, DING Xusheng^{a,b}

(a. College of Water Conservancy and Civil Engineering; b. Xinjiang Key Laboratory of Water Conservancy Project Safety and Water Disaster Prevention, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, P. R. China)

Abstract: The Tarim river's main stream contains substantial deposits of aeolian sand. Due to the scouring effect of seasonal floods, sliding failures frequently occurs along the riverbanks. To investigate the failure mechanisms,

收稿日期: 2023-11-19 网络出版日期: 2024-05-22

基金项目: 新疆维吾尔自治区杰出青年科学基金资助项目(2022D01E45); 2022 年自治区重点研发任务专项资助项目(2022B03024-3)。

Supported by Outstanding Youth Science Fund Project of Xinjiang Uygur Autonomous Region (2022D01E45) and 2022 Autonomous Region Key R & D Tasks (2022B03024-3).

作者简介: 贾威(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事风积沙力学特性试验方面的研究, (E-mail)1641092720@qq.com。

通信作者: 张凌凯, 男, 副教授, 硕士生导师, (E-mail)xjau_zlk@163.com。

we conducted indoor direct shear, compression, and penetration tests to explore the variation in the mechanical properties of aeolian sand under different water content and dry density conditions. The results show that as water content increases, cohesion initially increases and then decreases, reaching a maximum at the optimum moisture content. This relationship can be expressed by a quadratic function, whereas the internal friction angle decreases linearly. The formation of a viscous water film on the particle surfaces contributes to these effects. Beyond the optimal water content, the viscosity of the water film weakens, resulting in a decline in cohesion and increased sliding between particles. The thickened water film also reduces sliding friction as particles roll over one another. As dry density increases, both cohesion and internal friction angle increase linearly. This is due to decreased particle spacing, enhanced van der Waals forces, and improved inter-particle locking. These factors collectively lead to greater resistance to shear displacement and higher internal friction. Additionally, with increasing water content, both the compression coefficient and modulus of resilience show a linear increasing trend. Under the same axial stress, higher water content leads to a thicker water film, reduced interparticle resistance during displacement, greater compressibility, and higher rebound potential. Conversely, increasing dry density results in a linear decrease in the compression coefficient and a linear increase in the modulus of resilience. Closer particle contact and increased resistance during displacement contributes to reduced compression deformation and enhanced elastic rebound. The permeability coefficient also decreases linearly with increasing dry density, ranging from 1×10^{-4} cm/s to 3×10^{-4} cm/s, which is 2 to 3 orders of magnitude lower than traditional theoretical estimates. A modified theoretical formula for calculating the permeability coefficient is proposed. After eliminating the errors caused by the low dry density, the experimental values closely match the empirical calculations, with the relationship described by a linear function. As dry density increases, the resistance to water molecule migration through soil pores rises, resulting in decreased permeability.

Keywords: aeolian sand; shear characteristics; compression characteristic; permeability characteristics; influence mechanism

塔里木河位于新疆南部,是中国最大的内陆河,其沿岸分布着大量的风积沙。夏季随着温度的升高,高山冰川融雪量增加,伴随着降雨量的增加,河水流量增加,河岸冲刷严重,导致河岸出现滑动破坏现象^[1-2],给塔里木河流域生态输水工程带来了极大的危害。

风积沙具有分布广泛、储量丰富、沉降均匀等优点^[3-6]。继 Khan^[7]提出了风积沙能作为干旱地区建筑材料后,这些年来,国内外学者在风积沙力学特性及工程运用方面做了大量的研究。风积沙颗粒粒径相差悬殊,含水率与干密度的不同会影响到风积沙颗粒之间的接触与排列方式,也是影响土体力学特性的重要因素。国内外学者针对砂性土的力学特性进行了相关研究,并取得了一定的进展。Fang 等^[8]和许仙娥等^[9]通过直剪试验,分析了不同外界因素对风积沙抗剪强度的影响规律,研究发现风积沙在含水率为零时,黏性几乎为零,内摩擦角分布在 20°~40°。Martin 等^[10]和刘清秉等^[11]基于室内试验结果,发现颗粒形状、粒径分布对颗粒介质的力学性质有着显著的影响,认为其原因是复杂的表面形状会增强颗粒间的咬合能力,在剪应力的作用下大小颗粒会发生重新排列,从而增强了试样的抗剪强度。肖建勇等^[12]、张磊等^[13]和张龙菊等^[14]通过设计不同因素的对比试验,研究发现压实程度与剪应力的增加均会提升砂性土的抗剪强度,认为随着压实程度的增加,土体更加密实,剪切面土体的接触点增多,在剪应力的作用下发生剪切位移所需要的能量增加;同时随着剪应力的增加,承担骨架作用的大颗粒发生破裂、重组来消耗做功,进而增强了土体的抗剪强度。刘光秀等^[15]和王李^[16]通过侧限压缩试验研究发现轴向应力对风积沙压缩特性有着重要的影响,随着轴向应力的增加,压缩系数逐渐减小。Cheng 等^[17]、Li 等^[18]针对颗粒级配对土体屈服应力的影响开展压缩试验,研究发现粒径分布均会影响土体的压缩特性,认为在轴向应力的作用下,砂土颗粒会发生的移动、挤压和破碎,导致颗粒分布发生改变,小颗粒会在轴向应力的作用下,通过以上现象位移到相对稳定的状态,土体会产生一定的压缩变形进而影响其压缩特性。土的种类、表面粗糙度、密实度、水温等因素都会影响到土体的渗透系数^[19-24]。邓成

进等^[25]通过重型压实试验,研究发现当砂土细粒含量较多时,在重型碾压作用下颗粒之间联系紧密,且具有一定含量的黏粒,碾压密实后会表现出一定程度的黏性土特征;同时随着密实程度的增加,渗透系数呈减小趋势,认为其主要原因是当该试样密实度较高时,水分子通过土体受到的阻力增大,导致渗透系数减小。

上述研究表明,目前对于砂性土力学性质方面的研究已经取得较为明显的进展,但缺少不同含水率、不同干密度对风积沙直剪压缩渗透力学特性的综合研究,且对其影响机制的阐述也相对较少。基于此,笔者以塔里木河干流沿岸风积沙为研究对象,通过开展室内直剪试验、压缩试验、渗透试验,探究不同含水率、不同干密度对风积沙力学特性的影响,并讨论其影响机制,以期为塔里木河河岸的治理和维护提供理论依据。

1 试验材料及方案

1.1 试验材料

选取的风积沙取自塔里木河干流沿岸,外观呈淡黄色,颗粒粒径不均匀,表面粗糙度高,由现场取样发现,当含水率较低时,土体呈单一颗粒的粉状;当含水率较高时,土体呈凝结在一起的块状,如图1所示。



图1 取样地点及土样

Fig. 1 Sampling site and soil sample

参考《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[26]对该试样进行颗粒试验、击实试验、比重试验、相对密度试验,结果如表1所示,风积沙颗粒粒径分布如图2所示。由图2可知,风积沙的颗粒主要以细颗粒为主,其0.075 mm以下粒径的颗粒占据了整体质量的42.7%,经计算得出的不均匀系数 $C_u=35.7$,曲率系数 $C_c=14.3$,级配不良。

表1 风积沙基本物理性质指标

Table 1 Basic physical property index of aeolian sand

天然含水率 $w/\%$	天然干密度 $\rho_d/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	最优含水率 $w_{opt}/\%$	最大干密度 $\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	颗粒比重 G_s	相对密度 D_r
18.9	1.50	14	1.59	2.68	0.62

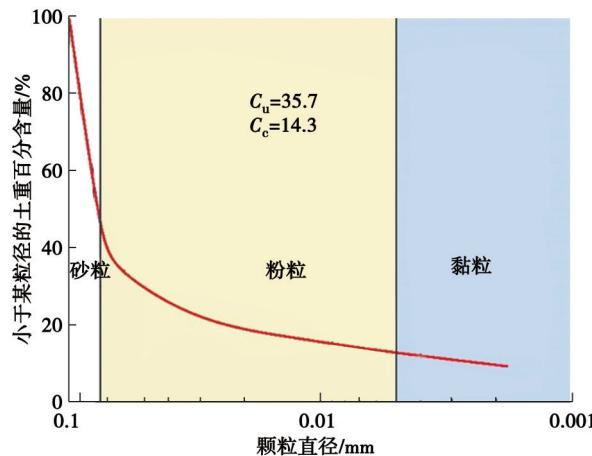


图2 风积沙的颗粒级配曲线

Fig. 2 Particle size distribution curve of aeolian sand

1.2 试验方案

为深入探究风积沙的力学特性,开展直剪试验、压缩试验、渗透试验。直剪、压缩试验控制指标如表2所示。试验步骤如图3所示。

表2 直剪压缩试验控制指标

Table 2 Control index of direct shear compression test

不同含水率		不同干密度	
控制含水率 w/%	控制干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	控制含水率 w/%	控制干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$
8	1.50	14	1.40
11	1.50	14	1.45
14	1.50	14	1.50
17	1.50	14	1.55
20	1.50	14	1.59

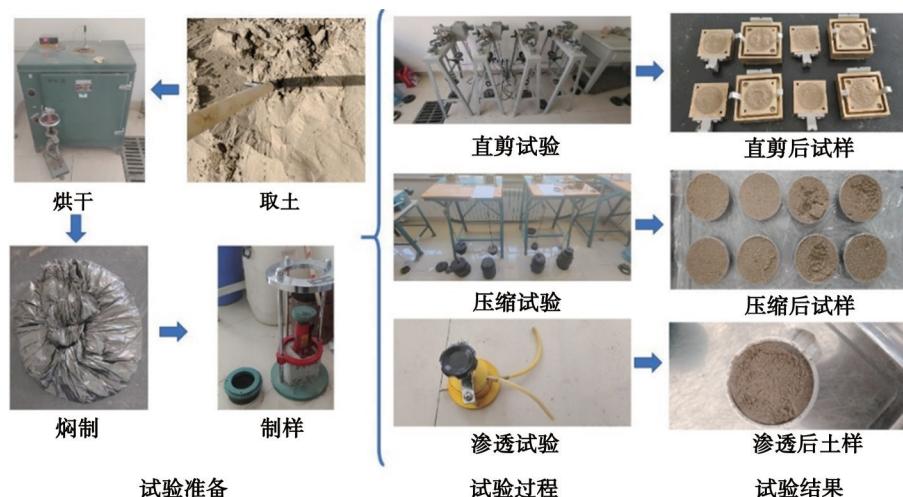


图3 试验步骤流程图

Fig. 3 Flow chart of experimental steps

1.1.1 直剪试验

采用ZJ50-1A型的应变控制式直剪仪试验,探究风积沙抗剪强度与含水率、干密度之间的关系,垂直压カ设置为100、200、300、400 kPa。采用固结快剪,固结时间为24 h,剪切速率为0.8 mm/min,剪切试样直至水平位移6 mm后停止试验。

1.1.2 压缩试验

采用WG-3A型的单杠杆固结仪,探究不同含水率、不同干密度条件下风积沙压缩性指标的变化规律。加压过程采用加载—卸载—再加载的方式,加压等级采用25、50、100、200、400、200、100、50、25、50、100、200、400、800、1 200、1 600 kPa。

1.1.3 渗透试验

采用TST-55型渗透仪,探究在饱和状态下,不同干密度对风积沙渗透系数的影响,控制干密度为1.40、1.45、1.50、1.55、1.59 g/cm³分别对应0.914、0.848、0.787、0.729、0.686的孔隙比。因该土样细粒土含量较多,采用抽气饱和法,即抽气1 h,饱和12 h。

2 试验结果及分析

2.1 风积沙的剪切特性

2.1.1 含水率对风积沙抗剪强度的影响分析

图4为不同含水率风积沙剪切特性的变化规律。由图4(a)可知,当干密度保持不变时,在含水率相同的

条件下,剪应力随着剪切位移的增加而迅速增加,达到峰值后保持不变;随着含水率增加,相同剪切位移对应的剪应力增大。说明当含水率较低时,其抗剪强度较高。图4(b)表明,当干密度相同时,随着含水率增加,其对应的峰值剪应力逐渐减小,当含水率从8%增加到14%时,降低速率不明显,当含水率大于最优含水率14%时,其峰值剪应力随着含水率的增大而迅速降低。可知,风积沙峰值剪应力随着含水率的增加而呈现降低趋势,在最优含水率之前变化不明显,当大于最优含水率时,其对应的峰值剪应力下降明显。由图4(c)可知,风积沙的黏聚力较低,最大黏聚力仅为4.52 kPa,黏聚力随着含水率的增加呈先增加后减小的趋势,以最优含水率为拐点,可以用二次函数来表示,相关系数 $R^2=0.946\ 04$,如式(1)所示;不同含水率风积沙的内摩擦角分布为 $20\text{--}30^\circ$,随着含水率增加,内摩擦角呈线性减小的变化趋势,可用一次函数来表示,相关系数 $R^2=0.915\ 21$,如式(2)所示。

$$c = -2.31 + 61.18w - 0.58w^2, \quad (1)$$

$$\varphi = 33.68 - 0.58w, \quad (2)$$

式中: c 为风积沙的黏聚力; φ 为风积沙的内摩擦角; w 为风积沙的含水率。

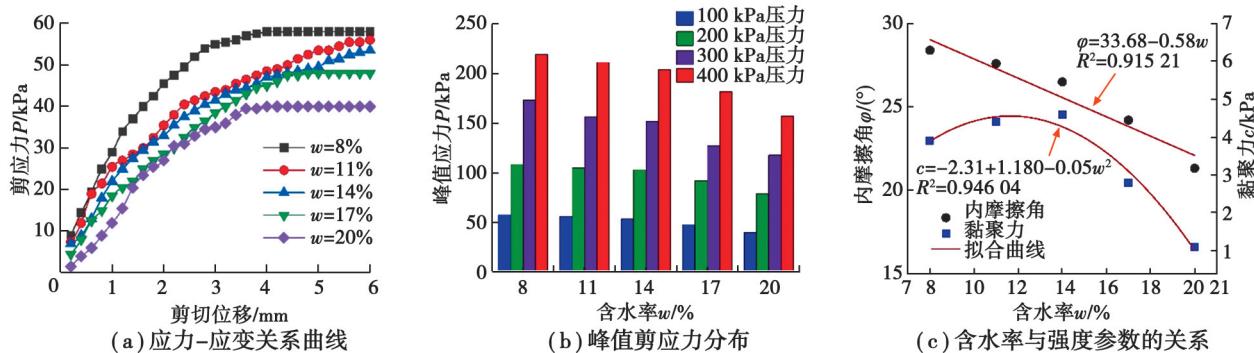


图4 不同含水率风积沙的剪切特性

Fig. 4 Shear characteristics of aeolian sand with different moisture contents

2.1.2 千密度对风积沙抗剪强度的影响分析

图5为不同干密度风积沙剪切特性的变化规律。由图5(a)可知,当含水率相同时,在相同干密度的条件下,剪应力随着剪切位移的增加呈线性增加的趋势,其应力应变曲线表现为“硬化性曲线”。由图5(b)可知,控制含水率相同时,随着干密度增加,其对应的峰值剪应力呈增加趋势,整体变化较为稳定。风积沙的黏聚力受干密度的影响较小,但总体呈线性增加的趋势,可以用一次函数来表示,相关系数 $R^2=0.948\ 06$,如式(3)所示;风积沙的内摩擦角随着干密度的增加呈线性增加的趋势,最大内摩擦角为 32.2° ,其曲线可用一次函数来表示,相关系数 $R^2=0.984\ 64$,如式(4)所示。

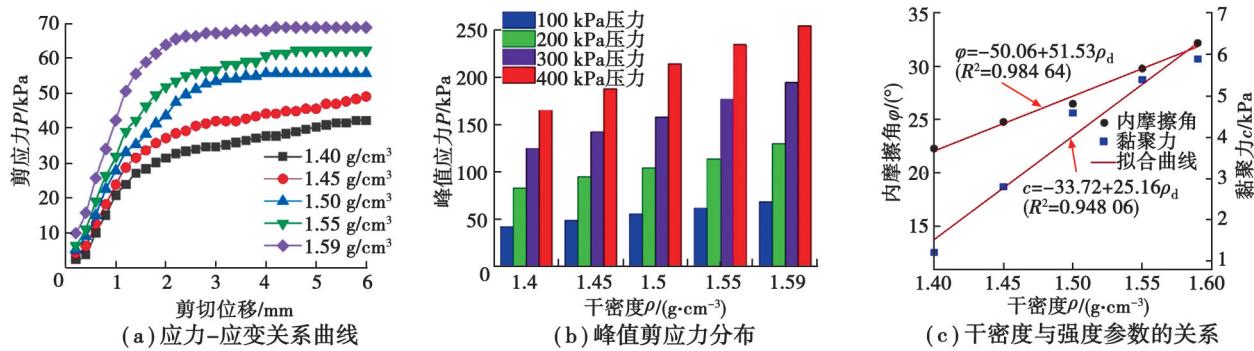


图5 不同干密度风积沙的剪切特性

Fig. 5 Shear characteristics of aeolian sand with different dry densities

$$c = -33.72 + 25.16\rho_d, \quad (3)$$

$$\varphi = 50.06 + 51.53\rho_d. \quad (4)$$

2.1.3 风积沙的剪切特性机理分析

图6为风积沙的剪切特性机理分析。由图6(a)可知,当含水率较低时,颗粒表面会形成具有一定胶结能力的水膜,这一水膜具有一定的黏滞性和抗剪性,在固结压力的作用下会使颗粒联结在一起形成假黏聚力。随着含水率增加,其具有胶结作用的水膜逐渐加厚,水的黏滞性和抗剪性随颗粒表面距离的增大而逐渐减小;同时土体孔隙被水占满,假黏聚力消失,导致其黏聚力降低。因此,整体呈现以最优含水率为拐点的二次函数曲线关系。当风积沙含水率较低时,在剪应力的作用下,土颗粒发生摩擦、破碎、滚动现象时受到的阻力较大,从而得到较大的内摩擦角,随着含水率增加,结合水膜加厚,在结合水膜的作用下,颗粒之间发生以上现象所受到的滑动摩擦力减小,内摩擦角下降明显,呈一次函数的曲线关系。

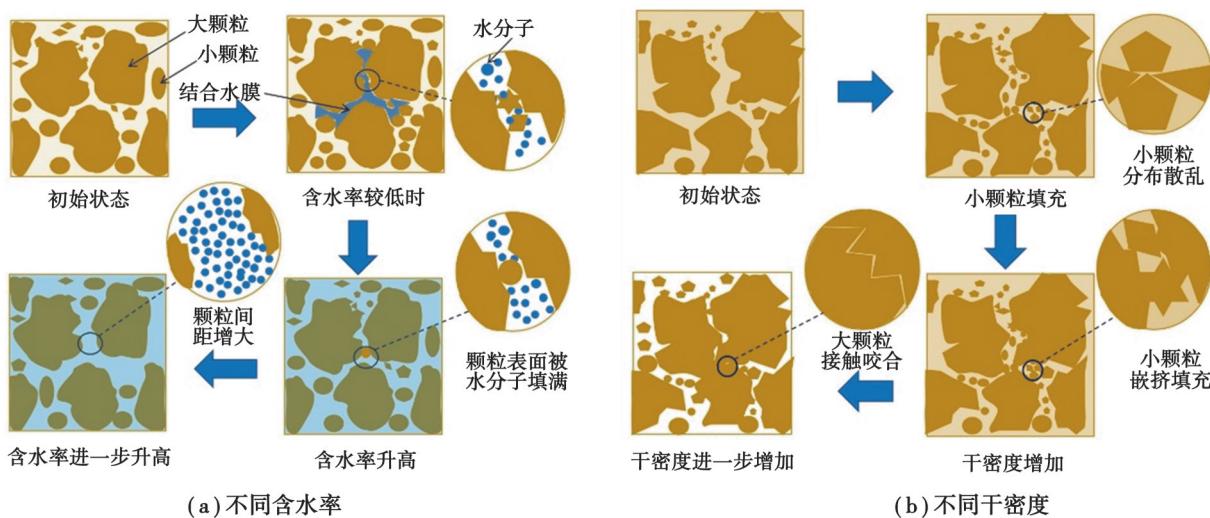


图6 风积沙剪切特性机理分析

Fig. 6 Mechanism analysis of shear characteristics of aeolian sand

由图6(b)可知,随着干密度增加,颗粒之间联系紧密,单位面积上的颗粒的接触点增多,范德华力增加,黏聚力随干密度增加呈线性增大的趋势。当干密度较小时,土体较为疏松,土体颗粒间距较大,颗粒间直接接触咬合的能力较弱,随着干密度增加,颗粒间距减小,颗粒间的咬合能力增强,结构受到破坏时所受的能量增加;同时,颗粒间的接触点增加,发生剪切破坏时颗粒表面运动产生的滑动摩擦力越大,内摩擦角随着干密度增加呈线性增大的趋势。

2.2 风积沙的压缩特性

2.2.1 含水率对风积沙压缩特性的影响规律

图7为不同含水率风积沙的压缩特性变化曲线。由图7(a)可知,控制干密度相同时,在同一含水率条件下,随着轴向应力的增加,孔隙比变化曲线较为稳定,基本呈线性下降的趋势,近似呈“拟弹性变化”^[27];在卸载过程中,回弹曲线与压缩曲线相似,近似呈弹性变化,但变化较为平缓。当含水率不同时,随着含水率升高,在轴向应力的作用下,以最优含水率为界限,压缩变形愈加明显,但不同含水率的压缩曲线具有相似性,均随着轴向应力增加呈下降趋势。由图7(b)可知,当干密度相同时,随着含水率增加,压缩系数、回弹模量呈线性上升趋势,说明当含水率升高时,相同轴向应力下的压缩量与回弹量都呈上升趋势;压缩模量与压缩系数成反比,近似呈线性下降趋势。当含水率大于8%时,风积沙由低压缩性土转化为中压缩性土,说明风积沙在含水率较高时表现出较高的压缩性。

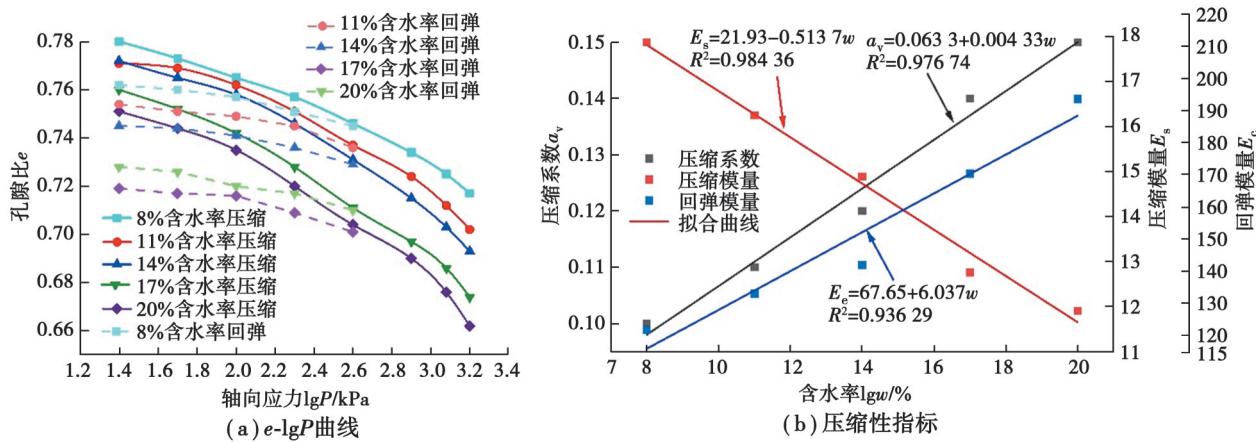


图7 不同含水率风积沙压缩特性

Fig. 7 Compression characteristic curve of aeolian sand under different water contents

2.2.2 千密度对风积沙压缩特性的影响规律

图8为不同干密度风积沙的压缩特性变化曲线。由图8(a)可知,控制含水率相同时,保持干密度不变,在低应力作用下,孔隙比的变化趋势较为缓慢,在达到屈服应力400 kPa后,其变化较为明显,且当干密度较低时,孔隙比变化较为显著;在卸载过程中,其变化曲线与加载过程相似。当干密度不同时,随着干密度增加,轴向位移变化曲线愈加平缓,基本遵循统一规律呈下降趋势且随着干密度增加,下降趋势逐渐缓慢;土体的初始孔隙比相差较大,但随着轴向应力的增加,最终达到的稳定孔隙比较为接近。由图8(b)可知,当含水率相同时,随着干密度增加,压缩系数呈线性减小的趋势,回弹模量呈线性增大的趋势,压缩模量呈二次函数增大的趋势。当干密度大于1.55 g/cm³时,风积沙由中压缩性土转化为低压缩性土,说明该土样在干密度较高时表现为较低的压缩性。

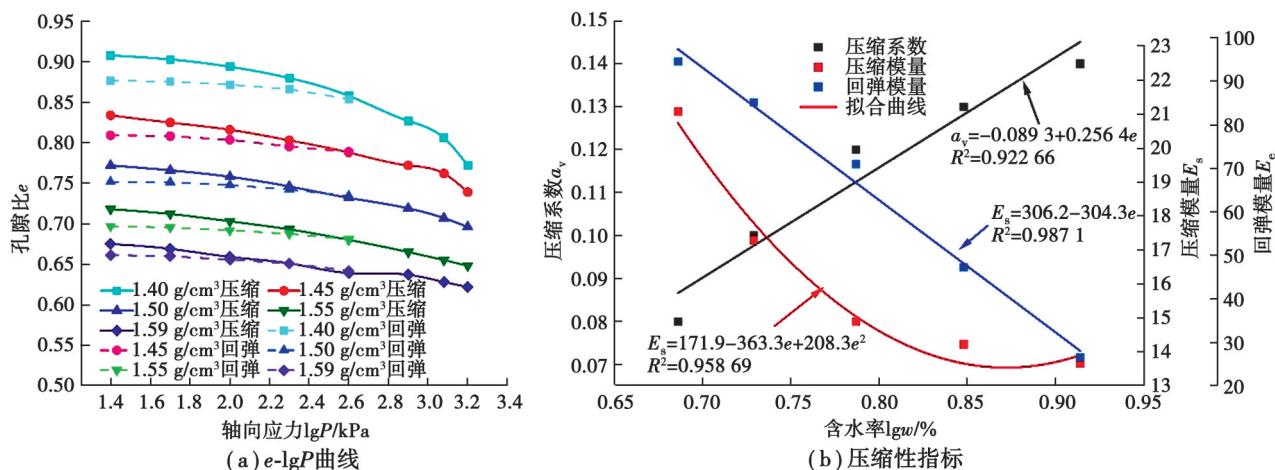


图8 不同干密度风积沙压缩特性

Fig. 8 Compression characteristic curve of aeolian sand under different water contents

2.2.3 风积沙压缩特性机理分析

图9为风积沙的压缩特性机理分析。由图9(a)可知,含水率对风积沙压缩特性影响较大,主要原因是:1)风积沙属于砂性土,排水效果较好,随着轴向应力的增加,土体骨架较难以压缩,在压缩过程中,主要是土体孔隙的压缩及孔隙水的排出,在卸载阶段,土体回弹主要是土体骨架与结合水膜的变化,因此,当含水率较低时,压缩与回弹变化不明显。2)当含水率较低时,粗细颗粒嵌合交错,在受到轴向应力时,颗粒之间发生错动位移,粗细颗粒重新排列,达到较为稳定的状态,从而极大地增强了风积沙抵抗变形的能力。3)随着含水

率增加,结合水膜变厚,颗粒之间发生错动位移时受到的阻力越小,压缩系数增大,同时随着结合水膜变厚,当处于卸载状态时,回弹模量随之增加,呈线性变化。

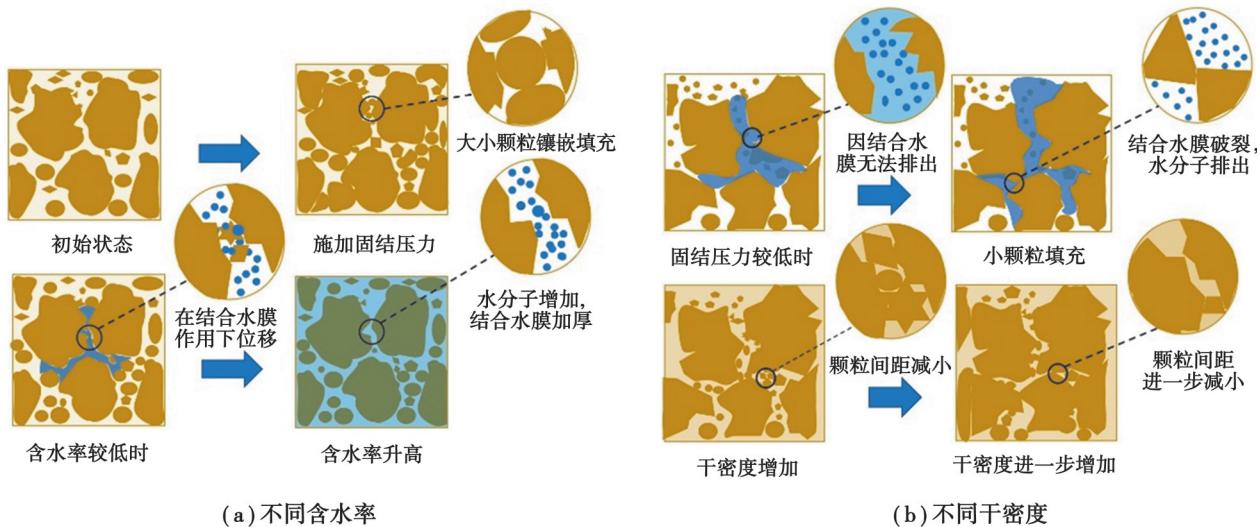


图9 风积沙压缩特性机理分析

Fig. 9 Mechanism analysis of aeolian sand compression characteristics

由图9(b)可知,干密度对风积沙压缩特性影响较大,主要原因是:1)当轴向应力较低时,颗粒之间的孔隙水因水膜的作用不能迅速排出,因此,轴向变化不明显;当轴向应力较高时,颗粒之间的水膜发生破裂,水分子可以沿着土体之间的孔隙排出。2)随着干密度增加,颗粒之间的联系更加紧密,当受到固结压力时,颗粒之间发生错动位移时受到的阻力就会愈大,压缩变形就会愈小,压缩系数随之减小。3)随着干密度增加,风积沙的可压缩性呈下降趋势,但下降曲线逐渐平缓。其主要原因是随着干密度增加,风积沙之间的孔隙被小颗粒填充,即使干密度增加,土体内部已经达到较为稳定的状态,压缩性的下降趋势逐渐缓慢。

2.3 风积沙的渗透特性

2.3.1 不同孔隙比渗透系数影响规律

国内外学者针对渗透系数,在理论研究和室内试验基础上,提出了大量的经验公式,研究发现砂性土的渗透系数主要与孔隙比和颗粒粒径分布有关。Hazen^[28]根据太沙基公式考虑土体孔隙比的影响,提出了有效粒径 d_{10} 、孔隙比 e 与渗透系数 k 的关系,如式(5)所示。针对于无黏性土,孔隙结构主要受颗粒级配和孔隙结构大小的影响,中国水科院以 d_{20} 为特殊粒径提出了无黏性土的常规经验公式,如式(6)所示。张国栋等^[29]通过对无黏性土进行渗透试验,也同样认为等效粒径 d_{20} 对砂性土渗透系数影响较大。基于太沙基公式与中国水科院渗透系数计算常规经验方程,并结合前人研究,修正了无黏性土的渗透系数计算公式,修正结果如式(7)所示。

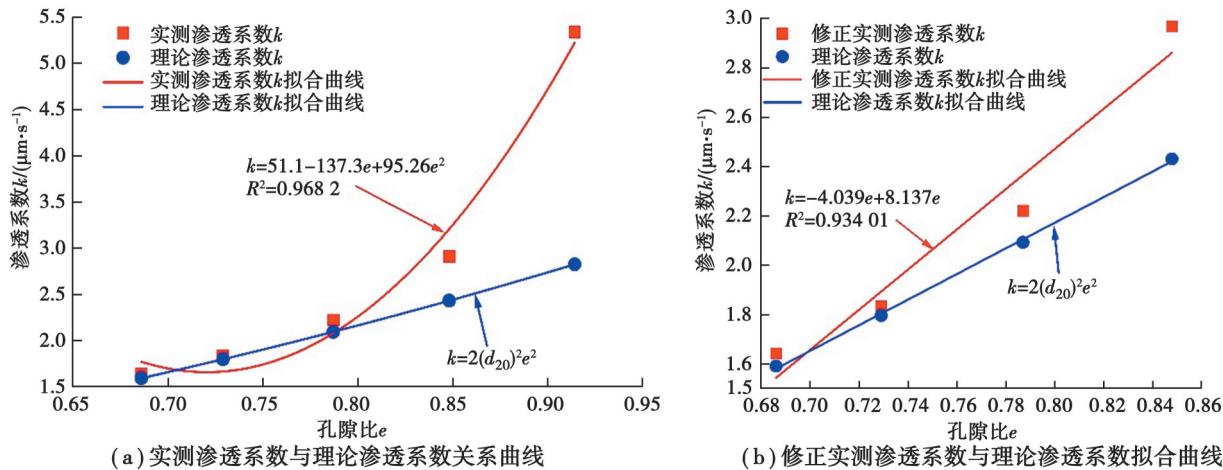
$$k = 2(d_{10})^2 (n/1 - n)^2 = 2(d_{10})^2 e^2, \quad (5)$$

$$k = 234n^3 (d_{20})^2, \quad (6)$$

$$k = 2(d_{20})^2 e^2, \quad (7)$$

式中: k 为达西定律中的渗透系数; d_{10} 为该土样累计质量占颗粒级配曲线中整体质量10%的粒径; d_{20} 为该土样累计质量占颗粒级配曲线中整体质量20%的粒径; e 为试样的孔隙比。

图10为渗透系数 k 与孔隙比 e 的关系曲线。由图10(a)可知,随着孔隙比增加,理论渗透系数变化曲线与实测渗透系数变化曲线具有相似性,基本遵循统一规律,呈上升趋势,且当孔隙比在一定范围内时,实测值与理论值较为接近。当孔隙比超过一定范围时,渗透系数相差过大,主要原因是风积沙中细颗粒含量较大。当孔隙比较大时,细颗粒流失严重进而发生管涌现象^[30](见图11(a))。剔除孔隙比较大的试样进行拟合,结果如图10(b)所示。由图10(b)可知,随着孔隙比的增加,经修正后得到的渗透系数与理论渗透系数均呈线性增加趋势,且取值较为接近。综上所述,表明经修正后的理论渗透系数计算方式能较好地反映风积沙的渗透特性。

图 10 渗透系数 k 与孔隙比 e 关系曲线Fig. 10 Relationship between permeability coefficient k and void ratio e

2.3.2 不同孔隙比渗透系数影响机理分析

图 11 为不同孔隙比风积沙渗透机理分析。由图 11(a)可知,当初始孔隙比较小时,试样土体颗粒之间排列紧密,土体均匀致密。当土体孔隙比较大时,试样表面可以观察到较为明显的孔隙,并且试样呈松散状。由图 11(b)可知,当初始孔隙比较小时,在渗透的作用下,小颗粒难以通过试样之间的孔隙,与大颗粒镶嵌交错,形成较为致密的排列方式,进而无法形成稳定的渗流通道。当初始孔隙比较大时,在渗透的作用下,小颗粒跟水分子通过试样之间的孔隙,导致试样之间形成稳定的渗流通道,水分子往往从阻力最小的方向前进,渗透系数明显增大。

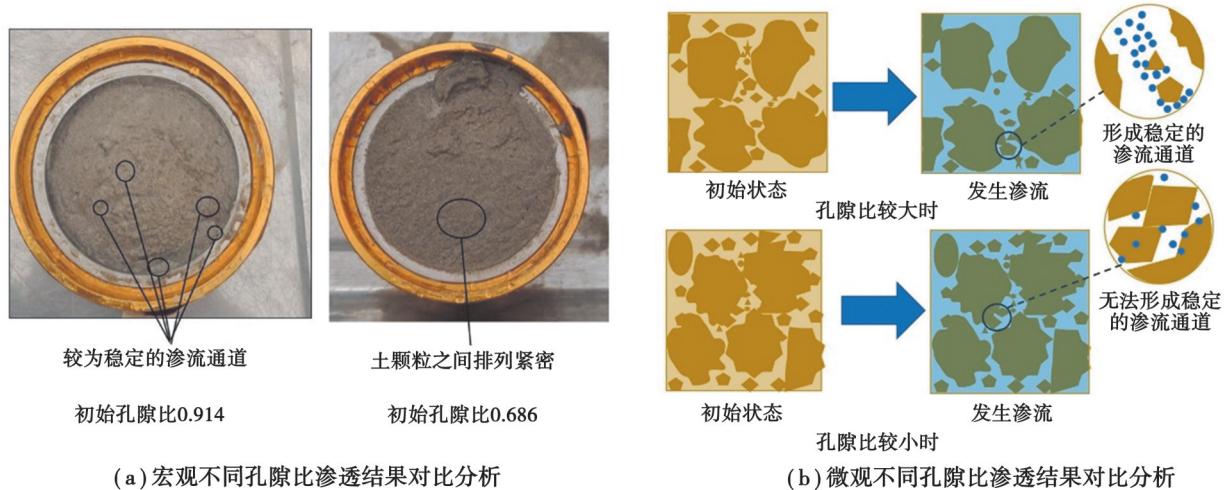


图 11 不同孔隙比风积沙渗透特性机理分析

Fig. 11 Mechanism analysis of permeability characteristics of aeolian sand with different initial void ratios

3 结论

以塔里木河干流沿岸风积沙为研究对象,通过开展室内直剪试验、压缩试验、渗透试验,探究不同含水率、不同干密度对风积沙力学特性的影响,并讨论其影响机制,得出以下结论:

1) 随着含水率增加,黏聚力呈先增大后减小的趋势,在最优含水率处达到峰值,变化曲线可以用二次函数来表示,内摩擦角呈线性减小的趋势。颗粒表面在水分子的作用下形成结合水膜,当含水率较低时,这一结合水膜具有一定的黏聚性和抗剪性,达到最优含水率后,结合水膜作用减弱,导致黏聚力先增大后减小;随着含水率增加,导致风积沙在剪应力作用下发生滚动所受到的滑动摩擦力减少,内摩擦角减小。随着干密度

增加,黏聚力、内摩擦角均呈线性增大的趋势。随着干密度增加,颗粒间距减少,颗粒之间联系紧密,范德华力增加,导致黏聚力增大;同时随着干密度增加,颗粒间接触咬合能力增强,结构受到破坏时所受的能量增加,导致内摩擦角增大。

2)随着含水率增加,压缩系数、回弹模量呈线性增大的趋势。含水率增加,结合水膜变厚,颗粒之间发生错动位移受到的摩擦力减少,压缩系数增大;同时随着结合水膜的变厚,当处于卸载状态时,回弹量增加,回弹模量随之增大。随着干密度增加,压缩系数呈线性减小的趋势,回弹模量呈线性增大的趋势。随着干密度增加,粗细颗粒镶嵌填充,颗粒之间发生错动位移时受到的阻力增大,导致试样在受到轴向应力下的变形减小,压缩性随之减小;但随着干密度增加,导致土粒接触点的弹性变形增加,回弹量增大。

3)随着干密度增加,渗透系数呈线性减小的趋势,分布在 $1\times 10^{-4}\sim 3\times 10^{-4}$ cm/s之间,通过对传统的理论渗透系数计算公式进行修正,排除因干密度较低产生管涌现象造成的误差后,研究发现通过试验得到的实测值与计算得出的经验值较为接近,整体可以用一次函数来表示。随着干密度增加,风积沙内部的孔隙逐渐减小,导致水分子通过土体颗粒之间的孔隙时受到阻力就越大,渗透性就越弱;风积沙细粒土含量较多,导致其具有一定黏性土特性,渗透系数大幅度减小,采用修正后的渗透系数计算公式较为准确。

参考文献

- [1] Fang G H, Li Z, Chen Y N, et al. Projecting the impact of climate change on runoff in the Tarim river simulated by the soil and water assessment tool glacier model[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(16): 3922.
- [2] Yu X H, Zeng X K, Gui D W, et al. Projection of flash droughts in the headstream area of Tarim river basin under climate change through Bayesian uncertainty analysis[J]. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 2023, 128(6): e2022JD037634.
- [3] Wang H, Jiang M H, Hang M Y, et al. Research on the mechanical properties and frost resistance of aeolian sand 3D printed mortar[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, 19: e02332.
- [4] Yan H, Liu Q, Han F X, et al. Frost durability of self-compacting concrete prepared with aeolian sand and recycled coarse aggregate[J]. *Materials*, 2023, 16(19): 6393.
- [5] Liu J, Wang B, Hu C T, et al. Multiscale study of the road performance of cement and fly ash stabilized aeolian sand gravel base[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 397: 131842.
- [6] Wang S S, Yang R S, Li Y L, et al. Single-factor analysis and interaction terms on the mechanical and microscopic properties of cemented aeolian sand backfill[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2023, 30(8): 1584-1595.
- [7] Khan I H. Soil studies for highway construction in arid zones[J]. *Engineering Geology*, 1982, 19(1): 47-62.
- [8] Fang Y, Cheng H, Zou X Y, et al. Shear strength of aeolian sand sediments[J]. *Transactions of the ASABE*, 2018, 61(2): 583-590.
- [9] 许仙娥,段世委.沙漠风积沙用作渠道填筑料的试验研究[C]//第十二届全国边坡工程技术大会论文集.2020: 203-206.
Xu X E, Duan X W. Analysis on canal embankment material test results of aeolian sand in desert[C]// Proceedings of the 12th National Conference on Slope Engineering Technology. 2020: 203-206. (in Chinese)
- [10] Martin K, Tirkolaei H K, Kavazanjian E. Enhancing the strength of granular material with a modified enzyme-induced carbonate precipitation (EICP) treatment solution[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 271: 121529.
- [11] 刘清秉,项伟, M.Budhu,等.砂土颗粒形状量化及其对力学指标的影响分析[J].*岩土力学*, 2011, 32(S1): 190-197.
Liu Q B, Xiang W, M B, et al. Quantitative analysis of sand particle shape and its influence on mechanical indexes[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(S1): 190-197. (in Chinese)
- [12] 肖建勇,严伟,乔世范,等.干密度与含水率对标准砂抗剪强度的影响研究[J].*铁道科学与工程学报*, 2023, 20(10): 3789-3797.
Xiao J Y, Yan W, Jiao S F, et al. Experimental research on the influence of dry density and moisture content on the shear strength of standard sand[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2023, 20(10): 3789-3797. (in Chinese)
- [13] 张磊,刘慧,王铁行.不同初始干密度黄土与混凝土接触面直剪试验[J].*西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 52(3): 384-389.
Zhang L, Liu H, Wang T H. Direct shear test on interface between loess with different initial dry densities and concrete[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 52(3): 384-389. (in Chinese)
- [14] 张龙菊,黎亮,孙艳玲,等.含黏风积沙的抗剪强度特性试验研究[J].*塔里木大学学报*, 2019, 31(3): 57-62.
Zhang L J, Li L, Sun Y L, et al. Experimental study on shear strength characteristics of viscous aeolian sand[J]. *Journal of Tarim University*, 2019, 31(3): 57-62. (in Chinese)

- [15] 刘光秀, 李玉根, 郑文, 等. 陕西榆林地区风积沙工程特性试验研究[J]. 河南科学, 2020, 38(8): 1242-1248.
Liu G X, Li Y G, Zheng W, et al. Experimental study on engineering characteristics of aeolian sand in Yulin Area of Shaanxi Province[J]. Henan Science, 2020, 38(8): 1242-1248. (in Chinese)
- [16] 王李. 风积沙地层隧道围岩破坏模式及预加固效果研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
Wang L. Study on failure mode and pre-reinforcement effect of surrounding rock in aeolian sand stratum[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [17] Cheng H Y, Wu S C, Zhang X Q, et al. Effect of particle gradation characteristics on yield stress of cemented paste backfill[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2020, 27(1): 10-17.
- [18] Li Y J, Chen J W. Experimental study on the permeability of microbial-solidified calcareous sand based on MICP[J]. Applied Sciences, 2022, 12(22): 11447-11447.
- [19] Zhang Q, Zhang Z J, Lin D M, et al. Influence of alternating temperature on the effectiveness of EICP in consolidating aeolian sand[J]. Applied Sciences, 2023, 13(12): 7035.
- [20] 霍玉龙, 王雪晴, 姜开放, 等. 颗粒形状对钙质砂渗透性的影响试验研究[J]. 土工基础, 2022, 36(3): 437-441.
Huo Y L, Wang X Q, Jiang K F, et al. Experimental study of the effect of particle shape on the permeability in calcareous sand[J]. Soil Engineering and Foundation, 2022, 36(3): 437-441. (in Chinese)
- [21] Yin S H, Yang X Y, Chen W, et al. Permeability characteristics of sandstone-type uranium deposits under different temperature and confining pressure[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(7): 2302-2312.
- [22] Wang Y C, Zheng S H, Wang Y M, et al. Experimental study on the permeability and seepage characteristics of bimsoils[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2021, 12(1): 3001-3020.
- [23] Hilal A A. Effect of aggregate roughness on strength and permeation characteristics of lightweight aggregate concrete[J]. Journal of Engineering, 2021, 2021: 9505625.
- [24] Yang S S, Cui R K, Yuan X B, et al. Fractal study on permeability characteristics in rough and dense porous media[J]. Chemical Engineering Science, 2023, 282: 119265.
- [25] 邓成进, 周恒, 党发宁, 等. 压实后砂砾石料渗透特性试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2023(3): 121-129.
Deng C J, Zhou H, Dang F N, et al. Experimental study on permeability of sand gravel after compaction[J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(3): 121-129. (in Chinese)
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)
- [27] 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 L K, Cui Z Y. Compression and permeability characteristics of expansive soil under drying-wetting-freezing-thawing cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(3): 728-740. (in Chinese)
- [28] Hazen A. Some physical properties of sands and gravels, with special reference to their use in filtration[M]//State Sanitation Volume II. Cambridge, MA and London, England: Harvard University Press, 2014.
- [29] 张国栋, 廖爱明, 李泯蒂, 等. 碎石土渗透特性试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2016(5): 91-95.
Zhang G D, Liao A M, Li M D, et al. Model test studies on permeability of gravel soil[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(5): 91-95. (in Chinese)
- [30] 陈亮, 滕耀宗, 蔡国栋, 等. 变水头下管涌细颗粒迁移试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 82-88, 110.
Chen L, Teng Y Z, Cai G D, et al. Experimental study on the migration of fine particles in piping under variable water head[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(5): 82-88, 110. (in Chinese)

(编辑 郑洁)