

掺水泥粉土的改良风积沙三轴压缩特性

刘万乐¹,田正宏¹,鲁洋¹,许健²,巩转定³,吴彦军³

(1.河海大学水利水电学院,江苏南京 210098; 2.甘肃农业大学水利水电工程学院,甘肃兰州 730070;
3.甘肃水利工程地质建设责任有限公司,甘肃兰州 730014)

摘要:基于单掺5%水泥的经济性设计指标,开展了混掺水泥粉土的改良风积沙三轴压缩试验,分析了改良风积沙试样不同围压下的应力-应变及强度特性,揭示了不同掺比改良风积沙黏聚力和内摩擦角的变化规律,以及改良风积沙的破坏形式及剪切破坏机理。结果表明:改良风积沙的应力-应变关系曲线均为应变软化型曲线;弹性模量和破坏强度与围压正相关,弹性模量在粉土掺量增至15%时达到峰值;破坏强度与粉土掺量正相关;10%粉土掺量下改良风积沙黏聚力最大,内摩擦角则随粉土掺量增加而单调增长。水泥水化物包裹在沙粒表面,增加了沙粒表面粗糙度,并在沙粒之间的空隙形成网状结构,将沙粒联结起来,阻碍沙粒相对运动;掺入适量粉土可填充沙粒和水化物之间的空隙,但过量粉土会制约水化反应,同时碱性离子与水化物反应产生胶结能力差的硅酸钠和铝酸钠,导致改良风积沙整体性能下降。

关键词:风积沙;水泥粉土;改良土;黏聚力;内摩擦角;破坏形态;三轴压缩试验

中图分类号:TV41 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)02-0051-07

Study on triaxial compression characteristics of improved aeolian sand mixed with cement silt//LIU Wanle¹, TIAN Zhenghong¹, LU Yang¹, XU Jian², GONG Zhuanding³, WU Yanjun³(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3. Gansu Water Conservancy Engineering Geology Construction Co., Ltd., Lanzhou 730014, China)

Abstract: Based on the economic design index of single 5% cement, the triaxial test of improved aeolian sand static in mixed cement silt was carried out. The stress-strain and strength characteristics of improved aeolian sand sample under different confining pressures were analyzed, based on which the change law of the viscosity and internal friction angle of different doping ratios, the failure form of improved aeolian sand, and the shear failure mechanism were revealed. The main results show the stress-strain relationship curves of improved aeolian sand are all strain softening curves. The elastic modulus and failure intensity are positively correlated with confining pressure, and elastic modulus reaches to its peak value when the amount of silt mixing is increased to 15%. The value of failure intensity is positively correlated with the amount of silt. The cohesion of modified aeolian sand is the largest under 10% silt mixture, and the internal friction angle increases monotonously with silt mixing amount. The reason is that cement hydrate is wrapped in the surface of sand particles, increasing the surface roughness and forming a network structure in the gap between sand particles. The sand particles are linked together and the relative movement of sand grains is hindered. Incorporating an appropriate amount of silt can fill the gaps between sand particles and hydrates, but excessive silt will restrict the hydration reaction, and at the same time, alkaline ions and hydrates react to produce sodium silicate and sodium aluminate with poor cementing capacity, resulting in a decrease in the overall performance of improved aeolian sand.

Key words: aeolian sand; cement silt; improved soil; cohesion; internal friction angle; destruction morphology; triaxial test

风积沙广泛分布于我国西北地区^[1],存在级配差、抗剪性能差、易液化、抗震性差、成型困难等诸多缺陷,因此直接作为建筑材料应用于水利工程会导致坝体的强度、抗震性能、抗渗性能等都不满足规范要

求^[2]。为了能在西北地区工程建设中利用当地材料,降低工程成本,有必要对风积沙进行改良研究。

目前风积沙改良分为单掺和混掺,单掺的掺入物常为水泥、粉土、纤维等。任辉明等^[3-4]研究发现

改良风积沙的强度与养护龄期正相关;水泥掺量过高,风积沙会向脆性材料发展,实际工程中水泥掺量应控制在5%左右。胡三喜等^[5-6]研究了粉土改良风积沙在路基工程的应用效果,发现粉土掺入风积沙后,碾压效果明显提高;松铺厚度随粉土掺量的增大而减小,施工方便且节省成本。张达德等^[7-9]探究了土工格室对风积沙的改良效果,发现土工格室加固沙漠路基具有明显的分散荷载作用,使沙基所受力、应变均匀;显著提高沙基的抗剪强度和承载能力;一定范围内土工格室越高、层数越多,承载能力越大,但成本相对粉土和水泥略有提高;Gray等^[10]通过研究土工织物加筋沙和纤维加筋沙发现,2种加筋方式均可以提高沙的抗剪性能,并减少损失残余强度;土工织物加筋沙小应变时发生刚度损失,最终破坏面在加筋层之间,而纤维沙初始小应变无刚度损失,破坏面为经典平面。Santoni等^[11-12]研究发现沙土中掺入随机分布的纤维可以提高材料的强度,最佳的纤维长度为51 mm,最佳的纤维掺量在0.6%~1.0%之间。关于混掺改良研究,李德超^[13]认为石灰、粉煤灰的掺入可以提高风积沙的强度,适宜的灰土比为1:3~1:4。胡玉娇等^[14-15]同时运用石灰、粉煤灰和纤维来提高风积沙在道路工程中的稳定性,试验表明该种改良方式可以同时提高材料的抗压、抗拉和抗收缩性能。Chauhan等^[16]研究了椰壳纤维和合成纤维对沙土路基强度的影响,结果表明加入纤维后,沙土的弹性应变和塑性应变均随围压增大而减小,弹性模量随围压增加而增大。

综上所述,单掺改良风积沙相对更方便,但对风积沙性能提升相对单一;混掺改良风积沙可以提高风积沙多种力学性能,但部分掺入物成本相对较高。目前改良风积沙主要应用在道路建设中,且研究方向多为风积沙的路用性能,而对改良风积沙筑坝性能研究较少。相比道路,筑坝风积沙应能够承受更大的围压,有更好的抗剪性能、更高的强度和更好的抗震性,如李佳杰等^[17]通过直剪试验对改良风积沙抗剪性能进行了初步研究。本文通过三轴试验研究不同水泥和粉土掺比下改良风积沙的抗剪强度变化和不同围压下改良风积沙强度变化规律,并结合微观图像进行机理分析,阐述堤坝填筑采用混掺风积沙的可行性,以期能为设计施工提供参考。

1 试验材料

1.1 风积沙

试验所用风积沙为古浪县黄滩蓄水池工程现场用沙,沙粒较细,所有粒径小于0.5 mm,粒径集中在0.25~0.075 mm之间(占总质量91.5%),不均

匀系数 $C_u = 1.725$,曲率系数 $C_c = 0.852$,有效粒径 $d_{10} = 0.080$ mm,中间粒径 $d_{30} = 0.097$ mm,界限粒径 $d_{60} = 0.138$ mm。风积沙级配曲线如图1所示,由图1可知其级配不良。

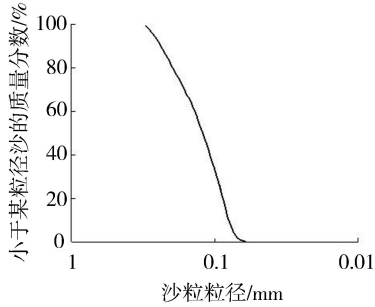


图1 风积沙级配曲线

1.2 粉土、水泥

粉土取自黄滩蓄水池工程料场冲洪积粉土,主要性能参数:沙砾、粉粒、黏粒的质量分数分别为10.75%、76.91%和12.35%,相对密度为2.73,液限为25.09%,塑限为13.66%,塑性指数为7.6,密度为1.7 g/cm³,最大干密度为1.86 g/cm³,最优含水率为13.4%,pH值为9.1~9.7。水泥为海螺牌普通硅酸盐水泥P·O42.5,细度为1.35%,密度为3.1 g/cm³,28 d抗压强度为45.5 MPa。

2 试验方案

研究^[18]表明,风积沙单掺5%水泥时,不仅能满足96%压实度和0.80相对密度的施工要求,而且相比更高水泥掺量,5%水泥掺量更经济;粉土掺量超过9%时可显著提高风积沙干密度,粉土掺量超过20%后,干密度提高效果不明显,且经济性降低,因此本文选取纯风积沙(方案1)、5%水泥改良风积沙(方案2)、5%水泥+10%粉土改良风积沙(方案3)、5%水泥+15%粉土改良风积沙(方案4)、5%水泥+20%粉土改良风积沙(方案5),进行固结不排水三轴压缩试验。

通过标准击实试验获得改良风积沙最大干密度和最优含水率,并由此确定各种配料的质量,结合工程施工要求,按96%压实度制样,拌好的料在保鲜袋中闷24 h,制样前加入水泥搅拌均匀,避免闷料期间水泥水化反应对试样强度造成影响。改良风积沙分5层击实制备圆柱体试样,纯风积沙利用对开模套和橡皮膜在三轴仪压力室底座上分3层制样,试样的直径和高度分别为39.1 mm和80 mm。通过7 d、14 d和28 d养护龄期改良风积沙的无侧限抗压强度试验发现,养护龄期为14 d时改良风积沙强度基本稳定,因此试验采用14 d养护龄期。试样采用抽气饱和与水头饱和相结合的方式饱和;利用

TSY-10 型土工三轴试验仪对试样进行力学性能测试,结合黄花滩工程坝体材料受力情况,5 种试验方案均选取 100 kPa、200 kPa 和 300 kPa 3 种围压水平。由于改良风积沙渗透性较好,因此选取试样剪切应变速率为 0.5%/min,持续剪切至试样的轴向应变达到 15%~20%。

3 试验结果与分析

3.1 应力-应变特性

由图 2 可知(图中 ε_1 为轴向应变、 $\sigma_1-\sigma_3$ 为主应力差),不同种类风积沙试样破坏过程中应力-应变关系曲线均保持应变软化的特点,试样的应力-应变曲线可分为线弹性阶段、非线性阶段、应变软化阶段和残余强度阶段。

线弹性阶段,随着应力增大,应力-应变近似为线性关系,出现硬化现象;非线性强化阶段,应力逐渐增大至峰值,直线向曲线过渡,应变随应力增大速率不断提高,且围压越大,应变随应力变化相对越小,即强化阶段斜率越大,围压对轴向抗压强度影响越大;应变软化阶段,应力达到峰值后出现应变软化现象,即应力随应变增加而减小,速率先增大后减

小,粉土掺量越多,围压越大,现象越明显;残余强度阶段,随着应变的持续增大,应力逐渐减小,趋于稳定,达到残余强度值;围压越大,残余强度越大。

纯风积沙的应力-应变曲线应变软化不明显,随着掺入水泥和粉土掺量的不断增加,改良风积沙的应力-应变曲线应变软化现象越来越明显。

3.2 弹性模量

工程上常用峰值应力 50% 对应的割线弹性模量 E 来研究水泥石土变形难易程度,因此本文以弹性模量来描述试样刚度。弹性模量随围压和风积沙种类变化曲线如图 3 所示。

图 3(a)表明,弹性模量与围压正相关,随着围压的增加,方案 4 相对于其他改良风积沙始终保持最大弹性模量。图 3(b)表明,同一围压下,随着 5% 水泥掺入和粉土掺量的增加,风积沙的弹性模量先增加后降低,呈现“峰形”变化趋势。掺入 5% 水泥后,弹性模量大幅度提高;掺入 10% 粉土后,弹性模量持续增加,增速减缓;掺入 15% 粉土后,弹性模量有较大的提高,达到最大值;而掺入 20% 粉土后,弹性模量大幅度降低,即适量粉土有利于提高风积沙弹性模量,而过量粉土会降低风积沙弹性模量,存

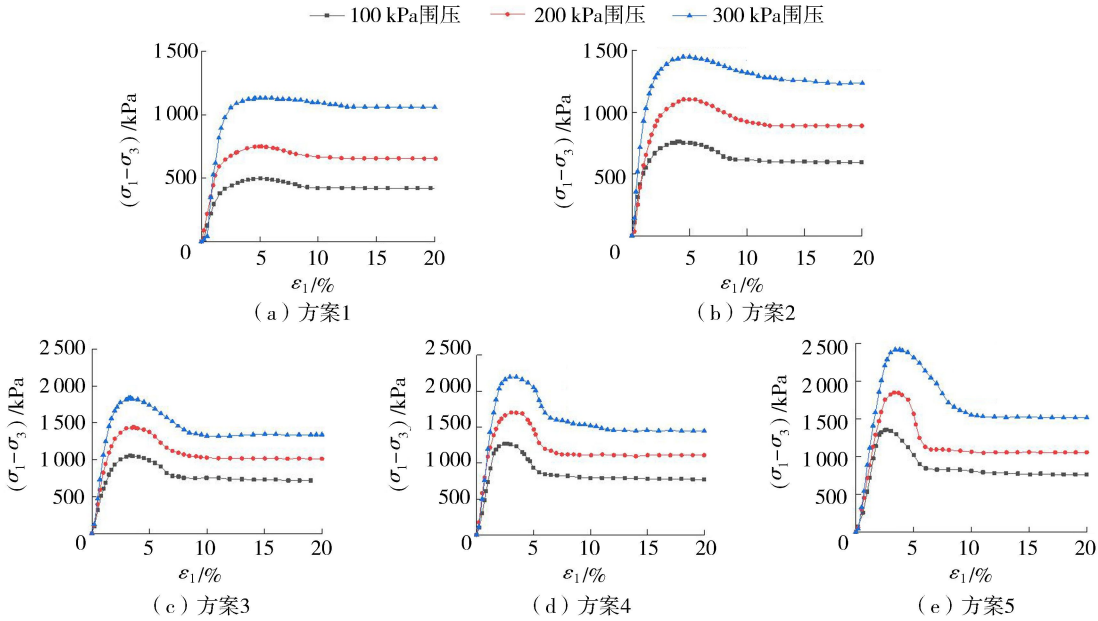


图 2 不同试验方案应力-应变关系曲线

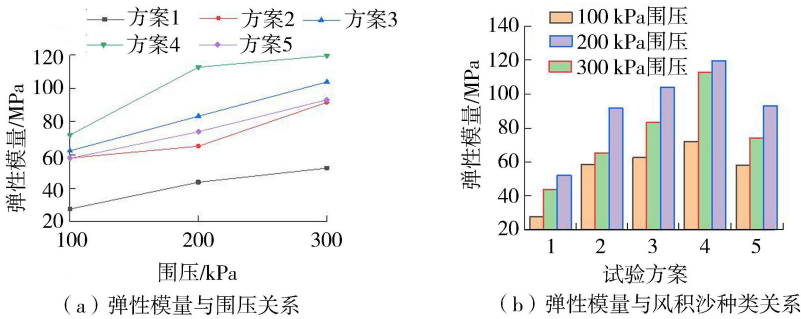


图 3 弹性模量与围压和风积沙种类关系

在一个最佳的粉土掺量(约为15%)。

3.3 强度特征

由图2知,不同种类风积沙的应力-应变曲线均呈应变软化型,根据GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》,以 $\sigma_1-\sigma_3$ 的峰值点作为破坏点,对应 $\sigma_1-\sigma_3$ 即为破坏强度 q_f 的值;试样破坏后,应力随应变增加逐渐稳定,取应变达到17%时对应的强度为残余强度 q_r , q_f 和 q_r 与围压和风积沙种类的变化曲线如图4~7所示。

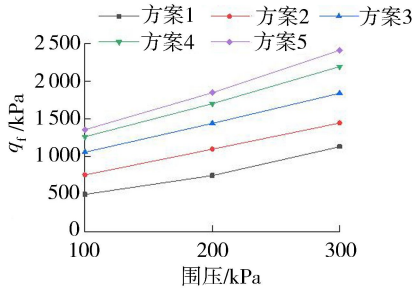


图4 破坏强度随围压变化

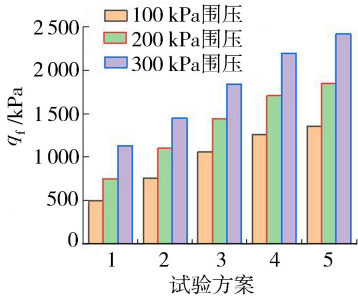


图5 破坏强度与风积沙种类关系

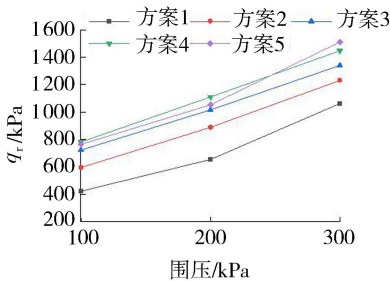


图6 残余强度随围压变化

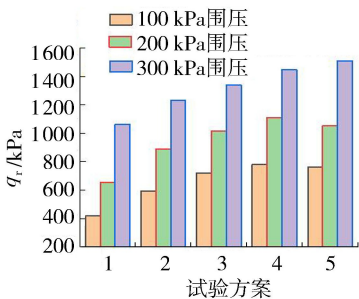


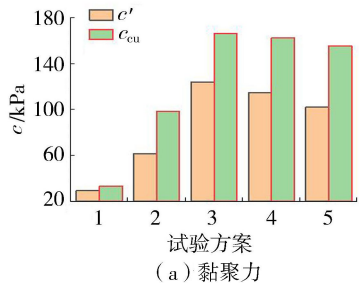
图7 残余强度与风积沙种类关系

由图4可知,同种改良风积沙试样的 q_f 与围压正相关,粉土掺量越大, q_f 随围压的变化速率越大。

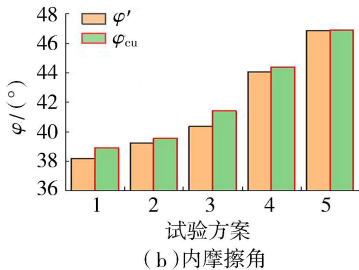
由图2可知,轴向应变达到3%~5%时,试样达到 q_f ,且破坏应变随着围压的增大而增大,即随围压的增大结构可以承受更大的变形。由图5可知,掺入5%水泥后, q_f 明显提高,同一围压下, q_f 与粉土掺量正相关,但 q_f 的增速随粉土掺量的增加而逐渐降低。相同粉土增量,围压越大, q_f 增速越大。图6表明,同种改良风积沙试样的 q_r 与围压正相关,说明围压增大有利于提高风积沙的 q_r 。图7表明,掺入5%水泥后, q_r 明显提高;100 kPa和200 kPa围压下 q_r 随粉土掺量的增加先增加后降低,呈现“峰形”,15%粉土掺量 q_r 最大;说明适量的粉土可以改善风积沙的 q_r ,但过量的粉土不利于水泥水化,导致 q_r 降低;300 kPa围压下 q_r 随粉土掺量的增加而增大,增速逐渐降低,这是由于高围压下,围压对残余强度的影响较大,因此当粉土掺量达到20%时,残余强度仍在增加,但增速减缓。

3.4 抗剪强度

由图8可知,总黏聚力 c_{cu} 和总内摩擦角 φ_{cu} 均大于有效黏聚力 c' 和有效内摩擦角 φ' ,但变化趋势一致;这是由于密实的风积沙具有剪胀性,剪切过程中产生负孔隙水压力,使有效围压增加,以保持试样体积不变。由图8(a)所示,掺入5%水泥后, c' 和 c_{cu} 均明显增大,掺入粉土后,随着粉土掺量增加 c' 和 c_{cu} 均先增大后减小,增长速率大于减小速率,粉土掺量10%时 c' 和 c_{cu} 均最大, c_{cu} 达到166 kPa,但 c_{cu} 和 c' 相差越来越大。即5%水泥能够明显提高风积沙的 c' 和 c_{cu} ,适量粉土有利于提高风积沙的 c' 和 c_{cu} ,但过量粉土会降低风积沙的 c' 和 c_{cu} 。由于纯风积沙试样饱和度在试验过程中难以达到95%以上,试样内存在毛细水压力,增加了颗粒间错动的摩擦阻力,产生的效果与黏聚力类似,被称为假黏聚力,受



(a) 黏聚力



(b) 内摩擦角

图8 风积沙黏聚力与内摩擦角

到假黏聚力的影响,试验得出纯风积沙表现出较小的黏聚力。由图 8(b)可知,掺入 5% 水泥后, φ_{cu} 和 φ' 有小范围增长,掺入粉土后,随着粉土掺量增加 φ_{cu} 和 φ' 不断增大,增长速率均先增大后减小,且 φ_{cu} 和 φ' 越来越接近。

3.5 破坏形态

由图 9 可知,试样破坏后高度明显降低,直径略有增加,整体性好,表面没明显的脱落现象;纯风积沙为膨胀破坏,没有明显的破坏截面,改良风积沙为剪切破坏,破坏截面非常明显。根据摩尔-库仑强度理论可计算得出剪切破坏面与大主应力面之间的夹

角 α ,计算得出的单掺 5% 水泥和混掺 5% 水泥与 10%、15%、20% 粉土改良风积沙的 α 分别为 64.77° 、 65.7° 、 67.2° 和 68.45° 。实测 α 如图 9 所示。

α 实测值与计算值误差相对较小,可忽略;随着粉土掺量的增加 α 逐渐增大,这是由于内摩擦角随粉土掺量的增加而增大。图 9 表明,同种改良风积沙,围压越大,破坏面以上的楔形体体积越小;以图 9(c)为例,围压越大,试样的破坏截面越多越明显。

4 机理分析

将 4 种改良风积沙养护好的试样制作作为长宽不超过 10 mm,厚度不超过 5 mm 的小试块,烘干后采用 FEI Quanta FEG250 型电子扫描显微镜,对小试块进行表面形貌扫描(图 10、图 11),分析改良风积沙性能变化的机理。

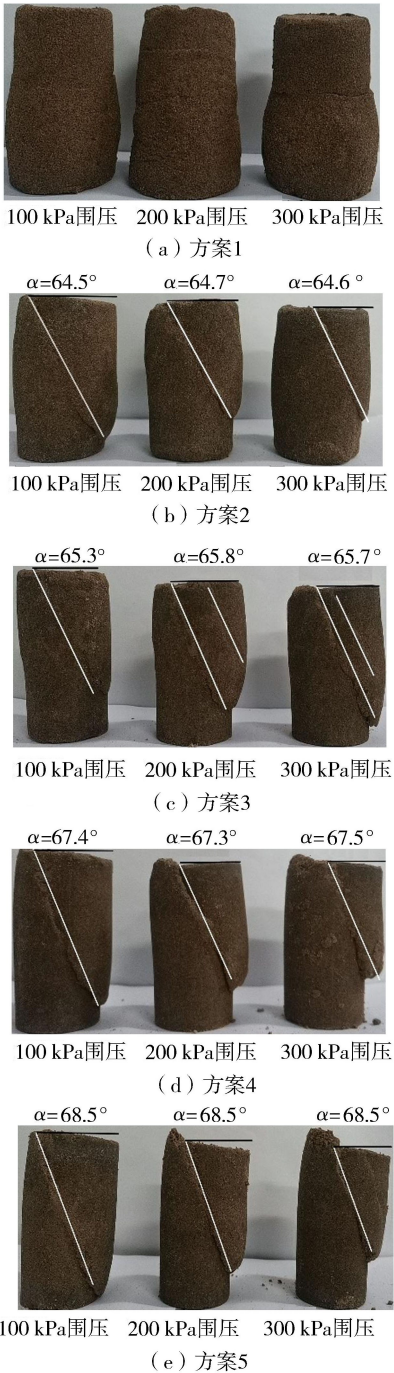


图 9 试样破坏形态

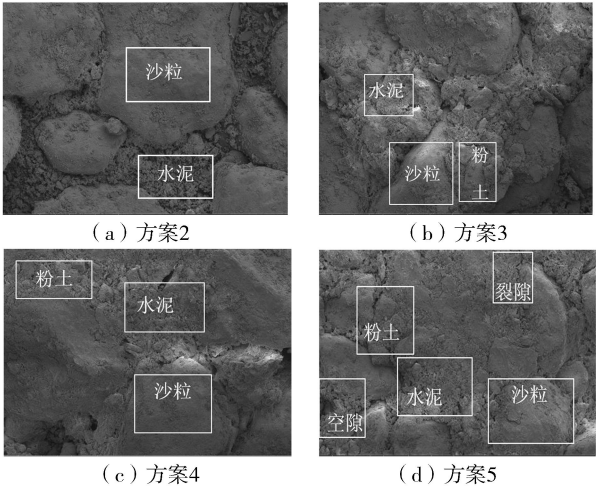


图 10 100 μm 下改良风积沙形态

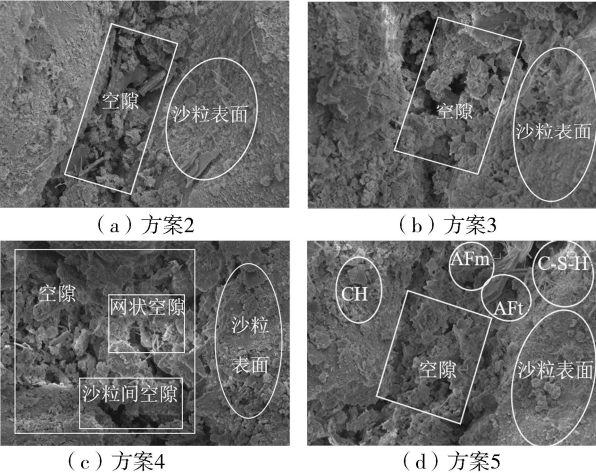


图 11 10 μm 下改良风积沙微观形貌

图 10 表明,随着水泥和粉土的掺入,风积沙颗粒之间的空隙逐步得到填充,单掺 5% 水泥填充效果较差,空隙填充率较低;掺入粉土后,水泥水化物包裹着粉土填充空隙,填充效果明显提高,粉土掺量

越大,空隙填充越充分,导致土体压缩变形量减小,压缩性降低,刚度增大;粉土掺量达到 20% 时,沙粒周围仍有明显的空隙和裂缝,沙土颗粒之间有明显的挤压现象,另一方面,粉土承载力较低,压缩性大,过量粉土替换风积沙后,土体压缩变形增大,导致刚度减小。

由图 11(a)发现,掺入水泥后,沙粒表面被絮状和管状触须的水化硅酸钙 C-S-H 包裹,导致沙粒表面变得粗糙;空隙之间,C-S-H 凝胶体、板状氢氧化钙 CH、晶体钙矾石 AFt 和单硫型水化硫铝酸钙 AFm 相互交错,促使沙粒和水化物联结成整体,提升了沙粒之间的整体抗剪性能以及沙粒表面之间产生的摩擦力,宏观表现为掺入水泥后风积沙 q_t 、黏聚力和内摩擦角均提高。

图 11(b) ~ (d) 表明掺入粉土后,粉土同时对沙粒之间的空隙和 C-S-H、CH、AFt、AFm 形成的网状空隙进行填充,同时 C-S-H 凝胶体包裹在沙粒和土颗粒表面,将粉土颗粒和沙粒联结起来,因此掺入粉土后的沙粒表面更加粗糙。粉土掺入量为 15% 时,沙粒表面附着的 C-S-H 和粉土比粉土掺入量为 10% 时多,而粉土掺入量为 20% 时,沙粒表面附着的 C-S-H 与粉土相对减少,同时可以看到粉土掺入量为 20% 时,沙粒之间的管状触须型 C-S-H 相比粉土掺入量为 15% 时明显减少。由于粉土 PH 值在 9.1 ~ 9.7 之间,粉土掺量较少时,碱性离子与空气中的 CO_2 和 H_2O 发生反应生成晶体 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$,填充在试样空隙中,提高试块的密实性和抗压强度^[19-20];粉土掺量较多时,改良风积沙碱性较强,较强碱性环境下碱性离子与水泥水化物反应产生胶结能力差的硅酸钠 ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$) 和铝酸钠 ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)^[19];同时粉土比表面积大于风积沙,保水性更好,可以吸附大量水分。综上,适量粉土有利于水泥水化作用和沙粒与水泥水化产物联结,过量粉土,会阻碍水泥水化作用,同时产生胶结能力差的产物,不利于水泥水化物、粉土和沙粒之间的联结。宏观表现为 q_t 和内摩擦角随粉土掺量增加逐渐增大,增速在较大粉土掺量时,逐渐降低,黏聚力随粉土掺量的增加先增大后减小。

5 结 论

- a. 不同种类风积沙应力-应变曲线均呈现应变软化的特点,且粉土掺量越多,应变软化现象越明显。
- b. 掺入 5% 水泥后,风积沙的弹性模量、破坏强度、黏聚力和内摩擦角均提高;弹性模量随粉土掺量的增加呈现“峰形”变化,15% 粉土掺量的改良风积沙 E 最大; q_t 与粉土掺量正相关,增速随着粉土掺量的增加逐渐降低。

c. 风积沙 c_{cu} 和 φ_{cu} 均大于 c' 和 φ' ,但随水泥和粉土掺入,变化趋势相同;随着 5% 水泥掺入黏聚力提高,内摩擦角相对提高较小;掺入粉土对黏聚力和内摩擦角影响显著,黏聚力随粉土掺量的增加先增大后减小,5% 水泥+10% 粉土时,黏聚力最大;内摩擦角随粉土掺量的增加持续增大,5% 水泥+20% 粉土掺量内摩擦角最大。改良风积沙 α 在 64.5° ~ 68.5° 之间。

d. 水泥水化物 C-S-H 包裹在沙粒表面使沙粒表面变得粗糙,同时 C-S-H、CH、AFt 和 AFm 在沙粒之间的空隙相互贯穿形成网状结构,将沙粒联结起来;掺入少量粉土时,可以填充沙粒之间的空隙,较弱碱性环境下产生的 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$,有利于提高材料强度,粉土掺量较多时,过量粉土可以吸附大量水分,阻碍水泥水化反应,碱性离子与水化物反应产生胶结能力差的 ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$) 和 ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$),导致水泥的联结作用降低,不利于材料性能的提高,改良风积沙的整体性能下降。

参考文献:

[1] 金旻昊,崔强,周楠,等. 水泥固化作用对风积沙试样抗剪强度影响机制的试验研究[J]. 工业建筑,2019,49 (7): 108-112. (JIN Minhao, CUI Qiang, ZHOU Nan, et al. Experimental research on influence mechanism of cement solidification on shear strength of aeolian sand samples[J]. Industrial Construction, 2019, 49 (7): 108-112. (in Chinese))

[2] 张景焄. 风积沙的压实特性研究[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12 (1): 77-82. (ZHANG Jingtao. Study on compaction characteristics of aeolian sand[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014, 12 (1): 77-82. (in Chinese))

[3] 任辉明,曾新迪,师高鹏,等. 水泥改良风积沙无侧限抗压强度试验研究[J]. 兰州交通大学学报,2017,36 (4): 67-72. (REN Huiming, ZENG Xindi, SHI Gaopeng, et al. Eeperiment research on unconfined compressive strength of cement improved aeolian sand[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2017, 36 (4): 67-72. (in Chinese))

[4] 唐玉龙. 大何铁路路基水泥改良粉细砂填料的试验研究[J]. 铁道标准设计,2012 (6): 24-27. (TANG Yulong. Experimental study on cement-improved silty sand used in subgrade of data-hejata railway [J]. Railway Standard Design, 2012(6): 24-27. (in Chinese))

[5] 胡三喜. 包西铁路榆林地区风积沙填料物理改良研究[J]. 铁道标准设计,2012 (7): 18-22. (HU Sanxi. Research into physical improvement of aeolian sand as filling material in Yulin section of Baotou-Xi'an railway [J]. Railway Standard Design, 2012 (7): 18-22. (in Chinese))

- [6] 屈泽刚,陈志华,秦伟,等. 风积沙路基填料的物理改良研究[J]. 铁道建筑技术,2010(3):138-140. (QU Zegang,CHEN Zhihua, QIN Wei, et al. On the physical improvement of aeolian sand roadbed [J]. Railway Construction Technology, 2010 (3): 138-140. (in Chinese))
- [7] 张达德,张家豪,简大为,等. 土工格室于砂土之承载能力及动态特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2009,31(12):1833-1837. (CHANG T,CHANG Chiahao,CHIEN Tawei,et al. Bearing capacity and dynamic properties of sandy soil with confinement of geocells [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2009,31(12):1833-1837. (in Chinese))
- [8] 包建强,邢永明,刘霖. 土工格栅层式加筋风积沙的动力性状[J]. 工业建筑,2019,49(11):77-81. (BAO Jianqiang, XING Yongming, LIU Lin. Dynamic Characteristics of reinforced aeolian sands with geogrid [J]. Industrial Construction, 2019, 49 (11): 77-81. (in Chinese))
- [9] 景宏君,景宏伟,俞茂宏. 土工格室在加固沙漠高速公路路基中的应用[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2006(6): 15-18. (JING Hongjun, JING Hongwei, YU Maohong. Application of geocell to strengthen expressway subgrade in desert [J]. Journal of Changan University (Natural Science Edition), 2006 (6): 15-18. (in Chinese))
- [10] GRAY D H, OHASHI H. Mechanics of fiber reinforcement in sand [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 109(3): 335-353.
- [11] SANTONI R L, TINGLE J S, WEBSTER S L. Engineering properties of sand-fiber mixtures for road construction [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(3): 258-268.
- [12] SANTONI R L, WEBSTER S L. Airfields and roads construction using fiber stabilization of sands[J]. Journal of Transportation Engineering-Asce, 2001, 127(2): 96-104.
- [13] 李德超. 石灰粉煤灰稳定沙漠沙路用性能研究[J]. 中南公路工程,2005(3):92-96. (LI Dechao. Properties of lime and fly-ash stabilized aeolian sand for highway applications [J]. Central South Highway Engineering, 2005(3):92-96. (in Chinese))
- [14] 胡玉娇,尚淑萍,石红鸽,等. 石灰粉煤灰加纤维稳定风积沙路用性能研究[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(2): 136-139. (HU Yujiao, SHANG Shuping, SHI Hongge, et al. Study on Road-used Performance for stabilizing Aeolian Sand by Adding Fiber into Lime Flyash [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering,2014,12(2):136-139. (in Chinese))
- [15] 张彩利,孟庆营,韩森. 聚丙烯纤维在风积沙基层材料中的应用研究[J]. 中外公路,2007(2):154-157. (ZHANG Caili, MENG Qingying, HAN Sen. Application of polypropylene fiber in aeolian sand base materials [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2007 (2): 154-157. (in Chinese))
- [16] CHAUHAN M S, MITTAL S, MOHANTY B. Performance evaluation of silty sand subgrade reinforced with fly ash and fibre[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008,26(5):429-435.
- [17] 李佳杰,田正宏,许健,等. 混掺粉土与水泥改良风积沙堤坝性能试验研究[J]. 水电能源科学,2021,39(8): 112-115. (LI Jiajie, TIAN Zhenghong, XU Jian, et al. Experimental study on performance of aeolian sand dike improved by cement and silt [J]. Water Resources and Power, 2021,39(8):112-115. (in Chinese))
- [18] 赵昊宇,田正宏,许健,等. 水泥混掺粉土改性风积沙冻融特性分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(2):107-113. (ZHAO Haoyu, TIAN Zhenghong, XU Jian, et al. Analysis on freeze-thaw properties of aeolian sands improved by cement-silt mixtures [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42 (2):107-113. (in Chinese))
- [19] 李晓明,臧德胜. 碱性环境对水泥材料的力学性能影响[J]. 长春工业大学学报,2015,36(4):456-460. (LI Xiaoming, ZANG Desheng. Effect of alkaline environment on the mechanical properties of cementitious materials [J]. Journal of Changchun University of Technology, 2015,36(4):456-460. (in Chinese))
- [20] 李洋,王述银,殷海波,等. 碱对水泥基材料水化及水化产物的影响研究综述[J]. 长江科学院院报,2019,36(1):127-133. (LI Yang, WANG Shuyin, YIN Haibo, et al. Review on the influence of alkali on hydration and hydration products of cement-based materials [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36 (1):127-133. (in Chinese))

(收稿日期:2022 - 02 - 26 编辑:刘晓艳)

