

油污泥热解残渣处治风积沙路基力学性能研究

冉武平^{1,2,3†}, 王亚强^{1,2}, 李玲^{1,2}, 张珊珊^{1,2}, 王帅^{1,2}

(1. 新疆大学 建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017;

2. 新疆土木工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830017;

3. 干旱荒漠区公路工程交通运输行业重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要:为探究油污泥热解残渣处治风积沙路基的工程力学特性,通过室内试验研究了不同热解残渣掺量下风积沙路基的压实特性、回弹模量、加州承载比(CBR)、直剪特性以及25%残渣掺量下的无侧限抗压强度.结果表明:油污泥热解残渣掺量为25%时干密度值最大为2.071 g/cm³;掺量为15%时回弹模量最大为160.61 MPa;CBR随残渣掺量的增加不断增大,浸水后试样的CBR值明显减小,降幅为10.97%~38.46%;掺量为20%时内摩擦角最大为34.35°;25%残渣掺量试样的14 d及14 d以后的无侧限抗压强度值均超过0.4 MPa.综合试验结果可知,油污泥热解残渣可有效提升风积沙路基的各项力学性能,可以作为风积沙路基填料使用.

关键词:公路工程;风积沙路基;油污泥热解残渣;强度机理;力学特性

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

Study on Mechanical Properties of Aeolian Sand Subgrade Treated by Pyrolysis Residue of Oil Sludge

RAN Wuping^{1,2,3†}, WANG Yaqiang^{1,2}, LI Ling^{1,2}, ZHANG Shanshan^{1,2}, WANG Shuai^{1,2}

(1. College of Architectural Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China;

2. Xinjiang Civil Engineering Technology Research Center, Urumqi 830017, China;

3. Key Laboratory of Highway Engineering Technology in Arid Desert Area of Ministry of Transport, Urumqi 830000, China)

Abstract: In order to explore the engineering mechanical properties of the aeolian sand subgrade treated by pyrolysis residue of oil sludge, the compaction characteristics, resilience modulus, California bearing ratio (CBR), and direct shear characteristics of the aeolian sand subgrade with different content of oil sludge pyrolysis residue, as well as the unconfined compressive strength with 25% content of residue were studied through laboratory tests. The results show that the maximum dry density is 2.071 g/cm³ when the content of oil sludge pyrolysis residue is 25%; the maximum rebound modulus is 160.61 MPa when the content is 15%; the CBR increases continuously with the increase of residue content, the CBR value of the sample decreases obviously after soaking in water, within the decrease ranging from 10.97% to 38.46%; the maximum internal friction angle is 34.35° when the content is 20%; the unconfined compressive strength values of the sample with 25% residue content exceed 0.4 MPa at 14 d and after 14 d. The comprehensive test results show that the pyrolysis residue of oil sludge can effectively improve the mechanical properties of

* 收稿日期:2021-09-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51768070), National Natural Science Foundation of China(51768070)

作者简介:冉武平(1977—),男,甘肃镇原人,新疆大学教授,工学博士

† 通信联系人, E-mail: rwpju@163.com

the aeolian sand subgrade, and the residue can be used as filling material for the aeolian sand subgrade.

Key words: highway engineering; aeolian sand subgrade; pyrolysis residue of oily sludge; strength mechanism; mechanical properties

随着我国基础建设事业的长足发展,西北荒漠地区路网密度逐渐提高,风积沙作为荒漠地区广泛分布的筑路材料,用于道路建设不仅可节约成本,还具有环境效益^[1-2].然而风积沙存在无黏聚性、不易压实、抗剪性差、稳定性不足等不良特性,导致风积沙路基易产生失稳破坏,进而引起路面裂缝、车辙和沉陷等结构病害^[3-4].目前使用无机结合料处治风积沙会加剧路面开裂程度并提高造价,因此寻求更合理的方法处治风积沙路基是当前沙漠公路建设亟待解决的问题之一.

道路建设在工业固废的处治利用方面有很大潜力^[5],目前关于工业固废在道路工程中的应用研究已有很多,Rouabah等^[6]对矿渣的物理、化学和力学特性进行研究,表明矿渣可用作路基骨料.Javed^[7]发现铸造废砂的性能满足路基填料的设计要求.Huang等^[8]研究表明镍铁渣通过少量水泥改性可部分替代路基填料.查进^[9]对磷渣、锰渣路基材料的力学性能和收缩特性进行了分析,认为无机结合料改性后的磷渣、锰渣路基后期强度增高,具有一定自恢复性且抗裂性好.魏功槐^[10]研究了油页岩废渣的路用性能,得出含黏油页岩电厂渣具有较大CBR值,7%水泥稳定油页岩半焦可用作二级及以下公路基层或各级公路底基层.钢渣作为一种强度高、自然级配好的废料,其能通过微波加热的特性,在路面材料中使用可提升钢渣沥青混合料路面的自愈能力,同时也有优良的抗滑性能^[11-12];钢渣用作路基填料时可增加水化产物数量,使路基结构更紧密,并且可提升路基整体性和强度^[13-14].Wang等^[15]对高炉矿渣的微观结构和力学性能进行研究,最终研制了配比最佳的注浆材料.Cho等^[16]对废玻璃用作沥青混凝土集料的路用性能进行研究,表明其高温稳定性、水稳定性、抗滑性等符合规范要求,且反光性能良好.高昌胜等^[17-18]研究了粉煤灰、水泥和硫酸钠处治油污泥热解残渣的工程特性,结果表明:油污泥热解残渣可以作为路基材料使用;用粉煤灰处治的最佳掺量为20%;水泥掺量为4%即可满足强度要求且经济效

益最佳;适量地掺入硫酸钠(0.3%~0.9%)可改善热解残渣路基的多项使用性能.

综上所述,工业固废在道路建设中作为路基或路面材料已有了较多的研究,但在特殊路基材料中的应用研究尤其是风积沙路基的处治研究很少,且油污泥热解残渣废料在道路工程中的应用也处于起步阶段.鉴于此,本文借助室内试验,对不同油污泥热解残渣掺量下处治风积沙路基的工程力学性能进行研究,为其在风积沙路基结构中的应用提供参考.

1 试验材料的基本性质

1.1 试验材料成分分析

本文所用油污泥热解残渣取自新疆奎屯,且经800℃高温处理,外观为黑灰色;相对密度为2.32,含油率为0.008%,pH值为8.78,苯并[a]芘含量小于0.66 mg/kg.残渣的红外光谱如图1所示.由图1可知,在3 336.97、2 923.66、1 608.40、1 461.83、1 029.84、775.27 cm⁻¹处出现明显的伸缩振动的吸收峰,分别由羟基—OH键、C—H键、C=C键、C—C键、C—O及Si—O—Si和Al—O键引起,表明经高温处理后的残渣中含有苯酚类、短链烷烃类、芳香环类、长链烷烃类有机物和含氧官能团^[19-20].

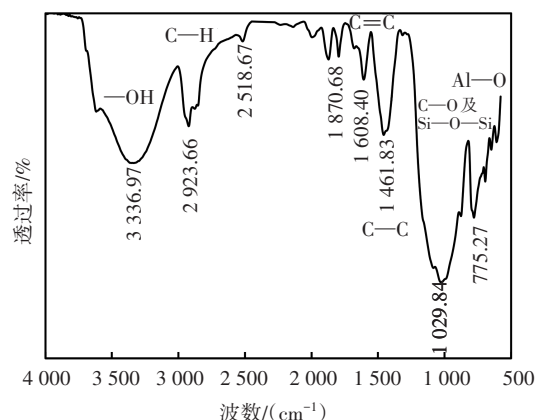


图1 热解残渣FT-IR光谱图

Fig.1 FT-IR spectra of pyrolysis residue

图2为热解残渣的X射线衍射谱.由图2可知,

在 $2\theta=27^\circ$ 附近有明显的 SiO_2 晶体衍射峰,且其衍射峰出现次数最多,说明 SiO_2 晶体成分含量最多;其次 Ca 和 Al 元素也出现了多次衍射峰,表明热解残渣中富含

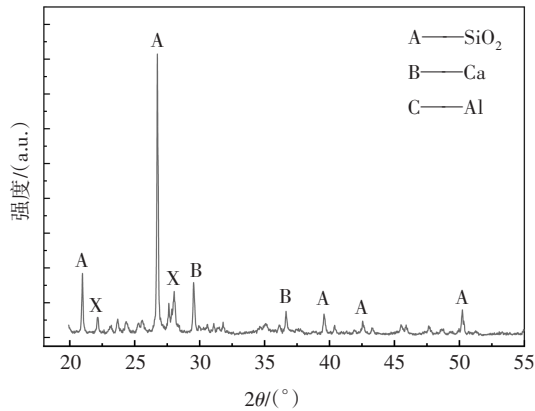


图2 热解残渣 XRD 谱

Fig.2 XRD spectrum of pyrolysis residue

元素为 Si、O、Ca、Al,主要成分则为 SiO_2 、CaO 和 Al_2O_3 .

热解残渣中也含有较多种类的重金属元素,如表 1 所示,包括 Cu、Cr、Zn、Ni、Pb、Cd 和 Hg,但含量较低,总质量比不超过 0.03%.

残渣的 X 射线能谱分析(EDS)试验结果见表 2.由表 2 可得残渣主要组分 SiO_2 、 Al_2O_3 和 C 约占总质量的 90%,其余成分则为 Na、Mg、Ca、K 和 S 的氧化物及微量盐分.

表 1 油污泥热解残渣重金属元素质量比

Tab.1 Mass ratio of heavy metals in pyrolysis residue of oily sludge

元素符号	Cu	Cr	Zn	Ni	Pb	Cd	Hg
质量比/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	42.1	55.1	120	38	28.7	2.81	0.024

表 2 油污泥热解残渣元素质量及原子分数

Tab.2 Elemental mass fraction and atomic fraction of pyrolysis residue of oil sludge

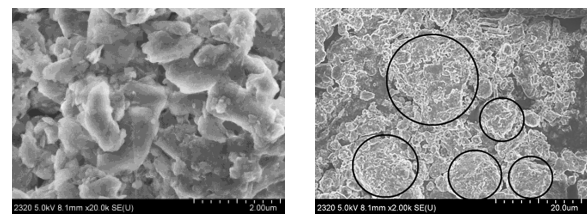
元素	O	Si	C	Al	Na	Mg	Ca	K	Cl	S	总量
质量分数/%	37.73	27.49	16.56	9.29	3.57	1.55	1.52	1.31	0.74	0.28	100
原子分数/%	43.83	18.21	25.63	6.40	2.89	1.18	0.70	0.62	0.39	0.17	100

风积沙的主要矿物成分岩屑、长石和石英占 90% 以上,其主要化学成分 SiO_2 约占 70%, Al_2O_3 和 Fe_2O_3 约占 15%,其余是 MgO 、 Na_2O 、 CaO 、 K_2O 、 MnO 等,约占 15%;易溶盐和中溶盐含量较小,均不超过 1%,难溶盐含量不超过 10%,属非盐渍土,呈弱碱性^[21-22].

综上所述,残渣经高温处理后,在现有温度环境下性质稳定,其重金属及有机污染物含量很少,均满足排放规定要求.此外由热解残渣与风积沙成分分析可知,在该过程中会发生化学反应生成少量的硅酸盐与氯酸盐,进一步提高二者的稳定性.

1.2 油污泥热解残渣电镜扫描

油污泥热解残渣的电镜扫描试验结果如图 3 所示.由图 3(a)可知残渣颗粒表面粗糙,形状不规则,存在大量宽度在 $1\sim 60\ \mu\text{m}$ 不等的孔隙;图 3(b)中圆圈所示为粒径大于 $75\ \mu\text{m}$ 的较大颗粒,其粒间由数量较多的直径在 $10\sim 40\ \mu\text{m}$ 的小颗粒填充.残渣中所含的小粒径颗粒可以填充风积沙的空隙,同时粗糙的粒面也可提高风积沙的摩擦力,为热解残渣提升风积沙的性能提供微观尺度的理论支撑.



(a)20 000 倍 (b)2 000 倍

图 3 热解残渣 SEM 图

Fig.3 SEM of pyrolysis residue

1.3 粒径分析

本文所用的风积沙取自新疆托克逊县塔克拉玛干沙漠边缘,相对密度为 2.71;油污泥热解残渣与风积沙的筛分试验结果如表 3 和图 4 所示.由表 3 可知,油污泥热解残渣的主要粒径小于 $5\ \text{mm}$,粒径小于 $0.075\ \text{mm}$ 的占比 24.10%,此部分含量主要为有机物热解过后形成的碳粉和细粒粉黏土;粒径大于 $5\ \text{mm}$ 的占比 3.46%,为油污泥中混入的碎砾石.风积沙的主要粒径在 $0.075\sim 0.5\ \text{mm}$ 之间,占比接近 90%,粒径大于 $0.5\ \text{mm}$ 的占比 12.10%,几乎不含粒径小于 $0.075\ \text{mm}$ 的细粒,颗粒整体较细,粒度分布集中.计算得油污泥热解残渣与风积沙的不均匀系数 C_u 分别为 2.36 和 2.28,曲率系数 C_c 分别为 0.63 和 1.00,同属于不良级配.

表 3 试验材料颗粒粒径与质量分数

Tab.3 Particle size and mass fraction of test material

粒径范围/mm	质量分数/%	
	油污泥热解残渣	风积沙
>60	0.00	0.00
60~40	0.00	0.00
40~20	0.82	0.00
20~10	1.20	0.00
10~5	1.44	0.03
5~2	3.67	0.25
2~1	1.35	2.62
1~0.5	3.67	9.20
0.5~0.25	2.13	17.01
0.25~0.075	61.62	70.13
<0.075	24.10	0.76

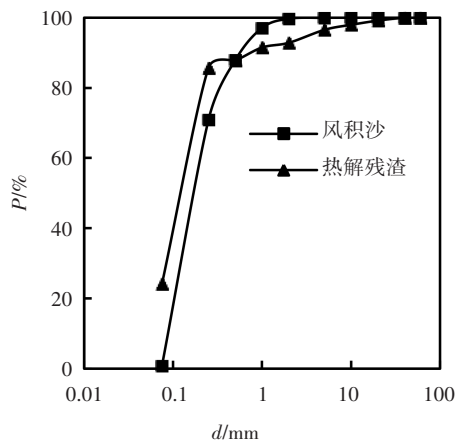


图 4 级配曲线

Fig.4 Grading curve

为全面研究不同油污泥热解残渣掺配比下风积沙的工程力学性质,残渣按照质量比为 5%、10%、15%、20%、25%、30% 掺入,级配结果如图 5 所示。

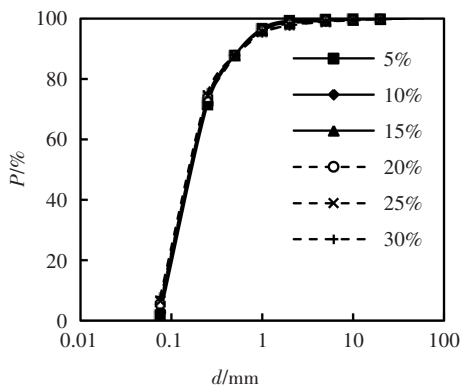


图 5 各掺量级配曲线

Fig.5 Gradation curve at different dosage

2 击实试验

2.1 风积沙的击实特性

风积沙采用标准重型击实试验得到含水率 ω 与干密度 ρ_d 的关系如图 6 所示. 由图 6 可知,风积沙的干密度与含水率呈典型的双峰值曲线关系;风积沙的最大干密度 ρ_{dmax} 为 1.89 g/cm^3 ,对应的最佳含水率 ω_{opt} 为 10%;干压实密度为 1.74 g/cm^3 ;含水率为 4% 时得 ρ_{dmin} 为 1.69 g/cm^3 .

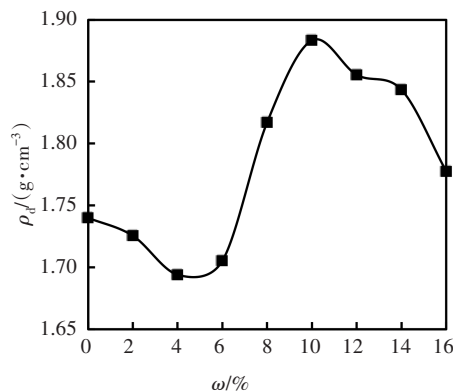


图 6 风积沙击实曲线

Fig.6 Compaction curve of aeolian sand

2.2 不同残渣掺量试样的击实试验

将热解残渣和风积沙烘干后进行混合,残渣掺入的质量比如 1.3 节所述,以 5%、7%、9%、11% 和 13% 五个含水率梯度配置试样,焖料 24 h 后进行标准重型击实试验,得到不同残渣掺量试样的击实结果如图 7、图 8 所示. 由图 7 可知,各残渣掺量下干密度都随含水率的增加呈先增大后减小的趋势;最佳含水率 ω_{opt} 随残渣掺量的增加略有增大,基本为 7%,当残渣掺量为 30% 时增大到 9%;由于残渣掺量为 30% 且粒径小于 0.075 mm 的细粒只占总质量的 7.76%,所以最佳含水率增加并不明显。

由图 8 可知随残渣掺量 w_{po} 的增大,最大干密度 ρ_{dmax} 有先增后减的趋势;残渣掺量为 25%、含水率为 7.00% 时干密度最大,为 2.071 g/cm^3 . 相对于非处治风积沙,处治后的风积沙干密度增大是因为风积沙中缺少 0.075 mm 以下的细粒土,而热解残渣中含有 0.075 mm 以下的细粒矿料所致,因此一定程度上可改善级配组成,填充风积沙孔隙,提高压实效果,从而提高混合填料的密实度。

结合图 7、图 8,残渣掺量为 25% 且在低含水率 (5%~9%) 时都有较大干密度,因此可对残渣掺量为 25% 的风积沙试样进行进一步研究。

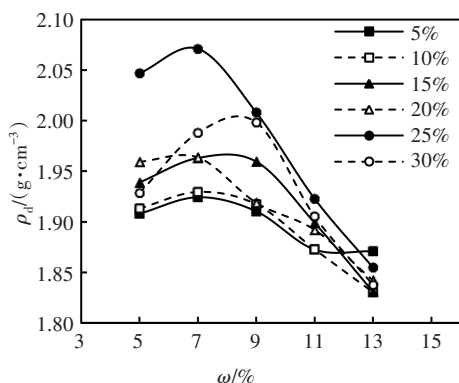


图7 不同残渣掺量试样的击实曲线
Fig.7 Compaction curves of samples with different residue contents

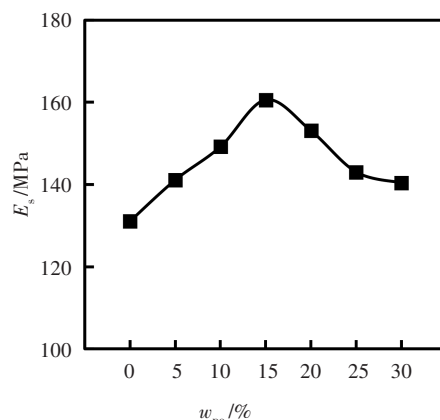


图9 不同掺量试样的回弹模量
Fig.9 Resilient modulus of samples with different contents

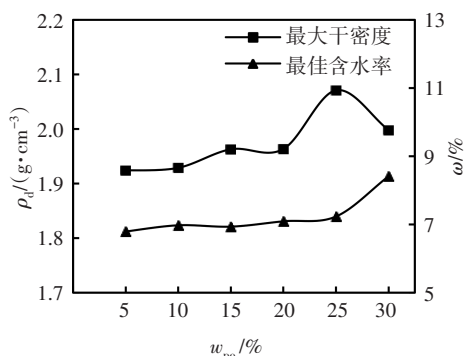


图8 不同残渣掺量试样的最大干密度与最佳含水率
Fig.8 Maximum dry density and optimum moisture content of samples with different residue content

3 力学特性试验

3.1 回弹模量试验

回弹模量试验使用室内承载板法,试样含水率7%,压实度98%,试验结果如图9所示.由图9可知回弹模量 E_r 随残渣含量的增加呈先增后减的趋势,残渣掺量小于等于15%时回弹模量增长较快,残渣掺量每增加5%回弹模量平均增大10 MPa;残渣掺量为15%时回弹模量值最大为160.61 MPa,掺量大于15%后回弹模量开始减小,但减小幅度逐渐降低.随残渣含量增加试样密实度和含水量增大,密实度越大试样可压缩性越小,回弹模量值越大.当试样中大于最佳含水量的水分留存量增加,对沙土的润滑作用增大,引起体应变和累积变形不断增大,回弹模量逐渐减小;同时细粒含量的增多促使土体孔压累积效应更加显著,导致沙土有效应力减小,回弹模量有所降低.故而随残渣掺量的增加,回弹模量呈现出先增后减的趋势^[23].

非处治风积沙的回弹模量为131.04 MPa,25%掺量时回弹模量为143.04 MPa,残渣掺入量为15%和25%时的回弹模量相比于非处治风积沙分别提高了22.57%和9.16%,且掺入残渣后的试样回弹模量均大于140 MPa.综上可知,该风积沙样品本身回弹模量较大,已满足路基顶面交通荷载等级为极重时回弹模量不小于70 MPa的要求,掺入适量油污泥热解残渣可显著提高风积沙路基的回弹模量.

3.2 CBR 试验

CBR 试验压实度为98%,含水率7%,试样击实成型,分别进行不浸水和浸水4 d的 CBR 试验,并且测量浸水试件的吸水量与膨胀率,结果如图10所示.可知:

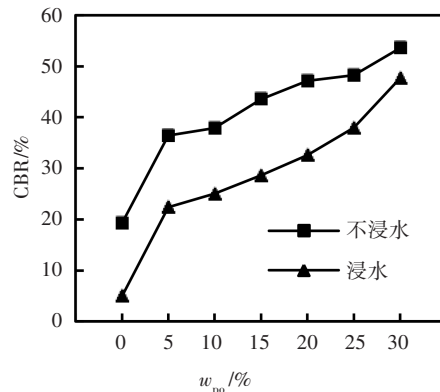


图10 CBR 试验
Fig.10 CBR test

- 1)不浸水时:风积沙的CBR值为19.29,掺量5%时CBR值为36.43,提高了0.89倍;CBR随着残渣掺量的增加不断增大,掺量为30%时CBR值为53.58.
- 2)浸水时:风积沙的CBR值为5.00,掺量5%时CBR值为22.42,提高了3.48倍;浸水后CBR值也随

残渣掺量增加不断增大,并且增幅逐渐升高,掺量为 30% 时 CBR 值为 47.70.

3)对比来看:两种工况下 CBR 值与残渣掺量都成正比关系, CBR 值不断增大说明密度仍在增大,致使相应密度下的强度在不断增大. 浸水后风积沙的 CBR 值下降为不浸水的 25.92%,说明浸水可明显降低风积沙的 CBR 值;同时对比 5% 残渣掺量与非处治风积沙的 CBR 值,可发现掺入少量残渣即可显著提升风积沙的 CBR 值;再者浸水后各掺量下的 CBR 值也有明显降低,掺量为 5%、30% 时分别降低了 38.46% 和 10.97%,随着残渣掺量的增加降幅逐渐减小.

结合图 8 不同残渣掺量下的最大干密度曲线来看,随着残渣掺量的增加,细粒含量增加,最大干密度呈增大趋势,因而试样密实程度增加致使 CBR 值不断增大;再由图 11 可知浸水后试样的吸水量在不断减小,内摩擦角增大,导致试样局部抗剪强度增大,因此随残渣掺量的增加,试样浸水后的 CBR 值也更接近相同掺量下不浸水时的 CBR 值.

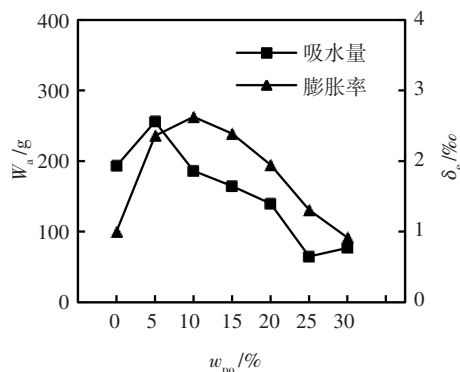


图 11 吸水量与膨胀率

Fig.11 Absorption mass of water and expansion rate of specimen

由图 11 可看出吸水量 W_a 与膨胀率 δ_e 整体随残渣掺量的增加呈先增后减的趋势,吸水量最大为 255.95 g,膨胀率最大值为 2.625%。相比于非处治风积沙,残渣中的细粒填充孔隙使比表面积增大,吸水量增大;随着密实试样密实程度的提高,吸水量减小,相应膨胀量也减小,故膨胀量与吸水量密切相关.

3.3 直剪试验

直剪试验竖向压力分别为 100 kPa、200 kPa、300 kPa 和 400 kPa. 25% 残渣掺量下的剪切试验结果如图 12~13 所示. 由图 12 可知各级竖向压力下剪应

力达到最大值后逐渐减小并趋于稳定. 取各级压力下的抗剪强度,得竖向压力 P 与抗剪强度 S 的关系如图 13 所示. 由图 13 可知抗剪强度 S 与竖向压力 P 成线性增长关系,其线性回归式为: $S=0.665 5P+21.395$,可得 25% 掺量试样的内摩擦角为 33.64° ,黏聚力为 21.395 kPa.

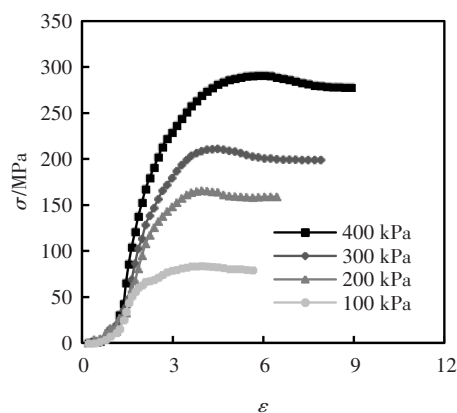


图 12 应力-应变曲线

Fig.12 Stress-strain curve

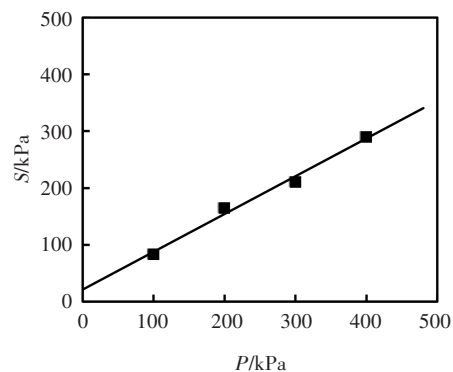


图 13 抗剪强度

Fig.13 Shear strength

各掺量试样的直剪试验计算结果如表 4 和图 14 所示. 可知风积沙的内摩擦角为 31.87° ,内摩擦角 φ 随残渣掺量的增加有先增后减的趋势,变化幅度较小. 由残渣电镜扫描结果可知其不规则的颗粒形状,可增大风积沙的内摩擦角,同时细粒含量增加会改善试样级配增大内摩擦角;但细粒增多会吸收更多水分,导致内摩擦角减小,耦合作用下在残渣掺量为 20% 时得到最大内摩擦角为 34.35° . 风积沙的黏聚力 c 为 16.09 kPa,掺入残渣后黏聚力明显增大,但随残渣掺量的增加黏聚力变化幅度很小,掺量为 10% 时取得最大值 21.58 kPa.

表4 各掺量的直剪试验结果

Tab.4 The results of direct shear test of different dosages

$w_{po}/\%$	拟合式	$\varphi/(\circ)$	c/kPa	R^2
0	$S=0.6216P+16.085$	31.87	16.09	0.9951
5	$S=0.6309P+21.045$	32.25	21.05	0.9937
10	$S=0.6614P+21.575$	33.48	21.58	0.9988
15	$S=0.6670P+21.485$	33.70	21.49	0.9971
20	$S=0.6835P+21.090$	34.35	21.09	0.9993
25	$S=0.6655P+21.395$	33.64	21.40	0.9890
30	$S=0.6419P+21.485$	32.70	21.49	0.9995

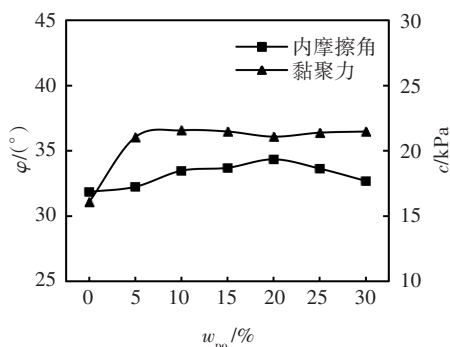


图14 内摩擦角和黏聚力

Fig.14 Internal friction angle and cohesion

风积沙直剪试验的含水率为其最佳含水率,试验所得的黏聚力并非风积沙的真黏聚力,实际干沙黏聚力为0.该黏聚力一方面因为土颗粒表面含有结晶水,为强结合水,通过化学键与矿物紧密连接具有较大黏阻性;在静电吸力和分子间作用力作用下非饱和土固体颗粒表面形成结合水膜,远离矿物表面时作用力逐渐减小,吸附强度变弱,强结合水转变为弱结合水,直到自由水;由结合水引起的毛细管张力、渗透吸力和基质吸力等共同作用下,使水膜产生胶连作用从而提升了土颗粒的黏聚力^[24-25].根据Fredlund等^[26]提出的非饱和土抗剪强度理论,如式(1)所示,其中 $(u_a-u_w)\tan\varphi^b$ 考虑了吸附力的影响,为非饱和和无黏性土的假黏聚力 τ_f 的来源.

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)\tan\varphi' + (u_a - u_w)\tan\varphi^b \quad (1)$$

式中: c' 为有效凝聚力(kPa); φ' 为有效内摩擦角(\circ); u_a 为孔隙气压力(kPa); u_w 为孔隙水压力(kPa); $\tan\varphi^b$ 为吸附力增速.

该吸附力在非饱和和无黏性土中即为毛细管水吸力,干燥时土颗粒孔隙与空气连通,此时只有摩擦力;水分进入土体后在土颗粒表面形成结合水膜,在低饱和度时水分与空气可在粒间流动,使土颗粒表

面的水膜存在气、水压力差,在表面张力反作用下使土颗粒压缩,增大了颗粒间的内聚力^[27].

结合图14可知掺入热解残渣后相对于非处治风积沙增大的黏聚力可看作有效黏聚力 c' ,主要由粉黏细粒提供;然而各掺量试样中小于0.075 mm的细粒含量占比分别为1.93%、3.10%、4.26%、5.43%、6.60%、7.76%,细粒含量差异较小,对黏聚力的影响较小.

3.4 无侧限抗压试验

选取25%残渣掺量的试样进行无侧限抗压强度试验,试件直径50 mm,高度122 mm,高径比为2.44;采用一次静压成型,脱模后放置于室内25 $\circ\text{C}$ 的常温环境条件下,如图15所示.



图15 无侧限抗压试件

Fig.15 Unconfined compression specimen

试件静置0 d、0.5 d、1 d、3 d、7 d、14 d、21 d、60 d和90 d后分别进行无侧限抗压强度试验,并测量压损试件的含水率,试验结果如图16所示.可见前3 d的抗压强度值 q_u 增长迅速,从初始的187.56 kPa增长到第3 d的334.78 kPa,增长了78.49%,相应的含水率从初始的7.00%下降到0.38%,其后抗压强度的增长和与之对应含水率的下降都趋于平缓,表明含水率与试件的强度存在相关关系.

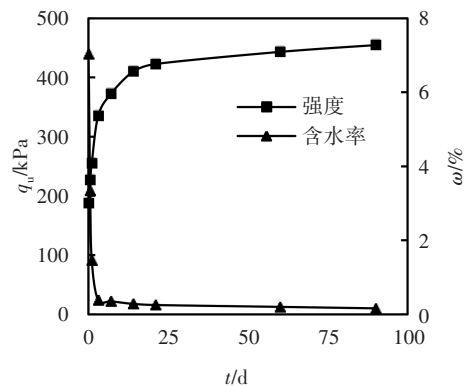


图16 无侧限抗压试验结果

Fig.16 Unconfined compression test results

由图 17 可知,在低含水率(<7%)时随着含水率的减小,试样强度不断增大.试样失水会引起粒间吸力的增大,含水率对基质吸力的影响如式(2)所示,由式(2)可知含水率降低使 φ 和 r 同时减小,但分母减小的幅度更大,因此基质吸力增大,土颗粒内聚力增大^[24].

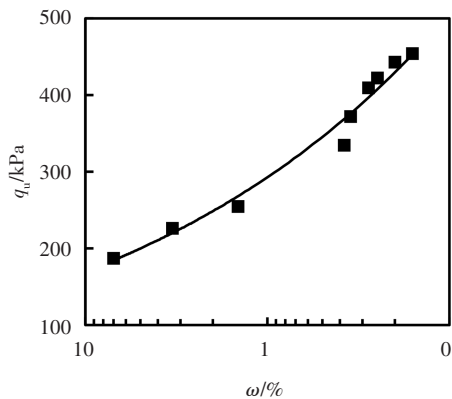


图 17 含水率与抗压强度关系

Fig.17 The relationship between water content and compressive strength

$$P = \frac{2\pi R\alpha \sin \varphi}{r} \quad (2)$$

式中: R 为土颗粒半径(m); α 为表面张力系数; φ 为土的两相邻颗粒中心线和弯液面切点与土颗粒中心连线之间的夹角($^\circ$); r 为两相邻颗粒间水膜弯液面半径(m).

此外 Tresca 准则^[28]表明土体的破坏是剪切破坏,当土体内任意面 $\tau_{\max} > \tau_0$ (剪切屈服应力)时就发生破坏.申春妮等^[29]则得出非饱和土抗剪强度与含水率的关系如式(3)所示.

$$\tau_f = (c_0 - \omega \tan \varphi_0^c) + \sigma \tan(\varphi_0 - \omega \tan \varphi_0^e) \quad (3)$$

式中: φ_0^c 和 φ_0^e 分别为黏聚力 c 和内摩擦角 φ 随着含水率的减小而呈线性增加曲线的倾角($^\circ$).

由式(3)可知随着含水率的减小,黏聚力项($c_0 - \omega \tan \varphi_0^c$)与摩擦力项 $\sigma \tan(\varphi_0 - \omega \tan \varphi_0^e)$ 均增大,并且含水率变化对黏聚力的影响更为显著;含水率对颗粒多重吸附作用力都有影响,使水膜的润滑作用减小,摩擦力增大,因而非饱和土抗剪强度随含水率减小而增大,致使无侧限抗压强度增大.

由图 17 得出 25% 残渣掺量下含水率与无侧限抗压强度的拟合关系如式(4)所示,可见无侧限抗压强度 q_u 与含水率 ω 呈幂函数关系,相关系数为 0.980 2.

$$q_u = 292.98\omega^{-0.237} \quad (4)$$

同时将成型的试样直接烘干后进行无侧限抗压试验,结果如表 5 所示,可见直接烘干与静置拟合式计算强度值接近.由前述微观试验分析知残渣与风积沙含少量的 Na_2O 和 K_2O ,会在水溶液中发生电解反应生成 OH^- ,与 Ca^+ 结合生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,最终与 CO_2 反应生成 CaCO_3 凝胶,可增强土体强度.当电解作用足够强烈时,富集的 OH^- 会与难溶氧化物 SiO_2 及 Al_2O_3 等反应生成大量凝胶,与土体水分结合形成固化结晶,从而提高土体强度^[30].但 Na_2O 与 K_2O 含量很少以及水分不断流失,这些微量氧化物的理化反应受到很大阻碍,即使在长时间作用下,化学反应可提供的强度也非常有限.

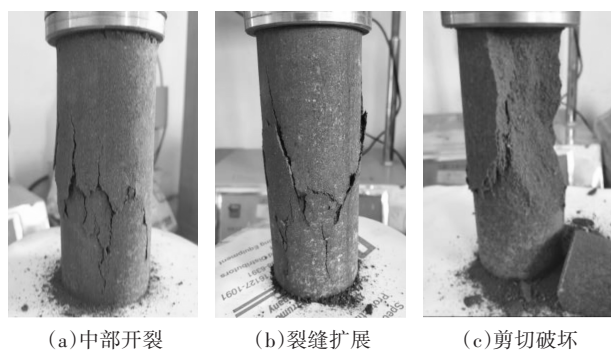
表 5 烘干试样无侧限抗压试验结果

Tab.5 Unconfined compression test results of dried samples

组号	含水率/%	无侧限抗压强度		
		实测值/kPa	预估值/kPa	实测值/预估值/%
1	0.279	342.63	396.48	86.42
2	0.203	418.10	428.25	97.63
3	0.198	429.17	430.93	99.59

已知 25% 的残渣掺量下,14 d 及其后的无侧限抗压强度均超过 400 kPa,90 d 时强度最大为 454.60 kPa;任辉明等^[31]以毛乌素沙漠风积沙为样品研究改性风积沙的无侧限抗压强度,得出掺入 5% 的 32.5 级水泥在 93% 压实度下 $q_{u,7}$ 为 460 kPa;阮波等^[32]和李德超^[33]得出 $q_{u,7}$ 分别为 480 kPa 和 440 kPa,表明该掺量下油污泥热解残渣处治风积沙能达到接近少量水泥的处治效果,获得较高的强度值.

图 18 为该试样无侧限抗压强度破坏特征图,可见试件中部产生的裂缝较多,竖向有斜裂缝贯穿.试样上下接触面在摩擦力的限制下阻碍了裂缝发展和变形,端部产生径向压应力;中部所受的约束力最小,在径向拉应力的作用下最先产生裂缝和变形;竖向压力与径向摩擦力的合力产生了斜向剪力,剪应力引起土颗粒间相互位置变化,使中部边缘裂缝逐渐向内发展变宽,加大颗粒间的孔隙,从而引起体积变化;当试件强度达到峰值后由于存在残余应力,应变持续增大而应力开始减小,直至试件完全剪断脱落时应力降为 0;由图 18(c)可见破坏面为斜面,最终试件可形成锥体,为剪切破坏形态.



(a)中部开裂 (b)裂缝扩展 (c)剪切破坏

图18 无侧限压破坏形态

Fig.18 Failure mode of unconfined pressure

由莫尔-库伦强度理论: $\tau_f = f(\sigma)$, 即式(5), 表明抗剪强度与正应力有关, 正应力是破坏面上抗剪强度的单值函数, 当应力圆与破坏包线函数相切或该点在包络线以外即导致材料破坏. 对于该试样而言, 由式(5)可知破坏面剪应力值小于无侧限抗压强度值, 因此破坏面剪应力较小, 试样的宏观变形主要由土颗粒间的相对位移组成, 基本不发生颗粒变形及破碎^[28,34].

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (5)$$

3.5 油污泥热解残渣处治风积沙长期特性

路基的长期性能主要受环境和荷载影响, 长期性能不足将导致路基强度和稳定性衰减, 引起道路结构沉降变形和失稳破坏; 而风积沙路基多在少降水、强蒸发和大温差的气候环境中服役, 在该特殊环境下油污泥热解残渣处治风积沙路基的长期性能主要受温度变化和行车荷载影响.

首先由图10可知油污泥热解残渣处治风积沙在浸水时也具有较高的CBR值, 因此即使在降水条件下残渣处治风积沙路基仍具有较好的稳定性和力学性能; 同时风积沙和经过高温处理后的油污泥热解残渣都具有热稳定性, 因此热解残渣处治风积沙路基在极端温度和大温差的服役环境中, 亦具有较好的稳定性. 由表2油污泥热解残渣化学元素组成分析可知, 热解残渣与风积沙富含性质稳定的 SiO_2 和 Al_2O_3 , 而活性较强的 Na_2O 、 CaO 和 K_2O 含量不足5%, 初期与水拌制后, 生成含碳酸盐、硅酸盐及氯化物的胶凝水硬性产物, 在干燥和弱碱性环境中, 其主要成分和少量生成物之间几乎不发生水化反应及化学反应, 由此既可增强风积沙颗粒间的胶结作用, 亦可提高其复杂环境下的稳定性.

其次经过油污泥热解残渣处治后的风积沙力学

性能有显著提升, 热解残渣掺量为25%时, 试样的最大干密度相对于非处治风积沙提升了9.6%; 非处治风积沙不具有无侧限抗压强度, 但经残渣处治后其值与低剂量水泥处治后的强度接近; 回弹模量与CBR分别提升9.16%和两倍以上; 在不同压力条件下的抗剪强度均有提升, 因此其在荷载作用下的力学稳定性显著提升. 其强度提升主要有两方面原因: 其一, 热解残渣中的细粒对风积沙缺失级配的补充, 25%掺量试样的 C_u 和 C_c 分别为2.54和1.03, 较非处治风积沙级配显著改善; 其二, 残渣和风积沙所含矿物成分在水分拌和条件下会发生胶凝反应, 可进一步提升处治风积沙的稳定性和耐久性.

综上所述, 从服役环境、化学反应和力学性能方面来看, 油污泥热解残渣处治风积沙路基在特殊服役环境下具有较非处治风积沙优越的环境稳定性和力学性能, 能够满足路用材料长期性能的要求, 完全可作为道路路基材料适应长期的复杂服役环境和荷载条件.

4 结论

1) 随着油污泥热解残渣处治风积沙掺量的增大, 各试样的干密度及所有试样的最大干密度都呈先增后减的趋势, 热解残渣掺量为25%时可得到最大干密度值 2.071 g/cm^3 , 最佳含水率的变化不明显, 约为7%.

2) 试样回弹模量与内摩擦角也随残渣增大呈先增后减的趋势, 风积沙回弹模量为 131.04 MPa 、内摩擦角为 31.87° 、掺量为15%时回弹模量最大为 160.61 MPa , 掺量为20%时内摩擦角最大为 34.35° , 各掺量试样黏聚力基本都在 21 kPa 左右. 两种工况下CBR值都随残渣掺量的增加不断增大, 浸水后非处治风积沙的CBR值急剧减小, 各掺量的CBR值也明显减小, 但随残渣掺量的增加幅度逐渐减小, 降幅在 $38.46\% \sim 10.97\%$ 之间.

3) 25%残渣掺量试样的无侧限抗压强度与含水率呈幂函数关系, 热解残渣与风积沙基本不发生化学反应; 14 d及14 d之后的无侧限抗压强度值均超过 400 kPa , 90 d时为 454.60 kPa , 接近低掺量水泥改性风积沙的强度.

综合上述, 掺入适量的油污泥热解残渣可明显改善风积沙的各项工程力学特性, 油污泥热解残渣处治风积沙可以作为路基填料使用.

参考文献

- [1] 张生辉,李志勇,彭帝,等. 风积沙作为路基填料的静力特性研究[J]. 岩土力学,2007,28(12):2511-2516.
ZHANG S H, LI Z Y, PENG D, *et al.* Study of static property of aeolian sand used as roadbed [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(12):2511-2516. (In Chinese)
- [2] 金昌宁,张玉红,李森,等. 细粒物质变化对风积沙击实特性的影响[J]. 公路交通科技,2008,25(10):36-40.
JIN C N, ZHANG Y H, LI S, *et al.* Influence of change of granule on compaction features of wind-laid sand [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2008, 25(10):36-40. (In Chinese)
- [3] 牟献友,谷攀. 国内风积沙工程特性研究综述[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2010,31(1):307-310.
MOU X Y, GU P. Review on engineering characteristics of wind-blown sand [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2010, 31(1):307-310. (In Chinese)
- [4] 郭永祥. 半刚性基层沥青混凝土路面病害分析与路面结构设计参数研究[D]. 长沙:中南大学,2012.
GUO Y X. Disease analysis and structural design parameters studies of semi-rigid base asphalt concrete pavement [D]. Changsha: Central South University, 2012. (In Chinese)
- [5] 于华洋,马涛,王大为,等. 中国路面工程学术研究综述·2020 [J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 1-66.
YU H Y, MA T, WANG D W, *et al.* Review on China's pavement engineering research·2020 [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(10): 1-66. (In Chinese)
- [6] ROUABAH K, ZERGUA A, BEROUAL A, *et al.* Recovery and use of blast furnace slag in the field of road construction in Algeria [J]. *Open Journal of Civil Engineering*, 2013, 3(2):113-118.
- [7] JAVED S. Use of waste foundry sand in highway construction: final report [R]. West Lafayette: Purdue University, 1994.
- [8] HUANG D, CHEN S H, MON H H. The preliminary study on re-utilization of ferrous-nickel slag to replace conventional construction material for road construction (sub-grade layer improvement) [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 723:694-702.
- [9] 查进. 磷渣锰渣路面基层材料的研究与应用[D]. 武汉:武汉理工大学,2005.
ZHA J. Study and application of road base material with phosphor slag and manganese slag [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005. (In Chinese)
- [10] 魏功槐. 油页岩废渣在公路路基及基层中的应用研究[D]. 长春:吉林大学, 2016.
WEI G H. Research on the application of oil shale waste residue in highway subgrade and base [D]. Changchun: Jilin University, 2016. (In Chinese)
- [11] 何亮,詹程阳,吕松涛,等. 钢渣沥青混合料应用现状[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(2): 15-33.
HE L, ZHAN C Y, LÜ S T, *et al.* Application status of steel slag as-phalt mixture [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2020, 20(2): 15-33. (In Chinese)
- [12] LOU B W, LIU Z Z, SHA A M, *et al.* Microwave absorption ability of steel slag and road performance of asphalt mixtures incorporating steel slag [J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2020, 13(3):663.
- [13] 冯群英. 钢渣在公路路基路面工程中的应用研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2013.
FENG Q Y. Study on application of steel slag in highway roadbed engineering [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013. (In Chinese)
- [14] LIU J Z, YU B, WANG Q. Application of steel slag in cement treated aggregate base course [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 269:121733.
- [15] WANG C H, WEN P H, WANG M H, *et al.* Preparation and characterization of road alkali-activated blast furnace slag paste [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 181:175-184.
- [16] CHO Y H, YEO S H. Application of recycled waste aggregate to lean concrete subbase in highway pavement [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2004, 31(6):1101-1108.
- [17] 高昌胜,魏茂,蒋文广,等. 基于含油污泥热解残渣的路基材料制备与性能评价[J]. 硅酸盐通报,2019,38(6):1895-1900.
GAO C S, WEI M, JIANG W G, *et al.* Preparation and performance evaluation of roadbed materials based on pyrolysis residue of oily sludge [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(6):1895-1900. (In Chinese)
- [18] 高昌胜. 含油污泥热解及其残渣制备路基材料的试验研究 [D]. 武汉:武汉理工大学,2019.
GAO C S. Experimental study on pyrolysis of oily sludge and its residue preparation for roadbed materials [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019. (In Chinese)
- [19] JINDAROM C, MEEYOO V, KITTIYANAN B, *et al.* Surface characterization and dye adsorptive capacities of char obtained from pyrolysis/gasification of sewage sludge [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2007, 133(1/2/3):239-246.
- [20] 沈伯雄,张增辉,李力,等. 热解终温对污泥热解残渣特性的影响[J]. 环境污染与防治,2011,33(2):7-11.
SHEN B X, ZHANG Z H, LI L, *et al.* Effect of the final pyrolysis temperature on the characteristics of the pyrolysis residue of sewage sludge [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2011, 33(2): 7-11. (In Chinese)
- [21] 李晓芳. 营双公路风积沙路用性能试验研究[D]. 西安:长安大学,2012.
LI X F. Study on aeolian sand pavement performance of yingshuang highway subgrade [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (In Chinese)
- [22] 李万鹏. 风积沙的工程特性与应用研究[D]. 西安:长安大学,2004.
LI W P. Engineering characteristics and application of aeolian sand [D]. Xi'an: Chang'an University, 2004. (In Chinese)
- [23] 赵莉. 不同荷载频率与细粒含量下路基粗粒填料动力特性研究[D]. 杭州:浙江大学,2017.

- ZHAO L. Experimental study on dynamic behavior of unbound granular materials with different fines contents under different-frequency cyclic loadings [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (In Chinese)
- [24] 赵明华,刘小平,彭文祥. 水膜理论在非饱和土中吸力的应用研究[J]. 岩土力学,2007,28(7):1323-1327.
ZHAO M H, LIU X P, PENG W X. Application of aqueous film theory to study of unsaturated soil's suction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1323-1327. (In Chinese)
- [25] 李生林. 苏联对土中结合水研究的某些进展[J]. 水文地质工程地质, 1982, 9(5): 52-55.
LI S L. Some progress in the study of bound water in soil in the Soviet Union [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1982, 9(5): 52-55. (In Chinese)
- [26] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WIDGER R A. The shear strength of unsaturated soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(3): 313-321.
- [27] 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):1931-1936.
LIN H Z, LI G X, YU Y Z, *et al.* Influence of matric suction on shear strength behavior of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1931-1936. (In Chinese)
- [28] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社,2004: 61-65.
LI G X. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 61-65. (In Chinese)
- [29] 申春妮,方祥位,王和文,等. 吸力、含水率和干密度对重塑非饱和土抗剪强度影响研究[J]. 岩土力学,2009,30(5):1347-1351.
SHEN C N, FANG X W, WANG H W, *et al.* Research on effects of suction, water content and dry density on shear strength of re-molded unsaturated soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1347-1351. (In Chinese)
- [30] 孟庆营. 无机结合料稳定风积沙路用性能研究[D]. 西安:长安大学,2003.
MENG Q Y. Research on road performance of stabilizing aeolian sand with inorganic binder [D]. Xi'an: Chang'an University, 2003. (In Chinese)
- [31] 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 H M, ZENG X D, SHI G P, *et al.* Experiment research on unconfined compressive strength of cement improved aeolian sand [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2017, 36(4): 67-72. (In Chinese)
- [32] 阮波,郑世龙,丁茜,等. 低温养护条件下水泥改良风积沙无侧限抗压强度试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(10): 2540-2548.
RUAN B, ZHENG S L, DING H, *et al.* Experimental study on unconfined compressive strength of cement-stabilized aeolian sand cured at low temperature [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(10): 2540-2548. (In Chinese)
- [33] 李德超. 水泥加固风积沙路用性能研究[J]. 公路交通技术, 2005, 21(1): 24-27.
LI D C. Study on road performance of cement stabilized aeolian sand [J]. Technology of Highway and Transport, 2005, 21(1): 24-27. (In Chinese)
- [34] 汪优,任加琳,李赛,等. 土-结构接触面剪切全过程本构关系研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2021,48(3):144-152.
WANG Y, REN J L, LI S, *et al.* Study on shear constitutive relation of soil-structure interface in whole process [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(3): 144-152. (In Chinese)