

沿海地区风积沙拌制混凝土性能研究

陈琦¹, 郑平²

(1. 福建信息职业技术学院 建筑工程学院, 平潭 350400; 2. 平潭综合实验区海峡建设发展有限公司, 平潭 350400)

摘要: 风积沙常见于荒凉的沙漠地区, 但在风力常年强盛的沿海地区也有分布。为缓解工程用砂紧缺, 充分发挥风积沙隐藏的经济价值, 以福建平潭岛上的风积沙为例, 将其按不同质量分数(0%、10%、20%、30%、40%和 50%)与普通河砂混合, 作为细骨料掺入拌制混凝土, 研究水灰比和风积沙掺量对混凝土和易性及力学强度的影响。结果表明, 适当掺入风积沙, 可改善骨料级配, 提高混凝土密实度, 改善混凝土和易性, 提升混凝土抗压强度。当风积沙替代率为 20%~30%时, 能获得性能良好的混凝土。

关键词: 混凝土; 风积沙; 和易性; 抗压强度

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2024)02-0036-07

Study on the performance of concrete mixed with eolian sand in coastal areas

CHEN Qi¹, ZHENG Ping²

(1. School of Civil Engineering, Fujian Polytechnic of Information Technology, Pingtan 350400, China;

2. Pingtan Comprehensive Experimental Zone Strait Construction Development Company Limited, Pingtan 350400, China)

Abstract: Eolian sand is usually seen in deserts and also found in coastal areas with continuous strong winds. To mitigate the current shortage of engineering sand and make full use of the hidden economic value of eolian sand, this study takes the eolian sand of Pingtan Island of Fujian Province as the research subject and produces concrete by using the mixture of eolian sand and ordinary river sand under different mixture ratios (0%, 10%, 20%, 30%, 40%, and 50%) as the fine aggregate. The effects of different water-cement ratio and different ratio of aeolian sand on the mechanical strength and workability of the concrete are studied. Based on the test, it is found that the appropriate adding of aeolian sand can improve the aggregate grading of the concrete and increase its density, workability and compressive strength. It is suggested that 20%~30% eolian sand should be used to replace the river sand to obtain a better performance.

Key words: concrete; eolian sand; workability; compressive strength

为缓解天然沙过度开采造成的生态环境破坏, 机制砂迅速成为建设用砂的主要来源, 但机制砂颗粒多呈片状, 且棱角多, 会导致混凝土的流变性降低^[1], 机制砂中过多的石粉则会增大混凝土用水量, 应用不当

收稿日期: 2023-09-20

基金项目: 福建省中青年教育科研项目(JAT210736)

作者简介: 陈琦(1981-), 女, 福建上杭人。硕士, 副教授, 主要从事建筑材料方面的研究。E-mail: 23147545@qq.com。

极易导致混凝土出现裂缝^[2]。

风积沙是经过风吹积淀而成的沙层,主要分布在我国沙漠地区,但在风力常年强盛的沿海地区也有分布,其颗粒圆滑细小,级配不满足《建设用砂》(GB/T 14684—2022)^[3]的要求,主要用于生产铸造砂和地基路基填筑^[4]。由于我国民用建筑普遍采用混凝土结构,若将风积沙替代机制砂,与天然沙混合应用于制备混凝土,同样可以缓解天然沙过度开采的问题,还能够节约建造成本,充分发挥风积沙隐藏的经济价值。

现有风积沙的研究多针对沙漠地区的沙源。何静等^[5]将库布齐风积沙等质量替代河砂制备水泥砂浆,研究发现水泥砂浆抗压强度随风积沙掺量增加先提高后降低,掺量为 15% 时水泥砂浆的抗压强度最高。李根峰等^[6]采用非接触式混凝土收缩变形测定仪连续 3 d 测定沙漠风积沙混凝土的收缩变形,结果表明随着风积沙掺量增加,混凝土收缩变形增大。吴俊臣等^[7]进行沙漠风积沙混凝土抗冻性研究,发现随着风积沙掺量增加,混凝土的抗冻性提高。银英姿等^[8]借助扫描电镜和核磁共振技术观察沙漠风积沙混凝土微观形貌和孔结构特征,建立了风积沙混凝土抗压强度与孔结构参数间定量关系模型。武新成等^[9]采用正交试验方法,利用塔克拉玛干沙漠沙研究配制超高性能混凝土。维利思等^[10]利用乌兰布和、腾格里和库布齐 3 个沙漠的风积沙分别代替 40% 的河砂掺入到混凝土中,采用无侧限抗压实验研究发现细度模数与风积沙混凝土强度关联度最大,其中乌兰布和的风积沙细度模数最小,混凝土强度最低;库布齐风积沙细度模数最大,混凝土强度接近普通混凝土强度。由于不同地区风积沙化学成分和粗细程度存在差异,获得的风积沙拌制混凝土性能也会不同,目前国内还没有针对风积沙混凝土的相关标准。

沿海地区气候和内陆不同,其风积沙性质及混合制备的混凝土性能有待研究。本文采用 6 组不同质量分数的平潭岛地表风积沙等量掺入河砂中拌制混凝土,并改变水灰比,研究不同风积沙替代率与不同水灰比对混凝土和易性及抗压强度的影响。

1 风积沙基本特性

平潭岛为我国第五大岛,岛上天然沙资源丰富,分为海水沙和淡水沙,淡水沙集中在岛内,特别是地表,积淀有深厚风积沙层。岛内沙资源以芦洋埔最为集中,该处砂矿分布面积达到全岛砂矿面积的 52.7%。

平潭岛地表风积沙层深厚,易于开采利用,砂质优良,岛上风积沙与内陆沙漠风积沙化学成分、杂质及细度模数分析如表 1—4 所示。与内陆沙漠风积沙相比,海岛风积沙 Si 含量更高,沙粒质地更坚实,碱性物质相对较少,同时细度模数较沙漠风积沙大,内蒙古 3 处风积沙属于特细砂,平潭岛 3 处风积沙介于细砂与特细砂之间,岛上风积沙颗粒平均粒径相较沙漠风积沙粗。在经历长期风吹筛选雨水淡化作用下,海岛风积沙颗粒圆滑、干净,其含泥量及 Cl^- 含量小,满足规范《建设用砂》(GB/T 14684—2022)^[3] II 类砂要求,但由于级配不良,不建议完全采用海岛风积沙作为混凝土细骨料。

表 1 平潭岛内 3 处风积沙的化学成分

沙区样品	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	%
芦洋埔	98.13	0.91	0.25	0.12	0.13	0.11	
流水	97.45	1.20	0.28	0.06	0.18	0.20	
洋中澳	97.21	1.41	0.32	0.13	0.16	0.18	

表 2 内蒙古 3 处风积沙的化学成分^[10]

沙区样品	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Ti	Na_2O	K_2O	%
乌兰布和	69	10	3	5	2	0.2	2	3	
腾格里	74	10	3	1	2	0.3	3	3	
库布齐	74	10	3	3	1	0.3	2	2	

表3 平潭岛内3处风积沙杂质及细度模数分析

砂样	含泥量/%	Cl ⁻ 含量/%	贝壳云母杂质/%	细度模数
芦洋埔	2.3	0.002	≤2.0	1.63
流水	2.6	0.001	≤2.0	1.56
洋中澳	1.8	0.002	≤2.0	1.61

表4 内蒙古3处风积沙杂质及细度模数分析^[10]

砂样	含泥量/%	Cl ⁻ 含量/%	云母杂质/%	细度模数
乌兰布和	2.8	—	≤2.0	0.59
腾格里	0.3	—	≤2.0	0.63
库布齐	0.3	—	≤2.0	0.71

2 试验材料与方案

2.1 试验材料

细骨料采用芦洋埔砂样风积沙,经筛分颗粒粒径小于0.3 mm,含量占97.2%,细度模数分析如表5所示,细度模数为1.63,属于细砂,偏向特细砂。河砂采用天然粗砂,细度模数分析如表6所示,细度模数为3.24。粗骨料采用5~31.5 mm花岗岩碎石。水泥采用海螺牌P·O 42.5普通硅酸盐水泥。考虑到风积沙SiO₂含量高,同时海岛城市湿度大,为避免碱骨料反应带来不利影响,通过岩相法和快速砂浆棒法测得砂样中变质石英含量达到16%,砂浆棒试件14 d膨胀率为0.088%,小于《预防混凝土碱骨料反应技术规范》(GB/T 50733—2011)^[11]0.1%的规定。可见该风积沙的石英结晶度高,活性较低,碱硅酸反应活性(ASR)低,不易发生碱骨料反应。

表5 平潭岛芦洋埔风积沙细度模数分析

筛孔尺寸/mm	筛余质量/g	分计筛余/%	累计筛余/%
4.75	0	0	0
2.36	1	0.2	0.2
1.18	1	0.2	0.4
0.60	12	2.4	2.8
0.30	302	60.4	63.2
0.15	164	32.8	96.0
筛底	18	3.6	99.6
细度模数		1.63	

表6 天然河砂细度模数分析

筛孔尺寸/mm	筛余质量/g	分计筛余/%	累计筛余/%
4.75	5	1.0	1.0
2.36	100	20.0	21.0
1.18	148	29.6	50.6
0.60	102	20.4	71.0
0.30	79	15.8	86.8
0.15	50	10.0	96.8
筛底	15	3.0	99.8
细度模数		3.24	

2.2 试验方案

依照《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)^[12],进行C30混凝土的配合比设计。3种水灰比分别为0.48、0.50、0.52,6组风积沙的质量替代率分别为0%、10%、20%、30%、40%、50%,其中0%为基准组,即不采用风积沙的情况,所有试件的配合比见表7。观测不同水灰比与风积沙替代率下的混凝土坍落度以研究其和易性,同时制作尺寸为150 mm的立方体标准养护试块,用万能压力试验机测定其在养护3、7、28 d下的抗压强度,分析混凝土强度与水灰比、风积沙替代率间的关系。

图1为不同风积沙替代率下的混合砂级配曲线。可以看出,随着替代率增加,级配曲线不断向上移动,其中0.60和1.18 mm筛孔尺寸下的筛余受风积沙替代率影响尤为明显,但无论级配曲线变化如何,风积沙替代率在10%~40%时的级配属于II区,依旧满足制备混凝土的要求;当风积沙替代率达到50%时,混合砂级配曲线已有部分凸向I区。

表 7 风积沙混凝土配合比设计

组别	水灰比	C30 混凝土各成分含量/(kg · m ⁻³)					砂率/%
		水	水泥	河砂	风积沙	石	
A ₀	0.48	195	406	646.0	0	1202	35
A ₁		195	406	581.4	64.6	1202	
A ₂		195	406	516.8	129.2	1202	
A ₃		195	406	452.2	193.8	1202	
A ₄		195	406	387.6	258.4	1202	
A ₅		195	406	323.0	323.0	1202	
B ₀	0.50	203	406	646.0	0	1202	35
B ₁		203	406	581.4	64.6	1202	
B ₂		203	406	516.8	129.2	1202	
B ₃		203	406	452.2	193.8	1202	
B ₄		203	406	387.6	258.4	1202	
B ₅		203	406	323.0	323.0	1202	
C ₀	0.52	211	406	646.0	0	1202	35
C ₁		211	406	581.4	64.6	1202	
C ₂		211	406	516.8	129.2	1202	
C ₃		211	406	452.2	193.8	1202	
C ₄		211	406	387.6	258.4	1202	
C ₅		211	406	323.0	323.0	1202	

3 试验结果与分析

3.1 风积沙混凝土坍落度

不同水灰比下 6 组风积沙替代率对混凝土坍落度的影响如图 2 所示。

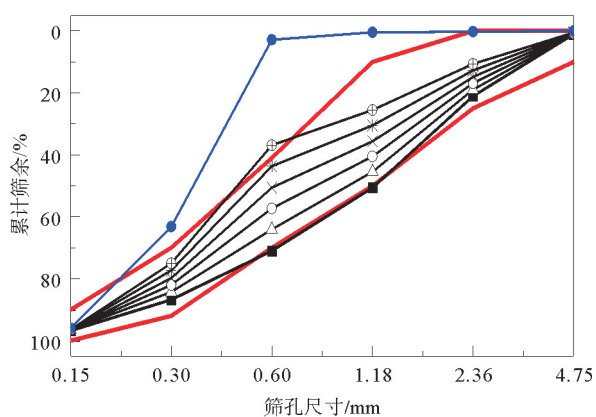


图 1 不同风积沙替代率下的细骨料级配曲线

— 级配Ⅲ区上下限; —■— 0%;
 —△— 10%; —○— 20%; —×— 30%;
 —*— 40%; —⊕— 50%; —●— 风积沙

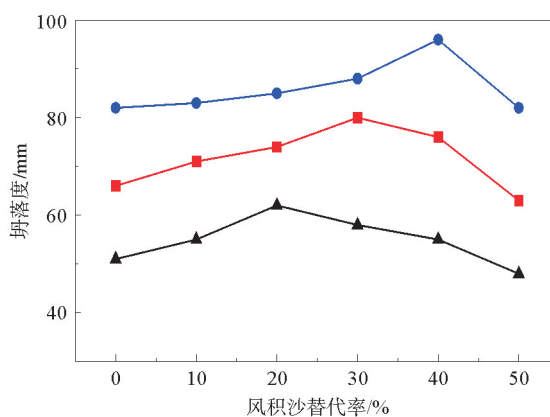


图 2 不同水灰比下风积沙替代率对混凝土坍落度的影响

—▲— 水灰比 0.48; —■— 水灰比 0.50; —●— 水灰比 0.52

各组别混凝土拌合物坍落度基本处于 50~100 mm, 满足规范《混凝土质量控制标准》(GB 50164—2011)^[13]坍落度等级 S2, 适用于绝大多数建筑工程。由图 2 可见, 随着风积沙替代率增加, 坍落度呈现出

先增大后减小的规律。由于风积沙颗粒圆滑、粒径细小,内摩擦角小于河砂^[14],在拌合物中起到润滑作用,其“滚珠”效应^[15]减小了混凝土中水泥浆与骨料间的摩擦力,因此开始时坍落度随着风积沙替代率增加而增大。然而随着风积沙掺量的进一步增大,混合砂级配曲线渐渐凸向 I 区,整体粒径变细,细骨料比表面积进一步增大,造成包裹骨料的水泥浆需求量增多,在胶凝材料用量不变的情况下,摩擦力增大,流动性也变差,从而坍落度减小,风积沙替代率为 50% 时,混凝土坍落度甚至低于基准组坍落度。

同时,随着水灰比增加,坍落度峰值对应的风积沙替代率也随之增大。水灰比 0.48 时,坍落度峰值对应的风积沙替代率为 20%;水灰比 0.50 时,坍落度峰值对应的风积沙替代率为 30%;水灰比 0.52 时,坍落度峰值对应的风积沙替代率为 40%。出现这一情况的原因是水灰比增大,水泥浆量增多,随着风积沙替代率增大,多出的水泥浆可以包裹更多骨料,混凝土拌和更加均匀,充分发挥风积沙“滚珠”和水泥浆润滑作用,坍落度进一步增大,峰值推迟出现。另从结果所示,水灰比 0.48 时,坍落度最大值为 62 mm;水灰比 0.50 时,坍落度最大值为 80 mm;水灰比 0.52 时,坍落度最大值为 96 mm,水灰比增大坍落度增大明显。以风积沙替代率为 10% 为参照,水灰比增加 0.02,坍落度增加约 15 mm;而水灰比不变,风积沙替代率增加 10%,坍落度最多增加 8 mm,风积沙替代率增加 20%,坍落度最多增加 11 mm。水灰比按 0.02 梯度增加,坍落度最小值均比增加前坍落度最大值还大,可见水灰比对混凝土坍落度的影响比风积沙替代率的影响大,水泥浆的润滑作用比细小圆滑的风积沙更明显。

3.2 风积沙混凝土抗压强度

不同水灰比下风积沙替代率对混凝土抗压强度的影响如图 3 所示。

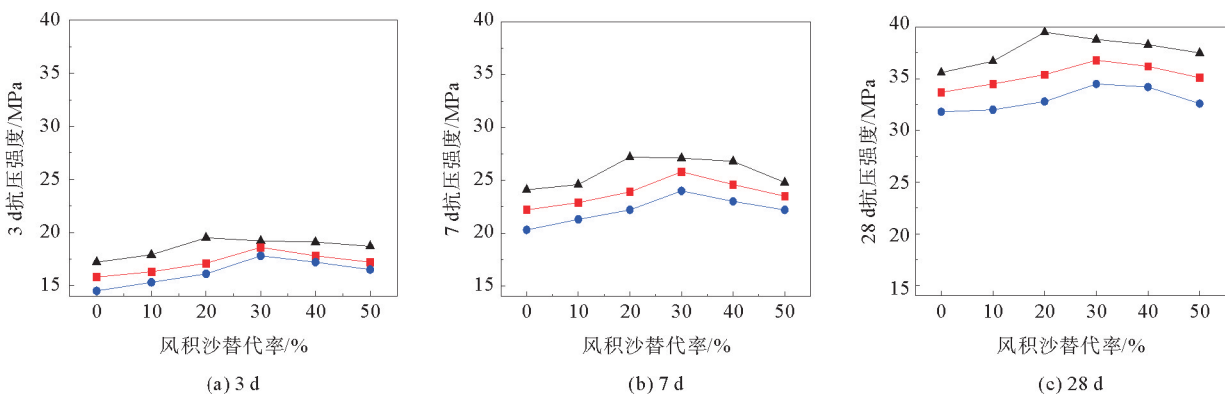


图 3 混凝土抗压强度与水灰比及风积沙替代率关系

—▲—水灰比 0.48; —■—水灰比 0.50; —●—水灰比 0.52

由图 3 可以看出,随着龄期增长,试块强度不断提升,在 0%~50% 的风积沙替代率内,28 d 试块的抗压强度均超过 30 MPa;同一龄期相同风积沙替代率下,水灰比越大,混凝土抗压强度越低;抗压强度随着风积沙替代率的增大先增大后减小。风积沙混凝土 28 d 抗压强度与水灰比及替代率的综合图谱如图 4 所示,可以显著看出三者之间的关系,水灰比不同时混凝土抗压强度的峰值位置也有差异。

在风积沙替代率较低时,风积沙有效地填充粗骨料孔隙,对骨料级配有改善作用,同时风积沙中少量活性 SiO_2 与水泥水化

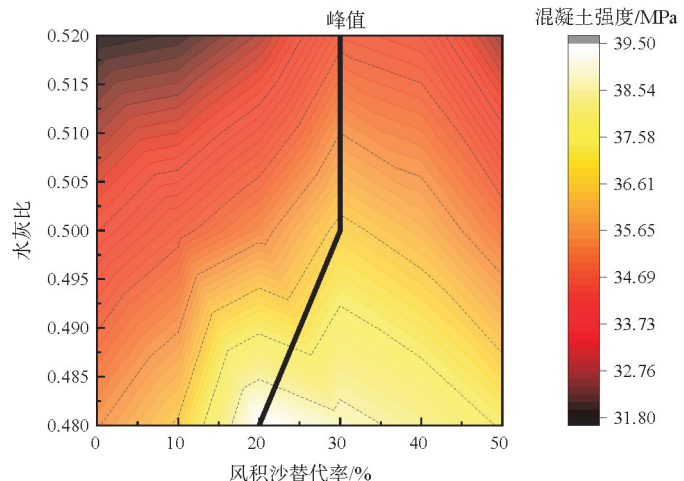


图 4 混凝土强度随水灰比和风积沙替代率变化的综合图谱

Ca(OH)₂ 发生二次水化反应生成水化硅酸钙凝胶 C-S-H, C-S-H 改变骨料界面结构,使骨料与浆体结合更加紧密,混凝土抗压强度得到提升。

随着风积沙替代率进一步增大,细骨料级配状况变差,级配曲线凸向 I 区,对粗骨料空隙的填充效果变差,骨料密实度降低,同时骨料比表面积增加造成水泥浆量不足,混凝土强度降低。风积沙替代率达到 50% 时,试件的抗压强度虽有降低,但仍然大于风积沙替代率为 0% 的试件。以 28 d 养护龄期为例, A₅ 组比 A₀ 组大 1.9 MPa, B₅ 组比 B₀ 组大 1.4 MPa, C₅ 组比 C₀ 组大 0.8 MPa。

另外,与坍落度相似,混凝土抗压强度峰值出现的位置也受水灰比影响。当水灰比为 0.48 时, 3、7、28 d 抗压强度均在风积沙替代率为 20% 时最高,水灰比 0.50 和 0.52 时, 3、7、28 d 抗压强度在风积沙替代率为 30% 时最高,说明水灰比、风积沙替代率与混凝土强度之间存在一定的耦合关系。当水灰比大时,水泥浆量多,早期水泥浆溢出现象明显,随着风积沙替代率由 20% 增至 30%, 颗粒比表面积进一步增大,溢出水泥浆被吸收,拌合物更加均匀,混凝土强度可以进一步提高。水灰比 0.52 时,水泥浆稀薄,黏结力变差,水泥颗粒细小、间距大,水泥水化后产生的胶凝材料无法填充颗粒空隙,并且多余水分蒸发过程中,混凝土内部出现细微孔隙,强度无法进一步提高。故水灰比为 0.50 与 0.52 时,混凝土抗压强度的峰值均在风积沙替代率为 30% 时出现,虽然水灰比 0.50、0.52 时,抗压强度峰值推迟出现,但由于水灰比大,水泥浆黏结力差,即使是抗压强度峰值,仍然低于水灰比为 0.48 时的最大抗压强度。

4 结论

采用平潭岛地表风积沙,通过改变风积沙与河砂的使用比例和水灰比,比较 C30 混凝土坍落度与不同龄期的抗压强度变化,得到以下结论:

- 1) 风积沙替代率在 0%~50% 时,混凝土坍落度和抗压强度均经历了先增后减的过程,但风积沙替代率对混凝土坍落度影响不及水灰比影响大。
- 2) 同一水灰比、不同龄期,混凝土抗压强度随着风积沙替代率变化规律相同。替代率为 50% 时,混凝土抗压强度虽有所降低,但仍高于不含风积沙的混凝土。
- 3) 适量的风积沙和河砂混合调整骨料级配,可改善混凝土和易性,提高抗压强度,能够用于配置满足工程需要的混凝土。建议采用 20%~30% 替代率的风积沙制备混凝土。

参考文献(References):

- [1] 柴松华. 机制砂特性对混凝土性能的影响研究[J]. 江西建材, 2023(2): 33-34.
CHAI Songhua. Study on the effect of machine-made sand properties on concrete properties[J]. Jiangxi Building Materials, 2023(2): 33-34.
- [2] 刘桂宾,于琦,刘宗祥,等. 利用机制砂制备轻骨料混凝土试验研究[J]. 青岛理工大学学报, 2019, 40(1): 138-144.
LIU Guibin, YU Qi, LIU Zongxiang, et al. Experimental study on the preparation of lightweight aggregate concrete with mechanism sand[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2019, 40(1): 138-144.
- [3] GB/T 14684—2022, 建设用砂[S].
GB/T 14684—2022, Sand for construction[S].
- [4] 刘城. 风积沙及加筋风积沙填筑重载铁路路基的工程特性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
LIU Cheng. Studies on the engineering characteristics of aeolian sand and reinforced aeolian sand filling the subgrade of heavy haul railway[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017.
- [5] 何静,申向东,董伟,等. 风积沙掺量对水泥砂浆力学性能和微观结构的影响[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(9): 2609-2613.
HE Jing, SHEN Xiangdong, DONG Wei, et al. Influence of aeolian sand dosage on mechanical property and microstructure of cement mortar[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(9): 2609-2613.
- [6] 李根峰,申向东,吴俊臣,等. 风积沙混凝土收缩变形的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(4): 1213-1218.
LI Genfeng, SHEN Xiangdong, WU Junchen, et al. Experimental study on shrinkage deformation of aeolian sand concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(4): 1213-1218.
- [7] 吴俊臣,申向东. 风积沙混凝土的抗冻性与冻融损伤机理分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 184-190.
WU Junchen, SHEN Xiangdong. Analysis on frost resistance and damage mechanism of aeolian sand concrete[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(10): 184-190.

- [8] 银英姿, 雷雅楠, 苏英. 风积沙混凝土微观结构及孔隙特征研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(16): 135-139.
YIN Yingzi, LEI Yanan, SU Ying. Study on microstructure and pore characteristics of aeolian sand concrete[J]. Building Structure, 2021, 51(16): 135-139.
- [9] 武新成, 黄勇, 斯毅, 等. 采用风积沙配制超高性能混凝土试验研究[J]. 青海交通科技, 2022, 34(1): 138-143.
WU Xincheng, HUANG Yong, SI Yi, et al. Experiment on preparation of ultra-high performance concrete with aeolian sand[J]. Qinghai Transportation Science and Technology, 2022, 34(1): 138-143.
- [10] 维利思, 申向东, 刘倩, 等. 不同风积沙混凝土强度的影响因素研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(9): 2933-2940.
WEI Lisi, SHEN Xiangdong, LIU Qian, et al. Influencing factors of different aeolian sand concrete strength[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(9): 2933-2940.
- [11] GB/T 50733—2011, 预防混凝土碱骨料反应技术规范[S].
GB/T 50733—2011, Technical code for prevention of alkali-aggregate reaction in concrete[S].
- [12] JGJ 55—2011, 普通混凝土配合比设计规程[S].
JGJ 55—2011, Specification for mix proportion design of ordinary concrete[S].
- [13] GB 50164—2011, 混凝土质量控制标准[S].
GB 50164—2011, Standard for quality control of concrete[S].
- [14] 郑木莲, 王倩倩, 陈旺, 等. 不同地区风积沙材料特性与剪切强度[J]. 中国科技论文, 2021, 16(4): 415-421.
ZHENG Mulian, WANG Qianqian, CHEN Wang, et al. Materials characteristics and shear strength of aeolian sand in different areas[J]. China Sciencepaper, 2021, 16(4): 415-421.
- [15] 李玉根, 马小莉, 胡大伟, 等. 风积砂掺量对砂浆混凝土性能影响及机理研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(6): 2128-2133.
LI Yugen, MA Xiaoli, HU Dawei, et al. Influence of aeolian sand content on mechanism of mortar and concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(6): 2128-2133.

(责任编辑 赵金环; 英文校审 程文华)

(上接第 27 页)

- [8] 路钊驰, 杨忠年, 刘继明, 等. 冻结橡胶加筋膨胀土(ESR)的动力特性研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(5): 1312-1319.
LU Zhaochi, YANG Zhongnian, LIU Jiming, et al. Low-temperature dynamic triaxial testing of frozen expansive soil-rubber (ESR) mixtures[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(5): 1312-1319.
- [9] LI B, HUANG M, ZENG X. Dynamic behavior and liquefaction analysis of recycled-rubber sand mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(11): 04016122.
- [10] NAKHAEI A, MARANDI S M, KERMANI S S, et al. Dynamic properties of granular soils mixed with granulated rubber[J]. Soil Dynamics Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 43: 124-132.
- [11] SENETAKIS K, ANASTASIADIS A, PITILAKIS K. Dynamic properties of dry sand/rubber (SRM) and gravel/rubber (GRM) mixtures in a wide range of shearing strain amplitudes[J]. Soil Dynamics Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 33(1): 38-53.
- [12] CHEN K S, WANG Q Q, LUO D P, et al. Study on dynamic characteristics of rubber-red clay mixtures[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020(12): 1-11.
- [13] 李晓雪, 庄海洋, 张沁源, 等. 橡胶颗粒土动剪模量与阻尼比的共振柱试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(2): 265-271.
LI Xiaoxue, ZHUANG Haiyang, ZHANG Qinyuan, et al. Experimental study on dynamic shear modulus and damping ratio of rubber-sand mixed soil[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(2): 265-271.
- [14] EHSANI M, SHARIATMADARI N, MIRHOSSEINI S M. Shear modulus and damping ratio of sand-granulated rubber mixtures[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(8): 3159-3167.
- [15] ZHANG T, CAI G J, DUAN W H. Strength and microstructure characteristics of the recycled rubber tire-sand mixtures as light-weight backfill[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(4): 3872-3883.
- [16] 周跃峰, 杨哲, 饶锡保, 等. 不同含水率下黏土弹性参数的弯曲-伸展元试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(S1): 387-393.
ZHOU Yuefeng, YANG Zhe, RAO Xibao, et al. Bending-extension element experiment to obtain elastic parameters of clay under different moisture contents[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(S1): 387-393.
- [17] SARIDE S, DUTTA T T. Effect of fly-ash stabilization on stiffness modulus degradation of expansive clays[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(12): 04016166.

(责任编辑 张晓靖; 英文校审 程文华)