

文章编号:1007-9629(2021)01-0191-08

库布齐风积沙对各分级河砂的填充效应

王尧鸿^{1,2}, 楚奇¹, 韩青^{1,2}

(1. 内蒙古工业大学 土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;

2. 内蒙古工业大学 内蒙古自治区土木工程结构与力学重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 为探究风积沙部分取代河砂带来的填充效应对细骨料空隙率的影响规律,采用库布齐沙漠边缘的风积沙,以不同取代率取代粗、中、细3级共9种细度模数的河砂,测试其对细骨料空隙率的影响;同时采用PFC3D离散元软件进行相应细骨料的堆积模拟,确定了库布齐风积沙对不同分级、不同细度模数河砂的最优取代率。另外,采用与库布齐风积沙级配一致的河砂进行了相似的试验与模拟探究,通过对比前期的试验结果,确定了库布齐风积沙对不同细度模数河砂、不同取代率情况下的细骨料空隙率粒形影响因子。

关键词: 风积沙取代率;填充效应;空隙率;粒形

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.01.025

Filling Effect of Kubuqi Aeolian Sand on Different Classifications of River Sand

WANG Yaohong^{1,2}, CHU Qi¹, HAN Qing^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. Key Laboratory of Civil Engineering Structure and Mechanics, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: In order to explore the influence of replacing river sand with aeolian sand on filling effect and voidage of fine aggregate, the optimal replacement rate of aeolian sand for river sand with different fineness modulus in different grade distribution areas was determined. This work was accomplished through the following two aspects. The first was comparative analysis of the data of voidage, which was obtained by the replacement of aeolian sand to 9 groups of river sand with different grade distribution areas under different replacement rates. The second was simulation of fine aggregate which was operated by PFC3D discrete element software. In addition, the river sand with the same gradation as Kubuqi aeolian sand was used to carry out similar test and simulation exploration. By comparing the previous test results, the influence factors of the grain shape of the aeolian sand in the Kubuqi desert on the voidage of fine aggregate under different fineness modulus river sand and different replacement rates were determined.

Key words: replacement rate of aeolian sand; filling effect; voidage; grain shape

在中国西北地区有较大面积的沙漠,其中库布齐沙漠位于内蒙古中西部,紧邻呼-包-鄂城市群。该城市群有着较大的经济活力与建设需求,若能“因地制宜、就地取材”,合理开发并有效利用风积沙,将其大量应用于实际工程中,一方面可以遏制荒漠化进

程,减少荒漠化损失,另一方面可以减少工程用砂的采集与运输成本,降低工程造价,减少采砂对环境的破坏,其经济效益和社会效益均十分显著。

许多研究显示,风积沙对普通河砂的部分取代可以在一定程度上提高混凝土的力学性能^[1-4],其中

收稿日期:2019-08-05; 修订日期:2019-10-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51868059)

第一作者:王尧鸿(1981—),男,内蒙古阿左旗人,内蒙古工业大学副教授,硕士生导师,博士. E-mail:wyh@imut.edu.cn

通讯作者:韩青(1965—),女,内蒙古呼和浩特人,内蒙古工业大学副教授,硕士生导师,博士. E-mail:19880000016@imut.edu.cn

的重要原因之一就是风积沙对普通河砂的部分取代会改善细骨料的级配^[5],研究得出的最佳风积沙取代率为 20%~40%。然而,由于所用河砂级配不同,以及分布在沙漠不同部分风积沙的差异性^[6-10],单纯地就混凝土性能试验结果给出风积沙最优取代率可能会产生较大误差。风积沙对普通河砂的取代本质上来讲是细骨料级配的变化,若要系统地研究风积沙混凝土,进一步推进风积沙在建筑行业的应用,有必要首先从风积沙对普通河砂取代后的骨料级配情况着手,深入分析并明确风积沙取代率与细骨料级配的影响关系。

实践中常按细度模数的大小,将普通河砂分为 3 级取用(见 JGJ 52—2006《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》)。基于此,本次研究采用库布齐沙漠边缘的风积沙,以不同风积沙取代率¹⁾取代粗、中、细 3 级共 9 种细度模数的普通河砂,测试其对细骨料空隙率的影响;同时利用 PFC3D 离散元软件,基于相应的级配情况对细骨料进行堆积模拟^[11],对比分析模拟结果与试验结果的差异,最终得出风积

沙对各细度模数河砂的最优取代率。

此外,由于风积沙经过长年风力的搬运,有着较好的磨圆度,其形状与有着同级配的细河砂颗粒区别较大^[12],因此,在某些情况下仅从传统骨料级配设计或优化的角度,即无差异地以质量分数考虑风积沙对普通河砂的取代,可能不利于确定真正优良的骨料级配。为了探究风积沙颗粒形状对细骨料空隙率的影响,本文又采用与库布齐风积沙有着同级配的河砂,以不同取代率取代 3 级河砂,测试了此种情况下的细骨料空隙率。通过对比级配一致的风积沙取代、河砂取代 2 种情况下的细骨料空隙率差异,得到了库布齐风积沙以不同取代率取代 3 级河砂后的细骨料空隙率粒形影响因子。

1 试验

1.1 原材料

1.1.1 风积沙

试验所采用的风积沙为库布齐沙漠边缘的典型风积沙,其级配情况如表 1 所示。

表 1 风积沙颗粒级配
Table 1 Particle gradation of aeolian sand

Particle size/mm	<0.075	0.075—0.16	0.16—0.315	0.315—0.63	0.63—1.25	1.25—2.5
Passing ratio(by mass)/%	8.7	35.3	45.5	10.5	0	0

1.1.2 普通河砂

普通河砂为建材市场的天然河砂。为了减少河砂中的杂质,首先对其进行水洗处理;然后将其投入烘箱烘干至恒重;再利用标准筛和摇筛机对其进行筛分,并将筛分出的河砂按粒径范围分开保存。

试验中,首先通过 Python3.0 语言 IDLE 框架

调取 Random 函数,随机生成粗、中、细 3 级共 9 种细度模数(M)的河砂级配,如表 2 所示;之后利用电子天平和浅盘等工具,严格按照这 9 种细度模数进行称量和制配,每种细度模数制备 90 kg 作为试验用砂。为了尽量模拟实际环境中的河砂情况,在试验前均将其置于振动台进行振动和摇匀处理。

表 2 河砂级配情况
Table 2 Gradation of river sand

River sand classification	M	Bulk density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Passing ratio(by mass)/%						
			<0.16 mm	0.16—0.315 mm	0.315—0.63 mm	0.63—1.25 mm	1.25—2.5 mm	2.5—5 mm	>5 mm
Coarse sand	3.6	1 676	2.08	6.28	10.60	19.25	27.79	29.41	4.59
	3.4	1 703	1.74	17.21	8.36	11.89	25.83	29.73	5.24
	3.2	1 672	3.35	3.51	16.22	30.49	26.04	12.77	7.62
Medium sand	3.0	1 692	4.04	8.29	23.70	16.30	27.92	12.36	7.39
	2.7	1 728	4.85	22.30	20.50	19.21	11.83	19.20	2.11
	2.4	1 731	6.27	22.38	24.03	19.37	12.00	9.43	6.52
Fine sand	2.2	1 700	3.50	31.70	26.97	12.85	13.31	6.35	5.32
	1.9	1 676	8.06	27.61	34.39	9.15	7.76	3.10	9.93
	1.7	1 671	6.47	36.98	35.76	11.08	3.24	1.15	5.32

1) 本文涉及的取代率均为质量分数;空隙率均为体积分数。

1.2 试验方法

风积沙取代率 R 定为 $0\% \sim 40\%$; 以 5% 为间隔, 取代已配制的 9 种细度模数河砂, 共得到 162 组各 5 kg 的细骨料. 再次将其置于振动台进行振动和摇匀处理, 之后严格按照 GB/T 14684—2001《建筑用砂》给出的检测方法测量各组细骨料的表观密度 ρ_s 和堆积密度 ρ_B , 并据此计算细骨料空隙率 φ_{FE} .

1.3 模拟过程

采用 PFC3D 离散元分析软件, 基于对库布齐风积沙颗粒和河砂颗粒实际现状的观测和提取, 分别建立几种 Clump 刚性簇颗粒模型. 在保证一定的运算效率条件下尽可能地提升网格精度以模拟真实砂粒形态, 具体见图 1. 同时, 利用软件自带的 Fish 语言, 编制建立了级配可以任意修改的细骨料堆积模



图 1 颗粒模型
Fig. 1 Particle model

拟项目; 之后按照细骨料的不同组成情况, 对相应参数进行调整并运行程序, 记录每次堆积模拟的细骨料空隙率.

图 1 所示的风积沙颗粒和河砂颗粒在模拟相应的细骨料类别中所占比例是随机的, 几种堆积模拟过程见图 2.

为了确定风积沙最优取代率, 继续通过 Python 3.0 语言 IDLE 框架调取 Random 函数, 为 3 级河砂各细度模数分别生成 10 组相应的随机级配, 其中细度模数 $M=3.6$ 的粗砂级配见表 3. 每组级配在 $0\% \sim 40\%$ 风积沙取代率范围内以 2.5% 间隔递增, 对河砂进行取代, 之后对所有新生成的细骨料种类再次运用 PFC3D 软件进行模拟.

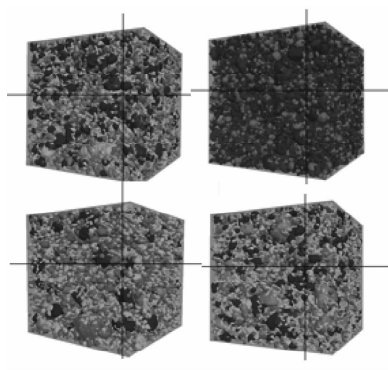


图 2 几种堆积模拟过程
Fig. 2 Several accumulation modeling processes

表 3 模拟用粗砂级配情况
Table 3 Gradation of coarse sand for simulation ($M=3.6$)

							$w/\%$
$<0.16\text{ mm}$	$0.16-0.315\text{ mm}$	$0.315-0.63\text{ mm}$	$0.63-1.25\text{ mm}$	$1.25-2.5\text{ mm}$	$2.5-5\text{ mm}$	$>5\text{ mm}$	
2.41	3.11	40.44	23.29	26.26	27.27	7.21	
3.39	4.16	10.98	24.37	22.41	33.48	1.21	
2.08	5.12	13.57	17.11	28.65	29.91	3.56	
2.98	5.16	8.07	20.67	30.27	26.72	6.13	
2.06	3.36	19.35	12.89	29.37	31.72	1.25	
4.38	7.52	4.92	18.33	33.09	29.06	2.70	
2.48	2.58	11.30	21.62	29.95	24.77	7.30	
3.05	4.53	9.93	18.16	35.90	25.38	3.05	
2.24	4.13	10.26	26.12	23.02	30.53	3.70	
2.99	2.56	17.27	17.66	25.10	32.80	1.63	

2 结果与讨论

2.1 试验及模拟

2.1.1 试验结果

图 3 为试验所得的各组细骨料空隙率 φ_{FE} . 由

图 3 可见: 在 $0\% \sim 40\%$ 风积沙取代率范围内, 随着取代率的增加, 河砂为粗砂 (细度模数为 $3.2 \sim 3.6$, 见表 2 分级) 的细骨料空隙率明显降低; 河砂为中砂 (细度模数为 $2.4 \sim 3.0$) 的细骨料空隙率主要呈现为先降后增趋势; 河砂为细砂 (细度模数

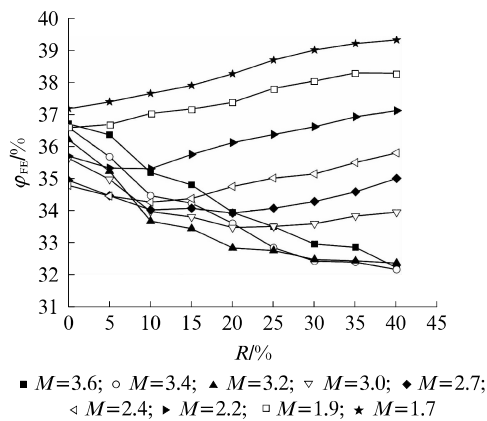


图3 细骨料空隙率试验结果

Fig. 3 Experimental results of fine aggregate voidage

表4 河砂细度模数不同时,风积沙取代率对细骨料空隙率影响的试验结果

Table 4 Experimental results of aeolian sand replacement rate on fine aggregate voidage with different fineness modulus of river sand

R/%	Change rate of voidage/%								
	M=3.6	M=3.4	M=3.2	M=3.0	M=2.7	M=2.4	M=2.2	M=1.9	M=1.7
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0.93	2.49	2.71	1.83	1.37	0.95	1.04	-0.27	-0.57
10	4.12	5.80	6.99	4.63	2.63	1.50	1.09	-1.20	-1.27
15	5.15	6.43	7.63	5.11	2.49	1.18	-0.14	-1.59	-1.94
20	7.50	8.15	9.28	6.04	2.92	0.09	-1.18	-2.16	-2.91
25	8.70	10.20	9.51	6.04	2.49	-0.66	-1.88	-3.34	-4.06
30	10.17	11.35	10.28	5.70	1.89	-1.04	-2.55	-3.97	-4.90
35	10.44	11.43	10.39	5.08	1.03	-2.04	-3.42	-4.65	-5.44
40	12.16	12.06	10.58	4.80	-0.17	-2.90	-3.95	-4.64	-5.73

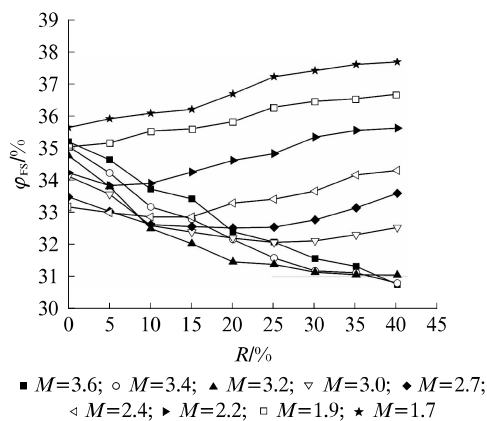


图4 细骨料空隙率模拟结果

Fig. 4 Simulated results of fine aggregate voidage

虑实际颗粒表面细微的棱角或沟壑所带来的影响,导致颗粒接触和堆积时倾向于更密实的状态.另外,由表4和表5可知,对于细骨料空隙率的变化率而言,试验结果与模拟结果具有一定相似性,例如,风积沙最优取代率在表4、5中的相对位置并未发生改

为1.7~2.2)的细骨料空隙率主要表现为增加的趋势.相对于风积沙取代率为0%的纯河砂细骨料空隙率,风积沙取代率不同的细骨料空隙率变化率见表4.

2.1.2 模拟结果

模拟得出的各组细骨料空隙率 φ_{FS} 见图4;相对于风积沙取代率为0%的纯河砂细骨料空隙率,风积沙取代率不同的细骨料空隙率变化率见表5.

2.1.3 模拟结果与试验结果的对比

对比图3和图4可知,2图中的空隙率曲线形态并无明显差异,只是模拟结果较试验结果偏小,其原因可能是所建立的颗粒模型与实际颗粒形状仍有偏差,颗粒模型只能表现出较大的棱角,不能充分考

变(见表中涂黑数据).

对所有细骨料空隙率变化率的试验结果和模拟结果进行了计算和统计,试验结果相对于模拟结果的变化率平均值见图5.由图5可见,无论从细度模数角度,还是从风积沙取代率角度,各组细骨料空隙率变化率的试验结果相对于模拟结果的变化率平均值均在一个范围内波动,这种波动主要集中在4.0%~4.5%之间.据此可得到对于细骨料空隙率堆积模拟结果的调整公式:

$$\varphi_F = k \cdot \varphi_{FS} \quad (1)$$

式中: φ_F 为细骨料实际空隙率; k 为空隙率修正系数,这里取值为1.043; φ_{FS} 为细骨料模拟空隙率.

2.2 风积沙最优取代率

基于模拟可行性的讨论,重复通过Python 3.0语言IDLE框架调取Random函数,对上述每种细度模数的河砂各生成10组级配,并就这些级配进行0%~40%范围且以2.5%为间隔的风积沙取代率下的模拟,根据式(1)对模拟结果进行调整,所得

表 5 河砂细度模数不同时,风积沙取代率对细骨料空隙率影响的模拟结果
Table 5 Simulation results of aeolian sand replacement rate on fine aggregate voidage with different fineness modulus of river sand

R/%	Change rate of voidage/%								
	M=3.6	M=3.4	M=3.2	M=3.0	M=2.7	M=2.4	M=2.2	M=1.9	M=1.7
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1.59	2.34	2.76	1.64	1.34	0.54	1.17	-0.34	-0.76
10	4.18	5.34	6.50	4.49	2.57	0.93	1.26	-1.40	-1.24
15	5.32	6.42	7.86	5.07	2.75	0.91	-0.23	-1.60	-1.85
20	7.65	8.08	9.47	6.63	2.87	-0.36	-1.11	-2.23	-2.92
25	8.84	10.13	9.70	6.01	2.81	-0.72	-1.72	-3.51	-4.13
30	10.29	10.99	10.39	5.86	2.12	-1.48	-3.21	-4.03	-4.94
35	10.97	11.45	10.62	5.31	1.02	-2.99	-3.83	-4.25	-5.47
40	12.28	12.08	10.65	4.66	-0.33	-3.41	-4.32	-4.65	-5.70

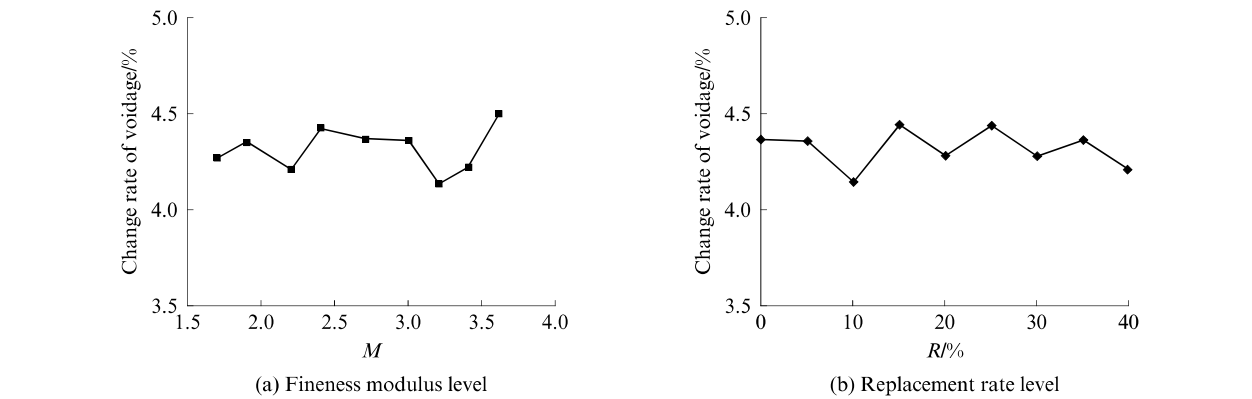


图 5 各组细骨料空隙率变化率试验结果相对于模拟结果的变化率平均值
Fig. 5 Change rate average values of each group of fine aggregate voidage change rate from experimental results to simulation results

到的各组细骨料实际空隙率平均值见图 6。

由图 6 可见,风积沙取代部分普通河砂后,会对细骨料的空隙率造成较大影响,且这种影响随着河砂分级的不同有较大的改变.在风积沙取代率为 0%~40% 范围内,以粗级河砂为取代基础的细骨料空隙率整体呈现下降趋势;以中级河砂为取代基础的细骨料空隙率呈现先降后升的上开口弧状特征;以细级河砂为取代基础的细骨料空隙率整体呈现上升趋势.在风积沙对细级河砂的取代中,填充效应非但不明显,还会较大概率地增加细骨料空隙率,降低骨料的密实程度.因此,风积沙在细级河砂范围内的应用价值不大,而对粗、中 2 级河砂的密实程度在一定范围内有着显著的优化作用。

为了探究风积沙最优取代率 R_{op} ,对以上每种细度模数河砂 10 次模拟得出的最优取代率分布进行统计,发现多次模拟结果均具有大范围内聚集、小范围内(均未超过 5%)分散且又有明显焦点的簇状分布特点,如图 7 所示,说明以细度模数来确定风积

沙最优取代率具有一定现实意义.之后从细骨料空隙率角度出发,绘制了不同细度模数河砂的风积沙最优取代率曲线,见图 8.同时,为了更好地服务于工程实践,又根据上述规律,将河砂级配区分成粗、中、细 3 段,对河砂细度模数和风积沙取代率进行函数拟合,见式(2);式(2)每段拟合函数的 R^2 均大于 0.94,说明可以用该拟合函数来进行不同细度模数河砂的风积沙最优取代率计算。

$$R=\begin{cases} 2.967M^2+1.547, & 3.1\leq M\leq 3.7 \\ 3.087^M-5.87, & 2.3\leq M\leq 3.0 \\ 3.18^M-7.32, & 1.6\leq M\leq 2.2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: M 是河砂细度模数; R 是对应的细骨料空隙率最小时的风积沙取代率。

由图 8 可以看出,随着河砂细度模数的改变,风积沙最优取代率的变化非常明显,在粗砂、中砂、细砂 3 级河砂范围内从 0%~40% 皆有分布,曲线呈现出略微的 S 形.其中,风积沙对粗级河砂的最优取代率均在 30% 以上,对中级河砂的最优取代率分布

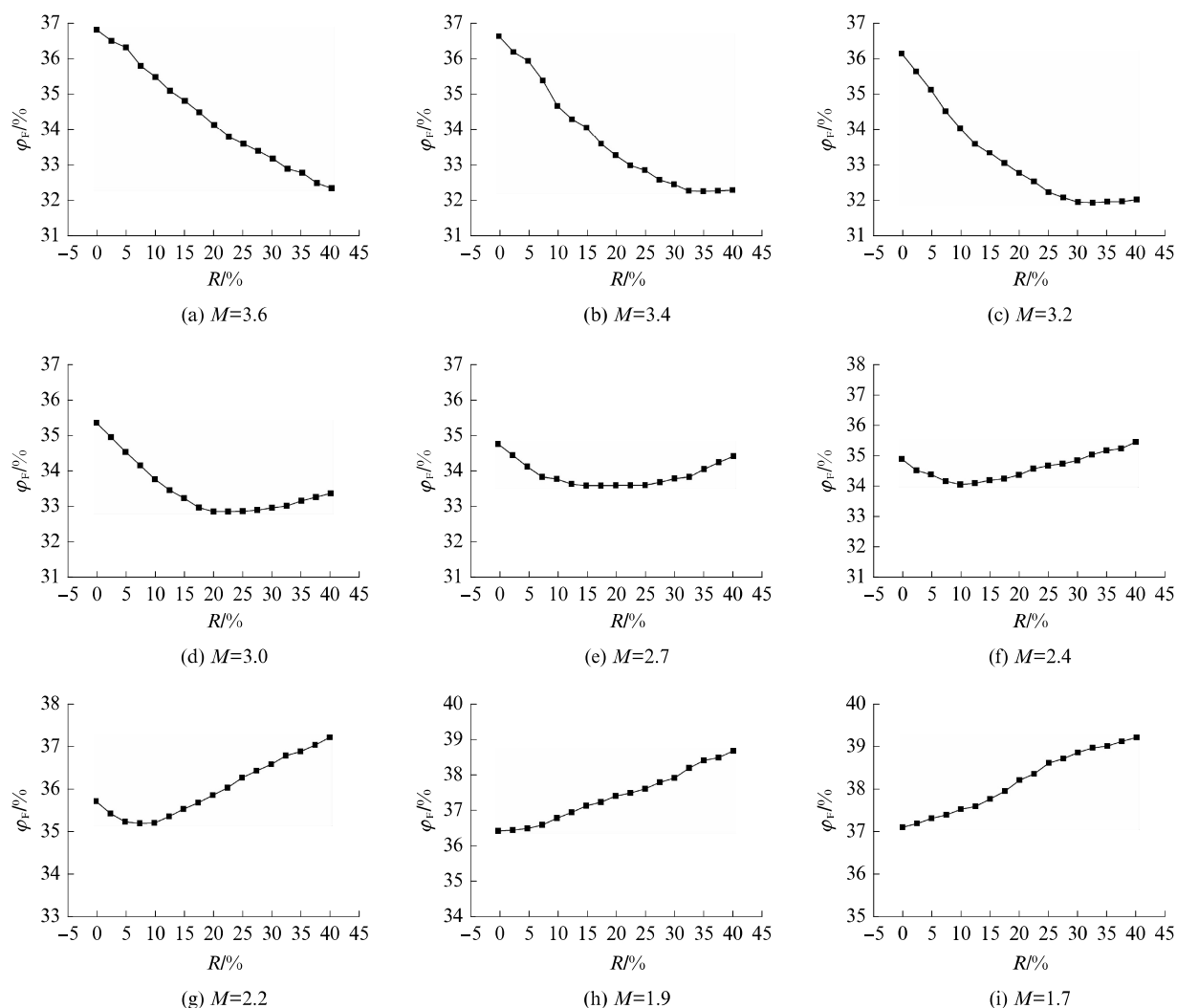


图6 不同河砂细度模数下不同风积沙取代率的细骨料实际空隙率

Fig. 6 Practical voidage of fine aggregate with different replacement rates of aeolian sand in different fineness modulus of river sand

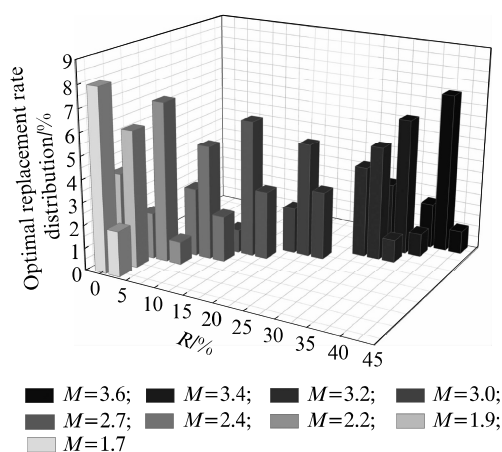


图7 风积沙最优取代率分布

Fig. 7 Optimum replacement rate distribution of aeolian sand

在10%~25%之间,对细级河砂的最优取代率较低,均低于10%;作为工程推荐用砂的中砂在其细

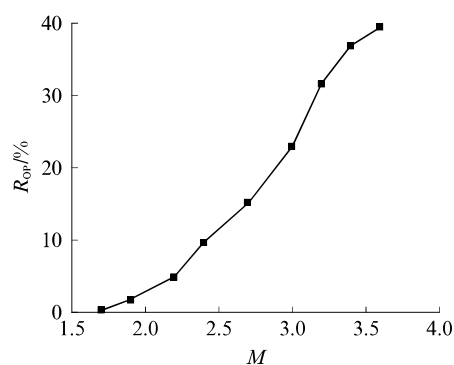


图8 不同细度模数河砂的最优风积沙取代率曲线

Fig. 8 Optimum replacement rate curve of aeolian sand with different fineness modulus of river sand

度模数范围内的曲线斜率要比粗砂和细砂部分大. 另外,河砂初始级配的差异会显著影响风积沙取代后所生成的细骨料性质,这种影响可能最终会较大程度地体现在风积沙混凝土的性能上. 因此,笔者认

为,以风积沙取代率角度来研究风积沙在混凝土中的应用,若不考虑细骨料尤其是河砂的初始级配,仅以混凝土性能测量结果来确定最优风积沙取代率,试验结果可能具有较低的移植性。

2.3 与已有试验结果的对比

通过搜集和统计近 10 年来从风积沙取代率角度来研究风积沙混凝土力学性能的论文,加上本课题组的试验结果,形成了一个小型数据库,挑出其中根据混凝土力学性能得出的风积沙最优取代率与图 8 从细骨料空隙率角度给出的风积沙最优取代率曲线进行对比,对比结果见图 9。

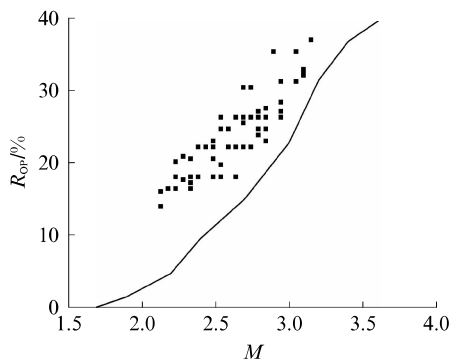


图 9 2 种风积沙最优取代率对比

Fig. 9 Comparison of two optimum replacement rates of aeolian sand

图 9 曲线上的黑色散点代表不同论文所作混凝土力学性能试验确定出的最优风积沙取代率。由图 9 可以看出,多数试验用的初始河砂细度模数均处在中砂范围内,以混凝土力学性能试验确定的最优风积沙取代率均高于从细骨料空隙率角度确定的最优风积沙取代率曲线,且 2 种分布形态类似,这也从另一个角度说明除去风积沙填充效应对混凝土性能的提升,风积沙对混凝土性能的影响还有其他潜在的原因,包括风积沙在混凝土中的活性效应或形态效应^[13-14],从图 9 可以看出,这种影响还是非常显著的。另外,风积沙的活性效应对混凝土的作用机理与其填充效应不同,其效果可能较大地与配合比中风积沙存在的净质量有关。通过确定这种质量-活性效应模型,可能会对风积沙混凝土的设计和性能预测有很大帮助,具体有待进一步研究。

2.4 风积沙颗粒形状对细骨料空隙率的影响

为了探究风积沙独特的颗粒形状对河砂被取代后的细骨料空隙率所造成的影响,利用实际筛分出来的与风积沙级配一致的河砂,以不同取代率来取代不同分级的河砂,并采用与上述相同的试验步骤测试此种情况下的细骨料空隙率。通过对比相同取

代率下风积沙取代、河砂取代这 2 种情况下的细骨料空隙率差异,可以找出风积沙颗粒形状对细骨料空隙率的影响。结果发现,相较于风积沙取代,当细级河砂以不同取代率取代河砂后,所得到的细骨料空隙率均更高,且河砂的不同细度模数对这种变化趋势并没有明显影响。级配相同的河砂和风积沙取代河砂后的细骨料空隙率差异随着取代率的增加有上升的趋势,结果如图 10 所示。

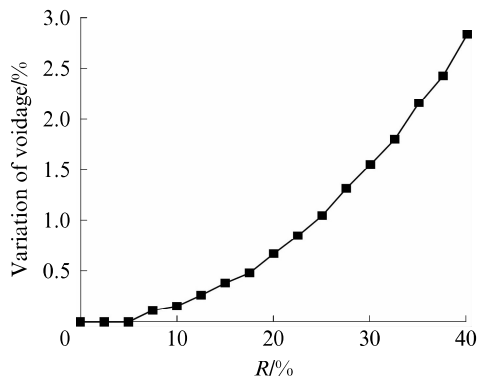


图 10 级配相同的河砂和风积沙取代河砂后的细骨料空隙率差异

Fig. 10 Voidage variation after the replacement of river sand and aeolian sand with same gradation

由图 10 可见,随着取代率的增加,2 种情况下细骨料空隙率差异的曲线形状有明显的指数函数特征。因此,对图 10 曲线进行了基于指数函数的拟合,之后对拟合出的曲线取负值,给出了风积沙颗粒形状对不同风积沙取代率下细骨料空隙率影响的经验公式:

$$\alpha = -1.035^R + 1.23 \quad (3)$$

式中: α 是细骨料空隙率粒形影响因子; R 是风积沙取代率。

3 结论

(1)以库布齐风积沙取代部分河砂,研究风积沙取代率对细骨料空隙率的影响。结果表明,模拟结果与试验结果吻合较好,可以用于对风积沙填充效应的研究。

(2)当风积沙取代率为 0%~40% 时,以粗级河砂为研究基础的细骨料空隙率整体呈现下降趋势;以中级河砂为研究基础的细骨料空隙率呈现先降后升的上开口弧状特征;以细级河砂为研究基础的细骨料空隙率整体呈现上升趋势。

(3)风积沙对不同分级河砂的最优取代率随着细度模数增加呈现略微的 S 形上升趋势。其中风积沙对粗级河砂的最优取代率均在 30% 以上,对中级

河砂的最优取代率为10%~25%,对细级河砂的最优取代率较低,均低于10%。

(4)除去风积沙的填充效应对混凝土性能的影响,风积沙的活性效应或形态效应对混凝土性能造成的影响也较为显著。

(5)风积沙颗粒形状对细骨料空隙率的影响随着风积沙取代率的增加逐渐明显。

参考文献:

- [1] ELIPE M G M, LÓPEZ-QUEROL S. Aeolian sands: Characterization, options of improvement and possible employment in construction—The state of the art [J]. Construction and Building Materials, 2014, 73: 728-739.
- [2] 包建强, 邢永明, 刘霖. 风积沙混凝土的基本力学性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2015(11): 8-11.
BAO Jianqiang, XING Yongming, LIU Lin. Experimental study on basic mechanical properties of aeolian sand concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2015(11): 8-11. (in Chinese)
- [3] 陈俊杰, 杨森, 李志强, 等. 沙漠砂混凝土配合比试验研究[J]. 混凝土, 2016(11): 133-136.
CHEN Junjie, YANG Sen, LI Zhiqiang, et al. Experimental study on the mixture ratio of desert sand concrete [J]. Concrete, 2016(11): 133-136. (in Chinese)
- [4] 鞠冠男, 李志强, 王维, 等. 古尔班通古特沙漠砂混凝土轴心受压性能试验研究[J]. 混凝土, 2019(4): 33-36.
JU Guannan, LI Zhiqiang, WANG Wei, et al. Experimental study on the axial compression properties of Gurbantonggut desert sand concrete [J]. Concrete, 2019(4): 33-36. (in Chinese)
- [5] 贺业邦, 沙吾列提·拜开依, 刘吉. 基于 Dinger-Funk 方程的沙漠砂混凝土配合比优化设计研究[J]. 混凝土, 2018(4): 145-150.
HE Yebang, SHAWULIETI Baikaiyi, LIU Ji. Study on mix proportion design of desert sand concrete based on Dinger-Funk equation [J]. Concrete, 2018(4): 145-150. (in Chinese)
- [6] 何清, 杨兴华, 霍文, 等. 库姆塔格沙漠粒度分布特征及环境意义[J]. 中国沙漠, 2009, 29(1): 18-22.
HE Qing, YANG Xingwen, HUO Wen, et al. Grain-size distribution characteristics and environmental significance of Kumtag desert [J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(1): 18-22. (in Chinese)
- [7] 刘铮瑶, 董治宝, 萨日娜, 等. 巴丹吉林沙漠边缘沉积物粒度和微形态特征空间分异[J]. 中国沙漠, 2018, 38(5): 945-953.
LIU Zhengyao, DONG Zhibao, SA Rina, et al. Grain size and distribution of sediments in the margin of Badain Jilin desert spatial differentiation of micromorphological features [J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(5): 945-953. (in Chinese)
- [8] ANDERSON J L, WALKER I J. Airflow and sand transport variations within a backshore-parabolic dune plain complex: NE Graham Island, British Columbia, Canada [J]. Geomorphology, 2016, 77(1): 17-34.
- [9] 毛东雷, 蔡富艳, 方登先, 等. 新疆策勒绿洲-沙漠过渡带风沙运动沙尘物质粒径分形特征[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 88-99.
MAO Donglei, CAI Fuyan, FANG Dengxian, et al. Fractal characteristics of particle size of sand and dust substances in wind-sand movement in Cele oasis-desert transition zone, Xinjiang [J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(1): 88-99. (in Chinese)
- [10] 霍文, 何清, 杨兴华, 等. 中国北方主要沙漠沙尘粒度特征比较研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(6): 6-11.
HUO Wen, HE Qing, YANG Xinghua, et al. A comparative study on grain size characteristics of sands and dust in main deserts of northern China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(6): 6-11. (in Chinese)
- [11] 顾馨允. PFC3D 模拟颗粒堆积体的空隙特性初步研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
GU Xinyun. Preliminary study on the void characteristics of PFC3D simulated particle deposits [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009. (in Chinese)
- [12] 赵聪敏, 何清, 杨兴华, 等. 巴丹吉林沙漠风沙流输沙粒形貌特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2012, 6(2): 25-29.
ZHAO Congmin, HE Qing, YANG Xinghua, et al. Morphological characteristics of sand particles transported by aeolian sand flow in Badain Jilin desert [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2012, 6(2): 25-29. (in Chinese)
- [13] 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. (in Chinese)
- [14] 蒋晓星, 孙振平, 杨正宏, 等. 风积沙的特性及应用[J]. 粉煤灰综合利用, 2018(1): 65-69.
JIANG Xiaoxing, SUN Zhenping, YANG Zhenghong, et al. Properties and application of aeolian sand [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2018(1): 65-69. (in Chinese)