

机制砂品质和取代率对混凝土性能的影响

张文一¹, 王红星¹, 赵迁乔^{2,*}, 王茂梅³, 周建国¹, 郭宁¹

(1. 山东省路桥集团有限公司, 济南 250014; 2. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525;

3. 青岛西海岸新区市政公用事业发展中心, 青岛 266400)

摘要: 为了促进高性能混凝土的可持续发展, 以高品质机制砂取代河砂制备了高耐久、低收缩的机制砂混凝土。系统研究了不同机制砂品质与取代率对混凝土自收缩性能与耐久性的影响。结果表明: 良好的机制砂级配和粒形提高了混凝土的抗氯盐侵蚀、抗硫酸盐侵蚀、抗冻以及抗碳化性能, 降低了混凝土的自收缩性能。机制砂取代率为 25% 时, 各项性能优异。砂的细度模数无法直观地反映颗粒级配的好坏, 而体积分形维数 (D_v) 与空隙率 (V_{void}) 测定值之间可拟合得到良好的线性相关关系; D_v 值越大, 骨料颗粒之间的填充能力越强, 级配越好; 通过对比不同机制砂取代率的 D_v 值与试验结果, 验证了 25% 的取代率为最佳机制砂取代率。

关键词: 机制砂混凝土; 机制砂品质; 取代率; 耐久性

中图分类号: TU528.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2026)02-0036-08

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4602.2026.02.005

Effect of the quality and substitution rate of manufactured sand on concrete properties

ZHANG Wenyi¹, WANG Hongxing¹, ZHAO Qianqiao^{2,*},

WANG Maomei³, ZHOU Jianguo¹, GUO Ning¹

(1. Shandong Road and Bridge Group Co., Ltd., Jinan 250014, China;

2. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

3. Qingdao West Coast New Area Municipal Public Utility Development Center, Qingdao 266400, China)

Abstract: In order to promote the sustainable development of high-performance concrete, this study replaces river sand with high-quality manufactured sand to prepare high-durability and low-shrinkage manufactured sand concrete. The effect of different quality of manufactured sand and substitution rate on the autogenous shrinkage performance and durability of concrete are systematically investigated. Results show that while reducing the autogenous shrinkage performance of concrete, good gradation and particle shape of manufactured sand could improve the chloride resistance, sulfate corrosion resistance, frost resistance and carbonation resistance of concrete. When the substitution rate of manufactured sand is 25%, its various properties are excellent. In addition, the fineness modulus of sand cannot intuitively reflect the quality of particle gradation, while a good linear correlation can be fitted between

收稿日期: 2024-07-30

基金项目: 国家自然科学基金(U22A202734)

作者简介: 张文一(1978—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人。高级工程师, 主要从事混凝土结构耐久性方面的研究。

E-mail: 1039030316@qq.com。

* 通信作者: 赵迁乔(1976—)女, 河北武邑人。博士, 讲师, 主要从事混凝土结构耐久性方面的研究。E-mail: 1197987472@qq.com。

the volume fractal dimension (D_v) and the measured porosity value (D_{void}). The larger the D_v value is, the stronger the filling ability between aggregate particles is, and the better the gradation is. By comparing the D_v values of different substitution rates of manufactured sand with the experimental results, it is verified that a substitution rate of 25% is the optimal substitution rate of manufactured sand.

Key words: manufactured sand concrete; quality of manufactured sand; substitution rate; durability

随着我国经济的快速发展,建筑资源短缺和环境污染等问题日益突出^[1-2]。目前,我国许多地区的河砂资源在经历数十年的开采后即将枯竭^[3-4],其价格也持续攀升,这将对工程建设造成不利影响^[5-7]。由此可见,未来机制砂大规模使用已成为必然趋势。然而,不同厂家生产的机制砂品质存在一定差异,因此研究机制砂品质对混凝土性能的影响对实际工程具有重要的参考价值。研究表明,细度模数从宏观上表征机制砂的品质,且会对砂浆的工作性能、力学性能产生影响^[8]。高品质骨料能够在保持混凝土工作性能与力学性能的同时,降低胶凝材料用量及减水剂用量,达到降本增效的效果^[9]。机制砂中适度的石粉含量、细度模数有利于混凝土的和易性^[10-11]。然而,机制砂品质对混凝土抗氯盐侵蚀性能、抗硫酸盐侵蚀性能、抗冻性能等综合耐久性的影响尚不明确,而这些性能是决定混凝土能否长期服役的关键。此外,国内外规范对细骨料级配的要求各有差异,且满足规范的骨料级配曲线有多种可能,采用单一的细度模数(M_x)并不能完全表征级配的好坏。

本文采用制砂设备制备了高品质机制砂,该砂粒形好、级配连续。研究了机制砂品质和取代率对混凝土自收缩及耐久性的影响,验证了自制机制砂颗粒级配的合理性,为实际工程中机制砂生产线机械参数的调整提供了依据。此外,计算了不同机制砂取代率的细度模数($M_{x\text{混}}$)和分形维数(D),推导出细骨料的体积分形维数(D_v),通过 D_v 与空隙率(V_{void})之间的拟合关系表征了细骨料级配的好坏。

1 材料和方法

1.1 原材料及配合比

采用的 P·O 42.5 水泥、S95 级矿粉以及 F 类一级粉煤灰的化学组成如表 1 所示。采用的细骨料分别为细度模数为 2.37 的天然河砂(S1)、细度模数为 3.13 的机制砂(S2)和细度模数为 3.48 的高品质机制砂(S3),相关性能指标如表 2 和图 1(a)所示;粗骨料采用 5~10 mm(C1)、10~20 mm(C2)和 16~31.5 mm(C3)3 种连续级配的玄武岩石子,级配如图 1(b)所示。高品质机制砂混凝土配合比如表 3 所示。减水剂采用聚羧酸减水剂,减水率为 28%,减水剂掺量为 2.1%。拌和水采用实验室自来水。

表 1 水泥及矿物掺合料的化学组成

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	RO ₂
水泥	22.33	5.87	3.59	62.65	0.56	0.29	—	3.32	0.35	0.92
矿粉	28.83	17.27	0.84	39.54	9.25	2.43	0.82	0.56	0.46	—
粉煤灰	45.41	37.83	7.21	6.77	0.35	0.22	1.53	0.17	0.51	—

注:RO₂表示其他金属氧化物。

表 2 砂的性能指标

种类	细度模数	表观密度/ (kg·m ⁻³)	堆积密度/ (kg·m ⁻³)	吸水率/%	含水率/%	空隙率/%	石粉含量/%
河砂(S1)	2.37	2573	1436	1.0	0.9	38.2	0.0
机制砂(S2)	3.13	2688	1568	1.5	1.0	41.3	5.0
高品质机制砂(S3)	3.48	2688	1568	1.5	1.0	32.3	5.0

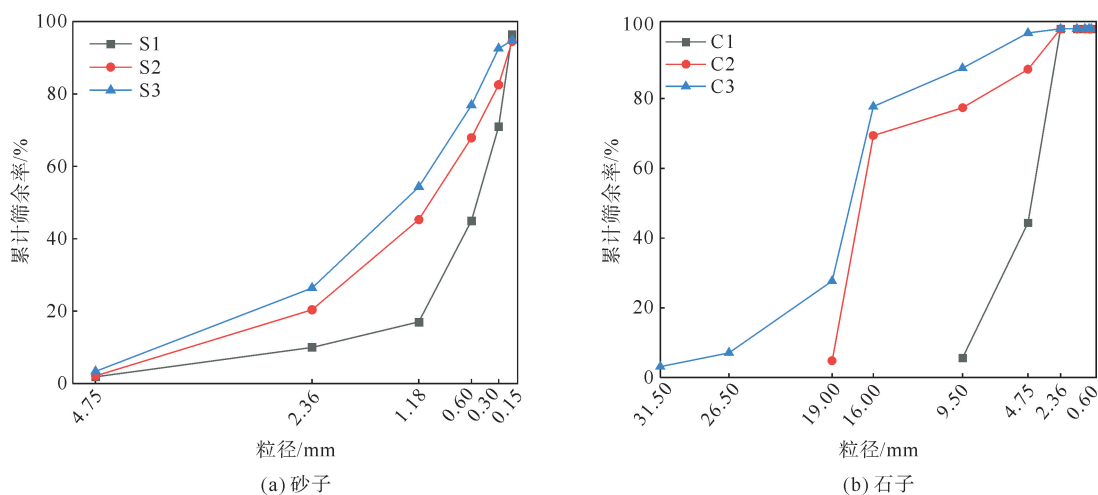


图1 砂子和石子的级配曲线

表3 高品质机制砂混凝土试验配合比

编号	胶材	水泥	粉煤灰	矿粉	粗骨料			河砂	高品质 机制砂	用水量
					5~10 mm	10~20 mm	16~31.5 mm			
AMC0	400	220	120	60	166.5	610.5	333	732	0	158.1
AMC25	400	220	120	60	166.5	610.5	333	549	183	155.0
AMC50	400	220	120	60	166.5	610.5	333	366	366	158.7
AMC75	400	220	120	60	166.5	610.5	333	183	549	160.0
AMC100	400	220	120	60	166.5	610.5	333	0	732	162.5

注: AMC0 表示高品质机制砂取代率为 0%, AMC25 表示高品质机制砂取代率为 25%, 后续编号以此类推。

机制砂混凝土(MC)配合比及编号规则同表 3, 其中, 机制砂分别以 0%、25%、50%、75% 和 100% 取代河砂, 编号为 MC0、MC25、MC50、MC75、MC100。

1.2 试验方法

试验前, 首先用水润湿搅拌锅, 随后将称量好的砂石混合放入锅中干拌, 持续 30 s, 然后加入水泥和矿物掺合料, 同时添加部分水和全部减水剂。按照 180~220 mm 的坍落度要求调整用水量。全部材料搅拌均匀后, 装入准备好的模具中, 并移入标准养护室(温度 $T=(20\pm 2)^\circ\text{C}$, 湿度 $\text{RH}\geq 95\%$) 养护, 24 h 后, 拆除模具继续养护。

1.2.1 自收缩性能测试

使用尺寸为 100 mm×100 mm×515 mm 的试块和 $\phi 25$ mm×10 mm 的铜探头测试自收缩性能。24 h 后拆模, 将试块放入恒温恒湿养护室静置 4 h, 随后用铝箔纸密封。标记测试方向后测试试块的初始长度, 然后分别测试不同龄期的长度。计算公式如式(1)所示:

$$\epsilon_{st} = \frac{(L_{10} - L_{1t}) + (L_{20} - L_{2t})}{L_b} \quad (1)$$

式中: ϵ_{st} 为时间 t 内的收缩量; L_{10} 为左侧仪器初始值, mm; L_{1t} 为 t 时左侧仪器数值, mm; L_{20} 为右侧仪器初始数值, mm; L_{2t} 为 t 时右侧仪器数值, mm; L_b 为测量标距, mm。

1.2.2 耐久性测试

根据《混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》(GB/T 50082—2024)^[12], 对 $\phi 100$ mm×50 mm 的试块进行快速氯离子扩散系数试验(RCM), 测定混凝土的氯离子扩散系数; 对 100 mm×100 mm×100 mm 的试块进行干湿循环, 测试质量损失率、耐蚀系数和相对动弹性模量; 对 100 mm×100 mm×400 mm 的试块进行冻融循环试验, 试块中心最低和最高温度分别为 (-18 ± 2) 和 $(5\pm 2)^\circ\text{C}$, 每循环 25 次取出试块, 测量其质量损失率和相对动弹性模量; 对 100 mm×100 mm×100 mm 的试块进行碳化试验,

测试碳化深度。

2 结果与讨论

2.1 自收缩性能

图 2 为机制砂品质对混凝土收缩变形的影响。当取代率分别为 25%、50%、75% 和 100% 时,高品质机制砂混凝土 AMC 比普通机制砂混凝土 MC 的 65 d 收缩率分别减少了 8.5%、14.9%、27.8% 和 37.0%。高品质机制砂颗粒更大,能够有效地抑制混凝土的收缩;其良好的颗粒级配还改善了机制砂混凝土的孔隙率和界面区域松散等问题,显著降低了混凝土的孔隙率和收缩。随着机制砂取代率的增加,AMC 自收缩先降低后增加,取代率为 25% 时自收缩最小;MC 在取代率为 0% 和 25% 时相差不大,此时的自收缩均最小。

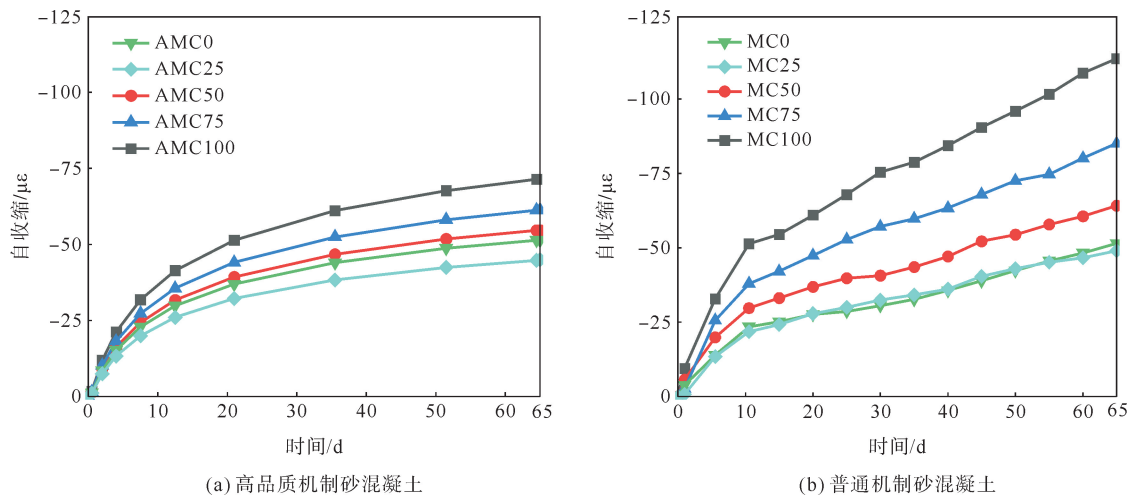


图 2 不同取代率机制砂的混凝土收缩变形

2.2 抗氯盐侵蚀性能

图 3 为机制砂品质对混凝土 28 d 氯离子扩散系数 (D_{RCM}) 的影响。与 AMC 相比,机制砂取代率分别为 25%、50%、75% 和 100% 时,MC 的 D_{RCM} 分别增加了 0.15×10^{-12} 、 0.18×10^{-12} 、 0.3×10^{-12} 、 $0.41 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。由于 MC 缺少 0.6 和 0.3 mm 粒径的骨料,形成了较大的孔隙体积,无法被较小的细颗粒填充,从而增加了混凝土中的缺陷,导致其抗渗透性能下降。根据《混凝土耐久性检验评定标准》(JGJ/T 193—2009), $D_{RCM} > 4.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 的试块为抗氯离子侵蚀性差的试块,图 3 中配合比均小于规范值。随着取代率的增加,抗氯盐侵蚀性能先增大后降低,取代率为 25% 时抗氯盐侵蚀性能最好。

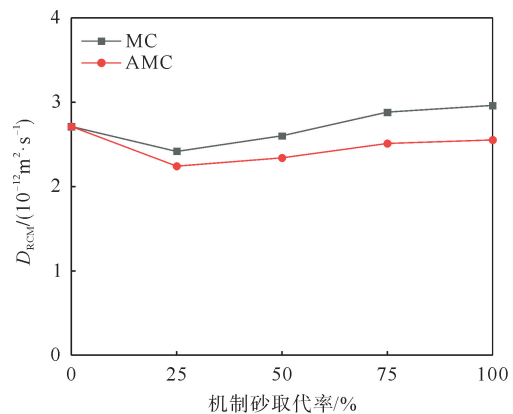


图 3 不同取代率机制砂混凝土 28 d 氯离子扩散系数

2.3 抗硫酸盐侵蚀性能

机制砂品质对混凝土抗硫酸盐侵蚀能力的影响如图 4 所示。相比于 MC 机制砂混凝土,当取代率为 25%、50%、75% 和 100% 时,AMC 机制砂混凝土的质量损失率分别减少了 0.01%、0.02%、0.04%、0.06%;耐蚀系数分别增加了 1.65%、3.03%、4.03%、5.35%;相对动弹性模量分别增加了 1.10%、1.75%、2.56%、3.20%。高品质机制砂的颗粒级配有连续、均匀地填充混凝土孔隙,提高其抗硫酸盐侵蚀性能。随着取代率的增加,抗硫酸盐侵蚀性能先增大后降低,取代率为 25% 时抗硫酸盐侵蚀性能最好。

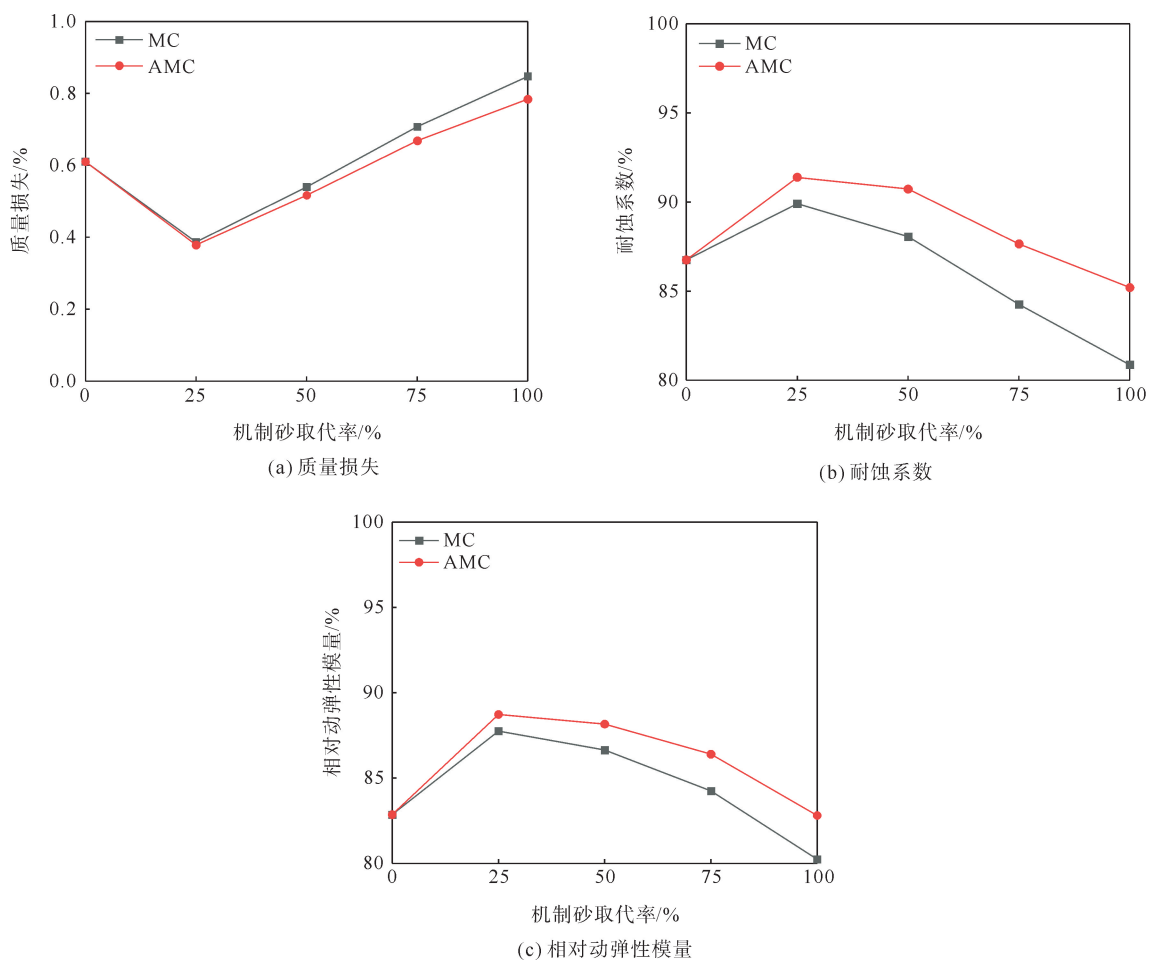


图4 不同取代率机制砂混凝土抗硫酸盐侵蚀性能

2.4 抗冻性能

图5为不同取代率机制砂混凝土的抗冻性能,可以看出,在不同机制砂取代率下,AMC的质量损失率明显小于MC,表明AMC的抗冻性能高于MC。当取代率为25%、50%、75%和100%时,AMC的质量损失率较MC分别减少了0.21%、0.40%、0.43%、0.45%;相对动弹性模量分别增加了0.80%、0.86%、1.10%、1.30%。这是因为MC中低品质机制砂空隙率较大、吸水率高,导致MC更容易受到冻胀效应的

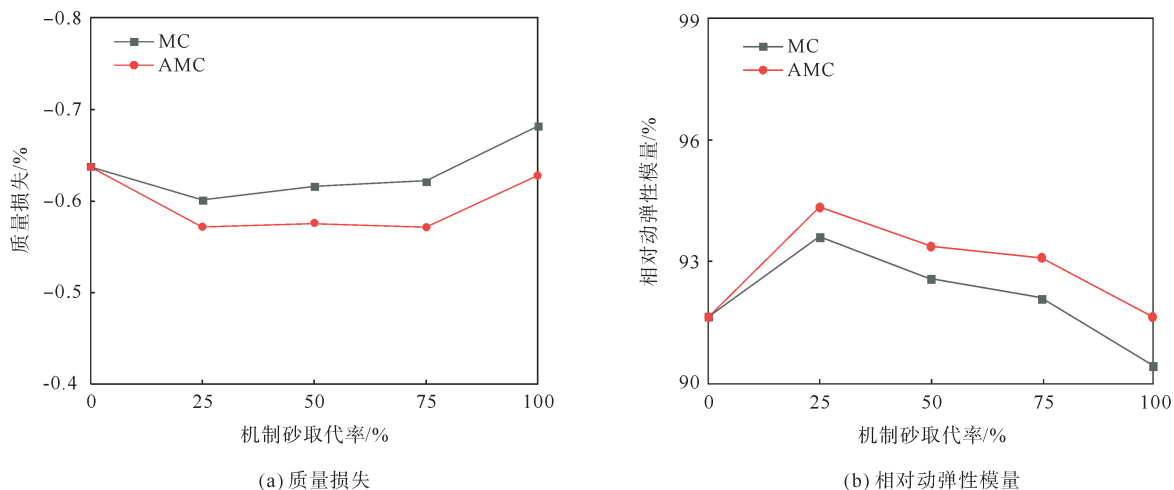


图5 不同取代率机制砂混凝土抗冻性能

影响。随着取代率的增加,相对质量损失先降低后增大,相对动弹性模量先增大后降低。因此,无论 AMC 还是 MC,均在机制砂取代率为 25% 时抗冻性能最好。

2.5 抗碳化性能

不同取代率机制砂品质与混凝土抗碳化性能的关系如图 6 所示。AMC 的抗碳化性能优于 MC。当取代率为 25%、50%、75% 和 100% 时,AMC 碳化深度较 MC 分别减少了 15%、19%、23%、27%。控制级配提升了混凝土内部的密实程度,尤其是 AMC 机制砂中间级配的增多。随着取代率的增加,碳化深度先降低后增大,取代率为 25% 时抗碳化性能最好。

2.6 机制砂混凝土的理论最佳取代率

目前,各国规范对细骨料级配的要求各有差异,且满足规范的骨料级配曲线有多种可能,采用单一的细度模数(M_x)并不能完全表征级配的好坏。分形理论可以用来描述自然界中不同形态和大小事物的复杂程度。通过类比分形理论在岩土体孔隙率及土体强度等方面的应用,计算不同机制砂取代率的细度模数($M_{x混}$)和分形维数(D),并以此参数推导出细骨料的体积分形维数 D_v ,最后通过 D_v 与空隙率 V_{void} 之间的拟合关系表征细骨料级配的好坏。

2.6.1 细度模数($M_{x混}$)

根据《混合砂混凝土应用技术规程》(DBJ50/T-169—2013),机制砂和河砂可以按照不同的配合比制备成不同细度模数的混合砂。

2.6.2 分形维数(D)

由于细骨料呈现各种各样的不规则形状,而分形理论可以对颗粒的分布情况进行描述,将机制砂假定为球状颗粒,粒径小于 x 的颗粒分布系数 $F(x)$ 可用式(2)表示:

$$F(x) = \frac{N(x)}{N} \quad (2)$$

式中: $N(x)$ 为粒径小于 x 的颗粒数量; N 为颗粒总数。

把细骨料颗粒看成是一个“点问题”,按照分形理论的基本模型,可以将小于某一粒径的细骨料颗粒总数表示为^[13]

$$N(x) = N_0 \left(\frac{x}{x_{max}} \right)^{0-D} \quad (3)$$

式中: x_{max} 为骨料的粒径,mm; N_0 为常数。

将式(3)代入式(2)并设定 $F(x_{max})=1$ 和 $F(x_{min})=0$,可得式(4):

$$F(x) = \left(\frac{x}{x_{max}} \right)^{0-D} \quad (4)$$

同样,细骨料质量分布可以用式(5)表示:

$$P(x) = \frac{M(x)}{M} \quad (5)$$

式中: $P(x)$ 为筛余率; $M(x)$ 为粒径小于 x 的细骨料质量; M 为细骨料总质量。

各种粒径砂粒的密度都被简化为 ρ ,其中粒径小于 x 的颗粒体积为 $V(x)$,且小于这一粒径的颗粒数量为 $N(x)$,则小于这一粒径的颗粒质量可由微分表达成式(6):

$$dM(x) = \rho \cdot V(x) \cdot dN(x) \quad (6)$$

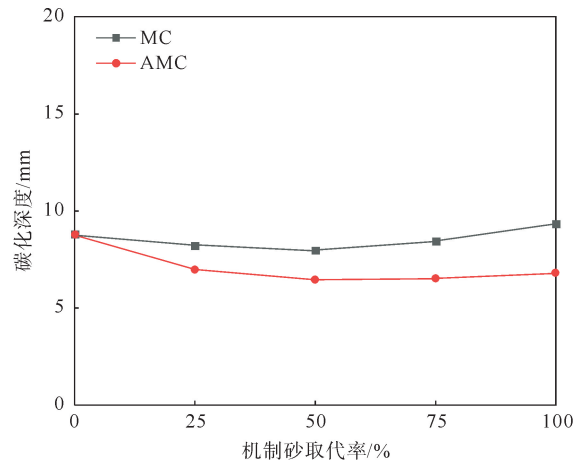


图6 不同取代率机制砂混凝土碳化性能

砂粒颗粒体积可以由式(7)表示:

$$V(x) = k \cdot x^3 \quad (7)$$

式中: k 为形状系数。

联立式(4)~(7), 设 $P(x_{\max}) = 1$ 与 $P(x_{\min}) = 0$, 则可以得到筛余率的分形维数表达形式, 如式(8)所示。对等式的两侧取对数可以计算出 D 的值。

$$P(x) = \frac{x^{3-D} - x_{\min}^{3-D}}{x_{\max}^{3-D} - x_{\min}^{3-D}} \quad (8)$$

2.6.3 体积分形维数(D_v)

粒径大小不同的细骨料颗粒聚集在一起, 形成具有间隙的堆积体时, 可用 D_v 来表征颗粒空间填充能力^[14], 依据分形理论可将堆积体的体积表示为

$$V'(x) = V_0 \left(\frac{x}{x_{\max}} \right)^{3-D_v} \quad (9)$$

式中: $V'(x)$ 为堆积体体积; V_0 为整形体积。

$$dV'(x) = d \left(V_0 \left(\frac{x}{x_{\max}} \right)^{3-D_v} \right) \quad (10)$$

不考虑体积空隙, V_0 可以表示为式(11):

$$dV_0 = \frac{M \cdot dP(x)}{\rho} \quad (11)$$

联立式(9)~(11)可得 $V'(x)$:

$$V'(x) = \frac{3-D}{6-D-D_v} \cdot \frac{M}{\rho} \cdot \frac{x_{\min}^{6-D-D_v} - x_{\max}^{6-D-D_v}}{x_{\min}^{3-D} - x_{\max}^{3-D}} \cdot x_{\max}^{D_v-3} \quad (12)$$

$V'(x)$ 是含有孔隙的堆积体体积, 而空隙率 V_{void} 可通过测定密度来间接获得, 如式(13)所示:

$$V_{\text{void}} = \frac{\frac{M}{\rho} - V}{\frac{M}{\rho}} = \frac{3-D}{6-D-D_v} \cdot \frac{x_{\min}^{6-D-D_v} - x_{\max}^{6-D-D_v}}{x_{\min}^{3-D} - x_{\max}^{3-D}} \cdot x_{\max}^{D_v-3} = 1 - \frac{\gamma}{\rho} \quad (13)$$

式中: γ 为细骨料颗粒堆积体的捣实密度; ρ 为堆积密度。

γ 和 ρ 可以参考规范试验得到^[15]。

2.6.4 机制砂取代率验证

表4为机制砂取代率0%、25%、50%、75%和100%的混凝土配合比细骨料颗粒的累计筛余率。机制砂的最大粒径(x_{\max})和最小粒径(x_{\min})分别为5.03、0.11 mm, 河砂的 x_{\max} 和 x_{\min} 分别为4.87、0.13 mm。

表4 不同机制砂取代率混凝土中细骨料颗粒的累计筛余率

%

粒径级别/mm	机制砂取代率				
	0%	25%	50%	75%	100%
4.75	1.90	1.95	2.00	2.05	2.10
2.36	10.00	12.60	15.20	17.80	20.40
1.18	17.00	24.08	31.15	38.23	45.30
0.60	45.00	50.73	56.45	62.18	67.90
0.30	71.00	73.88	76.75	79.63	82.50
0.15	92.00	92.63	93.25	93.88	94.50

不同机制砂取代率混凝土细骨料的特征参数如表 5 所示。

表 5 各组细骨料的特征参数

取代率/%	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\gamma/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$V_{\text{void}}/\%$	$M_{\text{X混}}$	D	D_v
0	2.44	1.6936	0.310	2.298	3.412	2.816
25	2.52	1.8975	0.247	2.490	3.268	2.862
50	2.33	1.6962	0.272	2.681	3.160	2.842
75	2.57	1.8324	0.287	2.873	3.067	2.820
100	2.43	1.7010	0.300	3.065	2.980	2.800

表 5 表明, $M_{\text{X混}}$ 与 V_{void} 的拟合关系较差, 即 $M_{\text{X混}}$ 并无法直观反映细骨料的级配情况。而 D_v 与 V_{void} 空隙率测定值之间的拟合关系较好, 如式(14)所示:

$$V_{\text{void}} = -0.949D_v + 2.97 \quad R^2 = 0.849 \quad (14)$$

细骨料的 V_{void} 越大, D_v 越小, 可认为 D_v 是细骨料空间填充能力的体现; D_v 越大则骨料颗粒之间的填充能力越强, 那么级配就越良好。验证了细骨料中机制砂取代率为 25% 时, 具有较好的空间填充能力和级配。结合机制砂混凝土的试验结果可知, 机制砂取代率为 25% 时, 其自收缩、干燥收缩最小, 耐久性优异。综上, 最终确定机制砂的最佳取代率为 25%。

3 结论

1) 良好的机制砂级配和粒形提高了混凝土的工作性能、自收缩性能及耐久性能。随着机制砂取代率的提高, 混凝土的抗氯盐侵蚀、抗硫酸盐侵蚀、抗冻以及抗碳化性能均表现为先升高后降低, 自收缩性能先降低后升高, 其中取代率为 25% 时, 机制砂混凝土的各项性能最佳。

2) 砂的细度模数无法直观地反映颗粒级配的好坏, 而体积分形维数 D_v 与空隙率 V_{void} 测定值之间可拟合得到良好的线性相关关系。 D_v 值越大, 骨料颗粒之间的填充能力越强, 级配越好。通过对比不同机制砂取代率的 D_v 与试验结果, 验证了 25% 的取代率为最佳机制砂取代率。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] YUAN X H, YANG T T, ZHOU Y R. Experiment on eco-friendly recycled materials of brick-concrete construction waste[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2022, 31(8): 7921-7930.
- [3] BHOOPATHY V, SENTHIL S S. The way forward to sustain environmental quality through sustainable sand mining and the use of manufactured sand as an alternative to natural sand[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(21): 30793-30801.
- [4] SHEN W G, WU J L, DU X J, et al. Cleaner production of high-quality manufactured sand and ecological utilization of recycled stone powder in concrete[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 375: 134146.
- [5] 马小龙. 机制砂和河砂混掺混凝土的性能试验与施工分析[J]. 四川水泥, 2023(3): 8-10.
MA Xiaolong. Performance test and construction analysis of concrete mixed with manufactured sand and river sand[J]. Sichuan Cement, 2023(3): 8-10.
- [6] 徐楠. 铁路工程机制砂混凝土的使用现状和问题[J]. 居业, 2023(2): 184-186.
XU Nan. Present situation and problems of the use of machine-made sand concrete in railway engineering[J]. Create Living, 2023(2): 184-186.
- [7] 韩涛. 机制砂在高性能混凝土中的应用研究[J]. 中国高新科技, 2022(23): 147-148.
HAN Tao. Research on the application of manufactured sand in high performance concrete[J]. China High and New Technology, 2022(23): 147-148.

(下转第 73 页)