

文章编号:1673-9981(2019)04-0299-08

砂岩机制砂颗粒特性及其配制的混凝土性能^{*}

闫光明,殷素红,郭文昊,刘 鹏,吕 辉

华南理工大学 材料科学与工程学院,广东 广州 510641



摘 要:研究了砂岩机制砂的粒形、级配和石粉含量等颗粒特性及其对砂需水性的影响,并探讨了砂岩机制砂混凝土的性能.结果表明:与河砂相比砂岩机制的砂表面粗糙而棱角较多、偏于“两头大中间小”的级配且石粉含量相对较多,这些均会使混凝土的流动性能变差;采用与河砂堆积空隙率相同的砂岩机制砂配制 C35 强度等级的混凝土,通过适当增加减水剂掺量可满足工作要求,强度与抗氯离子渗性能优于河砂混凝土;针对实际工程,采用机制砂配制 C20—C35 不同强度等级的混凝土,其各项性能指标达到设计要求.

关键词:砂岩机制砂;颗粒特性;配制混凝土性能

中图分类号:TU528

文献标识码:A

随着广东省对河砂开采进行大规模限制,河砂产量已难以满足建设工程的使用需求,机制砂代替河砂已成为必由之路.将采石场废石屑(行业内俗称石粉)加工处理制成机制砂(俗称人工砂),用来取代河砂用于配制混凝土和砂浆,这样既可以解决建筑用砂短缺和废石屑环境污染问题,又提高了资源利用率,社会综合效益显著,具有极大的推广意义.

广东省采石场主要的岩石类别有花岗岩、砂岩和石灰岩,其中以花岗岩为主,砂岩和石灰岩较少.目前废石屑主要用于路基填充材料,利用价值很低.其中石灰岩开采的废石屑更多的被加工为附加值更高的石灰石粉,用于水泥混合材及混凝土和砂浆掺合料;花岗岩废石屑的数量最多,除用于路基填料外,一些混凝土搅拌站直接将其当做细骨料来使用.

因此,对花岗岩机制砂使用方面的研究较多,而对砂岩废石屑制成机制砂用于混凝土的研究较少^[1].不同母岩机制砂的性质有所差异,机制砂与河砂在颗粒特性上的不同是影响机制砂混凝土性能的主要原因,本文拟对砂岩机制砂的颗粒特性及其配制的混凝土性能进行探讨.

1 试验方法与材料

1.1 试验材料

试验所用的水泥为华润水泥平南有限公司生产的 P · II 42.5R 水泥,其化学成分与抗压强度列于表 1.

表 1 水泥的化学成分与抗压强度

Table 1 Chemical composition and compressive strength of cement

化学成分 $w/\%$								抗压强度/MPa	
SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	其他	烧失量	3d	28d
21.9	3.78	59.3	6.2	2.99	2.34	3.41	1.05	33.0	53.9

收稿日期:2019-07-29

^{*} 基金项目:广东省省级科技计划项目(2013B10403005)

作者简介:闫光明(1996-),男,汉族,安徽省阜南县人,硕士研究生,主要从事水泥及混凝土材料、固体废弃物利用研究.

细集料河砂产自广东西江,三种级配和细度模数不同的砂岩机制砂产自广东清远,其主要参数如表 2 所示.

粗集料为花岗岩碎石(产地博罗),规格为 5~

25 mm. 粉煤灰为大唐宁德火电厂的 F 类Ⅱ级灰. 外加剂为广东博众建材公司生产的 BOZ-3001 高效缓凝减水剂,减水率为 25.1%.

表 2 细集料主要参数

Table 2 Main parameters of fine aggregate

种类	细度模数	表观密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	堆积密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	空隙率/%	石粉/泥含量/%	压碎指标/%
天然砂	2.7	2600	1590	39	0.6	3
机制砂 a	2.6	2650	1480	44	3.1	5
机制砂 b	2.8	2650	1520	43	3.7	5
机制砂 c	3.1	2620	1610	39	2.0	5

1.2 实验方法

依据标准《建设用砂》GB/T 14684-2011 对机制砂的各项指标进行检测,参考标准《水泥胶砂流动度测试方法》GB/T 2419-2005 测定机制砂拌制砂浆的需水量与流动度. 采用 OLYMPUS SZX10 体视显微镜(放大倍数 10 倍)对河砂与机制砂的表面形貌进行观察.

依据《普通混凝土配合比设计规程》JGJ55-2011 配制 C35P8、坍落度 150~180 mm 的混凝土. 以天然河砂为基准进行配合比设计(记为试样 A),然后以砂岩机制砂完全替代河砂(记为试样 B),同时以砂岩机制砂为基准再进行配合比设计并适当增加减水剂用量(记为试样 C). 三组混凝土配合比列于表 3.

表 3 河砂和砂岩机制砂混凝土配合比

Table 3 Sand and sandstone mechanism sand concrete mix ratio

编号	水泥:砂:石:水:粉煤灰:外加剂
A(天然砂)	1:2.24:3.36:0.57:0.32:0.010
B(机制砂)	1:2.24:3.36:0.57:0.32:0.010
C(机制砂)	1:2.31:3.45:0.57:0.32:0.014

混凝土工作性能测试和力学性能测试依据标准《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GBT 50080-2016 进行;混凝土抗渗性能测试依据标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GBT 50082-2009 中的 RCM 法和电通量法.

用 EVO18 型扫描电子显微镜,观察混凝土样品的表面形貌. 用 Auto Pore IV 9500 型高性能全自动压汞仪,测试混凝土的孔隙结构.

2 结果与讨论

2.1 砂岩机制砂的颗粒特性

机制砂与河砂在颗粒特性上的不同是其影响混凝土性能的主要原因,主要是颗粒粒形、级配和石粉含量等影响砂的堆积空隙率,从而影响新拌混凝土的性能.

2.1.1 砂岩机制砂的粒形

通过体视显微镜分别观察了不同单粒级(4.75~2.36,2.36~1.18,1.18~0.6 和 0.6~0.3 mm)的河砂与砂岩机制砂的粒形,如图 1 所示.

从图 1 可以看出:由于经过流水的冲刷,河砂表面光滑圆润,棱角被钝化,球形度较高;而砂岩机制砂是机械破碎而成,表面粗糙度较大,表面形貌较为复杂,粒形不规则、棱角多,明显可以看出附着的石粉. 球形度高且圆滑的表面有助于在拌合的时候形成良好的流动性,河砂中多为半透明的石英颗粒,主要成分为 SiO_2 ,与水泥有良好的相容性^[2]. 机制砂表面粗糙、多棱角使其有比天然砂更大的比表面积,对水的吸附能力更强,使混凝土拌合物的流动性能变差,相同流动度下比河砂需要更多用水量^[3];但是却有利于与水泥浆料的结合^[4],对力学性能有利,故使用机制砂时需要平衡两者的关系.

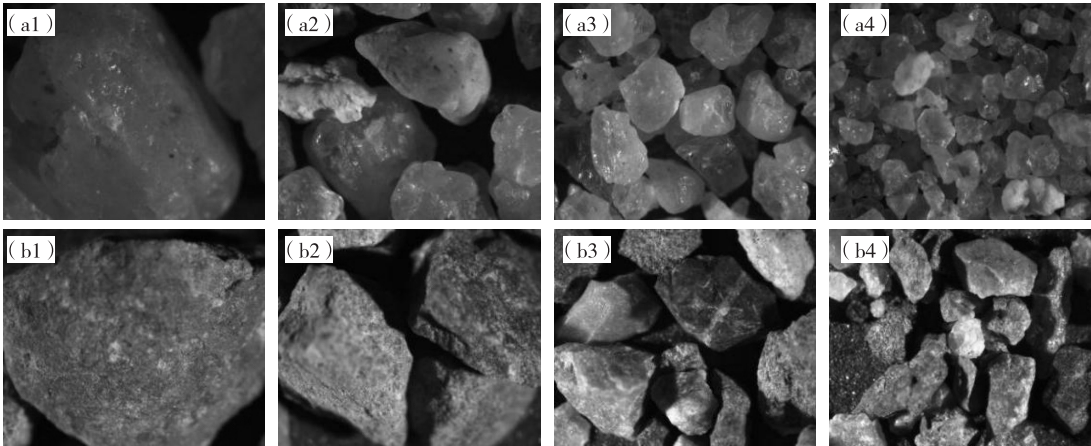


图 1 河砂与砂岩机制砂颗粒粒形

(a1)~(a4)分别为粒度 4.75~2.36,2.36~1.18,1.18~0.6 和 0.6~0.3 mm 的河砂;(b1)~(b4)分别为粒度 4.75~2.36,2.36~1.18,1.18~0.6 和 0.6~0.3 mm 的机制砂

Fig. 1 River sand and sandstone mechanism sand particle shape

(a1)~(a4) are river sands with particle sizes of 4.75~2.36, 2.36~1.18, 1.18~0.6 and 0.6~0.3 mm, respectively; (b1)~(b4) are Mechanism sands with particle sizes of 4.75~2.36, 2.36~1.18, 1.18~0.6 and 0.6~0.3 mm.

2.1.2 砂岩机制砂的级配

生产机制砂过程中可调控其颗粒级配,使其质量可控,这是机制砂相较于河砂的优势所在,砂的颗粒级配越好,堆积更紧密,空隙率越小^[5],拌制混凝土时需水量越少,达到相同流动度要求下可减少混凝土的用水量,使混凝土微观结构越致密,可提高混凝土强度和耐久性能.不同的生产工艺或生产控制

不到位,会影响机制砂的级配.

表 4 比较了河砂与 a、b 和 c 三个机制砂试样的级配.由表 4 可知,与河砂相比,机制砂中大于 1.18 mm 和小于 0.15 mm 的颗粒含量较多,而 0.60~0.15 mm 的颗粒含量较少,表现出“两头大中间小”的级配.

表 4 砂的颗粒级配和细度模数

Table 4 Particle gradation and fineness modulus of sand

编号	累计筛余/%						细度模数
	4.75mm	2.36mm	1.18mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm	
天然砂	1.4	11.4	25.4	50.2	86.6	98.2	2.7
机制砂 a	0.6	12.8	30.7	51.9	76.9	89.4	2.6
机制砂 b	2.0	23.5	39.7	58.5	78.2	87.8	2.8
机制砂 c	0.4	31.4	47.8	60.6	72.2	84.8	3.1
II 区砂技术要求	10~0	25~0	50~10	70~41	92~70	94~80	—

2.1.3 砂岩机制砂的石粉含量

砂中粒径小于 75 μm 的颗粒,在河砂中为含泥量,在机制砂中主要是石粉.众所周知,若河砂中含泥量偏高,由于泥粉吸水,吸附减水剂能力强,体积稳定性差,对混凝土强度尤其是抗拉强度、干缩、徐变及耐久性能等都会产生不利的影响.但机制砂中

石粉细颗粒的作用有所不同,石粉起到微细集料的作用,可以减少混凝土的孔隙,形成致密结构,从而提高混凝土强度和耐久性,所以一定的石粉含量是有利的,故国家标准《建设用砂》GB/T14684 的 2011 版中对机制砂的石粉含量限定值比 2001 版放宽了,为不大于 10%.

河砂和机制砂的空隙率和石粉含量列于表 5。由表 5 可知,三种机制砂的石粉含量在 3%~7.5% 范围不等,在生产过程中可以调控,建议石粉含量在 5%~10% 范围。

级配不佳,砂的堆积空隙率会增大,对比三种级配不同的机制砂,由表 5 还可以发现,机制砂 a 的堆积空隙率最大为 44%,即细集料颗粒间堆积密实度低,对新拌混凝土的工作性能不利,需要增加水泥浆

的用量。

从以上对砂岩机制砂颗粒特性的分析可知,其颗粒表面粗糙、棱角较多,偏于“两头大中间小”的级配,细颗粒石粉含量相对较多,这些均会增大其需水性,使混凝土的流动性能变差,表 6 参考标准《水泥胶砂流动度测试方法》,对河砂、机制砂配制的砂浆流动度与用水量进行比较。

表 5 砂的空隙率和石粉含量

Table 5 Sandporosity ratio and stone powder content				
编号	表观密度/(kg·m ⁻³)	堆积密度/(kg·m ⁻³)	空隙率/%	石粉/泥含量/%
天然砂	2620	1590	39	0.6
机制砂 a	2650	1480	44	3.1
机制砂 b	2650	1520	43	7.5
机制砂 c	2650	1610	39	5.2

表 6 河砂与机制砂配制的砂浆流动度与用水量比较

Table 6 Comparison of mortar fluidity and water consumption in river sand and machined sand				
项目	砂的类别	砂浆跳桌扩展/mm	流动度比/%	用水量比/%
对比砂浆	河砂	218	100	100
相同用水量下的流 动度比	机制砂 a	148	68	100
	机制砂 c	170	78	100
达到相同流动度时 的用水量比	机制砂 a	218	100	122
	机制砂 c	218	100	113

由表 6 可以看出,与河砂相比,相同用水量下机制砂配制的砂浆的流动度较差,流动度比在 70%~80% 左右;而要达到相同流动度,机制砂配制的砂浆用水量要高出 13%~22%,可以预见拌制混凝土时也会增加混凝土的用水量. 建议生产时调控机制砂的级配及石粉含量,将砂浆的用水量比控制在 120% 以内。

2.2 砂岩机制砂混凝土的性能

选取堆积空隙率与河砂相近的机制砂 c 配制混凝土,探讨砂岩机制砂对混凝土性能及混凝土微观结构的影响。

2.2.1 混凝土的性能

按照表 2 配制的 A、B 和 C 三组混凝土的工作性能、力学性能、抗氯离子渗透性能的结果如图 2 至图 4 所示。

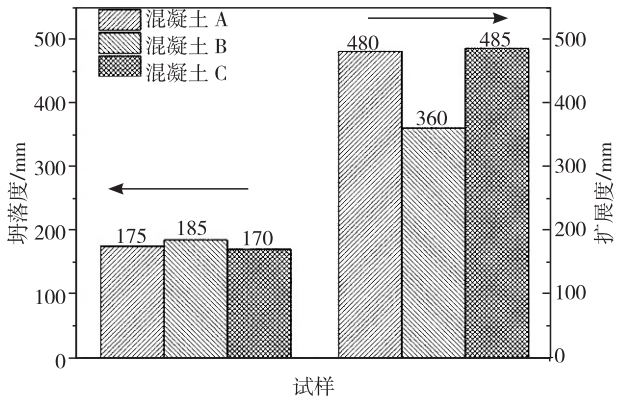


图 2 河砂与机制砂混凝土的工作性能

Fig. 2 Performance of river sand and machined sand concrete

从图 2 可见,相同配合比时以机制砂替代河砂,混凝土 A 和 B 的坍落度差异不大,但扩展度分别为

480 和 360 mm,差异较大.这是由于坍落时重力作用较大,坍落速率较快,差异体现不出来,而坍落后继续扩展流动,颗粒粒形对流动阻力的影响就体现出来,机制砂混凝土的扩展度更小.而经过配合比优化设计并适量增加减水剂用量的混凝土 C,可达到与河砂配制的混凝土相同的工作性能.

从图 3 可以看出,相同配合比下以机制砂替代河砂时,机制砂混凝土 B 比河砂混凝土 A 的 7 和 28 天的抗压强度均有较大程度地提高,表明机制砂由于表面粗糙棱角多,粘结能力强,提高混凝土的强度的作用明显.以河砂及机制砂设计相同强度等级混凝土时,集灰比有所增大,水泥用量有所减少,可以节约成本.实测机制砂混凝土 7 天强度仍比河砂混凝土要高,这是因为集灰比增大,集料增多,表面积增加,吸收了部分润湿水,降低了有效水灰比,使水泥浆体密实;同时水泥浆数量减少,混凝土内的总孔隙体积减少所致.而 28 天机制砂混凝土的强度与河砂混凝土相当.

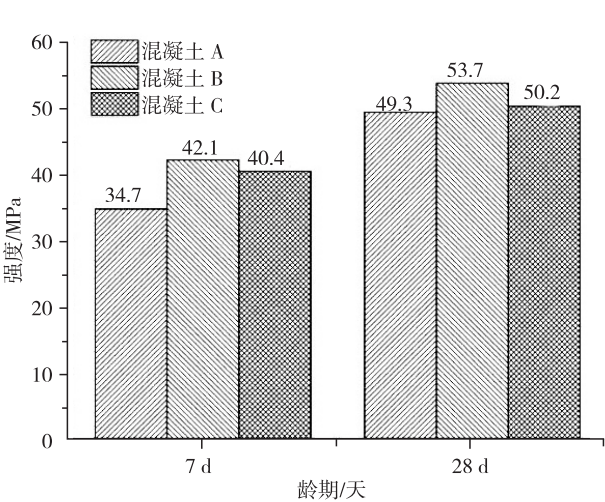


图 3 河砂与机制砂混凝土的抗压强度

Fig. 3 Compressive strength of river sand and machined sand concrete

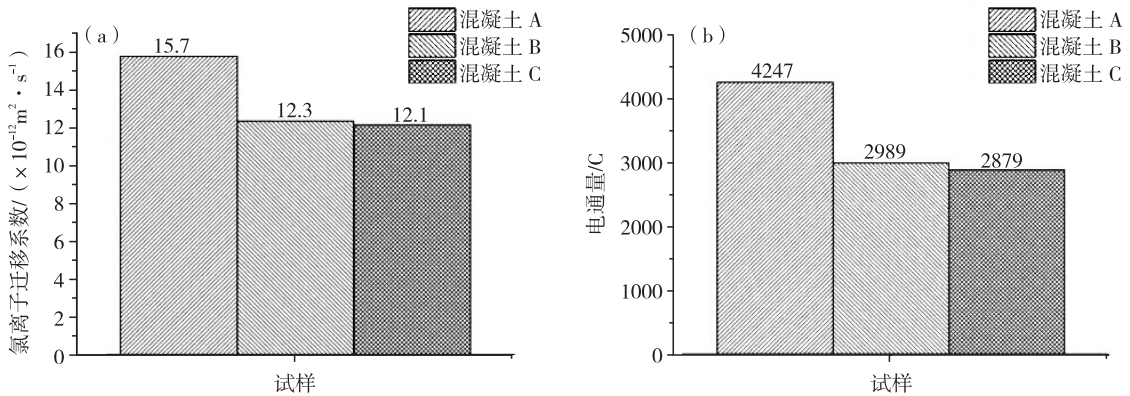


图 4 河砂与机制砂混凝土的抗氯离子渗透性能

(a)RCM 法;(b)电通量法

Fig. 4 Resistance to chloride ion penetration of river sand andmachined sand concrete

(a) RCM method;(b) electric flux method

从图 4 可见,无论是相同配合比下以机制砂替代河砂,还是经配合比设计为相同强度等级的河砂混凝土与机制砂混凝土,机制砂混凝土的 RCM 法氯离子迁移系数和电通量都要小于河砂混凝土,即机制砂混凝土的抗氯离子渗透性能更好.这是因为选取的机制砂 C 的堆积空隙率与河砂相同,相同配合比下,由于机制砂的粘结能力更强,石粉含量更多,有利于提高混凝土的密实度^[6].而相同设计强度等级下,机制砂混凝土配合比的集灰比更大,如前文所述会使混凝土内的总孔隙体积减少.

2. 2. 2 混凝土的微观结构

通过扫描电镜对 A 和 B 两组混凝土进行微观形貌分析,如图 5 所示.从图 5 可以明显看出,河砂混凝土中的砂粒与水泥浆的粘结力不够强,在抽真空制样过程中砂粒与水泥浆之间形成裂缝,而机制砂混凝土中的砂粒与水泥浆结合得非常紧密,这表现在宏观性能中更高的强度与抗渗性能^[7].

对 A 和 B 两种混凝土进行压汞法测试其孔结构,结果如表 7 和图 6 所示.

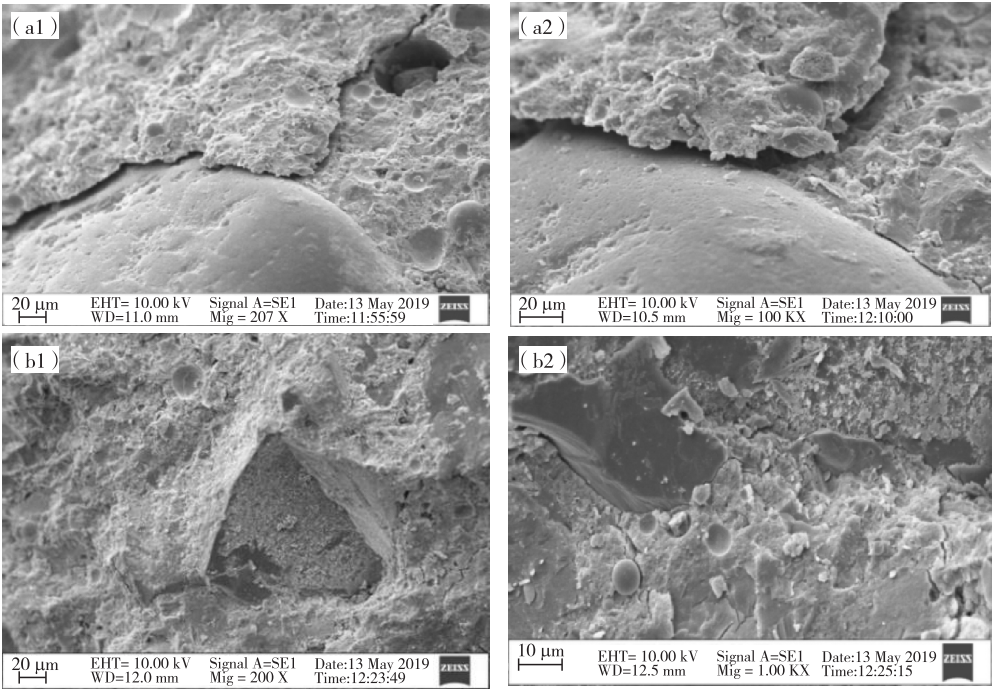


图 5 河砂和机制砂混凝土的扫描电镜照片

(a1)~(a2)河砂;(b1)~(b2)机制砂

Fig. 5 Scanning electron micrograph of river sand and machined sand concrete

(a1)~(a2) river sand; (b1)~(b2) machine sand

表 7 混凝土孔径分布

Table 7 Concrete pore size distribution

试样	平均孔径/nm	孔隙率/%	孔径(>10000nm)	孔径(100~10000nm)	孔径(0~100nm)
			占比/%	占比/%	占比/%
混凝土 A	20.4	18.5	3.2	19.5	77.3
混凝土 B	17.7	14.6	3.6%	15.4%	81.0

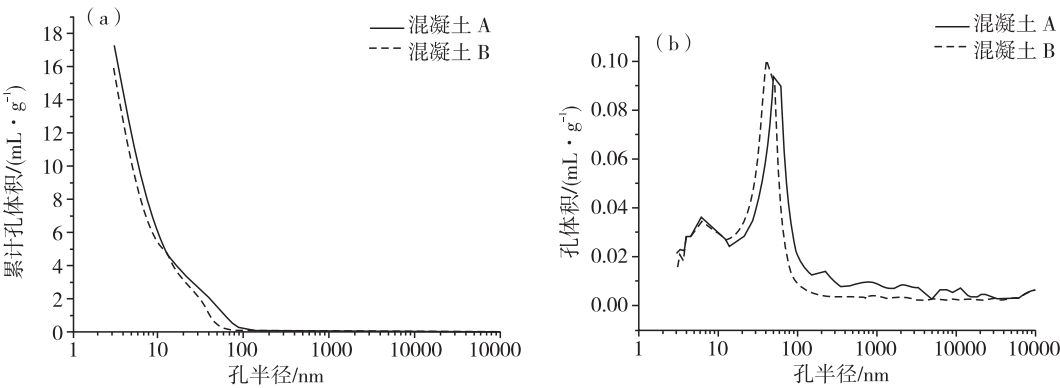


图 6 河砂与机制砂混凝土的孔结构

(a)累计孔体积曲线;(b)孔径分布曲线

Fig. 6 Pore structure of river sand and machined sand concrete

(a) cumulative pore volume curve; (b) pore size distribution curve

由表 7 可以看出:相同配合比下,河砂混凝土的孔隙率为 18.5%,机制砂混凝土的孔隙率为 14.6%,孔隙率越低其结构更加致密,宏观上表现出更高的抗压强度,与抗压强度试验结果相一致;机制砂混凝土的平均孔径为 17.7 nm,略低于河砂混凝土的 20.4 nm.

混凝土中 0~100 nm 和 100~10000 nm 的孔隙是影响离子渗透的主要因素^[8]. 从图 6 可见,机制砂混凝土中影响离子渗透的孔隙的绝对体积均小于河砂混凝土,且机制砂混凝土的平均孔径也低于河

砂混凝土,故其抗氯离子渗透性能更好.

2.3 砂岩机制砂混凝土在实际工程中的试用

上述研究表明,采用与河砂质量相近的砂岩机制砂配制的强度等级为 C35 的混凝土,其各项性能均能达到设计要求. 在此基础上,针对广州地铁实际工程,采用机制砂配制了不同强度等级的混凝土,验证其配合比及混凝土性能,并在地铁工程中进行试用. 表 8 为采用某混凝土搅拌站的实际原材料设计的机制砂混凝土配合比,表 9 为混凝土各项性能.

表 8 实际工程用砂岩机制砂混凝土配合比
Table 8 Sandstone machined sand mix ratio for engineering projects

强度等级	水泥:砂:石:水:粉煤灰:外加剂	水胶比	砂率
C35	1:2.31:3.46:0.57:0.32:0.01	0.43	0.40
C30	1:2.57:3.69:0.61:0.33:0.01	0.46	0.41
C25	1:3.03:4.18:0.71:0.37:0.01	0.51	0.42
C20	1:3.34:4.44:0.77:0.41:0.01	0.54	0.43

表 9 实际工程用砂岩机制砂混凝土性能
Table 9 Sandstone performance of sandstone in engineering projects

设计 标号	实测强度/MPa		坍落度/扩展度/mm			28d 电通量	28d 氯离子迁移系数
	7d	28d	初始	1 h	2 h	/C	/($\times 10^{12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
C35	42.9	61.5	155/360	140/375	130/330	2729	13.6
C30	39.1	57.5	160/430	155/410	158/380	3735	15.9
C25	31.7	47.1	165/355	150/330	140/320	4233	17.3
C20	27.5	42.3	165/465	135/450	130/355	4792	24.0

由表 9 结果可知:采用机制砂配制出不同强度等级的混凝土,其工作性能均在设计坍落度 150~180 mm 的范围,满足了现场施工的正常使用;混凝土的 7d 与 28d 抗压强度均达到混凝土配制强度要求;混凝土的电通量与 RCM 法氯离子迁移系数与图 4 中河砂混凝土的结果相近.

3 结 论

(1)砂岩机制砂的颗粒特性为表面粗糙、棱角较多,偏于“两头大中间小”的级配,石粉含量相对较多,这些均会增大其需水性,使混凝土的流动性能变差. 建议生产时调控机制砂的级配及石粉含量,与河砂配制的砂浆相比将用水量比控制在 120%以内.

(2)采用与河砂堆积空隙率相同的砂岩机制砂配制 C35 强度等级的混凝土,相同配合比下以机制砂取代河砂,混凝土的坍落扩展度变小,但 7 d 和 28 d 抗压强度明显更高;经配合比设计为相同强度等级的混凝土,机制砂混凝土的集灰比有所增大,水泥用量有所减少,可节约成本,通过适当增加减水剂掺量机制砂混凝土的工作性能与河砂混凝土相同,机制砂混凝土的 7 d 抗压强度更高,28 d 抗压强度与河砂混凝土相当.

(3)机制砂混凝土中砂粒与水泥浆结合得非常紧密,同时混凝土中孔隙率下降,孔径细化,平均孔径减小,混凝土微观结构更加致密,使得机制砂混凝土有更高的强度与抗氯离子渗性能.

(4)针对广州地铁实际工程,采用机制砂配制

C20~C35 不同强度等级的混凝土,其各项性均能指标达到设计要求.

参考文献:

[1] 徐健,蔡基伟,王稷良,等. 人工砂与人工砂混凝土的研究现状[J]. 国外建材科技,2004(3):20-24.
[2] 蒋正武,潘峰,吴建林,等. 机制砂参数对混凝土性能的影响研究[J]. 混凝土世界. 2011(8):30-32
[3] 张云龙,王静,吕翔. 机制砂对混凝土性能影响的研究现状[J]. 四川建,2017,43(9):13-14.

[4] 尹亚柳. 机制砂混凝土的性能与配合比研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.
[5] 季韬,李锋,庄一舟,等. 机制砂比表面积对混凝土性能的影响[J]. 混凝土,2011(2):80-82.
[6] 王稷良. 机制砂特性对混凝土性能的影响及机理研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2008.
[7] 王振军,沙爱民. 水泥混凝土浆体-集料界面区结构与性能[J]. 重庆建筑大学学报,2008,30(6):155-160
[8] 杜修力,金浏. 考虑孔隙及微裂纹影响的混凝土宏观力学特性研究[J]. 工程力学,2012,29(8):101-107.

Sand particles characteristics of sandstone mechanism and properties of prepared concrete

YAN Guangming, YIN Suhong, GUO Wenhao, LIU Peng LU Hui

School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641,China

Abstract: The grain characteristics, gradation and stone powder content of sandstone sand and its influence on sand water demand were investigated. The performance of sandstone mechanical sand concrete were discussed. The results show that compared with river sand, sandstone surface sand has a rougher sand surface and with more angular angles, which is biased towards the gradation of “two side large and middle small” and a relatively large amount of stone powder, all of which will increase the water demand and make the concrete flow performance deteriorated; the C35 strength grade concrete is prepared by using sandstone machine sand with the same porosity ratio in river sand. The work requirements can be satisfied by appropriately increasing the amount of water reducing agent, and the strength and chloride ion permeability resistance are better than river sand concrete. For practical projects, the C20-C35 concrete of different strength grades is prepared by machine sand, and its performance indexes meet the design requirements.

Key words: sandstone mechanism sand; particle characteristics; performance of formulated concrete