

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.08.006

机制砂 MB 值对路面混凝土抗盐冻性能的影响及机理研究

王稷良¹, 王在杭², 宋国林³, 杨志峰¹

(1. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088; 2. 云南云岭高速公路建设集团有限公司, 云南 昆明 650224;
3. 内蒙古路桥有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 针对天然砂资源越来越匮乏以及日益严重的路面混凝土盐冻破坏的问题, 为更合理地控制盐冻环境下机制砂的 MB 值, 采用外加泥粉调节机制砂 MB 值的方式, 系统研究了机制砂 MB 值变化对路面混凝土抗盐冻性能的影响。试验结果表明: 当 MB 值小于 1.4 时, 机制砂 MB 值对低强和高强混凝土的物理力学性能、抗盐冻性能均无明显的劣化影响; 但当 MB 值大于 1.4 时, 随着 MB 值的增大, 机制砂混凝土力学性能和抗盐冻剥蚀性能显著下降, 且低强混凝土的劣化幅度更加显著。另外, 结合微观测试方法, 揭示了泥粉劣化机制砂混凝土物理力学性能和抗盐冻剥蚀性能的机理。
关键词: 道路工程; 路面混凝土; 盐冻; MB 值; 机制砂; 水化

中图分类号: U414.101

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2016) 08-0031-06

Study on Effect of MB Value of Manufactured Sand on Salt-freeze Resistance of Pavement Concrete and Its Mechanism

WANG Ji-liang¹, WANG Zai-hang², SONG Guo-lin³, YANG Zhi-feng¹

(1. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China;
2. Yunnan Yunling Expressway Construction Group Co., Ltd., Kunming Yunnan 650224, China;
3. Inner Mongolia Roads & Bridges Co., Ltd., Hohhot Inner Mongolia 010051, China)

Abstract: In view of the increasingly serious lack of natural sand and the salt-freeze damage of pavement concrete, the impact of MB value change of manufactured sand on the salt-freeze resistance of pavement concrete is studied systematically by the method of adding clay powder to control the MB value of manufactured sand in the salt-freeze environment more reasonably. The experimental result shows that (1) when MB value is less than 1.4, the MB value of manufactured sand has no significant influence on the mechanical property and the salt-freeze resistance of low and high strength concrete; (2) when MB value is greater than 1.4, the mechanical property and the salt-freeze resistance of manufactured sand concrete degrade significantly with the increase of the MB value of manufactured sand, especially for the low strength concrete. In addition, the mechanism of the manufactured sand concrete's mechanical property and salt-freeze resistance degraded by the clay powder is studied through microscopic analysis method.

Key words: road engineering; pavement concrete; salt-freeze; MB value; manufactured sand; hydration

0 引言

MB 值是用于判定机制砂中粒径小于 75 μm 颗粒

的吸附性能的指标^[1]。通常, 机制砂中小于 75 μm 的颗粒被称为石粉, 而天然砂中 75 μm 以下的颗粒含量则被称为含泥量。二者虽然颗粒粒径基本相同,

收稿日期: 2015-06-10

基金项目: 交通运输部西部交通建设科技项目 (2011318223630)

作者简介: 王稷良 (1978-), 男, 河北香河人, 博士, 研究员. (jl.wang@rioh.cn)

但其性质确有着本质性的区别^[2]，首先，石粉为机制砂生产过程中的副产物，其物理化学性质与母岩完全相同，对混凝土性能的影响有利有弊，其含量受混凝土特性影响具有一个合理的范围^[3]。而天然砂中75 μm以下颗粒与机制砂则完全不同，其主要为夹杂在天然砂中的尘屑、淤泥和黏土颗粒^[4-5]，其对混凝土的性能只会产生负面影响，含量越低越好。但由于机制砂在生产过程中难免会带入部分山皮或夹泥，导致机制砂中75 μm以下部分含有一定量的泥粉^[6]。泥粉的作用与母岩岩性相同的石粉对混凝土性能的影响完全不同，如泥粉的存在可引起新拌混凝土用水量或外加剂用量的显著增加、阻碍水泥的正常水化反应，影响水泥石与骨料胶结作用的充分发展，致使硬化混凝土性能下降，加剧了混凝土耐久性下降的速度^[7]。为此国标《建设用砂》(GB/T 14684)规定混凝土用机制砂的MB值小于1.4，当MB值大于或等于1.4时，对机制砂中石粉含量的限制更加严格^[8]。

同时在北方寒冷地区，为防止公路上冰雪致滑引起的交通事故，保证道路交通正常运行，通常在

表1 水泥物理力学性能

Tab.1 Physical property of cement

项目	比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)	标准稠度/%	安定性	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
				初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
水泥	353	27.6	合格	209	267	6.5	9.4	36.1	54.8

(2) 集料

细集料为石灰岩机制砂，细度模数为3.01，石粉含量为6.9%，级配如图1所示。粗集料为4.75~26.5 mm连续级配石灰岩碎石，级配如图2所示。

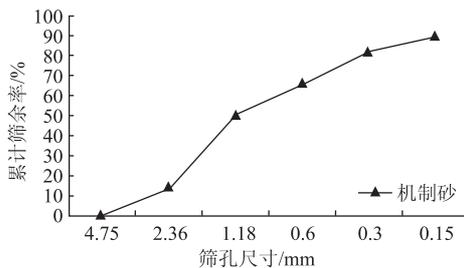


图1 机制砂的级配曲线

Fig.1 Grading curves of manufactured sand

(3) 石粉与泥粉

石粉为石灰岩机制砂中筛出石粉，粒径小于0.075 mm；泥粉为黏土颗粒经破碎，去除0.075 mm以上颗粒制成，其液限指数为42%，塑限指数为23%，液塑限指数为19%。

(4) 外加剂

路面撒除冰盐，但除冰盐将与冻融共同作用加剧混凝土的破坏，是一种最严酷的冻融破坏形式，其破坏程度和速率将比普通混凝土冻融大好几倍^[9]。我国北方寒冷地区应用机制砂取代河砂用于水泥混凝土路面需要解决的关键技术之一是机制砂路面水泥混凝土的抗盐冻性能，涉及到水泥混凝土路面的耐久性和安全性^[10]。

国内外对机制砂混凝土的研究主要集中在对石粉和岩性变化的影响研究^[11-12]，对MB值机制砂混凝土性能影响的研究较少，其中对机制砂MB值变化对混凝土抗盐冻性能的研究更是鲜见报道。本文将系统研究机制砂MB值变化对混凝土抗盐冻特性的影响，以揭示机制砂MB值变化对混凝土盐冻剥蚀性能的影响规律，以期为相关标准的制订提供参考依据。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

(1) 水泥

北京某水泥有限公司生产的42.5级普通硅酸盐水泥，其物理力学性能如表1所示。

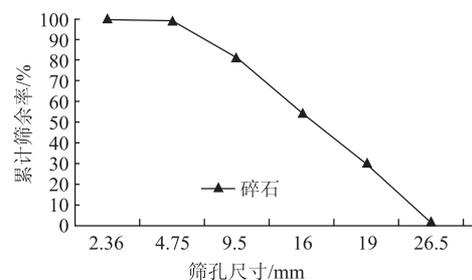


图2 碎石的级配曲线

Fig.2 Grading curves of crushed stone

减水剂为萘系高效减水剂。

1.2 试验方法

(1) 混凝土抗压强度

依据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T50081—2002)规定进行测试，试件尺寸为150 mm×150 mm×150 mm立方体。

(2) 盐冻测试

盐冻测试采用单面盐冻试验法。测试时试件单面浸泡在溶液中4~6 mm进行盐冻循环试验，盐冻试验介质为3%的NaCl溶液。测试试件为φ250 mm×

75 mm 圆台,测试面在成型时用木抹子进行处理。试样标养 24 d 后,在水中浸泡 4 d 待测。试件测试过程中,每个冻融循环在 8 h 内完成(测试温度范围 $-20 \sim +20 \text{ }^{\circ}\text{C}$)。每 5 次冻融循环后收集盐冻剥蚀物,并更换盐溶液。剥落量指盐冻循环前后单位面积的质量损失(单位为 g/m^2)^[13]。

(3) 水泥水化电阻率测定

采用香港科技大学李宗津等发明的无电极电阻率测定仪^[14]。测定环境温度为 $(20 \pm 2) \text{ }^{\circ}\text{C}$,采用水

泥胶砂试验搅拌机搅拌,搅拌与装模时间控制为 7 min。每间隔 1 min 采集一个数据,至 24 h 结束。

2 试验结果与分析

2.1 机制砂 MB 值对路面混凝土力学性能的影响

试验采用外加泥粉的方法调节机制砂 MB 值,即人工筛出石粉,添加泥粉的方式,调整机制砂的 MB 值,用以研究机制砂 MB 值变化对路面混凝土性能的影响。MB 值的调节方式见表 2。

表 2 机制砂 MB 值对路面混凝土力学性能的影响

Tab. 2 Effect of MB value of manufactured sand on mechanical property of pavement concrete

编号	强度等级	配合比特征			单方混凝土材料用量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$					28 d 强度/MPa	
		MB 值	泥粉含量/%	石粉含量/%	水泥	水	机制砂	碎石	减水剂	抗折	抗压
1	C30	0.35	0	7	350	175	701	1 194	1.75	6.12	42.3
2		0.70	1	6	350	175	701	1 194	1.75	6.03	43.1
3		1.10	2	5	350	175	701	1 194	1.93	6.32	45.8
4		1.45	3	4	350	175	701	1 194	1.93	6.35	44.2
5		1.80	4	3	350	175	701	1 194	2.10	6.21	43.8
6		2.15	5	2	350	175	701	1 194	2.28	5.69	44.1
7		2.50	6	1	350	175	701	1 194	2.45	5.05	40.7
8	C50	0.35	0	7	380	152	710	1 208	2.66	8.02	59.0
9		0.70	1	6	380	152	710	1 208	2.66	8.09	63.2
10		1.10	2	5	380	152	710	1 208	2.85	7.91	62.1
11		1.45	3	4	380	152	710	1 208	3.04	7.64	60.2
12		1.80	4	3	380	152	710	1 208	3.04	7.24	61.4
13		2.15	5	2	380	152	710	1 208	3.23	6.12	63.2
14		2.50	6	1	380	152	710	1 208	3.42	5.41	60.3

从表 2 结果可以看出,随着机制砂 MB 值的增大,C30 等级路面混凝土无论是抗压强度还是抗折强度均呈现出一个先增长再降低的趋势,即抗压强度约在 MB 值为 1.10~1.45 时(即泥粉含量在 2%~3%),出现一个最大值。但当 MB 值(即泥粉含量的继续提高)逐渐增大时,路面混凝土的抗压强度呈现逐渐降低趋势,但降低的幅度不显著。C30 等级的路面混凝土抗折强度的变化规律与抗压强度相似,但随着机制砂 MB 值的逐渐增大,混凝土抗折强度的降低幅度更加显著。C30 强度等级混凝土力学性能出现这种变化规律可能是由于:当混凝土强度较低时,尤其是机制砂混凝土,离析、泌水的倾向较为明显,混凝土中的自由水易于富集在粗集料表面,弱化了混凝土的界面过渡区,降低了混凝土的力学性能。当机制砂中含有一定的泥粉时(即 MB 值提高),改善了新拌混凝土的保水性,自由水在粗集料表面富集的状况得到了改善,提高了硬化混凝土界面过渡区性能,在一定程度上改善了路面

混凝土的力学性能。但从另一方面来讲,机制砂中泥粉含量的提高,妨碍了水泥水化的正常反应,降低了水泥石的强度,且随着泥粉含量的提高,混凝土内部的大量自由水被泥粉所吸附,硬化后内部形成大量的微小裂纹,降低了机制砂混凝土的力学性能。路面机制砂混凝土的力学性能受 MB 值的这两种作用共同影响,当 MB 值较小时(即泥粉含量较低时),MB 值的增强效应较为明显,混凝土的力学性能呈现增强趋势;但当 MB 值较大时,泥粉的劣化作用更加显著,导致混凝土力学性能呈现下降趋势。两种作用效果共同影响了混凝土的力学性能,但影响的效果随着 MB 值的变化呈现不同的状态。

另外,对于混凝土而言,混凝土的抗折强度受内部微裂纹的影响较抗压强度更加显著,这也是混凝土抗折强度对 MB 值变化更加敏感的原因。

表 2 结果还表明,机制砂 MB 值对 C50 强度等级混凝土力学性能的变化趋势与 C30 强度等级混凝土的基本相同。但从 C50 机制砂混凝土的抗压与抗

折强度变化情况可以看出, MB 值变化对 C50 混凝土抗压强度影响较弱, 即波动幅度较小, 但对混凝土的抗折强度影响非常显著, 混凝土抗折强度最高降低达 15%, 且 C50 混凝土抗折强度降低幅度明显高于 C30 混凝土。对于强度等级较高的 C50 混凝土而言, 由于高强度等级混凝土胶凝材料用量较高, 水胶比较低, MB 值改善混凝土保水作用在新拌混凝土中不再明显, 而 MB 值提高所导致的阻碍水泥水化的效应则明显放大, 即表现为高强度等级混凝土随 MB 值增大劣化效果更加显著。

2.2 机制砂 MB 值对路面混凝土抗盐冻性能的影响

试验所采用配合比见表 2。

从图 3 可以看出, 对于 C30 等级的混凝土而言, 当机制砂 MB 值低于 1.45 时 (即泥粉含量低于 3%), 机制砂 MB 值的变化对路面混凝土抗盐冻性能基本没有影响, 甚至在 MB 值较低时, 抗盐冻剥蚀性能还略有提高; 而当机制砂 MB 值大于 1.80 时 (即当泥粉含量高于 4%), 机制砂路面混凝土的抗盐冻剥蚀性能迅速降低, 其抗盐冻剥蚀量增加了 50% 以上。为进一步验证盐冻对机制砂混凝土破坏的严重性, 表 3 列出了在普通冻融循环条件下 MB 值对机制砂混凝土性能的影响。随着机制砂 MB 值的逐渐增大, 机制砂路面混凝土的抗冻融性能也出现了明显的降低趋势。对于 C30 混凝土, 当 MB 值不大于 1.45 时, 路面混凝土的抗冻融等级均超过了 F100; 但当 MB 值大于 1.45 时 (即泥粉含量超过 3%), 路面混凝土的抗冻等级呈现显著的下降趋势, 其抗冻等级仅能达到 F100 级及 F75 级。但与盐冻

(盐冻测试为 30 次冻融循环) 破坏相比, 普通的冻融循环破坏要慢得多, 且 50 次冻融循环内, 混凝土动弹性模量降低非常少, 即在冻融过程中其混凝土内部结构损伤不明显, 混凝土破坏主要为表面的剥蚀破坏。

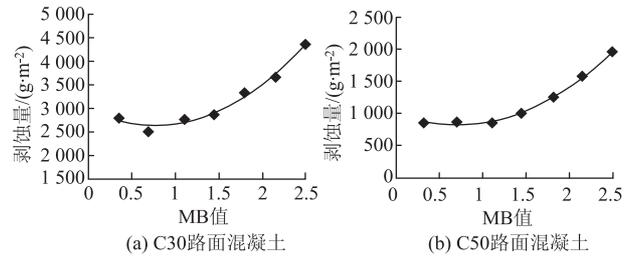


图 3 机制砂 MB 值对路面混凝土抗盐冻剥蚀性能的影响

Fig. 3 Effect of MB value of manufactured sand on salt-freeze resistance of pavement concrete

机制砂混凝土随 MB 值提高, 抗盐冻剥蚀性能下降的主要原因可能与 MB 值对力学性能影响的机理相同, 即对于低强度等级的 C30 混凝土, 泥粉的存在提高了机制砂混凝土的保水性, 改善了新拌机制砂混凝土的离析、泌水倾向, 进而提高了低强度等级混凝土界面过渡区的性能, 提升了路面混凝土表面结构的致密性, 也改善了路面混凝土的抗盐冻性能。但随着机制砂中 MB 值 (机制砂中泥粉含量的提高) 逐渐增大, 泥粉对水泥的水化阻碍作用进一步增强, 也妨碍了水泥石与集料之间黏结强度的提高, 因此当机制砂中 MB 值过高时, 机制砂混凝土的抗盐冻剥蚀性能呈现显著下降的趋势。

表 3 机制砂 MB 值对路面混凝土抗盐冻性能的影响

Tab. 3 Effect of MB value of manufactured sand on salt-freeze resistance of pavement concrete

编号	强度等级	配合比特征			相对动弹模量/%					抗冻等级
		MB 值	泥粉含量/%	石粉含量/%	50	75	100	150	200	
1	C30	0.35	0	7	97.2	89.2	80.3	—	—	> F100
2		0.70	1	6	98.1	89.1	85.5	—	—	> F100
3		1.10	2	5	98.9	91.1	79.4	—	—	> F100
4		1.45	3	4	95.3	87.6	75.1	—	—	> F100
5		1.80	4	3	98.6	73.2	63.1	—	—	F100
6		2.15	5	2	91.4	72.1	53.3	—	—	F75
7		2.50	6	1	85.2	65.9	36.7	—	—	F75
8	C50	0.35	0	7	97.3	—	98.5	98.1	97.5	> F200
9		0.70	1	6	98.1	—	96.8	98.3	98.5	> F200
10		1.10	2	5	98.2	—	97.7	96.6	91.2	> F200
11		1.45	3	4	96.4	—	96.8	97.2	76.9	> F200
12		1.80	4	3	95.3	—	97.2	91.2	65.7	F200
13		2.15	5	2	97.5	—	91.8	85.2	53.6	F150
14		2.50	6	1	97.1	—	81.2	71.3	43.2	F150

另外, 从图 3 结果还可以看出, 对于 C50 机制

砂混凝土而言, 随着机制砂 MB 值的提高, 机制砂

混凝土的抗盐冻性能呈现明显的降低趋势, 尤其是当机制砂 MB 值大于 1.45 时, 机制砂混凝土的抗盐冻性能呈现更加明显的劣化趋势。与低强度等级的 C30 混凝土相比, 机制砂 MB 值变化对盐冻破坏的改善作用明显减弱了。在高强度等级混凝土中, 由于胶凝材料用量较高, 水胶比较低, 新拌混凝土不再需要泥粉的保水作用, 即泥粉的吸水性不能再形成优势, 但其影响水泥水化的作用则更显突出。

同时, 对于高强度等级机制砂混凝土而言, 混凝土的抗冻融特性随机制砂 MB 值变化趋势与低强度等级混凝土相似, 即 MB 值大于 1.45 (泥粉含量约为 3%) 时, 混凝土的抗冻融性能也出现了明显的劣化趋势。但由于 C50 混凝土强度较高, 抵抗冻融破坏能力更强, 其抗冻等级也相应略高。

3 机理分析

3.1 泥粉对水泥水化电阻率的影响

为进一步揭示机制砂 MB 值变化对混凝土性能的影响, 本文采用无电极电阻率测试方法研究泥粉存在对水泥水化历程的影响。测试时, 泥粉的掺量为 3% (相对于水泥的质量), 水胶比为 0.4。

从图 4 结果可以看出, 泥粉会对水泥的水化历程产生较为显著的影响。泥粉的加入使水泥水化初期的电阻率略有增大, 即水泥水化过程中孔隙溶液的离子浓度降低。但图 4 (b) 结果表明, 掺加泥粉的水泥浆体溶解期结束的时间并未明显提前。这可能是由于泥粉的疏松多孔结构, 对自由水的吸附作用非常显著, 导致水泥浆体中的自由水量降低, 这可对水泥水化过程中的溶解期结束有一定促进作用, 但由于泥粉对水吸附作用所产生的促进作用与泥粉对水泥水化过程中的阻碍作用基本可以相抵, 因此电阻率测试结果呈现出加入泥粉后水泥浆体溶解期结束的时间与未掺加泥粉的水泥浆体溶解期结束的时间基本相同的现象。另外, 图 4 (a) 的结果显示随着泥粉的加入水泥水化过程中的诱导期与凝结期

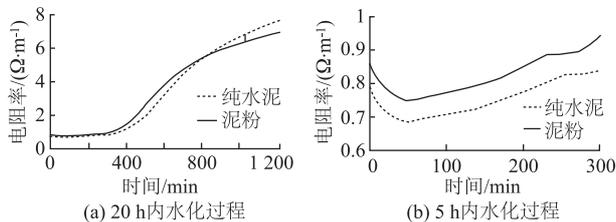


图 4 泥粉对水泥水化过程的影响

Fig. 4 Effect of clay powder on hydration process of cement

略有提前, 但当凝结期结束后, 掺加泥粉的水泥浆体的电阻率明显低于纯水泥浆体的, 水泥浆体的硬化期发展明显受到阻碍。其主要原因可能还是由于泥粉对自由水的吸附作用造成的, 吸附作用促进了诱导期与凝结期的提前, 但由于泥粉对水泥水化的阻碍作用, 导致了水泥浆体硬化期发展速度的变缓。

3.2 泥粉对水泥水化产物的影响

水泥水化产物的研究采用 XRD 和 SEM 两种微观测试方法。试验样品采用水胶比为 0.4 的水泥净浆, 泥粉掺量为 3%。

从图 5 的 XRD 与 SEM 图中可以看出, 当泥粉加入水泥浆体后, 水泥浆体的 1 d 水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 数量显著降低。在未掺加泥粉的纯水泥浆体中, 可以看到大量针状钙矾石和结晶完好的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 但随着泥粉的加入, 水泥水化样品中钙矾石和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体显著减少, 难以找到结晶完好的钙矾石和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体, 进一步证明了泥粉对水泥水化的阻碍作用。

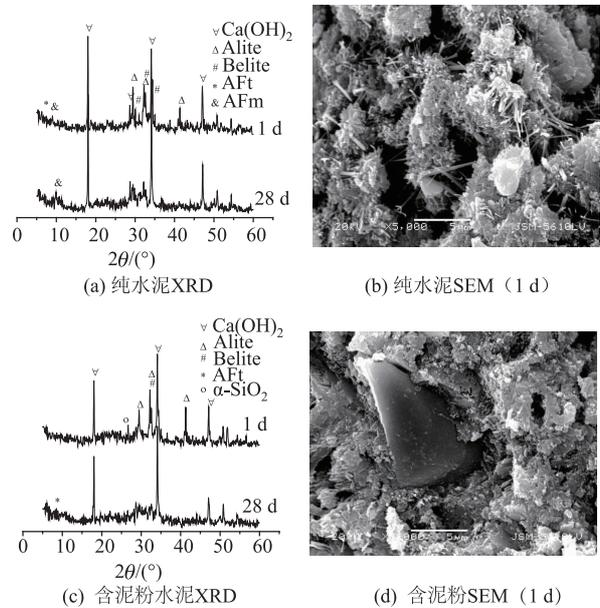


图 5 泥粉对水泥水化产物的影响

Fig. 5 Effect of clay powder on hydrated products of cement

4 结论

(1) 对于低强度的 C30 混凝土而言, 适当的 MB 值可以改善混凝土力学性能, 当机制砂 MB 值为 1.1 ~ 1.45 时, 机制砂混凝土具有最好的抗压强度和抗折强度, 当 MB 值过大时, 混凝土抗折强度下降明显; 对于高强混凝土而言, 机制砂 MB 值变化对混凝土抗压强度影响不明显, 但抗折强度随着 MB

值增大下降显著。

(2) 随着机制砂 MB 值的提高, 无论是高强混凝土还是低强混凝土, 抗冻耐久性下降显著。

(3) 当机制砂 MB 值低于 1.45 时, 机制砂 MB 值的变化对路面混凝土抗盐冻性能基本没有影响, 甚至在低强度等级混凝土中, 当 MB 值较低时, 对混凝土抗盐冻性能还有一定的改善作用。但当机制砂 MB 值大于 1.80, 机制砂混凝土的抗盐冻剥蚀性能迅速降低。

(4) 机制砂的 MB 值 (泥粉) 影响水泥的水化进程, 不利于水泥石强度的形成和发展, 不利于机制砂混凝土抗盐冻剥蚀性能的改善。

机制砂的 MB 值影响水泥的水化进程, 劣化混凝土物理力学性能和抗冻融性能, 降低了机制砂混凝土的抗盐冻剥蚀性能。建议在配制抗盐冻机制砂混凝土时应严格控制机制砂 MB 值小于 1.4。

参考文献:

References:

- [1] GB/T 14684—2011, 建设用砂 [S].
GB/T 14684—2011, Sand for Construction [S].
- [2] 李北星, 柯国炬, 赵尚传, 等. 机制砂混凝土路用性能的研究 [J]. 建筑材料学报, 2010, 13 (4): 529 - 534.
LI Bei-xing, KE Guo-ju, ZHAO Shang-chuan, et al. Research on Pavement Performance of Manufactured Sand Concrete [J]. Journal of Building Materials, 2010, 13 (4): 529 - 534.
- [3] 王雨利, 王卫东, 周明凯, 等. 中低强度机制砂混凝土石粉含量确定的研究 [J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34 (5): 154 - 158.
WANG Yu-li, WANG Wei-dong, ZHOU Ming-kai, et al. Determination Analysis of Content of Aggregate Micro Fines of Middle and Low Compressive Strength Manufactured Fine Aggregate Concrete [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34 (5): 154 - 158.
- [4] 张承志. 商品混凝土 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
ZHANG Cheng-zhi. Ready-mixed Concrete [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [5] YOOL A I G, LEES T P, FRIED A. Improvements to the Methylene Blue Dye Test for Harmful Clay in Aggregate for Concrete and Mortar [J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28 (10): 1417 - 1428.
- [6] WANG Ji-liang, NIU Kai-min, TIAN Bo, et al. Effect of Methylene Blue (MB) -value of Manufactured Sand on the Durability of Concretes [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition, 2012, 27 (6): 1160 - 1164.
- [7] 李进辉, 李兆松, 刘雨, 等. 碎石含泥量对海工高性能混凝土性能影响试验研究 [J]. 混凝土, 2013 (7): 127 - 130.
LI Jin-hui, LI Zhao-song, LIU Yu, et al. Investigated on Effect of Clay Content in Crushed Stone on Properties of High Performance Marine Concrete [J]. Concrete, 2013 (7): 127 - 130.
- [8] 李北星, 周明凯, 田建平, 等. 石粉与粉煤灰对 C60 机制砂高性能混凝土性能的影响 [J]. 建筑材料学报, 2006, 9 (4): 381 - 387.
LI Bei-xing, ZHOU Ming-kai, TIAN Jian-ping, et al. Effect of Stone Dust and Fly Ash on Properties of C60 High Performance Concrete Containing Manufactured Sand [J]. Journal of Building Materials, 2006, 9 (4): 381 - 387.
- [9] 李中华, 巴恒静. 道路混凝土抗盐冻性能的研究 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2008, 40 (5): 79 - 83.
LI Zhong-hua, BA Heng-jing. Study on the Freeze-deicing Salt Resistance of the Pavement Concrete [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2008, 40 (5): 79 - 83.
- [10] 张国强, 覃维祖. 混凝土抗盐冻剥蚀试验方法的研究 [J]. 公路交通科技, 2000, 17 (2): 5 - 8.
ZHANG Guo-qiang, QIN Wei-zu. Research on Test Method for Scaling Resistance of Deicing Chemicals [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2000, 17 (2): 5 - 8.
- [11] UCHIKAWA H, HANEHARA S, HIRAO H. Influence of Microstructure on the Physical Properties of Concrete Prepared by Substituting Mineral Powder for Part of Fine Aggregate [J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26 (1): 101 - 111.
- [12] BONAVETTI V L, IRASSAR E F. The Effect of Stone Dust Content in Sand [J]. Cement and Concrete Research, 1994, 24 (3): 580 - 590.
- [13] 王稷良, 申力涛, 牛开民. 路面水泥混凝土抗盐冻性能的影响因素 [J]. 公路交通科技, 2013, 30 (10): 1 - 5.
WANG Ji-liang, SHEN Li-tao, NIU Kai-min. Influencing Factors of Deicer-salt Resistance of Pavement Cement Concrete [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30 (10): 1 - 5.
- [14] LI Zong-jin, WEI Xiao-sheng, LI Wen-lai. Preliminary Interpretation of Hydration Process of Portland Cement Using Resistivity Measurements [J]. ACI Materials Journal, 2003, 100 (3): 253 - 257.