

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.08.006

考虑石粉含量的机制砂混凝土配合比设计方法研究

赵尚传¹, 刘龙龙^{*1}, 刘忠凯², 王少鹏¹, 刘勇²

(1. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088; 2. 中海建筑有限公司, 广东 深圳 518057)

摘要:为解决高石粉含量的机制砂导致混凝土耐久性不足的问题,基于现有的混凝土配合比设计方法,将机制砂石粉含量作为配合比设计的一个参数,提出了根据机制砂石粉含量调节粗、细骨料比例的配合比设计方法。与原配合比设计方法相比,保持水胶比不变,从而有效保障其强度;保持骨料比例不变,有利于提升其耐久性。根据机制砂石粉含量调控机制砂用量,分析了部分或全部机制砂石粉替代胶凝材料的混凝土配合比设计方法对混凝土流动性、黏聚性、保水性能的影响。通过控制砂率和骨料各粒径比例不变,推导出配合比设计中机制砂和粗骨料的质量。试验结果表明:未考虑机制砂石粉含量的影响,或部分机制砂石粉作为胶凝材料的混凝土配合比设计方法忽略了石粉对混凝土性能的影响,得到的机制砂混凝土工作性能较差,容易离析;采用全部机制砂石粉尤其是高石粉含量的机制砂作为胶凝材料的混凝土配合比设计方法明显改善了混凝土的工作性能;提出的配合比设计方法能结合机制砂石粉的实际含量,保持水胶比和骨料比例不变,能保障混凝土工作性能和力学性能,充分发挥机制砂中石粉的作用,提升混凝土的耐久性能。

关键词: 道路工程; 配合比设计; 定量分析; 机制砂混凝土; 石粉; 工作性能

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2023) 08-0037-06

Study on Mix Design Method of Manufactured Sand Concrete Considering Stone Powder Content

ZHAO Shang-chuan¹, LIU Long-long^{*1}, LIU Zhong-kai², WANG Shao-peng², LIU Yong²

(1. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China;

2. China Overseas Construction Co., Ltd., Shenzhen Guangdong 518057, China)

Abstract: To solve the insufficient durability of concrete caused by manufactured sand with high stone powder content, based on existing concrete mix design method, taking the stone powder content in manufactured sand as a parameter of mix design, a mix design method is proposed to adjust the proportion of coarse and fine aggregates based on the stone powder content in manufactured sand. Compared with the original mix design method, the water-binder ratio is kept unchanged effectively to ensure its strength, and the proportion of aggregate is kept unchanged to be beneficial for improving its durability. According to the stone powder content in manufactured sand, the influences of the concrete mix design method that partially or completely replace cementitious material with stone powder in manufactured sand on the fluidity, cohesion and water retention performance of concrete are analysed. By controlling the sand ratio and the proportion of each particle size of the aggregate unchanged, the masses of the manufactured sand and coarse aggregate in mix design are derived. The experimental result shows that (1) the mix design method of concrete without

收稿日期: 2021-11-05

作者简介: 赵尚传 (1973-), 男, 山东青岛人, 博士, 研究员. (sc.zhao@rioh.cn)

* 通讯作者: 刘龙龙 (1988-), 男, 河南许昌人, 博士, 助理研究员. (liulong4517@126.com)

considering the influence of the content of stone powder in manufactured sand or using partial stone powder in manufactured sand as cementitious material ignores the influence of stone powder on the concrete performance, resulting in poor workability and easy segregation of manufactured sand concrete; (2) the mix design method of concrete using all manufactured sand with stone powder, especially the manufactured sand with high stone powder content, significantly improved the working performance of concrete; (3) the proposed mix design method can combine the actual content of stone powder in manufactured sand, maintain the water-binder ratio and aggregate ratio unchanged, ensure the workability and mechanical properties of concrete, fully utilize the role of stone powder in manufactured sand, and improve the durability of concrete.

Key words: road engineering; mix design; quantitative analysis; manufactured sand concrete; stone powder; workability

0 引言

由于各地区机制砂原材料及生产工艺不统一,造成各地区机制砂石粉含量规定的限值相差较大。为确定合适的石粉含量范围,国内外学者开展了石粉对机制砂混凝土性能的影响机理的研究^[1-2]。一部分研究人员认为机制砂中的石粉改善了混凝土的和易性,对于混凝土的流动性、黏聚性和保水性均有辅助作用^[3-4];另一部分研究人员认为机制砂中的石粉对混凝土的性能的影响主要取决于石粉的粒径^[5],当石粉的粒径小于水泥和粉煤灰等颗粒的粒径时,主要表现为填充和活性效应,当石粉粒径大于胶凝材料粒径时,主要表现为填充效应。目前机制砂的研究主要集中于石粉对混凝土性能的影响^[6-8],并且制定了限制石粉含量的标准和规范^[9-10]。通过总结前期的研究成果发现,石粉的填充、活性和晶核效应^[11],都可使其替代为胶凝材料进行混凝土配合比设计。然而在现场进行配合比设计时,工程人员仍然将石粉作为机制砂,进行了机制砂混凝土配合比的试配^[12-16]。若机制砂石粉含量超出允许范围时,工程人员主要通过干法或湿法去粉^[17-19]。在降低石粉含量时,也除去了粒径相近的颗粒,从而破坏了机制砂原有的颗粒级配,并没有起到应有的

效果。为了充分利用机制砂中的石粉,减少生产成本,当石粉含量过高时,可采用部分或全部石粉作为胶凝材料,对混凝土中的粗、细骨料进行复配,形成一种高石粉含量的机制砂混凝土配合比设计方法。

本研究针对机制砂石粉含量高,在不采取机制砂机械去粉的条件下,根据石粉含量调控骨料比例,对机制砂混凝土配合比进行了设计,提出了一种考虑石粉含量的机制砂混凝土配合比设计方法。

1 原材料及骨料配比

1.1 机制砂级配

根据 JT/T 819—2011《公路工程水泥混凝土用机制砂》规定,要求 I 类、II 类和 III 类机制砂满足表 1 的要求。现场实测机制砂各粒径的比例,如表 2 所示,测得机制砂的石粉含量为 14.86%,材料为石灰岩,密度为 2 720 kg/m³。

表 1 规范机制砂级配范围

Tab. 1 Grading range of manufactured sand in specification

筛孔尺寸/mm	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15
累计筛 I 类	0	0~10	5~20	15~50	40~70	80~90	90~100
余/% II、III 类	0	0~10	5~50	35~70	71~85	80~95	90~100

表 2 现场实测机制砂各粒径比例

Tab. 2 Field measured particle size proportion of manufactured sand

筛孔尺寸/mm	4.75	2.36	1.17	0.6	0.3	0.15	0.075	0~0.075
分计筛余/%	4.07	30.35	20.96	7.99	12.91	6.44	2.42	14.86
通过率/%	97.67	67.32	46.36	38.38	25.47	19.03	16.60	1.74
累计筛余/%	4.07	34.42	55.38	63.36	76.27	82.71	85.14	100.00

1.2 原材料

水泥:天津市蓟州某有限公司生产,普通型硅酸盐水泥 P·O 42.5,粉煤灰:I 级粉煤灰,减水剂:高性能聚羧酸减水剂,粗骨料:分别采用 5, 9.5,

16, 19, 26.5 mm 标准筛,筛分出 5~9.5, 9.5~16, 16~19, 19~26.5 mm 单粒级碎石。

1.3 骨料配比

分别配制了 C30 和 C40 混凝土,固定混凝土

的水胶比、水泥、粉煤灰含量不变, 同时保持粗骨料各粒径的比例不变, 采用连续级配的骨料, 各粒径 26.5~19, 19~16, 16~9.5, 9.5~4.75, 4.75~0.075 mm 的比例为 1.00 : 0.46 : 1.20 :

1.21 : 2.81。采用部分或全部机制砂石粉作为胶凝材料的设计方法, 分别将 6%, 9% 和 14.86% 石粉作为胶凝材料考虑时, 得到的配合比如表 3~5 所示。

表 3 机制砂混凝土 A 的配合比 (按石粉含量 6% 设计)

Tab. 3 Mix ratio of manufactured sand concrete A (designed according to 6% stone powder content)

设计等级	水胶比	砂率/%	原材料种类及用量							
			水泥/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粉煤灰/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	机制砂/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粗骨料				水/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
						5~9.5 mm	9.5~16 mm	16~19 mm	19~26.5 mm	
C30	0.45	43.5	290	73	820	334	329	127	275	164
C40	0.36	43.5	345	86	801	326	321	124	268	155

表 4 机制砂混凝土 B 的配合比 (按石粉含量 9% 设计)

Tab. 4 Mix ratio of manufactured sand concrete B (designed according to 9% stone powder content)

设计等级	水胶比	砂率/%	原材料种类及用量							
			水泥/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粉煤灰/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	机制砂/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粗骨料				水/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
						5~9.5 mm	9.5~16 mm	16~19 mm	19~26.5 mm	
C30	0.45	44.3	290	73	835	329	324	125	271	164
C40	0.36	44.3	345	86	816	322	316	122	265	155

表 5 机制砂混凝土 C 的配合比 (按石粉含量 14.86% 设计)

Tab. 5 Mix ratio of manufactured sand concrete C (designed according to 14.86% stone powder content)

设计等级	水胶比	砂率/%	原材料种类及用量							
			水泥/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粉煤灰/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	机制砂/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粗骨料				水/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
						5~9.5 mm	9.5~16 mm	16~19 mm	19~26.5 mm	
C30	0.45	46.0	290	73	864	318	314	121	263	164
C40	0.36	45.9	345	86	845	312	308	118	257	155

2 试验结果

2.1 混凝土拌和物工作性能

图 1 所示为机制砂混凝土 A 的坍落度, 配合比采用 6% 机制砂石粉作为胶凝材料的设计方法。从图 1 中可以看出 C30 混凝土中粗骨料从水泥砂浆中分离, 在振捣的过程中出现粗骨料下沉, 垂直拔出坍落度桶时, 骨料和砂浆较快脱离, 说明混凝土的黏

聚性较差, 骨料下层有浆体流出, 没有出现泌水的现象。C40 混凝土水泥砂浆含量明显增加, 仍然出现了粗骨料和水泥砂浆分离的现象。初步分析 C30 混凝土出现粗骨料离析的原因主要是由于粗骨料的比率高, 胶凝材料和细集料的含量偏低造成的, 而 C40 混凝土主要是由于粗、细级配不合理引起的。

图 2 所示为机制砂混凝土 B 的坍落度, 配合比采用 9% 机制砂石粉作为胶凝材料的设计方法。从图 2 中可以看出 C30 混凝土和 C40 混凝土出现了骨料和浆体离析的现象, 和第 1 种配合比方法相比, 粗骨料的比有所减小, C40 混凝土的浆体量增加, 流动性增加。在搅拌的过程中 C30 混凝土中粗、细骨料混合相对比较均匀, 粗骨料和水泥砂浆拌和过程中分布相对合理; 在坍落度试验中, 骨料的粒径偏大, 较大粒径的骨料不能随着水泥砂浆流动, 造成水泥砂浆下沉, 粗骨料凸显, 水泥砂浆不能完全包裹骨料, 出现离析的现象。C40 混凝土的水泥

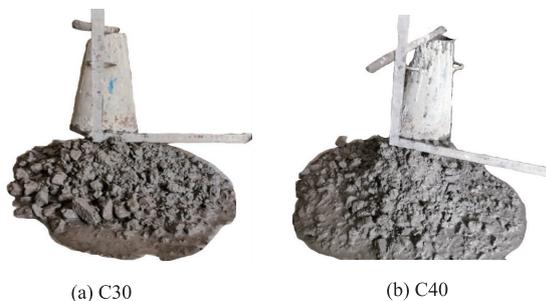


图 1 机制砂混凝土 A 坍落度

Fig. 1 Slumps of manufactured sand concrete A

砂浆偏多,振捣过程中出现浆体流出,相比 C30 混凝土,仍然出现了骨料最大粒径偏大,骨料离析的现象,但是混凝土的流动性和黏聚性较好,保水性较差,后期可通过减少减水剂的方法,控制混凝土的流动性,改善其保水性。

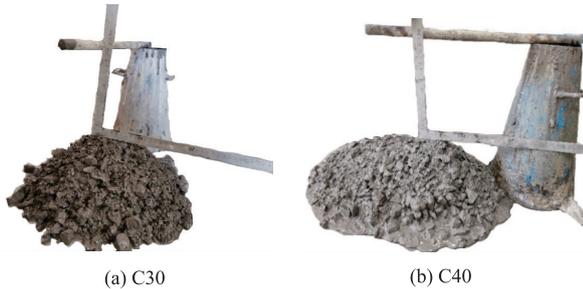


图2 机制砂混凝土 B 坍落度

Fig. 2 Slumps of manufactured sand concrete B

图3所示为机制砂混凝土 C30, C40 的坍落度,分别为 65 mm 和 70 mm,采用全部机制砂石粉作为胶凝材料的设计方法。在 C30 混凝土坍落度试验过程中,用振捣棒轻轻敲打坍落度桶侧面,混凝土逐渐下沉,坍落度桶底部有少量的浆体流出,桶内混凝土振捣密实,上部抹平后,垂直拔出坍落度桶,混凝土锥体慢慢下沉,混凝土锥体的底部有少量的浆液析出,骨料的表面均包裹有浆体。轻轻敲打混凝土锥体的侧面,混凝土慢慢下沉,没有出现粗骨料外漏的现象。C40 混凝土在搅拌的过程中,粗、细骨料分布较均匀,搅拌完成后,混凝土的流动性较好,很容易装填试件和坍落度试验。坍落度试验过程中,坍落度桶底部有少量的浆液析出,垂直拔出坍落度桶后,混凝土锥体缓慢下沉一段时间后稳定,锥体表面附着一层浆体,未出现骨料外漏的现象,骨料表面均包裹浆液。轻轻敲打混凝土锥体的侧面,混凝土缓慢向四周流动,没有出现锥体倒塌。说明采用全部机制砂石粉作为胶凝材料的配合比设计方法配制的混凝土流动性、黏聚性和保水性较好,工作性满足要求。



图3 机制砂混凝土 C 坍落度

Fig. 3 Slumps of manufactured sand concrete C

2.2 石粉含量对混凝土工作性能的影响

C30 混凝土中水泥、粉煤灰等胶凝材料的用量较少,按照 A 进行机制砂混凝土配合比设计时,机制砂的用量最少,出现了粗骨料离析的现象;C40 混凝土中水泥、粉煤灰等胶凝材料用量较多时,仍然出现了骨料离析的现象,说明浆体和骨料的比例仍不满足要求。B 是按照石粉替代胶凝材料 9% 的设计方法进行设计的,随着石粉含量的增加,混凝土的黏聚性也在增加,保水性有提高,仍有过多的浆体外流。C 是按照石粉替代胶凝材料 14.86% 的设计方法进行设计的,是将机制砂石粉含量全部作为胶凝材料考虑的,配制出的混凝土黏聚性和保水性均有所改善。

不同的配合比方法对混凝土的工作性能的影响汇总于表 6,固定水泥、粉煤灰等胶凝材料的掺量,保持骨料各粒径比例不变,采用相同的机制砂和粗骨料,对比了不同机制砂石粉掺量作为胶凝材料的设计方法,随着机制砂用量增加,混凝土的工作性能得到改善。试验结果表明,按照以往混凝土配合比设计方法得到的混凝土工作性能不满足要求时,可以根据机制砂实际的石粉含量,调整机制砂和骨料用量,从而改善机制砂混凝土的工作性能。

表6 石粉含量对混凝土工作性能影响

Tab. 6 Influence of stone powder content on workability of concrete

不同配合比编号	设计等级	石粉代替胶凝材料/%	浆骨比	工作性能		
				流动性	黏聚性	保水性
A	C30	6	34.2 : 65.8	差	差	差
	C40	6	35.7 : 64.3	差	差	差
B	C30	9	34.3 : 65.7	差	较差	较差
	C40	9	35.8 : 64.2	较好	较差	较差
C	C30	14.86	34.4 : 65.6	良好	良好	良好
	C40	14.86	35.9 : 64.1	良好	良好	良好

根据骨料掺量配比发现,假设原配合比中机制砂的质量为 100 kg,机制砂的石粉含量为 15%,若不考虑石粉含量对混凝土性能的影响,此时石粉的质量为 15 kg,相当于机制砂中细骨料缺失 15 kg;若考虑石粉含量为 6% 时,此时石粉被当作机制砂的质量为 9 kg,相当于机制砂中细骨料缺失了 9 kg。实际 1 m³ 机制砂混凝土配合比中机制砂的质量为 800~900 kg,若不考虑机制砂实际石粉含量,机制砂中细骨料的缺失范围在 120~135 kg,会对混凝土的性能造成比较大的影响。因此,应避免以往配合

比设计方法中忽略石粉造成机制砂级配缺失的影响,结合机制砂中的石粉含量,对机制砂混凝土配合比实时优化,建立一种可根据机制砂石粉含量调控的配合比设计方法。

结合本研究的配合比设计实例分析,假设原配合比中细骨料的质量为 m_s ,为保障混凝土的性能 m_c ,保持骨料各粒径含量的比例不变,砂率为 $m_s/(m_s+m_c)$,考虑机制砂的石粉含量为 α' 时,细骨料和粗骨料的比例不变,机制砂和粗骨料的质量保持恒定,如式(1)~(2)所示:

$$\frac{m'_s(1-\alpha')}{m'_s(1-\alpha')+m'_c} = \frac{m_s}{m_s+m_c}, \quad (1)$$

$$m'_s+m'_c = m_s+m_c. \quad (2)$$

根据式(1)~(2),机制砂的质量 m'_s 如式(3)所示:

$$m'_s = \frac{m_s(m_s+m_c)}{m_s+m_c-m_c \cdot \alpha'}. \quad (3)$$

粗骨料的质量 m'_c 如式(4)所示:

$$m'_c = \frac{m_c(m_s+m_c) \cdot (1-\alpha')}{m_s+m_c-m_c \cdot \alpha'}. \quad (4)$$

在原配合比的基础上,根据式(3)~(4),结合机制砂的石粉含量,即可计算出机制砂和粗骨料的质量。若 α' 取值远小于机制砂石粉含量时,造成混凝土中细骨料缺失,粗骨料偏多,配制的混凝土和易性差,出现泌水的现象;若 α' 取值远大于机制砂石粉含量时,会引起机制砂用量过大,粗骨料偏少,配制的混凝土自收缩大,易开裂。为避免机制砂中过高的石粉含量,防止混凝土后期的干缩裂缝,比一般规范中规定的机制砂石粉含量稍大, α' 取值不超过20%。因此,在混凝土配制过程中,当机制砂代替河砂,或机制砂原材料变化时,应根据机制砂级配及石粉含量的变化,实时调控机制砂和粗骨料的比例,以防忽略机制砂石粉含量及级配对混凝土性能的影响。

目前的机制砂混凝土配合比设计方法仍然是在普通混凝土配合比的基础上进行设计,认为C30混凝土的工作性能在石粉含量为7%~10%范围时最佳;C40混凝土的工作性能在石粉含量为5%~7%范围时最佳。在混凝土配合比设计初期,工程人员未考虑机制砂石粉作为胶凝材料或细粉颗粒对混凝土性能的影响。本研究在原有混凝土配合比设计的基础上,固定骨料各粒径的比例,通过改变机制砂用量的方式,研究了不同石粉含量对混凝土工作性能的影响,从而提出了新的配合比设计方法。

利用本研究的混凝土配合比设计方法,不仅可以根机制砂实际的石粉含量调整混凝土中各粒径骨料的用量,使其满足工作性能要求。对于高含量石粉的机制砂,可以采用部分或全部石粉代替胶凝材料的方法进行机制砂混凝土配合比设计,配制出的混凝土工作性能、力学性能和耐久性均能满足要求;在充分利用机制砂石粉的条件下,避免了机制砂生产过程中的干法或湿法降粉工序,提高了工作效率。

3 结论

本研究采用部分或全部机制砂石粉作为胶凝材料的配合比设计方法,分别设计了C30和C40混凝土,对比了不同配合比混凝土的工作性能,总结如下:

(1) 采用部分机制砂石粉作为胶凝材料的设计方法得到的混凝土工作性能均不能满足要求,由于高石粉含量机制砂的影响,粗、细骨料不合理,造成混凝土离析,黏聚性较差,粗骨料上浮,浆液外露,保水性差。

(2) 结合机制砂实际的石粉含量,考虑全部机制砂石粉作为胶凝材料,保持各粒径骨料的比例不变,明显改善了混凝土的工作性能,说明考虑全部机制砂石粉作为胶凝材料的配合比设计方法符合实际情况,应根据机制砂实际的石粉含量进行配合比设计。

(3) 基于现有的混凝土配合比设计原理,在不改变混凝土胶凝材料和骨料比例的前提下,提出了考虑机制砂石粉作为胶凝材料的辅助材料的配合比设计方法,实例分析表明该配合比设计方法不仅改善了混凝土的工作性能,更能够充分利用高石粉含量的机制砂,简化机制砂生产工序,提高生产效率。

参考文献:

References:

- [1] RAMEZANIANPOUR A A, GHIASVAND E, NICKSERESHT I, et al. Influence of Various Amounts of Limestone Powder on Performance of Portland Limestone Cement Concretes [J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31 (10): 715-720.
- [2] LI C, JIANG L, LI S. Effect of Limestone Powder Addition on Threshold Chloride Concentration for Steel Corrosion in Reinforced Concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2020, 131: 106018.
- [3] 陶俊, 罗小东, 彭丙杰, 等. 机制砂石粉含量对新拌混凝土流动性能的影响 [J]. 混凝土世界, 2023, 166

- (4): 47-51.
TAO Jun, LUO Xiao-dong, PENG Bing-jie. Effect of the Stone Powder Content of Machine-made Sand on the Flowability of Fresh Concrete [J]. *China Concrete*, 2023, 166 (4): 47-51.
- [4] 冷冬, 徐鑫, 夏京亮, 等. 机制砂石粉含量对轨枕混凝土性能影响研究 [J]. *新型建筑材料*. 2020, 47 (12): 1-4.
LENG Dong, XU Xin, XIA Jing-liang, et al. Study on the Influence of Machine-made Sand Powder Content on the Performance of Sleeper Concrete [J]. *New Building Materials*, 2020, 47 (12): 1-4.
- [5] 王建国. 机制砂粒径分布对混凝土拌合物性能的影响研究 [J]. *建筑技术开发*, 2020, 47 (23): 140-141.
WANG Jian-guo. Influence of Particle Size Distribution of Manufactured Sand on Performance of Concrete Mixture [J]. *Building Technique Development*, 2020, 47 (23): 140-141.
- [6] 刘文浩, 卿迟, 冯前进, 等. 机制砂石粉参数对混凝土性能的影响 [J]. *武汉理工大学学报*, 2023, 45 (3): 31-38, 62.
LIU Wen-hao, QING Chi, FENG Qian-jin, et al. Effects of Physical and Chemical Parameters of Mechanized Sand on Concrete Properties [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2023, 45 (3): 31-38, 62.
- [7] 郭润平, 张亚舟, 夏京亮, 等. 机制砂石粉含量对轨枕混凝土耐久性能的影响研究 [J]. *混凝土*, 2020, 31 (8): 113-116.
GUO Run-ping, ZHANG Ya-zhou, XIA Jing-liang, et al. Study on the Influence of Machine-made Sand Powder Content on the Performance of Sleeper Concrete [J]. *Concrete*, 2020, 31 (8): 113-116.
- [8] XIANG J, LIU L, CUI X, et al. Effect of Limestone on Rheological, Shrinkage and Mechanical Properties of Alkali-activated Slag/Fly Ash Grouting Materials [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 191: 1285-1292.
- [9] JT/T 819—2023, 公路工程 水泥混凝土用机制砂 [S].
JT/T 819—2023, Highway Engineering—Manufactured Sand for Cement Concrete [S].
- [10] DB 62/T 2917—2018, 机制砂混凝土应用技术规程 [S].
DB 62/T 2917—2018, Technical Specifications for Manufactured Sand [S].
- [11] WANG D, SHI C, FARZADNIA N, et al. A Review on Effects of Limestone Powder on the Properties of Concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 192: 153-166.
- [12] SINGH S, NAGAR R, AGRAWAL V. A Review on Properties of Sustainable Concrete Using Granite Dust as Replacement for River Sand [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 126: 74-87.
- [13] SOUZA A T, BARBOSA T F, RICCIO L A, et al. Effect of Limestone Powder Substitution on Mechanical Properties and Durability of Slender Precast Components of Structural Mortar [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9 (1): 847-856.
- [14] GHAFoori N, SPITEK R, NAJIMI M. Influence of Limestone Size and Content on Transport Properties of Self-consolidating Concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 127: 588-595.
- [15] SUA-IAM G, MAKUL N. Utilization of Limestone Powder to Improve the Properties of Self-compacting Concrete Incorporating High Volumes of Untreated Rice Husk Ash as Fine Aggregate [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 38: 455-464.
- [16] SUA-IAM G, MAKUL N. Use of Limestone Powder During Incorporation of Pb-containing Cathode Ray Tube Waste in Self-compacting Concrete [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 128: 931-940.
- [17] WANG D, SHI C, FARZADNIA N, et al. A Review on Use of Limestone Powder in Cement-based Materials: Mechanism, Hydration and Microstructures [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 181: 659-672.
- [18] WANG H, WU D, MEI Z. Effect of Fly Ash and Limestone Powder on Inhibiting Alkali Aggregate Reaction of Concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 210: 620-626.
- [19] 刘通, 于本田, 王焕, 等. 高吸附性石粉含量对水泥砂浆力学性能及微观结构的影响 [J]. *公路交通科技*, 2021, 38 (8): 16-22.
LIU Tong, YU Ben-tian, WANG Huan, et al. Influence of High Adsorbent Stone Powder Content on Mechanical Properties and Microstructure of Cement Mortar [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2021, 38 (8): 16-22.