

细集料对自密实混凝土工作性能和力学性能的影响研究

熊泽佳, 张勇

(广东交科检测有限公司, 广东 广州 510550)

摘要: 细集料的品质稳定性直接影响着自密实混凝土的填充性和力学性能, 本文以河砂为研究对象, 重点研究细度模数、含泥量和砂率的波动对自密实混凝土工作性和力学性能的影响。结果表明, 河砂细度模数、含泥量和砂率的波动对自密实混凝土的工作性能有显著影响, 当河砂细度模数控制在2.4~2.9、含泥量控制在小于1.5%、砂率控制在47%~52%范围内时, 自密实混凝土工作性能和力学性能良好, 能够满足设计及现场施工要求。

关键词: 自密实混凝土; 细度模数; 含泥量; 砂率; 工作性能

中图分类号: U214.18

文献标识码: A

The Influence of Fine Aggregates on the Working Performance and Mechanical Properties of Self-compacting Concrete

XIONG Zejia, ZHANG Yong

(Guangdong Jiaoke Testing Co., Ltd., Guangzhou 510550, Guangdong, China)

Abstract: The stability of sand directly affects the filling performance and mechanical properties of self-compacting concrete. In this paper, the effects of fineness modulus and sand ratio on the workability and mechanical properties of self-compacting concrete were studied. The results show that the values of fineness modulus, mud content and sand percentage of river sand have significant effects on the fluidity and filling of self-compacting concrete. When the fineness modulus is between 2.4 and 2.9, the mud content of sand is less than 1.5%, and the sand percentage is between 47% and 52%, the working performance and mechanical properties of self-compacting concrete are the best, meeting the design and on-site construction requirements.

Key words: self-compacting concrete; fineness modulus; mud content; sand ratio; working performance

随着混凝土工程逐渐呈现建设规模化与结构复杂化的发展趋势, 目前大型混凝土结构内部的配筋率越来越高, 钢筋间距越来越密, 传统泵送混凝土浇筑施工振捣困难, 易造成混凝土局部不密实、空洞等质量问题^[1]。自密实混凝土由于其优异的流动性、自填充性能, 能在重力的作用下填充密实, 无需外部机械振捣, 满足了大型工程结构复杂、特殊混凝土构件的应用需求, 目前正在建设中的深中通道钢管混凝土就采用了自密实混凝土^[2]。自密实混凝土与普通泵送混凝土相比, 能有效改善浇筑施工复杂性和混凝土结构整

体的均匀性, 同时降低了混凝土施工工作强度, 提升了工作效率, 缩短了施工工期, 解决了技术工人短缺与环境噪声等问题, 在建筑节能减排、“碳达峰、碳中和”方面具有更加广阔的应用前景^[3-4]。

原材料的品质和稳定性对自密实混凝土工作性能和力学性能的影响比普通泵送混凝土更加显著。河砂作为自密实混凝土中重要组成部分, 在混凝土拌合物中以水泥砂浆的形式填充粗骨料间隙并包裹粗骨料, 起到润滑作用, 进而改善混凝土的流动性; 当混凝土硬化时, 细骨料被水泥水

收稿日期: 2023-06-30

作者简介: 熊泽佳, 路桥施工工程师, 本科, 研究方向为公路工程试验检测及管理

化产物胶结，起到骨架作用，提高混凝土的强度^[5-7]。当前优质河砂资源越来越少，且成本高昂，对于大型工程，其工期较长，河砂品质的稳定性更是难以保证。本文以深中通道沉管隧道钢壳自密实混凝土工程为依托，通过研究河砂细度模数、含泥量和砂率的波动对自密实混凝土工作性和力学性能影响，为后续自密混凝土施工中河砂质量控制提供指导意见，具有十分重要的实际意义。

1 原材料及配合比

1.1 原材料

自密实混凝土用原材料种类、性能指标见表 1。

表 1 原材料基本信息

原材料	类型	性能指标
水泥	P · II 42.5	密度 3.12 g/cm ³ ，比表面积 389 m ² /kg， 凝结时间：初凝 165 min、终凝 216 min， 3 d 抗折强度 6.0 MPa，28 d 抗折强度 8.5 MPa，3 d 抗压强度 31.7 MPa，28 d 抗压强度 53.1 MPa
粉煤灰	F 类 I 级	密度 2.38 g/cm ³ ，细度 7.8%，需水量 比 94%，烧失量 2.4%，28 d 强度活性 指数 84%
矿渣粉	S95 级	密度 288 g/cm ³ ，比表面积 429 m ² /kg， 烧失量 0.5%，7 d 活性指数 78%，28 d 活性指数 101%
碎石	5 ~ 20 mm 连续级配	针片状颗粒含量 1%，压碎指标值 5%， 含泥量 0.1%
河砂	II 区中砂	堆积密度 1520 kg/m ³ ，细度模数 2.64、 含泥量 0.5%
减水剂	SBT-CCP 型	减水率 28%，含气量为 3.7%

1.2 配合比设计

深中通道沉管隧道钢壳自密实混凝土配合比设计参照《自密实混凝土应用技术规程》（JTG/T 283—2012）计算，同时要求强度等级为 C50、塌落扩展度为 600 ~ 720 mm、T500 扩展时间为 2 ~ 5 s、V 型漏斗通过时间为 5 ~ 15 s、L 型仪充填比 ≥ 0.8 及含气量 ≤ 4.0%。通过计算并适当优化，自密实混凝土基准配合比见表 2，其各项性能指标测试结果见表 3，各项性能均满足工程质量控制指标要求。

1.3 试验方案

为探索不同批次进场河砂细度模数、含泥量及砂率波动对自密实混凝土工作性和力学性能的

表 2 自密实混凝土基准配合比

单位：kg/m ³								
水胶比	水泥	粉煤灰	矿渣粉	河砂	5 ~ 20 mm 碎石	水	减水剂	砂率/%
0.32	275	192	83	804	804	177	5.50	50

表 3 自密实混凝土各项指标结果

扩展度/mm	T ₅₀₀ /s	V 型漏斗通过时间/s	L 型仪充填比	含气量/%	出机状态	7 d 抗压强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa
675	3.4	11.3	0.94	2.3	良好	42.2	62.7

影响，在保证混凝土基准配合比不变的情况下，采用单因素控制，分别调整不同的河砂细度模数、含泥量和砂率进行自密实混凝土配合比试配，并依据《水运工程自密实混凝土技术规范》（JTS/T 226—2021）测试其工作性和力学性能。

2 试验结果与分析

2.1 细度模数对自密实混凝土性能影响

受项目工期、原材料产地等因素的影响，不同批次的河砂细度模数的难以保持稳定，往往在一定范围内波动，试验采用细度模数 M_x 分别为 2.19、2.52、2.64、2.80 和 2.97 的河砂，以研究细度模数对自密实混凝土拌合物工作性和硬化后力学性能影响；河砂的细度模数和级配情况见表 4，自密实混凝土拌合物工作性和硬化后力学性能见表 5。

从表 5 中可以看出，河砂的细度模数对自密实混凝土的工作性能影响较为显著。细度模数的增加对自密实混凝土的性能有利，随着细度模数的增大，混凝土扩展度增大， T_{500} 和 V 型漏斗通过时间均缩短，表明自密实混凝土拌合物的流动性、填充性增加。随着河砂细度模数 M_x 的逐渐增大，河砂中细颗粒含量（≤ 0.15 mm）逐渐降低，在砂率不变的情况下，砂的总比表面积逐渐减小，自密实混凝土拌合物的黏度有所降低，因

表 4 不同细度模数河砂级配情况

筛孔尺	累计筛余/%				
寸/mm	$M_x = 2.19$	$M_x = 2.52$	$M_x = 2.64$	$M_x = 2.80$	$M_x = 2.97$
0.15	93.8	97.1	94.9	98.4	98.2
0.30	63.6	84.6	83.2	92.6	87.1
0.60	39.7	43.2	51.4	57.8	69.8
1.18	19.5	22.9	31.0	27.0	33.4
2.36	7.2	7.5	13.8	7.8	11.6
4.75	1.6	1.2	4.5	1.5	1.7

表 5 细度模数对自密实混凝土性能的影响

细度模数	扩展度/mm	T_{500}/s	V 型漏斗通过时间 T/s	L 型仪充填比	出机状态	7 d 抗压强度/ MPa	28 d 抗压 强度/MPa
2.19	610	6.8	18.6	0.80	混凝土状态好, 比较黏	40.7	60.3
2.52	650	4.6	14.2	0.86	混凝土状态好, 黏度适中	41.5	61.7
2.64	675	3.4	11.3	0.90	混凝土状态好, 黏度适中	42.2	62.7
2.80	685	2.8	9.6	0.92	混凝土状态一般, 黏度适中	42.6	63.4
2.97	695	1.7	10.4	0.75	混凝土状态差, 黏聚性差, 有离析现象	38.7	56.3

此其流动性增强。同时, L 型仪充填比随细度模数的增大而先增大后减小, 表明自密实混凝土间隙通过性能先增强后减弱, 除上述原因外, 细度模数超过一定限值, 自密实混凝土黏聚性变差, 自密实混凝土拌合物出现了离析现象, 导致间隙通过性减弱。

此外, 河砂的细度模数变化对自密实混凝土硬化后的抗压强度影响并不明显, 当河砂细度模数为 2.97 时, 由于混凝土离析造成了成型试件的均匀性和密实性变差, 其抗压强度会有所降低。由于混凝土的抗压强度主要受水胶比和成型密实性影响, 当细度模数在 2.19~2.80 时, 自密实混凝土仍具有较好的充填性能; 当细度模数为 2.97 时, 自密实混凝土拌合物离析, 充填性能变差, 影响了混凝土成型的均匀性和密实性, 造成硬化后混凝土抗压强度降低。

2.2 含泥量对自密实混凝土性能影响

含泥量是河砂的主要控制指标之一。不同批次进场的河砂, 其含泥量往往存在一定差异。为研究含泥量对自密实混凝土拌合物工作性能的影响, 在保证配合比不变的情况下, 试验采用细度模数为 2.64 的河砂, 并等量置换调整含泥量分别为 0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5% 及 3.0%, 对扩展度、 T_{500} 、V 型漏斗通过时间及 L 型仪充填比等参数进行检测, 检测结果见表 6。

从表 6 可以看出, 当含泥量不大于 1.5% 时,

表 6 砂含泥量对自密实混凝土性能的影响

含泥量/%	扩展度/mm	T_{500}/s	V 型漏斗通过时间/s	L 型仪充填比	出机状态
0.5	670	3.3	11.4	0.95	混凝土状态好, 黏度适中
1.0	665	3.4	11.5	0.94	混凝土状态好, 黏度适中
1.5	660	3.4	11.7	0.92	混凝土状态好, 黏度适中
2.0	650	3.8	12.6	0.87	混凝土状态一般, 混凝土较黏
2.5	635	4.0	13.2	0.85	混凝土状态一般, 混凝土较黏
3.0	615	4.5	13.9	0.82	混凝土状态一般, 混凝土较黏

自密实混凝土各项检测指标变化不明显; 而当含泥量大于 1.5% 时, 各项指标虽都满足要求, 但自密实混凝土工作性能明显降低, 对自密实混凝土填充密实性极为不利。

2.3 砂率对自密实混凝土性能影响

工程现场常因河砂细度模数对自密实混凝土配合比进行调整, 且自密实混凝土配合比的实际砂率往往会随河砂的含水率不同而在一定范围内波动。为研究砂率对自密实混凝土拌合物性能和硬化后力学性能的影响, 试验采用细度模数为 2.64 河砂, 在保证其他材料用量不变的情况下, 调整混凝土配合比砂率, 自密实混凝土拌合物性能和硬化后力学性能测试结果见表 7。

表 7 砂率对自密实混凝土性能的影响

砂率/%	扩展度/mm	T_{500}/s	V 型漏斗通过时间 T/s	L 型仪充填比	出机状态	7 d 抗压 强度/MPa	28 d 抗压 强度/MPa
46	595	5.4	16.2	0.80	混凝土状态一般, 黏聚性差	44.3	66.1
48	640	3.9	12.9	0.88	混凝土状态好, 黏度适中	42.9	64.1
50	675	3.4	11.3	0.90	混凝土状态好, 黏度适中	42.2	62.7
52	665	3.7	12.4	0.86	混凝土状态一般, 黏度适中	40.8	60.1
54	610	6.0	17.6	0.74	混凝土状态差, 混凝土较黏	36.4	53.3

从表 7 可以看出, 混凝土的扩展度和 L 型仪充填比随砂率的增大先增大后减小, T_{500} 和 V 型漏斗通过时间 T 随砂率的增大先减小后增大。砂

率较低时, 混凝土拌合物中砂浆体积相对较小, 包裹碎石砂浆减少, 流动性减弱, 填充性能下降;

(下转第 10 页)

- 及防治措施初探[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(5): 66-76, 83.
- [3] 张兴华, 钟文健, 王辉, 等. 公路隧道排水系统结晶堵塞治理[J]. 广东公路交通, 2023, 49(1): 61-66.
- [4] 蒋雅君, 杜坤, 陶磊, 等. 岩溶隧道排水系统堵塞机理的调查与分析[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(7): 131-135.
- [5] 段海澎, 陈发根, 姚春江, 等. 岩溶区隧道结晶堵管现象及其诱发的风险问题浅析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(S1): 332-335.
- [6] 徐筱, 张胤, 李杰, 等. 岩溶区隧道排水管结晶规律模型试验[J]. 公路交通科技, 2022, 39(2): 133-139.
- [7] 马文镇, 张豹, 张彦龙. 公路隧道排水系统结晶堵塞机理及处治措施[J]. 广东公路交通, 2021, 47(5): 52-56.
- [8] 缪仑, 周裕, 任辉. 非岩溶隧道排水系统结晶机理及防治措施研究[J]. 中国市政工程, 2022(5): 66-69, 124.
- [9] 郭小雄. 铁路隧道排水系统结晶机理及应对措施研究[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(1): 71-77.
- [10] 黄少雄, 刘小飞, 张学富, 等. 基于电场的隧道排水管防结晶堵管技术研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(12): 5217-5226.
- [11] 陈昱池, 陈相阁, 张学富, 等. 基于磁处理法的隧道永磁体排水管防结晶试验[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(12): 2105-2111.
- [12] 高何杰, 陈胜, 吕建兵, 等. 灰岩隧道防化学结晶淤堵及新型可更换排水管研究[J]. 公路, 2022, 67(12): 403-406.
- [13] 詹树高, 钟祖良, 陈宇波, 等. 岩溶隧道排水管结晶堵塞机理及疏通试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(S2): 717-721.
- [14] 蒋雅君, 杜坤, 魏晨茜, 等. 铁路隧道排水盲管结晶沉积疏通清洗技术[J]. 隧道与轨道交通, 2020, (4): 9-13.
- [15] 张彦龙, 田卿燕, 张建同. 广东地区某公路岩溶隧道水害分析及其数值模拟研究[J]. 中国岩溶, 2018, 37(2): 307-313.
- [16] 李清, 祝志恒, 李林毅. 强降雨作用下岩溶区公路隧道衬砌破坏机制分析[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(6): 1102-1110.

(上接第3页)

但砂率过大时, 河砂的总比表面积增大, 在水泥浆体体积一定的情况下, 水泥砂浆的稠度增大, 流动性降低, 导致混凝土流动性大幅降低。

砂率对自密实混凝土的抗压强度影响不显著, 自密实混凝土的抗压强度随着砂率的增大会有所降低。当砂率低于 52% 时, 7 d 和 28 d 抗压强度降低幅度较小, 降幅均小于 3.5%; 当砂率超过 52% 时, 7 d 和 28 d 抗压强度降幅较大, 降幅超过了 10%。砂率过大时, 水泥砂浆体积较大、粗骨料体积较小, 硬化混凝土结构密实性降低, 因此其抗压强度随之降低。

3 结语

(1) 河砂的细度模数对自密实混凝土工作性能影响较为显著。随着细度模数增加, 自密实混凝土的流动性和填充性均增强, 但细度模数到 2.97 时, 由于混凝土的黏聚性变差, 填充性减弱; 为满足该项目自密实混凝土设计要求的工作性能, 细度模数应控制在 2.4 ~ 2.9 范围内。

(2) 河砂的含泥量对自密实混凝土工作性能有一定的影响。随着含泥量增大, 混凝土工作性能逐渐降低。含泥量 $\leq 1.5\%$ 时, 各项指标变化不明显; 当含泥量 $> 1.5\%$ 时, 虽然各项指标都满足要求, 但混凝土工作性能有明显降低。

(3) 砂率对自密实混凝土施工性能和强度均

有影响。随着砂率的增大, 混凝土的流动性和填充性均先增大后减小, 混凝土强度则逐渐降低。但当砂率低于 52%, 混凝土抗压强度降幅较小; 当砂率达到 54%, 混凝土抗压强度降幅达到 10% 以上。为满足该工程自密实混凝土设计要求的工作性能和强度等级, 砂率应控制在 47% ~ 52% 范围内。

参考文献:

- [1] 吕卫清, 王胜年, 吕黄, 等. 钢壳沉管自密实混凝土配制技术研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(12): 3952-3958.
- [2] 陈辉, 陈志超, 林艳. 自密实混凝土填充性能及细观结构的优化研究[J]. 水利科学与寒区工程, 2021, 4(3): 189-192.
- [3] 郑建岚, 罗素蓉, 王国杰, 等. 自密实混凝土技术的研究与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016: 1-36.
- [4] 徐杰, 叶燕华, 朱铁梅, 等. 砂率对自密实混凝土工作性能的影响[J]. 混凝土, 2013(4): 82-86.
- [5] 包丽丽. 细骨料对自密实混凝土性能的影响研究[J]. 低温建筑技术, 2020(7): 62-64.
- [6] 宗琦, 颜鑫, 方跃, 等. 骨料粒径及砂率对自密实混凝土力学性能的影响[J]. 安徽理工大学学报, 2021, 41(1): 1-6.
- [7] 谢清泉, 于连山, 马昆林, 等. 细骨料对填充层自密实混凝土施工稳定性的试验研究[J]. 科技研究, 2020(06): 10-13.