

# 机制砂在 C55F350 高性能抗冻混凝土中的应用

王旭, 于鹏程

(中交一航局第三工程有限公司)

**摘要:** 为了解决大连长兴岛恒力水工项目中 C55F350 高性能抗冻混凝土配制时机制砂的应用问题, 通过试验与分析, 验证了机制砂在实际工程应用中的可行性, 并通过实测 C55F350 高性能梁的强度及耐久性数据, 得到了机制砂能够替代河砂应用于 C55F350 高性能抗冻混凝土中的结论。在此基础上, 进一步探讨了不同掺量的机制砂与河砂对混凝土力学性能、工作性能以及耐久性的影响, 使机制砂混凝土在工程实践中遇到的关键技术问题得到了有效解决, 不仅为大连长兴岛恒力水工项目的顺利实施提供了坚实的试验技术支持, 同时也为机制砂在高性能抗冻混凝土中的应用奠定了坚实的理论和实践基础。

**关键词:** 机制砂; 高性能抗冻混凝土; 配合比设计

## 0 引言

随着中国建筑市场的不断扩大, 混凝土作为建筑材料中最基本的原材料, 市场对其需求量也在不断增加。河砂作为配制混凝土的主要原材料, 需求量无疑也是巨大的。但是经过不断挖掘和开采, 天然河砂在市场上的保有量迅速减少, 有的地方天然河砂资源已经枯竭。随着对环境保护越来越重视, 许多地区为了保护河堤及生态平衡、保持河流及自然景观, 已经明确禁止开采河砂。因此, 研究使用机制砂配置混凝土势在必行。我国自 20 世纪 60 年代前后就有机制砂的研究, 但应用较少, 20 世纪 90 年代开始逐步大规模的应用, 主要应用于工民建, 北方抗冻混凝土应用较少。

本文对机制砂在北方水运工程 C55F350 高性能抗冻混凝土中的应用及质量控制的关键技术进行研究。通过与河砂对比试验, 在保证质量的前提下, 确定机制砂完全替代河砂在 C55F350 高性能梁板抗冻混凝土中使用的可行性, 大幅度降低混凝土成本, 减轻项目竞争压力, 提升项目经济收益, 同时填补了机制砂在 C55F350 高性能抗冻混凝土中研究的空白。

## 1 工程概况

大连长兴岛恒力水工项目位于长兴岛北港区, 建设内容包括 6 个液体化工泊位(201—206 号)、5 个固体通用泊位(207—211 号)及其他零星工程, 总合同额 10.46 亿元。码头设计采用沉箱墩台+梁

板透空式结构, 整体离岸式布置, 泊位岸线总长 2 821 m。本工程预制梁板分 20 种型号, 共 1 702 榀, 重量 100~300 t, 分为预应力和非预应力, 混凝土标号 C55F350、C45F350。其中 C55F350 高性能混凝土梁 11 277 榀。

## 2 研究流程

首先对混凝土原材料进行选用, 通过各项试验来确定混凝土原材料的各项指标符合规范要求。然后根据砂率、外加剂掺量、水胶比及胶凝材料用量来进一步优选配合比设计, 再分析不同种类的细集料对混凝土工作性能及力学性能的影响, 最后对混凝土耐久性及物理性能进行分析, 确定机制砂用于 C55F350 高性能抗冻混凝土配置的可行性。研究流程图见图 1。

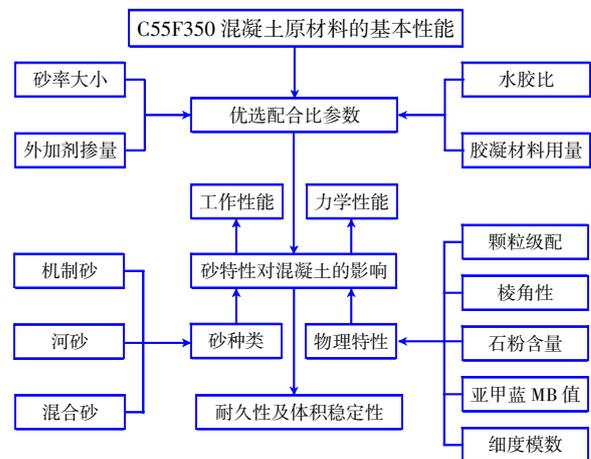


图 1 研究流程图

### 3 机制砂的特点

国家标准 GB/T 14684—2011《建设用砂》定义机制砂(Manufactured sand)是经除土处理,由机械破碎、筛分制成的,粒径小于4.75 mm的岩石、矿山尾矿或工业废渣,但不包括软质、风化的颗粒,俗称人工砂<sup>[1]</sup>。

机制砂的自身主要特点:

1) 强度高:机制砂采用高硬度的岩石作为原料,经过破碎、筛分、洗净等工艺处理,具有较高的抗压强度和抗剪强度,能够满足工程对于材料强度的要求;

2) 均匀性好:机制砂采用机械破碎和筛分的方式制备,颗粒形状均匀,粒度分布范围较窄,可以提供均匀的颗粒填充,提高工程材料的力学性能和稳定性;

3) 粒形好:机制砂颗粒形状多为角砾石状或圆砾石状,具有较好的抗压性能和抗剪性能,能够增加工程材料的抗压强度和抗震性能;

4) 粒径可调:机制砂的粒径可根据工程需要进行调整,可以生产出不同粒径的机制砂,满足不同工程对于颗粒大小的要求,提高工程材料的适应性和应用范围;

5) 纯净度高:机制砂经过洗净处理,能够去除其中的泥土、黏土和有机物等杂质,保证机制砂的纯净度,提高工程材料的稳定性和耐久性;

6) 可再生利用:机制砂可以通过再生回收利用,减少对自然砂的依赖,降低资源消耗和环境污染,符合可持续发展的要求。

机制砂的独特性质决定了其在混凝土配制中的独特表现。机制砂所配制的混凝土在配比设计、材料成型及养护条件均保持一致的情况下,与条件相同的河砂表现出以下显著特点:其坍落度相对降低,但提高了混凝土的28 d标准强度。如果保持坍落度不变,那么用水量需要相应的提高。若按照河砂的配比规律来设计混凝土,机制砂的需水量会相对较大,其和易性可能稍逊一筹,尤其在强度等级较低、水泥用量较少的混凝土中,更容易出现泌水现象。但是如果按照机制砂特有的性质进行配合比设计,通过对其中石粉成分的合理利用,调整砂率,能够配制出和易性极好的混凝土。普通混凝土的配比设计规则,机制砂也同样适用。在配制混凝土时,机制砂的细度模数在2.6~3.0之间,级配Ⅱ区时,可以达到最理想的

效果。机制砂在配制添加外加剂的混凝土时,对外加剂的反应比河砂敏感。机制砂配制的高强度泵送混凝土在泵送过程中不易堵泵<sup>[2]</sup>。合理运用机制砂的混凝土,整体密实度更大,且抗冻、抗渗性能更好,其长期耐久性、物理性能均能达到设计使用标准,适合应用在高性能混凝土、高等级混凝土、泵送混凝土配制中<sup>[3]</sup>。

### 4 原材料的选用

#### 4.1 细集料

通过对工程周边各个机制砂生产厂家进行调研,综合考虑产量、价格及机制砂试验结果,最终决定选用长兴岛石灰石矿所生产的机制砂。长兴岛石灰石矿位于长兴岛内,距离拌合站约14 km,运输成本低,能够有效降低使用成本。且长兴岛石灰石矿质量稳定,含有较高的CaO和MgO,能够有效提高机制砂的强度和耐久性;矿资源丰富,可以满足拌合站大规模生产的需求且检验结果均符合《建设用砂》中对细骨料的要求。选用普兰店刘大水库所生产的河砂来进行对比试验,检测结果均符合JTS/T 236—2019《水运工程混凝土试验检测技术规范》<sup>[4]</sup>和JTS 202—2011《水运工程混凝土施工规范》<sup>[5]</sup>的要求。

机制砂检测数据如表1所示,河砂检测数据如表2所示。

表1 机制砂检测数据

检验项目	标准指标	检验结果	结论
表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	≥2 500	2 720	合格
空隙率/%	≤44	43	合格
石粉含量/%	—	6.8	合格
云母含量/%	≤2.0	0.4	合格
SO <sub>3</sub> 含量/%	≤0.5	0.18	合格
亚甲基蓝值/(g·kg <sup>-1</sup> )	—	0.9	合格
轻物质含量/%	≤1.0	0.18	合格
堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	≥1 400	1 490	合格
总压碎值指标/%	≤25	15.1	合格
泥块含量/%	≤1.0	0.2	合格
氯离子含量/%	≤0.02	0.001	合格
有机物含量	—	颜色浅于标准色	合格
碱活性膨胀/%	—	0.03	合格
坚固性/%	≤8	1	合格
细度模数	—	2.9	合格

表2 河砂检测数据

检验项目	标准指标	检验结果	结论
总含泥量/%	≤2.0	2.0	合格
泥块含量/%	<0.5	0.2	合格
堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	—	1 380	合格
氯离子含量/%	—	0.001	合格
细度模数	—	2.8	合格

#### 4.2 粗集料

粗集料选用长兴岛石灰石矿所生产的5~25 mm碎石作为C55F350高性能抗冻混凝土的粗骨料,各项试验数据均满足规范要求。

#### 4.3 水泥

选用大连天瑞水泥厂所生产的P·O52.5水泥进行配合比设计,水泥品质稳定,早期强度较高。并按照GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》<sup>[6]</sup>要求进行检测,测得水泥标准稠度用水量为28.5%、安定性(雷氏夹)为0.8 mm、初凝时间为174 min、终凝时间为220 min、3 d抗折强度6.6 MPa、28 d抗折强度8.6 MPa。检测结果均满足规范要求。

#### 4.4 外加剂

外加剂选用减水率高、流动性保持良好、对混凝土有明显增强作用、能减少混凝土收缩的大连信德生产的聚羧酸高性能减水剂。引气剂选用青岛科力生产的PC-2型引气剂。

#### 4.5 掺合料

粉煤灰选用营口华能生产的I级粉煤灰,营口华能电厂的粉煤灰品质稳定,符合国家相关标准和行业要求,并且在生产过程中采用了先进的生产工艺,可以确保粉煤灰的质量。

矿渣粉选用鞍钢鲅鱼圈分公司的S95级矿渣粉,鞍钢矿渣中的微粉末能够填充混凝土中的空隙,提高混凝土的密实性和耐久性,使混凝土收缩得到了降低,并减少裂缝的产生。同时鞍钢矿渣具有良好的流动性和可泵性,能够在施工过程中提高搅拌效率和泵送效率,从而提高施工效率和降低成本。

### 5 混凝土配合比设计

在进行配合比设计时,根据施工经验适当提高配置强度,根据《水运工程混凝土施工规范》并结合以往工程经验,初步确定水胶比为0.35,砂率为40%,并分别用纯河砂、50%河砂和50%机制砂混合、纯机制砂分别试拌混凝土进行对比试验。当选用河砂配制混凝土时,坍落度为200

mm、7 d抗压强度为47.6 MPa、28 d抗压强度为63.5 MPa;机制砂和河砂掺量均为50%时,坍落度为195 mm、7 d抗压强度为50.2 MPa、28 d抗压强度为64.4 MPa;选用机制砂不参加河砂来配制混凝土时,坍落度为200 mm、7 d抗压强度为52.1 MPa、28 d抗压强度为64.7 MPa。

通过试验结果可以看出,随着机制砂掺量的提高,混凝土28 d抗压强度没有明显变化,而选用机制砂配制的混凝土由于机制砂表面粗糙、棱角较多,在骨料间和骨料-水化凝胶间体现出较好的嵌集咬合作用,进而导致机制砂混凝土早期强度较高。机制砂在早期为海工混凝土提供了更高的强度和力学性能<sup>[7]</sup>。

对纯河砂、纯机制砂所配置的混凝土进行抗冻和抗氯离子渗透试验,试验结果见图2—图4。

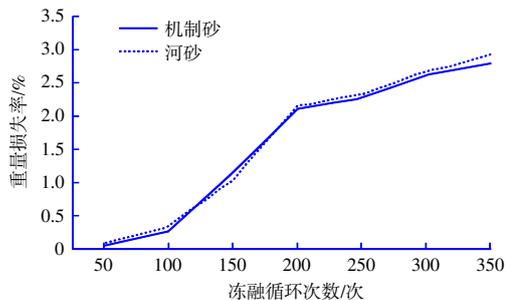


图2 重量损失率试验数据

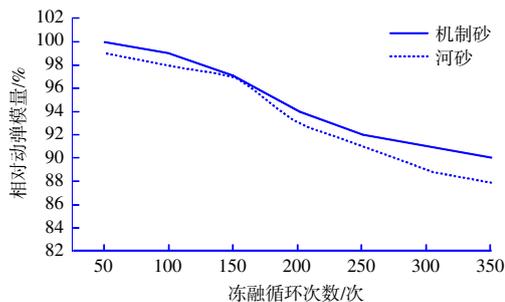


图3 相对动弹模量试验数据

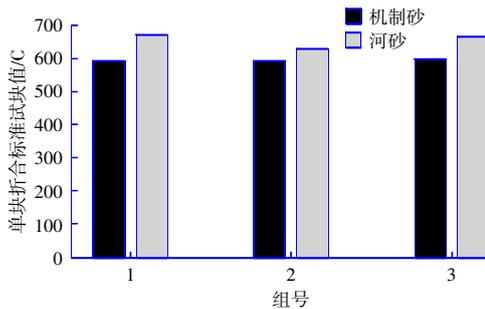


图4 混凝土28 d抗氯离子渗透性能试验数据

从试验结果来看,经过350次冻融循环,机制砂配置的混凝土试块重量损失率与河砂配置的混凝土试块相比差距不大,但机制砂配置的混凝土试块相对动弹模量要比河砂配置的混凝土试块高。并且在28d抗氯离子渗透性能上机制砂配制的混凝土试块比河砂配制的混凝土试块低。最终可以确定,与河砂配制的混凝土相比,机制砂混凝土配制C55F350高性能混凝土抗氯离子渗透性能和抗冻性能效果更好。

结合施工现场实际状况和经济效益等多方面因素综合考虑,确定选用纯机制砂作为细集料来配置C55F350高性能抗冻混凝土。并分别选用0.33、0.35、0.37水胶比以及39%、40%、41%砂率来进行试配以确定最佳配合比,试拌后选用机制砂配制的C55F350高性能抗冻混凝土力学性能和工作性能见表3。

表3 拌合物性能

水胶比	砂率/%	坍落度/mm	7 d 抗压强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa	工作性能
0.33	39	195	55.5	67.8	工作性能良好
0.33	40	190	55.9	68.3	工作性能良好
0.33	41	185	55.8	67.3	流动性差
0.35	39	205	53.3	64.5	石子有裸露
0.35	40	195	52.5	65.4	工作性能良好
0.35	41	200	53.0	65.0	工作性能良好
0.37	39	210	50.6	60.9	石子有裸露
0.37	40	205	51.9	61.8	扩展度较大
0.37	41	200	51.0	62.3	工作性能良好

结合试验数据并综合考虑工程实际情况,确定机制砂配制的C55F350高性能抗冻混凝土水胶比为0.35,砂率为41%。每方混凝土原材料用量为水泥318 kg、机制砂70 kg、碎石1 085 kg、水157 kg、减水剂7.99 kg、引气剂0.89 kg、粉煤灰84 kg、矿渣粉42 kg。测得混凝土坍落度为200 mm、含气量6.1%。

## 6 施工应用

C55F350高性能混凝土梁的施工流程为首先对为钢筋加工及绑扎,然后进行梁模板支立、浇

筑混凝土,浇筑完毕后对达到强度的梁进行预应力张拉,之后对混凝土进行凿毛,最后进行梁板倒运。

施工前对砂、碎石原材料进行含水率测定,在施工前出具施工配料单,同时开拌前对计量秤进行零点校核,校核合格后按照配合比进行称量,并做好记录,保证称量误差符合《水运工程混凝土施工规范》的要求。对首盘混凝土进行坍落度和含气量的测定,测定混凝土坍落度为200 mm,含气量6.2%。成型同条件抗压试块,罐车到达现场后混凝土和易性良好,满足施工要求。28 d后对现场梁进行检测,最终的得到现场混凝土梁28 d回弹强度为60.6 MPa,同条件试块抗压强度为59.4 MPa,标养试块抗压强度为64.1 MPa,混凝土强度均满足设计要求。对成型混凝土试块进行耐久性检测,混凝土抗氯离子渗透性能为597.3 C,350次冻融循环后相对动弹模量为90%,350次冻融循环后重量损失率为2.8%,试验结果表明机制砂配制的C55F350高性能抗冻混凝土耐久性满足设计要求。

## 7 结语

通过对C55F350高性能抗冻混凝土配合比的研究,确定了机制砂完全替代河砂在C55F350高性能梁板抗冻混凝土中应用的可行性,对其力学性能、施工关键控制技术参数、配合比配置等进行了研究,最终形成成套的试验配合比配置技术,为工程顺利实施提供试验技术支持,并为今后类似工程提供指导性建议。

## 参考文献:

- [1] GB/T 14684—2022,建设用砂[S].
- [2] 蒋正武,严希凡,梅世龙,等.机制砂特性及其在高性能混凝土中应用技术[C]/中国砂石协会.中国砂石协会2012年年会“砂石行业创新与发展论坛”论文集.2012:4—17.
- [3] 杨庆林.水利工程石粉改良机制砂混凝土力学性能试验研究[J].水利技术监督,2021(8):13—15.
- [4] JTS/T 236—2019,水运工程混凝土试验检测技术规范[S].
- [5] JTS 202—2011,水运工程混凝土施工规范[S].
- [6] GB 175—2007,通用硅酸盐水泥[S].
- [7] 周玉娟,徐文冰,潘根强,等.机制砂与河砂海工混凝土30 m预应力T梁的变形及开裂性能对比研究[J].施工技术,2016,45(23):109—114.