

基于高性能复配掺合料的大管桩混凝土配合比优化研究

高飞¹, 徐宝峰², 李硕¹, 陈红秀¹, 孙振¹

(1. 中交第三航务工程局有限公司江苏分公司科创公司, 江苏 连云港 222042; 2. 中交第三航务工程局有限公司, 上海市 200032)

摘要: 为提升海洋环境下大管桩混凝土的耐久性, 保障港口、桥梁等基础设施的安全性与使用寿命, 以连云港某港口工程为依托, 通过设计5组不同复配掺合料比例(0%、10%、20%、30%、40%)的配合比试验, 并结合维勃稠度、抗压强度、电通量及冻融循环测试, 系统探究了硅灰、粉煤灰及矿渣粉等高性能掺合料对大管桩混凝土性能的协同优化作用。结果表明, 掺入30%高性能掺合料(硅灰: 矿渣粉: 粉煤灰=30%: 35%: 30%)时效果最佳, 此时混凝土28 d抗压强度达84.6 MPa, 电通量降至453 C, 300次冻融循环后质量损失率仅3.9%。研究成果为大管桩混凝土耐久性提升提供了理论与技术支持。

关键词: 大管桩; 高性能复配掺合料; 抗氯离子渗透性; 抗冻性; 配合比优化

中图分类号: U444

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)12-0292-05

Research on Optimization of Concrete Mix Proportion for Large Pipe Piles Based on High-Performance Compound Admixtures

GAO Fei¹, XU Baofeng², LI Shuo¹, CHEN Hongxiu¹, SUN Zhen¹

(1. Science and Technology Innovation Company of Jiangsu Branch of China Communications Third Navigation Engineering Bureau Co., Ltd., Lianyungang 222042, China; 2. China Communications Third Navigation Engineering Bureau Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: To enhance the durability of large pipe pile concrete in the marine environments, the safety and service life of infrastructure such as ports and bridges should be ensured. Relying on a port project in Lianyungang, by designing five sets of mix ratio tests with different proportions of compound admixtures (0%, 10%, 20%, 30%, 40%), and combined with the Wiber consistency, compressive strength, electrical flux and freeze-thaw cycle tests, the synergistic optimization effect of high-performance admixtures such as silica fume, fly ash and slag powder on the performance of large pipe pile concrete is systematically explored. The results show that when 30% of high-performance admixtures (silica fume: slag powder: fly ash = 30%: 35%: 30%) are added, the effect is the best. At this point, the 28-day compressive strength of the concrete is reached 84.6 MPa, the electrical flux is dropped to 453C and the mass loss rate after 300 freeze-thaw cycles is only 3.9%. The research findings provide a theoretical basis and technical support for improving the durability of large pipe pile concrete.

Keywords: large pipe pile; high-performance compound admixture; chloride ion permeability resistance; freeze-thaw resistance; mix proportion optimization

0 引言

随着港口工程向深水化、大型化发展, 大管桩混凝土面临高强度与高耐久性的双重挑战。传统混凝土因抗氯离子渗透性差、早期强度不足等问题, 难以

满足复杂海洋环境需求^[1]。硅灰、粉煤灰及矿渣粉等工业废渣的复配技术, 通过火山灰效应与微填充作用, 可显著改善混凝土微观结构^[2-3]。本研究以连云港某港口工程为依托, 结合材料特性与工程需求, 提出一种高性能掺合料复配方案, 并系统验证其力学与耐久性能, 为类似工程提供参考。

为系统验证高性能掺合料复配方案的工程适用性, 结合海洋环境对混凝土“高强度、低渗透性、高抗冻性”的需求, 本研究以P·II 52.5水泥为基材, 选用硅灰(高火山灰活性)、矿渣粉(优化后期强度)、粉煤

收稿日期: 2025-03-27

作者简介: 高飞(1981—), 男, 学士, 高级工程师, 从事质量检测工作。

通信作者: 徐宝峰(1982—), 男, 学士, 高级工程师, 从事质量检测管理工作。电子信箱: 179214932@qq.com

灰(改善流动性)复配体系^[4],搭配Ⅱ区中砂与5~20 mm 碎石,基于水胶比0.35设计0%~40%掺合料梯度试验;通过维勃稠度、抗压强度等测试评估混凝土宏观性能,并借助扫描电子显微镜分析其微观孔隙结构,形成“材料选型-配合比优化-性能表征-机理分析”的完整研究链条,为后续试验提供理论与方法支撑。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料性能分析

1.1.1 水泥

采用P·Ⅱ52.5水泥,对其性能指标进行检测,结果见表1。

表1 水泥性能指标

抗折强度/MPa		抗压强度/MPa		凝结时间/min		氯离子含量/%	密度/(g·cm ⁻³)	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)
3 d	28 d	3 d	28 d	初凝	终凝			
5.3	8.7	33.8	59.4	139	205	0.026	3.13	344

表2 细集料技术指标测试结果

含泥量/%	泥块含量/%	表观密度/(kg·m ⁻³)	堆积密度/(kg·m ⁻³)	氯离子含量/%	硫化物及硫酸盐含量/%	14 d碱活性/%	坚固性/%
1.0	0.4	2 540	1 460	0.002	0.28	0.04	4

表3 粗骨料性能指标测试结果

筛分析/mm	含泥量/%	泥块含量/%	针片状颗粒含量/%	压碎指标/%	表观密度/(kg·m ⁻³)	堆积密度/(kg·m ⁻³)	坚固性/%	14 d碱活性/%
5-20	0.4	0.1	8	6.5	2 650	1 560	1	0.04

表4 HJSX-A型聚羧酸高性能减水剂性能指标测试结果

pH值	氯离子含量/%	硫酸钠含量/%	减水率/%	7 d抗压强度比/%	28 d抗压强度比/%	凝结时间差/min		含气量/%
						终凝	初凝	
5.26	0.028	0.71	26	158	146	+80	+75	3.2

表5 FDC-1型高性能复配掺合料化学成分和物理性能

指标	硅灰	粉煤灰	矿渣粉
SiO ₂ 含量/%	92.5	52.3	38.6
28 d活性指数/%	134	105	131
比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	28 500	420	450

注:硅灰的高比表面积可显著提升混凝土早期水化速率,矿渣粉、粉煤灰可优化混凝土后期强度发展^[3,5]。

1.2 配合比设计

基于水胶比0.35,设计5组掺合料梯度试验(0%、10%、20%、30%、40%),混凝土配合比见表7。

1.3 试验方法

1.3.1 维勃稠度

参照《水运工程混凝土试验检测技术规范》(JTS/

表6 FDC-1型高性能混凝土复配掺合料性能指标

密度/(g·cm ⁻³)	蒸养后活性指数/%			流动度比/%	氯离子含量/%	烧失量/%	安定性	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)
	蒸养后	3 d	28 d					
2.58	131	134	105	103	0.01	2.58	合格	716

1.1.2 细集料

采用天然河砂,细度模数为2.8的Ⅱ区中砂,相关检测结果见表2。

1.1.3 粗集料

采用5~20 mm连续粒径碎石,其性能指标检测结果见表3。

1.1.4 减水剂

采用HJSX-A型聚羧酸高性能减水剂(标准型)外加剂,其性能指标检测结果见表4。

1.1.5 高性能复配掺合料

采用FDC-1型高性能复配掺合料(其中硅灰30%、矿渣粉35%、粉煤灰30%),其比表面积为716 m²/kg;化学成分、物理性能及其他性能指标见表5、表6。

T 236—2019)要求,选用维勃稠度测试方法对混凝土拌合物工作性能展开量化评估。该方法能够有效反映混凝土拌合物的稠度状态,为评估混凝土施工和易性提供关键数据支持。

1.3.2 抗压强度

制备尺寸为100 mm的立方体试块,在标准养护条件下分别养护至7、28 d龄期。随后,通过压力试验机对试块施加压力,测定其抗压强度数值。此试验流程严格遵循相关标准规范,旨在精准获取不同龄期混凝土的抗压性能数据。

1.3.3 电通量

依据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方

表7 混凝土配合比						单位: kg/m ³
组别	水泥	掺合料	砂	石	水	减水剂
C80(A)	508	0	522	1 296	127	5.59
C80(B)	457	51	522	1 296	127	5.59
C80(C)	406	102	522	1 296	127	5.59
C80(D)	356	152	522	1 296	127	5.59
C80(E)	305	203	522	1 296	127	5.59

法标准》(GB/T 50082—2024)标准,针对养护至56 d的混凝土试件,开展氯离子渗透性测试。通过测定混凝土试件在规定直流电压下6 h内通过的电通量,以此评估混凝土抵抗氯离子渗透的能力,为混凝土耐久性研究提供重要参考依据。

1.3.4 抗冻性

依据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中的快冻法,对混凝土抗冻性能进行测试。试验过程中,将混凝土试件经历300次冻融循环,根据试件在循环过程中的质量损失、动弹模量变化等指标,综合评判混凝土的抗冻性能^[6]。

1.3.5 微观检测

选用SYD-XW2型号的扫描电子显微镜,将加速电压设定为15 kV,工作距离维持在10 mm。通过这些测试条件,对不同配合比的混凝土试样进行微观成像,以获取清晰的混凝土微观孔隙结构图像,深入分析孔隙分布特征。

2 试验结果与分析

2.1 工作性能分析

掺合料显著改善了混凝土和易性。其中掺合料比例为30%的混凝土维勃稠度达32 s,较基准组(18 s)提升77.8%,归因于粉煤灰的滚珠效应与硅灰的减水作用。

维勃稠度测定结果及分析见表8、维勃稠度随掺合料掺量变化趋势见图1。

表8 维勃稠度测定结果及分析			
掺合料比例/%	维勃稠度/s	标准差/s	关键影响因素分析
0	18	±1.2	基准组,无掺合料
10	24	±1.5	初始流动性下降
20	29	±1.8	粉煤灰效应显现
30	32	±2.0	最优工作性区间
40	36	±2.3	黏度显著增加

2.2 力学性能分析

当掺合料占比达到30%时,混凝土试件在7、28 d龄期的抗压强度分别为78.8、84.6 MPa,相较于基准配合比分别提高了20.1%、16.9%(见表9)。

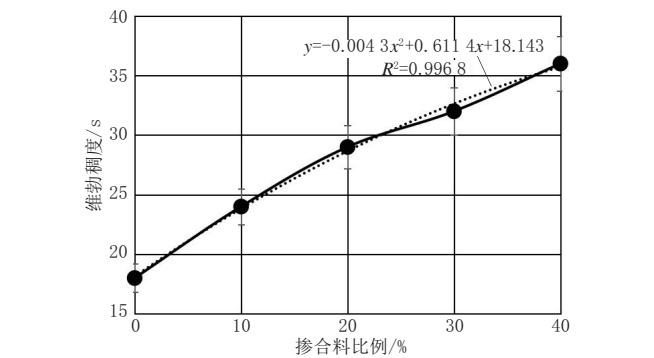


图1 维勃稠度随掺合料掺量变化趋势

表9 不同掺合料掺量下混凝土力学性能对比					
掺合料比例/%	7 d 抗压强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa	7 d 强度提升率/%	28 d 强度提升率/%	关键说明
0(基准)	65.6±1.8	82.3±2.1			P·II 52.5 水泥基准
10	68.2±1.9	84.6±2.2	+4.0	+2.8	初始效果显现
20	73.8±2.0	88.9±2.3	+12.5	+8.0	协同效应显著
30	78.8±2.1	84.6±2.2	+20.1	+16.9	最优性能组
40	72.6±1.9	76.8±2.0	+10.7	-6.7	胶凝材料不足

2.3 耐久性分析

2.3.1 电通量

在本次研究中,C80(D)组混凝土的电通量测定值为453 C。与基准组相比,该数值显著降低,降幅达40.6%。这一结果充分表明,C80(D)组中硅灰与矿渣粉发挥了协同作用。硅灰具有极高的比表面积和火山灰活性,能与水泥水化产生的氢氧化钙迅速反应,生成更多的水化硅酸钙凝胶^[7],细化混凝土内部孔隙;矿渣粉在碱性激发剂作用下,也参与二次水化反应,进一步填充孔隙。二者协同使得混凝土内部孔隙结构得到有效细化,减少了连通孔隙数量,极大地阻碍了氯离子在混凝土中的传输路径,从而显著降低电通量,提升了混凝土抵抗氯离子侵蚀的能力,增强了结构的耐久性。

2.3.2 抗冻性

经300次冻融循环后,对各试验组混凝土性能进行检测,结果表明C80(D)组表现突出。其质量损失率仅为3.9%,动弹模量保留率达86.9%,这2项指标均优于其他组别。在冻融循环过程中,混凝土内部孔隙中的水分反复冻结和融化,产生膨胀应力和渗透压力,可能导致混凝土内部结构损伤,表现为质量损失和动弹模量下降。C80(D)组较低的质量损失率和较高的动弹模量保留率,说明其内部结构在多次冻融循环后依然保持相对完整,抵抗冻融破坏能

力较强。这得益于 C80(D)组合理的配合比设计,以及硅灰、矿渣粉等掺合料对混凝土微观结构的优化,使其具有更加致密的孔隙结构,能够有效缓解冻融过程中的内应力,降低损伤累积^[8],从而展现出优异的抗冻性能。

耐久性分析结果见表 10。

表 10 不同掺合料掺量下混凝土耐久性数据对比

掺合料 比例/%	电通量/ C	较基准组 降幅/%	300 次冻融循环结果	
			质量损失率/%	动弹模量保留率/%
0	763±25		6.5±0.3	73.6±2.1
10	694±22	-9.0	5.2±0.2	78.5±2.3
20	546±18	-28.4	4.3±0.2	81.4±2.4
30	453±15	-40.6	3.9±0.1	86.9±2.5
40	703±20	-7.9	5.9±0.3	75.9±2.2

2.4 微观分析

从获取的图像(见图 2)中深入分析孔隙分布特征,发现 C80(D)组呈现出与其他组别有显著差异的结构特点。其孔隙数量明显少于普通配合比的混凝土,且孔径分布更为集中在较小尺寸范围。大尺寸的毛细孔在该组混凝土中极为少见,取而代之的是大量均匀分布的纳米级凝胶孔。这些凝胶孔被紧密排列的水化硅酸钙凝胶等水化产物所环绕,水化产物相互交织、搭接,构建起了坚实且连续的网络结构。

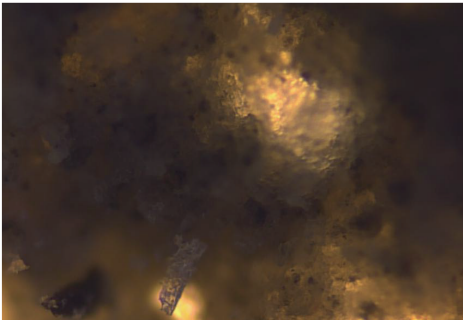


图 2 C80(D)组混凝土致密孔隙结构

3 工程应用与经济效益

在工程应用过程中,混凝土技术的优化展现出显著的经济效益和环保效益。

3.1 成本节约

通过对配合比的精心设计与优化,采用 30% 高性能掺合料复配体系(硅灰:矿渣粉:粉煤灰=30%:35%:30%,对应 C80(D)组)替代部分水泥,混凝土中的水泥用量从基准组(C80(A))的 508 kg/m³降至 356 kg/m³,实现节约水泥 152 kg/m³。基于当前水泥市场综合单价 580 元/t 及掺合料综合单价 435 元/t^[9]

核算,这一举措使得 C80 混凝土成本降低了 22.8 元/m³。这不仅直接降低了工程的材料成本,而且在大规模工程建设中,随着混凝土使用量的增加,成本节约效果将愈发显著,为项目整体经济效益提升提供了有力支撑。

3.2 施工效率

采用优化后的加压振动工艺^[10],混凝土施工质量在密实性、强度稳定性、外观及耐久性等核心指标上得到明显改善。该工艺有效减少了混凝土构件中蜂窝缺陷的出现频率^[11]。在实际施工检测中,构件的合格率从优化前的 90% 大幅提升至 98%。较高的合格率意味着减少了因缺陷导致的返工次数,缩短了施工周期,进而提高了施工效率,间接降低了工程的时间成本和管理成本。

3.3 环保效益

在混凝土制备过程中,大力推进工业废渣的资源化利用。经实践验证,工业废渣在混凝土中的利用率高达 65%^[12]。这一举措不仅实现了工业废弃物的有效处置,减少了对环境的潜在污染,还显著降低了混凝土生产过程中的碳排放。经测算,相较于以普通硅酸盐水泥为单一胶凝材料、工业废渣掺量低于 30% 的传统混凝土生产工艺,该方法减少碳排放达 12.3%,为推动建筑行业的绿色可持续发展做出了积极贡献。

4 结 语

(1)当混凝土中掺入 30% 的高性能复配掺合料,且掺合料组成为硅灰:矿渣粉:粉煤灰=30%:35%:30% 时,混凝土展现出最优综合性能。在强度性能方面,混凝土 28 d 抗压强度可达 84.6 MPa,显示出良好的力学承载能力;在耐久性指标上,电通量仅为 453 C,表明其具有卓越的抵抗氯离子渗透能力,能有效保障混凝土结构在恶劣环境下的长期稳定性。

(2)活性成分与水泥水化产物发生二次反应生成凝胶物质,同时超细颗粒对孔隙结构的填充优化,实现了混凝土耐久性的系统性提升。

(3)相较于传统方案,该优化方案可降低综合成本 15%~20%。成本的降低不仅源于水泥等原材料的节约,还得益于施工效率提升带来的时间成本和管理成本的减少。此外,工业废渣在混凝土中的大量使用,工业废渣利用率大幅提高,实现了废弃物的资源化利用,有效减少了碳排放,在获取显著经济效益的同时,展现出突出的环保效益,为建筑行业的绿

色、可持续发展提供了切实可行的路径。

参考文献:

- [1] 田培,王起才.矿物掺合料对大管桩混凝土性能的影响[J].混凝土,2015(8):134-137.
- [2] 吴中伟,廉慧珍.高性能混凝土[M].北京:中国铁道出版社,1999.
- [3] 王强,李华,张明.硅灰及矿渣粉对大掺量粉煤灰砂浆力学性能的影响[J].混凝土,2023(5):88-92.
- [4] 张伟,刘畅,陈宇.粉煤灰颗粒级配对混凝土抗氯离子渗透性能的影响[J].建筑材料学报,2024,27(4):890-896.
- [5] 李明,王华,张伟.矿渣粉-粉煤灰复配对混凝土早期强度及微观结构的影响[J].混凝土,2024(3):92-96.
- [6] LIU Y, ZHANG X, WANG Y. A novel carbon emission evaluation system for concrete considering freeze-thaw durability[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 390: 136012.
- [7] WANG Q, LI Y, LIU C. Effect of mineral admixtures on chloride ion permeability of concrete[J]. Journal of Materials Science, 2023, 58(12): 18234-18245.
- [8] SUN J, JIAO S, LI H. Research on durability of concrete with recycled aggregates[J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 402: 136897.
- [9] 房奎圳,刘畅,赵磊.水泥和混凝土的全生命周期碳排放核算[J].建筑材料学报,2025,28(1):1-10.
- [10] 李阳,张伟,刘洋.加压振动工艺对混凝土密实性影响的试验研究[J].施工技术,2023,52(10):45-49.
- [11] CHEN X, LI Y, WANG Z. Optimization of vibration parameters for high-performance concrete compaction[J]. Construction and Building Materials, 2024, 378: 131456.
- [12] ZHANG Y, LI H, WANG J. High-value utilization of industrial waste slag in concrete[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 350: 119034.
- (上接第282页)
- [7] 王腾飞.激光测距仪应用于隧道变形监测的试验研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2020.
- [8] 徐亚明,李佳妮,冯欣,等.基于B/S模式的核电站变形监测信息系统的设计与实现[J].测绘地理信息,2022(3):9-11.
- [9] 冯志勇,徐砚伟,薛霄,等.微服务技术发展的现状与展望[J].计算机研究与发展,2020(5):1103-1122.
- [10] 武汉大学测绘学院测量平差学科组.误差理论与测量平差基础[M].武汉:武汉大学出版社,2007.
- [11] 黄声享,尹辉,蒋征.变形监测数据处理[M].武汉:武汉大学出版社,2010.
- [12] 黄递全,向娟,田寿全.多源传感器数据采集系统的设计与实现[J].地理空间信息,2016(1):20-22.
- [13] 吴绍卫.WebSocket在实时消息推送中的应用设计与实现[J].福建电脑,2021(11):80-83.
- [14] 金亚兵,劳丽燕,刘川炜.工程结构安全自动化监测预警平台开发与应用[J].土木工程与管理学报,2021,38(6):38-44.
- [15] 石勇,易佳,熊桂开,等.基于多源监测传感器设备的运营轨道隧道安全分析[J].测绘通报,2024(增刊2):7-11.