



高性能混凝土在水工结构中的应用

吴梦恩, 李建军

(盐田港东区国际集装箱码头有限公司, 广东 深圳 518083)

摘要: 针对海水环境下混凝土结构易受侵蚀的问题, 通过介绍高性能混凝土在盐田港东作业区码头中的应用, 并进行大量的试验数据分析。结果表明, 采用较低的水胶比、优质原材料, 掺入足够数量的矿物掺合料和高效外加剂, 采用必要的质量控制措施, 生产出的混凝土可以很好地满足高耐久性、高工作性和高强度的要求, 可为水工结构混凝土提供借鉴。

关键词: 高性能混凝土; 电通量; 强度; 耐久性

中图分类号: U654

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)03-0190-06

Application of high-performance concrete in hydraulic structures

WU Meng'en, LI Jianjun

(Yantian East Port International Container Terminals Co., Ltd., Shenzhen 518083, China)

Abstract: Aiming at the problem that concrete structures are susceptible to erosion in seawater environment, we introduce the application of high-performance concrete in the wharf of Yantian Port east operation area, and carry out a large number of test data analysis. The results show that the concrete produced can meet the requirements of high durability, high workability and high strength by adopting lower water-binder ratio and high-quality raw materials, mixing a sufficient number of mineral admixtures and high-efficiency admixtures, and adopting the necessary quality control measures, which can provide reference for hydraulic structural concrete.

Keywords: high-performance concrete; electric flux; strength; durability

进入 21 世纪, 水工混凝土施工领域在新技术、新工艺、新材料、新设备等方面都取得了突破性进展^[1]。水工结构建筑物经常性或周期性受海水作用, 所采用的混凝土要求具有良好的抗渗透性。特别在水位变动区域, 要求混凝土具有较高的抗氯离子渗透性; 受侵蚀性水浸润时, 混凝土要求具有良好的耐蚀性; 为防止大体积混凝土温度裂缝的出现, 要求拌制混凝土的水泥具有低热性和低收缩性; 为满足水工结构的寿命要求, 对混凝土的耐久性能也提出了更高要求^[2]。高性能混凝土以其卓越的性能在水工结构中得到广泛应用, 成为保障水工建筑物安全、稳定和长期运行的重要材料。本文以盐田港东港区码头上部结

构混凝土为例, 介绍高性能混凝土在水工结构中的应用。

1 工程概况

盐田港东作业区一期工程码头及护岸工程建设 3 个 20 万吨级集装箱泊位, 码头岸线长 1 470 m, 为高桩梁板结构形式。码头后方护岸主体结构为抛石斜坡堤, 码头后方与陆域形成区过渡段护岸和陆域形成区护岸为直立堤结构^[3]。为保证码头主体结构 50 a 无大修的目标, 设计使用高性能混凝土。具体要求: 1) 水工主体结构混凝土设计强度等级为 C45, 胶凝材料用量 $\geq 400 \text{ kg/m}^3$, 56 d 电通量 $\geq 1 000 \text{ C}$ 。水灰比不得超过 0.35。混凝土

收稿日期: 2024-09-27

作者简介: 吴梦恩 (1990—), 男, 工程师, 从事港口工程质量管理。

氯化物含量之和不大于胶凝材料质量的0.1%,混凝土总碱含量 $\leq 3 \text{ kg/m}^3$ 。2) 在浇筑点混凝土卸料时最后测得的坍落度值和流动性不得低于最先测得数值的80%。3) 1 h最大泌水量不得超出净拌和用水量的0.5%。4) 在停止泌水前,最大总泌水量不得超出净拌和用水量的1.5%。5) 终凝时

间不得超出20 h。

2 原材料

2.1 水泥

本工程采用华润(封开)水泥厂生产的P·II 42.5R水泥。各项指标的检测结果见表1。

表1 华润水泥检测结果

Tab.1 Test results of Huarun cement

检测项目	标准稠度用水量/%	初凝时间/min	终凝时间/min	比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$	安定性(试饼法)	氯化镁/%	氯离子含量/%	三氧化硫/%	3 d抗折强度/MPa	3 d抗压强度/MPa	28 d抗折强度/MPa	28 d抗压强度/MPa	不溶物含量/%
检测结果	26.6	115	173	360	合格	3.44	0.026	2.46	6.5	38.2	9.0	57.6	0.16

2.2 矿物掺合料

矿物掺合料采用深圳妈湾电厂F类I级粉煤

灰和成都东蓝星EBS-A-2半密微硅粉。粉煤灰检测结果见表2。

表2 粉煤灰检测结果

Tab.2 Test results of fly ash

需水量比/%	烧失量/%	细度(45 μm 方孔筛筛余)/%	氯离子/%	碱含量/%	三氧化硫含量/%
94	1.75	4.3	0.36	0.01	0.51

硅粉最主要的品质指标是 SiO_2 含量和细度。 SiO_2 含量越高、细度越细,其活性率越高。硅粉掺量越高,需水量越大,自收缩增大^[4]。一般来说,在混凝土中掺入1 kg硅粉后,为保持其流动性不变,一般需要增加1 kg用水量。因此将硅粉的掺量控制在5%~10%,并用高效减水剂调节需水量^[5]。本工程用的硅粉为成都东蓝星新材料有限公司生产,掺量为3%,相关性能参数见表3。

表3 硅粉的物理化学分析结果

Tab.3 Physicochemical analysis results of silica fume

需水量比/%	活性指数/%	比表面积/ $(\text{万 m}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$	烧失量/%	SiO_2 含量/%
124	102	2.2	2.51	92.98

2.3 集料

粗集料采用的是河源芙蓉石场的粒径5~10 mm和10~20 mm单级配集料,经检测,无碱活性。属辉绿岩,粒形好,岩石抗压强度140 MPa,压碎指标不超过2%。

细集料采用惠州东江洁净的天然河砂,细度模数2.5~2.9,含泥量在1.5%以内,泥块含量不超过0.5%。

2.4 减水剂

减水剂采用深圳五山生产的聚羧酸缓凝高效减水剂,减水率大于25%,2.5 h坍落度损失不超过20%,保坍性能好。

3 试验分析

3.1 高性能混凝土的配制

3.1.1 配制原则

1) 科学使用各种外加剂。包括外加剂的选用、各种外加剂小料的复合、外加剂的最佳掺量,从而达到与水泥间的相容性良好、混凝土坍落度经时损失小的要求^[6]。采用高效减水剂以尽量减小混凝土的水胶比,从而提高混凝土的强度。

2) 合理使用掺合料的技术。包括掺合料的选用、各种掺合料的复合、掺合料的掺量。通过流动性、强度与耐久性对比试验进行优选^[7],其中流动性与电通量的对比试验最为关键。

3) 严格控制粗细集料质量。包括粗细集料的选择和集料碱活性的检测。优选母岩强度高、压碎指标小的碎石。碎石级配好,粒形圆润,配制出的混凝土工作性好,密实度高。砂子的选择应

当以洁净的河砂为宜，含泥量小于 1.5%、细度模数 2.6~2.8 的中砂。粗细集料的比例可通过调整合理的砂率达到混凝土的工作性更佳。

3.1.2 配合比

按上述原则进行配合比设计，配制出满足工

作性要求的混凝土拌和物，经标准养护至规定龄期测定其力学性能和耐久性指标，确定试验室配合比；试验室配合比确定后，进行连续 3 d 设备试拌。试拌全部合格后，确定上部结构混凝土的最终配合比，见表 4。

表 4 上部结构混凝土最终配合比

Tab. 4 Final mix proportion of concrete for superstructure

水	水泥	硅粉	粉煤灰	5~10 mm 碎石	10~20 mm 碎石	砂	减水剂	设计坍落度/mm
144	308	13	106	210	970	670	5.76	180±30

3.2 性能试验

为了确保高性能混凝土稳定性，进行连续 3 d 的设备试拌，每天生产 9 m³ 混凝土。从出机至 2.5 h，等间隔 6 次取样制作试块，测定混凝土的和易性、不同龄期的强度和电通量。当连续 3 d 试验结果全部合格时，该配合比方可用于实际工程。

3.2.1 工作性

控制好混凝土的工作性不仅施工方便，而且也有利于混凝土质量的保障。工作性应包括：流动性、保水性和黏聚性。工作性应满足现代混凝土施工工艺的要求，坍落度大及坍落度损失小；泌水小，抗离析，均匀性好；可泵性好；填充性好^[8]。良好的工作性是高性能混凝土质量控制的重要指标，对混凝土质量起决定性作用^[9]。拌和物连续 3 d 的坍落度和扩展度经时损失见图 1。

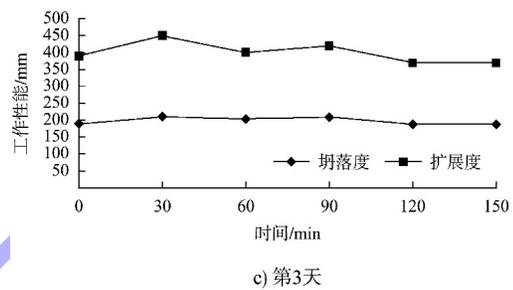


图 1 拌和物工作性能经时损失

Fig. 1 Time-dependent loss of workability of mixture

150 min 内坍落度损失基本为零，随着聚羧酸减水剂的保坍成分与水泥相互作用，扩展度先增大，最终趋于出机状态。拌和物在此期间无泌水、无离析、和易性较好。

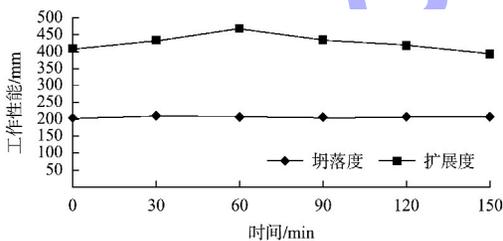
3.2.2 抗压强度

混凝土立方体抗压强度见表 5。

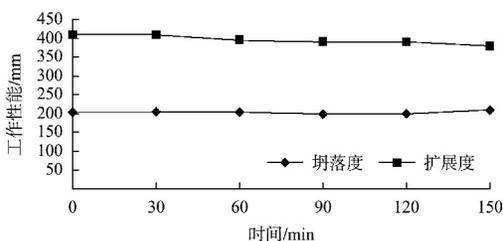
表 5 混凝土力学性能

Tab. 5 Mechanical properties of concrete

拌和 时间	试验 编号	7 d 抗压 强度/ MPa	平均值/ MPa	28 d 抗压 强度/ MPa	平均值/ MPa	达到设计 强度 比例/%
第 1 天	1	59.0		71.8		
第 1 天	2	60.5	60.8	82.9	78.6	175
第 1 天	3	62.9		81.2		
第 2 天	4	60.2		73.2		
第 2 天	5	66.4	63.8	79.3	78.6	175
第 2 天	6	64.7		83.2		
第 3 天	7	62.9		74.8		
第 3 天	8	70.4	68.3	76.8	79.0	175
第 3 天	9	71.7		85.3		



a) 第1天



b) 第2天

所有试件的 28 d 抗压强度远远超过设计强度, 达到高强混凝土标准。且连续 3 d 的试件强度平均值都在 79.0 MPa 左右, 强度波动小, 也体现了混凝土配合比的稳定性。水胶比为 0.35, 表明低水胶比对混凝土强度的重要性。

3.2.3 电通量

在海水环境中的混凝土结构, 电通量可以有效反映混凝土的抗渗透能力, 可用于判断混凝土能否长期抵抗海水的侵蚀。连续 3 d 拌和的混凝土电通量数据见表 6。

表 6 连续 3 d 拌和的混凝土 28 d 电通量数据
Tab. 6 28-day electric flux data of concrete mixed for three consecutive days

拌和时间	28 d 电通量/C			28 d 电通量 平均值/C
	试验 1	试验 2	试验 3	
第 1 天	472	410	443	442
第 2 天	429	430	436	432
第 3 天	386	375	397	386

对于掺加粉煤灰和矿物掺合料的混凝土, 一般采用 56 或 90 d 龄期的试件进行电通量试验。由表 5 可以看出, 连续 3 d 拌和的混凝土 28 d 电通量都远小于 1 000 C, 预计 56 d 的试件会更低。较低的电通量值意味着混凝土对水分和侵蚀性离子的渗透阻力较大, 能够更好地保护内部钢筋不被腐蚀, 从而提高混凝土结构的耐久性, 达到码头 50 a 无大修的目标。

4 工程应用

为了更好地保证工程结构的质量, 采用与工程实际相同的工艺和结构, 浇筑了 1 块 4.6 m×2.0 m×2.0 m(长×宽×高)的梁。对混凝土拌和物以及梁身进行了抽芯测试, 混凝土电通量和强度随时间变化的检测数据见图 2、3。

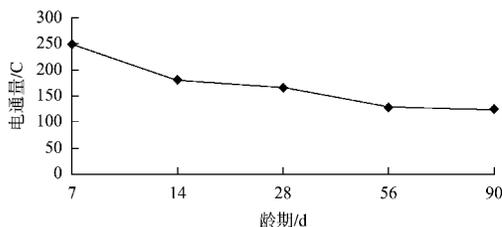


图 2 混凝土电通量随时间的变化
Fig. 2 Changes of electric flux of concrete with time

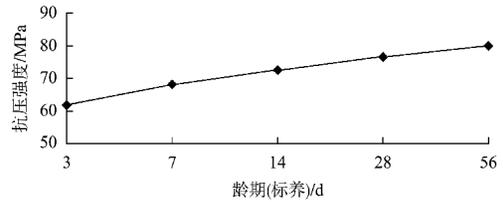


图 3 混凝土强度随时间的变化
Fig. 3 Changes of concrete strength with time

由图 2、3 可以看出, 随着水泥水化的进行, 电通量的大小随着龄期增加而下降, 90 d 龄期电通量是 124 C; 28 d 抗压强度与设备试拌时的数据基本吻合, 说明该混凝土配合比用于工程实际是稳定可靠的。

码头上部结构采用梁格一体化浇筑工艺, 使用模板安装、钢筋绑扎和混凝土浇筑形成流水化施工, 既满足工期目标又能保证质量。梁格混凝土经过多次取样检测, 混凝土 28 d 抗压强度和 56 d 电通量见图 4 和 5。

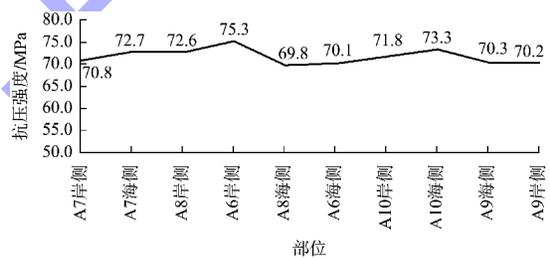


图 4 混凝土标养 28 d 抗压强度
Fig. 4 Compressive strength of concrete under standard curing for 28 days

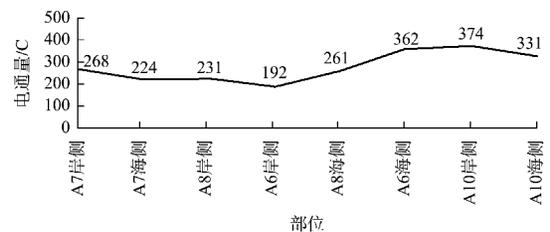


图 5 混凝土 56 d 电通量
Fig. 5 56-day electric flux of concrete

可以看出, 在原材料不变的情况下, 混凝土 28 d 抗压强度在 70 MPa 左右, 56 d 电通量在 400 C 以下。证明高性能混凝土的强度和耐久性均较高, 可以很好地抵抗海水中氯离子对码头结构的侵蚀。

5 质量控制

5.1 生产中质量控制

1) 应严格控制原材料的质量, 优良的原材料是配制高性能混凝土的基础^[10]。

2) 单盘混凝土搅拌时间应控制在 120 s, 以保证搅拌的均匀性。原材料配合比、砂石含水率确定后, 整个生产过程一键启动, 不允许二次加水, 极大保证了混凝土的质量稳定性。

3) 混凝土原材料计量偏差必须满足规范要求, 发现超差应立刻进行检查, 调整下料速度以及下料仓开关门时间。允许偏差见表 7。

表 7 各种原材料计量的允许偏差 (按质量计)
Tab. 7 Allowable deviations for measurement of various raw materials (by mass)

原材料种类	单盘计量允许偏差/%	累计计量允许偏差/%
胶凝材料	±2	±1
粗、细集料	±3	±2
拌和用水	±2	±1
外加剂	±1	±1

4) 拌和前对原材料进行温度控制, 水泥温度一般不能超过 65 °C。根据情况设置不同的冰池, 在拌和水中加入冰块冷却水温, 使拌和水温度控制在 3 °C 以下。控制混凝土有较低的出机温度, 以保证混凝土入模温度不超过 32 °C, 从而减少里表温差过大导致的温度裂缝。

5) 混凝土出机后进行出厂和进场检验, 分别在搅拌站和现场浇筑地点进行坍落度、扩展度和温度测试, 使混凝土工作性满足施工要求。

5.2 浇筑过程中质量控制

1) 浇筑顺序应根据混凝土的结构特点和供应能力, 确定合理的浇筑顺序。采用 2 台天泵, 1 台布置在边部轨道梁部位, 另 1 台布置在边纵梁和中纵梁部位, 满足连续浇筑的功效。分层浇筑时, 控制每层的浇筑厚度, 避免过厚导致混凝土振捣不密实。

2) 选择插入式振捣器, 均匀、密实地振捣, 避免过振或漏振。每次振捣时间控制在 20~30 s, 以混凝土表面不出现气泡和下沉为宜^[11]。

3) 在安排混凝土浇筑时尽量避免或减少设置施工缝, 如无法避免则将施工缝留置在结构受剪力较小且易于施工的部位, 施工缝采用垂直缝或水平缝, 分缝处采用镀锌收口网板, 水平施工缝采用在混凝土表面喷涂缓凝剂, 在混凝土终凝后采用高压水枪对施工缝处的混凝土表面进行清理, 剔除松动的石子和浮浆。

5.3 养护过程中质量控制

1) 混凝土浇筑完成后, 要及时进行养护, 防止混凝土因失水而产生裂缝, 养护时间不能少于 14 d。

2) 终凝前对混凝土表面采用塑料薄膜覆盖, 终凝后采用吸水材料进行覆盖洒水。

6 结语

1) 试验结果表明, 通过优化配合比设计、降低混凝土水胶比、选用高强度的集料、掺加硅粉和高效减水剂, 配制的混凝土可以满足高强度、高工作性和高耐久性的要求。

2) 工程应用表明, 高性能混凝土电通量数值随龄期增加而减小, 90 d 电通量数值较 28 d 减小 25%, 可以很好地抵抗海水中氯离子对码头结构的侵蚀, 延长结构寿命。

3) 必须从生产全过程进行质量控制, 精准的原材料配料, 足够的搅拌时间, 用冰水进行控温, 只有这样才能发挥高性能混凝土最大的作用。

4) 通过施工技术质量控制, 可进一步提高水工高性能混凝土的耐久性和工程质量。

参考文献:

- [1] 张卫军. 中国水工混凝土施工技术的进展[J]. 西北水电, 2007(4): 49-51.
ZHANG W J. Progress of hydraulic concrete construction technique in China[J]. Northwest hydropower, 2007(4): 49-51.
- [2] 胡兆球. 大掺量磨细矿渣水工高性能混凝土在三洋港挡潮闸枢纽中的应用[J]. 水利规划设计, 2011(1):

- 60-63.
- HU Z Q. Application of hydraulic high performance concrete with large amount of grinding slag in Sanyang Port tidal barrier hub[J]. Water resources planning and design, 2011(1): 60-63.
- [3] 陈亦瑞. 水运工程施工质量管理中 BIM 协同平台的应用[J]. 珠江水运, 2023(17): 13-15.
- CHEN Y R. Application of BIM collaborative platform in water transport construction quality management[J]. Pearl River water transport, 2023(17): 13-15.
- [4] 李恒. 浅谈高性能混凝土原材料及其选用[J]. 四川水泥, 2016(4): 334.
- LI H. Discussion on raw materials and selection of high performance concrete[J]. Sichuan cement, 2016(4): 334.
- [5] 刘超. 试析矿物掺和料对高性能混凝土的影响及其作用[J]. 大陆桥视野, 2010(21): 90-93.
- LIU C. Analysis of the effect and function of mineral admixture on high performance concrete [J]. New silk road horizon, 2010(21): 90-93.
- [6] 谢勇. 铁路现浇箱梁高性能混凝土的配制与施工控制[J]. 中华民居(下旬刊), 2013(2): 322-323.
- XIE Y. Preparation and construction control of high performance concrete for railway cast-in-place box girder[J]. China homes(last ten-day period of a month), 2013(2): 322-323.
- [7] 张永逸, 伍尉名. 研究系统化的高性能混凝土配合比设计要点[J]. 黑龙江交通科技, 2016, 39(7): 28-29.
- ZHANG Y Y, WU W M. The high performance concrete mixture ratio design research systematically [J]. Communications science and technology Heilongjiang, 2016, 39(7): 28-29.
- [8] 冯乃谦, 邢锋. 高性能混凝土技术[M]. 北京: 原子能出版社, 2000.
- FENG N Q, XING F. High-performance concrete technology[M]. Beijing: Atomic energy Press, 2000.
- [9] 郝丽峰, 王永志. 公路桥涵施工用水泥混凝土工作性问题处理方法探究[J]. 建筑工程技术与设计, 2018(3): 741.
- HAO L F, WANG Y Z. Discussion on the treatment of workability problems of cement concrete used in highway bridge and culvert construction [J]. Architectural engineering technology and design, 2018(3): 741.
- [10] 中交四航工程研究院有限公司, 中交第三航务工程局有限公司. 海港工程高性能混凝土质量控制标准: JTS 257-2—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd. Quality control standard of high-performance concrete for sea port engineering: JTS 257-2-2012 [S]. Beijing: China Communications Press, 2012.
- [11] 陈浩. 桥梁大体积混凝土施工技术及其质量控制[J]. 黑龙江交通科技, 2016, 39(8): 110-112.
- CHEN H. Construction technology and quality control of mass concrete for bridge [J]. Communications science and technology Heilongjiang, 2016, 39(8): 110-112.

(本文编辑 王璁)

(上接第 174 页)

- [9] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010(2016 年版) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- China Academy of Building Research. Code for seismic design of buildings: GB 50011-2010(2016 edition) [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [10] 中国建筑科学研究院. 空间网格结构技术规程: JGJ 7—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- China Academy of Building Research. Technical specification for space grid structures: JGJ 7-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.

(本文编辑 王传瑜)