

临海大体积抗渗抗腐蚀混凝土施工质量优化

曹涯温

(中交一航局西南工程有限公司)

摘要: 为提高临海建筑物大体积抗渗抗腐蚀混凝土施工质量, 结合现场实际应用中所涉及到的混凝土配合比、温控措施、浇筑工艺、养护方式等方面进行工艺提升试验, 利用理论计算、试验验证结合实际操作, 验证施工关键技术的可行性。提出的大体积抗渗抗腐蚀混凝土施工质量优化措施, 在优化混凝土配合比, 提升预拌混凝土半成品材料性能, 满足混凝土抗腐蚀性及耐久性设计要求的同时, 通过施工工艺改进和施工质量控制, 进一步确保混凝土抗渗性能和抗腐蚀性能的充分发挥, 有效保障了临海工程建筑物的使用寿命和安全性能。

关键词: 大体积混凝土; 临海建筑物; 配合比优化; 抗渗透; 抗腐蚀

0 引言

海洋环境具有湿度高、盐分和氯离子因素影响大的特性, 为满足临海建筑物混凝土结构的安全性、适用性以及耐久性, 通常要求所浇筑混凝土具有一定的抗渗抗腐蚀性能。抗渗混凝土主要通过提高内部密实度、掺用引气型外加剂、改善孔隙结构等措施达到抗渗的目的, 而抗腐蚀混凝土则主要通过添加抗腐蚀剂、选用适当的骨料、降低混凝土碱度等措施提高混凝土的耐腐蚀性能。此外, 大体积混凝土的内外温差控制、浇筑振捣密实、养护等施工工艺质量的把控对提高混凝土抗渗抗腐蚀性能具有重要作用^[1]。

1 工程概况

北海电厂二期(2 台 660 MW 机组)扩建工程新建循环水水泵房下部结构底板埋置深度达到 17.3 m, 底板为大体积钢筋混凝土结构, 设计长 40.6 m、宽 16.4 m、高 1.7 m, 采用一次浇筑成型, 浇筑方量 1 132 m³, 混凝土设计强度等级为 C40, 抗渗等级 W8。泵房底板上设置 3 道竖向隔墙, 墙体高度 15.4 m, 采用上下分段分层浇筑, 隔墙中间为泵房流道, 因此底板混凝土结构物与海水直接接触, 为提高混凝土抗腐蚀性和耐久性, 水泥选用普通硅酸盐水泥, 掺加抗硫酸盐外加剂和钢筋阻锈剂。

2 性能影响因素分析

大体积混凝土抗渗抗腐蚀性能影响因素较多, 主要从混凝土配合比、温控措施、浇筑工艺、养护方式等方面展开分析。

1) 配合比是影响混凝土整体抗渗抗腐蚀性能的关键因素之一, 在配制抗渗混凝土时, 需要根据所需强度等级和抗渗抗腐蚀要求, 通过试验验证确定适宜的配合比, 合理的配合比设计, 可以有效提高混凝土的强度和耐久性^[2]; 2) 合理的温控措施能够避免混凝土内外温差过大产生内部应力导致的结构裂缝、变形等问题, 从而提高混凝土抗渗抗腐蚀性能^[3]; 3) 浇筑工艺可以利用混凝土在模板中的排布和流动情况, 改善混凝土的致密性和均匀性, 减少混凝土中的空洞和裂缝, 提高其抗渗和抗腐蚀性能; 4) 适当的温湿度可以改善混凝土的水化速度和水化环境, 对混凝土各龄期强度发展起到积极的作用, 对混凝土塑性收缩裂缝、长期干缩裂缝、温度裂缝和化学物质侵蚀导致的裂缝有明显的抑制作用, 合理的养护措施能够显著提高混凝土的抗渗性、抗冻融性、抗腐蚀性和抗碳化性。

3 工艺优化

3.1 混凝土配合比优化

本项目中大体积混凝土性能参数要求如表 1 所示。

表 1 大体积混凝土性能参数表

强度等级	抗渗等级	最大水胶比	最低胶凝材料用量/(kg·m ⁻³)	最大氯离子含量/%	最大碱含量/(kg·m ⁻³)	28 d 龄期氯离子扩散系数/(m ² ·s ⁻¹)
C40	W8	0.40	360	0.10	3.0	≤6×10 ⁻¹²

常规工艺采用抗硫酸盐水泥配制抗腐蚀混凝

土,但由于抗硫酸盐水泥作为特种水泥,目前可选用的国内生产厂家生产规模并不大,考虑到数量、价格、运距以及工艺等不利因素的影响,在本项目临海泵房底板大体积混凝土的浇筑过程中,采用了由 BH-JK-NF 型高效抗腐蚀剂、BH-YJ-501 型钢筋阻锈剂、普通硅酸盐水泥、优质粉煤灰及粗、细骨料配制而成的防腐蚀混凝土,同时在混凝土中掺加 SPP-PC 聚羧酸高效减水剂,提高混凝土的抗渗效果^[4]。

表 2 抗渗抗腐蚀预拌混凝土配合比(重量比)

材料	P·O42.5 水泥	中砂	5~31.5 mm 碎石	饮用水	粉煤灰	SPP-PC 聚羧酸高效减水剂	BH-JK-NF 型高效抗腐蚀剂	YJ-501 型钢筋阻锈剂
配比	1.00	1.60	3.10	0.41	0.14	0.03	0.14	0.05

3.2 温控措施优化

大体积混凝土表观温度、内部温度及内外温差常规控制措施主要包括减少混凝土的发热量、降低混凝土的入模温度、埋设内部循环冷却水管等。为达到更好的温度控制效果,本项目在此基础上,采用将大体积混凝土保温法与降温法结合使用的方式,在混凝土浇筑后立即保温处理,并在浇筑和养护期间进行合理的降温处理,以达到更好的温度控制效果。

利用保温法在混凝土浇筑前将保温隔热材料提前铺设于基础侧模上,然后进行混凝土浇筑,浇筑完成后,在表面紧密覆盖塑料薄膜及湿润的毛毡,减少热量损失,防止混凝土表面过早干燥。

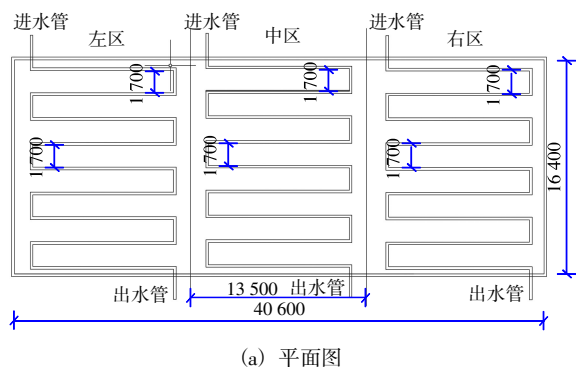
利用降温法在混凝土内部或表面设置冷却水

混凝土配合比试验验证中,试验用材料选用 P·O42.5 普通硅酸盐水泥,铝酸三钙含量为 7.1%;拌和用水采用淡水,其氯离子含量为 163~172 mg/L、硫酸根离子含量为 0.15%~0.18%、pH 值 ≥ 4 ;选用 BH-JK-NF 型抗硫酸盐腐蚀剂抗蚀系数 K 约为 0.92,28 d 氯离子扩散比约为 0.83,质量符合 JC/T 1011—2021《混凝土抗侵蚀防腐剂》规定要求。

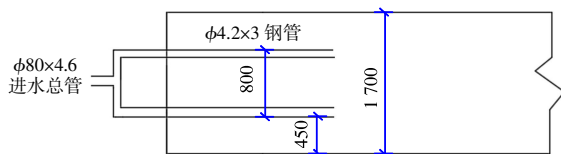
按表 2 配合比拌和混凝土,所配制的成品混凝土满足强度及抗渗、抗腐蚀等级要求。

管,利用水的循环流动带走混凝土内部的热量,从而达到降低混凝土内部温度,调节混凝土内外温差的目的。本次浇筑底板结构设计长 40.6 m,宽 16.4 m,高 1.7 m,考虑其结构长度及高度,冷却循环水管路按左、中、右 3 个循环系统安装,每个系统分上下 2 层单独布设,根据 GB 50204—2015《混凝土结构工程施工质量验收规范》,冷却水管均匀布置,铺设密度依据实际需求确定,且上下间距不大于 800 mm,与混凝土表面垂直距离需保持在 100 mm 以上,因此本工程冷却水管平面布置间距为 1.7 m,上下间距为 0.8 m,选用 $\phi 42 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 钢管作为冷却水管,管路布置示意图如图 1 所示。

混凝土温控测量采用电阻式温度传感器作为



(a) 平面图



(b) 立面图

图 1 循环冷却水管路布置示意图(mm)

基本测量单元,整个底板浇筑面布测按水平面间距 5 m 均匀布置,立面布置于底板基础中间部位,安装时使用绝缘材料与钢筋隔离接触,封装后埋设于混凝土内部,每一测点温度传感器均与温度测控仪相连,混凝土浇筑及后期养护过程中,根

据传感器反馈温度及时调节进水管进水温度。

3.3 浇筑工艺优化

大体积混凝土浇筑常规工艺分层浇筑可以减少模板的振动时间,增加混凝土的均匀性,强化混凝土密实程度,同时合理设置排气口和振捣点,

也可以减少混凝土中的空洞和裂缝, 提高其抗渗抗腐蚀性能。本项目在此基础上, 采用“上下分层、单次斜坡、薄层浇筑、逐次推进”的方法浇筑底板混凝土, 最大限度减少混凝土外露面, 提高混凝土浇筑强度, 缩短浇筑时间。混凝土浇筑顺序示意图如图 2 所示。

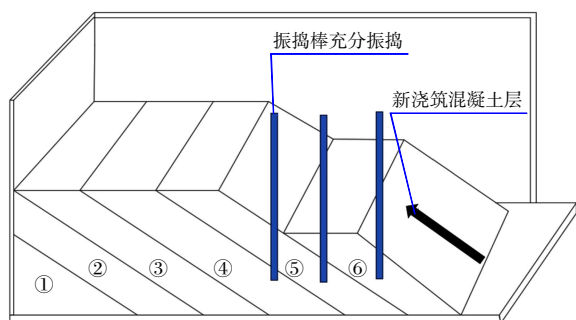


图 2 混凝土浇筑顺序示意图

混凝土分层浇筑厚度参照 GB 50666—2011《混凝土结构工程施工规范》, 在冬期施工时, 混凝土分层浇筑厚度不应大于 500 mm。此外, 浇筑基础混凝土时, 一般应分层浇筑, 每层混凝土厚度宜为 300~500 mm。因此本工程混凝土按 40 cm 分层泵送浇筑, 自然形成薄层斜坡面, 按照间距 3 m 布置振捣棒工作区间, 振捣棒移动间距为 30~50 cm, 确保新旧混凝土面结合紧密, 混凝土振捣密实, 避免产生空洞及渗透路径。

3.4 养护方式优化

针对养护所需的保温保湿问题, 在泵房底板大体积混凝土侧面采用“胶合板+塑料薄膜”的组合形式, 顶面面层采用“两膜夹一布”的组合形式。底板侧模利用铅丝在原胶合板模板与混凝土接触面处固定一层塑料薄膜, 浇筑过程中有利于与侧模接触面部分的混凝土振捣所产生气泡的顺利排除, 且在后期浇筑完成后的养护过程中达到保湿效果。对于面层混凝土, 待浇筑结束 6~8 h 后, 混凝土处于初凝阶段时, 及时洒水养护, 并在其上部依次布设 1 层塑料薄膜、1 层润湿毛毡布以及 1 层塑料薄膜, 其最上面塑料薄膜与毛毡布之间可通过搁置物形成一定空间, 不用紧贴, 这样在混凝土水化热反应表面升温时, 利用上层的塑料薄膜可实现一定的“蒸养”效果。

4 混凝土温控材料厚度选择

参照 GB 50496—2018《大体积混凝土施工标准》, 混凝土养护保温材料厚度计算公式^[9]见式(1)。

$$\delta = 0.5h\lambda_x(T_b - T_q)K_b / \lambda(T_{\max} - T_b) \quad (1)$$

式中: δ 为保温材料厚度, m; h 为结构物高度, m, 取 1.7 m; λ_x 为所选保温材料导热系数, W/(m·K), 毛毡材料取 0.05 W/(m·K); T_b 为混凝土表面温度, °C; T_q 为施工时大气平均温度, °C; λ 为混凝土导热系数, 取 2.33 W/(m·K); $T_{\max}$ 为计算得混凝土最高温度; K_b 为传热系数修正值, 两膜夹一布覆盖方式取 1.3。

由于混凝土表面温度与大气温度温差控制在 20 °C 以内, 表面温度与内部温度温差控制在 25 °C 以内, 因此 $(T_b - T_q)$ 取值为 20 °C, $(T_{\max} - T_b)$ 取值为 25 °C, 经过计算可得: $\delta = 0.019 \text{ m} \approx 2 \text{ cm}$ 。因此保温材料厚度选用 2 cm 即可。

5 工艺应用

5.1 混凝土配合比优化应用

实际应用时, 混凝土配合比中粗、细骨料均按干重计, 生产时按照实测含水率换算使用, 且试配坍落度须在设计坍落度范围内, 如不在范围内, 可通过增加或减少外加剂掺量的方式直至坍落度满足设计规范要求, 可参照每 10 mm 误差相应增减 0.1% 掺量进行调整。

1) 混凝土抗压抗渗试验

对防腐混凝土试件进行了抗渗试验, 水压加至 1.0 MPa 时, 试件均未出现渗水, 其抗渗等级全部满足要求。同时对相应的混凝土试件进行抗压强度试验, 强度等级也达到了设计要求。

2) 混凝土 28 d 龄期氯离子扩散系数性能试验

使用电化学方法进行氯离子扩散系数的测定, 测定步骤为: ①制备 $\phi 100 \text{ mm}$ 、高度为 $(50 \pm 2) \text{ mm}$ 的混凝土试件, 标准养护 28 d; ②清洗试件, 使用饱和的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液对试件进行真空饱盐处理; ③试件固定于 RCM 试验装置阴极试验槽, 安装装置阳极板, 注入浓度为 0.3 mol/L 的 NaOH 溶液; ④启动试验装置, 开始电迁移试验; ⑤试验结束, 利用 AgNO_3 溶液显色剂测定氯离子渗透深度^[6], 根据试验采集数据计算 28 d 龄期氯离子扩散系数。氯离子扩散系数性能试验参数如表 3 所示。

经试验验证, 混凝土试件氯离子扩散系数均小于 $6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, 满足设计要求。

3) 混凝土抗硫酸盐腐蚀干湿循环测试试验

混凝土抗硫酸盐腐蚀干湿循环测试试验步骤为: ①按设计要求的混凝土配合比浇筑成型 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 的混凝土试件, 标准养护 28 d;

表 3 氯离子扩散系数性能试验参数

组号	电压/V	温度/℃	试件厚度/mm	氯离子渗透厚度/mm	持续时间/h	氯离子扩散系数/($10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
第 1 组	50.0	20.4	50.1	17.2	24	4.719
第 2 组	50.0	20.4	50.2	16.9	24	4.640
第 3 组	50.0	20.5	50.2	17.6	24	4.845
第 4 组	60.0	22.3	50.2	18.7	24	4.341
第 5 组	60.0	22.4	50.0	19.2	24	4.447
第 6 组	60.0	22.3	49.9	18.9	24	4.364

②进行干湿循环试验，将试件在 5%Na₂SO₄ 溶液中浸泡 16 h，取出晾干 1 h，放入 80 ℃烘箱中烘干 6 h，冷却 1 h 后称重，一个循环为 24 h；③每 10 次用 NM-38 非金属超声检测分析仪测定纵向波速度，最后以 50 次循环后混凝土试件测定其质量损失小于 5%，且强度损失小于 25%，抗硫酸盐侵蚀性能满足要求。混凝土抗腐蚀干湿循环测试记录表如表 4 所示。

表 4 混凝土抗腐蚀干湿循环测试记录表

组号	初始试件质量/kg	干湿循环后试件质量/kg	质量损失率/%	初始试件强度/MPa	干湿循环后试件强度/MPa	强度损失率/%
第 1 组	2.52	2.41	4.4	46.5	40.8	12.3
第 2 组	2.49	2.39	4.0	45.8	41.2	10.0
第 3 组	2.53	2.44	3.6	47.1	40.6	13.8
第 4 组	2.51	2.41	4.0	43.2	41.8	3.2
第 5 组	2.53	2.42	4.3	44.6	41.5	7.0
第 6 组	2.50	2.42	3.2	43.5	40.1	7.8

5.2 温控措施优化应用

通过保温法与降温法结合的方式进行大体积抗渗抗腐蚀混凝土温度控制，大体积混凝土侧面及顶面采取保温措施，混凝土内部布设循环冷却水管路及利用传感器智能测温信号控制系统，便于现场利用测温传感器反馈的温度实时调节冷却水管进水口输送的循环水温度及进水流量，达到合理控制大体积混凝土表面温度、内部温度及内外温差的目的。经验证，在养护期间可实现混凝土温差控制在设计要求的范围内，其表面温度与大气温度温差控制在 20 ℃以内，表面温度与内部温度温差控制在 25 ℃以内。

5.3 浇筑工艺优化应用

浇筑工艺的改进优化能够有效保障大体积混凝土内部的均匀性以及密实度，薄层浇筑以及合

理的振捣方式能够更好地控制混凝土的温度和收缩量，减少混凝土中空洞和裂缝的产生，有利于混凝土的质量控制，提高混凝土的强度和耐久性，保证其抗渗透抗腐蚀性能。

5.4 养护方式优化应用

大体积混凝土侧面采用“胶合板+塑料薄膜”的组合形式，顶面面层采用“两膜夹一布”的组合形式，能够有效阻止混凝土水分蒸发，改善混凝土的水化速度和水化环境，提高混凝土相应龄期内的抗拉强度，抵抗其收缩应力，对混凝土塑性收缩裂缝、长期干缩裂缝、温度裂缝和化学物质侵蚀导致的裂缝有明显的抑制作用，有利于提高大体积混凝土的抗渗透抗腐蚀性能。

6 结语

本文基于临海大体积抗渗抗腐蚀混凝土施工工艺，通过理论计算、试验验证结合实际应用效果比对，针对混凝土配合比、温度控制措施、浇筑振捣工艺、养护方式等方面进行相应技术改进，在提高混凝土抗渗抗腐蚀性能方面，有了更精细化的数据参考和更完善的措施依据。后续研究中，希望从大体积混凝土原材选用到浇筑成型整套工艺开展深入研究，从经济、高效、环保方面提出改进措施，进一步优化施工工艺。

参考文献：

[1] 王金昆. 地下通道大体积抗渗混凝土的施工技术[J]. 建筑技术, 2017,48(6):668-669.

[2] 韩立刚,张苏娟.大体积泵送抗渗混凝土的原材料选择及配合比设计[J]. 中国港湾建设,2005(1):31-33,49.

[3] 彭再勇.红谷沉管隧道管节大体积混凝土温控与防裂技术[J]. 隧道建设,2016,36(9):1139-1146.

[4] JGJ 55—2011,普通混凝土配合比设计规程[S].

[5] GB 50496—2018,大体积混凝土施工标准[S].

[6] GB/T 50082—2024,混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S].