

拉西瓦灌溉工程 4#渡槽 40 米跨度空腹桁架混凝土配合比研究

马鸿¹ 孔令晨¹ 莫乃军²

1.海南藏族自治州贵德拉西瓦灌溉工程建设局 青海海南海南藏族自治州 811799

2.青海省西宁市湟中区水电开发总公司 青海西宁 811600

摘要:青海省拉西瓦灌溉工程位于贵德县境内 4#渡槽位于贵德县河西镇木干村青海地处高海拔地区日温差大,气候干燥,对于 40 米跨度空腹桁架而言,配筋率高,钢筋间距小,浇筑困难。为提高混凝土施工性能和结构耐久性,通过试验得出控制配合比水泥用量在 400kg/m³ 以内,能有效降低混凝土开裂风险,在施工中加强质控和养护工作,混凝土没有出现明显裂缝。

关键词: 拉西瓦灌溉工程; 40 米跨度空腹桁架; C50 混凝土配合比

Study on concrete mix ratio of 40 m span fasting truss for No. 4 aqueduct of Laxiwa Irrigation Project

Hong Ma¹, Lingchen Kong¹, Naijun Mo²

1.Guderaswa Irrigation Project Construction Bureau of Hainan Tibetan Autonomous Prefecture, Hainan and Hainan Tibetan Autonomous Prefecture, Qinghai, 811799

2.Huangzhong District Hydropower Development Corporation, Xining City, Qinghai Province, Xining, Qinghai, 811600

Abstract: The Laxiwa Irrigation Project in Qinghai Province is located in Guide County, and the 4th culvert is situated in Mugan Village, Hexi Town of Guide County. Qinghai is a high-altitude region with large diurnal temperature variations and a dry climate. For a 40-meter span hollow truss, the reinforcement ratio is high, and the spacing between steel bars is small, making concrete pouring challenging. To improve the concrete construction performance and structural durability, experimental results have shown that controlling the cement dosage within 400kg/m³ can effectively reduce the risk of concrete cracking. Strengthening quality control and maintenance during construction, the concrete did not exhibit significant cracks.

Keywords: Laxiwa irrigation project; 40 m span fasting truss; C50 concrete mix ratio

前言

随着国家对水利基础设施建设力度的不断加大,在青海高海拔地区有很多重大水利工程项目已经建成,还有一些项目正在规划建设中。受高海拔地区复杂地形及地质条件制约,引水工程输水线路中除了明渠之外还会出现隧洞、渡槽及倒虹吸等各种结构形式,有些特殊地段的渡槽工程采用较高强度等级的大跨度空腹桁架混凝土支撑结构。

青海高海拔地区日温差大,气候干燥,蒸发量大,降雨量少,冬季干冷,夏季光照时间长,气候条件恶劣。对 C50 大跨度空腹桁架混凝土而言,由于配筋率高,钢筋间距小,浇筑困难。针对青海高海拔地区空腹桁架混凝土特点,为了满足混凝土设计要求,提高混凝土施工性能和结构抗裂耐久性,结合拉西瓦灌溉工程 4#渡槽大跨度空腹桁架 C50 混凝土施工配合比设计工作,开展了相关的试验研究。

一、工程概况

拉西瓦灌溉工程位于黄河上游拉西瓦水电站大坝和李

家峡水电站水库库尾之间,在黄河的南岸,海拔在 2560m~2190m, III 等中型工程。拉西瓦灌溉工程 4#渡槽长 2603 米,其中 20 跨为预制吊装 C50 预应力大跨度空腹桁架和下承式预制吊装渡槽。空腹桁架每跨的长度为 40m,垂直高度 8.65m,需要配置钢筋 36.2t,浇筑 C50 混凝土 72.96 m³,在桁架两头各浇筑 0.3m 二期混凝土,预制成型后每跨空腹桁架的重量为 200t 左右。该项技术是在青海高原寒冷干燥地区,采用高排架大跨度拱式空腹桁架渡槽工程施工的先例。

二、混凝土配合比试验研究

2.1 空腹桁架混凝土特点

4#渡槽空腹桁架为大跨度预应力混凝土结构,混凝土强度等级为 C50,力学指标比较高,同时要具备较高的抗弯拉强度,由于预应力张拉及施工进度方面的要求,混凝土还应具有较高的早期强度;其次,每跨空腹桁架钢筋用量 36.2t,需要浇筑混凝土 72.96m³,钢筋体积约占整个混凝土结构 6%左右,配筋率高,钢筋间距很小,混凝土浇筑难度大,对混

凝土拌合物和易性及稳定性要求高；青海高海拔地区日温差大、寒潮出现次数多，受高温差、寒冷干燥多风等恶劣环境影响，在水泥用量较高的条件下，混凝土应具有很好抗裂性。针对空腹桁架混凝土这些特点，为提高混凝土施工性能和结构抗裂耐久性，配合比设计过程中主要存在以下问题：

2.1.1 在水泥品种确定的情况下，混凝土强度越高，需要水泥用量越高。目前有很多工程采用空腹桁架混凝土结构，其 C50 混凝土水泥用量超过 $500\text{kg}/\text{m}^3$ ，有的甚至超过 $550\text{kg}/\text{m}^3$ 。但胶材用量多，混凝土开裂风险就大。

2.1.2 空腹桁架配筋率高，钢筋间距小，混凝土浇筑施工难度非常大。为了提高混凝土流动性，就要采用较多的水量；另一方面，高强度混凝土水胶比小，浆液流动性差，浆液需求相对较多，混凝土结构开裂风险也就较大。

2.2 配合比设计思路

为配制出综合性能优良的混凝土，从分析空腹桁架混凝土特点为切入点，施工环境和施工手段为出发点，研究影响混凝土力学性能、抗裂耐久性和影响混凝土和易性、拌合物性能稳定性、单位用水量的主要因素，采取了以下设计思路：

2.2.1 对浇筑混凝土的施工环境、场地、气候条件和施工手段进行调查，作为混凝土配合比设计的基础信息资料，为混凝土拌合物性能如坍落度、保坍性、凝结时间以及个别原材料的选择提供依据。

2.2.2 减少骨料针片状含量，不采用棱角尖锐的粗细骨料；而采用级配合理，空隙率低的粗细骨料。

2.2.3 采用高效、高性能减水剂，降低混凝土单位用水量和胶材用量，提高混凝土工作性和拌合物性能的稳定性。

2.2.4 空腹桁架为预应力混凝土，有早强需求，配合比设计考虑不掺粉煤灰，以保证早期强度，降低徐变，减少预应力损失。

2.3 原材料选择

2.3.1 水泥：考虑到混凝土设计强度等级为 C50，并有早强需求，选用连山水泥有限公司 P·II52.5 硅酸盐水泥。

2.3.2 骨料：工程中使用的粗、细骨料均为拉西瓦灌溉工程团结砂场天然砂和人工骨料，品质较好，其中细骨料细度模数 2.85，含泥量 1.3%，坚固性 3%；粗骨料含泥量 0.3%~0.4%，坚固性 3%，压碎指标 4.1%，针片状含量 7%~8%，各项性能指标均符合《水工混凝土施工规范》SL677-2014^[1]要求。

2.3.3 减水剂：由于需要较大幅度降低空腹桁架混凝土用水量和水泥用量，并且从施工性能、强度、抗裂性等方面考虑外，还要考虑减水剂应与水泥和粗细骨料的相容性，要求减水率应在 25% 以上，且保坍性良好，通过调查研究，选择

西宁不冻泉建材有限公司 HA-HPC 型聚羧酸高性能减水剂，其减水率测试结果为 27.9%，其它各项性能检测结果满足《水工混凝土外加剂技术规程》DL/T5100-2014^[2]的相关要求。

3.3.4 拌合水为贵德县灌溉用水。

2.4 配合比参数选择试验

2.4.1 粗骨料最优级配试验

通过对不同级配组合的粗骨料混合后进行紧密密度对比试验，确定二级配粗骨料的最优级配为小石：中石=40:60。

2.4.2 单位用水量、砂率选择试验

试验条件：采用祁连山 P·II52.5 硅酸盐水泥，水胶比按 0.35；减水剂 HA-HPC 掺量为 0.8~1.2%并由试验情况确定，混凝土级配按小石：中石=40:60。考虑到空腹桁架钢筋间距小，混凝土浇筑施工难度大，采用中低流态混凝土，控制混凝土坍落度在 9~11cm 范围内。试验结果：在混凝土和易性良好、坍落度合适的条件下，混凝土最优砂率为 34%，单位用水量 $135\text{kg}/\text{m}^3$ ，减水剂 HA-HPC 最佳适宜为 0.8%。

2.4.3 水胶比与抗压强度关系

根据混凝土单位用水量、砂率、外加剂掺量选择试验结果和混凝土设计施工特点，选择了不同水胶比进行水胶比与抗压强度关系试验，在坍落度、用水量、HA-HPC 减水剂（0.8%）、容重不变的情况下，分别选择水胶比为 0.40、0.35、0.30；砂率为 36%、34%、32%；在 3 天、7 天、28 天的养护下，试验测得抗压强度为 35.7、39.5、46.2（3 天）；43.0、47.6、55.4（7 天）；51.5、57.3、66.9（28 天）。

根据上述试验参数和试验结果，混凝土抗压强度与水胶比关系拟合方程分别见式（1）、式（2）和式（3）。

$$R_{y_3 \text{天}} = 12.68C/W + 3.763 \quad (r=0.9971)$$

$$(1) \quad R_{y_7 \text{天}} = 14.96C/W + 5.327 \quad (r=0.9978)$$

$$(2) \quad R_{y_{28 \text{天}}} = 18.57C/W + 4.770 \quad (r=0.9982)$$

$$(3)$$

式中： $R_{y_3 \text{天}}$ 、 $R_{y_7 \text{天}}$ 、 $R_{y_{28 \text{天}}}$ 分别为混凝土 3 天、7 天和 28 天龄期抗压强度，C/W 为灰水比，r 为相关系数。

2.4.4 混凝土配合比设计

从混凝土抗压强度与水胶比关系拟合方程可以看出，不同龄期混凝土抗压强度与灰水比呈线性关系，相关性较好，通过抗压强度与灰水比关系可以确定满足设计要求水灰比。

C50 混凝土强度保证率为 95%，概率度系数为 1.645，根据《水工混凝土施工规范》SL677-2014，标准差取 5.5MPa，得到 C50 混凝土配制强度为： $50 + 1.645 \times 5.5 = 59.0\text{MPa}$ ，根据式（3）水胶比与抗压强度关系回归方程，求得 C50 混凝土

水胶比为 0.34。根据砂率和单位用水量试验结果,得到 C50 混凝土单位用水量为 $135\text{kg}/\text{m}^3$,最优砂率为 34%, HA-HPC 减水剂最佳掺量为 0.8%, 水泥用量为 $397\text{kg}/\text{m}^3$, 砂用量为 $648\text{kg}/\text{m}^3$, 5~20mm 的粗骨料用量为 $503\text{kg}/\text{m}^3$, 20~40mm 的粗骨料用量为 $754\text{kg}/\text{m}^3$, 坍落度保持在 9~11cm。

2.5 混凝土性能复核试验

2.5.1 拌合物性能复核试验结果

按照上述混凝土配合比,依据《水工混凝土试验规程》SL352-2006^[3],对拌合物性能复核:混凝土具有较好的和易性,流动性好,能够适用于小间距钢筋混凝土浇筑;混凝土出机坍落度为 10.4cm, 20 分钟后为 10.8cm,保坍性能良好,能够适应高温及干燥环境浇筑;混凝土容重 $2450\text{kg}/\text{m}^3$,初凝时间 7h39min,终凝时间 10h36min,能够满足施工要求。

2.5.2 力学性能复核试验结果

C50 混凝土力学性能复核试验结果可以看出,混凝土 28 天龄期抗压强度为 61.4MPa,达到了配制强度;强度发展速度较快,3 天抗压强度达到设计龄期的 69%,7 天达到了设计龄期的 83%。经过回归分析,得到混凝土强度发展系数 $m(\%)$ 与龄期 $t(d)$ 的相关性拟合方程: $m=13.72\text{Ln}(t)+54.8$,相关系数为 $r=0.9966$ 。C50 混凝土 28 天龄期劈裂抗拉强度试验结果为 4.93 MPa,约为抗压强度的 1/12,断面处破坏形式以骨料拉断破坏为主,说明混凝土劈裂抗拉强度受骨料抗拉强度的限制。

三、施工应用及质量抽检情况

4#渡槽 C50 空腹桁架预应力混凝土于 2016 年 8 月开始浇筑施工,2017 年 7 月浇筑结束,无冬季施工。施工过程中,严格按照《水工混凝土施工规范》SL677-2014 相关要求进行了质量控制,使用的水泥、砂石骨料和减水剂等原材料抽检结果均符合规范要求,从而保证了混凝土质量稳定性。在施工过程中监督抽检成型混凝土试件 14 组,检测的强度及波动幅度在 50.6 MPa 至 58.3 MPa 之间。通过分析,施工过程中混凝土强度波动不大,设计强度 50 MPa,最小值 50.6 MPa,标准差 2.48MPa,平均强度为 54.9MPa。

由于 C50 空腹桁架混凝土 28 天龄期抗压强度检测组数 $5 < n < 30$,根据统计结果对抽检的混凝土强度按照《水利水电工程施工质量检验与评定规程》SL176-2007 进行评定,经计算:

$$R_n - 0.7S_n = 53.2\text{MPa} > R_{\text{标}} = 50\text{MPa}$$

$$\text{且 } R_n - 1.60S_n = 50.9 > 0.83R_{\text{标}} = 41.5\text{MPa}$$

判定结果符合《水利水电工程施工质量检验与评定规程》SL176-2007 的相关质量要求。

对混凝土劈裂抗拉强度抽检 2 次,检测结果分别为 4.97MPa 和 4.08MPa,平均 4.53MPa,约为混凝土平均抗压强度的 1/12,其比值与配合比验证试验结论基本一致。

四、结论

4.1 空腹桁架混凝土的各项性能关系大跨度结构的安全性及稳定性,施工采用的混凝土是高性能的,必须具备良好的施工和易性、较高的力学指标和较好的抗裂性能,能够抵御西北高海拔地区日温差大、气候干燥、蒸发量大等恶劣气候条件对混凝土造成的收缩和开裂现象,以及对其它各项性能造成的不利影响。

4.2 C50 大跨度空腹桁架混凝土由于配筋率高,钢筋间距小,浇筑困难,一般用水量和水泥用量都很高,容易出现温度裂缝和干缩裂缝。为获得综合性能优良的施工配合比,从分析空腹桁架混凝土性能特点为出发点,选择了适应混凝土性能特点的原材料,提出了满足设计要求及施工要求的配合比。

4.3 在科学的配合比设计思想指导下,采用现代混凝土配合比设计技术进行配合比设计,通过研究、设计和试验,确定的 C50 空腹桁架混凝土配合比满足设计和施工要求,水泥用量控制在 $400\text{kg}/\text{m}^3$ 以内,只有其它类似工程的 80%左右,大大降低了混凝土结构收缩开裂的风险。

4.4 在施工过程中,严格按照相关规范要求进行质量控制,使用的水泥、砂石骨料和减水剂等各种原材料质量相对稳定,从而保证了混凝土质量稳定性。施工完毕后加强对空腹桁架结构实体的保湿和保温养护工作,使得混凝土性能指标满足设计要求,外观较好。截至目前,4#渡槽 C50 空腹桁架混凝土结构已经经过 7 年时间,没有发现明显开裂现象。

参考文献:

- [1] 水工混凝土施工规范:SL677-2014.[S].北京:中国水利水电出版社,2014.
- [2] 水工混凝土外加剂技术规程:DL/T5100-2014.[S].北京:中国电力出版社,2014.
- [3] 水工混凝土试验规程:SL352-2006.[S].北京:中国水利水电出版社,2006.