

引水隧洞衬砌混凝土裂缝原因及对策措施技术

李海洋

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450001

DOI:10.12238/etd.v3i4.5263

摘要: 引水隧洞是水电站厂房发电的重要组成部分, 它的衬砌质量直接影响其使用寿命及其后期维护费用。以某工程引水隧洞针钢梁台车混凝土衬砌施工为例, 从地质条件、混凝土配合比、混凝土浇筑施工等封面分析了隧洞衬砌混凝土裂缝产生的原因以及减少裂缝的相应对策, 并对裂缝进行处理, 取得了良好的效果并进行了总结, 以供参考。

关键词: 地下引水隧洞; 针钢梁台车; 混凝土衬砌; 裂缝分析; 预防措施; 裂缝处理

中图分类号: TU746 **文献标识码:** A

Causes and Countermeasures of Concrete Cracks in Diversion Tunnel Lining

Haiyang Li

China 11th Engineering Bureau of Water Resources and Hydropower Co., Ltd. Henan Zhengzhou 450001

Abstract: Diversion tunnel is an important part of power generation in hydropower station, and its lining quality directly affects its service life and its later maintenance cost. In this paper, taking the concrete lining construction of a diversion tunnel with needle steel beam trolley as an example, the causes of concrete cracks in tunnel lining are analyzed from geological conditions, concrete mix proportion, concrete pouring construction and other covers, as well as the corresponding countermeasures to reduce cracks. The cracks are treated, and good results are obtained and summarized for reference.

Keywords: Underground diversion tunnel; Needle steel beam trolley; Concrete lining; Crack analysis; Preventive measures; Crack treatment

1 概述

该水电站工程总装机容量为 $2 \times 150\text{MW}$ 。引水隧洞共2条(7#和8#引水隧洞), 分为上平段、竖井段和下平段, 其中隧洞针钢梁台车全断面浇筑区域长 473.58m (引水洞上平段区域), 设计坡度为 8% 。隧洞地质条件良好, 属Ⅱ、Ⅲ类围岩, 极少地下水发育, 衬砌厚度为 40cm , 衬砌后断面为 $\phi 7.5\text{m}$ 。建基面清理后对底部超挖部分进行了混凝土回填。

针钢梁台车按设计要求加工成型, 现场拼装, 钢模直径 7.52m , 针梁长 30m 。通过液压系统完成全圆模板的自动支立和拆模, 全圆布置有工作窗, 底板设计有排气孔, 并自带抗浮系统。衬砌每次浇筑段长度为 12m , 段与段之间设施工缝, 加 300mm 橡胶止水。设计钢筋为环向 $\Phi 25$, 纵向分布筋 $\Phi 20$, 单层钢筋网, 混凝土设计强度为 H30 (美标, 即国标 C37), 采用二级配泵送混凝土, 坍落度为 $160\text{mm}-180\text{mm}$, 骨料为人工碎石、天然河沙, 掺聚羧酸普通高效减水剂 Sika ViscoCrete-3088, 掺量为 1.2% , 南非生产的 I-级粉煤灰掺量为 25% 。

该区域气候分雨季 (11月至3月) 和旱季 (4月至10月), 其中9月至3月气温偏高, 最高气温达 44°C , 4月至8月气温偏低, 最低气温 10°C 。

2 施工具体情况及裂缝调查

根据施工安排, 首先进行了8#引水隧洞上平段的针钢梁台车全断面一次衬砌混凝土施工, 于2016年2月初进行了第一段混凝土浇筑, 平均4d完成一段混凝土浇筑, 早期拆模时无裂缝, 拆模后及时进行洒水养护。8#引水洞上平段钢模台车衬砌共15段, 2个月时间全部完成。

通过具体调查考证发现, 有裂缝产生, 表现为一定的规律性, 以纵向、环向裂缝为主: 纵向裂缝 (8条) 一般在隧洞腰线上下, 环向裂缝 (7条) 一般在上半洞, 底部零星有短而渗水的裂缝 (4条), 多为混凝土浇筑 $7-14\text{d}$ 左右产生, 裂缝有渗水或者不渗水。

分析本阶段裂缝产生原因, 并采取相应措施后, 为接下来7#引水隧洞的针钢梁台车混凝土衬砌提供施工依据。

3 裂缝产生的原因分析

3.1 地质条件及超欠挖分析

引水隧洞地处Ⅱ、Ⅲ类围岩区, 引水隧洞上平段的前 $1/4$ 区域为Ⅲ类围岩, 后 $3/4$ 区域为Ⅱ类围岩; Ⅲ类围岩区域进行了初期支护 (锚杆+挂网+喷射混凝土)。除在第15仓至17仓范围内有部分较大渗水和地质小断层现象外, 并无大的特殊地质构造, 衬砌之前洞内地质变形已趋于稳定, 故良好

的地质条件不会导致混凝土产生裂缝。但由于渗水处没有处理措施，混凝土衬砌后受渗水压力的影响导致薄弱环节，造成抗渗能力及强度降低，在静水压力作用下就有可能导致裂缝的发生。所以渗水区域的裂缝与此有一定的相关性，浇筑混凝土之前需对渗水点采取引排措施。

从开挖断面图来看，设计混凝土衬砌厚度平均为40cm，单层钢筋网布置。引水隧洞开挖断面可控，实际混凝土衬砌平均厚度为50cm，局部最大衬砌厚度为80cm，当混凝土内部受力时，无钢筋受力，对裂缝产生有一定促进的关系。

3.2 关于材料及混凝土配合比分析

混凝土配合比材料包括水泥、粉煤灰、减水剂、人工碎石、天然砂、洁净水。施工配比完全符合泵送混凝土要求。水泥（采用低水化热普通硅酸盐水泥）、粉煤灰（Ⅰ-级）材料稳定，骨料无碱活性都不会导致裂缝的产生。

已浇筑混凝土共取样30组，检测结果全部合格，平均强度为42MPa（国标）。在现场进行的回弹无损检测结果强度在43-45MPa（国标）。由于粉煤灰掺量为25%，28d后强度仍在增长，经测得45d龄期强度平均为45MPa。

初步分析，与国内引水隧洞衬砌强度相比，此衬砌强度远高于国内设计C20或C25强度，衬砌强度偏高，所以胶凝材料多。水泥用量315kg/m³，符合泵送混凝土要求，但泵送混凝土坍落度偏大（180-200mm），根据收缩裂缝特点，混凝土配比对裂缝有一定的促进影响，但不是主要因素。

3.3 混凝土施工浇筑分析

利用混凝土HZS60搅拌站进行混凝土的集中厂拌，由混凝土罐车运至现场，运距1.5km，到达现场后由混凝土托泵输送入仓，入仓温度28°-32°，符合美国标准35°的要求。针钢梁台车顶、底部设一排工作窗，两侧对称各3排工作窗，每排6个工作窗，由于大坍落度入仓，实际每排只使用1-2个工作窗，从坡高处基本自流填满。混凝土振捣方式：下半洞以插入式振捣为主，附着式振捣为辅，上半洞主要以附着式振捣为主，左右对称均匀入仓。混凝土浇筑20-24h后进行拆模，部分仓号有提前拆模现象。可见，混凝土入仓温度及其相关施工操作等对裂缝产生有较大影响。

3.4 混凝土的养护及洞室环境的分析

每一段拆模后，均采用洒水养护方式，每5m设置一个旋转喷嘴24h喷水养护14d，养护水为自然湖水。洞室内基本恒温，施工期虽然气温经历了从炎热雨季（38℃）到秋凉干旱季（28℃），但洞内温度变化不大，基本在28℃-30℃之间。但是发现一个重要因素：养护水温度，由于本地区昼夜温差均在10度以上，从卡里巴湖中抽水进行喷洒养护的水温也在随气温变化，旋转喷洒于洞室混凝土面上的水又时

刻流动排出，所以夜间喷洒养护时导致洞室温度偏低，而混凝土在浇筑完成的1-5d升温较大，测得混凝土内部最高气温为55℃，混凝土内外温差超出25℃，使得混凝土表面及其内部温度发生较大差异，致使裂缝的产生，为主要原因。

3.5 综合分析

从以上分析来看，断面超挖、混凝土配比、浇筑温度、施工流程以及养护条件的综合作用是导致混凝土裂缝的主要原因，不能从某一原因或环节来判断结果，是相互作用共同产物。断面的超挖改变了原有的设计受力和结构形态，渗水点的忽视导致裂缝的发展。设计浇筑厚度为40cm，加上钢筋网后，空间狭小，很难将混凝土入仓进行振捣，附着式振捣器又有一定的局限性，致使坍落度较大，甚至高达200mm；混凝土配合比胶凝材料多，水泥单耗大等迫使混凝土配合比需要进一步优化来减少大坍落度干缩比及水化热的影响。虽然浇筑温度没有超出美国规范标准，但是按国内规定以及温度应力分析来看，超过30℃须采取相应措施，否则温度应力产生的裂缝容易发生。特别是养护问题，导致了很多环向的温缩裂缝，须把内外温差控制在规范范围20℃以内，养护条件要满足规范要求，可以尝试新的养护方法避免裂缝的产生。混凝土施工环节应加强管理和指导，对施工人员进行培训，施工过程实行监管制度，避免引水隧洞混凝土衬砌裂缝的产生。

4 防止裂缝采取的策略及成效

4.1 裂缝的预防

通过上述分析，为保证7#引水隧洞施工时避免或尽可能减少裂缝发生，项目部采取了多项施工措施，以指导接下来的混凝土衬砌施工。

（1）优化了配合比设计，由于设计强度高，胶凝材料大，为保证混凝土和易性及流动性，控制混凝土坍落度160-180mm，完全满足现场施工要求；在减少水化热，保证强度的情况下，胶凝材料降至380kg（粉煤灰掺量为25%）；根据天气炎热情况，高效聚羧酸减水剂浮动0.2%，以缓解运输过程中的坍落度损失，严禁现场加水现象的发生。

（2）混凝土温控措施加大力度。本区域最高大气温度达44摄氏度，为降低混凝土出仓和入仓温度，骨料进行洒水、遮阳降温，地下廊道上料，采用冰水（0-5℃）拌合，混凝土罐车罐体采用遮阳保温材料包裹，并喷洒冷水降低罐体温度。规范浇筑时间段，在夜间和早11点前进行混凝土衬砌施工，避开中午12点至15点炎热区段。控制混凝土出料口温度在25℃以下，混凝土入仓温度控制在28℃以下。

（3）施工中注意事项。严格执行技术交底制度，对相关施工人员进行相关泵送混凝土及针钢梁台车施工工艺培

训并组织技术交底，责任到人。混凝土入仓施工时，充分利用针钢梁台车工作窗入仓，严禁混凝土从高处自流充满，安排专人分区分块振捣，条件允许时须人员入仓振捣密实。左右侧墙对称施工，泵管转移前准备工作提前就绪，缩短倒管、接管时间，必须保证上一层混凝土初凝前入仓下一层。

（4）超挖和渗水处理，对底拱采取提前浇筑基础垫层，再浇筑洞体法施工；对边顶拱超挖严重，如7#引水洞5号仓段为了组装针钢梁台车，半径超挖近1m，采用了双层钢筋网布置。其他小面积超挖增加了锚杆、拉杆甚至钢筋网形式来满足应力过大变形。对明显渗水点在浇筑混凝土之前进行打孔埋管采取引排措施，后期采用固结或密封灌浆法处理。

（5）养护措施。为了减少温缩裂缝，降低混凝土内外温差至关重要。鉴于养护用水水温控制困难，计划采用养护剂方案进行养护，采用著名外加剂厂家Sika生产的Antisol-E型养护剂，涂刷量为 1kg/m^2 ，经试验确认不影响强度的正常增长，效果优良。

4.2 成效

从8#引水隧洞衬砌后的裂缝分析，在进行7#引水隧洞衬砌时，以上措施得到了实施，而且严格把控，形成记录，特别是在配比、渗水引排、浇筑工艺以及养护方面重点关注和监控。从针钢梁台车衬砌结果来看，消除了纵向和环向裂缝的产生，全段仅在隧洞底部有2处短裂缝（干缝），成效显著。

5 裂缝处理措施

混凝土衬砌完成后，按要求进行回填和固结灌浆施工，然后重新排查引水隧洞裂缝的状况及发展趋势，形成记录，对比分析裂缝情况。为确保出现裂缝的混凝土主体结构满足补强设计的要求，满足结构的安全，通过采取化学灌浆方法对混凝土裂缝进行最终处理。

使用的化学灌浆材料为NE-IV型环氧灌浆材料，配合N

E-II高强度环氧砂浆密封，无需开槽，工艺流程为：混凝土裂缝基本情况描述、沿缝两边混凝土面处理、钻孔、封缝埋设注浆嘴、灌浆、可能的补钻及补灌、灌后效果检查及验收。

钻孔方向与缝面成 45° 夹角，穿过裂缝，孔中心距离裂缝一般为5cm以内，用高压风将孔内灰渣清理干净后，埋设专用灌浆嘴，采用NE-II高强度环氧砂浆密封，通过专门灌浆泵对NE-IV型环氧灌浆材料实施灌浆。灌浆原则：裂缝大致为水平走向时，注浆从裂缝最宽处进行；裂缝大致为上下走向时，注浆由最低点开始。对各个注浆嘴进行注浆直至达到所要求的压力值（稳压3-5mins），如果浆液从下一个注浆嘴溢流出，则证明浆液将该段（两个注浆嘴之间）缝内填充密实，同时释放压力，重复进行直至完成所有的注浆嘴。浆液固化后，清除注浆嘴，空洞部分用环氧砂浆填实、表面压光。

6 结论

通过引起引水隧洞衬砌裂缝的成因，根据工程实际情况进行了分析，并采取了切实可行的预防裂缝措施，取得良好成效。对已有裂缝通过采取化学灌浆方法进行及时处理，避免进一步发展。从本质来看，裂缝是混凝土结构普遍存在的一种现象；从质量角度讲，裂缝是混凝土结构的一种病害；经济上，混凝土裂缝需要灌浆修补，增加成本。因此须严格按规程、规范要求施工，严把质量关，采取有效措施来减少甚至避免裂缝的发生，方可赢得质量口碑和良好的经济效益。

参考文献：

- [1] 赵喜平.某尾水隧洞衬砌混凝土温控防裂措施分析[J].西北水电,2019(03).
- [2] 田振华,李宝石,王经臣.水工隧洞混凝土衬砌裂缝监测与成因分析[J].水力发电,2017(09).
- [3] 游志纯,刘婷,翟晓斌.浅谈引水隧洞混凝土衬砌裂缝及结构安全分析[J].四川水力发电,2017(02).

（上接第25页）

需要对施工流程进行有序安排。其中装饰装修工程关键施工技术包含抹灰技术、吊顶技术、涂料饰面施工技术、室内墙地砖施工技术等，要对这些施工技术进行合理掌握、规范操作，保障施工质量。同时需要做好全面的施工准备工作，优化施工技术应用效果，加大施工技术管理监督力度，提高施工管理人员的综合素养，为提高群体住宅建筑装饰装修工程施工质量奠定良好的基础。

参考文献：

- [1] 姜壮.群体住宅建筑装饰装修工程施工技术[J].四川水泥,2021(11):161-162.
- [2] 金子博.群体住宅建筑装饰装修工程施工技术要点研

究[J].居舍,2020(02):30-31.

[3] 李向阳.群体住宅建筑装饰装修工程施工技术[J].居舍,2019(08):22.

[4] 唐旦.群体住宅建筑装饰装修工程施工技术的应用研究[J].建材与装饰,2019(07):36-37.

[5] 史利波.群体住宅建筑装饰装修工程施工技术要点研究[J].山西建筑,2018,44(23):222-223.

[6] 陈永生.群体住宅建筑装饰装修工程施工技术关键点[J].居舍,2018(19):21.

作者简介：韩伟（1986.10），男，汉族，籍贯：浙江临海，学历：大专，从事建筑装修、建筑工程。