

某水电站坝基左岸爬坡廊道混凝土腐蚀状况研究

李树武^{1,2}, 付建伟^{1,2}

(1. 国家能源水电工程技术研发中心高边坡与地质灾害研究治理分中心, 陕西 西安 710065;
2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 某水电站坝基左岸爬坡廊道底板混凝土存在腐蚀破坏现象, 台阶表部多处出现大范围明显的隆起、剥落, 局部甚至整体垮塌。本文通过钻探取芯, 并结合孔内彩色数字摄像及孔内超声波检测, 查明了腐蚀范围、腐蚀程度, 并综合坝基混凝土渗水的水化学分析、混凝土物理力学试验成果等对混凝土遭受腐蚀, 造成耐久性损失程度进行研究。

关键词: 混凝土腐蚀; 钻探取芯; 试验及检测; 腐蚀程度; 混凝土耐久性

中文分类号:

文献标识码: A

某水电站大坝坝基左岸爬坡廊道底板混凝土存在腐蚀破坏现象, 台阶表部多被白色、淡黄色混凝土析出物覆盖, 且多处出现大范围明显的隆起、剥落, 局部甚至整体垮塌, 这对大坝长期安全运行具有潜在的不利影响。

目前, 国内外研究混凝土腐蚀方面的内容多集中在对混凝土腐蚀类型^[1,2]、水对混凝土腐蚀机理及腐蚀能力^[3~5]、混凝土析出物的成分和来源^[6~8]等方面, 而对混凝土遭受腐蚀, 造成耐久性损失程度研究^[9]很少。本文利用勘察的思路和手段, 通过钻探取芯结合孔内彩色数字摄像及孔内超声波检测, 并综合坝基混凝土渗水的水化学分析、混凝土物理力学试验成果, 以系统分析的理论和方法^[10], 将由多手段测试方法获得的多源信息加以融合, 从而对坝基左岸爬坡廊道混凝土遭受腐蚀, 造成耐久性损失程度进行研究。

1 工程概况

该水电站位于黄河上游, 电站坝型为混凝土三圆心双曲拱坝, 正常蓄水位高程 2180m, 大坝建基面最低开挖高程 2023m, 最大坝高 165m。坝基廊道左岸爬坡段(高程 2035m~2059m)底板混凝土分两期浇筑完成, 主体一期混凝土厚 4.3m~7.3m, 采用等级为 250 级(约 C23)的抗硫酸盐水泥浇筑, 其强度设计标准值为 20.9MPa; 表部二期混凝土厚 0.3m~0.9m, 采用等级为 C20 普通硅酸盐水泥浇筑, 强度设计标准值为 18.5MPa; 建基岩体为前震旦系深变质黑云斜长变粒岩。

2 现场调查及勘探¹

2.1 现场调查

现场调查表观腐蚀情况结合回弹测试成果(表 1), 对廊道底板混凝土的腐蚀情况进行初步了解, 并对各部位混凝土的腐蚀情况及腐蚀程度做出初步分区, 为勘探布置提供依据。

表 1 各部位表观腐蚀情况及回弹测试成果

高程(m)	是否浸水	表观腐蚀程度	强度推定值(MPa)	强度平均值(MPa)	强度标准差(MPa)	碳化深度(mm)
2035~2038	是	无	37.4	45.9	5.17	≤0.5
2038~2040	是	强	<10.0	<10.0	—	≤0.5
2040~2042	否	无	45.3	51.9	4.01	≤0.5
2042~2046	是	强	<10.0	<10.0	—	≤0.5
2046~2048	是	无	44.8	52.5	4.69	≤0.5
2048~2051	否	无	37.8	49.8	7.27	≤0.5
2048~2051	是	中	<10.0	14.5	6.53	≤0.5
2048~2051	是	弱	17.1	32.2	9.19	≤0.5

作者简介: 李树武(1973-), 男, 甘肃省会宁人, 博士, 教授级高工, 主要从事水电工程地质勘察及设计等方面工作。

高程(m)	是否浸水	表观腐蚀程度	强度推定值(MPa)	强度平均值(MPa)	强度标准差(MPa)	碳化深度(mm)
2051~2055	是	中	<10.0	16.5	10.04	≤0.5
	否	无	43.9	48.9	3.05	≤0.5
2055~2059	是	中	<10.0	29.5	11.09	≤0.5
	否	无	51.3	57.1	3.51	≤0.5

表1 成果表明, 表观腐蚀严重区因混凝土多呈酥松、软化状态, 混凝土的推定强度值均小于10MPa, 局部甚至无强度; 无腐蚀区(不论浸水与否)混凝土的推定强度值为37.4MPa~51.3MPa, 均大于设计标准值; 混凝土表面强度的大小不受台阶表部浸水与否的严格控制, 腐蚀发育区均为浸水区, 但浸水区不全为有腐蚀区。分析认为, 左岸爬坡段较高部位(高程2046.2m~2059m), 腐蚀程度呈现为轻微~弱, 局部中等; 较低部位(高程2035m~2046.2m), 腐蚀程度呈现为强~中等。

2.2 现场勘探及测试

(1) 现场勘探布置

根据现场调查及回弹法检测成果进行勘探布置(图1), 共布3组钻孔, 其中腐蚀严重部位(I区)2组, 不严重部位(II区)1组; 每组3孔, 其中2孔为垂直孔, 1孔为倾下游斜孔(孔斜45°); 为了更直观的查看爬坡段廊道一、二期混凝土的腐蚀现状及胶结情况, 于I、II区各布置1个探槽。钻孔全孔采用110mm金钢石双管单孔回转取芯钻进, 孔深至基岩接触面以下3m~5m, 勘探剖面图如图2。

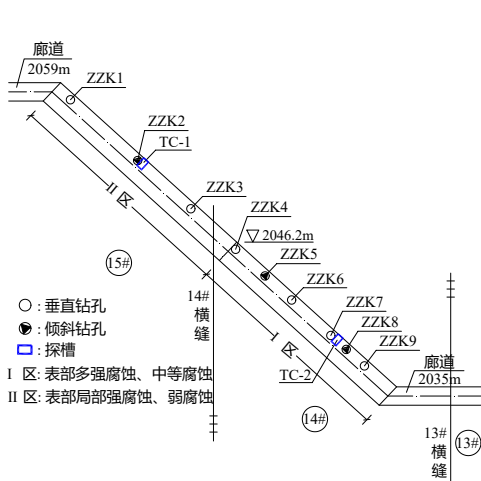


图1 左岸爬坡段廊道勘探布置图

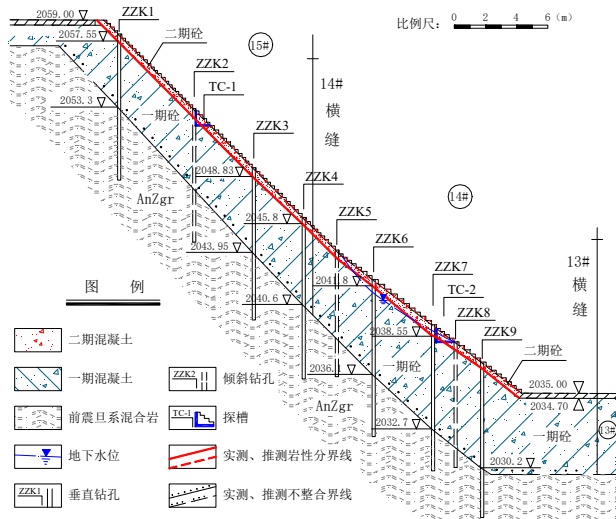


图2 左岸爬坡段廊道勘探剖面图

(2) 勘探及孔内彩色数字摄像成果

① 二期混凝土

左岸爬坡段二期混凝土层厚0.3m~0.9m, 无配筋, 混凝土多呈灰白色, 芯样多呈短柱状及碎块状; 取芯率44%~100%, RQD平均值约71%, 个别钻孔RQD较低(ZZK2为0, ZZK7为32%); 骨料级配不良, 胶结不密实或欠密实, 内部多气泡孔洞及微裂隙, 砼芯表部多呈麻面状, 局部酥松、无胶结, 存在腐蚀缺陷或腐蚀空洞(图3a); 左岸高程2038m~2039m处混凝土内部存在水石分离现象(图3b), 局部甚至有空洞。一、二期混凝土多呈斜面状接触, 接触面较平整, 局部未做刨毛处理, 砼芯多于接触面处断开(图3c)。



图3 二期混凝土腐蚀现状

②一期混凝土

一期混凝土胶结质量好，呈密实~较密实状，骨料级配好，分布均匀，内部配筋均无锈蚀，钢筋周围无膨胀变形现象；混凝土主要呈灰白色~灰色，砼芯多呈长柱状，表部平整、光滑（图4a），取芯率95%~100%，RQD值65%~94%；孔壁、砼芯表部气泡孔洞及微裂隙发育较少，仅局部小范围有剥蚀或腐蚀缺陷，存在弱腐蚀迹象。一期混凝土与基岩呈台阶状、锯齿状或斜面状接触，多呈焊接式胶结（图4c），胶结质量较好。

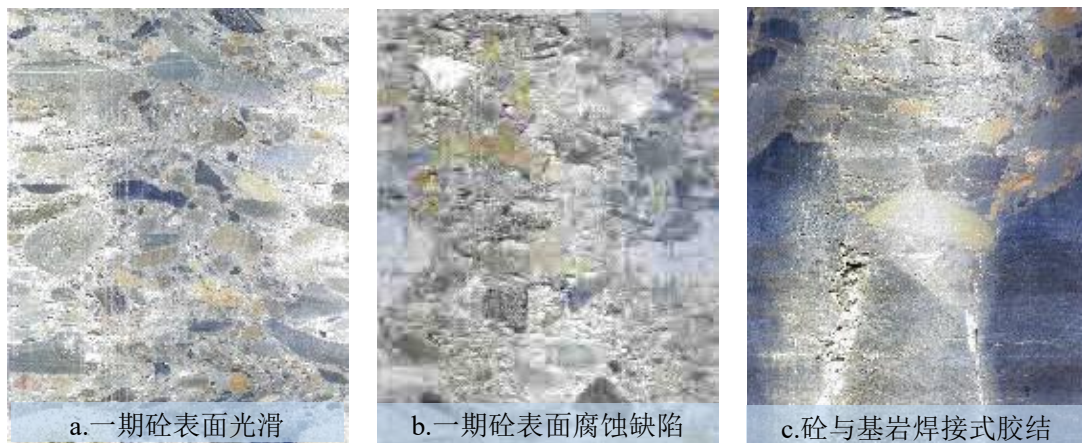


图4 一期混凝土腐蚀现状

③基岩

岩性主要为前震旦系深变质黑云斜长变粒岩，局部夹有黑云角闪斜长片岩及花岗伟晶岩岩脉，呈弱风化~微风化；层状结构，层面倾角 $32^{\circ} \sim 48^{\circ}$ ，单层厚6cm~20cm；主要发育层间裂隙及陡倾角裂隙，裂隙面多平直、粗糙；经坝体压重及灌浆等处理，坝基岩体整体质量较好，裂隙挤压紧密，充填饱满；各钻孔未揭露出断层破碎带或软弱夹层。

(3) 超声波检测

由波速平均值柱状图（图5）及各钻孔的波速曲线图发现：二期混凝土层的波速平均值大都位于3700m/s~4000m/s，混凝土内部多处存在强度衰减、内部缺陷等不良问题；一期混凝土层的波速平均值多位于4600m/s~5000m/s之间，整体质量较好；各钻孔内

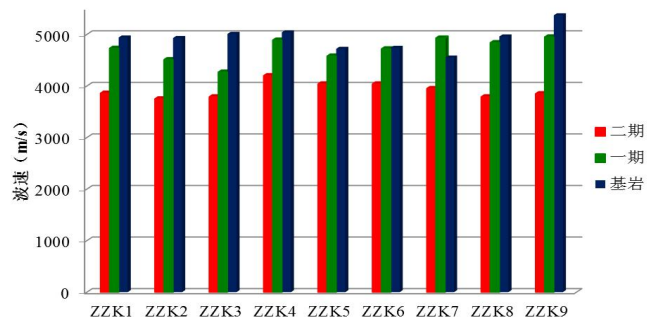


图5 各钻孔内各分层波速平均值柱状图

基岩段波速值大都大于 4600m/s，岩体质量较好。

3 试验

3.1 单轴抗压强度试验

各钻孔取芯完毕后，按上、中、下部位对各钻孔内一、二期混凝土及基岩取样，并进行单轴抗压强度试验。试样共计 58 组，其中二期混凝土样 7 组，一期混凝土样 39 组，岩样 12 组。

(1) 二期混凝土

二期混凝土层厚较薄，且腐蚀严重，个别钻孔未能取得能满足试验取样要求的试样。本次共取样 7 组进行单轴抗压强度试验，其抗压强度为 13.96MPa~23.87MPa，平均值为 19.66MPa，大于设计强度标准值（18.5MPa）。但由二期混凝土单轴抗压强度散点图（图 6），可以发现各钻孔内二期混凝土试样的抗压强度值离散型较强，且 3 组试验值小于抗压强度标准值（ $f_{cu,k}$ ）。利用《混凝土强度检验评定标准》（GBT 50107-2010）给出的非统计方法评定二期混凝土试验值，综合分析认为目前左岸爬坡段二期混凝土强度值低于设计强度标准值。

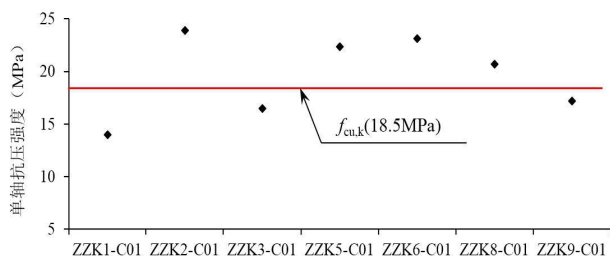


图 6 二期混凝土单轴抗压强度散点图

表 2 二期混凝土强度降低程度 F

试样编号	试验强度 (MPa)	强度设计标准值(MPa)	强度降低 F (%)
ZZK1-C01	13.96	18.5	32.54
ZZK2-C01	16.49		12.18
ZZK3-C01	22.34		未降低
ZZK5-C01	23.12		未降低
ZZK6-C01	20.66		未降低
ZZK8-C01	17.20		7.58
ZZK9-C01	23.87		未降低

根据本次物理力学试验成果对二期混凝土进行强度衰减程度分析，分析结果见表 2。由表 2 可以看出，试验取样的二期混凝土中有 42.9%存在强度衰减，其中 F 大于 20 的占 14.3%， F 为 5~20 的占 28.6%，其余占 57.1%。参考《水力发电工程地质勘察规范》（GB50287-2016）中环境水对混凝土腐蚀程度分级标准，定义 $F \geq 20$ 为强腐蚀、 $5 \leq F < 20$ 为中等腐蚀、 $F < 5$ 为弱腐蚀、 $F=0$ 为无腐蚀，无法取样区域划分为强腐蚀区，为腐蚀程度的分区提供依据。

(2) 一期混凝土

一期混凝土为大坝基础层，需着重分析研究，本次通过钻芯法共取 39 组试样做单轴抗压强度试验。室内试验所得的一期混凝土单轴抗压强度为 19.91MPa~37.32MPa，平均值为 27.92MPa，试验值满足正太分布。由一期混凝土单轴抗压强度散点图（图 7），可以发现各钻孔内一期混凝土试样的抗压强度值仅个别接近或略低于强度设计标准值（ $f_{cu,k}$ ）。用《混凝土强度检验评定标准》（GBT 50107-2010）给出的统计方法评定一期混凝土试验值，分析认为目前一期混凝土强度值大于设计强度标准值。

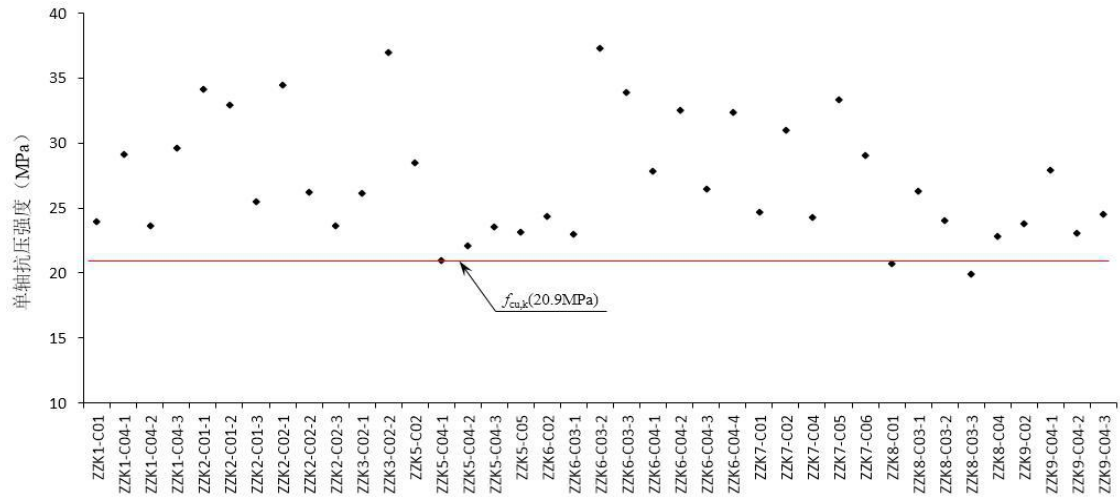


图 7 一期混凝土单轴抗压强度散点图

根据试验成果对一期混凝土进行强度衰减程度分析，分析结果见表 3。可以看出，试验取样的一期混凝土中仅有 3.8% 存在强度衰减，且强度降低值均小于 5。根据前述混凝土腐蚀程度分级标准，认为一期混凝土内部基本无腐蚀，仅局部（极小比例范围）区域存在弱腐蚀。

表 3 一期混凝土强度降低 F

试样编号	试验强度(MPa)	强度设计标准值(MPa)	强度降低值 F (%)
ZZK8-C01	20.76		0.7
ZZK8-C03-3	19.91	20.9	4.95
其余 37 组	> 20.9		未降低

(3) 基岩

坝基岩石的单轴抗压强度值为 94.85MPa~130.20MPa，均值为 113.44MPa；岩石单轴饱和抗压强度为 55.76MPa~94.87MPa，均值 70.96MPa；抗剪强度 ϕ 值为 1.12~1.29，均值 1.21， C 值为 1.51MPa~3.33MPa，均值 2.64。建基岩体的抗压强度及抗剪强度指标基本达到 B 级岩体的要求标准。部分指标偏低主要是由于本次岩石试样均取于建基面以下 2m~5m 的范围，代表性较差，且受大坝压重及钻芯取样机械振动等因素影响导致，本次不做深入论证。

3.2 水化学试验

对左岸爬坡段各取芯孔内地下水进行取样，并进行水化学分析，化验成果见表 4。

表 4 各取芯孔地下水水质化验成果

指标 取样孔	SO_4^{2-} (mg/L)	HCO_3^- (mmol/L)	pH	Mg^{2+} (mg/L)	TDS (mg/L)	硬度 (meq/L)	水化学 类型
ZZK1	1253.0	0.02	11.50	3.93	2723.34	18.73	SO ₄ -Cl-Ca·Na
ZZK2	1533.0	0.02	12.04	0.57	3062.29	25.30	SO ₄ -Cl-Ca·Na
ZZK3	3152.0	0.02	11.07	21.60	6007.12	49.05	SO ₄ -Cl-Ca·Na
ZZK4	2482.0	0.02	10.82	27.10	5013.43	41.96	SO ₄ -Cl-Ca·Na
ZZK5	2681.0	0.02	11.02	18.70	5390.60	46.01	SO ₄ -Cl-Ca·Na
ZZK6	3225.0	0.08	9.35	29.10	6031.75	51.83	SO ₄ -Cl-Ca·Na
ZZK7	2989.0	0.02	10.93	23.20	5907.18	51.03	SO ₄ -Cl-Ca·Na
ZZK8	2102.0	0.02	11.49	7.67	4334.61	35.54	SO ₄ -Cl-Ca·Na
ZZK9	2328.0	0.02	11.70	2.25	5024.45	40.64	SO ₄ -Cl-Ca·Na

表 4 化验成果对比《水力发电工程地质勘察规范》(GB50287-2016)附录 K 中的规定的环境水对混凝土的腐蚀判定标准可以发现：各钻孔内地下水中的 SO_4^{2-} 含量均大于 500mg/L，对普通硅酸盐水泥具强腐蚀作用，其中 ZZK3 和 ZZK6 钻孔内 $3000\text{mg/L} \leq \text{SO}_4^{2-} < 4000\text{mg/L}$ ，对抗硫酸盐水泥亦存在弱

腐蚀作用；各孔内的水样中 HCO_3^- 的量浓度普遍较低（小于 0.70mmol/L ），即存在中等程度的溶出型腐蚀作用。

4 腐蚀原因及程度分级

4.1 腐蚀原因

分析认为，影响本工程钢筋混凝土腐蚀的因素主要有以下四个方面：

（1）侵蚀介质：地下水多存在强硫酸盐类腐蚀（对普通硅酸盐水泥具强腐蚀作用，对抗硫酸盐水泥亦存在弱腐蚀作用）以及中等溶出型侵蚀作用。

（2）混凝土本身的特性：二期混凝土采用普通硅酸盐水泥浇筑，一期混凝土采用抗硫酸盐水泥浇筑，本工程因腐蚀作用造成显著破坏的混凝土厚度为 0.5m 左右，这与二期混凝土的厚度相当。

（3）侵蚀环境：一期混凝土大部分处于最低地下水位以下，而二期混凝土大部分处于地下水位波动带部位，受侵蚀性介质周期性干湿交替作用^[11,12]的影响。

（4）施工质量：二期混凝土施工质量较差，密实度较低，其抗腐蚀性较差；一期混凝土施工质量好，密实度好，其抗腐蚀较好。

4.2 腐蚀程度分级

综合现场调查、钻孔勘探、孔内彩色数字摄像、孔内超声波检测、混凝土物理力学试验及水化学分析，对左岸爬坡段混凝土腐蚀的基本情况进行详细的分区、分级，得到混凝土表面腐蚀程度平面图（图8）及腐蚀程度纵剖面图（图9）。

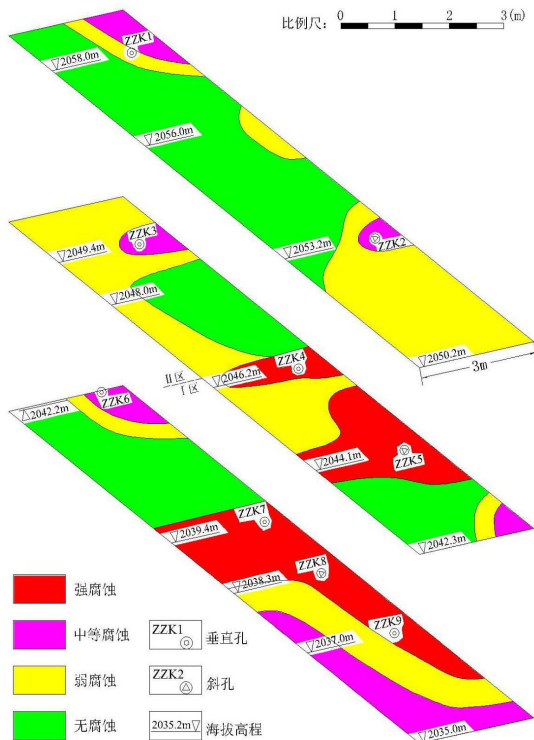


图8 腐蚀程度分区平面图

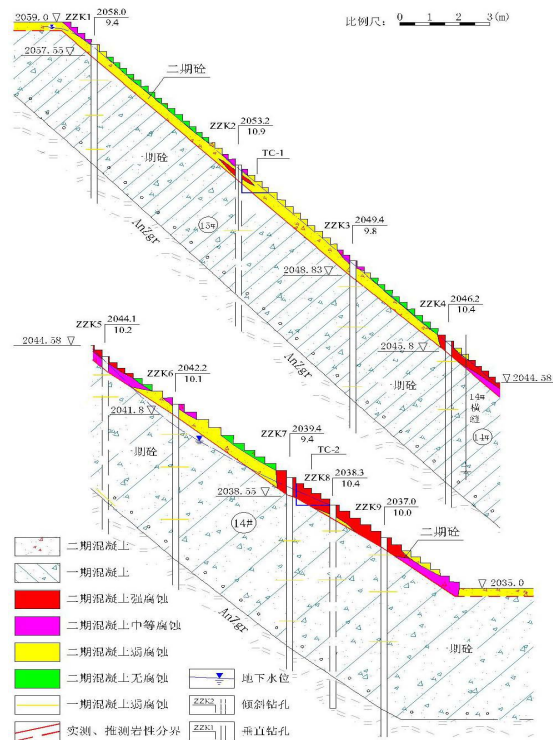


图9 腐蚀程度分区纵剖面图

5 结论

综合分析认为，左岸爬坡段二期混凝土内部存在强硫酸盐腐蚀及弱的溶出型腐蚀，腐蚀程度严重，而一期混凝土由于为抗硫酸盐腐蚀混凝土，内部虽存在中等程度的溶出型腐蚀及局部区域的弱硫酸盐腐蚀，但由于腐蚀的时效性、混凝土结构的施工质量以及埋藏环境（地下水位以下）等因素，目前仅局部存在较小范围的弱腐蚀。

建议对左岸爬坡段台阶应进行拆除，并重新施工。重新施工时，采用同一期混凝土相同标号的抗硫酸盐类水泥材料，并对混凝土结构进行配筋，以增强该部位经补强后混凝土结构的耐久性。

[参考文献]:

- [1]陈祖峰. 建筑基础腐蚀性试验与评价研究[D]. 吉林大学, 2006:27-34.
- [2]金雁南, 周双喜. 混凝土硫酸盐侵蚀的类型及作用机理[J]. 华东交通大学学报, 2006, 23(5):4-8.
- [3]张淑媛. 复杂环境下混凝土硫酸盐侵蚀机理[D]. 青岛理工大学, 2014:5-8.
- [4]张敬书, 汪朝成. 钢筋混凝土基础的腐蚀与防护措施[J]. 中国科学院研究生院学报, 2010, 27(2):145-153.
- [5]张今阳, 罗居刚, 邵洪生. 钢筋混凝土的腐蚀行为和钢筋腐蚀监测技术[J]. 人民黄河, 2011, 33(4):112-114.
- [6]高小建, 马保国, 赵志受. 西部地区水工混凝土长期腐蚀产物与腐蚀机理[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2005, 25(5):299-302.
- [7]宋志刚, 李贤胜等. 硫酸侵蚀混凝土的腐蚀产物附面层及其影响[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(3):348-355.
- [8]余红发, 孙伟等. 盐湖地区混凝土的长期腐蚀产物与腐蚀机理[J]. 硅酸盐学报, 2003, 31(5):434-440.
- [9]张紫光. 硫酸盐腐蚀对方斗山隧道衬砌结构耐久性和力学特性的影响研究[D]. 长安大学, 2018:27-33.
- [10] 中国建筑科学研究院. 混凝土强度检验评定标准: GB/T 50107-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010:4-6.
- [11] 李长永, 贾春燕等. 干湿循环下硫酸根在混凝土中的传输规律研究[J]. 人民黄河, 2009, 31(12):114-116.
- [12] 孙迎召. 混凝土在硫酸盐侵蚀和干湿循环共同作用下耐久性研究[D]. 西安建筑科技大学, 2013:10-11.

Study on Concrete Corrosion in the Climbing Corridor on Left Bank of Dam Foundation of a Hydropower Station

LI Shuwu^{1,2}, FU Jianwei^{1,2}

(1.High Slope Geological Harzard Research & Treatment Division of China Hydropower Technology Research and Development Center,Xi'an,Shaanxi710065;
2.HydrochinaXibei Engineering Corporation,Xi'an,Shaanxi710065)

Abstract: The concrete in the climbing corridor on left bank of dam foundation of a hydropower station was corrosive damaged, and many parts of the footstep appeared large-scale obvious uplift, spalling, partial or even overall collapse. In this paper, the range and degree of corrosion is found out by core-drilling combined with color digital camera and ultrasonic detection in the bore hole, and at last studied the concrete durability loss degree of concrete corrosion integrated with hydrochemistry analysis of water seepage and physical mechanics test results of dam foundation concrete.

Key words: concrete corrosion; core drilling; test and detection; corrosion degree; concrete durability

作者简介: 李树武(1973-), 男, 甘肃省会宁人, 博士, 教授级高工, 主要从事水电工程地质勘察及设计等方面工作。陕西省西安市雁塔区丈八东路18号, 邮编: 710065, 联系电话: 18066967796, 邮箱: 50400998@qq.com。