

文章编号: 1672-3031 (2004) 03-0204-05

# 新安江厂房溢流面老环氧砂浆护面开裂状况的考察与分析

郝巨涛<sup>1</sup>, 祝君<sup>2</sup>, 鲍志强<sup>1</sup>, 关遇时<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院 结构材料研究所, 北京 100038;

2. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 新安江水电站溢流面采用环氧砂浆进行裂缝修补已40年, 是我国较早采用环氧砂浆进行修补的工程。本文对早期环氧砂浆修补薄层的开裂情况和特点进行了细致的现场考察和描述, 并从断裂能的角度对裂缝进行了分类。结果表明, 这一方法进行裂缝分类是可行的, 裂缝外观及其断裂能的考察结果是一致的。

关键词: 环氧砂浆; 裂缝修补; 断裂分析

中图分类号: TV46

文献标识码: A

## 1 工程概况

新安江水电站1960年投入运行。大坝最大坝高105.00m, 坝顶高程115.00m, 大坝全长466.50m, 设计正常高水位108.00m, 相应库容178.40亿m<sup>3</sup>。水电站装机9台, 总容量662.5MW, 是华东电网最大的水电站。水库建成后, 共拦蓄20000m<sup>3</sup>/s以上的洪水9次, 其中1999年拦蓄的洪峰流量达56160m<sup>3</sup>/s, 电站连续两天持续泄洪。

新安江水电站大坝采用厂房顶溢洪道, 布置在7~16号坝段。除反弧段、挑坎段以外, 厂房顶部的溢洪道平面面积为3860m<sup>2</sup>。为对其进行抗冲磨、抗气蚀防护, 1964年3~8月, 整个平面铺设环氧砂浆护面, 平均厚度2cm<sup>[1]</sup>。当时环氧砂浆的配置如下: 环氧树脂(634<sup>#</sup>)100, 不饱和聚酯(304<sup>#</sup>)30, 690<sup>#</sup>活性溶剂(环氧丙烷苯基醚)20, 间苯二胺固化剂16, 填料(石英粉/砂=1/3)500~800。当时室内试验表明, 该环氧砂浆的线胀系数为28.69×10<sup>-6</sup>/℃, 极限拉伸应变为1248×10<sup>-6</sup>, 固化收缩率为326×10<sup>-6</sup>, 极限抗压强度为81MPa, 极限抗拉强度为14.3MPa, 拉伸弹性模量为1.36×10<sup>4</sup>MPa, 泊松比为0.27, 徐变度(30d)为106.9×10<sup>-6</sup>/MPa<sup>[2,3]</sup>。施工时护面采用分段分块铺设, 厂房顶平面中的纵缝将各段护面分为上、下两块。其中上块的段缝与各坝段横缝大致重合, 坝段横缝间距为21.6m, 上块的上、下游宽度为8.5m; 下块的段缝与上块段缝相比向右岸移动2~4m, 上、下游宽度为12.2m。

历经近40年, 目前环氧砂浆护面已由棕褐色变为棕红色, 并失去光泽, 出现了裂缝、边缘起翘和脱空等现象, 需经常进行修补。近20年来还进行了其他各种材料的修补试验。在1999年大洪水泄洪中, 14、15号坝段横缝下游端靠近挑坎处近17m<sup>2</sup>的环氧砂浆护面被冲毁, 后采用300号插筋混凝土进行了修补回填。2003年11月还采用弹性环氧砂浆护面和弹性环氧涂膜对7、8号坝段的老环氧砂浆进行了修补试验。

新安江是我国水电行业首次采用环氧砂浆护面的工程之一, 目前环氧砂浆运用已近40年, 有必要全面总结经验。为了对环氧砂浆的裂缝成因进行分析, 本文结合对老环氧砂浆的修补试验, 对现场裂缝情况进行了考察, 并从断裂能的角度对裂缝进行了分类, 以期以此为基础, 对今后环氧砂浆的开裂机理做进一步深入的分析。

收稿日期: 2004-03-09

作者简介: 郝巨涛(1961-), 男, 辽宁辽阳人, 博士, 教授, 主要从事水工建筑物防渗水和缺陷修补方面的研究。

E-mail: hjt@iwhr.com

2 环氧砂浆护面裂缝的考察及分析

根据文献 [1] 的介绍, 1964 年 4~ 5 月施工期间, 涂层涂抹完不久就出现过许多裂缝, 随着裂缝的扩展, 在裂缝两侧有不同程度的脱空现象。涂层的裂缝多数是 1964 年刚涂抹之后产生的, 以后虽有发展和增加, 但数量较少。此次对裂缝进行现场检测认为, 环氧砂浆护面裂缝可以分为龟裂缝和贯通裂缝两类。通常环氧砂浆的龟裂缝是在固化收缩时产生, 贯通裂缝易在温度收缩时产生。

根据断裂力学理论, 材料在开裂过程中, 裂纹扩展单位面积所释放的能量是常数, 它仅与材料的性质有关, 即材料的断裂能量与开裂面积成正比。由于环氧砂浆护面的厚度仅有 2~ 3cm, 龟裂缝和贯通裂缝的缝深差别并不大。现场观察发现, 在龟裂缝稍密集区域 (裂缝间距约小于 20cm), 用榔头打击裂缝边缘音质发哑, 部分靠近接缝的龟裂缝区域与相邻区域有色差, 边界有水渍痕迹, 表明龟裂缝较深, 部分可能已经裂穿。2003 年 3 月进行老环氧砂浆的修补开挖时, 也证实了这一点。根据这一情况, 假设断裂能量与裂缝长度成正比。为了对裂缝密集程度进行评价, 引入裂缝密度  $C$ , 其定义为单位面积内的累计裂缝长度 ( $\text{m}/\text{m}^2$ )。依据这一假设, 裂缝密度  $C$  与材料在开裂过程中单位体积释放的能量成正比。由于不同的裂缝成因对应于不同的能量释放率, 因而有可能根据裂缝密度  $C$  对裂缝进行分类, 并据此探求裂缝的成因。

**2.1 龟裂缝** 环氧砂浆在固化反应过程中将发生体积收缩, 由于所处的固化环境条件不同, 环氧砂浆表面和内部之间将产生收缩差, 进而产生收缩应力。如果收缩差过大, 则环氧砂浆表面将产生龟裂缝。新安江厂房溢流面环氧砂浆护面的龟裂缝十分普遍, 开裂程度差异也很大。有的区域在数十平方米范围内很少发现龟裂缝, 有的区域龟裂缝则十分密集。表 1 给出的是从现场得到的典型龟裂缝密度  $C$  的特性参数, 其中量测区域采用正方形, 为使量测数据具有代表性, 正方形的面积应足够大, 这里采用边长为裂缝间距的 3~ 5 倍。从表 1 也可以看出, 龟裂缝密度与裂缝间距之间的大致关系, 间距越小,  $C$  值越大。

表 1 典型龟裂缝特性参数

位置	累计缝长/m	量测面积 $\text{m}^2$	缝宽/mm	裂缝间距/cm	裂缝密度 $C/(\text{m}/\text{m}^2)$
11 号坝段下块	3.73	0.25	1.10	10~ 15	14.92
15 号坝段下块	4.21	0.36	1.65	20	11.69
15 号坝段上块	6.88	1.39	0.80	35	4.94

为了解龟裂缝的分布情况, 作者还选择了 14 号坝段进行量测, 结果见图 1、图 2。从图 1、图 2 可以看出, 龟裂缝的分布很不均匀, 表明与此相关的固化收缩能量也很不均匀, 差别较大。

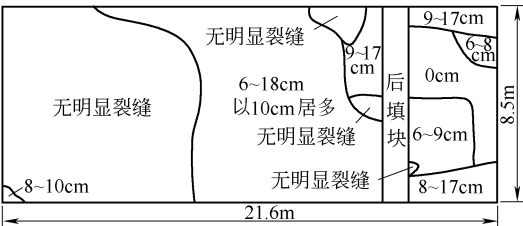


图 1 14 号坝段上块龟裂缝间距分布

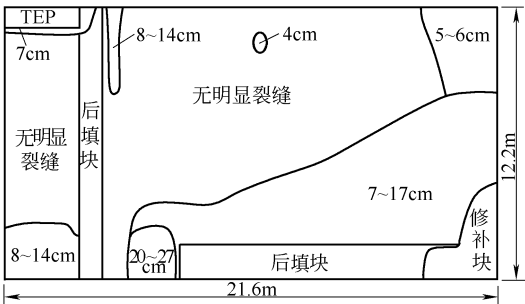


图 2 14 号坝段下块龟裂缝间距分布

**2.2 贯通裂缝** 贯通裂缝一般由温度变化引起。现场对各部位的贯通裂缝进行了普查, 结果见表 2。根据各区域的裂缝密度情况可以看出, 贯通裂缝的裂缝密度比较均匀, 大致为  $0.23 \sim 0.51\text{m}/\text{m}^2$ , 仅在 14 号坝段上块有一处后填筑条带, 贯通裂缝比较密集, 裂缝密度达到了  $1.37\text{m}/\text{m}^2$ 。它表明产生贯通裂缝的能量比较均一, 各填筑块之间变化不大。从表 2 还可看出, 贯通裂缝的裂缝密度远小于龟裂缝的裂缝密度, 表明环氧砂浆的固化收缩能量要大于其温度收缩能量。另外, 贯通裂缝比较严重, 人

工分缝对其影响不大。在 7、8 号坝段的开挖过程中发现，贯通缝大部分已经裂穿。

表 2 各坝段贯通裂缝统计

区域位置	累计缝长/ m		区域面积/ m <sup>2</sup>	裂缝密度 C/(m/m <sup>2</sup> )
	贯通裂缝	人工分缝		
9 号坝段上块	42.2	8 5	8.5× 21. 6	0 23
9 号坝段下块	107.0	24 4	12.2× 21. 6	0 41
10 号坝段上块	64.8	17. 0	8.5× 21. 6	0 35
10 号坝段下块	105.0	12 2	12.2× 21. 6	0 40
11 号坝段上块	63.9	17. 0	8.5× 21. 6	0 35
11 号坝段下块	85.9	24 4	12.2× 21. 6	0 33
12 号坝段上块	51.4	8 5	8.5× 21. 6	0 28
12 号坝段下块	135.2	24 6	12.2× 21. 6	0 51
13 号坝段上块	95.7	17. 0	8.5× 21. 6	0 52
13 号坝段下块	86.0	36 6	12.2× 21. 6	0 33
14 号坝段上块	46.2	17. 0	8.5× 21. 6	0 25
14 号坝段下块	81.4	12 2	12.2× 21. 6	0 31

2.3 贯通裂缝的走向和形态 新安江的环氧砂浆填筑块呈长方形，填筑块的短边为顺水流方向。现场观察发现，贯通裂缝走向大多数与填筑块的短边平行，同时还发现当一个方向形成贯通裂缝将填筑块分割成数个条带以后，则在与此垂直的方向，绝大多数条带即使很长距离也不会产生贯通裂缝。表 3 给出的是 9 号坝段的贯通裂缝统计，其中的贯通裂缝均与短边平行，而且这些平行贯通缝之间的条带中基本没有沿长边方向的贯通缝，这些条带长度大约 8~ 12m。

表 3 9 号坝段贯通裂缝统计

位置	裂缝编号	相邻贯通缝间距/ m	缝长及性状	缝宽/mm	裂缝说明
9 号坝段下游块	1	3.3	7.14	1.0~ 2 5	人工缝
	2	2.4	12 20 ( 贯通缝)	1.4~ 2 4	一半为人工缝
	3	1.6	断续贯通	1.6~ 2 2	裂缝
	4	2.2	7.00	1.6~ 2 1	裂缝
	5	1.9	分离出裂缝 3.80m		人工缝
	6	1.3	一半贯通	1.4~ 2 6	距上游端 4.5m, 拐向 5 号缝
	7	2.1	断续贯通	1.2~ 1.9	裂缝
9 号坝段上游块	横缝	4.7			
	1	0.9	贯通缝	1.0~ 2 3	人工缝
	2	6.4	贯通缝	1.2~ 2 0	裂缝
	3	1.9	4.20	1.5—2 4	偏上游半截缝
	4	0.9	3.70	1.8~ 2 3	抵下游半截缝
	5	0.8	3.50	1.3~ 2 2	偏上游半截缝
	6	2.0	贯通缝	1.1~ 2 0	裂缝
	横缝	6.8			

上述情况在 14 号坝段上填筑块有一例外。该填筑块中有一与短边平行的、宽 120cm 的后填筑条带，条带中出现了 6 条垂直于水流方向的贯通缝，另外还有 6 条半截缝。但在靠近下游边缘中部出现了一条平行于水流方向（即长边）、长 4.15m 的贯通缝。该条带的裂缝密度 C 高达 1.37m/ m<sup>2</sup>。

现场观察发现，很多贯通缝的缝边高于两侧缝肩，有的高出达 5mm，显示出受挤压的迹象。

2.4 横缝活动情况 现场观察可以明显看出填筑块横缝(短边接缝)的活动情况。首先是接缝宽度变化很大，一般变幅可达接缝平均宽度的 50%，最大可达 80%。其次接缝有明显的受挤压迹象，接缝边缘常高出护面平面，高出起点有发生折断的迹象。接缝一侧边缘高出另一侧边缘，而且常表现为两侧交替高出的现象，两同侧高出点之间的距离小的仅为 1m。有个别接缝呈现相互挤压，接缝缝面已被挤压成大 S 形。现场观察到的最大高出高度为 28mm，发生在 8 号与 9 号坝段之间接缝的下游端点，高出的环氧砂浆护面底部已经露出，下部已经脱空。表 4 给出的是各填筑块横缝活动情况的统计。

表 4 各填筑块横缝活动情况统计

坝段	位置	横缝宽度/mm	最大高出高度/mm	高出起点至横缝距离/mm	同侧高出点间距/m
8~ 9 号	上块	7.4~ 14.3	9.4	80	
	下块	8.4~ 13.0	28.0	400	
9~ 10 号	上块	11.0~ 15.0	3.2	60	
	下块	11.7~ 17.4	7.4	100	5.5
10~ 11 号	上块	10.6~ 18.8	7.6	100	2.2
	下块	10.3~ 18.9	20.6	120	1.9
11~ 12 号	上块	6.6~ 15.6	11.2	90	2.0
	下块	14.3	16.8	250	
12~ 13 号	上块	6.8~ 27.2	12.2	120	1.8
	下块	9.5~ 18.2	10.0	90	2.6~ 3.5
13~ 14 号	上块	9.5~ 12.2	7.4	90	
	下块	7.7~ 8.3	9.4	110	
14~ 15 号	上块	4.7~ 15.0	10.0	150	1.7
	下块	8.1~ 14.0	8.2	130	1.6
15~ 16 号	上块	7.9~ 10.7	8.0	110	1.4~ 2.7
	下块	10.6~ 12.2	8.0	100	

2.5 护面脱空情况 2003 年 3 月在 7、8 号坝段的环氧砂浆护面开挖过程中发现，护面存在 6 处脱空，其中 7 号坝段下块 2 处，上块 1 处；8 号坝段下块 1 处，上块 2 处。脱空面积大致为 0.1~ 0.3m<sup>2</sup>，7 号坝段下块下游侧的脱空面积较大，约 1~ 2m<sup>2</sup>。开挖后发现，脱空底部均潮湿有水。除 7 号坝段上块的脱空和下块上游侧的脱空以外，其余脱空部位或是靠近接缝，或是顶面有贯通缝穿过。

3 结语

环氧砂浆护面是目前混凝土结构表面经常采用的修补方法，其裂缝也比较常见。本文对新安江厂房顶溢流面已运行近 40 年的老环氧砂浆护面的裂缝情况进行了现场考察，得出了以下几点结论：(1) 环氧砂浆护面的缺陷和破裂形式主要有龟裂缝、贯通裂缝、接缝边缘翘起和护面底部脱空；(2) 由于护面较薄，龟裂缝和贯通裂缝的缝深差异不大，所以可以采用裂缝密度 *C* 对裂缝的断裂能量进行研究。对于局部龟裂缝，其裂缝密度为几至几十 (m/m<sup>2</sup>)，远大于贯通缝的裂缝密度 (一般为零点几 (m/m<sup>2</sup>))。龟裂缝裂缝密度分布的不均匀程度也远大于贯通裂缝。这些数据特点与龟裂缝和贯通裂缝的成因特点是一致的，即龟裂缝成因复杂，实际变动情况很大；贯通裂缝成因相对简单，实际变动情况较小；(3) 贯通缝的走向基本与填筑块的短边平行。贯通缝之间的条带很少出现另一垂直方向的贯通短缝。贯通缝大都贯穿整个护面厚度；(4) 环氧砂浆的分段分块不足以消除温度变形的影响，接缝变形、接缝宽度不均匀、缝边缘翘起等现象十分严重；(5) 环氧砂浆护面存在底面脱空现象，脱空部位较多是靠近接缝界面，由界面潮湿导致粘结不良引起，也有的脱空部位发生在填筑块的中部。

参 考 文 献：

[ 1 ] 买淑芳，方瑞良. 新安江厂房顶环氧涂层研究阶段试验报告 [ R ]. 北京：水利水电科学研究院，1982.

[ 2 ] 结构材料研究所. 环氧聚酯砂浆和环氧聚酯混凝土的徐变变形及温度线胀性能试验研究报告 [ R ]. 北京：水利水电科学研究院，1965.

[ 3 ] 结构材料研究所. 混凝土工程新型修补材料环氧聚酯砂浆及混凝土性能的试验研究 [ R ]. 北京：水利水电科学研究院，1965.

( 下转第 214 页 )

Deriving drainage networks and catchment boundaries from Grid Digital Elevation Model

LI Chong<sup>1</sup>, YANG Da-wen<sup>2</sup>

(1. Dept. of water Hazard Research, IWHR, Beijing 100038, China  
2. Department of Civil Engineering, University of Tokyo, Japan)

**Abstract:** Digital data of the position and characteristics of river networks and catchment are important for the construction of physically based distributed hydrological model, in which a detailed definition of a catchment's internal drainage structure is required. By applying the eight flow direction matrix (D8) approach, a software on extracting drainage networks from raster Digital Elevation Models (DEM) has been developed. Based on the software, a drainage network from  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  DEM with 100m resolution was derived for Tianshan region in Xingjiang and it compares well with the digital blue river with 1/250000 resolution in this region. Besides, a drainage network of the Yangtze River basin, whose drainage area is over 1 800 000 km<sup>2</sup>, has been extracted, based on the free digital elevation data of 1-km resolution and USGS HYDRO1k data set, Using the Pfafstetter scheme, the river network has been separated into the main river course and tributaries. Good visual consistence was obtained to compare the extracted river networks with digital actual river, as well as the inter-basins boundary and drainage area. The results imply that the proposed software is apt to automatically extract drainage networks from grid DEM with reliable resolution.

**Key words:** Digital Elevation Models; eight flow direction matrix (D8) approach; drainage network extract

(责任编辑: 李福田)

Crack checking and analysis of epoxy mortar facing on the spillway of Xin'anjiang Power Plant

HAO Jie-tao<sup>1</sup>, ZHU Jun<sup>2</sup>, BAO Zhi-qiang<sup>1</sup>, GUAN Yi-shi<sup>1</sup>

(1. Department of Structures and Materials, IWHR, Beijing 100038, China  
2. XiAn University of Technology, XiAn 710048, China)

**Abstract:** The crack repairing by epoxy mortar facing on the spillway of the Xin'anjiang Power Plant was made 40 years ago. It was the earliest practice of epoxy mortar repairing in China. On-site checking on cracks on the old epoxy mortar facing was conducted recently and the results are described in detail in this paper. The cracks are classified from the point of view of cracking energy. The feasibility of the classification can be proved by the consistency between the crack appearance and the cracking energy checking, which offers a basis for crack analysis in the future.

**Key words:** epoxy mortar; crack repairing; crack analysis

(责任编辑: 王成丽)