

混凝土大坝裂缝灌浆处理效果研究

李九红¹, 徐建光², 王延斌³, 邹少君⁴

- (1. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048; 2. 西北电力试验研究院, 西安 710054;
3. 中国电力投资公司西北分公司, 西安 710054;
4. 黄河水电测试科技有限公司宁电分公司, 宁夏青铜峡 751601)

摘 要: 混凝土大坝在施工期或运行期产生裂缝的现象较为普遍, 为了满足工程安全运行的要求, 一般对危害较大的裂缝进行灌浆处理。本文提出从以下四个方面对裂缝灌浆效果进行综合评价: (1) 通过裂缝的成因、特点和危害性认识, 评价灌浆处理原则、采用的嵌缝材料是否满足要求; (2) 从灌浆施工工艺和质量控制手段评价裂缝灌浆效果; (3) 对灌浆处理后的裂缝采取骑缝取芯样并进行力学性能试验, 掌握裂缝灌浆后的实际抗拉和抗渗性能; (4) 通过裂缝灌浆前后的三维有限元模拟计算, 分析灌浆后混凝土坝整体稳定性、重点部位和裂缝处局部力学性能的差异。最后, 以青铜峡大坝电站坝段三大条贯穿性裂缝的灌浆效果评价为例, 介绍本评价方法的应用。结果表明: 采用本评价方法能对裂缝灌浆效果进行较为科学、客观的评价, 并对今后的大坝裂缝处理、评价提供借鉴。

关键词: 水工结构; 灌浆; 实践研究; 裂缝; 混凝土坝
中图分类号: TV642.2 文献标识码: A

Research on crack grouting in concrete dams

LI Jiuhong¹, XU Jianguang², WANG Yanbin³, ZOU Shaojun⁴

- (1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048;
2. Northwest China Electric Power Test & Research Institute, Xi'an 710054;
3. Northwest China Branch of China Power Investment Corporation, Xi'an 710054;
4. Ning-Dian Branch of Test corporation for Huanghe Hydropower Science and Technology, Qingtongxia, Ningxia 751601)

Abstract: It is common that concrete dams occur cracks in construction or operation. In order to operate safely, grouting is always adopted as the treatment for some harmful cracks. In this paper, the four aspects are considered for overall evaluations of crack grouting. First, by the recognition of causes and characteristics as well as the harm of cracks, the grouting principle is examined whether the grouting materials can meet the requirements. Second, the grouting is evaluated from grouting technology and the measures of quality control. Third, the core samples of grouting obtained along the cracks are tested for mechanics properties so as to get the real behaviors of tensile strength and water proof. Fourth, by 3D FEM simulation computation of fore and aft crack grouting, stability of the whole dam and the mechanics differences of key parts and partial sections of cracks after grouting are analyzed. Finally, the grouting for three big penetrable cracks of Qingtongxia dam is taken for an example to introduce the application of this evaluation, the results show that the evaluations of grouting proposed in this paper can be scientific and objective and can provide the references for crack grouting of other concrete dams and its evaluation.

Key words: hydraulic structure; grouting; practical research; crack; concrete dam

关于混凝土大坝裂缝的研究国内外已进行了许多工作。主要的研究可分为两类, 一是通过断裂损伤理论, 研究裂缝的起裂条件、开裂方向、扩展稳定性、失效准则等^[1-3]; 二是根据已产生裂缝的成因和处理的主要目的, 研究适合工程的处理措施^[4] (多是采取灌浆处理措施) 或灌浆材料^[5], 以满足工程安全运行的要求。

随着水利水电建设的发展, 修建的混凝土大坝越来越多。而混凝土大坝在施工期或运行期产生裂缝的现象

收稿日期: 2005 12 12

作者简介: 李九红 (1969-), 男, 副教授, E-mail: ljh@xaut.edu.cn

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

较为普遍^[3-10]。对于危害较大的裂缝一般都要进行工程处理。为了解决众多的不同类型的工程安全问题,对混凝土大坝裂缝成因分析及灌浆处理材料进行研究文献较多^[5-8]。裂缝灌浆处理后混凝土坝整体稳定性、裂缝处局部力学特性的变化必将依赖灌浆材料特性、灌浆工艺、灌浆后裂缝部位力学性能等的影响。怎么对灌浆效果进行科学有效的评价,以综合反映裂缝处理效果,是很多水电工程遇到的实际难题。

本文通过对灌浆处理后裂缝部位的骑缝取样并进行力学性能试验,结合裂缝灌浆前后的三维有限元计算成果,综合评价裂缝的灌浆处理效果。根据灌浆效果评价结果,可以对下一步裂缝处理进行有效的指导,确保工程的安全稳定运行,具有重要的意义。

1 大坝混凝土裂缝成因综述

通过对国内许多混凝土大坝裂缝进行分析表明:产生混凝土大坝裂缝的原因主要有设计存在问题、施工质量控制问题、施工期温度控制问题三种。

设计方面,混凝土大坝裂缝的产生主要与工程地质问题、大坝的体型、设计荷载工况等因素有关。从施工质量控制来看,主要有:(1)温度应力,在浇筑时间较长的老混凝土上浇筑新混凝土,当新浇混凝土的温度下降时,由于老混凝土块约束,在新混凝土块内产生较大的温度应力而引起温度裂缝;(2)在北方寒冷地区,由于日温差较大和出现寒流次数较多,混凝土表里温差使得混凝土极易产生表面裂缝;(3)由于各工序的相互干扰,养护间断时有发生,这将会导致裂缝产生;(4)骨料质量,骨料中存在的软弱颗粒含量较高时,在应力较大情况下,在软弱颗粒处容易产生裂缝^[8]。

混凝土大坝的裂缝,存在其它潜在隐患的情况下,多数由于温度应力而诱发。对于混凝土重力坝,尤其在施工期产生的裂缝居多,对于混凝土拱坝,运行期不利工况易在坝后产生裂缝。

2 大坝混凝土裂缝灌浆处理

对于混凝土大坝的裂缝,由于产生的部位和裂缝的性质存在差异,对工程安全带来的危害也不同。在已投产运行的工程中,对于危害较大的裂缝一般都要进行灌浆处理。

对混凝土大坝裂缝的处理可分为表层处理和深层处理,表层处理一般采用表面凿槽嵌补,表面涂抹水泥砂浆、环氧、沥青、油漆等方法。深层处理一般采取灌浆方法,根据灌浆材料的不同,可分为水泥灌浆和化学灌浆。根据裂缝处理的目的不同,一般分为补强型、防渗型、补强防渗型。根据裂缝特点的不同,分为刚性灌浆与柔性灌浆。刚性灌浆一般采取环氧树脂一类的灌浆材料。其特点是强度高,力学性能好,但一般脆性高,只能用以灌注“死缝”。柔性灌浆一般采取聚氨酯类灌浆材料,其化学成分为聚氨基甲酸酯类高聚物,由多异氰酸酯和多羟基化合物反应而成。其水溶性配比物浆材遇水后体积可膨胀2~3倍,适用于有渗漏的活缝,因此采用柔性灌浆方法。裂缝处理的一般工艺为:开槽→埋管→嵌缝→试漏→灌浆→封孔^[9]。

3 裂缝灌浆效果评价方法

虽然不同类型的裂缝和不同部位的裂缝在处理的主要目的上存在差异,但对其灌浆处理的效果进行评价的

2) 抗拉试件, L1号试件和L2号试件在拉力50N时沿裂缝面断裂,抗拉强度约0.02MPa,断面呈乳白色胶膜。L3号试件在拉力2.45kN时沿裂缝面断裂,抗拉强度约1MPa,试验方法相似。抗拉试件断裂形状及断面如图6所示,断面呈咖啡色或褐色胶膜。具体评价思路如下:

(1) 通过裂缝的成因、特点和危害性认识,评价灌浆处理原则、采用的嵌缝材料是否满足要求;(2) 从灌浆施工工艺和质量控制手段评价裂缝灌浆效果;当灌浆处理裂缝有监测手段时,分析裂缝的变化规律和灌浆处理前后的差异;(3) 现场钻样并进行裂缝处理后的力学性能试验;一般情况下,裂缝的开裂首先在表面,裂缝在表面的出露为钻孔取样提供了条件;根据有关测量、分析、计算成果估计裂缝的内部走向,确定取样方向,采用骑缝钻取混凝土芯样的办法,然后按试验要求进行试件加工;(4) 根据试验结果,合理选择灌浆处理后裂缝处的有限元模拟方法、参数,模拟分析灌浆后裂缝处的应力、应变特性,并与完整结构、裂缝结构的模拟分析成果进行对比,分析裂缝灌浆后对整体稳定性和裂缝局部应力的影响;(5) 根据以上各点,综合分析灌浆效果,并指出可能存在的问题,以指导进一步的处理或供其它工程借鉴。

4 工程应用

此处以青铜峡电站坝段的三大条贯穿裂缝的灌浆效果评价为例,介绍本方法的应用。

4.1 基本资料

青铜峡水电站位于宁夏回族自治区境内黄河干流上, 是以灌溉、发电为主, 结合防洪、防凌等综合利用的大型水利枢纽工程。青铜峡水电站于 1958 年 8 月开工兴建, 1967 年 12 月第一台机组并网发电, 1978 年 8 台机组全部投入运行。施工过程中, 据 1962 年现场调查, 发现砼裂缝共 1566 条。电站坝段比较集中, 占 61.2%。其中, 位于电站坝段平行于机组中心线的机上缝、机中缝、机下缝, 从基础到顶部几乎贯穿, 在立面上呈断续分布, 似将大坝分为四块。裂缝示意图如图 1 所示。

4.2 裂缝的成因、特点、危害性

青铜峡水电站采用河床闸墩式钢筋混凝土薄壁结构, 坝址位于西北严寒地区, 气温年变幅大, 电站混凝土浇筑时由于分块错缝不合理, 缺乏温控、保温等措施, 水下结构孔洞多, 结构厚度薄, 跨度大, 施工后裂缝情况严重^[9-10]。

其中分布普遍、规律性强, 对电站坝段的应力、变形和整体稳定影响较大的是平行坝轴线的三条裂缝。分布在机中 0+000m 附近的机中缝(砼拉裂面)、机上 0+4.5~7.0m、机下 0+7.0~9.5m 的机上机下施工缝(相当于纵缝开裂)。机中缝和机下缝东墙最大缝宽 1.48mm, 西墙最大缝宽 1.78mm。机上裂缝宽度, 东墙介于 0.18~0.38mm, 西墙介于 0.2~0.44mm。

三大条贯穿性裂缝大致有以下特点: 1) 在边墙断面上, 从 1122m 高程到坝顶混凝土表面是连续或接近连续的, 同时, 边墙面上的纵向裂缝与蜗壳顶板的纵向裂缝已相互连续; 2) 涉水部位的裂缝均有渗水或渗水痕迹; 3) 电站坝段东西墙面上的裂缝互相对应; 4) 裂缝宽度受温度影响呈周期性变化, 最大值出现在 12 月~1 月(厂房外部斜墙), 1 月~3 月(机房边墙); 最小值出现在 5 月~7 月(厂房外部斜墙), 8 月(机房边墙)。

4.3 灌浆处理及效果评价

三条贯穿性大裂缝灌浆处理原则是以防渗堵漏为主, 适当考虑补强作用。灌浆压力控制在 0.4MPa 以内, 使浆液在缝内充填密实的同时, 减少灌浆压力对结构所产生的危害^[9]。

根据三条大裂缝的成因、特点、变化规律和危害性, 灌浆处理以防渗堵漏为主、适当考虑补强的处理原则是正确的。

根据处理原则, 选用的灌浆材料、施工工艺和质量控制手段基本也能满足要求, 但有些部位实际灌浆时段坝温偏高。

4.4 灌浆后裂缝的力学性能试验

(1) 现场骑缝取样

①目的: 评价灌浆后裂缝处的抗拉力学特性和抗渗力学特性。②方法: 根据有关资料估计内部裂缝走向, 确定取样位置, 采用骑缝钻取混凝土芯样的办法。③部位: 本次现场取样主要为厂房部位的三大条贯穿性裂缝。在 2 号、5 号、6 号边墙的机中缝、机下缝各取两个有效混凝土芯样。现场钻取的部分混凝土芯样如图 2 所示。

(2) 试样加工

采用大理石切割机对试件进行切割、用磨光机磨光。加工框图如图 3 所示。

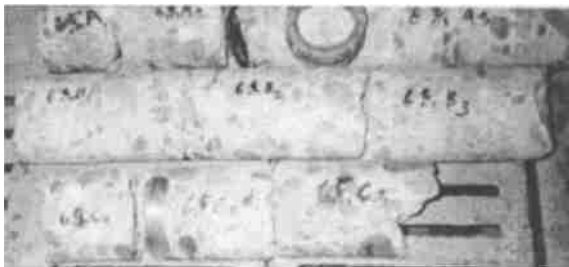


图 2 带有裂缝的混凝土芯样

Fig. 2 Core sample of concrete with cracks

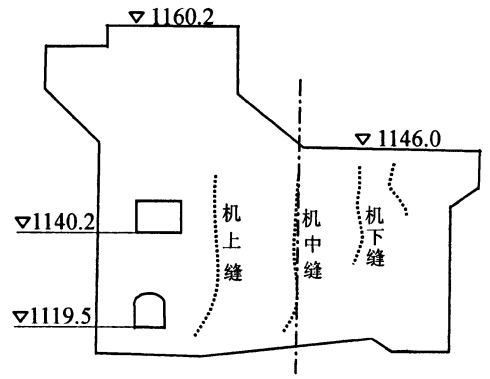
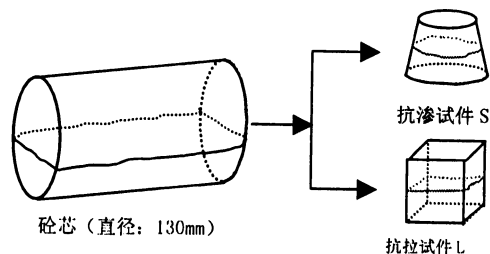


图 1 电站坝段三大条裂缝示意图

Fig. 1 The sketch of three cracks of power station dam



抗渗试件: 上圆直径 70mm × 下圆直径 80mm × 厚度 30mm

抗拉试件: 长 50mm × 宽 50mm × 高 50mm

图 3 试件加工示意图

Fig. 3 Sketch of process

(3) 试验过程

下面以一组试件(抗渗试件三个,编号为 S1、S2、S3;抗拉试件三个,编号为 L1、L2、L3)为例,介绍试验过程和结果。

图4为试验机上的抗渗试件,具体操作是将抗渗试件装入抗渗模具中,周边用防水材料密封,安装到砂浆抗渗试验机(SS-40型)上,排掉管路中的气体之后,开始加压,加压速度为0.5MPa/h。

图5为试验机上的抗拉试件,将抗拉试件上下表面用丙酮清洗干净,用强力胶将试件粘接在夹具上(粘接强度12MPa),在ZDM10000型全能试验机上进行抗拉试验,先手工加载10N/100r,后自动加载速度约50N/s。



图4 试验机上抗渗试件

Fig.4 The impemeable sample on the test machine

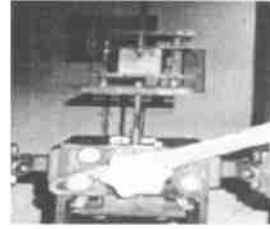


图5 试验机上的抗拉试件

Fig.5 The antr pull sample on the test machine

(4) 试验结果

1) 抗渗试件,加压2h6min,压力约0.1MPa时,S1号试件透水,透水处为上下窜透的卵石表面,即卵石与砂浆粘接处。加压5h,压力约0.5MPa时,S2号试件、S3号试件均未透水,表明抗渗性能不小于0.5MPa。

2) 抗拉试件,L1号试件和L2号试件在拉力50N时沿裂缝面断裂,抗拉强度约20kPa,断面呈乳白色胶膜。L3号试件在拉力2.45kN时沿裂缝面断裂,抗拉强度约1MPa。断面呈咖啡色或褐色胶膜。抗拉试件断裂形状及断裂面如图6所示。

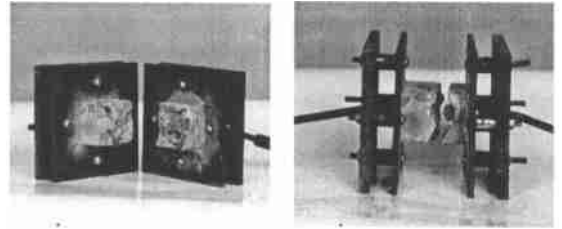


图6 L2号试件断面图

Fig.6 L2 section drawing of sample

(5) 试验结果简要分析

1) 从现场取到的芯样看,芯样在裂缝面上的粘结强度不高,达不到灌浆材料的粘结强度2~2.5MPa,灌浆效果较好时,裂缝处抗拉强度约1MPa。

2) 对于抗渗性来说,垂直于裂缝面的抗渗性与裂缝面粘接强度关系不大,虽然粘接强度可能较低,但在裂缝面上,灌浆材料形成一不透水的薄膜,这与试验结果基本一致,一般情况下,裂缝面上抗渗压力不低于0.5MPa。

3) 在裂缝面上,几乎均能看见乳白色、褐色或咖啡色灌浆材料。

4.5 灌浆裂缝的有限元模拟

裂缝问题是典型的接触摩擦边界非线性问题,对于水电站厂房这样复杂的多空腔结构以及内部多条裂缝的分布情况,采用三维非线性有限元分析。计算采用ANSYS-CAE仿真分析软件和SAP有限元软件,对电站坝段整体结构模型,按空间三维有限元法作了建模及分析计算,模型中对三条裂缝按实际位置、长度、深度进行了模拟。

(1) 计算范围: 砼结构5#机组段,基础部分,顺水流方向上及宽度同砼部分,铅直方向取一倍建筑物高度。

(2) 基本假定: 边界约束为基础底部三向固结约束,其它各面施加相应法向链杆约束,基础部分仅作为无质量的弹性支撑;裂缝用三维接触单元模拟。

(3) 计算工况: 为了模拟分析灌浆后裂缝处的应力、应变特性,并与完整结构、裂缝结构的模拟分析成果进行对比,分析裂缝灌浆后对整体稳定性和裂缝局部应力的影响,进行以下4种工况的计算。

坝体裂缝未灌浆(以下A为水库正常蓄水位,B为自重,C为设计温降,D为设计温升,E为淤沙压力)。

工况1: A+ B+ C+ E

工况2: A+ B+ D+ E

坝体裂缝灌浆后:

工况3: A+ B+ C+ E

工况4: A+ B+ D+ E

(4) 主要成果及简要分析

1) 变形

河床电站坝段坝顶最大位移出现在上游墙顶部,但坝体的“三条”裂缝对结构位移有一定影响,完整的坝体向下游位移小,有裂缝坝体向下游位移大,这是因为出现裂缝后,上游坝块的刚度小,其变形大,合乎一般规律。

在各计算工况下,坝体水平位移指向下游,垂直位移向下,位移随裂缝状态不同有较小的差异,温降情况表现为坝体连同基础的收缩变形,温升则表现为膨胀。

从计算成果看,裂缝只是微量地影响到结构的位移大小,并未引起明显的规律改变。水平位移最大值为6.0mm,竖向位移最大值为5.9mm,但结果还是可以看出坝体开裂后坝体变形随裂缝的开展及刚度减小而增加,坝体外表的位移相对减小。

2) 应力

坝踵部位:灌浆前后裂缝对坝踵应力分布影响不大,拉正应力最大差值为0.005MPa。灌浆前其最大值为0.027MPa,拉应力区宽度小于坝踵至帷幕中心线的距离。

坝趾部位:灌浆前后对坝趾应力分布影响甚微,拉正应力最大差值为0.001MPa,坝趾在水平方向出现较小的拉应力,灌浆前其最大值为 $\sigma_t = 0.066\text{MPa}$,拉应力的产生是由扬压力引起的,位于中墩底部。

裂缝处的应力:各计算工况下,各裂缝面上的接触应力均为压应力,应力值不超过0.45MPa;裂缝面间的相对位移很微小,最大滑动距离为0.046mm(工况2),均属于压剪型裂缝。

由此可以判定,裂缝的存在并未使结构的应力状况有明显的恶化,只是在局部区域内应力值略微有所增加,并且最大应力出现的部位稍有转移。

4.6 裂缝灌浆效果综合评价

1) 主要结论

青铜峡电站坝段的三条大裂缝经过灌浆处理后,近期内基本满足工程安全运行的要求,但仍存在以下问题:

(1) 裂缝内充填的灌浆材料,实际粘结强度只达到灌浆材料标称粘结强度的40%~50%,其原因是裂缝被一些疏松体所充填,这些疏松体可能来自以下几个方面:①三条大裂缝在施工期曾进行过水泥灌浆处理,裂缝在多年的开合变化过程中,水泥结石或水泥浮浆在长期的压缩拉伸(卸压)的循环作用下,可能与砼单面(或双面)脱开、碎裂;②暴露在大气中的裂缝,在长期的风沙、雨雪气候条件下,外界的粉尘随风堆集于裂缝浅表部位,又顺雨水下渗、沉积;③在外渗水的作用下,砼及水泥结石中的氧化钙溶化析出,变成氢氧化钙,在缝口形成碳酸钙结晶,长期的渗漏将使砼的强度下降;④黄河上游库水中含有硫酸钙,一些水下裂缝在长期渗水的过程中可能存在不同程度的化学侵蚀。

(2) $\nabla 1140.2\text{m}$ 以上边墙两侧暴露在大气中的裂缝,开度随气温变化而变化,所灌材料既要有较好的变形性能,以适应裂缝周期性变化,又要有较好的强度,以起到传力作用,这双重功能似难以两全。此类活动裂缝的治理目标只能以防渗和防止钢筋锈蚀为主。因此,可以选用变形大、弹模低的材料,进一步提高粘结强度,尽可能地在裂缝开度大的时候施灌;同时,做好裂缝迎水面和背水面的防水层,以防止渗漏。

(3) 灌浆效果不甚理想的原因与作业时间有很大关系。97年2[#]、5[#]机组段斜墙外侧施工,仅靠一只吊篮一个作业人员,灌浆一直延续到6月25号,气温高达30℃,阳光直射下的砼表面温度接近50℃,此时裂缝已趋于最小开度,已达不到灌浆效果。

2) 主要建议

(1) 从有限元分析结果看,裂缝存在不影响大坝的整体稳定性,充分灌浆后(理想状态)只在局部有应力改善的效果,所以灌浆处理应以防渗漏为主要目的,灌浆材料应选用防渗性能好的材料。

(2) 选择合适的灌浆时间是施工成功的关键。应将灌浆时间安排在裂缝开度最大的季节,这样才能做到充分灌浆。所以在灌浆之前应做好设计规划和时间安排,努力做到在规定的时间内完成灌浆施工。

(3) 对于缝内污物问题,建议增加一道压水程序,以清洗缝内污物。但应做好试验工作,然后再全面展开,否则可能会适得其反。

5 结语

本文介绍的混凝土大坝裂缝评价方法,能对裂缝灌浆效果进行较为全面、客观、科学的评价,并对今后的大坝裂缝处理、评价提供借鉴。

参考文献:

- [1] 冯伯林, 徐道远, 周先贵, 等. 温度荷载作用下拱坝裂缝的断裂力学分析方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2000, 23(6): 1003~ 1008.
- [2] 张雪虎, 张社荣, 陈祖坪. 用任意加密有限元剖分的方法研究拱坝强度裂缝的产状[J]. 水利学报, 2001, (9): 68~ 72, 80.
- [3] 李雪红, 顾冲时, 赵斌. 大坝裂缝的突变模型[J]. 水电能源科学, 2000, 18(4): 16~ 18.
- [4] 迟世春, 林皋. 带裂缝重力坝的并缝效果研究[J]. 世界地震工程, 2001, 17(2): 104~ 109.
- [5] 包银鸿. 我国大坝灌浆材料的多层次开发[J]. 华东水电技术, 1995, (4): 34~ 40.
- [6] 王志勇. 非稳定性混凝土裂缝的成因与处理[J]. 海岸工程, 2000, 19(2): 54~ 58.
- [7] 陈维杰, 李孟奇, 李中玉. 虎盘水电站大坝裂缝成因分析[J]. 水利水电工程设计, 2000, 19(4): 28~ 29.
- [8] 钱宁, 谢振江. 李家峡水电站主坝混凝土裂缝及其缺陷处理[J]. 西北水电, 2000, (4): 29~ 31, 63, 67.
- [9] 王春华, 邹少君. 青铜峡大坝电站坝段三大条贯穿性裂缝及 3[#] 胸墙裂缝处理[J]. 大坝与安全, 1998, (4): 61~ 65.
- [10] 吴子平, 吴中如, 顾冲时, 等. 青铜峡大坝电站坝段变形性状及裂缝物理成因分析[J]. 大坝观测与土测试, 2001, 25(1): 25~ 28.