

文章编号: 1001-5485(2011)03-0054-05

混凝土坝裂缝灌浆关键技术问题探讨

陈彦玉

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 混凝土坝施工期或运行期常出现不同程度的裂缝, 灌浆作为修补混凝土裂缝的一项主要技术, 能显著提高坝体整体性和承载力。结合国内外混凝土坝裂缝灌浆修补的工程实例, 对灌浆技术的应用进行阐述, 并对其中几个关键技术问题: 灌浆时机的选择、灌浆压力的合理取值及灌浆效果评价方法等进行了探讨。

关键词: 混凝土裂缝; 灌浆; 灌浆时机; 灌浆压力; 灌浆效果评价

中图分类号: TV 543 文献标识码: A

1 概 述

大坝等大体积混凝土结构, 施工期和运行期常因温度变化而产生较大的拉应力, 由于混凝土抗拉强度较低, 在拉应力的作用下坝体混凝土常出现不同程度的裂缝^[1]。裂缝不但影响结构的美观和混凝土的耐久性, 甚至还会给结构的整体安全性带来隐患。目前, 混凝土坝建设仍没有摆脱“无坝不裂”的历史, 防止裂缝是坝工结构设计和施工中的重要课题。

灌浆技术作为修补裂缝的常用手段, 其主要原理是通过灌浆泵等压送设备将浆体灌入裂缝内, 使其渗透、扩散、胶凝或固化, 以恢复坝体的整体性及其承载能力。上世纪初, 为提高水闸基础的抗渗性和承载力, 法国工程师 Charles 首次成功地将水泥浆注入水闸地基裂隙中, 并取得了良好的效果^[2]。此后, 新型灌浆材料的不断涌现及丰富的工程实践经验, 推动了灌浆施工技术和理论不断发展。

混凝土裂缝问题本身较为复杂, 灌浆过程中浆体与坝体混凝土存在流固耦合作用, 同时叠加早期残余温度应力, 使得混凝土坝裂缝灌浆机理更为复杂。工程实践表明, 有的灌浆效果较好, 达到了预期目的, 但也不乏灌浆过程中出现裂缝扩展等失败的案例。究其原因, 主要是对浆体与混凝土间耦合作用的机理及浆体压裂过程中裂纹扩展规律研究不够。因此, 开展灌浆作用下, 混凝土坝裂缝及灌浆效果研究具有重要的工程意义。本文在总结已有的工

程实践和相关理论的基础上, 探讨混凝土坝裂缝灌浆修补中存在的主要问题和研究思路, 以期为后续的研究工作提供参考。

2 国内外混凝土坝裂缝灌浆修补工程实践

作为一种常见的裂缝修补措施, 灌浆技术在坝工界受到高度重视。该技术的应用成功地解决了许多工程技术难题, 并取得了良好的效益。

我国的灌浆技术发展, 源于上世纪 50 年代。当时为应对三峡工程中可能出现的裂缝, 长江科学院等单位相继开展混凝土灌浆补强工作的研究^[3]。三峡二期工程因温度应力出现不同程度的裂缝, 采用化学灌浆技术修补, 取得了良好的工程效果^[4, 5]。

国外有关灌浆技术在混凝土坝中的应用较早。上世纪初, 灌浆技术就应用于修补大坝基础, 以提高坝基整体性和承载力^[6]。随着灌浆材料的不断涌现和灌浆工程实践经验的积累, 灌浆技术取得了长足的进步。在 Big Eddy 重力坝水平施工缝修补过程中, 首次提出了最大灌浆压力的概念^[7]; 瑞士坝工专家 Lombard 提出灌浆强度值法, 即 GIN 法, 通过定义 GN 的取值, 来防止灌浆过程中裂缝的张开和扩展^[8], 该法在国内外大坝裂缝修补中均得到广泛应用。

国内外应用灌浆技术修补大坝裂缝的实例很多, 包括成功的、较成功的及失败的。典型工程实例如表 1 和表 2 所示。

收稿日期: 2010-04-06

作者简介: 陈彦玉 (1984-), 男, 北京市人, 硕士研究生, 主要从事准大体积混凝土结构温控防裂研究, (电话) 13426017731 (电子信箱) che-nyan-yu0140@163.com

表 1 国内混凝土坝裂缝灌浆修补工程实例

Table 1 Examples of repaired concrete dams by grouting in China

大坝名称	位置	坝高 /m	裂缝产生原因	浆体材料	灌浆压力 /MPa	灌浆效果评价	参考文献
天堂山拱坝	广东	70.0	基础约束及温度应力	YDS 及环氧浆材	0.8~1.0	效果良好	[9]
宝珠寺重力坝	四川	132.0	温度应力	环氧浆材	0.2~0.3	没有提高坝体受力	[10]
大峡重力坝	甘肃	70.0	温度应力	环氧聚酰胺和环氧伯胺	0.3~0.6	质量良好	[11]
三峡重力坝	湖北	181.0	温度应力	环氧浆材 LPL	-	效果良好	[4], [5]
青铜峡重力坝	宁夏	42.7	温度应力	环氧树脂	0.4	不甚理想	[12], [13]
汾河二库重力坝	山西	88.0	温度应力	水溶性聚氨酯	0.4~0.8	效果良好	[14]
大花拱坝	贵州	134.5	温度应力	PSI-CW 环氧材料	0.1~0.3	效果较好	[15]
长潭拱坝	广东	53.0	温度应力及扬压力	EP-01 环氧树脂	0.4~0.8	比较理想	[16]

表 2 国外混凝土坝裂缝灌浆修补工程实例

Table 2 Examples of repaired concrete dams by grouting in foreign countries

大坝名称	国家	坝高 /m	裂缝产生原因	浆体材料	灌浆压力 /MPa	灌浆效果评价	参考文献
Zeuzier	瑞士	156	基础沉降	环氧树脂	1~4	成功	[17], [18]
Flm endosa	意大利	115	温度应力	环氧树脂	1~6	恢复坝体整体性	[19], [20]
Zillgrund I	奥地利	186	扬压力	环氧树脂	5~18	灌浆压力大导致新裂缝	[21]
Daniel Johnson	加拿大	215	结构体型及温度应力	超细水泥	1.15~2	灌浆后没出现渗漏现象	[22]
Kolbren	奥地利	200	结构体型	环氧树脂	3	GN 方法	[23]
Isle Maligne	加拿大	43	施工缝恶化	超细水泥	0~5	裂缝扩展	[24]
Sefid Rud	伊朗	106	地震作用	环氧树脂	6~10	浆材与混凝土结合良好	[25]
Big Eddy	加拿大	44	水平施工缝恶化与渗漏	水泥浆	有效压力 + 0.7kPa	除微小的渗漏外,效果良好	[7]

通过以上工程实例,可以获得以下几点认识:

(1) 新型灌浆材料的不断涌现。从早期水泥浆到现在的各种化学材料,如环氧树脂、水溶性环氧浆材等,灌浆材料不断向低成本、高强度、高抗渗性、绿色无污染的方向发展。

(2) 灌浆施工工艺日趋成熟。通过国内外大量大坝裂缝灌浆实例,已总结出系统的灌浆施工步骤,如裂缝普查→钻孔与埋管→表面封缝→清洗与压水试验→灌浆→质量检查验收等^[9],便于现场工人操作。

(3) 灌浆理论的匮乏。由于目前灌浆多是结合以往工程经验或现场试验开展的,灌浆指标的确定和灌浆效果的评价均缺乏理论层面的研究。工程中灌浆理论的匮乏与灌浆技术的迫切需求极不协调。

3 混凝土坝裂缝灌浆中几个关键技术问题

众所周知,灌浆技术在混凝土坝裂缝修补中的工程实践远远超出其基本理论研究。为满足工程需要,灌浆指标的确定多局限于现场试验或借鉴类似工程经验,这既是科学研究的逻辑步骤,也是在缺乏理论研究成果下的权宜之计。原因是多方面的:混凝土裂缝问题本身的复杂性,导致灌浆前坝体的应力状态较难确定;灌浆过程中,浆体与裂缝处混

土存在流固耦合作用,且关系到裂缝扩展的判别,机理较为复杂;灌浆结束后,浆体与坝体混凝土成为整体,灌浆效果的评价涉及到非线性分析问题^[26]。目前,混凝土坝裂缝灌浆修补中,工程界极为关注的几个问题,如灌浆时机的选择、合理的灌浆压力及灌浆后效果评价等,并没有理论层次上的深入分析。因此,灌浆作为一种技术手段,其理论基础的匮乏与实际工程的需求存在严重的矛盾。以下结合已有灌浆理论和工程实践,就上述 3 方面问题进行探讨。

3.1 灌浆时机的选择

由于坝体混凝土对温度变化较为敏感,裂缝产生后,在周而复始的气温变化作用下,裂缝张开位移 (Crack Mouth Opening Displacement, CMOD) 随之变化,并有可能扩展或出现新裂缝。灌浆时机的选择直接关系到灌浆效果:灌浆过早,当遭遇气温骤降或二期冷却时,浆体和裂缝处混凝土结合面有脱开的可能;若在裂缝产生很久后开始灌浆,一方面会影响施工进度,另一方面,混凝土表面会出现“白华”现象,严重影响浆体和混凝土的粘结效果^[27, 28];此外,在温度应力作用下,原有裂缝有可能扩展或出现新裂缝。目前,国内外常见的做法是:对于浅表裂缝,发现后立即进行灌浆处理,对于深层裂缝,一般在第一年冬季进行灌浆,如果灌浆效果达不到预期目标,则进行二次灌浆,如三峡二期工程中出现的裂缝,在 12 月至 2 月低温季节期间对裂缝进行处理^[4]。上

述灌浆时机是在总结国内外灌浆效果并结合现场试验的基础上提出的,目前对合理灌浆时机的确定从理论层次上仍没有合理的解释。

对于坝体混凝土施工期内出现的裂缝,由于此时混凝土只承受温度荷载,灌浆时机的研究可从以下两方面入手:其一,分析完整坝体混凝土在内部水化热及外界气温作用下的温度场和应力场,找出应力最大的时刻,作为灌浆的最佳时机。气温降低时,由于没有考虑裂缝产生后坝体混凝土应力重分布,导致计算的应力往往偏大,但这种计算仍具有指导意义。因为一般来说,温度应力越大,裂缝张开位移也越大,灌浆结束后,后期裂缝闭合产生的压应力保证了浆体与混凝土之间的有效粘结。其二,在进行混凝土温度场和应力场仿真时,引入混凝土开裂模型来模拟既有裂缝,通过分析外界气温变化情况下裂缝张开位移,判断最佳灌浆时机,在裂缝起裂前进行灌浆。但由于目前混凝土温度场和应力场的求解基于线弹性理论,混凝土开裂问题则涉及到非线性问题,且裂缝与坝体混凝土的尺寸在数量级上相差较大,采用传统的重新划分网格的有限单元法基本很难实现。程井等提出基于修正衍射准则的不连续面裂纹模拟方法,应用无单元伽辽金法(Element Free Galerkin Method EFGM)计算温度应力以及由温度应力引起的裂纹扩展^[29],由于采用的是线弹性断裂力学原理,其有效性和合理性有待进一步研究。

3.2 灌浆压力的合理取值

灌浆压力涉及到两方面的矛盾:灌浆压力过小,在裂缝处可能存在未粘结的地方,达不到修补裂缝、提高承载力的目的;由于裂缝尖端存在应力集中区域,过大的灌浆压力易导致裂缝扩展,适得其反。因此,合理的灌浆压力是指既能达到灌浆密实的效果,又能防止裂缝扩展的压力。在Big Eddy混凝土重力坝灌浆修补中,为了防止灌浆压力过大导致裂缝扩展,首次提出合理灌浆压力的概念,并对灌浆压力的取值进行了研究,采用水泥浆进行灌浆后,提高了坝体抗渗性和结构整体性^[7]。在混凝土坝裂缝修补过程中,不乏因灌浆压力过大致裂缝扩展的实例^[21],究其原因,主要是对浆体与混凝土间耦合作用的机理及浆体压裂过程中裂纹扩展规律研究不深入。

灌浆过程的实质是浆体在裂缝中流动,如图1^[30]和图2^[31]所示,浆体与混凝土存在流固耦合作用,合理的灌浆压力既要保证裂缝处浆体和混凝土之间有效粘结,又要防止裂缝进一步扩展。目前国内对合理灌浆压力的选择,亦多基于现场压水试验

或者类似工程经验,在理论层次上对灌浆压力合理取值进行研究的报道较少。张国新等从I型二维裂纹模型出发,对混凝土裂缝灌浆的临界压力以及灌浆压力对裂缝稳定性的影响进行定性分析,确定了不同缝长和约束条件下的混凝土裂缝安全灌浆压力^[32];连志龙等基于流固耦合理论,导出平行裂缝内层流流动压降方程,以临界应力作为裂缝扩展原则,模拟了水力导致的裂缝扩展问题^[33],该过程与灌浆过程十分相似,可能成为合理灌浆压力数值模拟的突破点。由于浆体多具有凝聚力和粘度,属于伯明翰流体,Amadei给出了伯明翰流体沿裂缝流动时的平衡方程,并根据裂缝表面的不光滑特性对压力梯度进行修正^[34]。ITASCA公司开发的二维离散元软件能对灌浆过程中的流固耦合进行模拟,但混凝土灌浆过程中裂纹扩展准则如何确定,并没有标准可循。

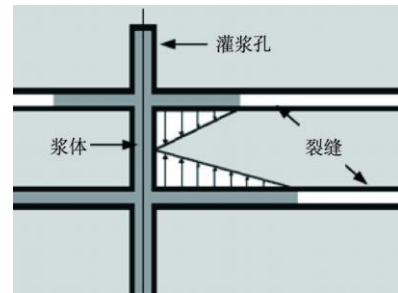


图1 浆体在裂缝中扩散及裂缝表面压力分布

Fig 1 The grout spread and the pressure on the fracture surfaces

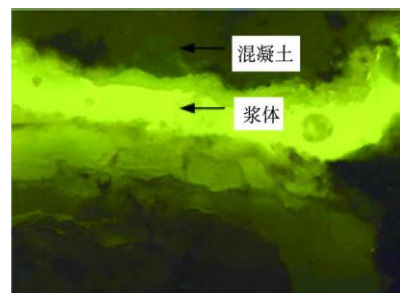


图2 浆体与裂缝处混凝土粘结图像

Fig 2 Cementation Photograph between concrete and grouting

灌浆过程涉及到流体力学、流固耦合以及断裂力学等多学科知识,同时叠加早期残余温度应力,合理灌浆压力的数值模拟有待于进一步研究。

3.3 灌浆效果评价方法

裂缝修补完成后,在正常蓄水或遭遇地震等其他特殊荷载时,能否安全运行是工程界最为关心的问题。目前工程中常用的灌浆效果评价方法有压水试验、钻孔取样及声波探测等^[12,35],这些手段在一定程度上能反映灌浆的补强效果;其局限性在于:检测方法尚不成熟,缺乏相应的判断标准,尤其不能反

映灌浆后坝体整体应力状态。目前,混凝土坝裂缝灌浆修补完成后,坝体整体应力状态并没有合理、统一的评价方法,国内外一般借助于数值方法对修补后的坝体应力状态进行评价。

李九红等对青铜峡电站坝段的 3 大条贯穿裂缝,运用 ANSYS-CAE 和 SAP 有限元软件,模拟分析了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,分析了裂缝灌浆后对整体稳定性和裂缝局部应力的影响,结果表明灌浆修补后大坝满足安全运行要求^[12]。Pierre Leger 采取二维离散元分析软件 UDEC,对一座 90m 高的重力坝灌浆修补后的坝体响应进行全过程仿真,分析灌浆后坝体的应力状态^[26]。

常规检测方法只能定性表达灌浆的局部效果,不能反映坝体整体应力状态,数值方法的优势在于:能对修补后的坝体进行全过程仿真,并综合评定灌浆后坝体整体性及灌浆效果。但由于灌浆后,浆体与混凝土粘结状态不可视,准确描述二者的接触状态存在困难,导致无法确定接触问题数值模拟中的参数。

4 结 语

混凝土坝开裂问题是工程界备受关注的问题,本文结合国内外混凝土坝裂缝灌浆修补工程实例和相关理论进展,对灌浆中的几点关键技术问题进行了探讨,以期为后续的研究工作提供参考。

(1) 目前国内外在灌浆实践方面,有丰富的工程经验,并在灌浆材料和灌浆设备的研发方面取得了长足的进步。对混凝土开裂理论、温度场和应力场数值模拟的研究也比较深入,但将混凝土开裂模型引入到混凝土温度应力场分析中较困难,原因是目前温度场和应力场的求解多是基于线弹性理论,而混凝土开裂问题涉及到非线性问题,使得灌浆前、开裂后坝体混凝土的初始应力难以描述。

(2) 灌浆过程涉及到流体力学、流固耦合以及断裂力学等多学科知识。虽然流固耦合等理论比较成熟,但将多场耦合与裂缝扩展结合起来,同时叠加早期残余温度应力,在数值模拟方面仍存在较大困难,导致目前对灌浆压力的确定仅局限于现场试验或借鉴类似工程经验。

(3) 对于修补后的大坝灌浆效果评价,目前尚缺少合理、统一的方法。常规的检测方法只能定性分析,缺乏相应的评判标准,即使采用数值方法进行全坝非线性仿真分析,混凝土与浆体之间接触参

数的描述仍存在困难。

(4) 灌浆技术的成败关系到整个坝体的修复效果及安全性。在灌浆之前,对裂缝及开裂后坝体应力状态应有合理描述;灌浆压力的合理取值除借鉴类似工程或现场试验外,应开展灌浆过程的数值模拟研究;灌浆过程中应加强裂缝张开位移的实时监测,防止灌浆压力过大导致裂缝扩展;灌浆结束后,应对整个坝体的灌浆效果进行评价,尤其是特殊荷载作用下坝体应力状态。建议对坝体裂缝灌浆进行全过程仿真分析,以达到修复坝体、提高其安全性的目的。

致谢:感谢加拿大蒙特利尔大学土木工程系 Pierre Leger 教授为本文的撰写提供了部分基础资料。

参考文献:

- [1] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003 (ZHU Bo-fang Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003 (in Chinese))
- [2] NONVILLER E. Grouting Theory, Practice [M]. New York: Elsevier, 1988
- [3] 谭日升, 蒋硕忠, 薛希亮. 三峡大坝化学灌浆研究 [J]. 长江科学院院报, 2000, 17(6): 4-8 (TAN Ri-sheng, JIANG Shuo-zhong, XUE Xi-liang. Study on Chemical Grouting for the Three Gorges Dam [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2000, 17(6): 4-8 (in Chinese))
- [4] 杜泽快, 敖昕, 刘春花. LPL 灌浆材料在三峡工程裂缝处理中的应用 [J]. 中国三峡建设, 2003, 10(4): 21-22 (DU Ze-kuai, AO Xin, LIU Chun-hua. Application of LPL Grout Material to Cracks Treatments at TGP [J]. China Three Gorges Construction, 2003, 10(4): 21-22 (in Chinese))
- [5] 许正平, 李浚元. 三峡二期工程大坝上游面裂缝处理 [J]. 西北水电, 2005, (2): 33-36 (XU Zheng-ping, LI Jun-yuan. Crack Treatment of Upstream Dam Surface in the Second Stage Works of Three Georges Project [J]. Northwest Hydro Power, 2005, (2): 33-36 (in Chinese))
- [6] KUTZNER C. Grouting of Rock Soil [M]. Netherlands: A. A. Balkema, 1996
- [7] GORE IW, BICKLEY J A. Investigation Rehabilitation of a Severely Deteriorated Concrete Gravity Structure, Big Eddy Dam [J]. ACI Concrete International, 1998, 9(6): 32-38
- [8] LOMBARDI G, DEERE D. Grouting Design, Control Using the GN Principle [J]. Water Power and Dam Construction, 1993, 45(6): 15-22
- [9] 卓寒清. 天堂山拱坝裂缝化学灌浆施工 [C] // 第二届全国岩石锚固与注浆学术会议论文集. 北京: 中国电力出版社, 2002, 221-225 (ZHUO Han-qing. Chemical Grouting in Tiantangshan Arch Dam Cracks [C] // Proceedings, the Second National Conference of Rock An-

- choring and Grouting Beijing: China Electric Power Press, 2002: 221–225. (in Chinese)
- [10] 王正生. 宝珠寺电站 6号坝段裂缝用环氧树脂灌浆的商榷 [J]. 四川水力发电, 1998, 17(1): 39–41. (WANG Zheng-sheng Discussion on Crack Gouted with Epoxy Material in the Block 6 at Baozhushi Hydropower Station [J]. Sichuan Water Power, 1998, 17(1): 39–41. (in Chinese))
- [11] 曹光钊. 大峡水电站坝体混凝土裂缝补强化学灌浆 [J]. 陕西水力发电, 1999, 15(1): 51–55 (CAO Guang-zhao Chemical Grouting of Concrete Cracks for Strengthening of Dam in Construction of Daxia Hydropower Station [J]. Journal of Shaanxi Water Power, 1999, 15(1): 51–55. (in Chinese))
- [12] 李九红, 徐建光, 王延斌, 等. 混凝土大坝裂缝灌浆处理效果研究 [J]. 水力发电学报, 2007, 26(3): 63–68 (LI Jiu-hong XU Jian-guang WANG Yan-bin, et al. Research on Crack Grouting in Concrete Dams [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(3): 63–68. (in Chinese))
- [13] 涂玥, 徐建光. 青铜峡大坝裂缝灌浆处理效果评价 [J]. 西北水电, 2006, (4): 64–68 (TU Yue XU Jian-guang Evaluation on Grouting Treatment of Dam Cracks in Qingtongxia Hydropower Station [J]. Northwest Hydro Power, 2006, (4): 64–68. (in Chinese))
- [14] 高若武. 汾河二库碾压混凝土大坝裂缝灌浆处理的工艺技术特点 [J]. 科技创新导报, 2007, (33): 55 (GAO Ruowu Technology Features of Crack Grouting in Fenheerku Roller Compacted Concrete Dam [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2007, (33): 55. (in Chinese))
- [15] 王勇, 刘书奇, 赵瑜, 等. 化学灌浆技术在大花水电站大坝混凝土裂缝处理中的应用 [J]. 华北水利水电学院学报, 2009, 30(5): 44–47. (WANG Yong LIU Shu-qi ZHAO Yu, et al. Application of Chemical Grouting in Treatment for Concrete Dam Cracks of Dahua Hydropower Station [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2009, 30(5): 44–47. (in Chinese))
- [16] 王香仙. 化学灌浆在混凝土拱坝补强补漏中的应用 [J]. 广东水利水电, 2007, (6): 48–52 (WANG Xiang-xian Chemical Grouting Reinforcement and Traps in the Concrete Arch Dam [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2007, (6): 48–52. (in Chinese))
- [17] BIEDERMANN R. Abnormal Behavior of Zeuzier Archdam (Switzerland) [C] // Special issue for the ICOLD Congress Rio de Janeiro Wasser Energie Luft, 1982: 66–70
- [18] BERCHTEN A R. Repair of the Zeuzier Arch Dam in Switzerland [C] // International Commission on Large Dams (ICOLD), 15th Congress, Lausanne, Switzerland, 1985: 693–711.
- [19] SILVANO R, FRONGIA F, LOMBARDIG, et al. Rehabilitation of the Flumendosa Arch Dam by Epoxy Grouting [J]. Hydropower and Dams, 1997, 4(6): 62–67.
- [20] SILVANO R, FRONGIA F, MONDADA A, et al. Repair Works at Flumendosa Arch Dam [C] // International Commission on Large Dams (ICOLD), 19th Congress, Florence, Italy, 1997: 525–538
- [21] SCHOBEL P. Crack Sanitation at Zillgundl Arch Dam [C] // Proceedings International Commission on Large Dams (ICOLD) Symposium on Repair and Upgrading of Dams, Stockholm, Sweden, 1996: 53–62
- [22] LEGER P, LECLERC M, LARIVIERE R. Seismic Safety Evaluation of Concrete Dams in Quebec [J]. International Journal on Hydropower & Dams, 2003, 10(2): 100–109
- [23] LOMBARDIG. Kohlen in Dam: An Unusual Solution for an Unusual Problem [J]. Water Power and Dam Construction, 1994, 43(6): 31–34
- [24] TURCOTTE L, SAVARD B, LOMBARDIG, et al. The Use of Stable Grout and GIN Technique in Grouting for Dam Rehabilitation [C] // Canadian Dam Safety Association (CDSA) Conference, Winnipeg, Manitoba, Canada, 1994: 137–162
- [25] ARCANGELI E, CIABARRI P. Manjil Dam Rehabilitation by Resin Grouting and High Capacity Anchors [J]. Water Power and Dam Construction, 1994, 46(2): 19–25.
- [26] FARROKH J, PIERRE L. Grouting of Cracks in Concrete Dams: Numerical Modeling and Structural Behavior [J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 2005, 7(4): 161–173.
- [27] 李春久, 鲍素坤. 混凝土表面白华现象的分析与防治 [J]. 混凝土, 1993, (1): 28–30 (LI Chun-jiu, BAO Su-kun. Analysis and Prevention of Bahua Phenomenon in Concrete Surface [J]. Concrete, 1993, (1): 28–30. (in Chinese))
- [28] 王宗昌. 混凝土表面泛碱的原因及对策 [J]. 腐蚀与防护, 1998, 19(5): 236–237 (WANG Zong-chang Causes and Countermeasures of Pan-alkali in Concrete Surface [J]. Corrosion & Protection, 1998, 19(5): 236–237. (in Chinese))
- [29] 程井, 常晓林, 周伟, 等. 基于无单元伽辽金法的水工结构温度应力及温度裂纹扩展计算 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2009, 41(4): 26–30 (CHENG Jing, CHANG Xiao-lin, ZHOU Wei, et al. Simulation of Thermal Stress and Crack Propagation in Hydraulic Structures Based on EFGM [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, 41(4): 26–30. (in Chinese))
- [30] RIKARD G, HAKAN S. Fracture-fracture Interaction during Grouting [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2009, 25(3): 1–6
- [31] FUNEHAG J, FRANSSON A. Sealing Narrow Fractures with a Newtonian Fluid: Model Prediction for Grouting Verified by Field Study [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2006, 21(5): 492–498
- [32] 张国新, 李海枫. 用断裂力学研究混凝土裂缝的允许灌浆压力 [J]. 水利水电技术, 2009, 40(12): 52–55 (ZHANG Guo-xin, LI Hai-feng. Research on Allowable Grouting Pressure of Concrete Crack by Means of Fracture Mechanics [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(12): 52–55. (in Chinese))

(下转第 62 页)

Analysis on Influence of Fluid Velocity on Static Force Responses of Aqueduct

XU Meng-hua MO Hai-hong

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China).

Abstract The influences of fluid velocity on lateral and vertical static force responses of aqueduct were studied by contrast calculation using three-dimensional finite element model. The results show that although the influence of fluid velocity on lateral displacement and moment of the aqueduct is evident and increases with fluid velocity, yet within a velocity range of 1.0–2.5 m/s the influence is limited. The influence of high fluid velocity on vertical displacement and moment is larger than that under low velocity. However, in a range of 1.0–2.5 m/s, the influence can be negligible.

Key words aqueduct; fluid velocity; static force; response

(上接第 58 页)

- [33] 连志龙, 张劲, 吴恒安, 等. 水力压裂扩展的流固耦合数值模拟研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3021–3026 (LIAN Zhilong, ZHANG Jing, WU Heng-an, *et al*. A Simulation Study of Hydraulic Fracturing Propagation with a Solid-fluid Coupling Model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 3021–3026 (in Chinese)).
- [34] AMADEI B, SAVAGE W Z. An Analytical Solution for Transient flow of Bingham Viscoplastic Material in Rock Fractures [J]. International Journal of Rock Mechanics

and Mining Sciences, 2001, 38(2): 285–296

- [35] SHI DAN IT, MONOKIS, CHAI H, *et al*. Elastic Wave Validation of Large Concrete Structures Repaired by Means of Cement Grouting [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(7): 2647–2652

(编辑: 刘运飞)

Discussion on Key Technical Problems of Grouting to Repair Cracks in Concrete Dams

CHEN Yan-yu

(Traffic Science and Engineering Institute, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract Cracking is a common phenomenon in the construction or operation period of concrete dams due to the low tensile strength of concrete. Grouting is considered to be an effective approach to repair the concrete crack, which can reinstate the integrity and bearing capacity of the dam. The stresses of concrete dam are redistributed by cracks before grouting; the effect of solid-fluid coupling exists between the concrete and the grouting material, and excessive grouting pressure easily leads to crack propagation during grouting; the new state of stress appears as the grout sets, so the effect of the grouting needs to be reasonably evaluated. In this paper, the application achievements of grouting in repairing cracks of concrete dams were reviewed. Then, some problems concerned were discussed, such as the grouting opportunity, the maximum grouting pressure to avoid hydro-fracturing, and the reasonable evaluation method of grouting effect in the repaired dam.

Key words concrete crack; grouting; grouting opportunity; grouting pressure; evaluation of grouting effect