

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2012.06.017

堤坝劈裂灌浆造孔间距改变的灌浆效果评价

武科^{1,2}, 马明月³, 孙岳⁴

(1. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 济南 250061; 2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部实验室, 南京 210098; 3. 山东科技大学, 山东 青岛 266510; 4. 中国石油集团工程设计有限责任公司岩土工程分公司 北京 100085)

摘要:堤坝劈裂灌浆技术是改善堤坝工程内在质量的一项重要技术措施,然而目前对该技术浆液在坝体内的渗透固结机理尚不明确,无法对灌浆后坝体的防渗效果进行有效地评价。为此,假定施工工艺其他条件不变的情况下,针对灌浆孔间距布设与劈裂灌浆防渗实际效果之间的相互作用规律,基于大型有限元数值计算方法,采用 Mohr-Coulomb Hardening 本构模型,通过布设不同间距灌浆孔的流固耦计算,研究了堤坝劈裂灌浆过程中浆液所产生的孔隙水压力、堤坝应力应变等分布规律,揭示了堤坝劈裂灌浆浆液在土体内渗流固结机理,探讨了其对坝体稳定性的影响,评价了灌浆效果。

关键词:堤坝; 劈裂灌浆; 数值模拟; 流固耦合。

中图分类号:TV543 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2012)06-0104-05

Evaluation on Effects of the Change of Hole-boring Distance During Splitting Grouting to Earth Dam

WU Ke^{1,2}, MA Mingyue³, SUN Yue⁴

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Institute, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, P. R. China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China; 3. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, Shandong, P. R. China; 4. China Petroleum Engineering Co. Ltd Geotechnical Engineering Company, Beijing 100085, P. R. China)

Abstract: The technology of splitting grouting for earth dam is one of the important technical measures to improve the quality of dam. However, the consolidation mechanism of slurry in the dam is not clear, which can not evaluate the effects of seepage control of the dam after grouting. Therefore, assuming that the construction technology does not change and with the consideration of interaction between the layout of hole-boring distance and the effects of seepage control, the Mohr-Coulomb Hardening model and fluid-solid coupling method were used to analyze the rule of pore pressure, stress and strain in the dam during splitting grouting based on the finite element simulation. The consolidation mechanics was discussed and stability of the dam was evaluated.

Key words: earth dam; splitting grouting; numerical simulation; fluid-solid coupling

收稿日期: 2012-03-28

基金项目: 中国博士后科学基金(20090451329); 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部实验室开放基金(GH200803)

作者简介: 武科(1978-), 男, 博士, 主要从事岩土工程理论与数值计算方面的研究工作, (E-mail) wk4223@163.com.

堤坝劈裂灌浆作为一种非常有效的防渗透加固技术,已在中国众多水库防渗透加固除险工程得到推广应用。该技术是通过在坝轴线处施加一定的灌浆压力,控制性劈裂坝体,灌入适宜的泥浆,填充坝体内在孔洞、裂隙等病害体,形成有效的防渗透实体,从而改善坝体应力状态,达到加固堤坝结构的作用^[1-3],中国相应的研究工作较多,而国外相对较少。赵军辉^[4]基于劈裂灌浆现场施工工艺,通过改变造孔间距,评价劈裂灌浆加固效果。Liu^[5]基于摩尔库伦模型,采用有限元分析方法,研究了劈裂灌浆加固机理。武科^[6]基于现场试验和有限差分计算方法,探讨了劈裂灌浆加固技术在土石坝加固中的应用。Berndt^[7]采用数值计算分析方法,研究了浆液的渗透性和土体强度变化规律。然而,以上研究中缺少灌浆孔间距布设与防渗效果之间的相互作用规律的理论分析。为此,针对以上分析所存在的问题,在大型有限元软件 ABAQUS 上,基于流固耦合分析,采用 Mohr-Coulomb Hardening 本构模型,通过布设不同间距灌浆孔的流固耦合计算,研究了堤坝劈裂灌浆过程中浆液所产生的孔隙水压力、堤坝应力应变等分布规律,揭示了堤坝劈裂灌浆浆液在土体内渗流固结机理,阐述了浆坝互压机理,探讨了其对坝体稳定性的影响。

1 计算模型与分析方法

作为大型通用有限元分析软件,ABAQUS 具有强大的非线性计算功能、丰富的本构模型以及便利的用户子程序接口,可以针对先进本构模型、复杂场变量、状态变量及特殊单元、复杂边界条件进行二次开发^[8]。

1.1 Mohr-Coulomb Hardening 模型

该模型与 Mohr-Coulomb 模型的不同之处是:当某一区域发生塑性屈服时,土体的凝聚力、内摩擦角、膨胀角以及抗拉强度等属性在 Mohr-Coulomb 模型中是恒定不变的,而在应变硬化模型中则会发生相应地变化——硬化。其破坏准则、屈服函数等都与 Mohr-Coulomb 模型相同,模型中的两个硬化参数分别为剪切硬化参数增量 Δk^s 和张拉硬化参数增量^[9-10]:

$$\Delta k^s = \frac{1}{\sqrt{2}} \left((\Delta \epsilon_1^{ps} - \Delta \epsilon_m^{ps})^2 + (\Delta \epsilon_m^{ps})^2 + (\Delta \epsilon_3^{ps} - \Delta \epsilon_m^{ps})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

其中: $\Delta \epsilon_m^{ps} = \frac{1}{3} (\Delta \epsilon_1^{ps} + \Delta \epsilon_3^{ps})$ 为体塑性剪应变增量;

$\Delta k^t = |\Delta \epsilon_3^{ps}|$ 为拉伸硬化增量。

根据 Mohr-Coulomb 破坏准则的主应力式形式可得:

$$f^s(c, \varphi) = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2c \sqrt{N_\varphi} \quad (2)$$

$$f^t = \sigma_3 - \sigma^t$$

其中: $N_\varphi = \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)}$; $\sigma_{max}^t = \frac{c}{\tan \varphi}$ 。

将(2)式用 Taylor 级数展开式表示可得:

$$f^s(c, \varphi) = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi_0}{1 - \sin \varphi_0} + 2c_0 \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi_0}{1 - \sin \varphi_0}} + 2\Delta c \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi_0}{1 - \sin \varphi_0}} + \frac{1}{2} \left[\Delta c \cdot \Delta \varphi \frac{4}{1 - \sin \varphi_0} - \Delta \varphi \left(\frac{2 \cos \varphi_0}{(1 - \sin \varphi_0)^2} c_0 + \frac{4 - 2 \sin \varphi_0 (1 - \sin \varphi_0)}{(1 - \sin \varphi_0)^4} \cdot \sigma_3 \right) \right] + \dots + \frac{1}{n!} \left(\Delta c \frac{\partial}{\partial c} + \Delta \varphi \frac{\partial}{\partial \varphi} \right)^n f_2(c, \varphi) + O(c, \varphi)^n$$

式中: c_0, φ_0 分别表示为坝体内的土灌浆前凝聚力和内摩擦角的初始值; $\Delta c, \Delta \varphi$ 分别为坝体内的土灌浆后凝聚力和内摩擦角的变化值。

1.2 有限元计算模型与分析方法

考虑堤坝劈裂灌浆防渗透加固技术施工工艺的特点及灌浆浆液渗流特性,以灌浆轴线为中心轴,取一半坝体为研究对象,基于 ABAQUS 大型数值计算软件,建立三维半坝有限元计算模型,如图 1 所示。其中,坝高 10.0 m,坝底长 20.0 m,坝顶长 6.0 m,灌浆孔位于灌浆轴线上。灌浆孔间距分别设定为 5.0、7.0、10.0 m,灌浆压力 ($P=0.5$ MPa) 及浆液的施加都是通过灌浆孔节点上改变孔隙水压力大小实现。假定距离灌浆轴线 0.5 m 范围内为灌浆带,距离灌浆轴线 3.0 m 范围内为灌浆影响带^[11-13]。模型单元采用实体单元 C3D8P,坝体底部为不透水边界,其他部位为透水边界。灌浆孔布设如图 2 所示。

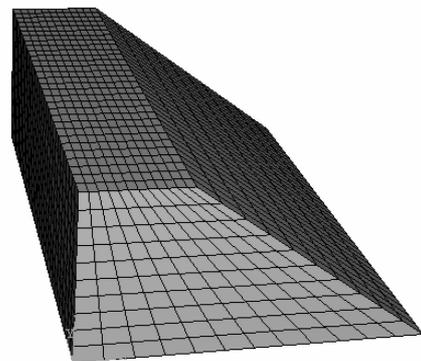


图 1 土坝模型

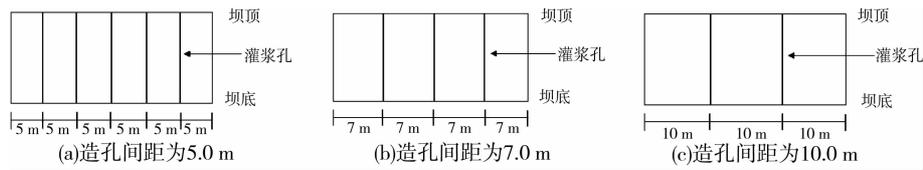


图 2 灌浆孔布设

1.3 计算模型力学参数

在计算过程中,我们根据该工程的工程地质勘察报告、水文资料以及室内土工实验,参考《中小型

水利水电工程地质勘察经验汇编》和《岩石力学参数手册》,取计算力学参数见表 1。

表 1 坝体计算力学参数

力学参数名称	孔隙率 n	渗透系数 $k/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	凝聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	弹性模量 E/MPa	容重 $r/$ ($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比 ν
灌浆带	0.30	8.23×10^{-8}	40.00	25.00	20.00	2.00	0.47
灌浆影响带	0.38	5.23×10^{-7}	34.50	23.00	18.00	1.92	0.40
土坝填土	0.47	6.56×10^{-5}	28.80	21.00	16.00	1.80	0.30

2 分析与讨论

2.1 孔隙水压力分析

图 3 给出了堤坝劈裂灌浆不同造孔间距情况下的浆液固结效果分布图。由图可知:1) 浆液在坝体内渗透所产生的孔隙水压力,以灌浆轴线为中心,向四周扩散,对称分布,其大小以灌浆轴线处最大,逐渐向远离灌浆轴线处减小;在沿坝轴线方向,其大小以底部最大,随着高程的增加而减小。这与浆液在坝体内渗流矢量趋势基本一致。2) 在相同的灌浆压力和灌浆时间下,造孔间距越小,通过劈裂灌浆技

术加固的坝体越容易形成连贯的防渗帷幕;其中造孔间距为 5.0 m 的灌浆实例,已在坝体内形成连贯的防渗体,而造孔间距为 10.0 m 的灌浆实例,还未形成连贯的防渗体。3) 浆液分布始终以灌浆轴线为中心,向四周扩散,且主要影响灌浆轴线附近有效区域,这与实际工程灌浆效果也基本一致^[14-15]。为此,在劈裂灌浆防渗加固施工过程中,根据坝体实际情况,建议只需造孔间距为 5.0 m 的灌浆孔,不必采用先灌注间距为 10.0 m 的灌浆孔,再灌注间距为 5.0 m 的,这样可以节省大量的人员、材料、机械消耗。

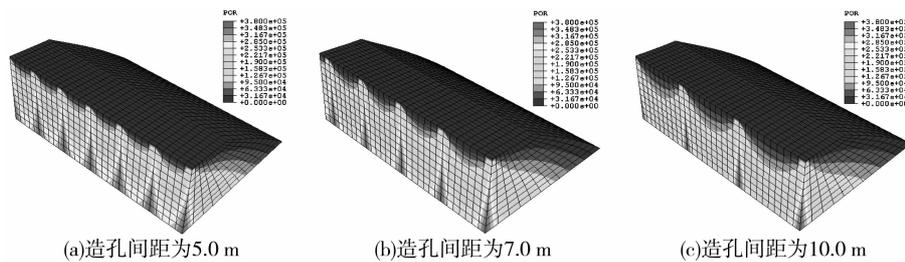


图 3 不同造孔间距情况下的浆液固结效果

2.2 应力分析

图 4、5 分别给出了不同造孔间距情况下堤坝劈裂灌浆后坝体最小、最大主应力分布图。由图可知:1) 随着劈裂灌浆防渗加固施工过程,灌浆后坝体内部形成防渗帷幕心墙,坝体应力将进行二次调整,灌浆帷幕带内部的最小、最大主应力均以拉应力为主,这是由于浆液渗透坝体内部,致使坝体土体内有效应力增大,挤压坝体土体,从而又反作用于浆液,造成灌浆轴线附件应力都得到显著提高,改善坝体应

力状态;与此同时,由于浆液与坝体互压作用,灌浆孔处容易出现冒浆,这与实际工程情况是一致的。2) 造孔间距越小,其最小、最大主应力改善效果越明显,如造孔间距为 5.0 m 的灌浆体,其最小、最大主应力通过劈裂灌浆加固技术改善后,形成连贯的应力加强区域,达到了加固效果;而造孔间距为 10.0 m 的灌浆体,其最大、最小主应力改善效果不如造孔间距为 5.0 m 的显著。

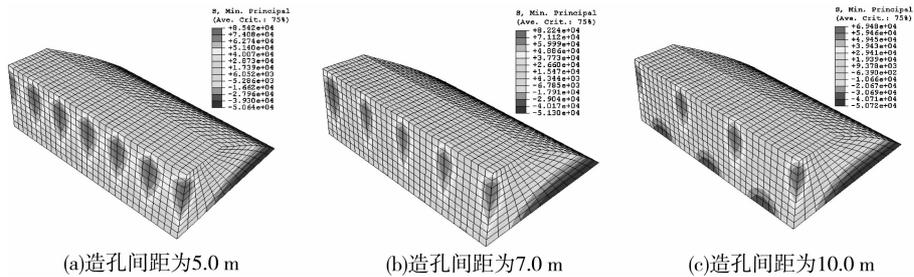


图 4 不同造孔间距情况下的坝体最小主应力分布

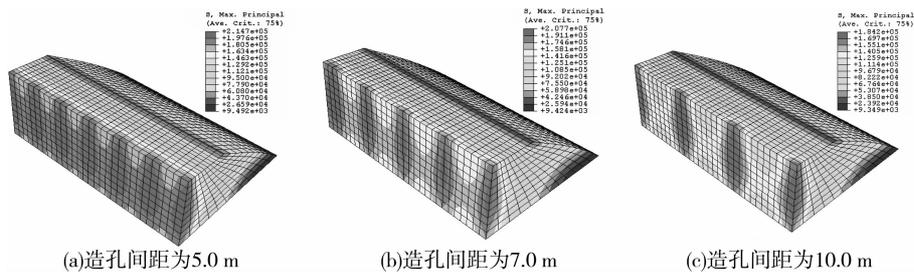


图 5 不同造孔间距情况下的坝体最大主应力分布

2.3 变形分析

图 6、7、8 分别给出了不同造孔间距情况下堤坝劈裂灌浆后坝体竖直位移与垂直于灌浆轴线、平行于灌浆轴线的水平位移分布图。由图可知:1) 竖直位移,随着造孔间距的减小,在坝顶顶部产生的竖直位移越明显,这是由于浆液灌入坝体内,浆液挤压坝体,改善灌浆区域土体力学强度,使灌浆轴线附近区域产生竖直位移,致使灌浆区域与非灌浆区域产生沉降差,从而造成坝肩部位容易产生开裂,这与实际

工程情况是一致的。2) 垂直于灌浆轴线的水平位移,以灌浆轴线为中心线,水平位移量逐渐向两侧增加,这是由于浆液灌入后,浆液挤压坝体,使坝体产生水平位移量。3) 平行于灌浆轴线的水平位移,灌浆孔与灌浆孔之间的两个区域产生显著的挤压位移,这是由于浆液在灌浆压力作用下,与坝体挤压所致,通过有效的浆坝互压,才能更好地改善坝体应力状态;其中随着造孔间距的增大,其浆坝互压效果明显降低。

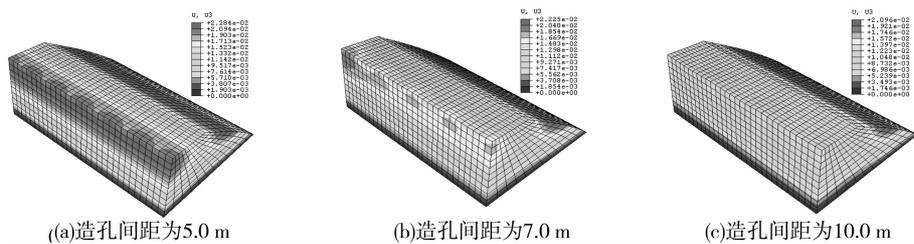


图 6 不同造孔间距情况下的坝体竖直位移分布

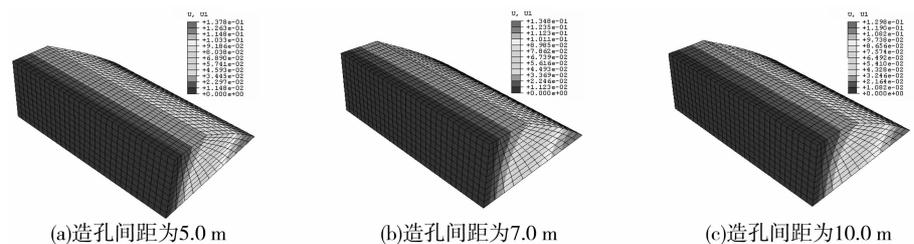


图 7 不同造孔间距情况下的垂直于灌浆轴线坝体水平位移分布

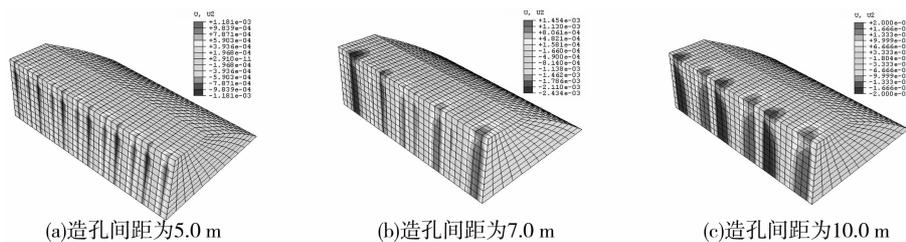


图 8 不同造孔间距情况下的平行于灌浆轴线坝体水平位移分布

3 结 论

针对灌浆孔间距布设与劈裂灌浆防渗实际效果之间的相互作用规律,在大型有限元软件 ABAQUS 上,基于流固耦合分析,采用 Mohr-Coulomb Hardening 本构模型,通过布设不同间距灌浆孔的流固耦合计算,得到以下结论:

1) 浆液分布始终以灌浆轴线为中心,向四周扩散,且主要影响灌浆轴线附近有效区域。在相同的灌浆压力和灌浆时间下,造孔间距越小,通过劈裂灌浆技术加固的坝体越容易形成连贯的防渗帷幕。

2) 随着劈裂灌浆防渗加固施工过程,灌浆后坝体内部形成防渗帷幕心墙,坝体应力将进行二次调整,造孔间距越小,其最小、最大主应力改善效果越明显。

3) 由于浆液在灌浆压力作用下,通过有效的浆坝互压,才能更好地改善坝体应力状态;其中,随着造孔间距的增大,其浆坝互压效果明显降低。

参考文献:

- [1] 白永年, 吴士宁, 王洪恩, 等. 土石坝加固[M]. 北京: 水利水电出版社, 1992.
- [2] 刘海林, 饶锡保, 黄斌. 劈裂灌浆技术在土石坝中的应用及发展[J]. 中国水运, 2009, 9(7):154-156.
LIU Hailin, RAO Xibao, HUANG Bin. Application and development of splitting grouting for earth dam [J]. China Water Transport, 2009, 9(7):154-156.
- [3] 孙肇政. 浅谈劈裂灌浆在土坝防渗处理中的设计与应用[J]. 广东建材, 2008, 7:12-13.
SUN Jianzheng. Generally speaking on the design and applies of splitting grouting in the anti-seepage processing of earth dam. Guangdong Building Materials, 2008, (7): 12-13.
- [4] 赵军辉. 堤坝劈裂灌浆造孔间距改变的效果分析[J]. 施工技术, 2007, 36:256-257.
ZHAO Junhui. Effect analysis of the change of hole-boring distance during splitting grouting to earth dam [J]. Construction Technology, 2007, 36:256-257.
- [5] Liu F C. Finite element analysis of split-grouting on earth-rock dam based on Duncan-Chang model [J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 15:1737-1746.
- [6] 武科. 土坝劈裂灌浆加固试验研究及数值模拟分析 [D]. 济南: 山东大学, 2004.
- [7] Berndt M L. Strength and permeability of steel fibre reinforced grouts [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(9):1768-1772.
- [8] 费康, 刘汉龙. ABAQUS 的二次开发及在土石坝静、动力分析中的应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(3):881-890.
FEI Kang, LIU Hanlong. Secondary development of ABAQUS and its application to static and dynamic analyses of earth-rockfill dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3):881-890.
- [9] 樊赞赞, 王思敬, 王恩志, 等. 岩土材料剪切破坏点安全系数的研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(增2):200-203.
FAN Yunyun, WANG Sijing, WANG Enzhi, et al. Research on point safety factor of shear failure geomaterials [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (Supp. 2):200-203.
- [10] Frantziskonis G, Desai C S. Constitutive model with strain softening [J]. International Journal of Solid Structure, 1987, 23(6): 733-750.
- [11] 钟龙, 张木建. 高水位运行下高土坝的劈裂灌浆施工实践[J]. 人民珠江, 1999, 3:44-52.
ZHONG Long, ZHANG Mujian. Construction work of splitting grouting in a high earth dam running with high-water level [J]. Pearl River, 1999, 3:44-52.
- [12] 许重富. 山美水库大坝防渗加固工程效果分析[J]. 中国水利, 2010, 29-32.
XU Zhongfu. Effect analysis reinforce by infiltration prevention of Shanmei reservoir dam [J]. China Water Power, 2010, 29-32.
- [13] 彭守良. 劈裂灌浆与高压喷射灌浆技术在土坝加固中的应用[J]. 广东水利水电, 2009, (6):43-46.
PENG Shouliang. Application of hydrofracture grouting and high-pressure jet grouting techniques to earth dam reinforcement [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2009, (6):43-46.
- [14] 马明月, 武科, 白永年. 劈裂灌浆加固技术现场试验研究[J]. 水利科技与经济, 2010, 16(5):487-489.
MA Mingyue, WU Ke, BAI Yongnian. In-situ tests research to anti-seepage reinforcement technology of splitting grouting [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2010, 16(5):487-489.
- [15] WU K, BAI Y N, LI S C. Application of splitting grouting on the dam reinforcement [J]. GEDMAR08, 2008, 755-761.