

文章编号: 1000-7598 (2009) 08-2452-05

劈裂灌浆对土石坝应力应变和稳定的影响

刘福臣, 程兴奇

(山东水利职业学院 教务与科研处, 山东 日照 276826)

摘 要: 土坝劈裂灌浆对坝体的应力、应变、稳定的影响很大。采用 Duncan-Chang 非线性模型, 模拟了某土石坝劈裂灌浆的灌浆-停灌施工过程, 进行了应力、应变、稳定有限元分析。劈裂灌浆可以同时增大大小主应力, 在灌浆轴线附近区域, 小主应力增加幅度大于大主应力增加幅度, 应力水平较灌浆前降低, 土坝稳定性增加。与原型观测资料进行对比分析, 表明计算结果与实测资料基本吻合。

关 键 词: 劈裂灌浆; Duncan-Chang 模型; 应力水平; 稳定分析

中图分类号: TV 543

文献标识码: A

Effect of split-grouting on earth-rock dam stress-strain and stability

LIU Fu-chen, CHENG Xing-qi

(Shandong Vocational Polytechnic College of Water Resources, Rizhao 276826, China)

Abstract: Split-grouting has great effect on stress, strain and stability on earth-rock dam. By using Duncan-Chang E-B model, the grouting period-stopping period of a earth rock dam, and the finite element analysis of stress and strain. Split-grouting can increase the maximum and minor principal stresses at the same time. In the neighborhood area of grouting axes, the minor principal stress increased more extent than the maximum one. The stress level was reduced and lower than before; and the stability of the earth dam increased. Comparing with the observation data, the result is in accordance with the measurement.

Key words: split-grouting; Duncan-Chang model; stress level; stability analysis.

1 引 言

土坝劈裂灌浆是利用堤坝水平小主应力的分布规律和水力劈裂原理, 沿坝轴线布孔, 以灌注泥浆的压力有控制性地将坝体劈开, 并灌入适宜的浆液, 通过浆坝互压和浆液析水引起坝体土的湿陷固结等作用, 使之形成竖直的浆脉, 起到加固坝体作用。从 20 世纪 70 年代开始, 山东省水科院先后对生花庵、石店、贺庄等土坝进行了劈裂灌浆试验, 经开挖检查, 坝轴线附近均形成了一条或几条防渗帷幕, 浆脉宽度一般为 20~30 cm。1978 年又对西埠土坝进行了劈裂灌浆试验^[1]。1981 年在黄前水库劈裂灌浆施工的同时, 做了大量的观测和室内试验工作。同年, 山东省水科院承担了“坝体劈裂灌浆技术研究”课题^[2], 该成果获 1985 年国家科学技术进步二等奖, 随后在全国范围内对土坝劈裂灌浆施工技术进行了推广, 取得了宝贵的施工经验。尽管各地取得了丰富的施工经验, 但劈裂灌浆对土坝的应力、

应变、稳定分析研究理论比较薄弱。武科^[3]运用流固耦合分析方法, 模拟工程蓄水后渗流场的变化对工程稳定性的影响, 分析了灌浆后坝体在蓄水情况下的稳定性。孙峰^[4]利用弹性理论对土坝钻孔周围应力场进行分析, 得出孔壁破裂的力学解, 并利用有限元程序进行了弹塑性应力分析, 得出了孔壁破裂和裂缝发展的主要影响因素。笔者运用邓肯-张的非线性弹性模型, 对已经实施劈裂灌浆的黄前水库大坝进行了有限元应力、应变、稳定分析, 并与实测资料进行了对比分析。

2 黄前水库大坝劈裂灌浆施工

黄前水库位于泰安市的东北部大汶河上游, 控制流域面积为 292 km², 总库容为 8 248 万 m³, 大坝为黏土心墙砂壳坝, 坝基为砂砾石, 厚度为 8 m, 最大坝高为 33.3 m, 坝顶宽度为 6 m, 坝长为 1 530 m。1961 年蓄水后沉降达 1.6 m 左右, 在坝顶顺坝轴线方向出现许多裂缝, 当时进行了充填式灌

浆处理。1981年在安装测压管时发现漏水现象。为解决上述隐患,对大坝进行了劈裂灌浆处理。灌浆采用单排布孔,孔底注浆,全孔灌注,灌浆轴线位于坝轴线上游侧 1.2 m 处,两序孔施工,孔距 20 m,每序每孔灌浆次数不少于 5 次,每次灌浆量不超过 20 m³,灌浆压力一般小于 100 kPa,浆料采用重粉质壤土,泥浆重度为 14.5~16.5 kN/m³。

3 计算模型

3.1 邓肯-张模型

邓肯-张模型考虑了土的非线性弹性特点,其物理概念明确,计算参数易于确定,在土石坝应力-应变计算中得到了广泛应用^[5]。王志亮^[6]对已有的邓肯-张模型中切线弹模进行了简化,提出了具体的修正系数,采用有限元计算沉降的一般道路工程,具有一定的借鉴意义和参考价值。笔者对邓肯-张模型进行了改进,可以模拟劈裂灌浆的灌浆-停灌施工过程,切线模量^[7]和体积模量计算公式如下:

$$E_t = E_i(1 - R_f s)^2 = k p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin \varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right] \quad (1)$$

$$B = k_b p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m \quad (2)$$

$$E_{ur} = k_{ur} p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (3)$$

对于中砂、紧砂,有:

$$\varphi = \varphi_1 - \Delta \varphi \lg \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right) \quad (4)$$

式中: E_t 为切线模量; B 为体积模量; E_{ur} 为卸荷模量; E_i 为初始切线模量; R_f 为破坏比, $R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}$, $(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$; s 为应力水平, $s = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}$; p_a 为大气压力; c 、 φ 分

别为土的凝聚力和内摩擦角; σ_1 、 σ_3 分别为大、小主应力; k 、 k_b 、 k_{ur} 、 m 、 n 均为计算参数。

邓肯-张 E-B 模型共有 7 个参数, c 、 φ 、 k 、 m 、 n 、 R_f 、 k_b 。本次有限元计算所采用的计算参数,一部分来源于黄前水库大坝的试验资料,另一部分参照同类工程用类比方法确定^[8]。各土料的参数见表 1,泥浆单元的参数见表 2。

表 1 各种土料的计算参数

Table 1 Calculation parameters of soils

材料	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{sub} (kN/m ³)	c /kPa	φ (°)	$\Delta \varphi$ (°)	R_f	k_{ur} /kPa	k_b /kPa	K /kPa	m	n
粉质黏土	21.5	12.0	2.5	24	0	0.8	260	180	200	0.3	0.5
砂壳	19.0	11.0	0	45	8	0.7	600	350	450	0.2	0.4
过渡料	19.0	11.0	0	43	7	0.7	500	300	400	0.2	0.4
砂砾石	20.0	11.8	0	30	6	0.7	860	700	700	0.2	0.5

表 2 泥浆单元计算参数

Table 2 Calculation parameters of mud

材料	γ /(kN/m ³)	c /kPa	φ /(°)	E /kPa	μ
泥浆	15.0	0	0	150	0.49

3.2 荷载的施加

劈裂灌浆施工时,由于黏土心墙的渗透性差,大量泥浆沿劈裂面进入坝体,只有少量的浆液可能进入空洞、裂隙,因此,灌浆压力主要以面力作用在坝体上^[9],停灌后孔口压力消失,坝体发生回弹,坝体挤压泥浆使泥浆析水、固结。劈裂灌浆过程为灌浆—停灌—再灌浆—再停灌,坝体则经历了加荷—卸荷—再加荷—再卸荷的应力历史。从坝体内某点开裂到泥浆上升到坝顶形成连续的浆脉,坝体的应力-应变发生一系列变化。为简单起见,假定这一过程作为一次荷载施加到坝体上,在该级荷载作用下浆脉厚度范围内的单元置换为泥浆单元,相应的原坝体计算参数也置换为泥浆单元参数;停灌时,孔口压力消失,回弹也作为一级荷载施加。

灌浆压力包括孔口压力和泥浆自重应力两部分。灌浆时,孔口压力和自重应力作为面力作用在孔壁上,将该面力转化为等效节点荷载,参加本级有限元计算;停灌后,孔口压力消失,将孔口压力反向施加在坝体上,同时转化为等效节点荷载,泥浆自重应力仍施加在孔壁上参加计算。

3.3 泥浆单元的处理

为探讨灌浆压力和上游水位的影响,必须采用泥浆单元来联系上下游坝体。泥浆单元和开挖工程中的空气单元非常相似。在模拟开挖工程中,被挖去的单元由空气单元来填补,常常假定空气单元的强度和弹性模量很小,参加有限元计算。在这种情况下,由于弹性模量很小而泊松比又接近 0.5,必然会形成病态矩阵,造成计算困难。冯平^[10]对泥浆单元的取值计算进行了研究,认为弹性模量取 150 kPa,计算结果比较满意。由于泥浆的静压力已作为外荷载转移到其他单元上,剩下的黏结强度很

小, 同时又不能承受拉应力和剪应力, 泥浆单元的真实应力是该单元形心处的自重应力, 完全可以作为破坏单元参加有限元计算, 计算参数取值见表 2。为避免计算出的泥浆单元应力与泥浆单元的实际受力不相符, 本次计算作了如下处理: ①灌浆时, 该级荷载最后一次迭代时, 将上次迭代计算出的泥浆单元的应力赋值为泥浆自重应力; ②停灌时, 该级荷载计算第 1 次迭代时, 将泥浆单元重新赋值为自重应力, 以后迭代时不再重新赋值。

4 有限元计算结果分析

为了分析劈裂灌浆对土坝应力、应变、稳定的影响, 对黄前水库大坝进行了有限元分析。有限元网格采用半自动划分, 共分 248 个单元、297 个节点, 考虑到灌浆压力作用在心墙上, 故灌浆轴线附近的网格划分得较密。计算水位采用 16 m, 孔口压力采用 50、100、300、500 kPa 等组合, 以下分析结果是以孔口压力为 100 kPa 得到的。计算共分为 13 级荷载, 其中第 1、2 级为覆盖层回填, 第 3~10 级为坝体填筑过程, 第 11 级为蓄水到 16 m, 第 12 级为灌浆期, 第 13 级为停灌期。

4.1 变形计算

灌浆期与蓄水期水平位移差值作为水平位移增量, 图 1 为下游坝坡水平位移增量沿坝高分布图(坝高程采用相对高程, 以坝基为相对 0 点)。从图中可以看出, 坝坡下半部, 水平位移增量较小, 坝体中上部增加较大。图 2 为坝轴线不同高程水平位移分布图。竣工期的水平位移偏向上游, 蓄水后水平位移又偏向下游, 灌浆时的水平位移增大, 停灌后水平位移又减少, 但没有恢复到灌浆前水平, 说明坝体产生了塑性压缩变形, 增加了坝体的密实度。劈裂灌浆对垂直位移的影响很小, 主要原因是在计算中并没有考虑浆液中的水分进入坝体而引起的坝体产生湿陷变形。

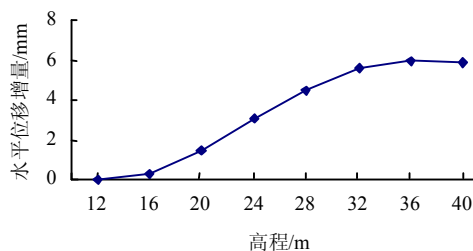


图 1 灌浆时水平位移增量沿坝高分布图(下游坝坡)

Fig.1 Horizontal displacement increments along dam height distribution in grouting period (downriver dam slope)

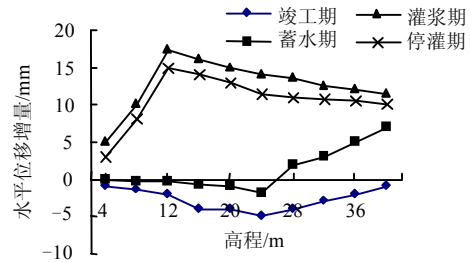


图 2 水平位移增量沿坝高分布图(坝轴线)

Fig.2 Horizontal displacement increments along dam height distribution (dam axis)

4.2 应力计算

4.2.1 大主应力

图 3 为大主应力增量沿水平向分布图(水平方向是指向坝下游, 坐标 0 点取灌浆轴线)。从图中看出, 离灌浆轴线越近, 大主应力增量越大, 随着水平距离的增大, 大主应力增量急剧下降, 之后又有所增大。大主应力增量沿水平向不是直线衰减, 应力影响范围也较大, 与黄前土坝观测结果不相符^[1]。图 4 为坝轴线处大主应力增量沿坝高分布图, 大主应力增量沿坝高分布极不均匀, 坝体中下部增量较大, 中上部较小, 坝基深度范围内为负值。停灌后, 大主应力增量与灌浆期基本相同, 但增加的幅度较小。

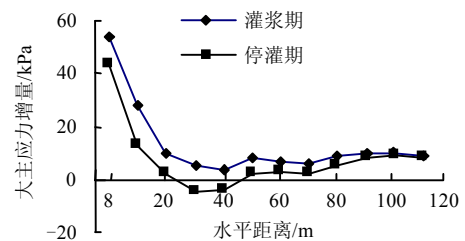


图 3 大主应力增量水平方向分布图(高程为 14 m)

Fig.3 Maximum principal stress increments along horizontal direction distribution (elevation is 14 m)

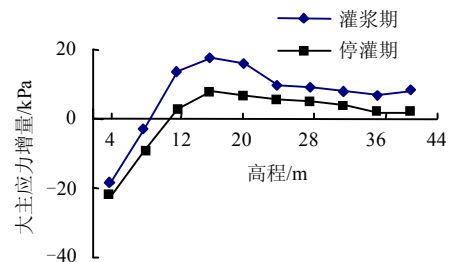


图 4 大主应力增量沿坝高分布图(坝轴线)

Fig.4 Maximum principal stress increments along dam height distribution (dam axis)

4.2.2 小主应力

图 5 为小主应力增量沿水平向分布图。从图中看出, 离灌浆轴线越近, 小主应力增量越大; 离灌浆轴线越远, 小主应力增量越小。小主应力增量沿水平向分布不是直线衰减, 应力最大影响范围几乎涉及整个坝体, 与黄前土坝观测结果不相符。图 6 为坝轴线处小主应力增量沿坝高分布图, 小主应力增量在坝体中下部增量较大, 中上部较小, 坝基深度范围内为负值。

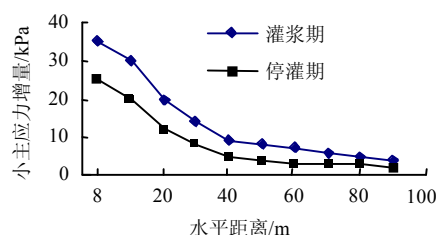


图 5 小主应力增量水平方向分布图 (高程为 14 m)
Fig.5 Minor principal stress increments along horizontal direction distribution (elevation is 14 m)

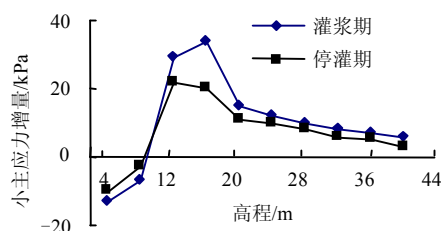


图 6 小主应力增量沿坝高分布图 (坝轴线)
Fig.6 Minor principal stress increments along dam height distribution (dam axis)

4.2.3 应力水平

应力水平 s 为大主应力与小主应力的差值。应力水平越大, 坝体的安全系数越小; 应力水平越小, 坝体的安全系数越大。应力水平增量 Δs 沿水平向的分布见图 7。离灌浆轴线越近, 应力水平降低值越大。当距离为 55 m 时, 应力水平增量为 0, 之后应力水平增量为正, 说明在某一范围内, 小主应力增量大于大主应力增量, 应力水平下降, 坝体的安全系数增加; 超过这个范围, 应力水平又升高, 坝体的安全性降低; 应力水平增量沿坝高分布图见图 8。坝体中下部小主应力增量大于大主应力增量, 所以应力水平增量为负值; 坝顶区域大主应力增量大于小主应力增量, 应力水平升高, 即应力水平增量为正值, 这一结论与黄前土坝观测结果一致。停灌后, 大小主应力增量比灌浆期减少, 但减少幅度一致,

故停灌时的应力水平增量与灌浆期完全相同, 两线重合。

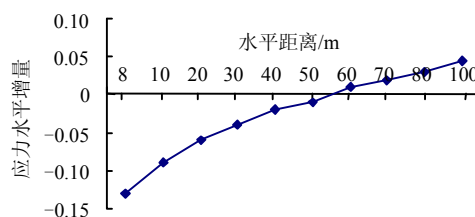


图 7 应力水平增量沿水平向分布图 (高程为 14 m)
灌浆期与停灌期两线重合
Fig.7 Stress level increment along horizontal direction distribution (elevation is 14 m) The lines of grouting period coincide with the stopping period's

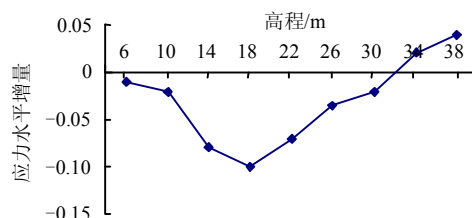


图 8 应力水平增量沿坝高分布图 (坝轴线)
灌浆期与停灌期两线重合
Fig.8 Stress level increments along dam height distribution (dam axis) The lines of grouting period coincide with the stopping period's

4.3 稳定分析

圆弧滑动法计算坝体稳定分析, 需要确定最危险圆心, 计算工作量很大。利用有限元计算成果确定最危险滑动面, 不需要进行大量的试算工作, 工作量可以大大减少。目前, 确定最危险滑动面的观点主要有 3 种: 一是利用大主应变等值线的脊线连线, 即为最危险滑动面; 二是剪应变的脊线连线, 即为最危险滑动面; 三是应力水平的脊线连线, 即为最危险滑动面。第 1 种和第 2 种观点认为, 应变决定着土体的破坏, 当土体的应变达到破坏应变时, 开始滑动破坏; 第 3 种观点认为当剪应力达到抗剪强度时, 开始滑动破坏。张天宝^[12]认为, 如果第 2 种和第 3 种方法确定的最危险滑动面重合最为理想, 笔者主张按应力水平的脊线连线确定的最危险滑动面。

最危险滑动面确定以后, 可按下式计算滑动面的平均安全系数:

$$K = \frac{\sum K_i L_i}{\sum L_i} \quad (5)$$

式中: K_i 为 i 单元的安全度, $K_i = 1/s_i$; L_i 为滑动面经过 i 单元的长度; s_i 为 i 单元的应力水平。

同一滑动面和最危险滑动面在蓄水期、灌浆期、停灌期的安全系数见表 3。从表中可以看出, 灌浆期的安全系数较蓄水期大, 停灌期的安全系数较灌浆期小, 但还高于灌浆前的安全系数, 说明无论是同一滑动面还是最危险滑动面, 灌浆后的安全系数比灌浆前提高, 说明劈裂灌浆可以有效地改善坝体的应力状态, 提高坝体的稳定性。

表 3 不同时期土坝的安全系数
Table 3 The safety coefficient of the earth dam in different periods

时期	同一滑动面安全系数	最危险滑动面安全系数
蓄水期	3.71	2.74
灌浆期	3.85	2.96
停灌期	3.74	2.76

5 结 论

(1) 劈裂灌浆可以引起坝体的水平位移。中上部的水平位移大, 中下部较小, 灌浆时引起的水平位移主要表现为内部压缩变形, 增加了坝体的密实度。劈裂灌浆对垂直位移的影响很小。

(2) 劈裂灌浆可以同时增大、小主应力。其中灌浆轴线附近区域, 小主应力增加幅度大于大主应力增加幅度; 远离灌浆轴线区域, 大主应力增加幅度大于小主应力增加幅度。

(3) 应力水平随水平距离增加而降低, 离灌浆轴线越近, 应力水平降低值越大。在坝高下半部大部分范围内, 应力水平降低, 坝体的安全性增加; 在坝坡附近和坝高上半部分, 应力水平有所增加, 坝体的安全性降低。

(4) 同一滑动面和最危险滑动面的安全系数, 均比灌浆前有所增加, 说明劈裂灌浆可以有效地改善坝体的应力状态, 提高坝体的稳定性。

参 考 文 献

- [1] 白永年. 西埠土坝劈裂灌浆技术研究[R]. 济南: 山东水利科学研究院, 1982.
- [2] 白永年, 王洪恩. 土坝坝体劈裂灌浆技术研究[R]. 济南: 山东水利科学研究院, 1984.
- [3] 武科. 土坝劈裂灌浆加固试验研究及数值模拟分析[硕

士学位论文D]. 济南: 山东大学, 2004.

- [4] 孙峰, 卢超, 尤春安, 等. 劈裂灌浆钻孔附近弹塑性应力分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2006, 4(4): 28—30.
SUN Feng, LU Chao, YOU Chun-an, et al. Study on elastic and plastic stress around holes for split grouting[J]. **Journal of Water Resources and Architectural Engineering**, 2006, 4(4): 28—30.
- [5] 王宏硕. 水工建筑物[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1990.
- [6] 王志亮, 殷宗泽, 李永池. 邓肯-张模型有限元分析路堤沉降实用方法[J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 1085—1089.
WANG Zhi-liang, YIN Zong-ze, LI Yong-chi. Practical method for finite element analysis of embankment settlement with Duncan-Chang model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(7): 1085—1089.
- [7] 赵红芬, 何昌荣, 王琛, 等. 高应力下砾质心墙料切线模量研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊): 193—196.
ZHAO Hong-fen, HE Chang-rong, WANG Chen, et al. Research on tangent modulus of gravel core materials under high pressure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(Supp.): 193—196.
- [8] 周葆春, 冯波, 汪墨, 等. 武汉黏土Duncan本构模型参数研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1788—1792.
ZHOU Bo-chun, FENG Bo, WANG Mo, et al. Research on parameters of Duncan models for Wuhan clay [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(7): 1788—1792.
- [9] 罗长军. 土坝坝体劈裂式灌浆施工技术的商榷[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1605—1611.
LUO Chang-jun. Discussion on the construction technique of split grouting in body of earth dam[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(9): 1605—1611.
- [10] 冯平. 泥浆固壁对土石坝混凝土防渗墙应力-应变的影响[硕士学位论文D]. 武汉: 武汉大学, 1990.
- [11] 白永年, 王洪恩. 山东黄前水库土坝劈裂灌浆原型资料分析[R]. 济南: 山东水科院, 1983.
- [12] 张天宝. 土坝稳定分析和土工建筑物的边坡设计[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 2004.