

基于分级加载的高面板堆石坝应力变形分析

常双梅¹, 何文社^{1,2}, 常周梅³, 张 硕⁴

(1. 兰州交通大学, 兰州 730070; 2. 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室, 兰州 730070;
3. 华北水利水电大学, 郑州 450000; 4. 洛阳水利勘测设计有限责任公司, 河南 洛阳 471000)

摘要: 依据非线性弹性 $K-G$ 模型理论对天池上水库面板堆石坝进行了应力变形分析。首先采用 CAD 图形和程序控制相结合方法建立坝体与地基模型, 考虑了断层构造和岸坡变化, 得到了较为精细的三维有限元模型。然后在模型计算中采用了施工逐级加载的方法对坝体进行了模拟, 应用修正后的分级加载位移变形公式, 对竣工期和正常水位蓄水期的应力变形进行三维有限元分析, 得出了两种工况下断层对该高面板坝应力变形影响一般规律。

关键词: 面板堆石坝; 非线性弹性模型; 逐级加载; 三维有限元; 应力变形分析

中图分类号: TV314; TV641.4 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2013)06-0093-05

Analysis of Stress and Deformation of High Concrete Faced Rockfill Dam Based on Stage Loading

CHANG Shuang mei¹, HE Wen she^{1,2}, CHANG Zhou mei³, ZHANG Shuo⁴

(1. Lanzhou jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Roads, Bridges and Underground Engineering of Gansu Province, Lanzhou 730070, China; 3. North China Institute of Water Resources and Hydropower, Zhengzhou 450000, China; 4. Luoyang Water Conservancy Survey and Design Co., Ltd, Luoyang 471000, China)

Abstract: The theory of nonlinear elastic $K-G$ model was applied to analyze the stress and deformation of the concrete faced rockfill dam in Tianchi reservoir. The combination method of CAD drawings and program control was used to develop the model of the dam and foundation. The fault structures and bank slope change were considered in the model, and thus a more refined three dimensional finite element model was obtained. The dam was simulated using the method of step by step loading, and the displacement formula of modified step by step loading was used to conduct three dimensional finite element analysis of the stress and deformation during the completion period and under normal water level conditions. The effects of the fault structures on the stress and deformation of the high concrete faced rockfill dam were determined for the two working conditions.

Key words: concrete faced rockfill dam; nonlinear elastic model; step by step loading; three dimensional finite element; analysis of stress and deformation

堆石体是混凝土面板堆石坝最重要的组成部分, 其变形程度对坝体的稳定和安全都有很大的影响^[1]。以往的三维建模对地基部分大都只是近似的将地基看成平面进行分层, 而未考虑其复杂的地形及地质条件; 大都假设坝体施工是一次性完成的, 因此其模拟分析不能真实反映坝体位移和变形。本文依据非线性弹性 $K-G$ 模型理论, 利用大型有限元软件 A D I N A^[2] 对天池上水库面板堆石坝复杂地形及断层地质构造进行精细模拟, 同时对坝体分级施工加载^[3-4] 进行了模拟, 建立了三维有限元模型, 对竣工期和蓄水期坝体应力应变进行了分析^[5-6]。

1 计算原理

1.1 非线性弹性 $K-G$ 模型基本理论

$K-G$ 模型是基于土体的变形特点, 以体积模量 K 和剪切模量 G 为参数来描述土体(包括堆石体)的应力与应变关系的。其中具有代表性的是耐勒(Naylor)提出的 $K-G$ 模型, 但其不能很好地反映土的压硬性和剪胀性。本文采用改进的非线性 $K-G$ 模型^[7-8], 以体积模量 K 和剪切模量 G 这两个参数作为变弹性参数:

$$K_i = K_i + \alpha_k p \tag{1}$$

收稿日期: 2013-05-01 修回日期: 2013-09-27 网络出版时间: 2013-10-10
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20131010.1028.015.html>
基金项目: 长江学者和创新团队发展计划(IRT1139)
作者简介: 常双梅(1987-), 女, 甘肃白银人, 硕士研究生, 主要从事水工结构方面的研究。E-mail: csm_2007@163.com
通讯作者: 何文社(1966-), 男, 甘肃庆阳人, 教授, 博士(后), 主要从事水工结构和河流动力学的研究。E-mail: hwe_@163.com

$$G_i = G_i + \alpha_c p + \beta_c q \quad (2)$$

式中： p 为广义正应力； q 为广义剪应力； K_i 、 G_i 、 α_c 、 β_c 分别为模型的 5 个参数，其形式较简单，可通过堆石料现场压缩试验解耦 $K-G$ 模型参数的分析方法求得。

改进的 $K-G$ 模型较好的反映土体的变形特点。

1.2 分级加载计算原理

一次性加载是假设施工和变形是瞬时完成的，各级荷载增量均由整个结构共同承担，因此上部后填筑土体的应力和变形要受到下部结构填土自重荷载的影响，这与实际不符。本文采用增量法^[9-10]来模拟施工过程中的逐级加载。增量法不仅可以反应不同施工阶段的应力应变情况，而且能够清楚的体现结构本身随施工过程^[11]的变化。

在施工逐级加载时，每级新增筑的填土单元初始应力 $\{\sigma\} = 0$ ，令 $\sigma_x = \sigma_y = \gamma h$ (h 为从土层最底部到单元形心的垂直距离)。本文每次加筑的土层厚度是均匀的，则可令 $\sigma_y = \gamma h$ ， $\sigma_x = K \gamma h$ (K 为土的静止侧压力系数)。按照公式^[12] $E_i = A \sigma_x^B$ 和 $v_i = C + F/\sigma_y + D$ 计算 E_i 、 v_i (其中 A 、 B 、 C 、 D 、 F 可按土体性质查得)。距坝顶 z 深处某一点 A 一次性加载的竖向位移 S_A 为：

$$S_A = \int_z^h m \gamma \xi d\xi = \frac{m \gamma}{2} (h^2 - z^2) \quad (3)$$

距坝顶 z 深处某一点 A 分级加荷的竖向位移 S'_A 为：

$$S'_A = \int_z^h m \gamma z d\xi = m \gamma z (h - z) \quad (4)$$

在对施工分级加载的位移结果进行整理时，将一次加载荷算出的位移 S_A ，修正到无穷分级时的位移 S'_A 。

$$S'_A = \frac{2z}{h+z} S_A \quad (5)$$

式中： h 为该级土层的厚度。式(5)在计算水平位移时也可近似采用。若竣工后坝顶仍继续产生位移则无需修正，该修正只是为了求累计位移，不可用来推算应力应变。

在进行有限元模拟^[13-14]时将新增土只作为荷载，作用于已填土上，而不形成计算网格，在这一级末了同时填土完成时才形成网格，参与到下一级荷载的计算中。

2 工程与模拟工况

2.1 工程概况

天池抽水蓄能电站由上水库、下水库、输水系统及发电厂四部分组成。上水库大坝为混凝土面板堆石坝，坝顶高程 1 068.40 m，坝顶宽度 10.00 m，最大坝高 118.40 m，坝轴线长度 412 m。坝址河谷呈“V”字型，谷底高程 973~ 975 m。左、右坝肩附近的山体有小垭口，高程分别为 1 094.5 m、1 083 m，左岸综合坡度为 47°；右岸综合坡度为 26°。坝底地基有 2 条断层(F_{11} 、 F_{41}) 出露。坝体主要由 6 个填筑区组成：黏土铺盖区、盖重区、垫层区、过渡层、主堆石区、下游堆石区。大坝的典型剖面见图 1。

根据天池上水库堆石料岩石(体)物理力学试验成果，本工程各区材料的物理力学参数建议值见表 1。面板为常态混凝土，其参数为： $E = 2 \times 10^{10}$ Pa， $\mu = 0.3$ ， $\gamma = 2.5 \times 10^4$ N/m³。

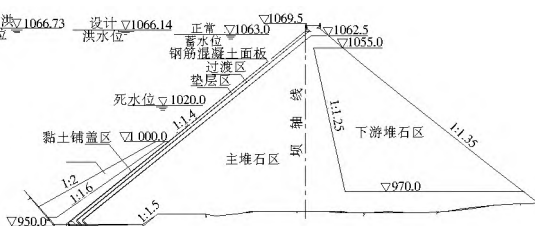


图 1 大坝典型断面及坝料分区

Fig.1 The typical cross section of dam and zonation of dam materials

表 1 材料的物理学参数

Table 1 The physical parameters of materials

材料名称	初始弹模 E /GPa	泊松比 μ	内摩擦角 φ (°)	黏聚力 c /MPa	密度 ρ (g·cm ⁻³)
主堆石	22	0.22	31.8	1.75	2.64
下游堆石	20	0.24	30.8	1.45	2.65
过渡料	25	0.22	31.8	1.70	2.65
垫层料	30	0.22	32.0	1.75	2.66
基岩	7	0.24	29.0	1.10	2.52
F_{11} 断层	6	0.24	29.0	1.11	2.64
F_{41} 断层	6	0.24	30.0	1.05	2.64

2.2 计算工况

计算时分以下两种工况进行有限元模拟分析。

(1) 坝体竣工期。模拟了坝体逐级施工的过程，在模拟坝体施工完成后对坝体的应力应变进行分析。主要分七步逐级施加坝体的自重荷载：首先施加全部的山体、断层，接着施加到高程 970 m 坝体断面(坝体最低高程为 950 m)，从高程 970~ 1 050 m，坝体土层厚度每 20 m 加载一次，分五级施加，最后一级加载到高程 1 066 m 坝体+ 防撞墙断面。

(2) 坝体正常蓄水期。坝体逐级施工完成后，在坝体上游施加水位为 1 063 m 的水荷载，对水荷载作用下的坝体的应力应变进行分析。

3 数值模拟分析

利用有限元分析软件 ADINA 进行分析，计算时采用非线性摩尔-库伦准则^[15]。取沿水流方向上游指向下游为 X 轴正向； Y 轴正方向为沿坝轴方向从右指向左； Z 轴正向为竖直向上与高程一致。地基模型范围为：坝基向上、下游各延伸 150 m，坝肩向左、右岸各延伸 100 m，底部伸至高程为 800.0 m 处。

有限元模型建立时通过 CAD 图形和程序控制相结合的方法精细地模拟了河槽的不规则形状和断层节理构造。主要通过以下 3 步来生成三维网格。

(1) 控制信息的读入。采用若干离散的关键点来控制三维河床，对坝体结构通过 CAD 图形和坝体的相关数据来控制，对坝体材料通过 CAD 图形和力学参数来控制，对于坝体的逐级施工通过数据文件来控制。

(2) 网格的生成。通过若干控制面(可为空间曲面)来控制几何信息，面之间可以有重合，面按一定规律生成一张网络，并定义其投影点的属性，将各个投影点形成三维八节点六面体网格，根据具体的要求来调整一些节点的坐标；以单元为单位，根据其 8 个节点的坐标来判断单元的形状，从而将重复

的点和不存在的单元滤掉,将不规则的单元进行细分。

(3)数据文件的生成。按逐级施工的顺序,将单元和节点号重排列,结合材料和荷载信息生成有限元计算数据文件。

生成的三维网格见图2。

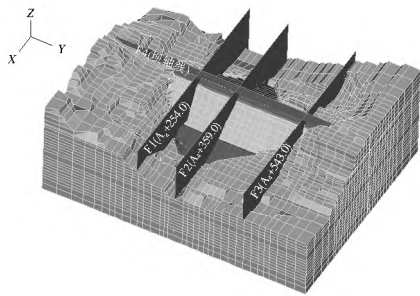


图2 天池上水库面板堆石坝三维网格

Fig. 2 Three dimensional model grids of the concrete faced rock fill dam in Tianchi reservoir

为便于对比分析,计算时选取了4个典型剖面:纵剖面 $F_1(A_4+254.0)$ 、 $F_2(A_4+359.0)$ 、 $F_3(A_4+643.0)$ 和横剖面 F_4 (坝轴线),见图2。通过模拟分析典型剖面 F_1 至 F_4 竣工期和正常蓄水期的大、小主应力以及水平、竖向位移,得到了两种工况下剖面的大、小主应力等值分布图和水平、竖向位移等值分布图。图3为纵剖面的材料分层图。

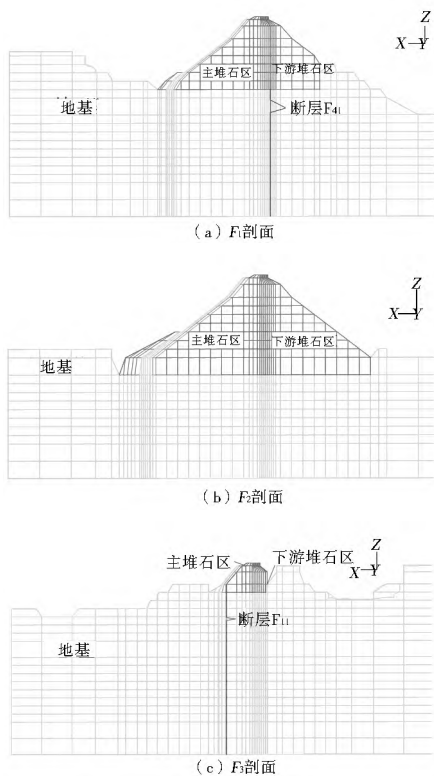


图3 纵剖面材料分层图

Fig. 3 Layered materials of section

3.1 坝体应力分析

由于篇幅所限,这里只列出 F_1 、 F_2 剖面在蓄水后的大、小主应力等值分布(图4至图7),进行对比。同时将4个剖面两种工况模拟分析所得的大主应力对应的最大应力值和小主应力对应的最大应力值绘于图8、图9中,以便对比分析。各图中正值表示拉应力。

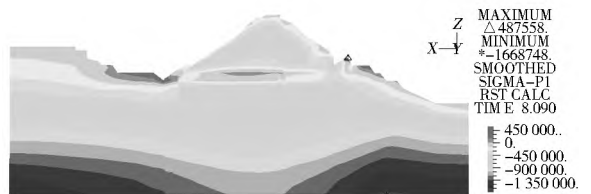


图4 蓄水期 F_1 剖面大主应力等值分布(Pa)

Fig. 4 Distribution of maximum principal stress of section F_1 during the storage period (Pa)



图5 蓄水期 F_2 剖面大主应力等值分布(Pa)

Fig. 5 Distribution of maximum principal stress of section F_2 during the storage period (Pa)

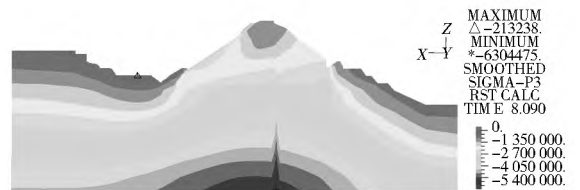


图6 蓄水期 F_1 剖面小主应力等值分布(Pa)

Fig. 6 Distribution of minimum principal stress of section F_1 during the storage period (Pa)



图7 蓄水期 F_2 剖面小主应力等值分布(Pa)

Fig. 7 Distribution of minimum principal stress of section F_2 during the storage period (Pa)

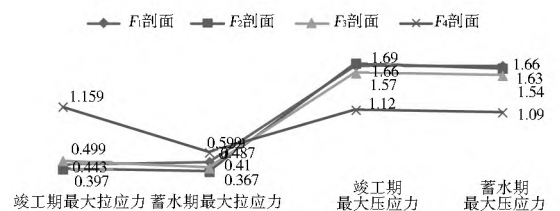


图8 竣工、蓄水期各剖面大主应力(MPa)

Fig. 8 Maximum principal stress of each section on completion and storage (MPa)

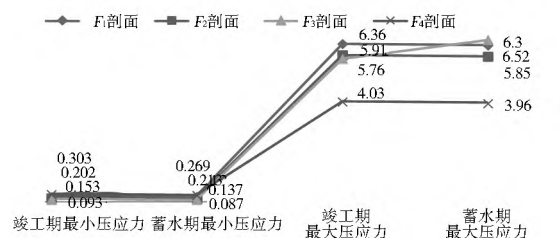


图9 竣工、蓄水期各剖面小主应力(MPa)

Fig. 9 Minimum principal stress of each section on completion and storage (MPa)

大主应力: 由图 4 看出, 大主应力的最大受拉区均在坝轴线偏上游部位的坝底岩基处, 而最大受压区都在坝体二分之一处; F_1 剖面在蓄水后坝基的应力分布几乎没有太大的变化, 只是在坝体上游小壅口附近出现拉应力切拉应力值有所增大, 而面板及坝体主堆石区压应力值有所增加, 在坝体二分之一偏下游处压应力值有所减小; 由图 5 可知, F_2 剖面在蓄水后的应力变化趋势和 F_1 剖面基本相同, 只是 F_2 剖面小壅口附近以压应力为主, 压应力在主堆石区附近普遍增大; 由 F_1 、 F_2 剖面比较得出, 岸坡坡度越缓, 坝肩处的拉应力值越大; 由图 8 可知, F_4 横剖面的最大拉应力蓄水后有明显降低, 而其余 3 个纵剖面的最大拉应力值变化不大。最大压应力在蓄水前后 4 个剖面变化都比较平和, 各剖面的最大压应力值较最大拉应力值要大。

小主应力: 由图 6、图 7 及图 9 看出, 小主应力在两种工况下都只有压应力而无拉应力。两剖面小主应力的分布都是从坝体顶部到坝底逐渐增加。但 F_1 剖面由于受到断层构造的影响小, 主应力在断层面出现了不连续的变化, 与同高程相比, 断层面压应力明显增大。由图看出, 在蓄水后各剖面压应力变化都比较平缓, 最大、最小压应力均变化不大。

3.2 坝体变形分析

为了便于分析横剖面的变形, 这里增列了 F_4 剖面的竖向位移等值分布图(以竖直上移为正)和水平位移等值分布图(以顺流水平位移为正)。

竖向位移: 由图 10、图 11 看出, 两种工况下坝体及下方地基都发生沉降, 只有在距离坝体较远的上游地基发生竖直上移, 最大位移变形在坝体二分之一的坝基处, 坝顶部位的位移变形较中间小。图 12 中, 纵剖面 F_4 最大位移变形在坝体顶部中间部位, 由上至下, 位移变形逐渐减小。由图 13 看

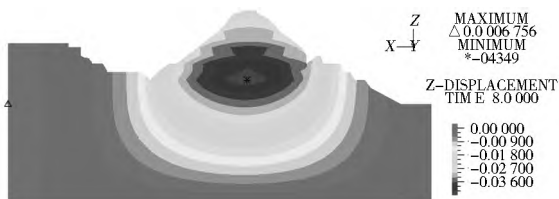


图 10 F_1 剖面竖向位移等值分布 (m)

Fig. 10 Distribution of vertical displacement of section F_1 (m)

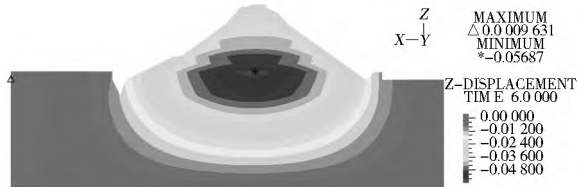


图 11 F_2 剖面竖向位移等值分布 (m)

Fig. 11 Distribution of vertical displacement of section F_2 (m)



图 12 F_4 剖面竖向位移等值分布 (m)

Fig. 12 Distribution of vertical displacement of section F_4 (m)

出, 纵剖面 F_4 在两种工况下各部位都只发生沉降, 其余剖面上游坝基有微小的竖向上移。相对于竣工期, 蓄水期的 F_1 、 F_2 剖面的上移量有所减小。同时蓄水期受扬压力的影响各剖面沉降量减小, 其中以 F_3 剖面减小量最大。

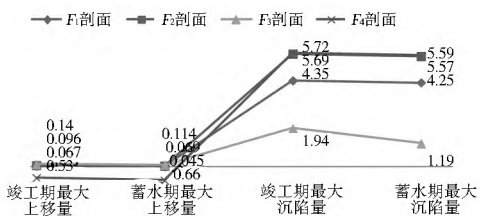


图 13 竣工、蓄水期各剖面竖向位移 (cm)

Fig. 13 Vertical displacements of each section during the completion and storage periods (cm)

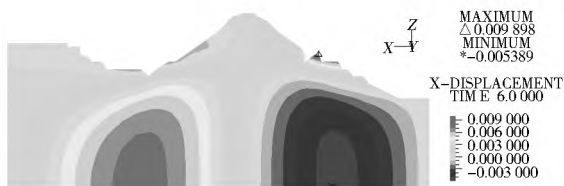


图 14 F_1 剖面水平位移等值分布 (m)

Fig. 14 Distribution of horizontal displacement of section F_1 (m)



图 15 F_2 剖面水平位移等值分布 (m)

Fig. 15 Distribution of horizontal displacement of section F_2 (m)

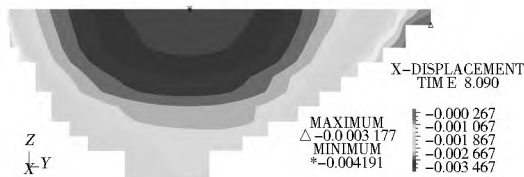


图 16 F_4 剖面水平位移等值分布 (m)

Fig. 16 Distribution of horizontal displacement of section F_4 (m)

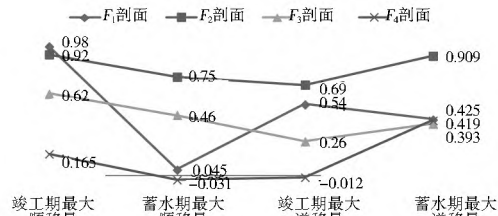


图 17 竣工、蓄水期各剖面水平位移 (cm)

Fig. 17 Horizontal displacements of each section during the completion and storage periods (cm)

水平位移: 由图 14 至图 16 看出, 坝体向下游整体水平变形, 蓄水后坝体上游侧的水平位移减少, 下游侧的水位位移增加由此看出水压力对坝体水平位移的影响在上游部位

比较显著。图 17 中,竣工期 F_4 纵剖面只有顺水流方向的位移,其余剖面在顺流和逆流方向都发生水平位移;蓄水后受到扬压力的影响该剖面只有逆流方向的水平位移,其余剖面在蓄水后顺着水流方向的位移值也都有所减小,而逆流方向位移值有所增加,增幅大都在 50% 左右。

4 总结

(1) 坝体应力。竣工期,坝体大主应力的最大受拉区均在坝轴线偏上游部位的坝底岩基处,而最大受压区都在坝体 1/2 处;小主应力分布表现出从坝体顶部到坝底逐渐增加的规律。蓄水期,大主应力明显增大,坝体各部分压应力也有所增大,而拉应力随着岸坡坡度变缓而增大;小主应力云图也有所增大,表明蓄水后主要由上游主堆石区支撑水荷载。坝底为最大压应力区。

(2) 坝体变形。竖向位移:坝体最大沉降量在坝体底部与岩基交接处。竣工期坝体仅受自重作用,因坝址河谷走势的不对称性,坝体填筑量的不同,左岸河谷坝体的沉降量远大于右岸。蓄水后坝体受垂直静水压力和扬压力的作用,尤其是在扬压力的作用,坝体沉降量反而略小于竣工期。

水平位移:竣工期坝体上游侧向上游偏移,下游侧向下游偏移,分布比较对称。蓄水后坝体上游侧更为直观,上游侧水平位移较竣工期减小,说明坝体受水平水压力的作用,坝体上游向下游偏移,但偏移量很小。

综上所述,蓄水期在自重和静水压力、扬压力的作用下,坝内大、小主应力较竣工期均有所增加,尤其是坝体上游侧变化比较明显。断层构造对坝体应力有所影响,使断层部位的压应力增加,而断层对于坝体变形的影响不明显。通过分级加载得出的应力分布图符合一般规律,垂直方向与水平方向的位移变形,主应力的最大值及发生部位,都与理论分析的结果基本一致,同时最大拉应力在混凝土抗拉强度范围之内,符合碾压式土石坝设计规范。

参考文献(References):

[1] [1] 朱伯芳.有限单元法原理及应用(第二版)[M].北京:中国水利水电出版社,1998.(ZHU Bo fang. The Principle and Application of the Finite Element Method(Second Edition)[M]. Beijing: China Water Power Press, 1998.(in Chinese))

[2] 马野,袁志丹,曹金凤. ADINA 有限元经典实例分析[M].北京:机械工业出版社,2011.(MA Ye, YUAN Zhi dan, CAO Jin feng. ADINA Classic Example of Finite Element Analysis[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2011.(in Chinese))

[3] 吴兴征,栾茂田,阴吉英.面板堆石坝应力与变形弹塑性有限元计算与分析[J].大连理工大学学报,2000,(5):602-607.(WU Xing zheng, LUAN Mao tian, YIN Ji ying. Elastic Plastic Finite Element Analyses of Stresses and Deformations of Concrete Faced Rockfill Dam[J]. Dalian University of Technology, 2000,(5):602-607.(in Chinese))

[4] 陈慧远.土石坝有限元分析[M].南京:河海大学出版社,1988.

(CHEN Hui yuan. The Earth Dam Finite Element Analysis [M]. Nanjing: Hohai University Press, 1988. (in Chinese))

[5] 卢延浩,高贯全,陈剑.蓄水后土石坝应力变形有效应力算法[J].岩土力学,2005,26(2):247-250.(LU Yan hao, GAO Guan zhong, CHEN Jian. Effective Stress Method of Stress and Deformation for Soil Rockfill Dam after Water Impounding [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(2): 247-250. (in Chinese))

[6] 徐泽平.混凝土面板堆石坝应力变形特性研究[M].郑州:黄河水利出版社,2005.(XU Ze ping. Stress and Deformation Properties of Concrete Faced Rockfill Dam [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2005. (in Chinese))

[7] 卢延浩.高等土力学[M].北京:机械工业出版社,2005.(LU Yan hao. Advanced Soil Mechanics[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2005. (in Chinese))

[8] 高莲士,汪召华,宋文晶.非线性解耦 K-G 模型在高面板堆石坝应力变形分析中的应用[J].水利学报,2001,(10):F7.(GAO Lian shi, WANG Shao hua, SONG Wen jing. The Application of Nonlinear Uncoupled K-G Model to Deformation Analysis of High Concrete Faced Rockfill Dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, (10): F7. (in Chinese)).

[9] BATHE K J. Finite Element Procedures in Engineering Analysis [M]. New Jersey: Prentice Hall, Inc, 1982.

[10] 王泳嘉,邢纪波.离散单元法及其在岩土力学中的应用[M].北京:科学出版社,1991.(WANG Yong jia, XING Ji bo. Discrete Element Method and Its Application in the Rock and Soil Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1991. (in Chinese))

[11] HACELAS J E. Construction and Performance of Salvajma Dam [A]. Concrete Faced Rockfill Dams Design, Construction and Performance [C]. New York: ASCE Convention, 1985.

[12] 郭诚谦,陈慧远.土石坝[M].北京:水利电力出版社,1992.(GUO Cheng qian, CHEN Hui yuan. Soil Rockfill Dam [M]. Beijing: China Water Power Press, 1992. (in Chinese)).

[13] 吕生玺.九甸峡混凝土面板堆石坝应力与变形有限元分析[J].南水北调与水利科技,2010,8(3):117-120.(LV Sheng xi. Finite Element Analysis on Stress and Deformation for Jiudianxia Concrete Faced Rockfill Dam [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(3): 117-120. (in Chinese))

[14] 丁遥,沈振中,李琛亮,等.复杂地形对面板坝面板应力和变形的影响分析[J].南水北调与水利科技,2010,8(1):33-35.(DING Yao, SHEN Zhen zhong, LI Chen liang, et al. Effect of Complex Topography on Deformation and Stress of Face Slab for a CFRD [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(1): 33-35. (in Chinese))

[15] 汪明元,和展林,林绍忠,等.水布垭面板堆石坝的三维弹塑性数值分析研究[J].岩土力学,2004,(增2):507-512.(WANG Ming yuan, HE Zhan lin, LIN Shao zhong, et al. Shuibuya CFRD Three-Dimensional Elastic Plastic Numerical Analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, (Supp. 2): 507-512. (in Chinese))