

土石坝混凝土防渗墙的非线性分析

杨令强¹, 武甲庆², 秦 冰³

(1. 济南大学 土木建筑学院, 济南 250022; 2. 山东省水利厅, 济南 250013; 3. 山东水利设计院, 济南 250013)

摘 要: 采用 Duncan-Chang E-B 模型描述土的非线性特性, 接触单元模拟防渗墙和土石坝之间的相互作用, 利用非线性有限元程序计算了土石坝和防渗墙的应力和变形。结果表明: 坝体应力状态和变形性质主要取决于坝体断面设计形式, 防渗墙在一定范围内起作用; 防渗墙材料不同对坝体应力与变形的影响主要由材料的刚度决定, 刚性防渗墙对垂直沉降的制约作用明显; 柔性防渗墙适应变形的能力强, 但对位移的影响较大。对坝体稳定, 刚性防渗墙的垂直变形是主要控制因素, 关键部位在墙的底部; 柔性防渗墙的水平位移是主要控制因素, 关键部位在坝体的中下部。

关 键 词: 土石坝; 防渗墙; 应力; 应变

中图分类号: TV 641

文献标识码: A

The nonlinear analysis of diaphragm wall in earth dam

YANG Ling-qiang¹, WU Jia-qing², QIN Bing³

(1. Department of Civil Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China; 2. Shandong Water Resources Bureau, Jinan 250013, China; 3. Shandong Water Resources Design Bureau, Jinan 250013, China)

Abstract: Contact element is used to simulate the nonlinear behavior of interaction of diaphragm wall and base. Duncan-Chang E-B criterion is used as constitutions relation of base and dam to represent nonlinear and inelastic characteristics. FEM is used to calculate the stress and deformation of dam, base and diaphragm wall. The result shows that the stress and strain of dam depend on the selection of dam. The characteristic of diaphragm wall also affects the stress and strain of dam in some regions. The stiffness of diaphragm wall is a key factor in the stress and strain in dam and diaphragm wall. If the stiffness of wall is large, the vertical displacement is affected obviously. And the danger location is at the bottom of the diaphragm wall. Besides, the ability of adapting to deformation is high. But the displacement is large. The danger location is at the bottom of dam.

Key words: earth dam; diaphragm wall; stress; strain

1 引 言

混凝土防渗墙是砂砾石地基上建造当地材料坝的主要防渗建筑物, 是整个工程安危的控制因素, 其受力状态比较复杂。合理评价防渗墙的应力位移一直是结构设计最为重要的内容之一。20 世纪 80 年代以前, 常将防渗墙视为地基梁来评价其应力和位移, 但结果和实测相差甚远^[1]。近年来, 随着有限元分析的日益成熟, 为防渗墙的分析计算提供了强有力的手段。目前, 国内一些重要的大坝和围堰工程都借助数值手段评价防渗墙的应力和变形^[2-5], 以进行方案的比选和优化。但大多数工程都是针对某个具体的设计方案和工况计算, 较少系统地分析

对比各种可能因素对防渗墙应力和位移的影响。本文以某土石坝为例系统地分析了土石坝在填筑和运行过程中的应力状态, 用接触单元模拟防渗墙和土石坝之间的相互作用, Duncan-Chang E-B 模型描述土的非线性特性, 用分析防渗墙对坝体的应力、位移和安全状况, 以及防渗墙自身的应力和变形特点。

2 计算模型与材料参数

某土石坝坝高 20 m, 地基为砂砾石, 深 20 m 左右。坝体采用 8 级填筑层和 3 级外加荷载 (包括建造一道防渗墙、水位的上升和下降)。具体的分级顺序见图 1, 材料参数见表 1。地基和坝体采用双曲线 Duncan-Chang E-B 非线性模型, 防渗墙采用线弹

性材料^[6], 防渗墙和土体接触处设置接触单元。

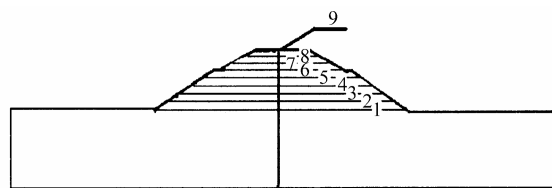


图 1 坝体填筑顺序图
Fig.1 The sequence of building dam

2.1 接触单元

由于防渗墙与土的变形及强度特性相差较大, 在外力作用下, 其界面有可能会产生相对错动、滑移或开裂。为了模拟这些物理现象, 在防渗墙和土这两种性质差别很大的材料之间设置接触面单元^[7], 单元的摩擦力 f_s 和法向力 f_n 为

$$f_s = \begin{cases} k_t u_s^e & \text{黏性阶性} \\ f_s' & \text{滑动动阶} \end{cases} \quad (1)$$

$$f_n = \begin{cases} k_n v & v < 0 \\ 0 & v > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: k_t 为黏结系数; f_s' 为库仑摩擦类型的静态摩擦限值 ($f_s' = \mu f_n$); μ 为摩擦系数; k_n 为法向接触刚度; u_s^e 单元的切向位移; v 为接触点对的距离。

图 1 坝体基地的材料参数
Table 1 Parameter of dam and base

材料	重度 /kN·m ⁻³	K	K_{ur}	n	R_f	c /kPa	φ /(°)	K_b	m
地基	20.8	630	756	0.3	0.7	12	37	209	0.2
坝体	21.1	654	665	0.4	0.7	8.0	36	295	0.4

2.2 地基的本构关系

地基和坝体的应力-应变关系可以用双曲线 Duncan-Chang E-B 模型^[8]表示:

$$E_t = K P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \left(1 - R_f \frac{(1 - \sin \varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right)^2 \quad (3)$$

$$B_t = K_b P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^m \quad (4)$$

式中: E_t , B_t 分别为切线弹性模量和体积模量; σ_1 和 σ_3 分别为大主应力和小主应力; P_a 大气压力; R_f 为破坏比; K 为弹性模数; n 为弹性模量指数; K_b 为体积模量数; m 为体积模量指数; c , φ 分别为土体凝聚力和内摩擦角, 而 φ 用下式表示:

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta \varphi \lg \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right) \quad (5)$$

卸荷时, 采用回弹性模量 E_{ur} , 即

$$E_{ur} = K_{ur} P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^{n_{ur}} \quad (6)$$

式中: K_{ur} 为卸荷弹性模量数; n_{ur} 为卸荷弹性模量指数; $\Delta \varphi$ 为内摩擦角变化率。

定义应力水平为实际主应力差和破坏时主应力差得比值^[9], 即

$$S = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \quad (7)$$

(1) 当水位上升时, 土体的重度变为浮重度, 计算时按卸荷处理, 卸荷模量按式 (6) 计算; 当水位下降时, 土体由浮重度变为湿重度, 按加荷考虑, 采用加荷模量 K 。

(2) 施工填筑层增量荷载的处理: 每一级荷载增量进行两次迭代, 第 1 次采用的弹性模量是以加荷前的初始应力来计算, 第 2 次以加荷前后的平均应力来计算。

(3) 拉力破坏的处理: 当某一个单元的 σ_1 为负值时, 认为该单元处于拉力破坏状态, 在第 1 次迭代时, 体积模量按 σ_3 为 0.1 个大气压力来计算。如第 1 次迭代后, 该单元仍处于拉力破坏状态, 体积模量就采用第 1 次时的 1/100。

(4) 剪切破坏的处理: 当某一单元应力水平大于 0.95 时, 则认为该单元发生剪切破坏, 此时采用相应于 0.95 应力水平的模量值。

3 计算结果与分析

3.1 坝体部分

3.1.1 应力情况

竣工时坝体的大、小主应力以及应力水平的等值线如图 2~4 所示。可以看出, 坝体应力分布较均匀, 下游比上游应力大, 主要是由于下游水位降低, 土体由浮重度变为湿重度, 相当于施加荷载。防渗墙两侧应力分布复杂, 这说明防渗墙对坝体的应力是有影响的。在图 4 的应力水平等值线图中直接反映了竣工时坝体的下游坡以及防渗墙顶部的两侧均出现了应力水平几乎大于 1 的剪切破坏区, 说明下游边坡的稳定应该引起重视, 混凝土防渗墙两侧的高应力水平区反映防渗墙上部存在比较明显的应力集中现象。

下游侧的破坏区域是由于施工完成后下游水

位下降引起的。在荷载的第 11 级，即上游水位下降时，上游边坡也出现破坏区，因此，在水位变动的区域应加强坝体位移的观测，防止发生滑坡等稳定破坏。

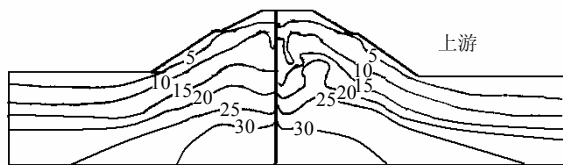


图 2 坝体及地基大主应力 (单位: 10 kPa)
Fig.2 The first stress of dam and base(unit: 10 kPa)

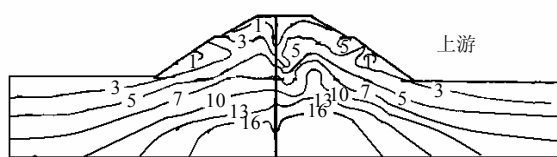


图 3 坝体及地基小主应力 (单位: 10 kPa)
Fig.3 The third stress of dam and base(unit: 10 kPa)

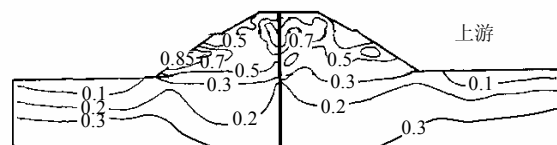


图 4 应力水平等值线(单位: m)
Fig.4 The stress level of dam and base(unit: m)

防渗墙材料不同时,应力的分布状况大体相近,坝体中的最值应力如表 2 所示,可以看出不同的混凝土材料强度,对坝体的应力影响不明显。

表 2 坝体最值应力
Table 2 The max stress in dam

混凝土强度等级	大主应力 / MPa	小主应力 / MPa
C5	0.311	0.162
C7.5	0.314	0.165
C10	0.317	0.168

3.1.2 变形状态

在竣工时累计水平位移(图 5)均向坝体上、下游方向扩展,图 6 为坝体及地基累计垂直沉降等值线图,可以看出,混凝土防渗墙对竖向位移明显起阻滞作用。防渗墙材料不同时,坝体中的最大位移如表 3 所示。可以看出,不同的混凝土材料强度对水平位移影响不明显,但对竖向位移有一定的影响。

3.2 防渗墙部分

防渗墙是土石坝的重要组成部分。在满足防渗

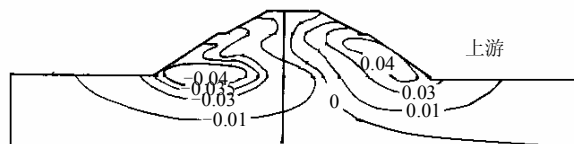


图 5 水平位移等值线(单位: m)
Fig.5 The horizontal displace of dam and base(unit: m)

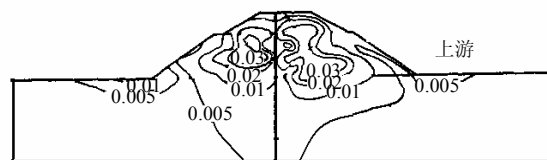


图 6 竖向位移等值线(单位: m)
Fig.6 The vertical displace of dam and base(unit: m)

表 3 坝体最大位移
Table 3 The max displace in dam

混凝土强度等级	水平位移 / cm	竖直位移 / cm
C5	5.02	4.71
C7.5	4.87	4.16
C10	4.74	3.70

要求的前提下,防渗墙本身的应力和变形状态就是工程安全的决定性因素。防渗墙内部应力既决定于墙本身的重量、墙体材料的性质,同时也决定于墙体在坝体断面设计中的部位、断面设计的形式以及水位变化时的浮托力、水压力和土压力作用在墙体的应力状态。图 7 分别列出了竣工后(9 级)和水位下降后(11 级)的坐标应力,在施工结束后,防渗墙所承受的荷载,主要是坝体断面不对称性对墙两侧土压力的影响。由于混凝土材料重度大、弹性模量高、变形小、与坝体摩擦阻力大,致使它的垂直应力远大于墙体本身自重,最大达 1.53 MPa,并且墙体的垂直应力基本上随着墙体的深度增加而增加。墙的侧向应力远小于垂直应力,墙体剪应力随高程不同,呈或正或负的复杂状态,其最大值远小于墙体材料的极限抗剪强度。墙体的最大挠度发生在 37 m 左右,即坝体底部的 1/3~1/2 处,上下游水位变动对防渗墙水平位移有较大的影响,上游水位升高时(10 级),墙体水平位移将会进一步加大,由于墙后土体对防渗墙有较大反力,墙身不会产生很大的弯矩和内力。

防渗墙的应力和挠度对不同材料的对比见表 4。可以看出,不同材料的水平向应力基本不变,竖向应力变化很大,切向力和挠度有一定变化。

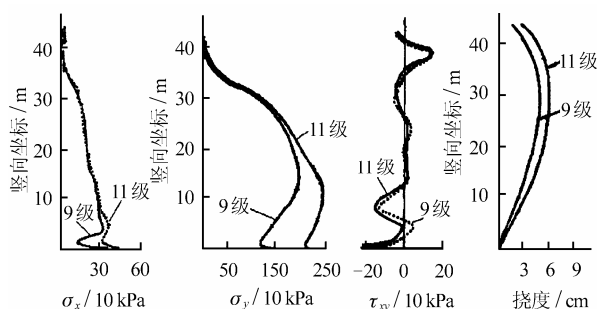


图7 防渗墙的坐标应力与挠度

Fig.7 The stress and deform of diaphragm wall

表4 防渗墙的应力与挠度

Table 4 The max stress and deform of diaphragm wall

混凝土标号	水平应力 / MPa	竖直应力 / MPa	切向应力 / MPa	挠度 / cm
C5	0.30	0.8	0.17	5.4
C7.5	0.31	1.2	0.20	5.1
C10	0.31	1.5	0.23	4.7

4 结 论

(1) 坝体应力状态和变形性质主要取决于坝体断面设计形式, 防渗墙仅在一定区域影响坝体应力和变形。

(2) 防渗墙材料不同对坝体应力与变形的影响主要由材料的刚度决定。防渗墙材的刚度愈大, 与相邻材料间的摩擦阻力愈大, 对垂直沉降的制约作用愈明显; 相反防渗墙材料的刚度愈小, 与相邻材料间的变形适应性愈好, 但对位移的影响较大。对坝体稳定, 刚性防渗墙的垂直变形是主要控制因素, 而对柔性防渗墙的水平位移起主要控制作用。

(3) 防渗墙材料性质不同除了对坝体应力和变形性质影响以外, 主要反映在防渗墙本身的应力及变形状态上。混凝土防渗墙材料弹性模量愈大, 刚度愈大, 挠度愈小, 与相邻材料间的摩擦阻力愈大, 垂直压力随墙的深度增加而增加, 最大垂直压力位于墙下部, 是影响工程安全的关键部位。如果防渗墙材料弹性模量小, 刚度也小, 挠度就大, 适应变形能力强, 与相邻材料之间的摩擦阻力要小。最大垂直压力的部位大致与坝体最大应力部位相一致。

参 考 文 献

[1] 刘祥生, 刘学祥, 刘洪. 三峡一期土石围堰防渗墙应力应变监测[J]. 人民长江, 1996, 27(10): 11—14.

LIU Xiang-sheng, LIU Xue-xiang, LIU Hong. Structural behavior monitoring for TGP's Stage I cofferdam seepage-proof wall[J]. *Yangtze River*, 1996, 27(10): 11—14.

[2] 沈新慧. 防渗墙及其周围土体的应力探讨[J]. 水利学报, 1995, (11): 39—45.

SHEN Xin-hui. Study on stresses of concrete diaphragm walls and surrounding soil[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1995, (11): 39—45.

[3] 包承纲. 数值计算在三峡二期围堰分析中的作用[A]. 第七届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会论文集[C]. 大连: 大连理工大学出版社, 2001.

[4] 王刚, 胡黎明, 濮家骝. 围堰基础混凝土防渗墙应力位移有限元分析[A]. 第七届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会论文集[C]. 大连: 大连理工大学出版社, 2001.

[5] 卢廷浩, 汪荣大. 瀑布沟土石坝防渗墙应力变形分析[J]. 河海大学学报. 1998, 26(2): 41—44.

LU Ting-hao, WANG Rong-da. Stress and deformation of concrete cut-off wall in Pobugou Earth-rockfill Dam[J]. *Journal of Hohai University*, 1998, 26(2): 41—44.

[6] 朱俊高, 殷宗泽. 高土石坝混凝土防渗墙弹塑性应力变形分析[J]. 水利学报, 1997, (7): 19—24.

ZHU Jun-gao, YIN Zong-ze. Elastic-plastic analysis of stress and deformation of concrete cut-off for high earth dam[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, (7): 19—24.

[7] 杨令强, 练继建, 张社荣, 等. 高拱坝水垫塘反拱底板衬砌结构的非线性静力分析[J]. 水利学报, 2002, (9): 77—82.

YANG Ling-qiang, LIAN Ji-jian, ZHANG She-rong, et al. Nonlinear static analysis of ogee-type floor of plunge pool in high dams[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, (9): 77—82.

[8] Duncan J M, Chang C Y. Non-linear analysis of stresses and strains in soil[J]. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, American Society of Civil Engineering*, 1970, 96(6): 1 629—1 653.

[9] 陈慧远. 土石坝有限元分析[M]. 南京: 河海大学出版社, 1987.