

超贫胶结材料坝非线性分析

孙明权 彭成山 陈建华 杨世锋

(华北水利水电学院水利学院 , 河南 郑州 450008)

摘要 模拟施工逐级加荷 , 计算了超贫胶结材料坝的应力和应变 , 通过“ 虚加刚性弹簧法 ”和“ 分步迭代法 ”解决了超贫胶结材料软化特性引起的负刚度问题 , 并编制了非线性有限元计算程序 , 确定了应力控制标准 , 实现了超贫胶结材料坝的非线性有限元分析。

关键词 超贫胶结材料 ; 非线性分析 ; 有限元 ; 应力水平

中图分类号 : TV64 文献标识码 : A 文章编号 : 1006-764X(2007)04-0042-04

Nonlinear analysis of over lean cemented material dam//SUN Ming-quan , PENG Cheng-shan , CHEN Jian-hua , YANG Shi-feng *Faculty of Water Conservancy , North China University of Water Conservancy and Electric Power , Zhengzhou 450008 , China*)

Abstract : The stress and strain of over lean cemented material dam were calculated by simulation of stepwise loading in construction. The virtual rigid spring method and fractional step iteration method were adopted to deal with the negative stiffness problem caused by material softening characteristic , and a nonlinear FEA program was compiled for determination of the stress control criterion.

Key words : over lean cemented material ; nonlinear analysis ; FEA ; stress level

超贫胶结材料是一种低胶凝材料用量的混凝土 , 三轴试验结果^[1]表明 , 超贫胶结材料的应力-应变关系是非线性的 , 而且具有明显的软化特性 , 在软化阶段 , 偏应力($\sigma_1 - \sigma_3$)随着轴向应变 ϵ 的增加而降低 , 以此确定的切线弹性模量是负值 , 引入“ 虚加刚性弹簧法 ”^[2]后建立了超贫胶结材料的非线性本构关系模型 , 本文在超贫胶结材料本构关系模型基础上进一步研究了非线性分析方法。

1 超贫胶结材料坝有限元分析基本理论

图 1 是采用“ 虚加刚性弹簧法 ”建立超贫胶结材料本构关系模型的应力-应变曲线示意图 , 在文献 [2] 中已经求得不同胶凝材料用量在不同围压下的双曲线③及直线②的表达式。图 1 中双曲线③的应变、应

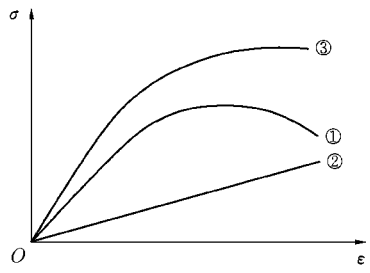


图 1 应力-应变曲线

力增量的计算是非线性的 , 而所要叠加直线②的应变增量、应力增量的计算是线性的。联系非线性计算与线性计算的纽带是应变 ϵ 相同。对应于某一确定的偏应变 , 材料的实际弹性模量 $E = E' - E_D$, 其中 E' , E_D 分别为双曲线③和直线②相应于该偏应变值的弹性模量。这样在有限元分析过程中 , 凡是与弹性模量有关的计算都要做与其相应的变化。

a. 单元应变

$$\boldsymbol{\epsilon} = (\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy})^T = (B_1, B_2, B_3, B_4) \boldsymbol{\delta}^e \quad (1)$$

应变 ϵ 相同 , 而双曲线③和直线②的应变矩阵 B 也相同 , 所以两者的 $\boldsymbol{\delta}^e$ 也相同。

b. 单元应力

$$\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})^T = D B \boldsymbol{\delta}^e \quad (2)$$

其中 D 为弹性矩阵。对于一般非线性问题 , D 随弹性模量 E 及泊松比 ν 的改变而改变。超贫胶结材料坝非线性计算中 , 认为泊松比 ν 为常数 , D 仅随弹性模量 E 的改变而改变 , 其表达式如下 :

$$D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} =$$

$$\frac{(E_1 - E_2)(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1 - \nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1 - \nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)} \end{bmatrix} =$$

$$D_1 - D_2 \quad (3)$$

式中: E_1 为双曲线③的切线模量; E_2 为直线②的切线模量, 为常数; D_1 为双曲线模型的切线模量确定的弹性矩阵; D_2 为直线模型确定的弹性矩阵, 为常量。

c. 单元刚度矩阵。对于四结点等参单元, 有

$$k = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 B^T DB |J| d\xi d\eta =$$

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 B^T D_1 B |J| d\xi d\eta -$$

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 B^T D_2 B |J| d\xi d\eta = k_1 - k_2 \quad (4)$$

式中: $|J|$ 为 Jacobi 矩阵的模; k_1 为双曲线模型确定的单元刚度矩阵; k_2 为直线模型确定的单元刚度矩阵。

d. 整体刚度矩阵

$$K = \sum_e G^T k G = \sum_e G^T (k_1 - k_2) G = K_1 - K_2 \quad (5)$$

式中: G 为单元结点转换矩阵; K_1 为双曲线模型确定的整体刚度矩阵; K_2 为直线模型确定的整体刚度矩阵。

2 超贫胶结材料坝非线性分析方法

本文所涉及到的非线性主要是由材料非线性引起的, 此类非线性问题要从数学上严格地求解是非常困难的。非线性问题的有限元分析一般是根据非线性应力-应变关系, 把它逐段地化为一系列线性问题, 用数值方法求解。本文的计算程序采用中点增量法实现。

2.1 中点增量法

由于超贫胶结材料存在负刚度问题, 在进行有限元分析时无法直接应用常规非线性分析的增量法。基于超贫胶结材料坝的有限元理论, 对中点增量法作适当修改后才能使用, 其调整后的实施过程如下:

a. 首先将全荷载分为 n 级荷载增量, 即 $R =$

$$\sum_{i=1}^n \Delta R_i。$$

b. 以第 i 级荷载增量 ΔR_i 为例, 根据双曲线③的初始应力 σ_{i-1} , 确定其弹性常数 E_{i-1} , μ_{i-1} (本文计算中泊松比 ν 为常数), 并以此形成双曲线③的整体劲度矩阵 $K_{1,i-1}$; 同时根据直线②的弹性常数形成直线模型的整体劲度矩阵 K_2 。

c. 在结构上施加荷载增量的一半 $\Delta R_i/2$, 以式

(6) 迭代求解位移增量 $\Delta \delta_{i-1/2}$:

$$K_{i-1} \Delta \delta_{i-1/2} = \Delta R_i/2$$

其中 $K_{i-1} = K_{1,i-1} - K_2 \quad (6)$

并分别计算曲线①(负刚度模型)和双曲线③(双曲线模型)的应力和应变增量, 进而累计求得加半载时的应力、应变和位移。

d. 根据加半载所求得的双曲线③的 $\sigma_{i-1/2}$ (或相应的应变), 确定弹性常数 $E_{i-1/2}$ 和 $\mu_{i-1/2}$, 再形成双曲线模型的整体劲度矩阵 $K_{1,i-1/2}$ 。

e. 在 R_{i-1} 的基础上重新施加全部荷载增量 ΔR_i , 根据式(7)迭代求解本级加载的位移增量 $\Delta \delta_i$:

$$K_{i-1/2} \Delta \delta_i = \Delta R_i$$

其中 $K_{i-1/2} = K_{1,i-1/2} - K_2 \quad (7)$

再求出曲线①和双曲线③相应的应力、应变和位移增量, 累加得到加第 i 级荷载增量 ΔR_i 时的结果。

f. 重复步骤 a~e, 可依次得到各级荷载增量下的解。

2.2 非线性方程组的求解

在中点增量法中, 方程组 $K \Delta \delta = \Delta R$ 为非线性方程组, 对超贫胶结材料, $K = K_1 - K_2$ 在应力-应变曲线下降段为负刚度矩阵, 不能直接求解这个非线性方程组, 本文提出采用迭代法求解, 迭代公式为

$$K_1 \Delta \delta_n = K_2 \Delta \delta_{n-1} + \Delta R \quad (8)$$

式中: K_1 为非线性计算中由双曲线模型确定的整体刚度矩阵; K_2 为非线性计算中由直线模型确定的整体刚度矩阵; $\Delta \delta$ 为结点位移增量; ΔR 为结点荷载增量。

迭代过程如下: ①先取 $\Delta \delta_0 = 0$, 代入式(8), 由 $K_1 \Delta \delta_1 = \Delta R$ 解出 $\Delta \delta_1$ 作为第一次近似; ②把 $\Delta \delta_1$ 代入式(8), 求得 $\Delta R^* = \Delta R + K_2 \Delta \delta_1$, 由 $K_1 \Delta \delta_2 = \Delta R^*$ 解出 $\Delta \delta_2$ 作为第二次近似; ③重复上述步骤, 直至 $\Delta \delta_n \approx \Delta \delta_{n-1}$, 即当位移增量的相对误差 $\frac{\Delta \delta_n - \Delta \delta_{n-1}}{\Delta \delta_n}$ 在允许的精度范围内时, 可以认为 $\Delta \delta_n$ 就是非线性方程组的解。

3 超贫胶结材料坝非线性有限元程序实现

为适应超贫胶结材料存在负刚度问题的本构关系, 笔者用 Fortran Power Station 4.0 再一次开发了超贫胶结材料坝有限元分析程序, 采用上述调整后的中点增量法来处理材料的非线性问题, 根据施工先后顺序逐级施加荷载, 计算坝体及坝基不同时期各结点的水平位移及竖直位移、各单元的应力分量及主应力的方向和大小。

4 计算实例

4.1 计算控制标准

考虑在满足坝体坝踵处不出现拉应力(或拉应力很小)条件下坝趾处单元的应力水平不超过 0.8 为控制标准。其中,应力水平(又称剪应力比)是实际主应力差和破坏时主应力差的比值,反映了实际剪应力与材料抗剪强度的比值关系,即材料强度的发挥程度。应力水平的表达式为

s = (σ1 - σ3) / (σ1 - σ3)λ (9)

式中:σ1 - σ3 为单元的偏应力 (σ1 - σ3)λ 为材料的破坏偏应力,其表达式[3]为

(σ1 - σ3)λ = (2ccosφ + 2σ3sinφ) / (1 - sinφ) (10)

在本文中,由于采用了“虚加刚性弹簧法”,其表达式变为

(σ1 - σ3)λ = (2c* cosφ* + 2σ3* sinφ*) / (1 - sinφ*) - (σ1 - σ3)2f (11)

式中:σ3* 为拟合双曲线③相应的小主应力;c*, φ* 为拟合双曲线③相应的黏聚力和内摩擦角 (σ1 - σ3)2f 为直线②相应的破坏偏应力,在胶凝材料用量分别为 30 kg/m³、50 kg/m³ 和 60 kg/m³ 时 (σ1 - σ3)2f 分别为 1.604 MPa、2.287 MPa 和 3.944 MPa。

4.2 计算模型和参数

取胶凝材料用量为 50 kg/m³ 的超贫胶结材料(简称 C50)作为坝体填筑料,为了分析问题方便,在保证对计算结果影响不大的前提下,本文建立计算模型时,作了以下简化:①计算中,坝顶宽取定值 5 m,不作为变化因素考虑;②不考虑上游面设置的混凝土防渗面板,而将水压力直接作用在上游坝面上;③根据超贫胶结材料坝剖面形式研究得到的合理剖面[1],上下游坡比分别取 1:0.40 和 1:0.70;④计算范围为坝体及部分地基,地基向坝体上下游侧及地基深度方向各取相应于 1 倍坝高的范围,计算荷载取自重 + 上游静水压力,水位取与坝顶齐平;⑤计算取单宽坝体进行平面应变分析,考虑超贫胶结材料的软化过程,按非线性问题处理;⑥计算过程中,坝基不参与非线性迭代。

坝体和地基参数见表 1。

表 1 材料参数

材料	密度 ρ/(t·m ⁻³)	φ/(°)	c/kPa	k	n	R _f	μ
C50	2.273	47.15	504.90	4897.79	0.44	0.88	0.29
坝基	1.979			1.0×10 ⁵	0.00	0.00	0.21

4.3 计算结果分析

控制坝体坝趾处应力水平不超过 0.8,得到 C50 的建坝高度应控制在 43 m 以内。

4.3.1 坝体应力分布

大主应力分布见图 2,小主应力分布见图 3(图中数值为正代表压应力,为负代表拉应力,坝高 43 m)。

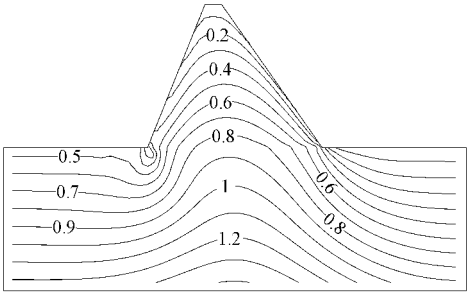


图 2 大主应力等值线(单位:MPa)

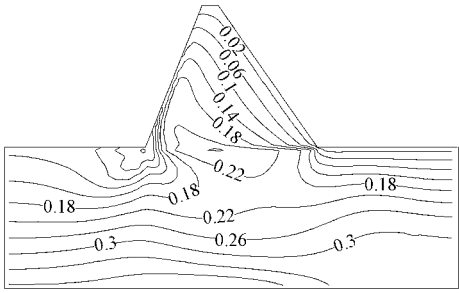


图 3 小主应力等值线(单位:MPa)

坝体大主应力分布趋势与一般堆石坝大致相同,但高应力区略向下移动,在坝基面处。坝基面上的大主应力分布较为均匀,坝体的 σ1max = 0.83 MPa,出现位置为坝基面中部。

小主应力在下游坝坡处其等值线基本与坝坡平行,在坝踵处出现局部拉应力,但数值很小,远小于其 90 d 龄期的抗拉强度 0.86 MPa。

用非线性分析方法得出的大主应力图很好地反映了坝体及地基的受力情况,所反映的应力分布规律更符合实际情况,计算结果更准确。

4.3.2 坝体应力水平

应力水平 s 反映了材料剪切强度的发挥程度, s ≥ 1 说明单元已经剪切破坏。坝体应力水平等值线见图 4(坝高 43 m)。应力水平等值线分布情况表

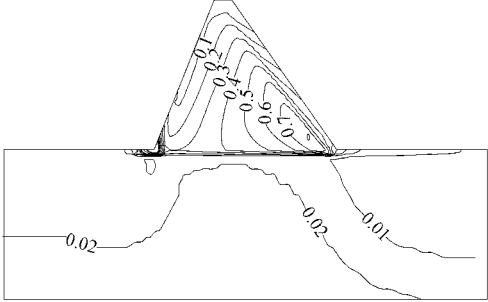


图 4 坝体应力水平等值线

明 超贫胶结材料坝的应力水平最大值出现在坝趾及坝踵处 ,坝踵处由于局部拉应力导致应力水平 $s \geq 1$,而坝趾处的应力水平最大值小于 0.8 ,说明所设坝体剖面不会产生剪切破坏。

5 结 语

本文通过数学推导和计算程序编制 ,实现了超贫胶结材料坝的非线性有限元分析 ,通过“ 虚加刚性弹簧法 ”和“ 分步迭代法 ”解决了超贫胶结材料的软化特性引起的负刚度问题 ,并编制了非线性有限元计算程序 ,确定了应力控制标准 ,对胶凝材料用量为

50 kg/m³ 的超贫胶结材料坝进行了非线性分析 ,所得应力及应力水平分布规律合理 ,为超贫胶结材料坝非线性有限元分析奠定了基础。

参考文献 :

[1] 张镜剑 ,孙明权 .超贫胶结材料土石面板坝研究阶段报告 R]. 郑州 :华北水利水电学院 ,2002.
[2] 孙明权 ,杨世锋 ,张镜剑 .超贫胶结材料本构模型 J]. 水利水电科技进展 ,2007 27(3) 35-37.
[3] 郭诚谦 ,陈慧远 .土石坝[M]. 北京 :水利电力出版社 ,1992 584-589.

(收稿日期 2007-04-12 编辑 :熊水斌)

(上接第 39 页)

表 1 不同倾斜基底护岸稳定性计算结果

基底倾斜方向	基底宽度/m	基底前趾厚度/m	基底后趾厚度/m	基底前趾长度/m	基底后趾长度/m	墙背倾角/(°)	抗滑稳定 $g_1(x)$ /kN	抗倾稳定 $g_2(x)$ (kN·m)	最大基底压力/kPa	墙身应力/kPa
平 基 底	3	0.4	0.4	0.2	0.2	73.34	4.830	150.616	38.076	42.829(压)
基底外倾	3	0.5	0.4	0.2	0.2	73.34	0.299	147.331	40.148	40.510(压)
基底内倾	3	0.4	0.5	0.2	0.2	73.34	9.904	158.082	40.958	42.829(压)
允 许 值							≥ 0	≥ 0	200	120(拉)

由表 1 计算结果可以看出 ,对于基底内倾的情况 , $g_1(x) = 9.904$ kN ,明显大于基底外倾时的 0.299 kN ,表明基底内倾有利于提高结构的抗滑稳定性 ,基底水平时 ,其抗滑稳定性介于内倾与外倾基底两者之间 ,而抗倾稳定性富裕度较大 ,一般不起控制作用。由此可见基底内倾的稳定性总体来说比基底外倾要好 ,在进行重力式护岸结构设计时 ,以采用内倾基底护岸结构更为经济合理。但需要注意的是 ,基底的倾斜角度一般不宜过大 ,以免挡土墙连同地基土体一起滑动 ,对于土基上的护岸结构 ,基底倾

角一般宜控制在 10°以内^[4]。

参考文献 :

[1] JTJ 290—98 重力式码头设计与施工规范 S].
[2] 陈忠达 .公路挡土墙设计[M]. 北京 :人民交通出版社 ,1999 70-101.
[3] JTJ 300—2000 ,港口及航道护岸工程设计与施工规范 S].
[4] 交通部第二公路勘察设计院 .路基[M]. 北京 :人民交通出版社 ,2001 591-604.

(收稿日期 2006-01-13 编辑 :熊水斌)

(上接第 41 页)

表 3 超贫胶结材料坝的上下游坡比

胶凝材料用量 C (kg·m ⁻³)	稳定临界坡比	上游坡比	下游坡比
40	1:0.65	1:0.70	1:0.70
50	1:0.32	1:0.40	1:0.60
60	1:0.25	1:0.30	1:0.65
70	1:0.12	1:0.20	1:0.70

c. 对于 40 kg/m³ < C < 70 kg/m³ 的超贫胶结材料坝 ,坝体剖面既要考虑坝体整体稳定和坝体应力状况 ,又要考虑坝坡的自身稳定及坝体局部抗剪强度 ,坝体剖面应介于土石坝剖面 and 混凝土坝剖面之间。

由上述分析 ,考虑 $C \leq 40$ kg/m³ 时 ,超贫胶结材料坝采用上、下游等坡比的土石坝剖面 ,而 $C \geq 70$ kg/m³ 时 ,采用上游较陡而下游较缓的、类似混凝土重力坝的剖面形式。

根据表 1 中计算的坝体稳定临界坡比 ,拟定超贫胶结材料坝的坝体剖面形式见表 3。

4 结 语

本文对超贫胶结材料坝的剖面形式进行了研究 ,通过对不同胶凝材料用量的超贫胶结材料坝进行坝坡稳定分析 ,得出胶凝材料用量与坝坡稳定坡比值之间基本呈双曲线关系 ,提出了针对不同胶凝材料含量超贫胶结材料坝的“ 三段设计法 ”,即 :超贫

胶结材料坝胶凝材料用量小于 40 kg/m³ 时 ,控制坝体剖面的是坝坡自身稳定性能 ,更趋于土石坝剖面 ;胶凝材料用量介于 40 ~ 70 kg/m³ 之间的超贫胶结材料坝 ,坝体剖面既有混凝土重力坝的特征又有土石坝的特征 ;当胶凝材料用量为 70 kg/m³ 以上时坝体剖面则属于重力坝剖面 ,这为进一步研究超贫胶结材料坝的剖面设计提供了指导性建议。

参考文献 :

[1] SL319—2005 混凝土重力坝设计规范 S].
[2] 陈胜宏 .水工建筑物[M]. 北京 :中国水利电力出版社 ,2004 135-136.
[3] SL274—2001 碾压式土石坝设计规范 S].

(收稿日期 2007-02-15 编辑 :熊水斌)