

# 大型围堰平面应变问题的一种算法<sup>\*</sup>

龙 江 孙明光

(中山大学应用力学与工程系, 广州 510275)

**摘 要** 对大型围堰施工过程采用逐级施加载荷进行模拟, 支配方程在空间上采用有限元法离散, 配合载荷的逐级施加用静态近似求解. 对土体的应力应变关系, 采用邓肯— 一张的非线性弹性模型, 用于其增量型应力应变关系的切线模量及泊松比. 考虑混凝土防渗墙与土体的相互作用, 在接触面上采用了古德曼单元. 计算了堰体与防渗墙的位移及应力, 结果在定性上是符合实际的.

**关键词** 围堰, 分级加载, 非线性弹性模型, 接触单元, 防渗墙, 应力

**分类号** O 317. 2, TV 698. 12

大型围堰是大型水电水利工程水下施工的临时挡水建筑物, 它的设计要求虽不如永久性建筑物那样高, 但大型围堰施工是决定工程成败的重要因素, 特别是带混凝土双防渗墙的围堰, 在葛洲坝工程中取得成功之后, 得到了越来越多的应用. 对于围堰数值分析方法, 文 [1] 给出了一般的说明. 而针对三峡二期围堰工程, 进行了具体的计算<sup>[2]</sup>, 对围堰数值分析的近期进展作了评论<sup>[3]</sup>, 并给出了葛洲坝工程中下游防渗墙位移的计算值与实测值的一个比较, 但计算值偏大. 因此, 在墙底部设置 10~ 20 cm 的低模量沉渣单元, 结果将会更合乎实际.

本文将给出一个计算方法, 在空间上采用有限元离散, 在接触面上用古德曼单元, 配合载荷的逐级施加, 采用增量式应力应变关系, 其切线模量及泊松比采用邓肯— 一张模型, 最后得出围堰的位移及应力计算结果. 过去很多结果认为, 防渗墙的力学特性是接近悬臂梁的, 故位移及应力都较大. 但本文的结果显示, 由于堰体施工过程中的历史影响, 以及防渗墙上部的下游侧的堰体的重度特别大, 使得防渗墙的水平位移有点像“二端简支梁”的位移, 即水平“刚度”增大, 从而减少了防渗墙底部的最大拉应力及压应力.

## 1 有限元计算模式

采用三角单元离散, 对每一结点, 水平位移增量  $\Delta u$ , 垂直位移增量  $\Delta v$  为未知量. 有限单元法的计算格式<sup>[4]</sup>和单元刚度矩阵分别为

$$[K] \begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (R - R_r)_{\text{水平}} \\ (R - R_r)_{\text{垂直}} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

\* 国家自然科学基金 (19572077) 资助项目

收稿日期: 1996-01-30 龙江, 男, 24 岁, 研究生

$$[K] = \begin{bmatrix} T(bb+ & T_{cb}c_s) & T(T_1b_{-a+} & T_{cb}b_s) \\ T(T_{cb}b+ & T_{bb}b_s) & T(T_{cb}b+ & T_{bb}b_s) \end{bmatrix} \quad (2)$$

这里

$$T = \frac{E(1-\nu)}{4(1+\nu)(1-2\nu)A}, \quad T_1 = \frac{\nu}{1-2\nu}, \quad T_2 = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}, \quad d = \frac{k\Delta t}{4V_w A}$$

$$E = \left[ 1 - \frac{R_f(1-\sinh)(e_1-e_3)}{2c \cosh 2e_3 \sinh} \right]^2 kpa \left( \frac{e_3}{pa} \right)^n \quad (3)$$

$$\nu = \frac{G-F \lg(e_3/pa)}{(1-A)^2} \quad (4)$$

$$A = \left\{ \frac{(e_1-e_3)d}{kpa \left( \frac{e_3}{pa} \right)^n \left[ 1 - \frac{R_f(e_1-e_3)(1-\sinh)}{2c \cosh 2e_3 \sinh} \right]} \right\}$$

其中  $R$  为结点的载荷,  $R_t$  表示  $t-\Delta t$  时刻以前各时刻发生的位移所平衡了的载荷。

对于接触面上的古德曼单元, 是一个四节点无厚度单元, 节点未知量为位移增量<sup>[1]</sup>。可按节点平衡条件, 与普通单元一样, 将各个古德曼单元刚度矩阵叠加到总刚度矩阵中去, 以求出其节点的位移, 再由位移求出接触面上的应力。古德曼单元的刚度矩阵有形式:

$$[K] = \frac{L}{6} \begin{bmatrix} 2ks & & & & & & & \\ 0 & 2kn & & & & & & \\ ks & 0 & 2ks & & & & & \\ 0 & kn & 0 & 2kn & & & & \\ -ks & 0 & -2ks & 0 & 2ks & & & \\ 0 & -kn & 0 & -2kn & 0 & 2kn & & \\ -2ks & 0 & -ks & 0 & ks & 0 & 2ks & \\ 0 & -2kn & 0 & -kn & 0 & kn & 0 & 2kn \end{bmatrix} \quad \text{对 称} \quad (5)$$

## 2 模拟加载次序

为模拟围堰施工过程中结构的变形及受力的变化, 我们将加载过程分割为 24 段施加。计算的网格共有 579 个单元, 623 个节点。所有的四边形单元自动划分为三角形单元。

加载过程如下: ① 抛填堆石体至 5.64 m; ② 抛填过渡料至 5.64 m; ③ 抛填风化砂及右上角石渣至 5.64 m; ④ 抛填上游坡石渣至 5.64 m; ⑤ 水上碾压至 5.73 m; ⑥ 在 5.73 m 平台建上游墙; ⑦ 碾压填筑子堤至 5.83.5 m; ⑧ 基坑抽水, 由 5.69 m 降至 5.40 m, 上游水位 5.75 m; ⑨ 在 5.73 m 平台建下游墙; ⑩ 碾压填筑至坝顶 5.88.5 m; ⑪ 围堰进入运行期, 两墙分担水载荷。

水载荷分三级

| 上游水位   | 墙间水位   | 下游水位   |
|--------|--------|--------|
| 5.80 m | 5.40 m | 5.30 m |
| 5.85 m | 5.40 m | 5.15 m |
| 5.85 m | 5.40 m | 5.0 m  |

在第③步之前, 结构只受垂向的外载荷, 但在第⑧步之后, 由上下游水位差而形成了侧向的载荷, 受力复杂化。

## 3 计算程序处理的两点说明

不同作者对计算程序的处理, 会有很多的不同。这里不加详细的说明而仅对我们的程序处理作两点说明:

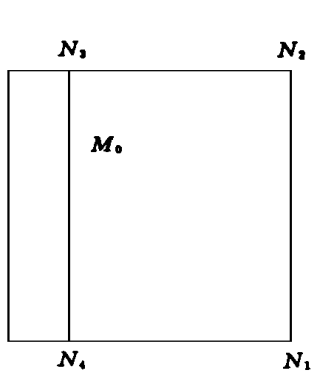


图 1 特殊单元

Fig. 1 Special element

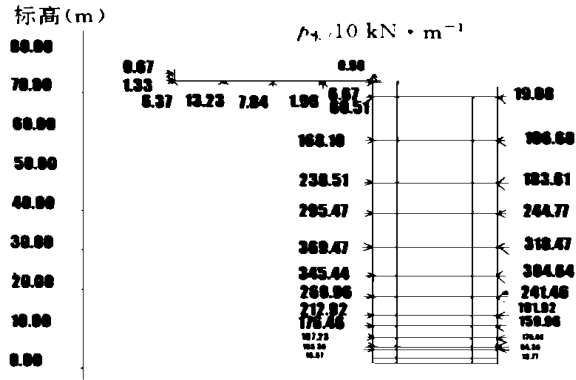


图 2 水载荷的施加

Fig. 2 Water load added

(1)在计算中,涉及到堰体普通单元到古德曼单元性质的转换.为此,本文引入没有厚度的普通单元.如图 1 所示.节点  $N_1$  和节点  $N_4$  坐标相同,节点  $N_2$  和  $N_3$  坐标相同.当单元  $M_0$  是普通性质单元时,节点  $N_1$  和  $N_2$  分别用  $N_3$  和  $N_4$  代替.除相应的对角线元素取为 1 000(非零)外,单元刚度矩阵内其它元素取为零,以便迭加入总刚度矩阵中计算可解.当打入防渗墙后,无厚度单元性质发生变化,此时,节点  $N_1$  和  $N_4$  分离, $N_2$  和  $N_3$  分离,单元左右两边分别是性质相差很大的材料.故此时单元的刚度矩阵采用古德曼单元刚度矩阵形式,各单元分别计算完后,叠加到总刚度矩阵中去.

(2)对于防渗墙的受力来说,主要影响是上下游水位差形成的侧压力,以及下游水位下降后,下游堰体压缩下沉,土体的部份应力通过摩擦阻力传给防渗墙,使防渗墙偏心受压.如在第⑧级加载时,上游水位为 75 m,下游水位为 69 m,等效的节点载荷如图 2 所示.上游堰体的湿化影响可略去,但下游堰体中水位下降的部分,其堰体材料则由饱态转为湿态,计算参数要改变.

### 4 计算结果及讨论

计算得到堰体的水平位移、垂向位移、大主应力、小主应力.以及得到防渗墙的水平位移、垂向位移和上(下)游防渗墙的水平应力、垂向应力、剪应力.

由图 3(a)所示,堰体下游部份的水平位移向后,上游部份向前,这是合理的.而由于施工过程及材料重度分布不同的原因,在下游堰体的上部(即等值线 30 的内部)没有形成更大的位移,反而减小一些,亦即形成了“简支梁”的另一支承端,这对减小防渗墙最大应变及应力都有很大的影响.堰体垂向位移最大值发生在堰体中部偏上位置,最大值达 80 cm.堰体大主应力,为  $1\,300\text{ kN/m}^2$  多,发生在堰体底中部,这显然主要是自重的影响,其等值线几乎平行堰底,这是合理的.

在图 3(b~d)中,可以看出上下游防渗墙图形主要特点像弯曲的悬臂梁,但在上部又受到堰体的约束,又有“一点”像两端受约束的简支梁.上游墙的水平位移略大于下游墙,最大值在 40 cm 左右.由于上下游堰体垂向位移在防渗墙附近没有太大的差别,因而造成上下

游防渗墙的垂向位移十分接近,最大值发生在墙中部偏上,只有 80 cm 左右。

由图 3(b)所示,上下游防渗墙的水平应力分布,基本特点与均布载荷下的悬臂梁剪力分布相近,最大值为  $1160 \text{ kN/m}^2$ ,在上游墙的底部附近。而由于墙底部附近的两侧,一边受拉,一边受压,特别是受到岩基的作用,故上下游防渗墙的下游侧的水平应力都比较大。

而在图 3(c)中示出了上下游防渗墙的垂向应力的分布。对于二墙,它们的二侧垂向应力分布基本上是相近的。这主要由自重引起的。在墙底部的两侧,由于弯曲影响一面受拉,一面受压,故下游侧的压应力较大,最大值发生在上游墙的下游侧,达  $5000 \text{ kN/m}^2$  左右。除自重影响外,墙两侧还受到土体压缩产生的摩擦力的影响,因而使墙所受的压应力远大于自重产生的压应力,此外,由于弯曲影响,在上游墙的上游侧的底部,存在拉应力区域。

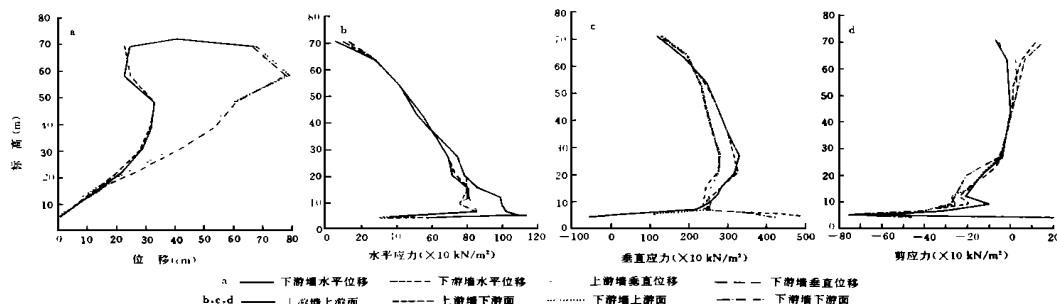


图 3 堰体水平位移和防渗墙位移与应力图

Fig. 3 Horizontal displacement of cofferdam and displacement and stress of water-tight core wall

图 3(d)给出剪应力的分布。无论是上游墙或下游墙,还是它的上游侧或下游侧,由于受到土体下沉影响,从而造成正的剪应力分布。但由于弯曲影响,墙向下游偏移,又造成负的剪应力分布。两种作用互相抵消,主要的影响出现在墙的底部,该部份土体下沉量小,而弯曲影响较大,故显示较大的负的剪应力分布。

从以上总的情况看,主要较大应力区是在墙的底部,由于弯曲影响,岩基与沉渣单元影响,在该处出现应力的“边界层现象”,故最大应力的出现,最主要因素是水平力的大小,岩基影响,其次是土体下沉的影响。这一点我们将进一步加予研究。

致谢: 广东省水利水电科学研究所杨光华高级工程师在本文计算过程中的帮助及建议。

## 参 考 文 献

- 1 华东水利学院. 土工原理与计算. 北京: 水利出版社, 1980. 296~ 319
- 2 殷宗泽, 李宏. 三峡二期围堰混凝土防渗墙的受力分析. 河海大学学报, 1987, 15(1): 51~ 57
- 3 朱百里, 沈珠江. 计算土力学. 上海: 上海科技出版社, 1990. 294~ 311
- 4 殷宗泽, 徐鸣江, 朱泽民. 饱和土平面固结问题有限单元法. 华东水利学院学报, 1978(1): 71~ 82

# An Algorithm for the Plane Strain Problem of Huge Cofferdams

Long Jiang<sup>\*</sup> Sun Mingguang

**Abstract** For simulating construction procedure of huge cofferdam, the load is added stage by stage. The solving process involves the finite element programming in space and the time-stepping scheme with static approximation associated with the stage load. The stiffness matrix in each increment analysis is not changed. The stress-strain increment dependence adopts a nonlinear model, the modulus and Poisson's ratio given by Duncan-Zhang are expressed. Considering the interaction between concret water-tight core wall and soil, a Goodman contact element B given on the contact surface between wall and soil. The displacement and stress of the body of cofferdam and the water-tight core wall are given. The results consist with practice qualitatively.

**Keywords** cofferdam, load added stage by stage, nonlinear elastic model, contact element, water-tight core wall, stress

· 简 讯 ·

## 1995年度中山大学学报优秀论文评选结果

1996年 12月,中山大学“理科学报优秀论文评选委员会”对 1995年度发表在《中山大学学报(自然科学版)》的论文进行评选,共评出 5篇优秀论文,中山大学对获奖论文的作者和责任编辑分别给予了奖励.获奖名单如下:

《广义导纳圆》(作者:范仰才、李景德、符德胜;责任编辑:张楚民)

《多维门限自回归序列的混合性》(作者:宋心远、邓集贤、陈少玲;责任编辑:陈曼华)

《黄茅海河口小尺度动力结构及其沉积作用》(作者:吴超羽;责任编辑:秦社彩)

《河南西峡恐龙 18s rDNA 片段质疑》(作者:屈良鹄、施苏华、周慧;责任编辑:缪汝槐)

《3-羟基-1,8-萘二甲酸酐的氧化偶合反应》(作者:刘汉标、梁智博、许遵乐;责任编辑:朱娴)

(芊子)

<sup>\*</sup> Department of Applied Mechanics and Engineering, Zhongshan University, Guangzhou 510275