

# 碾压混凝土坝层面影响带渐变规律分析模型<sup>\*</sup>

顾冲时<sup>1</sup>, 宋敬<sup>1</sup>, 方海挺<sup>2</sup>

(1. 河海大学 水利水电工程学院, 南京 210098;  
2. 浙江省水利水电勘测设计院, 杭州 310002)

(谢和平推荐)

**摘要:** 针对碾压混凝土坝层面影响带具有渐变特性, 基于复合材料分析思想, 利用串联和并联模型, 建立了碾压混凝土坝层面影响带渐变规律分析模型; 并根据模型的不同状况, 提出了确定层面影响带厚度瞬时弹性模量、延迟弹性模量以及粘性系数等的方法, 揭示了决定层面影响带性质的主要计算参数的渐变规律, 表征了层面的渐变特性; 在上述研究的基础上, 建立了相应的三维粘弹性分析模型, 研制了相应的各部分分析程序; 实例表明, 提出的确定层面影响带主要计算参数的方法以及建立的分析模型比较好地反映了碾压混凝土坝的工作性态。

**关键词:** 碾压混凝土坝; 层面影响带; 计算参数; 渐变规律; 粘弹性模型

**中图分类号:** T642.3      **文献标识码:** A

## 引 言

由于碾压混凝土坝在筑坝时层层碾压, 坝身存在众多的水平施工层面, 层与层之间胶结的好坏, 直接影响到坝的质量。与此同时, 层与层之间碾压过程中必然会产生一个过渡区(以下将本身的层与层的施工层面和过渡区合称为层面影响带), 而在这过渡区中, 碾压混凝土坝的性质也是一个渐变区。以往的研究, 注重于层与层之间的施工层面的性质研究, 而对于层面影响带的研究很少, 而事实上层面影响带对坝身的影响是显然的<sup>[1]</sup>。本文利用试验研究结果及理论分析, 深入探讨了碾压混凝土坝层面影响带中计算参数的渐变规律; 并基于碾压混凝土层的串联和并联特性, 研究并提出了确定碾压混凝土坝层面影响带的厚度、瞬时弹性模量、延迟弹性模量以及粘性系数等计算参数的方法; 在此基础上, 建立了碾压混凝土坝三维粘弹性分析模型, 研制了相应的有限元分析程序。

## 1 碾压混凝土坝层面影响带渐变规律分析模型

设碾压混凝土层厚度为  $B$ , 其层面影响带的厚度为  $b_a$ , 碾压混凝土本体的厚度  $b_c$ , ( $b_c = B - b_a$ ), 图 1 为碾压混凝土层结构模型。在分析时, 假定碾压混凝土层在垂直和平行层面方

\* 收稿日期: 2005\_05\_15; 修订日期: 2006\_06\_25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50579010); 国家自然科学基金(重点)资助项目(50539010); 973 计划基金资助项目(2002CB412707); 水利部“948”基金资助项目(CI200612)

作者简介: 顾冲时(1962—), 男, 江苏启东人, 教授, 博士, 博士生导师(联系人, E-mail: damsaf@ sian.com)。

向的瞬时综合弹性模量分别为  $E_{v1}$ 、 $E_{l1}$ ，泊松比分别为  $\mu_{v1}$ 、 $\mu_{l1}$ ，代表流变特性的综合延迟弹性模量分别为  $E_{v2}$ 、 $E_{l2}$ ，粘性系数分别为  $\eta_{v2}$ 、 $\eta_{l2}$ ，碾压混凝土本体的瞬时弹性模量为  $E_{c1}$ ，泊松比  $\mu_{c1}$ 、代表流变特性的延迟弹性模量为  $E_{c2}$ 、粘性系数为  $\eta_{c2}$ ；碾压混凝土层面影响带中距层面影响带中心层  $x$  处的层面为各向同性薄层（但沿  $x$  方向，即层面厚度方向，不同的  $x$  对应的各层的计算参数不同），其瞬时弹性模量为  $E_{a1}(x)$ 、泊松比  $\mu_{a1}(x)$ 、代表流变特性的延迟弹性模量为  $E_{a2}(x)$ 、粘性系数为  $\eta_{a2}(x)$ 。此外，在建立碾压混凝土层粘弹性模型时，假定碾压混凝土层、本体以及层面影响带等部位粘性流动特性可用广义 Kelvin 模型模拟，见图 2（其中当  $i = v, l$ ，分别对应碾压混凝土层垂直层面和平行于层面方向的广义 Kelvin 模型； $i = c, a$  分别对应碾压混凝土层本体和层面影响带的广义 Kelvin 模型）。

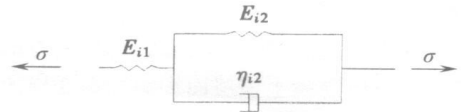
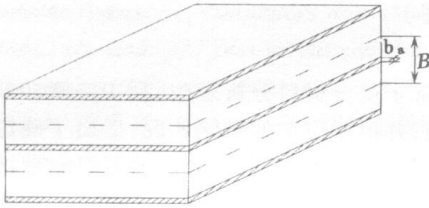


图 1 碾压混凝土层结构模型

图 2 广义 Kelvin 模型

对于碾压混凝土层，可将视为一种复合材料，其中碾压混凝土层本体可视为各向同性体材料，而层面影响带可视为垂直于层面方向渐变的材料，并且其渐变以层面影响带中心层为对称而两侧渐变。由复合材料分析思想，可建立垂直于层面方向的串联模型和平行于层面方向的并联模型，据此确定碾压混凝土层、本体以及层面影响带各部分计算参数之间的分析模型。

当碾压混凝土层垂直层面方向均匀拉伸时，则本体和层面影响带的横截面上具有相同的应力，设应力为  $\sigma$ ，则根据串联模型<sup>[2,3]</sup>，本体和层面影响带的伸长量  $\Delta b_c$  和  $\Delta b_a$  分别为

$$\begin{cases} \Delta b_c = \left[ \frac{\sigma}{E_{c1}} + \frac{\sigma}{E_{c2}}(1 - e^{-\eta_{c2}/E_{c2}t}) \right] b_c, \\ \Delta b_a = 2 \int_0^{b_a/2} \left[ \frac{\sigma}{E_{a1}(x)} + \frac{\sigma}{E_{a2}(x)}(1 - e^{-\eta_{a2}(x)/E_{a2}(x)t}) \right] dx. \end{cases} \quad (1)$$

则碾压混凝土层的总伸长量  $\Delta B$  为

$$\Delta B = \Delta b_c + \Delta b_a = \left\{ \left[ \frac{1}{E_{c1}} + \frac{1}{E_{c2}}(1 - e^{-\eta_{c2}/E_{c2}t}) \right] b_c + 2 \int_0^{b_a/2} \left[ \frac{1}{E_{a1}(x)} + \frac{1}{E_{a2}(x)}(1 - e^{-\eta_{a2}(x)/E_{a2}(x)t}) \right] dx \right\}. \quad (2)$$

此外，在垂直层面均匀拉伸荷载作用下，碾压混凝土层用综合等效参数可表示为

$$\Delta B = \sigma \left[ \frac{1}{E_{v1}} + \frac{1}{E_{v2}}(1 - e^{-\eta_{v2}/E_{v2}t}) \right] B. \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)得到碾压混凝土层、本体以及层面影响带等各部分计算参数的分析模型为

$$\left[ \frac{1}{E_{v1}} + \frac{1}{E_{v2}}(1 - e^{-\eta_{v2}/E_{v2}t}) \right] B = \left[ \frac{1}{E_{c1}} + \frac{1}{E_{c2}}(1 - e^{-\eta_{c2}/E_{c2}t}) \right] b_c + 2 \int_0^{b_a/2} \left[ \frac{1}{E_{a1}(x)} + \frac{1}{E_{a2}(x)}(1 - e^{-\eta_{a2}(x)/E_{a2}(x)t}) \right] dx. \quad (4)$$

由式(4)得到层面影响带的厚度  $b_a$  以及瞬时弹性模量  $E_{a1}(x)$ 、延迟弹性模量  $E_{a2}(x)$ 、粘性系数  $\eta_{a2}(x)$ 。同理根据并联模型<sup>[2,3]</sup>，可得到并联模型下碾压混凝土层、本体以及层面影响带

等各部分计算参数的分析模型为

$$B \left[ \frac{1}{E_{11}} + \frac{1}{E_{12}}(1 - e^{-\eta_{12}/E_{12}}) \right] = b_c \left[ \frac{1}{E_{c1}} + \frac{1}{E_{c2}}(1 - e^{(-\eta_{c2}/E_{c2})t}) \right] + 2 \int_0^{b_a/2} \left\{ 1 \left[ \frac{1}{E_{a1}(x)} + \frac{1}{E_{a2}(x)}(1 - e^{(-\eta_{a2}(x)/(E_{a2}(x)))t})} \right] \right\} dx \quad (5)$$

由式(5)同样可得到层面影响带的厚度  $b_a$  以及瞬时弹性模量  $E_{a1}(x)$ 、延迟弹性模量  $E_{a2}(x)$ 、粘性系数  $\eta_{a2}(x)$ 。

对于碾压混凝土层的  $E_{v1}$ 、 $E_{11}$ 、 $E_{v2}$ 、 $E_{12}$ 、 $\eta_{v2}$ 、 $\eta_{12}$  以及本体的  $E_{c1}$ 、 $E_{c2}$ 、 $\eta_{c2}$  等计算参数都可通过试验比较容易确定;此外,对于碾压混凝土层面影响带的中心层的瞬时弹性模量  $E_{a1}(0)$ 、延迟弹性模量  $E_{a2}(0)$ 、粘性系数  $\eta_{a2}(0)$  也可通过试验得到(一般可取层面影响带中对应参数的最小值)<sup>[4]</sup>。下面重点分析层面影响带厚度  $b_a$ 、瞬时弹性模量  $E_{a1}(x)$ 、延迟弹性模量  $E_{a2}(x)$ 、粘性系数  $\eta_{a2}(x)$  的具体确定方法。

## 2 碾压混凝土坝层面影响带厚度 $b_a$ 及瞬时弹性模量 $E_{a1}(x)$

当  $t = 0$  时,即加载瞬时,由式(1)可得  $\Delta b_c$ 、 $\Delta b_a$  为

$$\Delta b_c = \frac{\sigma_b}{E_{c1}}, \quad \Delta b_a = 2 \int_0^{b_a/2} \frac{\sigma}{E_{a1}(x)} dx \quad (6)$$

则在  $t = 0$  碾压混凝土层的总伸长量  $\Delta B$  为

$$\Delta B = \Delta b_c + \Delta b_a = \sigma \left[ \frac{b_c}{E_{c1}} + 2 \int_0^{b_a/2} \frac{1}{E_{a1}(x)} dx \right] \quad (7)$$

在  $t = 0$  时串联模型下由式(3)可得

$$\Delta B = (\sigma/E_{v1})B \quad (8)$$

将式(7)代入式(8)得到

$$\frac{B}{E_{v1}} = \frac{b_c}{E_{c1}} + 2 \int_0^{b_a/2} \frac{1}{E_{a1}(x)} dx \quad (9)$$

从式(9)可以看出,对于一定的碾压层,  $b_a$  主要与  $E_{c1}$ 、 $E_{v1}$  以及  $E_{a1}(x)$  有关,尤其是与  $E_{a1}(x)$  的变化规律有关。

同理根据并联模型,可得到并联模型下  $t = 0$  时刻碾压混凝土层的弹性模量  $E_{11}$  与  $E_{c1}$  和  $E_{a1}(x)$  的关系为

$$E_{11}B = E_{c1}b_c + 2 \int_0^{b_a/2} E_{a1}(x) dx \quad (10)$$

同样,由式(10)可得到层面影响带的厚度  $b_a$  以及弹性模量  $E_{a1}(x)$ 。

由式(9)和式(10)表明,影响层面影响带厚度  $b_a$  及瞬时弹性模量  $E_{a1}(x)$  的主要因素有  $E_{v1}$ 、 $E_{11}$ 、 $E_{c1}$ ;试验研究表明: $E_{v1}$ 、 $E_{11}$ 、 $E_{c1}$  可通过试验比较容易确定,同时  $E_{a1}(x)$  的取值范围也较为明确<sup>[5]</sup>,  $E_{a1}(x)$  的取值范围的上限为  $E_{c1}$ , 其下限为  $E_{a1}(0)$ , 即

$$E_{a1}(0) \leq E_{a1}(x) \leq E_{c1} \quad (11)$$

式(11)中,当  $x = 0$  时,层面影响带在该处的弹性模量为  $E_{a1}(0)$ , 当  $x = b_a/2$  时,则层面影响带在该处的弹性模量为  $E_{c1}$ 。

对于不同的  $E_{a1}(x)$  的变化规律,  $b_a$  也不同,因此,当  $E_{a1}(x)$  变化规律确定以后,可方便地确定  $b_a$ ;通常情况下,可假定  $E_{a1}(x)$  按某一些变化规律(如线性、对数、幂级数等型式),然后根据式(9)、式(10)求得  $b_a$ ,若根据式(9)、式(10)求得的  $b_a$  接近,满足计算精度要求,则可以认为

$E_{a1}(x)$  假定成立,  $b_a$  即为所要确定的层面影响带的厚度。

### 3 碾压混凝土坝层面影响带延迟弹性模量 $E_{a2}(x)$ 及粘性系数 $\eta_{a2}(x)$

当  $t > 0$  时, 则由式(4)、式(5)可知:  $E_{a2}(x)$  和  $\eta_{a2}(x)$  除了与碾压混凝土层的综合瞬时弹性模量( $E_{v1}$ 、 $E_{11}$ )、延迟弹性模量( $E_{v2}$ 、 $E_{12}$ ) 及粘性系数( $\eta_{v2}$ 、 $\eta_{12}$ ) 和本体的瞬时弹性模量  $E_{c1}$ 、延迟弹性模量  $E_{c2}$  及粘性系数  $\eta_{c2}$  有关外, 还与层面影响带的厚度  $b_a$ 、瞬时弹性模量  $E_{a1}(x)$  有关。而对于碾压混凝土层及本体的上述参数可由模型或现场试验可比较容易确定; 此外, 层面影响带的厚度  $b_a$  及瞬时弹性模量  $E_{a1}(x)$  则可通过前面提出的方法确定。由于  $E_{a2}(x)$  及  $\eta_{a2}(x)$  都是随变量  $x$  而变化, 因此在确定  $E_{a2}(x)$  及  $\eta_{a2}(x)$ , 首先假定这两者变化规律, 然后根据式(4)求得在任意时刻  $t$  时的  $E_{a2}(x)$ 、 $\eta_{a2}(x)$  的通用表达式, 由于  $E_{a2}(x)$  及  $\eta_{a2}(x)$  表达式中存在待定的相关系数, 则可根据若干个时刻的试验值, 利用优化理论可确定  $E_{a2}(x)$  及  $\eta_{a2}(x)$  中的待定参数, 由此确定  $E_{a2}(x)$  及  $\eta_{a2}(x)$ ; 然后将求得的  $E_{a2}(x)$  及  $\eta_{a2}(x)$  的表达式代入式(5), 若等式成立或满足计算要求的精度, 则  $E_{a2}(x)$  及  $\eta_{a2}(x)$  即为所求; 若不能满足式(5)要求, 则重新假定  $E_{a2}(x)$  及  $\eta_{a2}(x)$  的变化规律, 重复上述求解过程, 直至满足要求为止, 由此最终确定  $E_{a2}(x)$  及  $\eta_{a2}(x)$ 。上述的分析过程可通过自编的程序可方便地实现求解  $E_{a2}(x)$ 、 $\eta_{a2}(x)$ 。

### 4 碾压混凝土坝三维粘弹性分析模型

由上述分析可知, 碾压混凝土坝的流变特性可用广义 Kelvin 模型模拟。由图 2 可以看出: 总应变  $\varepsilon$  可以分解为弹性部分和粘性部分, 即

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^{ve}, \quad (12)$$

式中  $\varepsilon$  总应变,  $\varepsilon^e$  为弹性应变,  $\varepsilon^{ve}$  粘性应变。

弹性应变满足虎克定律, 而粘性应变由广义 Kelvin 模型确定, 即

$$\sigma = \mathbf{D}(\varepsilon - \varepsilon^{ve}), \quad (13)$$

$$\dot{\varepsilon}^{ve} + (E_{i2}/\eta_{i2}) \varepsilon^{ve} = (1/\eta_{i2}) \sigma, \quad (14)$$

式中  $\sigma$  为应力矩阵,  $\mathbf{D}$  为弹性矩阵,  $\dot{\varepsilon}^{ve}$  为表示粘性应变对时间求导数,  $E_{i2}$  为对应各部分的延迟弹性模量,  $\eta_{i2}$  为对应各部分的粘性系数。

设在所考察的时间步长  $\Delta t_m$  内, 粘性应变增量为

$$\Delta \varepsilon_m^{ve} = \dot{\varepsilon}_{m+\theta}^{ve} \Delta t_m, \quad (15)$$

其中  $\dot{\varepsilon}_{m+\theta}^{ve} = (1-\theta) \dot{\varepsilon}_m^{ve} + \theta \dot{\varepsilon}_{m+1}^{ve}$ ,  $(16)$

式中: 下标  $m$  和  $m+1$  分别表示时刻  $t_m$  和  $t_{m+1}$  时刻, 如果在上式中取  $\theta = 0$ , 便是欧拉积分, 由它所导出的迭代格式时段完全显式的, 如果取  $\theta = 1$ , 则是完全隐式方案, 即应变增量由时间步长末端的应变率确定。

考虑到碾压混凝土坝在结构分析时计算工作量较大, 因而在研制的有限元程序中采用常刚度迭代格式, 分析表明, 只要对时间步长作适当的限制, 收敛是有保证的。

令  $\theta = 0$ , 式(15)为

$$\Delta \varepsilon_m^{ve} = \dot{\varepsilon}_m^{ve} \Delta t_m, \quad (17)$$

则,  $t_{m+1}$  时刻的应变可以表示为

$$\dot{\varepsilon}_{m+1}^{ve} = \dot{\varepsilon}_m^{ve} + \dot{\varepsilon}_m^{ve} \Delta t_m. \quad (18)$$

上式对任何粘弹性模型都适用。对于图 2 模型, 为了提高积分精度, 还可以直接通过求解微分方程式(14) 得到  $\epsilon_{m+1}^{ve}$ , 即

$$\epsilon_{m+1}^{ve} = \epsilon_m^{ve} e^{(-E_{i2}/\eta_{i2})\Delta t_m} + D^{-1} \sigma_m (1 - e^{(-E_{i2}/\eta_{i2})\Delta t_m}) \quad (19)$$

利用以上提出的计算碾压混凝土层面影响带瞬时弹性模量、厚度、延迟弹性模量和粘性系数的方法, 建立相应的碾压混凝土层面影响带渐变规律分析模型, 并研制开发了相应的有限元分析程序。

## 5 实例分析

### 5.1 有限元模型计算参数及计算工况

某碾压混凝土重力坝, 坝顶高程为 146 m, 其最大坝高 57 m, 施工时各碾压层之间的厚度为 0.3 m, 经试验得到碾压混凝土层垂直层面方向的瞬时弹性模量为  $1.79 \times 10^4$  MPa、延迟弹性模量 75.0 GPa、粘性系数  $1.7 \times 10^7$  GPa·s; 碾压混凝土层平行于层面方向的瞬时弹性模量为  $2.02 \times 10^4$  MPa、延迟弹性模量 79.5 GPa、粘性系数  $1.8 \times 10^7$  GPa·s; 本体的瞬时弹性模量为  $2.04 \times 10^4$  MPa、延迟弹性模量 82.0 GPa、粘性系数  $\eta$  为  $2.0 \times 10^7$  GPa·s; 碾压混凝土层面影响带的厚度、瞬时弹性模量、延迟弹性模量及粘性系数由式(9)、式(10)及式(4)和式(5)确定。其有限元计算模型见图 3, 有限元计算范围: 坝体向上游约 2 倍的坝高, 向下游取约 1.5 倍的坝高, 坝基以下约 2 倍的坝高。共划分 33 749 个单元, 49 187 个节点。在分析计算时, 取 2002 年 1 月 29 日、2003 年 2 月 21 日、2004 年 1 月 5 日作为典型日进行分析比较。

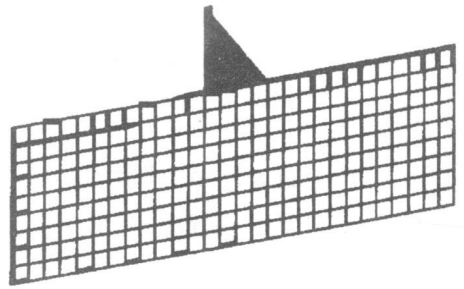


图 3 有限元模型网格图

### 5.2 计算成果分析

利用本文提出的确定碾压混凝土坝计算参数的方法, 自编了三维有限元分析程序, 对该碾压混凝土坝进行了分析计算, 实测值与有限元计算值见表 1。

表 1 坝顶水平位移计算成果(单位: mm)

时 间 位 移 值	坝顶水平位移计算成果(单位: mm)		
	2002- 01- 29	2003- 02- 21	2004- 01- 05
实测值	5.3	5.9	6.2
有限元计算值	4.7	6.4	6.9

由表 1 可以看出: 利用三维粘性有限元计算的成果与实测值比较接近; 由于实测值客观地反映了实际情况, 而有限元计算得的成果与实测值相接近, 说明根据本文提出的确定碾压混凝土坝计算参数的方法以及建立的分析模型比较合理。

## 6 结 论

本文重点分析了碾压混凝土层面影响带的计算参数的渐变规律, 在此基础上, 研究了碾压混凝土坝碾压层面影响带的渐变特性, 建立了相应的粘弹性分析模型, 得到了下列主要结论。

1) 基于复合材料思想, 对碾压混凝土层面影响带的瞬时弹性模量、延迟弹性模量以及粘性系数的变化规律进行了深入地研究, 导出了相应的分析计算公式, 同时提出了确定碾压混凝土

## 土坝层面影响带厚度的方法

2) 利用碾压混凝土坝层面影响带渐变规律分析模型确定的计算参数,建立了三维粘弹性分析模型,该模型能综合反映碾压混凝土层面影响带计算参数的渐变特性,以及层面影响带厚度随瞬时弹性模量等参数动态变化的特点。

3) 提出的分析方法和模型,经实例验证,能比较好地模拟分析碾压混凝土坝的工作性能,也可推广应用于如基础有断层和夹层等大坝的工作性态分析。

### [参 考 文 献]

- [1] 吴中如,顾冲时,吴相豪. 碾压混凝土坝安全监测理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001, 1—12.
- [2] 郭大智,任瑞波. 层状粘弹性体系力学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001, 138—148.
- [3] 沈观林. 复合材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996, 36—39.
- [4] 顾冲时,苏怀智,周红. 碾压混凝土坝渗流场与应力场耦合模型研究[J]. 应用数学和力学, 2005, 26(3): 325—332.
- [5] ZHENG Dong\_jian, ZHONG Lin. Interface behaviour of roller compacted concrete dams[A]. In: Wieland Martin, REN Qing\_wen, Tan Tohn S Y, Eds. New Developments in Dam Engineering [C]. London, UK: A A Balkema Publishers, 2004, 1111—1117.

## Analysis Model on Gradual Change Principle of Effect Zones of Layer Face for RCCD

GU Chong\_shi<sup>1</sup>, SONG Jing\_xiang<sup>1</sup>, FANG Hai\_ting<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering,

Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China;

2. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy & Hydro\_electric Power,

Hangzhou 310002, P. R. China)

**Abstract:** The effect zones of layer face for roller compacted concrete dam(RCCD) have gradual changing characteristics. Based on the analysis thought of complex material, a model was built to analyze above principle of RCCD by use of series\_wound and shunt\_wound connection. Some methods were proposed to determine the instantaneous elastic modulus, delayed elastic modulus and viscosity coefficient of effect zones of layer face. Above models and methods were used to mine the principle of gradual change of key calculation parameters which can respond the characteristics of effect zones. The principle of gradual change was described. A model was established to analyze the three-dimensional viscoelastic problem of RCCD. Above programs were developed. The examples show that the proposed models and methods determining the key calculation parameters of effect zones can reflect the status of RCCD accurately.

**Key words:** RCCD; effect zone; calculation parameter; principle of gradual change; viscoelastic model