

# 碾压混凝土坝施工层面变形分析模型<sup>\*</sup>

顾冲时, 黄光明, 赖道平

(河海大学 水利水电工程学院, 南京 210098)

(谢和平推荐)

**摘要:** 针对碾压混凝土坝施工层面对大坝变形产生显著影响的问题, 深入研究了施工层面的变化性质及规律, 提出了层面不同阶段变形的模拟方法, 建立了施工层面有厚度和无厚度分析模型。提出的模型能反映层面的弹性变形、衰减蠕变、不可逆变形以及加速蠕变等变形状态。实例分析表明: 所提出的碾压混凝土坝施工层面有厚度和无厚度分析模型能较客观地模拟大坝的结构变化形态, 尤其是施工层面有厚度分析模型较完整地模拟了层面的渐变规律, 其计算结果与原位监测成果吻合较好。同时, 提出的方法和建立的分析模型可推广应用于常规混凝土坝, 特别是坝基内断层和夹层等变形规律的分析

**关键词:** 碾压混凝土坝; 施工层面; 变形; 分析模型

**中图分类号:** TV642.3      **文献标识码:** A

## 引 言

碾压混凝土筑坝技术是最近几十年发展起来的一门技术, 由于施工快, 因而受到广泛的应用。但由于在筑坝工程中层层碾压, 产生了众多的水平施工层面, 这些层面与本体相比其结构和渗流特性有较大的差异, 施工层面成了整个大坝的薄弱环节, 甚至成了大坝的安全隐患。目前, 对于水平施工层面的认识有两种观点, 一种观点认为层面为无厚度的结构面<sup>[1,2]</sup>; 另一种认为层面为一个渐变过渡层<sup>[3,4]</sup>。上述两种观点虽然对水平施工层面的认识有一定的差异, 但总体上层面是整个大坝的薄弱部位的认识是一致的, 不同之处是在模拟层面的分析模型及相关参数的取用上有所不同。此外, 在以往碾压混凝土结构分析模型中, 重点研究了大坝的弹性变形和蠕变的衰减及卸载后的变形滞后回复变化, 而很少研究不可恢复的蠕变变形以及屈服以后的蠕变加速增大过程。对于碾压混凝土坝, 在水压等荷载作用, 由监测资料分析表明, 即使在较小的荷载作用下, 也会产生不可逆的时效变形。因此, 弄清碾压混凝土坝的施工层面的变化性质, 对于不可逆变化规律的认识至关重要, 也是评价大坝安全的重要依据。但由于碾压混凝土坝结构的复杂性, 如何较为客观地模拟其变形性状, 尚未找到比较理想的方法。本文从基本的力学分析模型入手, 以大坝变形为例, 将碾压混凝土坝的施工层面分成有厚度和无厚度两

\* 收稿日期: 2006\_03\_13; 修订日期: 2006\_09\_11

基金项目: 国家自然科学基金(重点)资助项目(50539010); 国家自然科学基金资助项目(50579010); 973 计划资助项目(2002CB412707); 水利部“948”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@ sina.com)。

种情况,深入研究了不同情况下碾压混凝土坝变形分析模型的建模原理,提出并建立了相应的分析模型。

## 1 有厚度碾压混凝土坝水平施工层面的变形分析模型

图1为碾压混凝土层的结构面图,碾压混凝土层由本体和水平施工层面(以下简称层面)组成,并假定碾压混凝土层的厚度为 $B$ ,层面厚度为 $b$ 。

### 1.1 水平施工层面的法向变形分析模型

由实验及原位监测资料分析表明,在荷载作用下,层面的法向变形过程为:首先产生瞬时的弹性变形,然后出现蠕变速率减小的蠕变变形,最后变形趋于一个稳定值。如果在加载一段时间后卸载,已经产生的法向变形有一部分可恢复,而另一部分成了不可逆的变形<sup>[5,7]</sup>。由上面的分析可知,碾压混凝土的水平施工层面的变形分析模型中应该包括反映瞬时的弹性变形、反映衰减蠕变及卸载后变形的滞后回复,以及能反映不可恢复的蠕变变形等方面,下面分析各部分的组成

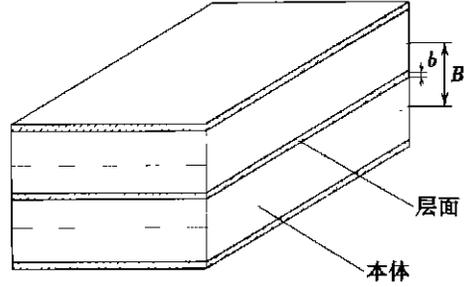


图1 碾压混凝土层的结构简图

#### 1) 瞬时弹性变形

对于弹性变形,其应力与应变关系符合虎克定律,即

$$\sigma = E_M \varepsilon \quad (1)$$

式中: $\sigma$ 为应力, $\varepsilon$ 为应变, $E_M$ 为瞬时弹性模量;

#### 2) 不可恢复的蠕变变形

不可恢复的蠕变变形用一个粘滞体来反映,其性质符合牛顿定律,即应力与应变速率之间关系为

$$\sigma = \eta_M \dot{\varepsilon} \quad (2)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 应变速率; $\eta_M$ 为粘滞系数;

对于式(2)来说, $\eta_M$ 是反映不可恢复的蠕变变形的特征量,分析表明,在一定的荷载作用下,法向变形逐渐趋于稳定,因此 $\eta_M$ 能反映衰减蠕变的特性,本文采用一个粘滞系数为时间函数的非线性量,即

$$\eta_M(t) = \eta_{M0}(at + c \ln(1+t)), \quad (3)$$

式中: $\eta_{M0}$ 为 $t=0$ 时粘滞体的粘性系数; $a$ 、 $c$ 为与材料流变特性相关的常数;

#### 3) 衰减的蠕变变形

用Kelvin体反映衰减蠕变和卸载后变形的滞后回复变形,由此体现衰减的蠕变变形。其中Kelvin体由一个弹性体和一个粘滞体并联组成,即

$$\sigma = E_K \varepsilon + \eta_K \dot{\varepsilon} \quad (4)$$

由式(4)可得到在应力 $\sigma$ 作用下的 $t$ 时刻蠕变表达式为

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_K} (1 - e^{-E_K t / \eta_K}), \quad (5)$$

同时由式(4)可得到 $\sigma$ 作用 $t_1$ 后卸载的回复过程的应力与时间的关系,即

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_K} (e^{-E_K t / \eta_K} - 1) e^{-E_K t / \eta_K}; \quad (6)$$

## 4) 水平施工层面法向变形分析模型

由上分析可知,水平施工层面的法向变形分析模型由图 2 所示组成

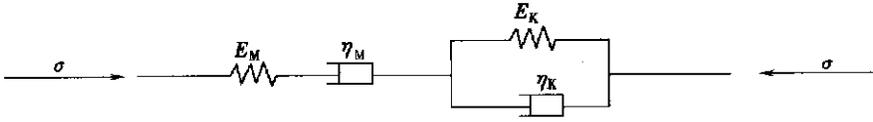


图 2 有厚度碾压混凝土坝水平施工层面法向变形分析模型

水平施工层面的变形  $\varepsilon$  为

$$\varepsilon = \varepsilon_M + \varepsilon_{\eta_M} + \varepsilon_K, \quad (7)$$

式中

$$\varepsilon_M = \frac{\sigma}{E_M}, \quad \varepsilon_{\eta_M} = \frac{\sigma}{\eta_M(t)}, \quad \sigma = E_K \varepsilon_K + \eta_K \dot{\varepsilon}_K, \quad (8)$$

由式(7)和式(8)得到在  $\sigma$  应力下时刻  $t$  的变形分析模型为

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_M} + \frac{\sigma}{E_K} (1 - e^{-E_K t / \eta_K}) + \int_0^t \frac{\sigma}{\eta_M(t)} dt, \quad (9)$$

同时在保持变形不变的情况下应力松弛分析模型为

$$\frac{1}{\eta_M(t)} (E_K - a \eta_K) \sigma + \left[ \frac{E_K}{E_M} + \frac{\eta_K}{\eta_M(t)} + 1 \right] \sigma + \frac{\eta_K}{E_M} \dot{\sigma} = 0. \quad (10)$$

应指出的是:由于碾压混凝土坝水平施工层面,其层面方向的性质变化是一个以层面中心层(层面 1/2 厚度处的水平层面)为中心向平行于中心层的两侧变化,因此,式(1)至式(10)的各计算参数  $A_i(x)$  ( $x$  为计算点距层面中心层的距离)也随之变化,其变化范围为

$$A_{\min} \leq A_i(x) \leq A_{\max}, \quad (11)$$

式中

$$A_{\max} = A(b/2), \quad A_{\min} = A(0),$$

其中:  $A_i(x)$  为水平施工层中平行于层面中心层部位的计算参数,如  $E_{M_i}$ 、 $\eta_{M_i}$ 、 $E_{K_i}$ 、 $\eta_{K_i}$  等,  $A(b/2)$  为层面与本体交接处的计算参数;  $A(0)$  为层面中心层的计算参数;与此同时,由于  $A_i(x)$  不是一个定值,而是沿层面法向逐渐变化,此外,层面厚度也是一个变化量,需要反演后才能确定。关于  $A_i$  及  $b$  的变化规律分析过程,本文作者已发表过有关的研究论文,详见文献 [4], 这里不再赘述。

## 1.2 水平施工层面切向分析模型

对于水平施工层面,在不同的剪应力等作用下,其剪切变形过程也不同。在应力水平较低时,首先产生瞬时弹性变形,然后产生过渡蠕变,最后蠕变趋于稳定的变形。在应力水平较高时,开始产生瞬时的弹性变形,然后产生蠕变变形(包括可恢复和不可恢复两部分蠕变),若应力水平很高时,则出现加速蠕变变形现象,直至剪切滑动破坏。根据上述水平施工层面切向变形规律分析,其有厚度的水平施工层面切向变形分析模型如图 3 所示。图 3 中,  $G_M$  为瞬时剪切弹性模量;  $\eta_M$  为反映不可逆变形的粘滞系数,采用式(3)的形式;  $G_K$ 、 $\eta_K$  分别为 Kelvin 模型反映衰减蠕变和卸载后变形的滞后回复特性的延迟剪切弹性模量及粘性系数;  $\tau_s$  为屈服剪应力;  $\eta_s$  为水平层面剪应力超过  $\tau_s$  后反映加速蠕变的粘滞系数。

在应力水平很高时,当剪应力超过屈服应力  $\tau_s$  时,切向变形产生加速蠕变变形,因此,反映屈服以后随时间加速蠕变特性的粘滞系数  $\eta_s$  应随荷载作用时间的增加而减小,根据相关的实验及监测资料分析成果,采用下式来表示

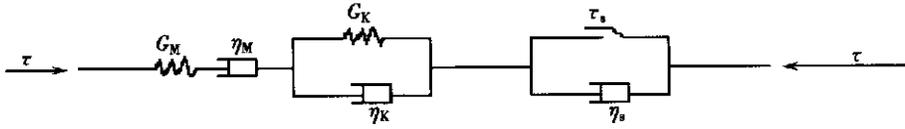


图3 有厚度碾压混凝土坝水平施工层面切向变形分析模型

$$\eta_s(t) = \eta_0/[a + c + d \ln(1 + t)], \quad (12)$$

式中:  $a$ 、 $c$ 、 $d$  为与材料相关的常数。

通过上面的分析可知,对于碾压混凝土坝水平施工层面切向变形,不同的应力状况,分析的模型也不同,当层面方向的剪应力  $\tau$  小于屈服剪应力  $\tau_s$  时,即  $\tau \leq \tau_s$  时,其应力与应变关系可表示为

$$Y(t) = Y_{G_M} + Y_{\eta_M} + Y_K = \frac{\tau}{G_M} + \frac{\tau}{\eta_M(t)}t + \frac{\tau}{G_K}(1 - e^{-G_K t / \eta_K}), \quad (13)$$

式中:  $Y_{G_M}$  为瞬时弹性变形;  $Y_{\eta_M}$  为不可恢复蠕变变形;  $Y_K$  为衰减蠕变变形。

当剪应力超过屈服剪应力时,即  $\tau > \tau_s$  时,则产生加速蠕变变形,其应力与应变关系可表示为

$$Y(t) = Y_{G_M} + Y_{\eta_M} + Y_K + Y_s = \frac{\tau}{G_M} + \frac{\tau}{\eta_M(t)}t + \frac{\tau}{G_K}(1 - e^{-G_K t / \eta_K}) + \frac{\tau - \tau_s}{\eta_s(t)}t, \quad (14)$$

式中:  $Y_s$  为加速蠕变变形,其余符号意义同式(13)。

应指出的是,当  $\tau > \tau_s$  时,  $Y_{\eta_M}$ 、 $Y_K$  的变形较小,  $Y(t)$  主要由瞬时弹性变形  $Y_{G_M}$  和加速蠕变变形  $Y_s$  组成。由于在分析时考虑水平施工层面有一定的厚度,因此,式(13)、式(14)中相关计算参数以及层面厚度  $b$  的确定,类似于式(9)、式(10),详细的确定方法见文献[4]。

## 2 无厚度碾压混凝土坝水平施工层面变形分析模型

如果在碾压混凝土坝的施工层面看成厚度很小的夹层,则可将施工层面看成无厚度的层面,由于层面厚度很小,则层面的法向变形与层面水平方向变形比较则相对很小,层面变形主要是层面切向变形,实验及监测资料分析表明,碾压混凝土坝水平施工层面的切向剪切变形较大,剪切强度也相对较低。因此,若将水平施工层面看作无厚度层面,应重点研究其层面剪切变形的变化规律。下面分析层面剪切变形的分析模型。

由于水平层面在分析时模拟成有厚度和无厚度不同的形式,但本身的实际结构及受力特性应保持不变,在荷载作用下,层面切向方向的变形应包括弹性变形、衰减蠕变变形、不可逆蠕变变形,当应力水平很高,超过屈服应力时,则产生显著的加速蠕变变形。因此,无厚度碾压混凝土水平施工层面变形分析模型类似于图3,其总变形  $Y(t)$  由弹性  $Y_e$ 、粘弹性  $Y_{ve}$ 、粘性  $Y_v$  及粘塑性  $Y_{vp}$  等4部分组成,即

$$Y(t) = Y_e + Y_{ve} + Y_v + Y_{vp}. \quad (15)$$

在层面上剪应力  $\tau$  小于屈服应力  $\tau_s$  时,其总变形  $Y(t)$  主要由  $Y_e$ 、 $Y_{ve}$ 、 $Y_v$  组成,即变形分析模型为

$$Y(t) = \frac{\tau}{G_M} + \frac{\tau}{\eta_M(t)}t + \frac{\tau}{G_K}(1 - e^{-G_K t / \eta_K}). \quad (16)$$

当剪层面上剪应力大于屈服应力  $\tau_s$  时,其总变形  $Y(t)$  如式(15),即变形分析模型为

$$Y(t) = \frac{\tau}{G_M} + \frac{\tau}{\eta_M(t)}t + \frac{\tau}{G_K}(1 - e^{-G_K t / \eta_K}) + \frac{\tau - \tau_s}{\eta_s(t)}t, \quad (17)$$

式(16)、式(17)的符号意义同式(13)及式(14)。由于式(16)、式(17)将碾压混凝土水平施工层面简化成无厚度进行模拟分析,因此,其对应的计算参数可通过实验或利用监测资料反演分析确定。

### 3 实例分析

#### 3.1 有限元模型及荷载的模拟

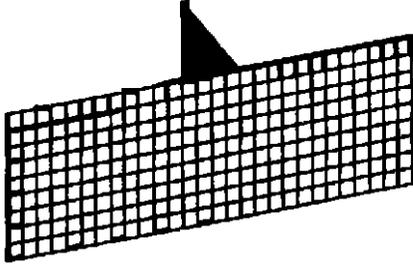


图4 有限元模型网格图

为了验证上述提出的理论的正确性,下面以某碾压混凝土坝<sup>7</sup>典型坝块为例进行分析。该坝坝高73 m,依据坝体结构剖面、坝地质情况,将有限元范围取为:上游取约2倍的坝高,下游取约2倍坝高,坝基以下约取1.8倍的坝高。共划分了3576个单元,4607个结点,有限元模型见图4。表1为各材料力学系数表(表中的 $c$ 、 $f$ 、 $\mu$ 分别是对应材料的凝聚力、摩擦系数及泊松比)。

由于大坝所受的荷载随着库水位、坝体温度等变化而变化,除了坝体温度变化具有一定的周期性外,其它荷载的变化受随机因素影响较大,为了尽可能使模拟的荷载工况与实际过程接近,首先模拟大坝的自重引起的初始应力场,大坝分10级模拟建坝的加载过程,大坝从浇筑到建成历时32个月,故每级间隔90 d,自重加载以后,然后进行水压、温度等荷载加载分析,由此模拟大坝变形随时间的变化过程,本文在分析时,水库蓄水后,计算的蠕变的时间为540 d。

表1 各部位材料力学参数表

参数	$E_M/\text{MPa}$	$\eta_M/\text{MPa}\cdot\text{d}$	$E_K/\text{MPa}$	$\eta_K/\text{MPa}\cdot\text{d}$	$\eta_0/\text{MPa}\cdot\text{d}$	$c/\text{MPa}$	$f$	$\mu$
混凝土本体	$2.04 \times 10^4$	$1.0 \times 10^8$	$8.0 \times 10^4$	$1.0 \times 10^7$	$2.0 \times 10^5$	1.1	1.2	0.167
坝基	$2.12 \times 10^4$	$1.1 \times 10^8$	$8.3 \times 10^4$	$1.1 \times 10^7$	$2.0 \times 10^5$	0.9	0.87	0.2
水平施工层面	$G_M/\text{MPa}$	$\eta_{M0}/\text{MPa}\cdot\text{d}$	$G_K/\text{MPa}$	$\eta_K/\text{MPa}\cdot\text{d}$	$\eta_0/\text{MPa}\cdot\text{d}$	$c/\text{MPa}$	$f$	$\mu$
	$6.88 \times 10^3$	$8.4 \times 10^7$	$2.6 \times 10^4$	$8.3 \times 10^6$	$1.6 \times 10^5$	0.95	0.97	0.2
中心层	$E_M/\text{MPa}$	$\eta_M/\text{MPa}\cdot\text{d}$	$E_K/\text{MPa}$	$\eta_K/\text{MPa}\cdot\text{d}$	$\eta_0/\text{MPa}\cdot\text{d}$	$c/\text{MPa}$	$f$	$\mu$
	$1.72 \times 10^4$	$9.1 \times 10^7$	$6.5 \times 10^4$	$9.2 \times 10^6$	$1.78 \times 10^5$	1.05	1.16	0.2

#### 3.2 成果分析

对于大坝安全而言,时效变化反映了大坝的趋势性,是判断大坝安全的一个最重要的标准。因此,下面以计算的时效位移与实测监测资料分离的时效位移作分析比较。图5为大坝蓄水后坝顶上下游方向位移(以向下游方向为正)两种计算模型(层面有厚度和无厚度两种情况)下的时效位移计算值与统计模型分离得的时效位移对比过程图。由图5可看出

1) 将碾压混凝土坝水平施工层面用两种方法进行模拟(层面有厚度和无厚度两种情况),计算得的时效位移的变化规律总体上一致,与统计模型分离得的时效位移变化规律相吻合;

2) 水平施工层面有厚度模型模拟得的时效位移与无厚度模型比较,上下游方向计算的时效位移绝对值要略大,这主要是有厚度的模型在模拟水平施工层面时,其计算的参数以水平层面中心层为基本面向混凝土本体逐渐变化,即模拟了实际水平施工层面的变化,有厚度模型与无厚度模型比较,层面的影响相对较大,因而出现了前者计算得的位移绝对值略大于后者的情况;

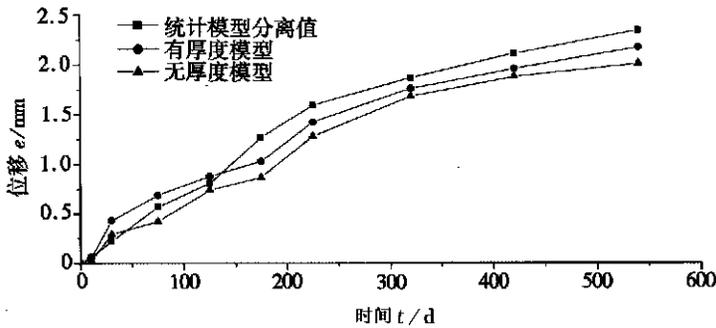


图5 坝顶水平位移时效分量

3) 从计算成果看,水平施工层面有厚度模型与利用实际监测资料建立的统计模型分离结果比较接近,这说明了在碾压混凝土坝模拟分析时,水平施工层面用有厚度模型进行模拟分析更能反映客观实际。

## 4 结 语

本文重点对碾压混凝土坝的水平施工层面的变形形态进行了模拟分析,建立了相应的分析模型,并对提出的模型与原位监测资料进行了对比分析,得出下列主要结论

1) 深入研究了碾压混凝土坝施工层面的变化规律,提出了层面有厚度和无厚度的分析模型。

2) 针对碾压混凝土坝层面变形特点,在分析模型中综合考虑了弹性变形、衰减蠕变、不可恢复变形以及加速蠕变等情况,提出了各个阶段的变形模拟模型。

3) 实例分析表明,提出的分析模型能较好地模拟分析碾压混凝土坝变形规律,尤其是层面有厚度分析模型的计算成果与原位监测成果吻合较好,说明在分析层面对大坝结构影响时,应考虑层面沿厚度方向变化的影响。

4) 虽然提出的模拟分析方法针对碾压混凝土坝,但由于方法的通用性,也可将提出的分析模型推广应用于常规混凝土坝,尤其是基础内断层及夹层的变形特性模拟分析。

## [参 考 文 献]

- [1] 詹美礼, 速宝玉, 刘俊勇. 碾压混凝土坝层(缝)面渗流分析的界面元方法[J]. 水电站设计, 1999, (2): 33\_37.
- [2] 朱岳明, 龚道勇, 章洪, 等. 碾压混凝土坝渗流场分析的缝面渗流平面单元模拟法[J]. 水利学报, 2003, (3): 63\_68.
- [3] 吴中如, 顾冲时, 吴相豪. 碾压混凝土坝安全监控理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [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] 朱伯芳. 有限元法原理与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998, 345\_375.
- [6] 赖道平. 地质缺陷对混凝土坝结构性质演变和转异的影响研究[D]. 博士学位论文. 南京: 河海大学, 2005.
- [7] 邓广哲, 朱维申. 岩体裂隙非线性蠕变过程特性与应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17 (4): 358\_365.

# Analytic Model of Deformation of Construction Interfaces of RCCD

GU Chong\_shi, HUANG Guang\_ming, LAI Dao\_ping

( College of Water Conservancy and Hydropower Engineer, Hohai University,  
Nanjing 210098, P. R. China )

**Abstract:** The construction interfaces of RCCD have a distinct influence on the deformation of dams. The characters and rules on deformation of construction interfaces were studied. The methods simulating the interfaces' deformation at different stages were proposed. A thickness analytic model and a no\_thickness analytic model of construction interfaces were built. These models can reflect the elastic deformation, the attenuation creep deformation, the irreversible creep deformation and the accelerating creep deformation of interfaces. The example shows that these proposed models can simulate the deformation of the dam structure objectively. Especially, the results of the thickness analytic model which simulates the gradual changing regularities of interfaces can tally with that of monitoring in situ preferably. The methods proposed and the analytic models can be generalized and applied to general concrete dams, especially to the analysis on deformation rules of fault and interlayer in dam base.

**Key words:** RCCD; construction interface; deformation; analytic model