

碾压混凝土坝层内弹性模量分布规律研究

陈 龙,顾冲时

(河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 根据碾压混凝土坝的施工过程和压实机理,认为弹性模量沿层深呈指数衰减分布.将碾压单元层分解成多层结构,用分解刚度法导出了层内弹性模量与本体和层面弹性模量之间的关系.用分解刚度法和有限元方法研究了不同层厚和强度下的弹性模量分布规律,得出了弹性模量指数衰减系数随着层厚和异弹模比的增大而减小的结论.

关键词 分解刚度法;碾压混凝土;弹性模量;分布规律

中图分类号 TV642.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-198X(2005)04-0409-04

分层碾压的施工方式使得碾压混凝土坝的实际结构呈现多层特性,并且坝体平行于层面方向和垂直于层面方向具有不同的强度和弹性模量^[1,2].位移计算时一般把碾压混凝土坝视为横观各向同性材料或把坝体分为本体和层面 2 个部分来处理.这样的处理方式并没有从本质上体现层内(包括 1 个本体和 1 个层面)弹性模量的分布情况.

本文根据碾压混凝土坝的施工过程和压实机理,利用分解刚度法探讨层内弹性模量的分布规律和影响因素.

1 碾压混凝土性能与振动特性

由于碾压混凝土分层浇筑和多次碾压的施工特性,层内很多参数(如抗压强度、密度、振动加速度等^[3]①②)与层深关系密切.试验表明,很多参数沿层深呈指数分布.

1.1 层内振动加速度衰减规律

碾压混凝土通过振动碾的激振力使混凝土产生强迫振动而液化,从而达到振实目的.由文献^[3]可知,碾压 6 遍以前加速度增加比较快,而 6 遍以后加速度变化比较平稳,基本上在平均值上下波动.同时,加速度由层面向下沿层深衰减,并可以用下式表示:

$$a_r = a_0 e^{-\frac{\beta}{2}x} \quad (1)$$

式中: a_r ——距基准点深度为 x 点的加速度实效值; a_0 ——层面基准点的加速度实效值; β ——衰减系数.除振动加速度外,碾压混凝土的振动振幅也由层面向下沿层深衰减.

1.2 层内激振力衰减规律^[3]

通过在碾压混凝土摊铺层内不同深度埋设土压力计,可以测定混凝土内的压力.激振力在混凝土层内的传播过程可用通过弹性介质正弦压缩波的传播公式来表示,即

$$p = p_0 e^{-\frac{\beta}{2}x} \quad (2)$$

式中: p ——距基准点深度为 x 点的混凝土压力; p_0 ——层面基准点的压力; β ——衰减系数.

对 BW—200、CC41 和 CA51S 3 种振动碾压机型型的 2 种碾压混凝土配合比而言,实测混凝土压力衰减系数大致相近, $\beta = 0.05$.以 BW—200 型振动碾为例,层深 70 cm 时混凝土压力约为 0.12 MPa,层深 1 m 时混凝土

收稿日期 2004-12-15

基金项目 教育部“跨世纪优秀人才培养计划”基金资助项目(2003512643);教育部博士点基金资助项目(20020294005)

作者简介 陈龙(1977—),男,陕西咸阳人,博士研究生,主要从事碾压混凝土坝问题及其应用研究.

① 姜福田.碾压混凝土性能与施工振动特性的关系.国际碾压混凝土坝学术讨论会论文集.1991.161—166.

② 欧珠光,姜福田.碾压混凝土振动压实机理的研究.国际碾压混凝土坝学术讨论会论文集.1991.205—211.

压力约为 0.059 MPa.如果碾压混凝土连续浇筑,每层 35 cm,按每天浇筑 1 m 高度计,上层振动碾碾压时,底层已接近终凝的混凝土的振动压力已衰减到可以忽略不计的程度.

1.3 层内密度分布规律^①

对于 BW—201 的单轮起振,在一定的振实条件下,密度在层内沿层深基本上也呈指数分布,如图 1 所示.图中 V_c 为混凝土稠度指标.

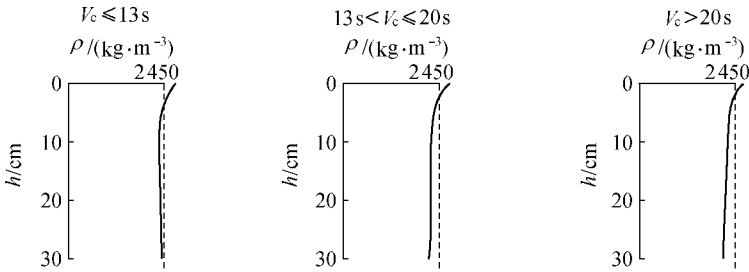


图 1 密度沿层深分布
Fig.1 Density distribution along depth of layer

2 层内弹性模量分布规律及参数确定方法

根据以上分析,由于振动加速度和激振力呈指数衰减分布,相应地,密度、抗压强度和抗拉强度等混凝土参数也沿层深呈指数分布.由于弹性模量与密度、强度等参数呈线性关系,层内弹性模量也呈指数分布.

2.1 用分解刚度法^[4 5]确定弹性模量分布参数

如图 2 所示,2 个弹簧的刚度分别记为 K_1 和 K_2 .在荷载 P 作用下,产生的总变形为 w .当 2 个弹簧并联时,所受荷载相同,变形分别为 w_1 和 w_2 .2 个弹簧串联时,采用刚度分解法,取 $K_2 = \infty$ (这时这个弹簧就不产生变形了,但仍能传递荷载), K_1 为有限值(只有这个弹簧依旧在变形)和 $K_1 = \infty$, K_2 为有限值时所产生的变形,则总变形等于 2 个刚度单独作用时所产生的变形的总和.而当 2 个弹簧并联时,在荷载 P 的作用下,2 个弹簧具有相同的变形.依据以上分析,可得总刚度的串联公式(3)和并联公式(4).

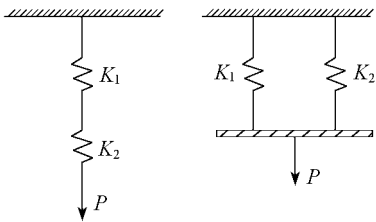


图 2 弹簧的串联和并联
Fig.2 Series and parallel connection of springs

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} \tag{3}$$

$$K = K_1 + K_2 \tag{4}$$

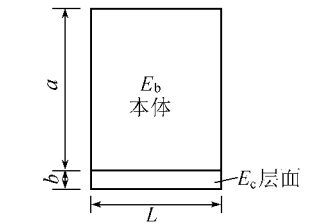


图 3 碾压混凝土层示意图
Fig.3 Sketch of RCC structure

通常,在对碾压混凝土坝进行有限元计算时,用薄层单元方法把碾压混凝土坝分为本体和层面 2 个部分(图 3).层面的弹性模量 E_c 一般取为本体弹性模量 E_b 乘以一个小于 1 的强度减弱系数 β (异弹模比),即 $E_c = E_b \times \beta$ ($0 < \beta < 1$).应用分解刚度法计算的关键是先形成一个等效结构.该等效结构的总厚度和总刚度应保证与原结构的总厚度和总刚度相同.

假设层厚 h ($h = a + b$)为 ncn (n 为整数),并将其划分为 n 段,则每段为 1 cm.设最后一段为层面,其他 $n - 1$ 段为本体.求弹性模量沿层深的分布,相当于计算出 n 层内每一个弹性模量的数值,并且其整体变形与只有本体和层面结构时的变形相同.图 4 用弹性模量的指数分布曲线代替了由本体和层面的弹性模量形成的阶跃分布曲线.

不失一般性,设每段长度为 m ,则层厚为 nm ,本体厚度为 $(n - 1)m$,层面厚度为 m .设层内弹性模量分布为

$$E(x) = E_0 e^{-\alpha x} \tag{5}$$

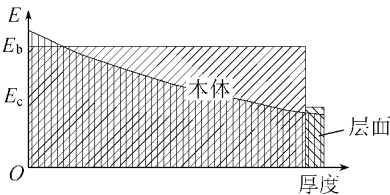


图 4 层内弹性模量转换示意图
Fig.4 Conversion of intra-layer elastic modulus

① 毛明宽.岩滩水电站围堰碾压混凝土振动压实机理的试验研究.国际碾压混凝土坝学术讨论会论文集.1991.174—180.

式中: $E(x)$ ——距基准点深度为 x 的弹性模量实效值; E_0 ——基准点的弹性模量实效值; α ——衰减系数。
由式(5)可知,各层内的弹性模量分别为

$$E_1 = E_0 e^{-\alpha m}, E_2 = E_0 e^{-2\alpha m}, \dots, E_n = E_0 e^{-n\alpha m}$$

(6)

令 $e^{-\alpha m} = \lambda$, 则式(6)变为

$$E_1 = E_0 \lambda, E_2 = E_0 \lambda^2, \dots, E_n = E_0 \lambda^n$$

(7)

根据式(3)(4)(7)可得

$$\begin{cases} \frac{1}{E_0} \left(\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda^2} + \dots + \frac{1}{\lambda^n} \right) = \frac{n-1}{E_b} + \frac{1}{E_c} \\ E_0 (\lambda + \lambda^2 + \dots + \lambda^n) = (n-1)E_b + E_c \end{cases}$$

(8)

式(8)有 E_0 和 λ 2 个未知参数,根据已知条件可解出 E_0 和 λ ,继而求出 α 。假设本体弹性模量 $E_b = 20 \text{ GPa}$, $\beta = 0.3 \text{ } 0.5 \text{ } 0.7 \text{ } 0.8$, $n = 3 \sim 100$,求解式(8),则得到不同的 E_0 , λ 和 α 值,计算结果见图 5、图 6 和表 1。对于 $\beta = 0.5 \text{ } 0.7 \text{ } 0.8$, 所得图形与图 5 相似,故文中省略。

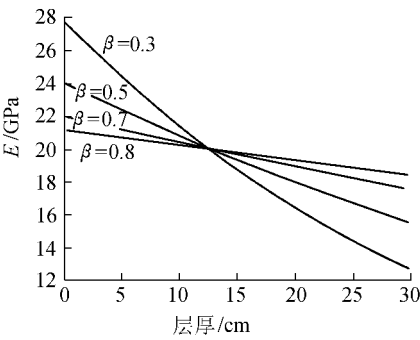


图 5 0.3 m 层厚的层内弹性模量分布曲线
Fig.5 Distribution curve of intra-layer elastic modulus with layer of 0.3 m thickness

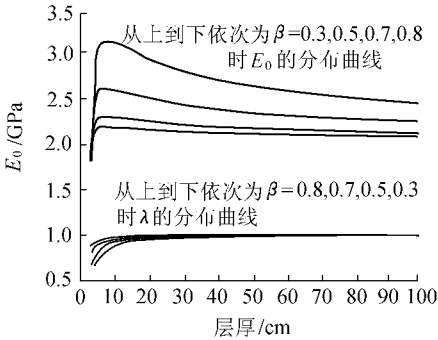


图 6 层厚与 E_0 和 λ 的关系曲线
Fig.6 Relation curve between thickness of layer, E_0 and λ

表 1 由分解刚度法和有限元法得到的不同层厚和 β 下的 α 值

Table 1 α for different thickness of layer and β values by stiffness partition method and FEM 10^{-4}

h/m	分解刚度法				有限元方法			
	$\beta = 0.3$	$\beta = 0.5$	$\beta = 0.7$	$\beta = 0.8$	$\beta = 0.3$	$\beta = 0.5$	$\beta = 0.7$	$\beta = 0.8$
0.3	3.50	2.98	2.66	2.53	3.62	3.05	2.53	2.61
0.5	1.96	1.70	1.55	1.49	1.87	1.71	1.59	1.52
0.7	1.34	1.18	1.09	1.06	1.29	1.16	1.05	0.98

2.2 有限元方法反演弹性模量分布参数

将图 3 所示单元层划分成若干层,给定 E_b 和 E_c ,利用有限元算出图 3 中 A 点的位移(X_0, Y_0)。
假设层内弹性模量呈指数分布,给定一组初值(E_0, λ),先按式(8)计算出各层的弹性模量,再据此计算出 A 点的位移(X, Y),然后按位移优化公式

$$\begin{cases} \min f(E_0, \lambda) = \min \{ (X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 \} \\ \text{s.t. } E_0 > 0, \lambda > 0 \end{cases}$$

(9)

在一定的收敛精度下求得最终的 E_0 和 λ ,继而根据 $e^{-\alpha m} = \lambda$ 求得 α 。

算例中,给定 $E_b = 20 \text{ GPa}$,取层厚 $h = 0.3 \text{ m } 0.5 \text{ m } 0.7 \text{ m}$, $\beta = 0.3 \text{ } 0.5 \text{ } 0.7 \text{ } 0.8$,宽度 $L = 5h$ 。
由表 1 可知,分解刚度法和有限元法得到的 α 存在着小于 5% 的差异,这种差异主要是因为利用分解刚度法计算 α 时没有考虑 L 的影响所造成的。

2.3 计算结果

- a. 衰减系数 α 值较小,并且 α 随着层厚 h 和 β 的增大而减小,其值变化范围为 $0.0010 \sim 0.0035$ 。
- b. E_0 随着层厚的增加而增大, $n \approx 10$ 时其值达到最大,之后随着层厚的增加而逐渐减小,最终趋近于转换前本体弹性模量 E_b ,本例趋近于 20 GPa 。

c. λ 随着层厚的增加而逐渐增大,并最终趋近于 1. $n > 20$ 时 λ 已没有什么变化.

3 结 语

通常,在对碾压混凝土坝进行分析时是从宏观角度考虑弹性模量的,这淡化了碾压混凝土坝本身所特有的层面特性.本文首先从微观角度出发,通过对碾压混凝土坝施工过程和压实机理的分析,发现诸多物理参数(如激振力、加速度和密度等)沿层深呈指数分布,然后根据弹性模量与其他参数的相互关系,认为弹性模量也沿层深呈指数分布,最后用分解刚度法和有限元方法计算了不同层厚和不同强度下的弹性模量.

根据层内弹性模量分布,为使碾压混凝土具有较高的弹性模量,应尽量减少碾压层厚、增大振动碾的激振力和振动加速度等.

参考文献:

- [1] 任旭华,夏颂佑,张世强.碾压混凝土重力坝失稳破坏机理初探[J].河海大学学报(自然科学版),1997,25(1):73—80.
- [2] 任旭华.碾压混凝土重力坝的安全评价方法和安全标准的研究[J].河海大学学报(自然科学版),1998,26(4):8—13.
- [3] 姜福田.碾压混凝土[M].北京:中国铁道出版社,1991.40—53.
- [4] 武兰河.求解复合材料板壳临界荷载和固有频率的分解刚度法[J].石家庄铁道学院学报,1994,7(4):58—71.
- [5] 华玉,酆正能,何庆芝.任意铺层开裂复合材料层板本构关系探讨及特例分析[J].复合材料学报,1996,13(4):82—88.

Study on intra-layer distribution of elastic modulus for roller compacted concrete dams

CHEN Long, GU Chong-shi

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract According to the process of construction and mechanism of compaction of RCCDs, it was considered that the elastic modulus was exponentially attenuated along the depth of layers. By decomposition of single roller compacted layer into multi layers, the relationships between the intra-layer elastic modulus and the elastic moduli of dam body and layer interface were derived by use of the stiffness partition method. With the stiffness partition method and FEM, the elastic modulus distribution in layers of different thickness and strength was studied. It is concluded that the coefficient of exponential attenuation of elastic modulus inversely varies with the thickness of layers and the ratio of the elastic modulus of layer interface and that of the dam body.

Key words stiffness partition method; roller compacted concrete; elastic modulus; regularity of distribution