

文章编号: 0559-934X(2005)08-0027-03

碾压混凝土坝层面弹性模量和厚度反演

彭友文^{1,2}, 郑东健¹, 吴中如¹

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏南京 210098; 2. 南昌工程学院, 江西南昌 330029)

关键词: 碾压混凝土坝; 层面; 层面弹性模量; 层面厚度; 反演

摘要: 将碾压混凝土坝层面的影响概化到整个坝体中, 视坝体整体为横观各向同性体, 基于实测资料, 结合有限元计算, 反演坝体横向和竖向弹性模量。然后利用变形等效假定建立横向和竖向弹性模量正分析模型及反演结果, 进而推求出层面弹性模量和厚度, 为客观模拟层面影响提供了科学依据。

Feedback analysis of the layer elastic modulus and thickness of RCC dam

Peng You-wen^{1,2}, Zheng Dong-jian¹, Wu Zhong-ru¹

(1. Hohai University, Nanjing Jiangsu 210098; 2. Nanchang Institute of Technology, Nanchang Jiangxi 330029)

Key Words: RCC dam; layer; layer elastic modulus; layer thickness; feedback analysis

Abstract: This paper generalizes the layer influence of RCC dam into the whole dam body and takes RCC dam as transverse isotropy. Based on the actual measured data and the finite element method, the feedback analysis is used to calculate the transverse and vertical elastic modulus of RCC dam body. And then, based on equivalent deformation assumption, a model is established to analyze equivalent elastic modulus. Applying the model and the results of feedback analysis equivalent elastic modulus, elastic modulus and thickness of RCC dam layer are solved.

中图分类号: TV642.2; TV131.6

文献标识码: B

1 反演分析原理

碾压混凝土(RCC)坝因是逐层填筑碾压而成, 致使碾压混凝土含有层间弱面(以下简称“层面”)。层面的存在, 使坝体强度降低, 变形和渗透性增大, 层面成为影响碾压混凝土坝强度、稳定和渗流的关键部位。为此, 在结构和渗流分析时要尽可能客观地模拟层面的影响, 以便较准确地分析碾压混凝土坝的变形、应力和渗流情况。但对碾压混凝土坝来说, 由于碾压上层混凝土时, 某些骨料会嵌入下层尚未完全凝固的混凝土或砂浆中, 所以层面不同于两块平板叠合时构成的平整接触面, 也不同于岩体的裂隙面, 它实质上是上下两层混凝土间有一定嵌入的起伏不平的齿合面^[1]。层面与本体间没有很明显的界限, 这为试验精确测定层面厚度和层面物理学参数增加了难度。与此同时, 随着大坝运行时间的增长, 受渗流侵蚀和材料老化以及环境的影响, 层面性态也将发生变化。为此, 本文利用大坝实测变形资料, 结合有限元计算, 对碾压混凝土坝层面弹性模量和层面厚度进行反演分析。

碾压混凝土坝由于层面众多, 若每个层面均用薄片单元模拟, 计算量将非常巨大, 直接反演层面弹性模量和层面厚度有时难以实现。为此, 将层面影响概化到整个坝体中, 根据碾压混凝土坝结构特点, 假定碾压混凝土坝本体和层面为各向

同性体, 由本体和层面组成的坝体整体为横观各向同性体, 设坝体垂直层面方向概化弹性模量(以下简称“竖向弹性模量”)和平行层面方向概化弹性模量(以下简称“横向弹性模量”)分别为 E_v 、 E_h , 利用大坝实测变形资料, 结合有限元计算, 反演出满足目标函数的 E_v 、 E_h 。然后根据变形等效原理, 分别建立 E_v 、 E_h 的正分析模型, 联立 E_v 和 E_h 正分析模型, 即可求解出层面弹性模量 E_v 和层面厚度 b_0 。

2 反演分析方法

2.1 有限元模型

据文献[2], 结点位移和结点荷载之间的平衡方程为:

$$[K]^e \{\delta\}^e = \{R\}^e + \{R_0\}^e \quad (1)$$

式中 $[K]^e$ 为单元刚度矩阵, $\{\delta\}^e$ 为单元节点位移列阵, $\{R\}^e$ 为单元节点荷载, $\{R_0\}^e$ 为单元初始应力等效节点荷载; 其中 $[K]^e$

收稿日期: 2005-03-21

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助(50139030); 教育部跨世纪优秀人才培养基金资助(2003512643); 教育部博士点基金资助(20020294005)

作者简介: 彭友文(1964—), 男, 江西南康人, 博士, 副教授, 主要从事水利水电工程安全监控理论及其应用研究。

设计与施工

表达式为：

$$[K]=\iiint_{\Omega}[B]^T[D][B]d\Omega \quad (2)$$

式中 Ω 为单元计算域 $[B]$ 为单元几何特性矩阵, 与单元的尺寸、形状等有关 $[D]$ 为弹性矩阵, 与弹性模量 E 和泊松比 μ 有关。有层面碾压混凝土坝的等效模型为横观各向同性体, 其弹性矩阵 $[D]$ 为：

$$[D]=\begin{bmatrix} C_1 & C_2 & C_3 & 0 & 0 & 0 \\ C_2 & C_1 & C_3 & 0 & 0 & 0 \\ C_3 & C_3 & C_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_6 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $C_1=\lambda n(1-n\mu^2)$ $C_2=\lambda n\mu_v(1+\mu)$ $C_3=\lambda n\mu_v(1+\mu)$ $C_4=\lambda(1-\mu^2)$ $C_5=\frac{E_v}{2(1+\mu)}$ $C_6=G_v$ $\lambda=\frac{E_v}{(1+\mu)(1-\mu-2n\mu^2)}$ $n=\frac{E_1}{E_v}$ E_1 、 μ_1 为横向弹性模量和泊松比; E_v 、 μ_v 为竖向弹性模量和泊松比; G_v 为竖向平面内的剪切模量。

2.2 反演目标函数

将测点的计算位移值与实测位移值的残差加权平方和, 作为参数反演优化问题的目标函数, 来寻求较为接近实际的碾压混凝土坝横向和竖向弹性模量 E_l 、 E_v 。即目标函数 $E(X)$ 为：

$$E(X)=\sum_{i=1}^n w_i(\delta_i^c-\delta_i^m)^2 \quad X \in D^N \quad (4)$$

式中 n 为观测点总数 w_i 为第 i 个观测点测值的权重; δ_i^c 、 δ_i^m 分别为第 i 个观测点位移的计算值和观测值 D^N 为可行域。

反演参数 E_l 、 E_v 一般都可以给出一个估计范围, 即：

$$a_j \leq E_j \leq b_j \quad (j=l, v) \quad (5)$$

式中 a_j 、 b_j 为第 j 个参数的上、下限值。

因此, 参数反演的优化问题为: 求待定设计变量 E_l 、 E_v , 使其在满足约束条件即式(5)的前提下, 式(4)中目标函数 $E(X)$ 取极小值。因为测点位移是设计变量的非线性隐函数, 因此, 式(4)是非线性加权最小二乘问题。采用加权函数 w_i 的目的是能够考虑测点的重要性和量测精度, 使准确性高的点所占权重重大一些, 误差大的点所占权重小一些。

2.3 反演方法

据文献[3], 大坝变形的统计模型可表达为：

$$\delta = \delta_H + \delta_T + \delta_\theta \quad (6)$$

式中 δ_H 为水压作用下的变形分量; δ_T 为温度变化引起的变形分量; δ_θ 为时效引起变形分量。水压分量 δ_H 、温度分量 δ_T 和时效分量 δ_θ 的统计模型表达式分别为

$$\delta_H = \sum_{i=0}^m a_i(H^i - H_0^i) \quad (7)$$

$$\delta_T = \sum_{i=1}^{m_1} [b_{1i}(\sin \frac{2\pi it}{365} - \sin \frac{2\pi i t_0}{365}) + b_{2i}(\cos \frac{2\pi it}{365} - \cos \frac{2\pi i t_0}{365})] \quad (8)$$

$$\delta_\theta = c_1(\theta - \theta_0) + c_2(\ln \theta - \ln \theta_0) \quad (9)$$

式中 a_i 为水压分量回归系数; i 为水头的指数 m 为项数重力坝 $m=3$, 拱坝 $m=4$ H 为观测日水深 H_0 为起测日水深 b_{1i} 、 b_{2i} 为温度因子回归系数 $m_1=1 \sim 2$ 表示年周期、半年周期 c_1 、 c_2 为时效因子回归系数 γ 为从起测日至观测日的累计天数 t_0 为从起测日至所计算时段起始日的天数; θ 为从测点起测日开

始的天数乘以 0.01; θ_0 为时段初始日至起测日的累计天数乘以 0.01。

综上所述, 由式(6)可得到水压分量

$$\delta_H = \delta - \delta_T - \delta_\theta = \delta - a_0 - \sum_{i=1}^m [b_{1i}(\sin \frac{2\pi it}{365} - \sin \frac{2\pi i t_0}{365}) + b_{2i}(\cos \frac{2\pi it}{365} - \cos \frac{2\pi i t_0}{365})] - c_1(\theta - \theta_0) - c_2(\ln \theta - \ln \theta_0) \quad (10)$$

由式(10)计算出水压分量。反演时因泊松比变化较小, 所以在反演层面厚度时认为不变, 本体弹性模量也可认为不变。常规大坝反演一般是利用有限元计算不同水位作用下的大坝任意点的变形, 然后根据实际情况, 用多项式拟合水深和变形水压分量的关系, 并用调整系数 X 来考虑计算参数取值和实际参数不同的影响, 即 $\delta_H = X \sum_{i=0}^m a_i H^i$ 。对于碾压混凝土大坝, 其弹性模量为双向异性, 难以用一个参数来调整计算参数和实际参数的不同, 为此可在竖向弹性模量 E_v 和横向弹性模量 E_l 的取值范围内, 通过反复试算求得计算的变形场和实测变形场中满足目标函数的 E_v 和 E_l 。

2.4 竖向和横向弹性模量正分析模型

根据碾压混凝土坝整体为横观各向同性的假定(许多试验成果也证实了该假定的合理性), 即层面水平各方向(x 和 y 向)等效弹性模量和泊松比相同, 竖向(z 向)与水平方向弹性模量和泊松比不同, 可以在确定等效弹性模量和泊松比等参数时简化为平面问题建立模型, 以便分析计算。

碾压混凝土坝整体(等效体)应变 $\varepsilon_i(i=x, z)$ 、 γ_{xz} 与应力 $\sigma_i(i=x, z)$ 、 τ_{xz} 有如下关系：

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1-\mu_{12}^2}{E_l} & -\frac{\mu_{31}(1+\mu_{12})}{E_v} & 0 \\ -\frac{\mu_{13}(1+\mu_{12})}{E_l} & \frac{1-\mu_{13}\mu_{31}}{E_v} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_z \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

式中 μ_{12} 为等效水平向(横向)泊松比; μ_{13} 为沿横向拉伸时决定竖向收缩量的等效泊松比; μ_{31} 为沿竖向拉伸时决定横向收缩量的等效泊松比; G_{13} 为等效竖向剪切模量; E_l 、 E_v 分别为等效横向和竖向弹性模量。

又因为碾压混凝土坝本体和层面分别为各向同性体, 设其弹性模量和泊松比分别为 E_i 、 μ_i (下标 $i=a$ 表示层面 ρ 表示本体); 层面厚度 b_a 占碾压层厚度的比例为 β 。本体和层面应变 $\varepsilon_j(j=x, z)$ 、 γ_{xz} 与应力 $\sigma_j(j=x, z)$ 、 τ_{xz} 有如下关系：

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{ix} \\ \varepsilon_{iz} \\ \gamma_{ixz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1-\mu_i^2}{E_i} & -\frac{\mu_i(1+\mu_i)}{E_i} & 0 \\ -\frac{\mu_i(1+\mu_i)}{E_i} & \frac{1-\mu_i^2}{E_i} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2(1+\mu_i)}{E_i} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{ix} \\ \sigma_{iz} \\ \tau_{ixz} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

令 $E_i' = \frac{E_i}{1-\mu_i^2}$ 、 $\mu_i' = \frac{\mu_i}{1-\mu_i}$ 。假定所建立模型等效体与由层面和

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \varepsilon_{ax} = \varepsilon_{cx} \\ \varepsilon_z = \beta \varepsilon_{az} + (1-\beta) \varepsilon_{cz} \\ \sigma_x = \beta \sigma_{ax} + (1-\beta) \sigma_{cx} \\ \sigma_z = \sigma_{az} = \sigma_{cz} \end{cases} \quad (13)$$

经相关变换, 并利用马克斯韦尔定理, 最后得到等效模型

横向和竖向弹性模量为:

$$\begin{cases} E_t = \left(\frac{1-\mu_c'^2}{S_{11}} \right) = [\beta E_a' + (1-\beta)E_c'] \left\{ 1 - \left[\frac{E_c \mu_c (1-\beta) + E_a \mu_a \beta}{E_c(1-\beta) + E_a \beta} \right]^2 \right\} \\ E_c = 1 / \left\{ \frac{\beta E_a' (1-\mu_a') + (1-\beta) E_c' (1-\mu_c')}{E_a' E_c'} + \frac{[\beta \mu_a' + (1-\beta) \mu_c']^2}{\beta E_a' + (1-\beta) E_c'} + \right. \\ \left. \frac{[\beta \mu_a' + (1-\beta) \mu_c'] [E_c (1-\beta) (1-\mu_c) + E_a \beta (1-\mu_a)]}{[\beta E_a' + (1-\beta) E_c'] [E_c (1-\beta) (1-\mu_c) + E_a \beta (1-\mu_a)]} \right\} \end{cases} \quad (14)$$

3 实例分析

3.1 工程概况

某水电站拦河大坝为整体式碾压混凝土重力坝, 由于两岸接头要求, 坝轴线呈折线形布置, 坝顶高程 145 m, 坝顶长 196.62 m, 最大坝高 63 m, 溢流坝布置在河床中间, 两岸为非溢流坝段。水库总库容 1.06 亿 m³, 正常蓄水位 143 m, 死水位 137 m, 校核洪水位 144.17 m。大坝坝基位于峡谷中。大坝布置有变形观测系统, 其中水平位移采用视准线观测, 视准线位于坝顶上游(坝下 0-001), 全长 198.47 m, 左右两岸各布设工作基点 A 点和 B 点, 以及校核基点点和点。视准线中间布置 3 个观测墩, 分别为 I(0+070.50)、I(0+106.50)、I(0+142.50)。

3.2 反演结果

(1) 由上述方法反演分析得到碾压混凝土坝竖向弹性模量 E_v 和横向弹性模量 E₁ 分别为 2.581 2×10⁴ MPa 和 2.714 4×10⁴ MPa, 本体弹性模量与竖向弹性模量之比在 1.1 左右, 这与有关文献试验成果较为接近^[4], 说明反演的方法是正确的。

(2) 求得 E₁ 和 E_v 后, 利用该坝现场取样试验资料 μ_a=0.3, μ_c=0.163, E_c=(2.012 3~3.675 1)×10⁴ MPa, 取 E_c=2.843 5×10⁴ MPa; 求解式(14)得出 E_a=1.058×10⁴ MPa, β=0.075, 因碾压层厚度为 30 cm, 这样求得该碾压混凝土大坝层面平均厚度 b_a 为 2.25 cm。为进行对比分析, 笔者还应用材料力学方法建立了横向和竖向弹性模量正分析模型, 应用该模型求解得 E_a=1.27×10⁴ MPa, β=0.082, 层面平均厚度 b_a 为 2.46 cm。

4 结论

本文利用等效模型, 同时基于实测资料, 结合有限元分析反演层面弹性模量和厚度, 为客观模拟层面影响提供了科学依据。

(1) 应用将层面影响概化到坝体整体的等效模型, 基于变形实测资料, 结合有限元分析计算变形场, 并通过与实测变形场的残差加权平方和最小值作为参数反演优化问题的目标函数, 比用薄层单元模拟层面的计算量大大减小, 且实例也表明, 反演成果较切合实际情况, 说明反演的方法是正确的。

(2) 通过联立求解由变形等效建立的竖向弹性模量 E_v 和横向弹性模量 E₁ 的正分析模型, 同时利用反演得到的 E_v 和 E₁ 成果, 推求出层面弹性模量和厚度, 为反演层面参数找到了一种有效的方法。

(3) 实例反演结果表明, 基于弹性理论计算模型反演出的层面弹性模量和层面厚度, 比材料力学模型的结果小。分析其原因, 主要是因为弹性理论计算模型综合考虑了本体与层面之间泊松比、弹性模量的差异影响, 模型反映出本体对层面的牵制作用; 而材料力学理论计算模型未考虑本体与层面之间泊松比的差异, 认为本体与层面的自由变形一致。因此, 基于弹性理论的计算模型比基于材料力学理论的计算模型更合理。

参考文献:

- [1] 杨华全, 任旭华. 碾压混凝土的层面结合与渗流[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [2] 彭友文, 等. RCC 坝双向异弹模对位移的影响[J]. 水力发电, 2005 (1).
- [3] 吴中如, 等. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 江苏: 河海大学出版社, 1990.
- [4] 林长农, 等. 龙滩有层面碾压混凝土的试验研究[J]. 水力发电学报, 2001 (3).

(上接第 21 页)

表 3 计算结果比较

方法	均值 \bar{x} (/m ³ /s)	变差系数 C _v	偏态系数 C _s	拟合误差		
				误差平方	离差绝对值	相对离差平方
矩法	2 715.02	0.343 9	0.433 4	4 998 440	10 299.3	0.4
单权函数法	2 715.02	0.343 9	1.275 8	2 102 976	5 314.6	0.1
层次单权函数法	2 726.16	0.352 5	1.473 8	1 709 325	5 011.9	0.1
目估适线法	2 590	0.36	1.44	2 278 289	5 701.7	0.1

可靠性拟定权重, 避免了以往算法尽力靠近大洪水的不合理做法, 更符合实际, 而且拟合效果较佳, 略优于其他几种计算方法, 该算法的结果与工程上常用的目估适线法结果接近, 具有一定的工程参考价值。

当然, 根据资料系列长短或大小的不同及频率曲线的功用, 层次分析中的措施层可再细化, 以进

一步细化权重, 提高精度。此外, 层次分析法具有一定主观性, 如何在应用中避免还有待研究。

参考资料:

- [1] 马秀峰. 计算水文频率参数的权函数法[J]. 水文, 1984 (3): 1-8.
- [2] 刘光文. 皮尔逊 III 型分布参数估计[J]. 水文, 1990 (4): 1-5.
- [3] 宋德敦, 丁晶. 概率权重矩法及其在 P-III 型分布中的应用[J]. 水利学报, 1988, (3): 1-11.
- [4] Greenwood, J.A. et al. Probability Weighted moments: definition and relation to parameters of several expressible in inverse form[J]. Water Resources Res, 1979, 15(5): 776-789.
- [4] 赵焕臣, 许树柏, 等. 层次分析法——一种简易的新决策方法[M]. 北京: 科学出版社, 1986.2-29.
- [5] 陈珽. 决策分析[M]. 北京: 科学出版社, 1987.38-45.
- [6] T.L. Saaty. The Analytic Hierarchy Process[M]. McGraw Hill, Inc., 1980.17-46.
- [7] 水利部长江水利委员会水文局等. 水利水电工程设计洪水计算手册[K]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995.56-84.