

渗流连续原理确定 RCC 坝层面厚度的适应性

彭友文¹, 顾冲时²

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

摘要 利用变形等效原理建立了碾压混凝土坝等效弹性模量正分析模型, 分析了按渗流连续原理确定的层面厚度对等效弹性模量的影响, 结果显示等效弹性模量 E_1 和 E_v 几乎均等于本体弹性模量 E_c , 即层面对坝体的弹性模量几乎没有影响, 与实际情况不符。理论分析和实例计算表明, 按渗流连续原理确定的层面厚度应用在变形分析中是偏小的, 在变形分析中采用该厚度是不适宜的。

关键词 渗流连续原理; 碾压混凝土坝; 层面厚度; 变形分析; 适应性

中图分类号: TV139.14; TV642.2 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2005)06-0028-03

Study on adaptability of continuous seepage principle used for determining layer thickness of RCCD//PENG You-wen¹, GU Chong-shi² (1. Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330029, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract Based on the equivalent deformation principle, an equivalent elastic modulus model for RCCDs was developed to analyze the influence of layer thickness determined by the continuous seepage principle on the equivalent elastic modulus. The result shows that the equivalent elastic moduli E_1 and E_v almost equal to the elastic modulus E_c of the dam body. In other words, the layer thickness has little influence on the elastic modulus of the dam body. The above conclusion does not accord with the reality. Furthermore, the adaptability of the layer thickness in deformation analysis was discussed, and the theoretical analysis and case study show that the layer thickness determined by the continuous seepage principle is too small to be adopted for deformation analysis of the dam body.

Key words: continuous seepage principle; RCCD; layer thickness; deformation analysis; adaptability

碾压混凝土(RCC)坝由于采用薄层通仓浇筑的施工工艺, 存在许多层间弱面(简称层面), 层面的弹性参数、强度指标等均与碾压混凝土本体相异。为此, 在对碾压混凝土坝进行变形分析时, 对层面的模拟无论是采用薄层单元, 还是等效模型, 都需确定层面厚度。但对碾压混凝土坝来说, 层面是由于碾压上层混凝土时, 某些骨料嵌入下层尚未完全凝固的混凝土或砂浆中而形成的, 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], 层面与本体间没有明显的界限, 这为测定层面厚度增加了难度。目前, 层面厚度主要是根据渗流连续原理^[2]确定, 即利用试验测得碾压混凝土本体渗透系数和综合渗透系数, 然后认为总渗流量等于本体渗流量与层面渗流量之和。由于采用渗流连续原理确定层面厚度过程中, 假定层面渗流为层流状态, 基本符合立方定律, 因此用该法确定的层面厚度

为层面等效水力隙宽, 是否适宜在碾压混凝土的应力、变形分析中应用, 有待进一步研究。

1 渗流连续原理确定层面厚度

渗流连续原理确定碾压混凝土层面厚度, 即利用试验测得本体渗透系数 k_0 和综合渗透系数 k , 由总渗流量等于本体渗流量与层面渗流量之和来推求。设层面厚度为 b_a , 碾压层厚度为 B , 本体厚度 b_c 等于 $(B - b_a)$, 根据文献[2], 层面厚度为

$$b_a = \left[\frac{12\nu B(k - k_0)}{g} \right]^{\frac{1}{3}} \tag{1}$$

式中: g 为重力加速度; ν 为运动黏滞系数。

2 适应性分析原理

据有限元法, 结点位移和结点荷载之间有如下平衡方程:

$$K^e \delta^e = R^e + R_0^e \tag{2}$$

基金项目: 教育部跨世纪优秀人才培养基金(2003512643); 教育部博士点基金(20020294005)

作者简介: 彭友文(1964—), 男, 江西南康人, 副教授, 博士研究生, 从事水电工程安全监控理论及应用研究。

式中: δ^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; K^e 为单元刚度矩阵, 表达式为

$$K^e = \iint_{\Omega} B^T D B d\Omega \quad (3)$$

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。

由此可知, 单元刚度矩阵 K^e 与单元的尺寸、形状及弹性模量和泊松比等有关。对某一坝体而言, 单元的尺寸和划分后的形状是不随材料特性而变的, 泊松比的变化也很小^[3], 变化的主要是弹性模量。因此, 渗流连续原理确定的层面厚度在变形分析中的适应性, 可以通过分析该法确定的层面厚度对弹性模量的影响是否符合实际状况来判断。

3 适应性分析方法

3.1 基本假定

根据碾压混凝土的实际状况, 同时为了便于分析, 在满足工程精度的前提下作如下假定:

a. 本体和层面分别为弹性各向同性体, 由本体和层面组成的坝体整体为横观各向同性体。碾压混凝土本体一般可认为是各向同性体, 层面不同于两块平板叠合时构成的平整接触面那样, 而是突变的, 其弹性参数应按某一规律沿垂直层面方向变化, 但由于弹性参数的变化规律目前还难以确定, 且据文献[4], 弹性参数的变化一般不是很大, 且层面很薄, 因此在分析中, 也可近似认为层面是各向同性体。因碾压混凝土坝的碾压厚度一般是不变的, 即层面是均匀分布的, 故可将坝体整体视为横观各向同性体。许多试验成果也证实了该假定的合理性。

b. 假定所建立的等效连续单元体模型的变形等于在相同荷载作用下层面变形与本体变形之和, 即变形等效。

3.2 建立等效弹性模量正分析模型

根据碾压混凝土横观各向同性的假定, 水平各向(x, y 向)等效弹性模量和泊松比相同, 竖向(z 向)与水平向弹性模量和泊松比不同。为了分析方便, 在确定等效弹性模量时以平面问题为例建立模型。

碾压混凝土坝整体(等效体)应变 $\epsilon_x, \epsilon_z, \gamma_{xz}$ 与应力 $\sigma_x, \sigma_z, \tau_{xz}$ 有如下关系:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1-\mu_{12}^2}{E_1} & -\frac{\mu_{31}(1+\mu_{12})}{E_v} & 0 \\ -\frac{\mu_{13}(1+\mu_{12})}{E_1} & \frac{1-\mu_{13}\mu_{31}}{E_v} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_z \\ \tau_{xz} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: μ_{12} 为等效水平向(横向)泊松比; μ_{13} 为横向拉伸(压缩)时决定竖向收缩(拉伸)量的等效泊松比; μ_{31} 为竖向拉伸(压缩)时决定横向收缩(拉伸)量的等效泊松比; G_{13} 为等效竖向剪切模量; E_1, E_v 分别为等效横向和竖向弹性模量。

碾压混凝土坝本体和层面分别为各向同性体, 设本体和层面弹性模量分别为 E_c 和 E_a , 泊松比分别为 μ_c 和 μ_a , 厚度分别为 b_c, b_a , 层面总厚度占坝体总高度的比例为 β , 则本体和层面应变 $\epsilon_{ix}, \epsilon_{iz}, \gamma_{ixz}$ 与应力 $\sigma_{ix}, \sigma_{iz}, \tau_{ixz}$ 有如下关系($i = c, a$, 分别表示本体和层面):

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{ix} \\ \epsilon_{iz} \\ \gamma_{ixz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1-\mu_i^2}{E_i} & -\frac{\mu_i(1+\mu_i)}{E_i} & 0 \\ -\frac{\mu_i(1+\mu_i)}{E_i} & \frac{1-\mu_i^2}{E_i} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2(1+\mu_i)}{E_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{ix} \\ \sigma_{iz} \\ \tau_{ixz} \end{bmatrix} \quad (5)$$

令 $E_i' = \frac{E_i}{1-\mu_i^2}$, $\mu_i' = \frac{\mu_i}{1-\mu_i}$ 。根据假定, 等效连续单元体的变形等于在相同荷载作用下层面变形与本体变形之和, 即有如下关系:

$$\begin{cases} \epsilon_x = \epsilon_{ax} = \epsilon_{cx} \\ \epsilon_z = \beta \epsilon_{az} + (1-\beta) \epsilon_{cz} \\ \sigma_z = \sigma_{az} = \sigma_{cz} \\ \sigma_x = \beta \sigma_{ax} + (1-\beta) \sigma_{cx} \end{cases} \quad (6)$$

经相关变换, 并利用马克斯韦定理, 可得等效横向和竖向弹性模量分别为

$$\begin{aligned} E_1 &= [\beta E_a' + (1-\beta) E_c'] \cdot \left\{ 1 - \left[\frac{E_c \mu_c (1-\beta) + E_a \mu_a \beta}{E_c (1-\beta) + E_a \beta} \right]^2 \right\} \\ E_v &= \left\{ \frac{\beta E_c' (1-\mu_a'^2) + (1-\beta) E_a' (1-\mu_c'^2)}{E_a' E_c'} + \frac{[\beta \mu_a' + (1-\beta) \mu_c']^2}{\beta E_a' + (1-\beta) E_c'} + \frac{[\beta \mu_a' + (1-\beta) \mu_c']^2}{\beta E_a' + (1-\beta) E_c'} \right\} \cdot \frac{E_c (1-\beta) (1-\mu_c) + E_a \beta (1-\mu_a)}{E_c (1-\beta) (1+\mu_c) + E_a \beta (1+\mu_a)} \end{aligned} \quad (7)$$

3.3 适应性分析

渗流连续原理确定的层面厚度在变形分析中的适应性, 可以通过分析该法确定的层面厚度对弹性模量的影响是否符合实际状况来判断。据文献[5], 渗流连续原理确定的层面厚度一般很小。为具体说明, 选用文献[6]资料, 碾压层厚度 30 cm, 由渗流连续原理确定的层面厚度为 0.02 cm, β 为 0.000 667, 代入式(7)和式(8)。假定本体和层面泊松比相等(该

假定不影响分析的结果),计算结果显示等效弹性模量 E_1 和 E_v 几乎均等于本体弹性模量 E_c ,也就是说层面对坝体的弹性模量几乎没有影响,这与实际情况不符.很多试验成果^[4,7,8]表明,碾压混凝土筑坝由于层面的存在,会引起坝体整体弹性模量降低,特别是竖向弹性模量降低更多,从而形成坝体双向异弹模,即水平各个方向(横向)具有相同的弹性模量,竖向弹性模量与横向则不同,使碾压混凝土坝具有横观各向同性性质.美国上静水坝的碾压混凝土材料试验表明,碾压混凝土的等效竖向弹性模量 E_v ,仅为等效横向弹性模量 E_1 的 1/2 左右.龙滩工程现场碾压混凝土 D 和 E 工况试件,进行了等效横向弹性模量 E_1 和竖向弹性模量 E_v 的测试,测得 E_v 和 E_1 之比约为 0.8.这就是说,实际上层面的存在引起了坝体整体弹性模量的明显降低,但采用渗流连续原理确定的层面厚度计算等效弹性模量,结果显示等效弹性模量 E_1 和 E_v 没有降低,几乎均与本体弹性模量 E_c 相等.这表明该厚度不能很好地反映出层面对坝体整体弹性模量的降低作用,在一定程度上减小了层面对坝体的真实影响.

为进一步说明,笔者基于原型观测资料结合有限元分析,以某水电站整体式碾压混凝土重力坝为例,对层面厚度进行了反演,反演结果为:垂直层面方向弹性模量 $E_v = 2.5812 \times 10^4$ MPa,平行层面方向弹性模量 $E_1 = 2.7144 \times 10^4$ MPa,本体弹性模量 E_c 与垂直层面方向弹性模量 E_v 之比在 1.1 左右,这与有关文献试验成果较为接近^[4].利用反演得到的 E_1 和 E_v ,采用该坝现场取样试验资料; $\mu_a = 0.3$, $\mu_c = 0.163$, $E_c = 2.0123 \times 10^4 \sim 3.6751 \times 10^4$ MPa,求得该碾压混凝土大坝层面平均厚度 $b_a = 2.25$ cm, $\beta =$

0.075.而采用渗流连续原理确定的层面厚度 b_a 仅为 3.99×10^{-5} cm,与反演结果相差甚远.

4 结 语

本文利用变形等效原理建立等效弹性模量正分析模型,通过分析层面厚度对等效弹性模量的影响,探讨了渗流连续原理确定的层面厚度在变形分析中的适应性,得到如下结论:渗流连续原理确定的层面厚度结果偏小,不能很好地反映出层面对坝体整体弹性模量的降低作用,在一定程度上减小了层面对坝体的真实影响,因此,在变形分析中采用该厚度是不适宜的.

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:水利水电出版社,1999.
[2] 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,2001.41—42.
[3] 吴中如.水工建筑物安全监控理论及其应用[M].南京:河海大学出版社,1990.279.
[4] 林长农,金双全,涂传林.龙滩有层面碾压混凝土的试验研究[J].水力发电学报,2001,74(3):117—129.
[5] 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.
[6] 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,2001.46.
[7] 成方,安冬英,林长农,等.碾压混凝土坝层面极限拉伸试验研究[J].红水河,2001,20(2):62—73.
[8] 孙恭尧,孙君森.碾压混凝土变形特性及其对重力坝分析的影响[J].红水河,1999,18(2):12—18.

(收稿日期 2005-08-25 编辑 骆超)

· 简讯 ·

“国际水文研究方法学术研讨会”在河海大学举行

由河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室等单位主办的“国际水文研究方法学术研讨会”于 2005 年 10 月 30 日至 11 月 1 日在河海大学隆重举行.来自美国、英国、法国、德国、日本、澳大利亚、波兰、韩国、泰国、尼泊尔、中国香港等 10 多个国家及地区的近 200 名专家学者相聚河海大学,探索数字时代水文科学及其相关领域的重要学术问题,研讨水文科学的机遇、挑战和水文研究方法的未来,交流水文研究方法的经验、成果和最新动态.会上,水利部水文局副局长张建云教授、IAHS 秘书长 Pierre Hubert 博士、美国路易斯安娜州立大学 Vijay P Singh 教授、教育部“长江学者”特聘教授余钟波博士、波兰国家科学院 Witold G Strupczewski 教授分别作了主题发言,然后分三个分会场举行研讨会,IAHS 正在实施的“无资料流域水文预报预测(PUB)”十年计划 2005~2007 专题工作会议也同时召开.本次会议以水文研究方法为主题,共收到学术论文 180 多篇,会后由英国 IAHS 出版社出版 Ei Compendex 检索的 IAHS 系列论文集(Red Book).

(本刊编辑部供稿)