

碾压混凝土坝结构性态的块体元与有限元耦合分析模型

朱国金,苏怀智,胡灵芝

(河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 将有限元和块体元相结合,用有限元描述碾压混凝土本体内部的位移场和应力场,用块体元从整体上分析层面的影响.在有限元和块体元耦合效应分析的基础上,针对碾压混凝土坝的成层特点和分区界面之间变形的不连续性,建立了碾压混凝土坝的变形分析模型,并编制了相应的耦合计算分析程序.实例表明,该分析模型能较好地模拟碾压混凝土坝的工作性态,既可描述碾压混凝土坝的复杂变形,又可分析其破坏过程,充分发挥了块体元与有限元各自的优势.

关键词 碾压混凝土坝 块体元 有限元 耦合分析

中图分类号 :TV642.2 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2005)06-0638-04

碾压混凝土坝由于实行薄层碾压,因此存在众多的水平施工层面.这些层面如果间歇时间控制欠妥、处理不当,往往成为渗流的主要通道和抗滑稳定的薄弱面.在各种荷载作用下,可能出现碾压层面的张开、闭合和滑动等不连续变形情形,影响坝体的连续性和内力传递.这使得碾压混凝土坝的结构性态分析比普通重力坝复杂得多.

作为一种力学状态分析方法,有限元法被广泛应用于碾压混凝土坝变形、应力、渗流特性的分析中,在连续小变形、小位移分析方面取得了巨大的成功.但为了解决实际工程中的复杂边界和界面不连续的边值问题,常常需要引进大量的特殊单元,如薄层单元、Goodman 单元等.这在网格剖分以及数据处理上会带来很大的困难,甚至可能使计算无法进行,而且还会影响有限元的计算精度^[1].近年来,离散元、块体元^[2]、DDA 等的发展为求解非连续介质力学问题提供了有效的途径.这些方法能充分考虑结构的实际不连续性,能够用来进行碾压混凝土层面的力学分析,但它们大多过分强调结构面的作用,而对于结构体的变形未给予足够的重视,虽然可以用于原生界面的破坏分析,但不能模拟实际结构体的破坏过程^[3].

考虑碾压混凝土坝的成层特点以及分区界面之间变形的不连续性,本文基于将整体(块体间)的不连续与局部(块体内)的连续相结合的思想,用有限元法描述碾压混凝土本体内部的变形,用块体元法的块体运动学理论来反映层面的影响,从而结合了块体元和有限元两者的优点,形成一种既能合理处理系统中块体间的运动变形关系,又能有效描述块体内变形分布的数值模拟技术,以便更有效地研究碾压混凝土坝的结构性态.

1 块体元与有限元

1.1 块体元控制方程

将碾压混凝土坝离散为 n 个块体单元,块体之间为层面单元,这样计算域 v 就由层面单元构成的 v_1 和由块体单元构成的 v_2 两部分组成.块体元以块体形心处的刚体位移作为基本未知量,用分片的刚体位移模式逼近实际位移场,用块体单元间的层面单元反映结构的物理性质.假定在外力作用下,第 i 块的刚体位移为

$$\{\delta_C^e\}_i = [u_i \ v_i \ w_i \ \theta_{xi} \ \theta_{yi} \ \theta_{zi}]^T \tag{1}$$

式中 $u_i, v_i, w_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}$ 分别为该块体单元在整体坐标系 xyz 下沿坐标轴方向的平移和绕坐标轴的转角,则边界面上的某一点的位移为

收稿日期 2005-01-05
基金项目 国家自然科学基金重点资助项目(50139030);教育部“跨世纪优秀人才培养计划”基金资助项目(2003512643)
作者简介 朱国金(1978—),男,江苏建湖人,硕士研究生,主要从事水工结构数值计算分析研究.

$$f = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = N_i \{ \delta_C^e \}_i \tag{2}$$
$$N_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z - z_{ci} & -y + y_{ci} \\ 0 & 1 & 0 & -z + z_{ci} & 0 & x - x_{ci} \\ 0 & 0 & 1 & y - y_{ci} & -x + x_{ci} & 0 \end{bmatrix}$$

式中 x_{ci}, y_{ci}, z_{ci} 是第 i 块单元的形心坐标.

因此,在局部坐标系 $x'y'z'$ 下,第 i 块和第 j 块之间的层面上任一点的位移为

$$f' = \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{bmatrix} = LN_i \{ \delta_C^e \}_i \tag{3}$$

式中 L 为整体坐标系和局部坐标系之间的方向余弦矩阵.

一般层面单元厚度 b_a 很小,可认为在层面 x' 和 y' 方向为平面应变问题^[4],得层面应变为

$$\varepsilon' = \begin{bmatrix} \gamma_{x'z'} \\ \gamma_{y'z'} \\ \varepsilon_{z'} \end{bmatrix} = \frac{1}{b_a} (f'_i - f'_j) = \frac{1}{b_a} LN \delta_C^e \tag{4}$$
$$N = [N_i \quad -N_j]^T$$
$$\delta_C^e = \{ (\delta_C^e)_i \quad (\delta_C^e)_j \}^T$$

层面应力为

$$\sigma' = D' \varepsilon' = \frac{1}{b_a} D' LN \delta_C^e \tag{5}$$
$$D' = \frac{E_2}{m} \begin{bmatrix} n(1 - n\mu_2^2) & n(1 + \mu_1)\mu_2 & 0 \\ n(1 + \mu_1)\mu_2 & (1 - \mu_2^2) & 0 \\ 0 & 0 & Gm/E_2 \end{bmatrix}$$

式中 $n = E_1/E_2, m = (1 + \mu_1)(1 - \mu_1 - 2n\mu_2^2)$; E_1, μ_1 ——垂直层面的弹性模量和泊松比; E_2, μ_2, G ——平行层面的弹性模量、泊松比以及剪切模量.

运用变分原理可得块体单元法的控制方程^[2]

$$K_C \delta_C = R' \tag{6}$$

式中 K_C ——块体元的整体劲度矩阵; R' ——整体荷载列阵; δ_C ——块体元整体位移列阵.

1.2 有限元控制方程

利用有限元来模拟碾压混凝土本体的变形行为.采用 20 节点等参单元来划分碾压混凝土本体,碾压混凝土本体单元内任意一点的位移为

$$f = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = M \delta_R^e \tag{7}$$

式中 M ——20 节点等参单元位移形函数矩阵; δ_R^e ——单元节点位移列阵.

运用变分原理可以得到有限元控制方程^[5]

$$K_R \delta_R = R'' \tag{8}$$

式中 K_R ——有限元整体劲度矩阵; δ_R ——有限元整体节点位移列阵; R'' ——整体荷载列阵.

2 基于块体元与有限元耦合的碾压混凝土坝结构性态分析模型

用有限元来描述碾压混凝土本体变形时,式(2)应表示为

$$f = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = LM \delta_R^e \tag{9}$$

则某一层面的应变和应力表述为

$$\boldsymbol{\varepsilon}' = \begin{bmatrix} \gamma_{x'z'} \\ \gamma_{y'z'} \\ \varepsilon_{z'} \end{bmatrix} = \frac{1}{b_a} (\boldsymbol{f}'_i - \boldsymbol{f}'_j) = \frac{1}{b_a} \boldsymbol{L} \boldsymbol{M} \boldsymbol{\delta}_C^e \tag{10}$$

$$\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{D}' \boldsymbol{\varepsilon}' = \frac{1}{b_a} \boldsymbol{D}' \boldsymbol{L} \boldsymbol{M} \boldsymbol{\delta}_C^e \tag{11}$$

式中： $\boldsymbol{M} = [\boldsymbol{M}_i \quad -\boldsymbol{M}_j]^T$ ； $\boldsymbol{\delta}_C^e = [(\{\boldsymbol{\delta}_R^e\}_i)^T (\{\boldsymbol{\delta}_R^e\}_j)^T]^T$ 。

由此可以得到层面单元劲度矩阵

$$\boldsymbol{k}_C = \frac{1}{b_a^2} \int_{v_1} \boldsymbol{M}^T \boldsymbol{L}^T \boldsymbol{D}' \boldsymbol{L} \boldsymbol{M} \mathrm{d}v \tag{12}$$

用最小势能原理导出系统的控制方程。系统的内力势能由两部分组成：碾压混凝土本体的变形势能以及层面单元的势能。计算式为

$$U = \sum_{i=1}^{N_1} \frac{1}{2} \int_{v_1} (\boldsymbol{\delta}_C^e)^T \boldsymbol{k}_C \boldsymbol{\delta}_C^e \mathrm{d}v + \sum_{i=1}^{N_2} \frac{1}{2} \int_{v_2} (\boldsymbol{\delta}_R^e)^T \boldsymbol{k}_R \boldsymbol{\delta}_R^e \mathrm{d}v \tag{13}$$

式中： N_1 ——层面元个数； N_2 ——本体划分的有限单元个数。

系统的外力势能为

$$V = - \sum_{i=1}^{N_2} \left(\boldsymbol{f}^T \boldsymbol{P}_i + \int_s \boldsymbol{f}^T \bar{\boldsymbol{p}}_i \mathrm{d}s + \int_v \boldsymbol{f}^T \boldsymbol{p}_i \mathrm{d}v \right) = - \sum_{i=1}^{N_1} (\{\boldsymbol{\delta}_R^e\}_i)^T \{\boldsymbol{R}^e\}_i \tag{14}$$

式中： $\{\boldsymbol{R}^e\}_i$ ——单元的等效荷载列阵； $\boldsymbol{P}_i, \bar{\boldsymbol{p}}_i, \boldsymbol{p}_i$ ——作用在本体单元上的集中力、面力以及体力集度。

系统的总势能为

$$\Pi = U + V = \frac{1}{2} \boldsymbol{\delta}^T \boldsymbol{K} \boldsymbol{\delta} - \boldsymbol{\delta}^T \boldsymbol{R} \tag{15}$$

由总势能变分可得耦合的控制方程

$$\boldsymbol{K} \boldsymbol{\delta} = \boldsymbol{R} \tag{16}$$

式中： $\boldsymbol{K}$ ——总体的劲度矩阵，由本体单元劲度矩阵和层面单元劲度矩阵组装而成； $\boldsymbol{\delta}$ ——整体位移列阵； $\boldsymbol{R}$ ——总体等效荷载列阵，由 $\boldsymbol{R}_i^e$ 形成。

3 算 例

3.1 计算模型和参数值

以某碾压混凝土重力坝为例进行分析。该碾压混凝土坝坝顶高程为 316 m，最大坝高 57 m。碾压混凝土本体和层面力学参数见表 1。计算范围：坝体向上游取约 2 倍的坝高，向下游取约 1.5 倍的坝高，坝基面以下取约 1.8 倍的坝高。对其进行块体元和有限元剖分，共划分有限单元 3 150 个，块体单元 1 830 个。

3.2 计算成果分析

基于块体元与有限元的耦合方法以及确定层面计算厚度的方法，应用自编的三维块体元和有限元耦合分析程序 B-FEM.F，对该碾压混凝土坝位移场进行了分析计算，其对应 135.0 m、140.0 m 和 144.5 m 库水位时的坝顶水平位移见图 1。此外，为比较分析，图 1 中还画出了利用统计模型[6]分离得到的水平位移的水压分量以及有限元计算结果。

由图 1 可以看出，利用本文耦合分析程序计算的结果与统计模型的分离结果接近，且较有限元计

表 1 材料计算参数取值

Table 1 Calculation parameters of material			
部位	弹性模量/GPa	泊松比	渗透系数/ ($10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)
本体	20.4	0.167	2.37×10^{-3}
层面	19.3(平行层面方向) 14.6(垂直层面方向)	0.169	1.13

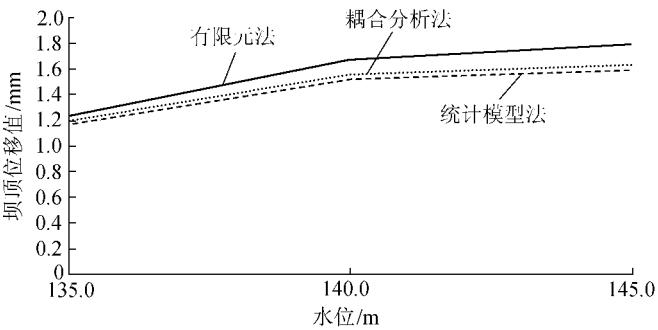


图 1 计算成果对比分析

Fig.1 Comparison of calculated results by different methods

算结果更接近实际情况.由于统计模型是基于实测资料建立起来的,其分离结果能比较真实地反映实际情况.本文提出的碾压混凝土的块体元与有限元耦合计算分析模型比较合理.

4 结 论

本文针对碾压混凝土坝的成层特点和分区界面间变形的不连续性,研究了块体元与有限元的耦合效应,推导出耦合控制方程.利用块体元来模拟某碾压混凝土坝的层面,并采用空间 20 节点等参元来描述碾压混凝土坝本体位移场和应力场,建立了碾压混凝土坝变形分析模型.实例计算结果表明,该模型能较好地模拟碾压混凝土坝的性质,为分析碾压混凝土坝的工作性态提供了一种有效方法.

参考文献：

[1] 顾冲时,程乐群,李婷婷. 探讨碾压混凝土坝薄层单元有限元分析法[J]. 计算力学学报,2004,21(6): 718—721.
[2] 任青文,余天堂. 块体单元法的理论和计算模型[J]. 工程力学,1999,16(1): 67—77.
[3] 陆晓敏,任青文. 基于有限元与块体元法的地下洞室变形及稳定分析[J]. 工程力学,2001,18(4): 60—66.
[4] 彭友文,顾冲时,吴中如. 碾压混凝土坝层面影响带厚度分析[J]. 长江科学院院报,2005,22(4): 59—61.
[5] 冯明琿,鲁林,张钟鼎,等. 碾压混凝土坝温度应力仿真计算[J]. 大连理工大学学报,2000,40(2): 228—232.
[6] 顾冲时,吴中如,吴相豪. 碾压混凝土坝安全监控理论和方法[J]. 水利学报,2003(9): 112—116.

BEM and FEM coupling analysis model for structural behavior of roller compacted concrete dams

ZHU Guo-jin, SU Huai-zhi, HU Ling-zhi

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

Abstract Block element method (BEM) was combined with FEM. FEM was used to describe the displacement and stress fields in roller compacted concrete, and BEM was adopted to analyze the effect of interfaces between concrete layers on the whole. In consideration of the stratification characteristics of roller compacted concrete dams (RCCDs) and discontinuity of interface deformation, a coupling model for deformation analysis of RCCDs was developed, and corresponding program was compiled. Case studies show that the proposed model is effective to describe the behavior of RCCDs. Taking full advantages of BEM and FEM, the model can not only reflect the complex deformation of RCCDs, but also analyze the failure process of dams.

Key words RCCD; BEM; FEM; coupling analysis