

文章编号: 1000-7598-(2003) 05-0767-04

混凝土面板堆石坝三维仿真分析

彭宣茂¹, 李太生²

(1. 河海大学 土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省科技厅, 江苏 南京 210012)

摘 要: 根据混凝土面板堆石坝的特点, 提出了一种计算机数值和图形模拟方法, 可以对混凝土面板堆石坝的整个施工过程和运行期进行三维非线性仿真计算分析和计算机图形模拟。

关 键 词: 混凝土面板堆石坝; 非线性分析; 图形模拟

中图分类号: TV 641.4; TB 11.5 **文献标识码:** A

Three-dimensional simulation analysis of concrete face rockfill dam

PENG Xuan-mao¹, LI Tai-sheng²

(1.College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jiangsu Provincial Department of Science and Technology, Nanjing 210012, China)

Abstract: Based on the characteristic of concrete face rockfill dam, a method of computer numerical and figure simulation is given. It is used to simulate three-dimensional nonlinear computation and computer figure simulation in the construction procedure and operation period for the concrete face rockfill dam.

Key words: concrete face rockfill dam; nonlinear analysis; figure simulation

1 引 言

混凝土面板堆石坝具有施工简单、工期短、造价低和运行安全等优点^[1]。自 20 世纪 60 年代以来, 随着岩土力学、土工试验技术与施工碾压设备的发展以及面板接缝的止水设施改进等因素, 使这种坝型得到了迅速的发展, 并且, 在建设高坝中的比例逐渐提高。目前, 这种坝型在我国显示出广泛发展的趋势, 因此, 采用先进的计算机技术和现代数值方法, 对混凝土面板堆石坝进行三维仿真模拟分析研究, 对提高混凝土面板堆石坝的设计水平具有很重要的理论和实用意义。

本文针对混凝土面板堆石坝的特点, 提出了一种计算机值和图形模拟方法, 可以对混凝土面板堆石坝的整个施工过程和运行期进行三维非线性仿真计算和计算机图形模拟。

2 模型的自动生成

在分析计算混凝土面板堆石坝时, 必须按照施

工顺序, 对已填筑的堆石或浇筑的混凝土结构进行计算。而每次的计算区域和有限元网格以及材料性质、荷载条件和边界约束都将随施工的进程而发生变化。所以, 模型的自动生成是仿真分析中至关重要的第一步。为此, 笔者采用整体输入, 条件取样的自动剖分技术, 自动生成对应于该施工步的有限元网格。

首先, 假定混凝土面板堆石坝已按区域施工完毕。全部区域 Ω_k 的总和就构成了地基和坝体结构的总体 Ω 。根据每个区域的几何形状和材料类型, 将其划分为若干个指定块。形成一个子块信息表 R , 包括各子块的母单元信息、结点坐标、剖分数和加权比例因子等。而各施工步有限元网格的形成, 实际上就是对这个数据表进行条件操作。即根据施工顺序, 按一定的条件取出对应子块的剖分信息进行组合, 进而实施自动剖分和生成相应的有限元网格及计算所需的全部信息。其中, 如何求出网格的结点坐标是关键。一般来说, 面板堆石坝的地基开挖面是不规则的, 而坝体内部和坝面是有规律的。因

此, 不同的区域所采用的求坐标方法是不同的。

对于规则区域, 采用等参变换法。该法先求母单元中的局部坐标为

$$\left. \begin{aligned} \xi_{i,j,k} &= \frac{2(\sum_{s=1}^i \lambda_{\xi}^{s-1} - 1)}{(\sum_{s=1}^m \lambda_{\xi}^{s-1} - 1)} - 1; \\ \eta_{i,j,k} &= \frac{2(\sum_{s=1}^j \lambda_{\eta}^{s-1} - 1)}{(\sum_{s=1}^n \lambda_{\eta}^{s-1} - 1)} - 1; \\ \zeta_{i,j,k} &= \frac{2(\sum_{s=1}^k \lambda_{\zeta}^{s-1} - 1)}{(\sum_{s=1}^l \lambda_{\zeta}^{s-1} - 1)} - 1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 λ_{ξ} , λ_{η} , λ_{ζ} 为剖分比例因子; m, n, l 为 i, j, k 三个方向的单元剖分数。

通过变换可以求得网格中的整体结点坐标为

$$\left. \begin{aligned} x &= \sum_{\alpha=1}^{n_p} \varphi_{\alpha}(\xi, \eta, \zeta) x_{\alpha}; \\ y &= \sum_{\alpha=1}^{n_p} \varphi_{\alpha}(\xi, \eta, \zeta) y_{\alpha}; \\ z &= \sum_{\alpha=1}^{n_p} \varphi_{\alpha}(\xi, \eta, \zeta) z_{\alpha} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 x, y, z 为整体结点坐标; φ_{α} 为坐标插值函数; ξ, η, ζ 为局部坐标; $x_{\alpha}, y_{\alpha}, z_{\alpha}$ 和 n_p 为母单元的已知结点坐标和个数。

对于不规则区域采用分区直接法^[2]。该法通过求极值的方法直接求结点的整体坐标。设 $D_{12}(\alpha, \beta)$, $D_{23}(\beta, \gamma)$, $D_{31}(\gamma, \alpha)$ 为超单元中两两网格线之间任意联线的长度, 其中, α, β, γ 为对应直线方程的参数, 通过对 D 求极值:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial D_{12}(\alpha, \beta)}{\partial \alpha} &= 0; \quad \frac{\partial D_{12}(\alpha, \beta)}{\partial \beta} = 0; \\ \frac{\partial D_{23}(\beta, \gamma)}{\partial \beta} &= 0; \quad \frac{\partial D_{23}(\beta, \gamma)}{\partial \gamma} = 0; \\ \frac{\partial D_{31}(\gamma, \alpha)}{\partial \gamma} &= 0; \quad \frac{\partial D_{31}(\gamma, \alpha)}{\partial \alpha} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

可得两两网格线的最短联线, 取这三条联线中点坐标的平均值作为网格点的结点坐标。

对于各子块公共边界上的重复结点, 可以采用边界结点扫描的方法进行消除。

对每个指定的施工步, 确定相应区域的填筑顺序和编号, 根据此编号在数据表 R 中按一定条件查寻对应的子块剖分信息, 以形成对应施工区域的子

块信息表 R_i , 对 R_i 中每个子块进行组合和自动剖分, 便可形成在该计算时刻的全部几何拓扑信息。

3 数值计算方法

目前, 混凝土面板堆石坝的设计计算的方法^[3]有很多, 本文采用 Duncan E-B 模型进行三维非线性应力-应变分析。假定堆石为非线性, 面板与基础为线弹性模型。

3.1 堆石的本构关系

将 E-B 模型中的二维问题推广到三维问题, 考虑第二主应力的影响, 以平均主应力 p 代替 σ_3 , 以广义剪应力 q 代替 $\sigma_1 - \sigma_3$, 即

$$\left. \begin{aligned} q &= \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2)}; \\ p &= \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

切线弹性模量为

$$E_t = K p_a \left(\frac{p}{p_a} \right)^n (1 - R_f S)^2 \quad (5)$$

式中 p_a 为大气压力; R_f 是破坏比; $S = q/q_f$ 称为应力水平; n 为弹模指数; q_f 为抗剪强度, 可根据三维问题的摩尔-库伦(Mohr-Coulomb)准则得

$$q_f = \frac{3p \sin \varphi + 3c \cos \varphi}{\sqrt{3 \cos \theta_{\sigma} + \sin \varphi \sin \theta_{\sigma}}} \quad (6)$$

式中 c 为材料凝聚力; φ 为材料摩擦角; θ_{σ} 为 lode 应力角, 可由下式求得

$$\left. \begin{aligned} \theta_{\sigma} &= \tan^{-1} \left(-\frac{\mu_{\sigma}}{\sqrt{3}} \right); \\ \mu_{\sigma} &= 1 - \frac{2(\sigma_2 - \sigma_3)}{\sigma_1 - \sigma_3} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中 μ_{σ} 为 lode 应力函数。

因堆石体的强度包线有弯曲, 呈非线性, 故对摩尔-库伦准则中的 φ 角需进行修正为

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta \varphi \lg \left(\frac{p}{p_a} \right) \quad (8)$$

在卸载条件下用回弹模量 E_{ur} 替代切线弹模 E_t

$$E_{ur} = K_{ur} p_a \left(\frac{p}{p_a} \right)^{n_{ur}} \quad (9)$$

式中 K_{ur} 为卸荷弹模基数; n_{ur} 为卸荷弹模指数。

在 E-B 模型中, 引入切线体积变量 B_t

$$B_t = K_b p_a \left(\frac{p}{p_a} \right)^m \quad (10)$$

式中 K_b 为切线体积变形基数; m 是切线体积变形

指数。由

$$B_t = \frac{E_t}{2(1-2\mu_t)} \quad (11)$$

可以求出对应于 E_t 的泊松比 μ_t 。

上述模型中需要用三轴试验测定 K , n , R_f , K_b , m , c , φ_0 , $\Delta\varphi$, K_{ur} , n_{ur} 10 个参数。

3.2 接触面

在混凝土面板与堆石体之间设置无厚度的古德曼 (Goodman) 单元, 其切向劲度可由一维模型简单地推广到二维接触面模型, 在两个切线方向的劲度分别为

$$\left. \begin{aligned} K_{xx} &= K_l \gamma_w \left(\frac{\sigma_z}{p_a} \right)^{n'} \left(1 - \frac{R_f' \tau_{zx}}{\sigma_z \tan \delta} \right)^2; \\ K_{yy} &= K_l \gamma_w \left(\frac{\sigma_z}{p_a} \right)^{n'} \left(1 - \frac{R_f' \tau_{zy}}{\sigma_z \tan \delta} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

依据接触面受力情况确定 K_{zz} , 当接触面受压时, 为保证上下面互不侵入, 取 K_{zz} 为较大值, 当接触面受拉时, 取 K_{zz} 为很小值。

3.3 缝间连接材料

对于混凝土面板间的竖向缝及趾板间的周边缝, 可根据不同的止水形式和材料性质, 通过做拉、压、剪试验确定材料的力学性能。

3.4 非线性方程的求解

采用分级加荷中点增量法求解非线性方程。对每级荷载需求解两次平衡方程组。如第 I 级荷载增量为 $\{\Delta R\}_i$, 先根据上一级荷载计算终了的应力值 $\{\sigma\}_{i-1}$ 确定每个单元的弹性模量 E_{i-1} , μ_{i-1} 以形成结构整体劲度矩阵 $[K]_{i-1}$, 施加本级荷载的 $1/2 \{\Delta R\}_{i/2}$, 然后, 根据下式求解位移增量:

$$[K]_{i-1} \{\Delta \delta\}_{i-1/2} = \{\Delta R\}_{i/2} \quad (13)$$

再进一步计算单元的应变与应力增量。累加到上一级终了的应变与应力上, 即可得本级的中点应变和应力, 以确定 $E_{i-1/2}$ 和 $\mu_{i-1/2}$ 。再形成本级中点的整体劲度矩阵 $[K]_{i-1/2}$, 同时, 按本级荷载增量 $\{\Delta R\}_i$ 用式(13)求得本级 $\{\Delta \delta\}_i$, 由其计算应力增量 $\{\sigma\}_i$, 累加到 $i-1$ 级终了的应力上得到本级应力终值。

4 仿真过程的图形可视化

为了形象地反映整个混凝土堆石坝的施工过程, 需进行空间图形模拟, 即仿真过程的图形可视化。对于给定的立体网格, 经过平移、缩放及旋转等图形变换后, 即可绘出任意视角下透明的立体网格图。为了增强立体感, 必须将空间网格中的那些被不透明的体和面遮挡的线段消去。对于一般只需

描述几何外形的立体图的消隐处理, 目前, 已有各种各样的方法。这些方法虽然也能应用于三维有限元网格图的消隐处理, 但由于有限元网格除了含有几何外形的边界或线段外, 还包含了大量的内部单元面和线段。如果, 按照通常的方法对全部的面和线进行消隐处理, 那么, 将花费大量的计算机时间。为此, 笔者采用了一种高效的消隐技术, 可以快速地对不同施工步的混凝土堆石坝的空间线画或渲染图形进行不同角度的显示或输出。

仿真过程的图形可视化中的另一个主要内容是成果的自动整理, 包括各施工期空间结构任意截面上的各种物理量值的等值线分布图、任意截面上的曲线分布图和等色图的自动绘制等。在文献[4, 5]的基础上, 结合混凝土面板堆石坝的特点研制了一个专门适合于混凝土面板堆石坝的成果整理的图形模块。其界面友好, 操作方便, 可以采用不同方式跟踪显示各施工期的任何物理量, 例如应力、应变和位移等。

5 工程实例

根据以上计算方法和计算机图形处理技术, 笔者研制了大型混凝土面板堆石坝三维非线性仿真分析软件, 并已在实际工程中得到应用。作为实例, 下面简要地介绍某面板堆石坝三维非线性仿真计算分析成果。

该面板堆石坝的最大坝高为 178.5 m, 其中, 混凝土面板分二期施工。空间整体有限元如图 1 所示。计算按实际填筑过程进行模拟, 整个施工期共分为 30 级。求出了各个施工步时以及正常水位和校核水位作用时, 堆石体和面板的位移、应力和周边缝与竖向缝的位移等, 绘制了大量的图形和表格。结果表明, 所得到的计算成果符合一般规律, 可供设计部门参考使用。

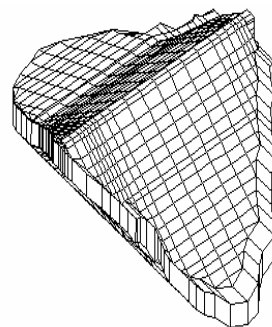


图1 整体有限元网格图
Fig.1 Finite element mesh

由于篇幅所限, 仅给出竣工期坝体某断面的垂直位移等值线图 (如图 2 所示), 和对应的最大主应力 σ_1 等值线分布图 (如图 3 所示)。

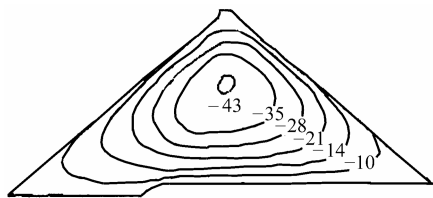


图 2 断面垂直位移等值线图 (单位: cm)
Fig.2 Isograph of vertical displacements on the section (unit: cm)

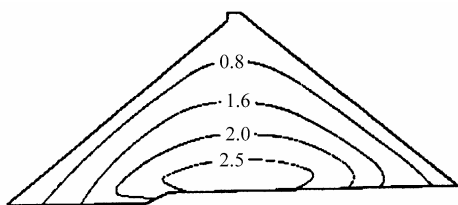


图 3 断面最大主应力等值线图 (单位: MPa)
Fig.3 Isograph of the maximum principal stresses on the section (unit: MPa)

上接第 766 页

态幅值取极值的极限长度为

$$l^* = \sqrt{\frac{c}{al^* + b}} = 882.3 \text{ (m)}$$

控制变量为

$$D_1 = \frac{2l^{*4}(1-\mu^2)}{\pi^4 EI} (P_k - P) = -3941 \text{ (m}^2\text{)}$$

变形模态幅值的极值为

$$(a_m)_{\max} = (-D_1/3)^{1/2} = 36.24 \text{ (m)}$$

顺层边坡初始屈曲后, 在其分叉点附近和后屈曲阶段平衡稳定。随着边坡上部滑动段的下滑, 屈曲模态幅值在不断增大, 岩层处于大变形溃屈状态。算例表明, 针对工程实际中的岩体结构和岩层材料, 利用本文建立的有关公式, 以极限长度 l^* 或模态幅值极值 $(a_m)_{\max}$ 作为岩体边坡稳定性的位移判据, 更易于实现用现场量测位移预测岩土边坡工程稳定性的目的, 可使边坡位移理论的研究进一步工程化。

5 结 语

分叉点后屈曲是由于变形因素引起的结构几

6 结 语

通过对实际工程的应用表明, 本文采用的计算机数值和图形模拟方法, 对混凝土面板堆石坝的整个施工过程和运行期进行三维非线性仿真计算和计算机图形进行了模拟, 为有关部门进行混凝土面板堆石坝设计提供了形象化的科学依据。但是, 由于堆石体材料的复杂性, 所采用的本构模型与实际有一定的差距, 其参数对结果的影响也较大。加上数值计算所花费的时间太长, 计算机图形难以做到实时动态显示。因此, 要使混凝土面板堆石坝的计算机仿真做到真正符合工程实际、且能产生逼真的动态效果, 还有很多课题需要进一步探讨和研究。

参 考 文 献

- [1] 马寿君. 钢筋混凝土面板堆石坝[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990. 1—91.
- [2] 彭宣茂, 钱向东. 有限元网格自动剖分的分区直接法[J]. 河海大学学报, 2000, (6): 94—96.
- [3] 姜弘道. 水工结构工程与岩土工程的现代计算方法及程序[M]. 南京: 河海大学出版社, 1992. 266—276.
- [4] 彭宣茂, 郑雄. 三维有限元网格的高效消隐技术[J]. 计算结构力学及其应用, 1990, (4): 107—112.
- [5] 彭宣茂. 空间任意剖面等值线图的自动绘制[J]. 数值计算与计算机应用, 1993, (3): 199—219.

何非稳定性问题, 极值点后屈曲是由于坡脚处材料非稳定性引起的结构物理非稳定性问题。研究表明, 顺层边坡岩体结构的后屈曲是一个由分叉点后屈曲性态到极值点后屈曲性态的转化过程。在这个过程中, 若 $a_m^2 + D_1/3 = 0$, 则结构处于分叉点后屈曲溃屈状态; 若 $a_m^2 + D_1/3 < 0$, 则结构处于极值点后屈曲剪切滑动状态。

参 考 文 献

- [1] 肖远. 用岩层梁代替岩层板分析顺层岩体边坡结构变形破坏的条件[A]. 第二届全国工程地质力学青年学术讨论会论文集[C]. 北京: 地震出版社, 1992, 79—83.
- [2] 范钦珊. 初始后屈曲理论及其应用[A]. 材料和结构的不稳定性[C]. 中国力学学会办公室, 等, 北京: 科学出版社, 1993, 55—69.
- [3] 程谦恭, 胡厚田, 彭建兵, 等. 高边坡岩体渐近性破坏粘弹塑性有限元数值模拟[J]. 工程地质学报, 2000, 8(1): 25—30.
- [4] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.