

DOI: 10.11779/CJGE202004003

位移多点约束法在面板堆石坝精细模拟中的应用研究

魏匡民^{1,2}, 陈生水^{1,2}, 李国英^{1,2}, 米占宽^{1,2}, 傅中志^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘 要: 面板堆石坝数值模拟中为了兼顾计算精度和计算效率, 可对混凝土面板划分精细网格, 并与堆石体相对稀疏的网格进行合理的连接过渡。基于自主研发的有限元执行平台, 开发实现了基于位移多点约束的疏密网格过渡方法, 并应用于在建 200 m 级面板堆石坝工程数值模拟。通过方案对比, 验证了该方法的精度, 且面板精细网格与堆石体稀疏网格之间变形协调。相较于传统模拟方法, 面板精细模拟方法可细致表达面板内应力变化梯度, 能够为跨尺度精细模拟混凝土面板性状提供技术基础。该方法简便实用、易于数值实现, 具有较好的推广应用前景。

关键词: 面板堆石坝; 有限元; 应力变形, 多点约束法; 精细模拟

中图分类号: TU43; TV641 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)04-0616-08

作者简介: 魏匡民(1985—), 男, 工学博士, 高级工程师, 主要从事岩土材料本构关系与数值计算等方面的研究工作。

E-mail: kmwei@nhri.cn。

Application of displacement multi-point constraint refinement method in simulation of concrete-faced rockfill dams

WEI Kuang-min^{1,2}, CHEN Sheng-shui^{1,2}, LI Guo-ying^{1,2}, MI Zhan-kuan^{1,2}, FU Zhong-zhi^{1,2}

(1. Geotechnical Engineering Dept., Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Key Laboratory of Failure

Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-Rock Dam of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: In the numerical simulation of a concrete-faced rockfill dam, to consider the accuracy and efficiency of calculation, the concrete slab can be simulated using fine mesh and the rockfill can be simulated using relatively coarse mesh. Therefore, the proper algorithm should be established between the slab and the rockfill for transferring the load and displacement. An algorithm to connect the fine mesh and the coarse mesh is developed based on the multi-point constraint method. It is used to simulate a 200 m-high concrete-faced rockfill dam under construction. By comparing the results of the traditional simulation and the current method, it is shown that the proposed method has good precision, and the deformation is continuous at the interface between the slab and the rockfill. Compared with the traditional simulation, the simulation based on the displacement multi-point constraint refinement method can describe the stress gradient in the slab, which can provide a technical basis for simulating the local damage of the concrete slab. The proposed method is practical and easy to implement numerically, and it has a good future for application.

Key words: concrete-faced rockfill dam; finite element; stress and deformation, multi-point constraint method; refinement method

0 引 言

近年来, 面板堆石坝发展迅猛, 世界上在建的多座高坝已达 250 m 级^[1], 由于缺乏相关设计和建设经验, 坝体应力变形控制面临严峻考验^[2]。有限元方法在面板堆石坝工程中应用广泛^[3-4], 随着大坝工程规模增大、建设难度增高, 对数值模拟精度也提出了更高要求。大型工程的计算模拟往往工作量大、时间进度紧迫, 研究人员应兼顾计算精度和计算效率。虽然近些年计算机运算速度和容量大幅增长, 但对于具有强非线性、弹塑性特征的筑坝土石料来说, 其静、动力

分析耗时仍然较长, 所以数值模型的建立应重点关注工程核心问题, 几何模型尽量做到详略得当。对于混凝土面板堆石坝来说, 面板以及接缝构成的防渗体安全是工程关心的重中之重, 由于混凝土面板是薄板结构, 而常规网格剖分面板在长、宽方向和堆石体保持同等尺寸, 使得面板网格过于粗糙, 且面板单元在长、

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1508503); 国家自然科学基金项目(U1765203); 中央级公益性科研院所基本科研业务费(Y319009)

收稿日期: 2019-05-09

宽方向的尺寸远大于厚度方向, 导致面板模拟精度降低。一般认为, 面板单元尺寸应达到米级, 对于面板局部破坏、裂缝扩展等特殊问题单元尺寸可能需达到厘米级, 且三向尺寸差应尽可能小, 常规方法中若要保证面板足够计算精度, 对于 250 m 级堆石坝及其附近地基, 离散后单元数量可能至数百万甚至千万, 计算成本大为增加。工程经验表明, 筑坝堆石体因其应力变形变化平缓, 可设置相对稀疏的计算网格, 而混凝土面板应力变化梯度大, 应布置精细网格^[5]。因此, 在面板堆石坝数值模拟中对面板划分精细网格, 而对堆石体划分相对稀疏的网格, 然后对两者建立合理的过渡连接是行之有效的方法。

目前, 将疏密网格过渡的算法应用于混凝土面板精细模拟的研究尚不多见, 其中清华大学周墨臻等^[6-7]基于非线性接触力学的方法, 模拟了堆石体、垫层、面板之间的多体接触特性, 该方法对面板、垫层采用较密网格, 堆石体采用相对稀疏网格, 各体之间通过接触力学算法实现荷载传递, 应用于了天生桥一级面板堆石坝应力变形性状模拟。孔宪京等^[8]、邹德高等^[9-10]采用多边形比例边界有限元技术实现了面板坝结构跨尺度精细化分析, 该方法对混凝土面板划分精细网格, 并采用多边形比例边界有限单元与相对稀疏的堆石体单元连接, 已应用于数座在建高面板坝工程。

本文将位移多点约束法引入了面板堆石坝工程数值模拟, 在自主研制的 TOSS3D 有限元平台上开发实现, 并应用于了在建的 200 级面板堆石坝中面板与堆石体的疏密网格连接, 研究结果表明, 该方法简单实用、精度较高、疏密网格交界面位移协调能严格满足, 可为跨尺度精细模拟混凝土面板性状提供技术基础, 具有较好的应用前景。

1 位移多点约束法基本理论

位移多点约束法通过引入位移约束方程, 实现位移场函数在交界面连续传递。有限元中, 在形成刚度矩阵和荷载列阵时根据引入的位移约束条件消去受约束的自由度, 保证位移场在交界面精确传递^[11]。

本文采用钟红、林皋等人提出的基于矩阵运算的多点位移约束方法^[5], 引用文献[5]二维有限元案例进行说明, 图 1 中密网格单元 I、单元 II 与稀疏单元 III 在界面 6-4 上进行过渡, 其中结点 5 为单元 I、II 共有, 与单元 III 无关。各结点自由度编号见图中括弧内, 6-5 长度为 L_1 , 5-4 长度为 L_2 , 记 $2L = L_1 + L_2$ 。单元 III 为常规单元, 其刚度矩阵、荷载列阵按常规有限元方法处理。单元 I、单元 II 位移列阵可表示为

$$[\delta^e] = [\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_{12}]_{12 \times 1}^T, \quad (1)$$

为了保证疏密网格界面处的位移协调, 引入以下线性插值约束条件:

$$\delta_9 = \frac{L_2}{2L} \delta_{11} + \frac{L_1}{2L} \delta_7, \quad (2)$$

$$\delta_{10} = \frac{L_2}{2L} \delta_{12} + \frac{L_1}{2L} \delta_8, \quad (3)$$

由式 (2), (3) 可以看出, 结点 5 处自由度并不是独立的, 可由结点 6, 4 表示, 所以在形成刚度矩阵、位移列阵、荷载列阵时应根据约束条件 (2), (3) 将自由度 9, 10 消去。此处自由度 9, 10 并不是独立的, 且不会出现在最终的平衡方程中, 称为“从自由度”, 其结点称为“从结点”。自由度 7, 8, 11, 12 是完全独立的称为“主自由度”, 其结点称为“主结点”^[5]。

单元 I、单元 II 中独立自由度的列阵为

$$[\delta^{e'}] = [\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_7, \delta_8, \delta_{11}, \delta_{12}]_{10 \times 1}^T, \quad (4)$$

由式 (2), (3) 可推导得 δ^e 和 $\delta^{e'}$ 存在以下转换关系:

$$[\delta^e]_{12 \times 1} = [A]_{12 \times 10} [\delta^{e'}]_{10 \times 1}, \quad (5)$$

式中, $[A]_{12 \times 10}$ 为转换矩阵。

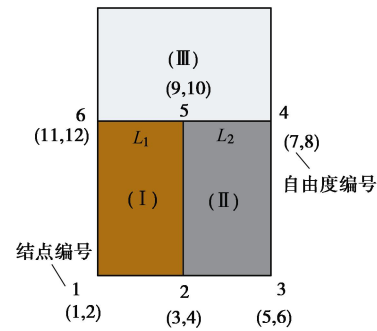


图1 多点约束法二维示例

Fig. 1 2D example of multi-point constraint refinement method

单元 I、单元 II 刚度矩阵记为 $[K]_{12 \times 12}^0$, 考虑到结点 5 处的自由度可分别由结点 4, 结点 6 表示, 实际上单元 I、单元 II 中只有 10 个独立的自由度, 所以刚度 $[K]_{12 \times 12}^0$ 会缩聚为 $[K]_{10 \times 10}^{10}$, 其转换关系见下式:

$$[K]_{10 \times 10} = [A]_{10 \times 12}^T [K]_{12 \times 12}^0 [A]_{12 \times 10}. \quad (6)$$

将式 (6) 展开, 可清晰看出其缩聚运算的物理意义, 式 (6) 实际上是将与自由度 9, 10 相关的刚度矩阵元素, 根据插值关系 (2), (3) 分配, 分别叠加到自由度 7, 11, 8, 12 对应的元素位置。

相应地, 单元 I、单元 II 荷载向量 $[R^e]_{12 \times 1}$ 也应进行相应转换, 如下式

$$[R^{e'}]_{10 \times 1} = [A]_{10 \times 12}^T [R^e]_{12 \times 1}. \quad (7)$$

将式 (7) 展开, 可看出该转换的物理意义在于将自由度 9, 10 处的荷载分量按照与式 (2), (3) 同样的插值方式分配至自由度 7, 11, 8, 12 元素位置,

$L_2/2L$ 和 $L_1/2L$ 为荷载分配的权重。

最后将转换后单元 I、单元 II 刚度矩阵 $[K]_{10 \times 10}$ ，荷载矩阵 $[R^e]_{10 \times 1}$ 叠加至整体刚度矩阵和荷载列阵，求解得到位移列阵 $[\delta^e]_{10 \times 1}$ ，再根据式 (5) 求得结点 5 的位移。

本文设计实现了位移多点约束法的三维情况，将该方法推广至三维，如图 2，单元 e_1 和 e_2 是稀疏网格单元，单元 e_3 为密集网格单元，可以得知， e_3 单元的结点 o' 、 p' 、 q' 、 r' 的 3 向位移均可由单元 e_1 和 e_2 结点位移表示，其中结点 o' 的 3 向位移 $u_{o'}$ 、 $v_{o'}$ 、 $w_{o'}$ 可由结点 i 、 j 、 m 、 n 的位移表达， q' 的 3 向位移可由结点 m 、 k 、 l 、 n 的位移表示。以结点 o' 为例，采用等参单元插值方法，其 3 向位移可表示为

$$\left. \begin{aligned} u_{o'} &= N_1 u_i + N_2 u_j + N_3 u_m + N_4 u_n, \\ v_{o'} &= N_1 v_i + N_2 v_j + N_3 v_m + N_4 v_n, \\ w_{o'} &= N_1 w_i + N_2 w_j + N_3 w_m + N_4 w_n, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中， $N_1 \sim N_4$ 为 i 、 j 、 m 、 n 平面局部坐标表示的形函数，表达如下^[12]：

$$N_1 = \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta) \quad , \quad (9a)$$

$$N_2 = \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta) \quad , \quad (9b)$$

$$N_3 = \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta) \quad , \quad (9c)$$

$$N_4 = \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta) \quad , \quad (9d)$$

式中， ξ 和 η 为结点 o' 在 i 、 j 、 m 、 n 面上的局部坐标。此时单元结点 o' 、 p' 、 q' 、 r' 的 3 向自由度均为“从自由度”，结点 i 、 j 、 m 、 n 、 l 、 k 的 3 向自由度为“主自由度”。

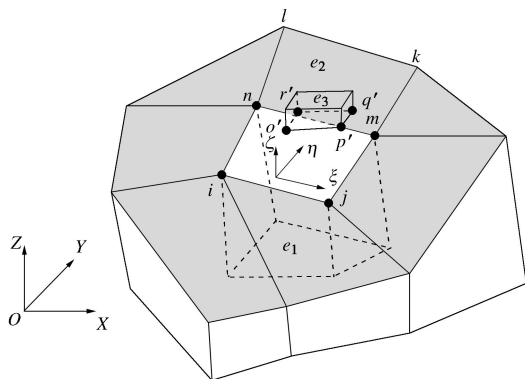


图 2 多点约束法三维示例

Fig. 2 3D example of the multi-point constraint refinement

同样地，将密集网格单元 e_3 刚度矩阵、荷载矩阵缩聚后，组装到整体刚度矩阵和荷载列阵，求解平衡方程后，得到结点 i 、 j 、 m 、 n 处位移，再根据式 (8)

反推出结点 o' 的位移。

2 位移多点约束法的数值实现

在常规有限元基础上易于实现位移多点约束法，但仍需解决两个关键问题。

2.1 三维空间中从结点局部坐标的确定

对于二维问题，如图 1，结点 5 的局部坐标或插值权重，可由结点 6 和 4 的相对位置很简单确定。对于三维问题，从结点和主结点的空间相对位移可能比较复杂。如何为每一个从结点搜索到其对应的主节点，且确定其局部坐标是首先需要解决的问题，即图 2 中，需要为 o' 确定其主结点号 i 、 j 、 m 、 n ，并求得其局部坐标 ξ 和 η 。本文采用如下方法：

由于式 (8) 也适用于空间坐标插值，此时有

$$\left. \begin{aligned} x_{o'} &= N_1 x_i + N_2 x_j + N_3 x_m + N_4 x_n, \\ y_{o'} &= N_1 y_i + N_2 y_j + N_3 y_m + N_4 y_n, \\ z_{o'} &= N_1 z_i + N_2 z_j + N_3 z_m + N_4 z_n, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中， $x_{o'}$ 、 $y_{o'}$ 、 $z_{o'}$ 为结点 o' 空间坐标， x_i 、 y_i 、 z_i 为结点 i 空间坐标， x_j 、 y_j 、 z_j 为结点 j 空间坐标， x_m 、 y_m 、 z_m 为结点 m 空间坐标， x_n 、 y_n 、 z_n 为结点 n 空间坐标。不难发现，式 (10) 中 3 个方程中仅有 ξ 和 η 共 2 个未知量，可以作简单的坐标系旋转，将结点 o' 、 i 、 j 、 m 、 n 由整体坐标 (X, Y, Z) 换算至局部坐标系 (ξ, η, ζ) 如下所示

$$\begin{Bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\xi, X) & \cos(\xi, Y) & \cos(\xi, Z) \\ \cos(\eta, X) & \cos(\eta, Y) & \cos(\eta, Z) \\ \cos(\zeta, X) & \cos(\zeta, Y) & \cos(\zeta, Z) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} \quad (11)$$

由于 o' 、 i 、 j 、 m 、 n 位于同一个空间平面内，坐标变换后式 (10) 中第 3 个方程恒成立，此时联立前 2 个方程，求解可得到 ξ 和 η ，由于该方程组是二次的，方程根的取舍应根据条件：

$$|\xi| \leq 1, \quad |\eta| \leq 1 \quad (12)$$

若所有根均不能满足式 (12)，则说明 o' 并不位于结点 i 、 j 、 m 、 n 形成的封闭区域内，本文研究根据此判断条件，基于对稀疏网格界面分片判断的思路，确定了所有从结点对应的主结点以及相应的局部坐标。

2.2 整体刚度矩阵的形成和存储

常规有限元中整体刚度矩阵的有效非零元素根据各单元内部相关自由度累加装配^[12]，基于位移多点约束法的整体刚度矩阵有效元素不但包含单元内部相关自由度累加装配，还包括由于主、从自由度的插值联系形成的单元外部自由度关联。

表 1 筑坝料“南水”模型参数
Table 1 Parameters of “NHRI” model

坝体分区	$\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\varphi_0 / (^\circ)$	$\Delta\varphi / (^\circ)$	k	n	R_f	$c_d / \%$	n_d	R_d
Part A/ Part B	2.30	47.8	6.3	789.6	0.25	0.67	0.61	0.54	0.65

图 1 中常规有限元方法中整体刚度矩阵元素 K_{17} , K_{18} 必然为 0 元素, 因为结点 1 和结点 4 未通过任何一个单元连接, 所以无论是指示矩阵形成或者刚度矩阵的压缩存储, K_{17} , K_{18} 均不是有效元素。但是采用了位移多点约束法后, K_{17} , K_{18} 不再是 0 元素, 这是由于自由度 1 通过单元 I 与自由度 9, 10 关联, 而自由度 9, 10 是从自由度, 其又和自由度 7, 8 关联, 这样间接地自由度 1 也与自由度 7, 8 关联。因此在指示矩阵形成过程中应通过主面一从面几何模型信息判断有效元素位置, 整体刚度矩阵则依据指示矩阵进行装配。

3 算例验证

本文基于 TOSS3D 有限元平台, 开发实现了基于位移多点约束的疏密网格过渡方法。TOSS3D 程序最早由沈珠江院士主持开发, 已先后应用于国内外数十座大坝静动力性状模拟, 近些年在地震动输入、动力弹塑性模拟、接触模拟方面进行了一系列改进。

本研究首先采用简化模型坝对程序进行验证, 模型坝几何尺寸如图 3, 大坝被切分为 Part A 和 PartB 两部分, 为验证算法的正确性采用了以下 2 个方案: ①采用常规有限元方法, Part A 和 PartB 网格连续, 如图 4 (a); ②Part A 和 PartB 分别独立剖分网格, 交界面处网格不连续, 采用本文开发的位移多点约束方法进行连接过渡, 如图 4 (b)。

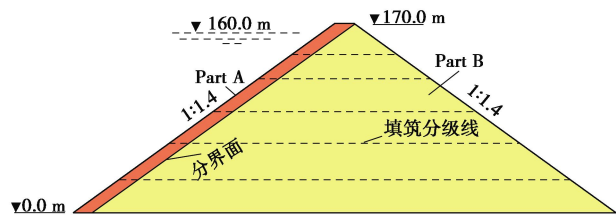


图 3 简化大坝几何尺寸
Fig. 3 Sizes of simplified dam

整体坐标规定如下: X 轴为坝轴向, 由坝左岸指向右岸, Y 轴为顺河向, 指向下游为正, Z 方向为垂直向, 向上为正。计算模型底边界结点施加 3 向约束, 坝轴向两侧面结点施加 X 向约束。坝料模型采用“南水”模型^[13], 材料参数如表 1。

图 5 为简化大坝蓄水期坝体位移与主应力分布, 可以看出 2 个计算方案坝体变形大小分布规律基本一致, 顺河向位移极值两种方法误差在 4% 以内, 沉降极值误差为 0.3%, 坝体大、小主应力分布非常接近,

极值误差分别为 0.3% 和 0.7%。图 6 给出了 2 方案蓄水引起的坝体变形增量, 可以看出, 2 方案位移增量基本吻合, 这说明本文开发的算法能保证非连续网格界面处位移和荷载高精度传递。图 7 给出了蓄水引起的坝体网格变形, 考察 Part A 和 Part B 界面处计算结果可以看出, 交界面处严格变形协调。

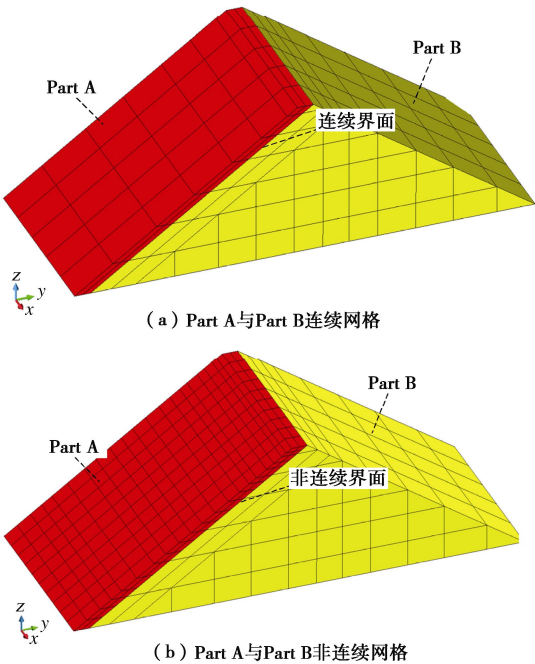


图 4 简化坝计算方案

Fig. 4 Calculation schemes of simplified dam

4 工程应用

4.1 工程概况

在建的老挝 Nam Ngum 3 面板堆石坝, 位于湄公河左岸一级支流 Nam Ngum 河上, 大坝最大坝高达 210 m, 正常蓄水位高程为 723.0 m, 典型断面材料分区与填筑次序如图 8 所示。坝体填筑分 III 期, 坝体填筑到顶后再进行面板浇筑, 面板分 II 期浇筑, I 期面板顶高程为 650.0 m。图 9 为根据实际地形建立的面板坝三维模型, 离散后结点总数 257004 个, 单元总数 207858 个, 建模时对面板以及附近区域 (面板、垫层、接触面、止水接缝) 进行独立加密剖分, 垫层区与过渡区交界面采用多点约束法连接, 如图 10。防渗体及附近单元数共计 154855 个, 占总单元数的 74.5%, 面板单元最大尺寸小于 2 m。筑坝料采用“南水”模型, 参数如表 2。面板—垫层接触面、止水接缝模拟如文献 [14], 面板—垫层接触面模型如式 (13), 参数如表 3。

表 2 Nam Ngum 3 筑坝料“南水”模型参数
Table 2 Parameters of “NHRI” model for Nam Ngum Dam 3

坝体分区	$\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\varphi_0 / (^\circ)$	$\Delta\varphi / (^\circ)$	k	n	R_f	$c_d / \%$	n_d	R_d
垫层	2.27	50.8	7.2	1295	0.27	0.70	2590	0.52	0.53
过渡	2.25	49.6	7.0	1001	0.27	0.69	2002	0.55	0.57
主堆石	2.20	47.9	6.2	806	0.29	0.65	1612	0.84	0.46
次堆石	2.17	46.4	5.7	616	0.34	0.68	1232	0.97	0.45

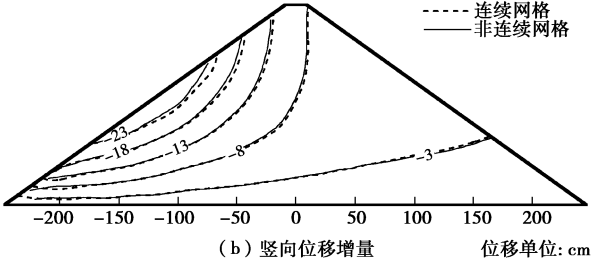
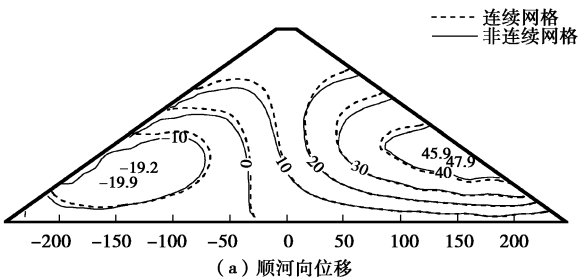


图 6 蓄水引起的坝体位移增量

Fig. 6 Increments of dam displacement caused by water load

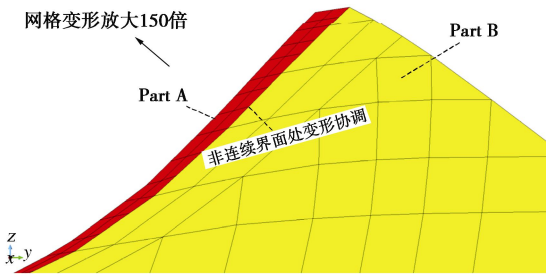
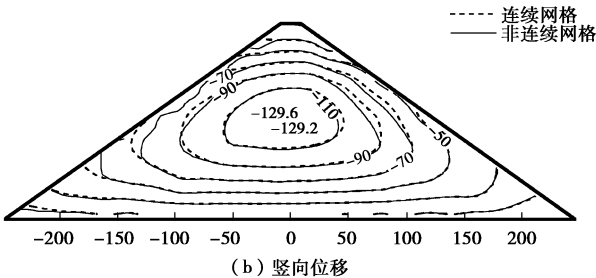


图 7 蓄水引起的坝体网格变形

Fig. 7 Deformations of dam grid caused by water load

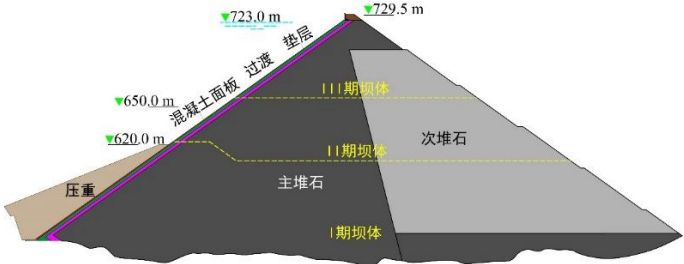
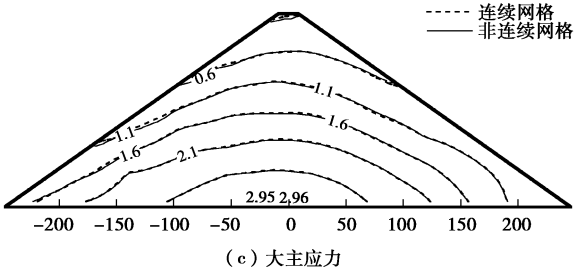


图 8 Nam Ngum 3 面板堆石坝材料分区与填筑次序

Fig. 8 Material zoning and construction schedule of Nam Ngum Dam 3

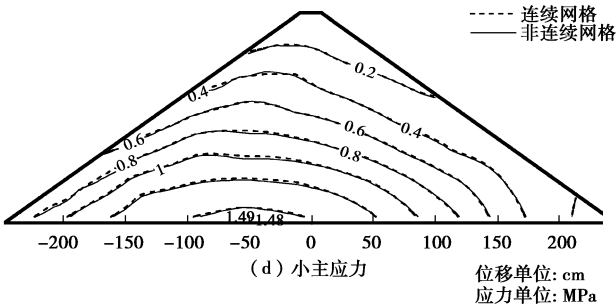
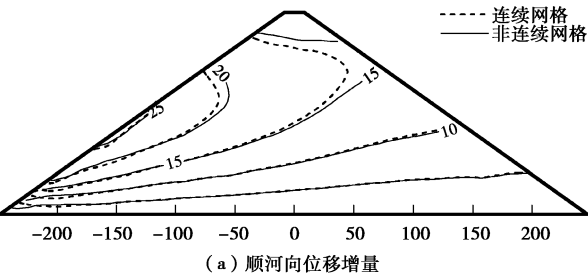


图 5 连续网格和非连续网格应力变形计算结果

Fig. 5 Calculated results of continuous and non-continuous mesh



$$K_t = k \cdot \gamma_w \left(\frac{\sigma_n}{p_a} \right)^n \left(1 - \frac{R_f \tau}{C + \sigma_n \tan \varphi} \right)^2, \quad (13)$$

式中, k , n , R_f 为材料参数, γ_w 为水的重度, C 和 φ 为咬合强度与摩擦角, p_a 为大气压力。面板为 C30 混凝土, 按线弹性材料考虑, 弹性模量取 30 GPa, 泊松比 0.167。

表 3 面板/垫层接触面 Goodman 模型参数

Table 3 Model parameters for Goodman interface element

位置	K	n	R_f	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
面板/垫层	4800	0.56	0.74	0	36

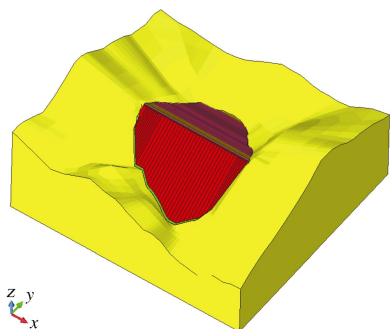


图 9 Nam Ngum 3 面板堆石坝三维模型
Fig. 9 3D model for Nam Ngum Dam 3

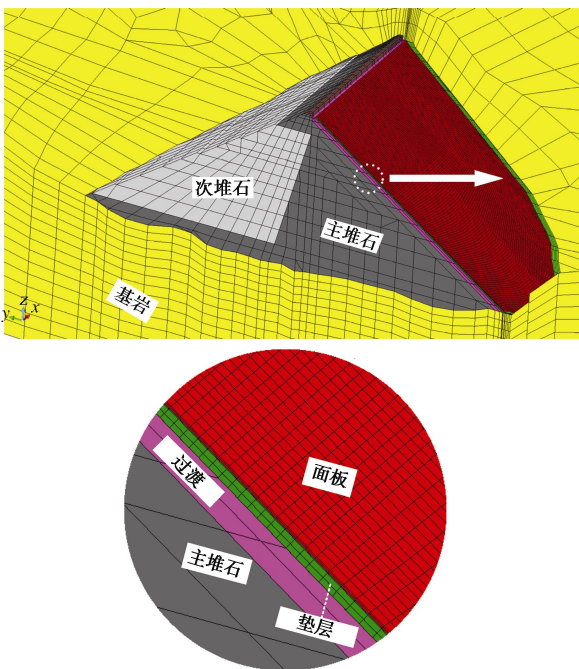


图 10 Nam Ngum 3 面板堆石坝网格加密细部
Fig. 10 Detailed view of mesh refinement of Nam Ngum Dam 3

4. 2 计算结果

面板及附近区域采用精细网格对坝体堆石区应力变形分布影响极小, 本节重点讨论采用精细化模拟后面板应力变形结果。

图 11~14 给出了蓄水期面板挠度、轴向位移、轴向应力、顺坡向应力计算结果。图中同时对对比了面板精细模拟与常规稀疏网格模拟(混凝土面板单元在长、宽方向尺寸与堆石体相同) 的差异, 2 个模拟方案面板应力变形极值如表 4。

计算结果表明, 2 个方案轴向位移极值大小相等, 挠度相差约 4.1%, 总体来看, 面板位移极值有一定差异。考察面板应力可知, 精细网格模拟方案的面板轴向和顺坡向拉、压应力均大于稀疏网格模拟方案, 其中顺坡向应力增幅较大, 压应力增加了 4.63 MPa, 拉应力增加了 1.0 MPa。图 15 (a), (b) 分别为 2 个方案最大剖面处面板挠度、顺坡向应力的散点图, 可以看出, 面板挠度差别较小, 其中精细网格计算的面板

表 4 精细模拟与常规模拟计算结果对比

Table 4 Comparison of results of slab with and without refinement			
方案	精细网格方案	稀疏网格方案	
挠度/cm	36.9	35.4	
轴向位移/cm	指向右岸	3.0	3.0
	指向左岸	2.6	2.6
轴向应力/MPa	压应力	13.89	13.40
	拉应力	2.15	1.95
顺坡向应力/MPa	压应力	17.81	13.18
	拉应力	2.12	1.12

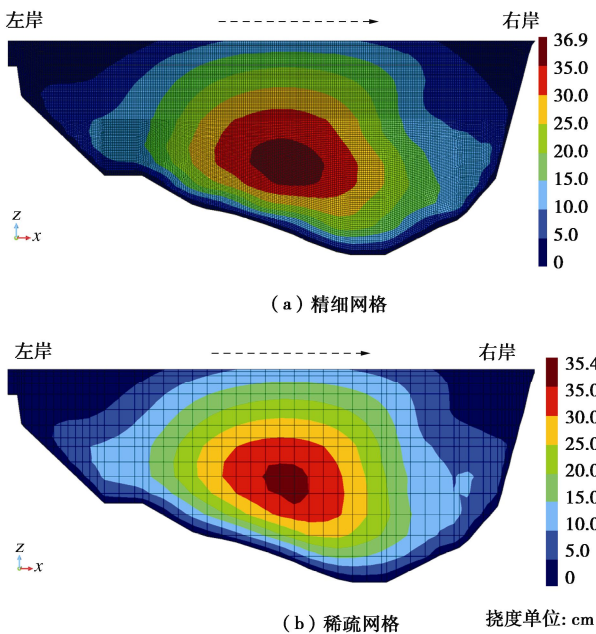


图 11 Nam Ngum 3 大坝蓄水期面板挠度
Fig. 11 Deflections of slab during full storage period

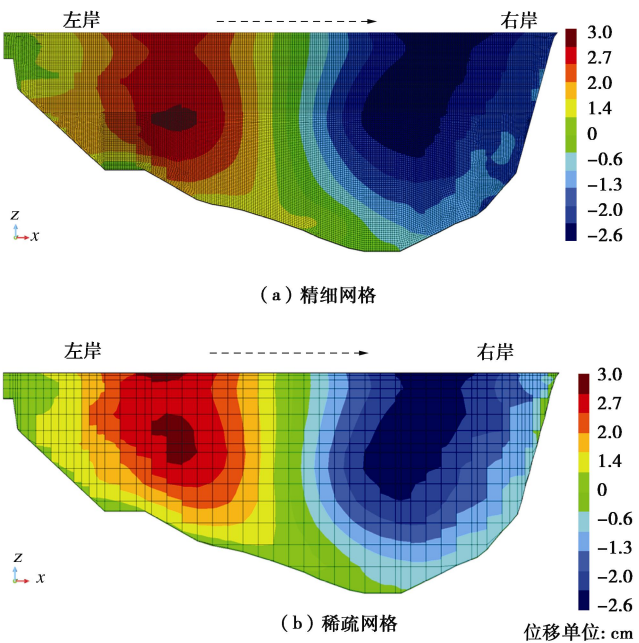


图 12 Nam Ngum 3 大坝蓄水期面板轴向位移
Fig. 12 Axial displacements of slab during full storage period

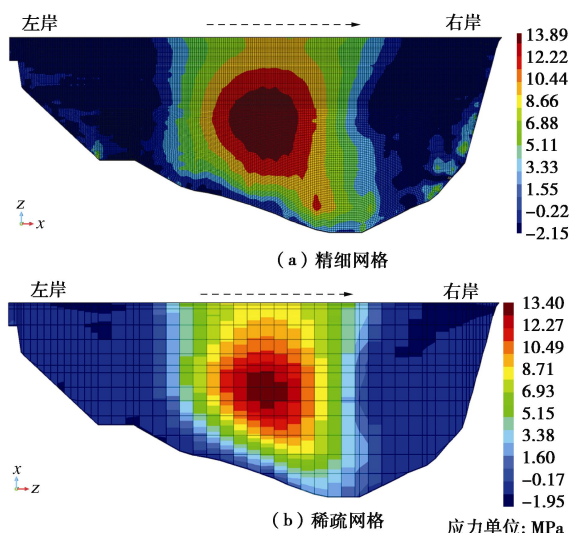


图 13 Nam Ngum 3 大坝蓄水期坝面板轴向应力

Fig. 13 Axial stresses of slab during full storage period

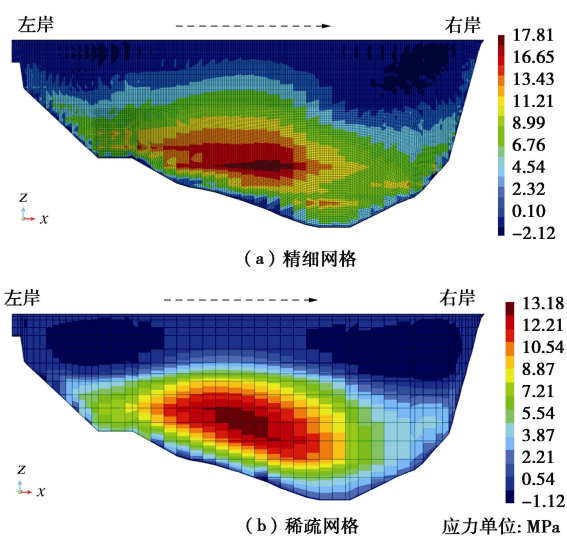


图 14 Nam Ngum 3 大坝蓄水期面板顺坡向应力

Fig. 14 Stresses of slab along slope direction during full storage period

挠度略大于稀疏网格；顺坡向应力存在显著差异，精细方案结果大于稀疏方案，这主要是由于稀疏网格对单元应力的“平均效应”使得峰值应力被削减，稀疏网格模拟结果对于工程而言是偏于危险的。从散点图分布很明显地看出精细方案描述的面板应力变化趋势更为详尽。

图 16 为面板轴向应力在其极值部位的分布细部图，可以看出，精细模拟方案能细致地描述单块面板内应力变化梯度，单块面板压应力极值出现在竖缝附近，这是由于竖缝两侧面板挤压的“应力集中”效应所致，该结果与已有高面板坝面板挤压破坏实际现象吻合。面板精细模拟法可为进一步跨尺度研究面板局部损伤破坏、裂缝扩展等问题提供必要的技术基础^[10]，以本文 Nam Ngum 3 面板坝为例，若堆石体与地基和面板同等精细剖分，则离散后结点数可达数百万至千万，普通工作站无法胜任，采用本文方法后在普通工作站上即

可完成计算，耗时仅约 6 h，数值模拟效率大幅提升。

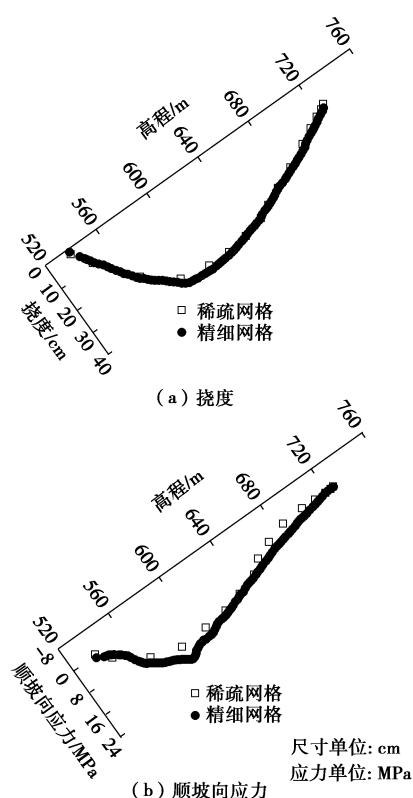


图 15 蓄水期最大剖面处面板应力变形分布

Fig. 15 Stresses and deformations of slab at maximum cross-section

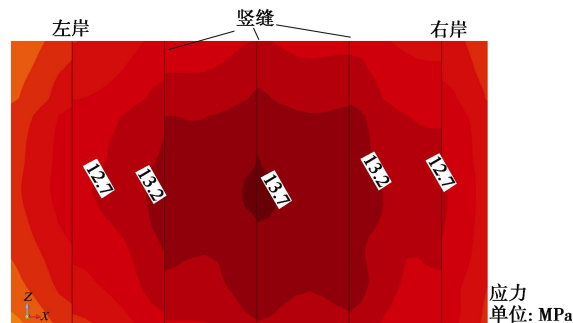


图 16 面板轴向应力细部图

Fig. 16 Axial stresses of slab

需要指出的是，本文采用的疏密网格过渡方法虽然可实现面板—堆石之间的疏密过渡，但堆石区网格划分不宜过于稀疏，这样会降低堆石体计算精度，进而影响面板计算精度。

5 结 论

基于自主开发的有限元执行平台，本文实现了位移多点约束过渡算法，并将其应用于高混凝土面板堆石坝精细模拟，结果表明：

(1) 位移多点约束过渡方法概念清晰、精度良好、疏密网格交界面变形协调、易于数值实现，可以方便的用于有限元局部区域精细加密。

(2) 混凝土面板、止水接缝组成的防渗体系及附

近区域是面板坝工程关心的重中之重, 位移多点约束法用于精细模拟混凝土面板及附近区域能够为高面板堆石坝设计、运行提供更为可靠的依据。

(3)以在建的210 m高Nam Ngum 3面板堆石坝为依托工程, 算例表明, 精细模拟方案面板压、拉应力极值均大于常规模拟, 这主要是由于稀疏网格产生的“平均效应”, 该效应对于工程实际而言是偏于危险的。另外, 精细模拟方法能较好反映面板内应力变化梯度, 可为进一步研究面板局部损伤、破坏、裂缝扩展等问题提供技术基础。

参考文献:

- [1] 陈生水, 阎志坤, 傅中志, 等. 特高面板砂砾石坝结构安全性论证[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(11): 1949 - 1958. (CHEN Sheng-shui, LI Guo-ying, FU Zhong-zhi. Safety criteria and limit resistance capacity of high earth-rock damssubjected to earthquakes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(11): 1949 - 1958. (in Chinese))
- [2] 陈生水. 特高土石坝建设与安全保障的关键问题及对策[J]. 人民长江, 2018, **49**(5): 74 - 78. (CHEN Sheng-shui. Key technological issues in construction and safety assurance of super-high earth and rockfill dams[J]. Yangtze River, 2018, **49**(5): 74 - 78. (in Chinese))
- [3] 孔宪京, 邹德高, 徐 斌, 等. 紫坪铺面板堆石坝三维有限元弹塑性分析[J]. 水力发电学报, 2013, **32**(2): 213 - 222. (KONG Xian-jing, ZOU De-gao, XU Bin, et al. Three-dimensional finite element elasto-plastic analysis of Zipingpu concrete faced rock-fill dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, **32**(2): 213 - 222. (in Chinese))
- [4] PANOS D. Nonlinear seismic response of tall concrete-faced rockfill dams in narrow canyons[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2012, **34**(1): 11 - 24.
- [5] 钟 红, 林 皋, 胡志强. 有限元计算中疏密网格过渡方法研究[J]. 计算力学学报, 2007, **24**(6): 887 - 898. (ZHONG Hong, LIN Gao, HU Zhi-qiang. Two methods for transition between coarse and fine finite elements[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2007, **24**(6): 887 - 898. (in Chinese))
- [6] 周墨臻, 张丙印, 王 伟. 高面板堆石坝软缝接触计算模型及其数值实现[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(增刊1): 2803 - 2810. (ZHOU Mo-zhen, ZHANG Bing-yin, WANG Wei. Algorithm and simulation methods for the soft longitudinal joint of the concretefaces in high concrete-faced rockfill dams[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(S1): 2803 - 2810. (in Chinese))
- [7] 周墨臻, 张丙印, 张宗亮, 等. 超高面板堆石坝面板挤压破坏机理及数值模拟方法研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(8): 1426 - 1432. (ZHOU Mo-zhen, ZHANG Bing-yin, ZHANG Zong-liang, et al. Mechanisms and simulation methods for extrusion damage of concrete faces of high concrete-faced rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(8): 1426 - 1432. (in Chinese))
- [8] 孔宪京, 陈 楷, 邹德高, 等. 一种高效的FE-PSBFE耦合方法及在岩土工程弹塑性分析中的应用[J]. 工程力学, 2018, **35**(6): 6 - 14. (KONG Xian-jing, CHEN Kai, ZOU De-gao, et al. An efficient FE-PSBFE coupled method and its application to the elasto-plastic analysis of geotechnical engineering structures[J]. Engineering Mechanics, 2018, **35**(6): 6 - 14. (in Chinese))
- [9] 邹德高, 刘 锁, 陈 楷, 等. 基于四叉树网格和多边形比例边界有限元方法的岩土工程非线性静动力分析[J]. 岩土力学, 2017, **38**(增刊2): 33 - 40. (ZOU De-gao, LIU Suo, CHEN Kai, et al. Nonlinear static and dynamic analysis for geotechnical engineering based on quadtree mesh and polygon scaled boundary finite element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(S2): 33 - 40. (in Chinese))
- [10] 邹德高, 陈 楷, 刘 锁, 等. 非线性比例边界有限元在面板坝分析中的应用[J]. 土木与环境工程学报, 2019, **41**(3): 11 - 18. (ZOU De-gao, CHEN Kai, LIU Suo, et al. Application of nonlinear scaled boundary polygon element method in the analysis of concrete face rockfill dam[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, **41**(3): 11 - 18. (in Chinese))
- [11] 王勰成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. (WANG Xu-cheng. Finite Element Method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese))
- [12] 陈国荣. 有限单元法原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (CHEN Guo-rong. Principle and Application of Finite Element Method[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [13] 朱百里, 沈珠江. 计算土力学[M]. 上海科学技术出版社, 1990. (ZHU Bai-li, SHEN Zhu-jiang. Computational Soil Mechanics[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1990. (in Chinese))
- [14] 顾淦臣, 沈长松, 岑威钧. 土石坝地震工程学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (GU Gan-chen, SHEN Chang-song, CENG Wei-jun. Earthquake Engineering of Earth and Rock Dam[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2009. (in Chinese))