DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20242188

基于 SBFEM-FEM 融合的边坡开挖快速仿真方法研究

周 靓,殷德胜,郑保敬,陈博夫,谢 旋,彭 辉,叶 永,吴振宇

(三峡大学水利与环境学院,湖北 宜昌 443002)

摘要:针对边坡开挖过程中岩体应力与变形变化可能导致的边坡失稳问题,提出了一种融合比例边界有限元法(SBFEM)和有限元法(FEM)的边坡开挖快速仿真新方法。该方法在模拟边坡的开挖过程时,利用边坡包含的地层、结构面和地形等信息,建立不含开挖面的初始有限元网格;将开挖面的信息作为动态参数实时输入,通过几何拓扑计算,将初始有限元网格分割为被开挖面切割的单元和未被切割的单元,未被切割单元仍为常规有限单元,切割单元被分解成比例边界单元或有限单元的组合,从而得到 SBFE-FE 的融合网格;将融合网格再次分成保留域和开挖域两部分,在开挖过程仿真时,利用数组计算方法常用流程,由保留域提供刚度矩阵,开挖域提供开挖荷载矩阵,从而实现开挖过程的自动快速仿真。采用 FORTRAN 语言,编写了相应的二维计算程序。通过算例研究,将新方法的结果与传统有限元法的结果进行对比。结果表明该方法具有较高的精度,能将复杂的有限元建模工作变成计算机的计算工作,降低前处理的难度,适合在多种开挖方案比选、开挖工况复杂等情况下应用。

关键词:比例边界有限元;岩质边坡;边坡开挖;数值模拟

中图分类号:TV314 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-7709(2025)03-0074-05

1 引言

水利工程中涉及大量的边坡工程,边坡开挖是其重要的环节,合理的开挖设计能够确保施工安全[1]。在模拟边坡开挖时,常用的方法为有限元法[2],该方法通过将复杂的连续介质离散化为有限数量的单元,并结合材料力学特性、边界条件和载荷作用来求解控制方程,从而模拟边坡在开挖过程中的变形和应力分布[3]。有限元法模拟边坡开挖时提前设置开挖面,将求解区域分为开挖域和保留域并对这两部分分别进行网格划分,通过控制开挖域单元的生死状态逐步实现开挖过程的动态模拟[4]。在边坡开挖的设计阶段,受地质条件等不确定性影响,可能需调整开挖面的具体位置,进而对整个边坡区域重新离散化及划分网格,由此显著增加了计算资源和计算时间[5];此外,有限元法的计算精度依赖于网格划分的细密程度。若网格划分过密,则计算量大幅增加;而若网格划分过稀,则影响结果的精确性[6]。为了更有效率地实现边坡的开挖仿真,本文提出了一种融合 SBFEM 和 FEM 的新方法,该方法在前处理时无需考虑开挖面的具体位置,仅需将开挖面的信息作为动态参数在计算过程中实时输入,避免了因调整开挖面位置而带来的重复网格划分工作,将复杂的有限元建模工作变成计算机的计算工作,以此提高前处理效率。

2 比例边界有限元法的基本原理

SBFEM[7-8]与传统笛卡尔坐标系不同,采用了径向和环向的局部坐标系,局部坐标系以比例中心为起点,ξ 轴沿径向延伸,s 轴沿环向延伸(图1)。径向坐标的值在比例中心为 0,在子域边界

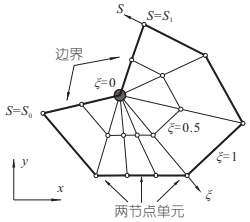


图 1 SBFEM 方法子域

Fig.1 Subdomains in the SBFEM method

收稿日期:2024-11-21,**修回日期**:2024-12-16

基金项目:国家重点研发项目(2022YFC3005500)

作者简介:周靓(2000-),女,硕士研究生,研究方向为水工结构数值模拟,E-mail:3306716192@qq.com

通讯作者:殷德胜(1983-),男,博士、副教授、硕导,研究方向为水工结构数值仿真,E-mail:deshengyin@163.com

中国知网 https://www.cnki.net

为 1,环向曲线取值为 0.5。该设置确保了子域边界上的每个点对比例中心的可见性,从而保证局部坐标系的有效性[9]。

设比例中心在整体坐标系中的坐标为(x_0,y_0),对比例边界坐标系中的任意一点(ξ,s),其在整体坐标系中的坐标(x,y)可表示为:

$$x = x_0 + \xi x_s(s) \tag{1}$$

$$y = y_0 + \xi y_s(s) \tag{2}$$

式中,$x_s(s)$、$y_s(s)$ 分别为比例边界在整体坐标系中沿环向 s 的分布函数,用于描述边界点相对于比例中心的径向位置变化。

在 SBFEM 中,假设局部坐标系中任意一点(ξ,s) 的位移 $u(\xi,s)$ 满足以下关系:

$$u(\xi,s) = \boldsymbol{N}(s)\boldsymbol{u}(\xi) \tag{3}$$

式中,$\boldsymbol{N}(s)$ 为区间环向($\xi=1$)的形函数矩阵;$\boldsymbol{u}(\xi)$ 为径向的位移矢量。

将式(3)代入虚功原理,推导出 SBFEM 的控制方程为:

$$\boldsymbol{p} = \boldsymbol{E}^0\boldsymbol{u}(\xi)_{,\xi} + \boldsymbol{E}^{1\mathrm{T}}\boldsymbol{u}(\xi)\,|_{\xi=1} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{E}^0\xi^2\boldsymbol{u}(\xi)_{,\xi\xi} + (\boldsymbol{E}^0 + \boldsymbol{E}^{1\mathrm{T}} - \boldsymbol{E}^1)\xi\boldsymbol{u}(\xi)_{,\xi} - \boldsymbol{E}^2\boldsymbol{u}(\xi) = 0 \tag{5}$$

其中

$$\boldsymbol{p} = \int_s \boldsymbol{N}(s)^{\mathrm{T}} t\,\mathrm{d}s \tag{6}$$

式中,$\boldsymbol{p}$ 为边界上的节点荷载矢量;$\boldsymbol{E}^0$、$\boldsymbol{E}^1$、$\boldsymbol{E}^2$ 均为系数矩阵,仅依赖于离散后边界的几何形状和材料属性,可通过表面数值积分的方式求解[10]。

根据推导,式(5)的解可表示为:

$$\boldsymbol{u}(\xi) = \sum_{i=1}^{2N} c_i \xi^{\lambda_i}\boldsymbol{\varphi}_i \tag{7}$$

式中,λ_i、$\boldsymbol{\varphi}_i$ 分别为满足径向平衡的特征值和对应的特征向量;c_i 为每阶模态对位移场的贡献系数。

计算子域的刚度矩阵 $\boldsymbol{K}_{\mathrm{SBFE}}$ 为:

$$\boldsymbol{K}_{\mathrm{SBFE}} = \boldsymbol{E}^0\boldsymbol{\Phi}[\lambda]\boldsymbol{\Phi}^{-1} + \boldsymbol{E}^{1\mathrm{T}} \tag{8}$$

其中

$$\boldsymbol{\Phi} = \{\varphi_1, \varphi_2, \cdots, \varphi_{2N}\}$$

式中,λ 为模态比例因子。

各子域的荷载矢量和刚度矩阵分别按式(6)、(8)计算,通过求解线性方程组可得到计算域边界的节点(包括内部边界节点)的位移 U_{b},即:

$$\boldsymbol{K}_{\mathrm{SBFE}}U_{\mathrm{b}} = \boldsymbol{p} \tag{9}$$

子域内任一点(ξ,s)的位移 $\boldsymbol{u}(\xi,s)$ 和应力 $\boldsymbol{\sigma}(\xi,s)$ 可通过下式得到:

$$\boldsymbol{u}(\xi,s) = \boldsymbol{N}(s)\sum_{i=1}^{2N} c_i\xi^{\lambda_i}\boldsymbol{\varphi}_i \tag{10}$$

$$\boldsymbol{\sigma}(\xi,s) = \boldsymbol{N}(s)\sum_{i=1}^{2N} c_i\xi^{\lambda_i-1}\boldsymbol{\psi}_i(s) \tag{11}$$

其中

$$\boldsymbol{\psi}_i(s) = \begin{Bmatrix}\Psi_{xx}(s)\\ \Psi_{yy}(s)\\ \Psi_{xy}(s)\end{Bmatrix} = \boldsymbol{D}[\lambda_i\boldsymbol{B}^1(s) + \boldsymbol{B}^2(s)]\boldsymbol{\varphi}_i \tag{12}$$

式中,$\boldsymbol{D}$ 为材料的弹性矩阵;$\boldsymbol{B}^1(s)$、$\boldsymbol{B}^2(s)$ 均为应变矩阵。

3　边坡开挖快速仿真方法

3.1　SBFE-FE 融合网格计算方法

比例边界元和有限元的融合网格见图 2,计



图 2　比例边界元和有限元融合网格

Fig.2　Scaled boundary element and finite element hybrid mesh

算域 Ω_1 采用有限元法计算,计算域 Ω_2 采用比例边界有限元法计算,两者之间相互独立,互不干扰。Ω_1 内任意点的位移采用常规有限元法计算,即:

$$\{\Delta\mu\} = [\boldsymbol{N}]\{\Delta\delta\}_e \tag{13}$$

式中,$\{\Delta\mu\}$ 为单元内任意点的位移增量;$[\boldsymbol{N}]$ 为形函数矩阵;$\{\Delta\delta\}_e$ 为单元内各个节点的位移增量。

Ω_2 内任意点的位移采用式(10)得到。

考虑线弹性本构关系,计算域内任意点的应力增量与应变增量之间的关系可表示为:

$$\{\Delta\boldsymbol{\sigma}\}_i = [\boldsymbol{D}]_i\{\Delta\boldsymbol{\varepsilon}\}_i \tag{14}$$

式中,$\{\Delta\boldsymbol{\sigma}\}_i$、$\{\Delta\boldsymbol{\varepsilon}\}_i$ 分别为单元内应力、应变增量向量;$[\boldsymbol{D}]_i$ 为 FE 或 SBFE 的弹性矩阵。

将位移函数和本构关系代入虚功原理,得:

$$[\boldsymbol{K}]\{\Delta\boldsymbol{U}\} = \{\Delta\boldsymbol{F}\} \tag{15}$$

其中

$$[\boldsymbol{K}] = [\boldsymbol{K}]_{\mathrm{FE}} + [\boldsymbol{K}]_{\mathrm{SBFE}} \tag{16}$$

$$\{\Delta\boldsymbol{U}\} = \{\{\Delta\boldsymbol{U}\}_1^{\mathrm{T}}, \cdots, \{\Delta\boldsymbol{U}\}_n^{\mathrm{T}}\}^{\mathrm{T}}$$
$$\{\Delta\boldsymbol{F}\} = \{\{\Delta\boldsymbol{F}\}_1^{\mathrm{T}}, \cdots \{\Delta\boldsymbol{F}\}_n^{\mathrm{T}}\}^{\mathrm{T}} \tag{17}$$

式中,$[\boldsymbol{K}]$、$\{\Delta\boldsymbol{U}\}$、$\{\Delta\boldsymbol{F}\}$ 分别为系统的整体刚度矩阵、整体位移增量、整体荷载增量向量,其中,$[\boldsymbol{K}]$ 中包含两种不同类型的子矩阵,分别为有限元的单元刚度矩阵 $[\boldsymbol{K}]_{\mathrm{FE}}$ 和比例边界元的刚度矩阵 $[\boldsymbol{K}]_{\mathrm{SBFE}}$;$n$ 为 FE 节点与 SBFE 的节点数之和;$\{\Delta\boldsymbol{U}\}_i$、$\{\Delta\boldsymbol{F}\}_i$ 分别为节点位移向量、荷载向量[11]。

基于上述理论,使用 Fortran 语言编写 SBFE-FE 耦合程序。

3.2　开挖过程模拟

通过几何拓扑计算,将初始有限元网格(图 3(a))分割为被开挖面切割的单元和未被切割的单元,未被切割单元仍为常规有限单元,切割单元被分解成比例边界单元或有限单元的组合,从而

中国知网　https://www.cnki.net

得到 SBFE-FE 融合网格(图 3(b));将融合网格再次分成保留域和开挖域两部分,其中,粗实线表示开挖面,以开挖面为界,阴影部分表示开挖域,其余为保留域,在开挖过程仿真时,利用数组计算方法常用流程,由保留域提供刚度矩阵,开挖域提供开挖荷载矩阵,从而实现开挖过程的自动快速仿真。具体内容如下:①未被切割单元:2、3、6、7;②切割单元:1、4、5、8、9。

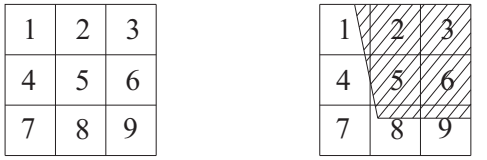


图 3 计算网格

Fig.3 Computational mesh

其中,切割单元被分解为比例边界单元或有限单元的组合,如单元 1、9 被开挖面分解为两个 4 节点的有限单元,均按照 FEM 计算;单元 4、5、8 被开挖面分解成比例边界单元和有限单元的组合,比例边界单元按 SBFEM 计算,有限单元按 FEM 计算。

3.3 开挖荷载矩阵

在岩土工程数值模拟中,准确模拟开挖卸荷过程是一个关键问题。在传统有限元分析中,通常是将开挖面上原有的初始应力反向转换为等效释放荷载,并施加到开挖面上,通过这种方式模拟开挖带来的应力变化。然后,通过将计算得到的应力场与初始应力场叠加,得出开挖后的应力场[12-13]。

与常规有限元不同的是,本文方法中的开挖荷载由图 3(b)阴影部分提供,其中包含 SBFE-FE 的融合网格,根据融合网格的计算方法,开挖边界荷载的等效节点力 P 为:

$$P_{\mathrm{FE}}=\sum_{i=1}^{M_{\mathrm{FE}}}\int_{V_{\mathrm{FE}}}\boldsymbol{B}_{\mathrm{FE}}^{\mathrm{T}}\sigma_0\,\mathrm{d}V+\sum_{i=1}^{M_{\mathrm{FE}}}\int_{V_{\mathrm{FE}}}\boldsymbol{N}_{\mathrm{FE}}^{\mathrm{T}}\gamma\,\mathrm{d}V \tag{18}$$

$$P_{\mathrm{SBFE}}=\sum_{i=1}^{M_{\mathrm{SBFE}}}\int_{V_{\mathrm{SBFE}}}\boldsymbol{B}_{\mathrm{SBFE}}^{\mathrm{T}}\sigma_0\,\mathrm{d}V+\sum_{i=1}^{M_{\mathrm{SBFE}}}\int_{V_{\mathrm{SBFE}}}\boldsymbol{N}_{\mathrm{SBFE}}^{\mathrm{T}}\gamma\,\mathrm{d}V \tag{19}$$

$$P=P_{\mathrm{FE}}+P_{\mathrm{SBFE}} \tag{20}$$

式中,M 为开挖有限单元或比例边界单元的总数;$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{N}$ 分别为 FE 或 SBFE 的应变矩阵和形函数矩阵;V 为第 i 个单元体的区域;σ_0 为初始应力场;γ 为开挖岩体的重度。

3.4 刚度矩阵

与开挖荷载向量的计算相反,刚度矩阵的计算中仅考虑保留域部分对整体的刚度贡献:

$$\boldsymbol{K}_{\mathrm{FE}}=\int_V\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}\boldsymbol{B}\,\mathrm{d}V \tag{21}$$

$$\boldsymbol{K}_{\mathrm{SBFE}}=\int_S\boldsymbol{N}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}\boldsymbol{N}\,\mathrm{d}S \tag{22}$$

$$\boldsymbol{K}=\boldsymbol{K}_{\mathrm{FE}}+\boldsymbol{K}_{\mathrm{SBFE}} \tag{23}$$

3.5 计算流程图

基于上述基本理论,采用 Fortran 语言自主开发程序,模拟了边坡开挖的全过程(图 4)。具体内容包括利用边坡包含的地层、结构面和地形等信息,建立不含开挖面的初始有限元网格;将开挖面的信息作为动态参数实时输入,并通过程序自动生成开挖面;通过几何拓扑计算,得到 SBFE-FE融合网格;将融合网格再次分成保留域和开挖域两部分,在开挖过程仿真时,利用数组计算方法常用流程,由保留域提供刚度矩阵,开挖域提供开挖荷载矩阵,从而实现开挖过程的自动快速仿真。在边坡开挖的设计阶段,若开挖面信息发生改变,可直接通过程序调整开挖面信息参数,无需再次进行网格划分,将复杂的有限元建模工作变成计算机的计算工作,从而显著提高工作效率。

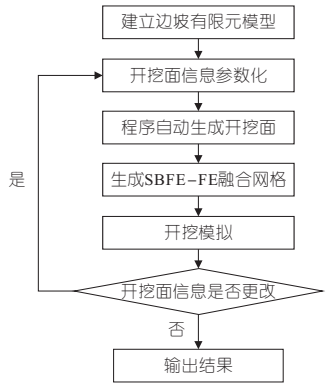


图 4 边坡开挖计算流程图

Fig.4 Flowchart of the slope excavation calculation process

4 算例分析与对比验证

4.1 计算模型

图 5(a)为一个二维边坡模型,其中虚线标示了开挖面的位置,开挖过程自上而下分为两步。假设边坡为均质材料,其力学参数包括弹性模量 $E=21$ GPa,重度 $\gamma=26$ kN/m^3,泊松比 $\nu=0.213$。以边坡自重引起的应力场作为初始应力场,模型底面和左侧边界施加法向约束条件。采用本文方法与有限元法(FEM)对边坡开挖过程进行数值模拟与对比分析。

在边坡开挖模拟中,FEM 通常通过提前设定开挖面并定义生死单元进行计算(图 5(b));而本文方法则是在原始网格(图 5(c))的基础上,利用

中国知网 https://www.cnki.net

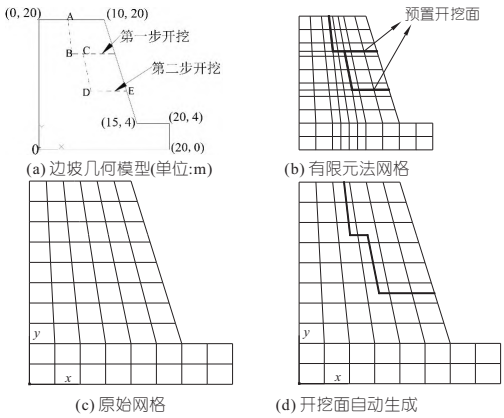


图 5　边坡的几何模型与网格

Fig.5　Geometric model and mesh of the slope

程序自动根据开挖面的几何信息生成开挖面(图 5(d))并进行计算。

4.2　应力计算结果

本文方法和传统有限元法在模拟边坡自上而下开挖时得到的最小主应力结果云图见图 6、7。由图 6、7 可看出,尽管两种方法的应力值在数值上存在差异,这主要源于应力计算基于单元内的高斯积分点,并通过插值拟合得到全单元的应力场。由于本文方法与有限元法所采用的网格划分不同,即高斯点的位置分布存在差异,部分数值差异由此产生。然而,整体应力分布的规律具有较高的一致性,且最大和最小应力的分布特征也表现出相似的趋势。这进一步验证了计算结果的可靠性和正确性。

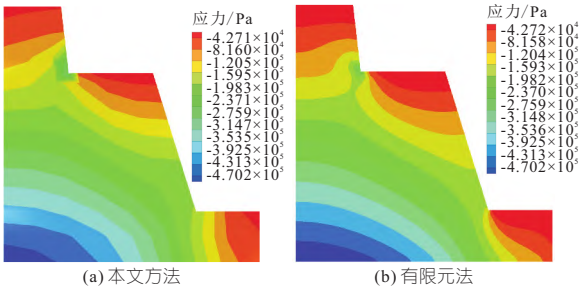


图 6　第一次开挖边坡应力图

Fig.6　Stress diagram of the first slope excavation

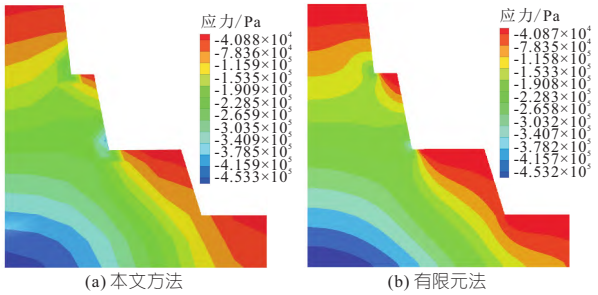


图 7　第二次开挖边坡应力图

Fig.7　Stress diagram of the second slope excavation

4.3　位移结果

本文方法和传统有限元法在模拟边坡自上而下开挖时得到的位移结果云图见图 8、9。由图 8、9 可看出,两者的分布规律一致,该结果表明本文方法是可靠的。表 1 为在开挖过程中本文方法与有限元法对边坡开挖面上 5 个特征点水平和竖直位移增量的对比结果。由表 1 可知,最大误差仅为 0.31%,表明该计算结果具有较高的精度。

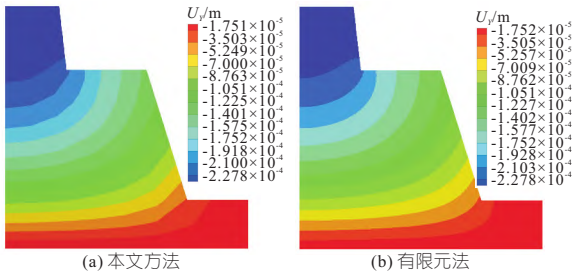


图 8　第一次开挖边坡位移图

Fig.8　Displacement diagram of the first slope excavation

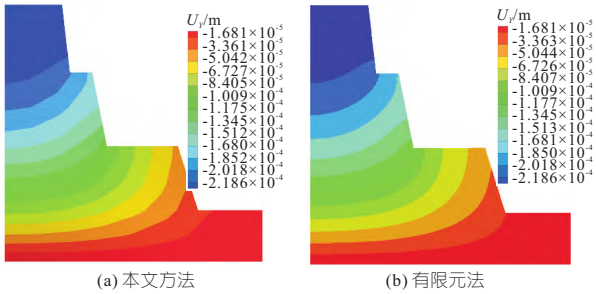


图 9　第二次开挖边坡位移图

Fig.9　Displacement diagram of the second slope excavation

表 1　本文方法与传统有限元法的位移增量对比

Tab.1　Comparison of displacement increments between the proposed method and traditional finite element method

特征点		本文方法/10^{-2}cm		有限元法/10^{-2}cm		相对误差/%	
		U_X	U_Y	U_X	U_Y	U_X	U_Y
第一次开挖	A	−0.024 09	−2.237 0	−0.024 10	−2.238 0	−0.04	−0.04
	B	−0.093 19	−1.997 0	−0.093 22	−1.999 0	−0.03	0.10
	C	−0.162 20	−1.697 0	−0.161 90	−1.694 0	−0.18	−0.17
第二次开挖	A	−0.025 73	−2.146 0	−0.025 79	−2.142 0	−0.23	0.19
	B	−0.058 97	−1.893 0	−0.058 91	−1.891 0	0.10	0.11
	C	−0.095 23	−1.614 0	−0.095 24	−1.619 0	−0.01	−0.31
	D	0.084 38	−1.142 0	0.084 31	−1.142 0	0.08	0
	E	0.089 43	−0.425 5	0.089 45	−0.425 9	−0.02	−0.09

5　结论

a. 本文提出的融合 SBFEM 和 FEM 的新方法最大的优点在于建立模型时无需提前设置预留面,将开挖面信息作为动态参数在开挖过程中实时输入,避免了在设计阶段由于地质条件、环境等因素可能带来的开挖面的重新调整,大幅度降低了前处理的难度,节省了时间和资源。与传统有限元法相比,该方法可靠、准确,且具有较高的精度。

b. 本文方法同样适用于洞室开挖仿真及其他类型的地下工程模拟,如隧道、地下室等。

中国知网　https://www.cnki.net

参考文献：

[1] 董建虎. 边坡开挖支护技术在水利施工工程中的应用研究[J]. 水上安全，2024(13)：191-193.

[2] ZHU J Z. The finite element method：Its basis and fundamentals[M]. Elsevier，2013.

[3] 张伟星. 有限元法和极限平衡法结合的某边坡稳定性分析[J]. 山西建筑，2021，47(18)：79-83.

[4] 殷德胜，汪卫明，陈胜宏. 岩质边坡开挖过程模拟的动态有限单元法[J]. 岩石力学与工程学报，2011，30(11)：2217-2224.

[5] 刘文平，赵燕明，郑颖人. 岩质边坡开挖应力与变形的有限元模拟[J]. 后勤工程学院学报，2004(2)：45-48.

[6] 陈锦璐，王俊杰，唐胜传. 有限元网格和边界条件对土坡稳定性计算的影响[J]. 水电能源科学，2011，29(11)：135-137，216.

[7] 张俊奇，余波，宋崇民. 比例边界有限元法的最新研究进展[J]. 应用力学学报，2022，39(6)：1038-1054.

[8] 王飞. 基于 SBFEM 的混凝土细观均匀化和粘性断裂模拟[D]. 杭州：浙江大学，2016.

[9] DEEKS A J，WOLF P. A virtual work derivation of the scaled boundary finite-element method for elastostatics[J]. Computational mechanics，2002，28(6)：489-504.

[10] CHONGMIN SONG. The scaled boundary finite element method：Introduction to theory and implementation[M]. John Wiley & Sons，Ltd.，2018.

[11] 殷德胜，尹栓，周宜红. 裂缝分析的比例边界有限元与有限元耦合的虚拟结构面模型[J]. 计算力学学报，2014，31(6)：735-741，748.

[12] 杨永恒，毛振凯，韩鹏辉，等. 库岸边坡开挖卸荷后稳定性评价[J]. 西北水电，2024(3)：42-47.

[13] 吴锦亮，何吉. 岩质边坡动态开挖模拟的复合单元模型[J]. 岩土力学，2019，40(增刊 1)：535-540，564.

Research on Rapid Simulation Method for Slope Excavation Based on SBFEM-FEM Coupling

ZHOU Liang，YIN De-sheng，ZHENG Bao-jing，CHEN Bo-fu，XIE Xuan，PENG Hui，YE Yong，WU Zhen-yu

(College of Hydraulic and Environmental Engineering，China Three Gorges University，Yichang 443002，China)

Abstract：A new rapid simulation method for slope excavation is proposed，which integrates the scaled boundary finite element method (SBFEM) and finite element method (FEM)，addressing the slope instability issues that may arise from changes in rock stress and deformation during the excavation process. In this method，when simulating the excavation process of the slope，the initial finite element mesh without the excavation surface is established by using the information of strata，structural plane and topography contained in the slope. The information of the excavation face is input as a dynamic parameter in real time，and the initial finite element mesh is divided into the elements cut by the excavation face and the elements that are not cut through geometric topology calculation. The uncut elements are still conventional finite elements，and the cutting elements are decomposed into a combination of proportional boundary elements or finite elements，so as to obtain the fusion mesh of SBFE-FE. The fusion mesh is divided into two parts，the reserved domain and the excavation domain. The common process of the array calculation method is used to provide the stiffness matrix and the excavation load matrix provided by the excavation domain，so as to realize the automatic and fast simulation of the excavation process.The corresponding 2D calculation program is writtenby using the FORTRAN language. Through the case study，the results of the new method are compared with the results of the traditional finite element method，and it is shown that the method has higher accuracy. This method turns the complex finite element modeling work into computer calculation work，reduces the difficulty of pre-processing，and is suitable for application in the case of comparison and selection of multiple excavation schemes and complex excavation conditions.

Key words：proportional boundary finite element；rocky slope；slope excavation；numerical simulation

(上接第 131 页)

Study on Seismic Performance of Gravity Dam with the Crack at the Downstream Face of Dam Head

SONG Yan，ZHANG Han-yun，ZHANG Huan-yu，WANG Hao-chen，TU Qian-jiao

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

Abstract：During the operation of a certain existing gravity dam's spillway section，deep cracks appeared on the downstream face of the dam head. To evaluate the impact of the cracks on the seismic performance of the dam section，a spillway dam monolith-foundation interaction model has been established to analyze the seismic dynamic response of the cracked dam body. This model employs a thermo-mechanical coupling contact model to simulate the crack at the dam head and analyzes the variation in crack gap corresponding to seasonal temperature fluctuations. Based on the results derived from a nonlinear dynamic time history analysis，the potential for crack propagation under design seismic loading conditions has been predicted when the crack and the maximum crack gap are present at the dam head. Furthermore，an assessment of the integral structural seismic strength and stability of its foundation plane has been conducted. The results show that under the designed seismic loading，the likelihood of further development of the crack at the dam head is minimal，and the crack of the dam head has little impact on the seismic performance of the whole dam section.

Key words：hydraulic structures；gravity dams；thermal stress coupling contact model；crack gap；seismic performance

中国知网 https://www.cnki.net