

裂隙岩体不稳定温度场的复合单元算法研究

薛变鸾^{1,2}

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641; 2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510641)

摘 要: 基于复合单元法, 结合三维热传导-对流方程和“充填模型”, 提出了裂隙岩体不稳定温度场的复合单元模型。该模型前处理简便快捷, 计算网格生成时无需考虑裂隙的存在, 网格剖分不受限制, 随后利用复合单元前处理程序, 依据裂隙的位置和方位将其自动离散在单元内。对常规热传导-对流方程进行自伴随性调整, 应用变分原理, 推导出裂隙岩体不稳定温度场的复合单元算法, 该算法可分别计算出岩块子单元和裂隙的温度值, 且可真实反映裂隙中水流与相邻岩块间的热能量交换规律。将复合单元数值模型计算的不稳定温度场结果与相应的实测数据进行对比分析可知, 数值计算结果与实测数据基本一致, 验证了裂隙岩体不稳定温度场复合单元算法的可靠性与有效性。算例分析表明, 裂隙中水流与相邻岩块间有明显的热传导和热对流作用。

关 键 词: 岩体; 裂隙; 不稳定温度场; 复合单元法

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2015) 07-2088-07

Composite element algorithm for transient thermal field in fractured rock mass

XUE Luan-luan^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China;

2. State Key Laboratory of Subtropical Building Sciences, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China)

Abstract: Based on the composite element method, we propose a composite element model associated with a three-dimensional heat conduction-convection equation and a “filled model” for the determination of the transient thermal field in fractured rock mass. Although the existence of fractures is not considered during mesh generation, it is explicitly treated in the mapping composite element by means of the composite element pre-processing work program. There is no restriction on the computational mesh generation. A self-adjoint process is made to adjust the heat conduction-convection equation. The composite element algorithm is deduced by applying the variational principle for solving transient thermal field in fractured rock mass. The proposed method is applied to calculate the respective temperature of rock sub-elements and fracture segments, in which it also takes into account the thermal exchange characteristics of the fluid in fracture and the adjacent rock blocks. The obtained numerical results are consistent well with the experimental data. The reliability and validity of the proposed numerical method are verified with the measured results, which show that the thermal conduction and convection and obviously occur between the fluid in fracture and the adjacent rock blocks.

Keywords: rock mass; fracture; transient thermal field; composite element method

1 引 言

岩石裂隙不仅会影响岩体的变形与渗透特性, 对岩体的温度场也会有重要的影响, 裂隙中流体的流动以及流体与相邻岩块间的热交换均会引起温度场随时间和空间的改变, 称为不稳定温度场。裂隙岩体不稳定温度场问题一直以来是环境工程、油藏工程、核废料贮存、增强地热系统等工程的研究重

点^[1-3]。

目前针对裂隙岩体的数值模拟方法主要可归纳为两大类: 一类是隐式模拟, 即等效连续介质方法^[4-6], 视整个岩体为一种均匀介质, 等效处理岩体中的裂隙, 即其渗透和导热特性都均化在岩体中, 不考虑裂隙的具体位置和方位; 另一类是显式模拟, 即离散模拟方法^[7-10], 视裂隙岩体为非均匀介质, 采用特殊单元离散模拟岩石裂隙, 并考虑裂隙的具

收稿日期: 2014-02-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51209097); 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室开放研究项目(No. 2013KB27); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(No. 2014ZZ0022)。

作者简介: 薛变鸾, 女, 1982 年生, 博士, 讲师, 主要从事裂隙岩体多场耦合的数值仿真等方面的研究与教学工作。E-mail: xueluanluan@scut.edu.cn

体方位和倾向、倾角。隐式模拟前处理简捷，普遍应用于含有大量裂隙的裂隙岩体。但等效模拟方法的计算结果是域内平均值，无法得到裂隙关键部位的计算信息，细节模拟过于简化。而显式模型注重相应的细部结构，可真实反映裂隙特性；但一般裂隙的开度较小，裂隙的前处理工作繁琐复杂，网格易畸形，导致计算误差大或结果不收敛，一般适用于规模较大的裂隙（如 IV 级以上断层）。

为试图在上述两种方法间取长补短，陈胜宏等^[11-13]提出了复合单元法。复合单元法首先视整个裂隙岩体为均匀介质进行网格单元划分，随后依据裂隙的位置、倾向、倾角等具体信息，利用复合单元前处理程序，将其嵌入相应的单元内，被插入裂隙的单元自动转换成复合单元，并生成相应的计算信息，网格剖分不受限制，前处理简便快捷。

本文基于复合单元法，建立了裂隙岩体不稳定温度场的复合单元算法。基于三维热传导-对流方程，在不改变基本方程性质的情况下将其调整为具有自伴随性质^[14]，结合不稳定温度场的隐式解法^[15]，应用变分原理，推导岩块子单元和裂隙片段的控制方程，建立裂隙岩体不稳定温度场的复合单元算法，是热传导方程复合单元算法^[16]的重要拓展。结合裂隙岩体水流-传热模型试验数据，构建相应的复合单元数值模型进行对比计算分析，验证了裂隙岩体不稳定温度场的复合单元算法的有效性和可靠性。算例分析表明岩石裂隙中的低温流体与相邻高温岩块间有较为明显的热传导-对流作用。

2 复合单元法原理

一个复合单元可以覆盖一组或者多组不连续结构面（如裂隙、断层等）。图 1 所示为一个复合单元被 3 条裂隙划分为 7 个岩块子单元和 9 个裂隙片段。文中下标 rl 表示岩块子单元 l ，下标 j 代表裂隙，下标 (rl, rm) 用来表示两相邻岩块子单元 rl 和 rm 间的裂隙片段。

复合单元中每个岩块子单元的节点温度 T_{rl} 可通过映射的复合单元的相应节点温度 $\{T\}_{rl}$ 插值得到，即

$$T_{rl} = [N]\{T\}_{rl} \quad (1)$$

其中插值型函数 $[N]$ 和有限元一致，且每个插值表达式仅在相应的子单元内有效，则图 1 所示的一个复合单元具备 7 套节点变量供 7 个岩块子单元插值。子单元上的已知变量通过等效原则转换到相应的映射复合单元节点上，依据变分原理推导复合

单元的控制方程，随后将复合单元控制方程整合到整体控制方程中。求解得到复合单元节点温度量，通过式 (1) 即可得到每个子单元的节点温度量。

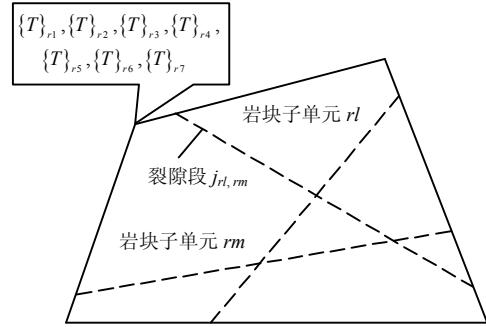


图 1 含裂隙面的复合单元

Fig.1 Composite element containing fractures

整体坐标系定义为： x 轴朝东， y 轴朝北， z 轴铅直向上。为了便于方程推导，每条裂隙面均定义相应的局部坐标系： y_j 轴沿着裂隙面指向其倾角方向， z_j 轴垂直于裂隙面指向上， x_j 轴由右手螺旋定律确定，如图 2 所示。

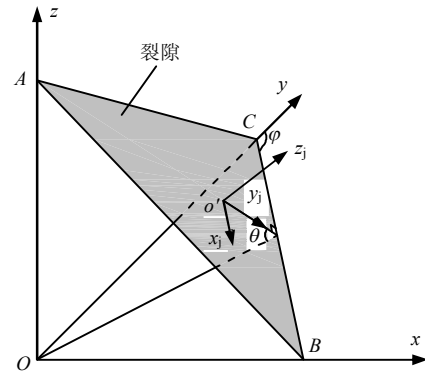


图 2 裂隙面的局部坐标系

Fig.2 Local coordinate system of fracture

裂隙面上的变量从整体坐标向局部坐标的转换表达式为

$$\{a\}_{rl,rm} = [L]_j \{A\}_{rl,rm} \quad (2)$$

式中： $\{a\}_{rl,rm}$ 、 $\{A\}_{rl,rm}$ 分别为局部和整体坐标系中的相应变量； $[L]_j$ 由裂隙面的倾向 φ_j 和倾角 θ_j 确定：

$$[L]_j = \begin{bmatrix} \cos \varphi_j & -\sin \varphi_j & 0 \\ \sin \varphi_j \cos \theta_j & \cos \varphi_j \cos \theta_j & -\sin \theta_j \\ \sin \varphi_j \sin \theta_j & \cos \varphi_j \sin \theta_j & \cos \theta_j \end{bmatrix} \quad (3)$$

3 裂隙岩体不稳定温度场的复合单元算法

对于不稳定温度场, 常规热传导-对流方程的具体表达式为^[17]

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla(a \nabla T) - \nabla(Tv) + Q \quad (4)$$

式中: τ 为时间; a 为导温系数; T 为温度; v 为流速; Q 为热源项。

针对时间域, 本文首先假定时间不变, 将空间域进行离散处理, 然后采用向后差分法^[15]导出时间域的递推公式, 逐步求解各时间单元节点变量。

Guymon^[17]在不改变式(4)性质的情况下, 推导了热传导-对流方程的变分原理, 即取泛函为

$$\begin{aligned} \Pi = \int_{\Omega} \left[\frac{a}{2} (S\phi)^T (S\phi) + \frac{v_x}{2} \phi S\phi + \frac{v_y}{2} \phi S\phi + \frac{v_z}{2} \phi S\phi + \right. \\ \left. \frac{v_x^2}{8a} \phi^2 + \frac{v_y^2}{8a} \phi^2 + \frac{v_z^2}{8a} \phi^2 + \frac{\partial \phi}{\partial \tau} \phi \right] d\Omega - \int_{\Gamma} Q \phi d\Gamma \end{aligned} \quad (5)$$

式中: S 为微分算子; ϕ 为温度变量 T 的转换函数。

$$\{S\} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\phi = T \exp(\beta/2) \quad (7)$$

式中: $\beta = -1/a(xv_x + yv_y + zv_z)$ 。

3.1 岩块子单元的控制方程

以岩块子单元 rl 为例, 联合式(1)和式(5), 应用变分原理可得

$$\begin{aligned} \delta \Pi = \int_{\Omega} \left[a(SN)^T (SN) + v_x NSN + v_y NSN + \right. \\ \left. v_z NSN + \frac{v_x^2}{4a} N^2 + \frac{v_y^2}{4a} N^2 + \frac{v_z^2}{4a} N^2 \right] \{\phi\}_{rl} + \\ \left. \frac{\partial \{\phi\}_{rl}}{\partial \tau} N^2 \right] d\Omega - \int_{\Gamma} Q N d\Gamma = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

上式可记为 $[h]\{\phi\}_{rl} + [R]\frac{\partial \{\phi\}_{rl}}{\partial \tau} + [F] = 0$, 其中:

$$\begin{aligned} [h] = \int_{\Omega} \left[a(SN)^T (SN) + v_x NSN + v_y NSN + \right. \\ \left. v_z NSN + \frac{v_x^2}{4a} N^2 + \frac{v_y^2}{4a} N^2 + \frac{v_z^2}{4a} N^2 \right] d\Omega \end{aligned} \quad (9)$$

$$[R] = \int_{\Omega} N^2 d\Omega \quad (10)$$

$$[F] = \int_{\Gamma} -QN d\Gamma \quad (11)$$

根据不稳定温度场向后差分的隐式解法^[15], 在 τ_{n+1} 时刻, 温度场方程如下:

$$\left([h] + \frac{1}{\Delta \tau_n} [R] \right) \{\phi_{n+1}\}_{rl} - \frac{1}{\Delta \tau_n} [R] \{\phi_n\}_{rl} + [F_{n+1}] = 0 \quad (12)$$

针对每一个岩块子单元 rl , 式(12)可记为 $[H]\{\phi\} = \{F\}$ 的形式, 其中:

$$[H]_{rl} = \left([h]_{rl} + \frac{1}{\Delta \tau_n} [R]_{rl} \right) \quad (13)$$

$$\{\phi\}_{rl} = \{\phi_{n+1}\}_{rl} \quad (14)$$

$$\{F\}_{rl} = \frac{1}{\Delta \tau_n} [R]_{rl} \{\phi_n\}_{rl} - [F_{n+1}]_{rl} \quad (15)$$

3.2 裂隙段的控制方程

真实的裂隙可视为表面大量的相互接触的突起物, 这些突起物可看作是具有高孔隙率的且夹在两平行岩壁间的物质颗粒。“充填模型”^[18]将裂隙视为一种具有变形特性的均匀的“充填介质”。本文基于“充填模型”, 假定裂隙内含有“充填物质”, 开度为 e , 具有一定的导温系数。

一般来说, 岩石裂隙开度尺寸相比复合单元尺寸小很多, 故在裂隙段的局部坐标系中可假定相应的变量如下:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} &= \frac{\partial \left[\frac{1}{2} (\phi_{rl} + \phi_{rm}) \right]}{\partial x_j} = \frac{[N_{x_j}]}{2} (\{\phi_{rl}\} + \{\phi_{rm}\}) \\ \frac{\partial \phi}{\partial y_j} &= \frac{\partial \left[\frac{1}{2} (\phi_{rl} + \phi_{rm}) \right]}{\partial y_j} = \frac{[N_{y_j}]}{2} (\{\phi_{rl}\} + \{\phi_{rm}\}) \\ \frac{\partial \phi}{\partial z_j} &= \frac{\phi_{rl} - \phi_{rm}}{e} = [N] \frac{(\{\phi_{rl}\} - \{\phi_{rm}\})}{e} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中: $[N_{x_j}] = \partial[N]/\partial x_j$; $[N_{y_j}] = \partial[N]/\partial y_j$; e 为岩石裂隙开度。

因裂隙开度 e 较小, 其体积微元可写为

$$d\Omega_{rl,rm} = e dx_j dy_j \quad (17)$$

以裂隙段 $j_{rl,rm}$ 为例, 联合式 (1)、(5)、(7)、(16)、(17), 应用变分原理可得裂隙段的控制方程为

$$\left. \begin{aligned} [H]_{rl,rl} \{\phi\}_{rl} + [H]_{rl,rm} \{\phi\}_{rm} &= \{F\}_{rl,rm} \\ [H]_{rm,rl} \{\phi\}_{rl} + [H]_{rm,rm} \{\phi\}_{rm} &= \{F\}_{rm,rl} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} [H]_{rl,rl} &= A + e \int_{\Gamma_{rl,rl}} \left[\frac{aN^2}{e^2} + \frac{v_{z_j}}{2e} N^2 \right] dx_j dy_j \\ [H]_{rm,rm} &= A + e \int_{\Gamma_{rm,rm}} \left[\frac{aN^2}{e^2} - \frac{v_{z_j}}{2e} N^2 \right] dx_j dy_j \\ [H]_{rl,rm} &= [H]_{rm,rl} = A - e \int_{\Gamma_{rl,rm}} \left[\frac{aN^2}{e^2} \right] dx_j dy_j \\ A &= e \int_{\Gamma_{rl,rm}} \left[\frac{a}{4} [N_{x_j}]^2 + \frac{a}{4} [N_{y_j}]^2 + \frac{v_{x_j}}{4} NN_{x_j} + \right. \\ &\quad \left. \frac{v_{y_j}}{4} NN_{y_j} + \frac{N^2}{16a} (v_{x_j}^2 + v_{y_j}^2 + v_{z_j}^2) + \frac{N^2}{2\Delta\tau} \right] dx_j dy_j \\ \{F\}_{rl,rm} &= \{F\}_{rm,rl} = e \int_{\Gamma_{rl,rm}} \frac{N^2}{4\Delta\tau} (\{\phi_0\}_{rl} + \{\phi_0\}_{rm}) dx_j dy_j \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中: $\{\phi_0\}$ 为上一时刻的变量, 为已知量。

3.3 复合单元的控制方程

综合上述推导, 以图 1 所示一个复合单元含有 7 个岩块子单元为例, 整合所有岩块子单元与裂隙段的控制方程, 基于变分原理, 在整个研究区域内, 可以得到此复合单元用于求解不稳定温度场问题的基本控制方程为

$$\begin{bmatrix} [HT]_{r1,r1} & [HT]_{r1,r2} & \cdots & [HT]_{r1,r7} \\ [HT]_{r2,r1} & [HT]_{r2,r2} & \cdots & [HT]_{r2,r7} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ [HT]_{r7,r1} & [HT]_{r7,r2} & \cdots & [HT]_{r7,r7} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\phi\}_{r1} \\ \{\phi\}_{r2} \\ \cdots \\ \{\phi\}_{r7} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{FT\}_{r1} \\ \{FT\}_{r2} \\ \cdots \\ \{FT\}_{r7} \end{Bmatrix} \quad (20)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} [HT]_{rl,rl} &= [H]_{rl} + \sum_{rm=1, rm \neq rl}^{r7} B_1(rl,rm)[H]_{rl,rm} \\ [HT]_{rl,rm} &= [H]_{rl,rm} \\ B_1(rl,rm) &= \begin{cases} 1, & \text{若 } rl \text{ 和 } rm \text{ 是相邻岩块子单元} \\ 0, & \text{若 } rl \text{ 和 } rm \text{ 不是相邻岩块子单元} \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

$$\left. \begin{aligned} [FT]_{rl,rl} &= [F]_{rl} + \sum_{rm=1, rm \neq rl}^{r7} B_2(rl,rm)[F]_{rl,rm} \\ B_2(rl,rm) &= \begin{cases} 1, & \text{若 } rl \text{ 和 } rm \text{ 是相邻岩块子单元} \\ 0, & \text{若 } rl \text{ 和 } rm \text{ 不是相邻岩块子单元} \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

需要指出的是, 式 (20) 是一个复合单元含有多个岩块子单元的控制方程, 此方程需联合其他复合单元或有限单元形成研究域的整体控制方程。若某复合单元内将不含裂隙, 则此复合单元自动回归成常规有限单元。求解得到变量 $\{\phi\}$ 后, 再通过式 (7) 求解相应的温度变量 $\{T\}$ 。

4 算例分析

为了验证上述不稳定温度场的复合单元算法的合理性和有效性, 本文通过数值模型计算与相应的试验实测数据^[19-20]进行对比分析。

试验采用甘肃北山地区的花岗岩制成裂隙岩体模型 (高 1.503 m × 长 0.904 m × 宽 0.30 m), 模型预置两条竖直裂隙和两条水平裂隙, 开度分别为 $e = 1.5 \text{ mm}(V_1)$ 、 $e = 2.5 \text{ mm}(V_2)$ 、 $e = 1.5 \text{ mm}(H_1)$ 、 $e = 1.0 \text{ mm}(H_2)$ ^[20]。采用砂粒充填裂隙, 模型周围采用防水岩棉板为保温层, 用以减少热量散失; 左侧布置电热板提供热源, 具体试验装置如图 3 所示^[20]。

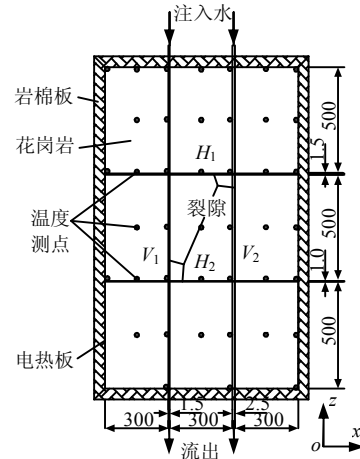


图 3 试验装置简图 (单位: mm)^[20]

Fig.3 Sketch of experiment system (unit: mm)^[20]

为方便与试验数据进行比较分析, 本文构建相应的复合单元模型, 如图 4 所示, 含有 162 个节点, 64 个单元, 包含 28 个含裂隙的复合单元 (如图 4 中灰色部分)。数值模型中的 4 条裂隙, 依据其倾向、倾角及具体位置, 应用复合单元前处理程序自动嵌入相应的复合单元中, 并生成相应的计算所需信息。

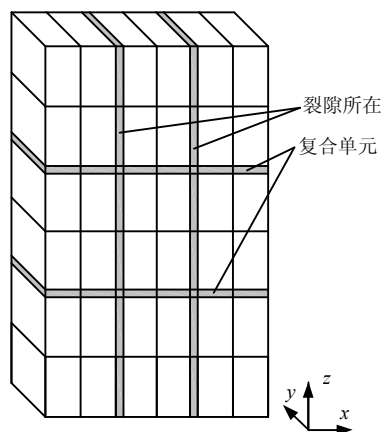


图4 裂隙岩体复合单元模型

Fig.4 Composite element model of fractured rock mass

复合单元模型的计算参数与试验模型参数相同, 花岗岩热传导系数为 $\lambda = 8.136 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$, 比热为 $c = 0.75 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 密度为 $\rho = 2.70 \text{ g}/\text{cm}^3$, 导温系数为 $a = 4.018 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ [20]。

复合单元模型和试验模型边界基本保持一致: 从模型顶部注入温度约为 16.4°C 的冷水, 沿着竖直裂隙从底部流出, 试验模型中通过恒流泵控制裂隙中的流速 [20]; 模型左侧面电热板提供热源, 试验模型中其他边界采用岩棉板隔热, 复合单元数值模型中其他边界为绝热边界。

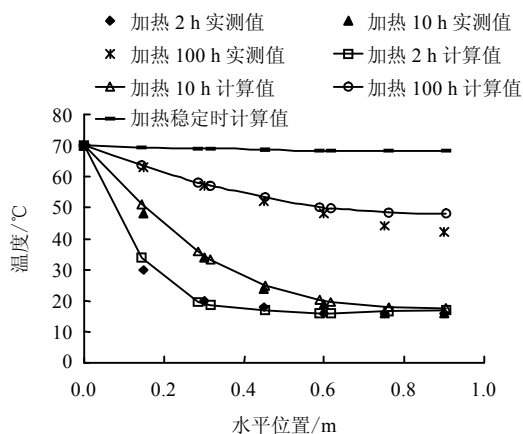
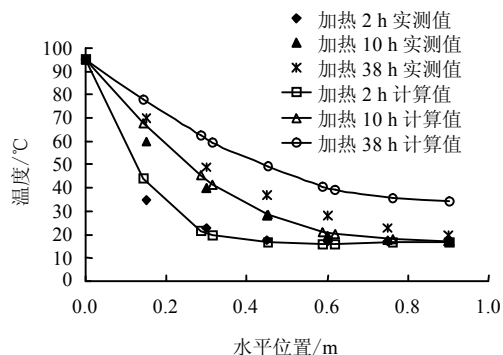
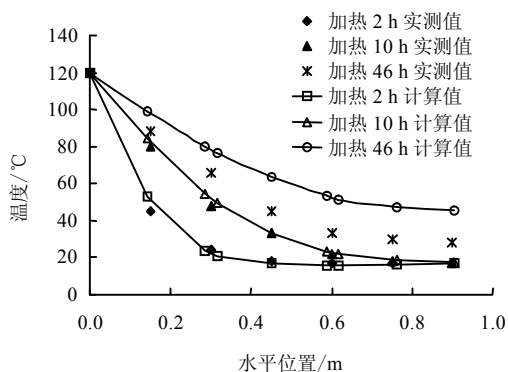
考虑 3 种工况进行对比分析。工况 1: 左侧面电热板提供 70°C 热源, 裂隙中水不流动; 工况 2: 左侧面电热板提供 95°C 热源, 裂隙 V_1 中流速为 2.2 mm/s , V_2 中流速为 2.4 mm/s ; 工况 3: 左侧面电热板提供 120°C 热源, 裂隙 V_1 中流速为 2.2 mm/s , V_2 中流速为 2.4 mm/s 。

工况 1 中 $z = 0.5 \text{ m}$ 处温度分布随时间变化曲线对比如图 5 所示。通过数值计算与实测数据对比分析可知: 数值计算结果与实测数据显示的规律基本一致。但随着加热时间的增加, 数值计算所得温度值相比实测值有所偏高, 特别是在右侧边界附近。主要原因是由于试验中采用的岩棉板无法实现完全绝热, 试验模型边界存在热量损失 [20]。数值计算在完全绝热条件下, 稳定状态时模型的温度与热源温度基本一致, 与实际相符。

图 6、7 分别为工况 2 和工况 3 实测值与数值计算温度分布对比图 ($z = 0.5 \text{ m}$)。通过比较分析可知, 数值计算结果与实测值的分布规律基本一致。因数值计算可保证边界处完全绝热, 在右侧边界附近计算值比实测值偏高。

图 8 所示为竖直裂隙 V_1 出口处水流温度随时间

变化曲线。再次, 计算值与实测值的分布规律基本一致; 但随着时间增加计算值比实测值偏大, 主要是由于试验模型有热量损失。从图中还可知, 岩体裂隙中低温水流与相邻高温岩块间通过热传导-对流作用可吸取热能, 进而可提取相应热能。

图5 工况 1 实测与数值计算温度分布对比图($z = 0.5 \text{ m}$)Fig.5 Comparison between measured and calculated values of temperature distribution for case 1 ($z = 0.5 \text{ m}$)图6 工况 2 实测与数值计算温度分布对比图($z = 0.5 \text{ m}$)Fig.6 Comparison between measured and calculated values of temperature distribution for case 2 ($z = 0.5 \text{ m}$)图7 工况 3 实测与数值计算温度分布对比图($z = 0.5 \text{ m}$)Fig.7 Comparison between measured and calculated values of temperature distribution for case 3 ($z = 0.5 \text{ m}$)

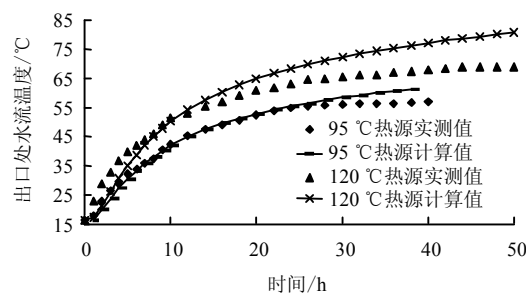


图8 竖直裂隙 V_1 出口处水流温度随时间变化曲线图
Fig.8 Curves of variation of water temperature at outlet of vertical fracture V_1 with time

5 结 论

基于三维热传导-对流方程,采用复合单元法,本文对裂隙岩体不稳定温度场的复合单元算法进行了初步研究,可得如下结论:

(1) 裂隙岩体不稳定温度场的复合单元算法在计算网格的剖分时可忽略裂隙的存在,网格划分不受限制,从而可得到规整的计算网格,随后通过复合单元前处理程序在相应的复合单元内部自动离散模拟裂隙,前处理简便快捷。

(2) 裂隙岩体不稳定温度场的复合单元算法可真实反映裂隙中流体与相邻岩块间的热传导-对流作用,兼具等效模型和离散模型优点。且该算法在程序编写过程中可有效地与传统有限元算法整合。构建复合单元数值模型进行不稳定温度场计算,与相应的试验实测数据进行对比分析,验证了该算法的可靠性。同时算例分析表明,岩石裂隙中低温流体与相邻高温岩块间有明显的热能交换。

(3) 诚然,裂隙岩体不稳定温度场的复合单元算法程序的编写相对较复杂,计算时间相对传统有限元略有增加。但可把人工从离散模拟带来的繁杂前处理工作中解放出来,且可获取细部构造的详细真实解。

参 考 文 献

- [1] DESILVA S J, CHAN C L, CHANDRA A, et al. Boundary element method analysis for the transient conduction-convection in 2-D with spatially variable convective velocity[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 1998, 22(1-2): 81-112.
- [2] SAMARDZIOSKA T, POPOV V. Numerical comparison of the equivalent continuum, non-homogeneous and dual porosity models for flow and transport in fractured porous media[J]. *Advances in Water Resources*, 2005, 28(3): 235-255.
- [3] SHAIK A R, RAHMAN S S, TRAN N H, et al. Numerical simulation of fluid-rock coupling heat transfer in naturally fractured geothermal system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(10): 1600-1606.
- [4] LONG J C S, REMER J S, WILSON C R, et al. Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures[J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(3): 645-658.
- [5] ODA M. An equivalent continuum model for coupled stress and fluid analysis in jointed rock masses[J]. *Water Resources Research*, 1986, 22(13): 1845-1856.
- [6] 黄涛. 裂隙岩体渗流-应力-温度耦合作用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 77-82.
HUANG Tao. Coupling study among seepage-stress-temperature in fractured rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(1): 77-82.
- [7] AHOLA M P, THORAVALL A, CHOWDHURY A H. Distinct element models for the coupled T-H-M processes: Theory and implementation[J]. *Developments in Geotechnical Engineering*, 1996, 79: 181-211.
- [8] ANDERSSON J, DVERSTORP B. Conditional simulation of fluid flow in three-dimensional networks of discrete fractures[J]. *Water Resources Research*, 1987, 23(10): 1876-1886.
- [9] BRUEL D. Heat extraction modelling from forced fluid flow through stimulated fractured rock masses: Application to the Rosemanowes hot dry rock reservoir[J]. *Geothermics*, 1995, 24(3): 361-374.
- [10] KOLDITZ O. Modelling flow and heat transfer in fractured rocks: Concept model of a 3-D deterministic fracture network[J]. *Geothermics*, 1995, 24(3): 451-470.
- [11] CHEN S H, QIANG S. Composite element model for discontinuous rock masses[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 2004, 41(7): 865-870.
- [12] CHEN S H, XUE L L, XU G S, et al. Composite element method for the seepage analysis of rock masses containing fractures and drainage holes[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(5): 762-770.
- [13] XUE L L, CHEN S H, SHAHROUR I. Algorithm of coupled normal stress and fluid flow in fractured rock

- mass by composite element method[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2014, 47(5): 1711—1725.
- [14] ZIENKIEWICZ O C, TAYLOR R L. The finite element method (fifth edition) volume 1: The basis[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [15] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [16] 强晟, 赵燕, 张杨. 不连续岩体温度场的复合单元模型初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2094—2100.
- QIANG Sheng, ZHAO Yan, ZHANG Yang. Preliminary research on composite element model of temperature field for discontinuous rock masses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(10): 2094—2100.
- [17] GUYMON G L, SCOTT V H, HERRMANN L R. A general numerical solution of the two-dimensional diffusion-convection equation by the finite element method[J]. **Water Resources Research**, 1970, 6(6): 1611—1617.
- [18] 陈胜宏, 王鸿儒, 熊文林. 节理面渗流性质的探讨[J]. 武汉水利电力学院学报, 1989, 22(1): 53—60.
- CHEN Sheng-hong, WANG Hong-ru, XIONG Wen-lin. Study of the seepage characteristics of joint surface[J]. **Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering**, 1989, 22(1): 53—60.
- [19] 路威, 项彦勇, 唐超. 填砂裂隙岩体渗流传热模型试验与数值模拟[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3448—3454.
- LU Wei, XIANG Yan-yong, TANG Chao. Model experiment and numerical simulation of flow and heat transfer for sand-filled fractured rock model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(11): 3448—3454.
- [20] 路威. 裂隙岩体水流-传热模型试验与计算理论研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.

《岩土力学》2015 年第 2 期被 EI 收录论文 (41 篇, 收录率 100%)

序号	论文题名	作者	页码
1	地面超载引起邻近埋地管道的位移分析	龚晓南, 孙中菊, 俞建霖	305—310
2	胶结钙质土的室内试验研究进展	朱长歧, 周 斌, 刘海峰	311—319
3	软土的一维次固结双曲线流变模型研究	余湘娟, 殷宗泽, 高 磊	320—324
4	土工袋减振隔振机制分析及试验研究	刘斯宏, 高军军, 王艳巧	325—332
5	卤水浸泡环境下盐岩剪切特性影响因素分析	姜德义, 张军伟, 陈 结, 等	333—339
6	悬臂式围护桩受力性状与土压力试验研究	黄雪峰, 张 蓓, 覃小华, 等	340—346
7	直角域中凸起和孔洞对 SH 波的散射与地震动	齐 辉, 蔡立明, 潘向南, 等	347—353
8	浅埋隧道开挖引起的土体水平位移分析	夏元友, 陈春舒, BAKRI Mudthir, 等	354—360
9	考虑黏度时变性的水泥浆液盾构壁后注浆扩散规律及管片压力模型的试验研究	刘 健, 张载松, 韩 烨, 等	361—368
10	压实红黏土失水收缩过程的孔隙演化规律	谈云志, 喻 波, 刘晓玲, 等	369—375
11	双排抗滑桩上滑坡推力近似解析方法	肖世国, 何 洪	376—380
12	基于相位差时延估计法的岩石声发射源定位研究	黄晓红, 张艳博, 田宝柱, 等	381—386
13	循环荷载作用下黏土改进边界面模型	李 剑, 陈善雄, 姜领发	387—392
14	岩石应变软化本构模型建立及 NR-AL 法求解研究	王军祥, 姜谔男	393—402
15	基于一种脆性指标确定岩石残余强度	彭 俊, 荣 冠, 蔡 明, 等	403—408
16	非饱和土中端承桩水平振动特性研究	章 敏, 王星华, 冯国瑞	409—422
17	颗粒级配对抗状材料不排水力学特性的影响	刘映晶, 李 罡, 尹振宇, 等	423—429
18	基于碳纤维加热光缆的砂性土渗流场 C-DTS 分布式监测试验研究	严珺凡, 施 斌, 曹鼎峰, 等	430—436
19	循环围压对饱和软黏土永久变形的影响	孙 磊, 蔡袁强, 王 军, 等	437—443
20	倾斜煤层水力压裂起裂压力计算模型及判断准则	程 亮, 卢义玉, 葛兆龙, 等	444—450
21	基于 M-P 法的抗滑桩支护边坡稳定性分析	梁冠亭, 陈昌富, 朱剑锋, 等	451—456
22	基于 H-B 准则的公路桥梁桩基嵌岩深度计算	雷 勇, 刘 泽	457—462
23	不同温度后红砂岩力学性质及微观结构变化规律试验研究	戎虎仁, 白海波, 王占盛	463—469

(未完, 见第 2104 页)