

DOI: 10.11779/CJGE201408013

基于离散-连续耦合的尾矿坝边坡破坏机理分析

张 铎¹, 刘 洋^{1*}, 吴顺川^{1,2}, 汪成林¹

(1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 在连续介质力学有限差分数值模拟的基础上, 选取有代表性的局部区域进行基于有限差分与离散元的离散-连续耦合分析。采用上述方法模拟了某尾矿坝边坡在尾矿冲填前后潜在滑移带附近的宏细观力学特征。模拟结果显示, 对于耦合和非耦合模型中的连续域两种方法的计算结果基本一致, 但离散域的存在可以对滑移带形成过程的细观力学特征, 如力链分布、土体细观组构发展等进行分析, 研究边坡破坏的细观机理。研究表明, 在滑移带形成过程中, 滑移带内外土体各向异性的发展明显不同: 随着荷载的施加, 潜在滑移带内土体颗粒发生了较明显的位移, 应力主方向发生了明显转动。颗粒的转动改变了带内组构的分布, 并逐渐形成剪切滑移带, 造成边坡失稳。滑带外土体虽然应力主方向发生了一定的偏转, 但剪应力变化不大。采用的离散-耦合分析方法可以分析边坡在渐进破坏过程中滑移带形成的细观力学机理。

关键词: 离散-连续耦合; 数值模拟; 尾矿坝边坡; 破坏机理

中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)08-1473-10

作者简介: 张 铎(1991-), 男, 湖北天门人, 博士研究生, 主要从事土细观力学方面的研究与数值模拟。E-mail: tmyxzd@hotmail.com。

Failure mechanism analysis of tailing dams based on coupled discrete and continuous method

ZHANG Duo¹, LIU Yang¹, WU Shun-chuan^{1,2}, WANG Cheng-lin¹

(1. Dept. of Civil Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of High Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Ministry of Education, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the numerical results from the finite difference method (FDM), a representative local area is selected to conduct discrete-continuous coupling analysis using FDM and discrete element (DEM). The macro-scale and meso-scale mechanical responses of a tailing dam slope before and after filling are simulated by using the above model. The numerical results indicate that for the continuous domain, the results are almost the same using non-coupled method and coupled method. The meso-scale mechanical response in the slip bands, such as distribution of force chain and development of soil fabric, can be analyzed by using the discrete domain to discuss the meso-mechanism of failure of tailing dams. The research shows that in the formation of slip bands, the soil anisotropies in and out of the slip bands are obviously different: with the increasing load, soil particles in the potential slip bands have significant displacement. The main direction of stress has a significant rotation. The rotation of particles changes the fabric distribution, which contributes to the formation of slip bands and the slope instability. The main direction of stress of soil outside the bands rotates to some degree, while the shear stress changes little. The proposed discrete-continuous coupling method can analyze the meso-mechanism of formation of slip bands during slope progressive failure.

Key words: discrete-continuous coupling; numerical simulation; tailing dam slope; failure mechanism

0 引 言

近年来随着中国大规模的矿山开采, 产生了越来越多的尾矿, 一些新的技术和手段也被提出并用来处理各类尾矿, 但就目前的经济技术水平而言, 尾矿坝堆存仍是最主要的处理方法之一^[1]。而尾矿坝的稳定性涉及到矿山安全生产以及库区下游居民的生命财产

安全, 因此加强对尾矿坝失稳破坏的宏细观机理研究, 深入了解其失稳破坏过程, 对可能发生的尾矿坝事故

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178044, 51174014); 新世纪优秀人才资助项目(NCET-11-0579)

收稿日期: 2013-09-23

*通讯作者

进行合理、及时的预报并采取有针对性的预防措施,对于减轻或杜绝人员伤亡和财产损失具有十分重要的现实意义。

作为典型的散粒体边坡——尾矿坝,传统的极限平衡分析和连续介质力学计算方法(如有限元或有限差分法)在分析其破坏的细观力学机理时受到限制,无法获得反映土体破坏的内部力链、组构变化等微观信息。而采用基于不连续介质力学的离散单元法是比较合理的手段^[2]。离散单元法把土体视为由离散颗粒组成的散体材料,在外荷载作用下颗粒发生平移、转动和变形,从而可以较真实地模拟散粒体边坡的非线性和大变形特征。

但在进行大尺寸土工问题模拟时,离散颗粒的数量将极其巨大,从而导致计算过程缓慢。同时在模拟土体周边的构造物时,计算结果也不如连续介质力学计算方法理想。因此,离散-连续耦合的分析方法是突破二者局限的有效手段。耦合分析将可能发生破裂的土体以离散元进行求解,较远的土体或土体周边的连续介质构造物以连续介质力学的计算方法进行求解,可有效提高计算速度及精度。

耦合算法最早在20世纪80年代初期由Park等^[3]提出,至今已有很多学者建立了离散元与连续元耦合的计算模型^[4-5],并取得了较好的结果。耦合算法的重点在于实现连续元与离散元之间的数据传递,为此可在两种模型之间设置耦合域。

简单的耦合域为接触面,如图1(a)所示。在这类模型中,连续元与离散元模型的边界相重合形成接触面。计算时将连续元与离散元接触的网络边作为墙体,通过墙与颗粒之间的接触作用计算出墙体所受力,进而通过各自的本构关系计算出变形并将其作为位移边界条件施加于模型,如Azevedo等^[6]进行的带缺口梁的加载断裂模拟;Fakhimi^[7]完成了三维状态下的单轴压缩试验模拟。

采用比较多的是耦合域模型,如图1(b)所示。在这类模型中,连续元与离散元模型有一定的交叉重叠,形成耦合域。这种模型主要是通过虚功原理、能量分配或动量传递等法则来确定模型间的数据传递关系并进行计算。如Wellmann等^[8]、乔华等^[9]采用的Arlequin算法,Aubry等^[10]采用的Cauchy-Born法则及胥建龙等^[11-13]采用的动量传递等法则。

近年来离散-连续耦合算法已经开始应用到岩土工程实践中。Cai等^[14]采用耦合计算模拟了大尺度地下开挖对周边岩石的影响,并将其与开挖过程中收集的声发射数据做了比较研究;周健等^[15-18]完成了挡土墙地震响应、加筋挡土墙及分层介质中桩端刺入的数值模拟;李锡夔等^[19-20]模拟了地基受力及非饱和土边

坡的变形问题。模拟结果从细观尺度上揭示了材料的破坏机理,这是连续元模型模拟所不具备的优势。

在材料破坏机理研究方面,蒋明镜等^[21]、毕忠伟等^[22]利用离散元分别研究了直剪试验、双轴压缩试验下试样剪切带内部力学响应。指出在剪切带内部颗粒接触分布形式将发生明显变化,而剪切带外变化不明显。刘洋等^[23]则研究了双轴压缩试验中颗粒法向、切向力的分布,研究了散粒体内部各向异性的发展。

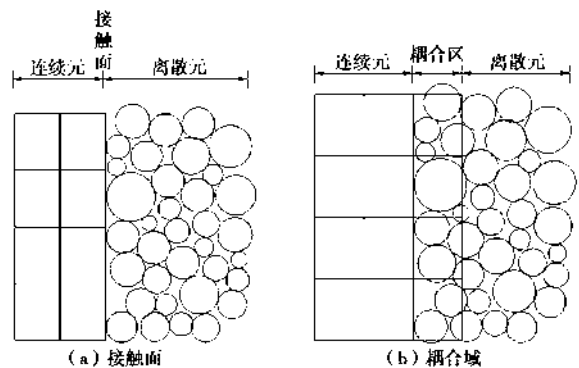


图1 接触面、耦合域示意图

Fig. 1 Sketch map of contact surface and coupling domain

本文采用耦合域的概念,通过两类模型在耦合域速度与力的传递实现耦合分析,用此算法模拟了某尾矿坝在冲填前后的宏细观力学特征,特别是滑移带形成过程的细观力学特征,如力链分布、土体细观组构发展等,探讨了尾矿坝边坡渐进破坏过程中的细观力学特征与破坏机理。

1 耦合计算基本理论

(1) 离散域离散元计算模型

假设在一个计算时间步长 Δt 内颗粒间作用力不变,由牛顿运动定律得到颗粒的运动方程:

$$F_i(t) + mg_i - \beta_g v_i(t) = m \frac{\Delta v_i}{\Delta t}, \quad (1)$$

$$M_i - \beta_g \omega_i(t) = I \frac{\Delta \omega_i}{\Delta t}, \quad (2)$$

式中, $i = \{1, 2, 3\}$ 为该向量沿 x, y, z 3个方向的分量, $F_i(t)$ 为 t 时刻颗粒受到的合力, g 为重力加速度, β_g 为全局阻尼系数,即动态松弛法中加入的人工阻尼, $v_i(t)$ 为平动速度分量, $\omega_i(t)$ 为转动速度, I 为转动惯量, M_i 为接触力合力矩。

(2) 连续域有限差分法计算模型

有限差分法求解的运动方程为

$$M\ddot{u} = -(C\dot{u} + Ku) + F_e. \quad (3)$$

对于不考虑能量耗散的系统,方程形式进一步简化为

$$M\ddot{u} = F_e, \quad (4)$$

式中, M 为质量, C 为阻尼, K 为刚度矩阵, F_e 为外

荷载向量。

令式 (1) 中 $F_i(t) + mg_i = F_0$, 则有

$$m \frac{\Delta v_i}{\Delta t} = -\beta_g v_i(t) + F_0 \quad (5)$$

可看出式 (3)、(5) 在形式上有相似之处, 这种形式上的相似为耦合计算提供了可能。

(3) 颗粒不平衡力

耦合计算中传递的颗粒所受的力为不平衡力, 即系统所受内外力之差。在建立离散元模型时, 需要先建立墙体来控制颗粒生成范围及施加初始应力场 (如图 1 (b) 中对应耦合域左边界的网格边), 而在开始耦合计算前需要删除墙体, 将耦合域网格节点速度作为边界条件施加于离散元模型, 这将引起离散元模型内不平衡力的变化。下面对删除墙体后不平衡力的变化作简要推导:

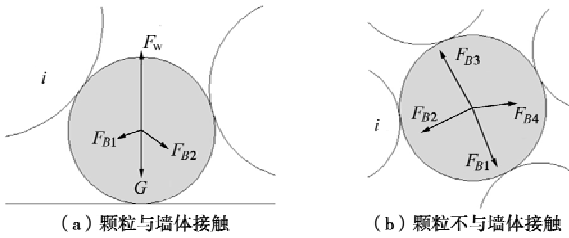


图 2 颗粒受力图示

Fig. 2 Contact forces acting on a particle

假设颗粒处于平衡状态, 且仅受来自于相邻颗粒、相邻墙的接触力和自重, 其受力如图 2 (a) 所示, 颗粒所受合力 $\sum F = 0$, 则系统达到平衡后, 内力 $F_{in} = G$, 外力 $F_{ou} = F_{1A} + F_{2A} + F_w$, 其中 F_{iA} 为相邻颗粒 i 对 A 的接触力, F_w 为相邻墙的接触力, G 为颗粒 A 自重。

若将墙体删除, 颗粒内力 F_{in} 仍然不变, 但外力 $F_{ou} = F_{1A} + F_{2A}$ 。显然, 删除墙体后, 颗粒内外力之差变化了 F_w , 即不平衡力变化了 F_w 。由于初始条件下颗粒平衡, 不平衡力应为 0, 故在删除墙之后, 不平衡力会显著增大。

若颗粒开始不与墙体接触, 如图 2 (b) 所示, 则有

$$\sum_{i=1}^4 F_{iA} + G = 0 \quad (6)$$

删除墙体后, 在式 (1) 的假设前提下, 颗粒速度及相对位置未发生变化, 则来自于颗粒间的接触力不会改变, 故式 (6) 在墙体删除之后仍成立, 即不平衡力变化并不显著。

综上, 在删除墙体后原模型中与墙体直接接触的颗粒不平衡力会显著增大, 且在大小上等于原模型中墙体给颗粒的接触力。而之前不与墙体直接接触的颗粒不平衡力不会发生显著变化。将此结果推广至不平

衡系统, 此时颗粒加速度 $a = dv / dt \neq 0$, 引入惯性力 $F_{惯性} = -ma$ 使颗粒受力在形式上平衡, 此时不平衡力变化趋势与平衡系统相似, 不再赘述。

将耦合域内所有颗粒看作整体, 对其不平衡力进行求和, 如图 3 所示。耦合域内颗粒用灰色标识。为便于化简, 此处暂不考虑颗粒自重, 耦合域内颗粒 A 所受不平衡力 $F_{UA} = \sum F_{iA}, i \in \{1, 2, 3, 4\}$, F_{iA} 为颗粒 i 对颗粒 A 的作用力, 其中 F_{1A} 为耦合域外颗粒对 A 的作用力。由于颗粒间接触力互为作用力及反作用力, 即 $F_{iA} = -F_{Ai}$, 故有:

$$\sum F_{Ui} = \sum F_{mn} \quad (7)$$

式中, $\sum F_{Ui}$ 为耦合区所有颗粒所受不平衡力之和, F_{mn} 为编号 m 的颗粒与编号为 n 的颗粒之间的接触力, 其中 m 在耦合域外, n 在耦合域内。

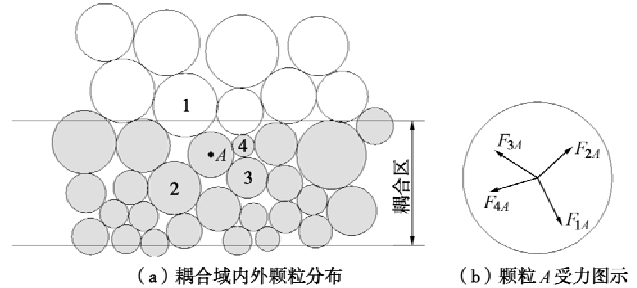


图 3 耦合域颗粒受力图示

Fig. 3 Contact forces acting on a particle in coupling domain

从式 (7) 可以看出, 耦合域内所有颗粒的不平衡力之和等于与耦合域相邻的颗粒对耦合域的颗粒接触力之和。故在耦合分析中, 将耦合域颗粒的不平衡力之和传递至网格节点, 其实质就是将离散元模型中作用于耦合域的接触力作为力的边界条件施加于连续元模型, 进而保证耦合分析中力的连续性。

(4) 耦合域内变量传递

在耦合分析中, 离散-连续模型间通过传递速度及力来实现耦合。要保证连续体与离散体之间耦合边界条件的连续性, 需要在数据传递之前先对其进行插值重分配, 使其在传递前后的边界条件对应一致。

取耦合域内某网格 $ABCD$ 及其中颗粒作为研究对象, 如图 4 所示。设颗粒 j 的速度为 u_j , 则有

$$u_j = \sum_{i=1}^N v_i \alpha_i \quad (8)$$

式中, v_i 为网格节点 i 的运动速度, N 为网格的节点数 (如图 4 中, $N=4$), α_i 为节点 i 的速度分配到颗粒 j 上的权函数。

在有限差分法模型中, 节点 A 所受力 F_A 为

$$F_A = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} F_{ij} \beta_{ij} \quad (9)$$

式中, N_i 为节点 A 所属的耦合域网格总数, N_j 为网

格*i*包含颗粒总数(如图4中, $N_i = 4$, $N_j = 14$), F_{ij} 为节点*A*所属的第*i*个网格内的颗粒*j*所受的力, β_{ij} 为球体*j*所受力在该节点的分配权函数。

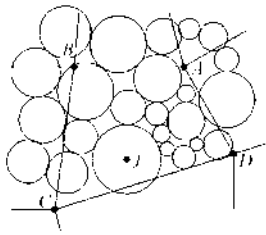


图4 耦合域网格与颗粒相对关系

Fig. 4 Position of grids and particles in coupling domain

取耦合域内单个网格及其内部颗粒分别作为研究对象。在耦合计算中, 耦合域内的离散元与连续元所受力相互传递, 则 $F_{DEM} = F_{FDM}$, 计算时步 Δt 也取相同, 显然一个计算时步中离散元与连续元所受冲量也相等, 即 $I_{DEM} = I_{FDM}$, 离散元模型的动量为

$$P_{DEM} = \sum_{j=1}^{N_j} m_j u_j = \sum_{j=1}^{N_j} m_j \sum_{i=1}^N v_i \alpha_i \quad (10)$$

式中, m_j 为颗粒*j*质量, v_i 及 α_i 意义同式(8)。

若 $\alpha_i = \frac{1}{N}$ 为常数, $P_{DEM} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_j} m_j \sum_{i=1}^N v_i$, 在网格

范围内, 离散元模型总质量 $M_{DEM} = \sum_{j=1}^{N_j} m_j$, 式(10)

可进一步简化为 $P_{DEM} = \frac{M_{DEM}}{N} \sum_{i=1}^N v_i$ 。

连续元模型的动量为

$$P_{FDM} = \sum_{i=1}^N m_i v_i \quad (11)$$

由于离散元与连续元为同种材料, 相同面积内连续元与离散元模型总质量相等, 即该网格范围内 $M_{FDM} = M_{DEM}$ 。在连续元计算中, 网格节点质量 $m_i = M_{FDM} / N$, 故式(11)简化为

$$P_{FDM} = \sum_{i=1}^N m_i v_i = \frac{M_{FDM}}{N} \sum_{i=1}^N v_i = P_{DEM} \quad (12)$$

显然在力的传递过程中, 若形函数 $\alpha_i = 1/N$ 为常数, 则耦合域模型的动量守恒。实际计算中, 若引入的形函数不是常数, 则会造成一定误差。

2 离散域散粒体细观组构的数学描述

在散粒体细观结构的研究中, 可采用组构张量, 通过平均方向矢量和矢量的幅度去观测细观组构的变化。Satake^[24]在1982年指出对于圆盘或者圆形颗粒, 组构张量可通过接触法向分布 n_i 定义为

$$\phi_{ij} = \frac{1}{2c} \sum_1^{2c} n_i n_j = \frac{1}{c} \sum_1^c n_i n_j \quad (13)$$

组构张量可用于描述接触法向分布的方向或者结构各向异性。组构张量为一个对称的二阶张量, 有两个主值。对组构张量还可求其特征值与特征向量, 进而求出该组构张量的主方向。

对于散粒体的接触法向、颗粒间法向接触力和切向接触力的分布可分别采用下式所示的傅里叶级数表示^[23, 25]:

$$E(\theta) = \frac{1}{2\pi} [1 + a \cos 2(\theta - \theta_a)] \quad (14)$$

$$f_n(\theta) = f_0 [1 - a_n \cos 2(\theta - \theta_f)] \quad (15)$$

$$f_t(\theta) = -f_0 a_t \sin 2(\theta - \theta_t) \quad (16)$$

式中, θ 是接触方向角度, f_0 是所有接触的平均法向接触力, 细观参数 a , a_n 和 a_t 为描述散粒体各向异性的参数。 θ_a , θ_f 和 θ_t 分别为接触法向、法向接触力和切向接触力各向异性的主方向。

3 离散-连续耦合数值模型与模拟过程

数值模拟算例的几何参数采用加拿大 Alberta 省的 Fort McMurray 附近的一座试验尾矿坝边坡数据^[26]。尾矿坝海拔 318 m 以下为砂土基础层, 该层位于地下水位以下(下文简称为 BBW)。海拔 321 m 以下为处于地下水位以上的尾矿砂层(下文简称为 BAW)。在其上建有一座尾矿坝, 坡度比 1 : 2.5, 坝高 8 m。尾矿库左侧采用压实的砂土建造了 10 m 高的外壳结构。尾矿库横剖面如图 5 所示。

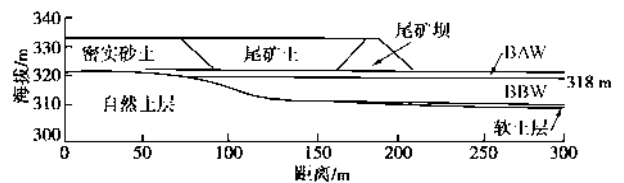


图5 尾矿坝剖面图

Fig. 5 Profile of tailing dam

鉴于同时考虑离散-连续耦合和颗粒-流体耦合的复杂性, 本文对上述模型作了简化, 不考虑流体的作用, 并将密实砂土层、BAW、BBW 及自然土层合为一层进行分析, 尾矿土与密实砂土层、尾矿坝间采用接触面模型, 允许两侧土体发生相对滑动。密实砂土模型左侧、底部及右端均采用固定边界条件。材料除自重外不受其它形式的外荷载。由于未考虑水的影响, 对土层的强度参数作了折减, 各层土材料参数如表 1 所示。为便于建模, 将海拔 321 m 的水平面对应于耦合模型中直线 $y=0$, 这对计算结果无影响。

建立的离散-连续耦合模型如图 6 所示, 其中连续元模型采用有限差分(FDM)软件 FLAC 建立, 离散元(DEM)模型采用 PFC 建立, 图中离散域的选择

是根据有限差分的模拟结果确定, 后面将详述, 耦合计算流程如下:

(1) 利用连续元建立尾矿坝模型(不包括冲填的尾矿), 赋予材料宏观力学参数, 固定边界循环计算至平衡。

(2) 根据连续元模拟结果, 在选定的区域建立离散元模型, 赋予其细观参数及围压, 循环计算至平衡。

(3) 将连续元模型耦合域内网格进行编号, 向离散元传递耦合域内网格节点坐标, 离散元将耦合域内颗粒按所处网格进行分组。

(4) 在连续元与离散元模型中施加各自对应的边界条件, 开始耦合计算。

(5) 每一时步计算开始前, 连续元从离散元模型接收耦合域颗粒所受不平衡力, 以节点集中力的形式施加于网格节点。计算结束后向离散元模型传递网格节点速度, 离散元计算完成后继续向连续元传递颗粒不平衡力, 进行下一时步计算。

(6) 循环步骤(5)直至达到平衡, 回到步骤(4), 在模型中增加冲填的尾矿部分, 继续进行计算, 直至模拟结束。

表 1 土体强度参数

Table 1 Strength parameters of soils

材料	体积模量/kPa	剪切模量/kPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	密度/(10 ³ kg·m ⁻³)
尾矿坝	10000	10000	10	28	1.5
密实砂	30000	30000	0	36	2
尾矿土	10000	100	0	30	1.7

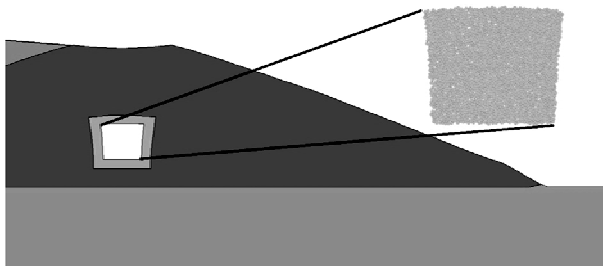


图 6 耦合计算模型

Fig. 6 Numerical model of discrete-continuous coupling

4 数值模拟结果分析

4.1 连续元数值模拟结果

首先建立基础和尾矿坝模型, 计算达到平衡后模拟尾矿冲填, 继续迭代直到平衡。计算模型如图 7 所示, 模型两侧及底部为固定边界, 坡面和顶面为自由边界。

计算完成后尾矿坝内主应力和位移分布如图 8, 9 所示(坝体左侧尾矿库部分未显示, 下同)。从图 8 中可以看出, 冲填尾矿后坝体主应力方向发生了改变,

坝体左侧由于受尾矿冲填挤压的影响土体应力比右侧集中。图 9 中坝体位移场显示冲填尾矿后坝体发生了较大的向右位移, 且呈类似于边坡滑动破坏的弧形位移场, 坝体右侧坡脚有明显的隆起。



图 7 连续元计算模型

Fig. 7 Numerical model of FDM

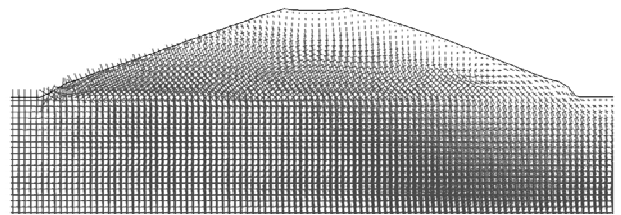


图 8 坝体主应力分布图

Fig. 8 Distribution of principle stress in tailing dam

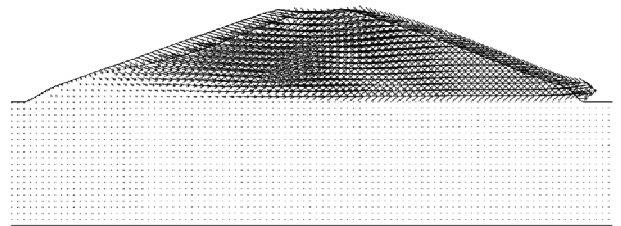


图 9 坝体位移分布图

Fig. 9 Distribution of displacement in tailing dam

坝体内塑性区的分布如图 10 所示, 图中不同充填图案分别表示弹性区、受拉区和塑性区。从图中可以看出, 坝体在尾矿冲填后很大一部分区域发生了屈服, 图中虚线为可能的潜在滑移面。在下面的耦合分析中, 我们将选取塑性区的一部分进行离散-连续耦合模拟, 以观察其宏观力学响应。

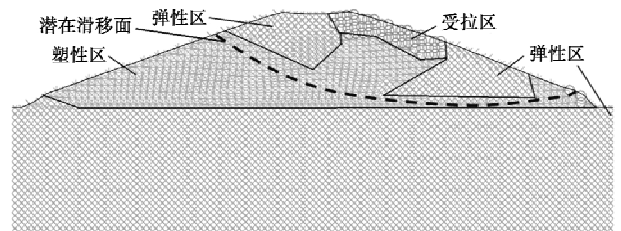


图 10 连续元计算坝体塑性区分布图

Fig. 10 Distribution of plastic zone from FDM results

4.2 离散-连续耦合域选择

图 10 中坝体已经进入屈服状态, 故选取连续体模型部分区域(横坐标为 186.5~188.5 m, 纵坐标 1.5~3.5 m) 替换为离散元模型进行离散-连续耦合分析, 离散域关于尾矿坝对称轴对称, 且处于图 10 中的塑性区和弹性区交界处, 实质上耦合域位于潜在滑移面边

缘, 左下部分位于滑移带内, 右上部分位于滑移带外。

为了保证耦合计算结果的正确性, 离散域细观参数的选择是关键。本文分别采用离散元和有限差分模拟双轴压缩试验, 当二者数值试验的结果接近时, 可近似认为宏观与细观参数相互对应。离散元模型采用接触模型, 双轴试验的结果见图 11。

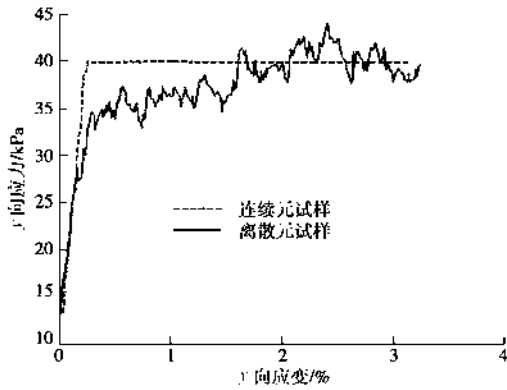


图 11 双轴试验应力 - 应变图

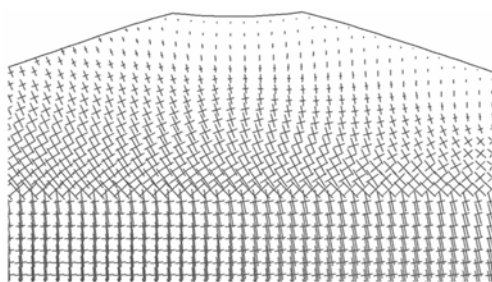
Fig. 11 Stress-strain curve of biaxial tests

获取离散元细观参数并建立如图 6 所示的数值模型后, 即施加初始应力场开始进行耦合计算。

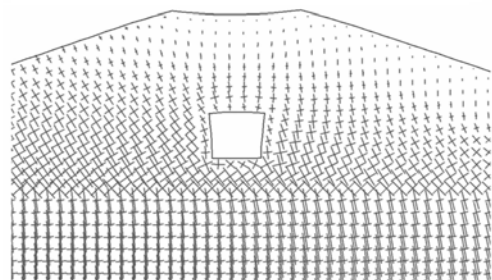
4.3 离散-连续耦合数值模型宏观力学结果分析

(1) 应力模拟结果分析

离散域附近非耦合和耦合模型主应力分布的结果如图 12 (a)、(b) 所示。从图 12 中可以看出, 耦合分析中的耦合域土体主应力略小于非耦合分析, 这是因为耦合分析中对耦合域的不平衡力进行了重分配。而在耦合域外的土体应力分布与非耦合条件下连续元计算结果基本相同。



(a) 非耦合条件下连续元模型计算结果



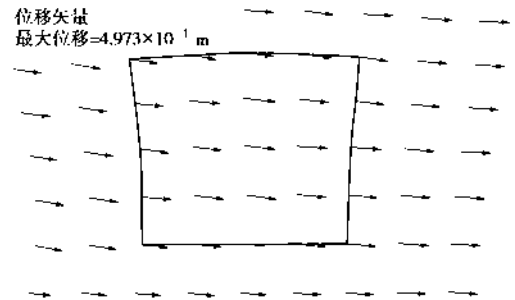
(b) 耦合条件下连续元模型计算结果

图 12 坝体主应力分布图

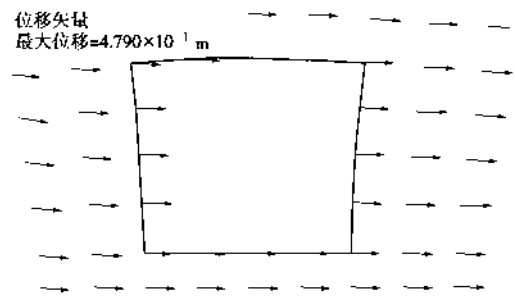
Fig. 12 Distribution of principal stress in tailing dam

(2) 位移模拟结果分析

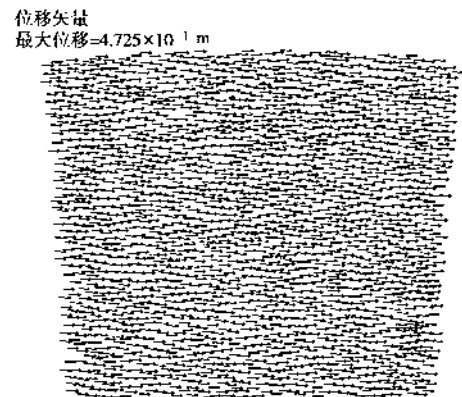
非耦合、耦合算法的连续元位移场如图 13 (a)、(b) 所示, 图 13 (c) 是离散域的位移场。从图 13 中可以看出, 耦合与非耦合分析中土体均发生了较大的变形, 耦合域的位移基本上保持了连续性, 但其值要稍小于非耦合的连续元计算结果。土体中应力分布和位移场的模拟结果也说明了本文采用离散-连续耦合算法的正确性, 耦合域中的应力和位移场未产生间断或突变。



(a) 非耦合连续元计算结果



(b) 耦合连续元计算结果



(c) 耦合域离散元计算结果

图 13 坝体位移分布图

Fig. 13 Distribution of displacement in dam

(3) 连续元模型塑性区模拟结果分析

耦合计算完成后坝体内塑性区分布如图 14 所示 (坝体左侧尾矿库部分未显示), 与图 10 非耦合计算结果比较, 二者的弹性区、受拉区和塑性区的分布基本一致, 显然耦合域的存在对模型整体计算结果并未有大的影响, 这也说明耦合域内变量传递的正确性。连续元模型内塑性区与弹性区的分界线穿过离散元模

型, 并将其分为左下及右上两部分。

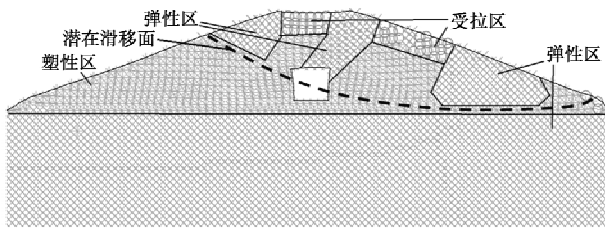


图 14 耦合计算坝体塑性区分布图

Fig. 14 Distribution of plastic zone from coupling method

4.4 离散-连续耦合数值模型细观力学结果分析

离散-连续耦合分析最重要的优点就是可以对感兴趣的局部区域进行微细观力学分析, 下面就选定的离散域内的接触力链、颗粒接触力、组构演化发展等进行研究, 分析滑移带内外力学差异的细观力学机理。

(1) 接触力链 (contact force chains)

尾矿冲填前后离散元模型内接触力链分布如图 15 所示。从图中可以看出, 尾矿冲填前土体内力链分布较为均匀, 冲填后土体内最大接触力有所增加, 模型左下部力链强于右上部, 且力链延伸方向大致在 120° 左右。

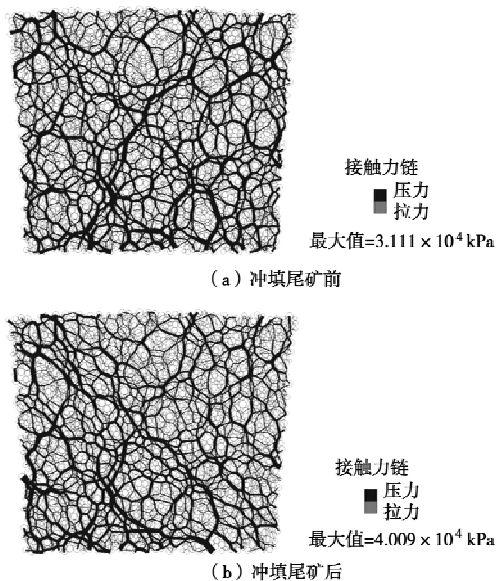


图 15 颗粒接触力链图

Fig. 15 Contact force chains between particles

(2) 接触法向与组构张量

冲填尾矿前后离散元模型内接触法向分布如图 16 所示。图中玫瑰片的长度代表该方向上的接触数与平均接触数之比, 实线为由式 (14) 拟合的理论解。从图中可以看出, 冲填尾矿前颗粒接触法向分布比较均匀, 冲填尾矿后接触方向在 120° 方向的接触分布有所增加, 与图 15 中力链的延伸方向基本一致。式 (14) 中描述接触方向分布各向异性的参数 a 增大,

说明模型各向异性程度增加。

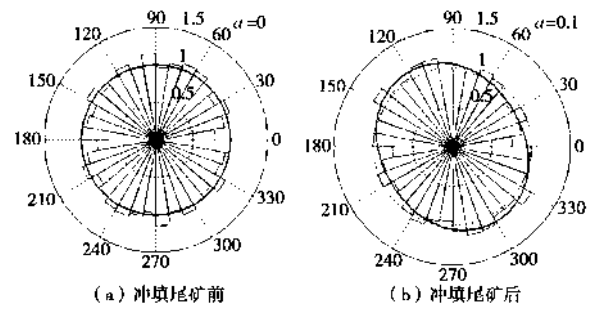


图 16 颗粒接触方向分布图

Fig. 16 Distribution of contact direction

根据式 (13) 的定义, 冲填尾矿前后离散域的组构张量分别为

$$\phi_1 = \begin{bmatrix} 0.481 & -4.215 \times 10^{-4} \\ -4.215 \times 10^{-4} & 0.519 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0.481 & 0 \\ 0 & 0.519 \end{bmatrix},$$

$$\phi_2 = \begin{bmatrix} 0.483 & -0.02 \\ -0.02 & 0.517 \end{bmatrix}.$$

组构张量 ϕ_1 的主方向为 90.64°, ϕ_2 的主方向为 113.96°, 显然在冲填尾矿后离散域内散粒体组构主方向旋转了约 23.32°, 与图 16 的统计结果基本一致。组构主方向发生变化的原因是外荷载的施加 (尾矿的冲填) 和剪切变形的发展引起力链变化, 从而导致颗粒接触法向和组构发生变化。

(3) 接触力分布

从图 14 弹塑性区分布以及图 15 力链的分布可以看出, 离散元模型正好处在潜在滑移面 (剪切带) 的边界, 左下部与右上部处于不同的变形阶段。故将离散元模型按弹塑性分界线划为如图 17 所示的两部分, 分析滑移带内外的法向接触力和切向接触力的不同。

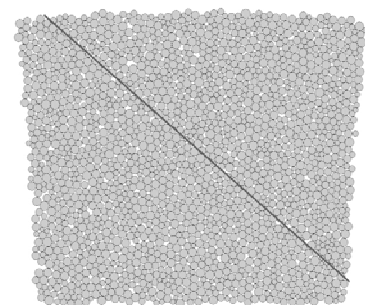


图 17 离散元分区图示

Fig. 17 Partition of DEM model

冲填尾矿前后离散元模型内法向接触力和切向接触力分布如图 18, 19 所示。图 18 中的玫瑰图长度为该方向上法向接触力的平均值与整个模型中法向接触力的平均值之比, 实线为式 (15) 的理论解。图 19 中玫瑰图的长度为该方向上切向接触力的平均值与整个模型中法向接触力平均值之比, 实线为式 (16) 的

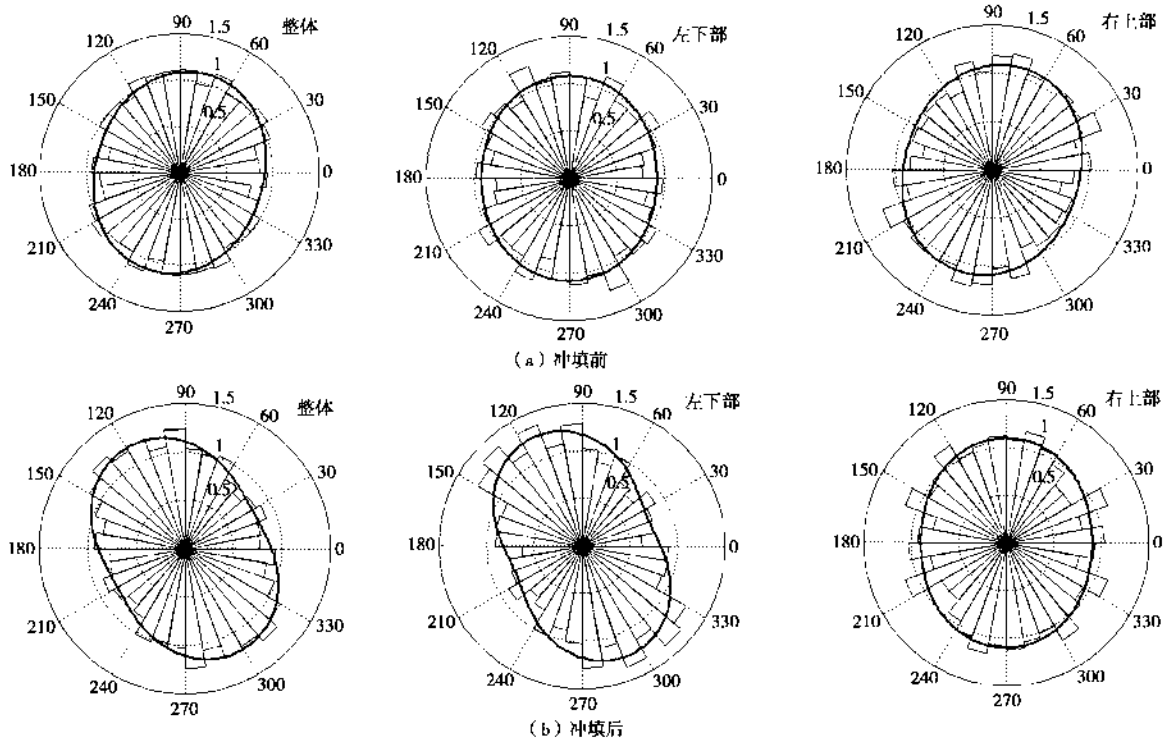


图 18 冲填尾矿前后法向接触力分布图

Fig. 18 Distribution of contact normal force

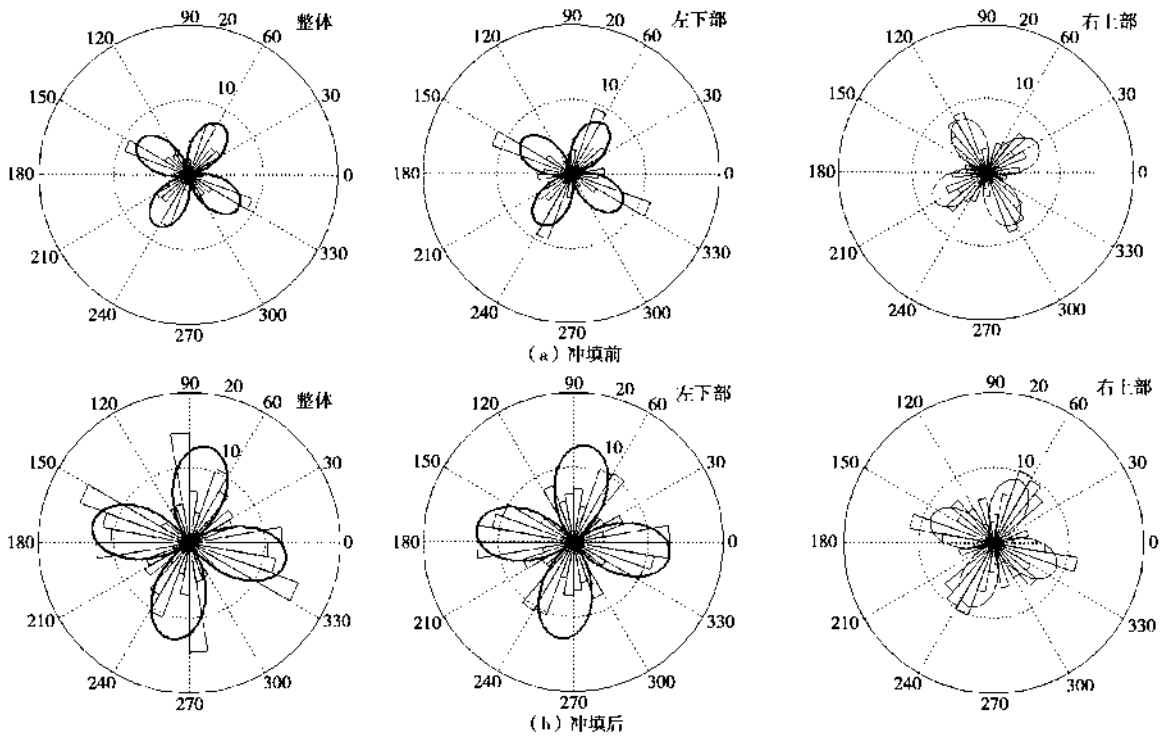


图 19 尾矿冲填前后切向接触力分布图

Fig. 19 Distribution of contact shear force

理论解。表 2 是冲填前后离散域滑移带内外各向异性参数的变化值。

从图 18, 19 和表 2 中各向异性参数变化值可以看出, 在离散-连续耦合模型中, 潜在滑移带附近土体的

细观结构和各向异性在加载前后发生了变化:

(1) 离散域整体统计结果表明, 尾矿冲填前后接触法向分布发生了改变, 接触法向的主方向与模型内较强力链的延伸方向大致相同, 模型法向接触力和切

向接触力分布也发生了明显改变。

表2 冲填前后离散域不同部分各向异性参数变化值

Table 2 Anisotropic parameters before and after filling in different domains of DEM

参数	整个离散域		离散域左下部		离散域右上部	
	前	后	前	后	前	后
a_n	0.1	0.2	0.08	0.25	0.1	0.1
$\theta_f/(^\circ)$	72.81	118.65	90	112.9	72.81	90
a_t	0.08	0.13	0.08	0.13	0.08	0.09
$\theta_t/(^\circ)$	56.46	79.38	56.46	82.24	27.81	67.92

(2) 离散域左下部分(滑移带内)模型颗粒法向力、切向接触力分布变化明显, a_n 和 a_t 都有明显的增加, 同时法向接触力和切向接触力的主方向也发生了较为明显的偏转。

(3) 离散域右上部分(滑移带外)法向接触力分布参数 a_n 和 a_t 变化不明显, 但主方向发生了一定的偏转。

(4) 离散域模型整体的组构与力各向异性参数变化也较为明显, 其值与变化趋势与左下部分模型的变化趋势相同, 显然, 左下部分颗粒的变形对离散域模型整体组构参数的影响要大于右上部分。

上述变化表明, 在滑移带形成过程中, 滑移带内外土体各向异性的发展明显不同: 随着荷载的施加, 潜在滑移带内土体颗粒发生了较明显的位移, 应力主方向发生了明显转动。颗粒的转动改变了带内组构的分布, 并逐渐形成剪切滑移带, 造成边坡失稳。滑移带外土体虽然应力主方向发生了一定的偏转, 但剪应力变化不大。

离散域的宏细观力学分析结果表明, 潜在滑移带内外由于应力和变形发展的差异, 其微细观的组构和各向异性均不同, 上述滑移带的分析结果与室内试验剪切带的离散元模拟分析结果规律基本相同^[21-23]。

5 结 论

本文采用基于连续元与离散元的离散-连续耦合算法, 通过耦合域的速度与力的传递实现耦合分析。采用该耦合模型模拟了某尾矿坝在冲填尾矿前后的宏细观力学特征, 特别是潜在滑移带附近土体细观力学参数的变化规律。研究表明:

(1) 采用离散-连续耦合算法可以对感兴趣的局部区域如剪切滑移带等进行更详细的分析, 研究岩土体破坏的细观力学机理。

(2) 对于连续域, 非耦合和耦合模型计算结果基本一致, 同时也说明了本文耦合域算法的合理性。

(3) 潜在滑移带附近离散域的细观力学分析表明, 随着荷载的施加, 潜在滑移带内土体颗粒发生了较明显的位移, 应力主方向发生了明显转动。颗粒的

转动改变了带内组构的分布, 并逐渐形成剪切滑移带, 造成了边坡失稳。采用的离散-连续耦合分析方法可以分析边坡在渐进破坏过程中滑移带形成的细观力学机理。

参考文献:

- [1] 门永生. 我国尾矿库安全现状及事故防治措施[J]. 中国安全生产科学技术, 2009, 5(1): 48 - 52. (MEN Yong-sheng. The current safety situation of tailing reservoir in China and preventive measures[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2009, 5(1): 48 - 52. (in Chinese))
- [2] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Géotechnique, 1979, 29(1): 47 - 65.
- [3] FELIPPA C A, PARK K C. Staggered transient analysis procedures for coupled-field mechanical systems: formulation[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1980, 24(1): 61 - 111.
- [4] NITKA M, BILBIE G, COMBE G, et al. A DEM-FEM two-scale approach of the behavior of granular materials[C]// Powders and Grains 2009. Sydney, 2009: 443 - 446.
- [5] VILLARD P, CHEVALIER B, HELLO B L, et al. Coupling between finite and discrete element methods for the modeling of earth structures reinforced by geosynthetic[J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(5): 709 - 717.
- [6] AZEVEDO N M, LEMOS J V. Hybrid discrete element/finite element method for fracture analysis[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2006, 195(33-36): 4579 - 4593.
- [7] FAKHIMI A. A hybrid discrete-finite element model for numerical simulation of geomaterials [J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(4): 386 - 395.
- [8] WELLMANN C, WRIGGERS P. A two-scale model of granular materials[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2012, 205-208(1): 46 - 58.
- [9] 乔 华, 陈伟球. 基于 Arlequin 方法的结构多尺度数值模拟[J]. 浙江大学学报(工学版). 2010, 44(12): 2314 - 2319. (QIAO Hua, CHEN Wei-qiu. Multi-scale numerical simulation of structures based on arlequin method[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(12): 2314 - 2319. (in Chinese))
- [10] AUBRY S, BAMMANN D J, HOYT J J, et al. A robust, coupled approach for atomistic-continuum simulation[R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2004.
- [11] 胥建龙, 唐志平. 离散元与有限元结合的多尺度方法及其

- 应用[J]. 计算物理, 2003, **20**(6): 477 - 482. (XU Jian-long, TANG Zhi-ping. Combined discrete/finite element multiscale numerical method and its application[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2003, **20**(6): 477 - 482. (in Chinese))
- [12] 张锐, 唐志平, 郑航. 离散元与有限元耦合的时空多尺度计算方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2009, **39**(2): 408 - 412. (ZHANG Rui, TANG Zhi-ping, ZHENG Hang. Time and space multiscale numerical method by coupling discrete element method and finite element method[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009, **39**(2): 408 - 412. (in Chinese))
- [13] 张锐, 郑航, 唐志平. 基于元/网格动量传递的离散元与有限元耦合的时空多尺度算法[J]. 中国科学技术大学学报, 2008, **38**(11): 1341 - 1347. (ZHANG Rui, ZHENG Hang, TANG Zhi-ping. Multiscale algorithm of time and space by coupling discrete element method and finite element method based on element/mesh momentum transfer[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2008, **38**(11): 1341 - 1347. (in Chinese))
- [14] CAI M, KAISER P K, MORIOKA H, et al. FLAC/PFC coupled numerical simulation of AE in large-scale underground excavations[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2007, **44**(4): 550 - 564.
- [15] 周健, 黄金, 张姣, 等. 基于三维离散-连续耦合方法的分层介质中桩端刺入数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(12): 2564 - 2571. (ZHOU Jian, HUANG Jin, ZHANG Jiao, et al. Coupled 3D discrete-continuum numerical simulation of pile tip penetration in layered media[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(12): 2564 - 2571. (in Chinese))
- [16] 陈建峰, 郑希, 李辉利, 等. 软土地基加筋土挡墙二维离散-连续耦合模拟[J]. 土木工程学报, 2011, **44**(增刊): 33 - 36. (CHEN Jian-feng, ZHENG Xi, LI Hui-li, et al. Coupling discontinuum-continuum simulation of a geogrid-reinforced soil retaining wall (RSW) on soft soil [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, **44**(S0): 33 - 36. (in Chinese))
- [17] 周健, 邓益兵, 贾敏才, 等. 基于颗粒单元接触的二维离散-连续耦合分析方法[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(10): 1479 - 1484. (ZHOU Jian, DENG Yi-bing, JIA Min-cai, et al. Coupling method of two-dimensional discontinuum-continuum based on contact between particle and element[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(10): 1479 - 1484. (in Chinese))
- [18] 周健, 金炜枫. 基于耦合方法的挡土墙地震响应的数值模拟[J]. 岩土力学, 2010, **31**(12): 3949 - 3957. (ZHOU Jian, JIN Wei-feng. Coupled approach based numerical simulation of a retaining wall under seismic excitation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(12): 3949 - 3957. (in Chinese))
- [19] 李锡夔, 万柯. 颗粒材料多尺度分析的连接尺度方法[J]. 力学学报, 2010, **42**(5): 889 - 900. (LI Xi-kui, WAN Ke. A bridging scale method for multi-scale analysis of granular materials[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2010, **42**(5): 889 - 900. (in Chinese))
- [20] 万柯, 李锡夔. Biot-Cosserat 连续体-离散颗粒集合体模型的非饱和土连接尺度方法[J]. 应用力学学报, 2013, **30**(3): 297 - 303. (WAN Ke, LI Xi-kui. Bridging scale method for Biot-Cosserat continuum-discrete particle assembly modeling of unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2013, **30**(3): 297 - 303. (in Chinese))
- [21] 蒋明镜, 王富周, 朱合华. 单粒组密砂剪切带的直剪试验离散元数值分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(1): 253 - 257. (JIANG Ming-jing, WANG Fu-zhou, ZHU He-hua. Shear band formation in ideal dense sand in direct shear test by discrete element analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(1): 253 - 257. (in Chinese))
- [22] 毕忠伟, 孙其诚, 刘建国, 等. 双轴压缩下颗粒物质剪切带的形成与发展[J]. 物理学报, 2011, **60**(3): 1 - 10. (BI Zhong-wei, SUN Qi-cheng, LIU Jian-guo, et al. Development of shear band in a granular material in biaxial tests[J]. Acta Physica Sinica, 2011, **60**(3): 1 - 10. (in Chinese))
- [23] 刘洋, 吴顺川, 周健. 单调荷载下砂土变形过程数值模拟及细观机制研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(12): 3199 - 3216. (LIU Yang, WU Shun-chuan, ZHOU Jian. Numerical simulation of sand deformation under monotonic loading and mesomechanical analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(12): 3199 - 3216. (in Chinese))
- [24] SATAKE M. Fabric tensor in granular materials: IUTAM conference on deformation and failure of granular materials[M]. Delft: Balkema, 1982: 63 - 68.
- [25] ROTHENBURG L, BATHURST R J. Analytical study of induced anisotropy in idealized granular materials[J]. Geotechnique, 1989, **39**(4): 601 - 614.
- [26] PUEBLA H. A constitutive model for sand and the analysis of the CANLEX embankments[D]. Columbia: The University of British Columbia, 1999.