

太和铁矿西端帮冰碛土边坡稳定性分析方法研究

徐鼎平¹, 朱大鹏²

(1. 中国中钢集团公司 马鞍山矿山研究院, 安徽 马鞍山 243004; 2. 广东省石油化工设计院, 广东 广州 510130)

摘要: 针对太和铁矿西端帮冰碛土边坡这一具体工程, 提出以冰碛土原位试验和室内试验成果为基础, 耦合元胞自动机(CA)和 FLAC^{3D} 进行冰碛土三轴数值模拟试验并建立其抗剪强度模型的方法; 提出基于数值模拟, 有效整合数值分析、极限平衡分析和可靠度分析方法的边坡稳定性综合分析方法。最后, 以上述研究成果为基础, 从多角度进行该冰碛土边坡的稳定性分析。位移矢量和变形分析表明, 边坡的潜在破坏主要以浅表层剪切破坏为主, 其均值安全系数较高(1.40~1.59), 但因参数不确定性大, 致使破坏概率亦较高(1.07%~3.36%), 为不可接受的风险水平, 故需采取适当的工程措施以降低风险。

关键词: 数值模拟; 冰碛土; 元胞自动机; 简化一次二阶矩法; 边坡稳定性分析

中图分类号: O 242

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)增 2 - 3335 - 06

STUDY ON STABILITY ANALYSIS METHOD FOR MORaine SOIL SLOPE IN WEST WALL OF TAIHE IRON MINE

XU Dingping¹, ZHU Dapeng²

(1. Maanshan Institute of Mining Research, Sinosteel Corporation, Maanshan, Anhui 243004, China;

2. Guangdong Petrochemical Engineering Design Institute, Guangzhou, Guangdong 510130, China)

Abstract: Aiming at the moraine soil slope in west wall of Taihe Iron Mine, a method based on the results of in-situ test and laboratory test for moraine soil which couples automata(CA) with FLAC^{3D} to conduct triaxial simulation test is presented and shear strength model for moraine soil is established. Firstly, CA is adopted to simulate the microstructure of moraine soil and specimens are prepared for triaxial simulation test. Secondly, the simulation procedures of specimens are introduced into FLAC^{3D} and then simulation tests are conducted. Finally, after the data from simulation results are processed, the probability models for shear strength are obtained. After that, a comprehensive analysis method of slope stability which integrates numerical analysis method, limit equilibrium method and reliability analysis method, is presented. In the comprehensive analysis method, three methods are linked to each other by adopting strength reduction technique, simplified first-order second-moment method and Rosenblueth method. The results of the three cases are interrelated consequently. According to the research results mentioned above, a multi-angle stability analysis of the moraine soil slope is made. The analyses of displacement vector and deformation indicate that the failure mode of the slope mainly exists as shallow circular shear failure. Although the mean factor of safety is high(1.40 - 1.59), the probability of failure(1.07% - 3.36%) is high due to the higher uncertainty of shear strength parameters. As a result, the risk level of this slope is unacceptable so that some effective measures should be adopted.

Key words: numerical simulation; moraine soil; cellular automata(CA); simplified first-order second-moment method; slope stability analysis

收稿日期: 2007 - 08 - 17; **修回日期:** 2007 - 10 - 20

作者简介: 徐鼎平(1980 -), 男, 硕士, 2004年毕业于青岛理工大学结构工程专业, 现任助理工程师, 主要从事边坡及尾矿库工程方面的设计与研究工作。E-mail: ben_johnson@163.com

1 引言

太和露天铁矿在实施 3×10^6 t/a 采矿扩建工程项目过程中, 边坡发生了多处台阶体塌落破坏和失稳, 严重影响了矿山的正常生产。其中, 尤以冰碛土边坡的破坏情况最为普遍: 在已生成的台阶边坡中, 滑落、塌落和冲蚀等病害比比皆是, 线性破坏比高达 50.7% 以上, 直接影响到该扩建项目的顺利实施乃至企业今后的生存与发展。因此, 急需进行该边坡的稳定性分析以评定其稳定性状态和风险水平。

目前, 极限平衡分析、数值分析和可靠度分析方法是最常用的几种边坡稳定性分析方法^[1], 人们通常单独使用或联合使用它们来评定边坡的稳定性分析状态。由于每种分析方法都是在一定假定下建立的, 自身都具有不确定性和局限性, 加之边坡工程的复杂性, 单一方法不足以有效评定边坡的稳定性状态, 需采用多种分析方法。不过, 在使用多种方法时, 若方法间缺乏有效整合, 其结果只是各方法计算结果的简单罗列, 无法充分发挥各种分析方法的长处, 其效果与采用单一分析方法并无二致。

至于冰碛土, 其强度的获取, 目前主要还是通过对传统试验(室内和原位试验等)方法的试验成果进行有针对性分析之后提出参数^[2, 3]。但这一处理方式带有很大的经验性和随意性, 通常会带来较大的参数选取误差。近年来, 不少学者^[4~9]尝试以数值方法进行岩土材料破坏过程的细观模拟研究, 但多应用于岩石和混凝土材料的研究, 鲜见用于冰碛土这类土-砾石混合体材料的研究。

本文根据太和铁矿西端帮冰碛土边坡的具体情况, 以强度参数研究为基础, 以稳定性分析为目的, 分为两大部分: (1) 充分利用已有的传统试验成果, 借助三轴数值模拟试验建立起太和铁矿冰碛土的抗剪强度模型; (2) 以强度模型为输入基础, 以数值模拟为平台, 建立起有效整合数值分析方法、极限平衡分析方法和可靠度分析方法的边坡稳定性综合分析方法, 进行太和铁矿西端帮冰碛土边坡稳定性分析, 从而评定其稳定性状态和风险水平。

2 边坡工程地质模型

太和铁矿露天采场呈 EW 向, 西端帮地势较高, 构成边坡岩体主要为厚层冰碛土和下伏辉长岩。在

本研究域, 最低标高(1 650 m 水平)以上, 基本上全为冰碛土体。在采场转向北帮(17[#]~18[#]勘探线)处, 冰碛土沉积受原始地形控制, 厚度较薄, 并与辉长岩大角度整合接触, 接触面呈 S 型。可以认为, 这是一个岩性单一、地质界面形状复杂的独立边坡工程地质单元。为了反映西端帮边坡的工程单元、构成完整的应力边界条件以及反映矿山决策者的意愿, 确定西帮边坡工程地质模型 3D 空间为: 纵向(x 向)坐标范围为 511 700~512 300; 横向(y 向)坐标范围为 3 087 600~3 088 300; EN 角以 17[#]勘探线为界; Z 向坐标为 1 650 m 水平以上。

地表调查和钻探资料表明, 构成边坡坡脚和东部边界的岩体为辉长岩体, 坡脚区正置断层破碎带, 边坡岩体的整体性和连续性遭受强烈破坏, 东部辉长岩体为古地形表面, 风化和蚀变较强。

从局部来看, 冰碛土体中砾石尺寸、砾石和黏土空间分布(密集程度或含量多寡)和形态、局部滞水及出水点位置呈现高度随机性; 而从总体上看, 冰碛土体性态的高度随机性恰恰表现为宏观均匀性。因此, 计算中将冰碛土体看成砾-土组成、展布形态与工程性质“视均匀”的同质体(即同一性质的边坡冰碛土体), 故西端帮边坡工程地质模型可简单概括为: 以同质的冰碛土体构成边坡主体, 以破碎辉长岩体构成边坡脚和东部边界的双介质、各向同性边坡。图 1 为边坡工程地质模型示意图^[10]。

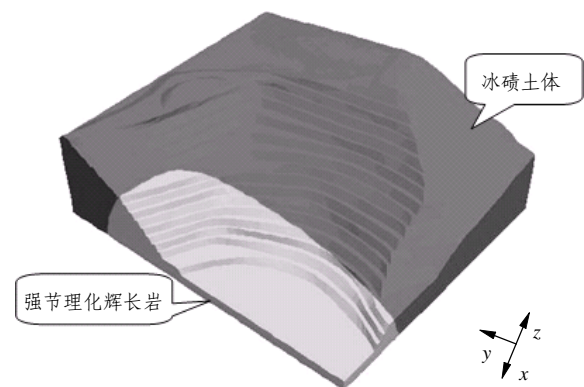


图 1 边坡工程地质模型示意图^[10]

Fig.1 Schematic diagram of engineering geologic model of slope^[10]

3 冰碛土抗剪强度参数研究

3.1 冰碛土组成和结构特性

太和铁矿冰碛土组成呈全级配状, 即粒径细至

黏土, 粗至巨砾(直径 3 m 以上); 砾石含量变化范围大, 为 5%~56%; 砾石在冰碛土中分布随机, 且有巨砾相对团聚的沉积特性; 冰碛土的胶结状态也非常不均匀, 多处为一般性胶结, 亦有较强胶结和疏散状。图 2 为台阶坡面上的砾石产出状态。



图 2 台阶坡面上的砾石产出状态
Fig.2 Output form of gravel on bench face

显然, 太和铁矿冰碛土的结构和组成特点使其抗剪强度试验的取样即有限尺寸的原位试样的代表性无法保证, 从而给传统试验结果的可信性打了折扣, 而且是不能量化的折扣, 难以使用。因此, 需另辟蹊径以获取合理的强度参数。

在强度参数研究中, 按下述步骤进行: 首先采用元胞自动机程序模拟冰碛土结构, 制备任意砾石含量的试样; 将模拟试样网格数据导入 FLAC^{3D} 进行三轴数值模拟试验并获取抗剪强度参数样本, 从而建立起冰碛土的抗剪强度模型, 为后续的边坡稳定性分析之用。

3.2 冰碛土结构的元胞自动机模拟

元胞自动机是空间、时间和状态都离散的动力系统, 无需构造复杂的数学模型, 而由一些极简单的局部相互作用的规则来驱动整个系统的演化。元胞的状态变化只决定于其自身及其邻居状态, 对元胞自动机整个空间来说, 元胞更新是彼此独立的, 元胞自动机的规则是通用的^[11]。因此, 采用元胞自动机模型来模拟冰碛土的沉积结构, 为三轴数值模拟试验“制备”任意尺寸的试样。

依据现场调查, 确定冰碛土的级配曲线、产出形态和工程性质之后, 概化出元胞自动机的演化规则; 然后依据元胞自动机的基本原理和已确定的演化规则, 编制出了模拟冰碛土结构的元胞自动机程序 GTSM^[12]。该程序可为用户提供多种选择, 包括试件尺寸、单位长度、初始条件以及砾石含量(确定性的和不确定性的)等, 从而为用户使用提供一个方便的模拟工具。图 3 为 GTSM 程序界面图。

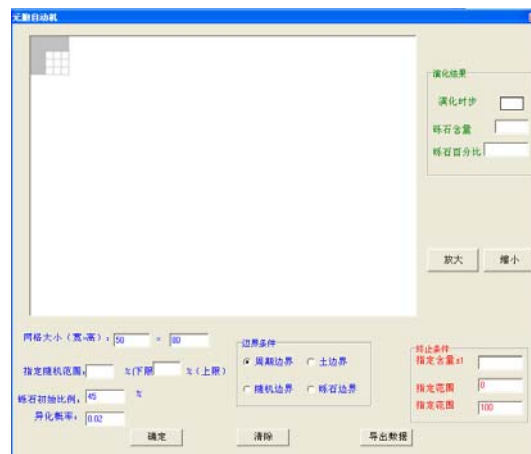
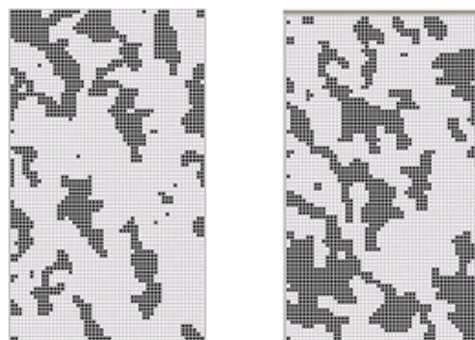


图 3 GTSM 程序界面图
Fig.3 Interface of programme GTSM

图 4 为采用 GTSM 程序在不同砾石含量下模拟生成的冰碛土结构, 图中黑色单元为砾石单元, 灰色单元为土体(细粒组成部分)单元。



(a) 砾石含量为 30% (b) 砾石含量为 40%

图 4 不同砾石含量下模拟生成的冰碛土结构
Fig.4 Structure simulation of moraine soil with different gravel contents

3.3 冰碛土三轴数值模拟试验

在 FLAC^{3D} 中取模型尺寸为 0.1 m × 5.0 m × 8.0 m, 网格单元尺寸为 0.1 m × 0.1 m × 0.1 m, 以便与元胞自动机模型相对应。在由 FLAC^{3D} 输出的网格单元文件中加入由 GTSM 输出的砾石单元 ID 号, 并定义为砾石单元组, 导入 FLAC^{3D}, 即实现土体单元与砾石单元在 FLAC^{3D} 中的分组^[13]。

因进行原位试验^[14]和室内试验^[15]时受试验仪器规格限制, 分别剔除了粒径大于 16 cm(40 cm×2/5)和 2 cm 的砾石, 试验得到的抗剪强度和变形参数实际上已经排除了大量砾石的贡献, 只能表征冰碛土细粒组成部分的强度和变形特征。尽管如此, 但它恰好为在三轴数值模拟试验中冰碛土细粒组成部分提供了强度参数(砾石强度参数则依经验选取)。对

模拟试样施加边界和约束条件，进行三轴试验模拟，便可借此研究细粒部分和砾石混合体(即冰碛土体)在外力作用下的力学响应特性了。

在进行 72 组共计 216 次三轴模拟试验，并对试验成果进行整理之后，共获得了 69 组冰碛土抗剪强度参数(c 和 ϕ)样本^[16]。鉴于冰碛土在太和铁矿出露广，埋藏深，分布不均匀且有强烈随机性，无法通过勘察获知深部的砾石含量以确定其强度和变形特性，本研究采用概率方法进行处理，即对这 69 组抗剪强度参数样本进行随机变量分布检验，确定其分布并依工程经验进行截尾，最后建立起黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 的截尾概率模型如下：

(1) 黏聚力 c 的截尾概率模型：

$$F(x) = \frac{1}{89.4\sqrt{2\pi}} \int_{62.3}^x e^{-\frac{(x-241.1)^2}{15 \cdot 984.72}} dx \quad (1)$$

(2) 内摩擦角 ϕ 的截尾概率模型：

$$F(x) = \frac{1}{2.4\sqrt{2\pi}} \int_{23.7}^x e^{-\frac{(x-28.5)^2}{11.52}} dx \quad (2)$$

表 1 为冰碛土抗剪强度参数建议值。其中侯克鹏等^[14, 15]的抗剪强度参数为三轴模拟试验中细粒组成部分强度参数的来源；E. Hoek 和 J. W. Bray^[17]为经验值。从中可以看出，概率模型所表征的抗剪强度参数范围与 E. Hoek 和 J. W. Bray^[17]所述范围内较为接近，说明了本次强度参数研究结果的可信性。

表 1 冰碛土抗剪强度参数建议值

Table 1 Suggested shear strength parameters of moraine soil

c/kPa	$\phi/(^\circ)$	参数来源	备注
42.6~112.2	24.0~29.0	侯克鹏等 ^[14]	原位试验
21.8~219.7	13.8~24.2	曹作中等 ^[15]	CU 剪
150.0~250.0	32.0~35.0	E. Hoek 和 J. W. Bray ^[17]	混粒冰碛物

由于冰碛土三轴数值模拟试验未考虑土体含水量、振动扰动和长期风化等因素对强度指标的影响，因此，在边坡稳定性分析中使用这一模拟试验结果中的强度指标时，根据太和铁矿冰碛土边坡的具体工作环境和工程判断，作了适当的经验折减。

4 边坡稳定性综合分析方法构建

选择三维数值模拟为整个分析方法的实现平台，以 FLAC^{3D} 为实现工具，根据已构造的冰碛土抗剪强度概率模型，选用依经验折减后的抗剪强度

参数均值进行应力 - 应变分析，观察荷载作用下边坡体的力学响应特性，预测其潜在破坏机制；接着采用强度折减法^[18]求解各种参数取值下的边坡整体安全系数，并以为之输入参数，由统计矩法(Rosenblueth 法)^[19]求得边坡的三维整体破坏概率；同时，为对比边坡三维总体可靠度与二维可靠度，依据三维应力 - 应变结果勾勒出的典型剖面的潜在破坏面，采用蒙特卡洛模拟法^[19]和简化一次二阶矩法(Sfosm 法)^[20]分别进行指定破坏面的二维可靠度分析。Sfosm 法是为搜索最小可靠度指标破坏面并进行该破坏面可靠度分析而提出的一种简便方法，其基本原理和公式的推导过程见作者^[20]相关研究，这里不再列出。图 5 为依据上述思路构建的边坡稳定性综合分析方法的结构示意图。

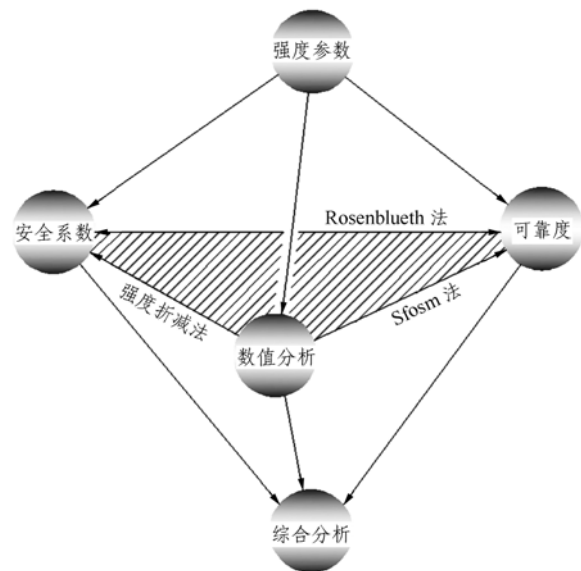


图 5 边坡稳定性综合分析方法结构示意图

Fig.5 Frame of approach for slope stability integrated analysis

5 计算结果及结果分析

5.1 计算条件

在有限元程序中建立边坡几何模型、地质界面以地下水水面，网格剖分后通过接口程序导入 FLAC^{3D}。整个网格模型由四面体、五面体和六面体混合网格单元组成，共 7 220 个节点，14 231 个单元。

计算本构模型采用 Mohr-Coulomb 准则。除坡面为设为自由边界外，模型底部为固定约束边界，模型四周为单向边界。在初始条件中，仅考虑自重应力产生的初始应力场和静水压力。

冰碛土抗剪强度依据前述抗剪强度概率模型取值，其均值依工程经验进行了折减和取整；辉长岩体强度则直接采用由地质强度指标(GSI)法获得的估

计值^[16]; 其他参数依有关报告^[15]选取。岩土体物理力学参数的具体取值见表 2。

表 2 岩土体物理力学指标

Table 2 Physico-mechanical parameters of rock and soil masses

名称	$\rho(g \cdot cm^{-3})$	K/GPa	G/GPa	c/kPa	$\phi(^{\circ})$	σ^l/kPa	$\psi(^{\circ})$
土体	2.02(2.12)	0.30	0.18	210(89.4)	25(2.4)	10	10
岩体	3.36(3.46)	0.80	0.60	460	37	4	15

注: 密度一栏中, 括号内的值为饱和密度; 土体抗剪强度参数栏中括号值内的值为标准差。

5.2 计算结果分析

5.2.1 位移场计算结果分析

图 6, 7 分别为典型剖面 $y=300\text{ m}$ 的位移矢量图以及边坡的整体位移分布图。

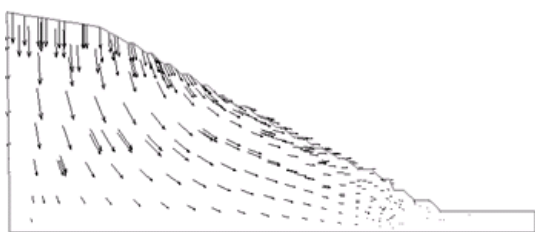


图 6 剖面 $y = 300\text{ m}$ 的位移矢量图

Fig.6 Displacement vectors of profile at $y = 300\text{ m}$

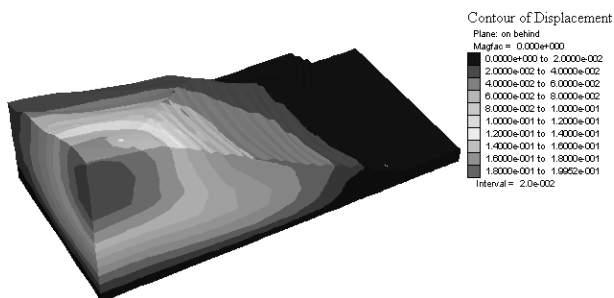


图 7 位移分布图(单位: m)

Fig.7 Distribution of displacements(unit: m)

从位移矢量图来看, 边坡上部位移矢量垂直向下, 表现为“沉降”; 中部位移矢量近乎与坡面平行, 表现为“剪切”; 下部位移矢量在渐近坡趾处表现为“剪出”。与之对应, 位移分布图在剖面上的表现形态为: 在边坡中上部呈半封闭状, 不与坡面相交, 且拐点距坡面较远; 在下部则与边坡底部近乎平行, 而后在近坡面处上翘。这些现象表明, 边坡的潜在破坏以浅表层圆弧形剪切破坏为主。

5.2.2 可靠度分析

表 3 为以简化 Bishop 法为基础, 采用 Sfosm 法和蒙特卡洛模拟方法求得的边坡典型剖面的破坏概

表 3 边坡可靠度计算成果

Table 3 Calculation results of slope reliability

计算方法	安全系数	可靠度指标	破坏概率/%
Sfosm 法	1.40*	1.83	3.36
蒙特卡洛模拟法	1.48	2.12	1.70
Rosenblueth 法	1.59(1.60*)	2.37	1.07

注: 安全系数一栏中标*号者为采用取变量均值求得的安全系数, 其他均为均值安全系数。

率以及由 Rosenblueth 法求得的边坡三维整体破坏概率。

从表 3 的可靠度计算结果来看, 边坡整体的均值安全系数(或采用变量均值求得的安全系数)较高, 相对于允许安全系数($F_s = 1.15$)有较大富余。然而, 由这 3 种方法获得的边坡破坏概率, 无论是整体的还是典型剖面的破坏概率都较高(从 1.07% 至 3.36%), 均处于露天矿边坡可接受的破坏概率范畴($3 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3}$)^[19]之外, 表明该工程处于较高的风险水平, 需采取适当工程措施以降低风险。而之所以会出现均值安全系数和破坏概率“双高”的现象, 其根本原因在于冰碛土自身抗剪强度的高变异特性(特别是 c 值变异系数达 0.89)。

表 3 的结果还显示, 采用相同的分析对象和计算条件, 简化一次二阶矩法得到的破坏概率稍高于蒙特卡洛模拟方法的计算结果, 但从精度上来说, 可满足实际工程可靠度初步分析的需要。而由 Rosenblueth 法求得的边坡均值安全系数(为 1.59)与采用状态变量均值计算出来的安全系数(为 1.60)非常接近, 表明本次采用强度折减法与 Rosenblueth 法耦合进行三维空间边坡总体破坏概率的计算是成功的。

6 结 论

(1) 本文在充分利用太和铁矿冰碛土原位试验和室内试验成果的基础上, 进行了冰碛土的三轴数值模拟试验并根据其试验结果, 建立了较为合理的抗剪强度模型。

(2) 本文基于数值模拟平台, 建立了有效整合数值分析方法、极限平衡分析方法和可靠度分析方法的边坡稳定性综合分析方法, 从多角度分析了太和铁矿冰碛土边坡的稳定性。位移矢量和变形分析表明, 边坡的潜在破坏主要以浅表层剪切破坏为主; 边坡均值安全系数较高, 但因参数不确定性大, 致使破坏概率亦较高, 高达不可接受的风险水平, 需采取适当的工程措施以降低风险。

(3) 本文的研究虽然针对的是太和铁矿西端帮冰碛土边坡这一具体工程,但其强度参数的获取方式和多种分析方法综合应用的思路可供类似工程借鉴和参考。

参考文献(References):

- [1] 夏元友, 李梅. 边坡稳定性评价方法研究及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 1 087 - 1 091.(XIA Yuanyou, LI Mei. Evaluation method research of slope stability and its developing trend[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 1 087 - 1 091.(in Chinese))
- [2] 张斌, 屈智炯. 冰碛土的应力-应变-强度特性的研究[J]. 成都科技大学学报, 1991, (3): 29 - 34.(ZHANG Bin, QU Zhijiong. Study of stress-strain-strength behavior of glacial till under complex stress condition[J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology, 1991, (3): 29 - 34.(in Chinese))
- [3] 屈智炯, 刘开明, 肖晓军, 等. 冰碛土微观结构、应力应变特性及其模型研究[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(6): 19 - 28.(QU Zhijiong, LIU Kaiming, XIAO Xiaojun, et al. Study of microstructure, stress-strain behavior and constitutive model of till[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(6): 19 - 28.(in Chinese))
- [4] 马志涛, 谭云亮. 岩石破坏演化观非均质物理元胞自动机模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2 704 - 2 708.(MA Zhitao, TAN Yunliang. Simulation study of rock failure based on MH-PCA model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15): 2 704 - 2 708.(in Chinese))
- [5] 王士民, 冯夏庭, 王泳嘉, 等. 脆性岩石破坏的演化细胞自动机(ECA)研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2 635 - 2 639.(WANG Shimin, FENG Xiating, WANG Yongjia, et al. Study on evolving cellular automata(ECA) to model crack of brittle rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15): 2 635 - 2 639.(in Chinese))
- [6] 刘恩龙, 沈珠江. 岩土材料破损过程的细观数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1 790 - 1 794.(LIU Enlong, SHEN Zhujiang. Mesoscopic numerical simulation of breakage processes of geomaterials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1 790 - 1 794.(in Chinese))
- [7] 宋力, 解英艳, 张后全. 岩石试样弹塑性破裂过程的数值模拟分析[J]. 计算力学学报, 2004, 21(5): 614 - 619.(SONG Li, XIE Yingyan, ZHANG Houquan. Numerical simulation on elastoplastic failure process of rock specimen[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2004, 21(5): 614 - 619.(in Chinese))
- [8] 岳中琦, 陈沙, 郑宏, 等. 岩土工程材料的数字图像有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 889 - 897.(YUE Zhongqi, CHEN Sha, ZHENG Hong, et al. Digital image processing based on finite element method for geomaterials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(6): 889 - 897.(in Chinese))
- [9] 朱万成, 唐春安, 黄志平, 等. 静态和动态荷载作用下岩石劈裂破坏模式的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 1 - 7.(ZHU Wancheng, TANG Chun'an, HUANG Zhiping, et al. Numerical simulation on splitting failure mode of rock under static and dynamic loadings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 1 - 7.(in Chinese))
- [10] 徐鼎平, 汪斌, 江龙剑, 等. 太和铁矿西端帮边坡工程地质模型及其三维剖分方法[J]. 矿业快报, 2006, (11): 17 - 20.(XU Dingping, WANG Bin, JIANG Longjian, et al. Geologic model of slope engineering in west wall of Taihe Iron Mine and its three-dimensional dividing method[J]. Express Information of Mining Industry, 2006, (11): 17 - 20.(in Chinese))
- [11] BASTIEN CHOPARD, MICHEL DROZ. Cellular automata modeling of physical system[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [12] 徐鼎平, 汪斌, 江龙剑, 等. 模拟冰碛土结构的元胞自动机模型[J]. 金属矿山, 2007, (1): 62 - 65.(XU Dingping, WANG Bin, JIANG Longjian, et al. Cellular automation model for glacial soil simulation[J]. Metal Mine, 2007, (1): 62 - 65.(in Chinese))
- [13] 徐鼎平, 汪斌, 江龙剑, 等. 冰碛土三轴数值模拟试验方法探讨[J]. 岩土力学(待刊).(XU Dingping, WANG Bin, JIANG Longjian, et al. Study on the approach for triaxial numerical simulation test for glacial soil[J]. Rock and Soil Mechanics(to be published).(in Chinese))
- [14] 侯克鹏, 穆大跃, 白玉兵, 等. 重庆钢铁集团公司太和铁矿“扩帮延深”工程边坡稳定性研究报告[R]. 昆明: 昆明理工大学, 2002.(HOU Kepeng, MU Dayue, BAI Yubing, et al. Stability research on expansion and deepening engineering of slope in Taihe Iron Mine of Chongqing Iron and Steel(Group) Company Limited[R]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2002.(in Chinese))
- [15] 曹作中, 江龙剑, 周玉新, 等. 重庆钢铁集团太和铁矿采场边坡工程地质勘察报告[R]. 马鞍山: 马鞍山工程勘察设计院, 2006.(CAO Zuozhong, JIANG Longjian, ZHOU Yuxin, et al. Report of slope engineering geological investigation in Taihe Iron Mine of Chongqing Iron and Steel(Group) Company Limited[R]. Maanshan: Maanshan Investigation Design and Research Institute, 2006.(in Chinese))
- [16] 徐鼎平. 基于三维数值模拟的边坡稳定性分析的整合方法研究[硕士学位论文][D]. 马鞍山: 马鞍山矿山研究院, 2007.(XU Dingping. Study on the integrated approach for slope stability analysis based on three-dimensional numerical simulation[M. S. Thesis][D]. Maanshan: Maanshan Institute of Mining Research, 2007.(in Chinese))
- [17] HOEK E, BRAY J W. 岩石边坡工程[M]. 卢世宗译. 北京: 冶金工业出版社, 1983.(HOEK E, BRAY J W. Rock slope engineering[M]. Translated by LU Shizong. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 1983.(in Chinese))
- [18] DAWSON E M, ROTH W H, DRESCHER A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Geotechnique, 1999, 49(6): 835 - 840.
- [19] 祝玉学. 边坡可靠性分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.(ZHU Yuxue. Slope reliability analysis[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993.(in Chinese))
- [20] 徐鼎平. 某露天铁矿冰碛土台阶边坡可靠性分析[J]. 岩土工程技术, 2007, 21(1): 11 - 14.(XU Dingping. Bench reliability analysis of slope in an open pit[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2007, 21(1): 11 - 14.(in Chinese))
- [21] Itasca Consulting Group, Inc.. FLAC^{3D}(fast Lagrangian analysis of continua in three-dimensions) user's manual(Version 3.0)[R]. USA: Itasca Consulting Group, Inc., 2005.