

铁路有碴道床动力特性分析的颗粒离散元分析软件

使用说明书

编写人： 赵金凤
 严 颖
 季顺迎

大连交通大学

大连理工大学

2014年1月15日

目 录

第一部分 软件简介	3
第二部分 显示软件安装说明	6
第三部分 软件使用手册	7
第四部分 模型简介	15
第五部分 程序介绍	20

第一部分 软件简介

在高速铁路有碴轨道中，散体道床已经成为轨道结构中的最薄弱环节，因此研究铁路有碴道床的动力特性对铁道工程有着至关重要的作用。针对铁路道碴的非规则形态，可破碎性、随机接触及排列等特点，开发了铁路有碴道床动力特性分析的组合颗粒离散元分析软件。该软件采用颗粒离散元模型，对铁路有碴道床的动力特性、道碴的可破碎性等进行数值模拟，研究其动力学过程的发生、演化规律及内在机理。该软件一方面具有模型真实，计算高效，结果精度高的优势，另一方面可直观地对道碴和道床结构的整个动力过程进行动画显示，具有很强的工程应用前景。

1.1 软件名称

中文：铁路有碴道床动力特性分析的颗粒离散元分析软件 简称 BallastDEM。

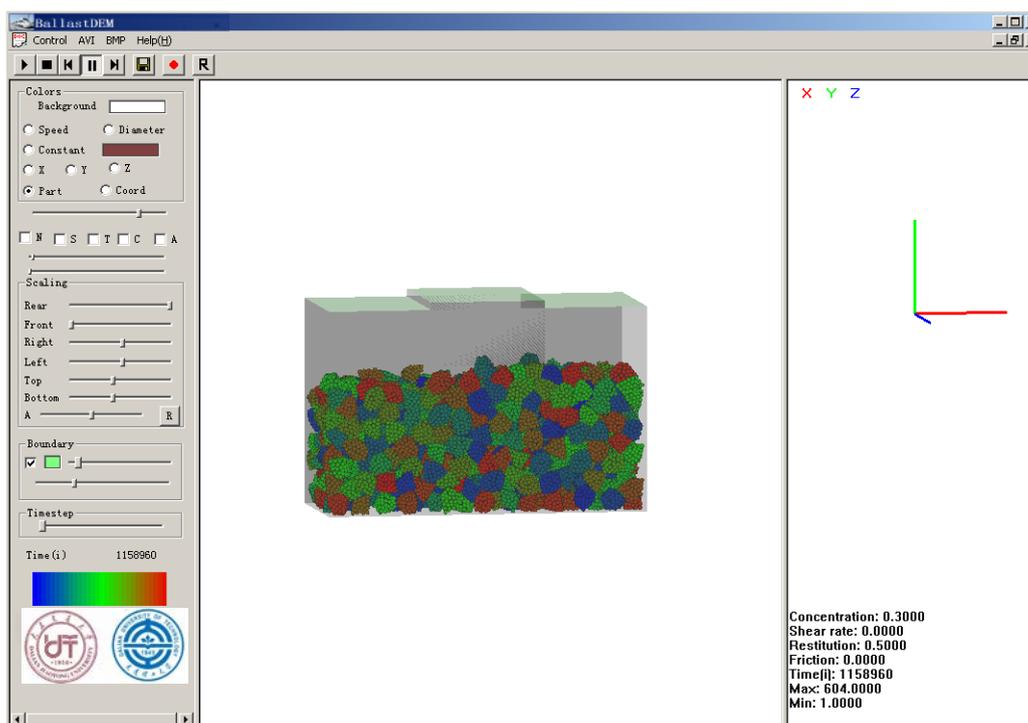


图 1.1 BallastDEM 软件执行主窗口

1.2 软件适用行业与用途

适用行业：可对铁路有碴道床在往复荷载下的动力过程、道碴颗粒破碎的发生、演化进行颗粒离散元数值分析和动态显示，适用于铁道工程、道路工程、土木工程等领域的沉降特性评估和数值分析。

用途：铁路有碴道床在列车荷载下的动力响应是一个复杂的物理进程。BallastDEM 可对有碴道床的累积沉降特性和有效弹性进行深入研究，并有助于揭示轨道结构的劣化机理。通过构造组合颗粒单元，并通过单元间的粘结和断裂，模拟铁路道床的沉降特性和道碴的破碎特性。通过对颗粒单元的位移、接触力等数值结果的动态显示，可直观地再现道床沉降、破碎的发展、演化过程。该软件可为铁路安全行车和有碴道床的结构设计提供一定的借鉴作用。

1.3 软件开发平台：Microsoft Visual C++

编程语言：Fortran、OpenGL 和 Visual C++

版本号： 1.0

程序量： 11489 行

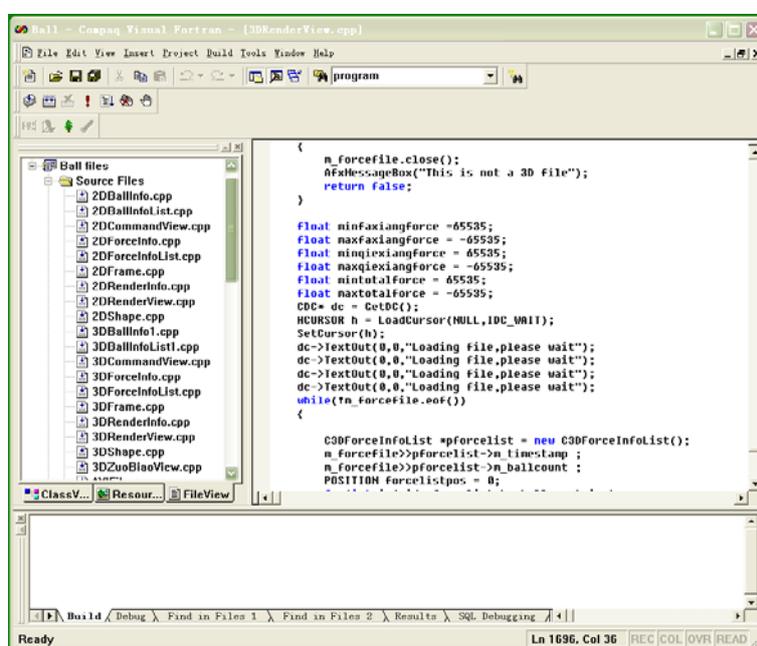


图 1.2 BallastDEM 软件开发代码窗口

1.4 创作目的及意义

有碴轨道结构是我国当前重载和高速铁路的主要轨道结构形式，而有碴道床又是线路结构中最薄弱的环节。在列车往复荷载的长期作用下，有碴道床会出现非均匀沉降和弹性降低等现象，影响行车的平稳性和安全性。另外，我国有相当长的铁路线路位于风沙区。在风沙条件下，细沙的贯入不仅会造成道床板结进而失去弹性，还会导致轨道不平顺，危及行车安全。在铁路列车运行过程中，道碴的破碎也是导致道床沉降的重点因素之一。因此，为提高有碴道床的工程质量和使用寿命，需要深入研究有碴道床在列车往复荷载下的动力特性、风沙条件对有碴道床在列车往复荷载作用下动力特性的影响、以及道碴颗粒的破碎机理及其对道床沉降的影响。

本软件采用颗粒离散单元模型对铁路道碴在细观尺度下的接触、运动规律、断裂进行数值模拟,进而对有碴道床在往复荷载下的宏观动力特性、道碴颗粒的破碎等进行深入研究,全面揭示有碴道床的基本力学行为。一方面,从理论上探讨有碴道床的非均匀沉降的影响因素,另一方面,为道床的养护和参数化设计等工程实践提供参考依据。本软件界面友好,易于被从事有碴轨道研究的科研人员及工程技术人员掌握。

1.5 主要功能

本软件主要有两个功能:

(一) 铁路有碴道床的离散单元数值模型

通过采用具有镶嵌效应和粘接-破碎功能的组合颗粒单元,构造道碴材料,并分析其在铁路运营过程中,在列车往复荷载下的相互作用、破碎以及道床的沉降规律。离散单元模型通过在细观尺度上处理道碴颗粒间的相互作用,可得到其在宏观尺度下的力学行为,是分析铁路道碴沉降、破碎、有效变形模量等力学行为的有效途径。

(二) 铁路有碴道床动力特性的三维动态显示

该显示软件可显示有碴道床的空间结构、道碴单元的接触力、位移等力学参数,具有旋转、缩放、透视等功能,可直观地再现道床沉降的发生、发展和演化过程。该显示软件主要有以下几个特点:

- (1) 输出数据更易于观察分析,对输出文件的数据进行统计分析更为方便。
- (2) 程序能够不间断运行,即绘制图形时不必终止正在运行的程序。
- (3) 用户界面友好,使用方便,易于用户学习。
- (4) 图形显示操作方便,能够实现旋转、缩放、平移图形及交互式选择绘图。
- (5) 可对图形实现即时打印保存。

1.6 软件开发组成员

严颖 (1973-), 女, 博士, 大连交通大学土木与安全工程学院副教授, 主要从事颗粒材料动力学行为的离散元模拟方法和铁路有碴道床变形研究。

赵金凤(1989-), 女, 硕士, 大连理工大学工程力学系工程力学专业硕士, 主要从事有碴铁路道床的动力特性研究。

季顺迎(1972-), 男, 博士, 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室教授, 主要从事离散介质力学, 工程海冰数值模拟和工程地质灾害。

第二部分 显示软件安装说明

2.1 软件运行环境

硬件环境： Intel 芯片主板的 Pentium 4 以上微机，内存容量 1G 以上，硬盘剩余容量 200MB， 屏幕分辨率 1024×768 以上。CPU 为 Intel 公司产品，主频 1.0G Hz 以上。

软件环境： Microsoft Windows 2000 以上操作系统。

2.2 安装过程说明

推荐屏幕分辨率是 1024×768 或更高，以便图形正常显示；本软件为绿色软件，无需安装。

2.3 备注

未解技术问题，可联系

季顺迎 Email: jisy@dlut.edu.cn 0411-84707212

第三部分 软件使用手册

3.1 主页面及功能项

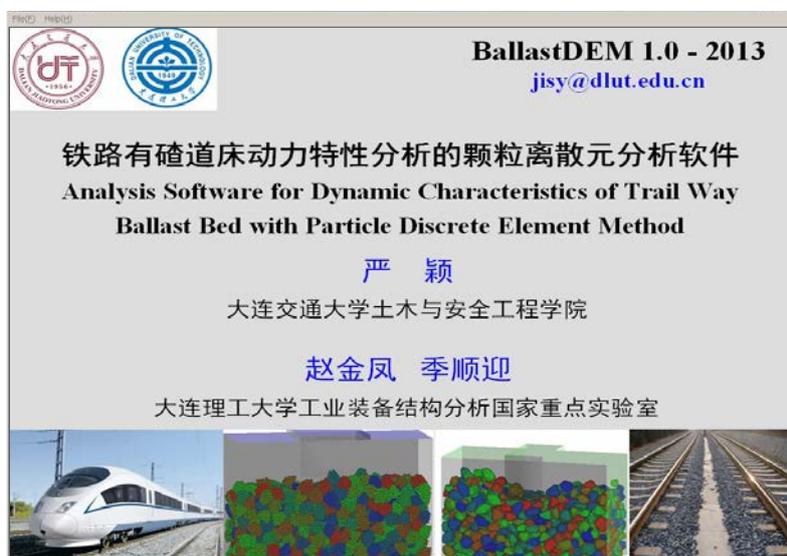


图 3.1 主页面

在主页面左上角有两个主要功能项：**File(E)** 和 **Help(H)**。**File(E)** 用于打开数据文件。

单击 **File(E)**，将弹出如下对话框，

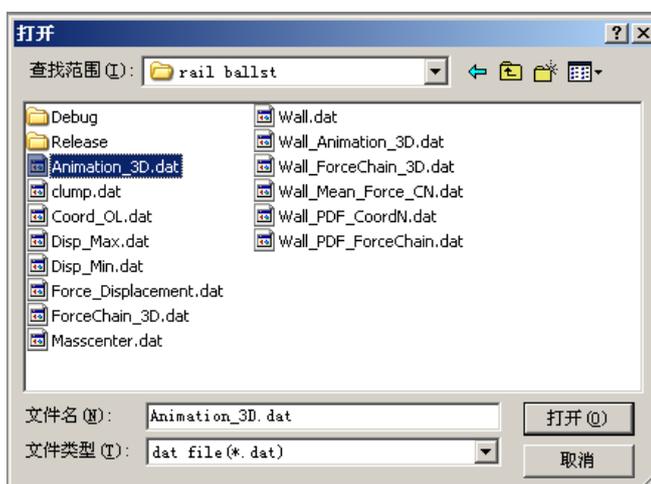


图 3.2 选择输入文件对话框

单击选择输入文件，并单击 **打开(O)** 按钮，软件将对输入文件进行解析。如果输入文件比较大，则用户需要耐心等待一会。输入文件解析完成后，界面如图 3.3 所示。

Error! Reference source not found.三维工作界面

Help(H) 用于查询数据文件格式。单击该按钮，将出现 3 个选项，About Ball(A)， 2D

Data structure 和 3D Data structure。单击 About Ball(A)，出现该应用程序的简单介绍。单击 2D Data structure 和 3D Data structure，将出现信息窗口，分别详细介绍 2D 和 3D 计算模型结果显示所需输入文件的格式要求。图 3.4 所示为 3D 计算模型的格式要求。按此格式要求，图 3.5 给出了相应的输入文件。

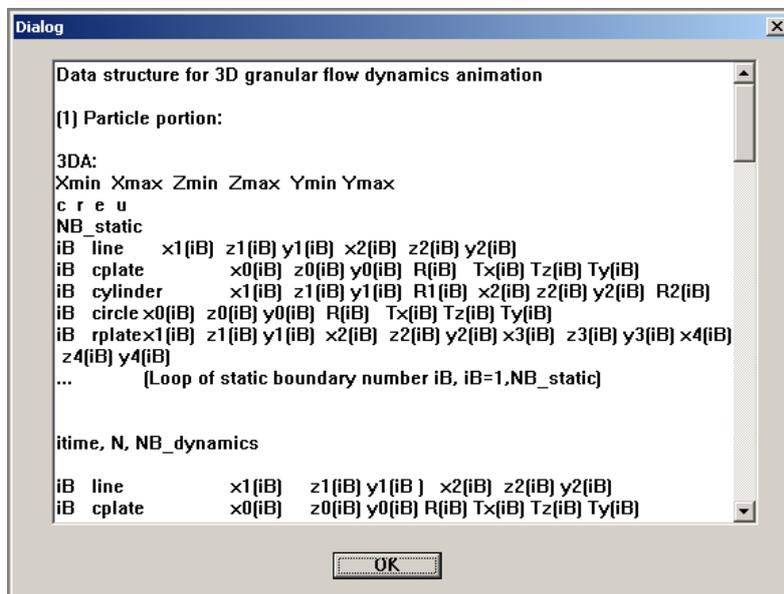


图 3.4 3D 计算模型输入文件格式说明

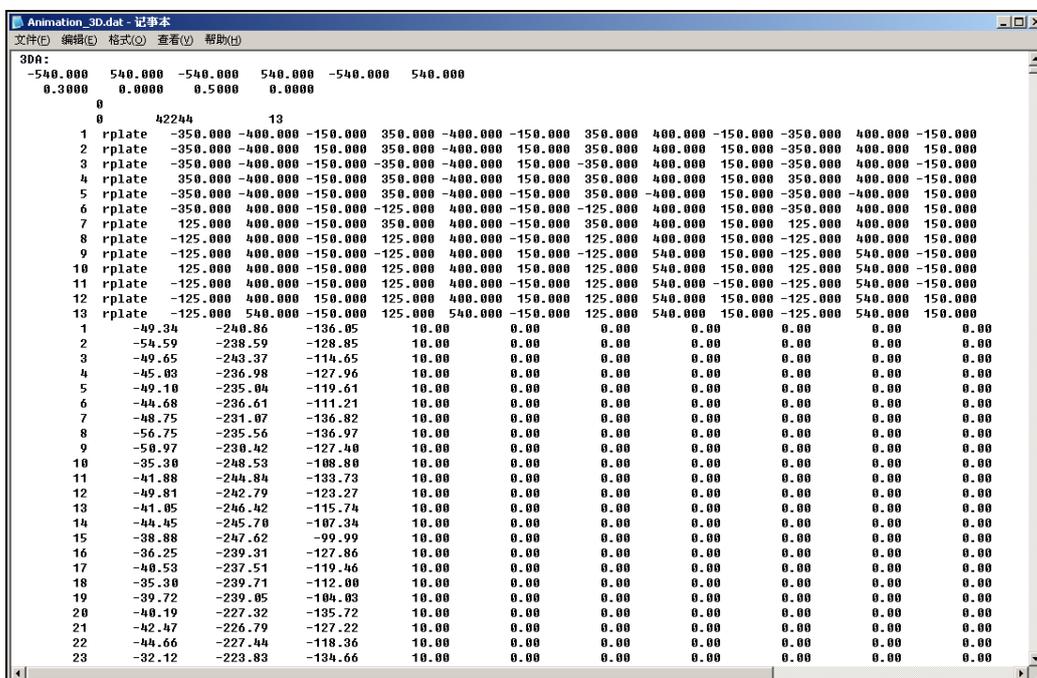


图 3.5 三维输入文件格式示例

3.2 三维动态显示

打开 3D 格式的输入文件后，软件工作窗口左侧的工具栏截图及其各部分的功能标注如图 3.66 所示，通过该工具栏可实现对要显示动画的调整。



图 3.6 图形工具栏

各部分功能介绍如下：

3.2.1 Background

单击 Background 右边的颜色块将弹出【颜色】对话框，用户可自行选择合适的颜色。若颜色不合用，可单击 **规定自定义颜色 (U) >>** 按钮弹出如图 3.77(b) 所示的【颜色】对话框。用户可以鼠标单击调色板区域，添加自定义颜色。图 3.8 所示为不同背景颜色的显示效果。



(a)颜色选择对话框

(b) 自定义颜色对话框

图 3.7 背景颜色选择项

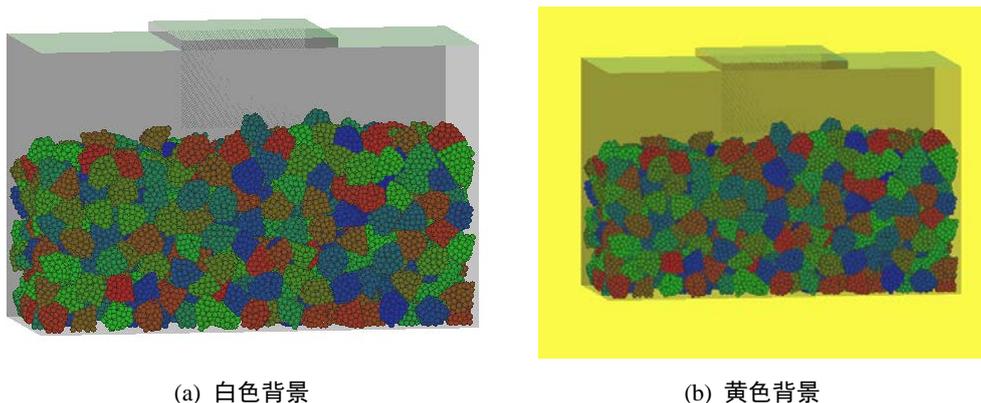


图 3.8 不同背景下的显示效果

3.2.2 Speed or Diameter

Speed 和 Diameter 选项的用途是以不同的颜色表征颗粒的不同属性。当选择 Speed 选项时，颗粒的颜色代表颗粒的不同速度；当选择 Diameter 选项时，则是用不同的颜色表征颗粒尺寸，色彩渐变进度如图 3.99 所示。色彩从深蓝色向红色渐变，颜色愈靠近蓝色，颗粒的速度、尺寸愈小，愈靠近红色则颗粒速度、尺寸愈大。其中，不同色彩所代表的参数实际大小由输入文件中颗粒参数的最大值最小值决定。图 3.10 给出不同粒径道碴颗粒运动时，分别以不同颜色表征颗粒的速度和尺寸时的显示效果。



图 3.9 色彩渐变参考条

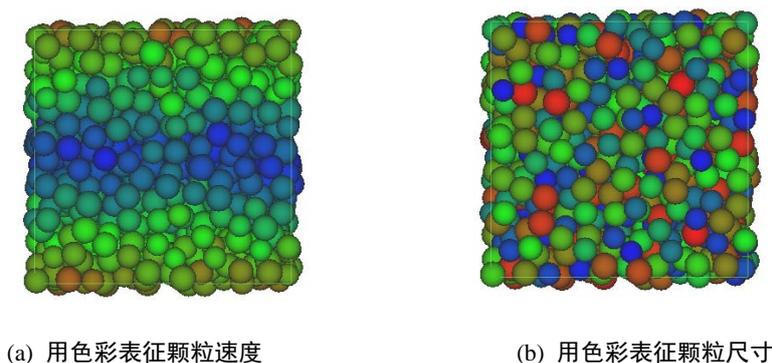


图 3.10 道碴颗粒运动时的显示效果

3.2.3 Constant 选项

该选项的作用与 Speed 和 Diameter 选项的作用相对应，但选择该选项时，颗粒的颜色为统一颜色，不随其速度或尺寸的改变而发生变化。其颜色框功能与 Background 选项的颜色框相同，可自定义显示颗粒的颜色。其显示结果如图 3.11 所示。

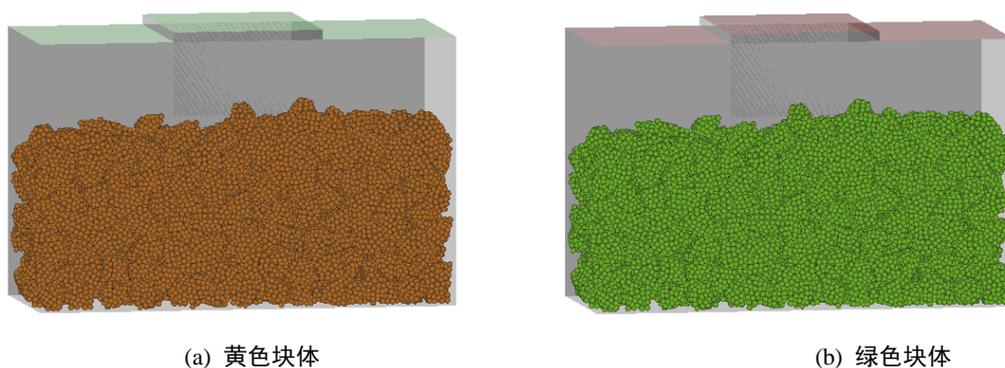


图 3.11 用匀色显示关键块体颗粒

3.2.4 光源位置

该项共有三个选项，分别为 X，Y，Z，表示将光源移至不同的坐标轴，图 3.22 为分别将光源移至不同的坐标轴，道碴箱的显示结果。

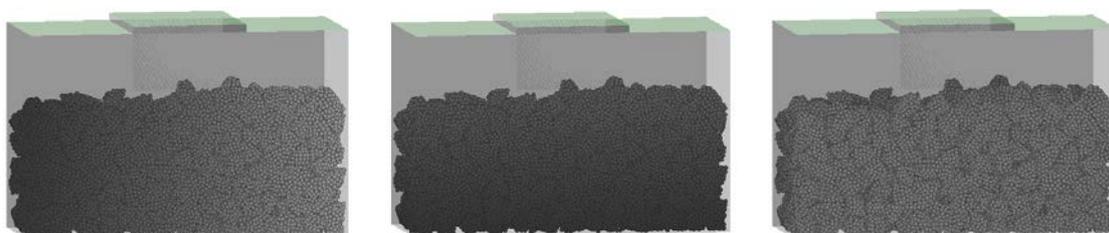


图 3.22 分别将光源移至 x 轴，y 轴，z 轴道碴箱的显示效果

3.2.5 不同块体显示

当考虑岩石的受压破碎时，初始时的单一整体，破碎后分成的不同块体。这时，可选中 Part 选项，通过用不同颜色显示破碎后的不同块体，使得道碴的破碎情况一目了然，如 **Error! Reference source not found.3** 所示，图(a) 表示没有破碎时的一个块体，以绿色显示。图(b)为使用该功能的情况，表示道碴受压破碎后的效果图。

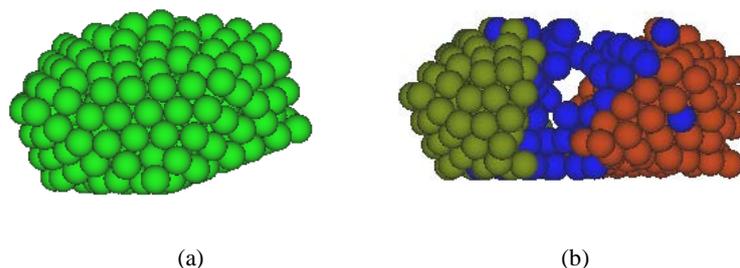


图 3.33 对不同块体进行显示

3.2.6 力链

打开动画文件后，选择 F，则会出现如图 3.14 所示的对话框提示用户输入力链文件。选择力链文件后，软件开始载入力链。此时，如果力链文件较大，载入时间稍长，在绘图区的左上角会提示‘Loading file, please wait’，对话窗口变为非激活状态，如图 3.55 所示。

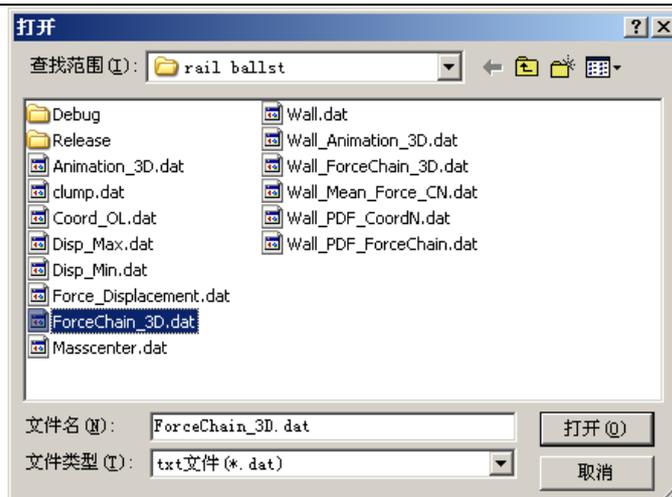


图 3.44 选择力链文件对话框

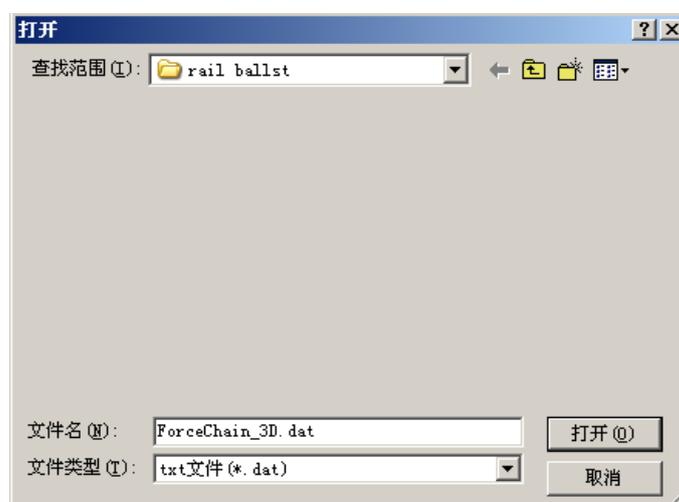
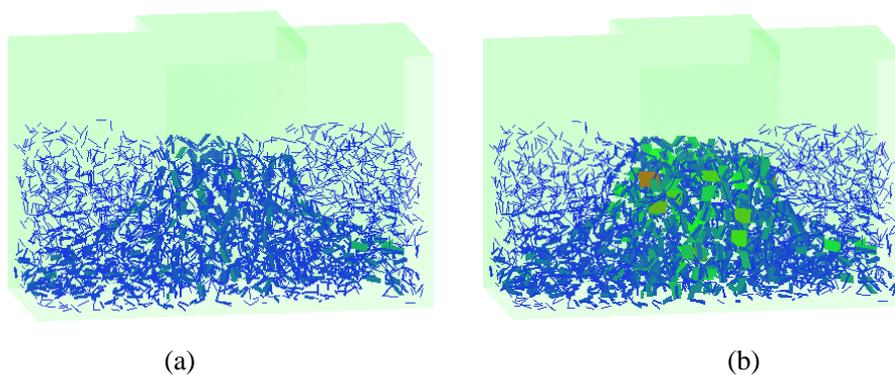


图 3.55 载入力链文件

力链连文件载入成功后，再次单击左上角的  按钮，便可以看到颗粒内部力链的情况，如图 3.6 (a)所示。力链的不同颜色代表力链的不同大小，用户可通过调整下方的第一条滑条上滑块的位置来调整力链的粗细程度，调整粗细后的力链如图 3.66 (b)所示。为了更加直观的看到力链在颗粒内部的分布情况，可以勾选 T 选项和 C 选项 T C，便可以同时显示颗粒和力链。通过滑动选项上方的滑条调整颗粒的透明度，以使用户观察力链情况，显示结果如图 3.6 (c)和(d)所示。



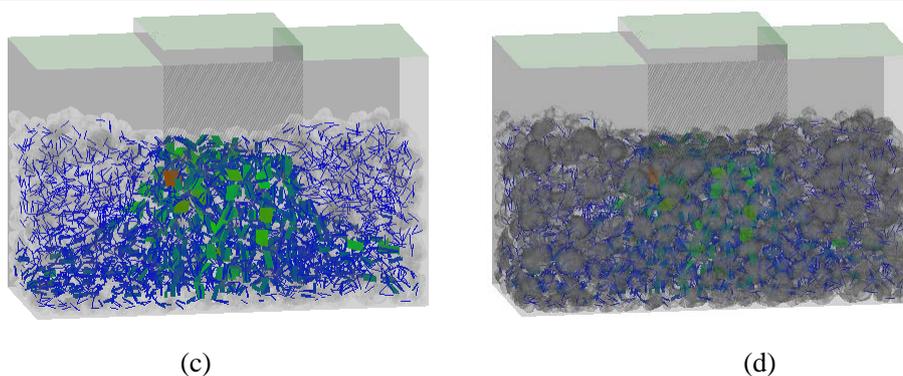


图 3.66 道碴箱力链和颗粒显示效果

3.2.7 断面显示

该选项可使用户自主选择要显示的道碴箱断面情况。例如，只需拖动 Scaling 区域的 Rear 滑条，将滑块从右往左拉，则显示的粒子从后往前逐渐消失。与之相反，拖动 Front 滑条从左往右将使颗粒从前往后逐渐消失，结果如 **Error! Reference source not found.7** 所示。

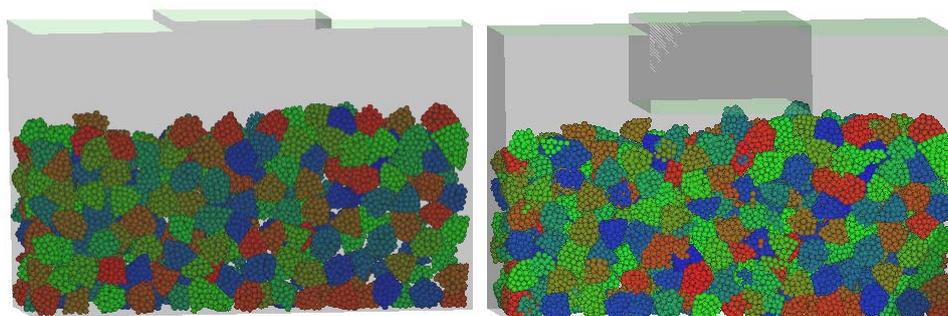
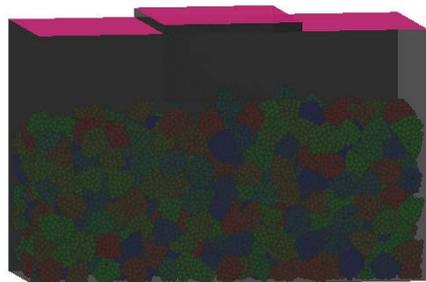
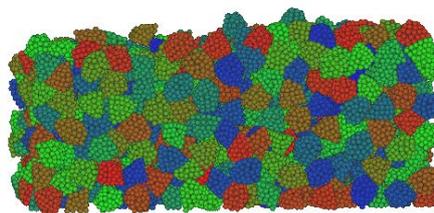


图 3.17 道碴箱断面显示

3.2.8 Boundary

Boundary 选项是对物理边界条件的显示情况进行设置。用户可以通过该选项色块

左边的勾选框 ，自行选择是否显示边界。



(a)不添加物理边界

(b)添加物理边界

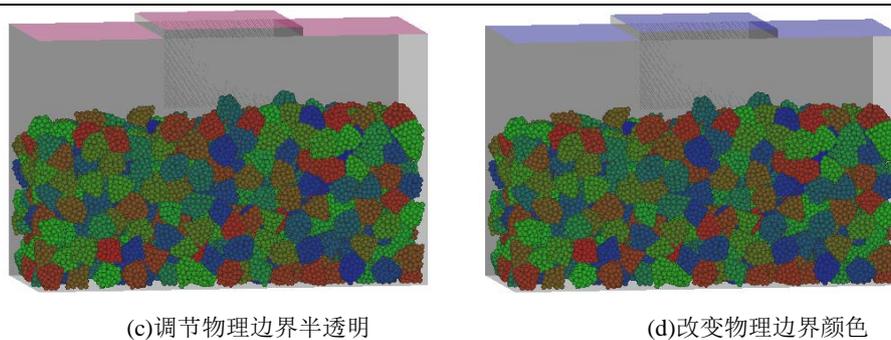


图 3. 18 为采用粘结-破碎模式的组合道碴单元模拟道碴的道碴箱数值试验。调节不同的物理边界参数，可按需要显示物理边界。

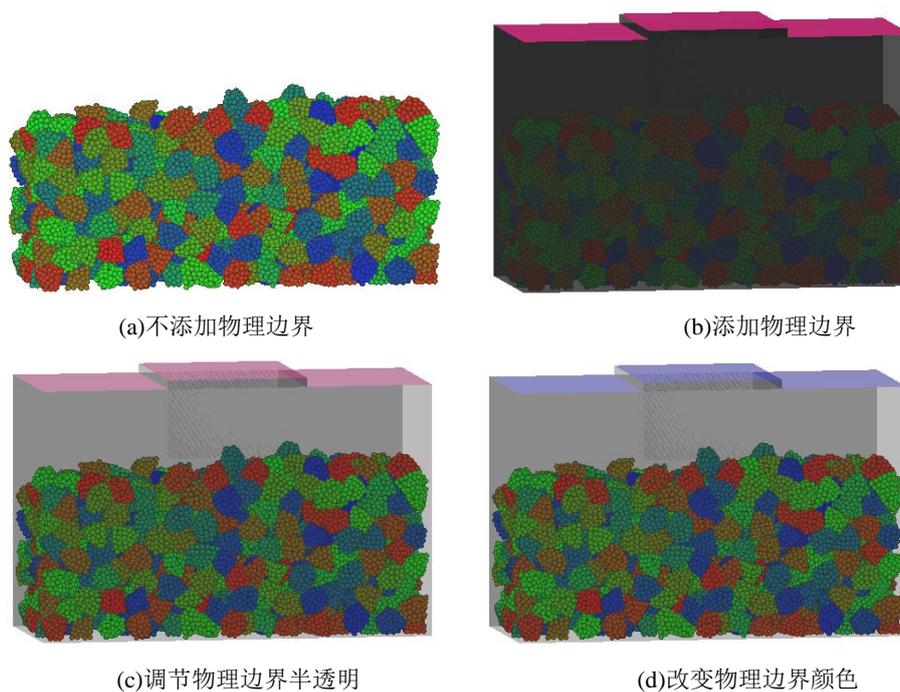


图 3. 18 不同参数下物理边界的显示

3.2.9 Time step

该选项可按用户需要即时调整动画播放的速度。时间步调节滑条越向右拖，则动画显示速度越慢。

第四部分 模型简介

BallastDEM 软件采用离散元方法，针对铁路道碴的非规则几何形态，分别采用镶嵌式组合颗粒单元和粘结式组合颗粒单元模拟道碴颗粒，构造出可破碎及不可破碎的道碴材料。在此基础上，BallastDEM 软件分别对风沙贯入下有碴道床的力学特性、往复荷载作用下的动力特性、以及道碴材料的破碎特性进行了离散元分析，有效地解决了相应的工程问题。

4.1 单元构造

在 BallastDEM 程序中，通过粘接、镶嵌两种不同方式进行非规则颗粒的构造，以更准确的研究道碴的细观结构对铁路道床沉降等动力特性的影响。

4.1.1 镶嵌式组合颗粒单元

针对铁路道床中道碴颗粒的非规则性，采用具有镶嵌模式的组合颗粒单元进行构造。该组合颗粒由不同粒径的球形颗粒按一定的组合方式构成，如图 4.1 所示。该组合颗粒的质量、质心和转动惯量可采用有限分割法进行确定，并通过四元数方法进行组合颗粒的动力学分量在整体坐标和局部坐标下的转换。采用具有镶嵌式组合单元，可以根据设定的颗粒形态进行任意组合，应用简便。

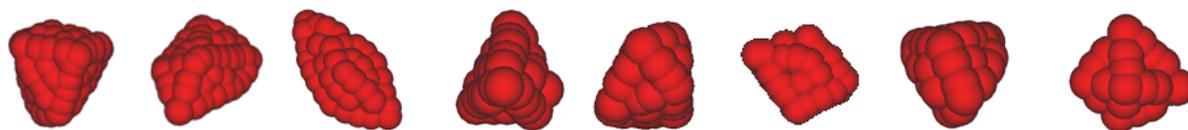


图 4.1 球体镶嵌式非规则单元

4.1.2 粘结式组合颗粒单元

对于可破碎的非规则颗粒单元，可通过球形颗粒粘接的模式进行构造，如图 4.1 所示。该非规则单元在一定作用力下可按一定的破坏准则发生破碎。单元间的粘结方式可采用接触粘结或平行粘结。在模拟岩石材料的破碎特性时，一般采用平行粘结方式。通过粘结球体单元间的作用力和力矩确定其法向应力和切向应力。采用该平行粘结模式不仅可以构造非规则颗粒单元，还可对连续体材料的破坏过程进行模拟。

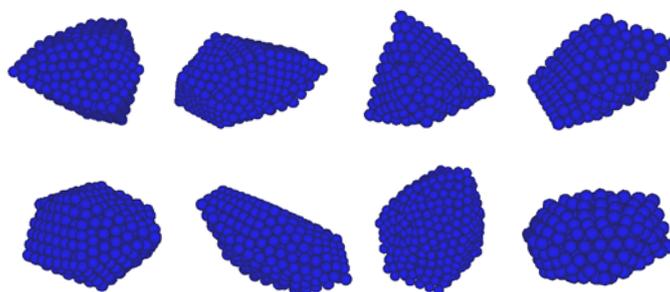


图 4.2 球体粘结式非规则单元

4.2 单元间的接触判断

接触判断主要包括单元与单元、单元与结构体间的接触。接触判断的确定是动力特性分析最重要的组成部分，单元间作用力的计算主要依赖于单元是否发生接触。

组合颗粒单元主要分为镶嵌式单元和粘结式组合单元。这两种单元都是基于球体单元形式构成的，其接触形式主要分为两种，即(1) 球面-球面，(2) 球面-平面。

(1) 球面—球面的接触判断

当圆球单元间发生接触时，两球的球心距离小于两球的半径和，即认为发生接触，根据球心距离及半径和可确定两球之间的重叠量，如图 4.3 所示。

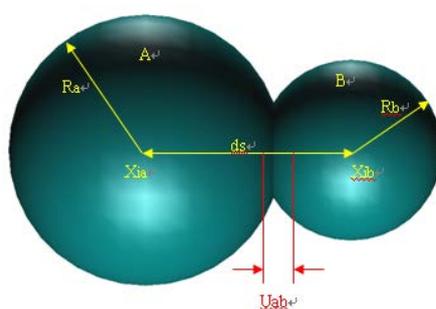


图 4.3 球体间接触判断

(2) 球面—平面的接触判断

对于镶嵌式或者粘结式单元，当其最外部球形颗粒与平面接触时，即认为单元与平面发生接触。具体的，当镶嵌式颗粒单元或者粘结式单元的最外部颗粒的球心与接触面间的距离小于球形颗粒的半径时，即认为已经发生接触。根据球心到接触面的距离，计算重叠量，如图 4.4 所示。

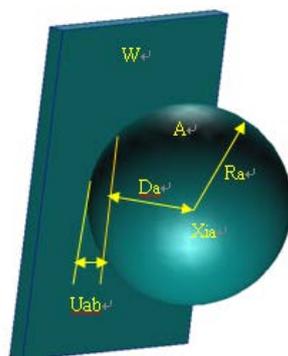


图 4.4 球体与平面间接触判断

4.3 单元间作用力

颗粒间的作用分为镶嵌式单元间的接触力模型和粘结单元的接触力模型。

4.3.1 镶嵌式单元间的接触力模型

在颗粒相互作用过程中，一般考虑单元间因相对速度和弹性变形而引起的粘弹性作用力，并采用 Mohr-Coulomb 摩擦定律计算剪切力，如图 4.5 所示。其中， M_A 和 M_B 为颗粒 A 和 B 的质量， K_n 和 K_s 分别是法向和切向刚度系数， C_n 和 C_s 是法向和切向阻尼系数， μ 是摩擦系数。

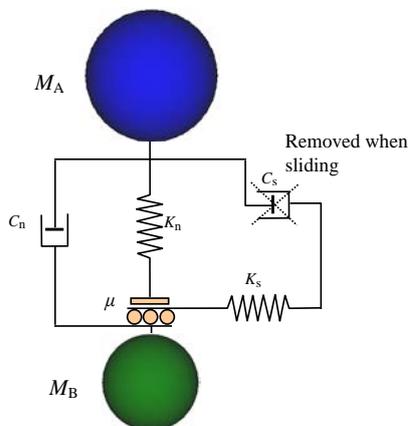


图 4.5 两个单元间的接触力模型

单元间法向力包括弹性力和粘滞力两部分，即：

$$F_n = K_n x_n - C_n \dot{x}_n$$

式中， x_n 和 \dot{x}_n 分别为颗粒的法向变形和应变率。

单元间的切向力也由弹性和粘滞两部分组成，且满足 Mohr-Coulomb 摩擦定律，有

$$F_s^* = K_s x_s - C_s \dot{x}_s$$

$$F_s = \min(F_s^*, \text{sign}(F_s^*) \mu F_n)$$

式中， x_s 和 \dot{x}_s 分别为颗粒的切向变形和应变率。

球单元 A 和 B 碰撞的法向有效刚度系数为：

$$K_n = \frac{2k_n^A k_n^B}{k_n^A + k_n^B}$$

式中， k_n^A 和 k_n^B 分别为球单元 A 和 B 的刚度系数。

法向阻尼系数按下式计算，即：

$$C_n = \zeta_n \sqrt{2MK_n}$$

这里无量纲法向阻尼系数为：

$$\zeta_n = \frac{-\ln e}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2 e}}$$

式中， M 为两颗粒单元的有效质量， e 为回弹系数。切向和法向刚度、阻尼系数有如下关系： $K_s = \alpha K_n$ ， $C_s = \beta C_n$ 。

在线性接触模型中，计算步长一般取时间步长为二元接触时间的 1/50。该二元接触时间定义为：

$$T_{bc} = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{2K_n}{M}(1-\zeta_n^2)}}$$

式中， T_{bc} 为二元接触时间，即两个球单元从碰撞到分离的接触时间。在线粘弹性模型中，它是一个与颗粒大小和材料性质相关的常数。

4.3.2 粘结式单元间的粘接模型

粘结模型可以分为两种：接触粘结和平行粘结。接触粘结的粘结仅发生在接触点上，并且只能传递力；平行粘结将两个球体胶粘在一起，不仅可以传递力，还可以传递力矩。这里，采用平行粘接模型以更合理地模拟道碴破碎的内部力学特征。

在平行粘接中，两个粘接颗粒单元间设定一个弹性粘接圆盘，如图 4.6 所示。圆盘可以传递两个单元间的作用力和力矩，即拉力、剪力、弯矩和扭矩。并且，力和力矩都可以分解为法向分量和切向分量

$$\vec{F}_i = \vec{F}_i^s + \vec{F}_i^n$$

$$\vec{M}_i = \vec{M}_i^s + \vec{M}_i^n$$

式中， \vec{F}_i^n, \vec{M}_i^n 和 \vec{F}_i^s, \vec{M}_i^s 分别是法向分量和切向分量。

在平行粘接模型中，粘接圆盘上的最大拉应力和剪应力依据梁的拉伸、扭转和弯曲理论有

$$\sigma_{\max} = \frac{-\bar{F}^n}{A} + \frac{|\bar{M}_i^s|}{I} \bar{R}$$

$$\tau_{\max} = \frac{|\bar{F}_i^s|}{A} + \frac{|\bar{M}_i^n|}{J} \bar{R}$$

式中，A、J 和 I 分别为平行接触圆盘的面积、极惯性矩，有 $A = \pi \bar{R}^2$ ， $J = 1/2 \pi \bar{R}^4$ ， $I = 1/4 \pi \bar{R}^4$ ，其中 \bar{R} 为粘接圆盘的半径。当最大拉应力和剪应力超过其拉伸强度和剪切强度时粘接单元将断开。

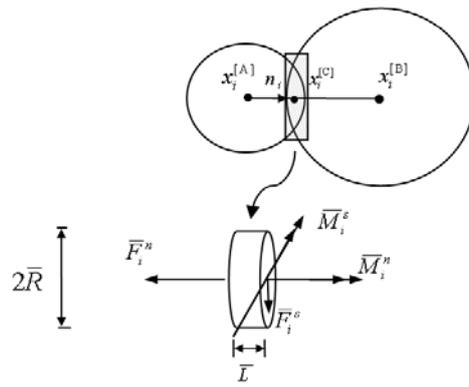


图 4.6 两个单元间的平行粘结模型

第五部分 程序介绍

5.1 输入文件

一、结构体数据输入格式

结构体用三角形单元来离散，其数据格式如图 5.1 (a)、(b)。在图 5.1(a)中，第一行依次为三角形单元节点总数与三角形单元总数，中间部分为各节点的 X、Y、Z 坐标。图(b)中为组成每个三角形顶点的节点编号。

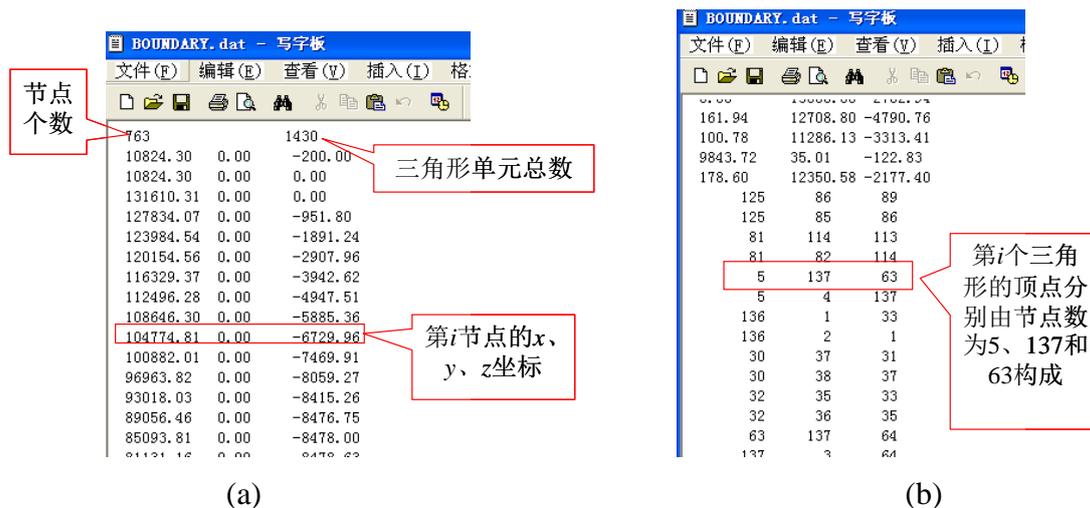


图 5.1 结构体数据输入格式

二、单元输入参数文件格式

计算中所需输入参数如图 5.2 所示。

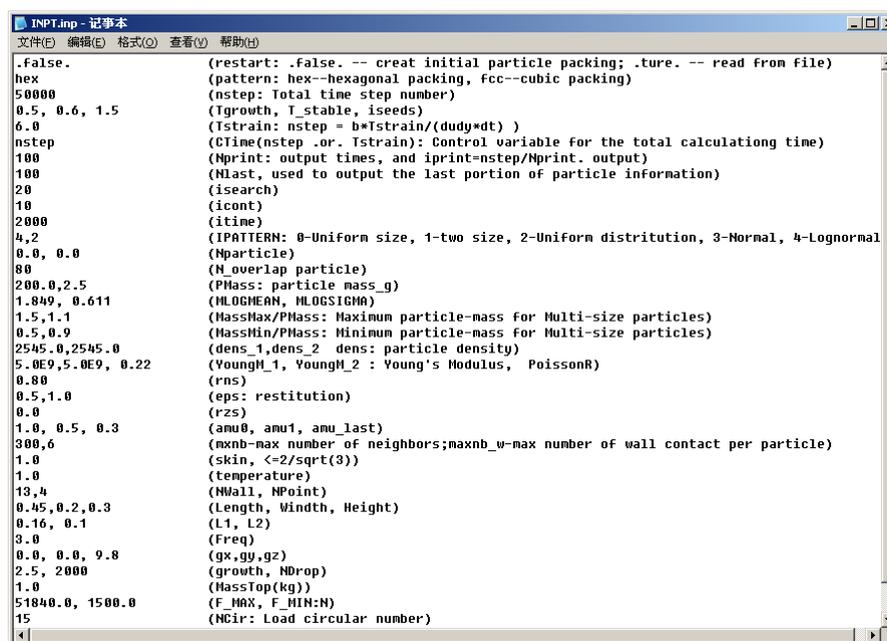


图 5.2 单元输入参数文件格式

关键输入参数说明：

restart: 关键块体的生成方式, **false:** 重新生成块体; **true,** 从文件中读取。

pattern: 在漏斗状边界中生成关键块体时颗粒的排列方式。

BOND_MODEL: 颗粒间粘结的方式, **P** 为平行粘结, **C** 为接触粘结。

nstep: 计算总时间步数, **NFILL:** 生成关键块体时所需时间步数。

NGROWTH: 关键块体生长所需时间步数。

NPrint: 输出动画文件的次数。

isearh: 邻居列表更新时间步间隔。

icont: 时间步长细化程度, **IPATTERN:** 颗粒尺寸分布方式。

DMAX/D, DMIN/D: 最大颗粒直径与最小颗粒直径比值。

cc: 颗粒初始浓度, **D:** 颗粒的直径, **dens:** 颗粒密度。

YoungM: 颗粒杨氏模量, **rns:** 切向刚度与法向刚度比值。

rzs: 切向阻尼与法向阻尼比值。

amu: 颗粒间摩擦系数, **eps:** 颗粒间回弹系数。

XO, YO, ZO: 坐标原点。

mxnb: 某一颗粒允许与其它颗粒接触的最大数。

MAXNB_W: 某一颗粒允许与边界接触的最大数。

GROWTH: 颗粒尺寸增长因子。

skin: 网格大小与颗粒直径比值。

nu_Wall: 颗粒与墙的摩擦系数。

eps_Wall: 颗粒与墙之间的回弹系数。

gz: 重力加速度, **ARF:** 滚动摩擦因子。

RPBN: 断裂强度与刚度比值。

BSTRENGTH: 颗粒粘结断裂强度。

TContact: 颗粒接触模型选择。

Reflection Coefficient: 回弹系数

5.2 程序执行

此程序由 Fortran 代码编写, 按照 Fortran 编译器的使用规则编译运行即可(Windows 平台与 Linux 平台均可编译通过)。如果算例中三角形单元与颗粒数目较大, 且时间步长较小的话, 所需计算时间会较长, 需耐心等待。算法的流程图如图 5.3 所示。

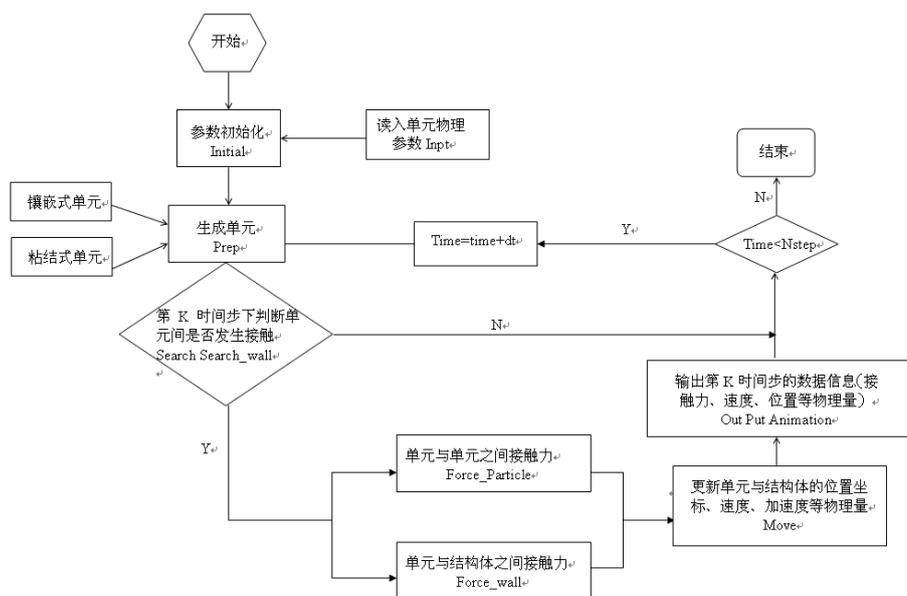


图 5.3 算法流程图

5.3 结果显示

BallastDEM 软件在环境力学应用方面得到了广泛的应用，通过 BallastDEM 中的显示软件可将模拟结果直观展现出来。这样，可以方便地宏观观察问题的发生、发展和演化规律。

分别采用镶嵌式组合颗粒单元和粘结式组合颗粒单元模拟道碴碎石颗粒。在此基础上，分别对往复荷载作用下有碴道床的动力特性、以及风沙贯入下的道碴力学特性进行模拟，如图 5.4 所示。图 5.5 为往复荷载作用下道碴颗粒间力链随时间的变化规律。对有碴铁路道床在往复荷载作用下的动力特性研究有助于道床结构的合理设计。采用粘结式组合颗粒单元构造非规则、可破碎的道碴颗粒，并对道碴材料在荷载作用下的破碎特性进行离散元分析，如图 5.6 所示。

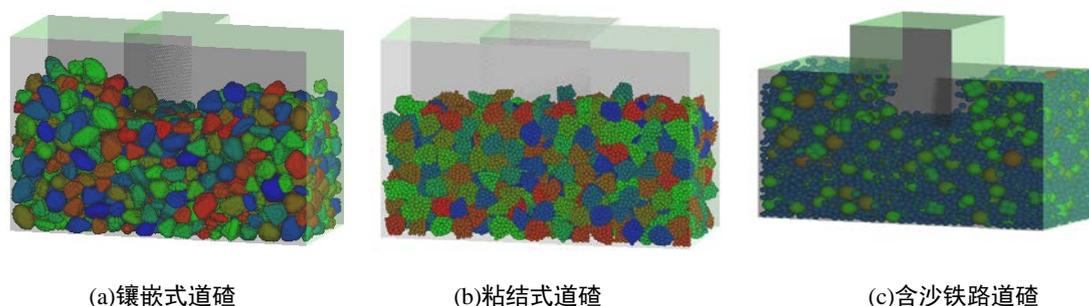


图 5.4 道碴箱的离散元模型

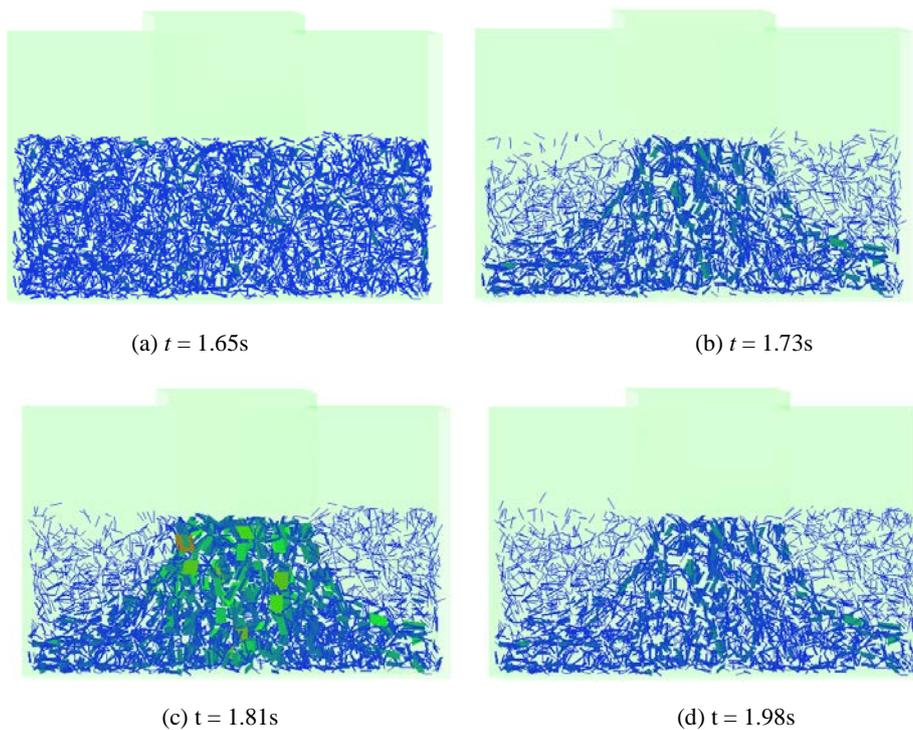


图 5.5 往复荷载下的力链分布

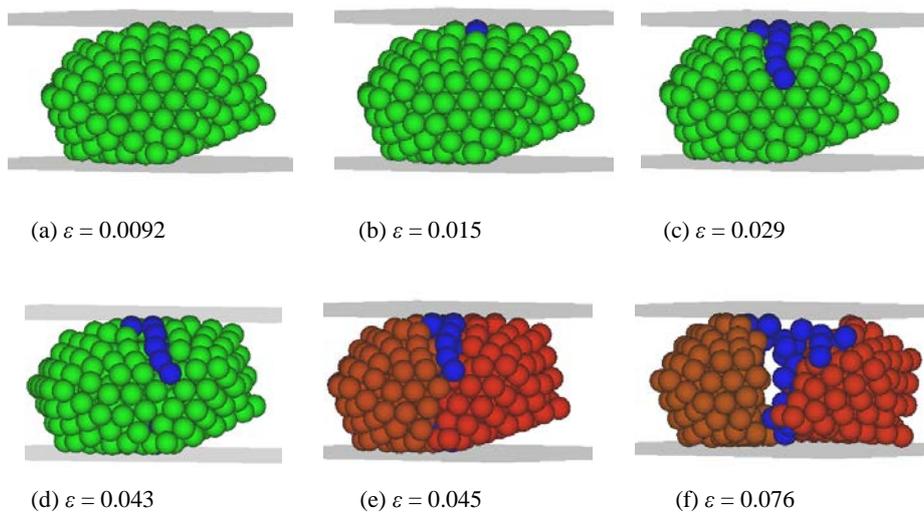


图 5.6 道碴材料的压碎试验离散元模拟