

沥青混合料 性能分析的PFC实践

LIQING HUNHELIAO XINGNENG FENXI DE PFC SHIJIAN

周长红 编著
李玉华 主审



大连理工大学出版社

沥青混合料 性能分析的PFC实践

LIQING HUNHELIAO XINGNENG FENXI DE PFC SHIJIAN

周长红 编著
李玉华 主审



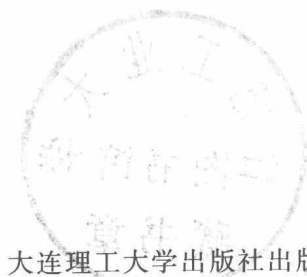
大连理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

沥青混合料性能分析的 PFC 实践 / 周长红编著. —
大连 : 大连理工大学出版社, 2015. 1
ISBN 978-7-5611-9634-2

I. ①沥… II. ①周… III. ①沥青拌和料—实验
IV. ①U414—33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 272796 号



大连理工大学出版社出版

地址:大连市软件园路 80 号 邮政编码:116023

发行:0411-84708842 邮购:0411-84708943 传真:0411-84701466

E-mail:dutp@dutp.cn URL:<http://www.dutp.cn>

大连理工印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸:185mm×260mm 印张:12 字数:277 千字
2015 年 1 月第 1 版 2015 年 1 月第 1 次印刷

责任编辑:王晓历

责任校对:栗莹悦

封面设计:张莹

ISBN 978-7-5611-9634-2

定 价:30.00 元

前 言

沥青混合物是一种复杂的散粒体结合材料(比较常见的还有粮食、化工粒料、药品、河流沙石和土壤等)。其颗粒形状、大小及分布一般不均匀并具有随机性,因此,通过实验方法研究其力学问题非常复杂和困难。随着计算机和数值计算技术的发展,研究者开始寄希望于运用数值模拟的方法解决此问题。显然连续力学理论基于均匀、连续、各向同性和小变形的基本假设不适用于描述该类材料的运动、变形等力学特性;而以离散单元法为核心的非连续介质力学计算方法在解决沥青混合物数值模拟上具有不可比拟的优势。

离散单元法最早是于1971年被Cundall在解决岩石力学问题时提出来的,随后出于岩土力学的统一又被Strack在1979年应用到土力学中,开创了离散单元法应用的先河。随后Chang、Meegoda、Buttlar、You等国际学者在沥青混合物离散元应用研究方面做出了卓越贡献。此外,国内华南理工大学的张肖宁、王端宜,哈尔滨工业大学的谭忆秋,同济大学的盛晓军,西南交通大学的黄晚清、陆阳,长安大学的沙爱民、胡霞光、田莉等众多学者也在沥青混合物离散元方法的应用方面做出了很多成果。

PFC是美国ITASCA公司出品的一款颗粒流离散元软件,它特别适合于沥青混合物的力学研究,因此成为该领域研究的得力工具。但是,除了PFC的用户手册之外,目前并没有一本实用性强、能够指导初学者快速开展沥青混合物相关研究的书籍。本书正是为了适应这种形势而编写的。

本书共6章:PFC基础、颗粒的生成、试件成型、三轴试验分析、HMA影响因素分析、HMA离析性能分析。本书结构由浅入深,层层递进,易于读者学习掌握。本书包含了大量的程序,并对程序进行了较多的剖析。书中给出了很多实例和大量的程序源代码,供读者参考使用,更多的程序代码可以从本社的资源中心下载(网址:<http://www.dutpbook.com/>)。

本书既可以作为高等工科院校道路工程学科的研究生教学或学习用书,也可以供从事沥青混合物研究的教师、科研工作者和工程技术人员参考使用。

本书由大连理工大学周长红编著,同时也融入了作者指导过的多位研究生(杜仲宝、王元杰、许斌、袁强、刘少华、卢佳乐及张苗苗等)的成果。大连理工大学李玉华审阅了书稿并提出了宝贵建议,在此谨致谢忱!

本书在编写过程中,参阅了众多国内外相关文献,在此谨向这些文献的作者表示诚挚的谢意。限于编者能力与水平,可能仍有疏漏之处,敬请读者批评指正。

编 者

2015 年 1 月

所有意见和建议请发往:dutpbk@163.com

欢迎访问教材服务网站:<http://www.dutpbook.com>

联系电话:0411-84708462 84708445



第 1 章 PFC 基础	1
1.1 PFC 简介	1
1.2 基本假设	1
1.3 计算过程	2
1.4 颗粒运动方程	3
1.5 力-位移关系	3
1.6 PFC3D 的特点	4
1.7 本构模型	4
1.8 PFC 重要概念	8
1.9 PFC3D 界面	12
1.10 输入方式	18
1.11 FISH 语言	19
1.12 路面力学算例	24
第 2 章 颗粒的生成	36
2.1 球形颗粒的生成	36
2.2 多面体颗粒的生成	38
2.3 椭球体颗粒的生成	47
2.4 颗粒形状参数的计算	50
2.5 非球颗粒的应用	53
第 3 章 试件成型	57
3.1 级配控制	57
3.2 颗粒群的生成	61
3.3 压缩成型	64
3.4 基球的建立	72
3.5 颗粒的替换	73
3.6 孔隙率计算	77

第 4 章 三轴试验分析	81
4.1 三轴试验原理	81
4.2 强度参数计算	83
4.3 三轴试验的应用	85
4.4 伺服机制的建立	86
4.5 三轴虚拟试验	90
第 5 章 HMA 影响因素分析	98
5.1 HMA 性能指标	98
5.2 胶浆参数及摩擦系数对 HMA 性能的影响	101
5.3 围压对 HMA 性能的影响	103
5.4 颗粒形状的影响	107
5.5 骨架级配的影响	110
5.6 单轴贯入试验压头尺寸的确定	118
第 6 章 HMA 离析性能分析	123
6.1 主要观点和进展	123
6.2 HMA 离析的料堆试验法	124
6.3 级配对离析的影响	128
6.4 沥青对离析的影响	134
6.5 离析试验数值模拟	135
6.6 离析历史过程模拟	144
附 录	148
附录 A:任意凸多面体壳生成程序	148
附录 B:用球体填充任意多面体的程序	151
附录 C:多面体颗粒形状参数的计算程序	153
附录 D:椭球体颗粒形状参数的计算程序	156
附录 E:一个完整的生成任意多面体颗粒的程序	159
附录 F:非球颗粒压缩成型计算程序	162
附录 G:三轴压缩试验计算程序	177
附录 H:三轴摩尔库伦强度模拟主程序	185

1.1 PFC 简介

PFC2D/3D 软件是美国 ITASCA 公司出品的商用 DEM 软件,适用于研究颗粒集合体(Particles Assemblies)的破裂和破裂发展问题,以及大位移的颗粒流问题,是一款用于模拟复杂固体力学问题和颗粒流问题的有效工具。

离散单元法在对对象的几何划分上分成了两大类,一类为块体单元,另一类为颗粒单元(图 1-1)。PFC 是针对颗粒单元的计算软件,具体地,PFC2D 是以圆盘作为基本单元,PFC3D 则是以球体作为基本单元进行仿真计算的。本书只介绍 PFC3D 的使用方法。

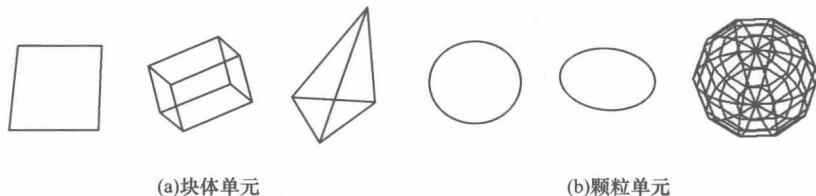


图 1-1 离散单元法采用单元

PFC3D 研究的基本对象是颗粒(Particles)和颗粒间的接触(Contact),它能直接模拟球形颗粒间的运动和相互作用的物理问题;可以通过“连接”(Attach)两个或多个小颗粒来创建任意形状的大颗粒,“连接”而成的“组合颗粒”(Group,Clump 等)可以作为独立的颗粒体研究。PFC3D 可以模拟固体的破裂问题。通过“粘结”(Bond)相邻颗粒得到的颗粒集合体可作为具有弹性属性的“固体”(Solid),当颗粒间的“粘结”(Bond)逐渐破坏时,该固体即产生“破裂”(Fracture)。

1.2 基本假设

- (1) 颗粒单元均为刚性体;
- (2) 接触只发生在很小的范围内,即点接触;
- (3) 接触的特性为柔性接触,即在接触的地方允许有一定范围的“重叠”;
- (4) “重叠”量的大小视接触力的大小而定,而且与颗粒的尺寸相比,接触处的“重叠”量微乎其微;
- (5) 接触的地方有一定的特殊的连接强度;
- (6) 颗粒单元为球形。

需要说明的是:实际工程中的大部分大变形都被解释为沿着各类软弱面、接触带而发生的相对运动,因此假设颗粒为刚体是合适的。尤其在密实颗粒集合体以及粒状颗粒

集合体材料的变形中,把颗粒看作刚体更加恰当,主要原因是此类材料的变形主要源自于颗粒刚性单元的滑移、转动还有接触处的开展和闭合,而颗粒自身的各种变形对材料的变形影响相对来说要小很多。在 PFC3D 模型中,除了圆形颗粒单元以外,还包含了“墙”(Wall)。软件通过“墙”来给予速度边界条件,以此达到对颗粒集合体的轴向或者围向的压缩。颗粒体与墙体之间通过施加在接触处的接触力发生相互作用,对于每一个颗粒而言其都要满足运动方程,而墙体却不满足,也就是作用在墙体上的接触力并不影响墙体本身的运动,墙体的运动是人为设定的。同样的道理,墙体跟墙体更不会产生接触力,所以 PFC3D 模型中只存在这样两种接触模型:颗粒—颗粒接触和颗粒—墙体接触。

1.3 计算过程

离散元法中的求解方法有两种——动态松弛法和静态松弛法。静态松弛法是直接寻找块体失去平衡后达到再平衡时的力—位移关系,需建立联立方程组求解,但此方法在求解联立平衡方程组时会出现数值奇异或病态问题。动态松弛法是把非线性静力问题转化为动力学问题求解的一种数值方法,其实质是在逐步积分过程中加入了临界阻尼来吸收系统的动能,使其收敛于静态值。由于 PFC3D 中颗粒间相互作用是一个动态过程,所以采用动态松弛法。

其求解思路是:以时步为迭代循环周期,重复对每对相互接触的颗粒应用牛顿运动定律,求出在此时步内颗粒单元所产生的运动;重复对每一接触(包括球与球和球与壁的接触两种)运用力—位移定律,计算此时步的运动完成后单元的接触力情况。重复上述两个过程,并且在迭代过程中自动识别接触的形成和分离,完成离散元动态模拟,其计算循环过程如图 1-2 所示。

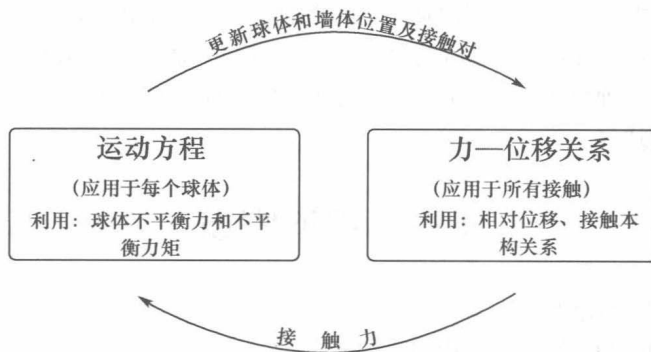


图 1-2 PFC3D 迭代循环

具体过程为:每一时步迭代开始,先由已知的颗粒(Ball)和墙体(Wall)的位置,以及根据接触本构模型计算出颗粒单元的合力和合力矩,应用牛顿运动定律计算颗粒在时步完成时的位置和速度,然后依据接触判断准则更新接触集,根据接触模型和接触颗粒单元间的相对运动,将力—位移关系应用于新的接触集,计算出每个接触的接触力。最后又可根据计算的接触力和体积力形成合力和合力矩。

1.4 颗粒运动方程

在离散单元法中,颗粒体被假定为刚体,颗粒和颗粒之间存在的接触力,以及外力和体力的作用,使得颗粒处于一种不平衡状态,必然产生加速度和速度,导致颗粒产生平动和转动行为,而接触力会由于颗粒力和位移的变化得到不断更新。颗粒的运动包括平移运动和旋转运动,以牛顿第二定律为基础,在一个时步内颗粒的基本运动方程为

$$\begin{cases} F_i = m \ddot{x}_i + \beta_R \dot{x}_i \\ M_i = I \ddot{\varphi}_i + \beta_R \dot{\varphi}_i \end{cases} \quad (1-1)$$

其中 $i=1,2,3$ 表示沿 x, y, z 三个坐标轴方向的分量; F_i 表示颗粒的不平衡力分量; x_i 表示颗粒的线位移; m 是颗粒的质量; M_i 是由接触力引起的不平衡力矩分量; I 是球的转动惯量; φ_i 是颗粒的角位移; β_R 是全局阻尼系数。若采用显式中心差分格式,得

$$\begin{cases} \ddot{x}_i^{(t)} = \frac{1}{\Delta t} (\dot{x}_i^{(t+\Delta t/2)} - \dot{x}_i^{(t-\Delta t/2)}) \\ \ddot{\varphi}_i^{(t)} = \frac{1}{\Delta t} (\dot{\varphi}_i^{(t+\Delta t/2)} - \dot{\varphi}_i^{(t-\Delta t/2)}) \\ \dot{x}_i^{(t)} = \frac{1}{2} (\dot{x}_i^{(t+\Delta t/2)} + \dot{x}_i^{(t-\Delta t/2)}) \\ \dot{\varphi}_i^{(t)} = \frac{1}{2} (\dot{\varphi}_i^{(t+\Delta t/2)} + \dot{\varphi}_i^{(t-\Delta t/2)}) \end{cases}$$

将以上两式代入(1-1)可得

$$\begin{aligned} \dot{x}_i^{(t+\Delta t/2)} &= \left[\left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{\beta_R}{m} \cdot \Delta t \right) \dot{x}_i^{(t-\Delta t/2)} + \frac{F_i^{(t)} \cdot \Delta t}{m} \right] / \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\beta_R}{m} \cdot \Delta t \right) \\ \dot{\varphi}_i^{(t+\Delta t/2)} &= \left[\left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{\beta_R}{I} \cdot \Delta t \right) \dot{\varphi}_i^{(t-\Delta t/2)} + \frac{M_i^{(t)} \cdot \Delta t}{I} \right] / \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\beta_R}{I} \cdot \Delta t \right) \end{aligned} \quad (1-2)$$

则 $t+\Delta t$ 时刻的位移为:

$$\begin{cases} x_i^{(t+\Delta t)} = x_i^{(t)} + \dot{x}_i^{(t+\Delta t/2)} \cdot \Delta t \\ \varphi_i^{(t+\Delta t)} = \varphi_i^{(t)} + \dot{\varphi}_i^{(t+\Delta t/2)} \cdot \Delta t \end{cases} \quad (1-3)$$

这样,对于一个颗粒单元,在动态平衡发展的交互作用下,颗粒不断地进行运动和平衡调整,进而引发颗粒间的不平衡力,导致下一时步计算,如此不断调整和循环。

1.5 力—位移关系

PFC 采用动态松弛法,其实质是根据单元体内部的应力变化,对所有单元体的位置进行调整。由颗粒的运动过程可知,颗粒单元不断的运动会产生颗粒间不平衡力的产生。在离散单元法中,采用的是最简单的力—位移关系:两个颗粒单元体之间的相互作用力与接触单元之间的叠合量有关。接触参数求解如图 1-3 所示。

接触力 F_i 可分解为颗粒单元接触面的法向和切向两个矢量的和,即

$$F_i = F_i^n + F_i^s \quad (1-4)$$

法线矢量计算公式为

$$F_i^n = K_n \cdot U^n \cdot n_i \quad (1-5)$$

切向力矢量用增量形式表示,即

$$\Delta F_i^s = -K_s \cdot \Delta U^s \quad (1-6)$$

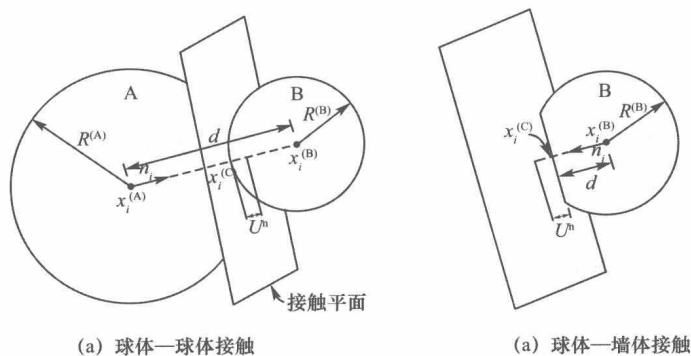


图 1-3 接触参数求解

式中 K_n ——颗粒间的法向刚度；
 K_s ——颗粒间的切线刚度；
 U^n ——颗粒间的法向叠合量；
 U^s ——颗粒间的切线叠合量。

因此，只要确定了单元间的接触法向和叠合距离，接触间的不平衡力便容易求出。

1.6 PFC3D 的特点

PFC3D 不仅能够直接模拟球体颗粒间的相互运动与相互作用，它还可以将任一颗粒与其邻近的颗粒组合成大小不限、形状随意的组合体来模拟块体结构问题。生成的颗粒单元的半径不仅可以均布，还可以按高斯分布随机给定。我们还能够不断地改变球体颗粒的半径从而来调节孔隙率。而且在计算颗粒间的相对位移时，我们可以直接运用坐标来计算而不需要位移增量。

与其他离散元程序相比，PFC3D 存在着如下优点：

1. 有着潜在的高效率。这主要是由于球形物体间的接触模式比角状物体间的要简单不少。
2. 对模拟的位移大小没有限制，因此能够有效地模拟大变形。
3. 由于是通过颗粒之间相互连接及相互运动来模拟材料块，所以这些材料块体能够在遭到破坏时彼此分离，如 HMA 骨料的压碎。
4. 采用显式计算格式，因而计算过程中的所有矩阵数据不用存贮，节省了大量的计算机内存。

1.7 本构模型

接触模型(Contact Constitutive Models)分为刚度模型、滑动模型和粘结模型。刚度模型是在接触力与相对位移之间规定了某种弹性联系；滑动模型是在法向和切向力之间建立的一种有关两个接触球体相互运动的模型；粘结模型则限定了法向力与剪力的合力最大值。

(1) 接触刚度模型(Contact-Stiffness Model)

适用于两个发生接触的实体之间不发生剪切滑移、受拉断裂的情况,也可以说应用于描述集料间的直接相互作用或者描述单元之间无粘结的情况。

接触刚度模型又分为两种:Hertz-Mindlin 模型与线性模型。不过,Hertz-Mindlin 模型的球体跟粘结模型的球体之间因为模型没有定义拉力所以不允许存在接触。而线性模型的球体跟 Hertz-Mindlin 模型的球体之间由于没有定义其行为,所以也不允许发生接触。

① 线性接触模型(The Linear Contact Model)

该模型通过法向跟剪切两方向的刚度来模拟,它通过把两个接触实体的接触刚度串联起来来计算模型的总联合刚度,此时式(1-5)(1-6)中 K_n, K_s 为常数。

② Hertz-Mindlin 模型

该模型是基于 Mindlin 和 Deresiewicz(1953)理论提出的近似的非线性接触公式,其采用了跟法向力有一定关联的初始剪切模量。它只适用于球体单元间的接触问题(这同剪切中的连续的非线性有很大差别)。Hertz-Mindlin 模型涉及两个参数:接触球体间的剪切模量 G 和泊松比。球体跟球体接触时,弹性参数采用平均值;而球体与墙体接触时,可视墙体为刚体,弹性参数只采用球体的。在运用 Hertz 接触模型时,尤其是在条件剧烈改变的情况下,时步一般采用较小的数值系数。

(2) 滑动模型(The Slip Model)

滑动模型是由接触粘结模型在接触实体产生粘结断裂后形成的模型,在这种模型中,允许颗粒在抗剪强度范围内发生滑移,且法向和切向力之间满足库仑摩擦定律,这种模型可用于描述发生滑动时离散单元间的相互作用。

(3) 粘结模型(The Bond Model)

粘结模型是限制总的法向力和切向力,使颗粒在粘结强度范围内发生接触的模型。它包含两种模型:接触粘结模型与平行粘结模型。

由于接触粘结模型是点接触,在接触处只存在拉力;而平行粘结模型则是在有限尺寸(矩形或者圆形截面)上的粘结,不仅存在力,还存在力矩,类似于骨料间的沥青粘接作用。

两种模型能够同时被激活,但是接触粘结不能跟滑动模型同时被激活。粘结不能发生在墙体与颗粒之间,而只能发生在颗粒之间。在缺省的状态下,由于颗粒之间是没有粘结的,所以需自行对创建的接触粘结强度赋值,使用命令“property n_bond”与“property s_bond”。而对平行粘结强度进行赋值时可用命令“property pb_nstrength”与“property pb_sstrength”。当法向力存在且未跟墙体接触时,这些指令就已经使给定范围内所有单元的接触间都建立了粘结关系;如果颗粒相似,则即使没有法向力,两种粘结还是能够在给定的范围内建立。若要删除这两种粘结,只需用上述命令将相应参数赋值为 0 即可。

①接触粘结模型(The Contact-Bond Model)

可以在接触处用带有刚度的弹簧来表示法向及切向两个方向的刚度和强度。

②平行粘结模型(The Parallel-Bond Model)

该模型在使用“set disk”命令之后才能使用。它可以形象地描述为:在接触平面上呈均匀分布的具有法向及切向刚度的一组弹簧来表示。接触处由于粘结材料的相对运动而存在力和力矩,其大小跟粘结边界上的最大法向、切向应力有关。如果任意一个弹簧应力比相应的粘结强度大,即表示平行粘结的状态被破坏了。该模型共用五个参数定义:法向及切向刚度、法向及切向强度及粘结半径。相应命令为“property”的关键字“pb_kn”、“pb_ks”、“pb_nstrength”、“pb_sstrength”、“pb_radius”。

平行粘结模型对沥青混合料是非常实用的模型,它的基本力学关系如图 1-4 所示。

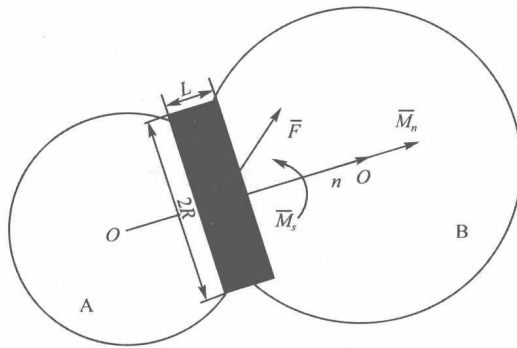


图 1-4 平行粘结模型示意图

平行粘结模型中的合力 \bar{F} 和合力矩 \bar{M} 可分解成法向和切向两部分:

$$\bar{F} = \bar{F}_n + \bar{F}_s$$

$$\bar{M} = \bar{M}_n + \bar{M}_s$$

在平行粘结模型中胶结材料的法向刚度为 \bar{K}_n , 切向刚度为 \bar{K}_s (Pa/m), 粘结面积半径为 \bar{R} 。

当粘结形成时候, \bar{F} 和 \bar{M} 被初始化为零, 在时步 Δt 内, 由接触位移增量产生的接触力法向和切向增量为:

$$\Delta \bar{F}_n = -\bar{K}_n A \Delta u_n \quad (1-7)$$

$$\Delta \bar{F}_s = -\bar{k}_s A \Delta u_s \quad (1-8)$$

式中 $\Delta u_n = (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) n \Delta t$;

$$\Delta u_s = v_s \Delta t;$$

$$v_s = \mathbf{v} - (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n};$$

\mathbf{n} ——接触法向;

\mathbf{v} ——接触相对速度。

转动增量产生的接触力矩法向和切向增量为:

$$\Delta \bar{M}_n = -\bar{K}_s J \Delta \theta_n \quad (1-9)$$

$$\Delta \bar{M}_s = -\bar{K}_s I \Delta \theta_s \quad (1-10)$$

式中 $\Delta\theta_n = (\Delta\theta \cdot n)n$;

$$\Delta\theta_s = \Delta\theta - \Delta\theta_n;$$

$$\Delta\theta = (\omega_A - \omega_B)\Delta t;$$

ω_A 、 ω_B 分别为接触两个球体的角速度矢量。

A 是接触圆盘的面积, J 是圆盘横截面的极惯性矩, I 是圆盘横截面关于方向轴通过接触点的惯性矩, 其表达式为:

$$A = \pi \bar{R}^2$$

$$J = \frac{1}{2} \pi \bar{R}^4$$

$$I = \frac{1}{4} \pi \bar{R}^4$$

在相邻时步接触平面运动过程中, 通过 $t - \Delta t$ 时刻修正的接触剪切力 $\bar{F}_{s,c}$ 和力矩 $\bar{M}_{s,c}$, 得到 t 时刻接触力和力矩:

$$\bar{F}_n(t) = |\bar{F}_n(t - \Delta t)|n + \Delta\bar{F}_n \quad (1-11)$$

$$\bar{F}_s(t) = \bar{F}_{s,c} + \Delta\bar{F}_s \quad (1-12)$$

$$\bar{M}_n(t) = |\bar{M}_n(t - \Delta t)|n + \Delta\bar{M}_n \quad (1-13)$$

$$\bar{M}_s(t) = \bar{M}_{s,c}(t - \Delta t) + \Delta\bar{M}_s \quad (1-14)$$

根据材料力学, 粘结圆盘外围的最大法向应力和切向应力为:

$$\sigma_{\max} = \frac{-\bar{F}_n}{A} + \frac{\bar{M}_s \bar{R}}{I} \quad (1-15)$$

$$\tau_{\max} = \frac{|\bar{F}_s|}{A} + \frac{|\bar{M}_n|}{J} \bar{R} \quad (1-16)$$

令 $\bar{F}_n = \bar{F}_n n$, 则上式为法向力的数值(拉为负, 压为正), 如果最大拉应力达到抗压强度 ($\sigma_{\max} \geq \bar{\sigma}_c$) 或剪切应力大于剪切强度 ($\tau_{\max} \geq \bar{\tau}_c$), 则平行粘结断裂, 接触力和力矩将为零。

(4) 备选模型 (Alternative Models)

可使用命令“MODEL”调用备选模型, 但“MODEL”命令只能够在已经存在的接触上应用, 若是要建立一个新接触, 则要用“fishcall”函数来提供模型。

① 简化粘弹模型 (Simple Viscoelastic Model)

即 Maxwell 模型, 由一个弹簧串联一个粘壶形成的模型, 考虑了最基本的粘弹性。可使用“MODEL viscous”命令调用该模型。

② 简化塑性模型 (Simple Ductile Model)

此模型是接触粘结模型的一个修正版本。它是在接触粘结模型的脆性破坏点处添加一个屈服面而形成的, 使用“MODEL ductile”命令即可调用该模型。

③ 位移—软化模型 (Displacement—Softening Model)

可用命令“MODEL softening”调用该模型。

④ 滞后阻尼模型 (Hysdamp Model)

它是在有摩擦滑动的线性接触模型中引用滞后阻尼并将能量耗散掉的模型。在

“config cppudm”指令后再键入“model load hyswrv. dll”命令,然后就可以用“MODEL hysdamp”命令调用该模型。若 hys_inheritprop 设为 1,即使已经指明切向刚度、法向刚度、摩擦系数、接触剪切强度(Contact Bond Shear Strength)、接触法向强度(Contact Bond Normal Strength),材料模型不再重新设置这些参数值。若 hys_inheritprop 设为 0,要想程序顺利执行则必须设定这些参数(至少要给定法向刚度),否则系统会在循环之前给出错误警示信息。在本模型中对于法向强度的值,其卸载时要比加载时大,且滞后阻尼在接触前后跟各个实体的运动速度无关。通常我们可以预设两个刚度的比值(hys_dampn)来得到一个可测值,譬如恢复系数。总的来说,本模型主要适用于存在相对较大运动的碰撞问题,对于致密颗粒组问题不适用。

⑤ 伯格斯模型(Burger's model)

该模型由麦克斯韦模型(Maxwell)与开尔文模型(Kelvin)串联形成,是典型的粘弹性模型。本模型主要用于模拟蠕变机理(图 1-5),在沥青混合料的模拟中应用最广泛。

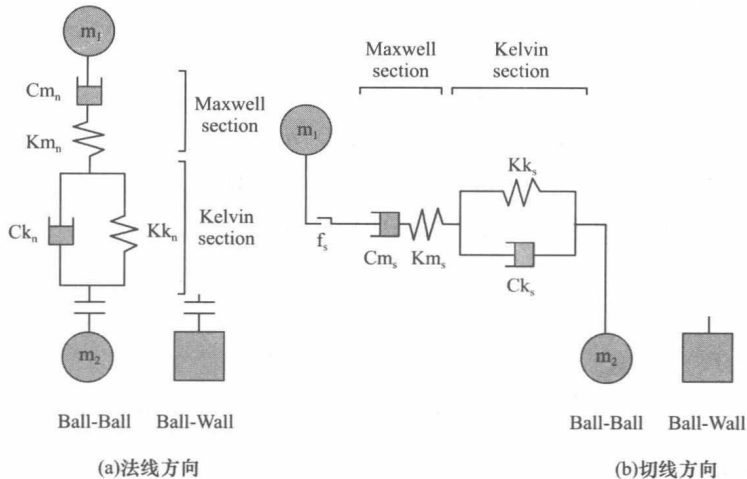


图 1-5 伯格斯模型

⑥ 粘滞阻尼接触模型(Viscous Damping Contact Model)

粘滞阻尼模型也使用了粘滞阻尼并引进了能量耗散。该模型也用于接触—粘结模型,不过最主要还是应用在有摩擦滑动的线性接触模型之中,它跟相对速度有关。

1.8 PFC 重要概念

1.8.1 颗粒(Particle)

PFC3D 可模拟任意大小球形颗粒的集合体的动力学行为,可以自动生成统计学上特定分布形式的颗粒集合,颗粒的半径可以均匀分布(即颗粒半径都相等),也可遵循高斯分布。任何状态下,颗粒的半径都能以任意大小的系数进行膨胀,并由此改变空隙率(porosity,或填充率)的大小。通过膨胀颗粒半径,不用通过反复试验即可得到指定空隙

率的致密填充状态。

PFC3D 对单个颗粒(Particle)或接触(Contact)赋予物性参数,而不是“型数”(Type Numbers)。因此,颗粒物性以及半径可按照指定的方式连续且有梯度地变化。绘图时的颜色也被作为一种物性赋予颗粒,因此用户可以使用更多样化的分类方案(Marking Schemes)。

1.8.2 接触(Contact)

颗粒间的接触是 DEM 中另一个主要的研究对象,PFC3D 软件中提供了多种用于计算颗粒间接触对的接触模型,可参见 1.7 节。

接触也被赋予物性参数,并可以读取和修改。比如,使用粘性阻尼时的粘性系数是赋予接触点的能量耗散系数。

1.8.3 壁面(Wall)

PFC3D 建立的模型中,其边界条件由壁面组成。与颗粒、接触一样,壁面也被赋予物性参数,如法向和切向刚度系数、摩擦系数、颜色编号等。

PFC3D 可生成多种形式的壁面,主要包括:

(1)有限平面,一般是由有限个点连接而成的任意多边形,有限平面在使用时应注意遵从右手法则;

(2)无限平面,指定平面的法向方向以及平面上的一个点,即可生成一个无限大的平面;

(3)圆柱面、圆锥面、圆台面,这些面可以通过使用同一个命令生成,这些回旋面作为一个整体而存在,并不是若干个分割小平面拼接而成的;

(4)其他形式的复杂面,通过 FISH 语言允许用户编写形式更复杂的边界面。

每个壁面有其特有的接触特性。可以指定壁面速度,并可以监测作用于每个壁面的合力和合力矩。颗粒和壁面可以在模拟过程中的任意时刻创建或删除。

1.8.4 时间步长(Timestep)

PFC3D 默认自动确定计算的时间步长。模拟过程中,时间步长随每个颗粒周围的接触数量以及瞬时刚度值而变化。同时还包含由于 Hertz 接触模型产生的刚度系数变化效应。

PFC3D 中也可以使用固定时间步长。PFC3D 自动计算得到的时间步长对于特定问题并不一定是最佳值,自动时间步长为了保证数值稳定性,往往偏保守,致使模拟的计算时间很长。对于特定问题,可以使用比最大自动时间步长更大的合适的固定时间步长值。不过,固定时间步长的选取是经验性的,需要先验证其正确性,太大的步长往往导致颗粒穿透、结果失真等问题。

1.8.5 阻尼 (Damping)

由于 PFC3D 使用动态松弛法,用动态的变化过程逼近静态受力状态,所以必须使用阻尼模型耗散颗粒的动能,使颗粒在合理的迭代步数内达到稳定的运动状态,此处指静止 (Stationary) 或恒稳运动 (Steady Motion)。PFC3D 有三种阻尼模型可选择:粘性阻尼、局部非粘性阻尼和组合阻尼。

(1) 局部非粘性阻尼 (Local Non-viscous Damping)

其被作为一种属性赋予颗粒,局部非粘性阻尼具有以下优点:

- ◆ 稳态运动下的体力为 0 (只在加速运动时有阻尼作用);
- ◆ 阻尼常数是无量纲量;
- ◆ 因为局部阻尼与频率无关,使用相同的阻尼常数时颗粒集合中具有不同自然周期 (自动步长) 的区域受到相同的阻尼作用。

PFC3D 软件默认使用局部非粘性阻尼,阻尼常数为 0.7。局部阻尼适用于大量颗粒的小位移运动,反之则不适用。例如颗粒的自由落体运动,若适用默认的局部阻尼,则始终在颗粒上加载了一个与速度相反、0.7 倍重力大小的阻尼力,与实际物理过程不符合。此时应将局部阻尼常量设为 0,而使用粘性阻尼等其他形式的阻尼模型。

(2) 粘性阻尼 (Viscous Damping)

粘性阻尼模型就是 Cundall 最初提出的弹簧-阻尼器模型。当粘性阻尼模型激活后,在每个接触点将分别增加法向和切向阻尼器,用以耗散法向和切向的动能。

PFC3D 软件中默认使用局部阻尼,粘性阻尼模型默认关闭,只有使用 DAMP 命令激活后才会由粘性阻尼,局部阻尼和粘性阻尼可以同时使用。

(3) 组合阻尼 (Combined Damping)

这种阻尼只有在颗粒速度改变方向时才会被激活。当颗粒做匀速运动或者不做振荡运动时,由于速度矢量与坐标轴没有交点,这时候组合阻尼是不存在的。因此这种阻尼比较适用于振荡运动的能量耗散,不过它的效率比较低,大部分情况下还是推荐使用局部阻尼。

1.8.6 示踪功能

PFC3D 可以开启能量追踪功能,捕捉计算过程中各种能量的变化情况,主要包括:

- ◆ 体积功 (Body Work), 所有体积力对颗粒集合体所做的总功;
- ◆ 键能 (Bond Energy), 平行键 (Parallel Bonds) 内颗粒集合体的总应变能;
- ◆ 边界功 (Boundary Work), 所有壁面对颗粒集合体所做的总功;
- ◆ 摩擦功 (Frictional Work), 所有接触点处因摩擦滑移而耗散的总能量;
- ◆ 动能 (Kinetic Energy), 所有颗粒的总动能;
- ◆ 应变能 (Strain Energy), 所有接触点上的颗粒集合体的总应变能。

除了捕捉能量的变化,PFC3D 还可以针对颗粒集合体内任意数量和任意体积的颗粒,测量其他一些量,主要有: