

文章编号:1671-6833(2009)01-0111-04

## 基于颗粒流程序的沥青混合料颗粒接触模拟

唐 炯<sup>1,2</sup>, 戴经梁<sup>2</sup>

(1. 陕西交通职业技术学院 公路工程系, 陕西 西安 710018; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:** 沥青混合料级配设计时, 通常先初拟级配再进行性能试验确定最优级配的做法, 缺乏科学理论依据。因此, 采用颗粒流的基本理论模拟混合料颗粒的运动规律, 应用颗粒流程序的线性接触模型, 赋予颗粒微观特性参数及模型尺寸, 对 CA0.2、CA0.4、CA0.6 和 CA0.8 级配进行接触模拟, 绘制颗粒接触力网络图, 模拟结果表明, CA0.4 与 CA0.6 的颗粒接触力比较均匀, 该混合料有良好的接触力, 在施工过程中具有良好的稳定性, 不易发生滚动, 而级配 CA0.2 与 CA0.8 的情况则相反。为沥青混合料级配设计提供一定的室内模拟依据。

**关键词:** 颗粒; 沥青混合料; 颗粒接触; 颗粒流; 接触力网络图

**中图分类号:** U 416.217 **文献标识码:** A

### 0 引言

沥青混合料是由不同粒径组成的颗粒状混合物, 在级配设计时, 通常是按照某种方法计算出各筛孔的质量百分比, 采用马歇尔试验, 测定沥青含量、油石比、空隙率等参数, 以确定一种比较好的级配, 再进行路用性能的试验, 然后根据气候条件从中选择一个综合性能较为优良的级配作为目标配合比。要设计出最优性能的沥青混合料, 就必须采用颗粒流的基本理论科学解释混合料颗粒的运动情况, 人们至今对颗粒流机理认识不深, 在很多相关工业部门, 由于输送颗粒材料遭遇的问题所带来的工业设备利用能力的浪费就高达 40%, 远远达不到优化设计和节能的要求<sup>[1]</sup>。作者采用颗粒流的基本理论分析混合料颗粒的运动规律, 通过不同级配的接触模拟, 为沥青混合料设计提供一定的理论依据。

### 1 颗粒流方法的基本理论

#### 1.1 力-位移定律

力-位移定律通过“球-球”与“球-墙”两种接触形式, 把相互接触的力与位移联系起来<sup>[2]</sup>。接触力可以分解为法向分量和切向分量。力-位移定律通过接触处的法向刚度和切向刚度

将接触力的分量与相对位移联系起来<sup>[3]</sup>。对于颗粒-颗粒的接触如图 1 所示; 颗粒-墙体接触的情况如图 2 所示。颗粒-颗粒接触时接触平面的单位法向量  $n_i$  和叠合量表示为

$$n_i = \frac{x_i^{[A]} - x_i^{[B]}}{d} \quad (1)$$

式中:  $x_i^{[A]}$ 、 $x_i^{[B]}$  分别为球 A 和 B 的颗粒中心位置向量;  $d$  为两个颗粒中心的距离;  $n_i$  为  $t - \Delta t/2$  相对应的位置矢量。

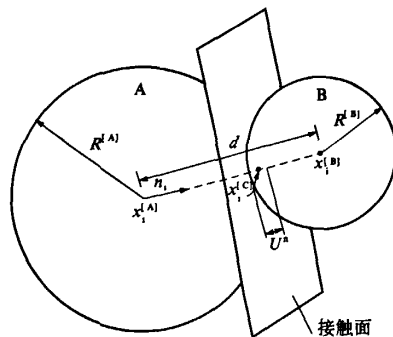


图 1 颗粒与颗粒的接触

Fig. 1 Contact between two particles

对于颗粒与颗粒接触:

$$U^h = R^{[A]} + R^{[B]} - d \quad (2)$$

对于颗粒与墙接触:

收稿日期:2008-09-15; 修订日期:2008-10-30

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划资助项目(90715003)。

作者简介:唐 炯(1974-), 男, 陕西安康人, 副教授, 长安大学博士研究生, 主要从事路基路面研究工作。E-mail:

tangxian2000@163.com

$$U^n = R^{[b]} - d \quad (3)$$

式中:  $U^n$  为接触点叠合量;  $R^{[b]}$  为颗粒  $b$  的半径。

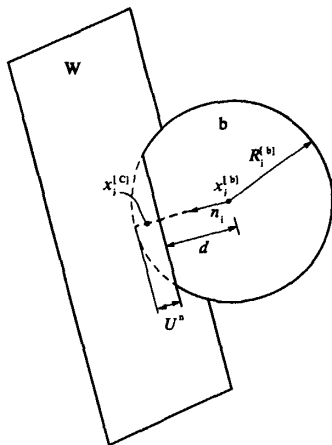


图2 颗粒与墙体的接触

Fig. 2 Contact between particle and wall

接触力  $F_i$  分解为切向与法向分量

$$F_i = F_i^n + F_i^t \quad (4)$$

式中:  $F_i^n$  为法向分量;  $F_i^t$  为切向分量。

法向分量采用式(5)计算:

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

式中:  $n_i$  为接触面单位法向量;  $K_n$  为接触点的法向接触刚度,  $K_n$  根据接触刚度模型计算。

切向接触力以增量的形式计算<sup>[4]</sup>, 当接触形成时, 总切向接触力初始为零, 后面的相对切向位移引起的弹性切向接触力累加到现值上, 通过更新每一时步内法向量  $n_i$  和  $x_i^{[c]}$  接触点来考虑接触的运动, 在接触点处的相对运动或者接触速度  $V_i$  采用式(6)计算:

$$V_i = (\tilde{x}_i^{[\phi^2]} + e_{3k} \tilde{x}_i^{[\phi^1]} (x_k^{[c]} - x_k^{[\phi^2]}) - (\tilde{x}_i^{[\phi^1]} + e_{3k} \tilde{x}_i^{[\phi^2]} (x_k^{[c]} - x_k^{[\phi^1]})) \quad (6)$$

式中:  $\tilde{x}_i^{[\phi^j]}$  为接触体  $\Phi^{[j]}$  的线速度;  $\omega_3^{[\phi^j]}$  为接触体  $\Phi^{[j]}$  的角速度。

接触速度分解为法向分量  $V_i^n$  和切向分量  $V_i^t$ , 切向分量  $V_i^t$  可表示为

$$V_i^t = V_i - V_i^n = V_i - V_i n_i n_i \quad (7)$$

在每一时步  $\Delta t$  内接触位移增量为

$$\Delta U_i^t = V_i^t \Delta t \quad (8)$$

弹性接触力切向增量为

$$\Delta F_i^t = -K_t \Delta U_i^t \quad (9)$$

式中:  $K_t$  为接触点的切向刚度。

通过迭加求出切向接触力分量:

$$F_i^t \leftarrow F_i^t + \Delta F_i^t \quad (10)$$

接触力的合力与合力矩表示为:

$$\begin{cases} F_i^{[\phi^1]} \leftarrow F_i^{[\phi^1]} - F_i \\ F_i^{[\phi^2]} \leftarrow F_i^{[\phi^2]} + F_i \\ M_3^{[\phi^1]} \leftarrow M_3^{[\phi^1]} - e_{3jk} (x_j^{[c]} - x_j^{[\phi^1]}) F_k \\ M_3^{[\phi^2]} \leftarrow M_3^{[\phi^2]} + e_{3jk} (x_j^{[c]} - x_j^{[\phi^2]}) F_k \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $F_i^{[\phi^j]}$  为  $\Phi^j$  接触体上的接触力的迭加;  $M_3^{[\phi^j]}$  为  $\Phi^j$  接触体上接触力矩的迭加;  $x_j^{[c]}$  为接触点位置坐标,  $x_j^{[\phi^j]}$  为  $\Phi^j$  接触体的位置。

## 1.2 运动定律

颗粒运动是合力和合力矩共同作用的结果<sup>[5]</sup>, 运动方程由两组向量方程表示, 一组是合力与线性运动的关系, 另一组是合力矩与旋转运动的关系, 分别表示为

$$F_i = m(\ddot{x} - g_i) \quad \text{线性运动} \quad (12)$$

$$M_i = \ddot{H}_i \quad \text{旋转运动} \quad (13)$$

式中:  $F_i$  为施加于颗粒上的外部合力;  $m$  为颗粒的质量;  $\ddot{x}$  为颗粒的加速度;  $g_i$  为重力加速度;  $M_i$  为合力矩;  $\ddot{H}_i$  为角动量。

## 1.3 边界条件和初始条件

墙体和颗粒的初始条件和边界条件可通过定义 PFC<sup>2D</sup> 程序命令实现, 对于每一墙体, 既可指定线速度又可以用角速度来描述, 墙体的速度由线速度、角速度和旋转中心三个参数控制。对于每一颗粒, 施加的外力或外力矩通过颗粒重心<sup>[6]</sup>。

## 1.4 时步的确定

运动方程的积分是通过中心有限差分法实现, 这些方程积分所得结果, 只有在运行时步不超过关键时时步才是稳定的, 采用简化方法确定关键时步。

## 2 颗粒流的接触本构模型

接触刚度模型提供了接触力和相对位移关系, 它可分为线性接触刚度模型与 Hertz - Mindlin 接触刚度模型, 线性接触模型分析颗粒间接触特性时, 将接触颗粒想象为一梁端点在颗粒中心的弹性梁, 梁端部受力或力矩相当于作用于颗粒的中心。若颗粒 A 和 B 接触, 则梁的半径为:

$$\bar{R} = \frac{R^{[A]} + R^{[B]}}{2} \quad (14)$$

式中:  $R^{[A]}$  为接触颗粒 [A] 的半径;  $R^{[B]}$  为接触颗粒 [B] 的半径。

梁的长度为:

$$L = 2\bar{R} = R^{[A]} + R^{[B]} \quad (15)$$

不同颗粒间、颗粒与墙间的法向接触刚度与

切向接触刚度分别表示为：

$$\begin{cases} K_n = \frac{AE_c}{L} \\ K_t = \frac{12IE_c}{L^3} \end{cases} \quad (16)$$

式中： $E_c$  为接触杨氏模量，不同于材料整体杨氏模量，通常大于整体杨氏模量。

若两球有相同的刚度，则：

$$\begin{cases} K_n = K_n^{[A]} = K_n^{[B]} \\ K_t = K_t^{[A]} = K_t^{[B]} \end{cases} \quad (17)$$

在描述变形微观参数时，先给定颗粒 - 颗粒接触的接触模量，再确定颗粒法向刚度与切向刚度。

3 颗粒流模拟

3.1 颗粒流参数的选取

按贝雷法设计的质量比换算成颗粒数量，颗粒数量、颗粒粒径如表 1 所示，赋予颗粒微观特性参数，颗粒密度为  $2.6 \text{ g/cm}^3$ ，摩擦系数为 0.5，采用线性刚度接触模型，颗粒运算 55 万时步，墙体的法向刚度和切向刚度分别为  $K_n = 2.0 \times 10^{30}$ ， $K_t = 2.0 \times 10^{30}$ ；两个墙体分别用两个线段表示，其坐标为：(0.0,0.0)，(0.5,0.0)；(0.0,0.5)，(0.0,0.0)。颗粒的法向刚度和切向刚度分别为  $K_n = 1.0 \times 10^{30}$ 、 $K_t = 1.0 \times 10^{30}$ ，颗粒的堆积模型尺寸坐标为： $x_l = 0.0$ ， $x_r = 0.2$ ， $y_b = 0.0$ ， $y_t = 0.4$ 。

表 1 不同级配颗粒数量

Tab.1 Particle amount of different gradation

筛孔尺寸 /mm	平均粒度 /mm	单个球体重量 /g	不同混合料级配类型的颗粒数/个			
			CA0.2	CA0.4	CA0.6	CA0.8
16.0~19.0	17.5	7.572 8	1	1	1	1
13.2~16.0	14.6	4.397 4	6	5	3	2
9.5~13.2	11.35	2.066 0	18	14	10	8
4.75~9.5	7.125	0.511 1	46	79	104	123
2.36~4.75	3.555	0.063 5	253	253	253	253
1.18~2.36	1.77	0.007 8	1 437	1 437	1 437	1 437
0.60~1.18	0.89	0.000 996	7 907	7 907	7 907	7 907
0.30~0.60	0.45	0.000 129	44 615	44 615	44 615	44 615
0.15~0.30	0.225	0.000 016 1	188 144	188 144	188 144	188 144
0.075~0.15	0.112 5	0.000 002 01	1 507 025	1 507 025	1 507 025	1 507 025
0~0.075	0.037 5	0.000 000 074 5	101 648 332	101 648 332	101 648 332	101 648 332
模拟混合料质量/g			151.46	151.46	151.46	151.46

3.2 颗粒流模拟结果

把 CA0.2、CA0.4、CA0.6 和 CA0.8 级配运行 55 万时步，颗粒接触力网络如图 3 ~ 图 6 所示。

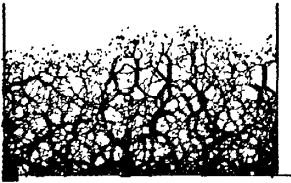


图 3 CA0.2 颗粒间接触力网络图  
Fig.3 Contact network among particles for CA0.2

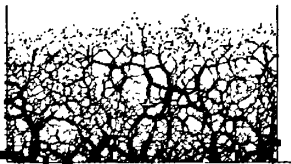


图 4 CA0.4 颗粒间接触力网络图  
Fig.4 Contact network among particles for CA0.4

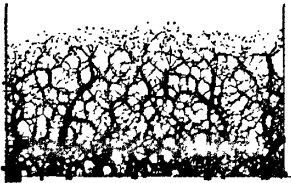


图 5 CA0.6 颗粒间接触力网络图  
Fig.5 Contact network among particles for CA0.6

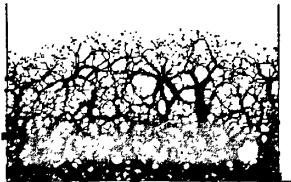


图 6 CA0.8 颗粒间接触力网络图  
Fig.6 Contact network among particles for CA0.8

从图 3 ~ 图 6 颗粒间接触力网络图看出，

CA0.4与CA0.6的颗粒接触力比较均匀,CA0.2与CA0.8的颗粒接触力不均匀,分析认为,当沥青混合料在外力作用时,不论是悬浮结构还是骨架结构,荷载传递的路径总是优先选择大粒径颗粒,粗集料骨架同沥青混合料的高温性能有很好的相关性。当CA值增大时,粗集料往细的方向发展,细集料对粗集料的干涉越来越明显,导致沥青混合料空隙率越来越大,粗集料骨架结构越来越弱,而CA0.2与CA0.8的颗粒接触力密度大,分层明显,该混合料的稳定性较差。

#### 4 结论

在分析了沥青混合料颗粒间运动规律的基础上,采用颗粒程序的线性接触模型,把设计质量比换算成颗粒数量比,赋予颗粒微观特性参数及模型尺寸,对CA0.2、CA0.4、CA0.6和CA0.8级配进行接触模拟,绘制颗粒接触力网络图。结果表明:CA0.4与CA0.6的颗粒接触力比较均匀,该混合料有良好的接触力,混合料在施工过程中具有良好的稳定性。而CA0.2与CA0.8的颗粒接触

力不均匀,混合料在运输和输送过程易发生滚动,稳定性较差,易造成混合料离析。

#### 参考文献:

- [1] 周健,池永,池毓蔚,等.颗粒流方法及PFC2D程序[J].岩土力学,2000,21(3):271-274.
- [2] 吕文江,陈爱文.贝雷法参数CA比对沥青混合料性能的影响[J].长安大学学报:自然科学版,2005:25(4):5-8.
- [3] 曾凡,胡永平,杨毅,等.矿物加工颗粒学[M].徐州:中国矿业大学出版社,2001:208-231.
- [4] 郝培文,徐金枝,周怀治.应用贝雷法进行级配组成设计的关键技术[J].长安大学学报:自然科学版,2004;24(12):1-6.
- [5] Itasca Consulting Group, Inc. Particle flow Code in 2 Dimensions, PFC2d Version 3.0[R]. Minneapolis. 2002:10-68.
- [6] RONG D, MIKAMI T, HORIO M. Particle and bubble movements around tubes immersed in fluidized beds numerical study[J]. Chem. Eng. Sci, 1999, 54(23):5737-5754.

### Simulation of Particle Contact of Asphalt Mixture Based on Particle Flow Code

TANG Xian<sup>1,2</sup>, DAI Jing-liang<sup>1</sup>

(1. Department of Highway Engineering, Shaanxi College of Communication Technology, Xi'an 710018, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** Recently, we firstly calculate initial gradation in the light of traditional experiences, then test their performance, and ascertain the optimum gradation when the gradation of asphalt mixture is designed. It is not a scientific method. So we simulate the particle moving laws of asphalt mixture with basic theory of particle flow code, and determine the microcosmic property parameter and model size with the help of line contact model. We choose line contact model, and microcosmic property parameter and model size. This paper simulates particle contact for CA0.2, CA0.4, CA0.6, CA0.8, draws particle contact force network diagram. Simulating results shows that particle contact force is uniform for CA0.4 and CA0.6, and it holds desired stability. On the contrary, particle contact force is disordered for CA0.2 and CA0.8, the asphalt mixture is easy to roll and causing segregation. It provides simulation basis for gradation design of asphalt mixture indoor test.

**Key words:** particle; asphalt mixture; particle contact; particle flow code; particle contact force network diagram