

文章编号:1005-0523(2018)05-0017-05

基于颗粒流理论的敞车静侧压力研究

何 华,陈兴强,刘春景

(蚌埠学院机械与车辆工程学院,安徽 蚌埠 233030)

摘要: 以往的研究认为,铁路敞车运送散粒体的静侧压力沿散体货物高度是三角形的线性分布,然而计算的结果往往与实际结果不符。随着计算机技术的发展,模拟分析、数值计算成为重要的研究方法。基于颗粒流理论,构建敞车散粒体模型,模拟分析不同容重和不同内摩擦角的散体对敞车静侧压力的影响,将模拟值与库仑力计算值进行比较,验证了模拟分析应用于计算敞车静侧压力的可行性。

关键词: 敞车;颗粒流;侧压力;散体

中图分类号: U272

文献标志码: A

铁路敞车是铁路车辆中一种具有端、侧壁而无车顶的车辆。在我国约有敞车 35 万辆,占货车总量的 56%,运货量占总运货量的 64%。敞车一般是由底架、侧墙、端墙等部件组成,端墙、侧墙与底架牢固的焊接在一起,整个敞车为板梁式侧壁底架共同承载结构^[1]。

敞车主要运输砂土、砾石土、碎煤、水泥及其它粒状和粉状的货物,按物理性质它们介于固体和液体之间,是由均质的颗粒所组成的物体,被称为散粒体或简称散体。散粒货物的侧压力,包括散粒货物的静、动侧压力,是指货物在敞车处于静、动两种状态时,敞车侧、端墙承受着的散体货物侧压力。以往的研究大体认为静侧压力沿散体货物高度是三角形的线性分布;动侧压力沿散体货物高度是均匀分布^[2]。然而随着铁路车辆提速,以及相关运行参数的改变使得按以往标准计算的结果与实际不符。本文用颗粒流法模拟散体对敞车的静压力,得到不同参数对静压力的影响,并把模拟结果和静压力公式计算比较,验证模拟的合理性。

1 理论基础与方法

对于散体货物对敞车的侧压力研究,国内外大多引用土力学中的研究方法,即库仑土压力理论^[3]。也就是当墙面为竖直平面,散体顶面为水平面,并且假设墙的表面为理想光滑,则墙承受的压力为

$$p = \frac{1}{2} \gamma h^2 \tan^2(45^\circ - \frac{1}{2} \phi) \times 9\ 810 \quad (1)$$

式中: p 为作用于单位长度上墙的压力, N/m; γ 为散体容重, kN/m³; h 为散体高度, m; ϕ 为散体的自然坡角, °。

那么散体压强沿墙高就呈线性三角形分布,大小为

$$q = \gamma y \tan^2(45^\circ - \frac{1}{2} \phi) \times 9\ 810 \quad (2)$$

收稿日期:2018-03-31

基金项目:安徽省教育厅重点项目(KJ2017A566);蚌埠学院科学研究项目(2017ZR02)

作者简介:何华(1974—),女,讲师,博士,研究方向为载运工具设计,流体分析,有限元分析。

式中： q 为高度为 γ 处墙承受的压强， N/m^2 ； y 为散体顶面到计算点处的距离， m 。

美国铁道学会 AAR 标准^[4]，前苏联 1987 年修订的规范^[5]以及我国科研工作者王寿长^[6]、洪原山^[7]等都在库仑压力理论的基础上，根据不同工况、不同条件，对库仑理论进行了修正。

这些对库仑理论的修正和在库仑理论上推导出的公式，和库仑理论一样，都是基于一个重要假设，那就是墙后填土在极限平衡状态时的破裂面为一条通过墙趾的直线，从而得到的土压力为线性分布。而众多实验及理论分析表明上述假设不准确。卡岗^[8]在 1960 年发表了《论挡土墙上非线性分布土压力》一文，对墙面竖直、填土表面水平、填土为砂土的挡土墙，采用水平层分析法进行了土压力的计算，得到了土压力沿墙高的分布为非线性曲线的分布，而非通常认为的三角形，其后很多国外学者也证实了这点^[9-10]。我国学者蒋纯秋^[11]、范宝华^[12]、王渭漳^[13]、姚代禄^[14]、曹振民^[15]、张丽娟^[16]等人加以发展，逐渐形成了目前的挡土墙非线性分布理论，比库仑理论更具严密性和合理性。

随着计算机技术的发展，模拟分析、数值计算成为重要的研究方法，许多学者使用有限单元法^[17-18]、颗粒流法^[19]对不同条件下土压力^[20]问题进行了研究。本文基于颗粒流理论，分析研究散粒体对敞车静侧压力的规律。

2 颗粒流法模型建立及计算流程

编制程序生成敞车颗粒流模型。敞车端、侧墙编号如图 1 所示。对本次构建的敞车模型，采用 C62 的原型车。整体在车长、宽、高上分别缩小十倍，车长为 1.25 m，车高为 0.2 m，车宽为 0.3 m。为了可以得到沿墙体高度方向的压力，端墙分为 10 段，每段 0.02 m。在敞车内，随机生成半径在一定范围的颗粒，颗粒处于 $9.8 m/s^2$ 的重力加速度场中，颗粒容重、摩擦系数等参数在程序内给定。墙体刚度和颗粒的法向和切向刚度、半径、数量等可以通过调试来确定。

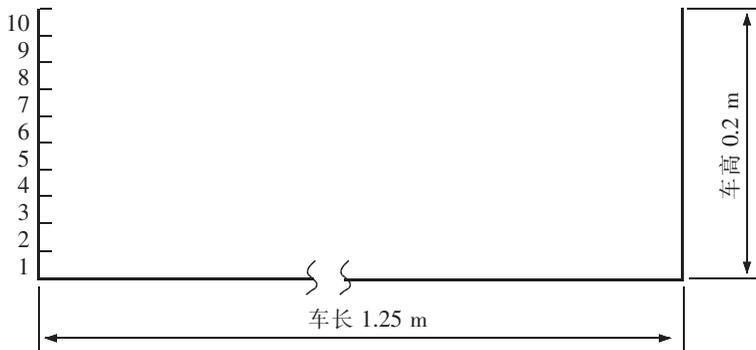


图 1 敞车和墙体模型

Fig.1 Gondola train and the wall model

颗粒流法模拟散体对敞车的静压力就是在颗粒模型生成后，让各颗粒在给定的参数和重力的作用下经过颗粒间的运动达到平衡状态。平衡状态的敞车和散体的颗粒流模型见图 2 所示。然后设定相关参数，运用 PFC 3D 程序中内置的 FISH 语言程序实现计算的自动处理，生成计算结果。

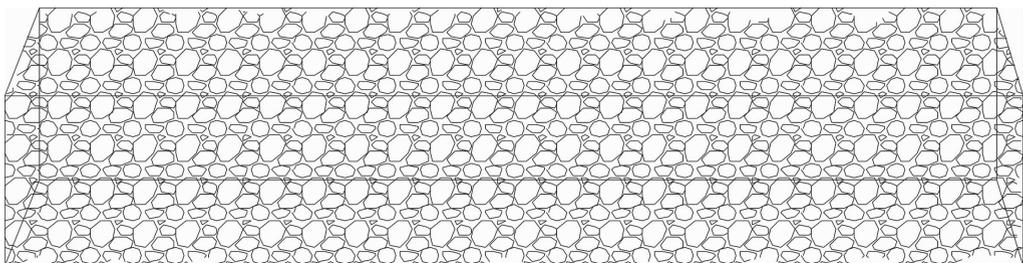


图 2 平衡状态的敞车和散粒货物示意图

Fig.2 Equilibrium-state gondola train and granular goods

3 颗粒流法模拟不同参数对侧压力的影响

3.1 容重对侧压力的影响分析

以小麦、水洗煤、砂石 3 种散体为例,它们的容重分别是 7.95,11,16.3 kN/m³。为了便于比较,假定 3 种货物的内摩擦角均为 30°,敞车与散体的摩擦角均为 5°。

分别将 3 种货物的容重参数输入到程序中,平衡后得到模拟值与各自计算的库仑土压力结果见表 1,比较图结果如图 3 所示。

表 1 3 种货物静平衡时水平受力值和库仑值
Tab.1 The static side pressure values of three different granular goods

敞车墙体编号	模拟值高度测量范围/m	库仑土压力/Pa			模拟计算单位面积上压力/Pa		
		小麦	水洗煤	砂石	小麦	水洗煤	砂石
1	0~0.02	363.5	502.9	745.2	548.6	710.3	961.9
2	0.02~0.04	314.9	435.9	645.3	437.9	563.3	867.3
3	0.04~0.06	266.3	368.7	546.1	403.2	601.2	771.9
4	0.06~0.08	217.8	301.6	446.8	287.9	380.8	548.1
5	0.08~0.10	169.3	234.6	347.1	199.6	222.9	300.2
6	0.10~0.12	120.9	167.4	247.6	172.9	240.1	316.1
7	0.12~0.14	72.68	100.3	148.3	85.83	117.9	99.2
8	0.14~0.16	24.19	33.29	49.52	19.52	15.09	15.01

由表 1 和图 3 可以得到以下结论: ① 墙体所受的静平衡侧压力随着散粒货物容重的增加而增加; ② 墙体所受的静平衡侧压力模拟值与理论库仑值相近,在高度方向上也大体呈三角形分布,但是有波动,这种波动是由于离散元法颗粒与墙接触不连续性所致; ③ 在靠近货物表面部分,墙体所受静压力模拟值小于库仑值,这是由于接近表面处货物没有压紧,处于松散状态,这种松散状态产生的压力小于按高度线性增加的库仑值; ④ 在货物底部,墙体所受静压力模拟值明显大于库仑值,这是由于越靠近底部,货物自身承受压力越大,散粒体间隙越小,不同高度的散粒体容重不同造成的。所以,库仑公式计算静压力进行设计时,安全系数偏小。

3.2 内摩擦角对侧压力的模拟分析

以水洗煤为例,容重为 11 kN/m³,敞车与水洗煤的摩擦角为 5°,假定内摩擦角分别是 20°,30°,40°,将相关参数输入到计算程序中,平衡后得到水平受力值和库仑土压力计算值见表 2,比较结果如图 4 所示。

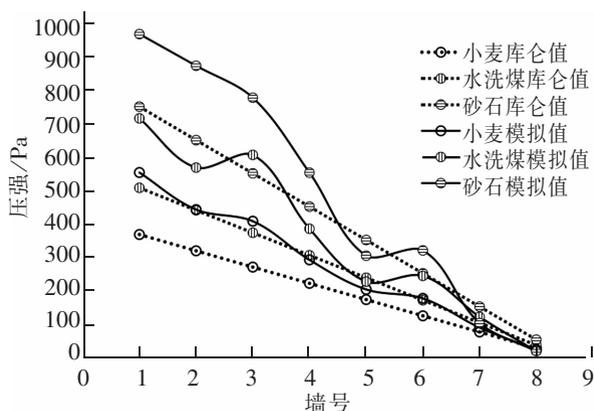


图 3 3 种不同散体库仑值和模拟值比较
Fig.3 Comparison of coulomb value and simulated value of three different granular goods

表2 内摩擦角 20° , 30° , 40° 时水洗煤静平衡时水平受力值
Tab.2 The static side pressure values of washing coal at friction angles of 20° , 30° , 40°

敞车墙体编号	模拟值高度测量范围/m	库仑土压力/Pa			模拟计算单位面积上压力/Pa		
		20°	30°	40°	20°	30°	40°
1	0~0.02	665.9	502.9	343.7	735.3	710.3	697.6
2	0.02~0.04	577.8	435.9	297.6	621.1	563.3	550.1
3	0.04~0.06	489.1	368.7	251.7	612.5	601.2	599.6
4	0.06~0.08	400.2	301.6	205.7	424.1	380.8	374.3
5	0.08~0.10	311.2	234.6	159.7	233.2	222.9	230.6
6	0.10~0.12	221.8	167.4	114.1	211.8	240.1	198.3
7	0.12~0.14	132.1	100.3	67.9	131.1	117.9	94.6
8	0.14~0.16	44.02	33.29	22.06	22.41	15.09	12.1

由表2数值和图4可以得到货物表层和底层的规律与前述一致,都是在货物表层模拟值小于库仑值,在底层模拟值大于库仑值。静压力库仑值随内摩擦角变化而变化明显,模拟值变化不明显,而模拟值和实验数据更接近,这也说明库仑公式可以进行理论计算,但是结果在假定条件下成立,是当假定条件不成立时具有不准确性。

4 结论

通过上述不同容重,不同内摩擦角的单因素影响关系比较可以得出:颗粒流模拟静侧压力近似呈三角形分布,这与库仑土压力规律相吻合;但在数值上,尤其是在墙趾处,模拟值明显大于库仑值,这与不同高度散粒体的压实程度不同有关,也就是说不同高度的散粒体的容重不同,越下面的散粒体容重越大,这个模拟结果与实际情况相吻合,也与实验数值基本相符,验证了颗粒流法用于散粒体对敞车静压力设计计算的可行性。

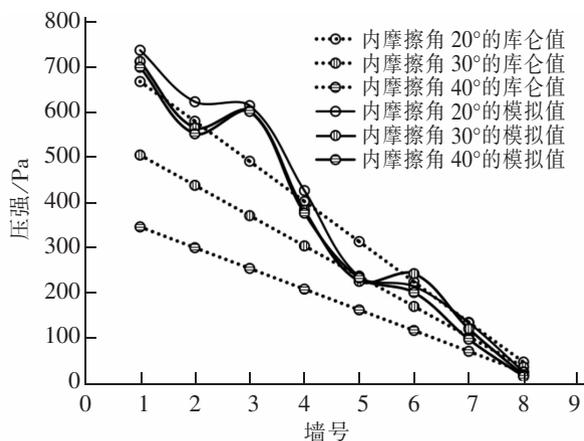


图4 内摩擦角不同的散体库仑值和模拟值比较
Fig.4 Comparison of coulomb value and simulated value of different friction angles

参考文献:

- [1] 严隽毫.车辆工程[M].北京:中国铁道出版社,1992:268-271.
- [2] 顾蔚慈.挡土墙土压力计算[M].北京:中国建材工业出版社,2001:10-129.
- [3] 张可绪.土动力学[M].北京:地震出版社,1989:11-38.
- [4] 铁道部四方车辆研究所. AAR 机务标准手册 C 分册—货车设计制造规范[S].青岛:铁道部四方车辆研究所编印,1986.
- [5] 铁道部科学研究院机车车辆研究所.苏联铁路车辆计算和设计规范及试验方法和技术条件 [S].北京:铁道部科学研究院,1990.
- [6] 王寿长.散粒货物对敞车侧、端墙压力计算的讨论[J].铁道车辆,2001,39(1):17-22.

- [7] 洪原山. 无粘着力散粒装货物的动侧压力[J]. 中国铁道科学, 1983, 4(1): 3-8.
- [8] М Е KARAN. О давлении на подпорную стенку при нелинейном его распределении[J]. Строительная Механика и Расчет Сооружений, 1960: 26-35.
- [9] ЦАРАПЕЛИ З В. Экспериментальное исследование давления сыпучей среды на подпорные стены с вертикальной задней гранью и Горизонтальной поверхностью засыпки[J]. Основания Фундаменты И Механика Грунтов, 1965: 31-37.
- [10] ФилВРОЗЕ Р М. Экспериментальные исследования давления грунта на подпорку[J]. Гидротехническое Строительство, 1967: 43-49.
- [11] 蒋纯秋. 挡土墙上土压力非线性分布解[J]. 土木工程学报, 1964(1): 56-65.
- [12] 范宝华. 摆线弧破裂面法求挡土墙上的土压力 [C]//中国土木工程学会第四届土力学及基础工程学术讨论会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986: 36-45.
- [13] 王渭漳. 粘性土对挡土墙侧压力的非线性分布[J]. 中南公路工程, 1986(2): 30-47.
- [14] 姚代禄. 挡土墙侧压力非线性分布的研究[J]. 重庆交通学院学报, 1984, 3(3): 40-47.
- [15] 曹振民. 挡土墙填土曲线破裂面的主动土压力分析[J]. 中国公路学报, 1995, 8(1): 7-13.
- [16] 张丽娟, 米海珍. 挡土墙填土曲线破裂面的地震主动土压力分析[J]. 建筑科学, 2003, 19(5): 42-45.
- [17] 王泳嘉, 邢纪波. 离散单元法同拉格朗日元法及其在岩土力学中的应用[J]. 岩土力学, 1995, 16(2): 1-14.
- [18] 李世海, 汪远年. 三维离散元计算参数选取方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3642-3651.
- [19] 杜明芳, 张昭, 周健. 筒仓压力及其流态的颗粒流数值模拟[J]. 特种结构, 2004, 21(4): 39-41.
- [20] 方焘, 王海龙, 杨锐锐. 放坡条件下有限土体主动土压力计算[J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(4): 51-55.

Research on Static Side Pressure of Railway Truck Based on Particle Flow Theory

He Hua, Chen Xingqiang, Liu Chunjing

(School of Mechanical and Vehicle Engineering, Bengbu University, Bengbu 233030, China)

Abstract: Previous studies have shown that the static side pressure of the granular goods transported by railway truck is a triangular linear distribution along the height of the loose particles, but the calculated results are often inconsistent with the actual results. With the development of computer technology, simulation analysis and numerical calculation become important research methods. Based on particle flow theory, the model of railway truck granule material was established. The static side pressure of granular goods with different bulk density and different internal friction angle was simulated and analyzed. Then, the simulation value was compared with coulomb force, and the reliability of the simulation results was verified by experiments.

Key words: railway truck; particle flow; side pressure; granule material