

文章编号: 1000-5013(2012)05-0561-04

土楼夯土墙的风驱雨撞击荷载影响分析

张丽, 彭兴黔

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 运用流体力学的相关知识,分析雨滴降落的运动方程,在考虑风速的基础上推算出风驱雨的雨滴撞击荷载,并分析各因素对撞击荷载的影响. 研究表明:雨滴降落的竖直极限速度与雨滴的直径及牵引阻力系数有关,并随着雨滴直径的增大而增大;雨滴的水平极限速度等于风速. 理论分析表明:雨滴的撞击荷载及其法向分荷载、切向分荷载均随着风速和雨滴直径的增大而增大.

关键词: 夯土结构; 阻力系数; 雷诺数; 雨量; 降雨强度

中图分类号: TU 312.1 **文献标志码:** A

福建土楼主要分布在闽西和闽南的龙岩和漳州山区,被誉为中国传统民居的瑰宝. 2008 年,有 6 个楼群和 4 个单体共 46 座福建土楼被正式列入《世界文化遗产名录》. 土楼之所以称为“土”楼,缘于以“土”为特色的墙体,采用不经过焙烧的沙土、粘土和石子经夯筑而成,夯土墙既是土楼的承重结构,也是维护结构,充分体现了土楼的建筑内涵和结构特征. 夯土墙下厚上薄,显得重心低沉,墙体环状构筑,整体性突出,具有良好的抗震、防火和抗风性能. 然而,夯土结构怕水,不耐雨水侵蚀,虽有屋盖遮挡雨水,但由于屋檐外挑长度有限,在风雨交加的气候条件下,受风驱使雨滴会斜向撞击在夯土墙上. 这会导致湿润夯土,劣化材料性能,而且撞击墙壁,对夯土墙产生明显的击溅侵蚀效应,从而降低夯土墙的耐久性,影响结构安全和建筑外观. 雨滴撞击是夯土墙产生风雨侵蚀的主要原因,因此,分析出夯土墙风驱雨的雨滴撞击荷载,对探究夯土墙材料风雨侵蚀机理和计算夯土墙侵蚀度至关重要. 基于此,本文运用流体力学的相关知识,分析了雨滴降落的运动方程,在考虑风速的基础上,推算出风驱雨的雨滴撞击荷载,并分析了各因素对撞击荷载的影响.

1 受风速影响的雨滴降落运动分析

1.1 雨滴降落的运动方程

雨滴自空中下落时,受到空气浮力、空气阻力和风速牵引阻力的作用,真实雨滴的形状和质量都是变化的,要对雨滴运动进行精确的分析相当困难. 国内外已有的雨滴下落运动分析中,大都作了必要的假设,得出了各种条件下的分析结果^[1-4]. 这里,根据流体动力学,列出雨滴的运动轨迹为

$$\left. \begin{aligned} m \frac{dv_x}{dt} &= A_x f_x, \\ m \frac{dv_y}{dt} &= (m - m_a)g - A_x f_x. \end{aligned} \right\} \tag{1}$$

式(1)中: v_x, v_y 分别为雨滴的水平和竖向运动速度; A_x, A_y 分别为雨滴在竖向面和水平面上投影面积,考虑雨滴为球形时, $A_x = A_y = \frac{\pi d^2}{4}$, d 为雨滴直径; m, m_a 分别为雨滴质量和与雨滴同体积的空气质量,

收稿日期: 2012-01-05

通信作者: 彭兴黔(1959-),男,教授,主要从事钢结构抗风抗火的研究. E-mail: pxq@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178196); 福建省科技计划重大项目(2011Y3005); 福建科技计划重点项目(2010Y0037)

$m=\frac{\pi\rho_w d^3}{6},m_a=\frac{\pi\rho_a d^3}{6},\rho_w,\rho_a$ 分别为水和空气的密度; f_x,f_y 为牵引阻力,当雨滴直径在毫米级尺度范围,其阻力与速度平方成正比,则 $f_x=C_d\rho_a\frac{(v_0-v_x)^2}{2},f_y=C_d\rho_a\frac{v_y^2}{2},v_0$ 为平均风速,水平流动, C_d 为阻力系数, $C_d=\frac{24}{Re}+\frac{6}{1+\sqrt{Re}}+0.4,Re$ 为流体雷诺数^[5-7]. 将各参数代入式(1),可得

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv_x}{dt} &= \frac{3}{4d}\frac{\rho_a}{\rho_w}C_d(v_0-v_x)^2, \\ \frac{dv_y}{dt} &= (1-\frac{\rho_a}{\rho_w})g-\frac{3}{4d}\frac{\rho_a}{\rho_w}C_dv_y^2. \end{aligned} \right\}$$

(2)

积分求解式(2),可得

$$\left. \begin{aligned} v_x &= v_0\left[1-\frac{1}{1+\frac{3}{4d}\frac{\rho_a}{\rho_w}C_dv_0t}\right], \\ v_y &= \sqrt{\frac{4d}{3C_d}\frac{(\rho_w}{\rho_a}-1)g}\times\frac{\exp(2t\sqrt{\frac{4d}{3C_d}\frac{(\rho_w}{\rho_a}-1)g}-1})}{\exp(2t\sqrt{\frac{4d}{3C_d}\frac{(\rho_w}{\rho_a}-1)g}+1)}. \end{aligned} \right\}$$

(3)

从式(3)可知,当 $t\rightarrow\infty$ 时, $v_x=v_{sx}\rightarrow v_0,v_y=v_{sy}\rightarrow\sqrt{\frac{4d}{3C_d}(\frac{\rho_w}{\rho_a}-1)g}$. 这表明雨滴水平运动以风速 v_0 为极限速度,竖向降落以 $\sqrt{\frac{4d}{3C_d}(\frac{\rho_w}{\rho_a}-1)g}$ 为极限速度,与雨滴直径有关. 由式(3)可知:极短时间内,雨滴水平和竖向速度趋近于极限速度. 设近地处雨滴与结构撞击前的合速度为 v_s ,则

$$v_s=\sqrt{v_{sx}^2+v_{sy}^2}=\sqrt{v_0^2+\frac{4d}{3C_d}(\frac{\rho_w}{\rho_a}-1)g},$$

(4)

在风驱雨情况下,设近地处雨滴的水平倾角为 α ,有

$$\tan\alpha=\frac{v_{sy}}{v_{sx}}=\sqrt{\frac{4d}{3C_d}(\frac{\rho_w}{\rho_a}-1)}\frac{g}{v_0^2}.$$

(5)

1.2 雨滴的撞击荷载

雨滴与结构撞击^[8-10]后,在很短时间内速度变化为零. 设此撞击持续时间为 τ ,由牛顿第二定律可知,雨滴动量方程为

$$\int_0^\tau p(t)dt=\int_{v_s}^0mdv,$$

(6)

雨滴在 τ 时间内的撞击荷载为

$$F(\tau)=\frac{1}{\tau}\int_0^\tau p(t)dt=\frac{mdv}{\tau},$$

(7)

取撞击时间 $\tau=d/2v_s$,并设雨滴为球形,得

$$F(\tau)=\frac{1}{3}\pi\rho_w d^2v_s^2=\frac{1}{3}\pi\rho_w d^2[v_0^2+\frac{4d}{3C_d}(\frac{\rho_w}{\rho_a}-1)g].$$

(8)

从式(8)可知:雨滴对结构的撞击荷载与其直径、水平风速、阻力系数等有关.

1.3 雨滴撞击荷载沿墙面的分解

土楼沿迎风面的夯土墙所受雨滴撞击荷载作用最为明显,一般情况下雨滴为斜向撞击墙体,其法向和切向撞击荷载对墙体的侵蚀效应不同,应进行雨滴撞击荷载分解.

如图 1 所示,设墙体与竖向夹角为 β ,将雨滴撞击荷载沿迎风面夯土墙的法向和切向分解,可得

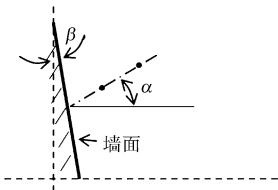


图 1 雨滴撞击示意图

Fig. 1 Raindrop impact diagrams

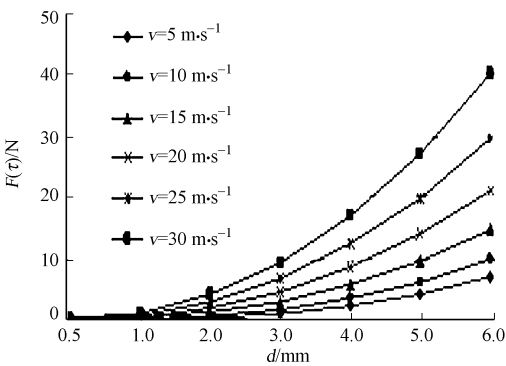
$$\left. \begin{aligned} F(\tau)_n &= F(\tau)\cos(\alpha-\beta), \\ F(\tau)_p &= F(\tau)\sin(\alpha-\beta). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

2 雨滴撞击荷载的影响分析

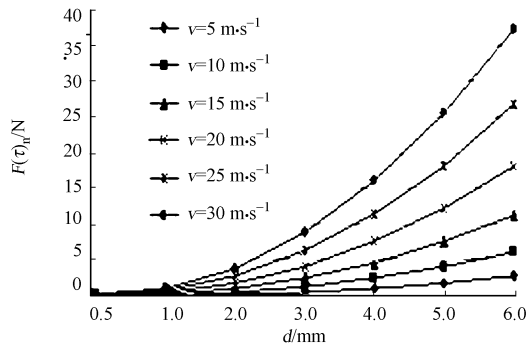
2.1 雨滴直径对雨滴撞击荷载的影响

在风速(v)为 5,10,15,20,25,30 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 状态下,雨滴的撞击荷载($F(\tau)$)及其法向分荷载($F(\tau)_n$)、切向分荷载($F(\tau)_p$)随着雨滴直径(d)的变化曲线,如图 2 所示.

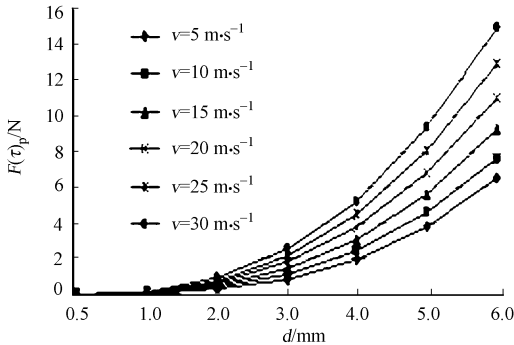
由图 2 可知:在相同的风速作用下,雨滴撞击荷载及其法向分荷载、切向分荷载的变化曲线有相似的规律,均随着



(a) 撞击荷载



(b) 法向分荷载



(c) 切向分荷载

图 2 雨滴撞击荷载随雨滴直径的变化曲线

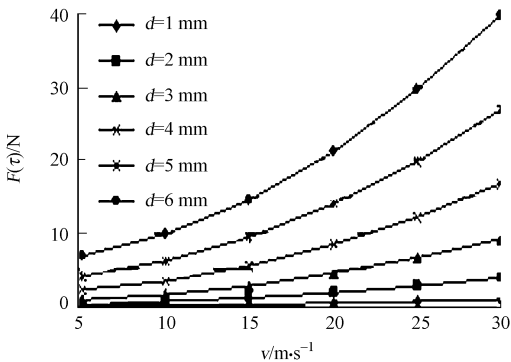
Fig. 2 Curve of Raindrop impact load versus rain diameter

雨滴直径的增大而增大;当风速为 30 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,直径为 6 mm 的雨滴撞击荷载已达到 40 N,雨滴直径对撞击荷载的影响明显.

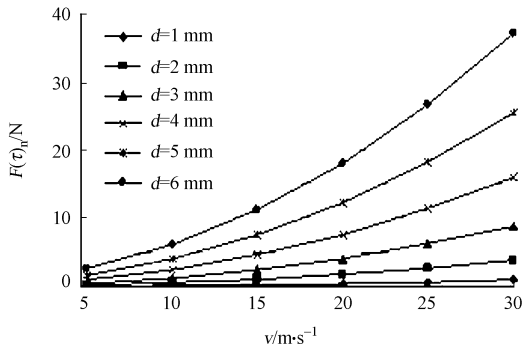
2.2 水平风速对雨滴撞击荷载的影响

在雨滴直径(d)为 1,2,3,4,5,6 mm 情况下,雨滴撞击荷载($F(\tau)$)及其法向分荷载($F(\tau)_n$)、切向分荷载($F(\tau)_p$)随着风速(v)的变化曲线,如图 3 所示.

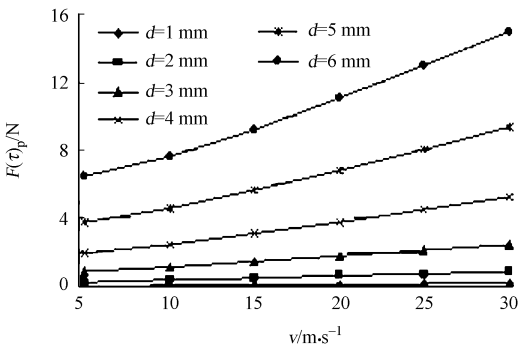
从图 3 可知:风速对雨滴撞击荷载的影响较大,在雨滴直径相同的情况下,雨滴撞击荷载及其法向分荷载、切向分荷载的变化曲线有相似的规律,均随着风速的增大而增大.



(a) 撞击荷载



(b) 法向分荷载



(c) 切向分荷载

图 3 雨滴撞击荷载随风速的变化曲线

Fig. 3 Curve of raindrop impact load versus wind speed

3 结 论

1) 文中通过分析雨滴降落的运动方程,在考虑风速的基础上推算出风驱雨的雨滴撞击荷载. 结果表明:雨滴降落的竖直极限速度与雨滴的直径及牵引阻力系数有关,并随着雨滴直径的增大而增大.

2) 通过一系列理论分析,计算出单个雨滴的撞击的法向荷载与切向荷载,计算了风速和雨滴直径变化下的雨滴撞击荷载,得出其规律性. 可以发现:雨滴的切向分荷载与法向分荷载的大小随风速、雨滴直径的增大而增大.

3) 文中的计算推导是理想状态下的理论分析,然而雨滴在降落中,受到气候、地形等的影响,实际下落速度很难精确计算,需要根据实测数据进行统计分析,得出实用的雨滴下落速度计算公式^[11-12].

参考文献:

[1] 刘雅君. 雨滴下落的收尾速度[J]. 大学物理, 2001, 20(12): 16-17, 27.
[2] 刘俊杰, 周秀芝. 雨滴下落收尾速度的一般讨论[J]. 物理与工程, 2010, 20(5): 17-19, 28.
[3] BLOCKEN B, CARMELIET J. A review of wind-driven rain research in building science[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92(13): 1079-1130.
[4] CHI E C C. Modeling of wind-driven rain and its soil detachment effect on hill slope[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(9): 1081-1097.
[5] WICK K, RUDDICK K. An accurate measurement of g using falling balls[J]. Am J Phys, 1999, 67(11): 962-963.
[6] BEST A B. The size distribution of raindrops quarterly[J]. Journal of the Meteorological Society, 1950, 76(16): 16-36.
[7] MARSHALL J S, PALMER W M. The distribution of raindrops with size[J]. Journal of Meteorology, 1948, 5(4): 165-166.
[8] 任月明. 风雨激励下输电塔线体系的动力响应分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
[9] 刘庆宽, 乔富贵, 杜彦良. 降雨对基本构件气动特性影响的初步研究[J]. 石家庄铁道学院学报: 自然科学版, 2007, 20(4): 14-18.
[10] 陈水福, 吴小平. 低层房屋风雨共同作用荷载的数值模拟研究[C]//第十四届全国结构风工程学术会议论文集. 北京: [出版者不详], 2009: 731-736.
[11] 周伏建, 陈明华, 林福兴, 等. 福建省天然降雨雨滴特性的研究[J]. 水土保持学报, 1995, 9(1): 8-12.
[12] 贡力. 黄土高原降雨雨滴动能的侵蚀计算[J]. 兰州交通大学学报: 自然科学版, 2005, 24(4): 43-45.

Impact Load of Rain Induced Wind on
Rammed Earth Wall of Earth Building

ZHANG Li, PENG Xing-qian

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Using hydromechanics, considering the effect of wind speed, the equation of motion of raindrops was presented to calculate the impact load of rain induced wind, the influence of different factors on the impact load was analyzed. Research results show that the vertical limit speed of the raindrops is related to the diameter of the raindrops and drawing resistance coefficient, and the speed increases with the increase of the diameter of the raindrops; the horizontal speed limit of raindrops is equal to the wind speed. Through a series of theory analysis, it is concluded that raindrop impact load, its normal and tangential component loads increase with the increase of wind speed and the diameter of the raindrops.

Keywords: rammed earth construction; resistance coefficient; reynolds number; rainfall amount; rainfall intensity

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)