

基于拉格朗日体系的典型桥梁断面 风-雨耦合作用数值模拟*

董国朝^{1†}, 张建仁¹, 薛繁荣¹, 蔡春声^{1,2}, 韩艳¹

(1.长沙理工大学 桥梁工程安全控制省部共建教育部重点实验室,湖南 长沙 410114;

2.路易斯安娜州立大学 土木与环境工程系,路易斯安娜 巴吞鲁日 70803)

摘要:对典型桥梁断面风-雨耦合作用下的静三分力进行了CFD(Computational Fluid Dynamics)数值模拟研究.对计算流体动力学软件进行二次开发,采用DPM(Discrete Phase Model)模型结合UDF(User Defined Function)函数施加源项的方法来研究风-雨耦合作用对桥梁断面静三分力系数的影响.将空气作为连续相通过欧拉法求解,采用基于拉格朗日体系的离散相模型对雨滴运动轨迹进行求解,引入离散随机游走模型来考虑旋涡对雨滴运动的影响,并通过冲量定理得到风-雨耦合下的雨滴对主梁断面的冲击载荷.通过与文献结果比较来验证方法的正确性,然后研究了风-雨耦合作用对典型桥梁断面三分力系数的影响,以及三维风-雨耦合作用对典型桥梁断面的作用机理,为研究桥梁风-雨耦合荷载提供了基础理论方法.

关键词:桥梁断面;风-雨耦合;拉格朗日法;数值模拟;大涡模拟

中图分类号:TU375.4

文献标志码:A

Numerical Simulation of Wind-rain Coupling Effect on Typical Bridge Section Based on Lagrangian System

DONG Guochao^{1†}, ZHANG Jianren¹, XUE Fanrong, CAI Chunsheng^{1,2}, HAN Yan¹

(1.Key Laboratory for Safety Control of Bridge Engineering of Ministry of Education and Hunan Province, Changsha University of Science and Technology Changsha 410114, China; 2.Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University, Baton Rouge 70803, USA)

Abstract: The static coefficients of typical bridge section under the wind-rain coupling effect were studied using the numerical simulation by CFD(Computational Fluid Dynamics). Based on secondary development for the computational fluid dynamics software by applying source term, DPM(Discrete Phase Model) model combined with a UDF(User Defined Function) function method was used to study the wind-rain coupling effect on static coefficients of bridge. Meanwhile, Euler method was used to simulate the air phase and Lagrangian method was adopted to simulate the rain with discrete phase model. Impact load on the bridge section was obtained by the impulse theorem. The accuracy of the method was verified by comparing with the existing results in the corresponding literature. The wind-rain coupling effect on the static coefficients of typical bridge section is then studied, and the mechanism research of wind-rain coupling on typical bridge section was realized, which provides a theoretical method for the study of the wind-rain coupling

* 收稿日期:2016-09-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51408061), National Natural Science Foundation of China(51408061); 国家重点基础研究计划(973计划)项目(2015CB057706), Major State Basic Research Development Program of China (973 Program) (2015CB057706)

作者简介:董国朝(1981—),男,广东阳春人,长沙理工大学讲师,博士

† 通讯联系人, E-mail: dgccpu@163.com

load on the bridge.

Key words: bridge section; wind-rain coupling; Lagrangian method; numerical simulation; large eddy simulation

特大型桥梁跨径大、结构柔,风荷载对其结构安全起决定性作用,降雨或风驱雨对桥梁的作用机理和效应也非常复杂。目前,学者们针对斜拉桥拉索、吊杆、输电线^[1-2]等的风-雨耦合作用开展了系列研究,并取得了一定进展,而对桥梁主体结构在风-雨耦合作用下的静三分力的研究甚少。

在桥梁主梁结构风-雨耦合作用研究方面,顾明等^[3]研究了风-雨耦合作用对流线型主梁颤振导数的影响,结果表明降雨对主梁颤振导数的影响可以忽略。辛大波^[4]对风-雨耦合作用下主梁颤振的试验研究显示:中小降雨起到了增大质量、频率和阻尼的作用,提高了颤振稳定性,大雨对颤振性能的影响则具有随机性;降雨对主梁的部分颤振导数有一定影响。葛耀君等^[5]应用节段模型风洞试验比较了雨滴冲击作用模型和空气密度等效变化模型的风雨独立作用静力性能,进行了简单几何形体的风雨定常荷载变化规律和风雨非定常气动力荷载作用及结构响应的研究。Choi^[6]首次采用数值方法研究风驱雨,发展了基于三维稳态风场下计算雨滴轨迹的数值方法,获得了风和雨稳态条件下的建筑表面风驱雨分布;Hangan^[7]利用CFD结果与风洞试验对比,提出了建筑表面雨量冲击影响的数值计算方法;陈水福等^[8]采用数值模拟方法研究了不同风速对雨滴运动轨迹的影响,研究表明,降雨附加荷载值达纯风荷载的30%以上。

本文拟采用数值模拟为主要研究手段,将空气作为连续项通过欧拉法来求解,采用基于拉格朗日体系的离散相模型(DPM模型)求解雨滴运动轨迹,并通过冲量定理来得到风-雨耦合中的雨滴对主梁断面的冲击载荷,从而实现风-雨耦合载荷对矩形断面的作用机理研究,为特大跨桥梁风-雨耦合载荷的计算提供理论基础。

1 离散相模型中颗粒轨迹的计算方法

1.1 雨滴轨迹计算

雨滴轨迹计算的基本思想是将雨滴颗粒相分离成一系列有代表性的独立的颗粒,然后通过求解颗粒运动方程来单独追踪这些颗粒在流场中的运

动轨迹。计算采用如下基本假设:假设水滴颗粒为球形,水滴在下落过程中不考虑热和质量传输计算,忽略颗粒之间的碰撞,只考虑空气与水滴两相之间的耦合计算。

水滴速度的轨迹运动方程为:

$$\frac{dr_p}{dt} = u_p. \quad (1)$$

式中: r_p 是水滴的轨迹; u_p 为水滴的瞬时速度。水滴轨迹可通过对式(1)积分得到。

建立颗粒平衡方程(颗粒惯性力=作用在颗粒上的各种力之和)如式(2)所示,对其积分可得 u_p 。

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x. \quad (2)$$

式中: u 为气体速度; ρ 为空气流体密度; $F_D(u - u_p)$ 为颗粒的单位质量曳力,如式(3)所示;其他的相互作用力(F_x)作为源项加在数值程序中以体现其在特定区域的影响,本文只考虑重力和空气对雨滴颗粒的阻力。

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} \frac{C_D Re}{24}. \quad (3)$$

式中: μ 为流体动力黏性系数; ρ_p 为水滴颗粒密度; D_p 为颗粒直径; Re 为颗粒相雷诺数; C_D 为气流作用于球形液滴的阻力系数,其为水滴雷诺数 Re 的函数,而雷诺数是液滴和空气之间相对速度的函数,见方程(4)(5)。

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2}, Re = \frac{\rho D_p |u_p - u|}{\mu}. \quad (4)$$

轨迹方程通过在离散时间步上逐步积分得到。通过同时求解方程(1)和方程(2)可得到给定时间步下的液滴速度和位置。对于球形颗粒,在一定的 Re 数范围内, a_1, a_2, a_3 为常数,因此 C_D 可改写为:

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + b_1 Re^{b_2}) + \frac{b_3 Re}{b_4 + Re},$$

$$b_1 = \exp(2.33 - 6.46\phi + 2.45\phi^2),$$

$$b_2 = 0.097 + 0.557\phi^2,$$

$$b_3 = \exp(4.91 - 13.89\phi + 18.42\phi^2 - 10.26\phi^3),$$

$$b_4 = \exp(1.47 + 12.26\phi - 20.73\phi^2 + 15.89\phi^3). \quad (5)$$

式中: $\phi = s/S$, s 为与实际颗粒具有相同体积的球形

颗粒的表面积, S 为实际颗粒的表面积.

空气相动量方程中的动量交换采用源项来施加, 通过方程(6)来计算.

$$F = \sum \left(\frac{3}{4} \frac{C_D Re}{\rho_p D_p^2} (u_p - u) + F_{\text{other}} \right) m_{p,0} \Delta t. \quad (6)$$

由于流场中的旋涡会对雨滴的运动产生影响, 因此, 为了考虑湍流旋涡对雨滴颗粒的影响, 计算中引入离散随机游走模型 (Discrete Random Walk (DRW) Model). DRW 模型通过采用随机方法将瞬时湍流脉动速度对粒子轨迹的作用进行计算, 考虑了颗粒与流体的离散涡之间的相互作用.

当给定粒子速度和位置的初始条件后, 粒子与不同的涡会接连地发生相互作用. 每一个旋涡都有一个特征生命周期、长度尺度以及速度尺度, 当旋涡的生命期结束或者粒子已经离开了旋涡的边界时, 粒子与涡的相互作用也随之中止. 同时, 粒子与新的一个旋涡的相互作用随之开始. 确定每个涡团的特征主要包括满足高斯概率分布的随机脉动速度 u' 、 v' 、 w' 和时间尺度 τ_e .

为了能够较好地捕捉旋涡, 本文采用大涡模拟 (Large Eddy Simulation, LES) 湍流模型进行计算. 对于 LES 模型, 速度脉动假设在各个方向上相同, 而涡团的特征生存时间 τ_e 可定义为关于大涡的时间尺度 T_L 的变量:

$$\tau_e = -T_L \log(r). \quad (7)$$

式中: r 为服从在 $(0, 1)$ 区间均匀分布的随机数.

颗粒穿过流体涡团的时间定义为:

$$t_{\text{cross}} = \tau \ln \left[1 - \left(\frac{L_e}{\tau |u - u_p|} \right) \right]. \quad (8)$$

式中: τ 为颗粒松弛时间; L_e 为涡团长度尺度; $|u - u_p|$ 为颗粒与流体的速度差.

1.2 雨滴载荷计算

雨滴的冲击载荷由雨滴与结构表面碰撞产生, 碰撞后的雨滴速度在短时间内变为零, 假设雨滴质量为 m , 碰撞前的末速度为 u_s , 雨滴在碰撞时间 τ 内速度变为零. 由动量定理知:

$$\int_0^\tau f(t) dt = \int_{u_s}^0 m du_p = 0. \quad (9)$$

式中: $f(t)$ 为单个雨滴撞击力. 雨滴在时间 τ 内对结构的撞击力 $F(t)$ 为:

$$F(t) = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau f(t) dt = \frac{m u_s}{\tau}. \quad (10)$$

假设下落雨滴为球体, $m = \rho \pi D_p^3 / 6$, 那么:

$$F(t) = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau f(t) dt = \frac{m u_s}{\tau} = \frac{1}{6\tau} \rho \pi D_p^3 u_s. \quad (11)$$

由于雨滴直径一般在 6 mm 以下, 而撞击结构的末速度比较大, 因此, 假设碰撞时间 $\tau = D_p / u_s$, 式(11)可变化为:

$$F(t) = \frac{1}{6\tau} \rho \pi D_p^3 u_s = \frac{u_s^2}{3D} \rho \pi D_p^3. \quad (12)$$

1.3 雨滴参数及下落影响因素

雨滴末速度决定了雨滴对桥梁结构的冲击大小, 是风-雨耦合计算的关键之一. 影响雨滴末速度的因素主要有雨滴大小、雨滴降落高度以及来流风速. 雨滴在风-雨耦合条件下的末速度可以分解为竖向速度与水平速度的合速度.

对于竖向速度, 雨滴在静止的空气中加速垂直下落, 受到重力、浮力、空气阻力的共同作用, 随着下落速度的增加, 雨滴受到的阻力会以近平方的倍数增加, 最终雨滴受力平衡后达到终点速度. 大自然中直径大于 5.4 mm 的雨滴在空中降落时不稳定, 在未达到终点速度之前就已破裂为直径小的雨滴. 姚文艺等^[9]提出了雨滴直径在 $1 \text{ mm} \leq d \leq 6 \text{ mm}$ 时单个雨滴的末速度经验公式为:

$$u_s = 0.894(1 - 0.6d) \sqrt{g \cdot d} - 4.117. \quad (13)$$

雨滴的水平运动主要受到水平方向风的驱动而产生, Barthazy 等^[10]在试验中认为雨滴的水平速度等于水平风速. 在本文计算中, 同样假设雨滴的水平速度等于当地的水平风速.

大自然中的雨滴直径一般分布在 0.1~6 mm 之间, 本文通过等效直径来描述雨滴大小分布. 雨滴直径采用表 1 方法进行等效, 而雨滴分布规律按照 Best^[11]描述的方法输入.

表 1 等效雨滴直径

Tab.1 Equivalent droplet diameter mm			
等效直径	等效范围	等效直径	等效范围
1.0	0~1.25	3.0	2.75~3.25
1.5	1.25~1.75	3.5	3.25~3.75
2.0	1.75~2.25	4.0	3.75~4.50
2.5	2.25~2.75	4.5	4.50~6.00

2 降雨 CFD 模拟

本节首先采用前文所提方法对一个空流域的雨滴下落过程进行模拟, 通过与相关文献结果比较, 验证本文方法的正确性.

2.1 计算流域

计算流域为 230 m(长)×14.4 m(宽)×52 m(高),如图 1 所示.顶部降雨面与地面的高度大于 20 m(雨滴到达均匀速度所需最小高度),雨滴完全可以达到受力平衡后的自由下落末速度.周围边界条件均为滑移壁面,地面为无滑移壁面;同时,雨滴的直径固定为 2.5 mm.

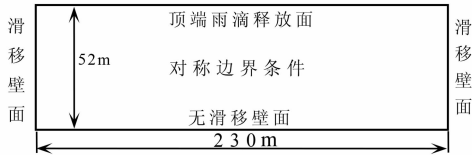


图 1 计算域及边界条件

Fig.1 Calculation domain and boundary conditions

2.2 计算结果

图 2 中雨滴下落末速度图显示:雨滴从顶部进入流场,在重力的作用下不断加速,最终达到平衡状态的末速度,雨滴颗粒的末速度主要分布在 7.6~7.8 m/s 之间,与文献[9]计算所得结果 7.78 m/s 吻合,验证了本文计算方法的正确性.

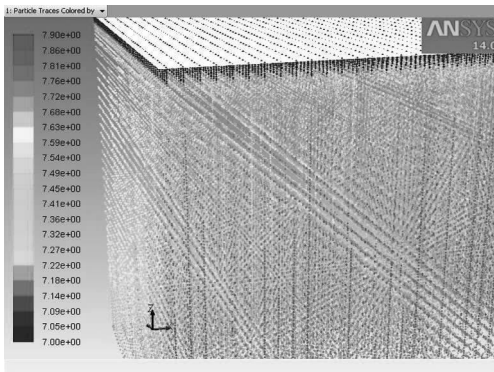


图 2 雨滴下落末速度图

Fig.2 Terminal velocity of the falling raindrops

3 典型桥梁断面三维风-雨耦合作用数值模拟研究

本节以典型桥梁断面矩形截面为研究对象,分别探讨了不同风攻角和湍流强度风场下风-雨耦合作用对矩形断面三分力的影响.

3.1 工况说明

计算风速为 10 m/s,降雨强度 50 mm/h 下的不同工况分别为:1) 5%湍流度下攻角为 0°、±15°、±6°五个工况;2) 0°攻角下湍流度分别为 5%、10%、15%和 20%四个工况,LES 入口边界中的湍

流脉动生成方法采用文献[12]所提出的方法实现.

3.2 计算几何参数

矩形桥梁断面尺寸为 30.8 m(长)×14.4 m(宽)×2.4 m(高).计算域的尺寸及边界条件如图 3 所示,计算域满足 5%阻塞比.计算采用大涡模拟湍流模型,本文网格在壁面的无量纲高度 Y+ 值在 1 附近,严格满足此要求以保证精度.

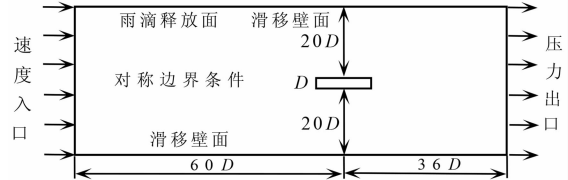


图 3 典型桥梁断面计算边界条件

Fig.3 Boundary conditions of typical bridge section

计算时间步为 0.05 s,入口风速为 10 m/s;考虑降雨量为 50 mm/h,雨滴输入采用前文所提的等效雨滴直径输入.为了减少计算量,在顶部固定区域注入雨滴,雨滴施加面及网格如图 4 所示.

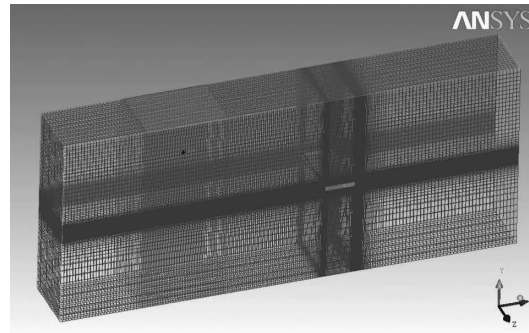


图 4 网格图以及顶端雨滴释放面图

Fig.4 Grid and releasing surface of rain

3.3 风-雨耦合下的三分力结果分析

3.3.1 风攻角对三分力系数的影响

各攻角下的三分力系数见表 2 至表 6.

表 2 0°攻角下风-雨耦合作用下的三分力系数

Tab.2 The aerodynamic coefficients of coupling effects of wind and rain under the 0° wind attack angle

荷载	三分力系数		
	C_d	C_l	C_m
风	1.06	-0.05	0.028
风-雨作用	1.09	-0.051	0.027
雨作用/风作用	2.83%	2.42%	3.91%

表3 -6°攻角下风-雨耦合作用的三分力系数

Tab.3 The aerodynamic coefficients of coupling effects of wind and rain under the -6° wind attack angle

荷载	三分力系数		
	C_d	C_l	C_m
风	1.445	-0.37	0.027 1
风-雨作用	1.487	-0.38	0.027 5
雨作用/风作用	2.9%	2.68%	1.48%

表4 6°攻角下风-雨耦合作用的三分力系数

Tab.4 The aerodynamic coefficients of coupling effects of wind and rain under the 6° wind attack angle

荷载	三分力系数		
	C_d	C_l	C_m
风	1.413	0.398 9	-0.028 0
风-雨作用	1.451	0.386 9	-0.028 7
雨作用/风作用	2.69%	3.01%	2.50%

表5 -15°攻角下风-雨耦合作用的三分力系数

Tab.5 The aerodynamic coefficients of coupling effects of wind and rain under the -15° wind attack angle

荷载	三分力系数		
	C_d	C_l	C_m
风	1.776	-0.758	0.163 1
风-雨作用	1.822	-0.783	0.166 2
雨作用/风作用	2.59%	3.30%	1.90%

表6 15°攻角下风-雨耦合作用的三分力系数

Tab.6 The aerodynamic coefficients of coupling effects of wind and rain under the 15° wind attack angle

荷载	三分力系数		
	C_d	C_l	C_m
风	1.791	0.794	-0.165 9
风-雨作用	1.831	0.779	-0.161 4
雨作用/风作用	2.23%	1.89%	2.71%

各攻角下的三分力系数结果表明:在不同的风攻角下,三分力系数在无雨与有雨下变化不大,表明风-雨耦合作用下,雨滴的冲击载荷对断面的三分力系数贡献较小.对于阻力系数,在-6°攻角下出现贡献比例最大值为2.9%;对于升力系数,在-15°攻角下出现贡献比例最大值为3.3%;对于扭矩系数,在0°攻角下出现贡献比例最大值为3.91%.图5至图7给出了0°攻角下矩形断面的压力分布以及周围流场情况.

图8表明:在DRW模型的作用下,雨滴随着旋涡运动,并且能分辨明显涡街.在远离矩形截面的地方,雨滴的水平速度值基本上分布在10 m/s周围,此结果也验证了其他学者的一致结论:在有横向风情况下的雨滴下落过程,雨滴由于在水平方向受到

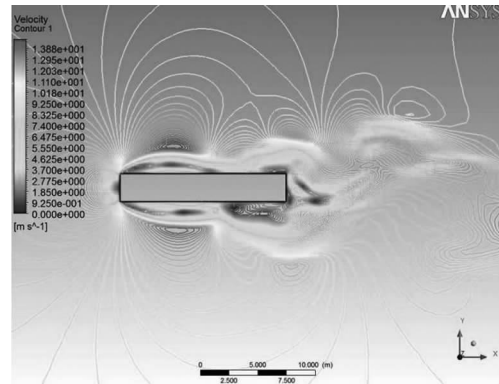


图5 中面速度等值线图

Fig.5 Velocity contour of middle surface

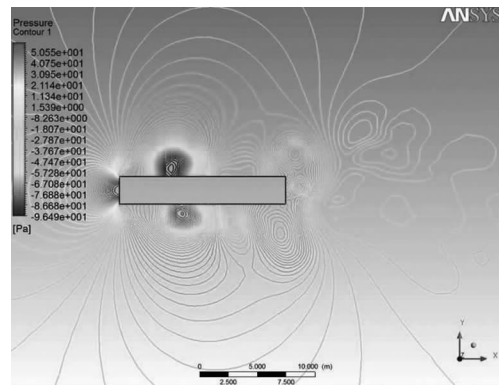


图6 中面压力等值线图

Fig.6 Pressure contour of middle surface

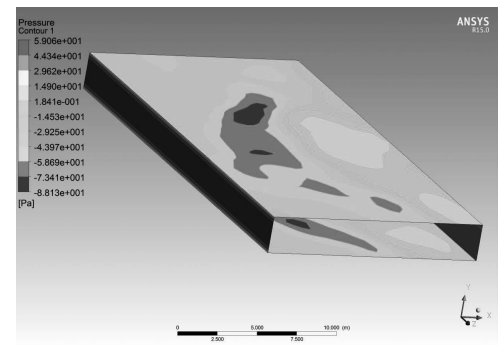


图7 矩形截面压力等值线图

Fig.7 Pressure contour of rectangle section

空气黏滞力作用,雨滴水平速度近似等于水平风速.此结论再一次证明了本文计算方法的正确性.

依据动量定理,雨滴末速度按7.78 m/s计算,降雨强度为50 mm/h时矩形断面上单位长度受到的雨滴水平冲击力约为4.62 N,而通过公式计算无降雨时的单位长度气动阻力为155.82 N($= 0.5 \rho u^2 C_d H = 0.5 \times 1.225 \times 102 \times 1.06 \times 2.4$ N),因此,雨滴水平冲击力对三分力的贡献率约为2.96%,与数值模拟结果2.83%基本一致.将本文数值计算结

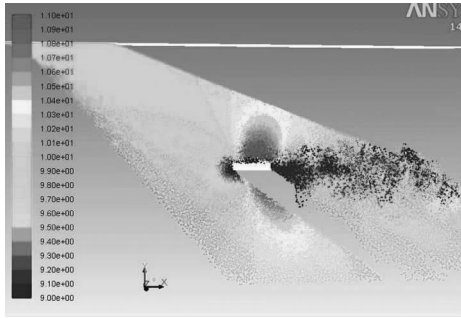


图 8 雨滴水平方向速度整体分布图

Fig.8 Horizontal velocity distribution of rain

果与以往文献比较可知,文献[13]中试验结果显示雨滴冲击力对三分力的贡献率为 3%,而文献[14]总结出最不利工况下的结果为 2.63%,本文数值计算结果与文献结果一致,进一步验证了本文计算方法的正确性,同时也论证了雨滴对阻力系数的贡献率较小,基本可以忽略。

3.3.2 湍流度对三分力系数的影响

表 7 至表 10 分别列出了大涡模拟计算所得的不同湍流强度(5%,10%,15%,20%)工况下矩形断面 0°攻角的平均三分力系数值。

表 7 湍流度为 5%的风-雨耦合作用三分力系数

Tab.7 The aerodynamic coefficients of coupling effects of wind and rain under 5% turbulence intensity

荷载	三分力系数		
	C_d	C_l	C_m
风	1.060 0	-0.050 0	0.028 1
风-雨作用	1.090 0	-0.051 2	0.027 0
雨作用/风作用	2.83%	2.42%	3.91%

表 8 湍流度为 10%风-雨耦合作用的三分力系数

Tab.8 The aerodynamic coefficients of coupling effects of wind and rain under 10% turbulence intensity

荷载	三分力系数		
	C_d	C_l	C_m
风	0.978 0	-0.020 6	0.006 7
风-雨作用	1.006 4	-0.022 1	0.005 6
雨作用/风作用	2.90%	7.28%	16.42%

表 9 湍流度为 15%风-雨耦合作用的三分力系数

Tab.9 The aerodynamic coefficients of coupling effects of wind and rain under 15% turbulence intensity

荷载	三分力系数		
	C_d	C_l	C_m
风	0.979 0	-0.032 0	0.015 4
风-雨作用	1.014 0	-0.035 0	0.012 4
雨作用/风作用	3.58%	9.4%	19.48%

表 10 湍流度为 20%风-雨耦合作用的三分力系数

Tab.10 The aerodynamic coefficients of coupling effects of wind and rain under 20% turbulence intensity

荷载	三分力系数		
	C_d	C_l	C_m
风	0.994 0	-0.006 0	0.020 4
风-雨作用	1.024 0	-0.006 5	0.015 0
雨作用/风作用	3.02%	8.30%	26.47%

由以上结果可知:在各种湍流度下,雨载荷在风-雨耦合中的贡献较小.对于阻力系数,在 15%的湍流度来流时出现贡献比例最大值为 3.58%;对于升力系数,在 15%的湍流度来流时出现贡献比例最大值为 9.4%;对于扭矩系数,在 20%的湍流度来流时出现贡献比例最大值为 26.47%.由数据可发现雨载荷对于升力系数以及扭矩系数影响相对比较大,主要是因为 0°攻角时的三分力系数相对较小,一个微小量就会引起较大的贡献值变动,但是从数据分析中可发现,雨载荷贡献绝对量相对较小。

4 结 论

本文在计算流体动力学软件的基础上进行二次开发,实现了基于欧拉-拉格朗日方法的三维风-雨耦合的数值模拟,并对三维风-雨耦合作用下典型桥梁断面的三分力进行了研究,为研究桥梁风-雨耦合荷载提供了基础理论方法,结论如下:

1)在不同的风攻角下,雨载荷在风-雨耦合中的贡献较小,降雨对三分力系数的影响无显著变化,大攻角($\pm 15^\circ$)下雨的冲击对模型三分力系数的影响依旧较小,在 5%以内。

2)在各种湍流度下,雨载荷在风-雨耦合中的贡献较小.雨载荷对于升力系数以及扭矩系数影响相对较大,主要是因为 0°攻角时的三分力系数相对较小,一个微小量就会引起较大的贡献值变动,但是从数据分析中可发现,雨载荷贡献绝对量相对较小。

参考文献

[1] 杜运兴,卢心龙.输电塔线体系风致覆冰脱落动力响应的研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2015,42(11): 88-94.
DU Yunxing, LU Xinlong. Research on dynamic response of wind-induced ice-shedding of transmission tower-line system [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42 (11): 88-94. (In Chinese)

[2] 李寿英,顾明,陈政清.运动水线三维连续弹性拉索风雨激振理论模型[J].湖南大学学报:自然科学版,2009,36(2): 1-7.
LI Shouying, GU Ming, CHEN Zhengqing. An analytical model

- of rain-wind-induced vibration of three-dimensional continuous stay cable with actual moving rivulet[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2009, 36(2): 1-7. (In Chinese)
- [3] 顾明, 许树壮. 风雨共同作用下平板模型的气动导数试验研究[J]. *土木工程学报*, 2004, 37(10): 73-77.
GU Ming, XU Shuzhuang. An experimental study on the flutter derivatives of a thin plate model subjected to wind and rain[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2004, 37(10): 73-77. (In Chinese)
- [4] 辛大波. 桥梁风雨致颤振稳定性分析及边界层控制方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学土木工程学院, 2008: 12-40.
XIN Dabo. Windrain induced flutter stability analysis and boundary layer control methods of bridges[D]. Harbin: School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 2008: 12-40. (In Chinese)
- [5] 葛耀君, 赵林, 许林汕, 等. 风雨共同作用下结构荷载与响应的理论分析及试验研究[C]//第十四届全国结构风工程学术会议论文集. 北京: 人民交通出版社, 2009: 187-196.
GE Yaojun, ZHAO Lin, XU Linshan, *et al.* Theoretical analysis and experimental study on structural load and response under the action of wind and rain[C]//Proceedings of the 14th National Conference on Structural Wind Engineering. Beijing: China Communications Press, 2009: 187-196. (In Chinese)
- [6] CHOI E C C. Simulation of wind driven rain around a building[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1993, 46/47: 721-729.
- [7] HANGAN H. Wind-driven rain studies. A C-FD-E approach[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1999, 81(1/3): 323-331.
- [8] 陈水福, 孙炳楠, 唐锦春. 建筑表面风压的三维数值模拟[J]. *工程力学*, 1997, 14(4): 38-43.
CHEN Shuifu, SUN Bingnan, TANG Jinchun. Three dimensional numerical simulation of wind pressures on buildings[J]. *Engineering Mechanics*, 1997, 14(4): 38-43. (In Chinese)
- [9] 姚文艺, 陈国祥. 雨滴降落速度及终速公式[J]. *河海大学学报*, 1993, 21(3): 21-27.
YAO Wenyi, CHEN Guoxiang. Calculation formula of rain drop fall velocity[J]. *Journal of Hohai University*, 1993, 21(3): 21-27. (In Chinese)
- [10] BARTHAZY E, GOKE S, SCHEFOLD R, *et al.* An optical array instrument for shape and fall velocity measurements of hydrometeors[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2004, 21(9): 1400-1416.
- [11] BEST A C. The size distribution of raindrops[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1950, 76: 16-36.
- [12] 沈炼, 韩艳, 蔡春声, 等. 基于谐波合成法的大涡模拟脉动风场生成方法研究[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2015, 42(11): 64-71.
SHEN Lian, HAN Yan, CAI Chunsheng, *et al.* Research on generating method of fluctuating wind field of LES base on WAWS[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2015, 42(11): 64-71. (In Chinese)
- [13] 雷旭. 大跨度桥梁柔细构件风(雨)作用及其振动控制研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2016: 57-68.
LEI Xu. Study about wind (rain) effects and vibration control of flexible structural members in long-span bridge[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2016: 57-68. (In Chinese)
- [14] 赵林, 葛耀君, 武占科, 等. 风雨耦合环境结构荷载与响应的分析及试验研究[J]. *振动工程学报*, 2014, 27(4): 507-517.
ZHAO Lin, GE Yaojun, WU Zhanke, *et al.* Theoretic and testing investigation of wind-rain coupling loads on bridges and structures[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2014, 27(4): 507-517. (In Chinese)