

文章编号:1673-2049(2018)01-0066-11

风雨耦合作用下桥梁主梁静力三分力系数研究

雷 旭^{1,2}, 陈政清², 华旭刚², 牛华伟², 何宏明¹, 聂 铭¹, 谢文平¹

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080;

2. 湖南大学 风工程试验研究中心, 湖南 长沙 410082)

摘要:针对风雨耦合作用下桥梁主梁的静力三分力变化问题,首先对降雨特性做了简要介绍,然后对降雨引起的空气密度改变、降雨对结构的冲击力及简化计算模型、结构表面积水厚度进行了分析。最后以 4 类典型主梁断面为例,进行了不同雨强下节段模型静力三分力测试。结果表明:降雨引起空气密度改变很小,即使雨强达到 $300 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,改变量不超过 1%;雨强达到上述超强暴雨时,结构竖向冲击力仅为 0.67 Pa,同样雨强且风速为 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,水平冲击力约为 100 Pa,占同等风速下纯风作用力的 6.5%,而且其随风速的增长率要远小于风作用力的增长率;随着雨强的增大,主梁升力系数明显减小,小风时可达到无雨时的数倍,扭矩系数无规律变化,阻力系数有所增大但比例十分有限;随着风速增大,降雨的影响会相对弱化;试验结果验证了通过质量加权平均简化后的雨滴冲击力计算公式的正确性。

关键词:桥梁工程;主梁;风雨耦合作用;冲击力;水膜厚度;静力三分力系数

中图分类号: TU311

文献标志码: A

Study on Static Three Component Force Coefficients of Bridge Main Girder Under Coupling Effect of Rain and Wind

LEI Xu^{1,2}, CHEN Zheng-qing², HUA Xu-gang², NIU Hua-wei²,
HE Hong-ming¹, NIE Ming¹, XIE Wen-ping¹

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co. Ltd., Guangzhou 510080, Guangdong, China;

2. Wind Engineering Research Center, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

Abstract: Aiming at the problem that bridge girder's static three component force coefficients change during wind driving rain, the authors firstly made a brief introduction about the characteristics of rainfall. Then the change of air density, the impact of rainfall on the structure and its simplified calculation mode, the surface water thickness were discussed. Finally, according to the wind tunnel tests of four typical main girder sections, the three component force tests of segmental model under different rain intensities were implemented. The results show that rain causes a small change in air density, even if the intensity of the rain is $300 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, the amount of change is not more than 1%. When the rain intensity reaches the above super heavy rain, the vertical impact force of the structure is only 0.67 Pa, when the wind speed is $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, and under the same rain intensity, the horizontal impact force is about 100 Pa, it is 6.5% of the wind force, and its increase rate with the wind speed is far less than that of wind force. The lift coefficient decreases with the increase of rainfall intensity, it can be several times

收稿日期:2017-07-01

基金项目:“十二五”交通运输重大科技专项项目(2011 318 824 140);中国南方电网有限责任公司科技项目(GDKJQQ20153010)

作者简介:雷 旭(1986-),男,湖南南县人,工学博士,博士后,E-mail:414972139@qq.com.

than the values without rainfall in weak wind, change of torque coefficient is not regular, the resistance coefficient is increased but the proportion is very limited, accompany with the wind velocity's increasing, rainfall influence will relatively die down composed with the wind load. In addition, test results verify the correctness of impact force calculation method simplified by mass weighting method.

Key words: bridge engineering; main girder; coupling effect of rain and wind; impact force; water film thickness; static three component force coefficient

0 引言

随着桥梁跨度的不断增大,主梁渐趋轻柔化,极端风气候下的主梁静风失稳问题将更为突出。目前,纯风作用下引起主梁失稳的静力三分力研究已相对成熟^[1],但实际工程中大风一般伴随着降雨,结构将另外受到降雨的作用和影响,其必须引起重视。近些年已有研究者对风雨耦合作用下的结构静力三分力系数变化进行了有益探索,Cao 等^[2-3]为了研究降雨对飞机失速的影响,通过理论分析、数值模拟以及风洞试验等探讨了强降雨对飞机降落前的附加作用,指出降雨会明显降低飞机的升力,增大其阻力。Blocken 等^[4-5]详细归纳了风驱雨对建筑结构迎风面作用的研究现状,给出了风驱雨强度的经验公式,指出降雨条件下建筑迎风面压力相比无雨时明显增大,并给出了压力分布规律。吴小平等^[6-7]分别对低矮房屋和输电塔线体系的风驱雨静力响应进行了数值模拟,结果表明雨强超过 $200 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,建筑风雨荷载相比无雨时增加了 30% 以上,输电塔结构相比无雨时的水平位移增量超过 15%。桥梁主梁断面形状与飞机机翼差异较大,而且其与建筑结构不同,不能仅考虑迎风面阻力,风雨耦合对于桥梁主梁三分力的影响目前还少有研究^[8-12]。本文从降雨特性入手,通过理论和试验分析,研究了风雨耦合对于桥梁主梁三分力系数的影响,从而为大跨桥梁主梁抗风精细化分析提供一定的参考。

1 降雨特性概述

目前一般认为自然界雨滴为球形且雨滴谱服从 M-P 分布^[13],基于这一模型,单位体积内直径为 D 的雨滴数 $N(D)$ 为

$$N(D) = N_0 e^{-\lambda D} \quad (1)$$

式中: N_0 为浓度参数, $N_0 = 8\ 000$; λ 为尺度参数, $\lambda = 4.1 I^{-0.21}$, I 为竖向雨强。

因此,单位体积空气的含水量 W_L 计算公式为

$$W_L = \int_0^{+\infty} N_0 e^{-\lambda D} \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2}\right)^3 \rho_r dD = 0.088\ 94 I^{0.84} \quad (2)$$

式中: ρ_r 为水的密度。

直径为 D 的雨滴下落的竖向速度和水平速度可以按下式计算^[14]

$$v_r(D) = 9.58 [1 - \exp(-(D/1.77)^{1.147})] \quad (3)$$

$$u_r(D) = \kappa U \quad (4)$$

式中: $v_r(D)$, $u_r(D)$ 分别为 D 粒径雨滴的竖向速度和水平速度; U 为结构物处的风速; κ 为雨滴水平速度修正系数^[15]。

2 降雨对结构静力响应影响理论分析

降雨对结构的作用体现在改变空气密度、对结构的冲击以及表面积水 3 个方面。

2.1 降雨对空气密度的影响

假设空气密度为 $1.225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 并认为雨滴均匀分布于空气中, 依据式(2)可得到不同雨强时单位体积空气含水量, 以及相比无雨时雨滴弥散引起的空气密度增大率, 如图 1 所示。

从图 1 可以看出, 即使雨强达到 $300 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 雨滴弥散引起的空气密度增大率也仅为 0.87%, 因此可以认为降雨对空气密度的改变忽略不计。

2.2 雨滴冲击力分析及简化计算模型

雨滴冲击作用相当复杂, 难以精确计算, 一般假设雨滴与结构接触后不发生溅射和分离, 而且最终速度完全和结构物本身速度一致。单个雨滴冲击作用见图 2, 其中 v_{rs} 为雨滴冲击合速度, A 为单个雨滴作用面积, t 为作用时间, t_0 为等效作用时间。假设冲击力随时间按正(余)弦规律变化, 按照冲量相等原则将作用时间 t 等效为以最大冲击力为作用力的等效作用时间 t_0 , 按照动量定理可得到单个雨滴冲击力 F_r 计算公式, 即

$$F_r = \frac{m_r v_{rs}}{t_0} = \frac{1}{6} \rho_r \pi D^3 \frac{v_{rs}}{t_0} \quad (5)$$

式中: m_r 为雨滴质量。

若要使如图 2(b)所示的正弦波面积和矩形面

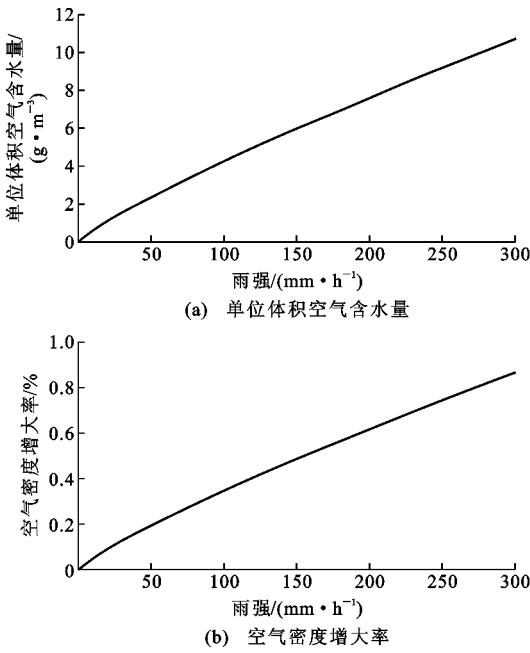


图1 雨强与含水量、空气密度增大率的关系
Fig. 1 Relationships of Rainfall Intensity and Water Content, Increasing Rate of Air Density

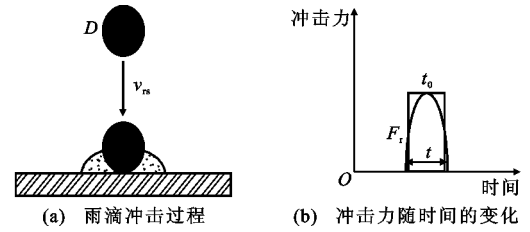


图2 单个雨滴的冲击作用模型
Fig. 2 Impact Model of Single Raindrop

积(幅值为 F_r)相等,则

$$F_r t_0 = \int_0^t F_r \sin\left(\frac{\pi}{t}\tau\right) d\tau = F_r \left[-\cos\left(\frac{\pi}{t}\tau\right) / \left(\frac{\pi}{t}\right)\right]_0^t \quad (6)$$

式中: τ 为雨滴冲击过程的积分时间变量。

将式(6)代入式(5)中并结合 $t=D/v_{rs}$ (近似假设从接触结构至完全散开历经路程为直径 D , 因雨滴粒径一般不超过 5 mm, 此过程极短, 可认为其保持匀速 v_{rs} , 故得 $t=D/v_{rs}$), 单个雨滴的冲击力 F_r 为

$$F_r = \frac{1}{12} \rho_r \pi^2 D^2 v_{rs}^2 \quad (7)$$

假设单个雨滴的作用面积 $A=0.25\pi D^2$, 雨滴在单位体积空气中的体积占有率 $\alpha=1/6\pi D^3 n$ (n 为单位体积空气中直径为 D 的雨滴数量), 雨滴速度和雨滴粒径的关系按公式(3)计算, 其中水平速度对风速的修正系数按文献[15]中的最不利情况取值 ($\kappa=1.9$), 那么可以得到落到结构单位面积上的

雨滴冲击力 F_{rA} 为

$$F_{rA} = \int_{D_1}^{D_2} N_0 e^{-\lambda D} \frac{\alpha}{An} \frac{1}{12} \rho_r \pi^2 D^2 v_{rs}^2 dD \quad (8)$$

式中: D_2, D_1 分别为积分选取的雨滴粒径上、下限。

运用公式(8)可计算结构表面单位面积的雨滴冲击力随雨强和风速的变化, 如图 3 所示。通过对图 3 中雨滴冲击力的分析发现: 即使雨强达到超强暴雨时($300 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$), 其单位面积的竖向冲击力仅为 0.67 Pa , 几乎可忽略; 对于结构单位面积的雨滴水平(顺风向)冲击力, 当雨强为 $300 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 且风速为 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 其值约为 100 Pa , 只占同等风速下纯风作用力的 6.5% , 冲击力随风速增加而增长的速率要远小于纯风作用。

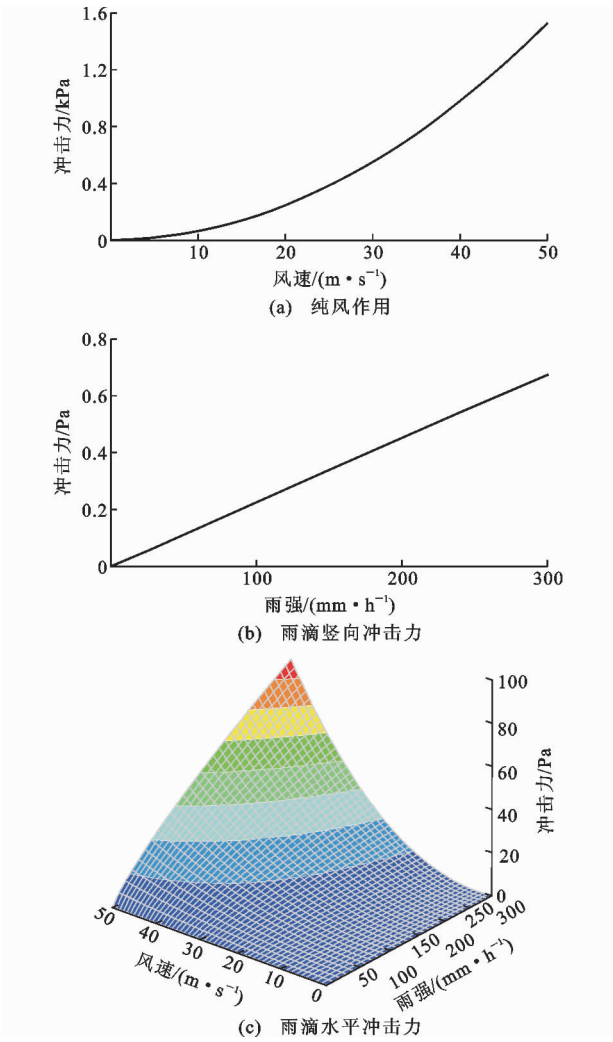


图3 结构表面单位面积纯风作用和雨滴冲击力
Fig. 3 Wind and Rain Impact Forces of Structure Surface Unit Area

上述理论公式运算复杂, 不利于工程分析, 可以按照单位体积空气含水量和雨滴冲击力一致的原则将其等效为单一粒径(等效雨滴粒径), 等效原则表

述为

$$\left. \begin{aligned} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2} \right)^3 \rho_r dD &= n_0 \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D_0}{2} \right)^3 \rho_r \\ \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) \frac{1}{18} \rho_r \pi^2 D^3 (v_r(D)^2 + u_r(D)^2) dD &= \\ n_0 \frac{1}{18} \rho_r \pi^2 D_0^3 v_{rs0}^2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: n_0 , D_0 , v_{rs0} 分别为单位体积空气等效雨滴数量、等效粒径和与其对应的等效速度。

上述方程组无显式解,运算复杂,也不便于工程分析,实际计算时可采用高阶矩等效方法,即

$$D_0 = \int_0^{+\infty} D^{n+1} N(D) dD / \int_0^{+\infty} D^n N(D) dD = \frac{n+1}{\lambda} \quad (10)$$

式(10)代表雨滴粒径的 $n+1$ 阶等效。目前一般采用 4 阶矩等效方法(质量加权平均法)来计算等效雨滴粒径 D_0 ,根据含水量一致的原则计算单位体积空气等效雨滴数量 n_0 ,即

$$D_0 = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} m_r(D) DN(D) dD / \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} m_r(D) N(D) dD \quad (11)$$

$$n_0 = 6W_L / (\pi D_0^3 \rho_r) \quad (12)$$

积分限取 $0 \sim +\infty$,由 $m_r(D) = \rho_r \pi D^3 / 6$ 得到按雨滴质量加权平均的等效粒径为

$$\begin{aligned} D_0 &= \int_0^{+\infty} D^4 N(D) dD / \int_0^{+\infty} D^3 N(D) dD = \\ &\frac{4}{\lambda} = 0.98 I^{0.21} \end{aligned} \quad (13)$$

根据等效雨滴粒径和雨滴数量,可以得到结构表面单位面积的雨滴竖向冲击力 F_{rAv} 为

$$F_{rAv} = \frac{1}{18} \rho_r \pi^2 D_0^3 v_{r0}^2 n_0 \quad (14)$$

式中: v_{r0} 为质量加权等效后的雨滴竖向速度。

计算水平冲击力 F_{rAu} 时,用水平速度 u_{r0} 替代式(14)中的 v_{r0} 即可。

得出等效雨滴粒径后,依据动量定理也可计算结构表面单位面积的雨滴竖向冲击力,即

$$F_{rAv} = v_{r0} \tau n_0 m_r v_{r0} / \tau = \frac{1}{6} n_0 \rho_r \pi D_0^3 v_{r0}^2 \quad (15)$$

同理,用水平速度 u_{r0} 替代 v_{r0} 即可得 F_{rAu} 。

式(15)计算结果比式(14)略微要小,其原因是式(14)将雨滴冲击看成连续作用,因此对时间估计略微偏大,图 4 给出了按照质量加权平均法得到的等效雨滴粒径和雨滴数量与雨强的关系。

值得注意的是由各阶矩等效雨滴的计算方式并结合公式(12),(14),(15)可知: nD^3 为常量,随着阶

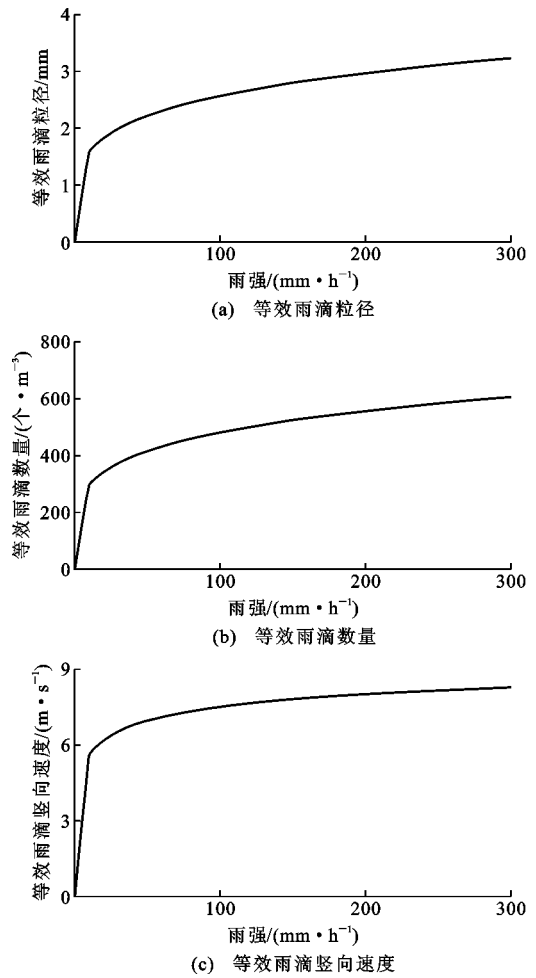


图 4 等效雨滴粒径、等效雨滴数量以及等效速度随雨强的变化规律

Fig. 4 Change Rules of Equivalent Particle Size, Equivalent Number and Equivalent Vertical Velocity of Raindrops with Rainfall Intensity

次的提高,等效雨滴的粒径增加,其竖向冲击速度增加从而使得等效的单位面积竖向冲击力增大,而水平速度仅与风速相关,因此其冲击力不因等效阶次的变化而发生改变。

图 5 给出了等效雨滴冲击力计算公式(14),(15)以及理论积分计算公式(8)的对比结果。由图 5 可知:就雨滴竖向冲击力而言,相比 3 阶和 5 阶矩等效方法,4 阶矩等效(质量加权平均)简化模型在偏保守的前提下与理论值更加吻合。质量加权等效方法得到的竖向和水平冲击力相比理论值最大相对误差仅分别为 8% 和 -4% 左右,其估算精度相对较高,由此证明上述等效方法是合理可行的。

基于质量加权的雨滴粒径等效方法,进一步分析风雨耦合作用下主梁断面雨滴冲击力。以矩形断面为例,风雨耦合作用下雨滴作用于结构物如图 6

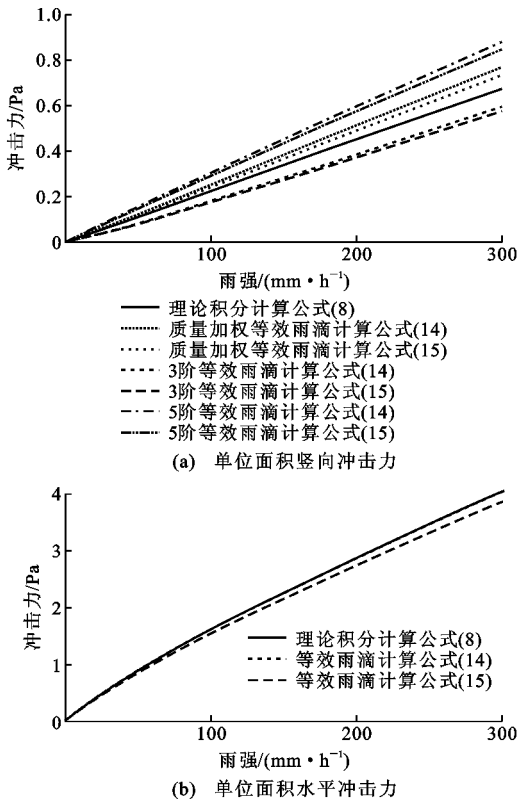


图5 等效雨滴冲击力对比

Fig. 5 Comparisons of Equivalent Impact Forces of Raindrops

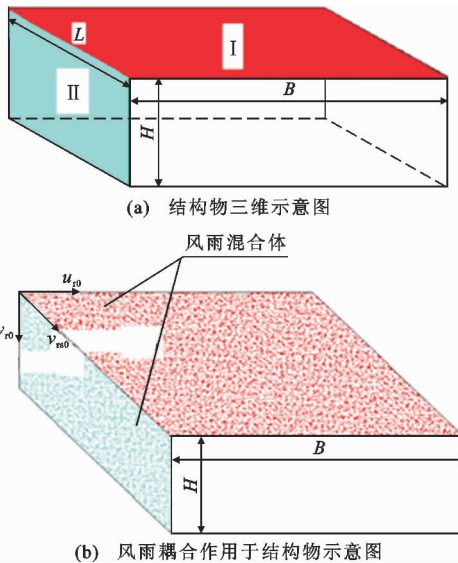


图6 雨滴作用于结构物示意图

Fig. 6 Schematic Diagram of Raindrops Impacting on Structure

所示。

图6中的Ⅰ区和Ⅱ区分别为上迎风面和侧迎风面。假定等效雨滴粒径为 D_0 ，其单位体积内的等效雨滴数为 n_0 ，则在时间 τ 内，落在Ⅰ区和Ⅱ区粒径为 D_0 的雨滴数量 N 为

$$N = (LHu_{r0} + LBv_{r0})\tau n_0 \quad (16)$$

式中： L, B, H 分别为矩形的长度、宽度和高度。

雨滴的竖向动量 P_{rv} 为

$$P_{rv} = \rho_r \frac{\pi}{6} D_0^3 v_{r0} \quad (17)$$

用水平速度 u_{r0} 替代式(17)中 v_{r0} 即可得水平动量 P_{ru} 。应用动量定理，在时间 τ 内Ⅰ区和Ⅱ区的雨滴总动量等于平均荷载的冲量，即可得雨滴竖向冲量表达式为

$$F_{rv}\tau = (LHu_{r0} + LBv_{r0})\tau n_0 \rho_r \frac{\pi}{6} D_0^3 v_{r0} = (LHu_{r0} + LBv_{r0})W_L \tau v_{r0} \quad (18)$$

将式(18)两边消去 τ ，则可得升力 F_{rv} 为

$$F_{rv} = (LHu_{r0} + LBv_{r0})W_L v_{r0} \quad (19)$$

将式(18)中括号外的竖向速度 v_{r0} 用水平速度 u_{r0} 替代即可获得相应的阻力 F_{ru} 表达式。

2.3 结构物表面积水模型

降雨打击在结构表面会形成复杂的产汇流现象，如图7(a)所示。

雨水经过蒸发、溅射和下渗后的剩余部分会在结构表面形成径流，其为一种高度非线性且时空分布不均匀的过程，结构表面的浅层径流受雨强、坡面长度和坡度、径流地形、雨滴打击、结构粗糙度等因素影响，难以估算准确。对于桥梁主梁，若不考虑其附属构件对水流的阻碍，可作为单宽一维自由排水断面^[16]，即坡度不变，沿长度方向的排水状态一致且水流从坡角无阻碍自由流出，如图7(b)所示。因水的表面张力有限，坡面上的积水不会无限增长，如图7(c)所示。季天剑^[16]通过试验和理论分析得到了路面单宽一维自由排水断面的积水厚度回归公式(20)，即

$$H_r = 0.125 \cdot 8l^{0.6715} S^{-0.3147} I^{0.7786} T_D^{0.7261} \quad (20)$$

式中： H_r 为水膜厚度； l 为坡面排水长度； S 为坡度，路面坡度一般为2%左右； T_D 为坡面构造深度，对于公路路面一般取为0.1 mm。

式(20)为目前与实际吻合较好的估算公式。由式(20)可知： H_r 随 l, I, T_D 的增大而增大，随 S 的增大而减小。假设横坡坡度取2%，雨强达到300 mm · h⁻¹，排水长度为50 m，构造深度取1 mm，在这种极端情况时，水膜厚度仅为20 mm左右，其与3~4 m的主梁高度相比不足0.6%，而且雨水的高流动低黏性决定了其厚度不能无限增大，故雨膜对实际主梁外形影响可忽略。对于排水设施复杂或者雍水严重的主梁表面水膜厚度须根据实际情况予以

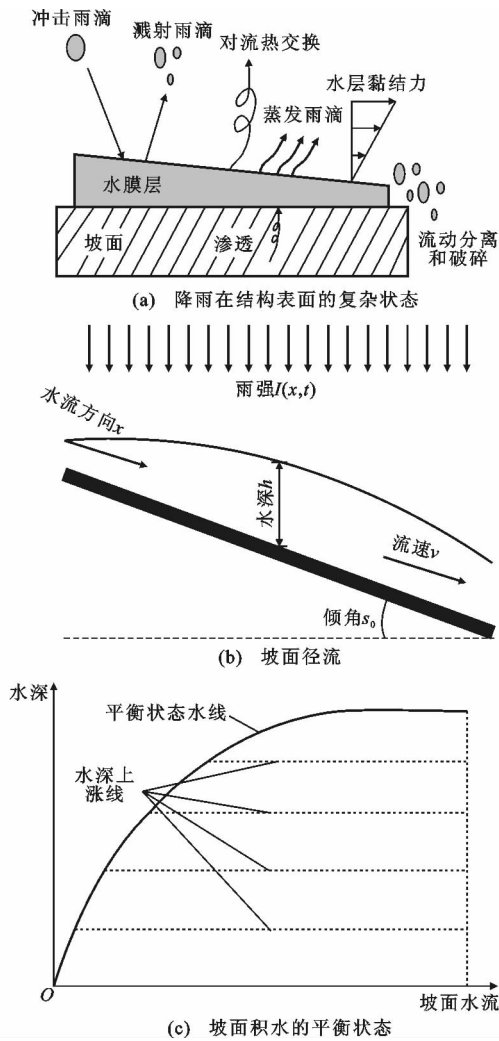


图 7 坡面积水示意图

Fig. 7 Schematic Diagram of Slope Area Water

特殊考虑。

2.4 降雨对主梁风致静力三分力的影响

对于有诸多附属设施的主梁断面,须在公式(18)中以修正系数方式考虑其影响,另外表面积水引起的附加竖向力也须加以考虑。风雨耦合静力作用如图 8 所示,其中 F_{rm} 为积水重力。

由图 8 及前文推导可得降雨引起的风轴坐标系下的阻力 F_{ru} 的表达式为

$$F_{ru} = L(\mu_H H u_{r0} + \mu_B B v_{r0}) W_L u_{r0} \quad (21)$$

式中: μ_H 为阻力面积修正系数,其值可近似取为所有附属设施和主梁主体断面在风轴坐标系下竖向投影之和与主体断面在风轴坐标系下竖向投影之和的比值; μ_B 为升力面积修正系数,其值可近似取为所有附属设施和主梁主体断面在风轴坐标系下水平投影之和与主体断面在风轴坐标系下水平投影之和的比值。

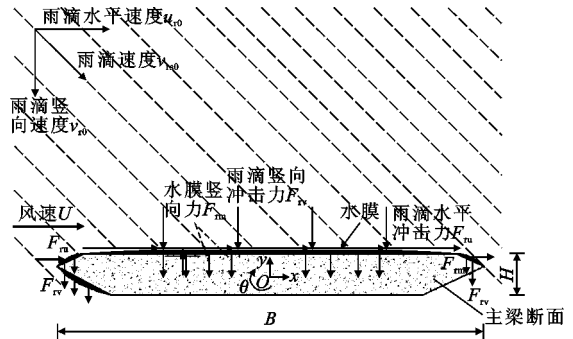


图 8 风雨耦合静力作用

Fig. 8 Static Coupling Effect of Rain and Wind

对于单宽一维自由排水的主梁断面,降雨引起的风轴坐标系下的升力 F_{rv} 表示为

$$F_{rv} = L(\mu_H u_{r0} + \mu_B B v_{r0}) W_L v_{r0} + \rho_r g \sum_{k=1}^n H_{rk} L_k B_k \quad (22)$$

式中: n 为主梁表面的单宽自由排水断面数; g 为重力加速度; H_{rk} , L_k , B_k 分别为第 k 个主梁受雨坡面的积水厚度、跨长和坡面宽度。

假设物体的质心在几何中心位置,因此降雨引起的附加扭矩 M_{rT0} 为

$$M_{rT0} = \int_{-B/2}^{B/2} [F_{rv}(x) + F_{rm}(x)] x dx + \int_{-H/2}^{H/2} F_{ru}(y) y dy \quad (23)$$

式中: x , y 为积分变量。

由于扭转运动会造成降雨在结构表面作用的复杂变化,因此难以计算其影响。

为考察降雨对主梁断面的作用,以某一自由排水的矩形断面为研究对象(图 9),以断面中轴线为界,分为左右 2 个完全一致的单宽自由排水断面。雨滴水平速度修正系数 κ 取极端值($\kappa=1.9$),路面构造深度 T_D 取为 0.1 mm,积水厚度按照公式(20)计算,阻力系数 C_D 取为 0.8,升力系数 C_L 取为 0.1。

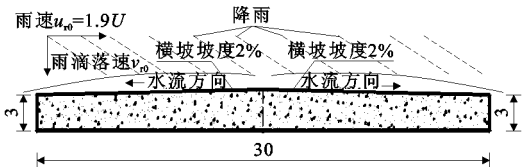
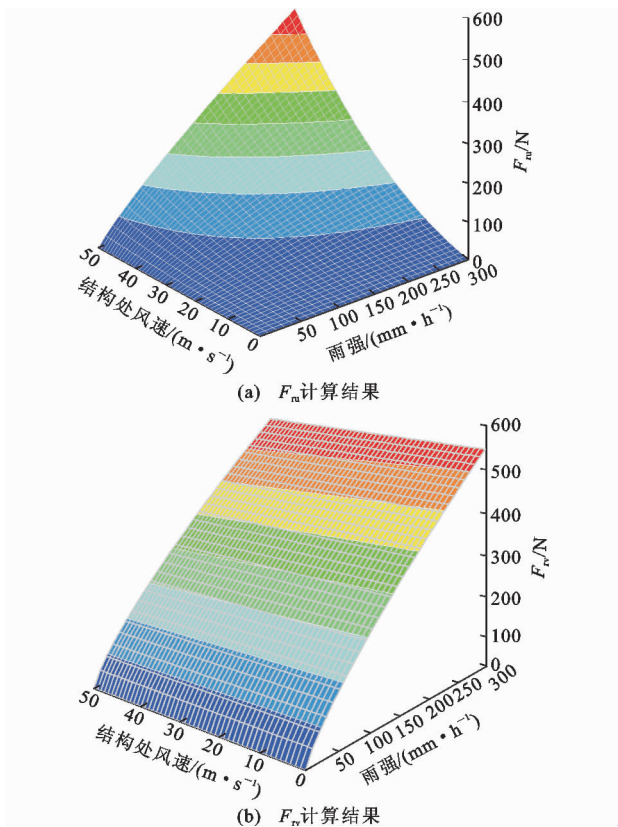


图 9 对称自由排水的矩形桥梁断面(单位:m)

Fig. 9 Rectangular Bridge Section with Symmetrical Free Drainage (Unit:m)

单位跨度主梁断面因降雨附加的阻力和升力计算结果如图 10 所示。

定义降雨引起的阻力(升力)和无雨时的风致阻

图 10 F_{ru} , F_{rv} 随风速和雨强的变化规律Fig. 10 Change Rules of F_{ru} , F_{rv} with Wind Speeds and Rainfall Intensities

力(升力)比值 γ_{rau} (γ_{rav}) 为

$$\gamma_{rau} = \frac{F_{ru}}{F_{au}} = \frac{L(\mu_H H u_{r0} + \mu_B B v_{r0}) W_L u_{r0}}{0.5 \rho_a U^2 C_D H L} = \frac{\kappa^2 \mu_H W_L}{0.5 \rho_a C_D} + \frac{\mu_B B v_{r0} W_L \kappa}{0.5 \rho_a U C_D H} \quad (24)$$

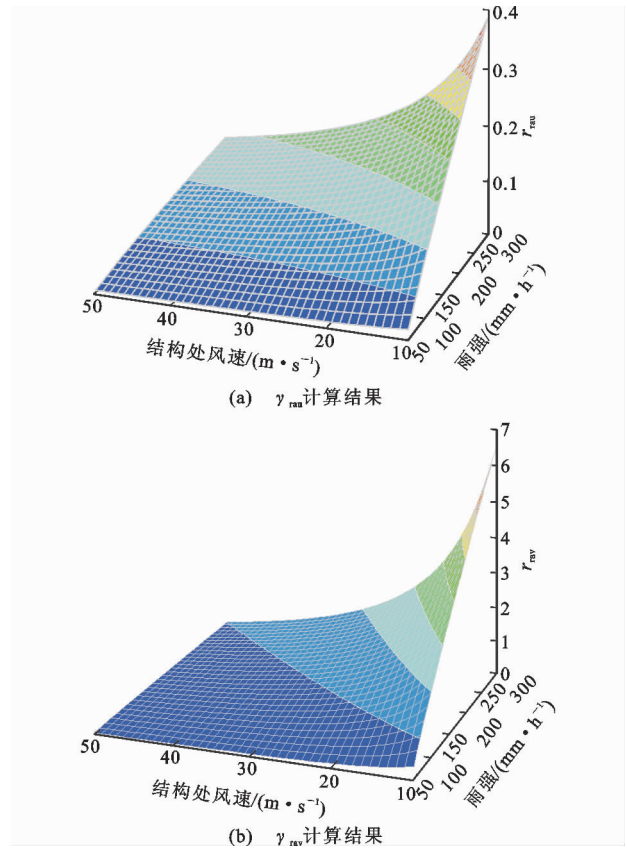
$$\gamma_{rav} = \frac{F_{rv}}{F_{av}} = \frac{L(\mu_H H u_{r0} + \mu_B B v_{r0}) W_L v_{r0} + \rho_r g \sum_{k=1}^n H_{rk} L_k B_k}{0.5 \rho_a U^2 C_L B L} = \frac{\mu_H H \kappa W_L v_{r0}}{0.5 \rho_a U C_L B} + \frac{\mu_B B L W_L v_{r0}^2 + \rho_r g \sum_{k=1}^n H_{rk} L_k B_k}{0.5 \rho_a U^2 C_L B L} \quad (25)$$

式中: F_{au} 为风致阻力; F_{av} 为风致升力; ρ_a 为来流密度。

由图 10 可知: 当风速达到 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 雨强为 $300 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 单位桥跨的水平作用力为 572 N 。对于竖向作用力, 竖向作用力随风速增长变化很小, 当雨强为 $300 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 风速从 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 变到 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 竖向作用力变化率仅为 5% 左右, 主要是因为雨滴竖向速度不随风速改变所致, 当风速为 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 且雨强为 $300 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 单位桥跨竖向作

用力为 573 N , 量级和水平冲击力相当, 表明积水重量影响很大, 但其与桥跨恒载值相比可忽略。

γ_{rau} , γ_{rav} 计算结果如图 11 所示。由图 11 可知: γ_{rau} 随雨强的增大而增大, 但随风速的增大而减小, 随着风速的增大, 降雨的水平作用力与风致作用力相比会弱化。当风速为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 且降雨达到 $300 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 降雨水平作用力会达到风致作用力的 40% 左右, 但风速达到 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 雨强即使达到 $300 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 其占风致作用力的比重不超过 15% 。对于竖向作用力, γ_{rav} 值同样会随雨强的增大而增大, 且随风速的增大而减小, 其作用力要比水平力变化更加明显, 譬如当雨强为 $300 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 且风速为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 其可为风致作用力的 6.4 倍, 这是因为主梁升力一般相比阻力要小, 而且降雨在结构表面的积水也增加了附加作用力。随风速的增大, 竖向作用力比重迅速减小, 主要因为雨滴竖向速度和积水不随风速变化, 风速加大后比重自然下降。

图 11 γ_{rau} , γ_{rav} 随风速和雨强的变化规律Fig. 11 Change Rules of γ_{rau} , γ_{rav} with Wind Speeds and Rainfall Intensities

3 风雨耦合作用下的静力三分力试验

3.1 试验概况

试验在湖南大学 HD-2 风洞中的低速射流段进

行,风洞射流处风速超过 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以后,紊流度小于 6% 。降雨装置采用西安清远测控技术有限公司生产的 QYJY-501 型人工模拟降雨器,该设备可以实现雨强的实时反馈控制,采用带压力垂直下喷式模拟降雨过程,雨强调控范围大,均匀度良好,所喷雨滴中值粒径、降雨动能与天然降雨十分接近,试验平台如图 12 所示。

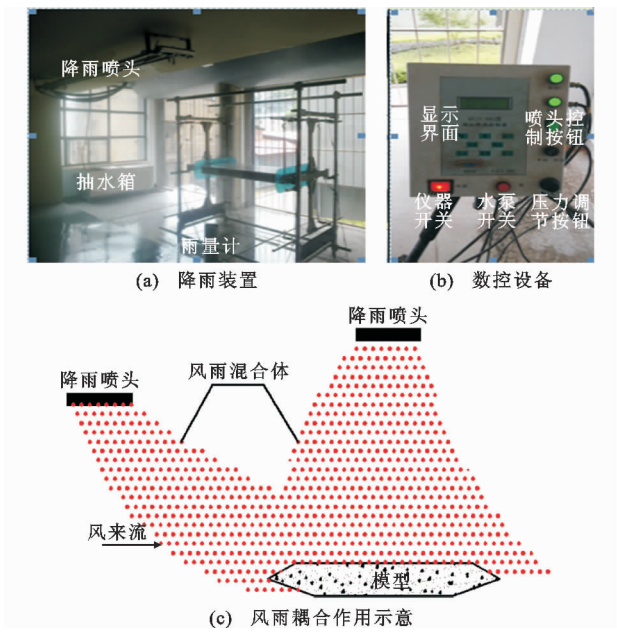


图 12 风雨耦合作用试验平台
Fig. 12 Test Platform for Coupling Effect of Rain and Wind

试验模型选取了 4 种典型的桥梁断面,模型断面构造和尺寸如图 13 所示。模型长度为 $1\,540\text{ mm}$,图 13(a),(b)断面横坡坡度为 0% ,图 13(c),(d)断面为双向坡度,横坡坡度为 2% 。试验风速为 $7.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风攻角为 $0^\circ, 3^\circ, -3^\circ$,试验雨强分别为 $0, 30, 60, 120\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,组成交叉试验工况测试风轴坐标系下的三分力系数。

风雨耦合作用测力装置如图 14 所示。测量竖向力和扭矩时,将 5# 和 6# 测力传感器与结构脱离,1#~4# 传感器通过刚性连接杆与模型相连而承受

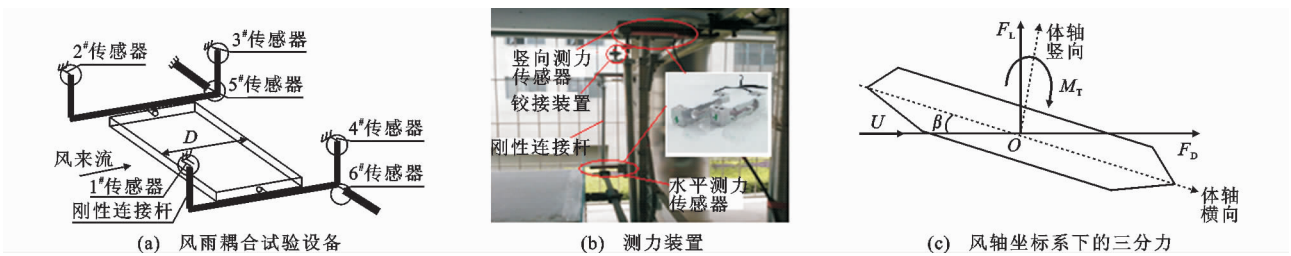


图 14 风雨耦合作用测力装置和三分力方向定义

Fig. 14 Force Measuring Device of Coupling Effect of Rain and Wind and Direction Definition of Three Component Forces

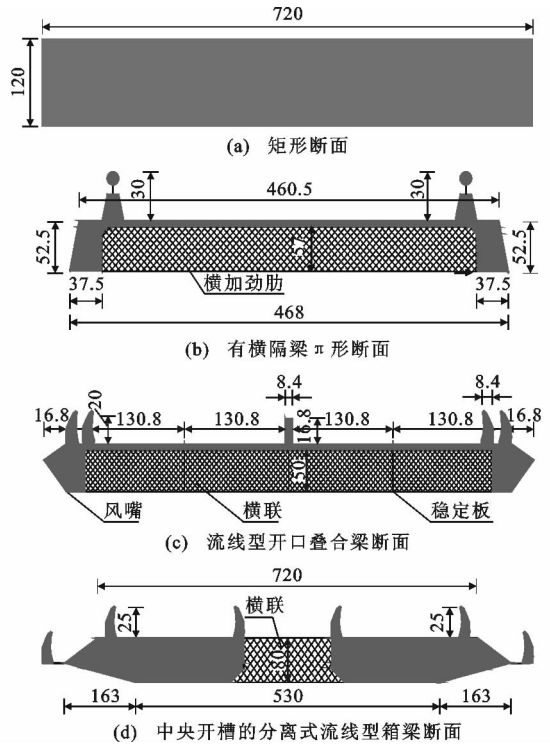


图 13 4 类试验主梁断面 (单位: mm)
Fig. 13 Four Kinds of Main Girder Sections for Testing (Unit: mm)

竖向力,测量水平力时,将 1#~4# 传感器与刚性吊杆的接触部分由固接改为铰接(可顺来流方向转动),从而可以避免产生水平约束而引起水平力,使模型受到的水平力全部由 5# 和 6# 传感器承受。利用此套装置得到三分力计算公式[式(26)],力的方向根据试验需要可自行规定。

$$\left. \begin{aligned} F_L &= |f_1 + f_2 + f_3 + f_4| \\ M_T &= (|f_1 - f_4| + |f_2 - f_3|) \frac{D'}{2} \\ F_D &= |f_5 + f_6| \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

式中: $f_i (i=1, 2, \dots, 6)$ 为传感器所测数据; D' 为模型宽度; F_L, M_T, F_D 分别为升力、扭矩和阻力。

3.2 试验结果与分析

断面在不同攻角和雨强下的三分力系数变化如图 15 所示。试验结果表明升力系数随着雨强增大

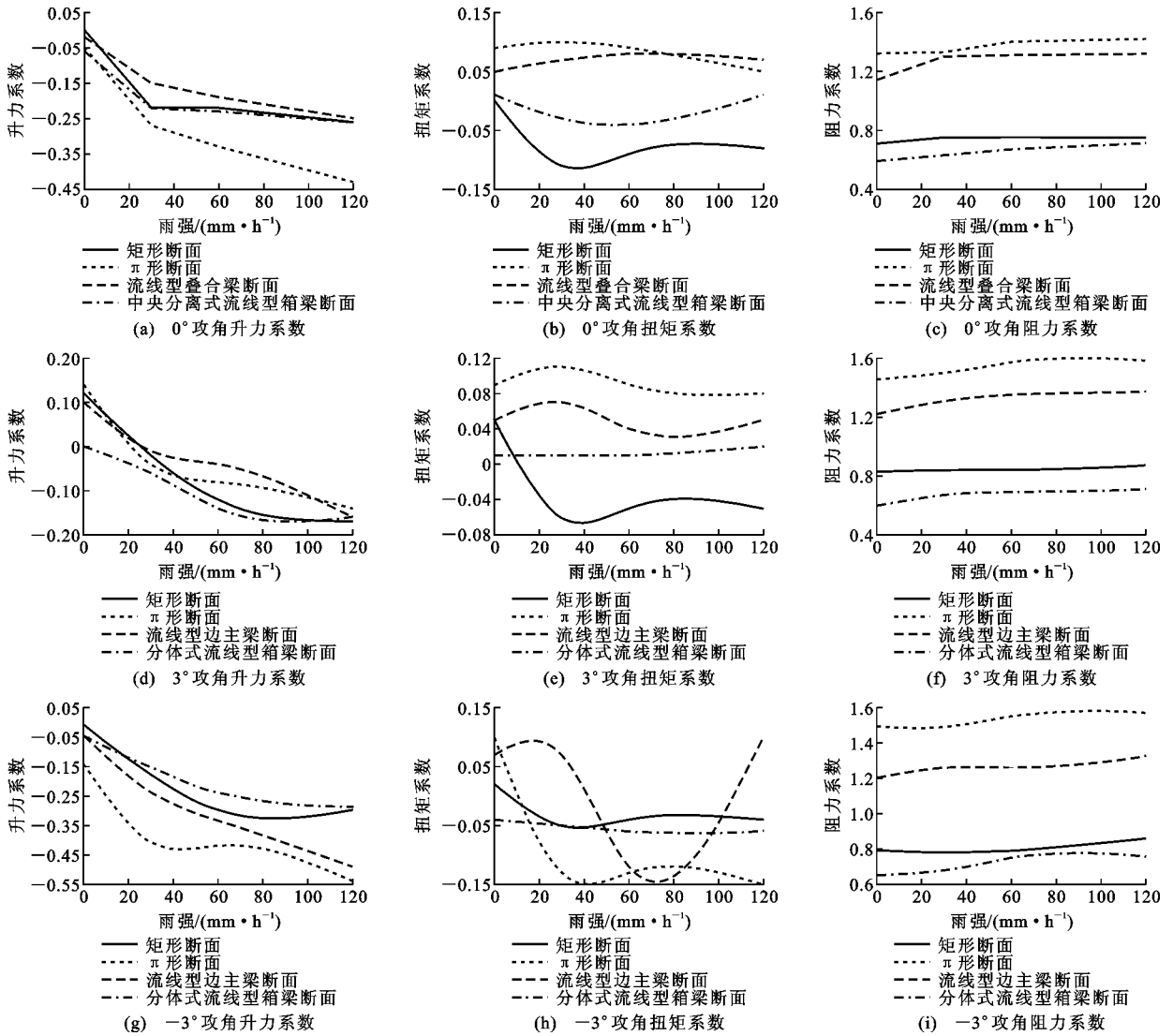


图 15 不同攻角时静力三分力系数随雨强的变化规律

Fig. 15 Change Rules of Static Three Component Force Coefficients with Rainfall Intensity Under Different Attack Angles

会明显减小,最大减小量可达到无雨时的数倍,扭矩系数无明显变化规律,阻力系数随着雨强的增大会有所增大,但增大量不如升力系数明显,增大幅度小于 18%。主要原因是升力系数除受雨滴冲击力之外,还有表面积水附加重力对其影响,风轴坐标下的阻力系数则与表面积水无关。无雨时阻力系数是升力系数的数倍,故降雨对阻力系数影响相对较小。

因不存在高空效应和大紊流度影响,可以认为试验中的雨滴水平速度等于风速,即不存在修正系数 κ 。通过前文已知的断面尺寸、风速和雨强,依据公式(21),(22)可得阻力系数和升力系数增量 ΔC_D 和 ΔC_L 分别为

$$\Delta C_D = \frac{\mu_H W_L}{0.5 \rho_a} + \frac{\mu_B B v_{r0} W_L}{0.5 \rho_a UH} \quad (27)$$

$$\Delta C_L = \frac{\mu_H H W_L v_{r0}}{0.5 \rho_a U B} + \frac{\mu_B W_L v_{r0}^2 B L + \rho_r g \sum_{k=1}^n B_k L_k H_{rk}}{0.5 \rho_a U^2 B L} \quad (28)$$

为验证前文简化的冲击力和水膜厚度计算模型正确性,将矩形断面 0° 攻角下各雨强的阻力和升力系数增量与简化模型计算值对比,结果如表 1 所示。从表 1 可知,最大相对误差小于 16%,考虑到模型积水引起的外形改变和雨滴的弹跳和溅射等作用影响,可以认为估算精度已非常高,可作为一种实用的估算方法。降雨引起的升力系数简化计算值与试验值对比如表 2 所示。从表 2 可知,最大相对误差达到 90%,通过前文分析得知,降雨对空气密度改变可以忽略,而雨滴冲击力造成的相对误差在 16% 以内。典型断面降雨作用分析也表明积水重力对升力

表 1 0°攻角时矩形断面 ΔC_D 试验值和简化方法计算值对比

| 雨强 30 mm · h ⁻¹ | | | 雨强 60 mm · h ⁻¹ | | | 雨强 120 mm · h ⁻¹ | | |
|---|---|----------|---|---|----------|---|---|----------|
| ΔC _D 试验值 <i>x</i> ₁ | ΔC _D 计算值 <i>x</i> ₂ | 相对误差 σ/% | ΔC _D 试验值 <i>x</i> ₁ | ΔC _D 计算值 <i>x</i> ₂ | 相对误差 σ/% | ΔC _D 试验值 <i>x</i> ₁ | ΔC _D 计算值 <i>x</i> ₂ | 相对误差 σ/% |
| 0.018 | 0.015 | 16.6 | 0.030 | 0.031 | 3.3 | 0.040 | 0.045 | 12.5 |

注:σ=(*x*₂−*x*₁)/*x*₁。

表 2 3°攻角时矩形断面 ΔC_L 试验值和简化方法计算值对比

| 雨强 30 mm · h ⁻¹ | | | 雨强 60 mm · h ⁻¹ | | | 雨强 120 mm · h ⁻¹ | | |
|---|---------------------------|----------|---|---|----------|---|---|----------|
| ΔC _L 试验值 <i>x</i> ₁ | 计算值 <i>x</i> ₂ | 相对误差 σ/% | ΔC _L 试验值 <i>x</i> ₁ | ΔC _L 计算值 <i>x</i> ₂ | 相对误差 σ/% | ΔC _L 试验值 <i>x</i> ₁ | ΔC _L 计算值 <i>x</i> ₂ | 相对误差 σ/% |
| −0.130 | −0.013 | 90 | −0.260 | −0.026 | 90 | −0.300 | −0.041 | 86.3 |

有非常大的影响,因此造成表 2 中理论计算值和试验值存在较大差异,而且应与积水厚度的估算误差以及部分测试误差有关,具体原因还有待后续进一步研究。根据水膜厚度估算经验公式(20)可知其对于参数的变化相当敏感,考虑到估算时参数取值的误差较大,水膜厚度以及由此产生的重力需根据实际断面测定以判断其对结构受力的实际影响程度。

4 结 语

(1)降雨引起空气密度改变很小,即使雨强达到 300 mm · h⁻¹,改变幅度不超过 1%,可忽略。

(2)雨强达到超强暴雨时(300 mm · h⁻¹),单位面积的竖向冲击力仅为 0.67 Pa,几乎可忽略,但结构表面单位面积的雨滴顺风向冲击力相比竖向冲击力要大得多,当雨强为 300 mm · h⁻¹且风速为 50 m · s⁻¹时,其值约为 100 Pa,只占同等风速下纯风作用力的 6.5%,且随风速的增长率要远小于风作用力的增长率。

(3)降雨引起的主梁表面积水厚度和坡长、坡度以及雨强和路面平整度密切相关,相比主梁高度其值较小,对实际主梁外形影响可忽略。当不考虑湍流影响时,降雨引起的阻力和升力与静风力的比值均随风速增大迅速减小,阻力减小更为明显。随着雨强的增大,升力系数明显向负方向变化,可达到无雨时的数倍,表明积水重量可能会较大地影响主梁升力,扭矩系数无规律变化,阻力系数有所增大但比例十分有限。

(4)简化的降雨冲击力计算模型结果和试验结果吻合较好,可作为实用计算方法。水膜厚度因表面积水状态的复杂性尚不能很好估算,需后续作进一步研究。

参考文献:

References:

[1] 陈政清. 桥梁风工程[M]. 北京:人民交通出版社,

[2] CAO Y H, WU Z, XU Z L, et al. Effects of Rainfall on Aircraft Aerodynamics[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2014, 71: 85-127.

[3] HAINES P A, LUERS J. Aerodynamic Penalties of Heavy Rain on Landing Airplanes[J]. Journal of Aircraft, 1983, 20(2): 111-119.

[4] 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.

[5] ETYEMEZHIAN V, DAVIDSON C I, ZUFALL M, et al. Impingement of Rain Drops on a Tall Building[J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(15): 2399-2412.

[6] 吴小平. 低层房屋风雨作用效应的数值研究[D]. 杭州:浙江大学, 2008.

[7] 王海峰. 输电塔线体系环境荷载致振响应研究[D]. 大连:大连理工大学, 2007.

[8] 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, 44.

[9] XIN D, LI H, WANG L, et al. Experimental Study on

- Static Characteristics of the Bridge Deck Section Under Simultaneous Actions of Wind and Rain[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2012, 107-108: 17-27.
- [10] 辛大波, 王亮, 李惠, 等. 降雨对桥梁主梁静力特性的影响[J]. 空气动力学学报, 2012, 30(5): 613-618.
- XIN Da-bo, WANG Liang, LI Hui, et al. The Influence of Rainfall on the Static Characteristics of Bridge Deck Sections[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2012, 30(5): 613-618.
- [11] 武占科. 风雨共同作用结构荷载模型及参数的试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.
- WU Zhan-ke. Experimental Research of the Structure's Load Model and Its Parameters in the Condition of Wind Driving Rain[D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [12] 胡俊. 大跨度悬索桥现场实测数据、风雨激励响应及风振疲劳研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- HU Jun. Study on the In-field Measured Data, Wind-rain Action and Wind-induced Fatigue of a Long-span Suspension Bridge[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [13] MARSHALL J S, PALMER W M K. The Distribution of Raindrops with Size[J]. Journal of the Meteorology, 1948, 5(4): 165-166.
- [14] GUNN R, KINZER G D. The Terminal Velocity of Fall for Water Droplets in Stagnant Air[J]. Journal of the Meteorology, 1949, 6(4): 243-248.
- [15] CHOI E C C. Wind-driven Rain and Driving Rain Coefficient During Thunderstorms and Non-thunderstorms[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2001, 89(3/4): 293-308.
- [16] 季天剑. 降雨对轮胎与路面附着系数的影响[D]. 南京: 东南大学, 2004.
- JI Tian-jian. Influence of Rainfall on Adhesion Coefficient of Tire and Road Surface[D]. Nanjing: Southeast University, 2004.