

降雨对桥梁主梁静力特性的影响

辛大波¹, 王亮¹, 李惠¹, 欧进萍^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:针对大跨桥梁主梁风雨联合作用现象,从静力学角度出发,分析风雨联合作用下桥梁主梁荷载的三个组成成分——风雨致静力三组分,以及桥梁主梁风雨致静力相对于纯风作用下风致静力增量,并给出了测试方法,通过在大气边界层风洞中搭建风雨联合作用试验系统,以一开槽双箱桥梁主梁节段模型为试验研究对象,完成节段模型在风雨联合作用下的静力特性试验,进而获取降雨对桥梁主梁风致静力作用的影响规律。试验结果显示:在较大的负攻角下,雨的冲击力对桥梁主梁风致阻力分量影响较大;在较小的负攻角及正攻角下,空间雨滴和主梁表面水膜附着引起的风场改变对桥梁主梁风致阻力分量影响较大。雨的质量、冲击力以及空间雨滴和主梁表面水膜附着引起的风场改变对桥梁主梁风致升力均有一定影响。空间雨滴和主梁表面水膜附着引起的风场改变对桥梁主梁风致扭矩影响最大,其次是雨的质量作用,最后是雨的冲击力作用。试验结果表明:降雨对桥梁结构的风致静力的影响主要取决于空间雨滴和主梁表面水膜附着引起的风场改变。

关键词:降雨;静力特性;桥梁主梁;风洞试验

中图分类号: TU311

文献标识码: A

0 引言

桥梁是重要的基础设施工程。随着科学技术的不断进步,桥梁结构呈现长、细、柔、轻的发展趋势,结构刚度和阻尼不断降低,这使得大跨桥梁结构对风的敏感性更加突出。风对桥梁的作用是一个十分复杂的现象,它受到自然风的特性、桥梁主梁断面形状、桥梁结构特性以及风与桥梁结构的相互作用等四个方面的制约^[1],风对桥梁的作用包括静力作用和动力作用,风致静力作用又包括静风荷载作用与风致静力失稳,与动力失稳相比,静力失稳发生前没有任何先兆,突发性强,破坏性更大^[2]。因此,风致静力作用具有重要的研究价值。

传统的桥梁结构静力作用的研究都是基于均匀来流风场^[3-7],然而,对于建设在台风频繁侵袭区域的大跨度桥梁结构来说,强风常常伴随着降雨,特别对于台风天气,强风与暴雨耦合更是其主要特征。大跨桥梁结构处于风雨联合作用时,单一考虑风场进行风致作用分析得出的结论与实际有一定的偏差,其原因在于雨场的存在以及雨场和风场的相互耦合作用。

因此,风雨联合作用构成了大跨桥梁的最不利荷载环境,在进行桥梁风致静力作用分析时考虑降雨的影响更符合客观实际。同时,考虑降雨作用对于精细化分析大跨桥梁风致作用至关重要。同济大学葛耀军等进行了风雨共同作用下结构荷载与响应的理论分析及试验研究^[8]。研究表明,降雨对模型受到的定常气动力有一定影响。目前,如何评价降雨对桥梁主梁风致静力作用的影响规律尚不清楚。

本文针对大跨桥梁主梁风雨联合作用现象,从静力学角度出发,分析风雨联合作用下桥梁主梁荷载的三个组成成分,即风雨致静力三组分,以及桥梁主梁风雨致静力相对纯风作用下的风致静力增量,并给出了测试方法,通过在大气边界层风洞中搭建的风雨联合作用试验系统,以一开槽双箱桥梁主梁为研究对象,完成主梁节段模型在风雨耦合场作用下的静力特性试验,进而研究降雨对桥梁主梁风致静力作用的影响规律。

1 风雨致静力三组分

参照桥梁风致静力模型,风雨联合作用下桥梁

* 收稿日期:2011-05-24; 修订日期:2011-08-11

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划重点项目(90815022);国家自然科学基金(50908069)

作者简介:辛大波(1978-),男,副教授,博士,主要从事结构风工程研究。E-mail: xindabo@hit.edu.cn

主梁风雨致静力荷载模型仍采用风致静力三分力模型,如图1所示。

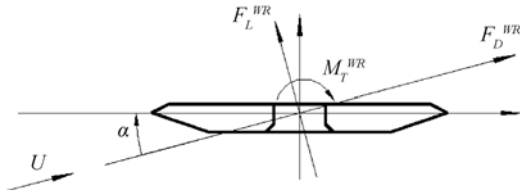


图1 桥梁主梁风雨致静力三分力

Fig. 1 Wind-rain-induced three dimensional static component forces of bridge section

图1中, F_D^{WR} 、 F_L^{WR} 、 M_T^{WR} 分别为在远端平均风速 U 作用下的桥梁主梁风雨致阻力、风雨致升力及风雨致扭矩。

在风轴坐标系下,主梁风雨致静力三分力可由无量纲的三分力系数表达为:

$$F_D^{WR} = \frac{1}{2} \rho U^2 C_D^{WR} B L \quad (1)$$

$$F_L^{WR} = \frac{1}{2} \rho U^2 C_L^{WR} B L \quad (2)$$

$$M_T^{WR} = \frac{1}{2} \rho U^2 C_T^{WR} B^2 L \quad (3)$$

式中 ρ ——来流密度 (kg/m^3);

U ——来流速度 (m/s);

C_D^{WR} 、 C_L^{WR} 、 C_T^{WR} ——风雨联合作用下桥梁主梁风雨致阻力系数、风雨致升力系数和风雨致扭矩系数;

B ——桥梁主梁宽度 (m);

L ——桥梁主梁长度 (m)。

风雨联合作用下桥梁主梁风雨致静力主要包括以下三个组成部分(三组分):

(1) 雨的质量引起的桥梁主梁静力。

(2) 雨的冲击力引起的桥梁主梁静力。

(3) 风雨联合作用下桥梁主梁风致静力。此时的风致静力相对于纯风作用下的风致静力变化由风场改变决定,该风场改变源自两个影响因素,即空间雨滴引起的风场改变以及桥梁主梁上的水膜附着引起的风场改变。

风雨联合作用下桥梁主梁风雨致静力三组分可以表达为:

$$F_D^{WR} = F_D^{W'} + F_D^G + F_D^I \quad (4)$$

$$F_L^{WR} = F_L^{W'} + F_L^G + F_L^I \quad (5)$$

$$M_T^{WR} = M_T^{W'} + M_T^G + M_T^I \quad (6)$$

式中 $F_D^{W'}$ 、 $F_L^{W'}$ 、 $M_T^{W'}$ ——风雨联合作用下桥梁主梁风致阻力 (N)、风致升力 (N) 和风致扭矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$);

F_D^G 、 F_L^G 、 M_T^G ——风雨联合作用下雨的质量引起

的桥梁主梁阻力 (N)、升力 (N) 和扭矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$);

F_D^I 、 F_L^I 、 M_T^I ——风雨联合作用下雨的冲击力引起的桥梁主梁阻力 (N)、升力 (N) 和扭矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$)。

降雨对桥梁主梁风致静力作用的影响可以通过风雨联合作用下桥梁主梁风雨致静力相对于纯风作用下桥梁主梁风致静力的增量来表达:

$$\begin{aligned} \Delta F_D &= D_D^{WR} - F_D^W \\ &= F_D^G + F_D^I + F_D^{W'} - F_D^W \\ &= F_D^G + F_D^I + F_D^S \end{aligned} \quad (7)$$

$$\Delta F_L = F_L^G + F_L^I + F_L^S \quad (8)$$

$$\Delta M_T = M_T^G + M_T^I + M_T^S \quad (9)$$

式中 ΔF_D 、 ΔF_L 、 ΔM_T ——风雨联合作用下桥梁主梁风雨致阻力、风雨致升力、风雨致扭矩相对纯风作用下桥梁主梁风致阻力、风致升力、风致扭矩的增量。

F_D^S 、 F_L^S 、 M_T^S ——风雨联合作用下桥梁主梁风致阻力、风致升力、风致扭矩相对纯风作用下桥梁主梁风致阻力、风致升力、风致扭矩的增量。

将上述三分力用相应的无量纲系数来表达,风雨联合作用下桥梁主梁风雨致静力相对纯风作用下桥梁主梁风致静力增量的三分力系数为:

$$C_D^{\Delta F} = \Delta F_D / (\frac{1}{2} \rho U^2 B L) \quad (10)$$

$$C_L^{\Delta F} = \Delta F_L / (\frac{1}{2} \rho U^2 B L) \quad (11)$$

$$C_T^{\Delta M} = \Delta M_T / (\frac{1}{2} \rho U^2 B^2 L) \quad (12)$$

风雨联合作用下雨的质量引起的桥梁主梁三分力系数分别为:

$$C_D^G = F_D^G / (\frac{1}{2} \rho U^2 B L) \quad (13)$$

$$C_L^G = F_L^G / (\frac{1}{2} \rho U^2 B L) \quad (14)$$

$$C_T^G = M_T^G / (\frac{1}{2} \rho U^2 B^2 L) \quad (15)$$

风雨联合作用下雨的冲击力引起的桥梁主梁三分力系数为:

$$C_D^I = F_D^I / (\frac{1}{2} \rho U^2 B L) \quad (16)$$

$$C_L^I = F_L^I / (\frac{1}{2} \rho U^2 B L) \quad (17)$$

$$C_T^I = M_T^I / (\frac{1}{2} \rho U^2 B^2 L) \quad (18)$$

风雨联合作用下桥梁主梁风致阻力、风致升力、风致扭矩相对纯风作用下桥梁主梁风致阻力、风致升力、风致扭矩增量的无量纲系数为:

$$C_D^S = F_D^S / (\frac{1}{2} \rho U^2 BL) \quad (19)$$

$$C_L^S = F_L^S / (\frac{1}{2} \rho U^2 BL) \quad (20)$$

$$C_T^S = M_T^S / (\frac{1}{2} \rho U^2 B^2 L) \quad (21)$$

2 桥梁主梁风雨致静力相对风致静力增量的测试方法

桥梁主梁风雨致静力系数与桥梁主梁风致静力系数的测试方法差别在于其三分力系数是在风雨联合作用环境中测得的。为了测量桥梁主梁风雨致静力相对风致静力增量,提出以下假设:

(1) 在有风环境下,主梁节段模型表面的积水量及水膜形状不因风速改变而改变;

(2) 雨的质量对桥梁主梁阻力无影响;

(3) 对于桥梁主梁处于正负对称的两个来流风攻角位置,雨的质量对桥梁主梁的静力作用相同。

在风雨联合试验环境中采用力传感器采集桥梁主梁节段模型的阻力、升力、扭矩,具体测量过程如下:

(1) 将节段模型放置于降雨影响范围中,且不在降雨器的正下方,如图2所示。

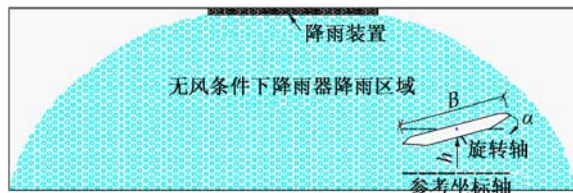


图2 试验装置相对位置图

Fig. 2 Relative position of experiment device

(2) 水平来流风相对于桥梁主梁模型攻角 α 的桥梁主梁位置,保持风速 $U=0$ 不变,给定雨强 I ,持续降雨一分钟,将雨强快速降至零,在雨强降至零的瞬间,通过力传感器采集模型荷载 F_K^S ($K=D, L, T$),这里 F_T^S 即为 M_T^S 。此时节段模型受到雨的质量作用而没有受到风的作用,雨的质量作用于节段模型上的力为 F_K^Q ,在雨停的瞬间虽还有少量雨滴从降雨器喷出,但不会降落到节段模型上,如图3所示。

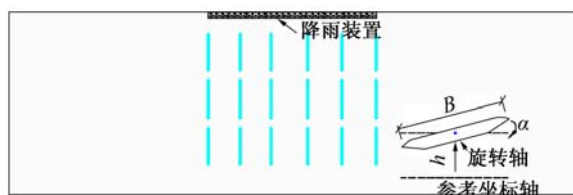


图3 试验装置相对位置图

Fig. 3 Relative position of experiment device

(3) 保持雨强 $I=0$ 时吹风,给定某一风速 U ,通过力传感器采集模型荷载 F_K^W 。此时节段模型受风的作用而不受到雨的作用,所受力为 F_K^W ,相当于纯风作用荷载。

(4) 在风速 U 条件下降雨,雨强 I ,采集节段模型荷载 F_K^S 。此时,节段模型处于风雨联合作用下,模型在风雨联合作用下如图4所示。

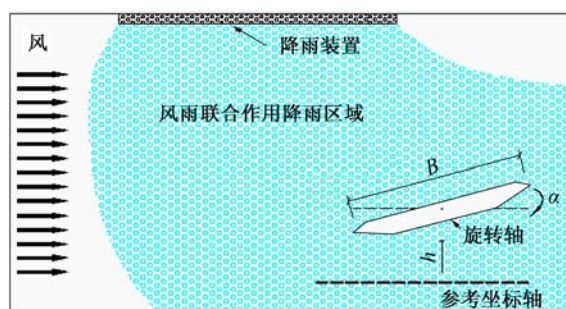


图4 风雨联合作用下节段模型测试示意图

Fig. 4 Schematic map of test of section model subjected to wind and rain

此时节段模型受雨的质量作用、雨的冲击力作用以及风雨联合作用下的风致静力作用,所受力分别为 F_K^Q 、 F_K^I 、 F_K^S 、 F_K^W 。

(5) 保持风速 U 不变,将雨强 I 降至0,采集模型荷载 F_K^S 。此时节段模型受雨的质量作用和风雨联合作用下的风致静力,所受力有 F_K^Q 、 F_K^S 、 F_K^W 。

(6) 选取不同攻角、风速、雨强重复以上过程,即可以得到不同攻角、风速、雨强下的 F_K^Q 、 F_K^I 、 F_K^S 、 F_K^W 。

3 开槽双箱梁桥梁主梁节段模型风雨致静力试验

3.1 试验模型

试验选取开槽双箱梁桥梁主梁节段模型为研究对象,模型截面如图5所示。

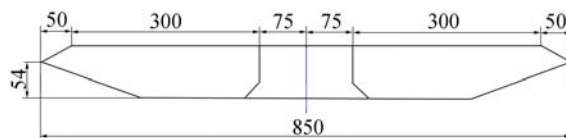


图5 开槽双箱梁主梁节段模型断面(单位:mm)

Fig. 5 Cross section of a bridge deck model(unit:mm)

3.2 试验环境及设备

通过在闭口回流大气边界层风洞中安装降雨系统,进而实现风雨联合作用环境,如图6所示。

风雨联合作用系统中的降雨系统的模拟雨强连续变化范围为 $10 \sim 200 \text{ mm/h}$,降雨面积为 $4 \times 5 \text{ m}^2$,雨滴直径为 $0.1 \sim 6 \text{ mm}$,降雨调节精度为 7 mm/h 。用于桥梁主梁节段模型静力测量的力传感器型号为

SML-200 以及 SML-1000, 其量程分别为 890N、4450N, 精度为 2.07648‰。



图6 风雨联合作用实测图

Fig. 6 Test chart of wind and rain actions

3.3 试验工况

试验中通过设定不同来流风速、攻角、降雨强度等参数交叉组成多种试验工况。具体参数如表1所示。

表1 来流风速、攻角、降雨强度数据

Table 1 Data of inflow wind velocity, rainfall intensity and angle of attack

来流风速 $U(\text{m/s})$	0	4	6	8	10	12
降雨强度 $I(\text{mm/h})$	0	30	60	90	120	-
来流攻角 $\alpha(^{\circ})$	0	± 3	± 6	± 9	± 12	-

3.4 试验结果及分析

3.4.1 阻力

桥梁主梁风雨致阻力相对纯风作用下风致阻力增量包含两个部分,即风雨联合作用下雨的冲击力引起的桥梁主梁阻力、风雨联合作用下桥梁主梁风致阻力相对纯风作用下桥梁主梁风致阻力增量。以上两个部分所占比重分别记为 $DPI = \frac{F_D^I}{\Delta F_D}$ 、 $DPS = \frac{F_D^S}{\Delta F_D}$, 不同攻角下,桥梁主梁阻力增量及其分量百分比如图7所示。

从图7可以看出,该开槽双箱梁桥梁主梁节段模型在风雨联合作用下,随来流风攻角由负方向至正方向连续变化过程中,雨的冲击力引起的主梁阻力先减小后趋于平缓,该主梁节段模型在风雨联合作用下的风致阻力相对于纯风作用下的风致阻力增量先增大后趋于平缓。攻角为 -3° 时以上两个阻力分别达到最小值和最大值,且以上两个阻力随来流风攻角的变化,呈现出相反的变化规律。从图7还可看出,当来流风攻角在 -7.5° 至 -12° 之间时,风雨联合作用下雨的冲击力引起的模型阻力增量所占比重较大;当来流风攻角在 -7.5° 至 12° 之间时,风雨联合作用下桥梁主梁模型风致阻力相对纯风作用下桥梁主梁模型风致阻

力增量在模型阻力增量中所占比重较大。因此,针对开槽双箱梁桥梁主梁风雨致阻力相对于风致阻力变化,在较大的负攻角下雨的冲击力作用占主导;在较小的负攻角及正攻角下,空间雨滴以及主梁表面水膜附着引起的风场改变作用占主导。

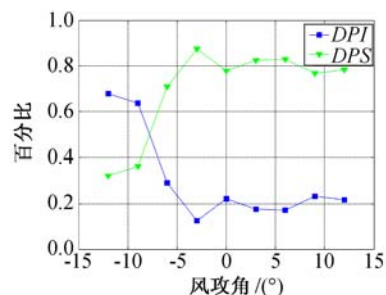
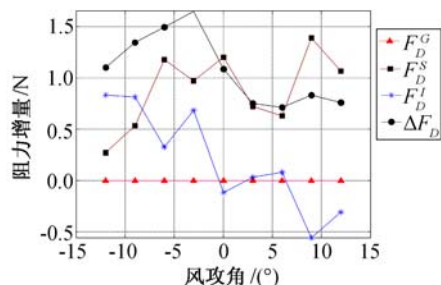


图7 桥梁主梁阻力增量

Fig. 7 Drag increment of bridge deck section

3.4.2 升力

桥梁主梁风雨致升力相对纯风作用下风致升力增量包含三个部分,即风雨联合作用下雨的质量引起的桥梁主梁升力,风雨联合作用下雨的冲击力引起的桥梁主梁升力,以及风雨联合作用下桥梁主梁风致升力相对纯风作用下桥梁主梁风致升力增量。以上三个部分所占比重分别记为 $LPG = \frac{F_L^G}{\Delta F_L}$ 、 $LPI = \frac{F_L^I}{\Delta F_L}$ 、 $LPS = \frac{F_L^S}{\Delta F_L}$ 。不同攻角下,桥梁主梁升力增量及其分量百分比如图8所示。

从图8可以看出,该主梁节段模型在风雨联合作用下随远端来流风攻角由负方向至正方向连续变化过程中,雨的质量引起的主梁升力先增大后减小,随后又增大再减小,沿攻角大致呈对称分布;雨的冲击力引起的主梁升力随攻角变化呈现波动特性;模型在风雨联合作用下的风致升力相对纯风作用下风致升力增量随攻角变化也呈现波动特性。从图8中还可看出,雨的质量、冲击力、空间雨滴和主梁表面水膜附着引起的风场改变三个因素对桥梁主梁升力影响所占比重比较接近。

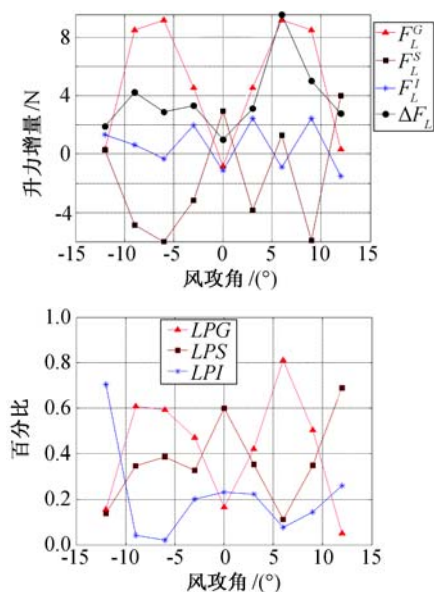


图8 桥梁主梁升力增量

Fig. 8 Lift increment of bridge deck section

3.4.3 扭矩

桥梁主梁风雨致扭矩相对纯风作用下风致扭矩增量包含三个部分,即风雨联合作用下雨的质量引起的桥梁主梁扭矩,风雨联合作用下雨的冲击力引起的桥梁主梁扭矩,风雨联合作用下桥梁主梁风致扭矩相对纯风作用下桥梁主梁风致扭矩增量。以三两个部分所占比重分别记为 $MPG = \frac{M_T^G}{\Delta M_T}$ 、 $MPI = \frac{M_T^I}{\Delta M_T}$ 、 $MPS = \frac{M_T^S}{\Delta M_T}$ 。不同攻角下,桥梁主梁扭矩增量分量百分比如图9所示。

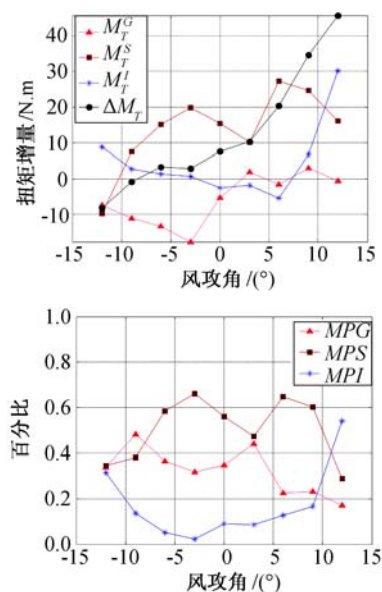


图9 桥梁主梁扭矩增量

Fig. 9 Torque increment of bridge deck section

从图9可以看出,该主梁节段模型在风雨联合作用下随来流风攻角由负方向至正方向变化连续变化过程中,雨的质量引起的主梁扭矩大致呈减小趋势,雨的冲击力引起的主梁扭矩先减小后增大,模型在风雨联合作用下风致扭矩相对于纯风作用下风致扭矩增量呈波动变化。从图9中还可看出,空间雨滴和主梁表面水膜附着引起的风场改变对桥梁主梁风致扭矩影响最大,然后依次为雨的质量作用、雨的冲击力作用。

4 结论

针对大跨桥梁断面风雨联合作用现象,本文从静力学角度出发,分析了桥梁主梁风雨致静力的三个组成部分,以及桥梁主梁风雨致静力相对于纯风作用下风致静力的增量,给出了测试方法,并通过在大气边界层风洞中搭建的风雨联合作用试验系统,以一开槽双箱梁桥梁主梁节段模型为试验研究对象,完成节段模型在风雨联合作用下的静力特性试验,进而获取降雨对桥梁主梁风致静力作用的影响规律,试验结论如下:

(1) 针对开槽双箱梁桥梁主梁风雨致阻力相对于风致阻力增量,在较大的负攻角下雨的冲击力作用占主导;在较小的负攻角及正攻角下,空间雨滴以及主梁表面水膜附着引起的风场改变作用占主导。

(2) 针对开槽双箱梁桥梁主梁风雨致升力相对于风致升力增量,雨的质量、冲击力、空间雨滴和主梁表面水膜附着引起的风场改变三个因素对桥梁主梁升力影响所占比重比较接近。

(3) 针对开槽双箱梁桥梁主梁风雨致扭矩相对于风致扭矩增量,空间雨滴和主梁表面水膜附着引起的风场改变对桥梁主梁风致扭矩影响最大,然后依次为雨的质量作用、雨的冲击力作用。

参考文献:

- [1] 贺德馨,等. 风工程与工业空气动力学[M]. 北京:国防工业出版社,2006:443-450.
- [2] 周颖,禹奇才,曹映泓. 大跨度桥梁非线性静力抗风研究[J]. 广州大学学报,2002,1(4):63-67.
- [3] 埃米尔. 希缪,罗伯特. H. 斯坎伦. 风对结构的作用[M]. 上海:同济大学出版社,1992:149-180.
(EMIL SIMIU, ROBERT H SCANLAN. Application of wind to structure[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1992: 149-180.)

- [4] 黄本才. 结构抗风分析原理及应用[M]. 同济大学出版社, 2008: 26-46.
- [5] 陈政清. 桥梁风工程[M]. 人民交通出版社, 2005: 55-62.
- [6] GE Y J, XIANG H F. Recent development of bridge aerodynamics in China[C]//Proceedings of the 5th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications. Ottawa, Ontario, Canada, 2004: 77-96.
- [7] CHENG Jin, JIANG Jian-jing, XIAO Ru-cheng, et al. Nonlinear aerostatic stability analysis of Jiang Yin Suspension Bridge [J]. *Engineering Structures*, 2002, (24): 773-781.
- [8] 葛耀军, 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[A]. 第十四届全国风工程会议论文集[C]. 2009: 187-196.

The influence of rainfall on the static characteristics of bridge deck sections

XIN Da-bo¹, WANG Liang¹, LI Hui¹, OU Jin-ping^{1,2}

(1. Harbin Institute of Technology, School of Civil Engineering, Harbin 150090, China;

2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The three influencing factors of wind-rain-induced static forces were analyzed aiming at the phenomenon of simultaneous actions of wind and rain for long-span bridge decks, based on the analysis of static load on the bridge deck section. The test method of the increment of wind-rain-induced static forces in joint wind and rain comparing to wind-induced static forces in single wind is given. The wind-rain-induced static characteristics test was carried out in the surroundings of simultaneous actions of wind and rain built in the atmospheric boundary layer wind tunnel, taking a twin-separated box girder as research object. The influencing rule of rainfall on the wind-induced static forces of bridge deck sections was obtained. Experimental results display the effect of impact force of rain on the wind-induced drag force of bridge deck sections is dominant in the large negative angle of attack of circumstances. The effect of change of flow field and water film on the surface of bridges on the wind-induced drag force of bridge deck sections is dominant in the small negative and positive angle of attack of circumstances. The gravity of raindrops, impact force of rain, change of flow field and water film on the surface of bridges all have certain contribution on the wind-induced lift force of bridge deck sections. The change of flow field and water film on the surface of bridges play the most important role on the wind-induced pitching moment of bridge deck sections, followed by the gravity of raindrops, finally is the impact force of rain. The result shows that the effect of rainfall on the wind-induced static forces of bridge deck sections is mainly depended on the change of flow field and water film on the surface of bridges.

Key words: rainfall; static characteristics; bridge deck section; wind tunnel test