

地面效应对近流线型断面静气动特性的影响

周志勇, 毛文浩

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 上海市政研究设计总院, 上海 200092)

摘要: 以风洞试验和计算流体动力学(CFD)相结合的方法, 对存在地面效应的近流线型断面的静气动特性(静三分力系数、St数)进行研究. 首先, 基于风洞试验获得近流线型断面在不同风攻角下的静气动参数随离地高度的变化规律, 试验结果表明, 地面效应将对断面静气动特性产生不利影响. 其次, 采用CFD识别各试验工况下断面的绕流特征及静气动参数, 分析了不同风攻角下地面效应对近流线型断面静力三分力系数的影响机理, 数值分析表明, 地面附面层带来的影响总体上减缓了桥梁下腹板与地面之间区域的流速, 局部负压区的强度及尺度加强及增大, 并增加了驻点处的压力.

关键词: 地面效应; 近流线型断面; 静气动系数; 风洞试验; 计算流体动力学(CFD); 机理

中图分类号: TU279.7⁺2

文献标志码: A

Ground Effects on the Static Force Coefficients of a Closed Box Girder

ZHOU Zhiyong, MAO Wenhao

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Municipal Design & Research Institute, Shanghai 200092, China)

Abstract: As many existing or under-construction bridges are of lower height from the ground, the height could probably become a key factor to the wind-induced responses of bridges, hence it may have an adverse influence on the aerostatic and aerodynamic performances of bridges under wind loads. In this paper, wind tunnel tests and numerical simulation methods were adopted to study the ground effects on the static responses of a closed box girder. First, wind tunnel tests have been conducted to study the variation rules change laws of the static force coefficients correlated with the height from the ground of the closed box girder. It is found that ground effects will adversely affect the static wind stability of the closed box girder. Second, computational fluid dynamics (CFD) numerical simulations have been conducted to study the variation rules of the static force coefficients correlated with the height from the ground of the closed box girder. Through

the CFD flow fields of the girder, ground effects mechanism on aerostatic performance of the closed box girder has been analyzed and described.

Key words: ground effects; closed box girder; static force coefficients; wind tunnel test; computational fluid dynamics (CFD); ground effect mechanism

当桥面接近地面时, 地面使断面的绕流与远离地面时的情况不同, 可以引用空气动力学中的概念, 称这种现象为“地面效应”. 目前为止, 国内外学者在桥梁断面静力响应、涡振和颤振性能研究方面还没有关于桥梁离地高度对桥梁气动响应影响的系统研究. 地面效应研究方面, 国内外的研究主要集中在航空航天领域, 其中大部分研究是针对机翼进行, 基本采用风洞试验的方法^[1-6]及数值模拟的方法^[7-18]进行研究.

Barber^[1]采用风洞试验和数值模拟方法研究地面效应对结构气动响应的影响, 并用试验验证了数值模拟的准确性; Justin等^[2]分别对NACA4412翼型在不同迎角下的地面效应和低雷诺数下的地面效应进行了实验研究. 杨美^[3]在风洞试验中利用移动路面模拟系统和六分力天平测量系统, 研究了地面粘性效应对地效翼空气动力的影响和地效翼空气动力特性. Marshall^[4]及Yang Z G^[5-6]针对附面层对地效应的影响进行了风洞试验研究, 研究表明边界层的位移厚度减小了地效翼风洞试验中的有效高度, 地面效应会变强.

Mokry^[7]采用数值模拟方法研究了地面效应对飞机尾涡消散和运动的影响, 研究表明地面效应使得尾涡散加快、下降趋缓; Park等^[8]采用数值模拟方法研究了地面效应对机翼端板的静力和动力稳定性影响, 解释了升力系数变化的原因, 结果表明, 地面效应使机翼端板气动稳定性降低; Prasad^[9]通过数值模拟方法, 研究了水波浪的地面效应对机翼的影

响. 王刚等^[10]研究了低速情况下二维翼型的地面效应问题, 采用离散涡方法研究了地面对翼型表面流动和压力分布的影响, 并对地面存在条件下的尾涡发展规律进行了讨论; 岳锋等^[11]采用 RANS 和 Spalart-Allmaras 湍流模型研究了二维翼型在移动地面和固定地面条件下的地面效应及流动特性问题; 应成炯等^[12]采用计算流体力学的方法, 通过对数值模拟结果的比较分析, 揭示了地面效应下机翼的失速特性; 龚军锋等^[13]采用一种新的结构动网格生成技术, 获得非非常的网格移动, 得到一系列的不同攻角、地面效应高度的计算流体动力学(CFD)网格及初始流场, 在此基础上进行定常流场求解, 对某无人机的地面效应进行了研究, 计算得到地面效应的定常 CFD 结果. 刘沛清等^[14]通过数值模拟的方法对地效飞行器整机的气动性能和分离流动进行了深入分析. 杨韡等^[15]对三维地效翼展向效应进行了数值模拟分析. 张斌等^[16]针对地效对二维气动弹性特性的影响进行了数值模拟分析. Lee 等^[17]通过数值方法研究了地效翼气动布局对空气动力特性的影响. Mahon 等^[18]对绕地效翼流动及其尾迹进行了数值研究.

现有的或在建的桥梁中存在不少离地高度较低的桥梁, 例如深港通道桥等. 位于水库上方的桥梁, 随着水位的上涨, 其桥面高度也会相对的降低, 更加

贴近水面. 可以预见, 当桥梁离地较低时, 由主梁和地面所形成的“通道”将对气流产生阻碍或者加速作用, 而这种作用反过来又会对主梁的气动力产生影响, 这对主梁在风荷载作用下的静力响应和动力响应必然产生影响. 因此考虑地面效应对桥梁风致振动的影响具有实际工程意义. 本文通过风洞试验和数值模拟两种方法研究地面效应对近流线型断面静气动参数的影响机理. 首先, 基于风洞试验获得近流线型断面在不同风攻角下的静气动参数随离地高度的变化规律, 并基于静三分力系数的试验结果, 分析了地面效应对断面静风稳定性、涡激振动可能产生的影响. 其次, 采用 CFD 识别各试验工况下断面的绕流特征及静气动参数, 分析了不同风攻角下地面效应对近流线型断面静力三分力的影响机理.

1 近流线型断面测力风洞试验节段模型设计

近流线型断面测力节段模型要求模型整体具有较大刚性. 本次试验模型长度 L 为 1.2 m, 高度 h 为 0.047 m, 宽度 B 为 0.364 7 m, 整个模型长宽比约为 3.3. 模型断面设计如图 1 所示. 模型离地高度布置如图 2 所示. 其中, 离地高度 H 为模型底面至地面的距离.

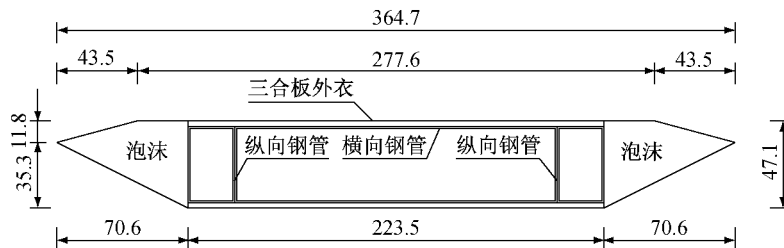


图 1 节段模型断面图(单位:mm)

Fig.1 section model(unit:mm)

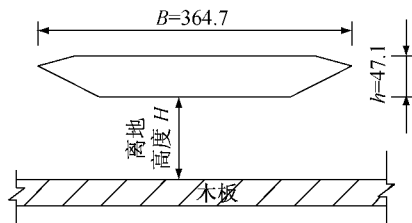


图 2 模型离地高度示意图(单位:mm)

Fig.2 Model height from the ground(unit:mm)

测力节段模型竖直安装在底支式六分量测力天平上, 并通过风洞的转盘来转动模型实现攻角变化. 试验通过皮托管和微压计确定试验风速固定为 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 每个离地高度完成了 -6° 到 $+6^\circ$ 共计 13 个

风攻角. 试验结果包括断面在不同离地高度、不同风攻角下, 主梁的静风阻力和阻力系数、静风升力和升力系数以及静风升力矩和升力矩系数. 节段模型安装示意图如图 3 所示, 试验工况见表 1.

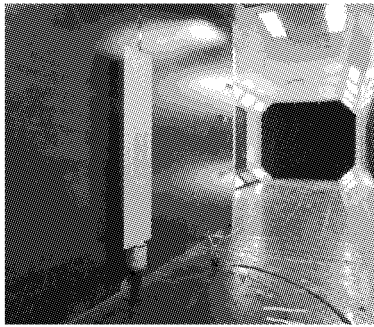
2 三分力系数随离地高度变化风洞试验结果

2.1 静力三分力系数定义

静力三分力系数是指表征结构断面在平均风作用下受力大小的量纲一系数, 它反映了风对桥梁的定常气动作用, 是确定结构静风荷载和其他动力响

表 1 测力节段模型试验工况
Tab.1 Cases of sectional model force measurement testing

断面宽度 B/mm	离地高度 H/mm	H/B	试验风速/ (m·s ⁻¹)	均匀流场	
				风攻角	步长
364.7	72.9	0.2	15	-6°~+6°	1°
	109.4	0.3			
	145.9	0.4			
	182.4	0.5			
	218.8	0.6			
	∞				



a 均匀流场



b 无地面效应

图 3 测力模型风洞安装示意

Fig.3 Photos of sectional model force measurement testing

应的关键参数。风对主梁的作用可以分解为三种力,按桥梁断面本身的体轴坐标系和风轴坐标系来分别定义,设风轴坐标系下的三分力分别记为阻力 F_D 、升力 F_L 和扭矩 M_T ,如图 4 所示。图中, F_H 为沿体轴阻力, F_V 为沿体轴升力, α 为来流攻角; U 为来流风速。

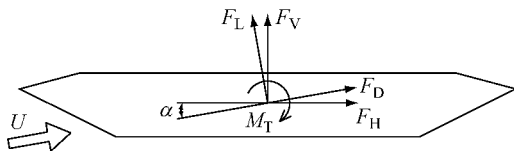


图 4 静力三分力示意图

Fig.4 Three-components of aerodynamic force diagram

风轴上的阻力系数 C_D 、升力系数 C_L 以及升力矩系数 C_M 定义如下:

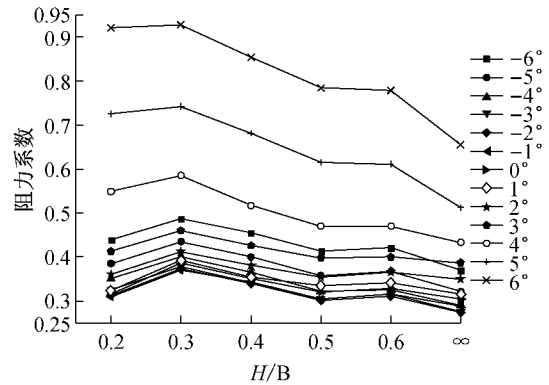
$$C_D = \frac{F_D}{1/2\rho U^2 HL}, \quad C_L = \frac{F_L}{1/2\rho U^2 BL},$$

$$C_M = \frac{M_T}{1/2\rho U^2 B^2 L}$$

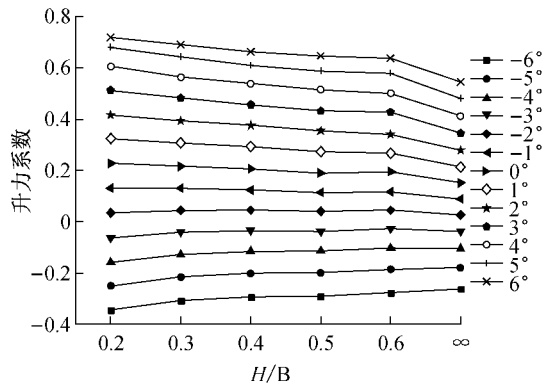
式中: ρ 表示空气质量密度,取 $\rho=1.225 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; H, B 及 L 分别表示节段模型投影高度,投影宽度及投影长度。

2.2 试验结果分析

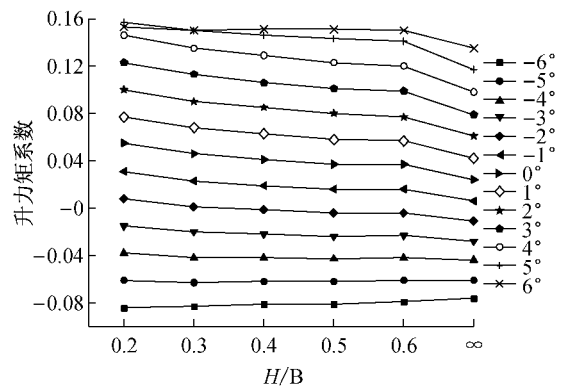
根据测力节段模型试验结果,静力三分力系数试验值随断面离地高度变化曲线如图 5 所示。由图 5 可知:



a C_D



b C_L



c C_M

图 5 均匀流场中阻力系数、升力系数及升力矩系数试验值随离地高度变化

Fig.5 The Drag coefficient, lift coefficient and moment coefficient test value change with height from the ground

(1)地面效应对升力系数和升力矩系数影响规律基本相同,对阻力系数的影响最明显;

(2)大攻角下地面效应的影响大于小攻角情况;

(3)当断面处于一定离地高度以上,即当 $H/B \geq 0.4 \sim 0.5$ 时,地面效应对三分力系数影响较弱,三分力系数的变化较小.

(4)均匀流场中,阻力系数随着离地高度的增加,总体上呈递减的趋势,说明离地较近时,地面效应使结构所受到的阻力增大,对结构产生不利影响;在 $-1^\circ \sim +1^\circ$ 攻角下,升力系数基本保持不变.可以认为在小攻角情况下,地面效应对升力系数的基本没有影响;随着离地高度的降低,升力系数绝对值增大,结构所受的风荷载增大,地面效应对结构产生不利影响.

(5)引用空气动力学中的概念,均匀流场中,在正攻角情况下,近流线型断面受到的是正的地面效应,即随着离地高度的降低,升力增大.在负攻角情况下,断面受到的是负的地面效应,即随着离地高度的降低,升力减小.

3 地面效应对静风稳定性、涡激共振区间的影响

在桥梁抗风研究中,静力三分力系数可用来计算结构扭转发散失稳风速.根据《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T D60-01—2004)和条文说明,扭转发

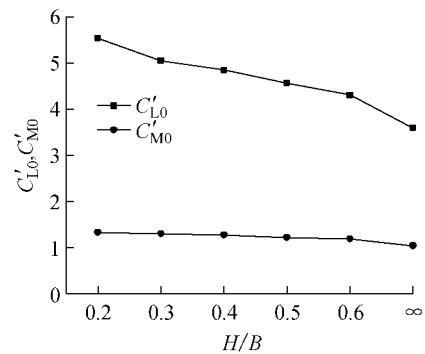
散临界风速为 $V_{td} = \sqrt{\frac{2K_t}{\rho B^2 C'_{M0}}}$.其中, k_t 为扭转刚度, C'_{M0} 为升力矩系数斜率, C'_{L0} 为升力系数斜率.因此,由此可知, C'_{M0} 越大,结构扭转发散临界风速越低.

图 6a 给出了 0° 攻角升力系数斜率 C'_{L0} 试验值和升力矩系数斜率 C'_{M0} 试验值随离地高度变化曲线.由图 6a 可以看出:均匀流场中,随着离地高度减小, C'_{L0} 和 C'_{M0} 值不断增大,最大变化幅度达到 50% 左右,可见结构的静风稳定性不断降低且变化幅度较大,地面效应对结构静风稳定性产生不利影响,且造成的临界风速降低不可忽视.位于水面以上的桥梁,在进行结构静风稳定性风洞试验时,应考虑地面效应的影响.

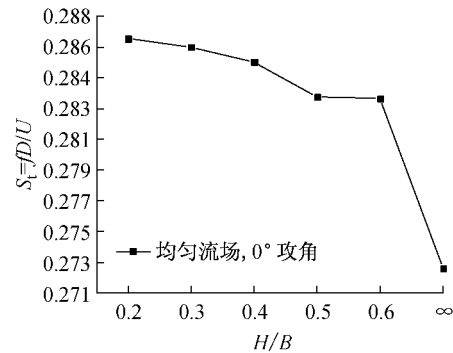
涡激振动中,Strouhal 数 (S_t 数)是反映旋涡脱落频率的一个量纲一系数.其表达式为 $S_t = fD/U$.其中, f 为旋涡脱落频率, D 为断面高度,断面的 Strouhal 数越大,说明在风速一定的情况下,该断面旋涡脱落频率越高.

对于涡激振动的研究一般是在均匀流场中进行.在此,以均匀流场, 0° 风攻角,不同离地高度下断面旋涡脱落频率为代表,来说明地面效应可能对涡激共振区间产生的影响.

对断面在 0° 攻角下,各离地高度的升力系数时程曲线稳定段进行快速傅立叶变换(FFT)变换后,可得断面的旋涡脱落频率,从而可以得到断面的 S_t 数随离地高度变化的曲线,如图 6b 所示.其中, D 取 0.047 m , U 取 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.由图 7 可知,均匀流场中,相同风速下,随着断面离地高度的降低,断面 S_t 数不断升高,断面旋涡脱落频率越大.而研究表明,结构的旋涡脱落频率基本上与风速成正比.这就意味着,当气流流过断面形成旋涡的脱落频率达到结构某一阶固有频率时,断面离地越低,则此时的风速越低,涡激振动更可能发生.因此,地面效应将导致断面的涡激振动区间提前.



a C'_{L0} 、 C'_{M0} 随离地高度变化



b S_t 数随离地高度变化

图 6 C'_{L0} 、 C'_{M0} 、 S_t 数随离地高度变化

Fig. 6 The Lift coefficient derivative, moment coefficient derivative and S_t number test values change with height from the ground

4 静力三分力系数数值模拟

4.1 计算模型、计算区域和工况

由于测力试验模型尺寸不大,因此本文按全模

型尺度进行数值模拟计算,即断面外形尺寸与原型断面一致.采用 ANSYS 提供的 Fluent 有限体积法求解器进行主梁断面绕流流场的数值计算.对于计算域的选择,要满足计算精度的要求,同时也不能够过大地增加计算量.数值模拟的计算域选取如图 7 所示,即入口位于断面前端 $10B$ 距离处,出口位于断面后端 $20B$ 距离处,上边界距断面顶部 $15h$.图中, B 为断面宽度, h 为断面高度, H 为断面底面离地高度.

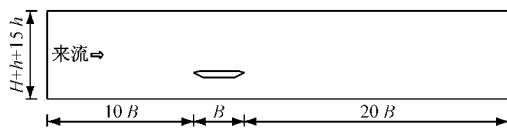


图 7 计算域示意图

Fig.7 Overview of computational domain

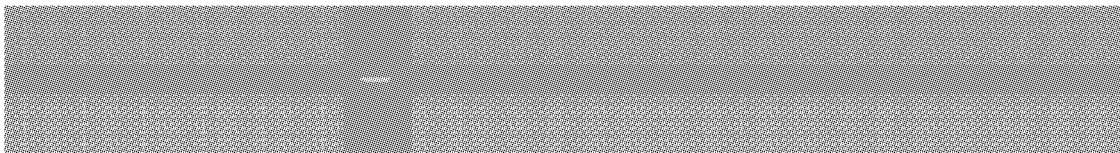


图 8 计算域网格划分示意

Fig.8 Mesh of the computational domain

本次计算采用二维非定常(Transient)分离式求解器.对于均匀流场,选取了 SST $k-\omega$ (剪应力输送 $k-\omega$ 和基于 SST $k-\omega$ 的二维分离涡模拟(DES)模型进行计算.

边界条件:入口采用速度入口(velocity-inlet);出口采用相对压力为 0 的压力出口(pressure-outlet);上边界采用对称边界条件(symmetry);下边界在考虑和不考虑地面效应情况下分别采用无滑移壁面(wall)和对称边界条件(symmetry);断面采用无滑移壁面(wall);压力-速度耦合方式采用求解压力耦合方程的半隐式方法(SIMPLEC);时间分辨率根据 $0.01B/U=0.000729$ s(B 为模型宽度, U 为速度)和 $d/U=0.00022$ s(d 为模型壁面附近最小流向网格尺度),物理时间步长设置为 0.0002 s.

4.3 静力三分力系数数值结果及与试验值的对比

图 9 给出了均匀流场下,近流线型断面不同离地高度、 $-6^\circ \sim +6^\circ$ 风攻角下,三分力系数风洞试验结果、SST $k-\omega$ 模型数值模拟结果.由图 9 可知,SST $k-\omega$ 模型的模拟结果与试验结果一致性很好,特别是在小攻角情况下,SST $k-\omega$ 的模拟结果十分令人满意,这也验证了 CFD 模拟的可行性和可靠性.

根据工况不同, H 取值分别为 $0.2B$ 、 $0.3B$ 、 $0.4B$ 、 $0.5B$ 、 $0.6B$ 、 $15h$.数值模拟计算了每个离地高度 H 下, 0° 、 $\pm 2^\circ$ 、 $\pm 4^\circ$ 和 $\pm 6^\circ$ 风攻角下的近流线型断面的静力三分力系数.

4.2 网格划分及湍流模型及边界条件

网格划分采用 ANSYS ICEM CFD 软件,采用二维结构化网格进行网格划分.对于所研究的近流线型断面,离断面相对较远的流场区域的网格划分对数值模拟计算结果影响不大,且产生的误差也相对较小,所以对于远离断面的流场区域的网格划分相对稀疏,靠近断面的网格较为密集,网格由断面向外由密变疏,均匀过渡.为在断面附近和地面附近更好地模拟边界层流动,第一层网格厚度设为 0.0002 m,每个工况整个区域总网格大约在 10 万左右.全局网格划分图见图 8.

5 地面效应对静力三分力系数影响机理

CFD 技术最直观的优点,便是能够将流动可视化,将各个工况下的流场状况直观地显示出来,从而能为各种现象进行机理解释,明确现象产生的原因.鉴于 $+6^\circ$ 攻角下的静气动力系数随离地高度变化较大,以 $+6^\circ$ 攻角下速度场及压力场为例,并基于上述分析结论,来分析地面效应如何影响气动力系数.

图 10 给出均匀流场下,断面在 $+6^\circ$ 风攻角、 $H/B=0.2$ 、 $H/B=0.4$ 和 $H/B=\infty$ 三种离地高度下的压力分布和速度分布.

图 10b、图 10d、图 10f 显示随着与地面的距离减小,地面附面层总体上减缓了桥梁下腹板与地面之间区域的流速,从而加强了 a 点、 c 点的流动分离,其后局部负压区的强度及尺度随与地面的距离减小而加强及增大,升力系数也因之增加,即升力系数随着离地高度降低而增大,与试验结果一致;图 10a、10c、10e 显示,随着与地面的距离减小,地面附面层减缓了 abd 线与地面区域之间的流速,加强了驻点处的

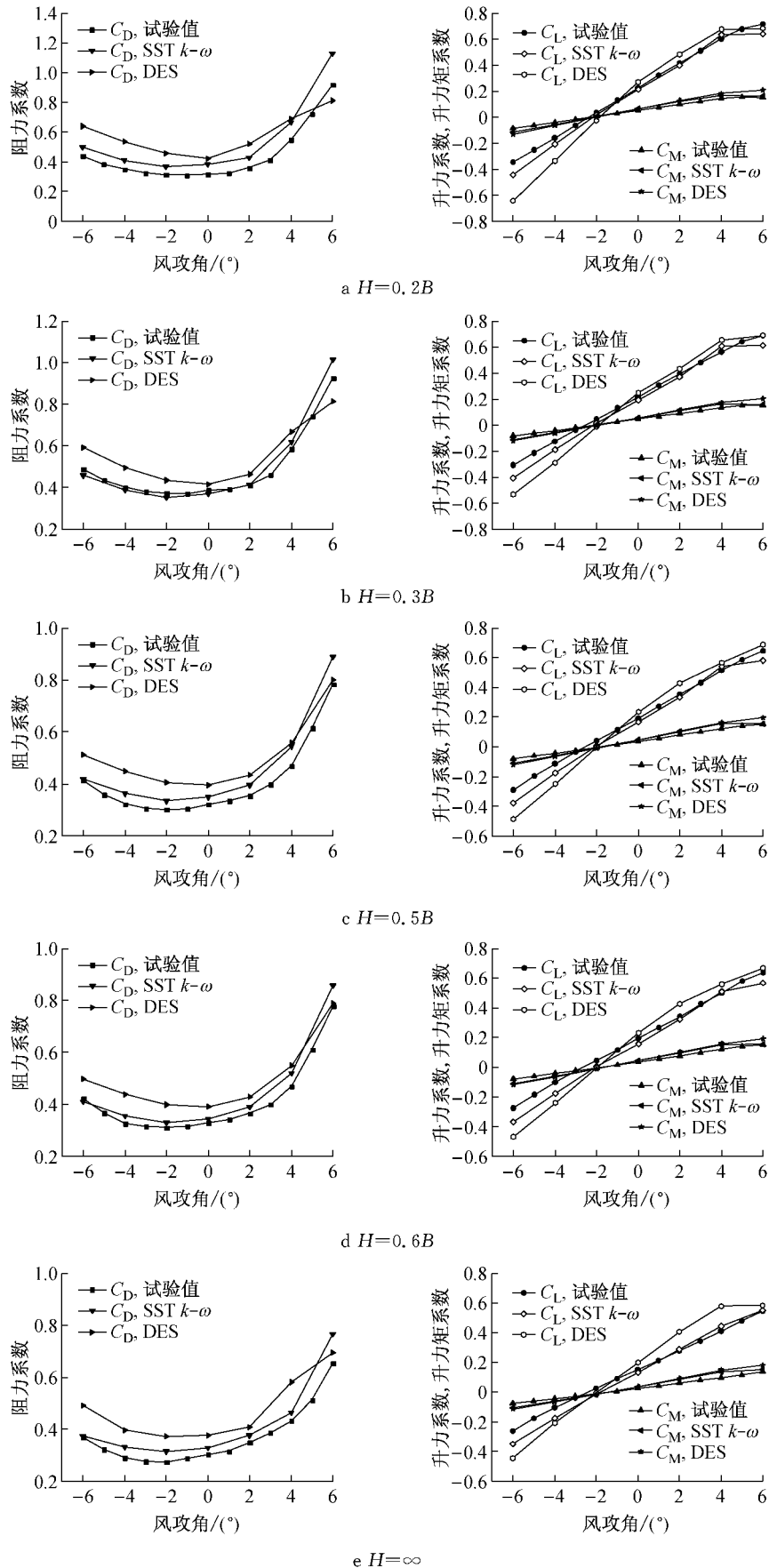


图 9 三分力系数数值模拟结果与试验结果比较

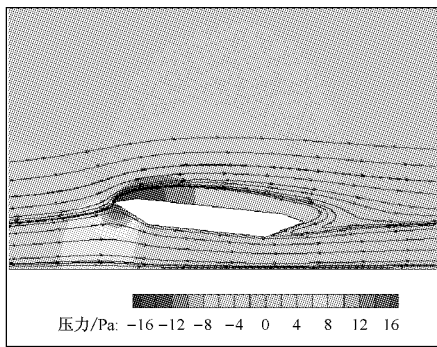
Fig. 9 The wind tunnel test value and computed value of the three-component coefficient

压力,由驻点处压力形成的阻力系数也随之增加,即阻力系数随着离地高度降低而增大,与试验结果也一致.

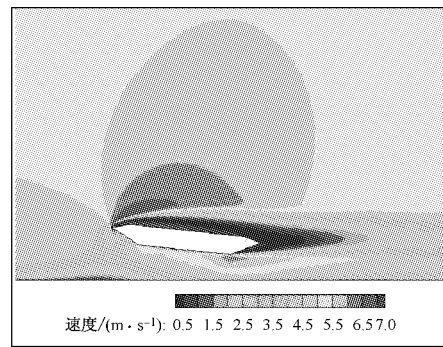
因此,根据图 10 所示速度场云图及压力场云图,可以明确:

(1) 随着离地距离减小,地面附面层带来的影

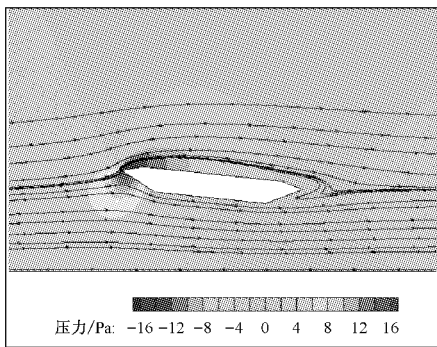
响总体上减缓了 abd 线与地面之间区域的流速(相对来流速度 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 而言),增大了桥面上方的流速,从而在一方面加强了 a 点、 c 点的流动分离,这可使分离产生的局部负压区的强度及尺度加强及增大(见图 11,并对比图 10d、图 10f 所示速度场);而另一方面也增加了驻点处的压力(基于伯努利方程).



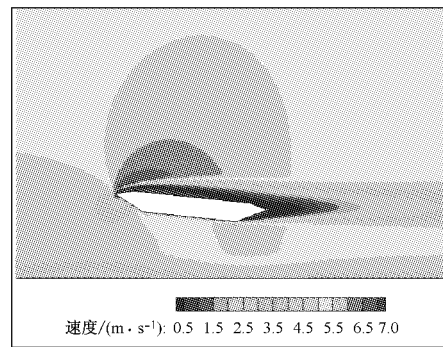
a $H/B=0.2$, 压力分布与流线



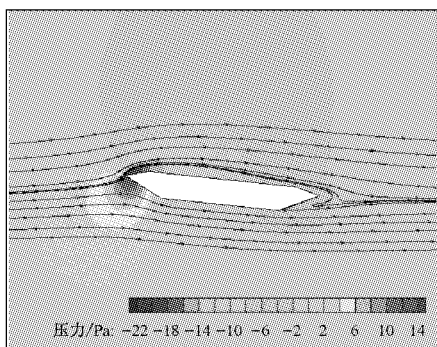
b $H/B=0.2$, 速度分布



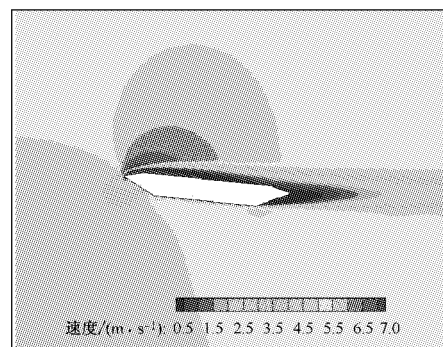
c $H/B=0.4$, 压力分布与流线



d $H/B=0.4$, 速度分布



e $H/B=\infty$, 压力分布与流线



f $H/B=\infty$, 速度分布

图 10 断面 +6° 攻角压力分布和速度分布

Fig. 10 Cloud image of velocity and pressure when $\alpha = +6^\circ$

(2) 随着断面离地距离减小, abd 线与地面之间区域的流速由于断面形状的渐变(变小,在较小的负风攻角、0°风攻角及所有风正攻角均是如此)可形成

隧道风效应,在桥面下腹板区域风速加大,可导致 d 点的流动分离加强,见图 11 所示.

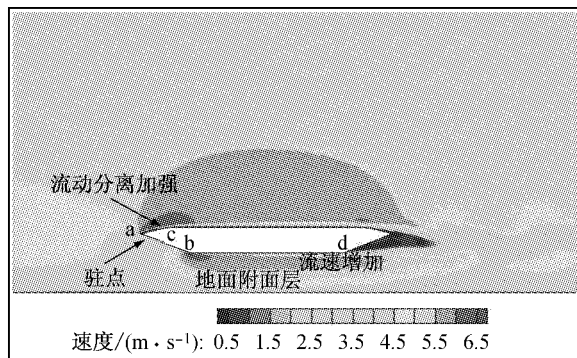


图 11 断面 0° 攻角速度分布 ($H/B=0.2$)

Fig. 11 Cloud image of velocity when $\alpha = +0^\circ$

6 结论

本文以风洞试验和计算流体动力学(CFD)相结合的方法,对存在地面效应的近流线型断面的静气动力特性(静三分力系数、 S_c 数)进行研究.试验结果及数值模拟结果显示,当桥面接近地面时,地面会使断面的绕流与在远离地面时的情况不同,主梁离地高度将成为影响主梁气动性能的重要因素,这可能对主梁在风荷载作用下的静力和动力响应产生不利的影响.具体有如下结论:

(1)地面效应对升力系数和升力矩系数影响规律基本相同,对阻力系数的影响最明显;

(2)大攻角条件下,地面效应的影响大于小攻角情况.小攻角情况下,地面效应对升力系数的基本没有影响.当断面处于一定离地高度以上,即当 $H/B \geq 0.4 \sim 0.5$ 时,地面效应对三分力系数影响较弱,三分力系数的变化较小;

(3)均匀流场中,阻力系数随着离地高度的增加,总体上呈递减的趋势,说明地面效应使结构所受到的风荷载增大,对结构产生不利影响.

(4)随着离地高度的降低,升力系数绝对值增大,结构所受的风荷载增大,地面效应对结构产生不利影响.

(5)地面的存在对断面静风稳定性会产生不利的影响,并会加快断面的旋涡脱落,导致涡激振动锁定区间提前,涡激振动现象提前发生.

(6)随着与地面的距离减小,地面附面层带来的影响总体上减缓了断面下腹板与地面之间区域的流速,一方面增加了驻点处的压力;另一方面加强了断面前缘分离点的流动分离,加大了分离点局部负压区的强度及尺度.

参考文献:

- [1] Barber T. Aerodynamic ground effect; a case study of the integration of CFD and experiments[J]. International Journal of Vehicle Design, 2006, 40(4): 299.
- [2] Justin Gross, Traub L W. Experimental and theoretical investigation of ground effect at low Reynolds numbers[J]. Journal of Aircraft, 2012, 49(2): 576.
- [3] Yang M, Yang W, Yang Z G. Wind tunnel test of ground viscous effect on wing aerodynamics[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2015, 33(1): 82.
- [4] Marshall D W, Newman S J, Williams C B. Boundary layer effects on a wing in ground effect[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2010, 82(2): 99.
- [5] 杨美,杨韡,杨志刚.地效翼地面粘性效应风洞试验研究[J].空气动力学学报,2015, 33(1):82.
YANG Mei, YANG Wei, YANG Zhigang. Aerodynamic investigation on design of tiltable end plate flow wingcraft[J]. Aircraft Engineering and Aeros, 2015, 33(1): 82.
- [6] Yang Z G, Yang W, Jia Q. Ground viscous effect on 2D flow of wing in ground proximity [J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2010, 4(4): 521.
- [7] Mokry M. Numerical simulation of aircraft trailing vortices interacting with ambient shear or ground [J]. Journal of aircraft, 2001, 38(4): 636.
- [8] Kyoungwoo Park, Juhee Lee. Influence of endplate on aerodynamic characteristics of low-aspect-ratio wing in ground effect [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22(12): 2578.
- [9] Prasad R. Computational modeling of wing in ground effect aerodynamics [D]. Gandhinagar: Indian Institute of Technology, 2014.
- [10] 王刚,叶正寅,陈迎春.基于 N-S 方程的地面效应模拟[J].飞行力学,2001,19(1):38.
WANG Gang, YE Zhengyin, CHEN Yingchun. The simulation of ground-effect based on N-S equations[J]. Flight Dynamics, 2001, 19(1): 38.
- [11] 岳锋,石亚军,李凤蔚.基于 N-S 方程的地面效应数值模拟研究[J].航空计算技术,2005,35(2):62.
YUE Feng, SHI Ya jun, LI Feng wei. Simulation of wing in ground effect based on N-S equations [J]. Aeronautical Computer Technique, 2005, 35(2): 62.
- [12] 应成炯,杨韡,杨志刚.地面效应下的机翼失速数值模拟[J].飞行力学,2010, 28(5): 9.
YING Chengjiong, YANG Wei, YANG Zhigang. Numerical simulation stall of wing in ground effect[J]. Flight Dynamics, 2010, 28(5): 9.
- [13] 龚军锋,祝小平,周洲.基于结构动网格的无人机地面效应研究[J].航空工程进展,2012,3(3):263.
GONG Junfeng, ZHU Xiaoping, ZHOU Zhou. Research on ground effect of unmanned aerial vehicle based on dynamic structural grid [J]. Advance in aeronautical science and engineering, 2012, 3(3): 263.
- [14] 屈秋林,刘沛清,秦绪国.地效飞行器大迎角近地面飞行分离流动数值研究[J].航空学报,2007, 28(1):72.

- QU Qiulin, LIU Peiqing, QIN Xuguo. Numerical research on separated flow around a WIG craft in flight close to ground at high incidence angle[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2007, 28(1):72.
- [15] 杨韡,杨志刚. 三维地效翼展向效应数值模拟[J]. 计算机辅助工程, 2008, 17(3):13.
- YANG Wei, YANG Zhigang. Numerical simulation on span dominated ground effect of 3D winging round effect [J]. *Computer Aided Engineering*, 2008, 17(3): 13.
- [16] 张斌,徐敏,谢亮. 地效对二维气动弹性特性的影响[J]. 航空学报, 2014, 35(8):2156.
- ZHANG Bin, XU ming, XIE liang. Influence on two dimensional aeroelastic characteristics in ground effect [J]. *Acta Aeronautica Sinica*, 2014, 35(8):2156.
- [17] Lee J, Han C S, Bae C H. Influence of wing configurations on aerodynamic characteristics of wings in ground effect [J]. *Journal of Aircraft*, 2010, 47(3): 1030.
- [18] Mahon S, Zhang X. Computational analysis of pressure and wake characteristics of an aerofoil in ground effect[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2005, 127(2): 290.

(上接第 1339 页)

(2) 高强螺栓牙板连接一共可能出现 5 种破坏形式: 齿间滑移破坏、截面削弱破坏、螺栓受拉破坏、牙纹承压破坏以及牙纹受剪破坏。通过构造要求可以避免连接发生后三种破坏形式, 并通过承载力计算以确保不发生前两种破坏形式。

(3) 通过试验, 验证了本文提出的理论计算公式的可靠性。理论公式计算出的承载力都略小于试验测得的承载力, 说明公式是可靠且偏于安全的, 能用于该类连接设计承载力计算。

(4) 试验研究发现单面牙纹高强螺栓牙板连接在承载后期出现“附加弯矩”, 这种附加弯矩并不对承载力造成显著影响, 但使用双面牙纹高强螺栓牙板连接时, 其结构性能的对称性更好。

参考文献:

- [1] 沈祖炎, 陈扬骥, 陈以一, 等. 钢结构基本原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- SHEN Zuyan, CHEN Yangji, CHEN Yiyi, *et al.* Fundamental of steel structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [2] 中华人民共和国建设部. GB50017—2003 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- Ministry of Construction, the People's Republic of China. GB50017—2003 Code for design of Steel structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局和标准化管理委员会. GB/T 228.1—2010 金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, the People's Republic of China and Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T228.1—2010 Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [4] 中华人民共和国建设部. GB50429—2007 铝合金结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- Ministry of Construction, the People's Republic of China. GB50429—2007 Code for design of aluminum alloy structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.
- [5] 郭小农. 铝合金结构构件理论和试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- GUO Xiaonong. Theoretical and experimental research on the aluminum alloy structure members [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [6] EN1999-1-1; 2000 Eurocode 9: Design of aluminum structures- General rules and rules for buildings [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2000.
- [7] BS8118-1; 1991 Structural use of aluminum: Code of practice for design [S]. London: British Standard Institution, 1991.
- [8] Aluminum Association. Aluminum design manual [S]. [S. l.]: Aluminum Association, 1994.