

文章编号:1671-6833(2003)02-0022-04

极端桥梁断面雷诺数效应研究

李加武, 林志兴, 项海帆

( 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 利用热线风速仪对两种极端桥梁断面的尾迹区的脉动风速进行了测量, 以模型高度为特征尺寸换算得到 Strouhal 数, 并利用天平测得模型的三分力系数. 以此为基础, 分析了以梁高为特征尺寸的雷诺数与上述参数的关系. 试验结果表明, 在以  $\Pi$  形梁为代表的钝体桥梁断面中雷诺数效应很小, 可以忽略不计; 在以南京二桥为代表的流线形断面的雷诺数效应不可以忽略, 同时, 试验表明传统的低雷诺数风洞试验给出的三分力系数结果偏于保守.

关键词: 雷诺数效应; 流线型断面; Strouhal 数; 阻力系数; 升力系数

中图分类号: TU 422.5 文献标识码: A

0 引言

桥梁断面的雷诺数效应尽管早有提出, 但是近年来才有学者开始研究, 进行研究的学者为数不多, 研究的分量也远远不足. 资料可查的且研究较深入的学者有 A.Larsen, Y.Kubo, K.Mitsuda. Larsen 在压力风洞中对 Great Belt East 的西引桥断面进行了研究<sup>[1]</sup>. 他认为, 在桥梁断面中存在雷诺数效应, 在他的试验雷诺数范围内( $4 \times 10^4 \sim 2 \times 10^6$ ), 阻力系数和 Strouhal 数有明显的变化. Y.Kubo 在对 Ikara 桥的研究中发现在其试验的雷诺数范围内 Strouhal 数的确有明显的变化<sup>[2]</sup>, 他认为在全桥模型试验中雷诺数效应尤其严重. K.Mitsuda 在对中央开槽率为 60%、边角为  $80^\circ$  的流线桥梁断面研究后认为: 利用低雷诺数风洞试验得到的气动力系数计算的颤振风速要比高雷诺数下的颤振风速低. 而且从他的计算结果发现颤振临界风速与雷诺数有关系. 他还通过表面压力的测量证实桥梁断面中的确存在雷诺数效应<sup>[3]</sup>.

基于上述学者的研究及圆柱断面研究成果, 笔者对两种极端桥梁断面进行了测力和 Strouhal 数测量以初步探讨桥梁断面的雷诺数效应. 为验证试验装置的可靠性, 还对圆柱和矩形柱进行了 Strouhal 数测量.

1 试验及分析

1.1 试验概况

试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验 TJ-2 边界层风洞中进行, 该风洞试验段尺寸为  $2.5 \text{ m} \times 3.0 \text{ m} \times 15.0 \text{ m}$ . 空风洞风速在  $0.6 \text{ m/s} \sim 68 \text{ m/s}$  间可调. 桥梁断面模型见图 1.

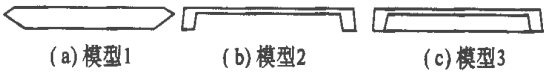


图 1 桥梁断面模型

Fig. 1 Model of bridge section

桥梁模型的断面选用钝体形和流线形两种. 试验模型用有机玻璃制作, 为提高模型刚度, 在模型体内用铝型材加强. 在充分考虑两个模型的对比性、雷诺数的跨度、风洞阻塞度、长宽比等对试验数据影响等因素后, 确定模型的尺寸为: 高度  $0.04 \text{ m}$ ; 宽度  $0.48 \text{ m}$ ; 长度  $1.68 \text{ m}$ .

需要说明的是, 在原先的试验方案中没有模型 3. 但是在测 Strouhal 数时, 由于开始很难找到模型 2 的涡脱强区, 猜测由于模型上下面相差较大, 从模型上下面脱落的涡相互抵消, 从而没有涡脱强区. 于是考虑将下面开口封起来才有模型 3, 试验发现模型 3 的涡脱强区的确很容易找到.

圆柱和矩形断面柱用有机玻璃制作, 表面均光滑. 确定模型尺寸时, 主要考虑展径比的影响.

圆柱尺寸:长 1.50 m, 直径 0.30 m; 矩形柱尺寸: 高 1.27 m; 长 0.32 m, 宽 0.21 m.

1.2 试验方法

测力试验:测力试验仅仅在模型 1 和模型 2 上进行. 将模型一端固定于测力天平上, 另一端用伪接触端板(相当于补偿模型)消除边端绕流引起的三维绕流影响. 模型 1 的风洞风速由 5 m/s 到 50 m/s 等步长变化, 以梁高为特征尺寸的试验雷诺数范围为:  $1.3 \times 10^4 \sim 1.3 \times 10^5$ ; 模型 2 由于侧向的振动较大, 风速在 5~30 m/s 间等步长变化, 以梁高为特征尺寸的雷诺数范围在  $1.3 \times 10^4 \sim 8 \times 10^4$  变化.

Strouhal 数测量:对模型 1、模型 2、模型 3 测量了尾流. 利用热线风速仪测量尾流区紊流, 通过 FFT 得到涡脱频率算得 Strouhal 数. 模型 1 涡脱强区的位置范围较大, 热线探头位于模型下游 10D

~40D 都可测得涡脱频率. 模型 2 的涡脱强区较小, 仅能在模型下游 1D 才能感受到较强的信号. 模型 3, 探头在下游 2D 处才能感受到强烈的信号 ( $D$  为模型的高度).

圆柱和矩形柱也是一端固定一端自由. 高风速由于两柱的侧向的振动, 风洞风速都没能吹到预期值 50 m/s. 圆柱模型热线探头位置为: 顺风向, 下游 1.5D; 横风向, 轴线外偏 0.5D. 矩形柱的热线探头位置: 顺风向, 下游 1.5 模型长, 横风向, 轴线外偏 0.5 模型宽.

2.3 试验结果与分析

图 2 的(a), (b), (c) 分别为模型 1 的阻力系数、升力系数和升力矩系数随雷诺数的变化情况; 图 3 的(a), (b), (c) 为模型 2 的三分力系数随雷诺数变化; 图 4 为三模型的 Strouhal 数随雷诺数的变化. 表 1 和表 2 分别为圆柱和矩形柱的试验结果.

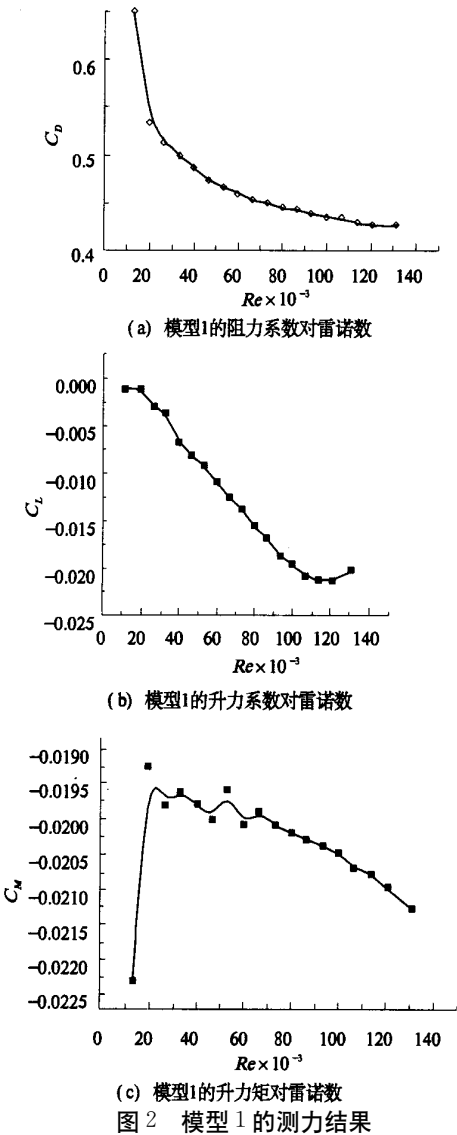


图 2 模型 1 的测力结果

Fig.-2 Result from balance of Mbdel 1

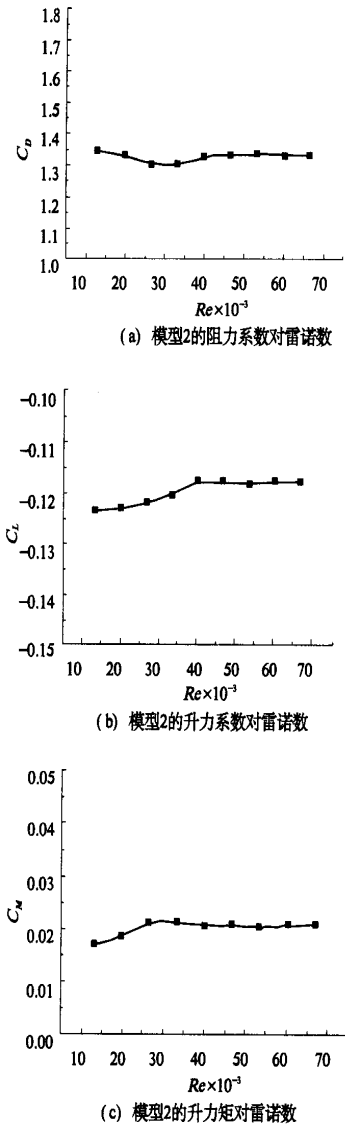


图 3 模型 2 的测力结果

Fig.-3 Result from balance of Mbdel 2

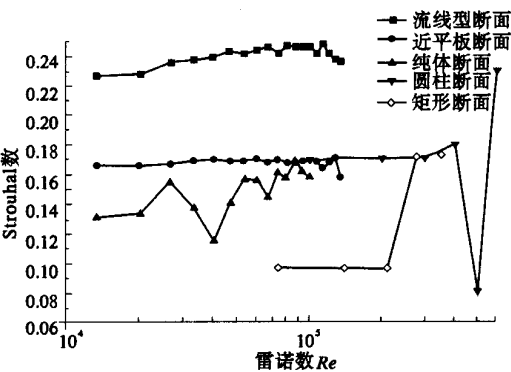


图 4 Strouhal 数对雷诺数

Fig. 4 Strouhal number vs ·Re

表 1 圆柱试验结果

Tab. 1 Result of circular section model

$U/(m\ s^{-1})$	$Re \times 10^5$	涡脱频率/Hz	S 数
5	1.0	2.84	0.17
10	2.0	5.62	0.17
15	3.0	8.42	0.17
20	4.0	11.96	0.18
25	5.0	7.06	0.08
30	6.0	22.58	0.23

表 2 矩形柱试验结果

Tab. 2 Result of rectangle section model

$U/(m\ s^{-1})$	$Re \times 10^5$	涡脱频率/Hz	S 数
5	0.74	2.32	0.097
5	0.74	4.61	0.190
10	1.40	4.55	0.096
10	1.40	9.09	0.190
15	2.1	6.83	0.096
15	2.10	13.64	0.190
20	2.80	16.37	0.170
25	3.50	20.47	0.170

如果忽略 5 m/s 风速对应的数据,模型 1 的阻力系数在试验的雷诺数范围内随雷诺数减小的规律还是很明显的,这都是临界区典型的特征.阻力系数由雷诺数为  $2 \times 10^4$  的 0.53 减小到雷诺数为  $1.31 \times 10^5$  的 0.43,相对降幅为 20%,印证了上述三学者所说的低雷诺数得到的阻力系数偏于保守.模型 1 的升力系数和阻力系数有相似的规律,升力系数变化的相对幅值远远大于阻力系数的幅值,升力系数由雷诺数为  $2 \times 10^4$  的 -0.003 7 降到  $1.31 \times 10^5$  的 -0.020 3,相对幅值约为 4 倍.升力系数在雷诺数为  $1.31 \times 10^5$  时稍有增加,但由于试验雷诺数范围有限,不能推断升力系数即将进入超临界范围.模型 1 的升力矩系数随雷诺数变

化不太明显,如果升力矩主要由升力提供,那么升力矩的力偶臂变化将是明显的.

在试验雷诺数范围内,模型 2 的三分力系数对应随雷诺数变化的确不是很大,但是还不知道在其他雷诺数范围,该断面的三分力系数随雷诺数变化规律.

由图 4 可以看出,模型 3 的 Strouhal 数在试验的雷诺数范围没有明显的变化.出乎意料的是模型 2 在试验雷诺数的范围波动很大,而且缓慢地增加,与众多学者关于钝体断面 Strouhal 数不随雷诺数变化的预言是相悖的.模型 1 的 Strouhal 数有变化,但是并不明显,本试验的雷诺数范围和 Larsen 的相比要狭窄得多,但与其相同的雷诺数区间,Strouhal 数变化的趋势及幅度还是比较吻合的.同时本试验中并没有发现 Larsen 所述:  $D_D \cdot S_L = \text{constant}$  的猜想.

在雷诺数分别为  $1.0 \times 10^5, 2.0 \times 10^5$  时,均为 0.17,比现有文献的 0.20 要偏小.风速大于 25 m/s,即雷诺数高于  $3 \times 10^5$  后,可能落入临界区,没能发现卓越频率,表中的频率仅仅是在功率谱图上占微弱优势的频率.因此在临界区可能没有规则的涡脱,热线也不能测得涡脱频率.

而对于矩形柱,在雷诺数分别为  $0.74 \times 10^5, 1.4 \times 10^5, 2.1 \times 10^5$  时,出现两个卓越频率,而且大的是小的 2 倍.由表 2 可以明显得到:不管采用哪个数据,在狭窄的试验雷诺数范围内,其 Strouhal 数也不是固定的,这一点和桥梁断面模型 2 有相似之处,同时和现有文献[5]的假定也是相悖的,也出乎笔者的意料.

3 试验结论

尽管本试验的雷诺数范围较窄,还是证实了预期的一些规律.结合上述试验结果和分析,总结几条结论如下:

- (1) 流线型断面的阻力系数和升力系数随雷诺数增加而减小,在低雷诺数风洞试验中得到的值偏于保守,用偏于保守的阻力系数和升力系数用于抖振分析,导致的结果自然可靠性值得质疑.
- (2) 钝体断面的三分力系数在本文试验中随雷诺数变化很小,但是此雷诺数区间以外的规律需要进一步研究.
- (3) 流线型断面的 Strouhal 数随雷诺数增加而增加,钝体断面(如本试验的模型 2)的 Strouhal 数可能也随雷诺数的增加而增加.
- (4) 不同断面的涡脱强区是不同的,而且涡

脱区的大小也是不同的. 流线断面的涡脱强区大, 热线探头在较大的范围都可以捕捉到涡脱; 钝体断面的涡脱区较小, 热线探头只有在狭小的区间内捕捉到涡脱.

(5) 圆柱在临界区可能没有规则的涡脱, 用测尾流涡脱来求临界区的Strouhal 数是不可行的. 涡脱卓越频率处的能量也随雷诺数的增加减小, 其他频率段分担的能量在增加( 包括低于卓越频率和高于卓越频率的频段), 直到落入临界区能量在各频率间均匀分配, 即卓越频率消失.

(6) 矩形柱的涡脱在低雷诺数区可能有双频. 矩形柱Strouhal 数在试验雷诺数范围内可能不是固定的, 卓越频率对应的能量也是随涡脱频率的增加而减小.

### 3 结束语

由于本文试验条件所限, 本文研究限于很窄的雷诺数范围内, 三分力系数和Strouhal 数对雷诺数的变化规律不明显. 鉴于此, 本文建议:

- (1) 增加试验雷诺数区间, 以找到三分力系数和Strouhal 数的全程变化规律.
- (2) 由于三分力系数和Strouhal 数的变化规

律受断面形状的影响很大. 因此建议对常用桥梁断面进行系列研究.

(3) 上述数据及结论都是在宏观领域进行的, 要得到更多的信息, 应该对之进行微观的研究, 如测压就可以可以实现这一点.

### 参考文献:

[ 1 ] LARSEN A , SCHEWE G · Reynolds number effects in the flow around a bluff bridge cross section[J] · J of Wind Eng and Indust Aerodyn , 1995,( 54) : 413~426.

[ 2 ] KUBO Y , NOGAM C , SHU K , et al , Reynolds number effects on bridge sections and fundamental sections for structures[J] · 风工学シソボジウム, 1994, 13: 119~124.

[ 3 ] MATSUD K A , COOPER K R · An investigation of Re number effects on the steady and unsteady aerody force on a 1:10 scale bridge deck section model[J] · J of Wind Eng and Indu Aerody , 2001,( 89) : 619—632.

[ 4 ] FARELL C , BLESSMANN J · On critical flow around smooth circular cylinder[J] · J Fluid Mech , 1983,( 136) : 375~391.

[ 5 ] WOOTON L R · Wind force on structures[J] · Trans ASCE , 1961,( 126) : 1124~1198.

## Study on the Reynolds Number Effect of two Extreme Bridge Sections

LI Jia -wu , LI N Zhi -xing , XIANG Hai -fan

(SLDRCE of Tongji University , Shanghai 200092, China)

**Abstract :** The characteristics of Reynolds number vs . Strouhal number the drag coefficient CD the lift coefficient CL and the moment coefficient CM have been investigated experimentally on the basis of three -component -forces measurements and of the hot -wire velocity -fluctuations measurement in the models wake . Deck height of the model is set as characeristic size . The Reynolds number effect of blunt bridge section (as the Π-shaped bridge section) is so slight that the effect can be ignored ,while for the streamline bridge section as the model 1 in this paper the Reynolds effects are great . The results obtained from low Reynolds -wind tunnel testing and applied in the bridge design appear conservative .

**Key words :** effect of Reynolds number ; streamline section ; Strouhal number ; drag coefficient ; lift coefficient