

桥墩轴向与水流成不同夹角时 流速分布特性定床试验研究

严建科^{1,2}, 焦 臣¹, 龙 涛¹, 杨久诚¹, 沈 波²

(1. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075; 2. 长安大学, 陕西 西安 710064)

摘 要:通过测量按照桥轴与水流方向成不同夹角布置的多级顺水圆柱桥墩周围各测点的流速, 研究多级顺水桥墩流速分布特性, 以及多级顺水桥墩的水力学特性。结果表明: 桥墩轴向与水流方向按照不同夹角布置, 多排桥墩会互有影响, 靠近下游桥墩的水流结构会受到上游桥墩影响, 其互相干扰是由于邻近、剪切、以及尾流三类机制造成的; 通过试验研究可知, 当桥轴方向垂直水流方向布置时, 流速在墩前、墩后变化最大, 但影响范围最小, 随着桥轴方向与水流方向夹角减小, 流速在墩前、墩后紊动变小, 但影响范围加大。

关键词:桥墩; 夹角; 流速; 水力学特性; 定床

中图分类号: U 442.3+9

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2013)06-0822-07

目前, 高速公路建设已由平原、微丘区转向山岭区, 山区沿溪线高速公路顺水或者与水流方向夹角较小桥梁越来越多, 此类桥梁的水文、水力特性以及冲刷深度等的计算分析有别于正交跨越的桥梁或者单墩计算结果^[1-3], 现有规范中还未有确切的计算方法或者公式, 部分学者有所研究^[4-7], 但尚未形成系统理论。本文通过在顺水圆柱桥墩周围布置测点, 测量其流速、流向等, 分析多级顺水圆柱桥墩流速分布特性, 为多级顺水桥墩水力特性和桥墩冲刷机理及防护研究提供参考。

1 试验设备及仪器

1.1 试验水槽

修建用于试验的人工水槽, 配备独立的供水和回水系统。试验水槽设计为直线开放型矩形水槽, 长 15 m、宽 1.5 m、高 0.7 m, 水槽底部比降 1‰, 水槽进口端设有进水阀门并安装电磁流量计, 在其出口端设有尾门, 进水阀门和尾门可调节水的流量和深度。为使水流进入试验区域时流速均匀, 在进口附近砌一道花墙, 并设置整流栅, 经其调整, 整流栅后 2 m 往下游水流流速均匀, 进入试验区域的定床段, 其长约 3 m, 往下游即进入动床段, 长约 7 m。选取水槽的定床段为试验段, 并选取若干断面观测。试验模型水槽立体图如图 1 示。

1.2 试验流速仪

流速测定采用挪威 Nortek AS 公司所推出的三维点式超声波高精度流速仪, 在圆柱桥墩周围按不同的方位角布置。

2 试验方案

经过初步分析, 选定了对试验影响最大的两个要素, 即: 水槽中试验水流流速和桥墩轴向与水流方

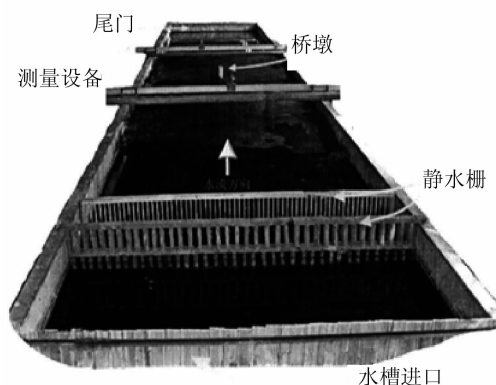


图 1 试验模型水槽立体图

Fig. 1 Three-dimensional shape of experimental water channel

收稿日期: 2013-02-25 修改稿日期: 2013-11-15

基金项目: 中交第一公路勘察设计研究院有限公司科技项目(KJYF2005-A04)

作者简介: 严建科(1979-), 男, 陕西眉县人, 博士, 高级工程师, 主要从事在役桥梁承载能力及技术状况评价研究。

向夹角作为控制要素。

为减少水流的表面张力对试验结果的影响,试验中最小水深大于 1.5 cm,一般水深大于 3 cm,表面流速不小于 23 cm/s;选取上游水流开始平稳的过水断面即整流栅后 2 m 处断面作为控制断面,经计算控制断面控制水深 $h=14.62$ cm,由此选取小于、等于和大于泥沙起动流速的三种流速对应的试验流量分别为 $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

模型桥墩采用直径为 5 cm 的空心圆柱桥墩,试验选用了五组串联双圆柱桥墩,采用的桥墩布置形式分别为与水流方向成 90° 、 60° 、 30° 、 0° ,每种角度时桥墩都均匀的布置在水槽中,前排与后排墩的中心间距为 30 cm。课题背景工程某高速路特大桥横向墩间距 8 m,桥墩直径 2 m,压缩比为 $1/4$;实验中左右柱横向间距 20 cm,圆柱直径 5 cm,压缩比亦为 $1/4$,与背景工程实桥断面横向压缩比相同。圆柱桥墩的布置形式如图 2~4 所示。

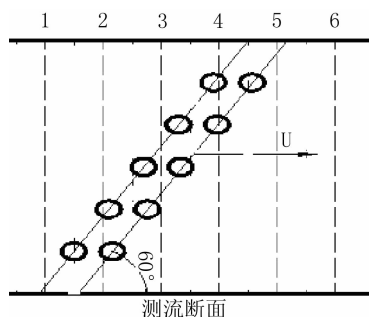


图2 与水流方向夹角为 60° 平面布置

Fig. 2 Plane layout of piers with 60° angle between bridge axle and flow direction

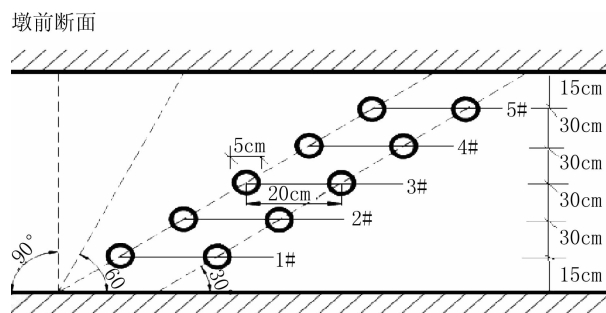


图3 与水流方向夹角为 30° 角平面布置

Fig. 3 Plane layout of piers with 30° angle between bridge axle and flow direction

试验桥墩采用横向 2 列纵向 5 排的多级顺水桥墩布置,每个桥墩均采用直径 5 cm 的 PVC 管材圆柱桥墩。前排墩布置在桥墩前排轴线断面上,后排墩布置在下游间距前排墩轴线 20 cm 处,每排墩相邻墩横向轴间距为 30 cm,墩径与墩间比尺 $30/5$,该比尺虽小于实际一般桥梁比尺 $30/2$ (即:一般桩径 2 m,桩间距 30 m),但墩间已经在墩间相互影响区外,不影响桥位冲刷试验结论。桥墩按顺水流方向从前往后依次编号为 1~5 号桥墩。根据高速公路桥梁实际情况,试验选择桥墩轴向与水流方向所成夹角分别为 0° 、 30° 、 60° 、 90° 四种情况,逐一进行观测研究。试验时在圆柱桥墩间分别设置流速观测断面,各断面间距 20 cm,顺着水流方向 1 号桥墩前断面设为断面 1,5 号桥墩后断面设为断面 6,中间各排墩间依次为 2~5 号断面。将桥墩轴向与水流方向夹角和试验水槽中的水流流速作为两个主要因素,正交组合,进行 12 组次试验,通过实际观测水流流态、测定水位、流速等,研究在不同顺水布置时圆柱桥墩的水力学特性,获得圆柱桥墩局部的冲刷特性,为桥梁设计提供理论依据。

2.1 行进流速观测方法

桥墩冲刷的关键影响因素是行进流速,为了对桥墩冲刷进行定量计算,试验中需要对行进流速进行全程详细观测,因而在试验段选设 n 个断面,进行行进流速观测。超声波流速仪需固定在测架之上,一方面测架可以在各个断面间移动,另一方面流速仪也可在测架上面上下或左右移动。将各个断面均匀十等分,然后采用三点法测每根垂线上三个点的流速,并将其平均作为该垂线上水流的平均

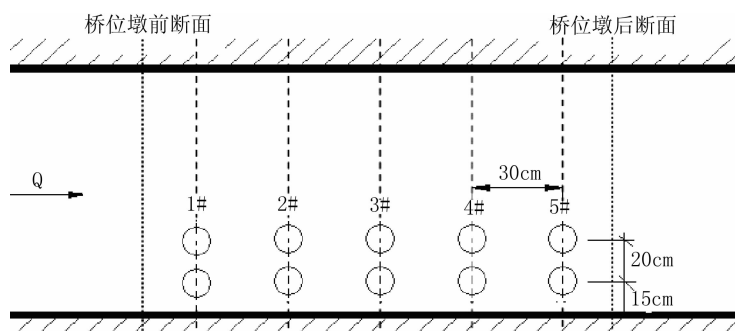


图4 与水流方向夹角为 0° 角平面布置示意图

Fig. 4 Plane layout of piers with 0° angle between bridge axle and flow direction

流速,最后再将十根垂线上水流的平均流速平均即得该断面的平均流速,此即为该处的行进流速.行进流速测量如图5示.

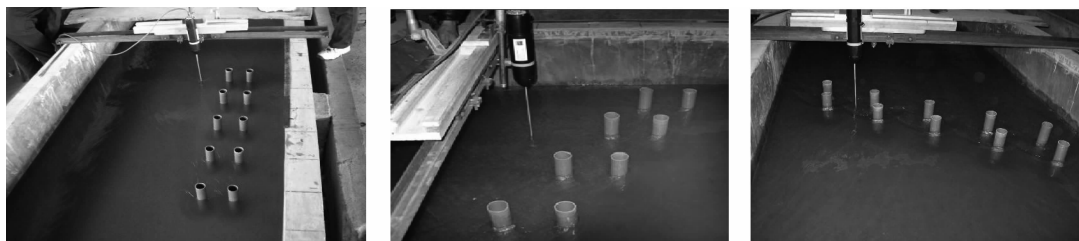


图5 Vectrino小威龙点式超声波流速仪断面测速

Fig. 5 Flow velocity test by vectrino ultrasonic current metre

2.2 沿程水位观测方法

进行沿程水位观测,通过比降变化来分析墩前的水位变化情况.沿程水位观测和出口水位控制采用SX40.1型水位测针测定,精度可达0.01 mm.布置三套带有测针的设备:为观测进口水位,在距离水槽进水口2 m处布置测针1;在活动测架上固定测针2,通过测杆地移动来测量沿程各个断面左、中、右三处水位;为控制出口水位布置测针3,同时也可观测沿程水位变化.

3 多级顺水圆柱墩周围水流运动特性

3.1 理想条件下多级顺水桥墩周围表层水流现象

在顺直河流中设置桥墩,在柱间的水流非干扰情况下,可认为属于理想条件下多级顺水圆柱桥墩周围的表层水流现象.试验观测表明,串联的双圆柱桥墩由于墩间水流相互影响的存在,与单墩比较周围的水流情况会发生很大变化,由于一组圆柱桥墩阻水绕流分流,在桥墩上游不远处水面雍高,至墩前达到最高,两侧水流收缩集中,动能增加,水面逐渐下降,在迎水最前墩后其交替性的漩涡脱落,导致垂直于来流方向产生剧烈振荡的提升力,从而导致水流剧烈紊动,同时在迎水墩后涡流区,后面的桥墩虽然存在前面迎水墩对水流的遮掩,但仍然起着阻水分流作用,使很大范围内涡流强度得以持续,使得水面不稳定.Zdravkovich等曾针对两圆柱串联和交错放置的绕流问题进行过试验研究.针对两圆柱中心距小于5倍圆柱直径的一系列情况,他们研究了两圆柱间的流动相互作用,发现圆柱中心距存在一临界值(约为3倍圆柱直径),小于该临界值时,就没有明显的漩涡自上游圆柱脱落.Standsby于1981年和1987年用离散涡方法和随机涡方法分别研究了并排、串联和交错放置的双圆柱墩绕流问题,试验结果与上述结论相符.如图6示(桥墩布置形式与水流方向成 90° 角,水槽中流量为 $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$),试验采用了直径为5 cm的圆柱桥墩,两圆柱中心间距为20 cm,也没有观察到明显的漩涡自上游圆柱脱落.

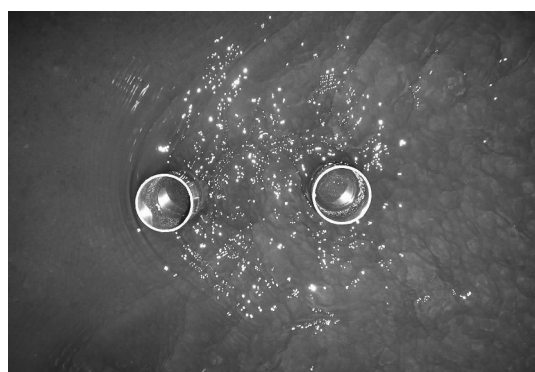


图6 串联双圆柱桥墩周围水流现象

Fig. 6 Flow phenomenon around tandem cylinder piers

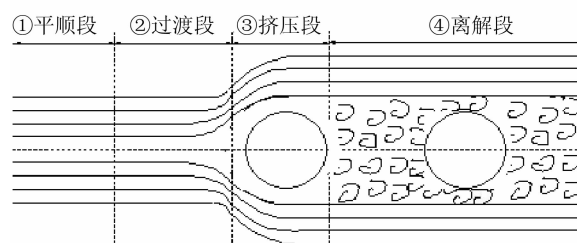


图7 理想条件下多级顺水桥墩周围表层水流现象

Fig. 7 Surface flow phenomenon around multi-level piers along river flow

对其水流结果进行分析:当水面附近的高速水流碰到桥墩时,水流方向偏转,水流流线弯曲,桥墩上游水体绕桥墩两侧流向下游,通过表面流线可以将这流动过程分为四段描述:(1)平顺段,位于桥墩的上游区,水流未受桥墩干扰,流线基本是平行的,水流结构近乎于均匀流;(2)过渡段:临近桥墩的上游区,水流流线类似“S”形曲线,由于水流受到桥墩的阻水作用,在墩前一定范围有壅水现象;(3)绕流挤压段:位于桥墩两侧的流区,水流流线虽然也近乎平行,但通常较上游更加密集;(4)离解段:位于桥墩后面的流区,流过桥墩两侧的水流,尚未扩散前,受挤压的水流流线在与墩后水体相互作用后,水流结构变得散乱,如图7示。

3.2 顺水桥墩情况下桥墩周围表层水流现象

五组桥墩沿与水流方向成不同角度的直线均匀的布置,如图8所示(桥墩轴向与水流方向成 60° 角,水槽中流量为 $0.08\text{ m}^3/\text{s}$),彼此之间必然会相互影响,靠近上游的桥墩影响了其靠近桥墩的水流结构。其互相干扰是由于邻近、剪切、以及尾流三类机制造成的,桥墩轴向与水流方向夹角不同,桥墩之间干扰程度就会不同,因而与水流不同夹角下桥墩的局部冲刷深度也不相同。

图9~11显示了与水流方向成不同角度布置的顺水桥墩的墩周表层水流现象,其所选水槽中的流量均为 $0.08\text{ m}^3/\text{s}$ 。

总体来看,当圆柱桥墩顺水流流向布置时,由于墩柱阻流产生水流冲击和涡流作用,墩柱周围会分离出三维(空间)边界层,从而形成具有高紊动、高流速特性的局部水流。桥墩阻碍了水流,被阻水流在桥墩周围以强烈的涡流形式与床面泥沙发生作用,产生床面切力,在桥墩周围尤其是墩前(迎水侧)产生冲刷坑。水流行进至墩柱附近时,因墩柱阻水而分流,部分水流绕墩而过,部分水流因冲击墩柱前端,转为向上、向下两部分流动。水流流入桥孔,在墩柱周围产生绕流,流速、流向急剧变化,引起旋涡并且向下游传播、发展,受干扰水流向下游延伸较远。对水流影响范围较非顺水布置桥墩的影响范围扩大,尤其是对下游的影响发生了明显变化。这些导致顺水桥墩的冲刷水力特性不同于垂直于流向布置桥墩。特别是桥墩轴向与水流方向成 0° 度的水流,受墩柱阻水影响,上游来水在墩前产生壅水,水流自上游最大壅水断面起急剧流入桥孔,桥孔略偏下游形成了收缩断面,过水断面有效面积最小,而流速最大。由于墩柱顺水流方向(或与水流方向成一夹角)布置,导致水流流向发生偏转,下游流向偏向左岸,使得左岸冲刷严重于右岸。流过墩柱后,水流不断扩散,在较远处恢复至天然状态。



图8 串联双圆柱桥墩间的水流干扰现象

Fig. 8 Flow interference phenomenon among cylinder piers



图9 桥轴与水流方向成 60° 的表层水流现象

Fig. 9 Surface flow phenomenon around piers with 60° angle between bridge axle and flow direction



图10 桥轴与水流方向成 30° 的表层水流现象

Fig. 10 Surface flow phenomenon around piers with 30° angle between bridge axle and flow direction

图11 桥轴与水流方向成 0° 的表层水流现象Fig. 11 Surface flow phenomenon around piers with 0° angle between bridge axle and flow direction

4 定床条件不同桥轴与水流的流速分布特征

定床条件下,试验流量 $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$,控制断面水深 14.62 cm ,上游平均来流流速 0.37 m/s . 定床条件下不同桥墩布置形式(桥墩布置与水流方向夹角分别为 0° 、 30° 和 60°)流速分布情况(断面测点号由左岸向右岸排列 1, 2, ..., 测点间距 15 cm),墩前断面 1 表流速如图 12,墩前断面 1 底流速图 13,墩后断面 6 表流速如图 14,墩后断面 6 底流速如图 15 所示.

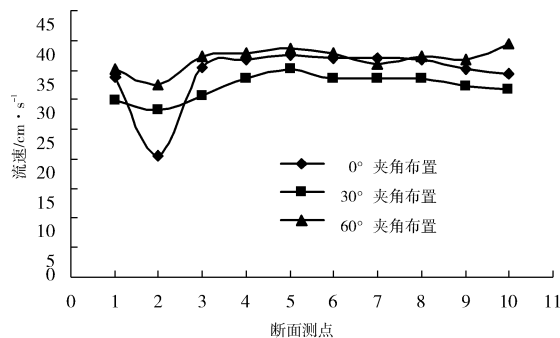


图12 定床不同桥轴与水流夹角墩前断面表流速

Fig. 12 Surface flow velocity in front of piers with different angle between bridge axle and flow direction in fixed-bed model

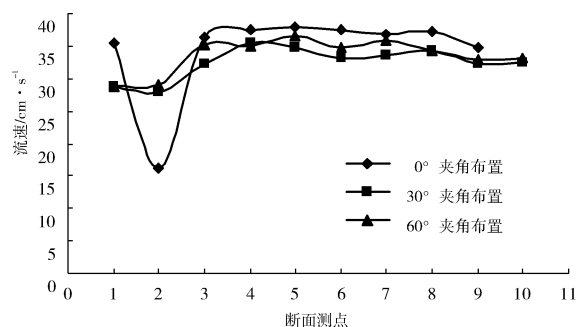


图13 定床不同桥轴与水流夹角墩前断面底流速

Fig. 13 Bottom flow velocity in front of piers with different angle between bridge axle and flow direction in fixed-bed model

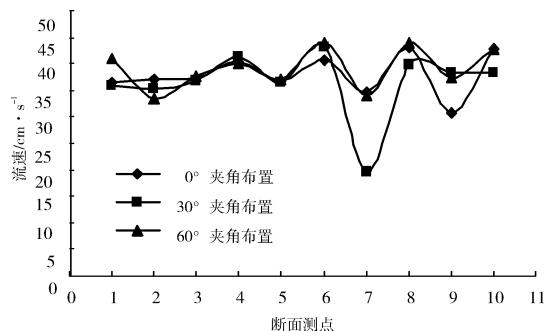


图14 定床不同桥轴与水流夹角墩后断面表流速

Fig. 14 Surface flow velocity behind piers with different angle between bridge axle and flow direction in fixed-bed model

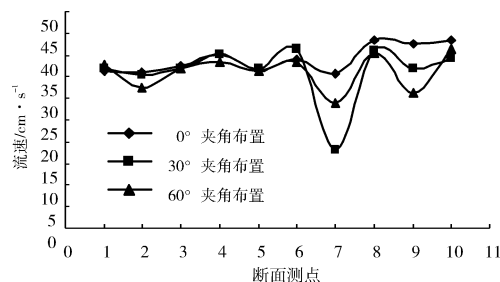


图15 定床不同桥轴与水流夹角墩后断面底流速

Fig. 15 Bottom flow velocity behind piers with different angle between bridge axle and flow direction in fixed-bed model

由图 12 和图 13 墩前断面表流速、底流速看出:桥墩顺水流布置,墩前断面的底左侧圆柱墩距离墩前断面较近, 60° 的夹角各桥墩形成桥轴线岸边投影短于 30° 的夹角,即: 60° 桥墩整体阻水扰流的先于

30°桥墩整体阻水扰流完成,在测量的桥墩墩前断面流速 60°桥墩整体桥位的水流表面流速和底流速大于 30°桥墩整体桥位的水流表面流速和底流速,0°夹角桥墩整体桥位情况,由于桥墩集中布置于左岸,在测量的桥墩墩前断面不论底流速还是表流速左岸水流受到的阻碍作用均较大,均较 60°、30°桥墩整体流速偏小;在其右侧,表流速与 60°桥墩整体桥位的几乎相等,而底流速大于 60°桥墩整体桥位的底流速,这断面流速的横向分布大小,显示了由于桥墩沿河道过水断面分散布置,对水流的诱导作用,在桥前断面的流速传递反映了整体桥位的阻力特性 $\sum h_j = \xi \sum_n (v_i^2/2g)$,在桥墩数 n 相等的条件下,桥墩局部阻力系数 ξ 一定条件下,桥墩前的行进流速决定了整体桥位阻力特性及壅水,可推断 60°桥墩整体阻水造成的壅水大于 30°桥墩整体阻水造成的壅水,表层流速与底流速的差值反映垂直水深上的流速梯度 (du/dz) ,从而进一步反映了墩前测流断面河床底的摩擦阻力 $(\tau = \rho l^2 (du/dz)^2)$, ρ 为水的密度, l 为掺混长度)大小,可以看出 0°夹角桥墩整体桥位的右侧河床底的摩擦阻力最小,可以进一步说明 0°夹角桥墩整体桥位阻水作用最弱。

由图 14 和图 15 墩后断面表流速、底流速可以看出,墩后断面流速分布不同于墩前断面,水流行进至墩柱附近时,因墩柱阻水而分流,部分水流绕墩而过,部分水流因冲击墩柱前端,转为向上、向下两部分流动,因墩柱顺水流方向分散布置于河道若干个过水断面上,使得水流在遇到墩柱时的时空分布不同,这样在不同的断面位置水流受到干扰的程度以及分布不同,流速、流向急剧变化,引起旋涡并且向下游传播、发展,到了墩后过水断面上的流速分布由于桥墩在右岸结束最晚,从而使得流速分布比左岸小,受阻力大,而左岸由于桥墩干扰结束较早,水流流速分布已经趋于均匀,0°夹角桥墩整体桥位,当后面桥墩仍在前面迎水面桥墩遮掩后的涡流区内时,必然会整体减小了桥墩的阻水挡水作用,桥位局部水流因此流速在墩后断面分布较小,且垂直水深的流速梯度较小,表明对整体河床水流扰流小。

5 结 论

本文通过测量多级顺水圆柱墩周围各测点的流速,研究多级顺水桥墩流速分布特性:

(1)桥轴向与水流方向按照不同夹角布置,多排墩柱间会互有影响,靠近下游桥墩的水流结构会受到上游墩柱影响,其互相干扰是由于邻近、剪切、以及尾流三类机制造成的。

(2)通过试验研究可得,当桥墩轴向垂直水流方向布置时,流速在墩前、墩后变化最大,但影响范围最小,随着桥墩轴向与流向夹角减小,流速在墩前、墩后紊动变小,但影响范围加大。

参考文献 References

- [1] 米居正. 库区下游桥梁基础冲刷与防护[J]. 中国公路学报, 1993(2): 35-37.
MI Ju-zheng. Scouring and protection of bridge foundation in the downstream reservoir area [J]. China Journal of Highway and Transport, 1993, (2): 35-37.
- [2] 李 玲, 李玉梁, 祁学春, 等. 浅水层圆柱绕流流动模式的试验研究[J]. 自然科学进展, 2000, 10(6): 554-555.
LI ling, LI Yu-liang, QI Xue-chun, et al. Experimental study of cylinder turbulent flow patterns in a shallow water layer [J]. Progress in Natural Science, 2000, 10(6): 554-555
- [3] 王兴奎, 邵学军. 河流动力学基础[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
WANG Xing-kui, SHAO Xue-jun. The basis of river dynamics[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2002
- [4] 季日臣, 刘志强, 张多平. 山区斜交桥渡水流特性的分析[J]. 甘肃科学学报, 1999, 11(4): 31-34.
JI Ri-chen, LIU Zhi-qiang, ZHANG Duo-ping. On characteristics of skew bridge hydraulics[J]. Journal of Gansu Sciences, 1999, 11(4): 31-34.
- [5] 季日臣, 何文社, 房振叶. 斜交桥壅水试验研究与理论探讨[J]. 水科学进展, 2007, 18(4): 504-508.
JI Ri-chen, HE Wen-she, FANG Zhen-ye. Experimental and theoretical study of skew bridge backwater[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(4): 504-508.
- [6] 李付军, 张佰战, 林桂宾. 斜交桥下水流流向偏转角度的理论分析[J]. 水科学进展, 2005, 16(5): 634-637.
LI Fu-jun, ZHANG Bai-zhan, LIN Gui-bin. Theoretical analysis of the deflection degree of the flow direction under bevel bridge[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(5): 634-637.

- [7] 凌建明, 林小平, 赵鸿铎. 圆柱形桥墩附近三维流场及河床局部冲刷分析 [J]. 同济大学学报, 2007(5): 582-586.
LING Jian-ming, LIN Xiao-ping, ZHAO Hong-duo. Analysis of Three-Dimensional Flow Field and Local Scour of Riverbed Around Cylindrical Pier[J]. Journal of Tongji University, 2007(5): 582-586.

Bed fixed experimental study on velocity distribution of bridge piers with different intersection angles between bridge axle and flow direction

YAN Jian-ke^{1,2}, JIAO Chen¹, LONG Tao¹, YANG Jiu-cheng¹, SHEN Bo²

(1. Chinese First Institute Limited Corporation of Highway Survey & Design, Xi'an 710075, China;

2. Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: By measuring the of velocity around multi-level bridge piers with different intersection angles between bridge axle and flow direction in fixed bed, the paper studies velocity distribution and hydrodynamic characteristics of bridge piers with different intersection angles between bridge axle and flow direction. The results show that bridge piers are arranged at different intersection angles between bridge axle and flow direction; that the piers influence each other, and that the piers in the upstream influence flow structure of the piers in the downstream. The disturbance can be attributed to three causes: near, shearing, and wake stream. When bridge piers are arranged at orthogonality between bridge axle and flow direction, velocity fluctuation in front of the piers or behind the pier is the biggest, but the affected region is the smallest. The smaller the intersection angle between bridge axle and flow direction bridge piers are arranged, the bigger velocity fluctuation in front of the piers or behind the pier, but the smaller the affected region.

Key words: pier; intersection angle; velocity distribution; hydrodynamic characteristic; fixed bed

Biography: YAN Jian-ke, Ph. D., Senior Engineer, Xi'an 710075, P. R. China, TEL: 0086-29-87906220-415, E-mail: yanjianke79@163.com

(上接第 821 页)

Simplified algorithm of buckling critical load for shear-bending cantilever rod under axially uniformly distributed load

LI Liang¹, LI Guo-qiang²

(1. College of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China;

2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: According to the boundary conditions, bending and shear buckling displacement curves of vertical cantilever bar, the trigonometric function expressions are selected to approximately express the bending component and shear component of the vertical cantilever rod. Then the energy method is used to deduce the buckling critical load calculation formula of the shear bending cantilever bar under vertical uniform loads, and the reliability of the simplified algorithm is verified by compare with the results of finite element calculation. Finally, the result comparison between the recommended formulas under vertical uniformly distributed load in this paper and the Timoshenko equation under top-concentrated load are conducted, and one dimensionless coefficient are recognized. Then the accuracy of the formula is verified through the parameter analysis.

Key words: vertical cantilever bar; boundary conditions; trigonometric function; bending component; buckling critical load

Biography: LI Liang, Ph. D., Xi'an 710061, P. R. China, Tel: 0086-13991276215, E-mail: bright_li@chd.edu.cn