

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.05.008

车轮荷载下钢箱梁疲劳构造细节应力等级评定

吉伯海¹,赵端端¹,傅中秋¹,汪 锋²,沈丹雯³

(1. 河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210098; 2. 江苏扬子大桥股份有限公司,江苏 靖江 214000;
3. 苏州市交通工程质量监督站,江苏 苏州 215000)

摘要: 针对车轮荷载作用下钢箱梁的疲劳构造细节等级评定问题,基于应力影响线,研究钢箱梁9种疲劳构造细节的局部疲劳应力。根据等效损伤原理对最大应力幅进行修正,并以此为依据划分钢箱梁疲劳构造细节。结果表明:车轮荷载对钢箱梁9种疲劳构造细节的应力影响范围均较小,横隔板与顶板、纵肋相交处的应力影响范围为横隔板间距;顶板与纵肋相交处、纵肋对接处以及顶板对接处,应力影响范围为横隔板间距的1/2。钢箱梁横隔板与纵肋相交处的修正等效应力幅最大,纵肋对接处的修正等效应力幅最小。考虑受力和施工质量,钢箱梁疲劳构造细节可划分为5个疲劳应力等级,并给出9种疲劳构造细节对应的等级。

关键词: 钢箱梁;车轮荷载;疲劳构造细节;等效应力幅;疲劳应力等级

中图分类号:U441⁺.5 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2014)05-0416-06

Fatigue stress level evaluation of structural details of steel box girder under wheel load

JI Bohai¹, ZHAO Duanduan¹, FU Zhongqiu¹, WANG Feng², SHEN Danwen³
(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Jiangsu Yangtze River Bridge Co., Ltd., Jingjiang 214000, China;
3. Suzhou City Traffic Engineering Quality Surveillance, Suzhou 215000, China)

Abstract: In order to evaluate the fatigue stress level of the structural details of a steel box girder under the wheel load, the local fatigue stress of nine structural details were studied based on the stress influence line. The greatest stress amplitude was corrected according to the principle of damage equivalence, and the structural details of the steel box girder were divided. The results show that the vehicle load has little influence on the fatigue stress of the nine structural details of the steel box girder. At the intersection of the diaphragm plate, the roof, and the longitudinal rib, the influence on the stress occurred in the interval of the diaphragm plate. At the intersection of the diaphragm plate and the longitudinal rib, and at longitudinal rib joints and roof joints, the influence on the stress occurred at half of the interval of the diaphragm plate. The corrected equivalent stress amplitude was the greatest at the joint of the diaphragm plate and the longitudinal rib, and the smallest at longitudinal rib joints. With consideration of stress and construction quality, the fatigue stress of the structural details of the steel box girder can be classified into five levels, and the corresponding levels of the nine fatigue structural details are also provided.

Key words: steel box girder; wheel load; fatigue structural details; equivalent stress amplitude; fatigue stress level

钢箱梁由于自重轻、强度高、制作施工快速等多方面的优点,在我国大、中跨度的公路和城市道路桥梁建设中得到日益广泛的应用。钢箱梁结构在运营期承受的车辆、风等动荷载循环应力会产生累积损伤,从而

收稿日期: 2013-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(51278166);高等学校博士学科点专项科研基金(20120094110009);江苏省交通科学研究计划(2011Y09-1, 2012Y13)

作者简介: 吉伯海(1966—),男,江苏扬州人,教授,博士,主要从事钢桥疲劳与维护研究。E-mail: hbbhji@163.com

引发钢箱梁结构细节的疲劳开裂。大跨度桥梁大多位于江海之上,环境湿度较大,环境大气中可能含有腐蚀成分,因此钢箱梁容易发生腐蚀。对于发生腐蚀的钢箱梁,动荷载循环应力会加剧疲劳裂纹的开展,影响钢板的疲劳性能。腐蚀与疲劳两者相互影响,严重缩短了钢箱梁的使用寿命,对于腐蚀严重的钢箱梁更易发生突然的破坏,导致桥梁出现安全事故^[1-3]。

现有规范大多分析钢箱梁整体疲劳程度,针对钢箱梁具体构造细节的疲劳分析较少,然而在相同的车轮荷载作用下各个细节处产生的疲劳应力大小并不相同。在评估钢箱梁疲劳等级时,若仅检测钢板外观,以疲劳裂纹发展长度作为判定疲劳程度的依据,评定出的疲劳等级不能真实地反映钢箱梁的疲劳程度。针对以上问题,笔者采用应力影响线对钢箱梁具体的疲劳构造细节进行分析,并通过泄水计数法及 Miner 线性等效损伤原理对最大应力幅进行修正,得到钢箱梁疲劳构造细节的修正等效应力幅,以此为依据将钢箱梁疲劳构造细节划分为 5 个疲劳应力等级,最终评估出钢箱梁易疲劳构造细节的疲劳等级。

1 钢箱梁节段有限元模型

某在役大跨径桥梁跨中节段的钢箱梁宽度为 32.8 m,顶板厚度为 14 mm,U 肋厚度为 8 mm,横隔板厚度为 8 mm,间距为 1.75 m。跨中节段钢箱梁截面构造见图 1。

为了节省计算空间,提高计算效率,利用有限元分析软件建立了钢箱梁跨中节段的桥面板简化计算模型^[4]:取桥面板长 14 m,桥面板宽 4.5 m,5 道横隔板,横隔板间距 1.75 m,7 条加劲肋。钢桥面板简化模型采用 shell63 壳单元模拟,网格尺寸为 0.2 m×0.2 m,疲劳构造细节位置进行局部细化,网格尺寸为 0.01 m×0.01 m,桥面板简化的几何模型如图 2 所示。简化模型中的横隔板边界条件,除了横隔板自身与顶板之间的固接,横隔板剩余的 3 个边界处各节点设置 3 个平动自由度与 3 个转动自由度。约束顶板节点处的 3 个平动自由度。

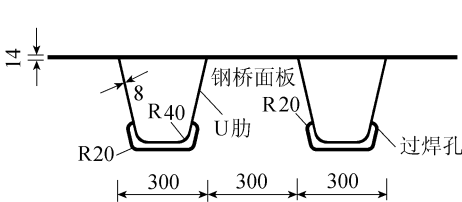


图 1 钢箱梁截面构造(单位:mm)

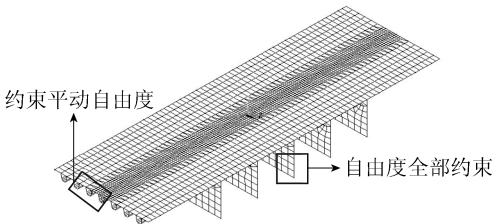


图 2 钢桥面板简化模型

Fig. 1 Structure of steel box girder's cross-section (units: mm) Fig. 2 Simplified model of steel bridge deck

2 车轮荷载施加

由于钢桥面板的纵向、横向荷载移动线较短,在钢桥面板的应力幅计算中可以忽略车轮作用的相互影响。因此,本文不考虑多车效应导致的应力幅叠加效应,在顺桥向、横桥向仅考虑单个车轮的作用效应^[5]。

车辆在行驶过程中会偏离轮迹中心线,产生车轮轮迹的横向分布。国内外对车轮轮迹横向分布均开展了相关研究^[6-7],本文基于崔冰等^[8]研究的虎门大桥车轮轨迹统计分析结果,假定横桥向以 150 mm 为一种分布情况,各位置车轮轮迹横向分布概率如图 3 所示。为方便计算,取车轮荷载为 100 kN。

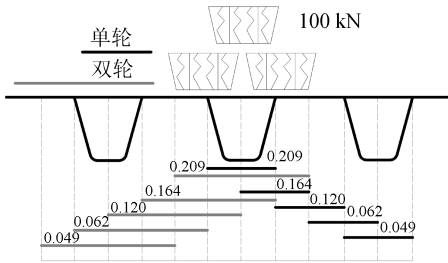


图 3 车轮轮迹横向分布概率

Fig. 3 Probability of transverse distribution of wheel track

3 钢箱梁疲劳构造细节应力等级划分

3.1 应力影响线

根据国内外学者对钢箱梁疲劳构造细节的研究资料,本文总结并划分出钢箱梁易产生疲劳裂纹的 9 个疲劳构造细节,用编号 A~H 表示,并给出了位置描述,见表 1。其中,细节 A、B 的疲劳裂纹一般出现在顶板并沿纵桥向发展,根据国际焊接协会 IIW 推荐,取距离焊缝 1.5 t (t 为顶板厚度) 处作为横向应力取值位置^[9]。细节

F 的裂纹多产生在顶板及焊缝内部,选取 2 条纵肋间顶板距离横隔板 5 mm 处作为纵向应力参考点^[10-11]。

车轮荷载采用单轮和双轮 2 种加载方式,车轮的横向加载位置如图 4 所示,P1'、P2'、P3'、P4'(Q1'、Q2'、Q3'、Q4')分别与 P1、P2、P3、P4(Q1、Q2、Q3、Q4)关于轮迹中心线对称,图中没有具体画出,轮迹中心线位于纵肋的中心(0 号位置)。通过有限元可以绘出各个疲劳构造细节在车轮作用下的应力影响线。本文仅列出疲劳构造细节 A、B 在单轮和双轮作用下的应力影响线,如图 5 和图 6 所示。

表 1 疲劳构造细节的应力取值位置
Table 1 Stress value position of fatigue structural details

疲劳构造细节	构造类型	参考点所在构件	横向/纵向位置	应力方向	其他
A	横隔板与顶板、纵肋相交处	顶板	横隔板	x	距焊缝 20 mm 处
B	顶板与纵肋相交处	顶板	横隔板间	x	距焊缝 20 mm 处
C	横隔板与纵肋相交处	横隔板/纵肋	相交处	最大主应力方向	焊缝处
D	横隔板与纵肋相交处	横隔板	横隔板	最小主应力方向	横隔板削弱最大的位置
E	纵肋对接处	纵肋	横隔板间	z	焊缝处
F	横隔板与顶板相交处	顶板	纵肋间	z	距焊缝 5 mm 处
G ₁	顶板对接处	顶板	横隔板间/纵肋间	z	横向对接
G ₂	顶板对接处	顶板	横隔板间/纵肋上	z	横向对接
H	顶板对接处	顶板	横隔板间/纵肋间	z	纵向对接

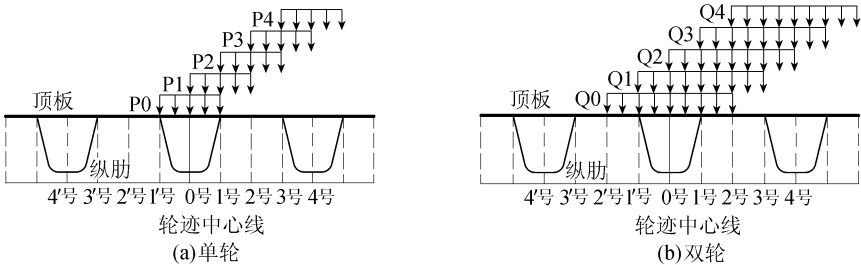


图 4 车轮横向加载示意图

Fig. 4 Schematic diagram of wheel lateral load

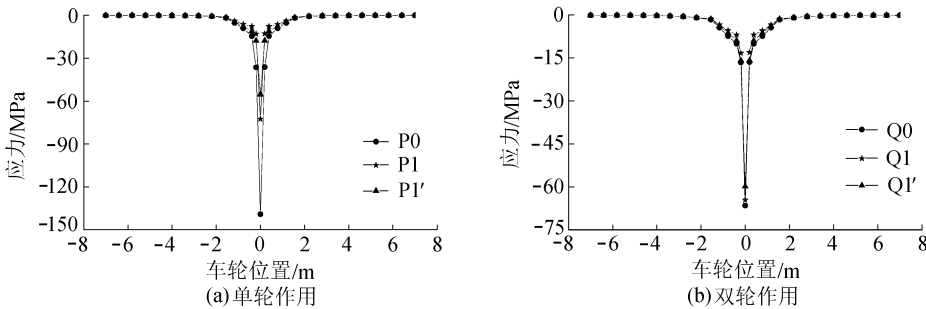


图 5 车轮作用下细节 A 的顺桥向应力影响线

Fig. 5 Stress influence line along bridge for detail A under influence of wheel

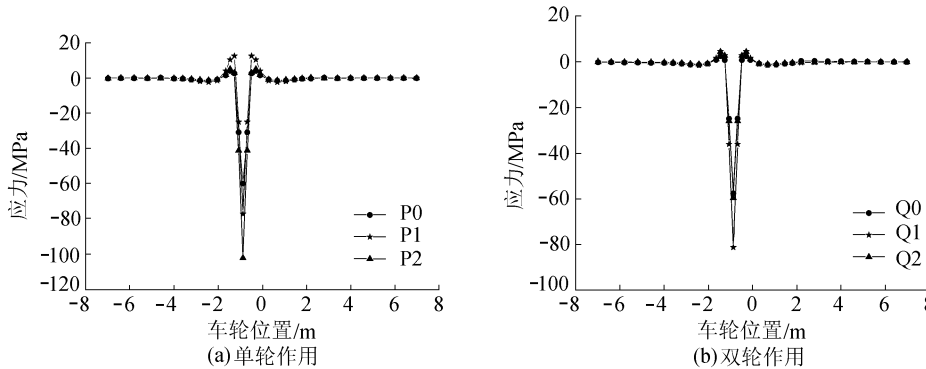


图 6 车轮作用下细节 B 的顺桥向应力影响线

Fig. 6 Stress influence line along bridge for detail B under influence of wheel

观察 9 个疲劳构造细节顺桥方向的应力影响线可知,车轮荷载作用产生应力的范围均较小。对于疲劳构造细节 A,在单轮、双轮作用下其最大的应力峰值在顺桥向均位于横隔板所在断面,当车轮位置与疲劳构造细节计算位置的纵向距离大于横隔板的间距时(>1.75 m),车轮荷载对细节产生的应力很小或几乎为零。细节 C、D 和 F 的最大应力峰值及位置与细节 A 基本一致。

对于疲劳构造细节 B,在单轮与双轮作用下其最大应力峰值在顺桥向均位于 2 个横隔板的中间,当车轮位置与疲劳构造细节计算位置的纵向距离大于横隔板间距的 1/2 时(>0.875 m),车轮荷载对细节产生的应力很小或几乎为零。细节 E、G₁、G₂ 和 H 的最大应力峰值及位置与细节 B 基本一致。

3.2 修正等效应力幅

国内外规范中疲劳车轮荷载模型有很多,本文采用中交路桥技术有限公司推导的适合我国公路钢桥设计的标准疲劳车辆模型,该标准疲劳车轮荷载的轴距最小值为 1.4 m^[12-16]。根据各细节的应力影响线得到对应的计算应力幅,表 2 分别列出了细节 A 和 B 的应力幅。按图 4 中车轮轮迹横向分布情况对计算应力幅进行车轮轮迹修正,得到轮迹修正系数见表 3。

表 2 横向加载位置细节 A 和 B 处的应力幅

Table 2 Stress amplitudes of details A and B at lateral loading position

车轮中心 位置/m	细节 A 处应力幅/MPa		细节 B 处应力幅/MPa	
	单轮加载	双轮加载	单轮加载	双轮加载
-0.6	1.87	1.16	2.01	1.35
-0.45	1.41	2.84	3.48	4.21
-0.3	5.55	27.82	10.22	19.04
-0.15	55.23	59.43	39.69	23.39
0	139.03	66.55	65.49	60.06
0.15	72.49	64.53	91.83	86.60
0.3	12.89	33.80	107.79	63.88
0.45	7.16	6.66	41.95	49.57
0.6	3.04	4.51	9.40	20.65

由表 3 可知,细节 G₁ 和 G₂ 的最大应力幅和修正应力幅均相差很小,因此两者无需分别考虑,统一称为桥面板横向对接细节 G,且采用应力值较大的细节 G₁ 的应力幅作为参考依据。

表 3 疲劳构造细节轮迹修正系数

Table 3 Correction coefficients of wheel tracks for fatigue structural details

疲劳构造 细节	单轮			双轮		
	最大应力幅/MPa	修正应力幅/MPa	轮迹修正系数	最大应力幅/MPa	修正应力幅/MPa	轮迹修正系数
A	139.03	52.99	0.381	66.55	42.50	0.639
B	107.79	52.80	0.490	86.60	45.01	0.520
C	103.60	56.86	0.549	79.48	52.09	0.655
D	185.55	87.21	0.470	126.85	77.78	0.613
E	42.43	29.86	0.704	44.58	28.59	0.641
F	135.61	53.17	0.392	57.57	38.07	0.661
G ₁	139.40	56.31	0.404	64.48	43.25	0.671
G ₂	133.17	54.37	0.408	59.64	40.41	0.678
H	189.93	74.21	0.301	80.81	52.81	0.654

根据疲劳构造细节应力影响线,采用泄水计数法提取疲劳构造细节的应力幅与应力循环次数,剔除较小的应力循环。将疲劳构造细节应力幅按 Miner 线性等效损伤原理计算等效应力幅,等效应力幅计算公式为

$$\Delta\sigma_{eq} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n n_i \Delta\sigma_i^m}{\sum_{i=1}^n n_i} \right)^{\frac{1}{m}} \tag{1}$$

式中:Δσ_{eq}——等效应力幅;n——应力循环次数;n_i——第 i 级应力幅对应的应力循环次数;Δσ_i——第 i 级应力幅;m—— S-N 曲线的斜率参数,一般取 3.0。

对式(1)计算得到的等效应力幅进行车轮轮迹修正,表 4 为 1~6 轴车疲劳车辆在单轮和双轮作用下钢箱梁各疲劳构造细节横向最不利加载对应的计算应力幅及修正等效应力幅。由于本文仅需得到车轮荷载下各疲劳构造细节应力幅的相对比值,因此可以忽略冲击系数修正。

由表 4 可知,8 种疲劳构造细节中,细节 D 在疲劳车轮荷载下产生的应力最大,细节 E 最小。表 3 和表 4 计算得到的修正等效应力幅在一定程度上反映了钢箱梁典型疲劳构造细节的相对易疲劳程度。

3.3 疲劳构造细节应力等级划分

对比分析表4中各疲劳构造细节的修正等效应力幅,以各细节中最大的修正应力幅值为分母,该细节的修正应力幅值为分子,计算得单轮、双轮的相对应力幅,见表5。表中第4列和第5列为5倍的相对应力幅值,数值均在1.00~5.00的范围内,对单轮、双轮的平均值采用四舍五入法则,并以此数值结果作为各疲劳构造细节的赋分依据,作为评定等级。

表4 单轮和双轮作用下疲劳构造细节修正等效应力幅

疲劳 细节	单轮作用下应力幅/MPa							双轮作用下应力幅/MPa						
	1轴车	2轴车	3轴车	4轴车	5轴车	6轴车	修正等效 应力幅	1轴车	2轴车	3轴车	4轴车	5轴车	6轴车	修正等效 应力幅
A	27.81	41.71	72.99	55.61	55.61	55.61	40.17	13.31	19.97	34.94	26.62	26.62	26.62	32.22
B	21.56	32.34	56.59	43.12	43.12	43.12	40.03	17.32	25.98	45.47	34.64	34.64	34.64	34.12
C	20.72	31.08	54.39	41.44	41.44	41.44	43.11	15.90	23.84	41.73	31.79	31.79	31.79	39.49
D	37.11	55.67	97.41	74.22	74.22	74.22	66.11	25.37	38.06	66.60	50.74	50.74	50.74	58.97
E	8.49	12.73	22.28	16.97	16.97	16.97	22.64	8.92	13.37	23.40	17.83	17.83	17.83	21.67
F	27.12	40.68	71.20	54.24	54.24	54.24	40.31	11.51	17.27	30.22	23.03	23.03	23.03	28.86
G	27.88	41.82	73.19	55.76	55.76	55.76	42.69	12.90	19.34	33.85	25.79	25.79	25.79	32.79
H	37.99	56.98	99.71	75.97	75.97	75.97	43.34	16.16	24.24	42.43	32.32	32.32	32.32	40.07

疲劳构造细节分为5个等级,分别对应分值1、2、3、4和5。由于细节E处在工程中只能采用仰焊的焊接方式,其焊接质量相对其他细节难以保证,因此将该细节提高一个等级,评分值改为3。

4 结 论

a. 车轮荷载对钢箱梁9种疲劳构造细节的应力影响范围均较小。横隔板与顶板、纵肋相交处,应力影响范围为横隔板间距(1.75 m),且最大应力峰值在纵桥向位于横隔板所在断面。顶板与纵肋相交处、纵肋对接处以及顶板对接处,应力影响范围为相邻横隔板间距的1/2(即0.875 m),且最大应力峰值在纵桥向位于两个横隔板的中间。

b. 在车轮荷载作用下,横隔板与纵肋相交处的横隔板产生的应力最大,纵肋对接处的纵肋产生的应力最小,其余疲劳构造细节处的应力大小基本一致。单轮作用下产生的疲劳构造细节应力大于双轮作用下产生的疲劳构造细节应力。

c. 根据我国疲劳车轮荷载模型,以有限元计算得出钢箱梁9种疲劳构造细节的修正等效应力幅为依据,将疲劳构造细节应力等级划分为5级,并给出了9种疲劳构造细节对应的等级。但由于纵肋对接处需要仰焊,所以将纵肋对接处的疲劳构造细节应力等级提高一级。

参考文献:

[1] FISHER J W, ROY S. Fatigue of steel bridge infrastructure[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2011, 7(8) :457-475.

[2] 钱冬生. 谈谈钢桥的疲劳和断裂[J]. 桥梁建设, 2009(3) :12-21(QIAN Dongsheng. Talk about steel bridge fatigue and fracture [J]. Journal of bridge construction, 2009(3) :12-21. (in Chinese))

[3] SONG Yongsheng, DING Youliang. Fatigue monitoring and analysis of orthotropic steel deck considering traffic volume and ambient temperature[J]. Science China;Technological Sciences, 2013, 56:1758-1766.

[4] 徐军,陈忠延. 正交异性钢桥面板的结构分析[J]. 同济大学学报:自然科学版, 1999, 27(2) :170-174. (XU Jun, CHEN Zhongyan. Analysis of orthotropic steel bridge deck structure[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1999, 27(2) : 170-174. (in Chinese))

[5] JI Bohai, CHEN Donghua, MA Lin, et al. Research on stress spectrum of steel decks in suspension bridge considering measured

表5 疲劳构造细节相对应力幅及评分值

Table 5 Relative stress amplitudes of fatigue structural details and scores

疲劳 细节	相对应力幅		相对应力幅×5		评分值
	单轮	双轮	单轮	双轮	
A	0.61	0.55	3.05	2.75	3
B	0.61	0.58	3.05	2.90	3
C	0.65	0.67	3.25	3.35	3
D	1.00	1.00	5.00	5.00	5
E	0.34	0.37	1.70	1.85	3
F	0.61	0.49	3.05	2.45	3
G	0.65	0.56	3.25	2.80	3
H	0.66	0.68	3.30	3.40	3

traffic flow[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities,2012,26(1):65-75.

[6] 崔冰,吴冲,丁文俊,等. 车轮轮迹线位置对钢桥面板疲劳应力幅的影响[J]. 建筑科学与工程学报,2010,27(3):19-23. (CUI Bing, WU Chong, DING Wenjun, et al. The influence of the wheel trace position influence to fatigue stress amplitude of steel bridge deck[J]. Journal of Building Science and Engineering, 2010,27(3):19-23. (in Chinese))

[7] IIW document XIII-2151r1-07/XV-1254r1-07—2007 Recommendations for fatigue design of welded joints and components[S].

[8] 崔冰,吴冲,丁文俊,等. 车轮轮迹线位置对钢桥面板疲劳应力幅的影响[J]. 建筑科学与工程学报,2010,27(3):19-23. (CUI Bing, WU Chong, DING Wenjun, et al. Influence of acting position of vehicle wheels on fatigue stress range of steel deck [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010,27(3):19-23. (in Chinese))

[9] EN 1993-2:2006 Eurocode 3:design of steel structures. Part 2:steel bridges[S].

[10] 张东波. 正交异性钢桥面板疲劳性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2012.

[11] XIAO Z G, YAMADA K, YA S, et al. Stress analyses and fatigue evaluation of rib-to-deck joints in steel orthotropic decks[J]. Int J Fatigue,2008,30(8):1387-1397.

[12] EN 1993-1-9:2005 Eurocode 3:design of steel structures. Part 1.9:fatigue[S].

[13] 周泳涛,鲍卫刚,翟辉,等. 公路钢桥疲劳设计荷载标准研究[J]. 土木工程学报,2010,43(11):79-85. (ZHOU Yongtao, BAO Weigang, ZHAI Hui, et al. The research of highway steel bridge fatigue vehicle load standard[J]. China Civil Engineering Journal,2010,43(11):79-85. (in Chinese))

[14] 杨美良,李波,张建仁. 车辆荷载作用下部分斜拉桥拉索疲劳可靠度研究[J]. 公路交通科技,2007,24(12):66-68. (YANG Meiliang, LI Bo, ZHANG Jianren. Fatigue reliability research of partially cable-stayed bridge under vehicle load cable [J]. Highway Traffic Science and Technology, 2007,24(12):66-68. (in Chinese))

[15] 王荣辉,池春,陈庆中. 广州市高架桥疲劳荷载车辆模型研究[J]. 华南理工大学学报,2004,32(12):94-96. (WANG Ronghui, CHI Chun, CHEN Qinzong. The study of Guangzhou viaduct fatigue load vehicle model[J]. Journal of South China University of Technology,2004,32(12):94-96. (in Chinese))

[16] 童乐为,沈祖炎,陈忠延. 城市道路桥梁的疲劳荷载谱[J]. 土木工程学报,1997,30(5):20-27. (TONG Lewei, SHEN Zuyan, CHEN Zhongyan. Fatigue load spectrum urban road bridges[J]. China Civil Engineer Journal,1997,30(5):20-27. (in Chinese))

· 简讯 ·

河海大学首次获得国家自然科学基金创新研究群体项目资助

2014 年 8 月 15 日国家自然科学基金委员会公布了 2014 年度创新研究群体项目评审结果,河海大学环境学院副院长王沛芳教授领衔申报的“水资源高度开发的河流水、沙及污染物生态效应”获批创新研究群体科学基金项目,这是河海大学首次获得此类基金资助项目。该项目资助期限为 6 年,资助经费为 1200 万元。

国家自然科学基金创新研究群体项目于 2000 年设立,旨在支持优秀中青年科学家为学术带头人和研究骨干,围绕某一重要研究方向开展创新研究,培养和造就在国际科学前沿占有一席之地研究群体,是目前我国学术影响力最大、竞争最激烈的人才计划类项目,2014 年度计划资助创新群体 30 个。

(本刊编辑部供稿)