

文章编号:1671-8879(2016)02-0044-08

随机车流作用下悬索桥钢箱梁细节 疲劳可靠度

刘 扬,李 明,鲁乃唯,邓 扬

(长沙理工大学 土木与建筑学院,湖南 长沙 410114)

摘 要:为了研究交通量对悬索桥钢箱梁细节疲劳安全水平的影响,基于实测车流数据分析了悬索桥钢箱梁顶板-U 肋的细节疲劳可靠度;基于 S-N 曲线和线性累积损伤准则建立了考虑交通量参数的钢桥细节疲劳可靠度模型;在 WIM(动态称重系统)实测车流数据的基础上建立了随机车流模型,分析了车辆运行状态和交通量增长对钢箱梁构造细节疲劳可靠度的影响。研究结果表明:密集运行状态下悬索桥跨中顶板-U 肋细节的等效应力幅和日循环次数分别是稀疏运行状态下的 1.52 倍和 2.50 倍,实际运行状态下的疲劳可靠指标在 1~100 年内由 6.25 降至 3.58;交通量和运营期的增长致使钢箱梁细节疲劳损伤和疲劳可靠指标显著下降,当交通量线性增长系数达到 6%时,100 年后钢箱梁细节疲劳可靠指标仅为 2.96。在运营期,通过实测车流数据评估钢箱梁细节疲劳可靠度尤为重要。

关键词:桥梁工程;疲劳可靠度;累积损伤;悬索桥;随机车流

中图分类号:U441.4;U448.25 **文献标志码:**A

Fatigue reliability for steel box girder details of suspension bridge under random traffic flow

LIU Yang, LI Ming, LU Nai-wei, DENG Yang

(School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science and
Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: In order to investigate the influence of traffic volume on fatigue safety level of steel box girder details of suspension bridges, fatigue reliability of rib-to-deck connections detail for steel box girder of a suspension bridge was analyzed based on the test traffic flow data. Detail fatigue reliability model of steel bridge under traffic flow effect was established based on the S-N curves and liner accumulated damage criterion. Random traffic flow models were established by using test vehicle data collected by WIM (Weigh-in-Motion) system. The impacts of vehicle states and increment of traffic on fatigue reliability of the bridge details were investigated. The results show that the equivalent stress-range and the daily circulation value under heavy traffic flow are 1.52 times and 2.5 times higher than those under spare traffic flow respectively. The fatigue reliability

收稿日期:2015-09-23

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2015CB057700);国家自然科学基金项目(51378071,51308073,51108045);湖南省
自然科学基金项目(14JJ3087)

作者简介:刘 扬(1973-),男,湖南岳阳人,教授,博士研究生导师,E-mail:liuyangbridge@163.com。

index of structural detail under actual traffic flow drops to 3.58 from 6.25. The increments of traffic volume and service time lead to a significant decline of the fatigue damage and reliability index of steel box girder detail. When the traffic volume growth factor grows up to 6%, the reliability index drops to 2.96 after 100 years. It is especially important to assess the fatigue reliability of steel box girder details based on the tested traffic data. 5 tabs, 10 figs, 19 refs.

Key words: bridge engineering; fatigue reliability; accumulated damage; suspension bridge; random traffic flow

0 引 言

大跨度悬索桥加劲梁一般采用抗风性能较好的扁平钢箱梁结构。在车辆荷载与环境荷载的反复作用下,钢箱梁构造细节将产生疲劳损伤^[1]。随着运营时间的增长,疲劳损伤逐渐累积,在超过疲劳抗力后将突然发生断裂破坏,甚至导致桥梁结构垮塌。车辆荷载的随机性以及钢箱梁构件抗力的不确定性致使结构的疲劳破坏为概率事件。因此,基于疲劳可靠度理论评估悬索桥钢箱梁细节疲劳性能具有重要的研究意义。

钢桥疲劳可靠度研究的基础是获取疲劳应力谱,主要方法有有限元数值模拟方法(FEM)和基于长期健康监测的状态评估方法(SHM)。基于 SHM 的监测应力数据可对钢桥的疲劳性能做出准确评估,但 SHM 系统造价较高,目前仅有部分大型桥梁安装了该系统。实测车流数据为基于 FEM 的钢桥疲劳安全评估提供了有利条件。文献[2]基于数值模拟方法对考虑车辆和风耦合作用下的大跨斜拉桥正交异性钢桥面板的疲劳可靠度进行了研究。文献[3]根据 SHM 系统采集的车辆数据,研究了钢箱梁细节疲劳应力,证明 FEM 和 SHM 这 2 种方法所得可靠度相同。上述研究为基于 FEM 的疲劳可靠度评估奠定了基础。

在疲劳可靠度分析方法方面,主要有基于 S-N 曲线和 Palmgren-Miner 线性累积损伤准则的方法(S-N 曲线法),以及基于 Paris 裂纹扩展模型的线弹性断裂力学法(LEFM)。文献[4]最早采用 LEFM 方法对存在初始裂纹的 3 座钢板桥进行了基于疲劳可靠度的安全评估。文献[5]基于长期监测数据对润扬长江大桥钢箱梁顶板-U 肋的焊接细节疲劳可靠度进行了研究,认为交通量的增长直接影响到桥梁的疲劳寿命。LEFM 方法能够考虑到疲劳裂缝的扩展过程,给出精确的损伤值和剩余寿命^[6]。在没有实测裂纹数据的情况下,S-N 曲线法

具有更好的适用性。

为了研究交通量对悬索桥细节疲劳可靠度的影响,本文以主跨为 820 m 的悬索桥为工程背景,在实测车流数据基础上,基于 S-N 曲线和线性累积损伤准则,采用数值模拟方法对考虑车辆运行状态和交通量增长的悬索桥钢箱梁细节疲劳可靠度及疲劳寿命进行研究。

1 车流作用下钢箱梁细节疲劳可靠度的数学模型

车流作用下悬索桥钢箱梁细节疲劳可靠度的研究需要解决 2 个问题:基于 S-N 曲线和线性累积损伤准则建立疲劳损伤功能函数;基于 FEM 方法的疲劳应力统计分析。

1.1 疲劳可靠度的功能函数

随机车流作用下钢箱梁的应力循环值具有变幅和高频特征,不能直接应用如式(1)所示的常用 S-N 曲线表达应力幅值和应力循环次数的关系^[7]

$$NS^m = C \quad (1)$$

式中: S 为应力幅值; N 为应力幅值 S 对应的应力循环次数; C 为材料性能参数; m 为 S-N 曲线图中 $\lg(N)$ 和 $\lg(S)$ 曲线的反斜率。

Eurocode 3(EC3)等规范对疲劳细节和疲劳应力幅值进行了详细分类,并给出了每种类型的 C 和 m 值^[8]。

根据疲劳损伤等价原则将变幅应力循环转换为等效应力循环后即可解决上述问题。实际钢桥的应力循环中,大部分应力均小于常幅疲劳极限 $\Delta\sigma_D$,如 EC3 规范中顶板-U 肋(细节编号为 50)的常幅疲劳极限 $\Delta\sigma_D = 37$ MPa。将变幅应力循环等效为小于常幅疲劳极限 $\Delta\sigma_D$ 的等效应力幅 S_{eq} 为

$$S_{eq} = \left[\frac{\sum_{S_i \geq \Delta\sigma_D} n_i S_i^3 / K_C + \sum_{S_j \leq \Delta\sigma_D} n_j S_j^5 / K_D}{N_d / K_D} \right]^{1/5} \quad (2)$$

$$N_d = \sum_{S_i \geq \Delta\sigma_D} n_i + \sum_{S_j \leq \Delta\sigma_D} n_j \quad (3)$$

式中: S_i 、 n_i 分别为应力谱中大于常幅疲劳极限 $\Delta\sigma_D$ 的应力幅和对应的循环次数; S_j 、 n_j 分别为应力谱中小于 $\Delta\sigma_D$ 的应力幅和对应的循环次数; K_C 、 K_D 分别为应力幅大于和小于 $\Delta\sigma_D$ 的疲劳强度系数; N_d 为日循环次数。

在随机车辆荷载作用下, 钢箱梁的疲劳破坏是结构随机损伤的累积过程, 由此建立疲劳损伤的功能函数为

$$g(X) = D_c - D(X) \quad (4)$$

式中: D_c 为临界损伤; $D(X)$ 为结构使用时间内的损伤值; X 为随机变量。

本文的随机变量主要选取日循环次数 N_d , 等效应力幅 S_{eq} , 以及材料性能参数 C 。

基于 $S-N$ 曲线和 Palmgren-Miner 线性累积损伤法则, 由式(1)和式(4)可得到 n 年运营时间内累积损伤为

$$g(X) = D_c - \frac{365nN_dS_{eq}^m}{C} \quad (5)$$

考虑车辆的不同运行状态以及交通量增长对疲劳损伤的影响, 根据车辆的行驶间距将桥梁的运行状态分为稀疏运行状态和密集运行状态。则考虑运行状态的桥梁构造细节损伤功能函数为

$$g(X) = D_c - \frac{365[aS_{eq1}^m + (1-a)S_{eq2}^m]n[1 + (n-1)b/2]N_d}{C} \quad (6)$$

式中: a 为密集运行车辆占通行车辆的比例; b 为交通量线性增长系数; S_{eq1}^m 为密集状态下细节的等效应力幅; S_{eq2}^m 为稀疏状态下细节的等效应力幅, S_{eq1}^m 、 S_{eq2}^m 的统计参数由基于 FEM 的统计分析得出。

1.2 车流作用下钢箱梁细节疲劳可靠度的分析方法

根据上述疲劳可靠度功能函数的建立过程, 将车流作用下钢箱梁细节疲劳可靠度分析划分为以下 3 个子步骤: ①基于有限元的应力时程分析; ②提取疲劳应力数据; ③疲劳可靠度分析。该方法的流程如图 1 所示。图 1 中, MC 抽样为 Monte-Carlo 抽样。为保证计算结果的精度, 抽样次数 N 应满足以下关系

$$N \geq \frac{100[\Phi(-2\beta_0)\exp(\beta_0^2) - \Phi^2(-\beta_0)]}{\Phi^2(-\beta_0) - \Phi^3(-\beta_0)} \quad (7)$$

式中: Φ 为标准正态分布函数; β_0 为可靠指标的估算值, 由试算得出。

针对运营前期由于循环次数较小导致疲劳可靠指标 β 较大的情况, 采用文献[9]所示的分层抽样方

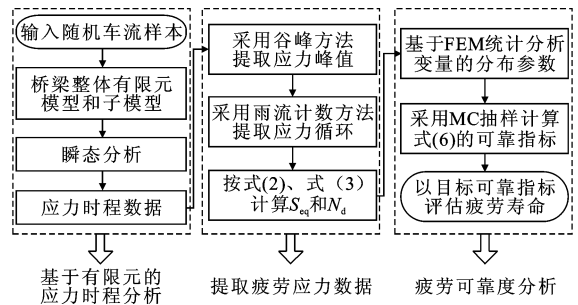


图 1 车流作用下桥梁构造细节的疲劳可靠度分析流程

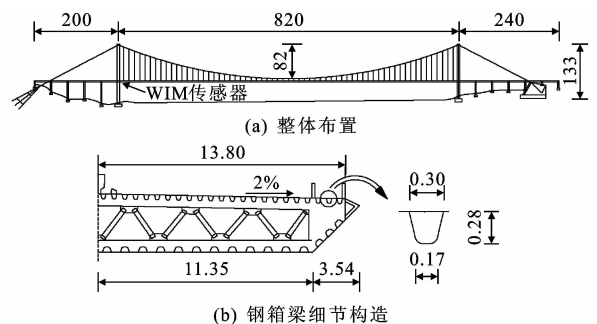
Fig. 1 Flow for fatigue reliability analysis of structural details of bridges under traffic flow

法增加样本数量, 以满足可靠指标计算精度。

2 随机车流下钢箱梁细节疲劳应力统计分析

2.1 南溪长江大桥有限元模型与随机车流模型

南溪长江大桥是宜泸(宜宾—泸州)高速公路上主跨 $L=820$ m 的钢箱梁悬索桥, 相关设计参数见图 2。



单位: m

图 2 南溪长江大桥

Fig. 2 Overall layout of Nanxi Yangtze River Bridge

采用 ANSYS 软件建立的有限元模型如下页图 3 所示。整体模型中, 索塔为 Beam4 梁单元, 主梁为 Shell63 壳单元, 主缆和吊杆为 Link8 杆单元。子模型采用 Shell63 壳单元建立, 车辆模型采用 Mass21 质量单元和 Combin12 弹簧单元模拟。

为了区分稀疏运行状态和密集运行状态车辆, 建立了车辆的时域模型。车辆的随机参数主要为车型、车速、车质量和行车间距^[10]。针对宜泸高速公路调整车辆监测数据, 车型服从均匀分布, 车速服从正态分布。

文献[11]的研究结果表明, 稀疏运行状态下车距服从 Weibull 分布; 密集运行状态下车距服从 Gamma 分布。结合宜泸高速交通量特征与文献[11]的研究成果, 将 2 辆车通过同一监测断面时间间隔为 2 s 以上的车辆划分为稀疏状态, 反之则为密

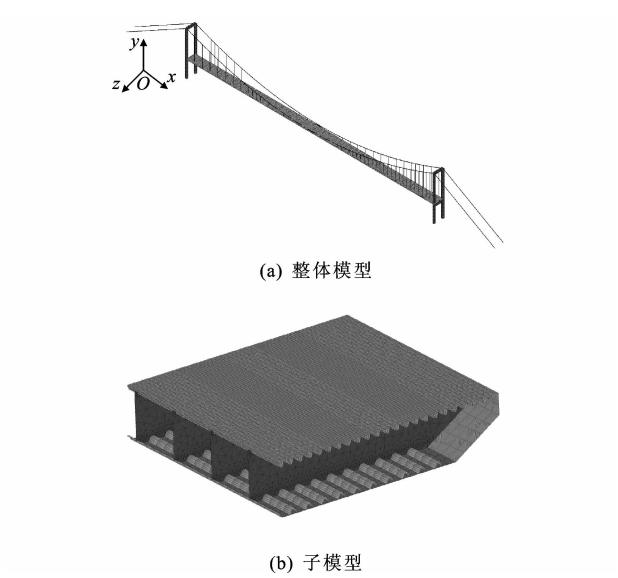


图 3 南溪长江大桥有限元模型

Fig. 3 Finite element models of Nanxi Yangtze River Bridge

集状态。采用上述分布类型对宜泸高速公路行车间距进行拟合,生成的随机车流样本如图 4 所示,图中每个点表示 1 辆车,上方数字表示车速,6 种典型车辆的轴重统计参数如表 1 所示。

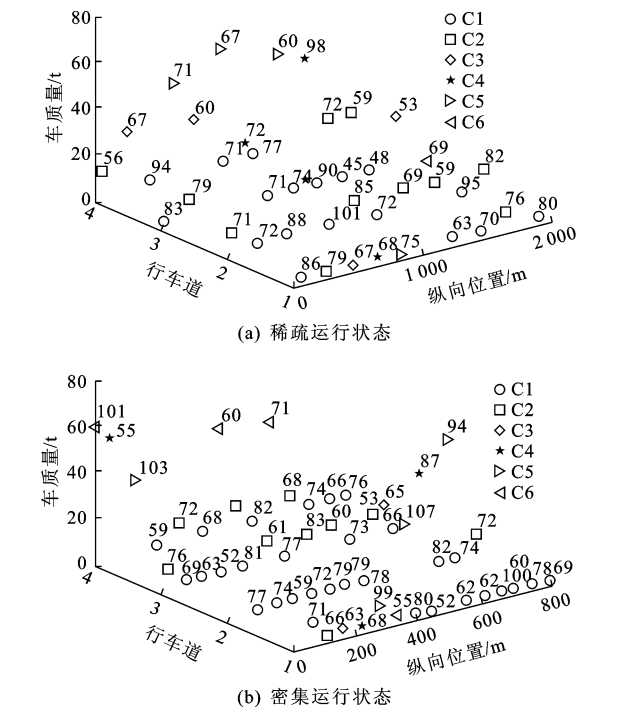


图 4 随机车流统计数据与随机样本

Fig. 4 Statistical data and random samples of random traffic flow

2.2 疲劳应力统计分析

在完成有限元模型的建立和随机车流样本的模拟之后,按图 1 所示的“基于有限元的结构动力响应时程分析”流程求解结构的动力响应。文献[12]和文献[13]分别对润扬长江大桥和九江长江公路大桥

表 1 6 种典型车辆的轴重统计参数					
Tab. 1 Statistical parameters of axis weight for 6 kinds of typical vehicles					
车型	图示数据/m	轴重变量	分布类型	均值/kN	标准差
C1		W_{A11}	N	10.5	1.3
		W_{A12}	L	9.6	1.4
C2		W_{A21}	L	46.0	7.9
		W_{A22}	L	121.2	14.8
C3		W_{A31}	N	65.7	14.5
		W_{A32}	L	90.8	15.2
		W_{A33}	L	92.4	9.5
C4		W_{A41}	N	39.0	9.7
		W_{A42}	N	125.9	16.4
		W_{A43}	L	95.3	14.9
		W_{A44}	L	95.7	11.2
C5		W_{A51}	N	40.6	13.0
		W_{A52}	N	118.2	23.3
		W_{A53}	L	78.4	9.7
		W_{A54}	L	80.9	14.5
		W_{A55}	L	81.0	14.5
C6		W_{A61}	N	51.0	7.9
		W_{A62}	N	92.0	9.3
		W_{A63}	N	92.4	13.1
		W_{A64}	L	87.1	10.0
		W_{A65}	L	81.4	12.2
		W_{A66}	L	83.2	8.7

注:N表示正态分布;L表示对数正态分布。

钢箱梁的细节疲劳进行了分析,结果均表明顶板-U肋交界处的细节疲劳应力较为突出。因此,本文选取主梁主跨 $L/4$ 和 $L/2$ 处的顶板-U肋交界处,进行细节疲劳应力分析。在有限元模型中,荷载子步积分时间为 0.16 s。

由图 1 所示“基于有限元的应力时程分析”步骤,可得 5 min 内主梁构造细节的应力时程如下页图 5 所示。由图 5 可知, $L/2$ 处响应值较 $L/4$ 处大,密集运行状态下响应值较稀疏运行状态下大。为了进一步分析不同运行状态下钢箱梁细节疲劳应力幅

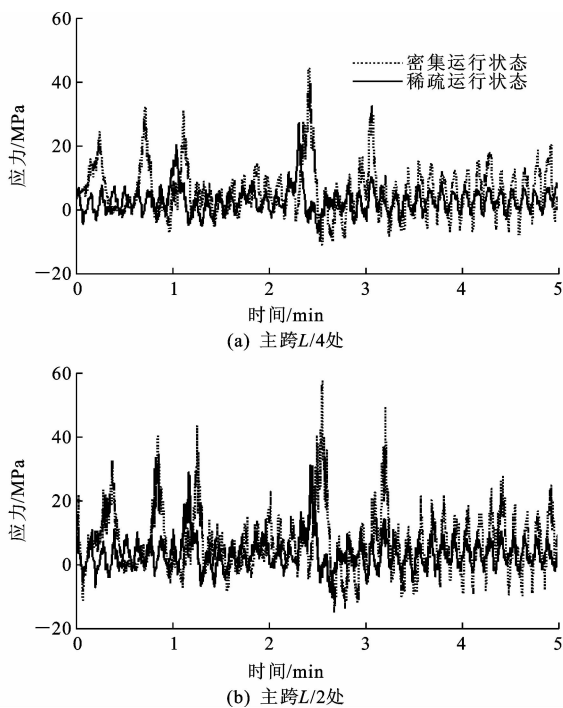


图 5 5 min 内主梁构造细节的应力响应时程
Fig. 5 Displacement response time history of girder nodes and power spectral density in 5 min

值与循环次数的变化,按图 1 所示“提取应力疲劳数据”步骤,将密集运行状态下的应力时程数据通过雨流计数法进行提取。

$L/2$ 处的应力循环如图 6 所示。由图 6 可知,密集运行状态下主梁主跨 $L/2$ 处的应力幅值及其循环次数均较稀疏运行状态下大。为了进一步对比其数值特征,将变幅应力循环转换为等效应力循环。根据 EC3 规范,针对顶板-U 肋处的构造特征,细节类型为 50,应力截止限 $\Delta\sigma_L=20$ MPa, K_C 和 K_D 分别为 2.5×10^{11} 和 3.47×10^{14} 。

由式(2)、式(3)得出的日疲劳损伤值 $D_{5\min}$ 和等效应力幅值 S_{eq} ,如表 2 所示。由表 2 可知,在相同的运行状态下,主梁主跨 $L/2$ 处的日损伤值与等效应力幅值均较 $L/4$ 处的大,其中等效应力幅值约为 $L/4$ 处的 1.26 倍。密集运行状态下等效应力幅值 S_{eq} 是稀疏运行状态下的 1.52 倍。

选取 $L/2$ 处的钢箱梁细节应力并进行统计分析,可得到表 3 所示的统计值。由表 3 可知,密集运行状态下日循环次数 N_d 的均值是稀疏状态下的 2.5 倍。密集运行状态下钢箱梁的细节疲劳损伤值和等效应力幅值较稀疏运行状态下大。而文献[14]的研究结果表明,在车辆数和车辆类型相同的条件下,稀疏运行状态下的疲劳损伤值较大。由于本文的车辆荷载由随机车流生成,在相同时间内,密集

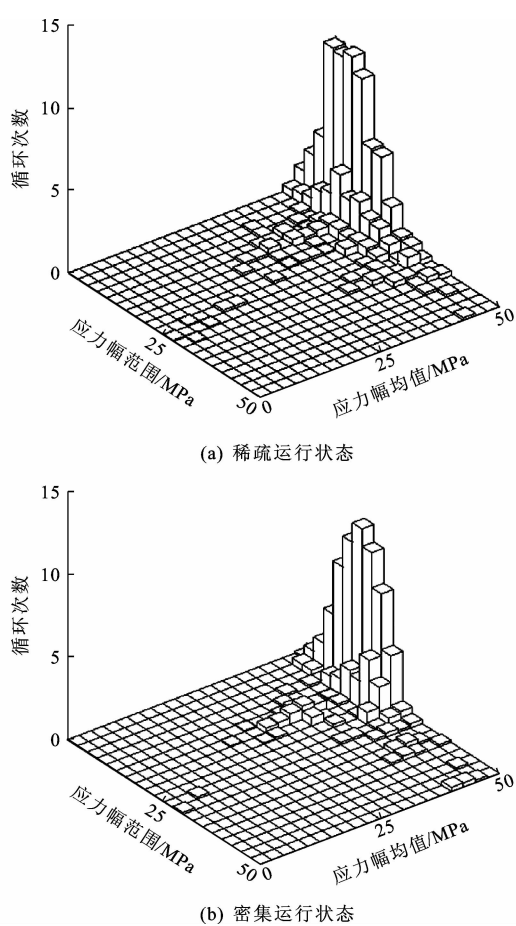


图 6 雨流计数法提取的应力循环
Fig. 6 Extracted stress cycles using rain flow counting method

表 2 5 min 内钢箱梁顶板-U 肋处的损伤值
Tab. 2 Damage values of rib-to-deck connections of steel box girders in 5 min

主梁位置	运行状态	损伤值 $D_{5\min}$	等效应力幅值 S_{eq}/MPa
$L/4$	稀疏	6.90×10^{-9}	5.33
	密集	2.01×10^{-8}	7.28
$L/2$	稀疏	1.91×10^{-8}	6.71
	密集	1.26×10^{-7}	10.23

表 3 钢箱梁顶板-U 肋处等效应力幅值及日循环次数统计值
Tab. 3 Statistical values of equivalent stress amplitude and daily cycles in rib-to-deck connections of steel box girders

位置	等效应力幅值 S_{eq}/MPa		日循环次数 N_d	
运行状态	稀疏	密集	稀疏	密集
均值	6.56	10.47	2 538	6 345
标准差	2.03	2.72	1 116	2 347
变异系数	0.31	0.26	0.44	0.37
分布类型	对数正态	对数正态	正态	正态

运行状态下车辆数量较稀疏运行状态下约大 2.5 倍,因此无论等效应力幅值与应力循环次数均是密集运行状态下的大,本文研究结果与文献[14]并不矛盾。

3 钢箱梁细节疲劳可靠度评估

3.1 疲劳可靠指标

在得到随机车流作用下钢箱梁细节应力幅值与循环次数统计特征后,由式(6)所示功能函数可得出不同运行状态下的细节疲劳可靠度值。由监测数据可得实际运行状态下的密集运营车辆占有率 $\alpha = 1.29\%$ 。 S_{eq1}^m 和 S_{eq2}^m 的统计参数如表 3 所示, D_c 和 C 的概率统计参数如表 4 所示。

表 4 疲劳损伤功能函数中随机变量的概率统计
Tab. 4 Probabilistic statistics of random variable in performance function of fatigue damage

随机变量	D_c	C
均值	1.0	3.47×10^{14}
标准差	0.3	1.56×10^{14}
分布类型	对数正态	对数正态
来源	文献[15]	文献[16]

由图 1 所示流程中“疲劳可靠度分析”步骤,可得出该悬索桥在运营期内及不同运行状态下的疲劳可靠指标变化趋势,如图 7 所示。

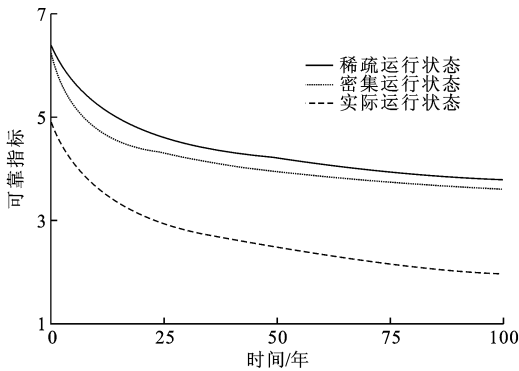


图 7 不同运行状态下的疲劳可靠指标

Fig. 7 Fatigue reliability indices under different operational states

由图 7 可知,在 1~100 年内,稀疏运行状态下钢箱梁细节疲劳可靠指标由 6.38 下降至 3.75;密集运行状态下的可靠指标由 4.88 下降到 1.95;考虑密集运行车辆的占有率 α 的实际运行状态下的可靠指标由 6.25 下降到 3.58;密集运行状态下的疲劳可靠指标较实际运行状态的低,且随着运营时间的增长,可靠指标下降趋势减缓,这与密集运行状态下较多的日通行车辆有关。

上述研究内容未考虑交通量增长,而实际交通量会随社会发展水平的提高而增长,因此钢箱梁细节处的应力幅值及循环次数均会增加。为了研究交通量增长对疲劳可靠度的影响,假定钢箱梁细节的应力幅值不随运营时间增加而增长,仅考虑日循环

次数 N_d 随时间呈线性增长。交通量线性增长系数对疲劳损伤的影响如图 8 所示。由图 8 可知,当交通量线性增长系数由 1% 增加至 6% 后,第 1 年,钢箱梁细节累积疲劳损伤值由 0.002 1 增加至 0.002 2;100 年后,疲劳损伤值由 0.23 增加至 1.26。

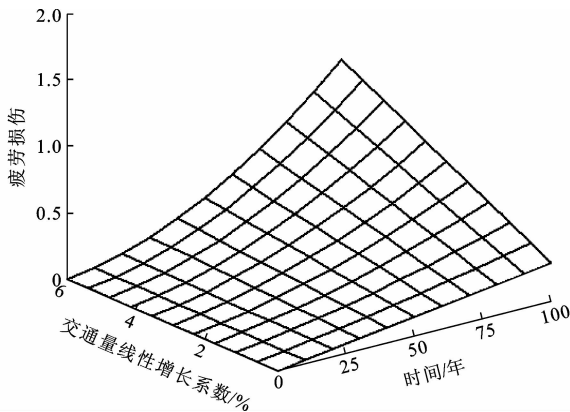


图 8 交通量线性增长系数对疲劳损伤的影响

Fig. 8 Influence of traffic volume linear growth factor on fatigue damage

交通量线性增长系数 b 分别为 2%、4% 和 6% 时,钢箱梁跨中的细节疲劳可靠度如图 9 所示。由图 9 可知,随着交通量线性增长系数的增加,钢箱梁细节疲劳可靠指标逐渐降低,运营时间的增加突显了交通量增长致使可靠指标降低的效果。

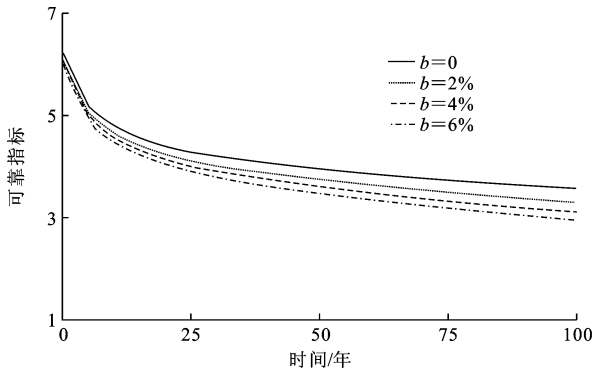


图 9 考虑交通量线性增长系数的疲劳可靠指标

Fig. 9 Fatigue reliability indices with consideration of traffic volume linear growth factor

为了研究交通量增长对不同运行状态下疲劳可靠指标的影响,分析了 3 种运行状态下 100 年后的疲劳可靠指标 β_{100} 随交通量线性增长系数 b 的变化趋势,分析结果如下页图 10 所示。由图 10 可知,随着交通量线性增长系数的增加,密集运行状态下钢箱梁细节疲劳可靠指标的下降趋势略大于稀疏和实际运行状态。由于实际车辆运行状态中的密集运行车辆占有率较低,交通量线性增长系数对实际运行状态和稀疏运行状态下钢箱梁细节疲劳可靠指标数

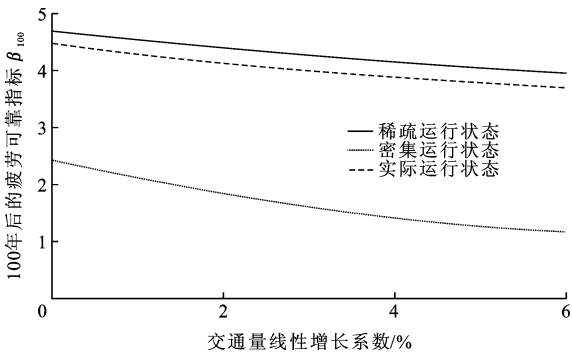


图 10 交通量增长对 3 种运行状态下钢箱梁
细节疲劳可靠指标的影响

Fig. 10 Influence of traffic volume growth factor on fatigue
reliability of steel box girder detail under three operational states

值较为接近,且下降趋势相同。

3.2 基于可靠度的疲劳寿命评估

疲劳可靠度的研究不仅是在概率水平上对结构进行安全评估,而且能确定在目标可靠指标内的运营时间,给桥梁的检测和维护提供依据。

疲劳目标可靠指标是评定结构是否达到疲劳破坏概率的标准,以桥梁的构造细节疲劳失效来评定结构的安全性。若目标可靠指标过高,则该结构在服役期内的安全水平就较高,但是为了维持该可靠指标,则会增加更多的检测和花费。文献[17]基于线性累积损伤准则,计算不同运行状态下的钢箱梁细节疲劳损伤值,由此反算累积损伤值 $D=1$ 时的疲劳寿命。文献[18]对欧洲钢结构协会规范进行了可靠度校准,并定义疲劳寿命的目标可靠指标为 2.0~3.5 之间。文献[19]通过对吊车梁的现场荷载试验,建议疲劳目标可靠指标为 2.7~3.1,中国铁路桥梁规范的目标可靠指标为 2.3~3.5。

综上所述,本文暂取目标可靠指标 $\beta_{\text{target}}=3.0$,不同运行状态下的疲劳寿命如表 5 所示。由表 5 可知,当交通量增长系数达到 6% 时,100 年后的疲劳可靠指标仅为 2.96,不能保证在设计基准期内达到目标可靠指标的安全水平。因此,在运营期内应有效控制交通量的增长,根据现有交通量数据及时对结构的疲劳可靠性做出评估。

4 结 语

(1)在 WIM 实测车流数据的基础上建立了随机车流模型,基于 S-N 曲线和线性累积损伤准则,给出了考虑运营状态和交通量增长的悬索桥钢箱梁顶板-U 肋构造细节的疲劳可靠度分析方法。

(2)南溪长江大桥的算例分析表明:在相同的运

表 5 目标可靠指标下的疲劳可靠度评估
Tab. 5 Fatigue reliability assessment based on target reliability indexes

项目		100 年的 可靠指标	β_{target} 为 3.0 时 的疲劳寿命/年
运行状态	稀疏状态	3.75	180
	密集状态	1.95	23
考虑交通量线 性增长系数	0	3.58	172
(b/%)的实际 运行状态	2	3.29	130
	4	3.11	112
	6	2.96	95

行状态下,主梁主跨 $L/2$ 的日损伤值与等效应力幅值均较 $L/4$ 处的大,等效应力幅值约为 $L/4$ 处的 1.26 倍;密集运行状态下的等效应力幅值 S_{eq} 和日循环次数 N_d 分别为稀疏运行状态下的 1.52 倍和 2.5 倍;实际运行状态下的疲劳可靠指标在 1~100 年期间由 6.25 降至 3.58,且随交通量增长系数的增加而持续降低。

(3)交通量和运营期的增长使钢箱梁细节疲劳损伤和疲劳可靠指标显著下降。当交通量线性增长系数达到 6% 时,100 年后的疲劳可靠指标仅为 2.96,不能保证在设计基准期内达到目标可靠指标的安全水平。在运营期应通过实测车流数据对交通量进行控制,以确保桥梁的疲劳可靠性。

参考文献:

References:

[1] 宋永生,丁幼亮,王晓晶,等.运营状态下悬索桥钢桥面板疲劳效应监测与分析[J].工程力学,2013,30(11):94-100.
SONG Yong-sheng, DING You-liang, WANG Xiao-jing, et al. Monitoring and analysis of fatigue effects on steel deck of a suspension bridge in working conditions[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(11): 94-100. (in Chinese)

[2] ZHANG W, CAI C S, PAN F. Fatigue reliability assessment for long-span bridges under combined dynamic loads from winds and vehicles[J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 18(8): 735-747.

[3] GUO T, FRANGOPOL D M, CHEN Y W. Fatigue reliability assessment of steel bridge details integrating weigh-in-motion data and probabilistic finite element analysis[J]. Computers & Structures, 2012, 112/113(4): 245-257.

[4] YAZDANI N, ALBRECHT P. Risk analysis of fatigue failure of highway steel bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1987, 113(3): 483-500.

[5] 邓 扬,丁幼亮,李爱群.钢箱梁焊接细节基于长期监

- 测数据的疲劳可靠性评估:疲劳可靠度指标[J]. 土木工程学报, 2012, 45(3): 86-92.
- DENG Yang, DING You-liang, LI Ai-qun. Fatigue reliability assessment for welded details of steel box girders using long-term monitoring data: fatigue reliability indices[J]. Chinese Civil Engineering Journal, 2012, 45(3): 86-92. (in Chinese)
- [6] 邓 扬, 丁幼亮, 李爱群, 等. 钢箱梁桥焊接细节的疲劳断裂可靠性分析[J]. 工程力学, 2012, 29(10): 122-128.
- DENG Yang, DING You-liang, LI Ai-qun, et al. Fracture fatigue reliability of welded details in bridge steel box girders [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(10): 122-128. (in Chinese)
- [7] MINER M A. Cumulative damage in fatigue[J]. Journal of Applied Mechanics, 1945, 12(3): 159-164.
- [8] BS EN 1993-1-9: 2005, Eurocode 3: design of steel structures, part 1-9: fatigue[S].
- [9] ZHANG F, LU Z Z, CUI L J, et al. Reliability sensitivity algorithm based on stratified importance sampling method for multiple failure modes systems[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(6): 660-669.
- [10] 王 达. 基于有限元模型修正的大跨度悬索桥随机车流车-桥耦合振动分析 [D]. 西安: 长安大学, 2008.
- WANG Da. Analysis of vehicle-bridge coupled vibration for long-span suspension bridge with finite element model updating under random traffic flowing [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese)
- [11] 宗周红, 李峰峰, 夏叶飞, 等. 基于 WIM 的新沂河大桥车辆荷载模型研究[J]. 桥梁建设, 2013, 43(5): 29-36.
- ZONG Zhou-hong, LI Feng-feng, XIA Ye-fei, et al. Study of vehicle load models for Xinyi River Bridge based on WIM data[J]. Bridge Construction, 2013, 43(5): 29-36. (in Chinese)
- [12] 宋永生, 丁幼亮, 王高新, 等. 正交异性钢桥面板疲劳性能的局部构造效应[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2013, 43(2): 403-408.
- SONG Yong-sheng, DING You-liang, WANG Gao-xin, et al. Local structural effects for fatigue performance of steel orthotropic deck[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2013, 43(2): 403-408. (in Chinese)
- [13] 陈一馨, 吕彭民, 郭成军, 等. 钢桥面板 U 肋与盖板焊缝构造细节疲劳性能评估[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2014, 34(1): 49-55.
- CHEN Yi-xin, LU Peng-min, GUO Cheng-jun, et al. Study on fatigue performance of orthotropic steel bridge deck U-rib and cover weld structure[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2014, 34(1): 49-55. (in Chinese)
- [14] 孙晓燕, 徐 冲, 王海龙, 等. 用于疲劳可靠性分析的公路桥梁荷载效应研究[J]. 公路交通科技, 2011, 28(5): 80-85.
- SUN Xiao-yan, XU Chong, WANG Hai-long, et al. Investigation of highway bridge load effect for fatigue reliability analysis[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(5): 80-85. (in Chinese)
- [15] 李 岩, 吕大刚, 盛洪飞. 考虑随机车载-风载联合作用的斜拉桥拉索疲劳可靠性分析[J]. 中国公路学报, 2012, 25(2): 60-66.
- LI Yan, LU Da-gang, SHENG Hong-fei. Fatigue reliability analysis on cable of cable-stayed bridge under random vehicle load and wind load[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(2): 60-66. (in Chinese)
- [16] KWON K, FRANGOPOL D M. Bridge fatigue reliability assessment using probability density functions of equivalent stress range based on field monitoring data[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(8): 1221-1232.
- [17] 郭 彤, 李爱群. 基于长期监测数据的桥面板焊接细节疲劳寿命评估[J]. 土木工程学报, 2009, 42(6): 66-72.
- GUO Tong, LI Ai-qun. Fatigue life assessment of welds in bridge decks using long term monitored data [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(6): 66-72. (in Chinese)
- [18] HELMERICH R, KUHN B, NUSSBAUMER A. Assessment of existing steel structures. A guideline for estimation of the remaining fatigue life[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2007, 3(3): 245-255.
- [19] 幸坤涛, 张家启, 岳清瑞. 钢结构吊车梁疲劳可靠性分析与评估[J]. 工程力学, 2004, 21(1): 77-80.
- XING Kun-tao, ZHANG Jia-qi, YUE Qing-rui. Fatigue reliability analysis and evaluation of steel crane beams[J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(1): 77-80. (in Chinese)