

正交异性钢桥面板闭口加劲肋对接焊缝疲劳性能评价

吴 冲, 袁 远, 姜 旭

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 根据等效应力幅的概念, 采用国内 2 座大桥近半年的交通数据对闭口加劲肋的疲劳性能进行评价。闭口加劲肋对接焊缝处应力影响线较短, 通过车型的调查可以将车辆荷载转化为轴型荷载加载应力影响线, 从而避免数值模拟实际车流。通过与我国钢桥规范推荐评价方法对比可以看出, 采用统计的轴型荷载计算得到的等效应力幅小于规范评价方法得到的计算结果。并对我国钢桥规范中的损伤等效系数的取值进行了讨论。

关键词: 正交异性钢桥面板; 对接焊缝; 等效应力幅; 损伤等效系数

中图分类号: TU398

文献标志码: A

Fatigue Assessment Method of the Close Ribs Butt Weld of the Orthotropic Steel Deck

WU Chong, YUAN Yuan, JIANG Xu

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the theory of the equivalent stress range, almost half a year traffic data of two bridges were adopted to assess the fatigue behavior of the butt weld of the close rib. Due to the length of the stress influence line of the butt weld was relatively short, the axle loads were used to pass the influence line instead of the vehicle loads. The equivalent stress range was obtained and then compared with the result of the method in China specification. It showed that the equivalent stress range obtained from the practice axle loads is less than the value in China specification, at last the values of damage equivalent factors are discussed.

Key words: the orthotropic steel deck; butt weld; equivalent stress range; damage equivalence factor

加劲肋通常沿纵桥向密布, 这种特殊的构造方式导致该桥面板在正交方向上刚度不同。我国多座跨江大桥的主梁采用钢箱梁形式, 正交异性钢桥面板不仅作为钢箱梁的上翼缘参与受力, 又作为桥面板承担车辆荷载。在施工组织设计中, 钢箱梁通常被划分为节段进行组拼, 之后将制作好的钢箱梁节段运送到桥位逐段连接。为降低闭口加劲肋对接头的内力, 钢箱梁的分段位置一般位于横隔板间距的 1/4 处。这种施工方式导致钢桥面中的闭口加劲肋需要在工地进行连接。若采用焊接的方式, 则需对该对接焊缝进行仰焊, 并且只能从闭口加劲肋外侧进行单面焊, 焊缝很难达到全部熔透。由于这种潜在的初始缺陷存在, 在应力集中的区域可能会萌生疲劳裂纹。

在欧洲规范^[1]中, 闭口加劲肋带衬垫的工地对接焊缝疲劳强度等级推荐值为 71 MPa。研究人员^[2-5]针对该疲劳细节进行了大量的疲劳试验, 证明主要影响该焊缝疲劳等级的因素是熔透率和装配误差。除了对该对接焊缝的疲劳强度等级进行研究, 如何评价该位置处的疲劳性能是另一个被关注的问题。文献^[6]针对某座桥梁闭口加劲肋对接焊缝进行钻孔取样, 发现对接焊缝存在 2~3 mm 未熔透的缺陷。随后连续采集了 3 d 的应变历程, 通过该实测数据采用线性累积损伤的方法对该对接焊缝进行了评估。文献^[7]中针对江阴大桥的对接焊缝进行了连续 24 h 的应变数据采集, 基于线性累积损伤方法计算了单日损伤度。之后对实际交通荷载进行了车流模拟, 通过加载有限元模型得到理论应力幅, 通过理论与实测结果对比发现重车道对接焊缝更容易发生疲劳破坏。西南交通大学刘益铭等^[8]针对港珠澳大桥正交异性钢桥面对接焊缝, 采用蒙特卡洛法模拟了随机车流的加载过程, 并且结合断裂力学的方法研究了对接焊缝裂纹扩展数值模型, 认为该大桥对接焊缝的疲劳寿命服从 Weibull 分布。

正交异性钢桥面板由顶板和焊接在顶板上的闭口加劲肋以及横梁组成。相对于横梁布置间距, 闭口

收稿日期: 2017-01-17

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2013CB036303); 国家自然科学基金(51408424)

第一作者: 吴 冲(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为钢与组合结构桥梁。E-mail: cwu@tongji.edu.cn

通讯作者: 姜 旭(1983—), 男, 讲师, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为钢与组合结构桥梁。E-mail: jiangxu@tongji.edu.cn

为了给设计人员提供一种更简便的疲劳性能评价方法,我国《公路钢结构桥梁设计规范:JTG D64—2015》(以下简称钢桥规范)参考了欧洲规范中对疲劳性能的评价方法,采用等效应力幅作为控制疲劳极限状态的指标^[9].为反映实际荷载产生的等效应力幅,计算过程引入损伤等效系数 γ 的概念,用于修正理想疲劳荷载模型得到的计算应力幅.损伤等效系数中的 γ_1 主要针对10~80 m跨径范围的梁式桥,然而钢桥面板的应力影响线通常很短,规范中对10 m以下影响线长度时按10 m进行取值的方法相对模糊.除此之外,钢桥规范中的疲劳荷载模型Ⅲ是根据1984年在法国欧塞尔(Auxerre, France)巴黎到里昂的高速公路实测得到的交通数据换算所得^[10],该疲劳荷载模型是否适用于我国不同地区的实际交通情况,仍有待实际工程验证.

本次分析所采用的疲劳荷载是基于我国2座大桥近半年统计的交通数据.由于线性累积损伤准则不计加载顺序对损伤度的影响,根据车型的调研情况将车辆荷载转化为4种特征轴型荷载,从而避免数值模拟随机车流加载.需要说明的是,这种简化方法只适用于影响线长度较短的情况.然后分别统计每种轴型的轴重和对应的频次,采用轴型荷载加载闭口加劲肋对接焊缝处的应力影响线,再根据等效应力幅的概念计算实际轴重荷载作用下的等效应力幅.最后与钢桥规范中疲劳荷载模型得到的等效应力幅进行对比,并对规范中损伤等效系数进行讨论.

1 闭口加劲肋对接焊缝疲劳裂纹形态

如图1所示,实际中的裂纹通常从闭口加劲肋下缘萌生,裂纹逐渐向上延伸直到贯穿整个对接焊

缝截面,这种裂纹会显著降低闭口加劲肋对轮载的支承刚度.疲劳裂纹的形式可分为2种,一种裂纹从焊趾位置处萌生,沿着加劲肋的板厚延伸(裂纹形式1);另一种裂纹从对接焊缝焊跟处产生,可能沿着焊喉开裂到焊缝表面(裂纹形式2).

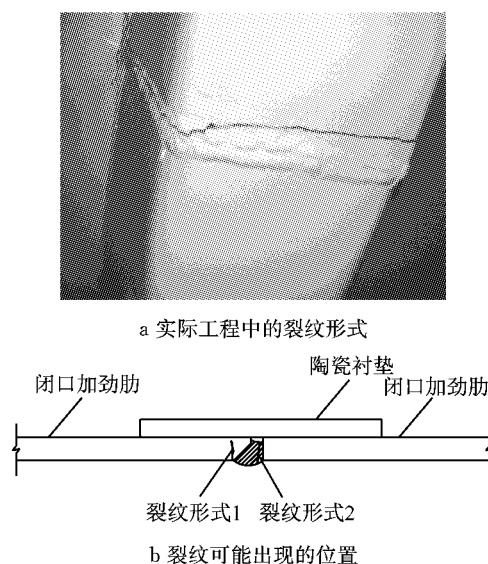


图1 闭口加劲肋对接焊缝处裂纹形式

Fig.1 Fatigue crack in the butt weld of the close rib

2 实际交通荷载统计

工程背景为国内一座双塔悬索桥H,跨径布置为302.0 m+888.0 m+348.5 m,高跨比为1/10.5,加劲梁为单箱单室钢箱梁,宽35.6 m,高3.012 m,横隔板间距为4 m.桥面设置双向六车道,横截面布置如图2所示.正交异性钢桥面板厚度为12 mm,闭口加劲肋中心距为620 mm,加劲肋尺寸为324 mm×262 mm×8 mm.

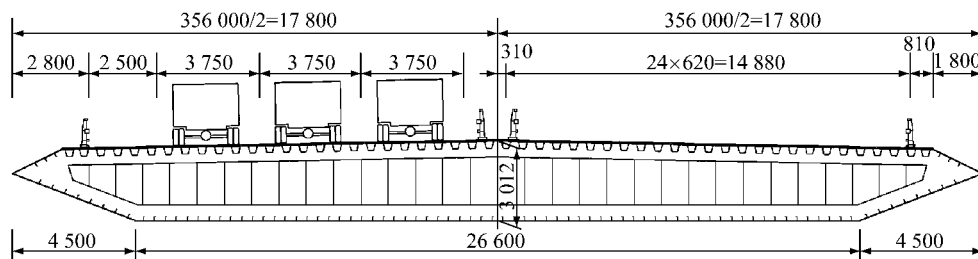


图2 钢箱梁横截面示意(单位:mm)

Fig.2 Cross section of the steel box girder(unit: mm)

计算采用该悬索桥H和另一座斜拉桥Z的实际交通统计荷载进行分析,2座大桥都包含2个重车道(慢车道),桥位所处地区均为交通量繁重的主干道.悬索桥H的交通数据有164 d,斜拉桥Z的交通

数据有130 d,测试期间通过悬索桥H的车辆总数为495万辆,通过斜拉桥Z的车辆总数为308万辆.2座桥梁的重车道货车日平均交通量(average daily truck traffic, ADTT)和平均车辆总质量如表1.需要

说明的是,钢桥规范中认为重车道上总重超过 10 t 的车辆才计为有效货车。可以看出 2 座大桥上重车道超过 10 t 的货车日平均交通量接近,但斜拉桥 Z 平均车辆总重超过悬索桥所统计的交通数据。

表 1 重车道货车交通特征统计

Tab.1 Statistics of truck traffic in the heavy lanes			
名称	车道	日平均交通量	平均车辆总质量/t
悬索桥 H	重车道 1	2 239	21
	重车道 2	2 072	16
斜拉桥 Z	重车道 1	2 033	34
	重车道 2	1 978	30

对车辆类型的调研如表 2 所示。可以看出,常见的车辆可以简化为 4 种典型轴型(表 3),分别是单轴单胎(单轴 A1-1)、单轴双胎(单轴 A1-2)、双轴双胎(联轴 A2-2)和三轴双胎(联轴 A3-2),其中联轴的轴间距统一简化为 1.3 m。每种轴重轮胎的着地面积参考文献[11],单胎的着地尺寸为 0.2 m×0.3 m,双胎的着地尺寸为 0.2 m×0.6 m。

通过对轴型分类和轴重统计可以得到 4 种特征轴型的频次分布,如图 3 所示。可以看出 2 座桥梁重车道的轴型 A1-1 的轴重主要在 4 t 以下,轴型 A1-2 的轴重分布集中在 3 t 至 5 t 之间。对于联轴轴型 A2-2,悬索桥 H 的重车道 2 中的统计数据在 6 t 时出现峰值,相比之下斜拉桥 Z 统计的数据表明该轴型偏重。相差最大的是联轴 A3-2,虽然斜拉桥 Z 的统计天数少于悬索桥 H,但其统计数据中联轴 A3-2 轴次和轴重上都比悬索桥 H 高。

3 应力幅统计

首先建立有限元模型计算闭口加劲肋对接焊缝位置的应力影响线。闭口加劲肋的抗弯作用主要体现了钢桥面板第二体系的受力特征,所以在建立有限元模型中主要考虑桥面系受力特征的模拟。针对悬索桥 H 的钢桥面板构造尺寸,采用有限元计算软件 Ansys 中的 shell63 壳单元模拟板件。有限元模型由 5 个横隔板和 12 个闭口加劲肋组成(图 4),长 20.0 m,宽 7.2 m,边界条件为约束横隔板底部节点 3 个方向上的自由度,单元划分精度为 1 cm。钢板材料为 Q345 钢,弹性模量为 2.1×10^5 MPa,泊松比为 0.3。加载方法可参考文献[12],具体过程为轮载在闭口加劲肋顶部沿纵桥向进行连续布载,模拟车轮逐渐通过 4 个横隔板间距,加载位置如图 4 所示。将每个加载步长设为 0.2 m(轮胎着地面积行驶方向长度),总共 90 步,所以影响线长度为 18 m。单胎荷

表 2 车辆类型调研

Tab.2 Survey of the vehicle typical types		
车辆类型	侧视图	轴型组成
V-2		
V3-1		
V3-2		
V3-3		
V3-4		
V4-1		
V4-2		
V4-3		
V4-4		
V5-1		
V5-2		
V5-3		
V5-4		
V6-1		
V6-2		
V6-3		

表 3 我国车辆典型轴型分类

Tab.3 Category of the axle types for typical vehicles			
单轴 A1-1	单轴 A1-2	联轴 A2-2	联轴 A3-2

载为轴重 70 kN 的一半,双胎荷载为轴重 120 kN 的一半。该轴重荷载参考我国对轴重的限制标准和疲劳荷载车的轴重规定^[9,13]。闭口加劲肋对接焊缝位置在图 4 中的 A-A 截面处,为横隔板间距 1/4 截面位置。名义应力的提取点位于闭口加劲肋底部,应力方向取纵桥向方向。通过上面的加载方法,计算得到该对接焊缝位置处的应力影响线如图 5 所示。

得到闭口加劲肋工地对接位置处的应力影响线后,可以采用上文统计得到的 4 种轴型荷载进行加载,得到每种轴型通过后的应力历程。这种加载方式的假设前提是忽略加载顺序对线性累积疲劳损伤度的影响。每种轴型通过应力影响线的应力历程如图 6

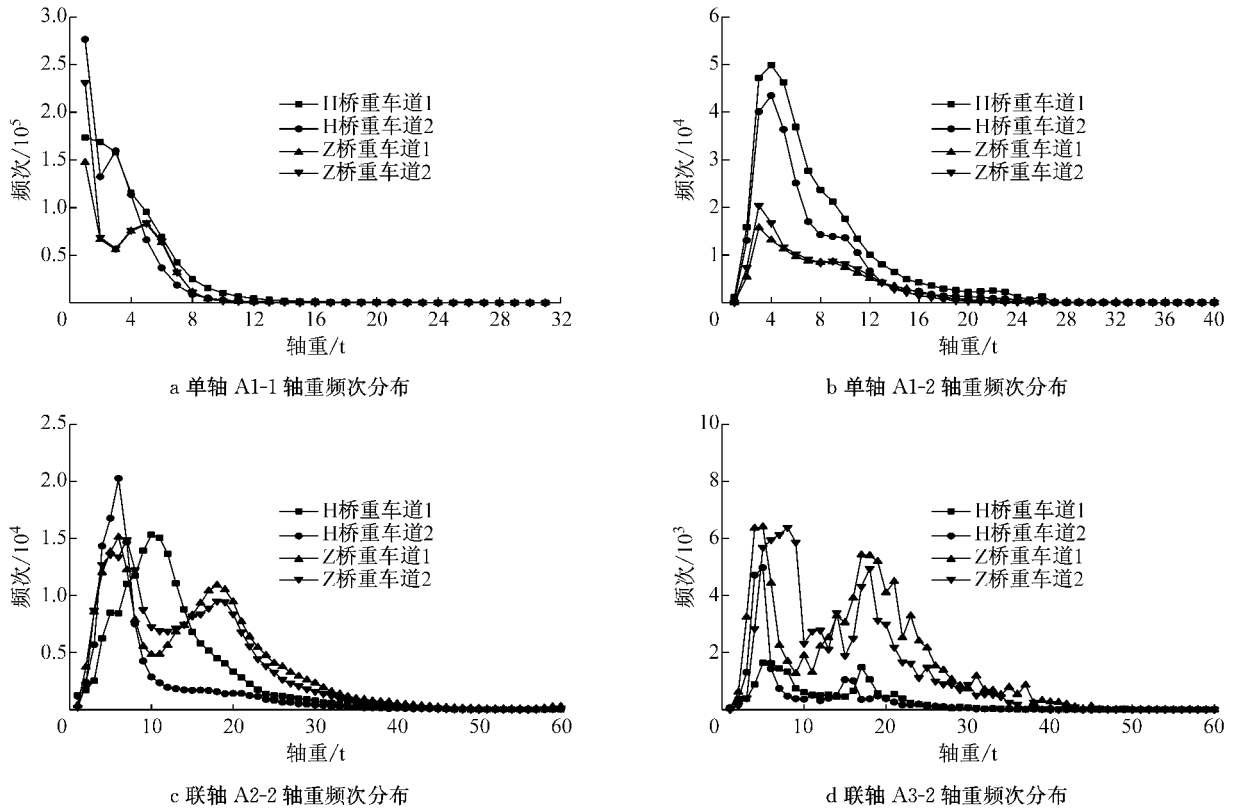


图3 统计期间4种轴型的频次分布

Fig.3 Frequency distributions of the four axle types

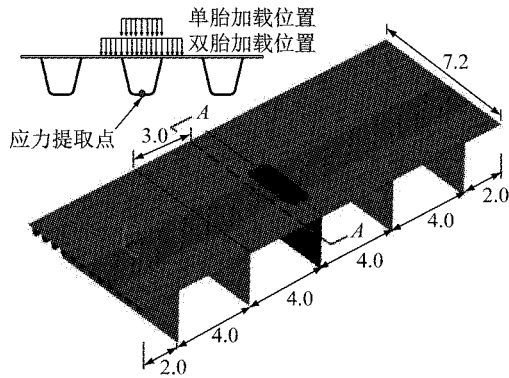


图4 桥面系有限元模型(单位:m)

Fig.4 FE model of the steel deck (unit:m)

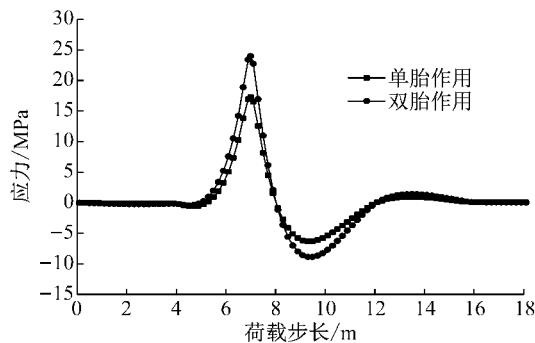


图5 闭口加劲肋对接焊缝应力影响线

Fig.5 Stress influence lines at the butt weld

所示,采用雨流计数法统计应力幅及循环次数,可以得到每种轴型通过一次的应力幅和循环次数.基于线弹性理论,轴重与应力幅值为线性关系,从而可以推算不同轴重大小下对应的应力幅.根据上面4种轴型的轴重频次分布,将不同轴重下的应力幅和循环次数进行汇总后,得到实际交通数据统计期间轴重加载下的应力幅统计直方图(图7和图8).需要说明的是,重车道中10 t以上的车辆仍包含较多3 t以下的轴重.由于3 t以下的轴重产生的应力幅基本处于疲劳截止线以下,并且循环次数颇多,该应力循环对累积损伤度几乎没有贡献,故在统计过程中忽略

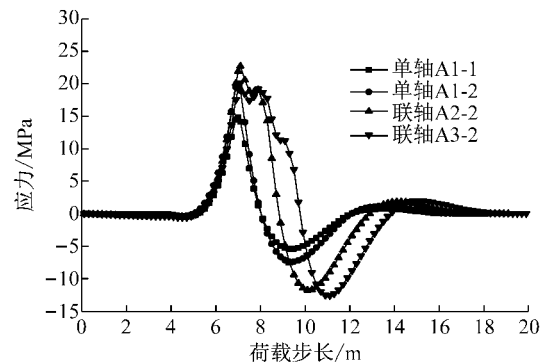


图6 不同轴型加载应力历程

Fig.6 Stress history of the four axle types

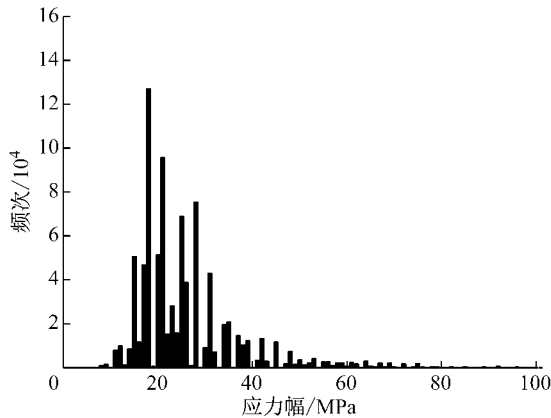


图 7 悬索桥 H 疲劳细节应力幅统计

Fig. 7 Stress range histogram of the detail in the suspension bridge H

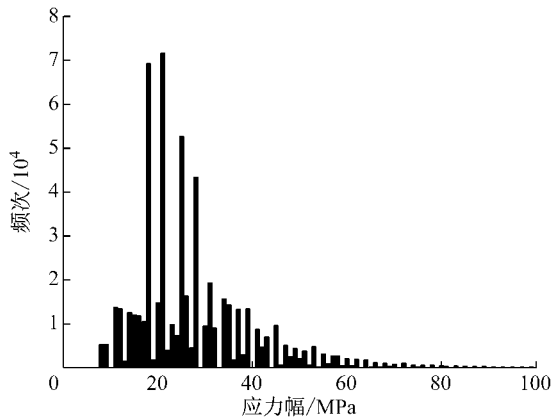


图 8 斜拉桥 Z 疲劳细节应力幅统计

Fig. 8 Stress range histogram of the detail in the cable-stayed bridge Z

了 3 t 以下轴重产生的应力幅和循环次数。

4 等效应力幅计算

等效应力幅^[14]是指对于变幅应力循环 $\Delta\sigma_i$ (i 为变幅应力幅的种类) 分别重复进行 n_i 次, 可以运用 Miner 线性累积损伤准则得到一个损伤度相同的常幅循环应力幅 $\Delta\sigma_E$, 其循环次数为 $\sum n_i$. 疲劳循环次数与应力幅之间满足如下关系:

$$(\Delta\sigma_E)^m N_E = A \quad (1)$$

式中: m 和 A 均为材料常数; N_E 为等效应力幅 $\Delta\sigma_E$ 对应的材料疲劳极限循环次数. 根据 Miner 线性累积损伤准则, 可以得到如下关系:

$$D_E = \frac{\sum n_i}{N_E} = \frac{(\Delta\sigma_E)^m}{A} \sum n_i \quad (2)$$

式中: D_E 为等效应力幅 $\Delta\sigma_E$ 产生的累积损伤度. 对于变幅应力循环造成的累积损伤度 D_b , 又有

$$D_b = \frac{\sum n_i}{N_i} = \frac{1}{A} \sum [n_i (\Delta\sigma_i)^m] \quad (3)$$

考虑到采用双直线 S-N 曲线进行疲劳设计, 假设不存在水平截止线^[10], 则当 $D_E = D_b$ 时, 有

$$\Delta\sigma_E = \left\{ \frac{\sum [n_i (\Delta\sigma_i)^{m_1}] + \Delta\sigma_b^{m_1-m_2} \sum [n_j (\Delta\sigma_j)^{m_2}]}{\sum n_i + \sum n_j} \right\}^{1/m_1} \quad (4)$$

式中: $\Delta\sigma_b$ 为疲劳等级的常幅疲劳截止极限; $(\Delta\sigma_i, n_i)$ 和 $(\Delta\sigma_j, n_j)$ 分别是 $m_1=3$ 和 $m_2=5$ 直线段范围内的应力幅和对应循环次数. 根据图 7 与图 8 中统计的应力幅和对应循环次数可计算出实测周期内的等效应力幅. 需要注意的是, 等效应力幅与对应的循环次数相关, 根据测试时间的顺序, 计算固定时间段内累加循环次数对应的等效应力幅(图 9). 可以看出随着变幅应力循环次数的不断累积, 等效应力幅在一个较小的区间内波动.

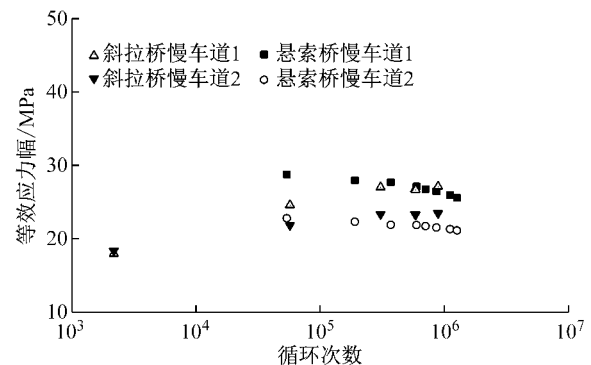


图 9 统计期间随循环次数累积等效应力幅的变化

Fig. 9 Equivalent stress ranges variation during the statistical period

由于样本数量有限, 只能假设交通荷载的变化符合平稳随机过程, 所以认为 100 年内等效应力幅的变化也较小. 设计使用年限内的等效应力幅循环次数采用实测时间段内的统计次数进行线性推算, 以悬索桥 H 重车道 1 为例, 此时累积循环次数为 $1\,265\,622/164 \times 100 \times 365 = 281\,678\,067$ 次. 因测试期间计算的等效应力幅位于双直线 S-N 曲线 $m_2=5$ 的范围内, 先将该等效应力幅换算为 $\Delta\sigma_{E,5}$, 即 $N_E = 5 \times 10^6$, 再根据式(1)推算设计使用年限 100 年内 2×10^6 次循环次数时对应的等效应力幅 $\Delta\sigma_{E,2}$ 为

$$\Delta\sigma_{E,5} = \sqrt[5]{(26)^5 \times 281\,678\,067 / 5\,000\,000} = 57 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_{E,2} = \sqrt[3]{(57)^3 \times 5/2} = 78 \text{ MPa}$$

其他计算结果如表 4 所示.

表4 设计使用年限内等效应力幅 $\Delta\sigma_{E,2}$ 计算Tab.4 Equivalent stress range $\Delta\sigma_{E,2}$ in design reference period

桥梁名称	车道	测试期间 等效应力幅/MPa	统计期间内 循环次数	100 年循环次数	100 年内等效应力幅 $\Delta\sigma_{E,2}$ /MPa
悬索桥 H	重车道 1	26	1 265 622	281 678 067	78
	重车道 2	21	976 142	217 251 116	61
斜拉桥 Z	重车道 1	27	817 364	229 490 662	79
	重车道 2	23	807 674	226 770 008	68

5 损伤等效系数计算

根据实际交通统计数据已得到了设计使用年限内的等效应力幅. 为了与我国钢桥规范中疲劳性能评价方法进行对比, 结合 2 座桥梁实际交通荷载样本数量, 采用疲劳加载模型Ⅲ计算闭口加劲肋对接焊缝处的等效应力幅.

首先说明我国钢桥规范中损伤等效系数的概念. 若对关注的疲劳细节进行应变监控或者数值模拟实际车流进行应力影响线加载, 都可得到该疲劳细节的应力历程, 通过雨流计数法可得到变幅应力循环的大小和次数. 然后根据式(4)可计算得到等效应力幅 $\Delta\sigma_E$. 如果采用疲劳荷载模型进行影响线加载, 也可以得到一个最大应力幅 $\Delta\sigma_{Q_{fat}}$, 为了使这个应力幅值反映实际荷载作用, 引入损伤等效系数 γ , 使 $\Delta\sigma_E = \gamma(\Delta\sigma_{Q_{fat}})$, 修正疲劳荷载模型计算的最大应力幅. 这样简化了计算过程, 只需要采用疲劳荷载车加载并计算 γ 便可以计算出等效应力幅.

在我国钢桥规范中, 损伤等效系数为 4 个系数的乘积, $\gamma = \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3 \cdot \gamma_4$, 并且需要小于 γ_{max} . γ_1 是损伤效应系数, 与构件影响线临界长度有关. 由于大跨径桥梁钢箱梁的横隔板间距通常不超过 4 m, 闭口加劲肋的受力形式类似弹性支承连续梁, 故沿用规范中的规定, 临界长度小于 10 m 按 10 m 计, 规定中影响线长度小于 10 m 时 γ_1 取值 2. γ_2 为交通流量系数, 由式(5)确定:

$$\gamma_2 = \frac{Q_0}{480} \left(\frac{N_{ly}}{0.5 \times 10^6} \right)^{1/5} \quad (5)$$

式中: Q_0 为疲劳车荷载总重, 对于疲劳荷载模型Ⅲ, 取值 480 kN; N_{ly} 为慢车道或者主车道重车 (总重大于 10 t) 年交通量. 综合 2 座大桥表 1 中重车道的日平均交通量估算年交通量, 可以得到悬索桥 H 计算的 γ_2 值为 1.07, 斜拉桥 Z 计算的 γ_2 值为 1.10. γ_3 为设计寿命影响系数, $\gamma_3 = (t_{LD}/100)^{1/5}$, t_{LD} 是构件设计使用寿命, 当设计寿命为 100 年时, 该项取值为 1. γ_4 为多车道效应系数, 当采用疲劳荷载模型Ⅲ时, 取值也为 1. 最大损伤效应系数 γ_{max} 也与构件影响线

临界长度有关, 取值为 2.5. 通过上面的计算结果, γ 乘积分别为 2.14 和 2.20, 均小于该上限值. 疲劳荷载模型Ⅲ通过闭口加劲肋对接焊缝位置处的应力影响线后, 可以得到疲劳荷载车加载的应力历程, 如图 10 所示, 计算得到最大的应力幅值为 49 MPa. 再乘以上面的损伤等效系数进行修正, 采用疲劳荷载模型计算得到的等效应力幅为 105~108 MPa.

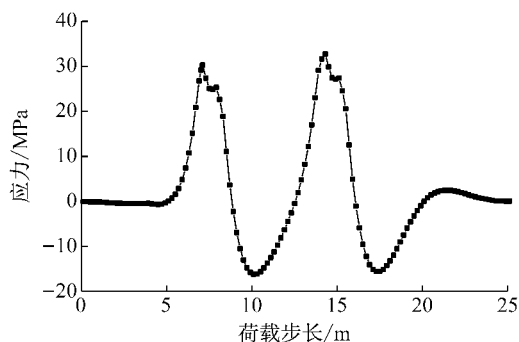


图10 加载疲劳荷载模型Ⅲ的应力历程

Fig. 10 Stress history generated by the fatigue load model III

6 结果对比与讨论

通过上面的计算可以看出, 采用钢桥规范中推荐的疲劳荷载模型Ⅲ计算得到的等效应力幅值 (105~108 MPa) 大于实际轴型荷载计算的等效应力幅值 (61~79 MPa). 而钢桥规范中对闭口加劲肋带衬垫的对接焊缝疲劳等级为 70 MPa, 2 种计算方法的等效应力幅均超过该疲劳强度等级.

对于实际交通荷载数据, 参考《道路车辆外轮廓尺寸、轴荷及质量限值: GB1589—2004》^[13] 中的规定, 可以看出轴型荷载存在一定的超载现象. 实际交通荷载可以通过交通管制进行控制, 但交通量的增加具有随机性, 上面的计算中假设交通量已经趋于平稳, 根据测试区间内的循环次数推算了设计寿命为 100 年的等效应力幅. 需要说明的是, 悬索桥 H 于 1997 年开始运营, 距数据采集时已经服役 11 年, 斜拉桥 Z 于 2008 年通车, 距数据采集时只有 5 年时间, 2 座桥梁的交通量可能仍没有达到饱和. 如果交

通量随着桥梁服役年限增加,等效应力幅的计算值还将随之增加。

采用钢桥规范中的疲劳荷载模型评估疲劳性能时,损伤效应系数 γ_1 和交通流量系数 γ_2 是 2 个主要参数,用来修正标准疲劳荷载模型计算所得的应力幅。首先讨论 γ_2 ,该系数应通过对近似交通状态进行交通调查得到,没有可靠数据时只能采用预测年的总交通量进行估算^[9]。从规范的要求可以看出,该交通量的取值具有一定的模糊性。文献[15]中将交通量统一换算成小客车进行统计,车辆换算系数根据车辆的总重进行分类。假设重车道通过 10 t 以上货车的年交通量为 0.5×10^6 辆,根据统计结果斜拉桥 Z 实际交通荷载统计中 10 t 以上的货车占重车道交通量约 55%,而悬索桥 H 的重车道中 10 t 以上的货车比例为 45%,可以计算出 2 座大桥重车道年总交通量分别为 1.0×10^6 和 1.1×10^6 辆,再结合表 5 中重车道不同重量的车型比例和折算系数,可以算出对应的年平均日交通量(AADT, $\text{pcu} \cdot \text{d}^{-1}$)。再进一步计算出重车道的服务交通量约等于 $300 \text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1}$,处于一级服务水平。通常随着交通量的逐年递增,服务水平会逐渐增加。如果货车数量的比例和车重比例都和本次的荷载样本类似, γ_2 取值很可能大于 1。随着货车年交通量增加, γ_2 大于 1 但增加趋势逐渐缓慢(图 11)。 γ_1 在本次计算中取 2,相当于将应力幅增大了 1 倍。闭口加劲肋受力可以类比连续梁受力特征,但钢桥规范中对于该构件的损伤等效系数取值不详,对于其他位置处的疲劳细节计算,规范中的 γ_1 取值方法明显不适用。所以在计算正交异性钢桥面板时, γ_1 的取值仍需要进一步探讨。

表 5 重车道中不同车重比例系数及车辆折算系数

Tab.5 Weight percentage of trucks in heavy land and the passenger car equivalent factor

质量/t	车重比例系数/%		车辆折算系数
	斜拉桥 Z	悬索桥 H	
<2	19	8	1.0
[2,7)	16	28	1.5
[7,20)	27	43	2.5
≥ 20	38	22	4.0

7 结论

针对正交异性钢桥面板闭口加劲肋对接焊缝位置,采用有限元模型计算了该疲劳细节的应力影响线,然后根据 2 座大桥实际交通统计的轴重荷载和钢桥规范中推荐的疲劳荷载模型Ⅲ进行等效应力幅的计算。对 2 种评价疲劳性能方法的计算结果进行

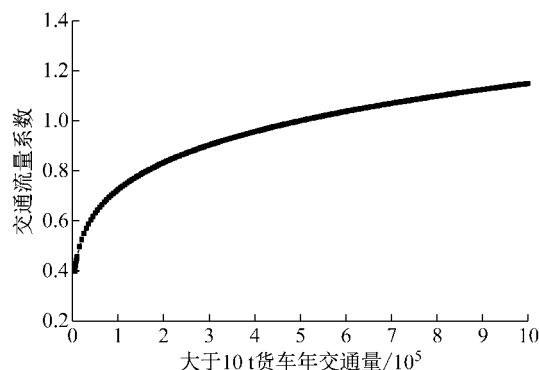


图 11 货车年交通量与交通流量系数 γ_2 的关系

Fig. 11 Relationship of truck annual traffic and the traffic volume factor γ_2

了对比,得到如下结论:

(1) 根据车辆类型的调研,可将车辆的轴型分为 4 种特征轴型进行应力影响线加载,但是这种简化方法仅适用于影响线长度较短的情况。

(2) 分别采用了规范中损伤等效系数的方法和实际交通轴重加载的方法计算了闭口加劲肋对接焊缝的等效应力幅,从 2 种评价方法的计算结果可以看出,钢桥规范中采用的疲劳性能评价方法计算得到的等效应力幅相对较大。由于荷载样本有限,假设交通量处于平稳状态,一旦交通量水平继续增加,等效应力幅的计算结果都会随之增加。

(3) 若重车道货车的交通量比例和货车车重比例都和本次荷载样本类似, γ_2 可能大于 1,即不会降低疲劳荷载模型计算得到的应力幅。对于评价正交异性钢桥面板的疲劳性能, γ_1 的取值方法可能仅适用于纵向加劲肋的疲劳细节,对于其他疲劳细节的取值方法还需进一步探讨。

参考文献:

- [1] European Committee for Standardization. EN 1993-1-9 Eurocode3: Design of steel structures Part1-9: Fatigue [S]. Brussels:[s. n.], 2005.
- [2] KOLSTEIN Menke Henderikus. Fatigue classification of welded joints in orthotropic steel bridge decks [D]. Netherlands: Delft, 2007.
- [3] KONDO A, YAMADA K, AOKI H, et al. Fatigue strength of field welded trough rib joints of orthotropic steel decks [J]. Proceeding of JSCE, 1983, 340: 49.
- [4] 陆云. 正交异性钢桥面板疲劳试验及评估方法研究 [D]. 上海: 同济大学, 2014.
LU Yun. Fatigue experimental investigation and evaluation methods of orthotropic steel decks. [D]. Shanghai: Tongji University, 2014.
- [5] 苏庆田, 贺欣怡, 曾明根. 组合桥面板 U 肋对接焊缝疲劳破坏及修复方法研究 [J]. 同济大学学报(自然科学版); 2017,

- 45(2): 167.
SU Qintian, HE Xinyi, ZENG Minggen. Research on fatigue failure and reinforcement method of butt weld in U-shaped rib of composite bridge deck [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(2): 167.
- [6] XIAO Zhigang, YAMADA Kentaro, INOUE Jirou, *et al.* Fatigue cracks in longitudinal ribs of steel orthotropic deck [J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28: 409.
- [7] 吉伯海, 朱伟, 傅中秋, 等. 正交异性钢桥面板 U 肋对接焊缝疲劳寿命评估 [J]. 重庆交通大学学报, 2008, 34(1): 16.
JI Bohai, ZHU Wei, FU Zhongqiu, *et al.* Fatigue life evaluation of U-rib butt weld of the orthotropic steel bridge [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2008, 34(1): 16.
- [8] 刘益铭, 张清华, 张鹏, 等. 港珠澳大桥正交异性钢桥面板 U 肋对接疲劳焊缝寿命研究 [J]. 中国公路学报, 2016, 29(12): 25.
LIU Yiming, ZHANG Qinghua, ZHANG Peng, *et al.* Study on fatigue life of U-rib butt weld in orthotropic steel deck of HongKong-Zhuhai-Macao bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(12): 25.
- [9] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢结构桥梁设计规范: JTG D64—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specification for design of highway steel bridge: JTG D64—2015 [S]. Beijing: China Communication Press, 2015.
- [10] NUSSBAUMER Alain, BORGES Luís, DAVAINÉ Laurence. Fatigue Design of steel and composite structure [M]. Mem Martins: ECCS, 2011.
- [11] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. General code for design of highway bridges and culverts: JTG D60—2004 [S]. Beijing: China Communication Press, 2004.
- [12] XIAO Zhigang, YAMADA Kentaro, YA Samol. Stress analyses and fatigue evaluation of rib-to-deck joints in steel orthotropic decks [J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30: 1387.
- [13] 国家标准化管理委员会. 道路车辆外轮廓尺寸、轴荷及质量限值: GB1589—2004 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Limits of dimensions, axle load and masses for road vehicles: GB1589—2004 [S]. Beijing: China Standardization Press, 2012.
- [14] 项海帆. 高等桥梁结构理论 [M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2013.
XIANG Haifan. Advanced bridge design theory [M]. 2nd ed. Beijing: China Communication Press, 2013.
- [15] 中华人民共和国交通部. 公路工程技术标准: JTG B01—2014 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical standard of highway engineering: JTG B01—2014 [S]. Beijing: China Communication Press, 2014.

(上接第 435 页)

参考文献:

- [1] 聂建国. 钢-混凝土组合结构桥梁 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
NIE Jianguo. Steel-concrete composite structure bridge [M]. Beijing: People Communications Press, 2011.
- [2] Association Francaise de Génie Civil. Ultra-high performance fiber reinforced recommendation [S]. [S. l.]: Association Francaise de Génie Civil, 2013.
- [3] 蒲心诚, 王志军. 超高高性能混凝土的力学性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2002, 23(6): 49.
PU Xincheng, WANG Zhijun. Study on mechanical properties of ultra high strength and high performance concrete [J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(6): 49.
- [4] TAYEH B A, BAKAR B H A, JOHARI M A M, *et al.* Evaluation of bond strength between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete as a repair material [J]. Procedia Engineering, 2013, 54: 554.
- [5] WATANABLE N, MUSHA H, YOSHINAGA K. Design and performance tests for bridge using ultra high strength fiber reinforced concrete [EB/OL]. [2017-10-01]. <http://www.pwri.go.jp/eng/ujnr/tc/g/pdf/23/23-9-3watanabe.pdf>.
- [6] BRUHWILER E, DENARIE E. Rehabilitation and strengthening of concrete structures using ultra-high performance fibre reinforced concrete [J]. Structural Engineering International, 2013, 23(4): 450.
- [7] THIBAUT T. Using UHPFRC for structural reinforcement of buildings and civil works [M]. [S. l.]: John Wiley & Sons Inc. 2013: 553-564.
- [8] GRAYBEAL B. Ultra-high performance concrete [J]. Technote, 2011, 19(10): 848.
- [9] HONARVAR E, SRITHARAN S, MATTHEWS R J, *et al.* Bridge decks with precast UHPC waffle panels: A field evaluation and design optimization [J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 21(1): 04015030.
- [10] LAMPROPOULOS A P, PASCHALIS S A, TSILOULOU O T, *et al.* Strengthening of reinforced concrete beams using ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) [J]. Engineering Structures, 2015, 106: 370.
- [11] FERRIER E, CONFRERE A, MICHEL L, *et al.* Shear behaviour of new beams made of UHPC concrete and FRP rebar [J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 90: 1.
- [12] Maintenance Construction Sécurité, École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Ultra-high performance fibre reinforced cement-based composites (UHPFRC) [S]. Lausanne: [s. n.], 2016.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. The first part of tensile test for metallic materials: Room temperature test method: GB/T 228.1—2010 [S]. Beijing: China Standard Press, 2011.
- [14] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范: GB50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
China Academy of Building Research. Specification for design of concrete structure: GB50010—2010 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2010.