



Research
Bridge Engineering—Article

基于统计分析的树脂灌注式螺栓连接疲劳强度评价

José António Fonseca de Oliveira Correia^{a,b,*}, Bruno Alexandre Silva Pedrosa^b, Patrícia Cordeiro Raposo^a, Abílio Manuel Pinho De Jesus^a, Helena Maria dos Santos Gervásio^b, Grzegorz Stanisław Lesiuk^c, Carlos Alberto da Silva Rebelo^b, Rui Artur Bartólo Calçada^a, Luís Alberto Proença Simões da Silva^b

^a Faculty of Engineering, University of Porto, Porto 4200-465, Portugal

^b Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering (ISISE), Department of Civil Engineering, University of Coimbra, Coimbra 3030-788, Portugal

^c Department of Mechanics, Materials Science and Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Wrocław University of Technology, Wrocław 50-370, Poland

ARTICLE INFO

Article history:

Received 8 April 2017

Revised 8 May 2017

Accepted 3 December 2017

Available online 8 December 2017

关键词

疲劳

连接

结构加强

S-N 曲线

树脂灌注式螺栓

摘要

在对老旧的螺栓和铆接金属桥进行修补和加固时可以使用不同的方案。由于铆接链接技术目前并不常用，连接它需要特定的设备和熟练的工人。另一种解决方案是使用焊接。但是，老旧钢材的可焊性较差。螺栓是一种非常可行的替代解决方案，并且常用于修复旧金属桥。装配螺栓的解决方案成本高昂，另一种方法是使用树脂灌注式螺栓。带有预紧力的树脂灌注式老旧螺栓连接的受力性能已经用准静态和蠕变试验进行了研究，然而，关于这些连接节点的滑移和疲劳行为的文献很少。本文概述了几位研究者的实验项目，旨在评估单侧受剪和双侧受剪的树脂灌注式螺栓连接的疲劳行为。对有预紧力的标准螺栓和有预紧力的树脂灌注式螺栓的连接节点的实验数据进行比较分析，显示后者的疲劳强度较低。但欧洲规范 3 (EC3) 对树脂灌注式螺栓和标准螺栓的连接节点提出的疲劳强度曲线大致相同，这应得到足够的重视。此外，本研究还展示了使用黏结螺栓连接的可行性研究。最后的研究是用高强度低合金结构钢板和用于金属黏结的丙烯酸结构黏结剂进行的。针对两个实际工程案例，使用线性化边界及 Castillo 和 Fernández-Canteli 模型对疲劳实验数据进行统计分析。最终提出疲劳设计曲线，并与欧洲和北美规范中的几个设计建议进行比较。

© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

在老旧铆接金属桥的修复作业中，可以采用多种修补和加固技术。铆接技术经常被采用，是因为可以保留桥梁的历史和建筑价值。但是，修复过程是有危险性的，并且成本高昂。由于老旧钢材的焊接性差，采用焊接技术修复并不合适。在金属连接中使用高强度摩擦型 (HSFG) 螺栓，接触面之间需要具有良好的

摩擦系数，因此对于老旧的金属桥梁，修复工程不是很好的选择。由于需要准备孔洞，装配螺栓虽然较适合修复工程应用但价格昂贵。因此，树脂灌注式螺栓连接用于维修和加固老旧铆接金属桥梁似乎是一种可行的解决方案。在已有的金属桥梁修复工程中，树脂灌注式螺栓连接已有一些应用实例。在葡萄牙，这种技术被用于修复 Figueira da Foz 地区 Mondego 河上的一座大桥 [1]。这个解决方案的另一个众所周知的应用实

* Corresponding author.

E-mail address: jacorreia@inegi.up.pt (J.A.F.O. Correia).

例是位于德国奥拉宁堡的桥梁[2]。

树脂灌注式螺栓不过是螺栓头部有一个小的注射孔的标准螺栓, 允许注入树脂, 填充螺栓和连接板之间的间隙。这个过程改善了板间的滑移。图1给出了树脂灌注式螺栓连接 (RIBJ) 的示意图[3]。

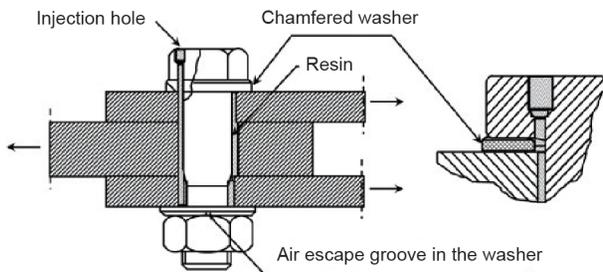


图1. 两侧剪切型连接中的RIBJ图解。

目前, 有关RIBJ的力学行为的研究已有所完成[1,2,4]。这些研究已经进行了准静态和蠕变试验, 以及与地震荷载有关的循环/动力试验。RIBJ滑移系数较低, 并且具有较高承载力和耐腐蚀性。此外, 在树脂灌注式螺栓上注入环氧树脂已被证明是一种可行的解决方案[1]。

很少有研究评估RIBJ在高周往复荷载下的疲劳行为。疲劳设计规范无法区分预紧力高强度螺栓和预紧力树脂灌注式螺栓连接的 $S-N$ 曲线。例如, 欧洲规范3 (EC3) [5]为这两种螺栓连接规定了相同的疲劳细节等级, 分别规定了两侧对称连接和单侧连接的疲劳细节等级为112和90。对于装配螺栓和无预紧力树脂灌注式螺栓连接, EC3提出了相同的疲劳细节等级, 例如, 它分别为两侧对称连接和单侧连接提出了90和80两个疲劳细节等级。

结构黏结剂通常用来提高螺栓连接的强度, 并有助于以最大面积分配和传递荷载。在螺栓连接中, 黏结剂的使用将会减弱孔周围的应力集中。实施结构黏结剂时有两种失效模式: 黏结界面破坏和黏结层本身破坏。第一种破坏模式是发生在黏结剂和粘贴母材的接触面(彼此分离), 而后者发生在黏结层材料内部[6]。

在RIBJ中进行的几项实验研究使用了环氧基树脂, 如Sikadur[®]-30和RenGel[®]-SW404, 因为它们可以提供冷固化、适合注塑的黏度和可接受的力学性能[7,8]。最近, 市场上推出了一种商品名为Sikadur[®]-52的新型环氧基树脂, 其特点为强度高。然而, 对于循环疲劳荷载作用, 研究结构黏结剂的滞回弹塑性行为很重要, 因为供应商提供的技术参数大多仅与静态性能有关。

本文重新讨论了De Jesus等对标准螺栓连接和RIBJ

疲劳试验的相关实验结果[8]。使用ASTM E739-91标准[9]与Castillo和Fernández-Canteli [10]提出的统计方法分析单侧和两侧剪切型螺栓连接。所研究的单侧和两侧剪切型螺栓连接分别由Trezóiz桥[11]和Fão桥[12-14]的材料制造商提供。此外, 对参考文献[15]采用黏结板的螺栓连接的疲劳试验结果进行对比分析。这项研究是用高强度低合金结构钢板(最小屈服强度为345 MPa)和丙烯酸结构黏结剂进行的金属粘贴。对于两个实际工程案例, 疲劳实验结果的统计分析使用线性化边界以及Castillo和Fernández-Canteli模型[10]进行, 旨在了解黏结剂对螺栓连接疲劳性能的影响, 并提出 $S-N$ 曲线。之后, 将几个标准 (EC3 [5]、AASHTO LRFD [16]和BS 5400 [17]) 的推荐设计曲线与建议的曲线进行对比分析。

2. $S-N$ 曲线和统计模型

2.1. 材料和结构细节的疲劳性能概述

由于结构中各不同构件的疲劳问题受到多个参数的影响, 而这些参数并不总是独立的, 所以设计和评估过程通常是经验性的。衡量材料、受力构件或结构细节的疲劳损伤的最常用方法是使用 $S-N$ 曲线。 $S-N$ 曲线将应力幅 ($\Delta\sigma$) 与破坏时经受的荷载频次 (N_f) 联系起来, 如图2所示。

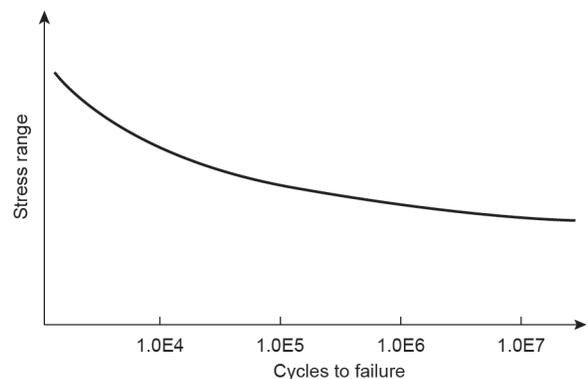


图2. $S-N$ 曲线图。

对于大多数研究结果, 为了建立 $\lg\Delta\sigma$ 与 $\lg N_f$ 之间的线性关系, 通常在两个轴上采用对数函数表示。这个线性关系可以用Basquin关系在数学上表达, 如式(1):

$$\Delta\sigma^m N_f = C \quad (1)$$

式中, C 和 m 为常数。

结构细节中的疲劳评估由EC3 [5]、BS 5400 [17]和AASHTO LRFD [16]等标准中的设计准则计算得到。但

是,关于RIBJ的疲劳设计准则,只有EC3明确指出要使用 $S-N$ 曲线。但是,它没有将树脂灌注式螺栓连接从标准螺栓连接中区分出来,两者都建议使用相同的疲劳细节强度等级。EC3规定了一组直接与应力幅相关的疲劳强度曲线,每个曲线由其疲劳细节类别(应力幅, $\Delta\sigma_c$, 200万次循环荷载)定义,如图3所示。表1总结了按照这个欧洲标准为每种类型RIBJ指定的疲劳细节强度等级。英国规范(BS 5400) [17]建议将D类用于螺栓连接组件,而AASHTO LRFD规范[16]则定义高强度螺栓连接属于B类疲劳细节。

2.2. 疲劳性能统计方法研究

通过采用统计方法解决疲劳问题,寿命预测符合金属桥梁、航空机械和工业机械的结构完整性标准的原则。此外,这允许在受力构件/结构细节的疲劳分析过程中建立适当的安全级别,涉及可能影响疲劳数据的多个因素的离散性。参考文献[18]研究了这种离散性对疲劳结果的影响,如图4 [18]所示,随着循环次数的增加和应力幅的减小,数据离散性通常会增加。

Zhao等[19]建立了一个针对长期性能的概率 $S-N$ 域函数,其假定为对数正态分布。Schijve [18]着重于建立结构疲劳评估的统计分布函数,但研究受限于描述 $S-N$ 域函数的特定位置。另一种概率分析方法是采用适当

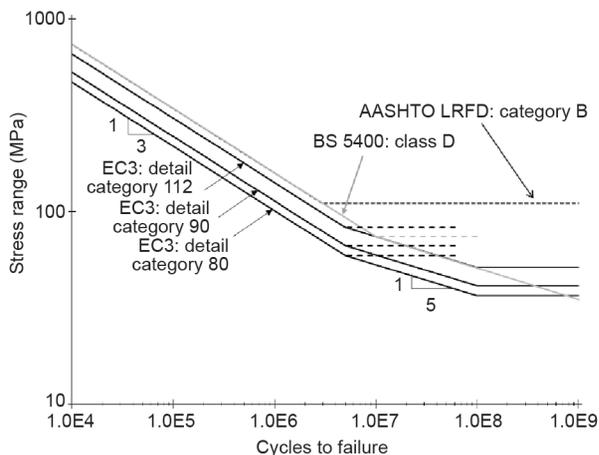


图3. 接压力范围内疲劳强度曲线 (RIBJ相关)。

表1 基于EC3的不同类型的RIBJ疲劳细节分类

Detail category	Preloaded	Non-preloaded	Double shear	Single shear
112	✓		✓	
90		✓	✓	
90	✓			✓
80		✓		✓

的概率分布函数来考虑现有确定性模型的各个参数/属性的变化。Correia等[20]的工作以及Sanches等[21]关于旧桥铆接头疲劳强度的概率建模的工作就是采用的这种方法。在文献中,可以找到一组概率模型,试图模拟完整的概率 $S-N$ 域函数[22-24]。最近,Castillo和Fernández-Canteli [10]提出了推荐用于中高甚至更高频次循环疲劳的概率模型。这项工作对使用物理和统计假设描述完整Wöhler场的解析概率模型有重要贡献。本文稍后将对该模型进行更详细的描述。

为了克服 $S-N$ 数据的离散性,工程实践考虑了对数函数数据的线性回归分析[式(2)],目的是用相应的标准偏差定义平均 $S-N$ 曲线:

$$N^* = A + B \cdot \Delta\sigma^* \quad (2)$$

式中, N^* 为 $\lg N_f$ 的因变量; $\Delta\sigma^*$ 为 $\lg \Delta\sigma$ 的自变量; A 和 B 为与式(1)中 C 和 m 常数有关的线性回归参数,如式(3)所示:

$$\begin{cases} C = 10^A \\ m = -B \end{cases} \quad (3)$$

此后,通过平移 $S-N$ 曲线建立线性离散带,如式(4)所示,其中, α 是整数, S 是残差的标准差:

$$N^* = A + B \cdot \Delta\sigma^* \pm \alpha \cdot S \quad (4)$$

A 和 B 参数通过式(5)和式(6)计算:

$$A = \bar{N} - B \cdot \bar{\Delta\sigma} \quad (5)$$

$$B = \frac{\sum_{j=1}^k (\Delta\sigma_j^* - \bar{\Delta\sigma})(N_j^* - \bar{N})}{\sum_{j=1}^k (\Delta\sigma_j^* - \bar{\Delta\sigma})^2} \quad (6)$$

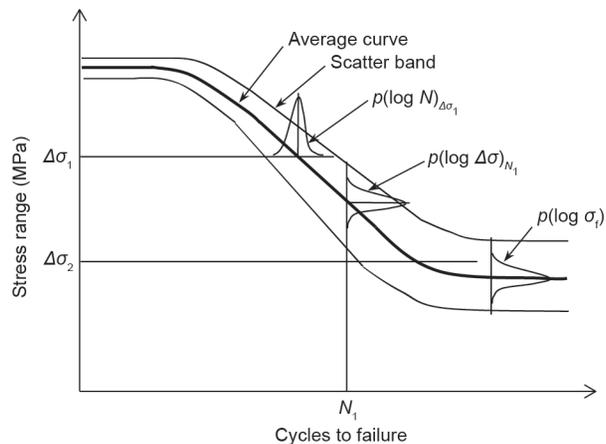


图4. $S-N$ 曲线中散射的影响[18] (p 对应于失效概率; σ_f 为疲劳极限应力)。

式中, $\overline{\Delta\sigma}$ 和 $\overline{N_f}$ 分别为试验数据 $\Delta\sigma_j^* = \log\Delta\sigma_j$ 和 $N_{f,j}^* = \log N_{f,j}$ 的平均值; K 为试验试件的数量。

这种计算方法已在材料标准如ASTM E739-91 [9]中得以应用, 然而, 对于非常高荷载循环频次疲劳寿命评估应用有局限性, 并且它没有考虑沿疲劳区域的可变离散性。如前所述, Castillo和Fernández-Canteli [10]提出了一个基于物理和统计假设的概率模型, 该模型是一个基本的概率 $S-N$ 域函数, 其定义如下:

$$F(\log N_f; \log \Delta\sigma) = p = 1 - \exp \left\{ - \left[\frac{(\log N_f - B)(\log \Delta\sigma - C) - \lambda}{\delta} \right]^\beta \right\} \quad (7)$$

$$(\log N_f - B)(\log \Delta\sigma - C) \geq \lambda$$

式中, N_f 为疲劳破坏循环次数; $\Delta\sigma$ 为应力幅; p 为失效概率; F 为基于给定 $\lg\Delta\sigma$ 的 $\lg N_f$ 的累积概率分布函数; $B = \lg N_0$, N_0 为疲劳寿命阈值; $C = \lg \Delta\sigma$, 其中, $\Delta\sigma$ 为疲劳极限; λ , β 和 δ 为无量纲模型参数 (其中, λ 为定义零百分位曲线位置的威布尔位置参数; β 为威布尔形状参数; δ 为威布尔尺寸参数)。图5给出了一些有代表性的百分位曲线 (双曲线) 的Weibull概率 $S-N$ 域函数, 这些曲线分布在代表疲劳极限的水平渐近线 $\log N_f = B$ 和代表寿命阈值的垂直渐近线 $\log \Delta\sigma = C$ 夹逼的区域。

3. 使用黏结剂的螺栓连接疲劳试验数据

在疲劳荷载作用下, 金属螺栓连接中黏结剂的使用几乎还没有研究过。主要研究由Albrecht等[15,25]在

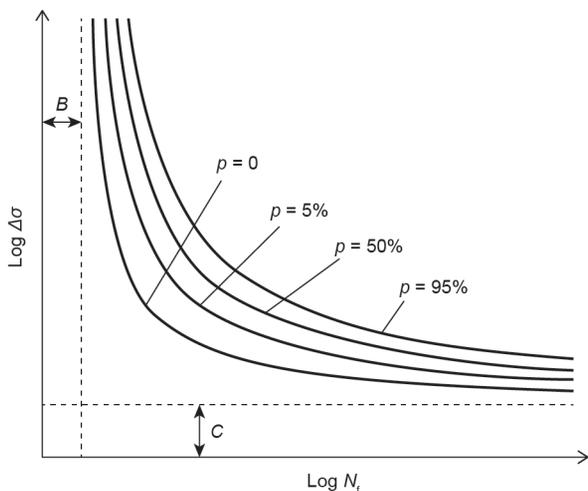


图5. 根据Castillo和Fernández-Canteli提出的Weibull分布的概率 $S-N$ 场 (p 对应于失效概率)。

1984/1985年完成以及最近由De Jesus等[8]在2010年完成。在以下章节中, 这些实验结果以 $S-N$ 曲线的形式进行了总结/重现。采用两种统计方法: 第一种为ASTM E739-91[9]推荐的方法; 第二种为Castillo和Fernández-Canteli提出的概率模型[10]。随后, 将相关规范如EC3[5]、AASHTO LRFD [16]和BS 5400 [17]的设计曲线与从统计分析中获得的设计曲线进行了比较。

3.1. 来自 De Jesus 等的研究数据

De Jesus等[8]使用标准螺栓和用葡萄牙老旧桥梁材料生产的树脂灌注式螺栓对螺栓连接进行疲劳试验。使用两种不同的几何形状: 用Fão桥中提取的锻铁制成的双侧剪切型螺栓连接, 以及从Trezói桥中提取的建筑钢材制成的单侧剪切型螺栓连接。Fão桥由锻铁制成, 建于1892年。这种锻铁是一种非均质材料, 所以材料性能有显著的分散性。Trezói桥 (1956年创立) 的材料与目前的建筑钢材力学性能相似。

研究采用的试件如图6所示。所有试件的螺栓都施加了80 N·m的扭矩。螺栓、螺母和垫圈允许树脂注入填充螺栓和板之间1 mm的径向间隙。

在De Jesus等[8]开展的RIBJ的疲劳试验中, 使用了商用环氧树脂Sikadur®-30 [26]。树脂/黏结剂的弹性模量为11.2 GPa (受拉)、9.6 GPa (受压)。固化时间至少8 d的树脂Sikadur®30 [26]的单调力学性能如下: 抗压强度为70~80 MPa、剪切强度为14~18 MPa、抗拉强度为24~27 MPa。最重要的是, 所有RIBJ都要经历与树脂所达到力学性能相同的固化时间。

单侧和双侧剪切型螺栓连接分别在MTS 321.21和Instron 8801伺服液压机上进行试验。试验是在恒定应力比下进行的, 即双侧剪切型螺栓连接的应力 R 比等于0, 单侧剪切型螺栓连接的应力 R 比等于0.1。

关于RIBJ, 实验研究针对两种试件进行疲劳测试, 一种是用Fão桥材料 (双侧剪切) 制成的7个试件, 疲劳荷载频率采用5 Hz或8 Hz, 另一种是用Trezói桥材料 (单侧剪切) 制成的4个试件, 采用的荷载频率为4~8 Hz。相同的净应力幅 $\Delta\sigma = 355$ MPa用于双侧剪切型螺栓连接的所有疲劳试验, 而对于单侧剪切型螺栓连接, 净应力幅为271.5~362.8 MPa。

标准螺栓连接由7个双侧剪切型螺栓连接试件和3个单侧剪切型螺栓连接试件组成。在第一种情况下, 试验的净应力幅为355.5~398.6 MPa, 荷载频率范围为2.5~10 Hz; 对于单侧剪切型螺栓连接试件, 净应力幅

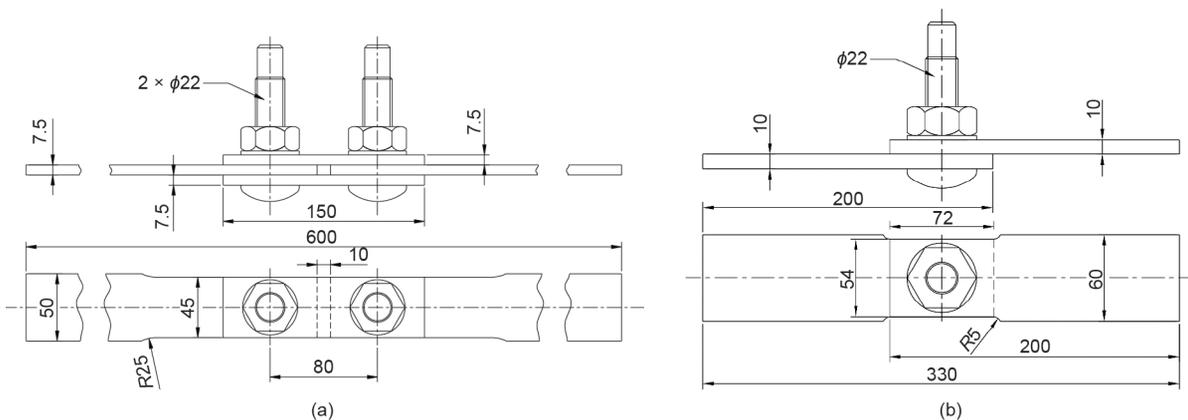


图6. 螺栓连接的几何尺寸 (单位: mm)。(a) 双侧剪切; (b) 单侧剪切。

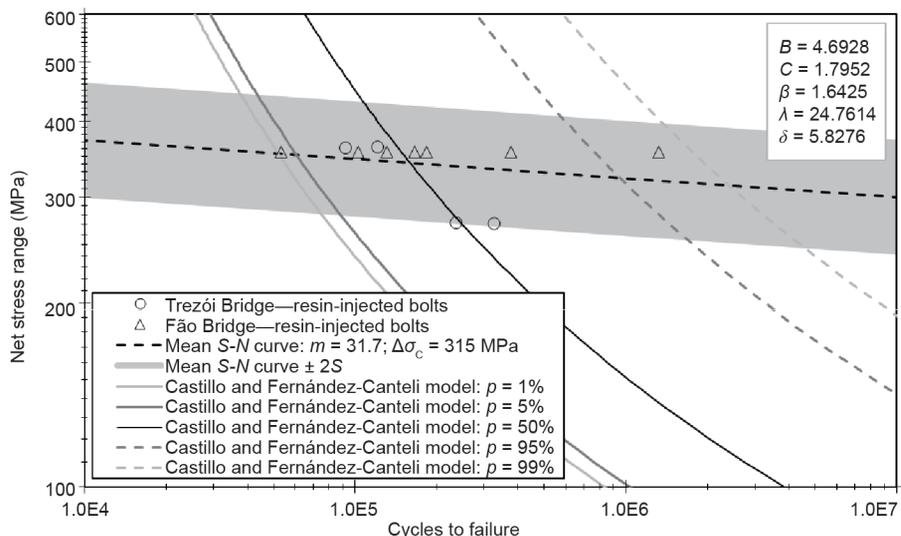


图7. 树脂灌注式螺栓连接的疲劳实验结果和使用线性化边界以及Castillo和Fernández-Canteli模型[10]的统计分析 (p 对应失效概率)。

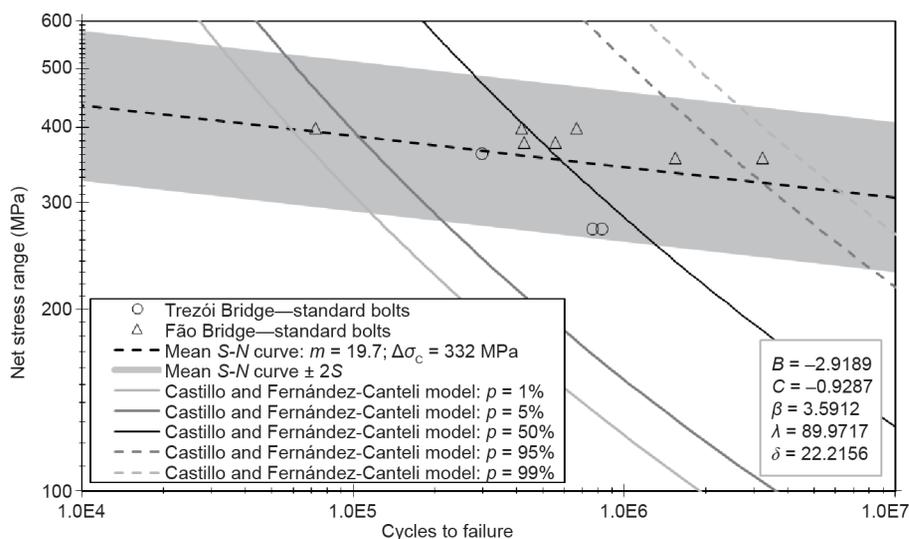


图8. 标准螺栓连接的疲劳实验结果和使用线性化边界以及Castillo和Fernández-Canteli模型[10]的统计分析 (p 对应失效概率)。

为271.4~362.2 MPa, 频率为4 Hz或6 Hz。

如图7和图8所示, 将RIBJ和标准螺栓连接的疲劳

试验结果绘制在净应力幅和荷载循环次数之间的对数尺度上。使用线性化边界以及Castillo和Fernández-Canteli

模型[10]对两种连接形式进行统计分析。将概率化 $S-N$ 域函数与百分比曲线一起比较, 分别对应1%、5%、50%、95%和99%的失效概率。

通过对实验结果用两种方法进行统计分析, 提出了RIBJ和标准螺栓连接的疲劳设计曲线。对于ASTM E739-91 [9], 疲劳设计曲线定义为 $\alpha = -2$ 。对于Castillo和Fernández-Canteli模型[10], 从百分位数曲线中获得的 $S-N$ 曲线对应的是5%的失效概率。

通过统计分析得到RIBJ和标准螺栓连接的设计曲线, 如图9所示。可以看出, 从Castillo和Fernández-Canteli模型[10]得到的设计曲线表明, 使用树脂灌注式螺栓连接在多个疲劳区域得到的疲劳抗力较低。线性化的边界增强了树脂灌注式螺栓的最差疲劳强度的提法, 尽管

只是针对循环次数较少的情况。

对这一分析结果的一个可能解释在参考文献[8]中有所提及, 它与预紧力的影响有关。预紧力对螺栓连接疲劳性能有利, 可使孔周围的应力集中减少。对于标准螺栓连接, 螺栓和孔之间的接触可使预紧力增大。然而, 用树脂填充孔中的间隙会导致压缩应力和预紧力的减小。同样重要的是, 与标准螺栓连接相比, 来自老旧金属桥梁的旧钢材微观结构特征可以证明RIBJ疲劳强度降低的合理性。材料的微观结构是铁素体基体, 通过变形形成许多夹杂物, 限制了材料的延展性, 增加了单调性和疲劳等力学性能的离散性[27-30]。但是, 这一假设需要进一步的试验和数值研究确定。

由于试验试件的数量较少且离散性显著, 疲劳设

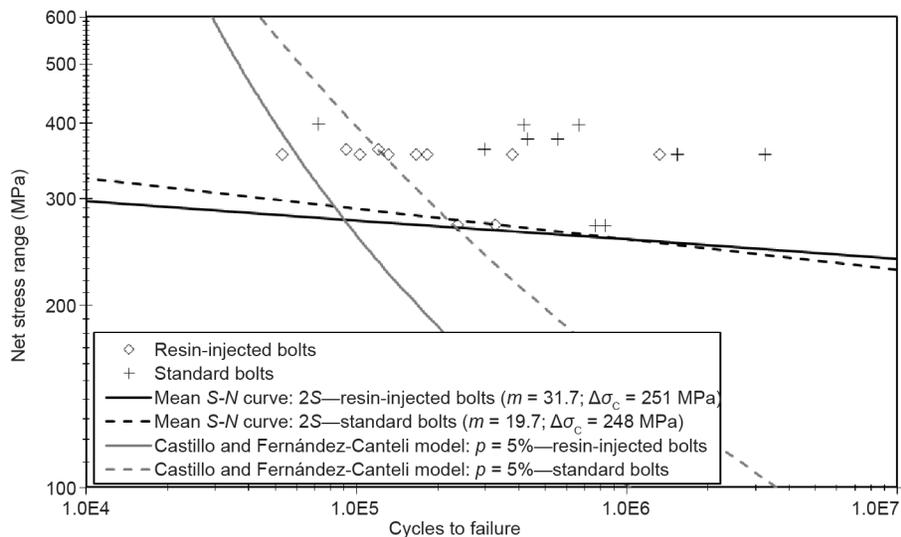


图9. 树脂灌注式螺栓和标准螺栓连接的疲劳设计曲线的对比研究 (基于统计分析)。

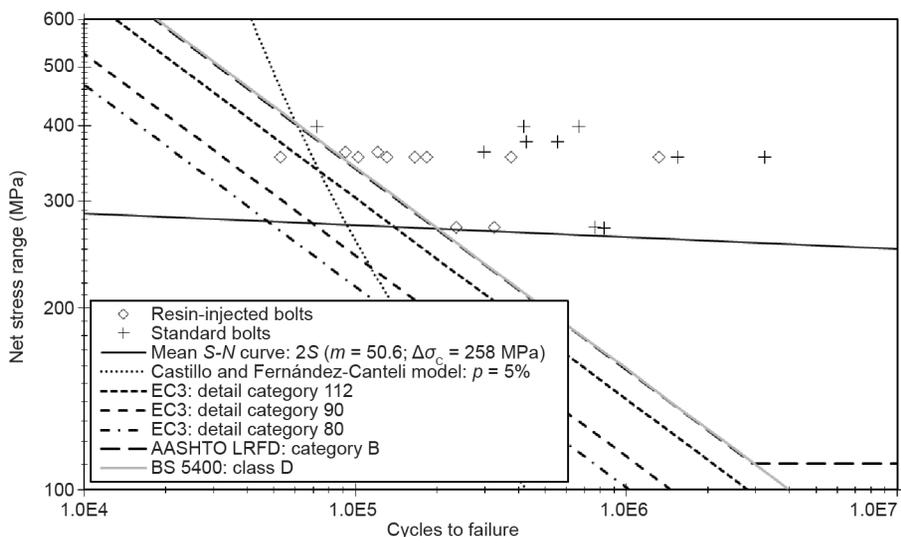


图10. EC3、AASHTO LRFD和BS 5400推荐的疲劳设计曲线与统计分析得出的疲劳设计曲线的比较。

计 $S-N$ 曲线的建立需综合考虑所有试验结果。图10给出了通过对所有疲劳数据进行统计分析获得的曲线,即ASTM E739-91 [9] (平均 $S-N$ 曲线: $2S$) 中以95%为保证率的数据带下限以及采用Castillo和Fernández-Canteli模型[10]确定的百分位数曲线(失效概率对应5%)。

EC3中提出的 $S-N$ 曲线也包含在图10中。该标准没有区分RIBJ和标准螺栓连接的疲劳强度等级,两者都提出了相同的疲劳细节类别。对于单侧剪切型螺栓连接,对于带预紧力螺栓,EC3建议使用90类细节,对于非预紧力螺栓,EC3建议使用80类细节。对于双侧剪切型螺栓连接,该规范规定带预紧力螺栓的细部类别为112,而非预紧力螺栓连接的细部类别为90。

图10表明,EC3的 $S-N$ 曲线较保守,因为只有一个数据点(树脂灌注式螺栓)位于EC3细节类别112曲线的下方。AASHTO LRFD类别B和BS 5400 D中设计曲线可以进行相同的分析。

为了进一步验证Castillo和Fernández-Canteli模型的适用性,以正确表示高和更高周期的疲劳性能,需要大量的实验数据,特别是对于低应力区。

3.2. 来自 Albrecht 等的研究数据

为了延长疲劳寿命并增加螺栓连接的疲劳强度,在板接触表面(剪切界面)上施加黏结剂材料。以期黏结剂有助于分布和传递荷载,从而减少应力集中。实验采用的黏结剂是丙烯酸黏结剂Versilok 201。在以前的几种结构黏结剂的比较研究中, Versilok 201在室温下显示出更高的强度以及快速固化性能(15 min): 剪切强度为26.34 MPa, 拉伸强度为22.82 MPa [25]。

试验研究采用了两种不同类型的试件。其差异体现在螺栓的数量和板的几何形状上。如图11(a)所示,一组试件由两个单侧螺栓组成,如图11(b)所示,另一组试件由一个单侧螺栓组成。

钢板按照ASTM A588 / A588M标准[31]生产,其要

求最小屈服强度为345 MPa。使用了直径为16 mm的高强度螺栓以及硬质垫圈和六角螺母。螺栓受到84.5 kN的预紧力,相当于螺栓最小拉伸强度的70%。接触表面涂有黏结剂的试件被称为黏结试件,而没有黏结剂的试件是非黏结试件。

试件在正弦循环往复荷载下以恒定幅值进行试验,应力 R 比等于0,并测试了不同的频率(4 Hz、6 Hz、8 Hz和10 Hz)以及不同的净应力幅(171 MPa、200 MPa、219 MPa和285 MPa)。

3.2.1. 双螺栓试件

关于双螺栓试件的疲劳试验,黏结试件和非黏结试件的实验数据应绘制在净应力幅和循环次数两坐标轴之间的对数尺度上,分别如图12和图13所示。和前述研究一样,对于两种连接形式均使用线性化边界以及Castillo和Fernández-Canteli模型进行了统计分析[10]。

如前所述,疲劳设计曲线都可以通过统计分析获得,采用ASTM E739-91 [9]方法并且取 $\alpha = -2$,也可以采用Fernández-Canteli模型[10]得到,取失效概率为5%的百分位数曲线。图14给出了双螺栓连接和非黏结试件的设计曲线。

由图14可知,根据ASTM E739-91 [9]推荐的统计分析方法得到的设计曲线表明,对于高周和低周疲劳荷载作用,黏结试件的疲劳强度都较高。然而,Castillo和Fernández-Canteli模型的5%曲线[10]表明,当采用黏结剂时,疲劳强度的提高并不显著,而对于高周疲劳荷载作用,疲劳强度甚至更低。

为了建立可靠的设计曲线,所有与双螺栓试件相关的疲劳数据被一并考虑。界定了具有95%保证率数据带的下限值(平均 $S-N$ 曲线: $2S$),以及对应于Castillo和Fernández-Canteli模型定义的失效概率为5%的百分位数曲线[10],如图15所示。

另外,图中添加了疲劳设计规范中的曲线: EC3细

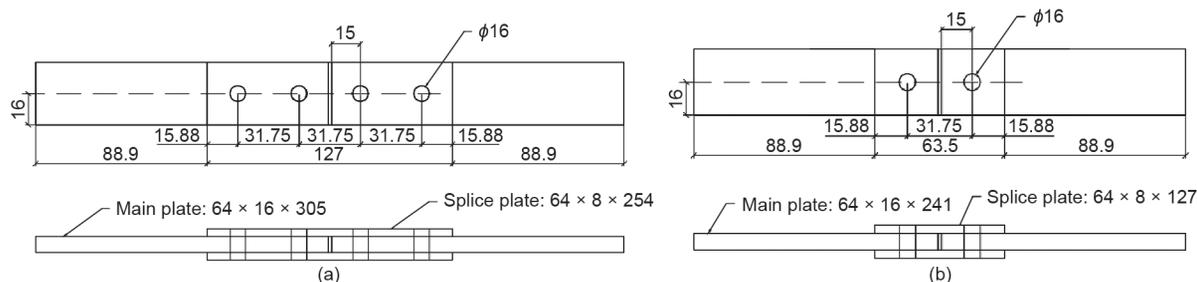


图11. 试验试件(单位: mm)的几何尺寸。(a) 双螺栓试件; (b) 单螺栓试件。

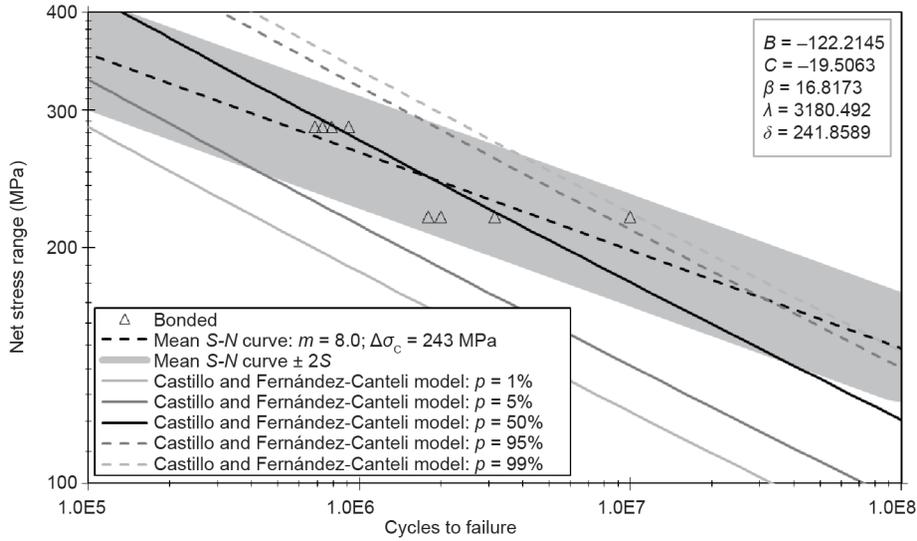


图12. 双螺栓黏结试件的疲劳实验结果和使用线性化边界以及Castillo和Fernández-Canteli模型的统计分析结果。

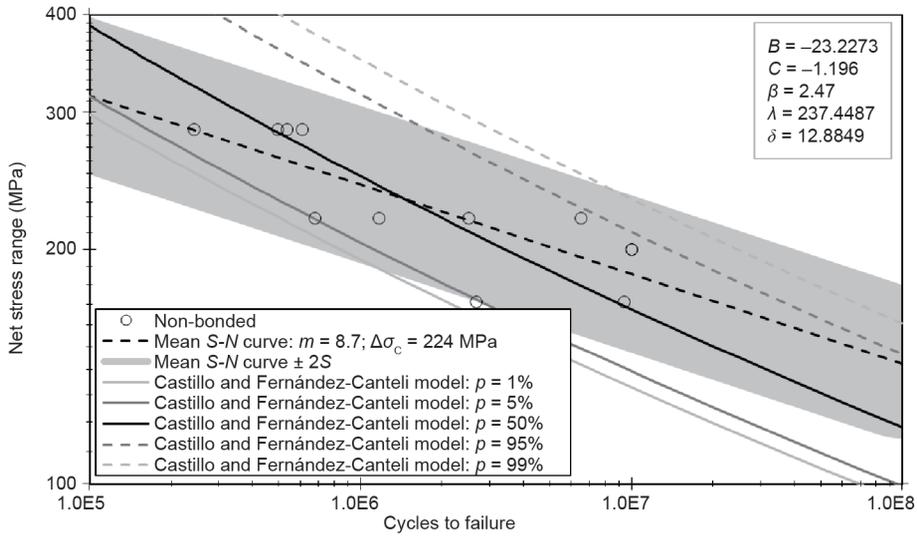


图13. 使用线性化界限和Castillo和Fernandez-Canteli模型[10]得出的双螺栓非黏结试件和统计分析疲劳实验结果 (p对应失效概率)。

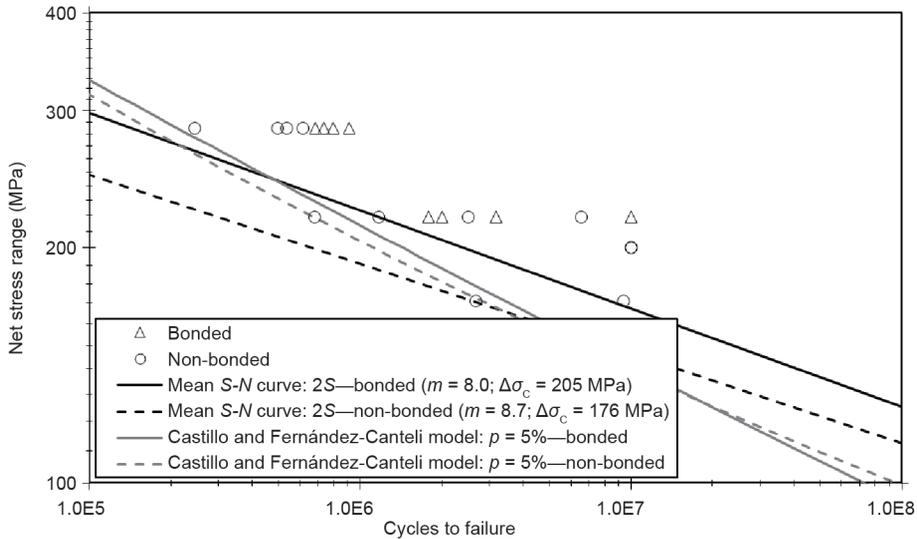


图14. 从统计分析中获得的疲劳设计曲线中双螺栓黏结和非黏结试件的对比。

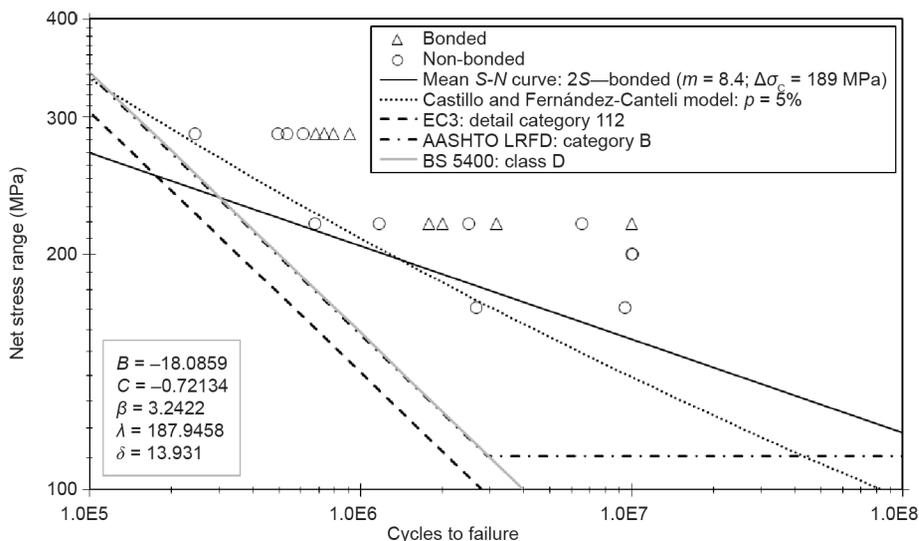


图15. EC3、AASHTO LRFD和BS 5400推荐的疲劳设计曲线与统计分析得出的疲劳设计曲线的比较。

节类别112（用于预应力高强度双侧剪切型螺栓连接）、AASHTO LRFD B类和BS 5400 D类。所有这些都比疲劳试验数据结果保守。

3.2.2. 单螺栓试件

单螺栓黏结和非黏结试件的疲劳试验结果被绘制在净应力幅和循环次数两坐标轴之间的对数尺度上，以便与双螺栓试件的统计分析结果对比，分别如图16和图17所示。

如前所述，通过统计分析得到黏结和非黏结试件的疲劳设计曲线，如图18所示。两种统计方法都表明黏结剂的使用在低周和高周疲劳荷载作用下都会导致连接的低疲劳强度。但是，值得注意的是，实验中应力幅的变

化有限，因此需要更多的实验数据才能得到可靠的结论。

单螺栓试件实验结果的可统计性较差（离散性很大）。经常由于螺栓脱开或非预期的破坏使实验数据无意义。因此，通过统计分析获得的疲劳设计曲线是针对所有单螺栓试件的实验数据，如图19所示，采用了相同的S-N设计曲线。结果表明，当螺栓数量减少时，疲劳强度急剧下降，规范中的S-N曲线也不再保守[32]。

4. 结论

本文讨论了连接节点疲劳性能的统计分析方法，采用文献中关于单侧和双侧剪切型螺栓连接的疲劳实验数据作为统计分析的数据源。这些连接采用旧桥钢板与

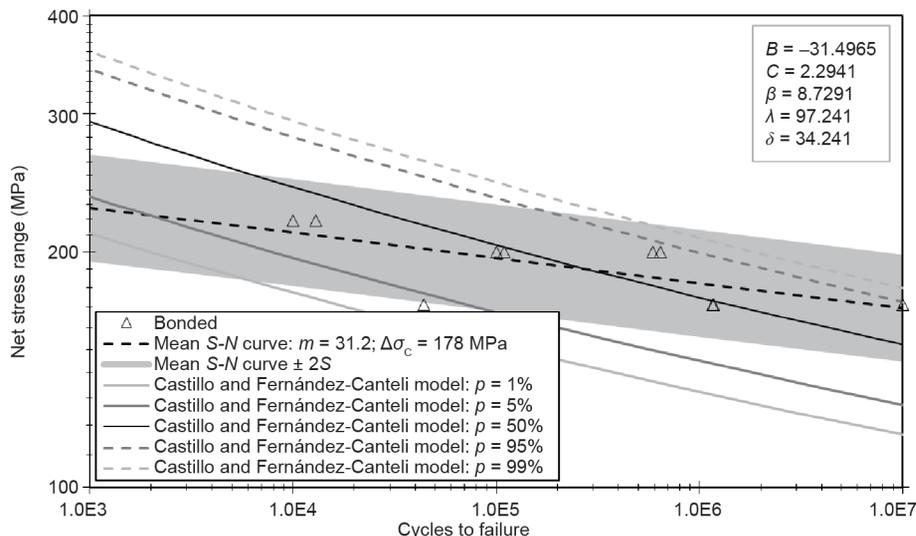


图16. 单螺栓黏结试件的疲劳实验结果和使用线性化边界以及Castillo和Fernández-Canteli模型的统计分析结果。

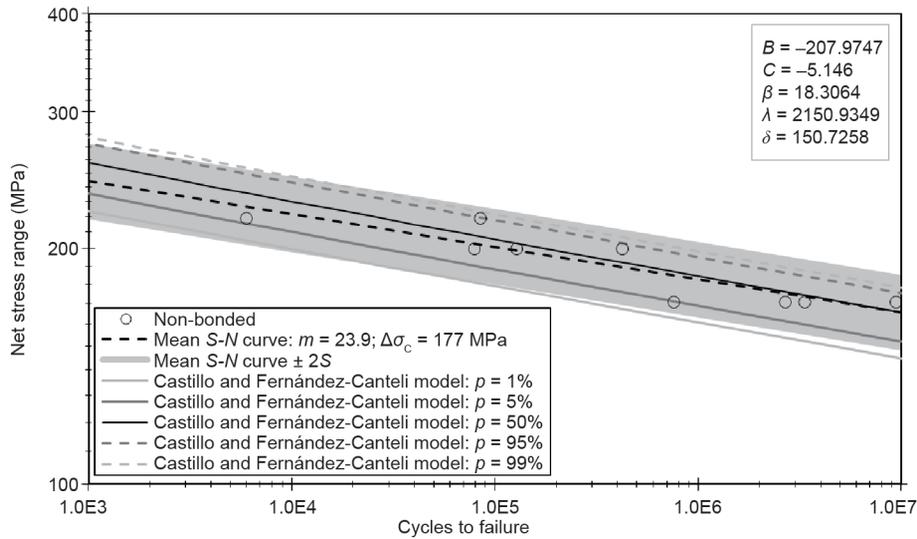


图17. 使用线性化界限及Castillo和Fernandez-Canteli模型[10]得出的单螺栓无黏结试件和统计分析疲劳实验结果 (p 对应失效概率)。

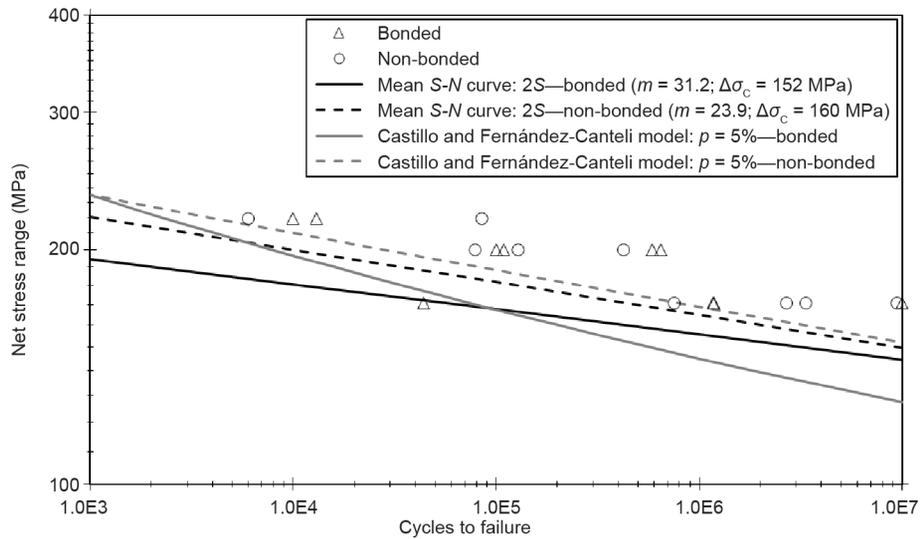


图18. 从统计分析中获得的疲劳设计曲线中单螺栓黏结和无黏结试件的对比。

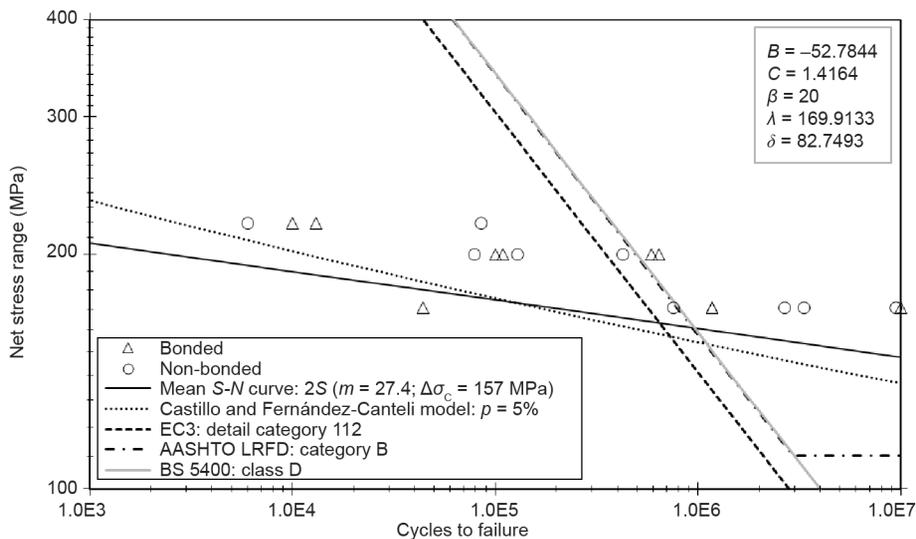


图19. 从统计分析及EC3、AASHTO LRFD和BS 5400 (单螺栓试件) 中获得的疲劳设计曲线对比。

RIBJ和标准螺栓连接而成。螺栓连接使用从Trezói桥和Fão桥提取的材料制成。根据实验数据,对RIBJ的疲劳强度降低进行了分析验证。EC3疲劳设计规范中针对有预紧力的高强度螺栓和有预紧力的树脂灌注式螺栓连接采用相同的S-N曲线。

将由统计分析获得的疲劳设计曲线与设计规范中的S-N曲线进行比较。现有的实验数据和统计分析结果表明,需要进行更多的实验研究以及相应的数值分析,以有效确定和评估RIBJ的疲劳性能。

对于带黏合板螺栓连接实验研究的主要结论是:对于双螺栓连接,黏结剂的使用增加了疲劳寿命,但是如果螺栓数量减少,疲劳寿命就会显著降低,而不能通过黏结来恢复或改善其疲劳性能。与非黏结连接相比,黏结连接的疲劳强度略有增大。

因此,本文提出了一个未来研究的机会:树脂灌注式螺栓对结构连接节点的疲劳性能的影响需要进一步研究。

Acknowledgements

The authors acknowledge the financial support of the Portuguese Foundation for Science and Technology (FCT) through the postdoctoral grant (SFRH/BPD/107825/2015), and the funding of Pro-Life—Prolonging the Lifetime of Old Steel and Steel-Concrete Bridges (RFSR-CT-2015-00025) by the Research Fund for Coal and Steel (RFCS).

Compliance with ethics guidelines

José António Fonseca de Oliveira Correia, Bruno Alexandre Silva Pedrosa, Patrícia Cordeiro Raposo, Abílio Manuel Pinho De Jesus, Helena Maria dos Santos Gervásio, Grzegorz Stanisław Lesiuk, Carlos Alberto da Silva Rebelo, Rui Artur Bartólo Calçada, and Luís Alberto Proença Simões da Silva declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Mattes JF. Substituição de Rebites por Parafusos Injectados com Resina [dissertation]. Lisboa: Technical University of Lisbon; 2007. Portuguese.
- [2] Gresnigt AM, Sedlacek G, Paschen M. Injection bolts to repair old bridges. In: Connections in steel structures IV. Proceedings of the Fourth International Workshop; 2000; Roanoke, USA. p. 349–60.
- [3] EN 1090-2. Execution of steel structures and aluminium structures—Part 2: Technical requirements for steel structures. European standard. Brussels: European Committee for Standardization; 2008.
- [4] European Convention for Constructional Steelwork (ECCS). European recommendations for bolted connections with injection bolts. In: Brussels: European Convention for Constructional Steelwork (ECCS).
- [5] EN 1993-1-9. Eurocode 3: Design of steel structures—Part 1-9: Fatigue. European standard. Brussels: European Committee for Standardization; 2003.
- [6] Miravalles M. The creep behavior of adhesives [dissertation]. Gothenburg: Chalmers University of Technology; 2007.
- [7] Zarafi B, Qureshi J, Mottram J, Rusev R. Static and fatigue performance of resin injected bolts for a slip and fatigue resistant connection in FRP bridge. Structures 2016;7:71–84.
- [8] De Jesus AMP, da Silva JFN, Figueiredo MV, Ribeiro AS, Fernandes AA, Correia JAF, et al. Fatigue behavior of resin injected bolts: An experimental approach. In: Proceedings of the Iberian Conference on Fracture and Structural Integrity; 2010 Mar 17–19; Porto, Portugal. p. 17–9.
- [9] ASTM E739-91. Standard practice for statistical analysis of linear or linearized stress-life (S-N) and strain-life (e-N) fatigue data. American standard. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials; 1991.
- [10] Castillo E, Fernández-Canteli A. A unified statistical methodology for modeling fatigue damage. Berlin: Springer; 2009.
- [11] De Jesus AMP, Pinto H, Fernández-Canteli A, Castillo E, Correia JAF. Fatigue assessment of a riveted shear splice based on a probabilistic model. Int J Fatigue 2010;32(2):453–62.
- [12] De Jesus AMP, da Silva ALL, Correia JAF. Fatigue of riveted and bolted joints made of puddle iron—An experimental approach. J Constr Steel Res 2015;104:81–90.
- [13] Gallegos Mayorga L, Sire S, Correia JAF, De Jesus AMP, Valente I, Rebelo C, et al. Design S-N curves for old Portuguese and French riveted bridges connection based on statistical analyses. Procedia Eng 2016;160:77–84.
- [14] Gallegos Mayorga L, Sire S, Correia JAF, De Jesus AMP, Rebelo C, Fernández-Canteli A, et al. Statistical evaluation of fatigue strength of double shear riveted connections and crack growth rates of materials from old bridges. Eng Fract Mech. 2017. Epub 2017 May 29.
- [15] Albrecht P, Sahli A, Crute D, Albrecht Ph, Evans BM. Application of adhesives to steel bridges Report. McLean: US Department of Transportation, Federal Highway Administration; 1984. Report No. FHWA/RD-84/073.
- [16] AASHTO LRFD. Bridge design specification. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO); 1995.
- [17] BS 5400. Steel, concrete and composite bridges—Part 10: Code of practice for fatigue. British standard. London: British Standards Institution; 1980.
- [18] Schijve J. Statistical distribution functions and fatigue of structures. Int J Fatigue 2005;27(9):1031–9.
- [19] Zhao YX, Yang B, Feng MF, Wang H. Probabilistic fatigue S-N curves including the super-long life regime of a railway axle steel. Int J Fatigue 2009;31(10):1550–8.
- [20] Correia JAF, De Jesus AMP, da Silva ALL, da Silva JFN. A procedure to derive probabilistic fatigue strength data for riveted joints. In: Proceedings of the 5th International Conference on Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization—IABMAS'10; 2010 Jul 11–15; Philadelphia, PA, USA. p. 608.
- [21] Sanches RF, De Jesus AMP, Correia JAF, da Silva ALL, Fernandes AA. A probabilistic fatigue approach for riveted joints using Monte Carlo simulation. J Constr Steel Res 2015;110:149–62.
- [22] ASTM STP511. Probabilistic aspect of fatigue—New method for the statistical evaluation of constant stress amplitude fatigue-test results. American standard. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials; 1972.
- [23] ASTM STP744. Statistical analysis of fatigue data—Some considerations in the statistical determination of the shape of S-N curves. American standard. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials; 1981.
- [24] Pascual FG, Meecker WQ. Estimating fatigue curves with the random fatigue-limit model. Technometrics 1999;41(4):277–90.
- [25] Albrecht P, Mecklenburg MF, Evans BM. Screening of structural adhesives for application to steel bridges Report. McLean: US Department of Transportation, Federal Highway Administration; 1985. Report No.: FHWA/RD-86/037.
- [26] Rodrigues M. Comportamento Monotónico e à Fadiga de Adesivos Estruturais para Reparação de Ligações de Pontes Metálicas [dissertation]. Porto: University of Porto; 2017. Portuguese.
- [27] De Jesus AMP, da Silva ALL, Figueiredo MV, Correia JAF, Ribeiro AS, Fernandes AA. Strain-life and crack propagation fatigue data from several Portuguese old metallic riveted bridges. Eng Fail Anal 2011;18(1):148–63.
- [28] Lesiuk G, Szata M, Bocian M. The mechanical properties and the microstructural degradation effect in an old low carbon steels after 100-years operating time. Arch Civ Mech Eng 2015;15(4):786–97.
- [29] Kucharski P, Lesiuk G, Szata M. Description of fatigue crack growth in steel structural components using energy approach—Influence of the microstructure on the FCGR. AIP Conf Proc 2016;1780:050003.
- [30] Lesiuk G, Szata M. Aspects of structural degradation in steels of old bridges by means of fatigue crack propagation. Mater Sci 2011;47(1):76–81.
- [31] ASTM A588/A588M. Standard specification for high-strength low-alloy structural steel. American standard. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials; 2015.
- [32] Correia JAF, De Jesus AMP, Pinto JCM, Calçada RAB, Pedrosa B, Rebelo C, et al. Fatigue behavior of single and double shear connections with resin-injected preloaded bolts. In: Proceedings of the 19th IABSE Congress; 2016 September 21–23, Stockholm, Sweden. p. 327–39.