

文章编号:1673-9469(2010)01-0016-05

钢-混凝土组合梁疲劳性能研究进展

杨涛

(同济大学 建筑工程系,上海 200092)

摘要:钢-混凝土组合梁广泛应用于桥梁结构,由车辆等活荷载引起的疲劳问题日益突出,但国内对钢-混凝土组合梁疲劳性能的研究并不充分,规范中相关的疲劳设计条款有待完善。疲劳试验是研究钢-混凝土组合梁疲劳性能的主要途径之一,而其耗时长、费用高的特点决定了无法进行大量的试验研究。因此,对现有研究成果进行汇总分析具有重要的意义。本文通过整理、分析国内外的研究文献和设计规范,对钢-混凝土组合梁的疲劳性能、疲劳设计方法等进行了探讨,相关内容可以为组合梁的疲劳设计提供参考。

关键词:钢-混凝土组合梁;疲劳性能;抗剪连接件;预应力

中图分类号: TU398.9

文献标识码: A

Advances in fatigue performance of steel-concrete composite beams

YANG Tao

(Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Steel-concrete composite beams are widely applied in bridge structures. The problem of fatigue damage caused by vehicle loads is becoming more and more serious. While research on fatigue performance of composite beams is insufficient in our country and the fatigue design guidelines in current codes are incomplete. At present, the fatigue performance of composite beams are mainly studied based on experimental programs. However, the characteristics of consuming time and high cost of fatigue tests make it difficult to conduct a lot of research. Therefore, it is greatly significant to summarize and analyze the existing research results. This paper investigated the fatigue performance, methods for fatigue design of composite beams on basis of the research literatures and design codes all over the world. The presented studies involved in this paper could provide some reference for the fatigue design.

Key words: steel-concrete composite beam; fatigue performance; shear connector; pre-stress

钢-混凝土组合梁最早出现于20世纪20年代,主要由钢梁、混凝土板和抗剪连接件组成。由于充分利用了钢材和混凝土的材料性能,组合梁具有承载力高、刚度大、施工方便等优点。1957年,我国在武汉长江大桥上首次采用了外包混凝土组合梁。随后,钢-混凝土组合梁在国内桥梁工程中得到了广泛的应用。由于车辆等动荷载的作用,钢-混凝土组合梁的疲劳问题日益突出。国外规范中, AISC LRFD^[1]、Eurocode 4^[2]和 BS5400^[3]等均对钢-混凝土组合梁的疲劳设计做了规定,我国部分规范如《钢结构设计规范》^[4]包

含了组合梁疲劳设计的条文,但并不完善。本文对国内外的相关文献进行了系统的整理分析,相关内容可以为组合梁的疲劳设计提供参考。

1 抗剪连接件的疲劳性能

抗剪连接件包括栓钉、开孔板和后安装抗剪连接件等多种类型,主要用于传递混凝土板和钢梁之间的剪力。由于连接件的重要作用,其疲劳性能得到了较多的关注。

收稿日期:2009-11-27

作者简介:杨涛(1979-),男,河南淅川人,博士研究生,从事混凝土结构的研究。

1.1 栓钉抗剪连接件

1) 影响疲劳性能的因素。栓钉是应用最广泛的抗剪连接件形式之一,而组合梁的疲劳破坏多始于栓钉连接件处^[5-6]。影响栓钉疲劳性能的因素主要有应力幅、混凝土性能、焊接质量、栓钉规格和受力形式等。1966-1967年,Slutter和Fisher通过研究认为栓钉连接件的疲劳寿命主要与所受的疲劳应力幅有关^[7],并提出了如下公式

$$\Delta_r = 1020N^{-0.186} \quad (1)$$

式中 N —疲劳循环次数; Δ_r —疲劳应力幅。

此后的大量试验也表明,疲劳应力幅是影响栓钉疲劳寿命的主要因素之一。Naithani 等人的研究表明:混凝土强度对栓钉疲劳寿命的影响不大^[5];混凝土浇筑方向的不同导致试验结果有一定的离散^[8]。目前,对直径 25mm 以上栓钉的疲劳性能研究较少。Lee 通过对直径分别为 25mm、28mm、30mm 栓钉的疲劳试验研究指出,大直径栓钉的疲劳强度与普通直径栓钉相比略微偏低,其设计的安全性应予以提高^[9];文献[10-11]的研究表明,AASHTO 和 ECCS 规范公式可用于大直径栓钉的疲劳设计。由于现有的栓钉疲劳寿命计算公式多基于对常规直径栓钉疲劳试验数据的拟合,其对大直径栓钉疲劳设计的适用性有待进一步的试验验证。焊接方式(手工电弧焊和焊枪熔焊)会对栓钉的疲劳破坏模式产生影响^[12];焊接质量对栓钉的疲劳寿命有较大的影响,应对其进行严格的质量检查^[13]。当所受的疲劳应力幅相同时,栓钉在双向荷载作用下的疲劳寿命高于单向荷载作用下的寿命^[14]。组合梁中采用预制混凝土板时,板上预留孔洞的大小和位置、钢梁和混凝土板之间砂浆垫层的厚度等均会对栓钉的性能产生影响。Shim 的研究表明^[15]:随着钢梁和预制混凝土板之间砂浆垫层厚度的增加,栓钉的静力抗剪承载力降低;砂浆垫层对栓钉疲劳性能的影响有待进一步的研究。

2) 栓钉疲劳寿命计算模型。较为常用的栓钉疲劳寿命计算模型有 3 种:(1)仅考虑疲劳应力幅对疲劳寿命的影响,如 Fisher 公式、EC4 规范公式等。(2)同时考虑栓钉静载能力和疲劳荷载幅的影响,如 BS5400 规范公式。(3)疲劳荷载作用下,栓钉的极限抗剪承载力随着疲劳循环次数的增加而降低^[16-18],因此,认为疲劳破坏前栓钉极限抗剪承载力为常量的观点并不合理^[19]。Oehlers 建议在

计算栓钉疲劳寿命时同时考虑最大疲劳荷载 P_f 和静力极限承载力 P_R 的影响,在此基础上形成了最大疲劳荷载模型(Peak load model)。3 种模型的计算公式见表 1,其中 Δ_r 为疲劳应力幅, Δ_p 为疲劳荷载幅, m 、 k 为特征参数, N 为疲劳荷载循环作用次数。文献[21]提出了一种基于断裂力学的栓钉疲劳寿命计算方法,该方法可用于有初始缺陷栓钉的疲劳寿命计算。

根据 Lee^[9]、Badie^[10]等学者的研究以及芜湖大桥、南浦大桥等工程建设中进行的栓钉连接件的疲劳试验,本文筛选出了 76 组数据,并将其与相关疲劳寿命计算公式进行了比较,如图 1 所示。由图比较可知,Fisher 公式的计算寿命偏于保守,EC4、BS5400 等规范公式的计算结果较为合理;修订后的 EC4 规范(EN1994-2,2005)对栓钉疲劳应力幅的要求较以前(ENV1994-2,1994)更为严格;由于 Naithani 采用了改进的栓钉试件^[5],其试验数据点明显偏下,可见试验方法对疲劳试验结果的影响较为明显。不同规范对栓钉疲劳应力幅的限制列于表 2。

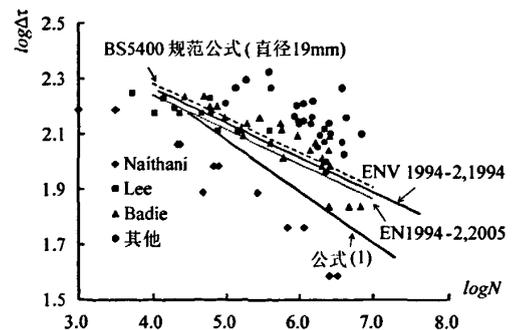


图1 栓钉应力幅与疲劳寿命关系曲线

Fig.1 Relation between stress range and fatigue life

1.2 其他抗剪连接件

近年来,开孔板和后安装抗剪连接件在工程中的应用逐渐增多,部分学者对其疲劳性能进行了研究。Ahn 等通过试验指出^[24]:承受循环荷载作用的开孔板连接件的孔洞中应配置横向钢筋以保证抗剪承载力。宗周红对开孔板连接件进行了疲劳试验,试验中开孔板试件的界面滑移小于栓钉试件,并且开孔板未发生疲劳破坏^[25]。目前,开孔板连接件疲劳性能的试验研究尚不充分,影响开孔板疲劳性能的因素有待进一步研究。后安装抗剪连接件可减少施焊量,但需要在钢梁翼缘上

表 1 栓钉疲劳寿命计算模型

Tab. 1 Calculating models of fatigue life of studs

计算模型	基本公式	建议公式
ECA	$N_e(\Delta\tau)^m = 10^4$	$\lg N + 8\lg\Delta\tau = 21.93$
BS5400	$N_e(\Delta p/p_R)^m = 10^4$	$\lg N + 8\lg(\Delta p/p_R) = 1.29$, 失效概率 $P = 2.3\%$
	$N_f(\Delta p/p_R)^m = 10^4$,	$\lg N + 5.1\lg(\Delta p/p_R) - \lg[1 - (p_p/p_R)] = 3.0^{[20]}$
Peak load model	其中 $N_e = N_f(1 - p_p/p_R)$	使用条件: $p_p/p_R \leq 0.6$

表 2 栓钉疲劳应力幅限值

Tab. 2 Limits of fatigue stress range of studs

疲劳循环次数 N		10^4	10^5	2×10^5	5×10^5	2×10^6	10^7	
疲劳应力幅	EC 4 ^[21]	174	131	120	107	90	73	
/MPa	BS 5400 ^[31]	d = 19mm	192	144	132	118	99	81
		d = 22mm	185	138	127	113	95	78
	AASHTO ^[22]	152	115	104	89	66	40	
	ECCS ^[23]	160	115	-	90	70	60	
	Fisher ^[7]	184	120	105	90	69	51	

注:表中 BS5400 规范对应栓钉静载强度按照栓钉高度 $h = 100\text{mm}$ 、混凝土强度 $f_{cu} = 50\text{MPa}$ 在 BS5400 Part5 中查得, d 为栓钉直径。

预留孔洞; Kayir^[26] 的研究表明, 非焊接后安装连接件的疲劳性能优于焊接抗剪连接件。

2 钢 - 混凝土组合梁的疲劳性能

2.1 普通钢 - 混凝土组合梁

钢 - 混凝土组合梁根据抗剪连接度可分为完全抗剪连接组合梁和部分抗剪连接组合梁。由于部分抗剪连接组合梁的整体性较完全抗剪连接组合梁差, 其疲劳性能得到了较多的研究。Yen 等人对 44 根组合梁进行了试验研究, 主要考察了连接度和混凝土板中配筋形式对组合梁疲劳性能的影响^[27]。研究表明: 较大的荷载、较少的栓钉抗剪连接件以及大间距的配筋是组合梁发生疲劳破坏的根源; 完全抗剪连接可以避免组合梁产生过大的变形; 板中配筋具有重要的作用, 板中配置金属网的试件性能较好。李建军通过对部分抗剪连接组合梁的疲劳试验得到以下结论^[28]: 在疲劳破坏发生前, 组合梁的刚度虽有下降, 但下降并不明显; 当疲劳破坏发生时, 组合梁的截面刚度迅速下降, 抗弯承载力也随之减小; 随着疲劳加载次数的增加, 梁的疲劳残余挠度逐渐增大。

最大疲劳荷载是影响组合梁疲劳性能的主要

因素之一。Krieger 等通过对 18 根压型钢板组合板试件的静力和疲劳试验指出^[29]: 对于任意的最小疲劳荷载, 当最大疲劳荷载大于 50% 的极限荷载时, 裂缝将不可避免的产生, 并导致刚度的损失、跨中挠度的增加以及板的最终破坏。

综上, 部分连接组合梁在疲劳破坏前承载力损失并不明显, 但可能产生较大的变形; 混凝土板中合理的配筋形式可以改善梁的疲劳性能; 疲劳荷载峰值过大是组合梁发生疲劳破坏的主要诱因之一。

2.2 预应力钢 - 混凝土组合梁

预应力的施加可以改善钢 - 混凝土组合梁的疲劳性能。Albrecht 等对 11 根预应力钢 - 混凝土组合梁进行了疲劳试验, 主要研究了预应力对钢梁及焊接于钢梁下翼缘的盖板细节疲劳强度的影响^[30]。试验表明: 预应力的施加使梁的平均疲劳强度提高了一个等级; 预应力对盖板细节疲劳强度的提高并不一致, 应力幅越小, 疲劳强度提高越多。

Kennedy 和宗周红对连续组合梁的研究也表明: 预应力可有效减小疲劳荷载引起的应力幅, 从而提高组合梁的疲劳寿命和极限承载力^[31]; 在连

续组合梁中,负弯矩区混凝土控制疲劳设计,采用预应力将消除横向裂缝,从而大大改善负弯矩区混凝土的受力性能^[25]。

2.3 加固后的钢-混凝土组合梁

在工程中常需对组合梁进行修复或加固,部分学者对修复或加固后组合梁的疲劳性能进行了研究。Dawood 对 3 根组合梁进行了疲劳试验研究,其中两根采用高弹性模量 CFRP 加固,一根为普通梁^[32]。试验表明:CFRP 有助于减小过载引起的残余变形;采用 CFRP 加固的试验梁经受了 300 万次疲劳循环加载,其疲劳性能与试验中承受较低荷载幅的普通组合梁相似。Albrecht^[33] 对 10 根预应力钢-混凝土组合梁进行了疲劳试验,在钢梁上出现疲劳裂缝后分别采用了 3 种加固方法,(1)在裂缝的端部打孔,并安装一个具有预压力的高强螺栓,如图 2(a)所示。(2)在腹板上开孔并设置连接板,如图 2(b)所示。(3)提高预应力筋的预应力。通过对加固后组合梁疲劳性能的研究可知,提高预应力筋的预应力是限制疲劳裂缝进一步发展的最有效方法。

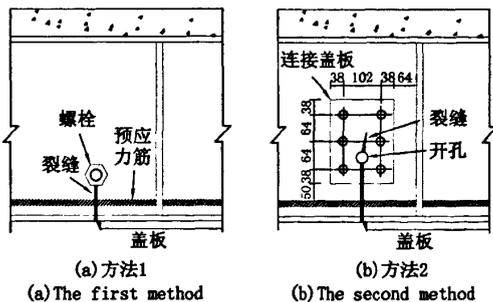


图2 加固方法示意图

Fig.2 Schematic view of strengthening methods

3 组合梁的疲劳寿命评估

结构的疲劳可分为高周疲劳和低周疲劳,其中高周疲劳的特点是应力水平低、经历的疲劳循环次数多,而低周疲劳的特点是应力水平高、经历的疲劳循环次数少。当组合梁用于公路桥梁结构中时,车辆等动荷载引起的结构疲劳一般属于高周疲劳,此时可按照以下程序对组合梁的疲劳寿命进行评估:(1)确定结构所承受的疲劳荷载。组合梁所承受的疲劳荷载可参照 BS5400、EC4 等国外规范采用车道荷载模型或标准疲劳荷载车模型进行计算,也可根据交通流量的观测统计资料或

对未来交通流量的预测得到相应的荷载谱^[34]。(2)计算疲劳应力谱。根据疲劳荷载谱,采用弹性方法计算出组合梁中相应连接和构造细节的疲劳应力谱。(3)疲劳寿命评估。在得到连接和构造细节的疲劳应力谱后,利用 Basquin 方程以及 Palmgren - Miner 线性累积损伤准则对其进行疲劳寿命评估。

4 结语

通过对国内外研究文献和规范的整理、分析和对比可知:在确保栓钉抗剪连接件焊接质量的前提下,应力幅是影响栓钉疲劳寿命的主要因素;开孔板、后安装抗剪连接件具有较好的抗疲劳性能,但应对影响其疲劳性能的因素做进一步的研究;在桥梁等承受动荷载的结构中,如果对结构变形有严格的控制,不宜采用部分连接组合梁;预应力的施加有利于改善组合梁的疲劳性能;疲劳损伤产生后,采用了合理加固措施的组合梁也可以具有较好的抗疲劳性能。

参考文献:

- [1] American Institute of Steel Construction. Load and resistance factor design specification for structural steel buildings[S].
- [2] European Committee for Standardization. Design of composite steel and concrete structures, Part2: bridges[S].
- [3] British Standards Institution. BS5400, Steel, concrete and composite bridges. Part 10: code of practice for fatigue[S].
- [4] (GB50017-2003), 钢结构设计规范[S].
- [5] NAITHANI K C, GUPTA V K, GADH A D. Behaviour of shear connectors under dynamic loads [J]. Materials and Structures Matériaux et Constructions, 1988, 21, 359-363.
- [6] AHN J H, KIM S H, JEONG Y J. Fatigue experiment of stud welded on steel plate for a new bridge deck system [J]. Steel and Composite Structures, 2007, 7(5): 391-404.
- [7] SLUTTER R G, FISHER J W. Fatigue strength of shear connectors[R]. Highway Research Record No. 147, 1966.
- [8] AKAO S, KURITA A. Concrete placing and fatigue of shear studs [C]. Fatigue of Steel and Concrete Structures. IABSE Colloquium Lausanne, 1982.
- [9] LEE P G, SHIM C S. Static and fatigue behavior of large stud shear connectors for steel concrete composite bridges [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005(61): 1270-1285
- [10] BADIE S S, TADROS M K, KAKISH H F, et al. Large shear studs for composite action in steel bridge girders [J]. Journal of Bridge Engineering, 2002, 7(3): 195-203.

- [11] 芜湖桥组合结构专题研究组. 芜湖桥组合结构试验研究报告总报告 [R]. 1997.
- [12] CIVJAN S A, SINGH P. Behavior of shear studs subjected to fully reversed cyclic loading [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(11): 1466 - 1474.
- [13] 郑州工学院. 钢 - 混凝土栓钉连接件压型钢板组合梁动载疲劳性能试验研究 [R]. 郑州工学院土建系, 1990.
- [14] SERACINO R, OEHLERS D J, YEO M F. Behaviour of stud shear connectors subjected to bi - directional cyclic loading [J]. *Advances in Structural Engineering*. 2003, 6 (1): 65 - 75.
- [15] SHIM C S, LEE P G, CHANG S P. Design of shear connection in composite steel and concrete bridges with precast decks [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2001, 5: 203 - 219.
- [16] MARIE WESTBERG M B. Influence of fatigue on headed stud connectors in composite bridges [D]. Lule: University of Technology, 2004.
- [17] HANSWILLE G, PORSCH M, USTUNDAG C. Resistance of headed studs subjected to fatigue loading, Part I: Experimental study [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2007, 63: 475 - 484.
- [18] HANSWILLE G, PORSCH M, USTUNDAG C. Resistance of headed studs subjected to fatigue loading, Part II: Analytical study [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2007, 63: 485 - 493.
- [19] OEHLERS D J. Deterioration in strength of stud connectors in composite bridge beams [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1990, 116(12): 3417 - 3431.
- [20] JOHNSON R P. Resistance of stud shear connectors to fatigue [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2000, 56: 101 - 116.
- [21] 王宇航, 聂建国. 基于断裂力学的组合梁栓钉疲劳性能 [J]. *清华大学学报*, 2009, 49(9): 35 - 38.
- [22] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [S].
- [23] European Convention for Constructional Steelwork, Composite Structures [S].
- [24] AHN J H, KIM S H, JEONG Y J. Shear behavior of pro-found rib shears connector under static and cyclic loadings [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2008, 60(5): 347 - 357
- [25] 宗周红. 预应力钢 - 混凝土组合梁静动载行为研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 1998.
- [26] KAYIR H. Methods to develop composite action in non - composite bridge floor systems: Fatigue behavior of post - installed shear connectors [D]. The University of Texas, 2006.
- [27] YEN Y J R, LIN Y, LAI M T. Composite beams subjected to static and fatigue loads [J]. *The Journal Structural Engineering*, 1997, (7): 765 - 771.
- [28] 李建军. 钢 - 混凝土组合梁疲劳性能的试验研究 [D]. 北京: 清华大学, 2002.
- [29] KRIGE G J, MAHACHI J. Dynamic behavior of composite floors [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 1995 (34): 249 - 269.
- [30] ALBRECHT P, LI W, SAADATMANESH H. Fatigue strength of pre - stressed composite steel - concrete beams [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1995(121): 1850 - 1856.
- [31] KENNEDY J B, GRACE N F. Pre - stressed continuous composite bridges under dynamic load [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1990, 116(6): 1660 - 1678
- [32] DAWOOD M, RIZKALLA S, SUMNER E. Fatigue and overloading behavior of steel - concrete composite flexural members strengthened with high modulus CFRP materials [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2007, 11 (6): 659 - 669.
- [33] ALBRECHT P, LENWARI A. Fatigue strength of repaired pre - stressed composite beams [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2008, 13(4): 409 - 417.
- [34] 童乐为, 沈祖炎. 城市道路桥梁的疲劳荷载谱 [J]. *土木工程学报*, 1997, 30(5): 20 - 27.

(责任编辑 刘存英)