

桥上纵连板式无砟轨道 HRB500 钢筋疲劳寿命 预测模型试验研究*

徐庆元[†], 张泽, 肖祖材, 段俊, 欧熙, 魏琪, 娄平
(中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要:进行了服役期间组合荷载下桥上纵连板式无砟轨道 HRB500 钢筋随机变幅疲劳应力谱平均应力修正模型和累积损伤模型研究,以便为组合荷载下桥上纵连板式无砟轨道 HRB500 钢筋疲劳寿命预测模型的建立提供支撑.通过对 HRB500 钢筋标准试件进行等幅疲劳试验,研究平均应力对 HRB500 钢筋疲劳寿命的影响规律,并在此基础上,研究工程上常用的疲劳应力谱平均应力修正模型对服役期间组合荷载下桥上纵连板式无砟轨道 HRB500 钢筋的适用性;通过对 HRB500 钢筋标准试件进行三级变幅疲劳试验,分析 Miner 准则计算服役期间组合荷载下桥上纵连板式无砟轨道 HRB500 钢筋累积损伤的适用性.研究表明,HRB500 钢筋标准试件疲劳寿命随平均应力的增大而减小,工程上广泛采用的 Goodman 模型适用于随机变幅荷载下 HRB500 钢筋平均应力修正;Miner 准则能较好地适用于服役期间组合荷载下桥上纵连板式无砟轨道 HRB500 钢筋累积损伤计算.

关键词:桥上纵连板式无砟轨道;HRB500 钢筋;平均应力;累积损伤;疲劳试验;Miner 准则

中图分类号:U213

文献标志码:A

Experimental Study on Fatigue Life Prediction Model of HRB500 Reinforcing Bar Used in Longitudinally Connected Ballastless Track on Bridge

XU Qingyuan[†], ZHANG Ze, XIAO Zucui, DUAN Jun, OU Xi, WEI Qi, LOU Ping
(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The mean stress correction model of random-amplitude fatigue stress spectrum and cumulative damage model for HRB500 reinforcing bar used in longitudinally connected ballastless track on bridge in service life under combined loads were studied to provide the support for the establishment of fatigue life prediction model for above mentioned HRB500 reinforcing bar. Through the constant-amplitude fatigue tests on standard specimens of HRB500 reinforcing bar, the influence law of mean stress on fatigue life of HRB500 reinforcing bar was studied, and the applicability of mean stress correction models of random-amplitude fatigue stress spectrum commonly used in practical engineering to HRB500 reinforcing bar was studied. Through the three-level variable-amplitude fatigue tests on standard specimens of HRB500 reinfor-

* 收稿日期:2016-05-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51178469), National Natural Science Foundation of China(51178469); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2015ZZTS239), Fundamental Research Funds for the Central Universities(2015ZZTS239); 国家自然科学基金-高速铁路基础研究联合基金资助项目(U1334203, U1134209), National Natural Science Joint High Speed Railway Foundation of China(U1334203, U1134209)

作者简介:徐庆元(1972-),男,湖北武汉人,中南大学教授,博士

[†] 通讯联系人, E-mail: xuqingyuan1972@163.com

cing bar, the applicability of Miner's rule to the calculation of cumulative damage of the HRB500 reinforcing bar was analyzed. The research results show that the fatigue life of standard specimens of HRB500 reinforcing bar decreases with the increase of mean stress. Goodman model widely used in practical engineering is applicable to the mean stress correction of HRB500 reinforcing bar under random-amplitude loading, and Miner's rule is suitable to calculate the cumulative damage of HRB500 reinforcing bar used in longitudinally connected ballastless track on bridge in service life under combined loads.

Key words: longitudinally connected ballastless track on bridge; HRB500 reinforcing bar; mean stress; cumulative damage; fatigue test; Miner's rule

桥上纵连板式无砟轨道(又称桥上 CRTS II 型板式无砟轨道)是我国高速铁路一种主要的桥上无砟轨道结构型式,在京沪、京津城际等多条高速铁路上得到了广泛应用。桥上纵连板式无砟轨道具有很多优点,如良好的线路平顺性、可以大大降低作用在桥梁和钢轨上的纵向力、有效缓解梁端转角对梁端扣件系统受力的不利影响等^[1-4]。但桥上纵连板式无砟轨道结构自身受力比较复杂,在列车垂向荷载、列车纵向荷载、无砟轨道混凝土徐变收缩、无砟轨道温度荷载^[5]等荷载的循环作用下,桥上纵连板式无砟轨道结构有可能发生疲劳破坏。这不但会恶化桥上纵连板式无砟轨道与桥梁之间的相互作用,影响无砟轨道系统的耐久性和稳定性,甚至会影响到高速列车的正常运行,且其修复比较困难,修复对行车干扰大。因此,迫切需要对桥上纵连板式无砟轨道,特别是对其主要受力部件 HRB500 钢筋的疲劳特性进行深入研究。

随着 HRB500 钢筋在我国工程结构物中的广泛应用,国内一些学者和工程技术人员对 HRB500 钢筋的疲劳特性进行了一些相关研究。吕王彪^[6]结合英国标准 BS4449^[7]对 3 种规格的 HRB500 钢筋进行了高周轴向拉伸疲劳试验,验证了 HRB500 钢筋在相应的加载条件下疲劳寿命符合要求。吕品^[8]对 HRB500 钢筋进行了常位移幅值拉压循环正弦加载方式控制的低周疲劳试验,得到了总应变幅表述的钢筋疲劳寿命方程。陆鹏雁等^[9-10]对 HRB500 钢筋进行了应力比为 0.1 的高周轴向拉伸疲劳试验,得到了 HRB500 钢筋的条件疲劳强度及相应的 S-N 曲线。目前,HRB500 钢筋的疲劳特性研究虽取得了一定的成果,但研究仅针对 HRB500 钢筋疲劳性能的特定方面,还存在很多不足,文献^[6]仅验证 HRB500 钢筋疲劳性能满足要求;文献^[8]研究的是 HRB500 钢筋低周疲劳性能,并不完全适用于桥上纵连板式无砟轨道在服役期间承受的低应力幅、高

循环次数的高周疲劳;文献^[9-10]中仅做了应力比为 0.1 及 -1 的 9 根试件拉伸疲劳试验,并不适用于在服役期间可能承受各种应力比的桥上纵连板式无砟轨道。此外,上述 HRB500 钢筋疲劳特性研究都没有研究平均应力影响,也没有对变幅疲劳下 HRB500 钢筋的累积损伤规律进行研究。另外,HRB500 钢筋仅为我国相关技术标准所收录的产品,国外与其性能相近的为英国标准 BS4449^[7]收录的 B500 系列钢筋^[11],但针对 B500 系列钢筋的疲劳性能研究有限:Abdalla 等^[12]通过 B500B 钢筋的低周疲劳试验,建立了预测 B500B 钢筋低周疲劳寿命的能量模型;Apostolopoulos 等^[13]利用基于名义横截面面积的质量指数对 B500C 等钢筋的低周疲劳响应进行了对比。因此,目前国内 HRB500 钢筋及国外相近种类钢筋疲劳特性研究成果还无法满足服役期间复杂荷载组合作用下桥上纵连板式无砟轨道 HRB500 钢筋疲劳寿命预测模型建立的需要。

服役期间复杂荷载组合作用下桥上纵连板式无砟轨道 HRB500 钢筋疲劳寿命预测模型包括 HRB500 钢筋的概率 S-N 曲线、随机变幅疲劳应力谱平均应力修正及累积损伤模型 3 个方面。限于篇幅,本文仅对桥上纵连板式无砟轨道 HRB500 钢筋疲劳寿命预测模型中平均应力修正及累积损伤模型两个方面进行研究,适用于桥上纵连板式无砟轨道 HRB500 钢筋的概率 S-N 曲线研究将另行撰文。

鉴于 HRB500 钢筋平均应力修正模型研究中需要钢筋抗拉强度等常规力学性能参数及对称循环荷载下钢筋的中值 S-N 曲线以计算等效疲劳寿命,累积损伤模型研究中需要对称循环荷载下钢筋的中值 S-N 曲线以计算不同应力水平下的疲劳寿命,本文首先对 HRB500 钢筋标准试件进行静力拉伸试验及对称循环荷载下的等幅疲劳试验以得到 HRB500 钢筋屈服及抗拉强度和中值 S-N 曲线。在

此基础上,进行不同平均应力下 HRB500 钢筋标准试件等幅疲劳试验,以研究工程上常用的疲劳应力谱平均应力修正模型对服役期间组合荷载下桥上纵连板式无砟轨道 HRB500 钢筋的适用性.最后,进行两种加载顺序下 HRB500 钢筋标准试件三级变幅疲劳试验,以研究荷载施加顺序对 HRB500 钢筋疲劳寿命的影响,分析 Miner 准则计算服役期间组合荷载下桥上纵连板式无砟轨道 HRB500 钢筋累积损伤的适用性.本文研究成果可为服役期间组合荷载下桥上纵连板式无砟轨道 HRB500 钢筋疲劳寿命预测模型的建立提供试验支撑.

1 HRB500 钢筋标准试件静力拉伸和中值 S-N 曲线试验

先进行 HRB500 钢筋标准试件静力拉伸和中值 S-N 曲线试验研究,为桥上纵连板式无砟轨道 HRB500 钢筋平均应力修正及累积损伤模型研究提供研究基础.试验原材料为某钢铁集团生产的直径 16 mm 的 HRB500 钢筋.

1.1 试验方案

参照国家标准《金属材料拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》^[14]加工 HRB500 钢筋标准试件以进行静力拉伸试验,加工后的 HRB500 钢筋标准试件如图 1(a)所示.静力拉伸试验一共进行 10 组.

参照规范《金属材料疲劳试验轴向力控制方法》^[15]加工 HRB500 钢筋标准试件以进行对称循环荷载下的等幅疲劳试验,加工后的 HRB500 钢筋标准试件如图 1(b)所示.试验中 HRB500 钢筋标准试件最大应力分别取 350,400,425,450 MPa,试验频率皆为 20 Hz,应力比都为 -1,每种应力水平下进行 6 组平行试验.静力和疲劳试验都在室温环境下的 MTS 810 电液伺服材料试验机上进行.

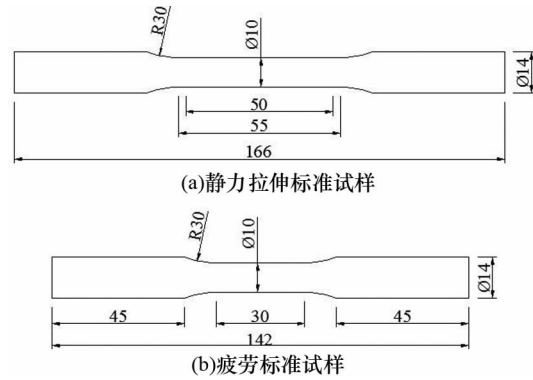


图 1 HRB500 钢筋静力拉伸标准试样及疲劳标准试样(单位:mm)

Fig.1 Standard specimens of HRB500 reinforcing bar for static tensile and fatigue test(Unit:mm)

1.2 试验结果

1.2.1 HRB500 钢筋标准试件静力拉伸试验

HRB500 钢筋标准试件静力拉伸性能如表 1 所示,屈服强度均值为 600.96 MPa,抗拉强度均值为 780.48 MPa.

1.2.2 HRB500 钢筋标准试件等幅疲劳试验结果

不同应力对称循环荷载下 HRB500 钢筋标准试件等幅疲劳试验结果如表 2 所示.表 2 中平均疲劳寿命为每组应力水平下试验所得疲劳寿命对数均值的反对数值.

表 1 HRB500 钢筋标准试件静力拉伸性能

Tab.1 Static tensile properties of standard specimens of HRB500 reinforcing bar

试样编号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
1	600.15	785.38
2	600.53	780.21
3	591.90	777.43
4	595.11	769.64
5	589.46	770.38
6	611.18	789.79
7	600.59	787.98
8	605.17	776.79
9	600.40	780.08
10	615.07	787.15
均值	600.96	780.48

表 2 对称循环荷载下 HRB500 钢筋标准试件等幅疲劳试验结果

Tab.2 Constant-amplitude fatigue test results of standard specimens of HRB500 reinforcing bar under symmetric cyclic loading

试验编号	最大应力/MPa	最小应力/MPa	疲劳寿命/次				平均疲劳寿命/次		
1	350	-350	119 452	146 059	189 554	211 349	325 807	584 604	225 968
2	400	-400	60 791	66 779	90 734	95 788	113 723	157 115	92 599
3	425	-425	24 287	34 651	39 780	50 550	56 824	91 527	45 439
4	450	-450	21 238	23 949	28 727	30 440	32 485	46 518	29 596

1.3 HRB500 钢筋标准试件中值 S-N 曲线拟合

本文选用 Basquin 方程^[16]进行 HRB500 钢筋标准试件中值 S-N 曲线拟合,其表达式为:

$$\lg N = \lg K - m \lg S \quad (1)$$

式中: K, m 为材料常数; S 为应力水平,本文取为应力幅值即 $(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$; N 为疲劳寿命。

将表 2 所示试验数据进行处理,得到对数应力幅值及对数平均疲劳寿命,再根据式(1)进行数据拟合,得到 HRB500 钢筋标准试件中值 S-N 曲线方程如式(2)所示,拟合相关系数为 0.993 6。

$$\lg N = 26.23 - 8.1965 \lg S \quad (2)$$

鉴于桥上纵连板式无砟轨道 HRB500 钢筋在服役期间承受的循环荷载次数可达上亿次^[17],而试验所得 HRB500 钢筋标准试件中值 S-N 曲线为中短寿命曲线,因此,需要对中短寿命中值 S-N 曲线进行外推。本文选用欧洲 ECCS 规范^[18]中的规定对 HRB500 钢筋标准试件中短寿命中值 S-N 曲线进行外推,即以 500 万次的疲劳寿命为界,将 S-N 曲线的指数从 m 变为 $2m-1$ 。外推所得 HRB500 钢筋标准试件中值 S-N 曲线方程如式(3)所示。

$$\lg N = 43.3782 - 15.393 \lg S \quad (3)$$

根据式(2),式(3)及表 2 数据可绘制 HRB500 钢筋标准试件中值 S-N 曲线及疲劳试验数据点如

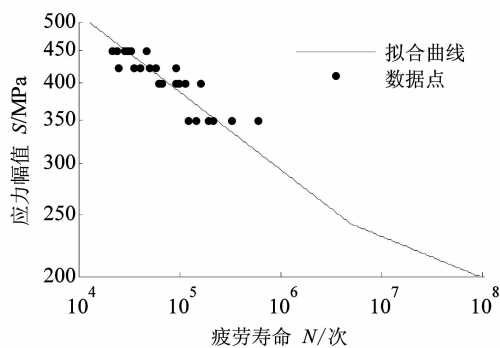


图 2 HRB500 钢筋标准试件中值 S-N 曲线
Fig.2 The median S-N curve of standard specimens of HRB500 reinforcing bar

图 2 所示,由图 2 可知,拟合曲线与试验数据点拟合良好。

2 HRB500 钢筋平均应力修正模型试验研究

2.1 试验方案

为研究 HRB500 钢筋平均应力修正模型,在 MTS 810 电液伺服材料试验机上进行不同平均应力下的 HRB500 钢筋标准试件等幅疲劳试验,图 1 (b)为疲劳试验用试样,试验温度为室温,应力幅值均为 400 MPa,平均应力分别取 -100, -50, 0, 50 和 100 MPa,试验频率皆为 20 Hz,每种应力水平下进行 6 组平行试验。具体步骤参照规范《金属材料疲劳试验轴向力控制方法》^[15]。

2.2 试验结果及分析

不同平均应力下 HRB500 钢筋标准试件等幅疲劳试验结果如表 3 所示。表 3 中平均疲劳寿命为每组应力水平下试验所得疲劳寿命对数均值的反对数值。

国内外研究者为了研究平均应力对金属疲劳寿命的影响建立了诸多模型, Gerber 模型、Goodman 模型和 Soderberg 模型^[19]是其中重要的代表,3 种模型表达式分述如下:

$$\text{Gerber 模型: } \sigma_a = \sigma_{-1} \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_b} \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$\text{Goodman 模型: } \sigma_a = \sigma_{-1} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_b} \right) \quad (5)$$

$$\text{Soderberg 模型: } \sigma_a = \sigma_{-1} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_s} \right) \quad (6)$$

式中: σ_a 为应力幅值,其值为 $(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$,本文取值为 400 MPa; σ_{-1} 为等效对称循环下的应力幅值; σ_m 为平均应力,其值为 $(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$; σ_b 为材料的极限强度,由表 1 本文取值为 780.48 MPa; σ_s 为材料的屈服强度,由表 1 本文取值为 600.96 MPa。

表 3 不同平均应力下的 HRB500 钢筋标准试件等幅疲劳试验结果

Tab.3 Constant-amplitude fatigue test results of standard specimens of HRB500 reinforcing bar under different mean stresses

试验编号	最大应力/MPa	最小应力/MPa	疲劳寿命/次			平均疲劳寿命/次			
1	300	-500	81 495	102 898	167 439	203 824	231 263	303 279	164 854
2	350	-450	63 576	76 206	96 184	131 178	136 064	194 891	108 384
3	400	-400	60 791	66 779	90 734	95 788	113 723	157 115	92 599
4	450	-350	42 850	51 241	52 148	69 532	76 898	88 856	61 555
5	500	-300	12 972	14 250	19 056	27 043	43 040	44 374	23 804

由式(4),(5)及(6)可计算不同平均应力对应的等效对称循环下的应力幅值 σ_{-1} ,再由式(2)和(3)计算相应的疲劳寿命,结合表 3 中 HRB500 钢筋标准试件平均疲劳寿命,可得 Gerber 模型、Goodman 模型、Soderberg 模型及试验数据平均应力对疲劳寿命的影响,如图 3 所示.对各修正模型的残差平方和进行计算,如表 4 所示.

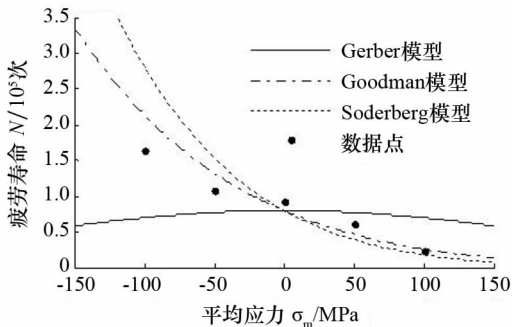


图 3 平均应力对 HRB500 钢筋标准试件疲劳寿命的影响

Fig.3 The effect of mean stress on fatigue life of standard specimens of HRB500 reinforcing bar

表 4 不同平均应力修正模型的残差平方和

Tab.4 Residual sum of squares of different mean stress correction models

平均应力/MPa	疲劳寿命/次			
	试验	Gerber	Goodman	Soderberg
-100	164 854	69 710	211 470	281 920
-50	108 384	77 193	132 820	153 710
0	92 599	79 839	79 840	79 840
50	61 555	77 193	46 400	39 170
100	23 804	69 710	25 950	17 960
残差平方和/ 10 ¹⁰	—	1.25	0.32	1.65

由图 3 和表 4 可知,HRB500 钢筋标准试件疲劳寿命随平均应力的增加而降低,拉伸平均应力降低了疲劳寿命,而压缩平均应力增加了疲劳寿命.平均应力对 HRB500 钢筋标准试件疲劳寿命的影响较大,在研究 HRB500 钢筋疲劳寿命时应考虑平均应力的影响.对比 3 种重要的平均应力修正模型的残差平方和,工程中广泛使用的 Goodman 模型的残差平方和最小,与试验数据匹配良好,将其作为桥上纵连板式无砟轨道 HRB500 钢筋随机变幅疲劳应力谱平均应力修正模型更为合适.

3 Miner 线性累积损伤准则对于 HRB500 钢筋适用性试验研究

Miner 准则^[20]具有形式简单、概念明确、计算

方便等优点,因而在实际工程中得到了较为广泛的应用,其表达如下:

$$D = \sum_{i=1}^k D_i = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (7)$$

式中: D 为累积损伤变量,达到 1.0 时即认为构件达到疲劳破坏; n_i 为第 i 级应力水平下的循环次数; N_i 为第 i 级应力水平下的疲劳寿命.

本节基于 HRB500 钢筋标准试件三级变幅疲劳试验结果,分析使用 Miner 准则计算桥上纵连板式无砟轨道 HRB500 钢筋累积损伤的适用性.

3.1 试验方案

在 MTS 810 电液伺服材料试验机上进行 HRB500 钢筋标准试件三级变幅疲劳试验,疲劳试验用试样如图 1(b)所示,采用低一中一高三级变幅和高一中一低三级变幅两种疲劳加载模式,各级试验频率皆为 10 Hz,试验温度为室温.

三级应力水平分别取 400,425 和 450 MPa,理论计算的各级应力水平下循环次数比依次为 0.4, 0.3 和 0.3.将理论计算的前两级应力水平下循环次数在计算机程序中设置好,达到相应加载次数后自动进行下一级加载,最后一级不设定次数,加载直至试件疲劳破坏.每种加载模式均进行 6 组平行试验,具体步骤参照规范《金属材料疲劳试验轴向力控制方法》^[15].

3.2 试验结果及分析

两种加载模式下 HRB500 钢筋标准试件变幅疲劳试验结果如表 5 所示.

根据表 5 试验结果及式(7)可计算每组变幅试验的累积损伤,各种加载模式的平均累积损伤以及变幅试验的总平均累积损伤.参照文献^[21-22],平均累积损伤取累积损伤对数均值的反对数值,计算结果如表 6 所示.

分析表 5 及表 6 可得出以下结论:

1)变幅疲劳试验中荷载的施加顺序对疲劳寿命有一定的影响,低一中一高顺序加载下 HRB500 钢筋疲劳寿命高于高一中一低顺序加载;

2)低一中一高顺序加载时 $\bar{D} > 1$,而高一中一低顺序加载时 $\bar{D} < 1$,说明 Miner 准则在预测加载顺序为低到高时的疲劳寿命偏保守,反之则偏危险;

3)虽然两种加载模式下试验所得平均累积损伤都与损伤原则“ $D = 1$ ”存在一定的误差,且低一中一高顺序加载时平均累积损伤误差达 21.8%,但总平均累积损伤与损伤原则“ $D = 1$ ”误差仅为 7.6%,在工程中处于可接受范围内,也偏保守.考虑

表5 HRB500 钢筋标准试件变幅疲劳试验结果

Tab.5 Variable-amplitude fatigue test results of standard specimens of HRB500 reinforcing bar

加载模式	试验编号	疲劳寿命/次	第3级加载次数/次	加载模式	试验编号	疲劳寿命/次	第3级加载次数/次
低—中—高	1	57 148	4 148	高—中—低	1	33 101	8 101
	2	63 161	10 161		2	35 087	10 087
	3	66 291	13 291		3	42 631	17 631
	4	66 848	13 848		4	64 625	39 625
	5	67 944	14 944		5	67 903	42 903
	6	87 756	34 756		6	72 618	47 618

表6 HRB500 钢筋标准试件变幅疲劳试验累积损伤

Tab.6 Cumulative damage of variable-amplitude fatigue tests of HRB500 reinforcing bar

加载模式	第1级应力水平		第2级应力水平		第3级应力水平		累积损伤 D	平均累积损伤 \bar{D}	总平均累积损伤 $\bar{D}_{总}$
	n_1	N_1	n_2	N_2	n_3	N_3			
低—中—高					4 148		0.880 6		
					10 161		1.083 8		
	38 000	92 599	15 000	45 439	13 291	29 596	1.189 6	1.218	
					13 848		1.208 4		
					14 944		1.245 4		
					34 756		1.914 8		
				8 101		0.755 5			1.076
				10 087		0.776 9			
高—中—低	10 000	29 596	15 000	45 439	17 631	92 599	0.858 4	0.951	
					39 625		1.095 9		
					42 903		1.131 3		
					47 618		1.182 2		

到疲劳试验存在较大的离散性及实际工程中两种加载顺序交替出现,根据 Miner 准则计算的累积损伤的误差在工程应用中处于可接受范围内,故 Miner 准则适用于计算桥上纵连板式无砟轨道 HRB500 钢筋疲劳累积损伤。

4 结论

1) HRB500 钢筋的疲劳寿命受平均应力影响明显,随着平均应力增加而降低;平均应力的 Goodman 模型修正结果与试验数据匹配良好,适用于桥上纵连板式无砟轨道 HRB500 钢筋随机变幅疲劳应力谱平均应力修正。

2) HRB500 钢筋变幅疲劳试验中各级应力的加载顺序对钢筋疲劳寿命具有一定的影响,应力水平由低到高条件下疲劳寿命要高于由高到低条件下;Miner 准则预测加载顺序为低到高时的疲劳寿命偏保守,反之则偏危险;考虑疲劳试验较大的离散性以及实际工程中两种加载顺序的交替出现,根据 Miner 准则计算的累积损伤的误差在工程应用中处于可接受范围内,故 Miner 准则适用于作为桥上纵连板式无砟轨道 HRB500 钢筋疲劳累积损伤模型。

3) 桥上纵连板式无砟轨道 HRB500 钢筋平均应力修正和累积损伤模型试验研究成果可为服役期间组合荷载下桥上纵连板式无砟轨道 HRB500 钢筋疲劳寿命预测模型的建立提供试验支撑。

参考文献

- [1] 徐庆元,张旭久.高速铁路博格纵连板桥上无砟轨道纵向力学特性[J].中南大学学报:自然科学版,2009,40(2):526-532. XU Qingyuan, ZHANG Xujiu. Longitudinal forces characteristic of Bogl longitudinal connected ballastless track on high-speed railway bridge[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2009, 40(2): 526-532. (In Chinese)
- [2] 戴公连,苏海霆,闫斌.秋季桥上纵连板式无砟轨道竖向温差试验研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2015,42(3):94-99. DAI Gonglian, SU Haiting, YAN Bin. Experimental study on the vertical temperature gradient of longitudinally connected slab ballastless track on bridge in autumn[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42(3): 94-99. (In Chinese)
- [3] 王庆波,姜子清,司道林.桥上纵连板式无砟轨道相关技术问题[J].铁道工程学报,2010(5):9-13. WANG Qingbo, JIANG Ziqing, SI Daolin. Analysis of technical problems related to longitudinal slab ballastless track on bridge[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010(5): 9-13. (In Chinese)
- [4] 陈小平,王平.客运专线桥上纵连板式无砟轨道制动附加力影响因素分析[J].铁道建筑,2008(9):87-90.

- CHEN Xiaoping, WANG Ping. Analysis of factors to the additional braking force to longitudinal slab ballastless track on bridge of passenger dedicated line [J]. *Railway Engineering*, 2008(9): 87—90. (In Chinese)
- [5] 赵磊, 孙璐, 孙伟, 等. 无黏结支撑的轨道板角离缝研究[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2016, 43(7): 75—81.
ZHAO Lei, SUN Lu, SUN Wei, *et al.* Research on the wrap of CRTS II slab track on the support layer without bonding[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2016, 43(7): 75—81. (In Chinese)
- [6] 吕王彪. 细晶高强钢筋的组织及性能研究[D]. 沈阳: 东北大学材料与冶金学院, 2010: 58—60.
LV Wangbiao. Microstructure and properties of fine grains for high strength hot rolled bars [D]. Shenyang: Northeastern University, School of Materials and Metallurgy, 2010: 58—60. (In Chinese)
- [7] BS4449:2005. Steel for the reinforcement of concrete—Weldable reinforcing steel Bar, coil and decoiled product specification [S]. London: British Standards Institution, 2005: 6—7.
- [8] 吕品. HRB500 高强钢筋低周疲劳性能研究[D]. 大连: 大连理工大学建设工程学部, 2011: 22—52.
LV Pin. Research on low cycle fatigue behavior of high strength steel HRB500 [D]. Dalian: Dalian University of Technology, Faculty of Infrastructure Engineering, 2011: 22—52. (In Chinese)
- [9] 陆鹏雁, 刘煜, 吴华杰, 等. HRB500 高强钢筋拉压疲劳性能研究及断口分析[J]. *机械强度*, 2015, 37(2): 248—253.
LU Pengyan, LIU Yu, WU Huajie, *et al.* Research on tension fatigue performance of HRB500 high-strength rebar and fractography analysis [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2015, 37(2): 248—253. (In Chinese)
- [10] LU Pengyan, LIU Yu, Wu Huajie, *et al.* Fatigue performance of microalloyed high-strength rebar and analysis of fracture mechanism [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2015, 22(12): 1149—1155.
- [11] WANG Limin. Interpretation and characterization of seismic performance of rebars in domestic and international standards [C]// *Proceedings of International Seminar on Production and Application of High Strength Seismic Grade Rebar Containing Vanadium*. Beijing: *Proceedings of International Seminar on Production and Application of High Strength Seismic Grade Rebar Containing Vanadium*, 2010: 77—88.
- [12] ABDALLA J A, HAWILEH R A, OUDAH F, *et al.* Energy-based prediction of low-cycle fatigue life of BS 460B and BS B500B steel bars [J]. *Materials & Design*, 2009, 30(10): 4405—4413.
- [13] APOSTOLOPOULOS C A, PASIALIS V P. Use of quality indices in comparison of corroded technical steel bars B500c and S500s on their mechanical performance basis [J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(12): 2325—2334.
- [14] GB/T 228.1—2010 金属材料拉伸试验 第1部分: 室温试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 9—32.
GB/T 228.1—2010 Metallic materials—tensile testing—part 1: method of test at room temperature [S]. Beijing: Standards Press in China, 2010: 9—32. (In Chinese)
- [15] GB/T 3075—2008 金属材料疲劳试验轴向力控制方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 2—12.
GB/T 3075—2008 Metallic materials—fatigue testing—axial-force-controlled method [S]. Beijing: Standards Press in China, 2008: 2—12. (In Chinese)
- [16] THEIL N. Fatigue life prediction method for the practical engineering use taking in account the effect of the overload blocks [J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 90: 23—35.
- [17] 滕东宇. 桥上纵连板式无砟轨道底座板耐久性研究[D]. 北京: 北京交通大学土木建筑工程学院, 2009: 34—53.
TENG Dongyu. Research on the durability of foundation plate in continuous-slab-track on bridge [D]. Beijing: School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 2009: 34—53. (In Chinese)
- [18] ECCS Technical Committee 6—Fatigue. Recommendations for the fatigue design of steel structures (1st edition) [R]. Brussels: European Convention for Constructional Steelwork, 1985.
- [19] KUJAWSKI D. A deviatoric version of the SWT parameter [J]. *International Journal of Fatigue*, 2014, 67: 95—102.
- [20] PAOLINO D S, CAVATORTA M P. On the application of the stochastic approach in predicting fatigue reliability using Miner's damage rule [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2014, 37(1): 107—117.
- [21] 宋玉普. 混凝土结构的疲劳性能及设计原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 243—245.
SONG Yupu. Fatigue behavior and design principle of concrete structures [M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 243—245. (In Chinese)
- [22] 姚卫星. Miner 理论的统计特性分析 [J]. *航空学报*, 1995, 16(5): 601—604.
YAO Weixing. Analysis of statistical characteristics of Miner theory [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1995, 16(5): 601—604. (In Chinese)