

文章编号:1671-6833(2012)01-0001-05

高铁用 HRBF500 钢筋混凝土梁疲劳寿命预测分析

王新玲¹, 高会宗², 李 可³

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 中广国际建筑设计研究院, 北京 100045;
3. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘 要: HRBF500 钢筋是我国冶金行业新研发的超细晶粒高强钢筋, 若用于高铁中的钢筋混凝土构件需承受反复荷载, HRBF500 钢筋混凝土梁的疲劳寿命预测成为必须解决的问题。基于 ANSYS 软件, 对配有 HRBF500 钢筋的矩形和 T 形混凝土梁的疲劳寿命进行分析, 得出影响疲劳寿命的主要因素为配筋率, 最小疲劳荷载及荷载幅, 寿命预测和试验结果吻合较好。为了使预测方法用于实际工程设计, 在有限元计算的基础上进行系统的分析、拟合, 提出了 HRBF500 钢筋混凝土梁疲劳寿命预测的简化计算公式, 可为实际高铁工程设计提供参考。

关键词: 钢筋混凝土梁; HRBF500 钢筋; 疲劳寿命; 有限元分析

中图分类号: U467.4⁺97

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2012.01.001

0 引言

500 MPa 细晶粒 (HRBF500) 钢筋作为我国目前最高强度的热轧钢筋, 具有优良的力学性能^[1]。如用于高速铁路上的钢筋混凝土构件需承受反复荷载, 所以迫切需要了解其疲劳性能。文献 [2-4] 已对配有 HRBF500 钢筋的混凝土受弯构件进行了疲劳荷载作用下的试验研究和有限元模拟分析, 但文献中的试验未做到疲劳破坏, 因此, 无法了解其疲劳寿命。根据文献 [5-7], 可以利用 ANSYS 软件对钢筋混凝土构件的疲劳性能进行数值分析和疲劳寿命预测。针对 HRBF500 钢筋的混凝土构件, 采用有限元软件进行疲劳寿命预测等疲劳性能的研究尚属空白。笔者基于 ANSYS 软件, 对配有 HRBF500 钢筋的混凝土梁进行疲劳寿命预测和理论分析, 为该构件尽快用于高速铁路提供理论计算依据。

1 HRBF500 钢筋混凝土梁疲劳试验概述

按桥涵规范^[8]设计了 3 根矩形、3 根 T 形截面钢筋混凝土梁^[2], 其截面和配筋见图 1 及表 1, 试验试件的纵向受拉钢筋均采用 HRBF500。本课题组 (文献 [2]) 已对表 1 中的 6 根简支梁进行了静载和疲劳荷载试验研究。试验梁的疲劳加载方

式为三分点等幅加载, 其最大疲劳荷载 F_{\max} 、最小疲劳荷载 F_{\min} 、水平应力 S ($S = F_{\max}/F_{u1}$, F_{u1} 为静载下试件的极限荷载)、荷载循环特征值 ρ ($\rho = F_{\min}/F_{\max}$) 满足最大疲劳荷载下受拉钢筋应力不小于 150 MPa, 如表 2 所示。

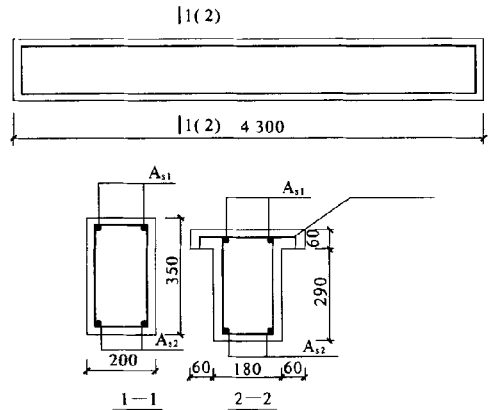


图 1 钢筋混凝土试验梁设计图

Fig.1 The design figuer of RC test beams

2 试验梁有限元分析与疲劳寿命预测

2.1 建立有限元模型

采用文献 [4] 的分离式模型, 混凝土采用 Solid65 单元及 Concrete 材料, 钢筋采用 link8 单元, 加载点与支撑点处垫块采用 Solid45 单元。混凝土

收稿日期:2011-09-01; 修订日期:2011-10-15

基金项目: 国家“863”支撑计划资助项目 (2008AA030704)

作者简介: 王新玲 (1963-), 女, 河南新乡人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事结构工程方面的研究。

表 1 钢筋混凝土试验梁设计方案

Tab.1 The design program of concrete test beams

试件号	截面形式	A _{s1}	A _{s2}	箍筋	混凝土
HBRS-1	矩形	2Φ10	2Φ16	Φ10@100	C50
HBRS-2	矩形	2Φ10	2Φ20	Φ10@100	C50
HBRS-3	矩形	2Φ10	2Φ25	Φ10@100	C50
HBTS-1	T形	2Φ10	2Φ16	Φ10@100	C50
HBTS-2	T形	2Φ10	2Φ20	Φ10@100	C50
HBTS-3	T形	2Φ10	2Φ25	Φ10@100	C40

表 2 疲劳加载方法

Tab.2 Fatigue loading methods

试件编号	N/万次	F _{max} /kN	F _{min} /kN	S	ρ
HBRS-1	250	15.00	12.00	0.36	0.80
HBRS-2	250	17.25	13.50	0.27	0.78
HBRS-3	250	34.50	18.30	0.35	0.53
HBTS-1	250	21.38	10.88	0.48	0.51
HBTS-2	250	15.15	8.25	0.23	0.54
HBTS-3	250	38.10	18.75	0.25	0.49

单轴受压的应力—应变关系采用 Saenz 公式来描述,钢筋选用完全弹塑性模型。

2.2 材料疲劳性质

国内外的研究表明,混凝土梁的疲劳破坏通常是由于钢筋的疲劳所致,所以可以用钢筋的疲劳性能来衡量钢筋混凝土梁的疲劳性能。笔者采用多种钢筋的 S-N 曲线进行试算,发现用文献[9]的 S-N 曲线模拟的结果与试验吻合最好。目前还没有 HRBF500 钢筋的 S-N 曲线的情况下,笔者的模拟采用文献[9]的 S-N 曲线来定义钢筋的疲劳性质,如式(1)所示:

lgN = 14.185 3 - 3.603 1lgσ, (1)

2.3 疲劳破坏的计算分析

因为 ANSYS 软件的疲劳分析以静力分析为基础,所以首先对 6 根试验梁进行了静载下的非线性有限元分析。分析结果与静载试验结果吻合较好[4],在此基础上进行疲劳计算。

利用 ANSYS 软件中疲劳分析模块对各梁进行预测,结果见表 3。表中 σ_{max}, σ_{min} 分别为最大和最小疲劳荷载对应的受拉钢筋应力。

由表 3 可见,梁体所受到的荷载幅越大,受拉钢筋的应力幅就越大,梁的疲劳寿命降低。和实际的疲劳试验结果相比[2], HBRS-1、HBRS-2、HBRS-3、HBTS-2 和 HBTS-3 梁在表 2 中疲劳荷载作用下,达到 250 万次时均未破坏,最大裂缝宽度仅 0.2 mm,受拉钢筋应力均小于 280 MPa,远小于强度设计值,与预测结果(均超过 250 万

表 3 试件梁疲劳寿命预测结果

Tab.3 The calculated results of specimens' fatigue lives

试件号	σ _{max} /MPa	σ _{min} /MPa	应力幅/MPa	疲劳寿命 N/万次
HBRS-1	159.88	15.70	144.18	255.49
HBRS-2	122.38	18.38	104.00	827.44
HBRS-3	164.00	25.98	138.02	298.45
HBTS-1	252.89	11.58	241.31	39.87
HBTS-2	113.29	10.76	102.53	870.96
HBTS-3	120.94	15.54	105.40	788.37

次)一致;而 HBTS-1 梁在疲劳荷载加至 32 万次时达到破坏[2],这与该荷载水平下 39.87 万次疲劳寿命的预测结果接近。

3 疲劳寿命理论分析及简化计算

虽然上述方法可以预测 HRBF500 钢筋混凝土梁的疲劳寿命,但操作复杂,不便在实际工程中应用。笔者结合 ANSYS 软件的计算数据,拟合出便于工程实际应用的简化计算公式。

根据项目研究对钢筋混凝土梁受荷载情况的要求[2],最大疲劳荷载应使试验梁受拉钢筋应力达到 150 MPa,即最大疲劳荷载大于开裂荷载。最小疲劳荷载可能大于开裂荷载也可能小于开裂荷载。因此,对这两种情况分别进行分析。

3.1 最小疲劳荷载和最大疲劳荷载均出现在开裂后

取不同的最小疲劳荷载和最大疲劳荷载,即改变荷载幅 ΔF,用软件分别计算出各梁的疲劳寿命。分析疲劳寿命和荷载幅的关系,发现二者的对数成线性关系,将分析结果绘于图 2 和图 3 中。

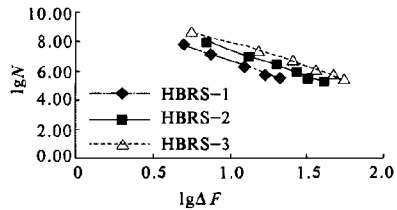


图 2 矩形梁疲劳寿命对数—荷载幅对数曲线

Fig.2 The fatigue life's logarithm-load amplitude's logarithmic curves of rectangular beams

基于图 2 和图 3 中试验梁的荷载幅对数与疲劳寿命对数的线性关系,拟合出 6 根钢筋混凝土梁疲劳寿命对数和荷载幅对数的关系式(2~7)。HBRS-1 梁:lgN = -3.406 3 lgΔF + 10.047; (2) HBRS-2 梁:lgN = -3.698 8 lgΔF + 11.21; (3) HBRS-3 梁:lgN = -3.362 6 lgΔF + 11.323; (4)

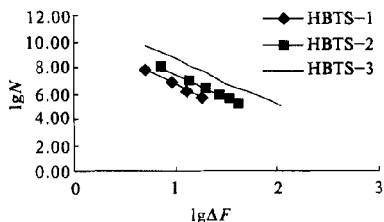


图3 T形梁疲劳寿命对数—荷载幅对数曲线

Fig. 3 The fatigue life's logarithm-load amplitude's logarithm curves of T-beams

HBTS-1梁: $\lg N = -3.5947 \lg \Delta F + 10.344$; (5)

HBTS-2梁: $\lg N = -3.495 \lg \Delta F + 10.911$; (6)

HBTS-3梁: $\lg N = -3.4848 \lg \Delta F + 12.14$; (7)

式中: N 为疲劳寿命; ΔF 为荷载幅。

公式(2~4)不同是因为3根矩形梁配筋率不同。同时考虑配筋率 ρ 影响,分析提出最小疲劳荷载和最大疲劳荷载均在开裂后的情况下,矩形梁的疲劳寿命简化计算公式: $\lg N = (1.187\rho^2 - 92.502\rho - 1.908)\lg \Delta F - 2.550.3\rho^2 + 240.11\rho + 5.8776$ 。 (8)

同理,得到该情况下T形梁疲劳寿命简化计算公式:

$$\lg N = (-219.1\rho^2 + 20.598\rho - 3.9515)\lg \Delta F + 516.32\rho^2 + 13.715\rho + 9.7591. \quad (9)$$

3.2 最小疲劳荷载出现在开裂前而最大疲劳荷载出现在开裂后

最大疲劳荷载确定后,最小疲劳荷载是否大于开裂荷载,对梁的疲劳寿命影响较大,故应考虑最小疲劳荷载的影响。由于该情况下钢筋的应力幅较大,故可以忽略流幅段,将静载下开裂前后的钢筋应变—荷载曲线的拟合公式带入到S-N曲线公式中,得到疲劳寿命简化计算公式。利用ANSYS软件非线性有限元计算得出的静载下开裂前后的应变—荷载曲线分别见图4~7^[4]。

由图4、5所示曲线可见,开裂前钢筋应力—荷载曲线基本符合线性关系。图5中,HBTS-1与HBTS-2梁的曲线较接近,是因为两者均属第一类T形截面梁。HBTS-3梁的曲线与其它两条相差较远,是因为HBTS-3梁配筋率较大,属第二类T形截面梁。6根非预应力梁开裂前的钢筋应力—荷载拟合曲线如式(10~15)。

$$\text{HBRS-1: } \sigma = 1.3238F - 0.1239; \quad (10)$$

$$\text{HBRS-2: } \sigma = 1.3611F + 0.0018; \quad (11)$$

$$\text{HBRS-3: } \sigma = 1.2748F - 0.1884; \quad (12)$$

$$\text{HBTS-1: } \sigma = 1.3277F - 0.0132; \quad (13)$$

$$\text{HBTS-2: } \sigma = 1.3111F - 0.0332; \quad (14)$$

$$\text{HBTS-3: } \sigma = 0.8287F + 0.0001, \quad (15)$$

式中: σ 为钢筋应力; F 为开裂前的加载。

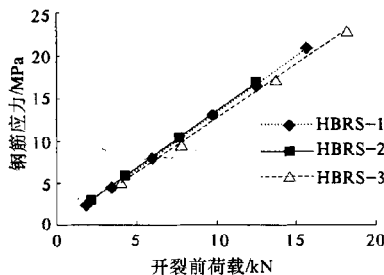


图4 矩形梁开裂前受拉钢筋应力—荷载曲线

Fig. 4 The load-stress curves of tensile reinforcement before cracking for rectangular beams

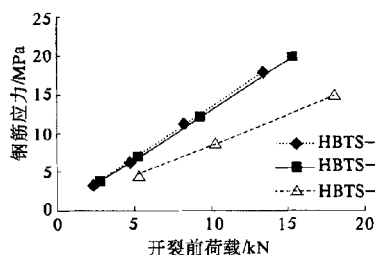


图5 T形梁开裂前受拉钢筋应力—荷载曲线

Fig. 5 The load-stress curves of tensile reinforcement before cracking for T-beams

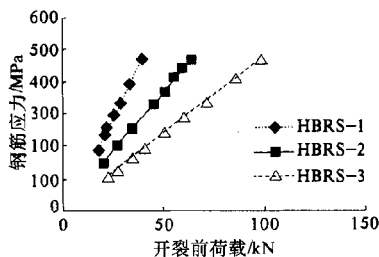


图6 矩形梁开裂后受拉钢筋应力—荷载曲线

Fig. 6 The load-stress curves of tensile reinforcement after cracking for rectangular beams

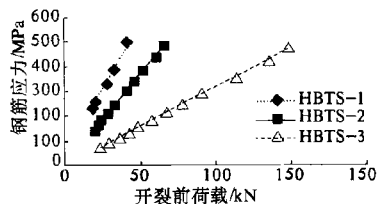


图7 T形梁开裂后受拉钢筋应力—荷载曲线

Fig. 7 The load-stress curves of tensile reinforcement after cracking for T-beams

由图6、7可见,各梁的开裂后钢筋应力—荷载曲线基本符合线性。6根钢筋混凝土梁开裂后

的钢筋应力—荷载拟合曲线如式(16~21)。

$$\text{HBRS}-1: \sigma' = 12.046 F' - 13.635; \quad (16)$$

$$\text{HBRS}-2: \sigma' = 7.463 7 F' - 4.064 2; \quad (17)$$

$$\text{HBRS}-3: \sigma' = 4.740 5 F' + 1.422 2; \quad (18)$$

$$\text{HBTS}-1: \sigma' = 11.26 9 F' + 12.304; \quad (19)$$

$$\text{HBTS}-2: \sigma' = 7.169 9 F' + 5.883; \quad (20)$$

$$\text{HBTS}-3: \sigma' = 3.122 5 F' + 2.012 7, \quad (21)$$

式中: σ' 为钢筋应力; F' 为开裂后的加载。

而笔者采用的 $S-N$ 曲线为式(1), 其中

$$\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}, \quad (22)$$

$$\text{令 } \sigma_{\min} = \sigma, \quad (23)$$

$$\sigma_{\max} = \sigma'. \quad (24)$$

由式(10)~(24)可以得到最小疲劳荷载在开裂前, 而最大疲劳荷载在开裂后情况下的疲劳寿命与荷载幅的关系式。

$$\text{HBRS}-1: \lg N = 14.185 3 - 3.603 1 \lg(-13.511 1 + 10.722 2 F_{\min} + 12.046 \Delta F); \quad (25)$$

$$\text{HBRS}-2: \lg N = 14.185 3 - 3.603 1 \lg(7.463 7 \Delta F + 6.102 6 F_{\min} - 4.066); \quad (26)$$

$$\text{HBRS}-3: \lg N = 14.185 3 - 3.603 1 \lg(1.610 6 + 3.465 7 F_{\min} + 4.740 5 \Delta F); \quad (27)$$

$$\text{HBTS}-1: \lg N = 14.185 3 - 3.603 1 \lg(12.317 2 + 9.941 3 F_{\min} + 11.269 0 \Delta F); \quad (28)$$

$$\text{HBTS}-2: \lg N = 14.185 3 - 3.603 1 \lg(5.916 2 + 7.169 9 \Delta F + 5.858 8 F_{\min}); \quad (29)$$

$$\text{HBTS}-3: \lg N = 14.185 3 - 3.603 1 \lg(2.012 6 + 3.122 5 \Delta F + 2.293 8 F_{\min}), \quad (30)$$

式中: N 为疲劳寿命; ΔF 为荷载幅; F_{\min} 为最小疲劳荷载。

同样, 考虑配筋率 ρ 的影响, 拟合出最小疲劳荷载在开裂前, 最大疲劳荷载在开裂后情况下矩形梁和 T 形梁的疲劳寿命简化计算公式(31)和(32)。

$$\text{矩形梁: } \lg N = 14.185 3 - 3.603 1 \lg[6.123.6\rho - 41.503 + (0.015 7\rho^{-1.265 3}) F_{\min} + (0.054 6\rho^{-1.044 8}) \Delta F - 217.440\rho^2]; \quad (31)$$

$$\text{T 形梁: } \lg N = 14.185 3 - 3.603 1 \lg[146.841.6\rho^2 - 4.142\rho + 31.218 - (8.567 9 \ln\rho + 34.379 6) F_{\min} - (9.127 \ln\rho + 35.860 7) \Delta F]. \quad (32)$$

3.3 对疲劳寿命简化计算公式进行检验

为检验以上疲劳寿命简化计算公式的精确度, 利用以上各式对各个简支梁的疲劳寿命进行预测。因为本试验梁进行疲劳试验时, 最小疲劳荷载均在开裂前, 最大疲劳荷载均在开裂后, 所以分别采用公式(25~32)进行计算, 结果见表 4。

表 4 疲劳寿命计算值及其试验值的比较

Tab. 4 The comparison of calculated fatigue lives and test values

试件号	疲劳寿命 N /万次				
	综合公式计算值 N_1	分公式计算值 N_2	解析值 N_0	$\frac{ (N_1 - N_0) }{N_0}/\%$	$\frac{ (N_2 - N_0) }{N_0}/\%$
HBRS-1	215.10	214.38	255.01	15.65	15.93
HBRS-2	760.72	764.51	827.44	8.06	7.61
HBRS-3	272.81	270.77	298.45	8.59	9.27
HBTS-1	42.04	41.40	39.87	5.44	3.84
HBTS-2	794.32	835.39	870.96	8.80	4.09
HBTS-3	837.14	787.38	788.37	6.19	0.13

由表 4 可见, 疲劳寿命的综合公式计算结果和分公式计算结果较接近, 并且各梁的简化公式计算值和解析值差别也较小, 除 HBRS-1 外, 平均误差在 10% 以内。

4 结论

(1) 基于 ANSYS 软件的疲劳模块对疲劳寿命的预测结果与试验结果吻合较好, 表明可以利用 ANSYS 软件对 HRBF500 钢筋混凝土梁和预应力混凝土梁的疲劳寿命进行预测。

(2) 钢筋混凝土梁的疲劳寿命随着受拉钢筋

所受应力幅(最大疲劳荷载幅和最小疲劳荷载幅)的增大而降低。

(3) 在最小疲劳荷载和最大疲劳荷载均在开裂后和最小疲劳荷载在开裂前而最大疲劳荷载在开裂后 2 种情况, 拟合出了疲劳寿命简化计算公式, 该公式和 ANSYS 软件的有限元计算结果及试验结果基本吻合。该公式可为实际工程设计提供指导。

参考文献:

[1] 肖建庄, 代媛媛, 赵勇, 等. 500 MPa 细晶粒钢筋高

- 温下的应力—应变关系[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(3): 276–282.
- [2] 王新玲,陈青萍,杜琳. 高速铁路用HRBF500钢筋混凝土梁疲劳性能试验研究[J]. 工业建筑, 2010, 40(11): 18–21.
- [3] 王新玲,段宏伟,吕振亚. 高速铁路用HRBF500钢筋预应力混凝土梁疲劳性能试验研究[J]. 工业建筑, 2010, 40(11): 22–28.
- [4] 赵更歧,李可,张龙. 高铁用细晶粒钢筋混凝土梁疲劳性能的数值分析及研究[J]. 郑州大学学报:工学版, 2010, 31(4): 22–28.
- [5] NAAMAN A E, FOUNAS M. Partially prestressed beams under random-amplitude fatigue loading[J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 117(12): 3742–3761.
- [6] 张兴亮,刘发明. 钢纤维混凝土抗折疲劳的ANSYS模拟[J]. 四川建筑, 2009, 29(1): 223–224.
- [7] SUSANTO T, WANG F. Finite element analysis of reinforced concrete deep beams under fatigue loading[J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(3): 315–323.
- [8] TB 10002.3—2005. 铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社, 2005.
- [9] 曾志斌,李之榕. 普通混凝土梁用钢筋的疲劳 $S-N$ 曲线研究[J]. 土木工程学报, 1999, 32(5): 10–14.

The Fatigue Life Prediction and Analysis of RC Beams with HRBF500 Used in High-speed Rail

WANG Xin-ling¹, GAO Hui-zong², LI Ke³

(1. School of Civil Engineering Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. China Radio & TV International Architecture Design-Research Institute, Beijing 100045, China; 3. School of Civil Engineering Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: 500 MPa level hot rolled steel bar of ultra-fine grains(HRBF500 steel bar) is successfully developed new-type steel of high-speed railways in Chinese metallurgical industry. HRBF500 steel bars will be used in high-speed reinforced, so it will be exposed to repeated loads. In view of that, the fatigue life predictions of RC beams reinforced with HRBF500'S are urgent to be solved. Based on ANSYS software, the fatigus life predictions of rectangular and T-section RC beams reinforced with HRBF500 were studied and compared well with the test results, which indicated that steel ratio, minimum fatigue load and load amplitude were the main factors affecting the fatiue life. In order to promote prediction method for practcal engineering design, the simplified fatigud life formulas were obtained based on comprehensive analysis of finite element calculation results. Those formulas can provide guidance for practical engineering design.

Key words: RC beam; HRBF500 steel; fatigue life; finite element analysis