

疲劳荷载作用下梁内不同类型钢筋破坏关系

宋玉普, 韩基刚

(大连理工大学 建设工程学部, 116024 辽宁 大连)

摘要: 为了研究在疲劳荷载作用下, 梁内钢筋的应力变化情况, 通过 12 片后张有粘结部分预应力混凝土梁的疲劳试验, 研究了与疲劳破坏密切相关的钢筋最大应力、应力幅的变化规律. 结果表明: 在梁的使用阶段, 预应力钢筋与非预应力钢筋的应力幅比值处于等比例变化, 非预应力钢筋应力幅是影响部分预应力混凝土梁疲劳性能的关键因素. 随着重复荷载次数的增加, 钢筋与混凝土之间粘结性能的退化和有效预应力的不断降低是两种不同类型钢筋破坏并不同步的两个重要原因. 最后, 在试验分析的基础上, 提出了开裂截面处消压后预应力钢筋应力增量的计算公式, 计算结果与试验结果吻合较好.

关键词: 部分预应力混凝土梁; 疲劳; 钢筋应力; 粘结退化; 应力重分布

中图分类号: TH133; TP183

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)08-0096-05

The failure relationship between different types of steel in beams under fatigue loading

SONG Yu-pu, HAN Ji-gang

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, 116024 Dalian, Liaoning, China)

Abstract: To investigate the stress variation of reinforcement in beam under fatigue loads, in this paper, based on fatigue test results of 12 post-tensioned partially prestressed concrete beams, the changes of reinforced maximum, stress amplitude which are closely related with the fatigue failure of partially prestressed concrete beams are obtained. The experimental results suggest that the prestressed and non-prestressed reinforced are basically at the same ratio of development. It has been found that the key factors of affecting fatigue capability of partially prestressed concrete beams are stress amplitude of reinforcement. The bond degradation of reinforcement and reduction of effective prestressed stress lead to stress redistribution, which are the two main important reasons why prestressed and non-prestressed reinforced damages are not in desynchronized way with the increase of repeated loading. Finally, a calculation method of prestressed steel stress increment in a cracked section after decompression is proposed by the experimental analysis, and the calculation results are matched with the test results quite well.

Key words: prestressed concrete beams; fatigue; reinforcement stresses; bond degradation; stress redistribution

部分预应力混凝土结构已经大量应用于铁路与公路桥梁工程中, 在使用阶段允许出现裂缝并随着高强材料的使用及在设计中的极限状态法的应用, 导致构件在使用阶段处于较高的应力水平下工作, 这都可能使其产生疲劳破坏, 所以部分预

应力混凝土梁的疲劳已经成为工程设计中不可忽视的问题. 大量试验研究表明部分预应力混凝土梁的疲劳破坏起始于非预应力钢筋的疲劳断裂, 而对部分预应力混凝土结构的疲劳使用性能仍研究不多, 尤其与疲劳破坏密切相关的钢筋应力在疲劳加载过程中的变化规律以及非预应力钢筋与预应力钢筋彼此破坏不同步的原因仍研究较少^[1-3]. 为此, 本文对部分预应力混凝土梁的疲劳问题进行了试验研究, 重点考察梁内非预应力钢筋与预应力钢筋的应力变化规律.

收稿日期: 2010-12-20.

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2007AA11Z133);

辽宁省教育厅科技计划项目(2008T231).

作者简介: 宋玉普(1944—), 男, 教授.

通信作者: 宋玉普, dulit2891@gmail.com.

1 试 验

1.1 试验梁设计

将 12 片后张有粘结部分预应力混凝土梁分为 3 组(L1,L2,L3),针对梁内预应力钢筋和非预应力钢筋疲劳破坏不同步现象,将 L1 组梁中钢绞线和非预应力钢筋布置在同一高度. L2、L3 组梁中钢绞线布置于非预应力钢筋的上部. 试验梁的加载装置,截面尺寸以及配筋情况分别如图 1、2 和表 1 所示. 试验在大连理工大学结构试验室的

1 000 kN MTS 疲劳试验机上进行,加载频率为 2 ~ 8 Hz. 混凝土应变片粘贴于梁跨中上翼缘表面,钢筋应变片粘贴于跨中处与加载点附近. 通过 MTS 与 SoMat eDAQ 组合系统进行动态应变采集.

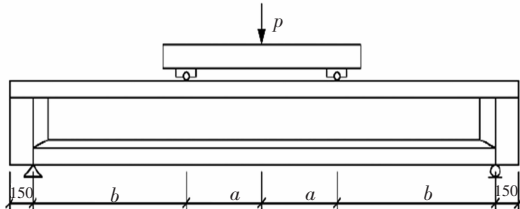


图 1 加载示意图

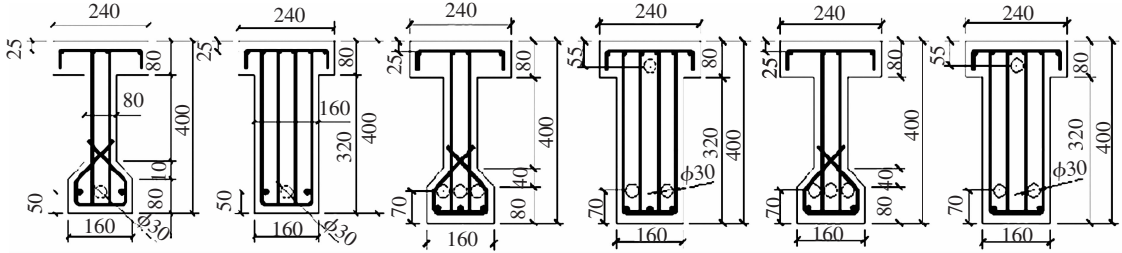


图 2 各截面尺寸

表 1 试验梁配筋及加载尺寸参数表

梁组号	根数	钢绞线	HRB400	a/ mm	b/ mm	说明
L1	4	1 根 7Φ ₅ ^s	2Φ16	500	1 000	直线配置钢绞线
L2	4	3 根 7Φ ₄ ^s	3Φ14	400	1 100	曲线配置中间 1 根钢绞线
L3	4	2 根 7Φ ₄ ^s , 1 根 7Φ ₃ ^s	2Φ14	400	1 100	曲线配置中间 1 根钢绞线

1.2 试验材料

普通钢筋采用 HRB400 级钢筋,预应力钢筋采用 1860 级 7 股钢绞线,相应的材料试验力学性能如表 2 所示. 预应力钢筋的张拉控制应力为 $0.7\sigma_{\text{fpk}} = 1\,302\text{ MPa}$. 张拉结束后,立即进行灌浆封闭,灌浆质量良好. 箍筋与架力筋采用直径为 6.5 mm 的 HPB235 级光圆钢筋,在纯弯段内箍筋间距为 200 mm,其余为 100 mm. 混凝土采用 P·II42.5R 级硅酸盐水泥、粒径小于 20 mm 的石灰岩碎石、天然河砂和水,试件均按同一配合比进行制作,设计强度为 C50. 混凝土的材料力学性能均在每根梁正式试验前测得,详见表 3.

表 2 钢筋力学性能

钢筋类型	直径/mm	屈服强度/ MPa	弹性模量/ 10 ⁵ MPa
钢绞线	15.2	1 863	1.96
	12.7	1 795	1.96
HRB400 钢筋	16.0	497	1.97
	14.0	480	2.02

1.3 加载方案

每组试验梁均预留 1 根梁进行静载试验,得到相应的开裂荷载与极限承载力. 其余梁在进行疲劳试验前,均施加静载,进行预裂. 最大最小荷载的取值均参考静载试验梁拟定,详细加载方案如表 3 所示.

表 3 试验结果

梁号	$f_{cu}/$ MPa	$f_t/$ MPa	$E_c/$ 10 ⁴ MPa	λ	$M_{\text{max}}/$ (kN·m)	$M_{\text{min}}/$ (kN·m)	加载试验	破坏类型
S1	65.3	4.58	4.107	0.159				静载破坏, $M_u = 173.0\text{ kN}\cdot\text{m}$
CF11	59.5	4.49	3.858	0.157	60.55	8.65	200 万次后施加静载	静载破坏, $M_u = 170.5\text{ kN}\cdot\text{m}$
CF12	61.4	4.27	3.863	0.158	86.50	8.65	26.7 万次	起始于非预应力钢筋断裂
CF13	67.5	5.13	4.170	0.160	112.45	8.65	7.8 万次	起始于非预应力钢筋断裂
S2	63.2	4.47	4.006	0.176				静载破坏, $M_u = 245.0\text{ kN}\cdot\text{m}$
CF21	61.6	4.98	3.961	0.174	87.75	12.25	200 万次未破坏,提高上限荷载至 159.25 kN·m,至 11.9 万次破坏	起始于非预应力钢筋断裂
CF22	61.0	4.97	3.870	0.175	122.50	12.25	97.0 万次	起始于非预应力钢筋断裂
CF23	61.9	4.41	4.011	0.174	159.25	12.25	11.4 万次	起始于非预应力钢筋断裂
S3	62.0	5.08	4.203	0.211				静载破坏, $M_u = 269.5\text{ kN}\cdot\text{m}$
CF31	68.0	4.30	4.182	0.216	94.33	13.48	200 万次后未破坏,提高上限荷载至 134.75 kN·m 时,至 46 万次破坏	起始于非预应力钢筋断裂
CF32	62.5	4.12	4.213	0.211	134.75	13.48	42.9 万次	起始于非预应力钢筋断裂
CF33	61.2	4.99	4.094	0.212	175.18	13.48	3.4 万次	起始于非预应力钢筋断裂

2 结果分析

本文部分预应力混凝土试验梁均满足规范规定的最大受压区高度和最小配筋率要求. 各梁的疲劳寿命如表3所示, 对于承受静力荷载的部分预应力混凝土梁而言, 当进入破坏阶段, 预应力钢筋和非预应力钢筋在屈服强度内都将得到充分地利用, 同时受压区混凝土被压碎. 而在疲劳荷载作用下, 部分预应力混凝土梁的工作应力较低, 主要由于疲劳损伤积累, 导致受拉区某一根非预应力钢筋首先疲劳断裂, 此时截面的刚度迅速降低, 其余钢筋的应力急剧增加, 裂缝不断开展, 最终导致预应力钢筋的疲劳断裂, 直至梁完全丧失承载能力.

2.1 上缘混凝土压应变变

从 L1、L2、L3 组梁中分别选取 CF11、CF21、CF31 梁的实测结果, 此3片梁均在等幅疲劳荷载作用下, 经历200万次重复加载作用后仍未破坏. 文中均以拉应变为正值, 压应变为负值. 由图3可知, 随着循环次数的增加相应最大荷载作用下梁的上缘混凝土压应变变化较小.

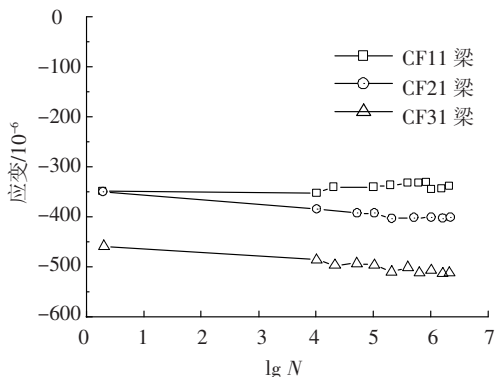


图3 上缘混凝土应变随荷载循环次数的变化

2.2 非预应力钢筋应力和预应力钢筋应力增量

图4给出了预应力钢筋与非预应力钢筋最大钢筋应力增量随疲劳荷载作用次数增加的变化情况, 试验结果表明, 以200万次为基准, 可知CF21、CF31梁内非预应力钢筋和预应力钢筋应力并未达到屈服强度, 在不同荷载循环次数下的应力变化并不相同, 表现为大约在0至10万循环次数以内, 随着循环次数的增加, 非预应力钢筋的应力增量增长率不断增大, 而相应的预应力钢筋增量变化较小, 两者之间的差值呈现不断增大的趋势. 10万次以后, 两种钢筋的应力增量值趋于稳定. 钢筋应力幅随疲劳循环次数的变化情况, 见图5, 从中可以看出, 其变化趋势与钢筋最大应力基本一致.

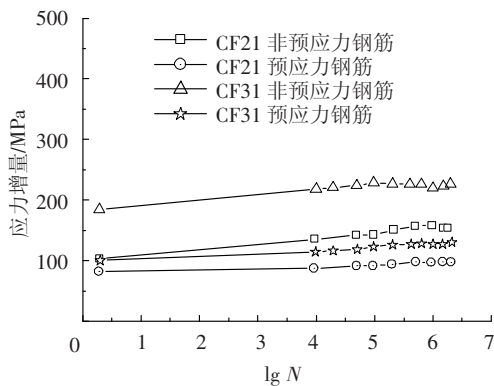


图4 最大钢筋应力随荷载循环次数的变化

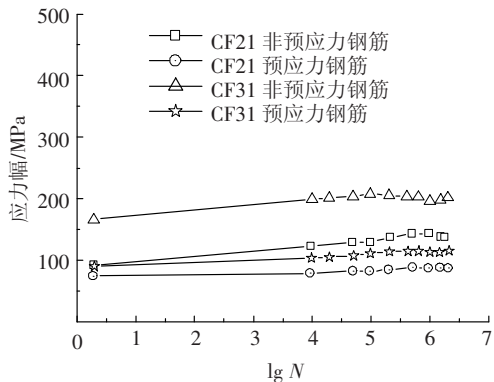


图5 钢筋应力幅随荷载循环次数的变化

CF31梁在不同循环加载后静测钢筋应力增量随弯矩的变化情况, 如图6、7所示. 在初始加静载阶段 ($N=2$ 时), 由于梁的疲劳损伤较小, 裂缝闭合性能较好, 非预应力钢筋与预应力钢筋应力增量基本处于等比例变化. 而加载200万次以后, 施加静载, 与初始静载阶段相比, 随着弯矩的增加, 非预应力钢筋应力和预应力钢筋应力增量显著增大, 斜率不断变大.

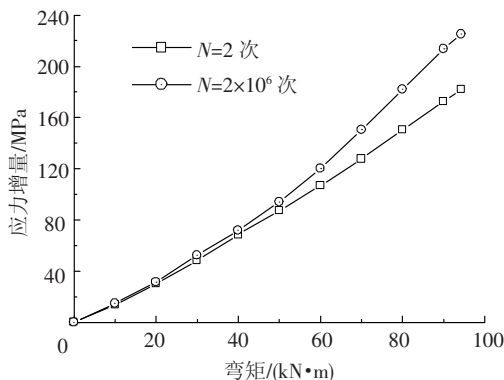


图6 CF31梁非预应力钢筋应力随弯矩的变化

2.3 疲劳荷载作用下钢筋应力幅比值的变化

选取 L1 组中的 CF12 梁为例, 在等幅疲劳荷载作用下, 得到了布置于同一层预应力钢筋与非预应力钢筋的应力幅比值 ($\Delta\sigma_p/\Delta\sigma_s$) 随循环次数增加的变化规律, 如图8所示, 可知承受疲劳荷载作用下的部分预应力混凝土梁在截面开裂后普通钢筋和预应力钢筋的应力幅值并不表现为同步

增长,两者之间的比值基本符合三阶段发展规律,即初始阶段、稳定阶段和临近破坏阶段,其中第二阶段钢筋应力幅比值处于稳定状态. 试验结果表明,对于 L1 组梁而言,其稳定阶段应力幅比的均值为 $\Delta\sigma_p/\Delta\sigma_s \approx 0.65$.

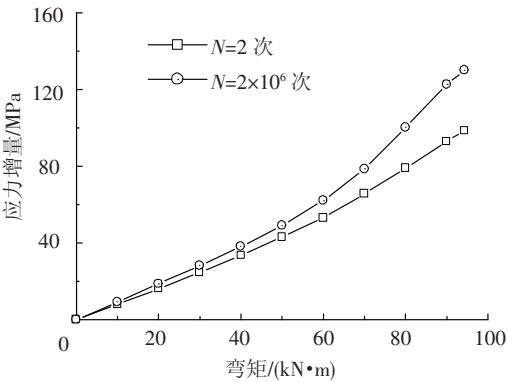


图 7 CF31 梁预应力钢筋应力增量随弯矩的变化

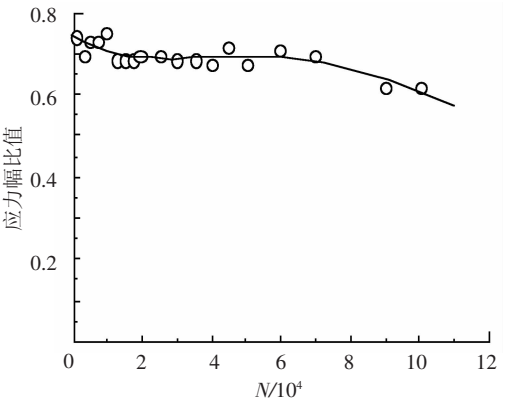


图 8 钢筋应力幅比值随荷载循环次数的变化

由以上试验结果可知,部分预应力混凝土梁在使用阶段,梁内非预应力钢筋明显处于不利的状态,同时,非预应力钢筋应力幅是影响部分预应力混凝土梁疲劳性能的关键因素.

3 非预应力钢筋与预应力钢筋破坏不同步原因分析

疲劳荷载作用下,引起预应力钢筋和非预应力钢筋破坏不同步,即非预应力钢筋首先破坏,其原因是多方面的,在保证灌浆质量前提下,主要有两个原因:一是梁开裂以后,不同类型钢筋与混凝土之间的疲劳粘结退化性能不同,导致开裂截面处钢筋应力重分布;二是有效预应力的不断降低.

3.1 粘结退化影响

文献[4]在考虑非预应力钢筋与预应力钢筋粘结性能不同的基础上,根据裂缝粘结滑移理论和变形协调条件推导出截面开裂后钢筋应力增量计算公式为

$$\alpha = \Delta\sigma_p/\Delta\sigma_s = \sqrt{\xi \frac{d_s}{d_p}}, \tag{1}$$

$$\Delta\sigma_p \cdot A_p + \Delta\sigma_s \cdot A_s = \Delta P_{p+s}. \tag{2}$$

其中: $\Delta\sigma_p$ 、 $\Delta\sigma_s$ 分别为开裂后预应力钢筋、非预应力钢筋的应力增量; α 为钢筋应力分配系数; ξ 为相对粘结系数, $\xi = \tau_{pm}/\tau_{sm}$; τ_{pm} 、 τ_{sm} 为预应力钢筋、非预应力钢筋的平均粘结应力; d_s 、 d_p 分别为预应力钢筋、非预应力钢筋的直径; ΔP_{p+s} 为使用荷载与消压荷载之差.

由式(1)可知,梁在开裂以后,非预应力钢筋与预应力钢筋之间产生了应力重分布,其中直径是由钢筋的本身性质确定的,钢筋平均粘结应力的大小则对钢筋的应力分配系数产生重要的影响. 由于我国相关的粘结试验较少,钢筋的相对粘结系数一般按照欧洲规范和欧洲模式规范中的规定取用^[5]. 但在疲劳荷载作用下,沿试件长度方向的粘结应力分布也不断发生变化,相对滑移量不断增大,这一切导致了沿试件长度上平均粘结强度的降低. 同时,由于肋筋与钢绞线的类型、表面形状的不同,在重复荷载作用下,裂缝反复开裂,钢绞线与混凝土的退化程度较带肋钢筋要高很多^[6],因此,为了更为合理地计算梁开裂后钢筋应力,应该考虑疲劳荷载对不同类型钢筋粘结

退化性能产生的影响,即 $\xi^f = \frac{\gamma_{pn}\tau_{pm}}{\gamma_{sn}\tau_{sm}}$, 其中 γ_{pn} 、 γ_{sn}

分别为考虑疲劳荷载影响下,得到的预应力钢筋与非预应力钢筋的衰减因子. 但针对疲劳荷载作用下,不同类型的钢筋材料与混凝土的疲劳粘结退化性能仍研究较少,确定 γ_{pn} 、 γ_{sn} 值尚需作进一步深入的研究.

由以上分析可知,当截面开裂后,随着重复次数的增加,由于不同类型钢筋与混凝土之间的粘结退化性能不同,产生了应力重分布,使得非预应力钢筋所分配的应力较预应力钢筋大,从而导致应力幅显著高于预应力钢筋.

3.2 有效预应力不断降低的影响

在疲劳荷载作用下,由于混凝土动力徐变引起的预应力损失不断增大,部分预应力混凝土梁的有效预应力逐渐降低^[7-8],这将降低裂缝的闭合能力,疲劳裂缝宽度不断增大,刚度降低,使得预应力钢筋的应力增长相对较小,而非预应力钢筋的应力增长相对较大.

4 疲劳荷载作用下规范中钢筋应力幅值计算方法讨论

文献[9]给出在疲劳荷载作用下,预应力混凝土梁开裂截面处钢筋应力幅计算公式为

$$\Delta\sigma_p = \Delta\sigma_{p1} + \Delta\sigma_{p2} - \Delta\sigma_{pg}, \tag{3}$$

$$\Delta\sigma_s = \Delta\sigma_{s2} - \sigma_{sg}.$$

(4)

其中: $\Delta\sigma_{p1}$ 为消压时预应力钢筋的应力增量; $\Delta\sigma_{pg}$, $\Delta\sigma_{sg}$ 分别为由恒载产生的预应力钢筋及非预应力钢筋中应力; $\Delta\sigma_{p2}$, $\Delta\sigma_{s2}$ 分别为消压后按开裂截面计算的预应力钢筋和非预应力钢筋应力增量,为了考虑疲劳荷载的影响,相应应力增量需乘以相应的增大系数.

由表 4 可知,采用文献[9]所得到的消压后非预应力钢筋应力增量 $\Delta\sigma_{s2}$ 的计算值与实测值较为接近,而对于消压后的预应力钢筋应力增量,按照文献[9]的计算值显著高于实测值,这是由于梁开裂后,在疲劳荷载作用下,钢绞线与混凝土的粘结性能退化较大的原因. 所以对于部分预应

力混凝土梁而言,在疲劳荷载作用下,合理计算开裂截面处的预应力钢筋应力增量,需考虑粘结退化对预应力钢筋与非预应力钢筋之间应力重分布的影响,本文建议疲劳荷载作用下,消压后的预应力钢筋增量可通过文献[9]计算得到的非预应力钢筋应力乘以相应的应力分配系数 α 来求得,即

$$\Delta\sigma_{p2} = \alpha \cdot \Delta\sigma_{s2}.$$

(5)

其中: $\alpha = \sqrt{\xi^f \frac{d_s}{d_p}}$, 在无可靠试验数据确定相对粘结系数 ξ^f 的情况下,可取本文所测得的应力分配系数 $\alpha \approx 0.65$. 如表 4 所示,本文计算公式所得到的结果与试验结果吻合较好.

表 4 开裂截面钢筋应力增量表

梁号	$M_{max}/$ (kN·m)	$\Delta\sigma_{p2}/\text{MPa}$			$\Delta\sigma_{s2}/\text{MPa}$		
		试验值	文献[9]计算值	考虑粘结退化 本文计算值	试验值	文献[9]计算值	考虑粘结退化 本文计算值
CF11	60.55	64.88	92.60	60.19	98.20	92.60	92.60
CF21	87.75	97.30	111.61	96.90	147.30	149.09	149.09
CF31	94.33	130.00	166.81	140.14	225.12	215.44	215.44

5 结 论

- 1) 部分预应力混凝土梁疲劳破坏是由于受拉区非预应力钢筋中某一根钢筋首先疲劳断裂,最终导致预应力钢绞线的疲劳破坏,梁退出工作.
- 2) 在最大荷载作用下,随着循环次数的增加,非预应力钢筋的应力增量增长速率不断增大,而预应力钢筋应力增量变化相对较小,至一定循环次数以后两者应力增量变化趋于稳定,此时预应力钢筋与非预应力钢筋应力幅比值为 $\Delta\sigma_p/\Delta\sigma_s \approx 0.65$. 非预应力钢筋应力幅是影响部分预应力混凝土梁疲劳性能的关键因素.

3) 疲劳荷载作用下,有效预应力的不断降低和不同类型钢筋与混凝土之间的疲劳粘结退化性能相差较大是两者破坏不同步的两个主要原因.

4) 本文建议的部分预应力混凝土梁在疲劳荷载作用下,考虑粘结退化影响的消压后开裂截面预应力钢筋应力增量计算公式的计算值与实测值吻合较好.

参考文献:

[1] 钟明全. 疲劳加载对部分预应力混凝土梁钢筋应力、裂缝宽度及静力强度的影响[J]. 西南交通大学学

报, 1995,30(3): 283-290.

[2] 姜昭恒. 部分预应力混凝土先张梁动载疲劳试验研究[J]. 长沙铁道学院学报,1989(4): 75-86.

[3] BENNETTE W, CHANDRASEKHAR C S. Supplementary tensile reinforcement in prestressed concrete beams [J]. Concrete, 1972, 6(10): 35-39.

[4] 徐美庚, 苏辉艳. 部分预应力混凝土结构开裂后的钢筋应力增量计算[J]. 铁道建筑,1998 (10): 27-30.

[5] 冯秀峰, 宋玉普, 张坚洋, 等. 疲劳荷载下预应力钢筋混凝土梁中钢筋应力重分布的试验研究[J]. 建筑结构学报,2006,27(2): 94-99.

[6] 陆莲娣. 持续长期荷载及重复荷载作用下力筋的粘结性能[J]. 重庆交通学院学报, 1989 (1): 36-43.

[7] 沈在康, 孙慧中, 马坤贞, 等. 允许出现裂缝的部分预应力混凝土梁的疲劳性能[C]//钢筋混凝土结构研究报告选集 No. 2. 北京: 中国建筑科学研究院, 1981.

[8] ABELES P W, BROWN E L, HU C H. Behavior of under-reinforced prestressed concrete subjected to different stress ranges [J]. ACI SP 41-42, 1974,2: 279-300.

[9] 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: 中华人民共和国交通部, 2005.

(编辑 魏希柱)