

文章编号:1673-2049(2017)04-0085-11

## 预应力混凝土梁疲劳性能研究现状

杨 鸥<sup>1</sup>, 张晓非<sup>1</sup>, 霍静思<sup>1,2</sup>, 陈 俊<sup>3</sup>

(1. 湖南大学 建筑安全与节能教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082; 2. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021; 3. 湘潭大学 土木工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105)

**摘要:**对预应力混凝土梁疲劳性能的研究进展进行了详细阐述,论述了等幅疲劳荷载下预应力混凝土梁的疲劳性能及疲劳加载后的静力性能,对控制其疲劳破坏形态的影响因素以及在疲劳加载过程中的受力筋应变变化、裂缝开展和挠度变化规律进行了总结。讨论了变幅疲劳荷载下预应力混凝土梁的疲劳寿命及加载顺序对疲劳寿命的影响,分析了变幅疲劳加载过程中的刚度退化,同时对腐蚀后预应力混凝土梁的疲劳性能进行分析,总结了钢绞线、普通钢筋腐蚀损伤对试验梁疲劳破坏形态、极限承载力及疲劳寿命的影响。在对文献进行总结分析的基础上,根据当前研究所存在的问题,提出了今后预应力混凝土结构疲劳性能研究的方向。结果表明:预应力混凝土梁疲劳破坏始于受力筋疲劳断裂,受压区混凝土一般不会发生破坏,变幅疲劳加载及腐蚀损伤对其疲劳性能有较大影响。

**关键词:**预应力混凝土梁;等幅疲劳;变幅疲劳;疲劳性能;腐蚀

**中图分类号:**TU378.2 **文献标志码:**A

## Research Status of Fatigue Performance of Prestressed Concrete Beam

YANG Ou<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-fei<sup>1</sup>, HUO Jing-si<sup>1,2</sup>, CHEN Jun<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 2. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China; 3. College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China)

**Abstract:** The research progress of fatigue performance of prestressed concrete beams was summarized in detail. The fatigue performance under constant-amplitude fatigue loading and static behavior after fatigue loading of prestressed concrete beams were discussed. The influence factors controlling the fatigue failure pattern, the strain variation of forced steel bars, the development of cracks and the variation of deflection during fatigue loading were summarized. The fatigue life of prestressed concrete beams under variable-amplitude fatigue loading and the influences of loading sequence on fatigue life were discussed, and the stiffness degradation in the process of variable-amplitude fatigue loading was analyzed. The fatigue performance of corroded prestressed concrete beam was analyzed. The influences of corrosion damage of steel strand and common steel bar on the fatigue failure pattern, ultimate bearing capacity and fatigue life of the test beam were summarized. Based on the summary and analysis of the literatures, the research direction of fatigue performance of prestressed concrete structures was put forward considering

收稿日期:2017-02-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51578229)

作者简介:杨 鸥(1981-),男,湖南永州人,讲师,工学博士,E-mail:ouyanghnu@hnu.edu.cn。

the existing problems of the current research. The results show that the fatigue failure of prestressed concrete beams starts with the fatigue fracture of the tendons, and the concrete in compression zone generally does not break. Variable-amplitude fatigue loading and corrosion damage have great influence on fatigue performance.

**Key words:** prestressed concrete beam; constant-amplitude fatigue; variable-amplitude fatigue; fatigue performance; corrosion

0 引言

预应力混凝土结构因质量轻、刚度大、抗裂性好被广泛应用于公路、铁路桥梁、吊车梁、海洋平台等结构中。实际工程中,预应力混凝土结构所受荷载谱复杂,不仅承受静载作用,随机车辆、工作吊车及海洋波浪等产生的往复作用力对结构承载力也有重要影响,使结构内部的疲劳累积损伤在长期反复荷载作用下增加,抗力逐渐下降直至结构失效。此外,随着预应力混凝土结构所处自然环境的复杂化,空气、淡水及海水中的酸盐成分均会对结构造成腐蚀损伤,改变材料的性质,对结构的疲劳性能产生极其不利的影响,使结构易出现腐蚀疲劳脆性破坏,严重危害到结构的安全性和正常使用性能。使用荷载和环境腐蚀的影响使构件所受应力状态更为复杂,预应力混凝土结构的腐蚀、疲劳问题较早受到更多关注并逐渐成为一个热点问题。本文总结了当前国内外预应力混凝土梁疲劳性能的研究概况,并针对等幅、变幅疲劳试验下预应力混凝土梁及腐蚀预应力混凝土梁的疲劳性能进行分析,为今后预应力混

凝土梁疲劳性能的研究提供借鉴。

1 预应力混凝土梁疲劳试验研究概况

预应力混凝土梁疲劳试验研究的对象主要是部分预应力混凝土构件,全预应力构件因预应力度高,钢筋和混凝土在反复荷载作用下产生的应力较小,故基本不考虑疲劳效应,但对部分预应力混凝土梁而言,必须考虑疲劳对结构承载力的影响<sup>[1-2]</sup>。目前,国内外关于部分预应力混凝土梁疲劳性能的研究主要是通过等幅疲劳试验和变幅疲劳试验,且随着结构所处自然环境的日益复杂化,越来越多学者开始关注腐蚀后预应力混凝土梁的疲劳性能,表 1 列出了国内外学者进行的预应力混凝土梁疲劳试验。从表 1 可以看出,到目前为止,预应力混凝土梁的疲劳试验研究涵盖:①多种试验梁的施工工艺,如先张法梁、后张法梁、自密实以及缓黏结梁等;②多种疲劳荷载,如等幅疲劳、变幅疲劳,其中变幅疲劳加载有 2 级变幅、多级变幅及随机变幅;③多种损伤工况,如腐蚀疲劳试验有钢绞线腐蚀和普通钢筋腐蚀。

表 1 国内外预应力混凝土梁疲劳试验

Tab. 1 Fatigue Tests of Prestressed Concrete Beams at Home and Abroad

文献来源	试件尺寸及说明	加载方式	破坏形态
文献[3]	$L=4\ 500\ \text{mm}$ , T 形截面后张有黏结	等幅, $\rho_{\max}=0.4$ ; $\rho_{\min}=0.05$	普通钢筋疲劳断裂
文献[4]	截面尺寸 $114\ \text{mm}\times 228\ \text{mm}\times 3\ 050\ \text{mm}$ , 先张法梁	等幅, $\rho_{\max}=0.6$ ; $\rho_{\min}=0.4$	预应力筋(全预应力混凝土梁)及非预应力筋疲劳断裂
文献[5]	$L=3\ 400\ \text{mm}$ , T 形截面后张缓黏结	等幅, $\rho_{\max}=0.4, 0.5, 0.6$ ; $\rho_{\min}=0.05$	普通钢筋疲劳断裂
文献[6]	截面尺寸 $200\ \text{mm}\times 350\ \text{mm}\times 3\ 990\ \text{mm}$ , 自密实后张有黏结	等幅, $\rho_{\max}=0.589\sim 0.701$ ; $\rho_{\min}=0.259\sim 0.304$	普通钢筋疲劳断裂
文献[7]	$L=4\ 500\ \text{mm}$ , T 形截面后张有黏结	等幅, $\rho_{\max}=0.46\sim 0.63$ ; $\rho_{\min}=0.07\sim 0.13$	普通钢筋疲劳断裂
文献[8]	$L=3\ 300\ \text{mm}$ , T 形截面后张有黏结	2 级变幅, $\rho_{\max}=0.5\rightarrow 0.65$ , $\rho_{\max}=0.65\rightarrow 0.5$	普通钢筋疲劳断裂
文献[9]	截面尺寸 $200\ \text{mm}\times 450\ \text{mm}\times 3\ 000\ \text{mm}$ ( $5\ 000\ \text{mm}$ ), 后张有黏结	多级变幅加载	普通钢筋疲劳断裂
文献[10]	$L=3\ 000\ \text{mm}$ , T 形截面先张法梁	随机变幅加载	普通钢筋疲劳断裂
文献[11]	截面尺寸 $150\ \text{mm}\times 300\ \text{mm}\times 2\ 700\ \text{mm}$ , 先张法梁, 锈蚀钢绞线	等幅, $\rho_{\max}=0.6, 0.5$ ; $\rho_{\min}=0.1$	预应力筋腐蚀疲劳断裂
文献[12]	$L=5\ 000\ \text{mm}$ , T 形截面后张有黏结, 锈蚀钢绞线	等幅, $\rho_{\max}=0.4$ ; $\rho_{\min}=0.05$	预应力筋腐蚀疲劳断裂
文献[13]	$L=5\ 500\ \text{mm}$ , T 形截面后张有黏结, 锈蚀普通筋	等幅, $\rho_{\max}=0.35$ ; $\rho_{\min}=0.15$	普通筋腐蚀疲劳断裂

注:  $L$  为试件长度;  $\rho_{\max}=M_{\max}/M_u$ ,  $\rho_{\min}=M_{\min}/M_u$ ,  $M_{\max}$ ,  $M_{\min}$  分别为疲劳荷载最大值和最小值对应的弯矩,  $M_u$  为静力极限弯矩。

## 2 预应力混凝土梁等幅疲劳性能研究

近年来,国内外学者进行了大量部分预应力混凝土梁等幅疲劳试验,主要集中在对其疲劳荷载下正截面破坏形态、应力状态的分析 and 裂缝宽度、挠度变化规律及疲劳后静力性能的研究上。

### 2.1 正截面破坏形态及受力筋应力状态

实际工程中部分预应力混凝土梁可通过降低预应力筋张拉控制应力或混合配置预应力筋和非预应力筋来构造。Ozell 等<sup>[14]</sup>研究了仅配置预应力筋的先张法预应力构件的疲劳性能,结果表明,试验梁的疲劳破坏均为钢绞线的钢丝疲劳断裂,未出现黏结破坏。文献<sup>[15]</sup>对不同预应力度下仅配置预应力筋的部分预应力混凝土梁进行疲劳试验,发现试验梁的正截面疲劳破坏均由预应力筋的疲劳脆性断裂引起,混凝土未出现受压破坏;因预应力筋疲劳强度分散性较大,受力筋未同时断裂,在第1根预应力筋疲劳脆断后仍具有一定的承载力,疲劳破坏前具有一定预兆。关于混合配筋的部分预应力混凝土梁正截面疲劳破坏形态,已有研究得出较为统一的结论:普通受力筋的疲劳断裂控制着混合配筋的部分预应力混凝土梁的正截面疲劳破坏形态,试验梁的疲劳破坏始于非预应力筋疲劳断裂。混合配筋的部分预应力混凝土梁的疲劳试验<sup>[16]</sup>表明,预应力筋处于有利状态而普通钢筋则较早趋向不利状态,建议通过研究钢筋的应力幅-疲劳寿命来评估预应力混凝土梁的疲劳强度,并提出直径10 mm冷加工钢筋的修正 Goodman 曲线。Foo 等<sup>[17]</sup>通过对6根部分预应力混凝土梁进行弯曲疲劳试验,发现疲劳破坏模式有2种,即普通筋疲劳断裂和普通筋、预应力筋相继断裂,2种疲劳破坏均始于普通筋断裂,且受压区混凝土均未出现疲劳破坏。Russell 等<sup>[18]</sup>对去黏结钢绞线的先张法预应力混凝土梁进行疲劳试验,疲劳破坏出现弯曲破坏和黏结锚固破坏2种形式。罗小勇等<sup>[6,19]</sup>先后对无黏结和自密实预应力混凝土梁进行疲劳试验,试验梁的破坏均是由梁底受拉普通钢筋疲劳断裂引起,预应力筋和受压区混凝土应力幅较低,未出现疲劳破坏。张建玲等<sup>[5]</sup>对12根缓黏结部分预应力混凝土梁进行等幅疲劳试验,发现相对于同条件下灌浆浇筑的试验梁,通过缓黏结施工可提高疲劳寿命,但疲劳破坏仍始于非预应力筋的疲劳断裂,说明即使是对于不同施工工艺的试验梁,非预应力筋的疲劳仍是影响混合配筋的部分预应力混凝土梁疲劳寿命的主要因素。宋玉普等<sup>[20]</sup>为探究疲

劳荷载下混合配筋预应力混凝土梁内预应力筋与非预应力筋的破坏关系,对疲劳加载过程中2种钢筋的最大应力、应力幅变化规律进行研究,结果表明2种不同类型钢筋不同步破坏的主要原因是钢筋与混凝土之间黏结性能的退化和有效预应力的不断降低。

随着对预应力混凝土梁正截面破坏形态研究的深入,越来越多学者认识到预应力混凝土梁中截面受力筋应力状态对其疲劳寿命的重要性,认为疲劳荷载下受力筋应力的计算对构件疲劳寿命的预测十分重要,并针对截面受力筋的应力计算力学模型进行了一系列研究。

Engelbrecht 等<sup>[21]</sup>将疲劳荷载下部分预应力混凝土梁中3种不同非预应力筋的应力范围与修正的 Goodman 曲线进行比较,认为增大非预应力筋的面积可使疲劳应力范围减小,并指出配置低碳钢筋对疲劳抗力最为有利。Nilson<sup>[22]</sup>认为利用基于未开裂截面的名义应力法计算服役中的部分预应力混凝土梁偏于危险,建议设计中考虑截面开裂后的弯曲应力,并提出一种更为精确的截面开裂后受力筋及混凝土应力计算方法。Muller 等<sup>[23]</sup>对配有斜向预应力钢绞线的试验梁进行疲劳试验,结果表明,相对于配置直线型钢绞线的构件,相同张拉控制应力下,配置斜向钢绞线的构件疲劳寿命下降较多,且斜向钢绞线的容许疲劳应力幅远低于直线型钢绞线,钢绞线的钢丝间磨损对疲劳寿命影响较为严重。

沈在康等<sup>[15]</sup>对仅配置预应力钢筋的先张法部分预应力混凝土梁进行疲劳试验,结果表明预应力筋应力增大是由受拉区混凝土开裂退出工作和多次重复荷载作用产生的,受拉区混凝土开裂引起的预应力筋应力增大值与构件的预应力度直接相关。同时考虑疲劳荷载对受拉预应力筋应力的影响,基于不同假设提出2种正截面处受拉预应力钢筋最大应力计算方法,2种方法得出的计算应力与试验结果比值为0.9~1.1,吻合良好。吕海燕等<sup>[24]</sup>为研究铁路混凝土桥梁在列车荷载下正截面应力增长规律及计算方法,对24根不同预应力度试验梁进行静载及疲劳试验,同样考虑重复荷载对受力筋应力的增大效应,提出了以静力为基础乘以重复荷载作用增大系数的正截面应力计算模式。

混合配筋的部分预应力混凝土梁中普通受力筋一般位于预应力筋外侧,且由于钢绞线外表面较为光滑,普通带肋筋外表面肋较为粗糙,二者与混凝土间的黏结性能存在较大差异,导致疲劳加载过程中受力筋应力分布不均。冯秀峰等<sup>[25]</sup>研究了部分预

应力混凝土梁中受力筋在疲劳荷载下的应力重分布规律,2种受力筋的应力幅值  $\Delta\sigma_s, \Delta\sigma_p$  之比在疲劳荷载作用下基本符合三阶段的发展规律,以第2阶段为主,比值处在 0.6~0.7 之间,并在此基础上提出了考虑黏结性能差异的受力筋应力增量计算公式,即

$$\left. \begin{aligned} \Delta\sigma_s &= \frac{\Delta F_{s+p}}{A_s + A_p \sqrt{\xi_1}} = \eta_s \Delta\sigma_{s1} \\ \Delta\sigma_p &= \frac{\sqrt{\xi_1} \Delta F_{s+p}}{A_s + A_p \sqrt{\xi_1}} = \eta_p \Delta\sigma_{p1} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $A_s, A_p$  分别为普通钢筋和预应力钢筋的截面面积;  $\Delta F_{s+p}$  为截面消压后外荷载的增量;  $\eta_s$  为系数,  $\eta_s = (A_s + A_p) / (A_s + A_p \sqrt{\xi_1})$ ;  $\eta_p = \sqrt{\xi_1} (A_s + A_p) / (A_s + A_p \sqrt{\xi_1})$ ;  $\sqrt{\xi_1}$  为截面开裂后预应力钢筋和普通钢筋的应力比值,  $\sqrt{\xi_1} = \Delta\sigma_p / \Delta\sigma_s$ , 计算得出应力幅值比  $\Delta\sigma_p / \Delta\sigma_s$  为 0.649, 与试验结果较为接近;  $\Delta\sigma_{s1}, \Delta\sigma_{p1}$  分别为不考虑 2 种钢筋黏结性能差异时的钢筋应力增量。

Han 等<sup>[26]</sup>在上述基础上,基于监测结果,考虑受力筋应力重分配影响,引入应力重分配系数  $\xi$  对已有的开裂截面分析方法进行改进。

从国内外对部分预应力混凝土梁正截面破坏形态及截面应力状态的研究可以看到,部分预应力混凝土梁在疲劳加载过程中,一般混凝土应力幅值较小,不会发生疲劳破坏,对于仅配置预应力筋的部分预应力混凝土梁,疲劳破坏始于其中某一根预应力筋疲劳断裂;对于混合配筋的部分预应力混凝土梁,普通钢筋的应力幅增长快于预应力筋应力幅的增长,疲劳破坏多是由梁底受拉普通钢筋疲劳断裂引起。对疲劳加载过程中受力筋应力的计算多是通过引入重复荷载增大系数考虑疲劳加载的影响,并开展了考虑应力重分配影响的应力计算方法研究。

## 2.2 裂缝宽度及挠度变化

在疲劳加载过程中预应力混凝土梁的混凝土裂缝宽度不断增大,受拉区混凝土逐渐退出工作,梁的刚度退化,挠度逐渐增加。国内外学者对疲劳过程中预应力混凝土构件裂缝宽度、挠度的变化规律及计算方法进行了相关研究。

Zia 等<sup>[27]</sup>对预应力混凝土 T 梁进行静力及疲劳试验,结果表明:在疲劳荷载小于构件开裂荷载的情况下,构件表面无裂缝开展,不会出现疲劳破坏,即不裂不疲;相对于静载下沿梁跨度分布较为均匀的细小裂缝,疲劳荷载下构件裂缝的开展主要位于关

键截面处,裂缝数量较少。Li 等<sup>[28]</sup>发现预应力度、配筋率、应力幅值对部分预应力混凝土梁疲劳性能有较大影响,跨中挠度及受拉钢筋的应力随应力幅值及疲劳荷载循环次数的增大而增大;Harajli 等<sup>[29]</sup>认为预应力度对疲劳荷载作用下挠度、裂缝宽度变化影响较大,而配筋率则影响不明显;也有一些学者<sup>[7,30]</sup>认为裂缝宽度在疲劳作用下的增长随初始裂缝宽度及初始钢筋应力的减小而增大,预应力度、表面接触效应、混凝土徐变和加卸载历史等是影响裂缝闭合性能的主要因素。

Balaguru<sup>[31]</sup>通过对疲劳荷载下预应力混凝土梁的混凝土循环蠕变、钢筋循环蠕变及受拉区混凝土刚度退化的分析,基于黏结力和拉应力平衡提出估算裂缝宽度的公式。Harajli 等<sup>[4,32]</sup>在对预应力混凝土梁进行疲劳试验的基础上,总结出疲劳荷载下试验梁的变形及裂缝开展规律,认为挠度、裂缝宽度随循环加载次数的增加呈快速发展—稳定发展—快速发展三阶段变化,建议应基于开裂截面分析法对构件进行疲劳评估;考虑循环加载引起的钢筋应力变化、钢筋与混凝土间滑移增加、混凝土收缩徐变等因素的影响,提出了疲劳加载下裂缝宽度计算模型。Shahawi 等<sup>[3]</sup>对不同预应力度下预应力 T 梁进行等幅疲劳试验,结果表明,预应力度为 0.4 时对疲劳荷载下裂缝和挠度的发展最有利,在整个疲劳加载过程中,裂缝宽度和挠度的发展经历了先增加后稳定的阶段,最后因非预应力筋的疲劳断裂出现急剧增大趋势,提出最大裂缝宽度与非预应力筋应力间的关系式。冯秀峰<sup>[8]</sup>基于黏结滑移理论,推出疲劳荷载重复  $N$  次后的最大裂缝宽度计算公式。张建玲等<sup>[33]</sup>对缓黏结预应力混凝土梁裂缝宽度进行试验研究,发现等幅疲劳荷载下裂缝宽度发展随循环次数呈三阶段发展,并提出修正后最大裂缝宽度  $\omega_{\max}^X$  的计算公式,即

$$\omega_{\max}^X = \beta \omega_{\max}^L \quad (2)$$

式中:  $\omega_{\max}^L$  为试验中每级疲劳荷载下实测的最大裂缝宽度;  $\beta$  为最大裂缝宽度修正系数。

何广汉等<sup>[34]</sup>认为,相对于最大裂缝宽度,用特征裂缝宽度更能表征预应力混凝土构件在疲劳荷载下的裂缝开展情况,对有黏结和无黏结的预应力混凝土板梁进行疲劳试验,结果表明,随荷载重复次数增加,特征裂缝宽度呈无稳定增长趋势,增长速度主要取决于构件初始开裂程度和截面受拉区的总黏结效应。

可见,关于疲劳荷载下预应力混凝土梁裂缝宽

度的计算,目前还未得出较为一致的结论。同时,一些学者对疲劳荷载下预应力混凝土梁的挠度展开研究,提出不同挠度计算方法。戴公连等<sup>[35]</sup>给出了疲劳荷载下预应力混凝土梁及钢筋混凝土梁的挠度统一计算模式。吕海燕等<sup>[36]</sup>在规范给出的静载下挠度计算公式的基础上,考虑疲劳荷载下预应力混凝土梁刚度的降低,提出预应力混凝土梁疲劳荷载下挠度  $f$  的参考定量表达式,即

$$f = cL^2 M / B_p \quad (3)$$

式中: $c$  为荷载系数; $L$  为梁的跨度; $M$  为跨中弯矩; $B_p$  为刚度。

刘立新等<sup>[37]</sup>通过对预应力混凝土梁挠度的研究发现,随荷载循环次数增加,挠度逐渐增加,残余挠度初期和后期发展较快,中间阶段较为稳定。同时认为疲劳荷载下构件的总挠度是由残余挠度和荷载挠度两部分组成,并利用刚度折减法和初始挠度扩大系数法分别得到荷载-挠度计算公式,计算值均与实测值吻合良好。李进洲等<sup>[38]</sup>发现,疲劳荷载下预应力混凝土梁的荷载-跨中挠度曲线不断向挠度增大方向发展,呈疏一密一疏三阶段特征,并基于实测挠度提出动态割线刚度衰减模型。

通过总结国内外学者的研究可以看出,疲劳荷载下预应力混凝土梁的裂缝和挠度基本都是经历快速发展—稳定发展—快速发展三阶段,预应力度、非预应力筋配筋率及应力幅值均会影响预应力混凝土梁裂缝及挠度的变化,其中预应力的影响最为明显,提高预应力度对减小挠度、裂缝宽度效果显著,计算裂缝宽度和挠度时需考虑预应力度及重复荷载次数的影响。

### 2.3 疲劳后静力性能

在预应力混凝土结构使用周期内,疲劳问题的日益突出使得国内外学者开始关注疲劳后构件的剩余承载力。

Abeles 等<sup>[39-40]</sup>对预应力混凝土梁进行静力与疲劳试验,结果表明一定次数的重复荷载对静载极限承载力没有影响。余志武等<sup>[41]</sup>对 10 片 1:6 缩尺模型预应力梁进行疲劳后静力试验,结果表明:疲劳后剩余静承载力的衰减经历基本不变、直线下降、压弯失稳的 Z 字形三折线阶段。在容许疲劳状态下,一定次数的疲劳荷载对静力性能没有明显影响;在极限疲劳状态下,静力性能受疲劳荷载影响较大,试验梁承载力迅速下降直至破坏,最终剩余静承载力降至原有承载力的 50%~60%,其主要由预应力筋提供;受压区混凝土残余应变不断增加;疲劳

加载试验后,梁静载破坏的变形模量较普通静载破坏试验梁降低 20%~30%,普通钢筋和预应力筋残余应变也明显增加,但弹性模量和屈服强度基本不变。

Song 等<sup>[42]</sup>考虑疲劳荷载水平和疲劳损伤对预应力混凝土梁受力性能的影响,对 11 片高预应力度 T 形试验梁进行试验得出以下结论:荷载水平越高,挠度越大,疲劳寿命下降和非预应力筋应力幅值增加更明显;疲劳后的静力性能与疲劳的损伤程度有关,轻度损伤对静力性能基本无影响;中度损伤使屈服强度降低 13.3%,极限强度降低 15.2%,延性增加 18.6%~30.8%;重度损伤使屈服强度降低 37.3%,极限强度降低 18.0%,延性增加 9.2%~41.0%。

由以上研究成果可知,疲劳损伤与疲劳荷载水平以及疲劳循环次数有关。在容许疲劳荷载或疲劳循环次数下,预应力混凝土梁的静力性能基本维持不变。在超过容许疲劳荷载或疲劳循环次数后,预应力混凝土梁疲劳后的静力承载力随疲劳损伤程度增加而降低。

## 3 预应力混凝土梁变幅疲劳性能研究

预应力混凝土梁在实际服役期内长期经受复杂的荷载历程,等幅疲劳试验对构件实际荷载历程模拟的准确性不高,因此需要一种与实际情况更为吻合的试验方法。两级变幅及随机变幅疲劳试验是目前国内外学者研究预应力混凝土梁复杂荷载历程的主要手段。

Warner 等<sup>[43]</sup>基于疲劳寿命曲线和 Miner 准则估算预应力混凝土梁的疲劳寿命,通过对 6 根预应力混凝土梁进行等幅和变幅疲劳试验,得到重复加载下钢绞线疲劳寿命估算方程。Naaman 等<sup>[10]</sup>进行了 12 根预应力 T 形梁随机变幅疲劳试验,疲劳荷载谱的均值为  $0.575P_u$  ( $P_u$  为梁静载极限承载力),试验发现随机变幅疲劳下试验梁的破坏形态仍以普通钢筋疲劳断裂控制的弯曲破坏为主,但相对于疲劳荷载上限取为  $0.6P_u$  的等幅疲劳<sup>[11]</sup>,钢筋应力幅值变化及混凝土裂缝宽度变化均更加明显,疲劳寿命下降较多;变幅疲劳下荷载的加载次序对试验梁疲劳寿命影响较大,先施加较高幅值的荷载会使构件后续疲劳寿命减少。冯秀峰等<sup>[8,44]</sup>对部分预应力混凝土梁进行两级变幅及随机变幅疲劳试验,并假定随机变幅疲劳荷载谱上限值  $M_{\max}$  服从正态分布,结果表明两级变幅下混凝土的残余应变符合变形惟

一性假设,随机变幅疲劳试验得出的构件疲劳寿命远低于由疲劳荷载上限值取为荷载谱均值  $\mu$  的等幅疲劳试验得出的构件疲劳寿命,且高于由疲劳荷载上限值取为  $M_{\max} = \mu + 1.5\sigma$  ( $\sigma$  为应力)的等幅疲劳试验得到的构件疲劳寿命,并指出 Corten-Dolan 累积损伤准则对变幅疲劳寿命的估算精度最高。因此,对于实际服役中的预应力混凝土构件,如果采用疲劳荷载上限值为荷载谱均值的等幅疲劳试验结果去估算其疲劳寿命是非常危险的。

张建玲<sup>[45]</sup>对 6 根缓黏结部分预应力混凝土 T 形梁进行了高-低、低-高 2 级变幅疲劳试验,结果表明,第 2 级疲劳荷载作用下构件的后续疲劳寿命与第 1 级荷载循环比密切相关。存在一临界值,当第 1 级荷载循环比小于该临界值时,疲劳累积损伤和大于 1,梁的后续疲劳寿命提高;当第 1 级荷载循环比大于该临界值时,疲劳累积损伤和小于 1,梁的后续疲劳寿命降低。朱红兵<sup>[46]</sup>进行了预应力混凝土空心板梁和 T 形梁的 2 级变幅疲劳、随机疲劳试验,发现 2 级变幅疲劳试验中,第 2 级疲劳荷载幅对疲劳承载力退化程度影响较大;高-低 2 级变幅加载下构件的疲劳寿命要比低-高 2 级变幅加载下构件的疲劳寿命高。随机加载中每一级荷载幅都存在一定差异,其疲劳寿命与整个荷载谱相关,并基于 Corten-Dolan 累积损伤准则,考虑加载顺序和非线性因素影响,推导出变幅疲劳下等效等幅疲劳应力幅值计算公式,建立了等幅疲劳与变幅疲劳之间的联系。

雷俊卿等<sup>[9]</sup>对预应力混凝土梁进行了 2 级及多级变幅疲劳试验,发现预应力混凝土梁损伤发展经历了先快速发展后稳定的阶段,基于条带法考虑混凝土损伤对截面刚度的贡献,初步推导出刚度退化方程。预应力混凝土梁的刚度  $EI$  由混凝土、预应力钢筋、普通钢筋三部分组成,即

$$EI = E_{c,i}I_{c,i} + \sum E_{p,i}I_{p,i} + \sum E_{s,i}I_{s,i} \quad (4)$$

式中:  $E_{c,i}$ 、 $I_{c,i}$  分别为第  $i$  个条带截面混凝土的弹性模量和截面惯性矩;  $E_{p,i}$ 、 $I_{p,i}$  分别为第  $i$  个条带截面预应力钢筋的弹性模量和截面惯性矩;  $E_{s,i}$ 、 $I_{s,i}$  分别为第  $i$  个条带截面普通钢筋的弹性模量和截面惯性矩。

利用条带法计算混凝土疲劳损伤,每个条带在经历疲劳循环荷载后对整个截面刚度  $E_{c,i}I_{c,i}$  贡献的退化方程为

$$E_{c,i}I_{c,i} = E_c(1 - D_{c,i}) \left[ \frac{1}{12} B_i \Delta x^3 + \right.$$

$$\left. B_i \Delta x (H_0 - x_i)^2 \right] \quad (5)$$

式中:  $E_c$  为混凝土弹性模量;  $D_{c,i}$  为第  $i$  个条带混凝土损伤量;  $B_i$  为截面上第  $i$  个条带宽度;  $x_i$  为第  $i$  个条带距截面底面的距离;  $\Delta x$  为条带高度;  $H_0$  为截面中性轴距底面高度。

经历疲劳循环荷载后每根普通钢筋或预应力筋对截面刚度  $E_{s(p),i}I_{s(p),i}$  贡献的退化方程为

$$E_{s(p),i}I_{s(p),i} = nE_c \left[ \frac{(A_{s(p),i}^D)^2}{4\pi} + A_{s(p),i}^D (H_0 - a_i)^2 \right] \quad (6)$$

式中:  $A_{s(p),i}^D$  为第  $i$  个条带截面上普通钢筋或预应力筋截面有效剩余面积;  $a_i$  为第  $i$  根钢筋或预应力筋距截面底边的距离。

从国内外研究可以看出,预应力梁在变幅疲劳荷载下的疲劳累积损伤更为严重,疲劳寿命远低于由疲劳荷载上限值取为荷载谱均值的等幅疲劳试验得出的构件疲劳寿命,将疲劳荷载幅值假定为一个不变的等幅荷载不能准确预测实际服役构件的疲劳寿命;疲劳荷载谱中荷载的加载次序对预应力混凝土梁的疲劳损伤影响较大,高-低 2 级变幅加载下构件的疲劳寿命比低-高 2 级加载下构件的疲劳寿命低,利用 Corten-Dolan 累积损伤准则能较精确估算构件的变幅疲劳寿命。

## 4 腐蚀预应力混凝土结构的疲劳性能研究

### 4.1 腐蚀预应力钢绞线力学性能

钢绞线作为最广泛预应力钢筋,钢丝截面面积较小,且处于高应力状态,其孔道内的空隙、水分和氯离子均易导致其出现腐蚀损伤,使其静力及疲劳性能受到较大影响。

Nurnberger<sup>[47]</sup>的研究表明,锈蚀预应力钢绞线的失效机制主要是锈蚀、氢脆引起的脆性断裂、应力腐蚀开裂、腐蚀疲劳引起的断裂。Maes 等<sup>[48]</sup>认为受力筋应力腐蚀开裂需具备 3 个条件:材料脆性较为明显,存在较高拉应力,所处环境氧气较为充足。采用随机分析法和时程分析法对腐蚀预应力钢绞线进行分析,研究了预应力筋应力腐蚀开裂发展与构件疲劳可靠性之间的相互关系。文献[49]~[51]为研究氯盐环境下混凝土中钢绞线的断裂性能,对锈蚀的钢绞线进行静力拉伸和弯曲疲劳试验,发现锈蚀钢丝的表面呈典型蚀坑状态,弯曲疲劳断裂表现出各向异性,轻度锈蚀时,疲劳作用是锈蚀疲劳的主导因素,锈蚀主要加速裂纹形成;重度锈蚀时,锈蚀和疲劳同时控制钢丝断裂,锈蚀促使裂纹形成且加

速裂纹的发展。

韩基刚等<sup>[52]</sup>发现疲劳荷载作用下预应力混凝土梁中的锈蚀预应力筋应变呈现出发展、稳定、破坏三阶段特征,锈蚀钢绞线的锈蚀疲劳破坏速度随锈蚀率和疲劳荷载水平的提高而加快。余芳等<sup>[53]</sup>对锈蚀后的钢绞线试件进行轴向拉伸疲劳试验,结果表明,锈蚀严重影响钢绞线的疲劳寿命,相同荷载下疲劳寿命的衰减随锈蚀率增加呈指数关系变化,建立了以锈蚀率为参量的锈蚀钢绞线疲劳寿命曲线方程。

由此可见,腐蚀损伤对处在高应力状态下的钢绞线力学性能影响较大,锈蚀后的钢绞线疲劳寿命急剧下降,严重影响了预应力混凝土构件的使用寿命及使用安全性。

#### 4.2 腐蚀预应力混凝土梁疲劳性能

预应力混凝土梁的受力筋腐蚀后表面呈典型蚀坑状态,出现较大应力集中。腐蚀后的预应力混凝土梁同未腐蚀的预应力混凝土梁疲劳特性区别主要表现在以下3个方面:

(1)腐蚀后的预应力混凝土梁疲劳破坏没有明显征兆,呈现出脆性破坏特征,疲劳寿命随锈蚀率增大显著减少,呈指数规律衰减。

(2)疲劳荷载下钢绞线或普通钢筋腐蚀损伤的出现均会使预应力混凝土梁疲劳性能大幅降低,钢绞线的腐蚀使预应力混凝土梁的疲劳破坏形态发生了转变,在普通受力筋疲劳断裂前出现腐蚀疲劳断裂;普通钢筋的腐蚀改变了配筋合适的预应力混凝土梁配筋率,使其最终出现少筋梁的脆性破坏。

(3)与单一疲劳损伤不同,腐蚀损伤与疲劳损伤间相互促进和相互影响,存在着耦合作用,加剧构件的累积损伤,对结构抗力的发展极其不利。

国内外学者关于腐蚀预应力混凝土梁疲劳性能的研究目前主要是通过腐蚀后试验梁的等幅疲劳试验。文献<sup>[54]</sup>,<sup>[55]</sup>认为钢绞线腐蚀改变了试验梁的一般疲劳破坏形态,使试验梁受力薄弱区由普通钢筋转移到钢绞线;疲劳寿命随腐蚀率的增大而降低,并由试验结果初步得到不同腐蚀率下预应力混凝土梁及预应力钢绞线的疲劳寿命曲线,发现试验梁的疲劳寿命随锈蚀率增加呈指数规律衰减。李进洲<sup>[56]</sup>完成了预应力混凝土梁在腐蚀和非腐蚀2种环境下的疲劳破坏试验,发现非腐蚀环境下配筋合适的试验梁疲劳破坏前具有明显征兆,而腐蚀环境下预应力钢筋没有塑性变形发展历程,疲劳破坏征兆不明显;发现非预应力筋对限制试验梁裂缝宽度

有较大影响,适当提高非预应力筋配筋率有利于分散裂缝宽度,提高疲劳破坏时的延性。余芳等<sup>[12]</sup>对预应力钢绞线腐蚀率为0%,4.31%,7.89%的腐蚀后部分预应力混凝土梁进行抗弯疲劳试验,发现腐蚀梁的挠度、普通筋应变变化和裂缝发展均与无腐蚀梁变化规律相似;挠度变化受钢绞线腐蚀率影响较小,而非预应力筋应变及裂缝宽度随着腐蚀率的提高显著增加,且因腐蚀削弱钢绞线截面面积,相同荷载下锈蚀梁非预应力筋应变及裂缝宽度均较非锈蚀梁大。李富民等<sup>[57]</sup>为研究腐蚀预应力混凝土梁的弯曲疲劳性能退化特征,对4根钢绞线锈蚀的预应力混凝土梁进行了掺盐率为0%,5%,10%,15%的疲劳试验,结果表明:腐蚀的钢绞线表现出典型的蚀坑特征,在疲劳应力下多个部位出现疲劳裂纹的形核和扩展,疲劳断口呈宏观脆性断口特征;梁的疲劳寿命随掺盐率的增加呈指数关系退化,随氯盐作用和疲劳作用的增强,弯曲刚度退化愈加显著。

以上多是对锈蚀钢绞线预应力混凝土梁疲劳性能进行的研究,而对于混合配筋的预应力混凝土梁,普通受力筋位于钢绞线外侧,且无管道保护,更易受到环境腐蚀。Zhang等<sup>[11]</sup>对预应力筋或普通钢筋锈蚀的预应力混凝土梁进行等幅疲劳试验,发现锈蚀梁疲劳破坏时出现锈蚀预应力筋或锈蚀普通筋疲劳断裂;预应力度和荷载幅值越大,普通钢筋和预应力筋的应力幅值和应力水平越大,导致试验梁的刚度下降更快和疲劳寿命更短。余志武等<sup>[13]</sup>为研究普通钢筋锈蚀后预应力混凝土梁的疲劳性能,对9片锈蚀率在0%~16.89%间的1:6缩尺模型梁进行疲劳试验得出以下结论:梁底普通钢筋锈蚀后改变了混合配筋合适的预应力混凝土梁配筋率,疲劳破坏前梁的刚度呈直线式下降,出现少筋梁疲劳脆性破坏特征;锈蚀率超过7%后,容许疲劳寿命急剧减少,但静载承载力受普通钢筋锈蚀程度影响较小,锈蚀率超过20%后普通钢筋出现锈蚀断裂破坏,静载承载力才急剧降低。

## 5 结 语

(1)预应力混凝土梁在疲劳加载过程中受压区混凝土应力幅值较小,一般不会发生疲劳破坏;对于仅配置预应力筋的部分预应力混凝土梁,疲劳破坏始于预应力钢绞线疲劳断裂,而对于混合配筋的部分预应力混凝土梁,因疲劳加载过程中普通受力筋处于更加不利状态,故非预应力筋应力控制着试验梁的疲劳破坏形式,计算受力筋应力时应考虑疲劳



荷载增大及应力重分配的影响;疲劳后预应力混凝土梁的静力性能与其疲劳损伤程度有关,轻度损伤对其静力性能几乎无影响,重度损伤使其屈服强度和极限强度降低,延性增加。

(2)2 级变幅疲劳试验中,试验梁的后续疲劳寿命受加载顺序及第 1 级荷载循环比影响较大;随机变幅疲劳试验得出的构件疲劳寿命远低于由疲劳荷载上限值取为荷载谱均值的等幅疲劳试验得出的构件疲劳寿命,但高于由疲劳荷载上限值取为  $M_{\max} = \mu + 1.5\sigma$  的等幅疲劳试验得到的构件疲劳寿命。因此,对于实际服役中的预应力混凝土构件,如果采用疲劳荷载上限值为荷载谱均值的等幅疲劳试验结果去估算其疲劳寿命是非常危险的。

(3)腐蚀损伤对预应力混凝土梁静力性能影响较小,但对疲劳性能影响较大。对于钢绞线腐蚀的预应力混凝土梁,因钢绞线处于高应力状态,腐蚀对其造成的损伤远比普通筋严重,使其在疲劳破坏时先于普通筋出现腐蚀疲劳断裂;对于普通钢筋腐蚀的预应力混凝土梁,普通筋的锈蚀改变了配筋合适的预应力混凝土梁配筋率,使其最终出现少筋梁的脆性破坏。

(4)实际工程中预应力混凝土结构在服役期间所受荷载谱复杂,其疲劳荷载是大量重复的动态随机荷载,且疲劳常常是一个长期的疲劳破坏过程,中间一般夹杂着间歇期。目前的疲劳试验研究中采用等幅加载方式,简单假设疲劳荷载是一个幅值不变的等幅荷载并进行连续重复加载,其中疲劳荷载的上、下限值选取一般依据随机荷载谱的均值和构件自重。采用此种等幅疲劳加载方式得到的构件疲劳寿命与构件实际服役疲劳寿命相差较大,不能较好预测工程中结构的疲劳寿命。结构往往在承受疲劳荷载作用的同时也存在腐蚀损伤,而腐蚀预应力混凝土结构的疲劳性能研究多通过对腐蚀后的构件进行疲劳试验,未考虑疲劳损伤与腐蚀损伤的耦合作用。因此,应基于实际荷载谱,考虑疲劳加载间歇期的影响,开展疲劳损伤和腐蚀损伤耦合的预应力混凝土梁疲劳性能研究。此外,因疲劳试验成本较高,且离散性较大,采用有限元数值模拟方法对预应力混凝土结构的疲劳性能进行全过程分析和寿命预测也是今后深入研究的一个方向。

## 参考文献:

## References:

[1] 何广汉. 部分预应力混凝土梁的疲劳[J]. 西南交通大

学学报,1985,20(1):26-34.

HE Guang-han. Fatigue of Partially Prestressed Concrete Beam[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,1985,20(1):26-34.

[2] RAO C,FRANTZ G C. Fatigue Tests of 27-year-old Prestressed Concrete Bridge Box Beams[J]. PCI Journal,1996,41(5):74-83.

[3] SHAHAWI M E,BATCHELOR B D. Fatigue of Partially Prestressed Concrete[J]. Journal of Structural Engineering,1986,112(3):524-537.

[4] HARAJLI M H,NAAMAN A E. Deformation and Cracking of Partially Prestressed Concrete Beams Under Static and Cyclic Fatigue Loading[R]. Ann Arbor:University of Michigan,1984.

[5] 张建玲,宋玉普,曲秀华. 缓粘结部分预应力混凝土梁等幅疲劳性能试验研究[J]. 大连理工大学学报,2008,48(1):112-117.

ZHANG Jian-ling,SONG Yu-pu,QU Xiu-hua. Experimental Research on Constant-amplitude Fatigue Behavior of Retard-bonded Partially Prestressed Concrete Beams[J]. Journal of Dalian University of Technology,2008,48(1):112-117.

[6] 罗小勇,余志武,聂建国,等. 自密实预应力混凝土梁的疲劳性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2003,24(3):76-81.

LUO Xiao-yong,YU Zhi-wu,NIE Jian-guo,et al. Experimental Study on Fatigue Properties of Self-compacting Prestressed Concrete Beams[J]. Journal of Building Structures,2003,24(3):76-81.

[7] 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.

ZHONG Ming-quan. Influence of Fatigue Loading on the Stress of Non-prestressed Reinforcement, Crack Width and Static Strength in PPC Beams[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,1995,30(3):283-290.

[8] 冯秀峰. 混合配筋部分预应力混凝土梁疲劳性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2005.

FENG Xiu-feng. Study on Fatigue Behavior of P. P. C Beams with Mixed Reinforcement[D]. Dalian:Dalian University of Technology,2005.

[9] 雷俊卿,肖 赓,张 坤,等. 预应力混凝土梁变幅疲劳性能试验研究[J]. 振动与冲击,2013,32(18):95-100.

LEI Jun-qing,XIAO Yun,ZHANG Kun,et al. Test for Fatigue Performance of a Prestressed Concrete Beam Under Variable Amplitude Fatigue Loading[J].



- Journal of Vibration and Shock, 2013, 32 (18): 95-100.
- [10] NAAMAN A E, FOUNAS M. Partially Prestressed Beams Under Random-amplitude Fatigue Loading[J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 117 (12): 3742-3761.
- [11] ZHANG W, LIU X, GU X. Fatigue Behavior of Corroded Prestressed Concrete Beams[J]. Construction and Building Materials, 2016, 106: 198-208.
- [12] 余 芳, 贾金青, 宋玉普. 钢绞线腐蚀后的部分预应力混凝土梁抗弯疲劳性能试验研究[J]. 建筑结构, 2012, 42(1): 97-100.
- YU Fang, JIA Jin-qing, SONG Yu-pu. Experimental Research on Fatigue Behavior of Prestressed Concrete Beams with Corroded Steel Strands [J]. Building Structure, 2012, 42(1): 97-100.
- [13] 余志武, 李进洲, 宋 力. 普通钢筋锈蚀后预应力混凝土桥梁疲劳试验研究[J]. 公路交通科技, 2014, 31 (4): 64-72, 93.
- YU Zhi-wu, LI Jin-zhou, SONG Li. Experimental Study on Fatigue Behaviors of PC Bridge Beams with Corroded Steel Bars [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31 (4): 64-72, 93.
- [14] OZELL A M, ARDAMAN E. Fatigue Tests of Pre-tensioned Prestressed Beams[J]. ACI Structural Journal, 1956, 53(10): 413-424.
- [15] 沈在康, 孙慧中, 马坤贞, 等. 部分预应力混凝土梁正截面疲劳性能及计算方法[J]. 建筑结构学报, 1981, 2 (5): 1-13.
- SHEN Zai-kang, SUN Hui-zhong, MA Kun-zhen, et al. Fatigue Behaviour of the Normal Section of Partially Prestressed Concrete Beams and Its Calculating Method[J]. Journal of Building Structures, 1981, 2 (5): 1-13.
- [16] BENNETT E W, JOYNES H W. Fatigue Strength of Cold-worked Non-prestressed Reinforcement in Prestressed Concrete Beams[J]. Magazine of Concrete Research, 1979, 31(106): 13-18.
- [17] FOO M H, WARNER R F. Fatigue Tests on Partially Prestressed Concrete Beams[R]. Adelaide: University of Adelaide, 1984.
- [18] RUSSELL B W, BURNS N H. Fatigue Tests on Prestressed Concrete Beams Made with Debonded Strands [J]. PCI Journal, 1994, 39(6): 70-88.
- [19] 罗小勇, 陈跃科, 邓鹏麒. 无粘结部分预应力混凝土梁的疲劳性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28 (3): 98-104.
- LUO Xiao-yong, CHEN Yue-ke, DENG Peng-qi. Experimental Study on Fatigue Properties of Unbounded Partially Prestressed Concrete (UPC) Beams [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(3): 98-104.
- [20] 宋玉普, 韩基刚. 疲劳荷载作用下梁内不同类型钢筋破坏关系[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(8): 96-100.
- SONG Yu-pu, HAN Ji-gang. The Failure Relationship Between Different Types of Steel in Beams Under Fatigue Loading[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(8): 96-100.
- [21] ENGELBRECHT A M, SMITH C, NEETHLING I, et al. Fatigue Resistance of Reinforcement in Partially Prestressed Beams[J]. PCI Journal, 1977, 22(2): 78-88.
- [22] NILSON A H. Flexural Stresses After Cracking in Partially Prestressed Beams[J]. PCI Journal, 1976, 21 (4): 72-61.
- [23] MULLER J F, DUX P F. Fatigue of Prestressed Concrete Beams with Inclined Strands [J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(4): 1122-1139.
- [24] 吕海燕, 戴公连. 铁路混凝土桥梁在疲劳荷载作用下正截面应力试验研究[J]. 长沙铁道学院学报, 1996, 14(3): 17-23.
- LU Hai-yan, DAI Gong-lian. Test Research of Normal Stress of Railway Concrete Bridge in Fatigue Load [J]. Journal of Changsha Railway University, 1996, 14 (3): 17-23.
- [25] 冯秀峰, 宋玉普, 章坚洋, 等. 疲劳荷载下预应力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.
- FENG Xiu-feng, SONG Yu-pu, ZHANG Jian-yang, et al. Experimental Study on Stress Redistribution of Reinforcing Steel in Prestressed Concrete Beams Under Fatigue Loading[J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(2): 94-99.
- [26] HAN J, SONG Y, WANG L, et al. Steel Stress Redistribution and Fatigue Life Estimation of Partially Prestressed Concrete Beams Under Fatigue Loading[J]. Advances in Structural Engineering, 2014, 17(2): 179-196.
- [27] ZIA P, MIRZA J F, RIZKALLA S H. Static and Fatigue Tests of Composite T-beams Containing Prestressed Concrete Tension Elements[J]. PCI Journal, 1976, 21(6): 76-93.
- [28] LI K, WANG X L, CAO S Y. Fatigue Performance of Partially Prestressed RC Beams with HRBF500 Bars [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 174-177:

- 1463-1470.
- [29] HARAJLI M H, NAAMAN A E. Static and Fatigue Tests on Partially Prestressed Beams[J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(7): 1602-1618.
- [30] 蓝宗建, 庞同和, 刘 航, 等. 部分预应力混凝土梁裂缝闭合性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1998, 19(1): 33-40  
LAN Zong-jian, PANG Tong-he, LIU Hang, et al. Experimental Research on Crack Closing of Partially Prestressed Concrete Beams[J]. Journal of Building Structures, 1998, 19(1): 33-40.
- [31] BALAGURU P N. Analysis of Prestressed Concrete Beams for Fatigue Loading[J]. PCI Journal, 1981, 16(5): 22-52.
- [32] HARAJLI M H, NAAMAN A E. Cracking in Partially Prestressed Beams Under Static and Fatigue Loading[J]. Special Publication, 1989, 113: 29-56.
- [33] 张建玲, 宋玉普. 缓粘结混合配筋预应力混凝土梁裂缝宽度的试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(2): 54-59.  
ZHANG Jian-ling, SONG Yu-pu. Experimental Research on Crack Width of Retard-bonded Partially Prestressed Concrete Beams with Mixed Reinforcement[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(2): 54-59.
- [34] 何广汉, 周述华. 重复荷载作用下部分预应力混凝土梁的裂缝开展[J]. 桥梁建设, 1989, 19(3): 32-38.  
HE Guang-han, ZHOU Shu-hua. Crack Width Development of Partially Prestressed Concrete Beams Under Repeated Load[J]. Bridge Construction, 1989, 19(3): 32-38.
- [35] 戴公连, 徐名枢. 预应力、部分预应力、钢筋混凝土梁在疲劳荷载作用下挠度试验研究[J]. 长沙铁道学院学报, 1991, 9(3): 90-100.  
DAI Gong-lian, XU Ming-shu. The Experimental Research of Deflection in Prestressed, Partially Prestressed and Reinforced Concrete Beams Under Cyclic Fatigue Loading [J]. Journal of Changsha Railway University, 1991, 9(3): 90-100.
- [36] 吕海燕, 戴公连, 李德建. 预应力混凝土梁在疲劳荷载作用下的变形[J]. 长沙铁道学院学报, 1998, 16(1): 24-28.  
LU Hai-yan, DAI Gong-lian, LI De-jian. Deflection of Prestressed Concrete Beam Under Fatigue Load[J]. Journal of Changsha Railway University, 1998, 16(1): 24-28.
- [37] 刘立新, 汪小林, 于秋波, 等. 疲劳荷载作用下部分预应力混凝土梁的挠度研究[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2007, 28(4): 4-7.  
LIU Li-xin, WANG Xiao-lin, YU Qiu-bo, et al. Study on Deflection of Partially Prestressed Concrete Beams Under Fatigue Loading [J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2007, 28(4): 4-7.
- [38] 李进洲, 余志武, 宋 力. 疲劳重复荷载下预应力混凝土梁的刚度退化规律[J]. 公路交通科技, 2013, 30(8): 62-69.  
LI Jin-zhou, YU Zhi-wu, SONG Li. Stiffness Degradation Regularity of PC Beam Under Fatigue Repeated Loading[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(8): 62-69.
- [39] ABELES P W. Static and Fatigue Tests on Partially Prestressed Concrete Constructions[J]. ACI Structural Journal, 1954, 5(12): 361-376.
- [40] BENNETT E W, CHANDRASEKHAR C S. Supplementary Tensile Reinforcement in Prestressed Concrete Beams[J]. Concrete, 1972, 6(10): 35-39.
- [41] 余志武, 李进洲, 宋 力. 疲劳荷载后重载铁路桥梁剩余静载承载力试验研究[J]. 铁道学报, 2014, 36(4): 76-85.  
YU Zhi-wu, LI Jin-zhou, SONG Li. Experimental Study on Post-cyclic-loading Residual Static Bearing Capacity of Heavy-haul Railway Bridges[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(4): 76-85.
- [42] SONG L, HOU J, YU Z W. Fatigue and Post-fatigue Monotonic Behaviour of Partially Prestressed Concrete Beams [J]. Magazine of Concrete Research, 2015, 68(3): 1-9.
- [43] WARNER R F, HULSBOS C L. Probable Fatigue Life of Prestressed Concrete Beams[J]. PCI Journal, 1966, 11(2): 16-39.
- [44] 冯秀峰, 宋玉普, 朱美春. 随机变幅疲劳荷载下预应力混凝土梁疲劳寿命的试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(9): 32-38.  
FENG Xiu-feng, SONG Yu-pu, ZHU Mei-chun. An Experimental Study on the Fatigue Life of Prestressed Concrete Beams Under Random-amplitude Fatigue Loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(9): 32-38.
- [45] 张建玲. 缓粘结部分预应力混凝土梁疲劳性能试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.  
ZHANG Jian-ling. Experimental Study on Fatigue Behavior of Retard-bonded Partially Prestressed Concrete Beams [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [46] 朱红兵. 公路钢筋混凝土简支梁桥疲劳试验与剩余寿命预测方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.

- ZHU Hong-bing. Method and Experiment Research on Highway Reinforced Concrete Simply-supported Girder Bridge's Fatigue Residual Service Life Forecast [D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [47] NURNBERGER U. Corrosion Induced Failure Mechanisms of Prestressing Steel[J]. Materials and Corrosion, 2002, 53(8): 591-601.
- [48] MAES M A, WEI X, DILGER W H. Fatigue Reliability of Deteriorating Prestressed Concrete Bridges Due to Stress Corrosion Cracking[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2001, 28(4): 673-683.
- [49] 李富民, 袁迎曙, 张建清. 氯盐腐蚀钢绞线的断裂抗力分布模型[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(6): 34-39.
- LI Fu-min, YUAN Ying-shu, ZHANG Jian-qing. Distribution Models of the Fracture Resistance of Steel Strands Corroded by Chloride[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(6): 34-39.
- [50] LI F M, YUAN Y S, LI C Q. Corrosion Propagation of Prestressing Steel Strands in Concrete Subject to Chloride Attack[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(10): 3878-3885.
- [51] 李富民, 袁迎曙, 杜健民, 等. 氯盐腐蚀钢绞线的受拉性能退化特征[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(2): 340-344.
- LI Fu-min, YUAN Ying-shu, DU Jian-min, et al. Deterioration of Tensile Behavior of Steel Strands Corroded by Chloride[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2009, 39(2): 340-344.
- [52] 韩基刚, 宋玉普, 宋世德, 等. 梁内受腐蚀预应力钢绞线应力状态研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(21): 69-73.
- HAN Ji-gang, SONG Yu-pu, SONG Shi-de, et al. Study on Stress State of Corroded Prestressed Steel Strands in Beams [J]. Building Structure, 2013, 43(21): 69-73.
- [53] 余 芳, 贾金青, 姚大立, 等. 腐蚀预应力钢绞线的疲劳试验分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(12): 1487-1491, 1502.
- YU Fang, JIA Jin-qing, YAO Da-li, et al. Experimental Analysis of Fatigue Properties of Corroded Prestressing Strands [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(12): 1487-1491, 1502.
- [54] 刁进东. 腐蚀预应力混凝土结构力学性能的试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- DIAO Jin-dong. Test Study on Mechanical Properties of Corrosion Prestressed Concrete Structure [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [55] 毛 伟. 腐蚀预应力混凝土梁静动力性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- MAO Wei. Study on Static and Dynamic Properties of Corrosive Prestressed Concrete Beams [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [56] 李进洲. 两种不同环境下预应力混凝土梁疲劳破坏试验对比分析[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(9): 76-82.
- LI Jin-zhou. Comparative Test Analysis of Fatigue Failure of Prestressed Concrete (PC) Beam in Two Different Environments [J]. Railway Standard Design, 2015, 59(9): 76-82.
- [57] 李富民, 杨 俊, 施小飞. 腐蚀钢绞线预应力混凝土梁的弯曲疲劳性能退化特征[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(1): 22-29.
- LI Fu-min, YANG Jun, SHI Xiao-fei. Degradation Characteristics of Flexural Fatigue Property of Prestressed Concrete Beam with Corroded Steel Strand [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(1): 22-29.