

# 疲劳加载后预应力混凝土梁受力性能试验研究

汪小林<sup>1</sup>, 刘立新<sup>2</sup>, 于秋波<sup>3</sup>

(1 同济大学 建筑工程系, 上海 200092 2 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450002

3 郑州大学 综合设计研究院, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 通过对 2 根经 250 万次疲劳加载而未破坏的预应力混凝土梁进行静载受弯试验, 研究疲劳加载对其剩余静载承载力、钢筋应力、刚度及裂缝等影响。试验结果表明, 前期的疲劳加载对试验梁受力性能影响较小, 各试验梁均发生正截面受弯破坏, 破坏时有明显的延性破坏特征, 并且其承载力与现行规范计算值相比有一定的安全储备。为评估既有预应力混凝土桥梁的受力性能及寿命提供一定的参考。

**关键词:** 疲劳荷载; 预应力混凝土梁; 受力性能; 静载

中图分类号: TU 375.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-855X(2010)01-0052-04

## Experimental Study on Performance of Prestressed Concrete Beams after Fatigue Loading

WANG Xiao-lin<sup>1</sup>, LIU Li-xin<sup>2</sup>, YU Qiu-bo<sup>3</sup>

(1. Department of Architecture, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China

3. Multi-functional Design and Research Academy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract** By the static flexural experiment on the two prestressed concrete beams, which have not fractured under 2.5 million times of fatigue loading, the effects of fatigue loading on the residual static bearing capacity, reinforcement stress, rigidity and crack width are studied. The experimental results show that the early fatigue loading has little effect on the testing beams, which fits in with the flexural failure model with significantly ductility, and the test bearing capacities have certain safety stock compared with the calculated results according to the current code. The experimental results also provide some references for the performance and fatigue residual life estimation of the existing prestressed concrete bridges.

**Key words** fatigue loading; prestressed concrete beam; mechanical behavior; static load

### 0 引言

预应力混凝土构件由于其优越性而被广泛应用到桥梁、吊车梁等长期承受重复荷载作用的结构物中。疲劳破坏是其主要失效模式之一。以往对预应力混凝土构件疲劳研究主要集中于其疲劳寿命和疲劳性能的研究, 而对疲劳加载后构件剩余承载力及受力性能研究甚少。Naaman 等研究表明, 未发生疲劳破坏的梁的剩余静载承载力并不受疲劳荷载加载历程的影响<sup>[1,2]</sup>; 而钟明全等研究表明, 经历疲劳加载后的剩余静载承载力不但没有衰减反而略有提高<sup>[3,4]</sup>。

为深入了解疲劳加载后预应力混凝土构件剩余承载力及受力性能, 为实际工程中预应力混凝土构件

收稿日期: 2009-06-09 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(项目编号: 50578148); 河南省交通厅计划资助项目(项目编号: 2005P338)。

第一作者简介: 汪小林(1981-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向: 混凝土结构基本理论及应用. E-mail: wxlin1262005@126.com

的疲劳损伤评估与加固维修等提供参考, 作者对 2 根经 250 万次疲劳加载而未破坏的预应力混凝土梁进行静载受弯试验, 重点考察疲劳加载对其剩余静载承载力、刚度及裂缝等的影响.

### 1 试验概况

试验梁的截面尺寸均为  $b \times h = 200\text{mm} \times 400\text{mm}$ , 梁长 7 500mm, 计算跨度 7 200mm. 其中先张法预应力混凝土梁 XPB-6 的预应力筋采用折线形钢绞线, 后张法预应力混凝土梁 HPB-4 的预应力筋采用抛物线形钢绞线. 试验梁的钢绞线均采用 2 束  $1 \times 7\Phi J15.2$  钢绞线, 抗拉强度标准值  $f_{pk} = 1\,860\text{ N/mm}^2$ , 非预应力钢筋均采用 HRB500 级钢筋, 抗拉强度标准值  $f_yk = 500\text{ N/mm}^2$ . 混凝土均按 C60 配合比配置, 水泥:水:砂:石:粉煤灰:减水剂 = 470:700:1 020:145:95:10, 单位均为  $\text{kg/m}^3$ . 试验梁参数见表 1.

表 1 试验梁参数

Tab 1 The parameters of tested beams

| 试件编号  | $f_{cu}/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$ | $f_c/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$ | $A_p/\text{mm}^2$ | $f_{py}/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$ | $A_s/\text{mm}^2$ | $f_y/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$ |
|-------|--|---------------------------------------|-------------------|--|-------------------|---------------------------------------|
| XPB-6 | 82.4                                     | 51.7                                  | 278               | 1320                                     | 402               | 507.4                                 |
| HPB-4 | 78.6                                     | 49.3                                  | 278               | 1320                                     | 603               | 507.4                                 |

在前期的等幅疲劳试验中, 2 根试验梁均经 250 万次疲劳加载而未发生疲劳破坏 (疲劳下限弯矩  $M_{\min} = 0.2M_d$ , 上限弯矩  $M_{\max} = 0.6M_d$ ,  $M_d$  为按桥梁规范<sup>[5]</sup>计算的弯矩值), 随后进行静载受弯破坏实验, 试验采用跨中单点加载 (如图 1), 量测各级荷载下试验梁的挠度、裂缝宽度及钢筋、混凝土应变.

### 2 试验结果与分析

平截面假定是静载作用下受弯构件正截面受力分析的基础, 已被国内外大量的试验所验证. 试验梁 XPB-6 及 HPB-4 在前期疲劳试验中已开裂, 产生不同程度的损伤. 图 2 为试验梁在不同高度处的混凝土应变. 可以看出, 疲劳加载后的梁静载作用下平截面假定仍然适用.

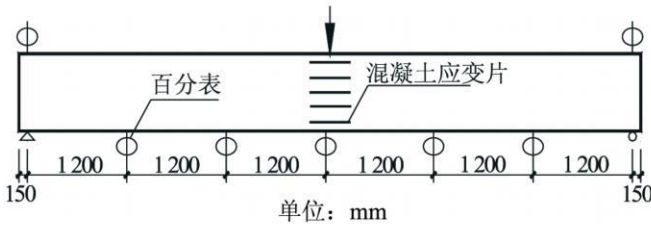


图1 试件尺寸及加载示意图  
Fig.1 Dimension and test setup of specimen

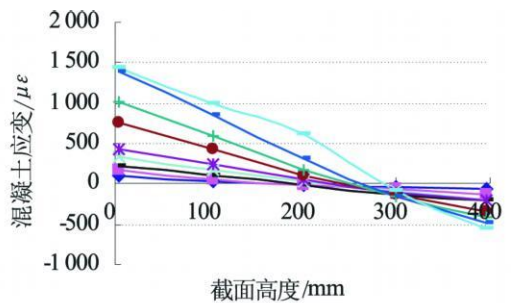


图2 试验梁XPB-6沿截面高度混凝土应变图  
Fig.2 Strain diagram in the section of specimen

表 2 为试验梁的静力承载力试验结果, 表中同时列出同批次制作的 4 根折线先张预应力混凝土梁的静载试验结果<sup>[6]</sup>与西南交通大学等单位的试验梁结果<sup>[3, 7]</sup>. 表中  $M_u$  为根据材料实测强度按现行规范公式计算的极限弯矩值,  $M_u^0$  为试验弯矩值.

从中可以得出以下结论:

- 1) 经 250 万次疲劳加载的试验梁在随后的静载试验中没有发生受力钢筋的脆性断裂, 而表现出良好的延性破坏特征. 这与其他单位研究结果相符<sup>[3, 7-8]</sup>.
- 2) 对比同批次的试验梁<sup>[6]</sup>可以看出, 经疲劳 250 万次后的试验梁其静力强度与未经疲劳荷载作用的试验梁的静载承载力相当或有所提高, 其实测静力承载力相对于现行规范计算仍有一定的富余量, 因此可以不考虑疲劳荷载对梁的极限荷载的影响. 这也验证了其他单位研究结果.
- 3) 疲劳加载后的试验梁的剩余承载力没有下降, 这与疲劳过程中钢筋得到硬化有一定的关系. 研究表明<sup>[8]</sup>, 在疲劳应力的作用下钢筋存在不同程度的硬化, 其屈服强度相应提高. 随着应力幅的增大, 屈服平台将逐渐退化, 甚至没有明显屈服平台.

表 2 疲劳加载对预应力混凝土梁剩余承载力的影响

Tab 2 Effect of fatigue load on residual static bearing capacity of prestressed concrete beams

| 研究单位                  | 梁号    | $\sigma_{max}$ / MPa | $\sigma_{max} / f_c$ | $M_{max}^f / (kN \cdot m^{-1})$ | $M_{min}^f / (kN \cdot m^{-1})$ | $N (\times 10^4)$ | $M_u / (kN \cdot m^{-1})$ | $M_u^p / (kN \cdot m^{-1})$ | $M_u^p / M_u$ |
|-----------------------|-------|----------------------|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------|
| 郑州大学 <sup>[6]</sup>   | XPB-6 | 9.82                 | 0.19                 | 71.29                           | 27.54                           | 250               | 180.0                     | 256.6                       | 1.42          |
|                       | HPB-4 | 7.40                 | 0.15                 | 80.06                           | 29.76                           | 250               | 195.9                     | 269.9                       | 1.38          |
|                       | XPB-1 |                      |                      |                                 |                                 |                   | 192.8                     | 249.4                       | 1.29          |
|                       | XPB-2 |                      |                      |                                 |                                 |                   | 181.2                     | 225.4                       | 1.24          |
|                       | XPB-3 |                      |                      |                                 |                                 |                   | 241.9                     | 296.2                       | 1.23          |
|                       | XPB-4 |                      |                      |                                 |                                 |                   | 192.7                     | 255.4                       | 1.33          |
| 西南交通大学 <sup>[3]</sup> | FA-1  | 11.4                 | 0.26                 | 108                             | 24                              | 100               | 233.9                     | 279                         | 1.19          |
|                       | FA-3  | 8.7                  | 0.25                 | 63                              | 12                              | 200               |                           |                             |               |
|                       |       | 10.1                 | 0.29                 | 72                              | 12                              | 100               | 132                       | 189                         | 1.43          |
|                       | FB-3  | 13.5                 | 0.38                 | 102                             | 24                              | 174               | 191.5                     | 198                         | 1.03          |
|                       | SA-2  |                      |                      |                                 |                                 |                   | 161.5                     | 207                         | 1.28          |
|                       | SB-2  |                      |                      |                                 |                                 |                   | 193.5                     | 248.4                       | 1.28          |
|                       | SC-2  |                      |                      |                                 |                                 |                   | 200.7                     | 252                         | 1.26          |
| SC-3                  |       |                      |                      |                                 |                                 | 203.6             | 240                       | 1.18                        |               |
| 大连理工大学 <sup>[7]</sup> | F12   | 7.47                 | 0.14                 | 62.535                          | 10.635                          | 200               | 174.99                    | 172.5                       | 0.986         |

图 3 为试验梁的跨中弯矩 - 钢筋应变曲线。从表 2 可以看出, 在加载初期, 普通钢筋曲线几乎呈现线性关系; 在 30% 极限弯矩时, 试验梁 HPB-4 曲线中出现明显转折点, 随后普通钢筋还是表现出明显的屈服现象, 但是屈服时应变接近  $3800 \mu\epsilon$  远大于普通钢筋材性试验时屈服的应变 (约  $2380 \mu\epsilon$ )。原因是, 在疲劳荷载作用下, 钢筋损伤累积造成其弹性模量降低、钢筋周期应变软化及屈服强度的增大。

图 4 为试验梁中弯矩 - 钢绞线应变关系曲线, 在接近极限弯矩时钢绞线的应变仍有较大的增长, 未发生断裂情况, 仍能保持良好的工作性能。

在疲劳荷载作用下, 试验梁中的普通钢筋、预应力钢绞线与混凝土的粘结受到一定程度的破坏, 但是综合图 3、4 可以看出, 在静载作用下, 钢筋与混凝土之间的粘结力仍然存在, 没有破坏殆尽, 并且在普通钢筋屈服之前, 试验梁未表现出混凝土和钢筋不协调工作的现象。

图 5 表示荷载循环 250 万次后进行静载试验时, 试验梁跨中的最大裂缝宽度随弯矩增大而变化的情况, 可以看出在疲劳试验卸载后 (弯矩为 0 时) 梁的裂缝基本闭合, 裂缝宽度很小 (0.01 mm 左右); 当弯矩增大到极限弯矩的 60% 左右时, 裂缝宽度仅为 0.2 mm, 表明试验梁仍保持较好抗裂性; 临近破坏时裂缝宽度接近 0.5 mm, 有较明显的破坏预兆。

图 6 为试验梁的弯矩 - 跨中挠度关系曲线。从中可以看出, 静载加荷前预应力梁仍有一定反拱 (5~6 mm), 说明疲劳试验后梁中仍保持一定的预压应力; 在达到极限荷载前梁跨中挠度小于 50 mm (约为计算跨度的  $l/150$ ), 说明疲劳试验后梁的刚度仍然较好; 临近破坏时, 梁跨中挠度为 150 mm (约为计算跨度的  $l/50$ ), 达到了延性破坏的标准, 说明虽然在疲劳荷载作用下钢筋有一定程度的硬化, 但是采用 HRB500 级钢筋作为非预应力筋的预应力混凝土梁疲劳试验后在静力荷载作用下仍具有较好的延性。

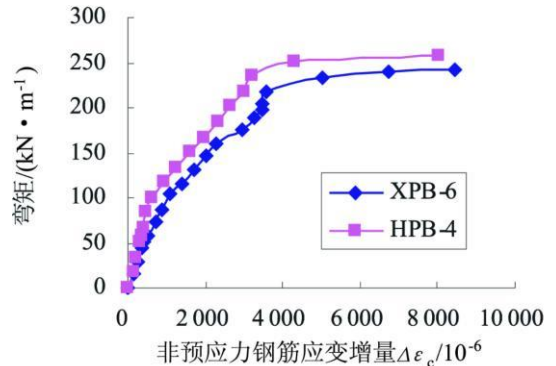


图3 试验梁非预应力钢筋跨中弯矩-应变曲线  
Fig.3 Moment-strain curves of ordinary steel bar in test beams

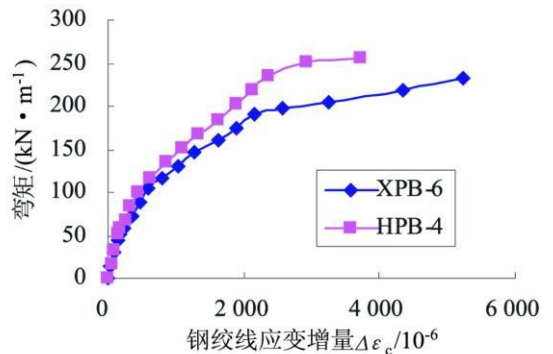


图4 试验梁中弯矩-钢绞线应变关系曲线  
Fig.4 Moment-strain curves of prestressed tendon in test beams

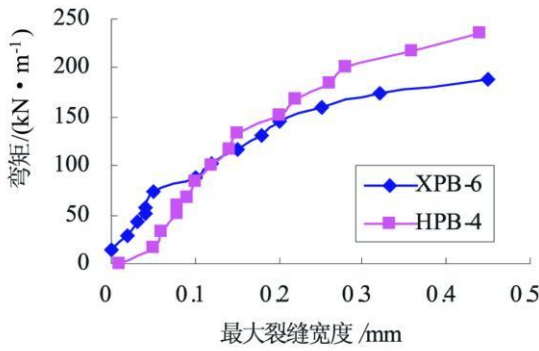


图5 试验梁跨中弯矩-最大裂缝宽度关系曲线

Fig. 5 Moment-maximal crack width curves of test beams

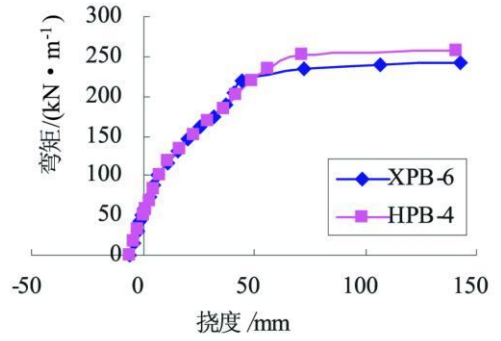


图6 试验梁弯矩-挠度关系曲线图

Fig. 6 Moment-displacement curves of test beams

图 7 为梁顶受压区边缘混凝土压应变  $\Delta\epsilon_c$  与跨中弯矩  $M$  关系曲线。可见  $M - \Delta\epsilon_c$  关系曲线可以分为 3 个阶段: 在加载期间的前大部分阶段, 跨中截面两者基本上呈线性关系; 接近 60% 极限荷载弯矩时, 曲线出现转折点, 混凝土开始出现非线性特征; 接近破坏时, 混凝土表现出明显的非线性特征。可见虽然在疲劳荷载作用下, 梁受压区内部产生疲劳损伤, 受压区上边缘的混凝土已经产生了塑性变形 (即存在残余应变), 但是其在静载破坏过程中, 混凝土仍然表现出线性与非线性特征, 并且破坏时应变达到  $2165 \sim 2344 \mu\epsilon$  这与静荷载作用下的极限应变相近。该结论与文献 [9] 比较一致。

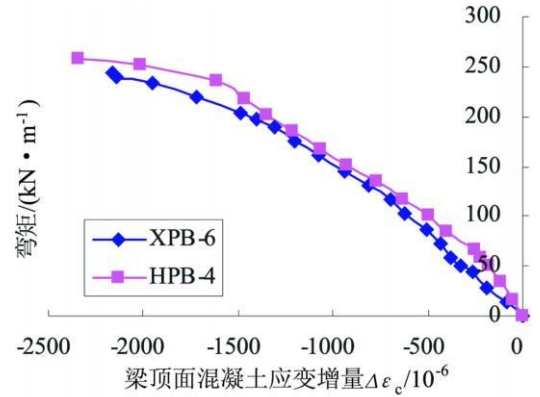


图7 试验梁M- $\Delta\epsilon_c$ 关系曲线

Fig. 7  $M-\Delta\epsilon_c$  curves of test beams

### 3 结论

- 1) 经疲劳荷载作用的部分预应力混凝土梁在静载作用下直至破坏, 截面应变仍近似线性分布, 平截面假定仍然适用。
- 2) 经疲劳荷载作用而未破坏的预应力混凝土梁在静载作用下其钢筋没有发生脆性断裂, 破坏形式为弯曲破坏, 表现为受拉钢筋屈服后, 受压区混凝土被压碎。同时其静载剩余承载力没有下降, 原因是疲劳荷载下钢筋屈服强度有所提高。
- 3) 前期的疲劳加载对预应力混凝土梁静载下的裂缝及变形有一定影响, 但是试验梁受力性能良好, 仍表现出明显的破坏征兆。

### 参考文献:

[1] 冯秀峰. 混合配筋预应力混凝土梁疲劳性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学土木水利学院, 2005.

[2] Naaman A E, Founas M. Partially Prestressed Beams under Random - Amplitude Fatigue Loading [J]. Journal of Structural Engineering 1991, 117(12): 3742- 3761.

[3] 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, 3(3): 283- 290.

[4] Naaman A E. Fatigue in Partially Prestressed Concrete Beams [C] // Recent Research in Fatigue of Concrete Structures. American Concrete Institute, SP-75, 1982, 25- 46.

[5] JTG D62-2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

[6] 胡丹丹. 配 500MPa 钢筋折线先张法预应力混凝土梁受力性能的研究 [D]. 郑州: 郑州大学土木工程学院, 2007.

[7] 章坚洋. 混合配筋部分预应力混凝土梁正截面疲劳性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学土木水利学院, 2005.

[8] 易伟建, 孙晓东. 锈蚀钢筋混凝土梁疲劳性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 6- 10.

[9] 太原工学院土木系. 钢筋混凝土受弯构件正截面疲劳验算方法的研究 [C] // 钢筋混凝土结构研究报告选集 2. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981: 235- 254.