

文章编号:1671-6833(2007)04-0004-04

# 疲劳荷载作用下部分预应力混凝土梁的挠度研究

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

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 综合设计研究院, 河南 郑州 450002)

**摘 要:**通过对 2 根先张折线形配筋部分预应力混凝土梁与 1 根后张有黏结部分预应力混凝土梁的疲劳试验,进行了疲劳荷载作用下平截面假定的验证,分析了其挠度随着疲劳循环次数增加的变化规律,探讨了部分预应力混凝土梁在疲劳荷载作用下挠度的计算方法和计算公式.结果表明,按本文提出的公式计算的结果与试验结果符合较好.

**关键词:**先张折线形;预应力混凝土梁;疲劳;挠度

**中图分类号:** TU 378.2 **文献标识码:** A

## 0 引言

目前部分预应力混凝土结构已广泛应用于吊车梁、桥梁、铁路轨枕等结构.在其服役期内,除承受静载作用外,还承受频繁的反复荷载作用,其抗力将随疲劳损伤的累积而衰减,最终导致结构功能退化或失效,如在使用荷载作用下的变形逐渐增大,而过大的变形可能影响到结构的正常使用性能,甚至安全性,所以有必要对疲劳荷载作用下部分预应力混凝土梁的构件变形和截面刚度进行研究.而我国混凝土结构设计规范<sup>[1]</sup>还没有明确给出疲劳荷载下挠度计算公式,在设计时可能会导致在疲劳荷载作用下结构变形没有安全保证;同时对于疲劳荷载作用下部分预应力混凝土梁的构件变形和截面刚度的研究很少.笔者以疲劳试验为基础,分析了部分预应力混凝土梁,特别是先张折线配筋部分预应力混凝土梁在疲劳荷载作用下变形的一般规律,并建立了疲劳荷载作用下挠度的计算公式.

## 1 试件制作与试验方法

本次试验共制作了 2 根先张折线配筋部分预应力混凝土梁 XPB-5、XPB-6 及 1 根后张有黏结部分预应力混凝土梁 HPB-4.试件混凝土按 C60 配合比配置,水泥:水:砂:石:粉煤灰:减水剂=470:700:1 020:145:95:10,单位为 kg/m<sup>3</sup>.混凝土

的立方体强度平均值为 77.5 MPa.试验梁设计方案详见表 1.普通受力钢筋采用 HRB500 级钢筋,直径为 16 mm,预应力钢绞线采用 1860 级 7Φ15.2 钢绞线,箍筋及架力钢筋均采用 HRB500 级钢筋,直径为 8 mm.配筋率  $\rho$  分别为 1.26%, 0.97%, 1.26%, 预应力度  $\lambda$  分别为 0.43, 0.61, 0.51(取使用荷载弯矩为计算抗弯强度  $M_p$  的一半<sup>[2]</sup>).HRB500 级钢筋的材料性能见表 2.试验包括静力试验和疲劳试验两部分,其中疲劳试验采用等幅正弦波加载,疲劳下限荷载均为 10% Pu,上限分别为 55% Pu、40% Pu、40% Pu;加载频率为 3 Hz.试验过程中,动载循环至 1 万、5 万、10 万、…、250 万时停止重复加载,卸载待稳定后量测残余挠度,然后进行一次加载至疲劳上限荷载的静载试验.试验采用单点加载,试验装置示意图见图 1 所示.在试验梁支座及跨中布置百分表以量测挠度;跨中混凝土侧面不同高度处粘贴 5 个电阻应变片量测混凝土应变.

表 1 试验梁设计方案

Tab. 1 Design of test beams

梁号	梁长 L /mm	截面尺寸 /mm × mm	混凝土 强度	预应力 筋线形	普通 钢筋
XPB-5	7 500	200 × 400	C60	折线	3 Ⅱ 16
XPB-6	7 500	200 × 400	C60	折线	2 Ⅱ 16
HPB-4	7 500	200 × 400	C60	抛物线	3 Ⅱ 16

收稿日期:2007-08-05;修订日期:2007-10-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50578148);河南省交通厅资助项目(2005P338)

作者简介:刘立新(1947-),男,湖北省汉川人,郑州大学教授,博士生导师,主要从事混凝土结构、砌体结构基本理论及应用研究.

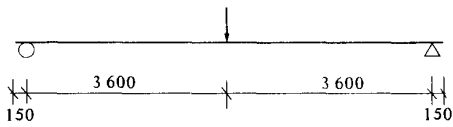


图 1 加载示意图  
Fig.1 The load arrangement

2 试验结果分析

2.1 疲劳荷载作用下平截面假定的验证

试验梁 XPB-5 截面实测应变如图 2 所示,可以看出,经多次疲劳荷载作用后,截面平均应变(扣除残余应变)仍接近于静载下裂缝出现后的截面平均应变,截面平均应变近似符合平截面假定。

表 2 钢筋的材料性能

Tab.2 Material properties of reinforcing steel

直径 $d$ /mm	屈服强度 $f_y$ /MPa	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	断口伸长 率 $\delta$ /%	均匀伸长 率 $\delta_g$ /%
8	548.1	718.3	25.5	10.8
16	507.4	680.6	28.0	16.8

注:①  $d=8\text{ mm}$  钢筋因直径较细,其断口伸长率量测标距取  $10\text{ d}$ ;  $d=16\text{ mm}$  钢筋断口伸长率量测标距取  $5\text{ d}$ ;② 均匀伸长率量测按照《金属拉伸试验方法》GB228-87 规定的方法进行。

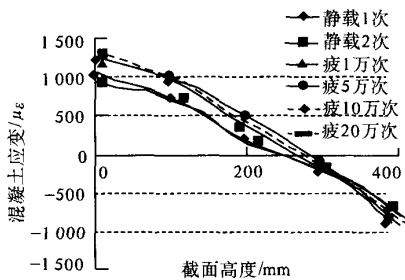
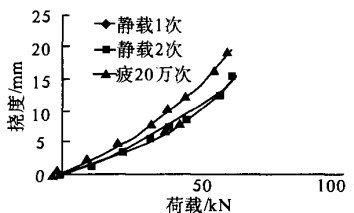


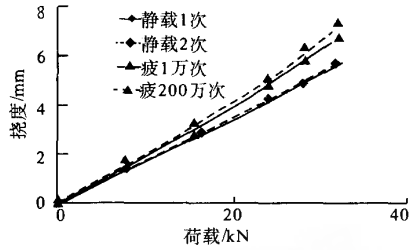
图 2 试验梁截面应变图  
Fig.2 Strain diagram in a section of test beam

2.2 挠度变化规律

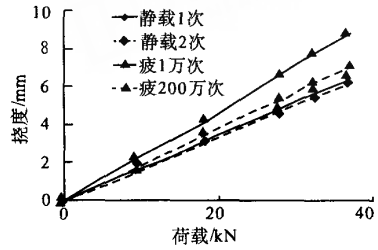
试验梁在静载及重复荷载作用下的实测荷载挠度曲线见图 3。可见在疲劳荷载作用下,梁的刚度降低,挠度逐渐增大。



(a) 试验梁 XPB-5



(b) 试验梁 XPB-6



(c) 试验梁 HPB-4

图 3 荷载-挠度-循环次数  $N$  关系曲线图

Fig.3 Load-Deflection-Number of Cycles curves

图 4 为疲劳上限荷载对应下各试验梁挠度随循环次数  $N$  变化曲线。由图中可以看出,在疲劳荷载的作用下,随着循环次数  $N$  的增大,在重复荷载作用下,梁的挠度增大,其增幅与重复荷载大小、重复次数  $N$  有关。对于试验梁 XPB-6、HPB-4,在 20 万 ~ 50 万次前挠度增加迅速,20 万 ~ 50 万次后挠度趋于稳定;其 200 万次后的荷载挠度分别为第一次静载作用下的挠度的 1.26 倍、1.38 倍。

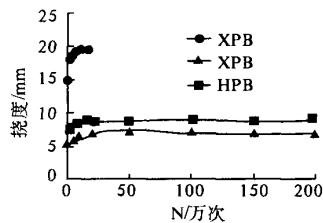


图 4 疲劳上限荷载作用下梁的挠度-循环次数关系曲线

Fig.4 Deflection-Number of Cycles curves of test beams under upper load

残余挠度随着荷载循环次数  $N$  的增加,初期增长较快,后期增长也较快,而中间发展较慢,中间段的发展类似于混凝土的徐变<sup>[4]</sup>。其中试验梁 XPB-5 在疲劳破坏后,残余挠度达到 4 mm,试验梁 XPB-6、HPB-4 在 200 万次后残余挠度大约为 1.5 ~ 2.2 mm。图 5 为各试验梁的总挠度及残

余挠度随循环次数的变化曲线图. 各试验梁 XPB-5、XPB-6、HPB-4 在破坏前或 200 万次时的总挠度增大系数约为 1.425 ~ 1.614.

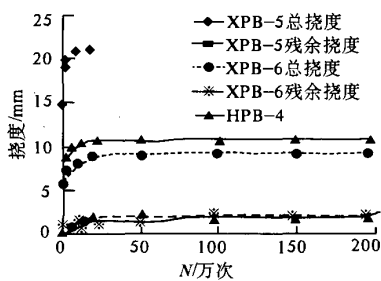


图 5 疲劳荷载作用下试验梁挠度随循环次数变化曲线图

Fig. 5 Deflection of test beams under fatigue loads versus number of cycles

### 3 疲劳荷载作用下部分预应力混凝土梁的挠度计算

#### 3.1 疲劳荷载作用下挠度增大的主要原因

在疲劳荷载作用下, 部分预应力混凝土梁挠度逐渐增大的主要原因是构件刚度的降低, 而构件刚度降低的主要原因是<sup>[3]</sup>:

(1) 疲劳荷载作用下, 受拉区混凝土疲劳以及钢筋与混凝土之间粘结的逐步破坏;

(2) 受压区混凝土在疲劳荷载作用下动力徐变的不断增加;

(3) 在疲劳荷载作用下, 钢筋周期应变软化以及在疲劳过程中其截面的不断削弱.

#### 3.2 疲劳荷载作用下的挠度计算

从试验结果来看, 随着疲劳荷载循环次数的增加, 各试验梁反拱下降, 即存在残余变形, 而且荷载挠度也增大. 因此疲劳荷载作用下第  $N$  次循环跨中总挠度  $f_N$  可以分为两部分, 残余挠度  $f_{rN}$  和荷载挠度  $f_{LN}$ . 在本文的计算中, 将分别考虑这两部分的挠度.

##### 3.2.1 残余挠度的计算

根据本文及文献[4]的试验表明残余挠度的变化特点, 把残余挠度分为两部分来考虑: 初次荷载作用下的残余挠度  $f_{r1}$  和重复荷载作用下的残余挠度  $f_{rN} - f_{r1}$ . 对于初次荷载作用下的残余挠度  $f_{r1}$  可以按照参考文献[4]的方法计算, 建立如下计算模式:

$$f_{r1} = a + b \times \frac{M_{\max}}{M_{cr} \alpha_E \rho} \quad (1)$$

由试验数据回归得到:

万方数据

$$f_{r1} = -0.06221 + 0.016862 \times \frac{M_{\max}}{M_{cr} \alpha_E \rho} \quad (2)$$

式中:  $\alpha_E = E_s/E_c$ ;  $\rho = (A_s + A_p)/bh_0$ .

对于第二部分残余挠度, 考虑中间段的变化类似于徐变曲线<sup>[4]</sup>, 考虑主要因素建立如下计算模式

$$f_{rN} - f_{r1} = \frac{M_{\max}}{M_{cr} \alpha_E \rho} \lg N \quad (3)$$

由试验数据回归得到:  $\gamma = 0.2507$ , 则残余挠度的计算公式为

$$f_{rN} = -0.06221 + (0.016862 + 0.2507 \lg N) \times M_{\max}/M_{cr} \alpha_E \rho \quad (4)$$

各试验梁残余挠度的实测值与按公式(4)计算的计算值之比  $f_{rN}^{\text{实}}/f_{rN}^{\text{计}}$  结果吻合较好. 其中: 均值  $\mu = 0.974$ ,  $\sigma = 0.013$ ,  $\delta = 0.0133$ .

##### 3.3.2 荷载挠度的计算

对于疲劳荷载作用下, 荷载挠度的计算方法大多是对刚度乘以一个小于 1 的折减系数来考虑疲劳荷载的影响, 这主要是基于: 在梁不至于产生疲劳破坏, 经历一段时间的重复荷载作用后, 荷载挠度基本上趋于稳定. 本文采用两种方法来计算其荷载挠度, 即考虑预应力度  $\lambda$  的刚度折减法和考虑循环次数  $N$  的静载挠度扩大系数法.

##### 1) 刚度折减法

试验表明, 预应力度越大, 荷载挠度增加的越少, 因此可以近似的认为刚度的折减与预应力度  $\lambda$  成反比, 采用文献[5]推荐的方法, 部分预应力混凝土梁的刚度按下式计算:

$$B = \alpha_1 \cdot \alpha_2 E_c I \quad (5)$$

式中:  $E_c$  为混凝土的弹性模量;  $I$  为换算截面的惯性矩计算;  $\alpha_1$  为刚度的疲劳折减系数, 可以按下式计算.

$$\alpha_1 = \frac{\lambda}{0.60\lambda + 0.40} \quad (6)$$

式中:  $\lambda$  为预应力度 ( $M_0/M$ );  $M$  取为 50% 的计算极限弯矩  $M_u$ ;  $\alpha_2$  为刚度的修正系数, 按下式计算:

$$\alpha_2 = \frac{0.85\beta M}{\beta M_{cr} + 0.85(M - M_{cr})} \quad (7)$$

式中:  $\beta = 0.1 + 2\alpha_p \rho$ ;  $\rho = (A_s + A_p)/bh_0$ .

则疲劳荷载作用下荷载挠度的计算公式为

$$f_{LN1} = \alpha ML^2/B \quad (8)$$

式中:  $\alpha$  为挠度系数.

##### 2) 初始挠度扩大系数法

初始挠度扩大系数法是在静载时挠度的基础

上,根据试验结果,利用统计方法得出一个增大系数表达式.笔者只考虑循环次数  $N$  的影响,建立如下表达式.

$$f_{LN2}/f_1 = k \quad (9)$$

式中:  $f_{LN2}$  为循环  $N$  次后的荷载挠度;  $f_1$  为初始荷载挠度;  $k$  为疲劳荷载作用下挠度的增大系数,是关于  $N$  的函数式.

设  $k = a + b \lg N$ , 其中  $a$ 、 $b$  均为待定系数,根据试验结果回归得:  $a = 0.9083$ ,  $b = 0.069$ ; 则有

$$f_{LN2}/f_1 = 0.9083 + 0.069 \lg N \quad (10)$$

于是

$$f_{LN2} = (0.9083 + 0.069 \lg N) \alpha M L^2 / B \quad (11)$$

式中:  $\alpha$  为挠度系数.

用上式计算的挠度与实测值拟合较好,均值  $\mu = 0.98$ , 方差  $\sigma = 0.034$ , 变异系数  $\delta = 0.035$ .

### 3.3.3 总挠度的计算

根据公式(4)和(5)、(11)得到总挠度的计算公式为

$$f_{N1}^j = f_{iN} + f_{LN1} \quad (12)$$

$$f_{N2}^j = f_{iN} + f_{LN2} \quad (13)$$

式中:  $f_N^j$  为总挠度实测值,按公式(12)计算得到的  $f_{N1}^j/f_N$  统计结果为:均值  $\mu = 0.947$ , 方差  $\sigma = 0.051$ , 变异系数  $\delta = 0.054$ ; 按公式(13)计算得到的  $f_{N2}^j/f_N$  统计结果为:均值  $\mu = 1.017$ , 方差  $\sigma = 0.067$ , 变异系数  $\delta = 0.066$ . 可见本文提出的计算公式与实测值吻合较好,可以满足工程使用的精

度要求.

## 4 结论及建议

(1) 疲劳荷载作用下折线配筋先张部分预应力混凝土梁的挠度变化规律与后张部分预应力混凝土梁相似,随着循环次数的增加,挠度不断增大;并且开始阶段增长迅速,在 20 万 ~ 50 万次时增长趋于稳定.各试验梁在破坏前或 200 万次时总挠度增大系数约为 1.425 ~ 1.614.

(2) 根据试验结果建立了疲劳荷载作用下残余挠度的计算公式,以及采用刚度折减法和初始挠度扩大系数法回归得到荷载挠度计算公式,从而得到疲劳荷载作用下部分预应力混凝土梁总挠度的计算公式,计算结果与实测值吻合较好,能够满足工程使用的精度要求.

## 参考文献:

- [1] GB 50010-2002, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [2] 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, (3): 32-38.
- [3] 赵国藩. 高等钢筋混凝土结构学[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [4] 杨德滋. 部分预应力混凝土梁疲劳性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 1990.
- [5] 卢树圣. 现代预应力混凝土理论与应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000.

## Study on Deflection of Partially Prestressed Concrete Beams Under Fatigue Loading

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

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Multifunctional Design and Research Academy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Through the fatigue test on deflection of 3 partial prestressed concrete beams, 2 fold-line pre-tension prestressed beams and 1 post-tensioned pre-stressed concrete beam, the paper validates the assumption of the flat section under fatigue load, and describes the law that deflection changes with increasing load circle degrees. It also discusses the calculation methods and formulae of deflection of partially prestressed concrete beams under fatigue load. The calculation results are in good agreement with the experimental results.

**Key words:** fold-line partial pre-tension; prestressed beam; fatigue; deflection