

配置高强非预应力钢筋的预应力 混凝土梁受弯试验研究

李 强¹, 马燕丰²

(1. 唐山学院 土木工程学院, 河北 唐山 063000; 2. 唐山市城市建筑工程总公司, 河北 唐山 063000)

摘要:通过对配置 HRB600 非预应力钢筋的预应力混凝土梁进行受弯试验, 分析了混凝土及非预应力钢筋应变的发展规律, 研究了预应力筋预应力损失的计算方法, 提出了试验梁短期抗弯刚度的计算修正公式。研究表明: 试验梁跨中截面平均应变符合平截面假定, HRB600 钢筋的受力过程呈现显著的三阶段发展规律; 计算预应力筋的预应力损失 σ_4 和 σ_5 时, 引入时间影响系数可以有效提高准确性; 通过引入综合配筋率影响系数, 可以有效提升试验梁的短期刚度计算精度, 配置 HRB600 非预应力钢筋的预应力混凝土梁在正常使用阶段满足挠度限值要求。

关键词:HRB600 钢筋; 预应力混凝土梁; 受弯试验

中图分类号:TU528.571 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-349X(2019)03-0035-05

DOI:10.16160/j.cnki.tsxyxb.2019.03.009

Bending Experimental Study on the Prestressed Concrete Beams with High-Strength Non-prestressed Steel Bars

LI Qiang¹, MA Yan-feng²

(1. School of Civil Engineering, Tangshan University, Tangshan 063000, China;

2. Tangshan City Construction Engineering Corporation, Tangshan 063000, China)

Abstract: Through the bending experiment of the prestressed concrete beams with HRB600, the development laws of the concrete and the strain for the non-prestressed steel bars were analyzed, and the calculation methods of the prestress loss were studied and the rectification formula of bending stiffness were proposed. The results show: the average strain at mid-span section conform to the plane section assumption, and the loading process of HRB600 fell into three stages; Calculation accuracy of the prestress loss (σ_4 and σ_5) can be improved by introducing the influence coefficient of the time; Calculation accuracy of the tested beam's short-term bending stiffness are improved by introducing the coefficient of the comprehensive steel ratio and the specimens during the period of normal use can meet the requirement of the maximum deflection.

Key Words: HRB600 steel bars; prestressed concrete beam; bending experiment

基金项目:唐山市科技计划项目(17130255a); 唐山学院博士创新基金项目(1401803)

作者简介:李强(1984—), 男, 河北唐山人, 讲师, 博士, 主要从事结构工程研究。

近些年,我国大力倡导和推进高强钢筋应用于建筑工程。早在 2012 年,住房和城乡建设部印发的《关于加快应用高强钢筋的指导意见》中明确提出,要积极推广并使用 500 MPa 螺纹钢,同时加强高强钢筋混凝土结构构件抗震性能的研究,将开展 600 MPa 及以上螺纹钢产品的研发列为重点工作^[1]。HRB600 钢筋是采用微合金化工艺的一种新型高强度、高性能钢筋,在有效提升混凝土结构的安全性、经济性和灵活性的同时,其结构在高应力状态下的性能也引起了学者们的关注^[2-4],从而为 HRB600 钢筋的工程应用提供了有力的理论依

据和试验基础。笔者将对配置 HRB600 非预应力钢筋的预应力混凝土梁进行受弯试验。

1 试验概况

1.1 构件设计

本试验共设计了 7 根试验梁,试验梁的变量参数分别为非预应力钢筋强度、HRB600 钢筋配筋率和混凝土强度等级。试验梁横截面均为矩形,截面尺寸为 400 mm×500 mm。预应力筋为直线型布置,均采用有粘结后张法张拉^[5]。试验梁的具体尺寸及配筋详见图 1,试验梁的参数见表 1,混凝土的实测材料性能指标见表 2,非预应力钢筋实测材料性能见表 3。

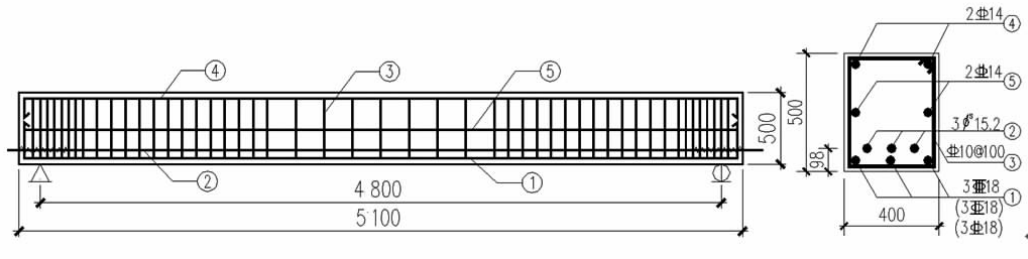


图 1 试验梁尺寸及配筋

表 1 试验梁参数

构件编号	梁长/mm	截面尺寸/mm	预应力筋②	受拉钢筋①	架立筋④	箍筋③	混凝土强度等级
L-1	5 100	400×500	3-1 ϕ^s 15.2	3 Φ 18	2 Φ 14	Φ 10	C50
L-2	5 100	400×500	3-1 ϕ^s 15.2	3 Φ 18	2 Φ 14	Φ 10	C50
L-3	5 100	400×500	3-1 ϕ^s 15.2	3 Φ 18	2 Φ 14	Φ 10	C50
L-4	5 100	400×500	3-1 ϕ^s 15.2	2 Φ 18	2 Φ 14	Φ 10	C50
L-5	5 100	400×500	3-1 ϕ^s 15.2	4 Φ 18	2 Φ 14	Φ 10	C50
L-6	5 100	400×500	3-1 ϕ^s 15.2	3 Φ 18	2 Φ 14	Φ 10	C40
L-7	5 100	400×500	3-1 ϕ^s 15.2	3 Φ 18	2 Φ 14	Φ 10	C60

注:1.表中 3-1 ϕ^s 15.2 表示有粘结预应力孔道数为 3,每个孔道内钢绞线根数为 1,预应力筋直径为 15.2 mm;

2.表中符号 Φ , Φ , Φ 分别表示 HRB400, HRB500, HRB600 钢筋。

表 2 混凝土实测材料性能 MPa

强度等级	$f_{cu,150}$	f_c^0	f_t^0	$E_c \times 10^4$
C40	47.32	31.65	2.90	3.41
C50	54.27	35.11	3.02	3.52
C60	67.42	43.27	3.29	3.68

表 3 非预应力钢筋实测材料性能

钢筋强度	直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
HRB400	10	462.0	628.0
	14	453.3	616.0
HRB500	18	552.0	711.0
HRB600	18	654.3	824.0

1.2 加载方案

本试验为静载试验,采用三分点对称加载,加载方案包括预加载和正式加载两个阶段。预加载每级加载 20 kN,共加载两级;正式加载级距为 20 kN,当总加载值接近特征荷载时,加载级距减半。当非预应力钢筋屈服后,加载方式改为位移控制,加载级距为 1 mm,当非预应力钢筋应变达到约 10 000 $\mu\epsilon$ 或试验梁跨中挠度达到其跨度的 1/50 时,宣告试验梁破坏^[1,6,7]。加载方式如图 2 所示。

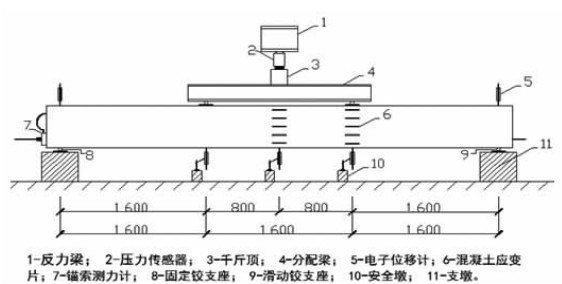


图2 加载方式

2 试验结果分析

2.1 混凝土应变分析

本试验采用混凝土应变片采集试验梁跨中侧面混凝土应变情况,应变片粘贴位置见图2,跨中截面混凝土应变分布如图3所示。在试验梁受力过程的初始阶段,构件基本处于弹性阶段,混凝土应变沿构件截面高度方向呈直线型分布,故符合平截面假定。随着加载值增大,混凝土平均应变直线型分布虽有所折线化,但仍基本符合平截面假定。总体而言,配置HRB600非预应力钢筋的预应力混凝土梁的跨中截面平均应变近似线性分布,符合平截面假定^[7]。

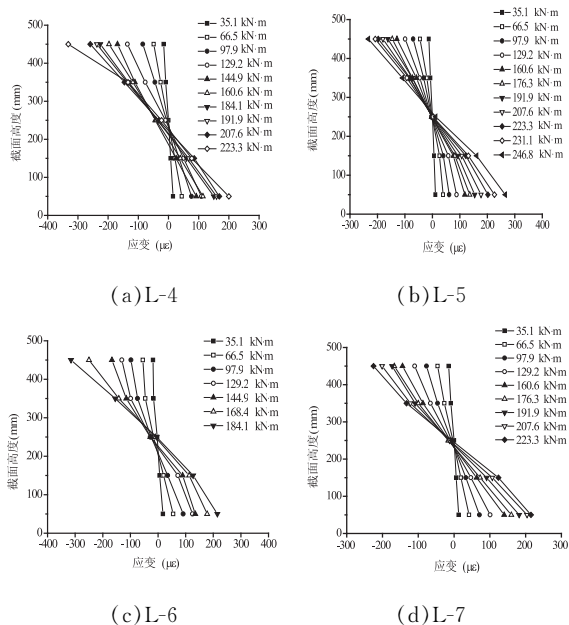


图3 跨中截面混凝土应变分布

2.2 非预应力钢筋应变分析

本试验用应变片采集非预应力钢筋在加载过程中的应变情况,应变片的粘贴位置在受拉

钢筋的跨中处。图4为试验梁荷载—非预应力钢筋应变曲线,将图4中(c)(d)与(a)(b)进行对比,不难发现 HRB600 钢筋与 HRB500, HRB400 的受力特征相似,钢筋应变发展均呈现出比较明显的三阶段增长规律:加载初期,钢筋发生弹性变形,其应变曲线近似直线型,且增幅较小;加载中期,尤其是试验梁开裂后,开裂处混凝土退出工作,非预应力钢筋拉应力大幅增加,应变曲线斜率减小;加载后期,钢筋在高应力状态下发生屈服,其应变的增速再次加快,应变曲线斜率再次减小,随着荷载进一步增加,试验梁的受弯承载力基本处于滞涨状态,而此时非预应力钢筋应变急剧增大,直至接近或达到 $10\,000\ \mu\epsilon$,宣告试验梁破坏。综观加载过程,HRB600 钢筋的三阶段受力过程明显,在 HRB600 钢筋屈服后,其应变能够继续稳定增长,这表明 HRB600 钢筋的高强度和延性能够得到充分发挥,从而试验梁的受弯承载力得到了显著提升。

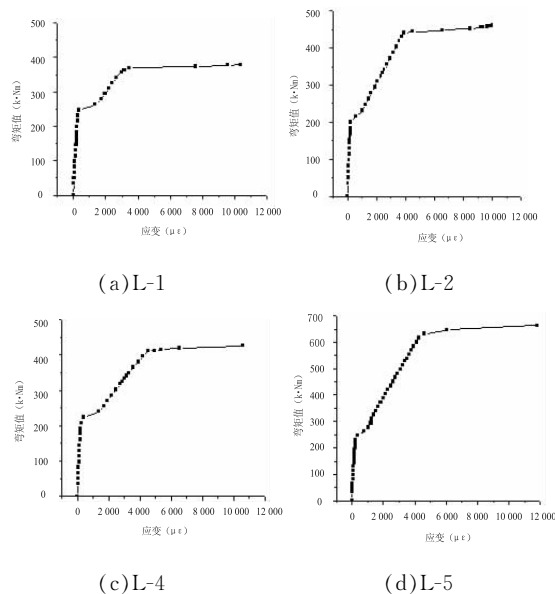


图4 试验梁荷载—非预应力钢筋应变曲线

2.3 预应力损失分析

基于构件制作工艺以及材料性质等原因,预应力筋的张拉控制应力 σ_{con} 会在张拉施工后有一定的衰减,这种预应力筋的应力降低现象称为预应力损失。本试验的预应力损失包括锚固变形损失 σ_1 (锚具变形、预应力筋的回缩、滑

移)、预应力筋在长期高应力状态下产生的应力松弛损失 σ_4 、由混凝土的收缩和徐变引起的损失 σ_5 。本文采用现行《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)^[8](以下简称《规范》)中给出的公式计算各预应力损失值。因为在计算 σ_4 和 σ_5 时要考虑时间变化的影响,故引入松弛损失系数和收缩徐变损失系数,以提高计算准确性。试验梁的有效预拉应力 σ_{pe}^{cal} 是由张拉控制应力 σ_{con} 减去各项预应力损失 σ_l ($\sigma_l = \sigma_1 + \sigma_4 + \sigma_5$) 得到的。表 4 分别列出了各试验梁的预应力筋有效预拉应力计算值 σ_{pe}^{cal} 和实测值 σ_{pe}^{exp} 。

表 4 预应力筋的有效预拉应力

构件编号	σ_{con} /MPa	σ_{pe}^{cal} /MPa	σ_{pe}^{exp} /MPa	$\sigma_{pe}^{exp} / \sigma_{pe}^{cal}$
L-1	1 395	1 071.54	1 091.08	1.018
L-2	1 395	1 071.54	1 121.22	1.046
L-3	1 395	1 071.54	1 082.23	1.010
L-4	1 395	1 070.39	1 098.92	1.027
L-5	1 395	1 072.62	1 064.17	0.992
L-6	1 395	1 070.35	1 076.26	1.006
L-7	1 395	1 072.34	1 084.17	1.011

注:试验加载前,采用锚索测力计测预应力筋的有效预拉应力值 σ_{pe}^{exp} 。

分析表 4 数据可知, $\sigma_{pe}^{exp} / \sigma_{pe}^{cal}$ 的均值为 1.012, 变异系数为 0.022, 由此可见计算值与实测值非常接近, 且数据离散性较小, 这表明预应力损失计算精度较高。本文建议在计算预应力钢绞线应力松弛损失和混凝土收缩徐变损失时, 要考虑时间因素对两者的影响, 通过引入随时间变化的松弛损失系数和收缩徐变损失系数, 有效提高计算准确性。

3 挠度分析

3.1 短期挠度分析

影响高强钢筋混凝土梁短期挠度的三个基本因素包括荷载、初始刚度和配筋率^[9]。本文考虑到非预应力钢筋和预应力筋的配筋率对试验梁短期挠度的显著影响, 提出在现行《规范》短期抗弯刚度公式的基础上引入综合配筋率影响系数 α (取值 1.5), 从而对试验梁的短期跨中挠度计算值进行修正。

本文采用公式(1)计算试验梁开裂后的短期截面抗弯刚度, 再利用结构力学方法计算得

到试验梁的短期跨中挠度计算值 f_s^{cal1} , 再将其与实测值 f_s^{exp} 进行对比, 对比结果见表 5。

$$B_s = \frac{0.85E_c I_0}{\kappa_r + (1 - \kappa_r) \left[\left(1.0 + \frac{0.21}{\alpha \cdot \alpha_E \cdot \rho} \right) (1 + 0.45\gamma_f) - 0.7 \right]} \quad (1)$$

表 5 试验梁跨中挠度实测值与计算值对比

构件编号	M / (kN · m)	f_s^{cal1} /mm	f_s^{exp} /mm	f_s^{exp} / f_s^{cal1}
L-1	309.53	12.636	13.070	1.035
L-2	356.57	16.099	15.583	0.968
L-3	372.25	17.717	19.428	1.097
L-4	348.73	18.385	16.904	0.919
L-5	529.05	24.849	19.540	0.786
L-6	380.09	19.749	20.145	1.020
L-7	419.29	20.142	19.620	0.974

分析表 5 中的数据可知, 试验梁短期跨中挠度的试验值与计算值的比值均值为 0.971, 变异系数为 0.095; 如果去掉偏差较大的试验梁 L-5 的试验数据再进行统计, 比值为 1.002, 变异系数为 0.057。由此可见, 考虑到 HRB600 钢筋和预应力筋对试验梁抗弯刚度的提升作用, 通过引入综合配筋率影响系数对《规范》中的公式进行修正, 进而使计算值与试验值非常接近, 可以提高短期跨中挠度的计算精度。

3.2 挠度限值分析

现行《规范》规定预应力混凝土受弯构件的长期最大挠度值要满足限值要求, 试验梁的荷载长期作用下的截面抗弯刚度计算公式为:

$$B = \frac{M_k}{M_q + M_k} B_s, \quad (2)$$

式中 M_k , M_q 分别为按照荷载的标准组合、准永久组合计算的最大弯矩 (kN · m), 本试验取 $M_k / M_q = 1.143$ 。

本文根据荷载标准组合与准永久组合计算的最大弯矩之比推导得到长期荷载作用下的截面抗弯刚度与短期截面抗弯刚度之比, 进而计算得到试验梁在荷载长期作用下的跨中挠度实测值 f_{lm}^{exp} , 将其与挠度限值 f_{lim} 进行比较, 从而判断试验梁是否满足挠度限值要求, 计算结果见表 6。分析表 6 数据可知, 配置 HRB600 非预应力钢筋的预应力混凝土梁在正常使用极限荷载长期作用下, 其最大挠度能够满足限值要

求,并具有一定的安全储备。

表6 试验梁挠度限值分析

构件编号	$M/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$f_l^{\text{exp}}/\text{mm}$	f_{lim}/mm
L-1	244.44	14.34	24.00
L-2	261.01	13.66	24.00
L-3	279.05	20.61	24.00
L-4	241.78	13.83	24.00
L-5	314.82	15.69	24.00
L-6	270.98	19.09	24.00
L-7	285.22	15.91	24.00

注:试验梁的跨中挠度限值取 $f_{lim} = l_0/200$,即 $f_{lim} = 24 \text{ mm}$

4 结论

本文通过对配置 HRB600 非预应力钢筋的预应力混凝土梁进行受弯试验,分析了混凝土和 HRB600 钢筋的应变发展规律,提出了预应力筋预应力损失的计算建议,研究了试验梁短期跨中挠度的计算方法,主要研究结论如下:

(1)试验梁跨中截面混凝土的平均应变近似呈线性分布,符合平截面假定。综观整个受力过程中,HRB600 钢筋的荷载—应变曲线呈现出显著的三阶段增长规律,尤其在 HRB600 屈服后,其应变仍能稳定增长,这表明 HRB600 钢筋与预应力筋协同受力较好,HRB600 钢筋的高强度和延性得以充分发挥。

(2)预应力筋的各项预应力损失值宜按照现行《规范》公式进行计算,在计算预应力筋应力松弛损失值以及混凝土收缩和徐变引起的损失值时,通过引入时间影响系数,可以有效提高两类损失值的计算准确性。

(3)在计算配置 HRB600 非预应力钢筋的预应力混凝土梁的短期抗弯刚度时,要充分考虑 HRB600 钢筋和预应力筋配筋率对抗弯刚度的贡献,本文建议引入综合配筋率影响系数

以提高计算精度,试验梁在正常使用极限荷载长期作用下的最大挠度符合限值要求。

参考文献:

- [1] 李强. 配置 600 MPa 非预应力钢筋的部分预应力混凝土梁受力性能研究[D]. 天津: 河北工业大学,2017.
- [2] 戎贤. 高强钢筋混凝土构件裂缝控制试验研究及有限元分析[D]. 天津: 天津大学,2005.
- [3] 王铁成,李艳艳,戎贤. 配置 500 MPa 钢筋的混凝土梁受弯性能试验[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2007,40(5): 507-511.
- [4] 李艳艳. 配置 500 MPa 钢筋的混凝土梁受力性能的试验研究[D]. 天津: 天津大学,2008.
- [5] 中国建筑科学研究院. GJBT-954 后张预应力混凝土结构施工图表示方法及构造详图[S]. 北京: 中国计划出版社,2006.
- [6] 中国建筑科学研究院. GB/T50152-2012 混凝土结构试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2012.
- [7] 李强,戎贤. 配置高强钢筋的无粘结部分预应力混凝土梁受弯性能试验研究及有限元分析[J]. 建筑科学,2017,33(3):33-38.
- [8] 中国建筑科学研究院. GB50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2010.
- [9] 陆春华,金伟良,延永东. 正常使用状态下 HRB500 钢筋混凝土梁受弯性能试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2011,32(3): 350-354.

(责任编辑:夏玉玲)