

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.02.011

HRB600 级钢筋混凝土梁受弯性能试验研究

陈安英^{1,2}, 邓松¹, 高鹏¹, 完海鹰^{1,2}, 朱华³, 刘西洋¹

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽合肥 230009; 2. 合肥工大共达工程检测试验有限公司, 安徽合肥 230009; 3. 安徽寰宇建筑设计院, 安徽合肥 230012)

摘要:为研究配置 HRB600 级钢筋混凝土梁的抗弯性能, 文章设计制作 12 根不同配筋率的 HRB600 级钢筋、C50 混凝土梁, 采用三分点静力加载的方式, 对试件的破坏形态、钢筋强度设计值取值、极限承载力、跨中挠度及裂缝宽度等进行试验研究。结果表明, 配置 HRB600 级钢筋混凝土梁的受力形态、破坏模式与普通钢筋混凝土梁相同, 其极限承载力仍然可以按照相关规范公式进行计算; 建议对于受弯构件, HRB600 级钢筋的屈服强度标准值取 600 MPa, 抗拉强度设计值取 520 MPa, 抗压强度设计值取 435 MPa; 对比跨中挠度实测值与相关规范计算值, 发现两者在正常使用阶段吻合良好; 试件实测最大裂缝宽度值比相关规范计算值大, 在此结果基础上提出最大裂缝宽度调整系数 k , 对短期荷载作用下最大裂缝宽度计算公式进行修正, 调整后得到的计算值与实测值吻合度较高。

关键词:HRB600 级钢筋; 混凝土梁; 受弯性能; 钢筋强度设计值; 最大裂缝宽度

中图分类号:TU375.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)02-0212-09

Experimental study on flexural performance of concrete beams with HRB600 steel bars

CHEN Anying^{1,2}, DENG Song¹, GAO Peng¹, WAN Haiying^{1,2}, ZHU Hua³, LIU Xiyang¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Hefei University of Technology Gongda Engineering Inspection and Testing Co., Ltd., Hefei 230009, China; 3. Anhui Huanyu Architectural Design Institute, Hefei 230012, China)

Abstract: In order to study the flexural performance of concrete beams with HRB600 steel bars, twelve concrete beams with HRB600 steel bars and C50 concrete under different reinforcement ratios were designed and fabricated. Experimental study on the damage modes, design value for steel bar strength, ultimate bearing capacity, midspan deflection and crack width of the members was conducted by means of three-point static loading. The results show that the force patterns and damage modes of concrete beams with HRB600 steel bars are the same as those of the concrete beams with ordinary rebar, and their ultimate bearing capacity can still be calculated according to the relevant code formula. It is recommended that for flexural members, the standard value for yield strength of HRB600 steel bars is 600 MPa, design value for tensile strength is 520 MPa and design value for compressive strength is 435 MPa. Comparing the measured values of mid-span deflection with the calculated values in the relevant code, there is a good agreement between the two values in the normal use phase. The measured maximum crack width values of the members are larger than the calculated values in the relevant code,

收稿日期:2021-07-08; **修回日期:**2021-09-23

基金项目:安徽省高校协同创新资助项目(GXXT-2019-005); 安徽省地方规程《高强钢筋应用技术规程》专题研究资助项目(W2019JJSFW0011)

作者简介:陈安英(1981—), 男, 安徽和县人, 博士, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师;

高鹏(1978—), 男, 安徽合肥人, 博士, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师, 通信作者, E-mail:owen_gp@163.com;

完海鹰(1960—), 男, 安徽合肥人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师;

朱华(1964—), 男, 安徽合肥人, 安徽寰宇建筑设计院正高级工程师, 硕士生导师。

and on the basis of this result, the adjustment coefficient k of maximum crack width is proposed, and the formula for calculating maximum crack width under short-term load in the code is modified. The calculated values obtained after adjustment are in good agreement with the measured values.

Key words: HRB600 steel bar; concrete beam; flexural performance; design value for steel bar strength; maximum crack width

随着现代混凝土结构朝着大跨、高层、重载的方向发展,越来越多的工程采用高强高性能的材料^[1-2]。相比于传统的 HRB400 级钢筋,HRB600 级高强钢筋这种新型的建筑材料具有强度高、综合造价低及绿色环保等优点。但是在实际工程中,HRB600 级高强钢筋并未得到广泛的应用,在行业整体内所占的比例并不是很高。这主要是由于文献[3]对 HRB600 级钢筋的设计参数未做规定,使得 HRB600 级钢筋混凝土结构设计理论不够成熟,在其推广应用过程中没有足够的理论依据。

目前对于配置 HRB600 级钢筋混凝土受弯构件的力学性能,已有一些试验研究。文献[4-6]对配置 HRB600 级钢筋混凝土梁受弯性能进行试验研究;文献[7-9]对配置 HRB600 级钢筋混凝土梁裂缝宽度进行试验研究;文献[10-12]对配置 HRB600 级钢筋混凝土梁的抗裂性能和变形性能进行试验研究;文献[13-14]对配置 HRB600 级钢筋混凝土梁的受弯及受剪性能进行试验研究。综合分析已有相关研究成果,对于配置 HRB600 级钢筋混凝土受弯构件的研究,主要集中在 2% 配筋率以下及跨高比小于 9 的试件,且对上部架立筋为 HRB600 级钢筋构件的研究报道很少,使得配置 HRB600 级钢筋混凝土受弯构件的试验资料缺乏完整性。

本文设计 12 根跨高比为 9 的高配筋率钢筋混凝土梁,且下部受拉钢筋和上部架立筋均采用 HRB600 级高强钢筋,结合试验现象及相关试验数据,对配置 HRB600 级钢筋混凝土梁的破坏形态、钢筋强度设计值取值、极限承载力、跨中挠度及裂缝宽度等开展研究,以期对 HRB600 级钢筋混凝土受弯构件的理论设计及工程应用提供一定的依据。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验共设计 12 根不同配筋率的 HRB600 级钢筋混凝土梁,其宽×高×长为 250 mm×400 mm×4 000 mm,计算跨度 $l_0 = 3 600$ mm。

设计混凝土等级为 C50,保护层厚度为 25 mm。纵向受拉钢筋采用 HRB600 级钢筋,直径有 12、16、18、20、22、25 mm 6 种;受压钢筋(架立筋)采用 2 根 HRB600 级钢筋,直径为 12 mm;箍筋采用 HRB400 级钢筋,直径为 10 mm。试件尺寸及配筋示意图如图 1 所示。图 1 中, A_s 、 A_s' 分别为受拉区、受压区纵向钢筋的截面面积。试件编号、纵筋分布及配筋率见表 1 所列。

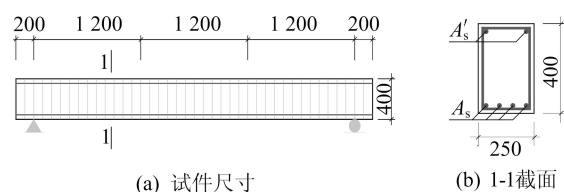


图 1 试件尺寸及配筋示意图

表 1 试件编号、纵筋分布及配筋率

试件编号	纵筋分布	配筋率/%
L1	$4\phi^{HRB} 18 + 4\phi^{HRB} 12$	1.755
L2	$4\phi^{HRB} 18 + 2\phi^{HRB} 18$	1.822
L3	$4\phi^{HRB} 20 + 4\phi^{HRB} 12$	2.040
L4	$4\phi^{HRB} 18 + 3\phi^{HRB} 18$	2.126
L5	$4\phi^{HRB} 25$	2.181
L6	$6\phi^{HRB} 16 + 2\phi^{HRB} 20$	2.190
L7	$4\phi^{HRB} 20 + 2\phi^{HRB} 20$	2.250
L8	$4\phi^{HRB} 20 + 3\phi^{HRB} 18$	2.411
L9	$4\phi^{HRB} 18 + 4\phi^{HRB} 18$	2.430
L10	$4\phi^{HRB} 20 + 3\phi^{HRB} 20$	2.624
L11	$4\phi^{HRB} 22 + 2\phi^{HRB} 22$	2.722
L12	$4\phi^{HRB} 22 + 3\phi^{HRB} 18$	2.726

注: ϕ^{HRB} 代表 HRB600 级钢筋。

1.2 材料力学性能

试验所用混凝土均为 C50 强度等级,试件浇筑时,每个试件预留 3 个边长为 150 mm 的标准立方体试块,制作完成后与浇筑好的试件在相同条件下养护。试验所用的钢筋型号主要为 HRB600,在钢筋下料时不同直径的钢筋各预留 3 根长度为 500 mm 的试样。试验开始前对所预留的材料试样进行力学性能试验,钢筋的力学性能试验结果见表 2 所列。

混凝土实测立方体抗压强度为 59.98 MPa,

轴心抗压强度换算值为 38.83 MPa,轴心抗拉强度换算值为 2.84 MPa,弹性模量为 35.99 GPa。

表 2 HRB600 级钢筋力学性能试验结果

ϕ /mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/GPa
12	657.36	812.59	200
16	635.41	818.73	200
18	623.12	804.00	200
20	617.31	808.68	200
22	634.56	826.77	200
25	641.86	842.08	200

1.3 试验加载及测量内容

试验采用三点静力加载方式,保证在试验梁跨中部位形成 1 200 mm 纯弯段。试验加载装置示意图如图 2 所示,通过液压千斤顶进行加载,用筒支分配梁将千斤顶的压力对称分配给试验梁,在千斤顶底面与分配梁之间安装压力传感器,记录荷载变化。试验梁支座采用筒支形式,一端为固定铰支座,另一端为滑动铰支座。加载点、支座处均加垫钢板,防止加载过程中混凝土局部压坏。

试验加载制度参考文献[15],正式加载前先预加载至梁计算开裂荷载的 10%,检验支座是否平稳,仪表及加载设备是否正常,并对设备进行调零。加载前期按照开裂荷载计算值的 20%进行分级加载,达到开裂荷载计算值 80%后,按照开裂荷载计算值的 5%进行加载;当试件开裂后,按照极限承载力计算值的 10%进行分级加载(极限承载力根据试验材料强度实测值计算得到),达到极限承载力计算值 90%后,按照极限承载力计算值的 5%进行加载,直至试件破坏。每级荷载加载结束后持荷 10 min,用于观察试验现象及数据记录。

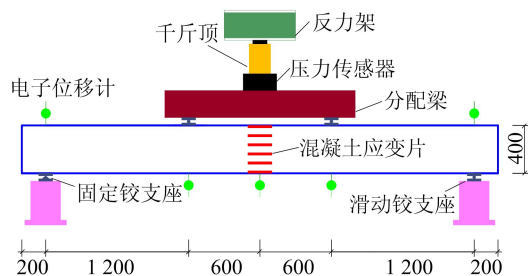


图 2 试验加载装置示意图

钢筋的应变通过在受拉与受压钢筋的跨中及 2 个三分点位置处粘贴应变片来测量;试验梁开裂

后,通过裂缝观测仪测量每级荷载下纵筋对应位置的裂缝宽度。试验梁钢筋应变片布置及裂缝测点位置如图 3 所示。图 3 中, a_s 为受拉区纵向钢筋合力点至截面受拉区边缘的距离。

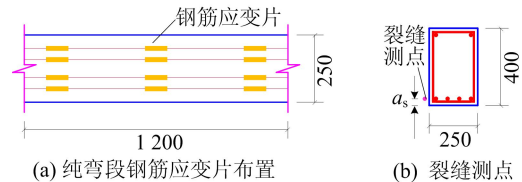


图 3 试验测点布置

2 试验现象

试验设计的 12 根 HRB600 级钢筋混凝土梁在加载过程中均出现适筋破坏特征,下面以最低配筋率试件(L1)和最高配筋率试件(L12)为代表,描述不同配筋率试件的试验现象。

(1) 试件 L1。试验先预加载(5 kN)检查各仪器是否正常工作,检查后卸载至 0 kN,然后开始正式加载。加载初期,钢筋的应变很小,钢筋及混凝土应变增长较为稳定。当加载至 57 kN 时,在纯弯段左、右加载点处截面下部各出现 1 条裂缝,宽度均为 0.02 mm,高度约 50 mm。加载到 106 kN 时,纯弯段裂缝延伸高度均大于 100 mm,最大延伸高度为 158 mm,此时最大裂缝宽度为 0.10 mm。加载到 174 kN 时,纯弯段裂缝高度发展迅速,最大延伸高度为 198 mm,最大裂缝宽度达到 0.20 mm。加载到 250 kN 时,纯弯段裂缝高度最大已达 252 mm,部分新增裂缝高度均超过 100 mm,此时最大裂缝宽度达到 0.24 mm。加载到 326 kN 时,弯剪段开始出现斜裂缝,纯弯段最大裂缝宽度达到 0.28 mm。加载到 392 kN 时,弯剪段斜裂缝迅速发展,纯弯段最大裂缝宽度已达到 0.38 mm。加载到 428 kN 时,纯弯段裂缝高度基本保持不变,最大裂缝宽度迅速发展至 0.48 mm,此时受拉钢筋屈服。随着荷载继续增加,试验梁最大裂缝宽度急剧发展,加载后期,荷载出现上下波动,荷载值难以增加,短暂的持续时间后,梁顶混凝土被压碎,试验梁破坏。整个加载过程经历较大的变形,破坏时最大裂缝宽度达到 2.00 mm,破坏具有明显的预兆。试件 L1 的裂缝分布及破坏形态分别如图 4、图 5 所示。

(2) 试件 L12。试件 L12 的裂缝分布及破坏形态分别如图 6、图 7 所示。

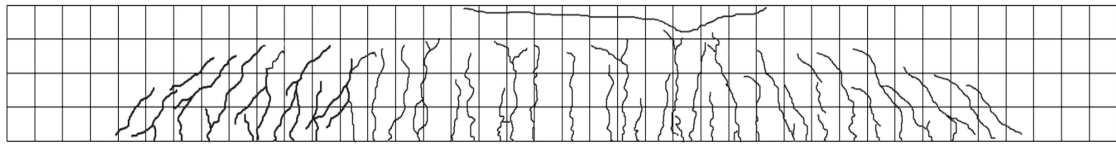


图 4 试件 L1 破坏阶段裂缝分布情况



(a) 整体破坏形态



(b) 受压区混凝土压碎

图 5 试件 L1 破坏形态

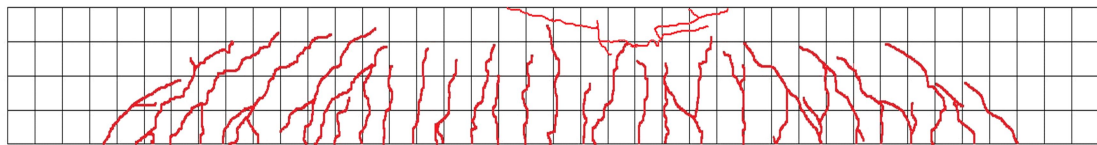
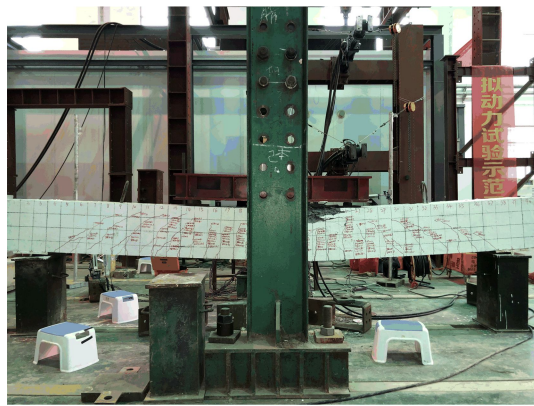


图 6 试件 L12 破坏阶段裂缝分布情况



(a) 整体破坏形态



(b) 受压区混凝土压碎

图 7 试件 L12 破坏形态

试验首先预加载(7 kN)检查各仪器是否正常工作,检查后卸载至 0 kN,然后开始正式加载。当加载到 75 kN 时,在纯弯段右加载点试验梁截面下部出现第 1 条裂缝,宽度为 0.03 mm,高度为 81 mm,梁开裂。加载到 137 kN 时,纯弯段裂缝高度延伸长度最大为 223 mm,平均延伸高度将近 1/2 梁高,最大裂缝宽度为 0.18 mm。加载到 210 kN 时,纯弯段裂缝高度发展很快,裂缝高

度接近 300 mm,最大裂缝宽度增大为 0.20 mm。加载到 270 kN 时,裂缝高度变化不大,裂缝宽度发展迅速,最大裂缝宽度为 0.28 mm。加载到 333 kN 时,纯弯段裂缝基本出齐,弯剪段裂缝开始斜向发展并不断延伸。加载到 393 kN 时,纯弯段裂缝高度基本保持稳定,最大裂缝宽度为 0.30 mm。加载到 528 kN 时,最大裂缝宽度为 0.40 mm,钢筋达到屈服应力。加载到 588 kN

时,纯弯段裂缝高度继续保持稳定,宽度保持不断增长,最大裂缝宽度为 0.50 mm,弯剪段斜裂缝开展明显,已经延伸到支座处。随着荷载的继续增加,裂缝宽度急剧增大,而基本不向上发展,跨中挠度增加较快。加载后期,荷载出现上下波动现象,荷载值很难增加,试验梁跨中挠度急剧增加,伴随着“蹦”的一声,梁顶部混凝土被压碎,试验梁破坏。整个过程经历较大的变形,破坏时最大裂缝宽度达到 2.30 mm,破坏具有明显的预兆。

分析试件 L1、试件 L12 整个加载过程中的试验现象,高配筋率试件在加载初期裂缝宽度增大更加快速,加载后期,不论是高配筋率试件,还是低配筋率试件,裂缝宽度发展都很快,在裂缝宽度发展到限值 0.30 mm 时,所有试验梁的承载力发挥程度均不充分,建议规范^[3]对配置 HRB600 级钢筋混凝土受弯构件裂缝宽度限值适当放宽。

3 试验结果分析

3.1 荷载-挠度曲线

12 个试件的荷载-跨中挠度曲线如图 8 所

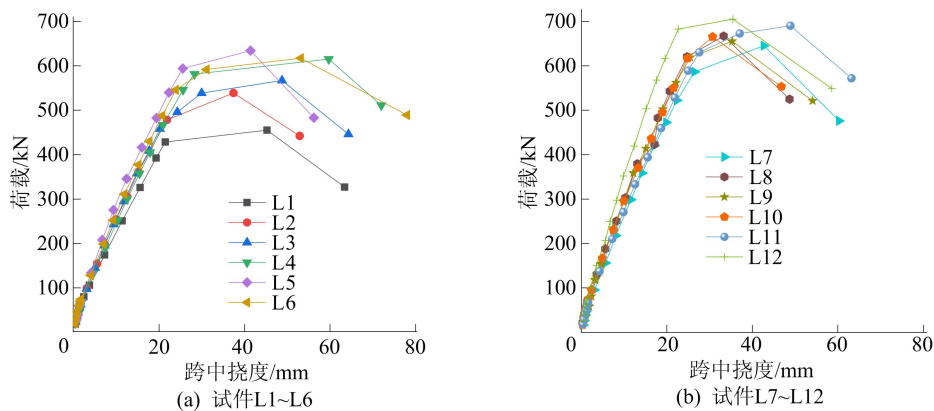


图 8 12 个试件的荷载-跨中挠度曲线

3.2 荷载-应变曲线

12 个试件的荷载-钢筋应变曲线如图 9 所示,钢筋应变片位于试验梁纯弯段受拉纵筋上。由图 9 可知:在加载初期,HRB600 级钢筋混凝土梁的钢筋应变较小,应变增长稳定,混凝土与钢筋共同受力;随着荷载增加,在试验梁的纯弯段首先出现裂缝,此时纯弯段区域抗拉承载力主要由受拉纵筋承担,钢筋应变明显增大,荷载-应变曲线斜率发生改变;此后继续加载,受拉钢筋应变不断增大,在约 $3\,000 \times 10^{-6}$ 时受拉钢筋屈服;之后随着荷载增加,荷载-应变曲线出现明显转折点,钢筋应变迅速增长;最终,随着荷载达到试验梁的极

限承载力,受压区混凝土被压碎,试验梁破坏。试验梁在破坏前受拉钢筋均已屈服,发生适筋破坏。

示,挠度值为跨中位移计读数与 2 个支座位移计读数平均值之差。

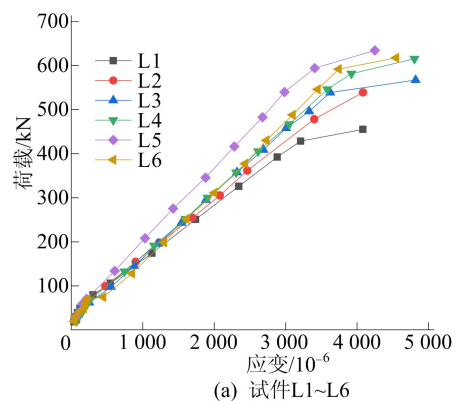
由图 8 可知,配置 HRB600 级钢筋混凝土梁的变形呈现适筋梁典型的三阶段模式。

(1) 弹性阶段。从开始加载至试验梁开裂前,试件的挠度增加较小,荷载-挠度曲线基本呈线性增加。

(2) 带裂缝工作阶段。当荷载增加至开裂荷载时,试验梁纯弯段内出现 1 条或几条初始裂缝,荷载-挠度曲线斜率开始发生改变,试件刚度略微降低。随着荷载进一步增加,试验梁挠度稳定增长,直至纵向受力钢筋达到其屈服强度后,试件变形发生突增,荷载-挠度曲线上出现明显的拐点,曲线斜率变化较大,试件刚度降低明显。

(3) 破坏阶段。当钢筋屈服后,荷载略微增加一段时间后基本保持不变,但试验梁挠度快速增加,中和轴位置快速上移,不久荷载出现上下波动现象,荷载值难以增加,随即伴随着清脆的“蹦”声,梁顶部混凝土被压碎,瞬间梁挠度值急剧增加,荷载下降,试验梁失去稳定承载能力。

限承载力,受压区混凝土被压碎,试验梁破坏。试验梁在破坏前受拉钢筋均已屈服,发生适筋破坏。



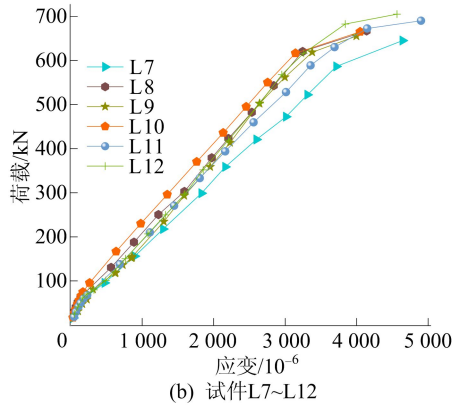
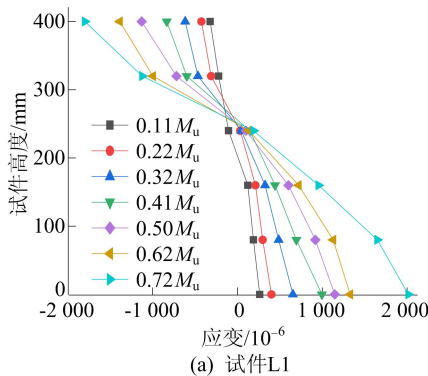


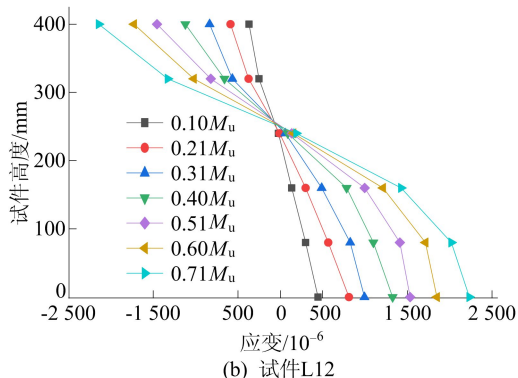
图 9 12 个试件的荷载-钢筋应变曲线

3.3 截面应变分布

试验过程中通过混凝土应变片测得试件在不同级荷载作用下的截面应变发展规律,试件 L1、L12 跨中截面应变分布如图 10 所示。图 10 中, M_u 为试件实测破坏弯矩。由图 10 可知,在正常使用阶段,配置 HRB600 级钢筋的混凝土梁在各级荷载作用下截面应变规律基本符合平截面假定。



(a) 试件L1



(b) 试件L12

图 10 试件 L1、L12 跨中截面应变分布

4 抗弯承载力试验分析

4.1 钢筋强度设计值取值

试验过程中,通过应变片和采集仪获得 12 个

试件破坏阶段的应变数据,见表 3 所列。

从表 3 可以看出,12 个试件破坏阶段受拉钢筋的峰值应变范围为 $3\ 996 \times 10^{-6} \sim 4\ 900 \times 10^{-6}$,受压钢筋的峰值应变范围为 $2\ 549 \times 10^{-6} \sim 2\ 818 \times 10^{-6}$ 。

表 3 12 个试件实测应变数据 10^{-6}

试件编号	受拉钢筋应变	受压钢筋应变
L1	4 081	-2 691
L2	4 082	-2 583
L3	4 818	-2 549
L4	4 803	-2 764
L5	4 248	-2 611
L6	4 544	-2 722
L7	4 643	-2 617
L8	4 138	-2 793
L9	3 996	-2 637
L10	4 047	-2 703
L11	4 900	-2 818
L12	4 564	-2 613

注:负号表示受压。

4.1.1 抗拉强度设计值

由表 2 可知,屈服强度实测值的平均值为 634.94 MPa,标准差为 12.92 MPa。结合表 3 试验梁破坏阶段受拉钢筋的应变数据,可认为对于受弯构件,受拉钢筋的屈服强度平均值 $\bar{f}_{yk} = 634.94$ MPa,标准差 $\sigma_{yk} = 12.92$ MPa。根据文献 [3],钢筋的强度标准值应具有不小于 95% 的保证率,则屈服强度标准值 $f_{yk} = \bar{f}_{yk} - 1.645\sigma_{yk} = 613.68$ MPa,可取屈服强度标准值 f_{yk} 为 600 MPa。

对于钢筋抗拉强度设计值,其为钢筋强度标准值除以材料的分项系数,按文献[3]取材料分项系数 γ_s 为 1.15,则抗拉强度设计值 $f_y = f_{yk}/\gamma_s = 521.70$ MPa,可取抗拉强度设计值 f_y 为 520 MPa。

综合以上分析,对于配置 HRB600 级高强钢筋混凝土受弯构件,钢筋的屈服强度标准值可取为 $f_{yk} = 600$ MPa,抗拉强度设计值可取为 $f_y = 520$ MPa。

4.1.2 抗压强度设计值

由表 3 可知,12 根试验梁的受压钢筋峰值应变平均值为 $2\ 675 \times 10^{-6}$,标准差为 82×10^{-6} 。钢筋的弹性模量为 200 GPa,则受压钢筋的应力平均值为 535 MPa,标准差为 16.59 MPa。钢筋的抗压强度标准值 $f_{yk}' = 507.71$ MPa,抗压强度

设计值 $f_y' = 441.49$ MPa,可取抗压强度设计值 $f_y' = 435$ MPa。

4.2 极限承载力计算

配置 HRB600 级钢筋混凝土梁在整个受力过程中基本符合平截面假定,根据文献[3]给出的公式对试件的极限承载力进行计算,计算结果与实测结果对比见表 4 所列。

表 4 中: M_u 为试验实测破坏弯矩; M_u^1 为取材料强度实测值计算的破坏弯矩; M_u^2 为取材料强度设计值计算的破坏弯矩。

表 4 12 个试件极限承载力试验值与理论计算值对比

试件编号	$M_u / (kN \cdot m)$	$M_u^1 / (kN \cdot m)$	$M_u^2 / (kN \cdot m)$	$\frac{M_u}{M_u^1}$	$\frac{M_u}{M_u^2}$
L1	273.0	267.5	226.0	1.02	1.21
L2	323.2	272.2	233.6	1.19	1.38
L3	340.2	300.4	257.1	1.13	1.32
L4	369.0	308.6	266.2	1.20	1.39
L5	380.4	372.2	314.0	1.02	1.21
L6	370.3	318.3	272.8	1.16	1.36
L7	387.0	320.3	279.0	1.21	1.39
L8	400.1	338.9	295.2	1.18	1.36
L9	393.1	342.4	297.1	1.15	1.32
L10	399.0	360.2	316.0	1.11	1.26
L11	414.1	377.4	325.1	1.10	1.27
L12	422.9	376.2	325.5	1.12	1.30

从表 4 可以看出:当钢筋和混凝土采用实测强度值进行受弯承载力计算时, M_u 值均大于 M_u^1 值, M_u/M_u^1 的变化范围为 1.02~1.21, 平均值为 1.13, 变异系数为 0.053, 这说明配置 HRB600 级钢筋混凝土梁的正截面受弯承载力可采用文献[3]中给出的计算公式进行计算;当材料强度取本文建议设计值进行计算时, M_u/M_u^2 的变化范围为 1.21~1.39, 平均值为 1.31, 变异系数为 0.047, 这说明对于抗弯承载力, 文献[3]的计算公式具有足够的安全储备。

5 现行规范计算公式适用性分析

5.1 短期刚度计算公式适用性

试验过程中用电子位移计测量试件从开始加载至破坏整个受力过程的位移变化,并与基于文献[3]短期刚度公式得到的挠度计算值进行对比,其结果如图 11 所示,见表 5 所列。图 11、表 5 中: f_t 为试件各级荷载作用下跨中挠度实测值; f_s 为基于文献[3]短期刚度公式得到的跨中挠度计算值。

从图 11、表 5 可以看出,当荷载较小时,试验梁跨中挠度实测值偏小,随着荷载增大,试验梁跨中挠度实测值与计算值比值逐渐稳定,整个加载过程中 f_t/f_s 的平均值为 0.925, 变异系数平均值为 0.099。

从整体上看,对于配置 HRB600 级钢筋混凝土梁,基于文献[3]短期刚度公式得到的跨中挠度计算值与试验实测挠度值吻合良好。

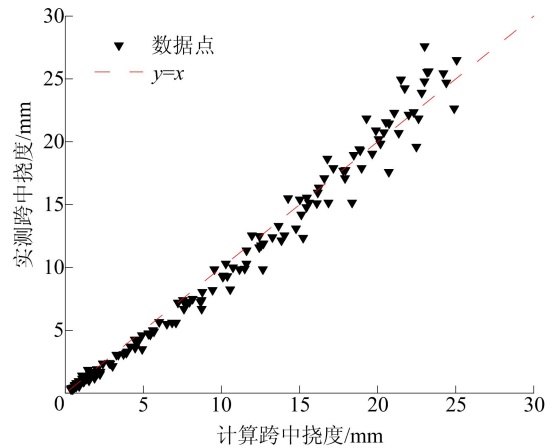


图 11 实测挠度值 f_t 与文献[3]计算值 f_s 比较曲线

表 5 12 个试件 f_t/f_s 平均值与变异系数

试件编号	测点数	f_t/f_s 平均值	变异系数
L1	12	0.945	0.062
L2	9	0.862	0.062
L3	15	0.944	0.123
L4	15	0.998	0.075
L5	12	0.976	0.090
L6	16	0.904	0.142
L7	14	0.959	0.047
L8	15	0.841	0.134
L9	17	0.968	0.147
L10	16	0.918	0.098
L11	15	1.022	0.099
L12	16	0.765	0.110

5.2 短期工况下裂缝宽度计算公式适用性

对于短期荷载作用下受弯构件纵筋水平位置处裂缝宽度最大值 w_{max} , 文献[3]给出的计算公式为:

$$w_{max} = \tau_s w_m = \tau_s \alpha_c \psi \frac{\sigma_{sq}}{E_s} \left(1.9c_s + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right) \quad (1)$$

其中: w_m 为平均裂缝宽度; τ_s 为短期裂缝宽度扩大系数; α_c 为裂缝间混凝土自身伸长对裂缝宽度的影响系数; σ_{sq} 为受弯构件受拉区纵向钢筋的应

力; ψ 为裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数; c_s 为最外层纵向受拉钢筋外边缘至受拉区底边的距离; E_s 为钢筋弹性模量; d_{eq} 为受拉区纵向钢筋的等效直径; ρ_{te} 为按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率。

试验过程中通过裂缝观测仪测量每级荷载下受拉纵筋水平处截面裂缝宽度,并与按照文献[3]公式计算的最大裂缝宽度值进行比较,结果如图 12 所示。

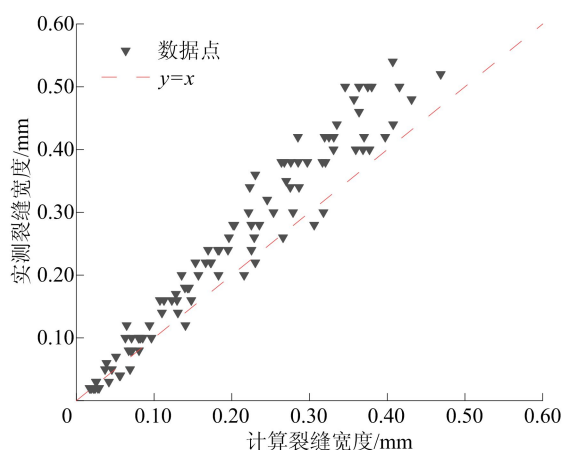


图 12 裂缝宽度实测值与文献[3]计算值比较曲线

从图 12 可以看出,在短期荷载作用下,配置 HRB600 级钢筋混凝土梁在不同等级荷载下,最大裂缝宽度实测值基本均比计算值大,特别是随着荷载增加,实测值大于计算值的程度越来越显著,当实测最大裂缝宽度大于 0.30 mm 后,实测值均大于计算值。研究结果说明,利用文献[3]计算配置 HRB600 级钢筋混凝土梁在短期荷载作用下的最大裂缝宽度时,计算公式需要调整。

5.3 短期工况下裂缝宽度计算公式修正

本文通过 12 根试验梁 108 个裂缝测点数据,得到短期荷载下最大裂缝宽度实测值与计算值的比值为 1.197,变异系数为 0.174。为保证文献[3]中计算公式的准确性和完整性,考虑直接对文献[3]中计算公式乘以最大裂缝宽度调整系数 k 。根据试件 L1~L12 的裂缝测点数据进行拟合分析,取 k 为 1.15。

调整后短期荷载作用下的最大裂缝宽度计算公式为:

$$\omega_{\max} = k\tau_s\omega_m = k\tau_s\alpha_c\psi\frac{\sigma_{sq}}{E_s}\left(1.9c_s + 0.08\frac{d_{eq}}{\rho_{te}}\right) \quad (2)$$

根据(2)式进行计算,将实测值与计算值进行

对比,结果如图 13 所示。实测值与本文(2)式计算值比值的平均值为 1.041,变异系数为 0.142,计算值与试验数据吻合较好。

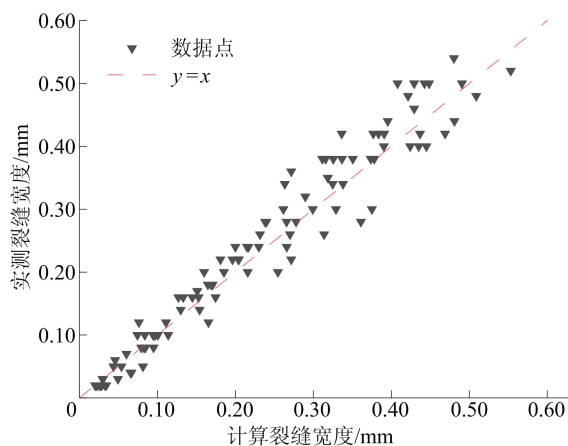


图 13 裂缝宽度实测值与本文公式计算值比较曲线

目前,对于配置 HRB600 级钢筋混凝土梁的裂缝宽度,已有一些研究成果。文献[4]通过 4 根 HRB600 级钢筋混凝土梁研究发现,最大裂缝宽度计算值 ω_{\max} 比由试验实测最大裂缝推算的长期最大裂缝宽度 ω_{\max}^0 大, $\omega_{\max}^0/\omega_{\max}$ 的平均值为 0.746,变异系数为 0.068,认为现行规范[3]计算公式具有足够的安全储备,该结果基于 4 根梁共 4 个裂缝测点所得;文献[5]通过 5 根 HRB600 级钢筋混凝土梁研究发现,各试件在正常使用极限状态下实测最大裂缝宽度与规范[3]计算值比值平均值为 1.090,变异系数为 0.043,认为现行规范[3]基本适用,该结果基于 5 根梁共 5 个裂缝测点所得;文献[9]通过 6 根 HRB600 级钢筋混凝土梁研究发现,试验梁实测最大裂缝宽度长期推算值与长期最大裂缝宽度计算值的比值平均值为 1.060,标准差为 0.060,变异系数为 0.056,认为现行规范[3]中最大裂缝宽度的计算公式可以用于计算 HRB600 级钢筋混凝土梁的最大裂缝宽度,该结果基于 6 根梁共 6 个裂缝测点所得;文献[8]通过 12 根 HRB600 级钢筋混凝土梁研究发现,配置 HRB600 级高强钢筋的受弯构件裂缝宽度的理论值大于实测值,此时高强钢筋的经济性无法得到充分发挥,建议调整计算公式的保证率来优化公式,公式调整后的变异系数为 0.310;文献[7]通过 18 根 HRB600 级钢筋混凝土梁研究发现,短期荷载作用下裂缝宽度计算值与实测值的比值平均值为 0.920,然后通过研究平均裂缝间距和短期裂缝宽度扩大系数对现行规范[3]的裂缝

计算公式进行调整,该结果是基于较丰富的试验数据所得,与本文的研究成果比较相似。

6 结 论

本文通过研究 12 根配置 HRB600 级钢筋、C50 混凝土梁的抗弯性能试验,结合试验现象及相关试验数据对试件的破坏形态、钢筋强度设计值取值、极限承载力、跨中挠度及裂缝宽度等开展讨论,主要结论如下:

(1) 试验梁的受力过程主要分为 3 个阶段,即弹性阶段(初始裂缝出现前)、带裂缝工作阶段(初始裂缝出现至受拉钢筋屈服)、破坏阶段(受拉钢筋屈服至受压区混凝土被压碎)。试验结果表明,配置 HRB600 级高强钢筋混凝土梁的受力形态、破坏模式与普通钢筋混凝土梁相同,且梁跨中截面混凝土应变符合平截面假定。

(2) 试验梁受拉钢筋的峰值应变范围为 $3.996 \times 10^{-6} \sim 4.900 \times 10^{-6}$,受压钢筋的峰值应变范围为 $2.549 \times 10^{-6} \sim 2.818 \times 10^{-6}$,结合钢筋的拉伸试验数据,本文建议对于受弯构件,HRB600 级钢筋屈服强度标准值取 600 MPa,抗拉强度设计值取 520 MPa,抗压强度设计值取 435 MPa。

(3) 通过观测试验梁纯弯段跨中挠度的发展情况,并与基于文献[3]中短期刚度计算公式得到的理论挠度值进行对比分析,发现试验梁跨中挠度实测值与理论计算值吻合良好。

(4) 利用文献[3]公式计算 HRB600 级钢筋混凝土梁的最大裂缝宽度,发现计算值比实测值小。基于文献[3]引入最大裂缝宽度调整系数 k ,直接在原公式基础上乘以最大裂缝宽度调整系数 k ;根据本次试验的裂缝测点数据进行拟合分析,取 k 为 1.15,研究发现,调整后的计算值与试验值吻合较好。

结构工程师,2013,29(6):169-176.

- [2] 白力更,刘维亚. 超高强钢筋在混凝土结构中的研究与应用[J]. 建筑结构,2016,46(12):49-53.
- [3] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010:19-100.
- [4] 陈晨,杨晓东,潘文,等. 600 MPa 钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 建筑结构,2018,48(6):1-4.
- [5] 王新玲,白岩,朱俊涛. 正常使用状态下 600 MPa 级钢筋混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 工业建筑,2020,50(10):20-25.
- [6] 熊浩,穆飞,葛杰,等. 600 MPa 级钢筋混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 工业建筑,2018,48(12):77-82.
- [7] 孙传智,缪长青,李爱群,等. 短期荷载作用下 600 MPa 级超高强钢筋混凝土梁裂缝宽度试验研究[J]. 土木工程学报,2020,53(1):12-23.
- [8] 熊浩,葛杰,孙翠华. 高强钢筋混凝土梁最大裂缝宽度试验与分析[J]. 建筑结构,2018,48(增刊 2):591-594.
- [9] 张健新,戎贤,刘平. 600 MPa 钢筋混凝土梁裂缝及变形性能试验研究[J]. 建筑结构,2017,47(24):89-92,82.
- [10] 管俊峰,张谦,王伟凤,等. 600 MPa 级新型高强抗震钢筋的混凝土梁抗裂性能研究[J]. 混凝土,2016(7):49-52.
- [11] 管俊峰,刘霖艾,白卫峰,等. 600 MPa 高强钢筋高强混凝土梁刚度试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2020,28(5):1197-1211.
- [12] 管俊峰,刘霖艾,张谦,等. 配置 600 MPa 高强钢筋混凝土梁跨中挠度试验研究及计算方法[J]. 建筑结构学报,2021,42(8):59-72.
- [13] 张建伟,姜立伟,乔崎云,等. HRB600 级钢筋高强混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 工业建筑,2017,47(6):6-12.
- [14] 张建伟,张德利,冯曹杰,等. HRB600 级钢筋高强混凝土无腹筋梁受剪试验研究[J]. 工程力学,2020,37(增刊 1):275-281.
- [15] 中国建筑科学研究院,中建国际建设有限公司. 混凝土结构试验方法标准:GB/T 50152—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012:23-25.

(责任编辑 张淑艳)

[参 考 文 献]

- [1] 范重,徐琳,冯远,等. 高强钢筋在工程中应用的探讨[J].