

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202002026



配置 500 MPa 级钢筋混凝土梁 的抗弯延性分析

刘志彬¹, 曾志兴¹, 刘祥², 赵荣春¹

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 为分析配置 500 MPa 级纵筋混凝土梁的抗弯延性性能,对 6 个混凝土梁试件进行弯曲破坏试验,分析不同混凝土强度和纵筋配筋率对延性性能的影响.结果表明:配置 500 MPa 级纵筋混凝土梁与 400 MPa 级纵筋混凝土梁的弯曲破坏形式基本一致;随着混凝土强度等级的增大,梁的抗弯承载力和延性也相应增大;纵筋配筋率的提高会使梁的延性降低;相对于 400 MPa 级纵筋混凝土梁,在相同的纵筋配筋率及混凝土强度条件下,配置 500 MPa 级纵筋混凝土梁的抗弯承载力得到明显改善,但其延性会下降.在工程中,可以通过降低纵筋配筋率提高混凝土梁的延性,达到节省钢筋的目的.

关键词: 500 MPa 级钢筋; 混凝土梁; 抗弯破坏; 延性

中图分类号: TU 375.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2020)04-0434-05

Analysis of Flexural Ductility of Reinforced Concrete Beams With 500 MPa Steel

LIU Zhibin¹, ZENG Zhixing¹, LIU Xiang², ZHAO Rongchun¹

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: In order to analyze the flexural ductility performance of concrete beams with 500 MPa longitudinal reinforcement, the bending failure tests of 6 concrete beam specimens were carried out to analyze the influence of different concrete strengths and the ratio of longitudinal reinforcement on the ductility performance. The results show that the bending failure of 500 MPa reinforced concrete beam is basically the same as that of 400 MPa reinforced concrete beam. With the increase of concrete strength grade, the flexural capacity and ductility of the beam increase. With the increase of the ratio of longitudinal reinforcement, the ductility of the beam decreases. Comparing with the 400 MPa longitudinal reinforced concrete beam, the flexural capacity of the 500 MPa longitudinal reinforced concrete beam with the same longitudinal reinforcement ratio and concrete strength is significantly improved, but its ductility decreases. In the engineering, the ductility of the concrete beam can be improved by reducing the ratio of longitudinal reinforcement, so as to save steel bar.

Keywords: 500 MPa steel bar; concrete beam; flexural failure; ductility

延性是指结构或构件在达到其极限承载力的情况下,仍能在产生一定的变形下维持它的承载力的一种变形能力,其在结构或构件出现危险后不会突然破坏,从而起到警示作用,同时,能够充分利用材料

收稿日期: 2020-02-25

通信作者: 曾志兴(1967-),男,教授,博士,主要从事混凝土结构的研究. E-mail:zhixing@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2017J01095); 华侨大学研究生科研创新基金资助项目(18014086019)

的性能^[1]. 500 MPa 级钢筋具有高强度、高延性等特点, 在工程结构中, 高性能材料能够起到节省材料的目的^[2]. 我国建筑钢筋的发展大致经历了引进模仿、自主研发、引进技术和设备、吸引创新 4 个阶段^[3-4], 总体上是由低强度向高强度发展.

近年来, 国内外已对 500 MPa 级钢筋混凝土进行了大量研究, 包括其构件的承载能力^[5-7]、正常使用性能^[8-11]、抗震性能^[12-15]等. 目前, 我国已将 500 MPa 级钢筋列入规范使用钢筋, 但其混凝土梁的设计规范仍然按照 400 MPa 级钢筋的要求. 采用旧规范对新钢筋进行规定, 有可能过于保守且浪费钢筋, 不利于高强钢筋的使用和推广. 因此, 本文对配置 500 MPa 级钢筋混凝土梁的抗弯延性进行试验研究, 讨论纵筋的强度等级、配筋率, 以及混凝土强度对混凝土梁延性的影响.

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

表 1 为试件参数. 表 1 中: ρ 为纵筋配筋率. 试验设计并制作 6 个钢筋混凝土梁试件, 其中, 2 个配置 400 MPa 级纵筋, 4 个配置 500 MPa 级纵筋. 试件均为截面 250 mm×400 mm(宽×高), 长度 2 700 mm 的矩形梁; 混凝土保护层厚度均为 25 mm; HPB 300 级钢筋的箍筋直径均为 10 mm、间距为 80 mm; 混凝土梁的上层纵筋采用 2 根直径为 10 mm 的 HPB 300 级钢筋作为架立筋, 其余纵筋均设置为底部钢筋. 为获取试件在加载过程中的应变变化情况, 分别在底部纵筋中间部位、混凝土梁中间截面的混凝土表面粘贴应变片.

1.2 试验加载装置、加载制度及量测

1.2.1 加载装置 为了分析混凝土梁的抗弯性能, 混凝土梁的两端为铰支(一边滑动、一边固定), 采用两点同步加载形式, 从而获得跨中纯弯段部分. 加载示意图, 如图 1 所示. 图 1 中: F 为荷载; a_1 为加载点到梁边支座间的距离, $a_1=800$ mm; a_2 为两个加载点间的距离, $a_2=800$ mm. 试验加载图, 如图 2 所示.

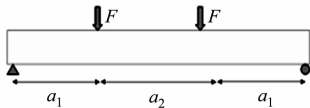


图 1 加载示意图



图 2 试验加载图

Fig. 1 Loading diagram Fig. 2 Test loading diagram

1.2.2 加载制度及量测 依据相关标准的要求进行分级加载, 在每个试件加载前有一个预加载部分. 正式加载初期, 采用力控制进行分级加载; 当荷载施加至预估极限承载力的 70% 时, 转为位移控制, 分级加载, 加载速率为 1 mm·min⁻¹; 试件的承载力下降至极限承载力的 85% 后, 停止加载^[16]. 在梁底中间部位及梁顶端部安置位移传感器.

2 试验现象与结果分析

2.1 材料性能

表 2 为钢筋强度表. 表 2 中: σ_s 为屈服强度; σ_b 为抗拉极限强度. 在加载前对材料进行测试, 得到 C50 和 C70 混凝土标准试块的抗压强度为 53.81, 2.31 MPa.

表 2 钢筋强度

2.2 试验现象

各个试件的破坏形态相似, 均为弯曲延性破坏. 加载初期, 各试件的首条裂纹均出现在单边荷载 40 kN 左右时, 其裂缝宽度为 0.04~0.10 mm, 且裂缝均由梁底跨中部位沿梁宽度

Tab. 2 Reinforcement strength

纵筋强度等级	σ_s /MPa	σ_b /MPa
400 MPa 级	446.2	586.0
500 MPa 级	540.0	675.0

发展. 随着荷载的增大, 纯弯段开始不断出现竖向裂缝和新的横向裂缝, 同时, 在剪跨区段也开始出现细长的斜裂缝, 但其宽度及发展速率较纯弯段小. 当试件 L1~L6 的荷载分别增加到 160, 220, 140, 220, 140, 220 kN 时, 梁的裂缝开展已较为明显, 此时, 试件 L1~L6 的主裂缝宽度分别为 0.62, 0.36, 0.30, 0.46, 0.36, 0.30 mm; 此后, 由力控制转为位移控制, 当试验梁达到极限荷载时, 试件 L1~L6 的承载力

分别为 419.75,589.10,452.95,615.20,470.17,654.60 kN;当试件 L1~L6 的作动头平均相对位移分别达到 33.98,25.90,34.06,27.31,36.40,27.53 mm 时,试验梁纯弯段受压区混凝土压碎,钢筋已屈服,试件发生适筋破坏,试验结束.各个试件纯弯段的最终破坏图,如图 3 所示.

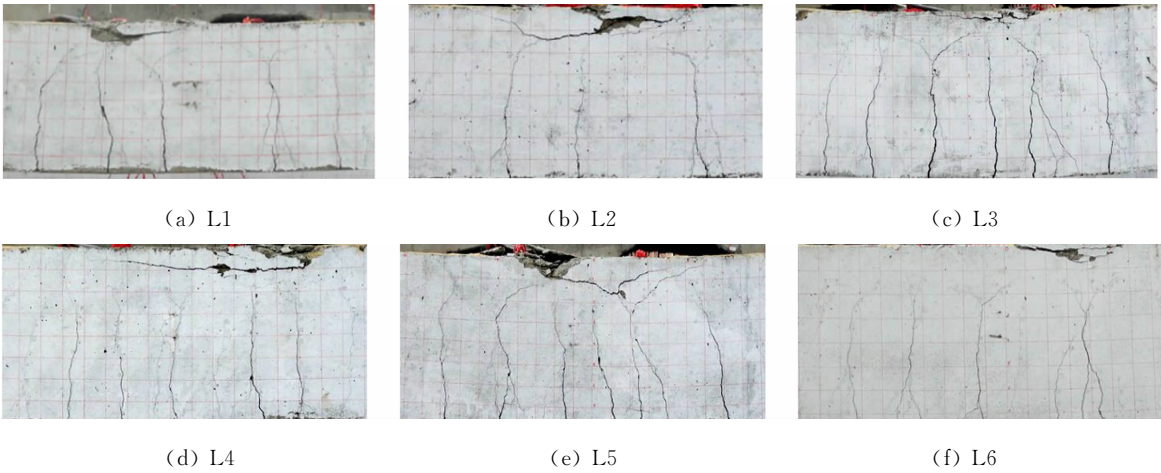


图 3 试件纯弯段的最终破坏图

Fig. 3 Final failure diagram of the specimen pure bending section

2.3 试验结果分析

2.3.1 试验梁平截面假定适用性 平截面假定即变形之前的平面在变形之后仍保持为平面^[17].为了分析配置 500 MPa 级纵筋混凝土梁截面是否满足平截面假定,在试件中部沿着高度均匀布置了应变片,以测量不同荷载作用下的应变分布情况.各个试件的跨中截面混凝土应变分布,如图 4 所示.图 4 中: h 为梁截面高度; ϵ 为跨中截面应变.

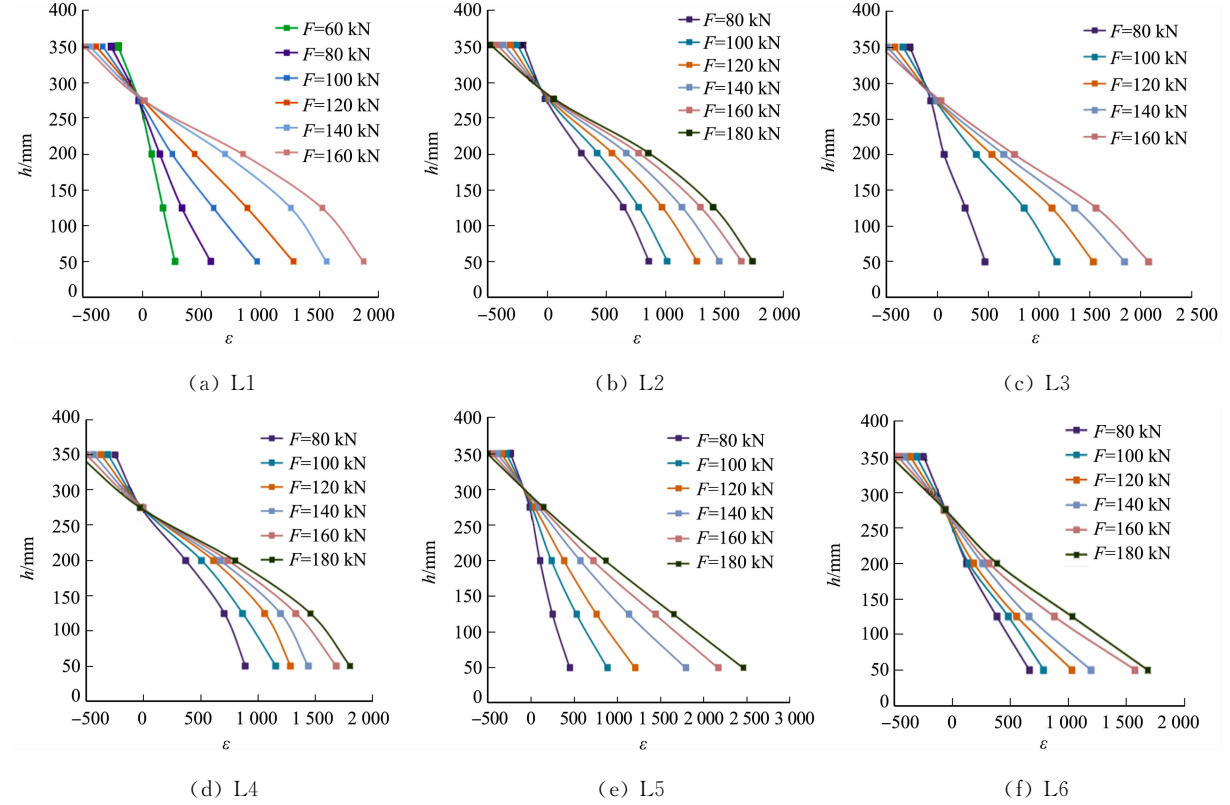


图 4 试件的跨中截面混凝土应变分布

Fig. 4 Strain distribution of concrete in midspan section of specimens

由图 4 可知:在加载初期,各个试件的应变分布沿着梁截面高度呈线性变化,随着荷载增大,该线性变化规律不再明显.总体而言,试件的截面基本上符合平截面假定.

2.3.2 试验梁跨中弯矩-挠度曲线分析 各个试件的跨中弯矩(M)-挠度(γ)曲线,如图 5 所示.各试件的弯矩-挠度曲线均经历了 4 个阶段:上升阶段 1;上升阶段 2;水平波动阶段;下降阶段.

由图 5 可知:上升阶段 1 持续较短,主要由于加载初期混凝土未开裂,整个试件为弹性阶段,荷载较小时混凝土即开裂,梁截面刚度突变;上升阶段 2 持续较长且基本为线性,当底部受拉钢筋屈服后,混凝土梁达到极限承载力;在水平波动阶段中,梁所承受的荷载不再加大,且过程较长,这一段体现了混凝土梁弯矩破坏的延性性质;随着位移的增加,混凝土不断被压碎,当受压区混凝土全部压碎后,梁所承受的荷载迅速下降,试件破坏.500 MPa 级和 400 MPa 级钢筋的试验梁从位移曲线的变化趋势上看,是基本一致的.

2.3.3 延性系数的计算 延性系数是衡量结构或构件延性性能的指标,通过构件的极限位移(Δ'_u)与屈服位移(Δ'_y)的比值确定.极限位移与屈服位移分别由架设在跨中梁底的位移计测量,并通过 DH3816N 型采集系统采集数据.计算得到的试件延性系数,如表 3 所示.

3 试验的影响因素分析

对钢筋混凝土梁抗弯延性的主要影响因素有混凝土强度、钢筋强度和纵筋配筋率.

3.1 混凝土强度

在采用同样钢筋强度和纵筋配筋率的情况下,分别对比试件 L3 与 L5,L4 与 L6 可知,随着混凝土强度的提高,梁的抗弯承载力略有提高,混凝土强度等级由 C50 提高至 C70,试件的抗弯承载力分别由 452.95 kN 提高到 470.17 kN,615.20 kN 提高到 654.60 kN,分别提高了 3.8%和 6.4%.随着混凝土强度等级的增大,试件的延性也相应提高.

3.2 钢筋强度

在采用同样混凝土强度和纵筋配筋率的情况下,分别对比试件 L1 与 L5,L2 与 L6 可知,它们的抗弯承载力分别由 419.75 kN 提高到 470.17 kN,589.10 kN 提高到 654.60 kN,分别提高了 12.0%和 11.1%,说明采用 500 MPa 级纵筋能够有效地提高试件的承载能力,而采用高强度钢筋并不能有效地提高混凝土梁构件的延性.

3.3 纵筋配筋率

在采用同样钢筋强度和混凝土强度的情况下,分别对比试件 L1 和 L2,L3 和 L4,L5 和 L6 可以发现,其抗弯承载力分别提高了 40.3%,35.8%和 39.2%,说明纵筋配筋率的提高能够显著改善混凝土梁的抗弯承载力,但纵筋配筋率大的试件的极限变形较小、延性较差,这与 400 MPa 级纵筋混凝土梁的规律类似.因此,在设计中应注意控制梁的最大纵筋配筋率,从而保障试件的延性性能.

4 结论

通过对 6 个钢筋混凝土梁的抗弯性能进行试验研究,分析配置 500 MPa 级纵筋混凝土梁截面的抗弯延性,得到以下 4 点结论.

- 1) 配置 500 MPa 级纵筋混凝土梁与配置 400 MPa 级纵筋混凝土梁的适筋受弯破坏形式类似,且混凝土梁截面基本符合平截面假定.
- 2) 在其他参数一致的情况下,随着混凝土强度的提高,梁的抗弯承载力和延性均有所提高.
- 3) 在其他参数一致的情况下,纵筋配筋率的提高能够有效提高梁的抗弯承载力,但纵筋配筋率大

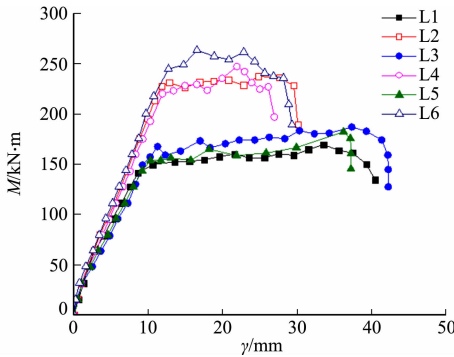


图 5 试件的跨中弯矩-挠度曲线
Fig. 5 Midspan bending moment-deflection curve of specimens

表 3 试件延性系数

Tab. 3 Ductility coefficient of specimens			
试件编号	Δ'_y/mm	Δ'_u/mm	Δ'_u/Δ'_y
L1	11.19	42.08	3.76
L2	12.62	29.17	2.31
L3	10.22	37.07	3.63
L4	11.89	26.77	2.26
L5	10.47	40.47	3.86
L6	12.81	30.09	2.35

的试件的极限变形能力较小、延性较差.

4) 在其他参数一致的情况下,配置 500MPa 级纵筋的混凝土梁较配置 400MPa 级纵筋的混凝土梁在抗弯承载力上有较大提高,但对延性的提高有限.

参考文献:

[1] 方德平. 外贴纤维布加固砼梁的截面延性分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2001, 22(4): 385-388. DOI:10.3969/j. issn. 1000-5013. 2001. 04. 012.

[2] 刘立新, 谢丽丽, 于秋波. 500 MPa 级钢筋混凝土构件受力性能与工程应用[C]// 首届全国建筑结构技术交流会论文集. 北京: 中国建筑设计研究院, 2006: 560-562. DOI:10.19701/j. jzjg. 2006. s1. 130.

[3] 王厚听, 李正邦. 中国热轧带肋钢筋的发展和现状[J]. 中国冶金, 2006, 16(6): 6-9. DOI:10.13228/j. boyuan. issn 1006-9356. 2006. 06. 002.

[4] 黄伟, 张丽, 王平, 等. 建筑用钢筋的应用发展研究[J]. 建筑技术, 2010, 41(3): 242-245. DOI:10.3969/j. issn. 1000-4726. 2010. 03. 014.

[5] 王全凤, 刘凤宜, 杨勇新, 等. HRB500 级钢筋混凝土简支梁受弯试验[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2007, 28(3): 300-303. DOI:10.3969/j. issn. 1000-5013. 2007. 03. 020.

[6] 戎贤, 宋鹏, 张健新, 等. 配置 HRB500 钢筋的混凝土桥墩承载力与耗能性能[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2015, 36(1): 62-66. DOI:10.15926/j. cnki. issn1672-6871. 2015. 01. 012.

[7] 易伟建, 潘柏荣, 吕艳梅. HRB500 级钢筋配箍的混凝土梁受剪性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(4): 56-62. DOI:10.15951/j. tmgcxb. 2012. 04. 014.

[8] 傅剑平, 王晓锋, 朱爱萍, 等. 配置 500 MPa 钢筋混凝土梁长期荷载裂缝宽度试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(1): 47-53. DOI:10.14006/j. jzjgxb. 2011. 01. 005.

[9] 李艳艳, 杜闯, 陈向上, 等. HRB500 钢筋的锚固设计及可靠度分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2012, 37(4): 808-813. DOI:10.13624/j. cnki. issn. 1001-7445. 2012. 04. 036.

[10] LI Ke, WANG Xinling, CAO Shuangyin, *et al.* Fatigue behavior of concrete beams reinforced with HRBF500 steel bars[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2015, 53(2): 311-324. DOI:10.12989/sem. 2015. 53. 2. 311.

[11] 于敬海, 王少华, 王燕, 等. 应用 HRB500 级高强钢筋的剪力墙与框筒结构体系安全性分析[J]. 建筑结构, 2015, 45(22): 55-59. DOI:10.19701/j. jzjg. 2015. 22. 010.

[12] 傅剑平, 邓艳青, 王晓锋, 等. 考虑箍筋约束的 HRB500 级纵筋柱抗震性能试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(1): 78-84. DOI:10.13204/j. gyjz2012. 01. 023.

[13] 周建民, 潘邢华, 张帆. 配 500 MPa 钢筋后张有黏结预应力混凝土梁抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(5): 47-57. DOI:10.15951/j. tmgcxb. 2013. 05. 015.

[14] 刘文锋, 王来其, 高彦强, 等. 高强钢筋混凝土框架抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(11): 64-74. DOI:10.15951/j. tmgcxb. 2014. 11. 041.

[15] WANG Tiecheng, LIU Xiao, ZHAO Hailong. Experimental study of the seismic performance of L-shaped columns with 500 MPa steel bars[J]. Scientific World Journal, 2014, 2014: 105826. DOI:10.1155/2014/105826.

[16] 熊仲明, 王社良. 土木工程结构试验[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.

[17] FERNANDO G M, ADOLFO A D, FLAVIA D L, *et al.* Ductility of wide-beam RC frames as lateral resisting system[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2016, 14(6): 1545-1569. DOI:10.1007/s10518-016-9891-x.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 方德平)