

配置高强钢筋的混凝土梁裂缝试验研究

李志华¹, 苏小卒², 赵勇²

(1. 扬州大学 建筑科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 2. 同济大学 土木学院, 上海 200092)

摘要:采用两点对称集中的同步分级加载方式,对8根配置500 MPa钢筋和4根配置400 MPa细晶钢筋的混凝土梁进行静力加载试验,观测试件的裂缝发展过程,了解此类构件的裂缝特点,为工程中推广应用500 MPa钢筋和400 MPa细晶钢筋提供试验依据。试验结果表明,配置500 MPa钢筋和400 MPa细晶钢筋的受弯构件裂缝发展规律与普通钢筋混凝土受弯构件基本相同,但在正常使用状态下,按照现行混凝土结构设计规范对此类构件进行裂缝宽度验算,计算值均大于试验值。同时,结合其它67根配置高强钢筋的混凝土梁试验数据,评估了现行混凝土结构设计规范裂缝宽度公式的适用性,并在该规范的计算模式基础上,提出平均裂缝间距及短期最大裂缝宽度计算的修正公式,修正公式的计算结果与试验结果符合较好。

关键词:钢筋混凝土;梁;高强钢筋;裂缝间距;裂缝宽度

中图分类号:TU375.1 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2010)01-0051-05

Experimental Analysis of Cracking Behavior of Concrete Beams Reinforced with High-Strength Bars

LI Zhi-hua¹, SU Xiao-zu², ZHAO Yong²

(1. Building Science and Engineering College, Yangzhou University, Yangzhou 225009, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: Eight concrete beams reinforced with 500MPa steel bars and four reinforced with 400MPa ultra-fine grain steel bars were tested under two-point symmetrical concentrated static loading to observe the details of crack pattern development on these beams and investigate their cracking characteristics. It was shown that the cracking behavior of the beams with high-strength bars was essentially similar to that of common RC flexural members, whereas the computed crack widths using the formula adopted in the Code for Design of Concrete Structures GB 50010-2002 exceeded that of the experiment under the normal service. Furthermore, the formulas for crack spacing and crack width specified in GB 50010-2002 were evaluated through the experimental results and previous studies of sixty-seven concrete beams reinforced with high-strength bars. On the basis of the calculation model in GB 50010-2002, revised formulas for crack spacing and crack width were proposed. The values calculated by revised formulas were in good agreement with the test results.

Key words: reinforced concrete; beams; high-strength bar; crack spacing; crack width

在发达国家500 MPa钢筋已成为非预应力钢筋混凝土结构的主导钢筋^[1-4],而我国的非预应力钢筋混凝土结构长期以来主要采用屈服强度标准值不超过335 MPa的钢筋,HRB400钢筋于1996年列入

收稿日期:2009-08-07

基金项目:国家“863”计划课题(2004AA33G050)

作者简介:李志华(1982-),女,博士,主要从事混凝土结构研究,(E-mail)lizhihua-1982@tom.com。

国家标准《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)^[5](以下简称《规范》)中。为了使国内的非预应力钢筋混凝土结构所用钢筋与国际接轨,我国新研制了 500 MPa 钢筋及 400 MPa 细晶钢筋,但因缺乏相应试验资料而尚未列入《规范》中,因此有必要补充相关的试验资料。

一般来讲,在同等结构体系中,钢筋强度越高,材料用量就会减少,可获得较好的社会效益。但配置高强钢筋的构件可能由使用性能要求控制配筋设计而限制钢筋强度的发挥^[6-7],对此,结构工程师对采用强度较高的非预应力钢筋持慎重的态度。因此,研究配置 500 MPa 钢筋或 400 MPa 细晶钢筋的混凝土构件使用性能是一个有意义的课题。该文主要通过配置 500 MPa 钢筋和配置 400 MPa 细晶钢筋的混凝土梁受弯性能试验,研究配置高强钢筋混凝土梁的裂缝特点,同时结合已有配置高强钢筋的混凝土梁试验数据,评估《规范》中裂缝宽度公式的适用性并提出修正建议。

1 试验概况及结果

试件为 8 根配置 500 MPa 钢筋(其中直径 25 mm 的为细晶钢筋,直径 32 mm 的为 HRB500 钢

筋)和 4 根配置 400 MPa 细晶钢筋的混凝土梁,设计时主要考虑保护层厚度、纵向受拉钢筋直径和配筋率等参数。所有试件均正位浇注。配置 400 MPa 钢筋的混凝土梁采用三分点集中对称的同步分级加载方式。配置 500 MPa 钢筋的混凝土梁采用反位加载(图 1),便于观测受拉底面的裂缝。试件明细如图 2 及表 1 所示。

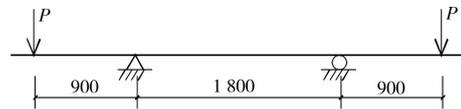
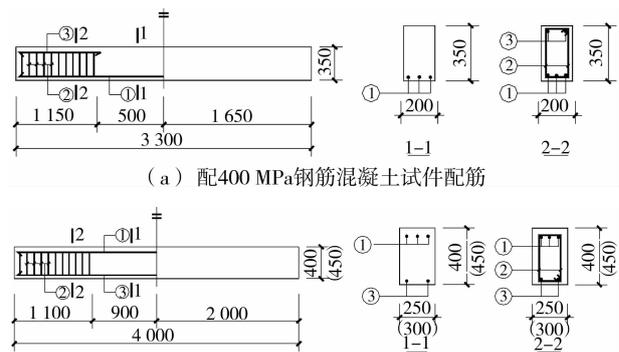


图 1 试件反位加载示意图



(a) 配 400 MPa 钢筋混凝土试件配筋

(b) 配 500 MPa 钢筋混凝土试件配筋

图 2 试件配筋

表 1 试验梁的基本参数

试件编号	f_{cu}/MPa	$b \times h \times L/\text{mm}$	保护层/ mm	配筋情况		
				①	②	③
B4F1	23.26	199×350×3 300	25	216	8@100	214
B4F2	28.30	200×352×3 300	25	2 Φ 25	8@60	2 Φ 14
B4F3	62.81	203×350×3 300	25	2 Φ 25+116	10@100	2 Φ 14
B4F4	58.07	205×349×3 300	25	2 Φ 25	8@60	2 Φ 14
B5F1	34.01	251×403×4 000	24	3 Φ 16	10@100	2 Φ 16
B5F2	34.01	250×402×4 000	23	2 Φ 25	10@60	2 Φ 16
B5F3	56.16	253×403×4 000	25	3 Φ 16	10@100	2 Φ 16
B5F4	56.16	249×401×4 000	23	2 Φ 25	10@60	2 Φ 16
CB5-1	34.01	251×402×4 000	59	2 Φ 25	10@100	2 Φ 16
CB5-2	34.01	303×454×4 000	56	2 Φ 32	10@60	2 Φ 16
CB5-3	56.16	255×406×4 000	59	3 Φ 25	10@60	2 Φ 16
CB5-4	56.16	254×403×4 000	57	2 Φ 32	10@60	2 Φ 16

配置 400 MPa 细晶钢筋的试件每个试件单独浇注,每个试件浇注后各留置 3 组(每组 3 个)边长为 150 mm 的立方体混凝土试块,并与试验构件同条件养护。配置 500 MPa 钢筋的试件分 2 批浇注(每种强度的混凝土为 1 批),每批浇注后各留置 3

组(每组 3 个)边长为 150 mm 的立方体混凝土试块,并与试验构件同条件养护。每种钢筋取 3 个试样。试件试验时,进行了材料性能试验,各试块混凝土立方强度的平均值见表 1。钢筋强度的平均值见表 2。

表 2 钢筋实测力学指标

钢筋规格	Φ16	Φ25	Φ25	Φ32
抗拉屈服强度 标准值 f_{yk}/MPa	400	400	500	500
抗拉屈服强度 实测值 f_y/MPa	460	478	495	530

各试件所经历的裂缝发展过程基本相同。加载至 $0.1 P_u$ (P_u 为计算极限荷载) 左右时, 截面未开裂, 构件表现为弹性变形特征。荷载加至 $0.2 \sim 0.3 P_u$ 时, 用肉眼可在纯弯段底面及两侧面发现一条或多条裂缝, 宽度很小, 侧面裂缝高度一般可达到梁高的 $1/4 \sim 1/3$ 。随着荷载的进一步增加, 纯弯段裂缝逐渐增多, 并逐渐延伸, 宽度也逐渐加大, 斜裂缝出现。当荷载加至 $0.5 P_u$ 左右时, 裂缝基本出齐。典型裂缝分布如图 3 (图中的数字表示加载级别, 两虚线间的区段为试件纯弯段) 所示, 配置 500 MPa 钢筋且保护层厚度约为 25 mm 的试件表面出现可见次生裂缝 (计算裂缝间距时将这些裂缝予以剔除), 其余试件表面基本未出现此类裂缝。荷载达到 P_u 时, 跨中附近一条裂缝宽度迅速增加, 最终试验梁因受压区混凝土被压碎而破坏。各试件的裂缝间距及裂缝宽度实测值详见文献 [8]。

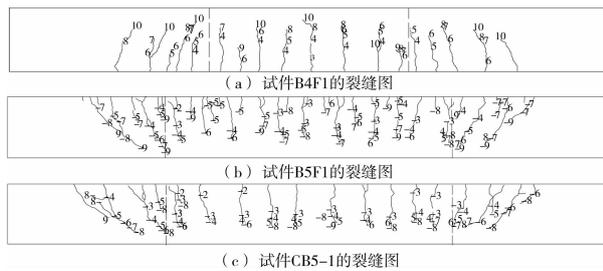


图 3 部分试件的侧面裂缝图

2 试验结果分析

2.1 以往配高强钢筋的混凝土梁裂缝试验研究

对于配置高强钢筋的混凝土梁, 东南大学、郑州大学、石家庄铁道学院的学者 [9-16] 曾进行过相关的试验研究, 试件中的钢筋包括了 HRB400 和 HRB500 钢筋, 混凝土强度等级在 C15—C80 的一个比较广的范围。试验多采用千斤顶两点集中对称正位加载以研究短期的裂缝, 也有研究者 [11] 设计了特殊的加载装置进行了长期试验。试验结果表明, 配置高强钢筋的高强混凝土 (C70) 试件裂缝开展情况优于普通钢筋混凝土试件 [9-10]; 配置高强钢筋的普通混凝土构件, 使用荷载阶段的裂缝宽度较大, 可能不满足规范要求 [12-15]。

20 世纪 60 年代初, 美国 PCA 研究室 [17-18] 对配置高强度钢筋的混凝土梁裂缝进行了试验研究, 试

件的钢筋屈服强度在 580~670 MPa 之间, 混凝土圆柱体抗压强度在 26.5~39.7 MPa 之间。试验均采用两点集中对称加载, 其中部分梁采用正位加载, 部分梁采用反位加载。试验结果表明, 梁的高度、宽度及混凝土抗压强度对裂缝宽度的影响不明显; 混凝土保护层厚度对裂缝宽度的影响显著。

2.2 裂缝宽度与《规范》公式的对比分析

按《规范》公式计算试件的平均裂缝间距, 实测值平均仅为计算值的 84%。按《规范》公式计算文中 12 根及文献 [9-16] 中 35 根配置高强钢筋混凝土梁的平均裂缝间距, 实测值 l_{cr}^0 与计算值 l_{cr}^c 之比的均值为 0.86, 变异系数为 0.135。可见, 按《规范》公式计算此类构件的平均裂缝间距时其值偏大。

文中试件的短期最大裂缝宽度 $w_{max,s}^0$ 普遍小于按《规范》公式计算的结果 $w_{max,s}^c$ 。对于保护层厚度约为 25 mm 的试件, 在钢筋应力不大于 300 MPa 时 $w_{max,s}^0/w_{max,s}^c$ 均值为 0.92, 在钢筋应力大于 300 MPa 时 $w_{max,s}^0/w_{max,s}^c$ 均值为 0.80; 对于保护层厚度约为 60 mm 的试件, 短期最大裂缝宽度实测值平均仅为计算值的 70%。按《规范》公式计算文中 12 根及文献 [9-16] 中配置高强钢筋混凝土梁的短期最大裂缝宽度, 实测值与计算值之比的均值为 0.82, 变异系数为 0.195。国外 32 根配高强钢筋混凝土梁 [17,18] (剔除了保护层厚度小于钢筋直径的试件, 对混凝土抗压强度及钢筋应力等数据均做了换算) 的短期最大裂缝宽度与按《规范》公式计算值之比的均值为 0.89, 变异系数为 0.260。可见, 按《规范》公式计算此类构件的短期最大裂缝时其值偏大。

3 裂缝宽度计算公式的改进建议

3.1 裂缝宽度计算模式

为了与《规范》相衔接, 配置高强钢筋混凝土梁的裂缝宽度计算模式宜取《规范》中的相应计算模式。针对此类构件的裂缝特点, 对裂缝宽度计算模式中的有关参数提出改进建议。据此, 配置高强钢筋混凝土梁的短期最大裂缝宽度计算表达式 [5] 仍为:

$$w_{max,s} = \tau_s \alpha_c \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} l_{cr} \quad (1)$$

式中, τ_s 为短期裂缝宽度的扩大系数; ψ 为裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数; α_c 为裂缝间混凝土应变对裂缝宽度的影响系数; 其余符号的意义同《规范》。

3.2 平均裂缝间距

该文及过往试验结果 [9-16] 表明, 当混凝土保护层厚度 c 基本相同 (取 $c = 25 \sim 30$ mm) 时, l_{cr}^0 与 d_{eq}/ρ_{te} 之间基本成线性关系但并非正比例, l_{cr}^0 一

d_{eq}/ρ_{te} 图在 l_{cr}^0 轴上的截距基本相等(见图 4),其中符号 d_{eq} 、 ρ_{te} 的意义同《规范》。这与裂缝计算方法中的综合理论是一致的。同时,由 l_{cr}^0/l_{cr}^c 与混凝土轴心抗压强度 f_c 的关系(见图 5, d 为钢筋直径),可见钢筋直径及混凝土强度对 l_{cr}^0/l_{cr}^c 的影响均不明显。基于《规范》中的平均裂缝间距计算模式,根据文中 12 根及文献[9-16]中 35 根配置高强钢筋混凝土梁的平均裂缝间距试验数据,由最小二乘法得:

$$l_{cr} = 1.50c + 0.075 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \quad (2)$$

式中各符号的意义同《规范》。按式(2)计算文中试件及文献[9-16]中配置高强钢筋的混凝土梁平均裂缝间距,实测值与计算值之比的均值为 1.00,变异系数为 0.138。

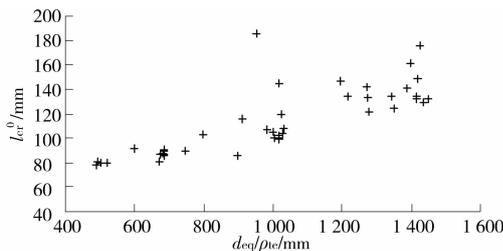


图 4 $l_{cr}^0-d_{eq}/\rho_{te}$ 关系图

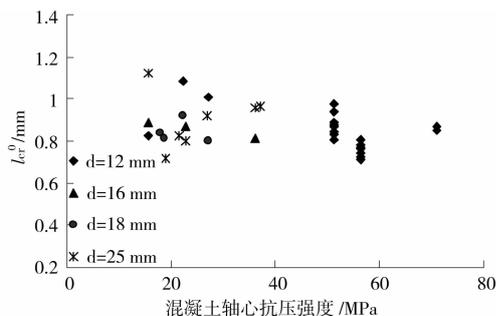


图 5 混凝土轴心抗压强度 f_c 与 l_{cr}^0/f_c 的关系

3.3 短期最大裂缝宽度

试验结果表明,对于配置 500 MPa 钢筋和 400 MPa 细晶钢筋的混凝土梁,其应变不均匀系数 ψ 的表达式仍为:

$$\psi = S \left(1 - \frac{M_c}{M_s} \right) \quad (3)$$

式中, S 为常数,根据试验结果,可取 $S=1.1$; M_c 为混凝土所承受的抗裂弯矩; M_s 为构件截面所承受的弯矩。这与文献[9]的结论一致。根据文献[19],混凝土所承受的抗裂弯矩

$M_c = 0.292 f_c b h^2$, 考虑收缩影响, M_c 可乘以系数 0.8^[20]。经过推导, ψ 的表达式可写为:

$$\psi = 1.1 - \frac{0.65 f_t}{\sigma_{sk} \rho_{te}} \quad (4)$$

式中各符号的意义同《规范》。由此可见, ψ 仍可按《规范》公式进行计算。以往研究^[5]表明,对各类构

件, α_c 可统一取为 0.85, 该文取 $\alpha_c = 0.85$ 。

对 12 根试件的裂缝分析表明,试件纯弯段的裂缝宽度基本上呈正态分布,若考虑 95% 的保证率,则其短期裂缝扩大系数仍为 $\tau_s = 1.66$ 。将上述各参数代入式(1)可得配置高强钢筋混凝土梁的短期最大裂缝宽度公式:

$$\omega_{\max, s} = 1.66 \times 0.85 \times 1.1 \left(1 - \frac{0.65 f_t}{\sigma_{sk} \rho_{te}} \right) \times \frac{\sigma_{sk}}{E_s} (1.50c + 0.075 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}}) \quad (5)$$

按式(5)计算文中试件及文献[9-16]中配置高强钢筋混凝土梁的短期最大裂缝宽度,计算值 $\omega_{\max, s}^c$ 与实测值 $\omega_{\max, s}^0$ 符合较好, $\omega_{\max, s}^0/\omega_{\max, s}^c$ 的均值为 0.96, 变异系数为 0.207。国外 32 根配高强钢筋混凝土梁的短期最大裂缝宽度实测值与按式(5)计算值之比的均值为 1.04, 变异系数为 0.271。

4 结 论

1) 试验结果表明,配置 500 MPa 钢筋和 400 MPa 细晶钢筋混凝土梁的裂缝发展规律与普通钢筋混凝土梁基本相同。而且,此类构件的短期最大裂缝宽度扩大系数仍可取为 1.66。

2) 按《规范》公式计算配置高强钢筋混凝土梁的平均裂缝间距和短期最大裂缝宽度,在均值意义上计算值均比试验值偏大。

3) 依据试验结果,并结合配置高强钢筋混凝土梁的过往试验数据,基于《规范》中的裂缝间距和宽度计算模式,对配置高强钢筋的混凝土梁提出平均裂缝间距和短期最大裂缝宽度修正公式,所提公式与试验数据符合较好。

参考文献:

- [1] ACI Committee 318. ACI 318 - 08 Building Code Requirements for Structural Concrete [S]. USA: American Concrete Institute, 2008.
- [2] European Standard EN1992-1-1 Euro-code 2: Design for Concrete Structures-Part 1: General Rules and Rules for Buildings [S]. London: European Committee for Standardization, 2004.
- [3] AS 3600 - 2001 Australian Standard for Concrete Structures [S]. Sydney: Standards Association of Australia, 2001.
- [4] 刘立新,李洪彦,张艳丽,等. 500 MPa 级钢筋混凝土偏心受压柱受力性能试验研究[J]. 郑州大学学报, 2007, 28(2): 30-34.
LIU LI-XIN, LI HONG-YAN, ZHANG YAN-LI, et al. Experimental study on behavior of eccentrically loaded R. C. Columns with 500 MPa steel bars[J]. Journal of Zhengzhou University, 2007, 28(2): 30-34.

- [5] 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.
- [6] 刘立新,谢丽丽,于秋波. 500 MPa 级钢筋混凝土构件的受力性能及工程应用研究[C]//首届全国建筑结构技术交流会论文集.北京:建筑结构杂志社,2006:5-66-5-68.
- [7] 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,2007,40(5):507-511.
WANG TIE-CHENG, LI YAN-YAN, RONG XIAN. Test for bending behavior of reinforced concrete beam with 500 MPa steel bar [J]. Journal of Tian Jin University,2007,40(5):507-511.
- [8] 李志华. 配高强钢筋混凝土梁的受弯性能研究[D].上海:同济大学土木工程学院,2008.
- [9] 梁书亭,蒋永生,姜宁辉. 高强钢筋高强混凝土梁裂缝宽度验算方法的研究[J].南京建筑工程学院学报,1998,45(2):10-15.
LIANG SHU-TING, JIANG YONG-SHENG, JIANG NING-HUI. Research for calculation method of cracking width of high-strength concrete beams [J]. Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute,1998,45(2):10-15.
- [10] 刘仲波,王海龙,钟铭. 高强钢筋混凝土梁的静载试验研究与分析[J].石家庄铁道学院学报,2004,17(3):63-66.
LIU ZHONG-BO, WANG HAI-LONG, ZHONG MING. Experimental research and analysis of high-strength reinforced concrete beams under dead loads [J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute,2004,17(3):63-66.
- [11] 龚志国. 高强混凝土受弯构件长期性能的试验研究[D].南京:东南大学土木工程学院,2000.
- [12] 张艇. HRB500 级钢筋混凝土构件受力性能的试验研究[D].郑州:郑州大学土木工程学院,2004.
- [13] 钱伟. 500MPa 螺旋肋钢筋混凝土构件受力性能的试验研究[D].郑州:郑州工业大学土木建筑工程学院,2000.
- [14] 李美云. HRB400 级钢筋混凝土构件受力性能的试验研究[D].郑州:郑州大学土木工程学院,2004.
- [15] 孟建伟. 高强钢筋混凝土梁疲劳性能的试验研究及分析[D].石家庄:石家庄铁道学院土木工程分院,2004.
- [16] 尚世仲,苏小卒,李志华. 配高强钢筋的混凝土梁受弯性能试验研究[C]//第四届全国预应力结构理论与工程应用学术会议论文集.上海:同济大学出版社,2006:3-47-3-50.
- [17] HOGNESTAD E. High strength bars as concrete reinforcement, Part 2: control of flexural cracking[J]. PCA Research and Development Laboratories, 1962, 4(1): 46-63.
- [18] KAAR P H, Mattock A H. High strength bars as concrete reinforcement, Part 4: control of cracking[J]. PCA Research and Development Laboratories, 1963, 5(1): 15-38.
- [19] 顾祥林. 混凝土结构基本原理[M].上海:同济大学出版社,2004.
- [20] 丁大均. 钢筋混凝土构件抗裂度、裂缝和刚度[M].南京:南京工学院出版社,1986.

(编辑 胡英奎)

(上接第 17 页)

- [17] SITHARAM T G, MAJI V B, VERMA A K. Practical equivalent continuum model for simulation of jointed rock mass using FLAC^{3D} [J]. International Journal of Geomechanics, 2007, 7(5): 389-395
- [18] PARISH Y, ABADI F. NAJAEI. Dynamic behaviour of earth dams for variation of earth material stiffness [C]// Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, FEBRUARY, 2009, 38: 606-611.
- [19] 董鹏,李长洪. 基于 ANSYS 软件的 FLAC^{3D} 实体建模[J].山西建筑,2007,33(5):350-351.
DONG PENG, LI CHANG-HONG. Modeling in FLAC^{3D} software based on ANSYS software entity[J]. Shanxi Architecture, 2007, 33(5): 350-351.
- [20] 周先齐,徐卫亚,钮新强,等. 拱坝-坝肩三维可视化建模和稳定性分析[J].岩土力学,2008,29(S0):118-122.
ZHOU XIAN-QI, XU WEI-YA, NIU XIN-QING, et al. Three-dimensional visualization model and stability analysis of arch dam-dam abutment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(Sup.): 118-122.
- [21] 徐文杰,胡瑞林. 基于逆向工程的三维复杂地质体精细建模及 ADINA 前处理在 FLAC^{3D} 建模中的应用[J].工程地质学报,2008,16(5):703-709.
XU WEN-JIE, HU RUI-LIN. Refined modeling of 3D geological body based on reverse engineering and the application of ADINA in the model building of FLAC^{3D} [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(5): 703-709.

(编辑 胡玲)