

圆形截面钢筋混凝土构件裂缝宽度试验研究

魏巍巍, 贡金鑫, 李 龙

(大连理工大学 近海与海岸工程国家重点试验室, 辽宁 大连 116023)

摘要: 对大偏心受压、受弯、大偏心受拉、小偏心受拉和轴心受拉圆形截面钢筋混凝土试件进行了试验, 测定了不同荷载下的钢筋应变、裂缝宽度、裂缝宽度-荷载曲线和钢筋应力-荷载曲线, 研究了各种试件的裂缝发展规律. 结果表明, 各种试件的裂缝发展规律基本一致, 即荷载很小时不出现裂缝; 从混凝土出现第一条裂缝到钢筋屈服, 裂缝宽度随荷载基本呈线性增长; 钢筋屈服后, 裂缝随荷载增大而迅速增长. 最后对裂缝宽度进行了统计分析, 给出裂缝宽度的概率分布.

关 键 词: 钢筋混凝土; 裂缝宽度; 钢筋应变; 钢筋应力; 钢筋屈服; 试验研究

中图分类号: TU375:TU317

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2007)04-0027-09

Experimental study on crack width of reinforced concrete members with round section

WEI Wei-wei, GONG Jin-xin, LI Long

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: An experimental study is made on reinforced concrete specimens with round section under combined action of axial force and bending. The reinforcement strain, crack width, crack width-load and reinforcement stress-load relationship at various load levels are measured and the development of crack is monitored. Experiment results show that the development rule of cracks is basically the same for all kinds of specimens, that there is no cracking in the specimens when load is small, that from the first crack appearance in concrete to the yield in reinforcement, crack width increases approximately according to linearity with loading, and that after reinforcement yield, crack width increases rapidly with loading. The probability distribution of crack width is established based on test results.

Key words: reinforced concrete; crack width; reinforcement strain; reinforcement stress; reinforcement yield; experimental study

圆形截面钢筋混凝土构件是港口工程中常用的一种构件. 国内外对圆形截面构件的裂缝研究^[1-4]主要针对偏心受压构件和受弯构件. 我国现行的《港口工程混凝土结构设计规范》^[5]已给出矩形、T形、倒T形和I形截面受拉、受弯和偏心受压构件的最大裂缝宽度计算公式, 但没有给出圆形截面构件的裂缝宽度计算公

收稿日期: 2007-03-30

基金项目: 教育部创新团队资助项目(IRT0518)

作者简介: 魏巍巍(1982-), 女, 辽宁锦州人, 博士研究生, 主要从事混凝土结构研究. E-mail: 3134586weiweiwei@gmail.com

式.《港口工程灌注桩设计与施工规程》^[6]虽然给出了计算公式,但相当复杂.《铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范》和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[7]也给出了圆形钢筋混凝土构件裂缝宽度的计算公式,但两个规范中圆形构件的裂缝宽度计算公式与矩形、T形和I字形截面构件的计算公式不协调.为此,本文结合《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ 267-98)的修订,对圆形混凝土截面构件的裂缝宽度进行了试验研究.

1 试件制作

1.1 试件尺寸及配筋

以往的研究表明,影响钢筋混凝土构件裂缝宽度的主要因素有钢筋直径、配筋率、混凝土强度、钢筋应力和混凝土保护层厚度.考虑这些因素,共制作了8根大偏心受压、12根受弯、8根大偏心受拉、12根小偏心受拉以及16根轴心受拉的试件.试件直径为300 mm,形式、配筋及截面如图1(a)~(f)所示.为避免试验过程中试件端部过早破坏,端部专门进行了加强.大偏心受压试件试验段长度(即观察裂缝的长度)取1.2 m,大、小偏心受拉及轴心受拉试件试验段长度取1.0 m,受弯试件取0.6 m.

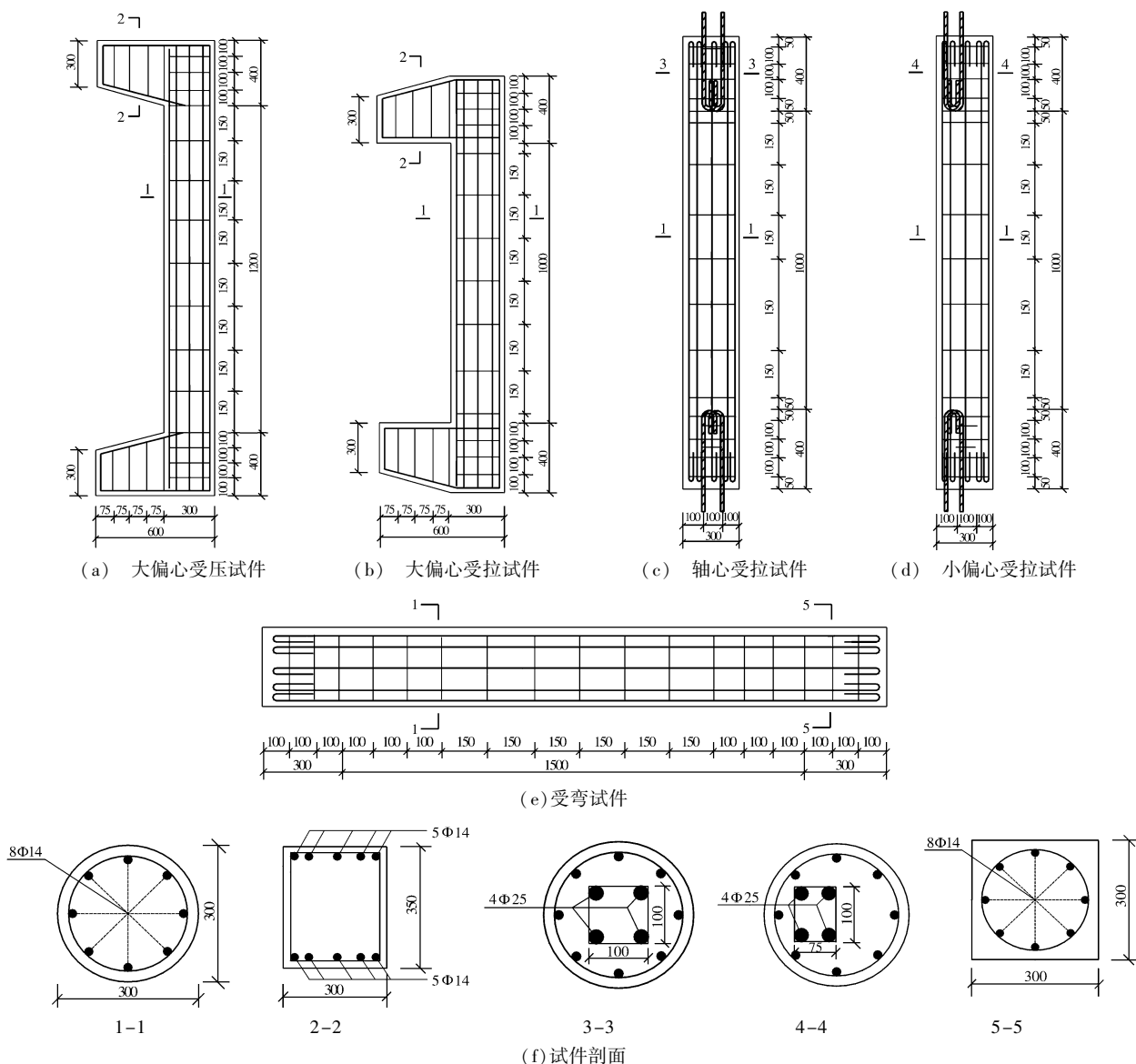


图1 试件形式、配筋及尺寸(单位:mm)

Fig.1 Specimens shapes, reinforcement and size (unit: mm)

大偏心受压、受弯和大偏心受拉混凝土保护层厚度分 30 和 45 mm 两种;轴心受拉和小偏心受拉试件采用 20、30 和 45 mm 3 种混凝土保护层厚度. 配筋为 6 Φ 12 和 8 Φ 14,沿截面周边均匀布置,对应的截面配筋率分别为 0.96% 和 1.74%. 小偏心受拉和轴心受拉试件两端预埋螺栓,预埋螺栓采用 Φ 25 螺纹钢筋加工作,预埋长度取 400 mm. 预埋钢筋和受力纵筋末端设置 180°弯钩来增加锚固强度.

试件分两批制作,第 1 批 32 个试件,截面内配置普通箍筋 Φ 8@150. 第 2 批 24 个试件,截面内配置螺旋箍筋 Φ 6@100. 试件详细情况见表 1 和表 2.

表 1 第 1 批试件详细情况

Tab. 1 Parameters of the first batch of specimens

受力类型	外径×长度	纵向钢筋	保护层厚度/ mm	数量/ 个	试件编号	偏心距/ mm
受弯	300 mm×1500 mm	6 Φ 12	30	2	SW-C	—
					SW-H	—
			45	2	SW-A	—
					SW-G	—
		8 Φ 14	30	2	SW-B	—
					SW-F	—
			45	2	SW-D	—
					SW-E	—
轴心受拉	300 mm×1000 mm	6 Φ 12	20	1	ZL-H	—
			30	2	ZL-B	—
					ZL-G	—
			45	2	ZL-A	—
		8 Φ 14	20	1	ZL-D	—
			30	2	ZL-I	—
					ZL-C	—
			45	2	ZL-J	—
小偏心受拉	300 mm×1000 mm	6 Φ 12			ZL-E	—
					ZL-F	—
			20	1	XPL-F	50
		8 Φ 14	30	1	XPL-B	50
			45	1	XPL-D	50
			20	1	XPL-C	50
大偏心受拉	300 mm×1000 mm	6 Φ 12	30	1	XPL-E	50
			45	1	XPL-A	50
		8 Φ 14	30	1	DPL-A	300
			45	1	DPL-C	300
大偏心受压	300 mm×1500 mm	6 Φ 12	30	1	DPL-D	300
			45	1	DPL-B	300
		8 Φ 14	30	1	DPY-D	200
			45	1	DPY-A	150
			30	1	DPY-B	150
			45	1	DPY-C	150

表 2 第 2 批试件详细情况

Tab. 2 Parameters of the second batch of specimens

受力类型	外径×长度	纵向钢筋	保护层厚度/ mm	数量/ 个	试件编号	偏心距/ mm
受弯	300 mm×1500 mm	6 Φ 12	30	1	SW-C'	—
			45	1	SW-A'	—
		8 Φ 14	30	1	SW-B'	—
			45	1	SW-D'	—
轴心受拉	300 mm×1000 mm	6 Φ 12	20	1	ZL-H'	—
			30	1	ZL-B'	—
			45	1	ZL-D'	—
		8 Φ 14	20	1	ZL-I'	—
			30	1	ZL-C'	—
			45	1	ZL-E'	—

(续表)						
受力类型	外径×长度	纵向钢筋	保护层厚度/mm	数量/个	试件编号	偏心距/mm
小偏心 受拉	300 mm×1000 mm	6Φ12	20	1	XPL-F'	50
			30	1	XPL-B'	50
			45	1	XPL-D'	50
		8Φ12	20	1	XPL-C'	50
			30	1	XPL-E'	50
			45	1	XPL-A'	50
大偏心 受拉	300 mm×1000 mm	6Φ12	30	1	DPL-A'	250
			45	1	DPL-C'	250
		8Φ14	30	1	DPL-D'	250
			45	1	DPL-B'	250
大偏心 受压	300 mm×1500 mm	6Φ12	30	1	DPY-D'	150
			45	1	DPY-A'	150
		8Φ14	30	1	DPY-B'	200
			45	1	DPY-C'	200

1.2 测 点 布 置

钢筋应力是影响裂缝宽度大小的主要因素,为准确测量钢筋应力,在拉力最大的钢筋上布置多个测点,中间间距为 75 mm,两端为 150 mm.沿试件中截面的钢筋上布置测点,以测量钢筋应变.

为测量混凝土开裂应变及同一截面上混凝土应变随截面高度的变化,第 1 批试件沿中间截面一周对称布置 12 个测点.第 2 批试件在中心截面受压侧(截面周长一半)布置 9 个测点测量受压区混凝土的应变.

2 施 加 荷 载

2.1 加 载 设 备

使用 500 t 万能试验机施加大偏心受压及受弯试验荷载.试验机作动头对试件施加的荷载使用刚性滚轴来传递荷载.

受弯试验使用 500 t 万能试验机施加荷载.试件放置在刚性可滑动支座上,两加载点间距为 600 mm.荷载通过压力传感器、分配梁、滚轴支座和弧形加载板传递给试件.

大偏心受拉及轴拉试验在自制的加载装置上进行.加载架水平放置,承载结构为钢梁(1 000 mm×355 mm×300 mm)和螺杆(直径 100 mm)组成的矩形框架,钢梁通过螺帽固定在螺杆上.加载设备为安装在框架钢梁外侧的两个液压千斤顶(60 t).千斤顶顶端安装带孔(直径 70 mm)的横梁(400 mm×200 mm),拉杆穿过横梁.加载装置两端均安装有球铰,分别位于钢梁内侧和拉杆上.球铰可使试件根据拉力自动平衡,确保施加荷载符合要求的加载条件.

大偏心受拉试验使用穿过试件预留孔的刚性拉杆(直径为 60 mm)提供拉力.加载面上使用直径为 40 mm 的刚性滚轴与试件接触,并通过螺帽将滚轴固定.拉杆另一端通过球铰和拉力传感器与螺杆相连.为防止底面摩擦约束试件的横向变形,试件放置在两组可滑动的滚轴上.

小偏心受拉及轴心受拉试验通过张拉预埋螺栓进行,预埋螺栓通过螺帽固定在刚性圆盘(直径400 mm)上.试件放置在圆弧形支座上,下方设可滑动滚轴.刚性圆盘通过球铰及拉力传感器与螺杆相连来提供拉力.

2.2 数 据 采 集 设 备

根据要获得的数据,试验中的采集设备包括:①应变采集设备:DH3815 静态应变测试系统,采集钢筋和混凝土应变;②荷载-挠度采集系统:由拉压式传感器(100 t)、电阻式位移计、桥盒、信号放大器、采集卡组成,采集荷载和挠度;③裂缝观测设备:读数放大镜(精度为 0.05 mm)、思维尔裂缝观测仪(精度 0.02 mm),观测裂缝宽度.

2.3 加 载 方 案

试验采用分级方式加载,每级荷载约为破坏荷载的 1/15.大偏心受压试验、小偏心受拉和轴心受拉试验每级加载约为 30 kN,大偏心受拉和受弯试验约为 10 kN.每级荷载持续 30 s 后,采集钢筋和混凝土应变并读

取裂缝宽度,持载时间由数据采集时间而定.数据采集完成后再继续加载至下一级荷载,重复上面步骤,直至试件破坏.

3 试验结果

3.1 裂缝发展

3.1.1 大偏心受压试件 本文用相对轴向荷载 $n = N / (f_c \pi r^2)$ (式中: N 为轴向荷载; f_c 为混凝土轴心抗压强度; r 为试件截面半径) 表示施加的轴力, 并采用标准化的荷载进行分析, 以便将多条曲线画在同一图中. 由于混凝土具有一定的抗拉强度, 荷载很小时, 试件不开裂, 当荷载增加到 $n \approx 0.05$ 时, 试件开裂 (见图 2 (a)), 开始裂缝宽度很小, 仅有 $0.01 \sim 0.02$ mm, 裂缝长度可达整个截面周长的 $1/3$ 左右, 方向垂直于纵向钢筋.

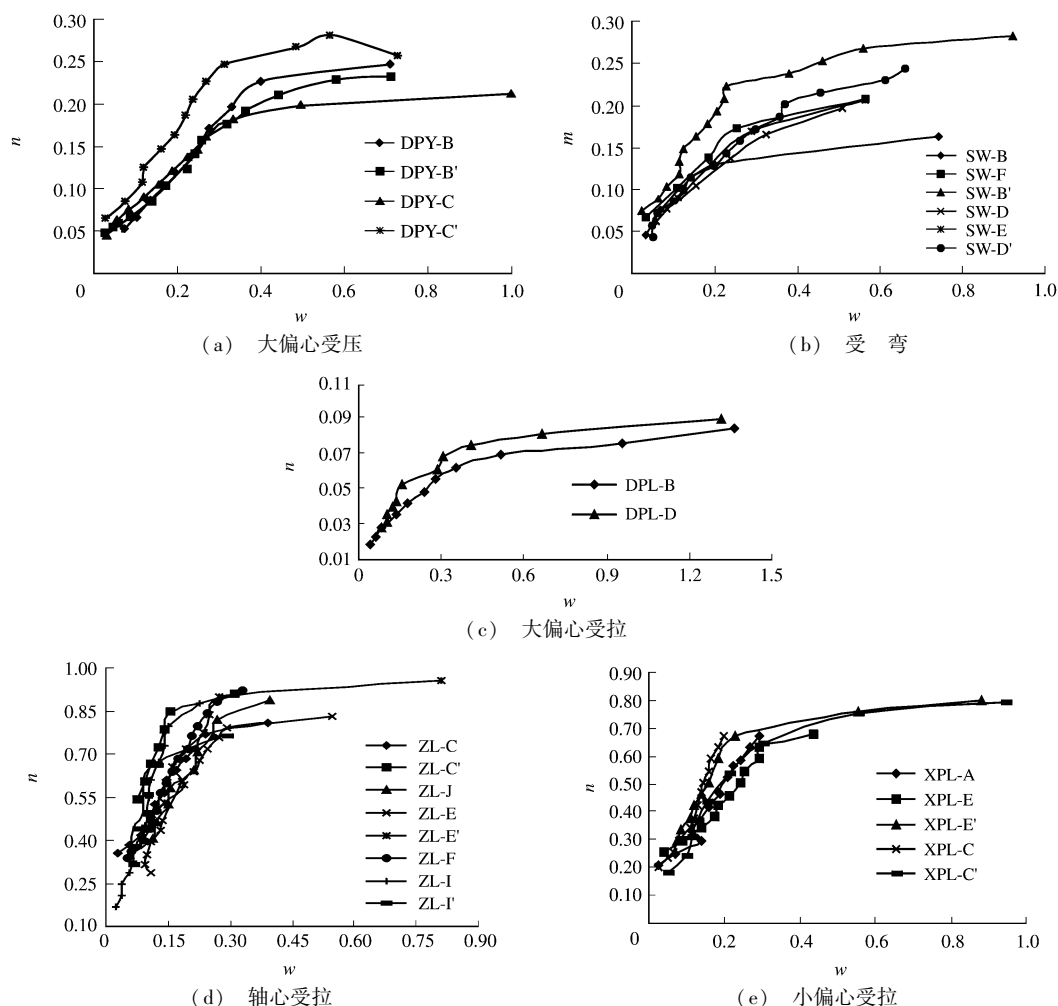


图2 荷载-裂缝宽度关系(配置8Φ14钢筋的试件)

Fig.2 Relationship curves of crack width and load (specimens reinforced with 8Φ14)

从试件开裂到钢筋屈服,裂缝宽度随荷载的增加而增大,两者近似成线性关系(如图2(a)中 $0 \sim 0.3$ mm 间的 $n \sim w$ 曲线),试件处于弹性阶段.试件开裂初期,裂缝长度增长迅速,当荷载达到钢筋屈服荷载的40%时,裂缝长度发展速度减缓,甚至不再发展,此时裂缝长度约为截面周长的 $1/2$ (见图3(a)),方向垂直于纵向钢筋.

当荷载增加到 $n \approx 0.2$ 时,钢筋开始屈服, $n \sim w$ 曲线变化趋于平缓(见图2(a)).这时裂缝宽度随荷载的微小增大而迅速增长,两者间不再成线性关系,裂缝尖端继续向受压区发展,方向仍基本垂直于纵筋,个别裂

缝斜向混凝土压碎区发展.此时,主裂缝之间出现次裂缝,有时两裂缝间纵筋处出现纵向裂缝.随着荷载进一步增大,受压区混凝土被压碎,试件破坏,破坏时最大裂缝宽度可达 1 mm 以上.裂缝宽度实测值见表 1.需要说明的是,所谓正常使用极限状态指的是钢筋屈服前的状态,本文关心的是钢筋屈服前的钢筋应变和裂缝宽度.

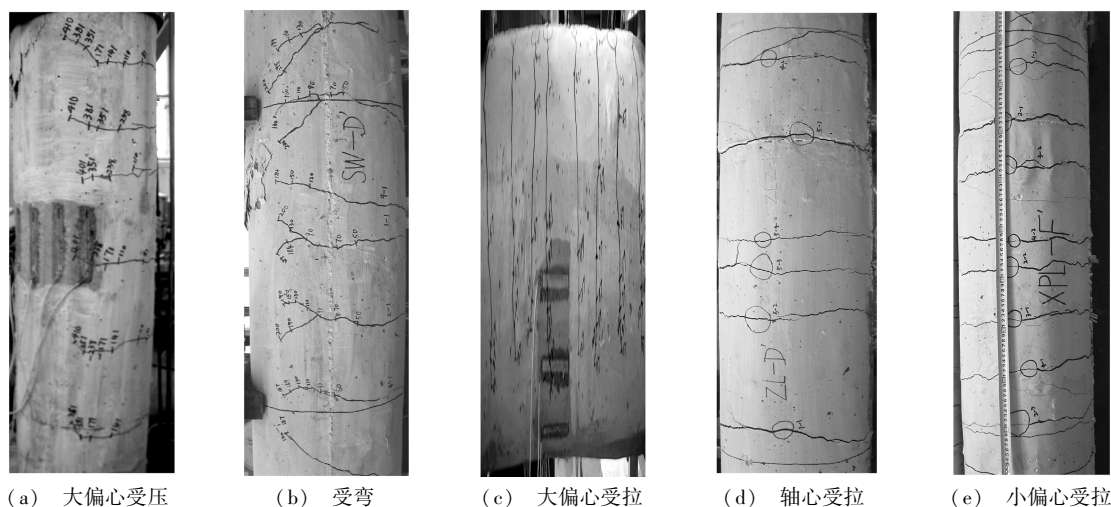


图 3 不同荷载(裂缝处的数值)下的裂缝扩展

Fig.3 Crack development in various load conditions

3.1.2 受弯试件 与大偏心受压的情况类似,在荷载很小时,试件不出现裂缝,当荷载增加到 m ($m = M/f_c \pi r^3$, 式中: M 为试件承受的弯矩; f_c 为混凝土轴心抗压强度; r 为试件截面半径) 等于 0.06 时,试件开裂(见图 2(b)),裂缝宽度一般可达 0.05 mm 以上,裂缝长度可达截面周长的 1/2 左右,方向垂直于钢筋纵向.

从试件开裂到钢筋屈服,试件处于弹性阶段,裂缝发展规律与大偏心受压试件基本相同,裂缝宽度随荷载的增加而增大,两者近似成线性关系.开裂初期,裂缝长度增长迅速,当荷载增加至钢筋屈服荷载的 60% 左右时,增长速度减缓,方向基本垂直于钢筋(见图 3(b)).

当 $m \approx 0.18$ 时,荷载-裂缝宽度曲线趋于平缓(见图 2(b)),钢筋开始屈服,裂缝宽度随荷载增加迅速增大,裂缝尖端出现分叉(一般分为 2 条裂缝),分叉后裂缝与原方向呈一定角度斜向混凝土受压区发展.随着荷载继续增加,混凝土压碎剥离,试件破坏.破坏时最大裂缝宽度可达 2 mm 以上.

3.1.3 大偏心受拉试件 荷载较小时的大偏心受拉试件不出现裂缝,当 $n \approx 0.015$ 时,试件开裂.开裂时的情况与大偏心受压、受弯试件基本相同,裂缝宽度一般在 0.05 mm 左右,裂缝长度约为截面周长的 1/3 ~ 1/2.

从试件开裂到钢筋屈服,试件处于弹性阶段,裂缝宽度随荷载增加而增大,两者近似成线性关系.与大偏心受压和受弯试件相比,大偏心受拉试件的裂缝扩展速度较快,方向基本垂直于纵向钢筋(见图 3(c)).

当荷载增加到 $n \approx 0.07$ 时,钢筋开始屈服.荷载继续增加,裂缝宽度增长速度加快, $n \sim w$ 曲线趋于平缓(见图 2(c)),随后裂缝向受压区迅速发展,但与受弯试件不同,裂缝尖端很少出现分叉现象(见图 3(c)).

钢筋屈服后,继续增加荷载,混凝土压碎剥离,试件破坏.破坏时最大裂缝宽度可达 2 mm 以上.

3.1.4 小偏心受拉及轴心受拉试件 小偏心受拉和轴心受拉试件的裂缝发展规律相似.当轴心受拉试件的 $n \approx 0.3$ 、小偏心受拉试件的 $n \approx 0.2$ 时(小偏心受拉和轴心受拉试件承受的轴力与混凝土抗拉强度有关,为与大偏心受压、受拉和受弯试件统一, n 采用前面的定义)试件开裂,裂缝宽度一般可达 0.05 mm 以上(见图 2(d)和(e)),方向垂直于纵向钢筋,并伴随较大的响声,裂缝长度一般可达整个截面周长的 1/2 左右.

从试件开裂至钢筋屈服,试件处于弹性阶段,裂缝宽度随荷载增加而增大,两者近似成线性关系.与大偏心受压试件及大偏心受拉试件相比,轴心受拉试件和小偏心受拉试件开裂后裂缝发展速度很快,在随后的 1~2 级的荷载下,裂缝贯通,方向垂直于纵向钢筋.继续加载,当轴心受拉试件 $n \approx 0.9$ 、小偏心受拉试件 $n \approx 0.7$ 时,钢筋屈服, $n \sim w$ 曲线趋于平缓,说明随荷载增加裂缝宽度迅速增加.继续施加荷载,主裂缝周围混凝土开始剥落,有时主裂缝间出现纵向裂缝(见图 3(d)),试件破坏.破坏时,裂缝宽度可达 2 mm 以上.

3.2 裂缝间距

在大偏心受压情况下,试件裂缝分布比较均匀,平均裂缝间距约为 140 mm(见图 4(a)). 两批受弯试件的裂缝分布上相差较大. 第 1 批试件裂缝分布比较均匀,平均间距约为 150 mm;第 2 批试件的裂缝间距较大. 可见,对于受弯试件,箍筋型式对裂缝分布的影响较大. 大偏心受拉情况下试件的裂缝分布都比较均匀,平均裂缝间距为 130 ~ 160 mm(见图 4(b)). 轴心受拉和小偏心受拉试验中,试件的裂缝分布比较均匀,平均裂缝宽度约为 150 ~ 160 mm. 除个别试件外,两批试件的平均裂缝间距相差不大,轴心受拉情况下箍筋对裂缝分布影响不大.

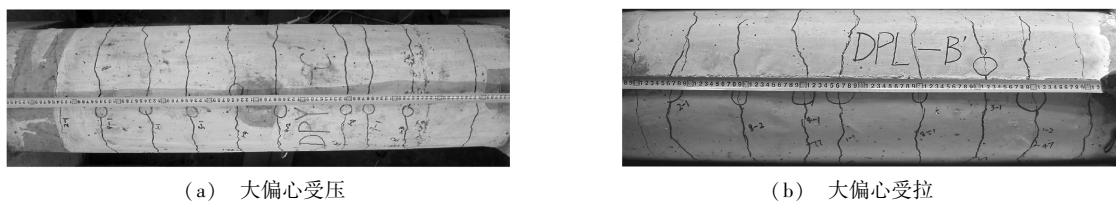


图 4 裂缝分布

Fig. 4 Crack distribution

3.3 钢筋应变

大偏心受压、受弯、受拉、轴心受拉和小偏心受拉试件的钢筋拉应变变化规律基本相同,这里一并介绍.

钢筋应变变化可分为 3 个阶段. 试件开裂前为第 I 阶段,随荷载增加,受拉钢筋应变增大,但增幅很小,两者基本呈线性关系(见图 5 中的 OA 段). 试件开裂至钢筋屈服为第 II 阶段,在这一阶段,裂缝处的钢筋应变突然增大,但两者仍近似成线性关系(见图 5 中的 AB 段). 当荷载增加到钢筋屈服时,钢筋应变变化进入第 III 阶段,随着荷载增加,钢筋应变增大的速度加快(见图 5 中的 BC 段),曲线趋于平缓.

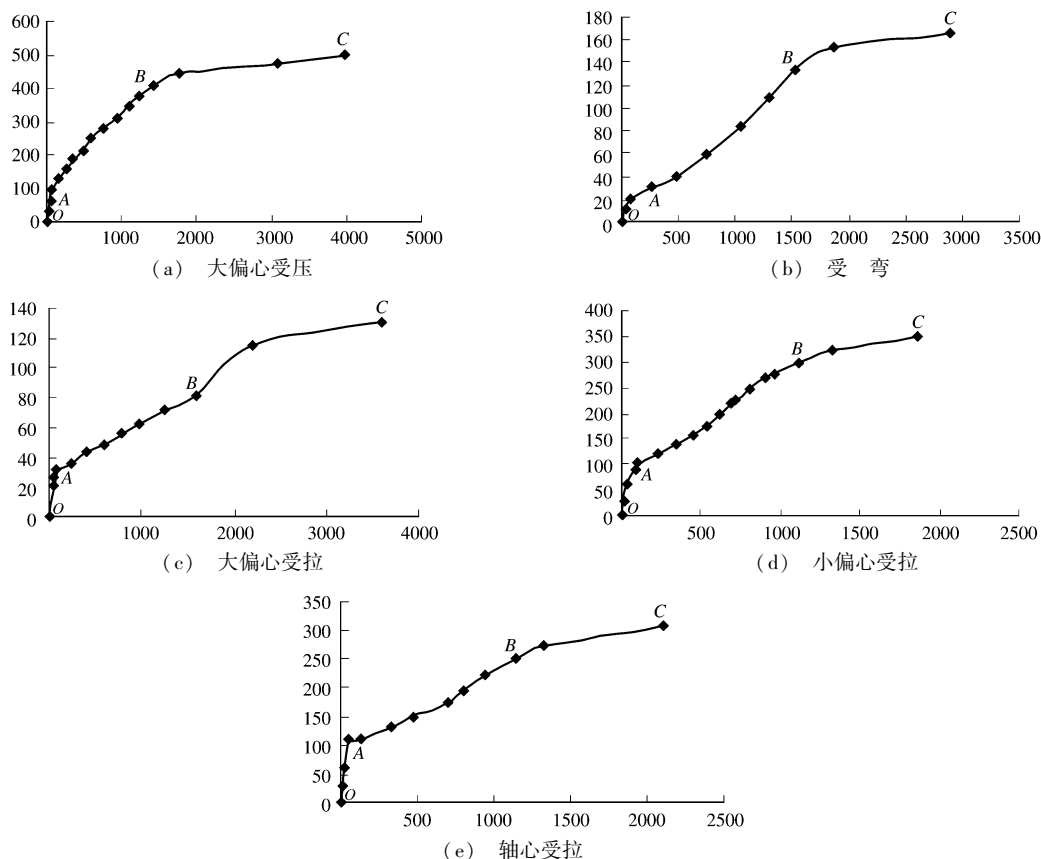


图 5 荷载-钢筋应力关系

Fig. 5 Reinforcement stress-load relationship curves

4 裂缝统计分析

试验得出了大偏心受压、受弯、大偏心受拉、小偏心受拉以及轴心受拉试件的最大、最小裂缝宽度以及平均裂缝宽度. 试验结果表明, 裂缝的产生具有相当大的随机性, 同样的试件在相同的荷载作用下, 裂缝的数目和宽度均不同. 因此, 裂缝的宽度及设计中所关心的最大裂缝宽度都不是一个确定的概念, 应从概率角度进行分析. 表 3 给出了不同试件在不同荷载下裂缝宽度的平均值, 用无量纲的相对裂缝宽度 r_{ij} 来表示:

$$r_{ij} = \frac{w_{ij}}{\bar{w}_i} \quad (1)$$

式中: r_{ij} 为第 i 级荷载下试件第 j 个裂缝的宽度与平均宽度的比值; w_{ij} 为第 i 级荷载下试件第 j 个裂缝的宽度; $\bar{w}_i$ 为第 i 级荷载下试件的平均裂缝宽度.

表 3 圆形截面试件实测裂缝宽度的统计结果

Tab. 3 The measured crack width of concrete specimens with round section

试件受力类型	裂缝数目/条	平均值 $\bar{r}_w$	标准差 S_w	变异系数 δ_w
大偏心受压	440	1.038	0.210	0.202
受 弯	248	1.062	0.298	0.281
大偏心受拉	229	1.061	0.307	0.289
小偏心受拉	205	1.079	0.366	0.339
轴心受拉	406	1.080	0.390	0.362

由于相对裂缝宽度与试件的荷载及其他因素无关, 则可将所有试件的相对裂缝宽度放在一起进行统计分析, 其平均值、标准差和变异系数可按式计算:

$$\bar{r}_w = \frac{1}{N_0} \sum \sum \sum r_{ij,k} \quad (2)$$

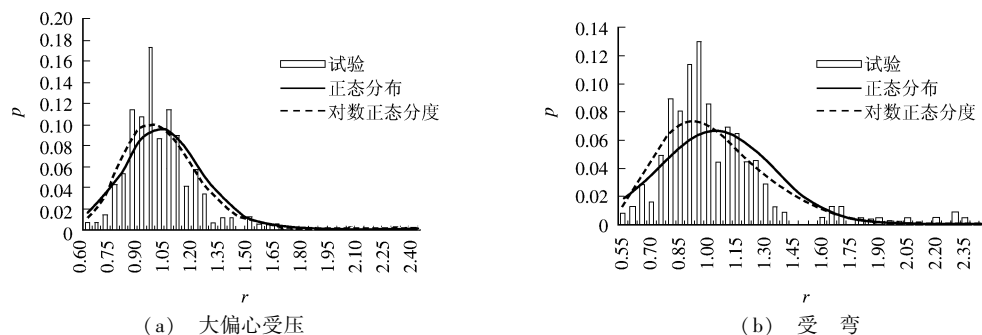
$$s_w = \sqrt{\frac{1}{N_0} \sum \sum \sum (r_{ij,k} - \bar{r}_w)^2} \quad (3)$$

$$\delta_w = \frac{s_w}{\bar{r}_w} \quad (4)$$

式中: N_0 为一种受力形式试件的总数目; k 为第 k 个试件.

表 3 为圆形截面试件实测裂缝宽度的统计结果, 图 6 为实测裂缝宽度的统计直方图与正态概率分布和对数正态分布的拟和曲线.

从图 6 可见, 裂缝宽度呈偏态分布, 对数正态分布的拟合结果要优于正态分布.



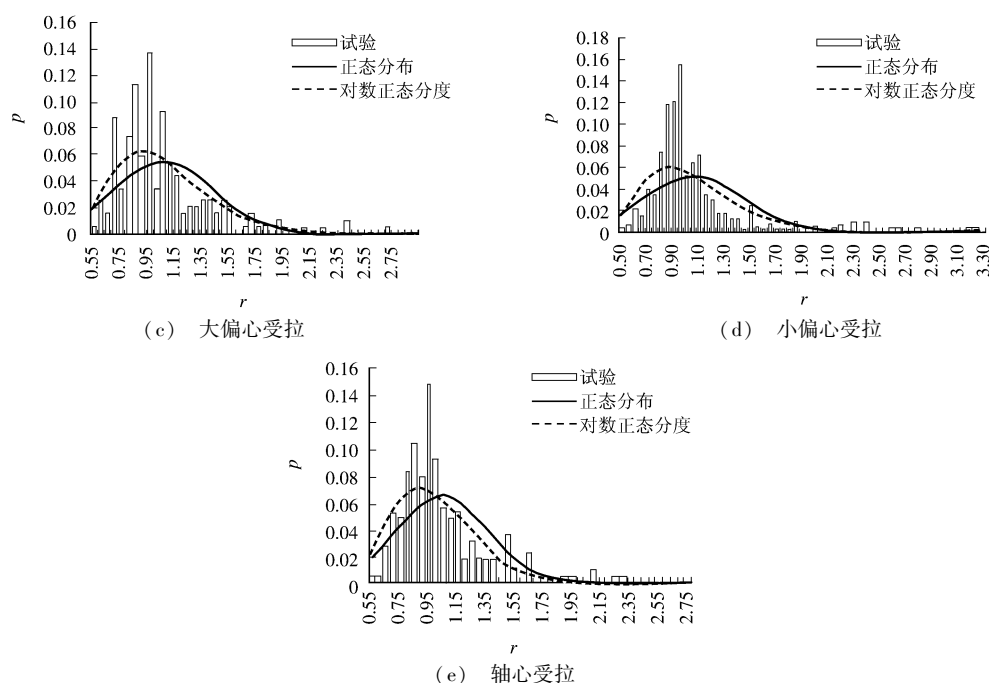


图6 试件实测裂缝宽度的统计直方图

Fig. 6 The measured crack width of concrete specimens

5 结 语

本文对8根大偏心受压、12根受弯、8根大偏心受拉、12根小偏心受拉和16根轴心受拉圆形截面钢筋混凝土试件进行了试验,测定了不同荷载下受拉钢筋的应变(应力)和裂缝的扩展宽度.试验表明,大偏心受压、受弯、大偏心受拉、小偏心受拉和轴心受拉试件的裂缝发展规律相类似,荷载很小时不出现裂缝;从混凝土出现第一条裂缝到钢筋屈服,裂缝宽度随荷载大致呈线性规律增长;钢筋屈服后,裂缝随荷载增大而迅速增长(但此时已不是正常使用极限状态的范围).钢筋应力是影响钢筋混凝土构件裂缝宽度的最主要因素.由于试件尺寸较小,钢筋较细,采用在钢筋表面贴电阻片的方法测量钢筋应力,在一定程度上影响了钢筋与混凝土的粘结力,因而也影响了裂缝间距与裂缝宽度的量测值.但从实用观点看,这种影响是偏于安全的.如何减小和避免这种影响有待进一步研究.通过用正态分布和对数正态分布对试件裂缝宽度进行拟和优度检验,得出裂缝宽度呈偏态分布,对数正态分布的拟合结果优于正态分布.

参 考 文 献:

- [1] 抗裂度及裂缝专题研究组. 钢筋混凝土环形、圆形截面偏心受压、受弯构件抗裂度和最大裂缝开展宽度的试验和计算方法[R]. 大连: 大连工学院, 1981.
- [2] 卢树圣, 林丕文, 汪子瞻. 钢筋混凝土圆(环)形截面偏心受压构件裂缝的试验研究[J]. 铁道学报, 1983, 5(3): 70-81.
- [3] 杨洪标. 钢筋混凝土环形、圆形截面构件最大裂缝宽度计算[J]. 土木工程学报, 1990, 23(2): 29-40.
- [4] 黄 侨, 张树仁, 王昌武. 钢筋混凝土圆形截面偏心受压构件的抗裂度及裂缝宽度试验研究[J]. 中国公路学报, 1996, 9(1): 66-73.
- [5] JTJ267-98, 港口工程混凝土结构设计规范[S].
- [6] JTG D62-2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [7] 钢筋混凝土结构设计规范修订组. 钢筋混凝土结构与构造(85年设计规范背景资料汇编)[G]. 北京: 中国建筑科学研究院, 1985.
- [8] 富文权, 韩素芳. 混凝土工程裂缝分析与控制[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.