

配置 500 MPa 箍筋的混凝土梁抗剪性能试验研究

周建民, 司 远, 王 眺, 熊学玉

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 对 12 根配置 500 MPa 箍筋的钢筋混凝土梁进行抗剪性能试验, 并对其抗剪性能、裂缝宽度和挠度进行分析. 在分析结果的基础上, 对《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010) 提出相应的修改意见. 试验与分析结果表明:《混凝土结构设计规范》能很好地预测高强箍筋混凝土梁的抗剪承载力; 在验算正常使用极限状态时, 抗剪强度设计值不应超过《混凝土结构设计规范》设计值的 80%; 在应用《混凝土结构设计规范》计算构件受剪切产生的挠度时, 应考虑剪切变形的影响.

关键词: 钢筋混凝土剪切梁; 500 MPa 箍筋; 抗剪性能; 裂缝宽度; 挠度

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

Experimental Study on Shear Behavior of Concrete Beam Reinforced With 500 MPa Stirrup

ZHOU Jianmin, SI Yuan, WANG Tiao, XIONG Xueyu

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Twelve concrete beams reinforced with 500 MPa stirrups were tested and some relevant factors including shear behaviors, crack width and deflections were analyzed. Based on analysis results, some corresponding suggestions to “Code for design of concrete structures” (GB 50010—2010) were put forward. It is shown that the code can precisely predict the shear capacity of high-strength concrete beams. In serviceability limit states, the design value of shear strength cannot exceed 80% of that in the code. Moreover, the effects of shear deformation should be considered when calculating the deflection of the member subjected to shear deformation with the code.

Key words: reinforced concrete shear beams; 500 MPa stirrups; shear behaviors; crack width; deflection

随着《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[1]的颁布和实施, 500 MPa 的高强钢筋得到了推广和使用. 但对于配置高强箍筋的混凝土梁, 仍有以下几个问题尚未解决: ① 梁发生剪切破坏时, 高强箍筋是否屈服, 即高强箍筋能否充分发挥作用; ② 使用阶段的斜裂缝宽度是否过大; ③ 挠度变形是否过大. 研究结果^[2-4]表明: 高强箍筋可用于混凝土梁抗剪中, 但大部分试验梁抗剪承载力的试验值与计算值的比值为 0.88 左右, 安全储备不高; 25%~30% 的试验梁抗剪承载力试验值与计算值比值小于 1.0, 偏于不安全. 文献[5-7]的研究结果表明: 高强箍筋用于混凝土梁中, 箍筋可以发挥作用, 但裂缝宽度会超限; 试验梁最大斜裂缝宽度随着配箍率的增加而减小, 配箍率的大小直接制约着斜裂缝的开展宽度. 李娟^[6]和李艳艳^[8]进行了配置 500 MPa 箍筋混凝土梁的抗剪性能试验, 但这些试验资料都非常有限. 还有一些高强箍筋的研究资料是基于 400 MPa 箍筋, 对 500 MPa 箍筋混凝土梁的参考价值不大. 在实际工程设计中, 我国现行混凝土结构设计规范的斜截面受剪承载力计算模式所依据的试验数据也大多源于普通箍筋混凝土梁试验. 因此, 迫切需要对配置 500 MPa 箍筋的混凝土梁抗剪性能进行进一步的试验研究, 以确定其抗剪承载力、裂缝发展和裂缝宽度、挠度变形等是否满足承载能力极限状态和正常使用极限状态下的相关要求. 在此分析结果的基础上, 对《混凝土结构设计规范》提出相应的修正建议, 使它更好地满足工程设计的需求. 本文对 12 根配置 500 MPa 箍筋的混凝土梁的试验结果进行分析, 并和《混凝土结构设计规范》相关抗剪承载力计算公式的计算结果进行比较^[9], 在此基础上, 评估配置 500 MPa 箍筋混凝土梁裂缝宽度和挠度计算的合理性.

收稿日期: 2014-07-07

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2012BAJ06B01-01)

第一作者: 周建民(1961—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究方向为混凝土结构、绿色建筑. E-mail: tjzhou2008@163.com

通讯作者: 熊学玉(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为工程结构、预应力混凝土.

E-mail: xiongxyu@tongji.edu.cn

1 试验设计

1.1 试件设计

研究资料表明,配筋率和剪跨比是影响混凝土梁抗剪的重要参数.本次试验设计根据正交设计法,

以剪跨比、箍筋配筋率和混凝土强度等级为参变量设计了 12 根矩形梁,具体参数如表 1 所示,试件尺寸和配筋如图 1 所示.表 1 中,B1~B9 表示第 1 批混凝土梁,混凝土等级为 C35;B10~B12 表示第 2 批混凝土梁,混凝土等级为 C50.

表 1 试件详情

Tab.1 The details of specimens

梁号	跨度/mm	加载跨度/mm	截面高度/mm	截面宽度/mm	剪跨比	$f_{cu}/$ MPa	$f_t'/$ MPa	箍筋	箍筋配筋 率/%	受拉钢筋	受压钢筋
B1	3 300	640	400	200	1.75	24.2	2.39	Φ 8@130	0.39	2 Φ 25+1 Φ 16	2 Φ 18
B2	3 300	820	400	200	2.25	24.2	2.39	Φ 8@200	0.25	2 Φ 25+1 Φ 16	2 Φ 18
B3	3 300	950	400	200	2.60	25.2	2.45	Φ 8@130	0.39	3 Φ 25	2 Φ 18
B4	3 300	640	400	200	1.75	42.5	3.29	Φ 8@200	0.25	2 Φ 25	2 Φ 18
B5	3 300	640	400	200	1.75	25.2	2.45	Φ 8@160	0.32	2 Φ 25	2 Φ 18
B6	3 300	820	400	200	2.25	50.0	3.60	Φ 8@130	0.39	3 Φ 25	2 Φ 18
B7	3 300	820	400	200	2.25	25.2	2.45	Φ 8@160	0.32	2 Φ 25+1 Φ 16	2 Φ 18
B8	3 300	950	400	200	2.60	50.0	3.60	Φ 8@160	0.32	3 Φ 25	2 Φ 18
B9	3 300	950	400	200	2.60	24.2	2.39	Φ 8@200	0.25	2 Φ 25+1 Φ 16	2 Φ 18
B10	4 000	640	400	200	1.75	74.7	4.52	Φ 8@160	0.39	2 Φ 25+1 Φ 12	2 Φ 20
B11	4 000	820	400	200	2.25	74.7	4.52	Φ 8@130	0.25	3 Φ 25	2 Φ 20
B12	4 000	950	400	200	2.60	74.7	4.52	Φ 8@200	0.39	2 Φ 25+1 Φ 20	2 Φ 20

注: f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度; f_t' 为混凝土轴心抗拉强度,按照公式 $f_t'=0.395f_{cu}^{0.565}$ 计算;第 1 批梁(B1~B9)中的热轧钢筋Φ 8、Φ 16、Φ 25、Φ 18 的屈服强度 f_y 实测值分别为 537.03、543.90、584.00、416.33 MPa,极限强度 f_b 分别为 694.96、710.43、698.53、504.32 MPa,弹性模量 E_s 分别为 2.05×10^5 、 1.99×10^5 、 2.08×10^5 、 2.01×10^5 N·mm⁻²;第 2 批梁(B10~B12)中的热轧钢筋Φ 8、Φ 12、Φ 20、Φ 25 的屈服强度 f_y 实测值分别为 554.76、516.67、546.26、539.26 MPa,极限强度 f_b 分别为 686.67、654.00、695.78、703.06 MPa,弹性模量 E_s 分别为 2.06×10^5 、 2.11×10^5 、 2.10×10^5 、 2.08×10^5 N·mm⁻².

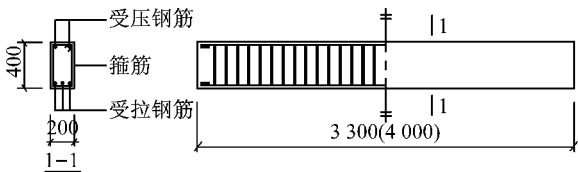


图 1 试件配筋情况(单位:mm)

Fig.1 Reinforcement of specimens (unit:mm)

1.2 加载方案

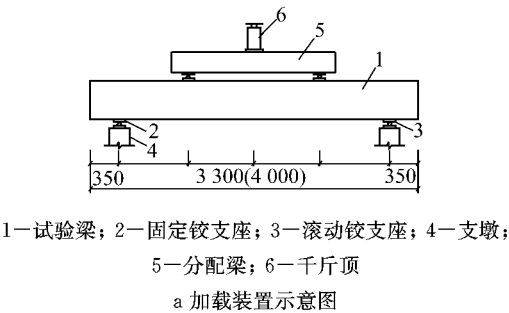
1.2.1 加载装置

本次试验在同济大学建筑工程系建筑结构试验室进行,采用 100 t 的千斤顶进行加载,荷载通过分

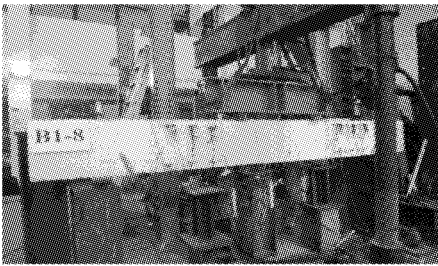
配梁分配到 2 个加载点上,实际加载装置如图 2 所示.在本次试验中,规定试验梁的加载点必须位于 2 个箍筋中间,从而明确剪弯段每根箍筋的具体位置,避免了以往其他试验中箍筋在梁中位置模糊不清的问题,如图 3 所示.

1.2.2 加载制度

试验过程中的加载分为预加载和正式加载 2 个过程.预加载时,先试加一级荷载 $F=20$ kN,以检查仪器是否正常工作以及试验梁是否对中.正式加载时,试验梁开裂以前,每级荷载约为极限荷载的 10%.当达到预估开裂荷载的 80%后,缓慢加载,以



1—试验梁;2—固定铰支座;3—滚动铰支座;4—支墩;
5—分配梁;6—千斤顶
a 加载装置示意图



b 加载装置照片

图 2 加载装置(单位:mm)

Fig.2 Schematic diagram of loading device(unit:mm)

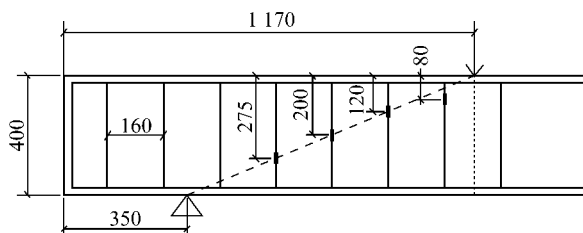


图3 箍筋应变测点

Fig.3 Arrangement of measuring points for stirrup strain

便捕捉实际开裂荷载.混凝土开裂后,每级荷载约为极限荷载的10%,以便捕捉斜裂缝的发展趋势.箍筋屈服后,不再观测斜裂缝和进行分级加载,而是缓慢加载,直至梁破坏,记录极限荷载.

1.2.3 试验内容

本次试验中,重点观测箍筋应变和试验梁极限荷载.根据《混凝土结构试验方法标准》(GB 50152—2012)^[10],混凝土梁可能出现斜裂缝的位置以加载点和支座的连线为准,如图3所示.因此,根据支座点和加载点之间的连线,在梁前后左右布置箍筋应变测点.

除了箍筋应变和试验梁极限荷载以外,本次试验其他测量内容有:纵向钢筋应变(分为跨中和剪弯段2个部分)、试验梁挠度、开裂荷载、裂缝发展和裂缝宽度等.

2 试验结果

2.1 试验过程和现象

由试验观察到,试件B1~B9都发生典型的剪压破坏,试件B11和B12发生弯曲破坏,试件B10发生弯剪破坏,即极限受剪承载力大于钢筋混凝土梁纵筋屈服荷载,但小于极限受弯承载力.本次试验中12根梁虽然箍筋配筋率、剪跨比和混凝土强度都不相同,但是试验现象基本一致,最终的破坏结果如图4所示.



图4 试验梁经典剪压破坏

Fig.4 Classical shear-compression failure of the beams

加载初期,试验梁表现为弹性.当荷载达到极限荷载的10%~20%时,梁出现正截面裂缝.当加载到20%~30%极限荷载时,在加载点梁底出现兼具正截面裂缝和斜截面裂缝共同特点的裂缝,这是因为加载点处的截面弯矩和剪力同时为最大.当加载到40%~50%极限荷载时,剪弯段突然出现典型斜裂缝.此阶段剪切变形显著,正截面裂缝不再发展,斜裂缝稳定发展.当达到极限荷载的60%~70%时,裂缝宽度超过规范规定的0.3 mm.当达到极限荷载后,试验梁突然脆性破坏.剪跨比较大的梁,箍筋应力迅速增大,斜裂缝经过的箍筋会拉断;剪跨比较小的梁,箍筋应力也迅速增加,但在箍筋拉断之前,梁顶混凝土先受压破坏.

试验梁发生剪压破坏的过程为:加载初期在剪弯段出现裂缝,该裂缝兼具正截面裂缝和斜截面裂缝的共同特点,沿斜向延伸为一条贯穿的较宽的主要斜裂缝,这便是临界斜裂缝.临界斜裂缝迅速延伸,使斜裂缝剪压区高度减小,最后导致剪压区混凝土破坏.

当达到以下4种情况时,认为试验梁已经达到极限状态:①斜裂缝端部受压区混凝土剪压破坏;②斜截面混凝土斜向受压破坏;③箍筋拉断;④油压千斤顶不能继续加载.

2.2 试验梁钢筋应力结果

本文以B2梁的箍筋和纵筋的应力结果为例,如图5所示,其他梁的应力和B2梁结果相似.纵筋应力 σ 根据《混凝土结构设计规范》中的公式计算得到,如下所示:

$$\sigma = M / (0.87 h_0 A_s) \quad (1)$$

式中: σ 为试验梁纵筋应力; M 为对应截面的弯矩; h_0 为截面有效高度; A_s 为纵筋面积.图5中, σ_{ZW1} 、 σ_{ZW2} 表示跨中纵筋应力, σ_{ZJ1} 、 σ_{ZJ2} 、 σ_{ZJ3} 、 σ_{ZJ4} 表示剪弯段纵筋应力,下标数字表示位置.箍筋采用另一种表示方法:如对于 $\sigma_{SR(L)F(B)80}$,S表示箍筋,R或L表示梁的右侧或左侧,F或B表示梁的正面或反面,80表示测点距梁顶的距离.

对比图5以及由式(1)计算的结果,可看出对于B2梁,跨中纵筋应力与计算值符合良好.同时对比分析其余11根梁,发现跨中纵筋应力与计算值均符合良好,说明规范公式对梁跨中纵筋应力预测是比较准确的.分析表明,对于B1梁到B9梁,破坏处箍筋的应力比跨中纵筋应力大,且跨中纵筋应力未屈服,表明这9根梁全都因箍筋屈服或剪压区混凝土压坏而发生剪压破坏.对于B10梁,跨中纵筋和箍筋

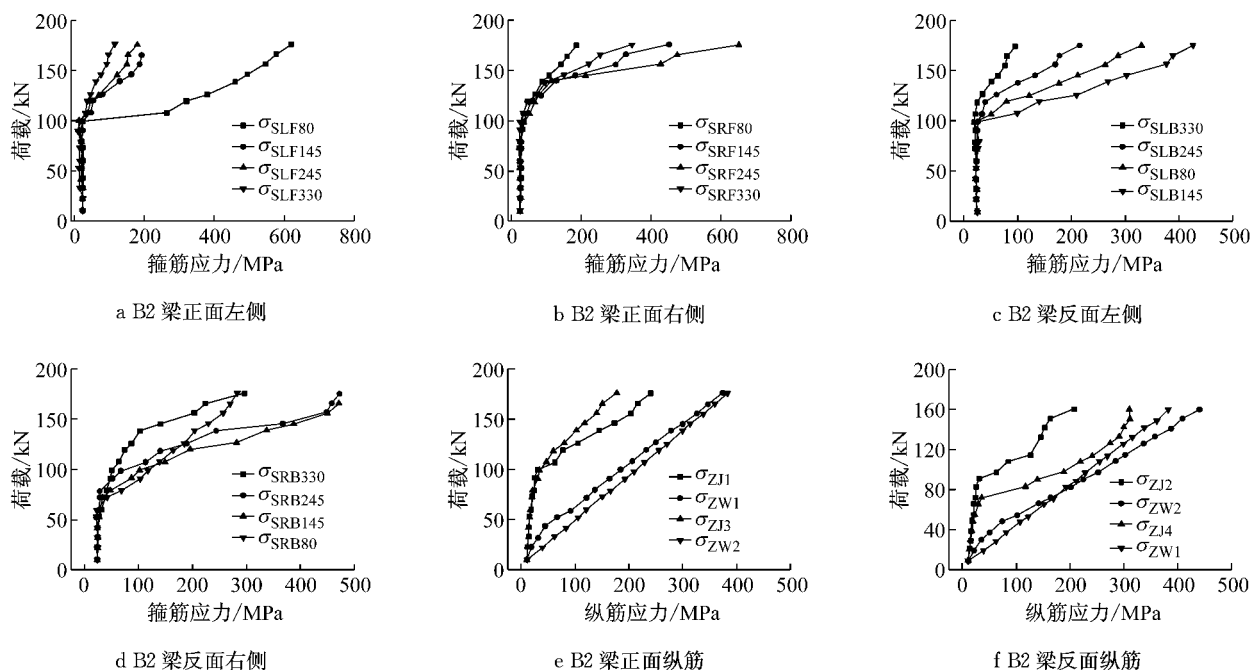


图 5 B2 梁钢筋应力

Fig.5 Rebar stress of B2 beam

一起屈服,表明此处破坏是典型的弯剪破坏。B11 梁和 B12 梁的混凝土强度提高,导致梁抗剪强度提高,从而发生了弯曲延性破坏,但 B11 梁和 B12 梁的箍筋也都发生屈服。

以 B2 梁为例,分析箍筋应力图可得出,梁斜裂缝出现前,箍筋应力几乎为零,剪力由混凝土承担。加载到 30%~40% 极限荷载后,斜裂缝出现,混凝土迅速退出工作,剪力由箍筋承担,箍筋应力突然出现转折。此后随着荷载的增加,梁的挠度逐渐加大,箍筋应力迅速增大,直至箍筋屈服。在箍筋应力发展过程中,有些原本应力增长迅速的箍筋会应力增长减缓,甚至下降。这是因为某些箍筋应力过高后,导致更多的箍筋与斜裂缝相交,梁中箍筋的应力也因此重新分配,剪力由更多的箍筋承担,从而抑制某些箍筋应力增长速度。

3 试验结果分析

3.1 试验梁抗剪承载力分析

为了验证《混凝土结构设计规范》对配有 500 MPa 箍筋的混凝土梁抗剪承载力计算公式的适用性,本文采用《混凝土结构设计规范》中集中荷载下受剪承载力公式计算并与实测值进行比较。《混凝土结构设计规范》中对于集中荷载作用下独立梁,钢筋混凝土梁抗剪承载力采用如下公式计算:

$$V_{cs} = \frac{1.75}{1+\lambda} f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (2)$$

式中: A_{sv} 为梁配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积; s 为箍筋间距; f_{yv} 为箍筋抗拉强度设计值,试验中取箍筋屈服强度 f_y ; λ 为剪跨比, $\lambda = a/h_0$, a 为荷载作用点到支座截面边缘的距离; f_t 为混凝土抗拉强度设计值,试验中取轴心抗拉强度 f'_t ; b 为梁的宽度。

将试验结果与计算值汇总于表 2。其中,试件 B11 和 B12 因弯曲破坏,没有抗剪极限承载力,不参与表 2 统计(括号内数字是极限抗弯承载力)。

以梁抗剪承载力试验值 V_u 为横坐标,梁抗剪承载力计算值 V_{cs} 为纵坐标,得到试验值与计算值的关系散点图,如图 6 所示。

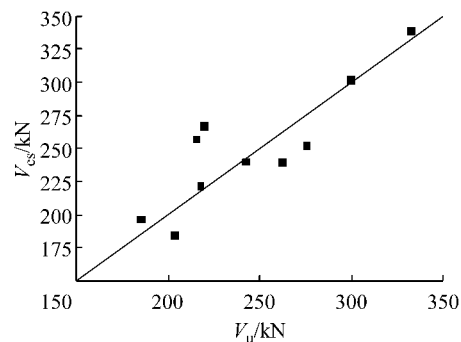


图 6 抗剪承载力试验值与计算值关系

Fig.6 Relationship of experimental and calculated results for shearing capacity

表 2 试验梁承载力对比

Tab.2 Comparison of bearing capacity of the experimental beams

梁号	实际高度/mm	实际宽度/mm	剪跨比	箍筋配筋率/%	混凝土抗压强度/MPa	混凝土抗拉强度/MPa	计算抗剪承载力 V_{cs}/kN	实测抗剪承载力 V_u/kN	V_u/V_{cs}
B1	402.3	203.7	1.75	0.39	24.2	2.39	267.36	219.2	0.820
B2	403.3	203.1	2.25	0.25	24.2	2.39	196.85	185.3	0.941
B3	401.0	200.2	2.60	0.39	25.2	2.45	240.08	262.2	1.092
B4	403.7	202.6	1.75	0.25	42.5	3.29	257.19	215.1	0.836
B5	401.1	203.3	1.75	0.32	25.2	2.45	240.23	242.4	1.009
B6	404.8	204.0	2.25	0.39	50.0	3.60	302.01	299.5	0.992
B7	401.7	200.3	2.25	0.32	25.2	2.45	221.62	217.4	0.981
B8	401.4	200.2	2.60	0.32	50.0	3.60	252.84	275.4	1.089
B9	401.4	200.4	2.60	0.25	24.2	2.39	184.85	203.2	1.099
B10	403.1	200.4	1.75	0.31	74.7	4.52	339.20	332.4	0.980
B11	405.3	201.5	2.25	0.39	74.7	4.52	340.80	(334.4)	
B12	405.6	200.8	2.60	0.25	74.7	4.52	266.90	(260.5)	

从表 2 和图 6 可知,10 根剪切破坏梁的抗剪承载力试验值与计算值之比平均值为 0.984,变异系数为 0.100.可见,《混凝土结构设计规范》的抗剪承载力计算公式能很好地预测简支梁集中荷载情况,但剪跨比较小时,规范计算公式高估了试验梁的实际承载力.由于本次试验计算中,混凝土抗拉强度和箍筋屈服强度都取为试验实测数据,而在工程设计中,《混凝土结构设计规范》公式值为设计值,具有足够的安全储备.综上所述,现行《混凝土结构设计规范》抗剪承载力计算模式能很好地预测集中荷载下配

置 500 MPa 箍筋混凝土梁的抗剪承载力.

3.2 开裂荷载和使用荷载下裂缝宽度分析

3.2.1 开裂荷载分析

本次试验测量了正截面开裂荷载和斜截面开裂荷载,并以此评估常用的正截面开裂荷载计算公式和斜截面开裂荷载计算公式的准确度,如表 3 和图 7 所示.表 3 中, $P_{cr}^{(V)}$ 为斜截面开裂荷载, $P_{cr}^{(M)}$ 为正截面开裂荷载, $P_{cr,c}^{(V)}$ 为计算斜截面开裂荷载, $P_{cr,c}^{(M)}$ 为计算正截面开裂荷载.

表 3 试验梁开裂荷载对比

Tab.3 Comparison of cracked load for the experimental beams

梁号	f_{cu}/MPa	f_t/MPa	$P_{cr}^{(V)}/kN$	$P_{cr}^{(M)}/kN$	$P_{cr,c}^{(V)}/kN$	$P_{cr,c}^{(M)}/kN$	$P_{cr}^{(V)}/P_{cr,c}^{(V)}$	$P_{cr}^{(M)}/P_{cr,c}^{(M)}$
B1	24.2	2.39	81.0	41.5	89.2	54.1	0.908	0.768
B2	24.2	2.39	61.4	47.8	80.8	42.3	0.760	1.131
B3	25.2	2.45	56.3	40.0	82.6	40.3	0.682	0.992
B4	42.5	3.29	61.0	49.0	114.7	67.9	0.532	0.722
B5	25.2	2.45	61.5	40.9	87.2	52.1	0.705	0.785
B6	50.0	3.60	74.5	50.0	125.3	65.8	0.595	0.760
B7	25.2	2.45	59.0	39.5	81.5	42.7	0.724	0.926
B8	50.0	3.60	66.0	42.5	116.9	55.3	0.565	0.769
B9	24.2	2.39	74.0	22.5	76.1	35.9	0.973	0.627
B10	74.7	4.52	74.5	57.9	149.5	95.4	0.498	0.607
B11	74.7	4.52	70.5	55.0	142.8	82.7	0.494	0.665
B12	74.7	4.52	75.5	52.2	128.9	68.4	0.586	0.763

在计算开裂荷载时,正截面开裂荷载和斜截面开裂荷载分别按照《钢筋混凝土结构的裂缝控制》^[11]提出的公式计算,如下所示:

$$P_{cr,c}^{(V)} = \frac{0.25 \csc^2 \theta + \alpha_E \rho}{C + 0.5 h_0 \cot \theta} f_t b h_0^2, \\ P_{cr,c}^{(M)} = 0.292 f_t b h_0^2 (1 + 5 \alpha_E \rho + \alpha_E \rho')$$

$$\cot \theta = \sqrt{4 \left(\frac{C}{h_0} \right)^2 + 4 \alpha_E \rho + 1} - 2 \frac{C}{h_0}, \\ C = \left(0.56 - \frac{0.636 \lambda}{l} \right) \lambda$$

式中: ρ 为受拉钢筋配筋率; ρ' 为受压钢筋配筋率; $\alpha_E = E_s/E_c$, E_s 为钢筋弹性模量, E_c 为混凝土弹性模量; l 为两支座的间距; θ 为斜裂缝平均倾角; C 为平均斜裂缝底点距支座的距离.

从表 3 和图 7 可以得出, $P_{cr}^{(V)}/P_{cr,c}^{(V)}$ 的平均值为 0.668,变异系数为 0.232, $P_{cr}^{(M)}/P_{cr,c}^{(M)}$ 的平均值为 0.793,变异系数为 0.193.无论正截面开裂荷载还是斜截面开裂荷载,常用的计算公式都高估了开裂荷载,且随着混凝土强度提高,高估的趋势越为明显.

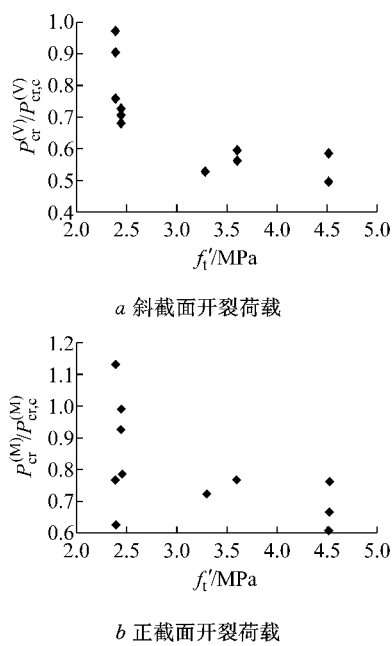


图 7 开裂荷载相关参数分析

Fig.7 Analysis of relevant parameters of cracking load

对于斜截面开裂荷载,计算公式中首先并未考虑箍筋的影响,这是由于文献[11]指出斜截面开裂

时箍筋应力非常小,所以忽略不计.其次,为计算简化,计算参数 θ 和 C 为假定的计算公式,这导致计算值与实测值偏离,并且随着混凝土强度增加,偏离值增大.

对于正截面开裂荷载,在分析时为使计算简化,以截面受拉区矩形应力分布代替原来线性应力分布.这种简化导致相对受压区高度与试验真实值偏离,而且随着混凝土强度增大,偏离值越大,从而正截面开裂荷载大于实测值.

3.2.2 使用荷载下裂缝宽度分析

为了满足正常使用极限状态的要求,斜裂缝宽度控制是必不可少的,通常斜裂缝宽度是指以裂缝边缘为法线方向和斜裂缝垂直的裂缝间距.斜裂缝宽度是梁在使用荷载下讨论的,使用荷载 V_{ser} 可由抗剪强度设计值 V_{cs} 按照式(5)得到^[6,8],其中 V_{cs} 要根据《混凝土结构设计规范》分别得到混凝土轴心抗拉强度设计值和箍筋屈服强度设计值后,再利用式(2)计算得到.图8为部分梁荷载-最大斜裂缝宽度图,其余梁的荷载-最大斜裂缝宽度图与之类似.

$$V_{ser} = V_{cs}/1.267 \approx 0.8V_{cs} \quad (5)$$

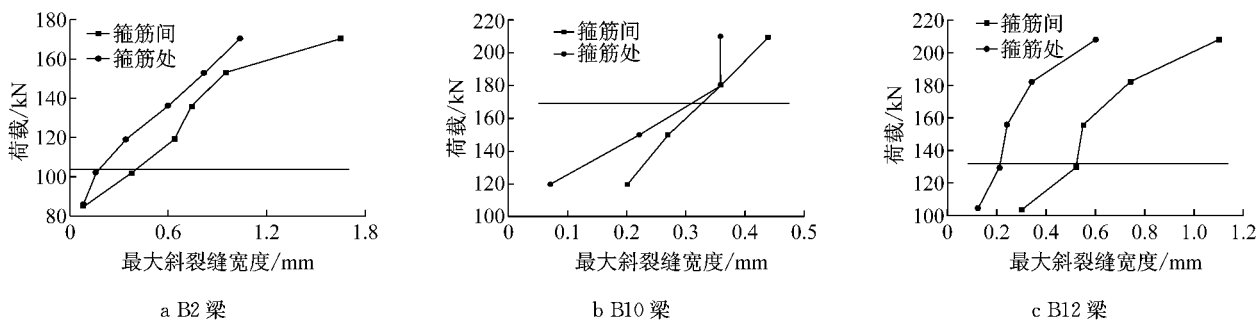


图 8 试验梁荷载-最大斜裂缝宽度关系

Fig.8 Relationship of load and maximum diagonal cracked width for the beams

结合图7,利用插值法,分别得到本次试验梁的 箍筋间最大斜裂缝宽度为0.3 mm的荷载值 $V_{0.3}$,如表 箍筋处最大斜裂缝宽度为0.2 mm的荷载值 $V_{0.2}$,箍 4所示.

表 4 使用荷载下裂缝宽度比较

Tab.4 Comparison of crack width under working loads

梁号	f_t'/MPa	f_y/MPa	$V_{0.2}/\text{kN}$	$V_{0.3}/\text{kN}$	V_{cs}/kN	$V_{0.2}/V_{cs}$	$V_{0.3}/V_{cs}$
B1	2.39	537.03	104.14	106.88	185.95	0.560	0.575
B2	2.39	537.03	97.31	105.78	131.37	0.741	0.805
B3	2.45	537.03	107.50	101.05	174.23	0.617	0.580
B4	3.29	537.03	126.00	118.80	164.16	0.768	0.724
B5	2.45	537.03	102.50	103.39	162.33	0.631	0.637
B6	3.60	537.03	162.00	148.50	205.27	0.789	0.723
B7	2.45	537.03	113.75	107.25	151.72	0.750	0.707
B8	3.60	537.03	121.00	117.33	173.36	0.698	0.677
B9	2.39	537.03	100.75	110.22	126.96	0.794	0.868
B10	4.52	554.76	160.00	146.00	214.40	0.746	0.681
B11	4.52	554.76	168.00	113.75	224.11	0.750	0.508
B12	4.52	554.76	104.00	127.11	167.79	0.620	0.758

根据表4可以得出, $V_{0.2}/V_{cs}$ 的平均值为0.705, $V_{0.3}/V_{cs}$ 的平均值为0.687,无论是对于 $V_{0.2}$ 还是 $V_{0.3}$,梁在使用过程中其荷载不超过设计值 V_{cs} 的65%时,能保证斜裂缝宽度不超限,即这时的使用荷载并未达到 $V_{0.3}$,满足裂缝宽度要求,超出使用荷载 V_{ser} 约20%。而当使用过程中荷载增大后,即大于 $V_{0.3}$,裂缝宽度则会大于0.3 mm,这时按照《混凝土结构设计规范》进行斜截面设计时,正常使用极限状态会不满足要求。为保证集中荷载作用下的斜裂缝宽度不超限,抗剪极限承载力必须留有一定的富余

量,偏于安全。本文建议,对配置500 MPa 箍筋的混凝土梁,在验算正常使用极限状态时,抗剪设计值不应超过现行《混凝土结构设计规范》设计值的80%。

3.3 试验梁挠度变形分析

本次试验对配置500 MPa 箍筋的混凝土梁挠度变形进行了测量,本文用实际跨中挠度 y_m 和实际加载点挠度 y_l 来描述梁的整体变形。图9表示了部分梁的荷载-挠度曲线关系,其他梁的荷载-挠度曲线与之类似,其中 $y_{m,c}$ 为计算跨中挠度, $y_{l,c}$ 为计算加载点挠度。

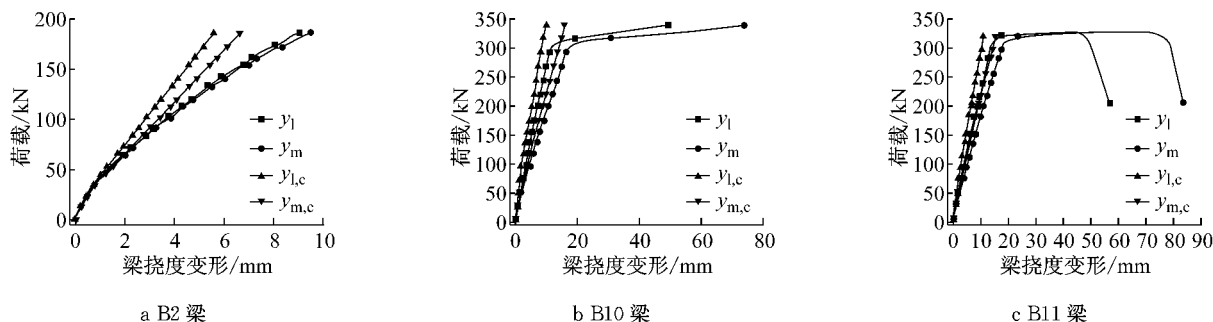


图9 试验梁荷载-挠度曲线

Fig.9 Load-deflection curve of the beams

在试验梁荷载-变形全过程中,随着最开始挠度的增加,其裂缝为细微小裂缝,而纵筋的应力很小,大部分应力由混凝土承担。当荷载增加,梁的挠度逐渐增大时,裂缝宽度逐渐变大,并由最开始的细微裂缝形成受弯段和剪弯段的主要裂缝,剪力逐渐由之前混凝土承担逐渐转向纵筋承担。当达到极限荷载时,梁的挠度已经比较明显,主要裂缝已贯穿试验梁,而纵筋的应力也达到屈服。

从图9可以得出,配置高强箍筋的挠度没有超过《混凝土结构设计规范》的限值(跨度的1/200),但试件的实际挠度变形明显比根据《混凝土结构设计规范》弯曲挠度计算公式得到的计算值要大。破坏时,某些梁的实际挠度甚至比计算值大50%。这是因为在计算试验梁刚度的时候,《混凝土结构设计规范》公式只考虑了弯曲变形对梁挠度的贡献,忽略了剪切变形的影响,而在混凝土梁抗剪试验和分析中,剪切变形是一个非常重要的因素,所以计算挠度要比实测值小,由此可见剪切变形影响显著。本文建议在《混凝土结构设计规范》计算构件受剪切产生的挠度时,需加入剪切变形对挠度的影响。

4 结论

(1) 本次试验结果 V_u/V_{cs} 的均值为0.984,变异

系数为0.100。所以《混凝土结构设计规范》抗剪承载力计算公式适用于配置500 MPa 高强箍筋的混凝土梁,并能很好地预测高强箍筋混凝土梁极限抗剪承载力。

(2) 本次试验中,配置500 MPa 高强箍筋后,抗剪承载力提高,但出现使用荷载下斜裂缝宽度超限的问题。本文建议箍筋间的斜裂缝宽度不应超过0.3 mm,箍筋处斜裂缝宽度不应超过0.2 mm。根据试验数据,为保证使用荷载下斜裂缝宽度不超限,建议在验算正常使用极限状态时,抗剪设计值不应超过现行《混凝土结构设计规范》设计值的80%。

(3) 在荷载比较小时,根据《混凝土结构设计规范》计算的挠度与实测挠度比较接近,但随着荷载增大,两者的误差逐渐增大,最大能达到50%。主要原因是《混凝土结构设计规范》低估了剪切变形的影响,因此本文建议在计算构件挠度时考虑剪切变形的影响。

(4) 配置500 MPa 箍筋的混凝土梁与普通的抗剪破坏形式基本一致,达到极限荷载后,试验梁以一种非常突然的方式发生脆性破坏。剪跨比较大的试验梁,箍筋的应力继续迅速增大,斜裂缝经过的箍筋会出现拉断现象,此时接近斜拉破坏,但是仍然属于剪压破坏;剪跨比较小的试验梁,箍筋的应力也会迅速增加,此时,梁顶混凝土先受压破坏,但是仍然属

于剪压破坏。

(5) 500 MPa 高强箍筋能在普通混凝土梁中使用,可减少钢筋用量,即使不和高强混凝土搭配(低于 C50),只要设计良好,500 MPa 箍筋依然能充分发挥作用,达到屈服强度。B10 到 B12 梁的延性破坏表明,只要设计良好,配置 500 MPa 箍筋的混凝土梁的延性良好。

参考文献:

- [1] 中国建筑科学研究院. GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
China Academy of Building Research. GB 50010—2010 Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [2] 李进. 高强箍筋混凝土梁受剪性能研究及有限元分析[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2008.
LI Jin. Shear properties and finite element analysis of reinforced concrete beams with high-strength stirrups [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008.
- [3] 吕艳梅. 高强箍筋高强混凝土梁抗剪性能试验研究与理论分析[D]. 长沙:湖南大学, 2008.
LÜ Yanmei. Theoretical and experimental research on shear capacity of high strength concrete beams with high strength stirrups [D]. Changsha: Hunan University, 2008.
- [4] 李朋,王命平,耿树江,等. 高强箍筋混凝土简支梁抗剪承载力试验研究[J]. 青岛理工大学学报, 2009, 30(5):20.
LI Peng, WANG Mingping, GENG Shujiang, *et al.* Experimental study on shear-bearing capacity of simple supported beam with high-strength stirrup reinforced concrete [J]. Journal of Qingdao Technological University, 2009, 30 (5):20.
- [5] 白家荣. 高强箍筋高强混凝土梁受剪性能试验研究及有限元分析[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2009.
BAI Jiarong. Experiments and finite element analysis of shear behavior for high strength concrete beams with high strength stirrups [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009.
- [6] 李娟. HRB500 级箍筋混凝土梁斜截面受力性能试验研究[D]. 长沙:湖南大学, 2007.
LI Juan. Experimental study on mechanical behavior of diagonal section of reinforced concrete beams with HRB500 stirrups [D]. Changsha: Hunan University, 2007.
- [7] 徐龙,王命平,李朋,等. 500 MPa 细晶粒箍筋混凝土梁的斜裂缝宽度试验研究[J]. 建筑科学, 2010, 26(3):32.
XU Long, WANG Mingping, LI Peng, *et al.* Experimental study on shearing diagonal crack widths of reinforced concrete beams with 500 MPa hot rolled bars of fine grains [J]. Building Science, 2010, 26(3):32.
- [8] 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.
LI Yanyan. Experiment study on the performance of concrete beams with 500 MPa steel bars [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [9] 王眺. 配置 500 MPa 箍筋的混凝土梁抗剪性能研究[D]. 上海:同济大学, 2012.
WANG Tiao. Research on shear behavior of concrete beams reinforced with 500 MPa stirrups [D]. Shanghai: Tongji University, 2012.
- [10] 中国建筑科学研究院. GB 50152—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.
China Academy of Building Research. GB 50152—2012 Standard for test method of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [11] 赵国藩. 钢筋混凝土结构的裂缝控制[M]. 北京:海洋出版社, 1991.
ZHAO Guofan. Crack control of reinforced concrete structure [M]. Beijing: Maritime Press, 1991.