

文章编号: 1001-4888(2016)02-0253-10

水工结构高强钢筋混凝土梁受剪性能试验研究^{*}

李朋^{1,2}, 郑鸿飞^{1,2}, 张宪堂^{1,2}, 张永波³

(1. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东青岛 266590;
3. 青岛国家海洋科学研究中心, 山东青岛 266071)

摘要: 通过对 12 根配置高强箍筋的混凝土梁在集中荷载作用下的受剪试验, 研究梁的挠度、箍筋应变、斜裂缝扩展规律及破坏形态。依据现行《水工混凝土结构设计规范》, 对比分析试验梁斜截面承载力及考虑荷载长期作用的正常使用阶段斜裂缝宽度。研究表明, 配置高强箍筋的混凝土梁斜向开裂规律和受力特征与普通钢筋混凝土梁基本相同, 受剪承载力可按现行《水工混凝土结构设计规范》公式计算, 且有较高安全储备。当考虑荷载长期作用, HRBF500 钢筋在水工结构中抗拉强度设计值取 360MPa 时, 斜裂缝宽度满足正常使用极限状态要求。

关键词: 水工结构; 高强钢筋; 受剪性能; 极限承载力; 正常使用极限状态

中图分类号: TV32⁺1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-15-119

0 引言

500MPa 级高强钢筋在欧美国家已得到广泛应用, 在相应的规范和标准中也有明确规定^[1-4]。HRBF500 钢筋是我国研发的基于温控技术的高强度细晶粒钢筋, 通过控轧控冷工艺获得超细组织, 在不增加合金含量的基础上大幅提高钢材的性能。在混凝土结构中使用高强钢筋, 可显著改善结构性能, 降低施工难度^[5-7]。针对 HRBF500 高强钢筋, 已有较多研究成果^[8-13], 但在水工结构中, 该高强钢筋缺乏相关数据资料及应用实例。特别是在复杂恶劣外部环境条件下, 针对水工结构使用该高强钢筋, 如何确定其使用限制条件, 如何强度取值, 如何充分发挥其强度优势而又理想地控制裂缝开展, 这都需要大量的数据支持, 而这也直接影响其在水工结构中的快速推广和使用。

依据构件受剪主要影响因素, 对 14 根不同设计参数的钢筋混凝土梁进行集中荷载作用下的受剪试验, 研究构件变形、箍筋应变及斜裂缝开展规律, 观测其破坏形态; 同时采集构件不同受力阶段时的荷载, 将实测值与采用《水工混凝土结构设计规范》^[14,15] 公式所得计算值进行比较和分析, 为 HRBF500 高强钢筋在水工结构中的快速推广应用提供参考和科学依据。

1 试验研究方案

1.1 构件加载方案

试验加载设备采用 500 吨压力试验机, 构件端部均为铰接, 铰接支座根据试验方案专门加工制造, 并进行强度检测以满足试验要求。在支座及加荷处均加设宽 100mm、厚 25mm 的钢板, 以防止混凝土

^{*} 收稿日期: 2015-07-13; 修回日期: 2015-10-09

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR2013EEM023); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2015HZ017); 山东省土木工程防灾减灾重点实验室开放课题基金项目(CDPM2013ZR01); 山东科技大学人才引进科研启动基金项目(2013RCJJ032); 青岛市博士后研究人员应用研究项目(01020120406)资助

通讯作者: 李朋(1984—), 男, 博士, 讲师。主要从事海洋工程结构动力分析、设计及防灾减灾技术研究。Email: lipeng@sdust.edu.cn

的局部压碎。试验前,台座及支座结合处涂刷润滑油,以保证受力状态良好。构件侧面设置两组吊环,以配合实验室天车对构件吊装及定位。两支点处通过水准尺严格定位,确保在同一水平面上。试件与支座、台座之间为保证密合稳固,采用高强水泥砂浆坐缝处理。为便于裂缝的观测与绘制,在构件两侧均匀涂刷一层白浆,并用黑色墨线以 $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 单元格将构件表面均匀划分,加载方案如图 1 所示,加载详图如图 2 所示。

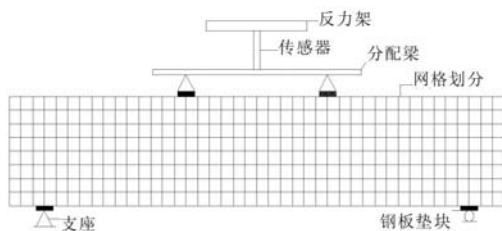


图 1 加载整体示意图

Fig. 1 The loading diagram



图 2 试验实况图

Fig. 2 Scene of the experiment

1.2 试验构件设计

本文共进行了 14 根主尺混凝土梁的受剪试验。在构件的设计中,以混凝土强度、剪跨比、配箍率、箍筋强度、纵筋率、截面形式等为变化参数。其中 13 根矩形梁,1 根 T 形梁。13 根矩形梁中,12 根为简支梁,1 根为悬臂梁。构件混凝土采用现场配比浇筑,每个试件预留标准尺寸试块 3 组,与构件在同一环境条件下养护,选取不同直径钢筋中间部分各 3 根进行拉伸试验,测定其力学性能。构件详细配筋如图 3 所示,构件的详细参数见表 1,实测混凝土及钢筋强度参数见表 2,其拉伸过程及所得应力—应变曲线如图 4、图 5 所示。

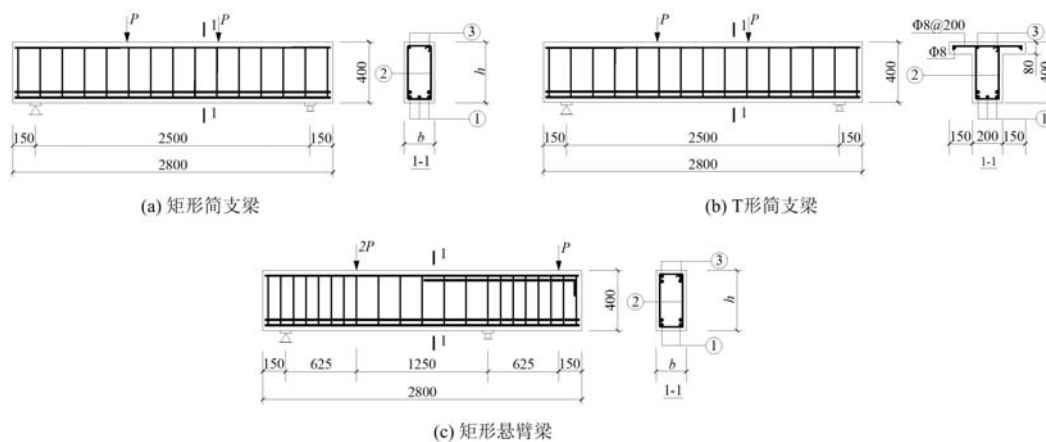


图 3 试验梁配筋详图

Fig. 3 Diagram of the member steel



图 4 钢筋拉伸试验

Fig. 4 Tension test of rebars

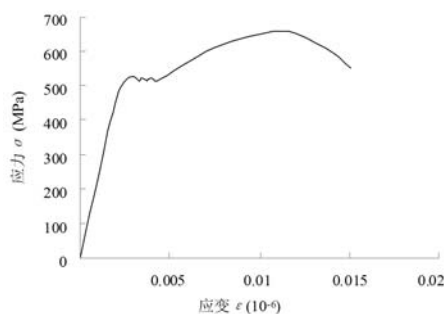


图 5 HRBF500 钢筋应力—应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curve of HRBF500 rebars

表 1 试验构件参数表
Tab. 1 Section details of the test members

构件编号	$b(\text{mm})$	$h(\text{mm})$	$c(\text{mm})$	λ	$f_{cu}^s(\text{MPa})$	钢筋①	钢筋②	钢筋③	ρ_{sv}
BS-1	200	400	25	2.45	26.2	5 Φ 25	Φ^F 8@200	2 Φ 12	0.25%
BS-2	200	400	25	2.45	67.9	5 Φ 25	Φ^F 8@150	2 Φ 12	0.34%
BS-3	200	400	25	1.85	26.2	5 Φ 25	Φ^F 8@150	2 Φ 12	0.34%
BS-4	200	400	25	1.67	26.2	5 Φ 25	Φ^F 8@150	2 Φ 12	0.34%
BS-5	200	400	25	1.62	26.2	4 Φ 25	Φ^F 8@200	4 Φ 25	0.25%
BS-6	200	400	25	2.45	26.2	5 Φ 25	Φ^F 8@150	2 Φ 12	0.34%
BS-7	200	400	25	1.67	33.0	5 Φ 20	Φ^F 8@200	2 Φ 14	0.25%
BS-8	200	400	25	1.85	33.0	5 Φ 20	Φ^F 8@200	2 Φ 14	0.25%
BS-9	200	400	25	2.45	33.0	5 Φ 20	Φ^F 8@200	2 Φ 14	0.25%
BS-10	200	400	25	2.45	33.0	5 Φ 20	Φ^F 8@250	2 Φ 14	0.20%
BS-11	200	400	25	3.0	33.0	5 Φ 20	Φ^F 8@250	2 Φ 14	0.20%
BS-12	200	400	25	3.0	33.0	5 Φ 20	Φ^F 8@300	2 Φ 14	0.17%
BS-13	200	400	25	2.45	26.2	5 Φ 25	Φ 8@150	2 Φ 12	0.34%
BS-14	200	400	25	1.67	26.2	5 Φ 25	Φ 8@150	2 Φ 12	0.34%

备注：试验梁 BS-5 为矩形悬臂梁；试验梁 BS-6 为 T 形简支梁；试验梁 BS-13 箍筋采用 HRB400 钢筋；试验梁 BS-14 箍筋采用 HRBF600 钢筋。

表 2 钢筋强度参数表
Tab. 2 Strength parameters of rebar

钢筋类别	符号	实测屈服强度	实测极限强度	伸长率	弹性模量 E_s
		$\sigma_s(\text{MPa})$	$\sigma_b(\text{MPa})$	δ_5	$(\times 10^5 \text{ N/mm}^2)$
HRB400	Φ	423.3	546.6	26.8%	2.015
HRBF600	Φ^F	636.2	830.5	29.1%	2.206
HRBF500	Φ^F	525.6	670.6	29.6%	2.096

1.3 试验数据采集及现象观测

根据每个试验构件的设计参数,初步计算受剪极限承载力。根据《混凝土结构试验方法标准》^[16]规定,按照 10%~15%极限承载力的原则分级加载,在接近斜向开裂和极限承载力阶段时,每级按照 5%极限承载力加载。构件及试验设备就位后进行预加载试验,检测应变计、压力机等仪器设备的工作性能。每级荷载加载过程中,保持缓慢均匀施加,达到预设荷载值,保持稳定约 30min 后开始采样。试验构件在剪跨区依据剪跨比不同,四面对称粘贴 3~5 组电阻应变计,用来采集剪跨区斜裂缝可能出现位置处的箍筋应变。在剪跨区纵筋对应位置粘贴应变计,用来测量纵筋应变。钢筋应变计采用防水胶粘贴,并采用环氧树脂包裹,强度满足要求后采用万用表对应变计进行逐个检测,均满足要求后浇注混凝土。为防止混凝土涨模,在构件表面设置 3 道方木,并设置 4 道横向支撑,如图 6 所示。钢筋的绑扎,模板的加工及混凝土浇筑由施工企业现场完成。同时为获得混凝土应变数据,在相应剪跨区中间位置粘贴 5 组混凝土应变计,外涂防水胶。试验采用 DH3815N 型应变测试数据采集仪进行数据采集,应变计粘贴位置如图 7 所示。

为了准确地观测裂缝的开展过程及采集每级荷载下的裂缝宽度,试验前首先对浇筑好的构件表面进行光滑平整处理,然后用纯石灰水溶液均匀涂刷在结构表面,待构件充分干燥后在表面画出 50mm 方格栅,如图 1 所示。为防止吊装、定位过程中造成构件的破损及传感器的破坏,构件表面采用帆布包

裹。在试验过程中,为准确及时地反映裂缝包括垂直裂缝的出现及开展过程,在 4 个斜截面及 2 个跨中截面采用放大镜实时观测,在白色方格栅表面紧邻裂缝边缘标示其走向并记录荷载值。每级荷载持续时间为 30min。待荷载稳定后,采用 DJGK-2 型裂缝测宽仪测定构件的裂缝宽度,并将裂缝开展过程、宽度及对应荷载值描绘记录于坐标纸上^[16]。对于试验梁挠度的测量,采用 3 个布置在构件两端及跨中的百分表来完成,如图 7 所示。



图 6 现场浇筑混凝土详图

Fig. 6 Concrete pouring of the test beams

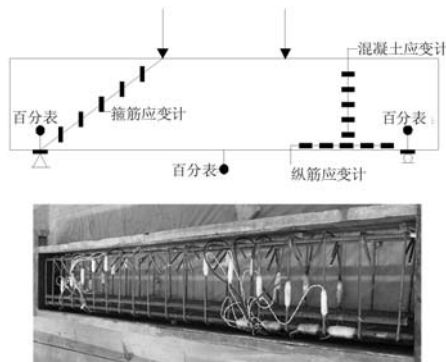


图 7 应变计粘贴位置及加工详图

Fig. 7 Strain gauges attaching of rebars

2 试验结果观测与分析

2.1 构件变形规律

根据对构件的数据采集分析以及对试验过程的观测可以发现,构件受力状态在外荷载的作用下分为两个明显的区域,以构件出现斜裂缝为界限,分为斜向开裂之前和斜向开裂之后。开始加载时,尚未出现斜裂缝,构件处于弹性受力阶段,此时挠度很小,如图 8 所示。

本文配置 HRBF500 高强钢筋的构件均发生了典型的剪压破坏,下面以构件 BS-3 为例分析。构件斜向开裂时,其挠度为 1.16mm。而由构件的挠度发展过程可以看出,在斜裂缝出现的左右边界,挠度没有呈现突变,斜率基本保持一致,挠度在开裂前后基本呈线性增加,且幅度不大,增幅在开裂前一级及开裂后一级均小于 0.5mm。随着荷载的逐渐增大,挠度也逐渐增大,且与荷载不再维持线性关系,增加比例大于荷载的增加比例;特别是在加载的最后几级,荷载值增加较小但挠度却有大幅增加,在临近破坏时,荷载基本不再增加,但挠度仍有较大增幅。

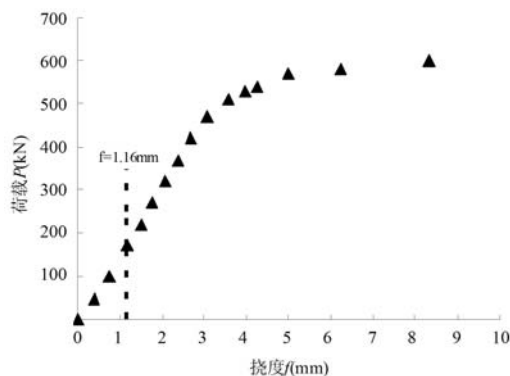


图 8 试验梁 BS-3 荷载—挠度曲线

Fig. 8 Load-deflection curves of BS-3

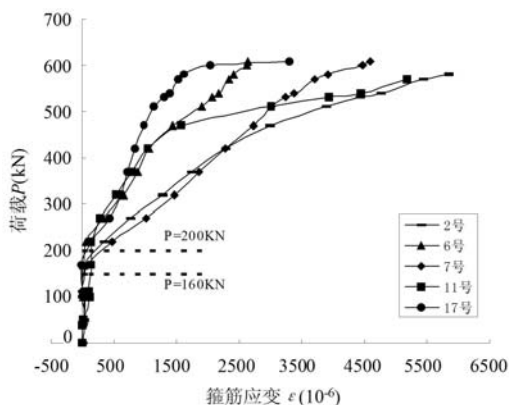


图 9 试验梁 BS-3 荷载—箍筋应变曲线

Fig. 9 Load-stirrup strain curves of BS-3

2.2 构件箍筋应力及裂缝扩展规律

在构件斜向开裂之前,构件变形较小,此时外部荷载较小,构件仅在纯弯段出现若干条垂直裂缝,且

裂缝的宽度和高度均较小。随着荷载的增加,垂直裂缝的高度有所增加,但宽度始终较小。由图9可以看出,斜向开裂之前,箍筋尚未承担剪力,应变值很小,有些甚至处于受压状态,此时构件的剪力主要由混凝土来承担。根据试验观察可以得到,当外荷载增加到大约为20%~30%极限荷载时,斜裂缝以一种非常突然的方式在剪跨区段内出现。斜裂缝往往一出现就具有较大的延伸长度,如图10所示。延伸长度最小的构件BS-8为72mm,延伸长度最大的构件BS-9为146mm,但斜裂缝刚出现时宽度并不大,约为0.02~0.04mm,仅构件BS-1、BS-8、BS-10超过0.05mm,如图11所示;而初始斜裂缝倾斜角度在30°~60°之间。

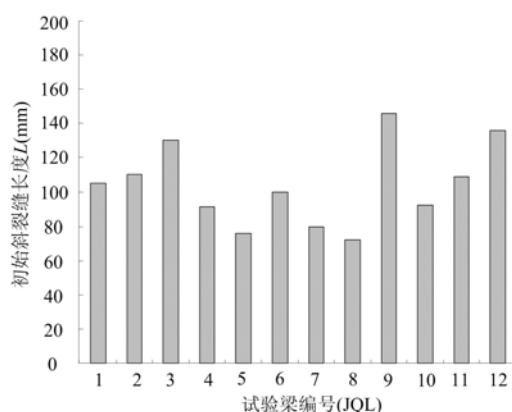


图10 试验梁初始斜裂缝长度

Fig. 10 The initial diagonal crack length of test beams

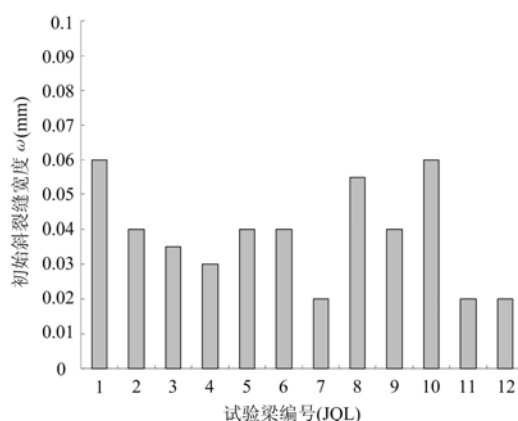


图11 试验梁初始斜裂缝宽度

Fig. 11 The initial diagonal crack width of test beams

由试验观测可知,试件BS-3的斜向开裂荷载 P_{cr} 为170kN。通过观测构件BS-3在外荷载区间[160kN,200kN]所对应的箍筋应变可清晰发现,试验梁的箍筋应力突然地增加,呈现出一个明显的转折点,且由该转折点以后,箍筋应变逐渐增大。由此可见,当初始斜裂缝出现以后,开裂前由混凝土承担的剪应力转由箍筋承担。但通过整体对比可以发现,斜裂缝刚出现时的箍筋应力虽发生突变,但幅值并不大,并且其增长速度要低于进入斜裂缝扩展阶段后箍筋应力的增长速度。随着荷载的逐渐增大,构件进入斜裂缝稳定扩展阶段,构件挠度不断增加,新的斜裂缝也陆续出现。加载到接近极限荷载时,构件出现异常响动,斜裂缝快速向两端延伸,构件整体变形明显,所施加荷载无法稳定,有快速下降的趋势,上部剪压区混凝土表面开始逐渐脱落,荷载继续保持下降趋势,最终构件上部剪压区混凝土被压碎,构件破坏。与配置HRB400钢筋的试验梁BS-13对比可知,配置HRBF500高强箍筋的混凝土梁受剪特征与其基本相同,构件BS-3斜裂缝扩展如图12所示。

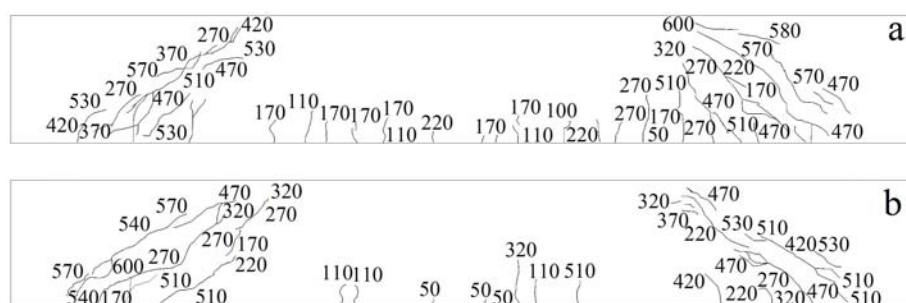


图12 试验梁BS-3裂缝扩展示意图

Fig. 12 The crack propagation diagram of BS-3

3 受剪承载力计算分析

为了研究《水工混凝土结构设计规范》对配置HRBF500高强钢筋为箍筋的混凝土构件斜截面受剪承载力计算的适用性,本文采用规范规定的受剪承载力计算公式进行计算,结合本文试验均为集中荷载

作用下的独立梁构件,公式中采用的相关计算系数根据《水工混凝土结构设计规范》对仅配箍筋的混凝土梁斜截面承载力计算公式及条文相关要求来确定,计算结果如表 3 所示。

表 3 《水工混凝土结构设计规范》公式计算对比结果

Tab. 3 The results calculated by formula of “Hydraulic concrete structure design code”

构件编号	V_u (kN)	V_s^1 (kN)	V_s^2 (kN)
BS-1	246	143	92
BS-2	330	206	126
BS-3	301	167	109
BS-4	321	167	109
BS-5	346	143	92
BS-6	326	167	109
BS-7	270	151	92
BS-8	214	151	92
BS-9	194	151	92
BS-10	226	136	82
BS-11	186	136	82
BS-12	151	126	75

备注:

V_u 为构件实测的破坏剪力;

V_s^1 为构件按实测混凝土强度和实测箍筋屈服强度计算的破坏剪力;

V_s^2 为构件按混凝土设计强度和箍筋设计强度 (HRBF500 钢筋设计强度取 360MPa) 计算的破坏剪力。

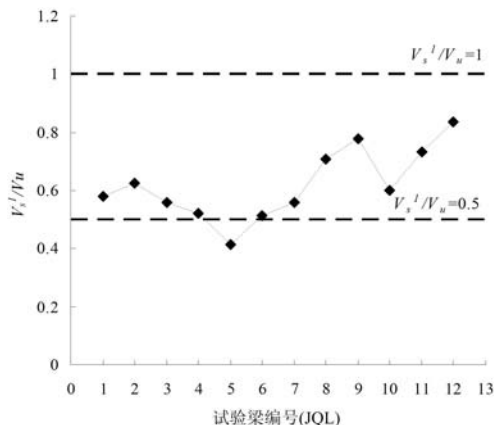


图 13 试验梁 V_s^1/V_u 对比曲线

Fig. 13 The contrast curve of V_s^1/V_u

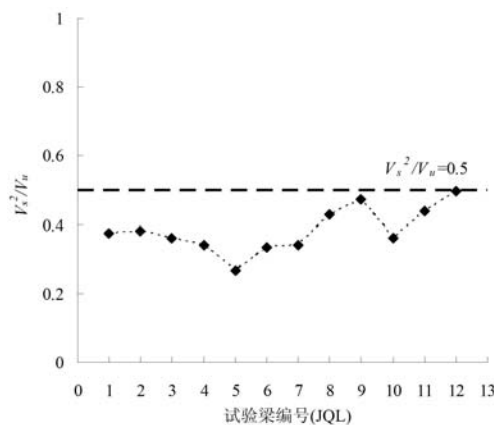


图 14 试验梁 V_s^2/V_u 对比曲线

Fig. 14 The contrast curve of V_s^2/V_u

根据表 3 所示计算结果,可得试验梁 V_s^1/V_u 、 V_s^2/V_u 对比曲线如图 13、图 14 所示。由图分析可知,所有试验构件按材料实测强度计算的剪力 V_s^1 与实测破坏剪力 V_u 的比值规律性较好。除试验梁 BS-5 的 V_s^1/V_u 小于 0.5 以外,其余构件的 V_s^1/V_u 比值均落在 $[0.5, 1]$ 区间内,计算结果均小于实测值,其 V_s^1/V_u 均值为 0.618,小于 1,变异系数为 0.197。而依据材料设计强度计算结果 V_s^2 均小于实测值,试验梁的 V_s^2/V_u 比值均落在 $[0, 0.5]$ 区间内, V_s^2/V_u 均值为 0.384,变异系数为 0.170。由此可见,配置 HRBF500 高强箍筋的混凝土构件其斜截面承载力按照《水工混凝土结构设计规范》规定公式计算的结果小于试验实测结果,且具有较高的安全储备。

4 正常使用极限状态分析及讨论

通过分析发现,水工规范主要是通过对抗剪强度的控制来实现对斜裂缝宽度的限制,并没有相关计算公式。而配置 HRBF500 钢筋后,钢筋强度得到很大提高,但由于钢筋用量的大幅减少,其在正常使用阶段的应力必然提高。那么,针对水工建筑物,配置高强箍筋的构件能否满足正常使用阶段斜裂缝宽度限值的要求;HRBF500 钢筋如何取最优设计值。对正常使用阶段的这两个关键问题,本文依据所得试验数据,进行了讨论与分析。

《水工建筑物荷载设计规范》^[17] 及《水工混凝土结构设计规范》3.2.5 条和 5.3.1 条规定,正常使用

极限状态验算应按照标准组合进行。考虑本文试验数据分析结果,取标准组合下荷载综合分项系数的平均值 γ 为 1.1。依据钢筋材料分项系数取值范围,分别取 HRBF500 高强钢筋设计值为 360MPa、380MPa、420MPa、435MPa、450MPa,依据规范规定公式,分别求得剪力设计值 V_z ,并由已知荷载综合分项系数,推得钢筋取不同设计值时正常使用阶段的组合剪力 V_z 。同时在试验过程中采集每个构件斜裂缝宽度为 0.2mm^[18]时对应的荷载值,并将其换算成剪力值 $V_{0.2}$ 。将两者进行对比,从而判断钢筋设计值是否满足正常使用阶段的要求,计算结果见表 4。

表 4 箍筋取不同设计强度时 $V_z/V_{0.2}$ 的计算结果

Tab. 4 The computing results of $V_z/V_{0.2}$ with different design strength of stirrups

构件编号	$V_{z(360)}/V_{0.2}$	$V_{z(380)}/V_{0.2}$	$V_{z(420)}/V_{0.2}$	$V_{z(435)}/V_{0.2}$	$V_{z(450)}/V_{0.2}$
BS-1	0.754	0.777	0.824	0.842	0.859
BS-2	0.845	0.871	0.922	0.941	0.961
BS-3	0.735	0.761	0.812	0.832	0.851
BS-4	0.657	0.680	0.726	0.744	0.761
BS-5	0.558	0.575	0.609	0.623	0.636
BS-6	0.735	0.761	0.812	0.832	0.851
BS-7	0.669	0.690	0.732	0.747	0.763
BS-8	0.664	0.685	0.726	0.741	0.757
BS-9	0.761	0.784	0.832	0.849	0.867
BS-10	0.701	0.721	0.760	0.775	0.789
BS-11	0.736	0.756	0.797	0.813	0.828
BS-12	0.709	0.727	0.763	0.777	0.790

由表 4 可知,HRBF500 钢筋设计值分别取为 360MPa、380MPa、420MPa、435MPa、450MPa 时,与试验采集到的斜裂缝宽度为 0.2mm 的剪力值 $V_{0.2}$ 的比值 $V_z/V_{0.2}$ 均小于 1,各构件所得对比数据中, $V_z/V_{0.2}$ 最大值为 0.961,最小值为 0.558。图 15、图 16 为箍筋取不同设计强度时 $V_z/V_{0.2}$ 的平均值及变异系数,由图分析可知,5 种不同设计值对应的 $V_z/V_{0.2}$ 平均值分别为 0.710、0.732、0.776、0.793、0.809,而变异系数较小,均小于 0.1。由此可知,在短期荷载作用下,构件均能满足正常使用极限状态斜裂缝宽度限值的要求,且具有一定的安全余量。

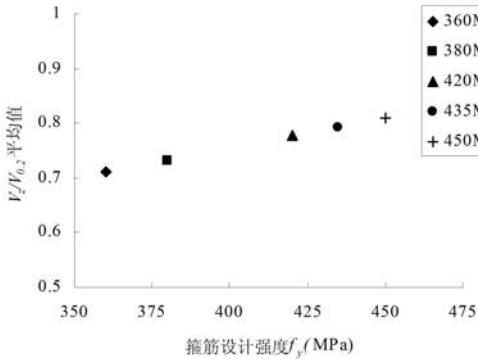


图 15 箍筋取不同设计强度时试验梁 $V_z/V_{0.2}$ 的平均值
Fig. 15 The average value of $V_z/V_{0.2}$ with different design strength of stirrups

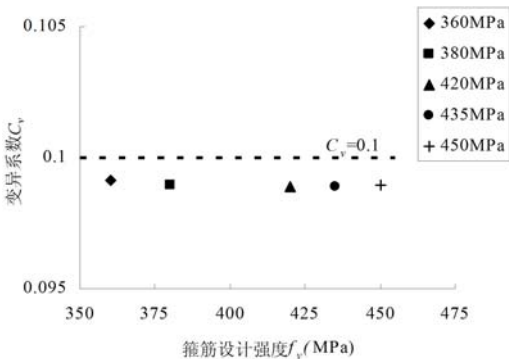


图 16 箍筋取不同设计强度时试验梁 $V_z/V_{0.2}$ 的变异系数
Fig. 16 The variation coefficient of $V_z/V_{0.2}$ with different design strength of stirrups

由于钢筋混凝土构件设计使用年限较长,因此,荷载长期作用是一个影响裂缝开展的重要因素,尤其对水工结构而言,一般处于室外环境,构件在荷载的长期作用下,钢筋能否满足正常使用阶段的要求也是不容忽视的问题。通过对配置 HRB400 钢筋的构件 BS-13 的反算结果分析可知,其长期荷载影响系数 $C < 1.3$ 。针对本文数据,取其上限值,长期荷载影响系数 $C = 1.3$,从而可得在长期荷载作用下剪力值 $V_L = C \cdot V_z$,剪力值 V_L 与剪力值 $V_{0.2}$ 计算对比结果见表 5。

表 5 箍筋取不同设计强度时 $V_L/V_{0.2}$ 的计算结果Tab. 5 The computing results of $V_L/V_{0.2}$ with different design strength of stirrups

构件编号	$V_{L(360)}/V_{0.2}$	$V_{L(380)}/V_{0.2}$	$V_{L(420)}/V_{0.2}$	$V_{L(435)}/V_{0.2}$	$V_{L(450)}/V_{0.2}$
BS-1	0.979	1.010	1.071	1.094	1.117
BS-2	1.099	1.132	1.199	1.223	1.248
BS-3	0.956	0.989	1.056	1.081	1.106
BS-4	0.855	0.885	0.944	0.967	0.989
BS-5	0.725	0.748	0.793	0.809	0.827
BS-6	0.956	0.989	1.056	1.081	1.106
BS-7	0.870	0.897	0.951	0.972	0.992
BS-8	0.863	0.890	0.944	0.963	0.984
BS-9	0.989	1.019	1.081	1.104	1.127
BS-10	0.911	0.937	0.988	1.007	1.026
BS-11	0.956	0.983	1.037	1.057	1.077
BS-12	0.922	0.945	0.992	1.009	1.027

根据表 5 数据分析可知,箍筋设计强度为 420MPa、435MPa、450MPa 时,比值 $V_L/V_{0.2}$ 大于 1 的构件分别为 6 根、8 根、8 根,均已超过测试构件数的 1/2,比值 $V_L/V_{0.2}$ 的平均值分别为 1.009、1.031、1.052,均已大于 1。而箍筋设计强度为 360MPa、380MPa 时,比值 $V_L/V_{0.2}$ 大于 1 的构件分别为 1 根、3 根,比值 $V_L/V_{0.2}$ 的平均值分别为 0.923、0.952,变异系数均小于 0.1。由此可见,5 种不同设计强度中,当箍筋设计强度取为 360MPa、380MPa 时,能够满足正常使用极限状态的要求。但对于单个构件而言,箍筋设计强度为 380MPa 时的 $V_L/V_{0.2}$ 比值超过限值的单个构件相对较多。

综上所述,并考虑水工结构的其他不利影响因素,以及足够的安全余量等因素,HRBF500 钢筋在水工钢筋混凝土中的抗拉强度设计值取为 360MPa 时能够满足正常使用极限状态要求。

5 结 论

通过对水工结构配置 HRBF500 高强钢筋为箍筋的混凝土梁在集中荷载作用下的受剪试验研究与分析,主要得到以下结论:

(1) 配置 HRBF500 高强箍筋混凝土梁与普通箍筋混凝土梁的开裂规律和受力特征基本相同,钢筋和混凝土共同作用效果良好,钢筋强度可以被充分利用。

(2) 集中荷载作用下配置 HRBF500 高强箍筋混凝土梁的受剪承载力,可以按照现行《水工混凝土结构设计规范》的公式进行计算,且具有较高的安全储备。

(3) 集中荷载作用下配置 HRBF500 高强箍筋混凝土梁,短期荷载作用下斜裂缝宽度满足正常使用阶段要求,当考虑荷载长期作用,HRBF500 钢筋在水工结构中抗拉强度设计值取 360MPa 时斜裂缝宽度满足正常使用极限状态要求。

参考文献:

- [1] 孙治国, 司炳君, 王东升等. 高强箍筋高强混凝土柱抗震性能研究[J]. 工程力学, 2010, 27(5):128—136 (SUN Zhiguo, SI Bingjun, WANG Dongsheng, et al. Research on the seismic performance of high-strength concrete columns with high-strength stirrups [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(5):128—136(in Chinese))
- [2] 贡金鑫, 魏巍巍, 胡家顺. 中美欧混凝土结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007:118—130 (GONG Jinxin, WEI Weiwei, HU Jiashun. Chinese, American and European design of concrete structure[M]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2007:118—130(in Chinese))
- [3] Shin K J, Lim J H, Oh Y S, et al. An experimental study on the flexural behaviour of RC beams strengthened with high-strength bars [J]. Magazine of Concrete Research, 2007, 59(7):469—481.
- [4] Mast R F, Dawood M, Rizkalla S H, et al. Flexural strength design of concrete beams reinforced with high-strength steel bars [J]. ACI Structural Journal, 2008, 105(5):570—577.
- [5] 林双平, 苗明明, 张岩等. 建筑高强抗震钢筋[J]. 金属热处理, 2012, 37(7):102—105 (LIN Shuangping, MIAO Mingming, ZHANG Yan, et al. High-strength aseismic reinforcement steel bar for building[J]. Heat Treatment of Metals, 2012, 37(7):102—105(in Chinese))
- [6] 徐有邻, 王晓锋, 刘刚等. 混凝土理论发展及规范修订的建议[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(1):1—6 (XU Youlin, WANG Xiaofeng, LIU Gang, et al. The proposal of concrete structure theory development and code amendment [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(1):1—6(in Chinese))
- [7] 赵勇, 王晓锋, 苏小卒等. 配置 500MPa 钢筋的混凝土梁裂缝试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(1):29—34 (ZHAO Yong, WANG Xiaofeng, SU Xiaozu, et al. Experimental research on crack spacing and width of reinforced concrete beams with 500MPa steel bars[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(1):29—34(in Chinese))
- [8] 叶献国, 于文静, 蒋庆等. 500MPa 钢筋高强混凝土无腹筋梁抗剪试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(11):11—15 (YE Xianguo, YU Wenjing, JIANG Qing, et al. Experimental study on shear behavior of high-strength concrete and HRBF500 steel beams without web reinforcement [J]. Industrial Construction, 2012, 42(11):11—15(in Chinese))
- [9] 刘家慧, 白娟, 刘立新. 细晶高强钢筋混凝土梁受剪性能试验研究[J]. 工业建筑, 2010, 40(11):106—110 (LIU Jiahui, BAI Juan, LIU Lixin. Experimental study on shear behavior of concrete beams reinforced by hot rolled ribbed bars of fine grains [J]. Industrial Construction, 2010, 40(11):106—110(in Chinese))
- [10] 李朋, 郑鸿飞, 张宪堂等. 基于模型试验的高强度钢筋混凝土梁斜向开裂研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(1):73—79 (LI Peng, ZHENG Hongfei, ZHANG Xiantang, et al. The research on diagonal cracking of reinforced concrete beams with high strength rebars based on model test [J]. Industrial Construction, 2015, 45(1):73—79 (in Chinese))
- [11] 戎贤, 孙永成, 任泽民. HRB500 钢筋混凝土受剪承载力分析[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(1):197—201 (RONG Xian, SUN Yongcheng, REN Zemin. Analysis of shear bearing capacity of HRB500 reinforced concrete beams [J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(1):197—201(in Chinese))
- [12] 王静, 王命平, 耿树江. HRBF500 钢筋混凝土柱的受压试验研究[J]. 工程力学, 2011, 28(11):152—157 (WANG Jing, WANG Mingping, GENG Shujiang. The experimental research on reinforced concrete column by HRBF500 bars[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(11):152—157(in Chinese))
- [13] 周建民, 王眺, 赵勇等. 高强钢筋混凝土受弯构件裂缝宽度计算方法的研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(9):69—76 (ZHOU Jianming, WANG Tiao, ZHAO Yong, et al. Research on the calculation of crack width for RC flexural member using high-strength bars [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(9):69—76(in Chinese))
- [14] SL 191—2008, 水工混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009 (SL 191—2008, Design code for hydraulic concrete structures[S]. Beijing: China Water Power Press, 2009(in Chinese))
- [15] DL/T 5057—2009, 水工混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010 (DL/T 5057—2009, Design code for hydraulic concrete structures[S]. Beijing: China Power Press, 2010(in Chinese))
- [16] GB/T 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 (GB/T 50152—2012, Standard for test method of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2012 (in

Chinese))

- [17] DL5077—1997. 水工建筑物荷载设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 1998 (DL5077—1997. Specifications for load design of hydraulic structures[S]. Beijing: China Power Press, 1998(in Chinese))
- [18] 赵国藩, 李树瑶, 廖婉卿 等. 钢筋混凝土结构的裂缝控制[M]. 北京: 海洋出版社, 1991: 232—248 (ZHAO Guofan, LI Shuyao, LIAO Wanqing, et al. Control of cracks in reinforced concrete structure [M]. Beijing: China Ocean Press, 1991:232—248(in Chinese))

Experimental Investigation on Shear Performance of High Strength Rebar Reinforced Concrete Beam in Hydro-structure

LI Peng^{1,2}, ZHENG Hong-fei^{1,2}, ZHANG Xian-tang^{1,2}, ZHANG Yong-bo³

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China; 3. National Oceanographic Center of Qingdao, Qingdao 266100, Shandong, China)

Abstract: Based on shear experiment for 12 concrete beams reinforced by high-strength HRBF500 rebar subjected to concentrated loading action, the beam deflection, rebar strain, diagonal crack growth pattern and failure mode were investigated. According to current design code for hydraulic concrete structure, comparison analysis for the beam oblique cross section bearing capacity and the oblique crack width in normal limit stage was carried out. Results show that the diagonal crack growth pattern and stress characteristics of beams reinforced by high strength HRBF500 rebar is as same as the commonly reinforced concrete beams. The shear bearing capacity can be calculated by the formula published in design code for hydraulic concrete structure, which has higher safety reserve. Taking into account the influence of long-term load effects, when the recommended design value of tensile strength of HRBF500 rebar is taken as 360MPa, the diagonal crack width of reinforced concrete beam can meet the requirement of normal limit state.

Keywords: hydro-structure; high strength rebar; shear performance; ultimate bearing capacity; normal limit state