



港口工程高强钢筋混凝土梁 受剪极限状态分析*

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: 通过对配置 HRBF500 高强钢筋的混凝土梁在集中荷载作用下的受剪试验, 并依据《水运工程混凝土结构设计规范》条文规定, 研究该高强钢筋在港口工程混凝土受剪构件中的应用。试验观测构件斜裂缝开展规律及破坏形态, 采集构件不同状态时的荷载数据。依据《港口工程荷载规范》条文规定, 并引入荷载长期影响系数, 分析构件斜截面极限承载力及正常使用极限状态斜裂缝宽度。研究结果表明, 配置高强钢筋的混凝土梁斜向开裂规律与普通梁基本相同, 其钢筋强度可以被充分利用, 基于水运规范所得极限承载力和考虑荷载长期影响的正常使用阶段斜裂缝宽度满足要求, 且有较好的安全储备。

关键词: 港口工程; 水运规范; 高强钢筋; 混凝土受剪梁; 极限状态分析

中图分类号: TU 375.1; P 753

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)11-0052-07

Analysis of limit state of reinforced concrete shear-beams with high-strength rebar in port engineering

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, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation,

Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 3. National Oceanographic Center of Qingdao, Qingdao 266071, China)

Abstract: In order to study the application of HRBF500 high-strength rebar on reinforced concrete beams in port engineering, we carry out an experiment of reinforced concrete beams with HRBF500 rebar as stirrups under concentrated load based on normative clauses of design code for concrete structures of port and waterway engineering. The propagation laws of diagonal crack and failure mode are observed under different external loads. The load values are collected under different stress state of the beams. Shear capacity and diagonal crack width during the limit state of serviceability considering influence coefficient of long-term loads are analyzed based on normative clauses of load code for harbour engineering. The results indicate that the propagation laws of diagonal crack of the beams with high-strength stirrups are basically the same to the ordinary beams and the strength of rebar can be fully utilized. The shear capacity and diagonal crack width considering the effect of long-term loads in the normal service stages can satisfy the requirement of design code for concrete structures of port and waterway engineering, which is safe enough.

Keywords: port engineering; design code of port and waterway engineering; high-strength rebar; shear beam; analysis of serviceability limit states

收稿日期: 2015-04-21

*基金项目: 山东省自然科学基金 (ZR2013EEM023); 山东科技大学人才引进科研启动基金 (2013RCJJ032); 山东省土木工程防灾减灾重点实验室开放课题基金 (CDPM2013ZR01); 青岛市博士后研究人员应用研究 (01020120406)

作者简介: 李朋 (1984—), 男, 博士, 讲师, 从事海洋工程结构动力分析、设计及防灾减灾技术研究。

随着我国海运量的快速增长以及海运船舶的大型化及专业化需求,港口工程建设对结构材料及其综合性能要求越来越高^[1-2]。由于港工结构地理位置的特殊性,除承受陆地结构荷载外,还承受波浪、海流、潮汐、风暴潮、冰等复杂海洋环境荷载的作用;同时还受到如泥沙输移等海洋工程地质、地貌环境影响及海洋化学环境如海水侵蚀的影响^[3]。相比陆地结构,复杂恶劣海洋环境的影响也使得港工结构对材料综合性能及耐久性要求很高。

安全性高、焊接性能好、强度等级高的钢筋在国外已经得到普遍应用^[4-5]。在结构设计中运用高强钢筋,对港口工程按照海水环境混凝土部位划分细致的结构而言,能大大降低施工难度,解决配筋密集、混凝土振捣困难等技术问题,同时又可节约能耗及降低工程成本。HRBF500 高强钢筋是采用控制钢筋轧制温度技术而研发的细晶粒钢筋,具有强度高、延性好及成本低等优点^[6-9]。在港口工程中,由于外部海洋环境因素复杂,如果在相应结构中使用该高强钢筋,那么高强度优势如何充分发挥、裂缝开展如何理想控制,这些都需要大量的数据支持。而目前在港工结构领域缺乏相关数据资料及应用实例,JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》^[10]也尚未将 HRBF500 钢筋列入。

基于以上阐述,本文通过对 12 根配置 HRBF500 高强钢筋的混凝土梁集中荷载作用下的受剪试验,并依据水运规范条文规定,研究了 HRBF500 高强钢筋在港口工程混凝土受剪梁构件中的应用。依据 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》^[11]条文规定,并引入荷载长期影响系数,分析了构件斜截面极限承载力及正常使用极限状态斜裂缝宽度。为 HRBF500 高强钢筋在港口工程混凝土结构中的应用提供科学依据和参考。

1 试验概况

1.1 试验方案设计

试验采用三分点集中单向加载,主加载设备

采用 500 t 压力试验机,采用机械阀门施加荷载,用数显设备实时监控荷载变化。试验梁两侧支座留出 150 mm,两端台座上上部加设钢板焊接滚轴模拟铰接边界。试验梁 JQL1 ~ JQL12 箍筋均为 HRBF500 高强钢筋,其中 JQL5 为矩形外伸梁,JQL6 为 T 形简支梁,其他构件均为矩形简支梁。依据水运规范受剪承载力计算公式所涉影响参数,构件设计过程中分别变化混凝土强度、剪跨比、配箍率及纵筋强度等因素。作为对比构件,试验梁 JQL13 为配置 HRB400 箍筋矩形简支梁。加载方案及传感器布置如图 1 所示,试验梁配筋如图 2 所示,构件参数如表 1 所示。

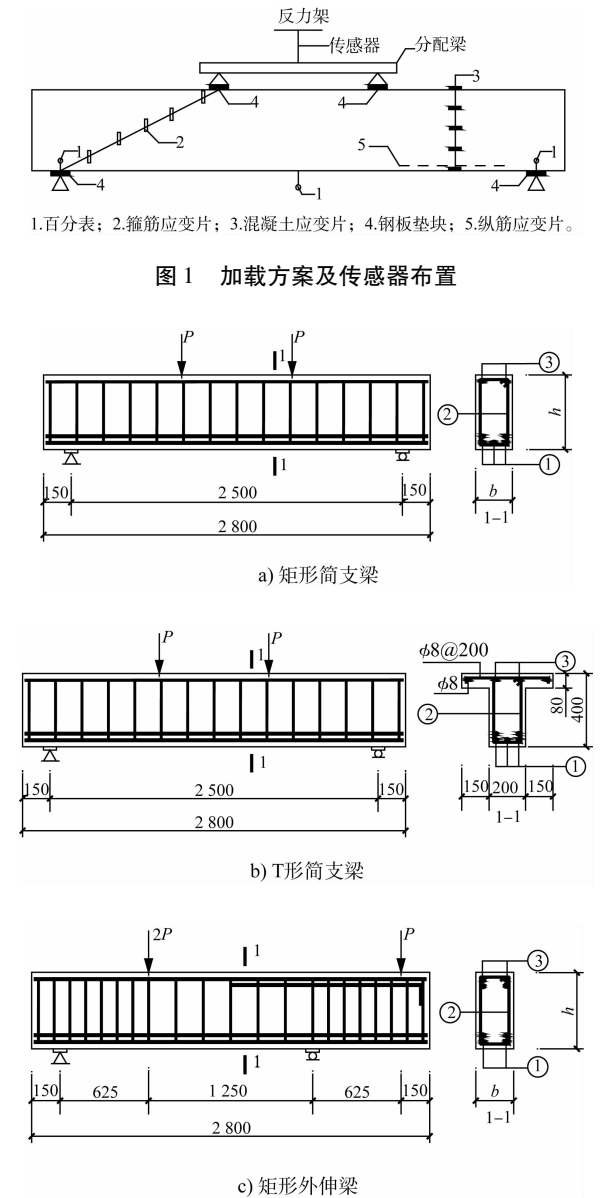


图 2 试验梁配筋 (单位: mm)

表 1 试验梁参数

构件编号	<i>b</i> /mm	<i>h</i> /mm	<i>c</i> /mm	λ	钢筋①	钢筋②	钢筋③	$\rho_{sv}/\%$
JQL1	200	400	25	2.45	5 Φ 25	Φ 8@200	2 Φ 12	0.25
JQL2	200	400	25	2.45	5 Φ 25	Φ 8@150	2 Φ 12	0.34
JQL3	200	400	25	1.85	5 Φ 25	Φ 8@150	2 Φ 12	0.34
JQL4	200	400	25	1.67	5 Φ 25	Φ 8@150	2 Φ 12	0.34
JQL5	200	400	25	1.62	4 Φ 25	Φ 8@200	4 Φ 25	0.25
JQL6	200	400	25	2.45	5 Φ 25	Φ 8@150	2 Φ 12	0.34
JQL7	200	400	25	1.67	5 Φ 20	Φ 8@200	2 Φ 14	0.25
JQL8	200	400	25	1.85	5 Φ 20	Φ 8@200	2 Φ 14	0.25
JQL9	200	400	25	2.45	5 Φ 20	Φ 8@200	2 Φ 14	0.25
JQL10	200	400	25	2.45	5 Φ 20	Φ 8@250	2 Φ 14	0.20
JQL11	200	400	25	3.00	5 Φ 20	Φ 8@250	2 Φ 14	0.20
JQL12	200	400	25	3.00	5 Φ 20	Φ 8@300	2 Φ 14	0.17
JQL13	200	400	25	2.45	5 Φ 25	Φ 8@150	2 Φ 12	0.34

注：试验梁 JQL5 为矩形外伸梁；试验梁 JQL6 为 T 形简支梁；试验梁 JQL13 箍筋采用 HRB400 钢筋。

为保证试验构件质量，所有构件均在实验室内现场加工制作，混凝土保护层厚度均为 25 mm，箍筋沿梁长均匀布置。箍筋、纵筋及混凝土应变计粘贴位置如图 1 所示，钢筋应变计采用防水胶粘贴，并采用环氧树脂包裹（图 3）。混凝土应变计粘贴后直接涂刷防水胶（图 4）。应变数据采用 DH3815N 型应变测试数据采集仪进行采集。试验梁表面打磨清理后均匀涂刷石灰水，并采用 50 mm

矩形方格网划分。试验过程中，采用 4 个高倍放大镜观测已有裂缝扩展及新裂缝的产生情况，每级荷载加载稳定后，采用 DJGK-2 型裂缝测宽仪测量构件的裂缝宽度（图 5）。对与理论计算相对应的关键斜裂缝宽度处的施加荷载进行重点采集。建立与试验布置方向一致的坐标系，采用缩放比例坐标纸描绘裂缝开展过程并详细记录荷载值，对分配梁等上部附加荷载称重后将施加荷载换算为剪力值。

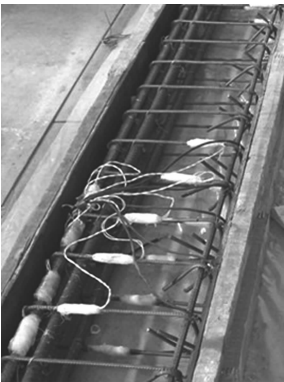


图 3 模板和钢筋应变计

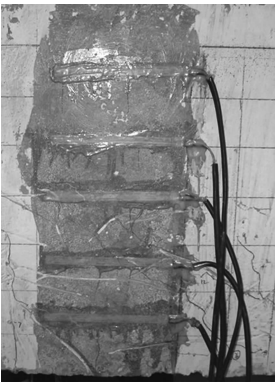


图 4 混凝土应变计



图 5 裂缝宽度测量

1.2 构件材料性能试验

试验构件均在实验室内现场浇注、养护。浇筑过程中为防止振捣对箍筋位置及应变计造成破坏，按照定位采用人工振捣棒振捣。在浇注的同时每个构件预留边长为 100 mm 的立方体试块 3 组，与构件在同一环境条件下养护，

浇筑及振捣过程如图 6 所示^[12]。对预留混凝土试块进行试验得到混凝土的平均强度 f_{cu}^s （表 2）。针对试验中所用 HRBF500 高强钢筋，选取 3 根，取中间部分进行钢筋拉伸试验。实测钢筋强度参数见表 3，其拉伸过程及所得应力-应变曲线如图 7~8 所示。



图 6 构件混凝土现场浇筑

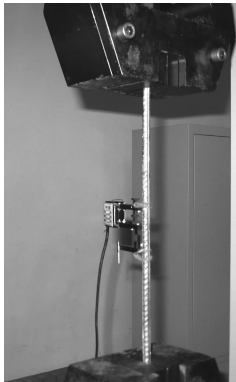


图 7 钢筋拉伸试验

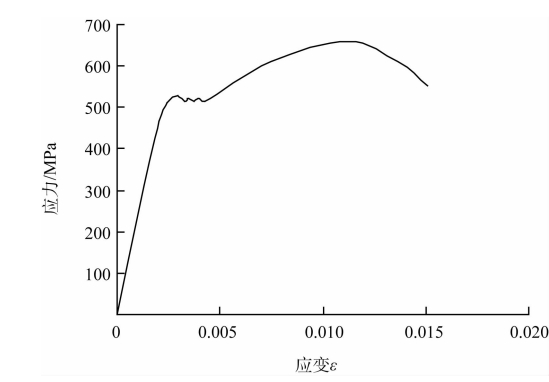


图 8 实测 HRBF500 钢筋应力-应变曲线

表 2 构件混凝土平均强度参数

构件编号	JQL1	JQL2	JQL3	JQL4	JQL5	JQL6	JQL7	JQL8	JQL9	JQL10	JQL11	JQL12	JQL13
f_{cu}/MPa	26.2	67.9	26.2	26.2	26.2	26.2	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	26.2

表 3 HRBF500 钢筋强度参数

钢筋类别	符号	D/mm	实测屈服强度 σ_s/MPa	实测极限强度 σ_b/MPa	强屈比 σ_b/σ_s	伸长率 δ_5	弹性模量 $E_s/(10^5 \text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$
HRBF500 钢筋	Φ	8	525.6	670.6	1.28	29.6%	2.096

2 构件极限承载力分析

在试验过程中,随着荷载的逐渐增大,通过对构件箍筋应变、纵筋应变、混凝土应变、斜裂缝宽度、构件挠度、破坏荷载及破坏形态等数据的观测、采集及分析可以发现,配置 HRBF500 高强钢筋混凝土梁的斜向开裂过程与配置普通钢筋的混凝土梁基本相同,在接近极限荷载时,斜裂缝向下发展到支座处,向上发展到加载处并有水平发展的趋势,最终上部受压区混凝土被压碎,12 根试验构件均发生了典型的剪压破坏。试验梁 JQL2 典型破坏形态及裂缝开展过程如图 9 ~ 10 所示。



图 9 试验梁 JQL2 破坏形态

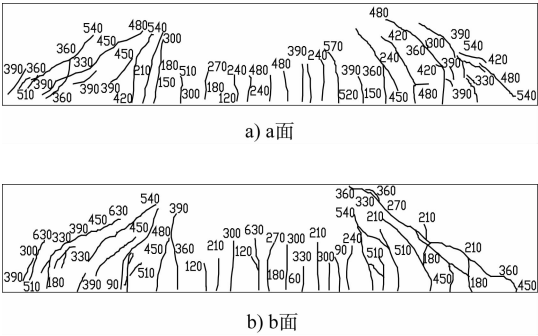


图 10 试验梁 JQL2 裂缝扩展

依据《水运工程混凝土结构设计规范》第 5.5.4 条规定公式计算构件斜截面承载力。由于水运规范没有引入 HRBF500 高强钢筋,因此,依据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[13]对钢筋分项系数规定,并借鉴其条文中对钢筋的设计值规定,在计算中,HRBF500 高强钢筋抗拉强度设计值取为 360 MPa。在试验中,对每个构件极限荷载值均进行了采集,并考虑分配梁自重等外部附加荷载,换算为极限剪力。针对每个构件,对不同剪力设计值与实测值分别进行对比分析,以研究高强钢筋在港工结构中的使用程度及安全储备。

由于所有构件截面高度均小于 800 mm，计算得截面高度系数 β_h 为 1.24，结构系数 γ_d 为 1.1。

表 4 《水运工程混凝土结构设计规范》公式计算对比

构件编号	$V_{\text{实测值}}/\text{kN}$	$V_{\text{计算值}}^1/\text{kN}$	$V_{\text{计算值}}^2/\text{kN}$
JQL1	246	163	105
JQL2	330	236	144
JQL3	301	205	132
JQL4	321	210	135
JQL5	346	184	118
JQL6	326	190	123
JQL7	270	195	117
JQL8	214	189	113
JQL9	194	173	105
JQL10	226	157	94
JQL11	186	145	88
JQL12	151	135	80

注： $V_{\text{实测值}}$ 为构件实测的破坏剪力； $V_{\text{计算值}}^1$ 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； $V_{\text{计算值}}^2$ 为构件按混凝土设计强度和箍筋设计强度（HRBF500 钢筋抗拉强度设计值为 360 MPa）计算的破坏剪力。

表 4 为依据《水运工程混凝土结构设计规范》第 5.5.4 条规定公式所得构件斜截面承载力计算值与实测值。由表 4 分析可知，对所有构件而言，无论是剪力值 $V_{\text{计算值}}^1$ 还是 $V_{\text{计算值}}^2$ 均小于其对应实测值 $V_{\text{实测值}}$ 。同时由图 11 分析可知，构件 $V_{\text{计算值}}^1/V_{\text{实测值}}$ 比值结果均落在区间 $[0.5, 1]$ 内，比值最小值为试验梁 JQL5，为 0.533；最大值为试验梁 JQL12，为 0.891。所得 12 组比值数据均值为 0.724，变异系数为 0.163。当计算斜截面承载力采用混凝土及箍筋设计强度值时，由图 12 可知，构件 $V_{\text{计算值}}^2/V_{\text{实测值}}$ 比值结果大部分落在区间 $[0, 0.5]$ 内，比值最小值为试验梁 JQL5，为 0.340；最大值为试验梁 JQL9，为 0.540。所得 12 组比值数据均值为 0.447，变异系数为 0.138。由以上分析可知，所得对比数据变异系数较小，基于《水运工程混凝土结构设计规范》公式计算所得配置 HRBF500 高强钢筋混凝土梁斜截面承载力计算值均小于实测值，且具有较大的安全余量。

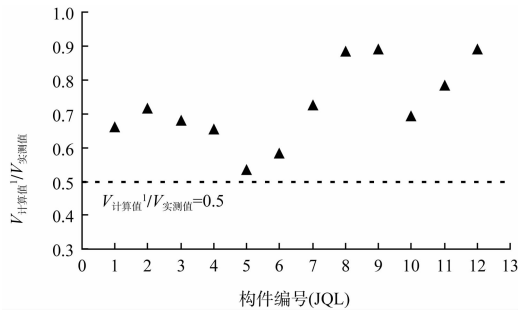


图 11 构件 $V_{\text{计算值}}^1/V_{\text{实测值}}$ 对比曲线

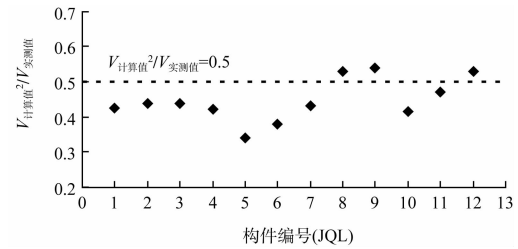


图 12 构件 $V_{\text{计算值}}^2/V_{\text{实测值}}$ 对比曲线

3 正常使用极限状态分析

在钢筋混凝土构件中使用高强钢筋可显著减少用钢量、降低工程施工难度及成本。但在构件中使用 HRBF500 高强钢筋后，配筋量的减少会带来正常使用阶段钢筋应力的提高，因此针对 HRBF500 高强钢筋抗拉强度设计值，斜裂缝宽度验算非常重要。对于承载力计算，本文采用水运规范规定的集中荷载作用下受剪承载力计算公式，并与实测值进行比较。对于正常使用极限状态验算，随着时间的推移，混凝土结构裂缝逐渐增大，但在试验中无法考虑荷载长期影响，因此可由设计荷载效应推算得到正常使用阶段的荷载效应。

根据 GB 50153—2008《工程结构可靠性设计统一标准》^[14] 及 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》条文规定，在正常使用阶段允许出现裂缝的钢筋混凝土构件，应验算荷载作用的准永久组合下裂缝宽度。按照《水运工程混凝土结构设计规范》第 3.2.7 条规定，取结构重要性系数为 γ_0 为 1.0，准永久组合下荷载综合分项系数的平均值 γ_d 计算结果为 1.46。依据钢筋材料分项系数取值范围，分别取 5 组不同 HRBF500 高强钢筋抗拉强度设计值，依据规范公式，由已知荷载综合分项系数，推求钢筋取不同设计值时正常使用阶段的组合剪力 V_z ，并分别与试验采集到的斜裂缝宽度

为 0.2 mm 时的剪力值 $V_{0.2}$ 进行对比^[15], 从而分析验证是否满足正常使用极限状态的要求。参照水运规范对海水港钢筋混凝土结构最大裂缝宽度依据大气区、浪溅区、水位变动区及水下区进行的划分, 本文试验还采集到最大斜裂缝宽度为 0.25 mm 时的荷载值, 并进行对比分析。

图 13 为试验构件中 HRBF500 高强钢筋设计强度分别取 360、380、420、435、450 MPa 时根据水运规范公式推求的正常使用阶段的组合剪力值 V_z 与试验采集到的斜裂缝宽度为 0.2 mm 时的剪力值的比值 $V_z/V_{0.2}$ 。

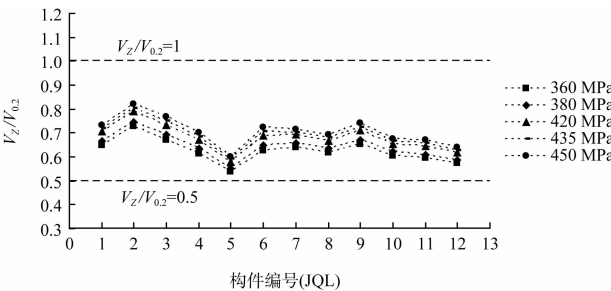


图 13 构件箍筋取不同设计强度时 $V_z/V_{0.2}$ 计算结果

图 14 为每种设计强度对应的 12 根构件所得 $V_z/V_{0.2}$ 比值的平均值。由图 13 可知, 不论取何种设计强度, 构件 $V_z/V_{0.2}$ 计算结果均小于 1, 且结果均落在 $[0.5, 1]$ 区间内。其中 $V_z/V_{0.2}$ 比值最小值为构件 JQL5, 最大值为构件 JQL2。由图 14 可知 5 种设计强度对应的 $V_z/V_{0.2}$ 比值均值和变异系数分别为 0.625、0.078, 0.643、0.079, 0.679、0.080, 0.693、0.081, 0.706、0.082。由此可见, 在短期荷载效应作用时, 构件所采用 5 种设计强度均能满足正常使用阶段的要求, 即满足斜裂缝宽度限值的要求, 且具有较大安全余量, 同时数据变异系数较小, 均小于 0.1。

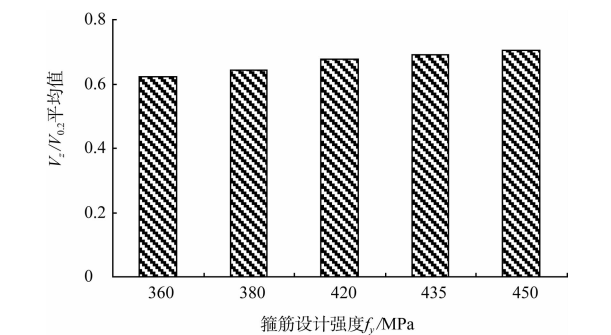


图 14 构件箍筋取不同设计强度时 $V_z/V_{0.2}$ 平均值

钢筋混凝土结构往往有较长的设计使用年限, 随着使用年限的增加, 特别是对承受复杂海洋环境荷载作用的港工结构, 荷载长期作用的影响是一个不可忽略的因素。随着时间的推移, 裂缝宽度逐渐增加, 在设计使用年限内, 斜裂缝宽度能否满足正常使用阶段的要求也是不可忽视的。但在试验中, 无法考虑荷载的长期影响。文献 [15] 提出了考虑荷载作用的时间影响系数 C , 依据本文试验设计, 取长期或多次重复荷载作用下的剪力等于全部计算荷载作用下的剪力, 即取考虑荷载作用的时间影响系数上限值 $C = 1.5$ 。将计算得长期荷载作用下剪力值 V_L 与斜裂缝宽度为 0.2 mm 时的剪力值 $V_{0.2}$ 进行计算对比, 结果见图 15、16。

由图 15 ~ 16 可知, 当考虑荷载长期影响, 钢筋设计强度分别取 420、435、450 MPa 时, 从单个构件来看, $V_L/V_{0.2}$ 比值大于 1 的构件个数分别为 8 个、8 个及 10 个, $V_L/V_{0.2}$ 比值均值分别为 1.019、1.039 及 1.060。由此可见, HRBF500 高强箍筋设计强度取上述 3 种时已不能满足正常使用阶段斜裂缝宽度限值的要求。而在设计强度取 380 MPa 时, $V_L/V_{0.2}$ 比值均值为 0.965, $V_L/V_{0.2}$ 比值大于 1 的构件个数为 3 个, 但数据偏态系数为负值, 呈现负偏, 即大多构件的 $V_L/V_{0.2}$ 比值大于均值, 并且构件 JQL1、JQL6 及 JQL7 的比值分别为 0.999、0.972 及 0.985, 均非常接近于 1, 安全余量较小。在钢筋设计强度取 360 MPa 时, $V_L/V_{0.2}$ 均值为 0.937, $V_L/V_{0.2}$ 比值大于 1 的构件个数为 2 个, 但数据偏态系数为正值, 呈现正偏, 即大多构件的 $V_L/V_{0.2}$ 比值小于均值。同时, 考虑海洋环境的其他不利影响因素, HRBF500 高强钢筋抗拉设计强度取 360 MPa 满足正常使用极限状态的要求。

参照规范对海水港钢筋混凝土结构最大裂缝宽度依据大气区、浪溅区、水位变动区及水下区进行的不同划分, 作为对比参照, 本文试验还采集到最大斜裂缝宽度为 0.25 mm 时的剪力值。图 17 为箍筋设计强度为 360 MPa 时斜裂缝宽度限值为 0.20、0.25 mm 对应的 $V_z/V_{0.20}$ 、 $V_z/V_{0.25}$ 比值,

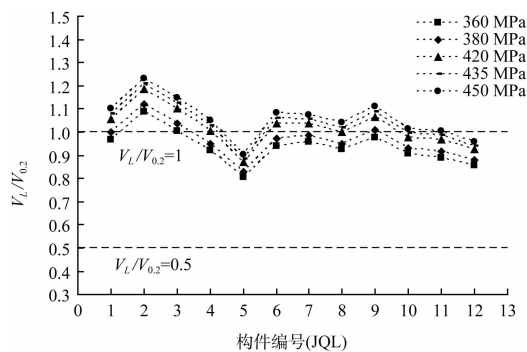
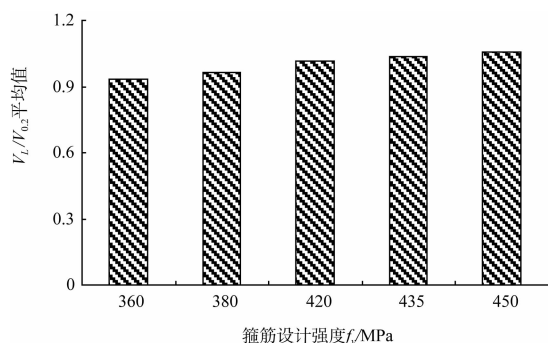
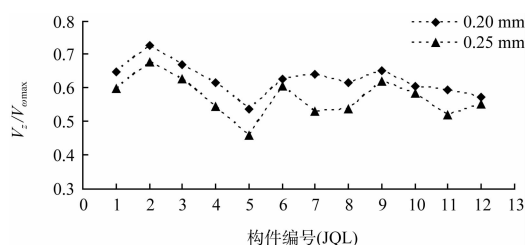
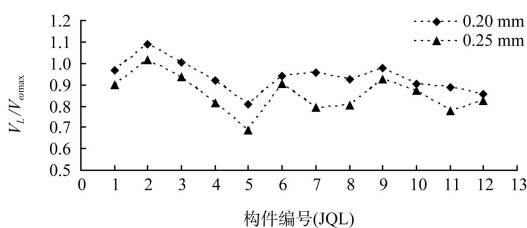
图 15 构件箍筋取不同设计强度时 $V_L/V_{0.2}$ 计算结果图 16 构件箍筋取不同设计强度时 $V_L/V_{0.2}$ 平均值图 17 不同斜裂缝宽度限值时 $V_z/V_{\omega\max}$ 计算结果图 18 不同斜裂缝宽度限值时 $V_L/V_{\omega\max}$ 计算结果

图 18 为引入荷载长期影响系数 C 后的计算对比结果。由图 17、18 可知, 由于放宽了斜裂缝宽度限值, 曲线整体呈比例下降, 但构件 JQL6、JQL10 及 JQL12 变化不大, 而斜裂缝宽度限值放宽后, $V_z/V_{0.25}$ 比值均值为 0.570, 比 $V_z/V_{0.20}$ 均值降低了约 8%, 而施加荷载值提高约 10%。

4 结论

1) 配置 HRBF500 高强箍筋的混凝土梁斜向

开裂规律与普通钢筋梁基本相同, 12 根试验构件均发生了典型的剪压破坏。

2) 根据构件实测破坏剪力, 并分别取混凝土和钢筋强度的实测值及设计值, 依据《水运工程混凝土结构设计规范》公式, 所得构件斜截面承载力计算值与实测值对比结果较好, 且有较大的安全余量。

3) 根据《工程结构可靠性设计统一标准》及《港口工程荷载规范》规定, 在使用阶段允许出现裂缝的钢筋混凝土构件, 验算荷载作用的准永久组合下裂缝宽度, 同时考虑荷载长期作用的影响。计算对比结果表明, 在箍筋抗拉设计强度为 360 MPa 时, 构件斜裂缝宽度满足正常使用极限状态的要求, 且钢筋强度能够得到充分利用。

参考文献:

- [1] 薛鸿超. 海岸及近海工程[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
- [2] 严恺. 海岸工程[M]. 北京: 海洋出版社, 2002.
- [3] 董胜, 孔令双. 海洋工程环境概论[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2013.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] JTS 151—2011 水运工程混凝土结构设计规范[S].
- [11] JTS 144-1—2010 港口工程荷载规范[S].
- [12] GB/T 50152—2012 混凝土结构试验方法标准[S].
- [13] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S].
- [14] GB 50153—2008 工程结构可靠性设计统一标准[S].
- [15] 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.

(本文编辑 郭雪珍)