

无腹筋混合配筋混凝土梁抗剪性能试验研究

张晓亮, 屈文俊

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 对 1 组无腹筋混合配筋 (GFRP 筋 (glass fiber reinforced polymer) 和钢筋) 混凝土梁抗剪性能进行了试验研究. 所有试验梁均为三分点加载, 剪跨比为 2.54 和 2.67. 12 根试验梁按有效配筋率分为 3 组, 共包括 3 根钢筋混凝土梁, 3 根 GFRP 筋梁和 6 根 GFRP 筋和钢筋混合配筋梁. 所有试验梁均为斜拉破坏. 分析了试验梁的荷载-挠度关系, 裂缝开展及抗剪承载力, 并将各设计规范或指南的抗剪承载力预测值与试验结果对比. 试验表明, 有效配筋率相同的钢筋混凝土梁、混合配筋混凝土梁和 GFRP 筋梁具有相近的抗剪承载力. 钢筋与 FRP (fiber reinforced polymer) 筋轴向刚度比对抗剪性能影响较小. 规范 Eurocode 2—04 及 CSA A23.3—04 的抗剪承载力预测结果与试验结果符合度较好, 而规范 ACI440.1R—06, JSCE 及 CSAS6—06 的预测结果偏保守.

关键词: 混凝土梁; 复合材料; FRP 筋; 抗剪承载力

中图分类号: TU 375.1; TU 377.9+4 **文献标识码:** A

Shear Behavior of Concrete Beams Reinforced with Hybrid (GFRP and Steel) Bars Without Stirrups

ZHANG Xiaoliang, QU Wenjun

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

Abstract: This paper evaluates the shear behavior of hybrid GFRP/steel-reinforced concrete beams without transverse reinforcement. All beams were subjected to four-point loading, with shear span-to-effective depth ratio of 2.54 and 2.67 respectively. The test variables were effective reinforcement ratio and axial stiffness ratio between GFRP and steel bars. The test beams included three beams reinforced with steel bars, three beams reinforced with GFRP bars and six beams reinforced with GFRP and steel bars. An analysis was made of the load-midspan deflection curves, cracking behavior and shear strength of tested beams. The test results were

compared with the predictions provided by different codes and design guidelines available. The test result shows that beams designed with the same effective reinforcement ratio, exhibits similar shear strength regardless of reinforcement arrangement (steel, GFRP, or combination of steel and GFRP). Axial stiffness ratio between GFRP and steel bars has little influence on shear behavior of hybrid GFRP/steel-reinforced concrete beams. Eurocode 2—04 and CSA A23.3—04 design method provides reasonable predictions, whereas the ACI440.1R—06, JSCE and CSA S6—06 results in conservative shear strength estimates.

Key words: concrete beams; composite materials; FRP bars; shear strength

在普通大气环境下, 混凝土碳化是钢筋锈蚀的主要原因, 碳化降低钢筋周围混凝土的 pH 值, 钢筋钝化膜被破坏, 伴随着环境中氧、水分及有害介质的渗透, 钢筋发生锈蚀. 通常, 截面角区或下排的钢筋在拉应力和双向碳化作用下首先锈蚀, 引起这些部位的混凝土提前开裂^[1].

与钢筋比较, 纤维增强聚合物 (fiber reinforced polymer, FRP) 筋材具有轻质高强、耐腐蚀的特点, 用 FRP 筋替代钢筋可以从根本上解决钢筋锈蚀问题, 被普遍认为是一种最具发展潜力的解决方案. 但 FRP 筋是线弹性材料, FRP 筋梁的破坏表现出脆性破坏性质; 此外, FRP 筋弹性模量较低, FRP 筋梁刚度小、挠度大、裂缝宽度大, 正常使用性能常成为 FRP 筋梁设计中的控制因素, FRP 筋的强度不能充分发挥.

为了克服钢筋混凝土梁和 FRP 筋梁的缺点, 将钢筋和 FRP 筋混合使用是较为理想的配筋方式^[2]. 在截面角区和下排等易受环境有害因素侵蚀的部位用 FRP 筋替代钢筋, 将钢筋放于内部或上排, 构成

收稿日期: 2009-06-23

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(50178050); “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2007BAG02A04)

作者简介: 张晓亮(1969—), 男, 博士生, 主要研究方向为混凝土结构. E-mail: zxlzy12000@yeah.net

屈文俊(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为混凝土结构. E-mail: quwenjun@online.sh.cn

混合配筋混凝土梁,可有效提高构件的耐久性能.适当限制 FRP 筋的比例,可以将混合配筋梁设计成适筋梁,在承载力极限状态下,钢筋屈服保证构件的延性,FRP 筋提高构件的极限承载力^[3].在正常使用极限状态下,与 FRP 筋梁相比,适筋混合配筋梁挠度小、裂缝间距小、裂缝宽度小^[4].

Tan^[2], Leung 和 Balendran^[3], Aiello 和 Ombres^[4]及屈文俊等^[5]研究了混合配筋混凝土梁的抗弯性能.通过试验及理论分析,研究了混合配筋梁抗弯承载力、挠度和裂缝宽度等的计算模型,为混合配筋混凝土梁的推广应用奠定了基础,而混合配筋混凝土梁的抗剪性能仍待研究.

无腹筋混凝土梁抗剪传递机制基于以下 5 种方式^[6]:①受压区未开裂混凝土的抗剪承载力;②斜裂缝界面处骨料间咬合力及摩擦力;③纵筋销栓力;④拱作用;⑤斜裂缝处混凝土残余拉力.其抗剪承载力主要影响因素包括:构件尺寸、剪跨比、纵向钢筋配筋率及轴向荷载等.随着 FRP 筋构件的出现,人们已认识到用纵筋配筋率作为抗剪承载力影响因素是不准确的,而应以纵筋刚度作为影响因素^[7].构件尺寸及纵筋刚度对抗剪承载力的影响可以归于它们对斜裂缝宽度的影响^[8].

无腹筋 FRP 筋混凝土梁抗剪性能研究表明^[7,9]:纵筋面积相同的 FRP 筋梁与钢筋混凝土梁相比,由于 FRP 筋的弹性模量较低、横向强度小,FRP 筋梁的抗剪承载力比钢筋混凝土梁低;而纵筋刚度相同的 FRP 筋混凝土梁与钢筋混凝土梁有相近的抗剪承载力.

目前,许多国家都颁布了 FRP 筋混凝土结构的设计规范或设计指南^[10-12].各规范或指南给出的 FRP 筋混凝土梁抗剪设计方法大多是基于对钢筋混凝土规范抗剪设计方法进行修正得到,但由于抗剪问题本身的复杂性,各规范或指南计算结果之间的差别较大.

混合配筋混凝土梁将 FRP 筋与钢筋混合使用,FRP 筋与钢筋力学性能不同,它们与混凝土的粘结性能也有差异,这些因素都可能影响混合配筋混凝土梁的抗剪性能.

笔者研究无腹筋混合配筋混凝土梁的抗剪性能,通过混合配筋混凝土梁与 FRP 筋梁及钢筋混凝土梁对比试验,研究纵筋刚度以及钢筋和 FRP 筋间刚度比对混合配筋梁抗剪性能的影响,分析现有 FRP 筋梁及钢筋混凝土梁抗剪承载力计算方法,并推荐适宜的混合配筋混凝土梁抗剪承载力计算

公式.

1 现有抗剪承载力计算公式

目前各国规范或设计指南关于抗剪承载力计算均采取二项式:混凝土对抗剪承载力贡献 V_c 、箍筋对抗剪承载力贡献 V_s .本文只介绍各国规范或设计指南中关于混凝土抗剪承载力贡献 V_c 计算.这些计算公式可以分为两大类:第 1 类是基于抗剪承载力试验的经验回归公式,如规范 ACI318—05^[13], Eurocode 2^[14], ACI440.1R—06^[10], JSCE^[11]等;第 2 类是基于修正压力场理论的抗剪承载力计算公式,如 CSA A23.3^[15], CSA—S6—06^[12]等.

1.1 钢筋混凝土梁抗剪承载力计算

规范 ACI318—05 推荐的混凝土抗剪承载力 V_c 的公式为

$$V_c = \left(0.16 \sqrt{f'_c} + 17 \rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d \leq 0.29 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (1)$$

式中: f'_c 为混凝土轴心抗压强度; ρ_w 为纵筋配筋率, $\rho_w = A_s / (b_w d)$, A_s 为纵筋面积, b_w 为截面宽度, d 为截面有效高度,取受拉纵筋形心到混凝土压区边缘纤维之间的距离; V_u 为计算截面的剪力; M_u 为计算截面的弯矩.式(1)考虑了纵筋配筋率和剪跨比对抗剪承载力的影响.

规范 Eurocode 2 给出的混凝土抗剪承载力公式 $V_{Rd,c}$ 为

$$V_{Rd,c} = 0.18 k (100 \rho_1 f_{ck})^{1/3} b_w d / \gamma_c \geq 0.035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2} b_w d \quad (2)$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2.0 \quad (3)$$

式中: ρ_1 为纵筋配筋率, $\rho_1 = A_s / (b_w d)$; f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值; γ_c 为抗力分项系数,对于混凝土, $\gamma_c = 1.50$; k 为截面尺寸效应系数.该式考虑了纵筋配筋率和构件尺寸对抗剪承载力的影响.

规范 CSA A23.3—04 推荐的混凝土抗剪承载力 V_c 公式为

$$V_c = \phi_c \lambda \beta \sqrt{f'_c} b_w d_v \quad (4)$$

式中: ϕ_c 为抗力折减系数, $\phi_c = 0.65$;对于混凝土, $\lambda = 1.0$; d_v 取 $0.72 h$ 及 $0.9 d$ 的较大者.

β 的计算公式分为简化公式和通用公式,下面只给出通用公式:

$$\beta = \frac{0.4}{1 + 1500 \epsilon_x} \cdot \frac{1300}{1000 + s_{ze}} \quad (5)$$

$$s_{ze} = \frac{35s_z}{15 + a_g} \quad (6)$$

$$\varepsilon_x = \frac{M_f/d_v + V_f}{2E_s A_s} \leq 0.003 \quad (7)$$

式中: ε_x 为截面高度中点处的纵向应变; s_{ze} 为等效裂缝间距; s_z 为裂缝间距参数, 取 d_v ; a_g 为粗骨料最大粒径; M_f 为验算截面弯矩; V_f 为验算截面剪力; E_s 为纵筋弹性模量; d_v 取 $0.72h$ 及 $0.9d$ 的较大者. 此方法需反复试算, 计算结果与试验值符合度高, 但计算过程较烦.

1.2 FRP 筋混凝土梁抗剪承载力计算

规范 ACI440.1R—06 推荐的 FRP 筋混凝土梁抗剪承载力 V_c 计算公式为

$$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} b_w k d \quad (8)$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \quad (9)$$

式中: ρ_f 为纵向 FRP 筋配筋率, $\rho_f = A_f/(b_w d)$, A_f 为 FRP 筋的面积; n_f 为 FRP 筋与混凝土弹性模量比, $n_f = E_f/E_c$, E_f 为 FRP 筋的弹性模量, E_c 为混凝土弹性模量. 公式考虑了纵筋配筋率对混凝土抗剪承载力的影响.

JSCE Standard 推荐的混凝土抗剪承载力 V_c 计算公式为

$$V_c = \beta_d \beta_p \beta_n f_{\text{vcd}} b_w d / \gamma_b \quad (10)$$

$$f_{\text{vcd}} = 0.2(f'_{\text{cd}})^{1/3} \leq 0.72 \text{ MPa} \quad (11)$$

$$\beta_d = (1000/d)^{1/4} \leq 1.5 \quad (12)$$

$$\beta_p = (100\rho_f E_f/E_s)^{1/3} \leq 1.5 \quad (13)$$

式中: β_d 为截面尺寸效应系数; β_p 为考虑 FRP 筋与钢筋弹性模量差异的修正系数; β_n 为轴向力影响系数, 无轴向力时, β_n 取 1.0; f_{vcd} 为混凝土抗压强度设计值; γ_b 为构件安全系数; f'_{cd} 为混凝土的轴心抗压强度; E_f 为 FRP 筋的弹性模量; E_s 为钢筋的弹性模量. 此公式为对钢筋混凝土梁抗剪承载力公式的修正.

规范 CSA-S6—06 给出的 FRP 筋梁混凝土抗剪承载力 V_c 计算公式为

$$V_c = 2.5\beta\phi_c f_{\text{cr}} b_w d_v \sqrt{E_f/E_s} \quad (14)$$

式中: f_{cr} 为混凝土抗拉强度, $f_{\text{cr}} = 0.4\sqrt{f'_c} \leq 3.2 \text{ MPa}$; β 的计算公式同式(5)~(7).

2 试验研究

研究无腹筋混合配筋混凝土梁的抗剪性能, 试

验变化参数主要是纵筋刚度、FRP 筋与钢筋刚度比. 定义混合配筋混凝土梁的有效配筋率 ρ_{eff} 及纵筋刚度比 R_f

$$\rho_{\text{eff}} = \rho_s + \rho_f \frac{E_f}{E_s} \quad (15)$$

$$R_f = \frac{E_f A_f}{E_s A_s} \quad (16)$$

式中: ρ_s 为纵向钢筋配筋率, $\rho_s = A_s/(b_w d)$. 与有效配筋率相对应的有效平衡配筋率 $\rho_{\text{eff,b}}$ 可以定义为钢筋屈服同时压区混凝土被压碎

$$\rho_{\text{eff,b}} = 0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_y} \frac{\varepsilon_{\text{cu}}}{\varepsilon_{\text{cu}} + \varepsilon_y} \quad (17)$$

式中: β_1 为混凝土强度修正系数, β_1 按规范 ACI318—05 取值; f_y 为钢筋的屈服强度; ε_{cu} 为混凝土极限压应变, 取 $\varepsilon_{\text{cu}} = 0.003$.

试验梁按有效配筋率 ρ_{eff} 分为 3 组; 每组包括 1 根钢筋混凝土梁, 1 根 GFRP (glass fiber-reinforced polymer) 筋混凝土梁, 2 根混合配筋 (钢筋和 GFRP 筋) 混凝土梁, 它们具有相近的有效配筋率; 2 根混合配筋混凝土梁具有不同的纵筋刚度比 R_f . 所有混合配筋混凝土梁的有效配筋率均小于有效平衡配筋率; GFRP 筋梁纵筋配筋率均大于规范 ACI440.1R—06 给出的平衡配筋率.

2.1 试验概况

共制作了 3 根 GFRP 筋混凝土梁、3 根钢筋混凝土梁、6 根混合配筋梁. 试验梁以 B-S(G)XXX 表示, S 代表钢筋, G 代表 GFRP 筋, SG 代表钢筋和 GFRP 筋混合, XXX 代表有效配筋率 ρ_{eff} . 试件简图及主要试验参数见图 1 及表 1.

GFRP 筋采用晓士达复合材料建材 (广东) 有限公司生产的 Aslan100, 直径 25 mm; 钢筋采用 $\Phi 12$ 变形钢筋 (HRB335); 钢筋和 GFRP 筋的力学性能见表 2. 混凝土配合比为 1.00 : 0.50 : 1.40 : 2.80; 每立方米混凝土用水量为 215 kg; 水泥采用普通硅酸盐水泥 42.5R (早强水泥), 石子最大粒径 20mm. 实测混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 见表 1. 与试件浇注同时, 制作边长 200 mm 立方体试块, 钢筋或 GFRP 筋按 $5d'$ (d' 为筋直径) 埋入混凝土, 各 5 块, 测试钢筋、GFRP 筋与混凝土的粘结性能.

需要指出的是: 由于本试验采用 GFRP 筋直径大, 在粘结性能试验中, 达到最大粘结强度前试块均劈裂破坏, 表 2 中所列 GFRP 筋的最大粘结强度为生产厂家所给. 加载示意图 1, 加载点下及支座处放置 $350 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 钢板. 分级加载, 每

级荷载 5 kN,正式加载前,先预加载.每级荷载下记录构件挠度、混凝土及纵筋应变,描绘裂缝发展,并量测裂缝宽度.

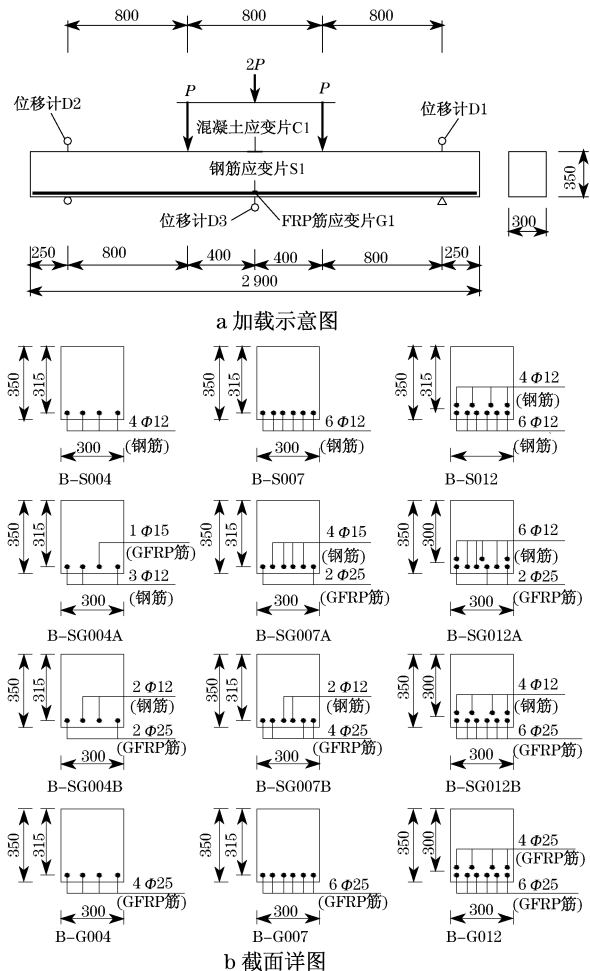


图1 试验试件详图(单位:mm)

Fig.1 Test specimen details(unit:mm)

表1 试验梁明细表

Tab.1 Details of tested beams

梁编号	$A_s/$ mm ²	$A_f/$ mm ²	$\rho_{\text{eff},b}/$ %	$\rho_{\text{eff}}/$ %	R_f	$f_{\text{cu}}/$ MPa
B-S004	452		4.97	0.478		59.3
B-SG004A	339	506	4.97	0.478	0.33	59.3
B-SG004B	226	1 012	4.97	0.478	1.00	59.3
B-G004		2024		0.478		59.3
B-S007	678		4.80	0.717		55.6
B-SG007A	452	1 012	4.80	0.717	0.50	55.6
B-SG007B	226	2 024	4.80	0.717	2.00	55.6
B-G007		3 036		0.716		55.6
B-S012	1 130		4.96	1.256		58.2
B-SG012A	678	1 518	4.96	1.129	0.50	58.2
B-SG012B	452	3 036	4.96	1.254	1.50	58.2
B-G012		5 060		1.254		58.2

表2 GFRP筋及钢筋力学性能表

Tab.2 Mechanical properties of GFRP and steel bars

纵筋类型	$E/$ GPa	$f_y/$ MPa	$f_u/$ MPa	最大粘结 应力/MPa
$\Phi 25$ GFRP筋	44.6		618	11.6
$\Phi 12$ 钢筋	200.0	345	485	10.9

2.2 试验结果分析

图2给出了试验梁的荷载-挠度曲线.从图中可以看出,荷载-挠度曲线可以分为2个阶段.第1阶段从加载到试件出现弯曲裂缝,此时各试件处于弹性变形阶段,挠度基本相近.从出现裂缝至构件破坏为第2阶段,在此阶段,构件的弯曲刚度取决于纵筋的轴向刚度.有效配筋率 ρ_{eff} 可以作为纵筋刚度相对大小的指标,有效配筋率相同的钢筋混凝土梁、混合配筋梁和GFRP筋梁有相近的荷载-挠度曲线,这一趋势在有效配筋率较高时尤为明显.而纵筋刚度比 R_f 对构件受剪性能影响不明显; R_f 较小的A系列梁与 R_f 较大的B系列梁荷载-挠度曲线相近.图2同时表明,对于同一种纵筋类型的钢筋混凝土梁、GFRP筋梁或混合配筋梁,试件开裂后的弯曲刚度随有效配筋率的增加而增大.

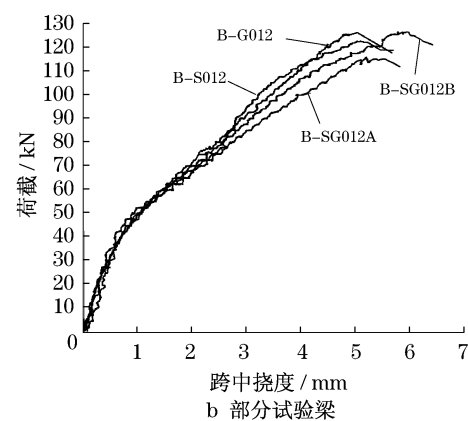
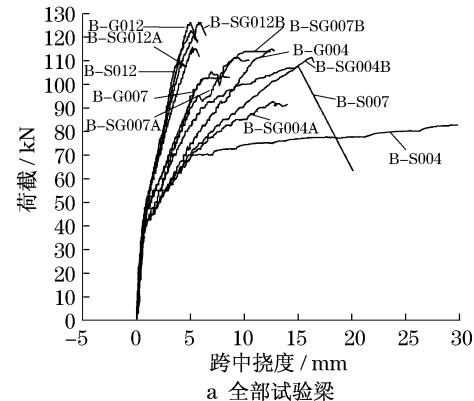


图2 试验梁荷载-挠度曲线

Fig.2 Load-deflection curves

图3给出了部分试验梁破坏时的裂缝分布.各梁裂缝分布相近.裂缝首先在弯曲正应力最大的纯弯段出现,裂缝一般竖直向上.随着荷载增加,剪跨段出现弯曲裂缝,由于存在剪应力,裂缝向上发展时,倾角逐渐减小.此后,纯弯段内裂缝发展停滞,裂缝发展主要集中在剪跨段内,弯剪裂缝向上延伸,直到荷载板下,向下延伸与纵筋相交,形成临界裂缝,最后发生斜拉破坏. B-S004 由于配筋率较低,随着荷载的增加,在剪跨段裂缝发展的同时,纯弯段内的裂缝宽度不断增加,但最终仍发生受剪破坏.

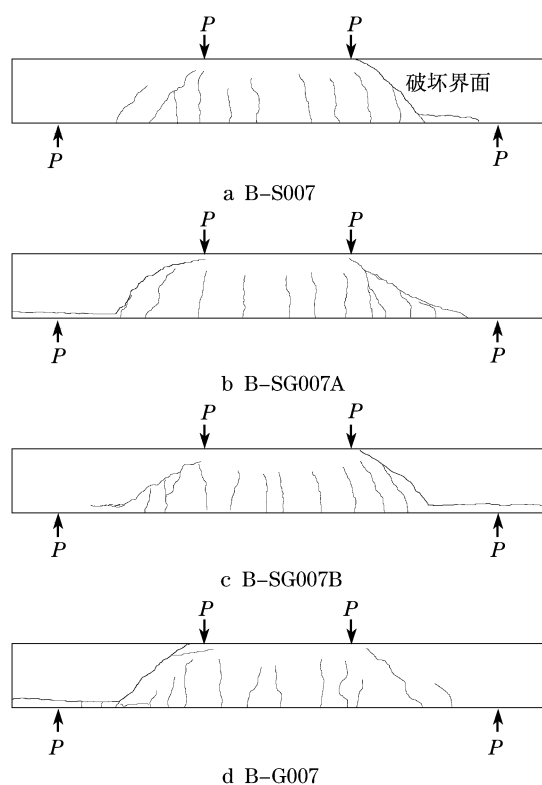


图3 部分试验梁破坏时的裂缝分布

Fig.3 Typical specimens crack pattern

2.3 抗剪承载力分析

各试件临界裂缝形成时对应剪力 V_{cr} 、破坏时对应剪力 V_u 及相关数据列于表3.各构件均为斜拉破坏.通常情况下,当剪跨比大于2.50时(本试验中剪跨比为2.54,2.67),临界剪力 V_{cr} 与极限剪力 V_u 相差较少^[7].本文取临界裂缝形成时剪力 V_{cr} 作为构件的抗剪承载力.

表3表明,有效配筋率相同的各组试件其抗剪承载力相近,同时,每种梁其抗剪承载力随有效配筋率增加而增加.当有效配筋率增加50%(从0.478%到0.717%),钢筋混凝土梁和GFRP筋梁的抗剪承

载力分别增加25.8%和24.4%,混合配筋梁则分别增加9.0%(A系列)和20.6%(B系列).而当有效配筋率增加163%(从0.478%到1.250%),对应抗剪承载力增加分别为63.3%,52.7%,31.4%和41.8%.从表3可以看出,有效配筋率最小的一组梁($\rho_{eff} = 0.478\%$)的临界剪力 V_{cr} 与极限剪力 V_u 相差较大,其原因主要可归于:当有效配筋较小时,构件在受剪破坏前发生了较明显的内力重分布.

表3 梁试验结果

Tab.3 Test results

梁编号	$V_{cr}/$ kN	$V_u/$ kN	纵筋最大 应变/ 10^{-6}	混凝土最大 应变/ 10^{-6}
B-S004	77.8	88.8		1 690
B-SG004A	87.5	92.8	3 171	867
B-SG004B	85.0	111.5		1 103
B-G004	85.3	115.1		907
B-S007	95.0	107.6	1 727	1 106
B-SG007A	95.4	111.5	2 648	837
B-SG007B	102.5	114.1	1 750	870
B-G007	102.5	103.5	1 415	657
B-S012	120.5	122.5	1 355	612
B-SG012A	115.0	115.1	1 792	669
B-SG012B	120.5	126.6	1 209	715
B-G012	122.7	126.2	1 305	783

图4给出了有效配筋率 ρ_{eff} 对抗剪承载力的影响曲线.从图中可以看出,钢筋混凝土梁、混合配筋梁和GFRP筋混凝土梁的抗剪承载力都随有效配筋率的增加而增加,而且它们的变化趋势相近.

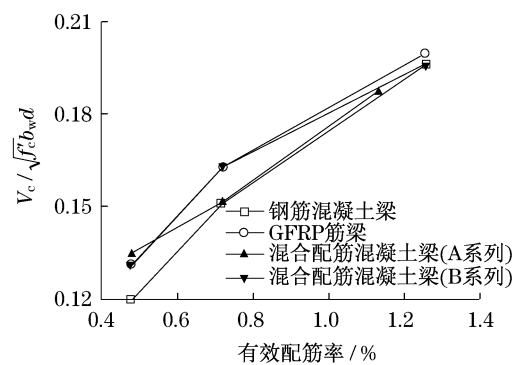


图4 有效配筋率-抗剪强度曲线

Fig.4 Normalized shear strength versus effective reinforcement ratio

从图4还可以看出,具有相同有效配筋率的钢筋混凝土梁、混合配筋混凝土梁和GFRP筋梁具有相近的抗剪承载力,表明在有效配筋率 ρ_{eff} 的基础上,有可能建立三者相统一的抗剪承载力计算公式.

3 理论计算与试验结果比较

表4列出了前述各抗剪承载力计算公式的预测值与试验值的比较,表中, V_{exp} 为抗剪承载力试验值, V_{pred} 为抗剪承载力预测值.规范Eurocode 2中参数 γ_c 取1.0,JSCE中参数 γ_b 取1.0,CSA A23.3—04及CSA-S6—06中参数 ϕ_c, λ 取1.0.

规范ACI440.1R—06推荐的FRP筋梁混凝土抗剪承载力计算公式为Tureyen和Frosch^[16]所给

公式,他们指出,公式也可用于钢筋混凝土梁抗剪承载力计算,笔者将其用于混合配筋梁的抗剪承载力评估,与混合配筋梁对应参数 k 的计算公式为

$$k = \sqrt{2\rho_{\text{eff}} n_s + (\rho_{\text{eff}} n_s)^2} - \rho_{\text{eff}} n_s \quad (18)$$

式中: n_s 为钢筋与混凝土弹性模量比, $n_s = E_s/E_c$.

JSCE公式中,依据有效配筋率的定义,参数 β_p 可以表示为

$$\beta_p = (100\rho_{\text{eff}})^{1/3} \leq 1.5 \quad (19)$$

笔者也将其用于混合配筋梁混凝土抗剪承载力计算.

表4 试验梁承载力试验值与规范计算结果对比

Tab.4 Comparison of predicted and experimental shear capacities

梁编号	V_{exp}/kN	ACI318—05		Eurocode 2—04		CSA A23.3—04		ACI440.1R—06		JSCE—1997		CSA S6—06	
		$V_{\text{pred}}/\text{kN}$	$V_{\text{exp}}/V_{\text{pred}}$	$V_{\text{pred}}/\text{kN}$	$V_{\text{exp}}/V_{\text{pred}}$	$V_{\text{pred}}/\text{kN}$	$V_{\text{exp}}/V_{\text{pred}}$	$V_{\text{pred}}/\text{kN}$	$V_{\text{exp}}/V_{\text{pred}}$	$V_{\text{pred}}/\text{kN}$	$V_{\text{exp}}/V_{\text{pred}}$	$V_{\text{pred}}/\text{kN}$	$V_{\text{exp}}/V_{\text{pred}}$
B-SG004A	87.50	107.10	0.82	86.50	1.01	72.10	1.21	56.00	1.56	72.30	1.21	45.70	1.92
B-SG004B	85.00	107.10	0.79	86.50	0.98	72.10	1.18	56.00	1.52	72.30	1.18	45.70	1.86
B-SG007A	95.40	105.40	0.91	96.90	0.98	83.20	1.15	65.60	1.45	81.00	1.18	51.80	1.84
B-SG007B	102.50	105.40	0.97	96.90	1.06	83.20	1.23	65.60	1.56	81.00	1.27	51.80	1.98
B-SG012A	115.00	104.80	1.10	110.30	1.04	94.90	1.21	76.52	1.50	91.10	1.26	57.90	1.99
B-SG012B	120.50	105.50	1.14	114.20	1.06	98.60	1.22	79.90	1.51	94.40	1.28	59.80	2.01
平均值			0.96		1.02		1.20		1.52		1.23		1.93
变异系数/%			15.06		3.34		2.68		2.68		3.72		3.70

从表4可以看出,ACI318—05,Eurocode 2—04及CSA A23.3—04的计算值与试验结果符合度较高,但ACI318—05预测值变异系数较大.ACI440.1R—06,JSCE及CSA-S6—06的预测结果均偏安全.

4 结论

研究了无腹筋混合配筋混凝土梁的抗剪性能.共制作了12根试验试件,其中3根钢筋混凝土梁、6根混合配筋混凝土梁和3根GFRP筋梁;试验变化参数主要是纵筋的有效配筋率及FRP筋与钢筋刚度比.将试验结果与各设计规范计算结果进行了对比,可以得出以下结论:

(1) 纵筋轴向刚度影响混合配筋混凝土梁的抗剪承载力,纵筋刚度越大,抗剪承载力越高.有效配筋率可以作为表征纵筋刚度相对大小的参数.

(2) FRP筋与钢筋刚度比对混合配筋混凝土梁的抗剪性能影响较小.

(3) 钢筋和GFRP筋粘结性能相近时,有效配筋率相同的钢筋混凝土梁、混合配筋混凝土梁和GFRP筋梁有相近的抗剪承载力.基于有效配筋率概念,有

可能建立起钢筋混凝土梁、混合配筋混凝土梁和FRP筋梁三者统一的抗剪承载力计算公式.

(4) 各规范所给抗剪承载力计算公式中,CSA A23.3—04和Eurocode 2—04所给计算方法预测无腹筋混合配筋混凝土梁抗剪承载力与试验值符合度较高;而ACI440.1R—06,JSCE及CSA-S6—06的预测结果偏保守.

以上结论基于本试验得出,对其他混合配筋形式,如钢筋和CFRP(carbon fiber-reinforced polymer)筋、钢筋和AFRP(aramid fiber-reinforced polymer)筋,其适用性还有待进一步试验研究.同时,本文主要研究有效纵筋率对混合配筋混凝土梁抗剪性能的影响,其他抗剪承载力影响因素,如剪跨比、构件尺寸等将是下一步研究的重点.

参考文献:

- [1] 屈文俊,张誉.混凝土桥梁的耐久性维护方法[J].铁道学报,2001,23(1):98.
QU Wenjun, ZHANG Yu. Method for durability maintenance of concrete bridge[J]. Journal of the China Railway Society, 2001, 23(1):98.
- [2] Tan K H. Behavior of hybrid FRP-steel reinforced concrete beams[C]//Proceeding of the Third International Symposium

- on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), Vol 2. Sapporo: Japan Concrete Institute, 1997: 487-494.
- [3] Leung H Y, Balendran R V. Flexural behavior of concrete beams internally reinforced with GFRP rods and steel rebars [J]. Structural Survey, 2003, 21(4): 146.
- [4] Aiello M A, Ombres L. Structural performances of concrete beams with hybrid (fiber-reinforced polymer-steel) reinforcements [J]. Journal of Composites for Construction, 2002, 6(2): 133.
- [5] 屈文俊, 张健, 黄海群. 钢筋-GFRP 筋混凝土梁抗弯试验与裂缝和挠度算法研究 [J]. 建筑结构, 2006, 36(3): 38.
QU Wenjun, ZHANG Jian, HUANG Haiqun. Research on calculation method of crack and deflection of steel-GFRP reinforced concrete beams [J]. Building Structure, 2006, 36(3): 38.
- [6] Joint ACI-ASCE Committee 445. Recent approaches to shear design of structural concrete [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1998, 124(12): 1375.
- [7] Tureyen A K, Frosch R J. Shear TEst of FRP-Reinforced concrete beams without stirrups [J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(4): 427.
- [8] Bentz E C, Collins M P. Development of the 2004 Canadian Standards Association (CSA) A23. 3 shear provisions for reinforced concrete [J]. Can J Civ Eng, 2006, 33: 521.
- [9] El-Sayed A K, El-Salakawy E F, Benmokrane B. Shear strength of FRP-Reinforced concrete beams without transverse reinforcement [J]. ACI Structural Journal, 2006, 103(2): 235.
- [10] ACI Committee 440. Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars [S]. Detroit: American Concrete Institute (ACI), 2006.
- [11] Japan Society of Civil Engineers (JSCE). Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials [S/OL]. [2009-03-21]. www.jsce.or.jp/committee/concrete/e/newsletter/newsletter01/recommendations.htm.
- [12] Canadian Standard Association (CSA). Canadian highway bridge design code, CSA - S6-06 [S]. Toronto: Canadian Standards Association (CSA), 2006.
- [13] ACI Committee 318. ACI 318-05 Building code requirements for reinforced concrete and commentary [S]. Detroit: American Concrete Institute (ACI), 2006.
- [14] European Committee for Standardization. EN1992 - 1 - 1 Eurocode 2 Design of concrete structures—part 1 - 1: general rules and rules for buildings [S/OL]. [2009-03-23]. http://xoomer.virgilio.it/laboratorio.strega/E2_1_1.Pdf.
- [15] Canadian Standard Association (CSA). CSA A23. 3-04 Design of concrete structures [S]. Mississauga: Canadian Standard Association (CSA), 2004.
- [16] Tureyen A K, Frosch R J. Concrete shear strength: another perspective [J]. ACI Structural Journal, 2003, 100(5): 609.

(上接第 1413 页)

- [2] Van Dyke P, Laneville A. Galloping of a single conductor covered with a d-section on a high-voltage overhead test line [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(6): 1141.
- [3] Chabart O, Lilien J L. Galloping of electrical lines in wind tunnel facilities [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74(6): 967.
- [4] McComber P, Paradis A. A cable galloping model for thin ice accretions [J]. Atmospheric Research, 1998, 46(12): 13.
- [5] 范钦珊, 官飞, 赵坤民, 等. 覆冰导线舞动的机理分析及动态模拟 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1995, 35(2): 6.
FAN Qinshan, GUAN Fei, ZHAO Kunmin, et al. The mechanism analysis and dynamic simulation of iced conductor galloping [J]. Journal of Tsinghua University: Science & Technology, 1995, 35(2): 6.
- [6] 李万平, 杨新祥, 张立志. 覆冰导线群的静气动力特性 [J]. 空气动力学学报, 1995, 13(4): 427.
LI Wanping, YANG Xinxiang, ZHANG Lizhi. Static aerodynamic characteristics of the galloping of bundled iced power transmission lines [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 1995(4): 427.
- [7] Zhang Q, Popplewell N, Shah A H. Galloping of bundle conductor [J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 234(1): 115.
- [8] 白海峰, 李宏男. 分裂式覆冰导线横风驰振响应研究 [J]. 振动工程学报, 2008, 21(3): 6.
BAI Haifeng, LI Hongnan. Crosswind-induced galloping of iced-bundle conductors [J]. Journal of Vibration Engineering, 2008, 21(3): 6.
- [9] 李万平, 黄河, 何程. 特大覆冰导线气动力特性测试 [J]. 华中科技大学学报, 2001, 29(8): 84.
LI Wanping, HUANG He, HE Zeng. Aerodynamic characteristics of heavily iced conductors [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2001, 29(8): 84.
- [10] 蒋兴良. 输电线路覆冰及防护 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
JIANG Xingliang. Iced transmission line and protection [M]. Beijing: China Power Press, 2002.
- [11] ESDU. Mean forces, pressures and flow field velocities for circular cylindrical structures: single cylinder with two-dimensional flow [R]. [S. l.]: ESDU, 1981.
- [12] DenHartog J P. Mechanical vibrations [M]. New York: McGraw Hill, 1956.