

文章编号:1673-2049(2018)02-0023-07

混合配箍混凝土梁最小配箍率分析

屈文俊¹, 刘文博¹, 庞 蕾²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要:为研究基于等耐久性原理的混合配筋梁最小配箍率,对混合配筋构件最小配箍率的影响因素进行了分析,对各国规范最小配箍率的计算公式进行了介绍。进行了 9 根混合配箍混凝土梁的抗剪试验,验证了破坏模式以及最小配箍率下纤维增强复合材料(FRP)箍筋的应变范围。在美国 ACI 规范中混合配筋梁抗剪承载力公式及中国规范最小配箍率公式的基础上,对混合配筋梁的最小配箍率进行了理论分析,提出了混合配筋构件的最小配箍率计算公式。结果表明:该公式考虑了纵筋刚度对梁抗剪承载力的影响,简化后的公式形式简单明确,可以用于所有配箍梁,适合工程应用。

关键词:混合配箍;最小配箍率;抗剪承载力;FRP 混凝土梁;纵筋刚度

中图分类号:TU375.1

文献标志码:A

Analysis of Minimum Stirrup Ratio of Mixed Stirrup Concrete Beams

QU Wen-jun¹, LIU Wen-bo¹, PANG Lei²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the minimum stirrup ratio of a mixed reinforcement beam based on the principle of equal durability, the influence factors of the minimum stirrup ratio of the mixed reinforcement component were analyzed, and the calculation formula of the minimum stirrup ratio in various countries was introduced. The shear test of 9 mixed reinforced concrete beams was carried out to verify the failure mode and the strain range of the FRP stirrups under the minimum reinforcement ratio. Based on the formula of shear strength of the mixed reinforced beam and the formula of minimum stirrup ratio in China, the minimum stirrup ratio of the mixed reinforcement beam was theoretically analyzed in the ACI code of the United States, and the formula for calculating the minimum stirrup ratio of the mixed reinforcement members was proposed. The results show that the formula takes into account the effect of the stiffness of the longitudinal reinforcement on the shear bearing capacity of the beam. The simplified formula is simple and clear. It can be used for all stirrup beams and is suitable for engineering applications.

Key words: mixed stirrup; minimum stirrup ratio; shear capacity; FRP concrete beam; longitudinal reinforcement stiffness

0 引言

混合配筋是基于截面等耐久性设计原理提出

的,其基本思想是将耐久性较好的纤维增强复合材料(FRP)筋配置于截面边角部位,而将钢筋配置于截面内部。这种配筋方式可以充分利用 FRP 筋耐

收稿日期:2017-07-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51678430);国家重点研发计划项目(2017YFC0703003)

作者简介:屈文俊(1958-),男,河南辉县人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:quwenjun. tj@tongji. edu. cn。

腐蚀性好和钢筋弹性模量高、延性好的优点,具有较好的耐久性能和力学性能,是一种非常理想的配筋方式。混合配箍为将 FRP 箍筋置于外部,而将钢箍筋置于内部的配筋方法。

对于钢筋混凝土梁的抗剪承载力,目前研究已经比较成熟,相应的计算公式也已经广泛使用。针对 FRP 配筋混凝土梁的抗剪承载力,各国学者也进行了相应的研究。Shehata 等^[1]进行了 10 根 FRP 箍筋混凝土梁的抗剪承载力试验,研究了包括 FRP 箍筋锚固能力、锚固长度、最小配筋率、裂缝宽度和抗剪承载力等多个方面,结果表明在满足构造要求的情况下,FRP 筋可以发挥极限承载力的 50%。Razaqpur 等^[2]进行了 7 根无腹筋玻璃纤维复合材料(GFRP)混凝土梁抗剪试验,试验变量仅为配筋率和剪跨比,试验结果显示,梁剪切破坏时纵筋未达到屈服强度,且梁剪切裂缝倾角约为 45°。El-sayed 等^[3]对 149 根 FRP 筋混凝土梁试验数据进行了统计,并分别采用各国规范公式进行了验证,研究表明纵筋配筋率可以显著影响 FRP 混凝土梁的抗剪承载力。师晓权等^[4]进行了 57 根 FRP 混凝土梁的抗剪试验,结果发现梁破坏时 GFRP 箍筋的应力仅为 75~165 MPa,远没有达到其抗拉强度。除此之外,Machial 等^[5-8]也进行了 FRP 混凝土梁的抗剪承载力研究。

虽然目前对钢筋混凝土梁及 FRP 混凝土梁的抗剪承载力研究已有很多,但对其最小配箍率的研究则相对较少。目前仅部分国家规范规定了 FRP 箍筋的最小配箍率,对混合配箍梁的最小配箍率则没有相应的计算公式。本文对影响混合配箍最小配筋率的因素进行研究和讨论,提出合理的最小配箍率公式,为工程设计提供技术依据。

1 FRP 箍筋梁的抗剪破坏特点及试验验证

1.1 FRP 箍筋梁抗剪受力特点

由于 FRP 筋的低弹性模量和无屈服点特性,使得配置 FRP 纵筋和箍筋的混凝土梁抗剪性能与普通钢筋混凝土梁有很大区别。

对于普通钢筋,由于其具有屈服平台,故弯曲段的极限承载力与直线段并无差异。Shehata 等^[1]指出,FRP 筋在弯曲过程中其弯曲段强度会显著降低,弯曲段强度一般为直线段的 30%~80%。目前美国和日本规范中均考虑了弯曲段强度的折减。

对于有腹筋混凝土梁,其抗剪承载力包括混凝

土提供的抗剪承载力和钢筋提供的抗剪承载力。混凝土提供的抗剪承载力与受压区高度密切相关,而受压区高度又与纵筋配置密切相关。对于配置 FRP 纵筋的混凝土梁,由于纵筋刚度较小,使得梁裂缝宽度较大,受压区高度减小,进而使得抗剪承载力降低。El-sayed 等^[9]通过试验发现,提高 FRP 纵筋的配筋率有助于提高 FRP 混凝土梁的抗剪性能。

配置 FRP 箍筋的混凝土梁破坏形态通常有 2 种^[10]:一种为 FRP 箍筋断裂破坏,另一种为混凝土压碎破坏,后者破坏时变形能力略大于前者。无论何种破坏模式,达到极限承载力后继续变形能力均较小,即 FRP 箍筋梁在极限荷载下破坏较为突然。

1.2 混合配箍梁抗剪破坏特点及试验验证

为了研究混合配箍梁在最小配箍率下的破坏形态,以及确定破坏时 FRP 箍筋的应变范围,本文进行了 9 根钢-GFRP 混合配箍梁的抗剪试验。试验的主要变量包括钢纵筋和 GFRP 纵筋配筋量、剪跨比、箍筋配筋形式。

1.2.1 试验概况

所有试件截面宽度 $b=300$ mm,截面高度 $h=350$ mm,有效高度 $h_0=315$ mm,试件全长 $L=2\ 900$ mm,试验时梁两端各留出 250 mm 长度以防止纵筋从端部拔出,实际加载跨度为 2 400 mm。试件加载如图 1 所示,其中 P 为荷载。试件主要参数见表 1, A_{sl} 为钢纵筋截面面积, A_{fl} 为 FRP 纵筋截面面积, A_{sv} 为钢箍筋截面面积, A_{fv} 为 FRP 箍筋截面面积, $\rho_{dev,l}$, ρ_{dev} 分别为按等刚度原则计算的等效纵筋配筋率和等效箍筋配筋率。 $\rho_{dev,l}$, ρ_{dev} 具体计算公式为

$$\rho_{dev,l} = \frac{A_{sl} + E_f/E_s A_{fl}}{bh_0}, \quad \rho_{dev} = \frac{A_{sv} + E_f/E_s A_{fv}}{bh_0} \quad (1)$$

式中: E_f , E_s 分别为 FRP 筋和钢筋的弹性模量。

试验在门式反力架上进行,采用两点加载方式(其中梁试验 SG-007A-3.5/4.5-GS2 为单点加载),使用液压千斤顶对试件施加竖向荷载。

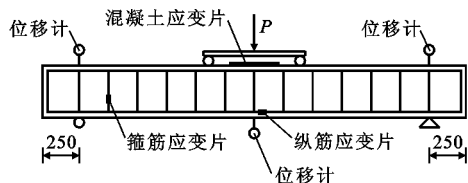


图 1 试件加载(单位:mm)

Fig. 1 Loading of Specimens (Unit:mm)

受拉钢筋及箍筋均采用钢筋-GFRP 筋混合配筋形式,钢纵筋采用 HRB335,实测屈服强度为 375 MPa;钢箍筋采用 HPB300,实测屈服强度为 310

表 1 试件主要参数
Tab. 1 Main Parameters of Specimens

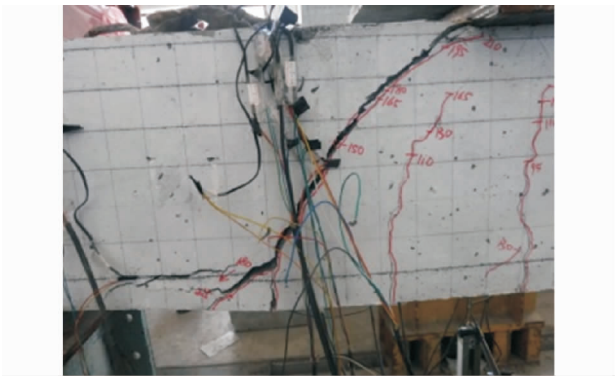
梁试件编号	梁试验编号	剪跨比	A_{sl}/mm^2	A_{fl}/mm^2	$\rho_{dev,l}/\%$	A_{sv}/mm^2	A_{fv}/mm^2	$\rho_{dev}/\%$
L1	SG-004A-2.54-GS2	2.54	339	491	0.46	100.6	100.6	0.21
L2	SG-004B-2.54-GS2	2.54	226	982	0.45	100.6	100.6	0.21
L3	SG-007A-2.54-GS2	2.54	452	982	0.69	100.6	100.6	0.21
L4	SG-007B-2.54-GS2	2.54	226	1 964	0.66	100.6	100.6	0.21
L5	SG-012A-2.54-GS2	2.54	678	1 473	1.03	100.6	100.6	0.21
L6	SG-012B-2.54-GS2	2.54	452	2 946	1.10	100.6	100.6	0.21
L7	SG-007A-2.0-GS2	2.00	452	982	0.69	100.6	100.6	0.21
L8	SG-007A-3.0-GS2	3.00	452	982	0.69	100.6	100.6	0.21
L9	SG-007A-3.5/4.5-GS2	3.50	452	982	0.69	100.6	100.6	0.21

MPa;GFRP 筋采用 Aslan-100 系列,实测极限强度为 1 120 MPa,实测弹性模量为 50 GPa。混凝土采用 C55,实测立方体抗压强度为 56.4 MPa。纵向受拉钢筋直径为 12 mm,纵向受拉 GFRP 筋直径为 25 mm;纵向架立筋均采用 2Φ10;箍筋采用四肢箍,外侧为 GFRP 箍筋,内侧为钢箍筋,直径均为 8 mm,间距为 200 mm。

1.2.2 试验过程

试验梁在正式加载前均先进行预加载,确认各仪表及应变片读数是否正常,同时保证加载面与梁紧密接触。

各试验梁的加载-破坏现象基本类似:当截面剪力达到 30~40 kN 时,梁底出现第 1 条裂缝;此后裂缝不断发展,形成剪切斜裂缝;之后梁腹部形成腹剪斜裂缝,并逐渐向支座处延伸;最终斜裂缝贯通加载点和支座,剪压区混凝土被压碎,梁受剪破坏。梁破坏情况见图 2,3。



式中: f_t 为混凝土抗拉强度; f_{yv} 为箍筋屈服强度。

中国规范计算最小配箍率时采用了混凝土抗拉强度,其表达式中的参数 0.24 根据试验资料及实际经验得到。

美国 ACI 318-11^[12] 规范中对抗剪最小配箍截面面积 $A_{sv,min}$ 的限值规定如下

$$A_{sv,min} = 0.062 \sqrt{f_c} \frac{bs}{f_{yv}} \geq 0.35 \frac{bs}{f_{yv}} \quad (3)$$

式中: s 为箍筋间距; f_c 为圆柱体抗压强度。

美国规范较独特地采用了公式和最小值限值的双重控制方法,其表达式是建立在经验基础上的。除表达式与中国规范不同外,美国规范的最小配箍率设置条件为 $V_u > 0.5\phi V_c$ (V_u 为截面设计抗剪承载力, V_c 为相应无腹筋梁抗剪承载力, ϕ 为混凝土抗力分项系数),而中国规范则为 $V_u > V_c$ 。

加拿大 CSA A23.3-04^[13] 规范中对抗剪最小配箍截面面积 $A_{sv,min}$ 的限值规定如下

$$A_{sv,min} = 0.066 \sqrt{f_c} \frac{bs}{f_{yv}} \quad (4)$$

加拿大规范最小配箍率在抗震情况下的要求与非抗震相同,且公式(4)中的箍筋截面面积包含抗扭箍筋截面面积。

日本 JSCE-2007^[14] 规范中取抗剪最小配箍率为 0.15%。日本规范最小配箍率是考虑到没有配置抗剪钢筋的构件中斜裂缝经常发生而设置的。日本规范限值是较为简单的经验值,其他问题通过对钢筋间距和直径的要求来保证。

2.2 混合配箍混凝土梁最小配箍率的定义

由试验可知,梁出现斜裂缝前,箍筋应力均较小,即筋材均处于线弹性状态,同时梁抗剪破坏时钢筋箍筋屈服先于 FRP 箍筋破坏^[15]。因此,混合配箍混凝土梁中可以将 FRP 筋截面面积按弹性模量等效为钢筋截面面积,配箍率 ρ_{dev} 定义为

$$\rho_{dev} = \frac{n_s a_{sv}}{bs_v} + \alpha_E \frac{n_f a_{fv}}{bs_f} \quad (5)$$

式中: a_{sv} , a_{fv} 分别为单肢钢筋和 FRP 箍筋截面面积; n_s , n_f 分别为钢筋和 FRP 箍筋肢数; $\alpha_E = E_f/E_s$; s_v , s_f 分别为钢筋和 FRP 箍筋间距。

对纯 FRP 箍筋的混凝土梁,由于 FRP 筋无名义屈服强度,且抗剪破坏时箍筋远不会达到极限承载力,故最小配箍率定义为梁出现抗剪斜裂缝时箍筋恰好达到某个应力或应变限值的配箍率。主要问题在于如何确定 FRP 箍筋在抗剪极限状态下的应变限值。目前美国和加拿大的 FRP 混凝土计算规范对 FRP 箍筋的应变限值为 0.004,日本规范则限

制 FRP 筋应力不超过弯曲段抗拉强度。由于本文讨论的是最小配箍率,其对应的是开裂荷载等于极限承载力的情况。在本文试验中,极限承载力下箍筋应变为 0.005 以上,其他学者的试验结果则为 0.002 0~0.003 5^[1,16],故混合配箍梁的最小配箍率 $\rho_{v,min}$ 定义为梁出现抗剪斜裂缝时 FRP 筋应变恰好达到 0.003 时的配箍率,在该应变下通常钢筋已经屈服。

3 混合配箍梁最小配箍率的分析

为了与中国现有规范保持一致,根据式(5)的定义,混合配箍梁的最小配箍率限值为

$$\rho_{v,min} = \alpha_v \frac{f_t}{f_{sv}} \quad (6)$$

式中: f_{sv} 为钢筋屈服强度; α_v 为系数,对钢筋混凝土梁,参照中国规范, $\alpha_v = 0.24$,对 FRP 配箍梁及混合配箍梁, α_v 通过分析确定。

ACI 规范已经指出,对 FRP 混凝土梁,纵筋刚度会显著影响梁的抗剪承载力,因此本文分析时将主要考虑纵筋刚度的影响,以式(6)为基础进行推导,确定系数 α_v 的取值。

中国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[11] 中受弯构件抗剪承载力 V_v 计算公式为

$$V_v = 0.7 f_t b h_0 + f_{sv} \frac{n_s a_{sv}}{s_v} h_0 \quad (7)$$

式(7)中的 $0.7 f_t b h_0$ 为混凝土提供的抗剪承载力,由于纵筋刚度会显著影响混凝土提供的抗剪承载力,因此有必要对最小配箍率下混凝土提供的抗剪承载力比例进行推导计算。

混凝土提供的抗剪承载力与总抗剪承载力的比值 R_{c-s} 为

$$R_{c-s} = 0.7 f_t b h_0 / (0.7 f_t b h_0 + f_{sv} \frac{n_s a_{sv}}{s} h_0) = 0.7 f_t / (0.7 f_t + \frac{n_s a_{sv}}{bs} f_{sv}) = \frac{0.7 f_t}{0.7 f_t + \rho_{v,min} f_{sv}} \quad (8)$$

中国规范中箍筋最小配筋率限值为 $0.24 f_t / f_{sv}$,代入式(8)得 $R_{c-s} = 0.745$ 。

对于最小配箍率的混凝土梁,名义上混凝土所占抗力比值为 0.745,当配箍率大于最小配箍率时,由公式(8)可知混凝土所占承载力比例下降,因此取比值 0.745 是较为保守的。

对于纵筋刚度对混凝土提供的承载力影响,本文将根据美国规范推导。

美国现行规范^[17] 中对 FRP 混凝土梁的抗剪承载力计算规定如下

$$V_c = \frac{2}{5} K \sqrt{f_c} b h_0 \quad (9)$$

$$V_{fv} = \rho_{fv} f_{fv} b h_0 \quad (10)$$

式中: V_{fv} 为 FRP 箍筋提供的抗剪承载力; $K = \sqrt{2\rho_{fl}\alpha_E + (\rho_{fl}\alpha_E)^2} - \rho_{fl}n_f$, ρ_{fl} 为 FRP 纵筋配筋率; ρ_{fv} 为 FRP 箍筋配筋率; f_{fv} 为 FRP 筋设计强度, $f_{fv} = 0.004E_f < f_{fb}$, f_{fb} 为 FRP 筋弯曲段强度。

美国现行钢筋混凝土计算规范^[12]中对梁的抗剪承载力规定如下

$$V_c = 0.75 \times 0.166 \sqrt{f_c} b h_0 \quad (11)$$

$$V_{sv} = 0.75 \frac{n_s a_{sv} f_{sv} h_0}{s_v} \leq 0.665 \sqrt{f_c} b h_0 \quad (12)$$

式中: V_{sv} 为钢纵筋提供的抗剪承载力。

定义系数 φ_c 为相同纵筋配筋率下 FRP 纵筋混凝土梁与钢纵筋混凝土梁中 V_c 的比值,即

$$\varphi_c = \frac{2}{5} K \sqrt{f_c} b h_0 / (0.75 \times 0.166 \sqrt{f_c} b h_0) \quad (13)$$

当配箍率恰好为最小配箍率时,FRP 纵筋混凝土梁的抗剪折减系数 c 为

$$c = 0.745\varphi_c + 0.255 \quad (14)$$

系数 c 的物理意义为当箍筋配筋形式相同且 ρ_v 等于钢筋混凝土梁的 $\rho_{v,\min}$ 时,相同纵筋截面面积的 FRP 纵筋梁与钢纵筋梁的抗剪承载力比值。 c 与纵筋配筋率 ρ_l 的关系见图 4 (AFRP 为芳纶纤维增强塑料)。

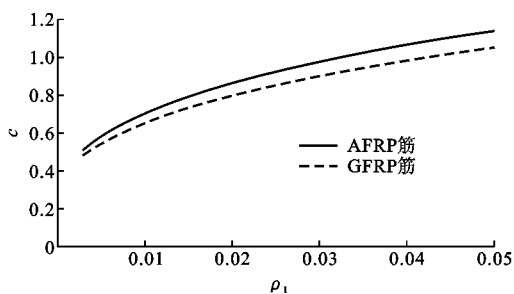


图 4 c 与 ρ_l 的关系

Fig. 4 Relationship Between c and ρ_l

由于 c 与 ρ_l 为非线性关系,为计算方便,偏保守地将其小于 1 的部分变换为直线。对目前常用的 HRB400 纵筋,混凝土抗压强度取 C50 时,纵筋最小配筋率 $\rho_{\min, \text{HRB400}}$ 为 0.002 4。

等刚度原则对应的 GFRP, AFRP 纵筋最小配筋率 $\rho_{\min, \text{GFRP}}$, $\rho_{\min, \text{AFRP}}$ 分别为 0.009 6 和 0.007 4。

当 FRP 纵筋配筋率大于 $\rho_{\min, \text{GFRP}}$, $\rho_{\min, \text{AFRP}}$ 的计算值时,其等效刚度大于钢筋混凝土梁纵筋最小配筋率时的刚度,此时可认为纵筋刚度对混凝土提供的抗剪承载力影响较小,可忽略不计。当纵筋配筋

率小于 $\rho_{\min, \text{GFRP}}$, $\rho_{\min, \text{AFRP}}$ 的计算值时,认为纵筋刚度会影响抗剪承载力,此时需对混凝土提供的抗剪承载力进行折减。

由于 FRP 箍筋受力时应变不均匀^[4],故取 2 倍 $\rho_{\min, \text{GFRP}}$, $\rho_{\min, \text{AFRP}}$ 值作为折减配筋率的上限值,同时取配筋率 0.004 作为折减配筋率的下限值,对 c 值进行直线化简。

对于 GFRP,有

$$c = 33\rho_{fl} + 0.38 \quad (15)$$

对于 AFRP,有

$$c = 41\rho_{fl} + 0.39 \quad (16)$$

式中: $c > 1$ 时取 $c = 1$ 。

由于混凝土、钢筋和 FRP 筋在开裂前均为线弹性,因此可运用叠加原理,将混凝土部分的抗剪承载力分解为两部分:一部分由混凝土和钢筋组成的梁提供,另一部分由混凝土和 FRP 纵筋组成的梁提供。这两部分中,由 FRP 部分提供的混凝土抗力需进行折减,折减系数按全部纵筋截面面积计算。

以上两部分抗力按钢筋和 FRP 筋的纵向刚度分配,分配系数如下

$$R_s = \frac{A_{sl} E_s}{A_{sl} E_s + A_{fl} E_f} \quad (17)$$

$$R_f = \frac{A_{fl} E_f}{A_{sl} E_s + A_{fl} E_f} \quad (18)$$

式中: R_s , R_f 分别为钢筋和 FRP 筋所占刚度比例。

综合式(15)~(18),可得出混合配箍混凝土梁最小配箍率计算公式为

$$\rho_{v, \min} = \alpha_v \frac{f_l}{f_{yv}} = 0.24\alpha \frac{f_t}{f_{yv}} \quad (19)$$

式中: α 为放大系数。

对配置钢箍筋和同时配置 FRP 箍筋和钢箍筋的混凝土梁, f_{yv} 取钢筋屈服强度;对仅配置 FRP 箍筋的梁,可偏安全地取 $f_{yv} = 300$ MPa。 α 按式(20)计算,即

$$\alpha = \frac{R_f}{c} + R_s \quad (20)$$

计算 c 值时配筋率 ρ_{fl} 应按全部受拉纵筋截面面积计算。

以上仅进行了 GFRP 筋和 AFRP 筋的推导,对于 CFRP 筋,由于其弹性模量相对较大(约为 1.5×10^5 MPa),与钢筋的弹性模量较为接近,故采用 CFRP 纵筋时可不考虑纵筋刚度对抗剪承载力的影响。

4 简化公式

式(19), (20)虽然给出了计算混合配箍梁最小

配箍率的理论公式,但该公式形式复杂,参数较多,不方便工程人员使用,现对其进行简化。

的 α 进行计算,此处偏保守地以 GFRP 进行计算,结果见表 2。

对不同纵筋配筋率和不同 FRP 所占刚度比下

依据表 2 中的数据,偏安全地进行线性简化,得

表 2 不同配筋率下 α 计算结果

Tab. 2 Calculation Results of α Under Different Reinforcement Ratios

纵筋配筋率	不同 R_f 下的 α 值								
	0.000	0.125	0.250	0.375	0.500	0.625	0.750	0.875	1.000
0.004 0	1.00	1.06	1.13	1.20	1.29	1.39	1.51	1.65	1.82
0.005 0	1.00	1.06	1.12	1.19	1.26	1.35	1.46	1.58	1.72
0.007 5	1.00	1.05	1.10	1.15	1.21	1.28	1.36	1.44	1.54
0.010 0	1.00	1.04	1.08	1.12	1.17	1.23	1.29	1.35	1.42
0.012 5	1.00	1.03	1.07	1.10	1.14	1.18	1.23	1.28	1.33
0.015 0	1.00	1.03	1.05	1.08	1.12	1.15	1.18	1.22	1.26
0.017 5	1.00	1.02	1.04	1.07	1.09	1.12	1.15	1.18	1.21
0.020 0	1.00	1.02	1.04	1.05	1.07	1.09	1.11	1.14	1.16
0.022 5	1.00	1.01	1.03	1.04	1.06	1.07	1.09	1.10	1.12
0.025 0	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07	1.08
0.027 5	1.00	1.01	1.01	1.02	1.03	1.03	1.04	1.04	1.05
0.030 0	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01	1.01	1.02	1.02	1.02
0.032 5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.035 0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

到 α 的简化计算公式为

$$\alpha=1+0.6R_f \tag{21}$$

表 2 中数据仅对工程上很少出现的纵筋配筋率很低的情况不满足(约占 2.4%),因此式(21)的简化计算结果在工程上是可以接受的。

横向抗剪最小配筋率 ρ_{dev} 的计算公式为

$$\rho_{dev}=\frac{n_s a_{sv}}{b s_v}+\alpha_E \frac{n_f a_{fv}}{b s_f}>\rho_{v, \min }=0.24(1+0.6 R_f) \frac{f_t}{f_{yv}} \tag{22}$$

对于仅配置 FRP 箍筋的梁,可以偏安全地取 $f_{yv}=300 \text{ MPa}$ 。

5 结 语

(1)进行了 9 根混合配筋混凝土梁的抗剪试验,研究了混合配箍梁的抗剪破坏形态及 FRP 箍筋的应变范围。试验表明混合配箍梁的抗剪破坏模式类似于钢筋混凝土梁的抗剪破坏模式,斜裂缝宽度为 0.15 mm 时,FRP 箍筋应变可达 0.005。

(2)提出了混合配箍混凝土梁配箍率的计算方法,给出了混合配箍混凝土梁最小配箍率的定义。根据美国 ACI 规范及中国钢筋混凝土规范,推导了混合配箍梁的最小配箍率限值计算公式。依据试验结果,给出了混合配箍梁最小配箍率的简化计算公式,该公式适用于所有配箍梁。

参考文献:

References:

[1] SHEHATA E, MORPHY R, RIZKALLA S. Fibre Reinforced Polymer Shear Reinforcement for Concrete Members: Behaviour and Design Guidelines[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2000, 27(5): 859-872.

[2] RAZAQPUR A G, ISGOR B O, GREENAWAY S, et al. Concrete Contribution to the Shear Resistance of Fiber Reinforced Polymer Reinforced Concrete Members[J]. Journal of Composites for Construction, 2004, 8(5): 452-460.

[3] EL-SAYED A K, SOUDKI K. Evaluation of Shear Design Equations of Concrete Beams with FRP Reinforcement[J]. Journal of Composites for Construction, 2011, 15(1): 9-20.

[4] 师晓权, 张志强, 李志业, 等. GFRP 筋混凝土梁抗剪承载力影响因素[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(6): 898-903, 913.

SHI Xiao-quan, ZHANG Zhi-qiang, LI Zhi-ye, et al. Influencing Factors of Shear Capacity of Concrete Beam Reinforced with GFRP[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(6): 898-903, 913.

[5] MACHIAL R, ALAM M S, RTEIL A. Revisiting the Shear Design Equations for Concrete Beams Reinforced with FRP Rebar and Stirrup[J]. Materials and

- Structures,2012,45(11):1593-1612.
- [6] NEHDI M, CHABIB H E, SAID A A. Proposed Shear Design Equations for FRP-reinforced Concrete Beams Based on Genetic Algorithms Approach[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(12):1033-1042.
- [7] 李炳宏,江世永,石钱华,等. BFRP 连续螺旋箍筋混凝土梁抗剪性能试验研究[J]. 后勤工程学院学报, 2011, 27(1):1-6.
- LI Bing-hong, JIANG Shi-yong, SHI Qian-hua, et al. Experimental Study on Shear Behavior of Concrete Beams Reinforced with Continuous BFRP Rectangular Spirals[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2011, 27(1):1-6.
- [8] 张晓亮,屈文俊. 无腹筋 GFRP 筋混凝土梁抗剪性能试验[J]. 中国公路学报, 2010, 23(5):51-57.
- ZHANG Xiao-liang, QU Wen-jun. Shear Behavior Test of GFRP-reinforced Concrete Beams Without Stirrups[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(5):51-57.
- [9] EL-SAYED A, EL-SALAKAWY E, BENMOKRANE B. Shear Strength of One-way Concrete Slabs Reinforced with Fiber-reinforced Polymer Composite Bars[J]. Journal of Composites for Construction, 2005, 9(2):147-157.
- [10] AHMED E A, EL-SAYED A K, EL-SALAKAWY E, et al. Bend Strength of FRP Stirrups: Comparison and Evaluation of Testing Methods[J]. Journal of Composites for Construction, 2010, 14(1):3-10.
- [11] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
- GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].
- [12] ACI 318-11, Building Code Requirements for Structural Concrete[S].
- [13] CSA A23. 3-04, Design of Concrete Structures[S].
- [14] JSCE-2007, Standard Specifications for Concrete Structures[S].
- [15] 梁志强. 混杂配筋混凝土梁抗剪性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- LIANG Zhi-qiang. Research on the Shear Behavior of Hybrid Reinforced Concrete Beams [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [16] EL-SAYED A, EL-SALAKAWY E, BENMOKRANE B. Mechanical and Structural Characterization of New Carbon FRP Stirrups for Concrete Members [J]. Journal of Composites for Construction, 2007, 11(4):352-362.
- [17] ACI 440. 1R-06, Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars[S].